3㎝

11-RTIP-D04

4㎝

Land Transport R&D Report

불포화 특성을 고려한 대구·경북 퇴적암 기반 풍화토층 사면의 안정성 평가기법 개발

(견고딕 14p)

2013

(견고딕13 p)

국토교통과학기술진흥원

(견고딕 17p)

5㎝

3㎝

(견고딕 25p)

건설교통지역특성화사업 최종보고서 (견고딕13p)

3㎝

0.5㎝ R&D /11-RTIP-D04

2.5㎝ 9㎝

(견고딕31p) 5㎝

불포화 특성을 고려한 대구·경북 퇴적암 기반 풍화토층 사면의 안정성 평가기법 개발

(0.1㎝)

2013. 6. 23

0.15㎝ (견고딕15p)

(별색바탕 : C50, M20, Y59, K0)

주관연구기관 / 영남대학교

협동연구기관 / 계명대학교, 금오공과대학교

2㎝

(견고딕 15.5p)

(백색바탕)

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

(견고딕 20p)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술지역특성화사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 건설교통기술지역특성화사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "불포화 특성을 고려한 대구·경북 퇴적암 기반 풍화토층 사면의 안정성 평가기법 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2013. 06. 23.

주관연구기관명 : 영남대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 이영휘
연 구 원 : 박영목
연 구 원 : 오세붕

협동연구기관명 : 계명대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 권오균
연 구 원 : 백승철

협동연구기관명 : 금오공과대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 한희수

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>11-RTIP-D04</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2011.10.24
~2013.06.23</td><td>단 계 구 분</td><td>1차년/
1년</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설교통기술지역특성화사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">불포화 특성을 고려한 대구·경북 퇴적암 기반 풍화토층
사면의 안정성 평가기법 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">이영휘</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 20 명
내부 :17 명
외부 : 3 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부 :200,000 천원
기업 : 70,000 천원
계 :270,000 천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 20 명
내부 :17 명
외부 : 3 명</td><td>총연구비</td><td>정부 :200,000 천원
기업 : 70,000 천원
계 :270,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">영남대학교 건설시스템공학과</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">이엔텍건설(주)</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 : 연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>180쪽</td></tr>
</table>

○ 불포화토 실내실험 및 분석기법 개발

- 불포화 사면 풍화토층의 불포화 물성 실험 및 분석기법 개발
- 불포화층의 함수특성, 투수계수, 전단강도 특성 평가
- SWRC와 전단강도의 상관관계 90%이상 정확도 확보

○ 불포화사면의 해석기법 개발

- 불포화 사면 풍화토층의 유효응력 기반 해석기법 개발
- 침투해석, 응력해석, 안정해석을 포괄한 기법 개발
- 강우에 따른 사면안전율 계산 엄밀성 개선: 응력장 해법의 안전율 정확도 95%이상 확보

○ 인공강우 모형실험을 통한 사면해석기법 검증

- 모형실험을 통한 검증 및 적용
- 강우시 파괴사면 모형실험 수행
- 강우에 따른 사면의 파괴기구 검증
- 모형사면의 파괴시 해석 안전율 정확도 90% 이상 확보

○ 대경권 사면현장 사례 해석 및 평가

- 불포화 사면 풍화토층 대경권 사례현장 해석 및 적용
- 강우시 사면의 안정성 변동 평가
- 풍화토층 강우에 따른 사면의 평가기법 검증
- 보강전 및 보강후 사면의 안정성 변화 평가
- 실제사면 사례의 붕괴시 안전율 95%이상 정확도 확보

○ 불포화사면 설계 가이드라인 제시

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	불포화토, 사면안정, 침투해석, 함수특성, 전단강도
	영 어	unsaturated soils, slope stability, seepage analysis, soil water retention characteristics, shear strength

요 약 문

Ⅰ. 제 목

“불포화 특성을 고려한 대구·경북 퇴적암 기반 풍화토층 사면의 안정성 평가기법 개발”

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 대구·경북 권역(대경권)의 지질은 퇴적암층으로서 사면의 안정성 취약.
○ 대경권 퇴적암 기반 풍화토층 사면에 대한 실증적인 연구 필요
○ 대경권 사면의 붕괴사례에 대하여, 실제 강우조건과 지층의 물성을 토대로 사면안정성 평가 절차 확립
○ 강우의 침투를 고려한 안정해석을 실시하는 경우, 설계정수와 해석방법에 대한 지침 필요
○ 대경권 지질 특성에 대하여, 강우조건에 따른 불포화층의 침투효과를 분석한 사례를 확보
○ 실제사면에 대한 설계 및 사후조사 관례 개선
○ 불포화 물성 획득 관례 및 분석 절차 수립
○ 불포화토의 유효응력 이론을 실제에 적용하여 불포화 사면 안정성 평가기법 개발
○ 사면의 붕괴를 재현하여 강우 침투를 고려한 해석방법의 검증
○ 확률 강우강도에 대한 불포화 사면 설계에 대한 적용성 검증
○ 불포화 사면 해석 및 설계절차의 가이드라인 제시

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

○ 불포화토 실내실험 및 분석기법 개발

- 불포화 사면 풍화토층의 불포화 물성 실험 및 분석기법 개발
- 불포화층의 함수특성, 투수계수, 전단강도 특성 평가

○ 불포화사면의 해석기법 개발

- 불포화 사면 풍화토층의 유효응력 기반 해석기법 개발
- 침투해석, 응력해석, 안정해석을 포괄한 기법 개발

○ 인공강우 모형실험을 통한 사면해석기법 검증

- 모형실험을 통한 검증 및 적용
- 강우시 파괴사면 모형실험 수행

○ 대경권 사면현장 사례 해석 및 평가

- 불포화 사면 풍화토층 대경권 사례현장 해석 및 적용
- 강우시 사면의 안정성 변동 평가
- 풍화토층 강우에 따른 사면의 평가기법 검증
- 보강전 및 보강후 사면의 안정성 변화 평가

○ 불포화사면 설계 가이드라인 제시

Ⅳ. 연구개발결과

○ 불포화토 실내실험 및 분석기법 개발

- 4개 사면 풍화토층 시험 수행 및 분석
- 함수특성곡선(SWRC)을 적용한 전단강도 분석기법 개발
  : SWRC와 전단강도의 상관관계 90%이상 정확도 확보

○ 불포화사면의 해석기법 개발

- 불포화 사면 풍화토층의 유효응력 기반 해석기법 개발
  : 활동면의 유효응력에 기반한 전단강도를 고려한 해석기법 개발
- 침투해석, 응력해석, 안정해석을 포괄한 해석기법 개발
- 강우에 따른 사면안전율 계산 엄밀성 개선
  : 응력장 해법의 안전율 정확도 95%이상 확보

○ 인공강우 모형실험을 통한 사면해석기법 검증

- 모형실험을 통한 검증 및 적용
  : 총 6회의 모형사면 조성, 실험 및 해석 수행
- 강우시 파괴사면 모형실험 수행
  : 모형사면의 강우시 붕괴 재현, 강우시 사면내 포화도와 간극수압변화 측정
- 강우에 따른 사면의 파괴기구 검증
  : 모형사면 실험에 대한 해석 수행 및 비교 검증
- 모형사면의 파괴시 해석 안전율 정확도 90% 이상 확보

○ 대경권 사면현장 사례 해석 및 평가

- 불포화 사면 풍화토층 대경권 사례현장 해석 및 적용
  : 4개 붕괴사면 사례 해석 수행
- 강우시 사면의 안정성 변동 평가
  : 강우시 실제 붕괴를 해석으로 재현, 실제사면 사례의 붕괴시 안전율

95%이상 정확도 확보

- 강우에 따른 풍화토층 사면의 평가기법 검증
  : 불포화 사면의 유효응력 해석기법 검증
- 보강전 및 보강후 사면의 안정성 변화 평가
  : 보강사면의 확률강우강도 및 실제 강우에 의한 안전율 비교

○ 불포화사면 설계 가이드라인 제시

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

○ 불포화토 사면안정해석과 안정성 평가에 활용

○ 불포화 사면 풍화토층의 불포화 물성치 평가에 활용

○ 불포화 사면 침투 및 안정해석에 대한 가이드라인 실무 활용

SUMMARY

Ⅰ. Title

"Development of evaluation technique of a slope stability of residual soils decomposed of sedimentary rocks in Daegu-Gyeongbuk Region considering unsaturated behavior characteristics"

Ⅱ.Objectives and Necessaries

○ Weakness in stability of the slope with weathered sedimentary rock in Daegu-Gyeongbuk Region

○ Requirement on practical research about the weathered soil slope based on the sedimentary rock in Daegu-Gyeongbuk Region

○ Establishment of the procedures evaluating the slope stability in Daegu-Gyeongbuk Region, to consider the real rainfall condition and parameter properties of layers

○ Requirement of guidelines to evaluate the soil parameters and to establish analysis method, in case of slope stability analysis considering the rainfall infiltration

○ Acquisition of the cases study on the infiltration effects of unsaturated layer depending on the rainfall conditions, with regard to the geological characteristics of Daegu-Gyeongbuk Region

○ Improvement of the engineering practice on design and post-investigation of the actual slope

○ Engineering practice to obtain the unsaturated parameters and establishment of the procedures to analyze the unsaturated slopes

○ Development of the evaluation method of unsaturated slope considering the effective stress theory of unsaturated soil

○ Simulation of the actual failure of slope, to verify the analysis method considering the rainfall infiltration,

○ Verification of applicability of the design method of unsaturated slope considering the probability rainfall intensity

○ Proposal of the guideline on the stability analysis method and design procedure of the unsaturated slope

Ⅲ. Content and Scope

○ Development of the laboratory test and analysis methods of the unsaturated soils

- Laboratory testing and evaluations of the material properties of weathered soils in the unsaturated slope
- Evaluation of the soil water characteristics, permeability and shearing strength of unsaturated soils

○ Development of stability analysis method of the unsaturated slope

- Development of analysis method based on the effective stress of the weathered soil in the unsaturated slope
- Development of analysis method covering the seepage analysis, stress analysis and stability analysis

○ Methodology verification of unsaturated slope analysis by artificial rainfall experiment.

- Verification and application by model experiment.

- Simulation of the slope failure by rainfall experiment.

○ Analysis and evaluation of the actual slope cases in Daegu-Gyeongbuk Region

- Analysis and application of the unsaturated slope cases of residual soils in Daegu-Gyeongbuk Region
- Evaluation of the slope stability variation during rainfall
- Verification of the evaluation of slope stability due to the rainfall infiltration into residual soils
- Estimation of slope stability changes before and after reinforcement.

○ Proposal of the design guideline on unsaturated slope

Ⅳ. Results

○ Development of the laboratory test and analysis methods of the unsaturated soils

- Laboratory tests of weathered soils on 4 slope cases and analysis of the test results
- Development of the shearing strength analysis method applying SWRC : the accuracy over 90% on the correlation between SWRC and shearing strength

○ Development of the analysis method of unsaturated slope

- The analysis method based on the effective stresses of residual soils in the unsaturated slope: analysis method considering shearing strength based on the effective stresses at sliding surface

- The analysis method covering the seepage analysis, stress analysis and stability analysis
- Improvement of accuracy of safety factor on slope stability due to rainfall : the accuracy of safety factor over 95% by the stress field analysis

○ Methodology verification of unsaturated slope analysis by artificial rainfall experiment.

- Verification and application by the model experiment
  : Total 6 times experiments and analyses
- Simulation of the slope failure in rainfall experiment device
  : the slope failure by experimental device, measuring the saturation and variation of pore water pressure.
- Verification of the slope failure mechanism by rainfall
  : Application and comparison between numerical analyses and experimental results of model slope.
- Acquiring the analysis accuracy more than 90% at the failure of model slope.

○ Analysis and evaluation of the field slope cases in Daegu-Gyeongbuk Region

- Analysis and application of the unsaturated slope cases of residual soils in Daegu-Gyeongbuk Region : analysis of 4 cases of the collapsed slope
- Evaluation of the safety variation of the slope at rainfall : analytical simulation of the collapsed slope and the accuracy of safety factor over 95% at failure of the field slope
- Verification of the evaluation method of slope stability according to

rainfall infiltration into residual soils : verification of the effective stress analysis method on unsaturated slope

- Evaluation of the safety variation of slope before and after reinforcement : comparison of the safety factor of reinforced slope by the probability rainfall intensity and real rainfall

○ Proposal of the design guideline on unsaturated slope

Ⅴ. Utilization plan

○ Application to the slope stability analysis and safety evaluation of unsaturated soils

○ Application to the evaluation of material properties of weathered soils in unsaturated slope

○ Design practice of the guideline on infiltration and stability analysis of unsaturated slope

CONTENTS

Chapter 1. Introduction ····· 1

Chapter 2. Status of research and development ····· 6

2.1 Soil water characteristic curve of unsaturated soils ····· 6

2.2 Unsaturated coefficient of permeability ····· 14

2.3 Shear strength of unsaturated soil by capillary force ····· 19

2.4 Effective stress and shearing strength of unsaturated soils ····· 23

2.5 2-dimensional numerical model ····· 30

Chapter 3. Analysis methodology on unsaturated slopes ····· 36

3.1 Outline of actual slopes and unsaturated material properties ····· 36

3.2 Analysis of failured slopes ····· 45

3.3 Analysis of reinforced slopes ····· 63

3.4 Analysis and summary ····· 80

Chapter 4. Artificial rainfall induced model tests on slope ····· 82

4.1 Construction of model slope with weathered granite soil ····· 82

4.2 Experimental procedure and installation of sensors ····· 86

4.3 Experimental results ····· 91

4.4 Seepage of model slope and slope stability analysis ····· 127

4.5 Analysis and summary ····· 140

Chapter 5. Accomplishments of objectives and contribution to related research ····· 145

Chapter 6. Applications of research result ····· 147

Chapter 7. International science and technology informations during research and development ····· 149

Chapter 8. References ····· 152

[Appendix]

Guideline on stability design considering infiltration of unsaturated slopes

목 차

제1장 연구개발과제의 개요 ····· 1

제2장 국내외 기술개발 현황 ····· 6

2.1 불포화토의 함수특성곡선 ····· 6

2.2 불포화 투수계수 ····· 14

2.3 모관흡수력에 따른 불포화지반의 전단강도 ····· 19

2.4 불포화토의 유효응력과 전단강도 ····· 23

2.5 2차원 수치모델 ····· 30

제3장 불포화 사면의 해석기법 개발 ····· 36

3.1 대상사면의 개요 및 불포화물성 ····· 36

3.2 붕괴사면의 해석 ····· 45

3.3 보강사면의 해석 ····· 63

3.4 분석 및 정리 ····· 80

제4장 인공강우 모형사면실험 ····· 82

4.1 대경권 화강풍화토 모형사면 축조 ····· 82

4.2 계측기 설치 및 실험방법 ····· 86

4.3 실험결과 ····· 91

4.4 모형사면 침투 및 사면안정해석 ····· 127

4.5 비교 분석 및 정리 ····· 140

제5장 목표달성도 ····· 145

제6장 연구개발결과의 기대성과 및 활용계획 ····· 147

제7장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 149

제8장 참고문헌 ····· 152

[부록]

불포화 비탈면의 침투를 고려한 안정성 설계 가이드라인(안)

제1장 연구개발과제의 개요

국내 내륙에 존재하는 토사사면은 중부 및 서부 지역에는 화강암을 모암으로 하는 화강풍화토가 주를 이루고 있다. 그리고 강원지역을 중심으로 석회암을 모암으로 하는 풍화토가 나타난다. 대구·경북 권역(대경권)의 지질은 퇴적암층으로서 대부분 사암, 셰일과 이암으로 구성되어 있으며, 여타 지역에 비하여 사면의 안정성이 취약하다. 그러나 기존의 국내 연구 성과는 화강암과 석회암 계통을 모암으로 하는 풍화토의 연구에 집중되어 있다. 따라서 대경권 퇴적암/풍화토층 특성을 분석하여 설계에 적용할 수 있는 실증적인 연구가 필요한 실정이다. 특히 대경권 사면의 붕괴사례에 대하여, 실제 강우조건과 지층의 물성을 토대로 사면안정성을 평가하는 절차를 검증해야 한다.

최근 사면 붕괴 사례는 하절기에 집중되어 나타나고 있어 강우로 인하여 변동하는 안정성이 사면 설계 및 시공 시 주요 검토 요소이다. 이에 따라 불포화 지층의 침투 특성 분석과 사면 안정성 평가를 수행해야 한다. 하지만 현 국내 시방서의 일부 사면 설계법에서는 불포화 특성을 고려하지 않고 완전 포화사면이나 과다한 지하수위에 대하여 사면안정해석을 수행하도록 하고 있다. 이러한 규준은 (1) 사면 단면을 보수적으로 설계하거나, (2) 근거가 미비한 설계 해를 찾게 되고 지반조사에 근거한 설계를 막고 있는 실정이다.

건설공사 비탈면 설계기준(한국시설안전공단, 2011)에 따르면, 토층 및 풍화암으로 구성된 비탈면의 안정해석은 (1) 지하수위를 결정하여 해석하는 방법 또는 (2) 강우의 침투를 고려한 방법을 사용하도록 하고 있다. 지하수위를 결정하여 해석하는 경우에는 현장 지반조사 결과, 지형조건 및 배수조건 등을 종합적으로 고려하여 지하수위를 결정하고 안정해석을 수행하며, 지하수위를 결정한 근거를 명확히 기술해야 한다(FS=1.2적용). 강우의 침투를 고려한 안정해석을 실시하는 경우에는 현장 지반조사 결과, 지형조건, 배수조건과 확률 계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우지속시간 등을 고려하여 안정해석을 실시하며, 해석시 적용한 설계정수와 해석방법을 명확히 기술하도록 하고 있다(FS=1.3적용). 따라서 불포화 토질역학에 기반한 설계정수와 해석방법에 대한 지침이 필요한 상태이다. 특히 대경권 지질 특성에 대하여 강우조건에 따른 불포화층의 침투효과를 분석한 사례를 확보하는 것이 필요하다.

실제 붕괴사면에 대한 사례 연구는 다음과 같은 의미를 내포한다.

- 실제사면에 대한 설계 및 사후조사 관례 개선
- 실제 현장 기록 및 자료 조사 절차 확립

- 불포화 물성 획득 관례 및 분석 절차 수립
- 사면의 붕괴를 재현하여 강우 침투를 고려한 해석방법의 검증
- 확률 조건(선행강우, 강우강도, 지하수위 등 경계조건 및 초기조건)에 대한 불포화 사면 설계에 대한 적용성 검증
- 불포화 사면 해석 및 설계절차의 가이드라인 제시

건설공사 비탈면 설계기준(한국시설안전공단, 2011)에 따르면, 토사비탈면 안정해석은 한계평형해석에 근거한 안전율에 의해 판단하는 것을 기본으로 하며 중요도가 큰 비탈면에 대해서는 유한요소법 및 유한차분법 등의 해석기법을 적용하여 안정성을 판단한다. 따라서 응력해석을 통하여 지층의 유효응력의 변동을 분석하는 절차를 포함할 필요가 있다. 본 연구에서는 유한요소 응력장에서 안전율을 계산하여 엄밀한 안정성 해석을 수행하였다. 특히 불포화토의 유효응력 이론을 실제에 적용하여 불포화 사면의 안정을 평가하는 기법에 초점을 두고 있다.

연구 배경에 따른 연구내용의 개요를 정리하면 다음과 같다 (그림 1.1 참조).

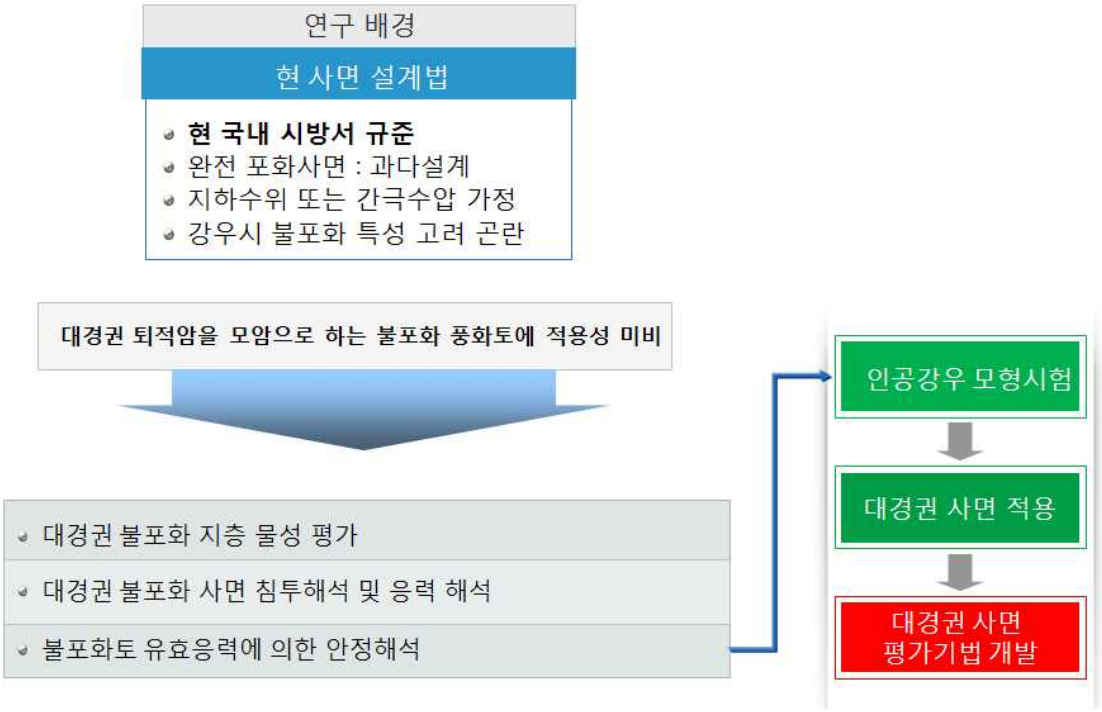


그림 1.1 연구배경 및 개요

본 연구에서는 대경권에 존재하는 (1) 풍화토 지층의 실내실험 및 분석, (2) 불포화토 사면해석기법 개발 (3) 모형사면실험을 통한 사면붕괴 기구 측정 및 해석 (4) 실제 붕괴사례에 대

한 불포화 사면안정해석으로 구성되었으며, 이러한 결과를 통합하여 불포화 사면의 안정성 평가기법 개발을 수행하였다. 이러한 내용을 상세하게 정리하면 다음과 같다. (표 1.1 참조)

○ 실내실험 및 분석

▪ 대경권 불포화 사면 풍화토층의 불포화 물성 실험 및 분석 기법 개발

○ 불포화 사면의 해석기법 개발

▪ 대경권 불포화 사면 풍화토층의 유효응력 기반 해석기법 개발

▪ 침투해석, 응력해석, 안정해석을 포괄한 기법 개발

○ 대경권 불포화 사면에의 적용

▪ 모형실험을 통한 검증 및 적용

▪ 불포화 사면 풍화토층 대경권 사례현장 해석 및 적용

○ 불포화 사면 설계 가이드라인 제시

이를 위하여 2장에서는 불포화층의 물성과 관련하여 함수특성, 투수계수, 전단강도의 개념과 실험법을 설명하였다. 특히 불포화 유효응력과 전단강도에 대하여 기술하였다. 그리고 불포화 유효응력에 기반한 사면 해석기법에 대하여 설명하였다.

3장에서는 실제 붕괴사면의 사례조사 및 해석에 관하여 나타내고 있다. 하동, 포항, 영덕지역에 소재한 4개 대상 사면에 대한 조사와 실내시험을 토대로 강우 침투로 인한 사면 붕괴를 해석하였다. 그리고 실제 보강된 단면을 토대로 보강사면의 해석을 수행하였다. 본 연구는 불포화 유효응력에 기반한 사면 해석기법을 적용하고 검증하는데 핵심을 두고 있다.

4장에서는 인공강우로 사면 붕괴를 재현한 모형실험에 대하여 설명하였다. 모형실험시 측정한 결과에 대하여 불포화 침투해석을 수행하고 사면안정해석을 수행하여 비교하였다. 총 6회의 시험 사면에 대하여 모형실험을 수행하였으며 최종 6번째 모형실험의 분석에 초점을 두었다.

부록에서는 이러한 연구개발 성과를 토대로 가이드라인을 제시하였다.

표 1.1 연구목표 및 내용

구분	목표	내용	범위
실내실험 및 분석	대경권 사면 불포화층 물성평가 기법 개발	• 불포화층의 함수특성, 투수계수, 전단강도 특성 평가	• 대구경북 풍화토 • 사례현장 시료 • 모형실험 시료
불포화사면 해석기법 개발	침투 및 응력의 변화를 고려한 불포화 사면 안정해석 기법 개발	• 유효응력에 기반한 사면해석기법 개발	• 침투해석, 응력해석, 안정해석 연계 • 모형실험 및 현장사례에 대한 검증
모형실험	인공강우 모형실험을 통한 사면해석기법 검증	• 강우시 파괴사면 모형실험 수행 • 불포화 사면 해석기법 검증	• 강우량/경사 조절 사면파괴 재현 • 풍화토층 대상 모형실험 수행
현장 사례연구	대경권 사면현장 사례 해석 및 평가	• 강우시 사면의 안정성 변동 평가 • 풍화토층 강우에 따른 사면의 평가기법 검증 • 보강전 및 보강후 사면의 안정성 변화 평가	• 풍화토 사면 현장 접근 • 대상 단면의 지층 및 시공일지 확보 • 포화토의 전단강도 및 투수계수 자료 확보 • 필요한 시료 채취 및 시험 수행

양적 및 질적 성과목표는 다음과 같다. (표 1.2, 표 1.3 참조)

표 1.2 연구과제의 양적 성과지표

연차 (단계)	연차별 성과목표	양적 성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차년도 (20개월)	불포화 특성을 고려한 대구・경북 퇴적암 기반 풍화토층 사면의 안정성 평가기법 개발	국내 학술지 논문게재 건수	국내 학술지게재 논문건수	3건	15%
		국외 학술지 논문게재 건수	국외 학술지게재 논문건수	1건	15%
		대경권 풍화토층 사면설계시 입력정수 분석	실내시험 수행 및 분석 건수	2건	10%
		강우시 대경권 풍화퇴적층 사면 안정성의 설계	불포화 사면 수치해석 건수	3건	10%
		모형실험	모형실험 수행 건수	1건	15%
		현장 사례연구	현장사례 건수	1건	15%
		불포화 사면 안정해법 및 사면설계 가이드라인	가이드라인 건수	1건	20%
	소 계				100%

표 1.3 연구과제의 질적 성과지표

질적 성과지표	성과검증 기준				가중치
	목표수준		측정방법	검증방법	
	목표치	달성치			
SWRC와 전단강도의 상관관계	80%	90%	SWRC와 전단강도의 상관관계	3.1절	20
강우에 따른 사면안전율 계산 엄밀성 개선	90%	90%	한계해석법에 대한 응력장 해법의 안전율 정확도 비교	3.2절	20
강우에 따른 실제사면의 파괴사례	90%	95%	실제사면 사례의 안전율 오차	3.2절	30
강우에 따른 모형사면의 파괴기구 검증	90%	90%	모형사면의 안전율 오차	4.4절	30

제2장 국내외 기술개발 현황

2.1 불포화토의 함수특성곡선

흙은 흙 입자와 간극으로 구성되며, 간극은 공기와 물로 채워져 있다. 간극 중에 기체가 남아있는 상태를 불포화토라고 한다. 통상적으로 지형이 높은 사면에서, 지반은 불포화상태로 존재하며, 물-공기 접촉면에서 발생하는 모관흡수력(matric suction)이 나타난다.

불포화토의 구조는 그림 2.1과 같이 흙 입자, 물, 공기의 삼상구조로 되어있다. 불포화토는 포화토와 달리 간극이 물과 공기로 채워져 있으며, 물과 공기의 접촉면을 물-공기 접촉면(contractile skin)이라 한다. 물-공기 접촉면에서는 표면장력이 작용하며 흙 입자 간에 역학적인 구속효과를 발생시킨다.

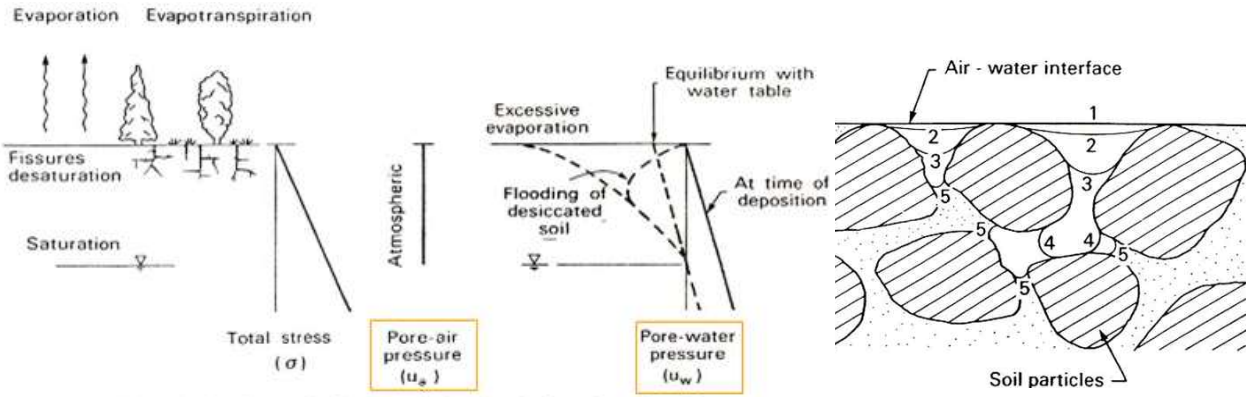


그림 2.1 불포화지층의 간극수압 및 조직 (Fredlund and Rhardjo, 1993)

강우로 인해 침투가 일어나면 지표 하부로 간극수가 유입되어 흐르므로 지표면에 가까운 지층에서는 함수비와 포화도가 증가한다. 반대로 증발이 일어나면 불포화층에서도 상부로 간극수가 유출되므로 함수비와 포화도는 감소하게 된다. 이로 인하여 간극수압이 변화한다. 또한 모관흡수력이 변동하고 지층의 유효응력이 변화한다.

정수압 상태에서, 지하수위 하부에서는 양의 간극수압이 깊이가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 띤다. 그런데 지하수위 상부의 불포화층에서는 부의 간극수압이 나타난다. 건기 시 지표에서 증발이 일어나면 불포화층의 간극수압은 더욱 감소하고, 우기 시 지표로부터 침투가 발생하면 간극수압은 지표로부터 증가하게 된다. 강우로 인한 침투가 극심하면 지표 부

근은 포화되고 양의 간극수압을 가질 수 있다.

지층 내의 물과 공기의 접촉면에서 공기압(u_a)은 수압(u_w)과 차이가 있으며, 그 차이가 모관흡수력($u_a - u_w$)이 된다. 불포화층에서 발생하는 부의 간극수압은 모관흡수력을 증가시키는데 기여한다. 이러한 모관흡수력은 흙 입자에 표면장력으로 전달된다. 이로 인하여 흡수력이 클수록 입자들을 서로 잡아당기며 흙 골격의 구속효과가 증가한다. 반대로 포화도가 증가하여 흡수력이 감소하면 구속효과는 감소하게 된다.

지표의 대기압은 절대기압으로 표시하면 1기압(101.3 kPa)이고 계기압력으로 0이 된다. 따라서 간극공기압이 대기압상태인 경우에 모관흡수력은 $-u_w$가 된다. 예컨대 불포화층의 수압이 −50 kPa인 경우, 간극공기압이 대기압인 경우에는 모관흡수력이 50 kPa이다(김상규 등, 2012).

불포화토에 작용하는 모관흡수력의 크기는 수리특성에 따라 다양하게 변화한다. 이인모 등(2003)은 현장사면에서 모관흡수력 및 체적함수비를 계측하였고 대상지반에 대한 투수해석을 수행하였다. 강우 전 모관흡수력이 작을수록 침투현상이 미약하게 이루어지며 흡수력의 변화가 작게 발생하였다. 반면 투수계수는 크기 때문에 깊은 깊이까지 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 오세붕 등 (2008)은 강우시 붕괴사면의 사례 연구를 통하여 사면에 작용하는 모관흡수력이 20kPa 정도의 낮은 수준임을 보여주었다. 이로 미루어 보건대 실제 사면과 같은 공학적 문제에서 발생하는 모관흡수력의 수준은 제한적인 범위에서 작용할 경우가 있다.

체적함수비는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = V_w / V = SV_v / V = Sn = \frac{Se}{1+e} \tag{2.1}$$

여기서, V_w: 물의 용적, V_v: 간극의 용적, S: 포화도

모관흡수력의 변화는 그림 2.2에 보인 바와 같이 포화도나 체적함수비의 함수로 표시할 수 있다. 이를 함수특성곡선(soil water retention curve, SWRC)이라고 한다. 모관흡수력이 변화하여도 간극비와 입자조직이 그대로 유지된다고 가정하면 함수특성곡선은 임의의 지층에 대하여 유일하다고 가정한다.

건조과정에서 모관흡수력이 증가하면 포화도 및 체적함수비는 감소한다. 모관흡수력이 0인 경우는 포화상태를 의미하고, 완전 건조 상태가 되면 모관흡수력은 100 MPa 수준의 거대한 압력이 작용하게 된다. 한편, 지층 내에서 침투가 발생하면 습윤과정을 따르므로 모관흡수력이 감소하는 과정을 겪는다.

포화상태에서 모관흡수력이 공기함입치(air-entry value)에 도달할 때까지는 포화도의 변화가 거의 일어나지 않는다. 공기함입치를 초과하면 잔류포화도(잔류함수비)에 이를 때까지 포화도가 크게 변화하게 된다.(그림 2.2) 이 영역은 불포화층의 모관흡수력의 영향에 따라 포화도나 함수비의 변화가 급격하게 일어나는 구간이다. 잔류포화도 이후에는 수천 내지 수만 kPa 수준의 모관흡수력이 가해지더라도 포화도는 서서히 감소한다. 낮은 수준의 모관흡수력에서는 모세관 효과(capillarity)에 의한 영향이 지배적으로 나타나며, 모관흡수력이 증가할수록 흡착작용(adsorption)의 효과가 크게 나타난다.

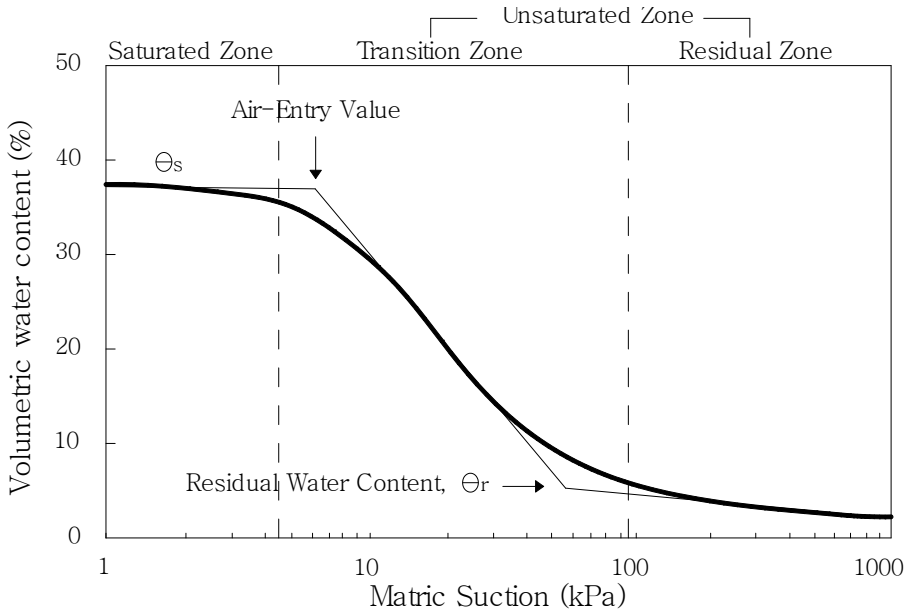


그림 2.2 전형적인 함수특성곡선(Fredlund & Xing, 1994)

van Genuchten(1980)은 모관흡수력과 체적함수비의 관계를 식 (2.2)와 같이 제안하였다.

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\left[\frac{1}{1+\{\alpha(u_a-u_w)\}^n}\right]^m \tag{2.2}$$

여기서, θ_s: 포화 체적함수비

θ_r: 잔류 체적함수비

α : 공기함입치의 역수

n : 함수특성곡선의 기울기와 관련된 계수

m : 모관흡수력이 높은 수준에서 기울기와 관련된 계수, 통상 $m=1-1/n$

Fredlund 와 Xing(1994)은 식 (2.3)을 제안하였다.

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=C(u_a-u_w)\left[\frac{1}{\ln\left\{e+\left(\frac{u_a-u_w}{a}\right)^n\right\}}\right]^m \tag{2.3}$$

여기서, a = 공기함입치과 관련된 계수, n = 변곡점의 경사에 관련된 계수
m = 잔류함수비와 관계된 계수, e = 자연대수, 2.71828
(u_a-u_w) = 모관흡수력, $C(u_a-u_w)$ = 보정함수

보정함수 $C(u_a-u_w)$는 식 (2.4)과 같이 정의 된다.

$$C(u_a-u_w)=\left[1-\frac{\ln\left\{1+\frac{(u_a-u_w)}{(u_a-u_w)_r}\right\}}{\ln\left\{1+\frac{1{,}000{,}000}{(u_a-u_w)_r}\right\}}\right] \tag{2.4}$$

여기서, $(u_a-u_w)_r$ = 잔류함수비의 흡수력
(u_a-u_w) = 각 측점의 모관흡수력

증발이나 배수로 인하여 건조과정이 발생하면, 침투나 모세관 상승에 의한 습윤과정에 비하여 동일한 모관흡수력하에서 더 많은 양의 간극수를 저장하는 경향이 나타난다(Vanapalli et al., 1996; Ng and Pang, 2000; Lu and Likos, 2004; 유건선, 2010). 따라서 그림 2.3에서 보여지듯이 함수특성곡선은 건조 및 습윤과정에서 이력현상(hysteresis)이 발생한다. 이러한 이력현상의 기구는 아직 명확하게 밝혀지지는 않았지만, (1) 건조시 큰 간극에 영향을 받고 습윤시 작은 간극에 영향을 받는 잉크병 효과 (2) 흙입자-간극수 접면에서의 접촉각 차이 (3) 습윤시 공기의 폐색(occluded air bubbles) (4) 습윤 및 건조시 흙의 팽창과 압축의 차이로 인한 것으로 알려져 있다(Lu and Likos, 2004).

또한 포화시료를 건조하여 구한 함수특성곡선과 습윤과정의 곡선에서는 일반적으로 포화시 체적함수비가 상이하게 나타난다(Vanapalli et al., 1996; Ng and Pang, 2000; Lu and Likos, 2004). 초기에 시료 포화시 시료 표면의 흙조직보다 다소 높은 수위를 가질 수 있기 때문이다. 또는 습윤시 폐색된 공기로 인하여 모관흡수력이 0일 때 낮은 함수비를 나타낼 수 있다.

각 과정에서의 함수특성곡선은 간극비가 일정한 상태에서 모관흡수력에만 의존하는 관계를 가진다. 구속응력이나 간극비가 상이한 경우에는 함수특성곡선이 다양하게 정의될 수 있다 그림 2.3에서 보여지듯이 구속응력이 증가하면 포화시 체적함수비가 감소하며 구속응력에 따라 함수특성곡선이 변화한다(Vanapalli et al. 1996; Ng and Pang, 2000; 성상규와 이인모, 2003). 따라서 각 지층을 대표한 함수특성곡선을 추출할 때 어려움을 겪을 수 있다.

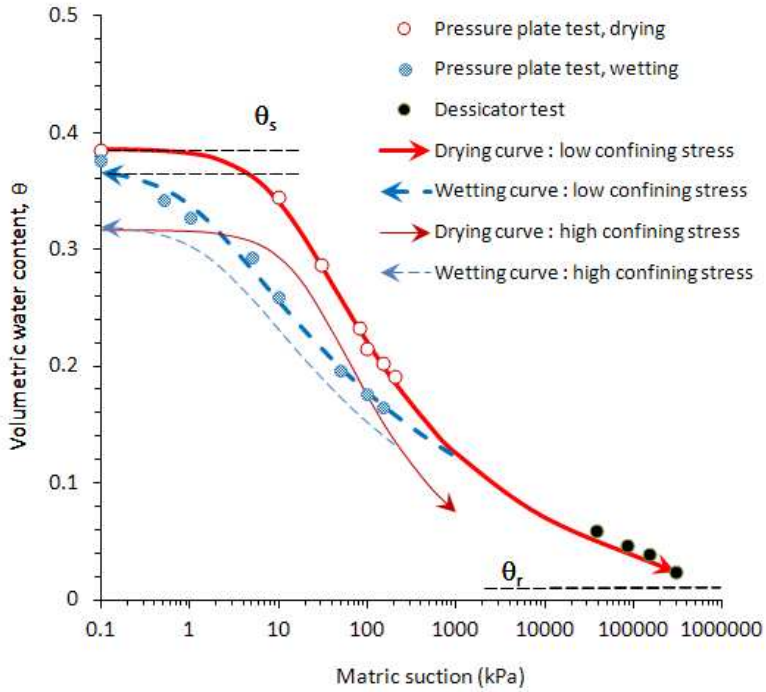


그림 2.3 건조 및 습윤과정에서 나타나는 함수특성곡선의 이력현상

그림 2.4는 본 연구에서 함수특성곡선을 획득하기 위해 사용된 압력판 추출시험기(volumetric pressure plate extractor)의 개요도이다. 압력판 추출시험기는 고압의 공기함입치를 갖는 세라믹판으로 모관흡수력을 조절하면서 시료 내로 들어가거나 빠져나오는 물의 양을 확인할 수 있다. 시험기의 구조는 크게 extractor와 air trap, ballast tube, burette으로 구성되어 있다.

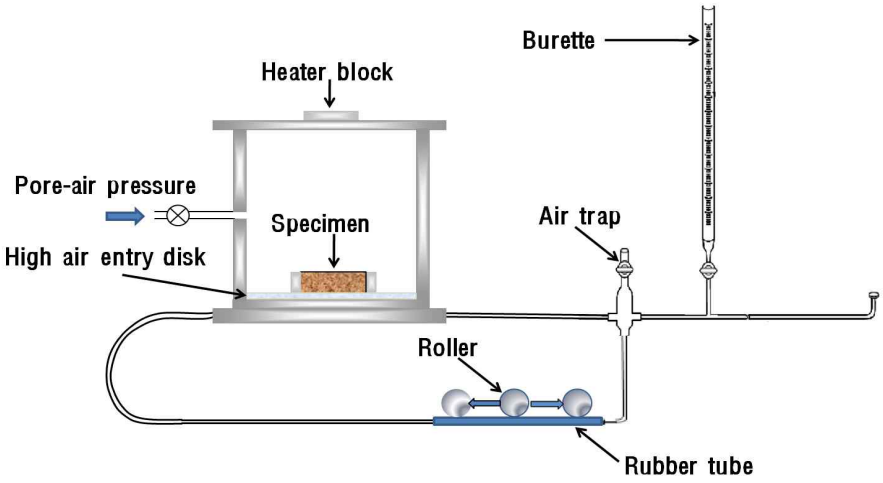


그림 2.4 압력판 추출시험기 개요도

Extractor는 밑판은 세라믹 디스크로 되어있고 셀 내부의 공기압을 가할 수 있게 실린더형 셀과 regulator가 연결이 되어있다. air trap은 세라믹 디스크를 통과한 공기방울이 ballast tube로 넘어가지 못하게 하는 기능을 한다. 시료에서 빠져나온 물은 ballast tube에 모이게 되고 이를 인위적으로 burette으로 넣어서 시료에서 물이 빠져나온 양 혹은 들어간 양을 확인할 수 있다.

압력판 추출시험기를 이용하여 함수특성곡선을 얻는 방법은 아래와 같다.

1) 그림 2.4와 같이 시험장치를 구성하는 요소들을 서로 연결한다. 이때 주의할 점은 ballast tube를 세라믹 판의 아래쪽 바닥과 같은 높이에 두거나 시료의 중간 높이와 같은 높이에 위치하도록 해야 한다는 것이다. 또한 vapor saturator의 방향이 바뀌지 않게 주의해서 연결해야 한다.
2) 뷰렛에 물을 담고 stopcock을 열어 실험장치의 여러 요소에 위치한 관에 물을 채운다. air trap과 ballast tube의 level mark를 항상 동일한 위치에 둘 수 있도록 장치한다. (그림 2.5(a))
3) 구속용 링에 조성한 시료를 바닥의 세라믹 판과 접촉이 잘 되도록 평평하게 다듬고 세라믹 판 위에 올려놓는다. (그림 2.5(b))
4) 시료보다 약 1 mm 정도 아래까지 물을 채운 후 시료에 물이 충분히 흡수되도록 방치한다. (그림 2.5(c))
5) 시료에 물이 충분히 흡수되면 셀 내부에 있는 물을 주사기 등을 이용하여 뽑아낸다.

(그림 2.5(d))

6) Ballast tube의 level mark 위치를 기준으로 뷰렛의 물의 양을 측정한다. (그림 2.5(e))

7) 뷰렛의 stopcock을 열고 ballast tube 끝에 압력을 가하여 ballast tube 속의 물을 왼쪽으로 밀어놓은 후 계획된 압력단계에 따라 가장 낮은 단계의 압력을 가한다. (그림 2.5(f))

8) 시료에서 물이 빠져나와 평형상태에 도달할 때까지 충분히 기다린다. 시료의 높이가 1cm일 때 24 시간정도가 소요된다고 보여진다. 이 때 ballast tube 끝으로 물이 흘러넘치지 않게 자주 관찰해야한다.

9) 시료에서 더 이상의 물이 빠져 나오지 않는 평형상태에 도달했다고 판단되면 roller를 누르면서 화살표방향으로 굴려서 세라믹 판 아래에 모인 공기를 air trap에 모은다. Ballast tube의 끝을 들어올리고 air trap의 stopcock을 열어서 공기를 빼내고 level을 맞추고 stopcock을 닫는다. (그림 2.5(g))

10) Level mark 위치를 기준으로 뷰렛의 물의 양을 측정한다.

11) 물의 양을 측정한 후 뷰렛의 stopcock을 열고 ballast tube 끝에 압력을 가하여 ballast tube 속의 물을 왼쪽으로 밀어놓은 후 계획된 압력단계에 따라 다음 단계의 압력을 가한다. (그림 2.5(h, i))

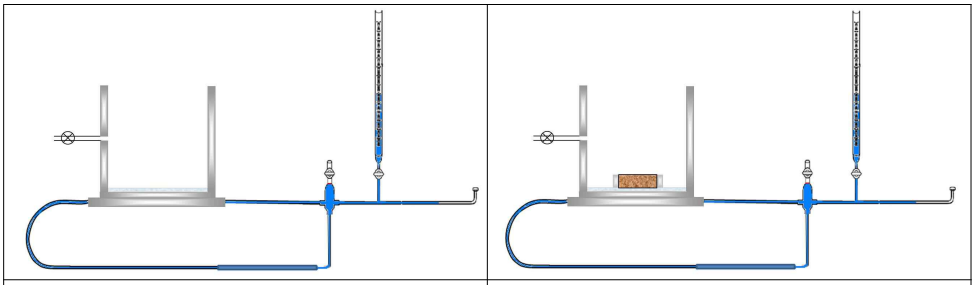
12) 압력을 높여 가는 마지막 단계까지 9)~11)의 과정을 반복한다.

13) 계획된 압력단계의 최고 압력까지 실험한 후 다시 압력을 감소시키면서 실험할 때는 시료 내부로 물이 들어가게 되므로 8)에서 설명한 것과 반대로 ballast tube의 오른쪽으로 물을 채운 후 압력을 감소시킨다.

14) 시료로 물이 들어가 평형에 도달할 때까지 기다린 후 9)~11)의 과정을 반복한다.

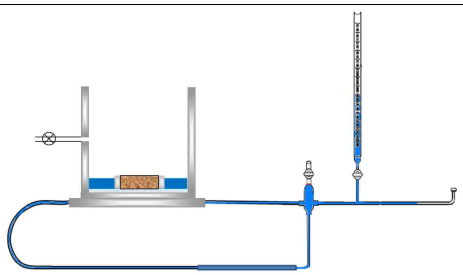
15) 계획된 압력단계를 모두 거쳐 실험한 후 압력을 제거하고 셀을 열어서 시료의 함수비를 측정한다.

16) 측정된 함수비와 각 압력단계에서의 뷰렛에서 측정한 물의 양으로부터 각 압력단계에서의 함수비를 계산하여 함수특성곡선을 완성한다.

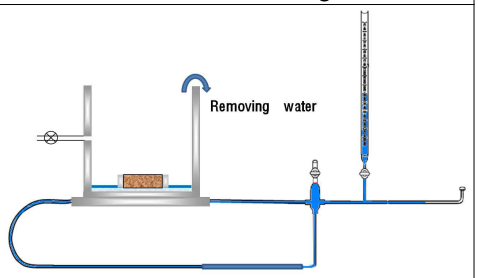


(a) 구성장비 연결

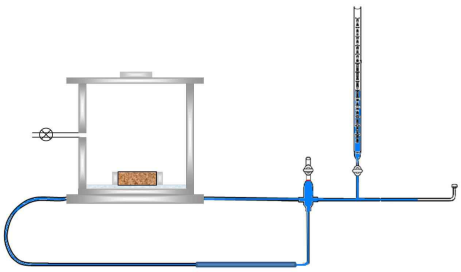
(b) 시료 setting



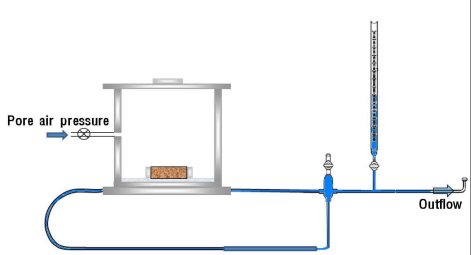
(c) 시료포화단계



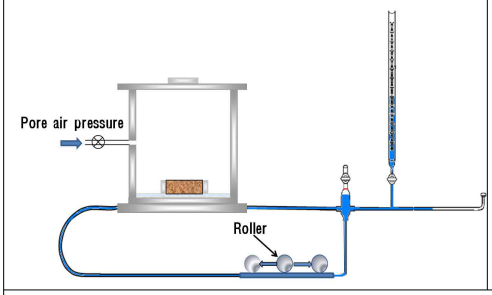
(d) 잔류 물 제거

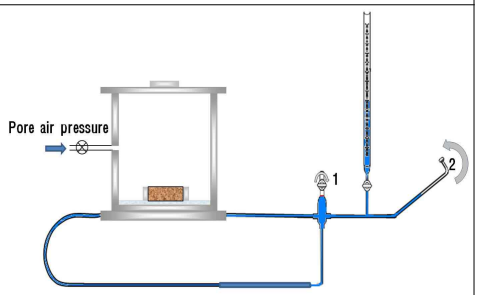


(e) 뷰렛의 수량 측정

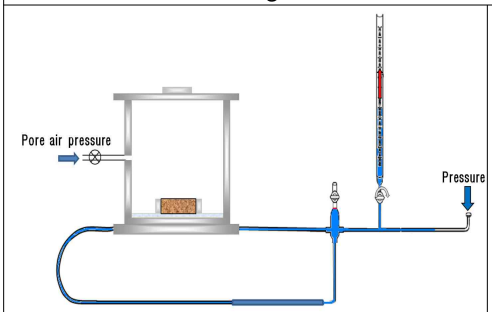


(f) 모관흡수력 증가

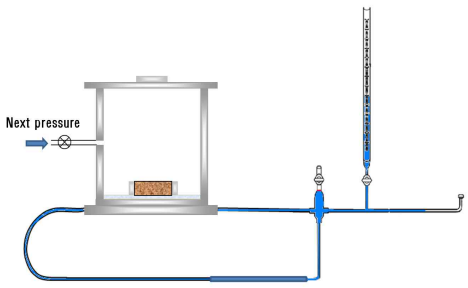




(g) 공기 제거 및 air trap 수위조절



(h) ballast tube에 압력을 준 후 수위측정



(i) 다음단계 모관흡수력 가함

그림 2.5 압력판 추출시험 순서

2.2 불포화 투수계수

불포화층 내에서도 간극 내 유체는 흐름이 발생한다. 간극 내 공기와 물은 각각 독립적으로 연속성을 나타내며, 간극공기와 간극수는 각각의 유로를 따라서 퍼텐셜이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르게 된다. 통상적인 사면문제에서는 간극공기압은 대기압상태로 일정하다고 가정하고 공기의 흐름은 고려하지 않는다. 하지만 공기의 압축이 일어나는 경우에 대하여 공기압의 변동을 고려할 필요가 있다.

불포화층의 간극수 흐름은 포화시와 마찬가지로 Bernoulli 정리와 Darcy 법칙이 성립한다고 가정할 수 있다. 이 경우에 압력수두는 0보다 작은 음의 값을 가진다. 간극수는 간극내 차지한 공간을 따라 흐르므로 포화도는 유속에 영향을 끼치는 중요한 인자가 된다. 불포화토의 투수계수는 포화도나 체적함수비가 감소할수록 감소한다. 모관흡수력이 증가하면, 건조가 진행됨에 따라 공기가 차지하는 공간이 넓어지므로 투수계수가 감소하게 된다.

투수계수는 함수특성곡선과 관련이 있으며 함수특성곡선과 유사한 공기함입치를 보이는 것으로 알려져 있다. 모관흡수력이 증가하면, 조립토의 경우에 세립토보다 투수계수의 감소가 급격하게 일어난다. 또한 불포화토의 투수계수는 모관흡수력에 따라서 1/10 내지 1/100씩 차수가 변동하는 경향을 나타낸다.

불포화투수특성은 시험을 통해 정확한 투수특성을 파악하는 것이 필요하지만 시간이 많이 소요되고 모관흡수력을 조절하는 장비를 필요로 한다. 이러한 이유로 지반 내 수분특성을 표현하는 함수특성곡선으로부터 불포화투수곡선을 추정하고자 하는 연구가 진행되어 왔다 특히 van Genuchten 모델의 경우, 함수특성곡선의 계수로부터 직접적으로 투수곡선을 얻을 수 있어 많이 적용되어 왔다. 하지만 Vogel et al.(2001)은 van Genuchten 모델로부터 추정된 투수곡선의 경우 낮은 모관흡수력 범위에서 나타나는 함수비 변화가 과다하게 반영되어 이 범위에서 투수곡선 변화가 크게 나타나 전체적인 모관흡수력 범위에서 추정된 투수곡선이 실제보다 작게 나타나는 경향에 대해 지적하였다. 또한 국내 풍화토에 대한 비교에서도 van Genuchten 투수모델을 비롯한 대부분의 추정 투수모델이 실험값보다 과소하게 나타났다(김윤기, 2009).

따라서 비교적 함수비 변화가 크지 않은 낮은 모관흡수력 범위의 van Genuchten 함수특성곡선을 영역별로 세분화하여 수정 모델을 제시하고 이를 통해 추정된 불포화투수곡선이 낮은 모관흡수력 범위에서 과다하게 과소평가되는 것을 개선하였다.

van Genuchten 모델(1980)에 의한 식 (2.5)의 SWRC(VG 모델)는 유효포화도 Θ와 모관흡수력 p에 다음과 같은 관계를 나타낸다.

$$p = \frac{1}{\alpha}\left[\frac{1}{\Theta^{1/m}} - 1\right]^{1/n} \tag{2.5}$$

여기서, Θ는 공기함입치의 p_b역수이며, n은 간극크기 스펙트럼 계수이고, m=1-1/n이다. p는 간극공기압과 간극수압의 차로 정의되며, 대기압 하에서는 수압의 -1배에 해당한다.

Mualem(1976)에 의하면, 상대 투수계수 K_r은 함수특성곡선의 관계로부터 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$K_r(\Theta) = \Theta^l \left(\int_0^{\Theta} \frac{d\Theta}{p}\right)^2 \Big/ \left(\int_0^1 \frac{d\Theta}{p}\right)^2 \tag{2.6a}$$

$$K(\Theta) = K_s K_r(\Theta) \tag{2.6b}$$

여기서, Ks는 포화투수계수이다. 식 (2.7b)로부터 Ks와 함수특성곡선을 실험적으로 획득하면 불포화토의 투수계수 K를 계산할 수 있다. l은 간극 연결성 계수로 통상 0.5로 가정한다 (Mualem, 1976).

식 (2.6a)에서 피적분 함수는 함수특성곡선으로부터 구한다. 식 (2.5)를 식 (2.6a)에 대입하면 다음과 같이 상대 투수계수를 예측할 수 있다(VGM 모델).

$$K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} f(\Theta)^2 / f(1)^2 \tag{2.7a}$$

$$f(\Theta) = \alpha\{1 - (1 - \Theta^{1/m})\}^m \tag{2.7b}$$

그림 2.6에서는 특정한 SWRC(p_b = 2.43kPa, n=1.34)에 대한 불포화토의 수리특성을 보여준다. 그림 2.6에서, p_b'은 비선형적인 SWRC의 가상적인 공기함입치로서, 식 (2.5)에 나타난 VG 곡선의 공기합입치 p_b와 같거나 낮은 값을 가진다. Θ_b'은 p_b'에 상응하는 유효 포화도이다.

VG 곡선을 p_b'로부터 접선방향으로 대수축에서 선형화하면, 유효 포화도가 1일 때 p_s를 정의할 수 있으며, Brooks and Corey 모델(1964)과 유사한 형태로 수정 모델을 구축할 수 있다. 수정 SWRC 모델에서, p가 p_s보다 작은 경우에는 Θ=1이고 p가 p_b'보다 큰 경우에는 식(2.5)의 VG 모델과 동일하다.

그림 2.6(a)에서 보여지듯이, SWRC에서는 모관흡수력이 p_s미만의 수준에서는 거의 포화상태이고 함수특성에는 거의 영향을 끼치지 않는 구간이다. 하지만, 식 (2.7)에 의하여 불포화 투수계수를 예측할 때에는 이 부분의 형태가 큰 영향을 끼친다. 그림 2.6(b)에서 Θ가 1일 때, 1/p

는 무한대로 접근하므로, 식 (2.7)의 VGM 모델에서 K_r은 급격하게 떨어진다. 특히 n이 1.5보다 작을 때에는 그림 2.6(c)에서 보여지듯이, VGM 모델은 모관흡수력이 매우 낮은 포화상태 부근에서 K_r은 급격하게 감소한다(Vogel et al. 2001). 이로 인하여 VGM모델은 포화상태 부근에서 투수계수의 급격한 변화를 나타내므로 수치적인 불안정성을 야기하고 해가 수렴하지 않거나 해의 불규칙적인 진동(oscillation)이 일어난다.

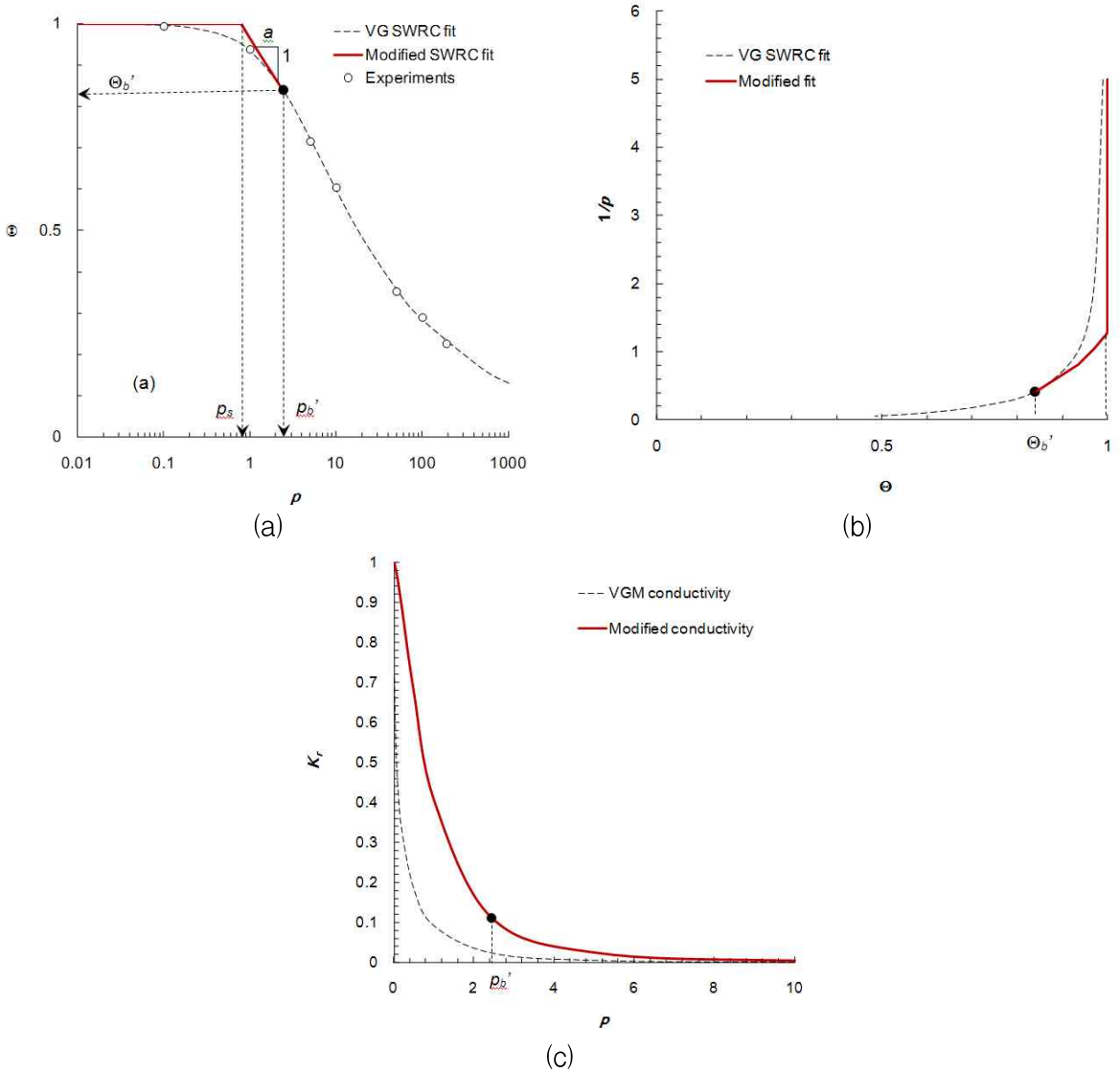


그림 2.6 실험 Case별 초기 모관흡수력 분포

이를 보완하기 위하여 Vogel et al. (2001)은 Brooks and Corey 모델 (1964) 형태의 함수특성곡선으로 수정하였으며, SWRC의 비선형성을 유지하기 위하여 매우 낮은 최소 공기함입치를 적용하였다. 하지만 최소 공기함입치를 정의하는 것이 어렵고, SWRC를 VG모델과 상이하게

다시 회귀분석해야 한다. 따라서 VG 모델을 이용하여 편리하게 투수계수를 수정하는 방법을 찾을 필요가 있다.

그림 2.6(a)에서 보여진 수정 VG 모델에 따른 SWRC곡선은 다음과 같이 나타난다.

$$p = \frac{1}{\alpha}\left[\frac{1}{\Theta^{1/m}} - 1\right]^{1/n}, \qquad \Theta < \Theta_b' \tag{2.8a}$$

$$p = p_b' \exp\{a(\Theta - \Theta_b)\}, \qquad \Theta_b' \le \Theta < 1 \tag{2.8b}$$

$$0 \le p \le p_s, \qquad \Theta = 1 \tag{2.8c}$$

이 때

$$p_s = p_b' \exp\{a(1 - \Theta_b)\}, \quad a = \frac{\left\{1 + (\alpha p_b')^n\right\}^{m+1}}{-mn(\alpha p_b')^n} \tag{2.8d}$$

이다.

식 (2.7)을 식 (2.6a)에 대입하면 다음과 같이 상대투수계수를 수정할 수 있다.

$$K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} f(\Theta)^2 / \{f(\Theta_b') + g(1)\}^2, \qquad \Theta < \Theta_b' \tag{2.9a}$$

$$K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} \{f(\Theta_b') + g(\Theta)\}^2 / \{f(\Theta_b') + g(1)\}^2, \qquad \Theta_b' \le \Theta < 1 \tag{2.9b}$$

$$K_r(\Theta) = 1, \qquad \Theta = 1 \tag{2.9c}$$

여기서

$$g(\Theta) = \frac{1}{a}(1/p(\Theta) - 1/p_b') \tag{2.9d}$$

이다.

그림 2.6(b)에서 보여지듯이 수정된 SWRC는 포화시에는 1/p가 유한한 값에서 시작되며, 이를 식 (2.9d)에 의하여 구간별로 적분하면 그림 2.6(c)와 같이 나타난다. 모관흡수력이 낮을 때 수정 곡선은 급격한 감소가 일어나지 않고 K_r이 서서히 변화하는 것을 알 수 있다.(그림 2.6(c)).이를 통하여 VG 모델에 비하여 수치적인 안정성을 개선할 수 있다. 그리고 SWRC가 미세한 차이를 보이지만, K_r은 VGM 모델에 비하여 매우 증가하고 있음을 알 수 있다. 수정

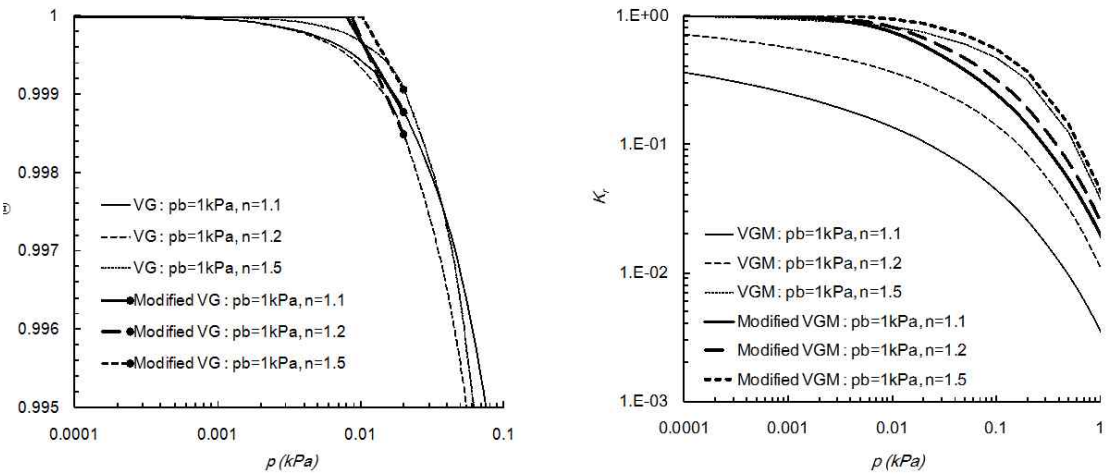
K_r은 VG모델로 SWRC를 회귀분석하면 식 (2.9)에 의하여 간편하게 구할 수 있었다.

p_b'이 p_b/50인 경우에 대하여 그림 2.7(a)에서 SWRC를 비교하고 있다. 수정 모델에 의한 함수특성은 0.001~0.02kPa 구간에서 VG 모델과 차이를 나타내고 있으며, 전반적인 모관흡수력 수준에 대하여 실제 함수특성을 모델하는 데는 거의 영향을 끼치지 않는다. 그림 2.7(b)에서 보여지듯이, 수정모델의 경우에 K_r은 최대 10배까지 증가한다. 또한 포화도가 1부근에서 K_r이 급격하게 감소하는 현상이 없어진다. n이 1.5인 경우에는 수정 모델과 VGM모델 간에 큰 차이가 나타나지 않지만, n이 감소할수록 VGM 모델이 K_r을 매우 낮게 평가하고 있음을 알 수 있다.

K_r 모델이 모든 흙의 실제 거동에 대한 유연성을 높이기 위해 보정계수를 추가하였다. 이러한 모정계수는 간극의 굴곡성을 고려하기 위하여 유효 포화도의 함수를 이용하여 고려하고 있다 (Mualem 1976, Fredlund et al, 1994)

$$K_r' = \Theta^q K_r \tag{2.10}$$

여기서 q는 실험적으로 구하는 계수로, -4를 적용할 수 있다.



(a) (b)

그림 2.7 다양한 함수특성에 대한 수정 투수계수

2.3 모관흡수력에 따른 불포화지반의 전단강도

포화토의 경우에는 평형상태에서 간극수압이 주로 0이상의 값을 가지므로 유효응력에 불리한 영향을 미치게 되나 불포화토는 평형상태에서 간극수압이 음으로 작용하여 유효응력을 증가시키는 역할을 한다. 이러한 부(-)간극수압은 모관흡수력에 기여하며 포화도와 연관이 있다.

포화토의 경우 Terzaghi 유효응력으로 Mohr-Coulomb 파괴규준을 나타내며 식 (2.11)과 같다.

$$\tau_{ff} = c' + \sigma'_{ff} \tan \phi' \tag{2.11}$$

여기서, τ_{ff} = 파괴시 파괴면의 전단강도

c' = 유효 점착력

σ'_{ff} = 파괴시 파괴면의 유효수직응력

ϕ' = 유효 마찰각

불포화토는 모관흡수력 효과가 중요한 역할을 하며, 특히 전단강도에 큰 영향을 끼친다. 순수직응력 $\sigma - u_a$는 흙입자와 공기의 접촉면에서 작용하는 응력성분이며 모관흡수력 $u_a - u_w$는 물과 공기의 접촉면에 작용하는 성분으로서 모두 입자 간의 구속효과를 높이는 데 기여한다.

일반적으로 불포화토의 전단강도를 결정하는 접근법에는 두 가지가 있다. 독립상태변수 접근법(Fredlund et al., 1977)과 유효응력(effective stress) 접근법(Bishop, 1959)이다. 전자에서는 응력상태변수를 순연직응력과 모관흡수력의 항으로 나누고 전단강도는 식 (2.12)에 의해 평가한다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \tag{2.12}$$

여기서, $(\sigma_f - u_a)$ = 파괴시 순수직응력

$(u_a - u_w)$ = 파괴시 모관흡수력

ϕ^b = 모관흡수력에 따른 전단강도의 증가비율을 나타내는 각

위 식에서, c'은 포화토의 유효점착력, ϕ'은 포화토의 유효내부마찰각이다. ϕ'은 다양한 모관흡수력이 작용하더라도 포화토의 경우와 동일한 것으로 알려졌다. 포화도가 증가하여 포화상태가 되었을 때, 간극 내 공기가 차지하는 공간은 간극수로 채워지고 간극공기압 u_a는 간극수압 u_w로 대체된다(즉, $u_a \rightarrow u_w$). 따라서 포화시 식 (2.12)는 Terzaghi의 유효응력의 원리에 따른 Mohr-Coulomb 파괴규준과 일치한다.

식 (2.13)에서 순수직응력이 0일 때의 전단강도는 겉보기 점착력(apparent cohesion)으로 정의되며, 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력 $\bar{c}$는 식 (2.13)과 같이 표시된다.

$$\bar{c} = c' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \tag{2.13}$$

ϕ^b는 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력의 변화 기울기를 나타내는 흡수마찰각이다. 따라서 식 (2.12)과 (2.13)로부터,

$$\tau_{ff} = \bar{c} + (\sigma - u_a) \tan \phi' \tag{2.14}$$

으로 쓸 수 있다.

순수직응력이나 모관흡수력이 증가하게 되면 불포화토의 전단강도도 증가하게 된다. 이러한 관계를 순수직응력-모관흡수력-전단응력에 대한 3차원 관계로 나타내면 그림 2.8과 같다. 순수직응력-전단응력 관계에서 불포화토의 파괴규준은 기울기가 ϕ'인 평행한 직선으로 나타난다. 겉보기 점착력은 순수직응력-전단응력축에서 나타나는 절편을 의미하며, 모관흡수력이 클수록 겉보기 점착력은 증가하게 된다.

모관흡수력에 따른 겉보기 점착력은 실험적으로 얻을 수 있다. 모관흡수력의 범위가 크지 않은 경우에는 선형적으로 단순화할 수 있는데, 이 때 ϕ^b가 일정하다. 이 그림에 보인 바와 같이 모관흡수력이 증가하면 불포화토의 파괴규준은 3차원 공간상에서 유일한 평면을 형성하고 있다.

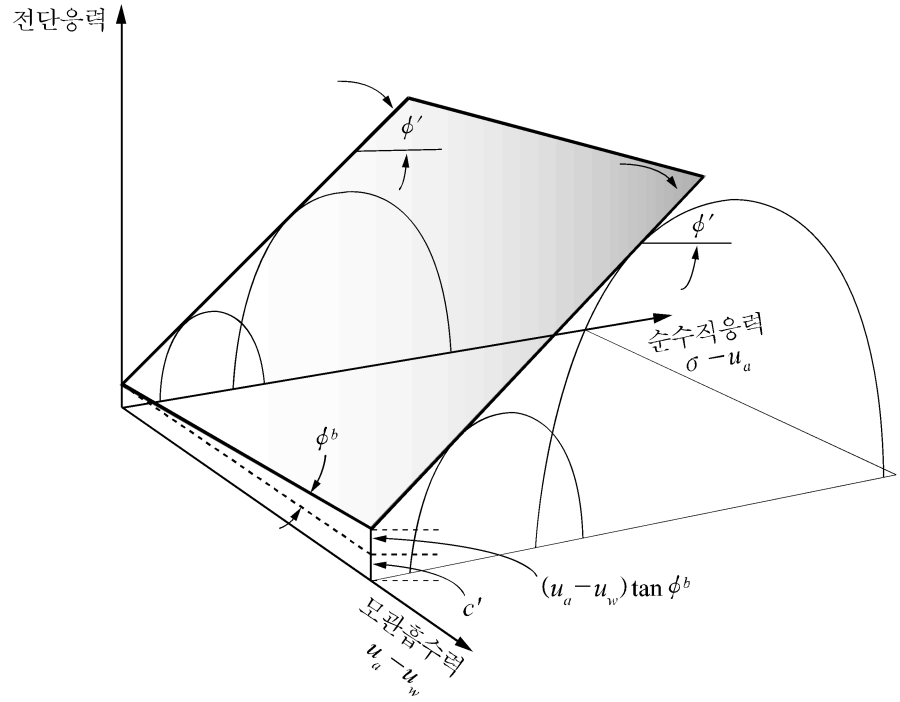


그림 2.8 불포화토의 Mohr-Coulomb 파괴규준 (김상규 등, 2012)

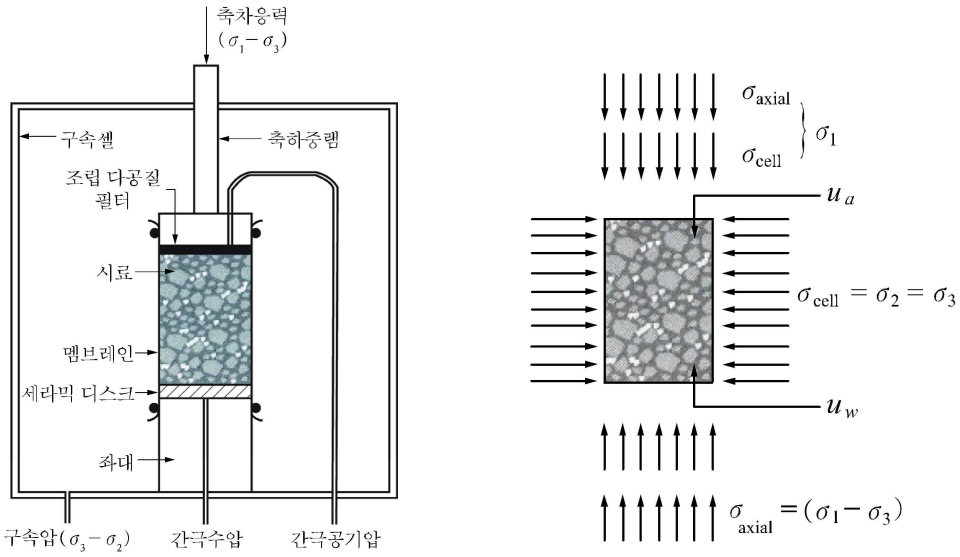
모관흡수력의 수준이 높으면 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력이 비선형적인 것으로 알려져 있다. 이러한 경우 ϕ^b는 제한된 모관흡수력 범위 내에서만 일정하게 평가할 수 있다. 1996년 Vanapalli 등은 함수특성곡선으로부터 시료의 잔류체적함수비를 구하여 불포화 전단강도를 구할 수 있는 식 (2.15)를 제안하였다. 식 (2.15)는 흡수력의 증가에 따른 전단강도의 비선형적인 증가를 고려할 수 있으며, 식 (2.15)에 사용되는 포화체적함수비 θ_s와 잔류체적함수비 θ_r 및 각 흡수력에서의 체적함수비 θ_w는 시료의 함수특성곡선으로부터 얻을 수 있다. 따라서 시료의 흙-수분 특성곡선과 포화상태의 강도정수 c', ϕ'를 알면 쉽게 식 (2.15)를 이용하여 불포화토의 전단강도를 계산 할 수 있다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\left[\tan\phi'\left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)\right] \tag{2.15}$$

전체 모관흡수력 범위에서는 비선형적인 겉보기 점착력을 나타내기 위해서는 식 (2.15)를 이용하거나 다음 절에서 기술하는 불포화토의 유효응력에 따른 파괴규준을 적용할 수 있다.

그림 2.9는 불포화토의 3축압축시험을 수행하는 개요도를 보여준다. 그림 2.9(a)에 보인 바와 같이 하부 좌대(base pedestal) 위에는 적절한 공기함입치(2~5 bar)를 가지는 세라믹 디스

크를 올려두고, 시료 위에 두는 상부 캡은 기존의 다공판을 이용한다. 그러면 시료의 상부에서는 다공판을 통하여 공기압이 가해지고, 시료의 하부에서는 세라믹 디스크를 통하여 불포화 시료 내부에 간극수압을 가하거나 측정할 수 있다.



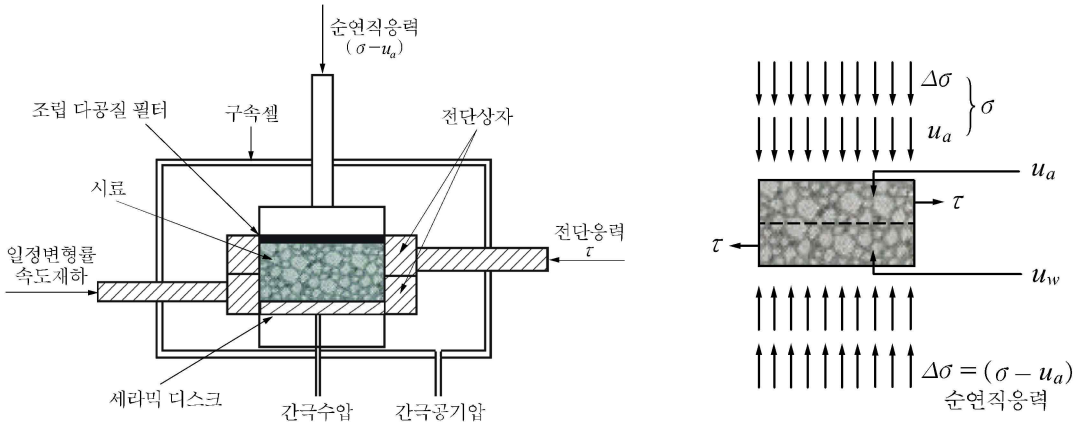
(a) (b)

그림 2.9 모관흡수력을 조절하는 불포화토의 3축압축시험
(김상규 등, 2012)

시험 시에는 포화토 시료에 대한 시험과 마찬가지로 구속압력 σ_3로 압밀시킨 후 축차응력을 가하여 파괴에 도달시킨다[그림 2.9(b) 참조]. 불포화시험에서는 시료 내에 간극 수압과 간극공기압을 가하여 모관흡수력 (u_a-u_w)이 결정된다. 간극수압과 간극공기압을 일정하게 가한 후, 횡방향 순수직응력 (σ_3-u_a)이 일정한 상태에서 축방향 순수직응력 (σ_1-u_a)이 증가하게 된다.

그림 2.10(a)에서는 불포화토의 직접 전단시험을 보여주고 있다. 3축압축시험과 마찬가지로 시료의 상부에서는 공기압이 가해지고 시료의 하부에는 세라믹 디스크를 설치하여 간극수압을 가하거나 측정할 수 있도록 한다. 공기압은 전단상자를 둘러싼 구속 셀을 통해 외부로부터 가해지므로, 시료 내부 뿐 아니라 시료의 외부에도 공기압이 작용한다.

그림 2.10(b)는 연직응력을 가하여 흙을 전단시키는 방법을 보여준다. 공기압을 가한 후 추가로 연직응력을 일정하게 재하한 상태에서 흙을 전단시키면 파괴에 도달하게 된다. 시료의 내·외부에 공기압이 동시에 작용하여 상쇄되므로 순연직응력 $\sigma-u_a$는 연직응력과 동일하다.



(a) (b)

그림 2.10 모관흡수력을 조절하는 불포화토의 직접 전단시험

일반적으로 불포화토의 실내시험에서는 수압은 대기압 상태로 둔 채(즉, $u_w=0$), 공기압을 증가시켜 모관흡수력을 조절한다. 모관흡수력이 평형을 이룬 후, 그 값을 일정하게 유지시켜 압밀과 전단시험을 수행한다. 불포화토의 강도시험에 있어서는 모관흡수력이 평형을 이루는 데 소요되는 시간이 오래 걸리므로 하나의 시료를 여러 모관흡수력 단계에 대하여 반복하여 시험하는 다단계시험을 선호한다.

2.4 불포화토의 유효응력과 전단강도

Bishop 유효응력은 식 (2.16)과 같이 정의할 수 있다(Bishop, 1954, 1959; Bishop & Blight, 1963).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \tag{2.16}$$

여기서 $(\sigma-u_a)$는 순응력으로 간극공기압이 대기압인 경우에는 전응력 또는 외부응력에 상응한다.

Bishop 응력 두 번째 항인 $\chi(u_a-u_w)$는 모관흡수력 (u_a-u_w)에 관련된 흡수응력(suction stress)을 의미한다. 이때 χ는 유효응력 계수로서 포화상태에서 모관흡수력이 0일 때 1이고 완전 건조시 0의 값을 가진다. Bishop 응력에 따라서 유효응력을 기술하려면, χ에 대한 정의가 핵심적이며 모관흡수력이나 체적함수비나 포화도의 함수로 나타난다. 그러나 χ는 모관흡수력에 대한 유효응력 변화율이므로 실험적으로 구하기 까다롭고, 모관흡수력이 매우 큰 경우에는

흡수응력이 실제와 달리 항상 0이 되도록 정의하고 있다. 이로 인해 불포화토의 유효응력에 대한 연구가 진전을 이루는데 어려움을 겪어 왔다.

Lu & Likos (2006)는 흡수응력 σ^s를 정의하여 이러한 단점을 개선하고 유효응력을 식 (2.17)과 같이 일반화하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \tag{2.17}$$

Bishop의 유효응력과 흡수응력에 의한 유효응력 식 (2.17)는 형태는 유사하지만 여러 차이를 보이고 있다. 식 (2.17)은 Bishop 응력을 포함하고 일반화 할 수 있다. 흡수응력은 모관흡수력이 유효응력에 기여하는 척도를 나타낸다. Terzaghi 유효응력처럼 간극수압 대신에 흡수응력으로 표현하므로, 포화토와 유사한 방식으로 불포화토 거동에서 유효응력의 변화를 분석할 수 있어 그 의미가 있다.

흡수응력 σ^s는 흙 골격의 단면에 작용하는 응력이다. 반면 모관흡수력은 흙 입자 사이의 물과 공기의 접촉면에 작용한다. 따라서 모관흡수력은 흙의 응력을 정의하는 변수가 될 수 없다 (Lu, 2008). 그리고 흡수응력은 미시적으로는 분자간의 힘(van der Waals force), 이중층에 의한 힘(double layer force), 표면장력과 모관상승력의 조합으로 나타나는 것으로 밝혀졌다 (Lu & Likos, 2006).

흡수응력은 불포화토의 함수특성과 직접적인 관계를 가지고 있다. Lu 등 (2010)은 열역학적인 관점에 흡수응력과 함수특성의 관계를 규명하고 모관흡수력에 따른 흡수응력의 관계를 흡수응력 특성곡선(suction stress characteristic curve, SSCC)으로 정의하였다. 함수특성곡선을 모관흡수력에 대한 모델로 정의하면 흡수응력 특성곡선도 모관흡수력에 대한 유일한 함수로 나타난다. 이러한 흡수응력 특성곡선은 모관흡수력에 따른 전단강도나 함수특성곡선으로부터 쉽게 구할 수 있다.

Lu 등(2010)은 흡수응력을 열역학적인 평형에 근거하여 식 (2.18)과 식 (2.19)로 정의하였다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w)\Theta \tag{2.18}$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \tag{2.19}$$

여기서 θ_s, θ_r은 포화 및 잔류 체적함수비이다. Θ는 유효포화도이며 체적함수비 θ를 포화시 및 잔류시 함수비로 규준화한 것이다.

함수특성곡선은 임의의 흙에 대하여 유일하게 정의되며, van Genuchten 모델 (van Genuchten, 1980; van Genuchten et. al., 1991)에 의하여 식 (2.2)와 같이 정의될 수 있다.

$$\Theta = \left[\frac{1}{1+\alpha(u_a - u_w)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}} \qquad (2.2 \text{ bis.})$$

식 (2.2)을 식 (2.18)에 대입하면 흡수응력 특성곡선은 다음과 같이 모관흡수력의 함수로 나타난다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \left[\frac{1}{1+\alpha(u_a - u_w)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}} \qquad (2.20)$$

흡수응력 특성곡선은 함수특성곡선으로부터 구할 수 있으며 함수특성곡선과 마찬가지로 유일하게 정의될 수 있다. 반대로 흡수응력 특성곡선으로부터 함수특성곡선을 구할 수도 있다. 식 (2.17)에서 정의된 유효응력에서 보듯이, 모관흡수력이 주어지면 유효응력이 흡수응력 특성곡선에 의하여 정의될 수 있다. 따라서 함수특성곡선 및 흡수응력 특성곡선은 파괴시 뿐 만 아니라 파괴이전을 포함한 전반적인 거동에 대하여 각각 유일하게 정의할 수 있다.

흡수응력은 그림 2.10의 불포화토의 파괴규준으로부터 정의할 수 있다. 모관흡수력에 따른 불포화토의 파괴규준이 서로 평행한 것으로 알려져 있다. 파괴포락선을 축차응력이 0인 상태까지 연장하면 파괴시 등방 인장응력을 구한다. 이 등방인장응력을 포화시 등방인장응력 값만큼 축이동한 것이 흡수응력이다. 이러한 흡수응력은 모관흡수력에 따른 유일한 관계로 나타나는데 이로부터 흡수응력 특성곡선을 정의한다. 전단강도나 함수특성을 실험적으로 획득하면 둘 중의 하나를 이용하여 불포화토의 함수특성곡선과 흡수응력 특성곡선(또는 유효응력)을 모두 구할 수 있다.

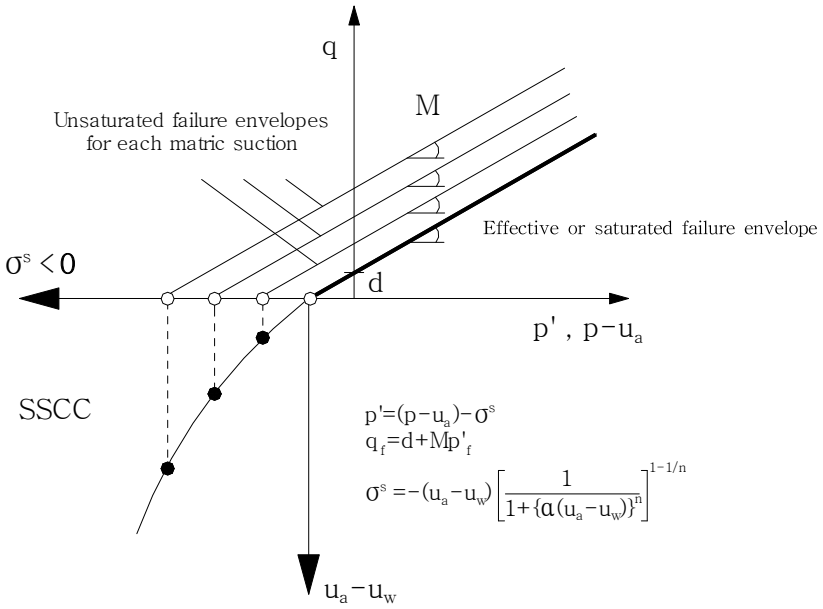


그림 2.12 p-q면에서의 Mohr-Coulomb 파괴규준으로부터의
흡수응력특성곡선(Oh 등, 2012)

삼축압축시험에서 체적응력 불변수(volumetric stress invariant) $p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$이고 축차응력(deviatoric stress) $q=\sigma_1-\sigma_3$이다. 유효 체적응력에 따른 파괴규준은 식 (2.21)로 나타난다.

$$\tau_{ff} = c' + \sigma'_{ff}\tan\phi' \tag{2.21a}$$

$$q_f = d + M(p-u_a)_f - M\sigma^s \tag{2.21}$$

($p-u_a$) - q면에서 M은 파괴규준의 기울기를 나타내고 d는 포화시 절편을 나타낸다. 첨자 f는 파괴 시점을 표현한다. 삼축압축시험에서 포화시 마찰각과 점착력은 M과 d로부터 식 (2.22)와 식 (2.23)과 같이 구할 수 있다.

$$\phi' = \sin^{-1}\{3M/(6+M)\} \tag{2.22}$$

$$c' = \frac{d}{M}\tan\phi' \tag{2.23}$$

식 (2.21)에서, 흡수응력 σ^s 는 삼축압축시험결과 응력으로부터 식 (2.24)와 같이 구할 수 있다.

$$\sigma^s = \frac{d + M(p - u_a)_f - q_f}{M} \tag{2.24}$$

Oh 등 (2012)은 국내 풍화토를 대상으로 흡수응력 특성곡선을 구하고 파괴규준이 유효응력에 의거하여 포화토 규준으로 유일하게 정의됨을 확인하였다. 뿐만 아니라 전단강도로부터 구한 흡수응력 특성곡선과 함수특성곡선으로부터 구한 흡수응력 특성곡선이 일치함을 확인할 수 있었다. 흡수응력에 기반한 불포화토의 유효응력 가설은 불포화토의 파괴시 거동을 적절하게 기술한다. 특히 실제 거동에서 유효응력에 의한 파괴규준이 모관흡수력과 상관없이 포화토 규준과 동일하고 유일하게 정의되므로 불포화 지반문제를 포화토와 동일한 이론과 해법으로 해결하는 것이 가능하다.

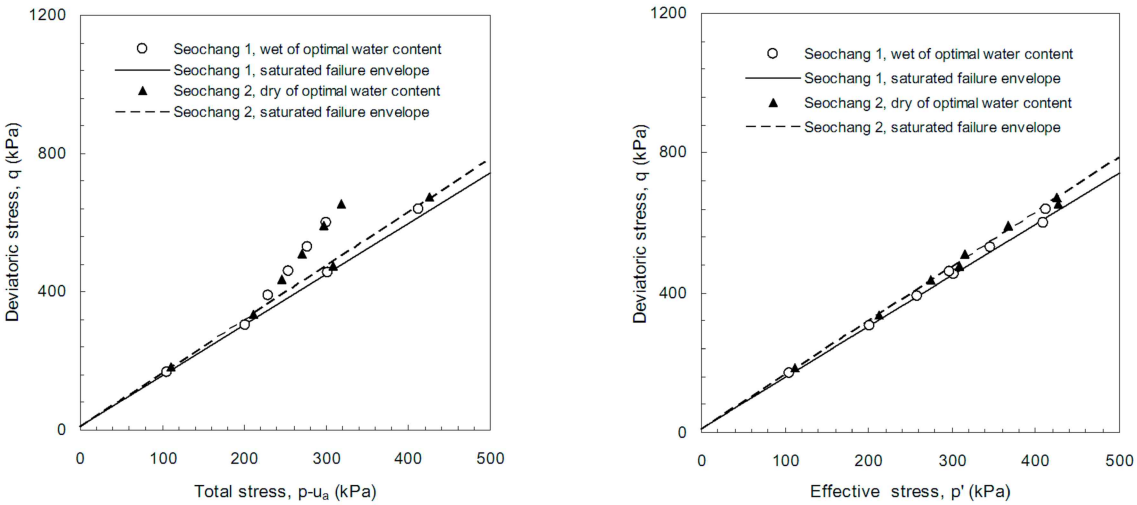
표 2.1에서는 서창, 옥천, 연기에서 채취한 자료의 성형조건과 통일분류를 보여준다. 이러한 시료에 대하여 포화시 전단강도와 함수특성곡선 시험을 한 결과가 표 2.2에 나타나있다. 표 2.2에 나타난 함수특성곡선계를 이용하면 식(2.17)의 흡수응력과 유효응력을 구할 수 있다. 그림 2.12에서는 국내 풍화토 시료를 대상으로 삼축시험을 수행한 결과를 보여준다. 모관흡수력에 따라 변화하는 전단강도가 유효응력으로 나타냈을 때 모두 포화토의 전단강도와 일치하고 유일하게 정의할 수 있었다.(Oh 등, 2012)

표 2.1 국내 풍화토 시료의 특성

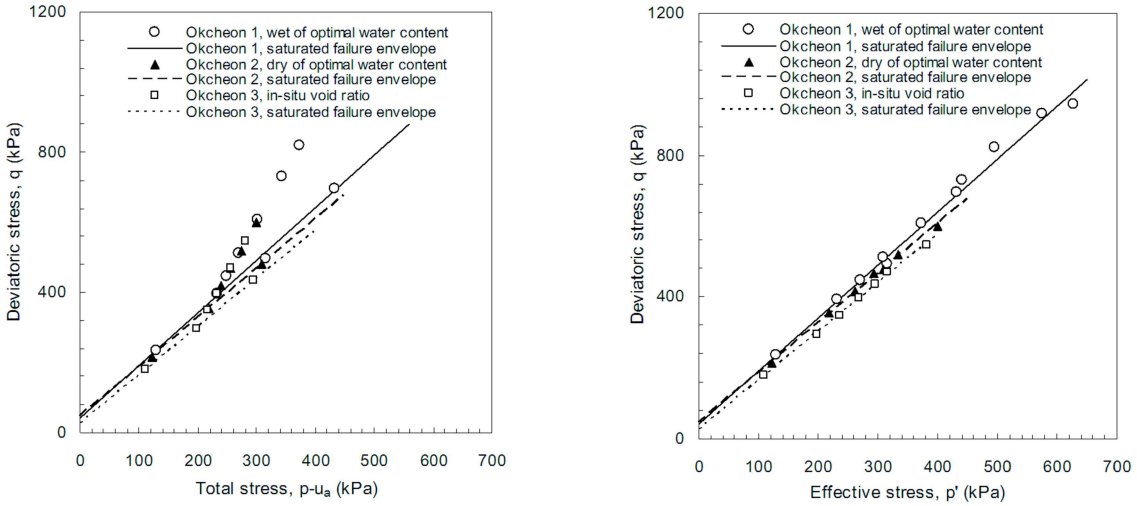
Region	Notation	Sample description	USCS	Sand (%)	Silt/ Clay (%)	Void ratio	ρ_d (g/cm^3)	Water content (%)
Seochang	Seochang 1	0.95 $\rho_{d,max}$ compaction (wet)	SC	79	14	0.61	1.64	20.6
	Seochang 2	0.95 $\rho_{d,max}$ compaction (dry)	SC	79	14	0.61	1.64	4.4
Okcheon	Okcheon 1	0.95 $\rho_{d,max}$ compaction (wet)	SP	95	5	0.57	1.7	19.9
	Okcheon 2	0.95 $\rho_{d,max}$ compaction (dry)	SP	95	5	0.57	1.7	7.9
	Okcheon 3	In-situ void ratio	SP	95	5	0.77	1.51	19.9
Yenki	Yeonki 1	0.95 $\rho_{d,max}$ compaction (wet)	SP	93	2	0.48	1.78	18.8
	Yeonki 2	0.95 $\rho_{d,max}$ compaction (dry)	SP	93	2	0.48	1.78	8.5
	Yeonki 3	Passing #20 sieve	SP	95	5	0.48	1.78	18.8

표 2.2 국내풍화토 시료의 전단강도 및 함수특성곡선관계 물성값

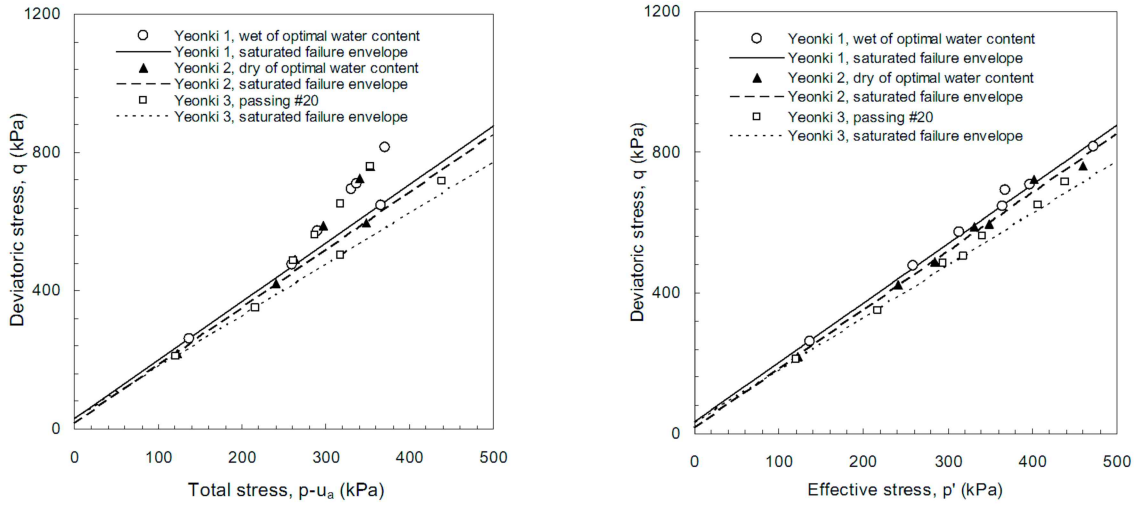
Region	Notation	c′ (kPa)	ϕ' (°)	SWRC				
				θ_s	u_b (kPa)	θ_r	n	R^2
Seochang	Seochang 1	5.97	36	0.358	11.022	0	1.301	0.99
	Seochang 2	3.07	38	0.418	11.251	0.023	1.431	1
Okcheon	Okcheon 1	20.44	37	0.324	21.160	0	1.327	0.99
	Okcheon 2	22.51	35	0.343	3.625	0	1.286	0.99
	Okcheon 3	12.79	34	0.410	1.369	0	1.234	0.99
Yenki	Yeonki 1	17.15	41	0.255	2.654	0	1.259	0.99
	Yeonki 2	7.8	41	0.272	0.885	0	1.193	0.98
	Yeonki 3	15.5	36	0.334	9.440	0.03	1.25	0.99



(a) 서창시료



(b) 옥천시료



(c) 연기시료

그림 2.11 국내 불포화토의 유효응력과 전단강도 관계

유효응력 가설은 불포화토의 파괴규준을 유일하게 정의할 수 있다(Lu & Likos, 2004; 2006; Oh 등, 2010). 불포화토의 파괴규준은 흡수응력에 근거한 유효응력으로 그림 2.11과 같이 포화시 파괴규준으로 유일하게 기술할 수 있다. 특히 함수특성곡선으로부터 불포화 전단강도를 구할 수 있다. 이러한 결과는 불포화 토질역학의 문제에 포화토의 이론을 그대로 적용할 수 있음을 보여준다. Terzaghi의 유효응력에 근거한 지지력, 비탈면안정, 토압이론에 간극수압 대신에 흡수응력으로 유효응력을 정의하기만 하면 된다. 또한 식 (2.18)과 식 (2.19)는 파괴이전의 거동에 적용되므로 구성관계, 변형계수와 관련한 거동을 새로운 유효응력으로 기술할 수 있다.

그림 2.13은 강우 시 침투로 인해 파괴에 이르는 지반 내 응력경로를 보여준다. 불포화지반 내 한 위치의 전응력으로 표시한 응력은 Mohr 원상의 A점에 존재하고, 유효응력으로 표시하면 모관흡수력 효과로 인하여 발생한 부간극수압만큼 증가하므로 A'점에 위치한다. 강우로 인한 침투가 일어나고 포화도가 증가하여도 전응력은 거의 일정하다. 그러나 불포화토의 유효응력 Mohr 원은 포화도가 증가할수록 불포화층의 모관흡수력이 감소하게 되므로 좌측으로 이동하면서 포락선에 접근하게 된다.(A'에서 A''로). 또한 포화도가 증가하면 파괴포락선은 포화상태에 접근한다. 다시 말하면, 강우시에는 불포화토에 침투가 일어나면서 유효응력에 의한 Mohr 원과 파괴포락선은 함께 근접하게 되어 파괴에 도달하게 된다.

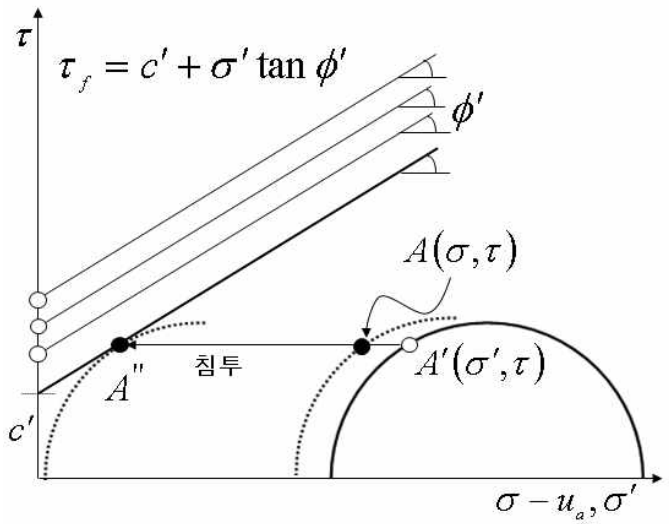


그림 2.13 강우시 침투로 인한 전단강도 및 유효응력의 변화

2.5 2차원 수치모델

사면의 수리특성은 다음과 같은 Richards의 방정식으로 기술한다.

$$\nabla \cdot K(h)\nabla H + W = \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} \tag{2.25}$$

여기서, $K(h)$ = 수리 전도도 함수

h = 압력 수두

H = 전수두 ($H = h + z$)

W = 유량

$\theta(h)$ = 체적함수비

일반적으로 $K(h)$와 $\theta(h)$는 압력수두 h의 비선형 함수이다.

사면의 전응력은 주로 사면의 형상과 자중의 영향을 받는다. 선형 탄성 재료에서의 전응력에 대한 지배방정식은 선형 운동량의 평형에서 나온다.

$$\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma}) + \frac{\gamma}{g}\mathbf{b} = 0 \tag{2.26}$$

여기서, $\boldsymbol{\sigma}$ = 응력텐서

$\mathbf{b}$ = 물체력 벡터

γ = 지층의 습윤단위중량

g = 중력가속도

유효응력은 식 (2.25)과 (2.26)의 해답에 의존하고, 일반적으로 안정해석에 사용된다. 비균질한 다공질 재료에서 일반적인 유효응력은 다음과 같다(Lu and Likos, 2004).

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} - \left(u_a + \sigma^s\right)\mathbf{I} \tag{2.27}$$

여기서, $\mathbf{I}$ = 2차 identity 텐서

$$\sigma^s = -\left(u_a - u_w\right) \qquad \left(u_a - u_w \le 0\right) \tag{2.28a}$$

$$\sigma^s = -\left(u_a - u_w\right)\Theta \qquad \left(u_a - u_w \ge 0\right) \tag{2.28b}$$

사면에서의 전응력, 모관흡수력, 흡수응력 분포로부터 유효응력을 계산하면, 사면의 안정은 불포화토의 전단강도와 유효응력 분포를 고려하여 계산할 수 있다. 부정류 수치모델과 알고리즘은 그림 2.14에서 보여주고 있다.

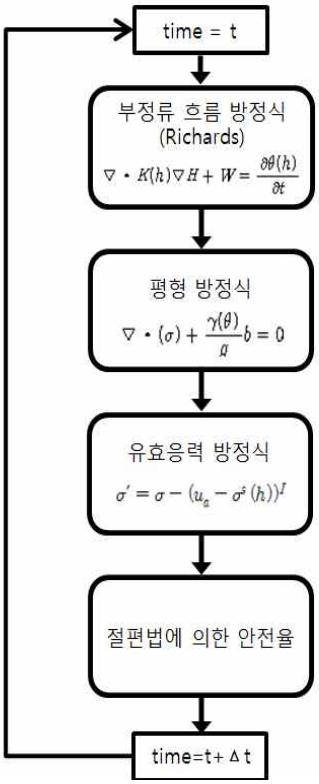


그림 2.14 사면 안정해석에 대한 수리 역학적연계 체계

해석 절차는 불포화 유동, 전응력 분포 및 안전율을 구하는 과정을 포함하며 (Lu et al. 2013), Geostudio 2007 (Geo-slope, 2007) 코드를 이용하여 수행하였다. 불포화 유동은 강우에 따른 정상류 및 부정류 해석에 의하여 수행한다. 두번째로 전응력분포는 탄성모델을 이용하여 단순하게 계산한다. 탄성계수는 변위에는 크게 영향을 끼치지만 전응력에는 크게 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 불포화 유동 및 전응력에 대한 유한요소해석을 통하여 대상사면 내의 절점에서 유효응력과 상응하는 전단강도를 구할 수 있다. (그림 2.15 참조)



그림 2.15 해석절차 개요

안전율을 평가하기 위하여, 현장 파괴면을 고려하고 예비해석을 통하여 활동면을 설정하였다. 주어진 활동면에 대하여 작용응력 및 유효응력에 기반한 전단강도를 구해야한다. 안전율은 유한요소해석에 의하여 계산된 응력에 근거하여 평가한다.

사면문제에서 간극공기압이 대기압인 경우, 모관흡수력은 간극수압의 -1배가 된다. 식 (2.28b)은 $\sigma^s = u_w\Theta$가 되고 유효응력 식 (2.17)은 $\sigma' = \sigma - u_w\Theta$로 나타난다. 이 때 Θ는 함수특성곡선으로부터 구할 수 있다. 따라서 포화시 파괴규준과 함수특성을 이용하면 불포화토의 파괴규준을 유일하게 기술할 수 있다.

전응력은 탄성해석으로부터 계산하였고 간극수압 u_w는 부정류해석에 의하여 계산되었다. 각 적분점에서 구한 응력은 절점으로 투영된다. 그리고 각 요소의 평균값으로부터 절편 저면의 중심부에서 나타나는 수직응력σ와 전단응력 τ를 평가한다. 흡수응력 $\sigma^s = u_w\Theta$는 식 (2.20)에 의하여 간극수압과 함수특성곡선으로부터 계산된다. 전단강도 τ_f는 흡수응력에 근거한 유효수직응력 $\sigma' = \sigma - u_w\Theta$로부터 계산할 수 있다 (표 2.3).

안전율은 활동면 작용한 전단력과 저항력의 비이며, 다음과 같이 적분된다.

$$FOS = \frac{\sum_i(\tau_f\, l_{base})_i}{\sum_i(\tau\, l_{base})_i} \tag{2.29}$$

여기서 l_{base}는 절편 저면의 길이이며, i는 절편번호이다.

표 2.3 해석절차

구분	내용	결과
침투해석	• 불포화토의 침투해석 • 정상류해석 : 선행강우 • 부정류해석 : 집중강우	• 불포화 사면의 수두, 수압분포 계산 • 강우에 따른 포화도 계산
응력해석	• 전응력해석 : 탄성해석 • 전 지층의 응력계산	• 절편에 작용되는 수직응력, 전단응력 계산 • 절편측면에 작용하는 힘 분포를 고려한 안정해석
안정해석	• 절편법에 따른 안전율 계산 • 불포화토의 유효응력에 따른 전단강도 고려 • 불포화토의 유효응력 변화를 고려한 안전율 계산	• 강우에 따른 안전율 변화 계산 • 활동면에 작용하는 유효응력 계산

해석절차에 입력되는 물성치들에 대한 관계는 다음과 같다.

표 2.4 해석시 필요한 불포화 물성

구분	이론	연구내용
함수특성곡선	Van Genuchten 모델 $\Theta = \left[\frac{1}{1+\{a(u_a-u_w)\}^n}\right]^m$ (2.1)	• 압력판추출시험 수행 • Tempe cell시험 수행 • Curve fitting 분석
불포화투수계수	수정 Mualem 모델 $K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} f(\Theta)^2 / \{f(\Theta_b') + g(1)\}^2, \quad \Theta < \Theta_b'$ (2.9a) $K_r(\Theta) = \Theta^{1/2} \{f(\Theta_b') + g(\Theta)\}^2 / \{f(\Theta_b') + g(1)\}^2, \Theta_b' \le \Theta < 1$ (2.9b) $K_r(\Theta) = 1, \quad \Theta = 1$ (2.9c)	• 포화투수계수 획득 • 투수계수 보정기법 개발
불포화전단강도	유효응력이론 $\tau_{ff} = c' + \sigma_{ff}' \tan\phi'$ (2.21) $\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s$ (2.17) $\sigma^s = -(u_a - u_w)\Theta$ (2.18)	• 포화전단강도 획득 • 직접전단시험 수행 • 삼축압축시험 수행 • 모관흡수력에 따른 전단강도 획득

한계평형해석에서는 그림 2.14에서 나타난 활동원의 절편에서 양측면에 작용하는 힘의 분포를 가정한다. 이로 인하여 안전율에 오차가 포함된다. 반면에 유한요소해석을 통하여 응력을 계산하면 구성관계에 따라 평형을 이루도록 절편 측면에 작용하는 힘을 계산할 수 있다. 또한 시공절차에 따른 지층의 응력변화를 고려할 수도 있다.

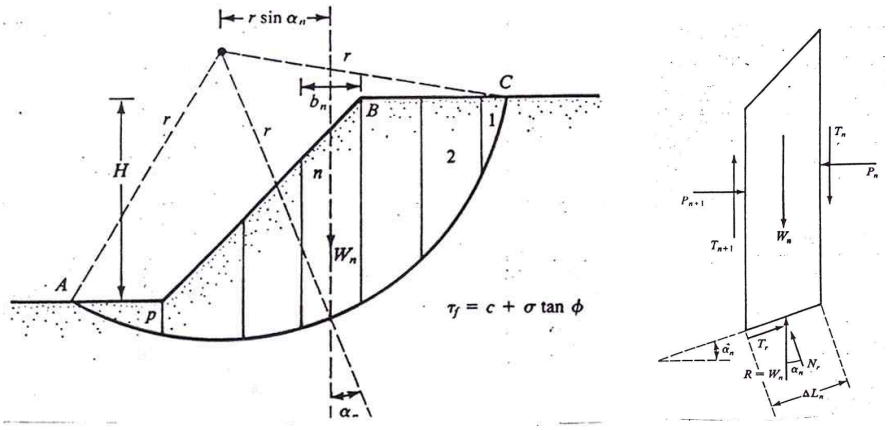


그림 2.16 한계평형해석에서의 절편

불포화토의 침투해석을 수행하면, 강우에 따른 지층의 포화도의 변화를 계산하고 지하수위의 변동을 알 수 있다. 따라서 불포화토의 유효응력의 변화를 계산한다. 반면 이러한 절차를 고려하지 않으면, 강우 시 지하수위나 지층의 포화도를 가정할 수밖에 없다

제3장 불포화 사면의 해석기법 개발

3.1 대상사면의 개요 및 불포화 물성

구분	목표	내용	평가지표	측정방법	가이드라인 기여도
실내실험 및 분석	대경권 사면 불포화층 물성평가 기법 개발	불포화층의 함수특성, 투수계수, 전단강도 특성 평가	실내시험 수행 및 분석 : 4개 현장	SWRC와 전단강도의 상관관계	• 실제사면에 대한 설계 및 사후조사 관례 개선 • 실제 현장 기록 및 자료 조사 중요성 확인 • 불포화 물성 획득 관례 및 분석 절차 수립

(1) 사면의 현황

국내에는 백만개 정도의 절토사면이 존재하고 이는 홍콩의 20배에 이른다. 하지만 산악지형에서 넓고 깊은 범위에 대한 지반조사가 부족하여 도로계획이나 시공은 비용과 질적 수준에서 한계가 있다. 설계단계에서는 절토사면의 안정성 평가가 실제적이지 못하여 시공중 붕괴가 다반사로 일어나는 실정이다 (Lee and Hencher, 2009).

또한 사면이 붕괴하는 원인을 파악하고 대책을 마련하기 위해서는 시공절차와 붕괴현황에 대한 단면 변화를 기술해야 한다. 하지만 여러가지 이유로 이러한 기록들은 보전되지 못하고 있는 실정이어서, 지반공학 관례의 기술적인 개선이 이루어지지 않고 있다. 본 연구는 실제 붕괴사면을 대상으로 사면 설계의 관례를 개선하는 데 중점을 두고 있다. 그림 3.1에서는 대상사면의 현장 위치를 나타내고 있다.

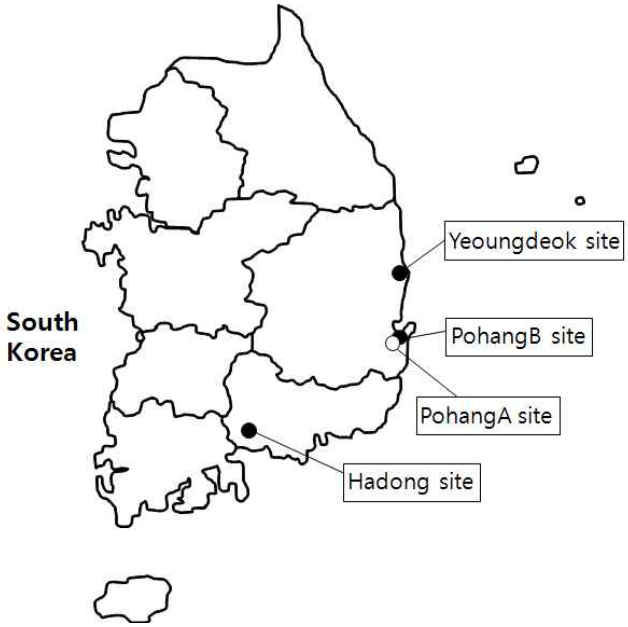


그림 3.1 대상사면의 현장위치

그림 3.2에서는 네 개의 붕괴사면 단면을 보여준다. 하동, 포항 A, 포항 B, 영덕 사면은 유사한 형태의 지층구조를 가지고 있다. 대상 사면들은 도로 현장의 절토사면으로, 사면의 붕괴가 광범위하게 일어났다. 지층은 퇴적암을 위주로 구성되었다. 퇴적암은 풍화되어 불연속면을 매우 심한 빈도로 포함하고 있으며 사면의 상부는 잔류토층을 이루고 있다. 이와 같은 지질 형태는 대구경북을 중심으로 동남부 내륙에서 흔히 나타난다.

하동지역의 경우에는 화강암과 편마암을 모암으로 하는 지층으로 구성되어 있다. 이로 인하여 풍화토층의 투수성이 양호하게 나타난다. 포항지역의 두 사면은 이암과 셰일이 풍화된 잔류토층으로 이루어져 있다. 영덕 사면의 잔류토층은 셰일과 사암이 풍화된 지층이다.

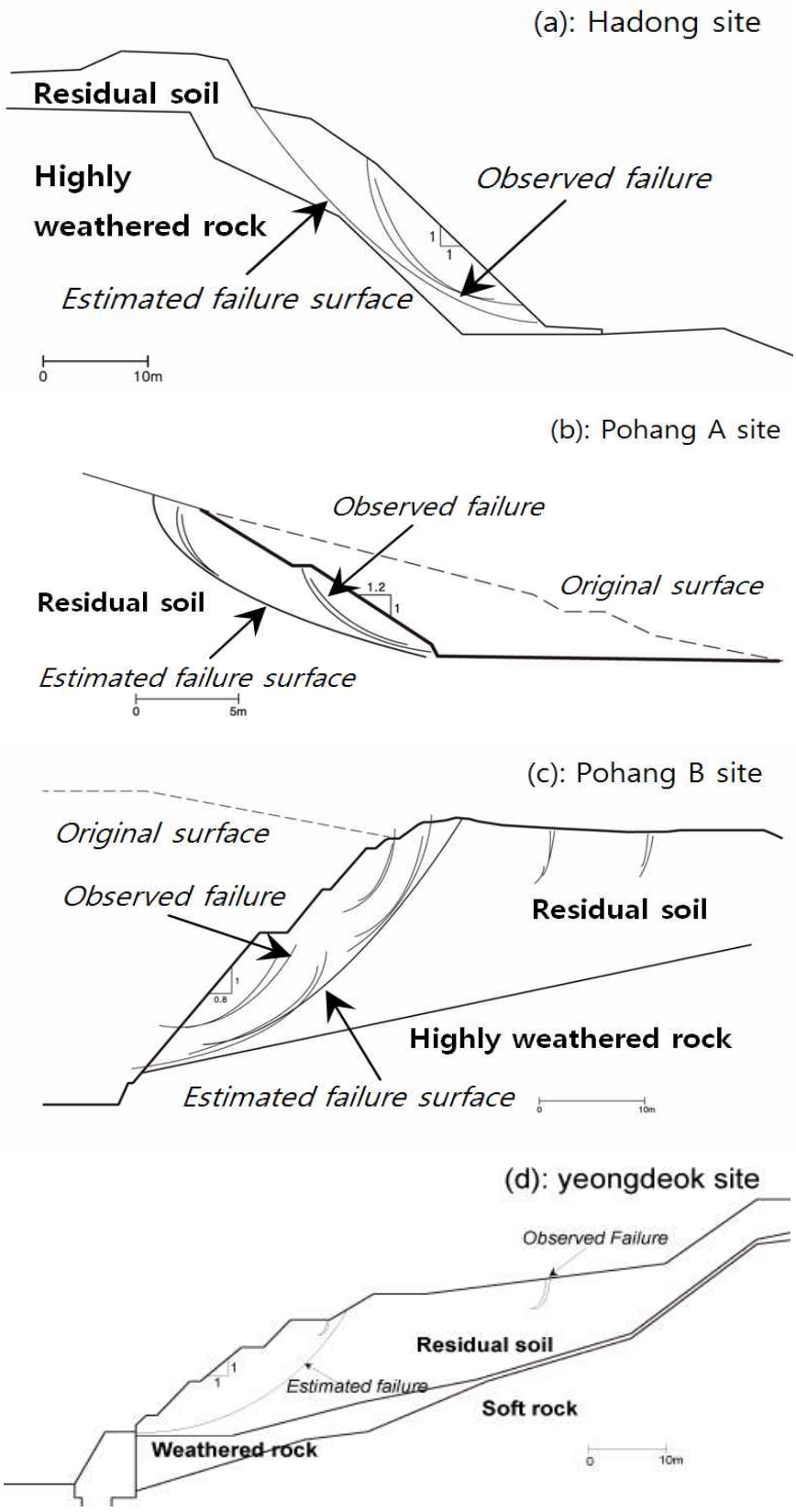


그림 3.2 지층의 개요 및 사면붕괴 현황

(a) 하동사면, (b) 포항 A 사면, (c) 포항 B 사면, (d) 영덕사면

표 3.1에서 보여지듯이, 하동사면은 기존의 절개사면으로 2009년 7월 집중강우로 인하여 붕괴가 일어났다. 포항 A, B 사면은 2010년 10월과 1월에 절개를 완료하였고 각각 2011년 6월, 2010년 3월 붕괴하였다. 영덕사면의 경우 2011년 10월, 2011년 12월 2차례에 걸쳐 사면활동이 발생하였다. 대상지역은 2011년 복구가 되기 이전에 현장에 답사하여 시료를 채취하면서 대상 단면이 강우로 인한 붕괴가 일어난 것을 육안으로 관찰할 수 있었다.

표 3.1 시공절차 및 강우조건

Construction Sequences	Hadong	Pohang A	Pohang B	Yeongdeok
Excavation of slope	Old excavated slope	2010.06.28.~ 2010.10.27	2009.10.24.~ 2010.01.16	Under construction
Failure	2009.07.16	2011.06.27	2010.03.09	1st. 2011.10.4~7 2nd, 201112.12
Steady state flow	2008.04.16.~ 2009.04.15 2.86e-8m/s (902mm during 1year)	2011.03.01.~ 2011.03.31 5.60e-9m/s (15mm during 1month)	2009.12.17.~ 2010.01.16 5.79e-10m/s (1.6mm during 1month)	2010.01.1.~ 2010.12.31 3.10e-8m/s (978mm during 1year)
Transient flow	2009.04.16.~ 2009.08.15 (4 months)	2011.04.01.~ 2011.07.29 (3 months)	2010.01.17.~ 2010.04.18 (3 months)	2011.09.1.~ 2011.12.31 (4 months)

각 사면의 강우기록은 그림 3.3에서 보여준다. 하동사면은 붕괴시 일강우량 150mm이상의 집중강우(4개월간 누적 강우량: 1200mm 이상)가 발생하였고, 포항 A 사면은 붕괴시 일강우량 100mm이상의 집중강우(3개월간 누적 강우량: 600mm 이상)가 발생하였다. 반면 포항 B 사면은 붕괴시 일강우량 10~20mm의 강우(3개월간 누적 강우량: 약 180mm)가 발생하였다. 영덕사면은 1, 2차 사면활동이 발생한 시점에 강우가 기록되지 않았고, 사면활동 이전의 일강우량 15~38mm의 강우(4개월간의 누적강우가 약 250mm)가 발생하였다.

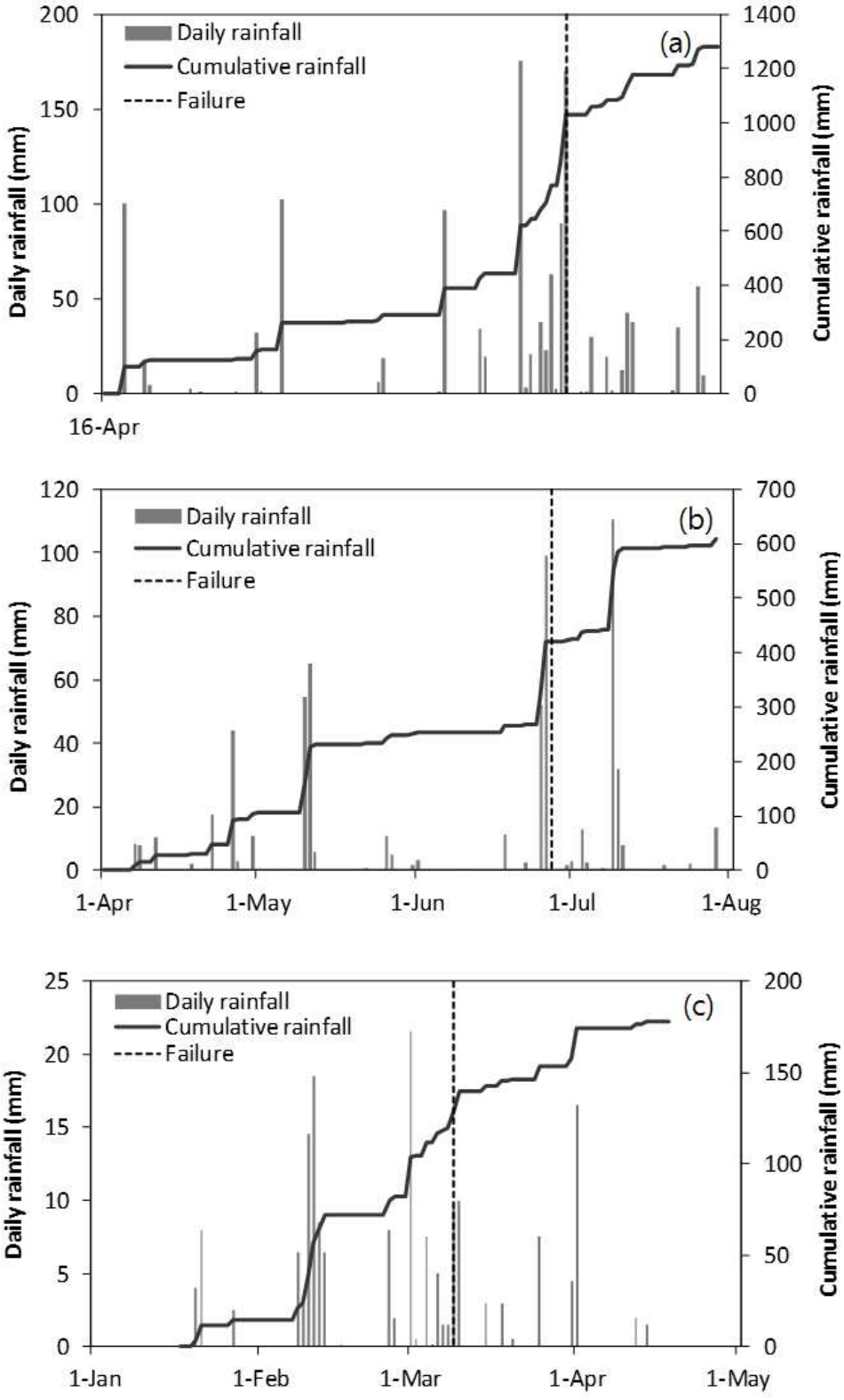


그림 3.3 사면 붕괴 무렵 강우기록

(a) 하동사면, (b) 포항 A 사면, (c) 포항 B 사면, (d) 영덕사면 (계속)

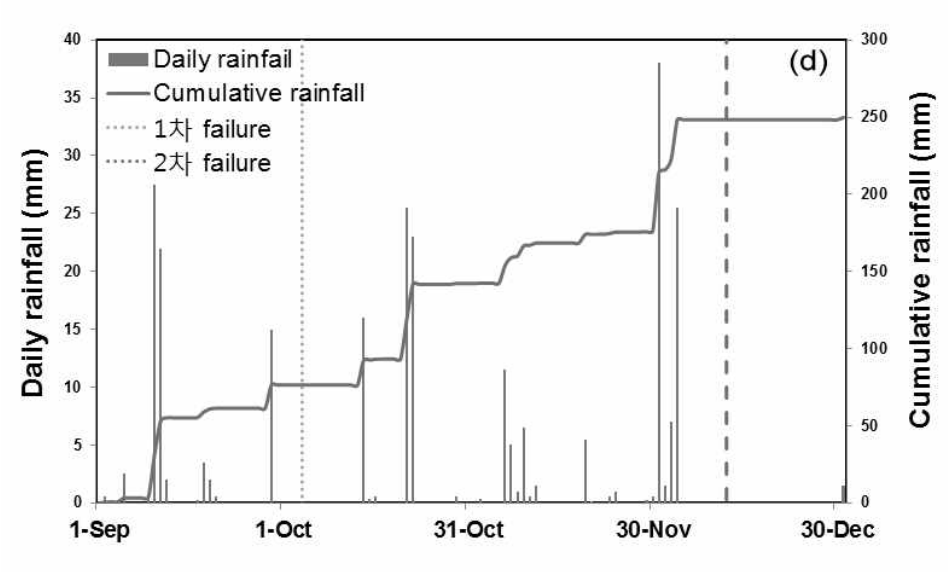


그림 3.3 사면 붕괴 무렵 강우기록
(a) 하동사면, (b) 포항 A 사면, (c) 포항 B 사면, (d) 영덕사면

선행 강우량은 대상문제에 적합하게 선정하였다. 하동사면은 사면절개 후 수년 후에 붕괴가 일어난 사례로 거의 자연사면과 같은 상태를 나타내고 있었다. 선행강우는 1년간 연평균 강우량으로 산정하였다. 반면 포항 A 및 B사면, 영덕사면은 사면 절개 후 1년 이내에 붕괴가 일어났으며, 1개월간의 평균 강우량을 선행강우로 설정하였다. 이를 이용하여 해석절차는 다음과 같이 설정한다.

(1) 정상류해석-선행강우(표 3.1)
(2) 부정류해석-붕괴 시점을 중심으로 3-4개월간(표 3.1)
(3) 응력해석-탄성해석
(4) 사면안정해석-유한요소 응력장

(2) 불포화 물성

잔류토층의 붕괴단면 외곽에서 교란시료 및 블록시료를 채취하였다. 잔류토는 본질적으로 균질하게 불교란시료를 채취하기가 까다롭다. 시료의 채취위치에 따라 불균질성을 보이기도 하여 충분한 양의 시험을 수행하여야만 대표적이고 일관된 시험성과를 획득할 수 있다. 대상현장에서는 시료의 일부에서 불연속면과 암편을 포함하였고, 제원이 긴 삼축시험시료의 경우에는 균질성을 확보하기 어려웠다. 실내시험은 함수특성시험과 강도시험을 중심으로 수행하였으며, 불교란시료를 이용하려고 노력하였지만 대부분 교란시료의 시험성과를 이용할 수밖에 없었다.

표 3.2에서는 대상지역의 풍화토층에 대한 기본 물성을 보여준다. 화강풍화토 계열인 하동 시료는 입도분포가 양호한 모래(SW)이며 포항지역 시료는 이암 풍화토로 실트(MH)로 분류된다. 두 사면 모두 세립분 함유량이 50%이상으로 나타났으며, 소성지수는 18~32%이다. 영덕시료는 사암 및 셰일을 모암으로 하며 통일분류는 입도분포가 불량한 모래(SP)이다.

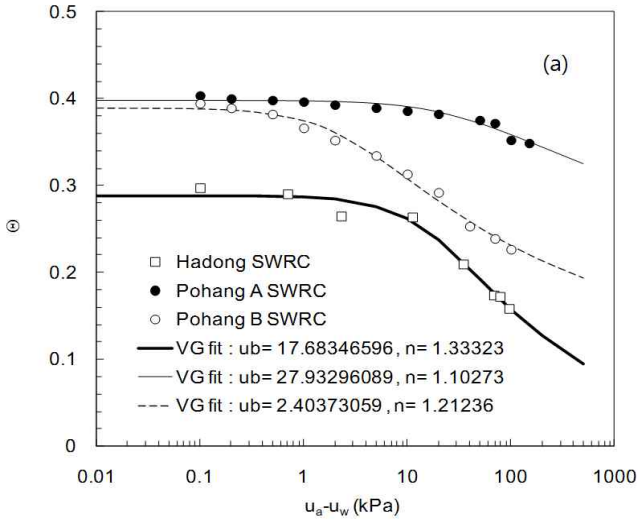
표 3.2 풍화토시료의 기본물성

Sample	USCS	G_s	#200 (%)	Void ratio	ρ_d (g/cm^3)	w (%)	PI (%)
Hadong	SW	2.63	4.7	0.977	1.33	6.1	-
Pohang A	MH	2.65	62.6	0.866	1.42	29.4	18.3
Pohang B	MH	2.40	52.2	0.983	1.21	36.1	32.2
Yeongdeok	SP	2.77	1.4	1.137	1.75	34.9	-

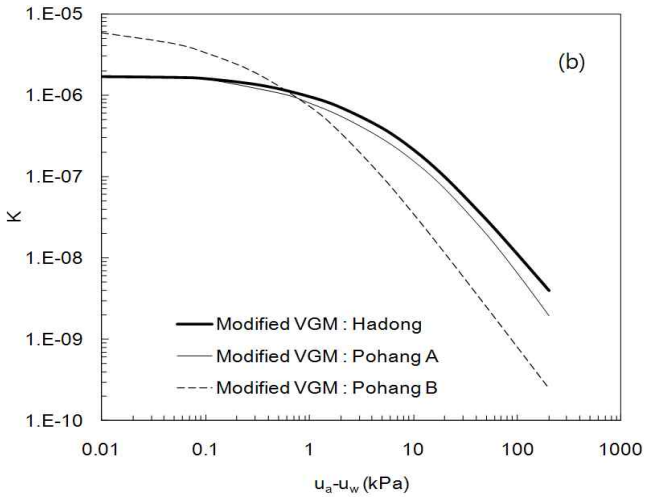
하동 및 포항지역사면에 대한 불포화 물성치를 그림 3.4에서 보여준다. 그림 3.4 (a)에서 보여지듯이, 압력판추출시험을 통하여 함수특성곡선을 획득하였고, RETC 프로그램을 이용하여 van Genuchten 모델로 회귀분석을 하였다 (van Genuchten et al., 1991). 공기함입치 u_b와 계수 n, 포화 체적함수비, 잔류함수비는 표 3.3에 정리되었다.

표 3.3 사면 지층의 역학 및 수리 물성

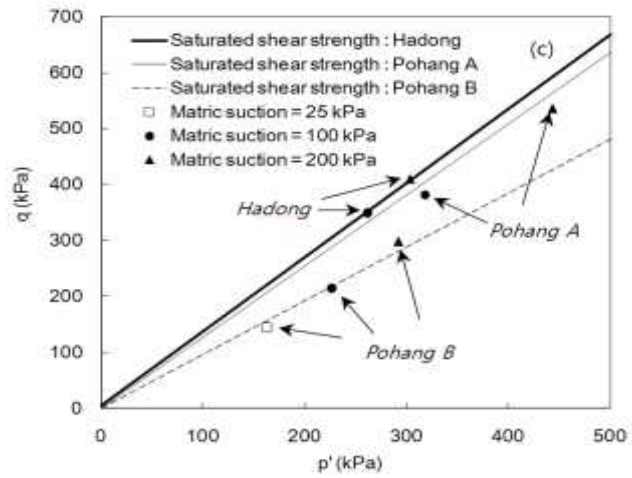
Analysis	Parameter	Hadong		Pohang A	Pohang B		Yeongdeok	
		Soil	Rock	Soil	Soil	Rock	Soil	Rock
Stress analysis	E (kPa)	2×10^6		2×10^6	2×10^6	4×10^6	-	
	n	0.333		0.333	0.333	0.333		
Seepage analysis	u_b(kPa)	22.48		27.93	2.4		28.51	
	n	1.37		1.1	1.21		1.16	
	Θs	0.282		0.398	0.390		0.349	
	Θr	0		0.12	0.10		0	
	k_s(m/s)	1.68×10^{-6}		1.73×10^{-6}	6.37×10^{-6}		3.48×10^{-6}	
Slope analysis	γ_t(kN/m3)	18.2	21	18.4	17.1	21	1.75	18
	c′(kPa)	2.8	50	0	0	23	0	20
	Φ′(°)	32.8	35.5	31.6	24.5	28.5	30	35



(a) 함수특성곡선



(b) 투수계수



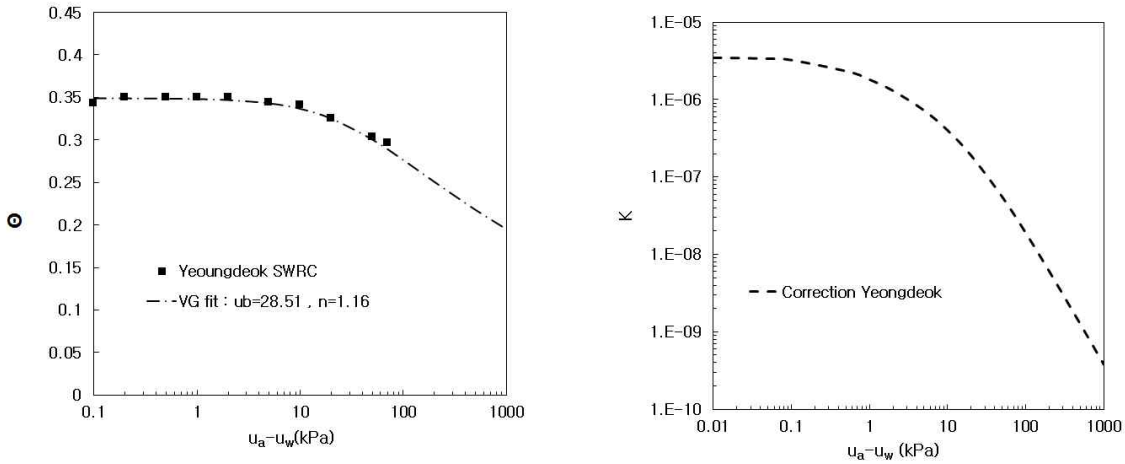
(c) 전단강도

그림 3.4 하동 및 포항지역사면 지층의 불포화 지반 및 수리 물성

불교란 시료의 투수계수는 함수특성곡선으로부터 Mualem 이론에 의하여 추정하는 방법(2.2절)을 이용하였다. 그 결과 그림 3.4 (b)와 같이 평가되었으며, 예비 해석과정에서 계수 연구를 통하여 포화투수계수를 설정하였다. 풍화암에 대하여, 함수특성곡선은 잔류토와 동일하게 가정하였다. 편의상, 투수계수곡선은 잔류토의 투수계수와 동일하게 가정하였으며, 표 3.3에 정리하였다.

삼축시험에서는 포화조건에서 직접전단시험을 수행하였다. 불포화조건에서는 모관흡수력을 조절하여 삼축시험을 수행하였다. 시료는 현장 함수비 및 밀도하에서 정적다짐으로 교란시료를 재성형하여 수행하였다. 그림 3.4 (c)에서는 흡수응력에 근거한 유효응력에 대한 삼축시험 결과를 보여준다. SWRC 시험으로부터 구한 SSCC가 삼축시험으로부터 구한 실험치를 합리적으로 예측할 수 있었다. 다양한 모관흡수력에 대하여 유효응력으로 기술한 전단강도는 유일한 파괴포락선위에 존재한다. 특히 포화시 파괴규준과 동일한 파괴규준으로 정의할 수 있음을 알 수 있다. 이로부터 그림 3.4(a)에 나타난 SWRC가 전단강도에서 나타난 유효응력을 적절하게 기술할 수 있음을 확인하였다.

그림 3.5에서는 영덕사면의 함수특성곡선과 투수계수곡선을 보여준다.



(a) 함수특성곡선 (b)투수계수

그림 3.5 영덕사면의 불포화 지반 및 수리 물성

3.1절의 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

목 표	내 용
대경권 사면 불포화층 물성 평가기법 개발	• 4개 붕괴현장 사례에 대한 조사를 수행 (하동, 포항A, 포항B, 영덕) • 함수특성곡선 획득 및 분석 : 압력판 추출시험 수행 • 불포화투수계수 산정 • 포화 전단강도 획득 : 직접전단시험 • 불포화 전단강도 획득 : 삼축압축시험 • 함수특성곡선에 따른 유효응력과 전단강도 분석 • 유효응력에 대한 불포화 전단강도 분석 : SWRC와 전단강도의 상관관계의 상관성 90% 이상 만족 (그림 3.4)

3.2 붕괴사면의 해석

구분	목표	내용	평가지표	측정방법	가이드라인 기여도
불포화 사면 해석기법 개발	침투 및 응력의 변화를 고려한 불포화 사면 안정해석 기법 개발	유효응력에 기반한 사면해석 기법 개발	강우에 따른 사면안전율 계산 엄밀성 개선	한계해석법에 대한 응력장 해법의 안전율 정확도 비교	• 3개 현장의 붕괴사면 해석 수행, 실제 적용성 확보 • 침투해석 및 응력해석 수행절차 확립 • 강우시 침투에 의한 안정성 해석 절차 확립 • 유한요소 응력장에서 실제사면의 붕괴 재현, 실용적 적용성 확보
현장 사례연구	대경권 사면현장 사례 해석 및 평가	강우시 사면의 안정성 변동 평가 및 검증	강우에따른 실제사면의 파괴사례	실제사면 사례의 붕괴시 안전율 오차	• 풍화토 사면 현장 접근 • 대상 단면의 지층 및 시공일지 확보 • 포화토의 물성 확보 • 불포화 물성 획득: 시료 채취 및 시험수행

정확도 해석 후, 그림 3.6과 같이 요소망을 적절하게 세분화하였다. 부정류에 대하여, 유량 경계조건은 그림 3.3에 나타난 강우기록을 지표면에 적용하였다. 사면의 경사부 표면에서는 지

하수가 유출될 수 있도록 설정하였다. 측면의 수두 경계는 현장 상황과 표고를 고려하여 설정하였다. 예비해석을 통하여 최소안전율을 나타내는 활동면을 파악하였으며, 현장에서 관찰된 형태와 유사하게 전반적인 활동이 일어났다.

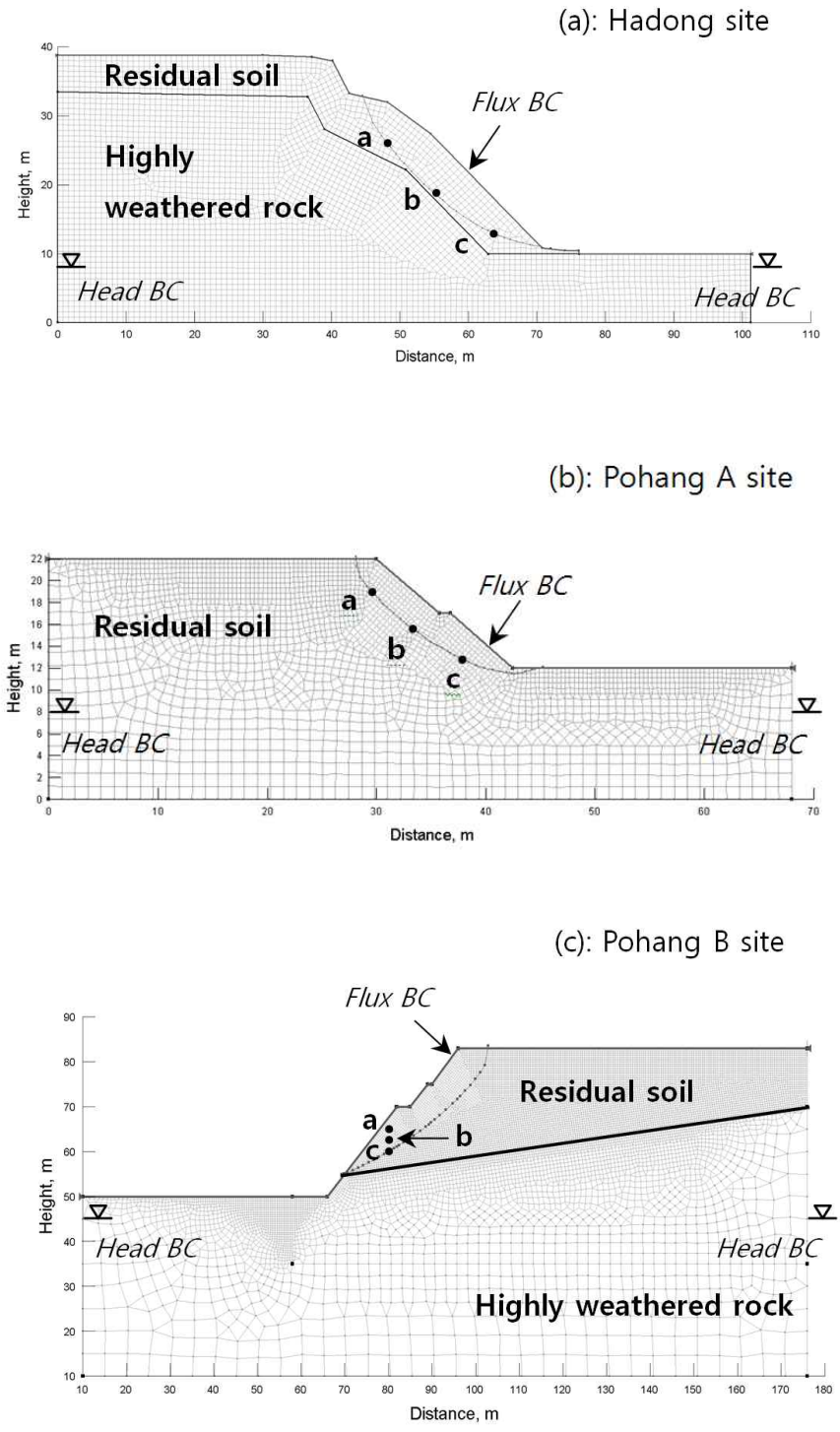


그림 3.6 대상사면 요소망

(a) 하동사면, (b) 포항 A 사면, (c) 포항 B 사면, (d) 영덕사면 (계속)

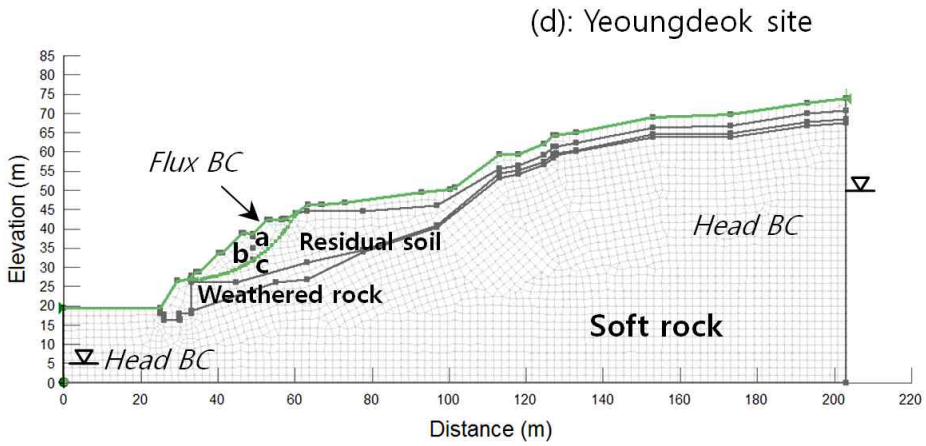


그림 3.6 대상사면 요소망
(a) 하동사면, (b) 포항 A 사면, (c) 포항 B 사면, (d) 영덕사면

해석 절차는 불포화 유동, 전응력 분포 및 안전율을 구하는 과정을 포함하며(Lu et al. 2013), Geostudio 2007 (Geo-slope, 2007) 코드를 이용하여 수행하였다. 불포화 유동은 강우에 따른 정상류 및 부정류 해석에 의하여 수행한다. 불교란 시료부터 구한 SWRC 및 투수계수를 입력하여 사면 지층의 간극수압을 구한다.

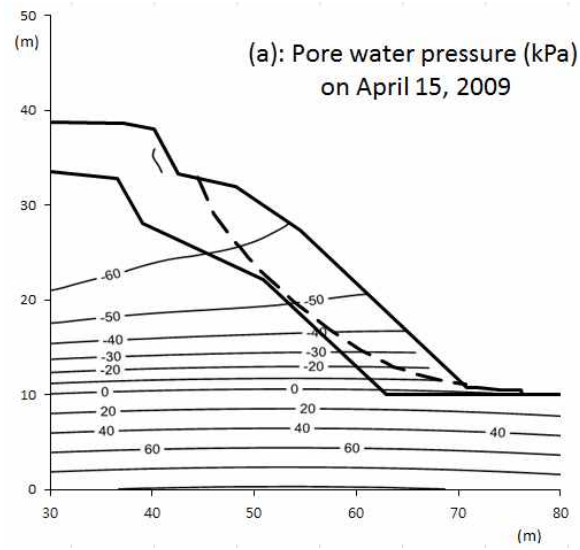
두번째로 전응력분포는 탄성모델을 이용하여 단순하게 계산한다. 탄성계수는 변위에는 크게 영향을 끼치지만 전응력에는 크게 영향을 주지 않는다고 판단하여, 계수들은 표 3.2와 같이 가정하였다. 불포화 유동 및 전응력에 대한 유한요소해석을 통하여 대상사면 내의 질점에서 유효응력과 상응하는 전단강도를 구할 수 있다.

안전율을 평가하기 위하여, 현장 파괴면 및 예비해석을 통하여 활동면을 설정하였다. 주어진 활동면에 대하여 작용응력 및 유효응력에 기반한 전단강도를 구한다. 안전율은 유한요소해석에 의하여 계산된 응력에 근거하여 평가한다. 전응력은 탄성해석으로부터 계산하였고 간극수압과 체적함수비는 부정류해석에 의하여 계산되었다. 각 적분점에서 구한 응력은 절점으로 투영된다. 그리고 각 요소의 평균값으로부터 절편 저면의 중심부에서 나타나는 수직응력과 전단응력을 평가한다. 흡수응력은 식 (2.20)에 의하여 계산되며, 전단강도는 식 (2.21a)에 의하여 흡수응력에 근거한 유효수직응력으로부터 계산할 수 있다.

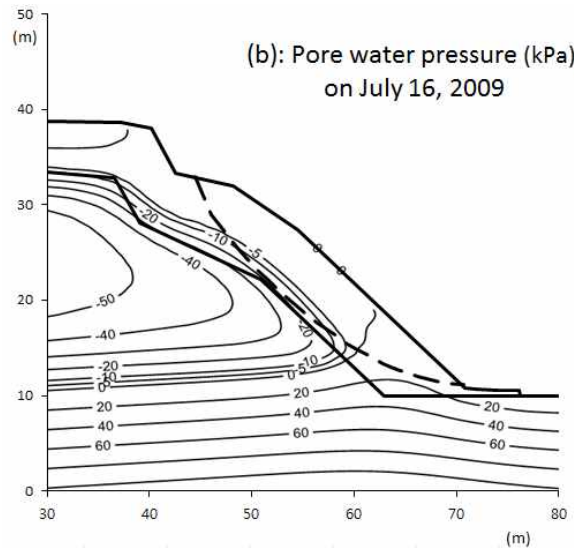
(1) 하동사면

하동사면 잔류토층의 간극수압분포는 그림 3.7과 같이 나타났다. 그림 3.7(a)에서는 불포화층의 정상류 해석으로 나타난 초기 간극수압 분포를 보여준다. 전년도 연평균 강우에 의하여, 수압은 -70 kPa에서 0 kPa정도로 나타났다. 수압분포의 양상은 깊이에 따라 증가한다.

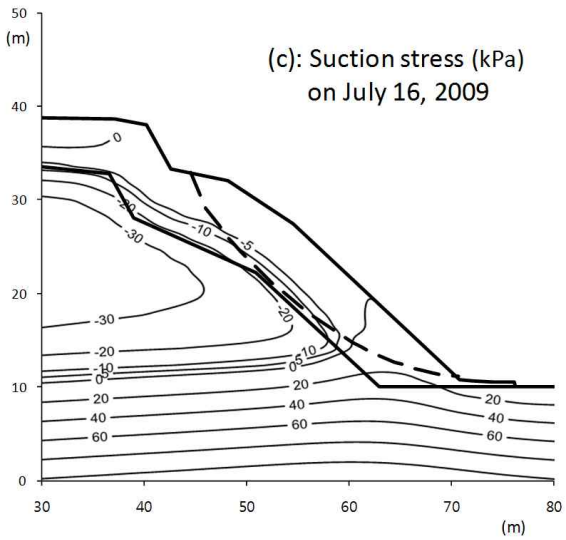
부정류 해석에서는 간극수압이 증가하여 포화도가 증가하며 지하수위가 다소 상승하였다. 그림 3.7(b)의 사면붕괴 시 수압은 파괴면 주변에서 -10kPa 이상인 영역이 확장되고 있다. 그림 3.7(c)에서는 흡수응력 등고선을 보여주며, 간극수압과 유사한 경향을 나타낸다. 그림 3.7(c)의 흡수응력은 파괴면 주변에서 최소 -15kPa정도를 나타내며, 부정류 해석시 강우에 의하여 포화도가 증가하면 표면 부근에서 흡수응력이 증가하여 거의 0에 가깝다.



(a) 2009년 4월 15일 간극수압



(b) 2009년 7월 16일 간극수압

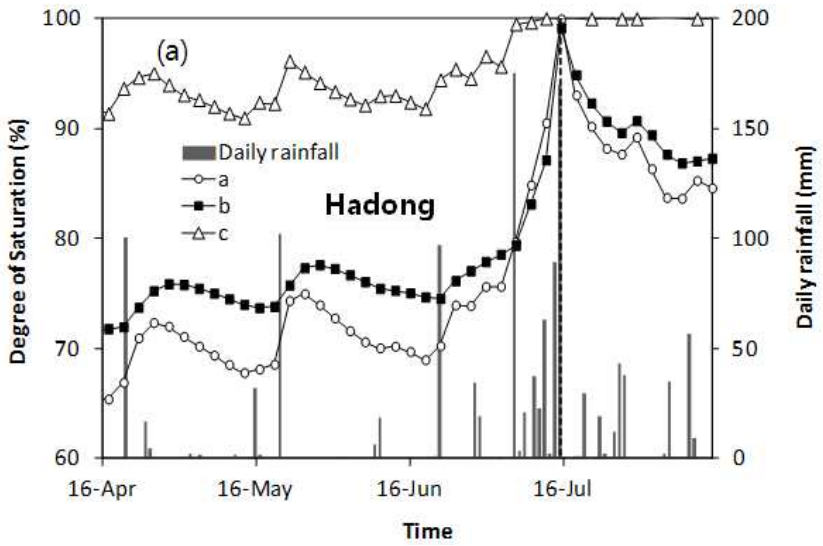


(c) 2009년 7월 16일 흡수응력

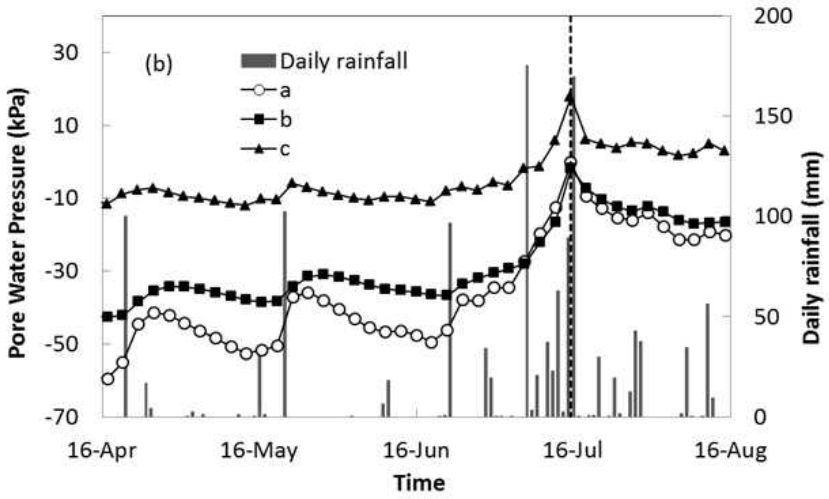
그림 3.7 하동사면의 간극수압 및 흡수응력 분포

그림 3.8에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도 변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 상부에 위치한 점 a와 b(그림 3.6(a))에서 65%에서 100%로 증가하고 있다. 활동

면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 그림 3.8 (b)에서는 포화도가 증가함에따라 간극수압도 증가하는 것을 보여주고 있다. 그림 3.8 (c)에서 보여지듯이, 침투가 진행되면서 흡수응력은 증가하고 있다. 특히 하단부 c점에서는 습윤화가 심하게 일어나고 포화되어 흡수응력이 양의 간극수압과 일치하고 0보다 커진다.

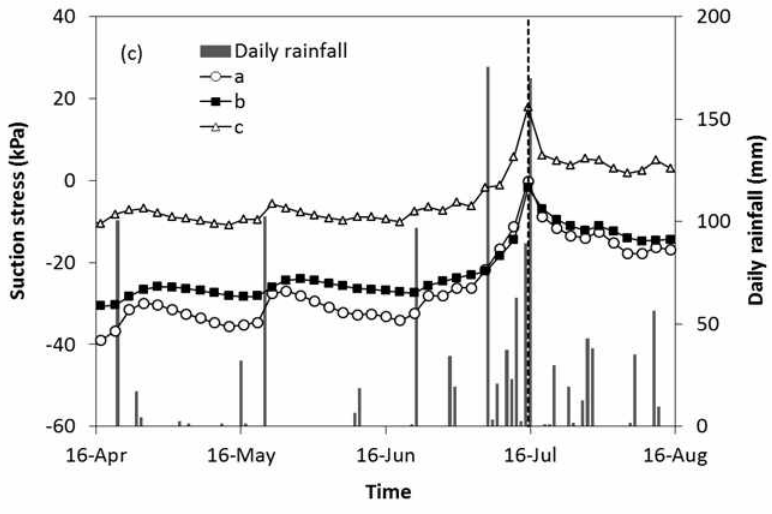


(a) 포화도



(b) 간극수압

그림 3.8 하동사면의 포화도, 간극수압, 흡수응력 변화 (계속)

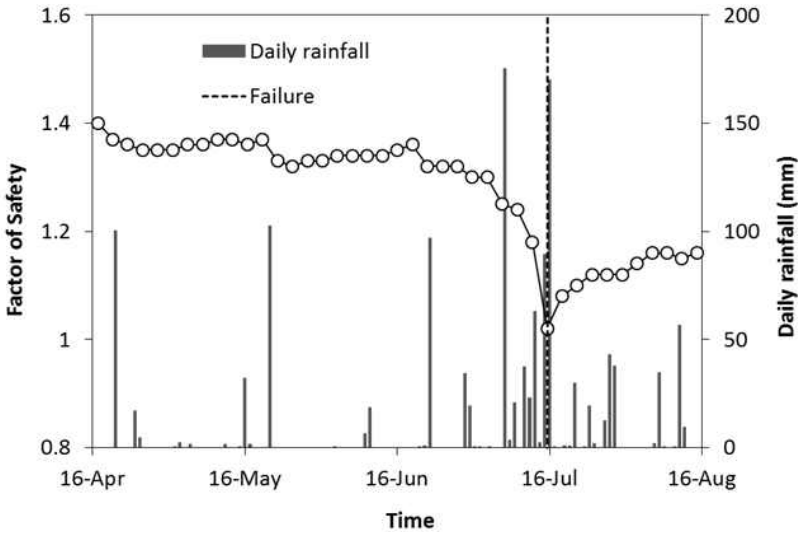


(c) 흡수응력

그림 3.8 하동사면의 포화도, 간극수압, 흡수응력 변화

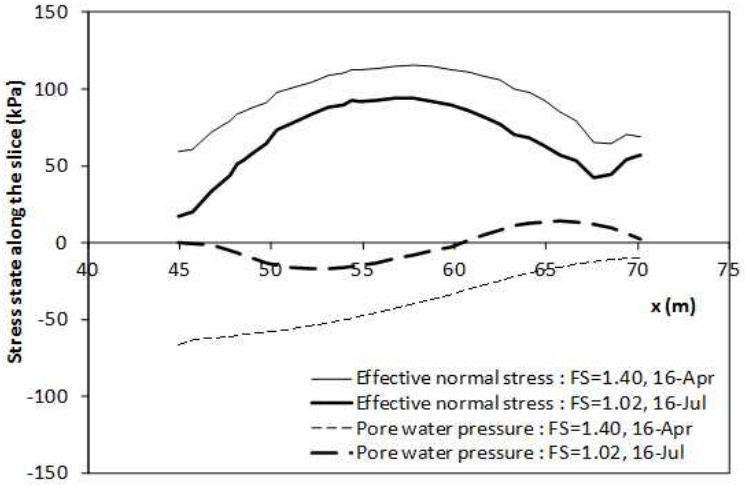
그림 3.9 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 2009년 6월, 전반적인 사면활동이 발생하였고 안전율은 1.0부근으로 실제 파괴를 모의할 수 있었다. 초기에 안전율은 1.4정도지만 집중강우로 인하여 1.0까지 점차 감소하였다.

그림 3.9 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -60에서 -10kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 40kPa 정도 감소하였다.



(a) 안전율

그림 3.9 하동사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포 (계속)



(b) 유효응력

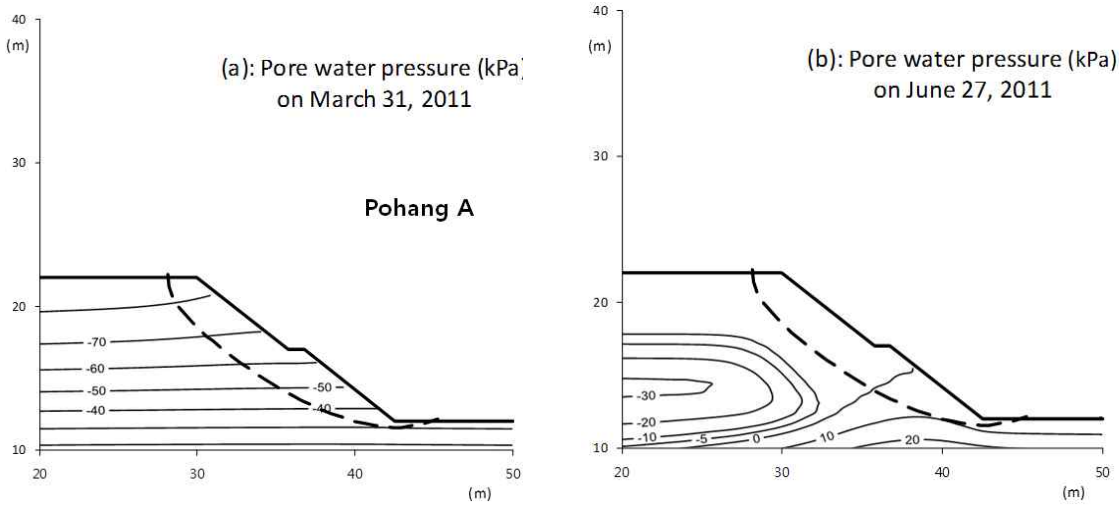
그림 3.9 하동사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포

하동사면은 붕괴시 일강우량 150mm이상의 집중강우가 발생하였고, 이로 인하여 일어난 붕괴 현상을 불포화토의 물성을 고려한 침투 및 안정성 해석으로 예측할 수 있었다.

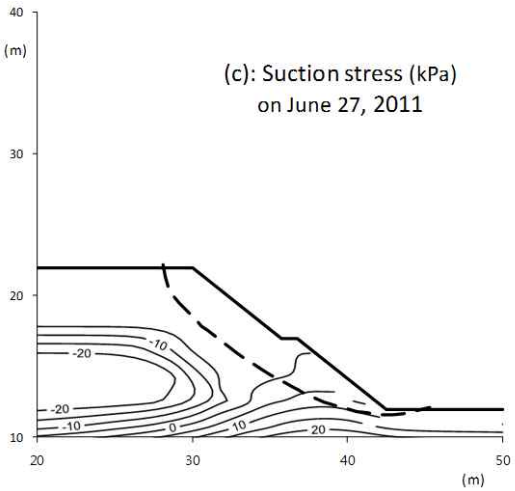
(2) 포항 A 사면

포항 A사면 잔류토층의 간극수압분포는 그림 3.10과 같이 나타났다. 그림 3.10 (a)에서는 불포화층의 정상류 해석으로 나타난 초기 간극수압 분포를 보여준다. 전월 월평균 강우에 의하여, 수압은 -80 kPa에서 -30 kPa정도로 나타났다. 수압분포의 양상은 깊이에 따라 증가한다.

부정류 해석에서는, 간극수압이 증가하여 포화도가 증가하며 지하수위가 다소 상승하였다. 그림 3.10 (b)의 사면붕괴 시 수압은 파괴면 주변에서 -5kPa 이상인 영역이 확장되고 있다. 그림 3.10 (c)에서는 흡수응력 등고선을 보여주며, 간극수압과 유사한 경향을 나타낸다. 흡수응력은 파괴면 주변에서 최소 -5kPa이상을 나타내며, 부정류 해석시 강우에 의하여 포화도가 증가하면 표면 부근에서 흡수응력이 증가하여 거의 0에 가깝다.



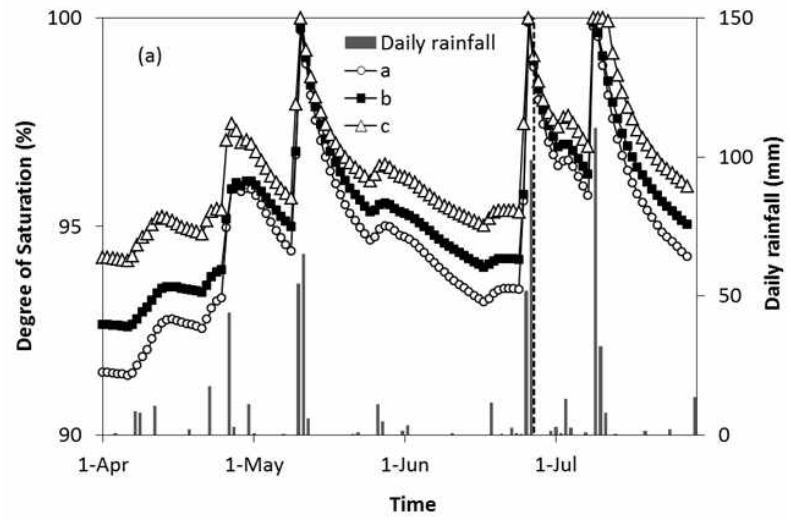
(a) 2011년 3월 31일 간극수압 (b) 2011년 6월 27일 간극수압



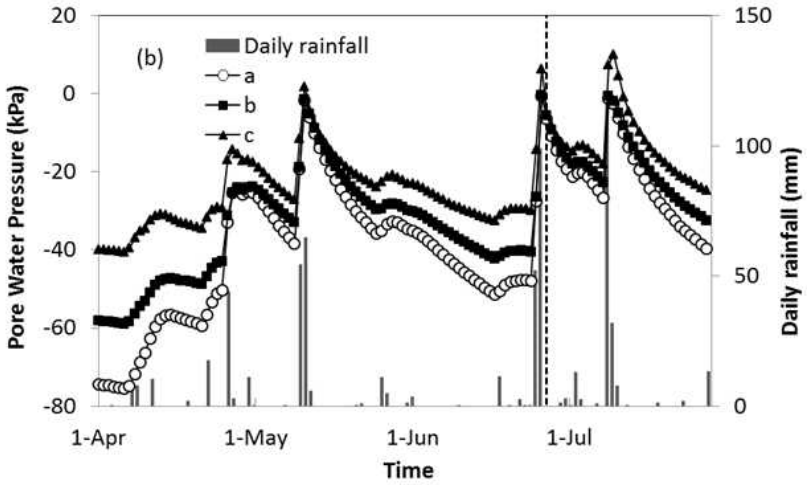
(c) 2011년 6월 27일 흡수응력

그림 3.10 포항A사면의 간극수압과 흡수응력 분포

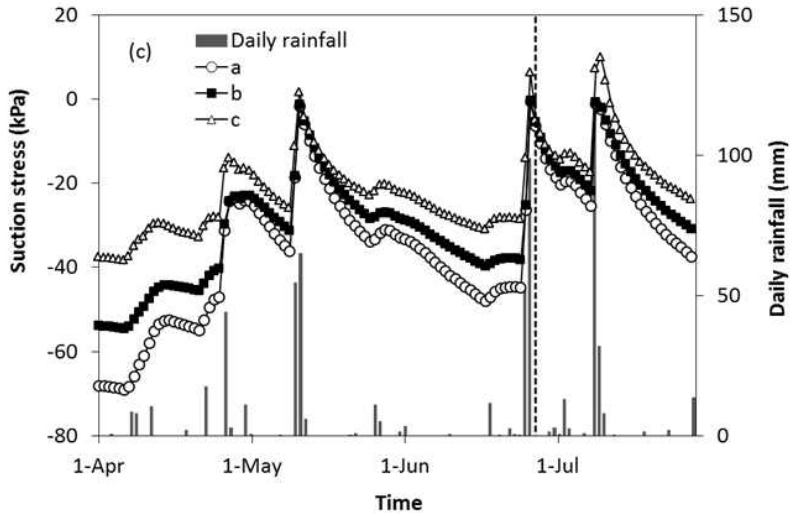
그림 3.11 (a)에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도 변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 활동면에서 전체적으로 90%에서 100%로 증가하고 있다. 그림 3.11 (b)에서는 포화도가 증가함에 따라 간극수압도 -80kPa에서 0kPa이상으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 그림 3.11 (c)에서 보여지듯이, 침투가 진행되면서 흡수응력은 증가하고 있다. 모든 점에서 포화되어 흡수응력이 양의 간극수압과 일치하고 0보다 커진다.



(a) 포화도



(b) 간극수압

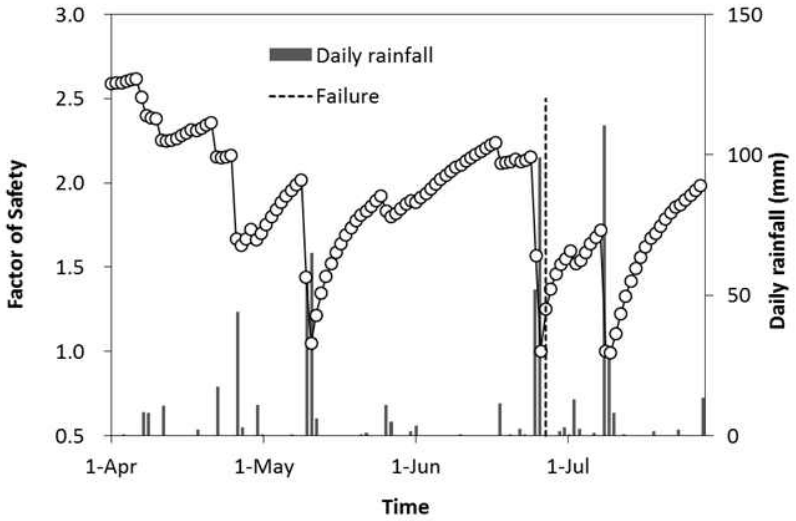


(c) 흡수응력

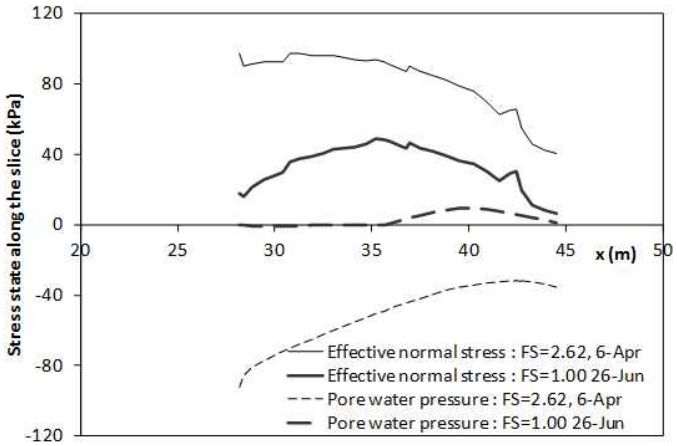
그림 3.11 포항 A사면의 포화도 및 흡수응력 변화

그림 3.12 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 2011년 6월, 전반적인 사면활동이 발생하였고 해석시 계산된 안전율은 1.0으로 실제 파괴를 모의할 수 있었다. 초기에 안전율은 2.5정도지만 집중강우로 인하여 1.0까지 점차 감소하였다.

그림 3.12 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -90에서 -40kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 60kPa 정도 감소하였다.



(a) 안전율



(b) 유효응력

그림 3.12 포항 A사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포

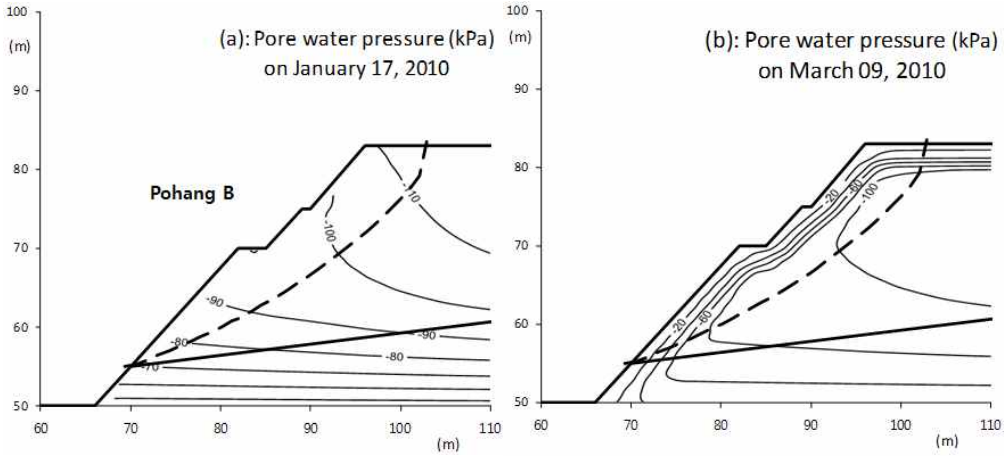
포항 A 사면은 붕괴시 일강우량 100mm이상의 집중강우가 발생하였다. 이로 인하여 시공후 일정기간 안정성에 문제가 없던 사면의 붕괴가 있어났으며, 침투를 고려한 유효응력해석 절차

를 통하여 사면의 붕괴과정을 규명할 수 있었다.

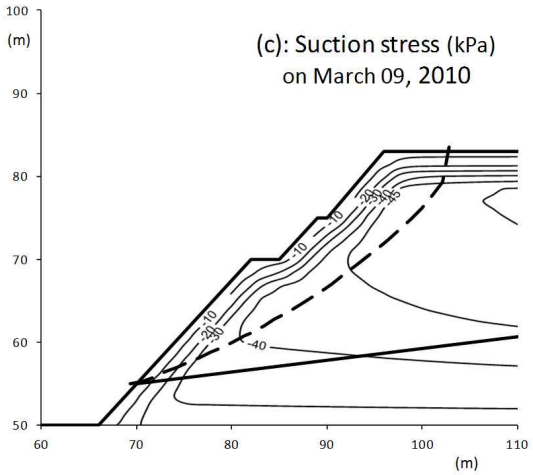
(3) 포항 B 사면

포항 B 사면 잔류토층의 간극수압분포는 그림 3.13과 같이 나타났다. 그림 3.13 (a)에서는 불포화층의 정상류 해석으로 나타난 초기 간극수압 분포를 보여준다. 전월 월평균 강우에 의하여, 수압은 -110 kPa에서 -70 kPa정도로 나타났다. 수압분포의 양상은 깊이에 따라 증가한다.

부정류 해석에서는, 간극수압이 증가하여 포화도가 증가하였다. 그림 3.13 (b)의 사면붕괴시 수압은 파괴면 주변에서 -10kPa 이상인 영역이 확장되고 있다. 그림 3.13 (c)에서는 흡수응력 등고선을 보여주며, 간극수압과 유사한 경향을 나타낸다. 흡수응력은 파괴면 주변에서 최소 -45kPa정도를 나타내며, 부정류 해석시 강우에 의하여 포화도가 증가하면 표면 부근에서 흡수응력이 증가하여 거의 0에 가깝다.



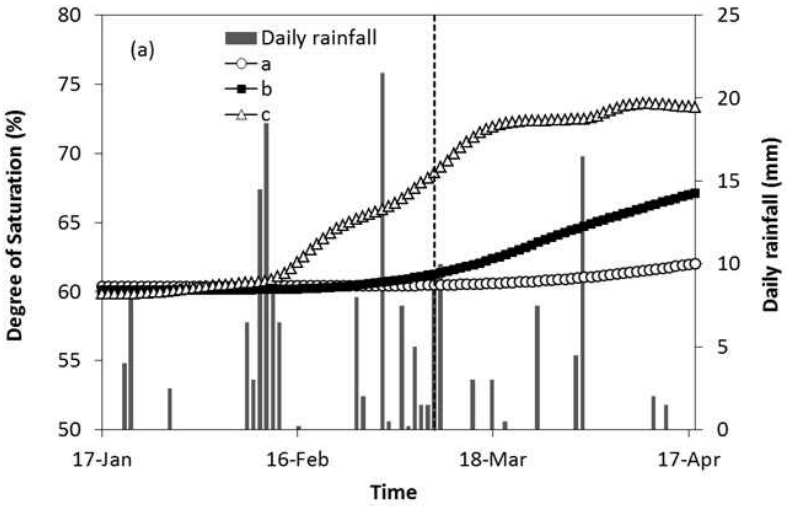
(a) 2010년 1월 17일 간극수압 (b) 2010년 3월 9일 간극수압



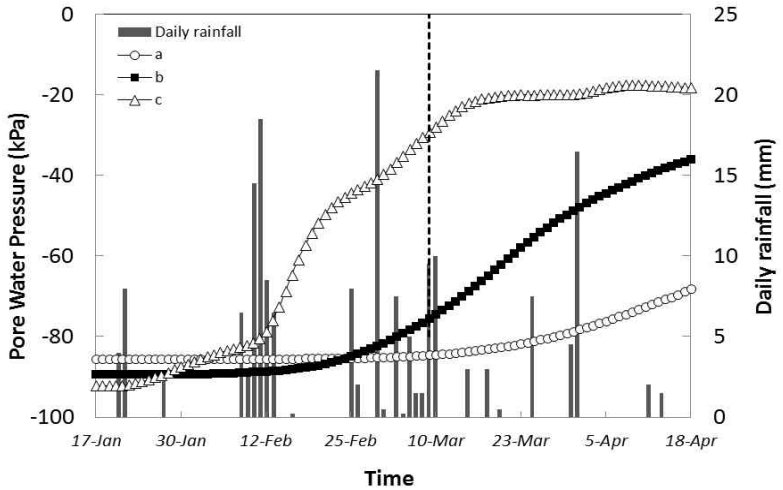
(c) 2010년 3월 9일 흡수응력

그림 3.13 포항 B사면의 간극수압 및 흡수응력 분포

그림 3.14 (a)에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도 변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 활동면 상부에 위치한 점 a와 b, c(그림 3.6(c))순서로 각각 60%에서 62%, 68%, 73%정도로 증가하고 있다. 활동면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 그림 3.14 (b)에서는 포화도가 증가함에 따라 간극수압도 -90kPa에서 -20kPa이상으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 그림 3.14 (c)에서 보여지듯이, 침투가 진행되면서 흡수응력은 증가하고 있다. 특히 하단부 c점에서는 습윤화가 심하게 일어나고 있다.

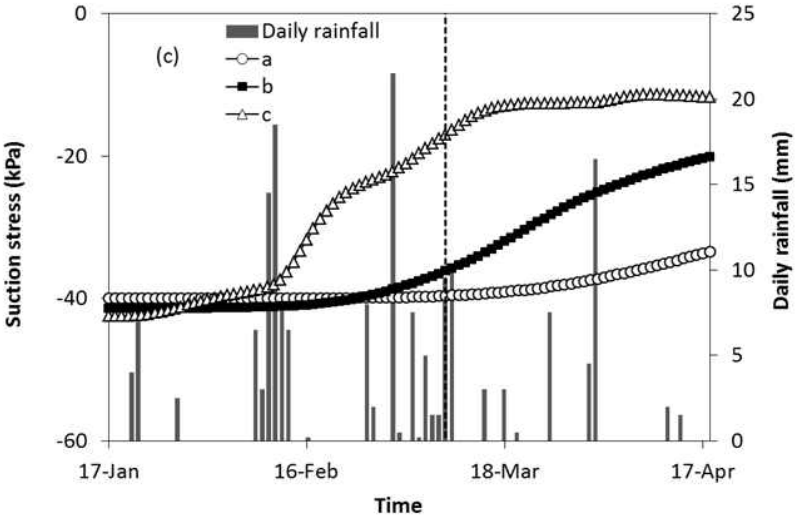


(a) 포화도



(b) 간극수압

그림 3.14 포항 B사면의 포화도 및 흡수응력 변화 (계속)

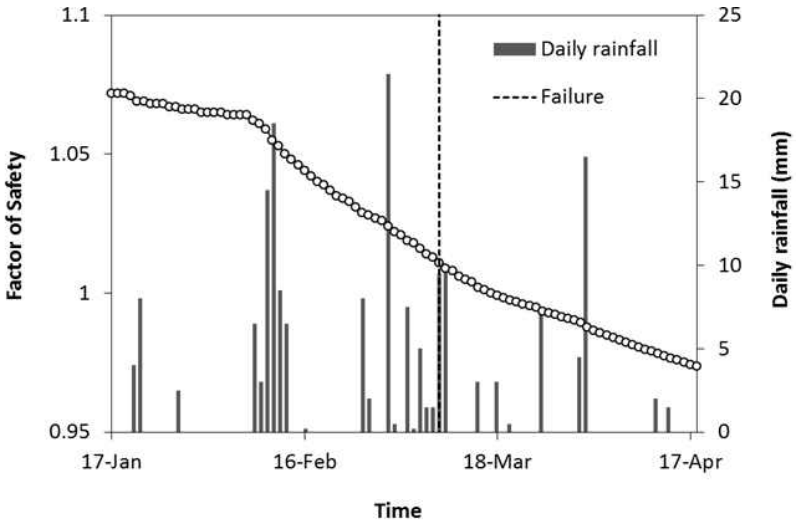


(c) 흡수응력

그림 3.14 포항 B사면의 포화도 및 흡수응력 변화

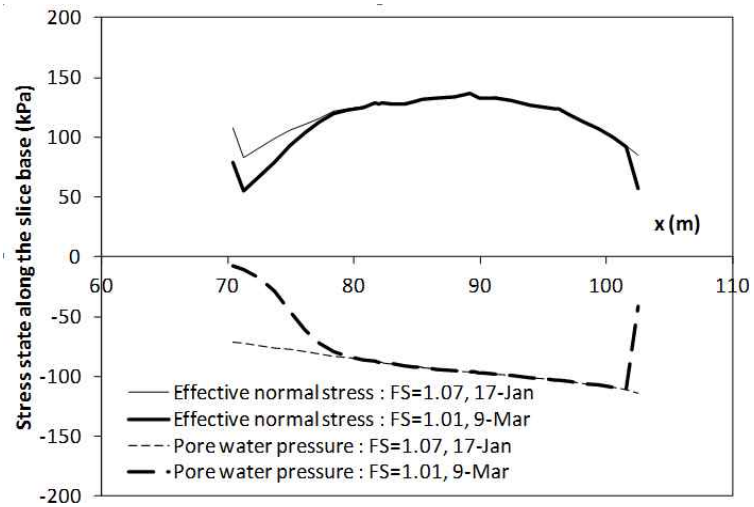
그림 3.15 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 2009년 6월, 전반적인 사면활동이 발생하였고 안전율은 1.0으로 실제 파괴를 모의할 수 있었다. 초기에 안전율은 1.07정도지만 강우로 인하여 1.0까지 점차 감소하였다.

그림 3.15 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -70에서 -120kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 양끝부근에서만 증가하며, 활동면 양단에서 유효응력이 30kPa 정도 감소하였다.



(a) 안전율

그림 3.15 포항 B사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포 (계속)



(b) 유효응력

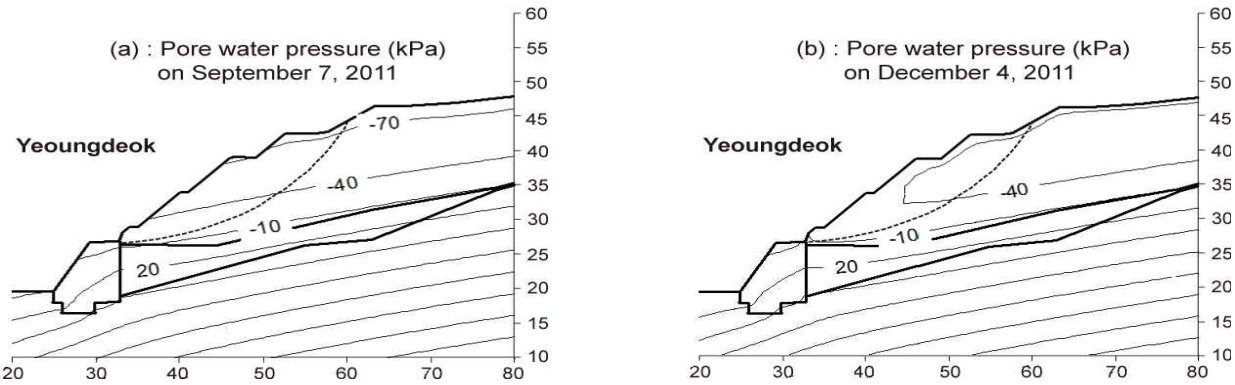
그림 3.15 포항 B사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포

포항 B 사면은 붕괴시 일강우량 10~20mm의 강우(3개월간 누적 강우량: 약 180mm)가 발생하였고 사면의 경사가 급하여 강우 이전의 안전율이 충분하게 확보되지 못하였다. 해석결과로부터, 약한 강우에도 안전율은 감소하여 붕괴가 일어난 사례로 판단되었다.

(4) 영덕 사면

영덕사면 잔류토층의 간극수압분포는 그림 3.16과 같이 나타났다. 그림 3.16 (a)에서는 불포화층의 정상류 해석으로 나타난 초기 간극수압 분포를 보여준다. 전년 연평균 강우에 의하여, 수압은 10 kPa에서 -70 kPa정도로 나타났다. 수압분포의 양상은 깊이에 따라 증가한다.

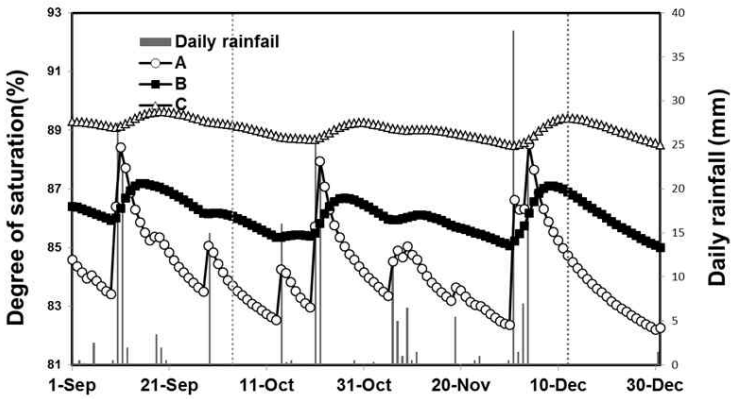
부정류 해석에서는, 간극수압이 증가하여 포화도가 증가하였다. 그림 3.16 (b)의 사면붕괴시 수압은 파괴면 주변에서 -40kPa 이상인 영역이 확장되고 있다.



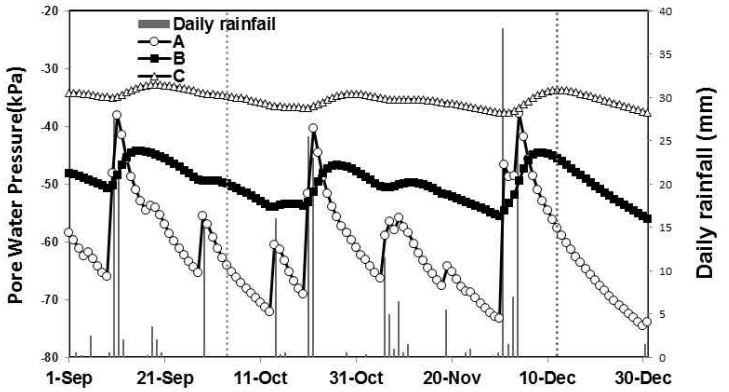
(a) 2011년 9월 7일 간극수압 (b) 2011년 12월 4일 간극수압

그림 3.16 영덕사면의 간극수압 분포

그림 3.17 (a)에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도 변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 상부에 위치한 점 a와 b(그림 3.6(d))에서 강우가 발생한 경우에는 85%에서 90%로 증가하고 있다. 활동면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 하지만 강우주기에따라 간극수압이 반복적으로 증감되고 있다. 그림 3.17 (b)에서는 포화도가 증가함에 따라 간극수압도 변동하는 것을 보여주고 있다. 그림 3.17 (c)에서 보여지듯이, 강우량이 많은 시점에 침투가 진행되면서 흡수응력은 증가하고 있다. 특히 하단부 c점에서는 습윤화가 일어나고 있다.

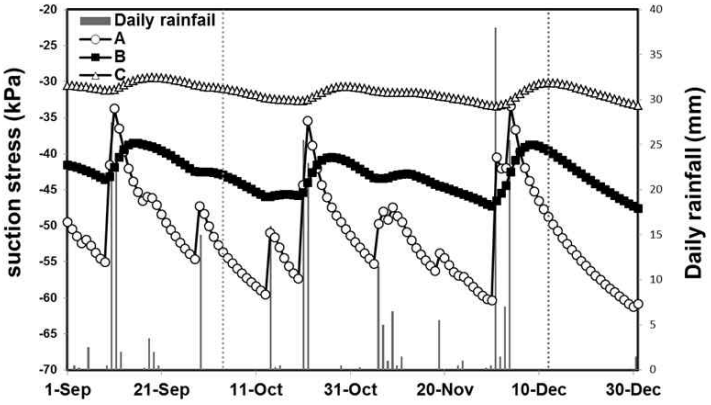


(a) 포화도



(b) 간극수압

그림 3.17 영덕사면의 포화도 및 흡수응력 변화 (계속)

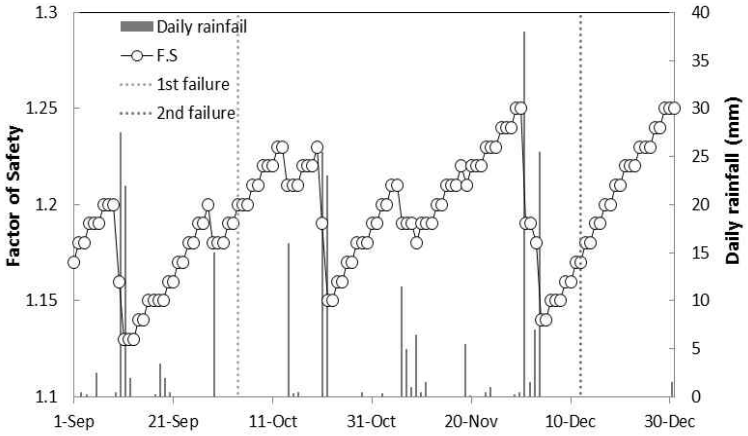


(c) 흡수응력

그림 3.17 영덕사면의 포화도 및 흡수응력 변화

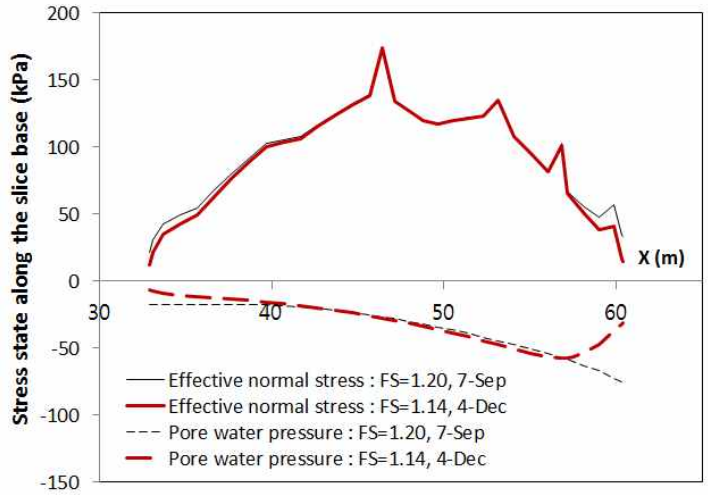
그림 3.18 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 2011년 10월과 12월에 걸쳐 2차례 사면활동이 발생하였고 사면활동이 발생한 시점을 해석상 안전율은 1.0부근일 때와는 다소 차이가 있었다. 강우에 의해 안전율이 저하되는 모습은 관찰할 수 있었지만 실제 사면활동과 일치하지는 않았다.

그림 3.18 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -80에서 -20kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 다소 감소하였다.



(a) 안전율

그림 3.18 영덕사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포 (계속)



(b) 유효응력

그림 3.18 영덕사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포

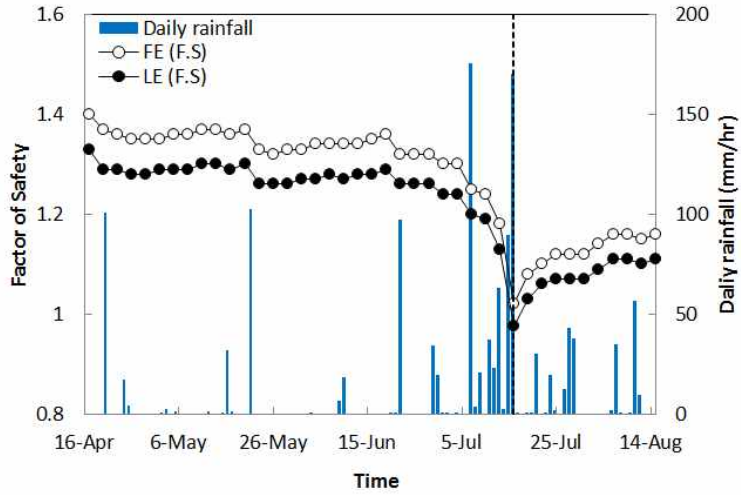
(5) 붕괴사면 사례해석 분석

하동사면은 여러 해 안정성에 이상이 없이 공용중이던 사면이다. 붕괴시 일강우량 150mm 이상의 집중강우(4개월간 누적 강우량: 1200mm 이상)가 발생하였고, 과도한 강우로 인하여 붕괴가 있어난 현상을 불포화토의 물성을 고려한 해석으로 예측할 수 있었다.

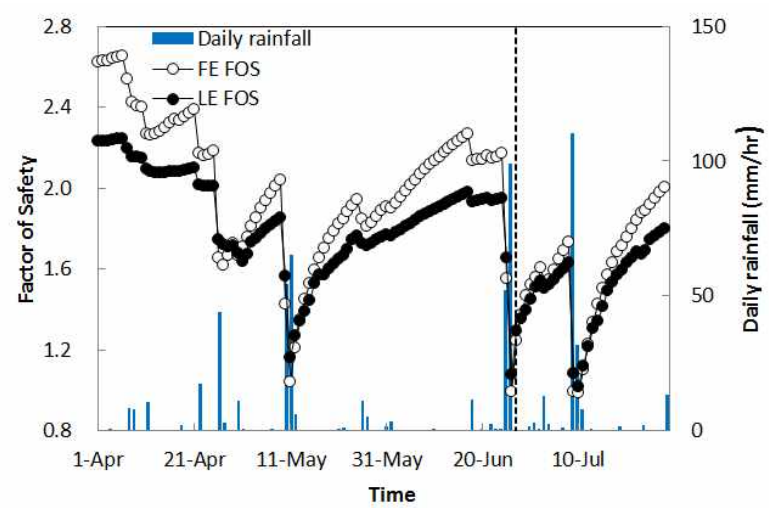
포항 A 사면은 붕괴시 일강우량 100mm이상의 집중강우(3개월간 누적 강우량: 600mm 이상)가 발생하였다. 이로 인하여 시공후 일정기간 안정성에 문제가 없던 사면의 붕괴가 있어났으며, 불포화 사면 해석절차를 통하여 규명할 수 있었다.

반면 포항 B 사면은 붕괴시 일강우량 10~20mm의 강우(3개월간 누적 강우량: 약 180mm)가 발생하였고 영덕사면은 일강우량 15~38mm의 강우(4개월간의 누적강우가 약 250mm)가 발생하였다. 두 경우에는 사면의 경사가 급하여 강우 이전의 안전율이 충분하게 확보되지 못하였고 심하지 않은 강우로 인하여 붕괴가 일어나 사례로 판단되었다.

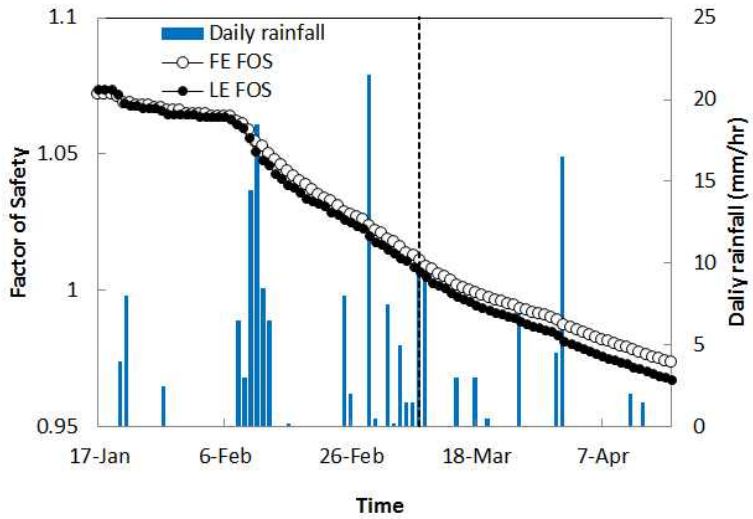
이러한 안정성 변동을 유효응력에 기반한 불포화 안정성 해석을 통하여 분석할 수 있었다. (그림 3.19). 본 연구의 해법은 유한요소(FE) 응력장에서 절편에 작용하는 힘 분포에 대하여 안전율을 계산한다. 이러한 해법은 한계평형법(LE)에 비하여 절편 측면에 작용한 힘 평형을 고려하여 해의 엄밀도를 높일 수 있다. 그림 3.19에서는 3개 현장에 대하여 FE와 LE의 안전율을 비교하고 있다. 하동 및 포항 A 붕괴사면에 대하여 FE 안전율이 붕괴시 안전율 1.0에 가깝게 계산되었다. 포항 B 사면에서는 유사한 결과를 보여준다. 세 사면 모두 FE 안전율이 LE 안전율보다 크게 계산된다.



(a) 하동사면



(b) 포항A사면



(c) 포항B사면

그림 3.19 한계평형법과 응력장 해법 안전율 비교

하동사면의 경우, LE 안전율이 FE의 경우에 비하여 10% 정도 낮게 나타난다. 포항 A 사면은 안전율 1.0 부근에서는 유사한 안전율을 계산하지만, 안전율 2.0부근에서는 LE 안전율이 FE의 경우에 비하여 20%정도 낮게 계산된다. 포항 B 사면은 LE 안전율이 FE의 경우에 비하여 조금 낮게 계산되지만 대체로 유사한 경향을 나타난다.

본 절의 성과를 정리하면 다음과 같다.

목 표	내 용
침투 및 응력의 변화를 고려한 불포화 사면 안정해석 기법 개발	• 하동, 포항A, 포항B, 영덕 사면의 실제 단면에 대한 해석 실시. • 실제 강우기록에 따른 사면의 안정성 평가. • 불포화 사면의 침투에 따른 안정성 변화 해석기법 개발 • 유효응력에 기반한 사면해석기법 개발 • 침투해석 및 응력해석 수행절차 검증 및 실제 적용성 확보 • 하동사면 : 심한 집중강우(대)로 안전율 감소로 인한 붕괴 재현 • 포항A사면 : 집중강우(중)로 안전율 감소로 인한 붕괴 재현 • 포항B사면 : 급경사와 강우(소)로 안전율 감소로 인한 붕괴 재현 • 실제사면 붕괴시 안전율(1.0) 계산 • 유한요소 해석법과 한계해석법에 대한 응력장 해법의 안전율 정확도 비교(그림 3.19)
대경권 사면 현장사례 해석 및 평가	

3.3 보강사면의 해석

구분	목표	내용	평가지표	측정방법	가이드라인 기여도
불포화사면 해석기법 개발	대경권 사면현장 사례 해석 및 평가	보강전 및 보강후 사면의 안정성 변화 평가	불포화 사면 수치해석 : 3개 현장	확률 강우조건 비교	• 침투해석 및 응력해석 수행절차 확립 • 강우시 침투에 의한 안정성 해석 절차 확립

하동 및 포항지역의 사면은 붕괴후 보강을 계획하고 실시하였다. 하동사면의 경우 20본의

소일네일링과 계단식옹벽(5단), 2본의 영구앵커로 보강이 이루어졌고, 포항A사면과 포항B사면은 경사완화(사면경사 1:1.5로 조정)로 보강이 이루어졌다. 보강단면을 대상으로 해석을 수행하여 설계단계에서 본 연구의 해석방법을 적용하였다.

붕괴사면에 대한 해석 절차는 앞 절에 설명과 동일하며, 각 사면에 대하여 붕괴 발생 후 실제 보강된 사면에 대하여 그림 3.20과 같이 요소망을 적절하게 세분화하였다. 불포화물성은 동일하며, 부정류 해석시 실제 강우에 대한 해석과 확률 강우에 대한 해석을 비교하였다. 하동사면의 경우 진주시의 100년 빈도 24시간지속 강우강도를 사용하였고, 포항A, 포항B사면의 경우 포항시의 100년 빈도 24시간 지속 강우 강도를 사용하여 부정류해석을 실시하였다(국토해양부, 한국 확률강우량정보).

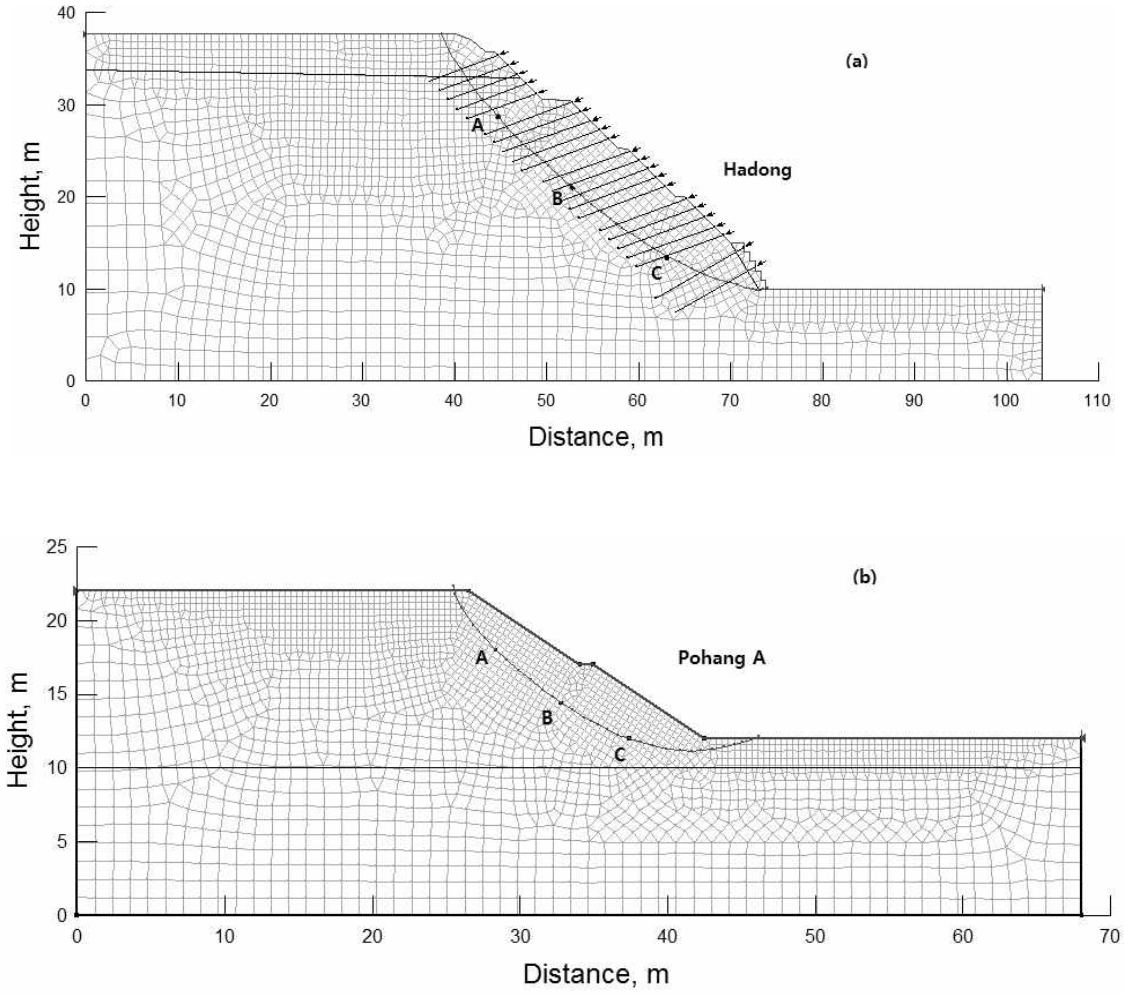


그림 3.20 보강사면 요소망 (a) 하동사면, (b) 포항 A 사면, (c) 포항 B 사면 (계속)

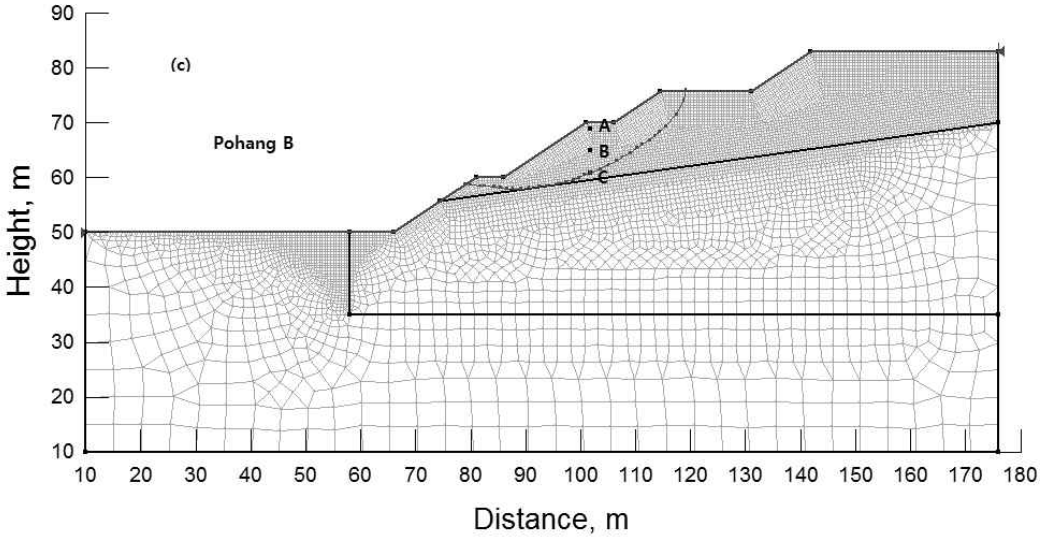
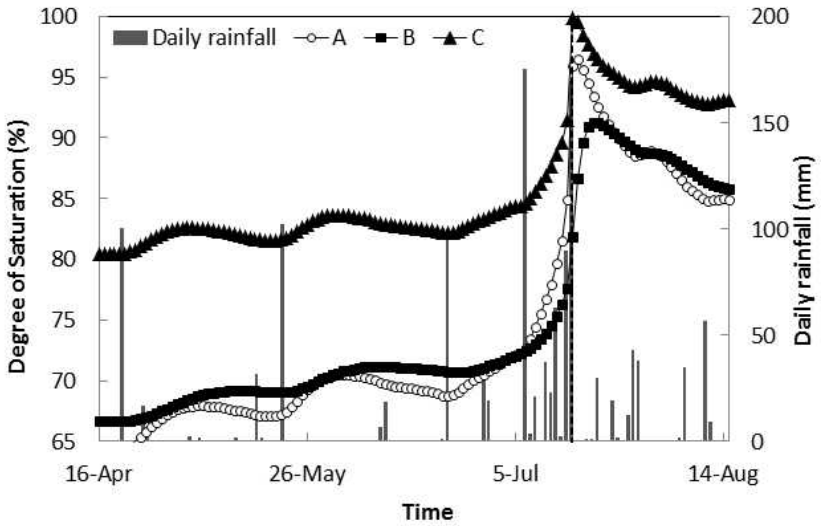


그림 3.20 보강사면 요소망 (a) 하동사면, (b) 포항 A 사면, (c) 포항 B 사면

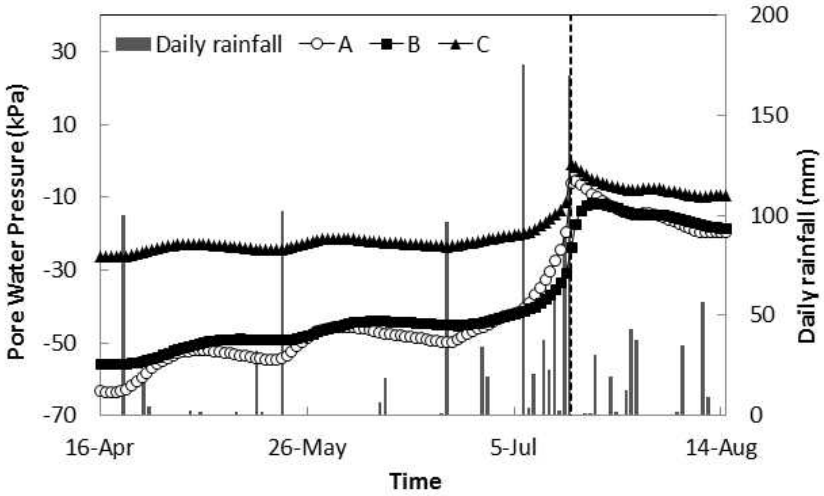
(1) 하동사면

보강사면에 대하여 실제 강우로 부정류해석을 실시한 결과로, 그림 3.21 (a)에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도 변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 상부에 위치한 점 a와 b(그림 3.20(a))에서 65%에서 100%로 증가하고 있다. 활동면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 그림 3.21 (b)에서 보이듯이, 침투가 진행되면서 간극수압이 증가하여 그림 3.21 (c)와 같이 흡수응력이 증가한다. 특히 하단부 c점에서는 습윤화가 심하게 일어나고 포화되어 흡수응력이 양의 간극수압과 일치하고 0보다 커진다.

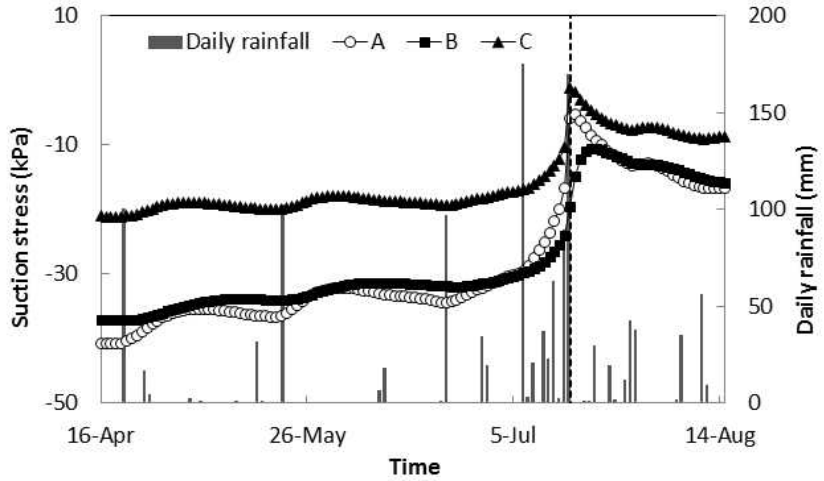


(a) 포화도

그림 3.21 하동사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화 (실제강우 기준)(계속)



(b) 간극수압

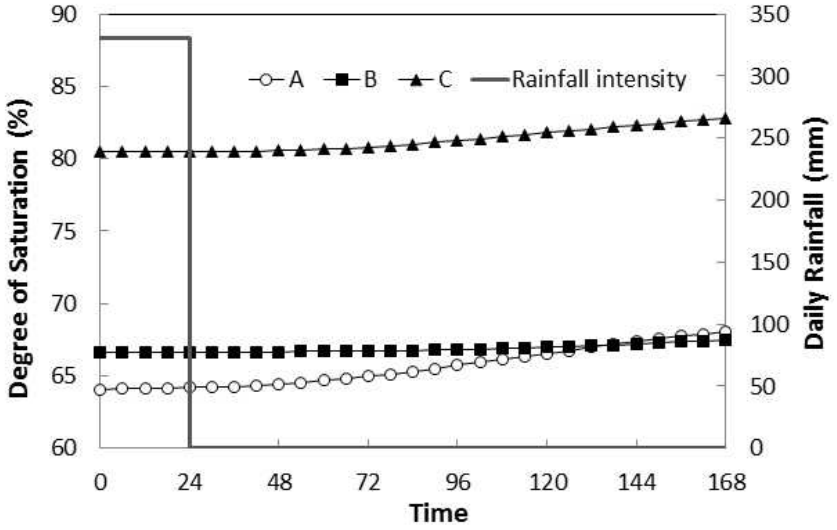


(c) 흡수응력

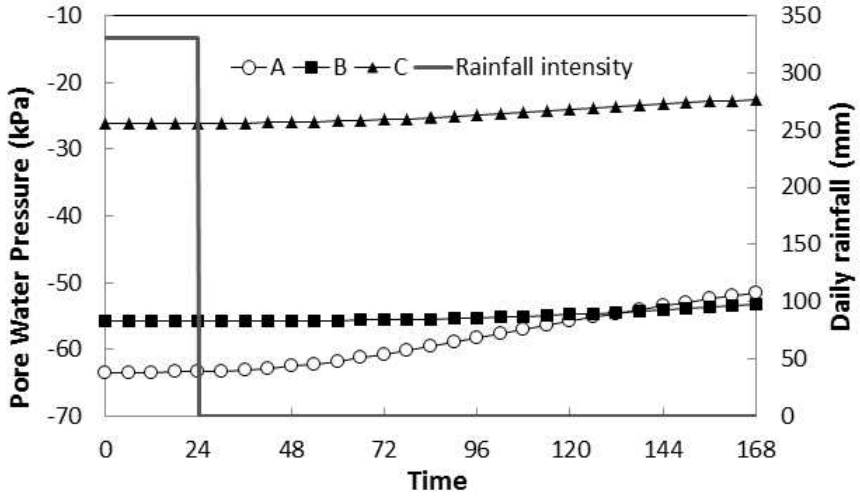
그림 3.21 하동사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화 (실제강우 기준)

보강사면에 대하여 확률 강우강도로 부정류해석을 실시한 결과로, 그림 3.22 (a)에서 포화도는 상부에 위치한 점 a와 b(그림 3.20(a))에서 64%에서 67%로 증가하고 있다. 활동면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 그림 3.22 (b)에서 보이듯이, 침투가 진행되면서 간극수압이 증가하여 그림 3.22 (c)와 같이 흡수응력이 증가한다.

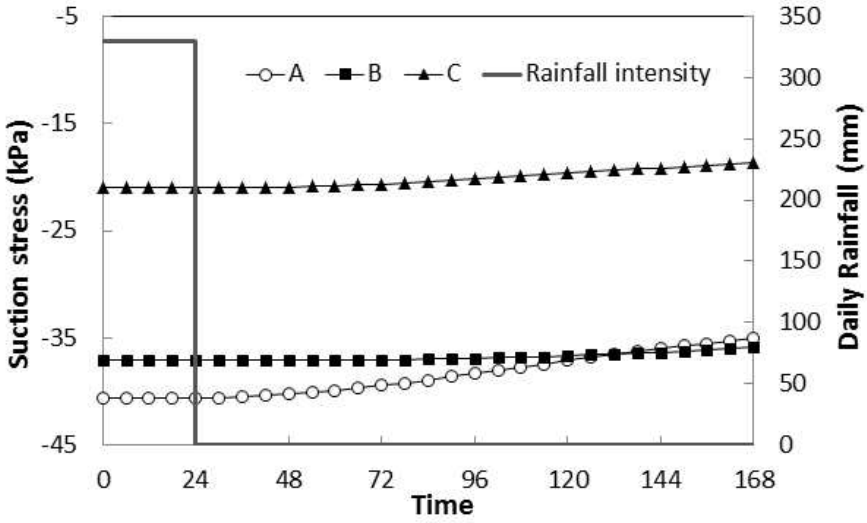
그림 3.21과 그림 3.22의 포화도와 간극수압 및 흡수응력을 비교해 보면 실제 강우로 해석한 결과가 확률 강우강도로 해석한 결과에 비해 변화폭이 크게 나타났으며, 강우에 의한 변화 특성이 뚜렷하게 나타났다.



(a) 포화도



(b) 간극수압

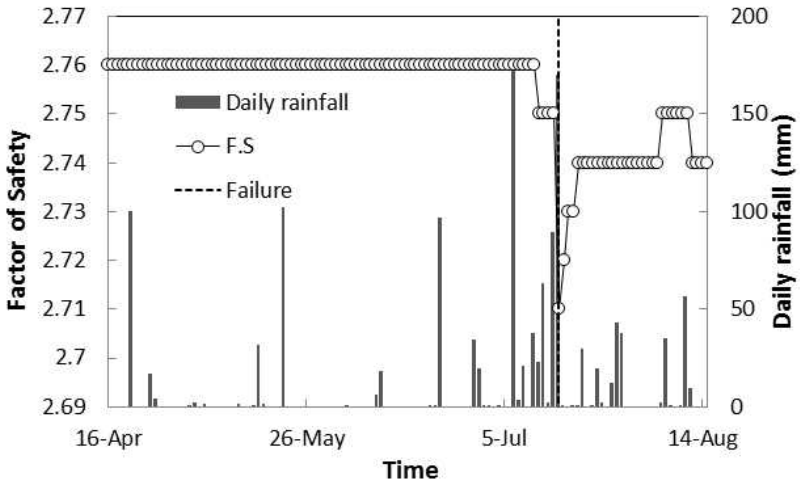


(c) 흡수응력

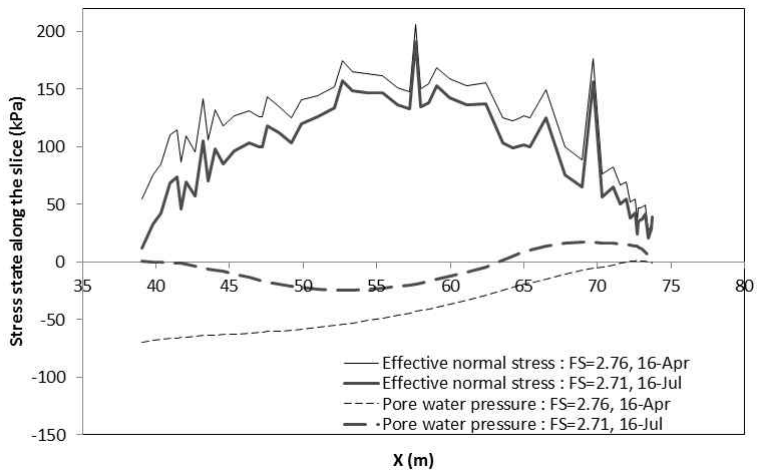
그림 3.22 하동사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화
(100년빈도 24시간지속 확률 강우강도 기준)

실제 강우에 대하여 해석 결과 그림 3.23 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 붕괴된 사면에 대하여 보강을 실시한 후의 안전율은 2.71~2.76으로 안전하게 나타났으며 강우에 의한 안전율의 변화폭은 매우 미미하게 나타났다.

그림 3.23 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -70에서 0kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 70kPa 정도 감소하였다.



(a) 안전율

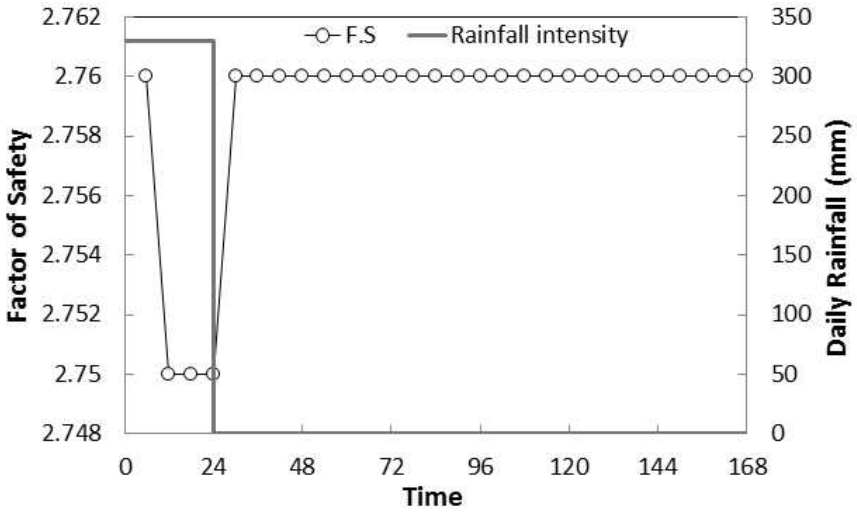


(b) 유효응력

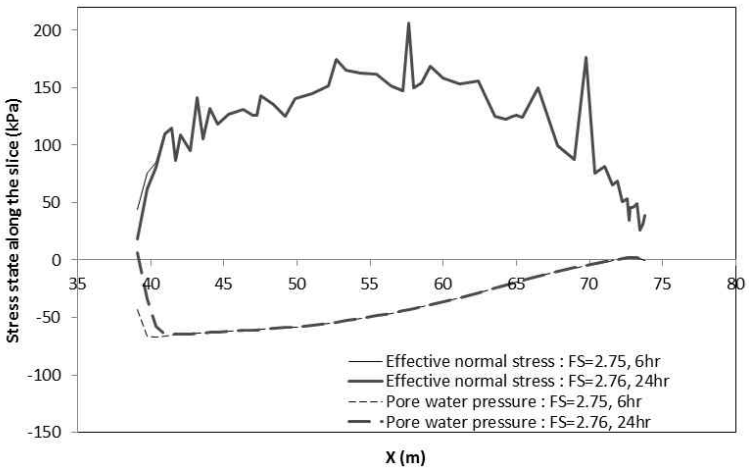
그림 3.23 하동사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포
(실제강우 기준)

확률 강우강도에 대하여 해석 결과 그림 3.24 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 붕괴된 사면에 대하여 보강을 실시한 후의 안전율은 2.75~2.76으로 안전하게 나타났으며 강우에 의한 안전율의 변화폭은 매우 미미하게 나타났다.

그림 3.24 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -70에서 0kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 70kPa 정도 감소하였다.



(a) 안전율



(b) 유효응력

그림 3.24 하동사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포
(100년빈도 24시간지속 확률 강우강도 기준)

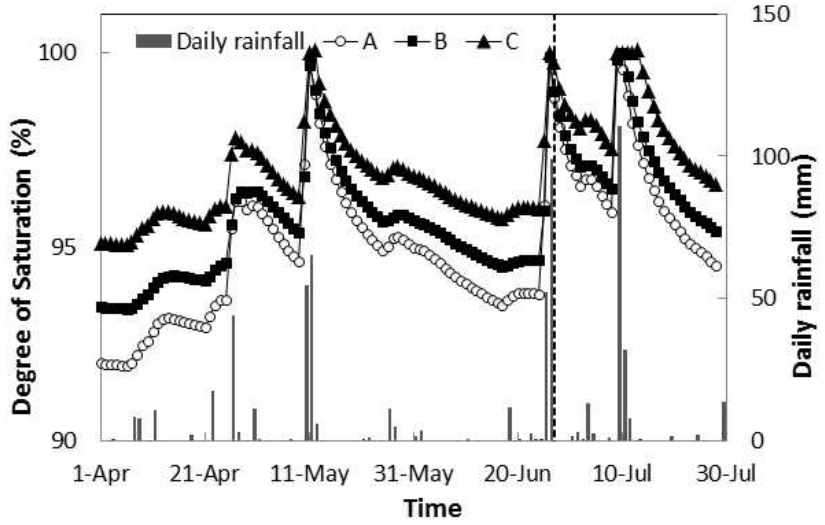
그림 3.23과 그림 3.24의 안전율과 유효응력을 비교해 보면, 안전율의 변화폭은 실제 강우로 해석한 결과가 확률 강우강도로 해석한 결과에 비해 약간 크게 나타났다. 유효응력의 변화는 실제 강우로 해석한 결과가 크게 나타났다.

확률 강우강도는 지층의 포화투수계수보다 많은 양의 강우 경계조건을 입력하므로 수치해석과정에서 해의 수렴성을 확보하는데 주의해야 한다. 이로 인하여 실제 강우조건으로 인한 안전율 변화를 병행하여 해석하는 것이 바람직하다.

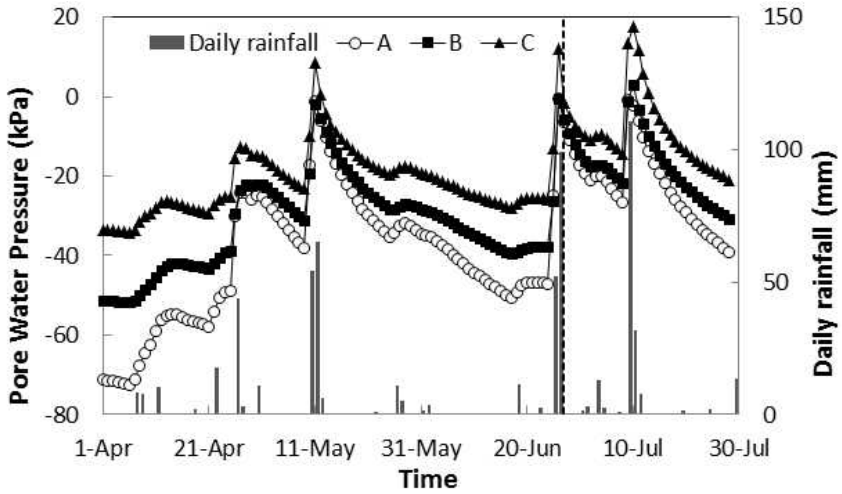
이미 보강이 시행된 하동사면은 안전율이 전반적으로 2.7이상으로 나타났으며, 과다하게 보강된 사면으로 판단된다. 따라서 사면의 보강대책을 축소하여도 안정성을 확보하고 비용을 절감할 수 있었을 것이다. 이러한 결과는 보강설계시 불포화 사면의 지하수위 및 간극수압조건을 보수적으로 평가하고 지층의 전단강도를 과소하게 평가하여 발생한 것으로 여겨진다. 불포화특성을 고려한 사면의 설계기법을 적용하면 하동사면의 보강설계를 합리적이고 경제적으로 수행할 수 있다.

(2) 포항A사면

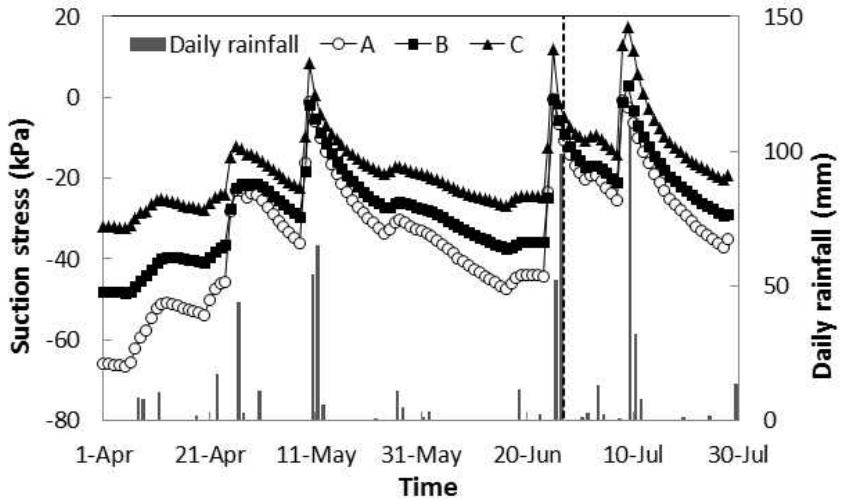
보강사면에 대하여 실제강우로 부정류해석을 실시한 결과로, 그림 3.25 (a)에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도 변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 상부에 위치한 점 a와 b(그림 3.20 (b))에서 93%에서 100%로 증가하고 있다. 활동면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 그림 3.25 (b)에서 보여지듯이, 침투가 진행되면서 간극수압이 증가하여 그림 3.25 (c)와 같이 흡수응력이 증가한다. 특히 하단부 c점에서는 습윤화가 심하게 일어나고 포화되어 흡수응력이 양의 간극수압과 일치하고 0보다 커진다.



(a) 포화도

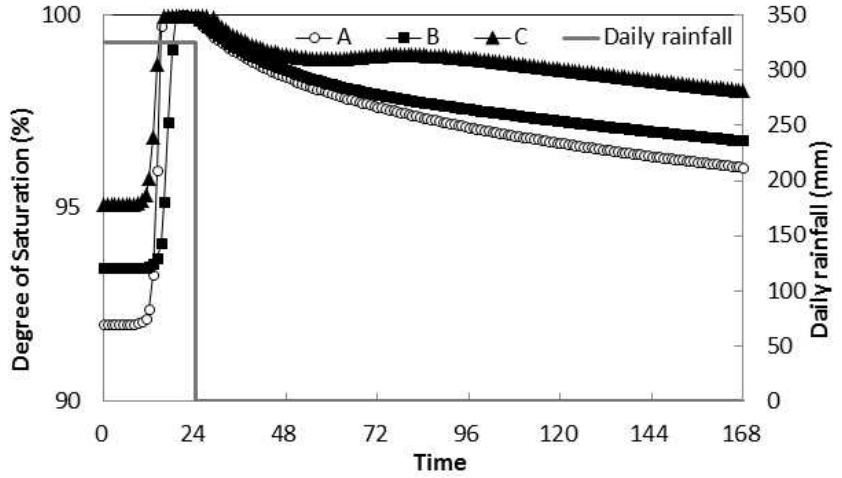


(b) 간극수압

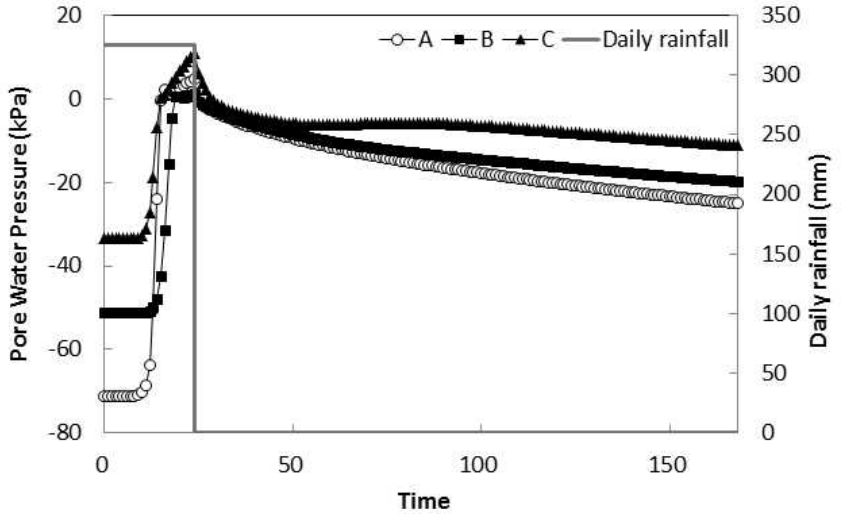


(c) 흡수응력

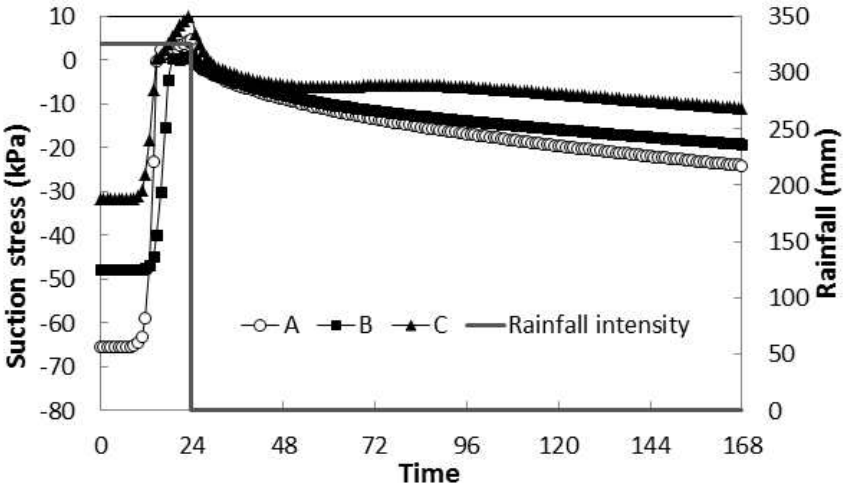
그림 3.25 포항A사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화 (실제강우 기준)



(a) 포화도



(b) 간극수압



(c) 흡수응력

그림 3.26 포항A사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화
(100년빈도 24시간지속 확률 강우강도 기준)

보강사면에 대하여 확률 강우강도로 부정류해석을 실시한 결과로, 그림 3.26 (a)에서 포화도는 상부에 위치한 점 a와 b(그림 3.20 (b))에서 92%에서 100%로 증가하고 있다. 활동면 하부 c에서는 포화도가 상대적으로 높게 나타나고 있다. 그림 3.26 (b)에서 보여지듯이, 침투가 진행되면서 간극수압이 증가하여 그림 3.26 (c)와 같이 흡수응력이 증가한다.

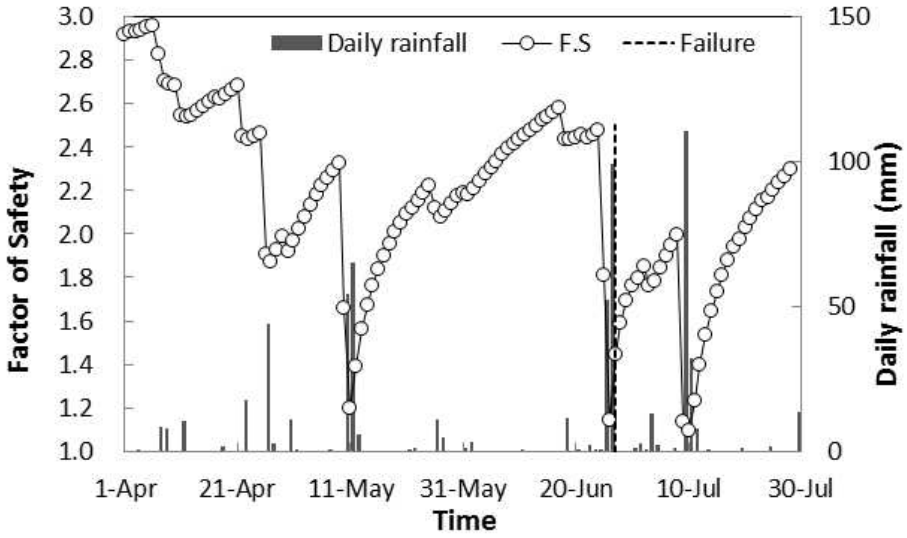
그림 3.25와 그림 3.26의 포화도와 간극수압 및 흡수응력을 비교해 보면 실제 강우로 해석한 결과가 확률 강우강도로 해석한 결과에 비해 변화폭이 크게 나타났으며, 강우에 의한 변화 특성이 뚜렷하게 나타났다.

실제 강우에 대하여 해석 결과 그림 3.27 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 붕괴된 사면에 대하여 보강을 실시한 후의 안전율은 1.15~2.95로 나타났으며 강우에 의한 안전율의 변화가 뚜렷하게 나타났다.

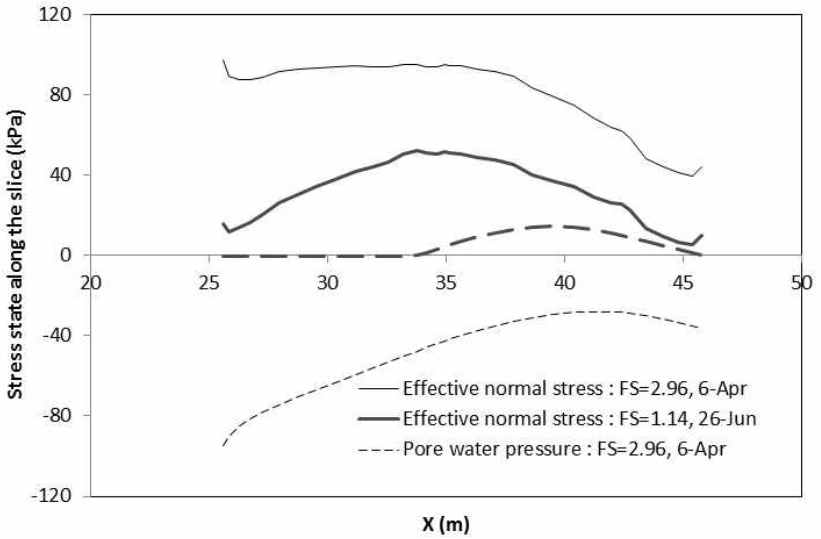
그림 3.27 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -100에서 -40kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 60kPa 정도 감소하였다.

확률 강우강도에 대하여 해석 결과 그림 3.28 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 붕괴된 사면에 대하여 보강을 실시한 후의 안전율은 1.0~2.81로 나타났으며 강우에 의한 안전율의 변화가 뚜렷하게 나타났다.

그림 3.28 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -80에서 0kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 80kPa 정도 감소하였다.

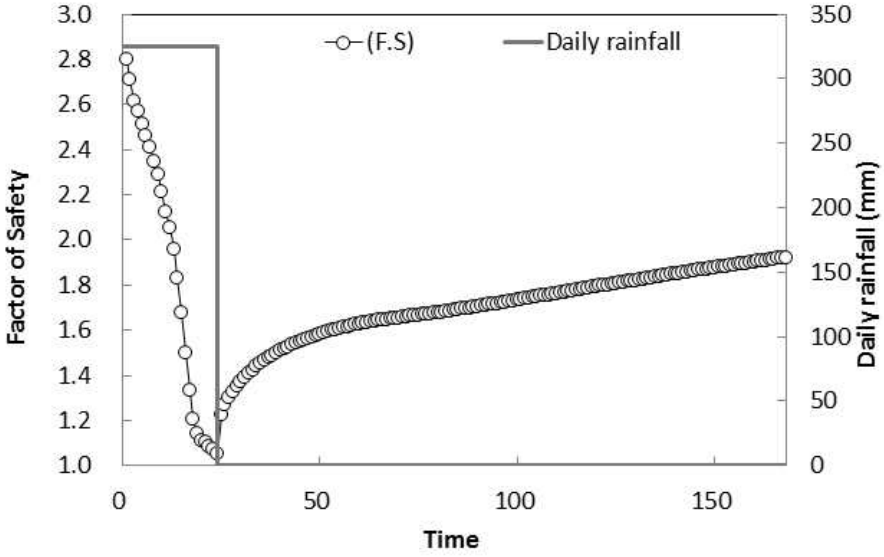


(a) 안전율

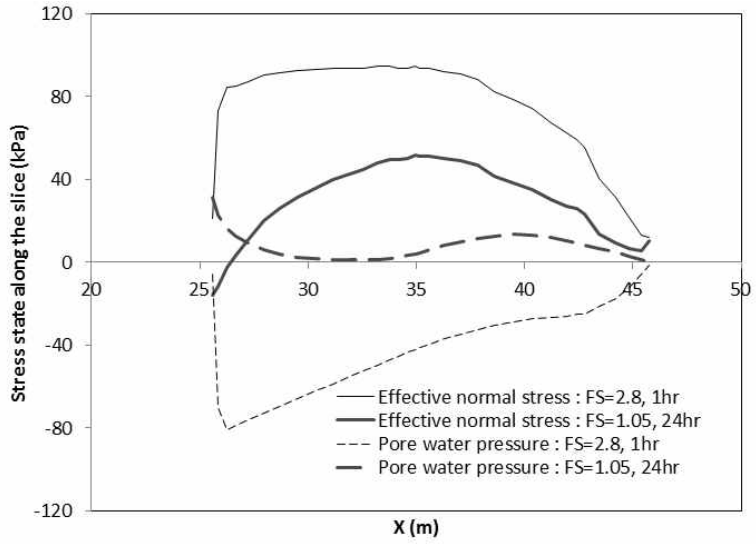


(b) 유효응력

그림 3.27 포항A사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포
(실제강우 기준)



(a) 안전율



(b) 유효응력

그림 3.28 포항A사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포
(100년빈도 24시간지속 확률 강우강도 기준)

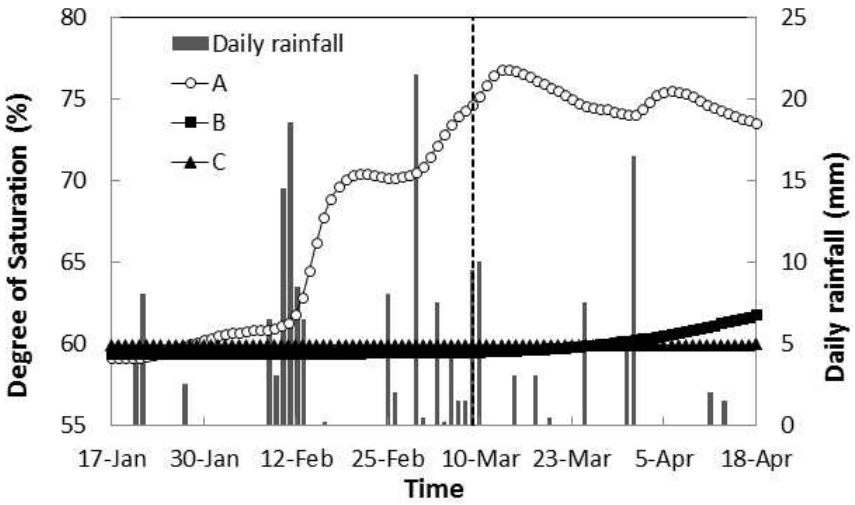
그림 3.27과 그림3.28의 안전율과 유효응력을 비교해 보면 안전율의 변화폭은 실제강우로 해석한 결과가 확률 강우강도로 해석한 결과에 비해 변화폭이 크게 나타났다. 유효응력의 변화는 안전율의 변화폭에 따라 그 변화폭이 큰 실제 강우로 해석한 결과가 크게 나타났다.

확률 강우강도로 해석을 실시한 경우 최소안전율이 1.0으로 나타났으며, 실제 강우로 해석한 결과 최소안전율이 1.14로 나타났다. 확률 강우강도는 지층의 포화투수계수보다 많은 양의 강우 경계조건을 입력하므로 수치해석과정에서 해의 수렴성을 확보하는데 주의해야 한다. 이로 인하여 실제 강우조건으로 인한 안전율 변화를 병행하여 해석하는 것이 바람직하다.

포항A 사면은 안전율이 1.0-1.1로 나타났으며, 과소하게 보강된 사면으로 판단된다. 따라서 추후 붕괴의 우려가 있으므로 추가적인 보강을 시행할 필요가 있다. 이러한 결과는 불포화 사면의 지하수위 및 간극수압조건을 지나치게 안전측으로 평가하고 지층의 전단강도를 과대 평가하여 발생한 것으로 여겨진다. 불포화특성을 고려한 사면의 설계기법을 적용하면 하동사면의 보강설계를 합리적이고 안전하게 수행할 수 있다.

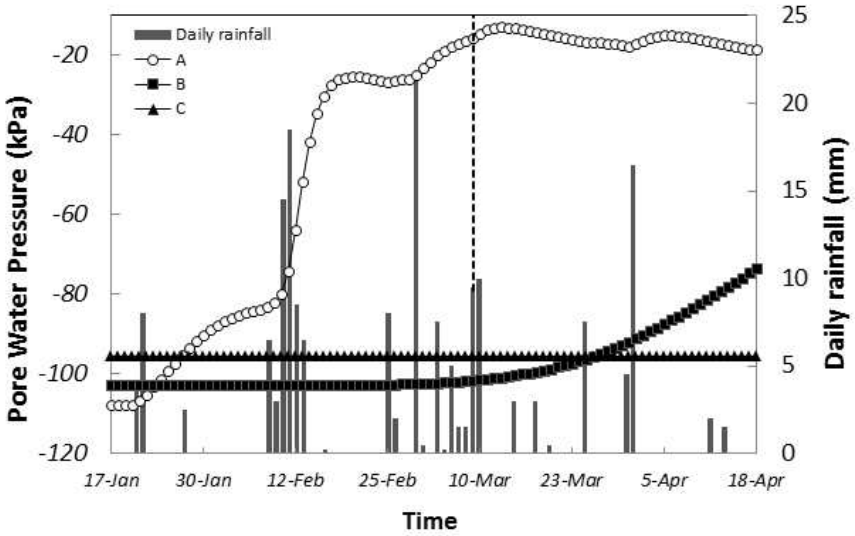
(3) 포항B 사면

보강사면에 대하여 실제강우로 부정류해석을 실시한 결과로, 그림 3.29 (a)에서는 전반적 활동면에서 불포화토의 습윤도 변수들의 시간에 따른 변화를 보여준다. 포화도는 상부에 위치한 점 a(그림 3.20 (c))에서 60%에서 76%로 증가하고 있다. 활동면 중간부와 하부의 점 b와 c에서는 포화도가 상대적으로 낮고 그 변화폭이 미미하게 나타나고 있다. 그림 3.29 (b)에서 보여지듯이, 침투가 진행되면서 점 a와 b의 간극수압이 증가하여 그림 3.29 (c)와 같이 점 a와 b의 흡수응력이 증가한다. 또한 상단부 a점에서는 습윤화가 심하게 일어나고 포화되어 흡수응력이 -10kPa에 가깝게 커진다.

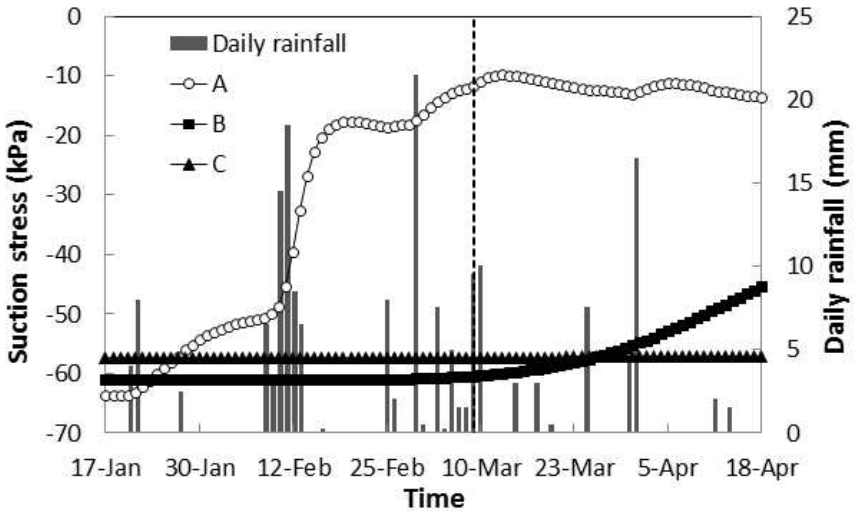


(a) 포화도

그림 3.29 포항B사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화 (실제강우 기준) (계속)



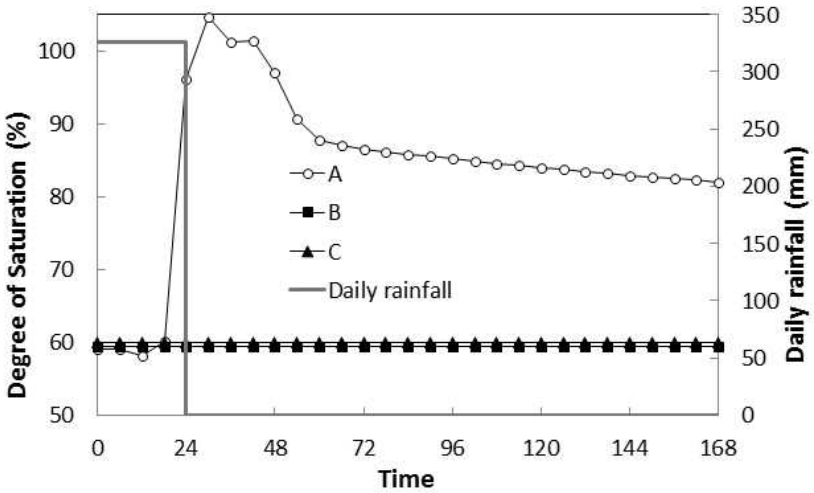
(b) 간극수압



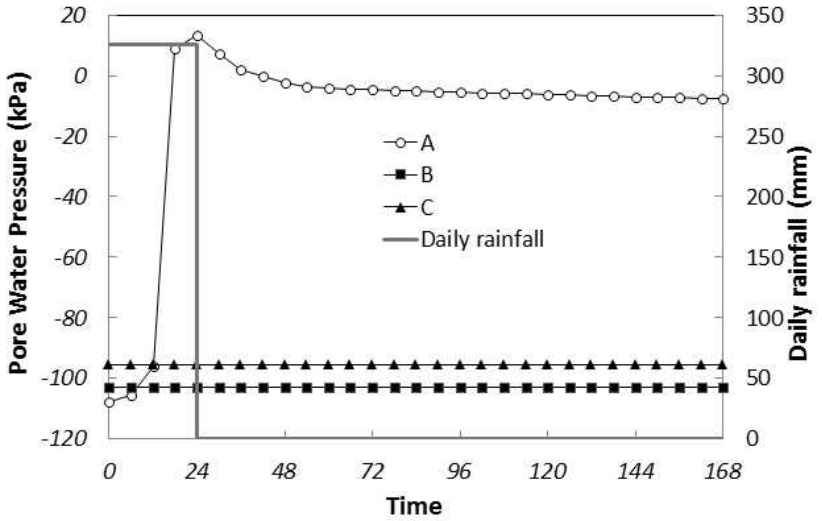
(c) 흡수응력

그림 3.29 포항B사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화
(실제강우 기준)

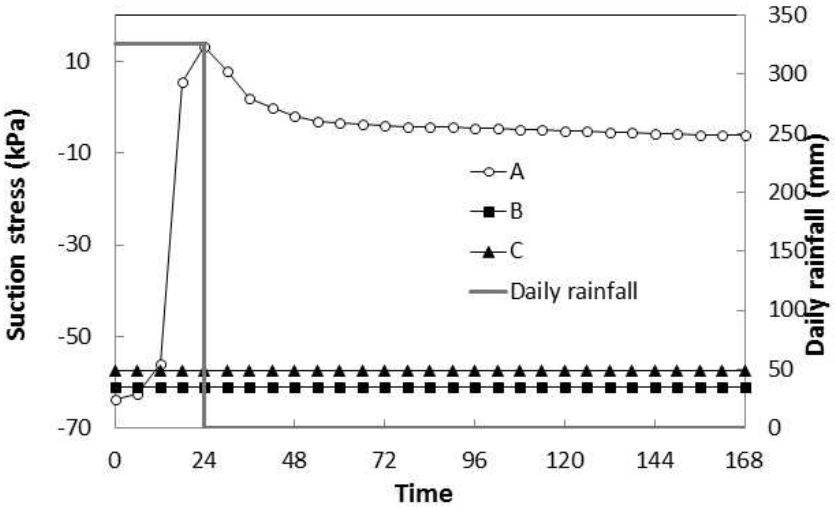
보강사면에 대하여 확률 강우강도로 부정류해석을 실시한 결과로, 그림 3.30 (a)에서는 포화도는 활동면 상부 점 a(그림 3.20 (c))에서는 포화도 60%에서 100%로 증가하고 있다. 중심부와 하부에 위치한 점 b와 c에서 포화도는 60%로 변화가 미미하다. 그림 3.30 (b)에서 보여지듯이, 침투가 표면부에서만 진행되면서 점 a의 간극수압이 증가하여 그림 3.30 (c)와 같이 a점에서만 흡수응력이 증가한다.



(a) 포화도



(b) 간극수압

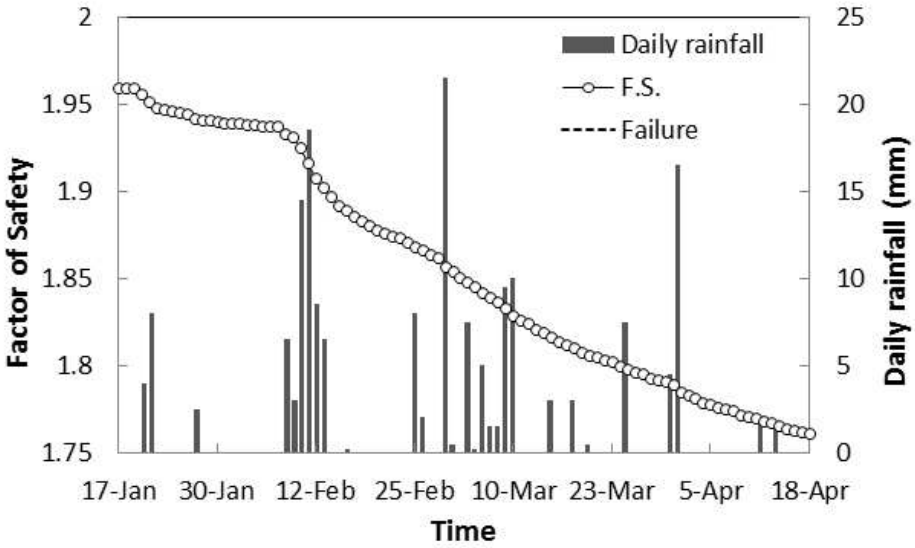


(c) 흡수응력

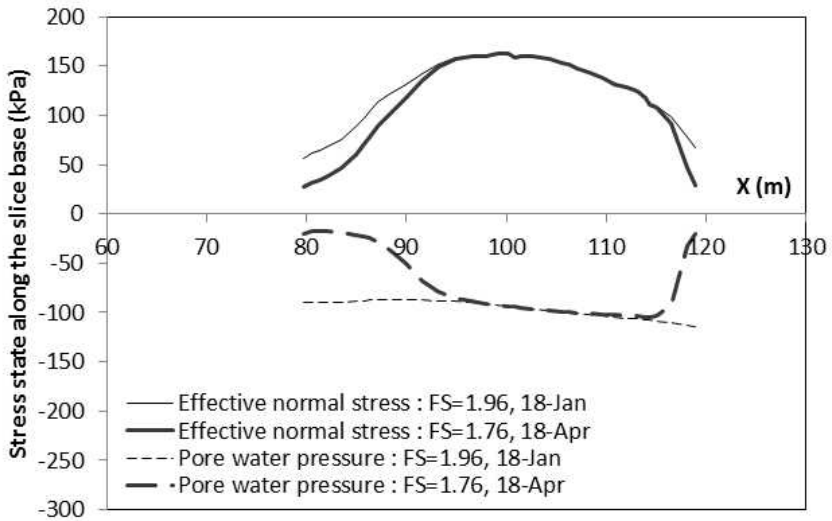
그림 3.30 포항B사면의 포화도와 간극수압 및 흡수응력 변화
(100년빈도 24시간지속 확률 강우강도 기준)

실제 강우에 대하여 해석 결과 그림 3.31 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 붕괴된 사면에 대하여 보강을 실시한 후의 안전율은 1.76~1.96으로 나타났으며 강우에 의한 안전율의 변화가 뚜렷하게 나타났다.

그림 3.31 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -110에서 -90kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 20kPa 정도 감소하였다.



(a) 안전율

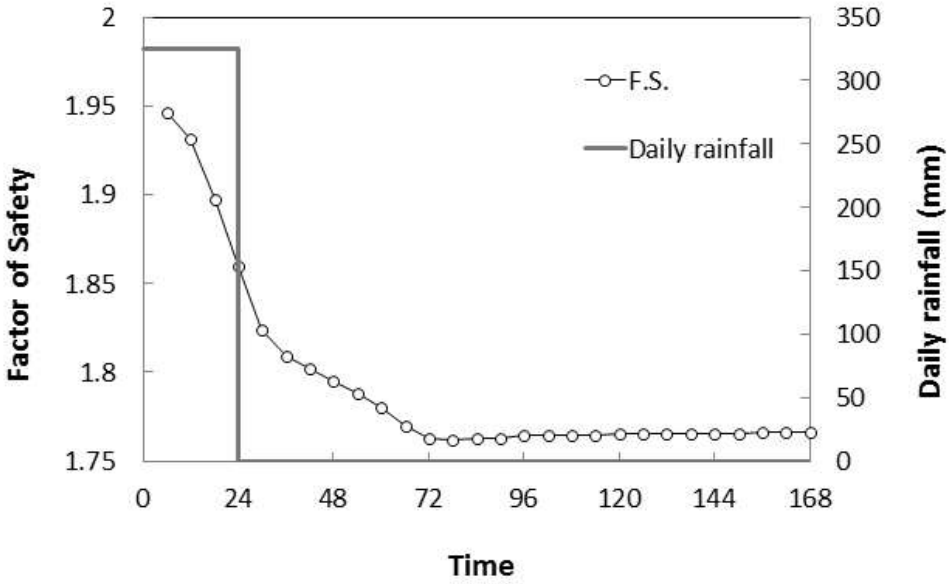


(b) 유효응력

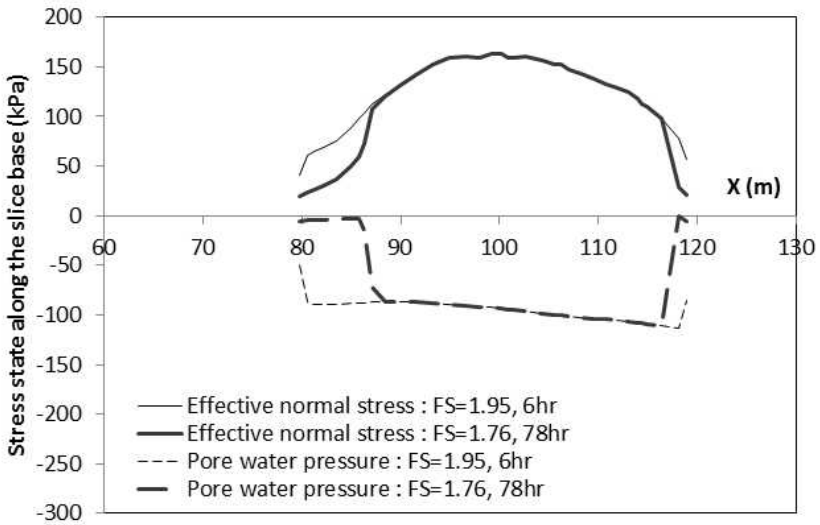
그림 3.31 포항B사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포
(실제강우 기준)

확률 강우강도에 대하여 해석 결과 그림 3.32 (a)에서는 주어진 활동면들에 대하여 시간에 따른 안전율을 보여준다. 붕괴된 사면에 대하여 보강을 실시한 후의 안전율은 1.76~1.95로 안전하게 나타났으며 강우에 의한 안전율의 변화가 뚜렷하게 나타났다.

그림 3.32 (b)에서는 침투로 인하여 활동면에서 간극수압이 증가하여 유효응력이 감소하는 것을 보여준다. 정상류해석 후, 각 절편에서는 초기 간극수압이 -100에서 -50kPa까지 나타난다. 부정류해석에 의하여 간극수압은 점차로 증가하며, 표면부근 활동면에서는 포화상태에 이루고 유효응력이 50kPa 정도 감소하였다.



(a) 안전율



(b) 유효응력

그림 3.32 포항A사면의 안전율 변화 및 유효응력 분포
(100년빈도 24시간지속 확률 강우강도 기준)

그림 3.31과 그림3.32의 안전율과 유효응력을 비교해 보면 안전율의 변화폭은 실제 강우로 해석한 결과가 확률 강우강도로 해석한 결과와 유사하게 나타났다. 유효응력의 변화는 실제 강우로 해석한 경우보다 확률 강우강도로 해석한 결과가 크게 나타났다.

실제 강우 및 확률 강우강도에 의한 해석결과, 모두 최소안전율이 1.76으로 우기시 기준안전율 1.3을 상회하였고 안정성을 확보하였다. 포항B 사면은 다소 과다하게 보강된 사면으로 판단된다. 이러한 결과는 보강설계시 불포화 사면의 지하수위 및 간극수압조건을 보수적으로 평가하고 지층의 전단강도를 과소하게 평가하여 발생한 것으로 여겨진다. 불포화특성을 고려한 사면의 설계기법을 적용하면 하동사면의 보강설계를 합리적이고 경제적으로 수행할 수 있다.

3.4 분석 및 정리

3장에서는 실제 붕괴사면의 사례조사 및 해석을 수행하였다. 하동, 포항, 영덕지역에 소재한 4개 대상 사면에 대한 조사와 실내시험을 토대로 강우 침투로 인한 사면 붕괴를 해석하였다. 특히 불포화 유효응력에 기반한 사면 해석기법을 적용하고 검증하는데 핵심을 두고 있다.

1) 강우시 지층내 침투로 인하여 포화도는 변동한다. 포화도가 증가하여 완전포화 상태가 되면 지표부근이나 지층의 경계부에 포화대가 형성될 수 있다. 이러한 불포화토의 침투거동을 반영하여 해석과 설계에 적용할 수 있도록 불포화토의 유효응력에 기반한 해석기법을 개발하고 검증하였다.

2) 불포화층 물성 평가기법을 개발하기 위하여 4개 붕괴현장 사례에 대한 조사를 수행하였다 (하동, 포항A, 포항B, 영덕). 대상지층에 대하여 함수특성곡선을 획득하고 분석하였으며 이를 토대로 불포화 투수계수를 산정하였다. 포화 전단강도는 포화 시료의 직접전단시험을 통하여 획득하였고 불포화 전단강도는 삼축압축시험을 통하여 유효응력으로 분석하였다. 이를 통하여 SWRC와 전단강도의 상관관계의 상관성이 90% 이상 만족하는 것을 알 수 있었다.

3) 하동, 포항A, 포항B, 영덕 사면의 실제 단면에 대하여 침투 및 응력의 변화를 고려한 불포화 사면 안정해석을 수행하고 해석기법을 검증하였다. 실제 강우기록에 따른 사면의 안정성 평가 결과, 불포화 사면의 침투에 따른 안정성 변화 해석기법이 적용 가능함을 알

수 있었다. 특히 유효응력에 기반한 사면해석기법이 침투해석 및 응력해석 수행절차를 통하여 실제문제에 적용할 수 있음을 검증하였다. 유한요소 해석법과 한계해석법에 대한 비교를 통하여 응력장 해법의 안전율 정확도가 우수함을 알 수 있었다.

4) 하동, 포항A, 포항B 사면의 실제 보강 후 단면에 대한 해석을 실시하여 100년 빈도 24시간 지속강우강도에 대한 안정성을 평가하였다. 또한 실제 강우기록에 따른 보강사면의 안정성을 평가하여 확률 강우강도와 동등한 안전율이 평가됨을 알 수 있었다. 하동사면과 포항B 사면은 과다하게 보강되어 비용이 많이 투여되었고, 포항A 사면은 과소하게 보강되어 안정성이 미흡한 것으로 판단된다. 불포화 특성을 고려한 설계를 시행하면 경제성을 개선하고 안정성을 확보하는 합리적인 보강대책을 마련할 수 있을 것이다.

제4장 인공강우 모형사면실험

구분	목표	내용	평가 지표	측정방법	가이드라인 기여도
모형 실험	인공강우 모형실험을 통한 사면해석 기법 검증	강우시 파괴사면 모형실험 수행	모형 실험 : 1건 수행	모형사면의 안전율 오차	• 인공강우에 의한 모형실험을 통하여 함수비 및 간극수압 측정 • 불포화 사면 안정 해석 및 설계 절차의 적합성 검증 • 강우에 의한 침투 및 사면붕괴 기구 규명

4.1 대경권 화강풍화토 모형사면 축조

모형사면의 대상토는 대구경북권의 화강풍화토를 이용하였으며 기본 물성시험 결과는 표 4.1과 같다. 대상시료는 통일분류법상 SW로 산정되었고 비중은 2.53, 최대건조단위중량은 $18.95kN/m^3$, 최적함수비는 11.50%로 산정되었다. 모형사면 축조 후 현장단위중량시험을 수행하여 모형사면의 건조단위중량과 함수비를 측정하였다. 모형사면의 건조단위중량은 $16.05kN/m^3$, 초기함수비는 8.42%로 산정되었고, 다짐도는 85%로 나타났다. 다짐도(85%)와 동일한 조건에서 삼축압축시험과 정수위 투수시험을 수행하였으며, 점착력은 0kPa, 내부마찰각은 36.9°, 포화투수계수는 0.013cm/sec로 산정되었다.

표 4.1 기본 물성시험 결과

비 중		2.53	소성한계	N.P
다짐시험	최대건조단위중량(kN/m^3)	18.95	D_{10}(mm)	0.25
	최적함수비(%)	11.50	D_{30}(mm)	0.78
현장단위중량시험	건조단위중량(kN/m^3)	16.05	D_{60}(mm)	1.87
	함수비(%)	8.42	자갈(%)	6.05
투수계수(cm/sec, 다짐도 85%, 정수위)		0.013	굵은 모래(%)	78.80
삼축압축시험	점착력(kPa)	0.0	가는 모래(%)	13.20
	내부마찰각(°)	36.9	실트(%)	2.00
균등계수		7.47	통일분류법	SW
곡률계수		1.32		

대상토의 강도특성을 파악하기 위해 모관흡수력(20, 50, 100kPa)을 조절한 삼축압축시험을 수행하였으며 그 결과는 그림 4.1과 같다. 시험결과, 응력경로에서 d=0, M=1.49로 산정되었으며 M-C의 파괴포락선과 비교하여 점착력은 0.0kPa, 내부마찰각은 36.9°로 산정되었다.

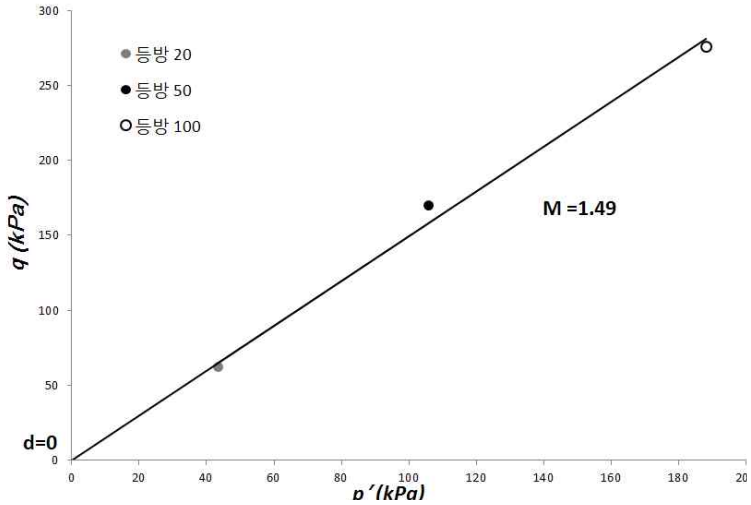


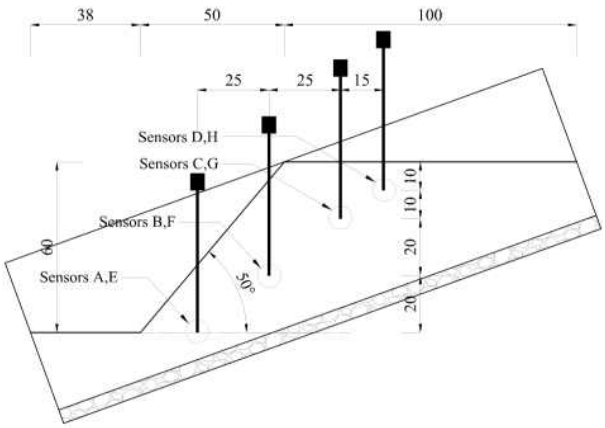
그림 4.1 삼축압축시험 결과

그림 4.2는 인공강우 모형사면실험 장치를 나타낸 것이다. 실험장치는 노즐을 이용하여 인공강우를 재현할 수 있는 강우재현장치와 강우강도를 조절할 수 있는 유량조절장치, 소정의 다짐에너지(수정 다짐 E조건)로 토사를 일정하게 다질 수 있는 다짐장치와 사면경사 조절장치로 구성된다.



그림 4.2 인공강우 모형사면실험 장치

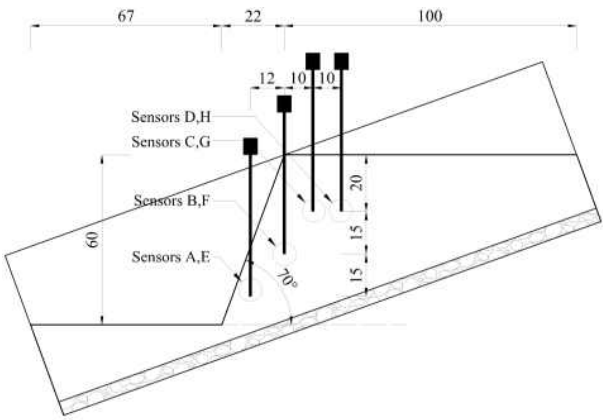
그림 4.3은 대경권 화강풍화토 모형사면으로 경사를 50°와 70°로 형성하여 인공강우를 재현시켜 불포화 사면 안정해석 및 설계 절차의 적합성을 검증하였다. 그림 4.3 (a)와 (b)의 사면경사 50° 모형사면의 경우, 센서는 2단면 4개소씩 총 8개소에 설치하였다. 최하단 A와 E센서는 지중 60cm지점, B와 F센서는 지중 40cm지점, C와 G센서는 지중 20cm지점, D와 H센서는 지중 10cm지점에 설치하여, 함수비와 모관흡수력을 5분 간격으로 측정하였다. 그림 4.3 (c)와 (d)의 사면경사 70° 모형사면의 경우, 센서는 2단면 4개소씩 총 8개소에 설치하였다. 최하단 A와 E센서는 지중 50cm지점, B와 F센서는 지중 65cm지점, C와 G센서, D와 H센서는 지중 20cm지점에 설치하여, 함수비와 모관흡수력을 5분 간격으로 측정하였다.



(a) 단면도(사면경사 50도)



(b) 전경(사면경사 50도)



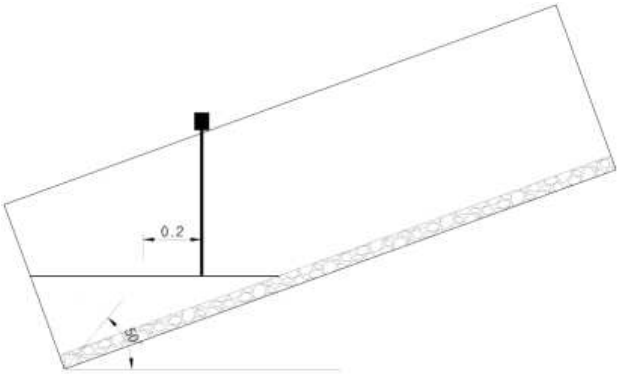
(c) 단면도(사면경사 70도)



(d) 전경(사면경사 70도)

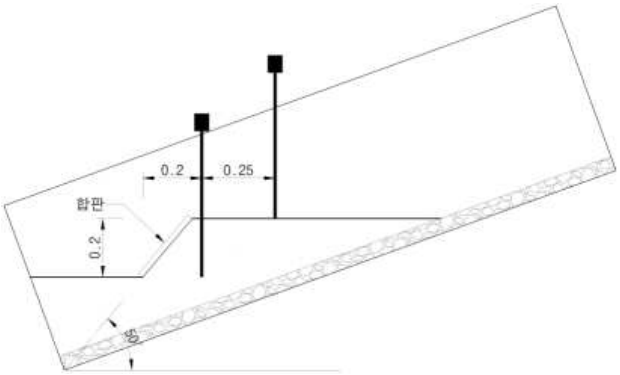
그림 4.3 대경권 화강풍화토 모형사면

모형사면은 대경권 화강풍화토를 이용하여 각 다짐층 높이 20cm씩 균일하게 축조하였으며 축조 시 각 지점별로 계측센서를 설치하였다. 사면 경사부는 합판을 이용하여 축조시에 붕괴되지 않고 균일하게 다져지도록 하였다. 그림 4.4은 모형사면 축조과정을 보여주고 있다.



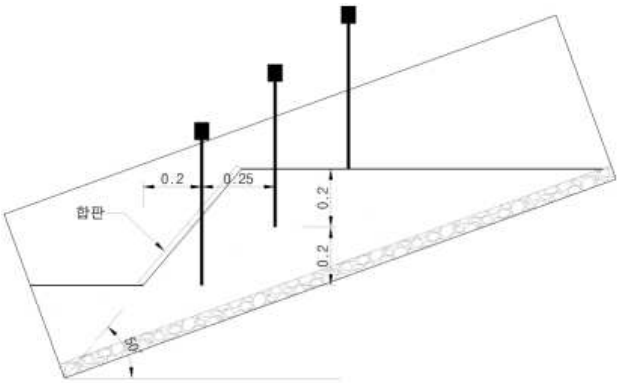


(a) 하부 축조



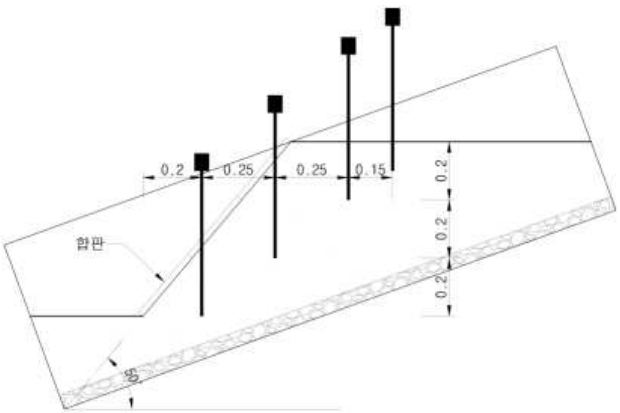


(b) 1단(20cm) 축조





(c) 2단(40cm) 축조





(d) 3단(60cm) 축조

그림 4.4 모형사면 축조과정

4.2 계측기 설치 및 실험방법

인공강우로 인한 모형사면의 침투 거동을 파악하기 위해 함수비와 모관흡수력을 측정하였으며 함수비는 TDR(Time Domain Reflectometer)센서를 이용하여 측정하였다. TDR센서는 함수비와 유전상수와의 상관관계를 이용하며, TDR계측기 본체의 전기펄스가 프루브까지 이동한 후 함수비에 의해 전기펄스가 변하게 되고 간단한 보정과정을 통해 지반 내 함수비를 파악하게 된다. 그림 4.5는 함수비 측정용 TDR센서를 나타낸 것으로 프루브와 데이터로거로 구성된다. TDR센서의 프루브는 그림 4.5 (a)와 같이 Decagon Devices사에서 제작된 EC-5이며, 크기는 8.9×1.8×1.7cm이고 정확도는 사질토에서 ±3%이며, 분해능은 0.1%이다. 출력값이 전압으로 나타나므로 대부분의 데이터로거(Decagon Devices사 : Em50b, ECH20과 Cambell Scientific사 : CR10X, 21X, 23X, CR1000, CR3000)에 연결이 가능하다. 데이터로거는 그림 4.5 (b)와 같이 Decagon Devices사에서 제작된 Em50을 이용하였으며 5채널을 지원하며 34,000개의 측정값을 저장할 수 있으며 측정시간 간격은 1분에서 24시간까지 지정이 가능하고 컴퓨터와의 통신 방식은 USB타입과 RS232 시리얼 포트를 지원한다. 크기는 8.7×6.2×3.5cm이며 전원으로는 AAA 타입 알칼라인 건전지를 이용한다.



(a) TDR센서 프루브(EC-5) (b) 데이터로거(Em5b)

그림 4.5 함수비 측정용 TDR센서

모관흡수력은 토양수분장력계를 이용하여 측정하였으며 그림 4.6와 같이 다공질 세라믹 파이프와 압력 센서로 구성된다. 다공질 세라믹 파이프는 그림 4.6 (a)와 같이 Soilmoisture사에서 제작된 Jet Fill Tensiometer와 압력 센서는 그림 4.6 (b)와 같이 ICT International Pty사

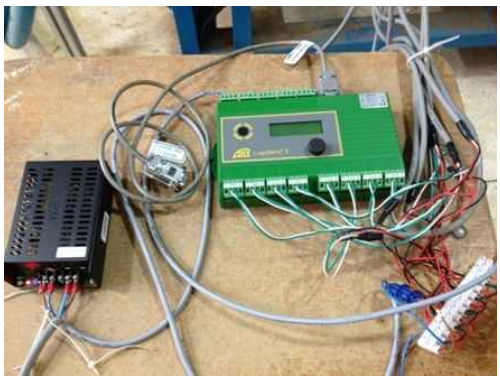
에서 제작된 Tensiometer Transducer를 이용하였다. Jet Fill Tensiometer는 다공질 세라믹 컵과 흙의 접촉부에서 물의 표면장력에 의해 부의 간극수압이 발생되고 이를 압력 센서가 측정하여 데이터로거에 자동으로 저장되게 된다. 압력 센서의 측정범위는 0~-100kPa이며, 분해능은 0.1kPa이며 정확도는 ±1.0%이다. 데이터로거는 그림 4.6 (c)와 같이 OTT hydrometric사에서 제작된 LogoSens를 이용하였으며 전압 측정방식이며 컴퓨터와의 통신은 RS 232, RS 485 시리얼포트를 지원하며 1MB의 저장용량을 가지고 있으며 총 12채널까지 지원이 가능하다.



(a) Jet Fill Tensiometer



(b) Transducer



(c) 데이터로거(LogoSens)

그림 4.6 토양수분장력계

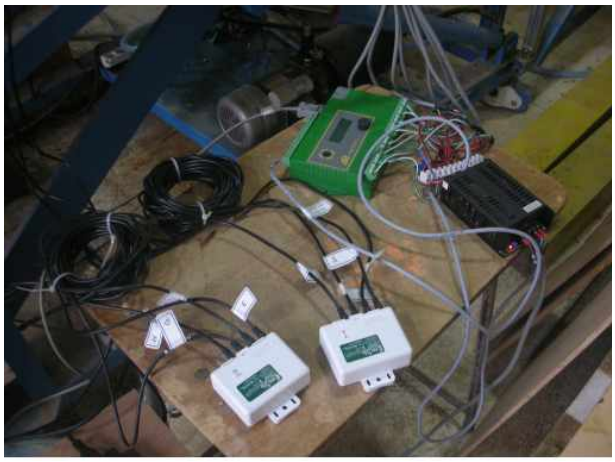
계측기는 모형사면을 축조하면서 그림 4.7 (a)와 같이 Jet Fill Tensiometer와 TDR프루브(EC-5)를 설치하였으며 그림 4.7 (b), (c)와 같이 모형사면을 축조한 뒤 각 센서와 데이터로거를 연결하였으며 그림 4.7 (d)와 같이 2단면에 각 4개소씩 총 8지점에서 함수비와 모관흡수력을 측정하였다.



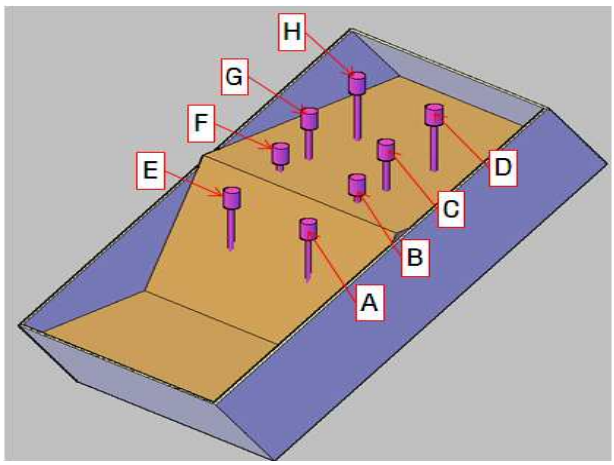
(a) 센서 설치



(b) 모관흡수력 센서 연결



(c) 데이터로거(Em5b, LogoSens)



(d) 센서 위치

그림 4.7 함수비 및 모관흡수력 센서 설치

인공강우로 인한 불포화 사면 안정 해석 및 설계 절차의 적합성 검증하기 위해 총 6회 실험을 수행하였으며 인공강우를 재현한 후 함수비와 모관흡수력을 측정하고 사면 파괴시에는 파괴면과 인장균열 등 파괴형상을 맵핑하였다. 그림 4.8은 실험장치의 인공강우 재현과정을 나타낸 것이다. 그림 4.8 (a)와 같이 노즐을 이용하여 인공강우를 재현하였으며 표면 유출과 세굴로 인한 토사 유실로 인한 영향을 제거하기 위해 모형사면의 상부($1m \times 1m = 1m^2$)에만 재현하였다. 그림 4.8 (b)는 인공강우 재현 전경을 나타낸 것이다.



(a) 강우 재현용 노즐 (b) 전 경

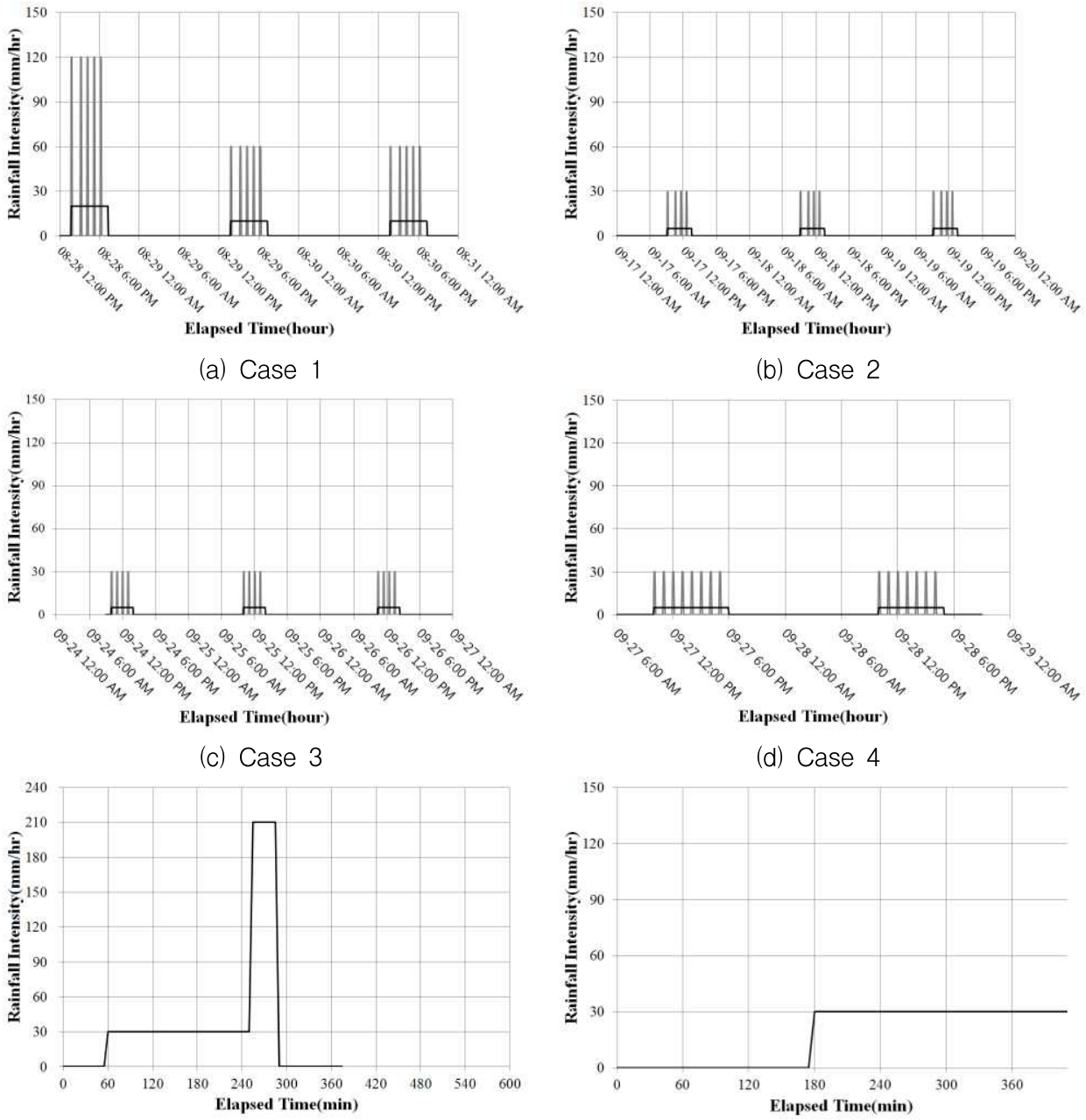
그림 4.8 실험장치의 인공강우 재현

실험 Case는 목적에 따라 크게 인공강우의 침투·배수에 따른 모형사면의 침투거동을 파악과 인공강우에 의한 모형사면의 파괴 및 안전율 변화 파악으로 나뉘며 각 실험 Case별 사면경사, 강우강도, 재현 및 침투시간, 반복횟수, 재현 일수 등은 표 4.2에 나타내었다. 또한 각 실험 Case별 시간 vs 강우강도 그래프는 그림 4.9과 같다.

Case 1은 그림 4.9 (a)와 같이 120mm/hr의 강우를 10분 재현한 후 50분 침투과정을 4회 재현하는 과정을 1일 경과 후 60mm/hr의 강우를 10분 재현한 후 50분 침투과정을 4회 재현하는 과정을 총 2일 반복하였다. Case 2와 Case 3은 그림 4.9 (b)와 (c)같이 30mm/hr의 강우를 10분 재현한 후 50분 침투과정을 4회 재현하는 과정을 총 3일 반복하였다. Case 4는 그림 4.9 (d)와 같이 30mm/hr의 강우를 10분 재현한 후 50분 침투과정을 8회 재현하고 1일 경과 후 동일한 강우를 7회 재현하였다. 인공강우에 의한 모형사면의 파괴 및 안전율 변화를 파악하기 위해 Case 5는 그림 4.9 (e)와 같이 30mm/hr의 강우를 180분 재현 후 강우강도를 210mm/hr로 증가시켜 사면의 붕괴가 발생될 때까지 실험을 수행하였다. Case 6은 사면경사를 70도로 증가시켜 그림 4.9 (f)와 같이 30mm/hr의 강우를 재현하여 붕괴가 발생될 때까지 실험을 수행하였다.

표 4.2 인공강우에 의한 모형사면의 실험조건

목 적	구 분	사면 경사	강우강도 (mm/hr)	재현 및 침투시간	반복 횟수	재현 일수	상대 다짐도
인공강우의 침투·배수에 따른 모형사면의 침투거동 파악	Case 1	50°	120	10분 재현 / 50분 침투	4	1	85%
			60	10분 재현 / 50분 침투	4	2	
	Case 2		30	10분 재현 / 50분 침투	4	3	
	Case 3		30	10분 재현 / 50분 침투	4	3	
	Case 4		30	10분 재현 / 50분 침투	8	2	
인공강우에 의한 모형사면의 파괴거동	Case 5	50°	30→210	180분 재현 강우강도 증가	-	-	
	Case 6	70°	30	-	-	-	



(a) Case 1 (b) Case 2

(c) Case 3 (d) Case 4

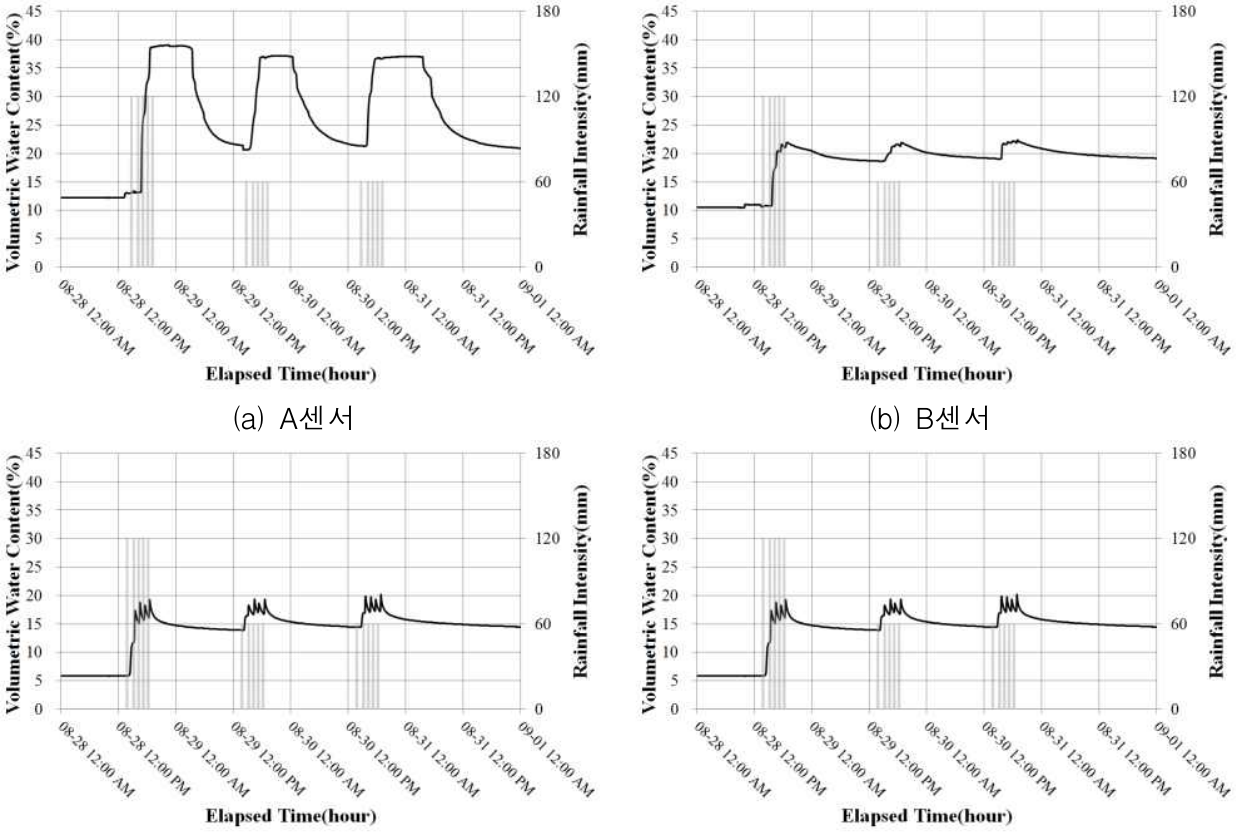
(e) Case 5 (f) Case 6

그림 4.9 실험 Case별 강우강도 vs 시간 그래프

4.3 실험결과

(1) Case 1

그림 4.10는 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅰ단면의 센서별 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 함수비는 12.25%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 38.94%에서 최소 20.92%로 변화되었으며 변화폭은 18.02%로 나타났다. B센서의 초기 함수비는 10.55%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 21.94%에서 최소 18.71%로 변화되었으며 변화폭은 3.23%로 나타났다. C센서의 초기 함수비는 5.87%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 20.16%에서 최소 13.87%로 변화되었으며 변화폭은 6.29%로 나타났다. D센서의 초기 함수비는 8.51%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 31.89%에서 최소 18.00%로 변화되었으며 변화폭은 13.89%로 나타났다.



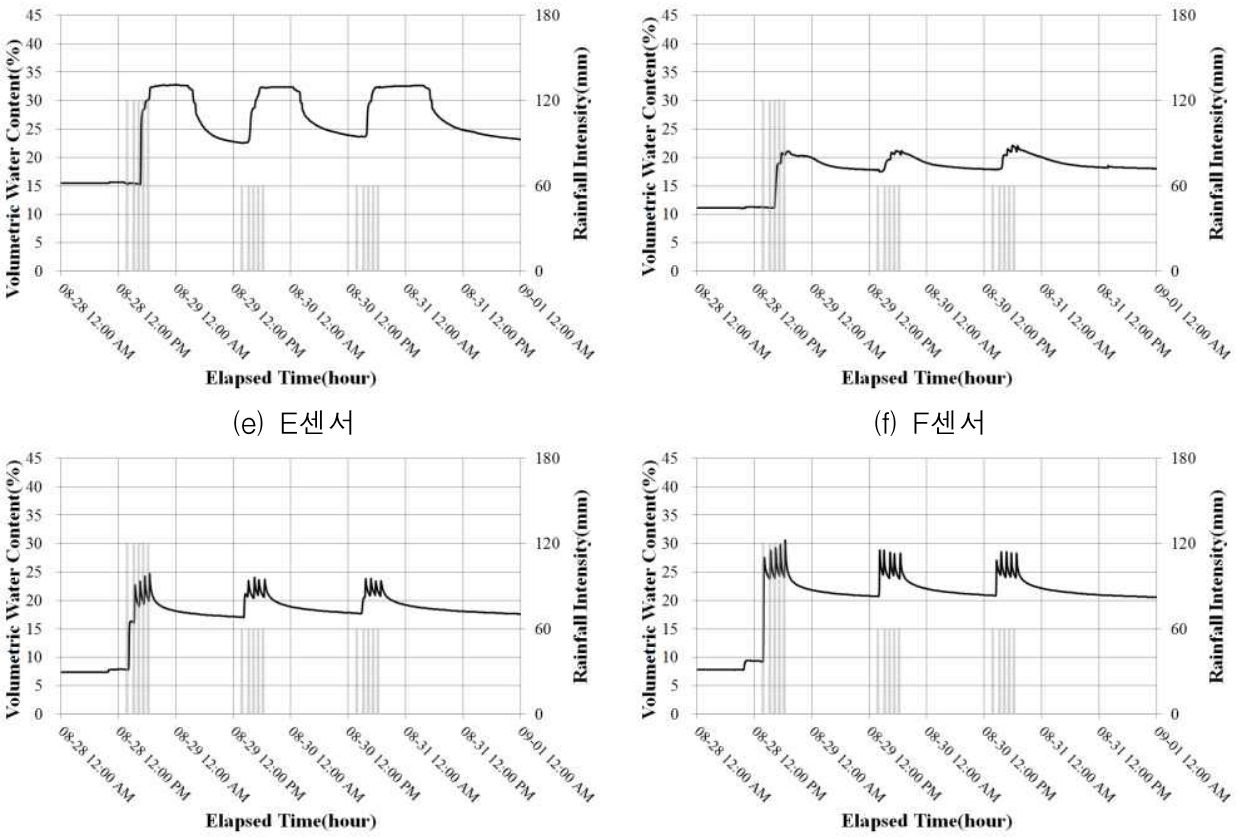
(a) A센서 (b) B센서

(c) C센서 (d) D센서

그림 4.10 센서별 함수비 변화(Case 1, Ⅰ단면)

그림 4.11은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 센서별 함수비 측정 결과를 나타낸 것

이다. E센서의 초기 함수비는 15.48%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 32.34%에서 최소 22.71%로 변화되었으며 변화폭은 9.63%로 나타났다. F센서의 초기 함수비는 11.15%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 20.44%에서 최소 17.52%로 변화되었으며 변화폭은 2.92%로 나타났다. G센서의 초기 함수비는 7.41%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 24.66%에서 최소 17.10%로 변화되었으며 변화폭은 7.56%로 나타났다. H센서의 초기 함수비는 7.83%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 30.53%에서 최소 20.75%로 변화되었으며 변화폭은 9.78%로 나타났다.



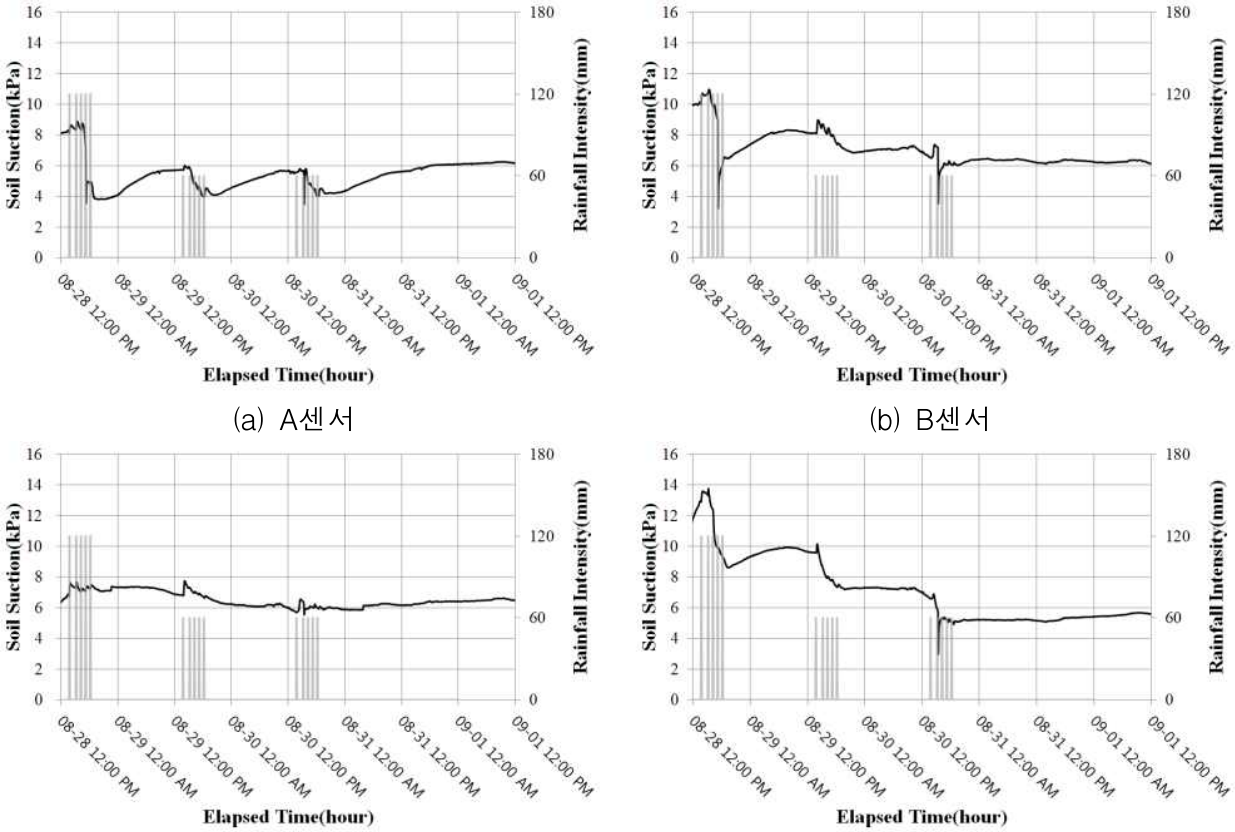
(e) E센서 (f) F센서

(g) G센서 (h) H센서

그림 4.11 센서별 함수비 변화(Case 1, II단면)

그림 4.12은 인공강우의 침투·배수에 따른 II단면의 센서별 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 모관흡수력은 8.82kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 3.83kPa에서 최대 6.01kPa로 변화되었으며 변화폭은 2.18kPa로 나타났다. B센서의 초기 모관흡수력은 10.37kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.57kPa에서 최대 8.96kPa로 변화되었으며 변화폭은 3.39kPa로 나타났다. C센서의 초기 모관흡수력은 6.62kPa로 나타났으며

인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.55kPa에서 최대 7.75kPa로 변화되었으며 모관흡수력의 변화과정이 명확히 나타나지 않았다. D센서의 초기 모관흡수력은 12.20kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 감소와 증가를 반복하였으며 최종 5.21kPa로 나타났다.

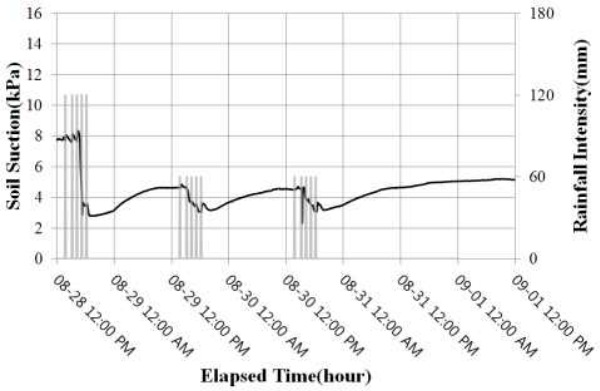


(a) A센서 (b) B센서

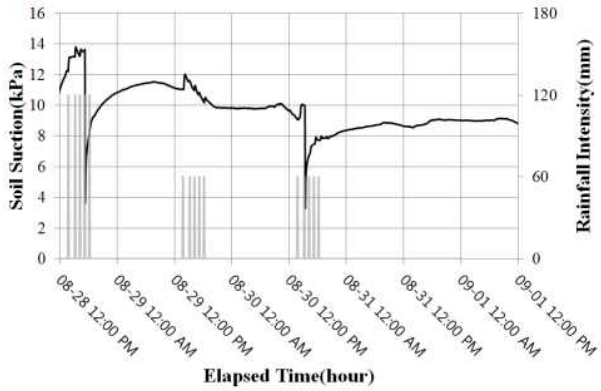
(c) C센서 (d) D센서

그림 4.12 센서별 모관흡수력 변화(Case 1, Ⅰ단면)

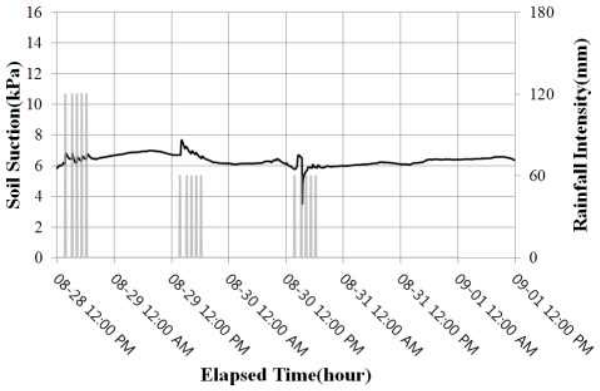
그림 4.13는 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 센서별 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 모관흡수력은 7.75kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 2.80kPa에서 최대 4.69kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.89kPa로 나타났다. F센서의 초기 모관흡수력은 13.15kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인한 거동이 명확히 나타나지 않았으며 최종 9.03kPa로 나타났다. G센서의 초기 모관흡수력은 5.86kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인한 거동이 명확히 나타나지 않았으며 최종 6.44kPa로 나타났다. G센서의 초기 모관흡수력은 11.6kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인한 거동이 명확히 나타나지 않았으며 최종 7.84kPa로 나타났다.



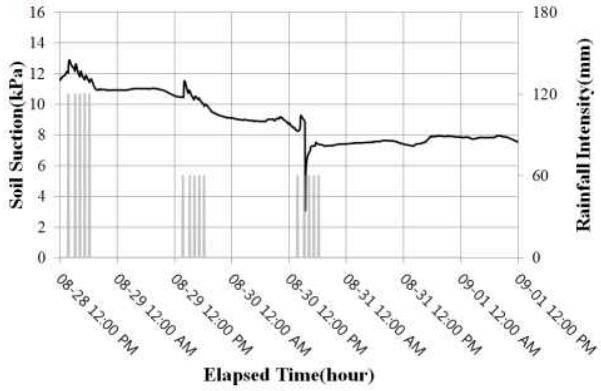
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서

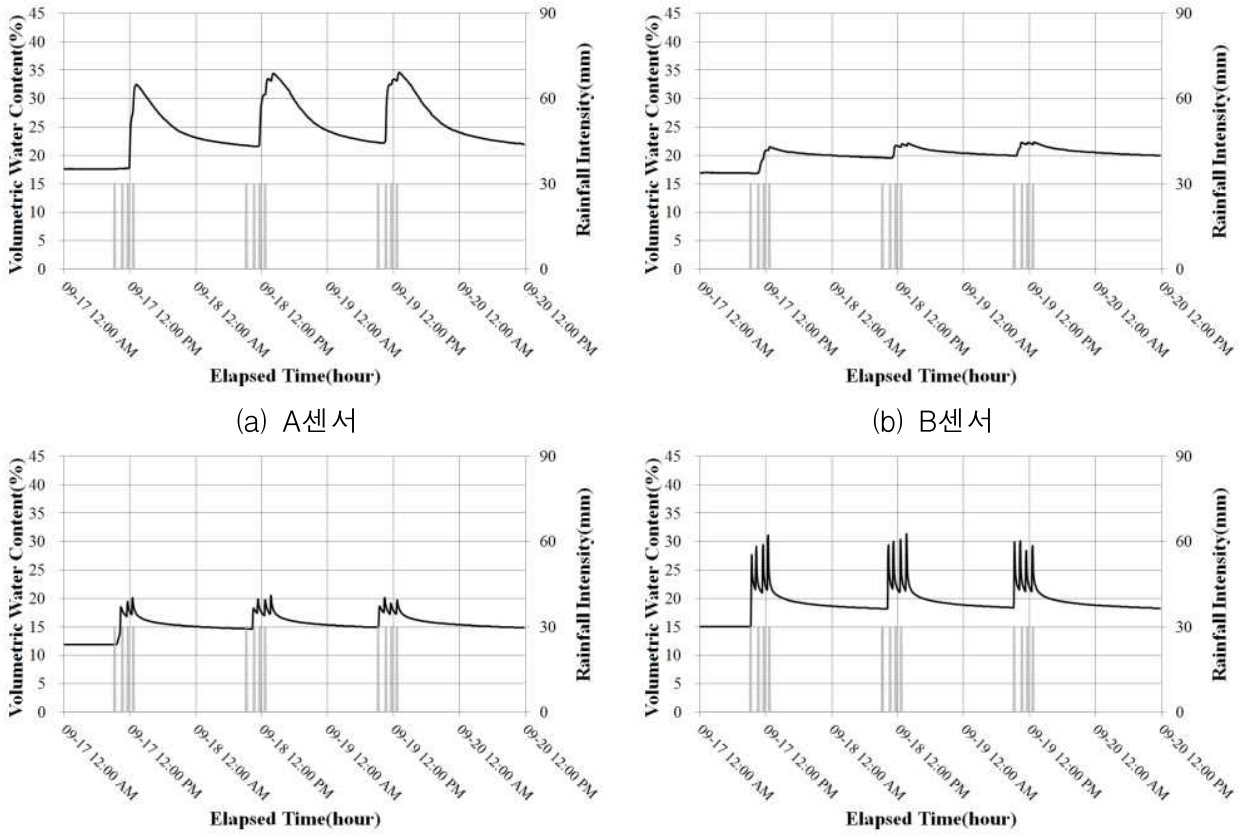


(h) H센서

그림 4.13 센서별 모관흡수력 변화(Case 1, II단면)

(2) Case 2

그림 4.14은 인공강우의 침투·배수에 따른 I단면의 센서별 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 함수비는 17.69%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 32.31%에서 최소 21.60%로 변화되었으며 변화폭은 10.71%로 나타났다. B센서의 초기 함수비는 17.01%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 21.51%에서 최소 19.56%로 변화되었으며 변화폭은 1.95%로 나타났다. C센서의 초기 함수비는 11.91%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 19.64%에서 최소 14.63%로 변화되었으며 변화폭은 5.01%로 나타났다. D센서의 초기 함수비는 15.05%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 30.61%에서 최소 18.20%로 변화되었으며 변화폭은 12.41%로 나타났다. 결과를 정리하면 다음 표 4.3과 같다.



(a) A센서 (b) B센서

(c) C센서 (d) D센서

그림 4.14 센서별 함수비 변화(Case 2, Ⅰ단면)

표 4.3 센서별 함수비 변화(Case 2, Ⅰ단면)

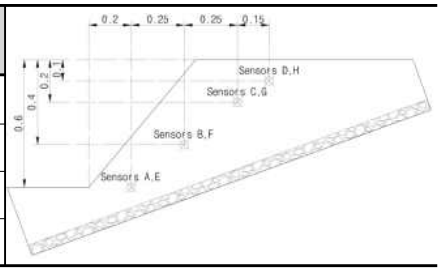
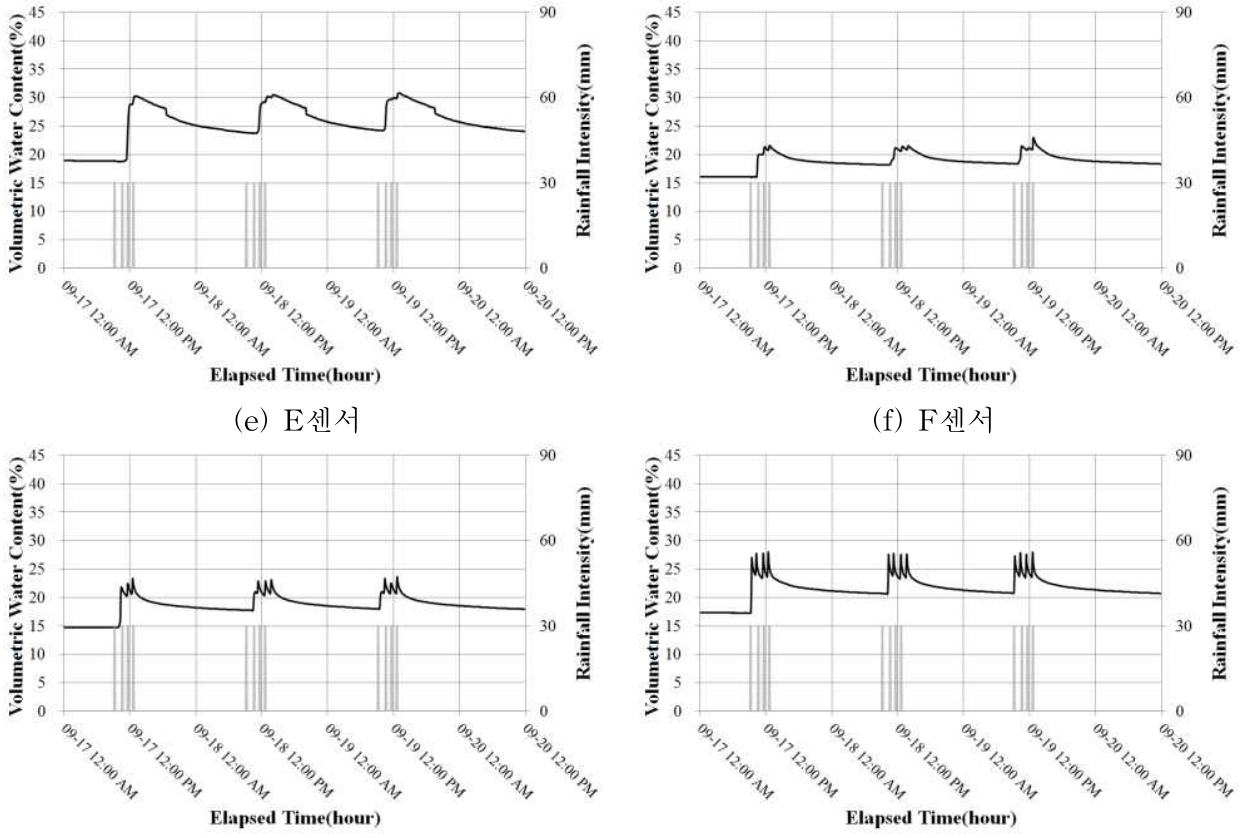
구 분 / 함수비(%)		A센서	B센서	C센서	D센서	
초기값		17.69	17.01	11.91	15.05	
침투 및 배수	최대값	32.31	21.51	19.64	30.61	
	최소값	21.60	19.56	14.63	18.20	
	변화량	10.71	1.95	5.01	12.41	

그림 4.15는 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 센서별 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 함수비는 18.96%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 29.76%에서 최소 23.73%로 변화되었으며 변화폭은 6.03%로 나타났다. F센서의 초기 함수비는 16.08%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 22.96%에서 최소 18.20%로 변화되었으며 변화폭은 4.76%로 나타났다. G센서의 초기 함수비는 14.71%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 23.30%에서 최소 17.78%로 변화되었으며 변화폭은 5.52%로 나타났다.

H센서의 초기 함수비는 17.35%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 27.97%에서 최소 20.67%로 변화되었으며 변화폭은 7.3%로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.4와 같다.



(e) E센서 (f) F센서

(g) G센서 (h) H센서

그림 4.15 센서별 함수비 변화(Case 2, II단면)

표 4.4 센서별 함수비 변화(Case 2, II단면)

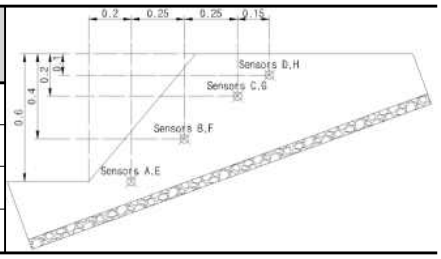
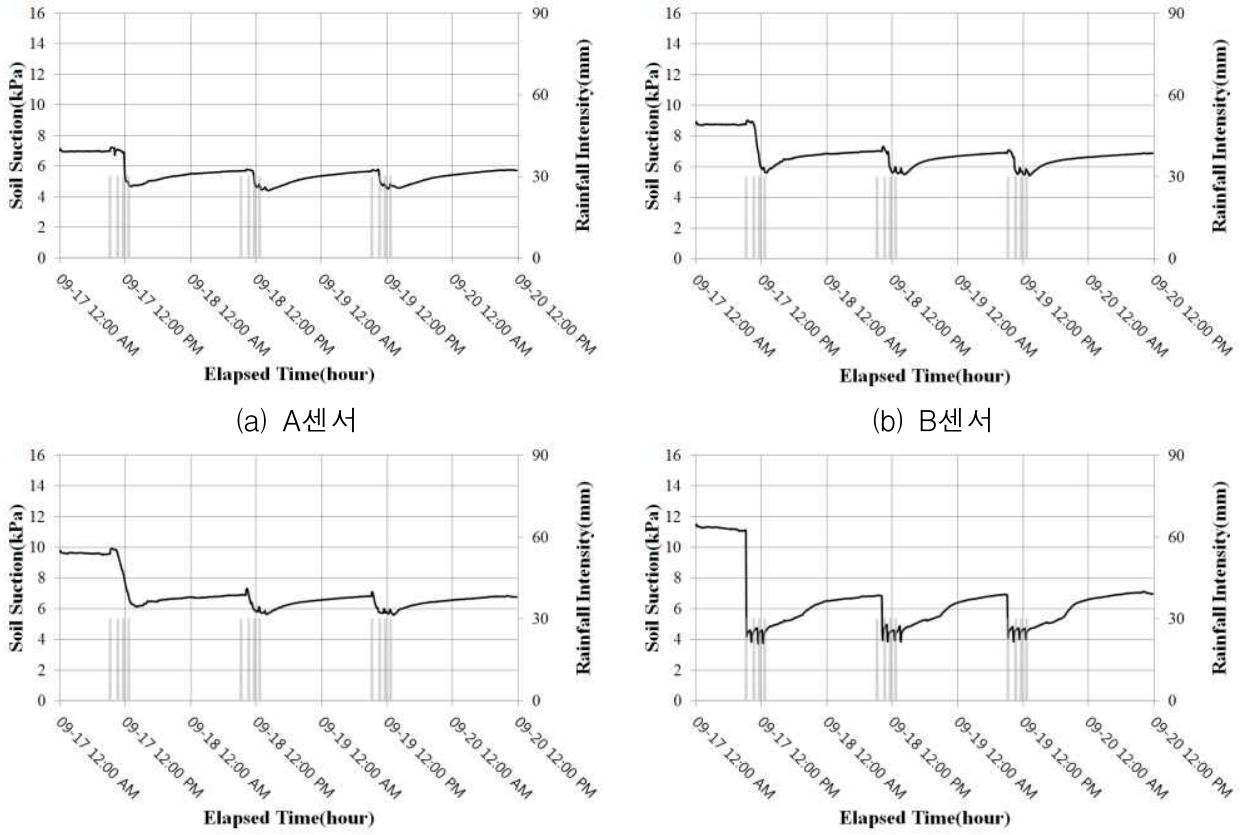
구 분 / 함수비(%)		E센서	F센서	G센서	H센서	
초기값		18.96	16.08	14.71	17.35	
침투 및 배수	최대값	29.76	22.96	23.30	27.97	
	최소값	23.73	18.20	17.78	20.67	
	변화량	6.03	4.76	5.52	7.30	

그림 4.16는 인공강우의 침투·배수에 따른 I단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 모관흡수력은 7.21kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 4.41kPa에서 최대 5.79kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.38kPa로 나타났다. B센서의 초기 모관흡수력은

9.02kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.65kPa에서 최대 7.31kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.66kPa로 나타났다. C센서의 초기 모관흡수력은 9.89kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.64kPa에서 최대 7.08kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.44kPa로 나타났다. D센서의 초기 모관흡수력은 11.46kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 3.74kPa에서 최대 6.87kPa로 변화되었으며 변화폭은 3.13kPa로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.5와 같다.



(a) A센서 (b) B센서

(c) C센서 (d) D센서

그림 4.16 센서별 모관흡수력 변화(Case 2, Ⅰ단면)

표 4.5 센서별 모관흡수력 변화(Case 2, Ⅰ단면)

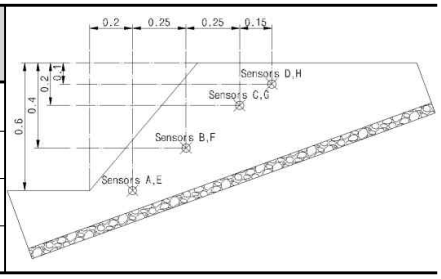
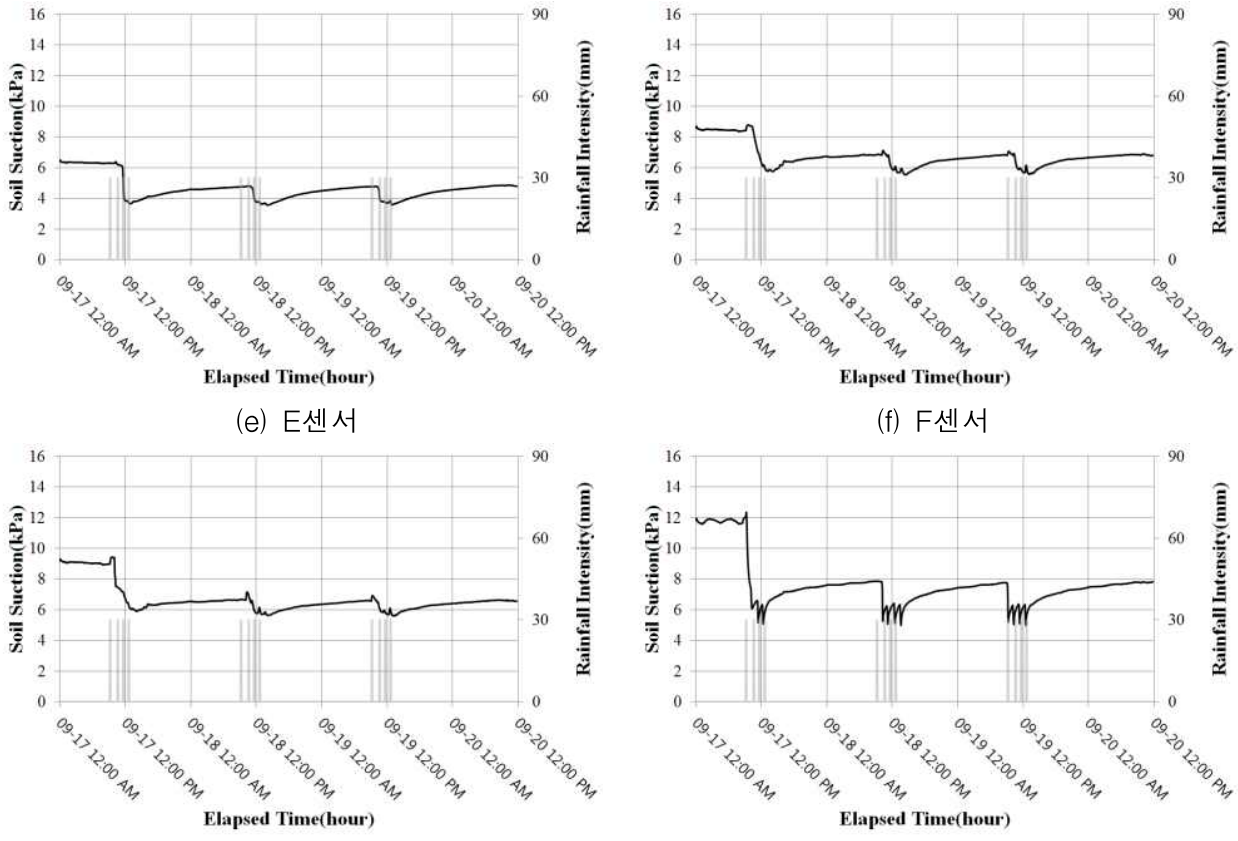
구 분 / 모관흡수력(kPa)		A센서	B센서	C센서	D센서	
초기값		7.21	9.02	9.89	11.46	
침투 및 배수	최대값	5.79	7.31	7.08	6.87	
	최소값	4.41	5.65	5.64	3.74	
	변화량	1.38	1.66	1.44	3.13	

그림 4.17은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 모관흡수력은 6.37kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 3.65kPa에서 최대 4.80kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.15kPa로 나타났다. F센서의 초기 모관흡수력은 8.79kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.87kPa에서 최대 7.1kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.23kPa로 나타났다. G센서의 초기 모관흡수력은 9.42kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.77kPa에서 최대 6.56kPa로 변화되었으며 변화폭은 0.79kPa로 나타났다. H센서의 초기 모관흡수력은 12.35kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.1kPa에서 최대 7.87kPa로 변화되었으며 변화폭은 2.77kPa로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.6과 같다.



(e) E센서 (f) F센서

(g) G센서 (h) H센서

그림 4.17 센서별 모관흡수력 변화(Case 2, Ⅱ단면)

표 4.6 센서별 모관흡수력 변화(Case 2, II단면)

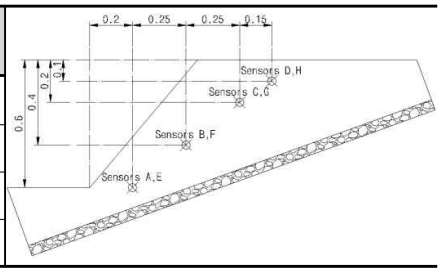
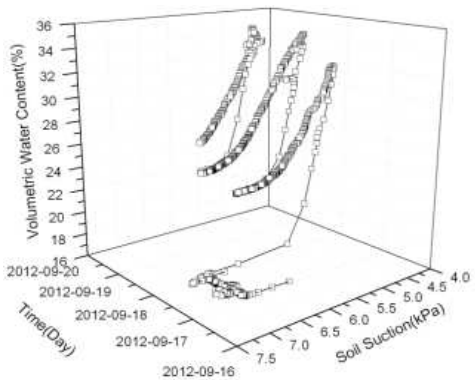
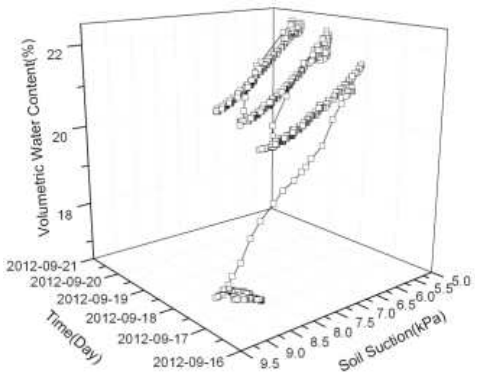
구 분 / 모관흡수력(kPa)		E센서	F센서	G센서	H센서	
초기값		6.37	8.79	9.42	12.35	
침투 및 배수	최대값	4.80	7.10	6.56	7.87	
	최소값	3.65	5.87	5.77	5.10	
	변화량	1.15	1.23	0.79	2.77	

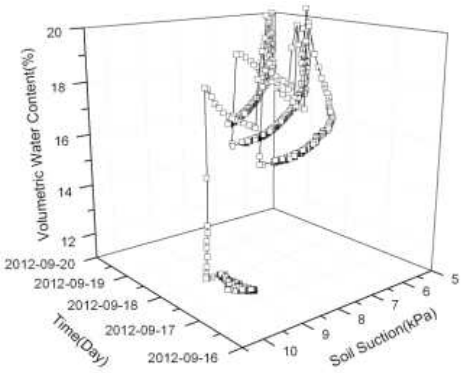
그림 4.18은 인공강우의 침투·배수에 따른 센서별 3차원 그래프를 나타낸 것이다.



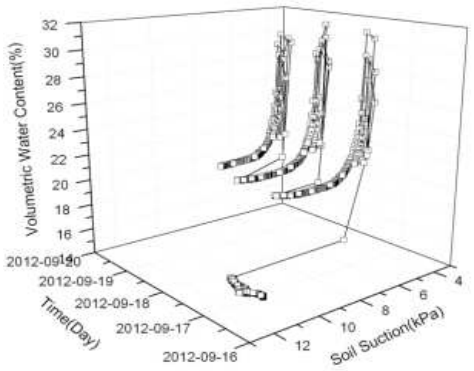
(a) A센서



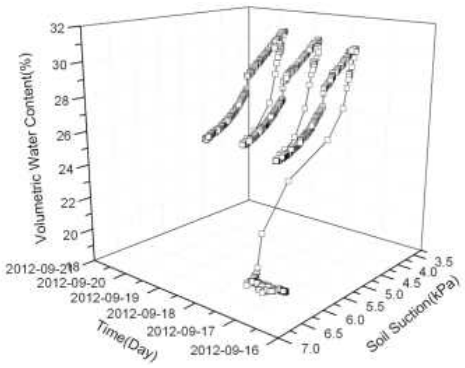
(b) B센서



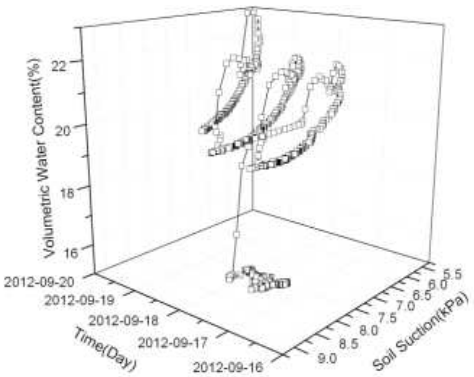
(c) C센서



(d) D센서

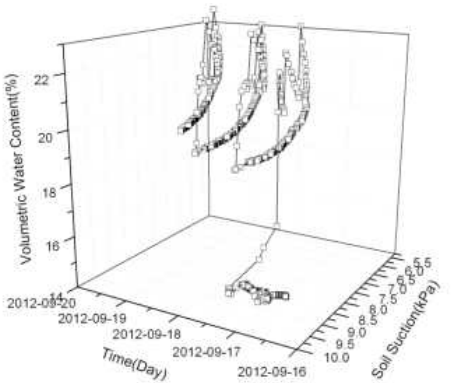


(e) E센서

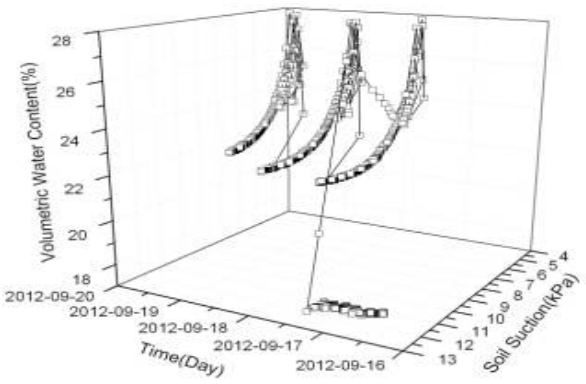


(f) F센서

그림 4.18 센서별 3차원 그래프(Case 2) (계속)



(g) G센서

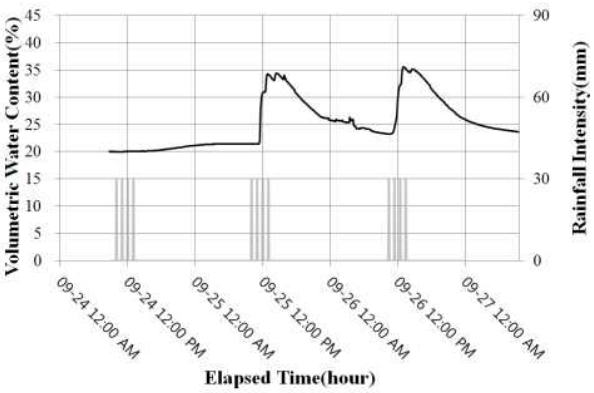


(h) H센서

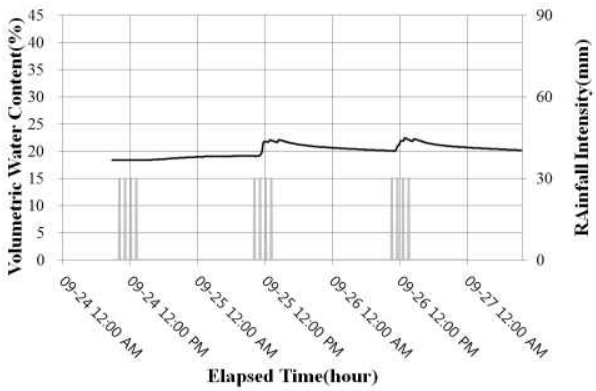
그림 4.18 센서별 3차원 그래프(Case 2)

(3) Case 3

그림 4.19은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅰ단면의 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 함수비는 19.98%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 35.54%에서 최소 23.30%로 변화되었으며 변화폭은 12.24%로 나타났다. B센서의 초기 함수비는 18.37%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 22.11%에서 최소 19.30%로 변화되었으며 변화폭은 2.81%로 나타났다. C센서의 초기 함수비는 13.44%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 19.73%에서 최소 14.63%로 변화되었으며 변화폭은 5.1%로 나타났다. D센서의 초기 함수비는 16.92%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 29.59%에서 최소 18.37%로 변화되었으며 변화폭은 11.22%로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.7과 같다.

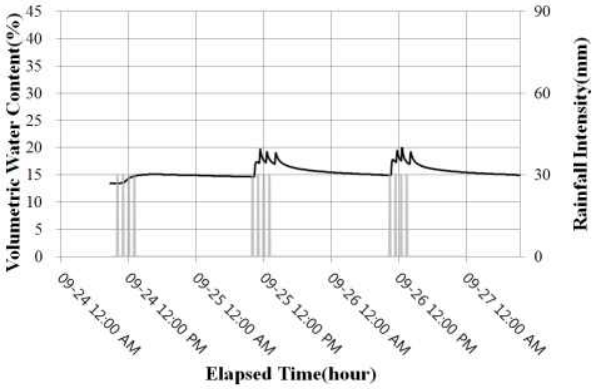


(a) A센서

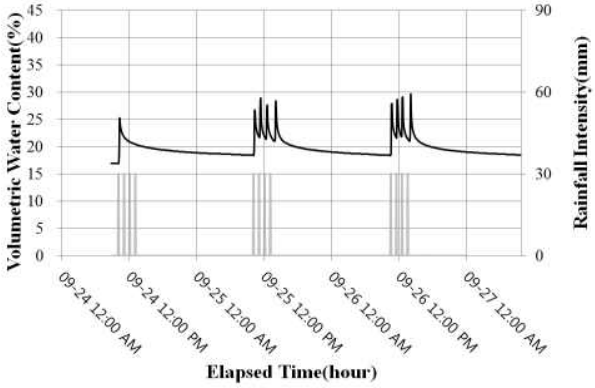


(b) B센서

그림 4.19 센서별 함수비 변화(Case 3, Ⅰ단면) (계속)



(c) C센서



(d) D센서

그림 4.19 센서별 함수비 변화(Case 3, Ⅰ단면)

표 4.7 센서별 함수비 변화(Case 3, Ⅰ단면)

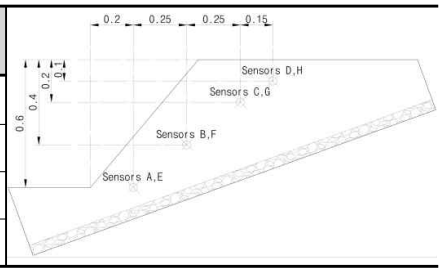
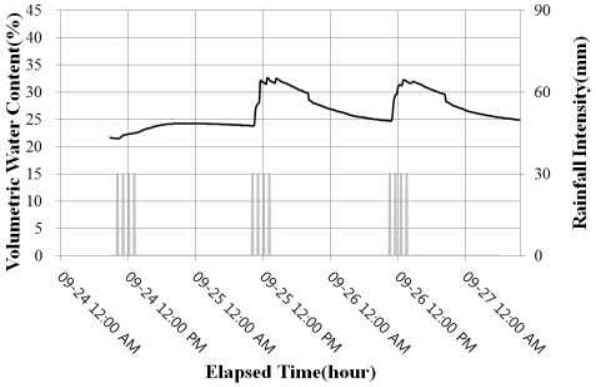
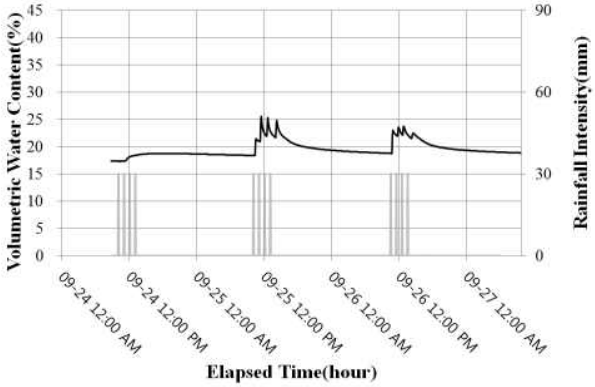
구 분 / 함수비(%)		A센서	B센서	C센서	D센서	
초기값		19.88	18.37	13.44	16.92	
침투 및 배수	최대값	35.54	22.11	19.37	29.59	
	최소값	23.30	19.30	14.63	18.37	
	변화량	12.24	2.81	5.10	11.22	

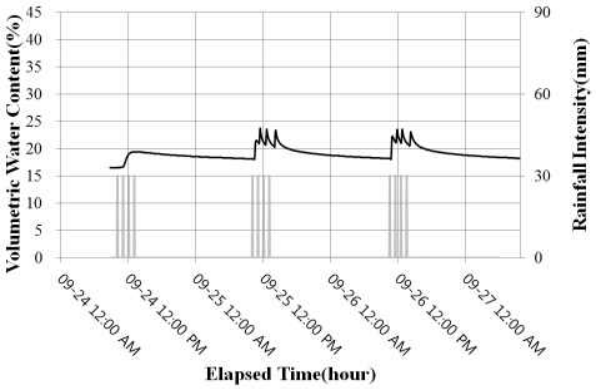
그림 4.20는 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 함수비는 21.68%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 32.57%에서 최소 24.66%로 변화되었으며 변화폭은 7.91%로 나타났다. F센서의 초기 함수비는 17.35%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 25.51%에서 최소 18.37%로 변화되었으며 변화폭은 7.14%로 나타났다. G센서의 초기 함수비는 16.50%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 23.73%에서 최소 18.03%로 변화되었으며 변화폭은 5.7%로 나타났다. H센서의 초기 함수비는 19.39%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 28.23%에서 최소 20.75%로 변화되었으며 변화폭은 7.48%로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.8과 같다.



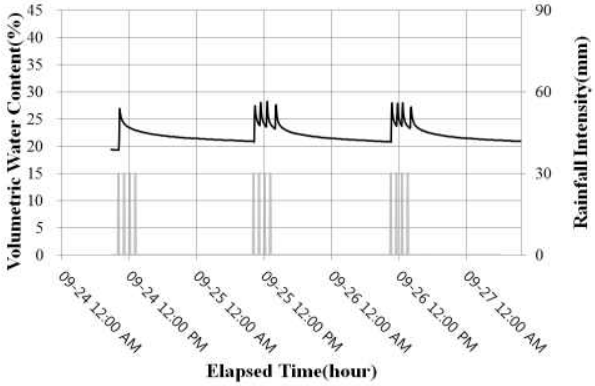
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



(h) H센서

그림 4.20 센서별 함수비 변화(Case 3, II단면)

표 4.8 센서별 함수비 변화(Case 3, II단면)

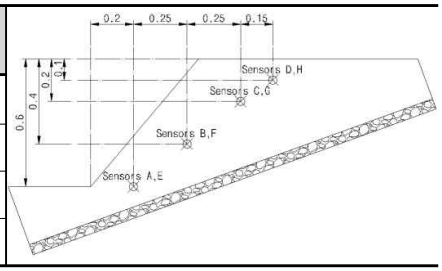
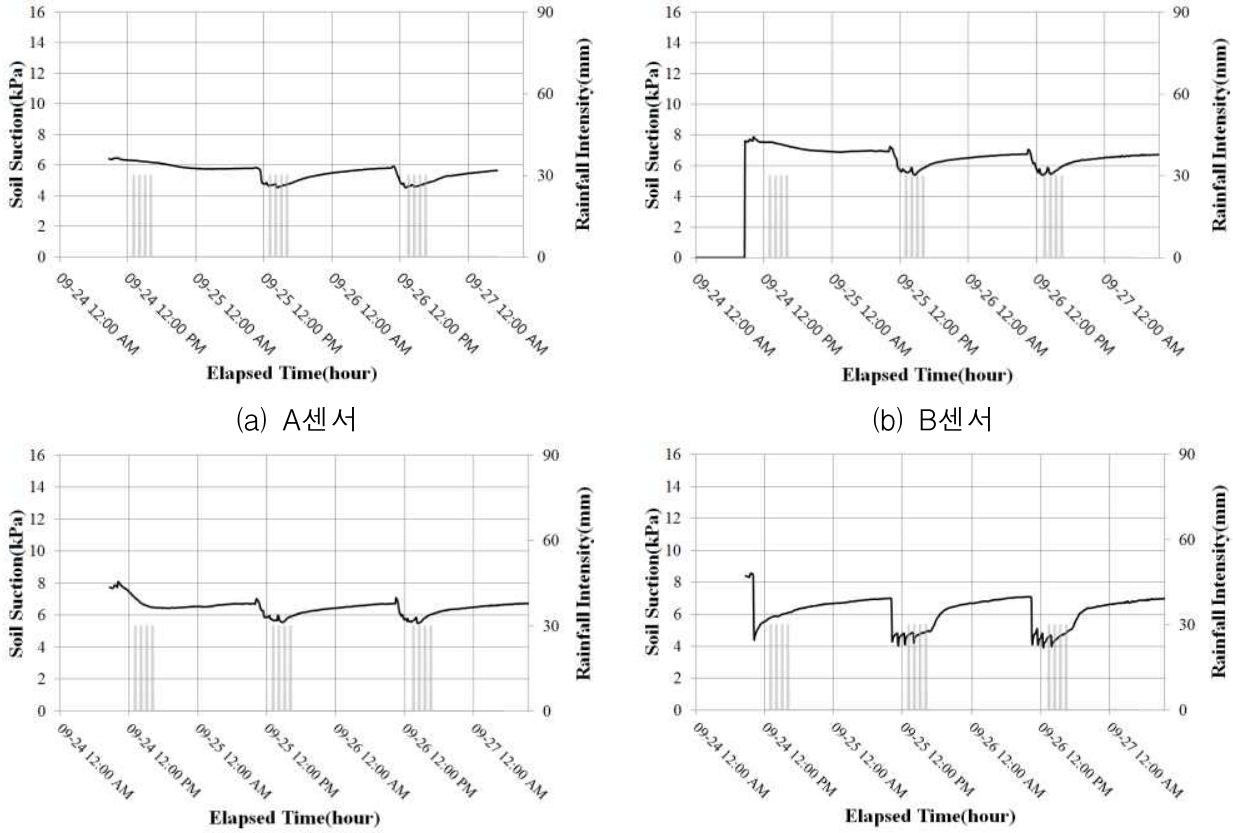
구 분 / 함수비(%)		E센서	F센서	G센서	H센서	
초기값		21.68	17.35	16.50	19.39	
침투 및 배수	최대값	32.57	25.51	23.73	28.23	
	최소값	24.66	18.37	18.03	20.75	
	변화량	7.91	7.14	5.7	7.48	

그림 4.21은 인공강우의 침투·배수에 따른 I 단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 모관흡수력은 6.46kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 4.61kPa에서 최대 5.93kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.32kPa로 나타났다. B센서의 초기 모관흡수력은 7.79kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.39kPa에서 최대 6.81kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.42kPa로 나타났다. C센서의 초기 모관흡수력은 8.0kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.69kPa에서 최대 7.03kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.34kPa로 나

타났다. D센서의 초기 모관흡수력은 8.57kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 4.20kPa에서 최대 7.08kPa로 변화되었으며 변화폭은 2.88kPa로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.9와 같다.



(a) A센서 (b) B센서

(c) C센서 (d) D센서

그림 4.21 센서별 모관흡수력 변화(Case 3, Ⅰ단면)

표 4.9 센서별 모관흡수력 변화(Case 3, Ⅰ단면)

구 분 / 모관흡수력(kPa)		A센서	B센서	C센서	D센서
초기값		6.46	7.79	8.0	8.57
침투 및 배수	최대값	5.93	6.81	7.03	1.08
	최소값	4.61	5.39	5.69	4.20
	변화량	1.32	1.42	1.34	2.88

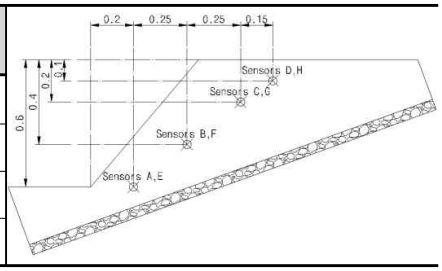
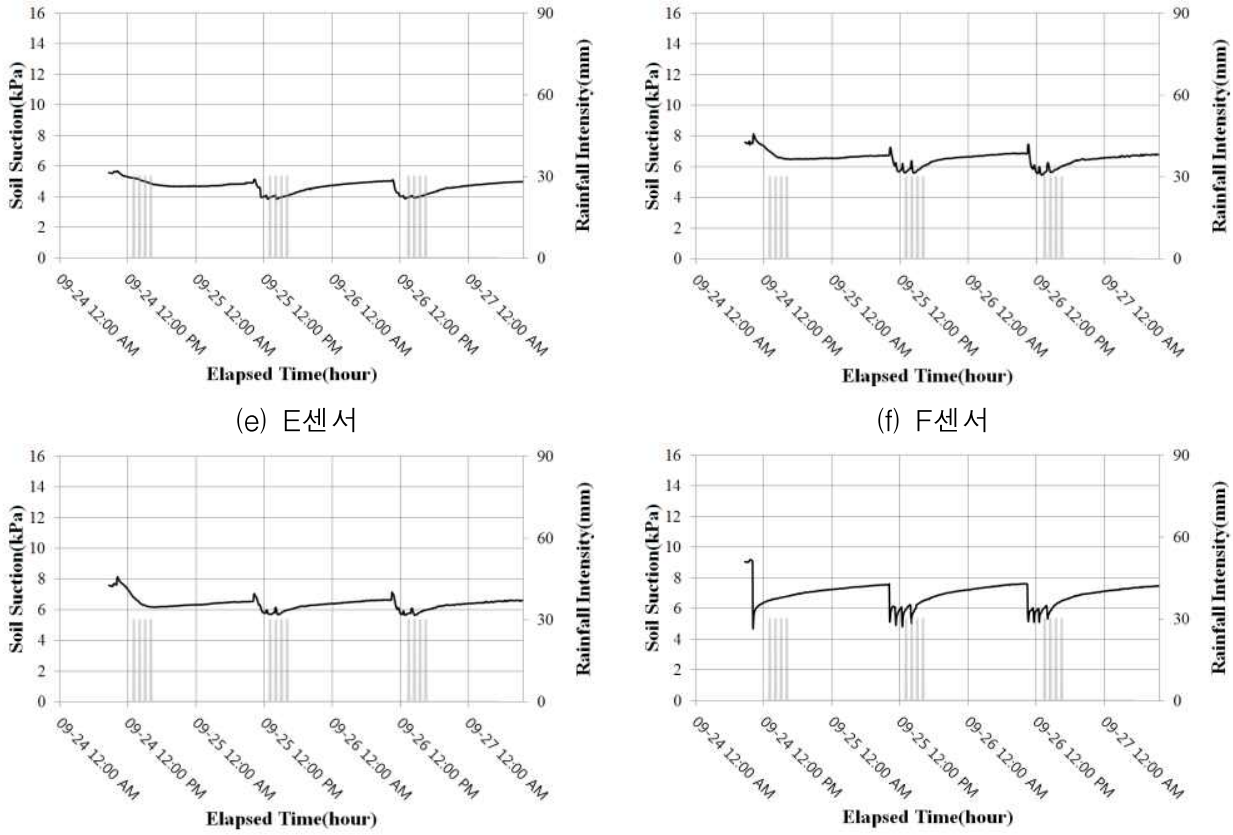


그림 4.22은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 모관흡수력은 5.66kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 3.84kPa에서 최대 5.06kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.22kPa로 나타났다. F센서의 초기 모관흡수력은

8.13kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.59kPa에서 최대 6.92kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.33kPa로 나타났다. G센서의 초기 모관흡수력은 8.14kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.67kPa에서 최대 7.14kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.47kPa로 나타났다. H센서의 초기 모관흡수력은 9.11kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 4.83kPa에서 최대 7.62kPa로 변화되었으며 변화폭은 2.79kPa로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.10과 같다.



(e) E센서 (f) F센서

(g) G센서 (h) H센서

그림 4.22 센서별 모관흡수력 변화(Case 3, II단면)

표 4.10 센서별 모관흡수력 변화(Case 3, II단면)

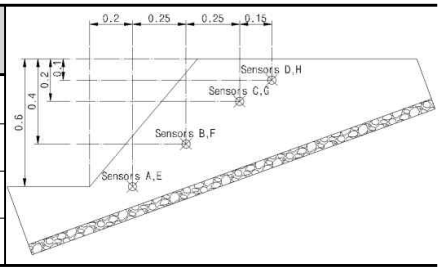
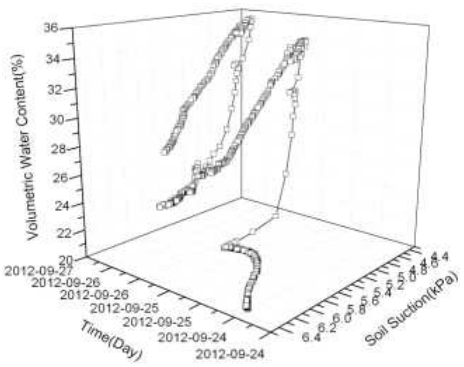
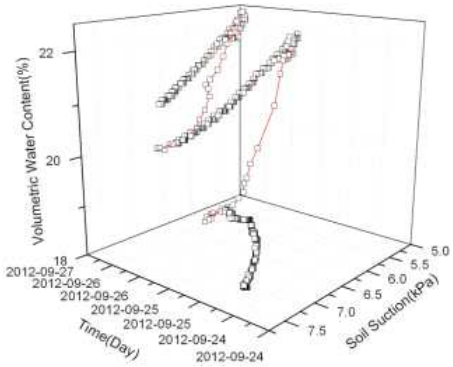
구분 / 모관흡수력(kPa)		E센서	F센서	G센서	H센서	
초기값		5.66	8.13	8.14	9.11	
침투 및 배수	최대값	5.06	6.92	7.14	7.62	
	최소값	3.84	5.59	5.67	7.62	
	변화량	1.22	1.33	1.47	2.79	

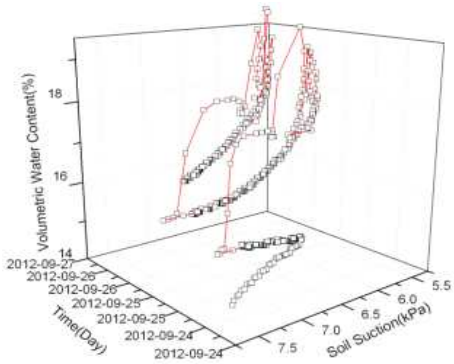
그림 4.23는 인공강우의 침투·배수에 따른 센서별 3차원 그래프를 나타낸 것이다.



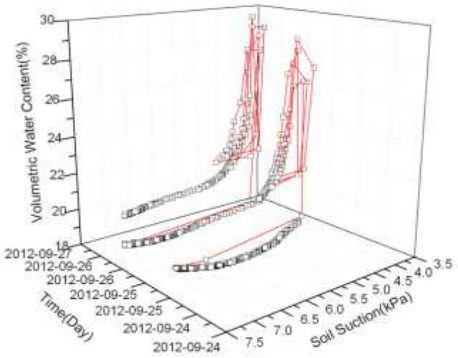
(a) A센서



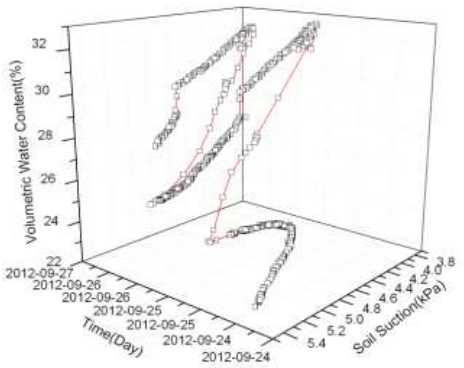
(b) B센서



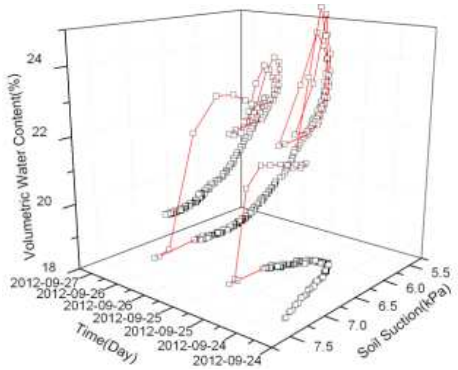
(c) C센서



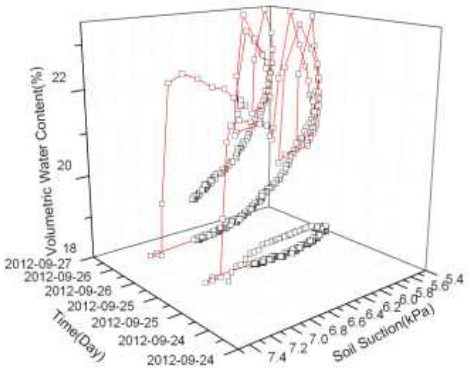
(d) D센서



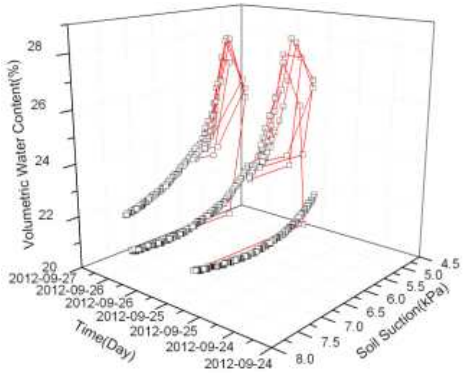
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서

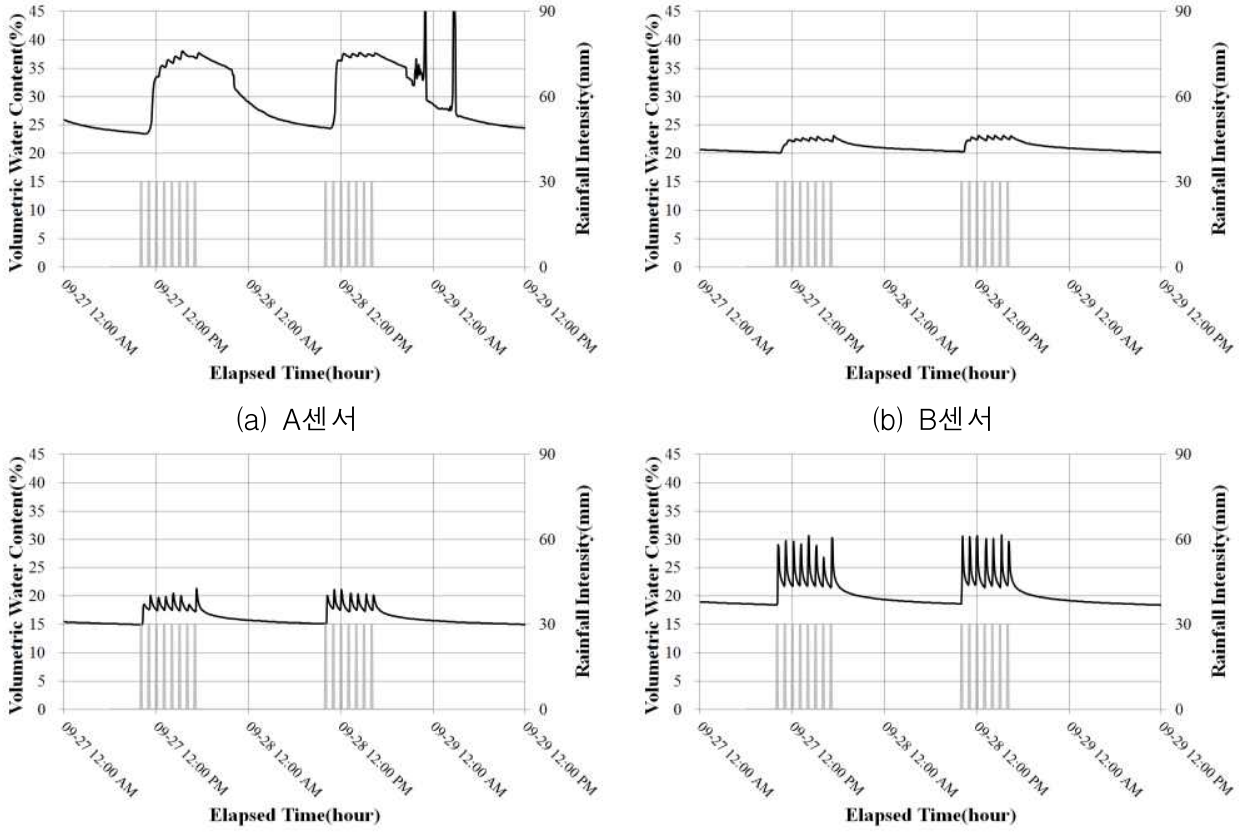


(h) H센서

그림 4.23 센서별 3차원 그래프(Case 3)

(4) Case 4

그림 4.24은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅰ단면의 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. A 센서의 초기 함수비는 25.94%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 37.92%에서 최소 24.40%로 변화되었으며 변화폭은 13.52%로 나타났다. B센서의 초기 함수비는 20.67%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 22.88%에서 최소 20.33%로 변화되었으며 변화폭은 2.55%로 나타났다. C센서의 초기 함수비는 15.48%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 21.26%에서 최소 15.14%로 변화되었으며 변화폭은 6.12%로 나타났다. D센서의 초기 함수비는 18.96%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 30.61%에서 최소 18.63%로 변화되었으며 변화폭은 11.98%로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.11과 같다.



(a) A센서 (b) B센서

(c) C센서 (d) D센서

그림 4.24 센서별 함수비 변화(Case 4, Ⅰ단면)

표 4.11 센서별 함수비 변화(Case 4, Ⅰ단면)

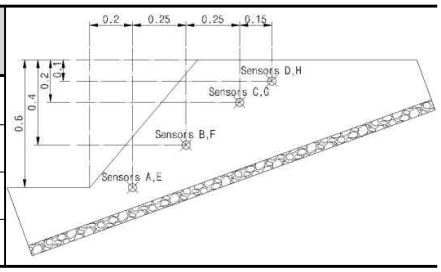
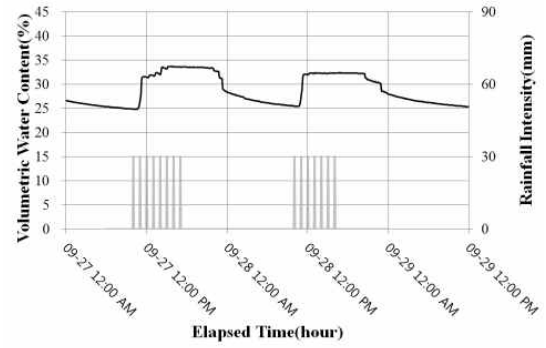
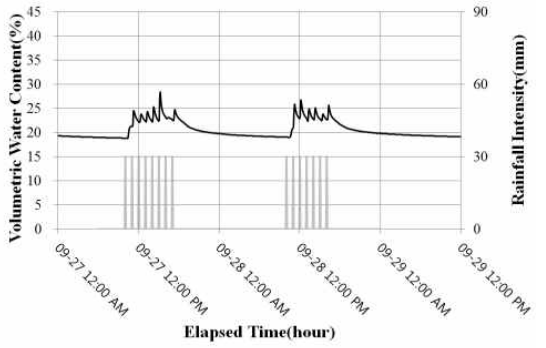
구 분 / 함수비(%)		A센서	B센서	C센서	D센서	
초기값		25.94	20.67	15.48	18.96	
침투 및 배수	최대값	37.92	22.88	21.26	30.61	
	최소값	24.40	20.33	15.14	18.63	
	변화량	13.52	2.55	6.12	11.98	

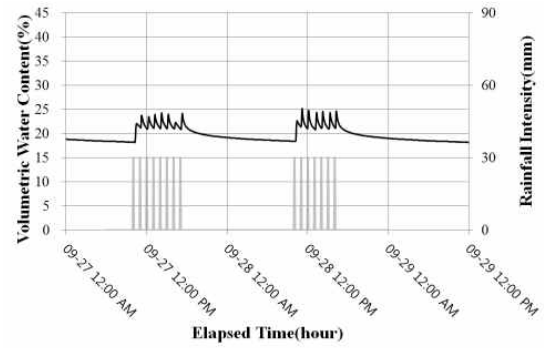
그림 4.25는 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 함수비는 26.61%로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 33.59%에서 최소 25.42%로 변화되었으며 변화폭은 8.17%로 나타났다. F센서의 초기 함수비는 19.30%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 28.40%에서 최소 19.30%로 변화되었으며 변화폭은 9.1%로 나타났다. G센서의 초기 함수비는 18.80%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 25.08%에서 최소 18.37%로 변화되었으며 변화폭은 6.71%로 나타났다. H센서의 초기 함수비는 21.43%로 나타났으며, 인공강우의 침투·배수로 인해 최대 28.91%에서 최소 21.01%로 변화되었으며 변화폭은 7.9%로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.12와 같다.



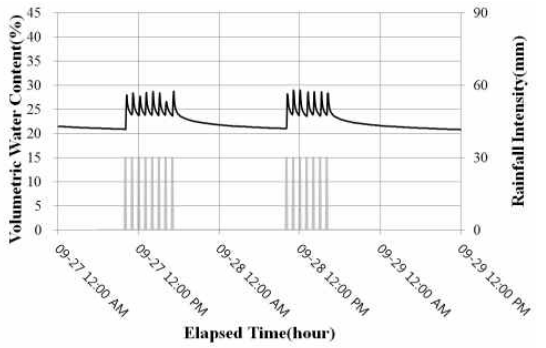
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



(h) H센서

그림 4.25 센서별 함수비 변화(Case 4, Ⅱ단면)

표 4.12 센서별 함수비 변화(Case 4, II단면)

구 분 / 함수비(%)		E센서	F센서	G센서	H센서
초기값		26.61	19.30	18.80	21.43
침투 및 배수	최대값	33.59	28.40	25.08	28.91
	최소값	25.42	19.30	18.37	21.01
	변화량	8.17	9.10	6.71	7.90

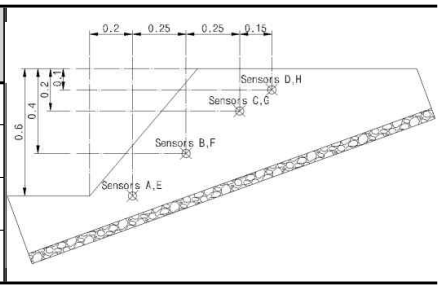
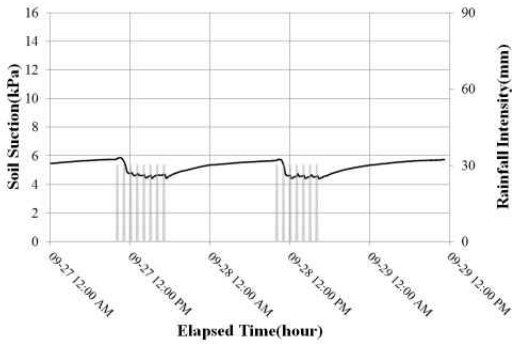
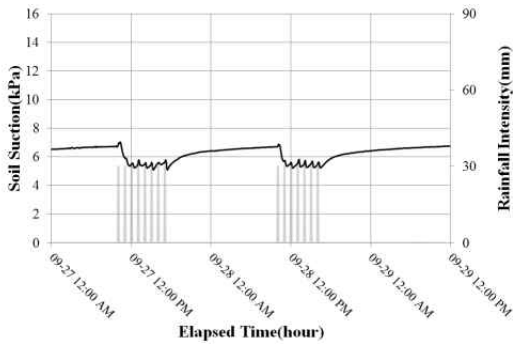


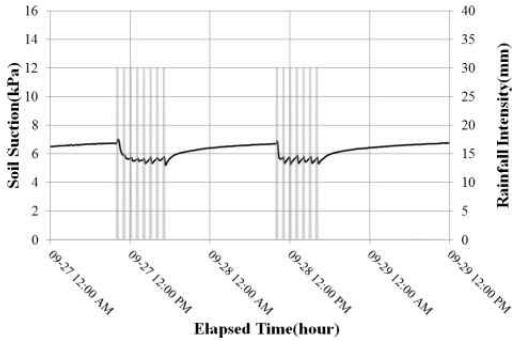
그림 4.26는 인공강우의 침투·배수에 따른 I 단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 모관흡수력은 5.86kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 4.48kPa에서 최대 5.74kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.26kPa로 나타났다. B센서의 초기 모관흡수력은 7.03kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.09kPa에서 최대 6.70kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.61kPa로 나타났다. C센서의 초기 모관흡수력은 7.01kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.21kPa에서 최대 6.9kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.69kPa로 나타났다. D센서의 초기 모관흡수력은 7.01kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 3.70kPa에서 최대 6.90kPa로 변화되었으며 변화폭은 3.20kPa로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.13과 같다.



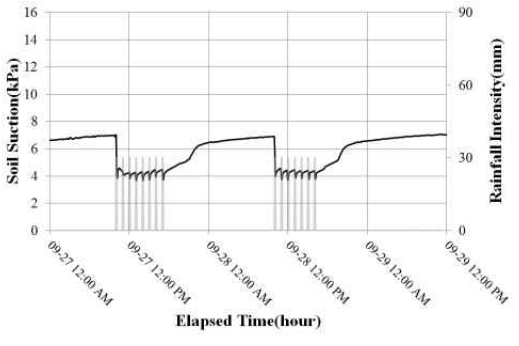
(a) A센서



(b) B센서



(c) C센서



(d) D센서

그림 4.26 센서별 모관흡수력 변화(Case 4, I 단면)

표 4.13 센서별 모관흡수력 변화(Case 4, Ⅰ단면)

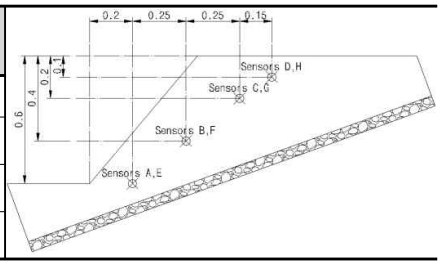
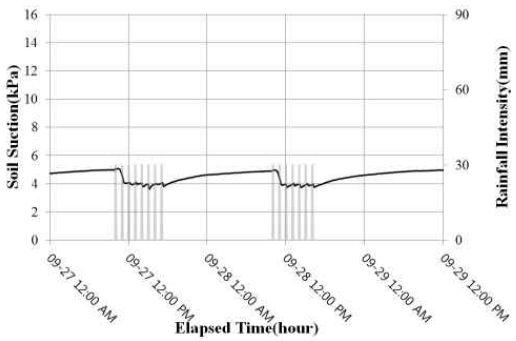
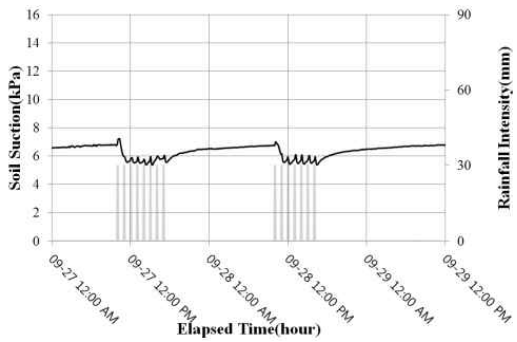
구 분 / 모관흡수력(kPa)		A센서	B센서	C센서	D센서	
초기값		5.86	7.03	7.01	7.01	
침투 및 배수	최대값	5.74	6.70	6.90	6.90	
	최소값	4.48	5.09	5.21	3.70	
	변화량	1.26	1.61	1.69	3.20	

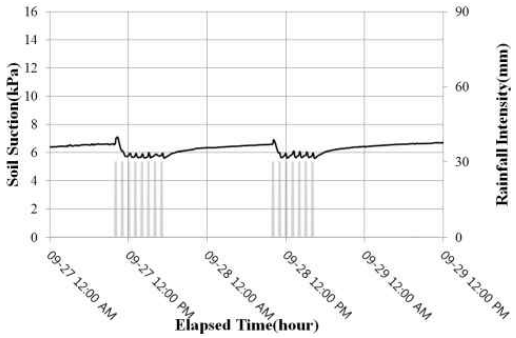
그림 4.27은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 모관흡수력은 5.07kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 3.61kPa에서 최대 4.98kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.37kPa로 나타났다. F센서의 초기 모관흡수력은 7.13kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.39kPa에서 최대 7.01kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.62kPa로 나타났다. G센서의 초기 모관흡수력은 7.11kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 5.62kPa에서 최대 6.91kPa로 변화되었으며 변화폭은 1.29kPa로 나타났다. H센서의 초기 모관흡수력은 7.54kPa로 나타났으며 인공강우의 침투·배수로 인해 최소 4.73kPa에서 최대 7.40kPa로 변화되었으며 변화폭은 2.67kPa로 나타났다. 결과를 정리하면 표 4.14와 같다.



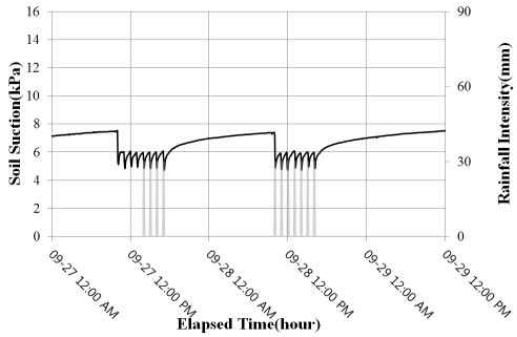
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



(h) H센서

그림 4.27 센서별 모관흡수력 변화(Case 4, Ⅱ단면)

표 4.14 센서별 모관흡수력 변화(Case 4, Ⅱ단면)

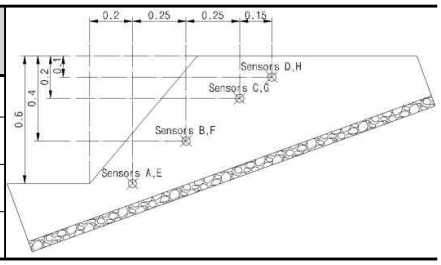
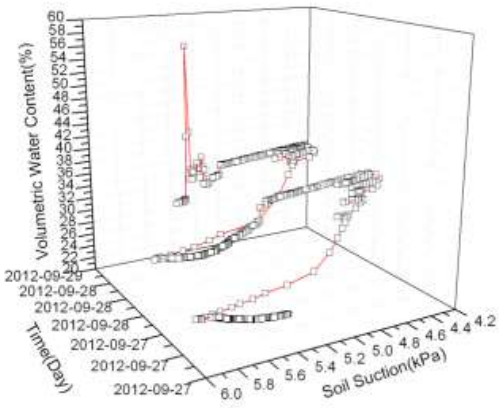
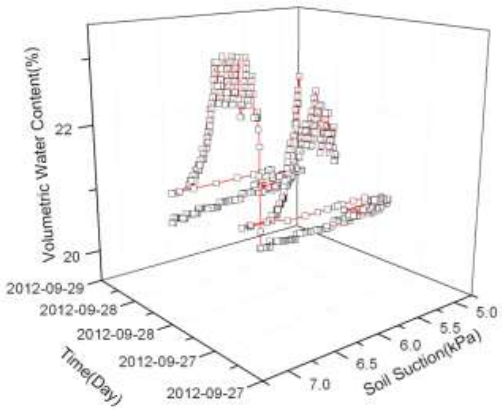
구 분 / 모관흡수력(kPa)		E센서	F센서	G센서	H센서	
초기값		5.07	7.13	7.11	7.54	
침투 및 배수	최대값	4.98	7.01	6.91	7.40	
	최소값	3.61	5.39	5.62	4.73	
	변화량	1.37	1.62	1.29	2.67	

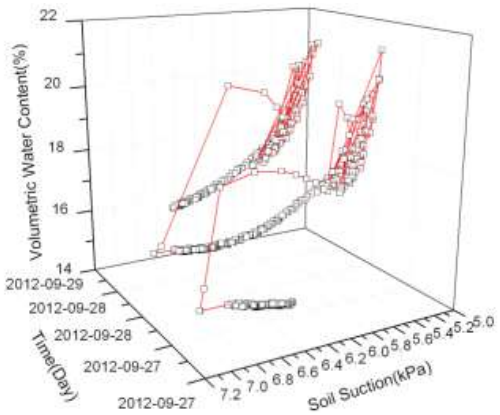
그림 4.28은 인공강우의 침투·배수에 따른 센서별 3차원 그래프를 나타낸 것이다.



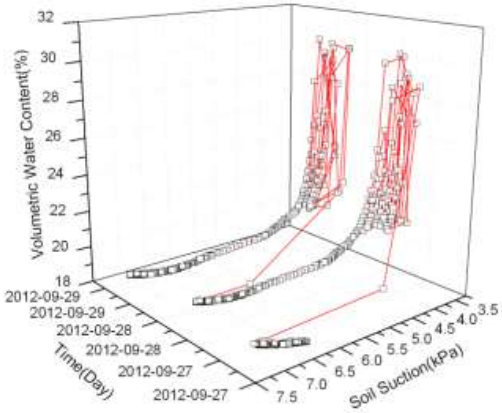
(a) A센서



(b) B센서

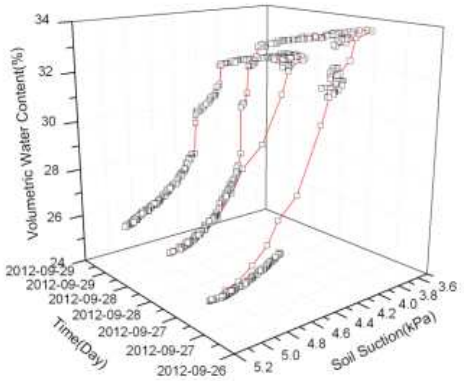


(c) C센서

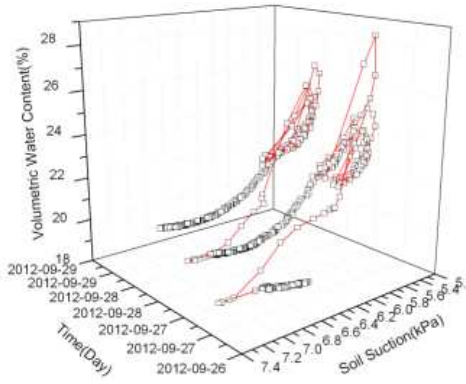


(d) D센서

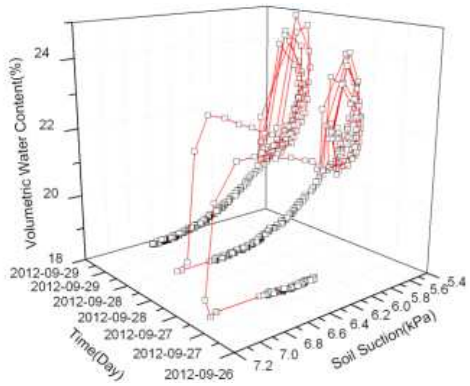
그림 4.28 센서별 3차원 그래프(Case 4) (계속)



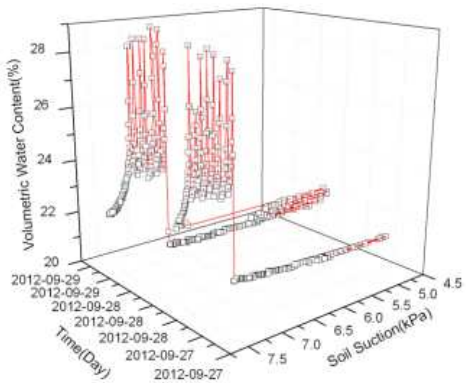
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



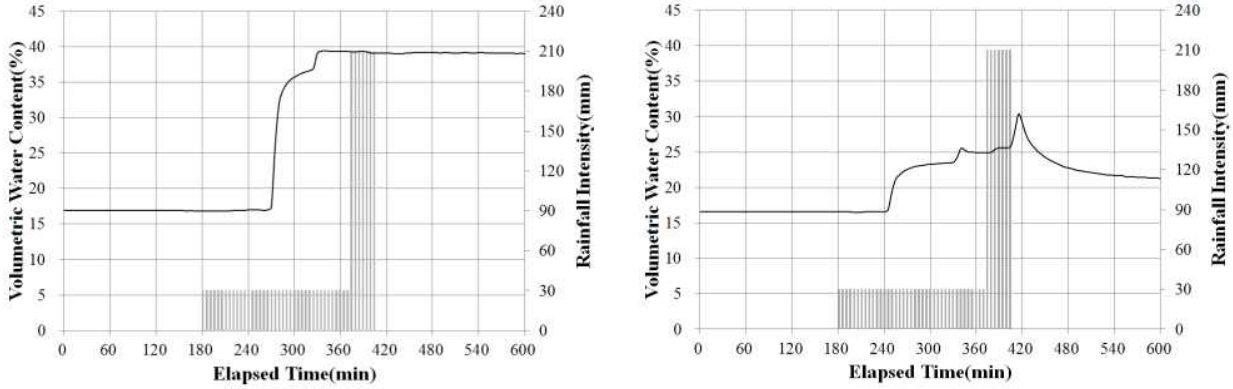
(h) H센서

그림 4.28 센서별 3차원 그래프(Case 4)

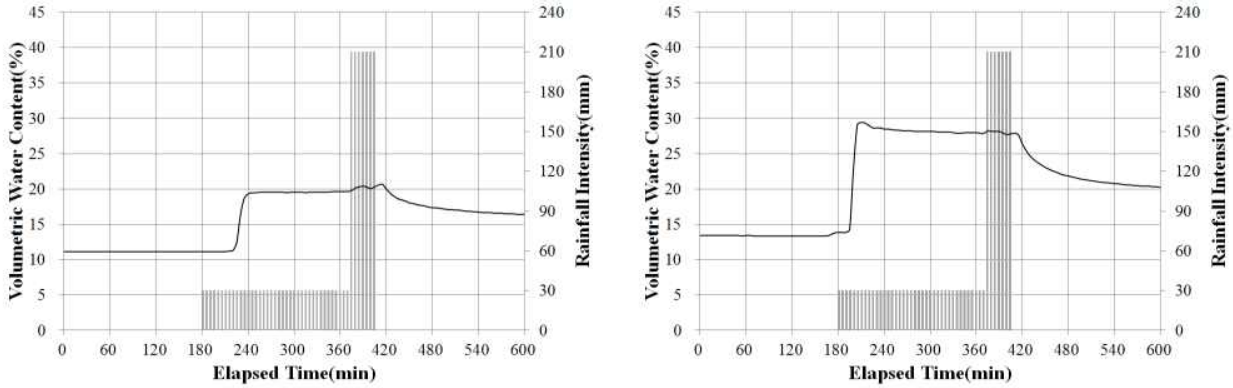
(5) Case 5

인공강우에 의한 모형사면의 파괴 및 안전율 변화를 파악하기 위해 Case 5를 수행하였으며 30mm/hr의 강우를 180분 재현 후 강우강도를 210mm/hr로 증가시켜 사면의 붕괴가 발생될 때까지 실험을 수행하였다. 강우 재현 후 약 420분 경과 후에 사면 붕괴가 발생되었다.

그림 4.29은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅰ단면의 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 함수비는 16.92%로 나타났으며 인공강우의 침투로 인해 최대 39.11%로 정상류 침투상태에 도달한 이 후 사면의 붕괴 후에도 일정하게 유지되었다. B센서의 초기 함수비는 16.58%로 나타났으며, 인공강우의 침투로 인해 최대 30.36%까지 증가되었다가 사면 붕괴로 인해 급격히 함수비가 감소하여 16.58%로 변화되었다. C센서의 초기 함수비는 11.15%로 나타났으며, 인공강우의 침투로 인해 최대 21.67%까지 증가되었다가 사면 붕괴로 인해 급격히 함수비가 감소하여 16.23%로 변화되었다. D센서의 초기 함수비는 13.44%로 나타났으며, 인공강우의 침투로 인해 최대 29.42%까지 증가되었다가 사면 붕괴로 인해 급격히 함수비가 감소하여 18.92%로 변화되었다.



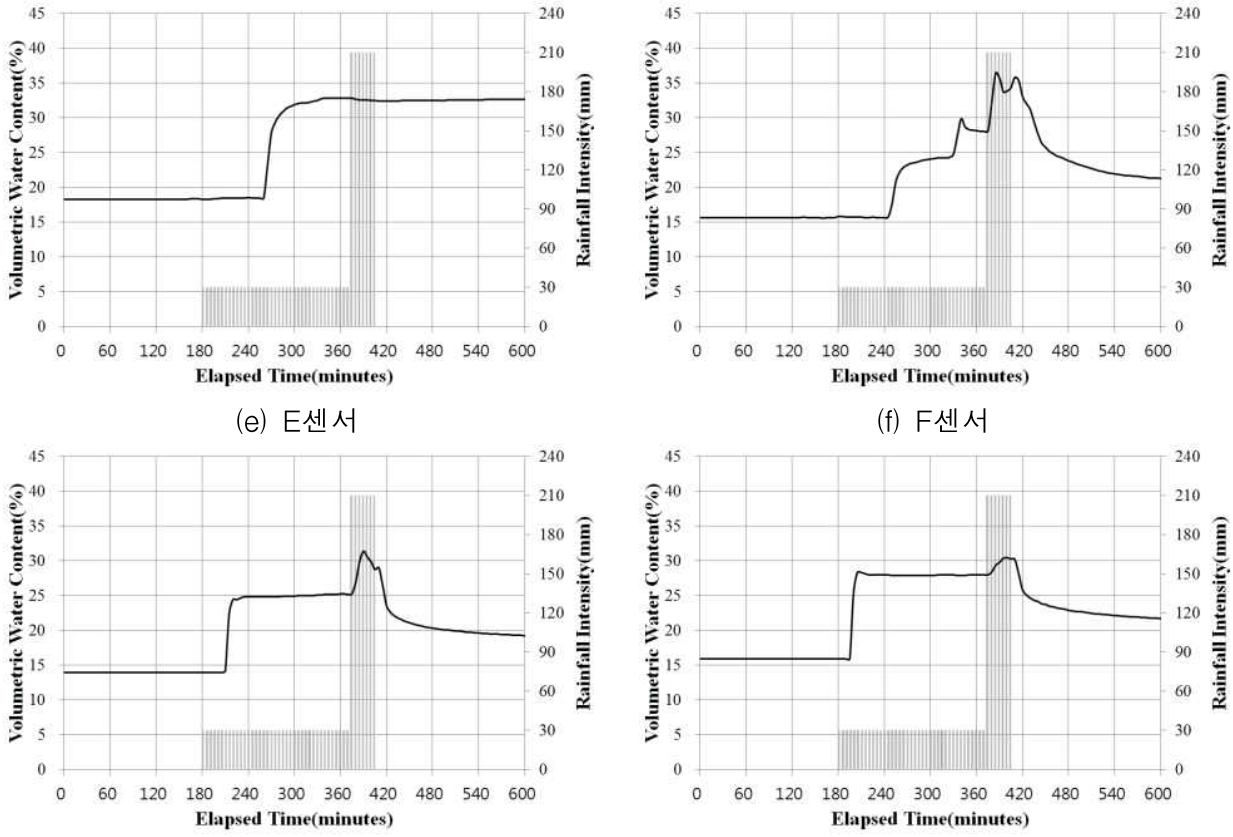
(a) A센서 (b) B센서



(c) C센서 (d) D센서

그림 4.29 센서별 함수비 변화(Case 5, Ⅰ단면)

그림 4.30는 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅰ단면의 함수비 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 함수비는 18.29%로 나타났으며 인공강우의 침투로 인해 최대 32.82%로 정상류 침투상태에 도달한 이 후 사면의 붕괴 후에도 일정하게 유지되었다. F센서의 초기 함수비는 15.65%로 나타났으며, 인공강우의 침투로 인해 최대 36.39%까지 증가되었다가 사면 붕괴로 인해 급격히 함수비가 감소하여 19.89%로 변화되었다. G센서의 초기 함수비는 13.95%로 나타났으며, 인공강우의 침투로 인해 최대 31.37%까지 증가되었다가 사면 붕괴로 인해 급격히 함수비가 감소하여 18.21%로 변화되었다. H센서의 초기 함수비는 15.91%로 나타났으며, 인공강우의 침투로 인해 최대 30.44%까지 증가되었다가 사면 붕괴로 인해 급격히 함수비가 감소하여 21.20%로 변화되었다.

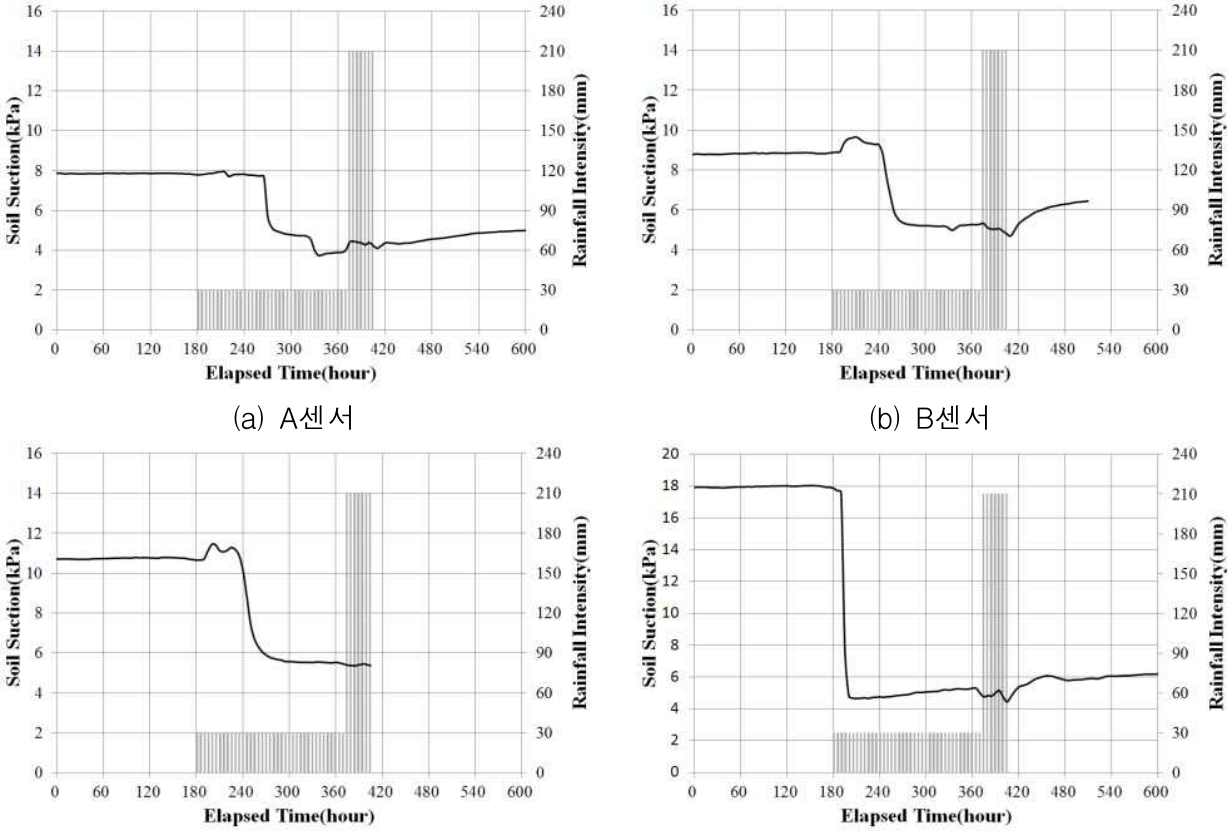


(e) E센서 (f) F센서

(g) G센서 (h) H센서

그림 4.30 센서별 함수비 변화(Case 5, II단면)

그림 4.31은 인공강우의 침투·배수에 따른 I 단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. A센서의 초기 모관흡수력은 7.86kPa로 나타났으며 인공강우의 침투로 인해 3.73kPa까지 감소되었다가 사면 붕괴 후 지속적으로 증가하여 사면 붕괴 후 5시간 경과 후에는 5.91kPa까지 증가되었다. B센서의 초기 모관흡수력은 8.78kPa이며 강우 재현 직후 모관흡수력이 9.66kPa까지 증가되었다가 사면 붕괴 후 5.31kPa까지 급격히 감소되었다. C센서의 초기 모관흡수력은 10.7kPa이며 강우 재현 직후 모관흡수력이 11.44kPa까지 다소 증가되었다가 사면 붕괴 직후 5.57kPa까지 급격히 감소되었다. D센서의 초기 모관흡수력은 17.92kPa이며 강우 재현 직후부터 4.67kPa까지 급격히 감소되었다가 사면 붕괴 후 6.48kPa까지 서서히 증가되었다.

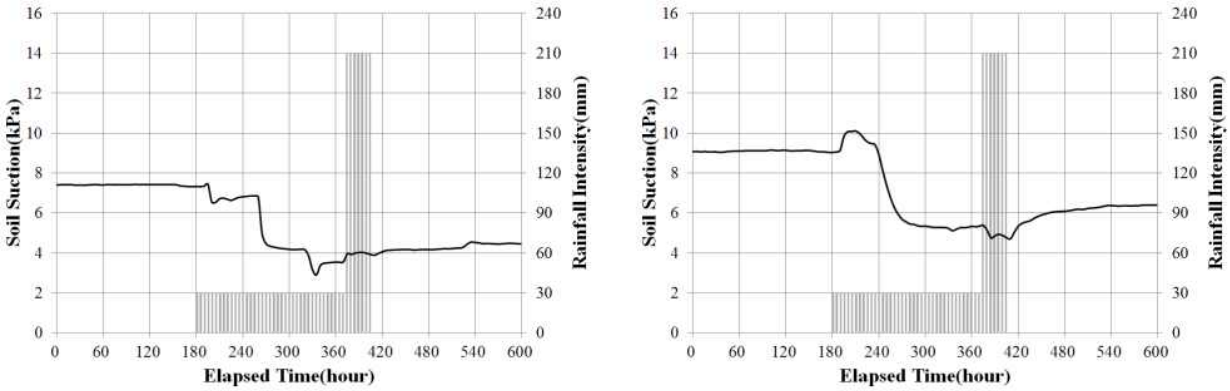


(a) A센서 (b) B센서

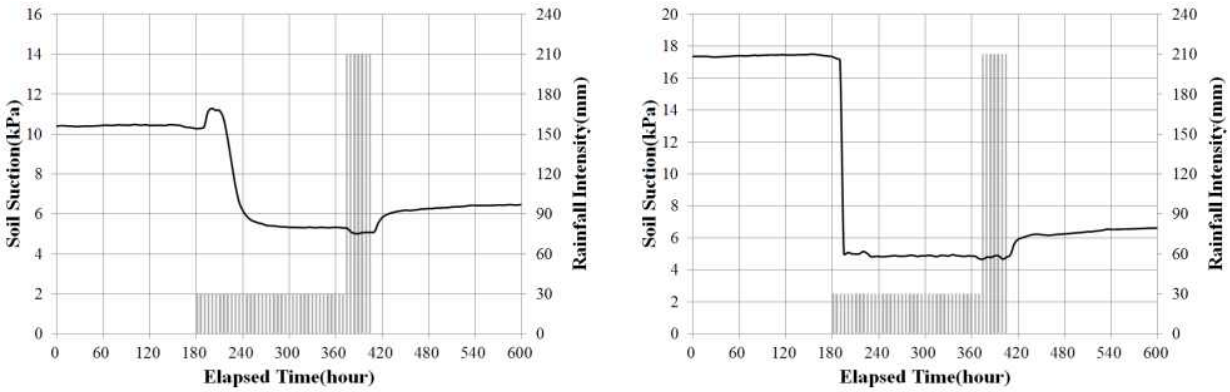
(c) C센서 (d) D센서

그림 4.31 센서별 모관흡수력 변화(Case 5, Ⅰ단면)

그림 4.32은 인공강우의 침투·배수에 따른 Ⅱ단면의 모관흡수력 측정 결과를 나타낸 것이다. E센서의 초기 모관흡수력은 7.40kPa로 나타났으며 인공강우의 침투로 인해 2.89kPa까지 감소되었다가 사면 붕괴 후 지속적으로 증가하여 사면 붕괴 후 5시간 경과 후에는 4.58kPa까지 증가되었다. F센서의 초기 모관흡수력은 9.07kPa이며 강우 재현 직후 모관흡수력이 10.08kPa까지 증가되었다가 사면 붕괴 후 5.27kPa까지 급격히 감소되었다. G센서의 초기 모관흡수력은 10.4kPa이며 강우 재현 직후 모관흡수력이 11.29kPa까지 다소 증가되었다가 사면 붕괴 직후 5.35kPa까지 급격히 감소되었다. H센서의 초기 모관흡수력은 17.37kPa이며 강우 재현 직후부터 5.00kPa까지 급격히 감소되었다가 사면 붕괴 후 6.82kPa까지 서서히 증가되었다.



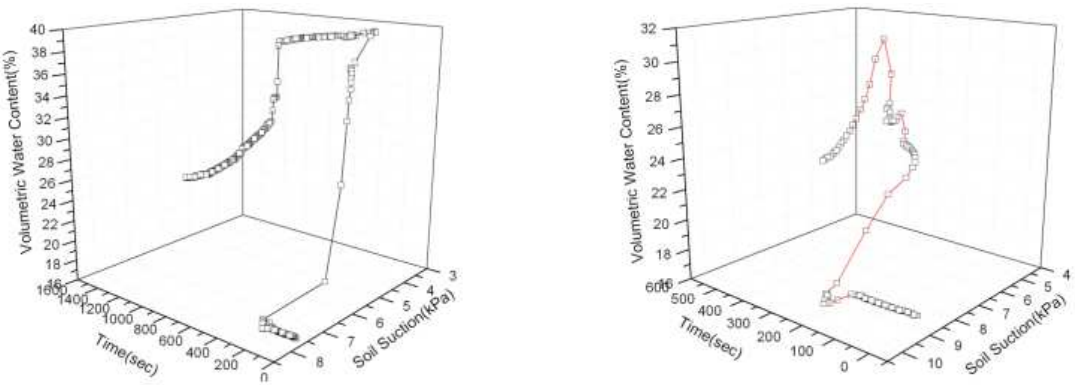
(e) E센서 (f) F센서



(g) G센서 (h) H센서

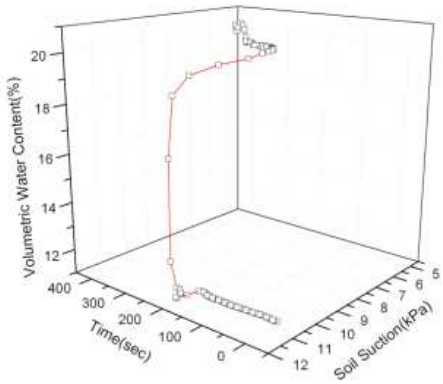
그림 4.32 센서별 모관흡수력 변화(Case 5, II단면)

그림 4.33는 인공강우의 침투에 따른 센서별 3차원 그래프를 나타낸 것이다.

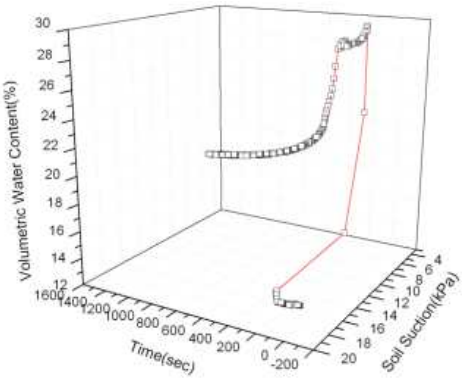


(a) A센서 (b) B센서

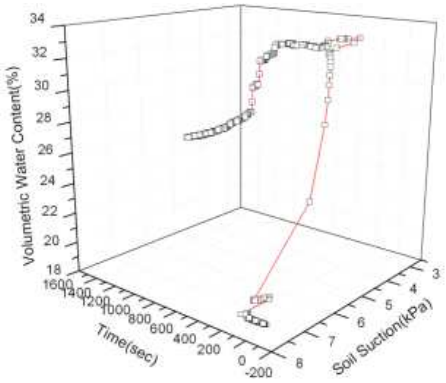
그림 4.33 센서별 모관흡수력vs함수비 그래프(Case 5) (계속)



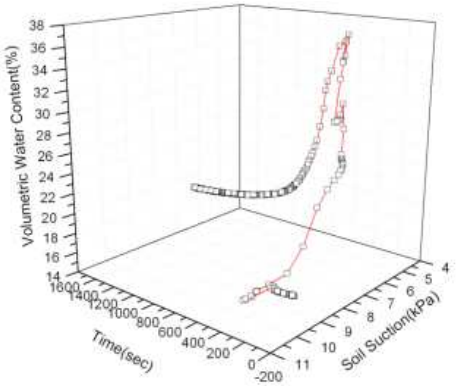
(c) C센서



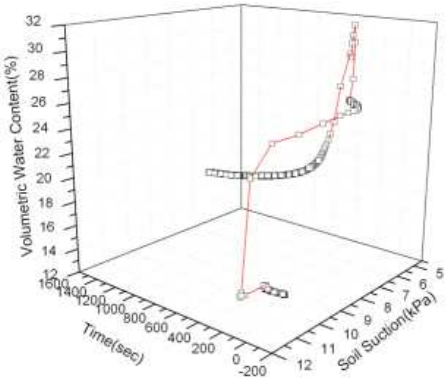
(d) D센서



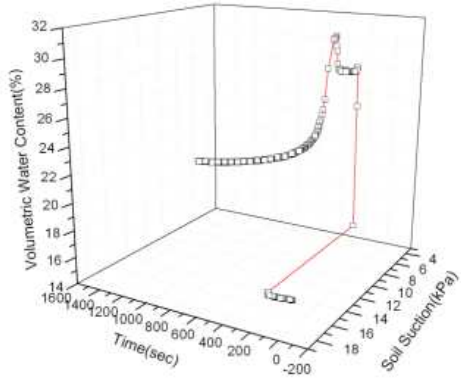
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



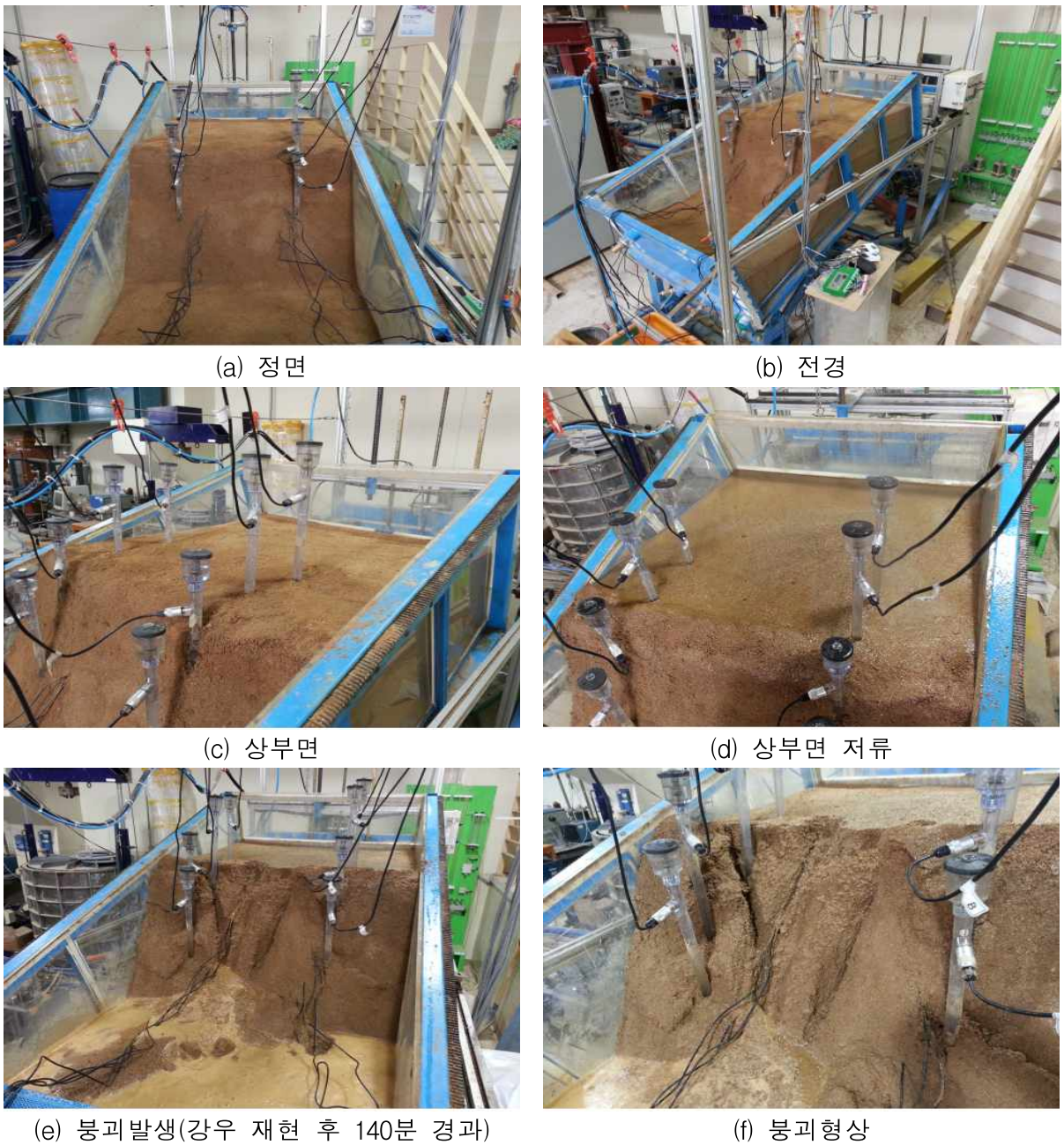
(h) H센서

그림 4.33 센서별 모관흡수력vs함수비 그래프(Case 5)

(6) Case 6

인공강우에 의한 모형사면의 파괴 및 안전율 변화를 파악하기 위해 Case 6을 수행하였으며 그림 4.34은 Case 6의 인공강우 모형실험 과정을 나타낸 것이다. 그림 4.34 (a)~(c)와 같이 사면의 경사를 70도로 증가시켜 모형사면을 형성하였다. 30mm/hr의 인공강우를 모형사면의 붕괴가 발생될 때까지 재현하였다. 그림 4.34 (d)와 같이 강우 재현 후 약 30분 경과 후부터 사면 상부에 물이 저류되기 시작하였다. 강우 재현 후 140분 경과시 그림 4.34 (e)와 같이 붕괴가 발

생되었으며 그림 4.34 (f)와 같이 원호파괴 형태로 붕괴가 발생되었다.



(a) 정면 (b) 전경

(c) 상부면 (d) 상부면 저류

(e) 붕괴발생(강우 재현 후 140분 경과) (f) 붕괴형상

그림 4.34 인공강우 모형사면실험 과정(Case 6)

그림 4.35는 인공강우의 침투에 따른 토조 벽면에서 관찰한 모형사면의 습윤영역 변화를 나타낸 것이다. 초기에는 전체적으로 동일하게 침투가 발생되지만 그림 4.35 (f)와 같이 1시간 경과시에는 우측벽면에서 관찰한 결과 사면 배면 쪽의 침투가 더 많이 발생된 것을 알 수 있다.



(a) 20분(좌측)



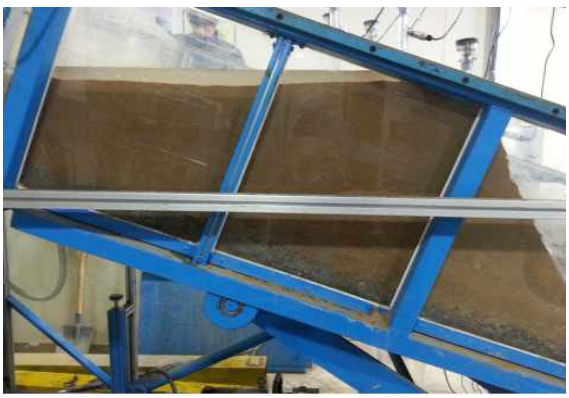
(b) 20분(우측)



(c) 40분(좌측)



(d) 40분(우측)



(e) 60분(좌측)



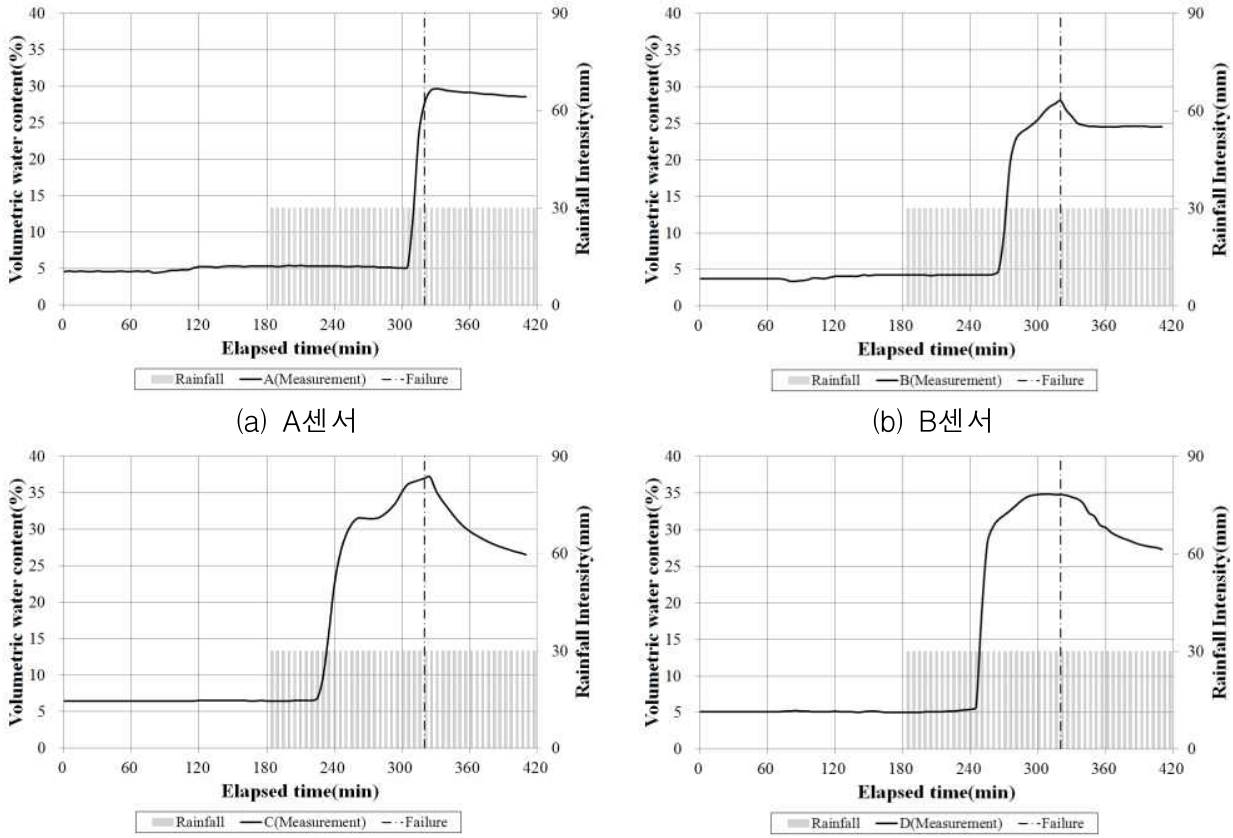
(f) 60분(우측)

그림 4.35 인공강우 침투에 따른 습윤영역 분포

그림 4.36~4.40와 표 4.15~4.18은 Case 6의 모관흡수력과 함수비에 대한 실험결과를 정리한 것이다. 그래프는 강우 재현 전의 값들도 나타내었으며 초기 시간 0분부터 180분 후 인공강우를 재현하였으며 측정시간부터 총 320분 경과 후에 모형사면의 붕괴가 발생되었다. 결국 인공강우 재현 후 약 140분 경과 후에 사면 붕괴가 발생되었다. 인공강우의 재현 후부터 파괴 시까지의 함수비와 모관흡수력의 변화 및 발생시간 등은 표 4.15~4.18에 정리하여 제시하였다.

그림 4.36는 Ⅰ단면 센서별 함수비 변화를 나타낸 것이고 표 4.15는 센서별 함수비 변화를

표로 정리한 것이다. 센서의 심도가 깊을 수 록 침투에 의한 거동이 발생되는 데 오랜 시간이 소요되었고, 파괴 시 상면상부 20cm지점에 설치된 C와 D센서의 경우, 포화함수비 38%에 거의 근접하였으며 35cm지점에 설치된 B와 50cm지점에 설치된 A센서는 각각 28.06%와 27.63%로 불포화상태를 나타내었다. 이는 모형사면의 붕괴는 파괴면 주변이 완전 포화되기 전에 발생된 것을 알 수 있다.



(a) A센서 (b) B센서

(c) C센서 (d) D센서

그림 4.36 센서별 함수비 변화(Case 6, Ⅰ단면)

표 4.15 센서별 함수비 비교표(Case 6, Ⅰ단면)

구 분 / 함수비(%)		A센서	B센서	C센서	D센서
초기값		4.60	3.75	6.89	5.79
강우재현 후 침투거동 발생시간(분)		120	80	45	65
침투거동 발생시부터 붕괴시까지	시간(분)	20	60	95	75
	최대량	27.63	28.06	36.99	34.78
	변화량	23.03	24.31	30.10	28.99

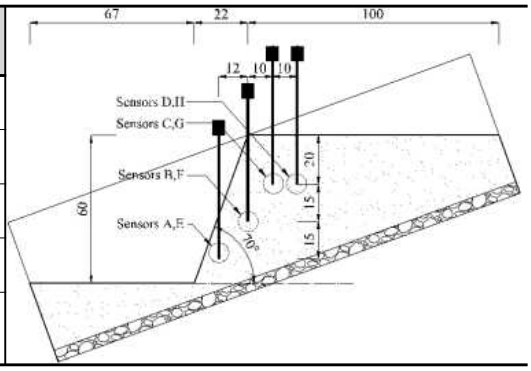
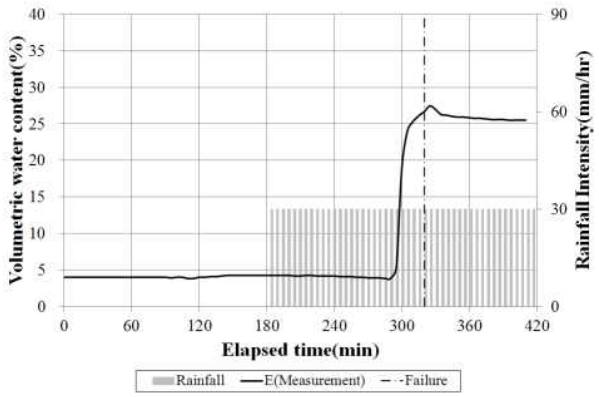
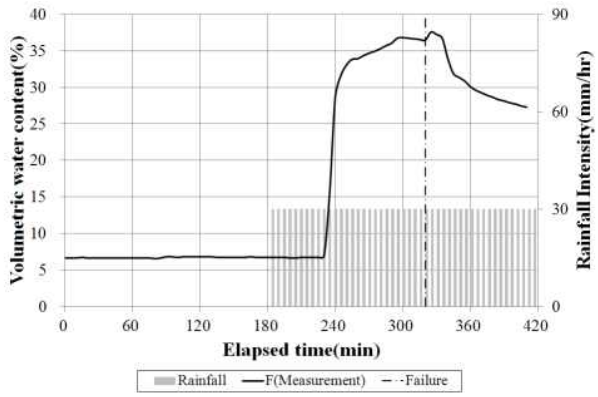


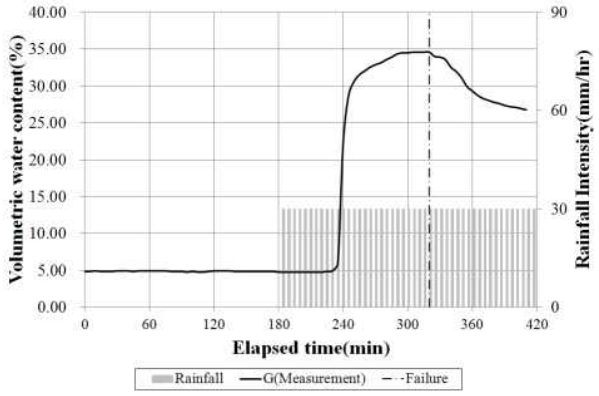
그림 4.37은 Ⅱ단면 센서별 함수비 변화를 나타낸 것이고 표 4.16은 센서별 함수비 변화를 표로 정리한 것이다. Ⅱ단면의 경우 Ⅰ단면과 같이 센서의 심도가 깊을수록 침투에 의한 거동이 발생되는데 오랜 시간이 소요되었으며 모형사면의 붕괴는 파괴면 주변이 완전 포화되기 전에 발생된 것을 알 수 있다.



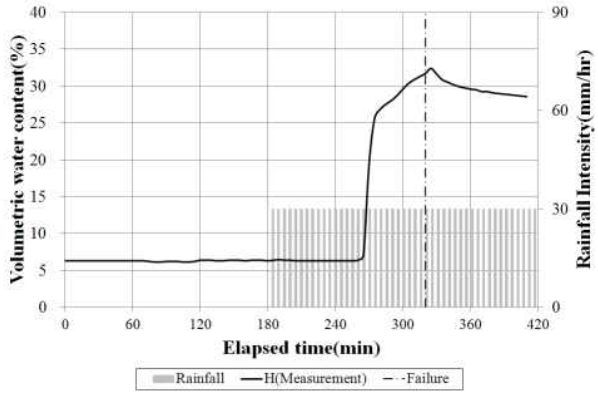
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



(h) H센서

그림 4.37 센서별 함수비 변화(Case 6, Ⅱ단면)

표 4.16 센서별 함수비 비교표(Case 6, Ⅱ단면)

구 분 / 함수비(%)		E센서	F센서	G센서	H센서
초기값		3.84	6.89	4.94	6.39
강우재현 후 침투거동 발생시간(분)		110	50	50	80
침투거동 발생시부터 붕괴시까지	시간(분)	30	90	90	60
	최대량	26.70	36.47	34.60	31.71
	변화량	22.86	29.58	29.66	25.32

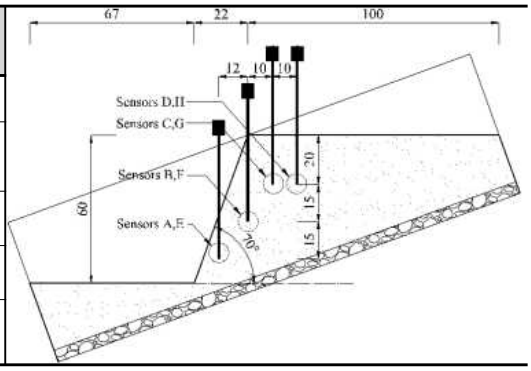
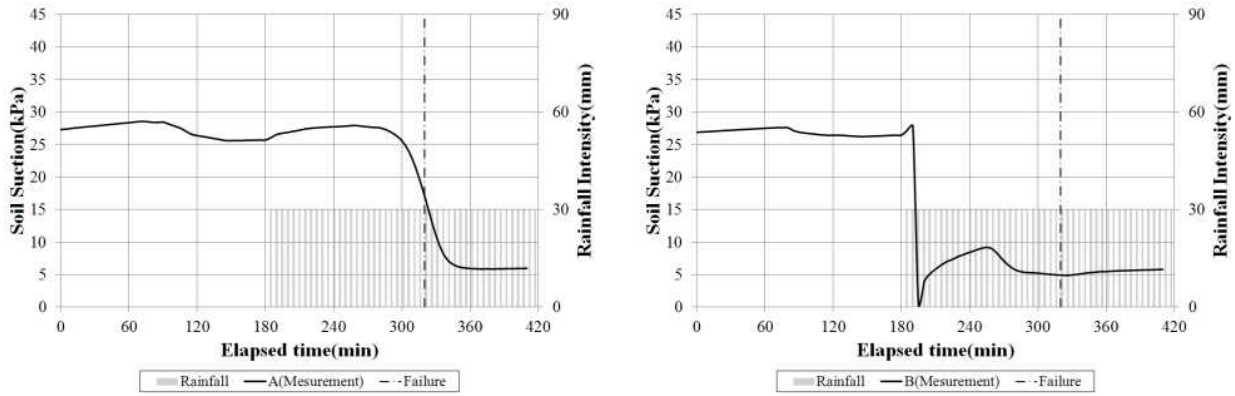


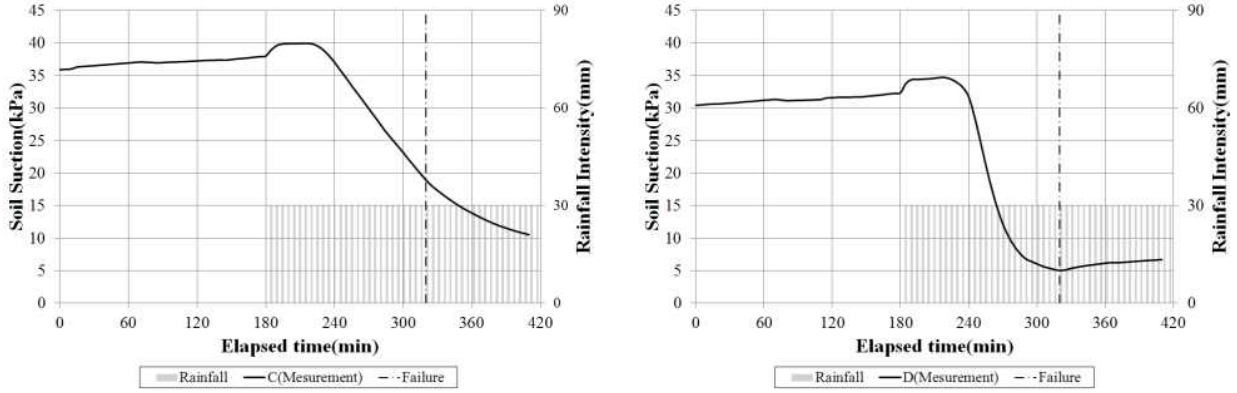
그림 4.38은 Ⅰ단면의 센서별 모관흡수력 변화를 나타낸 것이고 표 4.17은 센서별 모관흡수력 변화를 표로 정리한 것이다. 모관흡수력도 함수비와 동일하게 센서의 심도가 깊을수록 침투에 의한 거동이 발생되는데 오랜 시간이 소요되었다. A센서를 제외한 B~D센서의 모관흡수력 감소량은 약 20.93kPa~29.68kPa로 나타났다.

또한, 모형사면의 사면경사면 중간부분에 설치된 B센서는 인공강우의 노즐과 케이블이 교차되는 부분이 발생되어 텐션미터의 벽면을 타고 물이 침투되어 그림 4.38 (b)와 같이 측정시간 180분~260분 사이에서 노이즈가 발생되었다.



(a) A센서 (b) B센서

그림 4.38 센서별 모관흡수력 변화(Case 6, Ⅰ단면) (계속)



(c) C센서 (d) D센서

그림 4.38 센서별 모관흡수력 변화(Case 6, Ⅰ단면)

표 4.17 센서별 모관흡수력 비교표(Case 6, Ⅰ단면)

구 분 / 모관흡수력(kPa)		A센서	B센서	C센서	D센서
초기값		27.34	27.84	39.87	34.69
강우재현 후 침투거동 발생시간(분)		105	-	40	35
침투거동 발생시부터 붕괴시까지	시간(분)	35	-	100	105
	최소량	17.09	4.98	18.94	5.01
	변화량	10.25	22.86	20.93	29.68

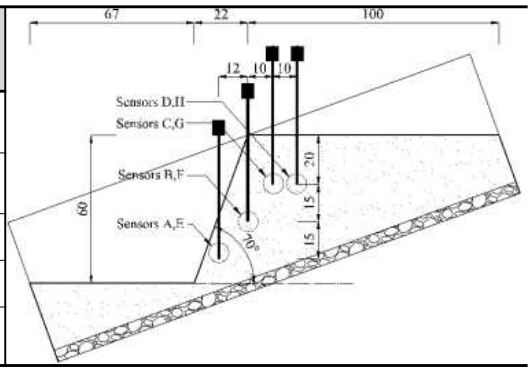
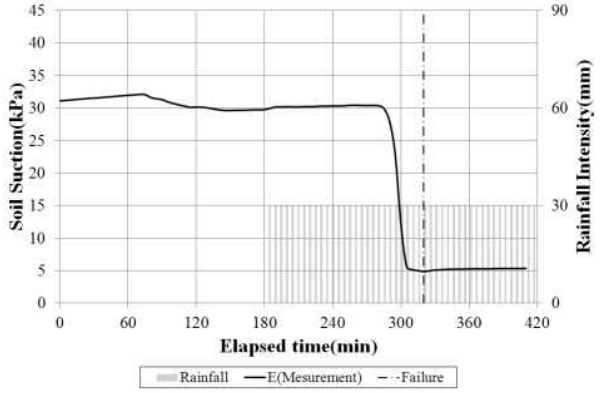
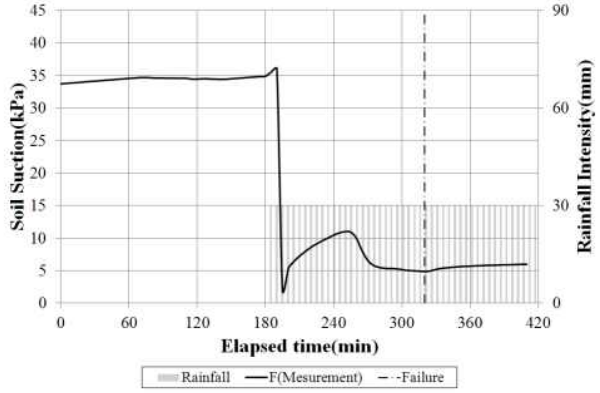


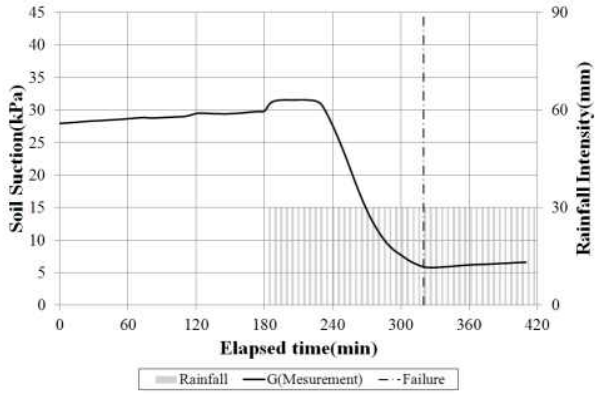
그림 4.39은 Ⅲ단면의 센서별 모관흡수력 변화를 나타낸 것이고 표 4.18은 센서별 모관흡수력 변화를 표로 정리한 것이다. 모관흡수력도 함수비와 동일하게 센서의 심도가 깊을수록 침투에 의한 거동이 발생되는 데 오랜 시간이 소요되었다. G와 H센서의 모관흡수력 감소량은 약 24.84kPa~25.48kPa로 나타났다. 또한, 모형사면의 사면경사면 중간부분에 설치된 F센서는 B센서와 동일하게 노이즈가 발생되었다.



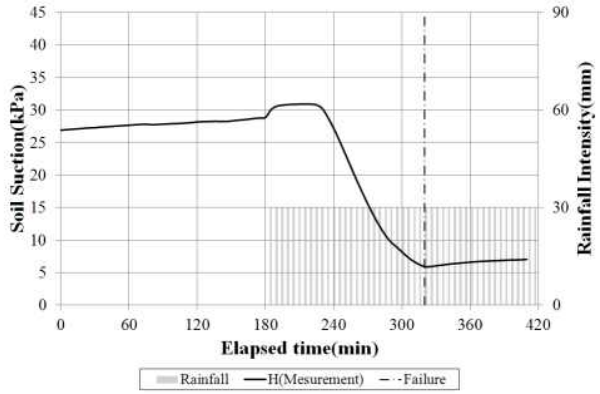
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



(h) H센서

그림 4.39 센서별 모관흡수력 변화(Case 6, II단면)

표 4.18 센서별 모관흡수력 비교표(Case 6, II단면)

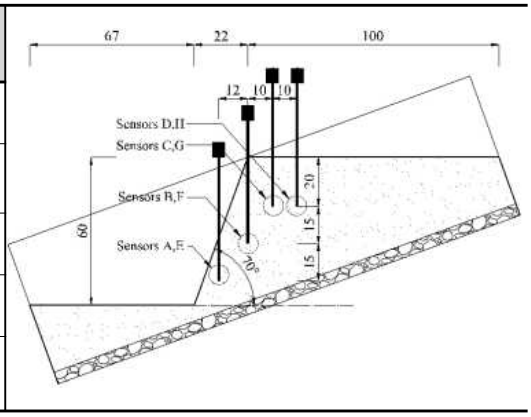
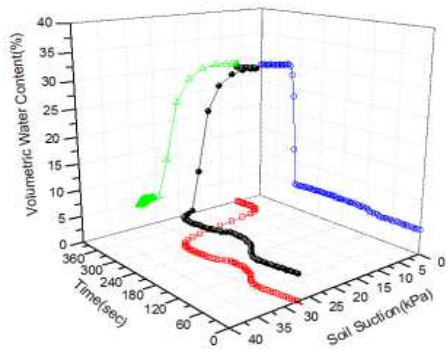
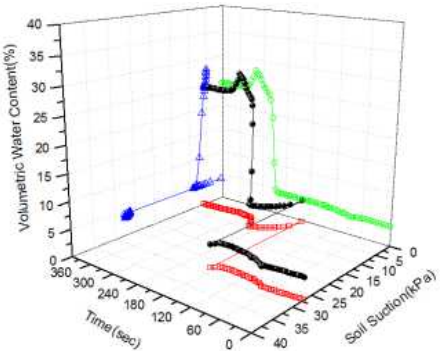
구 분 / 모관흡수력(kPa)		E센서	F센서	G센서	H센서	
초기값		30.35	36.04	31.38	30.77	
강우재현 후 침투거동 발생시간(분)		100	-	45	45	
침투거동 발생시부터 붕괴시까지	시간(분)	40	-	95	95	
	최소량	4.87	4.86	6.19	5.93	
	변화량	25.48	31.18	25.19	24.84	

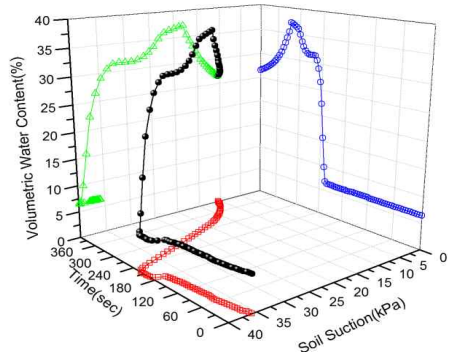
그림 4.40는 인공강우의 침투에 따른 센서별 3차원 그래프를 나타낸 것이다.



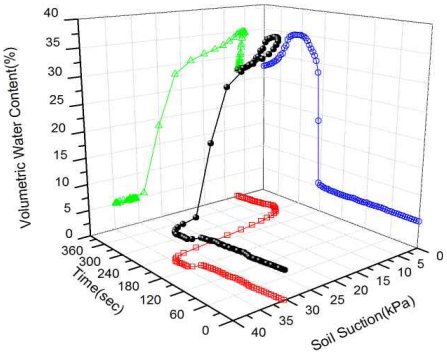
(a) A센서



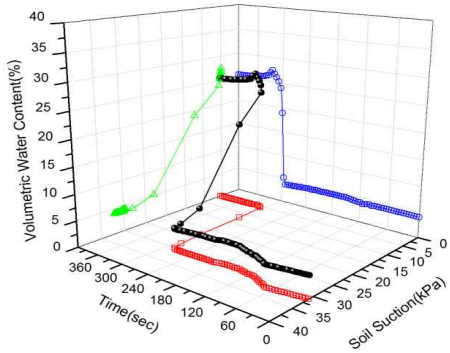
(b) B센서



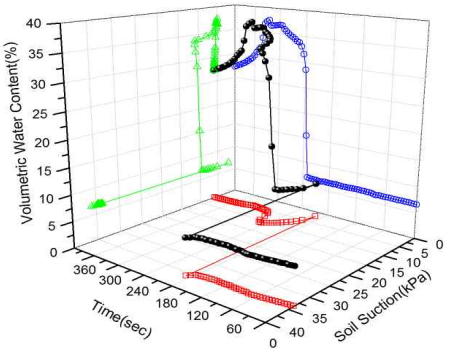
(c) C센서



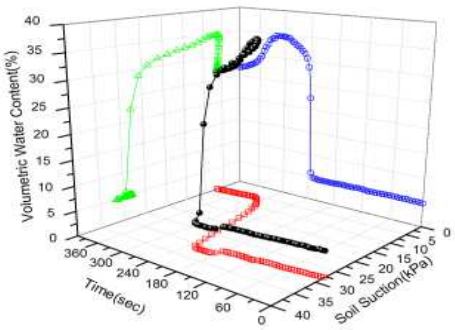
(d) D센서



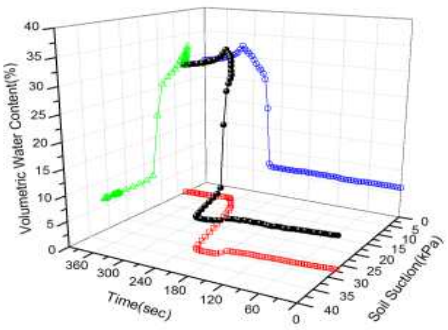
(e) E센서



(f) F센서



(g) G센서



(h) H센서

그림 4.40 센서별 모관흡수력vs함수비 그래프(Case 6)

(7) 모형사면실험 결과 정리

그림 4.41~4.43은 모형사면실험 결과를 흐름도로 정리한 것이다. 그림 4.41과 같이 인공강우의 침투·배수에 따른 모형사면의 침투거동을 파악하기 위하여 수행한 모형사면실험의 Case 1~4는 사면경사는 50°, 상대다짐도는 85%로 강우조건만을 달리하여 실험을 수행하였다.

인공강우의 침투·배수에 의한 거동이 센서의 위치에 따라 다소 차이는 있었지만 비교적 명확히 나타났으며, 이력현상도 발생되었다. 각 실험 Case별로 인공강우의 침투·배수에 의한 거동의 차이는 크게 발생되지 않았으며 심도가 깊어질수록 인공강우의 침투·배수에 의한 급격한 거동이 줄어드는 것으로 나타났다.

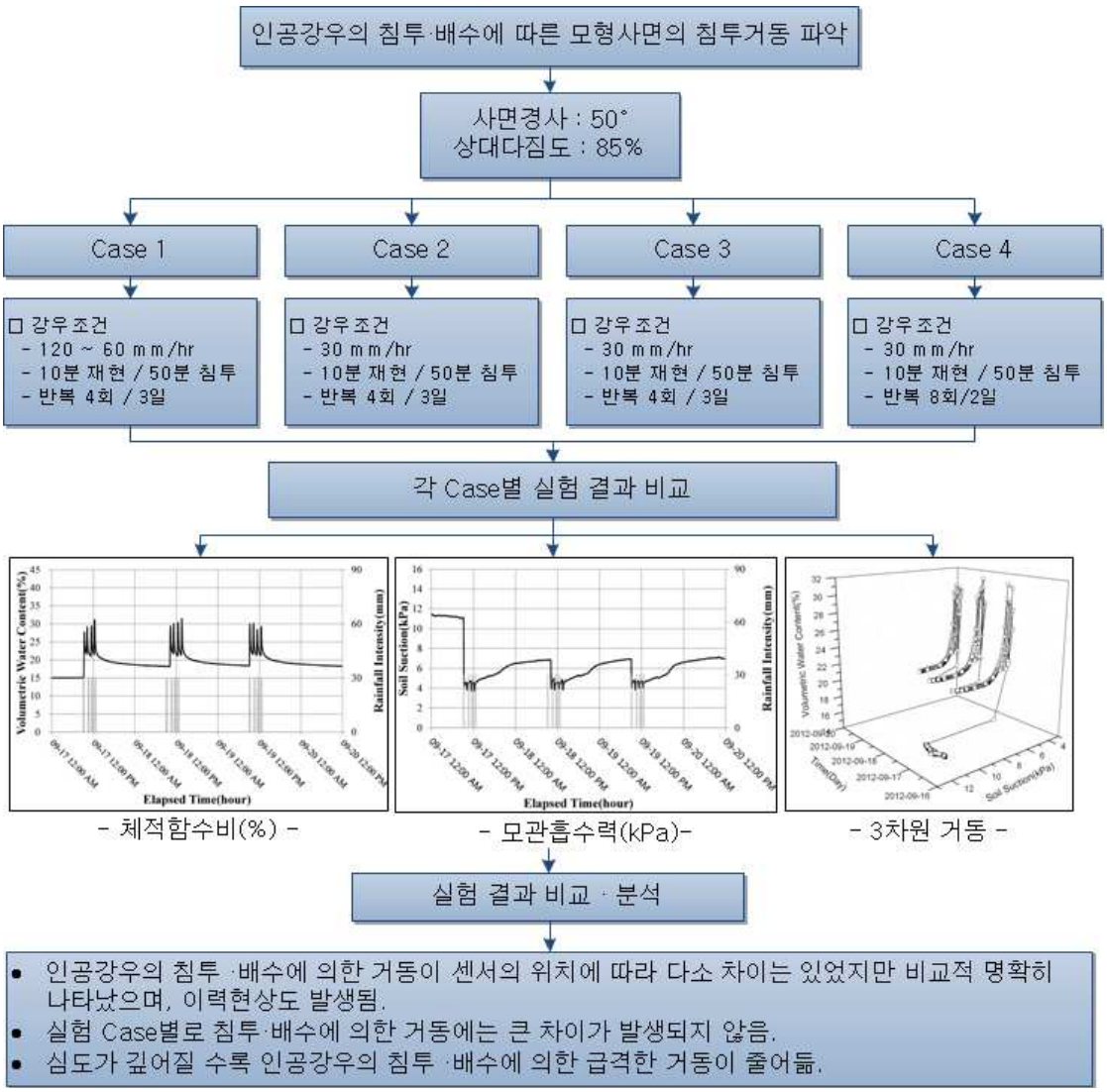


그림 4.41 인공강우의 침투·배수에 따른 모형사면의 침투거동 파악 결과 정리도표

인공강우에 의한 모형사면의 파괴거동을 파악하기 위해 수행한 실험 Case 5와 6의 결과는 그림 4.42와 그림 4.43에 나타내었다. 실험 Case 5은 사면경사 50°, 상대다짐도 85%로 사면을 축조하였으며 인공강우는 30 mm/hr의 강우강도로 재현한 후 180분 재현 후 210 mm/hr로 증가시켰다. 인공강우의 침투에 의한 파괴거동을 파악하고자 하였지만 사면의 경사가 완만하여 특이한 파괴거동을 발생되지 않았다.

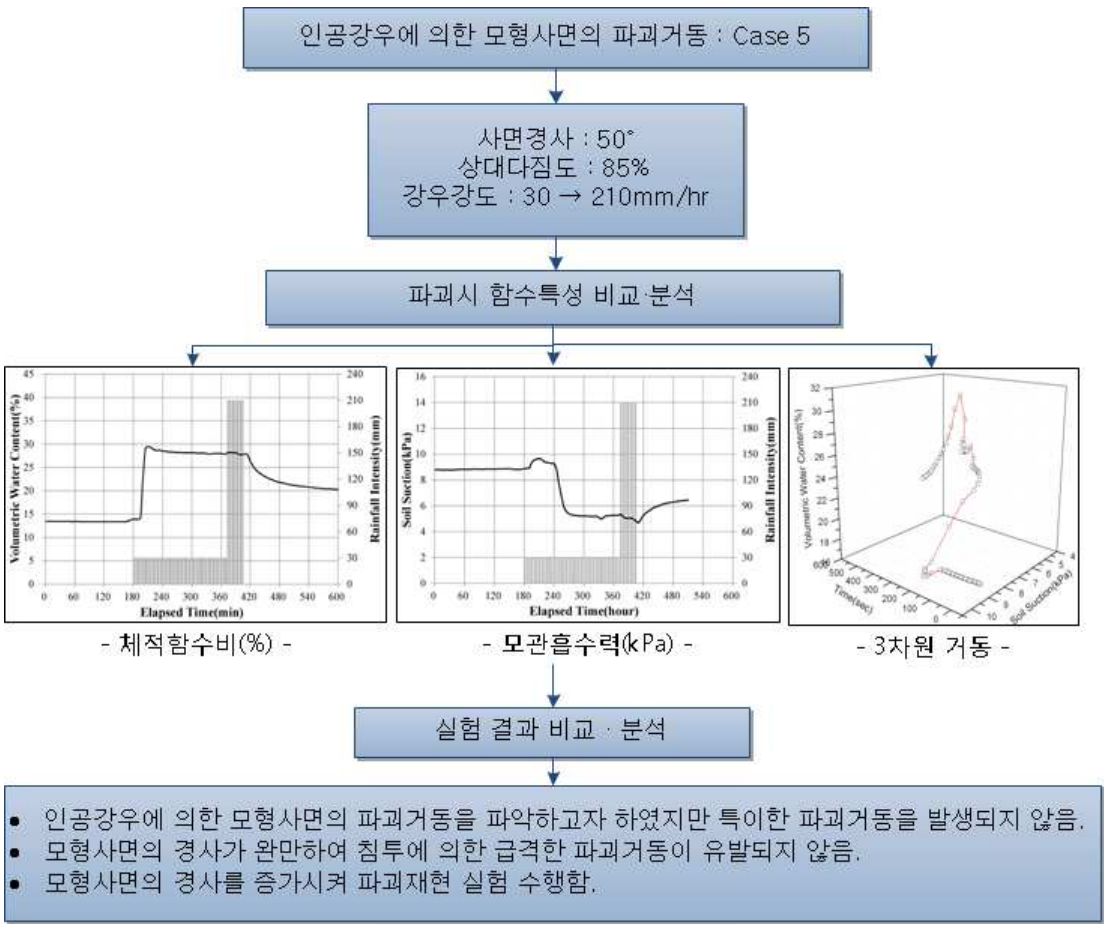


그림 4.42 인공강우에 의한 모형사면의 파괴거동(Case 5) 결과 도표

실험 Case 6은 사면경사 70°, 상대다짐도 85%로 사면을 축조하였으며 인공강우는 30 mm/hr의 강우강도로 붕괴시까지 재현하였다. 인공강우 재현 후 140분에 모형사면이 파괴되었으며 초기 함수비는 약 5%에서 파괴시 30~38%까지 증가되었으며, 모관흡수력은 초기 26~33kPa에서 파괴시 약 5kPa까지 감소되었다. 또한 파괴면 주변 지반이 포화되기 전에 붕괴가 발생되었다.

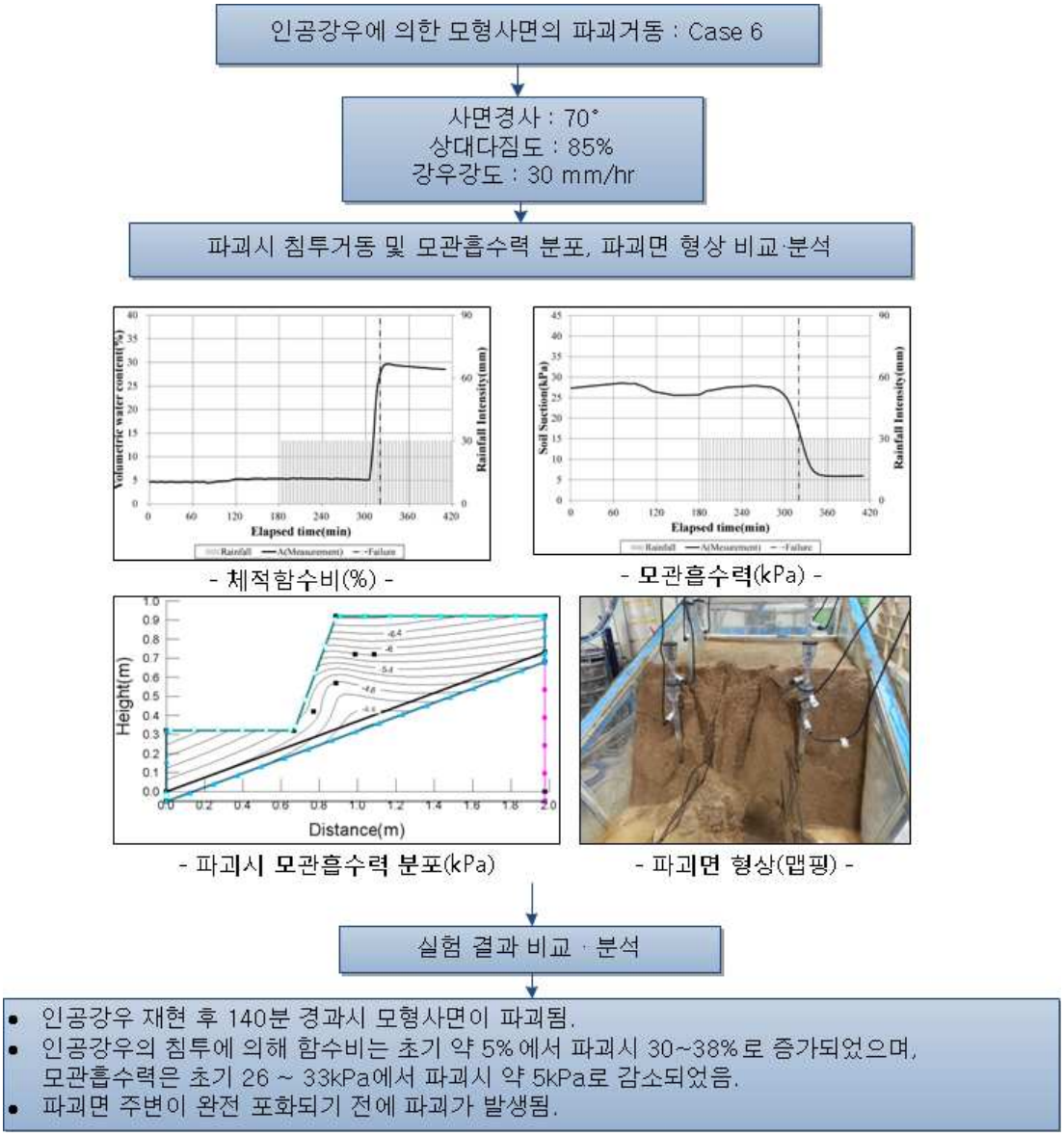


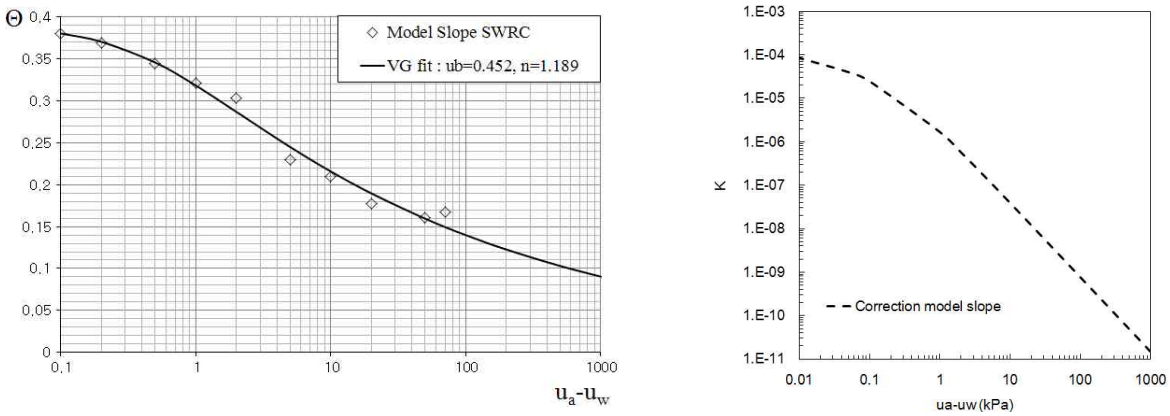
그림 4.43 인공강우에 의한 모형사면의 파괴거동(Case 6) 결과 도표

4.4 모형사면 침투 및 사면안정해석

(1) 모형사면의 불포화 물성 및 요소망

실내시험은 함수특성시험과 강도시험을 중심으로 수행하였으며, 불교란시료를 이용하려고 노력하였지만 대부분 교란시료의 시험성과를 이용할 수밖에 없었다. 그림 4.44 (a)에서 보여지듯이, 압력판추출시험을 통하여 함수특성곡선을 획득하였고, RETC 프로그램을 이용하여 Van Genuchten 모델로 회귀분석을 하였다(Van Genuchten et al., 1991). 공기함입치 u_b와 계수 n, 포화 체적함수비, 잔류함수비는 표 4.19에 정리되었다. 불교란 시료의 투수계수는 함수특성곡선

으로부터 Mualem 이론에 의하여 추정하는 방법을 이용하였다. 그 결과 그림 4.44 (b)와 같이 평가되었으며, 표 4.19에 정리되었다.



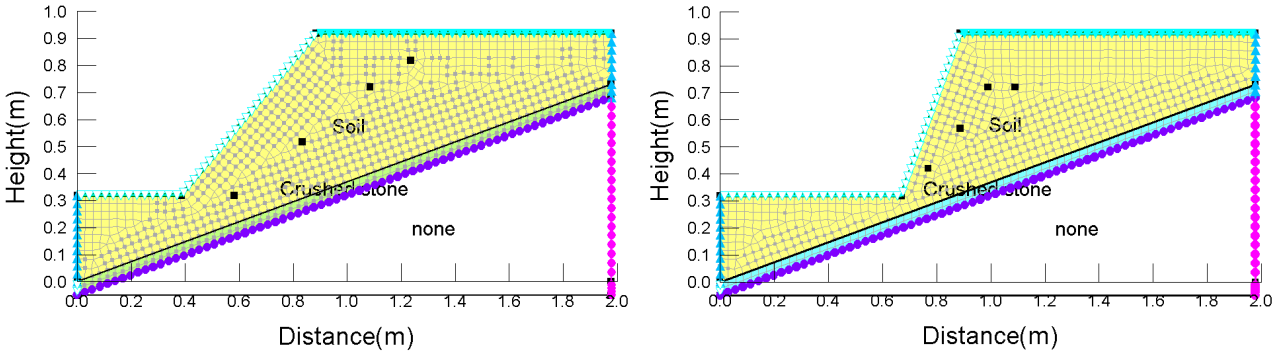
(a) 함수특성곡선 (b) 투수계수

그림 4.44 모형사면의 불포화 지반 및 수리 물성

표 4.19 수치해석시 적용된 수리 및 강도 물성

Analysis	Seepage(SEEP/W)		Slope(SLOPE/W)		
Parameter	Soil	Crushed Stone	Parameter	Soil	Crushed Stone
u_b(kPa)	0.452	-	$\gamma_t(kN/m^3)$	16.05	19.00
n	1.189	-	c′(kPa)	0	0
θ_s(%)	0.38	-	$\phi'(°)$	36.9	45.0
k_s(m/s)	1.30E-04	0.13			

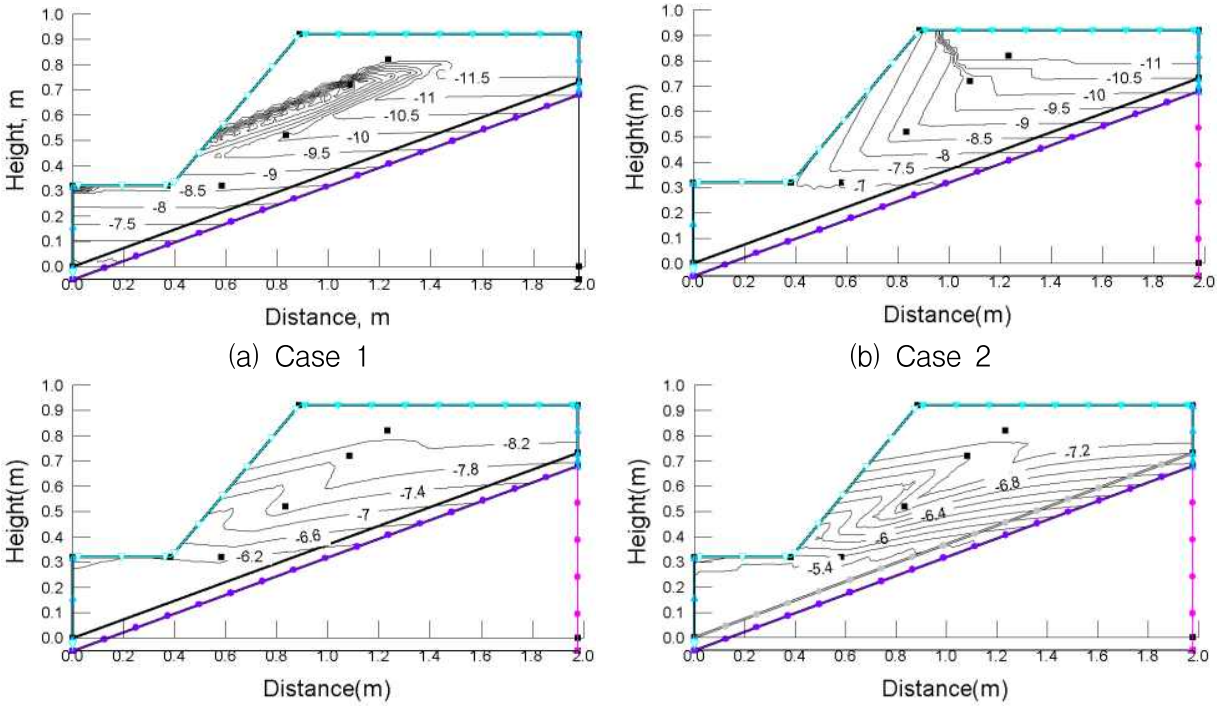
수치해석을 위한 모형제방의 Geometry는 그림 4.45과 같다. 요소망 생성은 사각형과 삼각형을 혼합한 형태로 대략적인 Element size는 0.03m로 설정하여 그림 4.45 (a)와 같이 경사 50도의 모형사면은 1032개의 Node와 948개의 Elements로 요소망을 세분화하였고 그림 4.45 (b)와 같이 경사 70도의 모형사면은 942개의 Node와 853개의 Elements로 요소망을 세분화하였다. 부정류에 대하여, 유량 경계조건은 그림 4.9에 나타난 인공강우를 실험조건(Case 1~6)에 따라 지표면에 적용하였으며 사면의 경사부 표면에서는 지하수가 유출될 수 있도록 설정하였다. 측면의 수두 경계는 모형사면의 표고를 고려하여 설정하였다.



(a) 사면경사 50°(Case 1～5) (b) 사면경사 70°(Case 6)

그림 4.45 모형사면의 Geometry

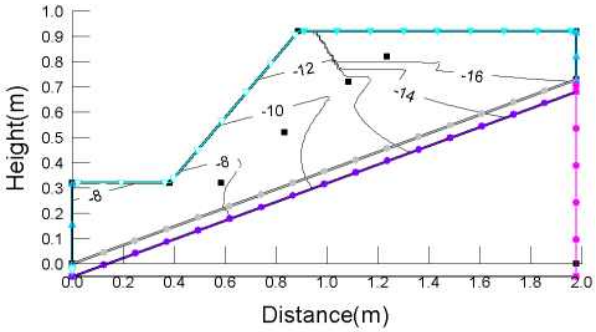
모형사면의 초기조건은 Spatial function을 이용하여 실험과정에서 측정된 모관흡수력을 입력하였다. 그림 4.46는 실험 Case별 초기 모관흡수력 분포를 나타낸 것이다.



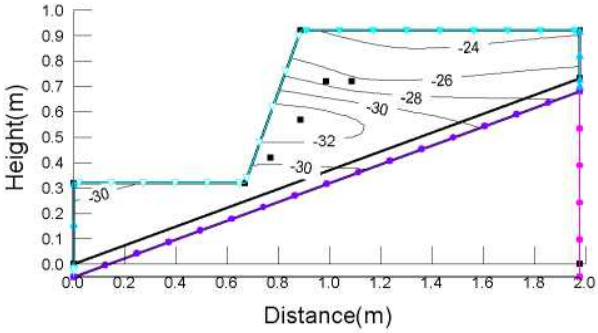
(a) Case 1 (b) Case 2

(c) Case 3 (d) Case 4

그림 4.46 실험 Case별 초기 모관흡수력 분포 (계속)



(e) Case 5

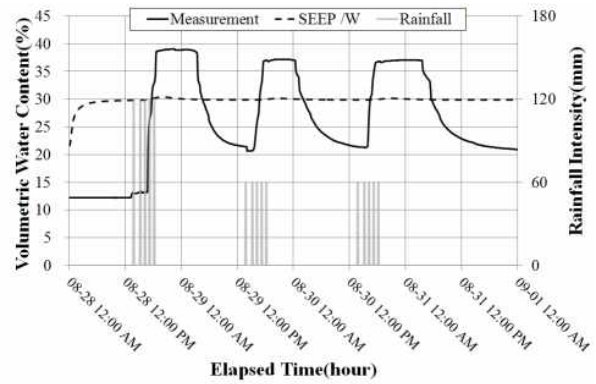


(f) Case 6

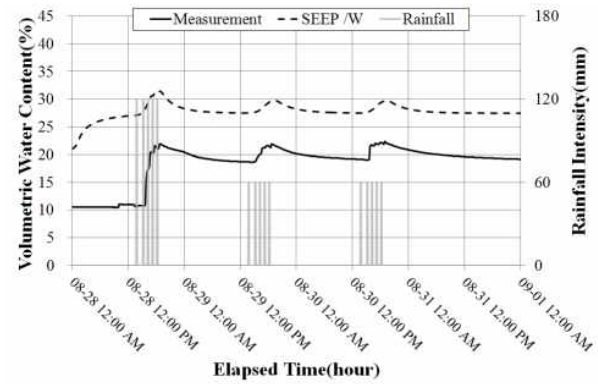
그림 4.46 실험 Case별 초기 모관흡수력 분포

(2) Case 1 비교

그림 4.47은 모형실험(Case 1)과 침투해석의 함수비와 모관흡수력의 변화를 비교한 것이다. 모형실험과 침투해석 결과의 경향은 거의 동일하였으며, 지표면 60cm지점에 설치되어있는 A 센서의 경우 인공강우의 침투로 인한 거동이 수치해석에서는 거의 나타나지 않았다. 지표면에 가까운 수록 두 결과 값의 차이가 감소되었다. 또한 침투해석 결과가 모형실험 결과보다 높은 함수비와 낮은 모관흡수력 영역에서 거동이 발생되었다.

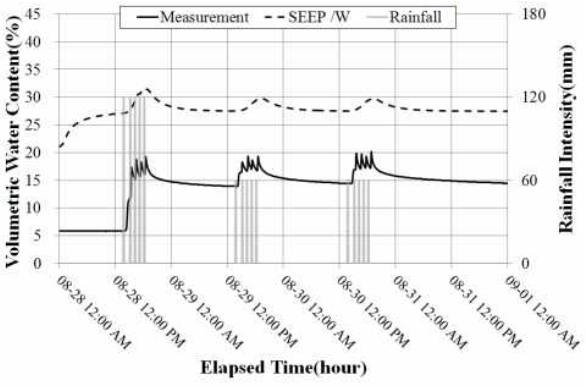


(a) A센서(함수비)

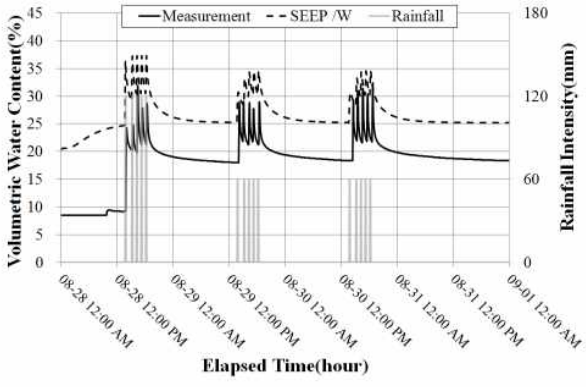


(b) B센서(함수비)

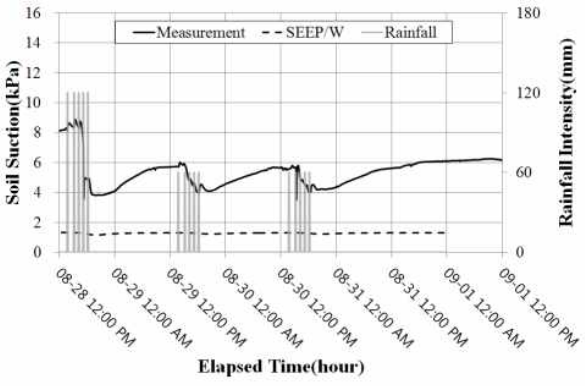
그림 4.47 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 1) (계속)



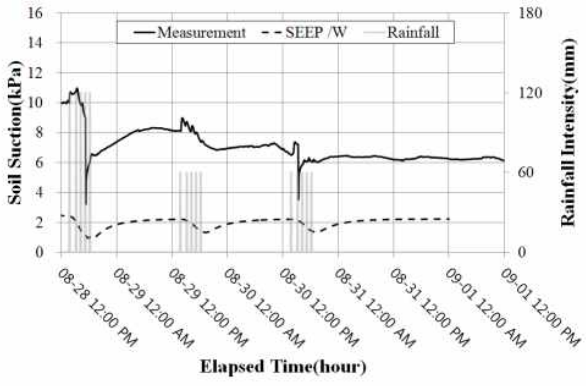
(c) C센서(함수비)



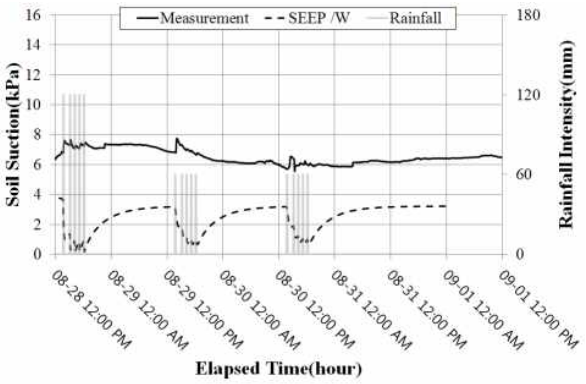
(d) D센서(함수비)



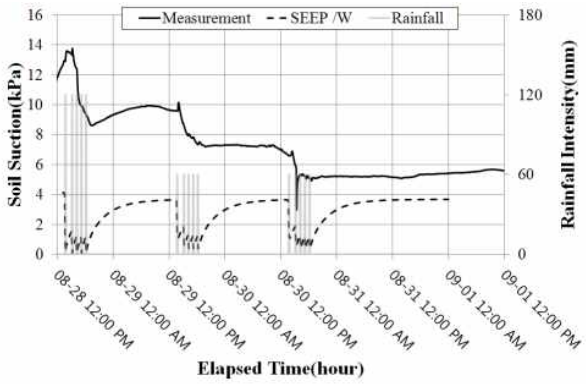
(e) A센서(모관흡수력)



(f) B센서(모관흡수력)



(g) C센서(모관흡수력)

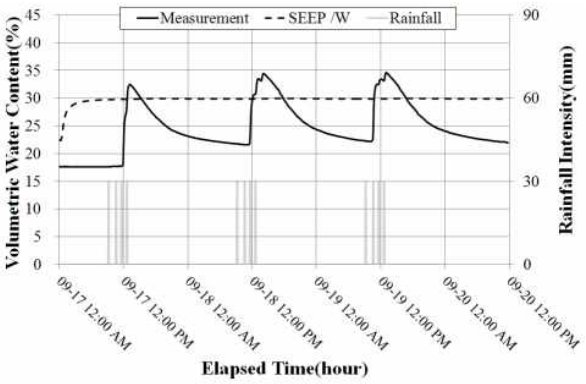


(h) D센서(모관흡수력)

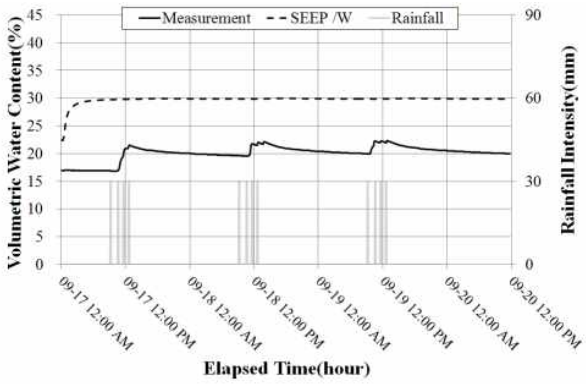
그림 4.47 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 1)

(3) Case 2 비교

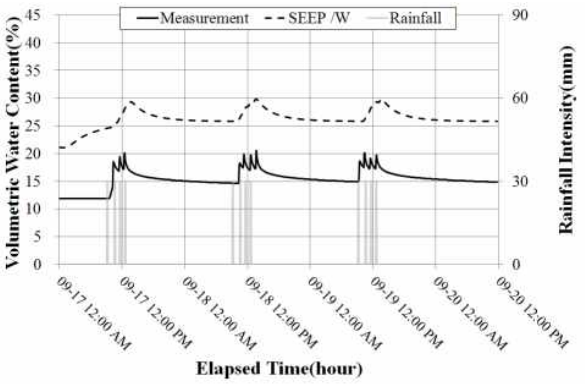
그림 4.48는 모형실험(Case 2)과 침투해석의 함수비와 모관흡수력의 변화를 비교한 것이다. 모형실험과 침투해석 비교 결과는 Case 1과 동일하였다.



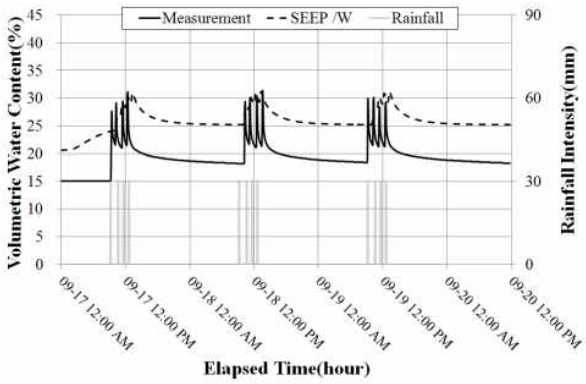
(a) A센서(함수비)



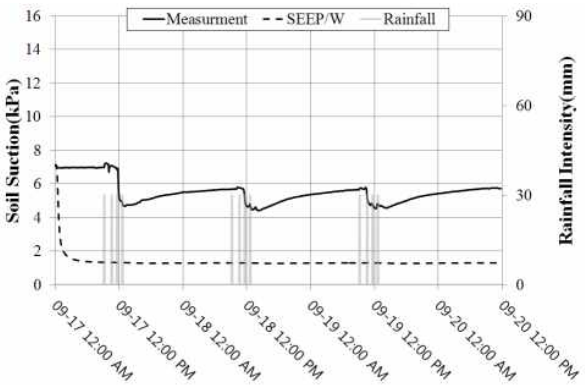
(b) B센서(함수비)



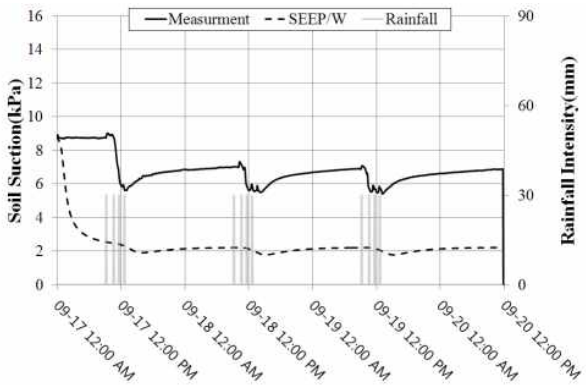
(c) C센서(함수비)



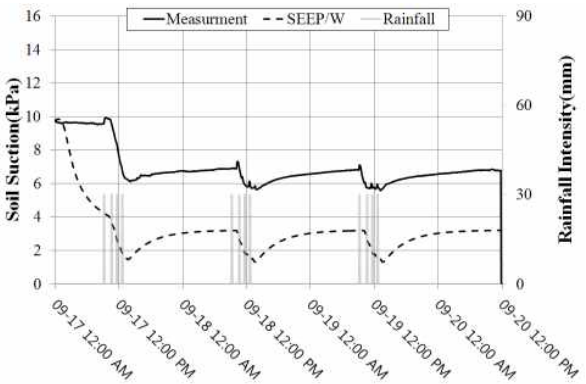
(d) D센서(함수비)



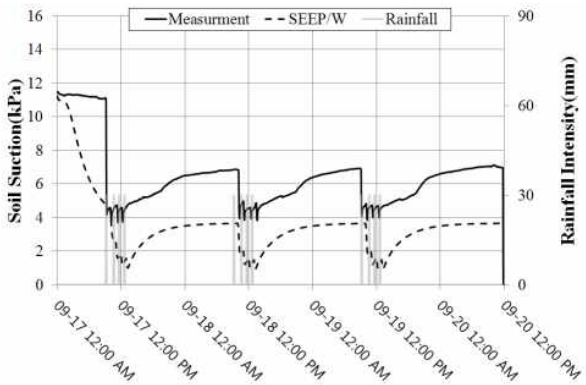
(e) A센서(모관흡수력)



(f) B센서(모관흡수력)



(g) C센서(모관흡수력)

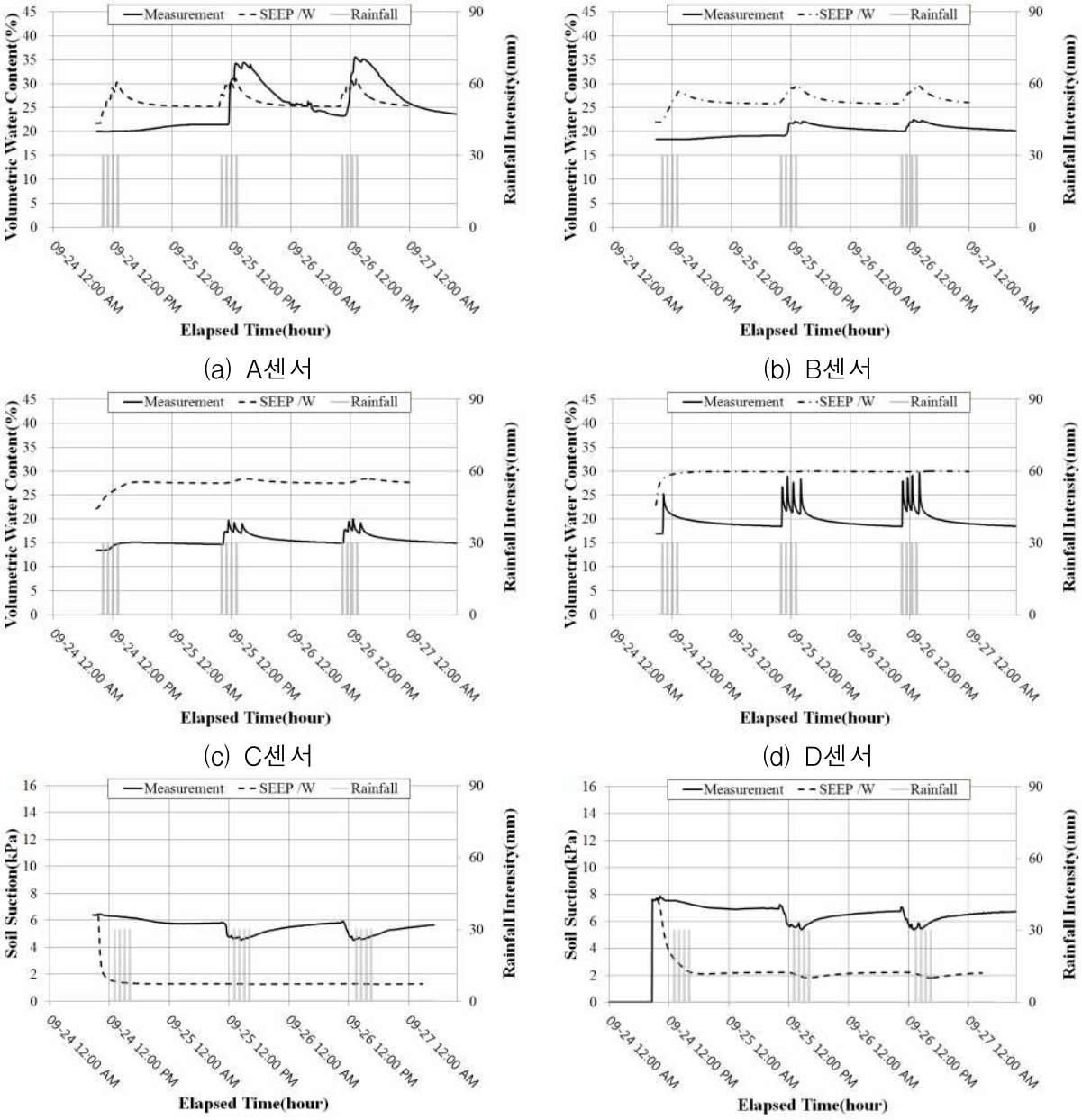


(h) D센서(모관흡수력)

그림 4.48 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 2)

(4) Case 3 비교

그림 4.49는 모형실험(Case 3)과 침투해석의 함수비와 모관흡수력의 변화를 비교한 것이다. 모형실험과 침투해석 비교 결과는 Case 1, 2와 동일하였다.

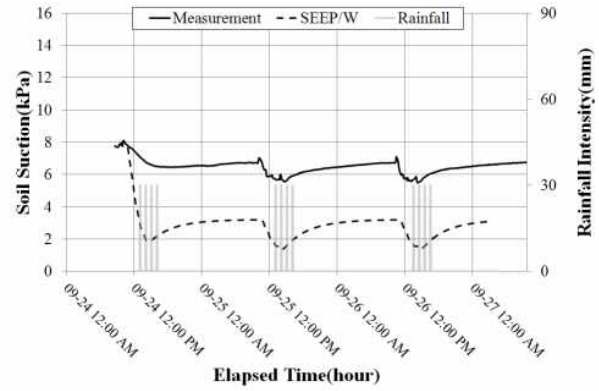


(a) A센서 (b) B센서

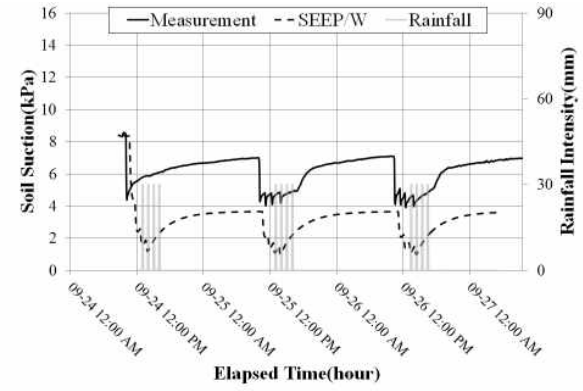
(c) C센서 (d) D센서

(e) A센서(모관흡수력) (f) B센서(모관흡수력)

그림 4.49 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 3) (계속)



(g) C센서(모관흡수력)

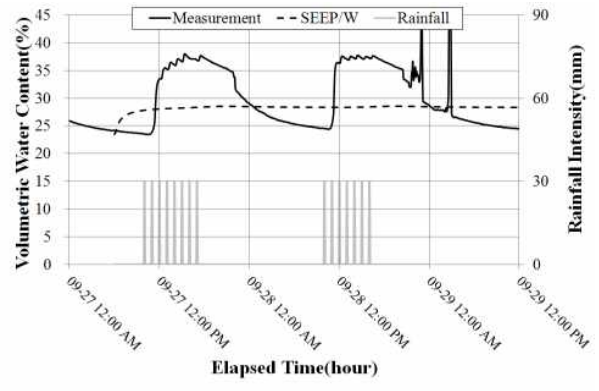


(h) D센서(모관흡수력)

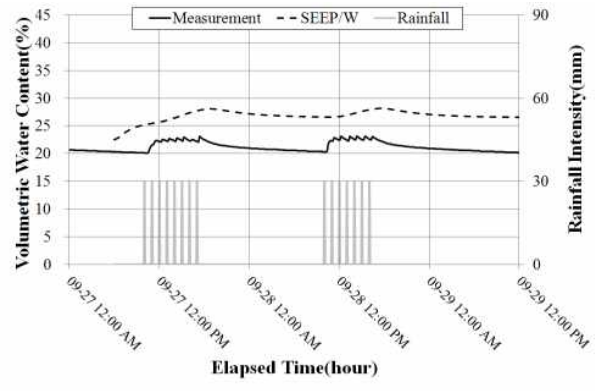
그림 4.49 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 3)

(5) Case 4 비교

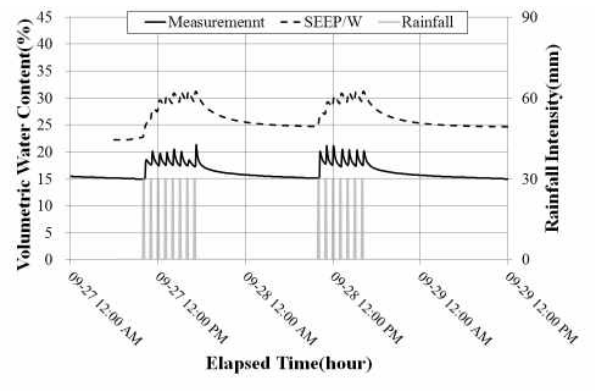
그림 4.50은 모형실험(Case 4)과 침투해석의 함수비와 모관흡수력의 변화를 비교한 것이다. 모형실험과 침투해석 비교 결과는 Case 1~3과 동일하였다.



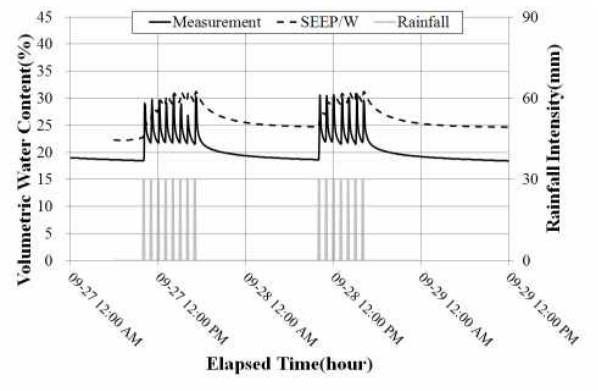
(a) A센서(함수비)



(b) B센서(함수비)

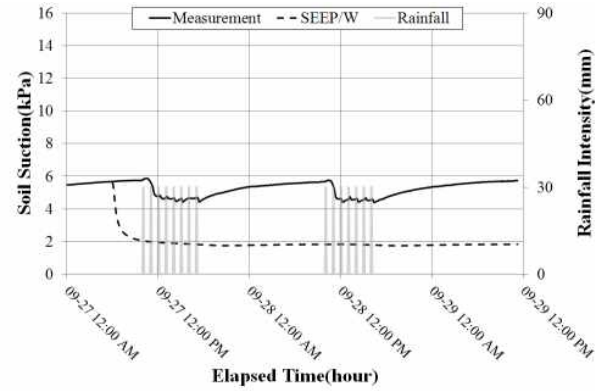


(c) C센서(함수비)

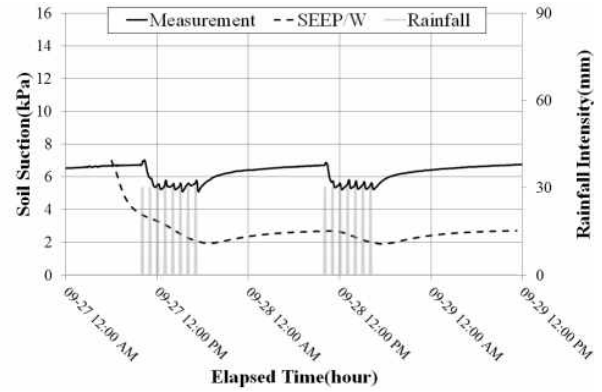


(d) D센서(함수비)

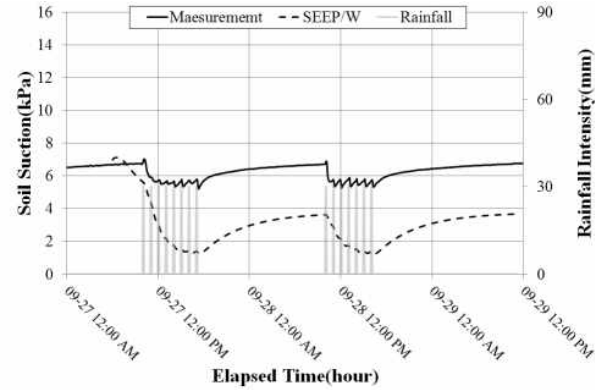
그림 4.50 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 4) (계속)



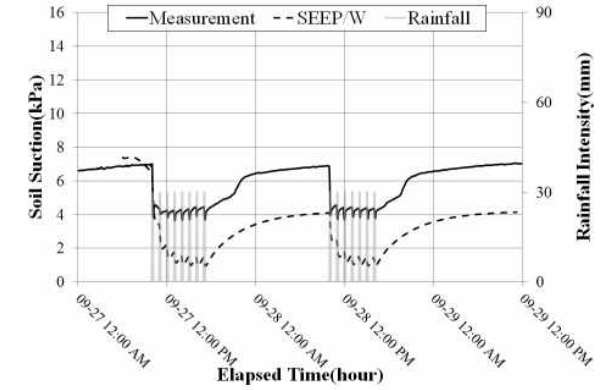
(e) A센서(모관흡수력)



(f) B센서(모관흡수력)



(g) C센서(모관흡수력)

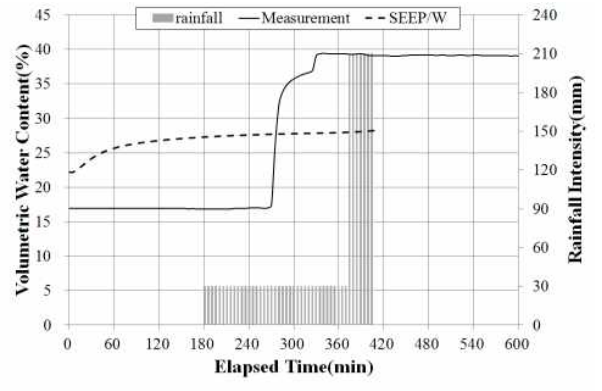


(h) D센서(모관흡수력)

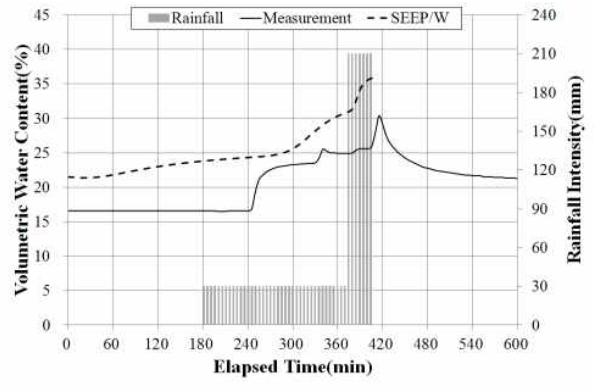
그림 4.50 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 4)

(6) Case 5 비교

그림 4.51은 모형실험(Case 5)과 침투해석의 함수비와 모관흡수력의 변화를 비교한 것이다. 모형실험과 침투해석 비교 결과는 Case 1~4와 동일하였다.

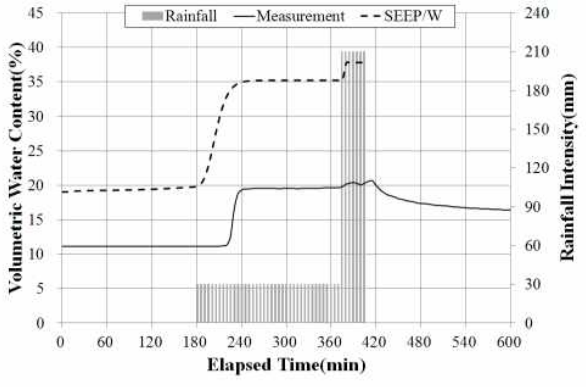


(a) A센서(함수비)

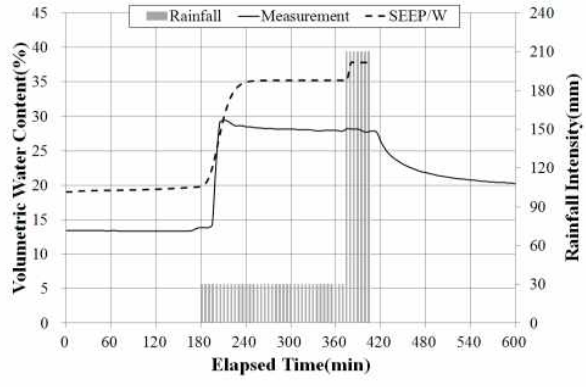


(b) B센서(함수비)

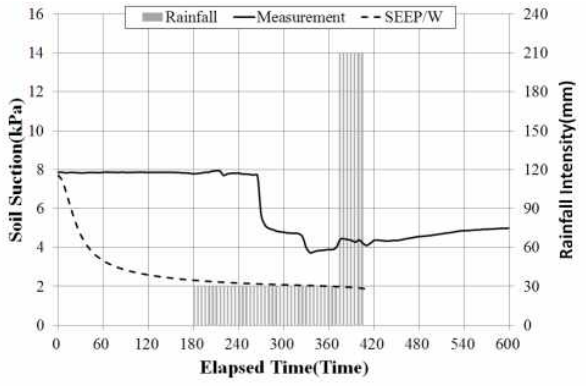
그림 4.51 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 5) (계속)



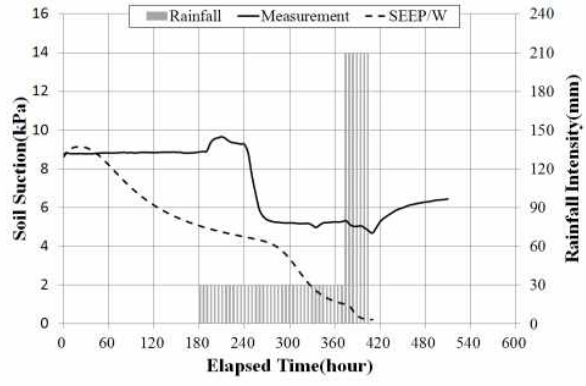
(c) C센서(함수비)



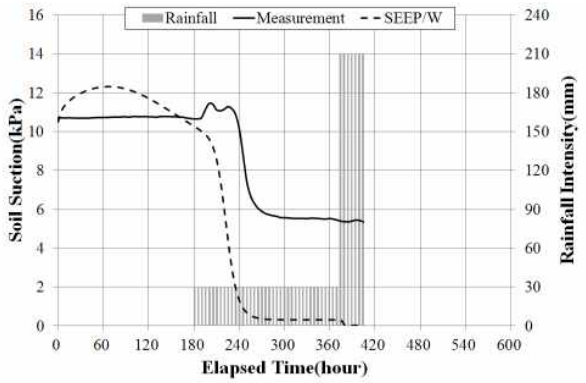
(d) D센서(함수비)



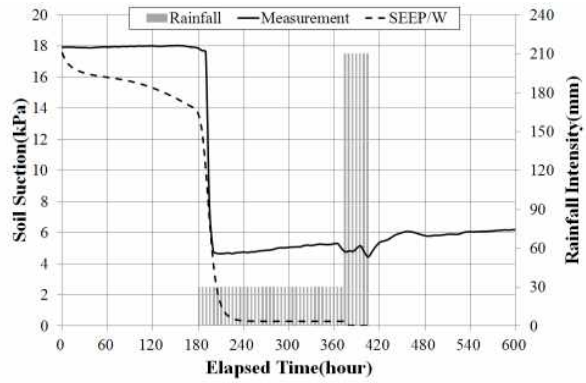
(e) A센서(모관흡수력)



(f) B센서(모관흡수력)



(g) C센서(모관흡수력)



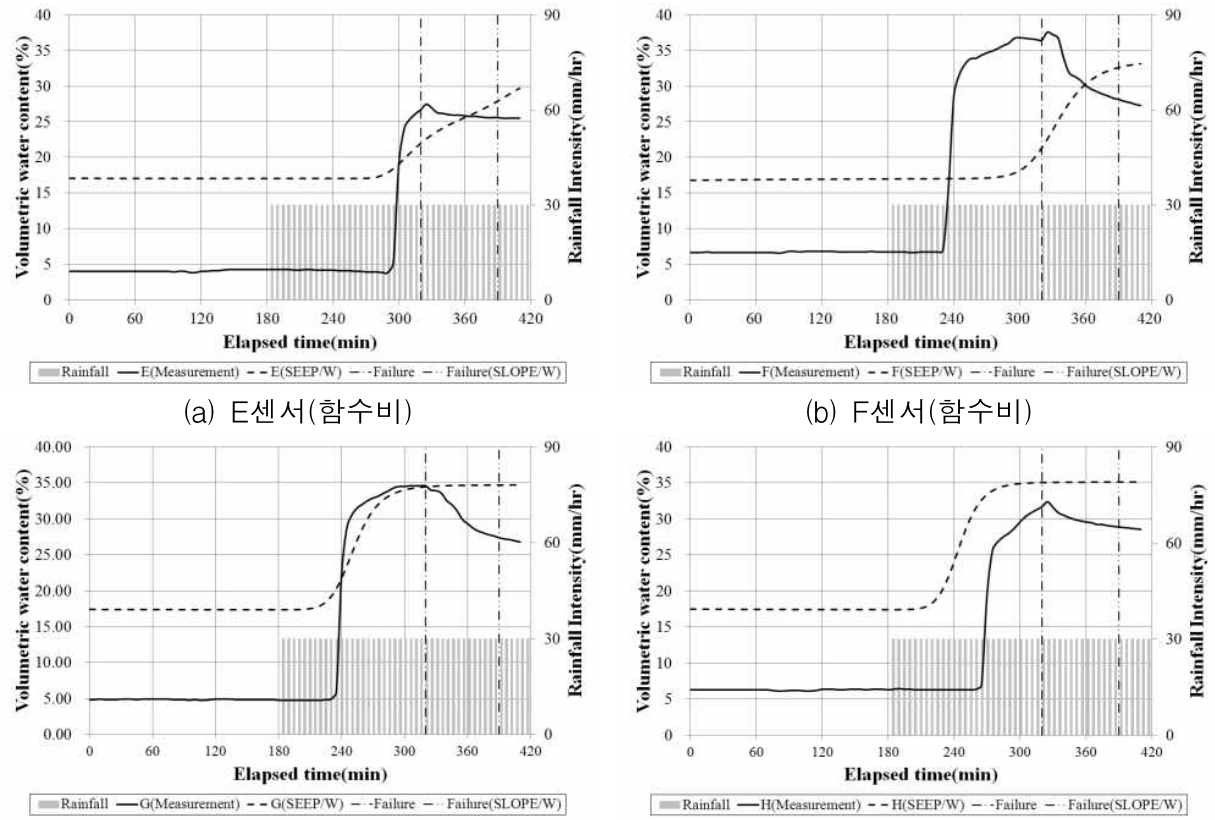
(h) D센서(모관흡수력)

그림 4.51 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비와 모관흡수력 비교(Case 5)

(7) Case 6 비교

그림 4.52은 Case 6 모형사면실험과 수치해석의 함수비를 비교한 것이다. 또한 각 센서의 함수비 변화와 실제 모형사면실험의 붕괴시점(320분)과 수치해석에서 측정된 붕괴시점(390분)을 같이 나타내었다. 각 센서의 심도에 따라 강우 재현 후 함수비 변화가 발생된 시간과 변화량이 달랐다. 그림 4.52 (a)와 같이 심도 50cm지점에 설치된 E센서의 경우, 모형사면실험과 거의 비슷한 시점에 거동이 발생되었으며 지속적으로 증가되었다. 그림 4.52 (b)와 같이 심도

35cm지점에 설치된 F센서의 경우, 모형사면실험보다 약 50분 늦게 거동이 발생되었으며 지속적으로 증가하지만 기울기는 감소하였다. 그림 4.52 (c)와 (d)같이 심도 20cm지점에 설치된 G와 H센서의 경우, 수치해석 결과는 동일하게 나타났지만 모형사면실험 결과는 두 값이 다르게 나타났다. 이는 모형사면실험의 인공강우가 사면상부에서 균일하게 침투되지 않기 때문인 것으로 판단된다.



(a) E센서(함수비) (b) F센서(함수비)

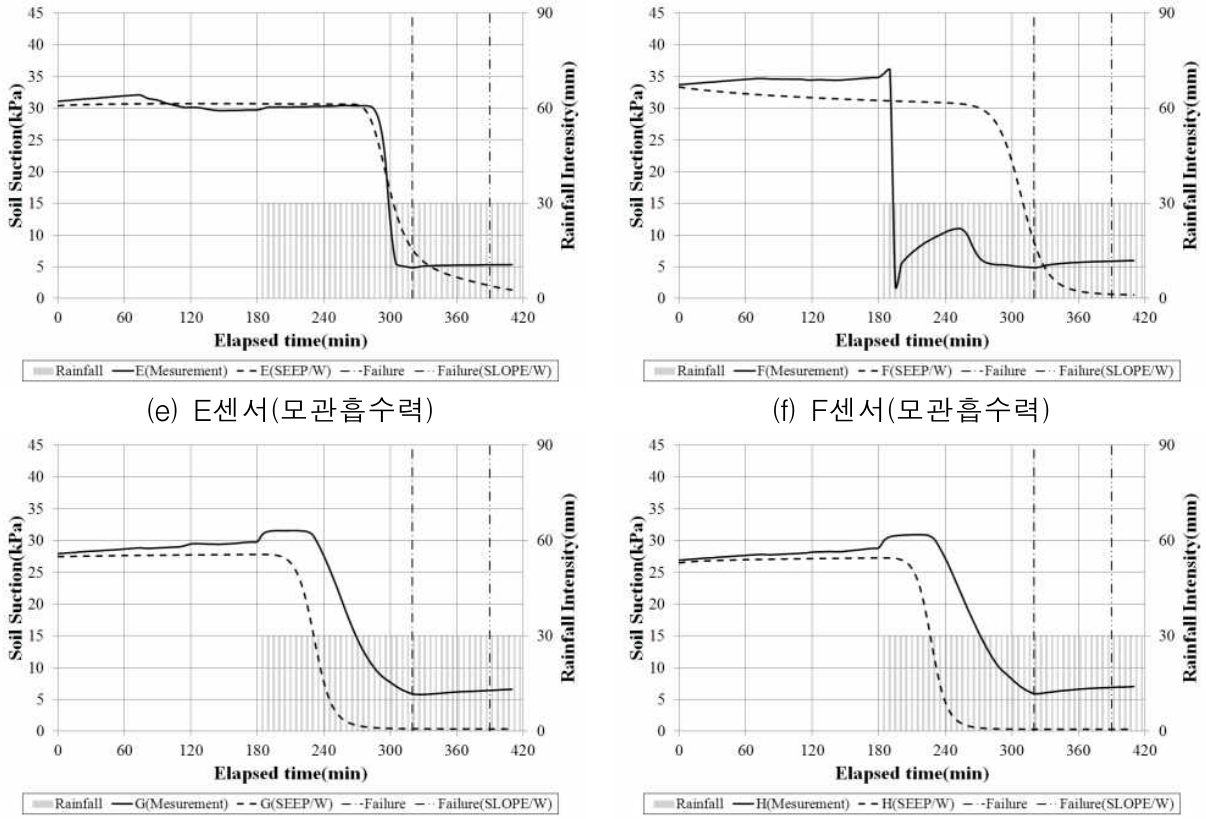
(c) G센서(함수비) (d) H센서(함수비)

그림 4.52 모형사면실험과 수치해석의 센서별 함수비 비교(Case 6)

그림 4.53는 Case 6 모형사면실험과 수치해석의 모관흡수력을 비교한 것이다. 또한 각 센서의 함수비 변화와 실제 모형사면실험의 붕괴시점(320분)과 수치해석에서 측정된 붕괴시점(390분)을 같이 나타내었다. 각 센서의 심도에 따라 강우 재현 후 모관흡수력 변화가 발생된 시간과 변화량이 달랐다. 그림 4.53 (a)와 같이 심도 50cm지점에 설치된 E센서의 경우, 함수비와 동일하게 두 결과가 거의 유사하게 나타났다. 그림 4.53 (b)와 같이 심도 35cm지점에 설치된 F센서의 경우, 모형사면실험보다 약 75분 늦게 거동이 발생되었으며 지속적으로 감소하여 345분 경과 후부터 0 kPa에 수렴되기 시작하였다. 그림 4.53 (c)와 (d)같이 심도 20cm지점에 설치된

G와 H센서의 경우, 함수비 비교 결과와 달리 모형사면실험과 수치해석 결과에서 모두 동일하게 나타났으며 이는 함수비와 모관흡수력을 측정하는 센서의 특징에서 발생된 것으로 판단된다.

모형사면실험의 붕괴시점에서 모관흡수력은 대부분 약 5kPa정도로 측정되었으며, 불포화 사면안정해석 결과의 붕괴시점에서는 약 0.2kPa정도로 측정되어 모형사면실험이 더 높은 모관흡수력에서 붕괴가 발생되었다.

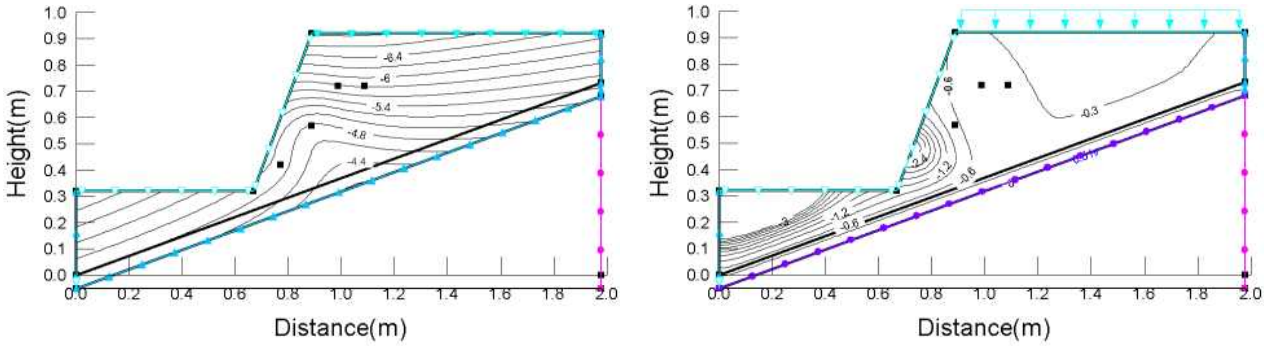


(e) E센서(모관흡수력) (f) F센서(모관흡수력)

(g) G센서(모관흡수력) (h) H센서(모관흡수력)

그림 4.53 모형사면실험과 수치해석의 센서별 모관흡수력 비교(Case 6)

그림 4.54은 사면 붕괴시 모관흡수력 분포도를 비교한 것이다. 그림 4.54 (a)는 모형사면실험의 붕괴시 모관흡수력 측정 결과를 이용하여 분포도를 작성한 것이며, 파괴면 주변의 모관흡수력이 약 4.6~6.6 kPa로 나타났다. 그림 4.54 (b)는 불포화 사면안정해석의 붕괴시 모관흡수력 분포도를 나타낸 것이며, 파괴면 주변의 모관흡수력이 약 0.3~2.4 kPa로 나타났으며 모형사면실험이 상대적으로 높은 모관흡수력에서 붕괴가 발생되는 것을 알 수 있다.

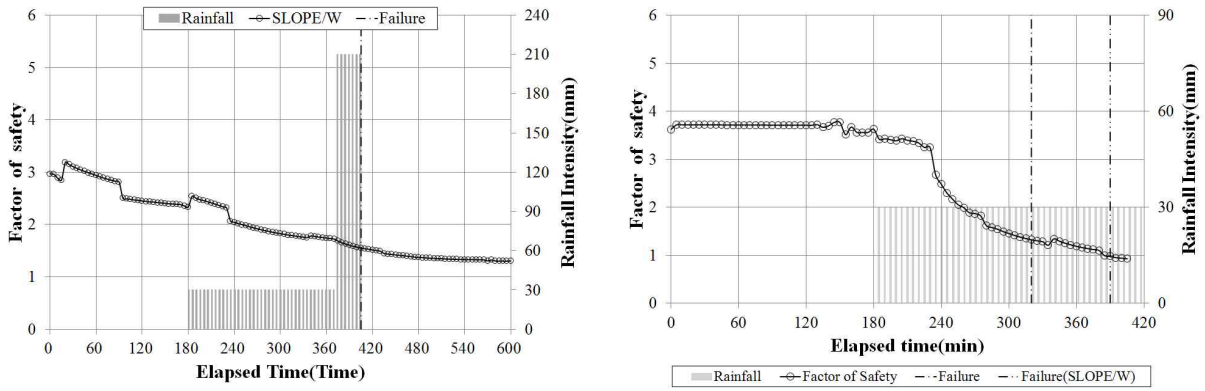


(a) 모형사면실험(단위 : kPa) (b) 불포화 사면안정해석(단위 : kPa)

그림 4.54 사면 붕괴시 모관흡수력 분포도 비교

그림 4.55은 붕괴실험을 수행한 Case 5와 6의 인공강우의 침투로 인한 불포화 사면 안정 해석 및 설계 절차의 적합성 검증하기 위해 안전율을 비교한 것이다.

그림 4.55 (a)는 사면경사 50°일 때 안전율 비교 결과이며, 사면의 경사가 완만하여 불포화 사면 안정 해석에서는 안전율이 1이하로 떨어지지 않아 직접적인 비교가 어려웠다. 그림 4.55 (b)는 사면경사 70°일 때 안전율 비교 결과이며, 불포화 사면안정해석에서는 인공강우 재현 후 약 50분 경과 후부터 안전율이 급격히 감소되기 시작하여 인공강우 재현 후 약 200분 경과 후에 안전율이 1이하로 감소되었다. 모형사면 실험에서는 강우 재현 후 약 140분 경과 후에 사면의 붕괴가 발생되었으며 불포화 사면 안정해석 결과가 약 60분 정도 늦게 붕괴가 발생되는 것으로 나타났다.



(a) Case 5 (b) Case 6

그림 4.55 모형실험과 불포화 사면안정해석의 안전율 비교

그림 4.56 모형사면실험(Case 6)과 불포화 사면 안정 해석의 파괴형상을 비교한 것이다. 모형실험에서는 다수의 인장균열과 함께 붕괴되었으며 사면 천단에서 수평방향으로 16cm, 지표

하 45cm의 원호형태로 붕괴되었다. 불포화 사면안정 해석의 파괴형상과 비교하면 거의 유사한 형태로 붕괴가 발생되었다.

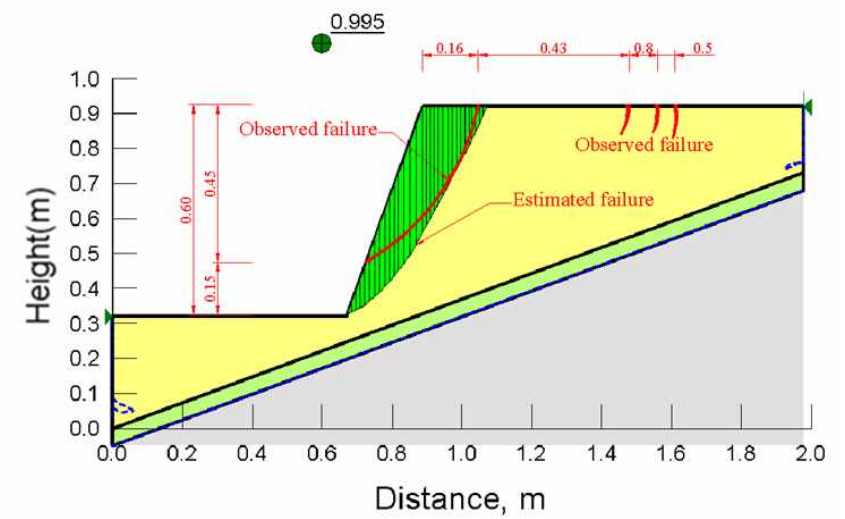


그림 4.56 모형실험(Case 6)과 불포화 사면 안정 해석의 파괴형상 비교

4.5 비교 분석 및 정리

그림 4.57~4.59는 모형사면실험과 수치해석 결과를 비교하여 흐름도로 정리한 것이다. 그림 4.57과 같이 인공강우의 침투·배수에 따른 모형사면의 침투거동을 파악하기 위하여 수행한 Case 1~4의 모형사면실험과 수치해석 결과를 비교한 결과, 수치해석 결과가 모형사면실험보다 높은 함수비와 낮은 모관흡수력 영역에서 거동이 발생되었지만 실제 침투거동과 유사하게 나타났다. 두 결과가 비슷한 양상을 나타냄에도 차이가 발생된 원인은 교란시료로부터 구한 함수특성곡선을 수치해석에 사용하였기 때문이며, 이력현상 등이 고려되지 않고 모형사면 실험과정에서 일정하게 재현되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

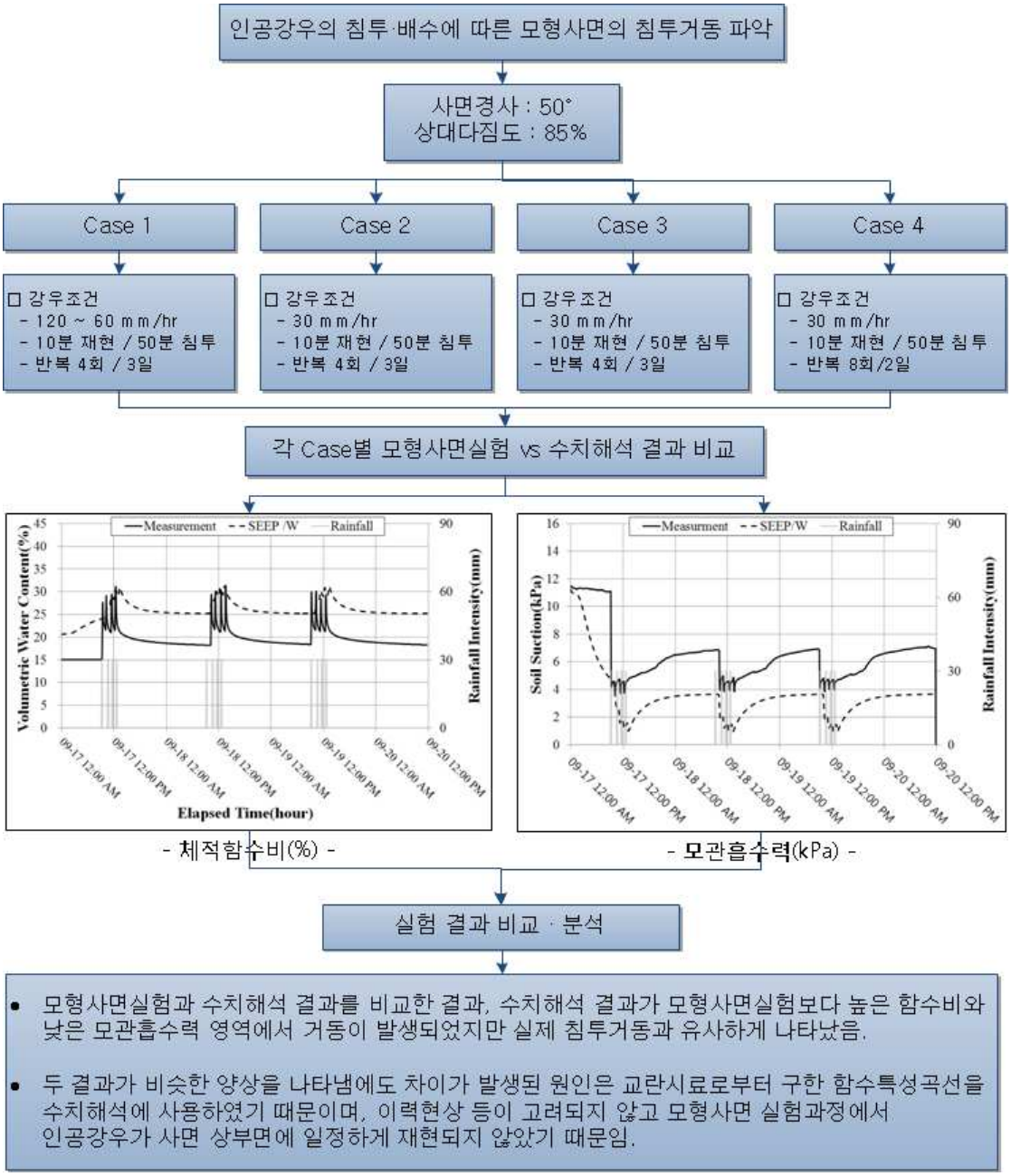


그림 4.57 인공강우의 침투·배수에 따른 모형사면의 침투거동 파악 도표(Case 1~4)

인공강우에 의한 모형사면의 파괴거동을 파악하기 위해 수행한 실험 Case 5와 6와 수치해석 결과를 비교한 흐름도는 그림 4.58와 그림 4.59에 나타내었다. 실험 Case 5은 사면경사 50°, 상대다짐도 85%로 사면을 축조하였으며 인공강우는 30 mm/hr의 강우강도로 재현한 후 180분 재현 후 210 mm/hr로 증가시켰다. 수치해석과 비교한 결과, 모형사면의 경사가 완만하여 침투에 의한 급격한 파괴거동이 유발되지 않았으며 이로 인해 사면경사를 증가시킨 실험 Case 6에서 비교하였다.

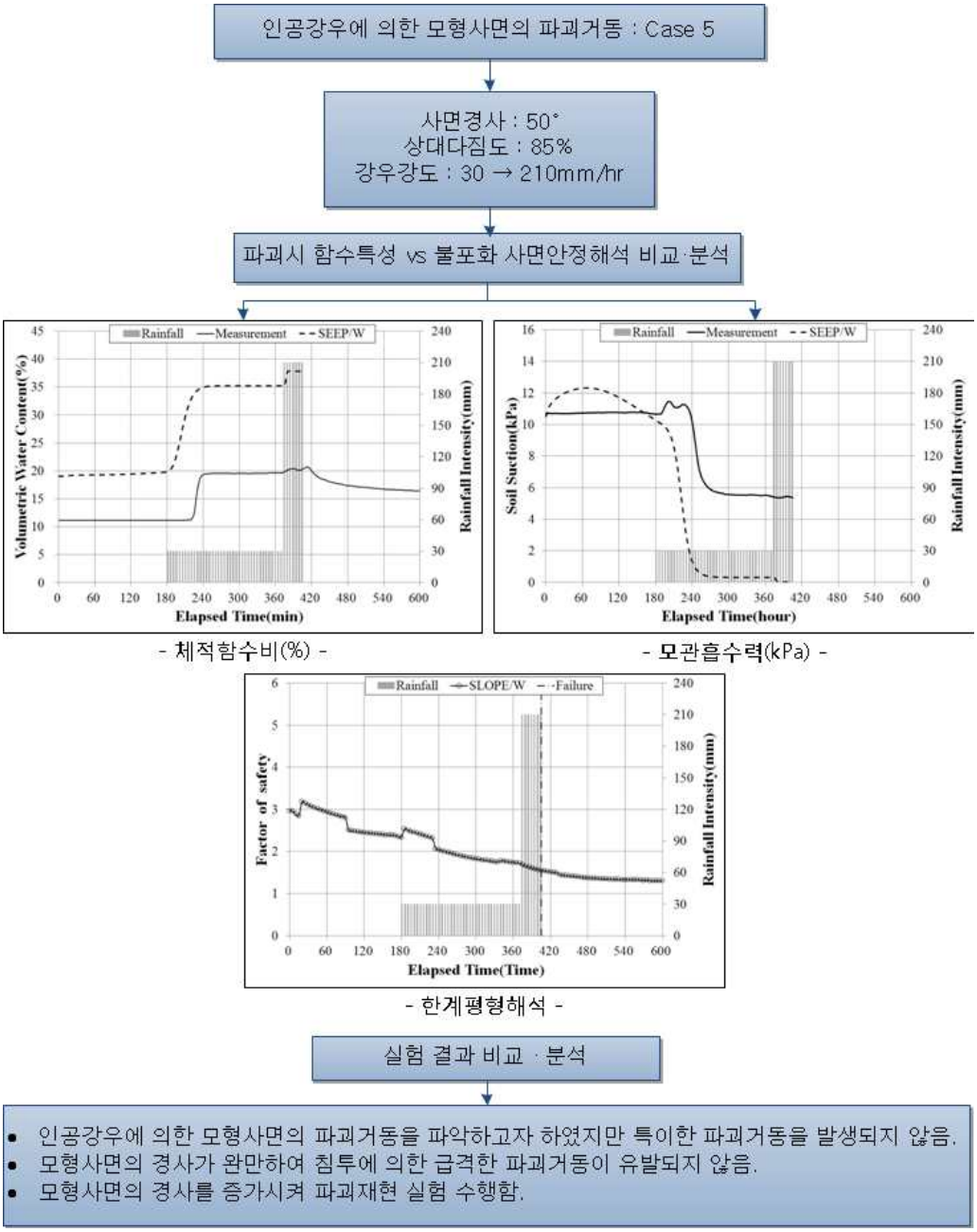


그림 4.58 인공강우에 의한 모형사면의 파괴거동 도표(Case 5)

그림 4.59의 실험 Case 6은 사면경사 70°, 상대다짐도 85%로 사면을 축조하였으며 인공강우는 30 mm/hr의 강우강도로 붕괴시까지 재현하였다. 수치해석결과와는 인공강우 침투로 인한 모관흡수력과 함수비 변화, 파괴면의 형상과 파괴시점을 비교하였다. 침투거동을 비교한 결과, 모관흡수력은 거의 동일하였으며 함수비는 수치해석결과가 다소 높은 영역에서 발생되었다. 또한 파괴면 주변이 불포화상태일 때 붕괴가 발생되었다. 모형사면실험은 강우재현 140분 경과시 파괴되었고 파괴면 주변의 모관흡수력은 약 5kPa이였으며, 수치해석에서는 강우재현 200분 경과시 파괴되었고 파괴면 주변의 모관흡수력은 약 0.2kPa로 나타나 모형사면실험보다 상대적으

로 낮은 모관흡수력에서 60분 늦게 붕괴되었다. 두 결과의 파괴형상은 거의 유사하게 나타났다.

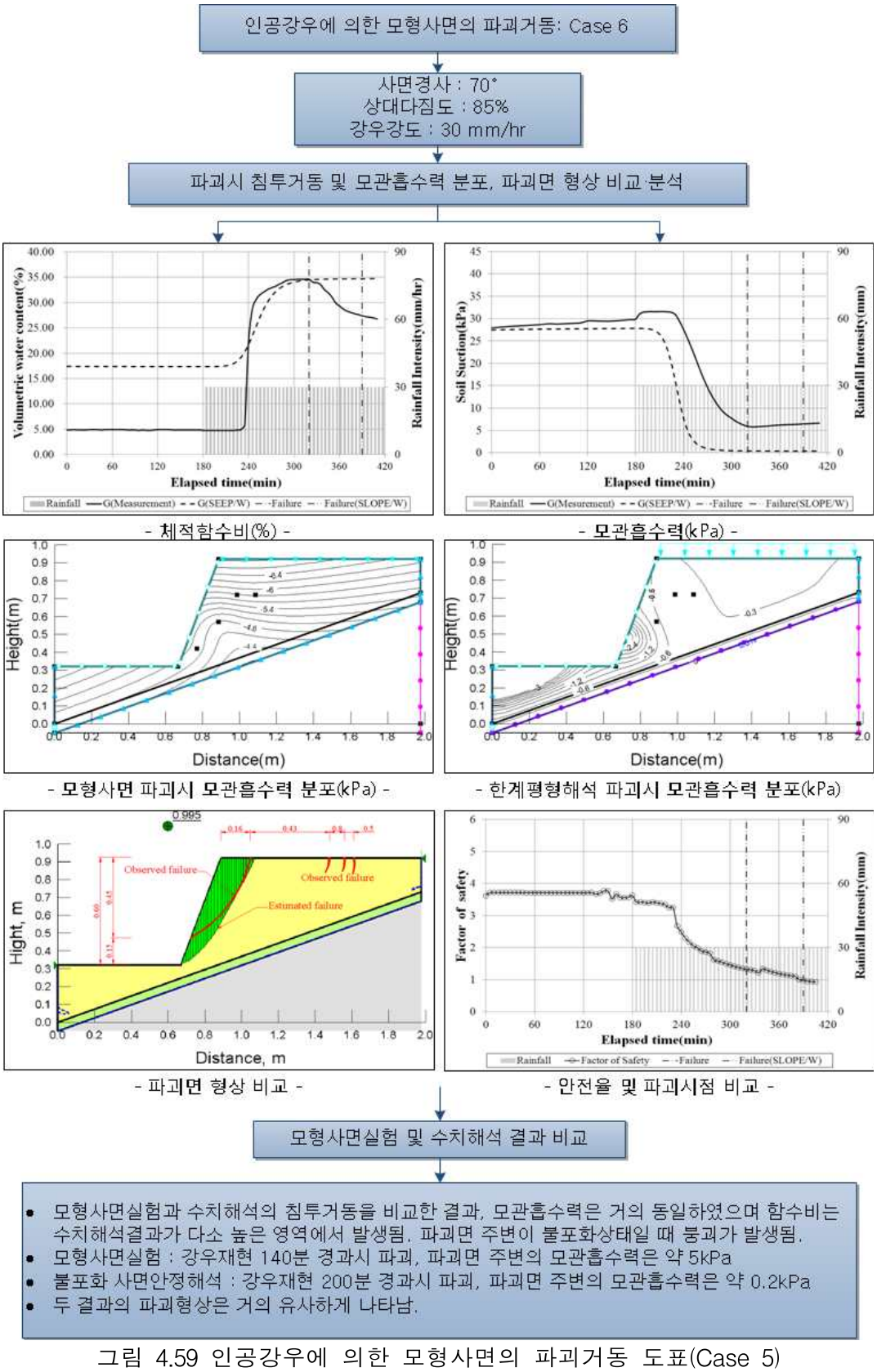


그림 4.59 인공강우에 의한 모형사면의 파괴거동 도표(Case 5)

본 장의 내용을 정리하면 다음과 같다.

1) 인공강우를 조절하여 다양한 강우조건과 지속기간에 대하여 모형사면실험(Case 1~4)을 수행하였다. 지중 60cm지점에 설치된 A와 E센서는 인공강우의 침투·배수에 의해 함수비와 모관흡수력이 즉시 변화되지 않았으며, 지중 20cm이내에 설치된 C, D, E, F센서들은 인공강우의 침투·배수에 의해 즉시 변화가 발생되었다. 인공강우의 침투·배수에 의한 거동이 센서의 위치에 따라 다소 차이는 있었지만 비교적 명확히 나타났으며 이력현상도 발생되었다.

2) 모형사면에서 측정된 모관흡수력을 초기조건으로 수치해석을 수행하여 두 결과를 비교하면, 침투해석 결과가 모형실험 결과보다 높은 함수비와 낮은 모관흡수력 영역에서 거동일 발생되지만 전반적으로 실제 침투거동과 유사한 결과를 얻을 수 있다. Case 1~4의 경우에는 실험과정에서 많은 시행착오와 사면붕괴를 재현하는 데 많은 어려움을 겪었다. 그리고 모형사면 실험과정에서 인공강우가 일부 지표수로 유출되고 사면 상부면에 저류되는 현상을 피할 수 없었다. 이로 인하여 추가시험을 수행하였다.

4) 강우 침투로 인한 모형사면의 붕괴를 재현한 실험 Case 5와 Case 6의 경우, 실험결과와 수치해석의 모관흡수력의 거동이 유사하게 나타났다. 특히 Case 6의 경우 수치해석결과에서 함수비는 다소 높게 발생되었다. 또한 심도에 따라 포화함수비(38%)에 거의 근접한 지점이 나타났으며 파괴면 주변이 불포화 상태일 때 붕괴가 발생되었다.

5) Case 6의 경우 모형사면실험의 붕괴시점에서 파괴면 주변의 모관흡수력은 대부분 약 5kPa정도로 측정되었으며, 불포화 사면안정해석 결과의 붕괴시점에서 파괴면 주변의 모관흡수력은 약 0.2kPa정도로 측정되어 모형사면실험이 상대적으로 높은 모관흡수력에서 붕괴가 발생되었다.

6) Case 6의 경우 모형사면의 붕괴거동과 불포화 사면안정해석에 따른 안전율을 비교한 결과, 불포화 사면 안정해석이 모형사면실험 보다 늦게 붕괴가 발생되지만 파괴형상의 거의 유사한 것으로 나타났다.

제5장 목표달성도

본 연구에서는 대경권에 존재하는 (1) 풍화토 지층의 실내실험 및 분석, (2) 불포화 사면안정해석, (3) 이러한 특성들을 고려한 불포화 사면의 안정성 평가기법 개발을 수행하였다. 연구목표에 따른 달성도를 정리하면 다음과 같다. (표 5.1 참조)

표 5.1 연구목표 달성도

구분	목표	달성도	기여도
실내실험 및 분석	대경권 사면 불포화층 물성평가 기법 개발	• 실내시험 수행 및 분석 : 4개 사면 불포화층의 함수특성, 투수계수, 전단강도 특성 평가 달성	• 실제사면에 대한 설계 및 사후조사 관례 개선 • 실제 현장 기록 및 자료 조사 중요성 확인 • 불포화 물성 획득 관례 및 분석 절차 수립
불포화사면 해석기법 개발	침투 및 응력의 변화를 고려한 불포화 사면 안정해석 기법 개발	• 유효응력에 기반한 사면해석기법 개발: 실제붕괴사면 및 모형사면 해석에 적용/검증	• 3개 현장의 붕괴사면 해석 수행, 실제 적용성 확보 • 침투해석 및 응력해석 수행절차 확립 • 강우시 침투에 의한 안정성 해석 절차 확립 • 유한요소 응력장에서 실제사면의 붕괴 재현, 실용적 적용성 확보
모형실험	인공강우 모형실험을 통한 사면해석기법 검증	• 강우시 파괴사면 모형실험 수행: 총 6개 모형사면 • 불포화 사면 해석기법 검증 달성	• 강우량/경사 조절 사면파괴 재현 • 풍화토층 대상 모형실험 수행
현장 사례연구	대경권 사면현장 사례 해석 및 평가	• 강우시 사면의 안정성 변동 평가 달성: 4개 사면 • 풍화토층 강우에 따른 사면의 평가기법 검증 달성 • 보강전 및 보강후 사면의 안정성 변화 평가 달성: 3개사면	• 풍화토 사면 현장 접근 • 대상 단면의 지층 및 시공일지 확보 • 포화토의 물성 확보 • 불포화 물성 획득: 시료 채취 및 시험수행

양적 및 질적 성과목표 달성도는 다음과 같다. (표 5.2, 표 5.3 참조)

표 5.2 연구과제의 양적 성과지표

연차 (단계)	연차별 성과목표	양적 성과지표	측정방법	목표치	달성치
1차년도 (20개월)	불포화 특성을 고려한 대구·경북 퇴적암 기반 풍화토층 사면의 안정성 평가기법 개발	국내 학술지 논문게재 건수	국내 학술지게재 논문건수	3건	4건
		국외 학술지 논문게재 건수	국외 학술지게재 논문건수	1건	1건
		대경권 풍화토층 사면설계시 입력정수 분석	실내시험 수행 및 분석 건수	2건	4건
		강우시 대경권 풍화퇴적층 사면 안정성의 설계	불포화 사면 수치해석 건수	3건	4건
		모형실험	모형실험 수행 건수	1건	6건
		현장 사례연구	현장사례 건수	1건	4건
		불포화 사면 안정해법 및 사면설계 가이드라인	가이드라인 건수	1건	1건
	소 계				24건

표 5.3 연구과제의 질적 성과지표

질적 성과지표	성과검증 기준				가중치
	목표수준		측정방법	검증방법	
	목표치	달성치			
SWRC와 전단강도의 상관관계	80%	90%	SWRC와 전단강도의 상관관계	3.1절	20%
강우에 따른 사면안전율 계산 엄밀성 개선	90%	90%	한계해석법에 대한 응력장 해법의 안전율 정확도 비교	3.2절	20%
강우에따른 실제사면의 파괴사례	90%	95%	실제사면 사례의 안전율 오차	3.2절	30%
강우에따른 모형사면의 파괴기구 검증	90%	90%	모형사면의 안전율 오차	4.4절	30%

제6장 연구개발결과의 기대성과 및 활용계획

대경권 불포화 사면의 연구개발을 통하여 유효응력에 기반한 분석 및 해법에 원천적인 최신기술을 확보할 수 있었다.

- ○ 함수특성곡선에 따른 불포화토의 유효응력 특성 분석
- ○ 모관흡수력에 따른 유효응력 특성 분석
- ○ 유효응력에 따른 불포화토의 파괴규준 분석
- ○ 강우조건에 따른 실제사면의 시뮬레이션
- ○ 강우시 사면파괴에 대한 모형실험 및 시뮬레이션
- ○ 대경권 사면 파괴 기구 규명 및 기술 축적

연구결과의 기대성과 및 파급효과는 다음과 같다.

- ○ 대경권 특성에 맞는 불포화 지반 실험 경험 축적에 따른 풍화퇴적층 및 불포화 사면 관련 전문가 양성 및 교육도구의 토대 구축
- ○ 대경권 풍화토 및 불포화토 해석기법 개발에 따른 기술선진화 및 공사비 절감
- ○ 대경권 특성에 맞는 사면 평가기술 축적에 따른 인명피해 감소 및 방재•안전 확보

연구결과의 활용방안은 다음과 같다.

- ○ 불포화토 사면안정해석과 안정성 평가에 활용
- ○ 불포화 사면 풍화토층의 불포화 물성치 평가에 활용
- ○ 불포화 사면 침투 및 안정해석에 대한 가이드라인 실무 활용

불포화 사면의 새로운 해법은 사면건설 및 방재 분야가 지식기반 산업으로 전환하는데 기여할 것이다. 자연사면이나 인공사면에서 강우로 인한 안정성을 확보하고 인명피해나 경제제적인 손실을 최소화 할 수 있다. 특히 최신기술은 대경권의 지역경제에도 기여할 수 있다.

대경권이 사면 건설 및 방재 분야에서 주축이 되는 관산학 연계체제를 구축할 수 있었다. 특히 영남대, 계명대, 금오공대, 안동대 연구진이 불포화토의 실험경험을 축적하고 분석기술을

공유할 수 있었다. 그리고 지역내 대학간의 기술 교류를 확대하여 불포화 사면 해석기법을 확장할 수 있었다. 이를 토대로 지역내 기업의 기술력을 높이고 지자체의 사면 보수관리 역량을 제고할 수 있다. 그리고 대경권 특성에 맞는 불포화 지반 실험 경험 축적에 따른 풍화퇴적층 및 불포화 사면 관련 전문가를 양성하고 교육도구를 개발할 수 있었다.

지속적인 산업체 연계방안 및 추진전략은 다음과 같다.

- ○ 대경권 풍화토 및 불포화토 사면의 해석기법에 대한 교육프로그램을 개설하여 사면 실무자들에게 기술을 연계하고 지속적인 기술상담과 지도를 통해 기술정보와 해석기술을 이전한다.
- ○ 건설업체의 사면설계시 대경권 특성에 맞는 해석기법을 적용하여 사면 최적 설계와 공사비 절감 효과를 가져올 수 있다.
- ○ 대경권 특성에 맞는 사면 평가기술을 기업이 축적하여 해석 및 시공 능력이 향상을 향상시켜 사면 붕괴로 인한 인명피해 감소 및 방재•안전 확보 효과를 가져올 수 있다.

연구개발 결과 불포화 사면 설계와 관련한 가이드라인을 제시하였다. 이로부터 불포화 특성에 맞는 해석기법을 적용하여 국가 주도의 유지관리 계획 및 법 제정에 활용할 수 있으며 정책 결정을 위한 기술자료로 활용할 수 있다.

제7장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

연구개발과정에 미국에서 열린 Geo-Institute 연례 학술발표회 Geo-Congress 2012에 참여하였다. 또한 유럽역학회에서 지원하는 소규모 콜로키움이 네덜란드 위트레흐트(Utrecht) 대학에서 다음과 같이 열렸다.

European Mechanics Society(EUROMECH), Colloquium 539

Mechanics of Unsaturated Porous Media:

Effective stress principle; from micromechanics to thermodynamics

(Department of Earth Sciences, Utrecht University, The Netherlands, August 27-30, 2012)

참여인원은 50명 내외였으며, 기조강연과 초청강연자는 다음과 같다.

Keynote speaker	Affiliation	Country
Eduardo Alonso	UPC	Spain
Ronaldo Borja	Stanford University	USA
John H. Cushman	Purdue University	USA
Patrick Dangla	ENPC	France
Ghassem Habibagahi	Shiraz University	Iran
Nasser Khalili	UNSW	Australia
Eric Lemarchand	ENPC	France
Ning Lu	Colorado School of mines	USA

세션은 다음과 같이 구성되었다.

1. Session A. Micromechanical approaches to effective stress: Theoretical, experimental, and numerical studies
2. Session B. Role of micro-structure, and phase change in the effective stress principle
3. Session C. The effective stress principle, hydraulic hysteresis, and hydro-mechanical coupling

4. Session D. Other approaches to effective stress: pore-scale models, artificial-intelligence -based techniques
5. Session E. Thermodynamic approaches to effective stress
6. Session F. Effective stress in unsaturated swelling porous media
7. Session G. The legacy of Professor Olivier Coussy in unsaturated poro-mechanics

미시역학으로부터 열역학까지, 불포화토의 유효응력 원리를 적용하는 연구에 대하여 다양하고 저명한 성과를 논의하였다. 불포화토의 역학적 거동은 지반공학뿐만 아니라 석유공학, 식품과학, 건축재료, 토양학, 농공학에 이르는 다양한 학문분야에 적용된다. 이 때, 유효응력 원리와 정식화는 불포화 간극 매질의 거동을 이해하는 핵심이다. 이 콜로키움은 기조강연과 초청강연을 중심으로 현재의 기술수준과 영감을 공유하였다.

미시역학 및 열역학분야에서는 유효응력에 기반한 수학적 정식화가 주요한 내용이었다. 불포화토의 물리-화학적인 거동을 연동하여 해석하는데 있어서, 열-수리유동-변형 뿐 아니라 기체이동, biomechanics, 전기적인 거동에까지 확장되고 있었다.

Alonso 교수는 유효응력에 기반한 구성모델 소개하고, 미시구조 간극비를 변수로 도입하였다. Khalili 교수는 역학-수리 히스테리시스 효과를 고려한 지배방정식을 정식화하였으며, 유효응력 기반 경계면 모델을 적용하였다. Lu 교수는 흡수응력의 미시역학적 접근을 이론적으로 설명하였고, Dangla 교수는 불포화토 유효응력의 열역학적 해석에 대하여 논하였다. Lemarchand 교수는 불포화 매질의 연동 거동을 미시역학적으로 접근하여, 고체/유체 또는 유체/유체 접면 거동에서 유효응력을 입증하였다. Nuth 교수는 불포화토 연동해석의 정식화와 진보적인 구성관계에 대한 선도적인 연구성과를 발표하였다.

연동해석을 구성하는 각 미분방정식에서는 유효응력에 따른 구성법칙이 연구의 독창성을 지배하였다. 그러나 유효응력에 기반한 역학적 구성관계는 Moh-Coulomb 모델과 같이 실용적이고 단순한 수준의 모델에 대하여 관심을 가질 필요가 있다. 그리고 여타 거동에 대한 구성관계도 실험적인 근거를 기반하여야 지속적으로 적용될 수 있을 것이다.

이번 콜로키움에서는 불포화토의 유효응력 개념이 팽창토, 전기삼투, 핵폐기물이나 가스의 지하 저장시설, 관절연골, 전기 및 지진 파동 전파, 유적의 화학적 손상 등에 적용되기에 이르렀다. 미시역학에서 열역학에 이르는 연동해법은 구체적인 대상문제를 확보해야 유의미해진다. 앞으로, 대상문제를 얼마나 실제적이고 구체적으로 설정하는가에 불포화토 유효응력 연구의 성과를 좌우할 것이다.

Lehigh에서 곧 학위를 받을 Dong은 전기 및 열 전도 하에서 불포화토의 수리특성을 실험

적으로 보여주었다. 동경대의 Aichi 교수는 신진학자로 복잡한 정식화를 보여주었으며, 콜로키움 후에, 이메일로 세라믹 디스크를 대체할 수 있는 멤브레인을 소개해 주었는데, 매우 기대가 되는 기법이다.

지층에서 생산되고 저장되는 에너지 분야는 새로운 산업을 창출할 것이다. 이로 인하여 불포화토 연구는 열, 화학물질, 전기적 거동으로 확장되고 있다. 이번 콜로키움은 이러한 연구를 망라하고 있었다.

제8장 참고문헌

1. Baek, S. C, Kang, I, K, Kim, H. T., Sim, Y. J.(2012), "An Experiment Study on the Variation of Pore-water Pressure in Soil Slope during the Rainfall", International Journal of Geo-Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 35～42.
2. Bishop, A. W. (1954) "The use of pore water coefficients in practice," Géotechnique, 4(4), pp. 148～152.
3. Bishop, A. W. (1959) "The principle of effective stress," Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk, Oslo, Norway, 106(39), pp. 859～863.
4. Bishop, A. W. and Blight, G. E. (1963) "Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils," Géotechnique, 13, pp. 177～197.
5. Brooks, R. H., and Corey, A. T.(1964), "Hydraulic properties of porous media", Colorado State University Hydrology Paper, Fort Collins, No. 3.
6. Fredlund D. G., Rahardjo H., Fredlund(2012) M. D., "Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
7. Fredlund, D. G., and Xing, A.(1994), "A Equations for the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 3, pp. 521～532.
8. Fredlund, D. G., and Morgenstern, N. R. (1977) "Stress state variables for unsaturated soils," J. Envir. Engrg. Div., 103(5), pp. 447～466.
9. GEO-SLOPE(2007a), "Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W 2007", GEO-SLOPE International Ltd, Canada.
10. GEO-SLOPE(2007b), "Seepage Modeling with SEEP/W 2007", GEO-SLOPE International Ltd, Canada.
11. GEO-SLOPE(2007c), "Stability Modeling with SLOPE/W 2007", GEO-SLOPE International Ltd, Canada.
12. Likos, W.J., and Lu, N. (2004) "Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil," Journal of Engineering Mechanics, 130, pp. 646～655.
13. Lu, N. and Likos, W. J. (2006) "Suction stress characteristic curve for unsaturated soils," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(2), pp. 131～142.

14. Lu, N. (2008) “Is matric suction stress variable?” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(7), pp. 899～905.
15. Lu, N., and Godt, J. and Wu, D. T. (2010) “A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil,” Water Resources Research, Vol. 46, doi:10.1029/2009WR008646, 1～14.
16. Lu, N., Wayllace, A., and S. Oh. (2012) "Infiltration-induced seasonally reactivated instability of a highway embankment near the Eisenhower Tunnel, Colorado, USA," Engineering Geology, 162, pp. 22～32.
17. Lu, N., Kaya, M., Collins, B.D., Godt, J.W. (2013) “Hysteresis of hydromechanical properties of a silty soil,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(3), pp. 507～510.
18. Lee, S.-G. and Hencher. S. R.(2009) “The repeated failure of a cut-slope despite continuous reassessment and remedial works,” Engineering Geology, 107, pp. 16～41.
19. Mualem, Y.(1976), “A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media”, Water Resources Research, Vol. 12, pp. 593～622.
20. Ng, W. W. and Pang, Y. W. (2000) “Influence of Stress State on Soil-Water Characteristics and Slope Stability,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(2), pp. 157～166.
21. Oh, S., Lu, N., Kim, Y. K., Lee, S. J. and Lee, S. R. (2012) “Relation between the soil water characteristic curve and the suction stress characteristic curve: experimental evidence from tests on residual soils,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(1), pp. 47～57.
22. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996) "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction," Canadian Geotechnical Journal, 33, pp. 379～392.
23. van Genuchten, M. T. (1980) “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils,” Soil Science Society of America Journal, 44, pp. 892～898.
24. van Genuchten, M. T., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991) The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, EPA 600/2-91/065.

25. Vogel, T. van Genuchtenb, M.T., and Cislerovac, M. (2001) "Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions," Advances in Water Resources, 24, pp. 133~144.
26. 국토해양부, 한국 확률강우량정보, http://www.k-idf.re.kr
27. 김상규, 류지협(1996), "불포화토의 투수 및 강도특성 측정", 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp. 375~378.
28. 김상규, 이영휘, 오세붕 (2012), 토질역학 이론과 응용, 청문각
29. 김윤기 (2009) 지반투수특성과 강우특성을 고려한 토사사면 설계 및 안정해석기법, 박사학위 논문, KAIST
30. 성상규, 이인모 (2003) "화강풍화 잔적토의 불포화 전단강도에 미치는 순연직응력의 영향", 한국지반공학회 논문집, 19권 1호, pp. 27~38.
31. 오세붕, 문종호, 김태경, 김윤기 (2008), "불포화 지반특성 영향에 대한 강우시 사면붕괴의 사례연구", 대한토목학회논문집, 제28권 3C호, pp. 167~178.
32. 유건선(2010) "체적압력판추출기의 측정법 개선에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 30권 4c, pp. 185~191.
33. 이인모, 조우성, 김영욱, 성상규(2003), "풍화토 사면에서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험연구", 한국지반공학회논문집, 19권, 1호, pp. 41~49.
34. 정인규, 장영창, 김기복, 김용일, 정선옥(2007), "다공 세라믹 컵을 이용한 디지털 토양수분 장력계 개발", 바이오시스템공학 논문집, 제 32권, 제 6호, pp. 448~454.
35. 한국시설안전관리공단 (2011), 건설공사 비탈면 설계기준(안)

3cm

11지역기술혁신D04

4cm

건설교통기술지역특성화사업 최종보고서 : 부록(견고딕13p)

3cm

0.5cm R&D / 11지역기술혁신D04

2.5cm 9cm

(견고딕31p) 5cm

불포화 비탈면의 침투를 고려한 안정성 설계 가이드라인(안)

(0.1cm)

2013. 6. 23

0.15cm (견고딕15p)

(별색바탕 : C50, M20, Y59, K0)

주관연구기관 / 영남대학교

협동연구기관 / 계명대학교, 금오공과대학교

2cm

(견고딕 15.5p)

(백색바탕)

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

(견고딕 20p)

불포화 비탈면의 침투를 고려한 안정성 설계 가이드라인 (견고딕14p)

5cm

2013 (견고딕13p)

국토교통과학기술진흥원

국토교통부 (견고딕17p)

3cm

(견고딕 25p)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술지역특성화사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 건설교통기술지역특성화사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

불포화 비탈면의 침투를 고려한 안정성 설계 가이드라인(안)

제 출 문

국토교통부장관 귀하

"불포화 비탈면의 침투를 고려한 안정성 설계 가이드라인(안)"을 "불포화 특성을 고려한 대구·경북 퇴적암 기반 풍화토층 사면의 안정성 평가기법 개발"과제의 최종성과물의 일부로 제출합니다.

2013. 06. 23.

주관연구기관명 : 영남대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 이영휘
연 구 원 : 박영목
연 구 원 : 오세붕

협동연구기관명 : 계명대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 권오균
연 구 원 : 백승철

협동연구기관명 : 금오공과대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 한희수

목 차

1. 적용범위 ····· 1

2. 불포화 물성 평가 ····· 2

2.1 함수특성곡선 ····· 3

2.2 투수계수곡선 ····· 7

2.3 전단강도 ····· 10

3. 불포화토의 침투해석 ····· 13

3.1 지하수위 조건 ····· 16

3.2 선행강우 해석 ····· 17

3.3 집중강우 해석 ····· 19

4. 불포화토의 안정해석 ····· 22

4.1 안전율 기준 ····· 24

5. 참고문헌 ····· 25

1. 적용범위

(1) 본 가이드라인은 불포화 비탈면의 강우로 인한 침투현상 및 안정성 변동 해석에 적용한다.

[해설]

(1) 본 가이드라인의 적용범위는 토사 비탈면에서 일어나는 전반적인 활동파괴시 안전율 계산에 있다. 건설공사 비탈면 설계기준(한국시설안전공단, 2011)에 따르면, 토층 및 풍화암으로 구성된 비탈면의 안정해석은 ① 지하수위를 결정하여 해석하는 방법 또는 ② 강우의 침투를 고려한 방법을 사용하도록 하고 있다. 본 가이드라인은 후자에 해당하는 내용을 다룬다.

2. 불포화 물성 평가

(1) 불포화토의 함수특성곡선은 수분저장능력을 평가한다.
(2) 불포화토의 투수계수는 포화도에 따라 변동한다.
(3) 불포화토의 전단강도는 포화도에 따라 변동한다.

[해설]

(1) 모관흡수력의 변화를 포화도나 체적함수비의 함수로 표시할 수 있고 이를 함수특성곡선(soil water retention curve)이라고 한다. 함수특성곡선은 임의의 지층에 대하여 유일하다고 가정한다.

(2) 불포화토의 투수계수는 포화도가 감소하거나 모관흡수력이 증가할수록 감소한다. 불포화층의 침투속도를 계산하기 위하여 모관흡수력에 따른 투수계수의 관계를 산정한다.

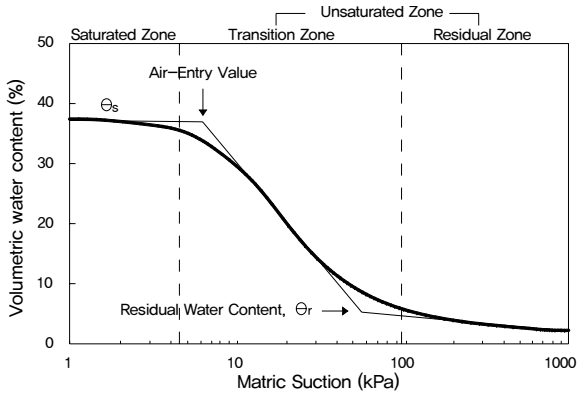
(3) 불포화토의 전단강도는 Mohr-Coulomb 파괴규준에 준거하여 나타낼 수 있다. 모관흡수력이 증가할수록 겉보기점착력이 증가한다. 특히 불포화토의 유효응력에 의하여 파괴규준을 정의하면 포화토의 파괴규준과 일치하는 유일한 파괴규준으로 정의할 수 있다. 불포화토에서는 모관흡수력에 따라 증가하는 전단강도를 반영해야 한다.

2.1 함수특성곡선

(1) 함수특성곡선은 모관흡수력에 따른 체적함수비나 포화도의 관계이며, 불포화토의 침투거동을 해석하는데 핵심적인 역할을 한다.
(2) 함수특성곡선은 압력판추출시험, 템피셀 시험 등 실내시험이나 현장계측자료를 이용하여 구해야 한다.
(3) 함수특성곡선은 van Genuchten 모델이나 Fredlund 와 Xing 모델 함수 또는 동등한 모델로 피팅할 수 있다.
(4) 함수특성곡선은 이력현상과 구속응력에 의하여 영향을 받는다.

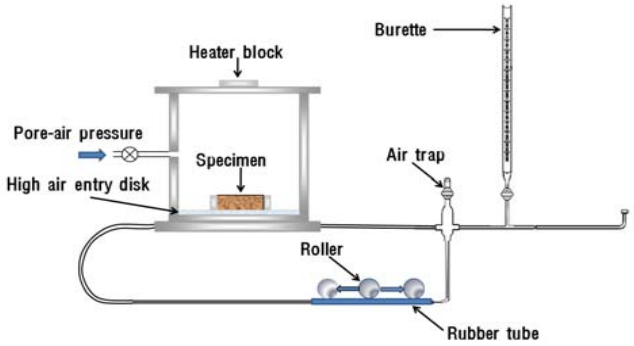
[해설]

(1) 해설그림 2.1에 나타난 함수특성곡선을 보면 포화상태에서 모관흡수력이 공기함입치(air-entry value)에 도달할 때까지는 함수비의 변화가 거의 일어나지 않는다. 공기함입치를 초과하면 잔류포화도(잔류함수비)에 이를 때까지 함수비가 크게 변화하게 된다. 이 영역은 불포화층의 모관흡수력의 영향에 따라 포화도나 함수비의 변화가 급격하게 일어나는 구간이다. 불포화비탈면의 안정해석에 필요한 침투해석 과정에서는 주로 낮은 수준의 모관흡수력 구간(100kPa 미만)이 지배적으로 영향을 끼친다.



해설그림 2.1 전형적인 함수특성곡선

(2) 함수특성곡선을 획득하기 위한 실험실 시험으로 압력판 추출시험기이 대표적이다. 압력판 추출시험기는 고압의 공기함입저항치를 갖는 세라믹판으로 모관흡수력을 조절하면서 시료 내로 들어가거나 빠져나오는 간극수의 변화량을 측정할 수 있다.



해설그림 2.2 압력판 추출시험기 개요도

밀판은 세라믹 디스크로 되어있고 시료내 간극수와 연속성을 유지하고 간극수의 통로역할을 하며 공기의 침입을 방지한다. 셀 내부에는 공기압을 가할 수 있게 실린더형 셀이 있다. air trap은 세라믹 디스크를 투과한 공기방울이 ballast tube로 넘어가지 못하게 하는 기능을 한다. 시료에서 빠져나온 물은 ballast tube에 모이게 되고 이를 인위적으로 burutte으로 넣어서 시료에서 간극수의 변화량을 확인할 수 있다.

또한 Tempe 셀이나 최신 개발 함수특성곡선 시험장비들과 같은 실내시험 장비를 적용할 수 있다. 가능한 경우에는, 현장에서 계측한 모관흡수력과 함수비와의 관계를 이용하여 함수특성곡선을 획득할 수 있다.

(3) van Genuchten(1980)은 모관흡수력과 체적함수비의 관계를 해설식 (2.1)과 같이 제안하였다.

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad \text{해설식 (2.1)}$$

$$\Theta = \left[\frac{1}{1+\{\alpha(u_a - u_w)\}^n}\right]^m \qquad \text{해설식 (2.2)}$$

여기서, Θ : 유효포화도

θ_s : 포화 체적함수비

θ_r : 잔류 체적함수비

α : 공기함입치의 역수

n : 함수특성곡선의 기울기와 관련된 계수

m : 모관흡수력이 높은 수준에서 기울기와 관련된 계수, 통상 $m = 1 - 1/n$

Fredlund 와 Xing(1994)는 다음과 같은 함수특성곡선을 제안하였다.

$$\Theta = C(u_a - u_w)\left[\frac{1}{\ln\left\{e + \left(\frac{u_a - u_w}{a}\right)^n\right\}}\right]^m \qquad \text{해설식 (2.3)}$$

여기서, a = 공기유입값과 관련된 계수, n = 변곡점의 경사에 관련된 계수

m = 잔류함수비와 관계된 계수, e = 자연대수, 2.71828

$(u_a - u_w)$ = 모관흡수력, $C(u_a - u_w)$ = 보정함수

보정함수 $C(u_a - u_w)$는 해설식 (2.4)과 같이 정의 된다.

$$C(u_a - u_w) = \left[1 - \frac{\ln\left\{1 + \frac{(u_a - u_w)}{(u_a - u_w)_r}\right\}}{\ln\left\{1 + \frac{1{,}000{,}000}{(u_a - u_w)_r}\right\}}\right] \qquad \text{해설식 (2.4)}$$

여기서, $(u_a - u_w)_r$= 잔류함수비의 흡수력, $(u_a - u_w)$= 각 측점의 모관흡수력

(4) 함수특성곡선은 습윤과정 및 건조과정에 따른 이력현상과 깊이에 따른 구속효과의 영향을 받는다. 또한 풍화토의 경우에 각 지층의 대표성을 나타내는 시료를 이용해야 한다. 따라서 지층의 대표적 관계를 도출하기 위하여 시험량을 충분하게 확보하고 이력 및 구속효과를 고려한 시험결과를 획득하는 것이 바람직하다.

실제 비탈면 붕괴시 거동은 습윤측 함수특성곡선을 적용하여 해석하는 것이 적절하지만 실험적인 절차상 시간이 많이 소요되고 여건상 적용이 어려울 수 있다. 따라서 접근 가능한 건조측 함수특성곡선을 적용할 수 있다. 불포화토에 대한 함수특성곡선은 소프트웨어나 문헌에 포함되

어 있는 DB를 활용시에는 실제 거동과 해석결과간의 차이가 크게 나므로 예비적 해석절차에 국한하여 적용하는 것이 바람직하다.

2.2 투수계수곡선

(1) 불포화토의 투수계수는 포화도가 감소하고 모관흡수력이 증가할수록 감소한다.
(2) 투수계수곡선은 포화시 투수계수와 함수특성곡선을 이용하여 Mualem 이론 또는 동등 이론으로 간접적으로 평가할 수 있다.
(3) 투수계수곡선은 모관흡수력을 조절한 투수시험으로 직접적으로 획득할 수 있다.
(4) 국내 풍화토의 일부 투수계수곡선은 모관흡수력이 낮은 수준(100kPa 미만)에서 급격하게 감소하는 경우가 나타나며, 이로 인하여 강우 침투가 일어나지 않는 해석결과를 초래한다. 따라서 이에 대한 보정이 필요할 수 있다.

[해설]

(1) 불포화층의 간극수 흐름은 포화시와 마찬가지로 Bernoulli 정리와 Darcy 법칙이 성립한다. 간극수는 간극내 차지한 공간을 따라 흐르므로 포화도는 유속에 영향을 끼치는 중요한 인자가 된다. 포화도나 체적함수비가 감소할수록 불포화토의 투수계수는 감소한다. 모관흡수력이 증가하면, 건조가 진행됨에 따라 공기가 차지하는 공간이 넓어지므로 투수계수가 감소하게 된다.

(2) Mualem(1976)에 의하면, 상대 투수계수 K_r은 함수특성곡선의 관계로부터 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$K_r(\Theta)=\Theta^{l}\left(\int_0^{\Theta}\frac{d\Theta}{p}\right)^2\Big/\left(\int_0^{1}\frac{d\Theta}{p}\right)^2 \qquad \text{해설식 (2.5a)}$$

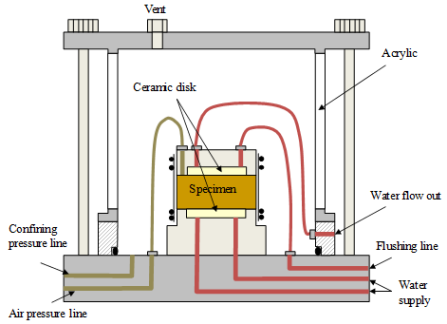
$$K(\Theta)=K_s K_r(\Theta) \qquad \text{해설식 (2.5b)}$$

여기서, p는 모관흡수력, K_s는 포화 투수계수이다. Ks와 함수특성곡선을 실험적으로 획득하면 불포화토의 투수계수 K를 계산할 수 있다. l은 간극 연결성 계수로 통상 0.5로 가정한다.
해설식 (2.5a)에 피적분 함수는 함수특성곡선으로부터 구한다. van Genuchten 함수특성곡선을 대입하면 다음과 같이 상대 투수계수 VGM 모델을 예측할 수 있다.

$$K_r(\Theta)=\Theta^{1/2}f(\Theta)^2/f(1)^2 \qquad \text{해설식 (2.6a)}$$

$$f(\Theta)=\alpha\{1-(1-\Theta^{1/m})\}^{m}$$ 해설식 (2.6b)

(3) 불포화 투수시험은 셀을 이용하여 시료에 공기압과 수압을 독립적으로 조절하여 모관흡수력을 조절한다. 기초판과 상부캡에는 세라믹디스크가 설치되어 있다. 상부캡과 기초판에서 수압차로 인해 시료 내부에 동수경사가 발생하고 흐름이 유발된다. 시료내부의 모관흡수력은 시료 상부와 하부 모관흡수력의 평균값으로 설정하여 Darcy 법칙으로 투수계수를 구할 수 있다.

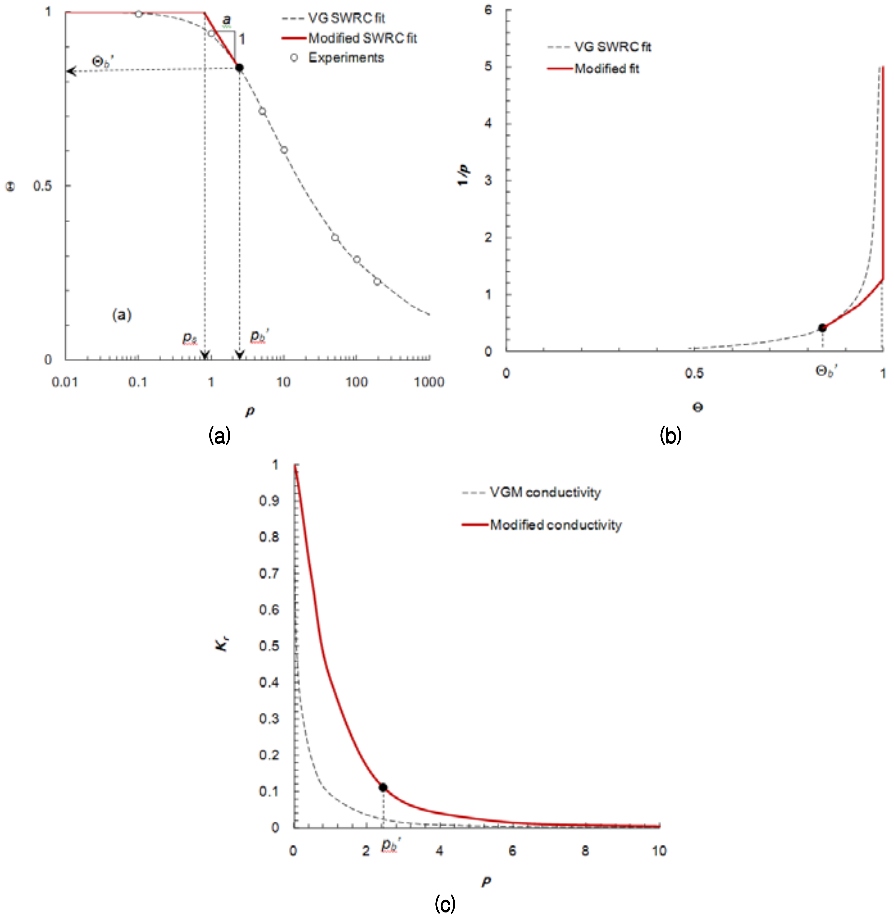


해설그림 2.3 불포화 투수시험 개요도

(4) 원활한 형태를 지닌 함수특성곡선으로부터 추정된 투수곡선의 경우, 낮은 모관흡수력 범위에서 나타나는 함수비 변화가 과다하게 반영된다. 이 범위에서 투수곡선 변화가 크게 나타나 전체적인 모관흡수력 범위에서 추정된 투수곡선이 실제보다 작게 나타나는 경향이 있다. 따라서 비교적 함수비 변화가 크지 않은 낮은 모관흡수력 범위의 함수특성곡선을 수정하여 불포화투수곡선이 낮은 모관흡수력 범위에서 심하게 과소평가되는 것을 보정할 수 있다.

해설그림 2.4(a)에서 보여지듯이, van Genuchten 함수특성곡선에서는 모관흡수력이 p_s미만의 수준에서는 거의 포화상태이고 함수특성에는 거의 영향을 끼치지 않는 구간이다. 하지만, 해설식 (2.5)에 의하여 불포화 투수계수를 예측할 때에는 이 부분의 형태가 큰 영향을 끼친다. 해설그림 2.4(b)에서 Θ가 1일 때, 1/p는 무한대로 접근하므로, 해설식 (2.5)의 VGM 모델에서 K_r은 급격하게 떨어진다. 특히 n이 1.5보다 작을 때에는 해설그림 2.4(c)에서 보여지듯이, VGM 모델은 모관흡수력이 매우 낮은 포화상태 부근에서 K_r은 급격하게 감소한다. 이로 인하여 VGM모델은 포화상태 부근에서 투수계수의 급격한 변화를 나타내므로 수치적인 불안정성을 야기하고 해가 수렴

하지 않거나 해의 불규칙적인 진동이 일어난다.



해설그림 2.4 초기 모관흡수력 분포

van Genuchten 함수특성곡선의 경우에는 $n \leq 1.5$일 경우 보정할 필요가 있다. 대체로 보정을 하면 불포화투수계수가 증가한다.

2.3 전단강도

(1) 불포화토의 전단강도는 포화도가 감소하고 모관흡수력이 증가할수록 증가한다.
(2) 불포화 파괴규준은 유효응력에 의한 파괴규준으로 나타내면 포화토의 파괴규준과 동일하게 나타난다.
(3) 포화시 전단강도는 직접전단시험이나 삼축압축시험 등 실내시험을 통하여 포화 시료에 대하여 구하여야 한다. 현장시험이나 문헌조사를 통하여 구하는 경우에도 포화조건에 대한 전단강도를 구해야 한다.
(4) 모관흡수력에 따른 전단강도는 함수특성곡선으로부터 간접적으로 추정할 수 있다.
(5) 모관흡수력에 따른 전단강도는 모관흡수력을 조절한 실내시험으로부터 직접적으로 획득할 수 있다.

[해설]

(1) 불포화토의 전단강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

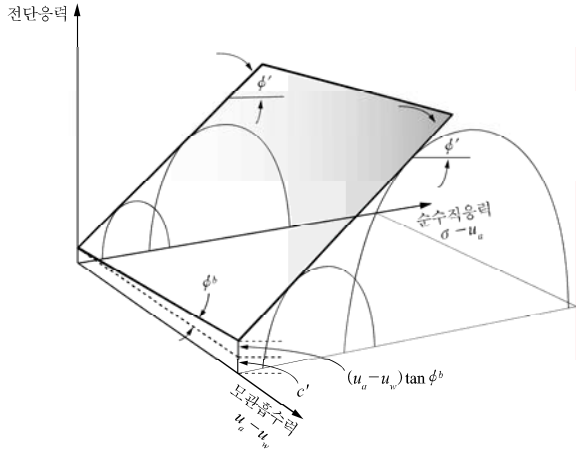
$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \qquad \text{해설식 (2.7)}$$

여기서, $(\sigma_f - u_a)$ = 파괴시 순수직응력

$(u_a - u_w)$ = 파괴시 모관흡수력

ϕ^b = 모관흡수력에 따른 전단강도의 증가비율을 나타내는 각

위 식에서, c'은 포화토의 유효점착력, ϕ'은 포화토의 유효내부마찰각이다. 해설그림 2.5에 보인 바와 같이 순수직응력($\sigma - u_a$)-전단응력(τ_{ff}) 관계에서 불포화토의 파괴규준은 기울기가 ϕ'인 평행한 직선으로 나타난다. 이 그림에서 겉보기 점착력은 순수직응력-전단응력축과 만나는 절편을 의미하며, 모관흡수력이 클수록 겉보기 점착력은 증가하게 된다. 모관흡수력에 따른 겉보기 점착력은 실험적으로 얻을 수 있다. 모관흡수력의 범위가 크지 않은 경우에는 선형적으로 단순화할 수 있는데, 그 기울기를 나타내는 각이 ϕ^b이다. 순수직응력이나 모관흡수력이 증가하게 되면 불포화토의 전단강도도 증가하게 된다.



해설그림 2.5 불포화토의 Mohr-Coulomb 파괴규준

(2) Bishop 유효응력은 해설식 (2.8)과 같이 정의할 수 있다

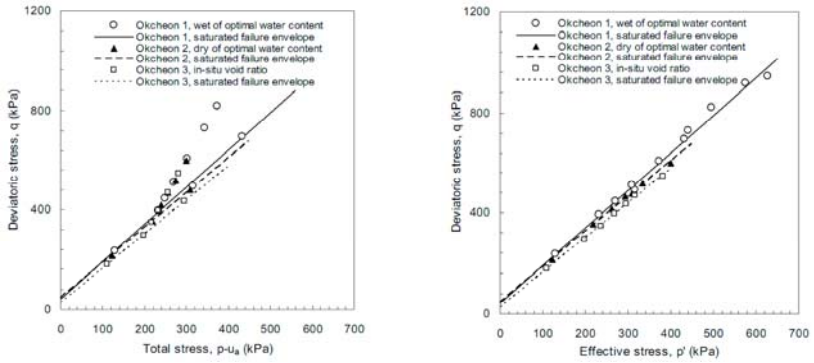
$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \qquad \text{해설식 (2.8)}$$

모관흡수력에 따라 변화하는 전단강도는 유효응력으로 나타냈을 때 포화토의 전단강도와 일치하고 유일하게 정의할 수 있다. 유효응력계수 $\chi = \Theta$일 때, 전단강도는 다음과 같다.

$$\tau_{ff} = c' + \sigma'_{ff}\tan\phi' \qquad \text{해설식 (2.9)}$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + \Theta(u_a - u_w)\tan\phi' \qquad \text{해설식 (2.10)}$$

해설그림 2.6은 유효응력에 의한 전단강도가 모관흡수력에 상관없이 포화토의 파괴규준으로 유일하게 정의됨을 삼축시험결과를 p-q 축에서 분석하여 보여준다.



해설그림 2.6 국내 불포화토의 유효응력과 전단강도 관계

(3) 불포화토의 파괴규준을 산정하기 위해서는 포화시 점착력과 마찰각이 필요하다. 따라서 c'와 ϕ'은 포화시료의 실내시험이나 포화층의 현장시험으로부터 구한다. 직접전단시험이나 삼축압축시험시 시료를 현장함수비 조건에서 포화시키지 않고 실험을 수행하면 겉보기 점착력이 측정되어 점착력을 과대평가한다. 현장시험의 경우에도 c', ϕ'를 산정할 때에는 지하수위 하부에서 수행한 성과를 이용하는 것이 바람직하다.

(4) 간극공기압이 대기압상태이면 $u_a = 0$이므로,

$$\tau_f = c' + (\sigma - \Theta u_w)\tan\phi' \qquad \text{해설식 (2.11)}$$

유효포화도는 함수특성곡선에서 모관흡수력의 함수로 구할 수 있다. 따라서 불포화토의 전단강도는 포화시 강도정수 c', ϕ' 및 함수특성곡선으로부터 구할 수 있다. 결과적으로 겉보기 점착력이 모관흡수력에 따라 비선형적으로 증가하는 양상을 고려할 수 있다.

(5) 일반적으로 불포화토의 실내시험(직접전단시험, 삼축압축시험)에서는 공기압을 증가시켜 모관흡수력을 조절한다. 모관흡수력이 평형을 이룬 후, 그 값을 일정하게 유지시켜 압밀과 전단시험을 수행한다. 불포화토의 강도시험에 있어서는 모관흡수력이 평형을 이루는 데 소요되는 시간이 오래 걸리므로 하나의 시료를 여러 모관흡수력 단계에 대하여 반복하여 시험하는 다단계시험을 수행할 수 있다.

3. 불포화토의 침투해석

(1) 비탈면내 불포화층은 강우로 인한 침투가 하향으로 발생하며, 이로 인하여 포화도의 변화가 일어나고 유효응력과 전단강도가 감소한다.
(2) 침투해석은 선행강우를 고려한 초기수압과 집중강우시 수압변화를 계산하는 절차를 포함해야 한다.
(3) 지하수위 및 수압에 대한 경계조건과 초기조건은 해석결과에 중요한 역할을 한다.
(4) 설계 강우조건은 해석결과에 중요한 역할을 한다.
(5) 시공과정에서 지층의 응력변화, 강우시 지표 유출, 증발에 의한 포화도 감소 등의 효과가 영향을 끼친다.

[해설]

(1) 비탈면의 침투해석은 다음과 같은 지배방정식을 푼다.

$$\nabla \cdot K(h)\nabla H + W = \frac{\partial \theta(h)}{\partial t} \qquad \text{해설식 (3.1)}$$

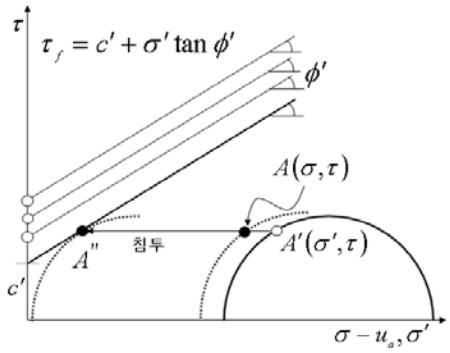
여기서, $K(h)$ = 투수계수 함수
h = 압력 수두
H = 전수두 $(H = h + z)$
W = 유량
$\theta(h)$ = 체적함수비 함수

미분방정식의 해는 임의의 시간과 지점에서의 전수두이며, 간극수압 및 포화도를 구할 수 있다. $K(h)$와 $\theta(h)$는 압력수두 h의 비선형 함수로 모관흡수력에 따른 불포화 투수계수 및 함수특성곡선으로 정의된다.

경계조건은 수두 경계와 유속(유량) 경계조건이 필요하다. 시간에 따른 경계조건의 변화가 없는 경우에는 정상류 해석을 수행하며 기간에 따라 경계조건이 변화하는 경우에는 부정류 해석을 수행한다.

강우에 의해 침투가 하향으로 일어나며, 포화도가 증가하고 유효응력과 전단강도는 감소하게

된다. 이로 인하여 안전율이 감소한다.



해설그림 3.1 강우시 침투로 인한 전단강도 및 유효응력의 변화

침투로 인하여 지층의 포화도가 깊이 및 시간에 따라 변동한다. 지층이 포화되는 경우에는 일시적으로 지표부근에 포화대가 형성되거나 투수계수가 낮은 층 경계에서 포화대가 형성된다. 또는 지하수위가 상승한다.

(2) 집중강우가 시작되는 시점에 대한 초기 조건을 설정해야 한다. 선행강우를 고려한 정상류 침투해석을 수행하거나 적절한 수압분포를 설정할 수 있다. 집중강우로 인한 부정류 침투시 지층의 수압 및 포화도의 변화는 초기 설정된 값으로부터 변동되기 시작된다. 따라서 초기 수압분포는 해석결과에 중요한 영향을 끼친다.

(3) 침투해석시 지하수위 및 수압(또는 전수두)에 대한 경계조건은 비탈면 안정해석 결과에 큰 영향을 끼친다. 따라서 합리적인 지하수위의 설정 및 전수두에 대한 경계조건 설정이 매우 중요하다.

(4) 집중강우에 의한 부정류 침투해석시 비탈면 표면에 설계 강우량을 경계조건으로 입력한다. 설계 강우조건은 확률강우강도 및 지속기간을 이용하거나 대상지역의 실제 강우기록을 이용할 수 있다. 강우조건에 따라 침투해석시 상이한 결과를 나타낸다.

(5) 시공단계에서 지표면의 형상변화 및 지중의 응력변화가 일어난다. 때로는 이러한 효과를 고

려한 해석이 필요할 수 있다. 또한 강우량은 모두 지층내로 침투하지 않고 일부는 지표수로 유출한다. 증발이 일어나면 지층내의 포화도가 감소한다. 지표수 유출과 증발을 고려하지 않은 전체 강우량에 대한 침투해석은 안정성을 보수적으로 고려하게 된다.

3.1 지하수위 조건

(1) 현장에 대한 지하수위 측정자료가 있는 경우 활용하는 것이 바람직하다.
(2) 국토교통부 관측자료를 이용할 수 있다.
(3) 지하수위를 선단 하부로 정의하는 경우에는 선행강우 효과를 고려하여 지층의 포화도를 높여서 해석할 필요가 있다.

[해설]

(1) 지반조사를 실시한 경우, 적절한 시기에 따라 지하수위 변동을 측정한 자료를 근거로 지하수위를 설정할 수 있다.

(2) 국토교통부가 주관하는 국가지하수정보센터(국가 지하수 관측망 관리시스템)에서 해당지역 정보를 참조할 수 있다.

(3) 지하수위를 암반층이나 비탈면 선단부 아래에 두는 경우에는 안전율이 과다하게 설정될 수 있으므로 선행강우조건을 충분히 고려하여 포화도를 높이고 모관흡수력을 감소시킬 필요가 있다. 토층심도가 얕은 경우에는 암선을 초기 지하수위로 설정하여 해석할 수 있다.

3.2 선행강우 해석

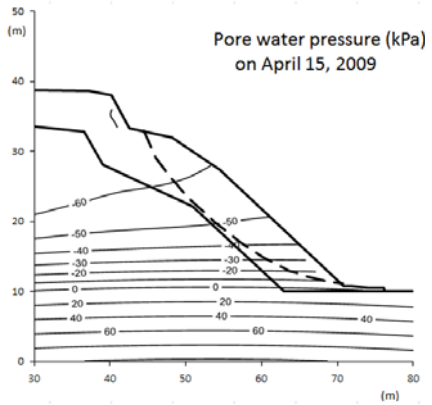
(1) 선행강우로 인하여 지층은 포화도가 증가하고 모관흡수력이 감소한다.
(2) 침투해석시 초기조건으로 정수압으로 정의한 경우에는 최대 모관흡수력을 100kPa 미만의 값으로 설정하는 것이 바람직하다.
(3) 연평균강우량 또는 동등한 조건으로 선행강우에 대한 정상류해석을 수행하여 지층의 포화도 및 간극수압 분포를 계산할 수 있다.

[해설]

(1) 선행강우 효과는 일정한 유량으로 정상류해석을 수행한다. 지층에서는 우기가 시작될 무렵부터 간극수압이 정수압 조건보다 크다. 이러한 상태를 집중강우시 부정류 해석결과의 초기조건으로 설정해야 한다. 선행강우 효과를 고려하지 않으면, 부정류 해석시에 모관흡수력이 과다하게 평가되고 포화도가 과소하게 평가되어, 우기시 안전율을 크게 평가할 수 있다.

(2) 정수압 조건하에서는 지하수위 상부 20m 지층에서는 간극수압이 -200kPa까지 나타날 수 있다. 이러한 조건에서는 포화도와 간극수압을 너무 낮게 평가하고 안전율을 크게 평가하게 된다. 따라서 최소 간극수압 또는 최대 모관흡수력을 100kPa 미만(예를들어, 75kPa, 50kPa 또는 25kPa)으로 제한할 수 있다.

(3) 해설그림 3.2는 연평균강우량을 이용하여 정상류해석을 수행하여 특정 위치에 대한 간극수압 분포를 나타낸 예이다. 연평균 강우량에 의한 정상류 침투해석은 지표유출을 무시한 것으로 침투효과를 과다하게 평가할 수 있다. 필요시 직전 월평균 강우량 또는 3개월 평균 강우량을 이용할 수 있다.



해설그림 3.2 정상류 해석시 간극수압 분포

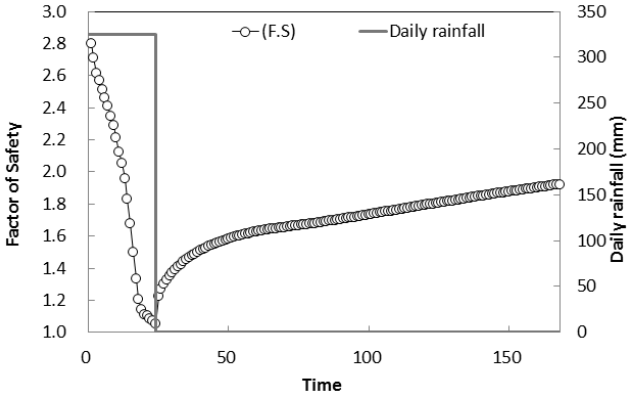
3.3 집중강우 해석

(1) 집중강우에 대하여 부정류해석을 수행한다.
(2) 확률계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우지속시간 등을 고려하여 강우조건을 산정할 수 있다.
(3) 해당지역 실제 강우기록 중에서 충분히 많은 강우기록을 이용하여 침투해석을 수행할 수 있다.
(4) 침투해석시 해의 수렴성을 확보해야 한다.

[해설]

(1) 적절한 기간과 강우량을 대상으로 부정류해석을 수행한다. 강우로 인하여 침투가 일어나면 부정류해석을 통하여 불포화 지층의 수압 및 포화도 변화를 계산할 수 있다.

(2) 국토해양부에서 제공하는 '한국확률강우량정보' 시스템을 활용하여 확률계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우지속시간에 대한 정보를 사용할 수 있다(http://www.k-idf.re.kr). 해설그림 3.3은 강우자료의 예로 100년 빈도 24시간지속 확률 강우강도 자료를 나타내고 있다.

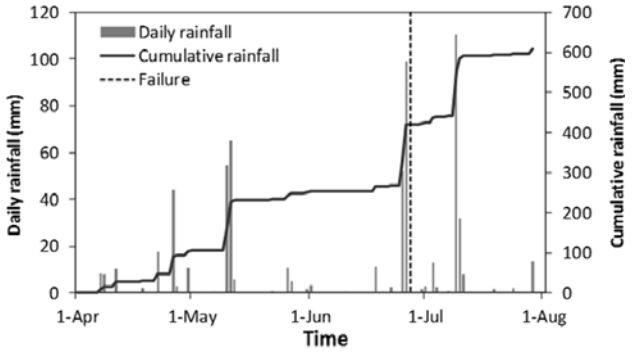


해설그림 3.3 확률강우 강도에 대한 안전율 변화 예

강우 지속시간 이후에도 안전율이 변동할 수 있으므로, 강우가 종료된 이후 충분한 기간에 대하

여 해석할 필요가 있다. 하지만 강우지속기간은 비탈면 표면에 도달하여 지층내로 침투하는 동안 소요되는 기간을 정의하지는 않는다. 따라서 잦은 소규모 강우의 누적으로 인한 효과보다 낮은 침투효과를 나타낼 수 있다.

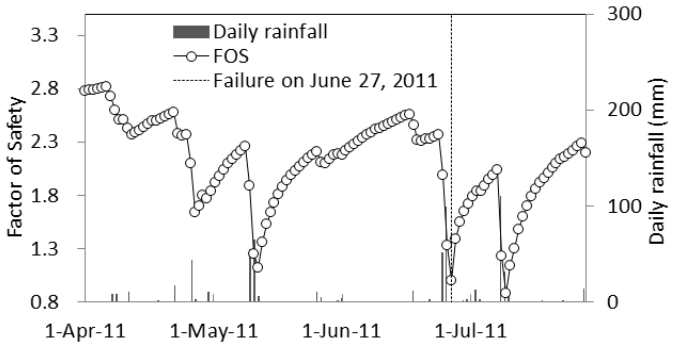
(3) 부정류해석 수행시 충분한 강우량을 나타낸 실제 강우기록이나 이와 동등한 강우기록을 사용할 수 있다. 해설그림 3.4는 강우자료의 예로 집중강우가 포함된 3개월간의 실제 강우량자료를 나타내고 있다.



해설그림 3.4 실제 강우량 자료

해설그림 3.5는 실제 강우량 자료를 이용하여 집중강우에 대한 안정해석결과 강우에 따른 안전율의 변화가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

(4) 확률강우강도와 같은 큰 강우조건에 대하여, 해가 수렴되지 않는 경우가 있다. 반드시 해가 수렴하였는지를 검토하고, 그렇지 않은 경우에는 시간단계를 조절하거나, 각 소프트웨어에서 제공하는 방법을 찾아야 한다. 특히 해가 수렴하지 않는 경우에 계산된 안전율은 잘못된 결과를 초래한다.



해설그림 3.5 실제 강우에 대한 안전율 변화 예

4. 불포화토의 안정해석

(1) 한계평형해석이나 연속체해석(유한차분법, 유한요소법등)을 적용한다.
(2) 침투해석 결과 나타난 수압의 분포를 고려한 안정해석을 수행한다.
(3) 불포화토의 전단강도를 고려한 안정해석을 수행한다.

[해설]

(1) 비탈면안정해석은 절편법에 기반한 안전율을 계산한다.

비탈면 안정해석의 목표는 예상 파괴면에서 힘 또는 모멘트의 평형을 고려하여 안전율을 계산하는 것이며, 일반적으로 안전율은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{안전율} = \frac{\text{저항력}}{\text{작용력}} \text{ or } \frac{\text{저항모멘트}}{\text{작용모멘트}} \qquad \text{해설식 (4.1)}$$

비탈면의 안정해석에서는 활동면을 따라 최대전단강도가 발휘한 것으로 가정하는 한계평형상태개념을 토대로 파괴토체에 작용하는 하중에 대한 정역학적인 평형을 고려하여 안전성을 해석하는 한계평형해석(limit equilibrium analysis)이 가장 널리 사용되고 있다.

최근에는 한계평형해석방법 외에도 연속체에 대한 유한요소해석 등을 통하여 계산된 응력장 또는 변형장으로부터 전단강도감소개념(SSR, Shear Strength Reduction) 또는 최대소성변형율 라인을 연결하는 선에 대한 응력평형으로부터 안전율을 계산하는 방법을 사용하기도 한다.

(2) 강우의 침투를 고려한 안정해석을 실시하는 경우에는 현장 지반조사 결과, 지형조건, 배수조건과 확률계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우지속시간 등을 고려하여 안정해석을 실시하며, 해석시 적용한 설계정수와 해석방법을 명확히 기술해야 한다 (F.S=1.3적용). 침투해석 결과는 해설표4.1과 같이 안정해석에 적용할 수 있다. 한계평형법에 의한 해석은 침투해석과 안정해석의 두 단계를 거치며, 응력해석 단계를 포함하면 연속체 역학에 근거한 안전율을 계산할 수 있다.

해설표 4.1 해석절차

구분	내 용	결 과
침투해석	• 불포화토의 침투해석 • 선행강우 : 정상류해석 또는 초기조건 • 집중강우 : 설계 강우조건	• 불포화 비탈면의 수두, 수압분포 계산 • 강우에 따른 포화도 계산
응력해석	• 전응력해석 또는 유효응력해석 : 탄성해석 또는 탄소성해석 • 전 지층의 응력계산	• 절편에 작용되는 수직응력, 전단응력 계산 • 절편측면에 작용하는 힘 분포를 고려한 안정해석 가능
안정해석	• 절편법에 따른 안전율 계산 • 모관흡수력에 따른 전단강도 증가 고려 • 또는 불포화토의 유효응력에 따른 전단강도 고려	• 강우에 따른 안전율 변화 계산 • 활동면에 작용하는 간극수압 고려한 안전율 계산

(3) 전단강도는 불포화토의 파괴규준을 고려하여 산정할 수 있다 (2.3절 참조). 활동면에 작용하는 전단강도는 간극수압(또는 모관흡수력)이 증가함에 따라 감소하고 안전율이 감소한다.

4.1 안전율 기준

(1) 안전율은 파괴면에서의 불포화 전단강도와 전단응력 비율, 저항력과 작용하중의 비율 또는 저항모멘트와 작용모멘트의 비율로 계산한다.

(2) 기준안전율은 안정해석방법과 입력변수가 내포하는 불확실성을 감안하여 경제성을 확보하면서 보수적인 설계를 유도하고자 설정하는 값으로서, 장기적인 비탈면의 안정성을 확보하기 위한 해석에서 적용하는 기준안전율은 다음과 같다 (한국시설안전공단, 2011)

구 분		기준안전율	참 조
장기	건기	FS > 1.5	· 지하수가 없는 것으로 해석
	우기	FS > 1.2 또는 FS > 1.3	· 강우의 침투를 고려한 안정해석을 실시하는 경우에는 현장 지반조사 결과, 지형조건, 배수조건과 확률계획빈도에 따른 해당지역의 강우강도, 강우지속시간 등을 고려하여 안정해석을 실시하며, 해석시 적용한 설계정수와 해석방법을 명확히 기술 (FS=1.3적용)
단기		FS > 1.1	· 1년 미만의 단기적인 비탈면의 안정성(시공중 포함) · 지하수 조건은 장기안정성 검토의 우기시 조건과 동일하게 적용
* 비탈면 상부 파괴범위 내에 1, 2종 시설물의 기초가 있는 경우 : 별도 검토			

5. 참고문헌

1. 국토해양부, 한국 확률강우량정보, http://www.k-idf.re.kr
2. 한국시설안전관리공단 (2011), 건설공사 비탈면 설계기준(안)
3. Fredlund, D. G., and Xing, A.(1994), "A Equations for the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, No. 3, pp. 521~532.
4. van Genuchten, M. T. (1980) "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils," Soil Science Society of America Journal, 44, pp. 892~898.