

고강도 콘크리트 말뚝과 기초판 접합부의 최적 철근보강량 산정

Assessment of Optimum Reinforcement of Rebar for Joint of PHC Pile and Foundation Plate

박종배¹ · 심영종² · 천영수³ · 박성식³ · 박용부³

Jong-Bae Park¹, Young-Jong Sim², Young-Soo Chun³, Seong-Sik Park³, and Yong-Boo Park³

(Received August 31, 2010 / Revised October 5, 2010 / Accepted October 13, 2010)

요 약

PHC 말뚝에서 강선을 노출시켜 건축물의 기초판과 연결시키는 기존 강선남김 방식은 강결합과 힌지결합의 중간형태로 공동주택(아파트)과 같은 건축구조물에 흔히 사용되는 방법이다. 그러나 이 방법은 역학적 성능이 검증되지 않았으며 시공과정도 복잡하다. 이에 본 연구는 기존 관련 연구의 결과를 분석하고, PHC 말뚝의 콘크리트 단면적 대비 강선면적 비인 0.3%를 말뚝 접합부의 최소 철근보강량으로 선정하여 PHC 말뚝과 기초판과의 최적의 철근보강 방법을 말뚝 규격별(PHC 450, PHC 500, 및 PHC 600)로 제시하였다. PHC 말뚝과 기초판 접합부의 역학적 성능(인장강도와 전단강도)을 평가하기 위해 실험크기의 실험을 실시하였다. 그 결과, 모든 경우에 대해 요구강도를 만족하였으며 실제 적용되어도 문제가 없음을 확인하였다. 본 결과는 기존 연구에서 제시되었던 접합부의 철근 보강량보다 그 양이 대폭 감소하는 것으로 나타나 PHC 말뚝 시공 시 원가 절감에도 기여할 것으로 판단된다.

주제어 PHC 말뚝 접합부, 최소 철근보강량, 인발실험, 수평전단실험

ABSTRACT

Method of protruding steel bar embedded in PHC pile for connecting with foundation plate is an intermediate form of fixed and hinged connection and has often been used in architectural structures such as apartment complex. However, mechanical properties of this method have not been proved and its construction process is not simple. In this study, therefore, by analyzing previous research and by considering ratio of steel bar and concrete in PHC pile, which is minimum reinforcement of rebar, the newly optimized method of reinforcing joint of PHC pile and foundation plate is suggested with respect to PHC pile type (PHC 450, PHC 500, and PHC 600). To assess mechanical properties (ultimate tensile and shear strength) of joint of PHC pile and foundation plate, full scale experimental tests are performed. As a result, all cases are satisfied with required design criteria and can be practically applied. Our results indicate that reduction of rebar reinforcement compared to previous method would lead cost saving in PHC pile construction.

Key words Joint of PHC Pile, Minimum Reinforcement of Rebar, Tensile Strength Test, Shear Strength Test

1. 서 론

PHC(Pretensioned spun High strength Concrete) 말뚝은 강관말뚝과 함께 매입말뚝 공법에 주로 사용되는 콘크리트 말뚝으로 1991년 국내에 도입된 이후 급속도로 활용이 증가하고 있으며[조천환, 2007], 국내에서는 현재 약 150만 본에 이르는 많은 양이 매년 시공되고 있다.

말뚝기초를 갖는 건축물은 상부구조로부터 말뚝기초까지

하중을 효과적으로 전달하기 위하여 말뚝의 머리(두부)와 건축물의 기초를 적절히 보강하여 접합한다. 그림 1은 중공말뚝의 대표격으로 현재 널리 사용되고 있는 PHC 말뚝의 머리(두부)를 보강하는 종래의 방법을 나타낸 것이다. 이 방법은 일본에서 개발되어 일본과 우리나라에서 건축물의 기초시공에 많이 사용되고 있는 방법으로, PHC 말뚝 몸체에 있는 PC 강선을 30 cm 정도 노출시켜 이를 기초에 정착하여 보강하는 방식이다[대한주택공사, 2004]. 시공은 먼저 PHC 말뚝을 지

1) 한국토지주택공사 토지주택연구원, 수석연구원(jbpark@LH.or.kr)
 2) 한국토지주택공사 토지주택연구원, 책임연구원(교신저자: yjsim@LH.or.kr)
 3) 한국토지주택공사 토지주택연구원, 수석연구원

표 1. 말뚝머리 보강상세별 역학적 성능 실험결과(단위: kN) [박종배 등, 2009]

말뚝머리 보강방법	압축내력	전단내력	인발내력	휨인발내력	
				수평하중	휨모멘트(kN·m)
철근보강	2,655.7 이상	300.9	246.1	101.0	88.0
기존 강선남김	2,655.7 이상	235.4	223.6	64.0	56.0
무보강	-	68.9	65.5	-	-

표 2. 말뚝머리(PHC 450)에 작용하는 설계하중(단위 : kN)[박종배 등, 2009]

층고/말뚝 본수	말뚝 본당 연직하중			말뚝 본당 수평하중	
	압축력 감소측	중립축	압축력 증가측	수동토압 미고려	수동토압 고려
15층/187본	537.3	875.1	1,212.9	56.0	46.0(지하층 2.6 m)
					12.0(지하층 5.3 m)
20층/229본	732.6	960.3	1,188.0	62.0	40.0(지하층 2.6 m)
					13.0(지하층 5.3 m)
25층/283본	789.0	963.5	1,138.0	39.0	35.0(지하층 2.6 m)
					13.0(지하층 5.3 m)

표 1의 실험결과와 표 2의 요구강도를 비교해 보면, PHC 450 말뚝의 압축내력은 보강상세와 무관하게 모두 2,655.7 kN 이상 보유하고 있는 반면 실제적으로 말뚝머리에서 요구되는 압축강도는 1,212.9 kN(표 2) 정도로 보유내력이 요구강도보다 2배 이상 크기 때문에 제안된 철근보강 방법과 기존 강선남김 방법 모두 충분한 안전율을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 표 2로부터 말뚝머리에는 수동토압이 작용하지 않을 경우 39.0~62.0 kN 정도의 수평하중이 작용하나 실험으로부터 확인된 전단내력은 제안된 철근보강 방법과 기존 강선남김 방법이 각각 300.9 kN과 235.4 kN이므로 수평하중에 대해서도 충분한 안전율을 가지고 저항할 수 있는 것으로 나타났다.

이상의 분석에 근거하여 보면 제안된 철근보강 방법에 의한 말뚝머리의 내력은 설계 요구 값보다 필요 이상으로 크게 나타나고 있어 철근보강량의 최적화를 통하여 비용을 절감하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 또한 공동주택의 고층화에 대응하기 위하여 향후에는 PHC 450뿐만 아니라 PHC 500 및 PHC 600도 사용하게 될 것으로 기대되는 바 이들 말뚝에 대해서도 최적 보강상세를 제시할 필요가 있다고 사료된다.

3. 말뚝머리 접합부 최적 철근보강량 선정기준

저자에 의해 수행된 기존 실험결과[박종배 등, 2009]에 의해 기존의 강선남김 방식에 의한 철근량만으로도 말뚝의 압축 및 수평전단 내력을 충분히 확보할 수 있는 것으로 확인된 점에 착안하여 PHC 말뚝의 콘크리트 단면적 대비 강선면적 비인 0.3%를 최적 철근보강량으로 선정하였다. 표 3은 현

표 3. 현장타설 말뚝의 최대·최소 철근보강량

항목	최대	최소
철근량	6% (6%)	0.4% (0.2%)
직경	- (32 mm)	22 mm (19 mm)
순간격	- (400 mm)	철근지름의 2배, 또는 조골재 최대치수의 2배 이상
갯수		6개

()안은 일본 국철기초표준 기준[토목공법연구회, 1992]

표 4. 말뚝규격별 말뚝머리 접합부의 철근보강량

말뚝규격		구분	철근단면적 (mm ²)	철근비 (%)	보강심도 (cm)
기존 연구	PHC 450 (159,043 mm ²)	6-HD13	796.4	0.28	40
		4-HD13	530.9	0.33	45
본 연구	PHC 450 (159,043 mm ²)	6-HD10	471.2	0.30	45
		PHC 500 (196,350 mm ²)	8-HD10	628.3	0.32
	PHC 600 (282,743 mm ²)	6-HD13	796.4	0.28	60

주) 보강심도는 말뚝직경과 비교하여 적어도 같거나 커야 하는 기준[토목공법연구회, 1992] 적용

장타설 말뚝에서 일반적으로 사용되고 있는 최대·최소 철근량을 나타낸 것으로 0.3%의 보강량은 일본의 국철기초표준에 의한 최소보강량 0.2%를 상회하는 값이라는 점에서 PHC 말뚝머리와 기초판 접합부의 역학적인 성능을 확보하는데 충분한 양으로 판단하였으며, 표 4와 같이 PHC 450, PHC 500, 그리고 PHC 600의 말뚝머리와 기초판 접합부의 최적 철근보강량을 결정하였다.

저자에 의한 기존 연구[박종배 등, 2009]에서는 PHC 450의 경우 6-HD13을 사용하여 보강하였으나 표 4에 나타난 바와 같이 철근비를 0.3%로 하면 4-HD13이면 충분하며, 6-HD10을 사용하였을 경우와 또한 유사하여 최고 40.8% 철근량이 기존 대비 감소하는 것으로 나타났다. PHC 450의 경우 동일한 철근비에서 철근 4개보다는 6개로 보강하는 것이 역학적으로 더 유리할 것으로 판단하였으며, 본 연구에서는 실험을 통하여 그 역학적 성능을 규명하고자 한다.

4. 역학적 성능 실험

4.1 실험체

표 4에서 제시된 말뚝규격별 철근보강 상세의 적합성을 검증하기 위하여 표 5와 같이 실물크기 실험체를 제작하여 수평전단 및 인발 실험을 실시하였다. 그림 3과 그림 4는 각각 인발실험과 수평전단실험을 위해 제작한 PHC 450 실험체의 배근상세를 예로서 나타낸 것이다. 실험체 제작 시 보강근으로 사용된 HD10과 HD13 철근의 항복강도는 각각 535.2

표 5. 실험체 일람표

구분	PHC 450	PHC 500	PHC 600	
철근보강량	인발실험	4-HD13 6-HD10	8-HD10 -	6-HD13 -
	수평전단실험	6-HD10	8-HD10	6-HD13
실험회수	3	2	2	

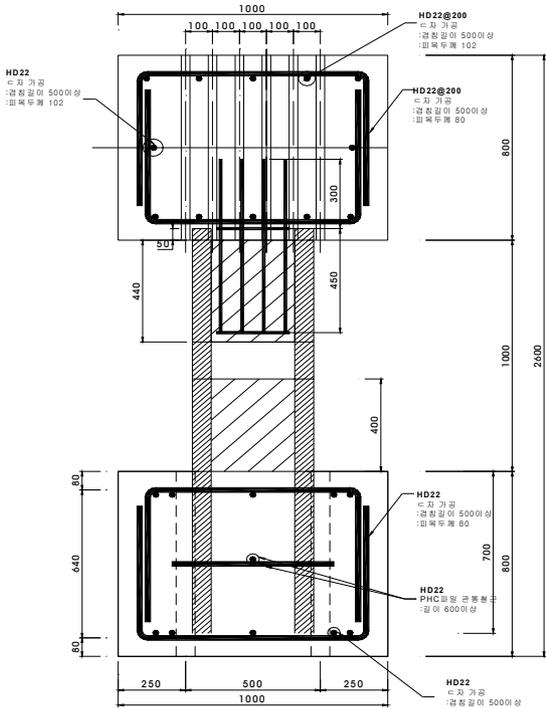


그림 3. 인발실험체 배근상세도(PHC 450, 6-HD10)

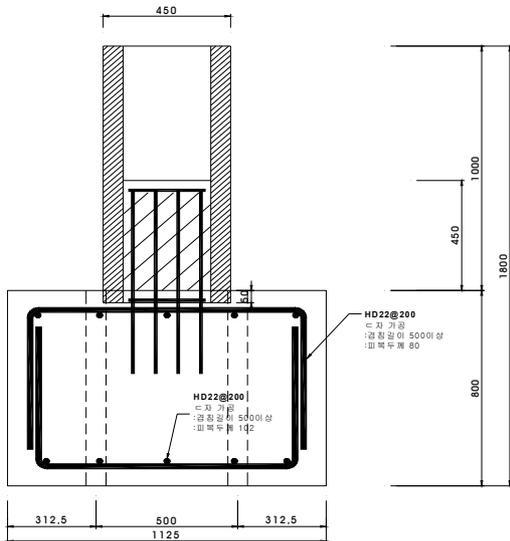


그림 4. 전단실험체 배근상세도(PHC 450, 6-HD10)

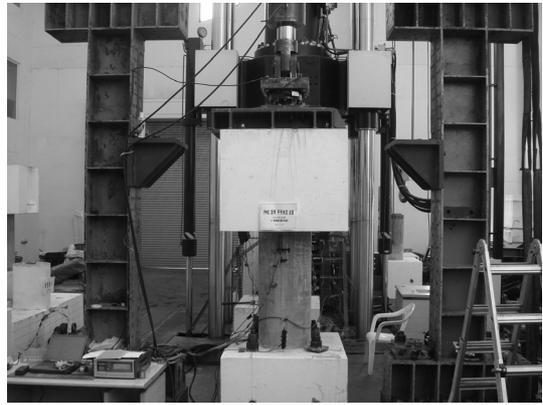


그림 5. 인발실험 전경



그림 6. 수평전단실험 전경

4.2 실험방법

그림 5와 그림 6에 인발실험과 수평전단실험의 실험체 설치전경을 나타내었다. 인발실험은 실험체에 중심 축하중으로써 인발하중이 작용하도록 그림 5와 같이 말뚝과 연결된 하부 기초를 반력바닥에 단단히 고정하고, 상부기초에 인장력을 가하여 말뚝머리와 상부기초 사이에 인발하중이 작용하도록 실험을 실시하였다. 계측은 실험과정에서 말뚝을 중심으로 상·하부에 설치된 기초부의 상대적 변위를 측정하였으며, 상하, 좌우 대칭으로 변위계를 설치하여 편심으로 인한 오차를 최소화하였다.

수평전단실험은 그림 6과 같이 PHC 말뚝규격별로 상부에서 설계압축력을 가력한 상태에서 측면 전단력을 작용시켜 실험을 실시하였다. 이 때 수평전단력은 가능한 한 기초판 가까이 위치한 말뚝 부위에 가력될 수 있도록 오일 잭을 기초판에 최대한 밀착시켜 하중을 재하하였으며, 실험이 진행되는 동안 작용 수평력과 하중점 변위를 계측하였다.

4.3 실험결과

4.3.1 인발실험

표 6은 실험결과를 정리한 것이며, 그림 7에 최종 파괴상

MPa와 441.1 MPa, 인장강도는 654.6 MPa와 661.4 MPa이며, 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 22.5 MPa이다.

황을 그리고 그림 8에 실험체별 하중-변위곡선의 비교를 나타내었다.

실험체의 파괴형태는 모든 실험체에서 공통적으로 말뚝머리 문힘부(문힘깊이 5 cm)의 초기 뿔힘 현상이 발생한 이후 말뚝파단과 말뚝주변 콘크리트의 파괴에 의해 최종파괴에 도달하는 양상을 나타내었다.

그림 8의 하중-변위 곡선을 살펴보면 모든 실험체가 극한 상태에 도달한 것을 볼 수 있으며, 항복이후 연성적인 거동을 나타낸 것을 확인할 수 있다. PHC 450말뚝의 경우 6-HD10의 경우가 4-HD13보다 역학적인 성능이 더 우수할 것으로 기대하였으나 인발 최대하중 및 변위연성도 측면에서 큰 차

표 6. 인발실험 결과

파일규격	보강방법	최대하중(kN)	최대하중시 변위(mm)	
기존 연구	PHC 450	6-HD13	246.1	1.44
본 연구	PHC 450	6-HD10	219	2.0
		4-HD13	251	2.0
	PHC 500	8-HD10	251	3.6
	PHC 600	6-HD13	472	2.7

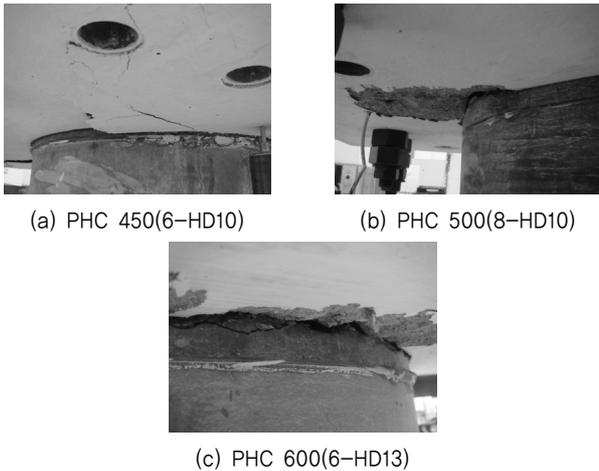


그림 7. 실험체별 최종 파괴상황(인발실험)

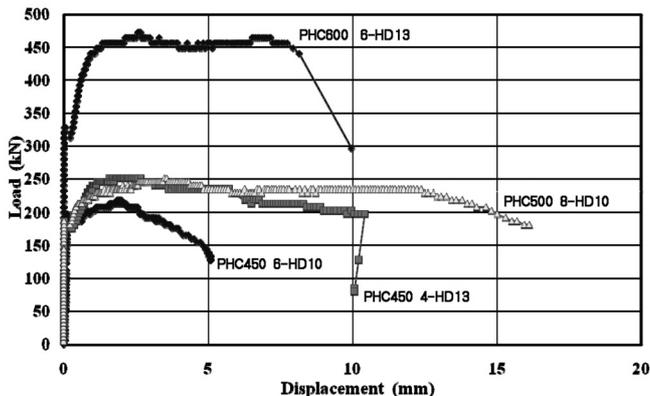


그림 8. 하중-변위 곡선 비교(인발실험)

이를 보이지 않았으며, 오히려 4-HD13의 경우가 더 큰 인발 최대하중과 탄성강성을 나타내었다. 이러한 차이는 단순히 철근보강량의 차이에 따른 내력증가에 기인한 것으로 사료되나, 기존연구[박종배 등, 2009]에서 PHC 450을 6-HD13으로 보강했을 때 인발 최대하중이 246.1 kN(표 1과 표 6)으로 나타난 사실에 비추어볼 때 철근보강량의 증가로 인한 차이가 내력증가의 큰 지배요인은 아닌 것으로 판단되며, 오히려 보강심도의 깊이에 따른 정착의 영향이 더 크게 작용하였을 것으로 판단된다.

PHC 500의 8-HD10은 보강철근량과 말뚝머리의 마찰면적이 PHC 450에 비하여 20% 이상 크에도 불구하고 4-HD13의 경우와 유사한 인발 최대하중을 나타낸 반면, PHC 600의 6-HD13은 472 kN의 인발 최대하중을 나타내어 다른 말뚝들에 비하여 2배 가까운 인발내력을 나타내었다. 이는 상기에서 언급되었듯이 철근보강량의 차이보다는 보강심도에 따른 영향이 말뚝머리 접합부의 인발내력을 결정하는데 더 큰 지배요인으로 작용한 것으로 판단된다.

4.3.2 수평전단실험

표 7에 실험결과를 정리하여 나타내었으며, 그림 9에 최종 파괴상황을, 그리고 그림 10에 말뚝규격별 하중-변위 관계를 비교하여 나타내었다.

실험체의 파괴는 그림 9에서 보듯이 모든 실험체가 공통적으로 PHC말뚝의 압괴가 아닌 철근콘크리트 기초부 연단에서의 파괴에 의해 최종파괴에 도달하였다. 기초부는 설계기

표 7. 수평전단실험 결과

파일규격	보강 방법	최대하중(kN)	최대하중시 변위(mm)	
기존 연구	PHC 450	6-HD13	300.9	2.15
본 연구	PHC 450	6-HD10	1,040	6.8
	PHC 500	8-HD10	1,210	7.7
	PHC 600	6-HD13	1,456	8.9

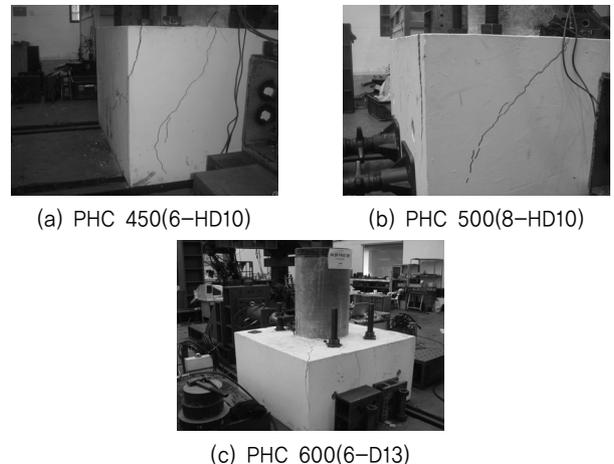


그림 9. 실험체별 최종 파괴상황(수평전단실험)

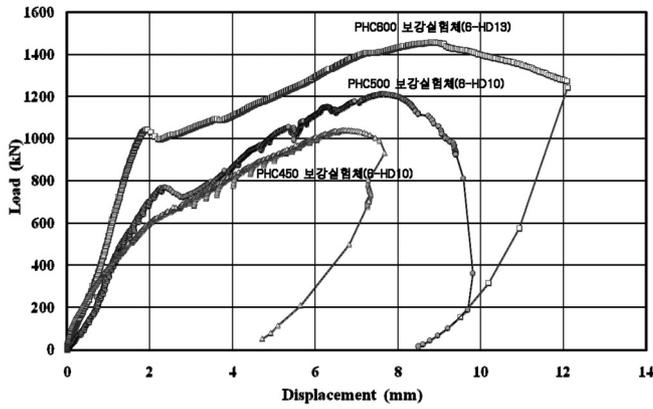


그림 10. 하중-변위 곡선 비교(수평전단실험)

준에 의한 최소 연단길이 규정을 만족하도록 제작되었으나 최종과파가 기초부에서 발생함에 따라 말뚝의 최대 수평내력은 본 실험에서 결정된 강도보다 훨씬 큰 내력을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 한 가지 주목되는 점은 실험결과 나타난 PHC 450말뚝의 최대 수평전단강도(1,040 kN)가 기존연구 [박종배 등, 2009]에서 PHC 450을 6-HD13으로 보강했을 때의 최대 수평전단강도(300.9 kN)보다 3배 이상 큰 값으로 나타난 점으로, 이러한 내력의 증가는 기존연구에서와 달리 이번 실험에서는 실제 상황을 반영하여 말뚝머리에 공동주택의 자중에 해당하는 무게를 재하(在荷)한 상태에서 실험한데 기인한 것으로 판단된다.

그림 10으로부터 수평전단에 의한 말뚝머리와 기초판 접합부는 충분히 안정적이고 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났으며, 철근보강량의 차이가 적은 PHC 450과 PHC 500은 유사한 거동을 보인 반면 PHC 450 대비 철근보강량의 차이가 큰 PHC 600은 큰 내력의 차이를 나타내어 철근보강량의 차이에 따른 효과를 분명하게 보여주었다.

5 설계하중과 실험결과 비교

5.1 말뚝머리에 작용하는 설계하중

현행 설계조건 하에서 제안된 말뚝머리 보강상세의 안전성을 검토하기 위하여 그림 11~그림 13과 같이 최근 널리 사용되고 있는 고층 공동주택의 말뚝기초를 대상으로 말뚝머리에 작용하는 설계하중을 산정하여 표 8에 제시하였다. 산정된 하중은 KBC2005 기준에 의한 하중조합에 따라 지진하중과 연직하중을 건물에 작용시켜 얻은 값이며, 해석 시 MIDAS 프로그램을 사용하였다.

표 8에서 나타난 바와 같이 해석결과로서는 말뚝머리에 모멘트와 인발력이 작용하지 않는 것으로 나타났으나, 지하층이 있는 공동주택의 저층공사 또는 지하주차장 공사 중에 지하수위 상승에 의한 부력이 발생하는 경우 말뚝머리에 인발력이 작용할 가능성이 있으므로 본 연구에서는 이에 대한 검토를 목적으로 인발내력도 검토하였다.

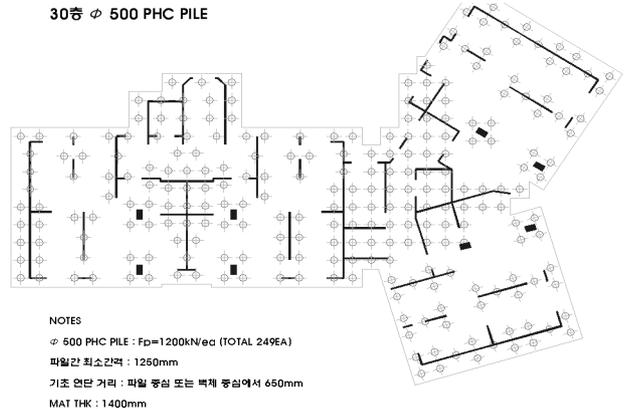


그림 11. 30층 공동주택 모델 평면도 및 말뚝배치도(PHC 450, PHC 500)

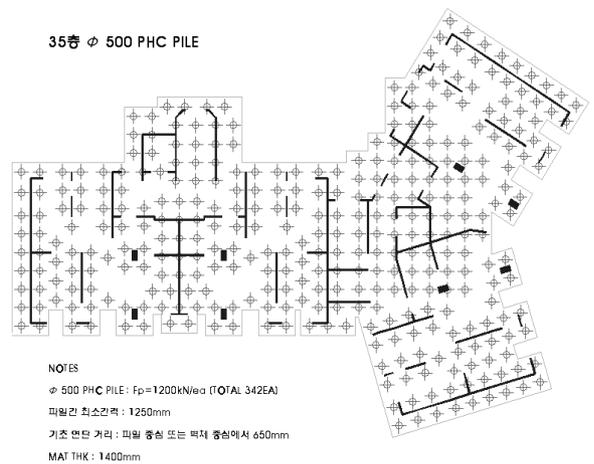


그림 12. 35층 공동주택 모델 평면도 및 말뚝배치도(PHC 500)

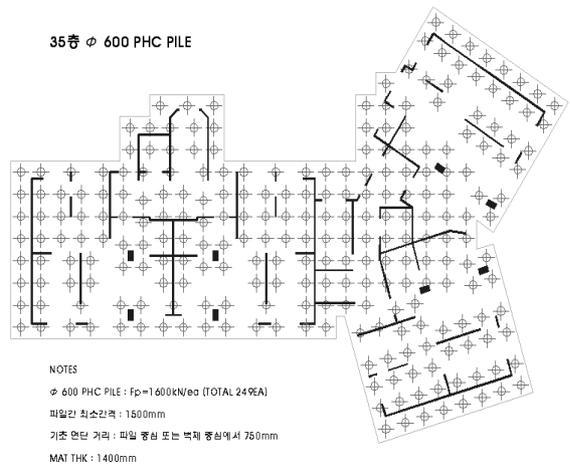


그림 13. 35층 공동주택 모델 평면도 및 말뚝배치도(PHC 600)

표 9는 말뚝규격별 실험결과와 표 8에 의한 설계하중을 비교하여 정리한 것으로 제안된 상세와 같이 최소철근비로 말뚝머리를 보강한다면 충분히 설계조건을 만족시키는 것으로 나타났다. 단, 전술하였듯이 집중하중 시 공동주택의 저층공사나 지하주차장 공사 시 건물에 부력이 발생하여 말뚝에 인

표 8. 공동주택 말뚝머리에 작용하는 설계하중

분 류	25층	30층	35층	
	PHC 450 (fp=1000kN)	PHC 500 (fp=1200kN)	PHC 500 (fp=1200kN)	PHC 600 (fp=1600kN)
파일갯수(본)	249	249	342	249
총연직하중(kN)	219,680	261,360	345,250	346,580
연직하중시 파일수직반력(kN/본)	880	1,100	1,010	1,390
지진하중 작용시 파일수직반력(약축/강축)(kN/본)	800/960	1,070/1,130	950/1,070	1,300/1,480
지진하중시 총수평반력(kN)	18,170	18,790	21,050	21,050
지진하중에 의한 파일수평반력(kN/본)	73	75	62	85

표 9. 설계하중과 실험결과 비교(단위 : kN)

말뚝 규격		보강상세	역학성능실험 결과		설계해석 결과	
			극한인발내력	극한수평내력	최대인발하중	최대수평하중
기존 연구	PHC 450	6-HD13	246.1	300.9	0	39
본 연구	PHC 450	6-HD10	219	1,040	0	73
		4-HD13	251	-		
	PHC 500	8-HD10	251	1,210	0	75
	PHC 600	6-HD13	472	1,456	0	85

발력이 작용하는 경우가 있을 수 있다. 하지만 이 때 발생하는 인발력은 말뚝본 당 100 kN 미만으로 인발실험 결과와 비교하여 2배 이상의 안전율을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

3. 본 연구에서 제시한 말뚝머리 철근보강량은 기존 연구에서 제시한 PHC 450에 대한 철근보강량보다 최고 40.8% 감소하는 것으로 나타나 원가절감에도 기여할 것으로 기대된다.

6. 결론

- 본 연구에서는 철근보강 방식의 말뚝머리 보강법에 대하여 최소철근비를 적용한 최적 철근보강상세를 PHC 450, PHC 500, 그리고 PHC 600에 대해 제시하였다. 기존의 강선남김 방식에 의한 철근량만으로도 말뚝의 압축 및 수평전단 내력을 충분히 견딜 수 있는 것으로 확인되어 강선남김 방식의 콘크리트 단면적 대비 강선면적 비인 0.3%를 최적 철근보강량으로 선정하였다.
- 최적 철근보강량(0.3%)을 바탕으로 제안된 말뚝규격별 철근보강상세에 대하여 실험형 역학성능실험을 실시하고 그 결과를 공동주택의 말뚝머리에 작용하는 설계하중과 비교한 결과, 인발과 수평전단에 대하여 2배 이상의 안전율을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 대한건축학회(2006), “건설교통부제작-건축공사표준시방서”, 기문당, pp. 1474.
- 대한주택공사(2004), “공사감독 핸드북-건축”, pp. 76-78.
- 대한토목학회(2008), 도로교 설계기준 해설.
- 박종배, 천영수, 심영중(2009), “건축구조물 PHC 말뚝머리 보강 방법에 대한 연구”, 한국지반환경공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 361-366.
- 조천환(2007), “매입말뚝공법”, 이엔지북, pp. 331.
- 토목공법연구회(1992), “토질기초공법”, 원기술, pp. 225-308.
- 한국지반공학회(2006), “PHC 말뚝의 설계 및 시공 요령”, Report No. KGS06-075, pp. 359.