

# 철도노반과 기초지반(고성토사면) 안정에 관한 연구

## A Study on the Stability for the Railroad Bed and the Foundation Ground (High Landfill Slope)

오명렬\*

Myoung Ryoul Oh

---

### ABSTRACT

Recently, medium or slight earthquakes was occurred in the Korea Peninsula and seismic design is considered seriously in the railroad facilities as case of other civil engineering facilities. In this study, it selected the Seongnam-Yeosu railroad 6th section and seismic analysis was accomplished. Specially, unlike existing seismic analysis using the artificial earthquake and the real earthquake, seismic analysis using a seismic vibration and the train vibration was accomplished. 1-D and 2-D ground response analysis of the railroad bed and 3-D Finite element analysis in the bridge connection section of high landfill slope was accomplished. Also, slope stability analysis and the evaluation of liquefaction was accomplished.

---

### 1. 서론

최근 토목구조물의 안정성에 영향을 미치는 인자로서, 그리고 도시민의 경제문화 생활에 불편을 초래하는 동적하중으로서, 지진동에 대한 고려가 필수적으로 인식되고 있다. 특히, 인구밀집지역에 건설되는 지하철과 같은 경우는 지진으로 인한 재해 또는 기타 유사 시 라이프라인 역할을 수행하여야 하기 때문에, 건설교통부에서는 철도시설을 내진 1등급 구조물로 선정하고 있다.

무엇보다도 21세기 들어서 한반도의 새로운 위협으로 대두되고 있는 것은 지진의 위협이다. 현재까지 지진에 관해서는 안전 지역으로 분류되는 한반도가 최근 지진의 위협이 더욱 증가하고 있는 실정이다. 충청남도 홍성(1978년 진도 5.0), 충청북도 속리산 (1978년 5.2), 강원도 영월(1996년 4.5), 울산 앞바다(2004년 진도 5.2) 등지에서의 지진은 한반도에서의 지진위험이 점차 증가하고 있음을 보여주고 있다. 한편, 한반도에서 가까운 1975년 만주 하이청에서 발생한 지진은 진도 7.2의 크기였고 지진예보로 인해 대피를 했음에도 인명피해가 1328명에 이르렀다고 한다. 역사적으로는 799년 신라 혜봉왕 3년 경주 지진으로 100여명 사망기록이 증보문헌비고에 나타나 있고, 조선왕조실록의 기록에서도 한반도에서의 지진발생빈도가 150년을 주기로 대지진이 발생하고 있음을 살펴볼 수 있다. 또한, 최근 한반도에서 발생하는 지진의 통계를 살펴보면, 1978년에서 2001년까지 총 지진발생회수는 512회로 조사되고 있고, 2001년 한해만 총 43회 발생한 것으로 기록되고 있다. 특히, 1978년부터 2003년까지 한반도에서 진도 3 이상의 지진이 남한에서 438회, 진도 5 이상의 지진은 4회 발생한 것으로 조사되고 있다. 따라서 지역에 따라서 중약의 정도는 있지만 한반도 전역이 지진의 위협에 노출 되어 있고, 진도 3 이상의 중약진 크기의 지진은 거의 한반도 모든 지역에서 발생하고 있다고 판단된다.

---

\* 오명렬, 비회원, 다산이엔지

E-mail : ohmroh@empal.com

TEL : (02)873-1701 FAX : (02)873-1702

따라서 신설 철도노선 구간에 신설되는 철로의 경우, 사전에 열차진동과 중약진의 지진동으로 인한 지반 진동 특성에 관한 영향평가를 사전에 수행하여야 하며 향후 발생 할 수 있는 민원의 요인을 사전에 근원적으로 해결함이 필요하다. 본 논문을 수행하기 위해 성남-여주 간 신설 철도노선 제 6공구 구간을 선정하였다. 구체적으로 본 논문에서 수행할 연구내용으로는 그림 1과 같이 성남-여주 간 신설 철도노선 구간에서 예상되는 열차진동과 지진동에 대하여 지반의 응답특성, 고성토 비탈면의 안정성 평가, 액상화 평가, 고성토 교량 접속부의 안정성을 포함한다.

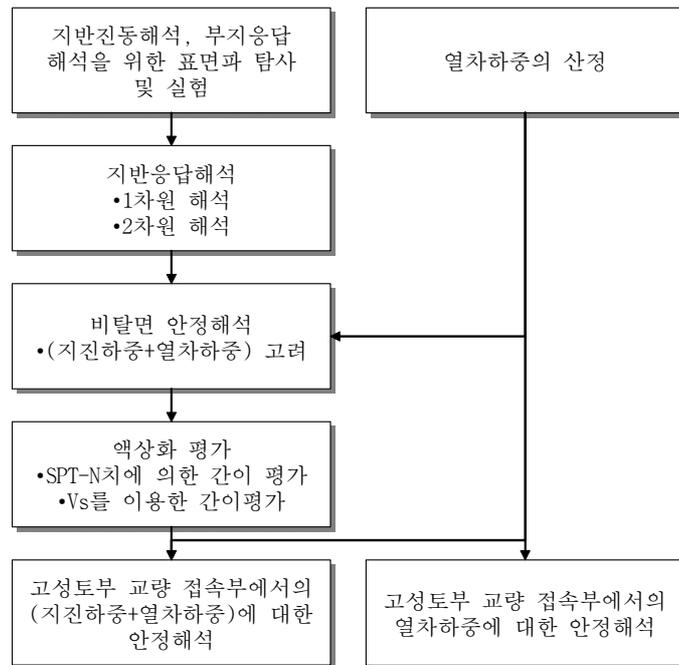


그림 1. 열차하중의 진동영향 평가를 위한 흐름도

## 2. 내진해석과 열차진동해석을 위한 입력 변수 산정

### 2.1 지반의 동적특성평가

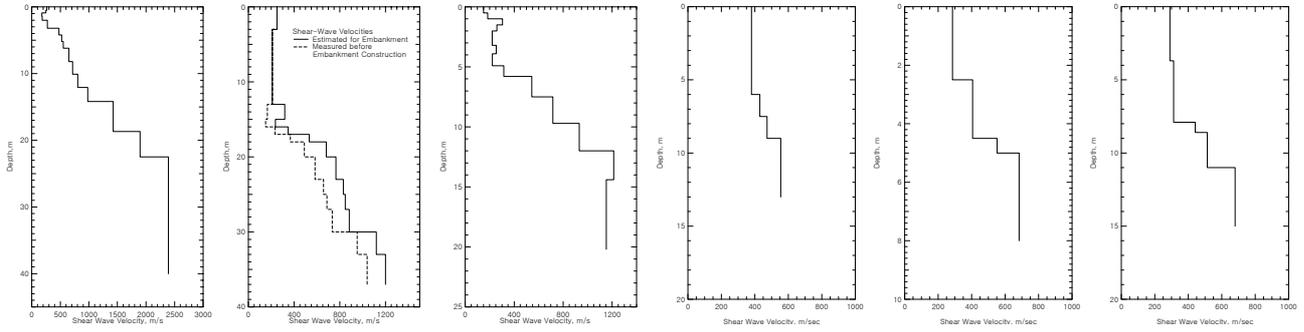
성남-여주 복선전철 제6공구 건설공사 지반의 내진성능 평가를 위하여 요구되는 기본 물성으로는 지반의 현장전단파 속도와 지반의 전단탄성계수 및 재료감쇠비의 전단변형률특성 등이다. 이를 위하여 본 논문에서는 그림 2와 같이 성남-여주 복선전철 제6공구 건설공사 지반 중 6지점에서 현장전단파 속도조사를 위해서 CAP-SASW 실험과 MASW 실험, 지반의 전단탄성계수 및 재료감쇠비의 전단변형률특성을 위해서 공진주 실험을 수행하였다.



그림 2. 지반조사가 수행된 지점

CAP-SASW 실험으로 곤지암 정거장, 초월터널 종점부, 초월교 단층부의 현장전단파속도를 측정하였고 MASW 실험으로 대쌍 정거장, 곤지암천교, 곤지암교 시점부의 현장전단파속도를 측정하였다. 각 지

역의 전단파속도 주상도는 그림 3에 정리하였고 공진주 실험 결과는 6개 지점 중 초월터널 시점부의 결과를 대표로 하여 표 1에 정리하였다.



(a)콘지암 정거장 (b)초월교 단층부 (c)초월터널 시점 (d)대쌍 정거장 (e)콘지암교 시점 (f)콘지암천교

그림 3. 전단파속도 주상도

표 1. 초월터널 시점의 전단탄성계수와 재료감쇠비의 변형률 특성

위 치	초월터널 시점 고성토부			
전단탄성계 수				
재 료 감쇠비				
지 층	상부노반	하부노반	방적층	풍화암/연암
근 거	국내유사지반자료		현장시료	문헌(Seed)

## 2.2 열차하중의 산정

열차의 운행으로 인한 진동이 지반에 전달되었을 때 지반의 진동에 대한 영향과 특성을 평가하기 위하여 열차의 하중을 차량과 궤도의 모형화를 통하여 산정하였고, 이를 기초로 열차의 이동하중에 의한 궤도의 동적해석과 궤도의 불규칙성으로 인한 동적해석을 수행한 후 이들 성분의 조합에 의한 지반 전파하중을 산정하였다. 지반-구조물 상호 작용계를 적절히 모형화하기 위하여 무한요소를 도입하였으며 지반의 감쇠효과를 함께 고려하였다. 또한 열차의 주행에 의한 지반의 진동과 응력전달은 크게 다음과 같은 두가지 성분에 의해 발생되어진다.

- 이동축하중(quasi-static load) : 열차 차량이 특정 지점을 통과하여 열차의 자중이 궤도에 미치는 접촉강성에 의한 변위를 고려한 하중성분
- 조도성분하중(roughness load) : 궤도의 노면조도(roughness)로 인한 차량과 궤도의 상호작용에

의해 추가적으로 발생하는 하중성분  
 결과적으로 노반에 미치는 열차의 하중은 열차 차체 이동축하중(quasi-static load)과 불균일한 조도 성분하중(roughness load)의 합으로 결정되어진다.

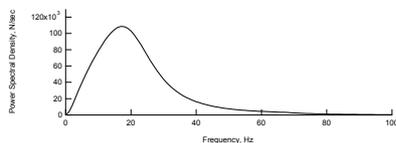
표 2. 열차하중 산정을 위한 열차와 궤도의 제원

	변수	입력 자료	
차 량	축중 : 최대승객하중 200ton/량 고려	제어차 (T <sub>c</sub> )	22×10 <sup>3</sup> ×9.8 N
		구동차 (M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> )	14.125×10 <sup>3</sup> ×9.8 N
		부수차 (T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> )	11.375×10 <sup>3</sup> ×9.8 N
	차륜질량	제어차 및 부수차 = 1363 kg	
	차륜과 레일사이의 강성	구동차 = 1800 (kg)	
		1.4×10 <sup>9</sup> (N/m)	
차량편성	T <sub>c</sub> + M <sub>1</sub> + M <sub>2</sub> + T <sub>1</sub> + T <sub>2</sub> + M <sub>1</sub> + M <sub>2</sub> + T <sub>c</sub> 총 8 량		
레 일	단위길이 당 질량	60 kg/m	
	탄성계수	2.06×10 <sup>11</sup> N/m <sup>2</sup>	
	관성질량	3.09×10 <sup>-5</sup> m <sup>4</sup>	
레일 패드	단위길이 당 강성	8.17×10 <sup>7</sup> N/m	
	재료감쇠계수	0.1	
PC 침목	단위길이 당 질량	600 kg/m	
자갈 도상	단위길이 당 강성	3.69×10 <sup>7</sup> N/m	
	재료감쇠비 계수	0.15	

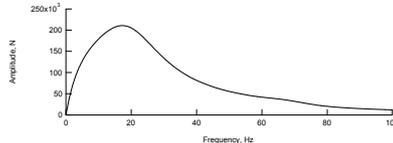
(a) 시속 120km

(b) 시속 200km

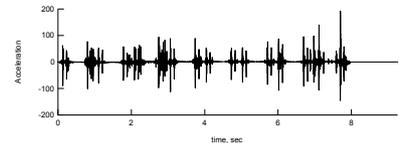
그림 4. 8량의 열차하중 재하에 대한 이동축중의 시간이력



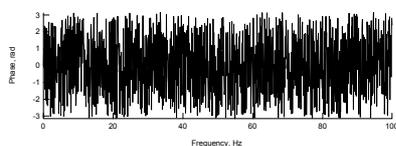
(a) 조도성분하중에 의한 등가평면 하중의 파워스펙트럼밀도



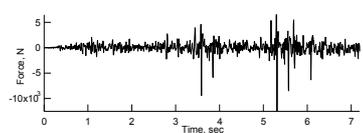
(b) 조도성분하중에 의한 등가평면 하중의 선형스펙트럼 진폭



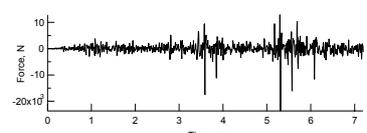
(c) 실제 측정된 열차 진동의 시간이력



(d) 실제 측정된 열차 진동의 위상각 성분

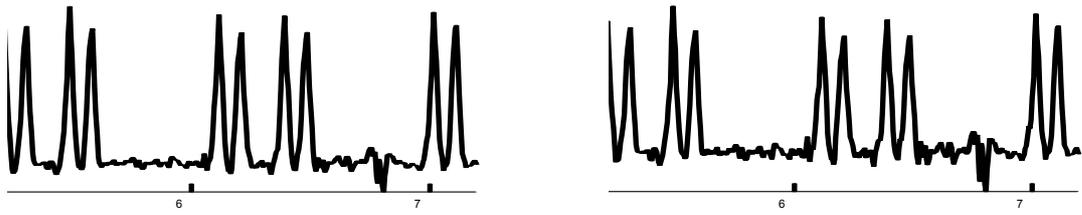


(e) 산정된 조도성분하중의 시간이력(시속120km)



(f) 산정된 조도성분하중의 시간이력(시속200km)

그림 5. 궤도의 어드미턴스와 레일조도로 인한 조도성분하중과 시간이력



(a) 시속 120km

(b) 시속 200km

그림 6. 8량의 열차하중 재하에 대한 이동축하중과 조도성분하중의 조합

### 3. 지반응답특성 평가

#### 3.1 지반내진해석의 일반

건설교통부의 규정에 의하면, 철도 구조물은 내진 1등급 구조물로서, 1000년 주기의 지진에 대해서도 안전하게 설계되어야 한다. 따라서 본 논문에서도 지진하중의 산정 시 1000년 주기의 지진을 고려하여 내진해석을 수행하였다. 지진에 대한 지반응답해석을 위해서 항만 및 어항시설에서 규정한 내진 해석지침을 따랐다. 항만 및 어항시설의 내진해석 관련 규정은 건교부에서 토목구조물의 내진설계 상위개념을 규정한 이후 가장 우선적으로 설계기준화된 것으로, 향후 기타 토목구조물의 내진설계 기준도 항만 및 어항시설의 기준을 참고하고 있다. 특히 철도구조물의 경우는 지반내진해석과 관련된 구체적인 기준이 제시되고 있지 않아서, 본 논문에서는 항만 및 어항시설의 규정을 참고하였다.

본 논문에서 수행한 지진에 대한 지반응답해석의 절차는 그림 7에 제시된 바와 같이 지반조사 및 설계입력자료 선정, 지반응답해석(지표면 최대가속도 및 층별 최대가속도 결정, 응답스펙트럼 결정), 지진에 대한 지반과 지반구조물의 안정성평가(액상화 평가, 비탈면 안정성 평가, 교량접속부 고성토 구간 안정성 평가) 등의 순서로 진행하였다. 입력지진파로는 Hachinohe 지진, Ofunato 지진과 항만 및 어항시설 기준에서 제시하는 설계응답스펙트럼에 부합하는 인공지진을 사용하였다.

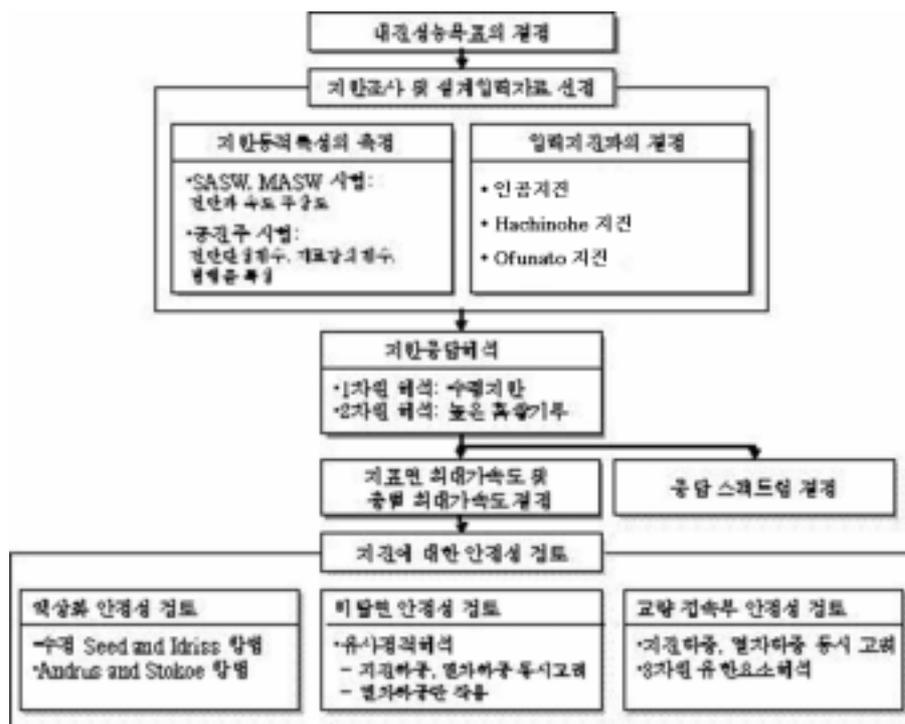


그림 7. 8량의 열차하중 재하에 대한 이동축하중과 조도성분하중의 조합

지반응답해석에 있어서는 지표면이 평면인 경우 1차원 지반응답해석을 수행하였고 고성토 지역에 대해서는 2차원 지반응답해석을 수행하였다. 또한 교량 접속부와 같이 복잡한 지형을 가지고 있는 경우에 대해서는 3차원 유한요소해석으로 지반응답해석을 수행하였다. 지반응답해석으로는 지표면에서의 최대지반가속도, 층별 최대지반가속도, 지표면, 풍화암 상부면, 연암 상부면 등에서 응답스펙트럼 등을 구하였다.

지반응답해석 결과를 이용하여 지반의 액상화 평가를 수행하였다. 지반의 액상화 평가는 SPT-N치를 이용하는 Seed and Idriss 방법과 전단파 속도를 이용하는 Andrus and Stokoe 방법을 적용하였다. 본 논문의 대상 지반은 대부분 충적토로서 사질토사 내에 자갈과 호박돌 등이 혼재해 있는 상황이어서 SPT-N치가 비정상적으로 크게 산정되는 경향이 있다. 따라서 본 논문에서 최종 평가할 때에는 SPT-N 치에 근거한 결과보다는 전단파 속도에 근거한 결과를 더 신뢰하는 것으로 하였다. 그리고 초월교 시점부의 고성토 비탈면의 안정성 해석에 있어서는 열차하중, 지진하중 등을 모두 고려하도록 하였으며, 등가정적해석과 동적해석 모두 수행하여 안정성을 평가하였다. 또한 초월교 시점부의 교량 접속부 안정성 평가는 지진하중과 열차하중을 동시에 고려하여 지반구조물의 안정성을 평가하고자 하였으며, 교대, 자갈 필터층, 성토층 등과 같은 지반구조물 형태의 복잡성 때문에 3차원 해석을 수행하였다.

### 3.2 1차원 지반응답해석

경기지역의 철도 구조물은 건설교통부의 내진구조물 설계에 관한 규정에 의하면 내진 1등급 구조물로 설계되어야 한다. 따라서 그림 8의 지진재해도를 참조하여 0.115g의 최대지반가속도(PGA)를 결정하였다. 최근 정비된 항만 및 어항시설(1999)에 의하면, 내진설계 대상 항만 구조물은 세 가지 지진에 대해 안전하게 설계되도록 규정하고 있다. 즉, 각 등급에 대한 설계응답 스펙트럼을 만족하는 인공지진, 장주기 지진, 단주기 지진 등 세 개의 지진에 대해 안전한 것을 요구하고 있는데, 본 논문에서도 SIMQKE 프로그램으로 구한 인공지진과 장주기 지진인 Hachinohe 지진, 단주기 지진인 Ofunato 지진에 대해서 고려하였다. 6개 지점 중 곤지암 정거장 지점의 인공지진과 실제지진을 그림 9에 제시하였다.

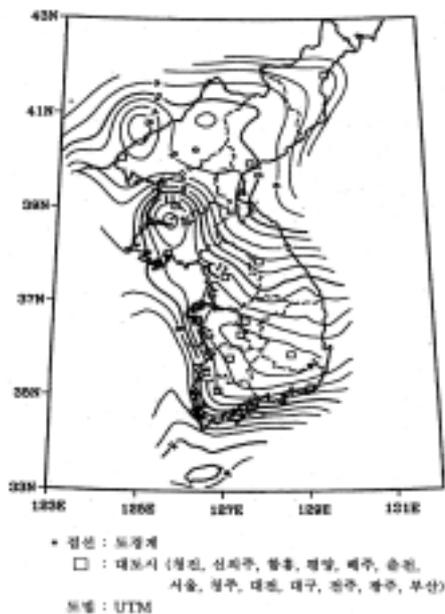
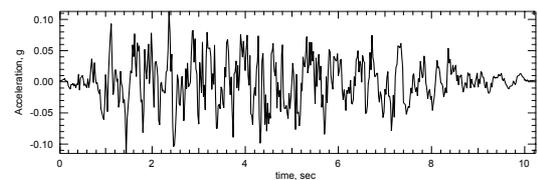
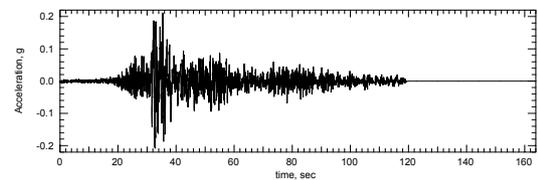


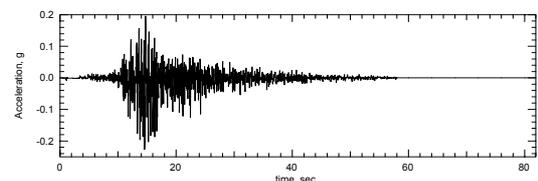
그림 8. 1000년 주기 지진재해도 (항만 및 어항시설 설계기준, 1999)



(a) 곤지암 정거장 지점의 인공지진



(b) Hachinohe 지진



(c) Ofunato 지진

그림 9. 지반응답해석을 위한 입력지진

1차원 지반응답해석은 지반이 횡방향으로 균질하게 형성되어 있고, 지진에 대한 지반의 응답이 기반암에서부터 수직으로 전파되는 SH파에 의해 지배적으로 영향을 받을 때 합리적으로 사용될 수 있는 기법이다. 1차원 해석에 있어서의 기본 가정은 기반암이나 토사층이 횡방향으로 무한히 연장되어 있다는 것인데, 대체적으로 이러한 가정에 기초한 해석결과는 실측 지반응답과 합리적으로 일치한다고 보고되고 있다. 그림 9에 도시된 암반노두 가속도 시간이력을 이용하여 1차원 지반응답해석을 수행하였다. 1차원 지반응답해석은 Shake91 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 3개 지진에 대한 지반응답해석의 결과 중 끈지암 정거장 지점의 결과를 그림 10~14에 도시하였다.

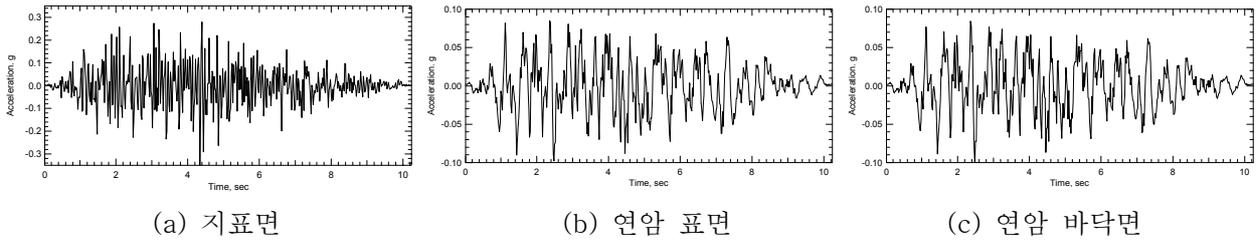


그림 10. 끈지암 정거장 지점의 지반응답해석결과 (인공지진)

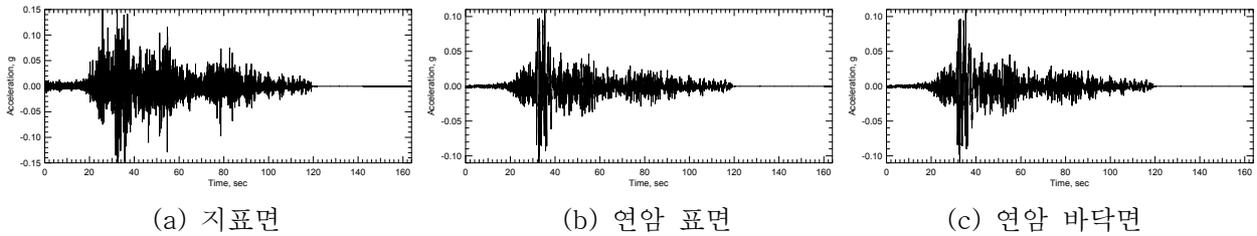


그림 11. 끈지암 정거장 지점의 지반응답해석결과 (Hachinohe 지진)

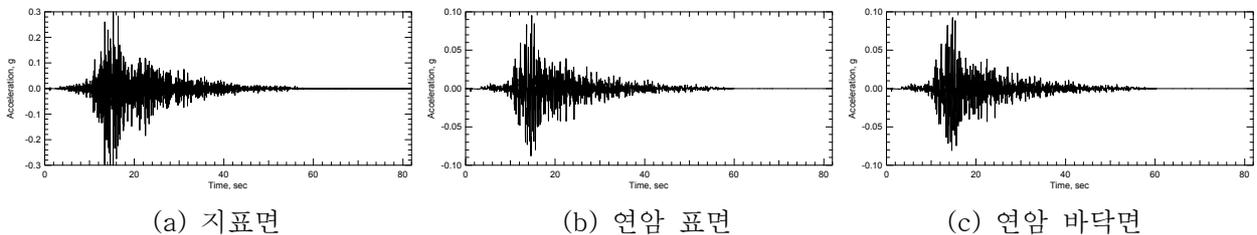


그림 12. 끈지암 정거장 지점의 지반응답해석결과 (Ofunato 지진)

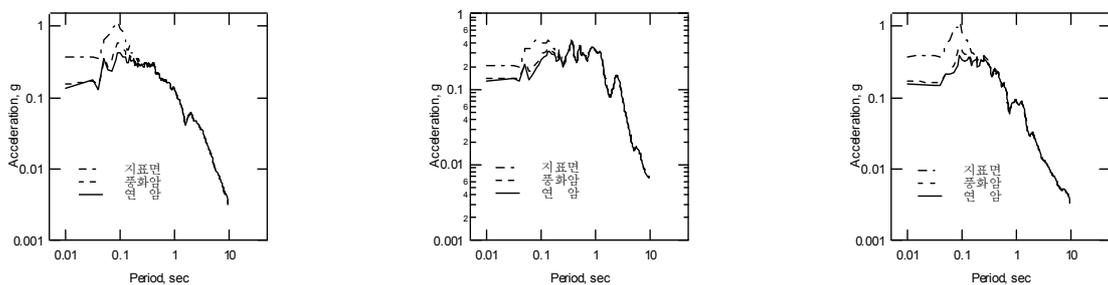


그림 13. 끈지암 정거장 지점의 응답스펙트럼

### 3.3 2차원 지반응답해석

초월터널 시점부에는 13m의 고성토 지반이 존재한다. 고성토 지반의 경우는 그 지형적 특성으로 인하여 1차원 지반응답특성과는 다른 경향을 가지고 있기 때문에, 고성토와 같이 성토부의 지반응답특성을 평가하기 위해서는 2차원 형상을 반드시 고려할 필요가 있다고 판단되므로 지반응답해석도 2차원

형상을 고려한 해석이 수행되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 Shake91과 동일하게 재료의 비선형성을 고려하는 등가선형해석을 수행하면서 2차원 지반응답해석을 가능하게 하는 FLUSH를 사용하여 고성토 지역에 대한 지반응답해석을 수행하였다. FLUSH에 의한 2차원 지반응답해석을 위하여 그림 15와 같은 유한요소망을 형성하였다. 유한요소망은 모두 2294개로 구성되어 있고 유한요소는 최대 1m의 크기를 가지고 있다. 그림 15의 유한요소 모델을 이용한 해석결과는 그림 16에 정리하였다.

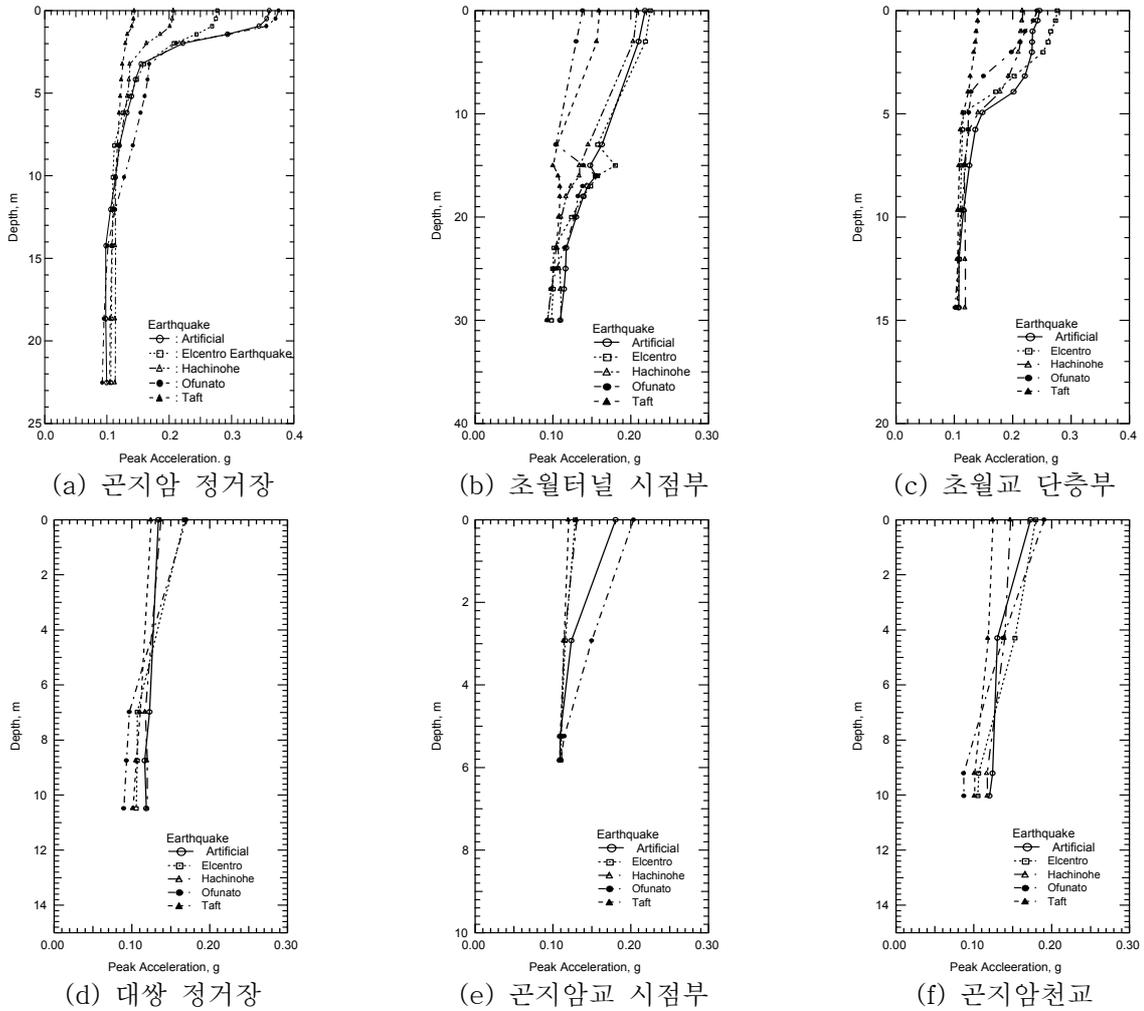


그림 14. 심도별 최대지반가속도

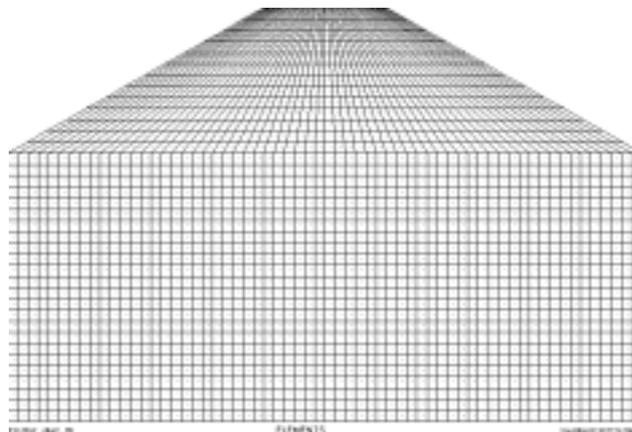


그림 15. FLUSH를 이용한 2차원 지반응답해석을 위한 유한요소망

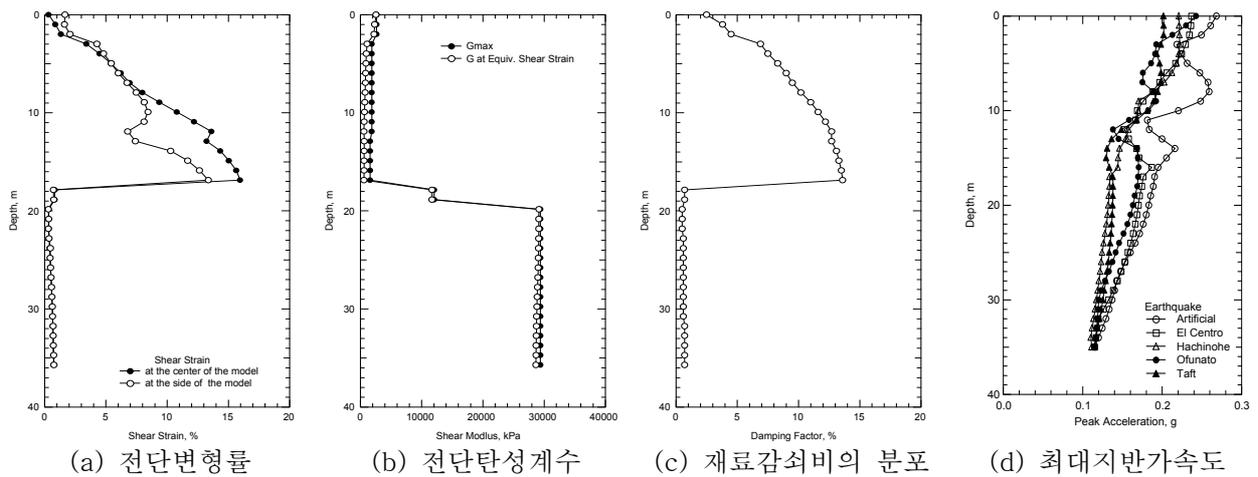
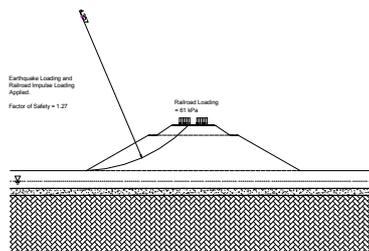


그림 16. FLUSH 해석결과

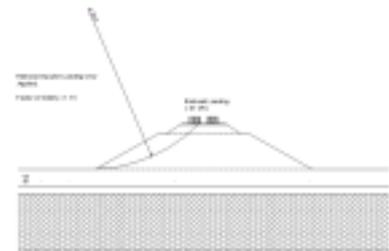
#### 4. 흙쌓기 비탈면 내진해석

초월터널 시점부에는 고성토 비탈면이 존재하므로 Xstabl 프로그램을 이용하여 그림 17과 같은 단면을 이용한 모델을 적용하여 비탈면 안정해석을 수행하였다. 이 비탈면모델에 사용된 노반 물성과 지반물성은 다음 표 3과 같다. 본 비탈면안정해석에서 철도 노반면 밑 -3m 지점에 지하수위를 가정하였고 열차하중과 지진하중을 동시에 받게 된다는 가정 하에 비탈면 안정해석을 실시하였다. 열차하중은 LS-22 표준 활하중으로 적용하였고(표 4), 지진하중은 Flush를 통한 3개의 지진에 대하여 최대지진가속도를 구해 유사정적해석방법에 의해 지진계수를 구한 후 비탈면 안정해석프로그램인 Xstabl에 적용하여 해석을 실시하였다. 원호활동에 대한 허용안전율은 1.2(NAVFAC DM 7.1)로 적용하였다. 해석결과는 표 5와 그림 18과 같다.



(a) 지진진동과 열차진동

그림 17. 해석단면



(b) 상시진동과 열차진동

그림 18. 비탈면 내진해석결과 단면

표 3. 노반과 지반물성표

토 층	습윤단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	포화단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (kN/m <sup>2</sup> )	마찰각 (°)
강화노반	18.6	19.6	0	35
상부노반	18.6	19.6	19.6	32
하부노반	17.6	18.6	7.8	30
붕 적 층	18.6	19.6	0	30
풍 화 암	20.6	20.6	49	32
연 암	23.5	23.5	245	35

표 4. 설계하중 선정

구분	검 토 결 과
상부	철도하중: EL-18=q1+ q2+ q3=4.827tf/m <sup>2</sup>
하중	LS-22 = 6.225tf/m <sup>2</sup>

표 5. 지진하중과 열차하중을 고려한 최소안전율

지진종류 안전율	인공지진	Hachinohe	Ofunato	상 시
Bishop	1.47	1.33	1.48	1.73
Janbu	1.40	1.31	1.45	-

5. 액상화 안정성 평가

5.1 간편예측 액상화 평가

본 논문에서는 지반의 액상화 가능성을 평가하기 위하여, SPT-N치를 이용하는 Seed and Idriss 방법과 전단파 속도를 이용하는 Andrus and Stokoe 방법을 사용하였다. 지반의 액상화에 대한 안정성 평가는 근본적으로 지진에 의해서 야기되는 전단응력에 비해 지반이 저항할 수 있는 전단저항이 얼마나 되는지를 비교하는 것이라고 할 수 있다. 지반이 저항할 수 있는 전단저항이 지진으로 인한 전단응력에 비해 큰 경우는 액상화에 대해 안전하다고 할 수 있다. 따라서 지반의 액상화 평가는 두 가지 영역으로 구분되어 계산이 수행된다. 첫 번째는 지진으로 지반 내에 야기되는 전단응력크기를 결정하는 부분과, 두 번째는 지반이 지진에 저항할 수 있는 전단저항의 크기를 결정하는 부분이다. 이 두 가지 항목을 세세히 정확하게 결정하는 것이 매우 어렵기 때문에, 대부분 간편법을 사용하여 N치나 전단파 속도 등을 이용하여 지반의 전단저항의 크기를 결정하게 된다. 그림 19에 Seed and Idriss 과정을, 그림 20에는 Andrus and Stokoe 과정을 자세히 설명하였다.

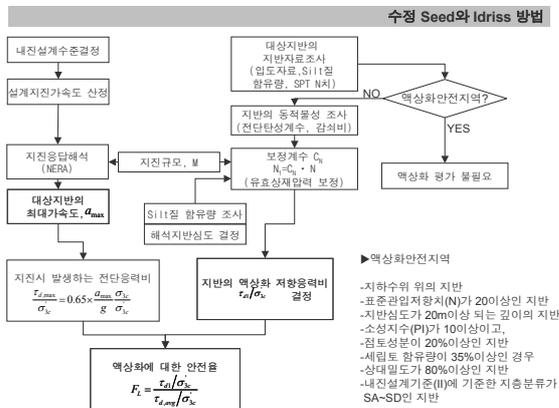


그림 19. 수정 Seed and Idriss 방법

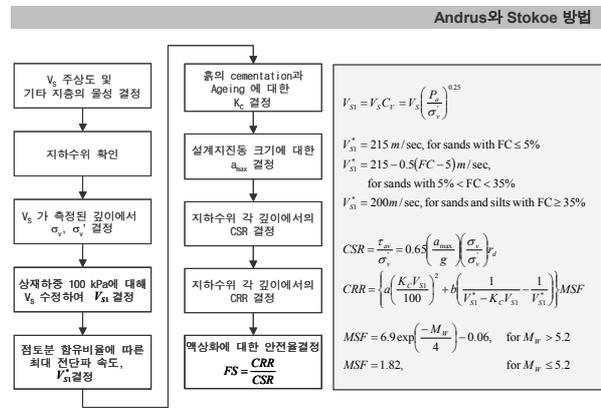


그림 20. Andrus and Stokoe 방법

5.2 액상화 가능지수(Liquefaction Potential Index)

일본지반공학회에서는 공학적인 시각에서 볼 때 특정 지층의 액상화 발생가능성을 평가하는 것도 중요하지만 액상화로 인한 지표면 및 주변 구조물의 피해를 예측하는 것이 더 중요하다고 주장하고 있으며, 이 주장을 정리하여 「Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazard」에 깊이별 액상화 안전율을 이용하여 지표면의 영향을 알아볼 수 있는 방법인 액상화 가능지수(Liquefaction Potential Index, LPI)를 소개하고 있다. 1982년 Iwasaki가 제안한 LPI(Liquefaction Potential Index)는 표준관입저항치와 간편법을 이용하여 얻어진 각 층별 액상화에 대한 안전율과 액상화로 인한 지표면의 영향을 정량화할 수 있도록 하였다. LPI의 범위는 0에서 100이며 Iwasaki 등이 63개의 액상화 발생 지역과 22개의 액상화 미발생 지역을 대상으로 하여 액상화에 의한 지표면의 영향을 다음의 표 6과 같이

범위를 구분하였다.

표 6. LPI범위에 따른 지표면 피해 정도

LPI 범위	지표면 피해 정도
LPI < 5	액상화의 영향이 없음
$5 \leq \text{LPI} < 15$	지표면에 미소한 액상화 영향이 예상됨
LPI > 15	액상화의 영향이 예상됨

최종적으로 간편법과 액상화 발생 위험성을 나타내주는 지표인 LPI를 구해보면 표 7에 정리 한 바와 같다. 표 7에 정리한 바와 같이, Seed and Idriss 방법과 Andrus and Stokoe 방법으로 구한 액상화 안전율은 1.5보다 크고 LPI 지수는 모두 5보다 작으므로 본 논문에서 검토한 6개 부지 모든 곳에서의 액상화 가능성은 현저히 낮은 것으로 판단된다.

표 7. 액상화 평가 결과

위 치	Seed and Idriss 방법	Andrus and Stokoe 방법	액상화 가능지수(LPI)
곤지암 정거장	2.71	1.54	0
초월터널 시점부	2.55	1.51	2.064
초월교 단층부	3.03	1.88	0
대쌍 정거장	2.81	1.72	0
곤지암교 시점부	2.79	1.62	0
곤지암천교	2.83	1.65	0

## 6. 고성토 교량접속부에서 지진하중, 열차하중이 동시에 작용할 때의 지반내진해석

### 6.1 유한요소해석 모델링

열차하중이 동시에 작용된 내진해석을 위한 초월교 터널시점부의 유한요소모델은 그림 21에 도시한 바와 같다. 고성토 교량 접속부에서 열차진동해석과 열차하중이 포함된 내진 해석에 대하여 기하학적인 형태와 운행하는 열차 하중재하 패턴, 지반의 성층구조 등을 고려하여, 초월터널 시점 부지에 대한 유한요소해석모델은 3D 모델링을 적용하였고, 열차하중이 수직방향으로만 재하 되고 지진하중은 Base motion으로 처리하였다. 그리고 지반 양측 면 경계조건이 탄성과의 반사를 초래하지 않도록 하기 위하여 스프링과 dashpot로 설정하였다. 해석에 사용된 총 element 개수는 218,686개이다.

열차진동이 포함된 내진해석을 위하여 지반 내 발생하는 변형률에 상응하는 탄성계수와 재료감쇠비를 입력하였다. 유한요소해석 위한 지반의 물성과 입력 기반암 지진을 구하기 위해서 일차적으로 해당 부지 지표면에서 CAP-SASW 시험을 시행하였고, 해당 부지에서 채취된 시료에 대한 공진주 실험을 시행 하였다. 또한 SIMQKE로 가속도 시간이력곡선 작성하였고, 이렇게 구해진 물성과 지진을 1차원 지반응답해석(SHAKE91)과 2차원 지반응답해석(FLUSH)에 사용하여 SHAKE로부터 deconvolution 된 인공지진, FLUSH로부터는 유한요소 해석에 사용되는 층별 물성치를 구하였다. 지층별로 결정된 전단파 속도와, 포아송비, 매질의 질량, 영탄성계수 등의 물성치를 표 8에 정리 하였다. 또한 내진해석에 사용된 열차하중과 지진하중은 그림 22에 제시하였다. 해석에 사용된 열차하중은 열차속도 120km/h와 200km/h에 대한 하중이고, 열차하중은 접속부 인근 50cm 떨어진 위치와 강화노반 노선 중심부(접속

부에서 29.5m 떨어 진 위치)에 동시에 작용하였다.

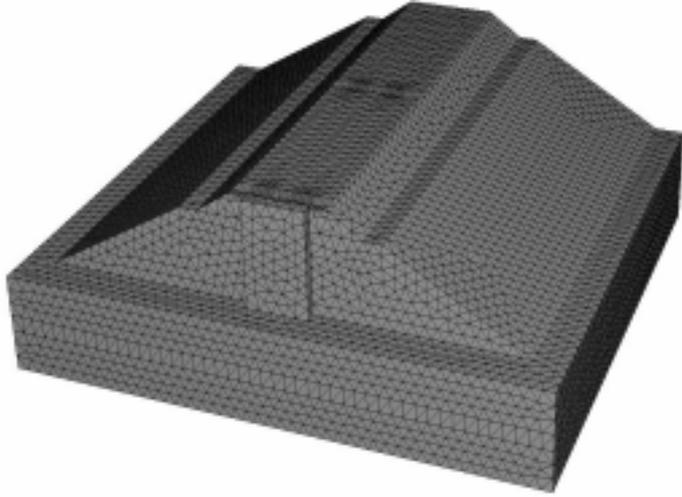
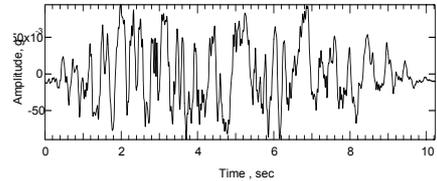


그림 21. 유한요소모델

(a) 열차하중(시속 120km)

(b) 열차하중(시속 200km)



(c) 지진가속도

그림 22. 지반응답해석을 위한 입력지진

표 8. 내진해석을 위한 유한요소해석 모델의 물성치: 초월터널 시점부

층번호	심도 m	전단파속도 m/sec	포와송비	단위중량 kg/m <sup>3</sup>	영탄성계수 N/m <sup>2</sup>	감쇠비	
1	강화노반	0~0.3	350	0.25	1900	5.820×10 <sup>8</sup>	0.02
2	상부노반	0.3~3	250	0.3	1900	3.090×10 <sup>8</sup>	0.02
3	하부노반	3~13	210	0.3	1800	2.060×10 <sup>8</sup>	0.02
4	충적층	13~18	195	0.3	1800	1.780×10 <sup>8</sup>	0.02
5	풍화암	18~20	490	0.22	2400	1.410×10 <sup>9</sup>	0.02
6	연암	2~25	770	0.22	2400	3.470×10 <sup>9</sup>	0.02
0	필터층	강화노반 동일 물성	350	0.25	1900	5.820×10 <sup>8</sup>	0.02
0	접속부	concrete	1500	0.21	2500	1.360×10 <sup>10</sup>	0.02

## 6.2 열차진동이 포함된 내진해석

열차진동이 포함된 내진해석에 대한 유한요소해석 결과를 그림 23~26에 도시하였다. 그림 23~26은 하중재하를 시작한 후 수직변위가 최대가 되는 시점인 2.5초에서 수직변위, 수평변위, 전단응력, 전단 변형률의 분포를 보여주고 있다. 열차하중에 의한 변위보다는 지진에 의한 상하부 노반 주변에 변위가 분포하고 있다. 열차하중 작용 시 내진해석 결과의 변위 분포를 살펴보면 지진에 의한 수평 변위가 영향이 더욱 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, 열차속도 변화에 따른 변위의 영향은 크지 않은 것으로 보이고 있다. 해석결과 노반에서 발생하는 최대 수직변위와 최대 수평변위를 표 9에 정리하였다. 열차 하중이 포함된 내진해석에서 발행되는 교량 접속부 배면 지반 표면을 열차속도 120km/hr의 경우 최대 수직변위가 0.312mm, 최대 수평변위가 23.5mm 계산되었고, 열차속도 200km/hr의 경

우는 최대 수직변위가 0.38mm, 최대 수평변위가 24.3mm로 계산되었다. 철도 설계기준에 의하면 허용 수직 변위는 2.5cm 이므로 본 논문에서 검토하는 열차하중으로 인한 변위는 만족스러운 것으로 판단되었다. 그리고 최대 수평변위는 기준이 존재하지 않는 상황이고, 계산된 최대 변위는 2.43cm에 불과하므로 사면의 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

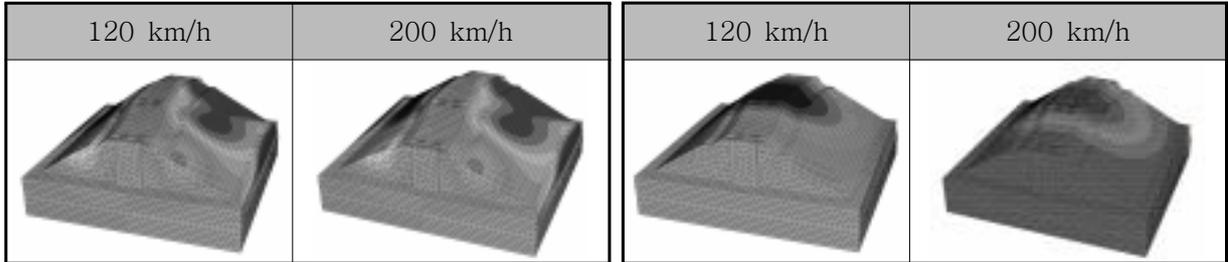


그림 23. 수직변형

그림 24. 수평변형

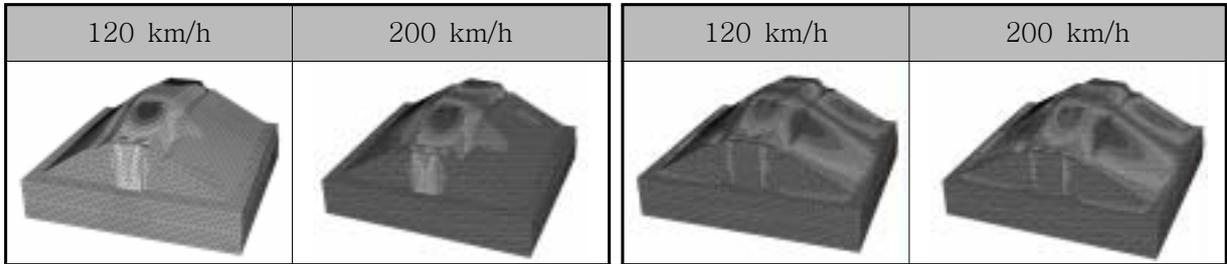


그림 25. 전단응력

그림 26. 전단변형률

표 7.4 열차진동, 지진하중에 따른 최대수직변위, 최대수평변위

열차운행속도	측정항목	열차하중+ 지진하중
120 km/hour	최대수직변위	0.312 mm
	최대수평변위	23.5 mm
200 km/hour	최대수직변위	0.368 mm
	최대수평변위	24.3 mm

## 7. 결론

금세기 들어 한반도에서는 토목, 건축 구조물에 더욱 큰 위협으로 각인되고 있는 지진에 대한 위협을 시공 전에 미리 진단하고 대처하는 노력이 이루어지고 있다. 이번 논문에서는 성남-여주간 철도노선의 지진의 위험 정도를 평가하기 위하여, 해당부지의 지반응답특성, 고성토와 같은 지반구조물의 내진성능 등 지진하중에 대한 종합적인 검토와 안정성 평가를 체계적으로 수행하였다. 본 논문에서 검토한 내진성능 관련 항목은 다음과 같다.

·지반응답해석:

- 심도별 최대지반가속도
- 지표면 최대지반가속도
- 풍화암, 연암, 지표면 응답스펙트럼

·고성토부 비탈면 안정성 평가

- 열차하중과 지진하중이 동시에 재하 되었을 때

- 등가정적해석
- 동적해석
- 액상화 안정성 평가
  - Seed and Idriss의 SPT-N치 방법
  - Andrus and Stokoe의 전단파속도 방법
  - 액상화 가능지수 (LPI) 산정
- 고성토지역의 교량접속부 안정성 평가
  - 열차하중과 지진하중이 동시에 재하 되었을 때
  - 최대 수직변위, 최대 수평변위 평가

이상과 같은 항목에 대한 내진해석은 2개의 정거장 부지를 포함하여 총 6개 지역에 대하여 수행하였으며, 평가한 각 항목에 있어서 모두 안전한 것으로 평가되었다. 내진해석에 사용된 지진은 총 3개로서 인공지진, 장주기 지진인 Hachinohe 지진, 단주기 지진인 Ofunato 지진 등이었다. 본 논문에서 대상 부지로 삼았던 전체 6개 지역은 위치에 따라 기반암의 심도가 다르게 분포되어 있는데, 기반암의 심도가 얇은 지역은 고주파 성분이 많은 지진에 취약하였고, 기반암의 심도가 깊은 지역은 저주파 성분이 많은 지역에 취약한 것으로 평가되었다. 그러나 평가한 항목에 있어서는 모두 안전성이 확보되는 것으로 평가되어, 성남-여주 간 신설 철도노선의 지반구조물 관련 설계가 지진하중과 열차하중의 측면에서 모두 만족스러운 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. A. De Stefano, D. Sabia, L. Sabia (1999). "Probabilistic Neural Networks for Seismic Damage Mechanisms Prediction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* Vol 28 No. 8, p 807 - 821.
2. Bay, J. A. (1997). *Development of a Rolling Dynamic Deflectometer for Pavement Testing*. Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
3. Ganji, Vahid (1997). *An automated inversion procedure for surface wave testing*, Ph. D. Dissertation, The University of New Jersey at New Brunswick.
4. Giovanni, Cascante. (1996). *Propagation of mechanical waves in particulate materials*, ph. D. Dissertation, The University of Waterloo.
5. Giovanni, Cascante., Carlos, Santamarina., najwa Yassir. (1998). *Flexural excitation in a standard torsional-resonant column device*. Canadian Geotechnical journal. J. Vol.35
6. Gucunski, N., Woods, R.D. (1992). "Numerical simulation of the SASW Test," *Soil dynamics and Earthquake Engineering*.
7. Heisey, J. S., Stokoe, K. H., II, Hudson, W. R., and Meyer, A. H. (1982). *Determination of in situ shear wave velocities from Spectral-Analysis-of-Surface-Waves*. Research Report No. 256-2 Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
8. Ian flood, Nabil Kartam Artificial Neural Network for Civil Engineerings: Advanced Features and Applications. "Merging Genetic Algorithms with Neural Networks: Owner-Contractor Prequalification Example," p247-259.
11. Joh, S.-H. (1996). *Advances in Data Interpretation Technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) Measurements*. Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin.
12. Joh, S.-H., and Stokoe, K. H., II (1997). "Impulse Response Filtration Technique for the Determination of Phase Velocities from SASW Measurements." *한국 지반공학회지* 제 13권 1호. pp. 111-121.
13. J H Bungey, (1997). "Evolution-Based Genetic Algorithms for Optimization of Nondestructive Surface Wave Texts on Pavements", *NDT-CE, 97 International Conference*, p 729 - 742.