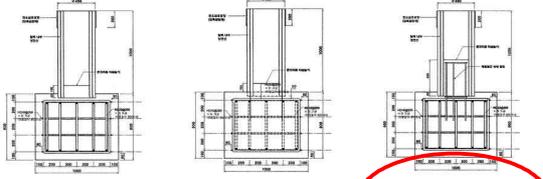
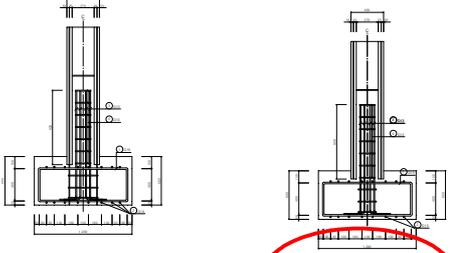
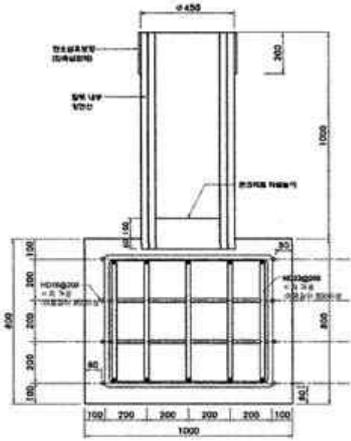
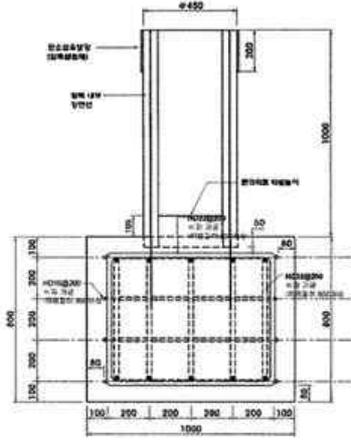
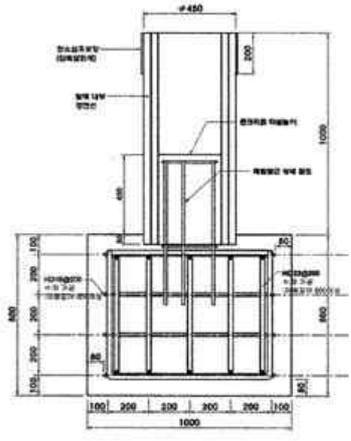
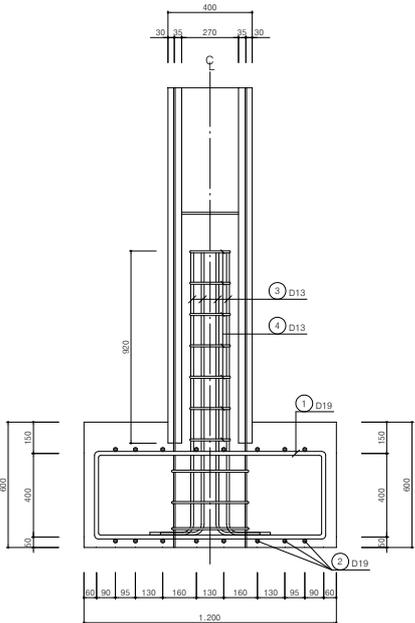
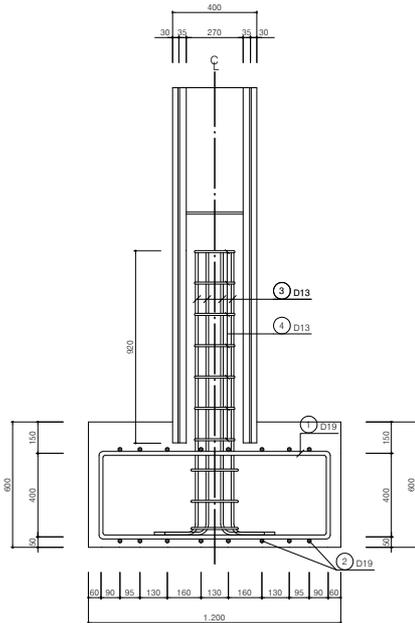


■ “PHC말뚝 두부보강 실험” 논문 비교

논문 비교		
	LH	영남대학교
시험 목적	<ul style="list-style-type: none"> • 건축 현행(강선 남김)과 개선안(원커팅 + 내부보강)의 성능 비교 • 시험체 성능을 상대평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 토목 현행(강선 남김+내부 보강)과 LH개선안(원커팅+내부보강) 성능 비교 • 말뚝본체 및 접합부 가상말뚝의 해석과 시험결과 비교
시험체 비교 (시험체 상세 참조)	 <p>A. 무보강 B. 현행(건축) C. LH개선안</p>	 <p>A. 현행(토목) B. LH개선안</p> <p style="text-align: center;">공통 A > B</p>
기초연결부 내력	A < B < C	공통 A > B
파괴 경향	<ul style="list-style-type: none"> • B는 말뚝본체 균열 없음. 강연선 인발 (부착파괴) • C는 인장측 수직균열 1개소. 하단 45° 경사균열 1개소. 접합부 파괴  <p>B. 현행(건축) C. LH개선안</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A는 압축부 수직균열 1개소, 횡균열 (수평방향) 다수, 접합부 파괴 • B는 균열 없음. 접합부 파괴  <p>A. 현행(토목) B. LH개선안</p>
시험 결과	<ul style="list-style-type: none"> • “아파트와 같은 건축물은 말뚝머리에 모멘트가 작용하지 않도록 구조설계를 하고 있다.” • 현행보다 개선안이 성능, 시공성, 경제성이 우수함 	<ul style="list-style-type: none"> • “... 결합부는 말뚝머리 고정으로 설계하고 ...” 도로교설계기준 • A는 설계기준 요구조건에 미달 • B는 힌지 거동하며, 설계기준 요구조건에 부적합.
결론	<ul style="list-style-type: none"> • LH실험은 시공성 향상을 위해 강선 남김(두부보강 철근 없이 강선만 기초에 매입)방식을 개선시키려는 목적의 실험임 • LH 및 영남대학교에서 실험한 시험체 모두 말뚝이 파괴되기 전에 연결부가 파괴되므로 설계기준 요구 조건에 미달(or 부적합) 	

■ 실험체 상세

구분	A. 무보강	B. 현행(건축)	C. LH개선안
LH 실험체			
영남대학교 실험체	A. 현행(토목)		B. LH개선안
			
	<ul style="list-style-type: none"> 말뚝 본체의 강봉과 속채움 보강철근이 기초와 연결(말뚝 본체에 보강철근 없음) 		<ul style="list-style-type: none"> 말뚝 본체의 강봉을 모두 절단하고 속채움 보강철근만 기초내에 매입

교량기초에 적용되는 PHC말뚝 두부보강법의 성능 실험

Experimental Verification of the Performance of PHC Pile Head Reinforcing Method applied to the Bridge Foundation

신성진* · 황도규** · 정현우*** · 이재훈****

Shin, Sung Jin · Hwang, Do Kyu · Jung, Hyun Woo · Lee, Jae Hoon

1. 서 론

국내에서 사용되고 있는 기성 말뚝 제품은 강관말뚝과 PHC(Pretensioned Spun High Strength Concrete)말뚝이 대부분이다. 이 중 강관말뚝은 경량이고 항타시 재료손상이 적을 뿐만 아니라 높은 타격에너지로 시공이 가능하며, 내구성이 우수한 장점을 가지고 있어 주요 교량, 고층건물과 같이 높은 안전성과 정밀한 품질관리가 요구되는 구조물의 기초로 많이 사용되었다. 그러나 2003년 이후 강제 가격이 크게 급등하면서 강관말뚝의 사용량은 감소하는 추세에 있다. 반면 PHC말뚝은 경제성이 우수하고 국제 원자재의 가격 변화에 영향을 적게 받는 말뚝으로, 최근까지도 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 하지만 PHC말뚝의 두부 접합부 보강 방법은 시공 중 또는 완공 후에도 여러 문제점을 야기하므로 개선책이 필요한 실정이다.

천영수 등⁽¹⁾에 따르면 기존의 PHC말뚝 두부보강법은 말뚝의 콘크리트를 털어내는 공정에서 작업 인부들의 안전사고가 빈번하고, 말뚝 본체에 수직균열이 발생하는 등의 문제를 보고하였다. 시공상의 문제보다 더 근본적인 문제는 유사한 내용을 규정하고 있는 일본의 경우⁽²⁾와 같이 국내 도로교설계기준⁽³⁾에서도 말뚝 본체 내부에 긴장재 외에 별도의 보강철근을 두어 두부보강에 활용하도록 규정하고 있으나 실제 시공되는 대부분의 PHC말뚝은 체내에 강봉만을 가지고 있어 국내 현실과 설계기준간의 괴리가 있다는 점이다. 강봉만으로 보강된 PHC말뚝을 확대기초와 접합하기 위하여 말뚝 중앙부를 컷팅하면 말뚝 본체의 긴장력 소실, 횡구속철근 간격 증대 등의 결함이 발생하고 이로 인하여 축인장 및 휨 강도가 저하된다.

최근 대한주택공사⁽⁴⁾에서 실험 연구를 통하여 제안한 “원컷팅 방식”이라는 PHC말뚝의 두부보강법은 기존의 방식에 비하여 시공성을 크게 향상시킨 것으로 평가되고 있다. 그러나 원컷팅 방식은 일련의 기술기어나 발표⁽⁵⁾에서 밝힌바와 같이 한지결합에 가까운 구조로서 건축물을 주요 적용 대상으로 삼고 있으며, 도로교설계기준에서 명시하고 있는 바와 같이 수평변위의 제한을 받거나, 지진하중 등 큰 횡하중을 지지하는 교량을 포함한 토목 구조물에는 부적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 휨 하중이 지배적인 조건에서 기준에 시공되어온 설계기준 유사방식과 원컷팅 방식을 실험을 통하여 구조 성능을 비교 검증하였다.

2. 실험 계획

2.1 검토 변수

실험체는 국내 I사의 기성 말뚝 제품을 구매하여 그림 1과 같이 실제 구조물의 상·하부를 뒤집어 제작하였다. 주요 변수는 두부보강법과 하중 형태 두 가지이다. 성능 검토의 기준이 되는 “설계기준 유사방식”은 그림 2의 상세를 가진다. 이 방식은 국내 대부분의 현장에 실제 적용되고 있는 방식이며, 전술한 바와 같이

* 비회원 · (주)한맥기술 구조연구팀 연구원 · 공학박사 · E-mail : sungjin@hanmaceng.co.kr - 발표자

** 비회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail : likeability@paran.com

*** 비회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 석사과정 · 공학사 · E-mail : wjdgusdn3737@naver.com

**** 정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : jhl79@ynu.ac.kr

기성제품으로는 설계기준을 완벽하게 만족시킬 수 없지만 최대한 규정에 근접한 방식이다. 비교안인 “원커팅 방식”은 그림3의 상세를 따른다. 말뚝 본체의 강봉을 모두 절단하고 속채움 보강철근만으로 접합되어 있다. 속채움 보강철근망의 철근량은 두 실험체가 동일하다. 하중의 형태는 휨하중이 지배적인 경우(L/D=3.5)와 전단 하중이 지배적인 경우(L/D=1.5)를 검토하였다. 두부보강을 위한 실효성 있는 대안을 제시하고자 더 많은 변수를 검토하였으나 본고에서는 표 1과 같이 두 가지 변수에 대한 4개 실험체의 결과만을 다루었다.



그림 1 실험방법

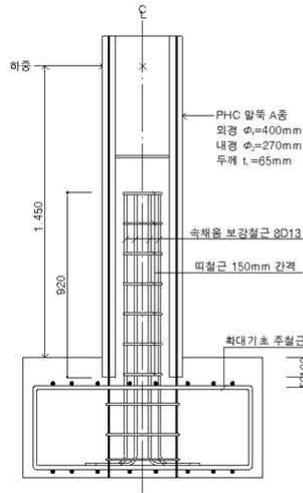


그림 2 설계기준 유사방안

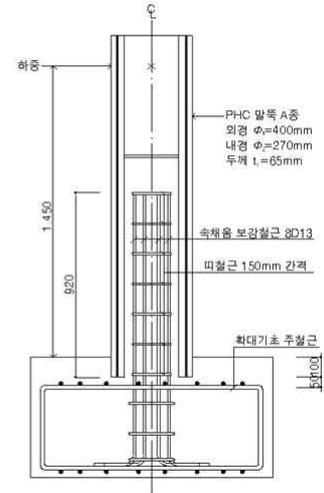


그림 3 원커팅 방법

2.2 재료 시험

기성 제품을 구매하여 실험체를 제작하였으므로 말뚝 본체 콘크리트 압축강도와 강봉의 강도는 제조사에서 제공한 자재공급 승인원의 시험 성적을 참조하였다.

속채움 보강 콘크리트와 기초 콘크리트는 KS F2403과 2405의 규정에 따라 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 규격의 원주형 공시체로 압축강도를 시험하였다. 모든 공시체는 콘 형상 또는 사선 형상으로 파괴되었으며, 속채움 보강 콘크리트의 평균 압축강도는 23MPa, 기초 콘크리트의 평균 압축강도는 29MPa로 확인되었다.

속채움 보강철근망의 주철근 및 횡철근은 모두 D13철근을 사용하였다. 종류당 3개씩 시편을 채취하여 공기기관에 시험 의뢰하였으며, 시험 성적은 표 2와 같다.

표 1 실험체 구분

구분	두부보강법	형상비(L/D)
N1	도로교설계기준 유사방식	3.55
N2	원커팅 방식	3.55
N6	도로교설계기준 유사방식	1.55
N7	원커팅 방식	1.55

표 2 강제 시험 성적

구분	규격	항복강도 (MPa)	항복변형률** ($\mu\epsilon$)	인장강도 (MPa)	연신율(%)	비고
말뚝 강봉	D7.4	1,383 ⁾	6,915	1,493	10	제조사 제공
보강 철근	D13	314	1,570	465	28	한국화학융합시험연구원
기초 철근	D19	506	2,530	614	20	

*) 0.2% 항복강도, **) 강제 탄성계수를 200GPa로 가정하고 항복강도로부터 계산함.

3. 결과 분석

균열 형태는 조금씩 차이가 있으나 4개 실험체 모두 말뚝과 기초의 접합부 손상으로 파괴되었다. 설계기준 유사방식 휨 실험체 N1(그림 4)은 말뚝 본체에 수평 균열이 발생하다가 횡하중이 최대일 때 수직균열이

발생하고, 횡변위가 42mm(drift ratio=3.0)일 때 말뚝 주변의 기초 윗면 덮개가 원형으로 박리 탈락되면서 접합부 손상으로 최종 파괴(최대 하중이 80%로 감소한 상태를 파괴로 정의함) 되었다. 검토한 실험체 중 말뚝 본체에 가장 많은 균열이 발생하였으나 접합면에서 말뚝 강봉의 최대 인장 변형율은 약 0.0042로 항복변형율의 60% 수준으로 탄성 상태였고, 말뚝 본체 콘크리트의 압축에 의한 파쇄 흔적은 없었다.

원켓팅 방식 휨 실험체 N2는 횡변위가 14mm(drift ratio=1.0)일 때부터 기초 윗면 덮개가 탈락되고 파괴가 진행되었다. N1의 극한상태와 동일한 변형상태(그림 5)에서 접합부 근처에 수직균열 1개소가 발생한 외에 말뚝 본체에 균열은 거의 발생하지 않았다. 횡변위가 126mm(drift ratio=9.0)에 이르도록 횡 하중이 80% 수준까지 감소하지 않아 실험을 강제 종료하였다. 실험 종료 후 탈락된 기초 덮개를 제거하고 조사한 결과 기초 속에 매입되어 있던 10cm 구간의 말뚝 콘크리트가 과단되어 균열 폭이 약 2cm에 달하였다.(그림 8) 말뚝 본체에 손상이 거의 없고 접합부에 과도한 균열이 발생한 이유는 제작 방법상 PHC말뚝 내부에는 슬러지가 발생하므로 속채움 보강 철근 콘크리트와 말뚝 내부의 접합면에서 슬립이 발생하고, 말뚝 본체를 기초에 접합시켜줄 어떠한 보강재도 없었기 때문에 발생한 현상으로 해석된다.

전단 하중이 지배적인 설계기준 유사방식 실험체 N6과 원켓팅 방식 실험체 N7은 균열과 파괴 거동이 유사하였다. 1개소의 수직균열이 발생한 외에 말뚝 본체에 수평 균열은 거의 없었고 횡변위가 15mm(drift ratio=2.5)에서 최대 하중을 지지하였다. 단 N6이 극한상태에 이르러 접합부 기초 덮개가 탈락한 반면 N7은 최대 하중에서 기초의 덮개가 탈락하였고 접합부 주변의 기초에 더 많은 균열이 발생하였다



그림 4 N1 접합부 파괴
(drift ratio=4.0)



그림 5 N2 접합부 균열
(drift ratio=4.0)



그림 6 N6 접합부 파괴
(drift ratio=3.0)

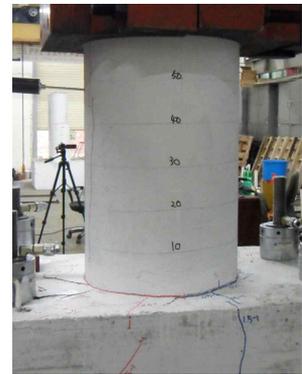


그림 7 N7 접합부 파괴
(drift ratio=3.5)

원켓팅 방식 휨 실험체는 설계기준 유사방식의 50%까지 휨강도가 낮게 예측되었다(그림 9). 전단하중이 지배적일 때도 최소 20% 낮게 예측되었는데 이는 지진시 축인장력과 휨의 조합하중이 작용할 경우 원켓팅 방식이 더 취약해질 수 있다는 반증으로 해석된다. 설계기준에서는 말뚝 외경 + 200mm(본 실험에서는 600mm에 해당)의 직경을 가지는 기초 내 가상철근콘크리트 단면을 정의하여 접합부가 말뚝 본체 강도 이상의 성능을 발휘할 것과 말뚝 체내에 보강철근을 배치하지 않을 경우 수평변위량은 말뚝머리 고정인 경우의 1.2배로 보도록 정의하고 있다. 그러나 결합부 강성에 대한 분석 결과 말뚝 체내에 보강철근을 배치하지 않은 설계기준 유사방식 실험체의 수평변위는 하중의 형태에 따라 말뚝 외경(400mm에 해당) 또는 말뚝 내경 + 200mm(470mm에 해당)의 가상 단면을 가지는 철근 콘크리트 부재 변위와 유사하였다.(그림 10) 강도에서는 단면 해석을 통하여 모든 실험체의 접합부가 말뚝 본체 강도에 미치지 못함을 확인하였다. 설계기준 유사방식의 경우 말뚝 본체 강도의 최소 89% 성능을 발휘하였으며 이는 말뚝 내경 + 200mm의 가상 단면 성능과 유사하였다(그림 11). 원켓팅 방식의 경우 말뚝 체내에 있던 강봉을 잘라버리므로 해석상 인장영역에서 접합부의 강도가 말뚝 본체 강도보다 작아지는 설계 위험 단면이 발생하게 된다. 실제로 휨실험체의 경우 말뚝 본체 강도의 최소 45% 성능을 발휘하였으며, 이는 말뚝외경 또는 말뚝 내경 + 200mm의 가상 철근 콘크리트의 성능과 유사하였다(그림 12).

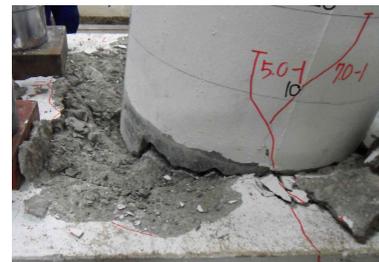


그림 8 실험종료 후 N2 접합부

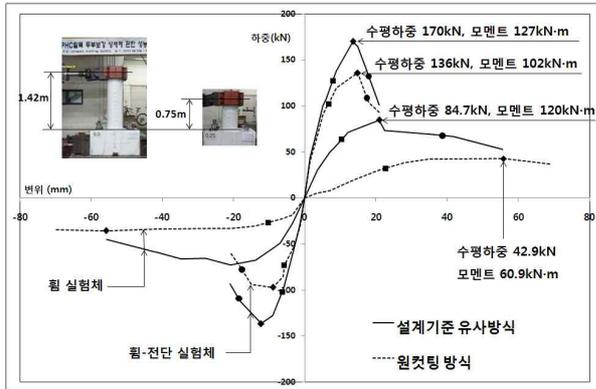


그림 9 횡하중-변위 계측 결과

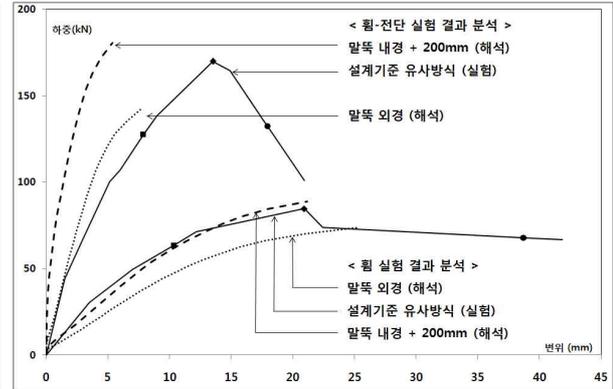


그림 10 횡하중-변위 분석(설계기준 유사방식)

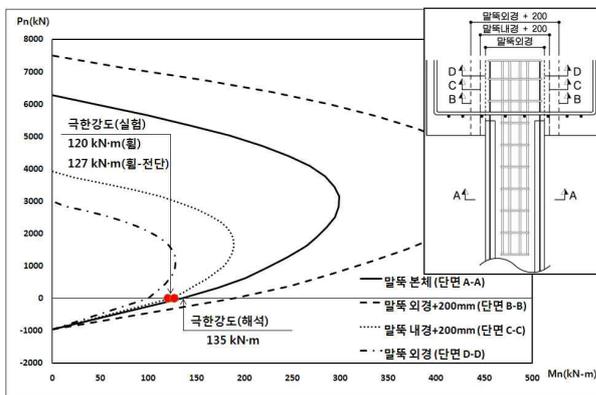


그림 11 설계기준 유사방식

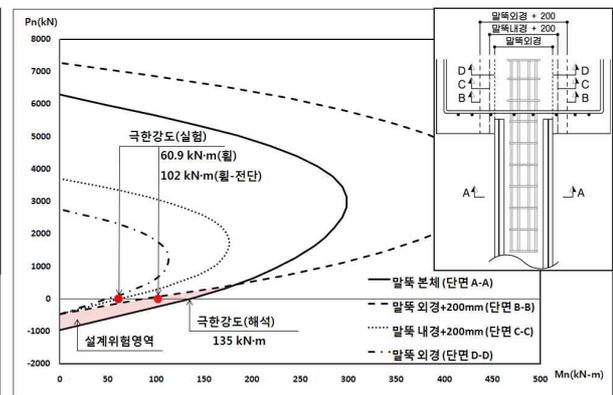


그림 12 원컷팅 방식

4. 결 론

1. 두부보강법과 형상비에 관계없이 모든 실험체는 접합부의 성능 저하로 파괴되었다.
2. 말뚝체내에 보강철근을 배치하지 않은 기성 PHC말뚝을 사용한 “설계기준 유사방식” 실험체 접합면의 휨강도는 말뚝 본체 공칭강도의 89% 수준이고, 휨강성 또한 매우 낮아서 수평변위량이 현 설계기준에서 허용한 강결합한 경우의 1.2배를 초과하였다. 계측 성능은 말뚝내경 + 200mm 또는 말뚝외경과 동일한 단면의 가상 철근콘크리트 부재의 해석 성능과 유사하였으며, 관련 설계기준에 대한 논의가 필요하다.
3. “원컷팅 결합방식”은 설계 가상단면의 휨강도가 말뚝 본체 강도 이하인 위험 영역이 발생한다. 실험체 접합면의 강도는 “설계기준 유사방식”을 따른 실험체 강도보다 최대 50% 낮은 성능을 보였으며, 본체 손상이 거의 없이 접합부에서 파괴가 발생되므로 말뚝머리 고정의 구속조건으로 보기 어렵다.

참고문헌

1. 천영수, 박종배, 심영중, (2010) 조립철근망을 사용한 PHC말뚝과 기초관 접합부의 역학성능 검증 및 현장시공 사례, *콘크리트학회지*, 제22권 5호, pp. 71-77.
2. 社團法人 日本道路協會, (2002) 道路橋示方書·同解説 - IV 下部構造編, pp. 107-567.
3. 대한토목학회, 교량설계핵심기술연구단 (2008) 도로교설계기준 해설, *기문당*, pp. 1-1008.
4. 천영수, 박종배, 심영중, 강인석, (2009) PHC말뚝과 기초관 접합부 상세에 관한 연구, *한국콘크리트학회 2009년 봄 학술발표회 논문집*, pp. 29-30.
5. 천영수, 박종배, 심영중, (2011) PHC말뚝과 기초관 접합부 보강상세 개발, *한국콘크리트학회 2011년 봄 학술대회 논문집*, pp. 45-46.