

지진시 고층 건물 밀면전단력 산정을 위한 지반계수 결정에 대한 연구

Evaluation of Soil Factors for Determination of Seismic Base Shear Force for High Story Buildings During Earthquake

윤 중 구*¹ Yoon, Jong-Ku

김 동 수*² Kim, Dong-Soo

임 중 석*³ Lim, Jong-Seok

손 덕 길*⁴ Son, Duck-Gil

Abstract

In this paper, earthquake response analyses were performed using equivalent linear method at the soil sites classified as soil types III and IV in "Standard Design Loads for Buildings". Soil Factors were back-calculated by using spectral accelerations obtained from the analyses and those values are compared with soil factors described in other domestic seismic guidelines. For buildings which have the natural period higher than 0.9 sec, it was possible to use soil factors of soil types II and III instead of those of soil types III and IV, respectively. Therefore, it can be concluded that seismic base shear force can be overestimated in the current seismic guidelines and the improvement is required.

요 지

본 논문에서는 건축물 하중기준 및 해설에서 제시된 지반분류 방법으로 지반 III 또는 IV에 해당하는 지반을 대상으로 등가선형해석을 수행하였고, 해설에서 얻어진 스펙트럴 가속도 값으로 지반계수를 역산하여 국내 각 기준에서 제시하고 있는 지반계수와 비교 검토하였다. 해석결과 고유주기 0.9초 이상 고층 건물의 경우 지반 III의 경우 지반 II의 지반계수의 사용이 가능하였고, IV의 경우 지반 III의 지반계수를 사용하여도 충분하였다. 또한, 대부분의 해석에서 얻어진 지반계수의 값이 국내 내진설계기준의 값보다 상당히 작게 나타났다. 이는, 내진설계시 국내 내진설계기준을 그대로 적용하면 구조물 밀면전단력이 보수적으로 산정될 수 있음을 의미한다.

Keywords : Earthquake response analysis, Seismic base shear force, Seismic design, Soil factor

1. 서 론

지진에 의해 발생된 지반운동은 국지적 지반조건에 의해 좌우되고 지진시 구조물의 거동은 구조물 하부 기초지반에 많은 영향을 받으므로, 지진관련 지반공학적인 문제들에 대한 이해와 연구는 매우 중요하다. 이러한 지반공학적인 내진설계의 중요성이 인식되면서, 근래에

들어 국내에서는 경쟁입찰을 중심으로 주요 구조물에 대한 내진설계는 지반-구조물의 상호작용을 고려한 비선형 해석 등을 이용하여 매우 체계적으로 수행되고 있다. 그러나, 현업에서 내진설계시 널리 이용되고 있는 방법은 등가정적해석법이며, 일반적인 구조물의 경우 우리나라의 지반조건과 예상지진을 고려할 때 등가정적해석을 적용하더라도 큰 문제가 없다고 판단된다.

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 (Member, KAIST, Civil and Environmental Engrg., jkyoon@bomun.kaist.ac.kr)

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수 (Member, KAIST, Civil and Environmental Engrg.)

*3 정회원, 목포대학교 토목공학과 교수 (Member, DIV. of Architecture, Landscape and Civil Engrg., Mokpo National Univ.)

*4 대한주택공사 건축구조부 부장 (Korea National Housing Corporation, Building Structure Engrg. Dept.)

등가정적해석법을 적용하여 내진설계를 하는 구조물은 밀면전단력을 결정하여 지진하중을 산정하고, 이를 이용하여 각 층의 지진하중을 계산하는 방법으로 내진해석을 수행한다. 지진시 구조물에 작용하는 밀면전단력에 영향을 주는 요소는 구조물이 들어서는 지역, 구조물의 중요도, 구조물의 형식, 구조물의 자중, 구조물의 연성에 따라 결정되는 반응수정계수 및 구조물 하부 지반조건을 고려한 지반계수 등이 있다(대한건축학회, 2000).

구조물이 들어서는 지역, 중요도 및 구조물 형식은 구체적인 설계가 이루어지기 전에 결정되는 요소이다. 그러나, 구조물에 대한 내진설계시 구조물의 하부에 작용하는 밀면전단력 결정에 가장 큰 영향을 주는 요소는 구조물 하부 지반의 국지적인 특성에 따라 좌우되고 가변성을 지닌 것은 지반계수라고 할 수 있다.

내진설계시 설계에 반영하는 지반계수는 국내 여러 기관에서 제정한 기준서 및 시방서 등에 명시되어 있다. 그러나, 각각의 기준은 제정한 기관 및 제정된 시기가 서로 다르기 때문에 일관된 지반계수 값을 제공하지 못하고 있다. 또한, 일부 기준에 명시되어 있는 지반계수의 경우 지반분류 방법이 명확하지 않아 실무자의 주관에 따라서 지반계수를 선정해야 하는 어려움이 있다.

본 연구에서는 이러한 여러 기준 및 시방서 등에서 정의하고 있는 지반분류 방법 및 그에 따른 지반계수를 비교·검토하였다. 또한, 전국 각지에서 건설되고 있는 아파트 현장의 지반조사 결과 및 전단파속도 주상도를 이용하여 지진응답해석을 수행하고, 지반공학적 관점에서 고유주기 0.9초 이상의 고층 건물의 지반계수를 합리적으로 결정하는 방법을 제시하였다.

2. 밀면전단력(Base shear force) 산정법 및 지반계수

2.1 밀면전단력 산정법

국내 건축물 하중기준 및 해설(대한건축학회, 2000)에 따르면 내진설계를 하는 건축물은 지진하중에 의한 밀면전단력, 층지진하중, 층전단력, 수평비틀림모멘트, 전도모멘트 등에 저항할 수 있도록 설계하여야 하며, 기타 층간 변위와 건물분리 등을 검토하여 필요한 조치를 하도록 규정하고 있다. 밀면전단력이란 지진하중을 등가의 정적하중으로 환산하였을 때 건물의 밀면상부에 작용하는 지진하중의 총합을 의미한다. 여기서 밀면은

지진하중이 건축구조물에 전달되는 구조물과 지면이 직접 접하는 지반 표면을 의미한다. 밀면전단력은 식 (1)을 이용하여 계산하고 동적계수는 식 (2)를 이용하여 계산한다. 또한, 구조물의 기본 진동주기(T)는 모멘트 골조인 철골구조의 경우 식 (3)을 이용하고, 모멘트 골조인 철근콘크리트 구조의 경우 식 (4)를 이용하며, 그 외의 경우 식 (5)를 이용하여 계산한다(대한건축학회, 2000).

$$V = \left(\frac{A I_E C}{R} \right) W \quad (1)$$

여기서, V = 밀면전단력, A = 지역계수(가속도 계수)
 I_E = 중요도계수, C = 동적계수
 R = 반응수정계수, W = 구조물의 전중량

$$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}} \quad (2)$$

여기서, S = 지반계수, T = 구조물의 기본 진동주기
 단, 동적계수가 1.75를 초과할 경우에는 1.75를 적용한다

$$T = 0.085 h_n^{3/4} \quad (3)$$

$$T = 0.0731 h_n^{3/4} \quad (4)$$

$$T = 0.0488 h_n^{3/4} \quad (5)$$

여기서, h_n = 구조물의 높이

따라서, 구조물이 건설되는 위치 및 중요도, 구조물의 형식 등은 구체적인 설계 이전에 결정되는 요소이므로, 지진시 구조물의 밀면전단력을 산정하는데 가장 중요한 요소는 구조물 하부지반 종류에 따라 결정되는 지반계수라고 할 수 있다.

2.2 지반계수의 정의

지반계수는 지반종류에 따라서 결정된다. 지반계수에 대한 정의는 국내 여러 기준 및 시방서에 명시되어 있다. 본 연구에서는 건축물 하중기준 및 해설(대한건축학회, 2000), 내진설계기준연구(II)(건설교통부, 1997), 도로교표준시방서(건설교통부, 1999) 등에서 정의하고 있는 지반계수를 비교·검토하였다. 전술한 바와 같이 위 기준들이 정의하는 지반분류 방법 및 그에 따른 지반

계수가 서로 다르다. 따라서, 본 절에서는 대표적인 국내 건축물·구조물 설계기준에서 정의하고 있는 지반 분류 방법에 대하여 먼저 정리하고, 각 기준에서 정의되는 지반계수에 대하여 살펴보았다.

2.2.1 건축물 하중기준 및 해설

표 1에는 대한건축학회의 건축물 하중기준 및 해설(이하 건축물 하중기준)에서 정의하고 있는 지반분류 방법, 표 2에는 지반계수를 나타내었다. 이 기준에서는 지반 I, 지반 II, 지반 III, 지반 IV 등의 네 가지 방법으로 지반을 분류한다. 이 경우 지반을 분류하는 기준이 객관적이지 않아 실무자의 주관에 따라서 다를 수 있다. 특히, 우리나라의 경우 연약지반이나 매립지반과 같은 특수한 지반을 제외하면 대부분 지반 II과 지반 III에 해당하는 것으로 판단된다. 따라서, 실무자의 판단으로 지반계수를 1.2와 1.5를 선택하여 사용해야 하는데, 두 지반계수 값의 차이는 공사비의 증감으로 이어진다.

그림 1에는 건축물 하중기준에서 정의하고 있는 지표면 표준 설계응답스펙트럼이 나타나 있다. 건축물 하중

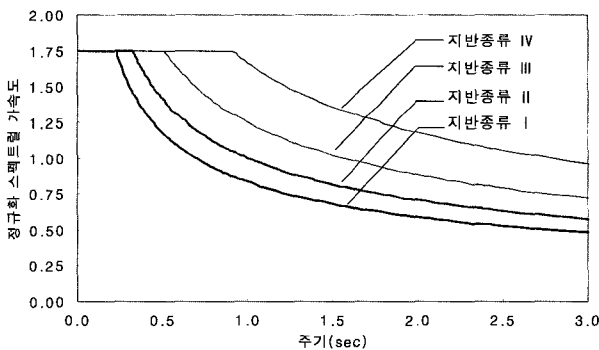


그림 1. 지표면 표준 설계응답스펙트럼(대한건축학회, 2000)

표 1. 지반의 분류(대한건축학회, 2000)

지반종별	지반상태
지반 I	1) 암반과 같은 재료로써 전단파 속도가 700m/sec 이상인 지반 2) 암반의 상부에 분포된 보통 단단한 모래 이상의 지반 또는 보통 단단한 점토 이상의 지반으로 구성된 지반의 전체 깊이가 60m 미만
지반 II	보통 단단한 모래 이상의 지반 또는 보통 단단한 점토 이상의 지반으로 구성된 지반의 전체 깊이가 60m 이상
지반 III	보통 단단한 점토 이하의 지반이 6m 이상으로써 단단하기가 보통 이하인 점토의 깊이가 12m 미만
지반 IV	전단파의 속도가 150m/s 미만인 단단하기가 보통 이하인 점토의 깊이가 12m 이상인 지반

표 2. 지반계수(대한건축학회, 2000)

지반계수	지반종류			
	I	II	III	IV
S	1.0	1.2	1.5	2.0

기준에서 정의하고 있는 설계응답스펙트럼의 경우, 네 가지 지반 모두 단주기 영역에서 지반의 증폭현상을 고려하지 않고 같은 값을 사용하는 것이 특이하다.

2.2.2 내진설계기준연구(II)

건설교통부에서 제정한 내진설계기준연구(II)는 내진 해석 기준의 상위 개념에 해당하는 기준으로, 국내 토목·구조 분야의 내진설계기준은 대부분 내진설계기준연구(II)를 근간으로 제정되어 있다. 표 3에는 내진설계기준연구(II)에서 정의하고 있는 지반분류 방법이 나타나 있고, 표 4에는 지진계수와 지반계수가 나타나 있다. 표 4에 나타나 있는 각각의 지반계수는 SB 지반의 지진계수를 1.0으로 보았을 때, 다른 지반의 지진계수를 SB 지반 지진계수로 나누어서 구한 값이다.

내진설계기준연구(II)에서 정의한 지반분류 방법은 전단파속도 주상도를 위주로, 표준관입시험 저항값(N 값) 및 비배수 전단강도를 부차적으로 이용하여 사질토 및 점성토에 모두 적용할 수 있다. 또한 수치적인 값으로 분류할 수 있어 현재 건축물 하중기준에 제시되어 있는 방법보다 구체적이다. 따라서, 현업에서 실무자들이 지반분류를 할 경우 특별한 어려움이 없을 것으로 판단된다. 그러나, 내진설계기준연구(II)의 방법으로 지반분류를 할 경우 상부 30m에 대한 평균 지반 특성 값으로 지반을 분류해야 한다. 이는 국내 대부분 지반의 경우 30m 이전에 기반암이 존재함을 고려해 볼 때, 상부 30m의 평균 지반 특성 값에 암반층의 영향이 커질 수 있음을 의미한다. 특히 전단파속도를 기준으로 지반을 분류할 경우, 연약한 토층이 얇고 암반층이 깊을 경우 토층의 특성보다는 주로 암반층의 특성이 반영되어 지반종류가 단단한 토사지반으로 분류 될 수 있기 때문

표 3. 지반의 분류(건설교통부, 1997)

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30m 에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 $\bar{N} (\bar{N}_{CM})$ (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 4. 지반계수(건설교통부, 1997)

지반종류	지진구역 I		지진구역 II	
	지진계수(C _a)	지반계수(S)	지진계수(C _a)	지반계수(S)
S _A	0.09	0.82	0.05	0.71
S _B	0.11	1.00	0.07	1.00
S _C	0.13	1.18	0.08	1.14
S _D	0.16	1.45	0.11	1.57
S _E	0.22	2.00	0.17	2.43

에 이에 대한 전문가의 의견이 반영되어야 할 것으로 판단된다.

그림 2에는 내진설계기준연구(II)에서 정의하고 있는 표준설계응답스펙트럼이 나타나 있다. 그림 2에 나타나 있는 응답스펙트럼의 경우 지진계수(C_a, C_v) 값에 따라서 응답스펙트럼 값이 달리 산출되도록 되어 있다. 건축물 하중기준의 경우 네 가지 지반 모두 단주기 영역에서 같은 값이나, 내진설계기준연구(II)에서 제시된 방법으로 설계 응답스펙트럼을 작성할 경우 지반종류에 따라서 단주기 영역의 응답값이 크게 달라지게 된다.

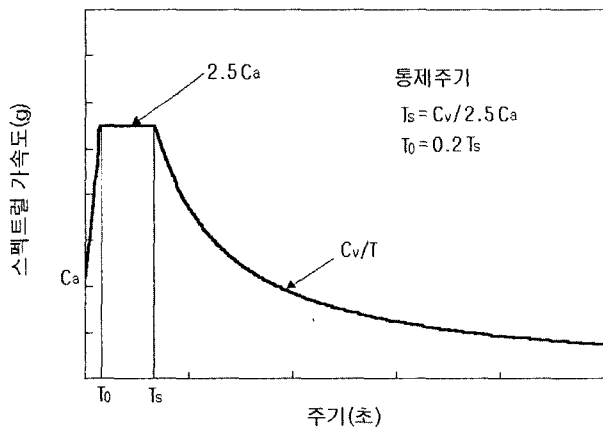


그림 2. 지표면 표준 설계응답스펙트럼(건설교통부, 1997)

2.2.3 도로교표준시방서

표 5에는 건설교통부에서 제정한 도로교표준시방서에서 정의하고 있는 지반분류 방법이 나타나 있다. 도로교표준시방서에 나타나 있는 지반분류 방법은 내진설계기준연구(II)에서 분류하고 있는 방법과 유사하지만, S_A, S_B지반을 지반 I로 통합한 점이 다르다. 이는 연암지반과 경암지반을 모두 암반지반으로 통일한 것이고, 보통지반의 경우 건축물 하중기준의 방법과 같이 4가지로 나누어서 분류를 하고 있다.

도로교표준시방서의 지반계수는 건축물 하중 기준에서 제시한 지반계수와 같다(표 2). 그러나, 지반분류 방법은 위 두 기준을 혼합하여 사용하고 있다. 즉, 내진설계기

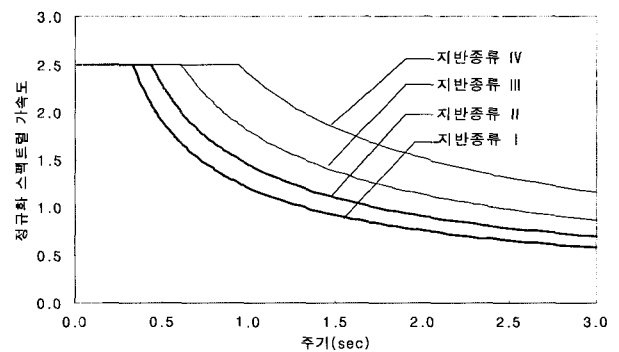


그림 3. 지표면 표준 설계응답스펙트럼(건설교통부, 1999)

표 5. 지반의 분류(건설교통부, 1999)

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30m 에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 $\bar{N} (\bar{N}_{CH})$ (blow/foot)	비배수전단강도 \bar{S}_u
I	경암지반 보통암지반	760 이상	-	-
II	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
III	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
IV	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
V	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

준연구(II)에 S_C 지반이 건축물 하중기준 또는 도로교표준 시방서 기준의 지반 II에 해당하고, S_D지반의 경우 지반 III, S_E 지반의 경우 지반 IV에 해당하는 것으로 판단된다.

도로교표준시방서의 설계응답스펙트럼은 그림 3과 같고, 단주기 영역에서 지반의 종류에 따른 지반증폭현상은 반영되지 않은 것으로 판단된다.

2.3 지진응답해석을 이용한 지반계수 산정법

밀면전단력을 산정하는 식 (1)에서 지역계수(A), 중요도계수(I_E), 동적계수(C)가 곱해져 있는 분자의 값은 지진시 구조물의 밀면 지반에 가해지는 가속도 값을 의미한다. 즉, 구조물의 관성력에 자중을 곱하면 구조물에 작용하는 지진하중이 되는데, 지역계수, 중요도계수, 동적계수의 곱은 관성력을 결정하는 지진가속도 값이다. 구조물의 밀면 지반에 가해지는 지진가속도를 α 라고 정의하면, 식 (1)과 식 (2)를 조합하여 식 (6)을 얻을 수 있다. 따라서, 지반계수 S는 식 (7)과 같이 지진가속도 및 지역계수, 중요도계수 및 구조물의 고유주기의 함수로 표현된다.

$$\alpha = A I_E C = A I_E \frac{S}{1.2\sqrt{T}} \quad (6)$$

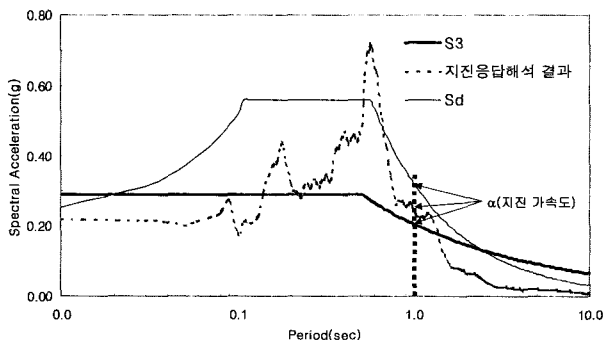


그림 4. 주기별 스펙트럴 가속도(α) 값

$$S = \frac{1.2 \alpha \sqrt{T}}{A I_E} \quad (7)$$

여기서, α = 지진시 구조물에 작용하는 가속도

일반적으로 등가선형 또는 비선형 해석방법을 이용하여 지진응답해석을 수행할 경우 지진시 구조물에 작용하는 스펙트럴 가속도(spectral acceleration) 값을 구조물의 고유주기에 따라서 얻을 수 있다. 지진응답해석으로 구해지는 스펙트럴 가속도 값이 식 (7)에서 α(지진시 구조물에 작용하는 가속도)에 해당하는 값이 된다.

그림 3에는 일반적으로 지진응답해석에서 얻어지는 구조물 주기에 따른 응답스펙트럼 값을 나타내었다. 또한, 건축물 하중기준에서 지반 III(S3)에 해당하는 설계 응답스펙트럼과 내진설계기준연구(II)에서 정의하고 있는 S_D 지반의 설계 응답스펙트럼을 함께 나타내었다. 그림 4의 지진응답해석 결과와 주기 1.0초에 점선으로 나타나 있는 선과 교차하는 값으로부터 지진가속도(α) 값을 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 지진가속도 값을 식 (7)에 대입하고 지역계수, 중요도계수, 구조물 고유주기를 대입하여 지반계수(S) 값을 역산할 수 있다. 이렇게 역산하여 구해진 지반계수를 본 논문에서는 지진응답해석을 이용하여 구해진 지반계수로 정의한다. 이때 얻어진 지반계수를 각 기준에 따른 지반계수와 비교하여, 구조물의 기본 진동주기에 따른 지반계수의 값을 합리적으로 결정할 수 있는 방법을 제시하였다.

3. 해석 조건

3.1 해석대상지반의 선정 및 해석부지의 특성

본 절에서는 지진응답해석을 이용한 지반계수를 산정하기 위하여 전국 각지에서 건설되고 있는 아파트

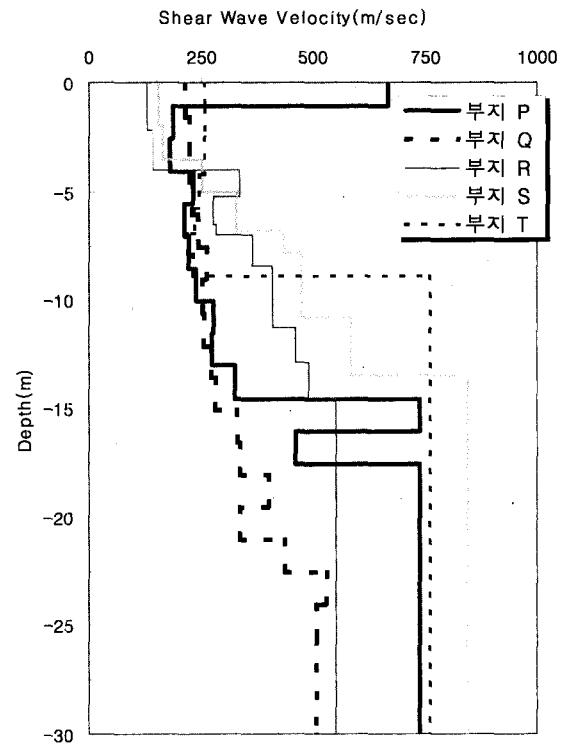
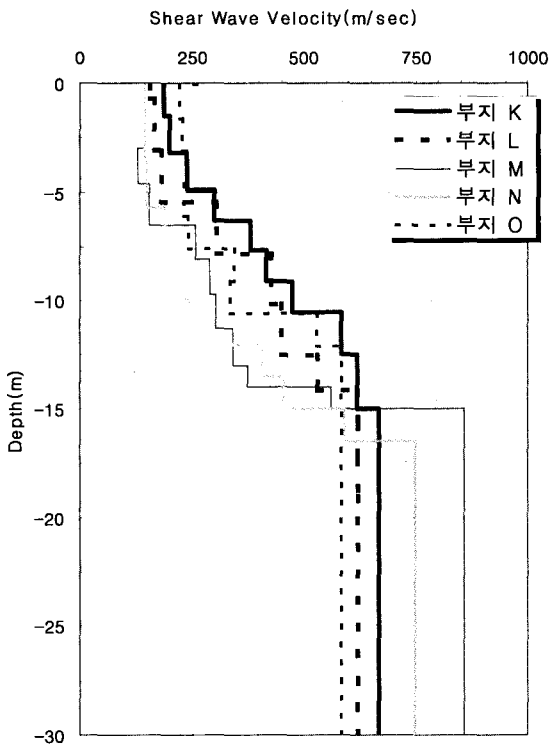
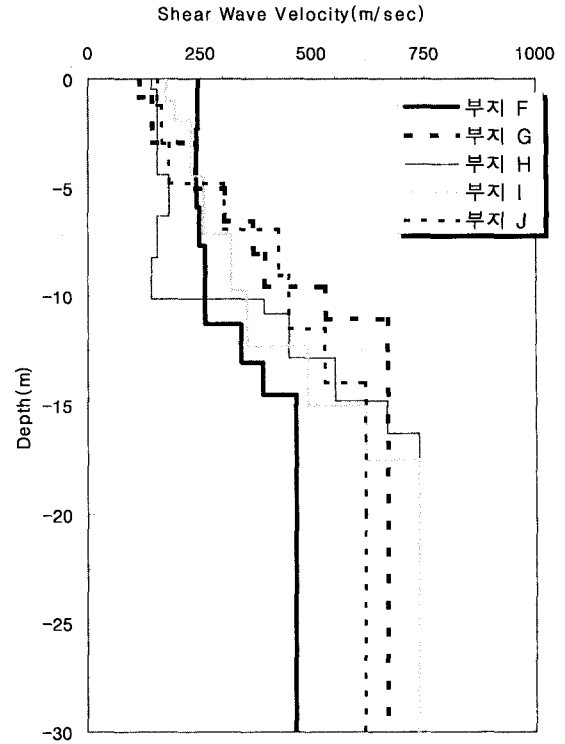
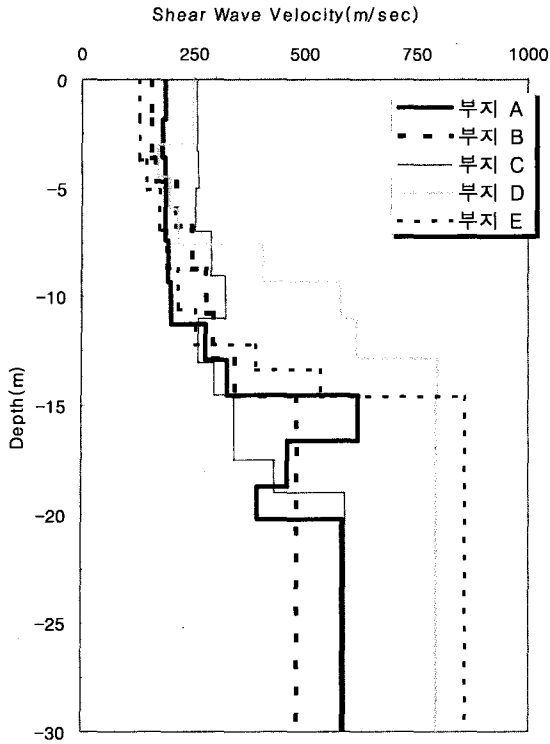


그림 5. 해석대상 지반의 전단파속도 주상도

건설 현장의 지반조사 결과와 시추주상도를 이용하였다. 해석 대상 지반은 표 6에 나타난 바와 같이 모두 20 곳이다. 본 연구에서 선정한 대부분의 지반은 상부 토층은 매립토 및 충적토가 분포하고 있고, 하부층은 풍화토와 풍화암 및 기반암층으로 구성되어 있다. 이

러한 층상구조는 우리 나라의 일반적인 층상구조로 판단된다.

지반의 전단파속도는 시추주상도에 나타난 SPT N값을 기준으로 Yamazaki and Umehara(1987)가 제안한 식 (8)을 이용하여 산정하였다(건설교통부, 1998). 대부분

표 6. 해석 대상 지반의 선정

지역	시추주상도 개수	지반의 층상 구조
서울 등촌지구	1 개	실트질 모래, 풍화토, 풍화암, 연암
경기 화성태안지구	1 개	모래, 자갈, 풍화토, 연암
경기 파주, 금촌지구	6 개	충적토, 풍화토, 풍화암, 연암
경기 수원망포지구	4 개	매립토, 충적토, 풍화토, 풍화암, 연암
인천 삼산지구	2 개	점토질 실트, 풍화토, 풍화암, 연암
전남 장흥건산지구	3 개	매립토, 풍화토, 풍화암, 연암
부산 안락지구	1 개	점토질 실트, 풍화토, 풍화암, 연암
부산 기장지구	1 개	점토질 실트, 풍화토, 풍화암, 연암
경남 함안지구	1 개	점토질 실트, 자갈질 모래, 연암

의 시추는 풍화암 아래의 연암에서 끝이 났으나, 일부 지반의 경우 연암으로 가정했지만 상관식으로 유추해보면 전단파속도가 500m/sec 보다 작은 경우도 존재하였다. 본 해석에서는 기반암의 전단파속도를 별도로 가정하지 않고, 시추주상도에 나타나 있는 값을 이용하여 기반암의 전단파속도를 산정하였다. 20개 부지의 전단파속도 주상도는 그림 5에 나타내었다.

$$V_s = 89.1 N^{0.34} \quad (8)$$

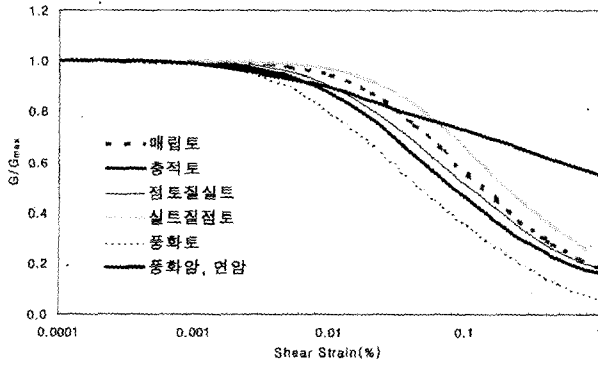
3.2 지반 분류 및 지반의 동적 물성치

해석 대상 부지의 지반종류는 건축물 하중기준과 내진설계기준연구(II)에서 제시한 방법으로 분류하였으며 표 7에 나타내었다. 평균 전단파속도(\bar{v}_s)는 식 (9)를 이용하여 계산하였다. 표 7의 결과를 살펴보면 해석대상 지반 모두 Sc 및 S_D 지반에 해당하는 것을 알 수 있다.

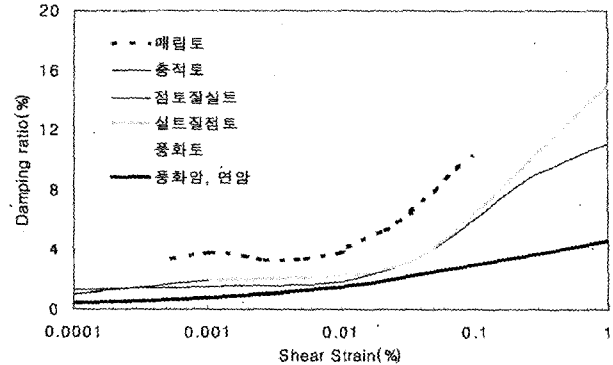
$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}} \quad (9)$$

표 7. 해석 대상 지반의 지반종류

지역	상부 30m 평균 전단파 속도 (m/sec)	고유주기 (sec)	지반 분류		
			건축물 하중기준	내진설계 기준연구(II)	
서울 등촌지구	부지 A	313.7	0.38	III	S _D
경기 화성태안지구	부지 B	380.3	0.26	III	S _C
경기 파주금촌지구	부지 C	422.4	0.22	III	S _C
	부지 D	596.1	0.31	III	S _C
	부지 D	345.7	0.35	III	S _D
	부지 F	356.7	0.34	III	S _D
	부지 G	401.6	0.30	III	S _C
	부지 H	313.5	0.38	III 또는 IV	S _D
	경기 수원망포지구	부지 I	406.5	0.29	III
부지 J		440.5	0.27	III	S _C
부지 K		391.1	0.31	III	S _C
부지 L		378.5	0.32	III	S _C
인천 삼산지구	부지 M	375.0	0.29	III	S _C
	부지 N	358.0	0.34	III	S _D
전남 장흥건산지구	부지 O	454.9	0.26	III	S _C
	부지 P	342.4	0.35	III	S _D
	부지 Q	229.1	0.52	III 또는 IV	S _D
부산 안락지구	부지 R	452.2	0.27	III	S _C
부산 기장지구	부지 S	351.5	0.34	III	S _D
경남 함안지구	부지 T	623.6	0.22	III	S _C



(a) 변형률 증가에 따른 전단탄성계수 감소곡선



(b) 변형률 증가에 따른 감쇠비 곡선

그림 6. 해석에 사용된 지반의 비선형 동적물성치(김동수, 추연욱, 2001)

여기서, d_i = 토층 i 의 두께 (m)

v_{si} = 토층 i 의 전단파속도 (m/sec)

기반암 상부 토층지반의 고유주기는 식 (10)을 이용하여 계산하였고, 계산결과는 표 9에 나타내었다. 해석 대상 지반의 고유주기를 살펴보면 지반의 공진주기는 0.4초 미만의 단주기에 해당하는 것을 알 수 있다.

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} \quad (10)$$

여기서, T_G = 지반의 고유주기 (sec)

H_i = i 번째 토층의 두께 (m)

V_{si} = i 번째 토층의 전단파속도 (m/sec)

본 해석에서는 1차원 지진응답해석에 널리 쓰이는 등가선형해석 프로그램인 SHAKE91(Idriss and Sun, 1992; Schnabel et al., 1972)을 이용하였다. 등가선형을 이용한 지반응답해석에 필요한 물성은 김동수와 추연욱(2001)의 데이터 베이스와 문헌의 자료를 참조하여 결정하였으며, 사용된 전단변형률의 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 감소곡선 및 감쇠비 곡선은 그림 6에 나타내었다.

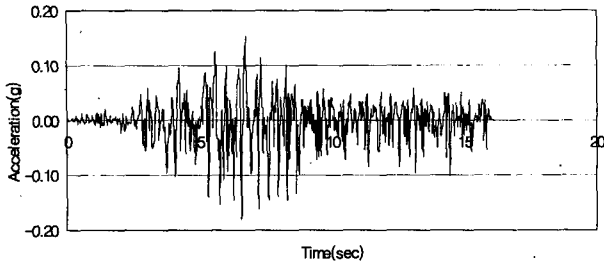
3.3 설계지반운동 수준 결정 및 입력지진의 결정

본 연구에서는 해석대상부지로 아파트 건설현장부지를 선택하였고, 대부분의 아파트가 15층 이상의 고층으로 건설되는 점을 고려하여 지진구역 계수는 I구역에 해당하는 0.11을 이용하였으며, 중요도계수는 특등급 도시계획구역을 적용하여 1.5를 이용하였다. 따라서, 본 연구의 지진응답해석에 이용된 기반암 노두

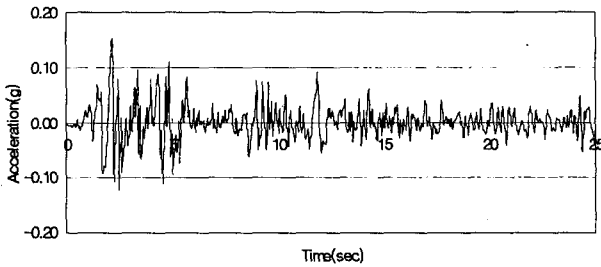
의 운동 수준은 0.165g로 모든 해석에 동일하게 적용되었다.

국내 지반의 지진시 지반증폭에 대한 연구를 위해서는 국내 지반 또는 암반에서 계측된 지진기록을 사용하는 것이 이상적이나, 국내 계기지진의 경우 진도와 규모가 소규모이고 국내 내진설계 기준에 부합되지 않아 지진응답해석에 사용하기엔 부적절하다. 본 연구에서는 이러한 사정을 고려하여 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research) 센터의 입력지진 선택 권고안을 바탕으로 입력 지진운동을 결정하였다(http://peer.berkeley.edu). PEER 센터에서는 지진기록을 지반계측과 암반계측을 구분할 것과, 근거리 단층지대(near fault)에서 발생한 지진과 원거리 지역(long duration)에서 발생한 지진기록을 구분하여 사용하도록 권고하고 있다.

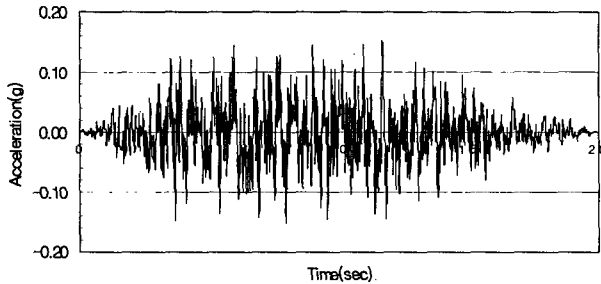
본 연구에서는 국내 내진설계기준에 따라 암반에서 계측되고, 국내에서 지진이 발생할 경우 원거리지진이 발생할 확률이 높아 원거리지진을 사용하기로 결정했다. 따라서, PEER 센터에서 추천한 여러 가지 지진기록 중에서 지진응답해석에 널리 쓰이고, 지진기록의 주파수 대역이 비교적 넓은 지진기록인 일본 Miyagi-ken-oki(1978) 현의 Ofunato항 지진기록 및 1940년에 미국 Imperial Valley El Centro에서 발생한 El Centro 지진기록을 이용하기로 결정하였다. Ofunato항 지진기록은 단주기 지진 기록에 해당하며, El Centro 지진기록은 장주기 지진 기록에 해당한다. 또한, 일반적으로 지진응답해석을 할 경우 실지진 기록과 인공지진기록을 함께 사용하여 해석하는 것을 추천하므로, 본 연구에서는 지진구역 I과 중요도 계수 1.5에 해당하는 인공지진을 작성하여 해석에 이용하였다. 실지진 및 인공지진의 시간영역에서 가속도의 이력곡선은 그림 7에 나타내었다.



(a) Ofunato 지진기록



(b) El Centro 지진기록



(c) 인공지진기록

그림 7. 해석에 이용된 지진파

4. 지진응답해석을 이용한 지반계수 산정

4.1 지진응답해석 결과

본 절에서는 3절에서 선정한 해석대상 부지의 전단파 속도 주상도와 기반암의 운동수준, 입력지진 및 지반의 동적물성치를 이용하여 등가선형해석을 바탕으로 지진응답해석을 수행하였다. 또한, 해석결과를 이용하여 지표면에서 구조물 주기에 따른 설계 응답스펙트럼을 구하고 2.3절에 언급되어 있는 지반계수를 역산하여 건축물 하중기준 및 내진설계연구(II)에 나타나 있는 지반계수와 비교하였다.

해석 대상 부지로 선정한 20개 지반에 대한 1차원 자유장 등가선형 해석결과 중 대표적인 결과로 부지 S의 결과를 그림 8에 나타내었다. 부지 S의 경우 건축물 하중기준으로 지반 III에 해당하고, 내진설계기준연구(II) 기준으로 S_D 지반에 해당한다(표 7 참조). 그림 8에는

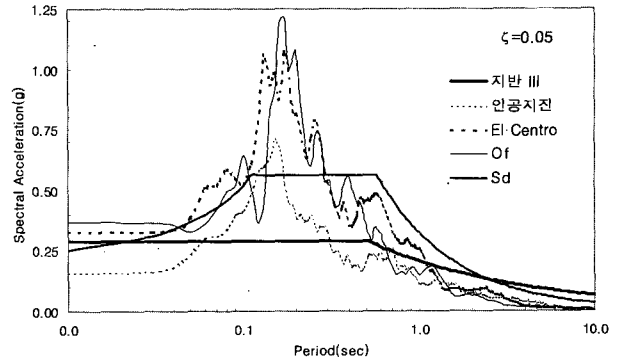


그림 8. 부지 S의 지진응답해석 결과와 내진설계기준과의 비교

세 가지 지진파에 대한 해석결과와 지반 III 및 S_D 지반의 응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 지진응답해석 결과와 각 기준에서 제시하고 있는 설계 응답스펙트럼을 비교하여 보면 많은 차이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 아파트 10층 건물의 고유주기가 1.0초 이상임을 고려해보면, 주기 1.0초 이상에서 해석결과의 값이 건축물 하중기준 및 내진설계연구(II)의 결과보다 대체적으로 작은 값을 가진다. 그러나, 단주기 부분에서는 지진응답해석 결과 값이 오히려 내진설계 기준의 값보다 큰 부분이 나타난다. 본 연구에서는 고유주기 0.9초 이상의 고층아파트를 대상으로 한정하여 해석결과를 분석하였다.

4.2 지진응답 해석결과를 이용한 지반계수의 결정

표 8에는 부지 S의 지진응답해석 결과의 구조물 주기에 따른 지반계수를 나타내었다. 표 2와 표 5에 나타나 바와 같이, 건축물 하중기준 지반 III의 지반계수는 1.5 이고, 지진구역 I의 지반에서 내진설계기준연구(II)의 S_D 지반 지반계수는 1.45이다. 지진응답해석 결과에서 얻어진 지반계수는 주기 1.0초 일 때 세 가지 지진파에 대한 평균값은 1.24로 두 기준의 값보다 작다. 특히, 최근 건설되고 있는 아파트는 대부분 15층 이상이 주로 건설된다. 15층 구조물의 경우 주기가 1.5초 이상의 장주기에 해당하므로, 지진응답해석에서 얻어진 지반계수는 더욱 감소하게 된다. 따라서, 국내 내진설계기준을 이용하는 것보다 지진응답해석을 수행하여 지반의 특성을 반영하여 설계할 경우 경제적이고 신뢰성 있는 설계를 할 수 있다.

표 7에 나타나 있는 20개의 해석 대상부지는 모두 건축물 하중기준을 이용하여 분류할 경우 지반 III 또는

표 8. 부지 S(지반 III 또는 S_D 지반)의 지반계수

주기(sec)	지반계수(Soil Factor, S)			
	인공지진1	El Centro	Ofunato	평균
0.90	1.04	1.86	1.21	1.37
0.92	0.98	1.88	1.25	1.37
0.94	0.94	1.88	1.24	1.35
0.96	0.88	1.87	1.19	1.31
0.98	0.82	1.83	1.12	1.26
1.00	0.78	1.85	1.08	1.24
1.05	0.87	1.72	1.18	1.26
1.10	0.83	1.44	1.34	1.20
1.15	0.87	1.30	1.43	1.20
1.20	1.00	1.28	1.45	1.25
1.25	1.02	1.12	1.39	1.18
1.30	0.94	0.95	1.25	1.05
1.35	1.01	0.81	1.10	0.98
1.40	1.02	0.75	0.99	0.92
1.45	0.95	0.77	0.85	0.86

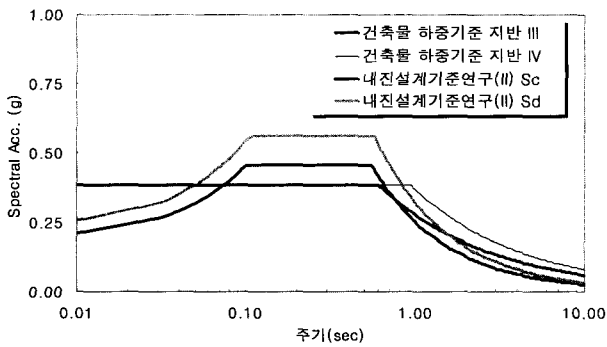


그림 9. 지반 III, 지반 IV, S_C 지반 및 S_D 지반의 설계응답스펙트럼

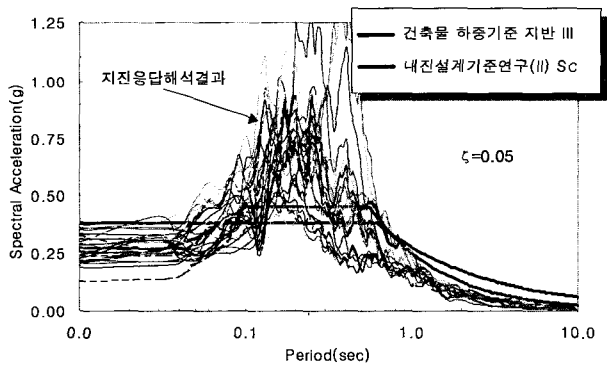
IV에 해당하고, 내진설계기준연구(II)를 이용하여 분류할 경우 S_C 및 S_D 지반에 해당한다. 그러나, 지반 III에 해당하는 지반이 S_C 또는 S_D 지반으로 분류되는 경우가 존재한다. 건축물 하중기준에서 지반 III, 지반 IV 및 내

진설계기준(II)에서 S_C, S_D 지반에 대한 설계응답스펙트럼을 그림 9에 비교하였으며, 네 종류의 설계응답스펙트럼이 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

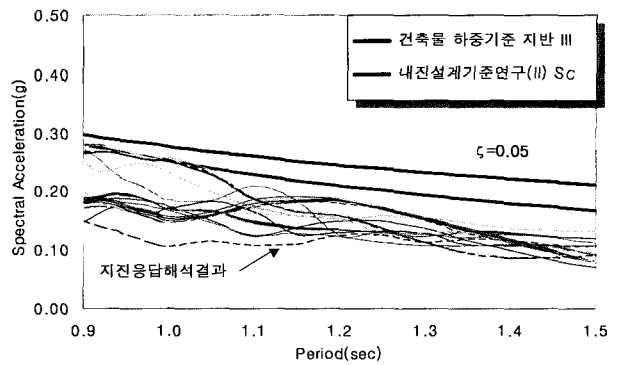
그림 10(a)에는 건축물 하중기준으로 지반 III에 분류되며 내진설계기준연구(II)에서 S_C 지반에 해당하는 지반의 해석결과를 지반 III와 S_C 지반의 설계응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 그림 10(b)에는 주기 0.9초와 1.5초 사이의 값을 확대하여 나타낸 것이다. 그림 10을 살펴보면 지진응답 해석에서 얻어진 결과의 값들이, 본 연구의 관심 주기인 0.9초 이상에서 지반 III와 S_C 지반의 설계응답스펙트럼 값보다 작게 나타났음을 볼 수 있다.

그림 11(a)에는 지반 III로 분류되며 S_D 지반에 해당하는 지반의 해석결과와 설계응답스펙트럼을 비교하여 나타내었다. 그림 11(b)에는 주기 0.9초와 1.5초 사이의 구간의 값을 확대하여 나타내었다. 그림 12(a)에는 건축물 하중기준으로 지반 III와 지반 IV의 중간정도에 해당하는 지반의 해석결과를 나타내었다. 이 경우 지반 IV의 응답스펙트럼 값과 비교·검토하였다. 그림 12(b)에는 주기 0.9초와 1.5초 사이의 값을 확대하여 나타내었다. 검토 결과 지진응답 해석에서 얻어진 값이 건축물 하중기준과 내진설계기준(II)에서 제시한 설계응답스펙트럼의 값보다 작게 나타났다.

그림 10~그림 12의 결과 모두 지진응답해석을 통하여 얻어진 스펙트럴 가속도 값이 건축물 하중기준이나 내진설계기준연구(II)의 값보다 작게 나타났다. 이러한 결과는 표 9에서 더 정확하게 확인할 수 있다. 표 9에는 지반 III와 S_C 지반으로 분류될 경우, 지반 III와 S_D 지반으로 분류될 경우 및 지반 IV와 S_D 지반으로 분류될 경우에 대하여 해석에서 얻어진 지반계수의 값을 나타내

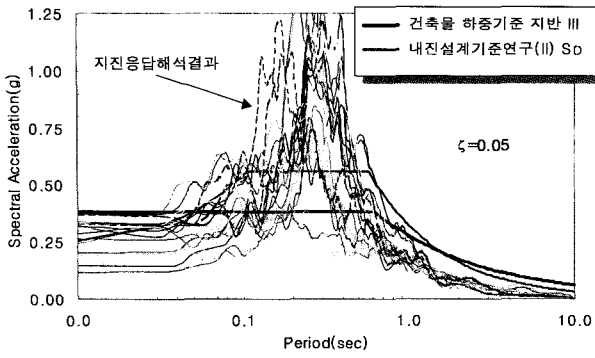


(a) 전체 주기 해석결과

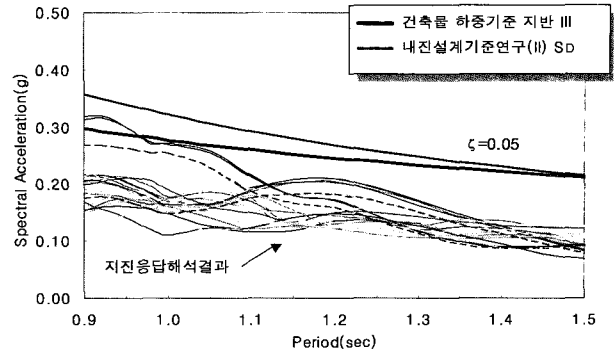


(b) 주기 0.9초에서 1.5초 구간 해석결과

그림 10. 지반 III와 S_C 지반의 설계응답스펙트럼과 지진응답 해석결과와의 비교

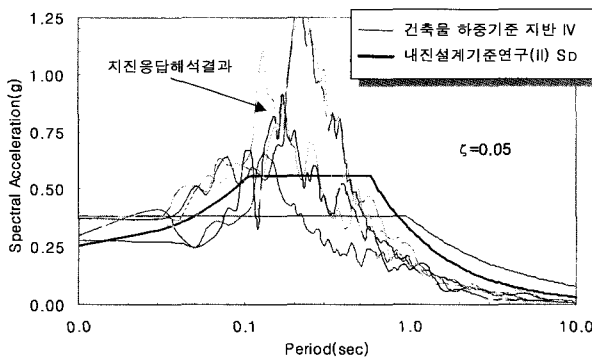


(a) 전체 주기 해석결과

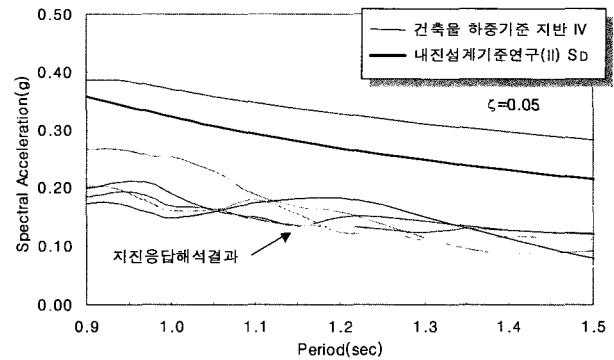


(b) 주기 0.9초에서 1.5초 구간 해석결과

그림 11. 지반 III와 S_D 지반의 설계응답스펙트럼과 지진응답 해석결과와의 비교



(a) 전체 주기 해석결과



(b) 주기 0.9초에서 1.5초 구간 해석결과

그림 12. 지반 IV와 S_D 지반의 설계응답스펙트럼과 지진응답 해석결과와의 비교

표 9. 지진응답 해석에서 얻어진 지반계수 평균값

주기 (초)	지진응답 해석에서 얻어진 지반계수 평균값		
	지반 III S _C 지반	지반 III S _D 지반	지반 IV S _D 지반
0.90	1.378	1.464	1.467
0.92	1.402	1.473	1.505
0.94	1.404	1.465	1.512
0.96	1.367	1.433	1.475
0.98	1.306	1.395	1.398
1.00	1.274	1.371	1.340
1.05	1.257	1.352	1.289
1.10	1.249	1.305	1.301
1.15	1.216	1.267	1.251
1.20	1.224	1.264	1.238
1.25	1.182	1.186	1.182
1.30	1.089	1.096	1.073
1.35	1.010	1.019	1.027
1.40	0.967	0.954	0.979
1.45	0.912	0.900	0.920
1.50	0.860	0.849	0.886

었다. 전술한 바와 같이 지반 III의 지반계수는 1.5, 지반 IV의 지반계수는 2.0 이다. 표 9에 나타난 수치는 주기 0.9초 이상에서 해석결과의 평균값은 1.5보다 작고, 장 주기로 갈수록 현저하게 작아진다. 이는 고층 건물일수록 시방서에 일률적으로 제시된 지반계수를 사용하는 것보다 지반조사를 통한 부지 고유의 응답해석을 이용하여 설계에 반영하는 것이 경제적인 설계를 할 수 있음을 의미한다.

5. 합리적인 지반계수 산정방법

5.1 지진응답해석 결과를 이용한 지반계수의 이용

현업에서는 내진설계시 부지고유의 특성을 평가하기 위한 지진응답해석을 수행하지 않고 시방서나 설계기준에서 제시된 값으로 등가정적해석을 이용한다. 그러나, 4장의 지진응답해석 결과에 나타난 바와 같이, 고유 주가 0.9초 이상의 고층 건물일 경우 지진응답해석을 이용하여 산정한 지반계수의 값이 국내 내진설계기준에서 제시하는 값보다 작은 값을 알 수 있다. 이는 고층 건물일 경우 부지 고유의 특성을 파악할 수 있는 지진응답해석 결과를 이용하여 설계에 반영할 경우 경제적인 설계를 할 수 있음을 의미한다. 단, 단주기 건물에 적용할 경우 주의해야 한다.

지진응답해석을 수행하려면 부지 고유의 지반특성을 파악할 필요가 있다. 이를 위해 현장지반의 전단파속도 주상도를 결정하기 위한 지반조사를 실시하고, 지반의 동적변형특성을 파악하기 위한 실내시험을 실시해야 신뢰성 있는 부지고유의 특성을 파악할 수 있다. 그러나, 내진설계를 위한 지반자료 조사가 부족할 경우에는 시방서나 내진설계기준에서 제시한 값을 사용하는 것이 바람직 할 것이다.

현장지반의 전단파속도 주상도의 결정을 위한 현장 실험 방법으로는 현업에서 많이 이용되고 있는 크로스홀 기법, 다운홀 기법, SASW 기법 등의 탄성파 실험법이 있다. 또, 지반의 동적변형특성을 규명하기 위한 실내실험 방법으로는 공진주 시험, 비틀전단 시험 등이 있다. 현재 우리 나라는 표준관입시험(SPT)이 지반조사 기법으로 널리 실시되고 있다. 표준관입시험에서 얻어지는 N값을 이용하여 지반의 전단파속도를 경험적 상관식으로 추정할 수 있다. 그러나, SPT N값으로 전단파속도를 추정하여 내진설계를 할 경우 현장 탄성파 실험

법에서 얻어진 전단파속도를 이용하는 것보다 신뢰성이 떨어진다. SPT N값 이외의 지반조사 자료가 없을 경우 경험식을 이용하는 방법을 추천한다.

현재 사용되고 있는 국내 내진설계기준에는 기준서에서 제시되어 있는 지반계수 값을 사용하도록 되어 있다. 그러나, 본 연구의 해석결과와 같이 지반조사를 실시하여 부지 고유의 응답해석을 수행할 경우, 지반종류별로 일률적으로 제시하고 있는 내진설계기준의 지반계수를 사용하는 것보다 신뢰성 있고 경제적인 설계를 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 향후 국내 내진설계기준을 개정할 경우 고층 건물의 경우 지반조사를 통한 지진응답해석 결과를 병행할 수 있도록 별도의 규정이 필요하다고 본다.

5.2 국내 기준의 지반분류 방법 개선 사항

2장에 언급된 바와 같이 지반계수는 지반이 분류되면 그에 따라 결정되어 진다. 따라서, 지반계수의 정확한 산정을 위하여는 지반분류를 명확하게 해야 한다. 그러나, 전술한 바와 같이 국내 여러 내진설계기준에서는 지반분류 기준이 달라 일관성 있는 지반분류에 어려움이 있다.

내진설계의 세계적인 동향은 지반의 지반공학적 특성을 점점 더 반영하고 있는 추세이다. 건축물 하중기준의 경우 응답스펙트럼 작성시 단주기 영역에서 지반의 증폭현상을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 건축물 하중기준에서 사용하고 있는 지반분류 방법을 개선할 여지가 있는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 밀면전단력 산정에 이용되는 스펙트럴 가속도 값과 지진응답해석에서 얻어진 스펙트럴 가속도 값을 비교하여 지반계수를 역산하였다. 해석결과 10층 이상의 고층 건물의 고유주기 영역에서 국내 내진설계기준의 값보다 상당히 작게 나타났다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- (1) 고유주기 0.9초 이상의 고층 건물에 대한 내진설계시 지반계수의 산정은 지진응답해석 결과를 이용하면 신뢰성 있고 경제적인 설계를 할 수 있다. 따라서, 현장 지반에 대한 지반조사를 실시한 후 지진응

답해석을 이용한 지반계수를 산정하는 방법을 최우선으로 적용하고, 저층 건물이나 내진설계를 위한 지반자료 조사가 부족할 경우에는 시방서나 내진설계기준에서 제시한 값을 사용하도록 추천한다.

- (2) 고유주기 0.9초 이상의 고층 건물 내진설계시 국내 내진설계기준을 그대로 적용할 경우 구조물 밀면전단력이 크게 산정되어 과다설계 및 공사비 증가가 예상되므로 향후 국내 내진설계기준의 개정시 개선의 여지가 있다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997), “내진설계기준연구(II)”.
2. 건설교통부, 한국도로교통협회(1999), “도로교표준시방서”.
3. 대한건축학회(2000), “건축물 하중기준 및 해설”
4. 김동수, 추연욱(2001), “공진주 시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성”, 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제5호.
5. 건설교통부(1998), “표면파기법을 이용한 사질토 지반 개량효과 평가시스템 개발”.
6. Idriss, I. M. and Sun, J. I.(1992), “SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits”, User's Guide, University of California, Davis, pp.13.
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.
8. <http://pecr.berkeley.edu>

(접수일자 2003. 4. 23, 심사완료일 2003. 10. 16)