



# 내부충전 콘크리트와 횡보강 및 축방향 철근으로 보강된 PHC 말뚝의 휨강도

방진욱<sup>1)</sup> · 현정환<sup>1)</sup> · 이방연<sup>2)</sup> · 이승수<sup>3)</sup> · 김윤용<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>전남대학교 건축학부 <sup>3)</sup>(주)HK ENC

## Flexural Strength of PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete, Transverse and Longitudinal Reinforcements

Jin-Wook Bang,<sup>1)</sup> Jung-Hwan Hyun,<sup>1)</sup> Bang-Yeon Lee,<sup>2)</sup> Seung-Soo Lee,<sup>3)</sup> and Yun-Yong Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2)</sup>School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

<sup>3)</sup>HK ENC Co. Ltd., Seoul 689-4, Korea

**ABSTRACT** The pre-tensioned spun high strength concrete (PHC) pile has poor load carrying capacity in shear and flexure, while showing excellent axial load bearing capacity. The purpose of this study is to evaluate the flexural performance of the concrete-infilled composite PHC (ICP) pile which is the PHC pile reinforced with infilled concrete, transverse and longitudinal reinforcement for the improvement of shear and flexural load carrying capacity. The ICP pile specimen was designed to make allowable axial compression and bending moment higher load bearing capacity than those determined through the investigation of abutment design cases. The allowable axial compression and bending moment of the ICP pile was obtained using the program developed for calculating the axial compression - bending moment interaction. Then, ICP pile specimens were manufactured and flexural tests were performed. From the test results, it was found that the maximum bending moment of the ICP pile was approximately 45% higher than that of the PHC pile and the safety factor of ICP pile design was about 4.5 when the allowable bending moment was determined to be 25% of the flexural strength.

**Keywords :** PHC pile, infilled concrete, transverse rebar, longitudinal rebar, flexural strength

### 1. 서 론

기초공사를 할 때 기초지반의 지지력이 충분하지 못하거나 침하가 과도하게 발생하는 경우, 상부구조물의 하중을 지지력이 큰 하부지반에 안정적으로 전달하기 위하여 말뚝을 사용하고 있다. 국내에서는 1960년대부터 1970년대 초반까지는 주로 철근콘크리트 말뚝이, 그 후 1990년대 초반까지는 프리스트레스트 말뚝이 주로 사용되었지만 구조물이 대형화, 고층화되고 지가상승 등으로 특수공사가 증가됨에 따라 좀 더 발전된 말뚝기초공법이 요구되었다.<sup>1)</sup> 또한 내진설계법의 도입으로 구조물의 안전성에 대한 인식이 높아짐에 따라 기초공사를 위해 사용되는 말뚝의 요구 성능이 높아지고 있는 실정이다.<sup>2,3)</sup> 이러한 사회적 요구에 의해 기존에 사용되었던 콘크리트

말뚝의 성능을 개선하고 고품질의 말뚝을 확보하기 위해 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝(pretensioned spun high strength concrete piles, 이하 PHC 말뚝)의 도입이 일본으로부터 이루어져 다양한 구조물의 기초공사에 사용되고 있다. 국내 PHC 말뚝의 총 사용량은 연간 약 100만본으로 추정되고 있으며, 특히 국내 주택건설에 PHC 말뚝 사용량이 해마다 증가하고 있어 2008년에는 약 30만본이 주택건설에 사용되었다. 현재 PHC 말뚝은 국내에서 현장타설 말뚝 다음으로 그 사용량이 많은 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup>

PHC 말뚝은 원심 회전력을 이용하여 말뚝 본체 콘크리트 압축강도를 78.5 MPa 이상으로 확보할 수 있어 말뚝의 지지력이 크고 항타시 저항력이 우수하며, 기계화 공정으로 대량생산 및 우수한 품질관리를 확보할 수 있는 장점이 있다.<sup>5)</sup> 그러나 앞서 기술한 우수한 축하중 저항 능력에 비해 상대적으로 전단 및 휨 저항 성능이 낮기 때문에 토압 또는 지진하중과 같은 수평력이 크게 작용하는 교대 등의 기초에는 PHC 말뚝 보다 강관 말뚝을 사

\*Corresponding author E-mail : yunkim@cnu.ac.kr  
 Received September 21, 2012, Revised November 5, 2012,  
 Accepted November 5, 2012  
 ©2013 by Korea Concrete Institute

용하는 것이 일반적이나 경제성이 저하된다는 단점이 있다.<sup>6)</sup> 현정환 등<sup>7)</sup>은 PHC 말뚝의 부족한 전단강도를 증진시키기 위해 축방향으로 일정 간격의 횡방향 철근과 말뚝 중공부에 콘크리트를 충전한 합성 PHC 말뚝(concrete-Infilled composite PHC pile, 이하 ICP 말뚝)을 개발하였고, 성능 및 적용 가능성을 평가한 연구를 수행한 바 있다.

이 논문에서는 Fig. 1과 같이 횡방향 철근 내측에 축방향 철근으로 보강하여 ICP 말뚝의 향상된 휨성능을 평가하는 연구를 수행하였다. 우선 휨 보강된 ICP 말뚝을 교대의 설계에 적용한다고 보고, 높이가 10 m 이하이면서 강관말뚝이 적용된 기존의 교대 설계사례<sup>8)</sup>를 조사하였다. 강관말뚝 1본당 허용 축력 및 휨모멘트 조합을 파악하여 ICP말뚝의 목표 허용 휨모멘트를 강관말뚝과 동등 이상이 되도록 정하였다. 또한 ICP 말뚝 단면의 축력-휨모멘트(P-M) 상관관계를 토대로 ICP 말뚝의 허용 휨모멘트를 계산하였다. 이를 기반으로 목표한 허용 휨모멘트를 만족시킬 수 있도록 ICP 말뚝의 내부충전 콘크리트와 축방향 철근을 설계하였다. 설계에 따라 ICP 말뚝을 제작하였으며, KS규정 시험방법에 따라 휨시험을 수행하여 휨거동을 평가하였다. 단면의 축력-휨모멘트(이하 P-M) 상관관계로 계산된 휨강도와 휨시험에 의하여 결정된 휨모멘트의 비교를 통하여 이 연구에서 제시한 휨강도 계산법의 타당성을 검증하였다.

## 2. ICP 말뚝의 휨강도 예측

### 2.1 ICP 말뚝의 P-M 상관관계 계산

축방향 철근과 내부충전 콘크리트를 설계하기 위하여 ICP 말뚝의 P-M 상관관계를 예측하는 계산법을 제시하였다. 기본적으로 현행 콘크리트 구조설계기준<sup>9)</sup>의 공칭 P-M 상관관계 계산과 동일한 과정을 적용하되, ICP 말뚝 본체 콘크리트, 내부충전 콘크리트, 프리스트레싱 강재, 축방향 철근 등 각 재료의 응력-변형률 곡선 특성을 그대

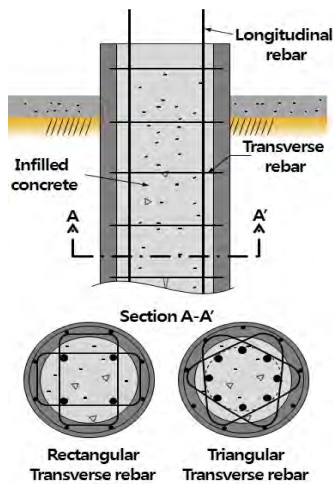


Fig. 1 Conceptual drawing of ICP pile

로 반영하였다. 또한 ICP 말뚝 본체의 경우, 프리텐션을 실시하는 제작 조건으로 인하여 콘크리트와 프리스트레싱 강재에 초기 변형률 및 응력이 존재하므로 이러한 특성도 해석에 반영하였다. 해석 절차는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 먼저 말뚝의 직경 및 두께 등의 치수와 ICP 말뚝 본체 콘크리트, 프리스트레싱 강재, 축방향 철근의 역학적 특성과 사용량 및 배근위치를 입력한 후, 각 재료의 응력-변형률 관계를 나타내는 재료 모델을 입력한다. 다음으로 프리스트레싱 강재의 프리스트레싱 힘을 입력한다. 프리스트레싱 힘이 입력되면 ICP 말뚝의 축강도( $P_0$ )는 식 (1)에 의하여 계산할 수 있다.

$$P_0 = 0.85\sigma_{ICP}(\epsilon_{ICPmi} + \alpha)A_{ICP} + \sigma_t(\epsilon_{tini} + \alpha)A_t + 0.85\sigma_c(\alpha)A_c + \sigma_s(\alpha)A_s \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{ICPmi}$ 는 ICP 말뚝 본체 콘크리트의 초기 변형률,  $\alpha$ 는 최대 축력이 작용할 때의 내부충전 콘크리트와 축방향 철근 변형률,  $\sigma_{ICP}(\epsilon_{ICPmi} + \alpha)$ 는 변형률의 크기가  $\epsilon_{ICPmi} + \alpha$  일 때 ICP 말뚝 본체 콘크리트에 발생한 응력,  $A_{ICP}$ 는 ICP 말뚝 본체의 단면적,  $\epsilon_{tini}$ 는 프리스트레싱 강재의

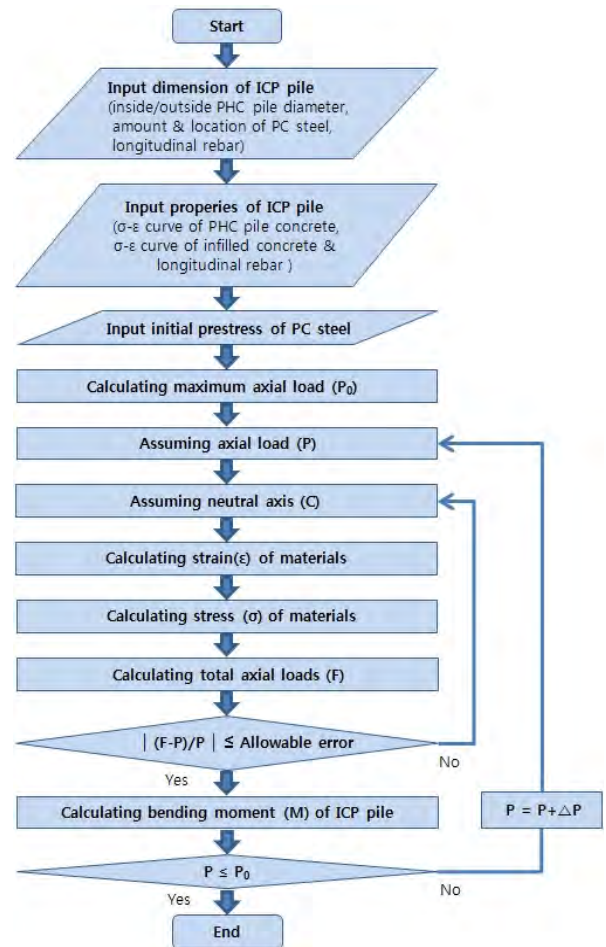
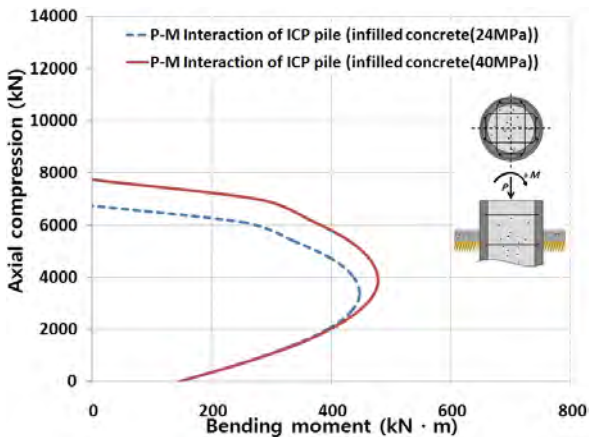
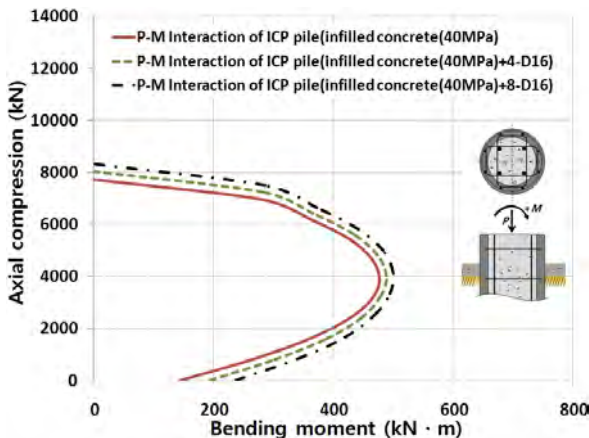


Fig. 2 Theoretical calculating process of strength interaction between axial compression and bending moment of ICP pile

초기 변형률,  $\sigma_t(\epsilon_{tini} + \alpha)$ 는 변형률의 크기가  $\epsilon_{tini} + \alpha$ 일 때 프리스트레싱 강재에 발생한 응력,  $A_t$ 는 프리스트레싱 강재의 단면적,  $\sigma_c(\alpha)$ 는 변형률의 크기가  $\alpha$ 일 때 내부충전 콘크리트에 발생한 응력,  $A_c$ 는 내부충전 콘크리트의 단면적,  $\sigma_s(\alpha)$ 는 변형률의 크기가  $\alpha$ 일 때 축방향 철근에 발생한 응력,  $A_s$ 는 축방향 철근의 단면적이다.  $P_0$  계산 후 ICP 말뚝의 P-M 상관관계를 계산하기 위해 초기 축력( $P$ )을 가정하고, 이때 압축연단에서 단면의 중립축까지의 거리( $c$ )를 가정하여 재료의 변형률을 위치에 따라 계산한다. ICP 말뚝 본체 콘크리트와 프리스트레싱 강재의 변형률은 프리스트레싱 강재의 긴장에 의한 초기 변형률과 가정한  $c$ 로부터 계산된 변형률이 합산되고, 변형률에 따른 응력은 각 재료의 응력-변형률 관계로부터 계산된다. 합력( $F$ )은 단면 전체에 걸쳐 계산된 응력으로부터 계산된다. 만약 가정한  $P$ 와 가정한  $c$ 에 의해 계산된  $F$ 의 차가 허용오차보다 크면  $c$ 를 다시 가정하고, 허용오차 안에 들면 휨모멘트를 계산한다. 가정한  $P$ 가 앞서 구한  $P_0$ 보다 작으면  $P$ 를 증가시켜 상기 과정을 반복수행하고, 가정한  $P$ 가  $P_0$ 보다 크면 해석을 종료하여 P-M 상관관계를 계산한다.



(a) P-M interaction diagrams according to the compressive strength of infilled concrete



(b) P-M interaction diagrams according to the amount of longitudinal rebar

Fig. 3 P-M interaction diagrams of ICP pile

Fig. 3은 설계기준 압축강도 24 MPa와 40 MPa 두 종류의 내부충전 콘크리트만을 ICP 말뚝 본체에 보강할 경우 (a)와 40 MPa의 내부충전 콘크리트와 D16 축방향 철근이 0, 4, 8개 보강된 경우 (b)에 대한 ICP 말뚝의 P-M 상관관계를 계산한 예시를 보여주고 있다. Fig. 3(a)의 경우 내부충전 콘크리트의 설계기준 압축강도가 증가할 경우 축력 및 휨모멘트가 증가됨을 알 수 있다. 또한 축방향 철근까지 보강한 Fig. 3(b)의 경우 철근보강으로 인한 축력 증가는 크게 나타나지 않는 반면, 순수 휨모멘트는 철근 보강이 없을 때에 비해 D16 철근 4개 및 8개로 휨 보강을 할 경우 각각 33.4%, 63.7% 증가하는 것으로 나타났다. 이 연구에서 제시한 P-M 상관관계 계산법을 이용하면 ICP 말뚝의 내부충전 콘크리트와 축방향 철근을 효율적으로 설계할 수 있을 것으로 사료된다. 이 계산 방법의 타당성은 휨시험 결과와 비교하는 방법으로 검증하였고, 4.3절에 상세히 기술되어 있다.

## 2.2 허용 축력-휨모멘트 상관관계 계산

현재 국내에서는 PHC 말뚝 본체를 설계할 때 허용응력설계법을 따르고 있다. 콘크리트 구조설계기준 해설 별도설계법<sup>10)</sup>에 따르면 휨압축 부재의 허용력은 공칭 P-M 상관관계의 40%를 취하도록 하고 있다. 그러나 이 연구에서는 ICP 말뚝 본체 콘크리트 허용 압축응력 및 프리스트레싱 강재의 허용 인장응력을 각각  $0.25f_{ck(ICP)}$ ,  $0.25f_{y(PC)}$ 로 적용하여 PHC 말뚝을 설계하는 국내의 실정<sup>11)</sup>을 반영하여 이와 동등한 수준의 안전율로 말뚝을 제작하기 위하여 공칭 P-M 상관관계의 25%를 허용 P-M으로 취하였다. Fig. 4에 기존 설계사례<sup>8)</sup> 조사를 통하여 얻은 교대기초에 작용하는 허용 P-M 조합을 점으로 나타내었다. 또한 직경 450 mm, 두께 70 mm인 기성 PHC 말뚝의 P-M 상관관계를 실선으로 나타내었다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 기성 PHC 말뚝의 경우 허용 축력은 만족하지만 휨

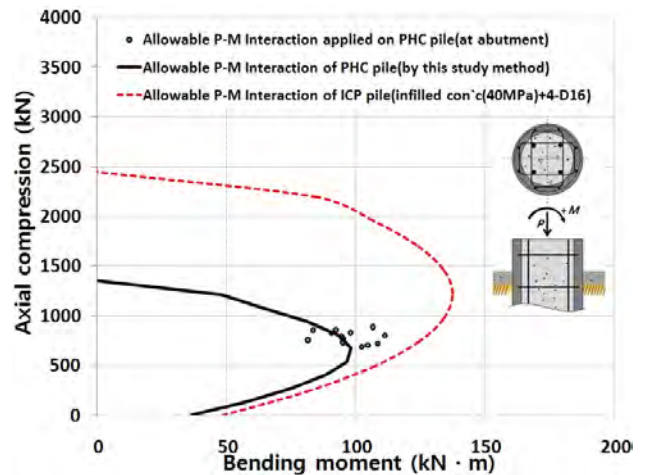


Fig. 4 Comparison of allowable P-M interaction diagrams between PHC pile and ICP pile

모멘트는 교대 기초설계에 반영된 허용력에 비해 대체로 부족한 것으로 나타났다. 한편, Fig. 4에서 점선으로 나타난 곡선은 40 MPa의 내부충전 콘크리트와 직경 D16의 축방향 철근 4개를 보강한 ICP 말뚝의 허용 P-M 상관도를 나타낸다. 그림에서 나타난 바와 같이 ICP 말뚝은 교대 기초설계에 반영된 작용력을 상회하는 허용 축력 및 휨모멘트를 확보하는 것으로 나타났다. 따라서 위 변수 조건에 따라 휨모멘트를 평가하기 위한 ICP 말뚝 시험체를 제작하였다.

### 3. 휨 시험체 제작 및 시험 방법

#### 3.1 사용 재료

이 연구에서 제작한 ICP 말뚝의 본체는 횡방향 철근을 프리스트레싱 강재와 함께 배근한 후, 이를 원심 성형한 PHC 말뚝이다. ICP 말뚝을 제조하기 위하여 추가 배근된 횡방향 철근을 제외한 모든 재원은 기성 PHC 말뚝인  $\phi 450-70t$  A종(Table 1)과 동일하다. Table 2에 나타난 바와 같이 내부충전 콘크리트의 설계기준 압축강도는 40 MPa이고, 횡방향 철근 및 축방향 철근은 설계기준 항복강도가 400 MPa인 D10 및 D16의 이형철근이다.

#### 3.2 시험체 제작

ICP 말뚝 휨시험체의 제작 과정은 말뚝 본체를 제조하는 1차 제작과 축방향 철근 배근과 내부충전 콘크리트 타설을 현장에서 실시하는 2차 제작으로 나눌 수 있다. 1차 제작은 기성 PHC 말뚝 제작 공정에 축방향 철근을 배근하는 공정이 추가된다. 따라서 말뚝 본체 콘크리트 타설 공정 전에 축방향 철근을 200 mm 간격으로 총 말뚝길이 6 m에 걸쳐 배근한 후 말뚝 본체 콘크리트를 타설하고 원심성형을 하였다. 원심성형 후 양생실에 넣어 65°C로 약 11시간 동안 증기양생을 실시한 뒤 ICP 말뚝 본체 제작을 완료하였다.<sup>7)</sup> 증기양생이 끝난 ICP 말뚝 본체에 축방향 철근 배근과 내부충전 콘크리트 타설을 위해 오거를 이용하여 지반을 수직으로 굴착한 후, 현장에서 말뚝

**Table 1** Properties of PHC pile ( $\phi 450-70t$ )

Diameter (mm)	Thickness (mm)	Specified concrete strength (MPa)	Effective prestress of concrete (MPa)
450	70	80	4.0

**Table 2** Properties of infilled concrete

Specified slump (mm)	Maximum size of coarse aggregate (mm)	Specified concrete strength (MPa)
120	20	40

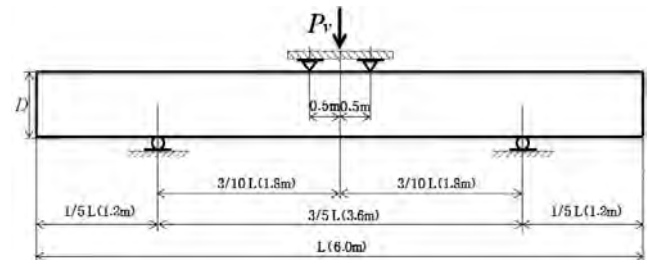
이 시공되는 것을 모사하여 수직으로 배치하였다. 그 후 4개의 축방향 철근을 삽입하여 교차하는 횡방향 철근의 내측부에 결속한 뒤 Fig. 5와 같이 진동 다짐기를 이용하여 내부충전 콘크리트를 ICP 말뚝 내부에 타설하였다. 총 4개의 휨 시험체를 제작하였으며 내부충전 콘크리트를 28일 기건 양생한 후 휨 시험을 실시하였다. 또한 기성 PHC말뚝 시험체로 I사에서 제조된 ICP말뚝 길이와 동일한 기성제품을 사용하였다.

#### 3.3 시험방법

ICP 및 기성 PHC말뚝에 대한 휨시험을 KS F 4306<sup>12)</sup> 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝의 휨강도 시험방법에 따라 수행하였다. Fig. 6과 같이 말뚝 총 길이 ( $L$ )에 대하여  $3/5L$ 을 지간으로 하고, 축력의 도입 없이 지간의 중앙에 연직방향 집중하중( $P_r$ )을 가하여 시험을 실시하였다. 연직하중은 I사에서 보유하고 있는 최대용량 1500 kN의 말뚝 전용 시험기를 사용하여 변위제어 방식으로 재하하였다. 연직하중과 중앙부 처짐은 시험기에 부착된 로드셀과 말뚝 중앙부에 부착한 변위계를 이용하여 각각 측정하였으며, 말뚝 시험체 인장부를 직접 관찰하여 초기 균열이 발생하는 하중을 측정하였다. 측정된



**Fig. 5** Casting of infilled concrete



**Fig. 6** Specimen geometry and test set-up view

하중을 바탕으로 식 (2)를 이용하여 ICP 및 기성 PHC 말뚝의 초기 균열발생 및 휨모멘트를 산출하였다.

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

여기서,  $W_{PHC}$ 는 ICP 말뚝 본체인 PHC 말뚝의 중량을 의미하며, 식 (3)<sup>13)</sup>을 이용하여 계산하였다.  $W_{con}$ 는 내부충전 콘크리트의 중량을 의미하며, 계산시 콘크리트의 단위중량을  $2300 \text{ kg/m}^3$ 으로 가정하였다.

$$W_{PHC} = 2.6\pi t(D-t)L \quad (3)$$

여기서  $D$ 는 말뚝의 직경,  $t$ 는 말뚝의 두께를 나타낸다.

ICP 말뚝에 작용하는 하중의 방향에 따라 말뚝의 휨내력이 달라진다. Fig. 7(a)와 같이 축방향 철근 단면의 주축 방향으로 수평력이 작용하는 Type A에 비하여 Fig. 7(b)와 같이 Type A와는 45도 회전한 방향으로 수평력이 작용하는 Type B의 휨강도가 낮을 것으로 예측된다. 따라서 Type B를 기준으로 설계하는 것이 안전측이지만, 축방향 철근 단면의 주축 방향으로 수평력이 작용하는 것으로 Type A와 같이 설계하는 것이 일반적이라는 가정하에 Type A ICP 말뚝 시험체를 기준 시험체로 결정하였으며, Type B의 휨강도가 갖는 안전율을 검증하기 위한 휨시험을 수행하였다.

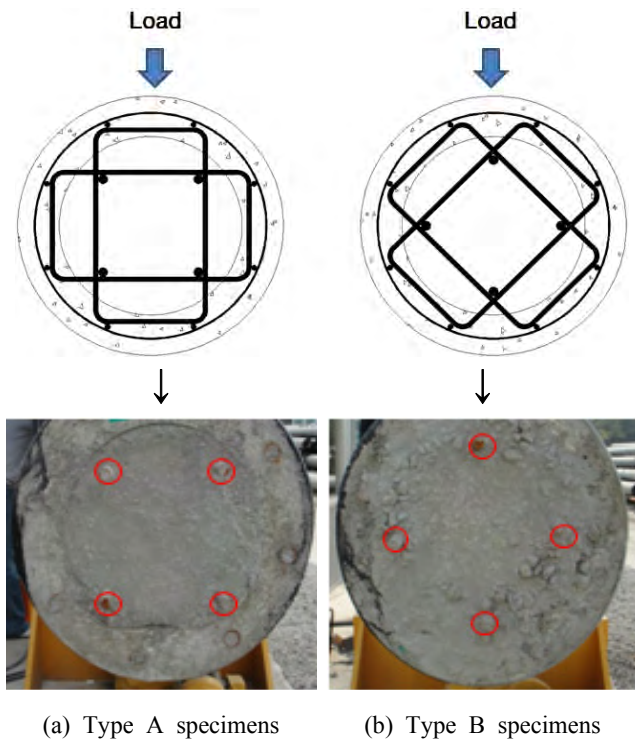


Fig. 7 Two types of cross sections of ICP pile specimens (the circles representing the location of longitudinal rebar)

## 4. 시험 결과 및 분석

### 4.1 휨시험체 균열 패턴

Fig. 8은 ICP 및 기성 PHC 말뚝의 휨시험 종료 후 시험체 지간사이에서 발생한 균열을 나타낸다. ICP 말뚝인 Type A 및 Type B 휨시험체는 모두 순수 휨구간( $3/5L = 3.6 \text{ m}$ )에서 초기균열이 발생하였으며, 그 이후 연직하중이 증가함에 따라 지간 전체에 걸쳐 다수의 휨균열이 발생하였다. 기준 시험체인 Type A(Fig. 8(a)~(b)) 시험체는 Type A 시험체를 45도 회전시킨 Type B 시험체(Fig. 8(c)~(d))에 비해 지간내 발생한 균열의 간격이 좁고 상대적으로 더 많은 휨균열이 발생하였다. 이러한 결과는 인장측에 배근된 축방향 철근량이 Type A 시험체가 많은 것에 기인하는 당연한 결과라 판단된다. 모든 ICP 말뚝 시험

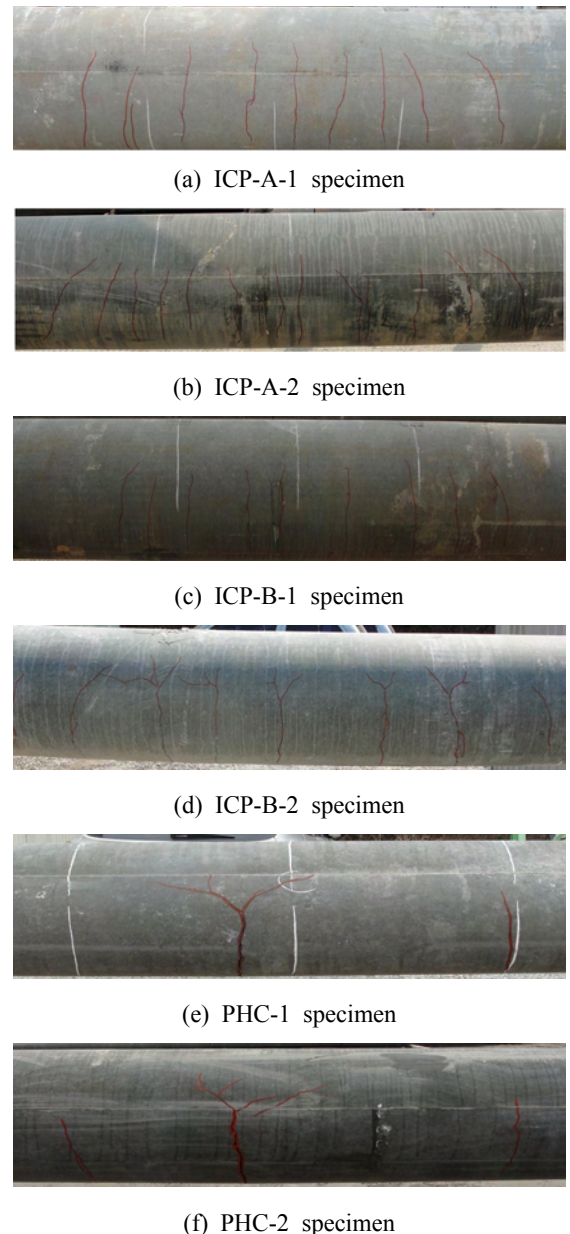


Fig. 8 Crack patterns of ICP and PHC pile specimens

체는 압축부가 파쇄로 최종 파괴되는 연성적인 파괴거동을 나타내었다.

한편, 기성 PHC 말뚝은 순수 휨구간에서 초기균열이 발생하였지만, ICP 말뚝에 비해 연직하중이 증가함에 따라 상대적으로 적은 수의 휨균열이 발생하였다. PHC 말뚝도 압축부의 파쇄로 인하여 최종 휨파괴에 도달하였는데, 휨균열의 개수가 적었기 때문에 ICP 말뚝에 비해 균열폭이 크게 확대되며 최종파괴 되는 거동을 나타내었다.

### 4.2 최대 휨모멘트 비교

Fig. 9는 ICP 및 기성 PHC 말뚝 시험체의 최고하중까지의 연직하중-중앙처짐 관계곡선을 나타낸다. 3.3절에서 기술한 바와 같이 축력의 도입 없이 수행된 시험의 결과를 나타내고 있다. ICP 말뚝 시험체는 기성 PHC 말뚝에 비해 내부충진 콘크리트와 축방향 철근으로 인하여 초기강성이 증가하였다. 휨시험을 통해 측정된 최고하중을 식 (2)에 대입하여 ICP 말뚝 및 기성 PHC 말뚝의 최대 휨모멘트를 계산한 결과를 Table 3에 나타내었다. 평균 최대 휨모멘트의 경우 Type A ICP 시험체와 Type B ICP 시험체는 각각 227.1 kN·m과 216.9 kN·m로 나타났다. 이 값은 기성 PHC 말뚝 시험체의 최대 휨모멘트(153.4 kN·m)에 비하여 각각 48%, 41% 증가된 결과이며, 내부충진 콘크리트와 축방향 철근을 보강함으로써 PHC 말뚝의 휨내력이 크게 증진됨을 알 수 있다.

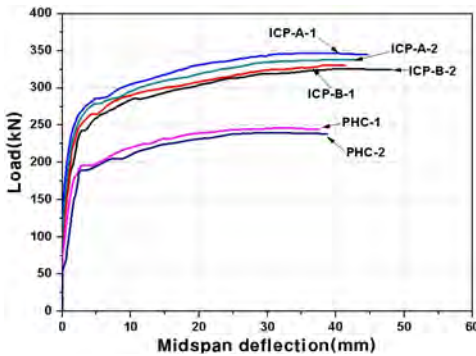


Fig. 9 Load vs. midspan deflection curves of ICP and PHC pile specimens

Table 3 The results of flexural tests

Test result		Maximum load (kN)	Max. pure bending moment <sup>(1)</sup> (kN·m)
Specimens			
PHC	1	239.2	157.4
	2	227.0	149.5
ICP (Type A)	1	348.9	230.4
	2	338.8	223.8
ICP (Type B)	1	330.6	218.5
	2	325.8	215.4

<sup>(1)</sup> Calculation on the basis of Eq. (2)

한편, Type A 시험체와 Type B 시험체의 최대 휨모멘트는 약 4.5%의 차이를 나타내고 있다. 따라서 말뚝에 작용하는 수평력 방향이 말뚝의 휨내력 설계에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

### 4.3 예측값과 휨시험 결과 비교

이 절에서는 ICP 말뚝의 P-M 계산법에 대한 타당성을 평가하기 위해 시험에 의하여 결정된 ICP 말뚝의 최대 휨모멘트와 Fig. 2의 과정을 통해 계산된 휨강도를 비교하였다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 2개의 기성 PHC 말뚝의 경우, 휨시험을 통해 얻은 휨모멘트가 평균 153.4 kN·m이며, 계산을 통해 예측한 휨강도는 148.0 kN·m이다. 시험값이 예측값에 비하여 약 1.04배 안전측인 것으로 평가되었다. 또한 Type A 및 Type B ICP 말뚝 시험체의 평균 휨모멘트가 각각 227.1 kN·m 및 216.9 kN·m으로 측정되어 예측값 193.6 kN·m에 비하여 약 1.17배 및 1.12배 안전측인 것으로 나타났다. 또한 외부하중에 대하여 불리한 조건인 Type B ICP 말뚝의 경우에도 Type A 조건으로 예측한 휨강도가 안전측인 것을 확인하였다.

한편, 이 연구에서는 ICP 말뚝의 1본당의 허용 휨모멘

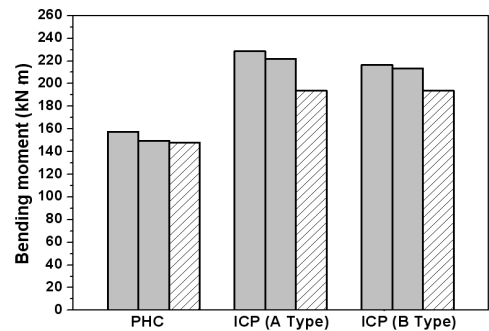


Fig. 10 Comparisons between maximum bending moments (shaded bars) obtained from flexural tests and calculated flexural strengths (dashed bars) based on the condition of pure bending without axial force

Table 4 Safety factor of flexural test results (maximum pure bending moments) of ICP piles with regards to calculated allowable bending moment

		Bending moment (kN·m)	Safety factor
Calculations (Type A)	Flexural strength	193.6	4.0
	Allowable bending moment	48.4 <sup>(1)</sup>	1.0
Test results	Type A	227.1 <sup>(2)</sup>	4.6
	Type B	216.9 <sup>(2)</sup>	4.4

<sup>(1)</sup> 25% of calculated flexural strength of Type A specimen

<sup>(2)</sup> Average value taken from two specimens

트를 Table 4에 나타낸 바와 같이 P-M 상관관계로부터 계산된 공칭 휨강도의 25%로 취하였다. Type A ICP 말뚝의 허용 휨모멘트 48.4 kN·m을 현재 말뚝 설계시 사용하고 있는 허용응력설계에 적용하면, Type A 시험체가 약 4.6, Type B 시험체는 약 4.4 수준의 안전율을 갖는 것으로 나타났다.

따라서 이 연구에서 수행한  $\phi 450-70t$  ICP 말뚝에 대한 전반적인 기초연구 결과를 종합하면,  $\phi 500-80t$ ,  $\phi 600-90t$  등 여러 종류의 ICP 말뚝과 보강재료의 특성에 따른 말뚝의 휨내력을 안전측으로 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 현재 말뚝의 설계방법인 허용응력설계법의 높은 안전율이 합리적인가에 대한 문제는 말뚝기초 설계 전반에 걸친 심도 있는 검토를 통하여 논할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 내부충전 콘크리트와 횡방향 및 축방향 철근으로 보강된 PHC 말뚝인 ICP 말뚝의 휨강도를 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구를 통해 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) ICP 말뚝의 P-M 상관관계를 예측하는 계산법을 제시하였으며, 국내 말뚝 설계의 현실을 고려하여 P-M 상관관계의 25%를 허용 축력-휨모멘트로 취하였다.
- 2) 허용 축력-휨모멘트를 바탕으로 교대 설계에서 요구되는 말뚝의 성능을 만족시킬 수 있도록 내부충전 콘크리트 및 축방향 철근의 변수를 결정하여 시험체를 제작하였다. 결정된 변수는 설계기준 압축강도 40 MPa의 내부충전 콘크리트와 D16 이형철근 4개의 축방향 철근이다.
- 3) 기성 PHC 말뚝 및 ICP 말뚝의 휨내력을 측정하기 위하여 축력이 없는 조건에서 휨시험을 수행하였다. ICP 말뚝의 경우, 휨이 작용하는 방향에 따라 Type A와 Type B 2가지 조건으로 휨시험을 수행하였다. 그 결과 Type A ICP 말뚝의 휨모멘트는 기성 PHC 말뚝에 비해 48% 향상되었으며, 단면을 45도 회전시킨 Type B 시험체도 41% 향상된 결과를 얻었다. 따라서 내부충전 콘크리트와 축방향 철근을 이용하여 보강하는 방법은 기성 PHC 말뚝의 휨모멘트를 효과적으로 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- 4) PHC 말뚝의 최대 휨모멘트는 계산을 통해 예측한 휨강도에 대하여 약 1.04배 안전측인 것으로 나타났고, Type A 및 Type B ICP 말뚝 시험체의 최대 휨모멘트는 예측된 휨강도에 비하여 약 1.17배 및 1.12배 안전측인 것으로 나타났다.
- 5) ICP 말뚝의 허용 휨모멘트를 휨시험에 의하여 구한 최대 휨모멘트와 비교해 볼 때, Type A 시험체는 약 4.6, Type B 시험체는 약 4.4의 안전율을 갖는

것으로 나타났다. 이처럼 높은 안전율을 갖는 허용응력설계법에 대하여는 말뚝기초 설계 전반에 걸친 심도 있는 검토를 통하여 논할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 (주)HK ENC의 지원과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다(No.2011-0024924).

## 참고문헌

1. Choi, S. S., "A Suggestion of High Quality Concrete for PHC Pile," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 6, 2002, pp. 41-48.
2. Hwang, Y. C. and Cho, C. H., "Pile Foundations in Korea," *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 21, No. 2, 2005, pp. 8-20.
3. Lee, S. H. and Kim, D. M., "An Experimental Study on Behavior of Composite Pile," *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 11, No. 2, 2010, pp. 23-32.
4. Chun, Y. S., Park, J. B., and Sim, Y. J., "Mechanical Properties of PHC Pile Head Connection with Foundation Slab and Field Application," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 5, 2010, pp. 71-77.
5. Byun, G. J., "Durability of PHC Piles and Characteristics of High Strength Concrete," 2004 KSCE Symposium on *Design of PHC Pile and Construction*, Construction Hall Seoul, pp. 1-25.
6. Song, T. E., "Decision Procedure in Applying PHC Piles instead of Steel Plies," *Technical Magazine of Ssangyong Engineering and Construction*, Vol. 48, 2008, pp. 32-36.
7. Hyun, J. H., Bang, J. W., Lee, S. S., and Kim, Y. Y., "Shear Strength Enhancement of Hollow PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete and Shear Reinforcement," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 1, 2012, pp. 71-78. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.1.071>)
8. Korea Concrete Institute, *Development of Design Method and Performance Evaluation of ICP (Infilled Composite PHC) Pile*, 2010, pp. Appendix K.
9. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2007, pp. 115-144.
10. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2003, 387 pp.
11. Korean Geotechnical Society, *Korean Foundation Design Code*, 2009, 298 pp.
12. KS F 4306, "Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles," *Korean Agency for Technology and Standards*, 2003, pp. 1-55.
13. KS F 4303, "Pretensioned Spun Concrete Piles," *Korean Agency for Technology and Standards*, 2001, pp. 1-16.

---

**요 약** PHC 말뚝은 우수한 축하중 저항 능력에 비해 상대적으로 전단 및 휨 저항 성능이 낮은 단점을 가지고 있다. 이 연구의 목적은 기존 PHC 말뚝의 단점을 개선할 목적으로 개발된 중공부에 내부충진 콘크리트, 축방향 철근과 전단 철근으로 보강한 합성 PHC 말뚝(ICP 말뚝)의 휨성능을 평가하는 것이다. 이를 위하여 기존의 교대 설계사례로 부터 말뚝에 발생하는 축력과 휨모멘트를 조사한 후, ICP 말뚝 계산을 위하여 개발한 축력-휨모멘트 상관관계 프로그램을 이용하여 허용 축력과 휨모멘트가 발생하는 부재력을 만족하도록 ICP 말뚝을 설계하였다. 설계에 따라 ICP 말뚝을 제작하였으며, 휨실험을 수행하였다. 실험 결과 ICP 말뚝은 PHC 말뚝에 비하여 약 45% 큰 휨내력을 나타내었다. 또한 계산에 의해 예측한 ICP 말뚝 휨강도의 25%를 허용 휨모멘트로 취할 경우, 약 4.5의 안전율을 갖는 것으로 평가되었다.

**핵심용어** : PHC 말뚝, 내부충진 콘크리트, 횡방향 철근, 축방향 철근, 휨강도