

해저터널 내진성능 향상을 위한 Flexible segment 효용성 연구

장동인¹ · 김종일¹ · 곽창원² · 박인준^{3*}

¹학생회원, 한서대학교 토목공학과, 박사과정

²정회원, 한국지역난방기술 토건설계그룹

³정회원, 한서대학교 토목공학과, 교수

Study on flexible segment efficiency for seismic performance improvement of subsea tunnel

Dong-In Jang¹ · Jong-Il Kim¹ · Chang-Won Kwak² · Inn-Joon Park^{3*}

¹Student Member, Department of Civil Engineering, Hanseo University

²Member, Civil&Architecture Design Group, Korea District Heating Engineering Co.Ltd

³Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hanseo University

*Corresponding Author : Inn-Joon Park, geotech@hanseo.ac.kr

Abstract

Underground structures that have recently become larger are required to be stable not only during normal times but also during earthquakes. Especially, it is very important to maintain the stability of the subsea tunnels during the earthquake. The objective of this paper is to verify the effectiveness of the flexible segment, which is one of the breakthrough facilities to maintain the stability of the subsea tunnel during the earthquake using the shaking table test. Another goal of this paper is to propose the optimum position of the flexible segment through 3D dynamic numerical analysis based on the verified results from shaking table tests. The 1g shaking table test considering the similarity ratio (1:100) to the cross section of the selected artificial subsea tunnel was carried out considering the Geongju and Artificial seismic waves, longitudinal and lateral wave, and with/without flexible segments eight times or more. As a result of the shaking table test, it was confirmed that the flexible segment is effective in improving the seismic performance of the undersea tunnel in all the experimental results. In addition, 3D dynamic numerical analysis was performed to select the optimum position of the flexible segment which is effective for improving seismic performance. As a result, it was confirmed that the seismic acceleration is attenuated when the flexible segment is installed adjacent to the branch section in subsea tunnel.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
19(3)503-515(2017)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2017.19.3.503>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received April 13, 2017

Revised April 24, 2017

Accepted May 17, 2017



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 © 2017, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Keywords: Flexible segment, Subsea tunnel, Shaking table test, Geongju seismic wave, Artificial seismic waves

초 록

최근 대형화되고 있는 지하구조물은 평상시는 물론 지진시에도 안정성을 확보하여야 한다. 특히 지하구조물 중에서도 해저터널은 지진시 안정성 유지가 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 논문의 목표는 해저터널의 지진시 안정성 유지에 획기적인 시설물 중의 하나인 Flexible segment에 대해서 진동대 시험을 이용한 효용성 검증이다. 검증된 결과를 토대로 3차원 동해석을 통해 Flexible segment의 최적위치를 제안하는 것이 또 다른 하나의 논문 목표이다. 본 연구 수행을 위해 선정된 가상해저터널 단면에 상사율(1:100)을 고려한 1g 진동대 시험(1g Shaking Table Test)을 경주지진파, 인공지진파, 종방향, 횡방향, Flexible segment유무 등을 고려해서 모두 8회 이상 수행하였다. 진동대 시험 수행결과 전 시험 모두에서 Flexible Segment가 해저터널 내진성능향상에 효과가 있음을 확인하였다. 또한 시험적으로 내진성능 향상에 효과가 검증된 Flexible segment의 최적 위치를 선정하기 위하여, 3차원 동적 수치해석을 수행하였다. 그 결과 분기구간에서 Flexible segment를 인접해 설치할 경우 지진가속도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

주요어: Flexible segment, 해저터널, 진동대 시험, 경주지진파, 인공지진파

1. 서론

빠른 산업발전과 이에 따른 도시화로 인해 교통량 또한 증가 하고 있다. 이로 인해 효율적인 공간 활용을 위해 다양한 지하 구조물의 건설이 증가며 그중 세계적으로 건설 및 설계에 있는 것이 바로 해저터널이다. 최근 들어 국내에서는 해저터널 구축에 대한 필요성 논의 및 시공계획 등이 발표되고 있다. 국내와는 달리 건설기술이 발전한 해외에서는 해저터널의 건설이 활발히 이루어지고 있다. 노르웨이, 중국, 영국 등 해저터널을 이용한 다양한 사회기반 시설, 교통난 해소, 관광 활성화 및 대형선박의 원활한 운항을 확보해 상당한 경제적인 효과를 보여주며, 이미 해저터널을 건설하고 활용함으로써 사회발전에 큰 성과를 성취했을 뿐만 아니라 지속적으로 해저터널 프로젝트 및 건설이 증가하고 있다(Kim et al., 2017). 특히 지중에 위치하는 지하구조물의 특성상 지진 시 지반 운동의 크기와 관성력이 작고 일산 감쇠가 커서 상부 구조물에 비해 유리하나 최근 발생한 지진의 규모와 빈도가 증가하면서 지중구조물 중 특히 해저터널의 내진설계 및 관련 면진 시스템의 개발에 관심이 증대하고 있는 추세이다. 따라서 터널의 지진시 응답 특성에 대한 보다 정밀한 접근이 필요하다. 이런 연구의 필요성을 충족하기 위하여 지진시 터널 단면형상, 설치심도, 라이닝의 강도 및 주변지반의 물성을 고려한 동적원심모형 시험 및 연구(Cilingir & Madabhushi, 2011a; Cilingir & Madabhushi, 2011b) 결과가 발표되었다. 최근에는 지진시 가속도 수준에 따른 도심터널의 동적거동을 동적원심모형 시험 및 동적 수치해석을 통해서 규명하고자 하는 연구들(Baziar et al., 2014; Chen & Shen, 2014; Yang et al., 2013)이 활발하게 진행되어왔다. 고수압을 받는 해저터널 대상으로는, Flexible segment가 설치된 가상해저터널의 지진시 동적거동 특성 규명을 위한 연구(Kwak and

Park, 2015; Kwak et al., 2016)가 진행되면서 최근에 그 결과물들이 발표되고 있다.

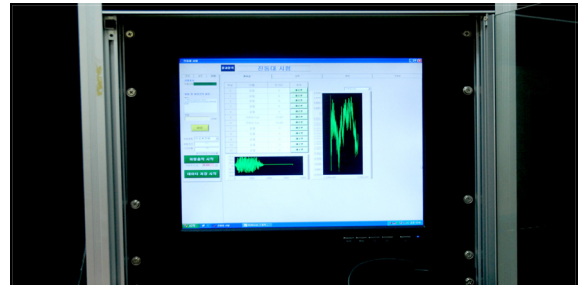
본 연구에서는 기존 연구와 달리 진동대 시험을 이용한 Flexible segment 설치시 해저터널 내진성능 향상의 효용성을 검증하고자 한다. 효용성이 검증된 결과를 토대로 3차원 동해석을 통해 Flexible segment의 최적위치를 제안하는 것이 본 연구의 또 다른 중요한 목표이다.

2. 진동대 시험

서론에서 언급한 기존 연구에서는 지진시 터널본선의 동적거동 특성파악을 위해 진동대 시험과 원심모형 시험 등의 위주로 진행되었다. 이런 기존 연구를 통해서 진동대 시험이 지진시 터널의 동적거동을 분석할 수 있는 시험 방법임이 검증되었다. 본 연구는 지진시 터널본선과 분기(수직구 및 횡갱) 접속구간에서의 지진응답특성 및 접속구간에 Flexible segment 설치시 그 내진 효용성을 검증하기 위한 다양한 조건의 진동대 시험을 진행하였다. 입력 최대가속도는 지진구역-1 내의 붕괴방지 내진 1등급에 해당하는 0.154 g를 적용하여 1 g 진동대 시험(1 g Shaking Table Test)을 수행하였다. 해저터널 모형에 횡방향 가진, 종방향 가진, Flexible Segment 유·무 그리고 2종류 입력지진파에 따른 터널의 동적응답 특성 및 내진성능 향상 효과 등을 계측하고 분석하였다. 시험에서 사용된 진동대 시험기 및 센서를 Fig.1에 도식하였다.



(a) System of Shaking Table Test



(b) Control program of Shaking Table



(c) Accelerometer



(d) Data logger

Fig. 1. System of shaking table test and sensors

2.1 시험 방법

가상해저터널(Kwak et al., 2016) 설계 단면중 지진에 가장 취약한 터널본선과 분기(수직구 및 횡갱) 접속구간의 단면을 선택하여 1:100 축소 모형을 제작하였다. 이때 상사율은 1989년에 Iai가 제안한 이론을 적용하였다.

본 연구의 목적을 달성 하기위하여 전체 8회의 시험을 수행하였으며, 그 각각의 시험을 위해서 제작한 모형은 크게 네 가지로써 횡방향 가진을 위한 모형 2가지(Flexible Segment 유·무), 종방향 가진을 위한 모형 2가지(Flexible Segment 유·무)이다. 각각의 모형에 2종류의 지진파(경주지진파, 인공지진파)를 가하여 진동대 시험을 수행하였다. Flexible Segment 유·무에 따른 내진성능수준 향상에 대한 검증을 위해서 가속도계는 원지반, 수직구, 수직구에서 1D떨어진 본선터널에 설치하고 그 결과를 계측하였다. 아래 표 Table 1은 종방향 가진 실험조건을 정리한 것이고, Table 2는 횡방향 가진 실험조건을 정리한 것이다.

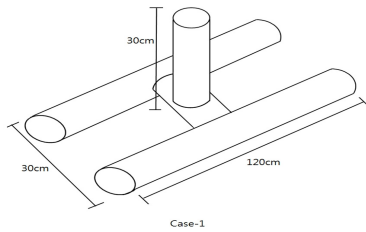
해저터널 구조물은 강화아크릴을 이용하여 Flexible segment 설치위치에 따른 시험모형(Fig. 2(a), (b))을 제작하였고 완성모형은 Fig. 2(c), (d), (e), (f)와 같다. 실제 터널을 1:100 스케일로 축소하였으며 지반은 사질토(단위중량 15.5 kN/m^3)를 상대밀도 80% 로 밀실하게 다져서 형성하였으며 2차례에 걸친 강사법으로 지반 모형을 구축하였다. 해저터널의 지진 응답가속도 측정을 위하여 가속도계를 부착하였으며 그 위치는 Fig. 2(g)와 같다.

Table 1. Cases of shaking table test at longitudinal direction shaking

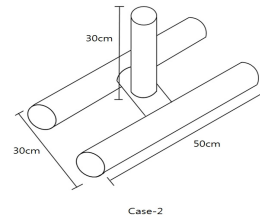
	Flexible Segment	Seismic wave	Remark
case-1	with	Geongju wave	case-1-w-G Fig. 2(a)
case-1	without	Geongju wave	case-1-w/o-G Fig. 2(b)
case-1	with	Artificial wave	case-1-w-A Fig. 2(a)
case-1	without	Artificial wave	case-1-w/o-A Fig. 2(b)

Table 2. Cases of shaking table test at lateral direction shaking

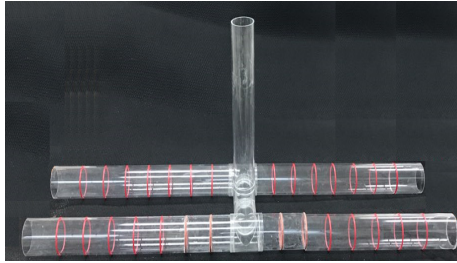
	Flexible Segment	Seismic wave	Remark
case-2	with	Geongju wave	case-2-w-G Fig. 2(c)
case-2	without	Geongju wave	case-2-w/o-G Fig. 2(d)
case-2	with	Artificial wave	case-2-w-A Fig. 2(c)
case-2	without	Artificial wave	case-2-w/o-A Fig. 2(d)



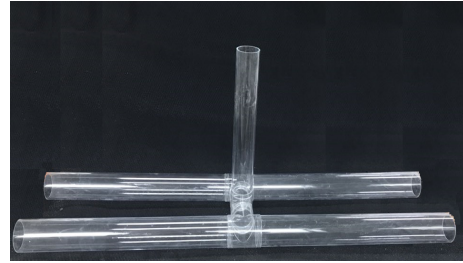
(a) Schematic figure for case-1



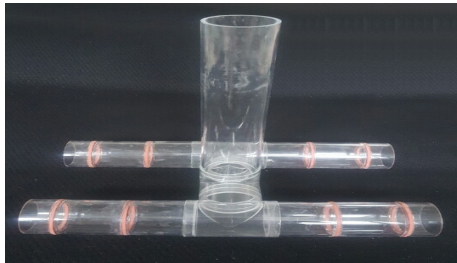
(b) Schematic figure for case-2



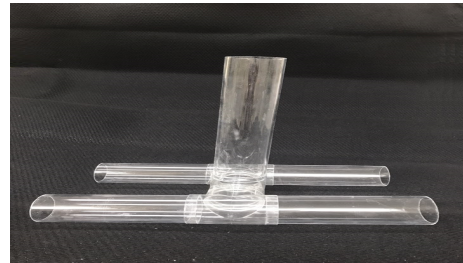
(c) case-1: with Flexible Segment



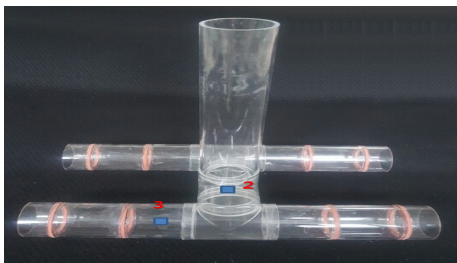
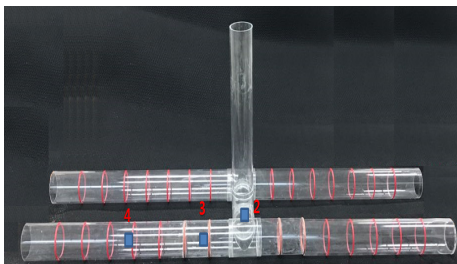
(d) case-1: without Flexible Segment



(e) case-2: with Flexible Segment



(f) case-2: without Flexible Segment



(g) Accelerometer position

- Model for case-1 with Flexible Segment
 - Point 1 : on Bedrock
 - Point 2 : on Vertical tunnel
 - Point 3 : on main tunnel at 1D interval from vertical tunnel
 - Point 4 : on main tunnel at 3D interval from vertical tunnel

- Model for case-2 with Flexible Segment
 - Point 1 : on Bedrock
 - Point 2 : on Vertical tunnel
 - Point 3 : on main tunnel at 1D interval from vertical tunnel

Fig. 2. Cases of shaking table test and Monitoring point

2.2 실험 결과 및 분석

Table 1 및 Table 2에 정리한 것과 같이 각 case 별로 시험을 수행하여 가속도계 설치 지점별 가속도 응답을 측정하였다. 본 연구의 목적상 종방향 실험(case-1, 2)에서는 2번, 3번 및 4번 지점에서의 가속도 응답을 측정하였고, 횡방향 실험(cses-3, 4)에서는 2번 및 3번 가속도 응답을 측정하여 시험 조건별로 해당지점에서의 최대가속도 응답치를 정리 분석하였다. 여러 계측값 중 종횡방향 시간이력 가속도 응답곡선을 각각의 case별로 정리하였다. 특히, 시간이력 가속도 응답곡선 중에서 종방향의 “case-1-w-A”와 “case-1-w/o-A”의 지점3, 횡방향의 “case-2-w-A”와 “case-2-w/o-A”의 지점3 결과만 아래 Fig. 3에 나타내었다.

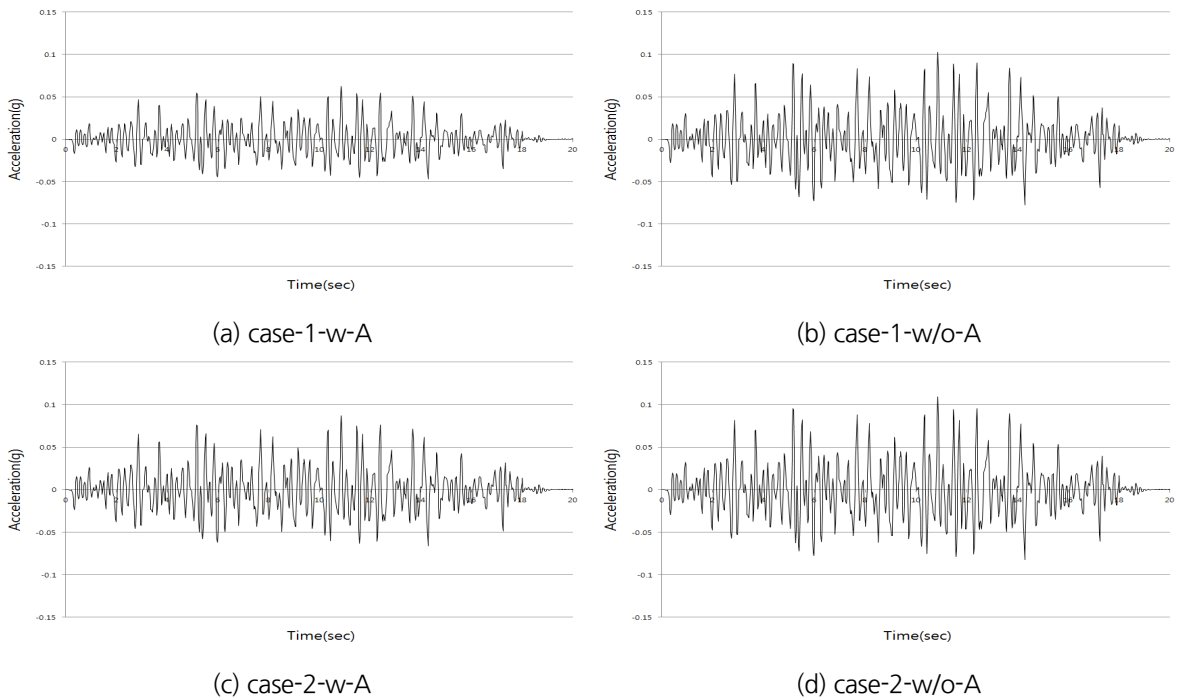


Fig. 3. Time history of response acceleration

계측 결과는 Table 3과 같으며, 그 계측 결과를 분석하기 용이하도록 Fig. 4와 같이 정리하였다. 이 결과를 통해서 진동대 시험결과를 분석하면 다음과 같다.

2.2.1 종방향 거동분석

종방향의 2가지 실험에서 지진파와 관계없이 터널본선과 분기(수직구 및 횡갱)접속구간에서 멀어질수록 지진 응답가속도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 지진시 분기 접속구간(수직구)에서 지진증폭이 발생함을 알 수 있었다.

경주 지진파를 이용한 시험시 Flexible Segment를 설치한 시험의 경우 수직구에서 멀어질수록 최대 60.6%지

진 지진 응답가속도 감쇠하는 경향을 확인할 수 있었다. 반면에 Flexible Segment를 설치하지 않은 경우 수직구에서 멀어 질수록 최대 30.9% 지진 응답가속도 감쇠를 확인 하였다. 인공 지진파를 이용한 시험시 Flexible Segment를 설치한 시험의 경우 수직구에서 멀어질수록 최대 71.7%지진 응답가속도 감쇠하는 경향을 확인할 수 있었다. 반면에 Flexible Segment를 설치하지 않은 경우 수직구에서 멀어 질수록 최대 32.5% 지진 응답가속도가 감쇠하였다.

Flexible Segment가 있는 모형이 없는 모형에 비해 지진 가속도가 평균 34.5% 더 감쇠 효과를 나타내는 것을 확인하였다.

2.2.2 횡방향 거동분석

횡방향의 2가지 실험에서도 지진파와 관계없이 터널본선과 분기(수직구 및 횡갱)접속구간에서 멀어질수록 가속도가 감쇠하는 경향을 보였다.

경주 지진파 실험 시 Flexible Segment가 있는 모형의 경우 없는 모형에 비해 최대 약 16%이상 지진 응답가속도가 감쇠하였다. 인공 지진파 실험 시 Flexible Segment가 있는 모형이 없는 모형에 비해 지진 응답가속도가

Table 3. Shaking table test results

Case	Monitoring Point	Peak Acc.(g)
case-1-w-G	2	0.132
	3	0.072
	4	0.052
case-1-w/o-G	2	0.142
	3	0.115
	4	0.098
case-1-w-A	2	0.113
	3	0.065
	4	0.032
case-1-w/o-A	2	0.132
	3	0.104
	4	0.089
case-2-w-G	2	0.133
	3	0.082
case-2-w/o-G	2	0.144
	3	0.098
case-2-w-A	2	0.138
	3	0.089
ase-2-w/o-A	2	0.146
	3	0.117

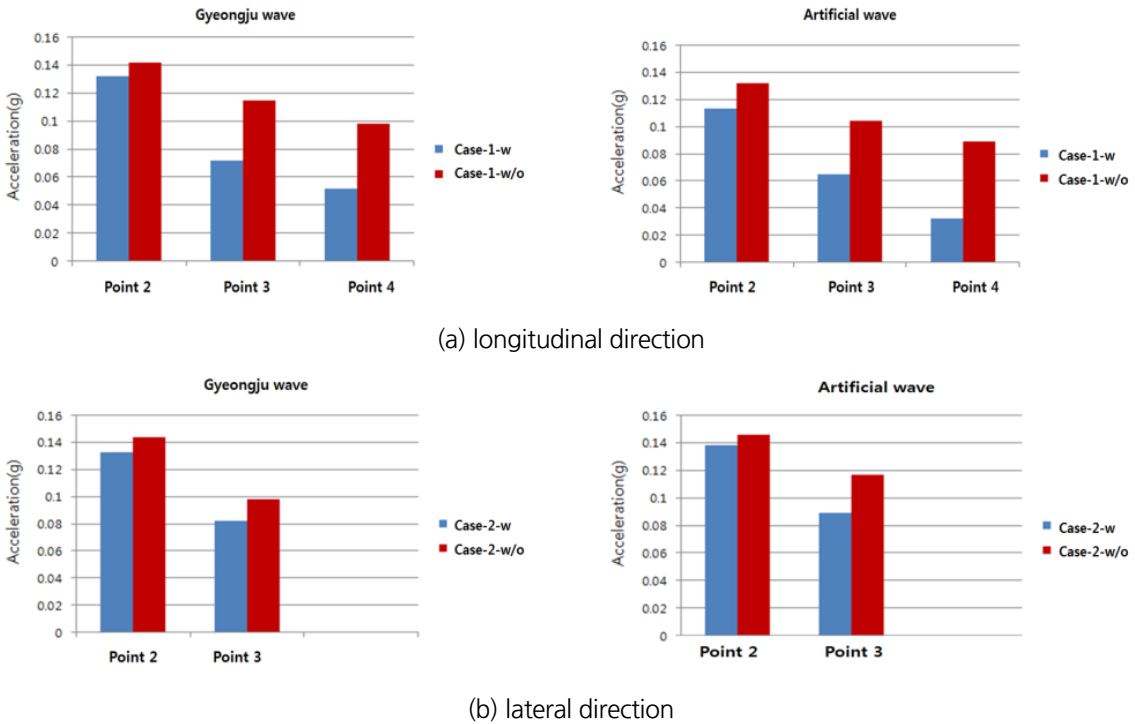


Fig. 4. Response acceleration from measurement

24%이상 감쇠 효과를 나타내는 것을 확인하였다.

두 실험 결과를 토대로 분석한 결과 횡방향, 종방향 실험 모두 Flexible Segment가 있는 시험에서 없는 모형보다 효과적인 지진 응답가속도 감쇠 효과를 확인할 수 있었다. 이 결과는 Flexible Segment가 해저터널 내진성능 향상에 효과가 있음을 확인한 것이다. 즉 본 연구를 통해서 해저터널 내진성능 향상을 위한 Flexible segment 효용성을 확인했다고 할 수 있다.

3. 3차원 동적 수치해석

진동대 시험 결과 수직구를 가진 해저터널에 Flexible segment 설치시 내진성능향상에 유리하게 작용하는 것으로 나타났다. 이러한 진동대 시험 결과를 바탕으로 Flexible segment가 설치된 해저터널을 3차원 동적 수치해석을 통해, Flexible segment의 최적위치를 선정하는 연구를 수행하였다. 이 때, 가속도 응답 뿐만아니라 부재력 분포 경향을 함께 파악하여 최적위치 선정시 고려하였다.

3.1 해석조건

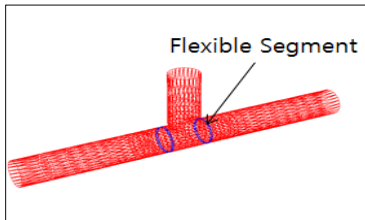
수치해석 조건은 다음 Table 4와 같고, 해석 모델링 결과는 다음 Fig. 5(a), (b), (c)와 같다. 본 해석에서 case-1

은 수직구에 인접(0.25D이격)하여 Flexible segment를 설치하였고, case-2는 1D이격하여 Flexible segment를 설치하였다. case-3의 경우 Flexible segment가 없는 모델이다. Fig. 5(d)에 지진 응답가속도 측정 지점을 표시하였고 각각의 지점의 위치는 Fig. 5(d)내의 범례에 정리하였다.

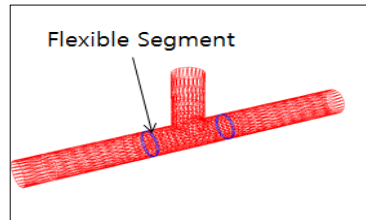
수치해석시 터널 전체를 솔리드(Solid) 요소로 모델링했으며 Flexible segment는 구조부재(Structural element)인 Shell 요소를 이용하여 모델링 하였다. Tunnel segment의 탄성계수는 23,500 MPa, Flexible segment는 20.9 GPa를 적용하였고, 탄성(Elastic) 모델을 사용하였다. 지반은 전체를 풍화암으로 적용하였으며, 탄성계수는 300 MPa를 적용하여 Mohr-Coulomb 탄소성 모델(Elasto-perfectly plastic model)로 모사하였다. 입력 지진파는 장, 단주기 특성을 모두 가지도록 인공지진파(Fig. 6(a))를 합성하여 적용하였으며 내진1등급 붕괴방주수

Table 4. Numerical analysis conditions

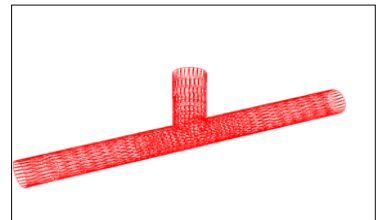
Item	Conditions	Remarks
Analysis method	Finite Difference Method (FDM)	
Analysis code	FLAC3D	
Boundary condition	Dynamic : Free-field	
Analysis sequence	Static-dynamic coupling	Dynamic analysis after excavation (static)
Input seismic wave	Artificial Wave	Peak Acc. Amplitude = 0.154 g
Thickness of flexible segment	1,000 mm	
Modeling of flexible segment	Shell element	



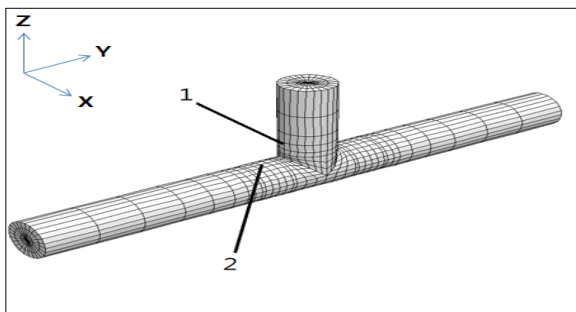
(a) case-1



(b) case-2



(c) case-3



point 1 : Vertical tunnel side wall

point 2 : Main tunnel crown

(d) Acceleration measurement point

Fig. 5. 3D modeling

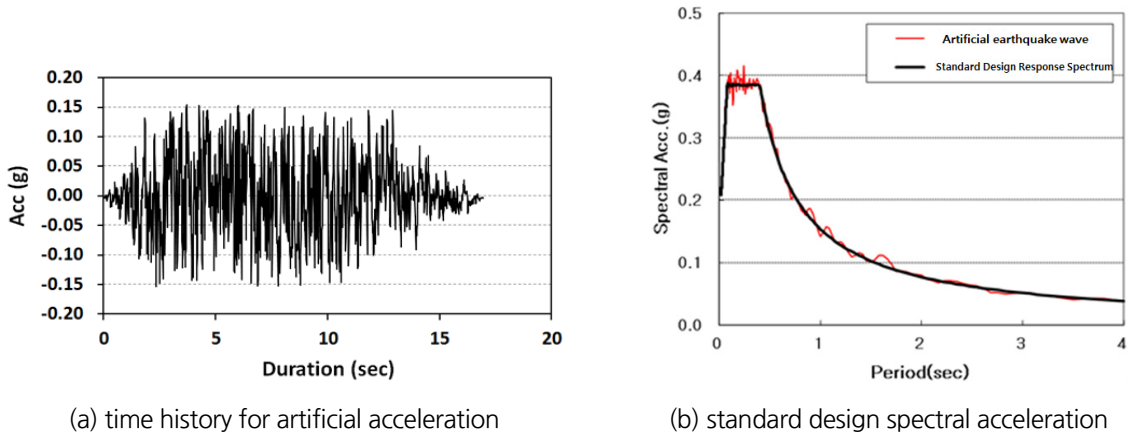


Fig. 6. Input seismic wave

준의 표준설계응답스펙트럼(Fig. 6(b))과 부합하도록 하였다. 자세한 수치해석상의 조건들을 Table 4에 정리하였다.

3.2 수치해석 결과

실제 터널 크기를 적용하여 모델링을 수행하였으며, 가속도 응답을 추출하였다. 가속도 추출 위치는 위 그림 Fig. 5(d) 와 같으며, Fig. 7은 최대가속도 산정 결과를 각 지점별로 비교한 것이며 Fig. 8은 지점 1, 2에서의 최대 가속도값을 해석 case별로 비교한 것이다. Fig. 7에 따르면, Flexible Segment 미적용시(case-3) 수직구, 본선 모두 최대가속도응답이 증가하였다. 최대가속도는 지점 1에서는 case-3(Flexible Segment 미적용) 대비 case-1(Flexible Segment를 접속부 인접하여 적용)에서 3.4% 감소하였고 case-2(Flexible Segment를 접속부로부터 1D 이격하여 적용)에서 3.0% 감소하였다. 지점 2에서는 case-3 대비 case-1에서 10.1% 감소하였고 case-2에서 7.4% 감소한 결과를 나타내어 수직구인 지점 1에서 지진파 증폭 억제효과가 현저히 크게 나타났다. 즉 수직구 인

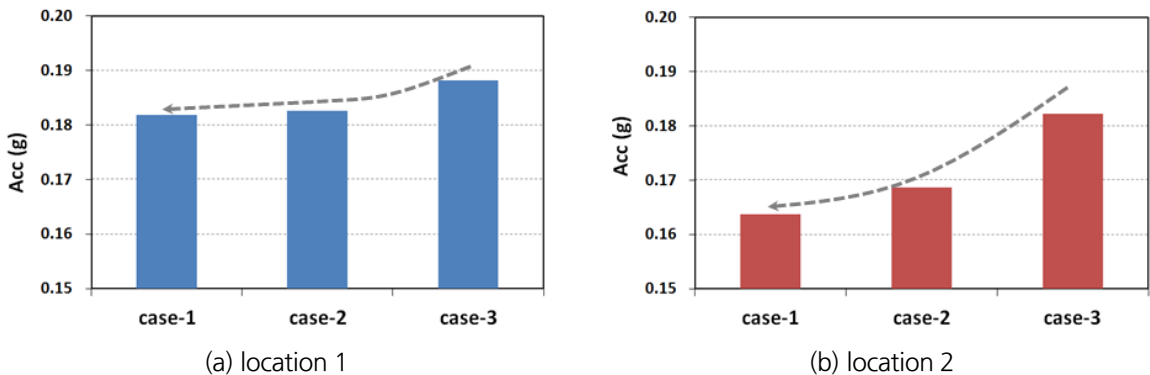


Fig. 7. Peak acceleration

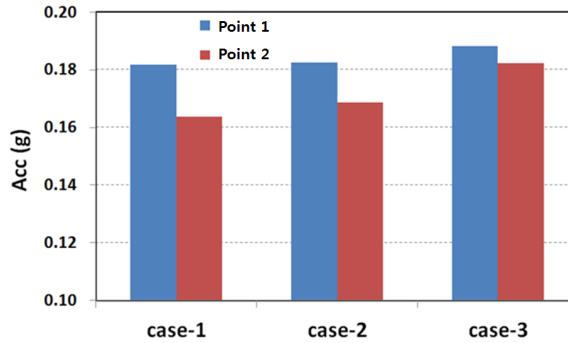


Fig. 8. Numerical analysis results

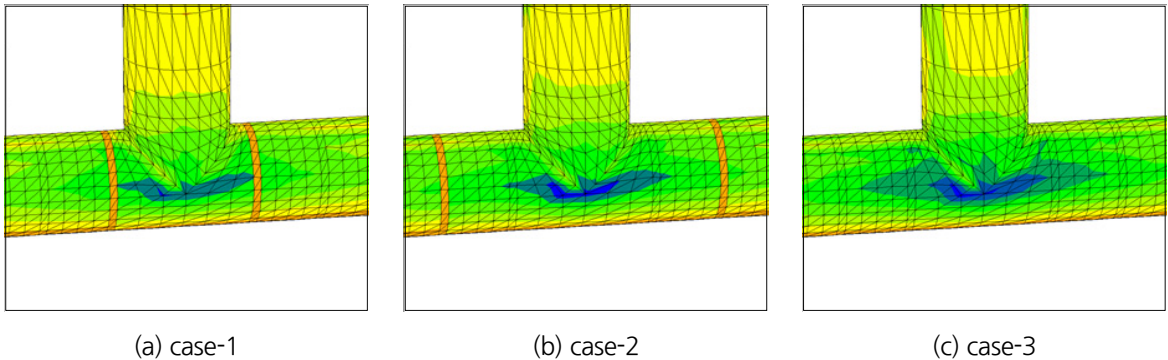


Fig. 9. Max. total stress result

접 Flexible Segment 설치 시(case-1)가 터널의 최대가속도 저감에 보다 효과적인 것을 확인할 수 있었다.

또한, Flexible segment의 최적 설치 위치를 결정하기 위한 추가적 지표로서 터널 1차 지보재의 최대휨압축응력 발생 경향을 검토하였으며 그 결과는 다음 Fig. 9와 같다. 최대휨압축 응력 분포는 Fig. 9(a)와 같이 접속부에 응력집중 현상을 보이나 Flexible segment에서 집중응력 해소 경향을 보이고 Flexible segment가 접속부에서 멀어질 경우(Fig. 9(b)) 응력집중 구간도 더 커지며 Flexible segment가 없는 경우(Fig. 9(c)) 응력집중 구간이 1D 영역까지 확장되는 경향을 보인다. 따라서 case-1이 터널 접속부의 집중응력 해소를 통하여 부재력에서도 가장 유리한 결과를 나타내었다.

결론적으로 해저터널 내진성능 향상을 위한 Flexible segment의 최적 설치 위치는 분기구(수직구)에 최대한 근접해야 함이 타당하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통해서 해저터널 내진성능 향상을 위한 Flexible segment 효율성을 확인하기 위하여 다양한 조건하에서 1 g 진동대 시험을 수행하여 분석하였고, 3차원 수치해석을 통하여 Flexible segment의 최적 위치를 산정하

였으며 그 결론은 다음과 같다.

진동대 시험 결과 지진파 및 가진방향에 무관하게 Flexible segment 설치 시 모든 시험결과에서 지진응답가속도 감쇠 효과가 현저하게 커짐을 입증하였다. 이 결과는 Flexible Segment가 해저터널 내진성능향상에 효과가 있음을 확인한 것이다. 즉 본 연구를 통해서 해저터널 내진성능 향상을 위한 Flexible segment 효용성을 확인했다고 할 수 있다.

진동대 시험으로 그 효용성을 확인한 Flexible segment를 고려하여 3차원 동적 수치해석을 수행하여 최대가속도 및 부재력 산정결과를 근거로 Flexible segment의 최적 위치를 선정한 결과, 수직구에 근접(0.25D)설치한 경우 지진 응답가속도 감쇠효과가 현저하게 나타남을 확인하였다.

결론적으로 Flexible segment 설치시 3차원 동적수치해석 결과 및 진동대 시험 결과 모두에서 지진 응답가속도가 현저하게 감쇠하는 경향을 보임으로써 해저터널 내진성능 향상을 위한 Flexible segment 효용성 확인하였고, 그 위치는 접속부에 근접(0.25D)하는 것이 유리함을 검증하였다.

향후 좀 더 다양한 해저터널의 단면과 지반 조건을 통하여 Flexible segment의 동적 거동특성에 대한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

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

References

1. Baziari, 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. (2011a), "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. (2011b), "Effect of depth on seismic response of circular tunnels", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 48, pp. 117-127.
5. 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.
6. Kim, H., Kang S.O., Yoo, K.S., Kim, S.H. (2017), "Design considerations and field applications on inflatable structure system to protect rapidly flooding damages in tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 2, pp. 161-177.
7. Kwak, C.W., Park, I.J. (2015), "Seismic behaviors of twin tunnel with flexible segment", Journal of

Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 6, pp. 695-702.

8. Kwak, C.W., Jang, D.I., Park I.J., Park, S.Y. (2016), “Seismic response analysis of virtual honam-jeju subsea tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 3, pp. 319-329.
9. 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.