



합성 PHC말뚝의 특성과 설계법

Performance and Design of Concrete-Infilled Composite PHC Pile

김윤용 Yun-Yong Kim
충남대학교
토목공학과 교수

이방연 Bang-Yeon Lee
전남대학교
건축학부 교수

방진욱 Jin-Wook Bang
충남대학교
토목공학과 박사후 연구원

1. 서론

고강도 콘크리트와 강봉으로 공장에서 제작되는 PHC말뚝 본체를 사용하여 제작의 편의성 및 균열에 대한 내구성능을 확보하고, 현장에서 중공부에 축방향 철근의 보강과 속채움 콘크리트를 충전하여 강도 및 연성능력을 증진시키는 새로운 개념의 합성 PHC말뚝이 개발되었다. 이 말뚝에 대해 우리 학회 및 공·사기관과 협력하여 2010년부터 2015년까지 다음과 같은 4차례의 이론적인 연구 및 실험에 대한 연구과제를 수행하여 설계법을 정립하고 검증하였으며, 국내 및 해외 저널에도 다수의 논문을 발표하였다.

- ① 내부충전 합성 PHC말뚝의 설계법 개발 및 성능평가(2010)¹⁾
- ② 내부충전 합성 PHC말뚝의 설계법 개발 및 성능평가 보완연구(2013)²⁾
- ③ 대구경 속채움 PHC말뚝의 구조성능에 관한 연구(2014)³⁾
- ④ PHC말뚝(기성 PHC말뚝 및 합성 PHC말뚝)과 확대기초 결합부 성능평가(2015)⁴⁾

이 기술기사에서는 일련의 연구과제에서 얻은 결과를 요약 정리하여 합성 PHC말뚝의 특성과 설계법을 간략히 소개하고자 한다.

2. 합성 PHC말뚝의 소개

합성 PHC말뚝은 기성 PHC말뚝 공정에 횡방향 철근의 배근 공정이 추가된 후, PHC말뚝과 동일하게 제작된 공장 PSC 제품을 현장에서 중공부에 축방향 철근을 보강하고 속채움 콘크리트를 타설하여 완성되는 말뚝으로 횡방향 철근을 갖는 PHC말뚝 본체와 철근콘크리트의 속채움부로 구성된 일체형 합성부재이다⁵⁾. <표 1>에서 기성 PHC말뚝과 합성 PHC말뚝의 특성을 비교하였다.

3. 합성 PHC말뚝의 설계방법

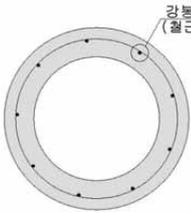
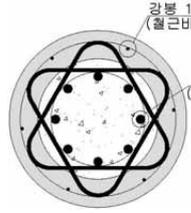
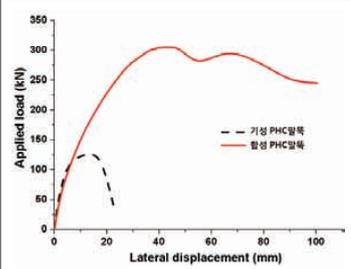
3.1 합성 PHC말뚝의 휨-압축 설계방법

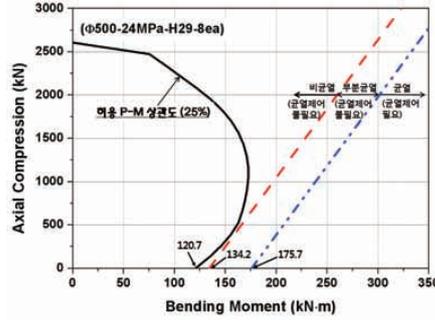
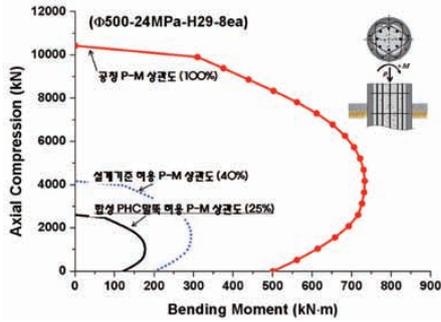
기성 PHC말뚝은 KS F 4306⁷⁾에서 제시한 바와 같이 작용하중 하에서 선형탄성이론을 기반으로 하는 허용응력설계 방법으로 휨-압축 설계를 하며, 연단부의 허용인장응력을 규정하여 균열 안전성을 확보한다. 반면, 합성 PHC말뚝은 콘크리트구조기준(2012)⁶⁾에서 규정한 축방향 강재비 1.0%를 초과하므로 단면의 공칭 축강도와

휨강도의 상관관계(P-M 상관도)에 일정한 계수를 곱하는 방법으로 휨-압축 설계를 하고, 비균열등급 조건을 만족시킴으로써 균열 안전성을 확보한다. 설계적용 허용축력-휨모멘트 계수로서 다음 ①, ②, ③의 조건을 모두 만족하는 P-M 상관도의 25%를 설계 허용값으로 적용하였다. 따라서 <그림 1>과 같이 단면 공칭강도에 대하여 4배 안전율을 갖는 안전하고 보수적인 설계가 된다.

- ① 콘크리트구조설계기준(2003)⁸⁾ 별도설계법(허용응력설계법)에 따라 P-M 상관도를 계산한 후 감소시키는 설계법으로 기준에서 규정한 계수 : 40%

표 1. 기성 PHC말뚝과 합성 PHC말뚝의 특성 비교

구분	기성 PHC말뚝	합성 PHC말뚝						
	무근콘크리트에 단순히 긴장력을 도입한 순수 PSC부재	PHC말뚝 중공부에 종횡방향 철근을 추가한 PSC+RC 합성부재						
단면 및 특성	 <p>강봉 9-9.2mm (철근비 0.56%)</p> <p>▶공장 제작 완료 상태 〈 기성 PHC말뚝 〉</p>	 <p>강봉 12-8.3mm (철근비 0.33%)</p>  <p>강봉 12-8.3mm (철근비 0.33%)</p> <p>8-H19-H32 (철근비 1.16-3.23%)</p> <p>▶현장 속채움 완료 후 〈 합성 PHC말뚝 〉</p>						
설계 방법	선형탄성설계법을 기반으로 한 허용응력설계법	강도설계법을 기반으로 한 허용응력설계법						
철근비	강봉만으로 철근비가 약 0.5%	강봉에 축방향 철근이 보강되어 철근비가 1.5~3.5%로 1% 이상						
균열 및 피복 기준	말뚝 연단부의 허용 인장응력을 규정하여 제어	콘크리트구조기준(2012) ⁶⁾ 에서 규정한 균열이 발생하지 않는 수준인 비균열등급 조건으로 설계						
	기성 및 합성 PHC말뚝 강봉의 순피복은 Ø500은 35 mm, Ø600은 40 mm로 콘크리트구조기준(2012) ⁶⁾ 의 최소 규정 "16 mm 이하, 긴장재는 30 mm 이상"을 만족							
파괴 거동	<p>▶기성 PHC 말뚝 - 균열발생 후 약 0.5배 정도의 추가 강도 발휘 후 바로 파괴되는 취성파괴 거동</p>	 <p>Applied load (kN)</p> <p>Lateral displacement (mm)</p> <p>--- 기성 PHC말뚝</p> <p>— 합성 PHC말뚝</p> <p>〈확대기초 결합부 하중-변위 거동⁴⁾〉</p> <p>▶합성 PHC 말뚝 - 균열발생 후 약 2.5배의 추가 강도가 발휘되는 연성파괴 거동</p>						
	허용휨모멘트의 약 3.4배							
	허용휨모멘트의 4.0배로 설정							
휨강도	기성 PHC (Ø500-80t)	허용휨모멘트 (kN·m)	해석 휨강도 (kN·m)	비율	합성 PHC (Ø500-80t)	허용휨모멘트 (kN·m)	해석 휨강도 (kN·m)	비율
	A종	45.5	156.0	3.43	H22-8ea	96.9	387.6	4.0
					H29-8ea	120.7	482.8	



- ① 콘크리트구조설계기준(2003) 계수: 40%
- ② 기성 PHC말뚝 적용 허용압축응력비: 25%
- ③ 비균열등급 조건 만족: 25%

그림 1. 공칭 P-M 상관도에 대한 설계적용 허용 P-M 상관도의 비율 결정 조건

- ② 기성 PHC말뚝 설계에 적용하는 허용압축응력비: 25%
- ③ 합성 PHC말뚝의 균열 안전성을 확보하기 위하여 콘크리트구조기준(2012)⁶⁾의 균열이 발생하지 않는 수준인 비균열등급 조건을 만족하도록 하는 계수: 25%

합성 PHC말뚝의 공칭 P-M 상관도는 설계기준에서 요구하는 힘의 평형과 변형률 적합 등의 조건을 만족시키는 층상화 단면해석법으로 계산된다. 콘크리트, 강봉 및 축방향 철근 등 각 재료의 응력-변형률 관계를 사용하고, 강봉의 프리텐션으로 본체 콘크리트와 강봉에 발생하는 초기 응력과 변형률도 반영한다.

3.2 합성 PHC말뚝의 전단 설계 방법

합성 PHC말뚝의 전단은 콘크리트구조설계기준(2003)⁸⁾의 별도설계법을 바탕으로 콘크리트구조기준(2012)⁹⁾에 비하여 안전측인 설계를 한다. 설계에 적용하는 합성 PHC말뚝의 허용 전단력 V_a 는 철근콘크리트 보의 허용응력설계법과 유사하게 PHC말뚝 본체 콘크리트 (V_{pa}), 속채움 콘크리트(V_{ca}), 횡보강 철근(V_{sa})에 대한 각각의 허용 전단력을 합산하여 구한다^{1,2)}.

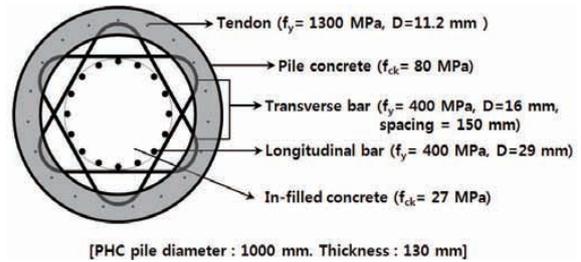
4. 합성 PHC말뚝의 강도 및 균열의 시험 검증

4.1 휨강도 및 균열의 검증

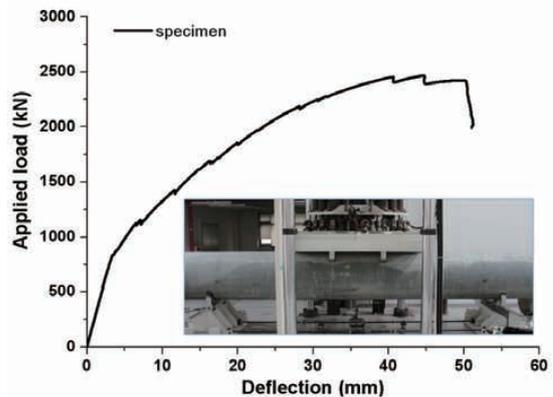
합성 PHC말뚝의 휨 및 균열 안전성 평가를 위해 KS

F 4306의 휨시험 방법에 준하여 시험을 수행하였고^{1~3)}, 이 중에서 표준이 되는 시험결과를 <표 2>에 정리하였다. <그림 2>는 여러 시리즈 시험의 일례로서 직경 1,000 mm의 대구경 합성 PHC말뚝의 휨시험 전경 및 시험을 통해 측정된 하중과 중앙부 처짐과의 관계를 나타낸다³⁾. <표 2>

에 말뚝의 직경과 보강조건에 따른 8종류의 합성 PHC말뚝의 해석 휨모멘트와 휨시험을 통해 측정된 휨강도를 비교하여 나타내었다. 모든 시험체는 파괴 휨강도가 해석값에 비해 1.16 ~ 1.51배 상회하고 허용설계 적용값과 파괴 휨강도의 비가 4.6 ~ 6.0배로 나타나 설계 가정이 휨파괴에 대하여 4배의 안전율임을 감안할 때 합성 PHC말뚝 단면은 충분한 강도 안전성을 확보하는 것으로 나타났다. <표 2>에서 알 수 있듯이 Ø500(8-H29) 시험체의 균열 휨강도(185.8 kN·m)는 설계 휨모멘트



(a) 단면도



(b) 하중-중앙부 처짐 곡선

그림 2. 대구경 합성 PHC말뚝 단면도 및 휨시험 결과³⁾

(120.7 kN·m)에 비하여 약 1.5배 높은 값이다. 또한 균열 휨강도는 <그림 1>의 비균열등급 최대 허용 휨모멘트(134.2 kN·m)에 비하여 약 1.38배 높은 값이다. 이외의 모든 합성 PHC 말뚝 시험체의 균열 휨강도가 설계 휨모멘트에 비해 1.4배 ~ 1.8배 수준의 높은 값을 나타내며, 이를 통하여 합성 PHC 말뚝은 충분한 강도와 함께 균열에 대한 안전성도 확보하고 있음을 알 수 있다.

4.2 전단강도와 전단균열 안전성

합성 PHC 말뚝의 전단강도 시험은 KS F 4306⁷⁾에 따라 수행되며, 전단 지간 내에 사인장 균열이 발생했을 때의 하중을 바탕으로 최대 전단력을 구한다. <그림 3>은 직경 450 mm의 기성 PHC 말뚝과 합성 PHC 말뚝의 전단강도 시험 종료시 발생하는 균열패턴을 비교하여 나타낸 것이다. 기성 PHC 말뚝의 경우 사인장 균열로 인한 전단 파괴가 발생되었지만 합성 PHC 말뚝의 경우 사인장 균열이 발생한 뒤에도 추가적인 하중을 지지하여 최종적으로 지간 중앙부의 휨에 의해 파괴가 일어남을 알 수 있다.

<표 3>은 직경에 따른 합성 PHC 말뚝의 전단 설계 및 시험 결과를 나타낸 것이다. 합성 PHC 말뚝의 공칭 전단강도는 강도설계방법에 준하여 실험결과와 비교하기 위하여 계산하였고, 말뚝본체 콘크리트, 속채움 콘크리트, 횡보강 철근의 전단강도를 합산한 값($V_p + V_c + V_s$)이다¹⁾. 전단강도 시험결과 설계 허용전단력에 대응하는 하중이 합성 PHC 말뚝에 가력되어도 모든 시험체에서 사인장 균열이 발생하지 않았고 허용전단력은 사인장 균열 발생 강도의 1.8배 ~ 2.1배 높은 수준을 확보할 수 있음을 알 수 있다. 또한 모든 시험체에서 합성 PHC 말뚝 본체 콘크리트와 속채움 콘크리트의 전단강도 합($V_p + V_c$) 이상이 작용하여도 말뚝 본체에는 사인장 균열이 발생하지 않았다.

계산식 및 콘크리트 강도에 내재되어 있는 오차를 감안하더라도 합성 PHC 말뚝 내부에 정착된 횡방향 철근이 전단 저항력에 기여하면서 전단연결재로서 역할도 충분히 하고 있음을 알 수 있다.

표 2. 합성 PHC 말뚝 종류에 따른 휨시험 결과^{1~3)}

시험체	해석 휨모멘트(kN·m)		측정 휨강도(kN·m)		균열 안전율 (2)/(1)	파괴 안전율 (3)/(1)
	공칭 휨모멘트	설계허용 휨모멘트 ⁽¹⁾	균열 휨강도 ⁽²⁾	파괴 휨강도 ⁽³⁾		
Ø500(8-H19)	344.4	86.1	132.4	474.2	1.5	5.5
Ø500(8-H22)	387.6	96.9	172.9	586.7	1.8	6.0
Ø500(8-H25)	434.4	108.6	182.2	623.4	1.7	5.7
Ø500(8-H29)	482.8	120.7	185.8	681.5	1.5	5.6
Ø500(8-H32)	532.4	133.1	213.6	750.8	1.6	5.6
Ø600(8-H22)	546.4	136.6	209.3	660.0	1.5	4.8
Ø600(8-H25)	610.8	152.7	212.8	734.0	1.4	4.8
Ø1000(16-H29)	2592.0	648.0	1101.8	3010.3	1.7	4.6

표 3. 합성 PHC 말뚝 종류에 따른 전단시험 결과^{1,2)}

실험체 제작상세		실험체명	Ø450-70t	Ø500-80t	Ø600-90t
		축방향 철근	4-D22	8-D25	8-D25
속채움 콘크리트		40 MPa	24 MPa	24 MPa	
횡보강 철근		D10@200			
계산 결과 (kN)	공칭 강도	콘크리트 전단강도 ($V_p + V_c$)	275	313	439
		말뚝 전단강도 ($V_p + V_c + V_s$)	352	463	622
	설계 강도	설계 허용전단력 ($V_{pa} + V_{ca} + V_{sa}$)	128.4	172.9	232.1
시험	사인장 균열시 전단강도(kN)	272.9	311.6	441.3	
	최대 전단강도(kN)	458.6	530.8*	650.1*	
균열 안전율(균열V/설계V)		2.1	1.8	1.9	
파괴 안전율(최대V/설계V)		3.6	3.1*	2.8*	

* 만능재료시험기의 용량 제한으로 파괴까지 가력하지 못함



(a) Ø450-70t 기성 PHC 말뚝



(b) Ø450-70t 합성 PHC 말뚝

그림 3. 합성 PHC 말뚝 전단시험체 균열 발생 패턴^{1,2)}

5. 합성 PHC말뚝과 확대기초 결합부의 강성도 평가와 설계적용

5.1 기성 PHC말뚝 및 합성 PHC말뚝의 확대기초와 연결부 회전강성 평가

한국도로공사 부산외곽순환 고속도로의 합성 PHC말뚝 시험시공 성능검증^{4,9)}에서는 도로교설계기준¹⁰⁾에서 제시한 기성 PHC말뚝의 A형(매립형) 및 B형(철근장착형)과 합성 PHC 말뚝에 대하여 반복가력 실험을 통해 확대기초 결합부의 초기 회전강성을 평가하였고, 그 결과를 <그림 4> 및 <표 4>에 나타내었다.

한편, 일본토질공학회¹¹⁾에서는 다양한 실험결과를 바탕으로 말뚝두부의 결합구조를 완전히 고정으로 하는 것은 현재의 구조로 불가능하다고 보고하고 있다. 또한 말뚝두부와 말뚝지중부에 작용하는 휨모멘트의 조건을 고려하였을 때에 <그림 5>와 같이 104 ~ 106 kN · m/rad의 범위가 합리적인 회전강성이라고 제안하였다. 도로교설계기준에서 규정한 기성 PHC말뚝의 결합 A, B형과 합성 PHC말뚝의 회전강성이 이 범위 내에 있으므로 모두 합리적인 회전강성을 갖는 결합이라 할 수 있다.

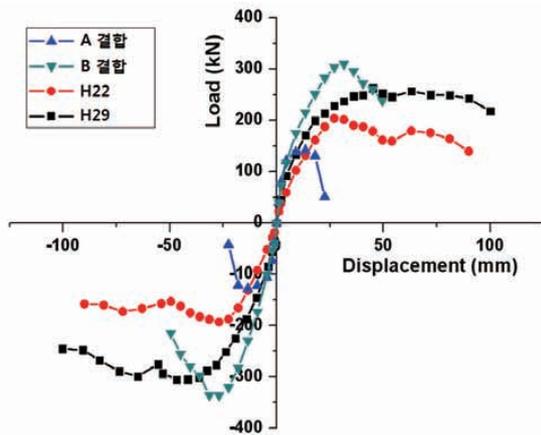


그림 4. 접합부 반복가력 실험 결과

표 4. 각 실험체의 초기 회전강성 평가^{4,9)}

시험체	기성 PHC말뚝		합성 PHC말뚝	
	A결합	B결합	H22	H29
회전강성 (kN · m/rad)	76,790	73,100	31,930	59,260

5.2 강성도를 감안한 합성 PHC말뚝-확대기초 결합부 설계

앞 절에서 언급한 바와 같이 말뚝-확대기초 결합부는 회전강성을 고려하여 설계하는 것이 타당하지만 회전강성은 하중, 결합구조, 시공상태 등 다양한 조건에 따라 변하므로 모든 조건을 고려하여 설계하는 것은 비현실

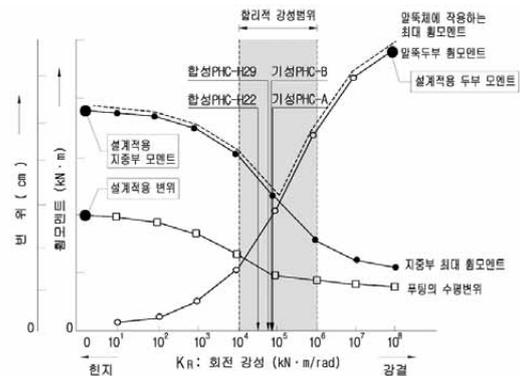


그림 5. 회전강성과 휨모멘트-변위 관계도 및 설계적용값

표 5. 기성 PHC 및 합성 PHC말뚝의 확대기초 결합부 파괴양상 비교^{4,9)}

기성 PHC-A형 결합	기성 PHC-B형 결합
<ul style="list-style-type: none"> • 축방향 철근량 작음 • 횡방향 철근 없음 • 최고하중 이후 급격한 하중저하, 말뚝 강봉 파단 • 최고하중 변위 약 1.67배에서 파괴 	<ul style="list-style-type: none"> • 축방향 철근량 충분 • 횡방향 철근 없음 • 최고하중 이후 급격한 하중저하, 말뚝 콘크리트 탈락 • 최고하중 변위 약 1.57배에서 파괴
합성 PHC-H22	합성 PHC-H29
<ul style="list-style-type: none"> • 축방향 철근량 충분 • 횡방향 철근량 충분 • 최고하중 이후 완만한 하중저하, 말뚝과 기초 모두에 균열 분산된 후, 균열이 진전하며 연성적으로 파괴 • 최고하중 변위의 약 2.2 ~ 3.3배에서 파괴 	

적이다. 따라서 다소 보수적이고 비경제적일 수는 있으나, 현재 대부분의 교량 설계에 적용하는 방법과 동일하게 <그림 5>와 같이 강결합과 힌지결합 두 조건 모두에서 최대값에 대한 구조 안전성과 변위를 검토하여 설계 기준을 충족시키는 방법으로 합성 PHC말뚝과 확대기초 결합부를 설계한다.

6. 합성 PHC말뚝의 내진성능

도로교설계기준에서 말뚝과 확대기초의 강결합을 규정 한 이유 중에 하나는 내진성능의 우수성 때문이다. 내진 성능은 연성 파괴거동과 에너지 흡수량을 토대로 평가할 수 있으며, 합성 PHC말뚝의 성능도 이를 근거로 평가하였다.

6.1 파괴양상에 따른 내진성능 평가

접합부 반복하력 실험체의 파괴양상은 <표 5>에 나타난 바와 같으며, 설계기준¹⁰⁾에서 제시한 기성 PHC말뚝의 A, B형 결합보다 합성 PHC말뚝 결합이 보다 우수한 파괴양상을 나타내었다.

6.2 에너지 흡수량에 따른 내진성능 평가

실험종료시까지 각 실험체의 에너지 흡수량은 <표 6>

표 6. 각 실험체의 에너지 흡수량^{4,9)}

시험체	에너지 흡수량(kN · m)
기성 PHC-A형 결합	13.5
기성 PHC-B형 결합	270.6
합성 PHC-H22	279.5
합성 PHC-H29	524.1

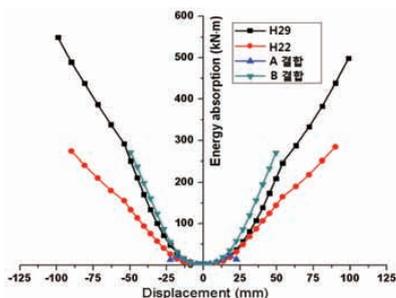


그림 6. 횡방향 변위에 따른 에너지 흡수량

및 <그림 6>과 같으며, 이를 토대로 성능을 평가하면 다음과 같다.

- 기성 PHC-A형 결합 실험체의 에너지 흡수량은 다른 실험체의 약 2.5~5.0%로써 현저히 낮은 값을 보이고 있으므로 상대적으로 내진성능이 매우 낮음.
- 기성 PHC-B형 결합 실험체의 에너지 흡수량은 휨강도가 유사한 합성 PHC-H29 실험체의 약 50% 수준으로 상대적으로 내진성능이 낮음.
- 합성 PHC말뚝은 기성 PHC-A, B형 결합에 비하여 높은 에너지 흡수량을 나타내므로 상대적으로 내진성능이 우수함.

7. 맺음말

합성 PHC말뚝은 PSC+RC의 합성기둥 부재로서 강도와 균열에 대한 안전성을 모두 만족시키기 위하여 휨-압축에 대한 단면설계를 공칭 P-M 상관도의 25%를 기준으로 하였다. 25%는 기성 PHC말뚝의 콘크리트 설계 기준압축강도에 대한 허용압축응력의 비율과 동일한 결과를 나타낸다. 또한 전단설계는 콘크리트구조설계기준(2003) 별도설계법을 적용하여 안전측으로 설계하였다. 설계의 안전성을 검증하기 위해 다양한 종류의 합성 PHC말뚝에 대한 강도실험과 균열폭 계측을 수행하였다. 합성 PHC말뚝의 휨-압축 및 전단설계 조건은 파괴강도에 대한 높은 안전율을 가질 뿐만 아니라, 비균열등급으로서 충분한 균열 안전성을 확보하는 것으로 나타났다. 또한, 합성 PHC말뚝-확대기초 결합부는 강결합과 힌지결합 모두에 대한 구조 안전성과 허용 변위를 만족하도록 설계되며, 이 결합부의 내진성능은 설계기준에서 제시하는 기성 PHC말뚝의 강결합 방법 A, B형에 비하여 우수한 것으로 평가되었다. 현재 추가 연구로써 한계상태설계법을 합성 PHC말뚝의 설계에 적용하는 연구과제가 추진 중에 있다. □

담당 편집위원 : 김재홍(UNIST) jaekim@unist.ac.kr

참고문헌

1. 김진근 등, 내부충전 합성 PHC 말뚝의 설계법 개발 및 성능평가, KCI R 10 007, 한국콘크리트학회, 2010.
2. 김진근 등, 내부충전 합성 PHC 말뚝의 설계법 개발 및 성능평가 보완 연구, KCI R 13 006, 한국콘크리트학회, 2013.
3. 김윤용 등, 대구경 속채움 PHC 말뚝의 구조 성능에 관한 연구, KCI R 15 002, 한국콘크리트학회, 2014.
4. 김윤용 등, PHC말뚝과 확대기초 결합부 성능평가, 충남대학교, 2015.
5. 이승수, 합성 피에이취씨 말뚝 및 합성 피에이취씨 말뚝 시공방법, 특허 제 10-0999020호, 2010.
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조기준, 2012.
7. KS F 4306, 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝, 2003.
8. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 2003.
9. 오상진 등, 합성 PHC말뚝의 현장 시공사례를 통한 적용성 연구, 대한토목학회지 63권, 10호, 2015, pp. 62-67.
10. 대한토목학회, 도로교설계기준, 2012.
11. 일본토질공학회, 말뚝기초의 설계법과 해설, 1997.



김윤용 교수는 콘크리트 균열에 관한 연구로 1998년 KAIST에서 박사학위를 취득하였고, University of Michigan에서 박사후 연구원으로 근무하였다. 대림산업과 청석ENG에서 구조기술사로서 업무 경력을 갖고 있으며, 2006년부터 충남대학교 토목공학과 교수로 재직 중이다. 관심분야는 고성능 복합재료의 개발과 구조물 적용, 콘크리트 합성부재 개발 등이다.
yunkim@cnu.ac.kr



이방연 교수는 KAIST 건설 및 환경공학과에서 이미지 프로세싱 기반 섬유 분포 특성 평가 및 섬유 분포 특성이 시멘트 복합체의 인장거동에 미치는 영향에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, University of Michigan에서 박사후 연구원을 거쳐 현재 전남대학교 건축학부 교수로 재직 중이다. 주로 고성능 및 다기능 섬유보강 복합재료 관련 연구를 수행하고 있다.
bylee@jnu.ac.kr



방진욱 박사는 충남대학교 토목공학과에서 횡방향 철근과 축방향 철근으로 보강된 콘크리트 충전 PHC 말뚝의 휨 및 접합부 거동 평가에 관한 연구로 2014년 박사학위를 취득하였다. 현재 동대학교에서 박사후 연구원으로 재직 중에 있으며, 관심 연구 분야로 섬유보강 콘크리트, CO₂ 배출저감형 건설구조재료, 합성말뚝에 관한 연구를 수행하고 있다.
best6516@naver.com

<http://www.kci.or.kr>



KOREA CONCRETE INSTITUTE