

지반-구조물 상호작용을 고려한 터널 구조물의 동적 해석

김현중 · 박장호[†] · 신영석

아주대학교 환경건설교통공학부
(2004. 4. 30. 접수 / 2005. 1. 10. 채택)

Dynamic Analysis of Tunnel Structures Considering Soil-Structure Interaction

Hyon Jung Kim · Jang Ho Park[†] · Yung Seok Shin

Division of Environmental, Civil and Transportation Engineering, Ajou University
(Received April 30, 2004 / Accepted January 10, 2005)

Abstract : When a underground structure is constructed at the site composed of soft soil, the behavior of a underground structure is much affected by the motion of soft soil. Therefore, the effect of soil-structure interaction is an important consideration in the design of a underground structure such as tunnel at the site composed of soft soil. This paper presents the results of the study on dynamic response of tunnel structures and soil-structure interaction effects. The computer program SASSI was used in seismic analysis of tunnel structures because it is more capable of analyzing dynamic response of structures considering soil-structure interaction. As regards the results, the flexibility of surrounding soil affects dynamic response characteristics of tunnel structures and response of tunnel structures can be amplified.

Key Words : tunnel, soil-structure interaction, dynamic response, SASSI

1. 서 론

대규모 구조물의 건설이 증가함에 따라 암반지역이 아닌 연약지반을 포함한 지반에 구조물이 건설되는 경우가 증가하고 있다. 연약지반을 포함한 지반에 구조물이 건설되는 경우 주변 지반의 유연성으로 인하여 지반과 구조물 사이에 상호작용이 발생하게 되며, 이러한 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction)은 연약지반을 포함하는 지반에 건설되는 구조물의 설계에 있어서 중요한 고려사항의 하나이다. 암반지역이 아닌 지반에 위치하는 터널과 같은 지중구조물에서는 지반운동이 지반을 통과하면서 기반암에서의 지반운동에 비하여 크게 증폭될 수 있고 주변 지반의 물성치에 많은 영향을 받을 수 있으므로 지반-구조물 상호작용이 설계에 적절히 반영되어야 한다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 구조물의 동적 해석에 관한 연구는 다수 이루어졌으나¹⁻⁴⁾, 대부분의 해석방법들은 수식화 과정에서 사용된 가정들과 단순화 등으로 인하여 터널

과 같은 지중구조물의 동적 해석에 한계를 지니고 있다.

본 논문에서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 다양한 구조물의 동적 해석에 사용되고 있는 해석 프로그램인 SASSI를 사용하여 연약지반을 포함한 지반에 놓인 터널 구조물에 대한 동적 해석을 수행하였다⁵⁾. 지반-구조물 상호작용을 받는 터널 구조물의 동적 거동은 입력지반운동의 규모에 따른 지반의 비선형성에 큰 영향을 받는다. 이러한 지반의 비선형 특성은 크게 1차 비선형과 2차 비선형으로 나눌 수 있다^{1,2)}. 1차 비선형이란 지반 자체만의 운동에 의한 재료의 비선형 특성으로 Schnabel 등이 개발한 프로그램 SHAKE91⁶⁾를 사용하여 지반의 비선형 물성치를 산정하여 고려하였다. 2차 비선형은 지반과 구조물의 상호작용 효과로 인하여 구조물의 거동이 지반에 전달됨으로써 발생하는 비선형 특성으로 지반-구조물 상호작용 해석프로그램 SASSI에서 고려된다³⁾. 프로그램 SASSI에서 터널 구조물은 유한요소로 모델링하였으며, 반무한의 지반은 visco-elastic 지반요소를 이용하여 모델링하였다. 깊이에 따른 지반운동의 차이가 작은 지반과 깊이에 따른

[†]To whom correspondence should be addressed.
jangho@ajou.ac.kr

지반운동의 차이가 큰 지반에서의 터널 구조물에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적 해석을 수행하고, 해석결과를 기존의 해석방법인 응답면 위법에 의한 해석결과와 비교함으로써 터널 구조물의 동적 거동 특성과 지반-구조물 상호작용의 영향을 살펴보았다.

2. 터널 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석방법

지반-구조물 상호작용을 고려한 터널 구조물의 동적 해석은 다음과 같은 순서로 이루어졌다.

2.1. 인공지진파의 생성

지반-구조물 상호작용을 고려한 터널 구조물 거동의 시간이력을 얻기 위해서는 입력지반운동의 가속도 시간이력이 필요하다. 입력지반운동의 가속도 시간이력을 구하는 방법에는 주어진 응답스펙트럼에 부합하는 지반운동의 가속도 시간이력을 랜덤진동론에 의하여 작성하는 방법과 진원, 전달경로 및 부지특성을 종합적으로 고려한 지반모델로부터 지반운동의 가속도 시간이력을 구하는 방법이 있다. 본 논문에서는 랜덤진동론에 의한 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 사용하여 설계기준의 응답스펙트럼을 만족하는 인공지진 가속도 시간이력을 생성하였다⁷⁾.

2.2. 비선형 지반 물성치 산정

지반 자체만의 운동에 의한 재료의 비선형 특성은 일반적으로 수치 해석 방법을 이용하여 고려되고 있다. 본 논문에서는 Schnabel 등이 개발한 프로그램 SHAKE91를 사용하여 지반의 비선형 물성치를 산정하여 지반의 1차 비선형 특성을 고려하였다⁸⁾.

2.3. 부분구조법을 이용한 터널 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석

지반-구조물 상호작용 해석방법에는 직접법, 부분구조법 등의 다양한 수치 해석 방법들이 사용되고 있다. 본 논문에서는 부분구조법으로 지반-구조물 상호작용을 고려하고 다양한 구조물의 동적 해석에 사용되고 있는 지반-구조물 상호작용 해석프로그램인 SASSI를 사용하여 터널 구조물에 대한 동적 해석을 수행하였다.

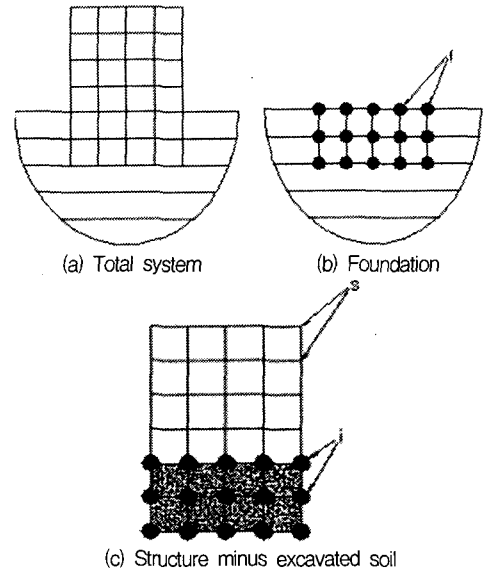


Fig. 1. Soil-structure interaction by substructure method

부분구조법을 사용하는 지반-구조물 상호작용 해석 프로그램인 SASSI에서는 Fig. 1과 같이 지반과 구조물로 이루어진 전체 시스템을 지반계와 구조물계로 분할하고 각 부분구조 거동의 상관관계로부터 전체 시스템의 응답을 구한다.

Fig. 1에서 전체 지반-구조물 시스템(Fig. 1(a))은 구조물이 놓이기 전의 지반(Fig. 1(b))과 굴착된 지반을 제외한 구조물(Fig. 1(c))의 두 부분으로 나누어진다. 여기서 지반과 구조물의 상호작용은 구조물이 매입된 기초 부분의 모든 절점에서 발생한다. Fig. 1에서 부분구조 (b)와 부분구조 (c)가 결합되면 전체 지반-구조물 시스템 (a)를 형성하게 되므로 전체 구조물-지반 시스템에 대한 운동방정식은 부분구조 (b)의 지반에 대한 운동방정식과 부분구조 (c)의 구조물에 대한 운동방정식을 진동수 영역에서 결합함으로써 다음과 같이 얻을 수 있다⁹⁾.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{st}] \\ [S_{ts}] & [S_{tt}^g] + [S_{tt}^s] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_t\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{tt}^g] \{u_t^g\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $[S]$ 는 동적 강성행렬, $\{u\}$ 는 변위벡터를 의미한다. 그리고 첨자 g 는 굴착된 지반의 상태를 나타내며, 밑첨자 i 와 s 는 각각 기초에서의 절점과 기초를 제외한 상부구조물에서의 절점을 나타낸다. $\{u_t^g\}$ 는 지반과 구조물의 접촉면에 작용하는 지진운동, 즉 산란운동으로 부분구조법에서 적용되는 기초

부에서의 입력운동을 나타낸다.

자유장 시스템은 굴착된 지반과 굴착되어진 지반의 합이므로 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$[S_{ii}^g] + [S_{ii}^f] = [S_{ii}^f] \quad (2)$$

여기서, 첨자 f 는 굴착 전의 지반을 의미한다. 또한, 산란운동의 항인 $[S_{ii}^g]\{u_i^g\}$ 는 다음과 같이 자유장 운동으로 나타낼 수 있다.

$$[S_{ii}^g]\{u_i^g\} = [S_{ii}^f]\{u_i^f\} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 식 (1)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} [S_{ss}] & [S_{si}] \\ [S_{is}] & [S_{ii}^g] - [S_{ii}^g] + [S_{ii}^f] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_i\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [S_{ii}^f]\{u_i^f\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 사용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 연약지반에서의 전체 지반-구조물 시스템의 운동을 평가할 수 있다.

3. 터널 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석 예

본 연구에서는 지반조건이 상이한 3개의 터널 구조물에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적 해석을 수행하였다. 터널의 단면은 Fig. 2와 같고 터널 구조물의 3차원 모델은 Fig. 3과 같다.

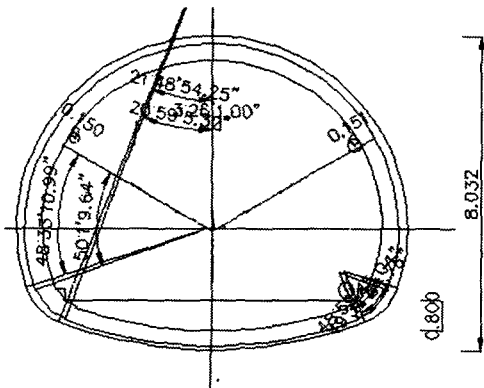


Fig. 2. Cross section of tunnel structure

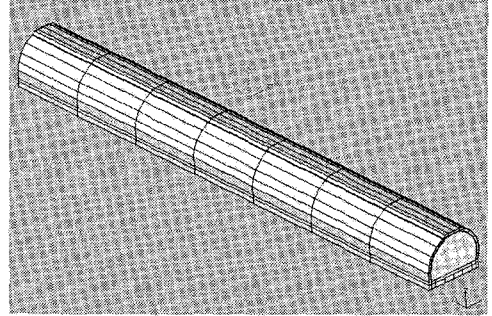


Fig. 3. Finite element model of tunnel structure for soil-structure interaction analysis

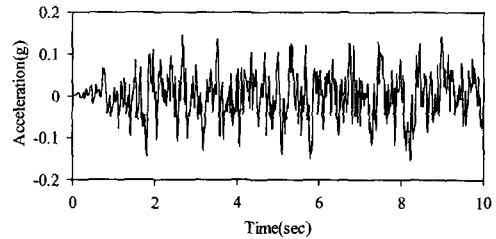


Fig. 4. Artificial earthquake acceleration time history

3.1. 인공지진파의 생성

지반-구조물 상호작용을 고려한 터널 구조물의 시간이력해석에 필요한 입력지반운동의 가속도 시간이력을 설계기준에 제시된 응답스펙트럼에 부합되도록 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 사용하여 생성하였다. 해석 대상 터널 구조물은 지진구역 I에 위치하여 지역계수 1.1을 사용하고, 위험도 계수는 재현주기 1000년인 1.4를 사용하여 가속도계수를 0.154g로 하였다. 10개의 인공지진 가속도 시간이력을 생성하고 그 중에서 응답스펙트럼에 가장 잘 부합되는 가속도 시간이력을 해석에 사용하였다(Fig. 4).

3.2. 비선형 지반 물성치 선정

프로그램 SHAKE91을 사용하여 각각의 터널(T1, T2, T3)이 위치하는 지반의 비선형 물성치를 선정하였다. 이때 해석에 사용된 터널 구조물 주변의 지반 형상과 물성치는 Table 1과 같다.

프로그램 SHAKE91로부터 구한 터널의 주변 지반에서 발생하는 깊이에 따른 최대지반가속도를 Fig. 5에 도시하였다. T1 터널의 경우 두꺼운 연암층에 위치하며, 터널의 위치에서 지반운동의 감소현상이 나타났다. 반면 T2 터널과 T3 터널의 경우 터널의 위치에서 지반운동의 변화가 크고 기반암에서의 지반운동에 비하여 지표면에서의 지반운동이 최대 1.468배, 2.11배 증폭되어 나타났다.

Table 1. Geometries and properties of soil layers

	T1		T2		T3	
	두께	물성치	두께	물성치	두께	물성치
1	12.9m 봉적층 (1.8)	$v_s = 420\text{m/s}$	3.7m 봉적층 (1.8)	$v_s = 420\text{m/s}$	15.9m 봉적층 (1.8)	$v_s = 420\text{m/s}$
2	2.8m 풍화토 (1.7)	$v_s = 500\text{m/s}$	12.2m 풍화암 (2.0)	$v_s = 900\text{m/s}$	4.8m 풍화암 (2.0)	$v_s = 900\text{m/s}$
3	2.9m 풍화암 (2.0)	$v_s = 900\text{m/s}$	9.8m 연암 (2.3)	$v_s = 900\text{m/s}$	8.2m 연암 (2.3)	$v_s = 900\text{m/s}$
4	7.2m 연암 (2.5)	$v_s = 2000\text{m/s}$	1.0m 연암 (2.5)	$v_s = 2000\text{m/s}$	1.0m 연암 (2.5)	$v_s = 2000\text{m/s}$
5	31.5m 연암 (2.6)	$v_s = 2500\text{m/s}$				

()는 흙의 단위중량, 단위 : ton/m^3

3.3. 지반-구조물 상호작용을 고려한 터널 구조물의 동적 거동

터널 구조물이 놓인 깊이에서 전단파 속도가 크고 깊이에 따른 지반 가속도의 변화가 작은 지반에 위치한 T1 구조물은 2D-plane strain element로 모델링하고, 터널 구조물이 놓인 깊이에서 전단파 속도가 작고 깊이에 따른 지반 가속도의 변화가 큰 지반에 위치한 T2, T3 구조물은 3D-solid element로 모델링하고, 프로그램 SASSI를 사용하여 동적 해석을 수행하였다. 해석으로부터 Fig. 6과 같이 T1, T2, T3 터널 구조물의 측벽에서 발생하는 가속도 시간이력을 구하였다. 터널이 놓인 깊이에서의 지반 가속도의 변화가 작을수록 구조물의 가속도는 작게 나타나고 있다.

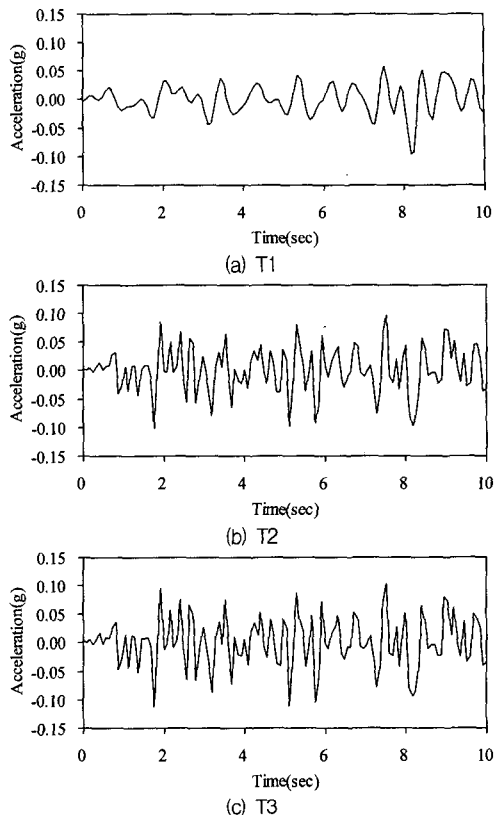


Fig. 6. Acceleration time histories of tunnel models

해석결과로부터 T2 구조물과 T3 구조물에 발생하는 Von-mises stress를 구하여 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 T2 터널의 경우 측벽부에서 최대응력이 발생하였으며, T3 터널의 경우에는 터널 입구부의 첨단부와 아치부에서 최대응력이 발생하였다.

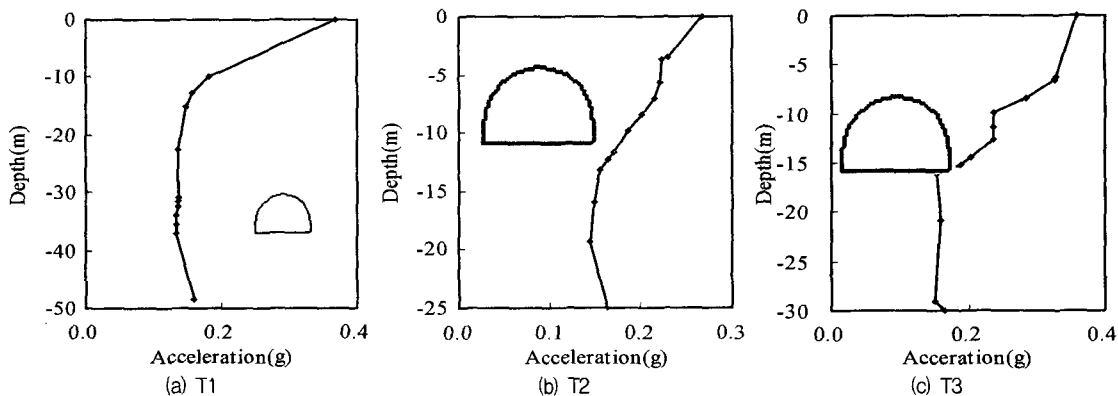
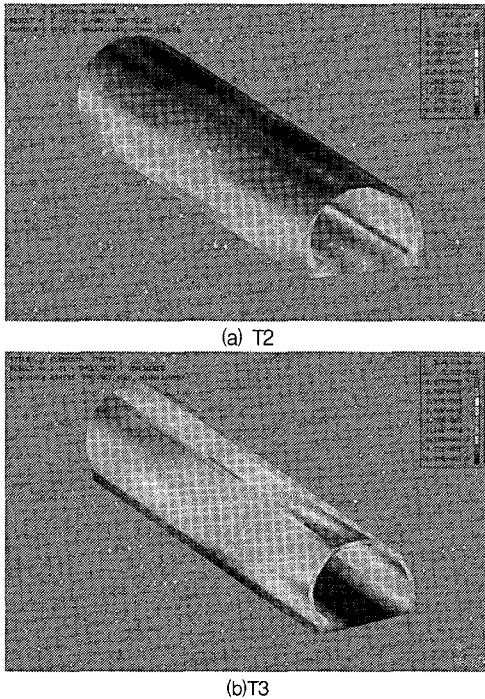


Fig. 5. Profiles of free field motion at several sites



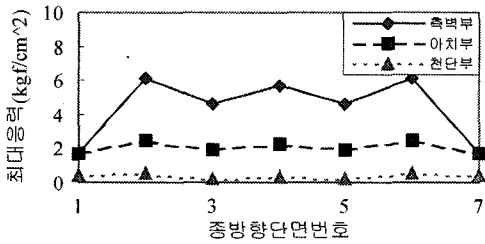
(a) T2

(b) T3

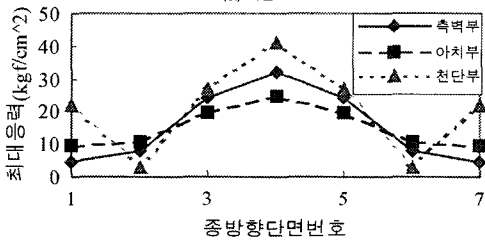
Fig. 7. Maximum stress distribution(von-mises stress) for tunnel structures

T2 구조물과 T3 구조물에 발생하는 종방향 최대 휨응력 분포를 구하여 Fig. 8에 도시하였다. T3 터널의 경우 T2 터널에 비하여 전체적으로 응력이 크게 발생하며, 분포 형상도 다르게 나타나고 있다.

프로그램 SASSI를 이용한 터널 구조물의 지반-구



(a) T2



(b) T3

Fig. 8. Maximum bending stress

Table 2. Comparison of analysis results

구분	최대 수직 응력(kgf/cm ²)		
	응답변위법	SSI를 고려한 동적 해석	
T1	천단부	1.89	2.89
	아치부	4.33	12.14
	측벽부	14.86	5.32
T2	천단부	0.35	0.54
	아치부	19.01	2.52
	측벽부	21.26	6.15
T3	천단부	1.10	41.17
	아치부	19.37	24.79
	측벽부	34.47	31.82

조물 상호작용 해석결과를 현재 설계에서 사용되고 있는 간편해석방법인 응답변위법을 이용한 해석결과와 비교하였다(Table 2). 프로그램 SASSI를 이용한 터널 구조물의 지반-구조물 상호작용 해석결과에서 T1, T2, T3 구조물에 발생하는 최대수직응력은 각각 12.14kgf/cm², 6.15kgf/cm², 41.17kgf/cm²이었으며, 응답변위법에 의한 T1, T2, T3 구조물에 발생하는 최대수직응력은 각각 14.86kgf/cm², 21.26kgf/cm², 34.47 kgf/cm²이었다. 응답변위법에 의한 결과와 지반-구조물 상호작용을 고려한 결과를 보면 동일한 구조물에 대하여 최대수직응력이 발생하는 위치와 그 크기가 상이하게 나타날 수 있음을 알 수 있다. 또한 Fig 5의 결과를 고려하면 깊이에 따른 지반 가속도의 변화가 큰 지반에 위치한 T3 구조물에서는 지반-구조물 상호작용에 의하여 응력이 크게 증폭되었으며, 반면 깊이에 따른 지반 가속도의 변화가 작은 지반에 위치한 T1 구조물에서는 응답변위법에 비해 작은 응력이 발생하였다.

T2 터널의 라이닝의 두께에 따른 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적 해석 결과와 정적 하중에 대한 해석결과로부터 허용력을 구하여 Table 3에 정리하고 터널 구조물의 안전성을 검토하였다. 라이닝의 두께가 800mm인 경우 허용력이 허용응력인 129.60 kgf/cm²보다 작아 안전하나, 라이닝의 두께가 600 mm인 경우 허용력이 허용응력인 129.60kgf/cm²를 초과하여 안전하지 못한 것으로 나타났다.

Table 3. Safety of tunnel Structure for the different thickness
단위 : kgf/cm²

구분 위치	정적해석	동적해석	합응력	검토
	휨응력	축응력	압축부	
600mm	102.92	25.93	137.26	> 129.6(N.G.)
800mm	75.98	19.83	101.96	< 129.6(O.K.)

4. 결론

본 논문에서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 다양한 구조물의 동적 해석에 사용되고 있는 해석 프로그램인 SASSI를 사용하여 지반조건이 상이한 터널 구조물에 대한 동적 해석을 수행하였다. 해석 결과를 기존의 간편해석방법인 응답변위법에 의한 해석결과와 비교하고 터널 구조물의 동적 거동 특성과 지반-구조물 상호작용의 영향을 살펴봄으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 터널이 놓인 깊이에서 전단파 속도가 크고 깊이에 따른 지반 가속도의 변화가 작은 지반에 위치한 T1 터널의 경우 응답변위법에 의한 결과가 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석결과보다 다소 큰 값을 보여주고 있다. 이는 동적하중인 지진하중을 정적하중으로 치환하여 해석하는 간편법인 응답변위법에 의한 해석이 깊이에 따른 지반운동의 차이가 작은 지반에서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석에 비하여 안전측으로 해석될 수 있음을 의미한다.

2) 터널이 놓인 깊이에서 전단파 속도가 작고 깊이에 따른 지반 가속도의 변화가 큰 지반에 위치한 T3 터널의 경우 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석결과가 응답변위법에 의한 결과보다 크게 나타났다. 이는 지반-구조물 상호작용이 깊이에 따른 지반운동의 차이가 큰 지반에서 더 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 또한 깊이에 따른 지반운동의 차이가 큰 지반에 위치한 터널에서는 응답변위법에 의한 결과가 과소평가 될 수 있음을 의미한다.

3) T2 터널의 경우 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석결과에서 응답변위법에 의한 결과에서보다 작은 응력이 발생하였다. 이 경우는 깊이에 따른 지반운동의 차이가 작지 않은 지반임에도 불구하고 다음의 몇 가지 원인에 기인한 결과로 판단된다. 첫째, 터널의 위치가 지표면 가까이 위치하여 하중으로 작용하는 주변토압이 매우 작은 것이고, 둘째, Fig. 5의 결과에서 볼 수 있듯이 터널이 위치하고 있

는 4m~10m 깊이의 지반에서 지반운동의 변화율이 크지 않은 것이 원인으로 판단된다.

위와 같은 결과로 미루어 볼 때 깊이에 따른 지반 가속도의 변화가 큰 지반에 위치한 터널 등의 지중구조물에 대한 보다 신뢰성 있는 해석을 위해서는 응답변위법과 같은 근사해석법보다 지반-구조물 상호작용을 충분히 고려할 수 있는 해석방법이 사용되어야 할 것이다.

감사의 글 : 이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Wolf, J. P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice-Hall Inc., 1985.
- 2) Wolf, J. P., *Soil-Structure Interaction Analysis in Time Domain*, Prentice-Hall Inc., 1988.
- 3) 장정범, 서용표, 이종립, 이계희, "Dwnhole 지진 계측자료에 의한 지반의 비선형성 평가에 관한 연구", 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제6호, pp. 29~45, 2001.
- 4) Chuan He, "Study on seismic behavior and seismic design methods in transverse direction of shield tunnels", *Structural engineering and mechanics*, Vol. 11, No. 6, 2001.
- 5) Lysmer, J., Tabatabaie, M., Tajirian, F., Vahdani, S., and Ostadan, F., "SASSI, a System for Analysis of Soil-Structure Interaction", University of California, Berkeley, 1981.
- 6) Idriss, I. M., Sun, J. I., "User's manual for SHAKE91 : a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits", University of California, Berkeley, 1993.
- 7) Gasparini, D., Vanmarcke, E. H., "Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra", Massachusetts Inst. of Technology, 1976.