

# 터널 횡방향 지진해석

## Part I: 응답변위법을 통한 터널의 지진응답 예측

### Seismic Analysis of Tunnel in Transverse Direction Part I: Estimation of Seismic Tunnel Response via Method of Seismic Displacement

박 두 희<sup>1</sup> Park, Duhee  
신 중 호<sup>2</sup> Shin, Jong-Ho  
윤 세 웅<sup>3</sup> Yun, Se-Ung

#### Abstract

Recent earthquakes have demonstrated that the tunnels, which were once considered to be highly resistant to earthquakes, are susceptible to substantial damage under severe seismic loading. Among various modes of deformation under an earthquake loading, the response of the tunnel in the transverse direction is known to be the critical mode. This paper investigates the seismic response of the tunnel in the transverse direction using the method of seismic displacement, which is a type of pseudo-static analysis. Firstly, the methods of calculating the ground deformation are compared. It is shown that the single and double cosine may not provide an accurate estimation of the ground deformation, and that a one-dimensional site response analysis needs to be performed for a more reliable evaluation. Secondly, the tunnel responses are calculated using the simplified, analytical, and numerical solutions. It is demonstrated that the simplified method provides poor estimates of the tunnel response ground deformation. The analytical solution is shown to be effective in modeling circular tunnels in uniform ground, but has serious limitation in modeling tunnel response in non-uniform ground. Numerical analyses are shown to be applicable to all cases, and give the most accurate estimates of the tunnel response. It is also demonstrated that the linear solutions can be so conservative that the soil nonlinearity needs to be accounted for more accurate evaluation of the tunnel response.

#### 요 지

지진에 대하여 상당히 저항력이 높다고 알려진 터널도 최근 국외에서 발생한 대 지진들에 의해서 심각한 피해를 입은 사례가 지속적으로 발생하고 있으며 터널 내진설계의 필요성을 입증하고 있다. 지진동에 대하여 터널에 발생하는 다양한 변형모드 중에서 횡방향 전단변형이 가장 치명적인 모드로 알려졌다. 본 논문에서는 횡방향 터널의 지진해석을 유사정적해석의 일종인 응답변위법으로 수행하였다. 먼저, 지반 내 변위를 계산한 결과 단일 및 이중 코사인법의 예측결과는 정확하지 않을 수 있으니 주의해야 하며 1차원 지반응답해석을 수행하는 것이 적절한 것으로 나타났다. 나아가 터널의 응답을 단순해, 해석해, 그리고 연속체 수치해석으로 계산하였다. 비교 결과, 단순해는 터널의 응답을 정확하게 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 해석해는 균질 지반과 원형터널에서는 적절하나 비균질 지반에서는 적절하지 않은 것으로 나타났다. 수치해석은 모든 경우에 적용 가능한 가장 정확한 방법인 것으로 나타났다. 또한, 선형해석은 보수적이며 지반의 비선형성을 고려하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

**Keywords :** Bending stress, Method of seismic displacement, Transverse direction, Tunnel, Seismic analysis

1 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 조교수 (Member, Assitant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg. Hanyang Univ., dpark@hanyang.ac.kr, 교신저자)

2 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

3 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

터널은 지진동에 대하여 지상구조물에 비하여 안전한 것으로 알려졌다. 이는 터널에 작용하는 지반운동은 지표면에 비하여 작으며, 겉보기 단위 체적 중량과 이로 인한 관성력이 작으며, 구조물이 지반에 둘러 쌓여 있어 일산 감쇄가 크기 때문이다(이인모 등, 2001). 하지만 1995년 고베 지진 시 붕괴된 Dakai 터널, 1999년 대만 치치 지진에 의하여 붕괴된 터널, 1999년 터키 Kocceali 지진에 의한 Bolu 터널 붕괴, 2004년 Niigata-Chuestu 지진 시 Haguro 터널에 발생한 심각한 구조적 손상 등 수많은 사례는 지진에 의하여 터널에도 심각한 피해가 발생할 수 있음을 보여주고 있으며 터널의 내진설계의 필요성을 입증하고 있다(Amorosi 등, 2009; Hashash, 2002; Towhata, 2008).

터널의 지진해석법은 1) 지반 - 구조물 상호작용(SSI) 고려 여부에 따라서 자유장 운동 또는 SSI 해석, 2) 해석 방향에 따라서 횡방향 또는 종방향 해석, 3) 해석 영역에 따라서 유사정적 또는 동적해석 등으로 분류할 수 있다. 터널은 수직방향으로 전파되는 전단파에 의한 전단변형에 가장 취약한 것으로 알려졌으며 따라서 터널의 내진설계 시 횡방향 해석은 기본적으로 수행된다. 터널의 횡방향 해석 방법은 매우 다양하지만 아직 각각의 방법과 계산된 결과의 차이에 대한 이해가 부족한 실정이다. 본 논문에서는 SSI를 고려한 다양한 기법을 적용하여 유사정적 횡방향 해석을 수행하여 해석방법 간의 차이를 분석하였으며 이를 기반으로 합리적인 해석 가이드라인을 제시하였다. 유사정적과 동적해석법 간의 차이와 동적해석법의 해석 가이드라인은 동반논문(박두희 등, 2010)에서 기술하였다.

## 2. 응답변위법

터널과 같은 지하 구조물은 겉보기 중량이 주변 지반과 비교하여 가볍거나 혹은 같은 정도이다. 또한 대부분 지반으로 둘러싸여 있기 때문에 발산감쇠가 커서 진동이 발생하여도 짧은 시간 안에 진정되는 특성을 갖고 있다. 이로 인하여 터널은 관성력에 의한 영향보다는 주변 지반에서 발생하는 상대적인 변위에 의해 크게 영향을 받게 된다. 이와 같은 사실에 근거하여 지진 시 발생하는 지반의 변위를 구조물에 강제적으로 적용하여 지중구조물에 발생하는 응력을 정적으로 구하는 방법을

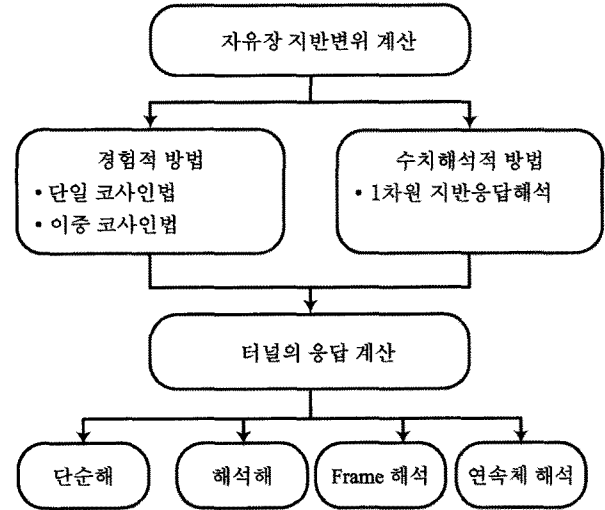


그림 1. 응답변위법 해석 순서도 및 종류

응답변위법이라고 한다. 응답변위법은 특별히 지하구조물의 내진계산을 위하여 고안된 유사정적 해석법의 일종으로 동적인 지반운동을 정적으로 변환하는 점은 진도법과 같으나, 관성력이 아니라 변위를 강제적으로 적용한다는 점에서 차이가 있다. 응답변위법의 해석 순서도는 그림 1과 같다. 응답변위법은 먼저 대상지반의 변위를 예측하며 이를 구조물에 작용하여 지하구조물의 응답을 계산한다. 그림 1은 또한 지반변위 예측방법 그리고 터널의 응답을 구하는 방법의 종류도 도시하였다. 아래 절에서는 각각을 자세하게 설명하였다.

## 3. 지반변위 예측: 이론적 배경

지진동에 의해 지중구조물의 위치에서 발생하는 지반 변위를 산정하는 것은 응답변위법의 핵심 요소이다. 예측 방법은 경험적 방법과 수치해석적 방법으로 대별된다. 경험적 방법은 기반암의 설계응답스펙트럼과 토층의 고유주기를 활용하며 단일과 이중 코사인법 두 가지 종류가 있다. 수치해석적 방법은 1차원 지반응답해석을 이용한다.

단일 코사인법과 이중 코사인법의 개요는 그림 2에 도시하였다. 먼저, 토층을 균질층으로 가정하는 단일 코사인법의 식은 다음과 같다(일본운수성, 1999).

$$U_h(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi x}{2H}\right) \quad (1)$$

여기서,  $S_v$ 는 지표층 지반의 고유주기에서의 기반암 설계속도 응답 스펙트럼,  $T_G$ 는 지반의 고유주기,  $H$ 는 지반

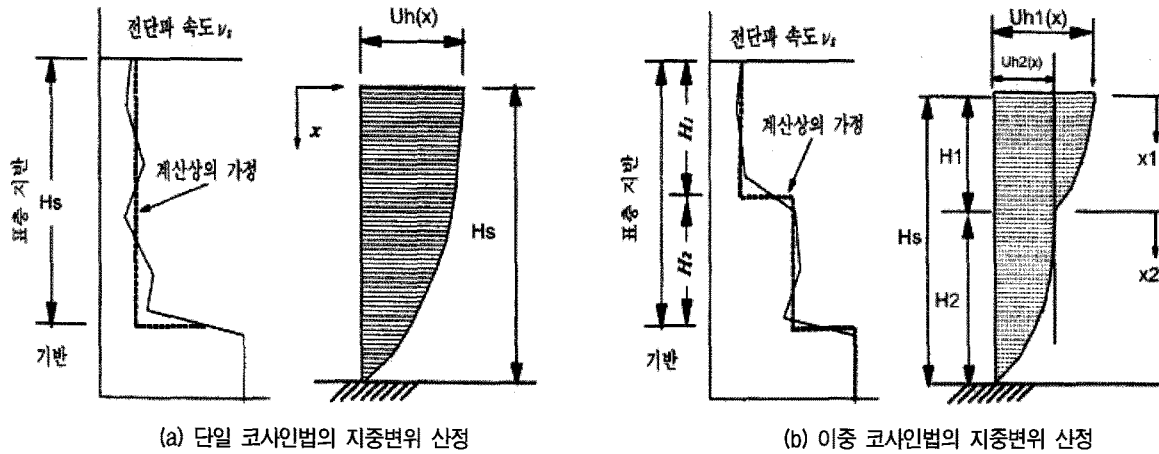


그림 2. 단일, 이중 코사인법의 지중변위 산정법(한국지반공학회, 2006)

의 두께이다. 단일 코사인법은 지반 내 변위의 분포(모드 형상)를 코사인 함수로 나타내며 수평변위의 크기는 기반암의 설계응답스펙트럼과 고유주기에 의하여 결정된다.

지반이 균질층일 경우에는 단일 코사인법이 적절하지만 대부분의 경우에 지반은 비균질하며 일반적으로 지표면으로 올라갈수록 강성이 점차적으로 감소한다. 이와 같은 지반에서는 강성이 큰 하부층에서는 변형이 작으며 강성 차이가 큰 지점에서 큰 증폭이 발생한다. 이와 같이 강성의 차이가 확연한 지반에서는 이중 코사인법을 사용하는 것이 적절하다. 식 (2)~(3)는 이중 코사인 함수를 나타내며 이를 합산하여 전체 지반변위를 산정할 수 있다(일본운수성, 1999).

$$U_{h1}(z_1) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\pi x_1}{v_{s0d1}}\right) \quad (2)$$

$$U_{h2}(z_2) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{v_{s0d1}}\right) \cdot \left\{ \begin{array}{l} \sin \frac{\omega_0 z_2}{v_{s0d2}} \\ \cos \frac{\omega_0 z_2}{v_{s0d2}} - \frac{\sin \frac{\omega_0 z_2}{v_{s0d2}}}{\tan \frac{\omega_0 z_2}{v_{s0d2}}} \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$(1 + \alpha) \cos\left\{ \omega_0 \left( \frac{H_1}{v_{s0d1}} + \frac{H_2}{v_{s0d2}} \right) \right\} + (1 - \alpha) \cos\left\{ \omega_0 \left( \frac{H_1}{v_{s0d1}} - \frac{H_2}{v_{s0d2}} \right) \right\} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $U_{h1}$ ,  $U_{h2}$ 는 제1, 2층의 지반변위,  $H_1$ ,  $H_2$ 은 제1,

2층의 두께,  $v_{s0d1}$ ,  $v_{s0d2}$ 는 제1, 2층의 전단파속도(m/s),  $\omega_0$ 는 지반의 고유 진동수이다.  $\omega_0$ 는 식 (4)에서 시행착오 방법으로 계산하며, 여기서  $\alpha = \gamma_1 v_{s0d1} / \gamma_2 v_{s0d2}$  이다.

단일 및 이중 코사인법은 국내 내진설계에서 널리 사용된다. 그러나, 국내 지반에서 지반의 고유주기가 0.4 초 이상인 장주기 지반에서는 지반응답해석을 수행하여 결정하는 것이 바람직하다는 연구결과가 제시된 바 있다(윤종구 등, 2003).

지중내 발생하는 진동을 정확하게 예측하기 위해서는 경험적인 방법으로는 한계가 있으므로 이와 같은 경우에는 지반응답해석을 수행해야 한다. 국내외 모두 1차원 등가선형 지반응답해석이 가장 지배적으로 사용되고 있다. 널리 사용되는 해석프로그램으로는 SHAKE91(Idriss 등, 1992)과 DEEPSOIL(Park 등, 2004)이 있다. 1차원 등가선형해석은 해석을 수행하기 간편하지만 이 방법도 사용자에게 따라서 오류를 범할 수 있으므로 주의를 해야 한다. 한국지반공학회(2010)는 지반응답해석 상호 검증시험을 통하여 사용자에게 따라서 매우 큰 분산정도가 발생할 수 있음을 보였으며 동적 물성 산정의 중요성을 역설하였다. 1차원 지반응답해석 수행자는 한국지반공학회(2010)와 같은 가이드라인을 참고하여 해석을 수행해야 할 것이다.

#### 4. 터널의 응답 계산: 이론적 배경

지반 변위를 계산한 후, 이를 터널에 작용하여 터널의 응답을 예측한다. 본 절에서는 터널의 응답을 계산하는 방법을 소개하였다.

#### 4.1 터널의 응답 계산: 단순해

터널의 응답을 계산하는 가장 간단한 해는 志波由紀夫 와 岡本晋(1991)이 제안하였으며 본 논문에서는 이를 “단순해”로 명하였다. 이 방법은 일반적으로 단일 또는 이중코사인법과 함께 사용된다. 단순해법은 코사인법으로 계산된 지표면의 상대변위를 식 (5)~(7)에 적용하여 터널 라이닝에 작용하는 모멘트, 축력, 전단력을 계산한다(그림 3).

$$M_{\max} = -\frac{3\pi \cdot E_l \cdot I_l}{2R \cdot H_g} \cdot U_h \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_g}\right) \cdot C \quad (5)$$

$$T_{\max} = \frac{3\pi \cdot E_l \cdot I_l}{R^2 \cdot H_g} \cdot U_h \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot H}{2H_g}\right) \cdot C \quad (6)$$

$$V_{\max} = \frac{3\pi \cdot E_l \cdot I_l}{R^2 \cdot H_g} \cdot U_h \cdot \sin\left(\frac{\pi H}{2H_g}\right) \left(1 + \frac{G_m \cdot R^3}{6E_l \cdot I_l}\right) \cdot C \quad (7)$$

여기서  $M_{\max}$  = 최대모멘트,  $T_{\max}$  = 최대축력,  $V_{\max}$  = 최대전단력,  $E_l$  = 라이닝의 탄성계수,  $G_m$ 는 지반의 전단탄성계수,  $I_l$  = 라이닝의 관성모멘트,  $U_h$  = 지표면에서의 상대변위,  $R$  = 터널 반경,  $H$  = 터널중심까지의 심도,  $H_g$  = 토층의 두께이다. 식 (5)~(7)의  $C$ 는 다음과 같다.

$$C = \frac{4(1-\nu_m) \cdot G_m \cdot R^3}{(3-2\nu_m) \cdot G_m \cdot R^3 + 6(3-4\nu_m) \cdot E_l \cdot I_l} \quad (8)$$

여기서  $\nu_m$ 은 지반의 포아송 비이다.

#### 4.2 터널의 응답 계산: 해석해

엄밀해라고도 불리는 해석해(Analytical solution)는

지반변위에 인한 터널의 응답을 수학적으로 계산한 해로써 Hoeg(1968), Peck 등(1972), Schwartz 등(1980)의 해를 Wang(1993)이 총정리 및 단순전단조건에 대하여 일부 변형시켜서 제안한 식들이 가장 널리 사용된다. 이외에 Penzien(2000)도 해석해를 제안하였지만 이는 문제점이 있는 것으로 증명되었으므로(Hashash 등, 2005) 본 논문에서는 다루지 않았다.

Wang(1993)은 등방성, 동질의 무한한 매질의 지반에 위치한 원형터널에 균일한 전단변형이 발생할 경우 터널의 응답을 유도하였다. 이때 터널과 지반은 탄성거동을 하는 연속체로 가정하였으며 지반의 무게는 고려하지 않았다. 지반과 터널 접촉면 경계조건을 Full-slip과 No-slip으로 분류하였으며 각각에 대한 해를 구하였다. Full-slip에 대한 해는 Peck 등(1972)의 해를 단순전단조건에 대하여 적용하여 유도하였으며 이들은 다음과 같다.

$$T_{\max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} R \gamma_{\max} \quad (9)$$

$$M_{\max} = \pm \frac{1}{6} K_1 \frac{E_m}{(1+\nu_m)} R^2 \gamma_{\max} \quad (10)$$

$$K_1 = \frac{12(1-\nu_m)}{2F+5-6\nu_m} \quad (11)$$

$$C = \frac{E_m(1-\nu_l^2)R}{E_l t(1+\nu_m)(1-2\nu_m)} \quad (12)$$

$$F = \frac{E_m(1-\nu_l^2)R^3}{6E_l I(1+\nu_m)} \quad (13)$$

여기서,  $E_m$  = 지반의 탄성계수,  $t$  = 터널 라이닝 두께,

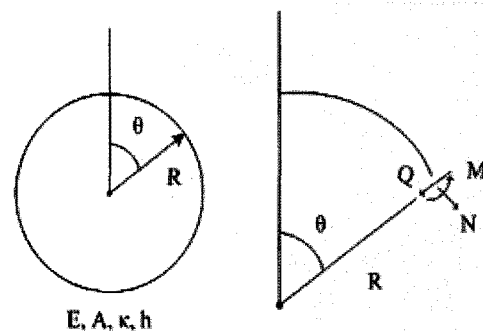
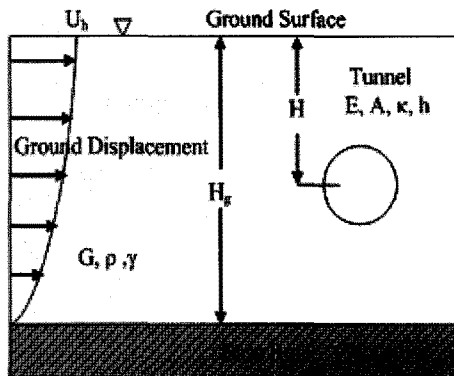


그림 3. 단순해에 대한 개념도(志波由紀夫 등, 1991)

$\nu_l$  = 라이닝의 포아손 비이다.  $C$ 와  $F$ 는 각각 압축비 (Compressibility ratio)와 유연도비(Flexibility ratio)이다.

Wang(1993)은 No-slip에 대한 해는 Hoeg(1968)과 Schwartz 등(1980)의 결과를 인용하였으며 이들은 다음과 같다.

$$T_{\max} = \pm K_2 \tau_{\max} R = \pm K_2 \frac{E_m}{(1 + \nu_m)} R \gamma_{\max} \quad (14)$$

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu_m)-(1-2\nu_m)C] - \frac{1}{2}(1-2\nu_m)^2 + 2}{F[(3-2\nu_m)+(1-2\nu_m)C] + C\left[\frac{5}{2} - 8\nu_m + 6\nu_m^2\right] + 6 - 8\nu_m} \quad (15)$$

No-slip 조건에 대해서는 축력만을 제안하였으며 모멘트는 계산하지 않았다. Wang(1993)은 Full-slip 조건에서의 모멘트가 No-Slip에 비하여 보수적이므로 설계 시 이를 사용할 것을 권장하였다. 반면, 축력은 No-slip 조건의 예측치가 Full-slip에 비하여 더욱 보수적이므로 이를 사용할 것을 권장하였다.

Wang(1993) 식은 원형터널과 지반과 터널이 선형 거동하는 경우에만 적용 가능하다. 지반이 비선형 거동을 할 것으로 예측된다면 해석해를 바로 적용할 수 없으며, 흙의 비선형성을 모사하기 위해서는 1차원 지반응답해석에서 계산된 유효변형률로부터 대표 전단탄성계수를 도출하여 이를 적용하는 것이 합리적이다.

### 4.3 Frame 해석

Frame 해석은 지반을 연속체로 모사하는 것이 아니라 일련의 스프링으로 모사한다. 그림 4는 Frame 해석의 개념도를 나타낸다. 이 때 스프링 상수(그림 4의  $K_H$ ,  $K_{SS}$ ,  $K_V$ ,  $K_{SB}$  등)를 결정하는 것이 가장 중요하다. 국내

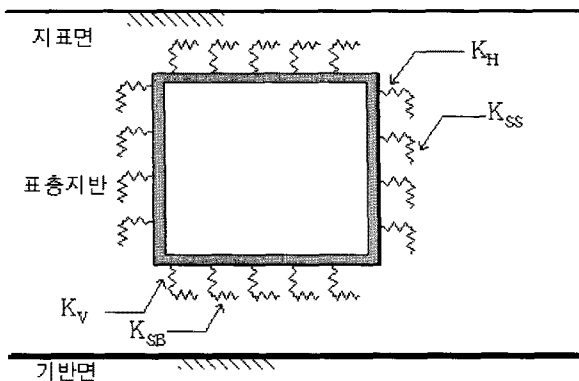


그림 4. Frame 해석 개념도(한국지반공학회, 2006)

에서는 일반적으로 도로설계기준(한국도로교통협회, 2000)에 제시된 방법을 적용하여 지반 스프링 상수를 결정한다. 이 방법에서는 표준관입시험의 N치로부터 변형계수와 동적탄성계수를 구하며, 이로부터 스프링 상수를 결정한다. 이와 같이 스프링 상수를 경험적으로 결정하는 방법은 불확실성이 매우 크므로 적용 시 주의해야 한다. 본 논문에서는 Frame 해석은 포함하지 않았으며 보다 정확한 연속체 해석만을 수행하였다.

### 4.4 연속체 수치해석

연속체 수치해석은 터널 주변을 일련의 스프링으로 모사하는 것이 아니라 일정크기의 요소의 합으로써 직접 모델링한다. 일반적으로 지반 요소는 터널과 완벽하게 부착되었다고 가정하며 이는 해석해의 No-slip 조건과 동일하다. 응답변위법에서 연속체 수치해석은 해석영역 측면경계에 응답해석에서 계산된 변위를 측면경계와 상부에 강제적으로 변위경계조건으로 작용하여 이로 인한 터널의 응답을 계산한다. 연속체 수치해석은 구성모형에 따라서 선형과 비선형해석으로 구분할 수 있다.

## 5. 터널의 응답 비교

### 5.1 대상 지반과 입력지진파

본 절에서는 일련의 해석을 수행하여 먼저 지반변위 예측 방법간의 차이를 규명하였으며 이를 적용하여 터널의 응답을 계산하여 해석기법간의 차이를 평가하였다. 해석에는 총 8가지 지반이 사용되었으며 이들은 그림 5에 도시하였다. 주상도 1 - 5는 지반강성이 균질한 지반이며 심도는 모두 50m이다. 터널의 직경은 10m이며 중심은 깊이 25에 위치한다. 나머지 3개 지반(주상도 6 - 8)은 비균질 지반이며 국내 실측 지반이다. 터널의 직경은 8m이며 심도는 그림 5에 표시하였다. 적용된 지반과 터널의 물성치는 표 1과 표 2에 정리하였다. 주상도 1 - 4 지반의 기반암의 Vs와 단위중량은 각각 800m/s와 25kN/m<sup>3</sup>를 적용하였으며 주상도 5의 기반암의 Vs와 단위중량은 1500m/s와 25kN/m<sup>3</sup>를 적용하였다. 주상도 6 - 8의 기반암은 풍화암의 물성을 적용하였다. 풍화암의 단위중량은 800m/s 단위중량은 23kN/m<sup>3</sup>를 적용하였다. 주상도 1 - 5 지반에 적용된 동적곡선은 그림 6에

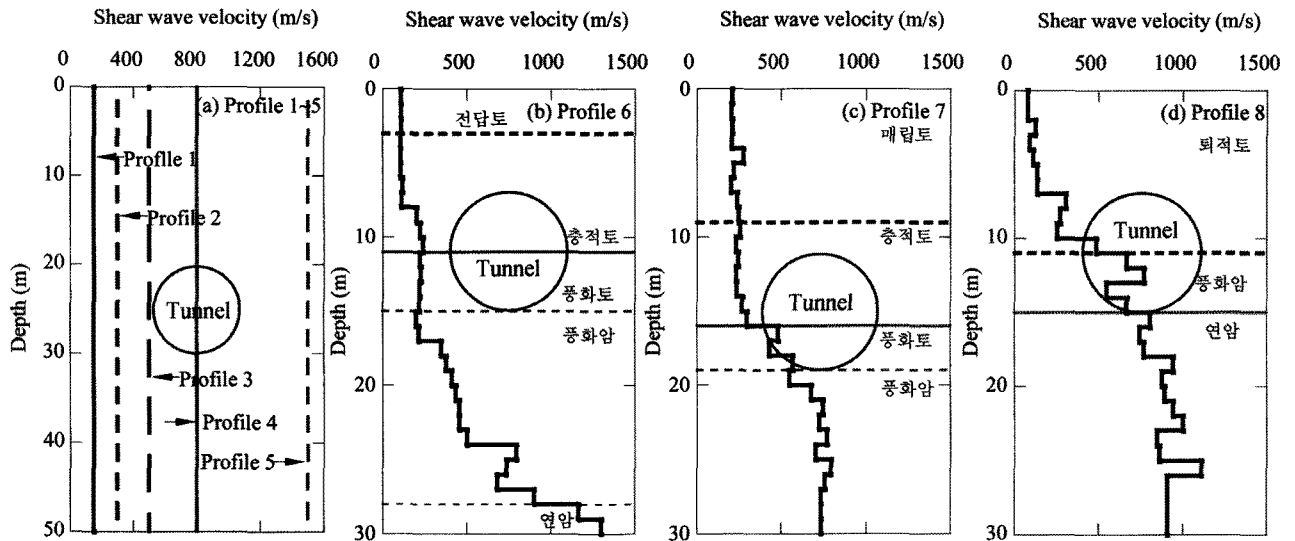


그림 5. 해석에 적용된 균질 지반의 전단파속도 주상도

표 1. 균질 지반에 적용된 물성과 동적곡선

	탄성계수 (kN/m <sup>2</sup> )	전단파속도 (m/sec)	포아슨비	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	동적곡선
주상도 1	120,000	150	0.30	20	Seed와 Idriss Lower (1991)
주상도 2	480,000	300	0.30	20	Seed와 Idriss Mean (1991)
주상도 3	1,460,000	500	0.30	22	Seed와 Idriss Upper (1991)
주상도 4	4,000,000	800	0.20	25	Schnabel (1973)
주상도 5	13,800,000	1,500	0.20	25	Schnabel (1973)

표 2. 해석에 사용된 터널 라이닝의 물성치

	탄성계수 (kPa)	포아슨 비	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	두께 (m)	단면 2차모멘트 (m <sup>4</sup> )
Lining	24,800,000	0.2	20	0.3	0.00225

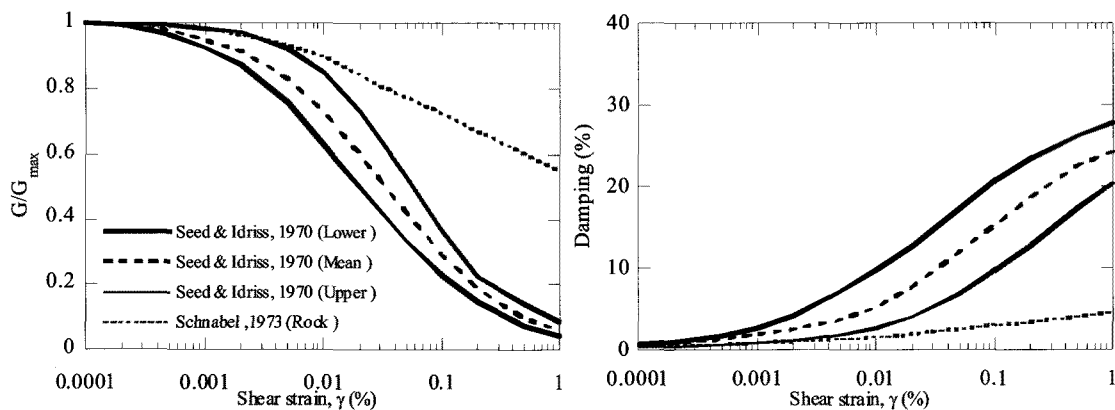


그림 6. 해석에 적용된 동적곡선

도시하였다. 주상도 6 - 8의 해석에 사용된 동적곡선은 Seed 와 Idriss(1970,Mean)곡선을 사용하였다.

입력운동은 국내에서 가장 널리 사용되는 Ofunato와 Hachinohe 가속도 시간이력을 적용하였다(그림 7). 지

반응답해석은 입력지진파를 재현주기 1000년에 대하여 최대지반가속도(PGA)를 0.154g로 스케일링 하였으며, 암반노두 운동으로 적용하였다.

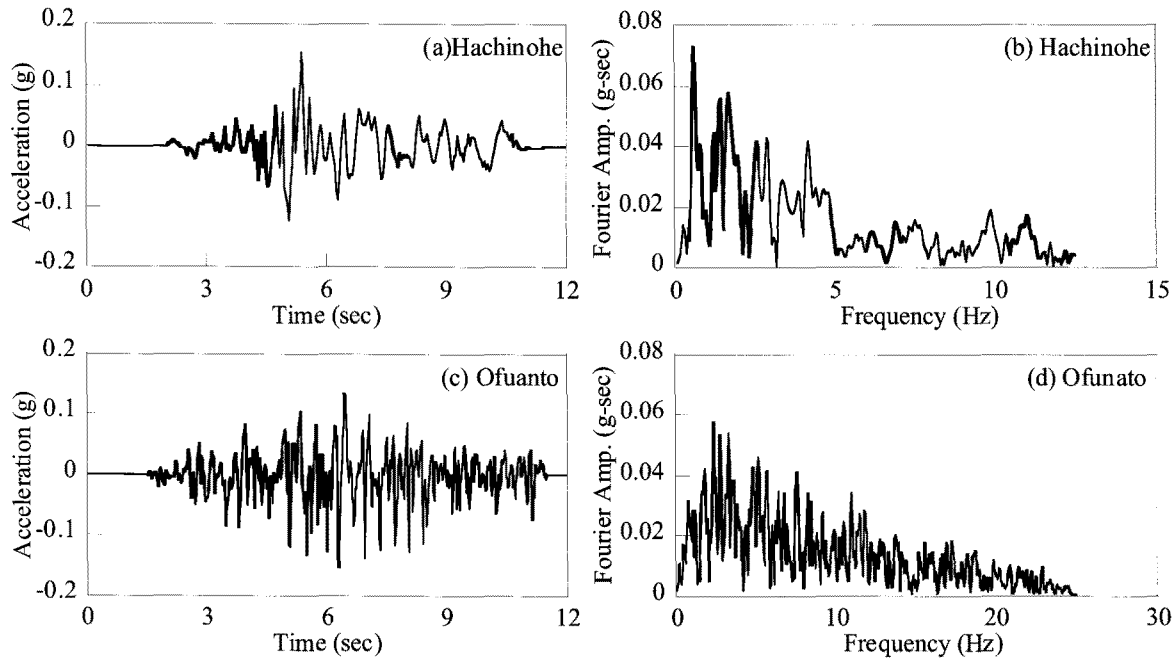


그림 7. 해석에 사용된 입력지진파의 시간이력곡선과 푸리에 스펙트럼

## 5.2 지반 변위 예측

본 절에서는 주상도 1 - 8에 대한 1차원 등가선형 지반응답해석과 단일, 이중코사인법으로 계산된 수평변위와 전단변형률 주상도를 비교하였다. 1차원 지반응답해석은 DEEPSOIL(Park 등, 2004)을 사용하였다. 유효변형률계수로는 0.65를 적용하였으며 충분히 수렴할 수 있도록 반복횟수는 10회를 적용하였다. 단일 코사인법은 균질 주상도(주상도 1 - 5)와 비균질 주상도(주상도 6 - 8)에 모두 적용되었으며 주상도의 심도는 균질 주상도의 경우에는 30m, 비균질 주상도는 풍화암 심도를 적용하였다. 이중코사인법은 주상도 6 - 8에만 적용되었으며, 제 1과 2층의 경계 심도는 전단파 속도가 크게 변이하는 깊이 또는 층 특성이 변하는 구간을 적용하였다. 주상도 6 - 8에 적용된 경계 심도는 각각 9m, 9m, 7m이다.

균질 지반 주상도 1 - 5에 대한 지반응답해석과 단일 코사인법으로 계산된 수평변위와 전단변형률 주상도는 그림 8에 비교하였다. 균질 지반에는 지반물성이 변화하는 구간이 없으므로 이중코사인법을 적용하지 않았다. 그림 8에 나타난 바와 같이 지반의 강성이 작아질수록 지반변위가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 단일 코사인법의 경우 지반응답해석과 비교하여 지반강성이 큰 경우에 과도한 지반 변위가 예측되었다.

그림 9는 비균질 지반(주상도 6 - 8)에 대한 지반응답해석과 단일, 이중 코사인법으로 계산된 수평변위와 전

단변형률 주상도를 비교하고 있다. 먼저 단일코사인법의 경우 지반 전단파 속도의 평균값을 사용하여 변위를 예측하였기 때문에 지반응답해석과 큰 차이를 나타낸다. 코사인 함수 형상은 기반암과 가까워질수록 수평변위의 변화율이 증가하며 전단변형률도 증가하게 된다. 반면, 일반적인 토층은 하부에서 지표면으로 올라갈수록 강성이 점차적으로 감소한다. 즉, 기반암 부근에서는 강성이 상대적으로 커서 변형률이 작으며 지표면으로 갈수록 변형률이 증가하게 된다. 이와 같은 경향은 지반의 강성이 균일한 지반과는 상이한 것이다. 지반응답해석으로는 이와 같은 경향이 정확하게 계산되지만, 단일 코사인법의 경우에는 균질 지반에서는 형상이 유사하지만 실측 지반에서는 큰 차이를 보이게 된다. 이중 코사인법으로 계산된 주상도를 살펴보면 단일 코사인법에 비하여 향상된 예측을 하며 결과가 지반응답해석과 상당히 유사함을 확인할 수 있다. 즉, 상부층에서는 지반변위가 크게 예측되지만 하부층 지반에서는 지반변위가 지반응답해석과 비교적 유사함을 확인할 수 있다. 이중 코사인법은 특히 주상도 6에서 지반응답해석과 유사한 결과를 예측하였다. 하지만, 주상도 7에서의 변형률 주상도를 보면 깊이 10m 이상의 변형률을 과대예측함을 볼 수 있으며 특히 심도 18m 부근의 급격한 전단변형률 변화까지는 모사하지 못하는 것으로 나타났다. 이중 코사인법은 주상도 8에서는 5m 부근의 큰 전단변형률을 과소예측하는 것으로 나타났다.

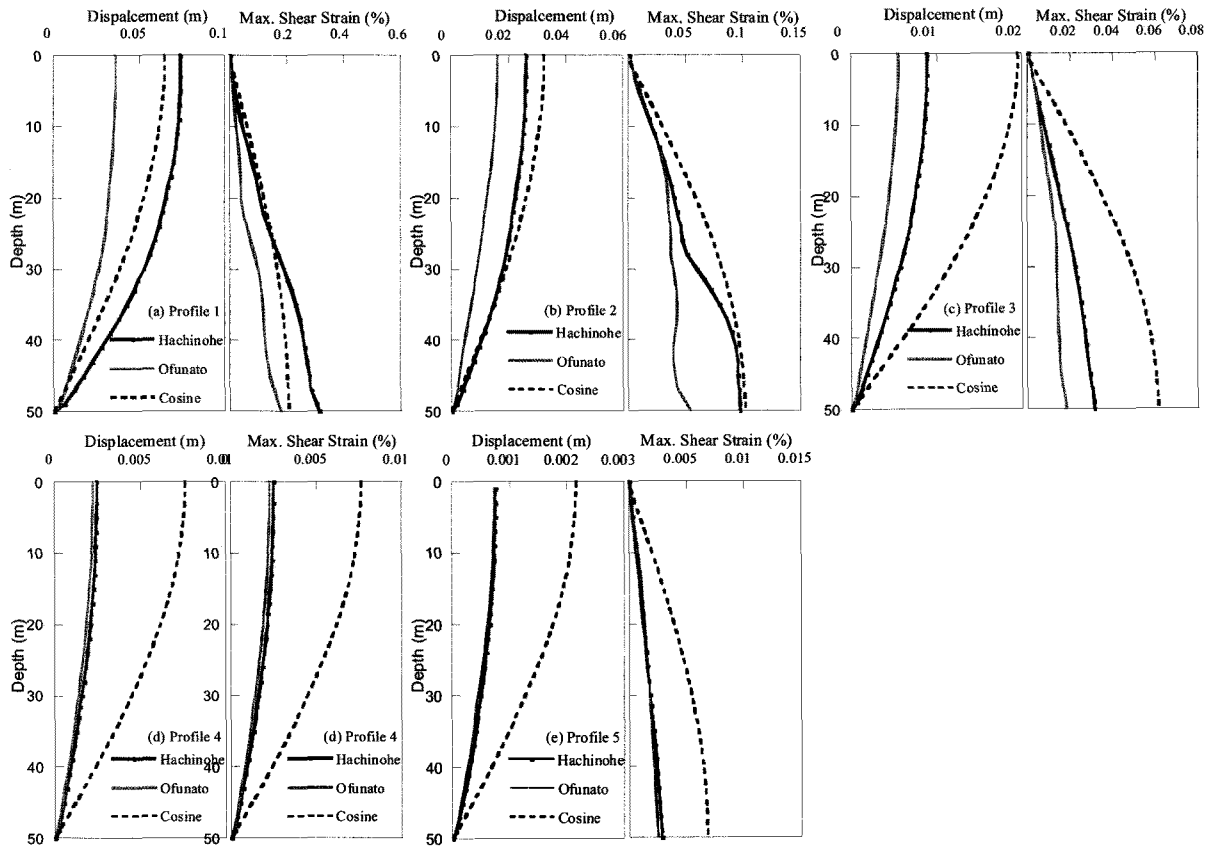


그림 8. 균질 지반의 전단변형을 및 수평변위 주상도

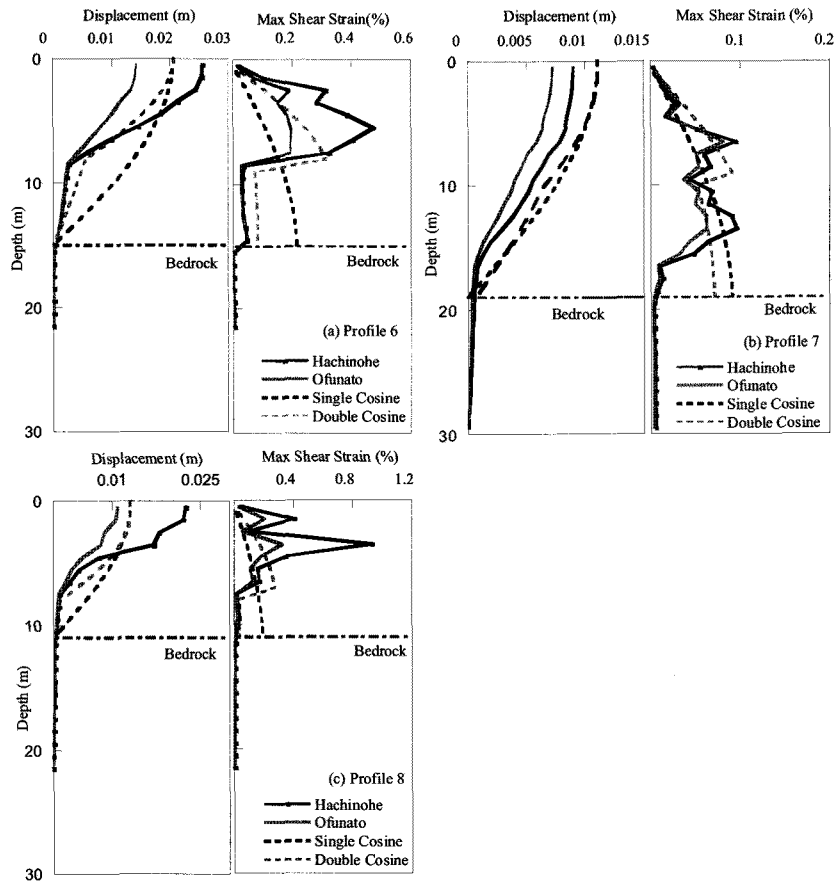


그림 9. 비균질 지반의 전단변형을 및 수평변위 주상도



### 5.3 터널의 응답 비교

본 논문에서는 지반변위 예측값을 단순해, 엄밀해, 연속체 수치해석에 적용하였으며 이로써 계산된 터널 응답의 차이를 규명하였다. 먼저, 균질 지반에 대하여 해석을 수행하였다. 단순해의 경우, 단일코사인법과 지반 응답해석으로 계산된 변위를 모두 적용하였다. 단순해는 언제나 단일코사인법과 같이 사용되지만 지반 응답 해석결과를 변위로 적용하였을 경우 해석결과가 어떻게 계산되는 지를 확인해보기 위해서 사용해보았다. 해석해는 Wang(1993)이 제안한 것처럼 축력과 모멘트는 각각 No-slip 조건과 Full-slip 조건의 해를 사용하였다. 연속체 수치해석은 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup> 6.0(Itasca, 2008)을 사용하였으며 평면변형률 (Plane Strain) 3절점 삼각형 요소를 적용하였다. 터널 라이닝은 2절점 Beam 요소를 적용하였으며 탄성으로 모델링 하였다. 터널에 작용하는 변위는 1차원 지반 응답 해석을 수행하여 터널위치에서 변형률의 평균값을 적용하였다. 터널과 라이닝 접촉면의 경계조건은 No-slip 조건을 적용하였다. 연속체 해석영역은 터널 중심으로

부터 양측면까지 주상도 1 - 5의 경우 25m, 주상도 6 - 8의 경우 20m이다. 하부경계는 균질 지반의 경우 주상도 하부경계까지, 비균질 지반은 풍화암까지 모델링하였다. 지반응답해석으로부터 계산된 지반변위는 측면변위경계조건으로 작용시켰다. 그림 10(a)에는 주상도 1의 해석영역, 메쉬, 그리고 변위경계조건을 도시하였다. 그림 10(b)에는 계산된 전단변형률 등고선을 도시하였으며 그림 10(c)에는 계산된 축력, 모멘트, 전단력, 그리고 축변형률을 도시하였다. 또한, 전단변형으로 인하여 발생한 터널의 변형 형상도 더불어서 도시하였다.

그림 11은 각각의 방법으로 라이닝에서 계산된 축력, 모멘트, 그리고 휨응력을 비교하고 있다. 좌열과 우열은 각각 Ofunato와 Hachinohe 입력지진파를 사용한 결과이다. 대상 지반은 선형으로 가정하였으며 비선형성은 고려하지 않았다. 먼저, 해석해와 수치해석 결과를 비교해보면, 축력은 거의 완벽하게 일치하는 반면 모멘트는 미세한 차이를 보이고 있다. 해석해의 축력은 No-slip 조건에 대하여 유도된 정해이므로 연속체해석과 동일한 것이 당연하지만 모멘트는 Full-slip 조건에 대하여 유도된 해이므로 차이가 발생한 것이다. Wang(1993)은 Full-slip

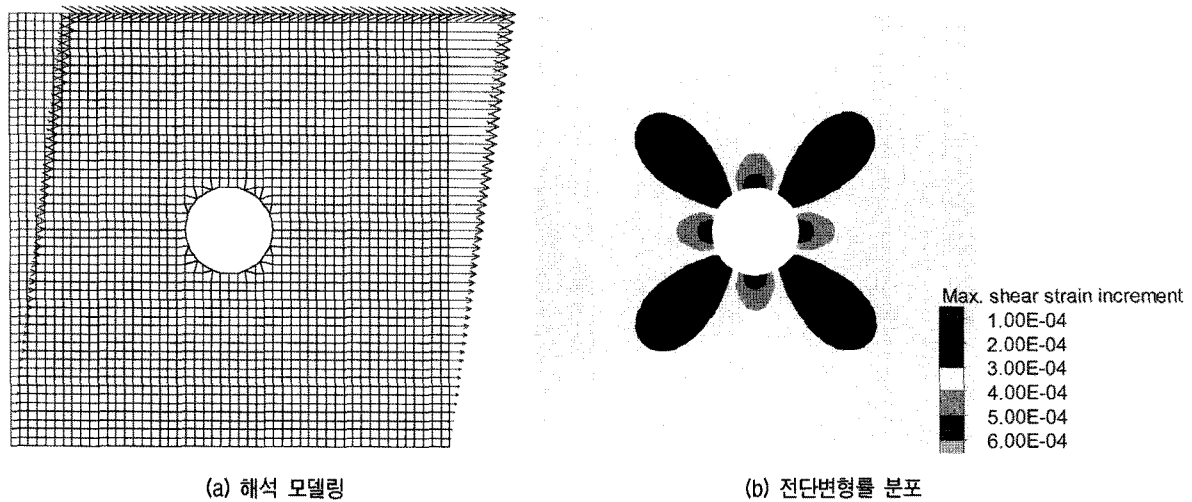


그림 10. 연속체 해석조건 및 터널 라이닝의 응력분포(주상도 1)

조건의 모멘트는 보수적인 해이므로 사용할 것을 권장하였는데 해석결과도 수치해석보다 크게 계산되어 Wang (1993)의 판단과 일치하는 것으로 나타났다. 모멘트에서는 약간의 차이를 보이지만 결과적으로 휨응력은 해석해와 수치해석 결과가 거의 일치한다고 볼 수 있다. 다음에는 단순해의 결과를 해석해와 수치해석 결과와 비교해 보았다. 단순해의 경우 코사인법으로 계산된 지반변위를 적용한 경우 결과 해석해와 연속체 해석에 비해 크게 계산된 것을 확인할 수 있다. 단순해+코사인법은 특히 축력을 과대예측하는 것으로 나타났으며 모멘트는 상대적으로 유사한 것으로 계산되었다. 휨응력은 축력의 영향으로 모든 균질 주상도에서 크게 계산되었다. 1차원 지반응답해석으로 계산한 지반변위를 적용한 단순해는 Ofunato 지진파에 대해서는 주상도 1 - 3은 상당히 유사하며 주상도 4 - 5에서는 약간의 차이를 보이고 있다. Hachinohe 지진기록에 대해서는 모든 주상도

에 대하여 상당히 유사한 결과를 예측하는 것으로 나타났다.

그림 12는 지반의 비선형성을 고려한 해석결과를 도시하였다. 단순해는 비교하지 않았으며 해석해와 수치해석 해만을 비교하였다. 해석해는 두가지 방법으로 전단탄성계수를 적용하였다. 첫번째 방법에서는 전단파속도에 보정계수를 곱해서 이를 감소시켜준 후 이로써 전단탄성계수를 구한다. 국내에서는 붕괴방지진동에 대하여 보정계수로 0.5를 일반적으로 사용한다. 두번째 방법에서는 지반응답해석에서 계산된 최대변형률에 상응하는 전단탄성계수를 산정하여 이를 해석에 적용한다. 첫번째 방법은 원칙적으로 문제가 있다. 왜냐하면, 지반의 강성 - 지층구성에 따라서 전단변형률이 크게 지배 받으며 일률적으로 0.5를 적용하는 것은 연약지반을 제외하고는 실제 전단변형률을 과대예측할 수 있기 때문이다. 수치해석에서 비선형성은 FLAC<sup>2D</sup> 6.0(Itasca, 2008)의

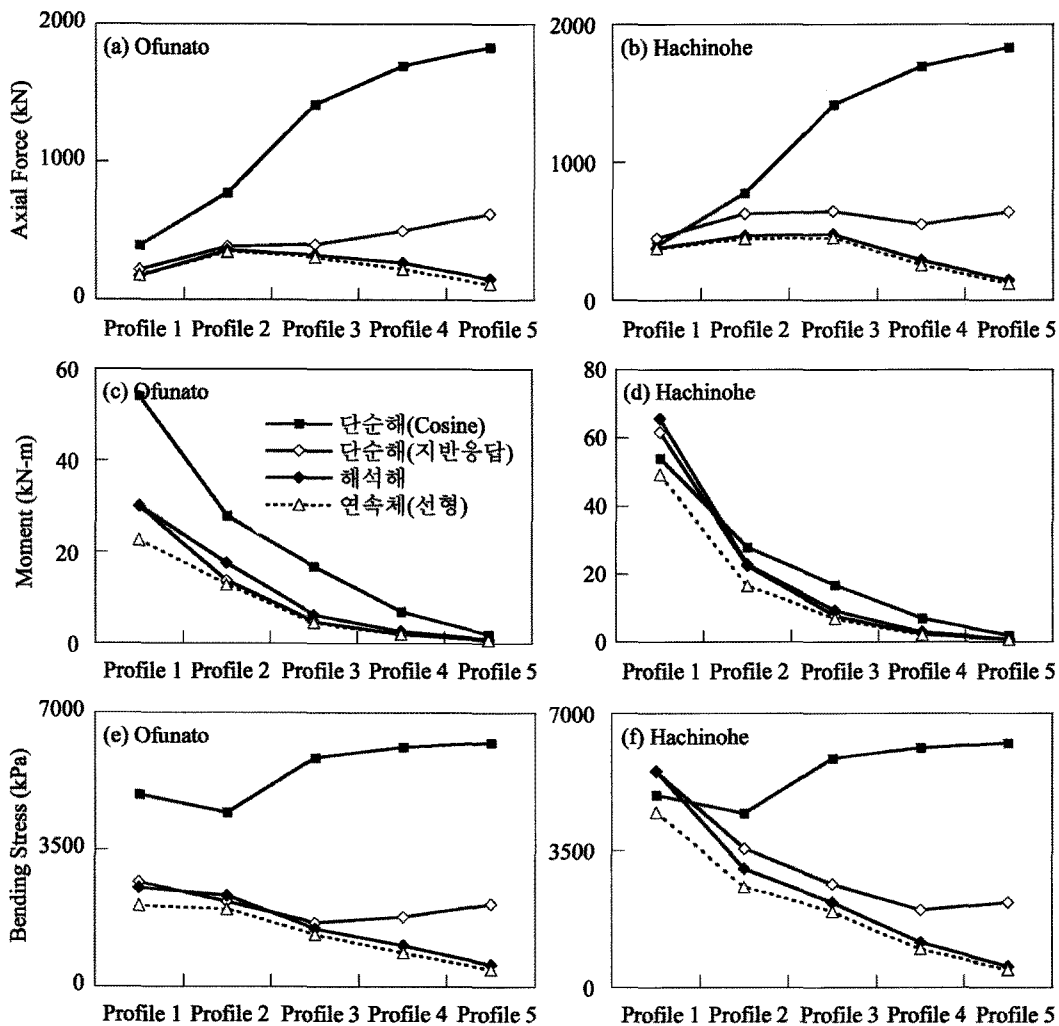


그림 11. 터널 라이닝에 발생하는 최대 축력, 모멘트, 압축응력(균질 지반)

내장모델인 Sig3 모델을 사용하여 모사하였다. Sig3 모델은 다음과 같이 정의된다.

$$G_{tan} = \frac{a}{1 + \exp(-(L - x_0)/b)} \quad (16)$$

여기서  $G_{tan}$  = 접선전단탄성계수,  $L = \log(\gamma)$ ,  $x_0$ ,  $a$ ,  $b$  = 모델 변수이다.

각각의 경우에 적용된 sig3 모델의 변수는

Seed와 Idriss(Lower, 1991)은  $a = 1.03$ ,  $b = -0.6$ ,  $c = -1.8$ ,  
 Seed와 Idriss(Mean, 1991)은  $a = 0.999$ ,  $b = -0.666$ ,  $c = -1.466$ ,  
 Seed와 Idriss(Upper, 1991)은  $a = 1.003$ ,  $b = -0.6$ ,  $c = -1.45$ ,  
 Schanbel(1973)은  $a = 1.03$ ,  $b = -0.53$ ,  $c = -1.15$ 이다.

그림 12의 결과를 보면 균질 지반에서는 최대전단변형률을 적용한 해석해와 수치해석 해는 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 그림 11의 선형해석과 비교해보면 계산된 응답이 확연하게 작은 것을 확인할 수 있다. 즉,

선형 응답변위법을 수행할 경우, 응답을 과대예측할 수 있으니 주의해야 한다. 해석해에 보정계수를 적용할 경우에는 지반의 전단변형률을 과대예측하여 타 결과에 비하여 계산된 결과가 작은 것으로 나타났다. 즉, 보정계수를 사용한 결과는 보수적이지 않을 수 있으므로 사용 시 유의해야 한다. 물론, 계산된 응력이 허용응력보다는 현격하게 작아서 설계에 영향을 미치지 않을 경우에는 무방하다.

비균질 지반에 대한 해석결과는 그림 13에 비교하였다. 해석에는 지반응답해석 결과를 적용한 해석해와 연속체 해석해가 사용되었다. 지반의 변위형상을 코사인 함수로 나타내는 단순해는 비균질 지반에 적용하기에 부적절하므로 포함시키지 않았다. 해석해는 지반 물성으로 터널 깊이에 대한 평균치를 적용하였으며 전단변형률도 마찬가지로 평균값을 계산하여 사용하였다. 연속체 해석은 선형해석과 비선형 해석 모두 사용하였다.

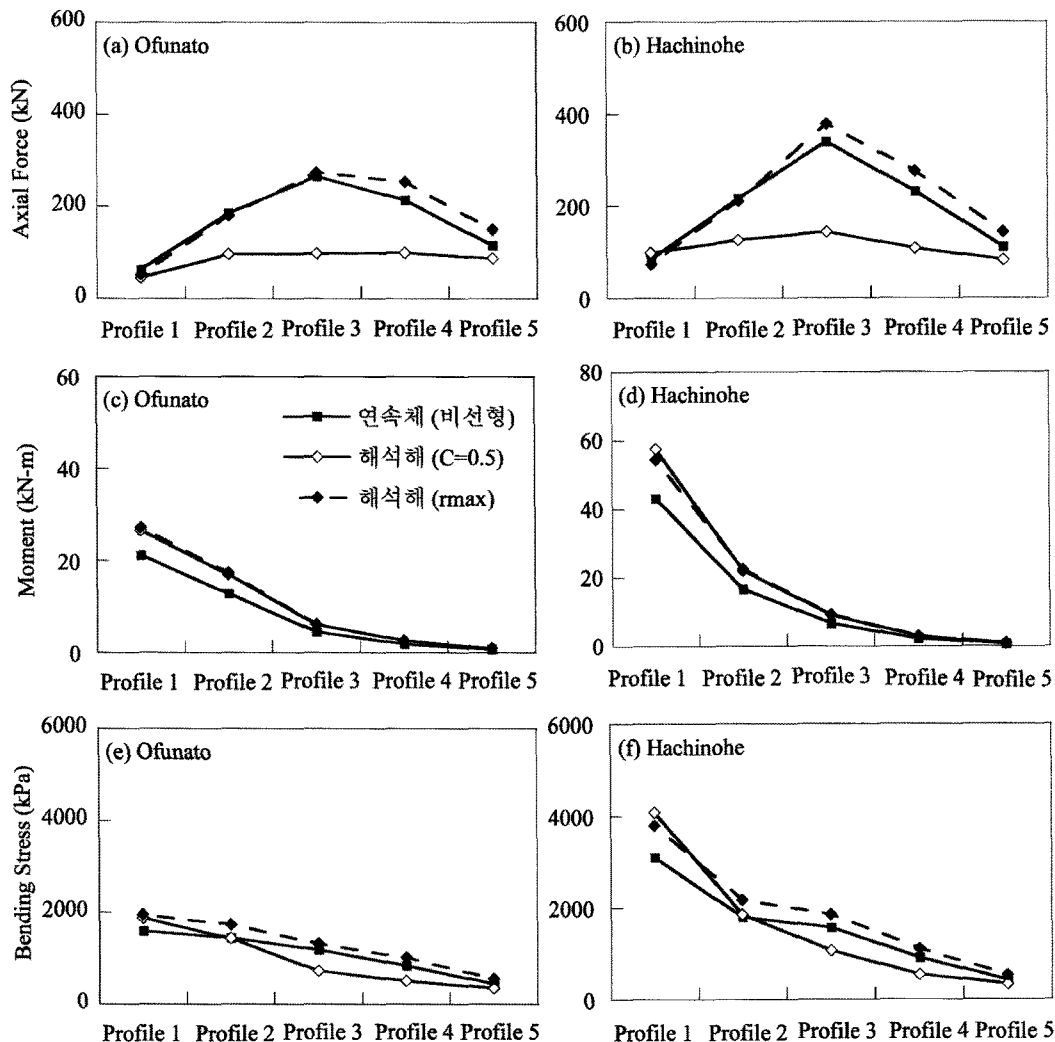


그림 12. 지반의 비선형 거동을 고려해서 계산된 터널의 응답(균질 지반)

균질 지반과 마찬가지로 1차원 지반응답해석으로 계산된 지반변위를 측면변위경계조건으로 작용하였으며 이에 대한 터널의 응답을 계산하였다. 그림 14는 주상도 6에 대하여 선형해석을 수행한 결과이다. 그림 14(a)는 깊이 별로 수평변위 경계조건이 급격하게 변이하는 것을 확인할 수 있다. 그림 14(b)는 지반 내에서 계산된 전단변형률의 분포를 도시하고 있다. 균질 지반과는 분포형상에서 확연한 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 14(c)에는 터널 라이닝에 작용하는 축력, 모멘트, 전단력, 그리고 축변형률, 그리고 터널 라이닝의 변형형상을 도시하고 있다. 균질지반에서는 터널형상이 타원형으로 변형하는 반면, 주상도 6에서는 매우 복잡한 형상을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉 주상도 6에서 터널의 하부는 단단한 지반으로 둘러 쌓여있는 반면 상부 2m 정도는 상대적으로 강성이 작은 지반에 놓여있다. 따라서 하부지반에서는 변형이 극히 작은 반면 모든

변위는 상부에서 발생하며 이로 인하여 터널 형상은 타원형상이 아니라 상부 부분이 하부보다 훌쭉한 모양을 가지게 되었다.

다시 그림 13의 결과로 돌아가보면, 비균질 지반에서의 터널응답은 균질 지반에 비하여 현격하게 큰 것을 볼 수 있다. 이는 그림 14와 같이 변형률의 급격하게 변화하는 부분에서 응력이 집중되기 때문이다. 평균 물성과 변형률을 적용한 해석하는 터널의 응답을 과소예측하는 것으로 나타났다. 반면, 연속체 해석의 경우 선형 해석은 지반의 강성을 과도하게 높게 예측하여 결과를 과대예측할 수 있음을 유의해야 한다. 위의 비균질 지반 해석 사례는 지반이 강성의 변화가 큰 경우에는 수치해석으로 터널의 안정성을 평가해야 하며 지반의 비선형성을 고려하는 것이 적절함을 입증한다.

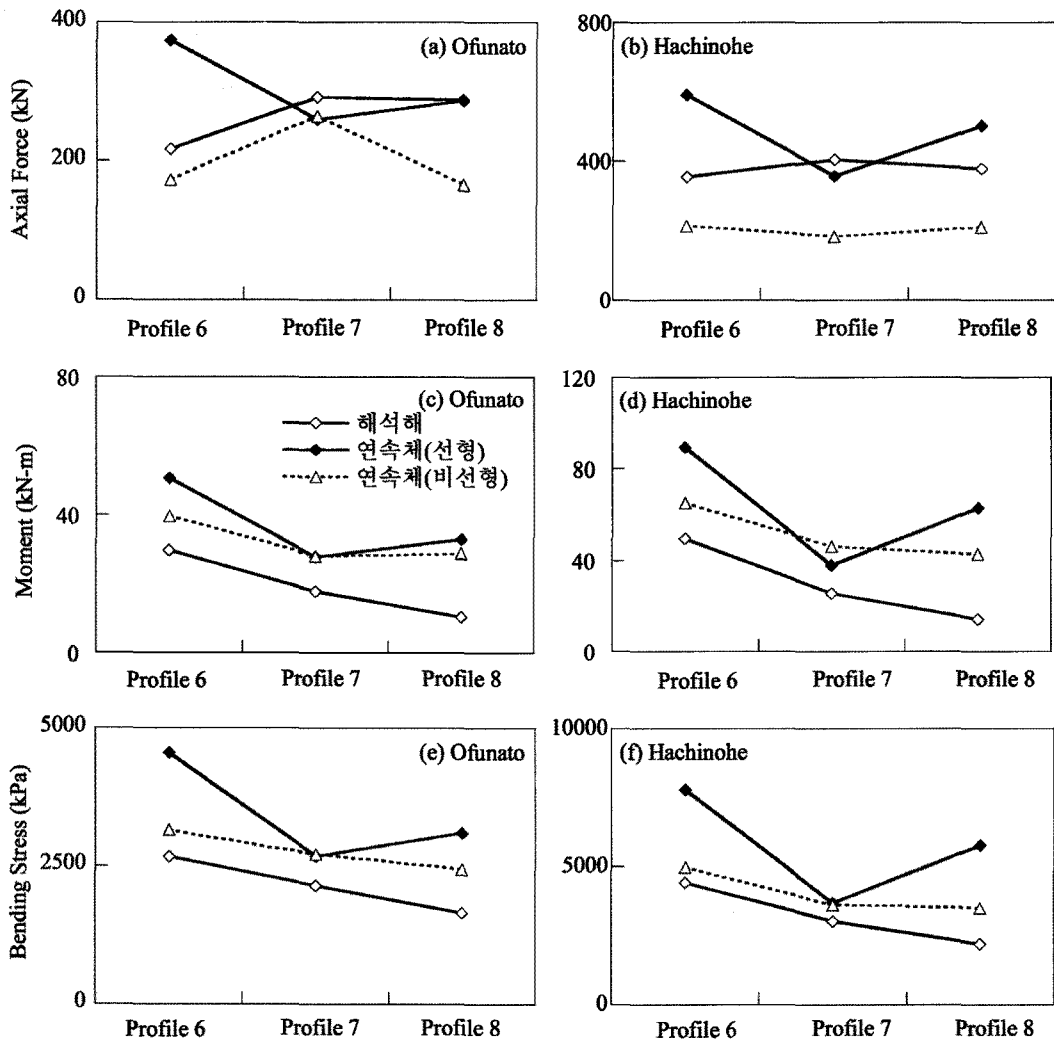
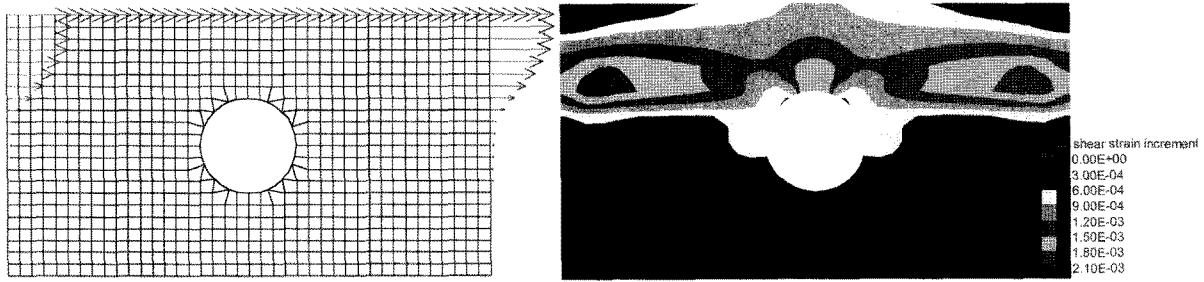


그림 13. 터널 라이닝에 발생하는 최대 축력, 모멘트, 휨응력(비균질 지반)



(a) 해석 모델링

(b) 전단변형률 분포

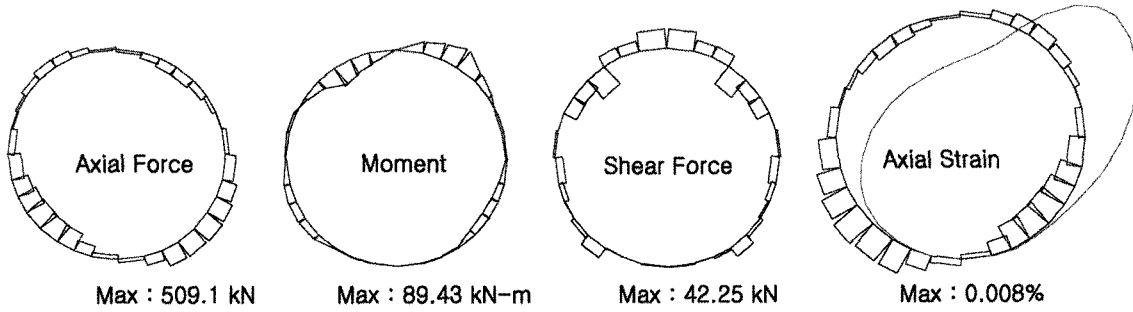


그림 14. 연속체 해석조건 및 터널 라이닝의 응력분포(주상도 6)

## 6. 결론

본 논문에서는 터널의 내진설계에 가장 널리 수행되는 응답변위법을 올바르게 수행하기 위한 가이드라인을 제시하고자 일련의 해석을 수행하였다. 먼저 지반변위는 단일, 이중 코사인법과 1차원 등가선형 지반응답 해석을 수행하여 결과를 비교하였다. 터널의 응답은 단순해, 해석해, 그리고 연속체 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 단일 코사인법은 지층의 변위분포를 코사인 함수로 나타내는 방법으로써 변위형상이 1차원 지반응답해석과는 크게 다른 것으로 나타났으며 균질 지반 이외에는 사용이 부적절한 것으로 나타났다. 이중 코사인법은 비균질 지반에서 사례별로 정확성이 크게 차이가 나는 것으로 나타났다. 결론적으로, 1차원 지반응답해석을 수행하는 것이 가장 안전한 것으로 판단된다.
- (2) 단순해와 코사인법을 사용하였을 경우, 균질 지반에서도 크게 응답을 과대예측할 수 있는 것으로 나타났다. 균질 지반에 한정해서는 지반응답해석으로 계산된 지표면 변위를 적용할 경우에는 비교적 정확하게 터널의 응답을 예측하는 것으로 나타났다. 반면, 비균질 지반에서는 단순해는 사용되지 말아

야 할 것이다.

- (3) 해석해는 엄밀해의 경우 균일지반과 터널형상이 원형인 경우에 정확하면서 간편하게 응답을 구할 수 있다. 터널과 지반의 경계조건을 Full-slip과 No-slip으로 계산할 수 있다. 또한 지반의 비선형성을 고려하기 위해 전단탄성계수를 감소시켜 계산식을 이용하면 비교적 수치해석과 유사한 결과를 얻을 수 있다.
- (4) 연속체 수치해석은 응답변위법 중에서 가장 정확한 결과를 예측하는 것으로 나타났다. 해석결과, 비균질 지반에서는 특히 수치해석을 수행해야 하는 것으로 나타났다. 연속체 해석 시 지반을 선형으로 모델링하면 터널의 응답을 과대예측할 수 있으니 지반의 비선형성을 고려하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(과제 번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술 연구)에 의하여 연구비가 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

1. 박두희, 신종호, 윤세웅 (2010), "터널 횡방향 지진해석 Part II: 동적해석을 통한 터널의 지진응답 예측", *한국지반공학회 논문*

- 집, 제 26권, 6호, pp.71-85.
2. 윤종구, 김동수, 유제남 (2003), “지중구조물 내진설계를 위한 기반면의 속도 응답스펙트럼 및 응답변위 산정기법에 관한 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제 19권, 4호, pp.211-222.
  3. 이인모, 안대진 (2001), “터널구조물의 내진해석”, *한국터널공학회 논문집*, 제 3권, 4호, pp.3-15.
  4. 일본윤수성 (1999), *지중구조물 내진설계 표준 및 동해설*, 과학기술, p.1-650.
  5. 志波由紀夫, and 岡本晋 (1991), “シーロ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, p.193-202.
  6. 한국도로교통협회 (2000), *도로교설계기준*, 건설정보사, p.1-474.
  7. 한국지반공학회 (2006), *지반구조물의 내진설계*, 한국지반공학회, p.1-655.
  8. 한국지반공학회 (2010), *상호검증을 통한 지진 지반응답해석 이해*
  9. Amorosi, A., and Boldini, D. (2009), “Numerical modelling of the transverse dynamic behaviour of circular tunnels in clayey soils”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.29, No.6, pp. 1059-1072.
  10. Hashash, Y.M.A. (2002), “Seismic design of underground structures: role of numerical modeling”, *North American Tunneling*, Seattle, WA.
  11. Hashash, Y.M.A., Park, D., and Yao, J.I.C. (2005), “Ovaling deformations of circular tunnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.20, No.5, pp.435-441.
  12. Hoeg, K. (1968), “Stresses against underground structural cylinders”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.94, No.SM4, pp.833-858.
  13. Idriss, I.M., and Sun, J.I. (1992), “SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits”: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis.
  14. Itasca (2008), “FLAC (Fast Lagrangian Analyses of Continua) v. 6.0”, *Ontario, Canada*.
  15. Park, D., and Hashash, Y.M.A. (2004), “Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis”, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.8, No.2, pp.249-274.
  16. Peck, R.B., Hendron, A.J., and Mohraz, B. (1972), “State of the art in soft ground tunneling”, *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, New York, NY: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Vol., pp.259-286.
  17. Penzien, J. (2000), “Seismically induced racking of tunnel linings”, *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, pp.683-691.
  18. 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.
  19. Towhata, I. (2008), *Geotechnical earthquake engineering*, Springer Verlag, pp.1-684.
  20. Wang, J.N. (1993), “Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach”, *Monograph 7*. New York, NY: Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc.

(접수일자 2010. 5. 10, 심사완료일 2010. 6. 28)