

지중구조물 내진설계를 위한 기반면의 속도 응답스펙트럼 및 응답변위 산정기법에 대한 연구

Evaluations of Velocity Response Spectrum of Seismic Base and Response Displacement for the Seismic Design of Underground Structures

윤 종 구*¹ Yoon, Jong-Ku

김 동 수*² Kim, Dong-Soo

유 제 남*³ You, Je-Nam

Abstract

The response displacement method is the most frequently used method for seismic design of underground structures. This method is pseudo-static method, and the evaluations of velocity response spectrum of seismic base and response displacement of surrounding soil are the most important steps. In this study, the evaluation of velocity response spectrum of seismic base according to the Korean seismic design guide and the simple method of calculating the response displacement were studied. It was found that velocity response spectrum of seismic base can be estimated by directly integrating the ground-surface acceleration response spectrum of soil type S_A , and the evaluation of the response displacement using double cosine method assuming two layers of soil profile shows the advantages in the seismic design.

요 지

지중구조물의 내진해석에 자주 이용되는 방법으로 응답변위법이 있다. 응답변위법은 정적인 해석방법으로, 이 방법의 핵심은 지진시 지중구조물 측벽에 작용하는 지반변위를 산정하는 것이다. 이때 해석대상부지의 고유주기에 해당하는 기반면의 속도 응답스펙트럼 값을 결정하는 일이 매우 중요하다. 본 연구에서는 국내 설계지반운동기준에 적합한 기반면의 속도 응답스펙트럼 산정과 지반응답해석 없이 응답변위를 신뢰성있게 산정하는 간편법에 대한 연구를 수행하였다. 해석결과 국내 내진설계기준의 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 기반면의 속도 응답스펙트럼으로 환산하는 방법과 지반을 두 개의 층으로 구분하여 지진시 지반의 응답변위를 산정하는 방법을 현업 설계에 적용할 경우 경제적으로 큰 잇점이 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Response displacement, Response displacement method, Seismic design, Underground structure, Velocity response spectrum,

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., KAIST, jkyoon@bomun.kaist.ac.kr)

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., KAIST)

*3 정회원, (주)삼안건설기술공사 구조부 상무이사 (Member, Director, Saman Engrg., consultant)

1. 서론

근래에 들어 터키와 같은 경쟁입찰을 중심으로 항만 등 주요 지상구조물에 대한 내진설계는 매우 체계적으로 수행되고 있으며, 이로 인하여 국내 내진설계 기술은 많은 발전을 하고 있다. 그러나, 터널이나 매설관로, 도시철도, 송변전 시설의 전력구와 같은 지중구조물의 경우 내진설계에 대한 기준 및 해석방법은 상대적으로 명확하지 않은 실정이다. 이러한 지중구조물들은 시민생활과 도시기능 유지 및 국가산업시설의 운영에 있어 필수불가결한 기본적인 시설로서, 다른 사회 기반시설과의 상호 의존성이 높을 뿐만 아니라 피해 복구가 빨리 이루어지지 않을 경우 사회 경제 시스템의 기능이 장시간 마비될 수 있다. 따라서, 지중구조물의 내진설계기준 및 해석방법을 보다 체계화하는 일은 매우 중요하고 의미가 있다.

지중구조물의 대표적인 내진해석방법으로는 등가정적해석법, 응답변위법, 시간영역 또는 주파수 영역에서의 동적해석법 등을 들 수 있다. 응답변위법은 지중에 있는 박스형 또는 원형 구조물의 내진해석을 위해 등가정적해석법과 동적해석법의 단점을 보완한 방법으로서 주로 일본에서 많이 이용되고 있는 정적인 해석방법이다(일본운수성, 1999).

응답변위법의 핵심은 지진시 지중구조물 측벽에 작용하는 지반변위를 산정하는 것이며, 지반변위의 산정시 가장 중요한 것은 해석대상부지의 고유주기에 해당하는 기반면의 속도 응답스펙트럼 값을 결정하는 일이다. 현재 국내에서 기반면의 속도 응답스펙트럼을 작성하는 방법은 1999년 환경부에서 발간한 “상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구”에 언급되어 있지만, 구체적인 근거는 제시되어 있지 않다(환경부, 1999). 따라서, 현업에서 응답변위법을 이용하여 내진해석을 수행할 경우, 지진응답해석을 수행한 후 그 결과를 이용하여 지반의 고유주기에 대한 속도 응답스펙트럼 값을 구해서 사용하여야 한다. 그러나, 2등급 구조물 및 상대적으로 중요하지 않은 시설에 대한 내진설계시, 항상 지진응답해석을 수행하는 것은 시간적으로나 경제적으로 낭비가 될 수 있다. 따라서, 지진응답해석을 수행하지 않고 간단한 수계산을 이용하여 기반면의 속도 응답스펙트럼 값을 신뢰성 있게 결정지을 수 있는 방법은 현업에 많은 도움이 되리라 판단된다.

현재 국내에서 주로 이용되는 응답변위 산정방법은

해석대상 부지의 전단파속도를 일정한 것으로 가정하여 단일 코사인 함수를 이용하는 것이다(환경부, 1999). 그러나, 토층은 일반적으로 여러 개의 층으로 분류하는 것이 합리적이고, 이를 위하여 다중 코사인 함수를 사용하여 지반변위를 산정하거나 지진응답해석 결과를 이용해야 한다. 특히, 국내지반과 같이 상부연약토층과 하부 단단한 풍화토층으로 되어있는 경우에는 단일 코사인 함수를 이용할 경우 풍화토층에서 매우 과다한 변위를 유발시킬 가능성이 높다.

본 연구에서는 국내 대도시 지하철 건설 현장 지반의 시추주상도를 바탕으로 8곳의 대표적인 해석대상부지를 선정하였다. 이를 바탕으로 지진응답해석을 수행하여 국내 내진설계 기준에 부합하는 기반면 속도 응답스펙트럼을 제안하고자 한다. 또한, 토층을 하나의 층으로 분류하여 단일 코사인 함수를 이용한 응답변위와 두 개 층으로 분류하여 이중 코사인 함수를 이용한 응답변위 및 지진응답해석을 이용한 응답변위를 비교하여, 지진응답해석을 수행하지 않고 합리적으로 응답변위를 산정할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 응답변위법에서 지반의 변위폭 산정

개착 터널이나 지하철 구조물, 매설관로 등의 지중구조물은 지상구조물과는 달리 지반에 둘러싸여 있어 지진시 주변 지반의 변형에 종속되는 거동을 한다. 따라서, 지중구조물의 내진 설계에서는 지반 내의 진동 및 변위 산정이 중요한 요소이다. 특히, 박스형 지중구조물의 경우 겉보기 질량은 주변 지반과 비교하여 작거나 같은 정도이므로 관성력에 의한 하중 증가는 다른 하중의 증가에 비하여 상대적으로 작은 편이다. 이러한 지중구조물의 내진설계를 위하여 일반적으로 응답변위법이 많이 이용되고 있다.

응답변위법은 구조물과 지반을 지반스프링으로 분리하여 모델링한 후, 지진시 주변 지반의 자유장 거동에서 발생한 지반변위가 구조물에 미치는 거동을 해석하는 정적인 해석 방법이다. 따라서, 지진시 지반의 변위를 산정하는 것이 응답변위법에서 가장 중요하다.

응답변위법에 사용되는 지반의 설계 수평 변위량의 연직방향 분포는 구조물 주변 지반의 특성을 고려하여 산정한다. 그림 1(a)와 같이 지반의 깊이에 따른 전단파속도가 일정하다고 가정할 경우, 지표면 아래 깊이 x m

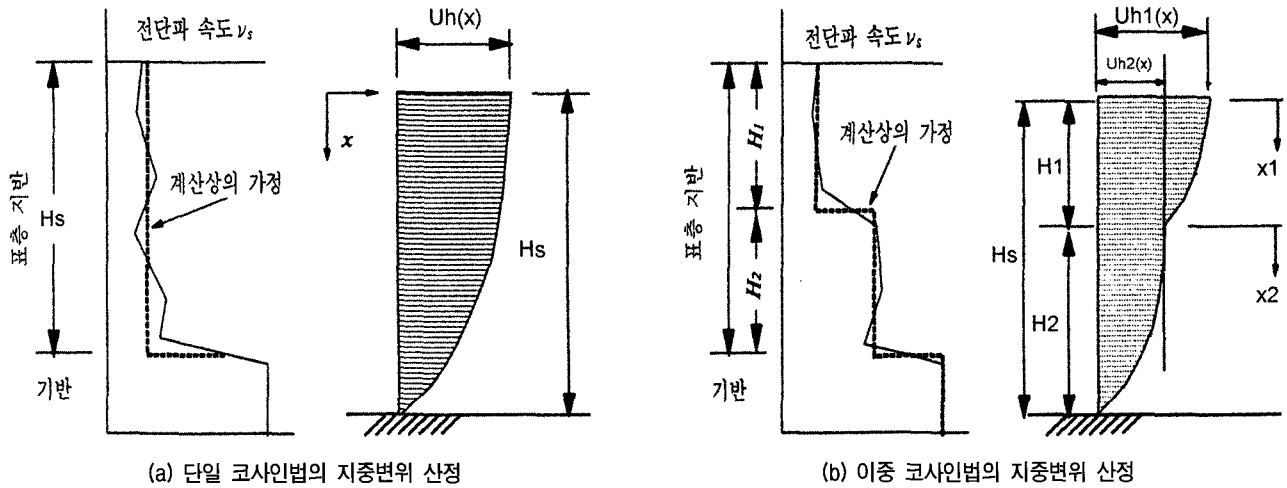


그림 1. 단일코사인, 이중코사인 이론을 이용한 지중변위 산정법 (일본운수성, 1999)

위치에서 설계지진에 의하여 발생하는 변위 $U_h(x)$ 는 식 (1)과 같이 단일 코사인 함수를 이용한 식을 주로 사용한다(환경부, 1999).

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

여기서, S_v = 지표층(기반암 상부 토층) 지반의 고유주기에 해당하는 기반면 속도 응답스펙트럼(m/sec)

T_G = 지반의 고유주기 (sec)

H_s = 지표층 지반의 두께 (m)

또한, 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 지반을 두 개의 층으로 구분하여 응답변위를 산정할 경우 식 (2)~식 (4)와 같이 이중 코사인 함수를 이용하여 각 층에 대하여 지반변위를 산정하고 이를 합산하여 전체 지반변위를 산정할 수 있다(일본운수성, 1999).

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

$$U_{h2}(x) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_G \cos\left(\frac{\omega_0 H_1}{v_{s0d1}}\right) \cdot \left[\cos\frac{\omega_0 x_2}{v_{s0d2}} - \frac{\sin\frac{\omega_0 x_2}{v_{s0d2}}}{\tan\frac{\omega_0 H_2}{v_{s0d2}}} \right] \quad (3)$$

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

여기서,

$U_{h1}(x), U_{h2}(x)$ = 제1층, 제2층의 지반변위(m)

T_G = 지반의 고유주기 (sec)

H_s, H_1, H_2 = 전체 토층 지반, 제1층, 제2층의 두께(m)

v_{s0d1}, v_{s0d2} = 제1층, 제2층의 평균 전단파속도(m/sec)

ω_0 = 지반의 설계 고유 진동수, 식 (4)에서 시행착오법으로 계산

α = 제1층과 제2층의 임피던스비, $\alpha = \frac{\gamma_1 v_{s0d1}}{\gamma_2 v_{s0d2}}$

3. 기반면의 속도 응답스펙트럼 산정방법

1997년 건설교통부에서 발간한 내진설계기준연구(II)에는 국내 각 지역의 지진특성과 지반성질을 고려하여 5% 감쇠비에 대한 지표면 가속도 표준설계응답스펙트럼이 그림 2와 같이 제시되어 있다. 그림 2의 표준 설계 응답스펙트럼의 완전한 결정을 위해 요구되는 지반종류 및 지진계수 C_a 와 C_v 의 값은 각각 표 1과 표 2에

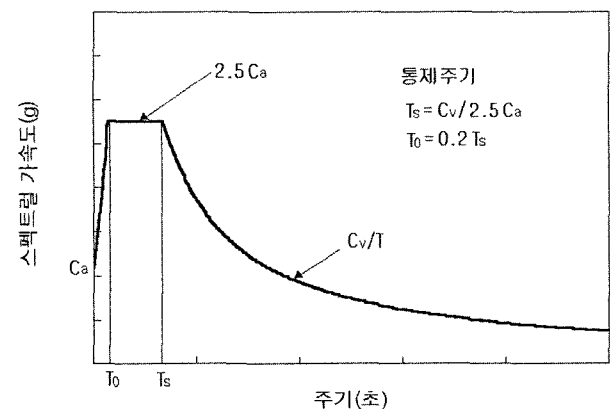


그림 2. 지표면 표준 설계응답스펙트럼 (건설교통부, 1997)

표 1. 지반의 분류 (건설교통부, 1997)

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 $\bar{N} (\bar{N}_{CH})$ (blow/foot)	비배수전단강도 \bar{S}_u
S _A	경암지반	1500초과	-	-
S _B	보통암지반	760에서 1500	-	-
S _C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
S _D	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S _E	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
S _F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

표 2. 지진계수 C_a, C_v (건설교통부, 1997)

지반종류	C _a		C _v	
	지진구역 I	지진구역 II	지진구역 I	지진구역 II
S _A	0.09	0.05	0.09	0.05
S _B	0.11	0.07	0.11	0.07
S _C	0.13	0.08	0.18	0.11
S _D	0.16	0.11	0.23	0.16
S _E	0.22	0.17	0.37	0.23

지진구역별로 주어져 있다.

응답변위법을 이용한 내진해석시 기반면의 속도 응답스펙트럼(S_v)은 두 가지로 방법으로 구할 수 있다. 첫째는 기반면 가속도 응답스펙트럼을 주파수 영역에서 적분하여 사용하는 방법이다. 그러나, 국내 내진설계 기준에는 기반면 가속도 응답스펙트럼을 제시하지 않고 있어, 직접 적분하여 구할 수 있는 기준은 없는게 현실이다. 둘째는 지진응답해석을 수행하여 기반면의 속도 응답스펙트럼을 직접 구하는 방법이다.

지진응답해석을 수행할 경우 해석 프로그램에서 기반면의 가속도 응답스펙트럼 및 속도 응답스펙트럼을 동시에 구할 수 있는 것이 일반적이므로, 속도 응답스펙트럼을 산정하는데 큰 어려움이 없을 것으로 판단된다. 그러나, 지진응답해석을 수행하지 않고 기반면의 속도 응답스펙트럼을 구할 경우 가속도 응답스펙트럼으로부터 계산을 해야 한다.

일반적으로 주파수 영역에서 가속도 응답스펙트럼을 속도 응답스펙트럼으로 적분할 경우 적분식은 식 (5)와 같다.

$$S_v = \frac{T}{2\pi} \cdot S_a \quad (5)$$

여기서, S_v = 속도 응답스펙트럼

S_a = 가속도 응답스펙트럼

$$T = \frac{1}{f} = \text{주기}$$

그러나, 식 (1)에서 속도 응답스펙트럼 S_v 값을 구할 경우 지표면의 가속도 응답스펙트럼을 적분하는 것이 아니고, 기반면의 가속도 응답스펙트럼을 적분해야 한다. 그러나, 환경부(1999)에서 제정한 기준인 “상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구”의 경우 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 기반면 속도 응답스펙트럼을 산정한다. 그러나, 이에 대한 근거는 제시되어 있지 않았다. 본 연구에서는 암반지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 기반면 속도 응답스펙트럼을 결정하는 국내 내진설계기준을 검증하고자 한다.

내진설계에서 지반의 기반면을 결정하는 것은 매우 중요하다. 국내 내진설계기준에서는 전단파속도 기준으로 760~1500m/sec 범위의 지반인 보통암 지반(S_B)을 기반면으로 정의하고 있다. 따라서, S_A지반(경암지반)과 S_B지반(보통암지반)의 경우 기반면으로 분류할 수 있다. 국내 지반의 경우 일부 해안 매립지역 및 연약지반을 제외하면 대부분의 지반이 S_C~S_E 지반에 해당되고, 기반암의 전단파속도는 대부분 760m/sec 이상으로 추정된다.

일반적으로 S_C~S_E 지반에서 지진응답을 수행할 경우, 지표면의 응답스펙트럼은 기반면에서의 응답스펙트럼 보다 상당히 증폭된다. 따라서, 지진응답해석을 수행하지 않고 지표면의 가속도 응답스펙트럼을 그대로 적분하여 기반면의 속도 응답스펙트럼으로 사용할 경우, 실제보다 과도한 지반 변위가 산정되거나 과도한 하중이 산정된다.

본 연구에서는 위와 같은 과도한 설계를 해결할 수

있는 대안으로, S_A 지반과 S_B 지반의 지표면 가속도 응답 스펙트럼을 이용하여 기반암 속도 응답스펙트럼을 산정하는 방법을 검토했다. 즉, S_A 및 S_B 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 식 (5)를 이용하여 주파수 영역에서 적분하여 기반면 속도 응답스펙트럼으로 환산하는 방법을 검토했다. 이를 위하여, 대표적인 국내지반에서 지진응답해석을 수행하고 제시된 방법과 기반면 속도 응답스펙트럼을 비교 분석하였다.

4. 해석 조건

4.1 해석부지의 시추주상도 및 전단파속도 주상도

본 절에서는 S_A 지반과 S_B 지반의 지표면 가속도 응답 스펙트럼을 이용하여 기반면 속도 응답스펙트럼을 산정하는 방법의 타당성과 응답변위를 신뢰성 있게 결정하기 위한 간편법을 제안하기 위하여 서울, 부산, 대전 등 국내 지하철 공사가 진행중인 8개의 대표부지를 선택하여 지반응답해석을 수행하였다.

해석을 위하여 선정된 부지는 대부분 매립토, 충적토, 풍화토, 풍화암 또는 연암 등으로 구성되어 있다. 지반의 전단파속도는 시추주상도에 나타난 SPT N값을 기준으로 Yamazaki and Umehara(1987)가 제안한 식 (6)을

이용하여 산정하였다(건설교통부, 1998). 기반면이 명확하지 않은 부지의 경우 연암의 전단파속도를 1000m/sec로 가정하여 해석을 수행하였다. 8개 부지의 전단파속도 주상도는 그림 3에 나타나 있다.

$$V_s = 89.1 N^{0.34} \quad (\text{m/sec}) \quad (6)$$

4.2 지반 분류 및 지반의 동적 물성치

표 1에 나타난 바와 같이 지반은 상부 토층 30m의 평균 전단파속도를 기준으로 분류한다. 평균 전단파속도는 식 (7)을 이용하여 계산하고(건설교통부, 1997), 표 3에는 해석대상 지반을 n 개의 층으로 나누었을 경우 상부 토층 30m의 평균 전단파속도 및 지반이 분류되어 있다. 표 3의 결과를 살펴보면 해석대상 지반 모두 S_c 및 S_d 지반에 해당하는 것을 알 수 있다.

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (7)$$

여기서, d_i = 토층 i 의 두께 (m)

v_{si} = 토층 i 의 전단파속도 (m/sec)

n = 토층의 개수

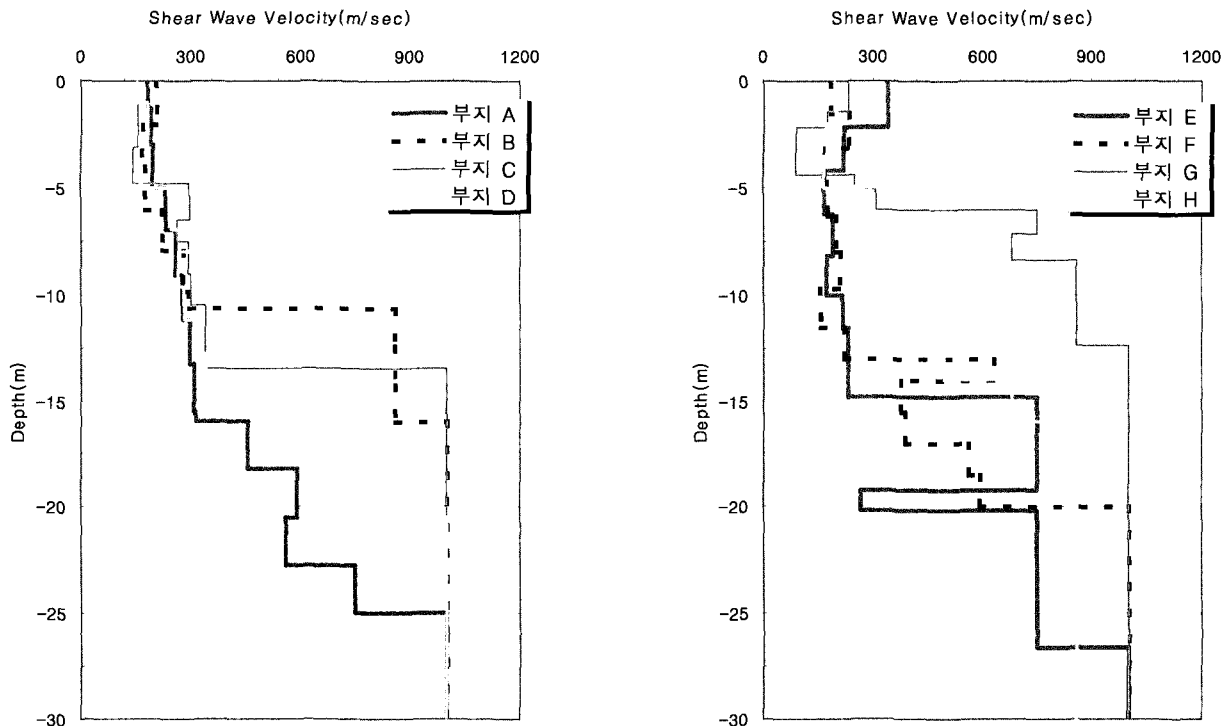
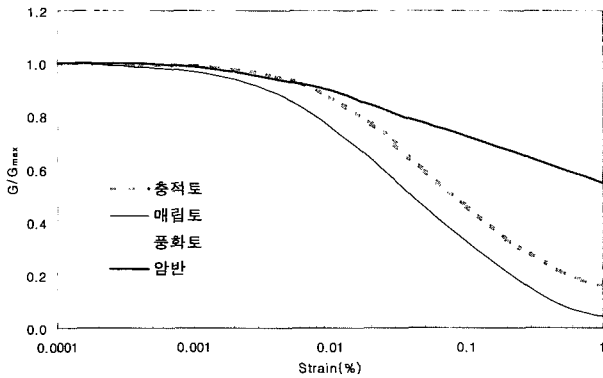


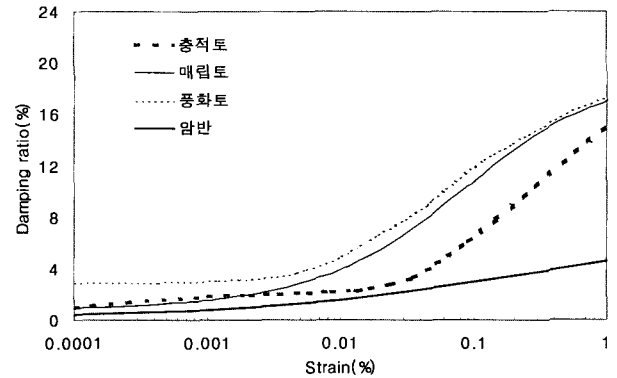
그림 3. 해석대상 지반의 전단파속도 주상도

표 3. 해석대상 지반의 지반분류 및 고유주기

	부지 A	부지 B	부지 C	부지 D	부지 E	부지 F	부지 G	부지 H
주기(sec)	0.328	0.232	0.241	0.282	0.365	0.335	0.196	0.289
평균 V_s (m/sec)	344.7	417.4	346.2	375.1	328.4	319.7	451.0	392.9
기반암 깊이(m)	-31.4	-22.3	-12.8	-26.0	-30.4	-26.0	-21.2	-21.8
지반분류	S_D	S_C	S_D	S_C	S_D	S_D	S_C	S_D



(a) G/G_{max} 곡선



(b) 감쇠비 곡선

그림 4. 해석에 사용된 지반의 비선형 동적물성치 (김동수, 추연욱, 2001)

지반의 고유주기는 식 (8)을 이용하여 계산하였고(일본운수성, 1999) 계산결과는 표 3에 나타내었다. 해석대상 지반의 고유주기를 살펴보면 지반의 공진주기는 0.4 초 미만의 단주기에 해당하는 것을 알 수 있다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{v_{si}} \quad (8)$$

여기서, T_G = 지반의 고유주기 (sec)
 H_i = i 번째 토층의 두께 (m)
 n = 토층의 개수

본 해석에서는 1차원 지진응답해석에 널리 쓰이는 등가 선형해석 프로그램인 SHAKE91을 이용하였다(Schnabel 등, 1972). 등가선형을 이용한 지반응답해석에 필요한 물성은 문헌의 자료를 참조하여 결정하였으며, 전단변형률의 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선은 그림 4에 나타내었다(김동수, 추연욱, 2001).

4.3 설계지반운동 수준 결정 및 입력지진의 결정

지하철 구조물의 경우 내진 1등급에 해당하는 구조물 이므로 내진 1등급을 위주로 해석을 수행하였고, 지하철 이외의 지중구조물을 고려하여 내진 2등급 붕괴방지수준

에 대한 해석도 함께 수행하였다. 최근 턴키와 같은 경쟁 입찰 설계에서는 주로 지진재해도를 이용하여 설계지반 운동 수준을 결정하는 예가 많은 것을 참고하여, 본 절에서는 지진재해도를 이용한 해석결과 위주로 설명을 한다. 그러나, 해석은 지진재해도 뿐만 아니라 행정구역 기준을 이용한 설계지반운동 수준에 대하여도 수행을 하였다.

설계지반운동 수준은 지진재해도를 기준으로 서울지역 0.12g, 대전지역 0.14g, 부산지역 0.11g 등으로 결정하였고, 행정구역을 기준으로 지진구역 I 구역과 위험도 계수는 재현주기 1,000년에 해당하는 1.4를 적용하여 보통암 노두 기준으로 0.154g를 설계지반운동 수준으로 결정하였다. 또한, 지진재해도를 이용하여 설계지반운동 수준 0.09g인 2등급 붕괴방지수준에 대한 해석도 수행하였다.

지진응답해석을 실시할 경우 실지진과 인공지진을 함께 사용하여 해석을 수행하는 것이 일반적이다. 본 해석에서는 실지진 기록으로 장주기 특성을 보이는 Hachinohe, 단주기 특성을 보이는 Ofunato 지진기록을 이용하였다. 인공지진의 경우 그림 2에서 제시된 S_B 지반의 표준설 계응답스펙트럼과 설계지반운동 수준에 적합하도록 생성된 인공지진 가속도 시간이력을 이용하였다. 인공지진은 동일한 응답스펙트럼으로 수많은 시간이력곡선을 작성할 수 있다. 그림 5에는 수많은 시간이력곡선 중에서 해석에 사용된 지진파를 나타내었다.

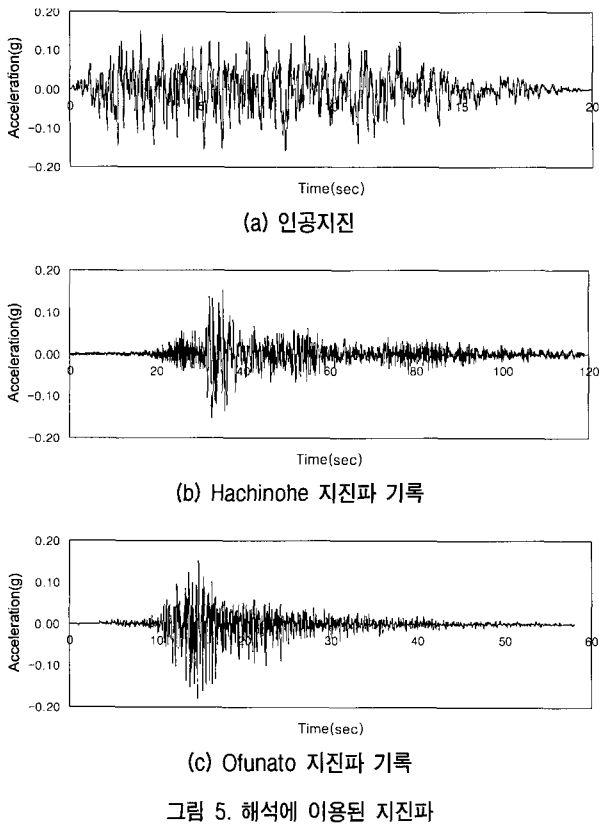


그림 5. 해석에 이용된 지진파

5. 기반면 속도 응답스펙트럼의 비교

본 절에서는 위 해석 조건을 이용한 8개 해석부지의 지진응답해석 결과와 S_A 및 S_B 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 기반면 속도 응답스펙트럼으로 환산한 값을 비교하여, 3절에서 제안한 방법의 타당성을 검증하고자 한다. 8개 해석부지의 지진응답해석 결과는 그림 6~그림 8에 나타나 있다.

그림 6에는 1등급 붕괴방지수준에 대한 8개의 해석부지에 세 가지 지진파를 입력하여 해석한 결과를 나타내었다. 그림 6(a)는 단주기 지진인 Ofunato 지진에 대한 속도 응답스펙트럼으로 주기가 1초 보다 작을 경우, 지진응답해석에서 얻은 속도 응답스펙트럼 값이 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼으로부터 얻은 것 보다 작음을 알 수 있다. 또한, 대부분의 영역에서 S_B 지반의 속도 응답스펙트럼 값 보다 작음을 알 수 있다. 그림 6(b)는 장주기 지진인 Hachinohe 지진에 대한 기반면에서의 속도 응답스펙트럼이다. 해석 결과 1초 근처에서는 S_A 및 S_B 지반의 속도 응답스펙트럼 보다 큰 곳이 있지만, 해석대상 부지의 공진주기인 0.40초 이하에서는 S_A 지반의 속도 응답스펙트럼 보다 작음을 알 수 있다. 또한, 인공지진에 대한 기반면에서의 속도 응답스펙트럼인 그림 6(c)의 경우, 대부분 영역에서 S_A

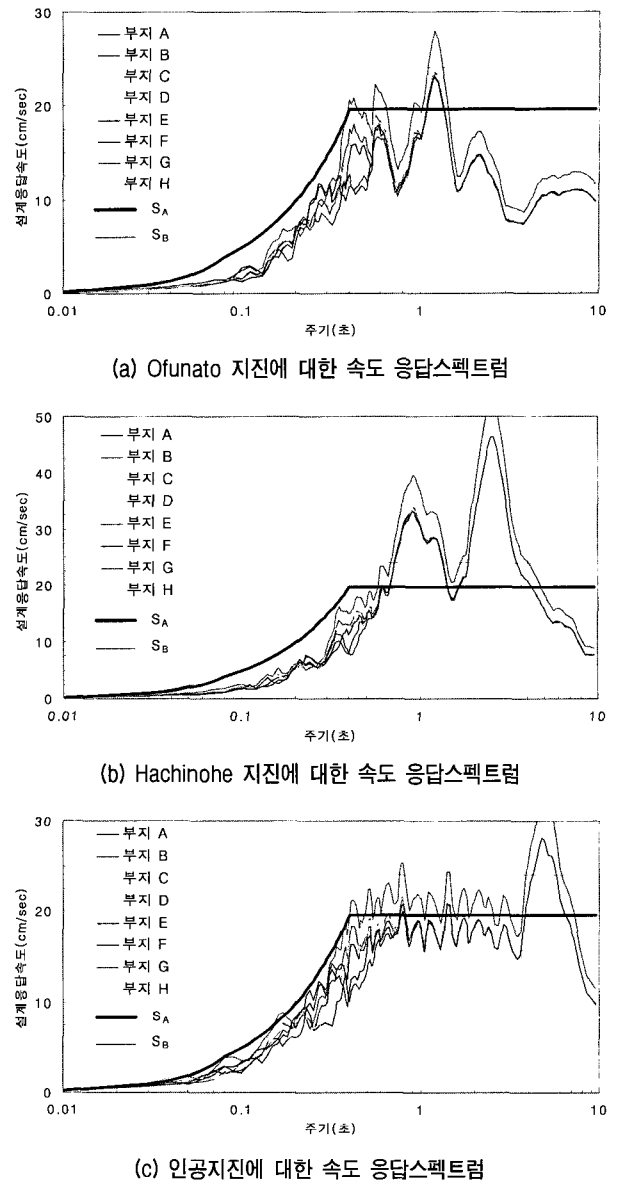
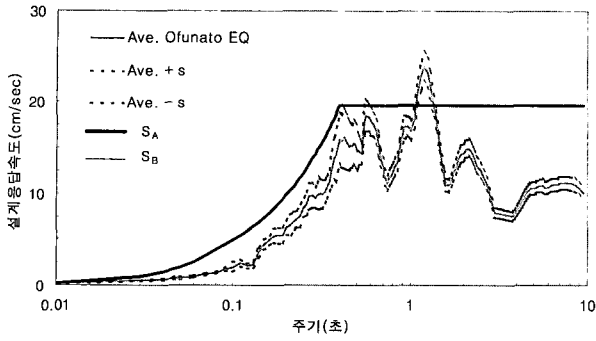


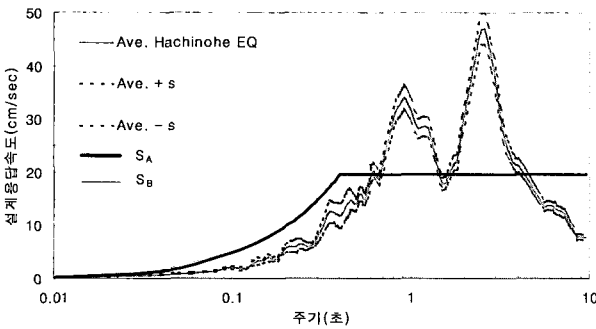
그림 6. 기반면의 속도 응답스펙트럼의 비교(1등급 붕괴방지수준 해석 결과)

지반의 속도 응답스펙트럼과 작거나 유사함을 알 수 있다. 그림 6의 전체적인 결과를 살펴보면 기반면의 속도 응답스펙트럼으로 S_A 지반과 S_B 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 사용하여도 충분히 안전한 것으로 판단된다. 또한, 주기가 대략 0.4초 미만일 경우 S_A 지반의 가속도 응답스펙트럼을 이용하여 기반면 속도 응답스펙트럼으로 환산하여 사용하여도 기준을 만족한다는 것을 알 수 있다.

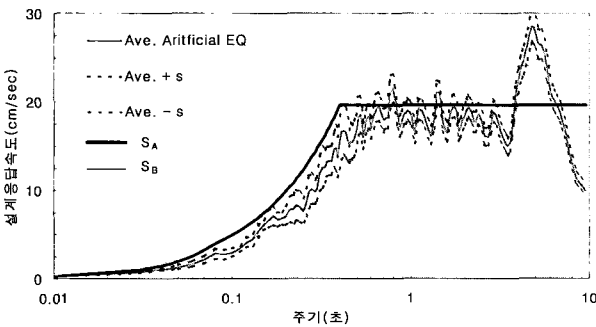
이러한 결과는 그림 7과 그림 8을 살펴보면 더욱 명확해진다. 그림 7에는 각 지진파에 대하여 8개 해석부지의 평균값(Ave.) 및 표준편차(s)를 고려하여 평균값에 표준편차를 더하고 뺀 값을 나타내었다.



(a) Ofunato 지진에 대한 평균 속도 응답스펙트럼

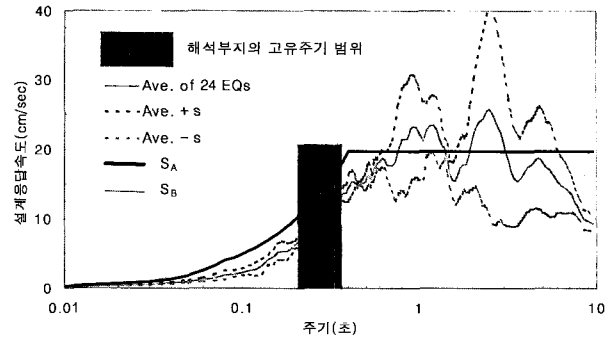


(b) Hachinohe 지진에 대한 평균 속도 응답스펙트럼

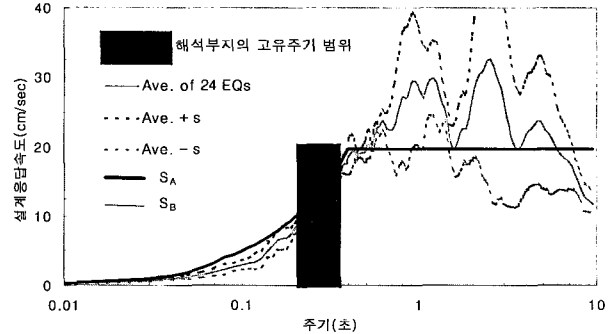


(c) 인공지진에 대한 속도 응답스펙트럼

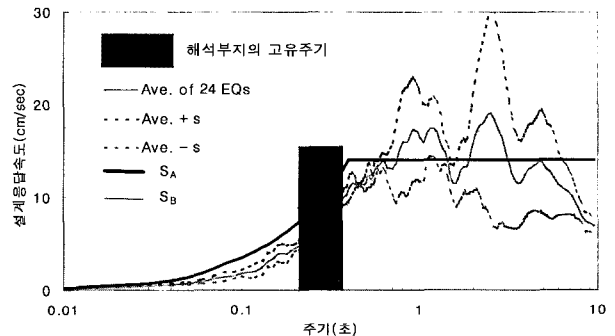
그림 7. 표준편차를 고려한 각 지진에 대한 기반면 평균 속도 응답스펙트럼



(a) 내진 1등급 지진재해도를 이용한 해석결과(재현주기 1000년)



(b) 내진 1등급 행정구역 기준 해석결과(지진구역 I 구역)



(c) 내진 2등급 지진재해도를 이용한 해석결과(재현주기 500년)

그림 8. 표준편차를 고려한 전체 해석지진에 대한 기반면 속도 응답스펙트럼

그림 8에는 8개 해석부지와 세 가지 지진파의 결과 등 24개 해석 결과를 모두 합하여 나타내었다. 그림 8(a)에는 지진재해도를 이용한 재현주기 1000년 수준의 내진 1등급에 대한 해석결과가 나타나 있고, 그림 8(b)에는 행정구역을 기준으로한 내진 1등급에 대한 해석결과가 나타나 있다. 그림 8(c)는 지진재해도를 이용한 내진 2등급에 대한 해석결과이다.

해석결과를 종합해보면, 평균값에 표준편차를 고려한 그래프에서도 대부분 S_A 및 S_B 지반의 속도 응답스펙트럼 값보다 작은 값을 가진다. 또한, 그림 8에 나타난 바와 같이 해석부지의 공진주기는 대부분 0.4초 보다 작은 값을 가지고, S_A 지반의 속도 응답스펙트럼 보다 충분히 작

아서 S_A 지반의 응답스펙트럼을 사용하여도 설계기준을 만족하며 충분히 안정함을 알 수 있다. 특히, 그림 8(b)의 경우 행정구역을 기준으로한 해석결과임을 고려하면 설계지반운동 수준의 상한값이라고 볼 수 있으므로, 공진 주기가 0.4초 보다 작을 경우 상한값이 S_A 지반의 응답스펙트럼을 이용한 값보다 작음을 알 수 있다. 이러한 결과를 근거로, 본 연구에서는 1999년 환경부에서 발간한 “상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구”에서 제안하고 있는 S_A 지반 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 기반면 속도 응답스펙트럼으로 환산하는 방법은 국내 지반에 적용할 경우 타당성이 있는 것으로 판단된다.

위 결과를 종합하여 판단하면, 지진응답해석 결과에서

얻어진 기반면의 속도 응답스펙트럼의 값은 S_A 또는 S_B 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 직접 적분하여 구한 값보다 작게 나타남을 알 수 있다. 따라서, S_A 및 S_B 지반의 응답스펙트럼의 값이 더 보수적인 결과를 주고 있으므로, 이를 설계에 반영하는 것은 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 또한, 해석대상 지반의 공진주기가 0.40초 미만인 대부분의 국내지반의 경우 S_A 지반의 응답스펙트

럼을 이용하여 기반암 속도스펙트럼을 결정하여도 충분한 것으로 판단되나, 0.50초 이상의 장주기 지반에 대하여는 지진해석을 수행하는 것이 바람직하다고 판단된다.

6. 지반의 응답변위 산정 방법

본 절에서는 2절에 언급되어 있는 응답변위를 산정할

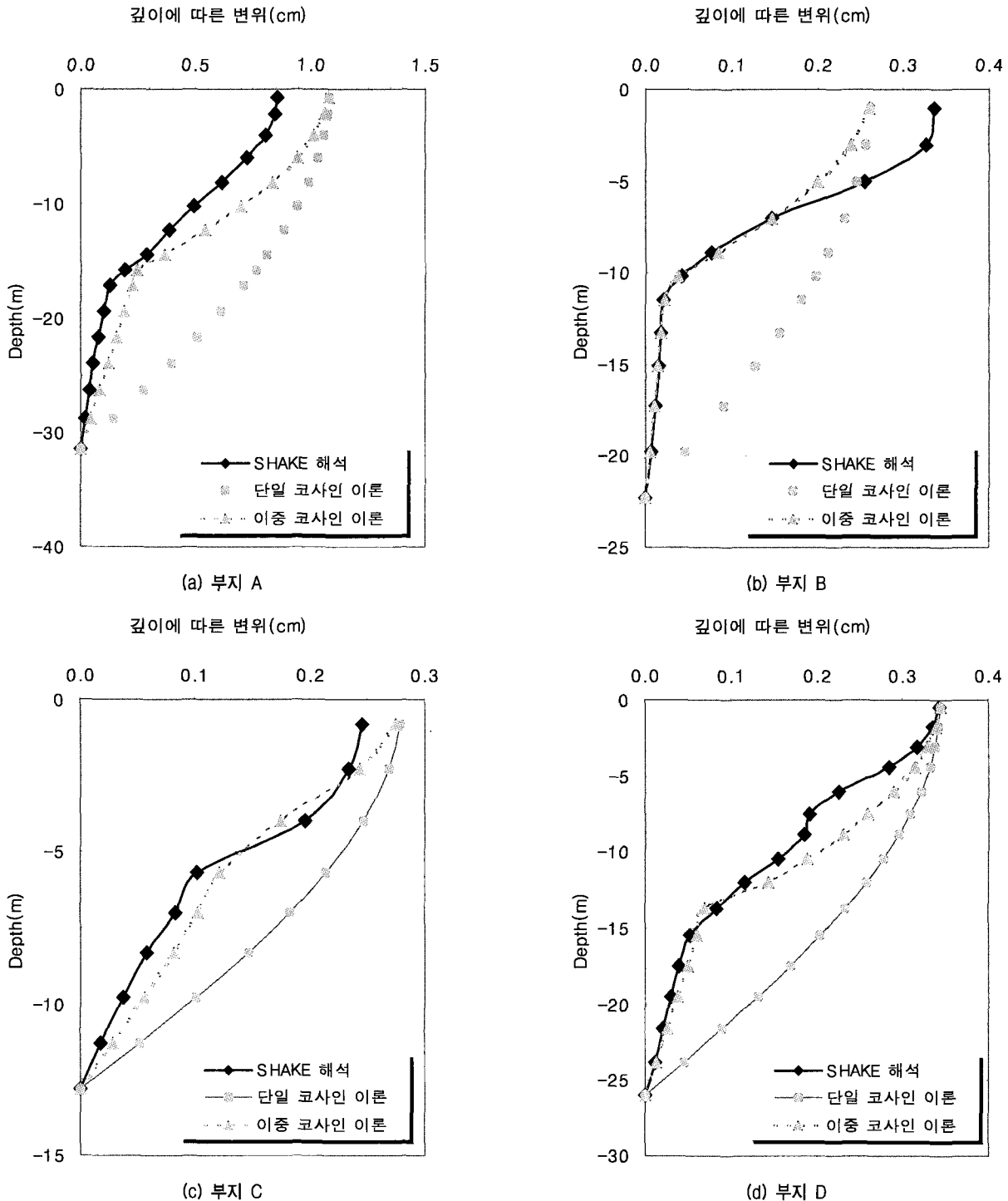


그림 9. 지진응답해석 결과와 단일·이중코사인법으로 구한 지중변위 비교(내진 1등급 지진재해도 재현주기 1,000년 이용)

수 있는 두 가지 수계산 방법을 이용하여 지반의 응답변위를 산정해 보았다. 이를 위하여 전체 토층을 단일 토층 및 두 개 층으로 가정하여 지반변위를 산정하였다. 또한, 이를 지진응답해석결과와 비교하였다. 지진응답해석에서 지중변위는 각 층에서 얻어진 전단변형률에 층의 두께를 곱하여 산정하였다.

그림 9에는 8개의 해석대상 부지에 대한 SHAKE91

해석결과와 단일코사인 이론, 이중코사인 이론을 이용한 수계산 결과를 비교하여 나타내었다. 해석에 이용된 지진파는 그림 5에 나타나 있다. 지반을 두 개의 층으로 나누어 지반변위를 계산할 때 가장 중요한 요소는 상부 층과 하부층을 구분하는 깊이이다. 본 해석에서는 시추 주상도와 전단파속도 주상도를 참조하여 지반의 전단파속도가 급격히 증가하는 풍화토 위치에서 두 층을 구

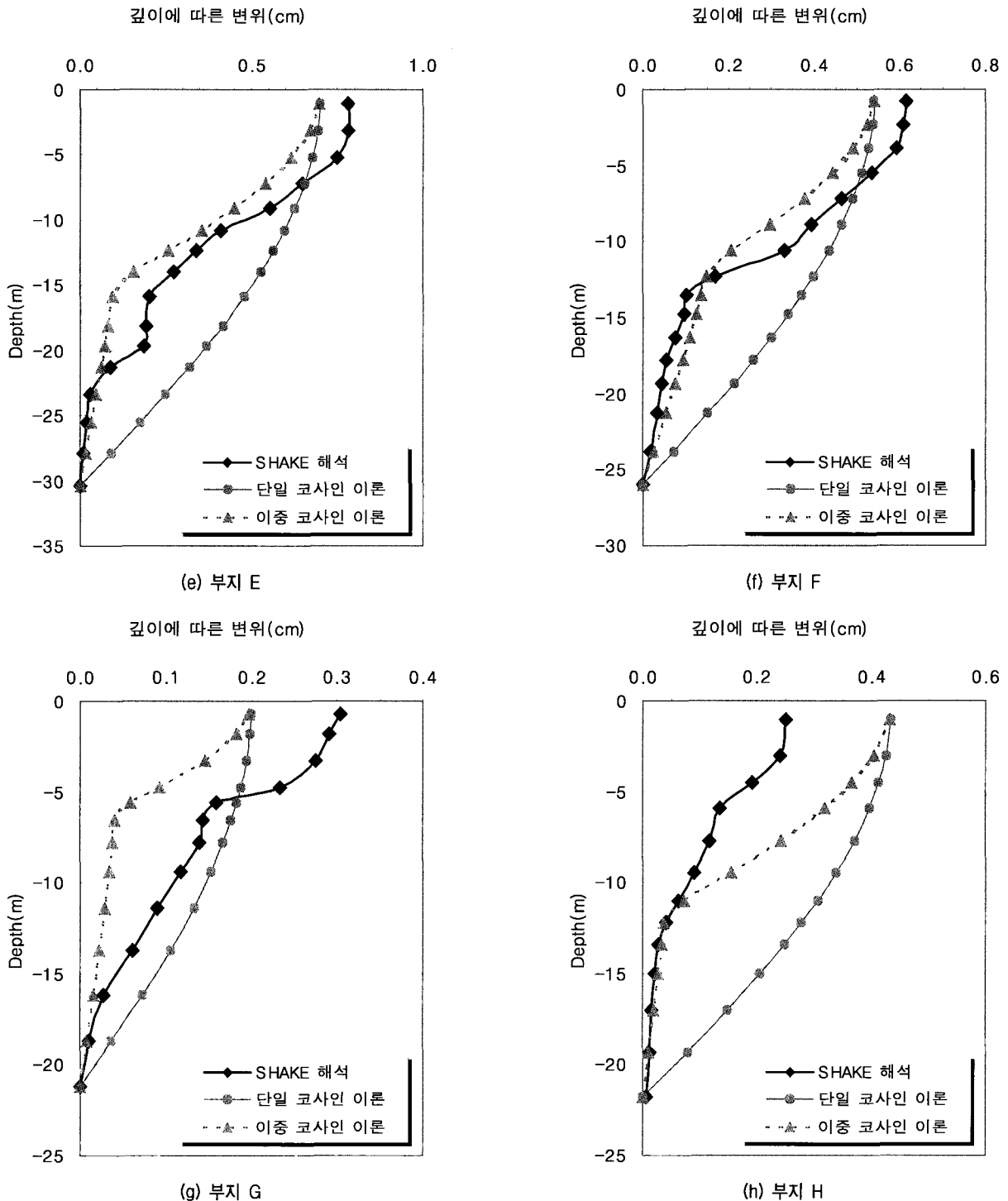


그림 9. (계속) 지진응답해석 결과와 단일·이중코사인법으로 구한 지중변위 비교(내진 1등급 지진재해도 재현주기 1,000년 이용)

별하여 계산하였다. 그러나, 지반의 전단파속도 주상도 상에 급격히 증가하는 부분이 없을 경우에는 엔지니어의 경험에 많이 의존해야 할 것으로 판단된다.

그림 9의 결과를 살펴보면 대부분의 지반에서 단일코사인 이론으로 구한 방법보다 이중코사인 방법으로 구한 지중변위가, 지진응답해석에서 얻은 지중변위 형상과 더 비슷함을 알 수 있다. 일부 지반 상부층의 경우 지진응답해석에서 얻어진 지반변위가 수계산으로 얻어진 지반변위보다 큰 값을 가지는 경우가 있으나, 하부층에서는 지진응답해석의 값이 작다. 또한, 풍화토에 해당하는 하부층의 경우 지진응답해석 결과와 이중 코사인 이론을 이용한 수계산 값이 매우 유사함을 알 수 있다. 그리고, 해석대상부지 B, G, H와 같이 압반과 토층의 강성비가 클 경우 지진응답해석을 하는 방법을 추천한다.

일반적으로 풍화토의 경우 지표면 가까이에 있는 토층보다 전단파속도와 구속압이 크므로 단단하고, 이로 인하여 지진시 지반변위가 크게 발생하지 않는다. 단일 코사인 이론식의 경우 기반암 바로 위에서부터 지반변위가 급격히 증가하는 모드형상을 가지므로, 풍화토에서의 지반특성을 효과적으로 반영할 수 없다. 따라서, 하부층의 응답변위가 크게 나타난 것으로 판단된다. 지하철 본선 박스구조물의 경우와 같이 풍화토 하부에 매설되는 지중구조물의 내진설계시 단일 코사인방법을 사용하면 실제보다는 과다한 변위를 적용하게 되므로 비경제적인 설계가 이루어진다. 그러나, 이중 코사인 이론을 이용할 경우 두 개의 모드형상을 이용할 수 있어 이러한 문제점을 보완할 수 있고, 지진응답해석 결과와 비슷하게 지반변위를 산정할 수 있다.

위 해석결과를 종합해보면, 지중 깊은 곳이나 기반암 바로 위에 건설되는 지하구조물은 이중코사인 이론을 이용하여 지반의 응답변위를 산정하여야 경제적인 것으로 판단된다. 그러나, 연약층이 존재하는 지중 얇은 곳에 설치되는 중요 매설관로 등의 지중 구조물의 경우 지진응답해석을 수행하거나 단일 코사인 방법을 이용하는 방법이 적절하리라 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 국내 설계지반운동기준에 적합한 기반면의 속도 응답스펙트럼 산정과 지반응답해석 없이 응답변위를 신뢰성있게 산정하는 간편법에 대한 연구를 수행하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 기반면의 속도 응답스펙트럼을 산정할 경우, 해석대상 지반의 공진주기가 0.40초 보다 작은 대부분의 국내지반에서는 S_A 지반의 지표면 가속도 응답스펙트럼을 적분하여 기반면 속도 응답스펙트럼으로 사용하는 방법이 적절하다. 그러나 공진주기가 0.50초 이상인 장주기 지반에서는 지진응답해석을 수행하여 결정하는 것이 바람직하다.
- (2) 단일 코사인 방법으로 산정한 지반변위 보다, 두 층으로 나누어 이중 코사인 방법으로 지반변위를 산정한 결과가 대표적 국내지반에서 지진응답해석 결과와 더 유사한 결과를 보였다.
- (3) 풍화토 지반이나 기반암 바로 위와 같이 깊은 심도에 설치되는 구조물의 경우 단일 코사인 이론을 이용한 방법보다는 이중 코사인 이론을 이용하여 지반변위를 산정할 경우 더 경제적인 설계를 할 수 있다. 그러나, 연약층이 존재하는 지반의 지표면 근처에 지중구조물을 건설할 경우 지반응답해석 수행을 추천하며, 이중 코사인 이론을 이용한 결과가 단일 코사인 이론을 이용한 방법보다 지표면 근처에서 상대변위가 크게 산정될 수 있음을 고려해야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자 지원사업 과제(KRF-2002-041-D00511)의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(1997), "내진설계기준연구(II)".
2. 건설교통부(1998), "표면파기법을 이용한 사질토 지반 개량효과 평가시스템 개발", pp.164.
3. 해양수산부(1999), "항만 및 어항시설의 내진설계 표준서".
4. 환경부(1999), "상수도시설 내진 설계기준 마련을 위한 연구".
5. 일본운수성(1999), "지중구조물 내진설계 표준 및 동해설", 도서출판 과학기술.
6. 김동수, 추연옥(2001), "공진주 시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성", 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제5호.
7. Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B(1972), "SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

(접수일자 2003. 3. 25, 심사완료일 2003. 7. 30)