

기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 지진응답에 관한 연구

Study on Seismic Response of Wall-Slab Apartment Building Structure Considering the Stiffnesses of a Foundation-Soil System

김지원*
Kim, Ji-Won

김용석**
Kim, Yong-Seok

ABSTRACT

Seismic analyses of structures can't be performed without considering the effect of soil-structure interaction and seismic responses of a structure taking into account the stiffnesses of a foundation-soil system show a significant difference from those with a rigid base. However, current seismic analyses of apartment building structures were carried out assuming a rigid base and ignoring the characteristics of a foundation and the properties of the underlying soil.

In this study, seismic analyses of apartment buildings of a particular wall-slab structural type were carried out comparing seismic response spectra of a flexible base with those of a rigid base and UBC-97. Wall-slab type low-rise or mid-height apartment buildings built on the deep soil layer showed a rigid body motion with the reduced seismic responses due to the base isolation effect, indicating that it is too safe but uneconomical to utilize the design spectra of UBC-97 for the seismic analyses of a wall-slab type apartment buildings due to the too conservative design.

1. 서 론

최근 건설되는 대부분의 아파트는 벽과 슬래브로 구성된 벽식구조로 되어 있다. 벽식구조 아파트의 평면은 단변 방향의 길이에 비해 장변 방향의 길이가 큰 장방향 형식을 가지고 있으며, 구조체는 전단벽과 슬래브만으로 구성되고, 전단벽이 장변 방향보다는 단변 방향 위주로 배치되어 횡력에 대한 아파트 전체 강성이 장변 방향보다 단변 방향이 큰 독특한 구조형식을 가지고 있다.

이러한 구조형식의 아파트 지진해석을 대부분 기초지반의 특성을 무시하고 암반 위에 건설된 것으로 가정하고 수행하거나, UBC 등의 내진설계 기준에서 제시하는 등가정적해석법이나 동적해석법을 이용하고 있다.

본 연구에 일반적인 벽식구조 아파트를 저층, 중층, 고층형으로 분류하여 해석하였으며, 기초지반의 특성은 암반지반과 UBC-97에서 제시하는 S_E 지반에 해당하는 연약지반을 고려하였으며, 기초지

* 목포대학교 건축공학과 석사과정, 학생회원

** 목포대학교 건축공학과 부교수, 정회원

반강성에 영향을 주는 기초지반깊이를 변수로 하여 아파트의 고유주기와 지진응답스펙트럼을 분석하고, UBC-97의 설계응답스펙트럼과 비교 분석하였다.¹⁾

2. 해석 모델링

우리 나라의 벽식구조 아파트 평면은 세대간의 분리와 한 세대내의 실 구분을 위해 주로 단변 방향으로 전단벽을 배치하여 단변 방향에 비해 장변 방향이 매우 구조적으로 취약하다. 이러한 평면형식을 갖고 있는 벽식구조 아파트 중 장변 방향 강성이 상대적으로 매우 작은 그림 1에 나타난 것과 같은 평면을 갖는 아파트를 해석 모델로 설정하였다.

해석 모델은 12.1m x 29.2m의 2 세대를 코어로 연결한 평면형태를 갖고, 지하1층, 지상25층까지 건물로 저층, 중층, 고층형으로 분류하였으며, 지상15층까지의 층고는 2.6m이고, 16층이상의 층고는 2.8m로 가정하였다.

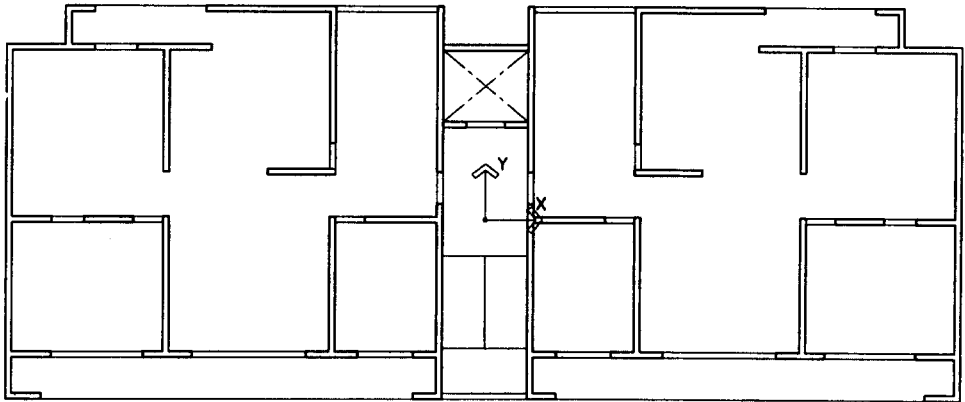


그림 1. 해석 모델 평면

기초지반은 지반이 균질한 연약지반으로 N치가 대략 10정도에 해당하는 전단파속도(C_s) 130m/sec인 지반을 고려하였으며, 지반의 단위중량은 $1.8t/m^3$, 감쇠비(D)와 포아송(ν)비는 0.05, 0.3으로 가정하였다. 그리고 기초지반깊이(H)는 10m와 30m를 고려하였고, 기초묻힘깊이(E)는 4.0m, 기초반경(R)은 10.6m로 가정하였다.

연약지반 위에 세워진 아파트 모델링은 기초지반의 강성을 기초저면에 등가강성 스프링으로 입력하여 지진해석을 수행할 수 있는 부구조물 해석법을 사용하였고, 부구조물 해석법을 지진해석을 할 경우에는 구조물-지반 상호작용의 영향을 고려하기 위해서 기초저면에서의 입력지진을 구해야 한다.²⁾

기초지반강성은 유한한 지반 위에 묻혀 있는 원형기초에 대한 등가정적 강성식을 이용하여 구하였으며, 아파트 기초저면의 입력지진은 지반 특성의 불확실성으로 어렵기 때문에 암반에서 지진기록을 시간영역에서 주파수영역으로 푸리에 변환한 후, 지표면의 지진기록을 구하기 위한 증폭계수를 곱하고, 다시 지표면에서 구한 지진기록을 기초 저면의 지진기록을 구하기 위해 Kim(1984)이

제한한 변환식을 곱하여 기초저면 입력지진을 구한 후 역푸리에 변환하여 시간영역에서 입력지진을 구하였다.³⁾

유한요소해석 프로그램인 SAP2000으로 연약지반 위의 아파트를 모델링 한 후 부구조물 해석법으로 해석하기 위해 기초저면에 기초지반강성을 입력하였다.^{4,5,6)} 등가정적강성계수는 스프링을 이용하여 입력하였으며, 스프링의 적절한 모델링 방법을 찾기 위해 25층 벽식구조 아파트를 표 1에 나타난 것처럼 5가지 지반조건을 고려하여 해석하고 고유주기를 비교하였다.⁷⁾

해석지반조건은 고정지반, 수평방향 장·단변 지반강성을 각각 고려한 경우, 수직방향 지반강성을 고려한 경우, 장·단변 수평과 수직방향 지반강성을 모두 고려한 경우로 나머지 자유도는 구속하였다.

표 1. 기초지반강성을 고려하기 위한 고유주기 비교

Type	장변 방향 주기 (sec)	단변 방향 주기 (sec)
고정지반 조건	1.45	1.16
수평 장변방향 지반강성만 고려	1.47	1.16
수평 단변방향 지반강성만 고려	1.45	1.18
수직 방향 지반강성만 고려	1.81	2.43
수평 장·단변 및 수직방향 지반강성 고려	1.86	2.46

고정지반 조건 해석 모델의 경우 장변 방향의 고유주기가 1.45sec로 전대한 등(1999)에서 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-BDS를 이용해 구한 고유주기 1.48sec보다 0.03sec 작게 나타났는데, 그 차이는 바닥판을 면내 무한 강성이 아닌 실제 유한요소 모델 강성으로 고려했기 때문으로 판단되었다.⁸⁾

장·단변 수평 지반강성만을 고려한 경우 기초지반강성의 영향으로 고유주기가 증가함을 알 수 있고, 수직 지반강성만을 고려한 경우는 기초의 Rocking Motion으로 인해 고유주기가 증가하였다. 그리고 수평 장·단변 및 수직방향 지반강성을 모두 고려한 경우는 수직강성만을 고려한 경우 보다 더 컸다. 유한요소해석 프로그램을 이용한 아파트의 3차원 지진해석시 부구조물 해석법에서 수평 및 수직 기초지반강성은 기초저면에 균등하게 입력하는 것이 타당한 것으로 나타났다.

3. 고유주기 변화

기초지반강성이 벽식구조 아파트의 고유주기에 미치는 영향을 알아보기 위해서 3차원 지진해석을 수행하고, UBC-97에서 제시하는 주기와 비교하였다.

기초지반강성이 연약지반의 기초지반깊이(H)에 따라 다르므로 기초지반깊이에 따른 고유주기 변화도 함께 비교하기 위해 기초지반깊이(H)가 10m인 경우와 30m인 경우를 비교해 보았다. 연약지반 위에 세워진 아파트의 기초지반강성은 유한한 지반깊이 위에 묻혀 있는(E=4m) 원형기초로 가정하여 등가정적 강성식에 의해 구하였으며, 그 결과는 표 2에 나타나 있다.

기초지반 강성에 따른 아파트의 고유주기의 변화를 비교하기 위해 5층, 10층, 15층, 20층, 25층 아파트에 대해 고유주기 해석을 실시하였다.

고정지반은 암반지반이며, 수평지반강성만을 고려한 경우와 수평·수직지반강성을 모두 고려한

경우는 기초지반깊이가 10m와 30m인 연약지반으로 SAP2000에 의한 동적해석으로 고유주기를 구하였다. 그리고 UBC Wall Type 고유주기는 콘크리트 및 조적 전단벽구조에 대해 UBC-97에서 제시한 식으로 구하였다.

표 2. 동가정적강성식에 의한 기초지반강성

지 반 강 성 (t/m)	기 초 지 반 깊 이 (m)	
	10	30
수 평 방 향	4.422E+05	2.647E+05
수 직 방 향	7.753E+05	3.562E+05

그림 2, 3에 나타난 것처럼, 기초지반강성을 고려한 연약지반 위의 아파트 고유주기가 장변 방향과 단변 방향 모두 암반 위의 아파트와 차이를 보였는데, 기초지반의 수평방향 강성만을 고려한 경우는 암반 위의 아파트 고유주기와 유사하나, 기초지반의 수평 및 수직강성을 모두 고려한 경우의 아파트 고유주기는 고정지반(Rigid Base)의 경우와 큰 차이를 보이고, 고층으로 갈수록 고유주기의 차이가 심하게 나타났다. 기초지반깊이(H)의 차이는 기초지반강성의 차이로 나타나기 때문에 기초지반이 깊은 경우 기초지반강성이 작아져 아파트의 고유주기가 더 크게 나타났다.

수평방향 지반강성을 고려한 고유주기가 암반 위의 아파트와 거의 비슷한 고유주기를 보이는 것은 아파트의 횡방향 강성이 기초지반 수평강성에 비해 상대적으로 매우 작기 때문이다.

기초지반의 수평 및 수직 지반강성을 모두 고려한 경우 암반의 경우보다 고유주기가 훨씬 커지는 것으로 보아, 아파트의 동적해석시 수평 및 수직지반강성을 모두 고려해야 할 것으로 판단되었으며, 장변 방향의 고유주기가 단변 방향보다 작게 나타나는 것은 건물의 장변 방향 강성이 단변 방향 강성보다 크기 때문이다.

UBC-97에서 제시한 아파트의 고유주기 제안식은 기초지반이 고정된 것으로 가정하고 있기 때문에 유한요소해석한 모델중 암반 위에 세워진 아파트의 고유주기와 유사하지만, 저층일 때는 UBC의 고유주기가 크고, 고층일 때는 UBC의 고유주기가 작은 것은 UBC-97 약산식이 우리나라 벽식구조 아파트의 구조적 특징을 정확하게 반영하지 못하고 있음을 보여주고 있다.

고유주기에 대한 연구 결과, 기초지반의 수평 및 수직 강성이 모두 아파트-지반 체계의 고유주기에 큰 영향을 미치므로 아파트 지진해석시 기초지반 수평 및 수직 강성을 모두 고려해야 할 것으로 판단되었다.

4. 응답스펙트럼 비교

벽식구조 아파트의 최대가속도를 시간영역에서 SAP2000을 이용한 유한요소 해석법으로 구하여 작성한 응답스펙트럼을 단자유도계의 응답스펙트럼 및 UBC-97 설계응답스펙트럼을 비교 검토하였는데, 입력지진은 1952년 발생한 Taft지진 E-W성분 기록을 사용하였다. Taft지진 E-W성분은 고유주기가 0.44sec이고, 연약지반에 의한 증폭효과를 고려했을 경우 지반깊이가 10m이면 입력지진의 고유주기는 0.33sec, 지반깊이가 30m인 경우는 0.82sec인 것으로 나타났다.

그림 4, 5에는 기초지반깊이가 10m와 30m인 연약지반 위에 세워진 구조물의 단자유도계

(SDOFS)와 아파트 유한요소 모델의 응답스펙트럼을 나타내고 있다.⁹⁾ 연약지반을 고려한 응답스펙트럼에서 고유주기가 고정지지된 단자유도계 고유주기에서 연약지반의 고유주기로 바뀐 것을 쉽게 알 수 있고, 연약지반을 고려한 단자유도계와 유한요소(F.E.M) 모델의 응답스펙트럼 최대가속도가 지반의 고유주기에서 공진현상으로 증폭되었는데, 이러한 현상은 장변 방향이나 단변 방향 모두 매우 유사하게 나타났다. 그런데 기초지반강성을 고려한 경우 벽식구조 아파트의 유한요소 모델의 응답스펙트럼이 단자유도계 응답스펙트럼과는 상당히 다른 거동을 보이고 있다. 단자유도계 응답스펙트럼에서 최대가속도가 지반깊이 10m인 경우 고정지반 단자유도계 최대가속도의 8배 정도, 30m인 경우는 3배정도 증폭되었는데, 유한요소 모델의 최대가속도는 기초지반깊이 10m의 경우 1.2배 정도로 약간 증폭되었으나 다른 주기에서는 상당히 감소를 보였으며, 기초지반깊이 30m의 경우는 최대가속도비가 0.6으로 크게 감소하고 저주기영역에서는 전반적으로 50%정도 감소를 보였다. 이러한 거동은 벽식구조 아파트 건물이 고층일 때는 골조형식 구조물과 유사하게 휨 거동을 보이지만 중·저층일 때는 벽식구조물의 강성이 크기 때문에 거의 강체거동을 보여 지반깊이가 깊을 경우 지진응답이 크게 감소하는 것으로 판단되었다.

그림 6, 7에서는 기초지반깊이 10m와 30m인 연약지반 위에 세워진 구조물의 단자유도계와 유한요소 모델의 장·단변 방향 응답스펙트럼을 UBC-97 설계응답스펙트럼과 비교하였다. 기초지반깊이가 10m인 경우, 단자유도계 모델의 응답스펙트럼은 고주기영역에서는 유한요소 모델과 거의 유사한 응답을 보이지만 고유주기를 포함하는 저주기 영역에서는 UBC-97 설계응답스펙트럼 보다 크게 나타났으나, 유한요소 모델의 응답스펙트럼은 고유주기 영역을 제외한 거의 모든 주기에서 UBC-97 설계응답스펙트럼의 50%정도의 응답을 보이고 있다. 기초지반깊이가 30m인 경우 단자유도계 모델의 응답은 고유주기 영역에서 3배정도의 증폭을 보이는 것을 제외하고는 UBC-97 설계응답스펙트럼과 유사한 거동을 보였는데, 유한요소 모델의 응답은 UBC-97 설계응답스펙트럼의 30%이하 수준으로 나타났다. 따라서 벽식구조 아파트 내진설계시 UBC-97의 기준을 적용하는 것은 너무 보수적이어서 안전성 측면에서는 유익하지만 경제적인 측면에서는 부담이 될 것으로 판단되었다.

5. 결 론

연약지반의 기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 지진응답에 대한 연구를 증진에 해당하는 1952년 Taft지진 E-W기록으로 SAP2000 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 시간영역에서 수행하고, 단자유도계 지진응답 및 UBC-97 설계응답스펙트럼과 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

기초지반강성은 등가정적 강성을 이용하고, 일반적으로 고려하고 있는 수평방향 강성만을 고려하는 것보다는 수평 및 수직방향 강성을 모두 기초 유한요소에 균등하게 입력하는 것이 보다 정확한 아파트 구조물의 지진거동을 파악할 수 있는 것으로 판단되었다.

벽식구조 아파트의 지진거동이 고층일 때는 골조형식 구조물과 유사한 거동을 보이지만 중·저층 아파트는 벽식구조의 큰 강성 때문에 구조물이 거의 강체거동을 보여 기초지반깊이가 깊을 경우 지진응답 스펙트럼이 크게 감소하는 것으로 판단되었다.

깊은 연약지반위에 세워진 벽식구조 아파트의 내진거동이 강체거동으로 상당히 감소하여 내진

설계시 UBC-97 설계응답스펙트럼을 적용하는 것은 과다설계로 인해 안전성을 양호하지만 경제성은 크게 떨어지는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. International Conference of Building Officials(1997), "Uniform Building Code," California, USA.
2. 김용석(1988), "반지하구조물 내진설계를 위한 지반 거동," 전산구조공학회 논문집, 제1권 2호, pp.91-100.
3. Kim Yong-Seok(1984), "EFFECT OF EMBEDMENT ON SEISMIC MOTION OF BUILDINGS," M.S.Thesis, The University of Texas at Austin.
4. CSI(1997), "SAP2000 ANALYSIS REFERENCE," Vol.1,2.
5. 한국지진공학회(1999), "구조물의 지진해석," 기술강습회 교재.
6. 김용석(1997), "구조물 내진설계를 위한 기초지반체계 동특성에 관한 연구," 한국지진공학회 논문집, 제1권 3호, pp.1-10.
7. Raw W. Clough, Joseph Penzien(1993), "Dynamics of Structures," McGraw-Hill, Inc.
8. 강호근, 박성수, 조한욱, 전대한(1999), "동적 탄소성 지진응답해석에 의한 고층벽식 아파트의 내진성능 검토," 한국지진공학회 논문집, 제3권 1호, pp.1-8.
9. 김용석(2000), "UBC-97에 분류된 깊은 지반위에 세워진 구조물의 지진응답 스펙트럼에 관한 연구," 한국지진공학회 논문집, 제4권 1호, pp.63-75.

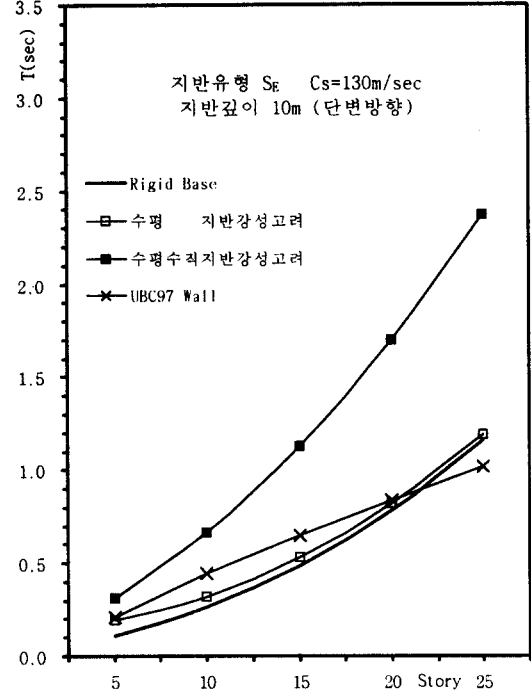
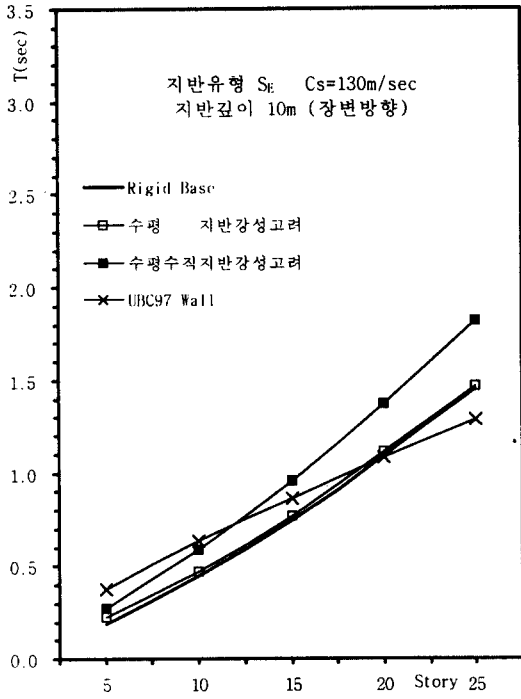


그림 2. 깊이 10m 연약지반 위에 세워진 벽식구조 아파트의 고유주기

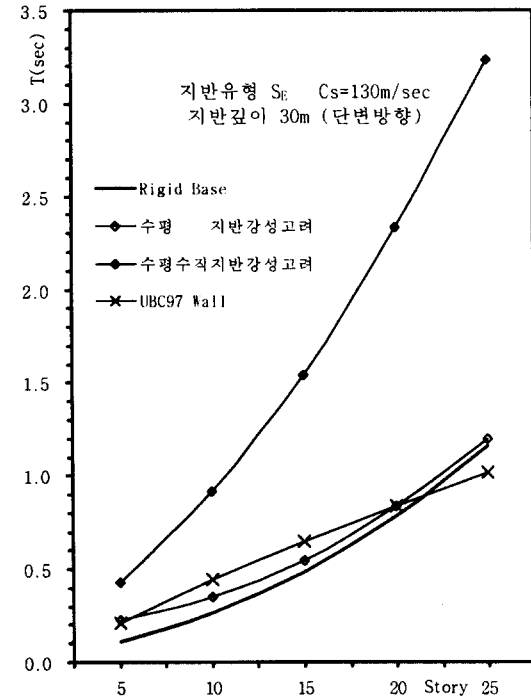
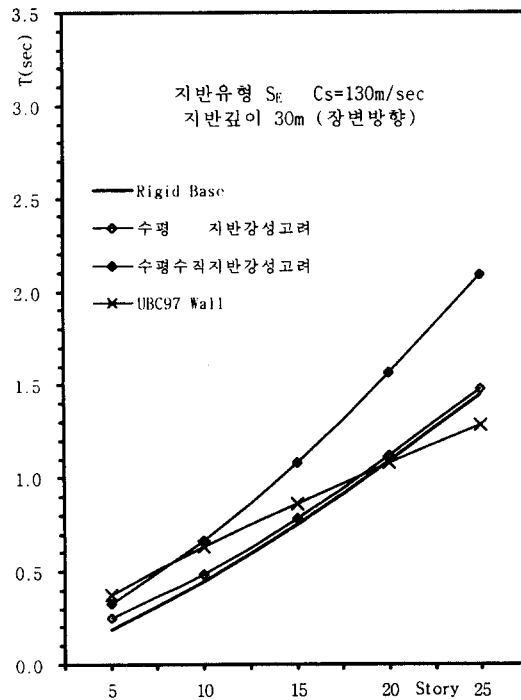


그림 3. 깊이 30m 연약지반 위에 세워진 벽식구조 아파트의 고유주기

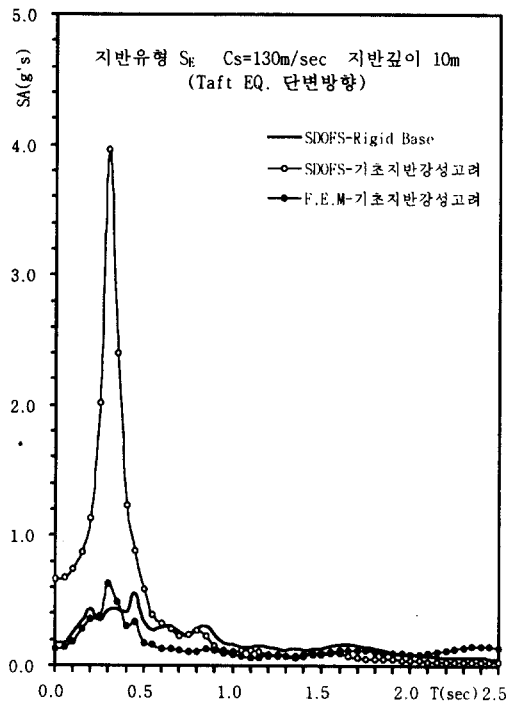
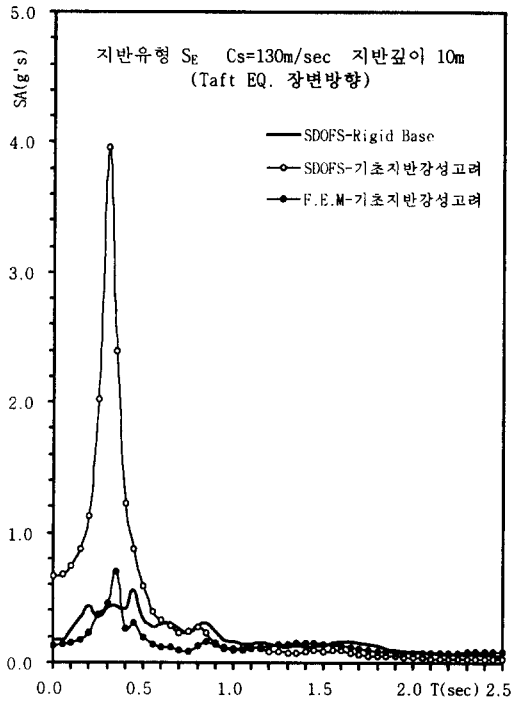


그림 4. 깊이 10m 연약지반 위에 세워진 구조물 응답스펙트럼

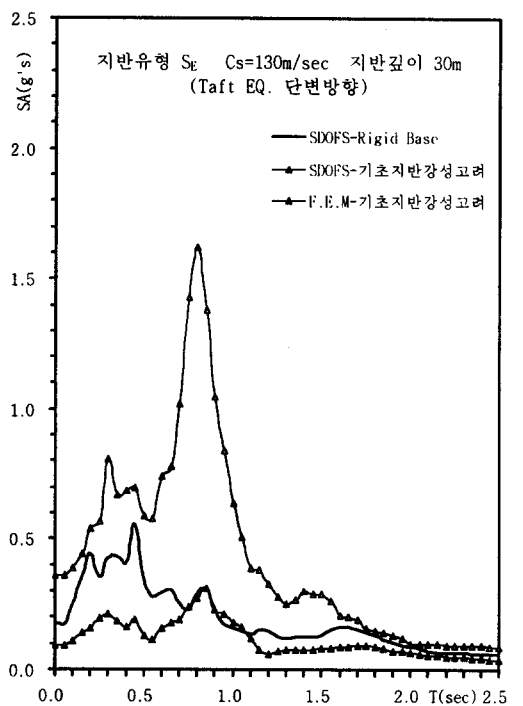
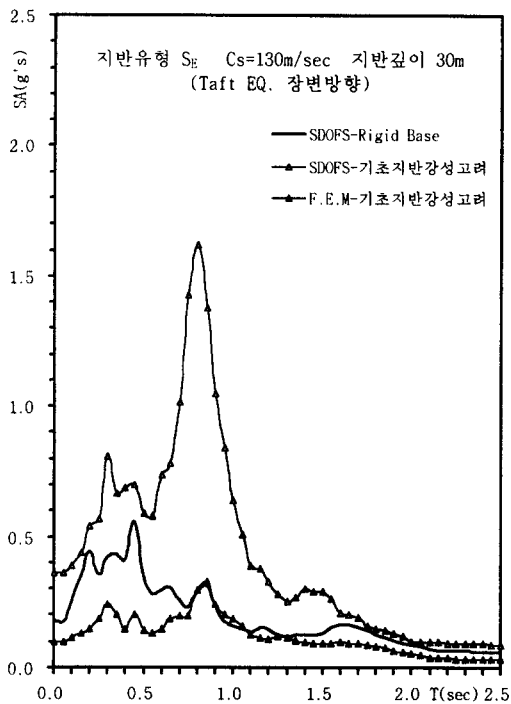


그림 5. 깊이 30m 연약지반 위에 세워진 구조물 응답스펙트럼

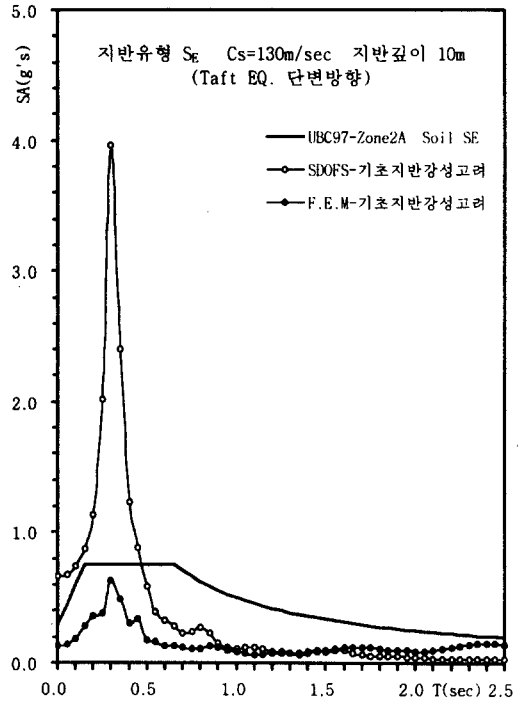
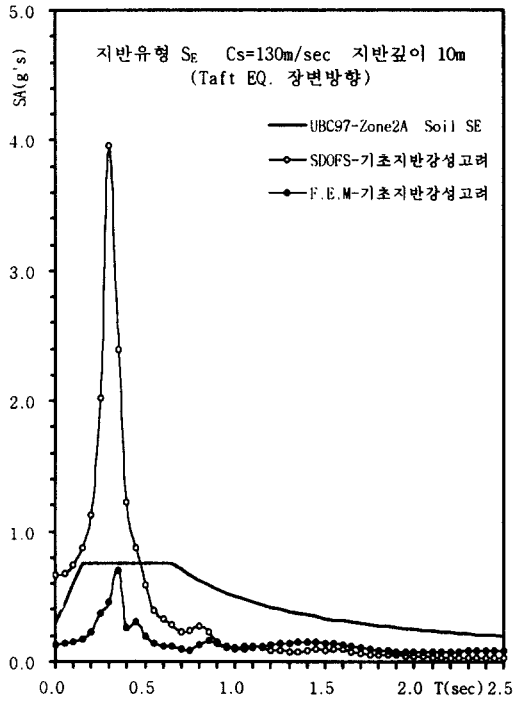


그림 6. UBC-97 설계응답스펙트럼과 깊이 10m 연약지반 위의 A.P.T 응답스펙트럼

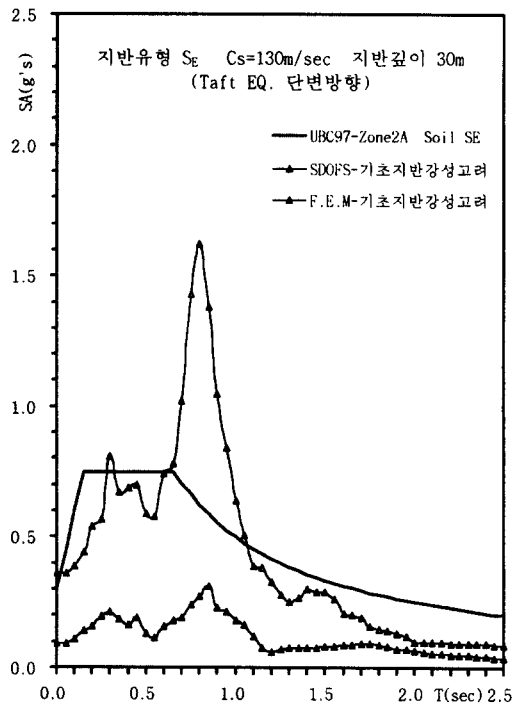
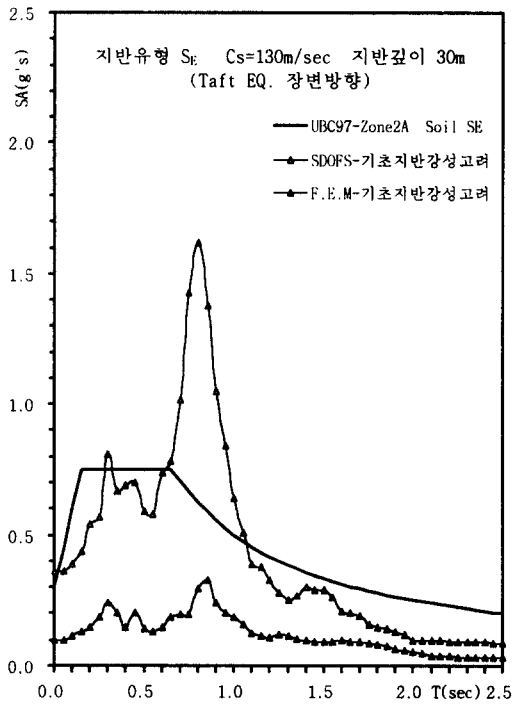


그림 7. UBC-97 설계응답스펙트럼과 깊이 30m 연약지반 위의 A.P.T 응답스펙트럼