

# 지하역사의 내진성능평가를 위한 원심모형 진동대 시험

## Centrifuge-Shaking Table Test for Seismic Performance Evaluation of Subway Station

김진호<sup>1)\*</sup>

Kim, Jin Ho

신민정<sup>2)</sup>

Shin, Min Jung

### Abstract

When a certain magnitude earthquake occurs, serious damage for human and properties is a major concern for most of the subway stations which were not applied for earthquake resistant design. Consideration and experimental verification for ground and structural behavior based on soil-structure interaction relation are required to evaluate seismic performance of the subway station as embedded structures. For 1/60 scaled subway station model, centrifuge modeling shaking table test is performed using Kobe and Northridge earthquakes. Compare to displacements and moments of the underground and structure obtained by soil response analysis and response displacement method based on experimental results, this paper shows how to evaluate seismic performance of subway station.

**Keywords** : Subway station, Centrifuge test, Seismic performance evaluation, Soil-structure interaction, Response displacement method

## 1. 서론

1970년대부터 2000년 이전 건설된 도시철도 시설물의 대부분이 지진에 대비한 내진 설계가 수행되지 않음으로 인하여 일정규모 이상의 지진이 발생할 경우 대규모 인명 및 재산피해가 우려된다. 특히 지하역사는 지중구조물로서 지진하중 전달 시 주변 지반과 상호작용의 결과로 인한 과도한 토압이 작용함으로써 구조물이 침하되거나 치명적인 구조적 손상이 발생할 수 있다. 또한 기초 지반과 구조물과의 거동차이로 인하여 부재가 손상을 입거나 붕괴된 사례가 국외에서 보고되었다(Koji et al., 2006 ; Seiji et al., 1999). 최근 지하역사, 지상역사 등이 포함된 도시철도 시설물에 대하여 내진성능평가가 수행 중에 있으며, 수행결과에 따라 구조물에 대한 내진보강이 필요한 실정이다. 따라서 내진성능 평가의 결과에 대한 신뢰도 향상은 매우 중요하며, 지중구조물의 경우 지진에 대하여 지반과 구조물의 상호작용이 고려된 성능평가 및 대책이 요구되고 있다.

지하역사의 내진설계 또는 내진보강을 위하여 사용되

는 해석방법으로 등가정적해석법, 응답변위법, 시간영역 또는 주파수 영역에서의 동적해석법 등이 있다. 이 가운데 응답변위법은 등가정적해석법과 동적해석법의 단점을 보완하는 방법으로서 널리 활용되고 있다(한국지반공학회, 2006). 그러나 응답변위법의 해석결과에 대하여 지반반력계수, 변위의 과소평가 등에 문제가 있음이 꾸준히 제기되고 있으며, 이에 대한 적절한 실험적 검증 및 보완이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 지하역사 구조물에 대하여 원심모형 진동대 시험을 수행하고, 실험결과와 지반거동 해석 및 응답변위법에 의한 지반 및 구조물의 변위, 모멘트에 대하여 비교·분석함으로써 지하역사의 내진성능을 평가하고 내진보강의 기초자료로 활용하고자 하였다.

## 2. 지하역사의 원심모형 진동대 시험

### 2.1 지하역사 시험체

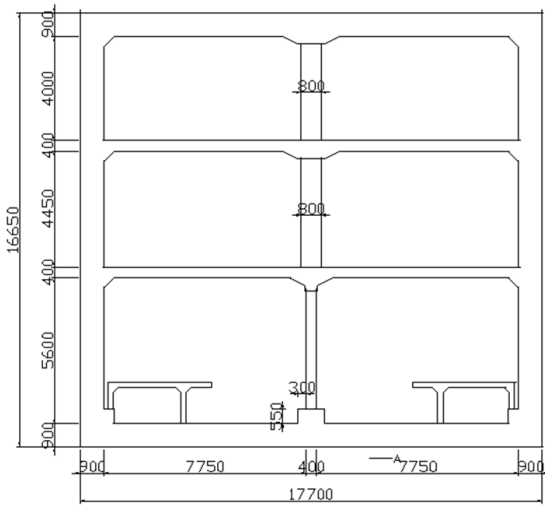
원심모형시험은 구조물의 축소모형을 이용하여 수행하

1) 정회원, 한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단 책임연구원

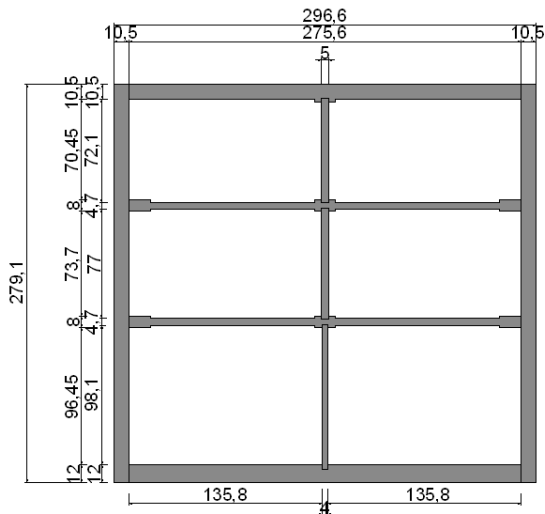
2) 학생회원, 과학기술연합대학원대학교 미래첨단교통시스템공학 석사과정

\* Corresponding author : ziminpa@krii.re.kr 031-460-5774

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.



(a) Section of a full scale model(mm)



(b) Section of a scale model(mm)

Fig. 1 Full scale and scale model of 3 story subway station

는 실험으로 축소모형과 원형사이의 상사법칙을 반영하는 것이 필요하다. 지하역사와 같은 지중 구조물에 지진 하중의 재하 시, 지반과 구조물의 상호작용이 중요하므로 구조물 원형과 축소모형 시험체의 강성을 상사법칙에 맞도록 반영함이 필요하다(Koji et al., 2006 ; Schofield, 1980). 축소모형의 크기를 결정하기 위한 상사비는 원형과 축소모형 재료의 강성값 식으로 구성된 식 (1)과 같다 (Stone et al., 1991).

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

Table 1 Dimension of scale model for subway station

Scale model	Material	Modulus of elasticity	Length	Width	Thickness	Slenderness ratio	
		GPa					mm
upper slab	Aluminum	70	484	275.6	10.5		
middle slab1,2					4.7		
bottom slab					12		
sidewall 1,2					279.1	10.5	
column1					71.65	5	S=800/4200
column2					76	5	S=800/4200
column3					99.15	4	S=2000/5000

Table 2 Results of subsurface exploration

Depth (m)	Soil classification	SPT-N	Penetrated depth (cm)	Ncorr,30cm
2	deposit soil	12	30	12
4		6	30	6
6		9	30	9
8		13	30	13
10		6	30	6
12		6	30	6
14		9	30	9
16		37	30	37
17		50	16	94
19		weathered rock	50	6
21	50		5	300
23	50		3	500
25	50		3	500

여기서  $E_m$ : 축소모형 재료의 탄성계수,  
 $I_m$ : 축소모형 재료의 2차 관성모멘트,  
 $E_p$ : 원형모형의 재료 탄성계수,  
 $I_p$ : 원형모형 재료의 관성모멘트,  
 $1/N$ : 축소율

개착식 철근콘크리트구조가 대부분인 지하역사에 지진 발생 시 지반과 구조물의 거동을 모사하기 위하여 수도권에 소개하고 있는 실제 지하역사의 단면을 Fig. 1(a)와 같이 선정하였다. Fig. 1(b)와 같이 상사비(1/60)를 적용한 축소모형 시험체는 상판과 중간층슬래브 2개 및 하부, 측벽부 2개와 기둥 3개로 총 9개의 알루미늄 판으로 구성되었고 제원은 Table 1과 같다. 지하역사 축소모형 시험체는 길이방향으로 무한하면서 평면 변형률 조건을 모사하기 때문에 ESB(Equivalent Shear Beam)박스 내부에 길이 방향으로 단부까지 매설하였고, 구조물의 양 끝단은 테프론 판으로 마감되었다.

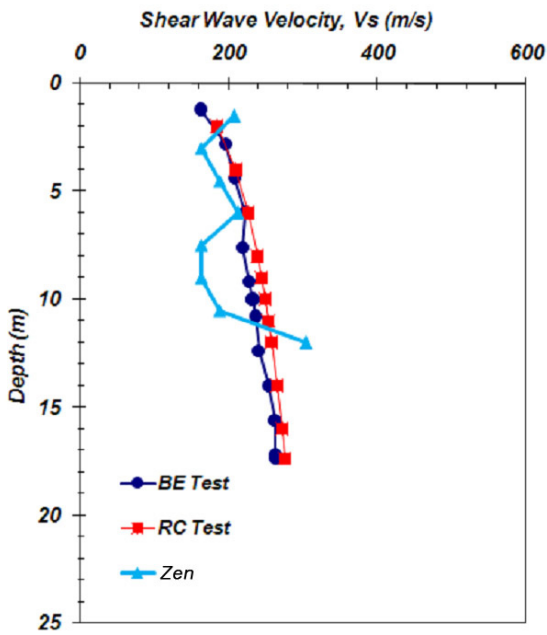


Fig. 2 Shear wave velocity profile for the ground

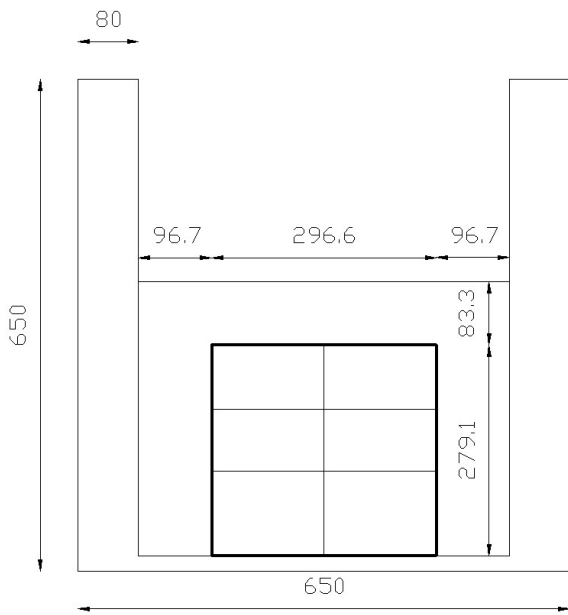


Fig. 3 Model for ground and subway station(mm)

선정된 지하역사 현장의 지반조사 자료는 Table 2와 같으며 풍화암을 기반으로 건설되었음을 알 수 있다. Table 2의 SPT N값을 Zen 등이 제안한 식 (2)에 적용하여 전단파속도( $V_s$ ) 주상도를 추정하였으며 Fig. 2와 같다(Zen et al., 1987).

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

지하역사의 지반을 모사하기 위한 모형 지반은 규사 (silica sand)를 사용하여 깊이 및 밀도에 따른 전단파속도 변화를 추정하였고, 상대 밀도 80%로 조성되었다(Lo Presti et al., 1993). 지하역사 현장지반의 전단파속도와 유사한 조건을 모사하기 위하여, 조성시료 규사에 대한 공진주 시험(Resonant Column Test)을 수행하여 깊이 및 밀도에 따른 전단파속도 변화를 추정하여 모형지반의 성형 조건을 선정하였다. 상대 밀도 80%로 조성된 규사지반의 경우 60g 원심가속 조건에서 현장지반의 전단파속도 주상도를 적절히 모사하고 있음을 확인하였다. 또한, 동일 상대밀도로 조성된 규사 지반을 60g 원심가속 조건에서 벤더엘리먼트 시험(Bender Element Test)을 통하여 직접 깊이별 전단파속도를 획득한 결과는 Fig. 2와 같고, 모형 지반의 조건은 현장 조건을 잘 모사함을 확인하였다.

지하역사는 기반암위에 건설된 것으로 가정하고 이와 동일한 조건을 모사하기 위하여 Fig. 3과 같이 강성이 높은 ESB 박스 바닥 면에 고정하였다.

## 2.2 실험 개요

지하역사 구조물의 변형 및 지반과의 상호작용을 측정하기 위하여 총 12개의 가속도계를 Fig. 4(a)와 같이 부착하였다.

모멘트가 가장 크게 발생할 것으로 예측되는 접합부 부근과 접합부로부터 5mm 떨어진 위치에 총 27쌍의 변형률계를 설치하였다. 지진하중 모사를 위해 사용된 입력 지진파에 대하여 지진 가속도 크기 N배, 지진 지속 시간 1/N배, 지진 주파수 성분 N배의 상사법칙을 적용하였다. 지진하중으로 장주기인 Kobe지진파와 단주기인 Northridge지진파를 사용하였으며 지하역사의 축소모형에 적용할 수 있도록 Fig. 5와 같이 변환하였다.

입력지진파는 두 개의 계측된 실지진파의 최대 가속도를 비례적으로 조절하여 입력 지진파의 최대 가속도수준을 Kobe지진파는 0.175 g, Northridge지진파는 0.16 g로 각각 적용하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1. 지반 및 구조물 변위

가속도계로부터 얻어진 신호를 2번 적분하여 변위를

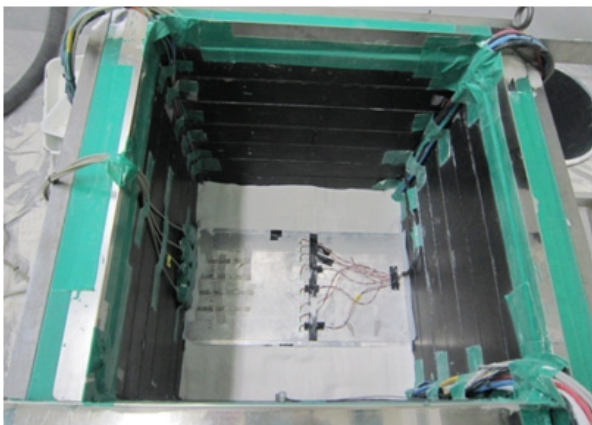
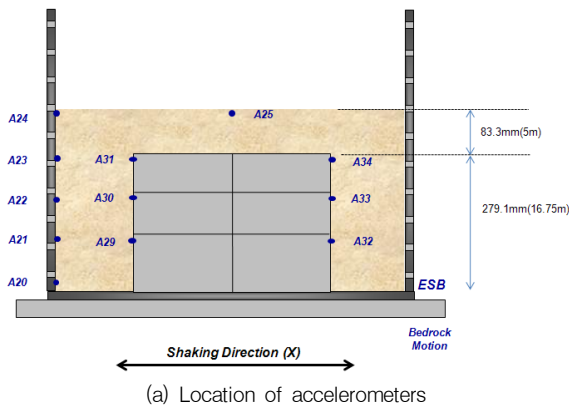


Fig. 4 Test specimen and location of accelerometers

구하고 기반암 변위를 기준으로 각 위치에서의 상대변위를 구하였다. 측정된 가속도 신호는 지진하중에 대한 지반 및 구조물 고유의 신호 외에 원심모형시험의 노이즈를 상당부분 포함하고 있으므로 적분된 변위신호의 발산을 막기 위하여 band pass filter를 계측신호에 적용하였다. 원심모형시험에서 사용하는 지진파의 주된 성분인 0.5Hz~12Hz에 해당하는 신호를 사용하였다.

적분을 통하여 획득되는 변위신호는 가속도계 A20의 적분 변위 신호로 구한 기반암 변위에 대한 상대변위로 Fig. 6과 같으며, 측정지점이 지표면에 가까울수록 큰 값을 가짐을 확인 할 수 있다. 깊이별 상대변위의 최대값은 설계에서 사용되고 있는 응답변위법에 의한 지반 변위에 상응하는 값이다.

지하역사의 설계 시 붕괴방지 수준에 해당하는 기반암 가속도 0.154g에 근접한 원심모형시험 결과와 응답변위법으로 계산한 지반 및 구조물의 상대변위는 Fig. 7과 같다. 또한 동일 단면에 대하여 내진설계에서 널리 사용되고 있는 SHAKE91을 이용하여 수행된 지반상대변위를

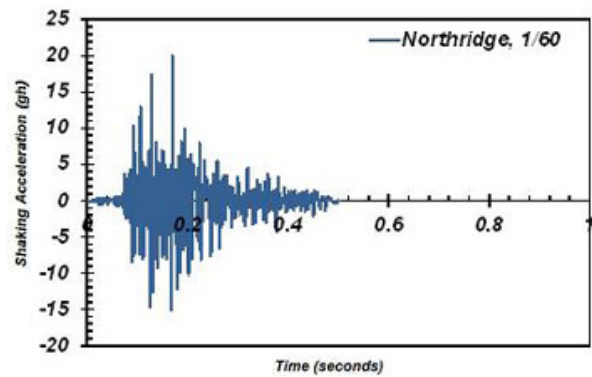
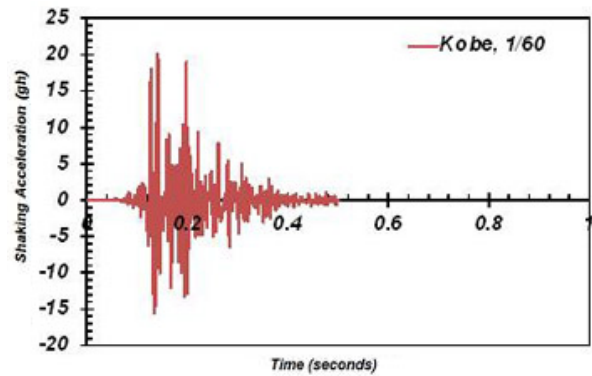


Fig. 5 Reduced accelerogram for centrifuge test(1/60 scale)

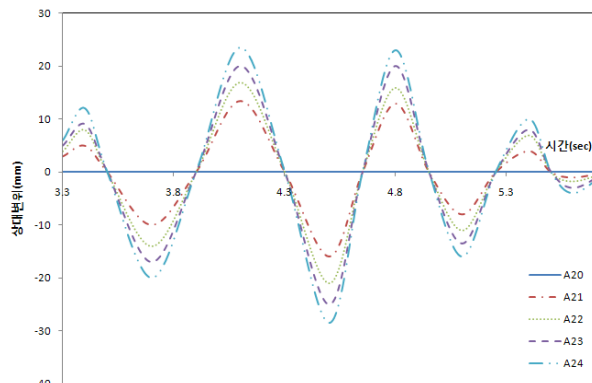


Fig. 6 Relative displacements for ground depth

Table 3 Accelerogram magnitudes with various methods

Experimental result		Soil response analysis		Response displacement method
Kobe	Northridge	SHAKE91		
0.175g (bedrock)	0.160g (bedrock)	0.175g (bedrock)	0.160g (bedrock)	0.154g (outcrop)

Fig. 7에 나타내었다(Idriss and Sun, 1992). 지반응답 해석 시 지반은 공진주 시험을 통하여 얻어진 조건에 따라 깊이별 구속압 효과를 고려하여 구속응력 50kPa, 100kPa 규사지반과 기반암으로 구분하였으며, 실험과 동

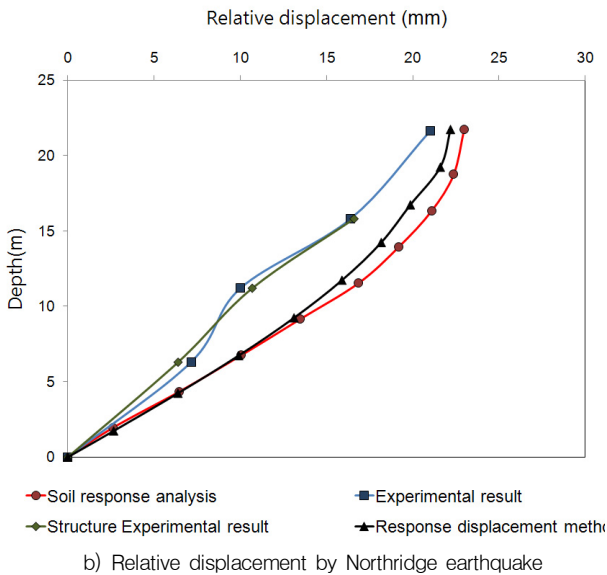
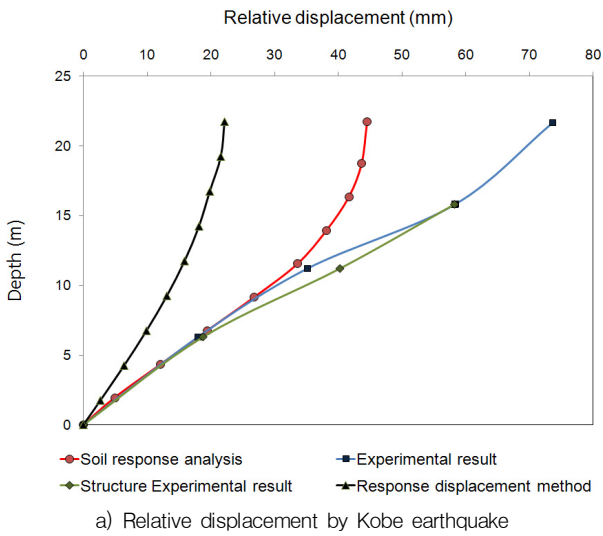


Fig. 7 Relative displacement between subway station and ground with underground depth

일한 전단파속도와 지진파를 적용하였다.

암반노두 가속도 수준이 0.175g의 Kobe지진에 의해 발생한 구조물 및 지반의 상대변위가 응답변위법의 지반 상대변위보다 크게 나타났다. 원심모형시험과 SHAKE 91을 이용한 지반응답해석 결과 값을 비교 시 기반암 부근에서 상대변위는 비슷한 경향이 나타나지만 지표와 가까워질수록 원심모형시험에 의한 상대변위가 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 실험결과에서 지반보다 구조물의 상대변위가 약간 크게 나타났다. 이는 지반의 강성보다는 구조물 강성의 영향이 크게 작용함으로써 구조물의 영향으로 인한 지반의 강성과 구조물 상부 지반의 강성의 차

이가 발생하고, 강성의 차이와 Kobe지진의 특성의 영향으로 인해 지표 부근에서의 실험과 지반응답해석으로 얻어진 상대변위가 다르게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 Kobe지진하중의 경우 지하역사 설계 시 주로 사용되는 응답변위법에 의해 얻어진 해석결과 또는 지반응답 해석결과를 이용하여 산정된 단면설계는 과소평가 될 수 있음을 알 수 있다(Tsutomu and Shigeki, 2000 ; Youssef et al., 2001).

Northridge지진에 의해 발생하는 구조물 및 지반의 상대변위는 도시철도 내진설계기준의 암반노두 최대가속도 0.154g에 비해 약간 큰 값인 0.165g가 가진되었음에도 불구하고 응답변위법에 의해 산정되는 값과 크게 차이가 나지 않았다. 이는 단주기인 Northridge지진의 경우 장주기인 Kobe지진과 다른 주기특성을 가짐으로 인해 지표 부근에서 지반의 상대변위 실험결과 값이 크게 나타나는 현상은 발생하지 않은 것으로 판단된다.

### 3.2 구조물 모멘트

구조물에 부착된 변형률계에서 얻은 변형률을 식 (3)에 적용하여 모멘트를 산정하였다.

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

여기서, M : 휨모멘트

$\epsilon_{out}$  : 구조물 외부의 변형률

$\epsilon_{in}$  : 구조물 내부의 변형률

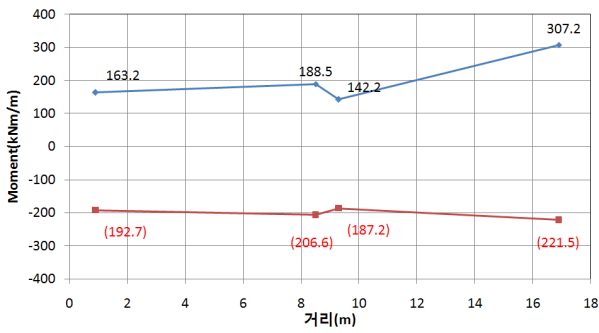
E : 구조물의 탄성계수

t : 구조물의 두께

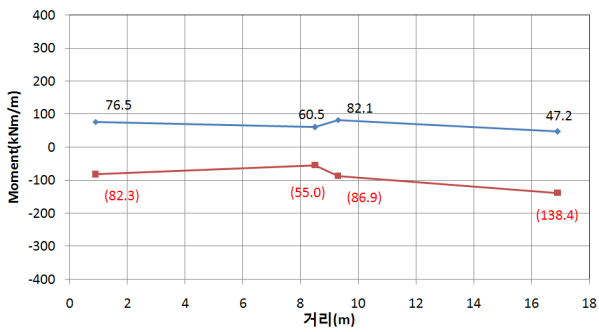
$\nu$  : 구조물의 포아송비

Northridge지진 0.160g의 지진하중 재하 시, 지하역사 구조물의 상판 및 지하1층 슬래브에서 발생하는 최대 모멘트는 Fig. 8과 같다. Fig. 8로부터 지하1층 슬래브에 비해 상판에서 모멘트가 크게 작용하고 있음을 알 수 있었으며, 기둥과의 접합부보다 슬래브의 양 끝단에서의 모멘트 값이 큰 차이를 보이고 있다. 기둥과 연결되는 접합부에서는 상판과 중앙슬래브 모두 모멘트 분배로 인한 모멘트 값의 변화를 볼 수 있다.

Kobe지진하중 재하 시 지하 3층의 벽체 및 기둥에서



a) Maximum and minimum moment of upper slab for the 1st basement level



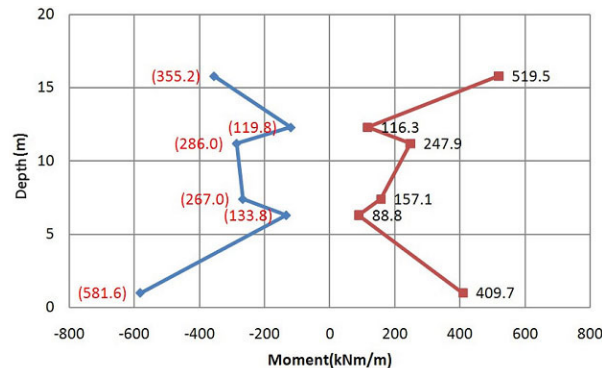
b) Maximum and minimum moment of bottom slab for the 1st basement level

Fig. 8 Moment of slab for subway station (Northridge 0.160g)

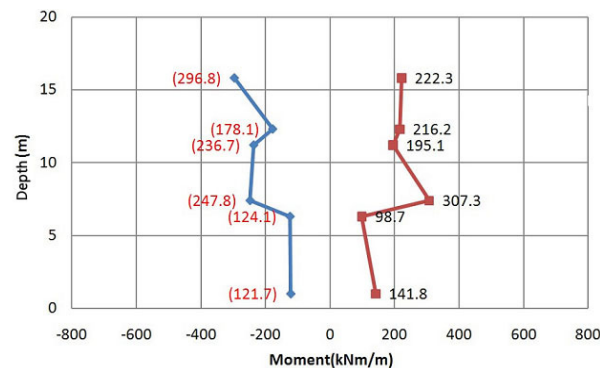
높이별로 발생하는 모멘트의 분포는 Fig. 9와 같다. 측벽의 중앙부에 비하여 상·하부 끝단에서 최대 모멘트가 발생하였고, 높이에 따라 모멘트의 변화차이가 큰 것으로 나타났다. 기둥에서의 모멘트는 벽체 상·하부에서 발생된 모멘트에 비해 상대적으로 작지만 중앙부에 비해 기둥 상단의 모멘트가 크게 발생하였다. 또한 기둥 모멘트의 변화는 측벽에 비해 위치에 따라 크기의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

도시철도 지하역사 구조물의 내진성능을 평가하기 위하여 원심모형 진동대 시험을 수행하였다. 또한 실험결과에 근거하여 지중구조물 해석에 널리 사용되고 있는 SHAKE91, 국내 내진 설계 기준으로 사용되고 있는 응답변위법에 의한 지반 및 구조물의 변위, 모멘트에 대하여 비교·분석을 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.



a) Maximum and minimum moment of sidewall for the 3rd basement level



b) Maximum and minimum moment of column for the 3rd basement level

Fig. 9 Moment of sidewall and column for subway station(Kobe 0.116g)

- (1) 실지진과를 활용한 원심모형시험 및 지반응답해석의 결과는 기반암 부근에서는 유사한 경향을 보였으나 지표에 가까울수록 실험결과로부터 얻어진 상대변위가 크게 나타났다. 이는 지반과 구조물 상부지반의 강성 차이와 지진하중의 특성으로 인하여 지표부근에서 실험과 해석값에 의한 상대변위가 크게 차이난 것으로 판단된다.
- (2) 장주기인 Kobe지진의 경우 응답변위법에 의한 상대변위보다 실험에 의한 상대변위가 상당히 크게 나타났다. 따라서 현재 지하역사의 설계에 널리 사용되고 있는 응답변위법에 의한 해석결과를 이용하여 산정된 단면은 과소설계가 될 수 있으므로 이에 대한 적절한 보정이 필요하다.
- (3) 국내 지반조건 및 지중구조물에 대하여, 원심모형시험과 수치해석을 연계한 매개변수 연구를 통하여 지반 변위 및 지반 반력 계수 산정에 있어서 재검토가 필요함을 알 수 있었다. 궁극적으로 지하역사의 내진설계

---

또는 내진성능 평가 시 단면의 합리적인 산정을 위해  
현행 내진 설계법의 보완이 필요한 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발  
사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 한국지반공학회, 지반구조물의 내진설계, 구미서관, 2006.
2. Idriss, I. M. and Sun, J. I., User's manual for SHAKE91, Center for Geotechnical Modeling Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis, 1992.
3. Koji, I., Satoru, O. and Takashi, M., "Seismic Response of Underground Reinforced Concrete Structure - Centrifuge Model Test and Its Analysis", JSCE, Vol. 23, No. 1, 2006, pp.117-124.
4. Lo Presti, D. C. F., Berardi, R., Pedroni, S. and Crippa, V., "A new travelling sand pluvaitor to reconstitute specimens of well-graded silty sands", Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 1, 1993, pp.61-77.
5. Schofield, A. N., "Cambridge university geotechnical centrifuge operation, Rankine Lecture", Geotechnique, Vol. 30, No. 3, 1980, pp.227-268.
6. Seiji, N., Kosuke, M. and Hirishi, H., "Seismic Design of Cut and Cover Tunnel Based on Damage Analyses and Experimental Studies", Quarterly Report of RTRI, Vol. 40, No. 3, 1999, pp.158-164.
7. Stone, K. J. L., Hensley, P. J. and Taylor, R. N., "A centrifuge study of rectangular box culverts", Centrifuge 91, Balkema, Rotterdam, 1991, pp.107-112.
8. Tsutomu, N. and Shigeki, U., "A Simplified Seismic Design Method for Underground Structures Based on the Shear Strain Transmitting Characteristics", Public Works Research Institute, Minamihara, Tsukuba, 2000.
9. Youssef, M. A. H., Jeffrey, J. H., Birger, S. and John, I-C. Y., "Seismic Design and analysis of underground structures", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 4, 2001, pp.247-293.
10. Zen, K., Yamazaki, H. and Umehara, Y., "Experimental study on shear modulus and damping ratio of natural deposits for seismic response analysis", Report of the Port and Harbour Research Institute, 1987, pp.26, 41-113.

(접수일자 : 2010년 11월 17일)

(수정일자 : 2010년 12월 27일)

(심사완료일자 : 2011년 1월 4일)

---

## 요 지

지하역사의 대부분은 지진에 대비한 내진설계가 거의 수행되지 않음으로 인하여 일정규모 이상의 지진이 발생할 경우 대규모 인명 및 재산피해가 우려된다. 지중구조물인 지하역사의 신뢰도 높은 내진성능 평가를 위하여 지진하중 재하 시 지반과 구조물의 상호작용이 고려된 거동의 고찰과 검증이 요구된다. 이에 본 연구에서는 수도권 소재의 실제 지하역사에 대하여, 상사비 1/60 스케일의 축소모형 지하역사 구조물 시험체에 장주기인 Kobe지진파와 단주기인 Northridge지진파를 적용한 원심모형 진동대 시험을 수행하였다. 원심모형시험결과와 응답변위법, 동일단면에 대해 SHAKE91에 의한 지반 및 구조물의 상대변위, 구조물의 모멘트에 대하여 비교·분석함으로써 지하역사의 내진성능을 평가하고자 하였다.

**핵심 용어** : 지하역사, 원심모형진동대시험, 내진성능평가, 지반-구조물 상호작용, 응답변위법