

실대형 진동대 시험을 통한 복층터널 중간 슬래브 진동 감쇠 고무받침 내진성능 평가

장동인¹ · 박인준^{2*}

¹학생회원, 한서대학교 토목공학과 박사과정

²정회원, 한서대학교 토목공학과 정교수

Seismic performance evaluation of middle-slab vibration damping rubber bearings in multi-layer tunnel through full-scale shaking table

Dongin Jang¹ · Innjoon Park^{2*}

¹Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Hanseo University

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanseo University

*Corresponding Author : Innjoon Park, geotech@hanseo.ac.kr

Abstract

Traffic jam and congestion in urban areas has caused the need to improve the utility of underground space. In response, research on underground structures is increasingly being conducted. Notably, a double-deck tunnel is one of the most widely used of all those underground structures. This double-deck tunnel is separated by the middle slab into the upper and lower roadways. Both vehicle load and earthquake load cause the middle slab to exhibit dynamic behavior. Earthquake-related response characteristics, in particular, are highly complex and difficult to interpret in a theoretical context, and thus experimental research is required. The aim of the present study is to assess the stability of a double-deck tunnel's middle slab of the Collapse Prevention Level and Seismic Category 1 with regard to the presence of vibration-damping Rubber Bearings. In vibration table tests, the ratio of similitude was set to 1/4. Linings and vibrating platforms were fixed during scaled model tests to represent the integrated behavior of the ground and the applied models. In doing so, it was possible to minimize relative behavior. The standard TBM cross-section for the virtual double-deck tunnel was selected as a test subject. The level of ground motion exerted on the bedrock was set to 0.154 g (artificial seismic wave, Collapse Prevention Level and Seismic Category 1). A seismic wave with the maximum acceleration of 0.154 g was applied to the vibration table input (bedrock) to analyze resultant amplification in the models. As a result, the seismic stability of the middle slab was evaluated and analyzed with respect to the presence of vibration-damping rubber bearings. It was confirmed that the presence of vibration-damping rubber bearings improved its earthquake acceleration damping performance by up to 40%.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
22(4)337-346(2020)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.4.337>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received March 10, 2020

Revised June 26, 2020

Accepted July 6, 2020



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: Double deck tunnel, Middle slab, Superiority, Vibration damping rubber feet

초 록

도심권의 교통 집중과 정체로 인하여 지하공간 활용성이 필요함에 따라 지하구조물에 대한 연구가 늘어나고 있다. 그 중 복층터널은 지하구조물을 대표 할 수 있다. 복층터널은 중간슬래브를 기준으로 상, 하부 차도를 구분하여 운영하고 있다. 중간슬래브는 차량의 하중 및 지진하중에 의하여 동적거동을 한다. 특히 지진의 의한 응답특성은 하중의 크기 및 작용 메커니즘이 매우 복잡하고 이론적 접근이 어려워 실험적 연구가 필요하다. 본 연구에서는 붕괴방지 내진 1등급의 복층터널 중간슬래브에 진동 감쇠 고무받침 유무에 따른 안정성 평가를 실시하는데 목적을 두고 있다. 본 진동대 실험에서는 상사율 1/4을 적용하였으며, 모형실험에서 지반과 모형의 일체거동을 묘사하기 위하여 라이닝과 진동대판을 고정시켰으며 이를 통해서 상대거동을 최소화 하였다. 실험대상은 가상복층터널 TBM 표준단면으로 정했다. 기반암에 가해지는 지반운동 수준을 0.154 g (붕괴방지 수준 내진 1등급 인공지진파)이며 이 가속도를 최대로 하는 지진파를 진동대 입력(기반암)에 작용시켜 모형에 증폭현상을 분석하고 진동 감쇠 고무받침 유무에 따른 중간슬래브의 내진 안정성에 대해 평가 분석 하였다. 그 결과, 지진 감쇠 고무받침 유무에 따라서 지진 가속도 감쇠 효과가 최대 40% 이상 있음을 알 수 있었다.

주요어: 복층터널, 중간슬래브, 상사율, 진동 감쇠 고무받침

1. 서론

최근에는 도심지 홍수저감과 교통량 분담 등을 위한 다목적 터널에 대한 연구(Kwon et al., 2015), 수로터널과 같은 다목적 비배수형 터널에서의 부력 안정성 검토(Lee and Moon, 2016) 등의 연구가 수행되고 있다. 복층터널은 하나의 단면으로 교통과 라이프 라인을 동시에 연결 및 소통할 수 있는 구조물이다(Jang et al., 2016a). 복층터널의 계획·설계기술은 국외에선 성장기에 진입하고 있는 단계이며 영국, 미국, 프랑스, 일본 등 기술선진국에서 독점 보유하고 있는 기술이므로 연구개발을 통한 기술력 확보가 시급한 상황이다. 최근엔 복층터널 개발 및 시공에 대한 계획이 발표되고 있으나, 아직까지는 국내외도 시공 사례가 많지 않아 기초 연구가 필요한 상황이다(Jang et al., 2017). 국내 상황에 적합한 대심도 복층터널을 개발하고, 이를 체계화시킴으로써 세계시장에 진출 기반을 마련하고, 이를 위해 기존 터널과 다른 복층터널만의 설계 및 시공기술 및 다목적 활용 기술이 필요하다. 국외의 경우에는 지상 공간 친환경 개발, 도심지의 교통문제 해결 및 홍수 및 재해 대응을 위해 기존 도로를 복층터널로 개량하거나 신설하는 추세도 점차 증가하고 있다. 현재 프랑스 파리, 일본 동경, 스페인 마드리드, 미국 보스턴, 말레이시아 등 여러 나라에서 복층터널을 운영 중이며, 시공 중인 복층터널도 다수 존재한다. 이에 비해 국내의 지하공간 분야 연구 개발은 설계 및 해석에 집중 되어 있으며 선진국과 비교할 때 미래지향적 신기술이나 운영기술 등에 대한 기술은 아직 미흡한 실정이다. 복층터널의 경우 특성상 단면의 크기가 커지게 되고, 지진 발생 시 관성력 및 외력도 커지게 된다. 2016년 9월에 일어난 경주 지진 및 가장 최근에 일어난 포항 지진까지, 최근 우리나라 지진의 발생 증가로 인하여 복층터널의 지진 시 동적 거동 파악이 중요해졌으며, 복층터널 내 구조물 중 가장 중

요한 핵심은 운전자 및 이용자의 안전과 직결된 중간슬래브의 거동이다(Jang et al., 2016b). 중간슬래브의 경우 지진 시 인명피해가 가장 많이 발생할 수 있는 지점이고, 또한 복층터널 내에 가장 중요한 지점이므로 동적거동을 파악해야 하는 가장 중요한 부분이라 판단된다.

최근에는 복층터널에서 중간슬래브와 측압계수에 따른 세그먼트 라이닝의 거동분석(Lee and Moon, 2016), 대심도 복층터널의 다목적 활용을 위한 입지선정 및 통수성능 평가(Moon et al., 2016) 등의 연구가 수행되고 있으며, 또한 복층터널 내 중간슬래브는 구조상 교량과 다르게 양단에서 지지되는 형태이므로 이러한 조건을 가지고 있는 복층터널 중간슬래브 지지 형식에 따른 수치 해석적 연구(Seok et al., 2015)도 진행되었다. 본 연구에서는 붕괴방지 내진 1등급의 복층터널 중간슬래브에 진동 감쇠 고무받침 유무에 따른 안정성 평가를 실시하는데 목적을 두고 있다. 본 진동대 실험에서는 상사율 1/4을 적용하였으며, 모형실험에서 지반과 모형의 일체 거동을 묘사하기 위하여 라이닝과 진동대판을 고정시켰으며 이를 통해서 상대거동을 최소화 하였다. 실험대상은 가상복층터널 TBM 표준단면으로 정했다. 기반암에 가해지는 지반운동 수준을 0.154 g (붕괴방지 수준 내진 1등급 인공지진파)이며 이 가속도를 최대로 하는 지진파를 진동대 입력(기반암)에 작용시켜 모형에 증폭현상을 분석하고 진동 감쇠 고무받침 유무에 따른 중간슬래브의 내진 안정성에 대해 평가분석 하였다.

2. 진동대 시험

2.1 진동대시험의 상사법칙

Iai (1989)는 지반-구조물-유체시스템을 지배하는 기본방정식(유체와 흙입자 사이의 평행방정식, 질량평형식, 그리고 구성방정식 등)으로부터 이 시스템에 대한 상사법칙을 연구하였다. 이러한 상사법칙에 대한 연구에 의해 지반-구조물-유체 상호작용 연구에 있어서 진동대 모형실험이 많은 주목을 받게 되었다.

본 연구에서는 Iai (1989)이 제안한 상사법칙을 적용한 진동대 모형실험을 실시하여 지반-구조물-유체 상호작용을 파악하였다. 또한 본 연구에서는 전단파 속도를 측정할 수 없기 때문에 다음 Table 1의 Type II 모델을 적용하였다.

Table 1. Size relationship between the real object and the model for vibration table model tests

Physical parameter	Similitude ratio (real object/model)			
	Generalized similitude ratio	Actual similitude ratio		
		Type I	Type II	Type III
		$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = 1, \lambda_\rho = 1$
Length	λ	λ	λ	λ
Acceleration	1	1	1	1
Displacement	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
Pore-water pressure	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ

2.2 모델링

Fig. 1은 설계표준단면과 모형 제작도면이다. 원형 세그먼트 전체를 진동대 시험기에 올려 실험 시 붕괴의 위험이 있어 반원모양으로 설계하였다. 중간슬래브의 경우 상사율을 적용하여 제작 시 두께가 얇아지므로 파손의 위험이 있어 안전에 유의하여 제작하였다. 중간슬래브의 동적거동을 중점적으로 보기위해 모델을 제작했으며, 실내 시험의 여건상 모형이 붕괴될 수 있어 반원의 모양으로 제작하였다.

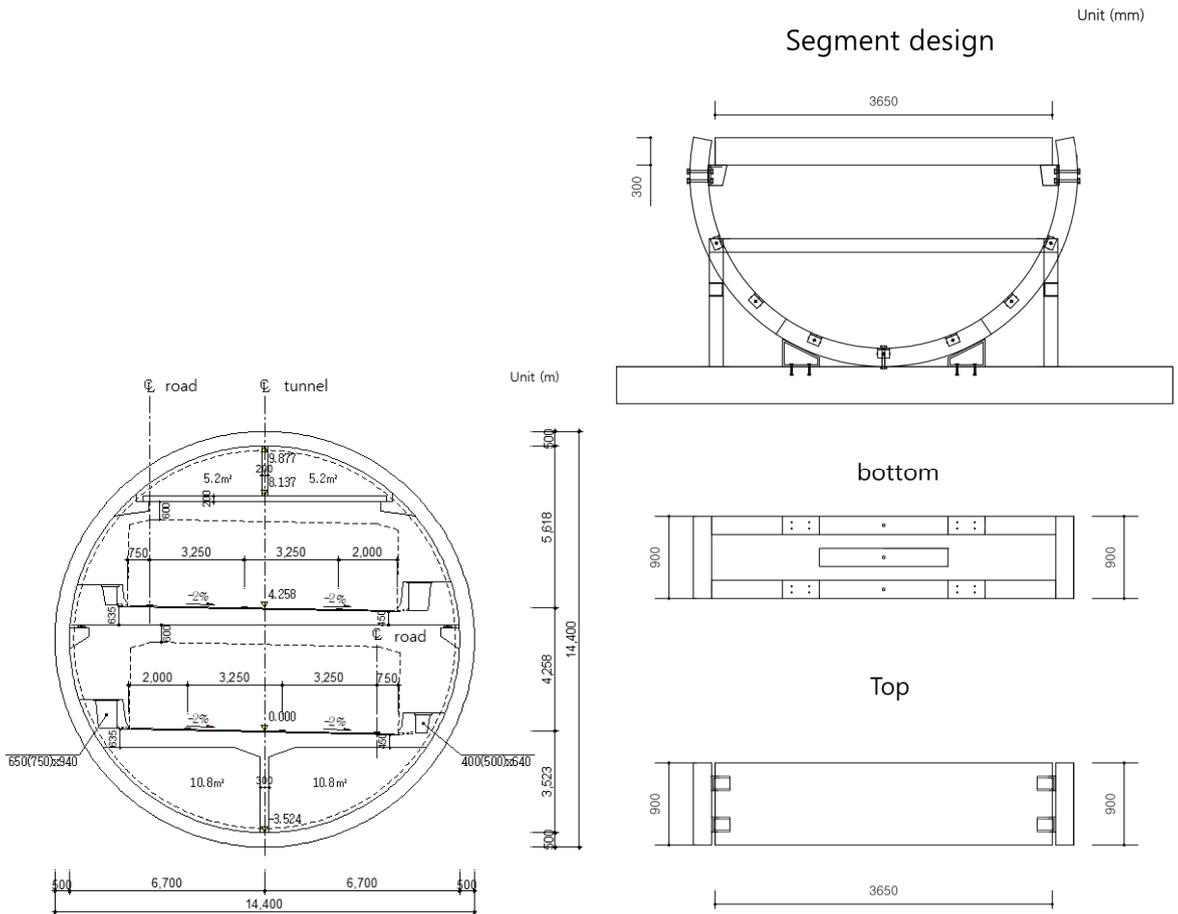


Fig. 1. Design standard cross-section and model design cross-section

2.3 지진파

다양한 주기특성을 가진 지진파를 모사하기 위하여 표준응답스펙트럼에 부합하는 인공합성 지진기록을 추가적으로 생성하여 본 실험에 사용하였다. Fig. 2는 지속시간 25초이며 붕괴방지내진 1등급(0.154 g) 인공지진파이다.

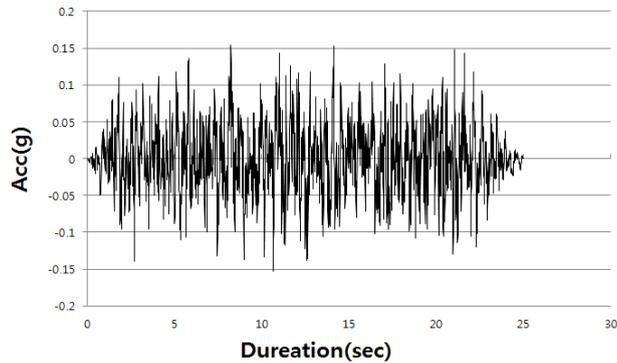


Fig. 2. Artificial seismic wave (0.154 g, Collapse Prevention Level and Seismic Category)

2.4 실험조건

진동대 바닥면에 원형 라이닝의 움직임을 지반과 일체화하기 위한 지그를 고정시킨 후 하부 세그먼트를 지그 바닥면에 고정시킨다. 그리고 측면 세그먼트에는 중간슬래브를 받쳐줄 수 있는 브래킷을 결합하고, 측면 세그먼트를 바닥 세그먼트와 지그와 함께 고정시킨다. 반원 형태의 모양을 갖춘 라이닝에 중간슬래브를 진동대 바닥에서 붕괴방지 1등급(0.154 g)의 인공지진파를 x축 방향으로 가진시킨다. Fig. 3은 터널의 모형과 계측기 부착위치를 나타낸 것이다.

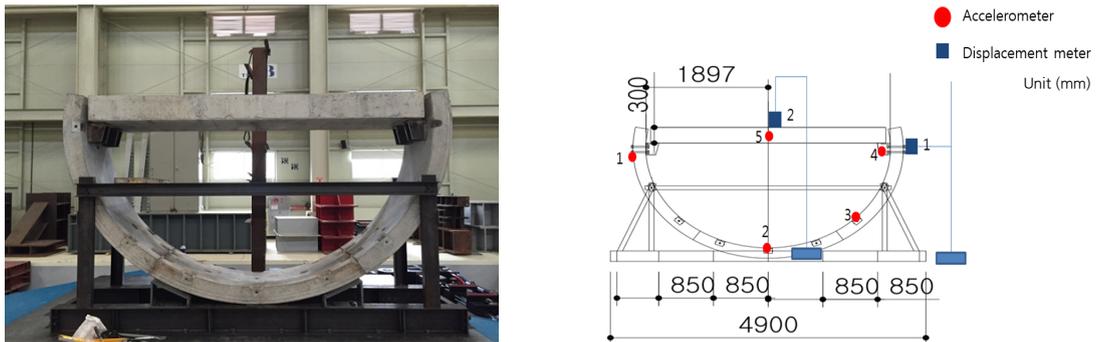


Fig. 3. Segment location and instrumentation location

3. 시험결과

지진 감쇠 고무받침 유무에 따른 각 계측기 별 데이터를 정리하였다. Fig. 4에서 라이닝 및 지지대(브래킷)에 설치된 가속도계 1번부터 4번까지의 결과를 보면 입력가속도가 지진 감쇠 고무받침 유무에 상관없이 감쇠효과가 없음을 알 수 있다. 이는 지진 감쇠 고무받침 등의 면진장치를 통하지 않고 입력지진파가 직접 전달되고 있는 경우에 해당됨으로써, 입력지진파가 구조체인 라이닝에서 어떤 감쇠 없이 작용하고 있음을 알 수 있다. 이를 통해서

암반 구간 내(입력지진파가 증폭되지 않는 구간) 설치된 라이닝 구조체의 내진 설계의 필요성을 간접적으로 확인할 수 있었다. 복층 터널 중간 슬래브의 중심선에 설치한 가속도계 5번 시험 데이터 분석 결과, 지진 감쇠 고무받침 유무에 따라서 지진 가속도 감쇠 효과가 최대 40% 이상 있음을 알 수 있었다. 이는 입력지진파가 세그먼트 라이닝을 타고 전달되다가 상대변위를 허용하는 지진 감쇠 고무받침을 통과하면서 지진 에너지가 상당부분 소산되고 있음을 알 수 있다.

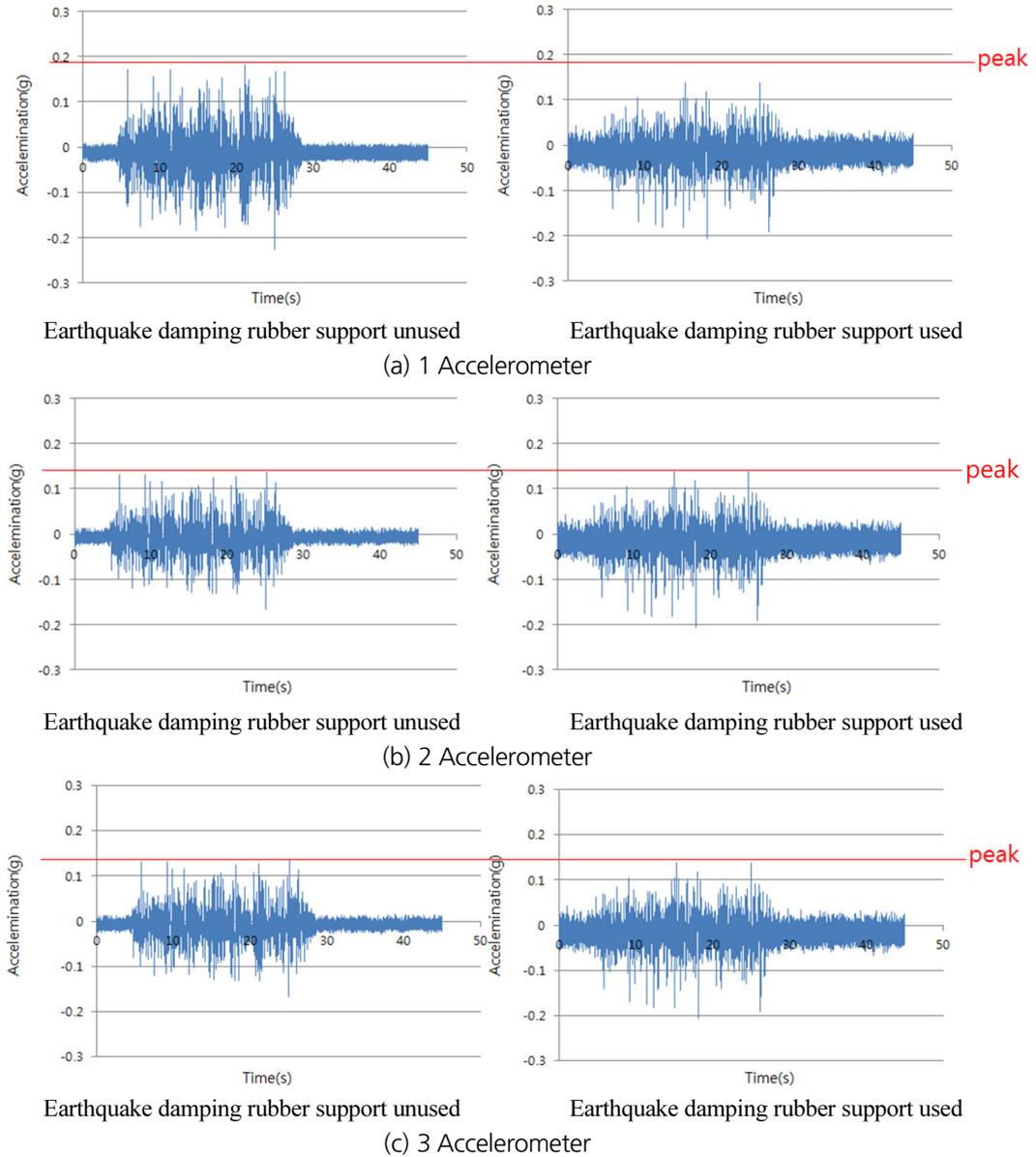


Fig. 4. Result data by measuring instrument

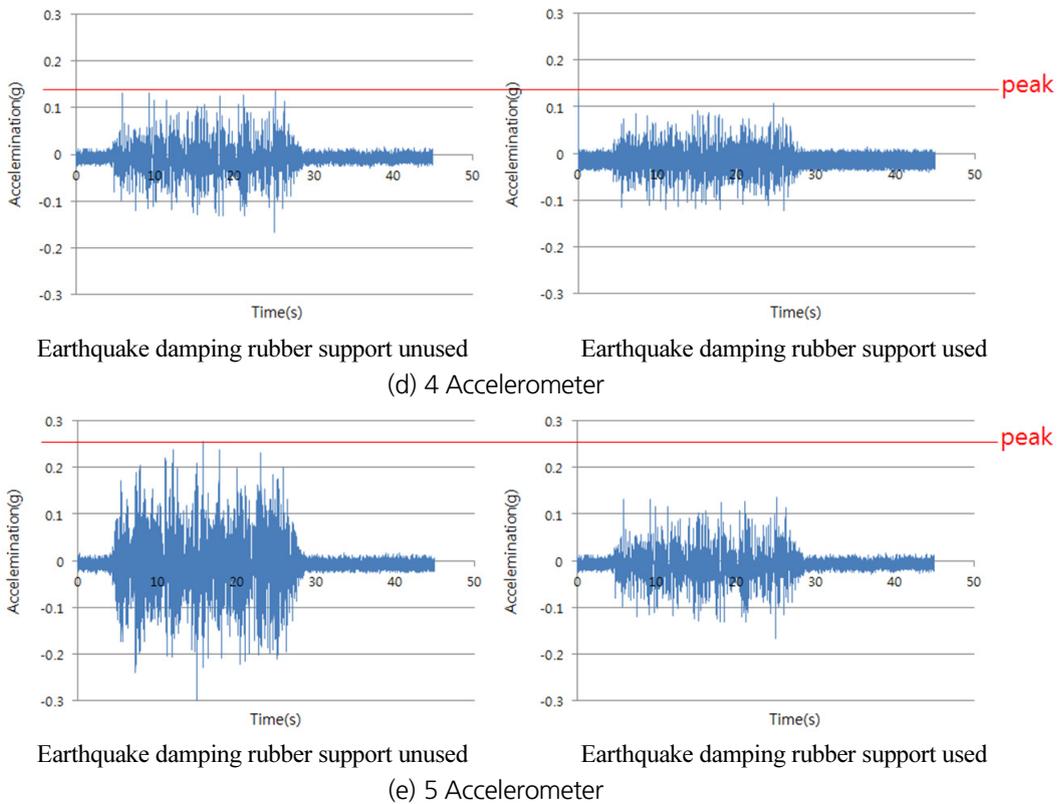


Fig. 4. Result data by measuring instrument (continued)

4. 수치해석을 통한 실대형진동대 시험 검증

지진 감쇠 고무받침 유무에 따른 복층터널의 동적 거동특성을 수치해석(flac 2D)적으로 검토하였고 이를 통해서 2장의 실대형 진동대 시험의 결과를 검증하였다.

4.1 복층터널 2차원 내진해석

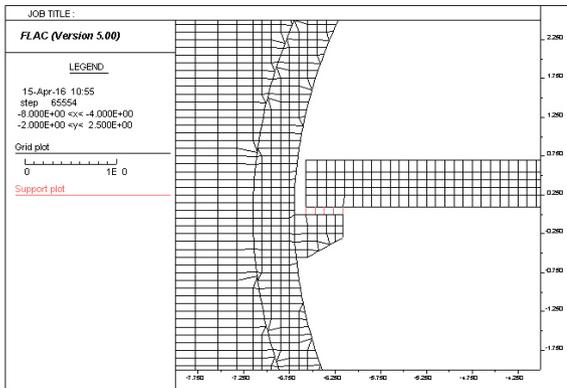
지진하중 재하시 2차원 수치해석에 의하여 복층터널의 동적 응답특성을 검토하며 중간슬래브의 지진 감쇠 고무받침을 적용한 것과 적용하지 않은 것을 나누어 거동을 비교 분석하였다. 본 해석에서 Case-1은 지진 감쇠 고무받침을 반영한 경우이고, Case-2는 지진 감쇠 고무받침을 배제하고 해석한 경우이다. 이는 2장의 진동대 시험 결과를 수치해석 적으로 검증하고자 하는 목적이며, 부가적으로 실제 지반 내에 시공된 복층터널의 내진성능 향상을 간접적으로 분석하고자 했다. Table 2는 해석 시 사용한 지반 물성치이다.

Table 2. Soil properties

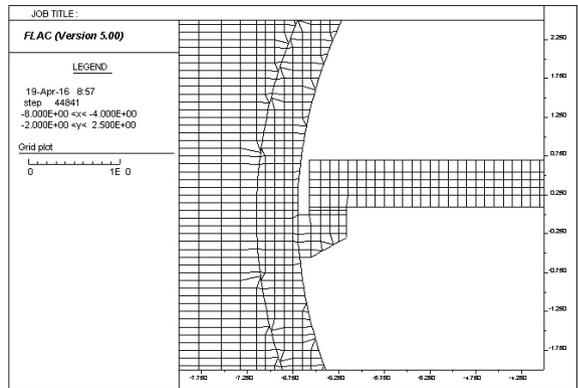
Division	Unit weight (kN/m ³)	Adhesiveness (kPa)	Internal friction angle (°)	Deformation coefficient (E, MPa)	Poisson's ratio (ν)
Ground	21.0	100	33.0	500.0	0.3

4.2 모델링

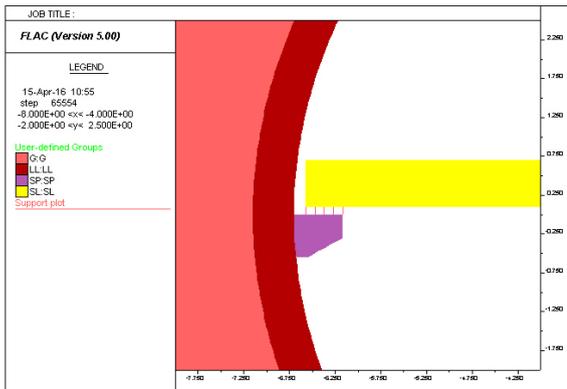
해석 모델링은 진동 감쇠 고무받침이 있는 것과 없는 것의 2가지로 모델링 하였다. 지진 감쇠 고무받침은 설치 지점 양측의 해석 요소망을 완전히 분리하고 구조요소(structural element) 중 Support element를 적용하여 모사 하였다. Fig. 5는 해석 요소망 및 해석 결과 추출지점을 그림으로 나타내고 있다. Case-1은 지진 감쇠 고무받침을 반영한 경우이고, Case-2는 지진 감쇠 고무받침을 배제하고 해석한 경우이다.



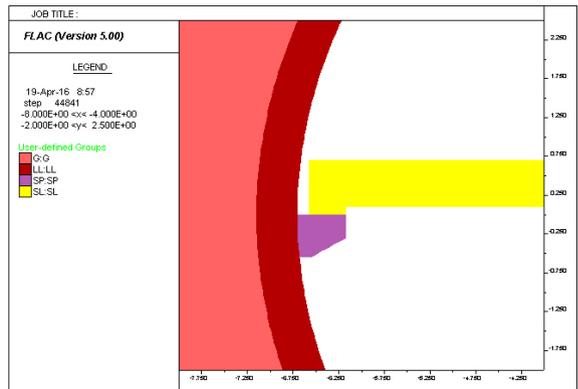
(a) Analysis mesh (middle slab-Case-1)



(b) Analysis mesh (middle slab -Case-2)



(c) Grouping (middle slab-Case-1)



(d) Grouping (middle slab-Case-2)

Fig. 5. Middle slab modeling

4.3 해석결과

1. 진동 감쇠 고무받침을 적용한 경우(Case-1) 중간슬래브 중앙부(지점-1)에서 중간슬래브 지지점(지점-2) 대비 약 29.1%의 가속도 저감 효과를 보임을 수치해석 적으로 확인하였다.
2. 진동 감쇠 고무받침을 적용하지 않은 경우(Case-2) 중간슬래브 중앙부(지점-1)에서 중간슬래브 지지점(지점-2) 대비 약 4%의 가속도 증폭현상을 보임을 수치해석 적으로 확인하였다.
3. 진동 감쇠 고무받침을 적용하지 않은 경우(Case-2), 터널 구조물 전체가 강체거동을 함으로써 세장비가 큰 중간슬래브에서 가속도 증폭현상이 발생하여 지진 시 취약할 것으로 판단된다.
4. 진동 감쇠 고무받침을 적용한 경우(Case-1), 중간슬래브의 가속도 응답이 Case-2 대비 29.7% 감소함으로써 지진 시 가속도 응답의 저감 효과를 수치해석 적으로 확인하였다.

Table 3은 실험결과를 나타낸 것이다.

Table 3. Experiment result

Case	Maximum acceleration (g)		
	Point 1	Point 2	Remarks
Case-1	0.111	0.156	Reduced by 29.1% at Point 1 compared to Point 2 Reduced by 29.7% at Point 1 compared to Case-2
Case-2	0.158	0.152	Increased by 3.9% at Point 1 compared to Point 2

5. 결론

진동 감쇠 고무받침의 유무에 따른 복층터널 내진성능 향상을 검증하기 위해서 진동대 실험 결과와 2차원 내진 해석 결과를 비교 검토하였다. 진동 감쇠 고무받침 적용 시 진동대 실험에서는 40%, 수치해석에서는 29.7% 이상의 최대 가속도 저감효과가 있는 것으로 파악되었다. 진동대 실험은 실내시험 여건상 완벽한 원형 구조를 만드는 제약이 있어 수치해석 결과와 차이가 있다. 최대 가속도의 감소 비율은 다소 차이가 있으나 진동 감쇠 고무받침 유무에 따른 가속도 감쇠 경향은 서로 일치하는 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서는 복층터널에서 핵심 구조체에 해당하는 중간슬래브 구조체의 요소기술 중 가장 핵심적인 접속부재의 형식과 종류를 확정하였고, 결정된 진동 감쇠 고무받침의 지진 저감효과를 실험적, 해석적으로 검증하여 연구의 타당성을 확보하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(18SCIP-B089409-05)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

저자 기여도

장동인은 실험설계, 실험데이터 수집 및 논문원고 작성을 하였고, 박인준은 연구 개념 및 논문 원고 검토를 하였다.

References

1. Iai, S. (1989), "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field", *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
2. Jang, D.I., Kim, J.I., Kwak, C.W., Park, I.J. (2017), "The characteristic of earthquake response on middle slab in double-deck tunnel under supporting conditions", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 5, pp. 55-60.
3. Jang, D.I., Kwak, C.W., Park I.J. (2016a), "Dynamic shear behavior of geosynthetic-soil interface considering thermalchemical factors", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 2, pp. 213-220.
4. Jang, D.I., Kwak, C.W., Park, I.J. (2016b), "The characteristics of dynamic behavior on middle slab in double-deck tunnel", *Proceedings of the KSCE 2016 Convention (2016 Conference and Civil Expo)*, Vol. 2016, No. 10, Jeju, pp. 188-189.
5. Kwon, S.H., Kim, J.H., Chung, G.H. (2015), "Proposal of design criteria on multi-functional tunnel for the urban traffic tunnel to flooding bypass", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 16, No. 5, pp. 3518-3524.
6. Lee, H.S., Moon, H.K. (2016), "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.
7. Moon, H.K., Kil, K.O., Song, I.C., 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", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 3, pp. 283-290.
8. Seok, J.H., Park, H.B., Cho, Y.K., Choi, L., Kim, S.M. (2015), "Numerical analysis of middle slab behavior in double-deck tunnel depending on support types", *Proceedings of the 2015 Korea Concrete Institute Fall Conference Symposium*, Vol. 27, No. 2, Gyeongju, pp. 241-242.