

PHC말뚝과 확대기초 연결방법에 따른 접합부 거동

방진욱¹, 오상진², 이승수³, 김윤용^{4*}

Pile-cap Connection Behavior Dependent on the Connecting Method between PHC pile and Footing

Jin-Wook Bang¹, Sang-Jin Oh², Seung-Soo Lee³, Yun-Yong Kim^{4*}

Abstract: The pile-cap connection part which transfers foundation loads through pile body is critical element regarding flexural and shear force because the change of area, stress, and stiffness occurs in the this region suddenly. The purpose of this study is to investigate the structural behavior of pile-cap connection dependent on fabrication methods using conventional PHC pile and composite PHC pile. A series of test under cyclic lateral load was performed and the connection behavior was discussed. From the test results, it was found that the initial rotational stiffness of pile-cap connection was affected by the length of pile-head inserted in footing and the location of longitudinal reinforcing bars. The types of pile and location of longitudinal reinforcing bars governed the behavior of pile-cap connection regarding load-carrying capacity, ductility, and energy dissipation.

Keywords: Pile-cap connection, Cyclic lateral load, PHC pile, Composite PHC pile

1. 서론

말뚝기초에 사용되는 PHC말뚝, 강관말뚝, 합성말뚝 등은 상부구조물의 하중을 지지력이 큰 하부지반에 유연하게 전달하여 구조물의 안정성을 확보하는데 중요한 역할을 하는 지하 구조체이다(Iskander and Hassan, 1998 ; Chun et al., 2010). 특히 PHC말뚝은 1992년 도입된 이래 꾸준한 양적 및 질적 성장을 거듭하여 토목 및 건축공사용으로 2000년 초반에는 약 400만톤 이상이 건설현장에 적용되었으며, 현재 전체 콘크리트 말뚝의 99.5%를 차지하고 있다(Choi, 2002). PHC말뚝은 PC강재의 프리텐션과 원심력을 이용하여 콘크리트 압축강도가 78.5 MPa 이상을 나타내는 특징으로 휨과 충격에 대한 저항성이 우수하여 상부에서 작용하는 재하하중을 증가시킬 수 있기 때문에 종래의 PC말뚝으로 시공할 수 없었던 중간층의 관통, 장대말뚝 시공이 가능하며 강관말뚝에 비해 부식에 대한 저항성 및 경제성을 확보할 수 있는 장점이 있다(Hwang and Cho, 2005; Song, 2008). 또한 시공시 직경, 길이, PC강재

의 프리텐션량에 따른 다양한 말뚝의 선택이 가능하므로 현장 적용성도 매우 우수한 장점이 있다.

말뚝기초를 구성하는 요소는 크게 말뚝본체, 말뚝머리-확대기초 접합부, 확대기초로 구분할 수 있으며, 국내 도로교설계기준(2008)에서는 이 3가지 요소들은 축력, 휨모멘트, 전단력 등의 외부하중에 대하여 안전하게 설계되어야 한다고 명시되어 있다. 특히 말뚝머리-확대기초 접합부는 상부구조물에서 전달되는 하중과 토압 등의 외부 하중을 온전히 부담하여 말뚝으로 하중을 전달하는 연결부분으로서 부재의 단면과 강성의 급격히 변화하는 부위이기 때문에 응력이 집중되고 작용하는 휨모멘트와 전단력이 큰 취약부분이다. 따라서 충분한 하중전달 능력뿐만 아니라 지진하중에 대한 연성 및 에너지소산 능력도 만족하여야 한다.

도로교설계기준(2008)에서는 접합부 연결방법을 강결합과 힌지결합의 2가지 방법을 제시하고 있으나 원칙적으로 강결합으로 설계하는 것으로 규정하고 있다. 강결합 방법은 확대기초 내부로 말뚝의 직경만큼 근입 깊이를 두어 삽입하는 방법 A와 근입 깊이를 10 cm로 최소화하고 말뚝본체 내부에 미리 삽입한 철근과 축방향 두부철근으로 보강하는 방법 B가 있다. 국내에서는 방법 B가 주로 적용되고 있으며, 현장 적용성과 성능향상을 위한 방법 B를 기본으로 한 다양한 방법이 개발되고 있다(Park et al., 2010; Bang et al., 2014).

이 연구에서는 PHC말뚝과 확대기초와의 접합부(pile-cap)

¹정회원, 충남대학교 건설방재연구소 박사후 연구원

²정회원, 한국도로공사

³정회원, 하경엔지니어링 대표이사

⁴정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

상세에 따른 역학적 구조거동을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 접합부 거동평가를 위해 국내 도로교설계기준에서 제시하고 있는 2종류의 강결합 방법과 Bang(2010) 등이 제시한 PHC말뚝의 성능을 향상시킨 합성 PHC말뚝연결방법에 따라 총 3종류의 연결방법을 적용하였다. 반복가력 하중 조건하에서의 접합부의 휨내력, 연성비, 에너지 소산능력 등을 평가하였고, 실험결과와 분석을 통해 연결방법에 따른 종합적인 접합부 성능을 평가하였다.

2. 실험체 제작 및 실험 방법

2.1 PHC말뚝 및 사용재료

접합부 실험체를 제작하기 위해 사용한 PHC말뚝은 직경 500 mm, 두께 80 mm이며, 공칭지름이 9.2 mm인 PC강재 9개, 콘크리트 압축강도가 80 MPa 이상인 A종이다. 합성 PHC말뚝은 PHC말뚝에 이중삼각형의 횡방향 철근이 200 mm 간격으로 배근된 것을 사용하였고, 8.3 mm의 PC강재 12개가 배근되었으며, 콘크리트 압축강도는 PHC말뚝과 동일하다. 모든 말뚝은 총 길이 4,000 mm로 제작하였다. 실험체 제작에 사용된 말뚝은 I사에서 생산되는 기성제품을 사용하였다. Fig. 1은 3종류의 연결방법에 따라 제작된 PHC말뚝의 형상을 나타낸다.

강결합 방법 A PHC말뚝과 합성 PHC말뚝은 실험체 제작 방법에 맞게 PC강봉과 콘크리트를 모두 절단하는 윈커팅 방법을 적용하였고, 강결합 방법 B PHC말뚝의 경우 말뚝본체 내부에 배근된 H19 이형철근 9개와 PC강봉 9개의 커팅 없이 말뚝본체 콘크리트만 제거하여 도로교설계기준(2008)에서 제시하고 있는 확대기초로 삽입되는 정착길이 920 mm를 확보할 수 있도록 제작하였다. 확대기초 및 PHC말뚝 중공부 속 채움 콘크리트는 설계기준 압축강도 24 MPa, 슬럼프 150 mm, 굵은골재 최대치수 25 mm인 레디믹스트 콘크리트를 사용하였다. 또한 말뚝 중공부 내의 축방향 보강철근(주철근)으로 설계기준 항복강도 400 MPa인 H16, H29 이형철근을 확대기초 철근으로 H25 이형철근을 각각 사용하였다.



(a) PHC pile for connection type A (b) PHC pile for connection type B (c) Composite PHC pile

Fig. 1 Preparation of PHC piles

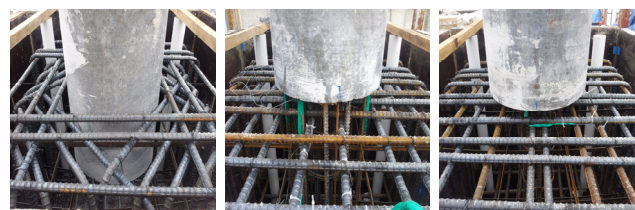
2.2 접합부 실험체 제작

강결합 방법 A로 제작된 PHC-A와 방법 B로 제작된 PHC-B 및 합성 PHC말뚝 방법으로 제작된 PHC-C 실험체를 각각 1개씩 제작하였다. 말뚝의 길이는 PHC-A의 경우 확대기초로 삽입되는 길이 500 mm를 고려하여 2,400 mm이며, PHC-B와 PHC-C는 1,900 mm이다. 확대기초는 1,500 × 1,500 mm, 높이 1,200 mm인 직사각형 모양으로 제작하였다. 말뚝머리 축방향 보강철근으로 PHC-C 실험체는 말뚝 중공부에 H29 이형철근을 8개 삽입하였고, PHC-B 실험체는 말뚝 중공부에 H16 8개를 삽입하여 각각 제작하였다. 확대기초로 삽입되는 부분의 축방향 보강철근은 원형 띠철근과의 용접을 통해 계획된 위치에 정확히 배근될 수 있도록 하였다. 한편, PHC-A 실험체는 축방향 철근 보강 없이 확대기초 내부로 말뚝직경 500 mm만큼 삽입되도록 제작하였고, 확대기초의 철근배근은 도로교설계기준(2008)에서 제시하는 방법을 바탕으로 말뚝 삽입용이하도록 H25 철근을 절단하여 배근하였다. Fig. 2에 실험체 종류에 따른 말뚝과 확대기초와의 접합부 연결전경을 나타내었고, Fig. 3과 Table 1은 실험체 제작을 위한 접합부 제작 상세를 나타내고 있다.

2.3 실험 방법

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 말뚝을 확대기초의 상부에 두고 실험을 실시하였는데, 말뚝에 축력을 도입하지 않은 상태에서 반력벽에 지지시킨 500 kN 용량의 역추에이터를 이용하여 실험체를 가력하였다. 확대기초 상부로부터 1,500 mm 떨어진 곳에 가력판을 정착하여 횡방향 수평변위를 단계별로 증가시키는 방법으로 횡하중을 재하 하였다(Fig. 5). 각 단계별 drift ratio에 맞추어 2주기씩 정가력(+)과 부가력(-)의 반복하중을 변위제어 방식으로 가력함으로써 동일한 수평변위 내에서 강도 및 강성의 저하를 평가할 수 있도록 계획하였다. 또한 철근의 변형 정도에 따른 접합부 성능을 평가하기 위해 휨모멘트가 가장 크게 발생하는 접합부에 위치하는 축방향 철근에 철근 게이지를 부착하였다.

가력 단계가 증가하면서 최대하중을 넘어서 이후에 최대 횡하중의 70% 이하로 하중이 저하될 때 실험을 종료하였다.



(a) PHC-A (b) PHC-B (c) PHC-C

Fig. 2 PHC piles Inserted in footing

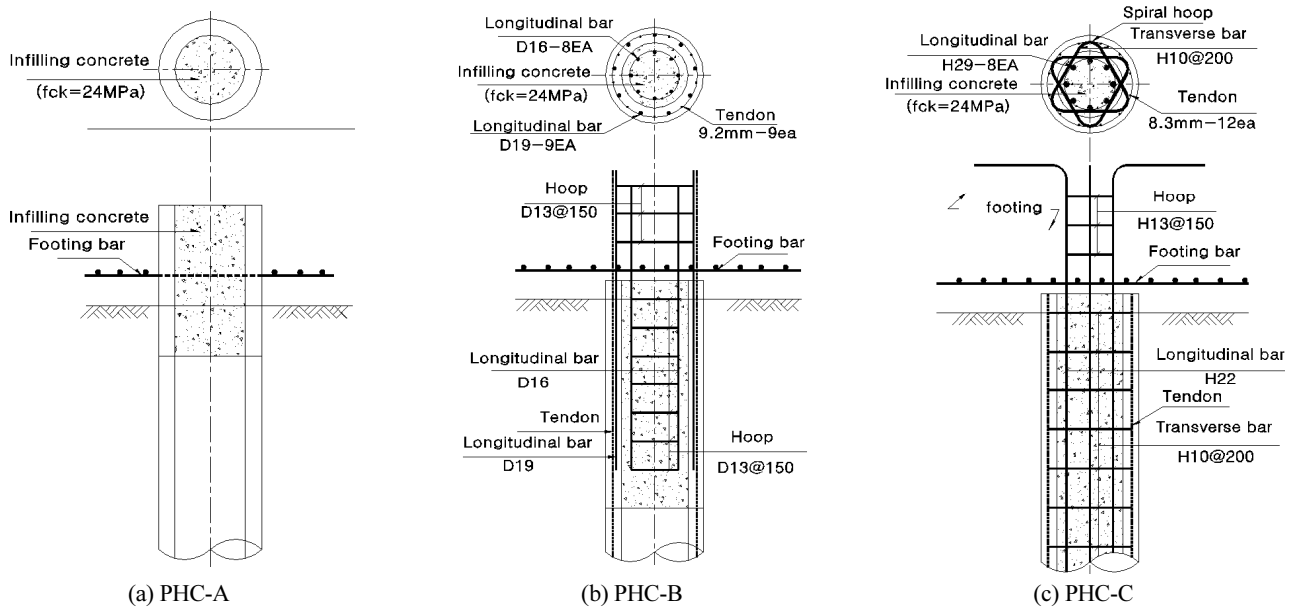


Fig. 3 Conceptual images of pile-cap specimens

Table 1 Properties of specimens

| Specimens | PHC-A | | | PHC-B | | | PHC-C | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------|--------------------------------------|----------------------------|
| | footing | Pile body | Concrete filling area | footing | Pile body | Concrete filling area | footing | Pile body | Concrete filling area |
| Dimension ($l \times h$)(mm) | 1,500×1,500 | ϕ 500-80t | ϕ 340 | 1,500×1,500 | ϕ 500-80t | ϕ 340 | 1,500×1,500 | ϕ 500-80t | ϕ 340 |
| Height(mm) | 1,200 | 2,400 | 2,400 | 1,200 | 1,900 | 1,900 | 1,200 | 1,900 | 1,900 |
| Concrete strength(f_{ck})(MPa) | 24 | 80 | 24 | 24 | 80 | 24 | 24 | 80 | 24 |
| Tendon | - | 9- ϕ 9.2 ($\rho=0.632\%$) | - | - | 9- ϕ 9.2 ($\rho=0.632\%$) | - | - | 12- ϕ 8.3 ($\rho=0.686\%$) | - |
| Longitudinal bar | - | - | - | - | 9-H19 ($\rho=2.44\%$) | 8-H16 ($\rho=1.75\%$) | - | - | 8-H29 ($\rho=5.66\%$) |
| Transverse bar | - | - | - | - | - | - | - | H10@200 ($\rho=2.07\%$) | - |



Fig. 4 Laboratory test set-up

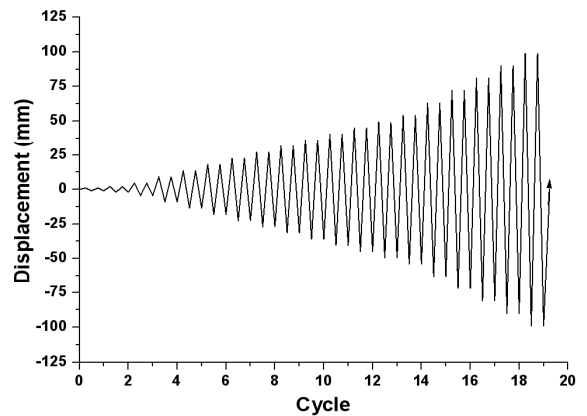


Fig. 5 Lateral loading history

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험체 균열 및 파괴양상

PHC말뚝 두부에 축방향 철근의 보강이 없이 말뚝직경에 해당하는 길이를 확대기초 내부로 삽입한 PHC-A 실험체의 반복가력 실험 과정에서 발생한 확대기초 및 말뚝본체의 최고하중 및 실험종료시의 균열 패턴을 Fig. 6(a)와 (b)에 나타내었다. 확대기초와 말뚝의 경계면에서 초기 균열이 발생(수평변위: 1 mm)한 이후, 수평변위가 증가함에 따라 경계면을 따라 균열이 진전되며 수평변위 4.5 mm에서 정가력 및 부가력 시 접합부 경계면 부근에서 말뚝 콘크리트의 초기균열이 관찰되었다. 수평변위가 증가함에 초기균열의 폭이 증가하였으나 말뚝에서 추가적인 균열의 발생은 관찰되지 않았고, 수평변위 13.5 mm에서 최고하중에 도달하였다. 최고하중 이후 수평변위 22.5 mm에서 말뚝 균열폭 확대와 함께 말뚝파괴가 발생되었지만 확대기초 균열은 관찰되지 않았다.

PHC-B 실험체의 경우 PHC-A 실험체와 같이 확대기초와

말뚝의 경계면에서 초기 균열이 발생하였다(수평변위 1 mm). 하중이 증가함에 따라 경계면을 따라 균열이 진전되었고, 수평변위 9 mm에서 정가력 및 부가력시 말뚝 콘크리트에서 균열이 관찰되었다. 수평변위가 증가함에 따라 말뚝 상부로 추가 균열이 발생되었고 수평변위 27 mm에 말뚝 전체에 경사균열이 발생하기 시작하였다. Fig. 6(c)에 나타낸 바와 같이 수평변위 31.5 mm에서 최고하중에 도달하였고, 36 mm에서 말뚝 콘크리트의 경사균열 발생지점에서 콘크리트가 탈락되기 시작하였다.

이와 같이 말뚝 본체 콘크리트의 탈락 현상이 나타난 것은 말뚝 내부에 횡방향 철근의 보강이 없어 경사균열을 효과적으로 제어하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 실험 종료인 수평변위 49.5 mm까지 말뚝 본체 콘크리트의 탈락이 추가적으로 발생되었고, 말뚝 전구간에 걸쳐 내부에 배근된 PC강봉 및 축방향 보강 철근이 노출되어 관찰될 정도로 상당히 넓고 깊은 균열들이 확장되며 하중이 감소되었다. 실험 종료시까지 확대기초의 균열은 발생되지 않았는데 확대기초 내부로 삽입되어 정착되는 철근량이 가장 많음에 기인한 접합부의 강결합을 충분히 확보한 결과로 판단된다. 그러나 최종 균열 패턴에서 볼 수 있듯이 수평하중을 말뚝본체가 온전히 부담하기 때문에 말뚝본체의 파괴가 가장 크게 발생되었다.

한편, PHC말뚝 중공부에 횡방향 철근이 보강된 합성 PHC말뚝을 사용한 PHC-C 실험체의 경우에도 접합부 초기균열은 수평변위 1 mm에서 발생되었다. 그러나 말뚝본체의 균열이 발생된 시점은 수평변위 18 mm으로 가장 큰 것으로 나타났다. 말뚝본체의 초기균열 발생 이후 1~2개의 추가균열 발생과 함께 수평변위 45 mm에서 최고하중에 도달하였는데 PHC-A 실험체 및 PHC-B 실험체에 비해 최고하중시의 변위능력이 약 3.3배, 1.4배 높은 것으로 나타났다. 정가력 수평변위 63 mm에 이르러 확대기초 콘크리트의 들뜸 현상으로 큰 폭의 균열이 발생하였지만 실험종료 수평변위 99 mm까지 급격한 하중감소 없이 연성적인 거동을 나타내었다. PHC말뚝으로 제작된 실험체에 비해 합성 PHC말뚝실험체는 경사균열이 관찰되지 않았고 말뚝본체에 발생된 균열의 폭을 상대적으로 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2 하중-변위 곡선

각 실험체의 반복가력 하중에 따른 하중-변위 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. PHC-A 실험체의 경우 정가력 수평변위 13.5 mm에서 최고하중 141.5 kN을 나타내었고, 최고하중 이후 접합부 부근의 말뚝의 파괴로 인해 급격한 하중감소가 발생되었다. 접합부의 휨강도는 정·부가력 평균 202.3 kN·m으로 Bang et al.(2014)의 사전연구에서 보고한 기성 PHC말뚝의 휨강도 199.0 kN·m 수준으로 나타나 접합부 내력은 말뚝본체의

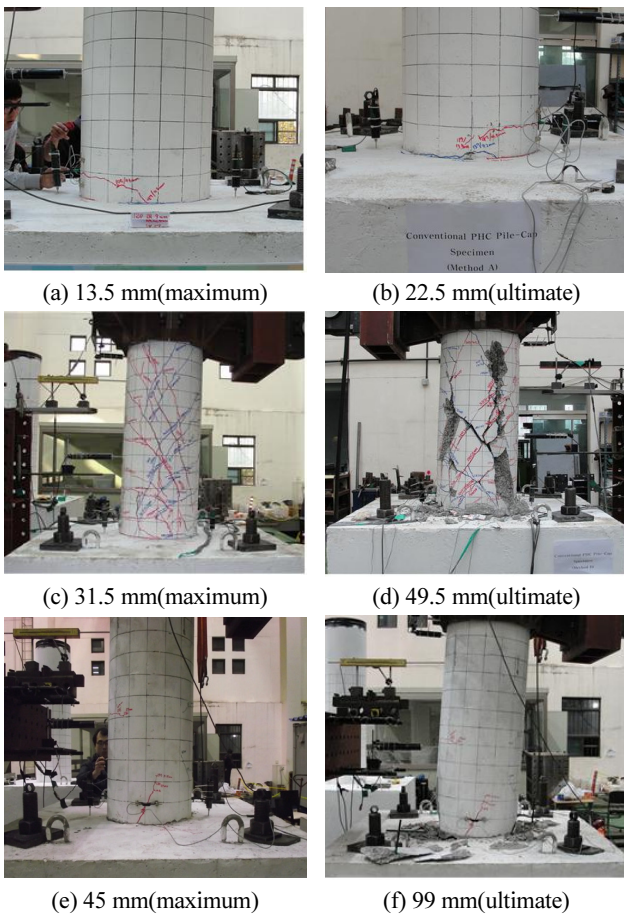
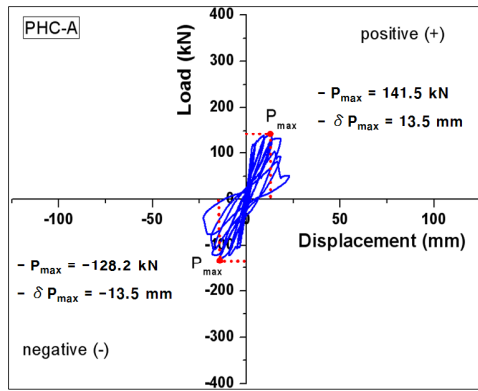
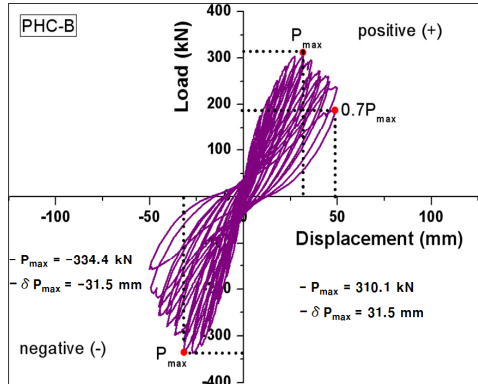


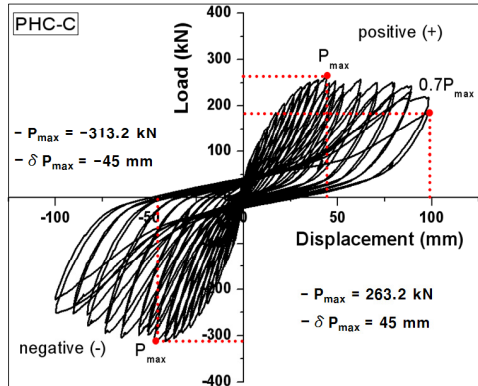
Fig. 6 Crack pattern and failure mode of specimens where, (a), (b): PHC-A specimen, (c), (d): PHC-B specimen, and (e), (f): PHC-C specimen



(a) PHC-A specimen



(b) PHC-B specimen



(c) PHC-C specimen

Fig. 7 Lateral load and displacement curve

휨강도에 의존하는 것으로 나타났다.

PHC-B 실험체의 경우 PHC-A 실험체와 다르게 접합부 철근의 항복이후 수평변위 31.5 mm에서 최고하중에 도달한 후 PHC말뚝 본체 콘크리트의 균열로 인한 단면손실 전까지 상대적으로 급격한 하중 감소 없이 연성파괴를 갖는 것으로 나타났다. Fig. 6(d)에서 볼 수 있듯이 PHC말뚝 본체 콘크리트의 단면 손실이 발생되기 시작한 시점부터는 급작스러운 하중감소가 관찰되었다. 최고하중은 부가력시 334.4 kN으로 측정되었다. 한편, PHC-C 실험체의 경우 철근의 항복이후 최고하중에 도달하기 전까지 파괴거동은 PHC-B 실험체와 유사

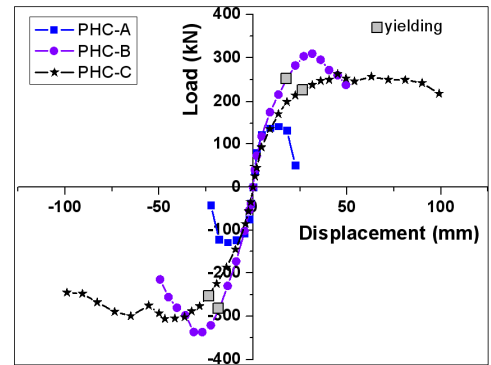


Fig. 8 Envelop curve of each specimen

하게 나타났으나 최고하중에서의 수평변위가 약 1.42배 증가되어 변위능력도 증가되었다.

또한 PHC-B 실험체의 종료 수평변위 49 mm 이후 수평변위를 2배 증가시킨 하중 조건하에서도 급격한 하중감소 없이 우수한 연성파괴가 수평변위 99 mm까지 확보됨을 확인하였다. Fig. 6(f)에서 볼 수 있듯이 최종 파괴시까지 말뚝본체의 콘크리트 단면손실은 관찰되지 않았는데 말뚝본체에 보강된 횡방향 철근의 영향으로 말뚝본체에 발생하는 균열을 효과적으로 제어했을 뿐만 아니라 PHC말뚝 콘크리트와 속채움 콘크리트를 일체화시키는 수평전단철근의 역할도 수행하여 말뚝 및 속채움 콘크리트와 축방향 보강철근(두부보강 철근)이 충분한 합성거동을 발휘하였기 때문으로 판단된다(Hyun et al., 2010 ; Bang et al., 2014).

Fig. 8은 하중-변위 곡선에서 각 가력단계에서 측정된 최대하중을 연결한 포락곡선이다. 축방향 두부보강 철근이 항복한 지점의 하중을 측정하여 항복하중 P_y 로 이에 대응하는 변위를 항복변위 δ_y 로 나타내었다. 또한 포락곡선에서 실험 종료시 최대변위를 δ_u 로 정의하여 연성비(δ_u/δ_y)를 계산하였고, 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2에 나타난 바와 같이 연성비의 경우 PHC-B 실험체와 PHC-C 실험체는 각각 최대 2.75와 4.54로 계산되었다. 보강된 철근량과 제작방법이 서로 다르기 때문에 직접적인 상대비교를 통해 우수성 여부를 언급하기에는 무리가 있지만 말뚝 콘크리트 단면 손실이 발생되지 않고 실험종료시까지 변위능력이 큰 PHC-C 실험체의 연성도가 큰 값을 나타내었다. PHC-A 실험체의 경우 횡방향 두부보강 철근 보강이 없기 때문에 연성비를 측정하지 못하였지만 실험종료시 최대 변위를 고려해 볼 때 두 실험체에 비해 작은 연성비를 나타낼 것으로 판단된다.

3.3 접합부 초기 회전강성 및 강결합 성능

모든 실험체의 초기강성은 탄성거동을 나타내고 정·부가

Table 2 Test results of each specimen

| | Yielding point | | | | Maximum point | | | | Ultimate point | | | | Ductility ratio (δ_u/δ_y) | |
|-------|----------------|-----------------|-------------|-----------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|-----------------|-------------|-----------------|---|--------------|
| | Positive(+) | | Negative(-) | | Positive(+) | | Negative(-) | | Positive(+) | | Negative(-) | | Positive (+) | Negative (-) |
| | P_y (kN) | δ_y (mm) | P_y (kN) | δ_y (mm) | P_{max} (kN) | δ_{max} (mm) | P_{max} (kN) | δ_{max} (mm) | P_u (kN) | δ_u (mm) | P_u (kN) | δ_u (mm) | | |
| PHC-A | - | - | - | - | 141.5 | -13.5 | -128.2 | -13.5 | 50 | 22.5 | -38 | -22.5 | - | - |
| PHC-B | 251.4 | 18.0 | -283.0 | -17.8 | 310.1 | 31.5 | -334.4 | -31.5 | 189.7 | 49 | -153.5 | -49 | 2.72 | 2.75 |
| PHC-C | 237.4 | 26.3 | -261.8 | -21.8 | 263.2 | 45 | -313.2 | -45 | 184.6 | 99 | -218.5 | -99 | 3.76 | 4.54 |

력에 따른 안정적인 초기 기울기를 나타낼 수 있는 수평변위 4.5 mm를 기준으로 하였는데 이 값은 3 종류의 접합부 실험체에서 말뚝본체에 균열이 발생하기 시작한 최소값이다. 회전강성은 다음 식 (1)을 통해 구할 수 있다(Kwak et al., 2003; Kim et al., 2014).

$$K_r = M/\theta \quad (1)$$

여기서, M 은 가력거리 1,500 mm와 수평변위 4.5 mm일때의 하중과의 곱으로 계산하였고, θ 는 접합부에서 가력부 사이의 회전각이다.

다음 Table 3은 식 (1)을 통해 계산된 모든 실험체의 초기 회전강성을 나타낸다. 회전강성의 크기는 PHC-A가 가장 큰 값으로, PHC-C가 가장 작은 값으로 계산되었다. 확대기초로 말뚝머리가 100 mm 삽입된 PHC-B와 PHC-C 실험체에 비해 500 mm로 삽입된 제작조건에 기인하여 회전에 대한 접합부 강성이 증가되었기 때문이다. 또한, PHC-B는 PHC-C 실험체에 비해 횡방향 두부보강 철근량이 적지만 약 1.17배 높은 회전강성값을 나타내었는데 PHC-C 실험체는 말뚝 중공부에만 축방향 철근이 배근된 반면, PHC-B 실험체의 경우 중공부 뿐만 아니라 PHC말뚝에 배근된 PC강선과 축방향 철근이 확대기초 내부로 삽입되는 제작방법에 의해 회전에 저항할 수 있는 유리한 조건이 확보되었기 때문이다. 한편, 도로교설계기준에서 말뚝과 확대기초의 강결합을 요구하는 것은 기초의 수평변위를 제어하기 위함인데 말뚝의 수평변위는 결합부 강성 및 지반과의 상호작용에 의하여 결정되므로 본 연구 실험

체의 접합부 회전강성만으로 강결합 정도를 평가하는 것은 미흡할 것으로 판단된다. 계산된 회전강성을 바탕으로 다양한 지반의 조건을 고려한 수평변위의 검토가 추가적으로 수행된 후 접합부의 강결합 특성을 최종적으로 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.4 접합부 에너지소산 특성

에너지 소산능력은 구조물의 내진성능을 평가하는데 있어 중요한 항목 중의 하나라고 알려져 있고, 그 값이 클수록 내진 성능이 우수한 것으로 평가되고 있다. Fig. 9는 수평변위에 따른 각 실험체의 누적 에너지 소산능력을 나타낸다. 누적 에너지 소산량은 Fig. 7의 하중-변위 곡선에서 변위 0 mm를 기준으로 각 변위에 따른 정·부가력 폐곡선의 면적의 누적합으로 정의하였고 계산 결과를 Table 4에 정리하였다. 우선, PHC-A 실험체 종류 시점까지를 기준으로 총 누적에너지 소산량은

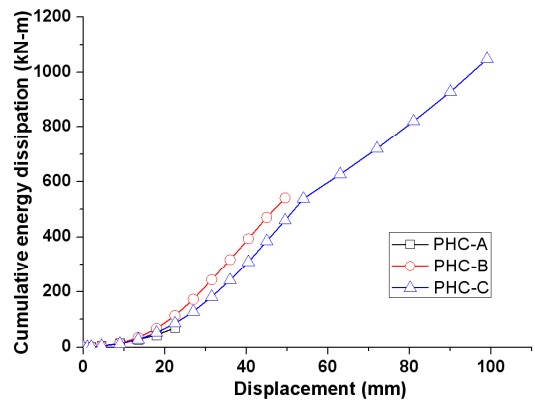


Fig. 9 Cumulative energy dissipation curve of each specimen according to displacement

Table 3 Initial rotational stiffness results of each specimen

| Specimens | PHC-A | PHC-B | PHC-C |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Lateral load (kN) | 113.6 | 109.5 | 93.2 |
| Flexural strength (kN·m) | 170.4 | 164.3 | 140.0 |
| Initial rotational stiffness (kN·m/rad) | 56,800 (100%) | 54,750 (96%) | 46,600 (82%) |

Table 4 Cumulative energy dissipation results of each specimen

| Specimes | Cumulative energy dissipation(kN·m) | | |
|----------|-------------------------------------|---------|-------|
| | 22.5 mm | 49.5 mm | 99 mm |
| PHC-A | 71 | - | - |
| PHC-B | 113 | 541 | - |
| PHC-C | 86 | 460 | 1048 |

PHC-B 실험체가 PHC-A, PHC-C 실험체에 비해 근소하게 높은 값을 나타내고 있지만 유사한 수준의 에너지 소산값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 최고하중에 도달한 후 실험 종료 시까지의 총 누적에너지 소산량을 비교할 경우 PHC-C 실험체가 PHC-A와 PHC-B 실험체의 14.8배 및 1.9배의 증가된 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 3 종류의 접합부 제작상세의 차이와 축방향 철근의 유무 및 철근비가 다르기 때문에 연결방법에 따른 직접적인 상대비교를 하기에 다소 무리가 있지만 최고하중 이후의 하중에 대하여 저항할 수 있는 내진성능은 PHC-C 실험체가 우수한 능력을 발휘하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 국내 도로교설계기준에서 제시하고 있는 PHC말뚝의 머리와 확대기초와의 강결합 연결방법(방법 A, 방법 B)과 합성 PHC말뚝의 연결방법에 따라 제작한 실험체의 반복가력 실험을 통해 그 성능을 평가하였고 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 말뚝직경 500 mm를 기초내부로 삽입하는 방법 A와 100 mm 삽입후 말뚝본체의 철근과 두부보강철근으로 보강한 방법 B를 통해 PHC말뚝과 확대기초의 접합부 실험체 제작하였고, 합성 PHC말뚝 중공부 내부에 두부보강철근만 보강하여 합성 PHC말뚝 접합부 실험체를 제작하였다.
- 2) 수평변위를 증가시키는 반복가력 실험을 통해 실험체의 파괴거동을 평가한 결과 PHC-A 실험체의 경우 4.5 mm 수평변위에서 말뚝의 초기균열이 발생되었고 추가균열 발생이 없이 초기균열의 폭이 확대되어 급속한 하중저하와 함께 실험이 종료되었다. PHC-B 실험체의 경우 9 mm에서 말뚝의 초기균열이 발생되었다. 변위증가에 따라 말뚝 전구간에 걸쳐 경사균열이 발생하였고 실험 종료시까지 균열폭 확대에 의한 콘크리트의 탈락으로 콘크리트 단면이 손실되었다. PHC-C 실험체의 경우 18 mm에서 말뚝의 초기균열이 발생되었고 경사균열 발생 없이 실험종료 변위 99 mm까지 연성적인 파괴거동이 관찰되었다.
- 3) PHC-A 실험체의 경우 정가력 수평변위 13.5 mm에서 최고하중 141.5 kN을 나타내었고, 접합부의 휨강도는 평균 202.3 kN·m으로 PHC말뚝의 휨강도 199.0 kN·m 수준으로 나타나 접합부 내력은 말뚝본체의 휨강도에 의존하는 것으로 나타났다. PHC-B 실험체의 경우 접합부 철근의 항복 이후 수평변위 31.5 mm에서 부가력 최고하중 334.4 kN이 측정되었다. PHC-C 실험체의 경우 철근의 항복이후 최고하중에 도달하기 전까지 파괴거동은 PHC-B 실험체와 유

사하게 나타났으나 실험 종료시까지보다 연성적인 파괴 특성을 나타내었다.

- 4) 접합부 실험체의 회전강성은 PHC-A가 가장 큰 값으로 PHC-C가 가장 작은 값으로 계산되었다. 이러한 결과는 말뚝이 확대기초에 삽입되는 깊이, 철근의 배근량 및 배근위치 등의 제작상의 차이 때문으로 판단된다.
- 5) PHC-A 실험체 종료 시점까지를 기준으로 총 누적에너지 소산량은 PHC-B 실험체가 PHC-A, PHC-C 실험체에 비해 근소하게 높은 값을 나타내고 있지만 모든 실험체가 유사한 수준의 소산값을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 최고하중에 도달한 후 실험 종료시까지의 총 누적에너지 소산량을 비교할 경우 PHC-C 실험체가 PHC-A와 PHC-B 실험체의 14.8배 및 1.9배의 증가된 값을 나타내었다.
- 6) 말뚝머리와 확대기초 접합부 구조거동은 말뚝의 삽입깊이, 축방향 철근의 보강량, 철근의 배근위치 및 말뚝의 종류에 따라 그 특징들이 각각 다르게 나타남을 실험을 통해 확인하였다. 이러한 기초연구 결과는 현장적용시 접합부 결합방법을 결정할 수 있는 기초자료로 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단 학문후속세대양성사업 박사후 국내연수(NRF-2015R1A6A3A01016717)사업 및 HKENC(주)의 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다.

References

1. 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.
2. Bang, J. W., Hyun, J. H., Lee, B. Y., Lee, B. J., 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.
3. Choi, S. S. (2002), A Suggestion of High Quality Concrete for PHC Pile, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 14(6), 41-48.
4. Chun, Y. S., Park, J. B., and Sim, Y. J. (2010), Mechanical Properties of PHC Pile Head Connection with Foundation Slab and Field Application, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 22(5), 71-77.
5. Hwang, Y. C., and Cho, C. H. (2005), Pile Foundations in Korea, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 21(2), 8-20.
6. 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.

7. Iskander, M., and Hassan, M. (1998), State of the Practice Review in FRP Composite Piling, *Journal of Composites for Construction*, 2(3), 116-120.
8. Kim, H., D., Yang, J., G., Lee, J., Y., and Lee, H., D. (2014) Evaluation of the Initial Rotational Stiffness of a Double Split Tee Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 26(2), 133-142.
9. Korean Society of Civil Engineers. (2008), Highway Bridge Design Code, Seoul, 905-915.
10. Kwak, S., S., Kim, H., S., Jung, S., J., Hong, G., H., and Lee, K., E. (2003), An Experimental Study on Shear and Rotation Stiffness in

the Connection Parts of Shores, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(6), 848-855.

11. Park, J. B., Sim, Y. J., Chun, Y. S., Park, S. S., and Park, Y. B. (2010), Assessment of Optimum Reinforcement of Rebar for Joint of PHC Pile and Foundation Plate, *LHI journal*, 1(1), 67-73.
12. Song, T. E. (2008), Decision Procedure in Applying PHC Piles instead of Steel Plies, *Technical Magazine Ssangyong Engineering and Construction*. 48, 32-36.

Received : 11/02/2015

Revised : 11/27/2015

Accepted : 12/29/2015

요 지 : 말뚝머리-확대기초 접합부는 상부구조물의 하중을 말뚝으로 전달하는 연결부분으로서 부재의 단면과 강성의 급격히 변화하는 부위이기 때문에 응력이 집중되고 작용하는 휨모멘트와 전단력이 큰 취약부분이다. 이 연구에서는 제작조건에 따른 PHC말뚝 및 합성 PHC말뚝과 확대기초 접합부의 구조성능을 평가하는데 목적이 있다. 반복가력 하중 조건하에서의 균열패턴, 하중-변위관계, 연성비, 초기 회전강성 및 에너지소산 특성을 각각 평가하였다. 접합부 초기 회전강성은 확대기초 내부로 삽입되는 말뚝삽입 깊이와 축방향철근 배근위치에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 접합부 강도, 연성비 및 누적 에너지소산 등의 접합부 거동은 말뚝의 종류와 축방향 철근 배근 위치에 영향을 받는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 말뚝머리-확대기초 접합부, 반복가력, PHC말뚝, 합성 PHC말뚝
