속채움 콘크리트와 전단철근을 사용한 대구경 합성 PHC말뚝의 전단보강 성능

현정환¹, 방진욱², 김윤용^{3*}

Shear Performance of Large-Diameter Composite PHC Pile Strengthened by In-Filled Concrete and Shear Reinforcement

Jung-Hwan Hyun¹, Jin-Wook Bang², Yun-Yong Kim^{3*}

Abstract: Recently, the demand for large diameter piles has been rapidly increased in order to secure the allowable bearing capacity of pile foundation due to the increase of large structures such as high rise buildings. In this study, to improve the shear capacity of a conventional PHC pile, a large diameter composite PHC pile strengthened by in-filled concrete and shear reinforcement was manufactured. All the piles were tested according to the shear strength test method of Korean Standard. As a result of the shear test, the F-type piles which are produced without shear reinforcement occurred abrupt horizontal cracks after flexural and inclined shear cracks occurred. On the contrary, the FT-type piles which are produced with shear reinforcement exhibited stable flexural and inclined shear cracks uniformly over the entire pile without abrupt horizontal cracks. Furthermore, the maximum load of the large diameter composite PHC pile improved to 2.9 times in the F series, and more than 3.3 times in the FT series compared to the conventional PHC pile. This result indicated that FT-type piles had excellent composite behavior due to the shear reinforcement and effectively prevented the unstable growth of inclined shear cracks.

Keywords: Large diameter composite PHC pile, Shear reinforcement, In-filled concrete, Composite behavior

1. 서 론

상부구조물의 하중을 지지력이 큰 하부지반에 전달하고, 기 초지반의 지지력이 충분하지 못할 경우 지반침하 등을 방지하기 위한 방법으로 말뚝 기초를 사용하고 있다. 현재 대구경 PHC 말 뚝은 한국과 말레이시아 등의 국가에서 대형구조물의 말뚝 기초 재료로 빈번히 사용하고 있다. PHC(Pretensioned spun High strength Concrete)말뚝은 기존 PC(Prestressed concrete)말뚝의 성능을 개선하여 압축강도, 휨 모멘트 저항성 및 경제성을 향상 시킨 말뚝으로 1992년 국내에 도입된 이후 PC말뚝을 대체하였 으며, 현재 기성 콘크리트 말뚝을 대표하고 있다(Chun et al., 2010; Choi, 2002). PHC말뚝은 텐던에 프리스트레싱을 도입하 여 균열 저항성이 우수하고, 원심성형과 오토클레이브 양생 과 정을 거쳐 짧은 시간에 80 MPa 이상의 콘크리트 압축강도를 확

'정회원, 충남대학교 토목공학과 건설방재연구소

2정회원, ㈜동양/건재부문

3정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

•본 논문에 대한 토의를 2017년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

보할 수 있다(Bang et al., 2016). 또한, PHC말뚝은 자동화 공정 으로 공장에서 제작되어 우수한 품질관리와 함께 대량 생산할 수 있는 장점이 있다. 국내에 도입된 1990년대 초반에는 300~ 400 mm 직경의 말뚝을 사용하기 시작하였고, 2000년대 이후에 는 직경 500~600 mm 말뚝을 주로 사용하였다. 최근 대형구조물 의 기초 지지력을 확보하기 위한 방법으로 700~1200 mm의 대 구경 PHC말뚝이 현장에서 사용되기 시작하였으며, 현장타설 말뚝과 비교할 경우 경제성이 우수한 것으로 보고하고 있다 (Kim et al., 2011). 국내에서는 콘크리트의 압축강도가 80 MPa 급인 기성 PHC말뚝의 압축강도를 130 MPa 까지 향상시킨 초고 강도 PHC말뚝을 개발하고 현장에 적용하여 대구경 PHC말뚝의 지지력 향상을 위한 연구(Bang et al., 2016)가 진행된 바 있으며, 기존 중구경 PHC말뚝 내부에 콘크리트와 전단철근을 사용하여 휨 및 전단 성능을 향상시킨 연구도 진행된바 있다(Kim et al., 2016; Bang et al., 2014; Hyun et al., 2012). 따라서, 이 연구에서 는 기존 연구를 토대로, 최근 대규모 구조물 건설 수요가 증가하 고 있는 대구경 PHC말뚝에 대한 전단보강 효과를 시험을 통해 평가하고자 한다. 대구경 PHC말뚝에 속채움 콘크리트, 전단철 근 및 휨보강 철근을 배근하여 보강 변수 조건에 따른 설계값 제 시와 대구경 합성 PHC말뚝의 제작 과정을 기술하였다. 제작된 대구경 말뚝은 KSF 4306의 규정에 따라 전단강도 시험을 수행

Copyright © 2017 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

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

하여 전단강도 증진과 균열제어 특성 등의 구조 성능을 평가/분 석하였다.

2. 대구경 합성 PHC말뚝의 전단 설계

본 절에서는 강도설계법을 바탕으로 대구경 합성PHC말뚝의 전단강도를 이론적으로 설계하였다. 말뚝의 전단강도(V_n)를 설계하기 위하여 식(1)과 같이 대구경 PHC말뚝 본체(V_{PHC})와 속 채움 콘크리트(V_c) 및 전단 철근의 전단강도(V_s)를 각각 합산하여 산정하였으며, Table 1에 계산결과를 표시하였다.

$$V_n = V_{PHC} + V_c + V_s \tag{1}$$

2.1 대구경 PHC말뚝의 전단강도

대구경 PHC말뚝 본체의 전단강도 계산은 KS F 4306(2003) 에서 제시하고 있는 PHC말뚝의 전단강도 계산 식을 활용하여 설계하였다.

$$V_p = \frac{2tI}{S_o} \times \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{cc} + 2\phi\sigma_t)^2 - \sigma_{cc}^2}$$
(2)

여기서, t는 PHC말뚝의 두께(mm), I는 중심축에 관한 콘크 리트의 환산 단면 2 차 모멘트(mm⁴)이며, r_0 는 PHC말뚝의 바깥 쪽 반지름(mm), r은 PHC말뚝의 내측 반지름(mm), S_o 는 말뚝 중심축 이상의 단면 중심축에 대한 환산 단면 1차 모멘트(mm³), σ_{α} 는 PHC말뚝 내부에 배근된 텐던의 유효 프리스트레스 (MPa), ϕ 는 0.5, σ_t 는 콘크리트의 인장강도이며 5.39 MPa이다.

2.2 속채움 콘크리트의 전단강도

대구경 PHC말뚝 중공에 충전하는 속채움 콘크리트는 설계기 준 압축강도 27 MPa 콘크리트를 사용하였으며 전단강도(*V_c*)는 다음 식(3)을 이용하여 계산하였다.

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \tag{3}$$

여기서, f_{ck} 는 말뚝 내부에 충전하는 속채움 콘크리트의 압축 강도이며, b_w 는 복부의 폭, d는 압축연단에서 인장부에 배근된 텐던까지의 거리이다.

2.3 전단철근의 전단강도

대구경 PHC말뚝에 전단보강을 위하여 배근되는 전단철근은 D16 이형철근을 사용하였고, 식(4)를 이용하여 전단강도(*V_s*)를 계산하였다.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \tag{4}$$

여기서, f_y 는 전단철근의 항복강도 400 MPa이다. 또한 A_v 는 전단철근의 단면적, d는 유효깊이, s는 전단철근의 배근간 격이다.

3. 대구경 합성 PHC말뚝 제작 및 시험 방법

3.1 사용재료

3.1.1 대구경 합성 PHC말뚝 본체 제작

본 연구를 위하여 제작한 대구경 합성 PHC말뚝은 외경 1,000 mm, 두께 130 mm의 말뚝을 사용하였다. 말뚝 본체 제작에 사용 된 콘크리트는 최대치수 25 mm의 굵은골재를 사용하였고, 설계 기준 압축강도는 80 MPa이다. 대구경 PHC말뚝은 프리스트레 싱 도입을 위하여 직경 11.2 mm의 프리스트레싱 텐던이 19개 배근되었으며, KS 기준을 만족하기 위하여 3.92 MPa의 유효 프 리스트레스가 도입되었다. 전단시험을 위한 대구경 합성 PHC 말뚝은 기존의 연구(Hyun et al., 2012)에서 제작했던 직경 450 mm의 중구경 합성 PHC말뚝과 동일한 방법으로 휨보강 철근과 전단철근을 배근하였다. 기존의 연구에서는 직사각형 형상의 전 단철근을 배근하였으나, 본 연구에서는 삼각형 형상의 철근을 배근하였다. 직사각형 형상을 삼각형 형상으로 변경할 경우 말 뚝본체와 전단철근 사이의 수평전단력이 더욱 향상되어 보다 우 수한 합성효과를 기대할 수 있다. 수평전단력의 설계방법은 기 존연구에 자세히 기술되어 있으며 본 연구에서도 동일한 방법으 로 수평전단강도를 산정하였다(Korea Concrete Institute, 2015).

Table 1 Calculated shear strength of ϕ 1000-130t PHC plie results in accordance with shear rebar details

Type of pile	Compressive strength of in-filled concrete(MPa)	Diameter of shear rebar(mm)	Spacing of shear rebar(mm)	Calculated Shear strength(kN)	
With shear rebar	27	15.9	150	1,843	
Without shear rebar	27	N.A.	N.A.	1,172	



Fig. 1 Sectional view of large diameter composite PHC pile

Types	Diameter (mm)	Yielding strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	
Prestressing tendon	11.2	1,300	1,453	
Longitudinal bar	28.6	400	515	
Transverse bar	15.9	400	513	

Table 3 Mechanical properties of concrete

Types	Maximum coarse aggregate (mm)	Compressive strength (MPa)	Slump (mm)
PHC concrete 25		80	-
In-filled concrete	13	27	180

전단철근은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 삼각형 형상을 엇갈려 배 근하는 이중 삼각형 형상으로 직경 D16, 항복강도 400 MPa의 이형철근을 150 mm 간격으로 배근하였다.

3.1.2 휨보강 철근 및 속채움 콘크리트

대구경 합성 PHC말뚝 제작을 위하여 중공부에 400 MPa의 항복강도를 가지는 호칭 D29의 이형철근 16개를 휨보강 철근으 로 배근하였다. 말뚝 내부에 위치하는 휨보강 철근의 배근과 중 공부 삽입 시 편의성을 확보하기 위해 원형 띠철근을 휨보강 철 근 길이방향으로 용접한 후 휨보강 철근 다발을 제작하였다. 이 연구에서 사용한 철근의 물리적 특성은 Table 2에 표기하였다. 휨보강 철근 다발의 배근 후 타설되는 속채움 콘크리트는 설계 기준 압축강도 27 MPa인 콘크리트를 사용하였으며 유동성과 충전성능을 확보하기 위하여 굵은골재의 최대치수 13 mm, 슬럼 프 180 mm인 콘크리트를 사용하였다. 사용 속채움 콘크리트의 물리적 특성은 Table 3에 표기하였다.

3.2 시험체 제작

전단강도 시험을 위한 대구경 합성 PHC말뚝 본체의 제작은 19개의 프리스트레싱 텐던과 나선철근을 전기용접을 통해 원형



Fig. 2 Fabrication of specimens(Bang et al., 2016)

다발로 제작 한 후 말뚝 몰드에 고정하였다. 이후, 전단철근을 이 중삼각형 형상으로 겹친 후 150 mm 간격으로 말뚝 전 지간에 배 근하였다. 이후, 콘크리트를 말뚝 길이방향으로 2회에 걸쳐 타설 하였다. 콘크리트 타설이 완료된 후 4단계로 자동 제어되는 원심 성형 공정을 15분 동안 실시하였으며, 증기양생을 통해 최종적 으로 말뚝 본체를 제작하였다. 2차 제작으로 말뚝 내부에 다발로 제작된 휨보강 철근의 배근과 속채움 콘크리트 타설을 마친 후, 28일간의 양생과정을 거쳐 최종적으로 전단강도 시험체 제작을 완료하였다. 제작된 전단강도 시험체의 총 길이는 7,000 mm이 다. Fig. 2에는 대구경 합성 PHC말뚝 시험체 제작 과정을 나타내 고 있다. 전단강도 시험체는 공통적으로 휨보강 철근이 배근되 며, 전단철근이 배근되지 않은 F시리즈 시험체 2개와 전단철근이 배근된 FT 시리즈 시험체 2개를 각각 제작하여 전단보강 철근의 유무에 따른 대구경 합성 PHC말뚝의 전단성능을 평가하였다.

3.3 전단시험 방법

대구경 합성 PHC말뚝의 전단성능 평가를 위해 국내 KS F 4306(2003)에서 제시된 방법에 따라 전단강도 시험을 수행하였

다. 시험체 총 길이(L) 7,000 mm에 대하여 전단지간과 재하지 간을 각각 1,000 mm로 설정하였고, 축력의 도입 없이 연직하중 (P)를 가력하였다. 가력시 최대용량 5,000 kN 용량의 만능재료 시험기를 이용하였고 1.0 mm/min 속도의 변위제어를 통해 하중 을 도입하였다. 시험체 중앙부 하단에 2개의 LVDT를 설치하여 실시간 하중에 따른 수직 처짐량을 측정하였다. 시험중 철근 및



Fig. 3 Experimental set-up



Fig. 4 Measured rebar strains plotted with applied load





(c) FT1

콘크리트의 변형률을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 휨보 강 철근과 말뚝본체 중앙의 압축부와 인장부에 각각 부착하여 하중 가력에 따른 변형률을 측정하였다. Fig. 3은 전단시험 상세 를 나타낸다. 전단강도 계산은 식(5)를 이용하였으며, Q_e는 전단 강도(kN), P_e는 전단지간 내에 경사균열이 발생했을 때의 하중 을 의미한다.

$$Q_c = \frac{P_c}{2} \tag{5}$$

4. 시험결과 및 분석

4.1 전단시험체의 균열 및 파괴양상

대구경 합성 PHC말뚝의 전단강도 실험 중 발생한 하중과 휨 보강 철근, 압축부와 인장부의 변형률을 각각 Figs. 4, 5에 나타 내었으며, 균열발생 패턴을 Fig. 6에 나타내었다. 전단강도 시험



Fig. 5 Measured concrete strains plotted with applied load



(b) F2



(d) FT2

Fig. 6 Photos of specimens after tests

을 통해 발생한 대표적인 균열은 크게 휨균열, 경사균열 및 수평 균열이 관찰되었다. 전단철근이 없는 F1 시험체의 경우 초기 휨 균열은 2,244 kN의 하중에서 말뚝 중앙부에서 처음 관찰되었고, 이때 인장부의 콘크리트 변형률은 323 µɛ이다. 초기 휨 균열이 발생한 이후 하중 증가와 함께 휨균열 또한 진전되었다. 이후, 전 단지간에서 발생한 균열은 급작스런 수평균열로 연결된 이후, 시험체는 전단파괴에 도달하였고, 이 균열은 말뚝 본체와 내부 충전 콘크리트의 계면파괴인 것으로 관찰되었다. F1시험체의 전단강도 시험을 통해 전단보강 철근이 배근되지 않을 경우 말 뚝의 전단지간에서 발생하는 경사균열을 효과적으로 제어하지 못할 뿐만 아니라 말뚝 본체 콘크리트와 속채움 콘크리트와의 계면파괴를 방지하지 못하는 것으로 나타났다. 수평균열의 발생 패턴은 기존연구(Kishida, 1998)에서 수행한 시험체 파괴거동 과 유사한 경향을 나타내었다. 최종적으로 -4321.1 kN의 하중에 서 말뚝은 전단파괴가 발생하였고 이때 압축부 콘크리트의 변형 률은 -1.404 με 으로 측정되었다. F1 시험체는 압축부 콘크리트 의 변형률이 0.003에 도달하기 전에 파괴에 도달하였고, 이때 시 험체는 휨파괴에 도달하지 못하고, 휨보강 철근이 항복 변형률 에 도달하였다. 이는 말뚝 본체와 속채움 콘크리트의 계면 전단 파괴가 먼저 발생하였음을 의미한다(Fig. 6(a)). F2 시험체의 경 우 Fig. 6(b)에 도시한 바와 같이 F1 시험체와 매우 유사한 균열 분포를 나타내었으며, 2,179 kN의 하중에서 초기 휨균열이 발생 하였다. 이후 하중의 증가와 함께 4,602.7 kN의 하중에서 급작스 런 수평균열의 발생과 함께 전단파괴 되었다. 파괴 시 압축부 콘 크리트의 변형률과 인장 철근의 변형률은 각각 -1,535 µ E, 2,789 με로 측정되었고, 시험체에서 발생한 전단 경사균열의 최대 폭 은 약 5.1 mm로 관찰되었다. 한편, 이중삼각형 형상의 전단철근 이 배근된 FT1과 FT2 시험체의 경우, 각각 2.389 kN, 2.289 kN 의 하중에서 초기 휨 균열이 관찰되었다. FT 시험체는 F 시험체 와같이 초기 균열하중까지 유사한 경향을 나타내었으며, F 시험 체의 초기 균열 하중보다 평균 5.8% 증가한 것을 확인하였다. FT 시험체는 F 시험체에서 발생한 수평균열은 발생하지 않았으 며, 말뚝 전 지간에 걸쳐 7~8개의 휨균열과 전단경사균열이 발 생하였다. 이 결과는, FT 시험체 말뚝 내부에 배근된 전단철근.

T 11 4		1.	0	1	•
Table 4	lest	results	ot	each	specimen
1 4010	1000	restarts	U 1	ouon	opeennen

속채움 콘크리트 및 말뚝 본체가 일체로 거동하는 합성효과로 인하여 전단균열 진전에 의한 계면파괴를 방지하고, 휨균열을 유발한 것으로 판단된다. FT 시험체는 인장철근이 항복 변형률 에 도달한 이후 시험기의 최대용량 한계로 인하여 파괴점까지 시험을 진행하지 못하고 5,000 kN에서 종료하였다.

4.2 최대 전단 하중

KS F 4306에서 제시하고 있는 전단강도 계산식((식(5))을 활 용하여 기성 PHC말뚝의 전단강도를 구할 수 있다. 기성 PHC말 뚝의 전단강도는 전단지간 내에 초기 경사균열이 발생될 때의 강도를 말한다. Table 4에는 직경 1.000 mm PHC말뚝의 경사균 열 발생 하중인 1.524 kN을 표기하였다. 이 하중은 KS F 4306에 제시된 전단강도를 토대로 계산한 값이다. F 시험체는 경사균열 발생 후 급작스런 수평균열로 연결되면서 시험체가 파괴되어 초 기 경사균열을 측정하지 못하였다. 이 원인은 F시험체 말뚝 내부 에 전단보강 철근이 배근되어 있지 않아 경사균열의 진전을 방 지하지 못한 것으로 판단된다. 반면, FT1과 FT2 시험체의 초기 경사균열하중은 각각 4211 kN. 3896 kN으로 측정되어 기성 대 구경 PHC말뚝에 비해 평균 2.6배 증진시킬 수 있는 것으로 나타 났다. 반면. 최대하중의 경우 F 시험체는 평균 4.462 kN으로 측 정되어 PHC말뚝의 경사균열 하중에 비하여 평균 2.9배 증가하 였다. 또한, FT 시험체는 시험기기의 용량 제한으로 인하여 파괴 에 이르지 못하였지만 PHC말뚝의 경사균열 하중에 비하여 3.3 배 이상 향상시킬 수 있는 것을 확인하였다. FT 시험체는 F 시험 체와 비교할 경우 12.1% 이상 증가한 최대 내력을 보였으나, 시 험을 파괴 시까지 도달하지 못한 값이므로, 실제 큰 용량의 시험 기로 진행할 경우 더욱 큰 값을 나타낼 것으로 판단된다. 이 결과 는 전단철근의 배근으로 대구경 합성 PHC말뚝의 우수한 합성거 동이 확보되었고, 전단 지간에 발생하는 경사 균열의 성장과 계 면의 파괴를 효과적으로 방지하였음을 증명하는 것이다.

4.3 하중-변위 관계와 설계 전단강도 안전율

Fig. 7은 F 시험체와 FT 시험체의 전단강도 시험을 통한 연직 하중과 중앙부 처짐 관계를 나타내고 있다. 전단보강 철근이 없

Specimen designation	Initial cracking load(kN)	Inclined cracking load(kN)	Ultimate load (kN)	Enhancement in shear capacity(%) than that of Conventional PHC pile	Failure description
PHC	N.A.	1,524	N.A.	100	
F1	2,179	N.A.	4,321	-	Horizontal and inclined cracks occured
F2	2,389	N.A.	4,603	-	Horizontal and inclined cracks occured
FT1	2,289	4,211	4,999	276	Few flexural and bending cracks and no failure occured
FT2	2,125	3,896	5,001	256	Few flexural and bending cracks and no failure occured



Fig. 7 Load vs. midspan deflection behavior of specimens

는 F 시험체의 최고하중 시 평균 처짐은 14.9 mm, FT 시험체는 평균 8.9 mm의 처짐량이 각각 측정되었다. F 시험체와 FT 시험 체는 3,400 kN 하중 지점까지 유사한 초기강성을 보였으나 이후 FT 시험체는 급격히 강성이 감소하는 반면, FT 시험체는 시험 종료시점 까지 강성을 유지하는 거동을 나타내었다. F 시험체의 경우 전단보강 철근이 배근되지 않아 경사균열 및 수평균열의 발생을 제어하지 못하여 초기 균열 발생 이후 강성이 감소하는 결과를 보였다. FT 시험체의 강성이 시험 종료까지 거의 동일하 게 유지된 것은 최대내력까지 시험을 수행하지 못하였음을 반증 하는 결과이다.

F시험체의 최대하중은 평균 4,462 kN 으로 측정되어 Table 1 에 제시된 전단강도의 2배인 계산 최대 하중 2,344 kN보다 약 1.9배 크게 측정되었다. 콘크리트 전단설계 식에 포함된 안전율 이 있고, 축방향 철근의 다월효과도 있기 때문에 기존 연구(Kim et al., 2016)에 따르면 내부충전 콘크리트와 철근으로 보강된 합 성 PHC말뚝의 파괴안전율은 약 3.0 배인 것으로 알려져 있다. 이러한 결과에 비하면 F 시험체들은 상대적으로 작은 안전율 1.9 를 갖고 파괴가 되었다. 이는 내외부 콘크리트의 합성 거동이 제 대로 형성되지 못한 상태에서 급격한 계면파괴가 발생하였기 때 문인 것으로 판단한다. 4.2절에서 기술한 바와 같이 FT 시험체 최대내력은 실측하지 못하였다. 시험이 중단된 하중인 5,000 kN 은 Table 1에 제시된 전단강도의 2배인 계산 최대 하중 3,686 kN 의 약 1.4배에 해당되는 값이다. 시험기 용량이 충분하여 시험이 파괴까지 진행되었다면, FT 시험체는 내외부 콘크리트의 합성 거동으로 기존 연구(Kim et al., 2016)와 마찬가지로 높은 안전 율의 전단강도가 측정되었으리라 예상된다.

5. 결 론

이 연구에서는 대구경 PHC말뚝을 속채움 콘크리트, 전단철

근 및 휨보강 철근으로 보강한 대구경 합성 PHC말뚝의 전단 성 능 시험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 전단철근 보강이 없는 F 시험체는 휨균열과 경사균열이 발생 한 이후 급작스런 수평균열이 발생하여 최종 파괴된 반면, FT 시험체는 말뚝시험체 전 지간에 걸쳐 7~8개의 휨균열과 전단 경사균열이 일정 패턴으로 발생하였다. 이 결과는 전단 철근의 우수한 합성효과로 전단균열이 계면파괴로 진전하는 것을 효과적으로 방지하였음을 알 수 있다.
- 대구경 합성 PHC말뚝의 최대 하중은 기성 대구경 PHC말뚝 과 비교할 경우, F 시험체는 2.9배, FT 시험체는 3.3배 이상 높은 값을 나타내었다. 또한, FT 시험체는 전단 철근이 없는 F 시험체보다 평균 12.1% 최대 전단하중이 향상된 것을 확인 하였다. 이 결과는 FT 시험체의 최대내력까지 시험을 수행하 지 못한 결과이며, 파괴시점까지 시험을 진행할 경우 더욱 높 은 수준의 전단내력 성능을 발휘할 것으로 예측된다.
- 3) 설계 전단강도에 대한 실험 전단강도의 안전율은 F 시험체 1.9배, FT 시험체 1.4배로 측정되었다. FT 시험체의 안전율 이 작게 측정된 것은 시험을 파괴까지 수행하지 못하였기 때 문이다. 기존 연구에 따르면 내부충전 콘크리트와 철근으로 보강된 합성 PHC말뚝의 전단강도의 안전율은 약 3.0 배이 며, 대구경 합성 PHC말뚝도 이와 유사한 값을 가질 것으로 예상할 수 있다. 하중-변위 관계의 강성을 비교하여 볼 때, FT 시험체는 파괴에 못 미치는 수준에서 시험이 중단되었음을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 2016년도 충남대학교 학술연구비(과제번호 2016-1319-01)에 의해 지원되었음.

References

- Bang, J. W., Oh, S. J., Lee, S. S., and Kim, Y. Y. (2016), Pile-cap Connection Behavior Dependent on the connecting Method between PHC pile and Footing, Journal of Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection, 20(3), 25-32.
- Bang, J. W., Park, C. K., Yang, S. Y., and Kim, Y. Y. (2016), Flexural Behavior of Large-Diameter Composite PHC Pile Using In-Filled Concrete and Reinforcement, Journal of Korean Institute for Structural Maintenance and Inspection, 20(5), 109-115.
- 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.
- Chun, Y. S., Park, J. B., and Shim, Y. J. (2010), Mechnical Properties of PHC Pile Head Connection with Foundation Slab and Field Application, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(5), 71-77.
- 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.
- Kishida, S. (1998), Experimental study on shear strength of the PHC pile with large diameter, *Journal of Structural and construction*

Engineering, 510, 123-130.

- Korea Concrete Institute (2015), Study on Structural Performance of Large-Diameter Concrete-Infilled PHC Piles, *R&D report (KCI R 15-002)*, 80.
- Korea Concrete Institute (2016), Performance and Design of Concrete-Infilled Composite PHC Pile, Technology articles 28(2), 27-33.
- KS F 4306 (2003), Pretensioned spun high strength concrete piles, 1-55.

Received : 06/30/2017 Revised : 10/23/2017 Accepted : 10/30/2017

요 지: 최근 초고층 빌딩과 같은 대형 구조물의 증가로 인하여 기초의 허용 지지력 확보를 위한 대구경 말뚝의 수요가 급속히 증가하고 있다. 이 연구에서는 기성 대구경 PHC말뚝의 전단성능을 향상시키기 위하여 속채움 콘크리트와 전단철근을 사용하여 대구경 합성 PHC말뚝을 제작하였다. 제작된 시험체는 KS규격의 전단강도 시험방법에 따라 수행하였고 변위제어 방법으로 진행하였다. 전단시험을 통하여 F 시험체는 휨균열과 경사균열이 발생한 이후 급작스런 수평균열이 발생하였으나, FT 시험체는 수평균열의 발생 없이 말뚝의 전 지간에 걸쳐 휨균열과 전단 경사균열이 일정 패턴으로 발생하였다. 또한, 대구경 합성 PHC말뚝의 최대하중은 PHC말뚝과 비교할 경우, F 시험체의 경우 2.9배, FT 시험체의 경우 3.3배 이상으로 크게 향상된 것을 확인하였다. FT 시험체의 높은 전단 저항 능력은 전단철근의 배근으로 인하여 대구경 합성 PHC 말뚝이 우수한 합성거동을 하였고, 발생한 전단균열의 성장을 효과적으로 제어하였기 때문인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 대구경 합성 PHC말뚝, 전단보강 철근, 속채움 콘크리트, 전단보강, 합성효과