응답변위법을 이용한 지중구조물의 지진해석

Earthquake Response Analyses of Underground Structures Using Displacement Responses of Soil

김 두 기* 서 형 렬** 박 진 우*** 최 인 정****

Kim, Doo-Kie Seo, Hyeong-Yeol Park, Jin-Woo Choi, In-Jung

Abstract

This study performed earthquake response analyses of underground structures using displacement responses of soil. In this study, spring coefficients of surrounding soil proposed by specifications and researchers were adopted and then their corresponding analysis results were compared. The free field analyses using ProShake were carried out in order to predict ground responses of the field without underground structures. Several earthquakes such as El Centro, Ofunato, and Hachinohe earthquakes were considered to calculate maximum displacements. Numerical examples were analyzed, and then the results were compared and commented depending on spring coefficients of soil for the analyses using displacement responses of soil. The soil coefficients ranged from 0.05 to 14.39 times of those calculated by Korean Bridge Design Specification (2005). In conclusion, the coefficients of soil proposed by standard specifications seemed to be overestimated compared with those by the finite element method(FEM).

요 지

본 연구에서는 응답변위법을 이용한 지중구조물의 지진해석에 있어서 지반반력계수에 관한 기본 자료와 근거를 제공하는데 목적이 있다. 지반반력계수를 도로교 설계기준(2001), 지하공동구 내진설계기준(2004), 유한요소법으로 산출한 후, 비교·분석 하였다. 지반반력계수는 산정방법에 따라 도로교 설계기준에 비해 지하공동구 내진설계기준은 최대 4.55배, 유한요소법은 연직과 전단방향에 대해 각각 최대 3.24배와 2.00배 크게 산정되었으며, 단면력은 도로교 설계기준과 지하공동구 내진설계기준에 근거하여 구한 값이 정밀해석인 유한요소법으로 구한 값보다 전반적으로 크게 산출 되었다.

Keywords : Underground structure, Displacement response method, Spring coefficient of soil, Seismic design

핵심 용어 : 지중구조물, 응답변위법, 지반반력계수, 내진설계

* 군산대학교 토목환경공학부 교수, 토목구조기술사

** 군산대학교 토목환경공학부 박사과정

*** 군산대학교 토목환경공학부 연구원

**** 군산대학교 토목환경공학부 박사과정

E-mail : kim2kie@chol.com 063-469-4770

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2007년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

지진 발생횟수의 증가와 산업화 및 도시화로 인해 지진에 의한 피해규모가 증가하고 있다. 또한, 도시의 대형화 및 고급화로 인해 지중구조물의 건설이 증가함에 따라, 지형 및 지반조건이 양호하지 않은 지역에 지중구조물이 건설되는 경우가 늘어나고 있다. 따라서 지진에 의한 지중구조물의 지진피해 가능성도 증가하고 있으므로, 이에 대한 지진해석 및 내진설계에 관한 관련 연구가 매우 중요하다.

지중구조물의 지진해석방법은 크게 등가정적해석법과 동적해석법으로 구분할 수 있다. 지중구조물의 내진설계시 일반적으로 등가정적해석법을 사용하여 지진해석을 수행하며, 이 경우 지중구조물의 동적 거동 특성을 반영할 수 있는 응답변위법이 널리 사용된다(Kawashima, 1996).

지중구조물의 동적 거동은 지상구조물의 거동과 상이한 경향을 보이는데 Okamoto 등(1973)은 대부분의 지하구조물이 구조물의 질량보다는 주변지반의 거동에 더 큰 영향을 받는다는 것을 검증하였다. Goto 등(1985)은 유한요소-경계요소 조합해석을 이용하여 해석을 수행하였다. Monsees 등(1988)은 터널의 내진설계기준 수립을 위하여 동하중을 정하중으로 바꾸어 해석하는 기법을 제안하였으며, 이에 대한 타당성을 2차원과 3차원 유한요소해석으로 검증하였다. Kawashima(1999)는 연약 지반 중에 있는 지하구조물의 해석을 통해서 지하구조물의 지진해석시 지반변위 산정의 중요성을 강조하였다.

국내에서는 윤종구 등(2003)은 국내 설계지반운동기중에 적합한 기반면의 속도 응답스펙트럼 산정과 응답변위를 신뢰성있게 산정하는 간편법에 대한 연구를 수행하였다. 김명철 등(2004)은 국내에서 구조물의 응답을 정확하게 구할 수 있는 합리적인 수정응답변위법을 제안하였다.

응답변위법을 사용할 경우, 중요한 두 가지 절차는 1) 지진시 지중구조물의 측벽에 하중으로 작용하는 인접지반의 변위산정과 2) 지중구조물의 해석에서 인접지반의 영향을 고려하기 위한 지반반력계수를 산정하는 것이다. 인접지반의 변위와 지반반력계수를 산정하는 방법 및 해석 절차는 조건별, 국가별, 제안자 별로 차이가 있다.

본 논문에서는 가장 합리적인 지반변위를 산정하기 위해 지진시 자유장해석 프로그램인 ProShake를 사용하여 자유장해석(또는 부지응답해석, free field analysis)을 수행하였으며, 도로교 설계기준(2001), 지하공동구 내진설계기준(2004), 유한요소법으로 지반반력계수를 각각 산정한 후, 이를 적용하여 응답변위법을 통한 지중구조물의 내진해석을 실시하였다. 그 결과를 동적해석과 비교·분석하였다.

2. 응답변위법

응답변위법(김두기, 2005)은 지중구조물의 내진설계를 위하여 1970년대 일본에서 고안된 방법으로, 구조물의 단위체적당 중량이 구조물을 둘러싼 주변 매개체의 단위체적당 중량보다 작은 지중구조물에 주로 사용하는 내진설계방법이다. 지상구조물의 경우 주변 매개체인 공기보다 상대적으로 구조물의 중량이 매우 크므로, 지진시 구조물의 관성력이 지상구조물의 응답에 주된 영향을 미친다. 그러나 지상구조물과는 달리 대부분의 지중구조물의 내부는 비어있는 상태(즉, 중공인 상태)이며, 단위체적당 중량이 인접지반의 단위체적당 중량에 비해 작다. 또한, 지중 구조물은 주변 지반으로 인해 자유롭게 진동하지 못하므로, 지상구조물에 비해 감쇠가 매우 크게 발생하며, 지중구조물의 변위거동도 인접지반의 변위거동과 유사하다. 즉, 지진시 지중구조물 응답은 구조물 자체의 질량에 의한 관성력보다는 인접지반에서 발생하는 지반의 상대변위에 주로 영향을 받는다. 지진시 지중구조물의 응답을 구하기 위해 본 연구에서 사용한 응답변위법의 개념 및 절차를 요약하면 다음과 같다.

(1) 자유장 지반응답(δ_f)

지중구조물이 없는 자유장 지반(free field soil)의 지진에 의한 지반 응답은 δ_f와 같다. 여기서 지중구조물 위치에서의 변형된 지중구조물의 형상을 가상 경계면으로 가정하면, 가상 경계면의 내부와 외부에서의 전단응력은 서로 평형상태를 유지한다.

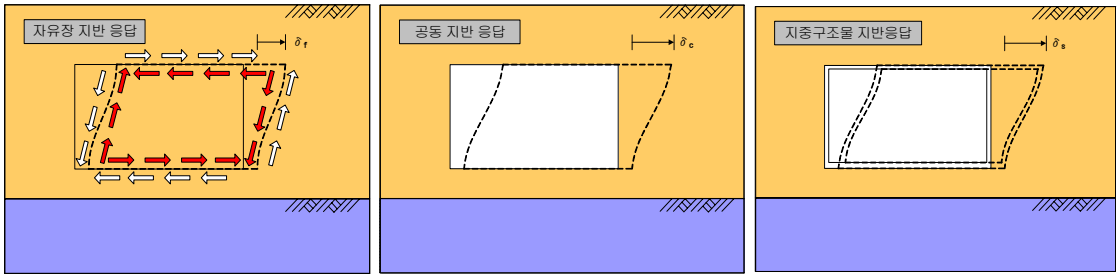


Fig. 1 지반의 변위응답

(2) 공동 지반응답(δ_c)

지중구조물이 들어설 위치의 지반을 제거한 공동지반(cavity soil)의 지진에 의한 전단변형은 δ_c와 같다. 여기서 자유장 지반응답(δ_f)에서 가상 경계면의 내부에서의 전단응력은 없어지므로, 평형상태가 무너져 추가 변형(δ_a)이 발생하여 경계면에서의 응력이 '0'으로 된다. 즉, $\delta_c \neq \delta_f$이며, 다음과 같다.

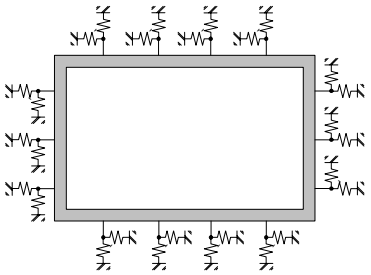
$$\delta_c = \delta_f + \delta_a \tag{1}$$

여기서 추가변형 δ_a는 자유장 지반응답(δ_f) 상태에서 가상 경계면의 외부에 작용하는 전단응력을 작용시킬 때 발생하는 지반의 추가응답(δ_a)이다.

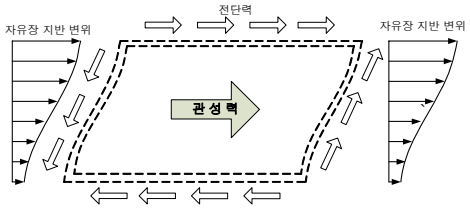
(3) 지중구조물 지반응답(δ_s)

지중구조물 지반응답(δ_s)은 자유장 지반응답 효과와 공동 지반응답 효과를 포함하여야 한다. 즉, 지중구조물 지반응답은 지중구조물 지반을 모델링한 후, 자유장 지반응답(δ_f)을 작용시키고, 동시에 자유장 지반응답(δ_f) 상태에서 가상 경계면의 외부에 자용하는 전단응력을 작용시킬 때 발생하는 지중구조물의 응답을 의미한다.

자유장 해석에서 구한 지반의 변위응답을 사용한 응답변위법을 정리하면 다음과 같다. 1) 지중구조물의 인접 지반을 스프링으로 모델링 한 후, 2) 스프링으로 지지된 지중구조물에 자유장 지반응답에서 구한 변위를 작용시키고, 3) 다시 자유장 지반의 지중구조물의 가상 경계면에서의 전단응력을 구조물의 주변에 작용시킨다. 여기서 지중구조물의 자체 질량 효과는 관성력을 사용하여 고려한다. 참고로 응답변위법은 정적하중으로 변환된 지진하중을 지중구조물에 작용시키는 정적 해석법이므로, 구조체의 강성과 하중과의 관계만으로 해석을 수행한다.



(가) 지중구조물과 인접지반 모델



(나) 작용하중과 지중구조물의 거동

Fig. 2 지중구조물의 거동

3. 지반반력계수

3.1 도로교 설계기준(2001)

지반반력계수는 지반이 탄성적인 거동을 보여주는 범위내에서 기초의 변위량이나 지반반력을 구하기 위해 필요한 상수이며, 다음과 같이 정의한다.

$$k = p/\delta \tag{2}$$

여기서, k는 지반반력계수(kN/m^3)이고, δ는 변위량(m)이며, p는 지반반력(kN/m^2)이다.

지반은 탄성체가 아니고, 깊이 방향으로 밀도나 압축성이 변하기 때문에 지반반력-변위량 곡선은 비선형의 형상을 갖는다. 따라서 지반반력계수는 변위량과 더불어 변화하지만, 본 논문에서는 변위량과 지반반력의 할 선 구배로 정의하였다. 지반반력계수는 지반과 구조물의 상호 작용을 나타내는 값이므로, 변위량 뿐만 아니라 구조물의 형상, 치수, 강성 등의 영향을 받는다. 또한, 이외에도 재하시간, 깊이에 따른 지반특성 변화, 시험시와 실제구조의 재하상태의 차이 등의 영향을 받는 아주 복잡한 성질을 갖는 상수이다. 그러므로 토질시험 및 현장시험 결과로부터 설계에 쓰이는 지반반력 계수를 결정하는 경우에는 앞서 설명한 여러 가지 요소를 고려하여야 한다.

도로교 설계기준에서는 기초의 형식과 평판재하시험 결과를 사용하여, 연직 및 수평방향 지반반력계수(k_V 및 k_H)를 추정하는 간편식을 제시하고 있으며, 본 연구에서는 지반반력계수를 산정하기 위해 이 식들을 사용하였다.

- 연직방향 지반반력계수

$$k_V = k_{V_0}\left(\frac{B_V}{0.3}\right)^{-\frac{3}{4}} \tag{3a}$$

- 수평방향 지반반력계수

$$k_H = k_{H_0}\left(\frac{B_H}{0.3}\right)^{-\frac{3}{4}} \tag{3b}$$

여기서 k_{V_0}와 k_{H_0}는 지름 0.3m의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 연직방향 및 수평방향 지반반력계수이며, B_V와 B_H는 연직방향 및 수평방향으로의 기초의 환산 재하폭이다.

3.2 지하공동구 내진설계기준(2004)

(1) 공동 지반에 대한 지반반력계수 산정

구조물이 설치될 위치의 지반을 제거한 지반(공동지반)에 대한 지반반력계수는 각종 지반조사 및 시험결과에 의해 얻어진 변형계수와 기초의 재하폭 등의 영향을 고려하여 정하는 것을 원칙으로 한다. 지반반력계수의 산정은 1) 도로교설계기준 해설-하부구조 편(대한토목학회, 2001)에서 제시한 식을 이용하거나, 2) 동적 전단탄성계수로부터 구한 지반탄성계수와의 관계식을 이용하여 구할 수 있으며, 3) 지하공동구가 건설되는 위치에서 지반조건이 매우 복잡한 경우 설계자의 판단에 따라 유한요소해석법을 사용하여 지반반력계수를 결정한다. 본 연구에서는 다음과 같이 동적 전단탄성계수를 사용하여 지반반력계수를 산정하였다.

(2) 지반의 강성계수 산정

지하공동구의 종단방향, 종단방향과 직교하는 수평면내 및 연직면내 변위에 대한 지반의 강성계수는 다음 식에 의해 산정한다.

$$\begin{aligned} k_1 &= C_1 \cdot G_{eq} \\ k_2 &= C_2 \cdot G_{eq} \\ k_3 &= C_3 \cdot G_{eq} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, C_1, C_2, C_3은 지반의 강성계수 k_1, k_2, k_3에 대한 정수로서 실험 등의 조사결과를 기초로 정하며, 일반적으로 $C_1 = C_2 = 1.0$, $C_3 = 3.0$을 사용한다. 그리고 G_{eq}는 지반의 동적전단탄성계수이며, 종단방향 검토시 표층지반 전체의 평균치를 사용한다.

3.3 유한요소법에 의한 방법

지반구조물의 내진설계(한국지반공학회, 2006)에 따르면 유한요소법을 이용하여 지반반력계수를 구하는 방법으로, 지중구조물과 지반을 유한요소법으로 모델링한 후, 구하고자하는 방향의 스프링 상수와 동일한 방향으로 단위 하중을 구조물에 작용시킨 후, 정적 해석을 통해 절점 변위와 하중간의 다음 관계식을 이용하여 지반 스프링 상수를 산정한다.

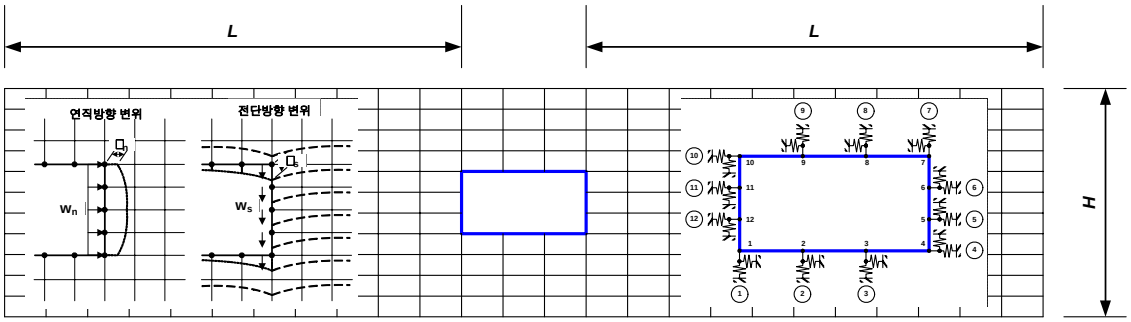


Fig. 3 유한요소법을 이용한 지반반력계수(지반모델과 지반 스프링)

$$k_n = \omega_n / \delta_n$$
$$k_s = \omega_s / \delta_s \tag{5}$$

여기서, k_n 및 k_s는 구조물 경계면에 설치된 연직방향 및 전단방향 지반 스프링상수이고, w_n 및 w_s는 구조물 경계면에 작용하는 연직방향 및 전단방향 단위하중이며, δ_n 및 δ_s는 구조물 경계면에 발생하는 연직방향 및 전단방향 변위이다.

이 방법을 이용할 경우 도로교설계기준 해석-하부구조편(대한토목학회, 2001)에 의한 방법보다 지반조건을 효율적으로 고려할 수 있는 장점이 있으나, 유한요소화를 위한 시간이 소요되는 단점이 있다.

지진시 지반반력계수를 구하기 위하여 공동지반을 2차원 유한요소 모델로 작성하고, 지반 탄성의 방향에 단위하중 "1"을 구조물에 작용시켜 그 방향의 하중과 변위의 관계에서 지반반력계수를 구한다. 이때 지중구조물은 상판 및 저판의 강성을 고려하거나, 혹은 강체로 간주한다. 그리고 보다 정확한 지반반력계수를 산정하기 위하여 측방의 경계와 구조물 측벽과의 거리를 다음 식과 같이 충분히 고려해야 한다.

$$L \geq 3H \tag{6}$$

4. 수치해석

4.1 해석제원 및 모델

본 본문에서는 지하철 구조물의 2차원 지진해석을 위해, 4절점 평면요소(2D Plane Strain Element)를 사용하여 지반을 모델링하고, 2절점 프레임(frame)을 사용하여 지중 구조물을 슬래브(slab)로 모델링 하였다. 지반을 모델링한 후 2절점 프레임에 연직방향과 전단방향에 각 단위하중을 주어 각 절점별대로 변위를 알아낸 후, 변위-하중과의 관계식으로 각 부재의 연직방향과 전단방향의 스프링상수를 산정하였다.

수치해석시 지중구조물에 대한 지반반력계수를 제안서별로 각각 적용함으로서 부재력을 산출 및 비교하여 내진설계에 미치는 영향을 분석하였다. 설계제원, 해석단면, 그리고 지반해석 모델은 다음과 같다.

Table 1 내진설계 제원

내진등급	구분	지진구역계수	지반계수(Ca/Cv)
	1등급	I 구역	0.09 / 0.09

성능목표	구분	재현주기	위험도계수(I)
	기능수행수준	100년	0.57
	붕괴방지수준	1000년	1.40

Table 2 구조물 물성치

콘크리트	단위중량 γ(kN/㎥)	25
	설계기준강도 f_{ck}(MPa)	27
	탄성계수 E(MPa)	24,000
철근	항복강도 f_y(MPa)	400
	탄성계수 E(MPa)	200,000

Table 3 지반 물성치

구분	정적 물성치			동적 물성치				
	단위중량 γ(kN/㎥)	포아송비 ν	탄성계수 E(kN/㎡)	단위중량 γ(kN/㎥)	포아송비 ν	전단파속도 V_s(m/s)	전단탄성계수 G_d(kN/㎡)	동적탄성계수 E_d(kN/㎡)
매립토	19.01	0.35	6,500	19.01	0.395	142	39,078	109,028
퇴적층	18.03	0.35	3,500	18.03	0.371	212	82,613	226,524
풍화토	19.01	0.33	15,000	19.01	0.359	244	115,382	312,916
풍화암	20.97	0.31	37,000	20.97	0.343	371	294,250	790,359
연 암	25.38	0.28	130,000	25.38	0.266	652	1,099,897	2,784,939
보통암	25.68	0.25	2,470,000	25.68	0.249	1,321	4,567,347	11,409,232
경 암	26.20	0.21	6,430,000	26.20	0.228	2,014	37,777,999	92,782,766

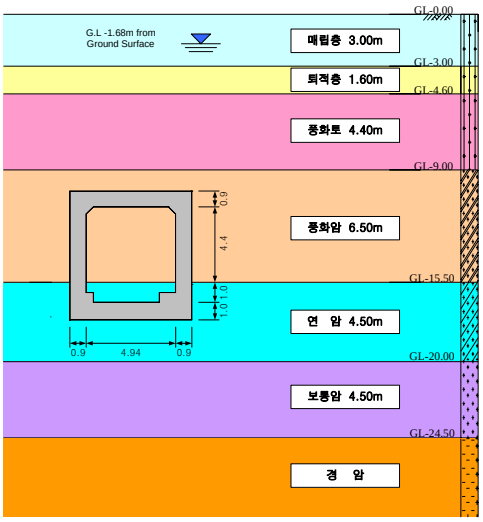


Fig. 4 해석단면

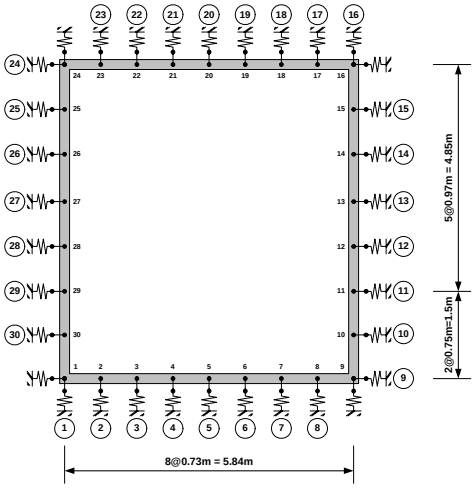


Fig. 5 스프링 모델

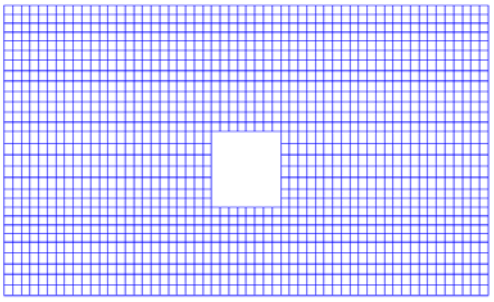


Fig. 6 유한요소법을 사용한 지반해석 모델

4.2 지반반력계수 산정

응답변위법 해석을 위해 각 제안서별 방법을 이용하여 지반반력계수를 산정하였다. 산정 결과를 살펴보면 도로교 설계기준에서 제시한 방법에 의해 산정된 값에 비해 지하공동구 내진설계기준에서 제시한 방법에 의해 산정된 값은 최대 4.55배, 유한요소법에 의해 산정된 값은 연직방향과 전단방향이 각각 최대 3.24배, 2.00배로 크게 산정되었다.

Table 4(a) 제안서별 지반반력계수(슬래브)

구 분		도로교 설계기준	지하공동구 내진설계기준	유한요소법	
				연직방향	전단방향
하부	1,9	264,631	1,204,387	676,804	277,339
	2,8	529,262	2,408,774	986,213	539,630
	3,7	529,262	2,408,774	810,458	528,980
	4,6	529,262	2,408,774	730,393	522,657
	5	529,262	2,408,774	707,105	520,571
상부	16,24	75,318	322,205	244,001	53,201
	17,23	150,636	644,411	278,990	105,377
	18,22	150,636	644,411	197,473	104,625
	19,21	150,636	644,411	164,177	104,164
	20	150,636	644,411	154,916	104,010

Table 4(b) 제안서별 지반반력계수(벽체)

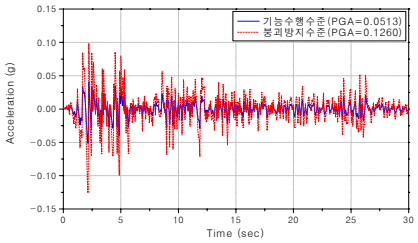
구 분		도로교 설계기준	지하공동구 내진설계기준	유한요소법	
				연직방향	전단방향
좌측	24	103,789	142,712	144,601	192,187
	25	207,577	285,424	236,033	383,411
	26	207,577	285,424	214,757	387,752
	27	207,577	285,424	222,859	397,839
	28	207,577	285,424	268,854	414,550
	29	510,137	555,173	349,023	389,449
	30	812,696	824,923	474,203	358,224
	1	406,348	412,461	421,137	189,947
우측	9	406,348	412,461	421,137	189,947
	10	812,696	824,923	474,203	358,224
	11	510,137	555,173	349,023	389,449
	12	207,577	285,424	268,854	414,550
	13	207,577	285,424	222,859	397,839
	14	207,577	285,424	214,757	387,752
	15	207,577	285,424	236,033	383,411
	16	103,789	142.712	144,601	192,187

4.3 자유장 해석

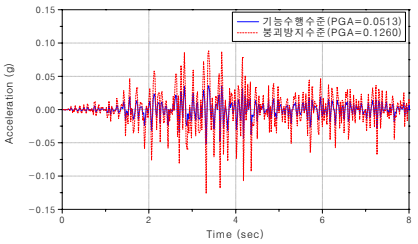
지중변위는 크게 수계산(단일 및 이중코사인 이론)으로 구하는 방법과 자유장해석을 이용하여 구하는 방법으로 나눌 수 있다. 그러나 지하공동구 내진설계기준 연구(건설교통부, 2004)에 제시되어 있는 단일코사인 함수법은 강진이 주를 이루는 일본으로부터 도입되어 중·약진 지역인 국내에서는 그 값이 과다하게 적용되어 비경제적인 설계가 이루어 질 수 있다(김문겸 등, 2004). 그러므로 본 논문에서는 ProShake를 이용한 해석 지반의 자유장해석을 통해 가장 합리적인 지중변위를 구하였다. 자유장해석에 이용한 내진설계 조건, 입력지진 및 해석으로 구한 지반응답은 다음과 같다.

Table 5 입력지진의 최대지반가속도(PGA)

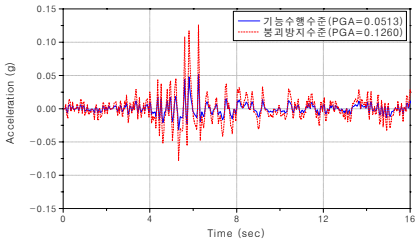
성능수준	기능수행수준	붕괴방지수준
지진구역(Z)	0.11	0.11
재현주기(년)	100	1000
위험도계수(I)	0.57	1.40
기반암 종류	SA	SA
Ca	0.09	0.09
Cv	0.09	0.09
PGA(g)=Ca*I	0.0513	0.126



(가) ELCENTRO 지진

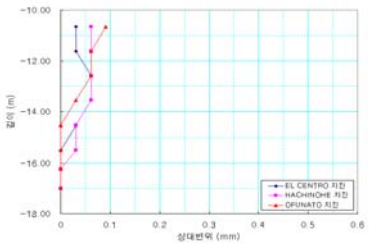


(나) OFUNATO 지진

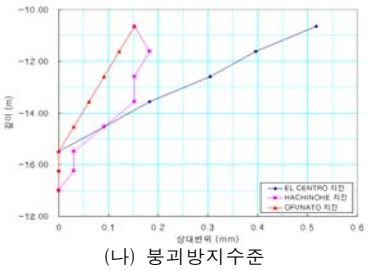


(가) HACHINOHE 지진

Fig. 7 입력지진의 시계열



(가) 기능수행수준



(나) 붕괴방지수준

Fig. 8 지진시 지반응답

4.4 지진하중

지진시 구조물에 작용하는 하중은 구조물의 측벽에 작용하는 수평하중 및 주면전단력이 있다. 이러한 지진하중은 자유장해석에서 구한 각 지진별 지중변위를 이용하여 산정하였으며, 그 값 중 유한요소법에 의한 결과를 나타내었다.

Table 6 수평하중(kN)

절점 (kN)	기능수행수준			붕괴방지수준		
	Elcentro	Ofunato	Hachinohe	Elcentro	Ofunato	Hachinohe
24,16	4.407	52.889	26.445	74.926	66.111	61.704
25,15	7.194	71.943	35.971	93.526	93.526	86.332
26,14	13.092	52.366	26.183	65.458	65.458	65.458
27,13	13.585	40.756	20.378	40.756	54.342	47.549
28,12	8.195	32.779	16.389	24.584	40.973	32.779
29,11	0	10.638	10.638	0	21.276	10.638
30,10	0	14.454	0	0	14.454	0
1,9	0	0	0	0	0	0

Table 7 측벽부 전단력(kN)

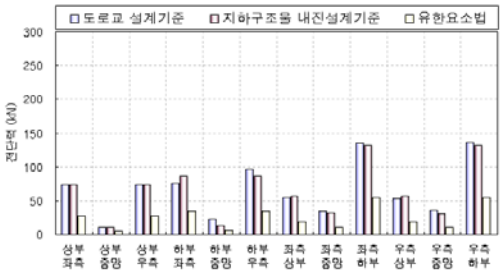
절점 (kN)	기능수행수준			붕괴방지수준		
	Elcentro	Ofunato	Hachinohe	Elcentro	Ofunato	Hachinohe
24,16	19.366	28.546	17.649	42.821	43.385	33.650
25,15	20.744	29.590	18.931	43.384	45.118	36.578
26,14	22.008	30.534	20.184	43.501	46.680	39.469
27,13	23.116	31.377	21.402	45.466	48.284	42.281
28,12	24.046	32.093	22.537	47.355	49.723	44.976
29,11	24.755	32.583	23.644	48.768	50.810	47.601
30,10	25.360	33.178	24.653	50.133	51.879	50.034
1,9	26.668	34.461	27.174	53.721	54.402	56.046

Table 8 상·하부 전단력(kN)

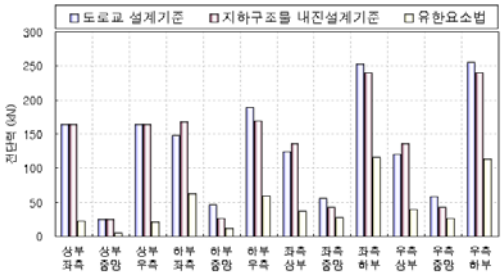
구분		기능수행수준			붕괴방지수준		
		Elcentro	Ofunato	Hachinohe	Elcentro	Ofunato	Hachinohe
하부	1,9	9.543	12.484	9.277	18.865	19.521	18.827
	2,3,4,5, 6,7,8	19.085	24.969	18.554	37.729	39.043	37.654
상부	16,24	7.287	10.741	6.641	16.113	16.325	12.662
	17,18, 19,20, 21,22,23	14.575	21.483	13.282	32.226	32.651	25.324

4.5 해석 결과

제안서별 지진 해석결과를 살펴보면 다음과 같다.

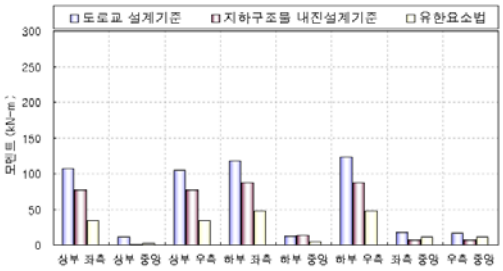


(가) 기능수행수준

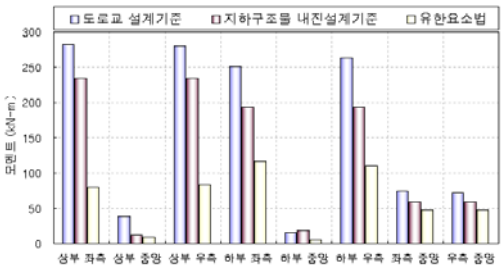


(나) 붕괴방지수준

Fig. 9 ELCENTRO 지진시 전단력 비교



(가) 기능수행수준



(나) 붕괴방지수준

Fig. 10 ELCENTRO 지진시 모멘트 비교

Table 9 제안서별 전단력 비교

구분(비율)				기능수행수준			붕괴방지수준		
				Elcentro	Ofunato	Hachinohe	Elcentro	Ofunato	Hachinohe
도로교/유한요소법	슬래브	상부	23	2.68	7.29	4.28	9.13	11.62	4.48
			19	2.48	5.10	3.97	5.83	7.74	3.55
			16	2.68	7.74	4.28	8.49	11.61	4.38
		하부	1	2.24	2.35	1.90	1.95	2.08	2.18
			4	4.27	3.85	2.82	2.56	3.52	3.47
			8	2.84	3.21	2.15	2.15	2.50	2.60
	벽체	좌측	24	2.85	3.35	3.96	3.63	3.23	3.30
			26	3.07	2.00	1.61	1.83	2.40	2.45
			30	2.46	2.18	2.02	2.10	2.22	2.20
		우측	15	2.78	3.14	3.90	3.78	3.17	3.32
			12	3.18	2.26	1.65	1.56	2.49	2.43
			9	2.48	2.26	2.03	2.07	2.24	2.19
지하공동구/유한요소법	슬래브	상부	23	2.68	7.28	4.28	9.13	11.62	4.48
			19	2.47	5.08	3.96	5.81	7.72	3.51
			16	2.68	7.74	4.28	8.49	11.62	4.38
		하부	1	2.54	2.67	2.03	2.10	2.29	2.43
			4	2.39	2.17	1.98	1.76	2.17	2.10
			8	2.54	2.87	2.03	2.01	2.29	2.37
	벽체	좌측	24	2.99	3.70	4.36	3.96	3.46	3.53
			26	2.83	1.53	1.32	1.52	2.04	2.03
			30	2.41	2.07	1.92	2.02	2.15	2.13
		우측	15	2.99	3.54	4.34	4.17	3.46	3.62
			12	2.76	1.66	1.32	1.44	2.04	1.93
			9	2.41	2.13	1.92	1.97	2.15	2.10

Table 10 제안서별 휨모멘트 비교

구분(비율)				기능수행수준			붕괴방지수준		
				Elcentro	Ofunato	Hachinohe	Elcentro	Ofunato	Hachinohe
도로교/유한요소법	슬래브	상부	23	3.16	3.52	4.30	4.00	3.88	4.24
			19	3.95	4.37	7.54	6.42	6.22	7.69
			16	3.12	3.36	4.28	4.17	3.85	4.33
		하부	1	2.47	2.16	1.87	1.95	2.06	2.04
			4	3.01	2.83	35.95	8.13	4.77	4.97
			8	2.59	2.40	1.91	1.92	2.13	2.06
	벽체	좌측		1.62	1.54	1.04	1.16	1.05	0.94
		우측		1.49	1.50	1.76	1.12	1.00	0.90
지하공동구/유한요소법	슬래브	상부	23	2.28	2.93	3.55	3.24	3.08	3.41
			19	0.28	1.41	2.33	1.69	1.34	1.95
			16	2.28	2.82	3.55	3.40	3.08	3.51
		하부	1	1.82	1.66	1.47	1.52	1.60	1.60
			4	3.15	3.47	53.32	10.93	6.16	6.69
			8	1.82	1.76	1.47	1.45	1.60	1.56
	벽체	좌측		0.65	1.22	0.74	0.79	0.65	0.66
		우측		0.65	1.23	0.74	0.78	0.65	0.66

5. 결 론

본 연구는 응답변위법을 이용한 지중구조물의 지진해석에 있어서 지반반력계수에 관한 기본 자료와 근거를 제공하는데 목적이 있다. 지반반력계수를 도로교 설계기준, 지하공동구 내진설계기준, 유한요소법으로 산출한 후, 그 결과를 비교·분석 하였다. 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 지반반력계수는 도로교 설계기준에 의해 산정한 값에 비해 지하공동구 내진설계기준에 의해 산정된 값은 최대 4.55배, 유한요소법에 의해 산정한 값은 연직방향과 전단방향이 각각 최대 3.24배, 2.00배로 크게 산정되었음을 알 수 있다. 이는 도로교 설계기준에서는 정적 지반 물성값를 사용하고, 지하공동구 내진설계기준과 유한요소법에서는 동적 지반 물성값을 사용하였기 때문인 것으로 판단된다.
2) 제안서별 방법을 적용하여 산정한 단면력을 비교하면, 도로교 설계기준과 지하공동구 내진설계기준은 유한요소법보다 크게 산정됨을 알 수 있다. 이는 지반의 연직방향에 대한 지반반력계수만을 고려한 도로교 설계기준과 지하공동구 내진설계기준은 지진에 의한 전단력에 저항하지 못하고 구조물에 직접적으로 영향을 미쳤고, 유한요소법은 지반의 연직방향 및 전단방향에 대한 지반의 영향을 고려한 지반반력계수가 적용됨으로써 지진으로 인한 전단력에 저항하여 구조물에 직접적인 영향이 적게 미쳤기 때문으로 판단된다.

보다 경제적인 설계를 위해 기존의 설계기준을 보완하기 위해서는 본 연구에 이어 동적 및 비선형성 등을 고려한 해석을 실시하여 보다 심층적이고 정확한 지중구조물의 지진해석이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김두기, “구조동역학”, 구미서관, 2005.
2. 대한토목학회, “도로교설계기준 해설(하부구조편)”, 2001, 104~107.
3. 한국지반공학회, “지반구조물 내진설계”, 구미서관, 2006, 497~564.
4. 김용석, “구조물-지반 상호작용과 지진해석”, 구미서관, 2005.
5. 서울특별시 지하철 건설본부, “지하철 9호선 구조물 내진설계(안)”, 1998.
6. 한상환외 6명, “IBC 내진기준 소개 및 해설”, 태림문화사, 2003.
7. 원대연, 김영진, 이철수, 변근주, “시공단계를 고려한 지하철 박스구조물의 해석모델의 제안”, 대한토목학회 논문집, 2002, 95~104.
8. 건설교통부, “지하공동구 내진설계기준”, 2004, 32~33.
9. 건설교통부, “내진설계기준 연구 (Ⅱ)”, 1997.
10. 김문겸, 곽충현, 김지순, 조경환, “응답변위법에 의한 지하공동구 내진설계시 합리적인 지반변위산정에 관한 연구”, 대한토목학회 학술대회 논문집, 2004, 3012~3017.
11. “지하 구조물의 내진설계”, 건설도서, 1996, 59~75.
12. Okamoto, S., Tamura, C., Kato, K. and Hamada, M., "Behaviors of Submerged Tunnels During Earthquakes", Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering, Vol 1. Rome Italy, 1973, 544~553.
13. Goto, K., Matsumoto, M. and Urayama, M., "Earthquake-Resistance Analysis by Finite Element-Boundary Element Hybrid Method", 5th International Conference on Numerical Method in Geomechanics, 1985, 1519~1524.
14. Monsees, J.E. and Merritt, J.L., "Seismic Modeling and Design of Underground Structure", Numerical Methods in Geo-mechanics, 1988, 1833-1841.
15. Kawashima, K., "Seismic Design of Underground Structures in Soft Ground a Review", Proceedings of the International Symposium on Tunneling in Difficult Ground Condition, Tokyo, Japan. 1999.
16. Kawashima, "地下構造物의 耐震設計“, 건설도서, 1996.

급행(접수일자 : 2006년 7월 20일)