

말뚝 강성을 고려한 지반의 지진하중 저감 효과에 관한 해석 연구

Analysis on the Seismic Load Reduction Effect of a Ground by Considering Pile Strength

김상연¹ · 박종배² · 박용부³ · 김동수⁴ · 이세현⁵

Sang-Yeon Kim¹, Jong-Bae Park², Yong-Boo Park³, Dong-Soo Kim⁴, Sei-Hyun Lee⁵

(Received September 13, 2012 / Revised October 25, 2012 / Accepted October 25, 2012)

요 약

최근에 건설되는 고층 건물들은 지하 3층 이상의 깊은 지하층을 갖는 경우가 일반적이며, 이 경우에 국내 지반의 특성상 기반암 깊이가 얕아 지하층 하부가 압반에 정착되거나 지중에 위치하는 경우가 많다. 현행 우리나라 내진설계기준의 지진하중은 자유장인 지표면에서의 응답을 바탕으로 하고 있어 말뚝이 매설된 기초 하부 지반에서의 지진하중과 상이하므로 비교 및 검증이 요구된다. 이를 위하여 본 연구에서는 2차원 동적(2D Dynamic) 수치해석 기법을 이용하여 말뚝기초가 기반암에 근입될 때 말뚝 강성효과에 의한 기초저면에서의 지진하중 감소를 확인하였으며 경제적인 내진설계를 수행할 수 있는 가능성을 확인해 보았다. 현행 내진 설계기준에 따른 자유장 지표면 가속도를 설계 지진 하중산정 과정에서 말뚝 강성을 고려한 지진 하중 저감효과를 평가하기 위해 PLAXIS 2D 프로그램을 사용하여 말뚝 개수 4개, 8개, 12개인 세가지 말뚝 배치 경우에 대하여 지중 및 기초 상부의 최대 지진 가속도와 동일 깊이의 자유장 최대 지진 가속도를 수치해석을 통하여 비교한 결과, 지반내 매설된 말뚝 기초에 의해 20~25% 가량의 지진하중 저감효과가 있는 것을 확인하였다. 그러나 말뚝의 개수 및 콘크리트 기초의 크기는 지진응답 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

주제어 : 지진하중, PHC 말뚝, 증폭, PLAXIS, 수치해석

ABSTRACT

In this study, a numerical analysis to evaluate the reduction of seismic load due to pile group was performed and compared the peak ground acceleration(PGA) measured at free-field and foundation. The special attention was given to the amplification of seismic acceleration on the foundation due to the pile effects. The analysis considering pile effects was carried out for 4, 8 and 12 piles with same condition by PLAXIS 2D Dynamics. Based on the analysis results, it is found that the overall reduction in seismic load due to foundation and reduction rates are similar irrespective of pile numbers. This study gives a possibility for effective design of piled foundation by reducing seismic load about 20~25%.

Key words: Seismic Load, PHC Pile, Amplification, PLAXIS, Numerical Analysis

1. 서 론

내진 설계 시 구조물에 작용하는 지진 하중은 구조물이 들어서는 지역, 구조물의 중요도 및 국지적 지반 조건 등에 의해 결정된다. 지역 및 구조물의 중요도는 설계가 이루어지기 전

에 결정되는 요소이므로 결국 국지적 지반 조건이 지진 하중 결정을 좌우한다. 구조물 하부에 위치한 지반의 국지적 특성에 따라 변하는 지반 증폭계수는 지진 시 구조물에 작용하는 지진하중 산정을 위한 직접적인 요소이며 1997년 건설교통부에서 제정한 내진설계 상위 개념인 내진설계기준연구 II (건설

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(주최자: sy-kim@lh.or.kr)
 2) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원(교신저자: jbpark@lh.or.kr)
 3) 한국토지주택공사 토지주택연구원 수석연구원
 4) 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수
 5) 한국원자력안전기술원 구조부지평가실 선임연구원

교통부, 1997) 및 이 후 정부 관련 부처와 산하 기관에서 제정한 기준서 등에 명시되어 있다. 그러나 국내 현행 내진설계기준에서 제시하고 있는 지반분류 방법과 지반 증폭 계수는 깊이가 100~300m로 깊은 기반암 조건의 미국 서부 해안지역 지반에 적합하도록 작성된 UBC-1997(ICBO, 1997)미국 내진설계기준을 준용한 것으로서, 일반적으로 비교적 얇은 기반암 깊이를 보이는 국내 지반 조건을 제대로 반영하지 못하고 있다. 특히, 국내 설계기준에 제시된 지반 증폭계수 및 설계응답스펙트럼은 상부 구조물 및 하부 기초 형식을 전혀 고려하지 않은 지표면 자유장(Free field)에서의 응답을 결정하도록 되어 있어서 지진하중을 합리적으로 예측하기 위해 고려되어야 하는 지반-기초-구조물 상호작용(Soil-Foundation-Structure Interaction SFSI)을 반영하지 못하고 있다(김용석, 2005).

국내에 건설되는 고층 건물들은 지하 3~6층의 깊은 지하층을 갖게 되며 국내 지반 특성상 기반암 깊이가 낮아 지하층 하부가 암반에 정착되거나 지중에 위치하는 경우가 많아 자유장 응답을 바탕으로 하는 국내 현행 내진설계기준의 지진하중은 말뚝이 매설된 지반에서의 지진하중과 상이하므로 비교 및 검증이 요구된다. 본 연구에서는 2차원(PLAXIS 2D Dynamic) 수치해석 기법을 이용하여 말뚝기초가 기반암에 근입될 때 말뚝 강성효과에 의한 기초저면에서의 지진하중 감소를 확인하였으며 경제적인 내진설계를 수행할 수 있는 가능성을 확인해 보았다.

2. 국내 내진설계기준

2.1 지반분류

지진 시, 지표면에서의 최대 지반가속도 및 구조물에 가해지는 지진력을 결정하기 위해 국지적인 지반 조건을 신뢰성

있게 평가하는 것이 중요하다. 현재 국내 내진설계기준에서는 상부 30m의 지반 평균 전단파 속도(V_{S,30})를 이용하여 지반을 분류하였으며 각 지반종류에 따라 설계 응답스펙트럼을 이용하여 지진하중을 산정하고 있다. 현재 국내 건축 및 토목 분야에서는 상위기준인 내진설계기준연구 II(건설교통부, 1997)와 건축구조설계기준(대한건축학회, 2005) 및 구조물설계기준(한국지반공학회, 2009)에서 제시하고 있는 지반분류는 표 1과 같이 S_A, S_B, S_C, S_D, S_E, S_F의 6종으로 분류하고 있다.

2.2 지진하중 결정

지반분류에 따라 현행 설계지반운동은 기본적으로 응답스펙트럼으로 표현한다. 구조물 기초 설계기준(한국지반공학회, 2009)과 건축구조설계기준(대한건축학회, 2005)에서 설계지반운동 수준을 결정하기 위한 지진구역계수(표 2)는 내진설계기준연구(건설교통부, 1997)에서 제시된 값을 사용하였으며 각각 대상 구조물의 용도 및 중요도에 따라 위험도계수를 적용하여 표준 설계응답스펙트럼을 작성한다. 건축구조설계기준에 따라 지진구역 1에 위치한 내진 특등급 구조물의 하부 기초 지반분류에 따른 표준설계응답스펙트럼은 그림 1과 같다. 응답스펙트럼 작성방법은 설계기준에 따라 달리 적용하고 있으나 현행 설계기준 모두 자유장 지반응답을 기준으로 하므로 말뚝이 매설된 지반에서의 지진하중은 상이할 것으로 예상된다.

3. 수치해석에 의한 지진하중 저감 효과 평가

3.1 해석 프로그램

수치해석은 2차원 선형 평면 변형률 해석을 위해서 네덜란드 PLAXIS사에서 개발한 PLAXIS 2D Dynamics를 사용하여

표 1. 지반분류 방법

지반 분류	지반종류의 호칭	상부 30m 에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 V _{S,30} (m/s)	표준관입시험 (blow/foot)	비배수 전단강도 Su (kPa)
S _A	경암지반	1500 초과	-	-
S _B	보통암지반	760~1500		
S _C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	50 초과	100 초과
S _D	단단한 토사지반	180~360	15~50	50~100
S _E	연약한 토사지반	180 미만	15 미만	50 미만
S _F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

표 2. 지진구역계수

지진구역	행정구역	지역계수(A)
1	지진구역 2를 제외한 전지역	0.11
2	강원도 북부, 전라남도 남서부, 제주도	0.07

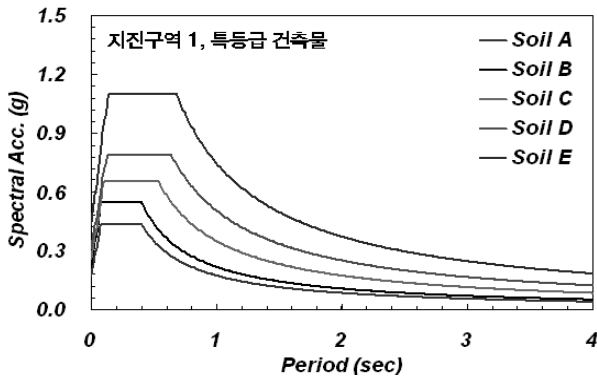


그림 1. 지반종류별 표준응답스펙트럼(건축구조설계기준)

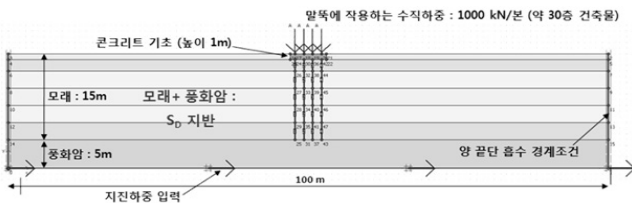


그림 2. 해석 단면 지반 층상 구조 (말뚝배치 단면 1)

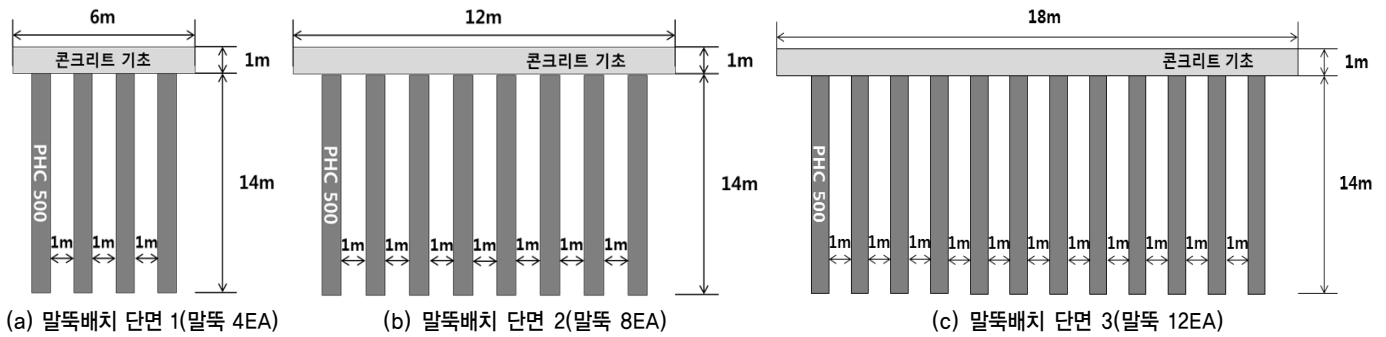


그림 3. 해석모델의 말뚝배치 단면

표 3. 지반 및 기초판 입력 물성

층상 종류	층 두께(m)	깊이(m)	$\gamma t(t/m^3)$	등가 VS(m/s)	등가 G(MPa)	등가 D(%)	ν
모래	1	1	1.55	107	18	5	0.3
	2	3	1.55	123	23	9	0.3
	3	6	1.55	125	24	13	0.3
	3	9	1.55	124	24	15	0.3
	3	12	1.55	126	25	16	0.3
	3	15	1.55	134	28	16	0.3
풍화암	5	20	2.22	513	584	4	0.3
콘크리트	1	1	2.30	2085	10000	0.5	0.2

표 4. PHC500 말뚝 물성

말뚝	길이(m)	지름(m)	Type	σ_{ck} (MPa)	EA(kN/m)	EI(kNm ² /m)	w(kN/m/m)
PHC500	14	0.524	Elastic	80	4000000	91500	35

으며 PLAXIS는 연약지반에 사용가능한 다양한 재료모형을 갖고 있으며 이는 매우 작은 전단강도의 지반에 굴착 또는 성토 등의 변형해석이 가능할 뿐만 아니라, 지진하중에 의한 동해석 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있음을 의미한다. PLAXIS는 탄소성 상태에서 평형상태에 도달하기 위한 수렴(convergence)를 돕는 강력한 알고리즘을 보유하고 있으며, 요소망 자동생성 등 편리한 사용자 인터페이스로 실무에서 많이 사용되고 있다.

3.2 해석 모델의 말뚝배치 단면

본 연구에서는 PLAXIS를 이용하여 총 3개의 말뚝배치 단면에 대하여 해석을 수행하였다. 지반 층상은 지표면부터 하부 15m까지는 연약한 모래가 분포하고, 이후 5m의 풍화암이 존재하는 구조로 모두 동일하다.(그림 2). 말뚝 해석단면은 지반에 매설된 말뚝(PHC-500)의 개수와 말뚝 상부 콘크리트 기초의 크기에 차이가 있고, 모든 말뚝은 풍화암 상부에 정착시켰다. 해석 모델로 사용한 말뚝배치 단면의 자세한 내용은 그림 3과 같다.

3.3 지반 및 말뚝의 특성치

지반의 층상 및 물성은 3개의 단면에 동일하게 적용하였으며, PLAXIS 는 지반의 비선형 특성을 반영하지 못하므로 전에 SHAKE 프로그램을 이용하여 해석에 사용된 지진하중에 대한 등가 전단파속도(또는 등가전단탄성계수)와 등가 감쇠비를 획득하고, 이를 PLAXIS의 입력 지반 물성으로 사용하여 지반의 비선형 특성을 고려한 선형 평면 변형률 해석을 수행하였다. 해석단면은 지진이 가해지기 전 전단파속도를 바탕으로 지반분류를 수행하여 S_D 지반으로 분류하였고 층 별 상세한 지반 물성과 콘크리트 기초 및 PHC500 말뚝의 물성은 표 3과 표 4에 나타낸 바와 같다.

해석을 위한 입력 지진파는 1990년 2월 28일 발생한 Upland Earthquake를 사용하였으며, 입력 위치는 풍화암 하부, 즉, 지표면으로부터 20m 깊이로 하였다. 최대 가속도는 지진구역 1, 1등급 건축물에 대한 0.176g의 값으로 수정하였으며 양 끝 경계의 영향을 최소화하기 위해, 흡수 경계조건(Absorbing boundary condition)을 사용하였다.

3.4 해석결과

콘크리트 기초 및 말뚝 강성에 의한 지진하중 저감 효과를 평가하기 위해, 1)말뚝 사이에 있는 지중(Pile-Soil)과 동일 높이에 위치한 자유장(Soil)에서의 지진응답 비교, 2)콘크리트 기초상부(Foundation)와 지표면 자유장(Surface)에서의 지진응답을 비교하였다. 각 가속도 측정지점의 위치를 그림 4와 같다.

PHC 말뚝 4개를 포함하는 해석단면 1의 Soil에서 측정된 최대 지진 가속도는 0.182g로서 기반암 입력 최대 가속도(0.176g)와 비교하여 약 1.05배 정도 증폭이 발생하였다. 그러나 Pile-Soil 에서는 0.141g의 최대 지진 가속도가 측정되어 기반암 입력 최대 가속도의 약 0.80배 정도가 측정되었다. 말뚝 주변에서의 최대 지진 가속도는 자유장 지역의 동일 깊이의 최대 가속도에 비해 약 23%(0.77배)의 저감 효과를 보였다. 이는 말뚝의 비교적 큰 질량으로 인한 관성의 영향으로 말뚝 주변 지반의 거동이 간섭을 받아 발생하는 현상으로 설명할 수 있다. 마찬가지로 말뚝의 영향이 없는 자유장 지표면(Surface)에서는 0.311g의 최대 지진 가속도가 측정되었고, 기초 상부인 Foundation에서는 0.241g의 최대 지진 가속도가 측정되었다. 기초상부에서의 최대 지진 가속도는 자유장 지반의 약 0.77배이므로 현행 내진설계기준에 따른 자유장 지표면 가속도의 지진하중을 약 23% 저감하는 것으로 평가되었다.

PHC 말뚝 8개를 포함하는 해석단면 2의 경우, 해석단면 1과 유사하게 Pile-Soil은 동일 깊이의 Soil보다 30% 증가한 최대 지진 가속도를 보이며 기초 상부인 Foundation에서의 최대 지진 가속도는 자유장 지표면보다 25%의 지진하중 저감효과를 보였다.

마지막으로 PHC 말뚝 12개를 포함하는 해석단면 3의 경우,

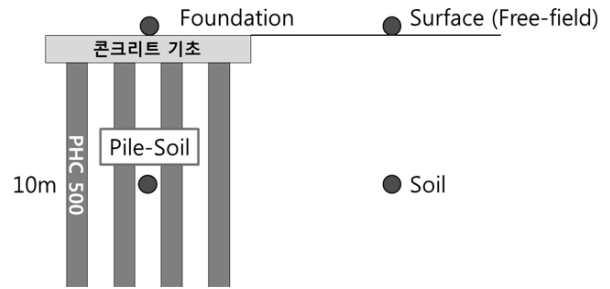
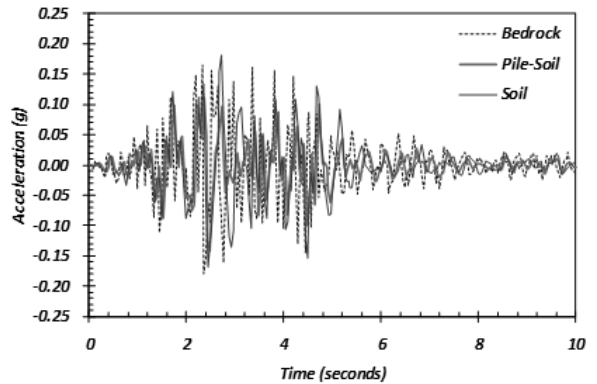
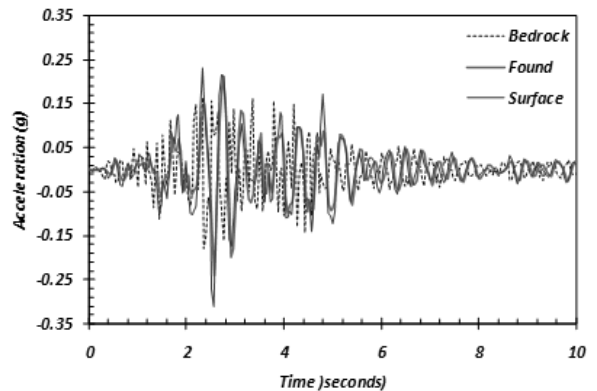


그림 4. 가속도 측정 지점



(a) Soil vs Pile-Soil



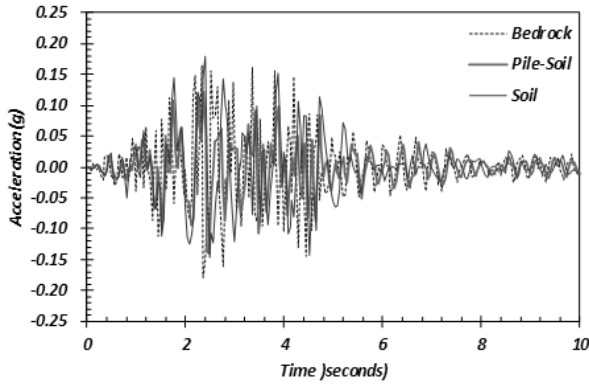
(b) Surface vs Foundation

그림 5. 해석단면 1(말뚝 개수 4)의 결과

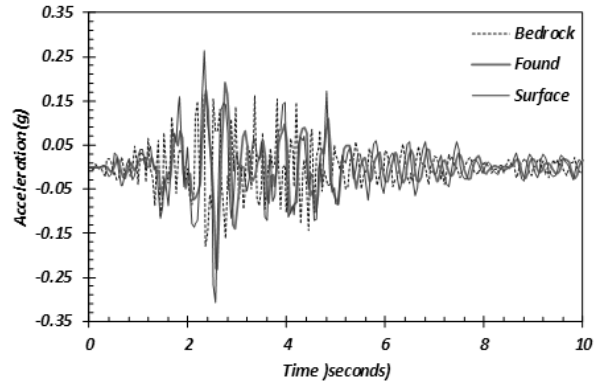
Soil에서는 0.179g, Pile-Soil에서는 0.137g의 최대 지진 가속도가 측정되어, 위의 두 해석단면과 유사한 비율의 지진하중 저감효과를 나타내었다. Surface에서는 0.304g, Foundation에서는 0.227g가 측정되었고, 약 25%의 지진하중 저감효과가 나타나는 것으로 평가되었다. 해석단면에 대해 수치해석으로부터 획득한 시간영역 지진기록은 그림 5~7과 같다.

4. 결론

현행 내진 설계기준에 따른 자유장 지표면 가속도를 설계 지진 하중산정 과정에서 말뚝 강성을 고려한 지진 하중 저감 효과를 평가하기 위해 세 가지 해석단면에 대해 지중 및 기초

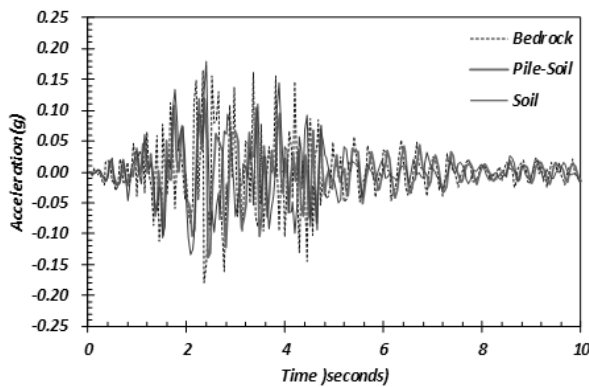


(a) Soil vs Pile-Soil

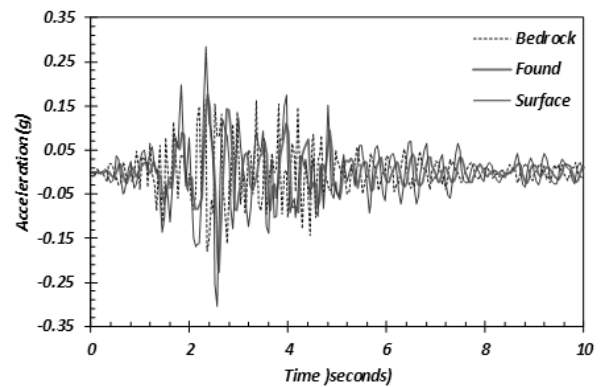


(b) Surface vs Foundation

그림 6. 해석단면 2(말뚝 개수 8)의 결과



(a) Soil vs Pile-Soil



(b) Surface vs Foundation

그림 7. 해석단면 3(말뚝 개수 12)의 결과

표 5. 위치별 최대 지진 가속도 값

	해석단면 1(말뚝 4)	단면 2(말뚝 8)	단면 3(말뚝 12)
Soil(g)	0.182	0.182	0.179
Pile-Soil(g)	0.141	0.140	0.137
Surface(g)	0.311	0.308	0.304
Foundation(g)	0.241	0.232	0.227
기반암 입력지진(g)		0.176	

상부의 최대 지진 가속도와 동일 깊이의 자유장 최대 지진 가속도를 수치해석을 통하여 비교하였다. 해석 결과로부터 지반 내 매설된 말뚝 기초에 의해 20~25% 가량의 지진하중 저감 효과가 있는 것을 확인하였다. 그러나 말뚝의 개수 및 콘크리트 기초의 크기는 지진응답 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다.

또한, 본 연구는 하나의 지반조건 및 하나의 지진파에 의한 해석 결과를 바탕으로 수행된 것이므로, 지진하중 저감효과에 대한 가능성을 고찰한 것으로 이 단계에서 설계 등의 실무에 적용하기에는 무리가 있으며, 실무에서의 적용을 위하여 해석

결과를 반영한 실험 연구 및 다양한 지반 조건 및 지진파의 주파수 특성, 가속도 크기에 따른 영향을 고려한 지속적인 해석 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 토지주택연구원에서 2011년 정과제로 수행한 “말뚝기초의 설계법 선진화 및 시공법 다양화” 연구결과와의 일부로 한국토지주택공사(LH)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 저자는 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997), 「내진설계기준연구Ⅱ-내진설계성능기준과 경제성 평가」, 한국지진공학회.
2. 대한건축학회(2005), 「건축구조설계기준」.
3. 한국지반공학회(2009), 「구조물 기초 설계기준」.
4. 김용석(2005), 「구조물-지반 상호작용과 지진해석」, 구미서관.
5. 박종배, 천영수, 심영중, 정득재, 한규범(2010), 「건축구조물 말뚝머리 접합부의 보강상세에 관한 연구」, 토지주택연구원.
6. 박종배, 김상연, 이범식, 박용부, 임해식, 최경륜, 김동수, 김범주(2011), 「말뚝기초의 설계법 선진화 및 시공법 다양화」, 토지주택연구원.
7. ICBO (1997), *1997 Uniform Building Code, Volume 2-Structural Engineering Design Provisions*, International Conference of Building Officials, California.