

Flexible Segment가 설치된 병렬터널의 지진시 동적거동

곽창원¹ · 박인준^{2*}

¹정회원, 한국지역난방기술

²정회원, 한서대학교

Seismic behaviors of twin tunnel with flexible segment

Chang-Won Kwak¹, Inn-Joon Park^{2*}

¹Korea District Heating Engineering Co.Ltd, 55 Bundang-ro, Seongnam-si 463-824

²Department of Civil Engineering, Hanseo University, 46 Hanseo 1-ro, Seosan-si, 356-706

ABSTRACT: Recently, the improvement of mechanical and theoretical issues in geo-centrifuge test enhances the applicability and accuracy of the test. Geo-centrifuge test is appropriate to simulate the behaviors of underground structures like tunnel, since tunnel interacts with the soil and/or rock around it and the test can embody the in-situ stress conditions effectively. In this study, the seismic behaviors of twin tunnel were analyzed based on geo-centrifuge test. Flexible segment to mitigate seismic acceleration were implemented in the model with thin and thick thickness. Based on the test results, it was found that flexible segment can decrease the peak acceleration generally, however, thin flexible segment was not able to reduce peak acceleration in short-period seismic wave. Thick flexible segment was more effective in case of high bedrock acceleration condition. Additionally, 3-dimensional numerical analysis was performed to verify the characteristics of seismic behavior and the effect of flexible segment. Consequently, the numerical analysis result showed good agreement with the test result.

Keywords: Geo-centrifuge, Twin tunnel, Flexible segment, Numerical analysis

초 록: 원심모형시험은 최근의 기계적, 이론적 발전에 따라 그 활용도와 정확성이 높아지고 있다. 원심모형시험은 원지반 응력을 효과적으로 재현할 수 있으므로 주위 지반 또는 암반과 상호작용을 하는 터널과 같은 지하구조물의 거동을 모사하기 적합하다. 본 연구에서는 병렬 터널의 지진시 동적 거동을 원심모형시험을 통하여 분석하였다. 터널 모델링시 지진에 의해 발생하는 최대 가속도 저감을 위하여 Flexible segment를 고려하였으며 Flexible segment의 두께가 얇은 경우와 두꺼운 경우를 각각 고려하였다. 시험 결과 Flexible segment의 지진시 터널 구조물에 발생하는 최대 가속도 저감 효과를 확인하였다. 그러나 Flexible segment가 얇은 경우 단주기파 적용시 최대가속도의 저감효과는 없었고, 두꺼운 경우 기반암 가속도가 클 경우 보다 효과적임을 확인하였다. 또한 동일 모델에 대하여 3차원 수치해석을 수행하여 지진시 거동을 파악한 결과, 시험 결과와 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다.

주요어: 원심모형시험, 병렬터널, Flexible segment, 수치해석

1. 서 론

작은 규모로 축소된 모형시험은 실험에 비하여 수행이 용이하고 경제적이므로 토목공학 전반에 걸쳐 활용도가 매우 높다. 그러나 지반공학 분야에서

는 상부 구조계와 달리 원지반 응력이 존재하므로 축소된 모형시험 수행시 현장 응력상태와 다른 조건에서 시험이 수행된다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 원심 가속도에 의해 축소모형의 원지반 응력 상태를 재현할 수 있는 원심모형시험이 고안되었으며, 최근의 급격한 기계공학 발전과 관련 이론들의 발전으로 인하여 지반공학 분야에서 원심모형시험의 활용도와 정확성이 지속적으로 증가하고 있다.

*Corresponding author: Inn-Joon Park

E-mail: geotech@hanseo.ac.kr

Received November 16, 2015; Revised November 23, 2015;

Accepted November 24, 2015

지중에 설치되는 토목 구조물 중 대표적인 것은 터널이다. 터널의 지진시 동적거동은 상부 구조물과는 현저히 다른 양상을 보이는데 이는 터널 구조물이 지반, 즉 흙 또는 암반과 같은 매질로 둘러싸여 있기 때문이다(Chen and Shen, 2014). 따라서 터널의 지진시 동적거동은 지진파의 전달과정과 측방유동, 사면 파괴, 전단파괴 등 지진시 발생하는 지반의 영구변형에 의존적인 경향을 보이며(Pitilakis et al., 2014) 매우 복잡한 응답거동을 나타낸다. 따라서 터널의 지진시 동적거동은 모형시험에 의하여 파악하는 것이 가장 합리적이며 원지반 응력상태를 충실하게 모사할 수 있다. 또한 주위 매질과의 상호작용을 관측할 수 있는 동적 원심모형시험이 적절할 것으로 판단되어 본 연구에 적용하였다.

원심모형시험을 통하여 터널의 동적거동을 파악하고자 하는 노력은 이전부터 지속되었다. Cilingir와 Madabhushi (2011)는 지진시 원형 터널의 심도에 따른 동적 응답을 원심모형시험과 유한요소해석을 통하여 분석하여 천이상태, 안정상태 및 잔류 상태의 3단계로 분류하였고 유연도가 큰 터널의 경우 대심도에서 단주기파 작용시 증폭이 커짐을 확인하였다. Yang 등(2013)은 터널 내 철도하중의 동적 영향을 다양한 경계조건을 고려하여 원심모형시험과 유한차분해석을 이용하여 분석하였다. 그 결과 바닥면 경계조건보다 벽체 경계조건이 터널의 동적 응답에 더 큰 영향을 미치며, 강성벽체 적용시 모델의 동적 응답이 현저히 증가되는 결과를 얻었다. Baziar 등(2014)은 매설 Box 터널에 대한 원심모형시험 및 유한차분해석을 수행하여 비교한 결과 잘 일치함을 확인하였다. 또한 수치해석 결과를 이용하여 Box 터널이 지표면 가속도에 미치는 변수에 대한 연구를 통하여 Box 터널 존재시 지표면의 장주기 응답을 증폭시키고 단주기 응답을 감소시키는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 지진시 가속도 증폭을 억제하기 위하여 Flexible segment를 설치한 터널에 대하여 Flexible segment의 가속도 저감효과를 분석하였다. Flexible

segment는 지진시 터널의 가속도 증폭을 억제하기 위하여 일정 길이마다 설치하는 불연속면으로서 최근 터키 유라시아 해저터널에 적용된 바 있다. 이를 위하여 동적 원심모형시험을 수행하고, 그 결과의 검증을 위하여 3차원 유한차분해석을 추가적으로 수행 후 결과를 비교하였다.

2. 동적 원심모형시험

터널의 동적거동을 파악하기 위한 동적 원심모형시험은 기존에 수행된 사례가 있다(Cilingir and Madabhushi, 2009; Lanzano, 2009). 그러나 기존 연구들은 해석적 방법을 검증하거나 입력지진파 특성이 터널의 동적거동에 미치는 영향을 파악하는 것에 그치고 있으며, 특히 본 연구와 같이 불연속면을 포함하는 터널에 대한 연구사례는 많지 않다.

2.1 시험조건

한국과학기술원 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형시험기 및 Electro-hydraulic servo type 진동대(shaking table)을 이용하여 최대가속도 20 g를 적용하여 시험을 수행하였다. 원심모형시험기의 최대 용량은 240 g-tons, 최대하중은 2,400 kg이며 최대 가속도는 유료하중(payload) 1,300 kg 적용시 130 g이다. 회전반경은 5 m, 플랫폼 크기는 1.2 m × 1.2 m × 1.2 m이다. 전기제어 방식의 진동대는 최대 유료하중 700 kg, 가용 하중 주파수 범위는 20~300 Hz이다. 최대 지진가속도는 하중재하시 20 g이며 하중부재시 40 g이다. 특히 진동대는 작동시 모델 하중에 의한 전도 모멘트 발생을 억제하고, 모델 하중에 상응하는 중량체(counter weight)를 설치하였다. 이로 인하여 가진에 따라 모델과 중량체를 반대방향으로 움직임으로서 불필요한 운동량을 상쇄시키는 동적 균형 시스템(dynamic balancing system)이 구축되어 있다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 원심모형시험기이다.

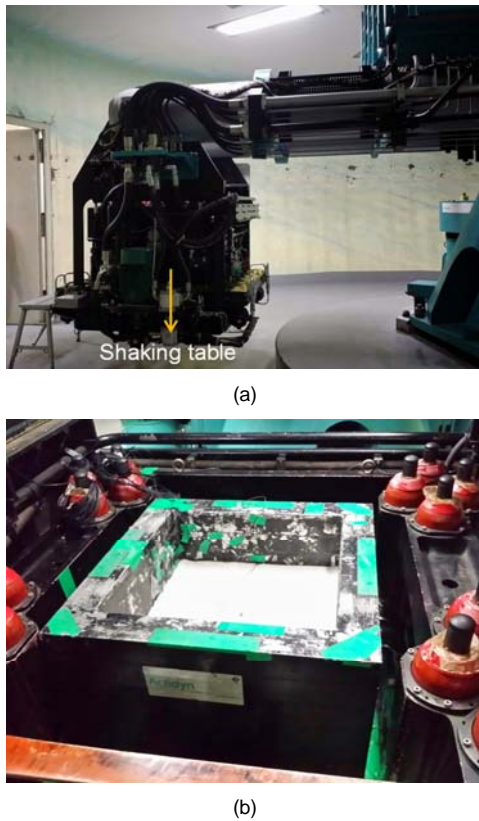


Fig. 1. Centrifuge machine: (a) main body (C72-2) and (b) shaking table (ESB)

축소모형 가진시 진동대의 강성 측벽에서 지진파 반사로 인하여 고주파가 발생할 수 있고 반사된 고주파가 시험결과 측정된 파와 유사한 진동수 영역대라면 결과에 오류가 발생할 가능성이 크다. 따라서 자연상태의 무한 경계조건을 진동대 박스에서 적절히 모사할 수 있는 등가전단보 모델 박스(equivalent shear

beam, ESB)를 이용하였다. 적용된 등가전단보 모델 박스는 알루미늄 프레임을 볼 베어링 및 주변지반의 강성과 유사한 고무로 연결하여 지반증폭, 지반-구조물 동적상호작용 및 지반구조물의 내진성능 평가에 적합하다(Fig. 1(b) 참조).

원심모형시험은 축소모형시험이므로 적절한 상사법칙(scaling law)의 적용이 중요하며 본 시험에 사용된 상사법칙은 다음 Table 1과 같다.

시험은 Flexible segment의 영향을 검토하기 위하여 Flexible segment가 없는 경우(case-1), 얇은 경우(case-2) 및 두꺼운 경우(case-3)로 나누어 진행하였고 구체적인 시험 조건은 다음 Table 2와 같다.

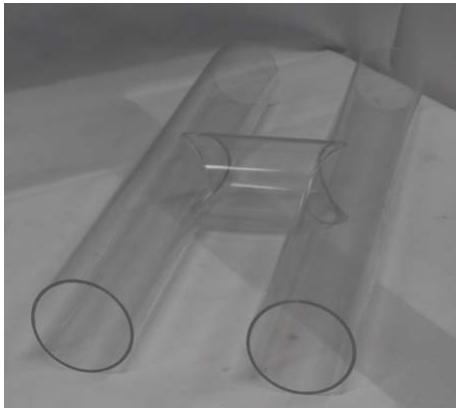
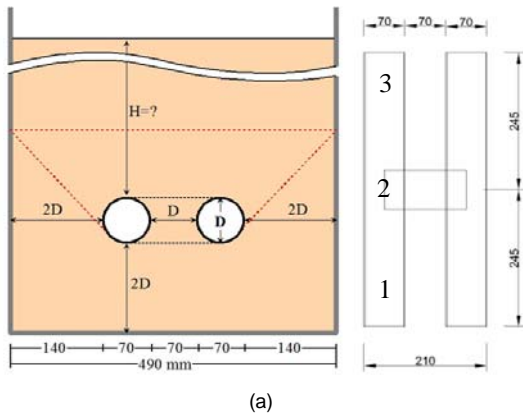
터널 구조물은 아크릴 판넬로 제작하였고, Flexible segment는 실리콘으로 제작하였다. 모형의 제원 및 제작결과는 Fig. 2와 같다. 실제 터널을 1/20로 축소하였으며 터널 주위 지반은 사질토(단위중량 15.5 kN/m^3)를 상대밀도 80%로 밀실하게 다져서 모사하였고 2차레에 걸쳐 강사법으로 모델을 구축하였다. 기반암 가속도는 10단계 이상으로 세분하여 가속도를 증가시키면서 재하하였다.

2.2 시험결과

Table 2에 나타난 것과 같이 3 case 별로 각각 시험을 수행하여 가속도 측정결과를 획득하였으며, 기반암 가속도는 0.154 g 및 0.22 g로 Scaling 하여 최종 결과를 비교하였다. Fig. 3~7에서 좌측 터널을 T1, 우측을 T2로 표기하였고(Fig. 2(a) 참조), C1~C3의 위치는

Table 1. Scaling factors for centrifuge modeling

Parameter	Scaling factors (model/prototype)	Dimensions	Values
Length	1/N	L	1/20
Stress	1	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$	1
Strain	1	1	1
Dynamic time	1/N	T	1/20
Acceleration	N	LT^{-2}	20
Frequency	N	1/T	20



(b)

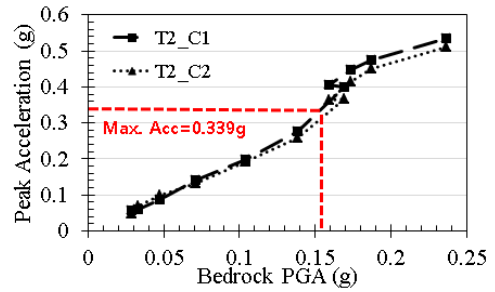
Fig. 2. Model manufacture : (a) dimensions and (b) model

Fig. 2(a)에서 표기된 1~3지점의 위치와 같다.

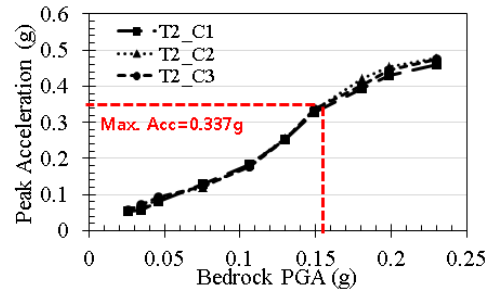
1) 단주기(Ofunato)파 적용시

단주기파 적용시 우터널 천단부 최대가속도 응답은 Flexible segment 유무에 따라 Fig. 3과 같이 나타났다. 공통적으로 기반암 가속도가 커질수록 지점별 최대가속도의 편차가 커지는 경향을 보였으며, Flexible segment가 없을 경우 천단부 시점부(지점 1)에서 최대 16.9% 더 증폭되는 결과를 보였다. 붕괴방지 내진 1등급 설계기준가속도인 0.154 g 적용시 Flexible segment가 있을 경우 0.6% 미소하게 감소하였다.

단주기파 적용시 좌터널 측벽부 최대가속도 응답은 Flexible segment 유무에 따라 Fig. 4와 같이 나타났다. 공통적으로 기반암 가속도가 커질수록 지점별 최대가

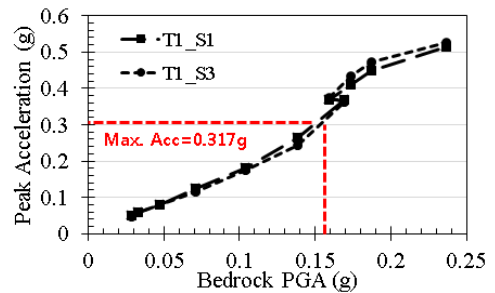


(a)

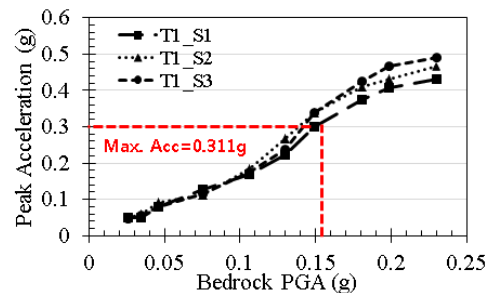


(b)

Fig. 3. Acceleration result at crown (Ofunato) : (a) case-1 and (b) case-2



(a)



(b)

Fig. 4. Acceleration result at springline (Ofunato) : (a) case-1 and (b) case-2

Table 2. Test program

Case	Description	Input motion	Acc. measuring location	Remarks
1	without flexible segment	Ofunato / Hachinohe	crown / springline	-
2	with thin segment	Ofunato / Hachinohe	crown / springline	thickness (flexible seg.) = 20 mm
3	with thick segment	Ofunato / Hachinohe	crown	thickness (flexible seg.) = 50 mm

속도의 편차가 커지는 경향을 보였으며, Flexible segment가 없을 경우 측벽부 종점부(지점 3)에서 최대 19.7% 더 증폭되는 결과를 보였다. 붕괴방지 내진 1등급 설계기준가속도인 0.154 g 적용시 Flexible segment가 있을 경우 1.9% 미소하게 감소하였다.

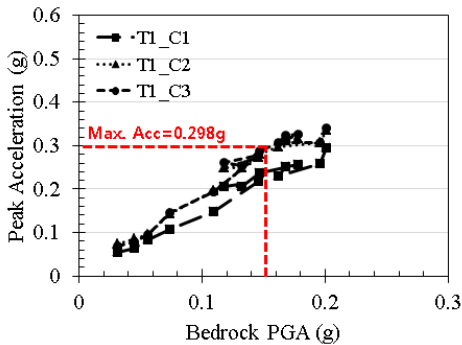
2) 장주기(Hachinohe)과 적용시

장주기와 적용시 좌터널 천단부 최대가속도 응답은 Flexible segment 유무에 따라 Fig. 5와 같이 나타났다. 공통적으로 기반암 가속도가 커질수록 지점별 최대가

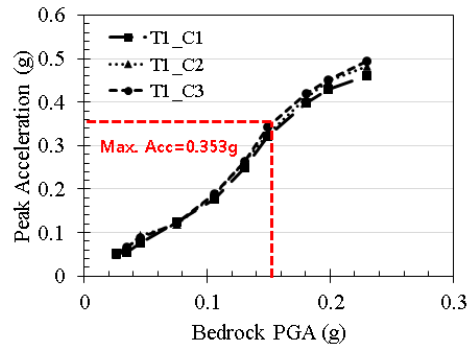
속도의 편차가 커지는 경향을 보였으며, Flexible segment가 없을 경우 천단부 시점부(지점 1)에서 최대 14.4% 더 증폭되는 결과를 보였다. 단주기와 적용시에 대하여 상이한 결과를 보이거나 최대치의 차이는 측정 위치에 따라 명확한 경향을 보이지는 않았다. 붕괴방지 내진 1등급 설계기준가속도인 0.154 g 적용시 Flexible segment가 있을 경우 14.4% 대폭 감소하였다.

3) Flexible segment 두께에 따른 차이

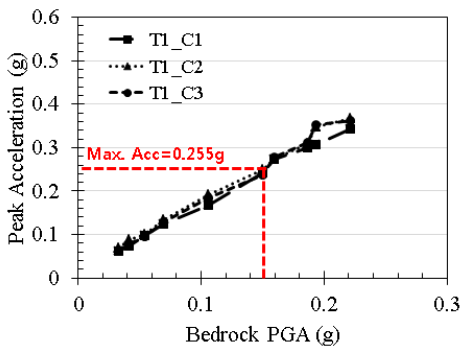
기반암 가속도 증가에 따라 지점별 최대가속도의



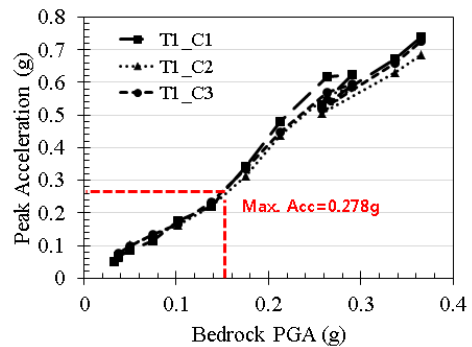
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5. Acceleration result at crown (Hachinohe) : (a) case-1 and (b) case-2

Fig. 6. Acceleration result at crown according to the thickness of flexible segment (Ofunato) : (a) case-2 and (b) case-3

편차가 커지는 경향은 동일하였다. 단주기파 적용시 좌터널 천단부 최대가속도 응답은 Fig. 6과 같다. Flexible segment가 두꺼울 경우 천단부 최대가속도는 시점부(지점 1)에서 최대 45.2% 증가하였다. 붕괴방지 내진 1등급 설계기준가속도인 0.154 g 적용시 Flexible segment가 두꺼울 경우 천단부 최대가속도가 21.2% 대폭 감소하여, 단주기파 적용시 Flexible segment 두께가 클 경우 가속도 응답이 감소함을 확인하였다.

장주기파 적용시 좌터널 천단부 최대가속도 응답은 Fig. 7과 같다. Flexible segment가 두꺼울 경우 천단부 최대가속도는 시점부(지점 1)에서 최대 48.0% 증가였다. 붕괴방지 내진 1등급 설계기준가속도인 0.154 g 적용시 Flexible segment가 있을 경우 천단부 최대가속도가 11.2% 소폭 증가하였다.

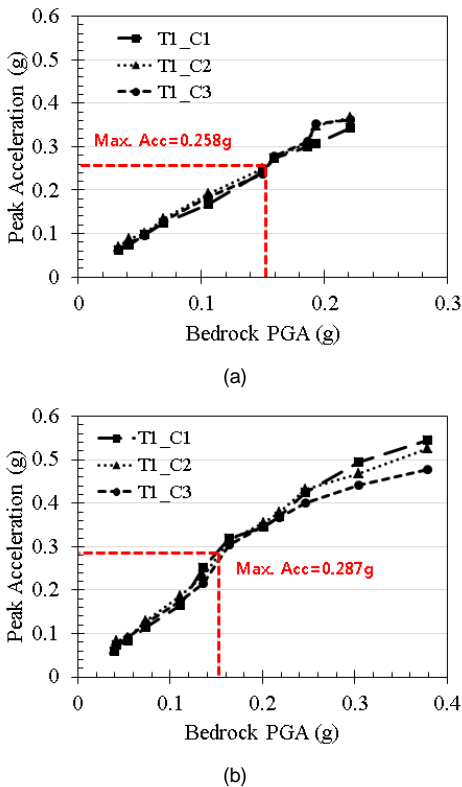


Fig. 7. Acceleration result at crown according to the thickness of flexible segment (Hachinohe) : (a) case-2 and (b) case-3

3. 3차원 수치해석

원심모형 시험 대상 구조물인 Flexible segment를 가진 병렬터널에 대한 3차원 동적 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 시험 결과와 비교함으로써 원심모형시험 결과를 검증하며 Flexible segment의 가속도 저감효과를 확인하도록 하였다.

3.1 해석조건

수치해석 조건은 다음 Table 3과 같다.

해석 모델링 결과는 다음 Fig. 8과 같이 전체를 Solid 요소로 모델링하고 Flexible segment는 Shell 요소로 모델링하였다.

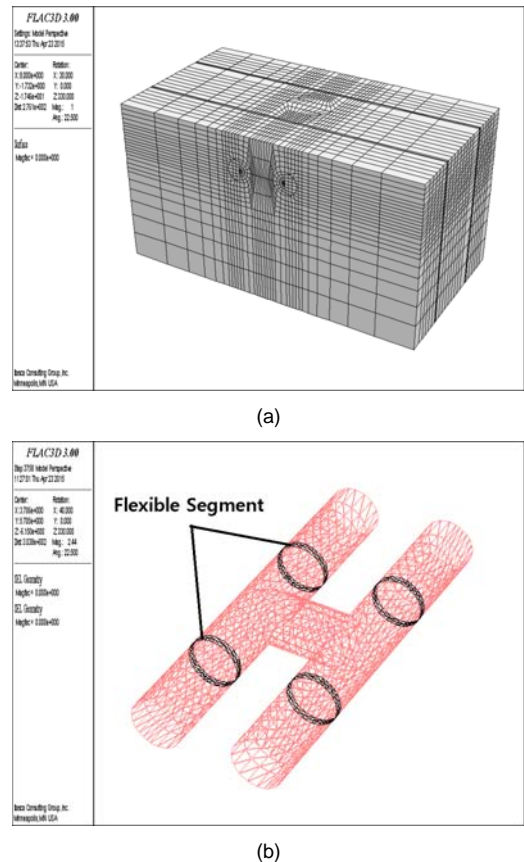


Fig. 8. 3D modeling by FLAC3D : (a) mesh and (b) tunnel with flexible segment

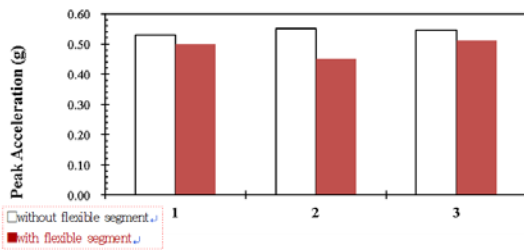
Table 3. Numerical analysis conditions

Item	Description	Remarks
Analysis method	Finite Difference Method (FDM)	
Analysis code	FLAC3D Ver. 3.00	
Boundary condition	Static : fixed boundary Dynamic : free-field boundary	
Analysis sequence	Static-dynamic coupling	vibration (dynamic) after excavation (static)
Input seismic wave	Hachinohe, Ofunato	
Thickness of flexible segment	1,000 mm	thick conditions
Modeling of flexible segment	Shell element	

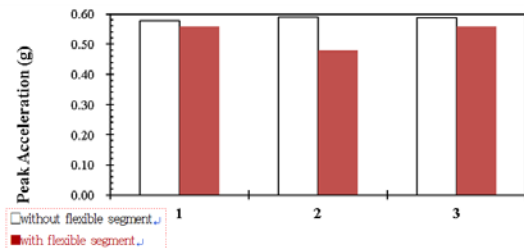
3.2 해석결과

3차원 유한차분해석을 수행하였으며 터널 천단부 및 측벽부에서 가속도 응답을 관측한 결과는 Fig. 9와 같다.

- (1) 장주기파 적용시 좌터널 천단부 최대가속도는 Flexible segment 가 있는 경우 지점 2에서 최대 18.1% 감소하여, Flexible segment의 가속도 저감 효과를 수치해석적으로 검증하였다.



(a)



(b)

Fig. 9. Analysis results : (a) left tunnel at crown (Hachinohe)
(b) right tunnel springline (Ofunato)

- (2) 단주기파 적용시 우터널 측벽부 최대가속도는 Flexible segment 가 있는 경우 지점 2에서 최대 20.2% 감소하여, Flexible segment의 가속도 저감 효과를 수치해석적으로 검증하였다.
- (3) 3차원 동적 수치해석 수행 Flexible segment가 있는 경우 우터널 측벽부에서 최대 20.2% 가속도 저감효과를 확인하였다. 좌터널 천단부 최대가속도는 원심모형시험 결과 14.4% 감소하였고, 수치해석 결과는 18.1% 감소하여 비교적 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 이를 통하여 추후 원심모형시험 결과를 수치해석을 통하여 비교 검증할 수 있다고 판단된다.

4. 결과분석 및 결론

본 연구에서는 지진가속도 저감을 위한 Flexible segment를 가진 병렬터널의 지진시 거동을 동적 원심모형시험을 수행하여 분석하였고, 3차원 수치해석을 통하여 비교 검증한 결과는 다음과 같다.

- 시험 결과를 붕괴방지 내진 1등급 설계기준가속도인 0.154 g로 Scaling 한 결과, 장주기파 적용시 우터널 천단을 제외하고 모든 경우에서 최대가속도가 Flexible segment 두께가 두꺼울 경우(case 3) 미소하게 증가하는 경향을 나타내었다.
- 장, 단주기파 모두에서 Flexible segment 두께가 두꺼울 경우(case 2) 최대가속도가 최소값을 보였

다. 따라서 일정 두께 이상의 Flexible segment가 형성되어야 충분한 가속도 저감효과가 나타남을 확인하였다.

3. 단주기파 적용시 Flexible segment가 없을 경우 (case 1) 보다 얇을 경우(case 2)에서 지점 1, 2의 최대가속도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 Flexible segment의 두께가 충분하지 못할 경우 단주기파에서 가속도 저감효과가 없는 것으로 평가되었다.
4. 장주기파 적용시 Flexible segment가 없을 경우 (case 1) 보다 있는 경우(case 2)에서 최대가속도가 감소하는 경향을 보였다. 따라서 Flexible segment의 두께가 얇을 경우(case 2)는 단주기에 취약하고 (최대가속도 증가), 장주기에 유리(최대가속도 감소)한 것으로 판단된다.
5. 시험 결과를 0.22 g로 Scaling 한 결과, 장, 단주기파 모두에서 Flexible segment의 두께가 두꺼운 경우 (case 3) 일 때 최대가속도가 최소값을 보였다. 이는 0.154 g로 Scaling시의 결과와 유사한 경향을 보이거나, 0.22 g로 Scaling시 감소경향이 보다 뚜렷하게 나타났다. 따라서 Flexible segment의 두께가 두꺼울 경우 상대적으로 높은 가속도 수준에서 가속도 저감성능 발휘가 우수한 것으로 판단된다.
6. 3차원 수치해석 결과는 동적 원심모형 시험 결과와 유사한 경향을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Baziar, M.H., Moghadam, M.R., Kim, D.S., Choo, Y.W. (2014), "Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 44, pp. 10-22.
2. Chen, Z.Y., Shen, H. (2014), "Dynamic centrifuge tests on isolation mechanism of tunnels subjected to seismic shaking", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 42, pp. 67-77.
3. Cilingir, U., Madabhushi, S.P.G. (2009), "A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, pp. 452-462.
4. Cilingir, U., Madabhushi, S.P.G. (2009), "Effect of depth on seismic response of circular tunnels", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, pp. 117-127.
5. Lanzano, G. (2009), "Physical and analytical modeling of tunnels under dynamic loadings. Ph. D. Dissertation, University of Naples 'FedericoII' Naples.
6. Pitilakis, K., Tsinidis, G., Leanza, A., Maugeri, M. (2014), "Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 67, pp. 1-15.
7. Yang, W., Hussein, M.F.M., Marshall, A.M. (2013), "Centrifuge and numerical modelling of ground-borne vibration from an underground tunnel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 51, pp. 23-34.