

속채움 콘크리트와 철근으로 보강된 대구경 합성 PHC말뚝의 휨성능 평가

방진욱¹, 박찬규², 양성영², 김윤용^{3*}

Flexural Behavior of Large-Diameter Composite PHC pile Using In-Filled Concrete and Reinforcement

Jin-Wook Bang¹, Chan-Kyu Park², Seong-Yeong Yang², Yun-Yong Kim^{3*}

Abstract: A demand of high bearing capacity of piles to resist heavy static loads has been increased. For this reason, the utilization of large diameter PHC piles including a range from 700 mm to 1,200 mm have been increased and applied to the construction sites in Korea recently. In this study, in order to increase the flexural strength capacity of the PHC pile, the large diameter composite PHC pile reinforced by in-filled concrete and reinforcement was developed and manufactured. All the specimens were tested under four-point bending setup and displacement control. From the strain behavior of transverse bar, it was found that the presence of transverse bar was effective against crack propagation and controlling crack width as well as prevented the web shear cracks. The flexural strength and mid-span deflection of LICPT specimens were increased by a maximum of 1.08 times and 1.19 times compared to the LICP specimens. This results indicated that the installed transverse bar is in an advantageous ductility performance of the PHC piles. A conventional layered sectional analysis for the pile specimens was performed to investigate the flexural strength according to the each used material. The calculated bending moment of conventional PHC pile and composite PHC pile, which was determined by P-M interaction curve, showed a safety factor 1.13 and 1.16 compared to the test results.

Keywords: Large diameter PHC pile, Transverse bar, Longitudinal bar, In-filled concrete, Axial compression and bending moment interaction

1. 서 론

지지력이 큰 하부지반에 상부구조물의 하중을 전달하고 지반침하 등을 방지하기 위한 방법으로 말뚝기초가 적용되고 있다. 국내 현장에서 사용되는 여러 가지 형태의 말뚝은 하중의 형태, 지질 조건, 지하수위 등의 환경 조건에 따라 다양하게 적용되고 있으며, 사용재료에 따라 대표적으로 콘크리트 말뚝과 강관말뚝 및 복합말뚝이 있다. 특히 콘크리트 말뚝 중 PHC(Pretensioned spun High strength Concrete)말뚝은 기성 콘크리트 말뚝을 대표하는 것으로서 강봉의 프리스트레싱을 통한 균열에 대한 저항이 크고, 콘크리트의 원심성형 및 오토 클레이브 양생으로 단기간에 80 MPa의 고강도 말뚝 본체를 확보할 수 있다. 또한 기계화 공정으로 제작되는 콘크리트 2차 제품이기 때문에 고생산성과 우수한 품질관리를 확보할

수 있는 장점이 있다.

PHC말뚝은 1992년 일본으로부터 도입되어 기존의 PC말뚝을 대체하기 시작하였다(Choi, 2002). 1990년대 초반에는 300~400 mm의 소구경 말뚝을 시작으로 2000년대부터 직경 500~600 mm의 중구경 말뚝이 최근 구조물의 대형화 및 고층화에 의한 큰 지지력을 확보할 수 있는 700~1200 mm 대구경 PHC말뚝이 현장에 적용되기 시작하고 있으며 대구경 PHC말뚝의 경우 현장타설 콘크리트말뚝에 비해 품질관리와 시공성이 우수하고 강관말뚝에 비해 경제성 확보에도 유리한 것으로 보고하고 있다(Kim et al., 2011). 대구경 PHC말뚝의 지지력 향상을 위한 연구도 진행되고 있는데 국내 S사에서는 콘크리트 압축강도 80 MPa급인 기성 PHC말뚝과 함께 130 MPa급의 초고강도 PHC말뚝을 개발하여 현장에 적용하고 있다. 또한 최근 기성 PHC말뚝 중공부에 철근과 콘크리트를 보강하여 지지력, 휨 및 전단 강도를 향상시킨 합성 PHC말뚝에 관한 연구도 수행되고 있다(Kim et al., 2016). 중구경 400~500 mm 기성 PHC말뚝을 대상으로 한 기존연구에서는 기성 PHC말뚝의 휨 및 전단강도를 우수하게 증진시킬 수 있다고 보고하였다(Bang et al., 2014; Hyun et al., 2012). 이 연구에서는 기존연구를 바탕으로 최근 수요가 증가하고 있는 대구경 PHC말뚝

¹정회원, 충남대학교 토목공학과 건설방재연구소 박사후 연구원

²정회원, 삼성물산 품질기술실

³정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

에 대한 보강과 보강후의 휨성능을 평가하고자 한다. 대구경 합성 PHC말뚝 제작을 위한 일련의 과정을 기술하였고, 국내 KS 규정에 따른 휨실험을 통해 말뚝 본체의 휨강도 증가 수준을 평가하였고, 보강 단면에 대한 해석을 통해 대구경 합성 PHC말뚝에 사용된 재료들이 휨강도에 기여하는 수준을 분석하였다.

2. 실험체 제작 및 실험 방법

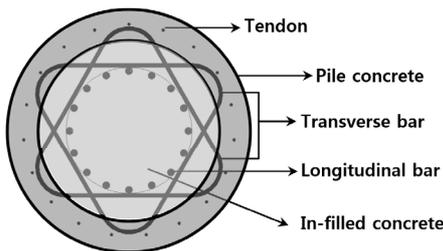
2.1 사용재료

2.1.1 대구경 합성 PHC 말뚝 본체

대구경 합성 PHC 말뚝본체는 직경이 1,000 mm, 두께가 130 mm이며, 굵은골재 최대치수 25 mm, 설계기준 압축강도 80 MPa의 레디믹스트 콘크리트를 사용하여 제작하였다. PHC 말뚝 본체 콘크리트의 프리스트레싱력 도입을 위해 직경 11.2 mm, 인장강도 1,450 MPa인 19개의 프리스트레싱 강봉이 등간격으로 배근되어 있다. 말뚝본체 콘크리트의 유효프리스트레스는 3.92 MPa로 국내 KS 기준에서 제시하는 A종이다. 대구경 합성 PHC말뚝은 기존의 직경 450 mm와 500 mm의 합성 PHC 말뚝과 동일하게 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 말뚝 중공부에 횡방향 철근이 배근된다. 횡방향 철근량과 배근간격은 전단연결재와 말뚝본체 콘크리트 경계면의 수평전단력이 충분히 확보되도록 설계하였다(KCI, 2015). 횡방향 철근은 호칭 D16, 항복강도는 400 MPa의 이형철근을 삼각형으로 제작하여 반대방향으로 겹친 이중삼각형이며, 150 mm 간격으로 배근하였다.

2.1.2 속채움 콘크리트 및 축방향 보강 철근

합성 PHC 말뚝 제작을 위해 말뚝 중공부에 항복강도 400 MPa, 호칭 D29의 이형철근 16개를 축방향 철근으로 사용하였다. 말뚝 중공부 삽입의 편의성과 축방향 철근의 정확한 배근을 위해 호칭 D10의 띠철근을 축방향 철근의 길이방향으로 용접하여 축방향 철근 다발을 제작하였다. 본 연구에서 사용



[Composite PHC pile diameter : 1,000 mm, Thickness : 130 mm]

Fig. 1 Details of composite PHC pile

Table 1 Mechanical properties of reinforcement

Types	Diameter (mm)	Yielding strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Prestressing tendon	11.2	1,300	1,450
Transverse bar	15.9	400	515
Longitudinal bar	28.6	400	510
Hoop bar	9.5	300	423

Table 2 Mechanical properties of concrete

Types	Maximum coarse aggregate(mm)	Compressive strength (MPa)	Slump (mm)
Pile body concrete	25	80	50
In-filled concrete	13	27	150

된 철근의 물리적 특성을 Table 1에 정리하였다. 또한 속채움 콘크리트는 설계기준 압축강도 27 MPa인 레디믹스트 콘크리트를 사용하였는데 충전성과 유동성 확보를 위해 굵은골재 최대치수 13 mm이고 슬럼프는 150 mm 이상이다. 사용된 콘크리트의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

2.2 실험체 제작

대구경 합성 PHC 말뚝 본체 제작은 기존연구(Bang et al., 2014)에서 소개한 방법과 동일한 과정으로 진행된다. 우선 등간격으로 배치된 19개의 프리스트레싱 강봉을 용접을 통해 원형 다발로 제작한 뒤 PHC 말뚝 몰드에 삽입하여 고정하였다. 그 후 이중삼각형의 횡방향 철근을 강봉다발 전체 길이에 대하여 150 mm 간격으로 배근한 뒤 2회에 걸쳐 말뚝 본체 콘크리트를 타설하였다. 4단계로 자동 제어되는 회전속도를 통해 약 14분 원심성형을 한 뒤 증기양생을 통해 말뚝 본체를 제작하였다. 횡방향 철근이 배근된 말뚝본체 중공부에 축방향 철근과 속채움 콘크리트 보강을 위한 2차 제작과정을 수행하였다. 원형 다발로 제작된 축방향 철근을 횡방향 철근이 배근된 말뚝 중공부에 삽입한 후 속채움 콘크리트를 타설하였다. 그 후 28일 기건양생을 통해 최종 실험체 제작을 완료하였다. Photo 1에 실험체 제작 과정을 나타내었고, 횡방향 철근이 배근된 휨실험체 2개와 배근되지 않은 실험체 2개를 각각 제작하여 횡방향 철근의 유무에 따른 휨성능을 평가하였다. 휨실험체의 길이는 10,000 mm이다.

2.3 휨실험 방법

대구경 합성 PHC 말뚝의 휨성능 평가를 위해 국내 KS F

4306에서 제시된 방법에 따라 휨강도 실험을 수행하였다 (Kwon et al., 2015). 실험체 총 길이(L) 10,000 mm에 대하여 시간(3/5 L)을 6,000 mm로 설정하였고, 축력의 도입 없이 연속하중(P)를 가력하였다. 가력시 최대용량 5,000 kN 용량의 만능재료시험기를 이용하였고 1.0 mm/min 속도의 변위제어를 통해 하중을 도입하였다. 실험체 중앙부 하단에 LVDT를 설치하여 실시간 하중에 따른 변위 발생량을 측정하였고, 하중 가력에 따른 콘크리트 및 철근의 변형률을 데이터로거를 통해 측정하였다. Fig. 2에 휨실험을 위한 실험체 set-up 및 게이지 등의 부착 상세를 나타내었다. 한편, 대구경 합성 PHC 말뚝 휨강도는 다음 식 (1)을 통해 계산할 수 있다.

$$M_{\max} = \frac{(W_{PHC} + W_{con})L}{40} + \frac{P_{\max}}{4} \left(\frac{3}{5}L - 1 \right) \quad (1)$$

여기서, P_{\max} 는 최대 휨하중, W_{PHC} 는 합성 PHC 말뚝 본체의 중량, W_{con} 는 속채움 콘크리트의 중량이며 단위중량을 2,300 kg/m³으로 가정하였다. 횡방향 및 축방향 철근의 자중은 무시하였다. 또한 휨하중 가력 수준에 따른 실험체에 발생되는 균열 패턴을 관찰하였고 철근 및 콘크리트 게이지를 분석하여 횡방향 철근의 유무에 따른 휨하중 조건하에서의 실험체 내력을 상대적으로 평가하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴 거동

휨실험을 통해 관찰된 대표 실험체의 균열발생 패턴을 Photo 2에 나타내었다. 순수 휨구간에서 횡방향 철근이 배근되지 않은 LICP-1의 경우 실험체 중앙부에서 초기균열이 807.5 kN에서 발생한 후 하중의 증가에 따라 7~8개의 추가적인 휨균열이 발생하였다. 초기균열의 발생은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 실험체 인장부에 부착된 콘크리트 게이지의 변화를 통해 판단하였고, 실제 관찰을 통해 균열발생을 확인하였다. 인장부 콘크리트 변형률 335 μ strain 범위에서 초기균열이 발생하였고, 이때의 압축부 콘크리트의 변형율이 -250 μ strain 범위로 측정되었다. 휨-전단균열 발생과 더불어 하중이 증가함에 따라 Photo 2에 나타낸 바와 같이 복부전단균열이 관찰되었다. 복부전단균열은 2,053 kN 하중에서 발생하였으며,

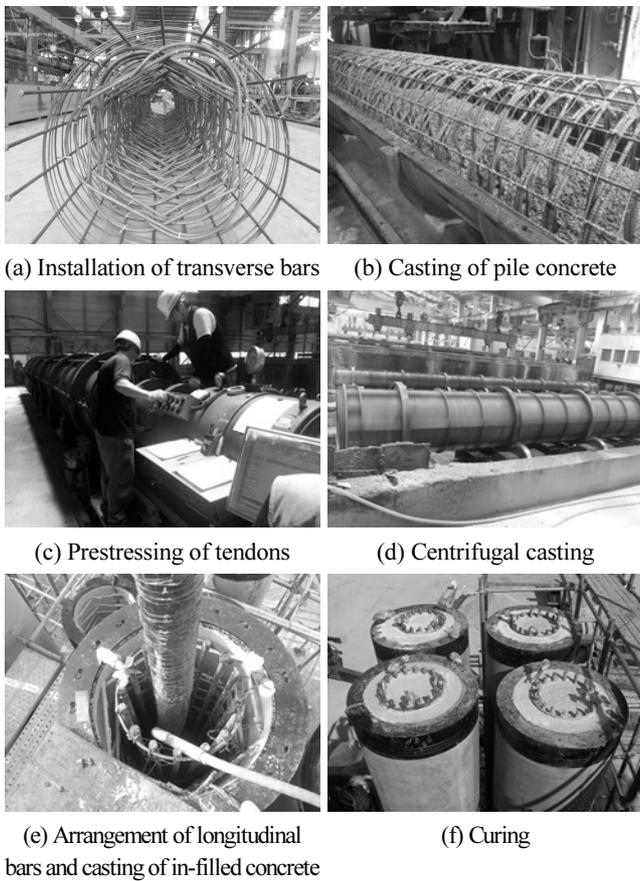


Photo 1 Fabrication of specimens

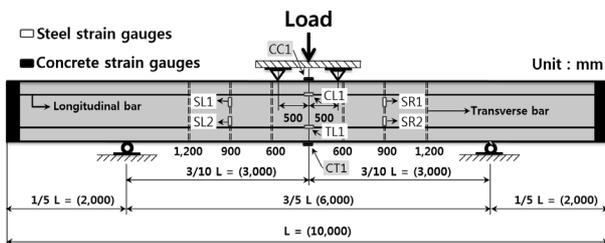
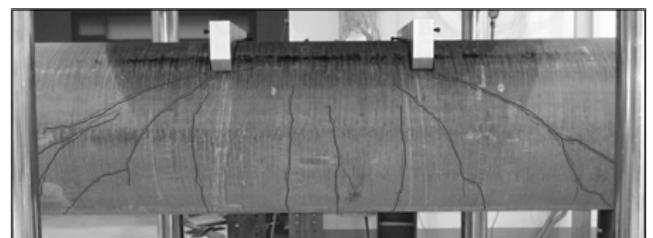
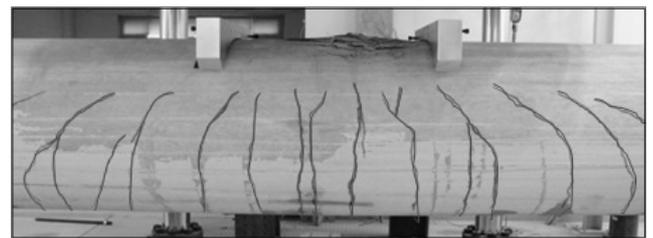


Fig. 2 Set-up for bending test



(a) LICP-1 specimen



(b) LICPT-1 specimen

Photo 2 Failure mode of specimens

하중 증가에 따라 균열의 폭이 증가되었다. 실험 종료시 압축부 콘크리트 압축파괴가 관찰되지 않았고, 이때의 변형률은 $-2,434 \mu\text{strain}$ 수준으로 측정되었다. 실험은 복부전단균열 폭 증가로 인한 휨-인장 파괴가 발생되어 종료하였고 이때의 균열폭은 4.1 mm로 나타났다.

한편, 횡방향 철근이 배근된 LICPT-2 실험체의 경우 하중 774.3 kN, 압축부 콘크리트 변형률 $-255 \mu\text{strain}$ 수준에서 실험체 초기균열이 발생하는 것으로 나타나 LICP-1 실험체와 유사한 초기균열 거동을 나타내었다. 초기균열 발생 후 하중의 증가에 따라 추가적인 휨균열 및 휨-전단균열이 발생하였고 최고하중에 도달하였다. 실험 종료시까지 복부전단균열은 발생하지 않았고 휨-전단균열의 폭도 상대적으로 작게 제어되었다. 본 연구의 실험체도 전단철근이 배근된 철근 콘크리트 보의 휨거동 및 기존 합성 PHC 말뚝의 연구사례(Kim et al., 2016)와 유사한 파괴거동을 나타남을 알 수 있는데 실험체에 배근된 횡방향 철근이 전단균열의 진전을 충실히 제어하였기 때문이다. 횡방향 철근의 거동은 Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 실험체에 초기 휨-전단균열이 발생한 후 인장측(SR2, SL2) 횡

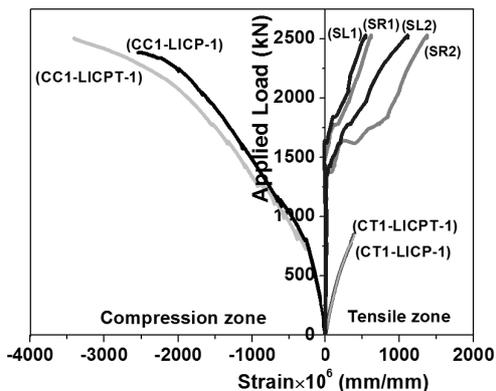


Fig. 3 Strain deformation of top and bottom concrete layer and transverse bars according to flexural load

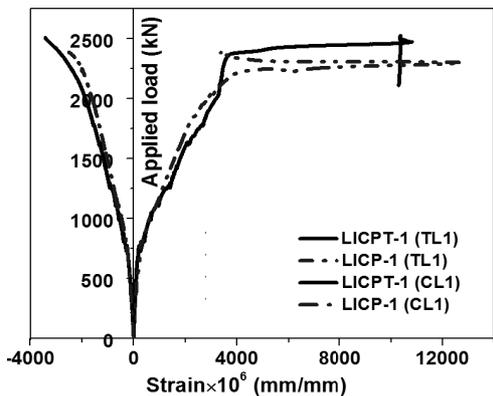


Fig. 4 Strain deformation of top concrete layer and longitudinal bars according to flexural load

방향 철근이 전단저항을 시작함을 알 수 있다. 하중이 증가함에 따라 균열이 압축부로 진전하면서 상부에 배근된 횡방향 철근(SR1, SL1)도 직접적으로 전단력 저항에 기여하고 있다. Fig. 4의 횡방향 철근이 배근된 LICPT-2 실험체의 인장부 축방향 철근과 압축부 콘크리트 변형률 거동을 분석함으로써 철근의 항복 후 압축부 콘크리트의 분쇄파괴가 발생하는 일반 철근콘크리트의 연성적인 휨파괴 거동을 확보함을 알 수 있다. 분쇄파괴시 압축부 콘크리트 변형률은 $-3,336 \mu\text{strain}$ 수준이다. 또한 실험종료시 말뚝본체 콘크리트와 속채움 콘크리트 경계면의 슬립은 관찰되지 않았는데 횡방향 철근의 배근으로 일체화를 위한 충분한 수평전단 강도를 확보하였기 때문이다(KCI, 2015).

3.2 하중-변위 관계

휨실험을 통해 측정된 실험체의 하중과 중앙부 처짐과의 관계를 Fig. 5에 나타내었고, 실험결과를 Table 3에 정리하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 모든 실험체는 하중이 증가함에 따라 초기균열 발생 후 최고하중까지 연성적인 파괴거동을 보이는 일반적인 철근콘크리트 부재의 휨거동을 보였다. 탄성거동을 보이는 균열이 발생하기 전까지의 초기강성은 LICPT 시리즈가 평균 223 kN/mm로 약 1.1배 높게 측정되었지만 증가량은 미미한 수준인 것으로 나타나 균열전의 초기강성은 말뚝 콘크리트와 축방향 철근 합성단면의 강성조합에 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 이는 Fig. 3의 횡방향 철근 변형률 분포를 통해 직접적으로 확인할 수 있다. 초기균열 이후 LICP 시리즈의 최고 휨하중은 평균 2,343 kN으로 횡방향 철근이 배근된 LICPT 시리즈는 평균 2,495 kN으로 측정되어 약 1.08배 증가하였고 실험종료시 측정된 변위는 약 1.19배 증가하였다. 횡방향 철근으로 인하여 최고하중 및 변위가 증가하였는데 특히, 휨하중에 대한 변위가 증가함으로써 실험체가 연성적인 휨파괴 거동을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 휨

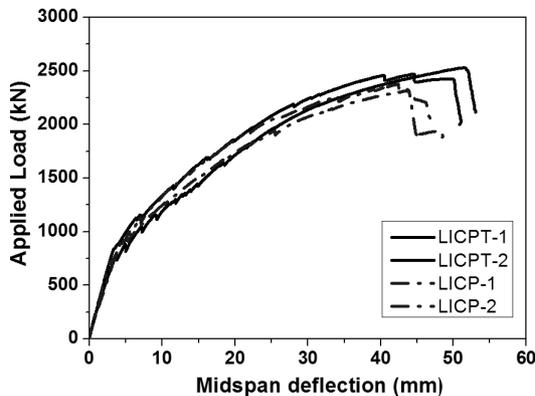


Fig. 5 Relation curve between flexural load and mid-span deflection

Table 3 Flexural test results of each specimen

Specimens	Initial state			Ultimate state		
	Cracking load (kN)	Deflection (mm)	Stiffness (kN/mm)	Maximum load (kN)	Flexural strength* (kN·m)	Deflection (mm)
LICP-1	807.5	4.12	196	2370.3	3011.4	41.2
LICP-2	836.3	4.00	208	2316.2	2943.7	42.6
LICPT-1	774.3	3.62	214	2543.9	3228.4	51.7
LICPT-2	841.5	3.59	233	2501.9	3175.9	48.4

* Calculation on the basis of Eq. (1)

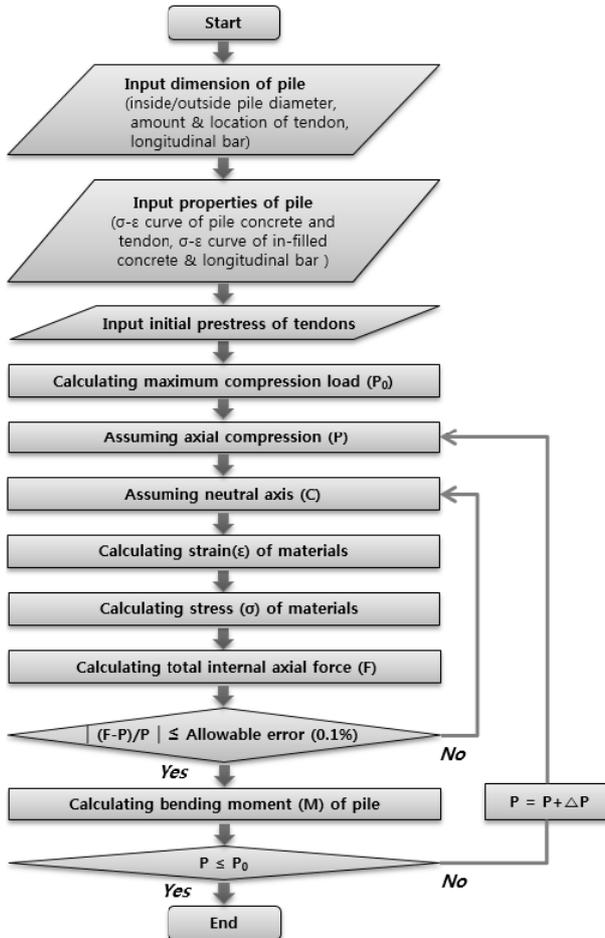


Fig. 6 Calculating process of axial compression(P) and bending moment(M) interaction curve(Bang et. al., 2014)

실험 종료시 Fig. 3에서 알 수 있듯이 LICPT-1 실험체의 압축부 콘크리트(CC1) 변형률은 콘크리트 파괴 변형률 0.003에 충분히 도달함을 알 수 있다. 한편, PHC말뚝에 횡방향 철근을 배근함으로써 말뚝의 전단강도와 말뚝두부의 반복이력력이 크게 향상되는 것으로 알려져 있는데(Hyun et al., 2012; Bang et al., 2014), 대구경 말뚝에 미치는 영향에 대해서는 후속 논문에서 보다 상세히 다루고자 한다.

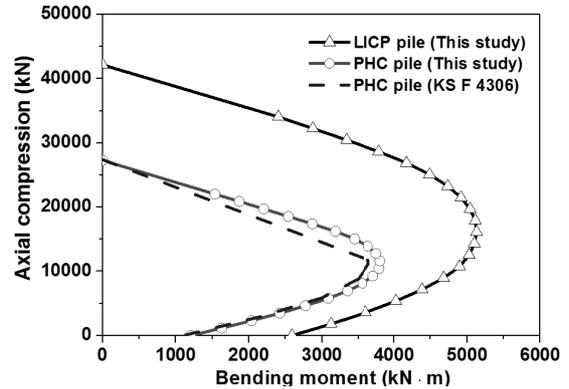


Fig. 7 Axial compression and bending moment interaction curve of LICP and conventional PHC pile

3.3 보강재료의 휨강도 기여량 평가

합성 PHC말뚝의 휨강도는 사용재료의 응력-변형률 조건을 고려한 층상화 단면해석을 통해 계산하였다. 합성 PHC말뚝 제작시 사용된 재료의 물리적 특성과 강봉의 프리스트레싱 강도로 인하여 발생하는 말뚝본체 콘크리트와 프리스트레싱 강봉의 초기변형률을 반영하였다. 휨실험 중에 측정된 압축부 콘크리트 파괴 변형률을 고려하여 파괴시 말뚝본체 및 속채움 콘크리트의 압축변형률을 0.003으로 가정하였다. 사용재료의 모델링 과정 및 Fig. 6의 해석방법은 기존연구에 자세히 소개되어 있다(Bang, 2014(a); Bang, 2013(b)). Fig. 7은 층상화 단면해석을 통해 계산된 LICPT 실험체와 동일 직경의 기성 PHC말뚝의 축강도-휨모멘트 상관 관계를 나타낸 것이다. 예측값은 사용재료 각각의 응력-변형률 관계 곡선을 바탕으로 계산된 내력의 총합으로써 프리스트레싱이 가해진 말뚝본체 콘크리트와 프리스트레싱 강봉, 그리고 프리스트레싱력의 영향을 받지 않는 속채움 콘크리트와 축방향 철근에 대한 값이며 횡방향 철근의 구속효과는 무시하였다. 또한 두 곡선과 함께 KS F 4306에서 제시된 동일 직경 A종류인 기성 PHC말뚝의 축력 - 휨강도 곡선을 파란색 점선으로 나타내어 비교하였다. 본 연구에서는 축력을 가력하지 않은 휨실험이므로 순수 휨에 해당하는 휨모멘트를 예측값으로 고려하였다. KS

Table 4 Flexural test results of each specimen

Specimens	(a) Analytical values					(b) Experimental values	
	Bending moment(kN·m)					Flexural strength(kN·m)	(b) / (a)
	Pile concrete	Tendons	In-filled concrete	Longitudinal bars	Total		
LICP pile(This study)	2,086	134	73	299	2,592	3,011.4	1.16
PHC pile(This study)	1,098	108	-	-	1,206	1,365.0	1.13
PHC pile(KS F 4306)	-	-	-	-	1,104	-	1.23

F 4306에서 제시된 상관 곡선에 비해 본 연구의 층상화 단면 해석을 통해 계산값이 근소하게 큰 값을 나타냄을 알 수 있다. 단면해석시 사용재료의 응력-변형률 곡선을 정의하는 식의 차이에 기인하는 결과로 판단되지만 대부분의 축력과 휨모멘트 조합 범위에서 상당히 일치하는 값을 예측할 수 있음을 알 수 있다. Table 4는 본 연구의 단면해석을 통해 계산된 각각의 재료의 순수 휨강도에 대한 기여량과 실험을 통해 측정된 휨강도를 비교하여 정리한 것이다. PHC 말뚝의 실험 결과값은 국내 S사에서 측정된 결과값을 사용하였다. 기성 PHC말뚝의 경우 실험값이 본 연구 및 KS F 4306의 상관도의 순수 휨모멘트에 비해 약 1.13배 및 1.23배 큰 값으로 측정되어 두 해석 모두 정확한 수준으로 실제 말뚝의 휨강도를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 단면해석을 통해 콘크리트와 프리스트레싱 강봉이 기성 PHC 말뚝 휨강도에 기여하는 비율은 각각 90%와 10% 수준인 것으로 해석되었다. 한편, LICP 실험체의 실험값은 해석값에 비해 약 1.16배 안전율을 확보할 수 있었고, 휨강도에 미치는 각각의 재료의 기여량을 살펴보면 말뚝본체가 78%, 강봉이 5%, 속채움 콘크리트가 3%, 축방향 철근이 14%로 계산되었다. 속채움 콘크리트와 축방향 철근의 보강이 휨강도에 미치는 영향을 해석을 통해 살펴보면, 속채움 콘크리트와 축방향 철근이 독립적으로 휨강도 향상에 기여할 뿐 만 아니라 말뚝 기성 PHC말뚝의 본체와 프리스트레싱 강봉 자체의 휨강도를 약 1.9배 및 1.2배 증가시킴을 알 수 있다. 이러한 결과는 순수 휨 모멘트 구간에서 말뚝 단면의 중립축 변화를 통해 알 수 있는데 보강시 압축연단으로부터 중립축의 거리가 약 1.76배 증가하였고 압축부 콘크리트 단면적이 증가에 기인한 휨강도 향상으로 판단된다. 따라서 휨강도 기여량 분석은 추후 보강재료의 종류에 따라 합성 PHC말뚝의 휨강도를 사전에 예측할 수 있는 자료로 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 직경 1,000 mm인 기성 PHC말뚝을 속채움

콘크리트와 축방향 및 횡방향 철근으로 보강한 합성 대구경 PHC말뚝의 휨성능을 실험을 통해 평가하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기성 PHC 말뚝에 횡방향 철근을 배근하고 말뚝 중공부에 D29 축방향 철근과 속채움 콘크리트를 보강함으로써 대구경 합성 PHC 말뚝을 제작하였다.
- 2) 횡방향 철근이 배근된 실험체는 초기균열 후 하중의 증가에 따라 추가적인 휨균열 및 휨-전단균열이 발생하였고 최고하중에 도달하였다. 실험 종료시까지 복부전단균열은 발생하지 않았고 휨-전단균열의 폭도 상대적으로 작게 제어되었다.
- 3) LICPT 실험체에서 초기 휨-전단균열이 발생한 후 인장축(SR2, SL2) 횡방향 철근이 전단저항을 시작하였고, 하중이 증가함에 따라 균열이 압축부로 전진하면서 상부에 배근된 횡방향 철근(SR1, SL1)도 직접적으로 전단저항에 기여함을 실험을 통해 확인하였다.
- 4) 횡방향 철근의 배근으로 인하여 실험체의 휨강도를 1.08배, 변위를 1.19배 증가시킬 수 있었고 연성적인 휨파괴 거동을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 횡방향 철근에 의하여 전단강도와 말뚝두부의 반복이력이 크게 향상되는 것으로 알려져 있는데 이에 대해서는 후속 논문에서 상세히 다루고자 한다.
- 5) 기성 PHC말뚝과 대구경 합성 PHC 말뚝 단면해석을 통해 계산된 값은 실제 휨강도를 1.13배, 1.16배 안전측으로 예측할 수 있었다. 또한 기성 PHC말뚝의 경우 총 휨강도에 대한 말뚝본체 콘크리트, 프리스트레싱 강봉의 기여량은 90%, 10%로 계산되었고, 합성 PHC말뚝의 말뚝본체 콘크리트, 프리스트레싱 강봉, 속채움 콘크리트, 축방향 철근의 기여량은 78%, 5%, 3% 및 14%로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 및 (주) HKENC의 연구비 지원과 2015

학년도 충남대학교 교육공무원 국외파견 연구경비 지원으로 수행되었습니다.

References

Bang, J. W., Hyun, J. H., Lee, B. Y., and Kim, Y. Y. (2014), Cyclic Behavior of Connection between Footing and Concrete-Infilled Composite PHC Pile, *Structural Engineering and Mechanics*, 50(6), 741-754.

Bang, J. W., Lee, B. J., Hyun, J. H., Seo, J. S., and Kim, Y. Y. (2013), *Proceedings of 2013 Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 319-320.

Bang, J. W., Lee, B. Y., Lee, B. J., Hyun, J. H., and Kim, Y. Y. (2014), Effects of Infilled Concrete and Longitudinal Rebar on Flexural Performance of Composite PHC Pile, *Structural Engineering and Mechanics*, 52(4), 843-855.

Choi, S. S. (2002), A Suggestion of High Quality Concrete for PHC Pile, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 14(6), 41-48.

Hyun, J. H., Bang, J. W., Lee, S. S., and Kim, Y. Y. (2012), Shear Strength Enhancement of Hollow PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete and Shear Reinforcement, *Journal of the Korea Concrete*

Institute, 24(1), 71-78.

Kim, H. G., and Chai, S. G. (2011), A Case on Design and Construction of Large-Diameter PHC PILE, *Journal of the architectural institute of Korea*, 55(12), 119-124.

Kim, Y. Y., Lee, B. Y., and Bang, J. W. (2016), Performance and Design of Concrete-Infilled Composite PHC Pile, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 28(2), 42-48.

Korea Concrete Institute (2015), Study on Structural Performance of Large-Diameter Concrete-Infilled PHC Piles, R&D report (KCI R 15-002), 80.

KS F 4306 (2003), Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles, 1-55.

Kwon, K. S., Bang, J. W., Hyun, J. H., Lee, H. K., and Kim, Y. Y. (2015), Flexural Test of Large Diameter PHC Pile Reinforced with Transverse and Longitudinal Rebar and In-Filled Concrete, *Proceedings of 2015 Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 279-280.

Received : 07/06/2016

Revised : 07/15/2016

Accepted : 07/21/2016

요 지 : 최근 구조물의 대형화에 따른 큰 지지력의 말뚝에 대한 수요가 증가하는 추세이다. 이에 따라 기성 PHC말뚝의 경우에도 700~1,200 mm 범위의 대구경 말뚝에 대한 활용이 증가하고 있고 최근 국내 현장에 적용되고 있다. 이 연구에서는 대구경 PHC말뚝의 휨성능을 향상시키기 위해 철근과 콘크리트로 보강하여 합성 PHC말뚝을 제작하였다. 휨강도 평가는 4등분점 제하실험을 통해 변위제어 방법으로 수행되었다. 휨실험을 통해 LICPT 실험체 횡방향 철근의 변형률 분포를 분석한 결과 횡방향 철근의 배근은 전단균열의 진전과 균열폭 제어에 효과적인 것으로 나타났고, 복부전단균열 발생을 억제할 수 있었다. LICPT 실험체는 LICP 실험체 보다 휨강도가 약 1.08배, 중앙부 변위가 약 1.19배 증가하였고, 횡방향 철근의 배근은 말뚝의 연성적인 휨거동 확보에 유리한 것으로 나타났다. 말뚝 제작시 사용되는 각각의 재료가 휨강도에 기여하는 수준을 층상화 단면 해석으로 계산된 축강도-휨모멘트 상관도를 통해 평가하였다. 기성 PHC말뚝과 LICP 실험체의 실제 휨강도를 1.13배, 1.16 배의 안전율로 예측할 수 있었다.

핵심용어 : 대구경 PHC말뚝, 횡방향 철근, 축방향 철근, 속채움 콘크리트, 축강도-휨모멘트 상관 관계
