

원심모형실험을 이용한 내진 보강된 개착식 지하역사의 거동특성 연구

김진호¹, 이나현^{2*}, 이후석³

Studies on Behavior Characteristics of Retrofitted Cut-and-Cover Underground Station Using Centrifuge Test Results

Jin-Ho Kim¹, Na-Hyun Yi^{2*}, Hoo-Seok Lee³

Abstract: Domestic urban railway underground station structures, which were built in the 1970s and 1980s, had been constructed as Cut-and-Cover construction system without seismic design. Because the trends of earthquake occurrence is constantly increasing all over the world as well as the Korean Peninsula, massive human casualties and severe properties and structures damage might be occurred in a non-retrofitted underground station during an earthquake above a certain scale. Therefore, to evaluate the retrofit effect and soil-structure interaction of seismic retrofitted underground station, a centrifugal shaking table test with enhanced stiffness on its structural main member are carried out on 1/60 scaled model using the Kobe and Northridge earthquakes. The seismic retrofitted members, which are columns, side walls, and slabs, are evaluated to comparing with existing non-retrofitted centrifuge test results. Also, to simulate the scaled ground using variation of shear velocity according to site conditions such as ground depth and density, resonant column test is performed. From the test results, the relative displacement behavior between ground and structures shows comparatively similar in ground, but is increased on ground surface. The seismic retrofit effects were measured using relative displacements and moment behavior of column and side walls rather than slabs. Additionally, earthquake wave can be used to main design factor due to large structural deformation on Kobe earthquake wave than Northridge earthquake wave.

Keywords: Seismic behavior, Retrofitted cut-and-cover underground station, Centrifuge test, Structural performance evaluation, Soil-structure interaction

1. 서론

2008년 중국 쓰촨성 지진, 2010년 아이티 지진, 2011년 일본 동호쿠 대지진, 2014년 미국 샌프란시스코 및 중국, 일본 등 규모 6.2 이상의 지진, 2015년 네팔 규모 7.8 강진 등 전 세계적으로 큰 규모의 지진이 끊임없이 발생하고 있다. 또한, 국내 기상청 자료에 의하면, 지난 1999년부터 2015년까지의 지진 발생횟수는 평균 47.8회로 1978년부터 1998년의 평균 19.2회보다 2.49배 증가하였으며, 최근 경주에서 발생한 규모 5.1, 5.8의 지진으로 인해 한반도 또한 지진 안전지대라고 판단하기에는 어려운 실정이다.

국내 도시철도 내진설계는 2005년에 제정하여, 지하에 건설되는 개착식 터널 본선 및 정거장과 같은 주요 도시철도 구

조물에 내진 1등급으로 적용하고 있으며, 지진구역 및 재현주기(100년, 1000년)에 따라 내진성능수준에 대하여 설계를 수행하고 있다. 그러나 서울시(2016, 기존 공공시설물 등 내진성능 확보현황) 자료에 의하면, 지난해 연말기준으로 도시철도의 교량 45%, 터널 77.7%, 건축물 76.1%에 내진성능이 확보되어 있으나, 내진 관련 기준이 없던 1970~80년대에 건설된 수도권 지하철 1~4호선 53.2 km 구간은 지진에 취약한 구간으로 내진보강 반영이 시급한 상황이다(Seoul Metro, 2007).

1970년대 서울 지하철 1호선을 시작으로 국내 도시철도의 지하역사는 주로 개착식 공법으로 건설되고 있다. 지하구조물인 개착식 지하역사는 지진 발생시, 교량, 건물 등의 지상구조물과 달리 증폭현상이 발생되지 않는 특성으로 인해 타 시설물에 비해 상대적으로 위험도를 낮게 평가하여 내진설계를 간과하는 경향이 있다. 그러나 일본 고베 대지진(1995) 발생시 개착식 지하역사가 붕괴되었으며, 중국, 대만, 터키 등 해외에서 발생한 지진으로 인해 지하구조물에 다양한 피해가 발생하면서 지하 구조물에 대한 내진성능 확보가 중요하게 인식되고 있다(日本トンネル技術協會, 2012; Park et al., 2009).

현재 도시철도 내진설계 기준(2016)에 의하면, 도시철도

¹정회원, 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 수석연구원

²정회원, 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 선임연구원, 교신저자

³정회원, 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 연구원

*Corresponding author: nahyunyi@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

지하구조물은 ‘기능수행조건’과 ‘붕괴방지수준’의 내진성능 수준에 따른 내진설계를 수행하고 있으나, 실제, 도시철도 지하구조물 내진설계에 따른 내진보강 성능효과는 충분히 검토되지 못하였다. 이는 내진보강 효과에 대한 기존 검증 자료들은 지진이 주로 발생하는 해외의 지질학적 환경 및 연구에 기초하기 때문에, 국내 환경에서의 내진성능 결과와는 상이하기 때문이다. 또한 지하구조물은 지반 운동에 대해 상대적인 새로운 거동을 하지 못하고, 지반과 같이 움직일 수밖에 없다. 즉, 대부분 지하구조물의 경우, 지반의 변형량과 지하구조물의 변형량은 거의 유사하기에, 지진하중이 작용하거나 주변 지반과 상호작용에 의해 과도한 토압이 작용할시 지하구조물은 구조적으로 큰 손상을 받는다(Matsui et al., 2004; Lee et al., 2015, Nam et al., 2006). 그러므로 내진성능평가 분석결과 이외에 내진 보강 후 지반변형 및 지반 상호작용으로 인한 지하구조물 구조 거동에 대해 고려되어야 한다(Hashash et al., 2001).

그러므로 본 연구에서는 내진 보강된 개착식 지하역사 축소모형에 대하여 국내 지반특성을 반영한 원심모형실험을 수행하였다. 본 연구의 실험결과와 기존 Kim and Shin(2011)에서 수행한 내진 보강 전 개착식 지하역사 축소모형의 거동을 비교 분석하였다. 이를 통해 지하역사의 내진성능을 평가하고 내진보강의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 원심모형시험

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 원심모형시험기는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 보 형태의 원심모형시험기로서, 회전반경 5.0 m, 유효

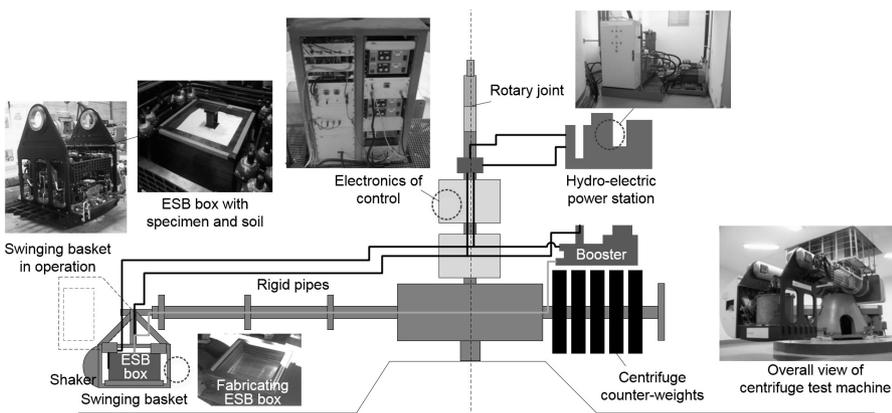
반경 4.5 m 크기의 시험기로 최대 2,400 kg의 모형하중을 100 g까지 가속이 가능한 장비를 사용하였다. 시험 모형은 회전팔의 끝단 ESB(Equivalent Shear Beam) 토조안에 설치하였다. 자연상태의 지반은 반무한의 경계를 가지나, 원심모형시험에서는 유한의 경계를 가질 수밖에 없으므로, 지반의 강성과 동일한 강성을 가지도록 ESB 박스의 알루미늄 프레임 벽체의 단면을 조정하여 프레임 벽체가 지반과 등가의 강성을 가지도록 제작하여, 자연 지반의 경계조건을 모사하고자 하였다.

또한, 구조물과 지반에 지진에 의한 거동분석을 위해 Fig. 1(b)와 같은 2차원 진동대를 사용하였다. 진동대는 전기제어-유압방식의 진동대로, 실제 자연상태의 복합지진을 모사하기 위한 수평방향 2차원 진동 모사가 가능하다. 원심모형실험기는 유압전원공급장치와 제어시스템으로 구성되며, 계측시스템은 원심모형시험기의 중앙에 설치하여, 장비와 함께 회전하도록 설치하였다. 특히, 센서에서 계측된 데이터를 전기적 노이즈 없이 수집하기 위하여 FORJ(Fiber Optic Rotary Joint)에 의한 광통신방식으로 데이터를 수집하였다(Shin, 2013).

2.2 원심모형 내진보강 구조물 제작

본 연구에서는 내진보강 대상으로 Kim and Shin(2011)이 수행한 Fig. 2(a)와 같이 수도권에 소재하고 있는 실제 지하역사 구조물의 단면을 선정하였으며, 상사비 1/60을 적용하여 축소모형 시험체를 Fig. 2(b)와 같이 제작하였다. 축소모형 실험의 용이성을 위해 알루미늄판을 사용하여 상판, 중간 슬래브 2개, 바닥판, 측벽 2개, 기둥 3개로 총 9개로 구성하였으며, 모형의 폭 296.6 mm×높이 279.1 mm×길이 484 mm의 개착식 지하역사를 구성하였으며, 사용된 구조물의 상세 제원은 Table 1과 같다.

본 연구에서는 내진보강을 위하여 강도 및 강성 증진 기법

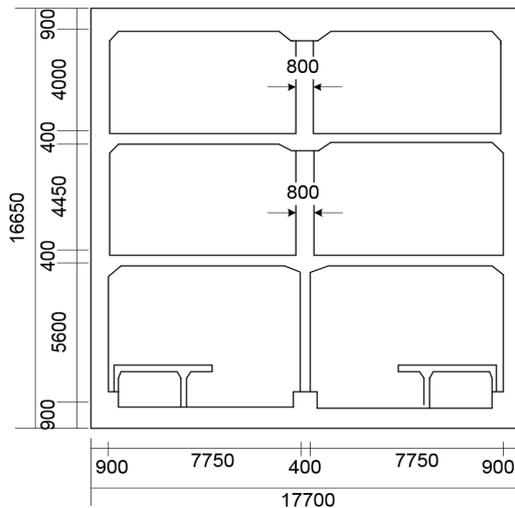


(a) Components of centrifuge test equipment

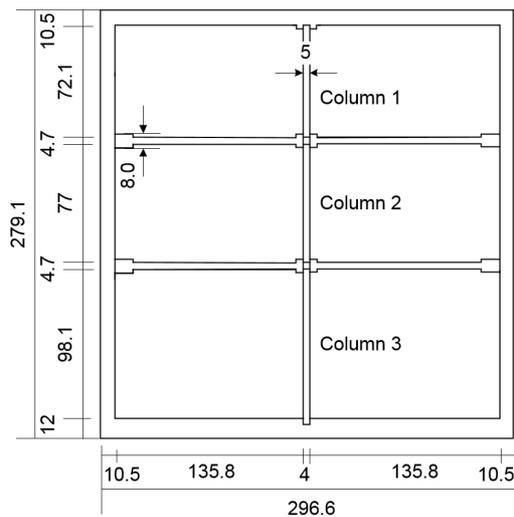


(b) 2-Dimensional shaking table

Fig. 1 Centrifuge test equipment components



(a) Section of full-scale model



(b) Section of down-scaled model (mm)

Fig. 2 Full- and down-scaled models of three-story underground station (Kim and Shin 2011)

Table 1 Dimensions of scaled model for underground station(Kim and Shin, 2011)

Scaled Model	Slabs			Walls	Column 1	Column 2	Column 3
	Upper	Middle	Bottom				
E_e (GPa)	70 (Aluminum)						
ℓ (mm)	484						
W (mm)	275.6	279.1	71.65	76	99.15		
t (mm)	10.5	4.7	12	10.5	5	5	4

Notes : E_e : modulus of elasticity, ℓ : length, W : width, t : thickness

Table 2 Dimension changes of seismic reinforced scaled model

Scaled Model		Walls	Column 1	Column 2	Column 3
t (mm)	Before retrofit	10.5	5	5	4
	After retrofit	11.2	5.5	5.5	4.5

Note : t : thickness

Table 3 Standard penetration test N-value of targeted underground station(Kim and Shin 2011)

Depth(m)	Classification	N-value	Penetration depth(cm)	$N_{corr, 30\text{cm}}$
2		12	30	12
4		6	30	6
6		9	30	9
8		13	30	13
10	Deposit soil	6	30	6
12		6	30	6
14		9	30	9
16		37	30	37
17		50	16	94
19		50	6	250
21	Weathered rock	50	5	300
23		50	3	500
25		50	3	500

Notes : N-value : the sum of the number of blows needed for the tube to penetrate 30cm. In case 50 blows are insufficient to advance it through a 30cm, the penetration depth after 50 blows is recorded, N_{corr} : Normalized N-value for the tube to penetrate 30cm.

을 선정하여 개착식 지하역사의 측벽과 기둥의 강성을 보강 재료 20% 향상시켰으며, 보강 전·후에 의한 내진성능의 성능 평가를 수행하고자 하였다. 축소모형의 보강단면을 결정하기 위해 식 (1)과 같이, 강성으로 구성된 상사법칙을 이용하여 도출하였다(Stone et al., 1991).

$$E_m \times (I_m \times 1.2) = \frac{(E_p I_p \times 1.2)}{N^4} \quad (1)$$

여기서, E_m 은 축소모형의 탄성계수, I_m 은 축소모형의 단면 2차모멘트, E_p 은 원형구조물의 탄성계수, I_p 는 원형구조물의 단면 2차모멘트, $1/N$ 는 상사비이다.

보강 전· 후 축소모형은 동일한 재료인 알루미늄을 사용하였고, 강성증가를 통한 보강을 위해서 원형 구조물과의 강성비에 따라 축소모형의 단면 2차 모멘트를 20% 증가하였다. 식 (1)에 의해 Table 2와 같이 단면 모형의 측벽과 기둥의 두께를 보강하였다.

2.3 원심모형 시험체의 지반 설계

본 연구에서 선정된 지하역사 현장의 지반은 표준관입시험을 통해 Table 3와 같이 깊이에 따른 N값을 측정하였다. 이를 통해 지하역사는 풍화암을 기반으로 건설되었으며, 표준관입시험 N값을 통해 Zen et al.(1987)이 제안한 전단파속도 식 (2)에 따라 추정하였다.

$$V_s = 89.1N^{0.34} \quad (2)$$

여기서, V_s 는 지반의 전단파속도(m/s), N 은 표준관입시험에 의한 N값이다.

Zen et al.(1987) 식에 의해 유도된 지반 깊이별 전단파속도 추상도는 Fig. 3에서 보는 것과 같다. 또한, 본 연구에서는 내진 보강 전후의 지하역사의 동적 거동을 비교하기 위하여 Kim 과 Shin의 원심모형모델과 같은 시험조건으로 수행하였다(Kim and Shin 2011).

Fig. 4에서 보는 것과 같이 ESB 박스에 원심모형 구조물을 넣고 낙사법을 이용한 자동낙하장치를 통해 모형지반을 모사하였다. 낙사법은 낙사 높이 및 모래입자의 낙하속도를 조절

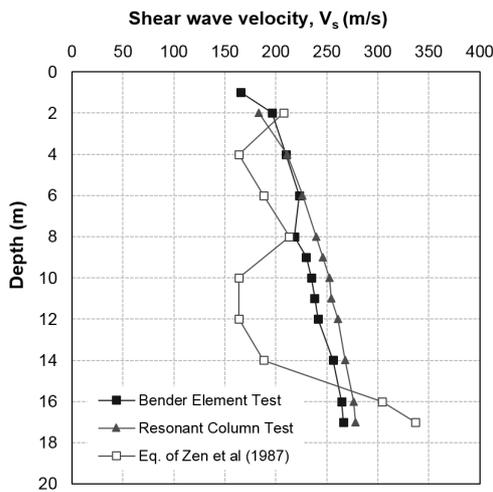


Fig. 3 Shear wave velocity profile of the ground(Kim and Shin 2011)

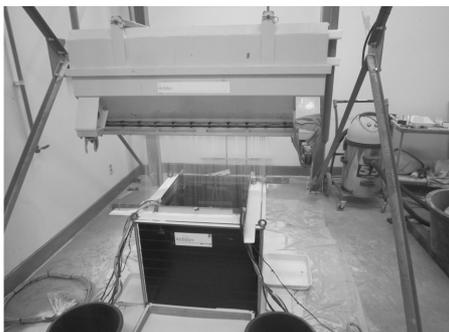


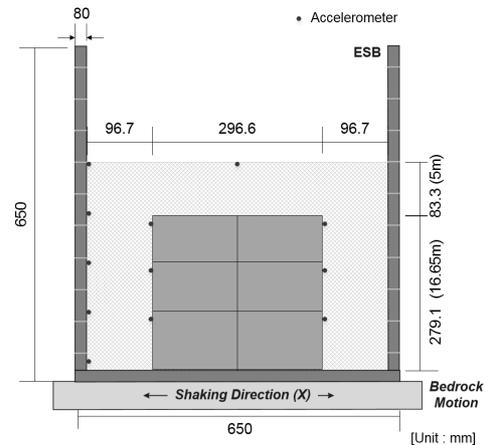
Fig. 4 Construction of simulated ground using equipment(Shin, 2013)

하여 조성지반의 밀도를 조절하는 방법으로, Miura et al.(1982)와 Lo et al.(1993) 제안된 균질한 모래지반을 조성하는 방법이다. 본 연구에서는 모형지반을 모사하기 위해 규사(Silica sand)를 이용하였다. 규사를 이용한 지하역사 모형지반의 공진주 시험(Resonant column test)을 수행하여, 실제 깊이 및 밀도에 따른 전단파 속도의 변화를 Fig. 3과 같이 추정하였다. 또한, 동일상대밀도로 조성된 규사지반을 60 g 원심가속 조건에서 벤더엘리먼트시험(Bender element testing)수행하여 Fig. 3과 같이 깊이별 전단파 속도를 구하였다. 이는 본 연구의 모형지반 조건이 현장 조건을 잘 모사한 것임을 확인할 수 있다.

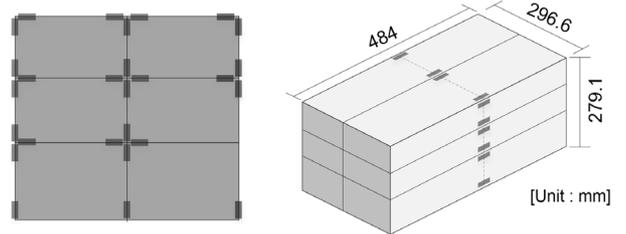
2.4 원심모형 실험

개착식 지하역사 구조물은 실제 기반암 위에 건설되므로, 이를 모사하기 위해 강성이 높은 ESB박스 바닥면을 기반암으로 가정하였으며, 축소모형은 ESB박스 바닥면에 접착제로 부착하여 고정하였다. 지진하중 재하시, 평면 변형률 조건과 길이방향의 무한대임을 모사하기 위해 ESB박스 길이방향 490 mm에 끝까지 매설하였으며, 모형구조물의 양 끝은 마찰계수가 거의 없는 테프론판으로 마감하였다(Kim and Shin 2011).

구조물의 변형 및 지반의 거동을 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 가속도계 및 변형률계이자를 부착하여 측정하였다. ESB 박스와 접촉하는 경계면의 영향을 가능한 배제하기 위해 계



(a) Locations of accelerometers(Kim and Shin 2011)



(b) Locations of strain gauge

Fig. 5 Test Specimen and locations of measurement sensors

측 센서는 구조물의 중앙에 부착하였다.

개착식 지하역사에 작용하는 지진하중 모사를 위해 사용되는 입력 지진파는 상사법칙에 따라, 지진 가속도 수준은 N배, 지진 지속 시간 1/N배, 지진 주파수 성분 N배를 적용하였다. 본 연구에서는 내진보강 전 시험체 구조물의 거동 비교분석을 위하여, Fig. 6와 같이 Kim and Shin(2011)에서 사용한 장주기의 Kobe지진파와 단주기의 Northridge지진파를 입력지진파로 선정하였으며, 축소모형에 맞게 지진파를 변환하였다. Kobe 지진의 경우에는 높은 수직가속도의 성분으로 인해 액상화 및 구조물의 구조적 피해를 발생시킬 수 있는 반면, Northridge 지진파의 경우, 비교적 양호한 지반상태에서 발생한 지진으로, 단주기 성분이 강하고 장주기 성분은 약한 경향을 보이고 있다(Nishiyama et al., 1999; Kim and Shin 2011; Shin, 2013).

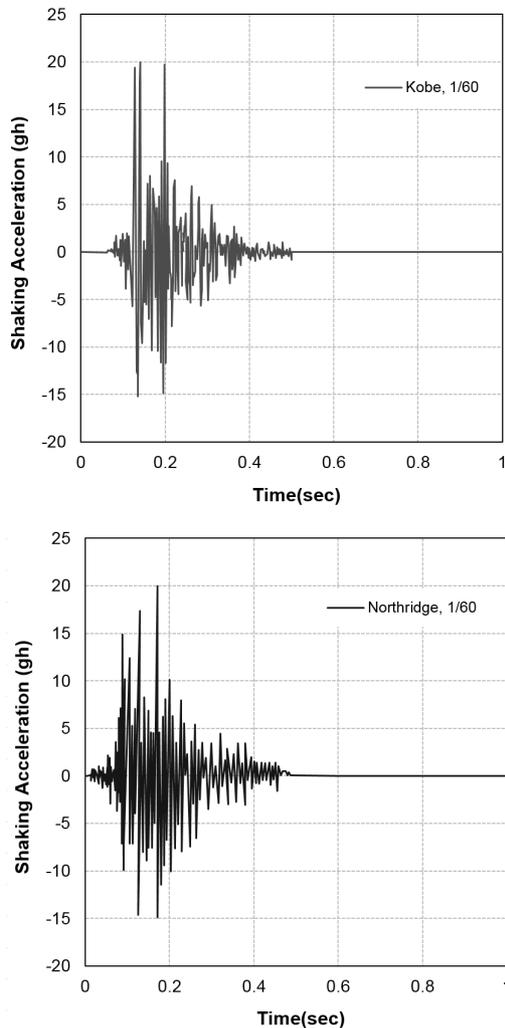


Fig. 6 Converted earthquake wave for centrifuge test (1/60 scale) (Kim and Shin 2011)

3. 실험 결과 및 분석

3.1 지반 및 지하역사 구조물의 변위

내진 보강된 지하역사 구조물의 거동을 검토하기 위하여, 본 연구에서는 선정된 내진보강 지하역사 축소모형에 대해 Kobe지진파와 Northridge지진파를 6단계의 수준으로 비례적으로 조절하여 순차적으로 가진하여 원형모형실험을 수행하였다.

Fig. 7과 같이 내진보강된 지하역사 구조물과 지반의 변위를 구하기 위하여, ESB 상자와 축소모형에서 계측된 가속도 값을 2번 적분하여 변위를 계산하였다. 또한, ESB 상자의 최하단(기반암) 변위를 기준으로 각 위치에서의 상대변위를 구하였다. 국내 내진설계기준(KBC 2009)에 의하면 내진 1등급에 대한 가속도 계수가 0.154 g임으로, 본 연구에서 검토하고자 하는 상대변위는 6단계의 입력지진과 가속도중 내진 1등급 가속도 계수에 가까운 값인 Kobe지진 0.14 g, 0.173 g과 Northridge 지진 0.156 g에 대한 구조물 및 지반의 상대변위를 검토하였다(Kim and Shin 2011). 또한, 도시철도 시설물 내진설계기준의 성능목표에서 기능수행 단계인 경우 최대 가속도 0.11g를 고려함에 따라, Fig. 8(a)의 Kobe지진 0.116 g에 대해 검토하였다.

Fig. 7은 Kobe지진 0.14 g의 구조물 높이별 변위시간이력

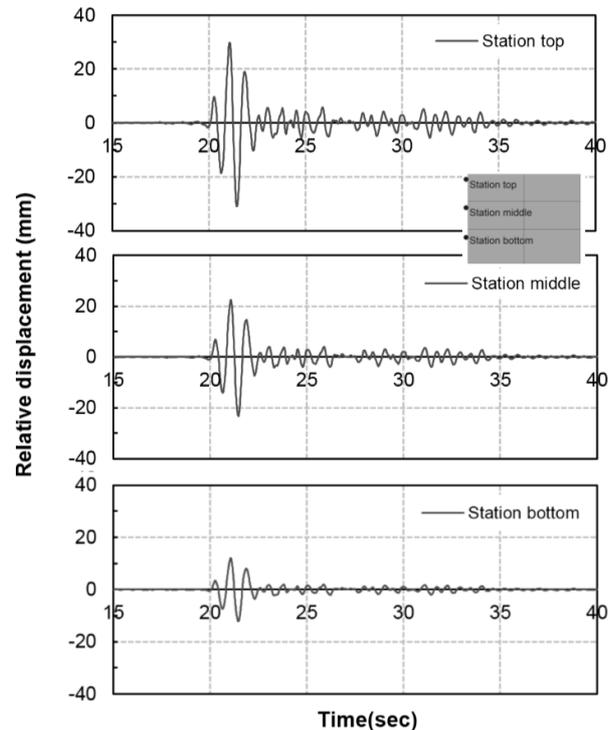


Fig. 7 Relative displacement-time history of Kobe Earthquake 0.14 g

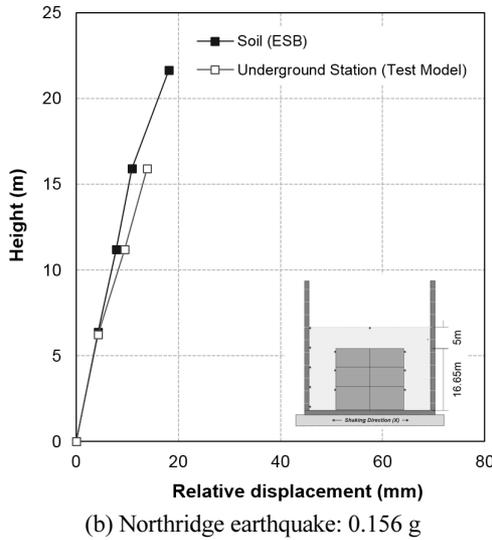
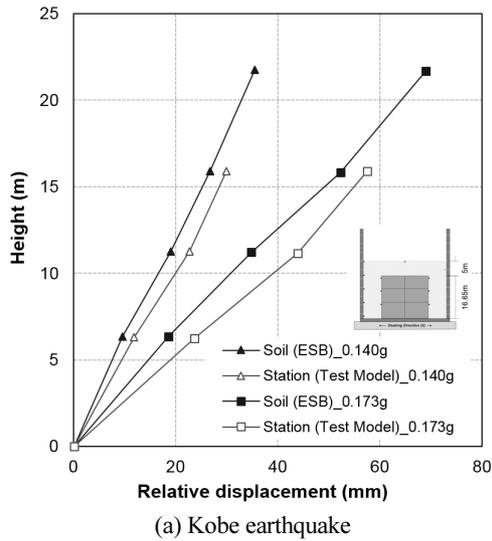


Fig. 8 Relative displacement for retrofitted underground station

을 나타내고 있으며, 지진과 감소에 따라 각 구조물에서 반응하는 변위도 감소하며, 구조물의 상부일수록 진동폭이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8에서 보는 것과 같이, 지반과 보강된 지하역사 구조물의 상대변위가 유사한 것을 확인할 수 있으며, 이는 지반 속의 지하역사에 지진이 가해지면, 지반과 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 8(a)에서 보는 것과 같이, 기반암에 작용하는 지진파의 가속도 수준이 증가할수록 지반과 지하역사 구조물의 상대변위는 증가하였으며, 지표면으로 갈수록 상대변위는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 특성주파수를 가진 진동은 지표면에서 크게 증폭되어 지반 및 구조물의 상대변위가 증가하기 때문이며 이는 지반증폭은 지반의 형태 및 종류 등에 따라 상이해지므로, 현장지반 조건을 고려한 모형실험의 모사가 필요한 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)은 Northridge 지진에 의한 상대변위로 Fig. 8(a)의 Kobe 지진에

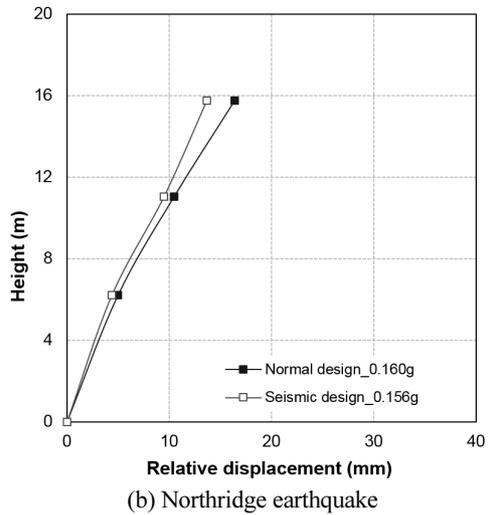
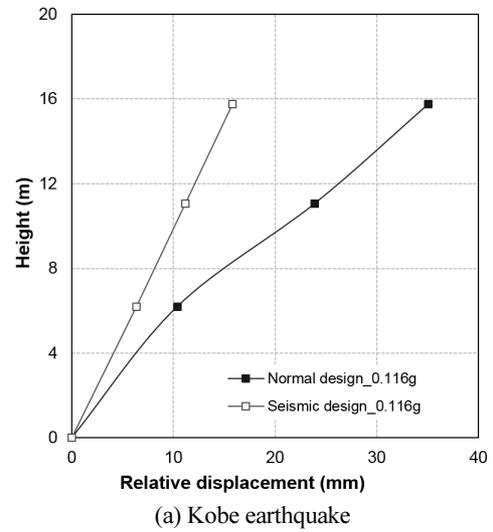


Fig. 9 Comparison of relative displacement between retrofitted and non-retrofitted stations

의한 상대변위에 비해 1.95배, 3.80배 작게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 지반조건임에도 불구하고, 상대변위 결과가 상이한 것은 내진보강 전의 지하역사의 구조물의 거동과 같이 지진파의 주기특성으로 인해 장주기인 Kobe 지진이 더 큰 피해가 발생 가능한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9은 Kim and Shin(2011)의 내진보강 전 지하역사 구조물의 원심모형 실험결과와 함께 비교하여, 내진보강 전·후의 지하역사 구조물의 상대변위를 고찰하였다. 내진보강 전의 구조물 변위를 비교하기 위하여 Kobe 지진의 가속도수준 0.116 g에 대해 추가적으로 검토하였다. Kobe 지진에 대하여, 내진보강이 적용된 지하역사 구조물 상단부의 변위에 대해 일반 지하역사 구조물에 비해 55%의 보강효과가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Northridge 지진에 대해서는 내진보강에 의해 지하역사 구조물 상단부의 상대변위가 16.8% 보강효과가 발생하였다. 이는 Kobe 지진이 단주기인 Northridge 지진에 비

해 높은 수직가속도와 장주기성분을 가지고 있으며, 근거리 지진에서 발생하는 펄스형태의 지반운동을 함으로써 큰 에너지를 내포하는 특성을 가지기 때문이다.

이로 인해, 무보강된 구조물에서 Northridge 지진에 비해 Kobe 지진에서 상대적으로 큰 변위가 발생되었으며, Kobe 지진에 대해 내진보강이 적용된 구조물에서는 현저한 보강효과가 발생한 것을 확인할 수 있었다.

3.2 지하역사의 구조적 거동

내진보강된 지하역사 구조물에 지진파에 의해 발생하는 응력분포를 검토하기 위해 식 (3)과 같이 변형률 값을 바탕으로 단위길이당 모멘트를 산정하였다(Kim and Shin, 2011).

$$M = -\frac{(\varepsilon_{out} - \varepsilon_{in}) \times b \times E \times t^2}{12 \times (1 - \nu^2)} \quad (3)$$

여기서, M 은 휨모멘트, ε_{out} 과 ε_{in} 은 구조물 외부와 내부에 발생하는 변형률, E 은 구조물의 탄성계수, t 는 구조물의 두께, ν 는 구조물의 프아송비, b 는 구조물 단위 길이당 폭을 의미한다.

보강된 지하역사의 측벽, 기둥, 슬래브에서의 정·부 최대 모멘트를 Kobe 지진과 Northridge 지진의 가속도수준 0.116g, 0.156g에 대해 각각 검토한 결과는 Fig. 10과 같다. 지진의 방향성으로 인해, 모멘트는 구조물을 중심으로 하여 정·부 양방향 대칭적인 경향을 보이고 있으며, 이는 보강 전후 지하역사에서 동일한 경향으로 거동함을 확인할 수 있었다(Kim and Shin, 2011). Figs. 10(a)와 (d)에서 보는 것과 같이, 중앙 기둥에서는 중앙부에 비해 상단에서 모멘트가 크게 발생하였으며, 이는 상대적으로 기둥의 지하 2층 높이에서는 모멘트가 적게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 지하 2층 높이 기둥과 연결되는 슬래브로 인해 모멘트 분배가 이뤄졌기 때문이다. Kobe 지진이 Northridge 지진에 상부에서 발생된 모멘트가, 정·부 모멘트별로 2.15배, 1.62배 크게 발생한 것을 확인할 수 있다.

Figs. 10(b), (e)와 같이, 측벽에서도 대체적으로 상부로 올

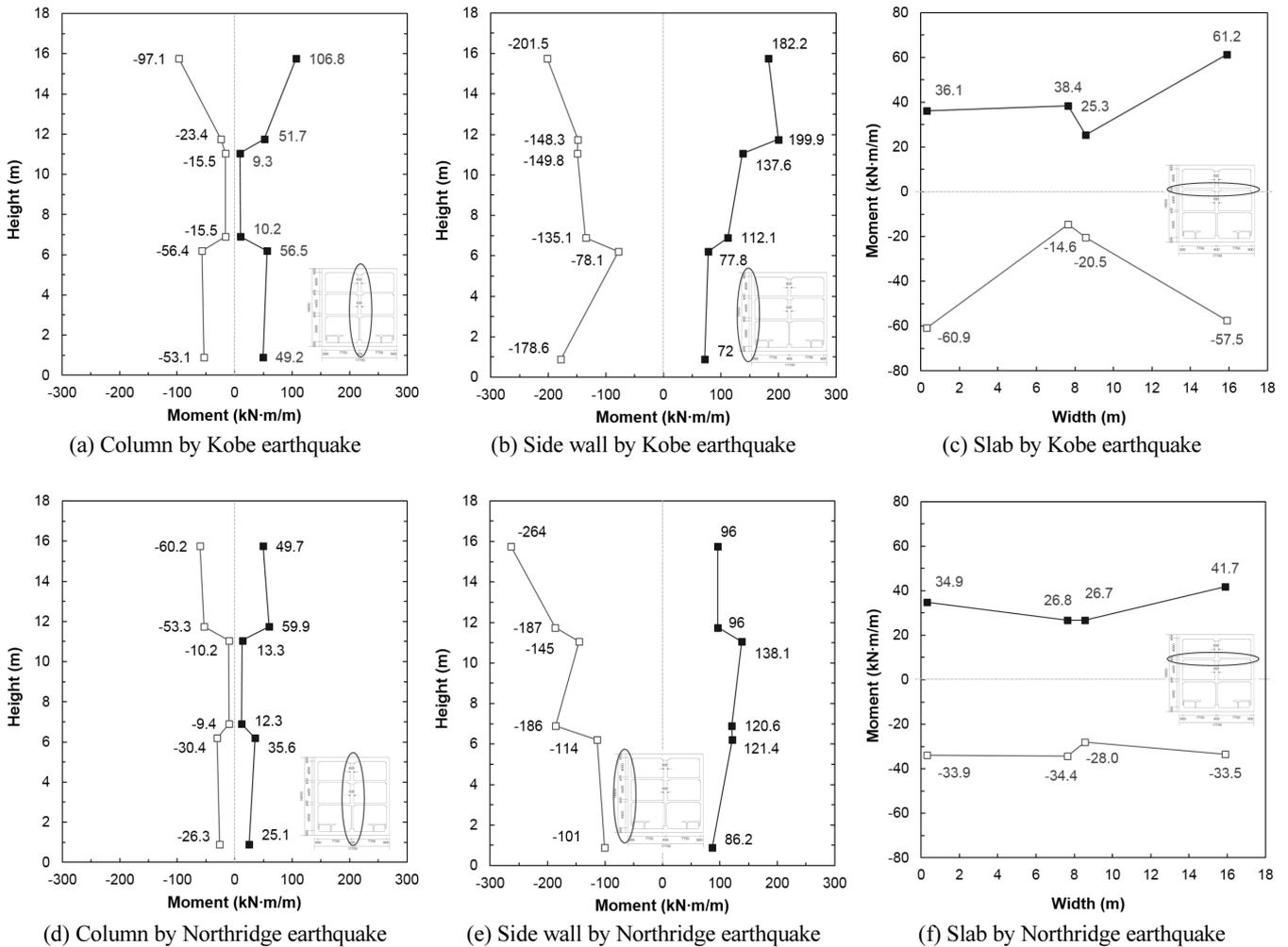


Fig. 10 Moment distribution of underground station second story

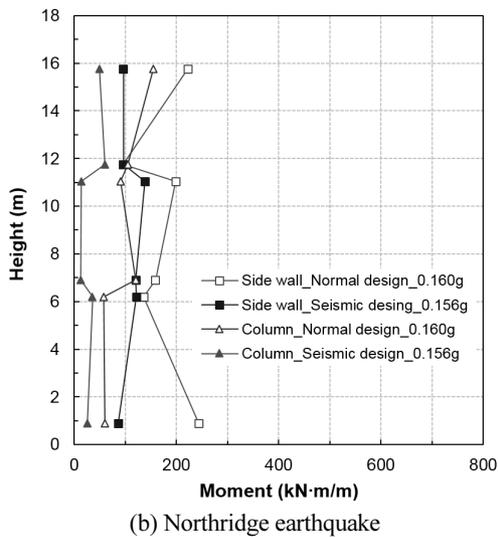
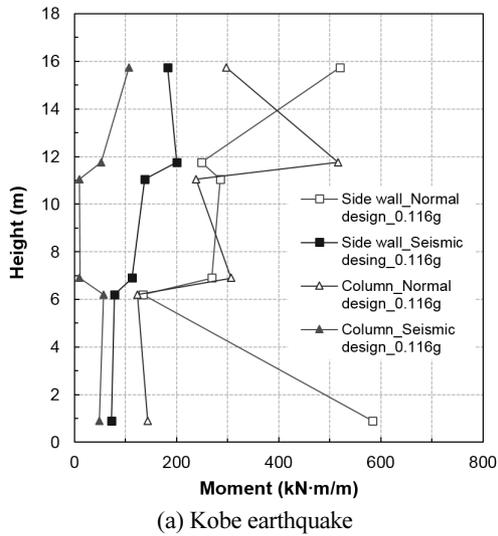


Fig. 11 Comparison of moment distribution between retrofitted and non-retrofitted stations

라갈수록 지하역사 구조물에 발생하는 모멘트가 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 더불어, 측벽에서 발생한 모멘트가 기둥 및 슬래브에서 발생한 모멘트에 비해 1.706배~7.56배 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 지진 발생시, 측벽 구조물에서 큰 변형이 가능하며, 측벽 구조물의 내진보강은 다른 부재에 비해 필연적인 것을 확인할 수 있다.

지하 1층 바닥 슬래브에서 발생한 모멘트는 Figs. 10(c), (f)와 같다. 슬래브의 양 끝단에서의 모멘트는 중앙의 기둥과의 접합부보다 1.21배에서 4.17배 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 중앙 기둥에 의해 슬래브의 모멘트 분배가 발생한 반면, 측벽과 연결되는 슬래브에서는 상대적으로 지진에 의한 변형 가능성이 높아짐을 알 수 있다. Northridge 지진에 비해 Kobe 지진에 의해 발생하는 슬래브의 모멘트는 1.47배에서 1.82배 더 크게 발생하였다.

Table 4 Seismic retrofitted effects of side wall and column

	Retrofitted effect (%)		Location
	Kobe	Northridge	
Side Wall	①	64.9	
	②	19.6	
	③	51.7	
	④	58.2	
	⑤	41.8	
	⑥	87.7	
Column	①	64.0	
	②	90.0	
	③	96.1	
	④	96.7	
	⑤	54.3	
	⑥	65.7	

Kim and Shin(2011)에서 수행한 보강 전 지하역사의 측벽 및 기둥의 모멘트 거동과 본 연구에서 수행한 내진보강에 의한 측벽 및 기둥의 모멘트 거동을 각 지진파에 대해 비교하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)에서 보는 것과 같이 Kobe 지진파와 Fig. 11(b)의 Northridge 지진파에 비해 상대적으로 모멘트의 변형이 크며, 이는 내진보강 설계시 지진파가 주요설계인자가 됨을 알 수 있다. 내진보강에 의한 측벽이 기둥에 비해 더 큰 모멘트를 받는 것을 확인할 수 있다. 내진보강효과에 대하여 일반 및 내진설계에 따른 측벽과 기둥의 모멘트 거동 변화율을 Table 4와 같이 계산하였으며, 이를 통해 각 지진파에 대한 내진보강 효과를 검토하고자 하였다. 모멘트 거동에 대한 측벽의 내진보강효과에 대해, Northridge 지진파의 경우에는 대체적으로 측벽의 상하부에서 큰 보강효과가 나타나는 경향이 있으나, Kobe 지진파의 경우에는 측벽의 상하부에서 큰 보강효과가 나타났다. 즉, Kobe 지진파에 의한 내진보강효과는 Northridge 지진파에 비해 벽체에 대한 보강효과가 높다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Kobe 지진파 같이 높은 수직가속도와 장주기 성분을 가지고 있는 지진파에 대해서는 내진설계에 의한 모멘트 거동의 보강효과가 상대적으로 크게 발생할 것으로 판단된다. 또한, 기둥에 대한 모멘트 거동에 대한 보강효과에 대해서는 각 지진파에 대하여 기둥과 슬래브의 접합부에서 큰 내진 보강효과가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 내진보강 된 도시철도 지하역사 구조물의 내진보강효과 및 지반과 구조물의 거동을 고찰하기 위해, 모

형구조 시험체의 강성을 20% 증가시켜 내진보강 지하역사 구조물에 대한 원심모형실험을 수행하였다. 또한 Kim and Shin(2011)에서 수행한 내진보강 전 지하역사 구조물의 원심 모형시험결과와 비교분석을 수행하였다.

내진 보강된 지하역사의 지반과 구조물의 상호작용은 지반과 구조물의 상대변위를 통해 검토하였으며, 비교적으로 지반과 구조물은 유사한 거동을 나타내었으나, 지표면에 가까울수록 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 내진보강 전의 지하역사 구조물의 상단부 변위에 비해, Kobe지진은 55%, Northridge지진에 대해서는 16.8%의 상대변위가 감소한 것을 통해 내진보강효과가 발생한 것을 확인하였다.

또한 지하역사 구조물의 거동을 검토하기 위하여, 측벽, 기둥, 슬래브에서 발생하는 모멘트 거동을 확인하였다. 그 결과, Kobe지진이 Northridge지진에 비해 각 부재별로 거동이 크게 발생하며, 이는 장주기 성분 및 높은 수직가속도의 지진파가 발생하는 경우, 지하 구조물에서 받는 변형 및 가해지는 모멘트 하중이 크게 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 내진 설계 시에는 설계 지진파가 주요 설계인자가 됨을 확인할 수 있었다. 슬래브의 모멘트 거동을 통해, 기둥과의 접속부에서는 모멘트 분배가 발생하는 반면에, 슬래브와 측벽의 접합부의 경우에는 상대적으로 지진에 의한 변형 가능성이 높아지는 것을 확인하였다. 또한, 슬래브의 모멘트 거동에 비해, 측벽과 기둥에 받는 모멘트가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 내진설계 시 측벽과 기둥 부재가 슬래브에 비해 주로 검토를 해야 하는 부재임을 확인할 수 있었다.

향후 본 연구에서 수행한 국내 지반 특성을 반영한 지하역사 1/60축소모형의 원심모형실험을 바탕으로 수치해석을 연계한 매개변수 연구가 필요하다고 판단된다. 이를 통해 지하역사 구조물의 내진보강 시 필요한 최적설계에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 「지진 및 강우재해에 대한 철도 대응시스템 핵심기술 개발(PK1705A)」의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

Hashash, Y., Hook, J., Schmidt, B., Yao, J. (2001), *Seismic Design and Analysis of Underground Structures*, Tunneling and Underground Space Technology, 16(4), 247-293.

Ito, K., Ohno, S., Matsuda, T., (2006), Seismic Response of Underground Reinforced Concrete Structure-centrifuge Model Test and Its Analysis, *Structural Engineering/Earthquake Engineering-Japan Society of Civil Engineers*, 23(1), 117-124.

Kim J.H., Shin M.J (2011), Centrifuge-shaking Table Test for Seismic Performance Evaluation of Subway Station, *Journal of the Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(3), 99-105 (In Korean).

Lee, T. H., Ki, J. S., Park, J. Y., Hwang, I. B. (2015), Example of Seismic Performance Evaluation on the Existing Railway Tunnel, *Proceedings of 2015 Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Busan, 342-345 (In Korean).

Lo, P., Berardi, R., Pedroni, S., Crippa, V. (1993), A New Travelling Sand Pluvaitor to Reconstitute Specimens of Well Graded Silty Sands, *Geotechnical Testing Journal*, 15(2), 61-77.

Matsui, J., Ohtomo, K., Kanaya, K. (2004), Development and Validation of Nonlinear Dynamic Analysis in Seismic Performance Verification of Underground RC Structures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(1), 25-35.

Miura, S., Toki, S. (1982), A Sample Preparation Method and Its Effect of Static and Cyclic Deformation-strength Properties of Sand, *Soils and Foundations*, 22(1), 61-77.

Nam S. H., Song, H. W., Byun, K. J., Maekawa K. (2006), Seismic Analysis of Underground Reinforced Concrete Structures Considering Elasto-plastic Interface Element with Thickness, *Engineering Structures*, 28(8), 1122-1131.

Nishiyama, S., Muroya, K., Haya, H., Shirou, T., Akihiko N. (1999). *Seismic Design of Cut and Cover Tunnel Based on Damage Analyses and Experimental Studies*, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 40(3), 158-164.

Park, B. H., Lee, W. C., Kim, J. H., Lim, N. H. (2009), A Study on Evaluation Method of Seismic Performance on Cut and Cover Tunnel of Subway in Japan, Korean Society for Railway, *Proceedings of 2009 the Korean Society for Railway*, The Korean Society for Railway, Gyeongju, 15-19 (In Korean).

Seoul Metro (2007), *Preliminary Evaluation of Seoul Metro Line No. 1-4 Seismic Performance*, Seoul Metro, 7-187 (In Korean).

Shin, H. Y. (2013), Seismic Performance of Cut and Cover Tunnel for Subway Using Centrifuge Model Test, Dissertation of Doctor of Philosophy, The University of Suwon, 8-100.

Stone, K. J. L., Hensley, P. J., Taylor, R. N. (1991), A Centrifuge Study of Rectangular Box Culverts, *Centrifuge '91 Balkema*, Rotterdam, 107-112.

Yoshihiko, M., (2012), Approach to Earthquakes in Tokyo Metro, *Journal of Tunnel and Underground*, Japan Tunnelling Association, 43(4), 295-300 (In Japanese).

Zen, K., Yamazaki, H., Umehara, Y. (1987), *Experimental Study on Shear Modulus and Damping Ratio of Natural Deposits for Seismic Response Analysis*, Report of the Port and Harbour Research Institute, 26, 41-113.

Received : 10/10/2016

Revised : 10/28/2016

Accepted : 11/17/2016

요 지 : 국내 도시철도 지하역사는 주로 개착식 공법으로 건설되었으며, 1970~80년대에 건설된 지하역사는 내진설계가 반영되지 않았다. 한반도 뿐 만 아니라, 전 세계적으로 지진 발생빈도는 증가하고 있는 추세이며, 내진설계가 적용되지 않은 기존 지하역사에 지진이 발생될 경우 막대한 인명 및 재산피해가 우려된다. 본 연구에서는 내진보강이 된 지하역사의 지반-구조물 상호작용과 보강효과를 검토하기 위해, Kobe 지진파 및 Northridge 지진파를 1/60축소모형에 적용하여 원심모형실험을 수행하였다. 내진보강은 주 부재인 기둥, 측벽, 슬래브의 강성을 증가시켜 내진보강 전후를 비교·검토하였다. 현장 조건에 따른 모형 지반을 모사하기 위해 공진주시험을 통해 실제 깊이 및 밀도에 따른 전단파 속도의 변화를 모사하였다. 지반과 구조물은 비교적 유사한 거동을 하였으며, 지표면으로 가까워질수록 상대변위가 증가하였다. 또한, 내진 보강전후의 지하역사 구조물의 슬래브에 비해 기둥과 측벽에서 상대변위와 모멘트 구조 거동을 통해 내진 보강 효과를 확인할 수 있었으며, 단주기인 Northridge 지진파에 비해 Kobe 지진파에서 구조물의 변형이 크게 발생하는 것을 통해 지진파는 주요 설계인자임을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 지진거동, 지하역사 내진보강, 원심모형시험, 구조적 성능 평가, 지반-구조물 상호작용
