

기초지반강성을 고려한 철골 건축구조물의 비선형 지진해석

Nonlinear Seismic Analysis of Steel Buildings Considering the Stiffnesses of the Foundation-Soil System

오영희¹⁾

김용석^{2)†}

Oh, Yeong Hui

Kim, Yong Seok

요약 : 구조물의 지진응답은 기초지반조건의 영향을 받는다. 이 연구에서는 고정지반과 연약지반을 고려한 3, 5, 7층 철골 건축구조물의 밀면전단력을 산정하기 위해 선형 시간이력지진해석과 비선형 Pushover 정적지진해석을 수행하였다. 등가정적강성식으로 구한 기초지반강성은 SAP2000의 Link 요소 중 Damper 요소를 사용하여 입력하였다. 범용구조해석 프로그램 SAP2000에 의한 시간이력으로 구한 철골건축구조물의 밀면전단력을 국내내진설계기준, UBC-97 설계응답스펙트럼, Pushover 정적 비선형해석으로 구한 밀면전단력과 비교하였다. 중력하중과 풍하중으로 설계된 철골 건축구조물은 0.11g의 중진에 대해 탄성응답을 보였고, 탄성 연약지반에서 구조물-지반의 상호작용과 지반증폭에 의해 구조물의 변위와 밀면전단력이 증가되었다. 따라서, 중약진 지역에서의 건축구조물은 연약지반의 특성을 고려하여 탄성지진해석을 수행하는 것이 더 합리적이다.

ABSTRACT : The seismic responses of a building are affected by the base soil conditions. In this study, linear time-history seismic analysis and nonlinear pushover static seismic analysis were performed to estimate the base shear forces of 3-, 5-, and 7-story steel buildings, considering the rigid and soft soil conditions. Foundation soil stiffness, based on the equivalent static stiffness formula, is used for the damper, one of the Link elements in SAP 2000. The base shear forces of the steel buildings, estimated through time-history analysis using the general-purpose structural-analysis program of SAP 2000, were compared with those calculated using the domestic seismic design code, the UBC-97 design response spectrum, and pushover static nonlinear analysis. The steel buildings designed for gravity and wind loads showed elastic responses with a moderate earthquake of 0.11 g, while the elastic soft-soil layer increased the displacement and the base shear force of the buildings due to soil-structure interaction and soil amplification. Therefore, considering the characteristics of the soft-soil layer, it is more reasonable to perform an elastic seismic analysis of a building's structure during weak or moderate earthquakes.

핵심용어 : 비선형 pushover 정적지진해석, 기초지반강성, 시간이력해석, 연약지반, 철골건축구조물

KEYWORDS : nonlinear pushover static seismic analysis, foundation soil stiffness, time-history analysis, soft soil layer, steel building

1. 서 론

최근 건축 구조물의 내진설계 연구동향을 살펴보면 성능에 기초한 내진설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 지진 발생 시 지진하중이 구조물에 큰 변형을 일으키는 원인으로

작용하여 구조물은 비탄성 거동을 하게 되고 이로 인해 막대한 경제적 손실을 가져온다는 사실을 Loma Prieta(1989), Northridge(1994), Gobe(1995)의 사례를 통해 알 수 있었다. 이러한 피해사례를 바탕으로 1995년 SEAOC(Structural Engineers Association of California) Vision 2000 보고서, 1996

1) 학생회원, 목포대학교 건축공학과, 공학석사(maxtrics@naver.com)

2) 교신저자, 정회원, 목포대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Tel. 061-450-2454, Fax. 061-450-6454, E-mail : yskim@mokpo.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

년 ATC-40, 1997년 FEMA-273 보고서 등 성능에 기초한 내진설계에 관한 연구결과를 바탕으로 작성되었고, 우리나라도 1997년 한국지진공학회의 내진설계기준연구를 통해 발표되었다.

성능목표를 만족시키기 위해 구조물의 보유 능력을 평가해야 하는데 건축구조물의 비선형 지진응답을 산정하고 내진성능을 평가하는데 있어 가장 많이 적용되고 있는 해석방법이 비선형 정적해석법이다. 비선형 정적해석법으로 가장 간단하면서도 실용적인 해석방법이 Pushover 해석이다.

이 연구에서는 3, 5, 7층의 철골건축구조물을 3차원으로 모델링하여 저진해석을 수행하고, 지반특성에 따른 구조물의 주기변화와 내진설계기준에서 제시한 반응수정계수의 적정성을 알아보았다. 또, 국내내진설계기준, UBC-97 설계응답스펙트럼, 시간이력해석으로 철골건축구조물의 전단력을 구하여 비교 분석하였다. 시간이력해석은 우리나라의 지진구역을 고려하여 1994년에 발생한 중진인 Northridge(San Marino) E-W 지진기록(0.116g)을 최대지반가속도가 0.11g가 되도록 조정하여 사용하였다. 사용된 지진데이터는 비선형 연약지반을 고려한 약진에 의한 비탄성 응답스펙트럼(김용석, 2003)에서 참고하였다.

마지막으로 탄성 시간이력해석과 비선형 정적 Pushover 해석 결과를 비교하여 철골건축구조물의 내진성능에 대해 분석하였다.

2. 본 론

2.1 지진해석모델

지진해석 모델의 평면은 응력집중이나 비틀림을 방지하기 위해 그림 1(a)와 같이 간단하고 대칭으로 모든 층을 동일하게 가정하였고, 건물층수는 주기를 고려하여 그림 1(b)와 같이 3, 5, 7층으로 가정하여 모델링과 지진해석을 3차원으로 수행하였다. 모델에 작용하는 고정하중과 적재하중은 표 1에 나타난 것과 같고, 풍하중은 국내기준 KS2000, 지진하중은 UBC-97에서 제안한 식으로 적용하였다. 지반계수 C_a , C_v 값은 1997년 건설교통부 내진설계기준연구보고서에서 평균재현주기 500년 지진을 기준으로 적용하여 산정한 후 X방향과 Y방향으로 각 절점에 작용시켜 정적해석을 수행하였다.

표 1. 적용하중(단위: kgf/m²)

층	고정하중	적재하중
기본층	510	200
Roof	380	200

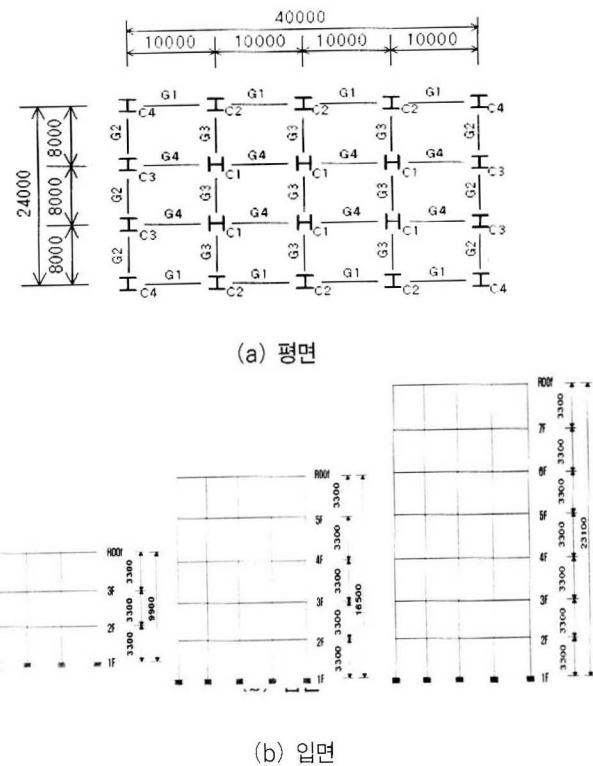


그림 1. 지진해석모델

2.2 구조물 고유주기

철골구조물의 기본주기는 ASCE7-02에서 제안한 아래의 식을 이용하여 구하였는데, C_f 는 철골구조의 경우 0.068이고 h_n 은 구조물의 높이를 나타낸다.

$$T = C_f (h_n)^{0.8} \quad (1)$$

모델 구조물 3, 5, 7층 건축물에 대한 고유주기를 제안식(1)과 SAP2000 고유치 해석으로 구하여 그 결과를 표 2에 비교하였다. 비교 결과에 의하면 단순 철골조를 고려한 SAP2000에 의한 고유주기가 제안식에 의한 것보다 평균 1.7배 크게 나타난 것을 알 수 있는데, 이것은 구조물의 전반적인 강성을 고려한 제안식과 단순히 보와 기둥의 골조만 고려한 SAP2000의 차이로 판단되어 보다 정확한 구조물의 고유주기를 구하기 위해 SAP2000에서도 슬래브의 강성을 고려하였다.

슬래브의 강성 고려는 그림 2에 나타난 것 같이 콘크리트 슬래브의 유효폭에 해당하는 콘크리트를 강재로 변환한 단면의 단면2차모멘트로 등기인 H-형강단면을 가정하였다.(한국강구조학회, 2004)

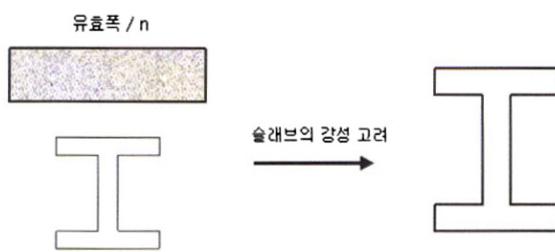


그림 2. 합성부재의 단면 변환

변환한 등가단면 부재를 고려하여 철골건물의 주기를 산정한 결과 표 3에 나타난 것처럼 등가단면 부재를 고려한 구조물의 주기가 철골보만 고려한 구조물의 주기보다 제안식(1)에 의한 주기와 근사하게 나타났다.

표 2. 고정지반의 경우 고유주기(sec) 비교

구 분	3층	5층	7층
ASCE7-02	0.43	0.64	0.84
등가 단면골조	X방향	0.65	0.79
	Y방향	0.57	0.74
단순 철골조	X방향	0.72	1.1
	Y방향	0.62	0.97

2.3 기초지반강성

지진 시 구조물의 거동이 구조물-지반 상호작용으로 기초지반의 특성에 따라 크게 달라지는 것이 Mexico City, Armenia, Kobe에서 나타났다. 구조물-지반 상호작용 (Structure-Soil Interaction : SSI)은 구조물과 지반이 서로 영향을 미치는 현상을 말하며, 지반이 지진파와 구조물 거동에 영향을 미쳐 구조물의 관성력을 유발하고, 그 관성력이 다시 지반에 전달되어 지반의 특성에 영향을 미치는 지반과 구조물 사이에 지속되는 작용과 반작용 현상이다.(김용석, 2005) '연약지반의 기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 지진응답'(김지원, 2001)을 참고하여 연약지반의 구조물-지반 상호작용 영향을 고려할 때 기초지반의 수평강성과 수직강성을 기초저면의 모든 절점에 균등하게 입력 하였다. 등가정적강성식으로 구한 수직방향 강성과 수평방향 강성은 SAP2000의 Link 요소 중 Damper 요소를 사용하여 기초저면 절점에 균등하게 분포시켰다. 연약지반의 강성은 유한한 깊이의 지반 위에 둔화 있는 원형기초에 대한 등가정적강성은 식(2), (3)을 이용하여 구하였다.

$$K_h = \frac{8GR}{2-\nu} \cdot 1 + \frac{2}{3} \frac{E}{R} \quad 1 + \frac{5}{4} \frac{E}{H} \quad 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{H} \quad (2)$$

$$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \cdot 1 + 1.28 \frac{R}{H} \quad 1 + 0.47 \frac{E}{R}$$

$$1 + (0.85 - 0.28 \frac{E}{R}) \frac{E/H}{1 - E/H} \quad (3)$$

R : 등기원형기초 반경

E : 기초문힘깊이

H : 기초지반깊이

G : 지반의 전단탄성계수

ν : 지반의 포이손비

지반깊이가 30m이고 지반의 전단파 전달속도가 180m/sec인 SD 지반에 놓인 이 연구에서 고려한 28m×44m($R=20m$) 기초에 대한 기초지반강성이 표 3에 나타나 있다.

표 3. 연약지반의 기초지반강성

지반특성	방향	지반강성 (t/m)
S_D 지반 ($C_S=180\text{m/sec}$)	수평방향	9.877×10^5
	수직방향	1.547×10^6

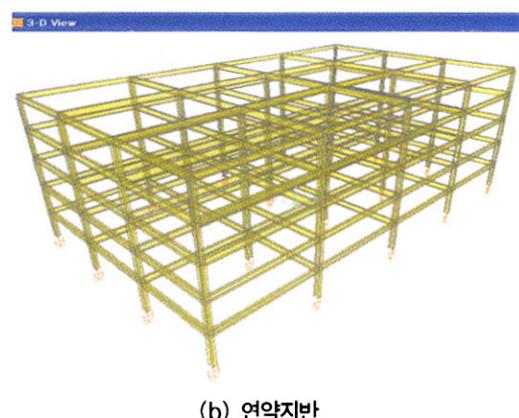
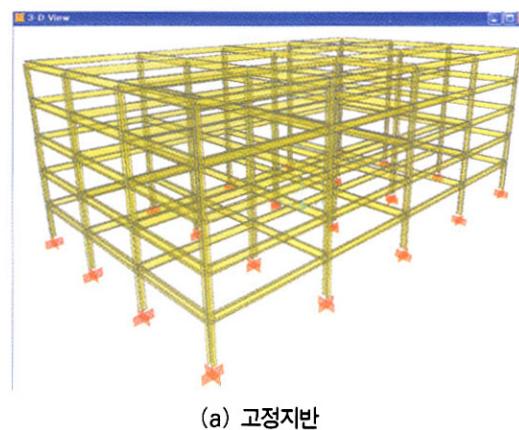


그림 3. 구조물-지반 모델링

그림 3과 같이 고정(Rigid)지반과 연약(Link-Damper)지반으로 SAP2000에서 구조물-지반해석 모델링을 수행하였다. 기초저면의 각 절점에 수직방향과 수평방향의 기초지반 강성 값을 균등하게 분포시켜 구한 구조물의 고유주기가 표 4에 나타나 있는데, SD지반의 고유주기가 SB지반인 경우보다 3층인 경우에는 1.5배, 5층과 7층의 경우에는 1.3배정도 길어짐을 알 수 있다. 이것은 기초지반의 영향으로 구조물-지반 체계의 강성이 약해졌기 때문이다.

표 4. 지반특성을 고려한 건물 고유주기 (sec)

건물층수	모드	거동방향	S_B 지반	S_D 지반
3층	1	X	0.65	0.82
	2	Y	0.57	0.76
5층	1	X	0.79	1.09
	2	Y	0.74	1.02
7층	1	X	1.22	1.50
	2	Y	1.16	1.42

2.4 동적지진해석

동적지진해석은 시간이력해석법으로 수행하였고, 시간이력해석 시 입력지진은 중·약진을 고려하여 최대가속도가 0.11g (107.8cm/sec²)가 되도록 1994년 Northridge E-W 지진기록(0.116g)을 조정하여 사용하였다.

그림 4에서의 Average+one SD(standard deviation)은 St. Louis, Seoul, Helena N-S, San Francisco E-W, San Francisco N-S, Parker Field N-S, San Fernando E-W, San Fernando N-S, Northridge E-W, Northridge N-S, Chichi E-W 등 11개 지진기록에 대한 최대지진가속도 0.11g를 고려하여 응답스펙트럼을 구하여 평균하고 거기에 표준편차를 더하여 작성한 응답스펙트럼이다.(김용석, 2003)

평균에 표준편차를 더한 응답스펙트럼(Average+one SD)을 Northridge E-W 지진 응답스펙트럼과 비교하였는데, 3, 5, 7층의 고유주기영역 내에서 SB지반의 경우 1.3배의 차이가 생겨 Northridge E-W지진기록을 증폭시켜 사용하였고, SD지반의 경우는 유한요소법으로 지반의 영향을 고려하여 구한 지표면에서의 지진기록을 사용하였다. 증폭된 지진기록은 그림 5와 같고, . 또 건물의 감쇠비는 0.05로 가정하였는데, 이는 대개 지진해석 시 5% 감쇠비를 이용하기 때문이다.

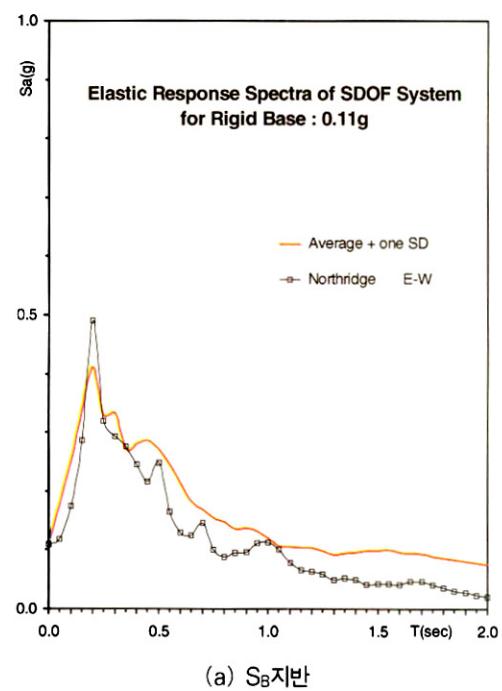
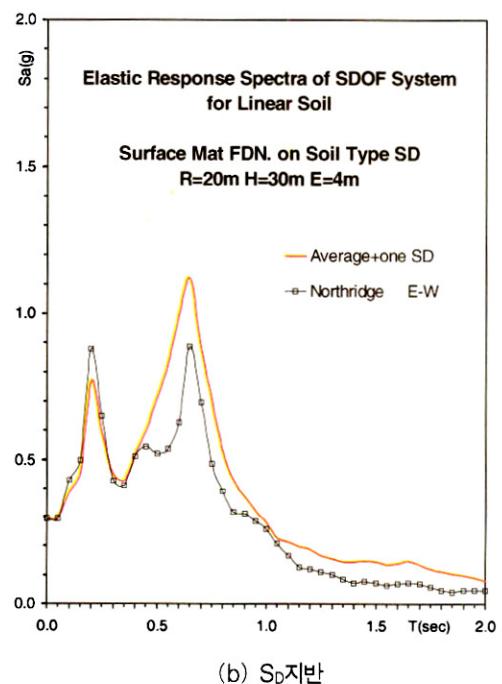
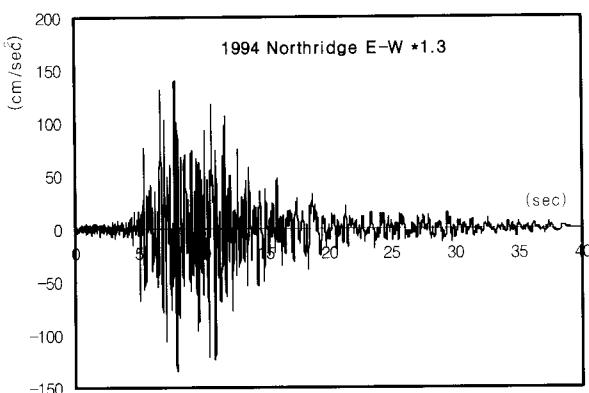
(a) S_B 지반(b) S_D 지반

그림 4. 지반층을 포함한 유한요소해석 스펙트럼(김용석, 2003)

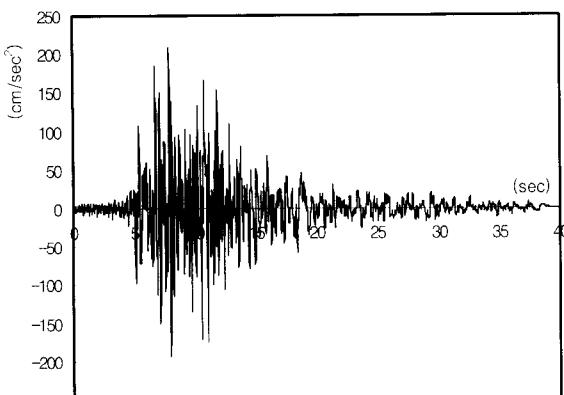
SAP2000 범용구조해석프로그램에 의한 SB지반과 SD지반 위에 놓인 3, 5, 7층 철골건물에 대한 탄성 지진해석과 국내내진설계기준 및 UBC97 설계응답스펙트럼을 수행하여 구한 설계밀면전단력을 표 6과 7에서 비교하였다. 국내내진설계기준에 의한 설계밀면전단력은 지역계수 0.11, 중요도 계수 1.0, 지반계수는 고정지반일 때는 1.0, 연약지반일 때는 1.5,

반응수정계수는 탄성으로 고려하기 때문에 1.0를 적용하여 구하였다. 설계응답스펙트럼에 의한 설계밀면전단력은 UBC-97에 따라 건설교통부에서 제시한 지진계수 Ca, CV를 사용하여 설계응답스펙트럼을 작성한 후 각 건물의 고유주기에 해당하는 응답가속도를 구하고 총 질량의 75%인 등가질량을 곱하여 산정하였다.

시간이력해석은 SAP2000을 사용하여 직접적분법 중 wilson θ Method(θ 는 1.5)로 해석을 수행하였다. 또한 시간이력해석 시 입력지진은 중·약진을 고려하여 고정지반(SB지반)일 때는 Northridge E-W지진기록을 증폭계수 1.3배 고려하고, 연약지반(SD지반)일 때는 지반의 영향을 고려한 증폭된 지진기록을 사용하였다.



(a) 고정지반(SB지반)의 지진기록



(b) 연약지반(SD지반)의 지진기록

그림 5. 입력지진 시간이력기록

표 5. SB지반의 탄성 설계밀면전단력 비교 (tonf)

건물 층수	방향	고유주기 (sec)	국내내진 설계기준	UBC-97 설계응답 스펙트럼	지반총을 포함한 유한요소해석 스펙트럼	시간이력 해석
3층	X	0.65	169	189	208	215
	Y	0.57	181	215	266	239
5층	X	0.79	264	268	288	268
	Y	0.74	273	286	304	302
7층	X	1.22	302	246	289	270
	Y	1.16	310	259	292	285

SB지반에서 3, 5, 7층 건물의 SAP2000에 의한 밀면전단력이 건물의 층수나 X, Y지진방향에 관계없이 국내 내진설계기준이나 UBC-97 설계응답스펙트럼에 의한 설계밀면전단력과 약간의 차이는 있지만 상당히 유사하게 나타났고, 지반총을 포함한 유한요소해석 결과와도 거의 일치하였다.

표 6. SD지반의 탄성 설계밀면전단력 비교 (tonf)

건물 층수	방향	고유주기 (sec)	국내내진 설계기준	UBC-97 설계응답 스펙트럼	지진 응답 스펙트럼	시간이력 해석
3층	X	0.82	226	313	536	254
	Y	0.76	235	338	781	248
5층	X	1.09	338	406	385	367
	Y	1.02	349	433	461	489
7층	X	1.50	408	416	382	393
	Y	1.42	420	442	355	380

SD지반에서는 UBC-97 지반조건이 국내 내진설계기준 지반조건과 분류상 차이가 있어서 결과를 직접 비교하는 것은 타당하지 않지만, 국내 내진설계기준에 의한 설계밀면전단력이 UBC-97 설계응답스펙트럼에 의한 밀면전단력과는 유사하게 나타났는데, 층수가 높을수록 더 유사하게 나타났다. 또, UBC-97과 국내 내진설계기준에 의한 설계밀면전단력을 SAP2000에 의한 시간이력해석 결과와 비교하면 3, 5, 7층의 경우 모두 상당히 유사하게 나타나 부구조물법에 의한 SAP2000 시간이력해석이 유효한 것으로 판단되었다. 그러나, 표 6에서 입력지진에 대한 지반의 증폭을 고려한 시간이력해석과 지반총을 포함한 유한요소해석 결과가 5, 7층은 매우 유사하지만 3층에서는 큰 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, 이는 그림 3(b)을 보면 3층 건물의 주기에 해당하는 0.6~0.8sec 구간에서 가속도가 크게 증폭되어 밀면전단력이 크게 나타났기 때문이다. SAP2000 프로그램에서 연약지반을 포함한 유한요소해석 시 적용한 스프링이 정적 스프링으로 지반의 Damping에 의한 지반의 동적강성 변화에 따른 구조물-지반체계의 주기 변화와 구조물-지반 상호작용 영향을 정확히 고려할 수 없기 때문에 판단되어 지반총을 고려할 수 없는

SAP2000 프로그램의 한계성으로 파악되었다.

그림 6에서는 UBC-97 설계 응답스펙트럼과 SAP2000에 의한 지진 응답스펙트럼을 고정지반(SB지반)인 경우와 연약지반(SD지반)인 경우에 대해 비교하였는데, 고정지반의 경우 3, 5, 7층 모두 설계 응답스펙트럼과 Northridge 0.11g에 1.3 배한 지진 응답스펙트럼의 최대가속도가 0.5sec이하에서 나타나고, 그 외의 모든 주기영역에서 비슷한 경향을 보였다.

기초지반강성을 고려한 정적 스프팅에 증폭된 지진기록을 고려한 3, 5, 7층 모든 층에서 최대가속도가 0.2sec에서 나타나고, SAP2000에 의한 지진 응답스펙트럼 고주기 영역에서 설계 응답스펙트럼보다 작게 나타났다.

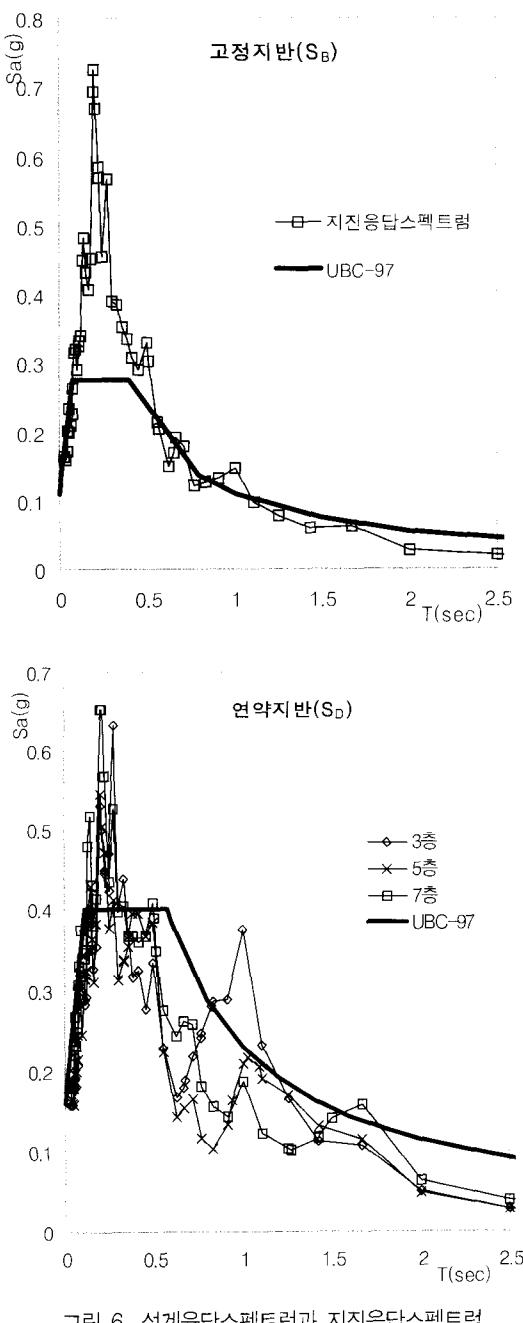


그림 6. 설계응답스펙트럼과 지진응답스펙트럼

2.5 비선형 정적지진해석

비선형 정적지진해석은 단조증가 하중상태에서 구조물 높이에 따른 횡하중을 분포시킴으로써 항복 이후의 동적특성을 고려할 수 있는 간단하고 실용적인 방법이다. 이 연구에서는 비선형 정적해석법인 Pushover해석을 이용하여 구조물의 항복 이후의 거동을 평가하고, ATC-40, FEMA-273 등에서 규정하는 이력거동을 적용한 SAP2000프로그램의 하중-변형관계를 사용하였다.

지반조건에 따른 3, 5, 7층 건물의 성능점 전단력, 시간이력 해석에 의한 밀면전단력, Pushover 비선형 해석에 의한 탄성 한계전단력이 표 8에 나타나 있다. 고정지반(SB지반)의 경우 시간이력해석 밀면전단력이 성능점 전단력과는 근사하고, Pushover 해석 탄성한계전단력보다는 고충일수록 상당히 작게 나타나 탄성한계 내에 있으며, 연약지반(SD지반)의 경우에도 성능점 전단력이 Pushover 해석 탄성한계전단력보다 작고 시간이력해석 밀면전단력이 탄성한계 내에 있어 중약진의 경우 구조물의 지진해석을 탄성적으로 수행하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

표 7. 탄성 밀면전단력 비교 (tonf)

건물 층수	방 향	고정지반(SB)			연약지반(SD)		
		성능점 전단력	시간이력 해석 전단력	Pushover 탄성한계 전단력	성능점 전단력	시간이력 해석 전단력	Pushover 탄성한계 전단력
3층	X	223	215	416	392	254	461
	Y	252	239	543	425	248	565
5층	X	285	268	1,024	495	367	543
	Y	310	302	1,074	530	489	900
7층	X	265	270	715	492	393	483
	Y	277	285	748	519	380	742

구조물의 성능점을 알아보기 위해 유한요소해석 프로그램 SAP2000으로 Pushover 비선형 정적해석을 수행하여, 그림 5에 나타난 것처럼 고정지반(SB지반)일 때와 연약지반(SD지반)일 때의 성능곡선과 탄성 요구스펙트럼을 비교하였다.

성능곡선에서 연약지반의 항복전단력이 고정지반보다 낮게 나타났는데, 이는 기초지반강성의 영향으로 구조물의 전체적인 강성이 저하되었기 때문으로 판단되었다.

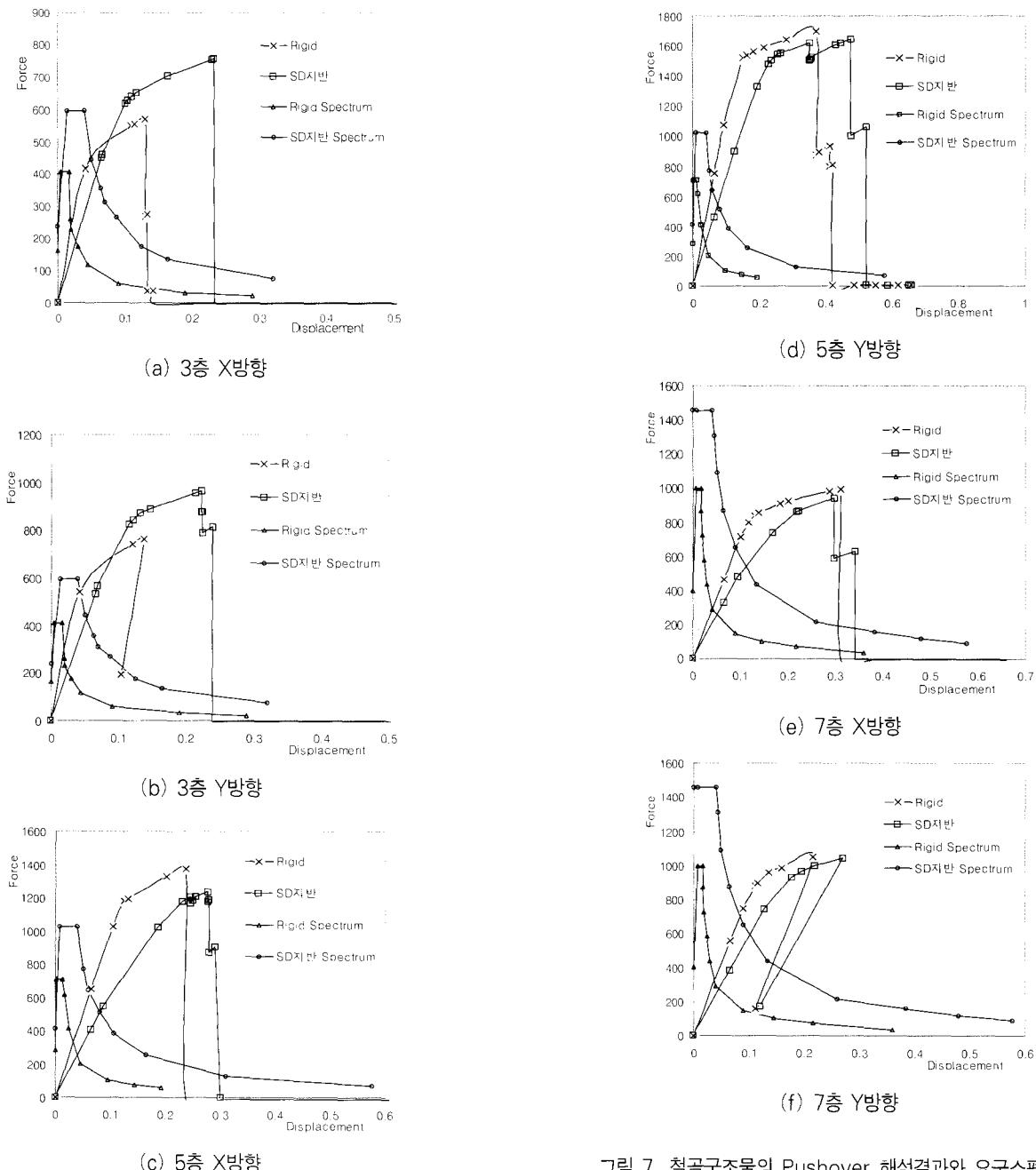


그림 7. 철골구조물의 Pushover 해석결과와 요구스펙트럼

표 7과 그림 7에서 보면 시간이력해석 밑면전단력이 모두 탄성한계 내에 존재하여 비탄성 거동을 고려한 반응수정계수를 무조건 기준에 따라 적용하는 것은 구조물의 성능과 무관하게 지진하중을 과소평가하는 경향이 있는 것으로 판단되어 중약진의 경우 탄성적으로 설계하는 것이 타당하다고 사료되었다.

3. 결 론

이 논문에서는 3, 5, 7층 철골조 건물에 대해 1994년 Northridge San Marino E-W 지진기록(0.116g)의 최대가

속도를 0.11g로 조정하여 기초지반강성을 고려한 탄성 시간이력지진해석과 Pushover 비선형 정적해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

철골구조물의 고유주기의 경우 SAP2000 프로그램에 의한 동적해석 고유주기가 ASCE7-02 제안식에 의한 고유주기보다 크게 나타났는데, 이는 구조물의 철골보 만이 고려되어 구조물의 전체강성이 과소평가되었기 때문인 것으로 나타났다. 따라서 건물의 지진해석 시 바닥 슬래브의 강성을 고려한 합성철골보에 대한 등가강성을 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

또한, 건물고유주기는 연약지반(SD지반)을 고려할 경우 고정지반(SB지반)인 경우보다 3층일 때는 대략 1.3배, 5층은 1.4배, 7층은 1.2배 주기가 길어짐을 알 수 있었다. 이는 기초지반의 영향으로 구조물-지반 체계의 강성이 약해졌기 때문으로 판단되었다.

국내 내진설계기준, UBC-97 설계응답스펙트럼, 시간이력해석에 의한 밀면전단력을 비교해 본 결과, 고정지반의 경우 구조물의 밀면전단력이 건물의 층수나 X, Y방향에 관계없이 약간의 차이는 있지만 상당히 유사하게 나타났고, 연약지반의 경우는 지반층을 포함한 유한요소해석 결과와 SAP2000 프로그램을 사용한 해석결과가 5, 7층은 매우 유사했지만, 3층은 큰 차이를 보였다. 이는 SAP2000 프로그램에서 사용한 정적스프링이 지반의 동적강성 변화에 따른 구조물-지반체계의 주기변화와 구조물-지반 상호작용의 영향을 정확히 고려하지 못하기 때문으로 판단되었다. 따라서, 지반층의 동적강성을 고려한 지진해석이 필요한 것으로 판단되었다.

건물에 대한 시간이력지진해석과 Pushover 비선형 정적해석 결과, 중약진인 지역에서 지진해석에 의한 설계밀면전단력이 중력하중과 풍하중으로 설계한 구조물의 탄성한계밀면전단력보다 작을 때에는 구조물의 등가정적해석 시 최대 반응수정계수(R)를 사용하는 것 보다 반응수정계수를 1로 가정하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다. 그러나 이 연구에서는 단순화시킨 철골부재와 Northridge San Marino E-W 지진기록(0.116g)에 의해서만 해석을 수행했기 때문에 한계성을 가진다고 할 수 있다. 따라서 실제 건물과 다양한 지진의 영향을 고려한 추가적인 연구가 필요하다고 사료되었다.

또, 기초지반이 연약할 경우에는 구조물-지반 체계의 고유주기가 길어져 구조물의 변위가 증가하고 설계밀면전단력이 커지는데, 기초지반의 비선형성을 고려하면 이러한 현상이 더욱 더 두드러질 것으로 판단되므로 기초지반의 비선형성을 고려한 계

속적인 연구가 필요한 것으로 사료되었다.

참 고 문 헌

- 김용석 (2003) 비선형 연약지반을 고려한 약진에 의한 비탄성 응답스펙트럼, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제7권, 제4호.
- 김용석 (2005) 구조물-지반 상호작용과 지진해석, 구미서관.
- 김지원, 김용석 (2001) 연약지반의 기초지반강성을 고려한 벽식구조 아파트의 지진응답, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제5권, 제3호.
- 대한건축학회 (2000) 건설교통부제정 건축물 하중기준 및 해설.
- 한국강구조학회 (2004) 강구조의 설계, 구미서관.
- ATC (1996) Seismic Evaluation and Retrofit of concrete Buildings, ATC-40, Applied Technology Council.
- CSI (2002) SAP2000 Analysis Reference Manual, California, USA.
- FEMA (1997) NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 273, Developed by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency.
- International Conference of Building Official (1997) Uniform Building Code, California.
- SEAOC (1999) Tentative Guidelines for Performance-Based Seismic Engineering, Structural Engineers Association of California.
- (접수일자 : 2005. 11. 15 / 심사일 2005. 11. 29 / 심사완료일 2006. 4. 10)