

# 원커팅 철근보강 PHC 말뚝의 속채움 콘크리트 부착파괴 성능

## Slip Failure Strength of Infilled Concrete with Reinforced PHC Pile by One-Cutting Method

천영수<sup>1</sup> · 심영종<sup>2</sup> · 박종배<sup>3</sup>

Young-Soo Chun<sup>1</sup>, Young-Jong Sim<sup>2</sup> and Jong-Bae Park<sup>3</sup>

(Received September 2, 2011 / Revised September 28, 2011 / Accepted October 17, 2011)

### 요 약

말뚝두부와 기초판의 연결방법으로서 기존의 강선남김방식은 시공성이 좋지 않고, 말뚝두부에 파손 및 균열이 발생할 가능성이 높을 뿐만 아니라 현장 인명사고가 자주 발생하여 최근에는 대안적인 방법으로서 원커팅에 의한 철근보강 방식이 제안되어 사용되고 있다. 하지만 이러한 방법들은 역학적 성능규명에 의하여 그 상세가 구체적으로 제안 또는 검증된 사례가 없다. 이 연구는 원커팅 철근보강 방식에 있어서 최적 보강상세를 제안할 목적으로 후 타설된 말뚝 내 속채움 콘크리트와 말뚝간의 전단마찰 저항력의 부족으로 인한 파괴를 실험을 통하여 규명하고, 적정 채움 깊이를 제안하였다. 실험결과에 근거하여 말뚝 부착파괴 강도를 안전측의 값으로 0.4MPa를 가정한다면, 부착파괴 이전에 철근이 항복에 도달하도록 하기 위해 속채움 콘크리트의 깊이는 최소한 PHC 450과 PHC 500의 경우 600mm 이상, PHC 600의 경우 1,000mm 이상 확보하여야 할 것으로 판단된다.

**주제어 :** 원커팅, 철근보강, PHC말뚝, 속채움 콘크리트, 부착파괴

### ABSTRACT

Existing method protruding strands that are embedded in PHC pile to connect pile head and foundation slab shows poor constructibility. As this causes crack and damage in pile head and casualties often occurs in construction site during the work, alternative method called one-cutting method, in which pile above the ground surface and strands embedded in pile are completely cut and pile head is reinforced with rebar for connection with foundation slab, is currently adopted. However, the capacity of details for these methods are not mechanically proved. In this study, in order to suggest proper details of reinforcement for one-cutting method, failures due to lack of shear resistance between infilled concrete and PHC pile are analyzed through experiments and embedded depth with infilled concrete inside PHC pile is suggested. Assuming that slip failure strength is 0.4MPa, which is obtained from experiment conservatively, to have rebar yielded before slip failure, minimum depth of infilled concrete for PHC 450 and PHC 500, need to be 600mm above, and for PHC 600, 1,000mm above.

**Keywords:** One-cutting method, Reinforcement with rebar, PHC pile, Infilled concrete, Slip failure

## 1. 서 론

건축물의 말뚝기초에서 PHC말뚝과 기초판을 연결하는 기존의 방법은 PHC말뚝 내의 PC강선을 300mm 정도 돌출시키고, 말뚝내부를 일정깊이 만큼 콘크리트로 채우는 방법(강선남김방식)으로 건축공사에서 보편적으로 사용되어 온 방법이다(그림 1(a), 박종배 외, 2009). 하지만 이 방법은 시공성이 좋지 않고, 강선을 남기는 과정에서 말뚝두부에 파손 및 균열

이 발생할 가능성이 높을 뿐만 아니라 현장 인명사고가 자주 발생하여 최근에는 이를 기피하는 추세이며, 대안적인 방법으로서 말뚝과 말뚝내의 강선을 완전히 절단하고 철근으로 보강하는 원커팅 방식이 제안되어 사용되고 있다(그림 1(b), 박종배 외, 2009).

그러나 이러한 보강방법들은 역학적인 요구 성능에 맞도록 상세가 개발되어 적용된 방법이 아니며, 현장에서의 필요에 따라 시공성에 주안점을 두고 제안되어 사용되고 있는 방

1) 토지주택연구원 수석연구원(주저자: cysoo@lh.or.kr)  
2) 토지주택연구원 책임연구원(교신저자: yjsim@lh.or.kr)  
3) 토지주택연구원 수석연구원

법으로 후자의 경우에 있어서도 철근의 보강양과 정착길이, 속채움 콘크리트의 채움 깊이 등에 대한 국내의 관련 지침은 최근까지 없었다.

기존의 콘크리트 말뚝과 강관말뚝의 두부 보강방법은 속채움 방법으로써 말뚝머리 접합부의 연직 및 수평 재하시험 등에 의해 덮개 판을 설치하지 않고 콘크리트를 속채움하는 구조가 축방향 압축력에 대한 분산효과가 크고 수평력에 대한 강관말뚝의 휨응력도 작은 것으로 평가되어 왔다(大志万, 和地, 1985). 도로교설계기준(한국도로교통협회, 2000)에서도 말뚝내부를 콘크리트로 속채움할 경우 합성구조의 형태를 이루기 때문에 강성이 크고 극한변형 능력이 증가하여 내진성능이 좋아지는 등의 많은 장점이 있다고 밝히고 있다. 하지만 말뚝과 속채움 콘크리트 간의 부착강도 및 적절한 속채움 깊이에 대한 구체적인 연구는 진행되지 않았다.

말뚝의 두부 보강방법을 개선하기 위한 국내의 연구는 강관말뚝의 경우 1988년부터 시작되었으며, 속채움 방법이 아닌 덮개 판을 볼팅하여 연결하는 방법에 관한 연구들이 주류를 이루었고(박영호 외, 1998), 현재도 이 방법이 많이 사용되고 있다.

기성 콘크리트 말뚝의 두부 보강방법은 건축용과 토목용으로 나누어 사용되어 왔으며, 건축용 말뚝 두부 보강방법을 개선하기 위한 연구는 2000년 후반에 들어서야 시작되었다(토지주택연구원, 2009).

박종배 외 (2009; 2010)에서 수행된 연구는 동 구조와 관련된 최초의 연구실적으로서 기초판과 말뚝두부의 보강상세를 말뚝규격별로 제안하고 있다. 이 연구는 앞서 수행된 말뚝두부와 기초판 접합부의 보강상세를 개발하기 위한 연구의 일환으로서, 특히 원커팅 철근보강 방식의 말뚝내부 속채움 콘크리트의 부착성능을 실험을 통하여 규명하고, 적정 채움 깊이를 제안하고자 하는데 그 목적이 있다.

철근보강 방법의 말뚝두부와 기초판의 연결상세에서는 ① 연결철근의 인장파괴, ② 연결철근의 부착파괴, ③ 말뚝과 속채움 콘크리트 간의 부착파괴와 같은 3가지 형태의 파괴를 예상해 볼 수 있다. ①의 파괴형태는 말뚝과 속채움 콘크리트 간의 부착이 충분하고 연결철근 또한 충분한 정착길이가 확

보되어 연결철근의 인장강도로서 전체적인 파괴가 결정되는 경우이며, ②의 파괴형태는 연결철근의 정착길이가 부족하여 철근과 콘크리트 간의 부착상실로 인한 뽑힘파괴를 의미한다. 마지막으로 ③의 파괴형태는 연결철근의 정착이 확실하고 인장강도가 충분히 확보된 조건에서 발생할 수 있는 파괴로서 후 타설된 말뚝 내 속채움 콘크리트와 말뚝간의 전단마찰 저항력의 부족으로 인한 파괴를 의미한다.

이 연구에서의 실험은 ③의 경우에 의한 파괴를 전제로 그 파괴강도를 알아보기 위한 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험체

본 실험은 말뚝과 속채움 콘크리트 간의 마찰전단에 저항하는 부착성능을 알아보기 위한 것으로서, 말뚝규격과 속채움 심도를 주요 변수로 하여 총 36개의 실험체를 제작하였다. 말뚝의 규격은 현재 실제 현장에서 사용하고 있는 종류로서 PHC(A종) 450, 500, 600의 3종류를 채택하였으며, 속채움 심도는 보강철근의 정착길이(KBC2009)를 기준으로 4단계로 변화시켜 실험하였다. 표 1은 실험체 일람표를 나타낸 것이다.

본 실험의 목적은 말뚝과 속채움 콘크리트 간의 마찰전단으로 인한 강도를 알아보기 위한 것임으로 실험체는 속채움 심도에 따라 말뚝을 일정 길이로 자르고 속채움 콘크리트 잔후부에 50mm의 여유를 두어 미끄러짐이 발생하도록 계획하였다. 그림 2는 대표적인 PHC 450 실험체의 보강심도별 형상을 도시한 것이다.

표 1. 실험체 일람표

실험체명	속채움 깊이 (mm)	실험체 수		
		PHC 450	PHC 500	PHC 600
PHC*-30	300	3	3	3
PHC*-45	450	3	3	3
PHC*-60	600	3	3	3
PHC*-100	1,000	3	3	3
계		12	12	12

주 : 말뚝직경(450, 500, 600)

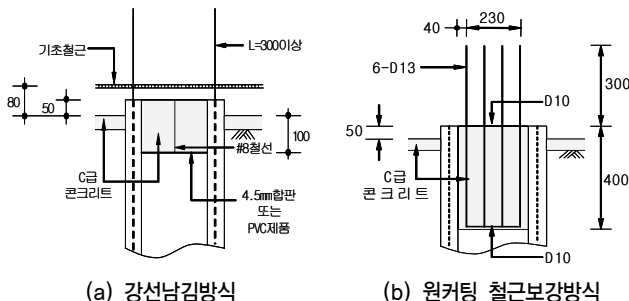


그림 1. 말뚝두부와 기초판의 연결방법

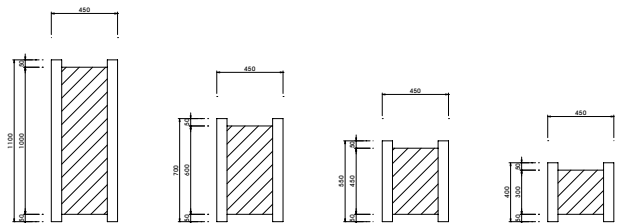


그림 2. PHC 450 실험체의 보강심도별 상세

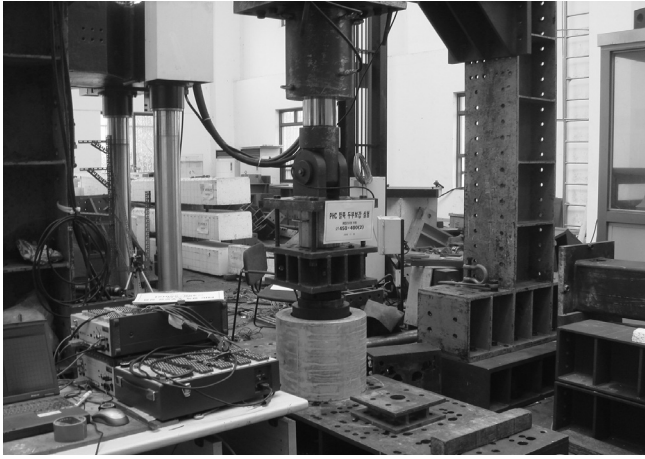


그림 3. 실험체 설치 및 가력상황



(a) PHC 450 (b) PHC 500 (c) PHC 600

그림 4. 실험체 적치 상황



그림 5. 콘크리트 타설 및 면정리

## 2.2 실험방법

기초판으로부터 말뚝에 인장력이 작용하는 경우와 압축력이 가해지는 경우 말뚝의 둘레방향으로 다른 응력상황이 발생하게 되므로 속채움 콘크리트에 인발력이 작용하도록 할 것인가 압축력이 작용하도록 할 것인가 하는 문제는 매우 중요할 수 있다. 하지만 속채움 콘크리트 내에 매립되어 있는 철근이 인발되는 상황을 모사하여 실험하는데는 한계가 있으므로 본 실험에서는 속채움 심도가 깊지 않아 인장을 가할 때와 압축을 가할 때 유사한 응력상황이 발생할 것이라는 가정 하에 가력상의 문제를 용이하게 하기 위하여 속채움 콘크리트를 인발하지 않고 후면에서 압축력을 가력하는 방식으로 실험을 실시하였다. 물론 이러한 가정은 전체적인 실험결과에 영향을 미칠 수 있을 것으로 사료되나 여기서는 그 효과를 무시하기로 한다.

따라서 실험은 먼저 실험체를 반력바닥에 수평으로 설치하고 실험체의 상부에 3,000kN 용량의 오일잭을 설치하여 연직방향으로 하중이 실험체에 인가되도록 실시하였다. 이 때 속채움 콘크리트의 상부 면에 속채움 내경과 동일한 크기의 원형 철판을 100mm 두께로 제작하여 실험 시 작용하는 압축하중이 속채움 콘크리트에 등분포로 작용할 수 있도록 하였다. 실험 시 속채움 콘크리트의 미끄러짐 양을 측정하기 위하여 실험체 하부 중앙에 변위계를 설치하였다. 그림 3은 이러한 실험체의 설치 및 가력상황을 나타낸 것이다.

## 2.3 실험체 제작

실험체는 (주)토탈PC 여주공장에서 제작하였으며, 동일한 위치에서 대기 양생 후 실험실로 반입하여 실험하였다. 실험체 제작에 사용된 속채움 콘크리트의 설계강도는 24MPa이며, 양생 후 실시한 28일 압축강도는 22.3 MPa이다.

그림 4와 그림 5는 실험체의 적치 및 제작과정을 나타낸 것이다.

## 2.4 실험결과

먼저 PHC 450에 대한 처음 2개의 실험체에 대한 실험을 실시한 결과, 당초 예상과는 달리 말뚝과 속채움 콘크리트와의 미끄러짐 파괴 이전에 말뚝이 할렬하는 파괴결과를 얻었다. 이는 마찰전단으로 인한 반경방향으로의 인장응력이 미끄러짐을 유발하는 마찰응력보다 커서 발생한 결과라 판단하였으며, 실제적으로는 말뚝이 기초판 내에 50mm 정도 묻히도록 시공되므로 단부 구속효과가 있을 것으로 판단하여 3개의 실험체 중 1개의 실험체는 말뚝 주위를 탄소섬유쉬트로 보강하여 쪼갬파괴가 발생하지 않도록 구속한 조건에서 실험을 실시하였다.

### 2.4.1 균열 및 파괴상황

보강전 실험체는 모두 최대하중 이후에 급격한 하중저하를 보이며 말뚝에 수직방향 관통균열이 발생하는 형태로 최종파괴되었다. 탄소섬유로 보강한 실험체의 경우에는 말뚝에 큰 균열발생 없이 속채움 콘크리트의 부착파괴로 최종파괴에 도달하였으며, 최대 하중이후에는 보강전 실험체와는 다르게 연성적인 거동을 나타내었다. 그림 6에 대표적인 PHC450 실험체의 균열 및 파괴상황을 나타내었다.

최대하중은 보강전 실험체의 경우 각각 PHC450-30이 218kN, 238kN(평균 228kN), PHC450-45가 182kN, 377kN(평균 280kN), PHC450-60이 448kN, 517kN(평균 483kN), 381kN, 417kN(평균 399kN)으로 나타났으며, 탄소섬유쉬트로 보강한 실험체의 경우 PHC450-30, 45, 60, 100실험체 각각 275kN, 962kN, 1,074kN, 872kN으로 보강전 실험체와 비교하여 약 21%, 343%, 222%, 219% 증가를 나타내었다.

또한 보강전 PHC500-30, 45, 60, 100 실험체의 최대하중은 각각 245kN, 292kN(평균 269kN), 333kN, 357kN(평균 345kN), 348kN, 411kN(평균 380kN), 579kN, 803kN(평균 691kN)으로 나타났으며, 탄소섬유쉬트로 보강한 실험체의 경우 각각

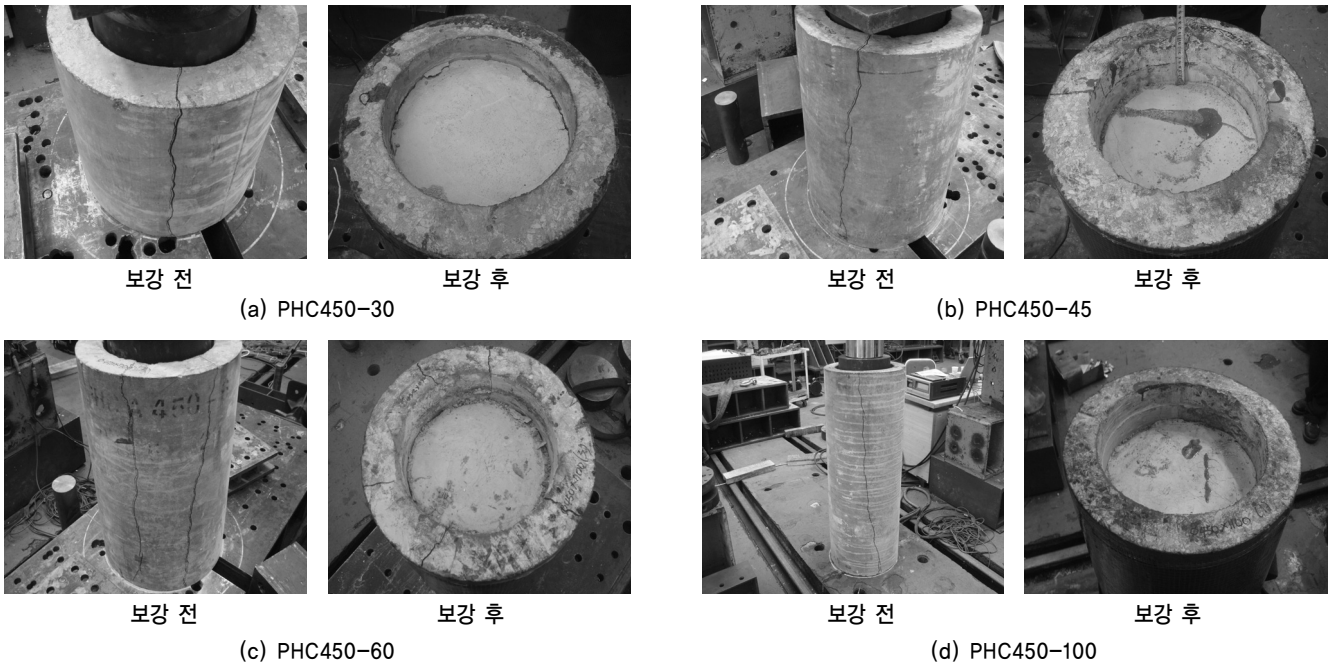


그림 6. PHC450 실험체의 균열 및 최종파괴 상황

표 2. 실험결과(최대강도 : kN)

속채움 깊이(cm)		PHC450	PHC500	PHC600
30	30-1	238	245	158
	30-2	218	292	190
	30-3*	275	285	286
45	45-1	182	333	227
	45-2	377	357	257
	45-3*	962	619	493
60	60-1	448	348	343
	60-2	517	411	481
	60-3*	1,074	711	445
100	100-1	381	579	518
	100-2	417	803	556
	100-3*	872	742	736

주 : 탄소섬유쉬트로 보강한 실험체

285kN, 619kN, 711kN, 742kN으로 보강전 실험체와 비교하여 약 6%, 27%, 87%, 7%정도 증가를 나타내었다.

PHC600-30, 45, 60, 100 실험체의 경우도 상기 두 실험체와 유사하게 보강전과 비교하여 보강후 각각 약 64%, 283%, 8%, 137%정도 증가를 나타내었다. 표 2는 전체 실험체의 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

#### 2.4.2 하중-변위 관계

대표적인 PHC450 실험체의 하중-변위 관계를 그림 7에 나타내었다. 실험체의 균열 및 파괴상황에서 설명하였듯이 모

든 실험체는 보강 전 최대하중이후 급격한 하중저하를 경험하는 것으로 나타났으며, 보강 후에는 단부 구속효과로 인하여 쪼갬파괴가 지연되면서 미끄러짐 파괴로 이어져 상당히 연성적인 거동을 나타내었다.

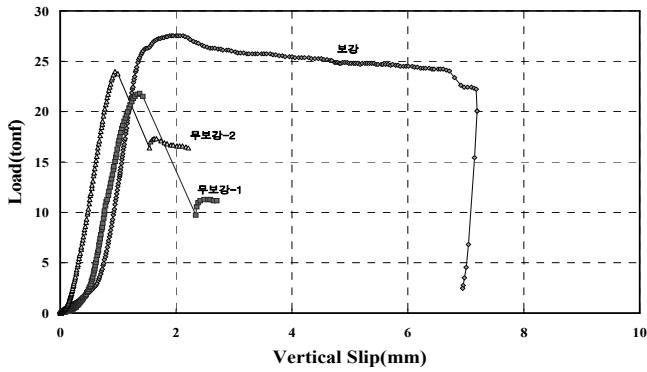
실험결과, 말뚝의 규격변화에 따른 거동의 차이는 그리 크지 않은 것으로 나타났으며, 보강심도에 있어서는 예상된 바와 같이 속채움 콘크리트의 깊이에 비례하여 최대강도가 커지는 양상을 나타내었다. 다만 보강 전, 후 최대강도의 차이는 보강심도와 일정한 비례관계를 형성하지 않고 있는데 이는 주로 말뚝 내부 슬러지 등의 불균등 분포와 보강쉬트의 부착에 따른 시공오차에 의한 것으로 판단된다.

### 2.5 실험결과 분석

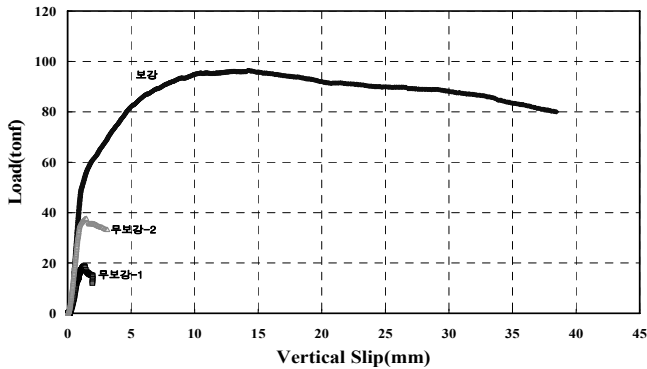
#### 2.5.1 응력전달 및 파괴 메카니즘

원커팅 철근보강 방식에 있어서 기초판과 말뚝 두부와의 연결을 위한 철근에 인장력이 가해질 경우 이들 철근을 둘러싸고 있는 말뚝 내 속채움 콘크리트와 철근 사이의 부착 또는 철근의 정착이 충분하다면 2차적으로 속채움 콘크리트와 말뚝 간의 미끄러짐이 발생할 수 있다. 이러한 마찰전단은 속채움 콘크리트와 말뚝 사이에 그림 7(Midas MODS)의 해석 결과에서도 보여지듯이 내부인장 외부압축의 응력상황을 발생시키게 됨으로 말뚝은 길이방향의 힘과 반경방향의 힘을 동시에 받게 되는 상황을 만들어 내게 된다.

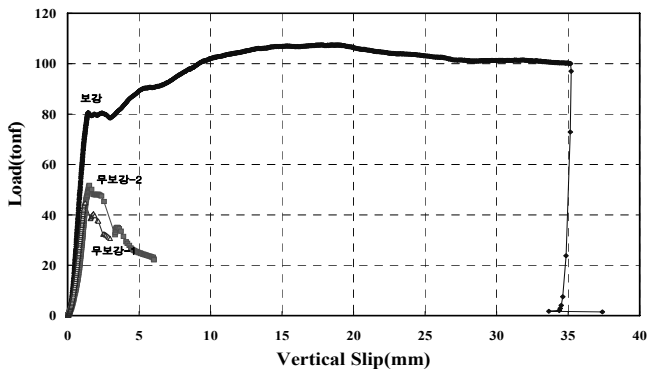
이러한 응력상황은 말뚝의 길이방향 단면을 고려해 보았



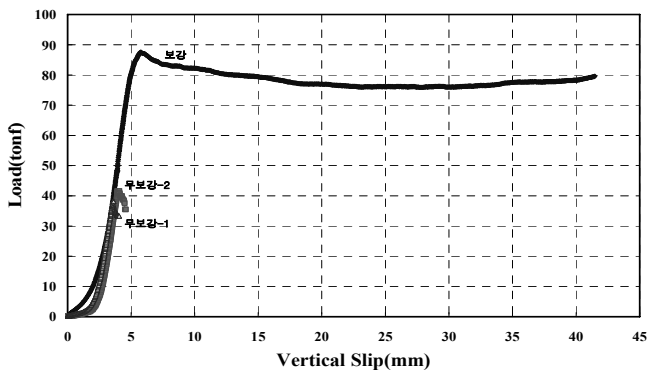
(a) PHC450-30



(b) PHC450-45



(c) PHC450-60



(d) PHC450-100

그림 7. PHC450 실험체의 하중-변위 관계

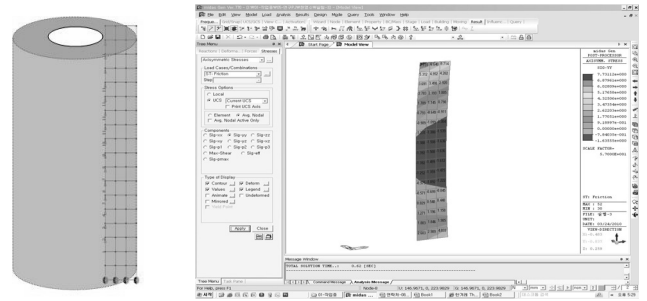


그림 8. 말뚝과 속채움 콘크리트 사이의 응력상황

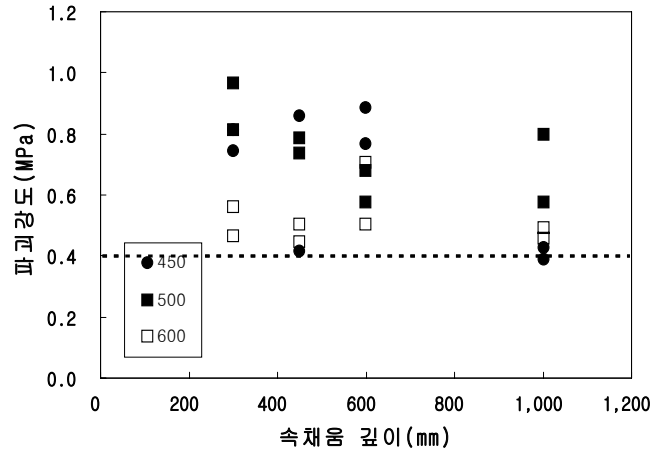


그림 9. 속채움 깊이별 말뚝의 파괴강도

움 콘크리트를 둘러싸고 있는 말뚝 주위에 인장력을 발생시켜 최종적으로는 말뚝의 길이방향으로 콘크리트의 쪼갬파괴를 유도하는 결과를 낳게 될 것으로 사료된다. 따라서 말뚝의 두께와 인장강도가 충분치 않다면 말뚝과 속채움 콘크리트는 전단마찰로 인한 미끄러짐 이전에 말뚝의 쪼갬파괴를 먼저 경험하게 될 수도 있다. 이러한 상황은 2.4절의 보강 전 실험 결과를 통하여 충분히 설명 가능하며, 보강심도와 철근량과의 상관관계를 결정하는데 반영되어야 할 것으로 판단된다.

### 2.5.2 속채움 콘크리트의 깊이와 철근배근 상세와의 관계

2.4절의 실험결과에서 보듯이 말뚝은 모두 속채움 콘크리트와 말뚝간의 미끄러짐이 발생하면서 말뚝의 쪼갬파괴를 동반하였으며, 말뚝머리가 구속된 경우에 있어서도 말뚝의 할렬을 동반한 상태에서 최종 파괴강도가 결정되었다. 이는 2.5.1절에서 설명되고 있듯이 미끄러짐 시 말뚝의 반경방향으로 작용하는 인장력에 의하여 말뚝이 파괴를 일으켰기 때문으로 사료된다.

그림 9는 말뚝과 속채움 콘크리트 간의 부착 파괴강도를 말뚝의 규격과 속채움 깊이별로 도식화하여 나타낸 것이다.

그림으로부터 부착강도는 말뚝 규격 및 속채움 깊이와 관련하여 다소 편차를 보이고는 있으나 대개 0.4MPa~ 1.0MPa 사이의 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 말뚝 내부 슬

을 때 말뚝 내부가 인장을 받는 캔틸레버와 유사한 경우로 생각할 수 있으며, 반경방향으로 작용하는 후자의 힘은 속채

표 3. 철근상세에 따른 항복강도와 말뚝파괴 강도 비교

구분	PHC 450	PHC 500	PHC 600
철근보강상세	6-D10(4-D13)	8-D10	6-D13
항복하중(kN)	170.4(203.2)	227.2	304.8
말뚝파괴강도(kN)	300 (mm)	116.8	135.7
	450 (mm)	175.3	203.6
	600 (mm)	233.7	271.4
	1,000 (mm)	389.6	452.4

러지의 잔존량이나 거칠기의 정도에 따라 말뚝 내부면의 부착특성에 편차가 있기 때문이라 사료된다.

표 3의 비교는 접합부 철근보강 상세별 철근의 항복강도와 말뚝 파괴강도와 비교를 나타낸 것이다. 이 경우 말뚝 파괴강도는 그림 9의 실험결과에 의거 안전측의 값으로서 0.4MPa를 선택하였다. 이는 실제적으로 말뚝머리가 50mm 정도 기초판에 묻히도록 시공하는 것으로 지침이 설정되어 있으나, 고려하는 작용하중의 형태가 인장인 점과 시공 시 오차 등을 감안한다면 실제적으로는 그 구속효과는 신뢰할 수 없을 것으로 판단되기 때문이다.

표 3의 결과로부터 주목되는 점은 말뚝의 파괴 이전에 철근이 항복강도에 도달하도록 하기 위해서는 최소한 속채움 콘크리트의 깊이를 PHC 450과 PHC 500의 경우 600mm 이상, PHC 600의 경우 1,000mm 이상 확보하여야 한다는 사실이다. 이는 역으로 해석하면 속채움 콘크리트의 깊이가 충분하지 않을 경우 과도한 철근보강은 오히려 말뚝의 선행파괴를 유도할 수 있으므로 보강철근의 양을 줄여서 보강하는 것이 더 합리적이다 라는 것이다. 따라서 상기 결과에 주목한다면 속채움 깊이와 철근 보강량의 관계는 보강철근의 항복 이전에 말뚝 파괴가 선행되지 않도록 다음 식 (1)과 같은 조건에 따라 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

$$A_R f_y < 0.4 D_P H_P \quad (1)$$

여기서,  $A_R$ ,  $f_y$ ,  $D_P$ ,  $H_P$ 는 각각 보강근의 단면적과 항복강도, 그리고 PHC말뚝의 내경과 속채움 깊이이다. 즉 속채움 깊이를 400mm로 할 경우 PHC 450과 PHC 500은 4(5)-D10, PHC 600은 6-D10 정도의 보강상세를 갖는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

### 3. 결론

이 연구에서는 원커팅 철근보강 방식에 있어서 연결철근의 정착이 확실하고 인장강도가 충분히 확보된 조건에서 발생할 수 있는 파괴로서 후 타설된 말뚝 내 속채움 콘크리트와 말뚝간의 전단마찰 저항력의 부족으로 인한 파괴를 실험을 통

하여 규명함으로써 적정 채움 깊이를 제안하고자 하였으며, 실험연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 말뚝의 규격변화에 따른 부착거동의 차이는 그리 크지 않은 것으로 나타났으며, 보강심도에 있어서는 예상된 바와 같이 속채움 콘크리트의 깊이에 비례하여 최대강도가 커지는 것으로 나타났다.
2. 말뚝의 두께와 인장강도가 충분치 않다면 말뚝과 속채움 콘크리트는 전단마찰로 인한 미끄러짐 이전에 말뚝의 쪼갬파괴를 먼저 경험하게 될 수도 있다.
3. 말뚝 파괴강도를 안전측의 값으로 0.4MPa를 가정한다면, 말뚝의 파괴 이전에 철근이 항복강도에 도달하도록 하기 위해서 속채움 콘크리트의 깊이는 최소한 PHC 450과 PHC 500의 경우 600mm 이상, PHC 600의 경우 1,000mm 이상 확보하여야 할 것으로 판단된다.
4. 속채움 콘크리트의 깊이가 충분하지 않을 경우 과도한 철근보강은 오히려 말뚝의 선행파괴를 유도할 수 있으므로 보강철근의 양을 줄여서 보강하는 것이 더 합리적이다. 따라서 속채움 깊이를 400mm로 할 경우 PHC 450과 PHC 500은 4(5)-D10, PHC 600은 6-D10 정도의 보강상세를 갖는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 박종배, 천영수, 박용부, 심영종, 이완철(2009), 「건축물 말뚝기초에서의 기초판과 말뚝두부 접합부 설계에 관한 연구」, 주택도시연구원.
2. 박종배, 천영수, 심영종, 한규범(2010), 「건축구조물 말뚝머리 접합부의 보강상세에 관한 연구」, 토지주택연구원.
3. 대한건축학회(2009), 「건축구조 설계기준 및 해설(KBC2009)」.
4. 大志万, 和地(1985), “杭基礎とプ-チング基礎部の設計”, 「基礎工」, 11월, 106~112.
5. 박영호, 김경석, 김성환, 전한철, 이기홍(1998), “새로운 강관말뚝 머리보강 방법”, 「한국지반공학회 봄학술발표회 논문집」, 159~172.
6. 박영호, 김성환, 장용채(1998), “볼트식 강관말뚝 머리보강 방법”, 「한국지반공학회지」, 14(6): 57~71.