

사면 경사도가 있는 뒷채움토와 지반특성을 고려한 역T형 옹벽의 지진시 취약도 평가

서환우* · 김병민** · 박두희***

Seo, Hwanwoo*, Kim, Byungmin**, Park, Duhee***

Seismic Fragility Evaluation of Inverted T-type Wall with a Backfill Slope Considering Site Conditions

ABSTRACT

Retaining walls have been used to prevent slope failure through resistance of earth pressure in railway, road, nuclear power plant, dam, and river infrastructure. To calculate dynamic earth pressure and determine the characteristics for seismic behavior, many researchers have analyzed the nonlinear response of ground and structure based on various numerical analyses (FLAC, PLAXIS, ABAQUS etc). In addition, seismic fragility evaluation is performed to ensure safety against earthquakes for structures. In this study, we used the FLAC2D program to understand the seismic response of the inverted T-type wall with a backfill slope, and evaluated seismic fragility based on relative horizontal displacements of the wall. Nonlinear site response analysis was performed for each site (S2 and S4) using the seven ground motions to calculate various seismic loadings reflecting site characteristics. The numerical model was validated based on other numerical models, experiment results, and generalized formula for dynamic active earth pressure. We also determined the damage state and damage index based on the height of retaining wall, and developed the seismic fragility curves. The damage probabilities of the retaining wall for the S4 site were computed to be larger than those for the S2 site.

Key words : Seismic fragility, Inverted T-type wall, Backfill slope, Site characteristics

초 록

옹벽 구조물은 철도, 도로, 원자력 발전소, 댐, 하천 시설 등 토압 저항을 통한 사면 붕괴방지에 활용된다. 동토압 산정 및 지진시 거동에 대한 특성을 파악하기 위해 많은 연구자들은 다양한 수치해석 프로그램(FLAC, PLAXIS, ABAQUS 등)을 활용하여 동적 하중에 대한 구조물과 지반의 비선형 거동을 분석하고 있다. 또한, 구조물의 지진에 대한 안전성을 확보하기 위해 지진취약도 곡선을 산정하여 확률론적 지진안전성 평가를 수행하고 있다. 본 연구에서는 수치해석프로그램 FLAC2D를 활용하여 뒷채움토의 사면 경사도가 있는 역T형 옹벽의 지진거동 특성을 파악하고, 옹벽 벽체의 상대적인 수평변위를 고려하여 지진취약도 평가를 수행하였다. 다양한 지진하중을 고려하기 위해 암반에서 계측된 7개의 지진파를 활용하여 각 지반특성 별(S2, S4) 비선형 지반응답해석을 수행하였고, 산정된 지진파의 크기를 5가지(0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 g의 최대지반가속도)로 조정하였다. 본 연구에 활용된 수치해석 모델은 다른 수치해석결과와 실험결과, 주동토압 산정식을 활용하여 비교 검증하였다. 옹벽 높이에 대한 상대수평변위를 손상지수로 고려하여 옹벽의 손상상태를 결정하여 지진취약도 곡선을 산정하였다. 상대적으로 깊고 토층 평균 전단파 속도가 느린 S4 지반에서 S2 지반보다 옹벽 벽체의 수평 변위에 대한 지진취약도가 크게 산정되었음을 확인하였다.

검색어 : 지진취약도 평가, 역 T형 옹벽, 뒷채움토 경사도, 지반특성

* 정희원 · 울산과학기술원 도시환경공학부 석박통합과정 (Ulsan National Institute of Science and Technology · hwanwooseo@unist.ac.kr)

** 종신희원 · 울산과학기술원 도시환경공학부 부교수, 공학박사 (Ulsan National Institute of Science and Technology · byungmin.kim@unist.ac.kr)

*** 종신희원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Hanyang University · dpark@hanyang.ac.kr)

Received November 23, 2020/ revised December 11, 2020/ accepted May 11, 2021

1. 서론

옹벽은 도로시설물(교량, 터널, 사면, 옹벽 등)에 포함되며 토압에 저항하여 토사가 무너지는 것을 방지하기 위해 다양한 시설(철도, 도로, 발전소 등)에서 활용되고 있다. 옹벽 구조물은 다른 구조물(교량, 터널 등)과 달리 모멘트나 변형율로 손상수준을 결정하지 않고 옹벽의 거동변위와 뒷채움토의 침하량에 따라 손상수준을 결정한다. 국내에서는 최근 2016년 9월에 발생한 규모5.8의 경주지진과 2017년 11월에 발생한 규모5.4의 포항지진을 포함한 지진들이 발생하면서 옹벽이 파괴(붕괴, 벽체탈락, 침하 등)가 되는 사례가 발생하고 있다. 이와 같이 옹벽의 지진에 대한 안전성을 평가하기 위해 국외에서는 다양한 지진파를 수집하고 약 1.0 g까지의 최대지반가속도(Peak ground acceleration; PGA)로 크기를 조정하여 옹벽에 대한 지진 취약도 평가에 많은 노력을 해왔다(Argyroudis et al., 2013; Huang et al., 2019; Kakderi and Pitilakis, 2010; Zamiran and Osouli, 2018). 하지만 국내에서는 옹벽에 대한 취약도평가 사례가 드물며(Kim et al., 2018), 지반특성과 경사도가 있는 뒷채움토를 고려한 지진시 옹벽 거동과 취약도 곡선 개발에 대한 연구는 더욱 드물다.

본 연구에서는 수치해석프로그램(FLAC2D)를 활용하여 지반특성과 뒷채움토의 경사도를 고려한 옹벽의 지진취약도 평가를 수행하였다. 수치해석은 지진하중에 대한 복잡한 구조물의 거동을 분석하기에 적절한 방법이지만, 공학적 판단과 수치해석 프로그램 사용능력이 요구된다. 따라서, 수치해석 모델의 검증에 위해 본 연구에서는 다른 수치해석프로그램, 원심모형실험결과, 토압산정식을 활용하였다. 또한, 다양한 입력지진파를 고려하기 위하여 포항지진과 경주지진을 포함한 한반도에서 기록된 7개 지진파를 활용하였으며, 지반종류에 따라 비선형 지반응답해석을 수행하여 지진파를 산정하였다. 산정된 지진파를 활용하여 옹벽의 동적거동특성에 대해 분석하고 문헌조사를 통해 옹벽 벽체에 대한 손상상태와 손상지수를 결정하여 지진시 옹벽의 취약도평가를 수행하였다.

2. 지진파 선정

2.1 데이터 수집

Table 1은 본 연구에 사용된 총 7개의 지진파의 정보를 나타내며, 모두 한반도에서 기록된 지반운동이다. 최근 국내에서 발생한 경주지진과 포항지진은 기상청의 국가종합정보시스템(National Earthquake Comprehensive Information System)에서 수집하였으며, 국내 지진환경과 유사한 국외지역에서 기록된 5개의 지진파를 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) Center와 KiK-net (Kiban Kyoshin network)에서 수집하였다. 국외지역에서 수집된 지진파는 경주지진과 포항지진의 규모와 유사한 지진

Table 1. Information about the Seven Ground Motions Used in This Study

| No. | Earthquake | Country | Year | Magnitude (M) | Distance (km) | PGA (g) |
|-----|------------------|---------|------|---------------|---------------|---------|
| 1 | Gyeongju | Korea | 2016 | 5.5 | 9.1 | 0.41 |
| 2 | Pohang | Korea | 2017 | 5.4 | 9.5 | 0.29 |
| 3 | Hokkaido | Japan | 2018 | 6.7 | 34 | 0.13 |
| 4 | N.Palm Springs | USA | 1986 | 6.06 | 17.03 | 0.13 |
| 5 | Kozani Greece-01 | Greece | 1995 | 6.4 | 19.54 | 0.21 |
| 6 | Sierra Madre | USA | 1991 | 5.61 | 10.36 | 0.28 |
| 7 | L'Aquila Italy | Italy | 2009 | 5.6 | 14.95 | 0.13 |

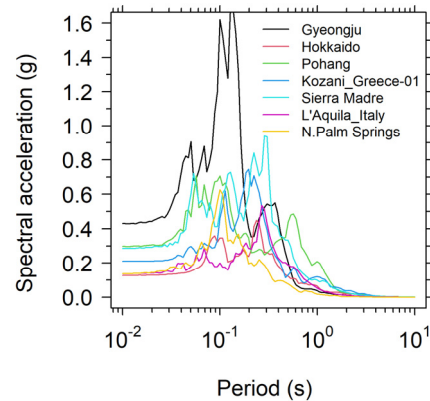


Fig. 1. Response Spectra for the Seven Ground Motions Measured at Rock Outcrops

모멘트 규모(M) 5 이상 7 이하이며 진원거리는 40 km 이하이다. 한국과 일본, 미국, 그리스, 이탈리아에서 기록된 지진파는 PGA가 0.13 g에서 0.41 g 값을 가진다. Fig. 1은 수집한 지진파의 응답스펙트럼을 보여주며, 단주기에서 스펙트럴 가속도가 큰 것을 알 수 있다. 특히, 경주지진 지진파는 다른 지진파들과 비교하였을 때, 0.01~0.1초에서 가장 높은 스펙트럴가속도를 가진다.

2.2 비선형 지반응답해석

지반 분류별 지진파의 증폭 특성을 고려하기 위해 비선형 지반응답해석을 수행하였다. 본 연구에서는 포항과 울산지역에서 116개 시추주상도 및 전단파속도 주상도를 확보하였으며, 기반암 깊이와 토층 평균전단파속도($V_{s,Soil}$)를 활용하여 내진설계기준 공통적용사항(MPSS, 2017)에 따라 분류하였다. S2 지반은 65개, S3 지반은 6개, S4 지반은 43개, S5 지반은 2개로 대부분 상대적으로 단단한 S2와 S4 지반이 주로 분포한다. 따라서, Fig. 2와 같이 두 지반(S2, S4)분류별 전단파속도 평균값과 가장 유사한 주상도를 대표주상도로 선정하였다. S2 지반은 자갈섞인 모래, 잔적토, 풍화암, 연암으로

구성되어 있는 반면에 S4 지반은 자갈섞인 모래와 잔적으로 구성되어 있다.

두 지반 조건에 대한 1차원 비선형 지반응답해석을 수행하기 위해 DEEPSOIL v7.0 프로그램(Hashash et al., 2020)을 활용하였다. 지반의 비선형 동적거동의 특성을 모사하기 위해 MKZ (Modified Konder and Zelasko; Matasovic, 1993) 모델과 Darendeli(2001) 비선형 곡선들을 활용하여 각 지반별 지표면 가속도 시간이력 및 응답스펙트럼을 산정하였다. S2 지반에서는 지표면 PGA가 0.17 g에서 0.71 g이고, S4 지반에서는 0.18 g에서 0.49 g로 산정되었다. Fig. 3은 최대지반가속도로 정규화한 지표면 산정 지진파와 응답스펙트럼을 보여준다. S2 지반과 S4지반의 경우 모두, 단주기(T=0.1s)에서 스펙트럴 가속도가 최대이지만, S4 지반은 0.2-0.3초 사이에 해당하는 스펙트럴 가속도 또한 상대적으로 높음을 확인할 수 있다. 지진파는 지진취약도 평가를 위해, 각 지반분류별 산정된 지진파를 5개의 PGA (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 g)로 조정하였다.

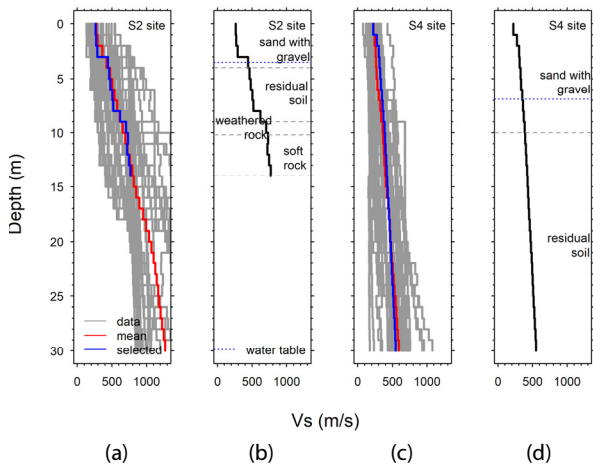


Fig. 2. V_s Profiles and Geotechnical Boring Logs for S2 and S4 Sites. (a) V_s Profiles for S2 Site; (b) Representative V_s Profiles and Geotechnical Boring Log for S2 Site; (c) V_s Profiles for S4 Site; (d) Representative V_s Profiles and Geotechnical Boring log for S4 Site

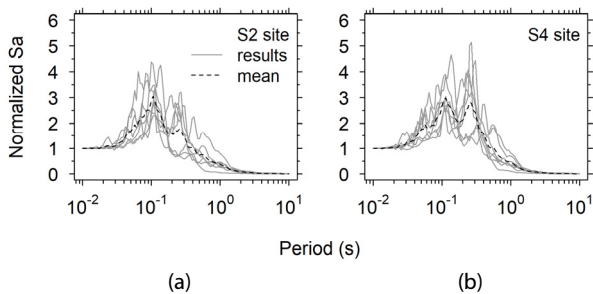


Fig. 3. Normalized Response Spectra Computed by 1-D Nonlinear Site Response Analyses for the S2 and S4 Sites

3. 수치해석 모델링

3.1 옹벽과 지반모델링

본 연구에서는 유한차분법 해석프로그램인 FLAC2D (Itasca, 2011)를 활용하여 경사도가 있는 뒷채움토와 지반특성을 고려한 지진 시 역 T형 옹벽의 동적 거동을 살펴보았다. 역 T형 옹벽 모델은 KEPCO(2017)에 나타나 있는 11개 역 T형 옹벽의 도면을 참고하였고, 옹벽들의 저판폭, 높이, 배면토사높이와 근입깊이의 중간값을 계산하여 대표 옹벽으로 Fig. 4(a)와 같은 역 T형 옹벽 모델을 선정하였다. 지반 모델의 크기는 가로 40미터, 높이 16.2미터이며 각 요소의 크기는 0.3-0.4 m로 설정하여 최대 66 Hz까지 필터가 되지 않도록 하였다. 또한, 옹벽 모델은 빔요소(Beam element)로 구성되어 있으며, 옹벽의 물성치는 도로옹벽표준도 (MOLIT, 2008)를 참고하였다. 지반 모델과 옹벽 모델의 물성치는 Table 2에 나타났다. 지반 모델의 경우 전단파속도 200 m/s의 강성을 가지는 모래로 가정하였으며, 옹벽 모델의 물성치는 강도 24 MPa를 고려하여 산정되었다. FLAC2D의 경우 평면변형률(plane-strain

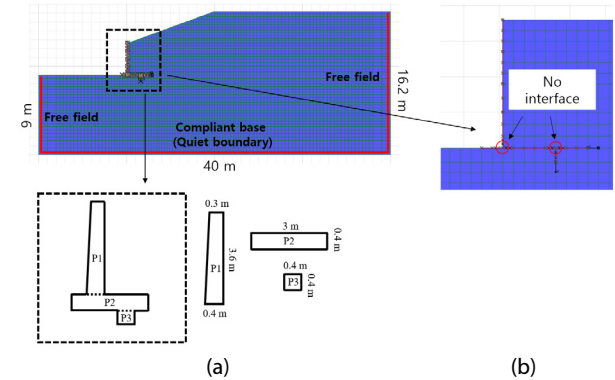


Fig. 4. Inverted T-type Retaining Wall and Soil Modeling Used in This Study

Table 2. Soil and Retaining Wall Properties Used in This Study

| Element | Parameter | Value |
|----------------|---|--|
| Soil | Unit weight (kN/m ³) | 18 |
| | Poisson's ratio | 0.3 |
| | Elastic modulus (kPa) | 1.9×10 ⁵ |
| | Cohesion (kPa) | 0 |
| | Internal friction angle (°) | 32 |
| | Dilation angle (°) | 0 |
| Retaining wall | Unit weight (kN/m ³) | 24.5 |
| | Poisson's ratio | 0.2 |
| | Elastic modulus (kPa) | 2.3×10 ⁷ |
| | Second moment of area (m ⁴) | 2.25×10 ⁻³ -5.33×10 ⁻³ |

condition)이 가정되기 때문에, 옹벽의 영률(Elastic modulus)은 Eq. (1)을 활용하여 계산하였다(Green et al., 2008).

$$E_{plane} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (1)$$

여기서 E_{plane} 은 평면변형률 조건이 고려된 옹벽의 영률을 의미하고, E는 옹벽의 영률을 나타내고, ν 는 옹벽의 포아송 비를 나타낸다.

지반의 전단파괴기준으로 Mohr-Coulomb 파괴기준을 사용하였다. 지반의 변형률에 따른 동적특성을 묘사하기 위해 Darendeli(2001)의 강성감쇠 및 댐핑비 곡선과 FLAC2D가 제공하는 4개의 비선형 모델(Default, Hardin, Sig3, Sig4)과 비교하여 가장 유사한 Default model을 선정하였다. 또한, 최소감쇠를 적용하기 위해 Rayleigh 감쇠를 적용하였다.

지반 모델의 경계조건으로 모델 양쪽에 수평전파되는 지진파의 반사를 방지하기 위해 자유장 요소(Free field boundary; Lysmer and Kuhlemeyer, 1969)를 적용하였으며, 모델 하단부에는 아래 방향으로 전달되는 입력지진파를 흡수하기 위해 점성감쇠 경계조건(Quiet boundary)을 활용하여 모델링하였다(Fig. 4). 또한, 하단부에 지진파를 입력하기 위해 Eq. (2)를 활용하여 시간이력 입력하중을 전단응력으로 변환하였다. 입력지진파는 각 지반에 대한 지반 응답해석을 수행하여 산정되었다.

$$\tau(t) = \rho V_s \dot{u}(t) \quad (2)$$

여기서 $\tau(t)$ 는 전단응력을 의미하고, ρ 는 하중이 입력되는 층의 밀도를 나타내며, V_s 는 하중이 입력되는 층의 전단파속도를 나타내고, $\dot{u}(t)$ 는 입력지진파의 속도 이력을 나타낸다.

옹벽과 지반 모델 사이에 경계요소를 Table 3과 같이 입력하였다. 경계요소가 가지는 지반반력계수(k_n 과 k_s)는 Eq. (3)을 통해 산정되었다(Itasca, 2011). 벽체와 뒷채움토의 마찰각은 뒷채움토의 마찰각의 2/3배를 하여 산정하였으며, 접착력(Adhesion)은 뒷채움토의 점착력(Cohesion)과 같은 값을 적용하였다. 또한, FLAC2D 경우 2차원 평면변형률 조건으로 Fig. 4(b)와 같이 옹벽 벽체와 저판의 접합부에서 경계요소를 적용하기 어렵다. 따라서 본 연구에

Table 3. Properties of the Interface Elements between the Retaining Wall and Backfill Soil

| Element | Parameter | Value |
|-----------|--------------------|-------------------|
| Interface | k_n (kPa) | 8.6×10^6 |
| | k_s (kPa) | 8.6×10^6 |
| | Friction angle (°) | 21.3 |
| | Adhesion (kPa) | 0 |

서는 Green et al.(2008)과 같이 옹벽 벽체와 저판의 접합부에서 빔 요소의 세그먼트(Segment)를 세세하게 나누어 경계요소가 적용되지 않는 면적을 줄였다. 하지만, 세세하게 나눌수록 해석 시간이 증가하기 때문에, 해석 시간을 고려하여 1개 세그먼트를 3개 세그먼트로 나누어 진행하였다.

$$k_n = k_s = \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \right] \times 10 \quad (3)$$

여기서 K는 뒷채움토의 체적탄성계수, G는 뒷채움토의 전단탄성계수, Δz_{min} 은 옹벽과 접하는 요소의 최소 폭을 나타낸다.

3.2 수치해석 검증

본 연구에서는 FLAC2D를 활용한 수치해석모델을 검증하기 위해 DEEPSOIL 프로그램을 활용한 1차원 비선형 지반응답해석과 FLAC2D를 활용한 자유장에서의 지반응답해석 결과를 비교하였다. 또한, 원심모형실험으로 검증된 Lee et al.(2015)의 FLAC3D와 FLAC2D 모델을 비교하는 두가지 과정을 추가로 수행하였다. 두 검증 과정을 바탕으로 Kim et al.(2010)에서 제안한 주동토압(Active earth pressure)을 계산하여 FLAC2D를 통해 산정된 주동토압과 비교하였다.

본 연구에서는 0.006 g에서 0.33 g의 PGA를 갖는 다양한 지진파를 활용하여 DEEPSOIL과 FLAC2D를 비교하였다. 이때 고려한 지반의 물성치는 모래를 가정하였으며, Darendeli(2001)의 흙의 비선형 곡선을 활용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 FLAC2D와 DEEPSOIL로 산정된 지표면에서의 지반운동이 유사함을 볼 수 있다

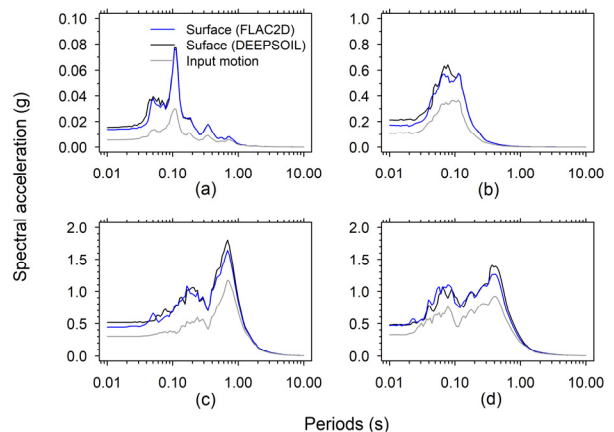


Fig. 5. 5% Damped Acceleration Response Spectra Computed by FLAC2D and DEEPSOIL Using Motions with PGAs of (a) 0.006 g, (b) 0.11 g, (c) 0.30 g, and (d) 0.33 g

Lee et al.(2015)는 FLAC3D를 활용하여 Fig. 6에 표시된 대표적인 옹벽 상단 3곳에서 속도이력과 옹벽 벽면에서의 깊이 따른 정적토압을 계산하여 원심모형실험(Jo et al., 2014) 결과와 비교 검증하였다. 본 연구에서는 Lee et al.(2015)이 사용한 물성치들 (Table 4참고)을 활용하여 FLAC2D 해석을 수행하였다. Figs. 7, 8 and 9와 같이 FLAC2D 결과를 원심모형실험(Jo et al., 2014)과 Lee et al.(2015)의 수평정적토압과 옹벽상단 3곳의 속도이력, 옹벽 벽체와 뒷채움토의 거동을 비교하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 수치해석모델(본 연구 및 Lee et al., 2015)을 통해 산정된 옹벽에 작용하는 깊이별 수평정적토압과 Jo et al.(2014)의 원심모형실험에서 측정된 깊이별 수평정적토압이 서로 유사함을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구에서 계산된 수평정적토압은 이론적 정지토압 (Earth pressure at rest)과 주동토압(Coulomb, 1776; Rankine, 1857)의 범위와도 상응한다. 이때, 흙의 내부마찰각을 활용하여 계산된 정지토압계수(K_0)는 0.344, Rankine과 Coulomb 주동토압 계수(K_a) 0.208 및 0.192를 고려하였다. Fig. 8은 FLAC2D로 계산한 옹벽 상단 3곳에서의 속도이력과 Jo et al.(2014)의 원심모형실험에서 얻은 계측값이 유사함을 보여준다. Fig. 9는 FLAC2D를 통해 계산한 옹벽 벽체의 상대적인 수평 변위(Relative wall

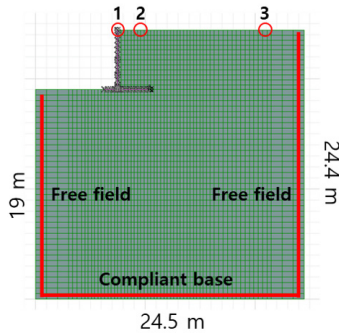


Fig. 6. FLAC2D Model for an Inverted T-type Retaining Wall. Locations 1, 2, and 3 are at the Top of Stem, Top of Active Wedge, and Free Field, Respectively

Table 4. Properties of the Soil and Retaining Wall Considered by Lee et al.(2015) for the FLAC3D Model

| Element | Parameter | Value |
|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Soil | Unit weight (kN/m^3) | 14.23 |
| | Poisson's ratio | 0.3 |
| | Elastic modulus (kPa) | $3 \times 10^4 - 2.8 \times 10^5$ |
| | Cohesion (kPa) | 0 |
| | Internal friction angle ($^\circ$) | 41 |
| | Dilation angle ($^\circ$) | 20 |
| Retaining wall | Unit weight (kN/m^3) | 26.5 |
| | Poisson's ratio | 0.34 |
| | Elastic modulus (kPa) | 6.89×10^7 |

displacement, RWD)와 뒷채움토의 침하량이 Lee et al.(2015)이 FLAC3D를 활용해 계산한 결과와 유사함을 보여준다.

본 연구에서는 수치해석모델로 계산한 지진 시 옹벽 벽체에서의 토압변화를 Kim et al.(2010)에서 제안한 토압 산정식을 활용하여 검증하였다. Kim et al.(2010)은 Mononobe-Okabe 식(Mononobe and Matsuo, 1929; Okabe, 1924)에서 뒷채움토의 점착력과 벽체와의 점착력, 외부 하중을 추가 고려한 주동토압식을 제안하였다. Kim et al.(2010)에서 제안된 식을 활용하여 옹벽 벽체에 작용하는 토압을 산정하기 위해서는 수평지진계수(k_h)와 수직지진계수(k_v)를 얻어야 한다. Fig. 10과 같이 주동토압 썩기 내에서 수평가속도와 수직가속도를 산정하였고, 각 가속도에 중력가속도를 나누어 두

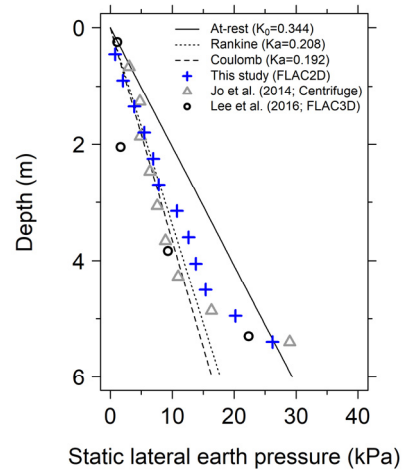


Fig. 7. Static Lateral Earth Pressures with Depth Calculated by FLAC2D (This Study), FLAC3D (Lee et al., 2015), and Those Measured by the Centrifuge Test (Jo et al., 2014). The Theoretical Lateral Earth Pressures for at-rest and Rankine and Coulomb Active Conditions are also Compared

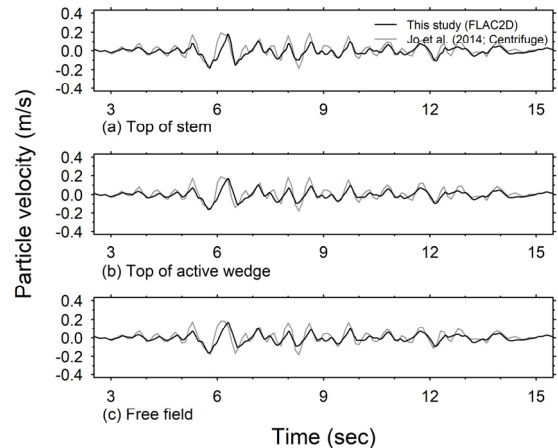


Fig. 8. Velocity Time Series Computed from the FLAC2D and Measured from the Centrifuge Test at (a) The Top of Stem, (b) The Top of Active Wedge, and (c) Free Field (Corresponding to Locations 1, 2, and 3, Respectively, in Fig. 6)

지진계수를 얻었다(Green and Ebeling, 2002). 입력지진파는 0.3 g의 PGA를 갖는 경주지진 지진파와 North Palm Spring 지진 지진파를 활용하였다. Fig. 11은 FLAC2D로 산정된 수평, 수직지진계수의 시간이력을 나타낸다. 본 연구에서는 정적하중으로 산정되는 Kim et al.(2010)의 토압과 동적하중으로 산정되는 FLAC2D

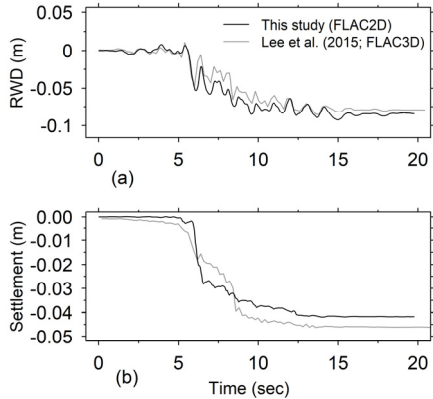


Fig. 9. Relative Wall Displacements and Settlements of the Backfill Soil Calculated by FLAC2D (This Study) and FLAC3D (Lee et al., 2015)

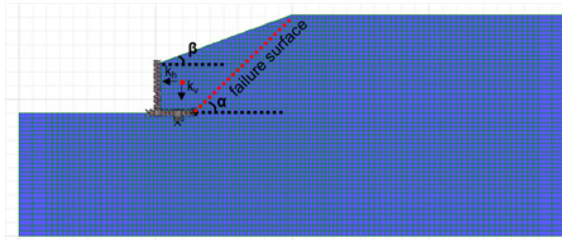


Fig. 10. Potential failure surface and wedge of the FLAC2D Retaining Wall Model and the Location for Horizontal Seismic Coefficient (k_h) and Vertical Seismic Coefficient (k_v)

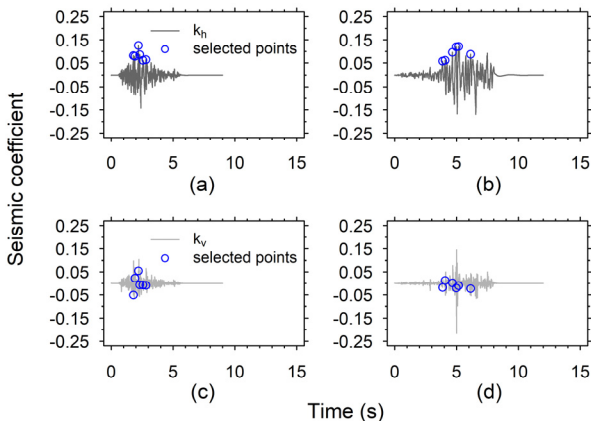


Fig. 11. Time Series of Horizontal and Vertical Seismic Coefficient from the Ground Motions of the 2016 Gyeongju Earthquake (a and c) and the 1986 North Palm Springs Earthquake (b and d)

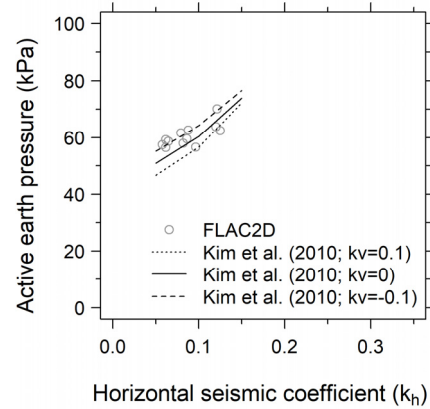


Fig. 12. Lateral Earth Pressure Calculated by the FLAC2D Analyses (This Study) and Kim et al.(2010)

의 토압을 비교 검증하기 위해 Fig. 11과 같이 수평지진계수의 시간이력에서 피크(Peak) 지점을 선정하였으며(Green and Ebeling, 2002), 수직지진계수는 선정된 수평지진계수와 동일한 시간에서 선정하였다. 수평지진계수와 수직지진계수에 따른 주동토압 변화를 Fig. 12에 나타내었다. FLAC2D와 Kim et al.(2010)으로 산정된 토압의 경향성과 크기는 유사함을 볼 수 있다.

3.3 수치해석 결과

Fig. 13은 S2 지반 조건에서 지반응답해석을 하고 PGA 0.3 g가 되도록 조정된 경주지진 지진파와 North Palm Spring 지진 지진파에 대한 지반 모델의 수평, 수직변위 분포를 나타낸다. 경주지진에 대한 최대 수평변위와 수직변위의 크기는 0.013 m와 0.0073 m이며, North Palm Spring 지진은 0.042 m와 0.025 m로 산정되었다. 두 지진파로 발생한 뒷채움토의 수평거동과 침하에 대한 변위 분포는 비슷한 양상을 보인다. 하지만, 같은 PGA입에도 불구하고 변위량에 대한 차이를 보인다.

또한, Fig. 14과 같이 지반특성에 따른 옹벽 벽체의 상대수평변위 분포를 PGA에 대하여 살펴보았다. 옹벽 벽체의 상대수평변위는 옹벽 벽체의 수평거동과 자유장(Free field)에서 수평거동의 차이를 구하였다. Fig. 14에서 수치모델에서 입력지진파의 최대지반가속도가 0.1 g일 때 S2 지반에서 옹벽의 거동은 최소 0.001 m에서 최대 0.007 m이고 S4 지반에서는 최소 0.002 m에서 최대 0.010 m이다. 상대수평변위는 PGA에 따라 증가하며, 최대지반가속도가 0.9 g일 때, S2 지반에서는 0.072 m에서 0.506 m이고, S4 지반에서는 0.232 m에서 0.708 m이다. S4 지반에서 산정된 지진파가 S2 지반에서 산정된 지진파보다 옹벽 벽체의 상대적 수평 거동이 최소 1.39배에서 최대 4.56배 차이를 보여준다. 이는 지반에 따라 산정된 변위 분포가 크게 다를 수 있음을 보여준다.

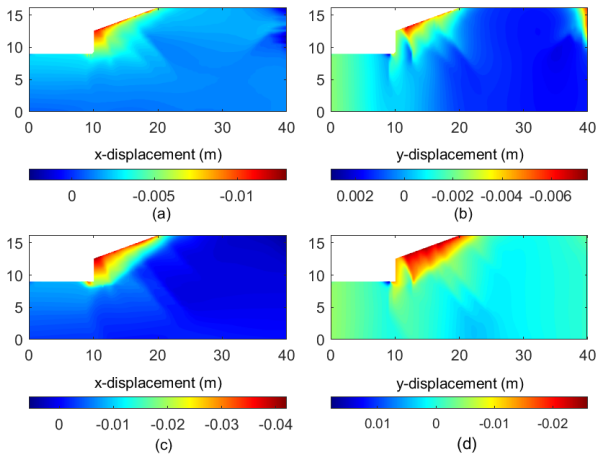


Fig. 13. Horizontal and Vertical Displacements of the Retaining Wall Model Under two Scaled Seismic Loadings (a and b: Gyeongju Earthquake and c and d: North Palm Spring Earthquake) with a PGA of 0.3 g and for the S2 Site Condition

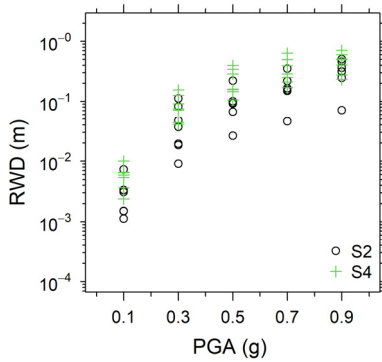


Fig. 14. Relative Horizontal Wall Displacements Against PGAs of Ground Motions Considering Two Site Conditions

4. 지진취약도 평가

수치해석 모델을 활용하여 산정된 각 하중에 대한 옹벽의 상대적 수평거동을 활용하여 지진취약도 평가를 수행하였다. 지진취약도 곡선을 산정하기 위해, 우선적으로 옹벽 변위에 대한 손상수준 및 손상지수를 결정해야 한다. 본 연구에서는 Zamiran and Osouli(2018)에서 제시된 손상상태와 손상지수를 참고하였다. 손

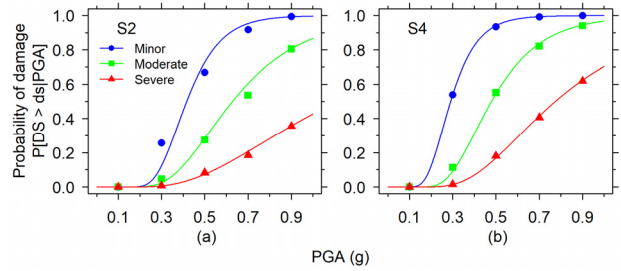


Fig. 15. Seismic Fragility Curves for Relative Horizontal Displacement of Retaining Wall for the Two Site Conditions

상상태는 3가지로 Minor, Moderate, Severe 3단계로 구분하였으며, 손상지수는 각 손상상태별로 0.02 H, 0.05 H, 0.1 H(H는 옹벽 높이)로 정하였다.

지진취약도 곡선을 산정하기 위하여 수치해석 모델의 결과인 상대적 수평변위를 대수정규분포(Lognormal distribution)으로 가정하였으며, 결정된 손상상태와 손상지수를 바탕으로 표준정규 누적함수(Standard normal cumulative distribution function)이 적용된 Eq. (4)를 활용하여 최대지반가속도별 옹벽 벽체의 상대수평거동에 대한 손상확률을 산정하였다(Chiou et al., 2011).

$$P[DS > ds|PGA] = 1 - \Phi\left[\frac{\ln(ds) - \lambda}{\zeta}\right] \quad (4)$$

여기서 DS는 수치해석 결과를 나타내고 ds는 손상지수(0.02 H, 0.05 H, 0.1 H)를 나타내며, λ 와 ζ 는 대수정규분포의 평균과 로그표준편차를 나타낸다.

Table 5는 손상확률 산정에 활용된 대수정규분포의 파라미터를 각 지반종류와 PGA별로 나타내었다. Fig. 15는 두 지반종류 별 옹벽 벽체의 상대적 수평거동의 지진취약도 곡선을 손상상태별로 나타내었다. S4 지반에서는 S2 지반보다 모든 하중에서 상대적으로 손상확률이 크게 산정되었으며, 특히 PGA 0.3 g 하중에 대해 Minor 손상확률이 2.09배 크게 나타났고, PGA 0.9 g 하중에 대하여 Severe 손상확률은 1.75배 크게 나타났다. 이는 상대적으로 기반암의 깊이가 깊고 전단파속도가 작은 S4 지반에서 옹벽의 수평거동에 대한 지진취약도가 S2 지반보다 손상확률이 높음을 나타낸다.

Table 5. Parameters of Lognormal Distribution Used to Calculate the Fragility Curves

| Site Classification | Lognormal parameter | PGA 0.1 g | PGA 0.3 g | PGA 0.5 g | PGA 0.7 g | PGA 0.9 g |
|---------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| S2 | ζ | 0.7735 | 0.8886 | 0.8795 | 0.7011 | 0.5621 |
| | λ | -5.8631 | -3.2089 | -2.2438 | -1.6511 | -1.2312 |
| S4 | ζ | 0.6833 | 0.7002 | 0.6611 | 0.5982 | 0.5534 |
| | λ | -5.2350 | -2.5613 | -1.6278 | -1.1638 | -0.8528 |

5. 결론

본 연구에서는 국내 도로시설물 중 하나인 옹벽에 대한 지진취약도 평가를 하기 위하여 KEPCO(2017)과 MOLIT(2008)를 참고하여 대표 옹벽 모델과 물성치를 선정하였으며, 수치해석프로그램(FLAC2D)를 활용한 시간에 따른 지반 구조물의 비선형 동해석을 수행하였다. 또한, 다른 수치해석 프로그램 결과와 원심모형실험 결과, 토압산정식과 비교하여 수치해석모델의 정확성을 검증하였다.

또한, 지반조건에 대한 영향을 평가하기 위해 포항과 울산지역에서 조사된 116개 시추 및 전단파속도 주상도를 활용하여 지반분류를 하였으며, 가장 많이 분포되어 있는 S2와 S4 지반에 대해 국내 및 국외의 입반에서 계측된 지진파를 활용하여 비선형 지반응답해석을 수행하였다. S4 지반에서 산정된 지진파는 S2 지반에서 산정된 지진파와 달리 0.2-0.3초 사이의 스펙트럴 가속도가 상대적으로 크게 산정되었다.

서로 다른 두 지반에서 산정된 다양한 지진파는 경사도가 있는 뒷채움토를 고려한 옹벽의 지진취약도 곡선을 산정하기 위해 활용되었다. 옹벽 벽체에 대한 손상상태와 손상지수는 Zamiran and Osouli(2018)을 참고하여 결정하였으며, 지반종류 별로 산정된 지진파의 최대지반가속도를 조정하여 옹벽의 지진시 거동을 살펴 보았다. 산정된 옹벽의 상대수평변위와 손상상태 및 손상지수를 활용하여 연속적인 지진 하중(0~1.0 g의 최대지반가속도)에 대한 옹벽 벽체의 상대수평변위에 대한 손상확률을 산정하였다.

본 연구에서는 상대적으로 토층의 깊이가 깊은 S4 지반에서 산정된 지진파가 S2 지반에서 산정된 지진파보다 옹벽 벽체의 상대수평변위가 크게 산정되었다. 이는 S4 지반에서 산정된 지진파가 S2 지반에서 산정된 지진파보다 장주기에서 더 큰 스펙트럴 가속도를 가지기 때문으로 보인다. 또한, 이러한 지반의 특성은 옹벽의 지진취약도에 영향을 미치는 것으로 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(20SCIP-B146946-03)에 의해 수행되었습니다.

본 논문은 2020 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

References

Argyroudis, S., Kaynia, A. M. and Ptilakis, K. (2013). "Development of fragility functions for geotechnical constructions: Application to cantilever retaining walls." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 50, pp. 106-116.

Chiou, J. S., Chiang, C. H., Yang, H. H. and Hsu, S. Y. (2011). "Developing fragility curves for a pile-supported wharf." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 5, pp. 830-840.

Coulomb, C. A. (1776). "Essay on maximums and minimums of rules to some static problems relating to architecture." *Academie Royale Des Sciences*, Vol. 7, pp. 343-382 (in French).

Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*, Ph.D. Dissertation, Civil Engineering, University of Texas at Austin, USA.

Green, R. A. and Ebeling, R. M. (2002). "Seismic analysis of cantilever retaining walls, Phase I." *Earthquake Engineering Research Program, U.S. Army Corps of Engineers*, Washington, DC, USA.

Green, R. A., Olgun, C. G. and Cameron, W. I. (2008). "Response and modeling of cantilever retaining walls subjected to seismic motions." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 23, pp. 309-322.

Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Ilhan, O., Xing, G., Groholski, D. R., Phillips, C. A. and Park, D. (2020). *DEEPSOIL 7.0, User Manual*, Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

Huang, Y., Hu, H. and Xiong, M. (2019). "Performance-based seismic fragility analysis of retaining walls based on the probability density evolution method." *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 103-112.

Itasca (2011). *FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) user's manual-dynamic analysis*, Itasca Consulting Group, Minneapolis, MN.

Jo, S. B., Ha, J. G., Yoo, M. T., Choo, Y. W. and Kim, D. W. (2014). "Seismic behavior of an inverted T-shape flexible retaining wall via dynamic centrifuge tests." *Bulleting of Earthquake Engineering*, Vol. 12, pp. 961-980.

Kakderi, K. and Ptilakis, K. (2010). "Seismic analysis and fragility curves of gravity waterfront structures." *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.

Kim, J. S., Lim, J. H., Jung, Y. S., Kwon, M. H. (2018). "Seismic fragility evaluation of retaining wall by 2D finite element analysis." *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 9, No. 3, pp. 21-27 (in Korean).

Kim, W. C., Park, D. and Kim, B. (2010). "Development of a generalised formula for dynamic active earth pressure." *Geotechnique*, Vol. 60, No. 9, pp. 723-727.

Korea Electric Power Corporation (KEPCO) (2017). *Study on seismic reinforcement plans for existing transmission and distribution cable tunnels and electric facilities around the Yangsan fault* (in Korean).

Lee, J. S., Chae, H. G., Kim, D. S., Jo, S. B. and Park, H. J. (2015). "Numerical analysis of inverted T-type wall under seismic loading." *Computers and Geotechnics*, Vol. 66, pp. 85-95.

Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. (1969). "Finite dynamic model for infinite media." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 95, No. 4, pp. 859-77.

Matasovic, N. (1993). *Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits*, Ph.D. Dissertation, University of California, Los Angeles.

- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLIT) (2008). *Standardized shop drawings of retaining wall* (in Korean).
- Ministry of Public Safety and Security (MPSS) (2017). *Minimum requirements for seismic design, Sejong, Korea* (in Korean).
- Mononobe, N. and Matsuo, O. (1929). "On the determination of earth pressure during earthquakes." *In: Proceeding of the World Engineering Congress*, Vol. 9, pp. 179-187.
- Okabe, S. (1924). "General theory on earth pressure and seismic stability of retaining walls and dams." *Journal of the Japanese Society of Civil Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp. 1277-1323.
- Rankine, W. J. M. (1857). "On the stability of loose earth." *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol. 1, pp. 9-27.
- Zamiran, S. and Osouli, A. (2018). "Seismic motion response and fragility analyses of cantilever retaining walls with cohesive backfill." *Soils and Foundations*, Vol. 58, No. 2, pp. 412-426.