

# 역T형 옹벽의 지진시 거동특성 Part I : 수치해석 모델링 기법의 검증

## Seismic Behavior of Inverted T-type Wall under Earthquake Part I : Verification of the Numerical Modeling Techniques

이진선\*

Jin-sun Lee\*

원광대학교 토목환경공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

### / A B S T R A C T /

Permanent deformation plays a key role in performance based earthquake resistant design. In order to estimate permanent deformation after earthquake, it is essential to secure reliable response history analysis(RHA) as well as earthquake scenario. This study focuses on permanent deformation of an inverted T-type wall under earthquake. The study is composed of two separate parts. The first one is on the verification of RHA and the second one is on an effect of input earthquake motion. The former is discussed in this paper and the latter in the companion paper. The verification is conducted via geotechnical dynamic centrifuge test in prototype scale. Response of wall stem, ground motions behind the wall obtained from RHA matched pretty well with physical test performed under centrifugal acceleration of 50g. The rigorously verified RHA is used for parametric study to investigate an effect of input earthquake motion selection in the companion paper.

**Key words:** Performance based earthquake resistant design, Response history analysis, Nonlinear numerical analysis, Retaining wall, Centrifuge test

## 1. 서론

지진시 옹벽은 뒷채움토와 옹벽자중으로 인하여 발생하는 관성력이 추가로 작용하게 된다. 관성력의 계산은 뉴턴의 제2법칙으로 손쉽게 계산 가능하다. 과거 90여 년간 옹벽을 포함한 토류 구조물의 지진시 토압계산은 관성력을 포함한 한계상태평형으로 유도된 Mononobe-Okabe(이하 M-O)공식 사용이 일반적인 설계 방법이었다[1, 2]. 그러나, 옹벽에 작용하는 횡도압은 벽체의 수평방향 변위에 의하여 최대 10배 이상(주동~수동 토압계수)의 차이가 발생하는데, M-O공식은 벽체 변위에 따른 토압변화를 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 특히 옹벽 뒷채움토 자중으로 평형을 유지하여야 하는 역T형 옹벽의 경우 지진시 벽체와 뒷채움토의 상대 변위에 의한 토압변화가 고려되어야 한다. 현시점에서 이와 같이 복잡한

거동을 살펴볼 수 있는 가장 좋은 방법은 수치해석이다. 최근 들어 수치해석 기법과 컴퓨터 연산능력의 비약적인 발전에 힘입어 과거 실현되기 어려웠던 지진시 지반구조물의 복잡한 거동을 해석할 수 있는 방법이 현실화되기 시작하였다. 그러나, 수치해석은 해석자의 공학적 판단과 지식에 의하여 그 결과물이 매우 상이하게 나타날 수 있으므로 반드시 실제사례 또는 정밀하게 시행된 물리적 시험결과를 바탕으로 검증되어야 한다.

현재까지 수치해석을 이용한 지진시 중력식 옹벽의 거동연구는 다수 존재하나, 상대적으로 복잡한 거동특성을 나타내는 역T형 옹벽에 대한 기존 연구는 많지 않은 실정이다. 대표적인 연구사례로 Green 등은 2차원 평면 변형을 해석 프로그램인 FLAC 2D를 이용하여 M-O공식의 유효성에 대하여 검증하였다[3]. 이때 수치해석의 유효성은 1g 진동대실험결과에 대해서 정성적인 분석을 실시하였으며, 전단파괴 이전 지반의 비선형 거동은 고려하지 않았다. Pathmanathan 등은 2차원 평면변형을 해석 프로그램인 DIANA 2D를 이용한 유한요소해석을 시행하여 지진파에 따른 거동특성을 살펴보았다[4]. 이때 수치해석의 유효성은 Green의 연구결과를 참조하였으며, 미소변형을 영역에서 지반의 비선형 거동은 고려하지 않았다. 최근

\*Corresponding author: Jin-sun Lee

E-mail: blueguy@wku.ac.kr

(Received August 27, 2015; Revised October 6, 2015; Accepted October 12, 2015)

들어 Mikola와 Sitar는 동적원심모형시험을 대상으로 FLAC2D를 이용한 수치해석을 시행하여 지진시 토압증가 양상에 대한 분석을 시행하였으나, 옹벽구조물의 응답에 대한 수치해석과 실험간 상호 검증자료는 확인되지 않는다[5]. 따라서, 본 논문에서는 국토해양부 표준옹벽도를 근간으로 모델링된 역T형 옹벽에 대하여 동적원심모형시험으로 지진시 거동을 평가하고 시험모델의 원형(Prototype)을 대상으로 수치해석모델을 구성하여 수치해석 검증을 실시하였다. 수치해석에 사용된 프로그램은 미국의 Itasca사에서 개발된 FLAC 3D ver 4.0으로 시간영역 양해법(Explicit method)을 이용하여 동적비선형 해석을 시행한다.

최근 내진설계분야에서 응답이력해석(RHA, Response History Analysis) 결과로 얻어지는 지진 후 구조물의 잔류변위는 시설물의 성능목표(Performance goal)를 검증하는데 있어 매우 중요한 평가요소로, 본 논문에서 검증된 수치해석절차를 바탕으로 동반논문[6]에서는 입력지진에 따른 역T형 옹벽의 잔류변위 영향검토를 실시하였다. 본 논문에서 언급된 동적원심모형시험 및 수치해석 검증절차는 동반논문[6]을 포함하여 다른 지반구조물의 성능기반내진설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

## 2. 동적원심모형시험

동적원심모형시험은 건조사질토 지반위 높이 5.4 m의 역T형 철근콘크

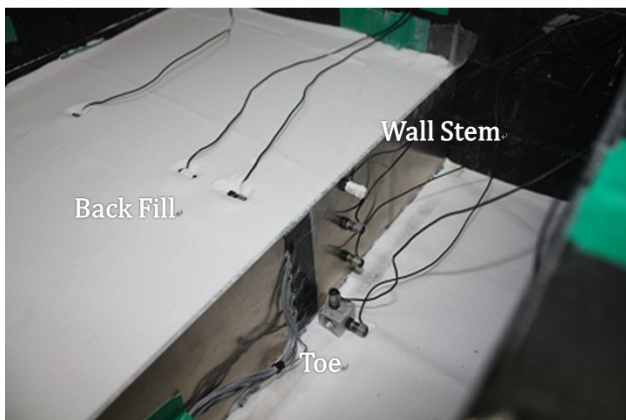
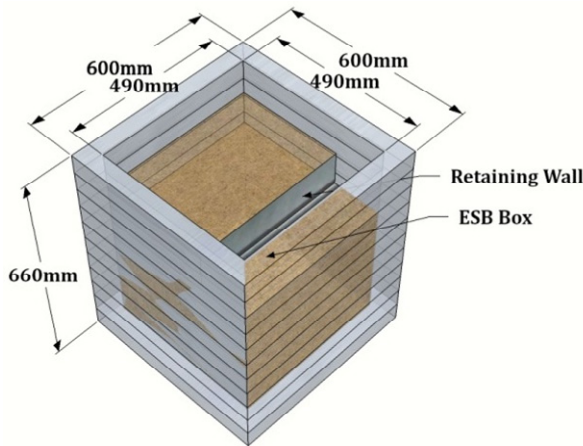


Fig. 1. Photo and schematic diagram of the centrifuge test setup (Dimensions in model scale)

리트 옹벽을 대상으로 시행되었다. 실험은 KAIST KOCED센터에서 시행되었으며, 원심가속도 50 g 하에서 실시되었다. 자세한 실험절차 및 과정은 Jo et al.[7]에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 간략히 언급하고자 한다.

### 2.1 동적원심모형시험 장비

KOCED센터의 동적원심모형시험기는 회전반경 5 m로, 최대 100g의 원심가속도 재하가 가능하다. 최대 적재하중은 2,400 kgf이며, 지진시물레이션을 위하여 전기-유압 진동대가 선단에 장착되어 있다. 실험을 위하여 지반은 등가전단보(ESB, Equivalent Shear Beam)박스 내부에 조성되며 ESB는 수평방향 지진에너지의 구축을 방지하기 위하여 수평방향으로 지반과 유사한 강성을 나타낼 수 있도록 듀랄루민 프레임 사이 베어링과 고무판으로 연결되어 있다. ESB에 대한 자세한 사양은 [8][9]에 상세히 설명되어 있다. ESB박스의 내부 크기는 가로, 세로, 높이 각각 490 × 490 × 630mm로 원심가속도 50g하에서 24.5 × 24.5 × 31.5m의 지반을 묘사하게 된다(Fig. 1). 본 논문에서 기술된 모든 물리량은 특별한 언급이 없는 한 원형의 물리량으로 표현되어 있다.

### 2.2 옹벽의 모델링

동적원심모형시험에 사용되는 모델은 원형을 목표로 상사법칙을 맞추어 제작/준비되어야 한다. 이 과정에서 원형과 동일재료로 모델을 제작하지 못하는 경우 크기, 강성, 질량 중 상사법칙을 맞추지 못하는 상황이 발생할 수도 있다. 따라서, 본 실험은 역T형 옹벽의 지진시 변위와 토압에 초점을 맞추어 시행되었으므로 옹벽모델은 벽체의 휨강성(EI, E:Young's modulus; I:2<sup>nd</sup> moment of inertia)을 목표로 상사법칙을 적용하여 제작되었다. 모델은 듀랄루민을 사용하여 제작되었으며, 바닥판과 벽체는 줄용접으로 강결되었다. Table 1에 실험에 사용된 옹벽모델 원형의 제원을 나타내었다.

모델옹벽의 상시 및 지진시 활동에 대한 안전율은 각각 1.4, 0.7로 계산되었으며, 하부 고정단 조건하에서 옹벽의 공진주기는 약 0.23초로 계산되었다. 옹벽의 폭은 ESB박스 내부크기와 동일하여, 평면변형을 조건을 만족시킬 수 있도록 제작되었다. 모델지반(건조 사질토)과 옹벽간 경계면은 원형 콘크리트 옹벽의 마찰저항을 묘사하기 위하여 사포를 부착하여 거칠기를 증가시키는 방법을 사용하였다.

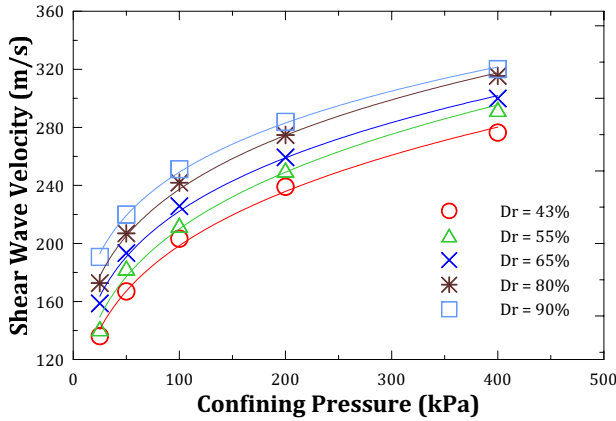
Table 1. Dimensions of inverted T type wall model (in prototype scale)

Stem height (m)	5.4
Thickness of base (m)	0.15 (0.22)*
Thickness of stem (m)	0.15 (0.22)*
Length of base (toe side)	1.23
Length of base (heel side)	2.68

\*Value in parenthesis are equivalent thickness for reinforced concrete retaining wall

**Table 2.** Engineering properties of the dry silica sand

Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kN/m <sup>2</sup> )	Internal friction angle (°)	Initial relative density (%)	Dilation angle (°)
14.23	0	41	60	20



**Fig. 2.** Shear wave velocity of silica sand with effective confining pressure

### 2.3 지반의 조성

ESB박스내 건조사질토 지반조성을 위하여 인공적으로 파쇄한 실리카 모래를 사용하였으며, 실내실험을 통하여 획득한 공학적 특성을 Table 2에 정리하였다. 지반재료의 동적거동특성인 최대전단탄성계수, 변형율에 따른 전단탄성계수, 감쇠비 변화곡선은 공진주/비틀전단 시험으로 상대밀도와 구속압을 달리하며 획득하였다(Fig. 2, Fig. 5).

### 2.4 계 측

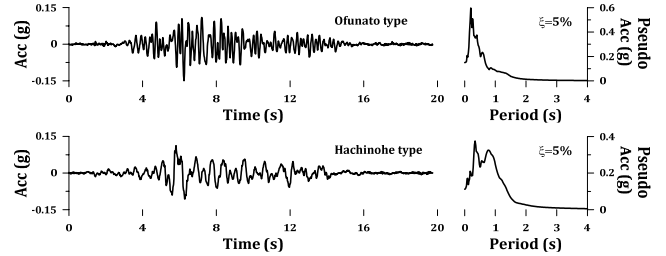
깊이별 지반의 가속도와 응벽의 움직임 계측을 위하여 가속도계를 사용하였으며, 응벽에 작용하는 토압의 크기변화 계측을 위하여 소형 토압계를, 힘모멘트 계측을 위하여 변형률계를 응벽벽체 앞/뒤로 부착하였다(Fig. 1).

### 2.5 입력지진

입력지진으로 실지진파 계측기록을 필터링 하여 사용하였다. 두 기록은 각각 내진설계 실무에서 장/단주기 지진을 대표하는 지진이다.

- Hachinohe : 1968.5.16. M<sub>L</sub> 7.9 recorded at Tokaki Oki
- Ofunato : 1978.6.12. M<sub>L</sub> 7.4 recorded at Miyagi-ken Oki

전체 실험 시스템의 안정성 확보를 위하여 상기 지진기록에 Band-pass 필터를 적용하여 사용하였으며, 동적원심모형시험 시 ESB박스 하단부로 전달되는 지진운동은 진동대 - ESB박스 간 전달함수특성[10]에 따라 입력 지진신호와는 차이가 발생할 수 있으므로 수치해석에 사용된 입력지진 기록은 ESB박스 하단 계측기록을 사용하였다[11]. 실험은 최대가속도



**Fig. 3.** Input earthquake records histories and spectra

0.04 ~ 0.35 g까지 단계별 지진가속도 크기를 증가시키며 진행되었다. Fig. 3에 동적원심모형시험 시 ESB 박스 하단부에서 계측된 입력지진 기록을 도시하였다.

## 3. 수치해석모델링

### 3.1 요소의 크기와 경계조건

본 연구에서는 사용된 수치해석 프로그램은 미국의 Itasca사에서 개발된 FLAC 3D ver 4.0으로 시간영역 양해법에 근간하여 동적비선형 해석이 가능한 프로그램이다. 입력지진은 1방향으로 가진되었으나, 모형과 지반이 조성된 ESB박스는 2방향 운동이 가능하므로 면외(Out of plane) 기하감쇠가 고려되어야 한다. FLAC 2D의 경우 평면변형을 해석시 면의 기하감쇠를 근사적으로 고려할 수 있으나, 적용변수의 결정방법이 모호한 단점이 있다. 또한, 2차원 평면변형을 조건으로 모델시 보요소(Beam element)로 구성되는 응벽구조물은 벽체-저판 접합부와 같이 구조물 연결부위 경계요소 적용이 어려운 단점을 가지고 있다[3]. 따라서, 실험조건은 2차원 평면 변형을 해석이 가능한 형태이나, 경계요소의 적용과 3차원 기하감쇠의 고려가 용이하도록 3차원 해석을 시행하였다.

수치해석 모델은 실험의 원형크기로 구성되었으며, 육면체 유한차분 요소의 최대 대각길이는 0.8m로 식 (1)로부터 19Hz이하의 에너지 전파가 가능한 크기임을 알 수 있다[12].

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10}, \quad f \leq \frac{v_s}{10 \times \Delta l} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta l$  육면체 요소의 대각길이;  $\lambda$ ,  $f$  전파 가능한 파장 및 주파수;  $v_s$  매질의 전단파속도

총 사용된 유한차분요소의 개수는 17,994개이며, 해석시간 단축을 위하여 길이방향 40% 수치모델로 구성하였다(Fig. 4). 수평전파되는 지진파의 반사를 막기 위한 경계조건으로 수평경계면에 Lysmer가 제안한 자유장 요소[13]를 적용하였으며, 입력지진이 가진되는 하단부는 해석오차 누

적에 따른 입력지진기록 왜곡을 방지하기 위하여 지표면 전달 반사파의 흡수가 가능한 반무한 탄성압반으로 모델링하였다[11, 14]. 입력지진운동은 식(2)를 이용, 전단응력으로 변환되어 수치해석모델 최하단부에 작용하게 되며[15], 이때 사용되는 지진기록은 ESB하단부에서 계측된 입사파시간이력이 사용된다[11].

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

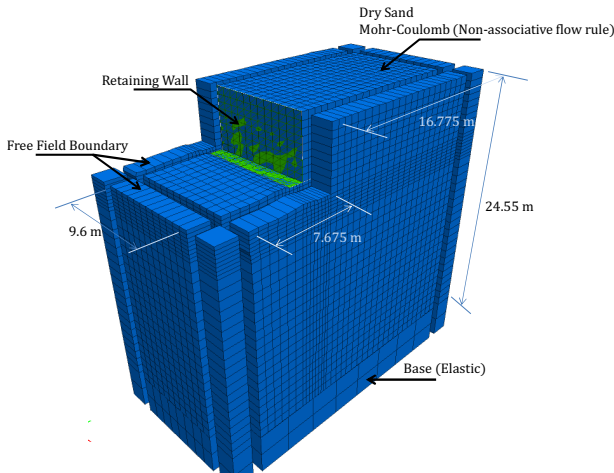


Fig. 4. Finite-difference model of the inverted T type wall (Dimensions in prototype)

여기서,  $\tau(t)$  전단응력시간이력;  $\rho$  매질의 밀도(가진위치);  $v_s$  매질의 전단파속도(가진위치);  $\dot{u}(t)$  입력지진운동속도이력

### 3.2 지반구성모델 및 초기응력

ESB박스내 조성된 건조사질토 지반의 공진주 시험결과로 얻어진 유효 구속압과 상대밀도에 따른 최대전단탄성계수 변화양상은 Fig. 5와 같다. 지반의 전단파괴기준으로 팽창각 20°의 비연관 흐름법칙(Non-associative flow rule)을 따르는 Mohr-Coulomb파괴기준을 사용하였으며, 파괴이전 동적하중에 대한 거동특성은 Hardin과 Drnevich이 제안한 쌍곡선모델 [16]과 Masing rule을 따를 수 있도록 구성하였다[17]. FLAC에서는 총 4개의 비선형 피팅모델을 제공하며, 본 논문에서는 사용가능한 세 개의 모델 (Table 3)을 이용, 구속압에 따른 각 모델의 피팅결과를 비교하여 Fig. 5에 함께 도시하였다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 차이에도 불구하고 감소비 곡선에 있어서 실내실험과 가장 유사한 결과를 나타내는 Model1[16]을 전단파괴 이전 비선형 모델로 적용하였다. 지진하중 재하 전 정적평형상태에서 계산된 요소별 유효구속압을 반영한 최대전단탄성계수와 쌍곡선모델이 반영되도록 내장 연산루틴을 추가하여 사용하였다.

반복하중 재하시, 쌍곡선 모델로 발생하는 이력감쇠에 추가로 최소감쇠비와 고주파 잡음제거를 위한 중간주파수 2.22 Hz의 Rayleigh감쇠를 사용하였다. 이때 중간주파수는 원심가속도 50g 하에서 모델부지의 탁월주파수와 동일하다.

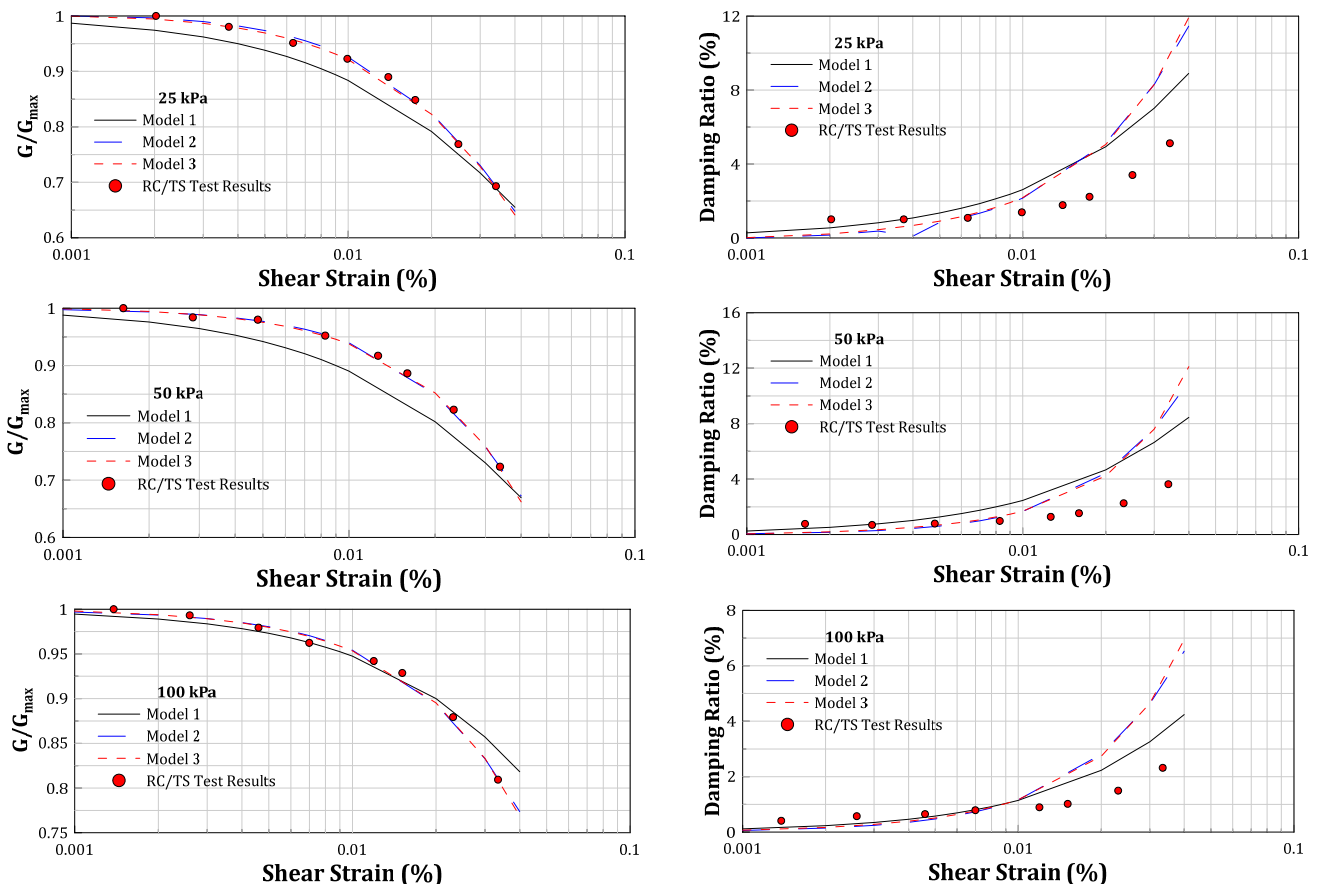


Fig. 5. Shear modulus and damping ratio fitting results of the silica sand (Relative density of 60%)

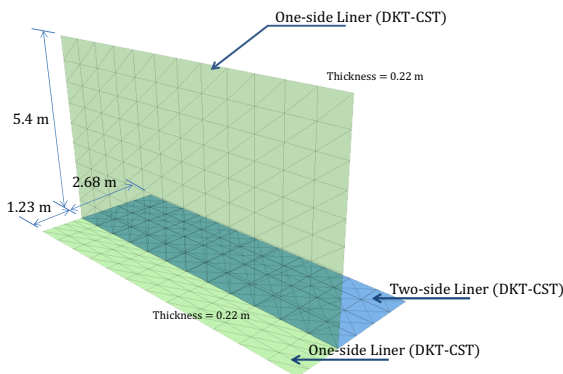
**Table 3.** Hystretic models in FLAC analysis

Model No.	Equation	Note
Model 1	$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}}$	Hyperbolic(Hardin)[16]
Model 2	$\frac{G}{G_{max}} = \frac{a}{1 + \exp(-(\frac{\log_{10}\gamma - x_0}{b}))}$	Sigmoidal (parameters : $a, x_0, b$ )
Model 3	$\frac{G}{G_{max}} = y_0 + \frac{a}{1 + \exp(-(\frac{\log_{10}\gamma - x_0}{b}))}$	Sigmoidal (parameters : $a, x_0, y_0, b$ )

$\gamma$  : shear strain,  $\gamma_{ref}$  : reference strain[11],  $G$  : shear modulus,  $G_{max}$  : Max. shear modulus

**Table 4.** Input parameters for the numerical analysis

Elements	Elastic Properties		Plastic Properties		
	$k_n$ (Pa/m)	$k_s$ (Pa/m)	Normal Yielding		Shear Yielding
Interface	$2.217 \times 10^{10}$	$2.217 \times 10^{10}$	Compression Failure : × Tension Strength : 0 Pa		Cohesion : 0 Pa Wall Friction : 14°
	$E$ (Pa) $6.89 \times 10^{10}$	$\nu$ 0.34	Density (kg/m <sup>3</sup> ) 2,700		Plastic hinge ×
Silica Sand	$E$ (Pa) $3 \times 10^7 \sim 2.8 \times 10^8$	$\nu$ 0.3	$c$ (Pa) 0	$\phi$ (°) 41	$\delta$ (°) Dilation Angle 20

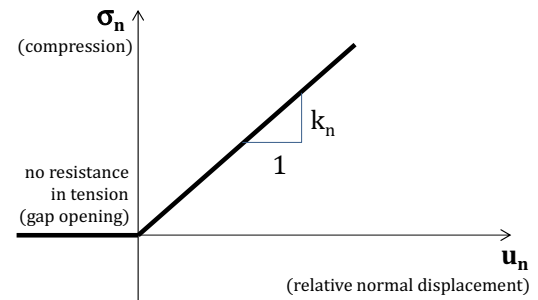


**Fig. 6.** Finite-difference model of the inverted T-type retaining wall (Dimensions in prototype)

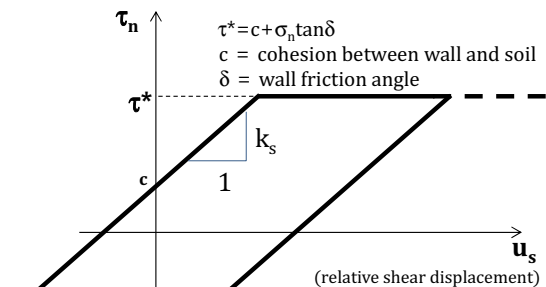
### 3.3 옹벽의 수치 모델

역T형 옹벽은 동적원심모형시험에서 사용된 옹벽의 원형의 크기로 수치모델링 하였으며, 지반과 경계요소를 가지는 쉘요소를 사용하였다. FLAC 3D에서는 이러한 요소를 라이너(Liner)요소로 제공하고 있으며, 본 논문에서 사용된 라이너 요소는 힘에 대한 저항이 가능한 DKT-CST (Discrete Kirchhoff Triangle-Constant Strain Triangle) 쉘과 쿨롱슬라이더 (Coulomb-slider) 경계요소를 가지고 있다. 특히, 옹벽의 뒷굽부분은 쉘요소 양면에 경계요소를 가지는 2면 슬라이더를 사용하였으며 나머지 벽체와 압굽 부분은 1면 슬라이더를 적용하였다(Fig. 6). 경계요소의 반복하중에 대한 거동은 Fig. 7과 같으며, 경계요소가 가지는 지반반력계수는 식(3)과 같이 산정가능하다[15].

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



(a) Behavior in normal direction



(b) Behavior in shear direction

**Fig. 7.** Interface behavior between wall and backfill soil of the liner element

여기서,  $K$  체적탄성계수;  $G$  전단탄성계수;  $\Delta z_{min}$  접하는 요소의 최소 폭

해석에 적용된 수치해석 입력변수를 정리하면 Table 4와 같다.

### 3.4 시간적분간격 및 해석시간

지진하중 재하 전 정적해석은 오일러좌표계(Euler coordinate)에서 시행되었으며, 지진시 동해석은 대변형에 따른 기하학적 비선형을 고려하기 위하여 라그랑지안좌표계(Lagrangian coordinate)에서 시행되었다. 시간 영역 양해법을 적용한 비선형 해석시, 해의 수렴을 위한 최소 시간적분간격 ( $\Delta t_d$ )은 식 (4)와 같이 계산 된다[15].

$$\Delta t_{crit} = \min \left[ \frac{V}{C_p A_{max}^f} \right], \Delta t_d = \Delta t_{crit} / 2 \quad (4)$$

여기서,  $V$  유한차분 요소체적;  $C_p$  매질의 압축파속도;  $A_{max}^f$  육면체요소 분할대각면적;  $\Delta t_d$  최소시간적분간격;  $\Delta t_{crit}$  한계시간적분간격; 2 안전율

본 논문에서 사용된 수치해석 모델의 최소 시간적분간격은 약  $3.75 \times 10^{-5}$  초로 일반적으로 수치모델 중 압축파속도가 가장 높은 요소에 의하여 결정 된다. 본 수치모델의 경우 듀랄루민 재질인 ESB 박스 하단부 요소의 크기에 의하여 결정되었다. 해석에 사용된 워크스테이션은 CPU 클럭스피드 3.46

GHz, 물리적 코어 12개를 가지고 있다. 강성행렬을 구성하는 유한요소법 과는 다르게 유한차분법의 경우 수치모델크기 증가로 인한 소요 메모리의 증가는 발생하지 않는다. 지진운동 지속시간 약 20여초의 해석에 소요된 시간은 약 4시간으로 이는 컴퓨터의 연산능력에 좌우되는 수치이다.

### 4. 수치해석의 검증

수치해석의 검증은 성능기반내진설계에서 주요 성능목표 인자로 사용되는 변위관련 항목에 대하여 이루어졌다. Fig. 8은 대표적인 옹벽상단 세 개의 지점에서 계측/해석결과 속도이력의 비교이다. 유한차분해석시 구조 요소(셀)로 모델링 된 옹벽 상단 절점의 응답은 속도의 향으로 얻어지므로 가속도가 아닌 속도이력을 비교하였다. 따라서, 동적원심모형시험 시 계측 된 가속도 시간이력을 적분 변환하여 비교하였다.

비교지점인 옹벽상단, 뒷채움부 주동토압 췌기상단, 지표면 자유장 모두 실험과 수치해석의 결과가 매우 일치하는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 수록되지 않은 다른 입력지진 조건하에서의 비교도 매우 일치하는 결과를 나타내었다. 따라서, 본 수치해석기법을 이용하여 지진시 옹벽의 거동(변위)을 신뢰성 있게 예측가능하다는 것을 검증 할 수 있다. 또한, M-O방법으로

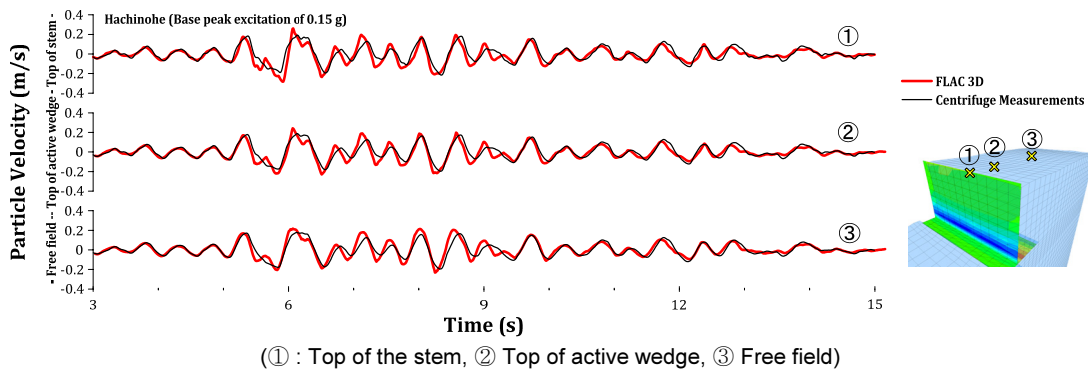


Fig. 8. Comparison of horizontal particle velocity time histories

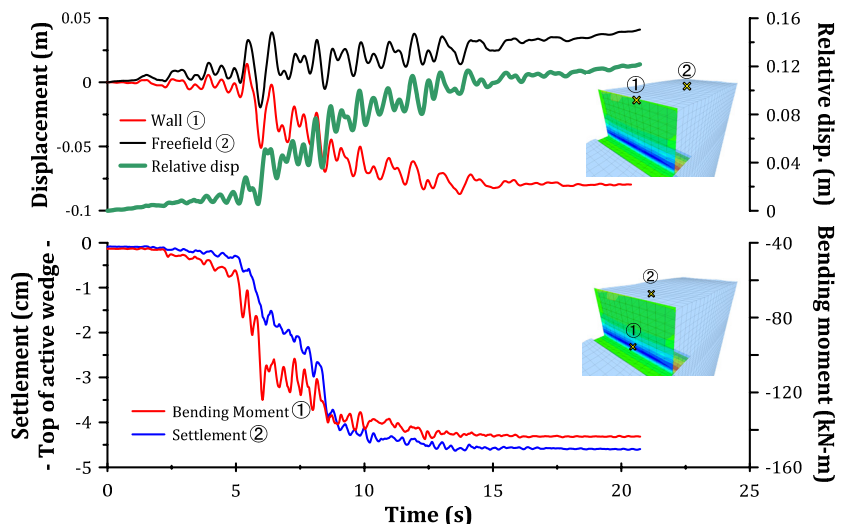


Fig. 9. Relative displacement between wall and backfill on bending moment of the wall and settlement of the backfill

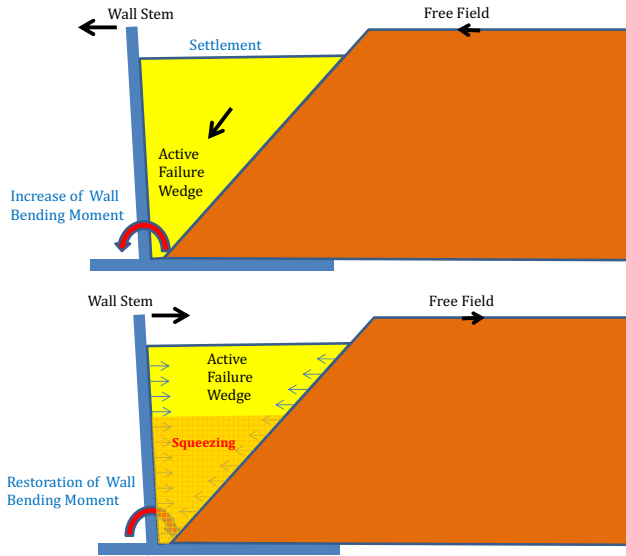


Fig. 10. Generation mechanism of dynamic earth pressure and wall bending moment for inverted T-type wall

계산되는 지진시 주동토압 썩기의 응답을 파악하기 위하여 벽체와 지표면 자유장간의 상대변위와 주동토압 썩기의 침하양상을 Fig. 9에 나타내었다.

분석은 Fig. 8과 동일한 해석결과에 대하여 시행되었으며, 지진운동 중 벽체와 지표면 자유장의 상대변위 증가로 인하여 벌어진 공간으로 주동토압 썩기가 지속적으로 침하하는 것을 알 수 있다. 상대변위 증가의 원인은 옹벽 자중으로 인한 옹벽의 변위와 지표면 자유장간의 위상차에 기인한 것으로 자세한 사항은 Jo et al.[7]에 기술되어 있다. 벽체의 전방 휨변형 이후 회복되려는 힘은 상대적으로 수동토압에 가까운 벽체의 변위로 나타나게 되어 지진하중 재하기간 동안 지속적인 휨모멘트의 누적이 발생함을 알 수 있다[18]. 상기 설명된 지진시 역T형 옹벽의 응답을 간략히 도식화 하면 Fig. 10과 같다.

## 5. 결론

본 논문에서는 지진시 역T형 옹벽의 거동을 평가하기 위한 시간영역 비선형 수치해석 기법의 검증을 실시하였다. 해석의 검증은 원심가속도 50g 하에서 실시된 동적원심모형시험의 원형을 기반으로 이루어 졌으며, 변위 관련 항목(속도)으로 평가시 옹벽벽체상단, 주동토압썩기 및 지표면 자유장 세 개의 지점에서의 응답이 동적원심모형시험과 매우 일치하는 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

따라서, 본 논문에서 적용된 수치해석절차를 이용하여 성능기반내진설계시 주요 성능목표로 사용되는 옹벽의 잔류변위를 신뢰성 있게 예측 가능할 것으로 판단되며, 지진시 지반구조물의 응답에 영향을 미치는 다른 여러 요소들(지반물성치, 옹벽의 기하학적 제원, 입력지진파의 선정 등)에 대한 연구를 시행할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 동반논문[6]에서는 본 논문의 검증결과를 바탕으로 입력지진의 선택에 따른 역T형 옹벽의 지진시 거동평가를 실시하였다.

## / 감사의 글 /

이 논문은 2013년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행됨.

## / REFERENCES /

1. Mononobe N, Matsuo H. On the determination of earth pressures during earthquakes. Proceedings of the world engineering conference, 1929;274-280.
2. Okabe S. General theory of earth pressure. J Jpn Soc Civ Eng. 1926;12(1).
3. Green RA, Olgun CG. Response and modeling of cantilever retaining walls subjected to seismic motions. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2008;23:309-322.
4. Pathmanathan R, Franchin P, Lai C, Pinto P. Numerical modelling of seismic response of cantilever earth-retaining structures. Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. c2007.
5. Mikola RG, Sitar N. Seismic earth pressures on retaining structures in cohesionless soils. UCB/GT [Internet]. Available from : <http://berkeley.edu/documents/elib/www/documents/GEOTECH/UCB-GT-2013-01.pdf>
6. Lee JS. Seismic behavior of inverted T-type wall under earthquake Part II : Effect of input earthquake motion. EESK J Earthquake Eng. in print.
7. Jo SB, Ha JG, Yoo M, Choo YW, Kim DS. Seismic behavior of an inverted T-shape flexible retaining wall via dynamic centrifuge tests. Bull Earthq Eng. 2014;12(2):961-80.
8. Kim DS, Kim NR, Choo YW, Cho GC. A newly developed state-of-the-art geotechnical centrifuge in Korea. J Civ Eng KSCE. 2013; 17(1):77-84.
9. Kim DS, Lee SH, Choo YW, Perdriat J. Self-balanced earthquake simulator on centrifuge and dynamic performance verification. J Civ Eng KSCE. 2013;17(4):651-61.
10. Ilankatharan M, Kutter B. Modeling input motion boundary conditions for simulations of geotechnical shaking table tests. Earthquake spectra. 2010;26(2):349-369
11. Lee JS. Appropriate input earthquake motion for the verification of seismic response analysis by geotechnical dynamic centrifuge test. EESK J Earthquake Eng. 2013;17(5):209-217
12. Kuhlemeyer RL, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems. J Soil Mech Found Eng Div ASCE. 1973; 99(5):421-7.
13. Lysmer J, Kuhlemeyer RL. Finite dynamic model for infinite media. J Eng Mech. 1969;95(4):859-77.
14. Mejia LH, Dawson EM. Earthquake deconvolution for FLAC. Proceedings of 4th International FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics; 2006; Madrid, Spain, 4-10.
15. FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D user's manual—dynamic analysis. Itasca Consulting Group. c2011.

16. Hardin BO, Drnevich VP. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves. *J Soil Mech Found Eng Div ASCE*. 1972;98(7):667-91.
17. Masing G. Eigenspannungen und verfestigung beim messing. *Proceedings of the second international congress of applied mechanics*. 1926;332-35.
18. Lee JS, Chae HG, Kim DS, Jo SB, Park HJ. Numerical analysis of inverted T-type wall under seismic loading. *Computers and geotechnics*. 2015;66:85-95.