

페타이어를 활용한 지반보강 및 옹벽시공 실용화 연구

2007. 10. 12.

주관연구기관 / 인 하 대 학 교
위탁연구기관 / 한국건설기술연구원
참 여 기 업 / (주)영 신 토 건
(주)동아기술공사

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “페타이어를 활용한 지반보강 및 응력시공 실용화 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2007. 10. 12.

주관연구기관 : 인 하 대 학 교

총 장 : 홍 승 용

위탁연구기관 : 한국건설기술연구원

대 표 : 정 낙 형

참여기업 : (주)영 신 토 건

대표이사 : 강 일 형

참여기업 : (주)동아기술공사

대표이사 : 김 영 삼

■ 총괄연구책임자		/	수석연구원	윤여원	연구수행총괄
■ 주관연구기관	참여연구원	/	연구원보조	김근수	시험·분석
		/	연구원보조	이용창	분석
		/	연구원보조	이승원	시험
		/	연구원보조	조성수	시험
		/	연구원보조	견광수	시험
		/	연구원보조	송규환	시험
		/	연구원보조	이호영	시험
		/	연구원보조	최은호	시험
		/	연구원보조	김우순	시험
■ 위탁연구기관	참여연구원	/	연구원보조	정지원	시험
		/	연구원보조	최병성	시험
		/	수석연구원	정하익	위탁수행총괄
		/	선임연구원	이용수	시험
		/	선임연구원	유준우	시험
		/	연구원	조진우	시험
■ 참여기업	참여연구원	/	연구원	김상근	시험
		/	연구원	권용완	시험
		/	수석연구원	윤동구	시공지원
		/	선임연구원	백관현	시공지원
		/	연구원	최평호	시공지원
		/	수석연구원	허승범	안정성해석

요 약 문

I. 제 목

페타이어를 활용한 지반보강 및 옹벽시공 실용화 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

자동차 문화의 발달로 전 세계적으로 매년 수십억 개에 달하는 폐타이어가 발생하고 있으나 야외적치, 매립, 소각과 같은 기존의 처리방법으로는 환경 및 사회적으로 많은 문제점을 포함하고 있다. 따라서 재활용하는 방법이 환경 및 사회적 문제 해결에 있어서 가장 최상의 방법이라고 할 수 있으나 경제성 문제와 기술개발의 부진으로 어려움이 있다.

폐타이어의 이용은 분쇄·가공 이용, 원형이용, 열이용 등 여러 분야에서 부분적으로 이루어지고 있으나 주로 경제적인 이유로 재활용량은 많지 않은 편이다. 그러나 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률(환경부, 2003)등이 제정되어 폐기물의 활용을 권장하고 있으므로 폐타이어 배출량이 점차 증가되는 우리나라에서도 폐타이어의 재활용이 활발한 미국, 일본, 호주 등 선진국과 마찬가지로 폐타이어를 토목분야에 재활용함으로써 대량처리뿐만 아니라 폐자원의 효율적인 재활용을 추구할 필요성이 있다.

본 연구는 폐타이어를 활용하여 지반보강 및 옹벽 공법의 실 구조물에 적용하여 시공하고 침출수가 수질기준에 적합한 범위 내에 있음을 확인함으로써, 연구 완료 후 상업용 지오셀과 같은 공학적 기능을 갖는 타이어셀(3D), 지오그리드와 같은 기능을 갖는 평면형 트레드매트(2D)를 토목분야에 활용하기 위한 가능성을 시험시공을 통하여 입증하여 재활용의 길을 여는데 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 페타이어를 활용한 지반보강 및 옹벽시공 실용화 연구를 위하여 1차년도에 실내 및 현장시험을 통하여 기본특성 및 설계인장강도를 결정하였다. 그리고 이를 바탕으로 2차년도에는 페타이어를 실구조물에 적용을 함으로써 페타이어가 지반보강재로서 활용 가능성을 확인하였다.

◎ 1차년도

- 실내·현장시험에서 사용하기 위하여 페타이어를 이용한 시작품 제작
- 실내·현장시험에서 사용한 사질토와 풍화토의 기본물성시험 및 대형전단시험
- 페타이어를 대량으로 연결해서 사용하기 위한 연결부에서의 인장시험
- 페타이어를 지반보강재로서 사용하기 위한 환경영향 평가 및 내구성 검토
- 지반보강재로서 보강효과를 확인하기 위한 토조 및 현장 평판재하시험
- 구조물 설계에 필요한 허용인발저항력을 산정하기 위한 현장인발시험

◎ 2차년도

- 보강 성토사면 및 보강토 옹벽의 시공을 위한 시작품 제작
- 페타이어의 침출수를 수집하기 위한 지반조성 및 시설시공
- 페타이어를 지반보강재로서 활용한 보강사면 및 보강토 옹벽시공
- 보강사면 및 보강토 옹벽의 거동 계측 및 자료분석
- 수치해석 프로그램을 이용한 안정성 해석
- 페타이어의 침출수 수집, 수질분석 및 환경영향 평가

IV. 연구개발결과

연구개발결과를 수행한 시험별로 요약하면 다음과 같다.

◎ 1차년도

- 실내·현장시험에서 사용하기 위하여 페타이어를 이용한 시작품 제작
 - 페타이어를 이용하여 지오셀과 유사한 기능을 갖는 타이어셀, 지오그리드와 유사한 트레드매트를 제작하였음
- 실내·현장시험에서 사용한 사질토와 풍화토의 기본물성시험 및 대형전단시험
 - 모래의 내부마찰각에 대한 모래-트레드외면의 내부마찰각비(δ/ϕ)는 1.06~1.08배, 모래-트레드내면의 경우 0.93~0.94배로서 마찰특성이 우수한 것으로 나타났음
 - 풍화토의 내부마찰각에 대한 풍화토-트레드외면의 내부마찰각비(δ/ϕ)는 0.98배, 풍화토-트레드내면의 경우 0.92배로 측정됨
 - 상기 결과는 타재료에 비해 타이어 재료의 우수한 마찰특성에 기인함
- 페타이어를 대량으로 연결해서 사용하기 위한 연결부에서의 인장시험
 - 고장력 볼트의 사용 시, 볼트의 개수가 증가할수록, 와셔의 크기가 증가할수록 인장강도 증가
 - 같은 조건의 연결방법에 대해서 트레드매트에 비해서 타이어셀 unit의 인장강도가 1.8~2.0배 크게 관측됨
- 페타이어를 지반보강재로서 사용하기 위한 환경영향 평가 및 내구성 검토
 - 입경에 따른 용출시험
페타이어의 입경이 증가할수록 용출농도 감소
 - 배수조건에 따른 용출시험
시간이 경과할수록 용출농도 감소
 - 페타이어의 내구성(내화학적, 내한성, 내열성, 내미생물성, 내후성) 확인
페타이어가 고온에 장기간 거치될 경우와 자외선에 노출되는 경우에는 강도감소를

고려하여 장기설계인장강도를 결정해야 함

- 지반보강재로서 보강효과를 확인하기 위한 토조 및 현장 평판재하시험
 - 토조내 재하시험
낮은 상대밀도에서 지지력 대폭 증가 및 침하량 대폭 감소하며 밀도가 클수록 보강효과가 작아짐
 - 현장재하시험
보강깊이비가 증가할수록 지지력 효과 감소하며, 침하량 감소량 줄어들음
트레드매트 보강지반은 지오그리드 보강지반보다 보강효과 큼
재하판 직경이 커질수록 극한지지력은 감소
- 구조물 설계에 필요한 설계인장강도를 산정하기 위한 현장인발시험
 - 시험에 의한 극한인발저항력은 계산에 의한 예상인발저항력보다 최소 1.7배 이상 크게 측정되었으므로 실제 지반보강에 사용되는 경우 안전할 것으로 판단됨
 - 전체면적당 극한 인발저항력은 트레드매트 6×6(F), 타이어셀 2×7(F), 지오그리드, 지오셀 순으로 나타남
 - 성토고가 증가할수록 타이어셀과 트레드매트의 극한인발저항력은 증가함

◎ 2차년도

- 보강 성토사면 및 보강토 옹벽의 시공을 위한 시작품 제작
 - 페타이어를 지반보강재로 적용하기 위하여 지오셀과 유사한 기능을 갖는 타이어셀, 지오그리드와 유사한 트레드매트를 제작하였음
- 페타이어의 침출수를 수집하기 위한 지반조성 및 시설시공
 - 페타이어의 침출수를 수집하기 위한 차수층, 배수층 및 집수시설을 시공하였음
- 페타이어를 지반보강재로서 활용한 보강사면 및 보강토 옹벽시공
 - 보강 성토사면(높이 3m, 경사각 45°(1 : 1))

수직간격 0.8m, 설계길이는 3.2m(타이어셀) 또는 3.6m(트레드매트)일 때 활동 및 전반적 안정에 대해 최소안전율을 만족

- 타이어셀 보강토 옹벽(높이 3m, 벽체경사각 18.4°(1 : 0.3))

수직간격은 0.6m, 전체길이는 3.2m일 때 모든 최소안전율을 만족

- 트레드매트 보강토 옹벽(높이 3m, 벽체경사각 5.7°(1 : 0.1))

수직간격은 0.6m, 전체길이는 3.6m일 때 모든 최소안전율을 만족

- 동상과 전면세굴에 의한 보강토 옹벽 기초부분의 피해, 편칭파괴를 방지하기 위하여 현장지역의 동결심도를 고려하여 0.8m 이상의 근입깊이 확보

- 동상에 의한 체적팽창압력으로 보강토 옹벽의 파괴를 방지하기 위하여 콘크리트 블록의 배면에 쇄석골재를 이용한 배수로를 확보

○ 보강사면 및 보강토 옹벽의 거동 계측 및 자료분석

- 경사계

모든 위치에서 허용변위 이내의 변위를 나타냄

- 침하계

보강 성토사면 및 보강토 옹벽의 시공시 융기·침하를 반복하였으나, 시공 후 침하량이 수렴 중인 것으로 보임

- 벽체의 변위

잔류침하량과 부등침하량이 허용한계값보다 작게 나타남

○ 수치해석 프로그램을 이용한 안정성 해석

- FLAC V4.0을 이용하여 안정성 해석 수행 중

○ 폐타이어의 침출수 수집, 수질분석 및 환경영향 평가

- 환경부 폐기물관리법(2005)에서 규정하는 침출수 허용기준(2급수)의 허용기준치 이하이며, 시간이 경과할수록 점점 감소하여 수렴, 우수와 비슷해지는 경향을 나타냄

V. 연구개발결과의 활용계획

1차년도의 연구결과는 2차년도에 보강 성토사면 및 보강토 옹벽을 시공하는데 직접적으로 사용되었다. 본 연구의 수행으로 페타이어가 확보 가능한 범위 내에서 광역지방자치단체의 건설공사, 공기업의 자체공사에서 지반보강재로 사용되는 지오셀(geocell), 지오그리드(geogrid)를 대체하여 한정적으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 이로써 폐자원을 대량처리를 할 수 있고, 재활용에 의한 공사비용의 절감을 기대할 수 있다. 특히 본 연구에서 사용하게 될 타이어셀과 평면형 트레드매트가 건설공사에 다량으로 사용될 경우에는 타이어 절단 및 결합을 위한 기계의 제작으로 다량을 단기간 안에 제작할 수 있을 것으로 생각된다. 활용분야로는 보강 성토사면, 보강토 옹벽, 기초보강, 박스구조물 전후의 부등침하 경감, 사면보호, 수로보호, 토류구조물 등에 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

S U M M A R Y

I . Title

A Study on the Application of Waste Tires for Soil Improvement and Construction of Reinforced Retaining Wall

II. Purpose and Necessity of the Study

Waste tires are increasing every year in urban areas. They are nondegradable and require a large amount of space for storage. Stockpiling of scrap tires is also undesirable because of the potential fire hazard and consequent environmental damage. Consequently there is an urgency to develop new, energy-efficient, beneficial ways to recycle and reuse large volumes of scrap tires.

Utilization of waste tires are made by crumbled powder, original form, thermal use and mechanical use in Korea. Korean government established a law concerning the recycling of construction waste to promote the save of energy and recycling. The reuse of waste tires in construction site has not only an advantage in the use of large quantities but also in substitution of commercial geotextile for soil improvement.

The purpose of this study are determination of strength parameter through field pull-out tests for the design of waste tire mats specially designed for soil improvement and construction of tire-reinforced soil slope and tire-reinforced retaining wall for confirmation of the determined strength parameter. In addition environmental assesment are performed from the leachate collected form the site.

III. Scope of the research

Fundamental index properties also studied in the laboratory and pull-out tests under an embankment for the first year. The test items are listed below.

- Making of tire mat and Tirecell for lab. and field tests
- Direct shear test using large shear box to determine the interface angle of friction between tires and soil for both sand and granite soils
- Pull-out test of connection parts of tires using universal testing machine
- Environmental assesment for various sizes of tire shreds and durability test under severe conditions
- Plate loading test to confirm soil reinforcement in a chamber and in field
- Pull-out tests of tire mat and Tirecell under an embankments for various heights and types of mats

IV. Research results

The summarized results from the research are as follows.

- Making of Tirecell and tire mat for lab. and field tests
Tirecell and tread mat have the same function with commercial geocell and geogrid, respectively.
- Direct shear test using large shear box to determine the interface angle of friction between tires and soil for both sand and granite soils
From the direct shear tests, the ratios of interface friction angles and shear friction angle of soil(δ/ϕ) were as high as 1.06 for sand and 0.98 for granite soil.
- Pull-out test of connection parts of tires using universal testing machine
As the number of both the bolts and washers increases the strengths of connection increased.
- Environmental assesment for various sizes of tire shreds and durability test under severe conditions
From the tests it can be seen that the larger the sizes of tire shreds, the less

concentration of metal ions.

- Plate loading test to confirm soil reinforcement in a chamber and in field

- Chamber test

Bearing capacities increased remarkably at lower densities and large amount of settlement reduction at lower density.

Tire-reinforced soils show higher bearing capacities than those of commercial geogrids..

- Pull-out tests of tire mat and Tirecell under an embankments for various heights and types of mats

Tread mat has higher pull-out resistance than that of geogrid for the same area of reinforcement.

Tirecell has higher pull-out resistance than that of geocell for the same area of reinforcement.

V. Utilization of the research results

The research results can be directly used for the construction of reinforced embankment structures and retaining walls in practice. Based on the inspection and measurements of behavior of the structures, specification for the structures are made. After successful research, the construction method using waste tires can be used instead of commercial geomaterial for the small scale construction of embankment firstly which launched by metropolitan local government. By accumulation of further application of the construction method, the method can be extended to large scale soil structures such as reinforcement of a footing, just before and after box structures for the reduction of differential settlement, slope protection and construction of retaining walls.

목 차

제 1 장 서 론	1
1절. 연구개발의 목적	1
2절. 연구개발의 필요성	1
1. 연구개발의 필요성	1
2. 연구개발의 중요성	2
3절. 연구범위	8
1. 페타이어를 이용한 시작품 제작	8
2. 사질토와 풍화토의 기본물성시험 및 대형전단시험	9
3. 연결부 인장시험	9
4. 환경영향시험 및 내구성 시험	9
5. 평판재하시험	10
6. 현장인발시험	10
7. 보강 성토사면	10
8. 보강토 옹벽	10
9. 페타이어의 침출수 분석	10
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	11
1절. 국내기술동향	11
2절. 국외기술동향	11
3절. 기술동향 분석 결론	12
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	15
1절. 기본물성 및 강도시험	15
1. 사질토의 기본물성 시험	15
2. 대형전단시험	16
가. 시험종류	16
나. 시험방법	16
다. 결과 및 고찰	17
3. 타이어 연결부의 인장시험	19

가. 시험종류	19
나. 시험방법	21
다. 결과 및 고찰	22
(1) 타이어셀 unit 연결부 인장시험	22
(2) 트레드 연결부 인장시험	24
4. 결론	26
 2절. 환경영향시험	27
1. 페타이어의 용출특성	27
가. 환경적 유해성 검토	27
나. 입경에 따른 용출특성	27
다. 배수조건에 따른 용출특성	28
2. 페타이어의 내구성	32
가. 시험조건 및 방법	32
나. 시험결과	33
3. 결론	36
 3절. 평판재하시험	37
1. 토조내 재하시험	37
가. 시험개요	37
나. 시험준비	37
(1) 시험토조 제작	37
(2) 타이어셀 제작	38
다. 시험방법	39
(1) 재하시험	39
(2) 극한지지력의 결정	40
(3) 지반보강 효과	40
라. 시험결과 및 고찰	41
(1) 무보강시험	41
(2) 타이어 종류에 따른 보강효과	42
㉠ 상대밀도	42
㉡ 타이어셀 LT와 PC의 비교	44

2. 현장재하시험	47
가. 시험개요	47
나. 지반조성 및 시험대설치	48
다. 시험결과 및 고찰	51
(1) 지반조성 시료의 물성치	51
(2) 재하관직경에 의한 영향	53
(3) 보강재 종류에 의한 영향	55
(4) 보강재 수에 의한 영향	55
(5) 상대다짐도에 의한 영향	55
3. 결론	57
 4절. 인발시험	58
1. 시험개요	58
2. 시험준비	60
가. 지반조성	61
(1) 풍화토의 특성	61
(2) 트레드매트 설치	63
(3) 재하용 성토	67
나. 시험대설치	68
3. 인발시험	70
4. 극한인발저항력의 산정	70
5. 시험결과 및 고찰	71
가. 지오그리드와 각각의 트레드매트 인발시험 결과	71
나. 지오셀과 각각의 타이어셀 인발시험 결과	73
다. 트레드매트와 타이어셀, 지오그리드와 지오셀 비교	76
라. 성토고에 따른 트레드매트의 인발시험 결과	77
6. 결론	78
 5절. 보강성토사면	80
1. 보강 성토사면의 설계	80
가. 설계개요	80
나. 설계조건	81

다. 페타이어의 인장강도	84
라. 보강재의 설계	85
(1) 보강재의 단위폭 당 전체 보강재 인장력(T_s)의 계산	85
(2) Chart를 이용한 최대 전체 보강재 인장력(T_{s-MAX})의 계산	88
(3) 보강재 수직간격(S_v)의 계산	89
(4) 보강재의 설계길이(L) 계산	90
(가) 임계영역에 의한 방법	91
(나) 계산에 의한 방법	91
2. 보강 성토사면의 안정해석	93
가. 활동(sliding)에 대한 안정	93
나. 전반적(deep seated global) 안정	94
다. 지반지지력에 대한 안정	96
3. 보강 성토사면의 시공	97
가. 시공개요	97
나. 기초터파기	98
다. 경사계 설치	98
라. 침출수 집수시설 시공	99
(1) 차수층 시공	99
(2) 배수층 시공	100
(3) 집수정 설치	101
마. 침하계 설치	101
바. 보강 성토사면의 시공	102
(1) 타이어셀 보강 성토사면	102
(2) 트레드매트 보강 성토사면	103
사. 사면 법면부 식생	104
4. 계측	105
가. 경사계	105
(1) 타이어셀	106
(2) 트레드매트	106
나. 침하계	107
5. 결론	108

6절. 보강토 옹벽	109
1. 보강토 옹벽의 설계	109
가. 설계 개요	109
나. 설계현황 및 설계조건	110
다. 외적안정 검토	111
(1) 예비설계단면 가정	111
(2) 외적안정성 검토를 위한 토압	111
(가) 타이어셀 보강토 옹벽	112
(나) 트레드매트 보강토 옹벽	113
(3) 저면활동에 대한 안정성 검토	113
(가) 타이어셀 보강토 옹벽	114
(나) 트레드매트 보강토 옹벽	115
(4) 전도에 대한 안정성 검토	115
(가) 타이어셀 보강토 옹벽	116
(나) 트레드매트 보강토 옹벽	116
(5) 그 외의 외적안정성	117
라. 내적안정 검토	117
(1) 단면가정	117
(가) 셀형 보강재 보강토 옹벽	117
(나) 쉬트형 보강재 보강토 옹벽	117
(다) 타이어셀 및 트레드매트 보강토 옹벽	119
(2) 보강재의 강도결정	119
(3) 가상파괴면의 설정	120
(4) 보강재의 파단파괴에 대한 안정성 검토	121
(가) 보강토체 내부의 토압분포	121
(나) 보강재의 소요인장력(T_{MAX})의 계산	122
(5) 보강재의 인발파괴에 대한 안정성 검토	124
마. 전체 사면활동에 대한 안정성	125
2. 보강토 옹벽의 시공	126
가. 시공개요	126
나. 기초터파기	127

다. 경사계 설치	127
라. 침출수 집수시설 시공	128
(1) 차수층 시공	128
(2) 배수층 시공	129
(3) 집수정 설치	130
마. 침하계 설치	130
바. 보강토 옹벽의 시공	131
(1) 타이어셀 보강토 옹벽	131
(2) 트레드매트 보강토 옹벽	132
사. 슈트타켓 설치	133
아. 옹벽 전면부 식생	134
3. 계측	135
가. 경사계	135
(1) 타이어셀 보강토 옹벽	135
(2) 트레드매트 보강토 옹벽	136
나. 벽체변위	136
다. 횡토압	138
라. 침하관	139
4. 결론	141
 7절. 페타이어의 침출수 분석	143
1. 개요	143
2. 침출수 집배수층의 시공	143
3. 침출수 분석	144
가. 분석항목	144
나. 분석방법	145
4. 침출수 분석 결과	146
5. 결론	148
 8절. 종합결론	149
 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	152

1절. 연구개발목표 달성도	152
1. 연구개발 수행 진도율	152
가. 1차년도	152
나. 2차년도	152
2. 연구개발 목표의 달성도	154
가. 1차년도	154
나. 2차년도	155
2절. 관련분야 기술 발전에의 기여도	156
1. 기술적 성과 및 파급효과	156
2. 시장성 및 경제적 기대성과	156
가. 페타이어를 활용한 보강토 옹벽의 경제성 분석	156
나. 시정성 및 경제적 기대성과	159
 제 5 장 연구개발결과의 활용계획	161
1절. 연구성과	161
2절. 연구결과의 활용방안	161
1. 활용방안	161
2. 향후 예상되는 활용분야	161
3. 추가연구 분야	161
 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	163
 제 7 장 참고문헌	165

■ 부 록 - 타이어셀 보강토 옹벽 시방서

표 목 차

표 1	지반보강재로서의 페타이어 활용방법 비교	4
표 2	사질토의 물리적 특성	15
표 3	전단시험 개요	16
표 4	대형 직접전단시험기의 제원	17
표 5	대형전단시험 결과	19
표 6	타이어셀 unit와 트레드의 연결부 인장시험 개요	21
표 7	타이어셀 units 연결부의 인장강도	24
표 8	트레드 연결부의 인장강도	25
표 9	페타이어의 내구성 시험 조건	32
표 10	페타이어의 내화학적 시험결과	34
표 11	페타이어의 내구성 시험결과	35
표 12	토조시험 개요	37
표 13	타이어셀 LT와 PC의 특성	39
표 14	무보강지반의 극한지지력	42
표 15	타이어셀 LT의 극한지지력과 BCR, SRF	44
표 16	보강지반의 극한지지력과 BCR, SRF	45
표 17	보강재의 종류에 따른 평판재하시험	47
표 18	재하시험 방법	51
표 19	평판재하시험 전경	52
표 20	풍화토A의 물리적 특성	53
표 21	재하판직경에 따른 극한지지력 비교	55
표 22	무보강지반(B=0.3m)의 극한지지력 비교	56
표 23	인발시험의 계획	59
표 24	인발시험 풍화토B의 특성	62
표 25	대형전단시험 결과	63
표 26	보강재별 극한인발저항력의 비교	73
표 27	전체면적의 변화에 따른 타이어셀의 마찰력과 극한인발저항력 비교	73
표 28	보강재별 극한인발저항력의 비교	75
표 29	전체면적이 같은 트레드의 마찰력과 극한인발저항력 비교	75
표 30	보강재별 극한인발저항력	76
표 31	보강 성토사면의 설계 조건	81
표 32	원지반, 보강토체와 배수용 골재의 특성	82
표 33	페타이어의 인장강도(T_a)	84
표 34	단위폭 당 전체 보강재 인장력(T_S)의 계산	87
표 35	보강토 옹벽의 설계 조건	110

표 36 조건에 따른 주동토압계수 계산식	112
표 37 지오그리드의 인장강도(T_a)	120
표 38 보강재 소요인장강도 계산결과	123
표 39 보강재 파단파괴에 대한 안정성 검토 결과	123
표 40 인발파괴에 대한 안정성 검토 결과	124
표 41 전면벽체의 특성에 따른 보강토 옹벽의 종방향 부등침하 허용한계(FHWA, 2001)	138
표 42 일반적인 타이어용 고무의 성분(Park et al., 1996)	144
표 43 페타이어 침출수 농도분석 결과	146
표 44 1차년도 연구개발 수행 진도율	152
표 45 2차년도 연구개발 수행 진도율	153
표 44 1차년도 연구개발 목표 달성도	154
표 45 2차년도 연구개발 목표 달성도	155
표 46 보강재 종류와 옹벽높이에 따른 보강토 옹벽 시공비 비교	158

그 립 목 차

그림 1	지반보강재의 비교	6
그림 2	무보강지반과 보강지반의 파괴메카니즘	6
그림 3	옹벽 시공비용의 비교 (Federal Highway Administration, 1997)	7
그림 4	시작품 제작	8
그림 5	타이어셀 및 트레드매트의 치수	9
그림 6	사질토의 입도분포 곡선	15
그림 7	대형전단시험기	16
그림 8	모래-타이어 전단시험	17
그림 9	Sand-Outside of tread 수평변형율-전단응력 곡선	18
그림 10	수직응력-전단응력 곡선	19
그림 11	볼트의 연결방법	20
그림 12	타이어 연결부 인장시험	22
그림 13	인장시험(타이어셀 unit)	23
그림 14	인장시험(Tread)	25
그림 15	페타이어 시료	27
그림 16	용출시험	28
그림 17	초기 pH와 페타이어 입경에 따른 Zn과 TOC의 농도 변화(회분식 용출)	29
그림 18	타이어 입경과 경과일에 따른 Zn과 TOC의 농도 변화(거치식 용출)	30
그림 19	배수조건에 따른 용출시험 결과	31
그림 20	비배수조건 시험결과	31
그림 21	페타이어 내구성 시험 장면	33
그림 22	페타이어의 내화학적 시험 결과	34
그림 23	페타이어의 내구성 시험 결과	35
그림 24	토조내 재하시험	38
그림 25	타이어셀 LT의 형태(단위 : cm)	39
그림 26	타이어셀 PC의 형태(단위 : cm)	39
그림 27	하중-침하곡선(무보강지반)	41
그림 28	하중-침하곡선(Dr=40%)	43
그림 29	하중-침하곡선(Dr=55%)	43
그림 30	하중-침하곡선(Dr=70%)	43
그림 31	상대밀도에 따른 타이어셀 LT의 BCR과 SRF	45
그림 32	상대밀도에 따른 타이어셀 PC의 BCR과 SRF	45
그림 33	상대밀도에 따른 타이어셀 PC와 LT의 BCR	46
그림 34	상대밀도에 따른 타이어셀 PC와 LT의 SRF	46
그림 35	원형단면에 작용하는 등분포하중에 의해 발생하는 수직응력의 분포	48
그림 36	1ton 진동롤러를 이용한 다짐과 들밀도시험	48

그림 37	얕은기초의 파괴형태	49
그림 38	하중재하방법	50
그림 39	평판재하시험 준비완료	50
그림 40	풍화토A의 입도분포 곡선	52
그림 41	풍화토A의 다짐곡선	53
그림 42	하중-침하곡선(재하판직경 0.3m)	54
그림 43	하중-침하곡선(재하판직경 0.75m)	54
그림 44	하중-침하곡선(재하판직경 1.25m)	54
그림 45	하중-침하곡선(무보강지반, 재하판직경 0.3m)	56
그림 46	풍화토B의 입도분포 곡선	62
그림 47	풍화토B의 다짐곡선	62
그림 48	수직응력-전단응력 곡선	63
그림 49	인발시험(재하용 성토고 1.5m, 충성토고 2.1m)	64
그림 50	인발용 와이어의 연결	66
그림 51	내부 변위측정용 와이어 피복 및 연결	67
그림 52	인발시험부지 성토 및 다짐	67
그림 53	인발시험부지 들밀도시험	68
그림 54	페타이어 인발을 위한 인발시험대 및 인발시험장치	69
그림 55	인발시험에 의한 단계별 사면파괴사진	70
그림 56	하중-변위곡선(타이어셀, 지오셀)	72
그림 57	하중-변위곡선(유효길이의 비교)	72
그림 58	하중-변위곡선(연결재료, 지오셀 비교)	72
그림 59	하중-변위곡선(트레드매트, 지오그리드)	74
그림 60	하중-변위곡선(유효길이의 비교)	74
그림 61	하중-변위곡선(형태, 지오그리드 비교)	74
그림 62	하중-변위곡선(타이어셀과 트레드매트, 지오셀과 지오그리드 비교)	76
그림 63	하중-변위곡선(타이어셀 2×7(F))	77
그림 64	하중-변위곡선(트레드매트 6×6(F))	77
그림 65	보강 성토사면 설계 순서도(FHWA, 2001)	80
그림 66	보강 성토사면의 파괴형태(FHWA, 2001)	82
그림 68	페타이어를 활용한 보강토 옹벽 및 보강 성토사면 시공 개요	83
그림 69	보강재의 단위폭 당 총인장력(TS) 계산 방법(FHWA, 2001)	85
그림 70	무보강 성토사면의 안정해석	86
그림 71	설계도표(Schmertmann 등, 1987)	88
그림 72	FSU=FSR인 임계영역(critical zone)의 결정	90
그림 73	보강 성토사면 단면도	92
그림 74	활동에 대한 안정성 해석(FHWA, 2001)	93
그림 75	전반적(deep seated global) 안정성 해석(FHWA, 2001)	94
그림 76	타이어셀(L=3.2m)의 deep seated global안정 해석 결과(slope/w)	95
그림 77	트레드매트(L=3.6m)의 deep seated global안정 해석 결과(slope/w)	95

그림 78 지지력(local bearing failure)에 대한 안정성 해석(FHWA, 2001)	96
그림 79 시공전의 현장 전경	97
그림 80 보강 성토사면 시공 순서도	97
그림 81 기초터파기	98
그림 82 경사계 설치	98
그림 83 차수층 시공	99
그림 84 배수층 설치	100
그림 85 집수정 설치	101
그림 86 침하계 설치	101
그림 87 타이어셀 보강 성토사면의 시공	102
그림 88 트레드매트 보강 성토사면의 시공	103
그림 89 사면 범면부 식생	104
그림 90 경사계 좌표측 방향	105
그림 91 경사계 계측	105
그림 92 타이어셀 보강 성토사면의 변위	106
그림 93 트레드매트 보강 성토사면의 변위	106
그림 94 보강 성토사면의 기초지반 침하량(mm)	107
그림 95 보강토 옹벽 설계 순서도(2001)	109
그림 96 보강토 옹벽의 주요 파괴형태(이은수 등, 2007)	110
그림 97 예비설계단면	111
그림 98 셀형(3D) 보강토 옹벽의 개요도(단위 : m)	117
그림 99 쉬트형(2D) 보강토 옹벽의 개요	118
그림 100 블록식 보강토 옹벽의 구성요소	118
그림 101 보강토 옹벽 단면도(단위 : m)	119
그림 102 보강토 옹벽의 가상파괴면	121
그림 103 보강재와 깊이애 따른 토압계수의 변화	122
그림 104 시공전의 현장 전경	126
그림 105 보강토 옹벽 시공 순서도	126
그림 106 기초터파기	127
그림 107 경사계 설치	127
그림 108 차수층 시공	128
그림 109 배수층 설치	129
그림 110 집수정 설치	130
그림 111 침하계 설치	130
그림 112 타이어셀 보강토 옹벽의 시공	131
그림 113 트레드매트 보강토 옹벽의 시공	132
그림 114 토압계 설치	133
그림 115 쉬트타켓 설치	134
그림 116 사면 범면부 식생	134
그림 117 타이어셀 보강토 옹벽의 변위	135

그림 118	트레드매트 보강 성토사면의 변위	136
그림 119	벽체의 X변위	137
그림 120	벽체의 Z변위	138
그림 121	횡토압의 측정	139
그림 122	보강토 옹벽의 기초지반 침하량(mm)	140
그림 123	페타이어 침출수 채수	144
그림 124	원자흡광 분석장치(Atomic Absorption Spectrometry) 분석	145
그림 125	페타이어 침출수 농도분석 결과	147
그림 126	보강재 종류와 옹벽높이에 따른 보강토 옹벽 시공비 비교	159

C O N T E N T S

Chapter 1	Introduction	1
Subtitle 1.	Purpose of the Research	1
Subtitle 2.	Necessity of the Research	1
1.	Necessity of the Study	1
2.	Importance of the Study	2
Subtitle 3.	Scope of the Research	8
1.	Making of Tirecell and tire mat	8
2.	Laboratory Tests	9
3.	UTM Tests	9
4.	Environment and Durability Tests	9
5.	Plate Loading Tests	10
6.	Field Pull-Out Tests	10
Chapter 2	Current Development	11
Subtitle 1.	Domestic	11
Subtitle 2.	Abroad	11
Subtitle 3.	Analysis of Trends	12
Chapter 3	Contents and Result of Research	14
Subtitle 1.	Laboratory Tests	14
1.	Physical Properties of Sands	14
2.	Large Direct Shear Test	15
3.	UTM Tension Test	18
4.	Conclusion	24
Subtitle 2.	Environment and Durability Tests	27
1.	Elution Properties of Tire Shreds	27
2.	Durabilities of Tire Shreds	32
3.	Conclusion	36

Subtitle 3. Plate Loading Tests	37
1. Chamber Test	37
2. Field Test	47
3. Conclusion	57
Subtitle 4. Field Pull-Out Tests	58
1. Summary	58
2. Arrangements of Test	60
3. Pull-Out Test	70
4. Determination of Ultimate Pull-Out Resistance	70
5. Result and Consideration	71
6. Conclusion	78
Subtitle 5. Reinforced Soil Slope	80
1. Design of Reinforced Soil Slope	80
2. Stability Analysis of Reinforced Soil Slope	93
3. Construction of Reinforced Soil Slope	97
4. Measurement	105
5. Conclusion	108
Subtitle 6. Mechanically Stability Earth Wall	109
1. Design of Mechanically Stability Earth Wall	109
2. Construction of Mechanically Stability Earth Wall	126
3. Measurement	135
4. Conclusion	141
Subtitle 7. Test on Water Quality	143
1. Summary	143
2. Construction of Drainage System	143
3. Analysis of Drainage Water	144
4. Result of Analysis	146

5. Conclusion	148
Subtitle 8. Comprehensive Conclusion	149
Chapter 4 Achievement & Contribution of Research	152
Subtitle 1. Achievement	152
Subtitle 2. Contribution to associated field	156
Chapter 5 Utilization of the Research Results	161
Subtitle 1. Results of Research	161
Subtitle 2. Utilization of the Results	161
Chapter 6 Science Technique Information of Aboard	163
Chapter 7 Reference	165

제 1 장 서 론

1절. 연구개발의 목적

본 연구는 페타이어를 활용하여 지반보강 및 옹벽 공법의 실 구조물에 적용하여 시공하고 침출수가 수질기준에 적합한 범위 내에 있음을 확인함으로써, 연구 완료 후 입체형 타이어셀(3D)은 상업용 지오셀, 평면형 트레드매트(2D)는 지오그리드와 같은 공학적 기능을 갖도록 하여 페타이어를 토목분야에 활용하기 위한 가능성을 입증하는데 있다.

2절. 연구개발의 필요성

1. 연구개발의 필요성

자동차 문화의 발달로 전 세계적으로 매년 수십억 개에 달하는 페타이어가 발생하고 있으며 자동차문화가 발달한 미국의 경우를 보더라도 매년 5천만 개가 발생한다고 보고되고 있다(Garga와 O'Shaughnessy, 2000). 국내의 경우 그 수가 1998년 이후 약 2,000만개에 이르고 있으며 회수비율은 약 40~80%로서 전량 수거되고 있지는 못한 형편이며 수거되는 페타이어의 활용실적 또한 부족한 상태이다(한국환경자원공사, 2003).

페타이어는 야외에 적치될 경우 많은 공간을 필요로 할 뿐만 아니라 미관을 해치고 각종 병원체의 전달 매개체인 동물의 서식지역할을 하게 되며 화재의 위험을 수반하게 된다. 보통 페타이어의 처리 방법에는 매립, 소각, 재활용으로 구분되어 있는데 매립에 의한 처리 방법은 매립지의 부족, 부수적인 환경오염 및 지역 주민의 기피 등으로 매립지의 확보에 한계가 있다. 또한 소각에 의한 처리 방법은 에너지로서 활용할 수 있으나, 독가스가 배출되어 2차 대기오염의 원인이 되어 이를 처리하는데 많은 비용이 소요되는 시설비의 부담이 문제가 되고 있다. 따라서 재활용하는 방법이 환경문제 해결에 있어서 가장 최상의 방법이라고 할 수 있으나 경제성 문제와 기술개발의 부진으로 어려움이 있다. 그러므로

우리나라의 경제수준과 더불어 누적 적치되고 있는 폐타이어의 새롭고 효율이 높은 바람직한 재활용 방법의 개발이 시급한 실정이다.

2. 연구개발의 중요성

가. 폐타이어의 재활용 분야

폐타이어의 이용은 여러 분야에서 부분적으로 이루어지고 있으며 타이어를 분쇄하여 재활용하는 방법과 원형을 크게 변화시키지 않고 재활용하는 분야로 크게 구분할 수 있다. 분쇄하여 재활용하는 방법으로는 시멘트 원료인 킬른(Kiln)으로 활용하는 방법, 분쇄된 고무를 성형하여 고무 블럭이나 타일 등으로 재활용하는 방법 등이 있다. 그리고 원형을 이용하는 분야로는 어초로 활용하는 방법, 놀이터 등에 활용하는 방법, 우리나라의 경우 군 부대 등에서 병커의 벽체에 사용하는 방법이 있고, 옹벽에 재활용하는 방법, 사면보호에 활용하는 방법 등이 있다. 폐타이어를 가루로 분쇄하는 데는 많은 경비가 소요되어 제품으로 나오게 되는 고무 블럭 등은 타제품보다 생산단가가 비싸서 활용이 많지 않은 편이다. 그리고 시멘트의 원료로서 사용하는 방법은 처리비용과 시멘트 공장의 지리적 위치로 인하여 사용량이 미미한 상태이다. 또한 군부대 등에서 병커구축용으로 소모하는 폐타이어는 90년대 이후에는 거의 전무한 실정이다.

나. 기술적 측면

(1) 폐타이어의 물리-화학적 특성

타이어는 폴리머 재료로 구성되어 있으며 주로 고온경화 고무로 되어 있으므로 통상적으로 부식의 영향을 받지 않는다. 그러나 타이어 재료의 초기의 역학적 성질은 물리-화학적인 노화(aging), 자외선 노출(UV radiation), 크리프, 시공 중의 손상 등에 영향을 받을 수도 있다. 물리화학적인 노화는 가수분해되는 폴리에스터와 폴리아미드의 화학적 특성의 결과로서 발생한다. 폴리에스터 재료의 가수분해는 온도, pH 그리고 응력의 크기와 관계된다. 그러나 가수분해는 보장된 구조물의 수명이 다하기 전에는 결코 관찰되지 않는다고 한다(Leclercq 등, 1990). 폴리에스터의 고분자 결합은 자외선노출과 오존의 영향을 받기 쉬우나 자외선의 영향은 흠으로 덮여있게 되면 영향을 받지 않으며 흠 속의 오존농도는

거의 무시할 정도이다. pH가 약 1정도의 강한 산은 고무를 파괴시키지만 산성의 지표수라 할지라도 보통 pH는 4와 5사이로 알려져 있다. 이러한 pH수준에서 고무의 열화는 거의 무시될 정도다. 시공 중 다짐에 의한 손상은 아직 관찰되거나 보고된 적이 없다. 타이어는 다짐 중 주변 흙의 변형과 같은 정도로 연성으로 거동함으로써 높은 응력을 견딜 수 있다. 만약 타이어를 엮어서 매트로 만들어진다면 강봉이나 폴리에스터 띠, 로프 등이 타이어보다 더 손상을 입을 수도 있다. 손상의 정도는 연결구의 인장강도와 연성에 관계될 것이다. AB-Malek과 Stevenson(1986)은 고온 경화된 천연고무를 24m의 바다에 42년 동안 담귀 놓고 외관의 물리적인 변화를 관찰 연구하였다. 이들의 연구에 의하면 타이어의 열화(deterioration)는 심각하지 않았으며 42년 해수 중에 잠겨진 후 흡수된 물의 양은 4.7%이었으며 타이어의 강도에는 영향을 미치지 않으며 소정의 흡수된 물은 0.05 mm의 얇은 표층을 형성하는데 쓰여 진다고 보고하고 있다. 또한 해저의 유기물에 의한 타이어의 외관상 파괴는 없었으며 타이어의 얇은 고무층은 내부에 포함된 보강용 연철의 부식을 방지하였으며 이러한 현상은 아주 심하게 산화된 물 속에서도 마찬가지로 나타났다. 결과적으로 낡은 페타이어조차도 부식이나 열화에 매우 강하며 고품질의 지반보강재로 사용될 수 있음을 의미한다.

(2) 지반보강재로서의 페타이어

지반보강재의 대체 재료로서 페타이어를 활용하기 위한 본 연구에서는 그 동안 페타이어를 칩으로 사용하거나 타이어 전체를 이용하는 것과는 달리 페타이어가 갖는 타이어 내부의 강선에 의한 내력성, 내구성의 장점을 충분히 살리고 지지력을 증대시키거나 침하량을 더욱 경감시킬 수 있을 것으로 예상되는 방법이다. 아래의 표 1에는 페타이어를 지반보강에 사용하는 기존의 몇 가지 방법을 비교하였다.

표 1에서 칩의 형태는 토사혼합의 경우 내부마찰각이 커지고 경량성토재로 사용할 수 있는 점이 있으나 처리비용이 비쌀 뿐 아니라 일부 중금속이 허용치를 초과하는 경우가 있으며 타이어의 크기가 커지면 환경부의 먹는물 수질기준(2003)에도 적합한 것으로 나타났으며(천성한, 2005), Garga와 O'Shaughnessy(2000)의 침출수 연구결과에 의하면 타이어내의 강선노출이 없는 경우 중금속의

표 1 지반보강재로서의 페타이어 활용방법 비교

구 분	타이어 칩	1 측면제거 타이어 원형	양측면제거 타이어 셀	트레드매트
활용 형태				
환경적 측면	일부 중금속배출로 불리	오염 없음	오염 없음	오염 없음
공학적 측면	지지력 증진 침하량 큼	지지력 다소 증진 침하량 큼	지지력 대폭 증진 침하 소량	지지력 다소 증진, 인발저항에 의한 사면안전율 증가
재처리 비용	큼	작음	작음	작음
사용 목적 혹은 방법	모래와 혼합사용 내부마찰각 증가, 경량성토재로 사용 배수재로 사용	성토지반에 사용	성토지반, 사면보호, 옹벽체 대신 적층 사용	사면 보강에 성토단계별 사용 인발저항력 보강으로 사면안전율 증가
연구자	Humphrey and Manion, (1992), Foose et al.(1996), Tatliso et al. (1998), Westerberg와 Macsik(2001)	Garga & O'Shaughnessy (2000), Nguyen(1996), Gerscovich et al. (2001) 김규래(2001)	윤여원 등(2004a, 2004b) Yoon et al.(2004)	윤여원 등(2002) 윤현식(2004) 천성한(2005)

위험은 전혀 없는 것으로 나타났다. 측면제거 타이어 원형 사용은 타이어의 원형이 커질수록 타이어 내부에 채워진 토사의 침하로 인해 전체 침하량이 크게 되며 이를 보완하기 위한 방법으로 타이어 양 측면을 절개하고 8자의 셀로 만드는 방법은 기존의 상업용 지오셀과 같은 기능을 갖는 장점이 있고 측면구속으로 침하를 경감하고 상업용 지오셀과 같은 용도로 지반보강, 옹벽축조, 사면보강 등의 목적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 더욱이 약간의 경사진 옹벽시공시는 옹벽외측이 초목류 식재 혹은 자생적인 잡초류가 자라 타이어의 노출이 가려져

콘크리트 옹벽보다 친환경적인 외관을 조성할 수 있다. 또한 표 1의 트레드매트(tread mat)는 차륜의 접지부에 해당하는 부분을 매트형태로 제작한 것으로 지오그리드 역할과 마찬가지로 지반보강에 사용할 수 있다.

특히 타이어의 내구성은 지반구조물에 사용하기에 매우 유리하며 특히 타이어를 칩으로 분쇄하지 않고 사용하면 비용이 절감되며 분쇄되지 않은 토공구조물은 구조물이 여러 가지 이유로 굴착 혹은 해체될 경우 타이어 재료만의 분리가 쉽고 페타이어의 열화상태가 심화되었을 때 최종적으로 분쇄하여 사용하는 것도 가능하게 된다. 이러한 타이어 구조물은 현재의 기술로 얼마든지 시공이 쉽게 이루어 질 수 있다.

따라서 실용화를 위한 현장 시험이 성공적으로 이루어지면 날로 증가되는 폐타이어를 기존의 방법 즉 타이어를 분쇄하여 칩으로 사용하거나 타이어의 1 측면만을 제거한 방법(표 1의 사진)보다 더 효율적으로 타이어셀을 사용할 수 있을 것이며 평면형 타이어매트는 한정적으로 지오그리드를 대체 사용할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 타이어의 재활용은 광역 지자체에서 발생하는 양을 자체 수행공사에 효율적으로 사용될 경우 장거리 수송에 따른 운반비용도 절감할 수 있을 것이다.

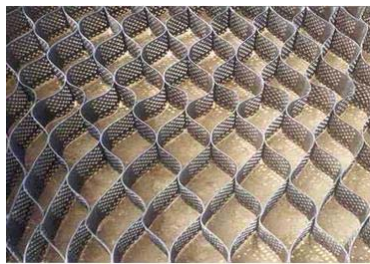
(3) 페타이어의 지반보강 메카니즘

선진국에서는 대량처리 목적으로 토목분야의 활용사례가 점차 증가하고 있다. 타이어는 고무와 인공섬유, 고강도 철사로 아주 잘 보강된 재료로 구성되어 있어 매우 높은 인장강도, 유연성, 탄력, 높은 마찰저항력을 갖고 있는 독특한 성질을 가지고 있다. 따라서 자동차 바퀴 역할로서의 수명이 끝난 후에도 그 성질을 이용할 수 있어서 이러한 독특한 성질을 보강된 옹벽이나 성토에 활용할 수 있다.

또한 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률(환경부, 2003)등이 제정되어 폐기물의 활용을 권장하고 있으므로 페타이어 배출량이 점차 증가되는 우리나라에서도 페타이어를 토목분야에 재활용함으로써 대량처리뿐만 아니라 폐자원의 효율적인 재활용을 추구할 필요가 있다. 기존의 상업용 지오셀(geocell), 지오그리드 등과 동일한 조건으로 토조 내에서 시험한 결과 지지력이 동등하거나 우수한 것으로 나타났다(윤여원 등, 2004). 타이어를 옆으로 연결하여 매트를 만들고 이

안에 토사를 채워 다수의 층으로 만들면 옹벽이나 보강된 사면이 되며 폐기물을 실제적인 대용물로 사용이 가능하게 된다. 이러한 개념은 토목공학에서 이미 널리 사용되고 있는 보강토 개념과 유사하다.

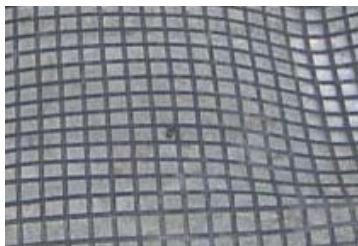
그림 1(b)의 타이어셀은 그림 1(a)의 지오셀과 마찬가지로 벌집모양의 3차원 보강재로서 지오셀의 사용목적과 동일한 장소에 사용될 수 있다. 그림 2(a)에 나타난 것과 같이 지반에 하중이 아래쪽으로 가해지면 흙은 하향 및 측방변형에 의하여 주변지반이 히빙을 일으키며 이로 인하여 침하가 일어나게 된다. 그러나 지반에 지오셀(geocell) 혹은 타이어셀(Tirecell®)이 보강되면 그림 2(b)에서와 같이 셀의 측면은 하중재하시 흙의 횡적인 변형을 억제, 침하를 경감시키고 지오그리드 혹은 트레드매트는 그림 2(c)에서와 같이 인발저항에 의하여 지지력을 증가시키게 된다.



(a) 지오셀



(b) 타이어셀

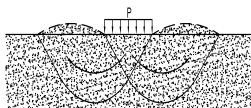


(c) 지오그리드

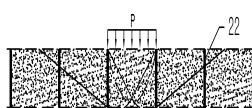


(d) 트레드매트

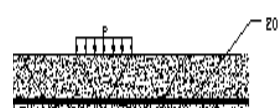
그림 1 지반보강재의 비교



(a) 무보강지반



(b) 지오셀 · 타이어셀



(c) 지오그리드 · 트레드매트

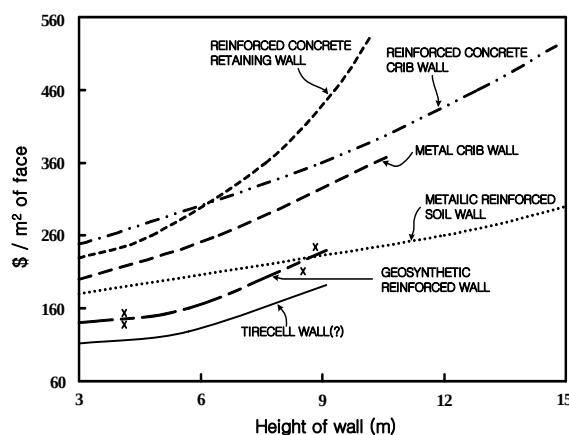
그림 2 무보강지반과 보강지반의 파괴메카니즘

따라서 본 연구에서는 페타이어를 보다 효율적으로 토목공사에 활용하기 위한 연구로서 현재 지반보강 또는 옹벽 등으로 사용되고 있는 지오셀(Geocell), 유사한 형태의 타이어셀, 지오그리드와 유사기능의 트레드매트를 각각 제작하여 옹벽의 축조에 실용화할 뿐 아니라 지반보강 목적에 활용하고자 하는 것이다.

다. 경제·산업적 측면

페타이어를 건설공사의 지반보강 혹은 옹벽 축조의 목적으로 사용하게 되면 기존의 수백억에 달하는 지반보강재 공사비와 수천억에 달하는 옹벽의 시공비를 부분적으로 대체할 수 있을 뿐만 아니라 지하수의 오염없이 폐자원을 활용할 수 있어 일석이조의 장점이 있다. 특히 건설공사 중 지반상의 성토 등 토공구조물 공사에서 소모하기 용이한 점이 있다. 따라서 본 연구에서 추구하는 실용화가 성공적으로 수행되면 다른 어느 분야에 활용하는 방법보다 양적, 질적 효과가 있을 것으로 생각된다.

그림 3은 옹벽의 시공 비용을 비교한 것으로서 보강토 옹벽이 기존의 콘크리



트 옹벽보다 시공비용이 저렴함을 보여주고 있으며 타이어로 옹벽체를 시공할 경우 재료비 경감, 폐자원의 재활용에 의한 일석이조의 효과가 있다고 할 수 있다. 그림에 나타낸 타이어셀에 의한 비용은 보강토 옹벽의 비용 중 재료비 20% 정도를 감산하여 개략적으로 예상한 값이다.

그림 3 옹벽 시공비용의 비교 (Federal Highway Administration, 1997)

3절. 연구범위

1. 페타이어를 이용한 시작품 제작

페타이어는 우선 육안으로 사용가능한 것과 불가능한 것을 선별하여 이를 바탕으로 선별기준을 설정한다. 기준설정에는 타이어의 내 외부 결함, 트레드내 강선 등의 기준을 적용한다. 타이어셀의 가공은 엄선된 페타이어를 우선 그림 4에 보인 바와 같이 타이어의 위 측면(sidewall)과 아래측면을 제거하여 그림 4(b)의 형태를 만든 후 이를 오픈려 그림 4(c)와 같은 8자 모양의 셀을 만들어 이를 다수 연결한 그림 4(d)형태의 매트로 제작한다. 트레드매트는 그림 4(b)의 원형을 절단하면 그림 4(e)벨트모양의 트레드가 되고 이를 격자형으로 연결하여 그림 4(f)와 같은 매트를 제작한다.

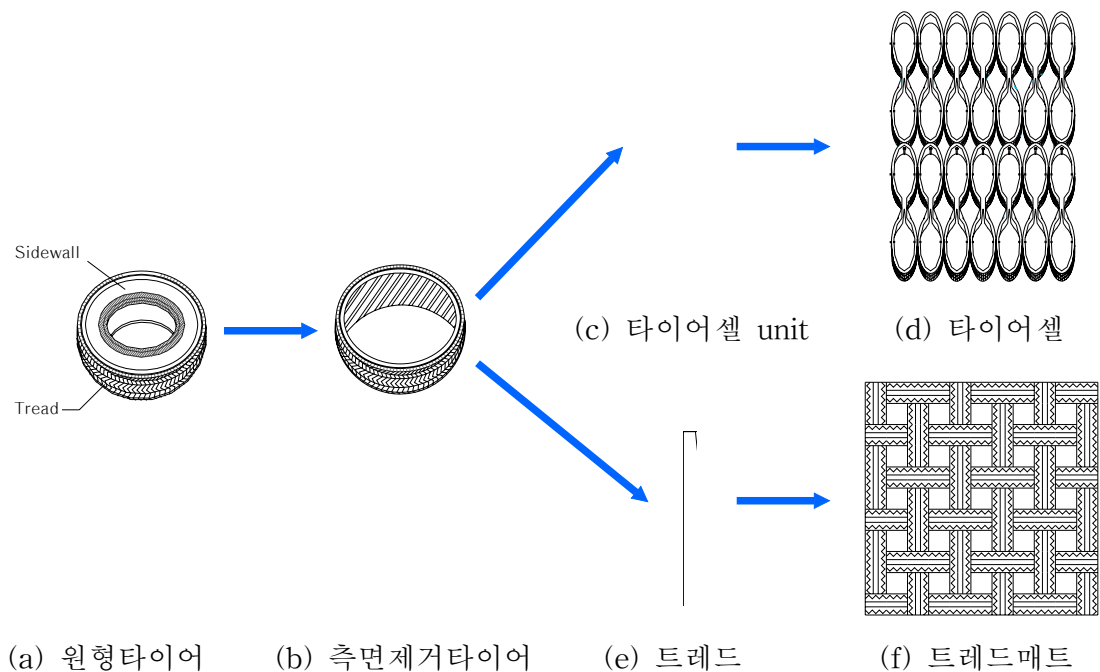


그림 4 시작품 제작

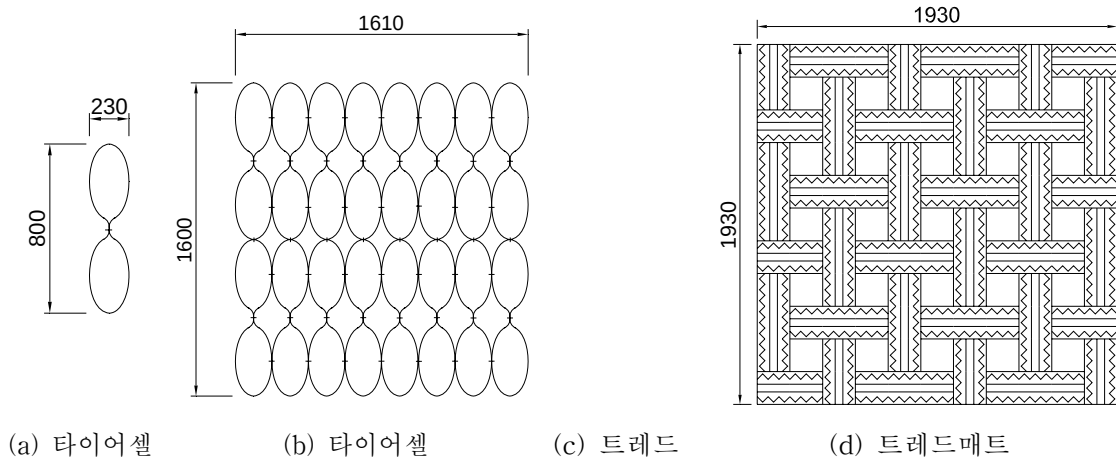


그림 5 타이어셀 및 트레드패트의 치수(단위 : mm)

2. 사질토와 풍화토의 기본물성시험 및 대형전단시험

가. 사질토

체분석, 비중, 상대밀도와 같은 기본물성시험을 통한 물리적 특성과 대형전단 시험을 통한 역학특성을 고찰한다.

나. 풍화토

체분석, 비중, 다짐, 애터버그와 같은 기본물성시험을 통한 물리적 특성과 대형전단시험을 통한 역학특성을 고찰한다.

3. 연결부 인장시험

타이어셀과 트레드패트의 인장강도는 셀 unit와 셀 unit, 트레드와 트레드를 연결하는 연결부의 인장강도에 좌우되므로 타이어 연결부의 인장강도 시험을 수행한다.

4. 환경영향시험 및 내구성 시험

폐타이어를 경량성토재 및 지반보강재로 활용하는 경우 우선적으로 재료의 환

경적 안정성이 규명되어야 한다. 본 연구에서는 입경과 배수조건에 따른 용출시험을 통하여 페타이어의 환경적인 영향에 대하여 고찰한다.

페타이어를 지반보강재로 사용할 경우 각종 외부적인 영향에 의하여 재료특성이 저하될 위험성이 있다. 본 연구에서는 페타이어의 내구성을 평가하기 위하여 내화학적, 내한성, 내열성, 내후성, 내미생물성에 대한 시험을 수행한다.

5. 평판재하시험

가. 토조내 재하시험

자연건조 시킨 인천송도 매립지의 해사를 이용하여 상대밀도 40, 55, 70%로 지반을 조성하고 보강깊이비(D/B)를 0.2로 유지하면서 직경 0.35m인 재하판으로 평판재하시험을 수행한다. 또한 소형트럭용 타이어(Light Truck tire, LT)와 페타이어의 발생율이 가장 높은 승용차용 타이어(Passenger Car tire, PC)를 구분하여 시험을 한다. 타이어셀 LT와 타이어셀 PC는 무보강시험의 상대밀도와 같도록 지반을 조성하고 재하시험을 수행한다. 보강깊이(D)는 재하판의 직경(B)의 0.2배로 한다.

나. 현장재하시험

현페타이어를 활용한 지반보강효과를 판단하기 위하여 현장에서의 평판재하시험은 실내시험과 달리 직경이 큰 0.3m, 0.75m, 1.25m 재하판을 사용하여 무보강 지반에서의 재하시험과 타이어셀과 트레드매트로 보강된 지반에서의 재하시험을 수행한다. 직경 1.25m의 재하판은 980kN이상의 하중에도 재하판의 휨이 발생하지 않고, 충분한 강성을 갖도록 두께를 50mm로 제작한다.

6. 현장인발시험

인발시험의 목적은 상재하중의 변화에 따른 타이어셀 및 트레드매트의 극한인발저항력을 측정하고 안전율을 적용하여 허용인발저항력을 구하기 위한 것이다. 타이어셀 인발시험은 성토고 1.5m, 2×7(그림 1(d)), 트레드매트는 성토고 1.5m, 6×6(그림 1(f))를 중점으로 계획하였다. 타이어셀과 지오셀, 트레드매트와 지오그

리드의 극한인발저항력을 각각 비교하였고, 타이어셀 2×7, 트레드매트 6×6의 재하용 성토고를 0.5m, 2.5m, 3.5m로 바꾸어 재하용 성토고에 따른 영향을 확인하였다. 또한 타이어셀은 2×7외에 1×7과 4×7, 트레드매트는 6×6외에 3×3, 4×4, 3×6, 12×6를 시험하여 타이어의 보강 개수에 대한 영향을 비교하였다. 그 외에 타이어 보강층의 사면끝단에서 타이어까지의 수평거리, 타이어셀의 연결방법에 대한 영향도 검토하였다.

7. 보강성토사면의 시공

페타이어를 지반보강 목적으로 활용하기 위하여 FHWA지침(2001)의 설계기준에 의해 페타이어가 보강된 사면(높이 3m, 사면경사 45°(1 : 1)의 설계를 하고 설계한 보강 성토사면의 안정성 해석을 수행한다. 또한 설계한 단면을 바탕으로 시험시공을 수행한 후 보강 성토사면의 거동을 계측한다.

8. 보강토 옹벽의 시공

페타이어를 보강토 옹벽에 사용되는 토목섬유의 대체재료로서 활용하기 위하여 FHWA지침(2001)의 설계기준에 따라 타이어셀 보강토 옹벽(높이 3m, 벽체경사 18.4°(1 : 0.3)과 트레드매트 보강토 옹벽(높이 3m, 벽체경사 5.7°(1 : 0.1)의 설계를 한다. 또한 설계한 단면을 바탕으로 시험시공을 수행한 후 보강토 옹벽의 거동을 계측한다.

9. 페타이어의 침출수 분석

페타이어에 의한 주변지반의 환경영향을 평가하기 위하여 페타이어를 이용하여 보강 성토사면 및 보강토 옹벽을 시공한 후 하부 집배수층으로부터 수집된 침출수의 농도를 분석하여 환경부 폐기물 관리법에 의한 침출수의 오염기준(2급수)과 비교한다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

1절. 국내기술동향

국내의 폐타이어 재활용에 관한 연구는 주로 폐타이어의 고무에 의한 흡착으로 인한 정화기능 등 환경적 영향에 대한 연구가 주종을 이루며(이태진 등, 2000; 정연규 등, 1986) 폐타이어에 관한 공학적 연구는 전무하여 성토에 적용한 사례는 주로 90년대 이전에 군부대에서 일부 사용되어 왔다. 그리고 폐타이어를 분쇄하여 사용한 사례는 분말을 이용한 고무블럭이나 타일로 활용되는 사례가 있다. 폐타이어를 이용하여 지반보강에 사용한 사례는 없으며 연구목적으로 폐타이어를 조그만 조각형태의 칩으로 분쇄하여 동상방지 목적으로 토사와 혼합하여 연구한 사례가 있다(김영진과 강병희, 1998). 폐타이어를 지반보강의 목적으로 연구를 수행 사례는 본 연구실에서 지난 5년간 수행한 것을 제외하고는 전무한 실정이다.

2절. 국외기술동향

해외에서 폐타이어를 성토의 목적으로 사용한 사례는 앞서 언급한 바와 같이 다수의 사례가 있다. 성토는 주로 타이어의 절단 없이 로프 등으로 묶어 사용하거나 타이어의 한쪽 면을 잘라 성토에 사용한 사례가 대부분이다. 그리고 폐타이어를 분쇄하여 칩으로 만들어 경량 성토 목적으로 사용한 사례와 타이어칩을 사질토와 혼합하여 전단강도를 증가시켜 사용할 목적으로 연구한 사례가 있다. 이 경우 타이어칩 외부에 노출된 다수의 강선으로 인하여 일부의 중금속이 허용기준치를 초과하게 된다. 그리고 표 1에서 보인 타이어의 한 측면을 절단하고 로프로 연결한 형태는 토사의 채움은 용이하나 타이어의 원형셀이 커서 본 연구에서 수행하고자 하는 8자형 셀보다 칩하량이 큰 결점이 있다.

O'Shaughnessy와 Garga(2000)의 연구결과에 의하면 칩으로 사용할 경우에는 일부 중금속이 허용치를 초과하나 강선의 노출 없이 사용하는 경우에는 지하수를 오염시키지 않음을 보고하고 있다. 한편 미국의 Integrated Waste

Management Board(1996)에서는 타이어가 환경에 미치는 영향에 대하여 다양하게 연구한 바 있으며, 국내의 문창만(2003), 천성한(2005)의 연구에서도 타이어의 큰 경우 침출수가 먹는 물 기준치를 초과하지 않음을 밝히고 있다.

미국, 캐나다, 브라질, 유럽, 일본 호주 등에서 페타이어를 이용한 사례가 그동안 수 차례 보고되었다. 처음으로 타이어의 실제적인 적용이 보고된 것으로는 1970년대 중반에 Santa Cruz 북쪽의 캘리포니아 236번 고속도로에서 사면보수한 것이 첫 번째 활용사례로 알려져 있다(Forsyth & Egan, 1976). 그리고 Hausmann(1990)에 따르면 타이어를 이용하여 일반적인 성토구배인 1.5H:1V 대신 0.5H:1V의 급경사로 70,000m³ 성토를 한 사례도 있으며. 캘리포니아주 Tehama county 32번 도로에서는 성토제방 노경부의 침식방지 및 사면보호 목적으로 활용하였다(Drescher & Newcomb, 1994). 또한 연약지반상에 성토제방 축조시 경량성토재료로써 타이어 파생 골재의 사용(Humphrey et al., 2000)과 옹벽 및 교대의 경량성 뒷채움재료로써 타이어 파생 골재 사용(Humphrey et al., 1998)등의 여러 분야에의 적용 사례가 있다. 캐나다에서는 오타와 근교에서 페타이어를 이용한 대규모의 성토를 캐나다 정부의 지원하에 수행하였다(Garga와 O'Shaughnessy, 2000).

영국의 잉글랜드에서 페타이어를 이용한 처음의 프로젝트는 West Yorkshire에서의 높이 3.7m 중력식 옹벽의 시공이었다. 시공된 구조물은 차량주차와 사무실 확장 공간 확보를 위한 것이었으며 4500개의 타이어가 사용되었다. 시험용 타이어 옹벽의 시공비용은 유사한 옹벽 시공비의 약 1/4로 추정되었다. Dalton과 Hoban(1982)는 잉글랜드의 M62도로 26번 교차로 서쪽 출구에 기존의 가비온(gabion) 옹벽의 대안으로 타이어 옹벽을 사용한 사례를 보고한 바 있다. 프랑스에서는 1982년 이후로 지속적으로 타이어를 이용한 250여 개의 보강구조물을 시공하였으며(Long, 1993), 페타이어 활용 전문회사가 있다.

오스트레일리아에서는 Wickham Annie street 32-34에 타이어를 이용한 옹벽 및 도로 시공사례가 있으며(Ecoflex, 2004), 폐자원활용 토목분야 전문회사가 있다. 일본의 경우에도 많은 적용 사례가 있다. Hokkaido, Hobetsu에 240ton의 타이어를 이용한 높이 20m의 성토사면 시공과 항만의 선착장 충격저감제(cushion)로서 옹벽 뒷채움재로 사용사례(Hazarika et al., 2006), 연약지반 개량시 사용되는 연직배수재 안에 지진시 액상화 및 변형 저감재로 사용사례

(Yasuhara et al., 2004) 등 여러 분야에서 폐타이어를 적용하고 있다.

이 외에도 타이어와 흙을 이용한 토목구조물은 옹벽, 보강사면, 경량성토, 에너지 확산용, 소음차단, 제방이나 강의 사면 보호, 기타 다른 분야의 적용 등 많은 적용 사례가 있다.

3절. 기술동향 분석 결론

폐타이어를 지반보강 목적의 성토는 이미 자동차 문화가 발달한 미국, 캐나다, 영국, 프랑스 등에서 타이어의 한 쪽 면을 절단한 후 로프로 연결, 시공하여 재 활용하고 있으며 국내에서는 폐자원 재활용 전문의 일부 중소기업에서 폐타이어를 분말화하여 타일, 블록으로 제작하여 사용하고 있으나 재처리 비용이 비싸 널리 활용되지는 못하고 있는 형편이며 지반보강 목적의 사용사례는 아직 없는 실정이다. 본 연구에서의 입체형 타이어셀(Tirecell® , 사진 2)은 8자형의 셀을 만들어 이를 다수 연결한 것으로 타이어의 측면은 다량 제작 시에는 절단용 기계장치를 제작하여 쉽게 만들 수 있으며 소량의 사용은 고무절삭용 칼로도 쉽게 타이어 측면(sidewalls)을 제거하여 셀을 제작할 수 있다. 앞에 보인 사진 1과 사진 2에서 비교한 바와 같이 타이어셀은 지오셀과 지지 메카니즘이 동일하여 지오셀과 동일한 목적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 사용하고자 하는 평면형 트레드 매트(사진 3)는 지오그리드의 대용으로서 사용가능한 것으로 이미 토조내 시험으로부터 기존의 지오그리드와 유사한 보강효과를 가지고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 외국에서 사용한 폐타이어 재활용 방법보다 지반보강면에서 우수할 것으로 생각된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1절. 기본물성 및 강도시험

1. 사질토의 기본물성 시험

본 연구에 사용된 시료는 인천 해안지역인 송도매립지에서 채취한 시료이며, 입도분포를 인위적으로 조절하지 않고 자연상태 그대로의 입도분포를 유지하였다. 사용된 시료는 균등계수(C_u)가 2.79, 곡률계수(C_z)가 1.15, 유효입경(D_{10})이 0.19mm인 시료이다. 입도분포곡선은 그림 6과 같으며 그 물리적 특성은 표 2에 나타내었다. 본 시료는 통일분류법상 SP로 분류되었다.

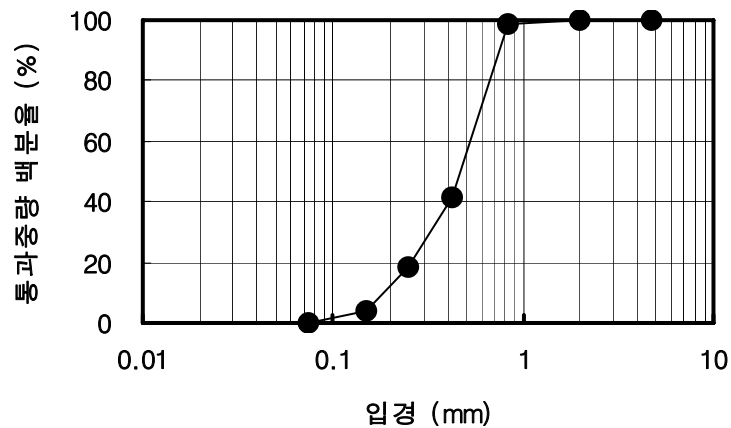


그림 6 사질토의 입도분포 곡선

표 2 사질토의 물리적 특성

G_s	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_z	$\gamma_d \text{ max}$ (kN/m^3)	$\gamma_d \text{ min}$ (kN/m^3)
2.64	0.19	0.34	0.53	2.79	1.15	15.86	13.27

2. 대형전단시험

가. 시험종류

표 3에서 보는 바와 같이 전단시험은 순수한 모래(sand-sand)와 모래-타이어(sand-tire)에 대하여 그림 7에 보인 W300×D300×H165mm(길이×폭×높이)규격의 대형전단시험기로 수행하였다. 상대밀도는 약 55%와 70%로 조성하였고 수직압력은 4단계(39.2, 78.5, 156.9, 313.8 kN/m²)로 변화하여 시험하였다.

표 3 전단시험 개요

시험방법	상대밀도 (%)	수직압력(kN/m ²)
모래-모래 전단시험	55, 70	39.2, 78.5
모래-타이어 전단시험		156.9, 313.8



그림 7 대형전단시험기

나. 시험방법

ASTM D5321에 의하면 전단박스의 크기는 300mm×300mm이상, 상·하 전단상자의 깊이는 150mm 이상을 추천하고 있다. 전단시험은 흙에 대한 전단시험과 같이 각각 다른 수직하중을 이용하여 3번 이상의 전단시험을 수행하도록 하며, 이 경우 수직하중의 범위는 현장의 조건과 유사한 조건으로 시험해야 한다. 본 연구에서 사용한 대형전단시험기의 제원은 표 4와 같다.

그림 8과 같이 전단 하부 상자에 더미(dummy)를 놓고 타이어가 전단면에 수

평이 되도록 맞추었다. 타이어는 굴곡이 크므로 더미와 타이어를 못을 이용하여 정착하였다. 모래-모래(sand-sand)의 시료성형은 상·하부의 전단상자를 3층으로 나누고 각 층을 4부분으로 나누어 시료를 넣고 다짐을 하였다. 모래-타이어(sand-tire)의 시료성형은 상부의 전단상자를 2층으로 나누고, 각 층마다 4부분으로 나누어 시료를 성형하였다. 상대밀도는 약 55%와 70%로 조성하고 평균전단변형속도(strain rate)는 1.0mm/min 으로 시험하였다.

표 4 대형 직접전단시험기의 제원

항 목	내 용
작동방법	변속 전동모터 방식
최저 및 최고 작동속도(mm/min)	0.4~1.2
전단상자 규격(mm)	W300×D300×H165
전단력 측정	proving ring(용량 3000kgf)
수직압력(kN/m ²)	39.2, 78.5, 156.9, 313.8

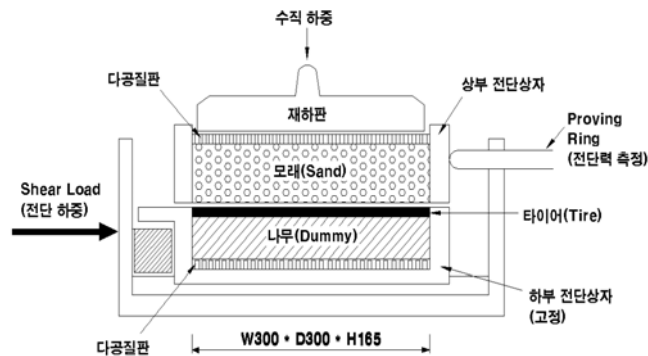


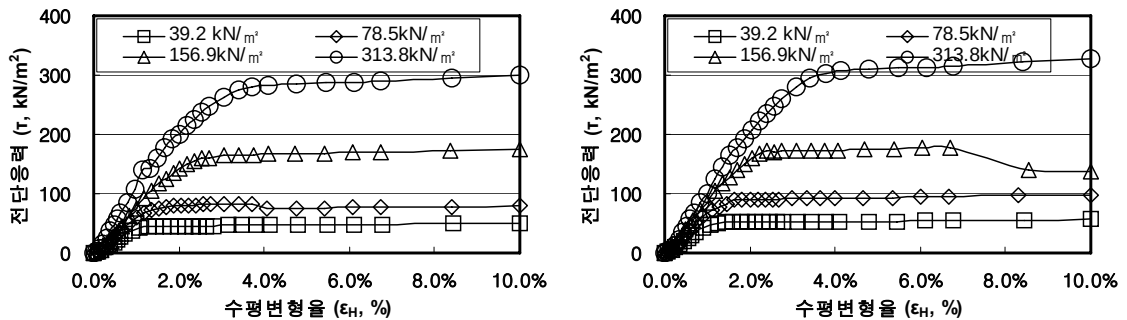
그림 8 모래-타이어 전단시험

다. 결과 및 고찰

전단응력-수평변형을 곡선은 조밀한 모래에서 나타나는 거동과 같이 수평변형율이 증가함에 따라 급격하게 전단응력이 증가하여 첨두점을 나타낸 후 감소하였다. 그러나 느슨한 모래에서 나타나는 거동은 수평변형율이 증가함에 따라 첨두점을 나타내지 않고, 전단응력이 일정한 값이 될 때까지 계속해서 증가하게 된다(그림 9). 첨두점이 나타나는 경우에는 첨두값을 최대 전단응력으로 정하지만, 첨두점이 나타나지 않는 경우에는 수평변형을 10%에서의 전단응력을 최대 전단응력으로 정하였다.

표 5에서 보는 바와 같이 모래의 내부마찰각(ϕ)은 상대밀도 55%와 70%의 경우 각각 39.8° , 42.1° 이고, 모래-트레드 외면의 마찰각(δ)은 42.8° , 44.5° , 모래-트레드 내면간의 내부마찰각(δ)은 37.2° , 39.4° 로 각각 측정되었다. 따라서 모래-트레드 외면간의 내부마찰각비(δ/ϕ)는 1.06~1.08, 모래-트레드 내면간의 내부마찰각비(δ/ϕ)는 0.93~0.94로 나타났다. 이것은 트레드 외면의 경우 표면에 모래가 부분적으로 관입될 뿐만 아니라 트레드형태에 의한 영향으로 마찰저항이 증가하는 것으로 생각된다. 트레드 내면은 외면보다 내부마찰각이 작게 측정되었으며 이것은 트레드 외면은 고무성분이 많아 모래 혹은 토립자가 고무에 관입되어 전단저항이 큰데 비하여 트레드 내면은 단단하여 모래의 관입이 거의 나타나지 않기 때문으로 판단된다.

이상의 값에서 트레드 내·외면과 흙과의 마찰각은 일반적으로 알려진 콘크리트와 흙과의 마찰각에 비하여 크게 나타남을 알 수 있다. 반면 Koerner(2005)에 따르면 $450 \times 450 \text{mm}$ 의 전단상자에서 조밀한 상태의 SW(well graded angular sand)의 흙과 geogrid간의 전단시험을 수행하였을 때, geogrid의 종류에 따라 마찰각비가 0.72~1.07의 범위를 나타낸다고 하였다.



(a) $D_r=55\%$

(b) $D_r=70\%$

그림 9 Sand-Outside of tread 수평변형율-전단응력 곡선

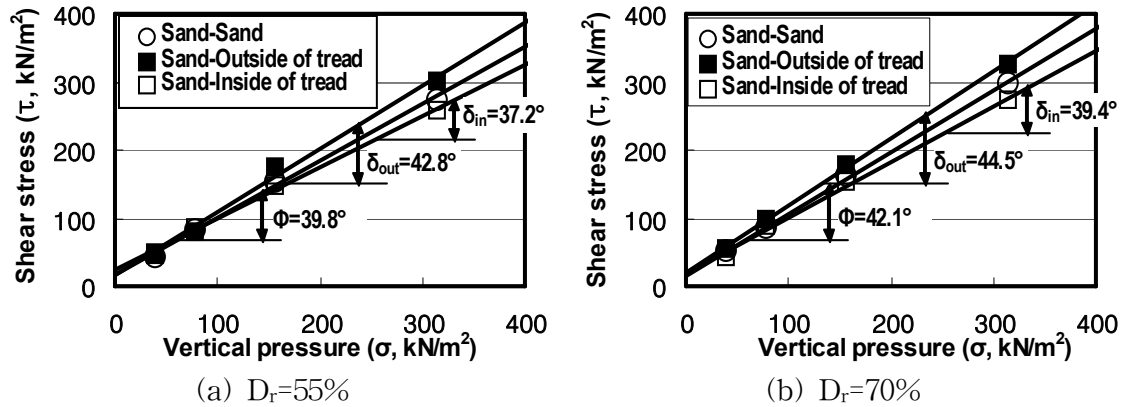


그림 10 수직응력-전단응력 곡선

표 5 대형전단시험 결과

구분		전단면	강도정수		
			마찰각	점착력 (c, kN/m^2)	마찰각비(δ/ϕ)
상대밀도	55%	모래-모래(ϕ)	39.8°	16.37	-
		모래-타이어 외면(δ_{out})	42.8°	14.75	1.08
		모래-타이어 내면(δ_{in})	37.2°	22.99	0.93
	70%	모래-모래(ϕ)	42.1°	16.71	-
		모래-타이어 외면(δ_{out})	44.5°	20.04	1.06
		모래-타이어 내면(δ_{in})	39.4°	18.96	0.94

3. 타이어 연결부의 인장시험

가. 시험종류

트레드는 타이어가 노면에 닿는 부분으로 트레드 내부에는 다수의 강선을 포함하고 있다. 따라서 타이어셀과 트레드매트의 인장강도는 셀 unit과 셀 unit, 트레드와 트레드를 연결하는 연결부의 인장강도에 좌우되므로 타이어 연결부의 인장강도 시험을 수행하였다.

타이어셀과 트레드가 지반에 보강될 경우 고장력 볼트의 부식에 따른 연결부의 강도저하에 대비하기 위해 스테인레스 볼트(stainless bolt)와 플라스틱 볼트를 사용하여 연결부의 인장시험을 수행하였다. 고장력 볼트와 스테인레스 볼트는 동일한 크기의 와셔(10-40mm)를 사용하여 비교하였다. 국내에서는 플라스틱 볼트의 와셔가 제작되지 않기 때문에 본 연구에서는 플라스틱 볼트에 의한 시험만을 수행하였다. 연결방법은 볼트개수, 와셔개수, 와셔크기를 변화시키면서 그림 11과 같이 볼트 1개 와셔 2개, 볼트 1개 와셔 4개, 볼트 2개 와셔 4개로 하였다. 여기서, 볼트 1개 와셔 2개는 B1W2, 볼트 1개 와셔 4개는 B1W4, 볼트 2개 와셔 4개를 이용하여 연결하는 방법을 B2W4로 표기하였다.

또한 타이어셀의 연결재료로서 폴리프로필렌(polypropylene) 로프를 사용하여 인장시험을 수행하였다. 폴리프로필렌 로프는 화학적·생물학적 환경요인에 대한 저항능력이 뛰어나고 자외선에 대해 내구성이 강하며 연결방법이 쉽기 때문에 외국의 경우 현장 시공에 폴리프로필렌 로프로 연결하여 시험한 사례가 있다 (Garga, 2000). 직경 10mm이고 인장강도가 118.7kN인 폴리프로필렌 로프를 사용하였으며, 타이어셀을 감는 횟수(1wrap, 2wrap)에 따라 시험하였다.

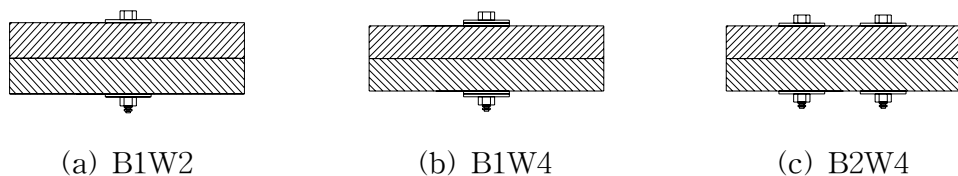


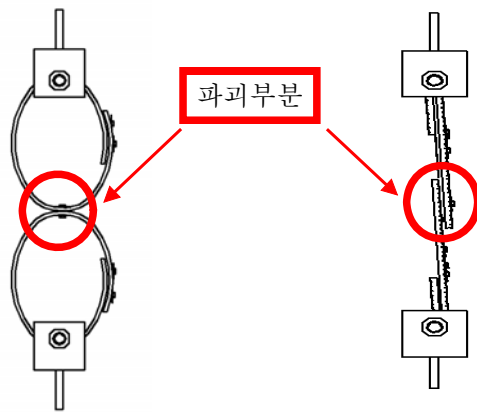
그림 11 볼트의 연결방법

표 6 타이어셀 unit와 트레드의 연결부 인장시험 개요

구분	연결재료	연결방법		
		볼트 개수	와셔 개수	와셔크기 (내경-외경) mm
타이어셀 unit	고장력 볼트	1	2	8-17
				8-30
				8-37
				8-40
				10-40
	스테인레스 볼트	1	4	8-40
		2	4	8-40
	플라스틱 볼트	1	2	10-40
		1	-	-
	폴리프로필렌 로프 (감는 횟수)	2	-	-
		1회	직경 = 10.0mm	
		2회	직경 = 10.0mm	
트레드	고장력 볼트	1	2	8-30
		1	2	8-40
		2	4	8-40
	플라스틱 볼트	1	-	-
		2	-	-

나. 시험방법

타이어 연결부의 인장시험은 최대 50ton 까지 하중을 가할 수 있는 대형 UTM(Universal Testing Machine) 장비를 이용하여 수행하였다. UTM장비에서의 최대 변위가 제한되어 있고 셀의 경우 신장율이 크기 때문에 트레드의 일부분을 잘라서 소형 셀 unit를 제작하였다. 그림 12와 같이 인장시험은 타이어 양 끝에서의 파단을 방지하기 위해 충분한 강성을 갖는 강판에 연결하여 UTM기의 grip에 고정시켜 시험을 수행하였다.



(a) 타이어셀 unit

(b) 트레드

(c) 인장시험

그림 12 타이어 연결부 인장시험

다. 결과 및 고찰

(1) 타이어셀 unit 연결부 인장시험

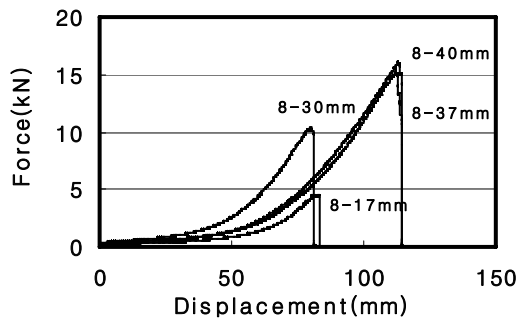
타이어셀 연결부와 로프연결부의 인장시험 결과는 그림 13에 나타내었다. 그림 13에서 볼 수 있듯이 타이어셀은 작은 인장력에서도 큰 변위가 나타난다. 타이어셀의 경우 인장력이 가해지면 원통형모양이 판형모양으로 변형하면서 작은 인장력에서도 초기신장율이 크게 나타나고 연결부의 볼트는 작은 힘을 받는다. 그러나 일정 변형량 이상이 되면 타이어의 강성으로 인하여 선형적으로 변형하게 되고, 극한하중에 도달되면 연결부 주위의 트레드내의 와이어가 끊어지면서 볼트가 빠져 나오는 것으로 관찰되었다.

연결재료에 따른 인장시험을 그림 13 (a)부터 그림 13 (d)까지 나타내었으며, 그 결과는 표 7에 정리하였다. 그림 13 (b)의 스테인레스 볼트는 그림 13 (a)의 고장력 볼트와 비슷한 거동을 나타내지만 인장강도는 다소 낮은 값을 나타내었다. 그림 13 (c)과 같이 플라스틱 볼트는 타이어의 강도보다 플라스틱 볼트의 강도가 상대적으로 약하기 때문에 와이어가 끊어지기 전에 볼트가 먼저 파괴되었다.

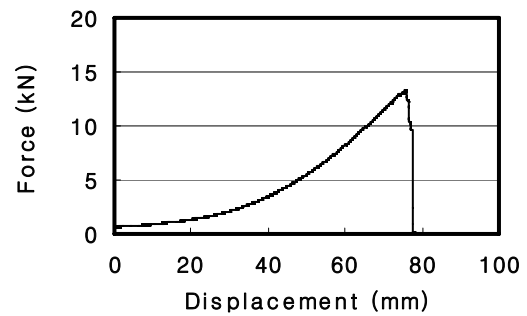
그리고 8-40mm의 와셔를 B1W2와 B1W4로 연결하여 비교한 결과, 와셔의 개수가 증가하더라도 인장강도는 큰 차이가 없었다. 이것은 트레드내의 와이어가 끊어진 후에는 와셔의 개수가 많더라도 볼트와 와셔의 뽐힘에 저항을 못하기 때문으로 생각된다. 그러나 B2W4연결에 의해 볼트의 개수가 증가하는 경우에는

개수에 비례하여 B1W2연결에 의한 방법보다 약 2배 큰 인장강도가 나타났다.

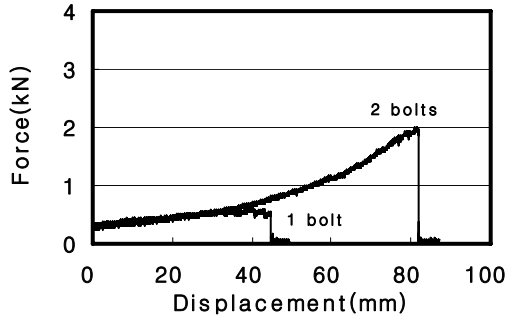
B1W2(8-17mm)일 때 타이어셀 연결부의 인장강도는 4.57kN으로 측정되었고, 와셔가 8-30mm, 8-37mm, 8-40mm는 각각 10.49kN, 14.80kN, 15.99kN으로 측정되었다. 따라서 와셔의 외경이 커지면 인장강도도 증가하는 것을 알 수 있으며, 이것은 볼트와 와셔의 뽐힘 저항이 커져 인장강도가 증가하는 것으로 판단된다. 폴리프로필렌 로프연결부 강도는 1회, 2회 감았을 때 각각 5.87kN, 11.75kN으로 고장력 볼트연결의 경우보다 작은 강도를 나타내었다.



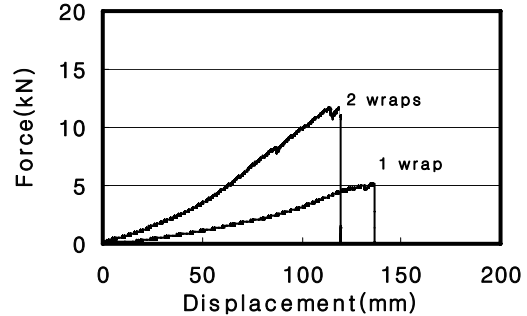
(a) 고장력 볼트



(b) 스테인레스 볼트



(c) 플라스틱 볼트



(d) 폴리프로필렌 로프

그림 13 인장시험(타이어셀 unit)

표 7 타이어셀 units 연결부의 인장강도

연결재료	연결방법			
	볼트 개수	와셔 개수	와셔의 내경-외경 (mm)	인장강도 (kN)
고장력볼트	1	2	8-17	4.57
	1	2	8-30	10.47
	1	2	8-37	14.80
	1	2	8-40	15.99
	1	2	10-40	17.92
	1	4	8-40	15.51
	2	4	8-40	31.64
스테인레스 볼트	1	2	10-40	13.37
플라스틱 볼트	1	-	-	0.62
	2	-	-	2.01
폴리프로필렌 로프 (감는 횟수)	1 회			5.87
	2 회			11.75

(2) 트레드 연결부 인장시험

타이어셀 unit와 달리 트레드는 그림 14와 같이 변형에 따라 인장력이 급격히 증가한다. 이것은 타이어셀 unit는 원통형에서 판형으로 변하면서 초기신장율이 큰 반면, 트레드는 형상의 변화가 크지 않기 때문에 선형적으로 급격히 증가된 후 나선모양으로 단계적 파괴를 나타내는데, 이것은 타이어 안에 있는 다수의 와이어가 점차적으로 파괴되기 때문으로 생각된다. 즉 트레드 연결부의 파괴 형상은 하중이 증가함에 따라 타이어의 와이어가 인장방향으로 지속적으로 찢어진 후, 트레드의 끝부분까지 찢어져 파괴되는 경우와 트레드의 끝부분까지 찢어지기 전에 찢어진 구멍을 통하여 볼트가 빠지면서 파괴되는 경우가 있다.

표 8에 트레드의 인장시험결과를 정리하여 나타내었으며, 타이어셀 unit(고장력 볼트, B1W2(8-40mm))의 인장강도는 약 16kN이었으나, 같은 조건의 트레드 인장강도는 약 9kN으로 타이어셀 unit보다 아주 작게 나타났다. 트레드의 인장강도는 같은 조건의 타이어셀 unit의 인장강도보다 50~56%정도 작게 측정되었는데 이것은 인장방향과 와이어의 배열방향이 일치하기 때문으로 판단된다.

연결재료에 따른 트레드의 인장강도는 고장력 볼트 B1W2(8-40mm)가 플라스

틱 볼트 1개보다 약 6배 크게 측정되었다. 연결방법에 따른 트레드의 인장강도는 타이어셀 unit에서와 같이 B2W4연결(8-40mm)에 의한 방법이 B1W2연결(8-40mm)보다 1.8배 크게 측정되었다. 또한 와셔의 외경이 커지면 인장강도도 증가하였다.

Koerner(2005)에 따르면 지오그리드의 단일 rib에 대한 평균인장강도는 0.61~8.90kN, 지오그리드의 연결부에 대한 평균강도는 0.18~2.68kN으로 나타난다고 하였다.

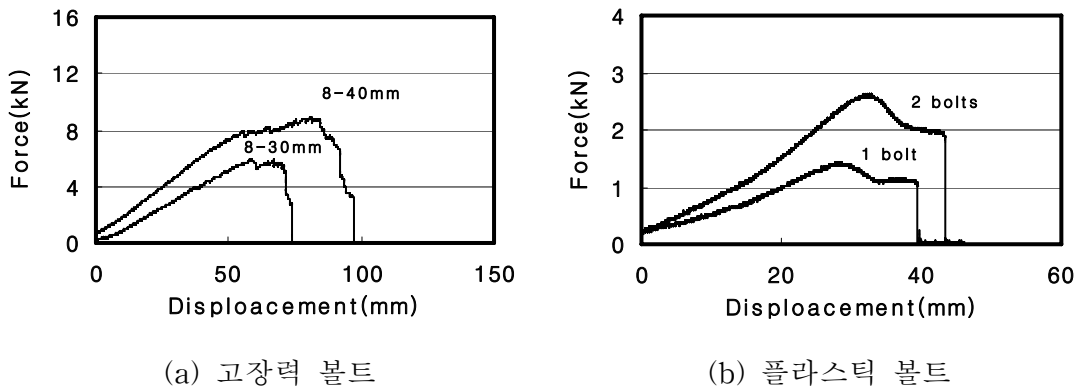


그림 14 인장시험(Tread)

표 8 트레드 연결부의 인장강도

연결재료	연 결 방 법			
	볼트개수	와셔개수	와셔의 내경-외경 (mm)	인장강도 (kN)
고장력볼트	1	2	8-30	5.90
	1	2	8-40	8.94
	2	4	8-40	15.76
플라스틱볼트	1	-	-	1.45
	2	-	-	2.63

4. 결론

본 연구에서는 페타이어의 지반보강효과를 검토하기 위하여 실내시험으로 페타이어를 이용한 기본물성시험과 전단시험, 연결부 인장시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 기본물성에 사용된 사질토는 균등계수(C_u)가 2.79, 곡률계수(C_z)가 1.15이고, 통일분류법상 SP로 분류되었다.
- (2) 대형전단시험을 수행한 결과 순수한 모래의 마찰각보다 모래-타이어의 마찰각이 더 크게 관측되었다. 이는 타이어의 표면에 모래가 부분적으로 관입될 뿐만 아니라 트레드표면의 홈에 의한 영향으로 마찰저항이 증가하기 때문으로 판단된다.
- (3) 모래의 내부마찰각에 대한 모래-트레드외면의 내부마찰각비(δ/ϕ)는 1.06~1.08배, 모래-트레드내면의 경우 0.93~0.94배로 측정되었다. 이러한 경향은 모래-콘크리트와는 달리 타이어의 표면특성에 기인한 것으로 판단된다.
- (4) 연결부의 인장강도를 평가한 결과 타이어셀 unit와 트레드에서 고장력 볼트를 사용했을 때가 가장 크게 나타났으며, 볼트의 개수가 증가할수록, 와셔의 크기가 증가할수록 인장강도도 증가하였다. 같은 조건의 연결방법에 대해서 트레드에 대한 타이어셀 unit의 인장강도비는 1.8~2배로서 타이어셀 unit이 크게 관측되었다. 트레드매트의 연결부 인장강도가 작은 이유는 인장방향이 트레드의 내부 와이어 배열방향과 일치하기 때문으로 판단된다.

2절. 환경영향시험

1. 페타이어의 용출특성

가. 환경적 유해성 검토

페타이어를 경량성토재 및 지반보강재로 활용하는 경우 우선적으로 재료의 환경적 안정성이 규명되어야 한다. 본 연구에서는 용출시험을 통하여 페타이어의 환경적인 영향에 대하여 고찰하였다. 이때 페타이어의 용출특성에 가장 큰 영향을 미치는 입경과 지하수위의 위치를 조절하여 페타이어의 용출특성을 조사하였다.

본 연구에서는 1, 3, 5, 7, 10, 50, 100, 200, 300mm의 페타이어를 사용하였다. 10mm 이하의 페타이어는 페타이어 재생업체에서 구입하여 사용하였으며 10mm 이상의 페타이어는 절단기를 사용하여 직접 제조하였다. 모든 시료는 증류수로 세척하여 자연건조 시킨 후 실험을 수행하였다. 그림 15는 본 연구에 사용된 페타이어의 사진을 나타내고 있다.

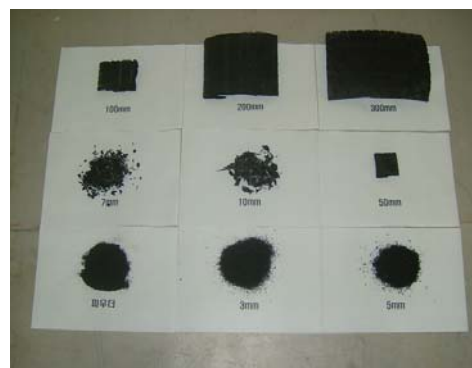


그림 17 페타이어 시료

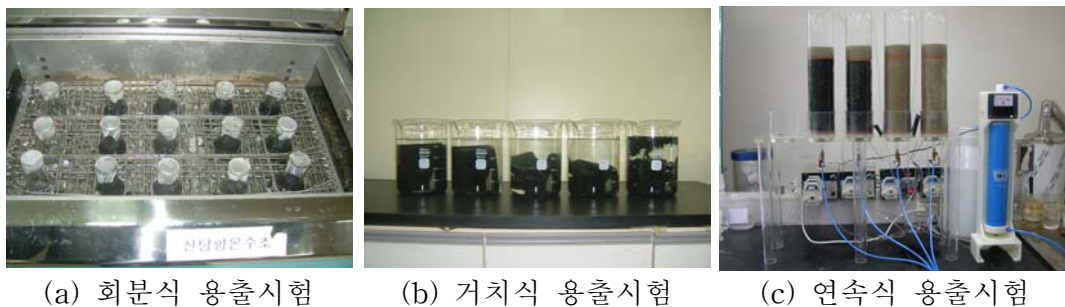
나. 입경에 따른 용출특성

입경에 따른 페타이어의 용출특성을 고찰하기 위하여 10mm이하의 시료들에 대해 폐기물 공정시험법에 의한 회분식 용출시험을 실시하였다. 10mm 이상의 시료들은 시료의 교반이 어려워 거치식으로 용출특성을 분석하였다. 회분식 용출시험시 초기 pH의 영향을 고찰하고자 초기 pH를 3.5, 7.5, 10.5로 구분하여 시

험을 수행하였으며 거치식 용출시험의 경우 시간경과에 따른 변화(1, 2, 3, 4, 5, 6일)를 고찰하였다. 농도의 분석은 9개의 선별된 무기원소(Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Se, Zn)와 총유기물함량(TOC), pH를 분석하였다.

다. 배수조건에 따른 용출특성

배수조건에 따른 용출시험은 배수시험 5일, 비배수시험 5일로 총 10일간 수행하였다. 페타이어 입경별로 4개의 칼럼(5, 10, 50, 100mm)을 준비하였으며 탁도, pH, TOC, Zn의 농도를 분석하였다. 칼럼은 직경 120mm, 높이 100mm의 아크릴 재료를 사용하였으며 펌프를 이용하여 인공강우를 1.2ml/min으로 조정하여 주입하였다. 배수조건으로 수행한 시험이 종료된 후에 비배수 조건의 시험을 실시하였는데 칼럼의 유출구를 닫고 펌프를 정지시켜 비배수조건을 구현하였다. 그림 16은 시험장면을 나타내고 있다.



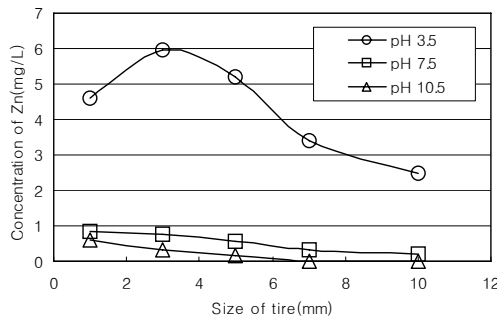
(a) 회분식 용출시험

(b) 거치식 용출시험

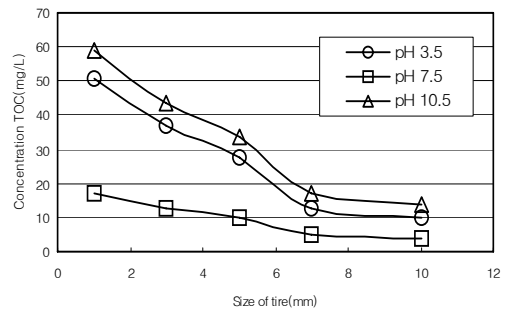
(c) 연속식 용출시험

그림 18 용출시험

그림 17에 회분식 용출시험결과를 나타내었다. Zn을 제외한 모든 원소가 국내 먹는물 수질기준 이하로 나타나 페타이어는 환경적 위험성이 적은 재료임을 알 수 있다. 그러나 초기 pH를 3.5로 시험한 결과 용출농도가 증가하는 현상을 나타냈는데, 특히 Zn의 경우 높은 용출농도를 나타내고 있다. TOC의 경우에는 산성과 알칼리 조건에서 용출농도가 높게 나오고 있음을 알 수 있다. 페타이어의 입경에 따른 용출농도를 살펴보면, 페타이어 입경이 증가할수록 용출농도는 감소하는 경향을 나타내고 있다.



(a) Zn

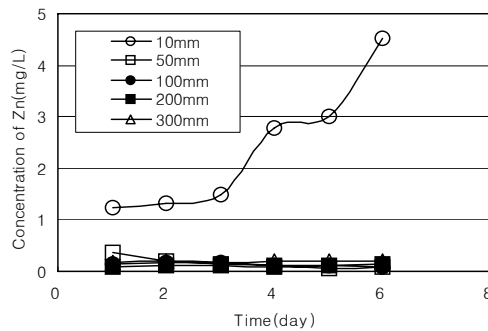


(b) TOC

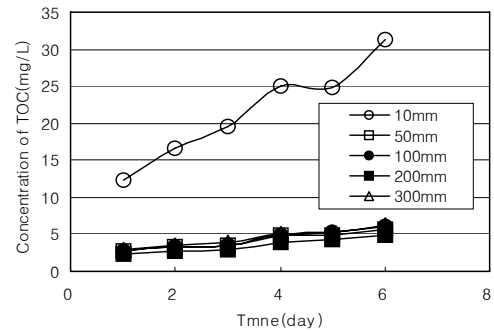
그림 19 초기 pH와 폐타이어 입경에 따른 Zn과 TOC의 농도 변화(회분식 용출)

그림 18에 거치식 용출시험결과를 나타내었다. 전반적으로 시간이 경과할수록 용출농도가 증가하고 있다. chip 형태의 폐타이어(10mm)의 용출농도가 shred 형태의 폐타이어(50mm~300mm) 보다 월등히 높음을 알 수 있는데, 이는 비표면적의 차이 때문으로 판단된다. shred 형태의 폐타이어(50, 100, 200, 300mm)의 경우 용출농도의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

앞서 실시한 회분식 용출시험과 직접 비교하기는 어렵지만 회분식 및 거치식 용출시험에 동시에 사용된 10mm 폐타이어의 결과로 유추해 볼 때, 폐타이어 입경이 증가할수록 용출농도가 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, 직경 10mm 이하의 ground rubber 및 chip 형태의 폐타이어와 50mm 이상의 shred 및 slit 형태의 폐타이어의 용출농도가 확연히 다르게 나타났는데 이는 비표면적의 차이 때문으로 판단되며, 따라서, 환경적 관점에서 볼 때 폐타이어를 재활용할 경우에는 shred 및 slit 형태로 활용하는 것이 환경적으로 유리하리라 판단된다.



(a) Zn



(b) TOC

그림 20 타이어 입경과 경과일에 따른 Zn과 TOC의 농도 변화(거치식 용출)

그림 19는 배수조건에 따른 용출시험 결과를 나타내고 있다. Zn, TOC, 탁도 모두 시간이 경과할수록 용출농도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 배수 조건은 페타이어가 지하수위 상부에 위치하는 경우를 묘사하는 것으로서, 만약 배수가 원활하게 진행된다면 유출수의 농도가 시간이 경과할수록 감소한다고 예상할 수 있다. Humphrey 등(1997)은 5년간의 현장 연구결과 페타이어가 지하수 위 위에 존재하는 경우 페타이어에 의한 주변환경의 영향을 무시할 수 있다는 결론을 도출하였고 본 연구의 결과도 이러한 사실을 간접적으로 증명하고 있다.

그림 20은 비배수조건의 시험결과를 나타내고 있다. Zn, TOC, 탁도 모두 시간이 경과할수록 용출농도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 탁도의 증가는 철성분의 침전에 의한 것으로 판단되며, TOC의 증가는 타이어 내의 미생물에 의한 것으로 판단된다. 이러한 비배수조건은 페타이어가 지하수위 하부에 위치하는 경우를 묘사하는 것으로서, 배수가 원활하게 진행될 수 없는 혹독한 상황을 묘사하고 있다. 따라서 페타이어를 성토재, 뒤채움재, 지반보강재로 재활용 하는 경우에 있어서 지하수위 하부에 위치하게 되는 경우에는 주변환경에 악영향을 미칠 것으로 예상되며 이에 대한 주의가 필요할 것이다.

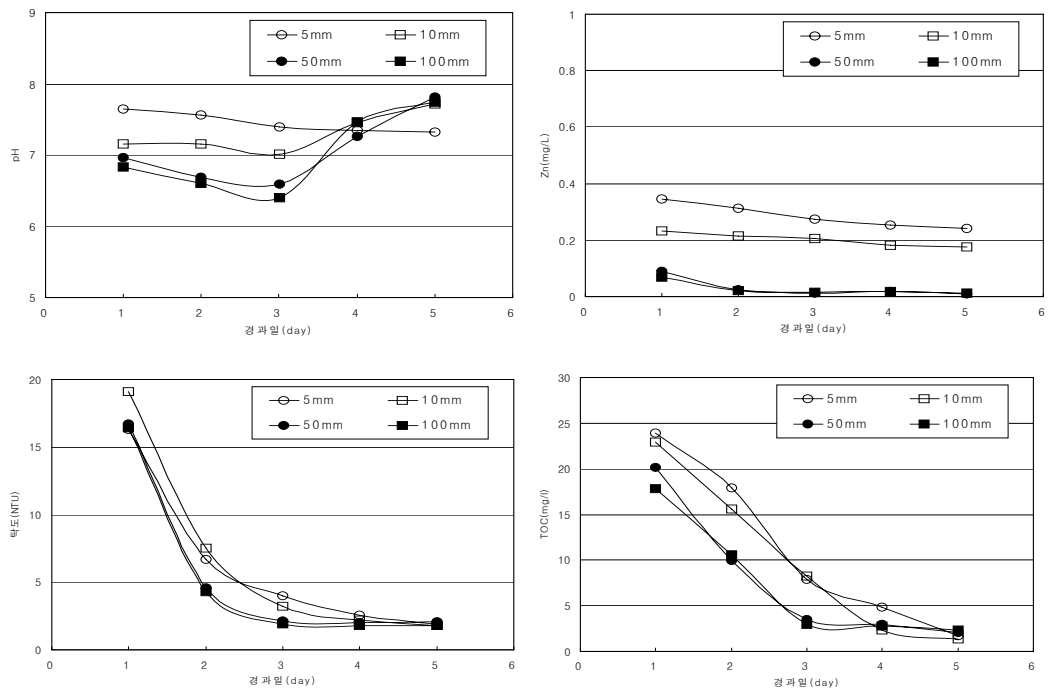


그림 21 배수조건에 따른 용출시험 결과

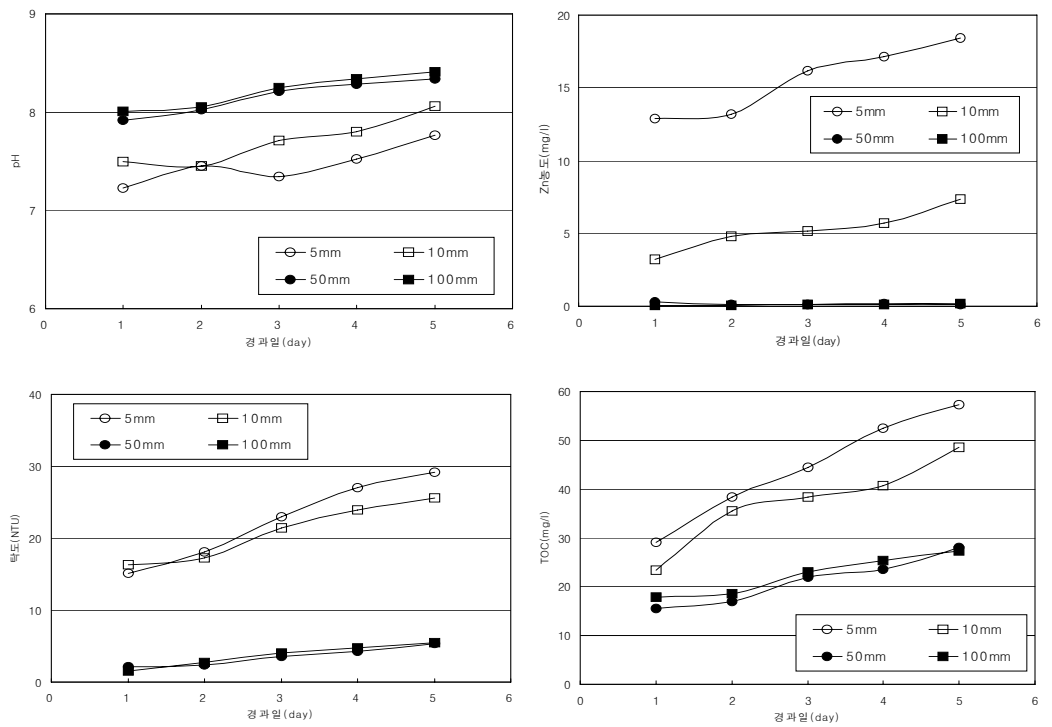


그림 22 비배수조건 시험결과

2. 페타이어의 내구성

페타이어를 지반보강재로 사용할 경우 각종 외부적인 영향에 의하여 재료특성이 저하될 위험성이 있다. 본 연구에서는 페타이어의 장기적인 내구성을 평가하기 위하여 내화학적, 내한성, 내열성, 내후성, 내미생물성에 대한 시험을 수행하였다.

가. 시험조건 및 방법

페타이어의 내구성을 평가하기 위하여 내화학적, 내한성, 내열성, 내후성, 내미생물성에 대한 시험을 수행하였으며, 각각의 시험조건은 표 9와 같다. 페타이어의 내구성에 대한 규격화된 시험방법은 없으므로 본 연구에서는 지오그리드의 시험방법을 참고로 하였다. 인장강도의 평가는 KS M 6782 가황고무의 인장시험 방법에 의하여 수행하였다. 그림 21에 내화학적, 내한성, 내열성, 내후성, 내미생물성에 대한 내구성 시험장면을 나타내었다.

표 9 페타이어의 내구성 시험 조건

시험항목	시험조건	시험규격 (지오그리드의 경우)	비고
내화학적	강산(pH 3), 약산(pH 5), 중성(pH 7), 약알칼리(pH 9), 강알칼리(pH 12), 염수	ASTM D 5322, GRI-GG4	인장강도의 증감으로 내구성 평가
내한·내열성	-20℃, 50℃	ASTM D 4594	
내후성	자외선 노출	-	
내미생물성	하수슬러지	-	



(a) 타이어 시편



(b) 인장강도 시험기



(c) 내화학성(25℃)



(d) 내화학성(50℃)



(e) 내한성(-20℃)



(f) 내열성(50℃)



(g) 내미생물성



(h) 내후성



(i) 화강토(기준 시료)

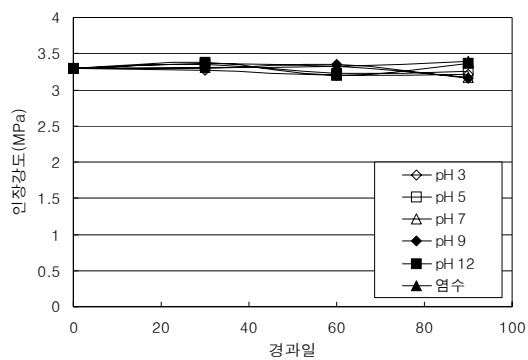
그림 23 페타이어 내구성 시험 장면

나. 시험결과

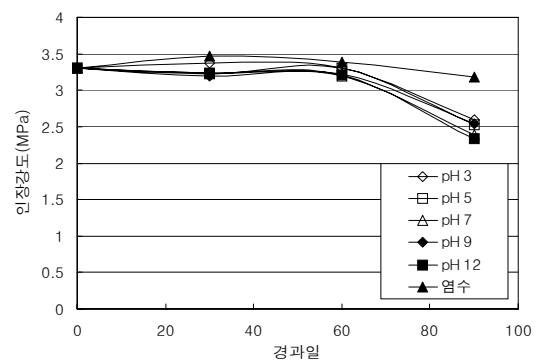
표 10과 그림 22는 타이어 시편의 내화학성 시험결과를 나타내고 있다. 거의 모든 시료의 인장강도는 25℃, 50℃ 온도하에서 시간경과에 따라 원시료에 비해 5% 이하의 강도감소를 나타낸다. 이러한 미미한 감소율은 제품편차, 실험오차범위에 포함되므로 강도감소계수에는 반영시키지 않아도 무방할 것으로 판단된다. 반면에, 50℃ 온도하에서 염수를 제외한 용액에 침지된 경우는 초기에는 인장강도의 감소가 나타나지 않으나 90일 경과후의 인장강도는 원시료에 비해 20~30% 정도의 인장강도감소를 보였다. 이는 페타이어가 고온에 장기간 거치할 경우 화학성분이 타이어 내부로 침투하여 원재료의 공학적 특성이 약화되었기 때문에 급격한 강도감소가 발생하였다고 판단된다. 따라서, 페타이어가 고온에 장기간 거치될 경우 주변 화학성분의 침투로 인한 강도감소를 고려하여 장기설계인장강도를 설정하여야 할 것이다.

표 10 페타이어의 내화학적 시험결과

시험조건 \ 항목	인장강도	0일 (MPa)	30일 (MPa)	60일 (MPa)	90일 (MPa)
강산(HCL, pH 3, 25℃)	평균	3.30	3.26	3.20	3.22
	강도감소율(%)	-	-1.1	-3.0	-2.4
약산(HCL, pH 5, 25℃)	평균	3.30	3.35	3.22	3.26
	강도감소율(%)	-	1.5	-2.3	-1.3
중성(pH 7, 25℃)	평균	3.30	3.36	3.33	3.17
	강도감소율(%)	-	1.8	0.8	-4.0
약알카리(NaOH, pH 9, 25℃)	평균	3.30	3.30	3.35	3.16
	강도감소율(%)	-	0.1	1.6	-4.3
강알카리(NaOH, pH 12, 25℃)	평균	3.30	3.38	3.20	3.37
	강도감소율(%)	-	2.3	-3.0	2.1
염수(25℃)	평균	3.30	3.31	3.32	3.40
	강도감소율(%)	-	0.2	0.7	2.9
강산(HCL, pH 3, 50℃)	평균	3.30	3.37	3.30	2.59
	강도감소율(%)	-	2.2	0.0	-21.6
약산(HCL, pH 5, 50℃)	평균	3.30	3.23	3.30	2.52
	강도감소율(%)	-	-2.2	0.0	-23.6
중성(pH 7, 50℃)	평균	3.30	3.23	3.20	2.39
	강도감소율(%)	-	-2.1	-3.0	-27.5
약알카리(NaOH, pH 9, 50℃)	평균	3.30	3.19	3.22	2.54
	강도감소율(%)	-	-3.2	-2.5	-23.0
강알카리(NaOH, pH 12, 50℃)	평균	3.30	3.23	3.21	2.33
	강도감소율(%)	-	-2.1	-2.9	-29.3
염수(50℃)	평균	3.30	3.47	3.39	3.18
	강도감소율(%)	-	5.0	2.6	-3.6



(a) 25℃



(b) 50℃

그림 24 페타이어의 내화학적 시험 결과

표 11과 그림 23은 타이어 시편의 내한성, 내열성, 내후성, 내미생물성 시험결과를 나타내고 있다. 거의 모든 시료의 인장강도는 시간경과에 따라 원시료에 비해 5% 이하의 강도감소를 나타낸다. 이러한 미미한 감소율은 제품편차, 실험오차범위에 포함되므로 강도감소계수에는 반영시키지 않아도 무방할 것으로 판단된다. 단, 내후성의 경우 90일 경과후 원시료에 비해 6% 정도의 인장강도감소를 보이고 있으며, 30일 및 60일 경과후 인장강도 감소율도 다른 조건에서 보다 크게 나타나고 있어 상대적인 주의가 요구된다고 볼 수 있다.

표 11 페타이어의 내구성 시험결과

시험조건 \ 항목	인장강도	0일 (MPa)	30일 (MPa)	60일 (MPa)	90일 (MPa)
내한성(-20℃)	평균	3.30	3.40	3.40	3.42
	강도감소율(%)	-	3.0	3.0	3.5
내열성(50℃)	평균	3.30	3.38	3.31	3.16
	강도감소율(%)	-	2.5	0.3	-4.1
내후성(자외선)	평균	3.30	3.19	3.14	3.10
	강도감소율(%)	-	-3.5	-4.9	-6.0
내미생물성(하수슬러지)	평균	3.30	3.33	3.38	3.26
	강도감소율(%)	-	1.0	2.5	-1.1
화강토(기준시료)	평균	3.30	3.31	3.26	3.34
	강도감소율(%)	-	0.2	-1.2	1.3

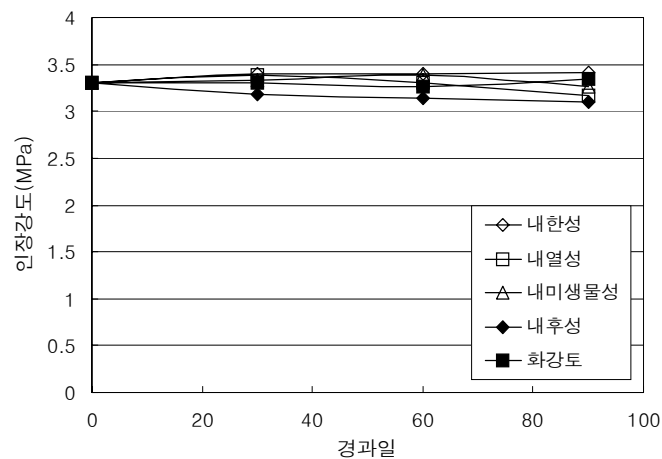


그림 25 페타이어의 내구성 시험 결과

3. 결론

- (1) 페타이어의 환경영향시험 결과 오염물질 용출량이 국내 환경 기준치 이내로 나타나 페타이어는 환경적으로 안전한 폐자원이라고 할 수 있다. 따라서 페타이어가 지하수위 상부에 위치하는 경우에는 환경적으로 영향을 미치지 않을 것으로 생각되며, 페타이어가 지하수위 아래에 위치하게 되는 경우 배수에 주의가 요구된다.
- (2) 페타이어의 내구성 시험 결과 거의 모든 시료의 인장강도는 시간경과에 따라 원시료에 비해 5% 이하의 강도감소를 나타낸다. 이러한 미미한 감소율은 제품편차, 실험오차범위에 포함되므로 강도감소계수에는 반영시키지 않아도 무방할 것으로 판단된다. 그러나, 50℃ 온도하에서 염수를 제외한 용액에 침지된 경우는 90일 경과후의 인장강도는 원시료에 비해 20~30% 정도의 인장강도감소를 보였다. 따라서, 페타이어가 고온에 장기간 거치될 경우 주변 화학성분의 침투로 인한 강도감소를 고려하여 장기설계인장강도를 설정하여야 할 것이다. 또한 상대적으로 내후성 시험결과가 인장강도의 감소율이 크게 나와 자외선 노출에 대한 주의가 요구된다고 볼 수 있다.

3절. 평판재하시험

1. 토조내 재하시험

가. 시험개요

자연건조 시킨 인천송도 매립지의 해사를 이용하여 표 12에 나타낸 바와 같이 상대밀도 40, 55, 70%로 지반을 조성하고 보강깊이비(D/B)를 0.2로 유지하면서 직경 0.35m인 재하판으로 평판재하시험을 수행하였다. 또한 소형트럭용 타이어(Light Truck tire, LT)와 페타이어의 발생율이 가장 높은 승용차용 타이어(Passenger Car tire, PC)를 구분하여 시험을 하였다. 타이어셀 LT와 타이어셀 PC는 무보강시험의 상대밀도와 같도록 지반을 조성하고 재하시험을 수행하였다. 보강깊이(D)는 재하판의 직경(B)의 0.2배로 하였다.

표 12 토조시험 개요

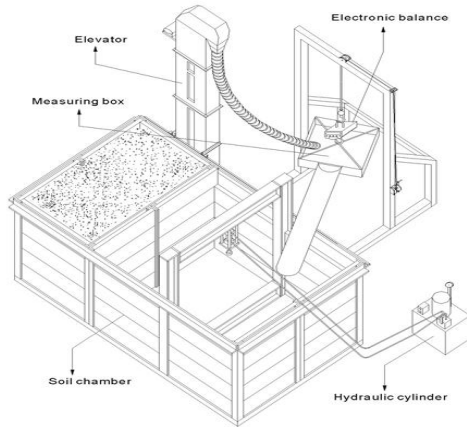
종 류	상대밀도 (%)	보강깊이비, D/B
무보강	40, 55, 70	0.2
타이어셀 LT		
타이어셀 PC		

나. 시험준비

(1) 시험토조 제작

그림 24에 현장지반을 실내모형지반으로 재현하기 위하여 사용한 토조를 나타내었고, 토조는 3.0m(L)×2.0m(D)×1.5m(H)의 크기며, 두께 15mm 의 H-형강과 I-형강을 사용하여 제작되었다. 길이 3m의 토조는 2m와 1m로 나누어 2m 크기의 토조는 시험, 1m 크기의 토조는 시료를 넣어두는 보조 토조로 이용하였다. 토조에는 재하시험을 위해 용량이 9.8kN/m²인 유압기를 토조 상단의 H-형강에 고장력 볼트를 이용하여 부착하였다. 또한, 재하시험시 재하판의 침하량과 하중 재하시 토조 단부에서의 지반의 용기량을 측정하기 위하여 감도 0.01mm의

다이얼 게이지를 사용하였다.



(a) 시험용 토조

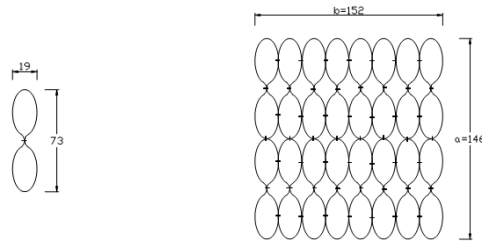


(b) 토조시험 전경

그림 26 토조내 재하시험

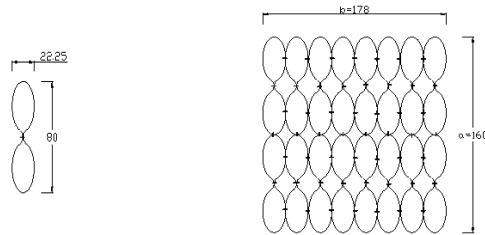
(2) 타이어셀 제작

1장 3절의 그림 4에서 나타난 것과 같이 타이어셀을 제작하기 위해서 양쪽의 사이드월을 제거하고 남은 원통형 모양의 트레드를 중간 부분에서 드릴로 구멍을 뚫고 볼트와 너트를 이용하여 8자 모양의 타이어셀 unit를 제작한다. 이와 같이 제작한 타이어셀 unit 16개를 연결하여 그림 25(c)와 그림 26(c)와 같은 타이어셀을 제작하였다. 타이어 종류에 따라 소형트럭용(LT)과 승용차용(PC) 두 가지의 타이어를 이용하여 타이어셀을 제작하였다. 소형트럭용(LT) 타이어와 승용차용(PC) 타이어의 특성은 표 13에 나타내었다. 여기서, 타이어셀 체적은 타이어 자체의 순수한 체적이다.



(a) 타이어셀 LT unit (b) 타이어셀 LT의 크기 (c) 타이어셀 LT

그림 27 타이어셀 LT의 형태(단위 : cm)



(a) 타이어셀 PC unit (b) 타이어셀 PC의 크기 (c) 타이어셀 PC

그림 28 타이어셀 PC의 형태(단위 : cm)

표 13 타이어셀 LT와 PC의 특성

특성	타이어셀 LT	타이어셀 PC
타이어셀 unit 치수	19cm × 73cm × 13.5cm	22.25cm × 80cm × 17cm
타이어셀 치수	152cm × 146cm × 13.5cm	178cm × 160cm × 17cm
타이어셀 unit 체적	2721.6cm ³	2845cm ³
타이어셀 체적	43545.6cm ³	45532.8cm ³

다. 시험방법

(1) 재하시험

재하시험은 직경 0.35m의 원형 재하판을 시험지반 가운데에 놓고 유압기를 사용하여 단조하중(monotonous load)을 재하하는 방법으로써 현장에서의 평판 재하시험을 재현하였다. 하중재하는 최초하중 392.3~588.4kN/m² 에서 5분마다 490.3kN/m²씩 증가시켰으며 재하판의 직경의 10% 내외(약 35mm)해당하는 침

하가 발생하면 재하를 중지하였다. 각 재하 단계에서는 2.5분 간격으로 하중판의 중심으로부터 105mm, 305mm, 505mm, 705mm 떨어진 곳에 변위측정센서(LVDT)를 설치하여 지반의 변형을 측정하였다.

(2) 극한지지력의 결정

하중-침하곡선(logP-S)에서 최대곡률점을 찾기 위해 초기와 마지막 부분 결과값으로부터 접선을 그린 후 접선의 교점에서의 하중을 극한지지력으로 정하였다. 대부분의 시험에서 최대 곡률점의 결정이 쉽지 않으며 재하량이 부족하여 극한지지력이 구해지지 않는 경우가 있는데 이때는 측정치를 침하-시간(S-logt), 하중-침하속도($P-dS/d(\log t)$), 하중-침하(logP-logS) 등으로 곡선을 그려 이들 곡선이 꺾어지는 부분을 극한지지력으로 산정한다.

(3) 지반보강 효과

재하시험을 통하여 지반보강효과를 판단하는 방법으로는 지지력비(Bearing Capacity Ratio, BCR)와 침하감소율(Settlement Reduction Factor, SRF)이 있으며 본 연구에서는 이 두 가지를 바탕으로 분석하였다. 지지력비(BCR)와 침하감소율(SRF)은 아래의 식으로 정의된다.

$$BCR = q_r / q_0$$

여기서, q_0 = 무보강지반의 극한지지력

q_r = 보강지반의 극한지지력

$$SRF = (s/B)_r / (s/B)_0$$

여기서, $(s/B)_0$ = 무보강지반의 극한지지력에 대한 침하율

$(s/B)_r$ = 무보강지반의 극한지지력과 일치하는 지지력에 대한
보강지반의 침하율

따라서 지지력비(BCR)가 클수록 지반보강효과가 큰 것을 나타내며 침하감소

율(SRF)이 작을수록 지반보강으로 인한 침하경감효과가 큼을 알 수 있다.

라. 시험결과 및 고찰

(1) 무보강시험

무보강지반의 재하시험에서 각각의 상대밀도에 대해 초기침하는 약간의 차이는 있으나 거의 비슷하며 상대밀도가 작은 40%는 아래쪽으로 완만한 곡선을 그리면서 하중-침하 곡선이 그려진다. 이것은 간극비가 큰 느슨한 지반은 압축성이 크므로 국부전단파괴형태의 지반거동이 일어나기 때문이다. 반면 상대밀도가 55, 70%로 증가할수록 갑작스럽게 꺾이는 곡선이 그려지는데 이것은 상대밀도가 증가할수록 간극비가 작아서 입자 사이의 마찰력과 지반의 강성이 커서 압축성이 작으므로 전반전단파괴형태의 지반거동이 일어나기 때문이다. 그림 27은 각각 상대밀도 40, 55, 70% 의 무보강지반의 하중-침하 곡선을 보여주고 있으며 그림 27에서 보는 바와 같이 상대밀도가 클수록 지반의 지지력이 커짐을 알 수 있다. 상대밀도에 따른 지지력을 표 14에 정리하였다.

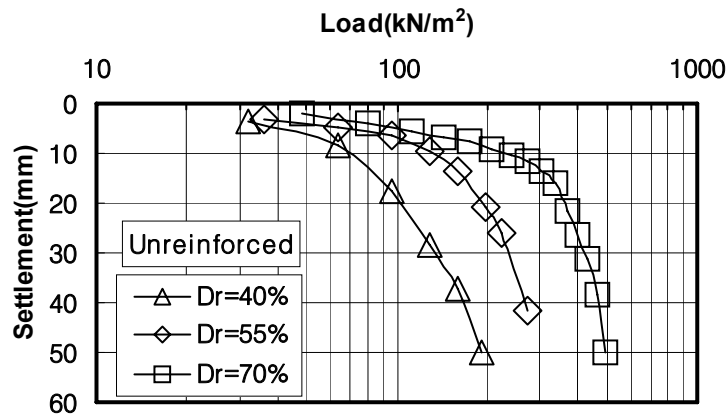


그림 29 하중-침하곡선(무보강지반)

표 14 무보강지반의 극한지지력

D_r (%)	극한지지력(kN/m^2)
40	107.87
55	175.54
70	307.93

(2) 타이어 종류에 따른 보강효과

(가) 상대밀도

상대밀도에 따른 타이어셀의 극한지지력과 극한지지력비(BCR) 및 침하감소율(SRF)을 알아보기 위해 보강깊이비(D/B)=0.2, 재하폭비(b/B)=4.34, 1층 보강으로 재하시험을 하였다. 그림 28~30에서 나타난 것과 같이 무보강지반의 극한지지력보다는 보강지반의 극한지지력이 매우 크게 나타난다. 표 15에서 보는 바와 같이 상대밀도가 증가할수록 극한지지력도 증가하며, BCR이 상대밀도 40%인 경우 타이어셀 LT는 2.31배가 증가하고 상대밀도 70%일 때는 1.59배가 증가한다. 여기서 상대밀도가 증가할수록 지지력 증가효과는 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한 타이어셀 LT에 대한 SRF는 상대밀도 40%일 때 0.20이고 상대밀도가 70%일 때 0.44로 나타났다. 여기서 상대밀도가 증가하면 침하 감소 효과도 줄어드는 것을 알 수 있다.

상대밀도가 낮은 무보강지반의 경우, 지반이 느슨한 상태이기 때문에 지반 강성은 작다. 이런 지반에 타이어셀과 같은 보강재를 넣으면 지반의 강성이 크게 증가하게 되므로 지반은 큰 지지력과 작은 침하를 나타낸다. 반면, 상대밀도가 높은 무보강지반의 경우, 지반 강성은 상당히 커서 그 자체만으로도 비교적 큰 하중에 견딜 수 있기 때문에 보강재를 넣어도 강성의 증가는 작아진다. 따라서 상대밀도가 40%일 때가 70%에서보다 보강효과가 크게 나타난다

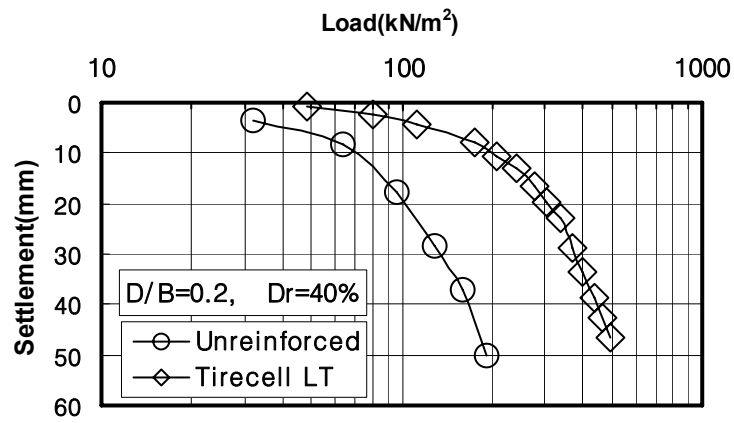


그림 30 하중-침하곡선($D_r=40\%$)

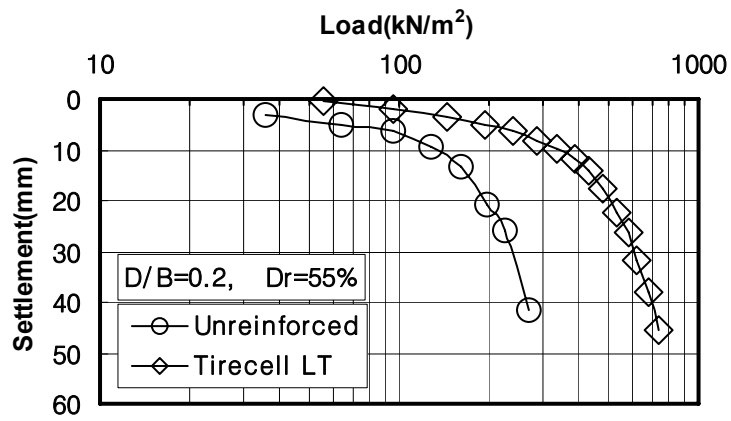


그림 31 하중-침하곡선($D_r=55\%$)

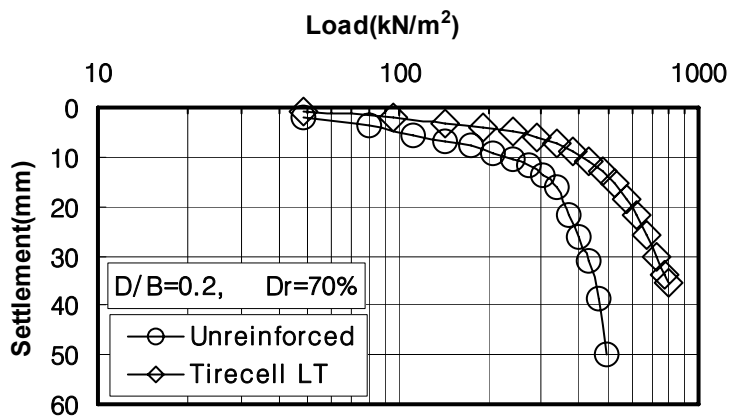


그림 32 하중-침하곡선($D_r=70\%$)

표 15 타이어셀 LT의 극한지지력과 BCR, SRF

D _r (%)	무보강지반	타이어셀 LT		
	극한지지력 (kN/m ²)	극한지지력 (kN/m ²)	BCR	SRF
40	107.87	249.09	2.31	0.20
55	175.54	403.06	2.29	0.23
70	307.93	490.34	1.59	0.44

(나) 타이어셀 LT와 PC의 비교

타이어는 사용되는 차량과 목적에 따라 제조방법 서로 다르다. 여기서는 폐타이어의 발생율이 가장 높은 승용차용 타이어(PC)와 소형트럭용 타이어(LT)를 구분하여 시험을 하였다.

시험을 수행한 결과 상대밀도가 40%일 때 타이어셀 PC의 극한지지력이 타이어셀 LT보다 약간 크게 나왔으며 상대밀도가 증가함에 따라 타이어셀 LT가 더 큰 보강효과가 나타났다. 이는 상대밀도가 낮은 경우 승용차용 타이어의 높이가 소형트럭용 타이어의 높이보다 더 높아서 구속되는 흙의 체적이 더 크기 때문으로 판단되며 상대밀도가 증가함에 따라 구속면적보다는 재료의 강도 효과가 지지력 보강효과에 더 큰 영향을 준다고 생각된다. 표 16과 그림 33에서 보면 상대밀도 40%일 때 타이어셀 PC의 BCR이 타이어셀 LT보다 더 크나 상대밀도가 55% 이상 증가하면 타이어셀 LT의 BCR이 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 표 16과 그림 34에 나타내었듯이 상대밀도 40%일 때 타이어셀 PC의 SRF는 0.16이고 타이어셀 LT의 SRF는 0.20으로 타이어셀 PC가 침하 감소효과가 크지만 상대밀도가 증가하면 침하 감소 효과도 줄어드는 것을 알 수 있다.

본 시험의 결과 상대밀도가 작을 때 즉 40%일 경우 타이어셀 PC가 타이어셀 LT보다 보강효과가 더 좋으며 상대밀도가 55%이상 증가하면 타이어셀 LT의 보강효과가 타이어셀 PC의 보강효과를 능가하는 것으로 나타났다. 위 두가지 타이어에서 보는 바와 같이 타이어셀 LT는 타이어셀 PC보다 두께가 두꺼운 반면 타이어셀 PC는 두께가 얇고 강도가 약해서 타이어 종류와 노후화 정도도 지반보강효과에 어느 정도 영향을 미칠 수 있을 것으로 생각된다.

표 16 보강지반의 극한지지력과 BCR, SRF

D_r (%)	타이어셀 LT (kN/m^2)			타이어셀 PC (kN/m^2)		
	극한지지력 (kN/m^2)	BCR	SRF	극한지지력 (kN/m^2)	BCR	SRF
40	249.09	2.31	0.20	260.86	2.42	0.16
55	403.06	2.29	0.23	370.69	2.11	0.26
70	490.34	1.59	0.44	423.65	1.38	0.50

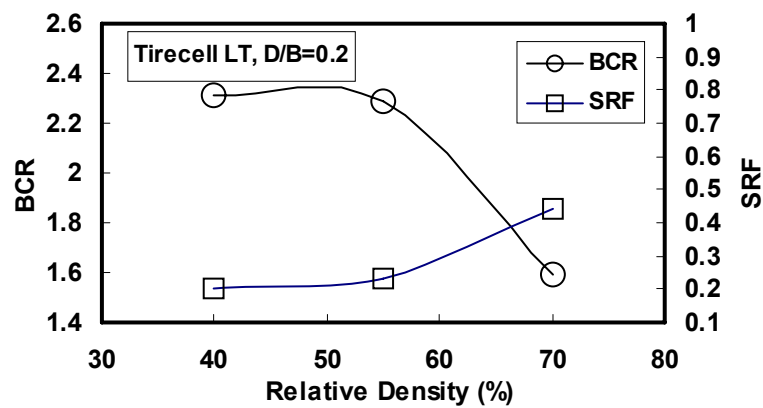


그림 33 상대밀도에 따른 타이어셀 LT의 BCR과 SRF

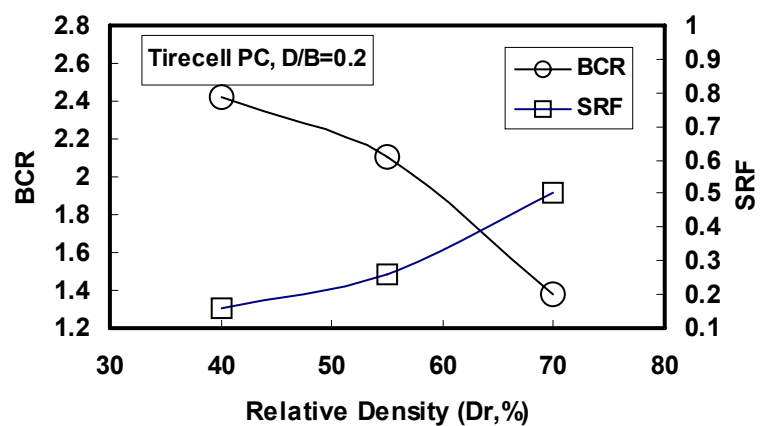


그림 34 상대밀도에 따른 타이어셀 PC의 BCR과 SRF

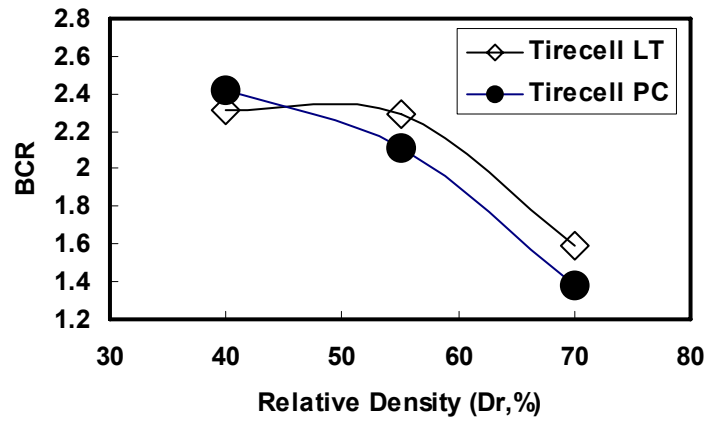


그림 35 상대밀도에 따른 타이어셀 PC와 LT의 BCR

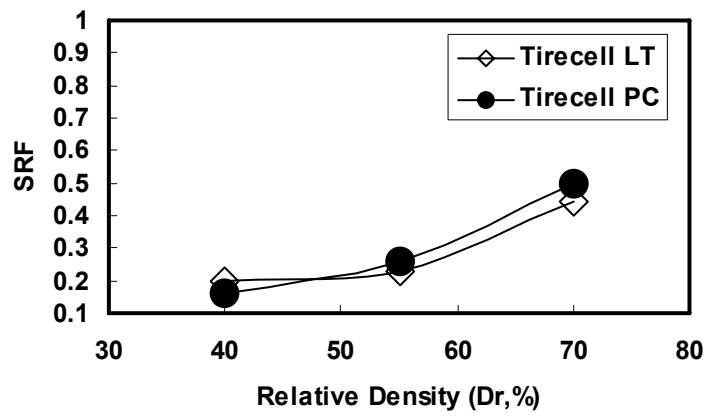


그림 36 상대밀도에 따른 타이어셀 PC와 LT의 SRF

2. 현장재하시험

가. 시험개요

페타이어를 활용한 지반보강효과를 판단하기 위하여 현장에서의 평판재하시험은 실내시험과 달리 직경이 큰 0.3m, 0.75m, 1.25m 재하판을 사용하여 무보강 지반에서의 재하시험과 타이어셀과 트레드매트로 보강된 지반에서의 재하시험을 수행하였다. 직경 1.25m의 재하판은 980kN이상의 하중에도 재하판의 휨이 발생하지 않고, 충분한 강성을 갖도록 두께를 50mm로 제작하였다. 표 17에 보강재의 종류에 따른 평판재하시험의 내용을 나타내었다.

표 17 보강재의 종류에 따른 평판재하시험

보강재	재하판직경 (m)	상대 다짐도(%)	보강깊이 (m)	성토고 (m)	보강재의 배열	비고
무보강	0.3	77,86,91,96		0.8		
	0.75			1.8		
	1.25			3		
타이어셀	0.3		0.15	0.8	2×7	
	0.75		0.3	1.8	2×7	
	1.25		0.6	3	3×9	
트레드매트	0.3		0.15	0.8	3×3, 4×4, 6×6	
	0.75		0.3	1.8	3×3, 4×4, 6×6	
	1.25		0.6	3	3×3, 4×4, 6×6	
						
타이어셀 2×7		트레드매트 3×3		트레드매트 4×4		트레드매트 6×6

나. 지반조성 및 시험대설치

그림 35는 원형등분포하중에 의해 지반에 발생하는 수직응력의 분포를 나타낸 것으로 직경 0.3m, 0.75m, 1.25m의 재하판을 통하여 전달되는 재하하중에 의해 지반내 응력을 고려하여 전체응력의 10%에 해당하는 응력 영향범위에 해당하는 깊이(반경의 약 4배)를 성토고로 정하였다.

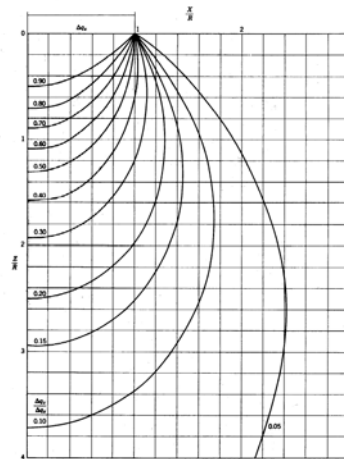


그림 37 원형단면에 작용하는
등분포하중에 의해 발생하는
수직응력의 분포

성토는 한 층의 높이를 0.3m로 하였고, 매 층에서의 상대다짐도가 90%가 되도록 9.8kN 진동롤러를 이용하여 다짐을 수행한 후, 들밀도시험을 통하여 상대다짐도를 확인하였다. 그림 36은 9.8kN 진동롤러를 이용한 다짐과 들밀도시험을 나타내었다.



그림 38 1ton 진동롤러를 이용한 다짐과 들밀도시험

Koerner(1990)는 토목섬유를 0.3m 이내로 보강할 것을 제안하였으나, 본 연구에서는 보강깊이비(D/B)를 0.5로 일정하게 하여 재하판에 가해지는 수직압력에 대한 폐타이어가 보강된 층에 전달되는 수직응력의 비를 비슷하게 함으로써 폐타이어 보강에 의한 지지력 증가 효과를 검토하였다. 그림 37에서 보는 바와 같이 얇은기초에서의 전단파괴형태에서 주동영역 및 수동영역의 높이(H)가 재하판 직경(B)의 약 0.9B~1.1B의 범위에 있으므로, 타이어셀 및 트레드매트의 보강을 재하판직경의 1/2에 해당하는 깊이(B/2)에 설치하였다. 그림 35에서 타이어가 보강된 위치에서의 수직응력은 재하판압력의 약 65%가 되는 것을 확인 할 수 있다.

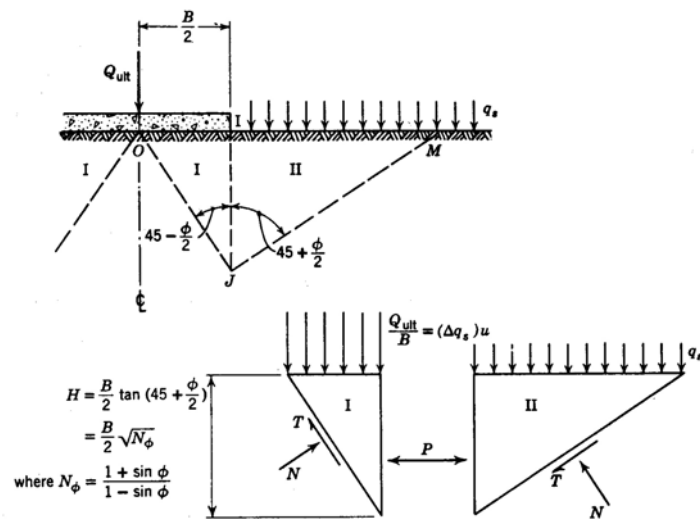
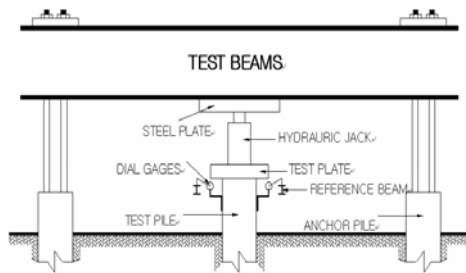


그림 39 얇은기초의 파괴형태

재하방법은 그림 38와 같이 앵커의 반력을 이용한 하중재하 방법과 사하중을 이용하는 방법이 있다. 본 시험현장에서는 H형강(300×300×10×15, 700×300×13×24)을 상재하중으로 사용하였다.



(a) 앵커말뚝의 반력을 이용한 하중재하방법



(b) 상재하중을 이용한 하중재하방법

그림 40 하중재하방법

타이어가 묻힌 위치에서의 각각의 타이어 중심을 찾아 시험위치를 찾아 평탄 정지작업을 하였고, 정지작업이 용이하지 않은 경우에는 깨끗한 모래를 포설한 후에 재하판을 설치하였다. 재하판 위에 유압실린더를 중심이 일치되게 설치하고, 변위측정센서(LVDT)를 부착하는 보조보를 재하판의 침하에 의한 영향이 없도록 시험위치에서 2m이상 떨어진 곳에 설치하였다.

재하판직경 0.3m, 0.75m의 시험시에는 용량 294kN, 스트로크(stroke) 150mm의 유압실린더를 사용하였고, 재하판직경 1.25m의 시험시에는 용량 980kN, 스트로크(stroke) 200mm의 유압실린더를 사용하였다. 변위측정센서(LVDT)는 감도(sensitivity) 0.01mm, 스트로크(stroke) 200mm의 내구성이 좋은 제품을 사용하였다.

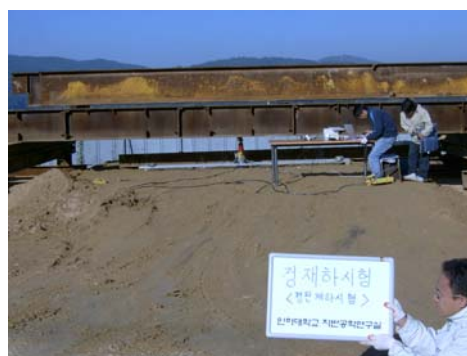


그림 41 평판재하시험 준비완료

재하시험방법은 KS F 2444-95와 ASTM D 1194-87을 참고하여 수행하였다. 하중 단계는 예상최대하중을 8단계로 나누어 재하판직경 0.3m, 0.75m, 1.25m에

대하여 각각 2.94kN, 29.43kN, 88.29kN을 단계하중으로 하였다. 각 하중 단계에서 0, 1, 3, 5, 10분마다 침하량을 측정하였다. 제하시에는 재하단계하중의 2배로써 5.89kN, 58.86kN, 176.58kN씩 제하하였고, 0, 1, 3, 5분마다 침하량을 측정하였다.

표 18 재하시험 방법

재하판직경 (m)	재하단계하중 (kN)	재하단계압력 (kPa)	재하단계하중 (kN)	재하단계압력 (kPa)
0.3	2.94	41.59	5.89	83.19
0.75	29.43	66.61	58.86	133.22
1.25	88.29	71.91	176.58	143.91

표 19에는 재하판직경 0.3m, 0.75m, 1.25m의 시험 중의 전경 및 시험 후의 전경 1과 2를 나타내었다. 시험 후 전경 2는 재하시험을 끝낸 후 보강된 타이어 중심과 시험위치가 일치하는지 확인하기 위해 시험위치를 굴착한 것을 보여준다.

다. 시험결과 및 고찰

(1) 지반조성 시료의 물성치

평판재하시험에 사용된 시료는 경기도 안성시 삼죽면에서 채취한 풍화토(풍화토A)를 사용하여 시험지반을 조성하였다. 사용된 시료의 입도분포곡선은 그림 40과 같고, 특성값을 표 20에 나타내었으며 통일분류법상 SM으로 분류되었다. 최대 건조단위중량과 최적함수비를 구하기 위해서 표준다짐과 수정다짐시험을 수행하였고, 다짐에너지가 비교적 낮은 9.8kN 진동롤러를 사용하였기 때문에 현장의 조건에 맞추어 표준다짐곡선으로 상대다짐도를 판별하였다. 표준다짐곡선과 수정다짐곡선은 그림 41과 같으며, 표 20에 다짐결과를 정리하여 나타내었다.

표 19 평판재하시험 전경

재하판 직경 (m)	시험 중 전경	시험 후 전경 1	시험 후 전경 2
0.3			
0.75			
1.25			

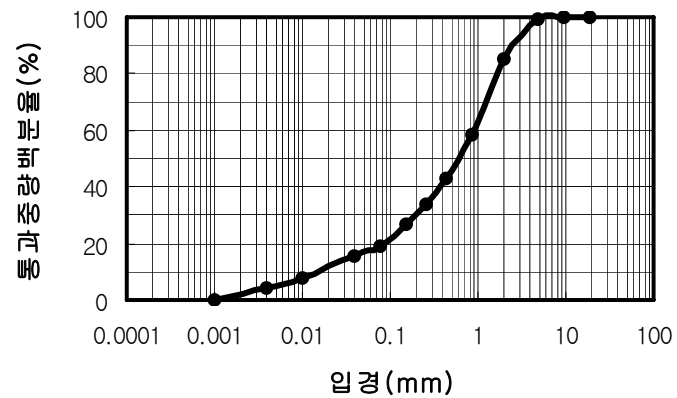
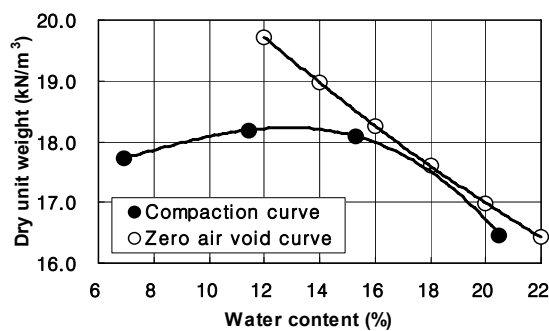


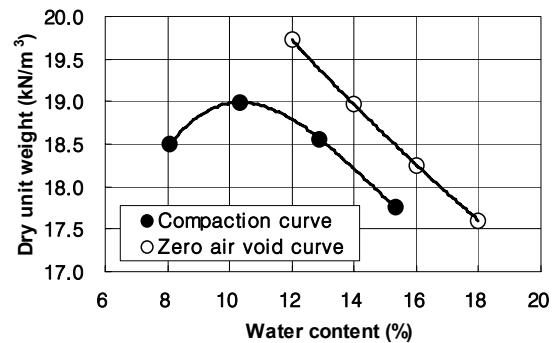
그림 42 풍화토A의 입도분포 곡선

표 20 풍화토A의 물리적 특성

water content (%)	G_s	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_z	표준다짐		수정다짐	
							γ_{dmax} (kN/m ³)	최적함수비 OMC (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	최적함수비 OMC (%)
13.5~14.5	2.62	0.015	0.20	0.90	60	2.96	18.21	12.77	18.96	10.27



(a) 표준다짐곡선



(b) 수정다짐곡선

그림 43 풍화토A의 다짐곡선

(2) 재하판직경에 의한 영향

지반보강의 효과를 알아보기 위해서는 보강을 한 지반의 극한지지력과 보강을 하지 않은 지반의 극한지지력의 비교가 필요하다. 따라서 무보강지반과 보강지반의 상대다짐도를 같게 조성한 상태에서 평판재하시험을 수행하였다. 그림 42~44는 재하판직경에 따른 무보강지반과 보강지반의 대수하중-침하(logP-S) 곡선을 나타내었다.

재하판직경에 따른 극한지지력을 표 21에 정리하였으며, 극한지지력은 재하판직경이 커질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 박용부와 정형식(2004)에 따르면 기초 크기 2m 이내에서는 기초 크기가 커질수록 극한지지력이 감소하는 경향을 보이며 기초 크기 2m 이상에서는 기초 크기가 커질수록 극한지지력이 증가하는 경향을 보인다고 하였다.

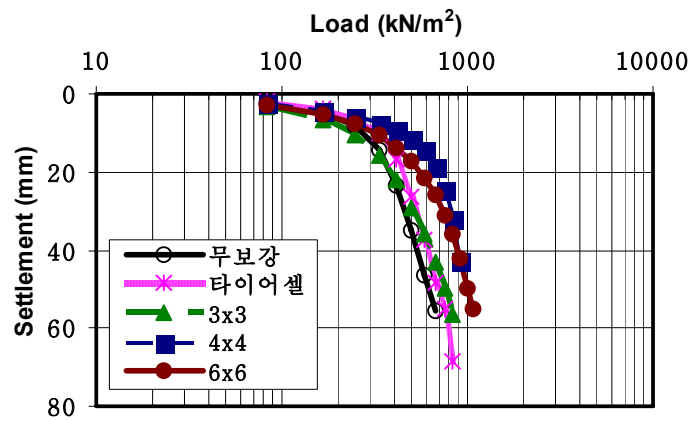


그림 44 하중-침하곡선(재하판직경 0.3m)

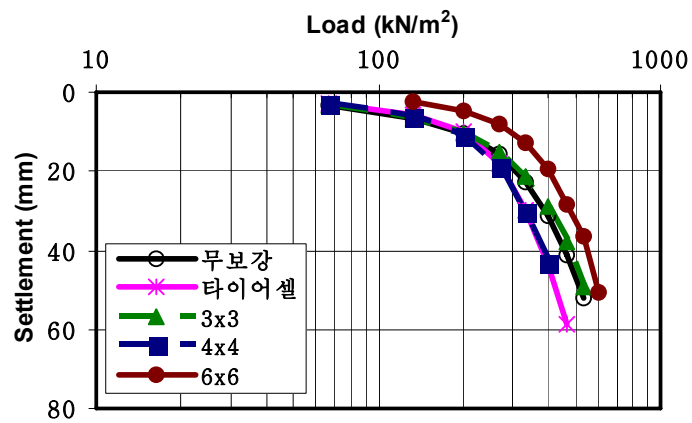


그림 45 하중-침하곡선(재하판직경 0.75m)

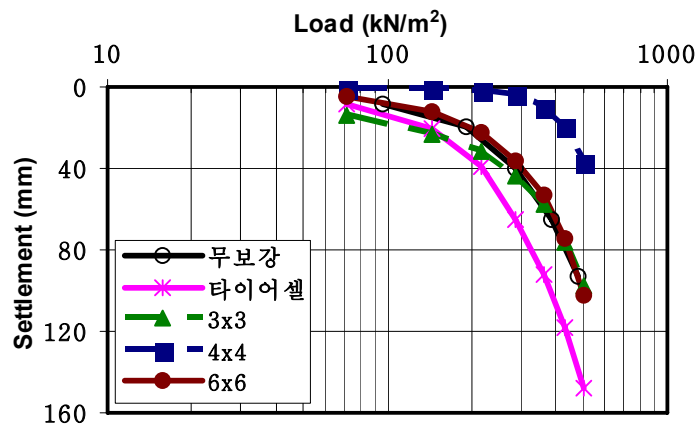


그림 46 하중-침하곡선(재하판직경 1.25m)

표 21 재하판직경에 따른 극한지지력 비교

재하판 직경 보강재 종류	무보강 (kN/m ²)	타이어셀 (kN/m ²)	트레드매트(kN/m ²)		
			3×3	4×4	6×6
0.3m	310	370	390	650	600
0.75m	310	280	320	230	410
1.25m	250	270	300	360	310

(3) 보강재 종류에 의한 영향

표 21의 극한지지력을 비교하여 보면 대체적으로 무보강지반보다 타이어셀과 트레드매트로 보강된 지반의 극한지지력이 크다는 것을 알 수 있다.

타이어셀로 보강된 지반에 하중이 가해지면 타이어셀에 의해 흙이 구속되어 벽체의 형태로 작용하고 주변 타이어셀에서도 이에 대응하는 수평응력으로 타이어셀을 밀어내고 있기 때문에 타이어셀은 중립위치에 있게 되어 자립성을 유지하며 하중분산효과를 얻는다. 또한 수직방향의 변위를 구속하여 지지력을 향상시킨다. 그러나 시험결과에서 타이어셀로 보강된 지반의 극한지지력이 트레드매트로 보강된 지반의 극한지지력보다 작게 나온 이유는 벌집 모양의 타이어셀 구멍이 커서 트레드매트보다 침하가 더 많이 발생하기 때문이라고 생각된다.

(4) 보강재 수에 의한 영향

트레드매트를 3×3, 4×4, 6×6으로 트레드의 결합수를 늘려갈 경우 극한지지력이 증가하였다. 재하판에 하중이 가해지면 지반으로 응력이 전달되는데 이 때 트레드매트에 인장력이 발생하여 지반의 지지력을 향상시킨다. 따라서 트레드매트의 보강재수가 늘어남에 따라 지반의 보강효과가 크다고 할 수 있겠다.

(5) 상대다짐도에 의한 영향

그림 45에서 나타내어지는 바와 같이 각각의 상대다짐도에 따른 초기 침하하는 거의 비슷하나 상대다짐도가 작은 77%의 지반은 아래쪽으로 완만한 곡선을 그리면서 대수하중-침하 곡선이 그려진다. 이것은 풍화토 지반이 충분하게 다져지

지 않은 느슨한 상태로 간극비가 커서 압축성이 큰 지반이므로 국부전단파괴형태의 지반 거동이 일어나기 때문이다. 반면에 상대다짐도가 86, 91, 96%로 증가할수록 지반의 대수하중-침하 곡선은 급격히 꺾이는 곡선이 그려진다. 이것은 상대다짐도가 증가할수록 간극비가 작고 입자 사이의 마찰력과 지반의 강성이 커서 압축성이 작은 지반이므로 전반전단파괴형태의 지반 거동이 일어나기 때문이다. 따라서 초기에는 상대다짐도가 큰 지반이 작은 지반보다 침하가 덜 일어나게 되지만 풍화토 입자가 더 이상 하중을 버티지 못 하는 단계에 이르면 상대다짐도가 작은 지반에 비해 급격하게 침하가 일어나게 된다.

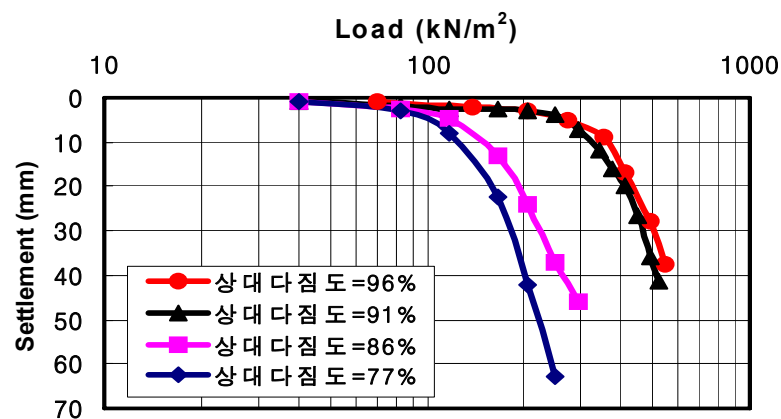


그림 47 하중-침하곡선(무보강지반, 재하판직경 0.3m)

표 22 무보강지반(B=0.3m)의 극한지지력 비교

상대다짐도 (%)	극한지지력(kN/m ²)
77	134.89
86	141.66
91	243.48
96	310.49

3. 결론

본 연구는 페타이어 발생율이 가장 높은 승용차용 타이어(Passenger Car tire, PC)와 소형트럭용 타이어(Light Truck tire, LT)를 타이어셀로 제작하여 상대밀도에 따른 실내토조시험을 수행하였고 현장에서의 평판재하시험은 직경 0.3m, 0.75m, 1.25m 재하판을 사용하여 무보강지반에서의 재하시험과 타이어셀, 트레드매트로 보강된 지반에서의 재하시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 상대밀도가 증가할수록 극한지지력은 증가하지만 BCR은 감소하고 SRF는 증가한다. 이는 상대밀도가 증가할수록 보강효과가 감소한다는 것을 나타낸다.
- (2) 상대밀도가 40%인 경우에는 타이어셀 PC의 극한지지력이 타이어셀 LT보다 약간 크지만 상대밀도가 증가하면서 타이어셀 LT가 더 큰 극한지지력이 측정된다.
- (3) 재하판직경 0.3m로 평판재하시험을 하였을 때 극한지지력은 무보강지반부터 6×6 트레드매트 보강시까지 310~650kN의 변화를 보였고 재하판직경 0.75m로 시험을 하였을 때는 230~410kN, 재하판직경 1.25m로 시험을 하였을 때는 250~360kN의 변화를 보여 재하판직경이 커질수록 극한지지력은 작아지는 경향을 나타내었다.
- (4) 전반적으로 극한지지력은 트레드매트가 가장 크게 측정되었고 그 다음이 타이어셀, 무보강지반 순이었다.
- (5) 무보강지반에서 상대다짐도를 변화시켜가며 재하판직경 0.3m로 평판재하시험을 수행하였는데 상대다짐도가 높아질수록 극한지지력이 크게 측정되었다.

4절. 인발시험

1. 시험개요

인발시험의 목적은 상재하중의 변화에 따른 타이어셀 및 트레드매트의 극한 인발저항력을 측정하고 안전율을 적용하여 허용인발저항력을 구하기 위한 것이다. 표 23에 타이어셀과 트레드매트의 인발시험계획을 나타내었다. 타이어셀 인발시험은 성토고 1.5m, 2×7(그림 49, 표 23의 시험번호 4번), 트레드매트의 인발시험은 성토고 1.5m, 6×6(그림 49, 표 23의 시험번호 15번)를 중점으로 계획하였다.

타이어셀과 지오셀, 트레드매트와 지오그리드의 극한인발저항력을 각각 비교하였고, 타이어셀 2×7, 트레드매트 6×6의 재하용 성토고를 0.5m, 2.5m, 3.5m로 바꾸어 재하용 성토고에 따른 영향을 확인하였다. 또한 타이어셀은 2×7외에 1×7과 4×7, 트레드매트는 6×6외에 3×3, 4×4, 3×6, 12×6를 시험하여 타이어의 보강개수에 대한 영향을 비교하였다. 그 외에 타이어 보강층의 사면끝단에서 타이어까지의 수평거리, 타이어셀의 연결방법에 대한 영향도 검토하였다.

표 23 인발시험의 계획

보강재 종류	시험 번호	성토고 (m)	배열	유효길이 (m)	사면에서의 수평거리 (m)	연결 방법	비 고	시험 회수
타이어 셀	1	0.5	2×7	1.6	0.75	Bolt	위치별 변위측정	1
	2	1.5	1×7	0.8	2.25	Bolt	위치별 변위측정	5
	3		2×7	0.8	1.45	Bolt	위치별 변위측정	
	4			1.6	2.25	Bolt	위치별 변위측정	
	5			1.6	2.25	Rope	위치별 변위측정	
	6		4×7	3.2	2.25	Bolt	위치별 변위측정	
	7	2.5	2×7	1.6	3.75	Bolt	위치별 변위측정	1
	8	3.5	2×7	1.6	5.25	Bolt	위치별 변위측정	1
	타이어 셀 시험회수							8
지오 셀	9	1.5	No.4와 같은 면적	1.6	2.25	Melt Bond	위치별 변위측정	1
	지오 셀 시험회수							1

표 23 인발시험의 계획 (계속)

보강재 종류	시험 번호	성토고 (m)	배열	유효길이 (m)	사면에서의 수평거리 (m)	연결 방법	비 고	시험 회수
트레드 매트	10	0.5	6×6	2.0	0.75	Bolt	위치별 변위측정	1
	11	1.5	3×6	1.0	2.25	Bolt	위치별 변위측정	6
	12		3×3	2.0	2.25	Bolt	위치별 변위측정	
	13		4×4	2.0	2.25	Bolt	위치별 변위측정	
	14		6×6	1.0	1.25	Bolt	위치별 변위측정	
	15			2.0	2.25	Bolt	위치별 변위측정	
	16		12×6	4.0	2.25	Bolt	위치별 변위측정	
	17	2.5	6×6	2.0	3.75	Bolt	위치별 변위측정	1
	18	3.5	6×6	2.0	5.25	Bolt	위치별 변위측정	1
	트레드매트 시험회수							9
지오 그리드	19	1.5	No.15 와 같은 면적	2.0	2.25	Melt Bond	위치별 변위측정	1
	지오그리드 시험회수							1

2. 시험준비

가. 지반조성

(1) 풍화토의 특성

인발시험에 사용된 시료는 인천 남구 학익동에서 채취한 풍화토(풍화토B)와 인천 연수구 청학동의 토사를 사용하여 지반을 조성하였다. 사용된 풍화토B의 입도분포곡선은 그림 46과 같고, 특성값을 표 24에 나타내었으며 통일분류법상 SM으로 분류되었다. 최대 건조단위중량과 최적함수비를 구하기 위해서 표준다짐과 수정다짐시험을 수행하였고, 다짐에너지가 비교적 높은 10ton 진동롤러를 사용하였기 때문에 현장의 조건에 맞추어 수정다짐곡선으로 상대다짐도를 판별하였다. 표준다짐곡선과 수정다짐곡선은 그림 47과 같으며, 표 24에 다짐 결과를 정리하여 나타내었다.

그리고 풍화토-풍화토, 풍화토-타이어의 역학특성을 그림 48과 표 25에 나타내었다. 실트성분이 있는 풍화토에서는 모래보다 작은 전단 거동을 보였다. 풍화토의 내부마찰각(ϕ)은 34.7° , 풍화토-트레드외면의 마찰각(δ)은 33.9° , 풍화토-트레드내면의 마찰각(δ)은 31.9° 로 측정되었다. 그 결과 트레드외면-풍화토에 대한 마찰각비(δ/ϕ)는 0.98, 트레드내면-풍화토의 마찰각비(δ/ϕ)는 0.92로 나타났다. 풍화토의 내부마찰각이 모래보다 작은 이유는 풍화토가 모래보다 실트 및 점토의 함유율이 크고 모래의 함유율이 적기 때문에 토립자간 마찰, 토립자의 엇물림 등의 영향이 감소하기 때문으로 생각된다. 또한 풍화토에서 δ 가 ϕ 보다 작게 나타나는 것은 풍화토는 모래와 달리 입자가 작아 트레드 표면에서 관입이 잘 되지 않고 미끄러지기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 트레드외면과 내면의 내부마찰각비가 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 이상의 값에서 트레드 내·외면과 흙과의 마찰각은 일반적으로 알려진 콘크리트와 흙과의 마찰각에 비하여 크게 나타남을 알 수 있다. 반면 Koerner(2005)에 따르면 $450 \times 450\text{mm}$ 의 전단상자에서 조밀한 상태의 SW(well graded angular sand)의 흙과 geogrid간의 전단시험을 수행하였을 때, geogrid의 종류에 따라 마찰각비가 0.72~1.07의 범위를 나타낸다고 하였다.

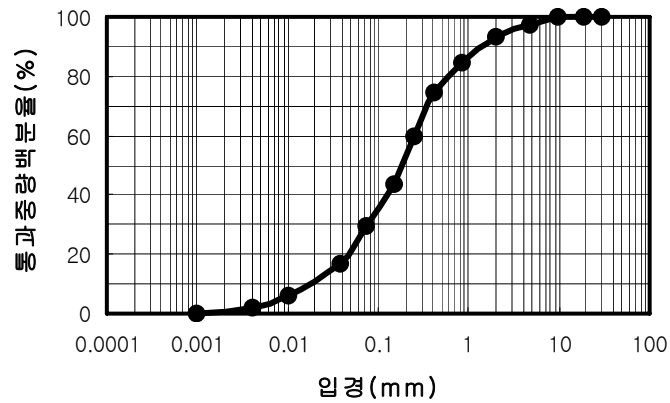
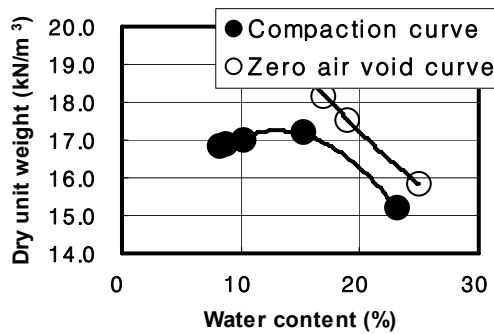


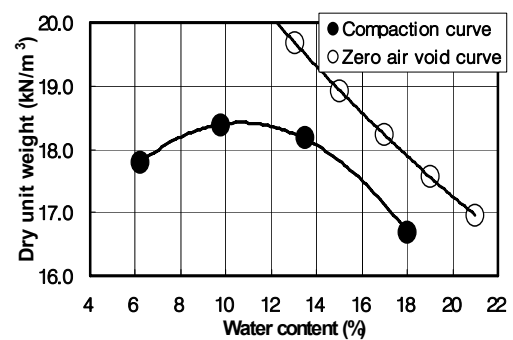
그림 46 풍화토B의 입도분포 곡선

표 24 인발시험 풍화토B의 특성

water content (%)	G_s	D_{10}	D_{30}	D_{60}	C_u	C_z	표준다짐		수정다짐	
							γ_{dmax} (kN/m ³)	최적함수비 (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	최적함수비 (%)
11.7~12.3	2.71	0.02	0.08	0.25	12.5	1.28	17.25	13.01	18.42	10.66



(a) 표준다짐곡선



(b) 수정다짐곡선

그림 47 풍화토B의 다짐곡선

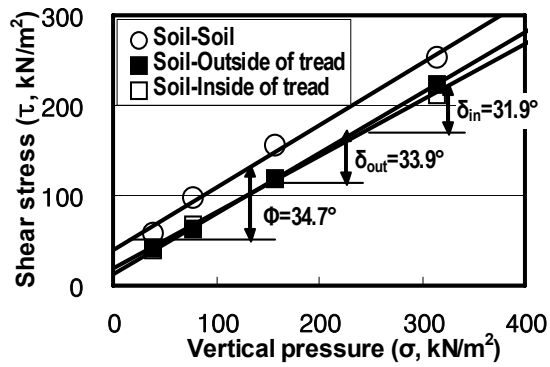


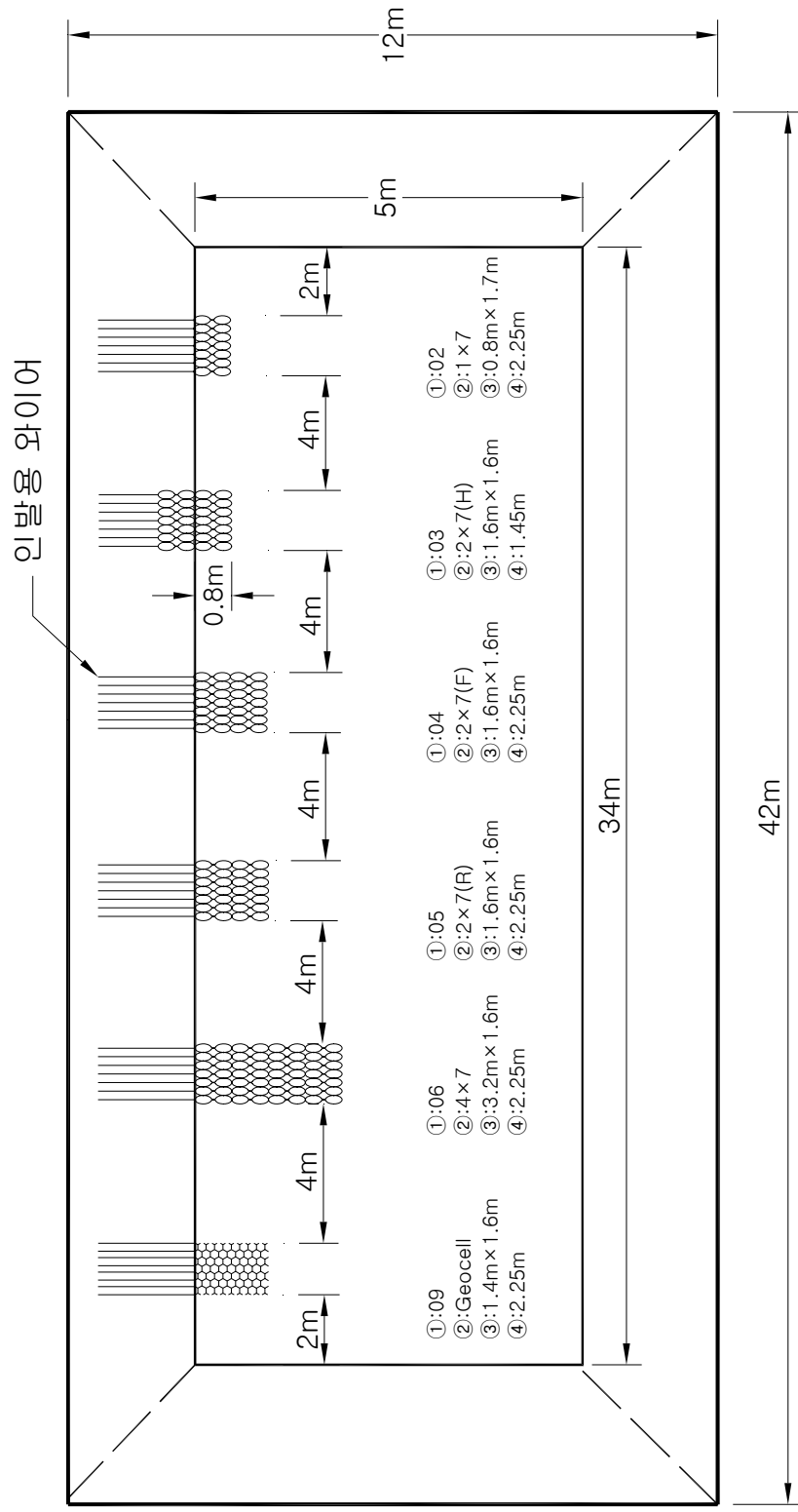
그림 48 수직응력-전단응력 곡선

표 25 대형전단시험 결과

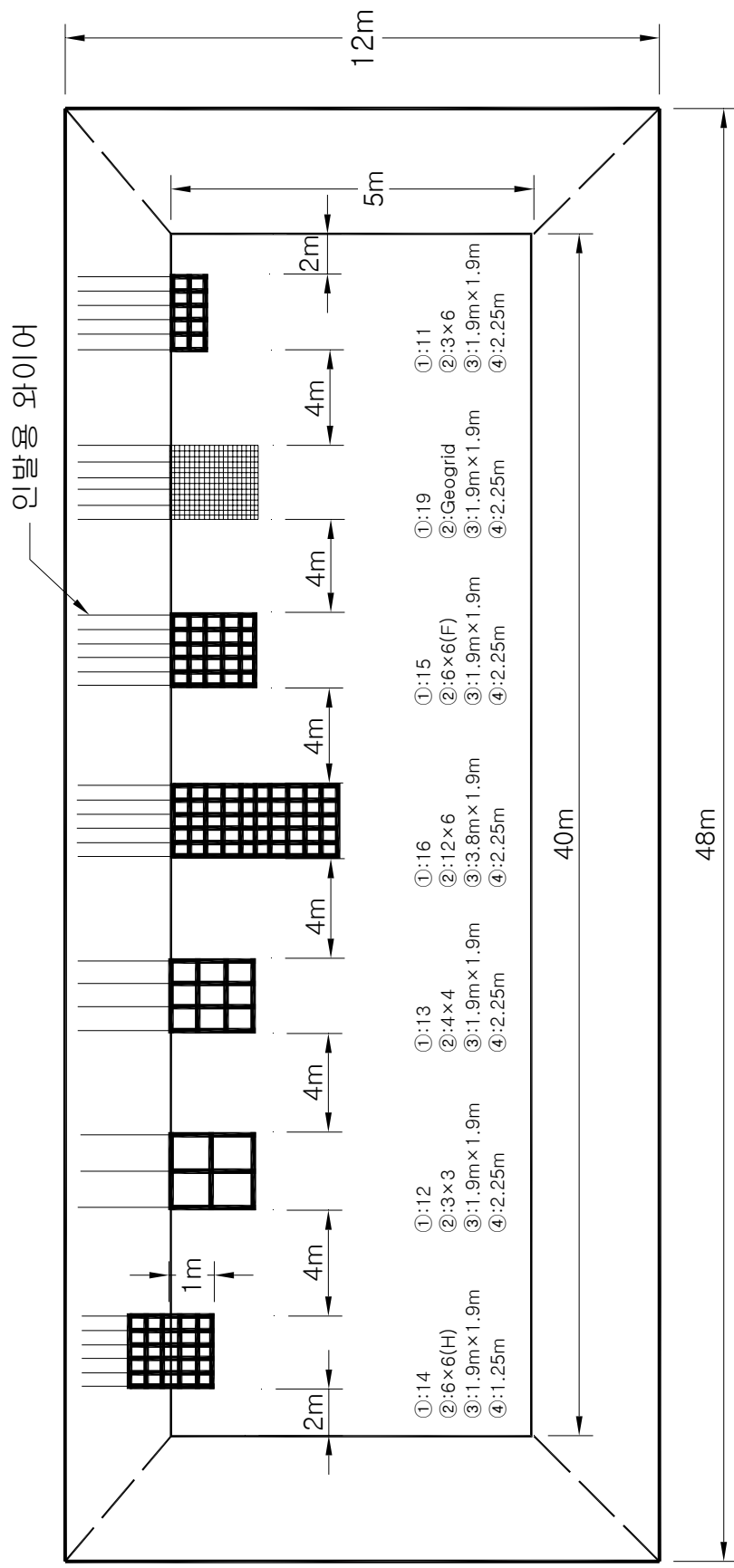
시료종류	강도정수		
	내부마찰각 (ϕ , °)	점착력 (c , kN/m^2)	마찰각비 (δ/ϕ)
풍화토-풍화토(ϕ)	34.7°	39.7	-
풍화토-타이어 외면(δ_{out})	33.9°	13.2	0.98
풍화토-타이어 내면(δ_{in})	31.9°	18.38	0.92

(2) 타이어셀 및 트레드매트 설치

지오셀(높이 20cm) 및 타이어셀(높이 18cm)의 인발시험시 응력의 영향권을 고려하여 60cm를 기본성토를 한 후 그림 49와 같은 간격으로 트레드매트를 설치하였다. 성토용 토사는 인천 학익동 지역에서 채취하였다. 그리고 트레드매트 사이의 거리 또한 트레드매트 폭의 2배 이상이 되도록 하였다.



(a) 타이어 셀



(b) 트레드메트

그림 49 인발시험(재하용 성토고 1.5m, 총성토고 2.1m)

그림에서 ① : 표 23에서의 인발시험 번호,

② : 타이어셀 및 트레드매트의 배열,

③ : 타이어셀 및 트레드매트의 크기,

④ : 타이어셀 및 트레드매트가 설치된 층의 사면끝단에서 트레드매트
까지의 거리

그림 50과 같이 타이어셀과 트레드매트를 인발하기 위하여 10mm 두께의 강
판을 볼트로 연결한 후, 사용하중 78kN의 와이어를 강판에 연결하였다. 인발시
험 시 타이어의 위치에 따른 변위를 측정하기 위하여 그림 51과 같이 폴리우레
탄 호스로 피복된 직경 3mm의 와이어를 설치하였다.



(a) 타이어셀



(b) 트레드매트

그림 50 인발용 와이어의 연결



(a) 와이어피복

(b) 타이어셀

(c) 트레드매트

그림 51 내부 변위측정용 와이어 피복 및 연결

(3) 재하용 성토

타이어셀 및 트레드매트를 설치한 후 기준성토면으로부터 60cm의 높이까지는 풍화토B를 이용하여 성토를 하였다. 60cm 이상의 재하용 성토고는 시험현장에서 쉽게 구할 수 있는 토사를 이용하였다. 성토는 모든 층에서 30cm씩 성토를 하고 98kN 진동롤러를 사용하여 다짐을 하였으므로 수정다짐곡선에 대한 상대다짐도가 90%가 되도록 다짐을 수행하였으며, 매 층마다 3회씩 들밀도시험을 하여 상대다짐도를 확인하였다.



그림 52 인발시험부지 성토 및 다짐



그림 53 인발시험부지 들밀도시험

나. 시험대설치

그림 54에서 나타낸 것과 같이 페타이어를 인발하기 위한 하중재하 방법으로 길이가 10m인 H형강(300×300×12×10)을 8.5m깊이까지 항타하여 반력말뚝(reaction pile)으로 사용하였고, channel을 이용하여 반력말뚝의 힘을 인발용 가로보 I (H형강-300×300×12×10, 길이 1.8m) 및 인발용 가로보 II,III(H형강-300×300×12×10, 길이 2.5m)에 전달하여 페타이어를 인발하도록 하였다.

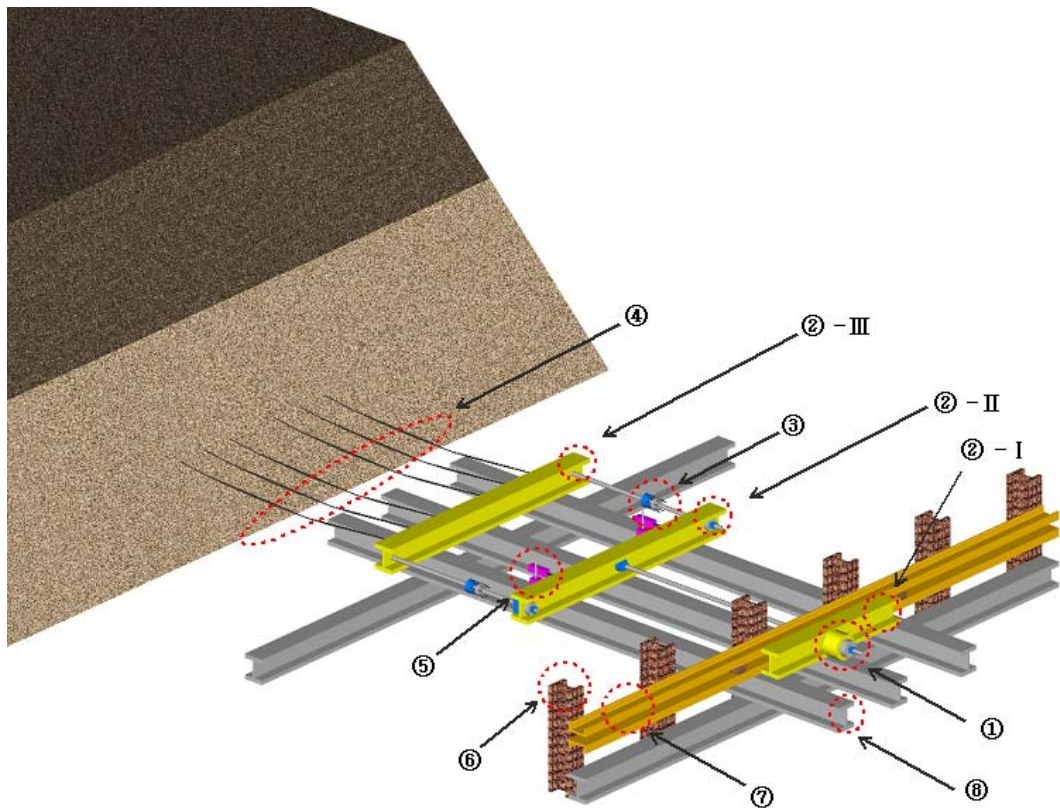


그림 54 페타이어 인발을 위한 인발시험대 및 인발시험장치

그림에서 ① : 유압실린더(용량:1370kN, 능력:200mm)

② - I, II, III : 인발용 가로보(H형강-300×300×12×10)

③ : 로드셀(load cell, 용량:195kN)

④ : 인발용 와이어(사용하중:78kN/개)

⑤ : 변위측정 센서(LVDT, 감도:0.01mm, 능력:200mm)

⑥ : 반력용 말뚝(H형강-300×300×12×10)

⑦ : channel

⑧ : 보조보(H형강-300×300×12×10)

인발시험장치(유압실린더, 인발 가로보)와 타이어가 설치된 위치의 높이를 맞추기 위하여 가로와 세로방향으로 보조빔을 설치하였으며, 그 위에 인발시험장치(유압실린더, 인발용 가로보)를 설치하였다. 그리고 인발시험 중에 편심 힘에 의한 인발용 가로보의 좌·우 부등변위가 발생하는지 확인하기 위하여 로드셀

(load cell), 변위측정센서(LVDT)를 인발용 가로보Ⅱ의 좌·우측에 각각 설치하였다.

3. 인발시험

페타이어의 인발시험 단계하중은 예상최대하중을 30~40단계로 나누어 4.9kN으로 정하였으며, 각 하중 단계에서 0, 1, 3, 5분마다 트레드매트의 변위량(displacement)을 측정하였다. 변위량은 침투 하중이 나오지 않는 경우 트레드매트 길이의 15%인 300mm까지 측정하였고, 침투 하중이 나오는 경우에는 최소 3단계 하중을 더 측정하였다. 그림 55에 트레드매트 6×6(A)의 인발에 의한 사면 파괴의 진행과정을 나타내었다.



그림 55 인발시험에 의한 단계별 사면파괴사진
(트레드매트 6×6(A), 성토고 1.5m)

4. 극한인발저항력의 산정

페타이어의 인발시험에서는 평판재하시험에서와 다르게 침투 하중이 나타나는 경우가 많았다. 따라서 침투 하중이 나타나는 경우에는 침투 하중을 극한인발저항력으로 정하였고, 침투 하중이 나타나지 않는 경우에는 평판재하시험에서 극한지지력을 구하는 방법과 같이 하중-변위량 곡선에서 초기값에서의 접선과 마지막 부분의 결과값에서의 접선이 만나는 교점에서의 하중을 극한하중으로 정하였다.

5. 시험결과 및 고찰

가. 지오셀과 각각의 타이어셀 인발시험 결과

그림 56은 지오셀 및 각각의 타이어셀에 대한 하중-변위 곡선을 나타내었고 표 26에 각각의 극한인발저항력을 정리하였다. 그림 57에서 타이어셀 4×7이 가장 큰 극한인발저항력을 보였고 다음이 2×7, 1×7순으로 측정되었다. 즉, 전체면적이 클수록 극한인발저항력은 크게 측정되었다. 그림 57에서 타이어셀 2×7(H)의 극한인발저항력은 42.92kN/m로 73.58kN/m인 타이어셀 2×7(F)보다 작게 측정되었고 42.8kN/m인 타이어셀 1×7과 비슷한 값을 보였다. 이것은 2×7(H)의 유효길이가 1×7과 같고 2×7(F)의 반절이기 때문인 것으로 생각된다. 그림 58에서 2×7(F)의 극한인발저항력이 가장 크게 측정되었고 다음이 지오셀, 2×7(R)순이었다. 즉, 로프로 연결한 타이어셀은 볼트로 연결한 타이어셀과 지오셀보다 작은 극한 인발저항력을 보였다.

표 27에 나타낸 바와 같이 타이어셀 4×7이 실제 지반과 접촉하는 표면적은 0.8m^2 로 2×7(F) 순면적의 2배이고 1×7 표면적의 4배를 나타낸다. 반면 타이어셀 4×7의 극한인발저항력은 166.77kN으로 2×7(F)의 1.42배, 1×7의 2.44배를 보였다.

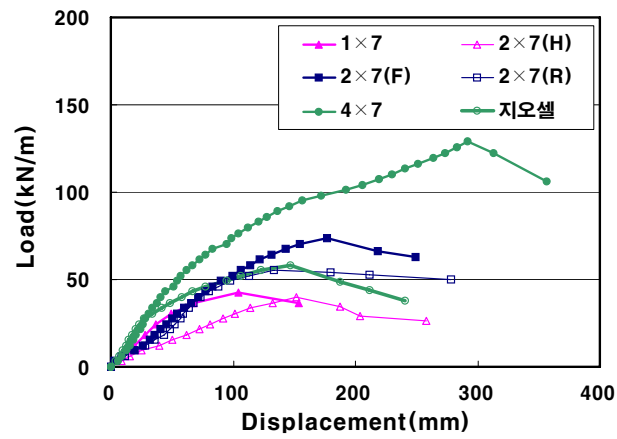


그림 56 하중-변위곡선(타이어셀, 지오셀)

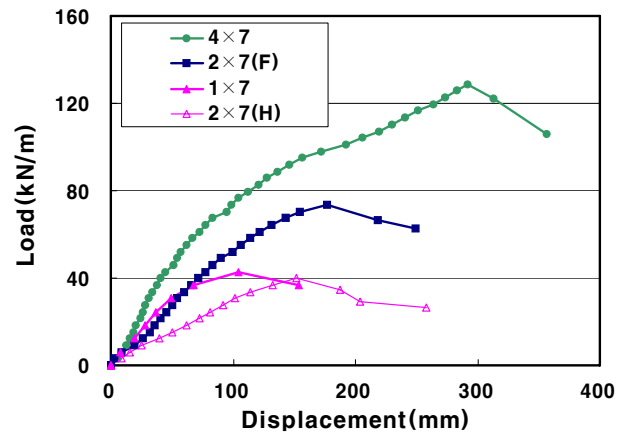


그림 57 하중-변위곡선(유효길이의 비교)

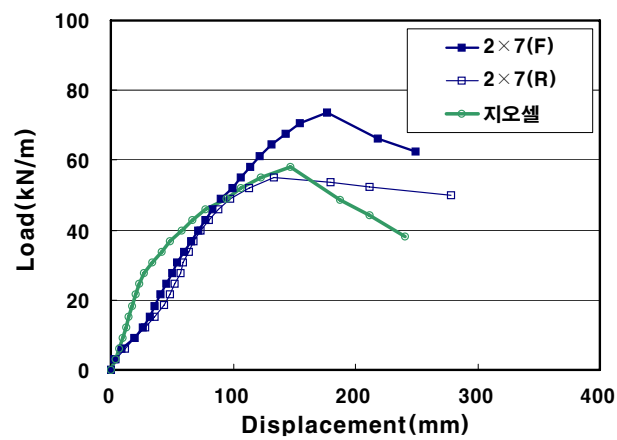


그림 58 하중-변위곡선(연결재료, 지오셀 비교)

표 26 보강재별 극한인발저항력의 비교

(단위: kN/m)

보강재 종류	지오셀	타이어셀 1×7	타이어셀 2×7(H)	타이어셀 2×7(R)	타이어셀 2×7(F)	타이어셀 4×7
극한인발 저항력	66.57	42.8	42.92	55.18	73.58	104.23

표 27 전체면적의 변화에 따른 타이어셀의 마찰력과 극한인발저항력 비교

보강재의 종류	타이어 셀 unit 개수	타이어셀 전체면적 ^① (m ²)	타이어셀 순면적 ^② (m ²)	예상인발 저항력 ^③ (kN)	극한인발 저항력 ^④ (kN)	인발 저항력비 ^⑤	(극한인발 저항력 ^⑥)/① (kN/m ²)
1×7	7	1.28	0.2	51.92	68.47	1.32	53.49
2×7(F)	14	2.56	0.4	103.85	117.72	1.13	45.98
4×7	28	5.12	0.8	207.70	166.77	0.8	32.57

여기서,

타이어셀 전체면적^① : 타이어셀의 길이(0.8, 1.6, 3.2m)×폭(1.6m)

타이어셀 순면적^② : 트레드의 길이(1.9m)×두께(0.015m)×타이어셀 unit 개수

예상인발저항력^③ : $2 \times ② \times \sigma_v \times \tan \delta$ (σ_v :수직압력, δ :풍화토-타이어 마찰각)

극한인발저항력^④ : 시험에 의해 결정

인발저항력비^⑤ : $④ \div ③$

(극한인발저항력^⑥)/① : $④ \div ①$

나. 지오그리드와 각각의 트레드매트 인발시험 결과

그림 59는 지오그리드 및 각각의 트레드매트에 대한 하중-변위 곡선을 나타내었고 표 28에 각각의 극한인발저항력을 정리하였다. 그림 60에서 트레드매트 6×6이 트레드매트 3×6보다 훨씬 큰 극한인발저항력을 보였고 같은 하중에서 작은 변형을 보였다. 그림 61에서 지오그리드는 극한인발저항력이 82.61kN/m로 126.5kN/m인 트레드매트 6×6(F)보다 작게 측정되었으나, 극한인발저항력이 80.03kN/m인 트레드매트 4×4와 비슷한 극한인발저항력을 보였다. 그리고 같은 하중에서 변형량은 트레드매트 4×4가 가장 컸고 다음이 지오그리드, 트레드매트 6×6(F)순이었다. 그림 61에서 트레드매트 6×6(F)가 가장 큰 극한인발저항력이

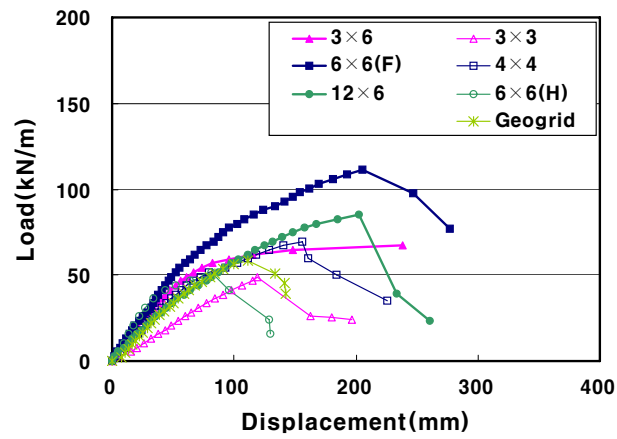


그림 59 하중-변위곡선(트레드매트, 지오그리드)

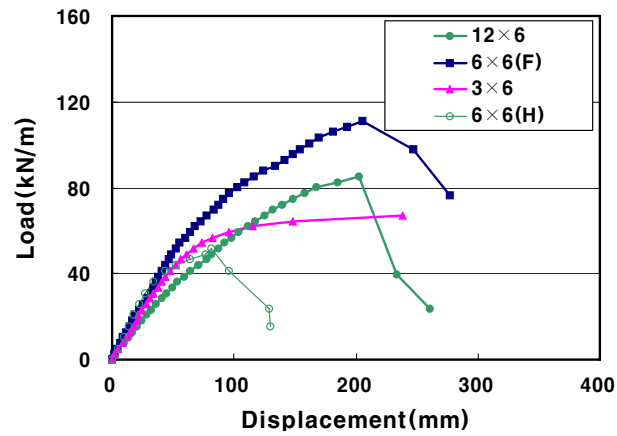


그림 60 하중-변위곡선(유효길이의 비교)

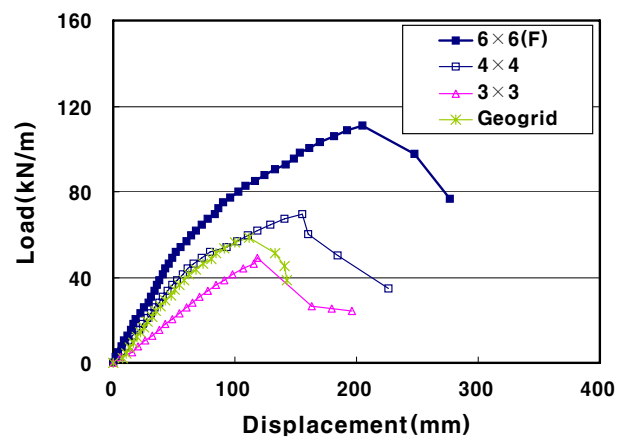


그림 61 하중-변위곡선(형태, 지오그리드 비교)

측정되었고 다음이 4×4, 3×3 순으로 측정되었다. 같은 하중에서 변형은 트레드 매트 3×3이 가장 컸고 다음이 4×4, 6×6(F) 순이었다.

표 29에 나타낸 바와 같이 트레드 매트 6×6(F)가 실제 지반과 접촉하는 표면적은 2.84m²로 3×3의 표면적의 1.7배이고 4×4 표면적의 1.34배를 나타낸다. 반면 6×6(F)의 극한인발저항력은 245.25kN으로 3×3의 2.17배, 4×4의 1.56배를 보였다. 그리고 트레드 개수는 6×6이 12개로 3×3의 2배, 4×4의 1.5배이다. 각각의 트레드 매트의 인발시험 결과 극한인발저항력이 트레드 개수에 비례하는 경향을 보였다.

그리고 각각의 트레드 매트에서 순면적당 극한인발저항력은 같은 유효 면적에서 트레드 결합 개수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

표 29에서 트레드 매트 3×6은 실제 지반과 접촉하는 표면적과 유효면적이 트레드 매트 3×3, 4×4보다 작지만 극한인발저항력이 더 크게 측정된 것으로 보아 수동저항의 영향이 있었던 것으로 사료된다.

표 28 보강재별 극한인발저항력의 비교 (단위: kN/m)

보강재 종류	지오 그리드	트레드 매트 3×6	트레드 매트 3×3	트레드 매트 4×4	트레드 매트 6×6(H)	트레드 매트 6×6(F)	트레드 매트 12×6
극한인발 저항력	82.61	85.19	59.43	80.03	72.28	126.5	85.2

표 29 전체면적이 같은 트레드의 마찰력과 극한인발저항력 비교

보강재의 종류	트레드 개수	트레드 매트 전체면 적 ^① (m ²)	트레드 매트 순면적 ^② (m ²)	예상인발 저항력 ^③ (kN)	극한인발 저항력 ^④ (kN)	인발 저항력비 ^⑤	(극한인발 저항력 ^⑥)/ ^② (kN/m ²)
3×3	6	3.61	1.68	66.34	112.91	1.70	67.2
4×4	8	3.61	2.12	83.88	156.96	1.87	74.04
3×6	9	1.81	1.42	56.06	166.77	2.97	117.44
6×6(F)	12	3.61	2.84	112.11	245.25	2.19	86.36

여기서,

트레드매트 전체면적^① : 트레드매트의 길이(1.9m)×폭(1.9m)

트레드매트 순면적^② : 트레드의 길이(1.9m)×폭(0.17m)

예상인발저항력^③ : $2 \times ② \times \sigma_v \times \tan \delta$ (σ_v :수직압력, δ :풍화토-타이어 마찰각)

극한인발저항력^④ : 시험에 의해 결정

인발저항력비^⑤ : $④ \div ③$

(극한인발저항력^⑥)/② : $④ \div ②$

다. 트레드매트와 타이어셀, 지오그리드와 지오셀 비교

그림 62에서 트레드매트 6×6(F)의 극한인발저항력은 타이어셀 2×7(F)보다 크게 측정되었다. 그리고 그림 62에서 지오그리드의 극한인발저항력은 지오셀보다 약간 크게 측정되었다. 종합하면 트레드매트 6×6(F)의 극한인발저항력이 가장 크게 측정되었고 다음이 타이어셀 2×7(F), 지오그리드, 지오셀 순이었다. 그러나 트레드매트 6×6(F)를 제외한 타이어셀 2×7(F), 지오그리드, 지오셀은 비슷한 값을 보였다.

표 30 보강재별 극한인발저항력

(단위: kN/m)

보강재종류	타이어셀 2×7(F)	트레드매트 3×6(F)	지오셀	지오그리드
극한인발저항력	73.6	85.19	58.2	58.48

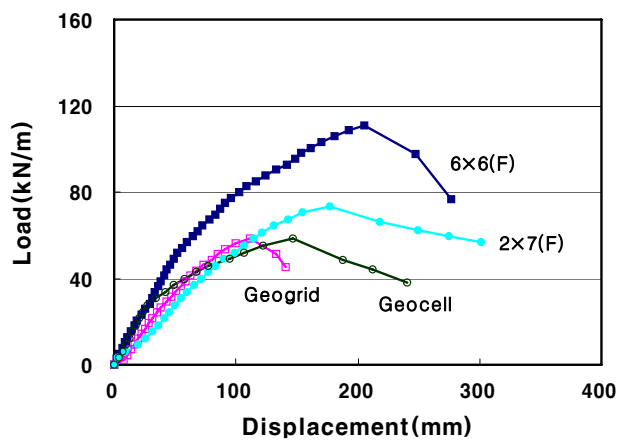


그림 62 하중-변위곡선(타이어셀과 트레드매트, 지오셀과 지오그리드 비교)

라. 성토고에 따른 인발시험 결과

그림 63과 그림 64는 타이어셀 2×7(F)와 트레드매트 6×6(F)의 성토고 변화에 따른 하중-변위곡선을 각각 나타내었다. 성토고가 증가함에 따라 수직하중이 증가하여 극한인발저항력이 증가하였다. 그러나 성토고 2.5, 3.2m 인 경우 트레드매트의 인장 파괴에 의하여 예상 극한인발저항력보다 작은 값을 보였다.

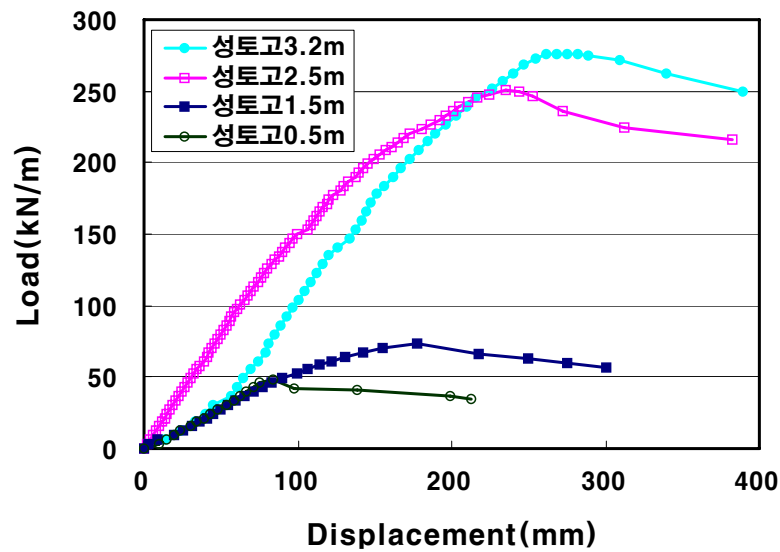


그림 63 하중-변위곡선(타이어셀 2×7(F))

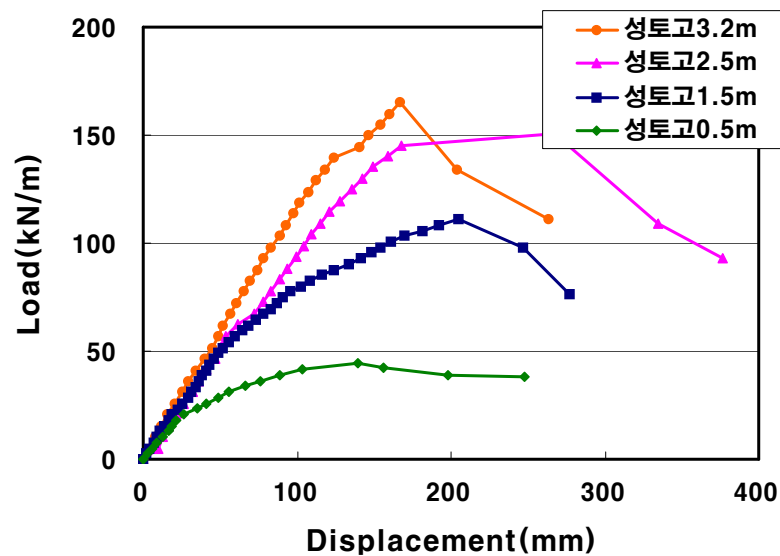


그림 64 하중-변위곡선(트레드매트 6×6(F))

6. 결론

페타이어의 재활용율을 높이기 위한 방안으로 페타이어를 지오그리드 형태로 제작한 트레드매트와 지오셀 형태로 제작한 타이어셀을 지반에 보강하였을 때 그 효과를 규명하기 위하여 트레드 개수, 유효길이, 연결방법, 성토고를 변수로 인발시험을 수행하였다. 수행한 결과를 분석하여 극한인발저항력을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 타이어셀을 $1 \times 7 \sim 4 \times 7$ 로 변화시키며 시험한 결과 전체면적 $1.28 \sim 5.12\text{m}^2$, 전체면적당 극한인발저항력은 $32.57 \sim 53.49\text{kN/m}^2$ 로 측정되었다.
- (2) 전체면적이 비슷할 경우 타이어셀은 지오셀보다 더 큰 극한인발저항력을 보여 지반보강재로서 사용가능 할 것으로 판단된다.
- (3) 로프로 연결한 타이어셀보다 볼트로 연결한 타이어셀이 더 큰 극한인발저항력을 나타내었다.
- (4) 트레드매트를 $3 \times 3 \sim 6 \times 6$ 으로 변화시키며 시험한 결과 트레드매트 순면적은 $1.68 \sim 2.84\text{m}^2$ 이었고, 이론에 의한 인발저항력은 $56.06 \sim 112.11\text{kN}$ 으로 계산되었고, 극한인발저항력은 $112.91 \sim 245.25\text{kN}$ 으로 이론값보다 2배 이상으로 측정되었다.
- (5) 트레드매트의 극한인발저항력은 트레드매트의 전체면적 또는 순면적과 인발 접촉부의 수동저항에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.
- (6) 트레드매트는 대체적으로 지오그리드보다 큰 값의 극한인발저항력을 보여 지반보강재로서 사용가능할 것으로 판단되었다.
- (7) 시험에 의한 극한인발저항력은 계산에 의한 예상인발저항력보다 최소 1.7배 이상 크게 측정되었으므로 실제 지반보강에 사용되는 경우 안전할 것으로

판단된다.

- (8) 전체면적당 극한 인발저항력은 트레드매트 6×6(F), 타이어셀 2×7(F), 지오그리드, 지오셀 순으로 나타났다.
- (9) 성토고가 증가할수록 수직하중이 증가하여 타이어셀과 트레드매트의 극한인발저항력은 증가하였다.

5절. 보강 성토사면

1. 보강 성토사면의 설계

가. 설계개요

FHWA지침(2001)의 설계기준에 의한 보강 성토사면(reinforced soil slope)의 설계과정을 그림 65와 같이 순서도(flow chart)로 나타내었다.

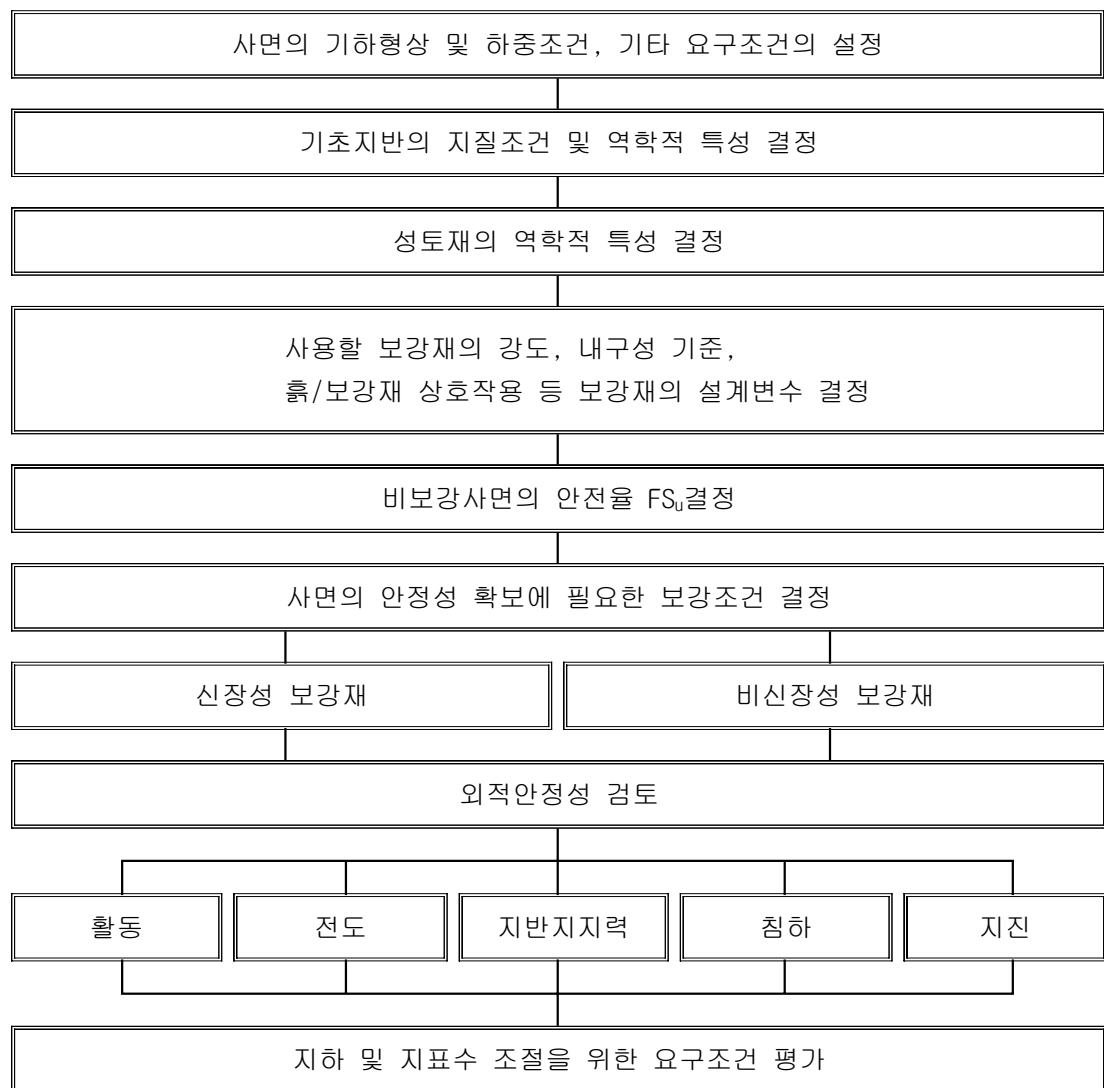


그림 65 보강 성토사면 설계 순서도(FHWA, 2001)

나. 설계조건

페타이어를 보강한 성토사면의 시험시공을 위한 설계 조건을 표 31에 정리하였다. 최소안전율은 FHWA지침(2001)에서 추천하는 안전율과 본 설계에서 사용한 안전율을 구분하여 나타내었다. 페타이어를 보강한 구조물의 시험시공은 국내에서는 최초로 시도하므로 사용안전율을 전체적으로 추천안전율보다 크게 정하였다. 외적안정의 세부검토항목인 지반지지력과 동적하중에 대한 안정은 본 설계에서는 고려하지 않았다.

그림 66에 보강 성토사면에서 발생할 수 있는 파괴형태를 나타내었다. 그리고 그림 68에 타이어셀과 트레드매트를 활용한 보강 성토사면을 시공하기 위한 개요도를 나타내었으며, 각각의 보강 성토사면에 대한 세부단면은 그림 73에 나타낼 것이다. 원지반(retained soil), 보강토체(reinforced soil)와 배수용 골재(drainage aggregate)의 특성은 3절의 현장재하시험과 4절의 현장인발시험에서 사용한 풍화토의 입도분포 및 단위중량, 마찰각을 고려하여 설계에 사용하기 위하여 가정한 값을 표 32에 정리하였다.

표 31 설계 조건

a. 구조물의 기하형상 및 상재하중 조건			
① 사면의 높이		3m	
② 사면의 경사각		45°(1 : 1)	
③ 상재하중		10kN/m ²	
b. 최소안전율(FHWA, 2001)			
		추천안전율 (FHWA, 2001)	사용안전율
① 외적안정 (external stability)	저면활동(sliding)	1.5	1.5
	저부활동(deep seated)	1.3	1.3
	지반지지력(bearing capacity)	1.3	-
	동적하중(dynamic loading)	1.1	해당 없음
② 복합안정(compound stability)		1.1	1.1
③ 내적안정 (internal slope stability)	파단(breaking)	$T_a \geq T_{\text{max}}$	$T_a \geq 1.5 T_{\text{max}}$
	인발(pullout)	1.5	1.5

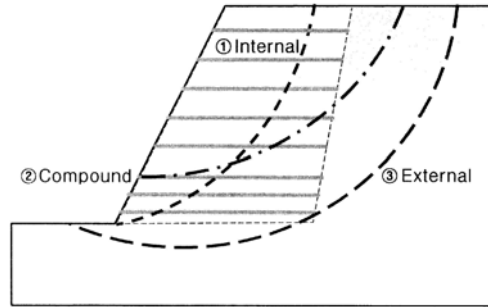


그림 66 보강 성토사면의 파괴형태(FHWA, 2001)

표 32 원지반, 보강토체와 배수용 골재의 특성

	$w_n(\%)$	$\gamma_d(kN/m^3)$	$\gamma_t(kN/m^3)$	$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	$c(kN/m^2)$	$\phi(^{\circ})$
원지반	9.7~12.3	16.68	18.51	20.12	0	35
보강토체	9.7~12.3	14.62	16.23	18.85	0	30
배수용 골재	0.1	19.55	19.57	21.94	0	45

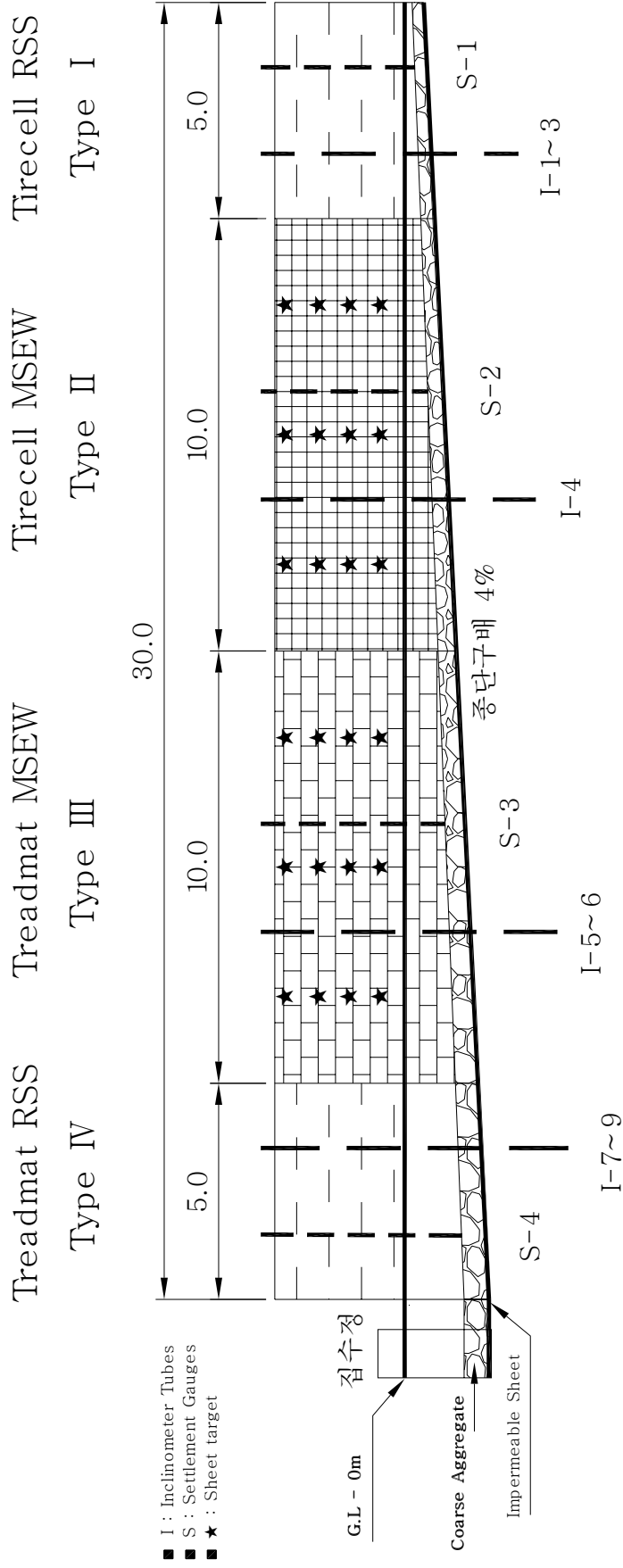


그림 68 페타이어를 활용한 보강토 옹벽 및 보강 성토사면 시공 개요(단위 : m)

다. 페타이어의 인장강도

타이어셀과 트레드매트의 인발저항력을 구하기 위하여 현장에서 일정한 높이의 성토하에 시험을 수행하였다. 시험결과는 앞의 4절의 현장인발시험(표 30, 그림 62)에 나타내었다. 표 30과 그림 62로부터 타이어셀 2×7(F)와 트레드매트 6×6(F)의 인발저항력으로부터 작은 값인 타이어셀 2×7(F)의 극한인발저항력 73.6kN/m를 페타이어를 활용한 성토구조물 설계에 적용하였다. 극한인발저항력으로부터 페타이어의 장기재료강도(T_{al})와 소요인장강도(T_a)를 결정하기 위한 식을 다음에 나타내었으며, 각각의 강도를 표 32에 나타내었다.

$$T_{al} = \frac{T_{ULT}}{RF} = \frac{T_{ULT}}{RF_{CR} \cdot RF_D \cdot RF_{ID}}$$

$$T_a = \frac{T_{al}}{FS}$$

여기서,

- RF : 강도 감소 계수(= $RF_{CR} \times RF_D \times RF_{ID}$)
 RF_{CR} : 크리프 감소 계수(폴리머 계열인 경우 1.6 ~ 5.0)
 RF_D : 내구성 감소 계수(토목섬유의 민감도에 따라 1.1 ~ 2.0)
 RF_{ID} : 시공시 손상에 대한 감소계수(덧채움재에 따라 1.1 ~ 3.0)
 FS_{UN} : 불확실성을 고려한 안전율
 T_{ULT} : 극한인장강도(ultimate tensile strength)
 T_{al} : 장기재료강도(long-term material strength)
 T_a : 소요인장강도(design long-term reinforcement tensile strength)

표 33 페타이어의 인장강도(T_a)

RF = 2.42			FS _{UN}	T _{ULT} (kN/m)	T _{al} (kN/m)	T _a (kN/m)
RF _{CR}	RF _D	RF _{ID}				
2.0	1.1	1.1	1.5	73.6	30.4	20.3

라. 보강재의 설계

(1) 보강재의 단위폭 당 전체 보강재 인장력(T_S)의 계산

보강재의 단위폭 당 전체 보강재 인장력을 계산하기 위한 식은 다음에 나타내었다.

$$T_S = (FS_R - FS_U) \frac{M_D}{R}$$

여기서,

T_S = 모든 층의 보강재가 활동면과 교차할 때 소요안전율 FS_R 을 확보하기 위하여 필요한 전체 보강재 인장력

FS_R = 사면 보강시 목표로 하는 소요안전율(1.5 사용)

FS_U = 무보강 성토사면의 안전율

M_D = 원호활동면의 중심에 대한 활동 모멘트

R = 원호활동면의 중심에 대한 T_S 의 모멘트 팔길이

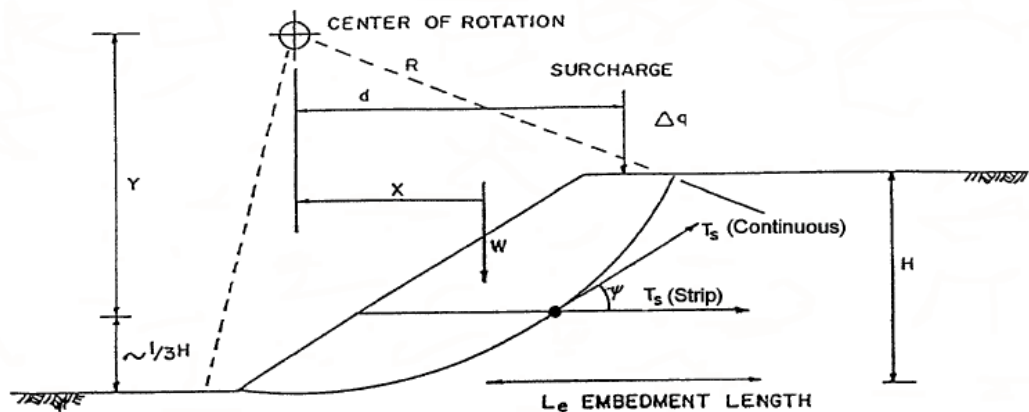


그림 69 보강재의 단위폭 당 총인장력(T_S) 계산 방법(FHWA, 2001)

그림 69에서,

○ 무보강 사면의 안전율 :

$$FS_U = \frac{\text{저항모멘트}(M_R)}{\text{활동모멘트}(M_D)} = \frac{\int_0^{L_{sp}} \tau_f \cdot R \cdot dL}{W \cdot x + \Delta q \cdot d}$$

여기서,

W : 토체의 무게

L_{SP} : 활동면의 길이

Δq : 상재하중

τ_f : 흙의 전단강도

○ 보강 사면의 안전율

$$FS_R = FS_U + \frac{T_S \cdot D}{M_D}$$

여기서,

T_S : 모든 층의 보강재가 활동면과 교차할 때 소요안전율 FS_R 을 확보하기 위하여 필요한 전체 보강재 인장력

D : 원호활동면의 중심에 대한 T_S 의 모멘트 팔길이
 = 쉬트형(sheet type, continuous) 보강재의 경우 R
 = 띠형(strip type, discrete) 보강재의 경우 Y

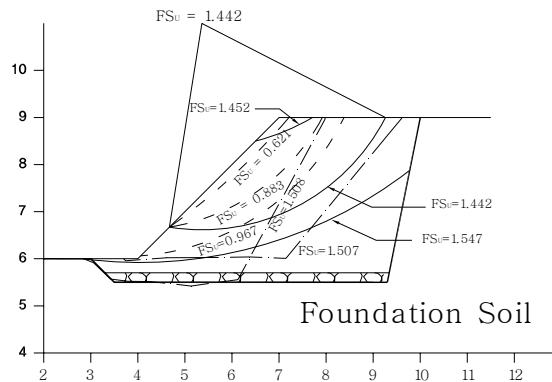


그림 70 무보강 성토사면의 안정해석

최소안전율($FS=0.621$)일 때의 파괴면과 최대 전체 보강재 인장력(T_{S-MAX})의 위치는 관계가 없으므로, 가능한 모든 활동파괴면에 대해서 전체 보강재 인장력(T_S)을 계산한 후, 가장 큰 전체 보강재 인장력(T_S)을 최대 전체 보강재 인장력(T_{S-MAX})으로 결정해야 한다. 그림 69에 PCSTABL5M program을 사용한 무보강 성토사면의 안정해석 결과를 나타내었다. 안정해석 결과로부터 안전율이 1.5

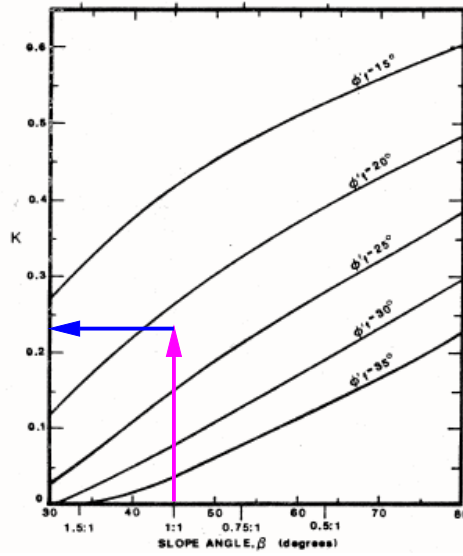
보다 작은 원호활동면에서의 활동모멘트(M_D)와 반지름(R)을 정리한 후 위의 식을 이용하여 전체 보강재 인장력(T_S)을 계산한 결과를 표 33에 나타내었다.

표 34에서 $FS_U = 0.967$ 일 때(음영처리 부분) 최대 전체 보강재인장력(T_{S-MAX})이 발생하는 것으로 나타났으며, 그림 69에 $FS_U = 0.967$ 일 때의 원호활동면을 표시하였다.

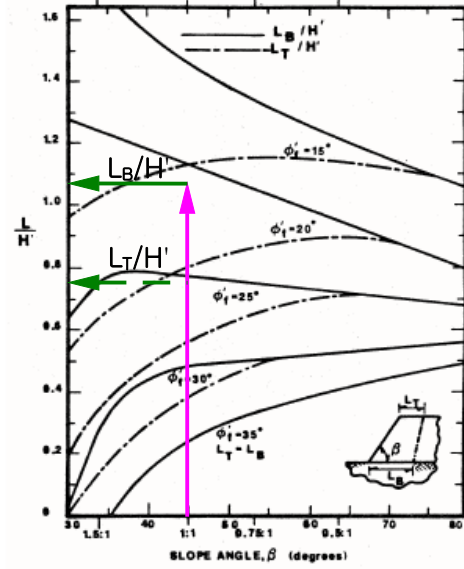
표 34 단위폭 당 전체 보강재 인장력(T_S)의 계산

FS Rank	FS_U	C_X	C_Y	R	M_D	T_S
1	0.621	-3.360	17.973	13.865	76.96	4.88
2	0.685	-25.983	47.133	50.556	67.78	1.09
3	0.772	-30.350	57.543	61.610	324.32	3.83
4	0.816	4.856	9.954	2.708	29.41	7.43
5	0.883	3.961	11.091	4.477	108.22	14.91
6	0.917	3.429	13.742	6.349	28.08	2.58
7	0.967	3.671	11.275	5.229	216.53	22.07
8	1.030	3.742	14.452	6.560	5.87	0.42
9	1.038	0.593	18.172	12.599	530.34	19.45
10	1.082	3.216	10.481	4.760	171.98	15.10
11	1.127	5.082	9.740	3.098	106.74	12.85
12	1.129	6.110	9.185	1.313	9.56	2.70
13	1.172	2.967	14.025	8.139	396.73	15.99
14	1.209	4.616	9.954	4.126	257.76	18.18
15	1.265	3.909	9.869	4.222	210.87	11.74
16	1.269	3.910	12.213	6.439	422.88	15.17
17	1.272	4.986	9.230	3.302	192.57	13.30
18	1.349	6.215	9.558	1.699	16.98	1.51
19	1.393	6.656	9.208	0.725	1.46	0.22
20	1.409	5.584	9.091	2.588	104.64	3.68
21	1.430	4.102	10.133	4.542	278.10	4.29
22	1.442	5.360	10.997	4.382	213.95	2.83
23	1.452	5.383	12.917	4.556	6.83	0.07

(2) Chart를 사용한 최대 전체 보강재 인장력(T_{S-MAX})의 계산



(a) 소요인장력 계수, K



(b) 보강재 길이의 비, L/H

그림 71 설계도표(Schmertmann 등, 1987)

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi_r}{FS_R} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{\tan 30}{1.5} \right) = 21^\circ$$

여기서,

ϕ_r = 보강토체의 내부마찰각(표 31 참고)

FS_R = 사면 보강시 목표로 하는 소요안전율(1.5 사용)

$\phi_f = 21^\circ$ 이므로 그림 71 (a)로부터 소요인장력 계수(K)를 찾아서 아래 식에 대입하면 최대 전체 보강재 인장력(T_{S-MAX})을 구할 수 있다.

$$T_{S-MAX} = 0.5 \cdot K \cdot \gamma_r \cdot (H')^2 = 0.5 \times 0.25 \times 16.23 \times 3^2 = 18.26 kN/m$$

여기서,

$$\begin{aligned}
T_{S-MAX} &= \text{최대 전체 보강재 인장력(kN/m)} \\
K &= \text{소요인장력 계수} \\
\gamma_r &= \text{보강토체의 습윤단위중량(kN/m}^3\text{)} \\
H' &= \text{환산높이}(= H + q/\gamma_r) \\
q &= \text{상재하중}
\end{aligned}$$

표 34에서 구한 $T_{S-MAX} = 22.07\text{kN/m}$ 이고, 그림 71 (a)로부터 구한 $T_{S-MAX} = 18.26\text{kN/m}$ 이므로 최대 전체 보강재인장력(T_{S-MAX})은 안전측의 값으로 18.26kN/m 로 결정하였다.

(3) 보강재 수직간격(S_V)의 계산

FHWA지침(2001)에서는 사면의 높이가 6m이하의 경우에 보강재의 간격을 일정한 것으로 가정하고 있으며, 이때의 수직간격을 최소 0.4m, 최대 0.8m가 되도록 권장하고 있다. 또한 각층에서의 보강재가 받는 인장력은 균등하게 분포한다고 가정하였다.

Koerner(2005)에 의한 보강재의 수직간격을 결정하는 식을 다음에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
S_V &= \frac{(T_{ULT}/RF)/FS}{\sigma_H} \\
&= \frac{T_{al}/FS}{K_a \cdot \gamma \cdot z_{max} + K_a \cdot q} = \frac{T_a}{K_a \cdot \gamma \cdot z_{max}} \\
&= \frac{20.3}{5.41z_{max}} = \frac{3.75}{z_{max}}
\end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
T_{ULT} &= 73.6\text{kN/m, 극한인장강도} \\
RF &= 2.42, \text{강도감소계수의 곱}(RF_{CR}=2.0, RF_D=1.1, RF_{ID}=1.1) \\
FS_{UN} &= 1.5, \text{불확실성을 고려한 안전율(보강토 옹벽 - 1.5, 보강 성토사면-1.0)} \\
T_{al} &= 30.4\text{kN/m, 장기재료강도} \\
T_a &= 20.3\text{kN/m, 소요인장강도}
\end{aligned}$$

따라서 수직간격 S_V 는

$$\therefore S_V = \frac{3.75}{z_{\max}} = \frac{3.75}{3} = 1.25m > 0.8m$$

계산된 보강재의 수직간격이 0.8m보다 크다. 따라서 FHWA지침(2001)에서 권장한 수직간격 범위(0.4m ~ 0.8m), 법면에서의 사면침식 및 국부파괴의 가능성, 시공성 및 경제성 등을 고려하여 보강재의 간격(S_V)을 0.8m로 하면, 보강층의 수(N)는 $3m/0.8m = 3.75layers \approx 4layers$ 가 된다. 따라서 각 층별 보강재의 소요인장강도는

$$T_{\max} = \frac{T_{S-MAX}}{N} = \frac{22.07}{4} = 5.52kN/m$$

그리고 표 32에서 페타이어의 소요인장강도(T_a)가 20.3kN/m이므로 보강재의 파단에 대해서 검토하면,

$$\frac{T_a}{T_{\max}} = \frac{20.3}{5.52} = 3.68 > 1.5(FS_{\text{breaking}}) \quad - \quad \text{O.K}$$

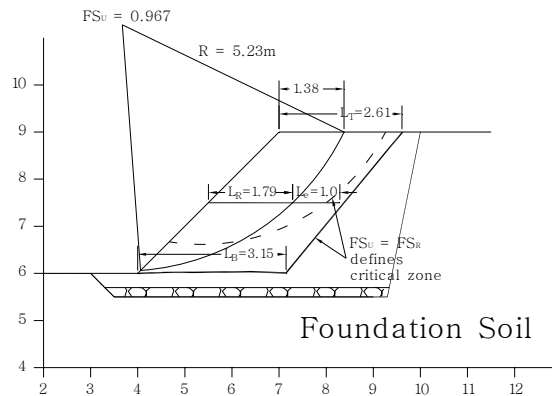


그림 72 $FS_U=FS_R$ 인 임계영역(critical zone)의 결정

(4) 보강재의 설계길이(L) 계산

보강재의 설계길이는 PCSTABL5M에 의하여 구한 임계영역(critical zone)으로부터 보강재의 길이를 구하는 방법과 활동파괴면 내부의 길이(L_R)와 활동파괴면 외부의 길이(L_E)를 각각 계산한 후 합하여 구할 수 있는 방법 2가지가 있다.

(가) 임계영역에 의한 방법

그림 72에서 $L_B = 3.15m$, $L_T = 2.61m$ 인 것을 알 수 있다.

이 값은 그림 70 (b)를 이용하여 확인할 수 있다. $1H : 1V$, $\phi_f = 21^\circ$ 일 때의 $L_B/H' = 1.07$ 이고, $L_T/H' = 0.76$ 이므로 사면을 보강하기 위해 필요한 보강재의 설계길이는 $L_B = 3.21m$ 와 $L_T = 2.28m$ 이다. 그림 72에서 구한 값과 비교하여 각각의 최대값인 $L_B = 3.21m$ 와 $L_T = 2.61m$ 로 하였다. 즉, 임계영역에 의해 구해진 설계길이는 사면을 보강하기 위해 필요한 최대한계 값이라고 할 수 있다.

(나) 계산에 의한 방법

인발에 저항하기 위한 최소 유효길이는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$L_e = \frac{T_{\max} \times FS_{\text{pull}}}{F^* \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot R_c \cdot C} = 0.74m$$

여기서,

L_e = 인발에 대한 보강재 유효길이(m)

$T_{\max}$ = 각 층별 보강재의 소요인장강도(kN/m)

FS_{pull} = 보강재의 인발에 대한 안전율(입상토 ≥ 1.5 , 점성토 ≥ 2.0 사용)

F^* = 보강재의 인발저항 계수 (토목섬유 보강재의 경우 $\frac{2}{3} \tan \phi$)

α = 형상보정계수[scale effect correction factor] (신장성 보강재의 길이에 따른 응력의 비선형 변화를 고려하기 위한 계수, 보통 비신장성 보강재의 경우 $\alpha = 1.0$, 토목섬유 보강재의 경우 $\alpha = 0.6 \sim 1.0$, 지오그리드의 경우 $\alpha = 0.8$)

σ'_v = 각 층별 보강재 위에 작용하는 유효수직응력

R_c = 보강재의 포설비율(= 보강재 폭/수평간격, 지오그리드의 경우 1.0)

C = 보강재의 인발저항면적(= 상·하면을 의미; 띠형, 그리드형, 쉬트형의 경우 $C=2$)

표 33으로부터 가장 위험한 원호활동면이 $FS_U = 0.967$ 일 때이며, 이 때의 원호활동면은 그림 72에 나타내었다. 그림 72에서 원호활동면과 사면까지의 최대거리 즉, 활동파괴면 내부의 길이(L_R)는 1.79m이다. 따라서 사면을 보강하기 위해 필요한 보강재의 설계길이(L)는 활동파괴면의 내부길이($L_R=1.79m$)와 외부길

이($L_c=1.0m$)를 더한 2.79m이며, 이 길이는 사면을 보강을 위해 필요한 최소한계 값이다.

페타이어를 보강목적으로 활용하기 위해 타이어셀과 트레드매트로 제작하는 경우 타이어셀의 길이는 0.8m부터 0.8m씩 증가하여 1.6m, 2.4m, 3.2m, ... 가 되고, 트레드매트의 길이는 1.9m부터 1.7m씩 증가하여 3.6m, 5.3m, 7.0m, ... 가 된다. 따라서 길이가 3.2m의 타이어셀, 3.6m의 트레드매트를 보강하게 되면 위에서 구한 설계길이를 모두 만족하게 된다.

그림 71에 위에서 구한 보강재의 수직간격 및 길이에 따라 타이어셀과 트레드매트를 보강하기 위한 사면의 단면을 나타내었다. 그림에서 I는 경사계이며, S는 침하계를 의미한다. I와 S의 뒤의 숫자는 설치순서를 의미한다.

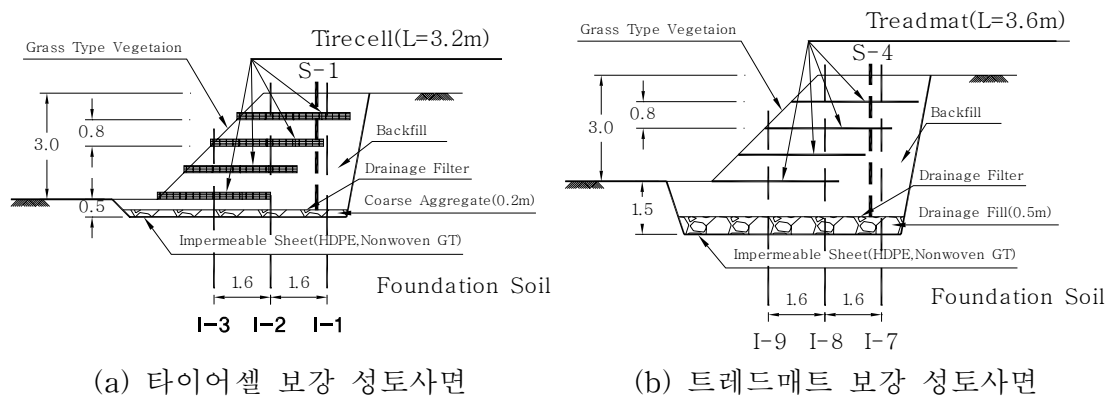


그림 73 보강 성토사면 단면도(단위 : m)

2. 보강 성토사면의 안정해석

가. 활동(sliding)에 대한 안정

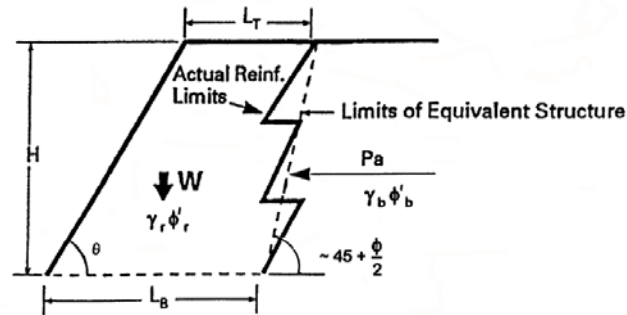


그림 74 활동에 대한 안정성 해석(FHWA, 2001)

활동에 대한 저항력 = $FS_{sliding} \times$ 활동력

$$(W + P_a \sin \phi_b) \tan \phi_{min} = FS_{sliding} \cdot P_a \cdot \cos \phi_b$$

$$W = \frac{1}{2} (L^2 \cdot \gamma_r \cdot \tan \theta_r) \quad \text{for } L < H$$

$$W = \left[LH - \frac{H^2}{(2 \tan \theta)} \right] \gamma_r \quad \text{for } L > H$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma_b \cdot H^2 \cdot K_a$$

여기서,

L = 고려중인 영역의 최하단 보강재의 길이

H = 사면의 높이

FS = 활동에 대한 안전율(보통 > 1.3)

P_a = 주동토압

ϕ_{min} = 흙/보강재 마찰각과 기초지반의 마찰각 중 작은 값

θ = 사면의 경사각

γ_r & γ_b = 보강토체와 배면토의 습윤단위중량

ϕ_b = 배면토의 내부마찰각

위의 식으로부터 계산하면

$$W = \left[3.2 \times 3 - \frac{3^2}{(2 \tan 45^\circ)} \right] \times 16.23 = 82.77 \quad \text{for } L < H$$

$$P_a = \frac{1}{2} \times 18.51 \times 3^2 \times \tan^2 \left(45 - \frac{35}{2} \right) = 22.57$$

$$\therefore FS_{sliding} = \frac{(W + P_a \sin \phi_b) \tan \phi_{\min}}{P_a \cdot \cos \phi_b} = \frac{(82.77 + 22.57 \times \sin 35) \tan 30}{(22.57 \times \cos 35)} = 2.99 > 1.5$$

- O.K

나. 전반적(deep seated global) 안정

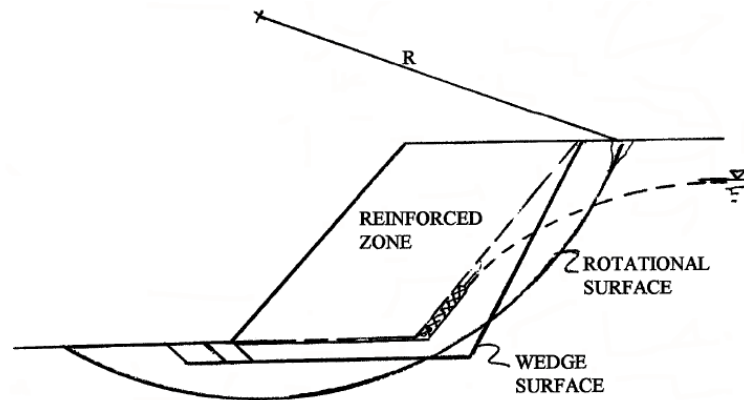


그림 75 전반적(deep seated global) 안정성 해석(FHWA, 2001)

보강 성토사면의 deep seated global stability에 대한 안정성 검토를 위해 slope/w 프로그램을 사용하여 보강 성토사면을 해석하였다. 타이어셀과 트레드 매트와 해석결과 bishop method와 morgenstern and price's method는 1.5보다 크게 나왔으나 ordinary method와 janbu method는 1.5보다 작게 나왔다. 원호활동에 의한 파괴형상은 모든 방법에서 사면저부파괴를 보이고 있다.

또한 트레드매트가 타이어셀보다 설계길이가 0.4m가 더 길기 때문에 안전율이 약 6 ~ 7%정도 더 컸다.

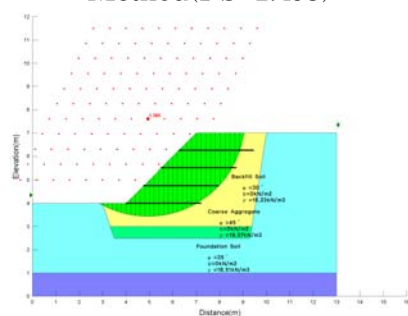
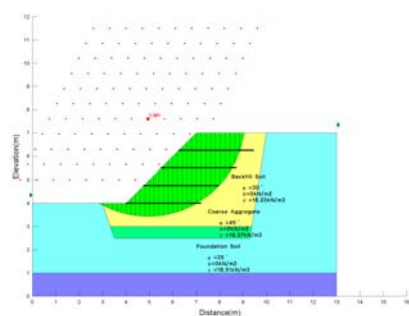
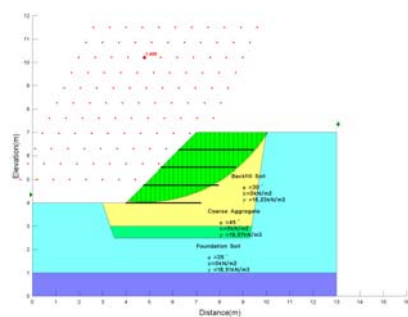
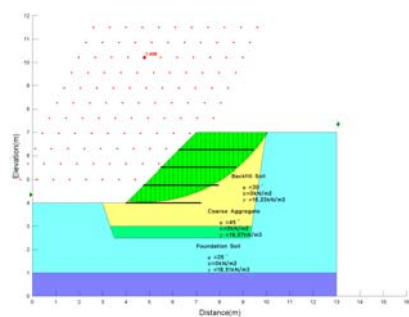


그림 76 타이어 셀(L=3.2m)의 deep seated global안정 해석 결과(slope/w)

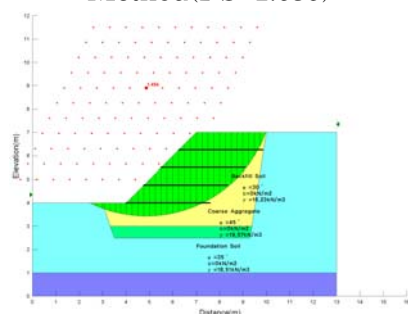
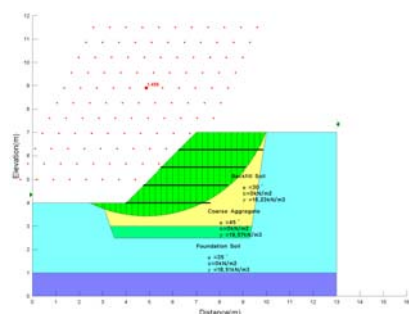
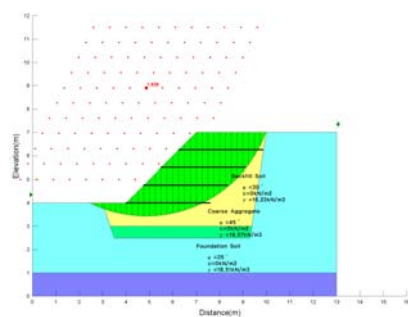
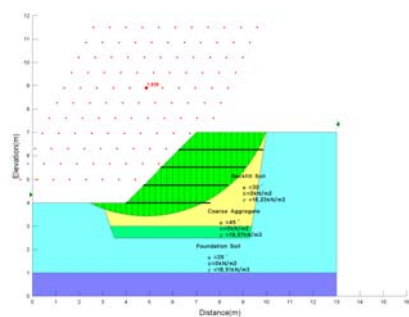


그림 77 트레드매트(L=3.6m)의 deep seated global안정 해석 결과(slope/w)

다. 지반지지력에 대한 안정

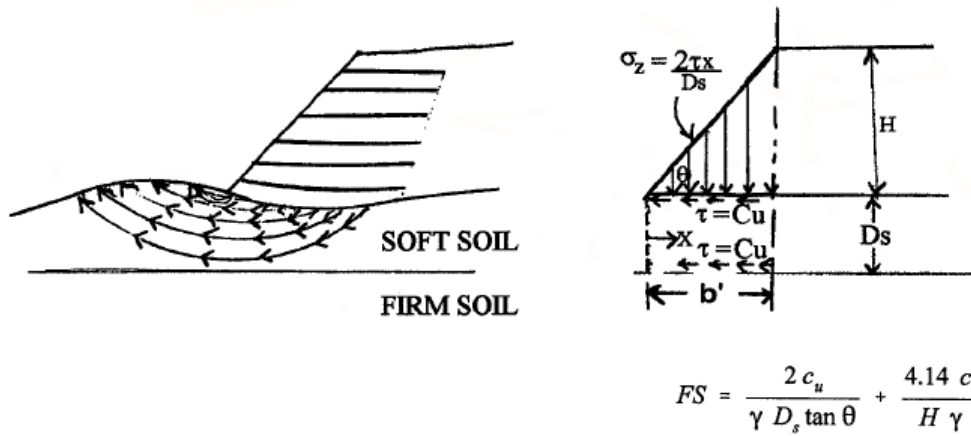


그림 78 지지력(local bearing failure)에 대한 안정성 해석(FHWA, 2001)

지반지지력(local bearing failure at the toe or lateral squeeze)에 대한 안정은 다음식으로 구할 수 있는데, 본 현장에서는 연약지반이 없는 것으로 고려하고 지지력에 대한 안정성 검토는 하지 않았다.

$$FS_{squeezing} = \frac{2c_u}{\gamma \cdot D_s \cdot \tan \theta} + \frac{4.14c_u}{H \cdot \gamma} \geq 1.3$$

여기서,

- θ = 사면의 경사
- γ = 보강토의 습윤단위중량
- D_s = 사면 아래의 연약지반의 깊이
- H = 사면의 높이
- c_u = 연약지반의 비배수강도

※ Note : 지반침하와 내진에 대한 안정성 검토는 생략.

라. 추가상재하중에 대한 검토

추가상재하중 10kN/m²에 대한 안정성 검토 결과 타이어셀 보강사면과 트레드 매트 보강사면 모두 1.30 이상으로 나타나 안정한 것으로 나타났다.

3. 보강 성토사면의 시공

가. 시공개요

그림 79에서 볼 수 있는 자연사면이 있는 곳에 그림 68에 나타낸 시공 개요도와 그림 73에 나타낸 단면도와 같이 보강 성토사면을 시공하였다. 그림 80에 보강 성토사면 시공순서를 순서도(flow chart)로 정리하여 나타내었다.



그림 79 시공전의 현장 전경

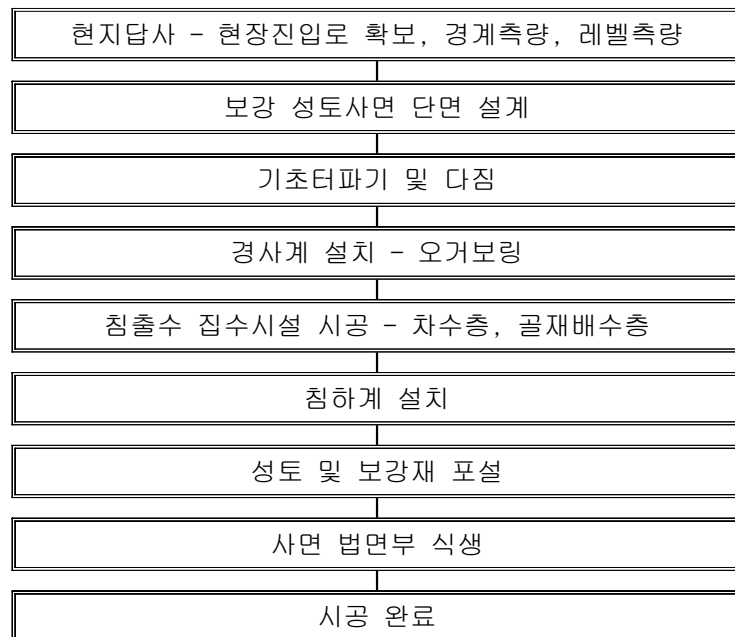


그림 80 보강 성토사면 시공 순서도

나. 기초터파기

그림 68에 나타난 것과 같이 침출수 집수시설을 시공하기 위하여 4%의 종단 구배로 기초터파기를 하였다. 그림 81에 기초터파기를 하고 있는 모습을 나타내었다.



(a) 기초터파기

(b) 기초 다짐작업

그림 81 기초터파기

다. 경사계 설치

그림 82에 경사계를 설치하는 모습을 나타내었다. 사면의 거동을 계측하기 위하여 타이어셀 보강 성토사면과 트레드매트 보강 성토사면에 각각 경사계 3지점을 설치하였다. 경사계의 설치위치는 그림 68과 그림 73에 나타내었다. 기초바닥면으로부터 2m깊이까지 오거보링을 한 후, 경사계 케이스를 설치하고 그라우팅을 하였다.



a) 오거보링

(b) 그라우팅

그림 82 경사계 설치

라. 침출수 집수시설 시공

(1) 차수층 시공

그림 83에 차수층 시공하는 모습을 나타내었다. 페타이어로부터 나오는 침출수가 외부로 흘러나가지 않고 집수정으로 모이도록 하기 위해 바닥면의 종단구배가 4%가 되도록 하였으며, 바닥면 위에 차수막을 포설하였다. 차수막은 두께 1.5mm, 길이 7m의 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 차수막을 사용하였다. 차수막의 이음매에서의 접합방법은 30cm 중첩되도록 한 후, 실리콘과 테이프를 이용하여 접합하였다. 시공중 차수막이 손상되는 것을 방지하기 위해 두께 2.0mm, 길이 3m의 부직포를 포설하였다. 이음매에서의 접합방법은 부직포를 30cm 중첩되도록 한 후, 열접합을 이용하였다.



(a) HDPE 포설



(b) HDPE 이음매 접합



(c) 부직포 포설



(d) 부직포 이음매 열접합

그림 83 차수층 시공

(2) 배수층 시공

그림 84에는 배수층을 시공하는 모습을 나타내었다. 하부에 모인 침출수가 집수정에 원활하게 배수가 되도록 쇄석 골재를 사용하였다. 종단구배에 의해 물이 타이어셀 보강 성토사면에서 트레드매트 보강 성토사면 방향으로 흐르면서 토사의 유입에 의한 배수층이 막힘을 고려하여 그림 73에 나타낸것과 같이 배수층의 두께는 타이어셀 보강 성토사면에서 0.2m, 트레드매트 보강 성토사면에서 0.5m가 되도록 하였다. 배수용 골재를 포설한 후 토사의 유입을 막기위해 부직포를 배수층 위에 깔아 필터 및 재료분리기능을 하도록 하였다. 이음매의 접합은 열접합을 사용하였다.



(a) 배수용 골재 포설



(b) 재료분리용 부직포 포설

그림 84 배수층 설치

(3) 집수정 설치

그림 85에는 차수층과 배수층에 의해 한 곳에 모인 침출수를 채수하기 위해 집수정을 설치하는 모습과 설치 후의 모습을 나타내었다.



(a) 집수정 바닥 드릴링



(b) 집수정 거치



(c) 집수정 매설



(d) 집수정 설치 완료

그림 85 집수정 설치

마. 침하계 설치

기초지반의 침하량을 계측하기 위해 타이어셀 보강 성토사면과 트레드매트 보강 성토사면의 각 1지점에 침하계를 설치하였다. 침하계의 설치 위치는 그림 73에 나타내었으며, 침하계를 설치하는 모습은 그림 86에 나타내었다.



(a) 침하계 설치



(b) 수평 확인

그림 86 침하계 설치

바. 보강 성토사면의 시공

(1) 타이어셀 보강 성토사면

그림 4에서 보였던 과정과 같은 방법으로 타이어셀을 제작한 후, 그림 73과 같이 설계하였던 성토고에서 타이어셀을 보강하기 위하여 백호를 이용하여 운반 후 포설하였다. 포설할 때에는 경사계 및 침하계의 손상에 유의하면서 포설하였다. 그리고 풍화토를 타이어셀 안에 채워 넣은 후, 9.8kN 진동롤러를 이용하여 다짐을 하였고, 흙이 충분히 채워지지 않은 타이어셀은 인력으로 흙을 채웠다.

타이어셀 보강토 옹벽 또는 타이어셀 보강 성토사면의 경우 타이어셀 안에 뒷채움 재료가 내부에 완전히 채워지지 않을 수 있으나 타이어는 강성재료가 아니고 연성재료 즉, 유연한 재료이다. 따라서 ‘타이어셀을 활용한 보강토 옹벽’ 시방서 p. 11에서 규정한 한 층 시공두께인 20cm를 넘지 않도록 성토 후 다짐도가 실내 다짐시험값의 95% 이상으로 다짐을 하면 뒷채움 재료가 채워지지 않아 생긴 공간을 타이어와 새로운 층의 뒷채움 재료에 의해 다짐시 채워지는 것으로 시험시공에서 확인되었다.



(a) 타이어셀 제작



(b) 타이어셀 포설



(c) 성토



(d) 다짐

그림 87 타이어셀 보강 성토사면의 시공

(2) 트레드매트 보강 성토사면

트레드매트 또한 타이어셀과 같이 그림 4에서 보였던 과정과 같은 방법으로 트레드매트를 제작한 후, 그림 73과 같이 설계하였던 성토고에서 트레드매트를 보강하기 위하여 백호를 이용하여 운반 후 포설하였다. 포설할 때에는 경사계 및 침하계의 손상에 유의하면서 포설하였다. 그리고 성토를 9.8kN 진동롤러를 이용하여 다짐을 하였고, 한 층의 성토 높이는 20cm로 하였다.



(a) 트레드매트 제작



(b) 트레드매트 운반



(c) 트레드매트 포설



(d) 성토

그림 88 트레드매트 보강 성토사면의 시공

‘타이어셀을 활용한 보강토 옹벽’ 지방서의 p. 6에 마모와 손상에 따른 타이어 등급을 분류하였으며, 지방서 그림 4에 등급에 따른 타이어의 사진을 나타내었다. 본 시험 시공에서 사용된 타이어는 그림 4에서 A 또는 B등급의 타이어이며, 백호를 이용한 운반 및 포설을 한 결과 타이어셀 및 트레드매트의 손상이 없는 것으로 확인되었다. 또한 트레드를 띠형(strip)으로 사용되는 경우 또한 운반 및 포설을 인력으로 할 수 있으므로 손상이 거의 없을 것으로 판단된다. 따라서 B급 이상의 타이어를 사용한다면 보강토 옹벽의 시공에 사용되는 타이어셀, 트레드 및 트레드매트의 품질은 적정수준이상 일 것으로 판단된다.

사. 사면 범면부 식생

사면 범면부에서 침식에 의한 세굴 및 국부파괴를 방지하기 위하여 환경친화적인 자연분해성 섬유를 이용한 녹화공법으로 비탈면에 잔디를 식생하였다. 그림 89에 잔디를 식생하는 과정과 2달이 지난 후, 비탈면이 녹화된 상태를 비교하여 나타내었다.



(a) 타이어셀 보강 성토사면 식생 중(5월)



(b) 타이어셀 보강 성토사면 식생 후(7월)



(c) 트레드매트 보강 성토사면 식생 중(5월)



(d) 트레드매트 보강 성토사면 식생 후(7월)

그림 89 사면 범면부 식생

4. 계측

가. 경사계

그림 73의 위치에 설치된 경사계를 계측하여 사면의 거동을 파악하였다. 그림 90에 나타난 바와 같이 경사계의 좌표축의 방향은 사면전면과 배면을 잇는 축을 X-axis, X-axis에 직교하는 축을 Y-axis로 정하였다. 각각의 축의 +, -방향은 그림에 나타내었다. 그림 91에 경사계를 계측하는 모습을 나타내었고, 그림 92와 그림 93에 타이어셀, 트레드매트의 계측데이터를 설치위치에 따라 각각 그래프로 정리하였다. 측정센서의 길이로 인해 사면 상단의 지표면으로부터 -0.5m 깊이에서 경사계 바닥면까지 계측을 하였다.

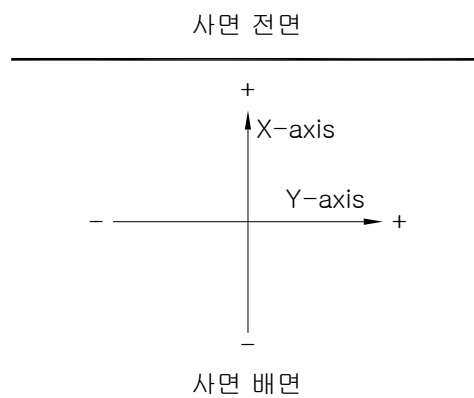


그림 90 경사계 좌표축 방향



(a)



(b)

그림 91 경사계 계측

아래 그림의 계측 결과를 보면 사면의 모든 위치에서 10mm 이내의 변위가 측정되었으며, 사면의 거동은 추후 지속적인 계측을 통해서 확인할 예정이다.

(1) 타이어셀

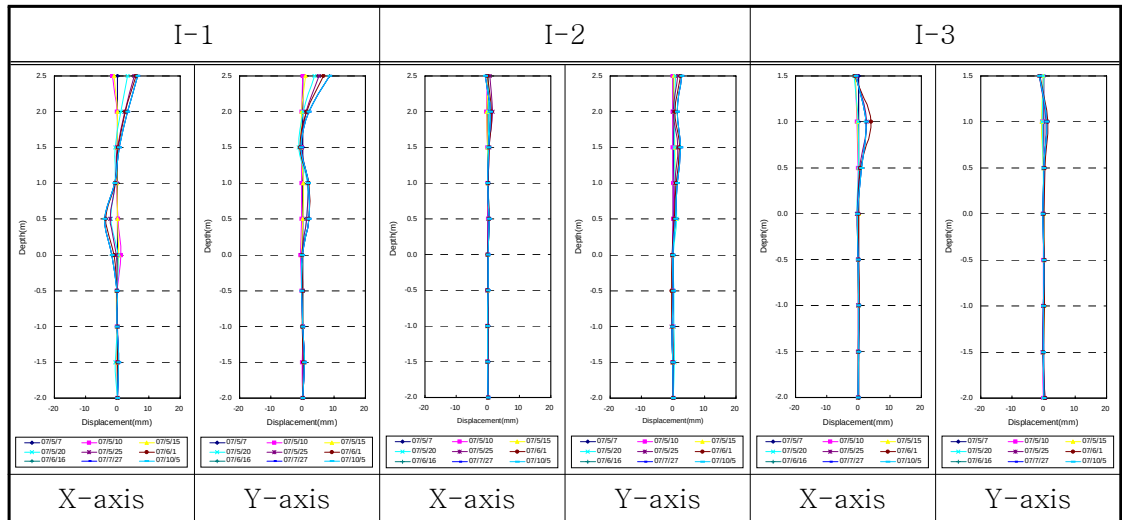


그림 92 타이어셀 보강 성토사면의 변위

(2) 트레드매트

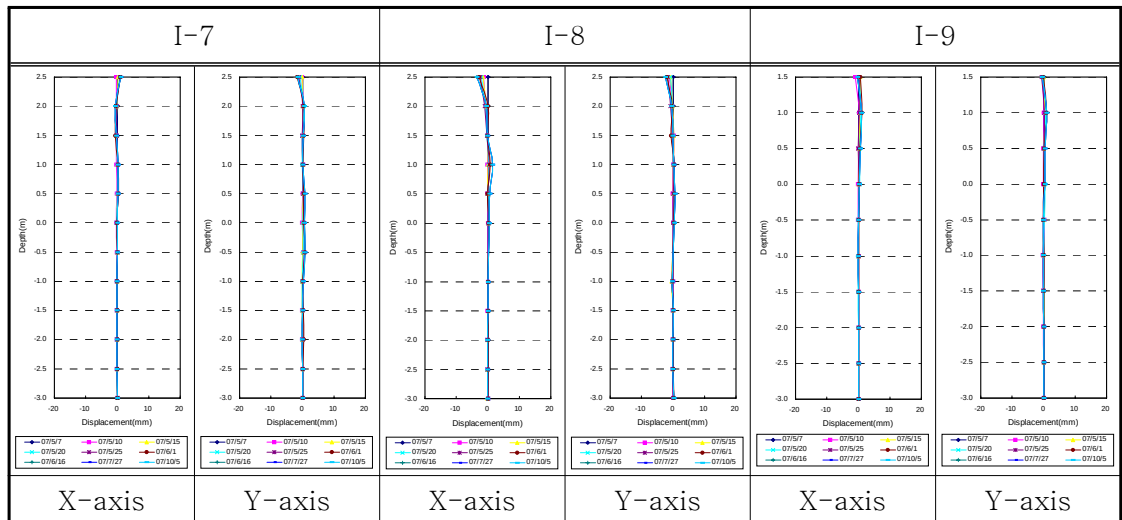


그림 93 트레드매트 보강 성토사면의 변위

나. 침하계

그림 73의 위치에 설치된 침하계를 계측하여 기초지반에서의 침하를 확인하였다. 그림 94에 타이어셀 보강 성토사면과 트레드매트 보강 성토사면의 기초지반의 침하량을 나타내었다. 그림에서 F-1, S-1은 타이어셀 보강 성토사면에서의 성토고와 침하량의 변화를 각각 나타내며, F-4, S-4는 트레드매트 보강 성토사면에서의 성토고와 침하량의 변화를 각각 나타낸다. 10일동안 성토고가 변화하면서 침하량 또한 크게 융기, 침하를 반복하는 것을 볼 수 있다. 이것은 시공 중 시공장비(백호 및 진동롤러)에 의한 영향으로 보이며 시공이 종료된 후에는 수렴을 하고 있는 것으로 보인다. 따라서 기초지반에서의 잔류침하량은 추후 정기적인 계측을 통하여 확인할 예정이다.

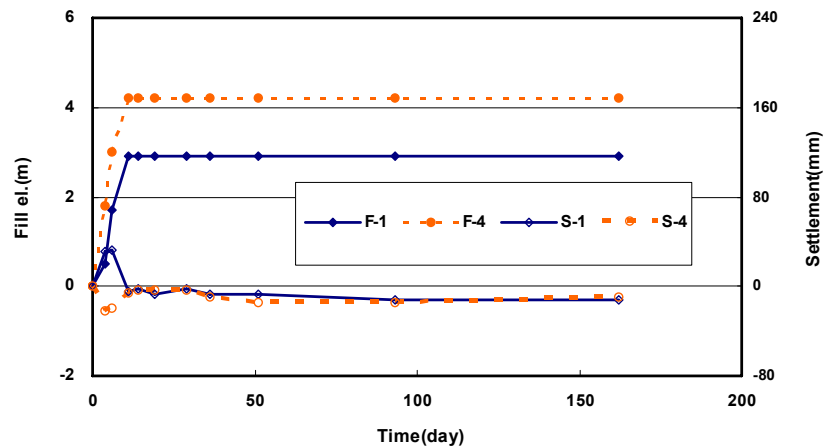


그림 94 보강 성토사면의 기초지반 침하량(mm)

5. 결 론

페타이어를 지반보강 목적으로 활용하기 위하여 FHWA지침(2001)의 설계기준에 의해 페타이어가 보강된 사면의 설계를 하고 설계한 보강 성토사면의 안정성 해석을 수행하였다. 또한 설계한 단면을 바탕으로 시험시공을 수행한 후 보강 성토사면의 거동을 계측하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 높이 3m, 경사각 45° (1 : 1)의 사면을 보강하기 위해 필요한 보강재의 수직 간격은 1.44m, 설계길이는 최소 2.53m에서 최대 3.21m(가장 하부층)로 나타났다. 그러나 사면 법면에서의 침식, 국부파괴 가능성, 시공성 및 경제성을 고려하여 수직간격은 0.8m로 정하였다. 그리고 보강재의 설계길이는 페타이어의 특성에 의해 타이어셀의 경우 3.2m, 트레드매트의 경우에는 3.6m로 결정하였다.

2. 앞에서 정해진 보강재의 수직간격 및 설계길이로 보강된 성토사면은 활동 및 전반적 안정에 대해 최소안전율을 만족하였다.

3. 앞에서 설계한 단면으로 페타이어를 보강한 성토사면을 현장 시험시공하였다. 또한 페타이어에 의한 침출수의 영향을 분석하기 위하여 차수층, 배수층 및 집수시설을 시공하였다. 그리고 경사계 및 침하계를 설치하여 보강 성토사면의 변위와 기초지반의 침하를 확인하였다.

4. 경사계를 계측한 결과 모든 위치에서 10mm이내의 변위를 보였다. 또한 기초지반에서의 잔류침하를 확인하기 위한 침하계를 계측한 결과 사면의 시공시 융기·침하를 반복하였으나, 시공 후 침하량이 수렴 중인 것으로 보였다. 추후 지속적인 계측을 통하여 보강 성토사면의 거동과 기초지반의 잔류침하량을 확인할 예정이다.

6절. 보강토 옹벽

1. 보강토 옹벽의 설계

가. 설계 개요

FHWA지침(2001)의 설계기준에 의한 보강토 옹벽(mechanically stability earth wall, MSEW)의 설계과정을 그림 95과 같이 순서도(flow chart)로 나타내었다.

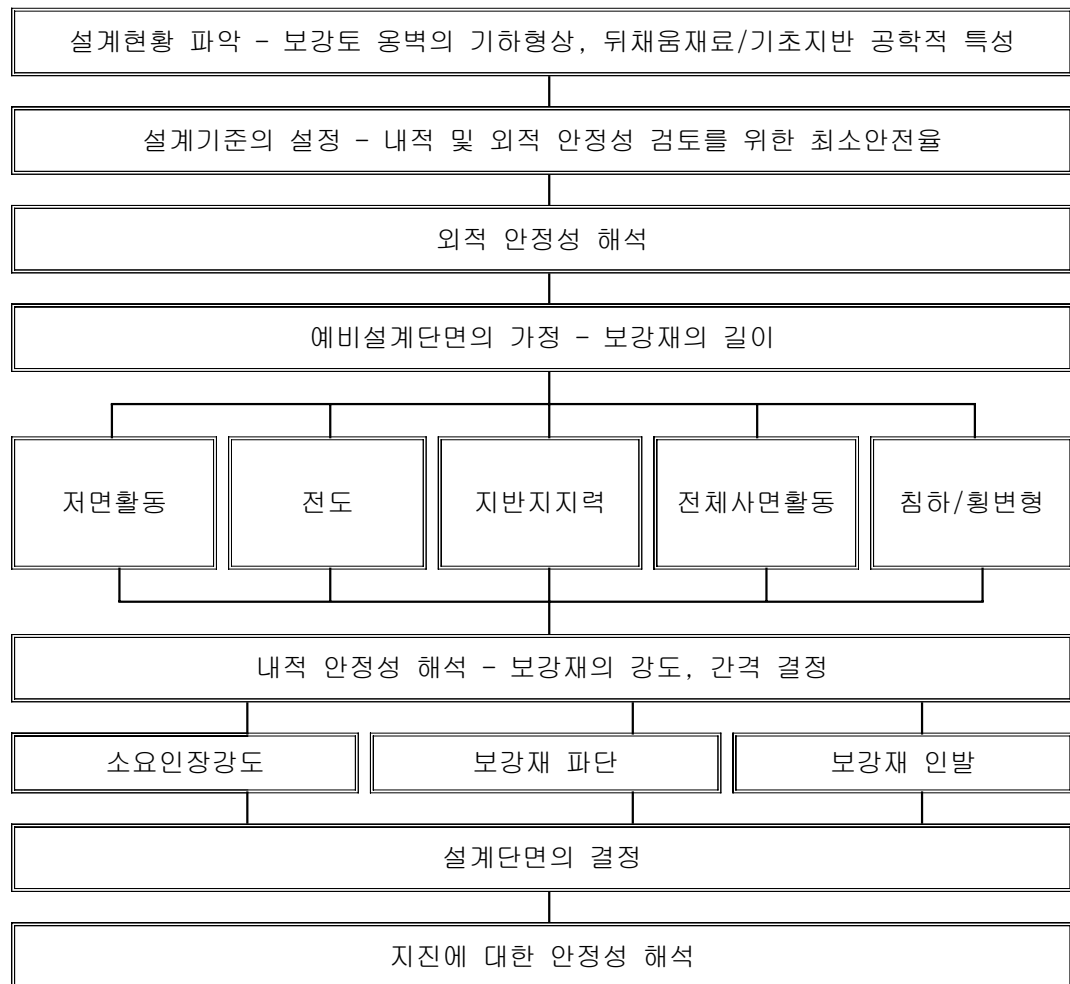


그림 95 보강토 옹벽 설계 순서도(2001)

나. 설계현황 및 설계조건

시험시공을 위한 설계 조건을 표 35에 정리하였고, 그림 96에 보강토 옹벽에서 주로 발생하는 파괴형태를 나타내었다. 그리고 시공 개요도는 그림 68과 같다. 원지반(retained soil), 보강토체(reinforced soil)와 배수용 골재(drainage aggregate)의 토질특성은 5절의 보강 성토사면과 같으며 표 32에 정리하였다.

표 35 설계 조건

a. 구조물의 기하형상 및 상재하중 조건		
① 보강토 옹벽의 높이	3m	
② 벽체의 경사각	타이어셀 - 18.4°(1 : 0.3), 트레드매트 - 5.7°(1 : 0.1)	
③ 상재하중	10kN/m ²	
b. 최소안전율(FHWA, 2001)		
① 외적안정 (external stability)	저면활동(sliding)	FS _{slid} = 1.5
	전도(overturning)	$e \leq L/6$ (토사), L/4(암반)
	지반지지력(bearing capacity)	-
② 내적안정 (internal slope stability)	파단(breaking)	$T_a \geq 1.5 T_{max}$
	인발(pullout)	FS _{pull} = 1.5
③ 전체안정(overall slope stability)		1.3

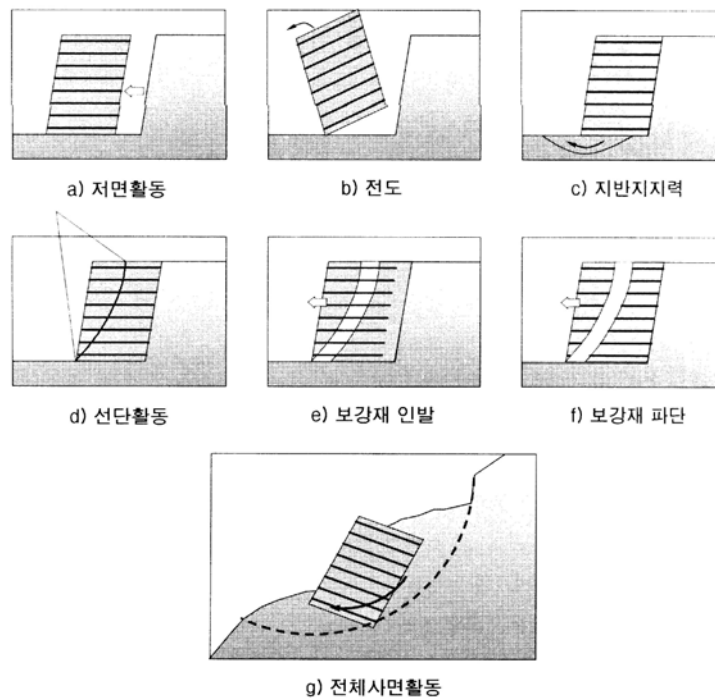


그림 96 보강토 옹벽의 주요 파괴형태(이은수 등, 2007)

다. 외적안정 검토

(1) 예비설계단면 가정

FHWA지침(2001)에 따르면 옹벽높이(H)의 0.7배 또는 2.5m 중 큰 값을 보강재의 최소길이로 사용할 것을 권장하고 있다. 따라서 보강토 옹벽의 높이가 3m 이므로 페타이어의 최소길이는 2.5m가 된다. 그러나 페타이어의 특성상 보강 성 토사면과 같이 최소 보강길이를 타이어셀은 3.2m(벽체는 1.6m), 트레드매트는 3.6m로 하였다. 그림 97에 외적안정성을 검토하기 위한 타이어셀과 트레드매트 보강토 옹벽의 예비설계단면을 나타내었다.

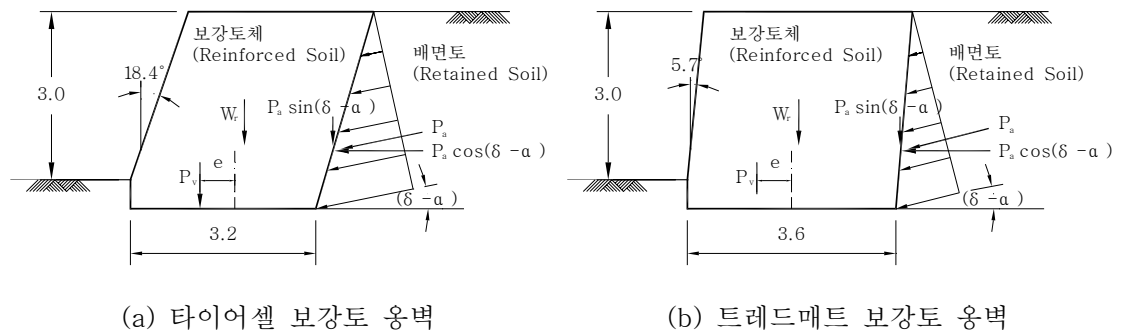


그림 97 예비설계단면

(2) 외적안정성 검토를 위한 토압

그림 97에 타이어셀 및 트레드매트 보강토 옹벽에 작용하는 배면토압의 분포를 개략적으로 나타내었다. FHWA지침(2001)에서는 벽면경사가 8° 이하인 경우에 Rankine 주동토압계수, 8° 이상인 경우에 Coulomb 주동토압계수를 사용할 것을 권장하고 있다. 보강토 옹벽 배면에 작용하는 주동토압은 다음 식으로 계산할 수 있으며, 표 36에 벽면경사와 상부 사면경사의 조건에 따른 토압계수의 계산식을 정리하여 나타내었다.

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma \cdot h^2$$

표 36 조건에 따른 주동토압계수 계산식

벽면경사	상부사면경사각	주동토압계수(K_a) 계산식
$0^\circ \leq \alpha < 8^\circ$	$\beta = 0^\circ$	$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right)$
$0^\circ \leq \alpha < 8^\circ$	$\beta > 0^\circ$	$K_a = \cos \beta \left[\frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}} \right]$
$\alpha \geq 8^\circ$	$\beta = 0^\circ, \beta > 0^\circ$	$K_a = \frac{\cos^2(\phi' + \alpha)}{\cos^2 \alpha \cdot \cos(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi' + \delta) \cdot \sin(\phi' - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cdot \cos(\alpha + \beta)}} \right]}$

여기서,

P_a : 보강토 옹벽 배면에 작용하는 주동토압(kN/m)

K_a : 주동토압계수

γ_b : 배면토(retained soil)의 단위중량(kN/m³)

h : 보강토 옹벽 배면에 주동토압이 작용하는 높이(m)

ϕ_b : 배면토(retained soil)의 내부마찰각(°)

α : 벽면경사(수직으로부터)(°)

β : 상부사면 경사각(°)

δ : 벽면마찰각(°)

표 35의 설계조건에서 타이어셀 보강토 옹벽과 트레드매트 보강토 옹벽은 상부사면 경사각(β)은 모두 0°이다. 그러나 타이어셀 및 트레드매트 보강토 옹벽의 벽면경사(α)가 각각 18.4°, 5.7°이므로 주동토압계수(K_a)를 계산하는 식은 달라지게 된다. 표 36에 의해서 주동토압계수를 구하여 타이어셀 및 트레드매트 보강토 옹벽의 배면에 작용하는 주동토압을 계산하는 과정을 다음에 나타내었다.

(가) 타이어셀 보강토 옹벽

$\alpha = 18.4^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 이므로 Coulomb의 주동토압계수(K_a)를 사용한다. 그리고 표 32로부터 $\phi_b = 35^\circ$ 이다. 또한 FHWA지침(2001)에 따르면 벽면마찰각(δ)은상부사면의 경사각(β)보다는 크고, 내부마찰각의 2/3보다는 작거나 같다고 하였다. 4절의 인발시험을 수행한 풍화토와 타이어의 내·외면간의 대형전단시험 결과 표

25로부터 $\phi = 34.7^\circ$, $\delta_{in} = 31.9^\circ$, $\delta_{out} = 33.9^\circ$ 이므로 $\delta = 20^\circ$ 로 정하였다.

$$\begin{aligned} K_a &= \frac{\cos^2(\phi_b + \alpha)}{\cos^2\alpha \cdot \cos(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_b + \delta) \cdot \sin(\phi_b - \beta)}{\cos(\alpha - \delta) \cdot \cos(\alpha + \beta)}} \right]} \\ &= \frac{\cos^2(35 + 18.4)}{\cos^2 18.4 \cdot \cos(18.4 - 20) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(35 + 20) \cdot \sin(35 - 0)}{\cos(18.4 - 20) \cdot \cos(18.4 + 0)}} \right]} \\ &= 0.136 \end{aligned}$$

따라서, 타이어셀 보강토 옹벽의 배면에서의 주동토압은

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma_b \cdot h^2 \\ &= 0.5 \times 0.136 \times 18.51 \times 3^2 \\ &= 11.33 kN/m \end{aligned}$$

(나) 트레드매트 보강토 옹벽

$\alpha = 5.7^\circ < 8^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 이므로 Rankine의 주동토압계수(K_a)를 사용한다. 그리고 다른 조건은 타이어셀 보강토 옹벽과 같다.

$$\begin{aligned} K_a &= \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_b}{2} \right) \\ &= \tan^2 \left(45^\circ - \frac{35}{2} \right) \\ &= 0.271 \end{aligned}$$

※ Coulomb의 주동토압계수 식으로부터 $K_a = 0.208$

따라서, 트레드매트 보강토 옹벽의 배면에서의 주동토압은

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma_b \cdot h^2 \\ &= 0.5 \times 0.271 \times 18.51 \times 3^2 \\ &= 22.57 kN/m \end{aligned}$$

(3) 저면활동에 대한 안정성 검토

그림 97과 위에서 구한 타이어셀 및 트레드매트 보강토 옹벽의 주동토압으로 저면활동에 대한 안정성을 검토하였다. 다음은 보강토 옹벽 저면에서의 활동에 대한 안정성 평가식을 나타낸 것이다. 보강토체 저면에 작용하는 수직력의 합

(P_v)은 보강토 자중과 주동토압의 수직력의 합으로 계산된다. 그러나 일반적으로 안전측으로 설계하기 위하여 보강토 자중(W_r)만으로 보강토체 저면에 작용하는 수직력의 합(P_v)으로 계산할 수 있다. 즉, $P_v = W_r$ 이다.

$$FS_{slid} = \frac{\Sigma \text{ horizontal resisting forces}}{\Sigma \text{ horizontal driving forces}} = \frac{\Sigma P_R}{\Sigma P_d} \geq 1.5$$

$$P_R = P_v \cdot \mu = \{W_r + P_a \cdot \sin(\delta - \alpha)\} \cdot \mu$$

$$= \{\gamma_r \cdot H \cdot L + P_a \cdot \sin(\delta - \alpha)\} \cdot \mu$$

$$P_d = P_a \cdot \cos(\delta - \alpha)$$

여기서,

P_R : 보강토체 저면의 활동에 대한 저항력(kN/m)

P_v : 보강토체 저면에 작용하는 수직력의 합(kN/m)

μ : $= \tan \phi_{\min}$ ($\phi_{\min}$ 는 기초지반의 내부마찰각(35°), 보강토체의 내부마찰각(30°), 흙/보강재 간의 마찰각(30°)중에서 최소값)

W_r : 보강토체 자중(kN/m)

P_a : 보강토 옹벽 배면에 작용하는 주동토압(kN/m)

P_d : 보강토에 배면토압에 의한 활동력(kN/m)

α : 벽면경사(수직으로부터)($^\circ$)

δ : 벽면마찰각($^\circ$)

(가) 타이어셀 보강토 옹벽

$$P_R = P_v \cdot \mu = W_r \cdot \mu = \gamma_r \cdot H \cdot L \cdot \mu$$

$$= 16.23 \times 3 \times 3.2 \times \tan 30$$

$$= 89.96 \text{ kN/m}$$

$$P_d = P_a \cdot \cos(\delta - \alpha)$$

$$= 11.33 \times \cos(20 - 18.4)$$

$$= 11.33 \text{ kN/m}$$

$$\therefore FS_{slid} = \frac{\Sigma P_R}{\Sigma P_d} = \frac{89.96}{11.33} = 7.9 \geq 1.5 \quad - \quad \text{O.K}$$

(나) 트레드매트 보강토 옹벽

$$P_R = P_v \cdot \mu = W_r \cdot \mu = \gamma_r \cdot H \cdot L \cdot \mu$$

$$= 16.23 \times 3 \times 3.6 \times \tan 30$$

$$= 101.20 kN/m$$

$$P_d = P_a \cdot \cos(\delta - \alpha)$$

$$= 22.57 \times \cos(20 - 5.7)$$

$$= 21.87 kN/m$$

$$\therefore FS_{slid} = \frac{\Sigma P_R}{\Sigma P_d} = \frac{101.20}{21.87} = 4.6 \geq 1.5 \quad - \quad \text{O.K}$$

(4) 전도에 대한 안정성 검토

다음은 보강토 옹벽 전도에 대한 안정성 평가식을 나타낸 것이다.

$$e = \frac{L}{2} - \frac{\Sigma M}{P_v} \quad \begin{array}{l} \text{if } e \leq \frac{L}{6}, \text{ 토사지반} \\ \text{if } e \leq \frac{L}{4}, \text{ 암반} \end{array}$$

$$\Sigma M = M_R - M_O$$

$$M_R = \gamma_r \cdot H \cdot L \cdot \frac{L}{2}$$

$$M_O = P_a \cdot \frac{h}{3} = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma_b \cdot h^2$$

여기서

- e : 편심거리
 L : 보강토체(타이어셀 또는 트레드매트)의 길이
 ΣM : 보강토체에 작용하는 모멘트의 합(kN·m/m)
 P_v : 보강토체 저면에 작용하는 수직력의 합(kN/m)
 M_R : 수직력(P_v)에 의한 저항모멘트(kN·m/m)
 γ_r : 보강토체의 단위중량(kN/m³)
 H : 보강토 옹벽의 높이(m)
 M_O : 수평력(P_d)에 의한 전도모멘트(kN·m/m)
 K_a : 주동토압계수
 γ_b : 배면토의 단위중량(kN/m³)
 h : 보강토 옹벽 배면에 주동토압이 작용하는 높이(m), 여기서는 $h = H$

(가) 타이어셀 보강토 옹벽

$$M_R = 16.23 \times 3 \times 3.2 \times \frac{3.2}{2} = 249.29 \text{ kNm/m}$$

$$M_O = 11.33 \times \frac{3}{3} = 11.33 \text{ kNm/m}$$

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{L}{2} - \frac{\Sigma M}{P_v} = \frac{L}{2} - \frac{M_R - M_O}{P_v} \\
 &= \frac{3.2}{2} - \frac{249.29 - 11.33}{155.81} \\
 &= 0.07 \text{ m} < 0.53 \text{ m} \quad - \quad \text{O.K}
 \end{aligned}$$

(나) 트레드매트 보강토 옹벽

$$M_R = 16.23 \times 3 \times 3.6 \times \frac{3.6}{2} = 315.51 \text{ kNm/m}$$

$$M_O = 21.87 \times \frac{3}{3} = 21.87 \text{ kNm/m}$$

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{L}{2} - \frac{\Sigma M}{P_v} = \frac{L}{2} - \frac{M_R - M_O}{P_v} \\
 &= \frac{3.6}{2} - \frac{315.51 - 21.87}{175.28} \\
 &= 0.13 \text{ m} < 0.60 \text{ m} \quad - \quad \text{O.K}
 \end{aligned}$$

(5) 그 외의 외적안정성

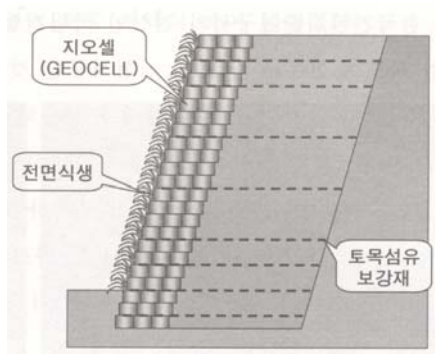
본 현장에서는 연약지반이 없는 것으로 고려하고 지반지지력 및 침하에 대한 안정성 검토와 내진에 대한 안정성 검토는 하지 않았다.

라. 내적안정 검토

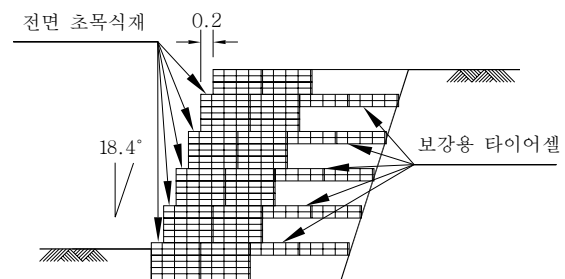
(1) 단면가정

(가) 셀형 보강재 보강토 옹벽

그림 98에 셀형(3D) 즉 입체형 보강재를 사용한 보강토 옹벽의 개요도를 나타내었다. 타이어셀 보강토 옹벽은 벽체부 타이어셀과 보강부 타이어셀로 나눌수 있다. 0.2m의 높이를 갖는 타이어셀은 지오셀과 같이 3차원 보강재이므로, 타이어셀 보강토 옹벽의 벽체는 타이어셀 자체로 가능하며, 타이어셀의 길이를 연장하여 토목섬유 보강재로 사용하였다. 벽체용 타이어셀의 길이는 1.6m이고, 보강용 타이어셀의 길이는 1.6m를 연장하여 3.2m가 되도록 하였다. 보강용 타이어셀은 벽체용 타이어셀의 세 번째 층마다 포설하여 보강용 타이어셀의 중심간격은 0.6m가 되도록 하였다. 그리고 전면에 초목식재를 하기 위하여 타이어셀 세 개 층마다 셋백(setback)을 0.2m로 하였다.



(a) 지오셀 보강토 옹벽



(b) 타이어셀 보강토 옹벽

그림 98 셀형(3D) 보강토 옹벽의 개요도(단위 : m)

(나) 쉬트형 보강재 보강토 옹벽

그림 99에 쉬트형(2D) 보강재를 사용한 보강토 옹벽의 개요를 나타내었다. 트레드매트 보강토 옹벽의 벽체는 트레드매트를 직접 연결할 수 있는 블록의 제작이 어려워 일반적으로 쓰이고 있는 높이 20cm의 콘크리트 블록을 사용하였다.

그림 100에 본 연구에서 사용한 콘크리트 블록, 캡블록, 지오그리드 및 핀을 나타내었다. 따라서 콘크리트 블록과 트레드매트를 연결하기 위하여 그림 99와 같이 지오그리드를 콘크리트 블록사이에 포설한 후 지오그리드와 트레드매트를 볼트로 연결하여 트레드매트 보강토 옹벽이 일체로 거동하도록 하였다. 그러나 실용화를 위해서는 트레드매트를 바로 연결할 수 있는 콘크리트 블록의 개발이 필요하다. 지오그리드와 트레드매트의 수직간격은 0.6m마다 계획하였다.

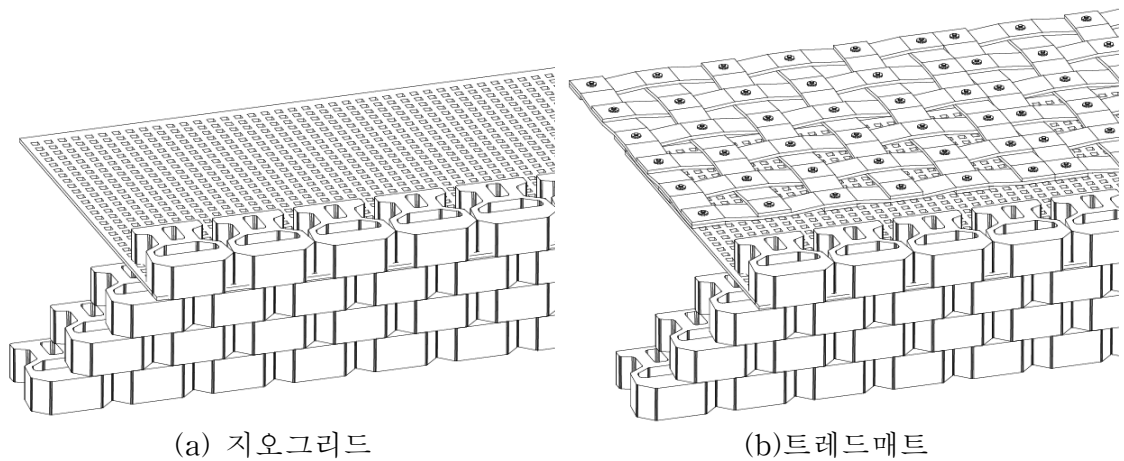


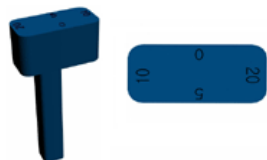
그림 99 쉬트형(2D) 보강토 옹벽의 개요



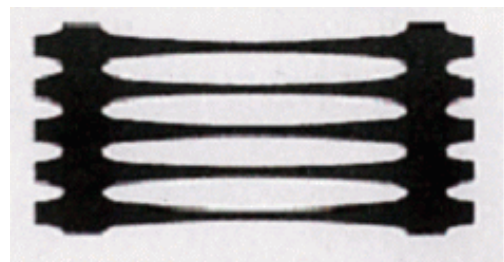
(a) 표준형 콘크리트 블록(528×480×200)



(b) 표준형 콘크리트 캡 블록(528×310×100)



(c) 핀(블록 연결용)



(d) 지오그리드($T_{ult}=85\text{kN/m}$)

그림 100 블록식 보강토 옹벽의 구성요소

(다) 타이어셀 및 트레드매트 보강토 옹벽

그림 101에 타이어셀 및 트레드매트 보강토 옹벽의 내적안정성을 검토하기 위한 단면도이며, 앞에서 정한 타이어셀 및 트레드매트의 보강길이, 벽체의 경사와 수직간격 등을 나타내었다. FHWA지침(2001)에서는 보강토 옹벽 전면의 세굴과 동상의 피해 등을 방지하고 전면벽체 근처에서의 국부적인 편칭(punching)과괴를 방지하기 위하여, 보강토 옹벽의 근입깊이는 동결심도 이상으로 하며 최소한 0.5m이상 확보할 것을 추천하고 있다. 따라서 보강토 옹벽 기초부분에서 동상피해, 전면에서의 세굴 및 편칭과괴를 방지하기 위하여 동결심도를 고려하여 0.8m 이상의 근입깊이를 확보하였고, 동상이 발생하지 않는 자갈 등으로 0.3m 이상 치환하였다.

김영진과 홍승서(2004)에 따르면 국내의 최대 동결심도는 지역에 따라 0.3m ~ 1.5m의 분포를 나타내며, 충청남도의 최대 동결심도는 0.6m ~ 0.8m로 나타났다. 블록식 보강토 옹벽의 경우 상부층에서 동상에 의한 체적팽창압력으로 보강재의 파단, 콘크리트 블록의 탈락 등의 보강토 옹벽의 파괴사례는 그 동안 많이 보고되었다. 따라서 트레드매트 보강토 옹벽에서도 이를 감안한 설계가 필요하였다. 그러므로 콘크리트 블록 배면에 쇄석골재로 뒷채움 함으로써 폭 0.3m의 배수로를 확보하였다.

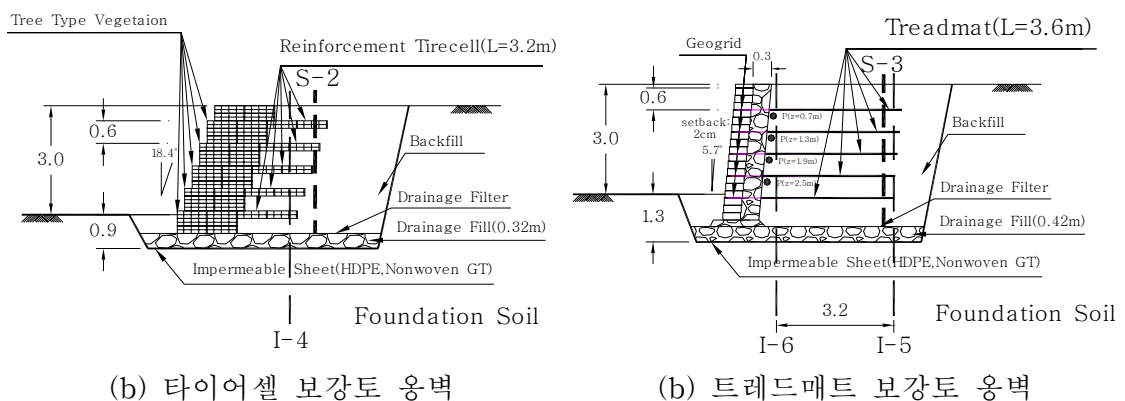


그림 101 보강토 옹벽 단면도(단위 : m)

(2) 보강재의 강도결정

보강토 옹벽을 시공하기 위한 보강재는 타이어셀, 트레드매트 및 지오그리드

가 있다. 타이어셀 및 트레드매트의 강도는 5절의 표 33에 나타내었다. 그리고 지오그리드의 강도는 표 37에 정리하였다.

표 37 지오그리드의 인장강도(T_a)

구분 포설위치	RF	RF _{CR}	RF _D	RF _{ID}	FS _{UN}	T _{ULT} (kN/m)	T _{al} (kN/m)	T _a (kN/m)
보강토체	2.42	2.0	1.1	1.1	1.0	85.0	35.1	35.1
연결부	3.03	2.5	1.1	1.1	1.0	85.0	28.1	28.1

여기서,

RF : 강도 감소 계수(= $RF_{CR} \times RF_D \times RF_{ID}$)

RF_{CR} : 크리프 감소 계수(폴리머 계열인 경우 1.6 ~ 5.0)

RF_D : 내구성 감소 계수(토목섬유의 민감도에 따라 1.1 ~ 2.0)

RF_{ID} : 시공시 손상에 대한 감소계수(뒷채움재에 따라 1.1 ~ 3.0)

FS_{UN} : 불확실성을 고려한 안전율

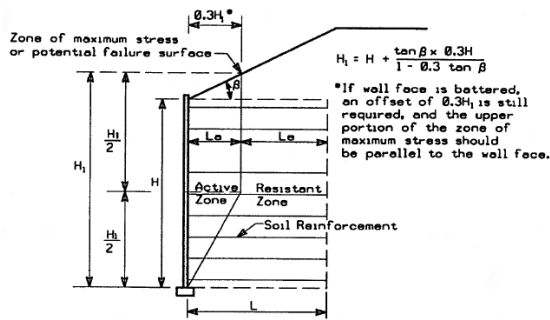
T_{ULT} : 극한인장강도(ultimate tensile strength)

T_{al} : 장기재료강도(long-term material strength)

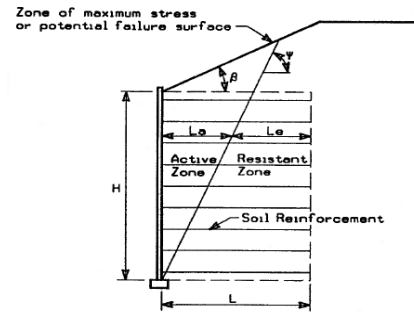
T_a : 소요인장강도(design long-term reinforcement tensile strength)

(3) 가상파괴면의 설정

그림 102에 보강재의 상대적인 강성에 따라 가상파괴면의 형상을 나타내었다. 보강재의 상대적인 강성은 주동토압 발생시 흙의 변형(양질의 사질토에서 보통 각변위 $\Delta=0.002H$)을 기준으로 하며, FHWA지침(2001)에서는 보강재의 극한인장 강도에서의 변형률이 흙의 변형률보다 작은 경우를 비신장성 보강재(inextensible reinforcement)로 분류하고, 이 보다 큰 경우를 신장성 보강재(extensible reinforcement)로 분류한다. 따라서 보강재의 강성은 내적안정성 검토를 위한 가상파괴면과 토압분포를 달리 적용하기 위한 기준이 된다. FHWA지침(2001) 외의 기준으로 BS코드(BS8006 : 1995)에서는 보강재의 축방향 변형률 1%를 기준으로 1% 미만이면 비신장성 보강재, 1% 이상이면 신장성 보강재로 구분하고 있다.



(a) 비신장성(inextensible) 보강재



(b) 신장성(extensible) 보강재

그림 102 보강토 옹벽의 가상파괴면

이러한 기준으로 현재 보강토 공법에 사용중인 보강재를 구분하면, 일반적으로 강재 보강재는 비신장성, 토목섬유 보강재는 신장성 보강재로 분류할 수 있다. 따라서 페타이어 또한 신장성 보강재로 분류하여 가상파괴면을 설정하였다.

그림 102 (b)에서 가상파괴면의 수평선으로부터의 각(ψ)을 구하기 위한 식은 다음에 나타내었다.

○ 수직벽체인 경우, 즉 트레드매트 보강토 옹벽인 경우이며

$$\psi = 45^\circ + \frac{\phi'}{2} = 45^\circ + \frac{30^\circ}{2} = 60^\circ$$

○ 벽체의 경사가 수직으로부터 10° 이상인 경우,

$$\begin{aligned} \tan(\psi - \phi) &= \frac{\tan(\phi - \beta) \cdot \sqrt{\tan(\phi - \beta)[\tan(\phi - \beta) + \cot(\phi + \alpha)][1 + \tan(\delta - \alpha)\cot(\phi + \alpha)]}}{1 + \tan(\delta - \alpha)[\tan(\phi - \beta) + \cot(\phi + \alpha)]} \\ &= \frac{\tan(30 - 0) \cdot \sqrt{\tan(30 - 0)[\tan(30 - 0) + \cot(30 + 18.4)][1 + \tan(20 - 18.4)\cot(30 + 18.4)]}}{1 + \tan(20 - 18.4)[\tan(30 - 0) + \cot(30 + 18.4)]} \\ &= 27.3 \\ \therefore \psi &= 57.3^\circ \end{aligned}$$

(4) 보강재의 파단파괴에 대한 안정성 검토

(가) 보강토체 내부의 토압분포

FHWA지침(2001)에서는 깊이에 따른 토압계수(K_r)의 변화를 주동토압계수 K_a 에 대한 비율로서 그림 103과 같이 적용한다. 또한 토압계수(K_r)는 사용하는 보강재의 특성에 따라서 깊이에 따른 분포가 달라진다. 토목섬유 보강재와 같은 신장성 보강재를 사용하는 경우에는 깊이에 상관없이 주동토압계수(K_a)를 사용한다. 그러나 강재 띠형 보강재와 같은 비신장성 보강재를 사용하는 경우에는

보강토 옹벽 상단부에서 6m까지는 깊이에 따라 변화하고 6m 이하에서는 일정한 것으로 가정한다. 벽체의 경사에 따라 주동토압계수를 구하는 식은 다음과 같다.

○ 수직벽체인 경우,

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) = 0.333$$

○ 벽체의 경사가 수직으로부터 8° 이상인 경우,

$$K_a = \frac{\cos^2(\alpha + \phi_r)}{\cos^3 \alpha \left[1 + \frac{\sin \phi_r}{\sin \alpha}\right]^2} = 0.221$$

따라서 타이어셀 보강토 옹벽의 내부에서의 토압계수는 0.221, 트레드매트 보강토 옹벽의 내부에서의 토압계수는 0.333이며 깊이에 따라 토압계수는 변하지 않고 일정한 것으로 가정한다.

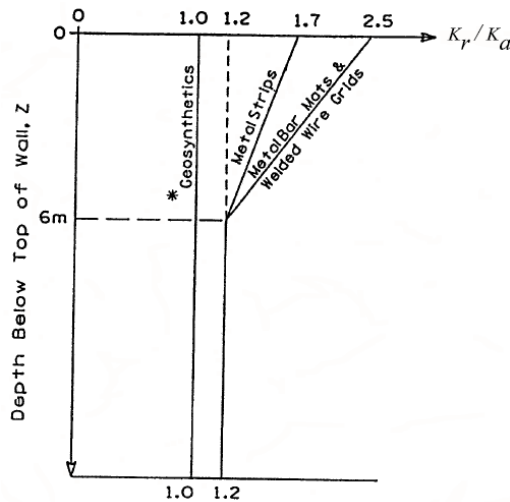


그림 103 보강재와 깊이에 따른 토압계수의 변화

(나) 보강재의 소요인장력($T_{\max}$)의 계산

각 층별 보강재가 최대인장력을 나타내는 점을 연결한 선인 가상파괴면을 설정한 후, 이를 기준으로 내적안정성 검토항목인 보강재의 인발 및 파단파괴에 대하여 검토하며, 각 층별 보강재가 부담하여야 할 최대인장력($T_{\max}$)은 보강재의 소요인장강도(T_a) 및 보강재의 유효길이에 따른 인발저항력(T_{pull})보다 작아야 한

다. 즉 $T_a \geq T_{\max}$ 이고, $\frac{T_{pull}}{FS_{po}} \geq T_{\max}$ 이어야 한다. 보강재의 소요인장력은 보강토 체 내에서 각 층의 보강재가 부담하는 수평토압으로부터 다음 식과 같이 계산된다.

$$T_{\max} = \sigma_H \cdot S_v = K_r \cdot \sigma_v \cdot S_v$$

표 38에 보강재 소요인장강도 계산결과를 나타내었고, 이에 따라 표 39에 보강재의 파단파괴에 대한 안정성 검토결과를 나타내었다.

표 38 보강재 소요인장강도 계산결과

구 분	z (m)	K	P _v (kN/m)	M _R (kN · m /m)	M _O (kN · m /m)	ΣM (kN · m /m)	e(m)	σ _v (kN/m ²)	S _v (m)	T _{max} (kN/m)
타이어 셀	0.5	0.221	25.97	41.55	0.07	41.47	0.0029	8.13	0.6	1.08
	1.1	0.221	57.13	91.41	0.80	90.61	0.0139	18.01	0.6	2.39
	1.7	0.221	88.29	141.27	2.94	138.33	0.0333	28.18	0.6	3.74
	2.3	0.221	119.45	191.12	7.27	183.85	0.0609	38.81	0.6	5.15
	2.9	0.221	150.61	240.98	14.58	226.40	0.0968	50.10	0.6	6.64
트레드 매트	0.6	0.333	36.36	58.17	0.31	57.86	0.0085	11.42	0.6	1.95
	1.2	0.333	67.52	108.03	1.98	106.05	0.0293	21.49	0.6	3.94
	1.8	0.333	98.68	157.89	6.18	151.71	0.0626	32.09	0.6	6.01
	2.4	0.333	129.84	207.74	14.07	193.67	0.1084	43.52	0.6	8.20
	3.0	0.333	161.00	257.60	26.83	230.77	0.1667	56.16	0.6	10.55

표 39 보강재 파단파괴에 대한 안정성 검토 결과

구 분	T _{max} (kN/m)	T _a (kN/m)	FS _y ^{주1)}	비 고
타이어셀	1.08	20.3	18.8	O.K.
	2.39	20.3	8.5	O.K.
	3.74	20.3	5.4	O.K.
	5.15	20.3	3.9	O.K.
	6.64	20.3	3.1	O.K.
트레드매트	1.95	20.3	10.4	O.K.
	3.94	20.3	5.1	O.K.
	6.01	20.3	3.4	O.K.
	8.20	20.3	2.5	O.K.
	10.55	20.3	1.9	O.K.

$$\text{주1) } FS_y = \frac{T_a}{T_{\max}}$$

(5) 보강재의 인발파괴에 대한 안정성 검토

보강재의 인발저항력은 전체 보강재 길이에 대하여 고려하는 것이 아니라 그림 102에서의 저항영역(resistant zone) 속에 묻힌 보강재의 길이에 대해서만 고려하며, 이 때 저항영역 속에 묻힌 보강재의 길이를 유효길이(effective length, L_e)라고 한다. 보강재의 인발파괴에 대한 안정성 검토는 다음 식으로 계산될 수 있으며, 표 40에 그 결과를 정리하여 나타내었다.

$$FS_{po} = \frac{F^* \cdot \sigma_v \cdot L_e \cdot \alpha \cdot R_c \cdot C}{T_{max}}$$

여기서,

L_e = 인발에 대한 보강재 유효길이(m)

T_{max} = 각 층별 보강재의 소요인장강도(kN/m)

FS_{po} = 보강재의 인발에 대한 안전율(입상토 ≥ 1.5 , 점성토 ≥ 2.0 사용)

F^* = 보강재의 인발저항 계수 (토목섬유 보강재의 경우 $\frac{2}{3} \tan \phi$)

α = 형상보정계수[scale effect correction factor] (신장성 보강재의 길이에 따른 응력의 비선형 변화를 고려하기 위한 계수, 보통 비신장성 보강재의 경우 $\alpha=1.0$, 토목섬유 보강재의 경우 $\alpha=0.6\sim 1.0$, 지오그리드의 경우 $\alpha=0.8$)

σ_v = 각 층별 보강재 위에 작용하는 유효수직응력

R_c = 보강재의 포설비율(= 보강재 폭/수평간격, 지오그리드의 경우 0.8)

C = 보강재의 인발저항면적(= 상·하면을 의미; 띠형, 그리드형, 쉬트형의 경우 $C=2$)

표 40 인발파괴에 대한 안정성 검토 결과

구 분	z (m)	σ_v (kN/m ²)	L_a (m)	L_e (m)	f^*	T_{po} (kN/m)	T_{max} (kN/m)	FS_{po} (kN/m)	비 고
타이어 셀	0.5	8.13	1.60	1.60	0.38	6.39	1.08	7.4	O.K.
	1.1	18.01	1.22	1.98	0.38	17.57	2.39	9.1	O.K.
	1.7	28.18	0.83	2.37	0.38	32.84	3.74	10.7	O.K.
	2.3	38.81	0.45	2.75	0.38	52.59	5.15	12.3	O.K.
	2.9	50.1	0.06	3.14	0.38	77.40	6.64	13.6	O.K.
트레드 매트	0.6	11.42	1.33	1.87	0.38	10.53	1.95	6.8	O.K.
	1.2	21.49	0.98	2.22	0.38	23.49	3.94	8.9	O.K.
	1.8	32.09	0.64	2.56	0.38	40.55	6.01	9.9	O.K.
	2.4	43.52	0.29	2.91	0.38	62.43	8.20	10.9	O.K.
	3.0	56.16	0	3.26	0.38	88.54	10.55	11.7	O.K.

마. 전체 사면활동에 대한 안정성

보강토 옹벽이 연약지반상 또는 사면상에 위치하거나 보강토 옹벽 상단에 고정토고의 성토사면이 있는 경우에는 보강토체를 포함한 전체 사면활동에 의한 파괴가 발생할 가능성이 있으므로, 이러한 경우에는 보강토 옹벽의 내적·외적 안정성 외에도 그림 96 g)에서와 같이 보강토체를 포함한 전체사면활동에 대한 안정성 또한 반드시 검토해야 한다. 그러나 본 연구의 보강토 옹벽이 위치한 곳은 이에 해당사항이 없으므로 전체 사면활동에 대한 안정성은 생략하였다.

바. 추가상재하중에 대한 검토

추가상재하중 10kN/m^2 에 대한 안정성 검토 결과 타이어셀 보강토 옹벽과 트레드매트 보강토 옹벽 모두 1.30 이상으로 나타나 안정한 것으로 나타났다.

2. 보강토 옹벽의 시공

가. 시공개요

그림 104에서 볼 수 있는 자연사면이 있는 곳에 그림 68에 나타난 시공 개요도와 그림 101에 나타난 단면도와 같이 보강토 옹벽을 시공하였다. 그림 105에 보강토 옹벽 시공순서를 순서도(flow chart)로 정리하여 나타내었다.



그림 104 시공전의 현장 전경

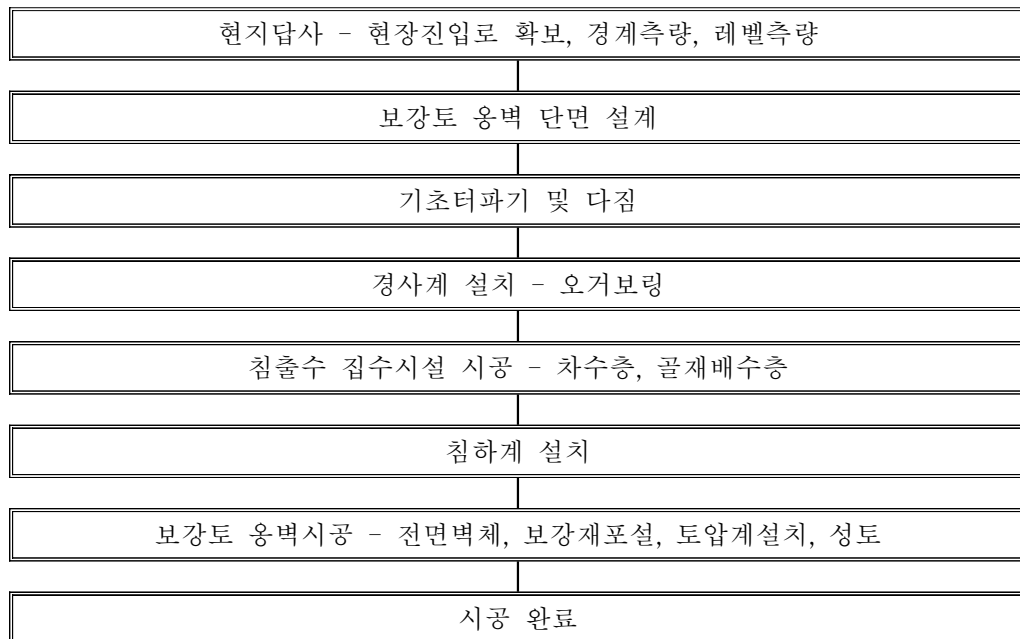


그림 105 보강토 옹벽 시공 순서도

나. 기초터파기

그림 68에 나타난 것과 같이 침출수 집수시설을 시공하기 위하여 4%의 종단 구배로 기초터파기를 하였다. 그림 106에 기초터파기를 하고 있는 모습을 나타내었다.



(a) 기초터파기

(b) 기초 다짐작업

그림 106 기초터파기

다. 경사계 설치

그림 107에 경사계를 설치하는 모습을 나타내었다. 보강토 옹벽의 거동을 계측하기 위하여 타이어셀 보강토 옹벽에 1지점, 트레드매트 보강토 옹벽의 2지점에 경사계를 설치하였다. 경사계의 설치위치는 그림 68과 그림 101에 나타내었다. 기초바닥면으로부터 2m깊이까지 오거보링을 한 후, 경사계 케이스를 설치하고 그라우팅을 하였다.



a) 오거보링

(b) 그라우팅

그림 107 경사계 설치

라. 침출수 집수시설 시공

(1) 차수층 시공

그림 108에 차수층 시공하는 모습을 나타내었다. 펠타이어로부터 나오는 침출수가 외부로 흘러나가지 않고 집수정으로 모이도록 하기 위해 바닥면의 종단구배가 4%가 되도록 하였으며, 바닥면 위에 차수막을 포설하였다. 차수막은 두께 1.5mm, 길이 7m의 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 차수막을 사용하였다. 차수막의 이음매에서의 접합방법은 30cm 중첩되도록 한 후, 실리콘과 테이프를 이용하여 접합하였다. 시공중 차수막이 손상되는 것을 방지하기 위해 두께 2.0mm, 길이 3m의 부직포를 포설하였다. 이음매에서의 접합방법은 부직포를 30cm 중첩되도록 한 후, 열접합을 이용하였다.



(a) HDPE 포설



(b) HDPE 이음매 접합



(c) 부직포 포설



(d) 부직포 이음매 열접합

그림 108 차수층 시공

(2) 배수층 시공

그림 109에는 배수층을 시공하는 모습을 나타내었다. 하부에 모인 침출수가 집수정에 원활하게 배수가 되도록 쇄석 골재를 사용하였다. 종단구배에 의해 물이 타이어셀 보강사면에서 트레드매트 보강사면 방향으로 흐르면서 토사의 유입에 의한 배수층이 막힘을 고려하여 그림 101에 나타낸것과 같이 배수층의 두께는 타이어셀 보강사면에서 0.2m, 트레드매트 보강사면에서 0.5m가 되도록 하였다. 배수용 골재를 포설한 후 토사의 유입을 막기위해 부직포를 배수층 위에 깔아 필터 및 재료분리기능을 하도록 하였다. 이음매의 접합은 열접합을 사용하였다.



(a) 배수용 골재 포설



(b) 재료분리용 부직포 포설

그림 109 배수층 설치

(3) 집수정 설치

그림 110에는 차수층과 배수층에 의해 한 곳에 모인 침출수를 채수하기 위해 집수정을 설치하는 모습과 설치 후의 모습을 나타내었다.



(a) 집수정 바닥 드릴링



(b) 집수정 거치



(c) 집수정 매설



(d) 집수정 설치 완료

그림 110 집수정 설치

마. 침하계 설치

기초바닥면의 침하량을 계측하기 위해 타이어셀 보강토 옹벽과 트레드매트 보강토 옹벽의 각 1지점에 침하계를 설치하였다. 침하계의 설치 위치는 그림 68과 101에 나타내었으며, 침하계를 설치하는 모습은 그림 111에 나타내었다.



(a) 침하계 설치



(b) 수평 확인

그림 111 침하계 설치

바. 보강토 옹벽의 시공

(1) 타이어셀 보강토 옹벽

그림 4에서 보였던 과정과 같은 방법으로 타이어셀을 벽체용 타이어셀(2×7)과 보강용 타이어셀(4×7)을 구분하여 제작한 후, 그림 101에 나타난 단면과 같이 타이어셀 보강토 옹벽을 시공하기 위하여 백호를 이용하여 운반 후 포설하였다. 포설할 때에는 경사계 및 침하계의 손상에 유의하면서 포설하였다. 그리고 풍화토를 타이어셀 안에 채워 넣은 후, 9.8kN 진동롤러를 이용하여 다짐을 하였고, 흙이 충분히 채워지지 않은 타이어셀은 인력으로 흙을 채웠다.

타이어셀 보강토 옹벽 또는 타이어셀 보강 성토사면의 경우 타이어셀 안에 뒷채움 재료가 내부에 완전히 채워지지 않을 수 있으나 타이어는 강성재료가 아니고 연성재료 즉, 유연한 재료이다. 따라서 ‘타이어셀을 활용한 보강토 옹벽’ 시방서 p. 11에서 규정한 한 층 시공두께인 20cm를 넘지 않도록 성토 후 다짐도가 실내 다짐시험값의 95% 이상으로 다짐을 하면 뒷채움 재료가 채워지지 않아 생긴 공간을 타이어와 새로운 층의 뒷채움 재료에 의해 다짐시 채워지는 것으로 시험시공에서 확인되었다.



(a) 타이어셀 제작



(b) 타이어셀 포설



(c) 성토



(d) 다짐

그림 112 타이어셀 보강 성토사면의 시공

(2) 트레드매트 보강토 웅벽

트레드매트 또한 타이어셀과 같이 그림 4에서 보였던 과정과 같은 방법으로 트레드매트를 제작한 후, 그림 101에 나타내었던 단면도와 같이 트레드매트를 보강하기 위하여 백호를 이용하여 운반 후 계측기의 손상에 유의하여 포설하였다. 트레드매트를 연결할 수 있는 전면벽체의 제작이 어려워 상용화 되어있는 전면벽체와 지오그리드를 포설한 후, 지오그리드에 트레드매트를 볼트로 연결하였다. 그리고 블록의 높이를 고려하여 한 층의 높이는 20cm로 하였고 20cm마다 성토를 한 후 9.8kN 진동롤러를 이용하여 다짐을 하였다.



(a) 트레드매트 제작



(b) 지오그리드 포설



(c) 트레드매트 포설



(d) 지오그리드와 트레드매트의 연결

그림 113 트레드매트 보강토 웅벽의 시공

‘타이어셀을 활용한 보강토 웅벽’ 지방서의 p. 6에 마모와 손상에 따른 타이어 등급을 분류하였으며, 지방서 그림 4에 등급에 따른 타이어의 사진을 나타내었다. 본 시험 시공에서 사용된 타이어는 그림 4에서 A 또는 B등급의 타이어이며,

백호를 이용한 운반 및 포설을 한 결과 타이어셀 및 트레드매트의 손상이 없는 것으로 확인되었다. 또한 트레드를 띠형(strip)으로 사용되는 경우 또한 운반 및 포설을 인력으로 할 수 있으므로 손상이 거의 없을 것으로 판단된다. 따라서 B급 이상의 타이어를 사용한다면 보강토 옹벽의 시공에 사용되는 타이어셀, 트레드 및 트레드매트의 품질은 적정수준이상 일 것으로 판단된다.

트레드매트 보강토 옹벽의 벽체에 작용하는 횡토압을 계측하기 위하여 그림 101에 나타난 위치에 토압계를 설치하였고, 그림 114에 토압계를 설치하는 모습을 나타내었다.



(a) 토압계

(a) 토압계 설치

그림 114 토압계 설치

사. 쉬트타켓 설치

블록식 보강토 옹벽의 벽체 거동은 보강재가 포설된 위치에서의 배부름 현상, 연결부 안정성 등에 의한 국부파괴 등을 고려하기 위하여 필요하다. 기울기를 측정하는 경사계보다 벽체 변위를 직접 측정하는 방법이 효율적으로 판단되었다. 따라서 페타이어가 보강된 보강토 옹벽에서 보강용 타이어셀 또는 트레드매트가 포설된 위치에 해당하는 벽체의 전면에 쉬트타켓을 부착하여 토탈스테이션을 이용한 벽체 변위를 측정하였다. 그림 115에 나타난 것과 같이 타이어셀 보강토 옹벽과 트레드매트 보강토 옹벽에 쉬트타켓을 12개씩 각각 부착하였다.



(a) 타이어셀 보강토 옹벽



(b) 트레드매트 보강토 옹벽

그림 115 쉬트타켓 설치

아. 옹벽 전면부 식생

트레드매트 보강토 옹벽과 달리 타이어셀 보강토 옹벽은 벽체가 폐타이어로 이루어져 있으므로, 폐기물이라는 혐오감을 감소시키고, 환경친화적인 구조물로 인식시키기 위하여 타이어셀 보강토 옹벽 전면부에 좁합나무, 철쭉나무 및 잔디 씨를 식생하였다. 그림 116에 식생하는 과정과 2달이 지난 후, 전면부가 녹화된 상태를 비교하여 나타내었다.



(a) 타이어셀 보강토 옹벽 식생 중(5월)



(b) 타이어셀 보강토 옹벽 식생 후(7월)

그림 116 타이어셀 보강토 옹벽 전면부 식생

3. 계측

가. 경사계

그림 101의 위치에 설치된 경사계를 계측하여 보강토 옹벽의 거동을 파악하였다. 그림 90에 나타난 바와 같이 경사계의 좌표축의 방향은 사면전면과 배면을 잇는 축을 X-axis, X-axis에 직교하는 축을 Y-axis로 정하였다. 각각의 축의 +, -방향은 그림에 나타내었다. 그림 91에 경사계를 계측하는 모습을 나타내었고, 그림 117와 그림 118에 타이어셀, 트레드매트의 계측데이터를 설치위치에 따라 각각 그래프로 정리하였다. 측정센서의 길이로 인해 사면 상단의 지표면으로부터 -0.5m 깊이에서 경사계 바닥면까지 계측을 하였다.

(1) 타이어셀 보강토 옹벽

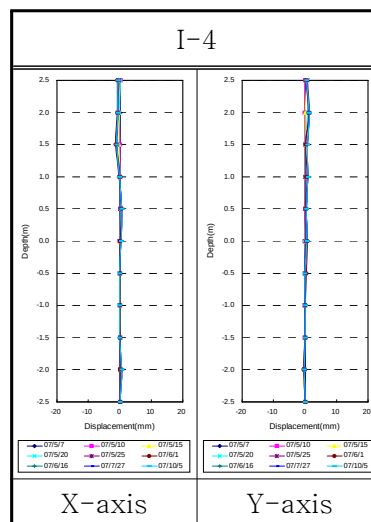
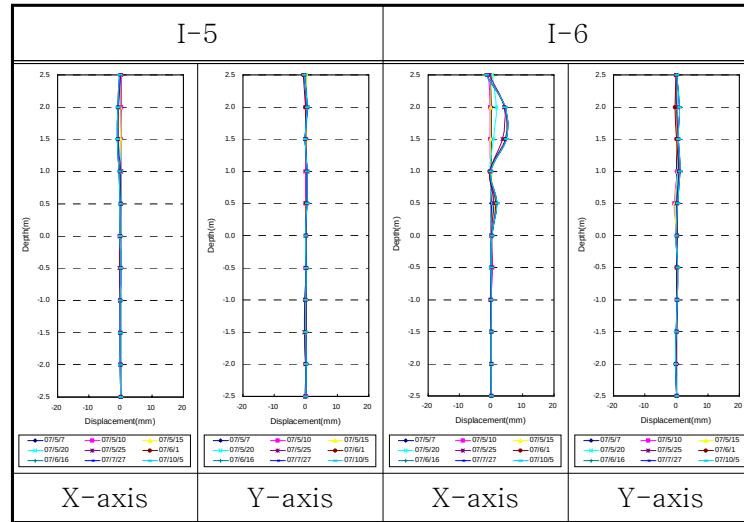


그림 117 타이어셀 보강토 옹벽의 변위

(2) 트레드매트 보강토 옹벽



	트레드매트 보강토 옹벽(mm)			타이어셀 보강토 옹벽(mm)		
보강재층수	6열	5열	4열	3열	2열	1열
5층	0.2	2.5	2.3	-0.4	-0.8	1.3
4층	1.0	3.2	2.4	-1.2	1.4	-0.1
3층	-1.5	1.1	2.6	-0.7	-0.4	1.2
2층	-0.7	0.6	0.7	-0.5	-0.2	4.5

그림 119 벽체의 X변위

그림 120에 벽체의 Z방향 변위량을 나타내었고, +는 융기를 -는 침하를 의미한다. 벽체의 Z방향 변위량을 측정함으로써 부등침하에 의한 블록식 보강토 옹벽의 파괴를 미리 예측하여 방지할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 같은 보강재 층수에서의 세 변위량의 절대값 차가 클수록 부등침하의 위험성이 크다고 할 수 있다. 그림에서 최대 절대값 변위량을 보면 타이어셀 보강토 옹벽에서 9.5mm, 트레드매트 보강토 옹벽에서 7.8mm의 Z변위가 측정되었다.

FHWA지침(2001)에 따르면 연성벽면을 갖는 보강토 옹벽의 경우에는 $\frac{\Delta}{L} \leq \frac{1}{50}$ 이고, 블록식 보강토 옹벽(몰탈 또는 콘크리트 블록)의 경우 부등침하의 허용한계를 $\frac{\Delta}{L} \leq \frac{1}{200}$ 이라고 하였다. 이 허용한계에 따르면 쉬트타켓 1열 ~ 3열, 4열 ~ 6열까지의 거리를 고려하여 타이어셀 보강토 옹벽은 80mm, 트레드매트 보강토 옹벽은 20mm가 허용침하량이다. 이 결과를 표 41에 정리하였다. 따라서 최대 절대값 변위량이 허용침하량 이내이므로 안전측이며, 추후 지속적인 계측을 통하여 구조물의 안정성을 검토할 계획이다.

보강재층수	트레드매트 보강토 옹벽(mm)				타이어셀 보강토 옹벽(mm)			
	6열	5열	4열	절대값	3열	2열	1열	절대값
5층	-3.8	-2.8	0.7	4.5	6.0	7.2	-2.2	9.3
4층	-3.0	-1.3	-2.0	1.7	2.2	1.2	4.1	2.9
3층	-4.3	-3.2	-0.5	3.8	-1.2	-4.7	1.8	6.5
2층	-4.0	3.8	-0.7	7.8	-1.3	2.2	-7.3	9.5

그림 120 벽체의 Z변위

표 41 전면벽체의 특성에 따른 보강토 옹벽의 종방향 부등침하 허용한계(FHWA, 2001)

	타이어셀 보강토 옹벽	트레드매트 보강토 옹벽
부등침하 허용 한계	$\frac{\Delta}{L} \leq \frac{1}{50}$	$\frac{\Delta}{L} \leq \frac{1}{200}$
허용한계 변위값	80mm	20mm

다. 횡토압

트레드매트 보강토 옹벽의 벽체에 작용하는 횡토압을 측정하기 위하여 토압계를 상부 지표면으로부터 깊이 0.7m, 1.3m, 1.9m, 2.5m의 4지점에 설치하였다. 0.7m, 2.5m 위치에 설치된 토압계는 계측이 가능하였으나 1.3m, 1.9m의 위치에 설치된 토압계가 센서 불량으로 계측이 불가능하였다. 그림 112에 0.7m와 2.5m에 설치된 토압계를 계측하여 얻은 횡토압과 Rankine 토압식으로 얻은 횡토압을 비교하여 나타내었다.

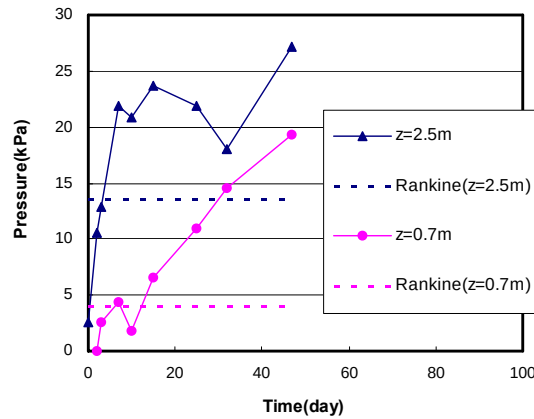


그림 121 횡토압의 측정

라. 침하판

그림 101의 위치에 설치된 침하계를 계측하여 기초바닥면의 침하를 확인하였다. 그림 122에 타이어셀 보강 성토사면과 트레드매트 보강 성토사면의 기초바닥면의 침하량을 나타내었다. 그림에서 F-2, S-2는 타이어셀 보강토 옹벽에서의 성토고와 침하량의 변화를 각각 나타내며, F-3, S-3은 트레드매트 보강토 옹벽에서의 성토고와 침하량의 변화를 각각 나타낸다. 10일동안 성토고가 변화하면서 침하량 또한 크게 옹기, 침하를 반복하는 것을 볼 수 있다. 이것은 시공 중 백호 및 진동롤러에 의한 영향으로 보이면 시공이 종료된 후에는 수렴을 하고 있는 것으로 보이며, 추후 정기적인 계측을 통하여 추가 침하량을 확인할 예정이다.

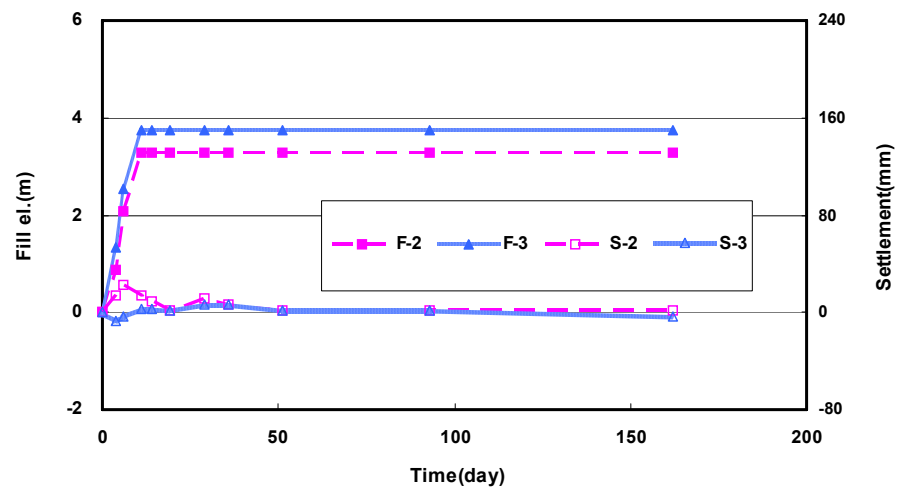


그림 122 보강토 옹벽의 기초지반 침하량(mm)

4. 결 론

페타이어를 보강토 옹벽에 사용되는 토목섬유의 대체재료로서 활용하기 위하여 FHWA지침(2001)의 설계기준에 따라 페타이어 보강토 옹벽의 설계를 하였다. 또한 설계한 단면을 바탕으로 시험시공을 수행한 후 보강토 옹벽의 거동을 계측하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 높이 3m, 벽체경사각 18.4° (1 : 0.3)의 타이어셀 보강토 옹벽은 Coulomb의 주동토압계수로 주동토압을 계산하였다. 따라서 벽체가 수직인 패널식·블럭식 보강토 옹벽에 비하여 작은 주동토압을 가지며, 보강재 수직간격이 0.6m이고 보강재 전체길이가 3.2m인 단면에 대해 외적안정 및 내적안정성을 검토한 결과 모든 최소안전율을 만족하였다.

2. 높이 3m, 벽체경사각 5.7° (1 : 0.1)의 트레드매트 보강토 옹벽은 Rankine의 주동토압계수로 주동토압을 계산하였다. 보강재 수직간격이 0.6m이고 보강재 전체길이가 3.6m인 단면에 대해 외적안정 및 내적안정성을 검토한 결과 모든 최소안전율을 만족하였다.

3. 트레드매트 보강토 옹벽에 $528\text{mm} \times 480\text{mm} \times 200\text{mm}$ (길이×폭×높이)의 콘크리트 블록을 사용하고 지오그리드를 블록사이에 포설한 후 트레드매트와 볼트로 연결하여 트레드매트 보강토 옹벽이 일체로 거동하도록 시공하였다.

4. 보강토 옹벽의 기초부분에서의 동상, 전면세굴에 의한 피해와 편칭파괴를 방지하기 위하여 현장지역의 동결심도를 고려하여 0.8m 이상의 근입깊이를 확보하였다. 또한 동상에 의한 체적팽창압력으로 블럭식 보강토 옹벽의 파괴를 방지하기 위하여 콘크리트 블록의 배면에 쇄석골재를 이용한 배수로를 확보하였다.

5. 앞에서 설계한 단면으로 페타이어 보강토 옹벽을 현장 시험시공하였다. 또한 페타이어에 의한 침출수의 영향을 분석하기 위하여 차수층, 배수층 및 집수시설을 시공하였다. 그리고 경사계, 침하계 및 슈트타켓을 설치하여 보강토 옹벽

의 거동을 확인하였다.

6. 경사계를 계측한 결과 모든 위치에서 10mm이내의 변위를 보였다. 또한 침하계를 계측한 결과 보강토 옹벽의 시공시 융기·침하를 반복하였으나, 시공 후 침하량이 수렴 중인 것으로 나타났다. 그리고 벽체의 변위를 측정한 결과 잔류 침하량과 부등침하량이 허용한계값보다 작게 나타났다. 추후 장기적인 계측을 통하여 보강토 옹벽의 거동을 확인할 예정이다.

7절. 폐타이어의 침출수 분석

1. 개요

폐타이어를 재활용하는데 있어서 가장 큰 문제점은 폐타이어로부터 발생하는 침출수의 수질 문제이다. 1차년도 실내실험으로부터 폐타이어의 입경이 작을수록 침출수의 오염농도가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 폐타이어를 재활용함에 있어 원형 그대로 사용하는 것이 환경적으로 유리한 것으로 알려져 있다 (조진우 외, 2006; 정하익 외, 2006).

폐타이어에 의한 주변지반의 환경영향을 평가하기 위하여 폐타이어를 이용하여 보강 성토사면 및 보강토 옹벽을 시공한 후 하부 집배수층으로부터 수집된 침출수의 농도를 분석하였다.

2. 침출수 집배수층의 시공

침출수 수집을 위한 집배수층의 개요도 및 단면도는 5절의 그림 68, 그림 73 및 6절의 그림 101에 상세하게 나타내었다. 먼저 폐타이어로부터 발생된 침출수를 집수정으로 유도하기 위하여 원지반에 종단구배 4%의 경사를 두었다. 원지반 위에 두께 2mm의 지오펜브레인을 포설하여 차수층을 형성하였으며 배수용으로 포설될 쇄석에 의한 지오펜브레인의 파손을 방지하기 위하여 지오펜브레인 상부에 부직포를 포설하였다. 부직포 상부에는 쇄석이 포설되었으며 토사에 의한 쇄석의 막힘현상 방지를 위하여 쇄석층 상부에 다시 한번 부직포를 포설한 후 옹벽을 시공하였다. 폐타이어로부터 발생된 침출수는 배수층, 차수층을 거쳐 지반의 구배에 따라 집수정으로 모이게 되며 주기별로 집수정의 침출수를 채수하여 분석하였다. 그림 123에 침출수를 채수하는 모습을 나타내었다.



(a) 침출수 채수



(b) 침출수 채수

그림 123 페타이어 침출수 채수

3. 침출수 분석

가. 분석항목

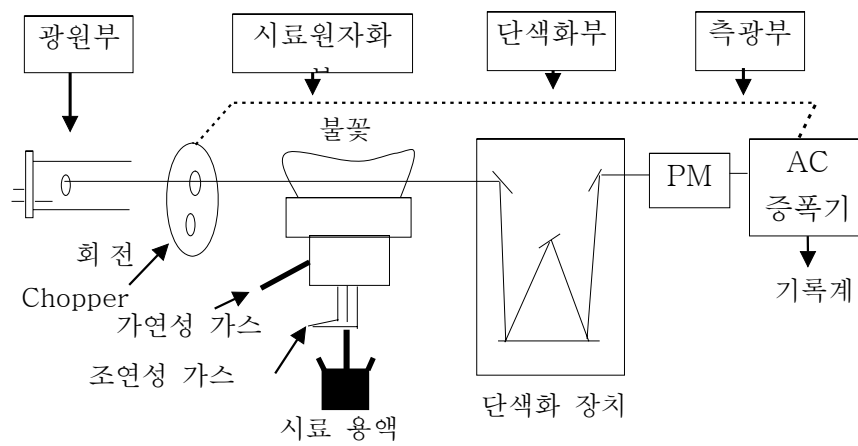
집수정으로부터 채수된 침출수의 분석항목으로는 기존 문헌과 환경부 폐기물 관리법에서 규정하는 침출수 오염기준을 참고하여 구리(Copper, Cu), 납(Lead, Pb), 알루미늄(Aluminum, Al), 크롬(Chromium, Cr), 망간(Manganese, Mn), 철(Iron, Fe), 아연(Zinc, Zn), 셀레늄(Selenium, Se), 카드뮴(Cadmium Cd), pH 등 10개 항목을 분석하였다. 표 42는 일반적인 타이어용 고무의 성분을 나타내고 있다.

표 42 일반적인 타이어용 고무의 성분(Park et al., 1996)

구성성분	SBR	Carbon black	Extender oil	Zinc oxide	Stearic acid	Sulphur	Accelerator
중량비(%)	62.1	31	1.9	1.9	1.2	1.1	0.7

나. 분석방법

침출수 농도의 분석은 먼저 원심분리기를 사용하여 고액분리를 시킨 후 상등액만을 뽑아내어 그림 124에 나타낸 원자흡광 분석장치(Atomic Absorption Spectrometry, AAS)를 사용하여 분석을 수행하였다. 원자흡광 분석장치는 광원부, 시료원자화부, 파장선택부 및 측광부로 구성되어 있다. 원자흡광 분석장치 분석은 시료를 적당한 방법으로 해리시켜 중성원자로 증기화하여 생긴 기지상태의 원자가 이 원자 증기층을 투과하는 특유 파장의 빛을 흡수하는 현상을 이용하여 개개의 특유 파장에 대한 흡광도를 측정하여 시료 중의 원소농도를 정량하는 방법으로 시료 중의 유해중금속 및 기타 원소의 분석에 사용된다.



(a) 원자흡광 분석장치 모식도



(b) AAS 장비

그림 124 원자흡광 분석장치(Atomic Absorption Spectrometry) 분석

4. 침출수 분석 결과

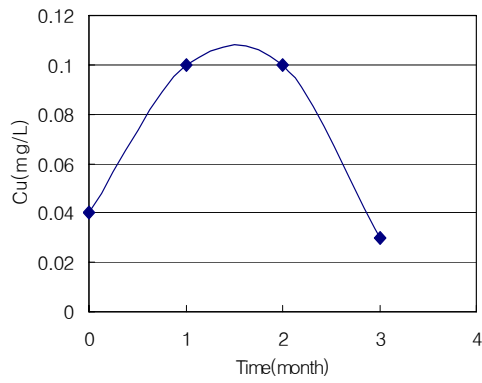
표 43은 환경부 폐기물 관리법(2005)에서 규정하는 침출수의 오염기준(2급수 기준)과 침출수 집배수층으로부터 채수된 침출수 및 동일 지역에서 채수한 우수의 농도분석 결과를 나타내고 있다. 침출수 채수는 매월 1회 실시하였다. 농도분석결과 Pb, Cr, Se, Cd는 검출되지 않았고, 검출된 Cu, Al, Mn, Fe, Zn과 pH는 침출수 오염기준(2급수)의 허용기준치 이하였다. 그리고 모든 오염물질에서 시간이 경과할수록 점점 감소하여 우수와 비슷해지는 경향을 나타내었다. 이는 Humphrey(1997) 등의 연구결과와 일치하는 것으로서 배수가 원활히 이루어진다면 페타이어를 지반보강재로 사용함에 따라 발생하는 환경적 영향은 무시할 수 있었으나, 3절의 비배수 용출시험 결과로부터 지하수위 이하에 페타이어가 장기간 노출될 경우에 대비하여 적절한 배수대책이 필요하다.

표 43 페타이어 침출수 농도분석 결과

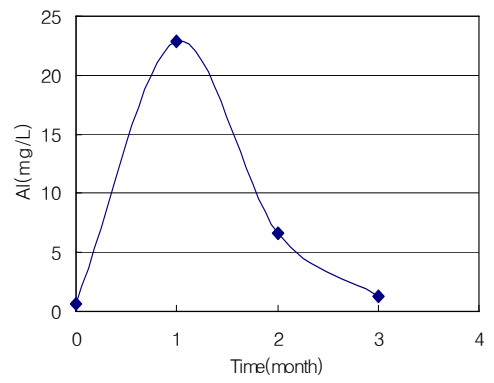
(단위 : mg/L)

항목 \ 경과일	침출수 오염기준 (2급수)	우수	페타이어 침출수		
			1개월	2개월	3개월
Cu	3.0	0.04	0.1	0.1	0.03
Pb	1.0	N.D	N.D	N.D	N.D
Al	-	0.63	22.9	6.63	1.33
Cr	2.0	N.D	N.D	N.D	N.D
Mn	10.0	0.44	1.47	0.74	0.82
Fe	10.0	0.98	17.7	5.78	1.22
Zn	5.0	0.14	0.18	0.09	0.1
Se	-	N.D	N.D	N.D	N.D
Cd	0.1	N.D	N.D	N.D	N.D
pH	5.8~8.0	6.5	7.3	7.2	7.0

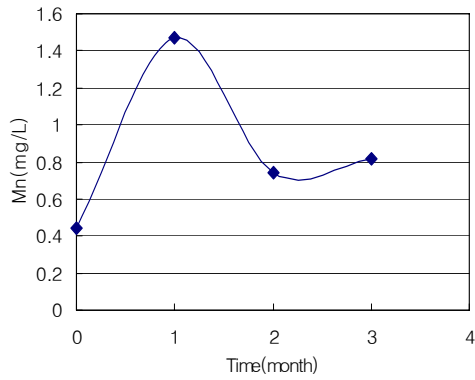
※N.D : not detected



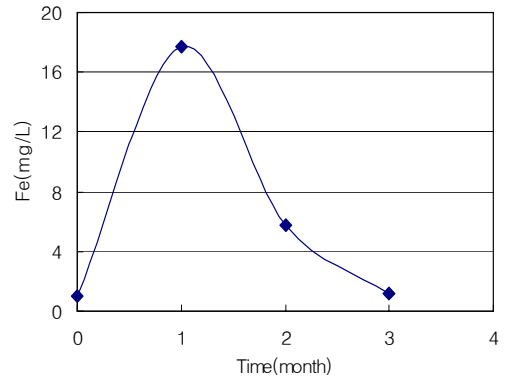
(a) 구리(Cu)



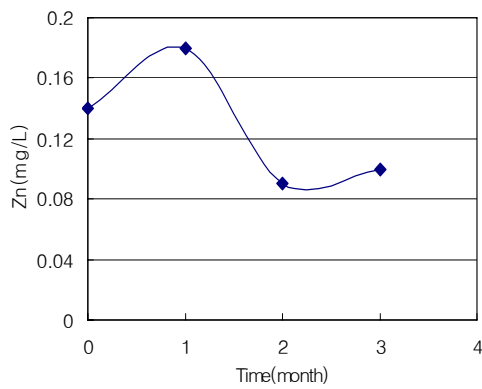
(b) 알루미늄(Al)



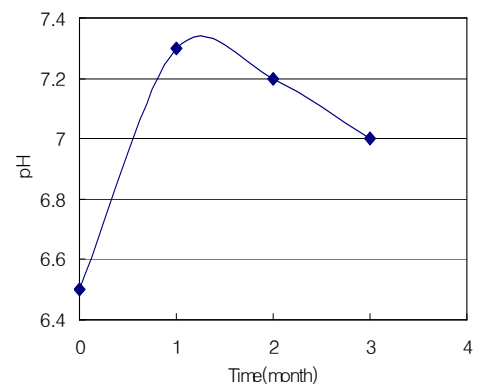
(c) 망간(Mn)



(d) 철(Fe)



(e) 아연(Zn)



(f) pH

그림 125 페타이어 침출수 농도분석 결과

5. 결론

페타이어로부터 발생하는 침출수의 오염물질 농도분석 결과 환경부 폐기물관리법(2005)에서 규정하는 침출수 허용기준(2급수)의 허용기준치 이하였으며, 시간이 경과할수록 점점 감소하여 우수와 비슷해지는 경향을 나타내었다. 따라서 페타이어를 지반보강재로 사용함에 따라 발생하는 환경적 영향은 무시할 수 있는 수준이었다.

8절. 종합결론

본 연구는 2개년 수행 연구과제로 페타이어를 활용한 지반보강 및 옹벽시공 실용화를 위하여 타이어셀 및 트레드매트의 지반보강재로서 실용화 가능성을 평가하는데 목표를 두었다. 이를 위하여 1차년도에는 페타이어의 기본특성 및 설계인장강도 결정과 관련된 실내시험, 모형시험, 현장시험을 수행하였다. 그리고 2차년도에는 1차년도의 결과를 바탕으로 실구조물에 적용하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 페타이어를 이용하여 지오셀과 유사한 기능을 갖는 타이어셀과 지오그리드와 유사한 트레드매트를 제작하였다.
2. 사질토사와 타이어와의 전단특성 파악을 위하여 상대밀도를 달리하여 대형전단시험을 수행한 결과 모래의 내부마찰각에 대한 모래-트레드외면의 내부마찰각비(δ/ϕ)는 1.06~1.08배, 모래-트레드내면의 경우 0.93~0.94배로 측정되어 마찰특성이 우수한 것으로 나타났다.
3. 타이어는 볼트를 이용하여 연결하였으며 연결재료, 연결방법에 따른 파괴특성을 분석하였다.
 - 1) 고장력 볼트, 스테인레스 볼트, 플라스틱 볼트 중 고장력 볼트를 사용했을 때 인장강도가 가장 크고, 볼트의 개수가 증가할수록, 와셔의 크기가 증가할수록 인장강도도 증가하였다.
 - 2) 같은 조건의 연결방법에 대해서 트레드매트에 비해서 타이어셀 unit의 인장강도가 1.8~2.0배 크게 관측되었다.
4. 입경 및 배수조건에 따른 용출시험과 내구성시험을 통하여 페타이어를 지반보강재로 활용하는 경우 환경적 안정성을 규명하였다.
 - 1) 입경에 따른 용출시험결과 페타이어의 입경이 증가할수록 용출농도가 감소하였다. 배수조건에 따른 용출시험 결과는 시간이 경과할수록 용출농도가 감소하였다.

2) 내화학적, 내한성, 내열성, 내미생물성, 내후성에 대한 페타이어의 내구성을 확인하였다. 페타이어가 고온에 장기간 거치될 경우와 자외선에 노출되는 경우에는 강도감소를 고려하여 장기설계인장강도를 결정해야 한다.

5. 보강재의 지반보강효과를 확인하기 위해 실내토조와 현장풍화토 지반에서 각각 평판재하시험을 수행하여 보강형태별 지지력과 침하특성을 분석하였다.

1) 토조내 재하시험시 사질토지반에서 낮은 상대밀도일수록 지지력 대폭 증가 및 침하량 대폭 감소하며 밀도가 클수록 보강효과가 작아졌다.

2) 현장재하시험에서는 보강깊이비가 증가할수록 지지력 효과 감소하며, 또한 재하판 직경이 커질수록 극한지지력은 감소하였다. 전반적으로 극한지지력이 트레드매트, 타이어셀, 무보강지반순으로 크게 측정되었다.

6. 페타이어를 보강한 구조물의 설계시 필요한 설계인장강도를 확인하기 위하여 타이어개수, 유효길이, 연결방법, 성토고를 변수로 인발시험을 수행하였다.

1) 시험에 의한 극한인발저항력은 계산에 의한 예상인발저항력보다 최소 1.7배 이상 크게 측정되었으므로 실제 지반보강에 사용되는 경우 안전할 것으로 판단된다.

2) 전체면적당 극한 인발저항력은 트레드매트 6×6(F), 타이어셀 2×7(F), 지오그리드, 지오셀 순으로 나타났다.

3) 성토고가 증가할수록 수직하중이 증가하여 타이어셀과 트레드매트의 극한인발저항력은 증가하였다.

7. FHWA지침(2001)의 설계기준에 의해 페타이어가 보강된 사면의 설계·안정성 해석을 수행하였다. 또한 설계한 단면을 바탕으로 시험시공을 수행한 후 보강 성토사면의 거동을 계측하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 수직간격 0.8m, 설계길이는 3.2m(타이어셀) 또는 3.6m(트레드매트)로 보강된 높이 3m, 경사각 45°(1 : 1)의 성토사면은 활동 및 전반적 안정에 대해 최소 안전율을 만족하였다.

2) 경사계를 계측한 결과 모든 위치에서 10mm이내의 변위를 보였다. 또한 기초지반에서의 잔류침하를 확인하기 위한 침하계를 계측한 결과 사면의 시공시

융기·침하를 반복하였으나, 시공 후 침하량이 수렴 중인 것으로 보였다.

8. FHWA의 설계기준에 따라 페타이어 보강토 옹벽의 설계를 하였고 설계한 단면을 바탕으로 시험시공을 수행한 후 보강토 옹벽의 거동을 계측하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 높이 3m, 벽체경사각 18.4° (1 : 0.3)의 타이어셀 보강토 옹벽은 Coulomb의 주동토압계수로 주동토압을 계산하였고, 보강재의 수직간격은 0.6m, 전체길이는 3.2m인 단면에 대해 외적안정 및 내적안정성을 검토한 결과 모든 최소안전율을 만족하였다.

2) 높이 3m, 벽체경사각 5.7° (1 : 0.1)의 트레드매트 보강토 옹벽은 Rankine의 주동토압계수로 주동토압을 계산하였고, 보강재의 수직간격은 0.6m, 전체길이는 3.6m인 단면에 대해 외적안정 및 내적안정성을 검토한 결과 모든 최소안전율을 만족하였다.

3) 보강토 옹벽의 기초부분에서의 동상과 전면세굴에 의한 피해, 편칭파괴를 방지하기 위하여 현장지역의 동결심도를 고려하여 0.8m 이상의 근입깊이를 확보하였다. 또한 동상에 의한 체적팽창압력으로 보강토 옹벽의 파괴를 방지하기 위하여 콘크리트 블록의 배면에 쇄석골재를 이용한 배수로를 확보하였다.

4) 경사계를 계측한 결과 모든 위치에서 10mm이내의 변위를 보였다. 또한 침하계를 계측한 결과 보강토 옹벽의 시공시 융기·침하를 반복하였으나, 시공 후 침하량이 수렴 중인 것으로 나타났다. 그리고 벽체의 변위를 측정한 결과 잔류침하량과 부등침하량이 허용한계값보다 작게 나타났다.

9. 페타이어로부터 발생하는 침출수의 오염물질 농도분석 결과 환경부 폐기물관리법(2005)에서 규정하는 침출수 허용기준(2급수)의 허용기준치 이하였으며, 시간이 경과할수록 점점 감소하여 수렴, 우수와 비슷해지는 경향을 나타내었다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

1절. 연구개발목표 달성도

본 과제의 수립된 목표에 대한 수행 진도율 및 달성도를 연구기간에 따라 항목별로 요약하면 다음과 같다.

1. 연구개발 수행 진도율

가. 1차년도

(2007. 07. 28일 현재)

구 분 연구내용		연구 개발 기 간												진도
		1 차 년 도												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. 문헌조사	계획	-----												100%
	실적	=====												
2. 기본물성시험	계획	-----							-----					100%
	실적	=====							=====					
3. 시작품 제작	계획	-----												100%
	실적	=====							=====					
4. 대형전단시험	계획		-----											100%
	실적		=====											
5. 타이어 인장시험	계획					-----								100%
	실적					=====								
6. 환경영향 및 내구성 평가(추가항목)	계획					-----				-----				100%
	실적					=====				=====				
7. 토조재하시험	계획			-----						-----				100%
	실적			=====						=====				
8. 현장재하시험	계획		-----											100%
	실적		=====											
9. 현장인발시험	계획									-----				100%
	실적									=====				
10. 결과분석 및 보고서 작성	계획										-----			100%
	실적										=====			
11. 총 진도율	계획	-----												100%
	실적	=====												

나. 2차년도

(2007. 07. 28일 현재)

구 분 연구내용		연구 개발 기 간												진도
		2 차 년 도												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. 시작품제작	계획	-----												100%
	실적	=====												
2. 보강사면 및 보강토옹벽 시공	계획			-----										100%
	실적									=====				
3. 현장계측 및 자료분석	계획						-----							100%
	실적										=====			
4. 구조물의 안정성해석	계획									-----				100%
	실적											=====		
5. 침출수 수집 기반조성 및 시설시공	계획	-----												100%
	실적										=====			
6. 침출수 수집 및 분석	계획						-----							100%
	실적										=====			
7. 최종보고서 작성	계획											-----		100%
	실적											=====		
8. 설계시방서 작성	계획											-----		100%
	실적											=====		
9. 총 진도율	계획	-----												100%
	실적	=====												

2. 연구개발 목표의 달성도

가. 1차년도

목 표	달성도 (%)	내 용
문헌조사	100	- 페타이어를 활용한 지반보강 사례 - 국내외 페타이어 관련 개발동향 분석
기본물성시험	100	- 사질토 및 현장풍화토의 기본물성시험 수행
시작품 제작	100	- 육안에 의한 페타이어의 사용기준 선정 - 타이어셀 및 트레드매트 제작
대형전단시험	100	- 사질토, 사질토-타이어 전단특성 규명 - 풍화토, 풍화토-타이어 전단특성 규명
인장시험	100	- 타이어셀과 트레드 연결부의 하중-변형특성 고찰 - 연결재료 및 연결방법에 따른 타이어셀, 트레드의 강도 특성 분석
환경영향 및 내구성 평가 (추가항목)	100	- 지반보강재로서 환경적 영향 없음 - 장기간의 거동을 관찰하고 있음
토조재하시험	100	- 토조내에 조성한 사질지반에 대한 평판재하시험 수행 - 재료특성이 보강재로서의 적합성판정
현장재하시험	100	- 재하판직경에 따라 풍화토를 성토하여 평판재하시험 수행 - 재료특성이 보강재로서의 실용화가능성 판정
현장인발시험	100	- 성토고등을 다르게 하여 풍화토로 조성된 지반에 타이어셀·트레드매트를 설치 후 인발저항력을 비교 분석 - 설계인발저항력의 보강재로서 적합성 판정

나. 2차년도

목 표	달성도 (%)	내 용
시작품제작	100	- 재료구입 - 타이어셀 및 트레드매트 제작 - 계측 소모품 구입 및 임차
침출수 수집 기반조성 및 시설시공	100	- 침출수 수집용 기반조성 - HDPE차수막, 부직포, 집수정 등 시설시공
보강사면 및 보강토 옹벽시공	100	- 높이 3m의 보강사면 및 보강토 옹벽 시공 - 계측기(토압계, 침하계, 경사계, 슈트타켓) 설치
현장계측 및 자료분석	100	- 현장 변위 계측 모니터링 - 현장계측 데이터 분석
안정성 해석	50	- 수치해석 프로그램을 이용한 안정성 해석
침출수 수집 및 분석	100	- 페타이어의 침출수 수집 - 침출수 수질분석 및 환경영향 평가
종합보고서 작성	100	- 1차년도 중간보고서를 포함한 종합보고서 작성
시방서 작성	100	- 보강토옹벽을 시공하기 위한 설계시방서 작성

2절. 관련분야 기술 발전에의 기여도

1. 기술적 성과 및 파급효과

입체모양의 타이어셀은 상업용 지오셀, 트레드매트는 지오그리드와 같은 메카니즘으로 지반보강 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 시작품단계에서는 제작이 번거로울 수 있으나 실 구조물이 성공적으로 시공되어 대량기술의 개발 가능성은 확실하다고 말할 수 있다. 장차 다량의 수량을 필요로 할 경우에는 자동절단 및 조립기계의 제작이 수반되어야 하며, 본 기술의 폐자원의 재활용인 만큼 정부의 폐자원 재활용 정책과 맞물릴 경우 시공물량이 대폭 증가할 것으로 생각된다.

또한 페타이어의 지반공학적 사용은 앞으로 폐자원의 건설 제반 분야 활용에 대한 인식을 제고하고 향후 타 폐기물도 환경문제가 해결된다면 건설분야에 활용할 수 있는 계기가 될 것으로 생각된다. 아울러 폐비닐·폐플라스틱 등의 가공에 의한 지반보강재 활용 등으로 연구를 확대하는 계기가 될 것이다.

2. 시장성 및 경제적 기대성과

가. 페타이어를 활용한 보강토 옹벽의 경제성 분석

타이어를 매립장에서 재활용하기 위해서는 재활용하는 지역의 관할 관청에 타이어 사업계획서를 제출하여 재활용 신고를 하면 관할 관청으로부터 재활용 신고필증을 교부받을 수 있으며, 타이어 공업협회와 계약을 함으로써 지역 타이어 회수업체로부터 타이어를 공급받게 된다. 타이어의 공급비용은 매립장(원형이용) 또는 고무블록(가공이용)으로 이용시 22,000원/t, 시멘트 킬른(열이용)으로 이용시 30,000원/t이다.

그러나 보강목적으로 사용하기 위해서는 마모 또는 손상정도에 따라 타이어를 선별하는 작업이 필요하므로 추가 비용이 들어가며, 약 40,000원/t(200원/개)정도가 될 것으로 예상되며, 재료비 단가는 832원/m^2 이 될 것으로 예상된다. 또한 본 시험시공에서 사용된 트레드매트는 트레드 중심간격이 0.35m인 지오그리드 형식의 매트이다. 트레드매트를 만들기 위해서는 개별의 트레드를 연결해야하는

추가 작업이 필요하며, 이에 따른 추가 노무비는 옹벽 시공속도에 맞춰야하나 현장 조건에 따라 변동이 크다고 할 수 있다. 본 시험시공의 경우 8명의 인부(57,820원/일)가 만들어야 보강재 포설량 속도($80\text{m}^2/\text{일}$)를 맞출 수 있었다. 따라서 노무비 단가는 $5,782\text{원}/\text{m}^2$ 이다. 그러나 향후 트레드 절단 및 연결 장비가 만들어진다면 작업효율성이 증대되고 시공비용은 저하 될 것으로 예상된다.

표 1과 그림 1에 보강재 종류와 옹벽높이에 따른 보강토 옹벽의 시공비용을 비교하여 나타내었다. 표 1에서 지오그리드는 재료비가 비싸고 시공성이 뛰어나 노무비가 저렴한 반면, 트레드매트는 재료비가 저렴하나 트레드매트를 포설하는 비용 외에 매트를 제작하기 위한 비용이 추가로 필요하므로 노무비가 비싼 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 문제는 대량사용의 경우 절단 및 연결 장비 제작으로 비용을 경감할 수 있다. 그림 1에서 트레드매트가 사용된 보강토 옹벽의 시공비는 지오그리드의 경우에 비하여 최소 94%에서 최대 64%로 옹벽 높이가 높아질수록 저렴한 것으로 나타났다.

또한 트레드를 패널식 보강토 옹벽에 쓰이는 강재 띠형(steel strip)과 같은 방법으로 사용된 보강토 옹벽의 시공비는 지오그리드의 경우와 비교하면 최소 92%에서 최대 48%까지 저렴한 것으로 나타났다. 이것은 트레드를 매트로 제작하지 않고 띠(strip)로만 사용하므로 소요되는 트레드가 트레드매트보다 50%적고, 제작비용이 추가로 들어가지 않으며 매트에 비해 운반 및 포설이 비교적 쉬우므로 시공성이 뛰어나기 때문이다. 따라서 트레드를 사용하면 기존 블록식 보강토 옹벽과 비교하여 공사기간은 비슷하나 공사비용이 저렴한 보강토 옹벽을 시공할 수 있을 뿐 아니라 재활용 측면의 부가적인 효과를 기대할 수 있다.

표 46 보강재 종류와 옹벽높이에 따른 보강토 옹벽 시공비 비교 (단위 : 천원)

높이 (m)	트레드 ¹⁾				트레드매트 ²⁾				지오그리드 ³⁾				비교 (^{1/3})
	재료비 ⁴⁾	노무비 ⁵⁾	경비 ⁶⁾	계	재료비 ⁴⁾	노무비 ⁵⁾	경비 ⁶⁾	계	재료비 ⁷⁾	노무비 ⁵⁾	경비 ⁶⁾	계	
1.1	98,655	76,384	1,125	176	99,684	86,266	1,125	187	113,767	76,384	1,125	191	92%
2.1	98,904	79,818	1,691	180	100,209	92,345	1,691	194	118,062	79,818	1,691	200	90%
3.1	99,410	75,865	1,897	177	101,378	94,759	1,897	198	128,304	75,865	1,897	206	86%
4.1	100,033	79,493	2,444	182	102,326	101,521	2,444	206	133,719	79,493	2,444	216	84%
5.1	100,647	77,884	2,882	181	103,306	103,427	2,882	210	139,707	77,884	2,882	220	82%
6.1	101,775	81,364	3,522	187	105,236	114,605	3,522	223	152,609	81,364	3,522	237	79%
7.1	102,849	83,507	4,076	190	107,122	124,542	4,076	236	165,603	83,507	4,076	253	75%
8.1	103,631	85,148	4,640	193	108,307	130,061	4,640	243	187,269	85,148	4,640	277	70%
9.1	104,856	89,222	5,343	199	110,357	142,055	5,343	258	204,902	89,222	5,343	299	67%
10.1	105,983	91,649	5,927	204	112,312	152,429	5,927	271	222,487	91,649	5,927	320	64%
11.1	107,118	94,121	6,514	208	114,278	162,886	6,514	284	240,140	94,121	6,514	341	61%
12.1	108,573	97,218	7,104	213	116,983	177,989	7,104	302	266,413	97,218	7,104	371	57%
13.1	109,402	99,107	7,694	216	118,228	183,878	7,694	310	284,337	99,107	7,694	391	55%
14.1	111,181	102,872	8,289	222	121,679	203,704	8,289	334	319,068	102,872	8,289	430	52%
15.1	120,973	114,209	9,511	245	134,008	239,408	9,511	383	390,667	114,209	9,511	514	48%

주 1) 트레드 : 트레드를 패널식 보강토 옹벽에 쓰이는 강재 띠형(steel strip)과 같은 방법으로 보강된 블록식 보강토 옹벽
 2) 트레드매트 : 트레드를 지오그리드 형식으로 매트를 제작하여 트레드매트가 보강된 블록식 보강토 옹벽
 3) 지오그리드 : 지오그리드가 보강된 블록식 보강토 옹벽
 4) 재료비 : 블록, 연결핀, 타이어 포함(단 쇠석은 채취장의 거리에 따라 단가가 결정되므로 미포함).
 5) 노무비 : 작업인부, 건설기계운전기사 노임 임.
 6) 경 비 : 시공장비의 연료비 임.
 7) 재료비 : 블록, 연결핀, 그리드 포함(단 쇠석은 채취장의 거리에 따라 단가가 결정되므로 미포함).
 1)/3) : 지오그리드 보강토 옹벽에 대한 트레드 보강토 옹벽의 시공비 비교

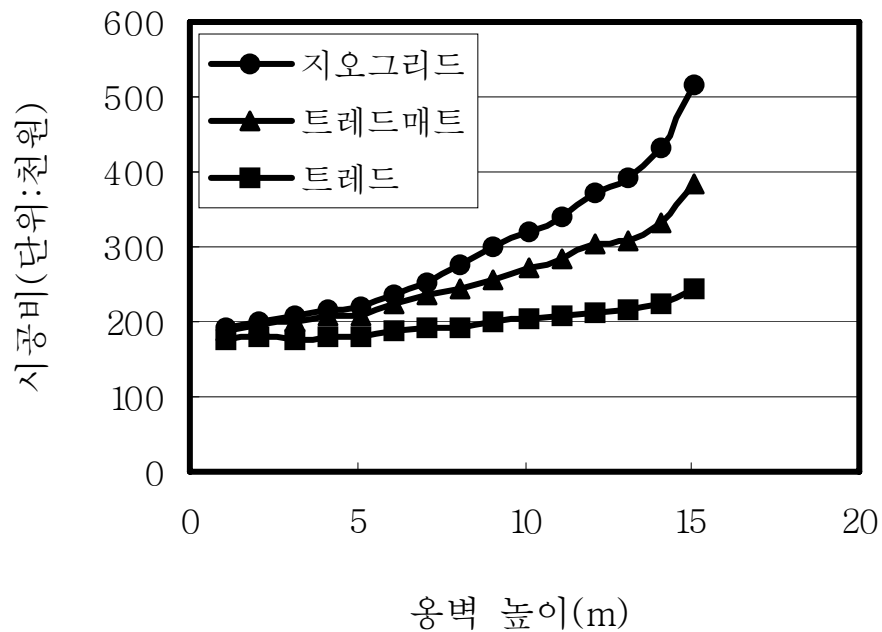


그림 126 보강재 종류와 옹벽높이에 따른 보강토 옹벽 시공비 비교

나. 시장성 및 경제적 기대성과

본 연구에서 사용하고자 하는 페타이어는 앞에서 언급한 바와 같이 타이어가 갖는 여러 장점으로 이를 지반보강재로 유용하게 활용할 수 있다. 현재 지오그리드(geogrid)와 지오셀을 사용하는 순수 보강토 공사는 200억/년 정도이며 지오셀(geocell)은 기초보강, 사면보강, 옹벽 등 다양한 분야에 사용가능하며 전량 수입에 의존하고 있으나 수입단가가 고가여서 사용이 비교적 적은 편이다. 그러나 타이어셀을 옹벽의 시공에 사용할 경우 저가에 시공이 가능하므로 옹벽공사의 상당부분을 페타이어로 대체가능하며 특히 경사도가 급한 옹벽의 시공과 벽면의 식재가 가능하여 시공 후 일정기간 경과후에는 덩굴식물 등으로 페타이어의 미관을 보완할 수 있다. 옹벽 시공의 연간 비용은 정확한 통계가 없으나 수 천억 이상의 상당한 액수에 달할 것이다. 따라서 페타이어를 건설공사의 지반보강 혹은 옹벽 축조의 목적으로 사용하게 되면 지오셀의 장점을 살릴 수 있고 지오그리드를 상당부분 대체할 수 있어 페타이어의 활용도를 높일 수 있다. 또한 지하수의 오염 없이 폐자원을 활용할 수 있어 일석이조의 장점이 있다. 특히 건

설공사 중 지반상의 성토 등 토공구조물 공사에 사용하게 되면 대량으로 소모하기 용이한 점이 있다. 따라서 본 연구에서 추구하는 실용화가 성공적으로 수행되면 폐타이어를 활용하는 다른 어느 분야보다 양적, 질적인 면에서 더 효율적일 것으로 생각된다. 시장성의 문제는 폐타이어의 강성이 상업용 보강재보다 큰 반면 타이어가 차지하는 단위면적당의 체적과 중량이 커서 운송에 더 어려운 점이 있으므로 가급적 폐타이어가 배출되는 대도시 중심의 지자체에서 자체공사에 우선적으로 사용하게 되면 운송비를 절감할 수 있을 것으로 생각된다. 산업적 효과로서는 건설산업과 타 산업분야의 폐기물을 건설산업에 효과적으로 사용하는 중요한 선례가 될 것으로 사료된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1절. 연구성과

총 2차년도 연구과제이며 현재 진행중인 연구과제이므로 성과물은 아직 없는 상황이나, 현재 1차년도 연구결과에 대해 각각의 항목에 대하여 논문작성중이며 국내외유명학술대회 및 학술지에 제출예정이다.

2절. 연구결과의 활용방안

1. 활용방안

1차년도 연구성과를 바탕으로 사면 및 옹벽에 페타이어를 지반보강재로 활용하여 실 구조물을 시공하고, 침출수가 수질기준에 적합한 범위 내에 있음을 확인하기 위한 2차년도 연구를 수행한다.

2. 향후 예상되는 활용분야

연구결과는 토목분야 중 지반보강분야 즉 성토사면에서의 사면안전을 향상, 직접기초의 보강, 상자형 구조물 전후의 부등침하 경감, 사면보호, 그리고 초목류의 식재 가능한 옹벽의 시공 등에 활용할 수 있다.

3. 추가연구 분야

타이어를 이용한 타이어셀 및 트레드매트 제품 생산의 자동화로 신속한 제품 생산이 효율적으로 이루어질 수 있도록 개선되기 위한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.페타이어 활용기술은 지반보강개념에 대한 이해를 교육함으로써 기술을 쉽게 이전할 수 있는 사항이며 기타 지반공학에 대한 이론적인 사항은 협동기업 기술자의 교육을 통하여 전수하게 되면 본 연구결과의 활용에 대한 지원

은 충분할 것으로 생각된다. 아울러 관련 혹은 유사연구로서는 폐타이어를 다른 경량재료와 혼용하여 연약지반상의 경량성토재료로서 후속 연구를 수행하고자 한다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해외에서 페타이어를 성토의 목적으로 사용한 사례는 다수가 있다. 성토는 주로 타이어의 절단 없이 로프 등으로 묶어 사용하거나 타이어의 한쪽 면을 잘라 성토에 사용한 사례가 대부분이다. 그리고 페타이어를 분쇄하여 칩으로 만들어 경량 성토 목적으로 사용한 사례와 타이어칩을 사질토와 혼합하여 전단강도를 증가시켜 사용할 목적으로 연구한 사례가 있다. 이 경우 타이어칩 외부에 노출된 다수의 강선으로 인하여 일부의 중금속이 허용기준치를 초과하게 된다. 그리고 표 1에서 보인 타이어의 한 측면을 절단하고 로프로 연결한 형태는 토사의 채움은 용이하나 타이어의 원형셀이 커서 본 연구에서 수행하고자 하는 8자형 셀보다 칩하량이 큰 결점이 있다.

O'Shaughnessy와 Garga(2000)의 연구결과에 의하면 칩으로 사용할 경우에는 일부 중금속이 허용치를 초과하나 강선의 노출 없이 사용하는 경우에는 지하수를 오염시키지 않음을 보고하고 있다. 한편 미국의 Integrated Waste Management Board(1996)에서는 타이어가 환경에 미치는 영향에 대하여 다양하게 연구한 바 있으며, 국내의 문창만(2003), 천성한(2005)의 연구에서도 타이어의 큰 경우 침출수가 먹는 물 기준치를 초과하지 않음을 밝히고 있다.

미국, 캐나다, 브라질, 유럽, 일본, 호주 등에서 페타이어를 이용한 사례가 그동안 수 차례 보고되었다. 처음으로 타이어의 실제적인 적용이 보고된 것으로는 1970년대 중반에 Santa Cruz 북쪽의 캘리포니아 236번 고속도로에서 사면보수한 것이 첫 번째 활용사례로 알려져 있다(Forsyth & Egan, 1976). 그리고 Hausmann(1990)에 따르면 타이어를 이용하여 일반적인 성토구배인 1.5H:1V 대신 0.5H:1V의 급경사로 70,000m³ 성토를 한 사례도 있으며, 캘리포니아주 Tehama county 32번 도로에서는 성토제방 노면부의 침식방지 및 사면보호 목적으로 활용하였다(Drescher & Newcomb, 1994). 또한 연약지반상에 성토제방 축조시 경량성토재료로써 타이어 파생 골재의 사용(Humphrey et al., 2000)과 옹벽 및 교대의 경량성 뒷채움재료로써 타이어 파생 골재 사용(Humphrey et al., 1998)등의 여러 분야에의 적용 사례가 있다. 캐나다에서는 오타와 근교에서 페타이어를 이용한 대규모의 성토를 캐나다 정부의 지원하에 수행하였다(Garga와 O'Shaughnessy, 2000).

영국의 잉글랜드에서 페타이어를 이용한 처음의 프로젝트는 West Yorkshire 에서의 높이 3.7m 중력식 옹벽의 시공이었다. 시공된 구조물은 차량주차와 사무실 확장 공간 확보를 위한 것이었으며 4500개의 타이어가 사용되었다. 시험용 타이어 옹벽의 시공비용은 유사한 옹벽 시공비의 약 1/4로 추정되었다. Dalton 과 Hoban(1982)는 잉글랜드의 M62도로 26번 교차로 서쪽 출구에 기존의 가비온(gabion) 옹벽의 대안으로 타이어 옹벽을 사용한 사례를 보고한 바 있다. 프랑스에서는 1982년 이후로 지속적으로 타이어를 이용한 250여 개의 보강구조물을 시공하였으며(Long, 1993), 페타이어 활용 전문회사가 있다.

호주에서는 Wickham Annie street 32-34에 타이어를 이용한 옹벽 및 도로 시공사례가 있으며(Ecoflex, 2004), 폐자원활용 토목분야 전문회사가 있다. 일본의 경우에도 많은 적용 사례가 있다. Hokkaido, Hobetsu에 240ton의 타이어를 이용한 높이 20m의 성토사면 시공과 항만의 선착장 충격저감제(cushion)로서 옹벽 뒷채움재로 사용사례(Hazarika et al., 2006), 연약지반 개량시 사용되는 연직배수재 안에 지진시 액상화 및 변형 저감재로 사용사례(Yasuhara et al., 2004) 등 여러 분야에서 페타이어를 적용하고 있다.

이 외에도 타이어와 흙을 이용한 토목구조물은 옹벽, 보강사면, 경량성토, 에너지 확산용, 소음차단, 제방이나 강의 사면 보호, 기타 다른 분야의 적용 등 많은 적용 사례가 있다.

제 7 장 참고문헌

- 김근수, 윤여원, 윤동구, 정하익 (2007), “타이어셀을 활용한 보강 성토사면의 설계”, 한국지반환경공학회 가을학술발표회 논문집, pp.493 ~ 496.
- 김영진, 홍승서 (2004), “Methylene Blue 동결심도계에 의한 전국 동결심도 조사”, 2004년 한국건설기술연구원 지반연구부 사이버 연구성과 발표회, pp.1 ~ 11.
- 김재윤 (2002), “고무 지오셀로 보강된 사질토의 정적 거동”, 인하대학교 석사학위 논문, pp.1 ~ 59.
- 강병희, 김영진 (1998), “페타이어를 이용한 지반동상 방지”, 한국지반공학회지 제 14권 제1호, pp.49 ~ 58.
- 김규래 (2001), “옹벽 뒤채움재로서 페타이어 활용방안에 관한 연구”, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.
- 김진만, 조삼덕, 윤수호, 정문경, 김영윤 (1999), “연약지반상 고속철도 노반 축조시 지오셀 시스템의 효과”, 토목섬유 학술발표회 논문집, pp.131 ~ 141.
- 김풍식 (2000), “사질토 지반에서의 지오셀 시스템의 보강 효과”, 인하대학교 석사학위 논문, pp.1 ~ 51.
- 박용부, 정형식 (2004), “화강풍화토에서 scale effect를 고려한 기초의 지지력 및 침하량 산정에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 제1호, pp.131 ~ 139.
- 신재범, 신은철, 신민호, 채영수 (2002), “다층 시스템에서 지오그리드의 보강특성에 관한 연구”, 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.553 ~ 539.

유충식, 신승우 (1994), “지오그리드로 보강된 연약지반 위에 위치한 연속기초의 극한 지지력”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.169 ~ 174.

유충식, 이대영 (1996), “지오그리드로 보강된 사면위에 위치한 연속기초의 지지력”, Geosynthetics Conference, pp.29 ~ 42.

윤여원 (2003), “페타이어를 활용한 지반강화 성토공법 최종보고서”, 대림산업(주).

윤여원, 김근수, 윤동구, 정하익 (2006), “지반 보강용 타이어셀의 인발거동 특성”, 한국지반환경공학회 가을학술발표회 논문집, pp.349 ~ 352.

윤여원, 김근수, 정하익, 윤동구 (2006), “지반 보강용 트래드매트의 인발거동 특성”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.2235 ~ 2238.

윤여원, 김방식, 서덕성 (2004), “페타이어와 토목섬유에 의한 지반보강효과의 비교 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제20권 제5호, pp.59 ~ 66.

윤여원, 김풍식, 천성한 (2003), “모래지반에서 모형 지오셀에 의한 보강 효과”, 한국지반환경공학회 논문집, 제4권, 제3호, pp.51 ~ 59.

윤여원, 문창만, 김건홍 (2004), “지반보강재로서 페타이어의 활용; (2)환경적 영향”, 한국지반공학회 논문집, 제20권, 제3호, pp.119 ~ 128.

윤여원, 이승원, 김근수, 허승범 (2006), “지반보강용 트래드매트의 인발저항 특성”, 대한토목학회 가을정기학술대회 논문집, pp.771 ~ 774.

윤여원, 김근수, 윤동구, 정하익 (2007), “트래드매트를 활용한 보강 성토사면의 설계”, 한국지반환경공학회 가을학술발표회 논문집, pp.477 ~ 480.

윤여원, 조성수, 김근수 (2007), “지반보강재로서 타이어 트래드의 공학적 특성”, 한

- 국지반환경공학회, Vol. 8, No. 1, pp.49 ~ 55.
- 윤여원, 차영일, 강대성 (2002), “건설용 재료로서의 페타이어의 지반보강 효과”, 한국폐기물학회지, 제 19 권 제 5 호, pp.518 ~ 525.
- 윤여원, 천성환, 허승범 (2005) “페타이어매트로 보강된 풍화토지반의 거동”, 한국지반환경공학회, Vol. 6, No. 4, pp.37 ~ 46.
- 윤여원, 최경순, 윤길림, 김방식 (2004), “지반보강재로서 페타이어의 활용; (1) 지반보강 효과”, 한국지반공학회 논문집, 제20권 제3호, pp.107 ~ 117.
- 윤여원, 최경순, 천성환 (2003), “지반보강재로서 페타이어의 보강 효과”, 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.827 ~ 832.
- 윤현식 (2004), “타이어 매트로 보강된 풍화토 지반의 지지력”, 인하대학교 석사학위 논문, pp.1 ~ 44.
- 이상구 (1999), “연약지반상 철도 노반에 적용한 지오셀 시스템의 보강 효과에 관한 연구”, 경희대학교 석사학위 논문, pp.1 ~ 49.
- 이은수, 김홍택, 이승호, 김경모 (2007), “보강토 공법”, 건설가이드, pp.215 ~ 467.
- 이진웅, 이종덕 (1993), “지오셀을 이용한 지반 안정”, KGS '93 National Conference/ Ground Stabilization and Reinforcement, pp.33 ~ 35.
- 이태진, 권오열, 안수정 (2000), “페타이어의 흡착과 폐놀 미생물을 이용한 악취 유발물질의 제거”, 대한환경공학회지 논문, Vol. 22, No. 9, pp.1601 ~ 1607.
- 전한용, 박영목, 이광열, 정진교, 정연인, 장용채 (2005), “지오신세틱스-GEOSYNTHETICS-”, 보성각, pp.82 ~ 422.

정연규, 민달기, 오현제 (1986), “페타이어에 의한 공장폐수내의 중금속 제거에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제6권, 제4호, pp.29 ~ 42.

정하익, 조진우, 윤여원 (2006), “입경에 따른 페타이어의 용출특성 연구”, 한국폐기물학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp.360 ~ 363.

조진우, 정하익, 윤여원 (2006), “배수조건에 따른 페타이어의 용출특성 연구”, 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회 논문집, pp.203 ~ 206.

조진우, 정하익, 윤여원 (2006), “지반보강재로서 페타이어의 내구성 평가” 대한토목학회 가을정기학술대회 논문집, pp.755 ~ 758.

조진우, 정하익, 이용수, 윤여원 (2007), “지반보강재로서 페타이어 사용에 따른 침출수 분석”, 한국지반공학학회 가을학술발표회, pp.1713 ~ 1716.

주재우, 심재범, 손순중, 김재영, 최경호, 최혁남 (1996), “상대밀도가 토목섬유 보강지반에 미치는 영향”, 96 Geosynthetics Conference, pp.17 ~ 27.

차영일 (2002), “사질토지반에서의 페타이어매트 시스템의 보강 효과에 관한 연구”, 인하대학교 석사학위 논문, pp.30 ~ 43.

천성한 (2005), “페타이어매트로 보강된 성토지반의 거동 및 환경영향 평가”, 인하대학교 박사학위 논문, pp.1 ~ 101.

최경순 (2002), “페타이어셀 매트로 보강된 모래지반의 지지력과 침하특성”, 인하대학교 석사학위 논문, pp.1 ~ 60.

한재관 (2004), “사질토지반에서 페타이어매트와 지오그리드의 보강효과”, 인하대학교 석사학위 논문, pp.1 ~ 52.

한국환경자원공사, 폐타이어 재자원화 및 재활용에 관한 기술사례조사, 1988.

한국환경자원공사, <http://www.envico.or.kr>.

환경부 (2003), “건설폐기물의재활용촉진에관한법률”, 법률 제 07043호.

환경부 (2003), “먹는물수질기준및검사등에관한규칙”, 환경부령 제 00147호.

환경부 (2003), “지하수의수질보전등에관한규칙”, 별표4, 지하수의수질기준.

환경부 (2003), “환경정책기본법시행령”, 별표1, 환경기준.

환경부 (2004), “수질환경보전법시행규칙”, 별표1, 수질오염물질.

환경부 (2004), “수질환경보전법시행규칙”, 별표5, 오염물질의배출허용기준.

환경부 (2005), “폐기물관리법시행규칙”, 별표8, 폐기물처리시설의관리기준.

Arai, K., Kamon, M., Nomura, S., and Yokota, Y. (2001), “Bearing capacity considering stiffness of reinforcement material”, *Landmarks in Earth Reinforce*, pp.523 ~ 528.

Aykol, A., Budakoglu, M., Kumral, M., Gultekin, A. H., Turhan, M., Esenli, V., Yavuz, F., and Orgun, Y. (2003), “Heavy metal pollution and acid drainage form the abandoned Balya Pb-Zn sulfide Mine”, *NW Anatolia*, Turkey, pp.198 ~ 208.

Bathurst, R.J. and Crowe, R.E. (2001), “Recent Case Histories of Flexible Geocell Retaining Walls in North America”, *Proc. Recent Case Histories of*

Permanent Geosynthetics -Reinforced sand over collapsible soil, J. Geotextiles and geomembranes, pp.81 ~ 87.

Bathurst, R. J., and Jarrett, P. M. (1996), "Large-Scale Model Tests of Geocomposite Mattresses over Peat Subgrades", *Transportation Research Record*, pp.28 ~ 36.

Blumenthal, M., Humphrey, D. N. and Katz, L. E. (1997), "Water Quality effects of Tire Chip Fills Placed Above the Grounder water Table", *Testing Soil mixed with Waste or Recycled Materials*, The American Society for Testing and Materials, pp.299 ~ 313.

Cho, Jin-Woo, Chung, Ha-Ik, Lee, Yong-Soo, Yoon, Yeo-Won (2007), "Characteristics of Waste Tire for Use in Soil Reinforcement", 7th Japanese-Korean French Seminar on Geo-Environmental Engineering, pp.103 ~ 108.

Crowe, R.E., Bathurst, R.J. and Alston, C. (1989), "Design and Construction of a Road Embankment Using Geosynthetics", Proc. 42'nd Canadian Geotechnical Conference, pp.266 ~ 271.

Dalton, D. C., and Hoban, K. M. (1982), "Tire walls in highway construction", *Journal of the Institution of Highway Engineers* 2, pp.2 ~ 9.

Dash, S. K., Rajagopal, K., and Krishnaswamy, N. R. (2001), "Strip footing on geocell reinforced sand beds with additional planar reinforcement", *Elsevier, Geotextiles and geomembranes*, pp.529 ~ 538.

Demerchant, M. R., Valsangkar, A. J., and Schriver, A. B. (2001), "Plate load tests on geogrid-reinforced expanded shale lightweight aggregate", *J.*

Geotextile and geomembrances, pp.174 ~ 190.

Drescher, A., and Newcomb, D. (1994), "Development of design guidelines for use of shredded tires as a lightweight fill in road subgrade and retaining walls", *Minnesota Department of Transportation, Report MN/RC-94/04*, National Technical Information Service, Springfield, Va.

Elias, V., Christopher, B. R., and Berg, R. R. (2001), "Mechanically Stabilized Earth Walls and reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines", Publication No. FHWA-NHI-00-043, National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

FHWA (1998), "User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction", FHWA-RD-97-148.

Foose, G. J., Benson, C. H., and Boscher, P. J. (1996), "Sand Reinforced with Shredded Waste Tire", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 122, pp.760 ~ 767.

Forsyth, R. A., and Egan, J. P. (1976), "Use of waste materials in embankment construction", *Transportation Research Record* 593, pp.3 ~ 8.

Garga V.K., and O'Shaughnessy, V. (2000), "Tire-reinforced earthfill. Part1 : Construction of a test fill, performance and retaining wall design", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 37, pp.75 ~ 96.

Gerscovich, D.M.S., de Medeiros, L.V., and Sayao, A.S.F.J. (2001), "Field pullout tests of scrap tire reinforcement layers under different soil surcharges", *Proc. of the 15th ISMGE*, Vol. 2, pp.1587 ~ 1590.

Griffiths, D. V., and Prevost, J. H. (1990), "Technical note on practical

applications–stress strain curve generation from simple triaxial parameters”, *International Journal, For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics*, pp.587 ~ 594.

Guido, V. A. and Christou S. N., (1988), “Bearing Capacity and Settlement Characteristics of Geoweb-Reinforced Earth Slabs”, Proc. ASCE 1988 Spring Meeting, 1988, pp.21 ~ 36.

Hausmann, M. R. (1990), “Slope remediation, In Stability and performance of slopes and embankments”, Edited by R. B., Seed and R. W. Boulanger, *Geotechnical Special Publication* 31, Vol. 2, pp.1274 ~ 1317.

Horace Moo-Young, Kassahun sellasie, Daniel Zeroka, and Gajanan Sabnis, (2003), “Physical and Chemical Properties of Recycled Tire Shreds for Use in Construction”, *ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 129(10), pp.921 ~ 929.

Humphery, D. N., and Katz, L. E. (2001), “Field study of water quality effects of tire shreds placed below the water table”, *Air and waste Management Association*, pp.1 ~ 10.

Humphery, D. N., and Katz, L. E. (2000), “Five-year field study of water quality effects of tire shreds placed above the water table”, *Transportation Research Record No.1714*, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.18 ~ 24.

Humphrey, D. N., Katz, L. E., and Blumenthal, M. (1997), “Water quality effects on tire shred fills place above the ground water table”, *ASTM STP 1275*, pp.288 ~ 1997.

- Humphrey, D.N., Whetten, N., Weaver, J., and Reacker, K. (2000), "Tire shreds as lightweight fill for construction on weak marine clay", Proceedings of the International Symposium on Coastal Geotechnical engineering in practice, Balkema, Rotterdam, pp.611 ~ 616.
- Humphrey, D.N. (1996), "Investigation of exothermic reaction in the shred fill located on SR 100 in Ilwaco", Washington. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D. C.
- Humphrey, D.N., and Manion, W.P. (1992), "Properties of tire chips for light weight fill" Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Geotechnical Special Publication, No. 30, Vol. 2, pp.1345 ~ 1355.
- Izgin, M., and Wasti, Y. (1998), "GeoMembrane-sand interface frictional properties as determined by inclined board and shear box tests", Elsevier, *J. Geotextiles and geomembranes*, pp.206 ~ 219.
- Jamnejad, G., Kazerani, B., Harvey, R.C. and Clarke, J.D. (1996), "Polymer Grid Cell Reinforcement in Pavement Construction", Proc. The 1986 International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, pp.537 ~ 546.
- Koerner, R. M. (2000), "Designing with Geosynthetics", Fifth Edition, Prentice Hall, pp.328 ~ 395.
- Komstus, T., Kikuta, H., Tuji, Y., and Muramatsu, E. (1998), "Durability assessment of geogrid-reinforced asphalt concrete", Elsevier, *J. Geotextiles and geomembranes* 16, pp.257 ~ 271.
- Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K., and Madhavi Latha, G. (2000), "Model Studies on Geocell Supported Embankments Constructed over a Soft Clay

Foundation”, Geotechnical Testing Journal. GTJODJ, pp.45 ~ 54.

Krishnaswamy, N.R., Rajagopal, K., and Sujit Kumar Dash. (2001), “Bearing Capacity of Strip footings supported on geocell-reinforced sand”, *Geotextile and geomembranes*, Vol 19, pp.235 ~ 256.

Lerclercq, B., Schaeffner, M., Delmas, Ph., Blivet, J. C., and Matichard, Y. (1990), “Durability of geotextiles : pragmatic approach used in France”, *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, The Hague, 28 May ~ 1 June, pp.679 ~ 684.

Liu, H. S., Mead, J. L., and Stacer, R. G. (1998), “Environmental Impacts of Recycled Rubber in Light fill Applications”, *Chelsea Center for Recycling and Economic Development*, pp.1 ~ 16.

Long, N. T. (1993), “Le pneusol, recherche-realisations-perspectives”, These de Doctorat, Institut National des Science Appliquees de Lyon, Lyon, France.

Long, N. T. (1996), “Utilization of used tires in civil engineering - The Pneusol Tyresoil”, *Environmental Geotechnics*, Kamon(ed), pp.809 ~ 814.

Madhav, M. R., Ghosh, C., and Yasuhara, K. (2001), “Multi-layered reinforced granular soil resting on soft soil-tension Membrane effect”, *Landmarks in Earth Reinforcement*, pp.553 ~ 558.

Mhaikar S.Y. and Mandal J.N. (1992), “Soft Clay Subgrade Stabilisation Using Geocells”, *Journal of Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, Vol 2, pp.1092 ~ 1103.

- Michalowski, R. L., and Xin, X. (2001), "Collapse loads on reinforced foundation soils", *Landmarks in Earth Reinforcement*, pp.577 ~ 580.
- NCMA (1997), "Design Manual for Segmental Retaining Walls", Collin, J., Editor, Second Edition, Nation Concrete Masonry Association, Herndon, Virginia, USA.
- Nguyen T.H. (1996), "Utilization of used tyres in civil engineering - The Pneusol 'Tyresoil'", Proc. of the 2nd Int'l Congress on Environmental Geotechnics, pp.809 ~ 814.
- O'Shaughnessy, V., and Garga V.K. (2000), "Tire-reinforced earthfill. Part2 : Pull-out behaviour and reinforced slope desing", Canadian Geotechnical Journal, Vol 37, pp.97 ~ 116.
- O'Shaughnessy, V., and Garga V.K. (2000), "Tire-reinforced earthfill. Part3 : Environmental assessment", Canadian Geotechnical Journal, Vol 37, pp.117 ~ 131.
- Omine, K., Ochiai, H., Yasufuku, N., Yamamoto, M., and Inoue, Y. (2001), "Improvement effect of composite geomaterial by utilization of plastic wastes", *Landmarks in Earth Reinforcement*, pp.111 ~ 116.
- Ormsby, W. C., Fohs, D. G. (1990), "Use of Waste and By-Products in Highway Construction", Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation, pp.47 ~ 57.
- Park, J.K., Kim, J.Y., Edil, T.B.(1996), "Mitigation of organic compound movement in landfills by shredded tires". *Water Environment Research* 68(1), pp.4 ~ 10.

- Perkins, S. W. (2001), "Mechanistic-empirical modeling and design model development of geosynthetic reinforced flexible pavements final report", Montana State University, pp.2 ~ 56.
- Rajagopal, K., Krishnaswamy, N. R. and Madhavi Latha, G. (1999), "Behaviour of sand confined with single and multiple geocells", *Geotextiles and Geomembranes*, 17(3), pp.171 ~ 184.
- Rea, C. and Mitchell, J.K. (1978), "Sand Reinforcement Using Paper Grid Cells", *Proc. ASCE Symposium on Earth reinforcement*, pp.644 ~ 663.
- RMA (2004), "U.S Scrap tire markets 2003 edition", Rubber Manufactures association, pp.1 ~ 51.
- Rouse, J. V. (1976), "Removal of heavy metals from industrial effluents", *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, pp.929 ~ 935.
- Sengupta, S., and Miller, H. J. (1999), "Preliminary Investigation of Tire Shreds for Use in Residential Subsurface Leaching Field Systems", Department of Civil Engineering University of Massachusetts Dartmouth, pp.1 ~ 11.
- Som, N., and Sahu, R. B. (1999), "Bearing Capacity of a Geotextile Reinforced Unpaved Road as a Function of Deformation : A Model Study", *J. Geosynthetics International*, pp.1 ~ 15.
- Tatliso, N., Tuncer, B., and Benson, C. H. (1998), "Interaction Between Reinforcing Geosynthetics and Soil-Tire Chip Mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, pp.1109 ~ 1119.

- Vince O'Shaughnessy and Vinod K.(2000),"Tire-reinforced earth fill. Part 3 : Environmental assessment", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, pp.117 ~ 131.
- Westerberg B., and Macsik J. (2001), "Geotechnical and environmental properties of tire shreds in landfill drainage applications", Proc. of the 15th ISMGE, Vol. 3, pp.2017 ~ 2021.
- Whetten, N., Weaver, J., Humphrey, D., and Sanford, T. (1997), "Rubber meets the road in Maine", *Civil Engineering*, 67(9) : pp.60 ~ 63.
- Williams, P. T., Besler, S., and Taylor, D. T. (1990), "The pyrolysis of scrap automotive tyres : the influence of temperature and heating rate on product composition", *Fuel*, 69, pp.1474 ~ 1482.
- Yamamoto, K., and Otani, J. (2002), "Bearing capacity and failure mechanism of reinforced foundations based on rigid-plastic finite element formulation", *Elsevier, Journal of Geotextiles and geomembranes*, pp.367 ~ 393.
- Yeo Won Yoon (2007), "Engineering characteristics of tire treads for soil reinforcement", *International Workshop on scrap Tire Derived GeoMaterials*, pp.80 ~ 101.
- Yoon, Y. W., Cheon, S. H., and Kim, B. S. (2004), "Bearing Capacity of Sands Reinforced by Tirecell and Geocell", *GeoAsia Proceeding of the 3rd Asian Regional Conference on Geosynthetics*, pp.619 ~ 624.
- Yeo Won Yoon, Seung Beom Heo, Keun Soo Kim (2007), "Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests", *Geotextiles and Geomembranes*, (2007 waiting list).

Yeo Won Yoon, Sung Han Cheon and Dae Seong Kang (2004), "Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 22, No. 5, pp.439 ~ 453.

Yeo Won Yoon, Sung Soo Cho, Keun Soo Kim, Gil Lim Yoon (2006), "Engineering Properties of Waste Tires for Soil Reinforcement", *Proceeding of International Conference on New Developments in Geoenvironmental and Geotechnical Engineering*, pp.503 ~ 508.

타이어셀을 활용한 보강토 옹벽
(Tirecell[®] System)
시방서

2007. 7

제 1 장 총 칙

1절. Tirecell® 공법의 정의

Tirecell® 공법은 타이어의 트레드를 주로 이용하며 필요에 따라 타이어 측면을 병용하여 이를 지반보강재의 일종인 지오그리드의 대응으로서 보강토 옹벽, 보강 사면, 사면보호용으로 활용하는 공법이다.

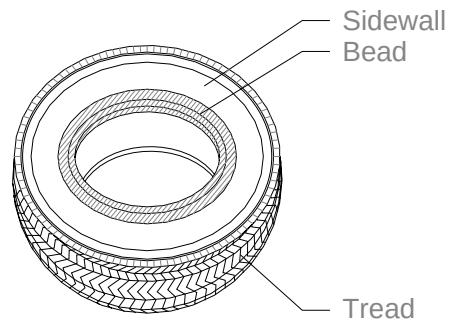
2절. 적용범위

1. 이 지침은 타이어 트레드(tread) 및 측면(sidewall)을 사용하여 도로, 철도 사면, 하천제방 등 제 사면의 보강 및 보강토 옹벽(Tirecell® System)보강재로서 시공을 위하여 필요한 사항을 규정한 것이다.
2. Tirecell® 공법은 이 규정과 일치되게 축조되어야 하며 설계도에 명시되어 있거나 책임기술자에 의하여 계획된 선형, 구매, 설계 및 치수와 합리적으로 일치되게 축조되어야 한다. 단, Tirecell® 공법 공종 중 우리나라 각 기관의 표준시방서 혹은 특별시방서와 일치되는 공종은 해당 시방서에 따른다.
3. 시공자는 인하대학교 산학협력단 및 (주)영신토건으로부터 시공에 관한 기술 지원을 받을 수 있다.

3절. 용어의 정의

1. 트레드(tread) 및 측면(sidewall)

트레드는 타이어에서 노면과 접하는 부분으로 트레드내에는 다수의 강선이 들어 있으며 주로 고분자 재료와 강선, 섬유등으로 구성되어 있고 측면은 자동차를 옆에서 보았을 때 잘 보이는 도우넛 모양의 것으로 고무와 섬유로 되어 있으며 강선이 없는 부분이다. 트레드를 이용하여 매트형태로 만들어진 것을 트레드 매트, 지오셀형태로 만들어진 것을 타이어셀 혹은 트레드셀이라 부른다.



<그림 1> 타이어의 각부 명칭



<그림 2>



<그림 3>

2. 보강토(reinforced earth)

흙은 금속이나 플라스틱과 달리 토립자로 된 고체사이의 간극에 물 혹은 공기가 차 있는 것으로 불연속체로서 인장강도를 갖지 못한다. 이러한 뒷채움 흙 속에 인장력이 강한 보강재(금속, 토목섬유 및 목재 등)를 적당한 간격으로 배치하여 성토함으로써 흙과 보강재 사이에 부착력과 마찰력을 유발시켜 성토재 전체의 강성을 증가, 개선된 토체를 보강토(reinforced earth)라 말한다.

3. 전면 블록(face)

보강토 옹벽의 외장재 역할을 담당하는 콘크리트 블록으로 보강토체의 표면을 보호하게 한다. Tirecell[®] 공법에서는 외관을 고려하여 전면블록을 사용하는 경

우와 전면블록 없이 급경사면을 시공하고 측면에 식재가 가능토록 시공할 수도 있다.

4. 보강재(reinforcing material)

보강재는 뒷채움 흙 속에 적당한 간격으로 설치하여 토사가 갖지 못하는 인장력을 받도록 한 재료로서 여러 가지 재료가 있으며 토목섬유(geosynthetics)라 부른다. Tirecell[®] 공법에서는 일반 보강토 옹벽에서 사용되는 고분자재료를 대신하여 타이어 트레드 및 측면을 활용한 것이다. 토사와의 마찰 및 부착력에 의하여 활동력에 저항하는 역할을 한다.

5. 보강영역(reinforcing area)

보강재가 조밀하게 배치되어 시공된 영역

제 2 장 재료 및 제작

1절. 전면블록

1. 개요

가. 타이어셀 보강토 옹벽에 사용하는 전면블록(block)은 공장 제작을 원칙으로 하며 타이어와의 연결부를 갖는 것이어야 한다.

나. 시멘트는 KSL5201에 규정된 보통 포틀랜드시멘트 이상의 강도를 갖는 것이어야 한다.

다. 골재는 배수성이 좋고 청결해야 하며, 유기물이나 점토 덩어리 등 유해한 물질이 함유되어서는 안된다. 골재내 이물질 함유량의 제한은 일반 표준시방서를 따르는 것을 원칙으로 한다.

라. 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상이어야 하며 혼합 공기량, 지연재, 촉진제 및 염화물을 함유한 첨가제는 책임기술자의 승인 없이 사용

해서는 안 된다.

2. 전면블록

- 가. 분리형 보강토 옹벽 설치에 사용되는 콘크리트 블록은 기본형, 대형, 소형, 코너형, 마감형 등 5가지 종류가 있다.
- 나. 기본형 블록은 본 공법의 표준형이며 대형, 소형은 곡선부 처리에 사용된다.
- 다. 보강토 옹벽의 전면블록 중량과 크기는 성인 1인이 혼자 들기에 적절한 크기와 모양이어야 하며, 설계도서에서 규정한 제품의 규격에 맞아야 한다.

3. 시험과 검사

- 가. 전면블록의 시험과 검사는 압축강도 시험과 육안검사를 근거로 하여 결정하며 시험방법은 KS F2405 및 KS F2422와 일치하여야 한다.
- 나. 압축강도 시험 결과 콘크리트 압축강도가 28일 압축강도 이상인 경우에는 양생기간에 관계없이 설치에 사용할 수 있다.
- 다. 블록 재령 7일 압축강도가 재령 28일 콘크리트 압축강도의 60%를 초과하는 경우 운반에 적합한 것으로 한다.
- 라. 도급자나 재료를 공급하는 자는 시설을 완비하고 빠르고 안전한 방법으로 모든 필요한 샘플 채취 및 시험을 시행하여야 한다.

4. 콘크리트 치기 및 양생

전면블록은 평탄한 면위에 전면이 바닥이 되고 뒷면이 윗부분이 되도록 콘크리트를 타설하여야 한다. 각기 제품마다 콘크리트를 계속적으로 타설해야 하며, 승인된 바이브레이터(vibrator)를 사용하고 핸드탬핑(hand tamping)으로 보충하여 콘크리트가 거푸집의 구석구석 까지 미치어 에어포켓(air pocket)이나 갈라진 면이 형성되지 않도록 필요한 힘을 가하여 경화시켜야 한다. 균일한 제품이 되도록 매번 콘크리트를 치기 전에 거푸집 내부청소 및 기름칠을 잘하여야 한다.

각각의 제품은 충분한 시간 양생시켜 콘크리트가 규정된 강도를 발휘하도록 하고 규정된 강도에 이르지 않은 블록은 사용할 수 없다.

5. 거푸집 제거

거푸집은 각각의 전면판이 손상없이 옮길 수 있을 때까지 그대로 놓아두어야 한다.

6. 콘크리트 마무리와 허용치

가. 콘크리트 블록의 표면은 감독관이 승인할 수 있는 끝마무리를 시행하여야 한다. 뒷면은 골재로 인하여 생기는 공극을 없애고, 표면의 뒤틀림(distortion)을 없애기 위하여 막대기로 표면을 마무리 한다.

나. 블록의 모든 치수는 $\pm 10\text{mm}$ 이내의 허용치 내에서 제작되어야 한다.

7. 압축강도

가. 공시체는 양생이 끝난 후 7일 이상 양생한 것으로 한다.

나. 전면블록의 재령 28일 압축강도는 240kg/cm^2 이상이어야 한다.

다. 시험방법은 KS F2405 및 KS F2422와 일치하여야 한다.

8. 폐 기

각개 제품은 위의 규정 중 어느 하나의 요건에라도 맞지 않는 경우 이를 폐기하여야 한다. 여기에 부가하여 다음과 같은 결함 중 하나 또는 그 이상을 가진 제품은 폐기처분 하여야 한다.

가. 불완전한 몰딩(moulding)으로 인한 결함.

나. 콘크리트가 붕소 상태(honey-comb), 또는 갈라진 결함이 있는 것.

9. 취 급

가. 모든 제품은 부분적으로 파손되거나 균열의 발생 또는 지나친 휨응력이 발생할 위험이 없는 방법으로 취급되어야 한다.

나. 블록의 운반은 소형 크레인이나 back hoe를 사용하며, 별도 제작된 운반장비를 사용한다.

다. 블록은 반드시 단단한 받침대를 놓고 수평으로 보관하여야 하며 블록은 6층 이상으로 쌓아 놓아서는 안 된다.

2절. 타이어 보강재

1. 보강재로 사용되는 타이어는 사용시에 표면의 손상 유무를 확인해야 하며, 트레드의 외측 표면의 마모량에 무관하게 사용이 허용되나 할열 또는 기타 손상된 것은 사용을 피하여야 한다.

2. 타이어의 마모와 손상정도에 따라 A, B, C 3등급으로 나누었으며, A와 B등급의 타이어는 사용이 가능하나 C등급은 사용을 피하여야 한다. 아래 그림에 타이어의 마모와 손상으로 등급을 나눈 사진을 나타내었다.

A등급 : 트레드의 홈이 마모가 적고, 외측 표면이 전혀 손상이 되지 않은 타이어

B등급 : 트레드의 홈이 마모가 심하여 홈 깊이가 2mm 이하이고, 외측 표면이 타이어 펑크 등에 의해 약간의 손상이 된 타이어

C등급 : 트레드 외측 표면이 못 또는 이물질 등에 의해 심하게 손상된 타이어

3. 보강재는 설계도에 표시된 바와 같이 합당한 규격의 길이와 허용치로 사용해야 한다.



A등급

B등급

C등급

<그림 4> 마모와 손상에 따른 타이어의 등급

3절. 뒷채움 재료

1. 입 도

모든 뒷채움 재료는 유기질 및 유해물이 함유되지 않은 재료로서 다음과 같은 입도에 일치되는 것이어야 한다.

입 경	통과백분률(%)
100mm	100~75
No. 4	100~20
No. 40	60~0
No. 200	30~0

단, $10\mu m$ 통과백분률이 10% 이하

2. 전단저항각(내부마찰각)

선정된 재료의 전단저항각(내부마찰각)은 표준삼축압축시험 또는 직접전단시험으로 결정했을 때 25° 이상이어야 한다.

(주) 위 사항에 일치되지 않는 뒷채움 재료는 감독관의 승인 없이 사용해서는 안된다.

3. 뒷채움 흙의 화학적 특성

토목섬위 보강재의 경우 뒷채움흙 내의 pH값에 의해 특성이 저하될 수 있으므로, $5 < \text{pH} < 9$ 의 조건을 만족하는 뒷채움 흙을 사용하여야 한다.

4절. 전면블록 속채움재

전면 블록 속채움재는 콘크리트 블록과 보강토 옹벽 사이 및 블록과 블록 사이에 속채움을 시행하며, 채움재는 배수가 자유롭고 충분한 내구성을 지닌 19mm 쇠석골재 또는 이에 준하는 견고한 자갈이나 쇠석을 사용하여야 한다.

제 3 장 시 공

1절. 기 초

1. 기초 터파기

- 가. 보강토 옹벽 구조물의 기초는 굴착기 또는 인력으로 터파기를 실시하며, 되메우기를 할 경우에는 95% 이상의 다짐밀도가 되도록 다짐을 하여야 한다.
- 나. 터파기는 설계에 결정된 깊이로 하나, 설계가 없는 경우에는 일반적으로 옹벽 높이의 0.05H 깊이로 하며, 교대로 사용되는 경우에는 교대 높이의 0.1H 깊이로 한다. 블록 설치 위치에는 20cm의 기초 높이를 고려하여 터파기를 실시하며, 터파기 폭은 블록, 배수시설 및 보강재의 설치에 충분한 넓이를 확보하도록 하여야 한다.
- 다. 지반조건에 좋지 않을 경우에는 기초두께를 두껍게 하거나 지반을 치환, 개량 또는 보강하여야 하며, 지표면의 식물이나 불필요한 잡석 등은 제거하여야 한다.
- 라. 기초지반의 물성치는 직접 실내 · 외 시험을 통하여 구하며, 이를 이용하여 기초의 허용지지력과 허용침하량 등의 설계 내하력에 대하여 검토하여야 한다.

2. 전면 블록의 기초

- 가. 전면 블록의 블록기초는 각 블록의 기초높이(footing level)에 맞추어 수평으로 기초를 설치하여야 하며, 지하수 또는 유입수가 많은 지역에서는 자갈 또는 쇄석을, 지하수 또는 유입수가 적은 지역에서는 모래 또는 혼합골재를 사용할 수 있다. 콘크리트 기초를 사용하는 경우에는 보통 무근콘크리트를 사용하나, 경우에 따라서는 철근콘크리트 기초를 사용할 수 있다.
- 나. 블록기초의 치수는 보통 깊이 20cm와 폭 60cm로 하며 지반조건에 따라 적절하게 보완되어야 한다.
- 다. 기초지반이 설계 내하력을 충분히 지지할 수 없을 경우에는 지반을 보강하여야 하며, 보강재로 보강하는 경우 기초넓이는 최소 1m 이상, 30cm 높이로 2단 이상 설치하여 층다짐하여야 한다.
- 라. 지반의 고저에 따라 변화가 있을 때에는 기초 footing을 계단식으로 준비하여 블록이 항상 수평으로 설치될 수 있도록 하여야 한다.

제 4 장 타이어셀 보강토 옹벽의 축조

1절. 블록설치

1. 첫단블럭 설치

블럭의 첫단은 아래 그림과 같이 겨냥줄에 맞추어 전면부의 선형 및 수평이 유지되도록 좌·우, 전·후 정밀하게 거치하여야 하며 블럭과 블럭 사이에 이물질이 끼지 않도록 하여야 한다.



<그림 5>

2. 윗단블럭 설치

윗단 블럭을 설치한 경우에는 아랫단 블럭 상부를 깨끗이 청소한후 도면에 표시된 공정 방법에 따라 견고하게 고정 시킨후 옹벽 전면의 경사와 수평상태를 수시로 확인하며 속채움 골재($\phi 25\text{mm}$)가 빠져 나올수 없도록 최대 10mm이내로 밀착하며 블럭을 쌓는다.



<그림 6>

3. 마감블럭설치

마감 블록을 설치시 아래단 블록 상부를 깨끗이 청소한후 승인된 접착제 또는 모르탈(1:2)를 사용하여 완전히 고착시켜야 한다.



<그림 7>

2절. 블록 속채움

1. 블록 한단 쌓기가 완료되면 블록 내부, 블록과 블록사이 및 블록 후면끝부분에서 도면에 표시된 폭(약30cm)만큼 자갈 또는 쇄석을 밀실하게 채운다.

2. 블록 속채움재의 입도기준

체의공칭규격	1inch	3/4inch	NO.4	NO.40	NO.200
통과백분율(%)	100	75~0	60~0	50~0	5~0

3절. 뒷채움 다짐

1. 한층의 시공두께는 블록의 한단 높이를 기준으로 하되 20cm가 넘지 않도록 한다.
2. 뒷채움은 전면블록의 휨방지를 위해 전면블록 쪽에서부터 시공하며 전면블록과 평행한 방향으로 진행하고, 보강재 상부에 포설할 경우에는 보강재가 움직이거나 손상을 입지 않도록 주의해야 한다.
3. 블록 배면에서 1m 이내에 대한 다짐은 과도한 다짐에 의한 측방 응력의 발생과 전면 블록의 변위를 억제하기 위해 소형 다짐기(1ton roller, compactor, tamper 등)를 사용해야 한다.
4. 다짐장비의 주행은 전면블록과 평행이 되도록 하고 다짐도는 실내 다짐시험치의 95% 이상 이어야 한다.
5. 보강재를 설치한 면을 다짐시에는 보강재 위를 다짐 장비가 직접 올라 타서는 안되고 반드시 뒷채움재를 명시된 포설 두께 만큼 포설후 다짐을 하여야 한다.
6. 뒷채움재의 포설과 다짐 작업은 구조물을 변형시키지 않도록 주의해서 시공해야 하며 만약 전면블록에 변형이 생긴 경우에는 즉시 모든 작업을 중단하고 수정후 재시공 하여야 한다.

7. 타이어 롤러는 시속10km 이하의 속도로 다짐을 하여야 하며, 급제동이나 급회전을 삼가 해야 한다.



<그림 8>

4절. 타이어 보강재 설치

1. 보강재가 설치될 모든 표면은 움푹 패인곳이나 뜬돌, 나무뿌리 등을 제거하고 청결한 상태를 유지해야 한다.
2. 보강재는 설계도에 별도의 명시가 없는 한 전면블럭과 직각을 이루도록 설치한다.
3. 전면블럭에 연결된 보강재는 뒷채움 포설 및 다짐시 이동이 없도록 끝부분에 고정핀 또는 인력으로 보강재가 팽팽하게 퍼진 상태가 되도록 한후에 포설하여야 한다.



<그림 9>

제 5 장 배수시설

옹벽상부가 사면으로 처리될 경우 옹벽상부 표면수 흐름은 보강토 층으로부터 멀리 유도하여야 한다. 배수방법으로는 벽체 끝 쪽으로 표면수를 유도하여 표면수의 보강토체 내로의 유입을 방지하여야 하며 (자연적인)식생 처리로 표면수의 침투를 방지할 수 있다. 또한 모르타르 처리나 플룸관, 수로관의 설치도 적용될 수 있다.

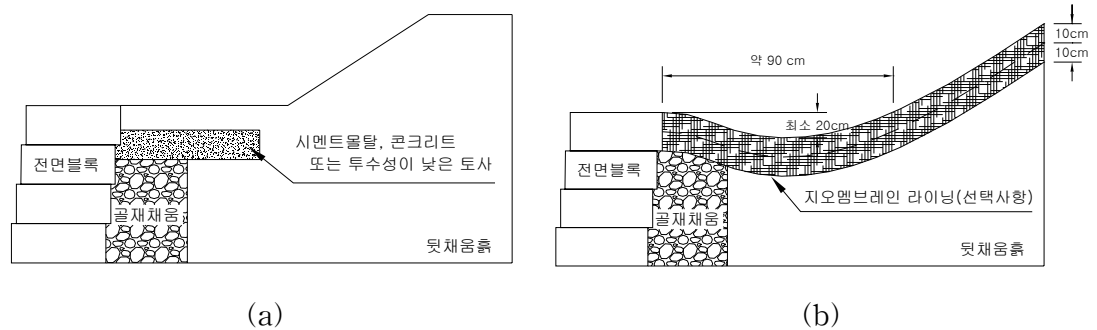
옹벽 하단 기초 전면에 급경사가 있거나 침식의 문제가 되는 곳은 별도로 잔디 등을 심어 세굴, 침식 등의 예방조치를 강구해야 한다.

1절. 배수시설 설치의 예

1. 조건 [1] - 지표수의 유입

전면블록 배면의 골재층을 통해 지표수가 유입되어 전면블록이 배수시킬 수 있는 수량보다 많은 양의 지표수가 유입된다면 전면블록의 배면에는 수압이 작용할 것이고, 이러한 수압은 전면블록과 보강재 사이 연결부에 응력을 증가시켜 결국에는 전면블록이 탈락하는 피해가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 피해를

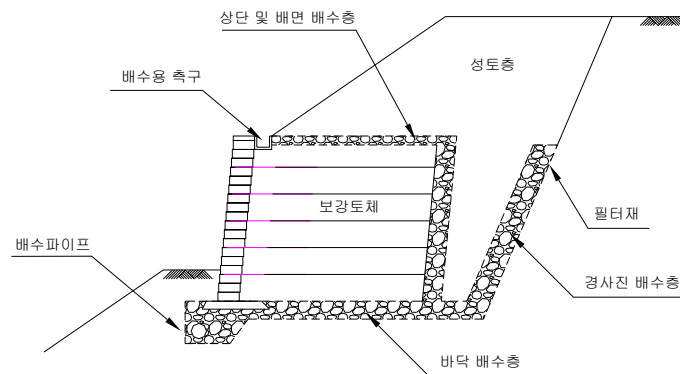
방지하기 위하여 보강토 옹벽 상단부에 다음 그림에서와 같이 차수층을 설치해 주는 것이 좋다.



<그림 10> 지표수 유입의 차단 예

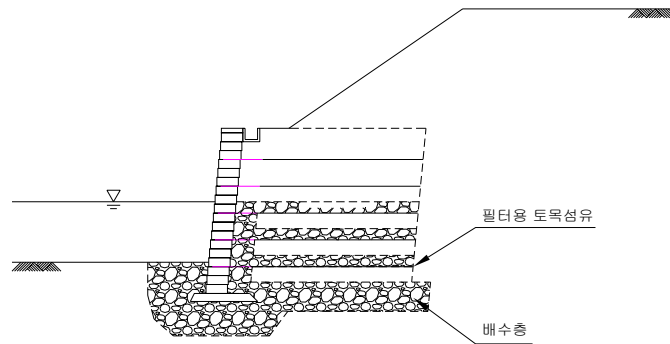
2. 조건 [2] - 지하수의 유입

다량의 배면 유입수로 뒤채움 흙이 포화되면 흙의 전단강도가 급격히 저하하여 불안정한 상태가 될 수 있으므로 배면 용출수의 유무, 수량의 과다에 따라 보강토체 내부로 물이 유입되지 않도록 다음 그림과 같이 배수시설을 설치하는 것이 좋다. 특히 계곡부에 설치되는 보강토 옹벽은 반드시 일반 성토의 경우와 동일하게 적절한 크기의 배수구를 설치하여야 한다.



<그림 11> 지하수 유입의 차단 예

3. 조건[3] - 침수구조물에서의 배수대책



<그림 12> 침수가능성이 있는 보강토 옹벽의 배수시설

침수가능성이 있는 위치에 설치되는 보강토 옹벽은 보강토체의 투수성에 따라서 수위급강하시 보강토 옹벽 외부와 내부의 수위차가 발생할 수 있으며, 이러한 수위차에 의하여 보강토 옹벽의 안정성은 급격히 저하될 수 있다. 따라서 침수 가능성이 있는 보강토 옹벽은 다음 그림과 같은 배수층을 두거나 홍수시 수중에 잠기는 최고수위까지 투수성이 좋은 골재로 배수층을 시공하여 보강토체 내·외부의 수위차가 발생하지 않도록 하는 것이 좋다.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업의 중간 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원	TEL 031)381-6311
인하대학교	TEL 032)873-8480
한국건설기술연구원	TEL 031)910-0523

R&D / 05건설핵심C07

페타이어를 활용한 지반보강 및 옹벽시공 실용화 연구
중간 보고서

- 발행일 / 2007. 07. 28.
- 발행처 / 인하대학교
인천시 남구 용현동 253
TEL : 032-873-8480(대)
- 인쇄처 / 동문인쇄