

말뚝기초의 동적실험결과를 사용한 아파트 골조의 경제성 비교분석

Comparative Study on the Quantity Economic Analysis of Apartment Frames Using SDS Result of Dynamic Centrifuge Test at Pile Foundation

김상연¹ · 박종배² · 박용부³

Sang-Yeon Kim¹, Jong-Bae Park² and Yong-Boo Park³

(Received July 22, 2015 / Revised August 29, 2015 / Accepted August 29, 2015)

요 약

현재, 국내의 내진설계기준에서 제시하고 있는 지반분류 방법과 지반 증폭계수는 깊은 기반암 조건의 미국 서부 해안지역 지반에 적합하도록 제시되어 있으므로 기반암이 약 30m 미만인 우리나라와는 다른 동적 거동을 나타낸다. 선행연구에 의하면, 말뚝 기초에 대한 원심모형 실험결과와 동적 지진 해석결과는 우리나라에서 사용하고 있는 설계스펙트럼의 가속도 값보다 주기 1.5초 부근에서는 낮게 나타나고 있다. 따라서, 본 논문에서는 원심모형 실험결과에서 얻어진 설계스펙트럼 가속도를 사용하여 구조해석을 수행하고 기존의 설계기준과 대비하여 철근 및 콘크리트의 물량 등을 상호 비교하여 아파트 골조공사의 경제성을 비교, 검토하였다. KBC-2009 기준의 Sc 지반과 SD 지반을 사용하여 구조해석 및 내진설계를 수행하고, SD에 해당하는 지반의 동적 지진 실험결과와 스펙트럼가속도(SDS)를 사용하여 구조해석 및 내진설계를 수행하여 상호 비교 고찰한 결과, 지반의 종류 SD 지반에 해당하는 연약지반의 경우라도 동적 실험 및 해석을 수행하여 지반의 스펙트럼 가속도를 산정하여 구조해석에 적용할 경우 Sc 지반과 유사한 정도의 철근 물량 값을 얻을 수 있었고, 이것은 당초 연약지반으로 고려되던 SD 지반으로 설계하는 경우에 비하여 17~23% 정도의 물량을 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 말뚝기초, 동적실험, 지반계수, 설계스펙트럼 가속도, 경제성 비교

ABSTRACT

Site coefficient and amplification factor of current domestic Seismic Design Code based on American Seismic Code, have no consideration for the domestic ground condition in which the base rock is normally placed within 30m from the surface. By previous studies, the measured spectral acceleration of the result of dynamic centrifugal test and analysis was smaller than the design spectral acceleration for the period over 1.5 sec. Accordingly, in this study structural analysis and design using dynamic centrifugal test result for pile foundation were achieved, and the quantity of concrete and reinforcement of wall frame was compared with each other. Comparison results of cost using KBC the design spectral acceleration of SC, SD site and SDS, the quantity of reinforcement using SDS for SD site was 17~23% smaller than using the design code SD site.

Key words : Pile Foundation, Dynamic Test, Site Coefficient, Design Spectral Acceleration, Cost Compare

1. 서론

우리나라의 내진설계 기준은 미국에서 수행된 연구결과들을 바탕으로 만들어진 미국의 내진설계 기준과 개념을 그대로 우리나라의 내진설계 기준에 도입하여 적용하고 있는 실정이다. 미국의 경우 기반암의 깊이가 깊게 분포하고 있어 기반암이 얇게 분포하고 있는 우리나라와는 다른 동적 거동을

나타낼 것으로 예상되며, 저자들이 수행한 연구 ‘지반-말뚝의 상호작용을 고려한 건축물의 내진설계 합리화연구’ 등에서 나타난 결과에 따르면, 말뚝 기초의 동적 실험결과와 동적 지진해석 결과에서는 우리나라에서 사용하고 있는 설계스펙트럼의 가속도 값보다 주기 1.5초 부근에서는 일관되게 낮은 값을 제시하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 선행 연구들에 기초하여 실험결과에서 얻어진 설계스펙트럼가속도

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(주저자: sy-kim@lh.or.kr)
 2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: jbpark@lh.or.kr)
 3) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원

를 사용하여 구조해석을 수행하고 기존의 설계기준에 따라 설계한 경우와 철근의 물량과 콘크리트의 물량 등을 상호 비교하여 아파트 골조공사의 경제성을 검토해 보고자 한다.

2. 대상의 선정과 구조해석

2.1 비교대상 건축물의 선정

검토대상 건축물은 한국토지주택공사에서 많이 건설하고 있는 유형의 15층 및 20층 규모의 아파트를 대상으로 하였다. 이들 아파트에 대하여 경제성을 검토하기 위해 기존 내진 설계 기준의 Sc 지반 및 Sd 지반에 대하여 해석을 수행하였고, 실험결과와 가속도 스펙트럼을 이용하여 지진 해석을 수행하였다. 검토 대상은 경기도 하남시 OO지구의 아파트로서 건물의 개요는 표 1과 같다.

표 1. 검토 대상 건축물의 개요

구 분	내 용
위 치	경기도 하남시 OO지구
용 도	아파트
규 모	지상 15층 및 20층, 지하 1층
구조형식	내력벽식구조(철근콘크리트 보통전단벽)

2.2 설계기준과 해석 프로그램

검토대상 건축물은 한국토지주택공사에서 많이 건설하고 있는 유형의 15층 및 20층 규모의 아파트를 대상으로 하였다.

본 건축물의 해석에서 적용한 기준은 표 2에서와 같이 현재 국내에서 사용하고 있는 건축물의 설계기준인 KBC 2009를 사용하였고, 해석에 사용한 프로그램은 표 3에 나타낸 바와 같이 구조해석에 대해서는 MIDAS Gen을 사용하고, 벽체 부재의 설계에서는 BeST Pro 프로그램을 사용하였다.

표 2. 구조설계 적용 기준

설계방법	RC조	내 용
설계기준	적용기준	건축구조기준(KBC 2009)
	참고기준	IBC 2009, ACI 318-08

표 3. 구조해석 및 설계 프로그램

프로그램 명	적 용 내 용
Midas GEN	건물 골조해석
BeST. Pro (WALL)	벽체 설계

2.3 사용 재료의 강도

건축물의 설계에서 사용한 재료의 강도는 LH 아파트에서 주로 사용하는 재료의 강도 값들을 사용하였다. 콘크리트의 강도는 24MPa이고 철근의 강도는 철근 굵기에 따라 500MPa 및 600MPa를 사용하였으며, 그 자세한 사항은 표 4와 같다.

표 4. 사용된 재료의 강도

구 분	층	층 별 적 용	강도 (N/mm ²)
아파트	15	전층	24
	20	전층	24
최하층 바닥 및 기초	-	-	24
철 근	fy = 500 N/mm ² (SD500) : D13이하 fy = 600 N/mm ² (SD600) : D16이상		

2.4 설계하중

이 건축물의 해석에 사용된 설계하중은 다음과 같이 고정하중, 활하중, 지진하중 및 풍하중을 사용하였다.

2.4.1 고정하중

건축물의 고정하중은 기준에서 정하고 있는 마감재의 고정하중 값들을 사용하여 하중을 부과하였다.

2.4.2 활하중

활하중은 구조기준의 하중편에서 제시하고 있는 공동주택에 해당하는 하중 값들을 적용하였고, 건축물의 부위별로 적용한 자세한 값들은 다음 표 5와 같다.

표 5. 구조해석에 사용된 건축물 부위별 활하중 값

부 위	적재하중(kN/m ²)
거실, 주방, 침실	2.0
화장실	2.0
발코니	3.0
코 아	3.0
홀	3.0
E/L, 기계실	15.0

2.4.3 풍하중

구조해석에 적용한 풍하중은 대상 건물이 위치한 경기도 하남시 지역에 대한 설계기준의 풍속을 적용하였고, 대상 건축물의 풍하중 해석을 위한 값들은 다음의 표 6에 나타내었다.

표 6. 구조해석에 사용된 풍하중 값

구 분	적 용 기 준
지 역	경기도 하남
설계기본풍속	30m/sec
지표면 조도구분	C
중요도 계수	1.0
지형계수	1.0
설계 풍하중	$W_f = p_f A$ $p_f = G_f (q_z C_{pe1} - q_H C_{pe2})$

이 표의 설계 풍하중 계산에서 사용된 각각의 계수들은 아래와 같다.

- q_H : 지붕면의 평균높이 H에 대한 설계속도압
- q_z : 지표면에서 임의높이 z에 대한 설계속도압
- G_f : 주골조용 풍방향 가스트영향계수
- C_{pe1} : 풍상벽의 외압계수
- C_{pe2} : 풍하벽의 외압계수

2.4.4 지진하중

구조해석에 적용한 지진하중은 설계기준을 따라 적용하였고, 대상 건물이 위치한 경기도 하남시 지역의 지역계수는 다음의 표와 같다. 건물의 중요도계수 및 내진설계 계 계수들은 다음의 표 7에 자세하게 나타내고 있다.

표 7. 구조해석에 사용된 지진하중 제반계수 값

구 분	적 용 기 준	
지역계수(S)	0.22	
설계유효지반가속도(S)	0.176	
지반종류	Sc 및 S _D	
중요도계수(IE)	1.2(내진등급 I)	
반응수정계수(R)	4	
기본진동주기 (T)	X-DIR	T = 0.049(hn) ^{3/4}
	Y-DIR	T = 0.049(hn) ^{3/4}

이들 계수 값들을 적용하여 등가정적 해석에 사용되는 밀면 전단력 값은 다음의 식 1로 구한다.

- 밀면전단력 (V)

$$V = C_s W \text{ ----- (식 1)}$$

여기서, $\left(0.01 \leq C_s = \frac{S_{D1}}{\left[\frac{R}{I_E} \right] T} < \frac{S_{DS}}{\left[\frac{R}{I_E} \right]} \right)$

- C_s : 지진응답계수
- W : 유효 건물중량 (kN)

2.5 지진하중 설계스펙트럼

구조해석 및 설계에 사용한 지진하중의 설계 스펙트럼은 설계기준에서 정하고 있는 Sc 지반의 설계스펙트럼, SD 지반의 설계스펙트럼 및 실험결과와 스펙트럼 값으로 작성한 설계스펙트럼(SDS)을 사용하여 지진 해석을 수행하였다. 각각의 스펙트럼 가속도 값은 다음의 그림에 나타내고 있다. 실험에서 사용된 지반은 실제로는 설계기준상의 SD 지반에 상응하는 연약 지반을 대상으로 한 것으로 해석결과와 분석에서 KBC 2009 기준의 Sc 지반 및 SD 지반과 비교 검토하였다.

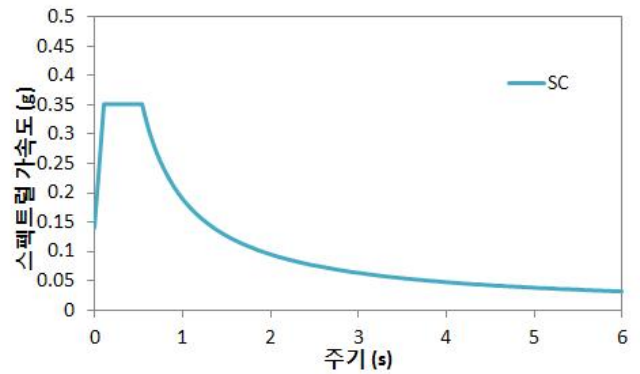


그림 1. KBC 2009에 의한 Sc 지반의 설계스펙트럼 가속도

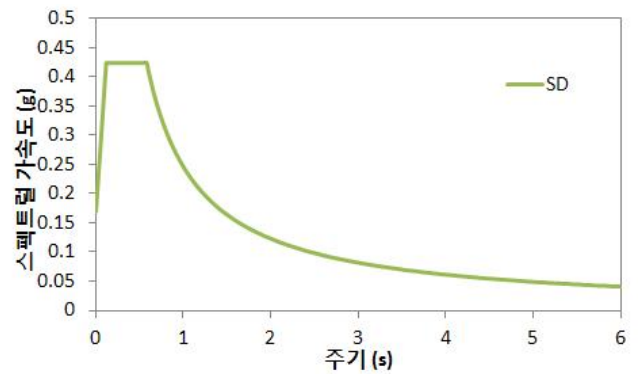


그림 2. KBC 2009에 의한 SD 지반의 설계스펙트럼 가속도

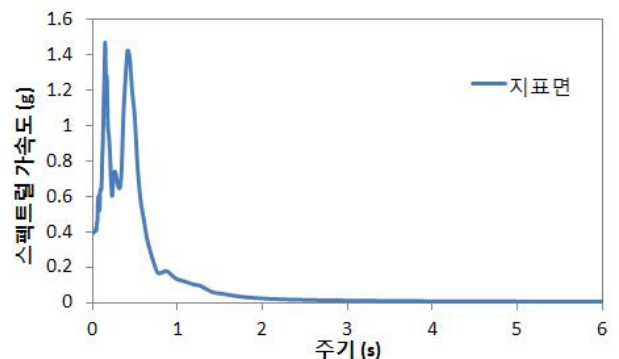


그림 3. 실험결과에 의한 지표면의 설계스펙트럼 가속도

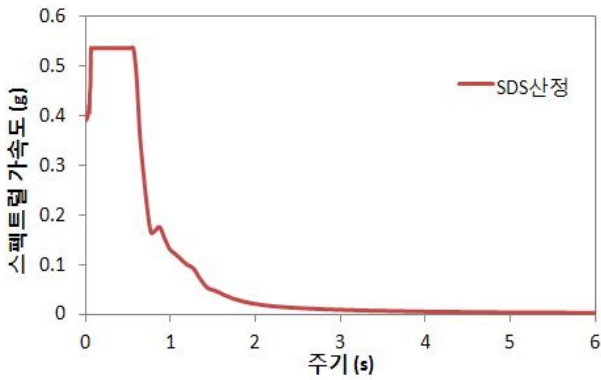


그림 4. 실험결과로 작성한 설계스펙트럼 가속도

로 해석을 수행하였다. 그 모델링 평면과 구조체 모델링결과를 그림 6에 나타내고 있다.

구조해석에 사용된 벽체의 두께는 코어벽체와 외벽부분은 모두 200mm를 적용하였고, 내벽은 15층 아파트의 경우 150mm, 20층 아파트의 경우 180mm를 적용하였고, 자세한 사항은 표 8과 같다.

표 8. 대상 아파트의 층별 벽두께

구분	부위	15층 아파트	20층 아파트
벽두께 (mm)	내벽	150	180
	외벽/코아	200	200
	지하외벽	350	350

2.6 대상건축물의 평면

대상 건축물은 LH에서 임대 및 분양 아파트로 많이 사용되는 74+84 타입이며, 그 기준층 구조평면도는 다음 그림 5와 같다.

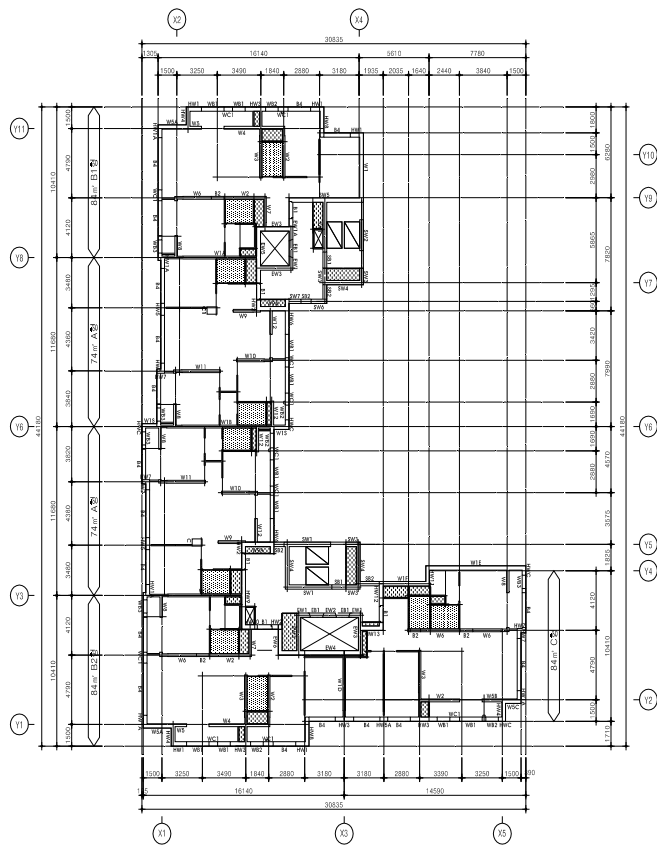


그림 5. 해석대상 아파트의 기준층 구조평면도

3. 해석 결과 및 경제성 분석

3.1 15층 아파트의 해석 결과

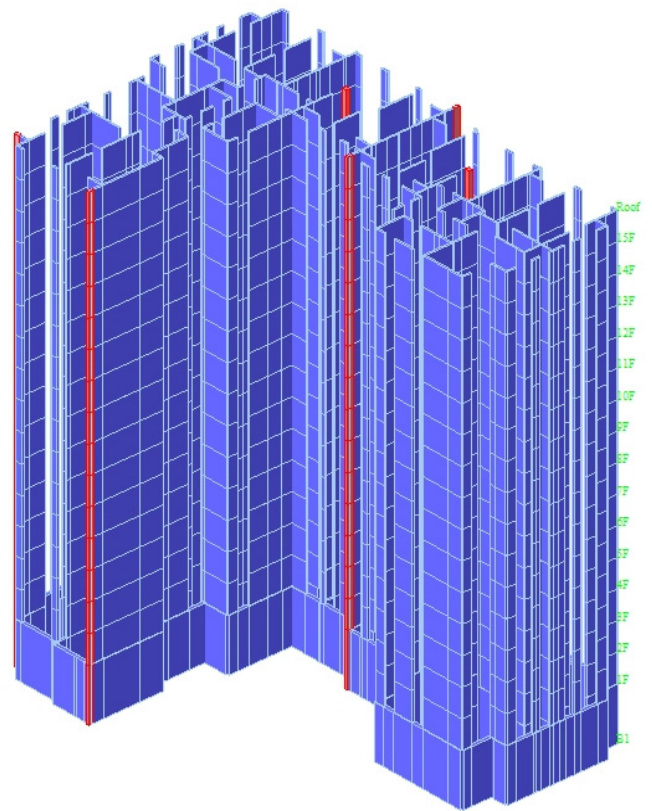


그림 6. 해석대상 아파트(15층)의 구조체 모델링 결과

2.7 대상건축물의 해석 모델링

내진설계결과 비교를 위하여 해석에 사용된 대상 건축물은 LH의 아파트로 많이 사용되는 74+84 타입이고, 평면은 동일한 평면을 사용하고 층수는 15층과 20층 두개의 유형으

위에서 기술한 제반 설계값을 적용한 검토 대상 74+84 타입 15층 아파트의 구조해석 결과는 KBC 2009기준의 Sc 지반 및 SD 지반 및 실험결과 스펙트럼가속도(SDS)를 사용한 경우 각각에 대해 다음의 표 9~11에서 나타내고 있다.

표 9. KBC 2009의 S_c 지반인 경우 15층 아파트의 해석결과

구 분	해 석 결 과
지반종류	S _c
X-방향 밀면전단력	9,470.84kN
Y-방향 밀면전단력	6,246.47kN
고유치해석 밀면전단력(X-)	6,500.53kN
고유치해석 밀면전단력(Y-)	4,309.31kN
X-방향 보정계수(Cmx)	1.238
Y-방향 보정계수(Cmx)	1.232

표 10. KBC 2009의 S_D 지반인 경우 15층 아파트의 해석결과

구 분	해 석 결 과
지반종류	S _D
X-방향 밀면전단력	12,223.45kN
Y-방향 밀면전단력	8,421.69kN
고유치해석 밀면전단력(X-)	8,286.59kN
고유치해석 밀면전단력(Y-)	5,402.92kN
X-방향 보정계수(Cmx)	1.254
Y-방향 보정계수(Cmx)	1.325

표 11. 실험결과 SDS사용한 15층 아파트의 해석결과

구 분	해 석 결 과
지반종류	S _D
X-방향 밀면전단력	6,461.37kN
Y-방향 밀면전단력	3,946.88kN
고유치해석 밀면전단력(X-)	6,084.76kN
고유치해석 밀면전단력(Y-)	4,505.11kN
X-방향 보정계수(Cmx)	1.0
Y-방향 보정계수(Cmx)	1.0

3.2 20층 아파트의 해석 결과

검토대상 74+84 타입 20층 아파트에 대해서 KBC 2009기준의 S_c 지반 및 S_D 지반 및 실험결과 스펙트럼가속도(SDS)를 사용하여 해석한 결과는 각각에 대해 다음의 표 12~14에서 나타내고 있다.

표 12. KBC 2009의 S_c 지반인 경우 20층 아파트의 해석결과

구 분	해 석 결 과
지반종류	S _c
X-방향 밀면전단력	7,713.40kN
Y-방향 밀면전단력	6,793.24kN
고유치해석 밀면전단력(X-)	6,188.59kN
고유치해석 밀면전단력(Y-)	4,668.61kN
X-방향 보정계수(Cmx)	1.059
Y-방향 보정계수(Cmx)	1.237

표 13. KBC 2009의 S_D 지반인 경우 20층 아파트의 해석결과

구 분	해 석 결 과
지반종류	S _D
X-방향 밀면전단력	9,955.22kN
Y-방향 밀면전단력	9,158.37kN
고유치해석 밀면전단력(X-)	7,771.38kN
고유치해석 밀면전단력(Y-)	5,756.95kN
X-방향 보정계수(Cmx)	1.089
Y-방향 보정계수(Cmx)	1.352

표 14. 실험결과 SDS사용한 20층 아파트의 해석결과

구 분	해 석 결 과
지반종류	S _D
X-방향 밀면전단력	5,262.37kN
Y-방향 밀면전단력	4,292.31kN
고유치해석 밀면전단력(X-)	6,475.81kN
고유치해석 밀면전단력(Y-)	5,913.58kN
X-방향 보정계수(Cmx)	1.0
Y-방향 보정계수(Cmx)	1.0

3.3 15층 아파트의 골조 철근량 비교

검토 대상 74+84 타입 15층 아파트의 구조해석 결과의 부재 물량을 비교하기 위하여 고려한 결과 슬래브의 경우 그 물량의 차이는 없으므로, 수직 부재로 내진 설계에서 기여하는 바가 큰 벽체 부분의 철근량을 산출하여 각 경우에 대하여 비교해 보았다. 각각의 경우에 대한 벽체의 철근량은 다음의 표 15와 같다. 표에서 나타내고 있듯이 실험결과와 스펙트럼가속도(SDS)를 적용한 경우의 벽체 철근량은 S_D 지반보다 약 17% 정도 절감되는 것으로 나타났고, S_c 지반의 경우와 유사한 정도로 나타났다.

표 15. 15층 아파트의 벽체 철근량 비교

설계 구분	S _c 지반	S _D 지반	SDS 적용
벽 철근량 (kN)	1177.6	1403.3	1160.2
상대비율 (%)	100(기준)	119.1	98.5

3.4 20층 아파트의 골조 철근량 비교

검토대상 74+84 타입 20층 아파트의 구조해석 결과의 부재 물량을 비교하기 위하여 수직 부재로 내진 설계에서 기여하는 바가 큰 벽체 부분의 철근량을 산출하여 각 경우에 대하여 비교해 보았다. 각각의 경우에 대한 벽체의 철근량은 다음의 표 16과 같다. 표에서 나타내고 있듯이 실험결과와 스펙트럼가속도(SDS)를 적용한 경우의 벽체 철근량은 S_D 지반

보다 약 20% 이상 절감되는 것으로 나타났고, Sc 지반의 경우와 유사한 정도로 나타났다.

표 16. 20층 아파트의 벽체 철근량 비교

설계 구분	Sc 지반	S _b 지반	SDS 적용
벽 철근량(kN)	1505.2	1839.6	1418.0
상대 비율(%)	100.0(기준)	122.2	94.2

4. 경제성 검토

4.1 해석결과 철근물량 비교를 통한 경제성 검토

74+84 타입의 15층 및 20층 아파트를 대상으로 KBC 2009 기준의 Sc 지반과 S_b 지반을 사용하여 구조해석 및 내진설계를 수행하고, 지반의 동적실험 결과를 반영하기 위하여 S_b에 해당하는 지반의 동적 지진 실험결과와 스펙트럼가속도(SDS)를 사용하여 구조해석 및 내진설계를 수행한 경우에 대하여 벽체의 철근물량을 토대로 상호 경제성을 비교 검토하였다.

그 결과는 다음 표 17과 같으며, 본 연구에서 검토 대상으로 고려한 S_b 지반의 경우에 동적 실험결과와 지반 가속도 스펙트럼(SDS)을 사용할 경우에 구조설계 결과 값은 Sc 지반에 상응하는 정도의 철근량을 갖는 것으로 나타났다. 이것은 현재 S_b 지반으로 설계하는 것으로 인해 크게 늘어나는 철근 물량을 약 17~23% 정도 줄여주는 것으로 나타났다.

표 17. 각 경우에 대한 경제성 비교검토

구 분	Sc 지반 (kN) (C)	S _b 지반 (kN) (D)	실험결과 적용(kN) (E)	D/C	E/C	E/D
15층 아파트	1177.6	1403.3	1160.2	1.19	0.98	0.83
				19% 증	2% 감	17% 감
20층 아파트	1505.2	1839.6	1418.0	1.22	0.94	0.77
				22% 증	6% 감	23% 감

(단) 1) 철근(SD400) 자재 단가는 톤당 813,000원 적용
 2) 표준 품셈의 철근가공조립비 기준

구분		단가(원/tonf)
보통가공조립	가공조립비	461,516
복잡가공조립	가공조립비	511,025

* 복잡가공조립은 DI3이하 철근이 전체의 50% 이상인 경우에 적용

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 KBC 2009기준의 Sc 지반과 S_b 지반을 사용하여 구조해석 및 내진설계를 수행하고, S_b에 해당하는 지반의 동적 지진실험결과와 스펙트럼가속도(SDS)를 사용하여 구조해석 및 내진설계를 수행하여 상호 비교 고찰한 결과는 다음과 같다.

지반의 종류 S_b 지반에 해당하는 연약지반에 동적실험 및 해석을 수행하여 지반의 스펙트럼 가속도를 산정하여 구조해석에 적용할 경우, Sc 지반과 유사한 정도의 철근물량 값을 얻을 수 있었고, 이것은 당초 연약지반으로 고려되던 S_b 지반으로 설계하는 경우에 비하여 17~23% 정도의 물량을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 단 이러한 물량 절감은 본 연구에서 검토한 아파트 구조물에 대한 것으로서 구조물 종류에 따라 달라질 수 있다.

본 연구에서 얻어진 지반의 동적실험 결과의 실무 적용시 철근 물량의 절감을 통한 경제성 향상이 기대되므로 본 연구 결과의 실용화를 위하여 후속연구를 통하여 간편한 해석적 검토를 통한 동적 내진설계 스펙트럼 가속도를 구하여 지진 해석을 수행할 수 있도록 지속적인 노력이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 토지주택연구원에서 연구과제로 수행한 ‘지반-말뚝의 상호거동을 고려한 건축구조물의 내진설계 합리화 연구’의 연구결과의 일부를 정리한 것이다.

참고문헌

1. 김상연, 박종배, 박용부, 김동수(2014), “동적 원심모형실험에 의한 점성토에 근입된 말뚝기초의 응답스펙트럼 분석”, 「LHI Journal」, 5(2): 115~120.
2. 대한건축학회(2009), 「건축구조설계기준 (KBC-2009)」, 국토해양부.
3. 박용부, 박종배, 김상연, 김동수(2014), “동적 원심모형실험에 의한 사질토에 근입된 말뚝기초의 응답스펙트럼 분석”, 「LHI Journal」, 5(1): 35~40.
4. 토지주택연구원(2013), 「지반-말뚝의 상호거동을 고려한 건축구조물의 내진설계합리화 연구」.