

# 흙-구조물 접촉면을 고려한 친환경 옹벽 구조물의 지진시 거동 및 T형 후방지지물의 보강효과에 대한 동해석 분석연구

## Seismic Behaviour of Eco-BELT System and Seismic Effectiveness of T-shaped Deadman Considering Soil-Structure Interface Based on Dynamic Numerical Analysis

곽 창 원<sup>1</sup> Kwak, Chang-Won

박 인 준<sup>2</sup> Park, Inn-Joon

### Abstract

A retaining wall system is widely constructed civil structure to maximize the effectiveness of practical use of the land. Recently, the technology which is more eco-friendly and owns seismic stability of the retaining wall system becomes important. In this study, an Eco-BELT system using natural rocks as the front wall is introduced and the seismic characteristics of the Eco-BELT system are analyzed based on 2 and 3 dimensional numerical analysis. The soil-structure interface comprises between backfill soil and natural rocks are considered. The relative density is mainly considered to influence the seismic behavior of Eco-BELT system, and T-shaped deadman is also considered to judge the increase of seismic stability. As a result, lateral displacement of the wall decreases 29.5% in maximum under 90% of relative density and decreases 21.2 to 21.9% with T-shaped deadman, therefore, the seismic effectiveness of T-shaped deadman and increasing relative density of backfill are verified by numerical analysis.

### 요 지

옹벽은 절, 성토부가 포함된 토지의 효율적 이용을 위하여 설치하는 대표적인 옹벽 구조물이다. 과거 국토개발 시기에는 시공성, 구조적 안정성 및 경제성에 치중하였다면, 최근에는 친환경적이고 내진 안정성을 갖춘 옹벽기술 개발의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 자연석을 활용한 친환경적 옹벽 구조물(Eco-BELT)을 제시하고 지진 시 동적 거동특성을 2, 3차원 수치해석을 이용하여 분석하였다. 자연석과 배면 뒤채움 흙 사이에 형성되는 접촉면을 고려하여 수치해석에 적용하였으며 동적거동에 영향을 미치는 주요 변수로서 뒤채움재의 다짐도를 기준으로 다짐도 증가에 따른 동적거동을 분석하고 T형 후방지지물의 유무에 따른 내진성능 향상을 수치해석적으로 검토하였다. 그 결과 다짐도 증가 시 옹벽 수평변위가 최대 29.5% 감소하여 다짐도 증가에 따른 내진안정성 증대효과를 확인하고 T형 후방지지물 설치 시 최대 수평변위는 약 21.2~21.9%가 감소하는 것으로 산출되어 지진하중 재하 시 T형 후방지지물의 보강효과를 확인하였다.

**Keywords :** Eco-BELT system, Interface, Numerical analysis, Seismic stability, T-shaped deadman

1 정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Inha Technical College)

2 정회원, 한서대학교 인프라시스템학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Infrastructure & Systems, Hanseo Univ., Tel: +82-41-660-1054, geotech@hanseo.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2021 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

흙깎기, 흙쌓기 등 부지조성을 위한 토목공사에 따라 관련 토지의 경제적이고 효율적인 이용을 위하여 설치하는 대표적인 토목 구조물이 옹벽이다. 옹벽은 설치위치를 기준으로 배면과 전면의 표고차가 발생하며 도로, 철도, 교대, 비탈면, 호안 등 다양한 현장에서 적용되고 있다. 우리나라는 1970년대 이후 급속한 도시화, 산업화를 거치면서 국토개발과 관련 토목기술 발전에 좀더 집중하여 왔으므로 옹벽 구조물과 관련된 기술은 주로 시공성, 경제성 및 안정성에 중점을 두고 발전되어 왔다. 그러나 2000년대 이후 산업화 및 도시화가 국토 전반에 걸쳐 높은 수준으로 달성되고 이에 따른 국민 생활수준 향상 및 가치관의 다양화 등으로 관련 기술에 대한 주안점 역시 친환경성, 자연 훼손의 최소화 및 심미적 요소 등으로 이동하게 되었으며 관련 연구도 활발히 이루어지고 있다(Ha et al., 2002; Yoo et al., 2006; Lee et al., 2013). 현재 친환경 옹벽을 명확히 정의하는 개념은 정립되어 있지 않으나, 일반적으로 친환경 옹벽은 철근 콘

크리트 재료에 의해서만 건설된 전통적 개념에서의 옹벽 구조물에 대비되는 것으로서 비록 철근콘크리트 재료를 사용하더라도 생태학적, 환경적 요소와 결합하여 토압지지 뿐만 아니라 추가적으로 다양한 환경적 이득을 얻을 수 있는 옹벽 구조물이라 할 수 있다.

옹벽 구조물은 배면토의 수평토압을 지지하게 되는데 그 설계과정에서 설계절차와 방법을 준수하고 토압, 배면상재하중 등의 설계하중산정, 지하수위 및 재료특성 반영 등에 큰 오류가 없다면 정적 조건에서의 안정성은 크게 문제될 것이 없다. 일반적인 정적 안정성은 다수의 경험과 이론적 토대를 바탕으로 확보하기에 큰 어려움이 없으나 지진하중과 같이 불확실한 하중이 가해질 경우 안정성 확보를 위하여 지진 시 동적 거동특성을 규명할 필요성이 있다. 지진은 예측 곤란하며 사면 및 옹벽 구조물에 비정형적, 불규칙적인 동하중을 가하게 되므로 옹벽 구조물에 있어서 반드시 고려하여야 한다(Jo et al., 2013). 국내 옹벽에 대한 지진피해는 경주지진 시 경주시 및 기장군의 옹벽 일부가 파손되는 사례가 보고되었고 국외에서는 1999년 대만의 Chi-Chi 지진(지



(a) Chi-Chi earthquake (Taiwan, 1999)



(b) Wenchuan earthquake (China, 2008)



(c) Kumamoto earthquake(1) (Japan, 2016)



(d) Kumamoto earthquake(2) (Japan, 2016)

Fig. 1. Examples of retaining wall failure due to earthquake (Sitar et al. (2012), Changwei et al. (2015))

진규모 7.7)과 2008년 중국의 쓰촨성 지진(지진규모 8.0), 2016년 일본의 구마모토 지진(지진규모 7.0) 등에서 옹벽 피해사례가 다수 보고되었다(Fig. 1).

과거에는 국내 역사지진 및 계기지진 관측 역사상 대규모의 지진 발생 빈도가 작아 지진하중은 상대적으로 중요도가 낮게 간주되어 왔으나, 국내 지진의 발생 빈도는 2000년대 중반 이후에 지속적으로 증가하고 있으며 (Fig. 2), 최근 지진 관측 역사상 최대규모(규모 5.8)의 경주지진이 발생(2016.09.12.)하는 등 지진하중의 중요성 역시 증대되고 있다. 이에 따라 지진에 대한 국가적 관심도 증가와 함께 국내 내진설계 기준 역시 강화되어 왔다. 그러나 중력식 옹벽(KDS 11 80 05) 및 보강토 옹벽(KDS 11 80 10)과 달리 자연석을 이용한 친환경 옹벽의 경우 명확한 내진설계 기준이 제시되어 있지 않고 기존의 강성옹벽인 중력식 옹벽의 내진설계 기준을 따르도록 명시되어 있어(KDS 11 80 15) 실제 연성에 가까운 거동이 예상되는 자연석 옹벽의 거동특성을 실제와 가깝게 고려하기 어려운 실정이다(Kim et al., 2019).

따라서 본 연구에서는 옹벽 구조물의 지진 시 내진안정성에 대한 검증 필요성을 반영하여 자연석을 이용한 친환경 옹벽 구조물의 내진 안정성을 3차원 수치해석을 이용하여 검토하였다. 특히 자연석과 뒤채움 토체와의 경계에서 형성되는 흙-구조물 접촉면(interface)을 고려하여 수치해석에 반영하였다. 접촉면은 수치해석 시 해석 요소망 사이에 형성되는 두께를 가지지 않는 가상의 면(face)으로서 접촉면과 접하는 해석 요소망 사이의 거동을 분리하여 실제와 유사한 거동을 모사할 수 있다. 또한 동적 안정성에 영향을 미치는 주요 인자로서 뒤채움재의 다짐도를 고려하였다. Jung(2012)의 연구에 따

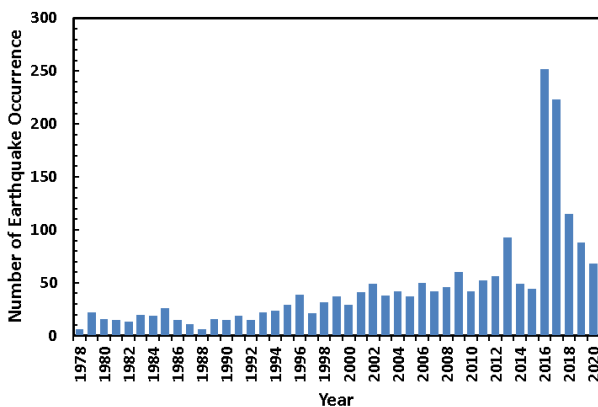


Fig. 2. Domestic statistics of earthquake occurrence (Earthquake and Volcano Monitoring Division, Korea Meteorological Administration, 2021)

면 보강토 옹벽에서 뒤채움재의 다짐도 증가에 따라 안전율이 최대 111% 까지 증가하는 결과를 얻어 정적 상태에서 다짐도의 중요성을 검증하였고, Yoon et al.(2002)은 중력식 옹벽에 대한 진동대 시험을 수행하여 지진 가속도 크기가 배면 토압에 미치는 영향을 관측하여 지진 시 벽체의 관성력이 토압에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. Kim et al.(2019)은 식생토양 옹벽에 대하여 진동대 시험을 통해 지진 시 동적 주동토압이 옹벽의 형태, 기울기 등에 영향을 받는 것으로 분석하였다. 그러나 대부분의 모형시험이나 수치해석적 연구가 지진 가속도 및 토압크기에 중점을 두고 있고 배면토의 다짐도에 따른 옹벽 시스템의 거동에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 지진 시 토압 및 옹벽 변위에 직접적으로 영향을 미치는 배면 지반의 다짐도를 80% 및 90%의 두 가지 경우로 나누어 3차원 수치해석을 수행하고 그 결과를 비교 분석하였다. 그리고 옹벽 배면에 설치하여 수동저항력을 발휘하는 T형 후방지지물이 지진하중 재하 시 기여하는 효과를 확인하기 위하여 2차원 수치해석을 수행하였다. 이때, 지반의 다짐도는 3차원 수치해석을 통해 선정하였다.

## 2. 친환경 옹벽 구조물(Eco-BELT system)

본 연구에서는 다음 Fig. 3과 같이 전면부에 자연석 또는 발파석을 노출시켜 배치함으로써 자연적인 형상을 유지하고 상부로 쌓아갈수록 기하학적 안정성을 확보하기 위하여 배면 방향으로 들어쌓기하는 방식을 취하도록 하였다. 또한 들어쌓기 하며 생성된 돌틈에는 관목 등 다양한 지피식물을 식재하여 옹벽 구조물 배면과 전면 사이의 환경적 연속성을 확보함으로써 일반적인 옹벽 구조물을 설치 시 옹벽의 배면과 전면 단차로 인한 생태영역의 단절을 극복하였다. 또한 옹벽 구조물의 토압에 대한 수동저항을 증가시키기 위하여 배면에는 T형 후방지지물을 별도로 설치하여 마찰력을 극대화하고 후방지지물끼리도 종방향으로 연결하여 일체화된 상자형 구조를 형성하도록 하였다. 후방지지물과 전면 자연석은 고강도 철근으로 연결되며 콘크리트 타설전 미리 후방지지물에 삽입하여 제작함으로써 연결 및 이음이 최소화되도록 하였다.

또한 친환경 옹벽은 하절기 도심지 온도저감에 기여할 수 있다. 전세계적인 지구온난화 현상과 더불어 우리나라도 급속한 산업화, 도시화로 인하여 도시의 열섬현상 또한 증가하고 있다. 환경부 통계에 따르면 지난 10



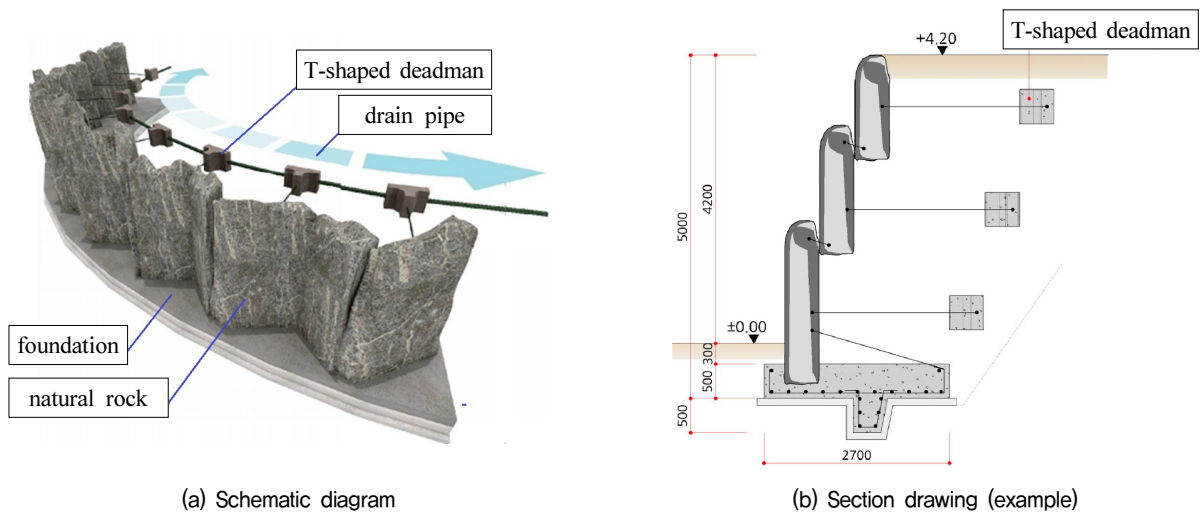


Fig. 3. Concept of Eco-BELT system

년간 서울시 평균기온이 약 1°C 상승하였고 전국 평균 폭염일수 또한 지속적으로 증가하고 있다. 이에 대하여 동식물의 생태공간 제공이 가능한 친환경 옹벽이 콘크리트를 이용한 중력식 옹벽의 대안이 될 수 있다. 콘크리트 구조물에 대하여 식물 피복만으로 실온이 3°C 까지 차이가 나고 벽면이 녹화된 건물에서 냉방전력이 30% 절감 가능하므로(한국도로공사, 1999) 친환경 옹벽 설치로 인하여 도심지 열섬현상을 저감시키고 부수적으로 미세먼지 및 대기오염물질(이산화질소) 흡착 등의 효과를 기대할 수 있다. 또한 자연석은 재활용 가능하며 피복된 식물과 불규칙한 자연석 표면이 직사광선으로 인한 섬광과 반사광을 경감시킬 수 있다(Cho et al., 2009).

### 3. 수치해석 조건

본 연구에서 수치해석은 지진 시 배면 뒤채움재의 다짐 정도에 따른 친환경 옹벽 구조물(Eco-BELT system)의 내진성능 특성을 분석하기 위하여 3차원 유한차분해석에 의한 동적해석을 수행하였다. 또한 T형 후방지지물이 지진 시 친환경 옹벽 구조물의 내진성능 향상에 기여하는지 여부를 검증하기 위하여 2차원 유한차분해석도 병행하여 수행하여 그 결과를 분석하였다.

#### 3.1 해석방법 및 동적하중

수치해석은 유한차분법에 의하여 시간영역에서 응답이력해석을 수행하였고 해석 모델의 측면 경계부에는 자유장경계(free-field boundary)를 적용하여 반사파의

영향을 최소화하였다. 3차원 해석 프로그램은 범용 유한차분해석 프로그램으로서 전세계적으로 널리 사용되고 있는 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)3D (Ver. 3.0)를 사용하였고, 2차원 해석 프로그램은 FLAC2D (Ver. 5.0)을 사용하였다.

입력지진파로서는 지진파의 장주기 성분과 단주기 성분 모두를 고려할 수 있도록 인공적인 지진기록을 작성하여 내진해석에 반영하였다. 인공적으로 생성된 지진의 가속도시간이력을 Fig. 4에 도시하였다. 국가건설기준(KDS)에 의거, 붕괴방지 내진1등급에 해당하는 유효지반가속도 0.154g를 최대값으로 하는 인공지진파를 작성하였다. 작성된 인공지진파의 지속시간은 16.96초로 설정하였다.

접촉면을 고려한 3차원 동적해석은 배면 지반의 상대 밀도를 80% 일 때와 90% 일 때로 나누어 배면 지반의 다짐 정도가 친환경 옹벽의 동적 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수행하였고, 2차원 동적해석은 T형 후

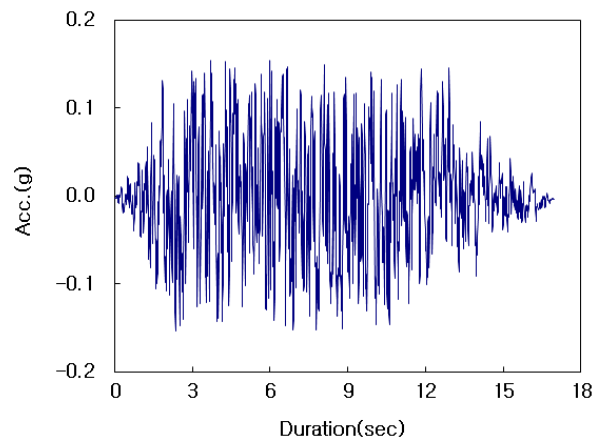


Fig. 4. Acceleration time history of artificial earthquake

Table 1. Cases of dynamic numerical analysis

Case	Analysis code	Relative density (%)	Remarks
1	FLAC3D	80	Considering soil–structure interaction
2	FLAC3D	90	
3	FLAC2D	90	Considering T-shaped deadman
4	FLAC2D	90	

방지지물을 포함한 친환경 옹벽 시스템 전체를 모델링하여 T형 후방지지물이 옹벽 시스템의 내진성능 향상에 미치는 영향을 검증하기 위하여 수행하였다. 해석 케이스는 Table 1에 요약하였다.

### 3.2 해석 모델링

3차원 동적해석의 경우, 친환경 옹벽 표준단면도를 기준으로 3단 옹벽을 구성하였고 총 높이 5.0m, 폭 10m 구간에 대하여 모델링하여 동적해석을 수행하였다. 요소망은 직육면체 요소를 적용하여 정사면체 요소 대비 정확도를 높이고 수치오차를 최소화하였다. 또한 옹벽-흙 접촉면을 고려하기 위하여 접촉면 요소(interface element)를 삽입하여 해석을 수행하였다. 자연석 등의 옹벽 구조물과 지반은 이질재료로서 그 경계부에는 반드시 재료가 서로 직접 맞닿아 있는 접촉면(interface)이 형성된다. 접촉면에 의하여 동적하중 작용 시 상호간 영향을 주고받으며 응답거동을 나타내게 되며 접촉면을 경계로 흙과 구조물은 분리된다. 따라서 수치해석 시 접촉면을 별도로 고려하지 않는다면 지반과 구조물이 하나의 강체거동을 함으로서 불안전측 해석 결과를 초래할 수 있다. 따라서 본 해석에서는 접촉면 요소(interface element)를 고려하여 동적 거동을 보다 실제와 부합하도록 모사하였다.

접촉면 요소는 서로 분리된 해석 요소망(mesh) 사이에 삽입하여 접촉면 전단특성 및 강도특성에 따라 분리 거동 또는 연계거동을 모사하는 역할을 한다. 접촉면 거동은 접촉면의 강성에 따라 달라지며 접촉면 강성은 Fig. 5와 같이 스프링의 전단강성( $k_s$ , shear stiffness) 및 연직 강성( $k_n$ , normal stiffness)으로 표현된다.

따라서 접촉면 요소 삽입 시 강성의 산정이 가장 중요하게 되며 본 연구에서 접촉면 강성은 해석 요소망의 최소크기와 지반의 동적 물성을 이용하여 다음 Table 2와 같이 산정하였다.

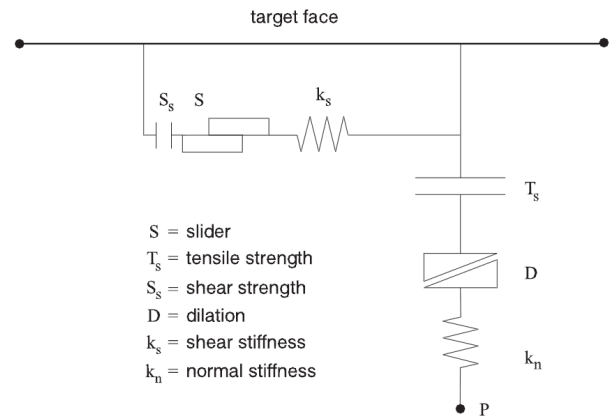


Fig. 5. Schematic diagram of interface modeling in FLAC (ITASCA, 2005)

Table 2. Estimation of interface stiffness

Interface stiffness	Results
<ul style="list-style-type: none"> <li>Interface stiffness is expressed as normal and shear stiffness.</li> <li>10 times of the maximum stiffness at the adjacent zone can be chosen (ITASCA, 2005).</li> <li>Normal and shear stiffness can be estimated based on the equation below;</li> </ul> $k_n = k_s = \max \left[ \frac{(K + \frac{4}{3}G)}{\Delta z_{\min}} \right]$ <p>where, <math>k_n</math> : normal stiffness  <math>k_s</math> : shear stiffness  <math>K</math> : bulk modulus, <math>G</math> : shear modulus,  <math>\Delta z_{\min}</math> : Min. width of adjacent mesh zone.  ( = 0.5m in this study)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li> <math display="block">K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{2615000}{3(1-2 \times 0.175)}</math> <math display="block">= 1341025.6 \text{ tf/m}^2</math> <math display="block">= 1.32 \text{ E}^{10} \text{ Pa}</math> </li> <li> <math display="block">G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2615000}{2(1+0.175)}</math> <math display="block">= 1285012.0 \text{ tf/m}^2</math> <math display="block">= 1.26 \text{ E}^{10} \text{ Pa}</math> </li> <li> <math display="block">\therefore \max \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right] = 6 \times \text{E}^{10} \text{ Pa}</math> </li> </ul>

접촉면 요소 생성 시 접촉면을 기준으로 양측 해석 요소망을 완전 분리된 상태에서 생성하고, 이를 원위치로 이동하여 최종적으로 요소망을 구성하였다. 해석 요소망의 총 길이(L)는 22m, 폭(B) 10m, 높이는 10m 이며 자연석의 높이는 1단 2.6m, 2단 및 3단은 1.8m 이다. 접촉면 요소를 포함한 해석 요소망 생성 결과와 해석결과 도출지점 3개소의 위치는 Fig. 6과 같다.

초기응력 분포를 위한 정적해석을 수행하기 위하여 해석 요소망 측면은 수평방향 변위와 속도를 구속한 고정경계(fixed boundary)를 적용하였고 바닥면은 연직방

향 변위와 속도를 구속한 고정경계(fixed boundary)를 적용한 후 중력가속도를 재하하여 초기지반응력조건을 구현하였다. 초기 정적평형상태에서 지반과 접촉면의 연직응력분포는 Fig. 7과 같다.

초기지반응력 분포 후 모든 요소의 변위와 속도를 0으로 초기화시킨다. 그 후 동적해석 수행을 위하여 해석 요소망의 측면부 경계를 자유장경계(free-field boundary)로 적용하여 동하중 재하 시의 측면경계에서의 중복반사파 영향을 최소화하도록 하였다. 그리고 지진하중을 해석 요소망의 바닥면에 가속도로 재하하여 동적 응력

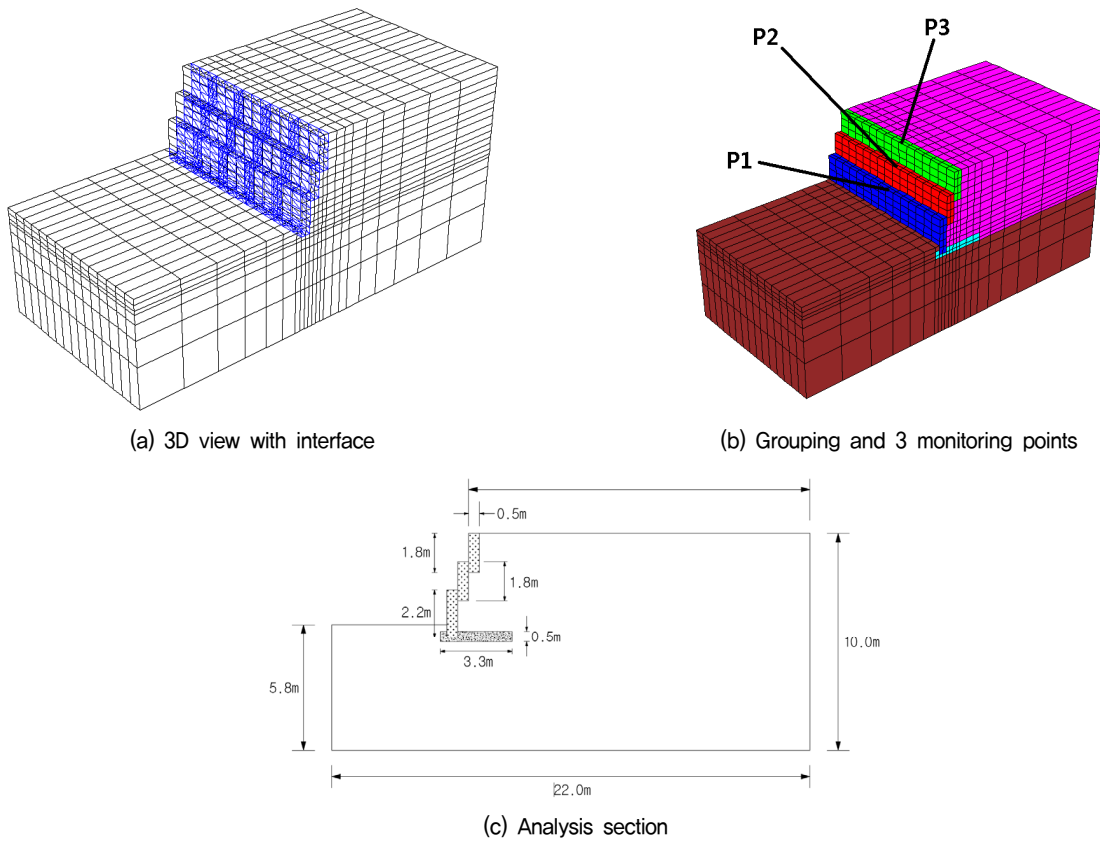


Fig. 6. Mesh generation for 3D analysis

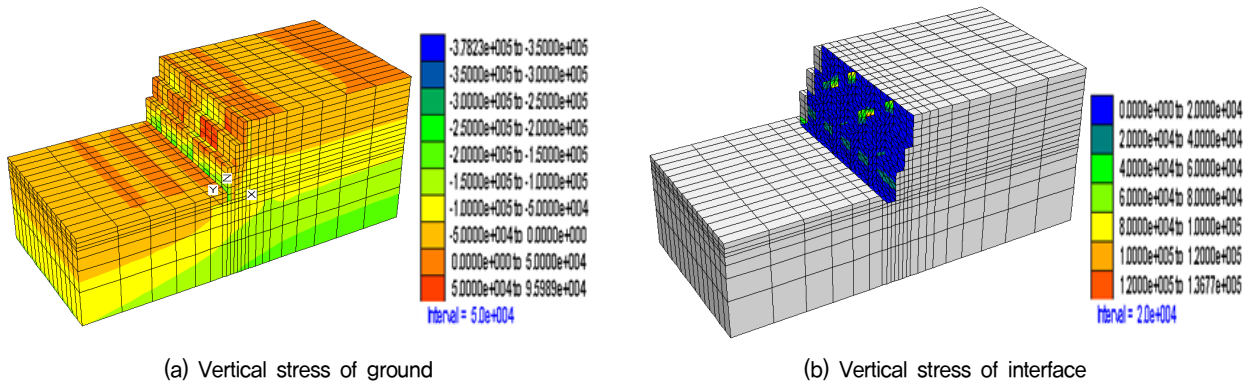


Fig. 7. Initial static conditions of 3D analysis

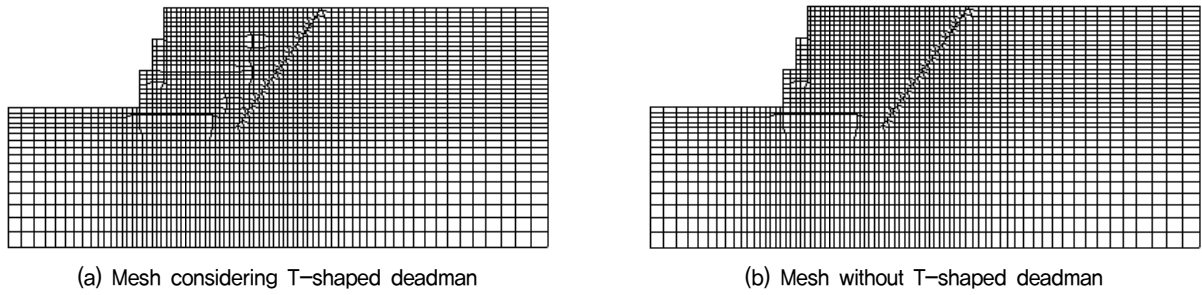


Fig. 8. Mesh generation for 2D analysis

이력해석을 시간영역에서 수행하였다. 인공지진파는 해석 요소망 바닥면에 수평(X-X axis)방향으로 가진하였으며, 구조물계의 강성과 요소망 크기에 의하여 결정되는 시간간격(time interval) 보다 미소하게 작은 값을 설정하여 해석 오차를 최소화하도록 하였다. 수치해석을 위한 구성모델로서 소성 거동을 하는 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였고 옹벽 전면부를 구성하는 석재는 탄성(elastic) 모델을 적용하여 실제와 유사성을 높였다. 또한 접촉면 요소(interface element)는 FLAC3D 프로그램 자체에 내장된 요소이며 주변지반의 강성과 요소망의 크기를 고려하여 앞 절에서 제시한 바와 같이 물성을 산정하여 적용하였다.

옹벽 뒤채움토의 상대밀도 차이에 의한 변위응답거동 차이를 확인하기 위하여 상대밀도 80% 일 경우와 90% 일 경우에 대하여 각각 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 상대밀도를 이용하여 N값을 역산(Table 3)하여 강도정수(내부마찰각)를 달리 적용하였으며 추정 N 값을 이용하여 탄성계수를 산정(Table 4)하여 해석에 반영하였다.

2차원 동적수치해석 구간의 옹벽 및 지반에 대한 유한차분해석 요소망은 다음 그림과 같이 T형 후방지지물 설치 시와 미설치 시를 각각 모델링하였다. T형 지지물의 앵커길이는 3.1m 이며 요소망은 사각형(rectangular)

요소를 적용하여 삼각형(triangular) 요소 대비 정확도를 높이고 수치오차를 최소화하였다. 또한 해석 요소망을 구성하고 있는 재료별로 Grouping 한 결과와, 변위 시간 이력곡선을 추출할 모니터링 위치(P1~P4) 및 축력 시간이력곡선을 추출할 모니터링 위치(A1~A3)는 Fig. 9 와 같다. 기타, 경계조건 및 초기응력분포 절차는 3차원 해석과 동일하게 적용하였으며, 초기응력분포 결과는 Fig. 10과 같다.

동적 수치해석 시, 자연석 배면에 T형 후방지지물 설치 여부에 따른 내진안정성을 비교 검토하기 위하여 T형 후방지지물을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대

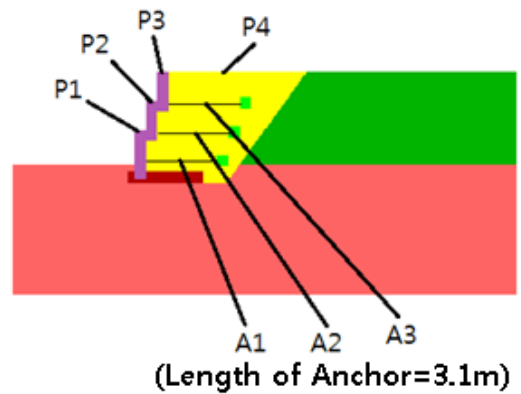


Fig. 9. Grouping and monitoring points

Table 3. Estimation of N value according to relative density (Meyerhof, 1956)

Relative density (%)	Status	Estimated N value
35 ~ 65	Medium	20
65 ~ 85	Dense	35
85 ~ 100	Very dense	50

Table 4. Estimation of elastic modulus according to N value (D'Appolonia et al., 1970)

Soil	Elastic modulus ( $E_s$ )	Remarks
Sand	$E_s = 766 N = 28,725 kPa$	$\phi = 0.3N + 27^\circ$
	$E_s = 766 N = 32,172 kPa$	

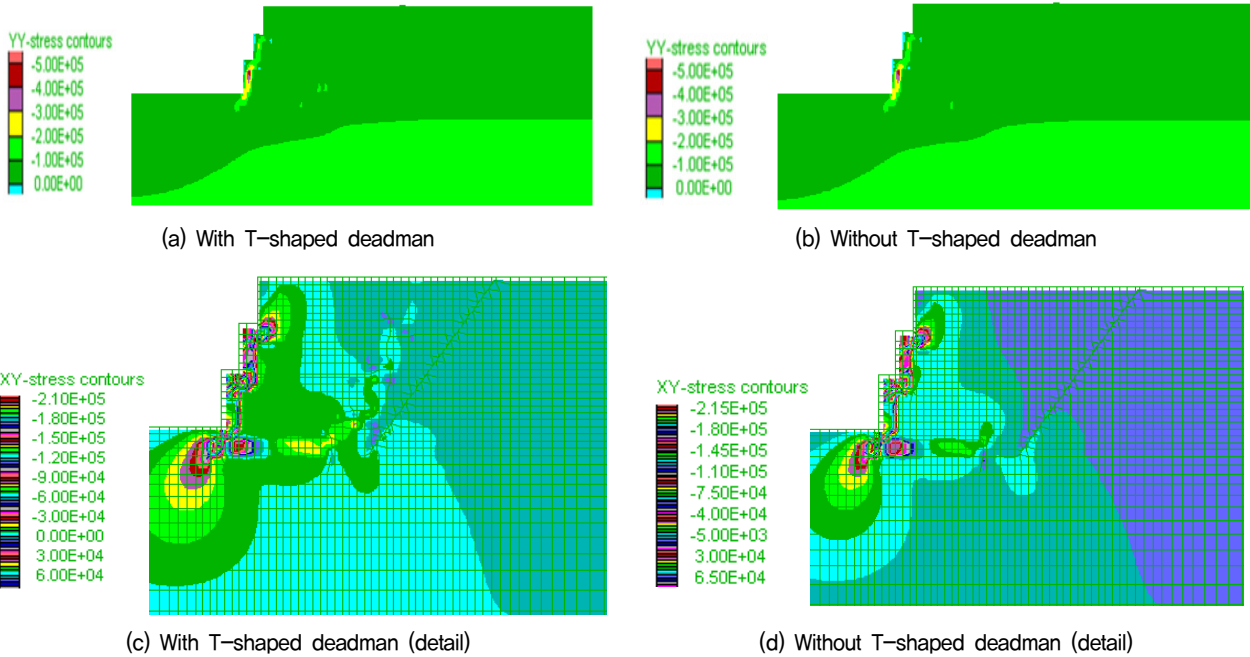


Fig. 10. Initial static conditions of 2D analysis

Table 5. Specification of beam element

Item	Specification	Remarks
Material	Re-bar (HD19)	
Diameter (m)	0,0191	
Area (m <sup>2</sup> )	0,0002865	
Allowable tensile strength (kN)	60,165	

Table 6. Input properties of ground

Soil	Elastic modulus (kPa)	Cohesion (kPa)	Friction angle (deg)	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
Backfill	28,725 (Dr=80%)	-	37,5 (Dr=80%)	1,800	0,3
	32,172 (Dr=90%)		42,0 (Dr=90%)		
Ground soil	300,000	60	36	1,900	0,3
Rock	1,500,000	-	-	2,400	0,2

하여 각각 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. 입력 지반물성은 3차원 내진해석과 동일하게 적용하였고 T형 후방지지물과 자연석을 연결하는 요소는 보요소(beam element)를 적용하였으며 그 제원은 다음 Table 5와 같다. 2, 3차원 해석에 적용된 지반의 물성치는 Table 6과 같다.

#### 4. 수치해석 결과

##### 4.1 3차원 해석결과

3차원 응답이력해석 결과 최대 수평변위는 위치별로

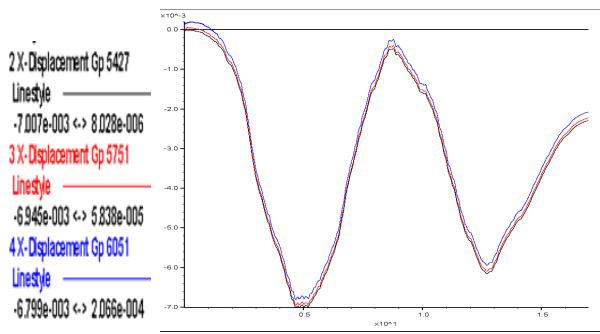
Table 7과 같이 산정되었고, 수평변위 시간이력 및 합변위 분포도는 Fig. 11과 같다.

인공지진파를 재하하여 응답이력해석을 수행한 결과 사전에 지정한 변위 시간이력의 최대값은 상대밀도 90% 일 경우 최대 7.007mm, 80% 일 경우 최대 9.815mm로서 상대밀도에 상관없이 지점 P1에서 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 접촉면 요소를 적용하여 석재와 토사를 물리적으로 분리하여 동하중 재하 후 해석을 수행하였으므로, 흙-구조물의 분리거동이 발생하여 하중 재하지점과 가장 가까운 최하단 석재에서 최대 수평변위가 산정되었다고 판단된다. 다만 변위의 절대적인 크기 차이는 상대밀도 90% 일 경우 최대 0.208mm, 80% 일 경우

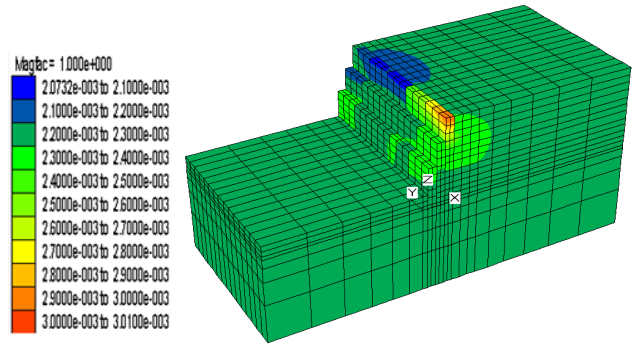


Table 7. Maximum lateral displacement results (3D)

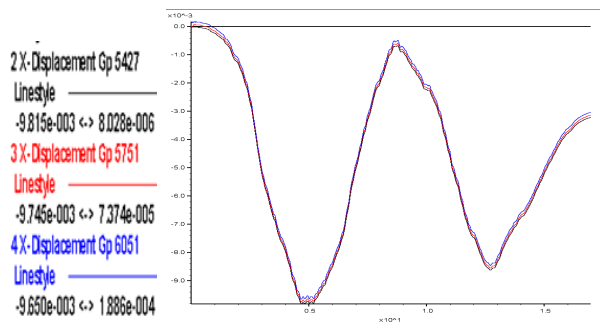
Location	Relative density (%)	Max. displ. (mm)	Time (sec)
P1	90	7.007	4.678
P2		6,945	4.675
P3		6.799	4.672
P1	80	9.815	4.678
P2		9.745	4.675
P3		9,650	4.672



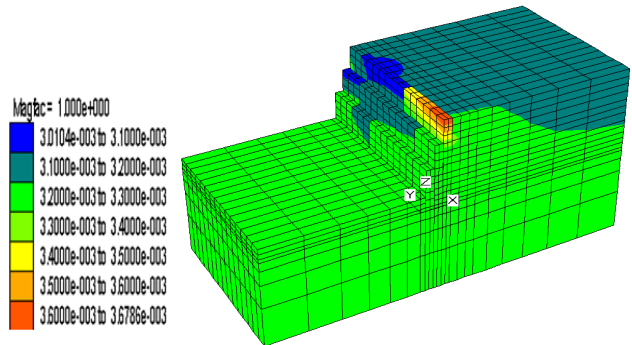
(a) Lateral displacement history (Dr=90%)



(b) Displacement magnitude (Dr=90%)



(c) Lateral displacement history (Dr=80%)



(d) Displacement magnitude (Dr=80%)

Fig. 11. Displacement estimation results (3D)

최대 0.165mm로서 미소하였다. 상대밀도별 최대 수평 변위 발생 경향은 Fig. 12와 같이 상대밀도 90% 일 때 80% 대비 약 28.6~29.5%가 감소하는 것으로 산출되었다. 이는 상대밀도 증가에 따른 뒤택움재의 탄성계수 및 강도정수(내부마찰각) 증가가 해석에 반영되었기 때문인 것으로 판단된다.

옹벽부에서 발생하는 수평변위의 방향은 Fig. 13과 같이 옹벽 하단(1단)에서는 수평방향 (X-axis)으로 나타났다. 이는 하중 재하지점과 근접하고 기초에 근입되어 설치 위치가 비교적 안정적인 옹벽 하단부에서 수평방향 지진하중의 영향이 흙-구조물 간 큰 간섭 없이 전달된 것이라 판단할 수 있다. 또한 옹벽 상단(3단)에서는 대각선 하방변위가 일부 발생하였는데, 이는 옹벽의 상

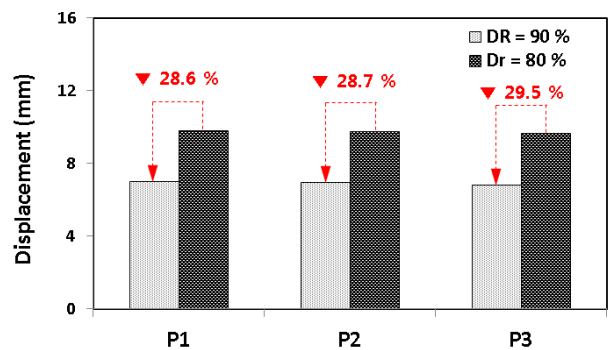


Fig. 12. Maximum displacement according to relative density

단부에 위치한 특성 상 수평력에 의해 변위가 발생함과 동시에 바로 전면 옹벽(2단) 역시 변위가 발생하였으므로 그 간극으로 중력방향의 쓸림이 동시에 발생하였기

때문인 것으로 판단된다.

옹벽 중앙부 접촉면 요소의 전단변위 발생 경향은 하중 재하지점과 가장 가까운 옹벽 하단부(1단)에서 전단방향(X-Y, X-Z)으로 주로 발생하고 있으며 이는 옹벽 하단부(1단)에서는 변위 발생 방향이 주로 수평방향(X-axis)이나 진동에 의한 자중침하로 옹벽 주변지반에서는 상부로 갈수록 중력방향의 변위가 미소하게나마 발생함에 따라 접촉면 전단변위가 일부 발생하는 경향을 나타

내고 있다.

옹벽 중앙부 배면 뒤채움토에서 전단변형률 발생경향은 Fig. 15와 같이 옹벽을 구성하는 석재와 접촉면 요소로 분리된 뒤채움토에서 상향으로 경사를 이루며 발생하였다. 옹벽 하단부(1단)에서는 수평방향(X-axis)으로 옹벽 석재 두께의 약 3.5배 영역까지 전단변형률이 발생하였고, 2~3 단에서는 약 45도의 각도로 우상향하는 형태로 전단변형률이 발생하였다. 최대 전단변형률

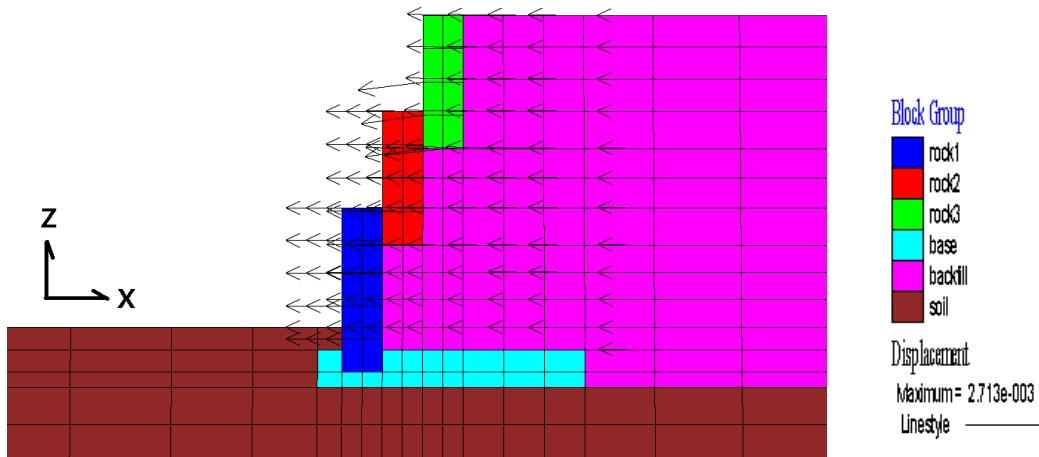


Fig. 13. Lateral displacement of Eco-BELT system (Dr=90%)

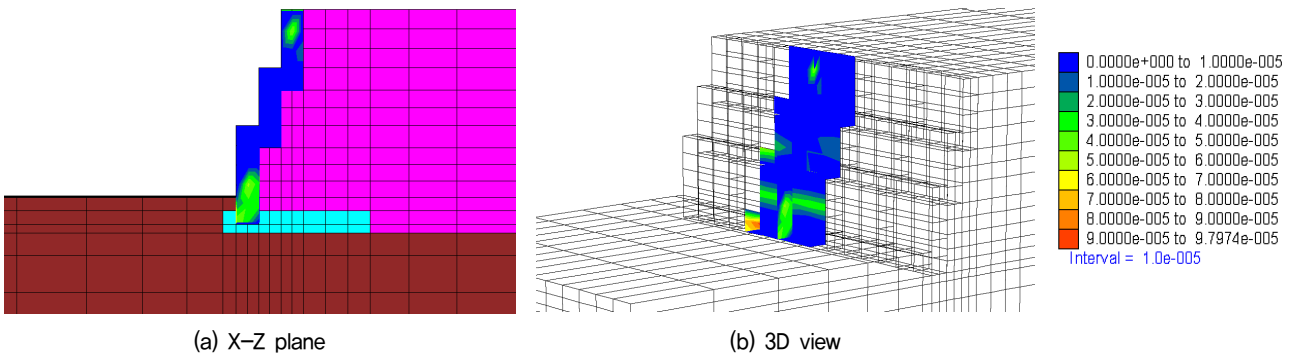


Fig. 14. Shear displacement of interface element

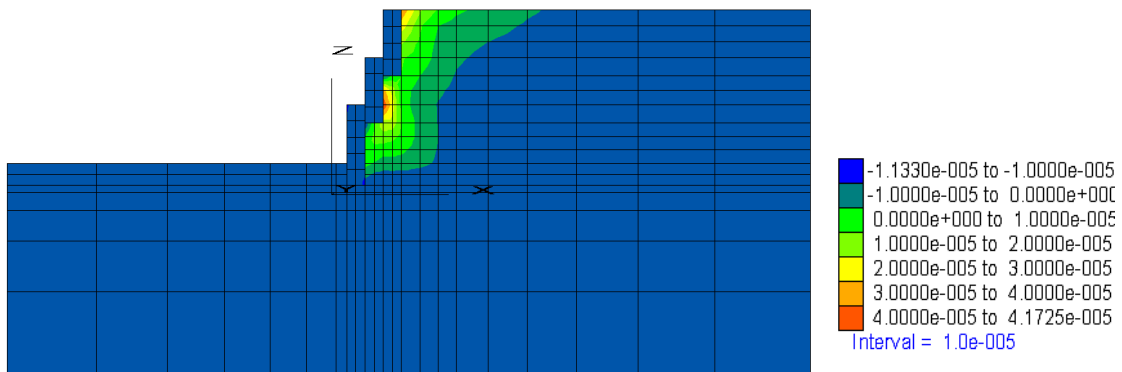


Fig. 15. Shear strain of backfill

은 1단 옹벽상부와 2단 옹벽하부가 중첩되는 위치에 발생하였고, 크기는 약 0.00783%으로서 미소한 값을 나타내었다.

#### 4.2 2차원 해석결과

2차원 응답이력해석은 친환경 옹벽 배면 뒤채움토의 상대밀도 90%를 기준으로 T형 후방지지물이 설치되어 있는 경우와 없는 경우에 대하여 각각 해석을 수행하고 그 결과를 비교 검토하였다. 해석결과 산정된 최대 수평 변위는 위치별로 Table 8과 같고, 자연석의 수평변위 시간이력곡선과 T형 후방지지물이 설치될 경우 후방지지물과 전면부 자연석을 연결하는 연결재의 축력 시간이력은 Fig. 16과 같다.

수평변위 시간이력의 최대값은 T형 후방지지물 설치 시 최상단(P1)에서 6.994mm, T형 후방지지물 미설치 시 최상단(P1)에서 8.931mm로서 옹벽 최상단 지점인 P1에서 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 자연석 상호간의 연결부재(앵커)로 연결되어 있어 동하중 재하 시 일체거동에 가까운 거동을 함으로써 지반의 가속도 증폭에 의하여 최상단 석재에서 최대 수평변위가 산정되었다고 판단된다. 그러나 옹벽 배면지반의 뒤채움이 충실하게 이루어

졌다고 가정할 때, 가속도 증폭 자체가 크지 않으므로 변위의 절대적인 크기 차이는 T형 후방지지물 설치 시 최대 0.103mm, T형 후방지지물 미설치 시 최대 0.204mm로서 미소하였다. T형 후방지지물 미설치 시 옹벽 상호간의 결속효과 및 지반 지지효과가 T형 후방지지물 설치 시 대비 감소하므로 변위가 증가하였다고 판단된다.

T형 후방지지물 설치 여부에 따른 각 지점별 최대 수평변위 발생 경향은 Fig. 17과 같이 T형 후방지지물 설치 시 약 21.2~21.9%가 감소하는 것으로 산출되어 지진하중 재하 시 T형 후방지지물의 변위 억제효과를 확인하였다.

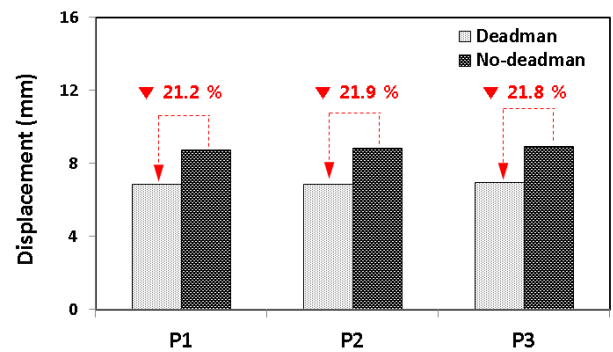
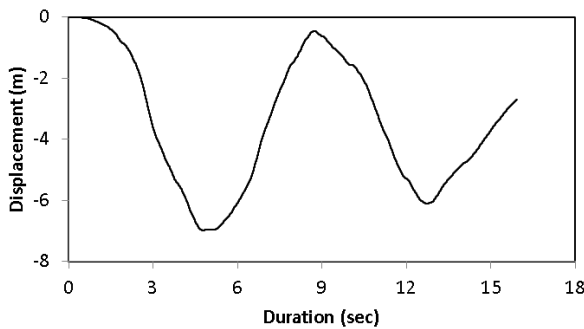
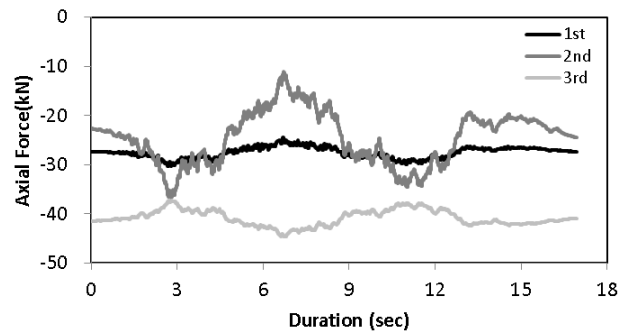


Fig. 17. Maximum displacement according to T-shaped deadman (2D)



(a) Lateral displacement history at P4



(b) Axial force histories at A1~A3

Fig. 16. Displacement and axial force estimation results (2D)

Table 8. Maximum lateral displacement results (2D)

Location	Max. displ. (mm)	Time (sec)	Remarks
P1	6.881	4.728	with T-shaped deadman
P2	6.892	4.788	
P3	6.984	4.791	
P4	6.983	4.790	
P1	8.727	4.782	without T-shaped deadman
P2	8.828	4.789	
P3	8.931	4.791	
P4	8.929	4.790	

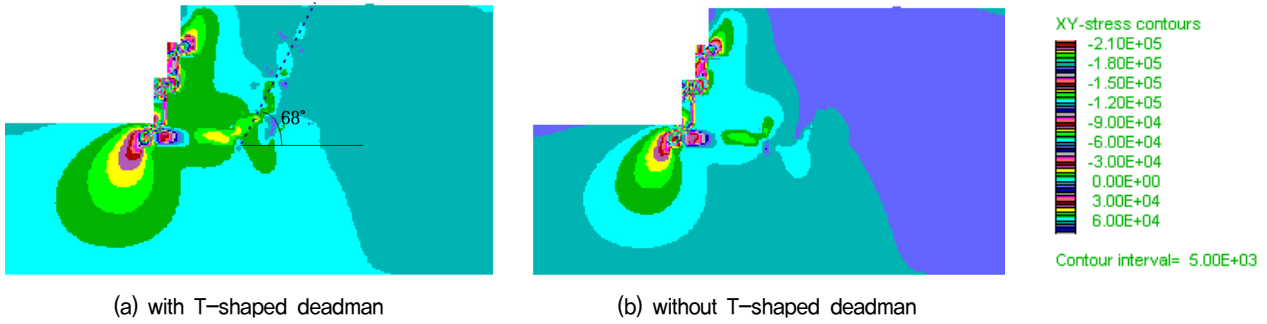


Fig. 18. Shear stress distribution according to T-shaped deadman (2D)

지진하중 재하 시 옹벽 배면부 및 지반 전단응력은 옹벽 인접부 지반과 최하단 근입구간 전면부에서 집중되며, T형 후방지지물 설치 시 T형 후방지지물 주변에서 전단응력 집중과 함께 T형 후방지지물 설치 위치를 따라 약 68°의 각도로 예상 파괴면을 형성함을 관측할 수 있다(Fig. 18).

## 5. 결론

본 연구에서는 친환경 옹벽구조물(Eco-BELT system)에 대하여 3차원 및 2차원 동적 유한차분해석을 수행하여 지진 시 변위 시간이력 및 지반-구조물 변위 발생경향을 파악하여 지진시 동적거동을 분석하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 단, 본 연구는 수치해석적 연구이므로 추후 보다 다양한 조건을 고려한 해석을 수행할 필요가 있으며, 해석 결과의 검증을 위한 실내시험(진동대 시험 등)을 수행할 예정이다.

- (1) 옹벽구조물-지반 동적 상호작용을 고려하여 3차원 응답이력해석을 수행한 결과 사전에 지정한 변위 시간이력의 최대값은 상대밀도 90% 일 경우 최대 7.007mm, 80% 일 경우 최대 9.815mm로서 미소하게 산정되어 내진안정성을 확보하는 것으로 판단된다. 또한 옹벽구조물과 뒤채움토 사이에 접촉면 요소(interface element)를 삽입하여 해석을 수행한 결과, 접촉면에서 흙-구조물의 분리거동이 발생하여 하중 재하지점과 가장 가까운 최하단 석재에서 최대 수평변위가 산정되었다.
- (2) 옹벽구조물의 변위 발생방향 검토결과, 전반적으로 수평변위(X-axis)가 우세하게 발생하였으나, 상단(3단)에서는 대각선 하방 변위가 일부 발생하였는데, 이는 옹벽의 상단부에 위치한 특성 상 수평력에 의

해 변위가 발생함과 동시에 바로 전면 옹벽(2단) 역시 변위가 발생하였으므로 그 간극으로 중력방향의 쓸림이 동시에 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 지진 시 하부 옹벽의 변위가 다소 커지더라도 중력방향의 쓸림이 발생하는 상부 옹벽의 안정성이 전체 옹벽 안정성을 지배할 것으로 예상된다. 또한 전단변형률 발생경향 검토결과, 하단부(1단)에서는 배면 방향으로 옹벽 석재두께의 약 3.5배 까지 전단변형률이 발생하였고, 2~3 단에서는 약 45도의 각도로 우상향하는 형태로 다소 복잡한 형상을 나타내었다. 최대 전단변형률은 1단 옹벽상부와 2단 옹벽하부가 중첩되는 위치에 발생하였으므로, 옹벽 석재 간 위치가 근접하여 중첩되는 지점이 지진 시 전단변위가 집중될 수 있는 취약구간으로 판단할 수 있다.

- (3) 자연석 상호간의 연결 및 T형 후방지지물을 고려한 2차원 동적 수치해석 결과, 변위 시간이력의 최대값은 T형 후방지지물 설치 시 최상단(P1)에서 6.994mm, T형 후방지지물 미설치 시 최상단(P1)에서 8.931mm로서 옹벽 최상단 지점인 P1에서 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 자연석 상호간의 연결부재(앵커)로 연결되어 있어 동하중 재하 시 일체거동에 가까운 거동을 함으로써 지반의 가속도 증폭에 의하여 최상단 석재에서 최대 수평변위가 산정되었다고 판단되며, 변위의 절대적인 크기 차이는 T형 후방지지물 설치 시 최대 0.103mm, T형 후방지지물 미설치 시 최대 0.204mm로서 미소하였다.
- (4) T형 후방지지물 미설치 시 옹벽 상호간의 결속효과 및 지반 지지효과가 T형 후방지지물 설치 시 대비 감소하므로 변위가 증가하였다고 판단된다. 또한 T형 후방지지물 설치 여부에 따른 각 지점별 최대 수평변위 발생 경향은 T형 후방지지물 설치 시 약



21.2~21.9%가 감소하는 것으로 산출되어 지진하중 재하 시 T형 후방지지물의 보강효과를 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 (주)에코밸리의 지원을 통해서 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Changwei, Y., Shixian, Z., Zhang, J., and Bi, J. (2015), Seismic Stability Time-Frequency Analysis Method of Reinforced Retaining Wall, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol.2015, No.1, Article ID 178692.
2. Cho, K. Y., Roh, K. T., and Seo, B. S. (2009), Natural Wall Systems-Esthetic View Element in a Downtown Facilities, *Professional Engineer*, Vol.42, No.4, pp.55-61.
3. D'Appolonia, D.J., D'Appolonia, E., and Brissette, R.F. (1970), Settlement of Spread Footings on Sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.96, No.SM2, pp.754-761.
4. Design Standard of Slope. (2016), Ministry of Land, *Infrastructure and Transport*, pp.74.
5. FLAC User manual (2005), *Itasca Consulting Group*.
6. Ha, W.J., Jeong J.H., Oak C.N., and Lee B.G. (2002), A Study on Retraining Wall using Natural Rock, *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, pp.2521-2525.
7. Jo, S.B., Ha, J.G., Choo, Y.W., and Kim, D.S. (2013), A Case Study of Evaluating Inertial Effects for Inverted T-shape Retaining Wall via Dynamic Centrifuge Test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.4, pp.33-44.
8. Jung, J.H. (2012), A study on Compaction and Settlement of Backfill Soil at Segmental Reinforced Earth, *M.S. Thesis*, Department of Civil Engineering, Graduate School, Yeungnam University, pp. 71-75.
9. Kim, D.B., Shin, E.C., and Park, J.J. (2019), Dynamic Active Earth Pressure of Gabion-Geotextile Bag Retaining Wall System Using Large Scale Shaking Table Test, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.20, No.12, pp.15-26.
10. Korean Design Standard 11 80 05, *Korea Construction Standard Center*, pp.11.
11. Korean Design Standard 11 80 10, *Korea Construction Standard Center*, pp.4-6.
12. Korean Design Standard 11 80 15, *Korea Construction Standard Center*, pp. 3.
13. Korean Design Standard 17 00 00, *Korea Construction Standard Center*, pp.13-14.
14. Lee, S.M., Choi, C.H., and Shin, E.C. (2013), A Study of Connection Stability for Reinforced Retaining Wall Constructed with Soilbag with Varying Connection Strength, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.12, No.1, pp.101-107.
15. Meyerhof, G. G. (1956), Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.82, No.1, pp.1-19.
16. Seismological Annual Report. (2020), *Korea Meteorological Administration*, pp.1-5.
17. Sitar, N., Mikola, R.G., and Candia, G. (2012), Seismically Induced Lateral Earth Pressures on Retaining Structures and Basement Walls, *Proceedings of GeoCongress 2012At: Oakland, CA*, pp. 335-358.
18. The Experiment of Vine for Covering the Traffic Noise Barrier. (1999), *Korea Expressway Corporation Research Institute*, pp.11.
19. Yoo, C.S., Kim, S.B., Jung, H.S., and Byun, J.S. (2006), Field Instrumentation of A Geosynthetic Reinforced Large Size Modular Block Wall, *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers*, pp. 2871-2874.
20. Yoon, S.J., Kim, S.R., and Kim, M.M. (2002), Analysis of Influence Factors on the Seismic Earth Pressure Acting on Gravity Walls, *Proceedings of Earthquake Engineering Society of Korea*, pp. 75-82.

Received : July 22<sup>nd</sup>, 2021

Revised : August 12<sup>th</sup>, 2021

Accepted : August 13<sup>th</sup>, 2021