

## 응답변위법에 의한 터널의 내진해석

### Seismic Analysis of Tunnel Response by Response Displacement Method

윤세웅<sup>1)</sup>, Se-Ung Yun, 신중호<sup>2)</sup>, Jong-Ho Shin, 박두희<sup>3)</sup>, Duhee Park

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>2)</sup> 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>3)</sup> 한양대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

**SYNOPSIS :** In this study, seismic analysis is performed using simplified method, analytical solution and numerical analysis based on one-dimensional seismic site response analysis. The results show that analytical solution of tunnel response is predicted more conservative than numerical solution. And simplified method is not appropriate for seismic analysis of tunnel response. In addition, it is reasonable to determine shear-modulus reduction ratio performing seismic site response analysis. to consider ground nonlinear-behavior.

**Keywords :** seismic analysis of tunnel, one-dimensional seismic site response analysis, shear modulus reduction ratio, ground nonlinear-behavior

## 1. 서 론

국내 내진설계기준에서 제안되는 응답변위법의 핵심은 지반반력계수와 지반변위를 합리적으로 산정하는 것이다. 하지만 내진설계기준에서 제안하고 있는 지반반력계수 산정법은 지상구조물의 기초에 적용하는 방법으로 지하구조물에 대한 적용성이 검증되지 않았으며, 산정방법에 있어서도 탄성계수 추정방법에 따라 추정계수를 사용함으로써 불확실성을 내재하고 있다. 또한 해석에 사용되는 지반의 동적전단 탄성계수 산정에 있어서 지반의 비선형성을 반영하기 위하여 성능수준별 동일한 보정계수를 적용함으로써 내진해석시 대상지반의 강성과 발생할 변형률의 크기를 고려하지 못하게 된다. 본 연구에서는 터널의 합리적인 내진해석방법을 제안하기 위하여 다양한 해석기법을 이용하여 터널의 응답을 계산하였으며 해석결과를 비교하여 해석기법의 정확성, 적절성, 그리고 적용범위를 규명하였다.

## 2. 터널의 내진해석 기법

### 2.1 단순예측법

志波由紀夫 등(1991)은 터널의 횡단방향 응답변위법에서 자유장 지반의 응답변위를 구하여 터널에 작용시키는 방법을 이용하여 다음과 같은 근사식을 제안하였다.

$$N = -\frac{3\pi EI}{R^2 H_g} U_h \sin\left(\frac{\pi H}{2H_g}\right) \left(2 + \frac{G_s R^3}{6EI}\right) \sin 2\theta \quad (1)$$

$$M = \frac{2\pi EI}{2RH_g} U_h \sin\left(\frac{\pi H}{2H_g}\right) \sin 2\theta \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 라이닝의 탄성계수,  $G_s$ 는 지반의 전단탄성계수,  $I$ 는 터널라이닝의 관성모멘트,  $U_h$ 는 지표면 상대변위,  $R$ 은 터널반경,  $H$ 는 터널중심의 깊이,  $H_g$ 는 지층의 두께이다

## 2.2 해석해

Wang(1993)은 주위 지반과 터널사이의 경계조건에 따라 Full-slip과 No-slip으로 나누어서 해석해를 유도하였다. Full-slip은 지반과 터널사이에서 마찰력이 존재하지 않다고 가정하였을 경우의 해인 반면 No-slip은 지반과 터널이 일체로서 거동할 경우의 해이다. 지반과 터널의 경계가 Full-slip조건일 경우 터널 라이닝에 발생하는 모멘트는 식 3과 같다. 하지만 라이닝에 발생하는 최대 축력의 경우 Full-slip조건에서는 과소예측할 수 있기 때문에 No-slip조건을 사용하는 것이 권장된다(Hoeg, 1968; Schwartz 등, 1980).

$$M_{max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1 + \nu_m)} R^2 \gamma_{max} \quad (3)$$

$$T_{max} = \pm K_2 \tau_{max} R = \pm K_2 \frac{E_m}{(1 + \nu_m)} R \gamma_{max} \quad (4)$$

## 2.3 수치해석해

수치해석해는 전단변형에 의하여 터널에 발생하는 힘과 모멘트를 계산하기 위하여 FLAC 2D를 이용하였다. 수치해석 수행시 지반응답해석으로부터 터널의 위치에서 계산된 최대 전단변형률을 지반에 정적으로 가해주게 되며 이로 인하여 터널에 발생하는 응답을 계산하였다. 수치해석시 측면 경계는 수직변위만을 구속하였으며 터널과 지반은 No-slip 조건을 적용하였다. 수치해석해의 경우 단순예측해와 해석해와 비교하여 지반의 비선형 거동 모사가 가능하며 비원형 터널에 대해서도 해석이 가능한 장점이 있다.

## 3. 터널의 응답 비교

### 3.1 해석모델

지반응답해석에 사용된 입력지진파는 Ofunato지진파로써 재현주기 1000년인 최대지반 가속도(PGA) 0.154g로 스케일링 하였으며, 기반암의 운동을 계산하기 위하여 Deconvolution을 적용한 후 해석을 수행하였다(그림 1). 해석에 사용된 지반의 물성치는 표 1과 같이 가정하였으며 해석에 사용된 모델과 지반의 동적곡선은 그림 2와 같다.

표 1. 해석에 사용된 지반 물성치

	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	전단파속도 (m/sec)	포아송비	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	동적곡선
Profile 1	120,000	150	0.30	20	S&I(1970) Lower
Profile 2	480,000	300	0.30	20	S&I(1970) Mean
Profile 3	1,460,000	500	0.30	22	S&I(1970) Upper
Profile 4	4,000,000	800	0.20	25	Schnabel(1980) Rock

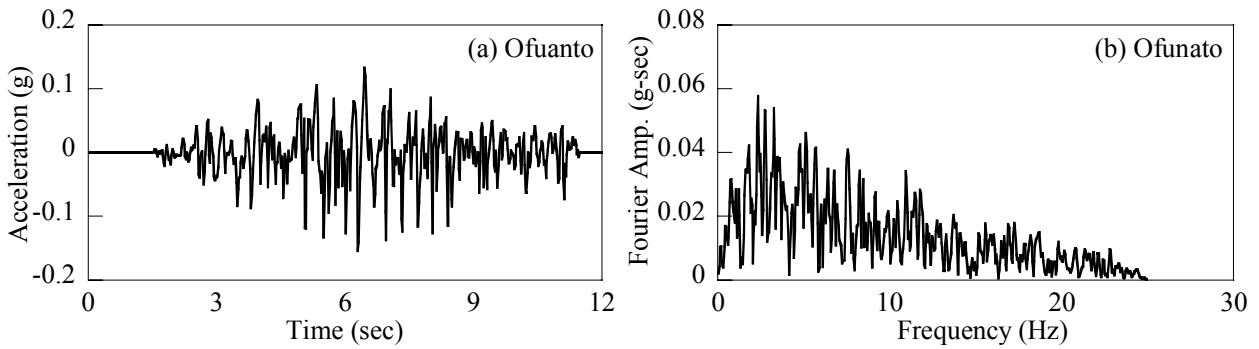


그림 1. 해석에 사용된 입력지진파의 시간이력곡선과 푸리에 스펙트럼

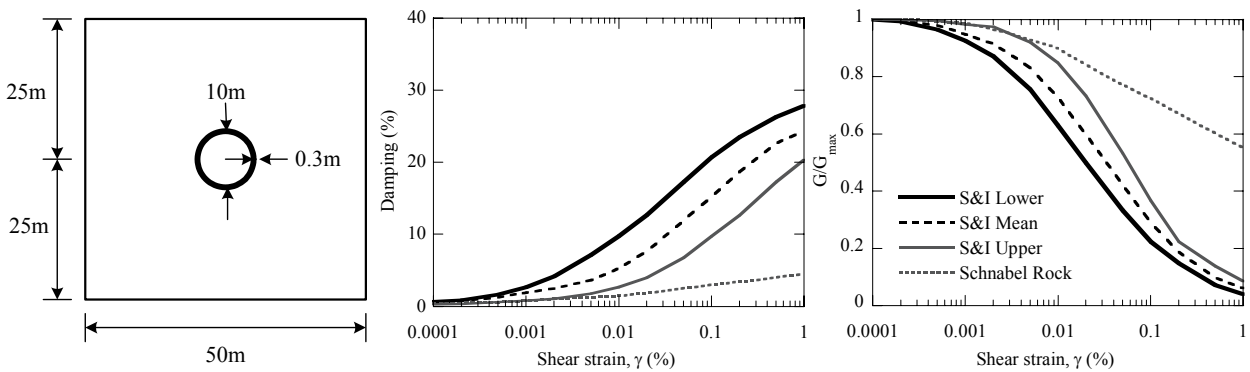


그림 2. 해석모델과 해석에 사용된 지반 동적곡선

지반의 종류별로 지진에 의해 발생하는 변위를 일차원 지반 응답 해석 프로그램을 이용하여 지반변위를 예측하였으며 일차원 지반응답해석을 통해 얻어진 상대변위를 이용하여 터널위치에서 전단 변형률을 구하였다(표2).

표 2. 터널위치에서의 전단 변형률

	Profile 1	Profile 2	Profile 3	Profile 4
Shear Strain (%)	0.06661	0.4224	0.01302	0.00453

### 3.2 선형해석

그림 3은 선형해석으로 계산된 터널 라이닝에 발생하는 최대 축력, 모멘트 그리고 압축응력을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 축력의 경우 해석해와 수치해석의 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 양상은 해석해와 수치해석해의 해석조건이 No-slip과 선형탄성으로 동일하기 때문으로 판단된다. 하지만 모멘트의 경우 Full-slip조건으로 가정한 해석해의 결과가 수치해석의 결과에 비하여 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 단순 예측법의 경우 지반과 터널의 상호작용을 적절하게 고려하지 못하기 때문에 다른 두 가지 해석법과 큰 차이가 발생하였다.

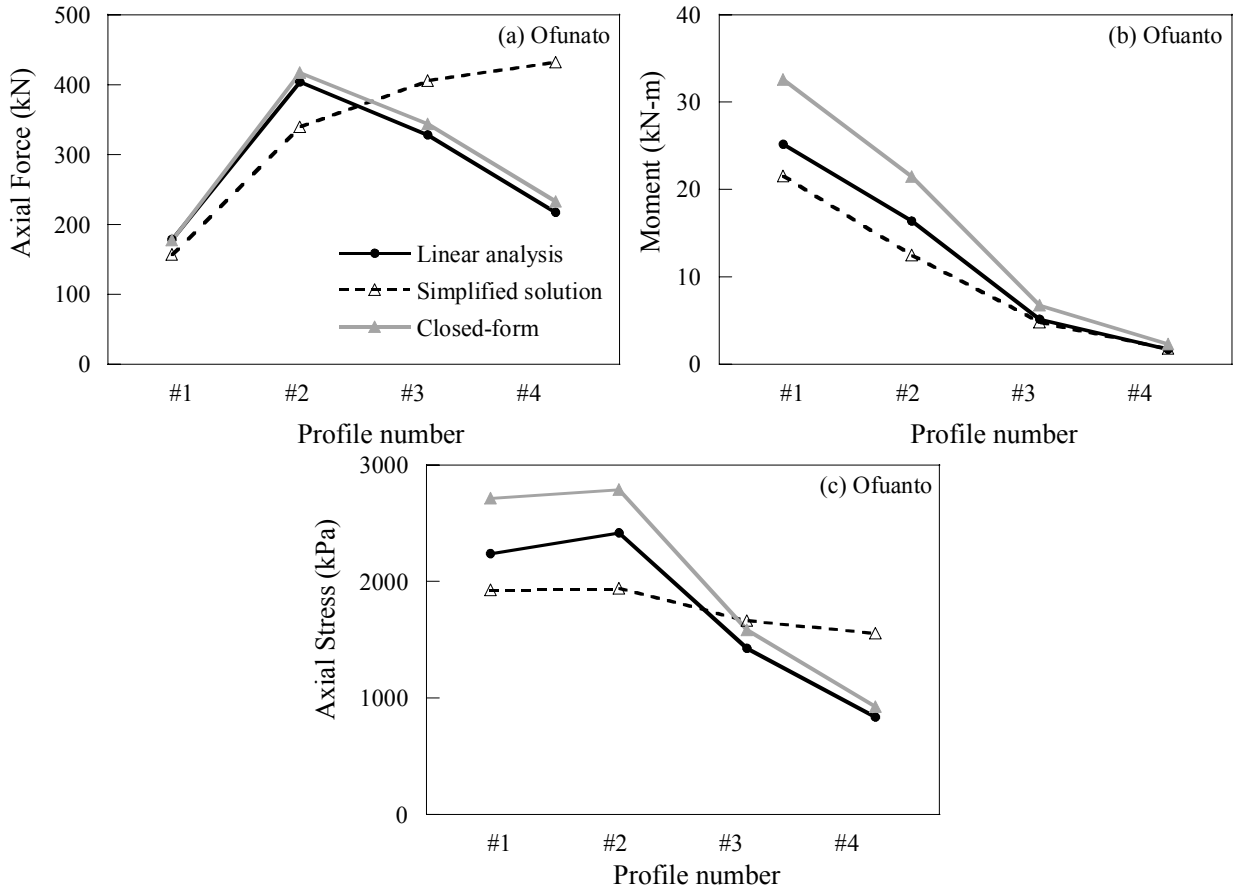


그림 3. 선형해석으로 계산된 터널 라이닝에 발생하는 최대 응력

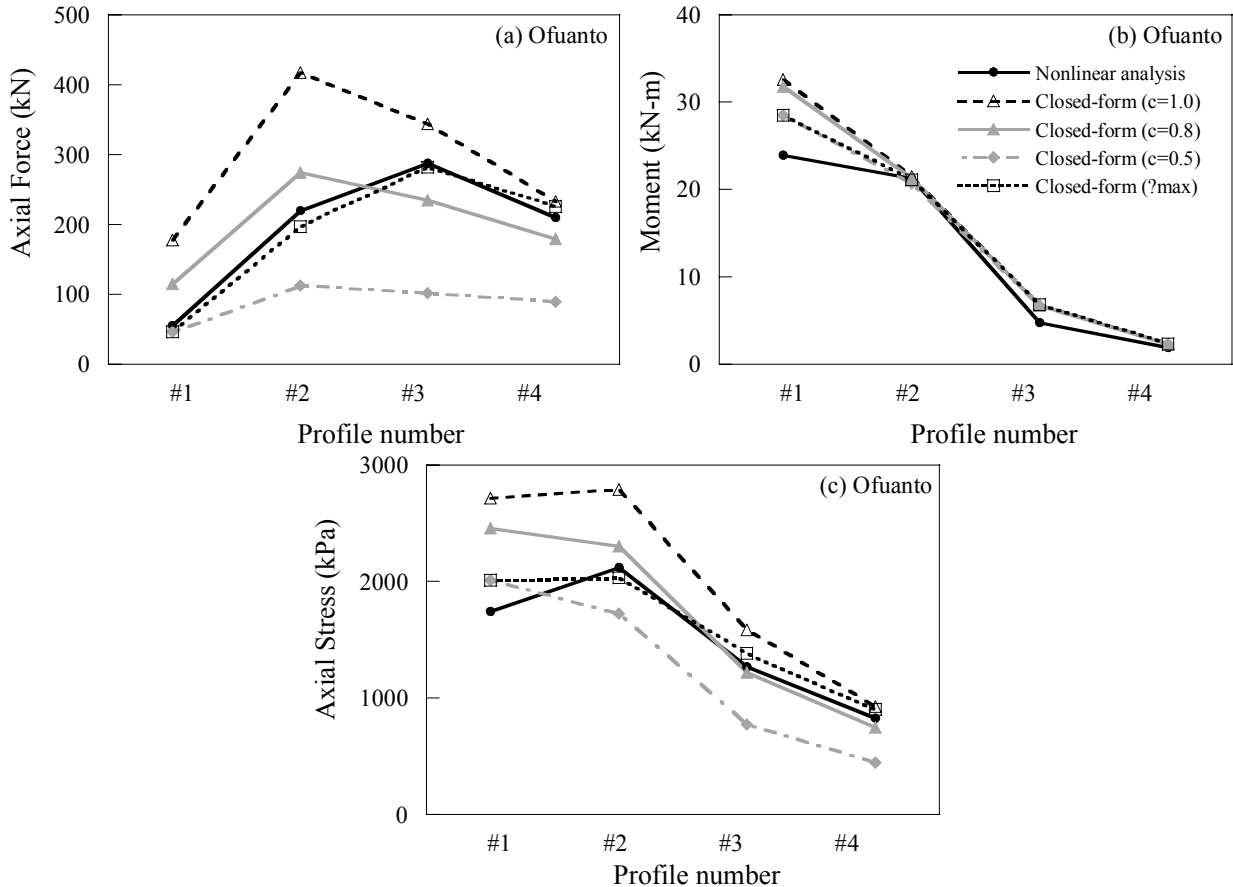
### 3.3 비선형해석

지반의 응력 변형률 관계는 변형률이 커질수록 지반의 탄성계수가 감소하는 비선형 거동을 보인다. 본 절에서는 지반의 전단탄성계수 감소 현상을 고려하기 위하여 비선형 모델을 이용한 수치해석을 수행하였다. 또한 해석해의 경우 비선형거동을 고려하기 위하여 지반의 전단탄성계수를 다음 식을 이용하여 보정하였다.

$$G_D = \rho V_s^2 \quad (5)$$

$$V_s = c V_0 \quad (6)$$

지반의 비선형 거동을 고려하기 위하여 그림 2에서 제안한 곡선을 사용하였다. 그림 4는 지반의 비선형 거동을 고려해서 계산된 터널의 응답을 나타낸 것이다. 비선형 수치해석 결과 모멘트는 큰 변화가 없지만 축력의 경우 최대 0.3배 작게 예측되었으며 지반강성이 작아질수록 감소폭이 크게 나타났다. 이는 지반의 강성이 작아질수록 전단변형률이 증가하여 지반의 비선형거동이 증가하기 때문으로 판단된다. 전단탄성계수 감소 현상을 고려하기 위하여 보정계수를 기능수행수준의 0.8로 적용한 경우 비선형 수치해석결과와 유사하게 예측된 반면 붕괴방지수준인 0.5로 적용한 경우 지반변형이 가장 큰 Profile1을 제외한 해석지반에서는 과소예측 되었다. 이는 지반에 발생하는 변형율에 관계없이 모든 해석지반에 동일한 보정계수를 적용하였기 때문이다. 따라서, 지반의 비선형특성을 감안하기 위해 보정계수를 사용할 경우 지반응답해석을 수행하여 정규화 전단탄성계수 감소비를 적용하는 것이 합리적이라 할 수 있다.



#### 4. 결론

본 연구에서는 단순 예측법, 해석해, 정적 수치해석을 수행하여 지진시 터널 라이닝에 발생하는 응답을 비교하였다. 단순 예측법으로는 志波由紀夫 등(1991)이 제안한 식을 사용하였으며 해석해로는 Wang(1993)의 해를 사용하였다. 수치해석은 FLAC 2D를 이용하여 2차원 유사정적해석을 수행하였다. 또한 다양한 지반조건과 지반의 비선형 거동을 고려하여 해석을 실시하였다. 이러한 과정을 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 해석해를 수치해석해와 비교하여 본 결과 축력은 해석해와 수치해석해의 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났으며 모멘트는 해석해의 결과가 수치해석해의 결과보다 더 보수적인 것으로 예측되었다. 이는 축력의 경우에는 해석해와 수치해석해가 No-slip조건으로 동일하지만 모멘트의 경우 해석해가 모멘트를 Full-slip조건에서 구하기 때문이다. 이와 같은 결과는 해석해의 조건이 대상지반을 단일층이며 선형탄성 거동을 한다고 가정하였기 때문으로 판단된다. 지반조건이 양호한 단일 암반층의 경우 해석해를 이용한 내진설계해석이 적절하다고 판단된다.
2. 단순 예측법은 지반과 터널의 상호작용을 적절하게 고려하지 못하기 때문에 전단파속도 300m/s를 기준으로 그 이상에서는 과대예측을 그 이하에서는 과소 예측을 하는 것으로 나타났으며 터널의 내진설계에 적절하지 않은 것으로 판단된다.
3. 지반의 비선형 거동을 고려하기 위하여 비선형 수치해석과 보정계수를 사용한 해석해법을 수행하였다. 보정계수를 사용할 경우 전단변형률에 관계없이 동일한 값을 적용하기 때문에 부정확한 결과를 예측하였으며 변형률에 따른 지반의 비선형 거동을 고려하기 위해서는 지반응답해석을 수행하여 전단탄성계수 감소비를 구하는 것이 합리적이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

## 참고문헌

1. Hoeg, K. (1968), "Stresses against underground structural cylinders", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 94, No. SM4.
2. Schnabel, P.B., Lysmer, J.L., and 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.
3. Schwartz, C.W., and Einstein, H.H. (1980), Improved design of tunnel supports: Volume 1, Simplified analysis for ground-structure interaction in tunneling, UMTA-MA-06-0100-80-4, Urban Mass Transit Transportation Administration, MA.
4. Seed, H.B., and Idriss, I.M. (1970), Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, College of Engineering University of California Berkeley., Berkeley, pp.
5. Wang, J.N. (1993), "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach", Monograph 7. New York, NY: Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc.
6. 志波由紀夫, and 岡本晋 (1991), "シールドトンネルの地震面方向の地震時断面力の計算法", 土木學會論文集, Vol. 437, pp.193-202.