

# 운영 중인 도로 터널의 내진 성능 평가

안재광<sup>1</sup> · 박두희<sup>2\*</sup> · 김동규<sup>3</sup> · 김광염<sup>3</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원

## Evaluation of seismic performance of road tunnels in operation

Jae-Kwang Ahn<sup>1</sup>, Du-Hee Park<sup>2\*</sup>, Dong-Kyu Kim<sup>3</sup>, Kwang-Yeom Kim<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Graduate Student

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Associate Professor

<sup>3</sup>Geo-Infrastructure Research Department, Korea Institute of Construction Technology (KICT), Senior Researcher

**ABSTRACT:** This study evaluates the seismic performance of road tunnels designed before the provisions for seismic design of tunnels were first established in 1999. Extensive design data and site investigation reports are investigated to select tunnels sections that are considered to be most susceptible to seismically induced damage under earthquake loading. Detailed analyses are performed on selected tunnels. The methods used are method of displacement and dynamic analysis. In performing the method of displacement, which is a type of pseudo-static analysis method used for underground structures, full domain and reduced domain modeling were used. The dynamic analyses are performed using finite difference method and using nonlinear constitutive model. Comparisons show that the reduced domain method of displacement match very closely with the dynamic analysis, demonstrating that it is the most suitable method for evaluating the seismic performance of road tunnels built in rocks. It is also shown that road tunnels, for which seismic design were not applied, are safe under the seismic risks corresponding to an earthquake with a return period 1000 years. It is concluded that additional seismic retrofit of tunnels is not necessary.

**Keywords:** Tunnel, Seismic design, Method of displacement, Dynamic analysis

**요 지:** 본 연구에서는 터널에 대한 내진설계 기준이 처음으로 제정된 1999년 이전에 설계된 현재 운영중인 도로 터널의 지진에 대한 성능을 평가하였다. 이를 위하여 1999년 이전에 설계된 도로 터널 자료를 조사하였으며 이 중에서 가장 지진에 취약할 것으로 예상되는 대표 단면을 선정하여 이들에 대한 정밀한 안전성 평가를 수행하였다. 사용된 해석방법은 응답변위법과 동적해석이며 모두 유한차분해석 프로그램을 이용하였다. 응답변위법은 전체영역과 축소된 해석 영역에 대한 해석을 수행하였으며 동적해석은 비선형 해석을 수행하였다. 해석 결과, 축소된 해석영역에 대한 응답변위법과 동적해석의 결과가 매우 유사한 것으로 나타났으며 내진설계가 적용되지 않은 터널들도 재현주기 1000년 지진에 대해서는 안전하며 추가적인 보강은 불필요한 것으로 나타났다.

**주요어:** 터널, 내진설계, 응답변위법, 동적해석

## 1. 서론

지진동에 대해서 터널은 지반운동이 지표면에 비하여 작고, 겹보기 단위 체적 중량과 이로 인한 관성력이 작으며, 구조물이 지반에 둘러싸여 있어 일산 감쇠가

크기 때문에 지상구조물에 비해서 안전한 것으로 알려졌다(Park et al., 2010a). 하지만 Kobe 지진(일본, 1995), Chi-Chi 지진(대만, 1999), Niigata 지진(일본, 2004) 등으로 인하여 지하구조물에 심각한 피해가 발생하였으며 터널도 지진에 대해서 안전하지 않다는 사실이 밝혀졌다. 국내에서는 지진에 의한 지하구조물의 피해 사례가 보고된바 는 없지만(Park et al., 2007), Kobe 지진의 영향으로 1997년에 처음으로 내

\*Corresponding author: Du-Hee Park

E-mail: dpark@hanyang.ac.kr

Received February 6, 2013; Revised February 13, 2013;

Accepted February 25, 2013

진설계기준(MOCT, 1997)이 제정되었으며 1999년에 터널에 대한 내진설계 기준이 제정되었고(MOCT, 1999) 2007년 기준이 보다 강화되었다(MOCT, 2007a). 또한 국내 실정에 맞는 터널의 내진설계의 연구를 통해 현실적인 내진설계의 제안이 활발하게 진행되고 있다 (Park and Yoo, 2010). 반면, 1999년 이전에 시공·설계된 터널에는 내진설계가 적용되지 않았으며 이들의 안전성은 아직 평가된 사례가 전무하다. 국내 교통 시스템의 핵심 인프라인 터널에 지진으로 인한

구조적 피해가 발생할 경우 심각한 인명·경제적 피해가 발생할 수 있으므로 이들의 안전성을 규명하는 것은 매우 중요하다고 판단된다. 본 연구에서는 내진설계가 적용되지 않은 현재 운영 중인 도로 터널의 내진 성능을 분석하였다. 이를 위해 설계기준 및 피해 사례를 기반으로 지진 시 가장 취약하다고 판단되는 터널 구간을 선정하였으며 이들에 대한 정밀한 유사정적 및 동적해석을 수행하여 내진 보강의 필요성을 평가하였다.

Table 1. Selected tunnels

Case No.	National Expressway	Tunnel	Completion Year
1	Chungju	Suanbo 1	1992
2		Suanbo 2	
3	Yeongju	Gopyeong (start point)	1994
4		Gopyeong (end point)	
5	Yeongju	Changpyeong	1996
6	Gangneung	Yongdae	2000

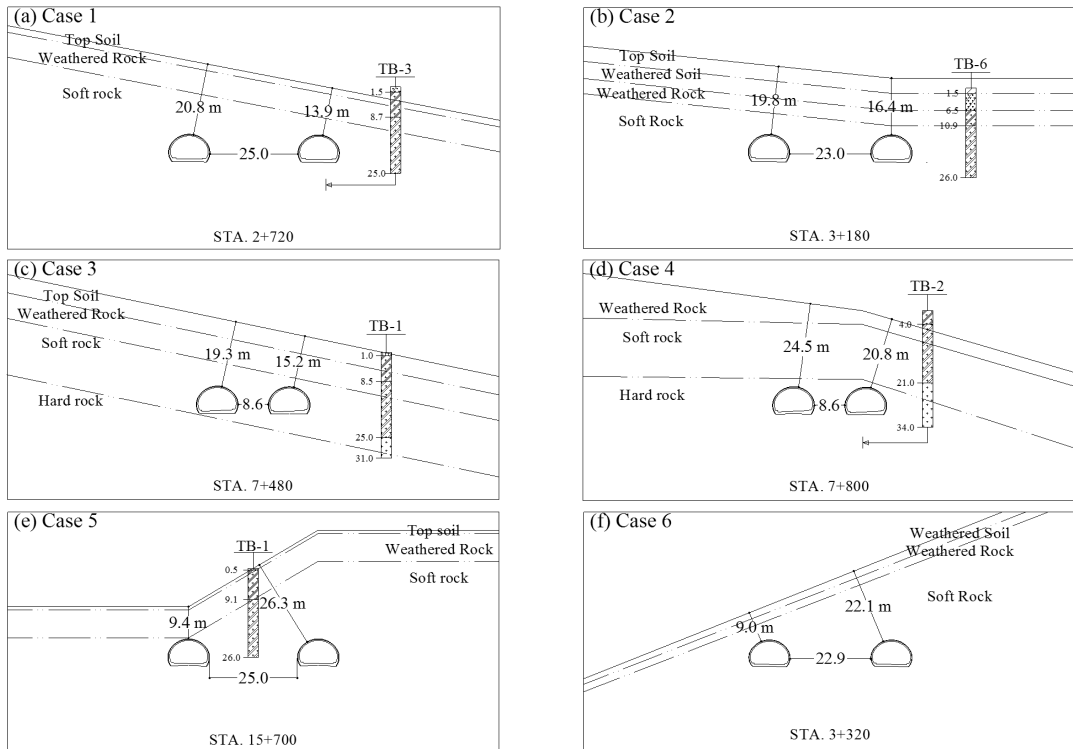


Fig. 1. Cross section of selected tunnels

## 2. 대상터널 선정

2007년 터널설계기준(MOCT, 2007a)에는 1) 지반이 약한 곳의 시·종점 갱구부 2) 터널 간 접속부 3) 액상화가 우려되는 연약지반 구간 4) 단층대 및 파쇄대 통과구간 5) 편토압이 예상되는 터널 구간에 대해서 내진 안전성을 검토하도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 국내에서 운영 중인 도로 터널 중 내진설계가 적용되지 않은 1999년 전후 준공된 터널 설계자료를 조사하였으며 이들 중에서 지진에 취약할 것으로 예측되는 단면을 선정하였다. 총 26개 터널의 설계자료를 분석한 결과, 액상화가 우려되는 구간은 전무한 것으로 나타났다. 터널간 접속부 중에서 구조적으로 지진하중에 의하여 특별하게 취약하다고 판단되는 구간이 없어서 포함되지 않았다. 국내에는 알려진 활성 단층구간이 없으므로 이에 대한 해석이 불필요하였으며 국부적인 파쇄대 구간도 조사되지 않아서 포함되지 않았다. 지반이 약한 곳의 갱구부 구간에 대해서는 사면 안정성을 평가하였지만, 본 논문에서는 이 구간에 대해서 수행된 유사정적 사면안정해석 결과는 제시하지 않았다. 본 논문에서는 편토압이 작용하는 구간에서 터널 본선의 내진 성능을 평가한 과정과 결과만을 다루었다. 26개의 터널 중에서 큰 편토압이 작용하는 구간은 총 6구간으로 조사되었으며 이들은 Table 1에 정리하였으며 선정된 터널의 횡단면도는 Fig. 1에 도시하였다.

## 3. 수치해석 모델링

지진 시 터널의 응답은 응답변위법 또는 동적해석으로 평가된다. 응답변위법은 특별히 지하구조물의 지진해석을 위하여 고안된 유사정적해석법의 일종으로 동적인 지반운동을 정적으로 변환하는 점은 진도법과 같으나, 관성력이 아니라 변위를 강제적으로 적용한다는 점에서 차이가 있다(Park et al., 2010a). 이는 터널에 발생하는 응력은 관성력에 의한 영향보다 주

변지반의 상대 변위에 의해 강제적으로 발생하기 때문이다(Lee and An, 2001). 응답변위법은 먼저 자유장 지반 변위를 계산한 후 이를 구조물에 적용한다. 자유장 변위는 경험적인 방법(단일 또는 이중 코사인법) 또는 1차원 지반응답해석 프로그램으로 계산한 후 이를 지하구조물을 둘러싸고 있는 지반에 변위경계조건으로 강제적으로 적용하게 된다. 응답변위법은 해석이 간편하다는 장점이 있는 반면, 동적인 터널-지반 상호작용은 모사할 수 없다.

동적해석법은 가장 정밀하게 터널의 동적 응답을 평가할 수 있는 방법이지만 하부 및 측면 경계조건 설정, 비선형 구성모형, Rayleigh 감쇠 등 해석 수행시 어려움이 많아 전문가가 아니면 정확하게 수행할 수 없다는 단점이 있다(Park et al., 2010b). 본 연구에서는 선정된 모든 터널에 대하여 응답변위법과 동적해석법을 모두 적용하여 이들의 안정성을 평가하였다. 해석에 사용된 프로그램은 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>(Itasca, 2008)이다. 유한차분해석법은 운동방정식을 풀기에 적절하며 대변형에도 적용될 수 있어 지반지진공학 분야에서는 가장 널리 사용되고 있다.

지진에 대한 터널의 응답은 크게 종방향과 횡방향 응답으로 분류할 수 있다. 종방향 응답은 터널 축과 평행한 방향으로 전파되는 지진파에 대한 터널의 거동을 나타내며 횡방향 응답은 터널 축과 수직인 방향으로 전파되는, 즉 상향 전파파에 대한 터널의 전단변형을 나타낸다. 터널은 횡방향 응답에 가장 취약한 것으로 알려져 있어(Wang, 1993) 본 연구에서는 터널의 횡방향 응답만을 모사하였으며 이는 Fig. 2에 도시하였다. 해석 시 먼저 정적 상태에서 라이닝에 작용하는 응력을 산정하기 위해서 하중분담율을 적용한 터널 굴착해석을 수행하였다(Sedarat et al., 2009). 이때, 측면은 수평방향으로 고정하였으며 하부 경계는 수평×수직 방향으로 모두 고정하였다. 터널 굴착으로 인하여 터널 라이닝에 발생하는 응력을 계산한 후, 측면경계조건을 수직방향 구속(수평방향 변위 허용)

으로 전환한 후 1차원 지반응답해석으로 산정된 지반 변위를 측면 및 상부 경계에 적용하였다. 이때 변위는 측면경계에만 적용하면 안되고 상부경계에도 변위를 적용해주어야 한다. 수평지반일 경우, 지표면에서의 변위가 일정하여 변위 적용에 문제가 없지만 본 연구에서와 같은 사면 내부에 위치한 터널의 경우 양 측면 경계면과 경사 지표면에서 위치별로 변위가 상이하어 변위 적용이 쉽지 않다. 본 연구에서는 해석영역 양 측면과 중심부에서 각각 지반응답해석으로 지반변위 주상도를 계산하였으며 상부경계의 나머지 위치에서는 보간법을 통하여 변위를 산정하였다.

본 논문에서는 위와 같은 전체 해석영역에 대한 해석과 더불어서 터널 중심으로부터 각각의 경계까지 1.5D인 정방형 형상의 축소된 영역에 대한 해석을 수행하였다(Fig. 3). 해석영역의 폭 3.0D는 경계의 영향이 없는 최소의 폭이며 이는 일련의 해석을 통하여 확인하고 적용하였다. 지진 시 터널 라이닝에 발생하는 응력은 초기 지중응력과 굴착에 의하여 발생하는 응력과 전단변형으로 인하여 발생하는 응력의 합이다. 응답변위법 수행 시, 1) 초기 응력은 고려하지 않으며 전단변형의 영향만을 모사하는 경우 또는 2) 터널 굴착 과정부터 모사한 후, 이에 전단변형을 적용

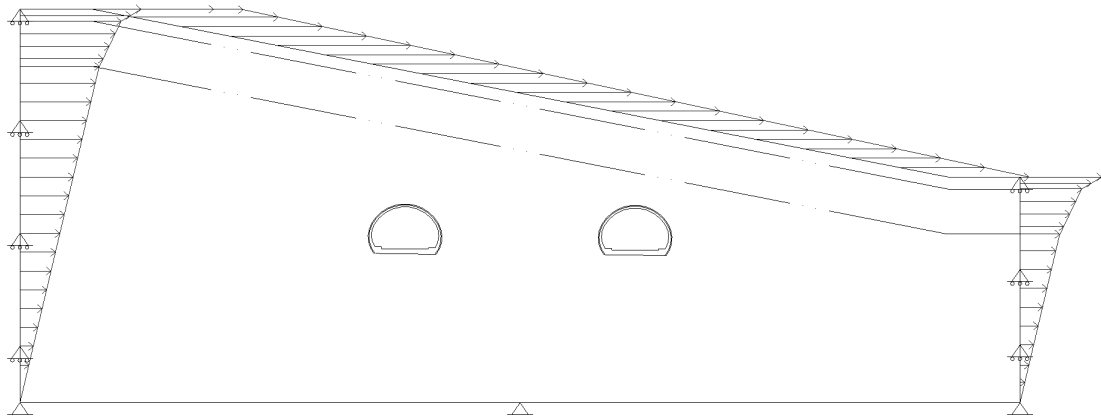


Fig. 2. Displacement boundary conditions applied for the full scale simulation (Case1)

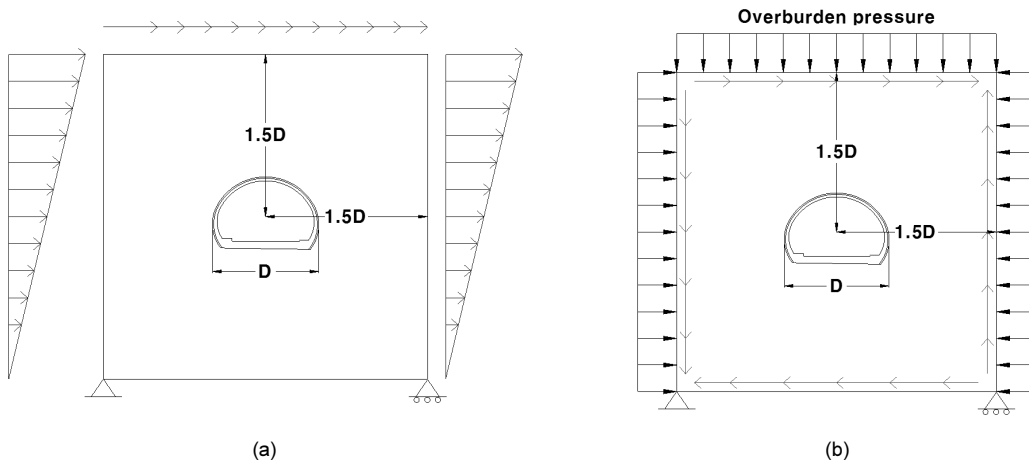


Fig. 3. Boundary conditions applied for reduced scale simulations (a) displacement boundary conditions applied when gravity is ignored (b) shear stress applied when gravity is applied and tunnel excavation process is modeled

하여 최종 응답을 계산할 수도 있다.

초기 응력을 고려하지 않는 방법에서는 중력은 적용하지 않으며 측면 및 상부경계에 변위 또는 전단응력을 적용하여 순수전단 조건으로 모델링한다. 일반적으로는 변위 경계 조건을 적용하며 이 방법의 모식도는 Fig. 3a에 도시하였다. 이 방법 적용 시 별도의 해석에서 초기 상태 라이닝에 작용하는 응력을 계산한 후 전단변형으로 인하여 발생하는 응력을 합하여서 최종 응력을 계산한다.

터널 굴착 과정까지 모델링 하는 방법의 모식도는 Fig. 3b와 같다. 축소된 영역에 대하여 해석을 수행하므로 중력을 적용하면 실제에 비하여 지중응력이 작아지므로 중력은 적용하지 않으며 등가 상재압을 가해주어야 한다. 일반적인 해석에서는 상부에 상재압

을 적용하고 측면경계는 수평변위 구속 - 수직변위 허용 조건을 적용하고  $K_0$  조건을 사용하면 지중 내수평압이 계산되어 적용된다. 하지만 지진 해석에서는 전단변형을 모사하기 위해서 측면경계에서 수평변위를 허용해야 하기 때문에 이와 같은 경계조건을 적용할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는  $K_0$  조건을 적용하지 않고 이에 상응하는 수평응력을 측면에 적용하였다. 하부 경계는 하부 좌측 끝단 노드만을 고정하고 나머지 노드에는 수직변위 구속 - 수평변위 허용 조건을 적용하였다. 수직 및 수평응력을 경계에 가해진 후, 전체영역 해석과 마찬가지로 굴착을 모사하기 위해서 하중분담율을 적용하였다. 이와 같이 하중경계조건을 적용하면 변위경계조건을 적용할 수 없으므로 측면 및 상부에 전단응력을 가해주었다(Fig. 2).

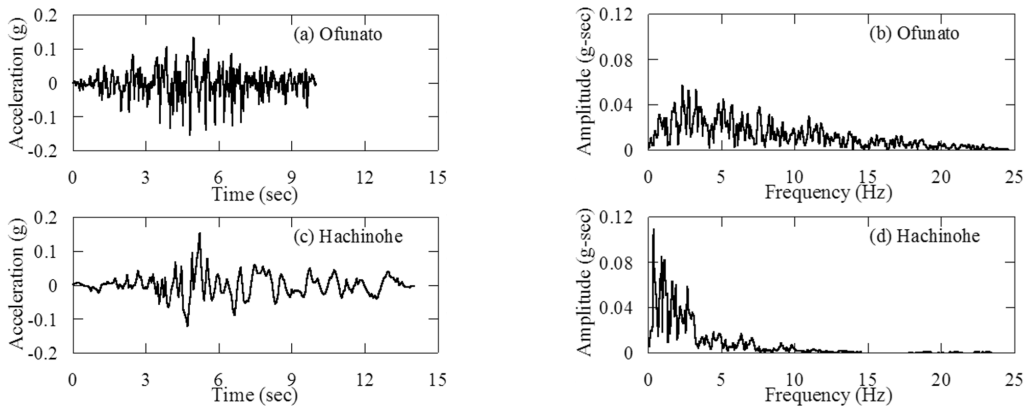


Fig. 4. Input ground motions

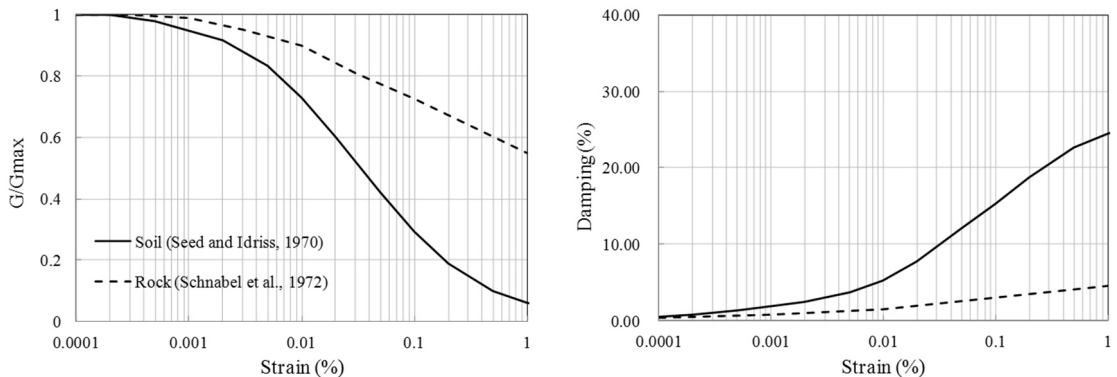


Fig. 5. Dynamic curves used in the analyses (Seed and Idriss, 1970; Schnabel et al., 1972)

등가전단응력의 크기는 목표하는 전단변형률을 유발 하도록 산정되었다.

이와 같이 터널 굴착과 지진으로 인한 전단변형을 동시에 모사하는 것은 쉽지 않다. 반면 굴착과정을 모사하지 않는다면 중력을 적용할 필요가 없어 해석을 간편하게 수행할 수 있다는 큰 장점이 있다. 또한, 터널 굴착 과정을 유한요소 - 유한차분해석으로 모사하지 않고 지반을 등가 스프링으로 모사하는 해석의 결과를 사용할 수도 있게 된다. 물론 이와 같은 결과는 지반이나 터널 라이닝이 비선형 거동을 하는 경우에는 적용될 수 없다. 두 방법의 차이는 다음 절에서 비교하였다.

지반 내의 자유장 지반변위는 1차원 지반응답해석 프로그램(Park, D., Hashash, Y.M.A., 2004a)로 등가 선형해석을 수행하여 계산하였다. 유효전단변형률 계수로는 일반적으로 사용되는 0.65를 적용하였으며 반복횟수는 10회를 적용하였다. 해석 시 지진파의 필터링이 발생하지 않으며 25 Hz 이상을 전파할 수

있도록 층 두께를 계산하여 적용하였다. 입력지진파는 암반노두 운동으로 적용하여 하향 전단파가 해석 영역으로 반사되는 것을 방지하였다. 사용된 입력 지진파는 국내에서 널리 사용되는 Ofunato와 Hachinohe 가속도 시간이력이며 이들은 내진설계기준(II) (MOCT, 1997)에 의거하여 지진구역 I 구역, 재현주기 1000년 지진  $S_B$  지반에서의 최대지반가속도인  $0.154g$ 로 크기를 조절하였다(Fig. 4). 지반의 비선형 동적곡선은 Seed and Idriss (1970)의 평균 곡선을 토사층에 적용하였으며, 암반층은 Schnabel et al. (1972)이 제시한 곡선을 적용하였다(Fig. 5).

요소의 종류와 크기는 응답변위법과 아래에 설명될 동해석과 동일하다. 터널은 2절점 빔 요소를 적용하였다. 지반은 솔리드 요소로 모델링하였으며 Constant Strain Triangular Element (CST)를 적용하였다. 지반의 비선형성을 모사하는 정밀한 해석을 수행하기 위하여 구성모형으로는 Sig3 모델이 사용되었으며 이는 다음과 같다.

Table 2. Sig3 model parameters

	Dynamic curve	Sig3 model parameter
Soil	Seed and Idriss (1970)	$a = 1.003$ $b = -0.6$ $x_0 = -1.5$
Rock	Schnabel et al (1972)	$a = 1.03$ $b = -1$ $x_0 = 0.01$

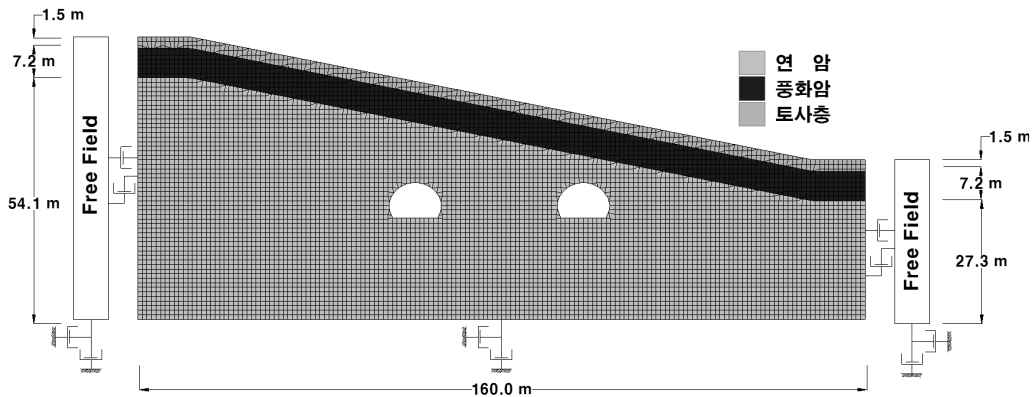


Fig. 6. Mesh and boundary conditions applied in the dynamic analysis (Case 1)

$$G_{\tan} = \frac{a}{1 + \exp((x_0 - \log(\gamma))/b)} \quad (1)$$

여기서,  $G_{\tan}$ =접선전단탄성계수,  $L = \log(\gamma)$ ,  $x_0$ ,  $a$ ,  $b$ 는 curve fitting 변수이다. 본 연구에서 사용된 동적곡선은 국내외적으로 널리 사용되고 있는 Seed and Idriss (1970)와 Schnabel et al. (1972)이 제시한 곡선을 사용하였다. 비선형 곡선의 입력변수는 각각 설계 전단탄성계수와 감쇠비 곡선 맞춤형 최적값이 선정되었으며 계산된 곡선의 입력변수는 Table 2에 제시하였다. 지반을 모사하기 위한 솔리드 요소는 주파수 필터링이 발생하지 않으며 25 Hz 이상을 전파할 수 있도록 크기가 결정되었다. 동적해석 시 하부경계에는 점성경계를 적용하여 하향 지진파가 해석영역으

로 반사되는 것을 방지하였다. 측면경계에는 마찬가지로 반사파를 제거하기 위해서 자유장 경계 조건을 적용하였다. Fig. 6에는 Case 1에 사용된 격자망과 경계조건을 도시하였다.

시간영역해석에서는 구성모형이 선형으로 거동하는 미소변형률에서의 감쇠를 모델링해야 한다. 다음과 같이 정의되는 Rayleigh 감쇠공식(Rayleigh and Lindsay, 1945)을 사용하여 지반의 미소변형률 감쇠를 모사한다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

여기서,  $[C]$ =감쇠행렬,  $[M]$ =질량행렬,  $[K]$ =강성행렬이며  $a$ 와  $b$ 는 다음과 같이 계산되는 계수이다.

Table 3. Rayleigh damping parameters

Case No.	$f_{site, soil}$ (Hz)	$f_{site}$ (Hz)	$\xi$ (%)	$a$	$\beta$
1	8.92	3.49	3	3.03	1.07E-04
2	3.75	2.38	3	1.27	2.55E-04
3	5.91	3.21	3	2.01	1.62E-04
4	9.62	3.79	3	3.26	9.93E-05
5	10.83	3.75	3	3.67	8.82E-05
6	10.34	3.49	3	3.51	9.24E-05
Input motion $f_n$	Ofunato = 2.44 Hz, Hachinohe = 0.63 Hz				

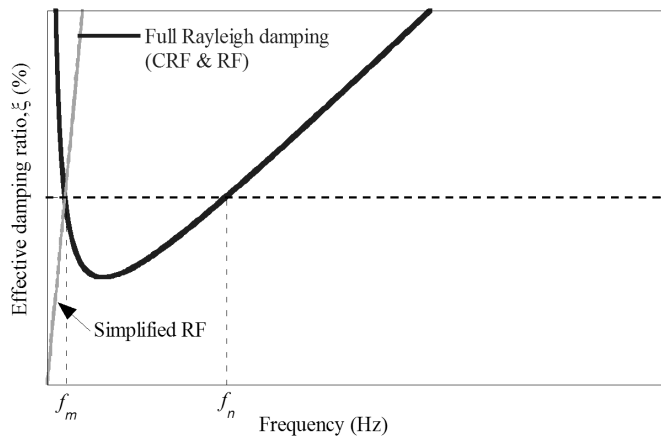


Fig. 7. The frequency dependence of Rayleigh damping formulation and the definitions of  $f_m$  and  $f_n$  (Park and Hashash, 2004b)

$$\alpha = 4\pi\xi \frac{f_m f_n}{f_m + f_n} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\xi}{\pi} \frac{1}{f_m + f_n} \quad (4)$$

여기서,  $x$  = 감쇠비,  $f_m$ 과  $f_n$ 은 Rayleigh 공식의 주파수의존성을 결정하는 주파수이다. Rayleigh 감쇠공식은  $f_m$ 과  $f_n$ 값에서는 목표 감쇠비와 일치하며  $f_m$ 과  $f_n$  사이에서는 과소예측, 이외의 주파수에서는 과대예측한다 (Fig. 7). 수평 토층에 대한 지반응답해석 시, 암반층은 포함하지 않으므로 토층에 대한 고유주기를 계산해서  $f_m$ 과  $f_n$ 을 결정하면 된다. Hashash and Park (2002)와 Kwok et al. (2007)은 각각 1차와 8차 그리고 1차와 5차 모드를 제안하였다. 토층 부지 고유주파수를  $f_{site}$  라고 한다면 1차와 5차 모드에 상응하는 주파수는  $f_m$ 과  $f_n$ 을 각각  $f_{site}$ 와  $9f_{site}$ 가된다. 국내 지반에서는 비교적 저심도 지반이 주를 이루므로 두개의 모드 세트의 영향은 크지 않다. 반면, 본 연구에서와 같이 암반층에서는, 모드를 토층과 다르게 적용해야 한다. 토층에서 1차와 5차 모드(또는 1차와 8차 모드)를 적용하는 이유는 이 주파수 범위에서의 증폭이 크기 때문에 이 범위에서의 감쇠비를 정확하게 모델링 해야 하기 때문이다. 하지만 암반층 통과 시 증폭은 거의 발생하지 않으며 입력지진과 고유의 주파수 특성을 대부분 보전한다. 따라서 암반층에서는 입력지진파의 탁월주파수에서 목표 감쇠비와 일치하도록 감쇠비의 변수를

결정해야 한다. 이를 위해서는  $f_m$ 은 해석영역 전체의 고유주파수 값을 적용하고  $f_n$ 은 입력지진파의 탁월주파수를 적용해야 한다. 본 연구에서 적용된 Rayleigh 감쇠공식의 변수는 Table 3과 같다.

본 연구에서 사용된 물성은 Table 4과 같고, 터널의 보수적인 평가를 위해서 슛크리트가 지반압을 받지 않고 하중은 콘크리트 라이닝이 모두 저항한다고 가정하였다. 이와 같은 가정은 지진해석 시 일반적으로 적용되고 있다. 터널의 라이닝은 콘크리트 구조설계 기준(MOCT, 2007b)에 의거하여 라이닝에 허용되는 휨응력과 전단응력을 계산하였다.

#### 4. 해석결과

Fig. 8은 Case1에 대해서 응답변위법으로 계산된 축력, 모멘트, 전단력을 나타낸다. 해석에는 Ofunato 지진파를 적용하였다. 결과는 터널 굴착, 지진으로 인한 응답(중력 미 적용), 최종(굴착+지진)의 3가지 조건에 대한 해석결과다. 결과적으로 초기 상태 해석과 지진으로 인한 응답만을 모사한 각각의 해석결과를 합한 결과는 굴착과정부터 지진에 대한 응답까지 순차적으로 적용한 결과(Fig. 8의 최종)와 동일한 것을 확인할 수 있다. 이는 초기 상태에 대한 응답이 이미 계산되었을 경우, 터널 굴착과정까지 새롭게 모사할 필요가 없으며 지진에 대한 응답만을 계산하면 된다는 것을 의미한다. 물론 이는 전절에서 설명한 바와 같이 지반과 터널 라이닝이 비선형 거동을 한다면 적용할 수 없다. 하지만 특수한 경우를 제외하고는

Table 4. Materials

	Density (kN/m <sup>3</sup> )	Shear Velocity (m/sec)	Poisson's ratio
Top Soil	19	110.0	0.30
Weathered Soil	20	300.0	0.28
Weathered Rock	22	500.0	0.28
Soft Rock	24	1000.0	0.27
Hard Rock	26	1500.0	0.25
Tunnel lining	Thickness = 0.30 m, Elastic Modulus= 23,000 MPa, Moment of inertia = 0.00225 m <sup>4</sup> , Poisson's ratio = 0.2		



암반과 터널 라이닝을 고려하는 해석을 수행하는 사례는 극히 제한적이므로 이와 같이 중첩해서 적용하는 것은 문제가 없을 것으로 판단된다. 참고로 본 논문에서 Fig. 6이후에 제시한 모든 결과는 터널 굴착과 지진 시의 거동을 순차적으로 모사한 해석의 결과이다.

해석 결과, Case 1에서는 터널 굴착으로 인하여 발생하는 응답이 지진으로 인하여 발생하는 응답에 비하여 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다(Fig. 8). 이는 터널은 암반 지반에 위치하여 전단변형이 크지 않기 때문이다. 또한, 축력은 어깨부에서 가장 크게 계산된 반면 모멘트와 전단력은 하부 측면에서 최대

값이 발생하는 것으로 계산되었다.

전절에서 기술한 바와 같이, 응답변위법 수행 시, 전체영역(Fig. 2)과 축소영역(Fig. 3)에대한 해석을 수행하였으며 Case 1, 2에 대해서 결과를 비교하였다(Fig. 9). 터널 라이닝에 작용하는 최대 힘응력 및 전단응력은 전체영역 해석이 축소영역 해석보다 작게 계산되었다. 이는 전체영역 해석 수행 시 측면 및 상부 경계에 계산된 변위를 적용하여도 해석영역이 크기 때문에 중심부에 위치한 터널에 경계면에 작용하는 변위가 완벽하게 전달되지 않으며 변형의 크기가 감소하기 때문이다. 따라서, 이와 같은 경우에는

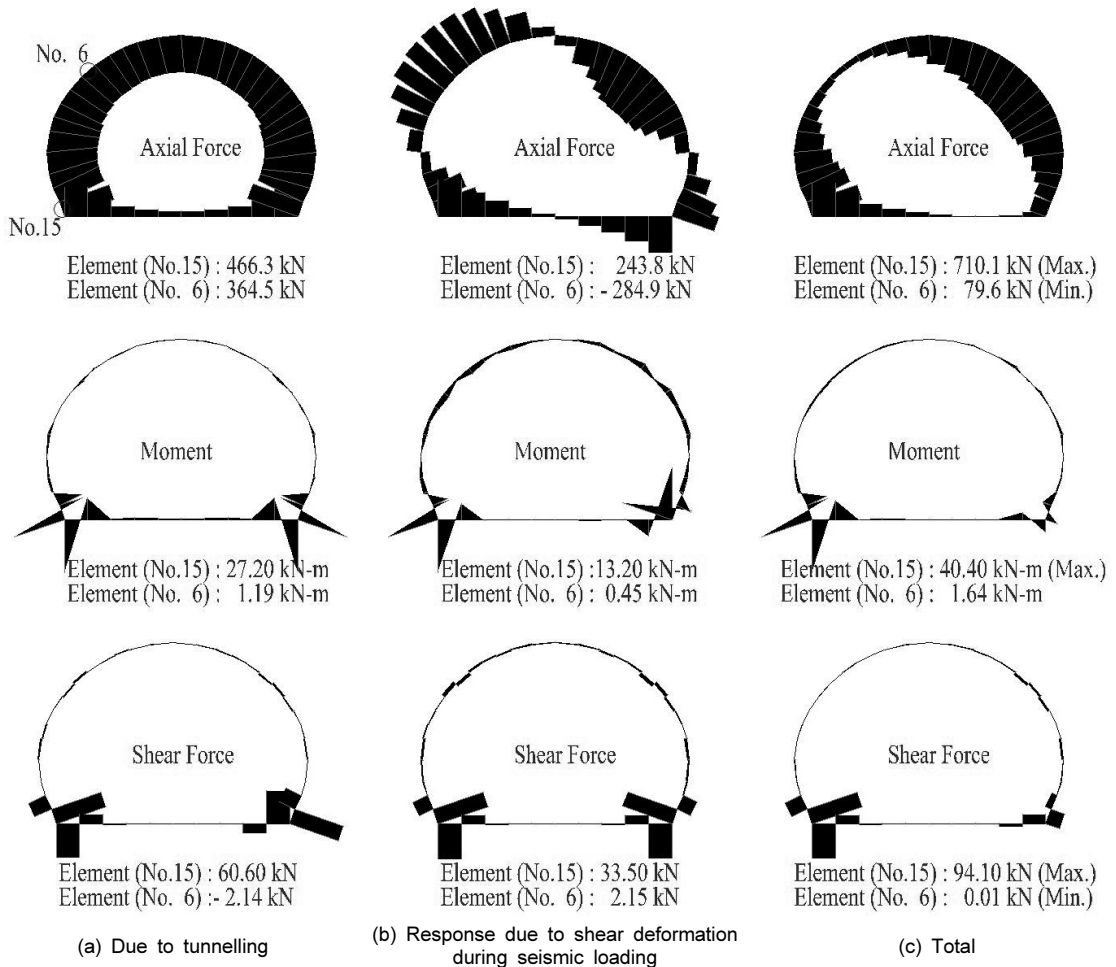


Fig. 8. Response of tunnel lining (a) due to tunnelling (b) response due to shear deformation during seismic loading (c) total (tunnelling + shearing)

축소영역 해석을 수행해야 한다. Fig. 10에는 축소영역에 대한 응답변위해석과 동적해석에서 계산된 라이닝의 최대 휨응력과 최대 전단응력을 비교하였다. 응답변위법과 동적해석의 차이는 매우 작은 것으로 나타났다으며 이는 암반에 위치한 도로 터널의 경우, 해석 수행이 어려운 동적해석을 수행할 필요가 없다는 것

을 의미한다. 6개의 경우에서 모두 지진과의 영향도 크지 않은 것으로 계산되었다. 모든 터널에서 계산된 휨응력 및 전단응력을 콘크리트 라이닝 허용응력과 비교하여 안전성을 평가하였다. 콘크리트 라이닝의 허용강도는 재령 28일 강도인  $f_{28}=24\text{MPa}$ 을 적용하여 휨응력 및 전단응력은 각각  $9.6\text{MPa}$ ,  $0.39\text{MPa}$ 으로

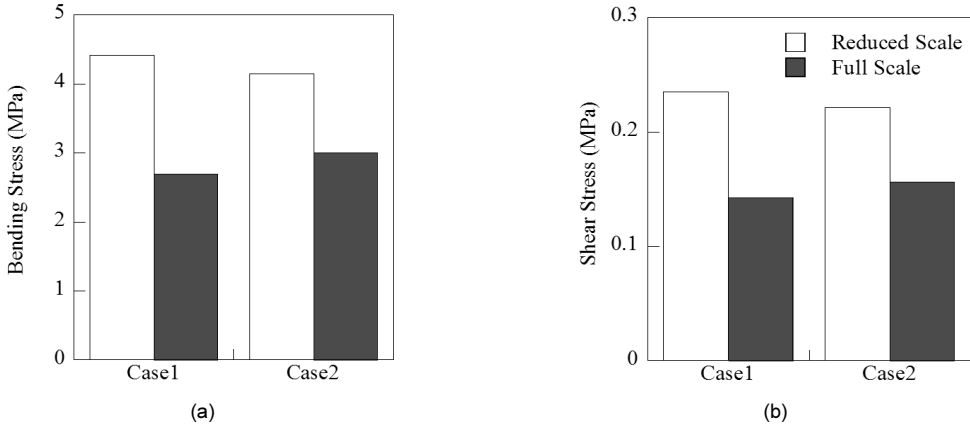


Fig. 9. Comparison of calculated stress between full-scale and reduced-scale simulations (a) maximum bending stress (b) maximum shear stress

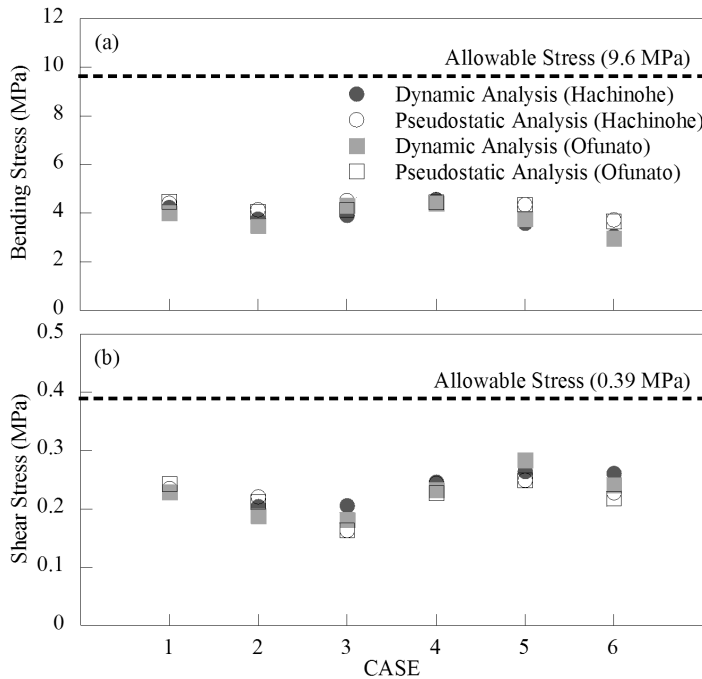


Fig. 10. Comparison of bending and shear stresses computed by method-of-displacement and dynamic analyses

계산되었다. 검토 결과 모든 터널에서 허용응력(MOCT, 2007b)보다 작게 계산되어 모두 안전한 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 내진설계가 의무화된 1999년 이전에 설계 및 시공된 운영 중인 도로 터널 중 편토압 발생이 예상되는 터널에 대하여 지진 시 안정성을 검토하였다. 터널의 안정성은 응답변위법과 동적해석법을 모두 적용해서 평가하였으며 라이닝에 작용하는 휨응력과 전단응력이 허용치를 초과하는지를 평가하였다. 본 논문에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 동적해석 수행 시 Rayleigh 감쇠공식의 계수는 토사층과 암반 층이 각각 다르게 적용되어야 한다. 토층은 1차와 8차(또는 1차와 5차) 모드에 상응하는 계수를 적용해야 하며 암반층은 1차 모드와 입력지진파의 탁월주파수에 대한 계수를 적용해야 한다. 암반층에 토층과 동일한 주파수를 적용하면 고주파수를 필터링할 수 있으므로 주의가 요구된다.
2. 응답변위법 수행 시, 전체 해석영역의 경계면에 변위를 적용하면 터널이 위치한 해석영역 중심부에서의 변위 및 변형률은 목표 값보다 작을 수 있다. 가장 효과적이면서 정확하게 터널에 목표 전단변형을 유발하는 방법은 축소 영역 해석인 것으로 나타났다. 축소 영역 해석 수행 시에도 터널 굴착의 영향을 동시에 모사하지 않고 지진에 대한 응답만을 계산한 후, 이를 초기 상태의 응답에 합하여 최종응력을 계산하는 것이 간편하면서도 정확한 것으로 나타났다. 축소 영역 해석에서 해석영역은 터널 중심으로부터 경계면까지 대략 2.5D~3.0D 이 적절한 것으로 나타났으며 이에 중력을 적용하지 않고 전단응력을 경계면에 적용하여 전단변형만을 유발하여 터널의 응답을 계산하는 방법이 가장 적절한 것으로 나타났다.

3. 모든 경우에서 응답변위법과 2차원 동적해석법간의 차이는 극히 작은 것으로 나타났다. 따라서 매우 연약한 지반에 대한 해석을 수행하지 않는 경우에는 응답변위법으로 지진에 대한 터널의 안정성을 평가하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.
4. 모든 사례에서 터널에 발생하는 휨응력과 전단응력은 허용응력에 비하여 현저하게 작은 것으로 나타났다. 즉, 내진설계가 적용되지 않은 국내 도로 터널은 재현주기 1000년 지진에 대하여 안전한 것으로 판단되며 추가적인 보강은 불필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2011년도 한국건설기술연구원의 지원으로 수행되었으며(운영 중인 터널의 내진 타당성 검토 No. 2011-000-0000-1762) 이에 깊은 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Hashash, Y.M.A., Park, D. (2002), "Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 7, pp. 611-624.
2. Itasca. (2008), FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua, Itasca Consulting Group Inc.
3. Kwok, A.O.L., Stewart, J.P., Hashash, Y.M.A., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z., Yang, Z. (2007), "Use of exact solutions of wave propagation problems to guide implementation of nonlinear seismic ground response analysis procedures", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, pp. 1385.
4. Lee, I.M., An, D.J. (2001), "Seismic analysis of tunnel structures", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 3, No. 4, pp. 3-15.
5. MOCT. (1997), Korean Seismic Design Standard,

- Ministry of Construction and Transportation (in Korean)
6. MOCT. (1999), Manual on tunnel design, Ministry of Construction and Transportation (in Korean)
  7. MOCT. (2007a), Manual on tunnel design, Ministry of Construction and Transportation (in Korean)
  8. MOCT. (2007b), Concrete Structure Design Criteria, Ministry of Construction and Transportation (in Korean)
  9. Park, D., Hashash, Y.M.A. (2004a), DEEPSOIL, University of Illinois at Urbana-Champaign.
  10. Park, D., Hashash, Y.M.A. (2004b), "Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 249-274.
  11. Park, D., Shin, J.H., Yun, S.U. (2010a), "Seismic analysis of tunnel in transverse direction part I: Estimation of seismic tunnel response via method of seismic displacement", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, pp. 57-70.
  12. Park, D., Shin, J.H., Yun, S.U. (2010b), "Seismic analysis of tunnel in transverse direction part II: Evaluation of seismic tunnel response via dynamic analysis", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, pp. 71-85.
  13. Park, I.J. and Yoo, J.H. (2010), "Aseismic design concept for underground space based on site response analysis", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 12, No. 3, pp. 257-264.
  14. Park, S.Y., Park, I.J., Lee, J.J., Choi, S.-H., Kim, S.-I. (2007), "Analysis of dynamic behavior for underground structures under earthquake loading", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 2, pp. 205-217.
  15. Rayleigh, J., Lindsay, R. (1945), "The theory of sound, 1945": Dover, New York.
  16. Schnabel, P.B., Lysmer, J.L., Seed, H.B. (1972), SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA.
  17. Sedarat, H., Kozak, A., Hashash, Y.M.A., Shamsabadi, A., Krimotat, A. (2009), "Contact interface in seismic analysis of circular tunnels", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, No. 4, pp. 482-490.
  18. Seed, H.B., Idriss, I.M. (1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses.", Report EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
  19. Wang, J.N. (1993), "Seismic design of tunnels: A state-of-the-art approach", Monograph 7. New York, NY: Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc.