Journal of the Korean Geo-Environmental Society
18(5): 55~60. (May, 2017) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2017.18.5.55

복층터널 중간슬래브의 지지조건에 따른 지진 응답특성

The Characteristic of Earthquake Response on Middle Slab in Double-Deck Tunnel under Supporting Conditions

장 동 인[1] · 김 종 일[1] · 곽 창 원[1] · 박 인 준†
Dongin Jang · Jongill Kim · Changwon Kwak · Innjoon Park

Received: March 24th, 2017; Revised: April 17th, 2017; Accepted: April 27th, 2017

ABSTRACT : It is critical for Korea to make effective use of limited space as it has dense population and high traffic volume compared to its terrestrial area. To resolve this issue, diverse types of underground structures have increasingly been applied so far, and one of the most representative structures is double-deck tunnel. It has upper and lower roads separated by middle slab that shows dynamic behavior according to the vehicle and earthquake loads. In case of the characteristics of earthquake response, it is necessary to have exploratory study as it has high loads, complex working mechanism, and difficult theoretical approach. In order to understand the characteristics of earthquake response based on the supporting conditions of middle slab in double-deck tunnel, this study conducts indoor shaking table test with 3 test cases: (1) fix both brackets, (2) free and fix at each bracket and (3) free at both brackets for 2 seismic waves of artificial and Gyeongju earthquake. The result shows if the middle slab is free at both brackets, the acceleration response is reduced 41% for artificial earthquake and 60% for Gyeongju earthquake compared to the one with fix at both brackets.

Keywords : Double-deck tunnel, Middle slab, Shaking table test, Artificial earthquake, Gyeongju earthquake

요 지 : 우리나라는 제한된 국토 면적에 비해 인구 밀도가 높고 그에 따른 교통량 증가로 인한 효율적인 공간 이용의 필요성이 시급하다. 이를 위해 여러 가지 지하구조물의 건설이 증가하고 있으며 그 대표적인 것이 복층터널이다. 복층터널 내에는 상, 하부 차도를 구분하는 중간슬래브가 있고 이러한 중간슬래브는 차량하중 및 지진하중에 의한 동적거동을 보이게 된다. 특히 지진에 의한 응답특성은 하중의 크기도 클뿐더러 작용 메커니즘이 매우 복잡하고 이론적인 접근이 쉽지 않아 실험적 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 복층터널 중간슬래브 지지조건에 따른 지진 시 응답특성을 파악하기 위하여 실내 진동대 시험을 수행하였다. 이를 위하여 중간슬래브의 양쪽 지지단을 모두 고정, 한쪽 탄성지지, 양쪽 탄성지지의 3가지 경우로 나누어 각각 인공지진파 및 경주실지진파의 2가지 지진파를 적용하여 시험을 수행하였다. 그 결과, 양단 고정 조건에 비하여 양단 탄성지지 조건일 경우 가속도 응답이 인공지진파에서 최대 약 41%, 경주실지진파에서 최대 약 60% 감소함을 확인하였다.

주요어 : 복층터널, 중간슬래브, 진동대 시험, 인공지진파, 경주실지진파

1. 서 론

급속한 산업발전과 이에 따른 도시화로 인하여 도심지 인구가 증가함에 따라 교통량도 따라 증가하고 있다. 제한된 국토면적에 비해 급증하는 교통량 때문에 효율적인 공간 활용의 필요성이 시급하므로 다양한 지하 구조물의 건설이 늘어나고 있다. 그 중 대표적인 것이 하나의 단면으로 교통과 라이프라인을 동시에 연결 및 소통시킬 수 있는 복층터널이라 할 수 있다. 최근 들어 복층터널의 의한 지하 네트워크 구축에 대한 계획이 발표되고 있으나 아직 복층터널의 국내 건설 현황은 전무하며, 국외에도 시공사례가 많지 않아 기초 연구가 절실한 상황이다. 최근에는 도심지 홍수저감과 교통량 분담 등을 위한 다목적 터널에 대한 연구(Kwon et al., 2015; Lee et al., 2017), 수로터널과 같은 다목적 비배수형 터널에서의 부력 안정성 검토(Lee & Moon, 2016a; Moon et al., 2016) 등의 연구가 수행되고 있다. 복층터널 내 중간슬래브는 구조상 교량과 달리 양단에서 지지되는 형태이므로 교량과 포장 슬래브의 중간 형태라고 볼 수 있으며 이러한 지지조건을 가지는 슬래브 구조체의 설계기술에 대한 연구(Lee & Moon, 2016b; Park et al., 2016) 또한 진행 중이다.

복층터널은 그 특성상 단면의 크기가 커지게 되는데, 이로 인하여 지진 시 발생하는 관성력 및 외력도 커지게 된다. 최근 지진의 발생빈도 증가로 인하여 복층터널의 지진 시

1) Hanseo University Department of Civil Engineering
† Hanseo University Deptment of Civil Engineering (Corresponding Author : geotech@hanseo.ac.kr)

동적거동 파악이 중요하며, 그중 가장 핵심은 운전자 및 이용자의 안전과 직결된 중간슬래브의 거동이다(Jang et al., 2016). 지진 시 중간슬래브 거동은 매우 복잡해지므로 실험적 접근이 필수적이다. 본 연구에서는 주변 지반을 암반지반으로 가정하고 복층터널의 중간슬래브의 지진 시 동적거동에 대하여 시험 결과를 바탕으로 분석하였다. 이를 위하여 중간슬래브의 양쪽 단을 모두 고정, 한쪽 탄성지지, 양쪽 탄성지지로 하여 2가지 지진파(인공지진파, 경주지진파)를 이용하여 실내 진동대 시험을 실시하여 최적의 중간슬래브 양단 지지 방법을 확인하였다.

2. 지하 구조물의 진동 특성

지하 구조물은 지진과 같은 진동하중 재하 시 지반 내에서의 지반운동과 상호 영향을 주고받으며 구조물이 진동하기 때문에, 상대적으로 큰 지진 피해를 받는 교량, 건물 등의 지상구조물과는 다르게 나타난다. 지하 구조물에서는 작용하는 지반운동이 지표면에서 나타나는 지반운동보다 작으며 증폭현상도 지상 구조물과는 다소 차이가 있다. 이에 대한 원인은 다음과 같이 분석할 수 있다.

첫째, 대부분의 지반에 있어서 깊이에 따른 지반운동의 크기가 지표면에서 최대가 되며 지중에서는 상대적으로 작은 지반운동의 진폭을 갖는다. 그리고 상부지반을 단일자유도 시스템으로 한 설계응답스펙트럼이 작성되지 않은 상태이며 해석 등을 통하여 지반을 따라 전파되는 지진파에 의한 지반운동의 크기를 적절히 파악할 필요가 있다.

둘째, 지하 구조물의 겉보기 단위체적중량은 일반적으로 주변 지반의 단위체적중량보다 작거나 같은 경우가 많다. 지하 구조물의 겉보기 단위체적중량이 주변 지반과 비교하여 작다는 것은 지하 구조물에 작용하는 관성력이 작다는 것이다. 따라서 지반 내에서 지하 구조물을 진동시키려는 힘이 상대적으로 작다는 것을 의미한다.

셋째, 지하 구조물은 주변이 지반에 의해 둘러싸여 있기 때문에 구조물에서 주변 지반으로 빠져나가는 에너지의 감쇠가 상당히 크다는 점이다. 이는 지하구조물이 주변 지반에 대해 상대적인 진동을 일으켰다 하더라도 시간이 지남에 따라 급속히 진폭이 축소된다는 것을 의미한다.

따라서, 일반 지하 구조물에서는 원지반에 대해 상대적인 진동을 일으키기도 어렵거니와, 일단 발생한 진동도 짧은 시간 내에 소멸되는 경향이 지배적이다. 또한 지하 구조물은 지진 시 지반에 변위나 변형이 생기면 그것이 직접적으로 지하 구조물에 영향을 미치게 된다. 따라서 지상 구조물에서는 지진 시 구조물에 발생하는 관성력이 중요하지만 지하 구조물에서는 지진 시 지반에 발생하는 변위 및 변형이 중요하다.

3. 진동대 시험

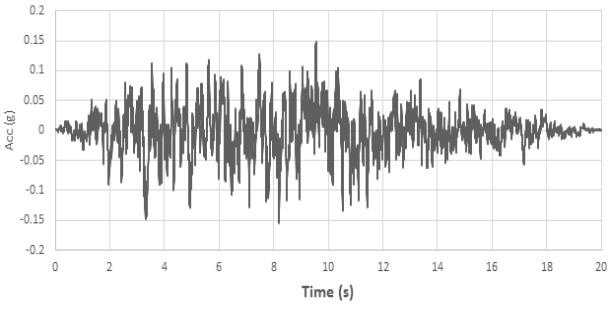
3.1 시험개요

터널의 지진 시 동적거동을 파악하기 위한 실내 모형 진동대시험은 기존에 수행된 사례(Kwak & Park, 2015)는 있으나, 기존 연구는 주로 해석적 방법을 검증하거나 입력지진파 특성 또는 주위 지반의 특성이 터널의 동적거동에 미치는 영향을 파악하는 것에 그치고 있다. 본 연구와 같이 복층터널의 중간슬래브의 지진 시 동적거동에 대한 연구사례는 많지 않다.

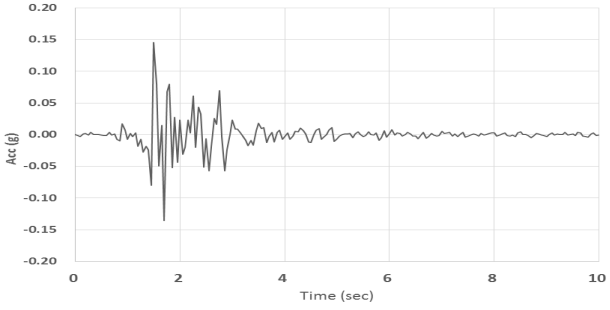
본 연구에서는 실물 복층 터널을 100:1로 축소모형 제작하여 실험하였으며, 상사법칙(Iai, 1989)에 영향을 상대적으로 적게 받는 지진 응답 가속도를 측정함으로써 계측의 신뢰성을 확보하였다.

3.2 지진파

본 시험에서 사용된 지진파는 2가지이며 장, 단주기 특성을 모두 적용한 인공지진파와 2016년 9월 12일 경주에서 발생한 실지진파(경주지진파)를 이용하였다. 경주지진파는 지진 지속시간이 약 5~7초로 매우 짧으며 단주기 특성을 가진



(a) Artificial earthquake



(b) Gyeongu earthquake

Fig. 1. Applied seismic time history

다. Fig. 1은 본 시험에 사용된 지진파 시간이력을 나타낸다.

3.3 시험 조건

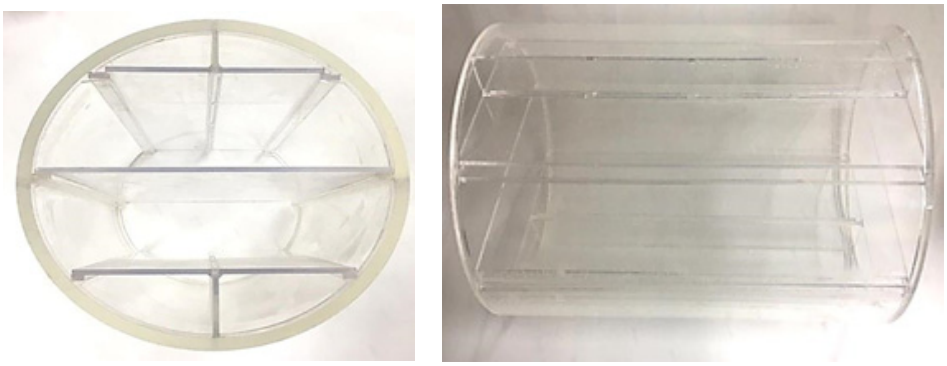
본 연구에서는 진동대 시험 수행을 위하여 한서대학교 내 모형 진동대 시험기를 이용하여 2가지 지진파를 횡 방향 가진시켜 시험을 수행하였다. 최대 가속도는 지진구역 1구역 내의 붕괴방지 내진 1등급에 해당하는 0.154g를 적용하였고 구체적인 시험 조건은 Table 1과 같다.

복층터널 구조물은 아크릴 판넬로 제작하였고 모형의 제원 및 제작 결과는 다음 Fig. 2와 같다. 실제 터널을 1/100 스케일로 축소하였으며 지반은 사질토(단위중량 15.5kN/m^3)를 상대밀도 80%로 밀실하게 다져서 형성하였으며 2차례에 걸친 강사법으로 지반 모형을 구축하였다. 복층터널의 응답가속도 측정을 위하여 가속도계를 부착하였으며 위치

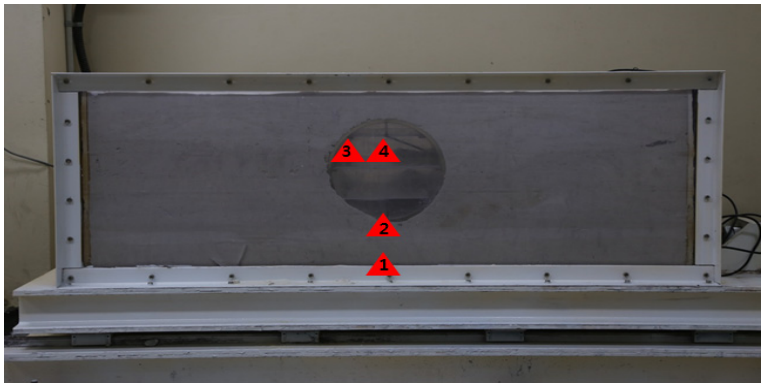
Table 1. Cases of shaking table test

Case	Seismic wave	Supporting condition of middle slab
Case-1	Artificial	Fix at both brackets (Fix&Fix)
		Free and fix at each bracket (Free&Fix)
		Free at both brackets (Free&Free)
Case-2	Gyeongju	Fix at both brackets (Fix&Fix)
		Free and fix at each bracket (Free&Fix)
		Free at both brackets (Free&Free)

(a) Small scale shaking table equipment



(b) Model of double-deck tunnel



Point 1 Bottom of clipbox

Point 2 Tunnel invert

Point 3 Connection point of middle slab

Point 4 Center of middle slab

(c) Locations of accelerometers

Fig. 2. Shaking table and tunnel model

는 Fig. 2(c)와 같다. 진동대 Box의 크기는 가로 50cm, 세로 150cm, 높이 50cm이다.

4. 진동대 시험 결과

Table 1에 나타낸 것과 같이 case 별로 각각 시험을 수행하여 가속도계 설치 지점별 가속도 응답을 측정하였다. 본 연구의 목적상 3번 및 4번 지점에서의 가속도 응답이 중요하므로 각 시험 조건별로 3번 및 4번 지점에서의 최대가속도 응답치를 파악하였다.

4.1 인공지진파 적용 시

중간슬래브의 양쪽을 고정단으로 하여 시험을 실시한 case-1의 경우, 3번 가속도계에서 최대 0.0893g, 4번 가속도계에서 최대 0.0692g가 측정되었다. 또한 중간슬래브의 한쪽을 탄성지지, 다른 쪽을 고정단으로 하여 시험을 실시한 case-2의 경우, 3번 가속도계에서 최대 0.0642g, 4번 가속도계에서 최대 0.0623g가 측정되었다. 중간슬래브의 양쪽을 탄성지지로 하여 시험을 실시한 case-3의 경우, 3번 가속도계에서 최대 0.0557g, 4번 가속도계에서 최대 0.0512g가 측정되었다. 3번 및 4번 지점에서의 가속도 시간이력 측정 결과는 다음 Fig. 3과 같다.

4.2 경주지진파 적용 시

중간슬래브의 양쪽을 고정단으로 하여 시험을 실시한 case-1의 경우, 3번 가속도계에서 최대 0.1092g, 4번 가속도계에서 최대 0.0962g가 측정되었다. 또한 중간슬래브의 한쪽을 탄성지지, 다른 쪽을 고정단으로 하여 시험을 실시한 case-2의 경우, 3번 가속도계에서 최대 0.0714g, 4번 가속도계에

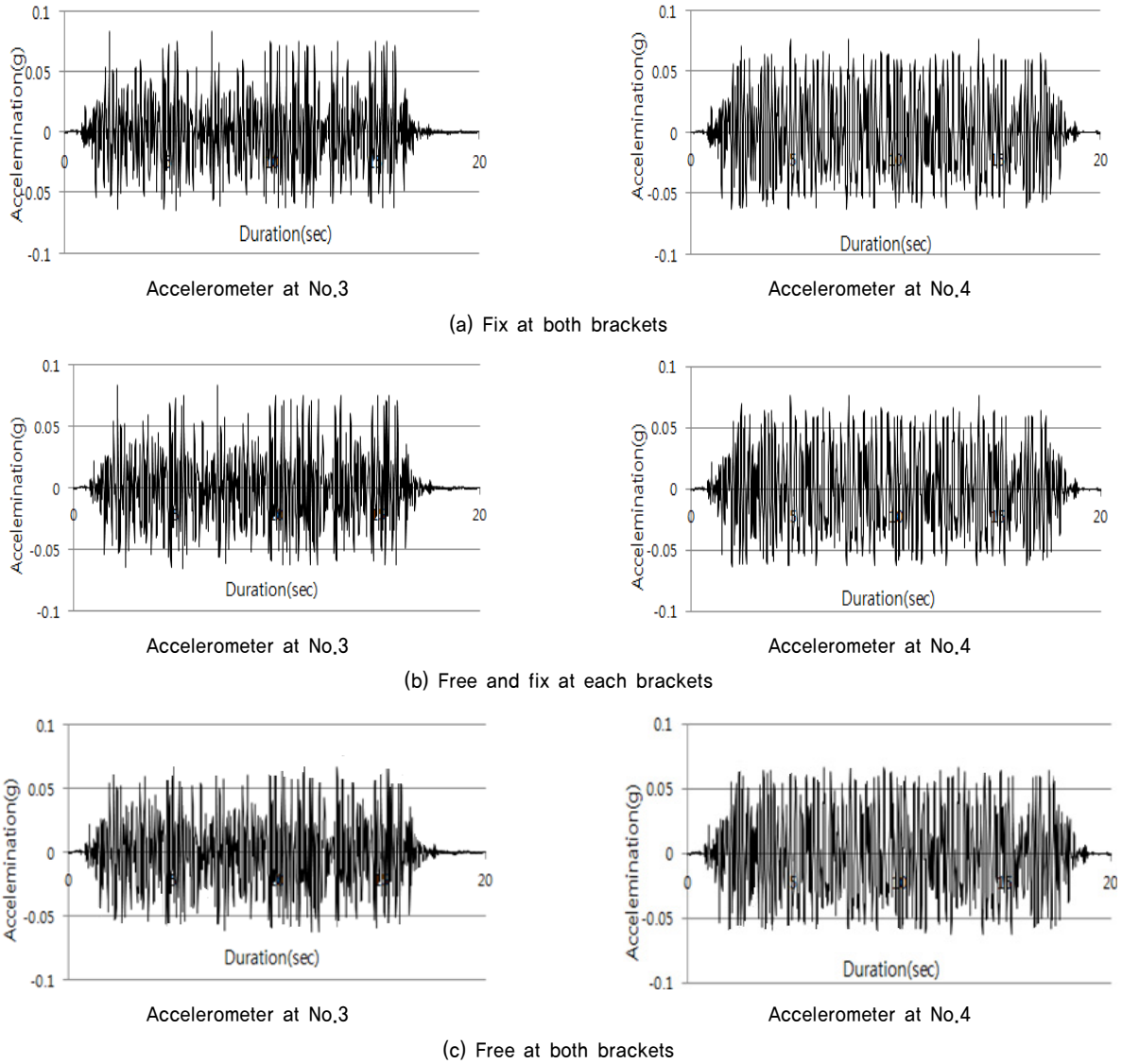


Fig. 3. Response acceleration time history for Artificial earthquake

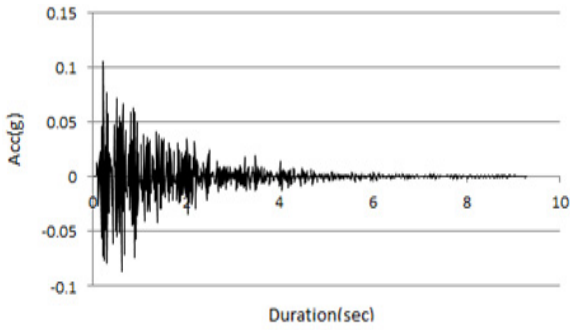
서 최대 0.0567g가 측정되었다. 중간슬래브의 양쪽을 탄성지지로 하여 시험을 실시한 case-3의 경우, 3번 가속도계에서 최대 0.0523g, 4번 가속도계에서 최대 0.0382g가 측정되었다. 3번 및 4번 지점에서의 가속도 시간이력 측정 결과는 다음 Fig. 4와 같다.

전체 최대가속도 응답 측정 결과를 종합하면 Table 2와 같다.

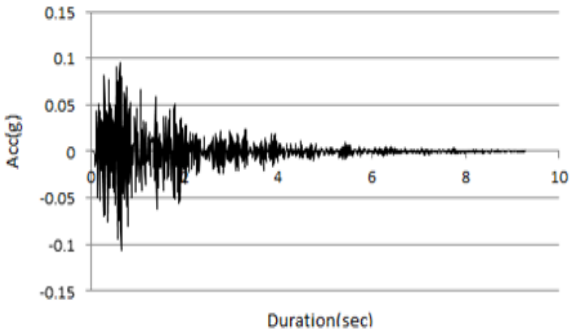
중간슬래브의 가속도 최대응답값을 다음 Fig. 5에서와 같이 비교하였다. 인공지진파 적용 시 최대 감소폭은 28%이고 경주지진파 적용 시 최대 감소폭은 34%로 나타나 인공지진파에 비해 경주지진파 적용 시 가속도 응답이 6% 더 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 지속시간이 짧고 가속도 값이 단주기 구간에 집중된 경주 지진파의 특성 때문에 나타난 결과라 판단된다.

Table 2. Peak response acceleration

Seismic wave	Bracket-condition	Peak response acceleration (g)	
		Point 3	Point 4
Artificial	Fix&Fix	0.0893	0.0692
	Free&Fix	0.0642	0.0623
	Free&Free	0.0557	0.0512
Gyeongju	Fix&Fix	0.1092	0.0962
	Free&Fix	0.0714	0.0567
	Free&Free	0.0523	0.0382

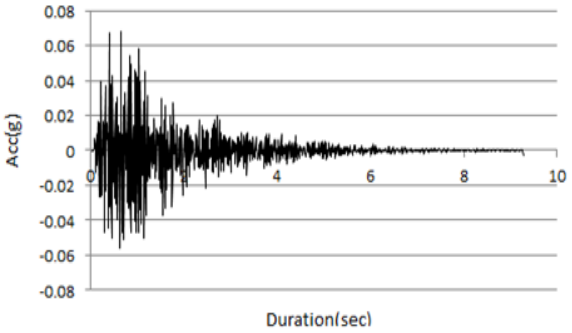


Accelerometer at No.3

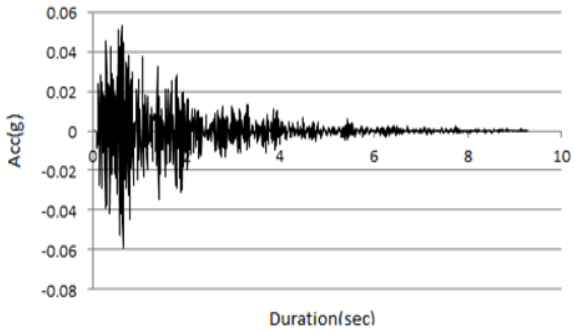


Accelerometer at No.4

(a) Fix at both brackets

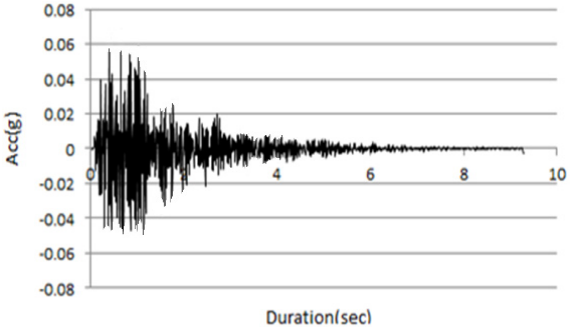


Accelerometer at No.3

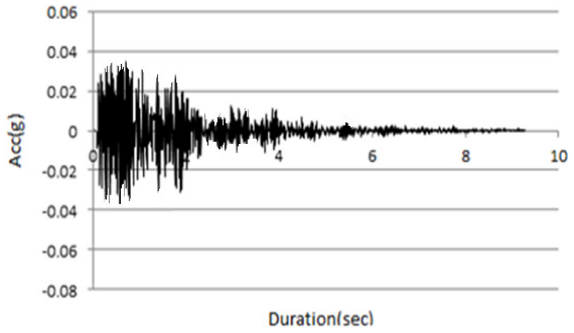


Accelerometer at No.4

(b) Free and fix at each brackets



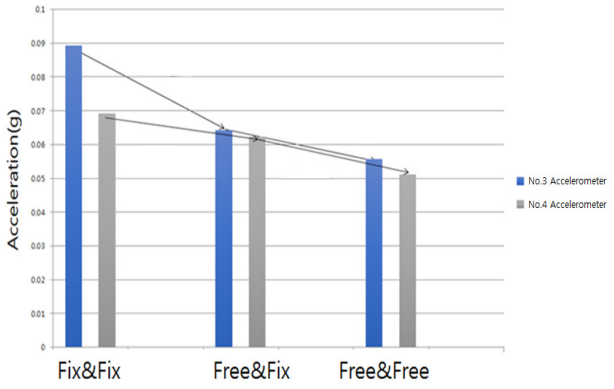
Accelerometer at No.3



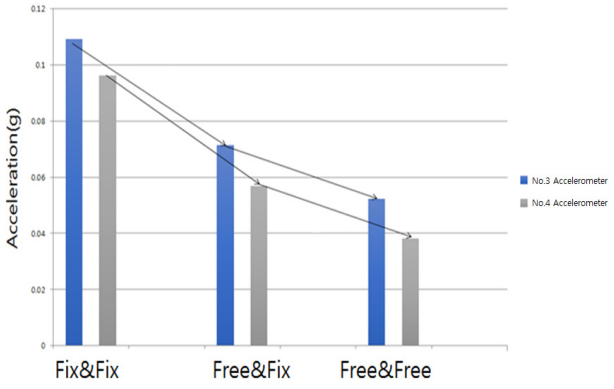
Accelerometer at No.4

(c) Free at both brackets

Fig. 4. Response acceleration time history for Gyeongju earthquake



(a) Artificial earthquake



(b) Gyeongju earthquake

Fig. 5. Peak response acceleration on middle slab in double-deck tunnel

5. 결 론

본 연구에서는 지진 시 중간슬래브에 발생하는 가속도 저감을 위하여 중간슬래브 양단에서의 최적 고정방법을 도출하기 위하여 모형 진동대 시험을 수행하여 그 결과를 분석하였고, 결론은 다음과 같다.

입력 지진파인 인공지진파와 경주 지진파는 최대치를 국내 지진구역 1구역의 붕괴방지 내진 1등급 설계기준가속도인 0.154g로 보정하여 적용하였다. 인공지진파 적용 시, 양단고정, 한쪽을 탄성지지로 한 중간슬래브 모형, 양쪽을 탄성지지로 모델링 한 순서대로 지진파의 감쇠효과가 커짐을 확인할 수 있다. 양단고정단 대비 양쪽 탄성지지단일 경우 최대 감쇠량은 41%(좌측 고정단 지지대 가속도계)로 나타났다. 또한, 경주지진파 적용 시에도 이와 유사하게 양단고정, 한쪽을 탄성지지로 한 중간슬래브 모형, 양쪽을 탄성지지로 시험한 순서대로 지진파 감쇠효과가 커지는 것을 확인하였으며, 양단고정단 대비 양쪽 탄성지지단일 경우 최대 감쇠량은 73%(중간슬래부 중앙 가속도계)로 나타났다. 이는 지속시간이 짧고 가속도 값이 단주기 구간에 집중된 경주 지진파의 특성 때문에 나타난 결과라 판단된다. 따라서 복층터널 중간슬래브의 고정 방법으로는 양쪽을 모두 탄성지지로 적용하는 것이 지진 시 중간슬래브에 발생하는 가속도 응답의 크기를 감소시킬 수 있으므로 내진성능 상 유리하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 '대심도 복층터널 설계 및 시공 기술 개발(14SCIP-B088624-01)' 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Iai, S. (1989), Similitude for shaking-table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. Soils Found, Vol. 29, No.1, pp. 105~118.
2. Jang, D. I., Kwak, C. W. and Park I. J. (2016), The characteristics of dynamic behavior on middle slab in double-deck tunnel, J. of Korean Tunnelling & Undergr. Sp. Assoc., Vol. 18, No. 2, pp. 213~220.
3. Kwak, C. W. and Park, I. J. (2015), Seismic behaviors of twin tunnel with flexible segment, J. of Korean Tunnelling & Undergr. Sp. Assoc., Vol. 17, No. 6, pp. 695~702.
4. Kwon, S. H., Kim, J. H. and Chung, G. H. (2015), Proposal of design criteria on multi-functional tunnel for the urban traffic tunnel to flooding bypass, J. of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 5, pp. 3518~3524 (in Korean).
5. Lee, D. S., Kim, B. Y., Bae, C. G. and Hur, J. H. (2017), The experimental study on transverse field joint method of precast road deck slab of double deck tunnel in great depth, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 29, No. 1, pp. 23~32 (in Korean).
6. Lee, H. S. and Moon, H. K. (2016a), Behavior of the segment lining due to the middle slab and the lateral pressure coefficient in duplex tunnel, Tunnel and Underground Space, Vol. 26, No. 3, pp. 192~200 (in Korean).
7. Lee, H. S. and Moon, H. K. (2016b), Numerical study on the connection type of inner-slab in double deck tunnel, J. of Korean Tunnelling & Undergr. Sp. Assoc., Vol. 18, No. 5, pp. 441~451 (in Korean).
8. Moon, H. K., Kil, K. O., Song, I. C. and Lee, H. Y. (2016), A Study on site selection criteria and discharge capability evaluation for the multi-purpose use of a double-deck tunnel in a great depth, J. of Korean Tunnelling & Undergr. Sp. Assoc., Vol. 18, No. 3, pp. 283~290 (in Korean).
9. Park, H. B., Cho, Y. K., Lee, Y. H. and Kim, S. M. (2016), Numerical analysis of middle slab behavior in double-deck tunnel considering emergency evacuation space, Proceeding of the 2016 Spring Conference in Korea Concrete Institute, pp. 43~44 (in Korean).