

## 말뚝머리 중공 프리캐스트 철근콘크리트 말뚝의 성능 평가

방진욱<sup>1</sup>, 현정환<sup>1</sup>, 안경철<sup>2</sup>, 김윤용<sup>3\*</sup>

## Development and Evaluation of Hollow-head Precast Reinforced Concrete Pile

Jin-Wook Bang<sup>1</sup>, Jung-Hwan Hyun<sup>1</sup>, Kyung-Chul Ahn<sup>2</sup>, Yun-Yong Kim<sup>3\*</sup>

**Abstract:** Due to the economic growth and development of construction technology, a role of foundation to resist heavy loads has been increased. In this present study to improve the structural performance of reinforced concrete pile, the precast HPC pile reinforced with rebar and filling concrete was developed and the strength of pile was predicted based on the limit state design method. The safety of HPC pile strength was evaluated by comparing with the design values. The geometry of HPC pile is a decagon cross section with a maximum width of 500 mm and a minimum width of 475 mm, and the hollow head of pile thickness is 70 mm. The inner area of the hollow head part was made as the square ribbed shape presented in the limit state design code in order to achieve horizontal shear strength between pile concrete and filling concrete. From the shear test results, it was found that the stable shear strength were secured without abrupt failure until maximum load stage despite the shear cracks was found. Shear strength is 135% and 119% higher than that of design value calculated from limit state design code. The driving test results of HPC pile according to the presence of additional reinforcement showed the outstanding crack resistance against impact loads condition. From the bending test results the flexural load between PHC pile and HPC pile was 1.51 times and 1.48 times higher than that of the design flexural load of conventional PHC pile.

**Keywords:** HPC pile, Horizontal shear strength, Shear strength, Limit state design

### 1. 서 론

최근 경제 성장과 건설 기술의 발달로 인해 구조물이 대형화, 고층화되고 해외의 택지 조성 사업이 증가됨에 따라 상부 구조물을 지지할 수 있는 기초의 역할이 중요시 되고 있다(Hwang et al., 2005; Park et al., 2010). 기초의 분류는 일반적으로 얕은기초와 깊은기초로 구분할 수 있으며 깊은 기초 중 말뚝기초가 대표적으로 적용되고 있다. 말뚝기초는 외부하중과 토질 및 사용재료에 따라 일반적으로 강관말뚝과 콘크리트 말뚝으로 구분되어 적용되고 있다. 특히, 콘크리트 말뚝 중 PHC(pretensioned spun high strength concrete piles) 말뚝은 원심력을 적용하여 제작된 말뚝으로 1980년대 초반까지 사용된 기성말뚝을 개선한 것으로 콘크리트 압축강도가 80 MPa 수준의 성능을 나타내고 긴재장재의 프리스트레싱력에 의한 균열에 대한 저항성이 우수하여 KS F 4306 등록 이후 국내 현장

적용이 급속히 증가하고 있다(Bang et al., 2014). 또한 PHC말뚝을 이용하고 성능을 향상시키고자 하는 연구도 활발히 진행되고 있는데 PHC말뚝의 콘크리트 강도를 증가시키는 방안, PHC말뚝 중공부에 전단철근, 축방향 철근, 속채움 콘크리트 등으로 보강하는 방안, PHC말뚝과 기성 강관말뚝 등과의 조합으로 보강하는 방안 등이 대표적이며, 말뚝의 휨강도, 전단강도 등의 내력을 우수하게 증진시킬 수 있는 것으로 보고하고 있다(Chun et al., 2010; Bang et al., 2014; Hyun et al., 2012) 한편, 다양한 연구가 수행되고 있는 PHC말뚝에 비해 철근콘크리트(Reinforced concrete, RC)말뚝의 경우 PC말뚝과 PHC말뚝의 등장으로 인해 1960년대부터 1970년대 초반까지만 사용되었지만 현재는 사용 및 성능개발에 대한 연구가 미미한 상황이다. 이는 1980년대 RC말뚝이 현장 요구조건에 부합하기 위한 콘크리트배합 및 혼화재료, 양생 등의 기술적인 한계와 PHC말뚝 등장으로 현장 요구성이 감소되었기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 말뚝 성능향상을 목적으로 프리캐스트공법과 철근 및 속채움 콘크리트로 말뚝머리부를 보강한 철근콘크리트 말뚝(hollow-head precast reinforced concrete pile, HPC pile)을 개발하고 제작 방법 및 구조성능을 평가하였다. 현행 한계상태설계법을 바탕으로 말뚝성능을 예측하였고 설계와 실제강도와 비교를 통해 말뚝 내력의 안전성을 평가하였다.

<sup>1</sup>정회원, 충남대학교 토목공학과 건설방재연구소 박사후 연구원

<sup>2</sup>정회원, KP E&C, 대표이사

<sup>3</sup>정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: yunkim@cnu.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 실험체 제작 및 실험 방법

### 2.1 HPC말뚝 제작

말뚝삽입의 시공성을 위해서는 원형이 가장 유리한 형상이나 원형으로 제작시 상부의 불완전 마감이 발생되므로 공장에서 제작하는 여건을 고려하여 원형에 가깝고 시공성에 유리한 10각 단면을 HPC말뚝의 단면으로 결정하였다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 PHC말뚝  $\phi 500$ -80 t와 일체식 결합을 확보하기 위해 10각 형상의 가장 긴 단면의 폭을 500 mm로 이에 대응되는 가장 짧은 단면의 폭을 475 mm로, 두부 중공부 본체 두께는 70 mm를 확보할 수 있도록 제작하였다. HPC말뚝과 속채움 콘크리트 계면에 발생하는 수평전단력을 저항할 수 있도록 두부 중공부 본체 내면에 거푸집을 삽입하여 요철을 형성하였다. 또한 기초와의 강결합 확보와 말뚝의 휨보강을 위해 축방향 철근을 배근하였다. 축방향 철근의 정위치 배근 및 전단보강을 위해 축방향 철근 외부로 나선철근을 150 mm 간격으로 결합하였다. HPC말뚝 제작 전경은 Photo 1에 나타낸 바와 같다. 본 연구의 실험체는 현장의 시공수준을 고려하여 Fig. 1과 같이 전단실험체, 휨실험체, 항타실험체의 총 3종류로 제작하였다. 전단실험체는 단면의 변화가 발생하는 말뚝의 충실부와 속채움 중공 경계부의 전단내력을 평가하기 위함이고 항타 실험체는 현장지반 굴착 후 속채움 콘크리트 타설 없이 근입되는 시공 여건을 고려하여 중공부 내면에 요철만 존재하는 말뚝 본체로만 제작하였다. 말뚝 두께 단면에

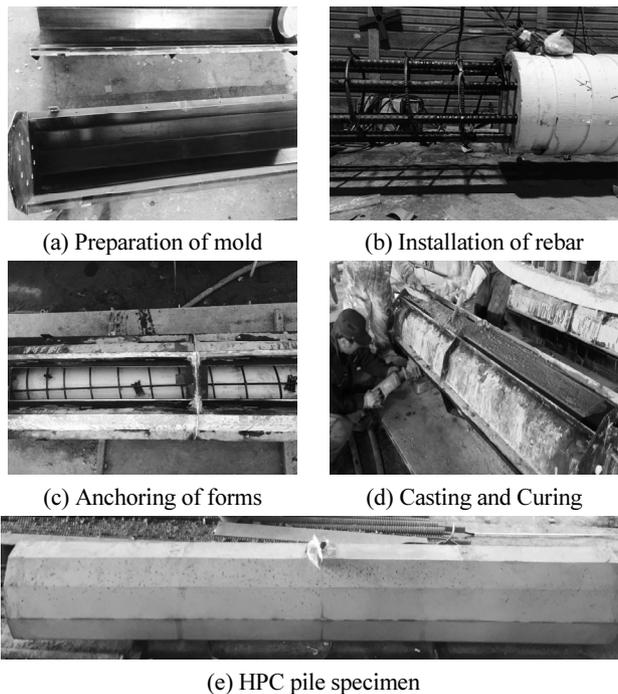


Photo 1 Manufacturing process of HPC pile specimen

가외철근으로 이형철근 H10 5개를 등간격으로 배근하여 항타시 철근 유무에 따른 말뚝 본체 균열발생 유무를 평가하였다. 한편, 휨실험체는 Fig. 1(b)와 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 기성 PHC말뚝과 HPC말뚝의 연결부의 휨강도를 평가하기 위해 제작되었는데 Fig. 1(a) 전단 실험체 B-B 단면에 해당하는 충실부 단면으로만 제작하였다. 제작된 휨실험체는 기성 PHC말뚝의 이음에 사용되는 연결판을 이용하여 기성 PHC말뚝과 연결하여 휨실험체 제작을 완료하였다. 실험조건에 따라 등

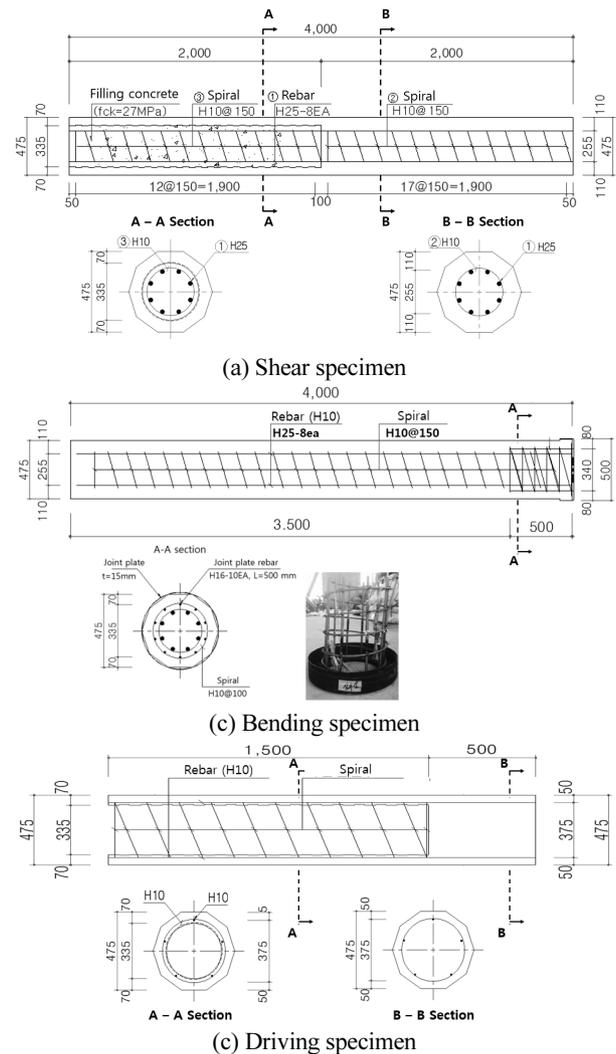


Fig. 1 Geometry of HPC pile specimen

Table 1 Detail and reinforcing condition of HPC pile specimens

Specimens	Length (mm)	Reinforcement		Concrete (MPa)	
		Longitudinal rebar	Spiral	Pile	Filling
Shear	4,000	H25-8ea	H10		27
Driving	2,000	H25-4ea	H10	40	27
Bending	8,000	H25-8ea	-		-

**Table 2** Mechanical properties of used concrete

Concrete	Compressive strength (MPa)	Slump (mm)	Maximum Coarse aggregate (mm)
Pile Body	40	150	25
Filling in hollow area	27	150	25

**Table 3** Mechanical properties of used reinforcement

Reinforcement	Tensile strength (MPa)	Diameter (mm)
Shear specimen	500	25.4
Bending specimen	400	25.4
Driving specimen	400	9.53

일한 실험체를 각각 2개씩 제작하였고 실험체에 따른 제작상세와 보강조건을 Table 1에 정리하였다.

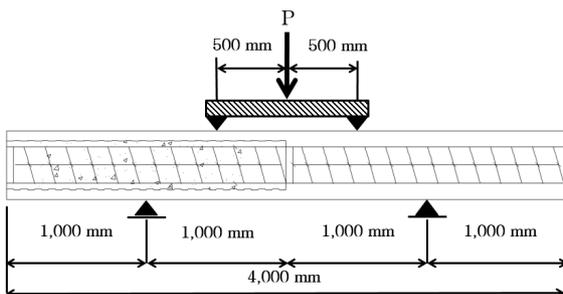
## 2.2 사용재료

HPC말뚝 제작을 위해 사용된 콘크리트의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. 말뚝 본체의 경우 설계기준 압축강도 40 MPa, 속채움 콘크리트의 경우 27 MPa이며 레디믹스트 콘크리트를 사용하였다. 축방향 보강용 철근은 설계기준 항복강도 500 MPa 이형철근, 나선철근으로 400 MPa 이형철근을 사용하였다. Table 3에 실험체 제작에 따른 철근의 물리적 특성을 정리하였다.

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 전단강도 실험

HPC말뚝의 전단강도 실험은 KS F 4306 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트말뚝의 전단강도 실험에 따라 Fig. 2와 같이 말뚝 총 길이 4,000 mm에 대하여(1,000 mm + 2.0D)를 지간으로 연직하중(P)을 가하는 방법으로 수행하였다. 전단 파괴를 유도하기 위해 전단경간비(a/d)를 1.05로 설정하였고,



**Fig. 2** Shear test of HPC pile specimen

하중 증가에 따른 중앙부 처짐량과 균열패턴 등의 말뚝 특성을 평가하였다. 측정된 하중을 바탕으로 식 (1)을 이용하여 말뚝의 전단강도( $Q_c$ )를 산출하였다.

$$Q_c = \frac{P}{2} \quad (1)$$

### 2.3.2 항타 실험

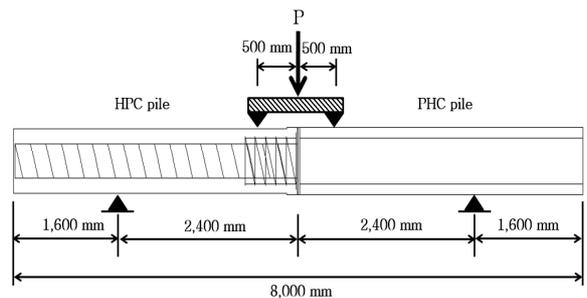
HPC말뚝 시공시 두부 항타에 의해 발생하는 균열과 파손 여부를 관찰하기 위해 실제 장비를 이용한 항타 실험을 수행하였다. 말뚝본체 항타 실험을 위해 먼저 오거를 이용하여 지반을 굴착한 뒤 말뚝을 근입하고 실제 현장 시공 조건과 동일하게 무게 3 ton해머를 이용하여 낙하고 2 m, 낙하 횟수 10회로 HPC말뚝 두부를 항타하였다.

### 2.3.3 HPC-PHC말뚝 연결부 휨강도 실험

HPC말뚝은 지표면으로부터 약 10 m 내외의 상부에 배치하여 지반 하부에 삽입된 PHC말뚝과 연결하는 방법을 통해 현장에서 시공된다. 상부에 위치한 HPC말뚝에 작용하는 하중이 안정적으로 하부 PHC말뚝에 전달하기 위해서는 연결부가 구조적으로 말뚝본체 이상의 강성 및 내력을 확보해야한다. 이러한 연결부 상세에 따른 강도특성을 평가하기 위해 HPC말뚝과 PHC말뚝을 이음부로 연결한 실험체에 대한 휨강도 실험을 수행하였다. HPC말뚝 휨강도 실험은 KS F 4306 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트말뚝의 축력이 가력되지 않은 휨강도 실험에 따라 수행되었다(Fig. 3). 총 길이(L) 8,000 mm에 대하여 3/5 L을 지간으로 하여 지간 중앙부에 연직하중(P)을 가하였다. 전단실험과 동일하게 최대용량 1,500 kN의 말뚝 전용 실험기를 이용하여 하중을 측정하였고, 실험체 중앙 하부에 LVDT를 이용하여 처짐량을 측정하였다.

측정된 하중을 바탕으로 연결부 휨강도를 식(2)를 통해 산출하였다.

$$M = \frac{(W + W_{con})L}{40} + \frac{P}{4} \left( \frac{3}{5}L - 1 \right) \quad (2)$$



**Fig. 3** Bending test of HPC pile specimen

여기서,  $W$ 와  $W_{con}$ 는 각각 말뚝 본체 총 중량과 속채움 콘크리트 중량이며, 콘크리트의 단위중량을  $2,300 \text{ kg/m}^3$ 으로 가정하였다.

### 3. 한계상태 설계법을 통한 전단강도 산정

#### 3.1 수직 전단강도 예측

HPC말뚝의 전단강도는 도로교설계기준(2012)에서 제시하는 한계상태설계법을 기반으로 산출하였다. 한계상태설계법에서는 전단철근 배근의 유무에 따라 전단강도가 나뉘며, 전단철근의 배근이 없는 경우 복부에 사인장 균열이 발생할 때의 전단력이 전단강도  $V_c$ 가 된다. 한편, 전단철근이 배근된 경우는 복부에 사인장 균열이 발생하면 콘크리트에 작용하는 전단력을 전단철근이 부담하게 된다. 이때 철근이 설계 항복강도를 나타낼 때의 전단력이 설계전단강도( $V_{sd}$ )이다. 전단강도에 대한 일반적인 설계방법은 식 (3)과 같이  $V_{sd}$ 가 계수전단력( $V_u$ )이상이라는 것을 검증하여 설계한다.

$$V_u \leq V_{sd} \quad (3)$$

전단철근을 고려한 HPC말뚝의  $V_{sd}$ 는 철근의 항복을 기준으로 하는 식 (4)를 이용하여 산정하였다.  $V_{sd}$ 는 콘크리트와 전단철근의 전단강도를 합산한 값으로 계산된다.

$$V_{sd} = \frac{\phi_s f_{vy} A_v z}{s} \cot\theta \quad (4)$$

여기서,  $\phi_s$ 는 철근의 재료계수로 0.9를 적용한다.  $f_{vy}$ 는 사용된 전단철근의 항복강도로 400 MPa이며,  $A_v$ 는 전단철근의 단면적으로 다리수 2개를 고려하였다.  $z$ 는 상현재와 하현재 중심 간의 거리로 단면모멘트 팔길이를 나타내지만 간편한 설계를 위해 유효깊이( $d$ )의 0.9배 값을 적용하였다.  $s$ 는 전단철근 배근간격으로 150 mm이다. 또한  $\cot\theta$ 는 한계 경사각으로 설계전단강도가 복부 콘크리트 스트럿의 압축파괴를 기준으로 한 최대설계 전단강도와 같을 때 경제적인 설계가 되며 그 최대값은 2.5이다(식 (5)).

$$\cot\theta = \sqrt{\frac{\phi_c \alpha_{cw} f_{c2,max} b_w s}{\phi_s f_{vy} A_v} - 1} \leq 2.5 \quad (5)$$

여기서,  $\phi_c$ 는 콘크리트의 재료계수로 0.65,  $\alpha_{cw}$ 는 부재의 복부에 작용하는 축방향 압축응력을 반영하는 값이지만 축력이

작용하지 않는 조건을 가정했기 때문에 1.0을 적용하였다.  $b_w$ 는 말뚝 중심을 지나는 단면의 최단거리로 475 mm를 적용하였다.  $f_{c2,max}$ 는 유효 압축강도로 다음 식 (6)과 같다.

$$f_{c2,max} = \nu f_{ck} = 0.6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] f_{ck} \quad (6)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 기준압축강도로 본체 콘크리트 40 MPa와 속채움 콘크리트 27 MPa 중 작은 값인 27 MPa를 적용하였다. 상기 과정을 통해 본 연구의 HPC말뚝의 설계전단강도를 산출하였다.

#### 3.2 수평 전단강도 검토

HPC말뚝은 공장에서 프리캐스트로 제작된 말뚝 본체에 속채움 콘크리트를 타설한 말뚝으로써 이미 굳은 콘크리트에 새로운 콘크리트를 타설하는 합성부재이다. 따라서 합성부재일 경우 도로교설계기준(2012) 한계상태설계법에서 제시한 서로 다른 시기에 타설한 콘크리트 사이 시공이음의 계면 전단에 대해서 식 (7)의 단면 설계를 실시하여 두 부재간의 합성능력 즉, 일체화 거동을 검증하였다. Photo 2는 HPC말뚝 중공부 내면의 요철(凹凸) 형상을 나타내며, Table 4에 세부내용을 정리하여 나타내었다. 요철 두께는 5 mm, 길이방향의 요철길이는 50 mm로 제작하였다.

$$v_u \leq v_d \quad (7)$$

여기서,  $v_u$ 는 계면에서 계수하중에 의한 전단응력이며,  $v_d$



Photo 2 Square ribbed shape of hollow area

Table 4 Detail of Square ribbed shape of hollow area

	Angle (°)	Thickness (d) (mm)	Convex length (mm)	Concave length (mm)
Design criteria	≤ 30	≥ 5	≤ 10d	≤ 10d
HPC pile	90	5	50	50

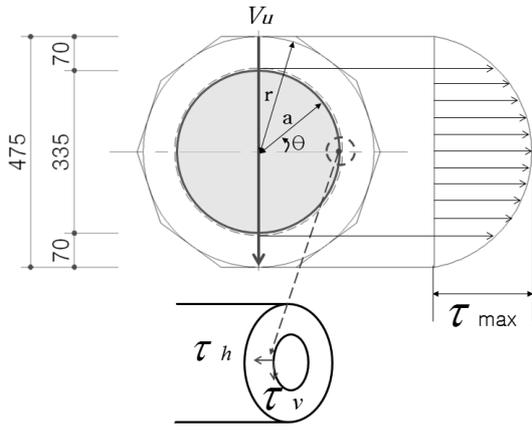


Fig. 4 Conception image for calculating horizontal shear strength between filling concrete and HPC pile interface

는 계면의 설계전단응력이다.

HPC말뚝의 중공부인 원형 단면의 경계면을 고려하기 위해 Fig. 4와 같이 계면에 작용하는 최대 수평전단응력( $\tau_{h,max}$ )을 직접구하는 방법을 적용하였다. 계면에 작용하는  $r$ 는 단면의 중립축으로부터 떨어진 거리 및 단면 폭의 변화에 따라 수직 전단응력( $\tau_v$ )과 수평전단응력( $\tau_h$ )을 구할 수 있다.

$$\tau_v = \frac{4V_u}{3\pi r^2} \left[ 1 - \left( \frac{a}{r} \right)^2 \sin^2 \theta \right] \quad (8)$$

$$\tau_h = \tau_v \times \sin \theta \quad (9)$$

여기서,  $V_u$ 는 계수전단력,  $r$ 은 HPC말뚝의 반지름,  $a$ 는 속 채움 콘크리트의 반지름이다. 계산결과  $\tau_v$ 는  $\theta = 0^\circ$ 에서 최대 값 1.2 MPa를  $\tau_{h,max}$ 는  $\theta = 55^\circ$ 에서 최대 값 0.65 MPa으로 평균 0.51 MPa로 계산되었다. 이때 계수전단력 ( $V_u$ )는 기존 설계 자료를 바탕으로 160 kN으로 가정하였다(KCI, 2015). 한편, 계면의 설계전단응력은 콘크리트의 부착력만을 고려한 식 (10)을 통해 계산할 수 있고  $v_d$ 는 0.68 MPa로 계산되었다.

$$v_d = \phi_c \mu_1 f_{ctk} \leq 0.5 \phi_c \nu f_{ck} \quad (10)$$

여기서,  $\phi_c$ 는 콘크리트 재료계수 0.65,  $\mu_1$ 은 요철표면 마찰 계수로 0.5,  $f_{ctk}$ 는 콘크리트 기준인장강도로 2.1 MPa이며,  $\nu$ 는 콘크리트 유효강도계수이다. 따라서 본 연구의 HPC말뚝 요철형상은 식 (7)을 만족하므로 속채움 콘크리트와의 일체성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 전단강도 실험 결과

HPC말뚝 전단강도 실험 후 실험체의 균열 패턴 및 최종 파괴 형상을 Photo 3에 나타내었다. 하중의 증가에 따라 지간 중앙 콘크리트 인장부에서 초기 균열이 관찰되었고, 이후 하중이 증가함에 따라 지간 내 균열의 수가 증가하였으며 콘크리트 압축부로 균열의 진전과 함께 전단지간에 지점부로부터의 사인장 균열이 뚜렷이 발생하였다. 사인장 균열 발생 후에도 두 실험체는 콘크리트의 탈락과 급작스러운 하중감소 등이 관찰되지 않았고 지간 내에 5~6개의 균열발생과 함께 최고하중에 도달하였다. 하중이 증가할수록 균열폭이 점차 증가하였으며, 최종적으로 말뚝 중앙부의 휨 균열폭과 전단지간 사인장균열의 폭이 크게 증가하면서 파괴에 도달하였다.

HPC말뚝의 전단실험을 통해 측정된 하중-중양부 처짐과의 관계는 Fig. 5와 같다. HPC-1 실험체의 경우 초기균열 하중이 1.38 mm에서 166 kN으로 측정되었고 하중 증가 후 사인장 균열이 719 kN에서 발생되었다.

중양부 처짐 11.1 mm일 때 최고하중 876 kN이 측정되어 실험을 종료하였다. HPC-2 실험체 도 유사한 파괴거동을 나타내었는데 초기균열 하중이 1.25 mm에서 158 kN으로 측정되었고 사인장 균열이 656 kN에서 파괴시 최고하중 771 kN 및 중양부 처짐 10.3 mm으로 측정되었다. 3.1절에서 수행한 한

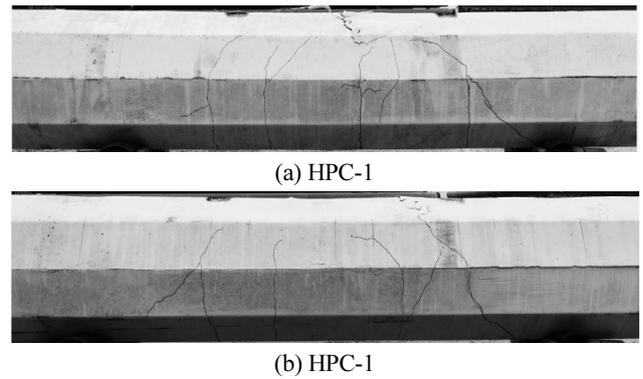


Photo 3 Shear crack patterns of HPC pile

Table 5 Shear test results compared with calculating value

	Inclined crack point		Maximum point		Calculating result
	Load (kN)	Shear strength (kN)	Load (kN)	Shear strength (kN)	Shear strength* (kN)
HPC-1	719	359	876	438	325
HPC-2	656	328	771	385	

\* Based on the Eq. (4)

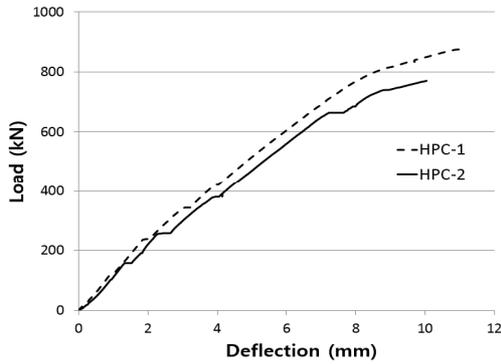


Fig. 5 Shear load-deflection curve of HPC pile

계상태설계법을 적용하여 HPC말뚝 부재의 수직전단강도를 예측한 결과를 실험 결과와 비교하여 Table 5에 나타내었다. 최고하중에서의 HPC말뚝의 전단강도는 각각 438 kN, 385 kN이며 한계상태설계법을 통해 계산된 강도값의 135%, 119% 높은 값을 나타내어 설계값에 대한 충분한 안전율을 확보할 수 있었다. 또한 KS F 4306에서는 말뚝의 전단강도를 사인장 균열이 발생할 때의 하중의 절반을 전단강도로 판정하고 있다. KS 기준에 따라 HPC말뚝의 전단강도는 359 kN과 328 kN으로 각각 계산되어 사인장 균열이 발생할 때를 기준으로 하는 전단강도값은 한계상태설계법을 통해 예측된 강도에 비해 약 110%와 101% 높은 값을 확보하므로 설계값에 비해 안정적인 강도값을 실험체가 확보하는 것으로 나타났다. 또한 기존연구(KCI, 2015)에서 강도설계법을 바탕으로 도출된 설계값 318 kN에 비해서는 약 113% 및 103% 안전측인 값이다.

#### 4.2 항타 실험 결과

항타용 해머를 이용하여 말뚝 머리부 경타 후 실험체의 변화를 Photo 4에 나타내었다. 먼저 말뚝 두께 단면에 가외철근이 배근되지 않은 무근 실험체를 관찰한 결과 항타시 해머와 접촉하는 말뚝머리부는 충격으로 인한 콘크리트 파쇄가 발생하였지만 말뚝 본체에는 충격에 의한 균열발생은 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 가외철근이 배근된 실험체에서도 동일하게 나타났으며 충격에 의한 말뚝 본체의 균열에 대한 저항성이 우수함을 확인할 수 있었다. 말뚝머리부 파쇄의 경우 시공시 말뚝머리 정리로 인한 파쇄단면이 제거되기 때문에 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 그러나 운반 및 적재시 예상치 못한 충격하중을 통해 균열이 발생할 수 있으므로 가외철근 등으로 보강하는 것이 말뚝의 품질관리 측면으로 유리할 것으로 판단된다.

#### 4.3 HPC-PHC말뚝 연결부 휨실험 결과

HPC말뚝과 PHC말뚝 연결부 휨강도 실험 결과 실험체에



(a) No reinforced specimen (b) Reinforced specimen

Photo 4 Driving test result of HPC pile

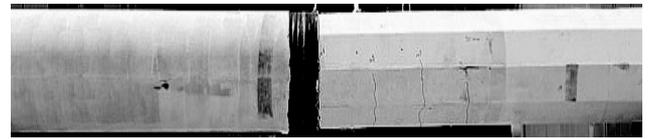


Photo 5 Flexural crack patterns of HPC pile

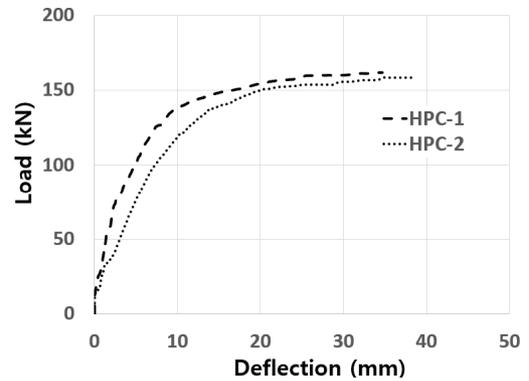


Fig. 6 Flexural load-deflection curve of HPC pile

발생된 균열패턴은 Photo 5에 나타난 바와 같다. 균열은 PHC말뚝에 비해 상대적으로 콘크리트강도가 낮은 HPC말뚝 실험체에서만 발생하였으며, 초기균열은 지간의 중심인 HPC말뚝 연결부로부터 이음판 정착철근의 길이인 500 mm 부근에서 발생하였다. 하중이 증가함에 따라 초기균열 발생지점으로부터 지지점쪽으로 균열이 추가적으로 발생되었고, 말뚝 상부로 균열이 진전되었다. HPC말뚝의 경우 순수 휨모멘트 구간에서 콘크리트의 사인장 균열 및 전단파괴는 관찰되지 않았고, 충분한 내력을 확보함으로써 일반적인 보의 휨파괴 거동을 나타낼 수 있어 이음판의 보강방법은 충분한 연결부 내력을 확보할 수 있음을 확인하였다. 두 연결부 휨실험체가 하중이 증가함에 따라 유사한 파괴거동 및 균열 패턴을 나타내었다. 휨실험을 통해 측정된 하중과 중앙부 처짐과의 관계는 Fig. 6에 나타난 바와 같다. HPC-1 실험체의 경우 최대하중은 162 kN으로 측정되었고, HPC-2 실험체는 159 kN으로 측

정되었다. 두 값 모두 PHC말뚝( $\phi 500-80t A$ 종)의 설계 휨균열 하중 107 kN (IS동서, 2007)에 비해 1.51배 및 1.48배 높은 휨하중을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이상으로 HPC말뚝과 PHC말뚝의 연결상세에 대한 성능을 평가한 결과 정착 길이 500 mm인 H16 이형철근 10개와 나선철근으로 보강한 연결부 철근상세는 충분한 휨모멘트에 저항할 수 있는 연결부 내력을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

### 3. 결론

이 연구에서는 말뚝머리 중공 프리캐스트 철근콘크리트 말뚝의 개발을 위한 일련의 연구내용을 기술하였다. 실험체의 구조적 특성을 평가하기 위해 단면형상, 말뚝머리 중공부 내측의 요철상세 등을 제시하였고, 실험체를 제작하여 구조적 특성을 평가하였고 한계상태설계법을 바탕으로 HPC말뚝의 강도를 예측하였다. 연구결과는 다음과 같다.

- 1) HPC말뚝 본체의 단면형상은 최대폭 500 mm, 최소폭 475 mm의 10각 단면으로 말뚝머리부 본체 두께는 70 mm이다. 축방향 철근과 나선철근 및 속채움 콘크리트로 말뚝머리 중공부 단면을 보강하였다.
- 2) HPC말뚝 중공부 본체와 속채움 콘크리트의 수평전단강도 확보를 위해 중공부 본체 내측에 한계상태설계법의 기준에 준하는 요철형상을 적용하였고, 수평전단강도를 평가한 결과 HPC말뚝 계면의 설계 전단강도는 계수하중에 의해 발생하는 전단응력 이상의 값을 확보할 수 있었다.
- 3) HPC말뚝의 전단강도 실험결과 초기균열 발생 이후 안정적으로 하중을 지지하였고 사인장 균열 발생 후에도 실험체는 콘크리트의 탈락과 급작스러운 하중감소 등이 관찰되지 않고 최고하중에 도달하였다. 최고하중시 2개의 실험체 전단강도는 한계상태설계법으로 예측한 전단강도에 비해서 각각 135%, 119% 높은 수준으로 측정되었다.
- 4) 말뚝머리 본체부 두께에 가외철근 보강 유무에 따라 제작된 실험체의 항타실험 결과 모든 말뚝 실험체에 균열이 발생하지 않았으나 운반 및 적재시 예상치 못한 충격하중을 통해 균열이 발생될 수 있으므로 가외철근으로 보강하는 것이 균열관리에 유리할 것으로 판단된다.
- 5) HPC말뚝과 PHC말뚝 연결부 휨내력 평가를 위해 휨실험을 수행한 결과 정착철근인 길이 500 mm의 H16 철근 10개

와 나선철근으로 보강한 연결부는 사인장 균열 및 전단파괴가 발생하지 않았고 급격한 하중 저하가 관찰되지 않았다. 2개의 휨실험체의 최대하중은 기성 PHC말뚝( $\phi 500-80t A$ 종)의 설계 휨균열 하중에 비해 1.51배 및 1.48배 높은 휨하중을 확보할 수 있는 것으로 나타나 충분한 연결부 휨내력을 나타내었다.

### 감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(중견연구 No. 2016R1A2B4011810) 이며 지원에 감사드립니다.

### References

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.

Hwang, Y. C., and Cho, C. H. (2005), Pile Foundations in Korea, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 21(2), 8-20.5.

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.

Korea Concrete Institute. (2015), Development and Performance Evaluation of High Performance Precast Reinforced Concrete Pile with Hollow Head, R&D report (KCI-R-15-013), 111p.

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

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2012), Highway Bridge Design Code (Limit state Design code), 5-47-5-49.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2012), Highway Bridge Design Code (Limit state Design code), 5-54.

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.

Received : 12/23/2016

Revised : 01/02/2017

Accepted : 01/03/2017

---

**요 지 :** 최근 경제 성장과 건설 기술의 발달로 인해 구조물이 대형화, 고층화됨에 따라 상부구조물을 지지할 수 있는 기초의 역할이 중요시 되고 있다. 이 연구에서는 철근콘크리트 말뚝 성능향상을 목적으로 프리캐스트공법과 철근 및 속채움 콘크리트로 말뚝머리부를 보강한 철근 콘크리트 말뚝(HPC)을 개발하고 한계상태설계법을 바탕으로 말뚝성능을 예측하였고 설계와 실제강도와 비교를 통해 말뚝 내력의 안전성을 평가하였다. HPC말뚝 본체의 단면형상은 최대폭 500 mm, 최소폭 475 mm의 10각 단면으로 말뚝머리부 본체 두께는 70 mm이다. 중공부 본체 내측은 도로교설계기준에서 제시하는 수평전단강도를 확보하기 위해 요철형상으로 제작하였다. 전단강도 실험 결과 사인장균열이 발생하였지만 최종 파괴단계까지 급격한 파괴 없이 안정적인 전단내력을 확보하였고 한계상태설계법으로 예측한 전단강도를 135%, 119% 상회하였다. 말뚝머리 본체부 두께에 가외철근 보강 유무에 따라 제작된 실험체의 항타실험 결과 모든 말뚝 실험체에 균열이 발생하지 않아 충격에 대한 저항이 우수한 것으로 나타났다. 기성 PHC말뚝과 HPC말뚝 연결부 휨실험을 통해 측정된 휨하중을 평가한 결과 기성 PHC말뚝 설계 휨균열 하중에 비해 1.51배 및 1.48배 높은 값을 나타내어 충분한 연결부 휨내력을 확보하는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** HPC말뚝, 수평전단강도, 전단강도, 한계상태설계법

---