

[별지 14] 최종보고서 표준서식

최종보고서·요약서

I. 인쇄규격

1. 크기 : A4 신판(가로 210mm * 세로297mm)
2. 제본 : 좌철
3. 용지
 - 가. 표지 200g/m² 양면 아트지
 - 나. 내용 80g/m² 모조지
4. 인쇄방법
 - 가. 표지 : 바탕 백색,활자 흑색
 - 나. 내용 : 흑색 지정활자

II. 편집순서

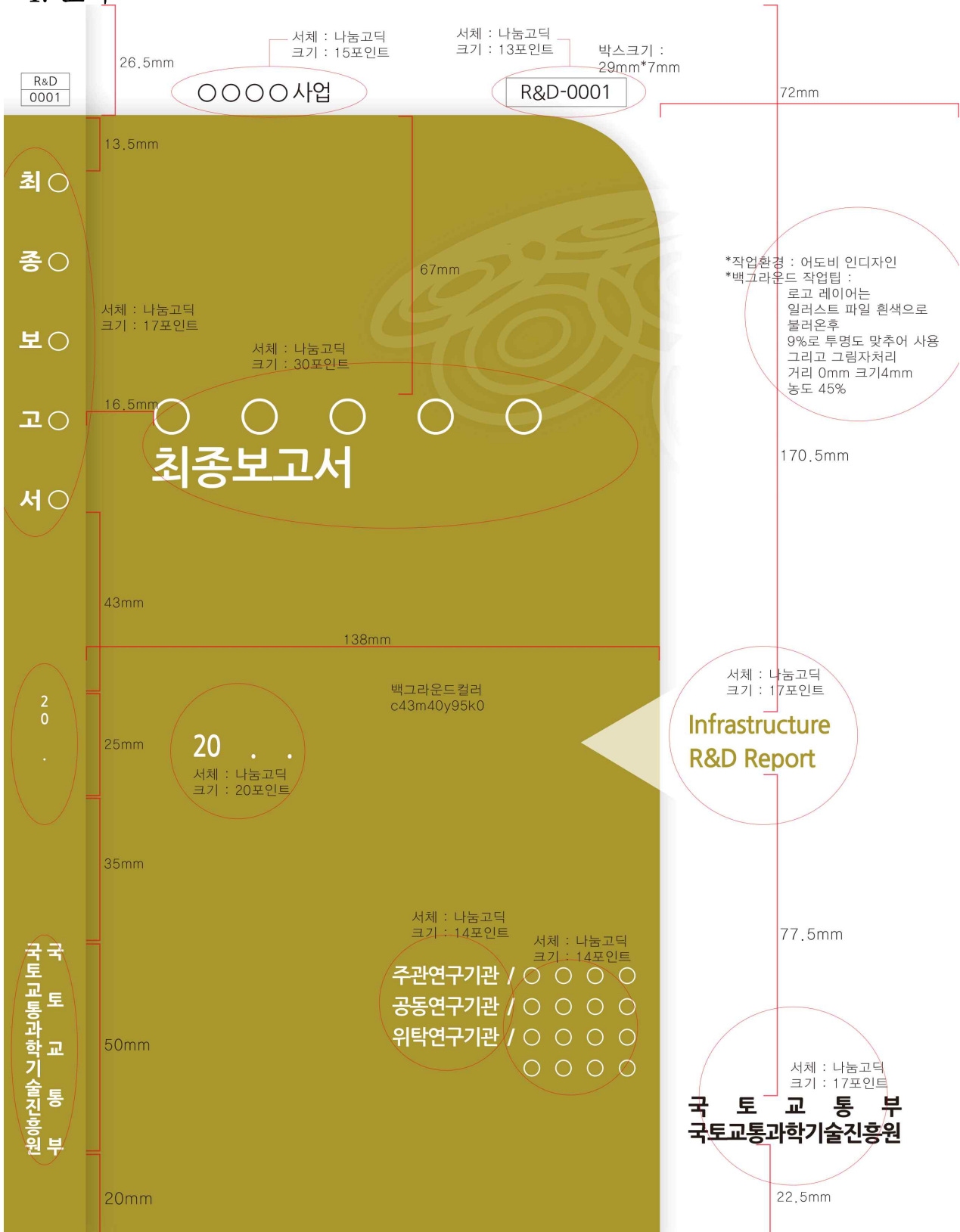
1. 표지
2. 제출문
3. 보고서 요약서
4. 요약문
5. 영문 요약서
6. 영문 목차
7. 목차
8. 본문
9. 뒷면지

III. 참고사항

전자조판 인쇄 시에는 이에 준한다.

IV. 편집순서별 서식

1. 표지



73mm

서체 : 나눔고딕
크기 : 10포인트

서체 : 나눔고딕
크기 : 12.5포인트

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

2. 제출문

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 "동적 원심모형실험을 이용한 기초-지반 시스템 및 토류구조물
지진하중 평가에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2014. 10. 28.

주관연구기관명 : 한국과학기술원

주관연구책임자 : 김 동 수

연 구 원 : 진 석 우

" : 김 수 린

" : 조 성 배

" : 김 재 현

" : 하 정 곤

" : 조 형 익

" : 성 준 태

" : 이 문 교

" : 조 영 규

" : 이 승 태

" : Satish

위탁연구기관명 : 원광대학교

위탁연구책임자 : 이 진 선

연 구 원 : 채 형 곤

" : 노 경 도

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제고유번호	11기술혁신 D02	해 당 단 계 연 구 기 간	2011.09.29. ~2014.09.28.	단 계 구 분	3차년도/ 3차년도
연 구 사 업 명	건설교통기술촉진연구사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	동적 원심모형실험을 이용한 기초-지반 시스템 및 토류구조물 지진하중 평가			
	단위과제명	위탁 : 동적원심모형 시험결과를 이용한 동적 수치해석 기법의 적용방안 연구			
연 구 책 임 자	김 동 수	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 31 명 내부 : 5명 외부 : 26명	총연구비	정부 : 939,000 천원 계 : 939,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국과학기술원 건설및환경공학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	
가. 국내외 내진 설계기준 및 연구동향 검토 나. 동적 원심모형실험을 이용한 옹벽의 지진시 거동 평가 ○ 벽체 유연도에 따른 지진 시 옹벽에 작용하는 동토압 변화 ○ Mononobe-Okabe 방법과 Seed and Whitman방법의 역T형 옹벽 적정성 평가 ○ 동적토압 분포 및 작용점 제시 다. 동적 원심모형실험을 이용한 지반-기초-구조물의 지진시 거동 평가 ○ 동적 원심모형실험을 활용한 지반-기초-구조물 상호작용 평가 ○ 얇은 기초의 회전 운동 영향 평가 ○ 얇은 기초 시스템의 등가 동특성 변화 평가 ○ 지반-말뚝기초-구조물 상호작용 평가 라. 동적원심모형실험을 이용한 동적수치해석 기법의 적용방안연구 ○ 지진시 지반-구조물 상호작용을 신뢰성 있게 해석 가능한 동적 수치해석 기 법의 선정 및 검증 ○ 검증된 수치해석 프로그램을 이용한 지반-구조물 상호작용 검토 마. 내진 설계 기준 개선(안) 도출					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	지반-기초-구조물 상호작용, 내진설계, 동적원심모형실험, 진동대, 수치해석, 옹벽, 얇은기초, 회전기초			
	영 어	Soil-Foundation-Structure Interaction, Seismic Design, Centrifuge Test, Shaking Table, Shallow foundation, merical Analysis, Retaining wall, Rocking Foundation			

4. 요약문

요 약 문

I. 제 목

동적 원심모형실험을 이용한 기초-지반 시스템 및 토류구조물 지진하중 평가

II. 연구개발과제 개요

지진 시 지반은 구조물과 달리, 3차원 무한성, 불균질 특성을 가지고 있다. 따라서 지반 종류 및 응력 조건에 따라 지반은 강성, 감쇠 특성 변화, 변형률에 따른 다양한 비선형 거동 특성, 에너지 소산 특성 등을 나타내며, 이러한 특성을 반영하여 지반의 거동을 정확하게 해석하는 것은 매우 어려운 실정이다. 또한 지진시 지반-구조물의 복잡한 상호작용과 함께 수많은 설계변수들을 고려할 때 많은 단순화된 가정들이 필요하다. 따라서 지진 시 지반-기초-구조물의 거동을 동시에 고려할 수 있는 실험방법 및 수치해석기법을 통하여 실제 거동을 정확히 모사(Modeling) 하여, 이를 가장 효율적인 방법으로 설계에 반영할 수 있는 방안을 모색하여야 한다.

본 연구에서는 동적 원심모형실험을 이용하여 지진시 교대 및 옹벽 구조물의 토압분포를 규명하여 설계기준에 반영하고자 한다. 또한 지반 및 구조물 기초형식에 따른 지반-기초-구조물의 지진시 상호거동을 동적원심모형실험을 이용하여 평가하고 이를 바탕으로 현행 설계 기법의 개선사항을 도출하고자 한다. 이와 같은 동적원심모형 시험의 결과를 토대로 지반-기초-구조물의 지진시 실제거동을 합리적으로 모사할 수 있는 수치해석 모델링 기법을 도출, 설계업무 적용을 위한 수치해석 절차를 제안하는 것을 본 과제의 최종 목표로 한다.

이를 위하여, 원심모형실험결과를 가장 정확히 모사할 수 있는 수치해석 절차 및 기법 (경계조건, 지반 및 경계모델, 지진 하중 등)을 제안하였다. 이는 추후, 국내 지반 구조물의 설계 및 해석 기술 향상 및 설계기준 선진화에 기여하고, 나아가 국가 경쟁력 향상에 이바지할 것으로 판단된다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

가. 국내외 내진 설계기준 및 연구동향 검토

- 해외 설계 기준과 국내 설계 기준 차이점 검토 및 국내 설계 기준 문제점 도출
- 세계 연구 그룹의 기술 수준 검토를 통한 연구 차별성 확보
- 옹벽의 내진설계 방법에서 개선이 필요한 방향과 연구 방향 설정
- 구조물 기초의 내진설계 방법에서 개선이 필요한 방향과 연구 방향 설정

나. 동적 원심모형실험을 이용한 옹벽의 지진시 거동 평가

- 벽체 유연도에 따른 지진 시 옹벽에 작용하는 동토압 변화
- Mononobe-Okabe 방법과 Seed and Whitman 방법 역T형 옹벽에의 적용 적정성
- 변위허용 및 높이에 따른 설계지진계수 (kh)
- 명확한 동적토압 분포 및 작용점 제시

다. 동적 원심모형실험을 이용한 지반-기초-구조물의 지진시 거동 평가

- 동적 원심모형실험을 활용한 지반-기초-구조물 상호작용 평가
- 얕은 기초의 회전 운동 영향 평가
- 얕은 기초 시스템의 등가 동특성 변화
- 지반-말뚝기초-구조물 상호작용 평가

마. 동적원심모형실험을 이용한 동적수치해석 기법의 적용방안연구

- 지진시 지반-구조물 상호작용을 신뢰성 있게 해석 가능한 동적 수치해석의 선정
- 선정된 수치해석 프로그램의 검증
- 검증된 수치해석 프로그램을 이용한 지반-구조물 상호작용 검토

라. 내진 설계 기준 개선(안) 도출

- 구조물 기초 설계 기준, 도로교 설계 기준 개선(안) 도출

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

가. 공공적 성과

- 재난안전성 확보를 통한 안전한 사회 구축
- 국내 사회간접자본의 안전성 확보
- 경제적이고 안전한 내진설계기법 제안
- 국내 내진설계 기준 개정(안) 제시 (구조물기초설계기준, 도로교)

나. 기술적 성과

- 교대 및 옹벽 구조물에 대한 동적 원심모형실험 절차 개발
- 지반-기초-구조물 상호작용 평가를 위한 동적 원심모형실험 절차 개발
- 다양한 지반-기초-구조물 상호작용 및 옹벽 구조물의 동적 거동 D/B 구축
- 관련 산업계에서 즉시 적용 가능한 상용수치해석 프로그램의 동적해석기법 검증
- 지반-구조물의 비선형거동을 동시에 수치 모델화 한 부지응답해석 및 지반-구조물 상호작용 검증을 정량적으로 실시

다. 학술적 성과

- 역T 형태의 옹벽에 대한 Mononobe-Okabe 적용 타당성 검증
- 옹벽 벽체의 유연도에 따른 옹벽 벽체의 동토압 변화
- 얇은 기초의 회전 거동이 구조물 지진하중에 미치는 영향 산정
- 얇은 기초 시스템의 등가 동특성 변화 검증
- 말뚝 두부의 지반 근입 조건에 따른 관성학적 힘의 변화
- 얇은기초의 지진시 지지력 파괴 메커니즘 규명
- 얇은기초의 지진시 영구침하 발생 메커니즘 규명
- 지진시 역 T 형 옹벽의 동토압 발생 메커니즘 규명

다. 정량적 성과

- SCI 7건, 비SCI 4건, 국내외 학술대회 15건, 설계기준 개정(안) 3건
(심사중 논문 포함)

V. 연구목표 달성 및 효과

가. 연구목표 달성

- 내진 설계 기준 개선(안) 도출
 - 용벽 내진설계 기준 선진화를 위한 제안
 - 지반-기초 시스템 내진설계 기준 선진화를 위한 제안
 - 현행 내진 설계 기준 개선(안) 도출
- 동적 원심모형실험을 이용한 토목 구조물 내진 성능평가 결과 D/B 구축 및 공개
 - 대형토목구조물 원심모형실험 데이터 D/B 구축 및 공유
 - 토목 구조물의 지진 시 지반과 구조물의 복잡한 상호 거동 메커니즘 규명
- 동적원심모형실험을 이용한 동적수치해석 기법의 적용방안연구
 - 연구결과의 관련 산업계를 위한 실용적인 수치해석 기법 정립
 - 실무 및 연구단계에서 수치해석시 고려되어야 할 주요 사안에 대한 정립

나. 연구결과 기대효과

- 물리 모델링 기법을 활용한 지진 연구 분야에서 세계 선두 그룹으로 도약
 - 강도 설계에서 성능 기반 내진 설계로 설계 패러다임이 전환
- 내진설계 기술 체계 정비와 국가 사회의 지속적 성장 기반 확립
 - 국내내진성능평가 및 설계기술 선진화
 - 국내외에서 지반지진공학 전문과와 내진 설계 전문가에 대한 고용 창출 효과 기대
- 국내 내진성능평가 및 설계 기술의 신뢰성 및 경쟁력 확보
 - 내진설계가 건설프로젝트 성공을 좌우할 수 있는 해외 건설시장에서 경쟁력 확보
- 국내 건설엔지니어링 산업 수치 해석 기술력 향상
 - 현업에 즉시 적용 가능한 프로그램과 실험기법을 적용
 - 해외 건설시장에서 경쟁력 확보

VI. 연구성과 활용계획

- 기초지반 및 지반구조물의 현장 조건 및 지반-구조물의 상호작용을 고려하고, 이를 바탕으로 신뢰성 있는 설계 지진하중 산정을 위한 체계적인 동적 원심모형실험 기술 확보
- 연구결과를 이용하여 명확한 동적토압 분포 및 작용점 적용시 경제적이고 안전한 옹벽의 내진설계 가능
- 지반 구조물에 대한 국내 내진설계 기준 및 평가요령 개정
- 얇은기초의 회전거동 정량적 평가 및 경제적인 신개념 설계 기법 개발을 위한 후속 연구에 본 연구개발 결과를 활용
- 원심모형실험의 결과를 기반으로, 실제 현업 업무자들이 수치해석을 이용할 경우 프로그램의 선정(FEM, FEM, DEM), Solver (Explicit, Implicit), 재료적 성질(선형, 비선형), 동적 거동특성의 반영(Rayleigh Damping, Hysteritic Damping, Nonlinear G/Gmax), 경계조건의 설정, 지하수의 존재에 따른 변화, 구조물-지반 경계요소의 선정 등을 보다 신뢰성 있게 모사하기 위한 수치해석 기법의 정립이 가능할 것으로 예상됨

5. 영문 요약서

SUMMARY

I. Title

Evaluation of Seismic Loading on Soil-Foundation System and Retaining Structure using Dynamic Geo-Centrifuge

II. Object and Necessity of this Study

Unlike structures, soil is a material having three-dimensional infinity, heterogeneous characteristics under earthquake. Because stiffness, damping and non-linear behavior depend on the type of soil and stress condition, it is difficult to analyze considering all together.

To consider various variables of the soil and SSI (Soil-Structure-Interaction), seismic design codes have many simplified assumptions. Therefore, experiments and numerical analysis have to simulate an actual behavior considering SSI and characteristics of the soil, and these should be reflected to the design code in the most efficient way.

This research evaluates the Soil-Structure-Interaction related to types of soil and foundation using Geo-centrifuge and will improve the current design methods. The research will also evaluate earth soil pressure on the retaining wall. Based on results of dynamic centrifuge model tests, the numerical analysis techniques are calibrated and can be used for simulating the actual behavior of Soil-Structure-Interaction under earthquake loading. Furthermore, the current seismic design criteria and design procedures will be verified, if necessary, it will be suggested to improve the seismic design criteria. It is expected that this research will contribute to improve the design and analysis of geotechnical structure domestically, and enhance the competition potential in the international geotechnical field.

III. Contents of Research and Development

1. Review of Korean and International seismic design criteria and research trends

- Review for difference between domestic and international seismic design criteria, and derive problems for Korean seismic design code
- Ensure excellence of research through review of worldwide technology
- Setup research directions for improving seismic design method of retaining structure
- Setup research directions for improving seismic design method of soil–foundation system

2. Evaluation of seismic load for retaining structure using dynamic geo-centrifuge test

- Variation of seismic earth pressure on retaining structure with wall flexibility
- Adequacy of Mononobe–Okabe and Seed and Whitman method for inverted T-shape retaining wall
- Design seismic coefficient(k_h) corresponding to allowable displacement and height
- Propose clear dynamic earth pressure distribution and control point

3. Evaluation of seismic load for soil–foundation system using dynamic geo-centrifuge test

- Evaluation of soil–foundation–structure interaction using dynamic geo-centrifuge test
- Evaluation of rocking behavior for shallow foundation
- Evaluation of equivalent dynamic characteristics for shallow foundation
- Consideration of soil–pile foundation–structure interaction

4. Research on the application of dynamic numerical analysis method using dynamic geo-centrifuge test

- Selection of an appropriate numerical analysis tools for reliable seismic soil–structure interaction analysis
- Verification of the numerical analysis tool using dynamic geo-centrifuge test
- Evaluation of seismic soil–structure interaction under seismic loading condition with the verified numerical analysis tool

5. Improve Korean seismic design criteria

- Improve seismic design codes for foundation design for structures and seismic design code for transportation bridge

IV. Research Accomplishments

1. Public Accomplishment

- Build safe society through disaster prevention
- Ensure the safety of domestic infrastructures
- Revise domestic seismic design codes

2. Technical Accomplishment

- Develop dynamic geo-centrifuge test procedure for retaining structure
- Develop dynamic geo-centrifuge test procedure for foundation structure
- Construct database (D/B) for seismic behavior of retaining structure and soil-foundation-structure interaction performed by dynamic geo-centrifuge test
- Verification of the commercial numerical analysis tool for industry applications
- Quantitative verification of the numerical analysis tool for the application on soil-foundation-structure interaction under seismic loading

3. Academic Accomplishment

- Validate application of Mononobe-Okabe method on inverted T-shape retaining wall
- Estimate variation of seismic earth pressure on retaining structure with wall flexibility
- Estimate influence of rocking behavior of shallow foundation to seismic load for superstructure
- Verify variance of equivalent dynamic characteristics of shallow foundation system
- Evaluate kinematic force effects by variation of pile cap embedment
- Identification of the seismic bearing capacity failure mechanism for shallow foundations
- Identification of the permanent settlement mechanism on shallow foundations
- Identification of the seismic lateral earth pressure generation mechanism for the inverted T-shape retaining wall

4. Quantitative Accomplishment

- SCI Journal : 7, Non-SCI Journal : 4, Domestic and International Conference : 15,
Revision of seismic design code : 3 cases.
(Including under review publications)

V. Research Achievements and Impacts

1. Research Achievements

- **Improve Seismic Design Criteria**
 - Propose direction for advanced seismic design of retaining structure
 - Propose direction for advanced seismic design of foundation system
 - Revision of domestic seismic design codes
- **Construct and share database (D/B) for seismic performance test results using dynamic geo-centrifuge test**
 - Build and share dynamic geo-centrifuge test results D/B for retaining structures and foundation system
 - Identify complicated soil-structure interaction behavior of large civil structure during earthquake
- **Study on the application of dynamic numerical analysis method using dynamic geo-centrifuge test**
 - Establishment of the verified dynamic numerical analysis procedure for industry applications
 - Establishment of the important points to consider in dynamic numerical analysis for practical and research application

2. Potential Impacts

- **Leap in earthquake research using physical modeling technology to the world-leading group**
 - Transition of design paradigm from strength based design to performance based design
- **Establish foundation for sustainable growth and Improve seismic design technologies**
 - Advancement of domestic seismic performance evaluation and design technology
 - New jobs for geotechnical earthquake engineering and seismic design expert professionals
- **Ensure reliability and competitiveness of seismic performance evaluation and design technology**
 - Ensuring competitiveness in the international construction market in seismic design can influence the success of construction projects

- Improvement of the level of dynamic numerical analysis in domestic industry
 - Establishment of the dynamic numerical analysis procedure for industrial application
 - Ensuring international competitiveness in the construction market

VI. Plan to make practical application of results

- To establish Dynamic Geo-Centrifuge testing procedure and obtain the reliable seismic load considering soil-structure-interaction and site condition
- To advance the current seismic design code for geotechnical structures
- Based on centrifuge results, establish the reliable numerical analysis method to select program and solver, material characteristics, reflecting of dynamic behavior of soil, boundary condition and soil-structure interface

Chapter 1. Introduction

1. Necessity of research development	1
2. Definition of research development	4
(1) Seismic behavior of retaining wall	4
(2) Seismic behavior of Soil-Foundation system	5
3. Background of foreign and domestic research development	8
(1) Domestic trend of research and technology	8
(2) Foreign trend of research and technology	12
4. Current status of the proposed research and development in related fields	17

Chapter 2. The Contents and Results 21

1. The strategies and methodology of research	21
(1) Centrifuge Test	21
(2) KAIST Dynamic Geo-Centrifuge	22
(3) ESB (Equivalent Shearbeam Box)	27
2. The procedure and theory of research	30
(1) Seismic behavior of retaining wall	30
(2) Seismic behavior of Soil-Foundation system	40
3. The results of research	51
(1) Seismic behavior of retaining wall (Part 1)	51
1) Change of Dynamic earth pressure depend on wall flexibility	52
2) Seismic behavior of retaining wall above the sand layer	70
3) Seismic behavior of retaining wall above the weathered soil	83
4) Analysis of Standard drawing of railroad retaining wall.	91
5) Suggestions for advanced domestic seismic code	94

(2) Seismic behavior of Soil-Foundation system (Part 2)	96
1) Experiments for seismic behavior of shallow foundation	97
2) Results for seismic behavior of shallow foundation 1 (Width of foundation)	105
3) Results for seismic behavior of shallow foundation 2 (mass of foundation & soil type)	119
4) Experiments for seismic behavior of piled foundation	134
5) Suggestions for advanced domestic seismic code	145
(3) Applications of dynamic numerical analysis technique based on results of dynamic centrifuge (Part 3)	147
1) Backgrounds	148
2) Numerical verification of soil-shallow foundation-structure interaction ..	149
3) Numerical verification of inverted T-shape retaining wall	167
Chapter 3. Outcomes of Research and Application	184
1. The outcomes of research	184
2. Main outcomes of theory and technology	187
3. The Case of application and execution of technique	191
4. The market outlook of research outcomes	191
Chapter 4. The Accomplishments and Impacts	192
1. Final achievement of research development	192
2. Technical impacts of research development	196
3. Economical impacts of research development	197
4. Strategic impacts of research development	198
Chapter 5. The Utilization of Research and Necessity of Additional Research Development	199
1. The application plan of research development	199
2. The necessity of additional research development	200
Reference	201

7. 목차

목 차

제1장 연구개발과제 개요	1
1절 연구개발의 목적 및 필요성	1
2절 연구개발의 정의, 범위, 특징	4
1. 옹벽의 지진시 거동 평가	4
2. 지반-기초 시스템의 지진 시 거동 특성 평가	5
3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황	8
1. 국내 기술 및 산업 동향	8
2. 국외 기술 및 산업 동향	12
4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	17
 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	21
1절 연구수행 전략 및 방법론	21
1. 원심모형시험	21
2. KAIST 동적원심모형시험기	22
3. ESB(Equivalent Shearbeam Box)	27
2절 연구수행과정 및 내용(이론적, 실험적)	30
1. 옹벽의 지진시 거동 평가	30
2. 지반-기초 시스템의 지진 시 거동 특성 평가	40
3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등	51
1. 옹벽의 지진시 거동 평가 (Part 1)	51
가. 옹벽 벽체의 유연도에 따른 옹벽 벽체의 동토압 변화	52
나. 사질토 지반에서의 지진 시 옹벽 거동	70
다. 풍화토 지반에서의 지진 시 옹벽 거동	83
라. 도로옹벽표준도 분석	91
바. 옹벽 내진설계 기준 선진화를 위한 제안	94

2. 지반-기초 시스템의 지진 시 거동 특성 평가 (Part 2)	96
가. 얇은 기초 시스템의 지진 시 거동 특성 평가 실험	97
나. 얇은 기초 시스템의 거동 특성 평가 결과 1 (기초 폭에 따른 거동)	105
다. 얇은 기초 시스템의 거동 특성 평가 결과 2 (기초 질량 및 지반에 따른 거동)	119
라. 말뚝 기초 시스템의 지진 시 거동 특성 평가 실험	134
마. 기초 시스템의 내진설계 기준 선진화를 위한 제안	145
3. 동적원심모형 시험결과를 이용한 동적 수치해석 기법의 적용방안 연구 (Part 3)	147
가. 연구 배경	148
나. 지반-얇은 기초-구조물 상호작용의 수치해석	149
다. 역 T형 옹벽 구조물의 수치해석 검증	167

제3장 최종 연구성과 및 적용실적	184
1절 최종 연구 성과	184
2절 주요 연구성과(학술적 성과 및 기술적 성과)	187
3절 기술 실시 및 적용사례	191
4절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망	191

제4장 연구목표 달성 및 효과	192
1절 연구개발 최종목표 달성도	192
2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석	196
3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)	197
4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석	198

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	199
1절 연구성과 향후 활용방안	199
2절 추가연구 필요성 등	200

참고문헌	201
-------------------	------------