

긴장력이 도입된 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝의 휨강도 산정

Estimation of Flexural Strength of Hollow Prestressed Concrete Filled Steel Tube Piles

백 규 호¹ Paik, Kyu-Ho

Abstract

Hollow prestressed concrete-filled steel tube (HCFT) piles, which combines PHC piles inside thin-wall steel tubes, were developed to increase the flexural strength of the pile with respect to the lateral load. Since P-M curves are needed for evaluating the structural safety of piles when applying HCFT piles to fields, equations for plotting P-M curves of HCFT piles in limit states were proposed. When the yield strength is applied to the steel tube and PC steel bar of HCFT piles, the proposed equations significantly underestimated the flexural strength of HCFT piles. Unlike the flexural strength test results, the proposed equations also provide greater flexural strengths for 12 mm thick steel pipe piles with the same diameter than for HCFT piles. However, when the ultimate strengths are used instead of the yield strengths for the steel tube and PC steel bar, the proposed equations provide the flexural strengths very close to the flexural strength test results.

요 지

수평하중에 대한 휨강성을 증대시키기 위해 얇은 두께의 강관 내부에 PHC말뚝을 합성한 중공형 콘크리트 충전 강관(HCFT)말뚝을 개발하였고, HCFT말뚝의 현장 적용 시 말뚝의 구조안전성 평가에 필요한 한계상태에서 P-M 상관도를 작도할 수 있는 산정식을 제안하였다. HCFT말뚝을 구성하는 강관과 PC강봉에 대한 강도 값으로 항복응력을 적용할 경우 제안식은 HCFT말뚝의 극한휨내력을 큰 폭으로 과소평가하였고, 축력이 작용하지 않을 때 휨강도시험 결과와 달리 HCFT말뚝보다 직경이 동일하고 두께가 12mm인 강관말뚝의 극한휨내력을 더 크게 산정하였다. 그러나 HCFT말뚝을 구성하는 강관과 PC강봉에 대해 항복강도인 f_y 대신 극한강도인 f_u 를 사용하면 제안식은 휨강도시험 측정결과에 매우 근접한 극한휨내력을 제공하는 것으로 나타났다.

Keywords : Flexural strength test, HCFT pile, Limit state design, P-M curve, Ultimate strength, Yield strength

1. 서 론

기성말뚝은 재질에 따라 콘크리트로 제작된 PHC말뚝과 강재로 제작된 강관말뚝으로 구분된다. 일반적인

로 PHC말뚝은 인장강도보다 압축강도가 훨씬 크기 때문에 압축하중이 크게 작용하는 건축구조물의 기초에 주로 사용되고, 강관말뚝은 인장과 압축강도가 동일하기 때문에 수평하중이 크게 작용하는 교량의 교대부 기

¹ 정회원, 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Catholic Kwandong Univ., Tel: +82-33-649-7515, Fax: +82-33-642-3359, pkh@cku.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

초에 많이 사용되어 왔다. 그러나 강관말뚝은 동일 직경의 PHC말뚝보다 가격이 4배 정도 고가이기 때문에 수평하중을 받는 구조물 기초의 공사비 상승을 이끄는 주원인으로 지목되어 왔다.

최근들어 강관말뚝의 사용에 따른 기초 공사비 증가 문제를 해결하기 위해 수평하중이 크게 전달되는 말뚝 상부에만 휨내력이 큰 강관말뚝을 사용하고 수평하중이 크게 전달되지 않는 말뚝 하부에는 휨내력은 작지만 가격이 저렴한 PHC말뚝을 사용하는 강관 복합말뚝(HCP, Hybrid Composite Pile)이 개발되었다(Piletech et al., 2008). 또한 Hyun et al.(2012)과 Bang et al.(2013)은 지반에 설치가 완료된 PHC말뚝의 중공부에 수평하중이 전달되는 깊이까지 종방향의 철근망을 설치하고 콘크리트를 타설해서 말뚝의 휨내력을 향상시킨 ICP(Infilled Composite PHC)말뚝을 개발하기도 하였다. 그러나 HCP와 ICP말뚝은 여전히 말뚝 재료비와 관련한 경제성, 이음부의 구조안정성, 말뚝의 구조성능 및 시공성과 관련하여 여러 문제점을 안고 있다(Paik, 2018).

이러한 기존 말뚝공법의 다양한 문제점을 해결하기 위해서 Paik(2018)은 Fig. 1과 같이 얇은 두께의 강관 내부에 원심성형을 통해 PHC말뚝을 합성하고 선행응력을 도입한 중공형 콘크리트 충전 강관(Hollow prestressed Concrete Filled steel Tube, HCFT)말뚝을 개발하였다. 그리고 HCFT말뚝에 대한 휨강도 및 전단강도시험을 통해 두께가 6mm인 강관을 사용한 HCFT말뚝의 극한 휨내력과 극한전단내력이 두께가 12mm인 동일 직경의 강관말뚝보다 각각 18.7%와 217.7% 크고, 동일 직경의 ICP보다 극한휨내력이 188.2% 크다는 시험결과를 제시하였다. 또한 휨하중을 받는 HCFT말뚝은 동일 조건 하에서 강관말뚝보다 휨변위를 약 50% 감소시켜 구조물의 수평변위 억제에 효과적이고, 강관말뚝과 달리 대변위에서도 극한휨내력이 유지되거나 변형경화(strain hardening)로 인해 다소 증가한다는 거동을 보고하였다.

그러나 강관말뚝 및 ICP말뚝보다 강도특성이 우수한

HCFT말뚝이 현장에 적용되기 위해서는 다양한 하중조건에서 말뚝의 구조안정성이 확인되어야 하며, 이를 위해서는 말뚝의 강도특성을 반영한 P-M 상관도가 필요하다. WSDOT(2012)에서는 중실형 철근 콘크리트가 충전된 원형 강관말뚝에 대해 P-M 상관도를 산정할 수 있는 수식을 제시하였고, Zhan et al.(2016)은 선행응력이 도입된 중실형의 콘크리트가 충전된 사각형 강관부재에 대한 휨내력 산정식을 제안하였다. 그러나 현재까지 강관 내부에 중공형의 PHC말뚝이 합성되고 동시에 선행응력이 도입된 HCFT말뚝의 P-M 상관도를 산정할 수 있는 산정식은 제시되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 대부분의 토목구조물들이 한계상태설계법(limit state design)으로 설계되는 점을 고려하여 한계상태에서 HCFT말뚝의 축력 P에 대한 휨내력 M의 변화를 나타낸 P-M 상관도를 산정할 수 있는 수식들을 제안하였다. 그리고 제안식으로부터 산정된 P-M 상관도의 결과를 특정조건에서 수행한 휨강도시험의 결과와 비교함으로써 제안식의 정확도를 평가하였다.

2. HCFT말뚝의 극한축력과 휨내력 산정

2.1 말뚝 단면의 가정과 중립축의 위치 정의

HCFT말뚝은 강관과 강관 내부에 합성되는 중공형 콘크리트, 그리고 강관과 합성 콘크리트에 선행응력을 가하기 위해 중공형 콘크리트에 설치되는 다수의 PC강봉으로 구성된다. 이 중 강관 및 합성 콘크리트와 달리 PC강봉은 연속적으로 분포하지 않아 말뚝이 놓이는 상태에 따라 PC강봉의 위치가 달라지므로 한계상태에서 PC강봉이 발휘하는 축력과 휨내력이 달라지게 된다. 따라서 한계상태에서 PC강봉이 발휘하는 축력과 휨내력을 손쉽게 구하기 위해 Fig. 2와 같이 HCFT말뚝에 설치된 다수의 PC강봉은 단면적이 동일하고 반경이 r_b , 두께가 t_b 인 PC원형관으로 대체하였다.

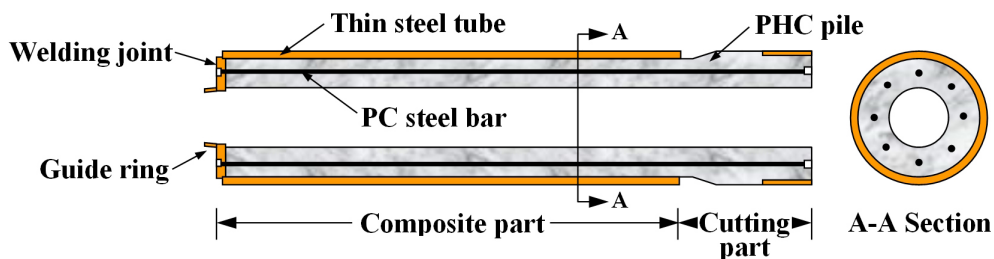


Fig. 1. Structural detail of HCFT piles

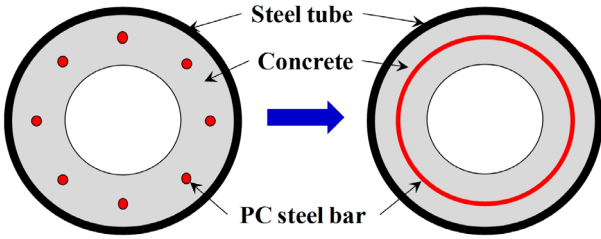


Fig. 2. Conversion of real to virtual cross section for PC steel bars of HCFT piles

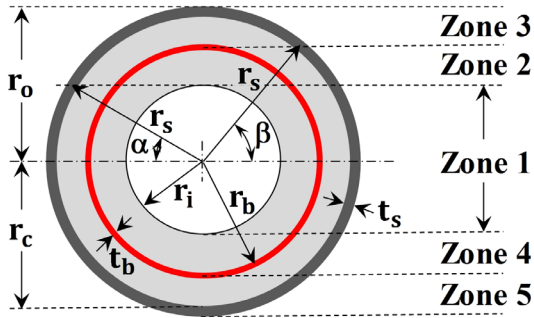


Fig. 3. Angles α and β defining the position of neutral axis

한계상태에서 중립축(neutral axis, N.A.)이 HCFT말뚝의 중공부에 접해서 위치할 때 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 중립축과 말뚝을 구성하는 강관 두께의 중간지점이 교차하는 지점까지의 각도 α 는 Fig. 3과 같이 말뚝 중심으로부터 강관 두께의 중간지점까지의 거리, r_s 와 말뚝의 중공부 반경, r_i 간의 기하학적인 관계에 의해 식 (1)과 같이 정의된다.

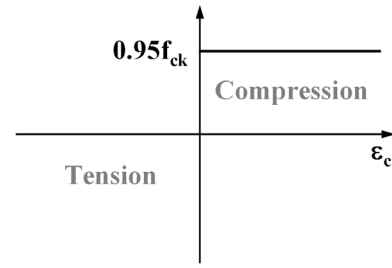
$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{r_i}{r_s}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{2r_i}{2r_o - t_s}\right) \quad (1)$$

여기서 r_o 는 HCFT말뚝의 반경이고 t_s 는 HCFT말뚝을 구성하는 강관의 두께이다. 그리고 중립축이 PC원형관의 상부나 하부에 위치할 때 중립축의 위치를 나타내는 각도 β 는 r_s 와 PC원형관의 반경인 r_b 간의 기하학적인 관계에 의해 식 (2)와 같이 표시될 수 있다.

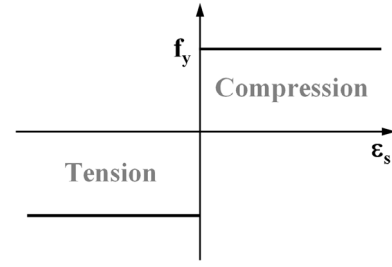
$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{r_b}{r_s}\right) \quad (2)$$

2.2 말뚝의 구성요소별 응력-변형률 관계

강구조설계기준 및 해설(KSSC, 2014)에 따르면 축력과 휨력을 함께 받는 콘크리트-강관 합성부재의 P-M 상



(a) Concrete



(b) Steel tube and PC steel bars

Fig. 4. Stress-strain model for components of HCFT piles

관도는 각 구성재료의 변형률을 고려해서 응력의 크기를 결정하는 변형률 적합법(strain compatibility method)과 변형률과 무관하게 일정 크기의 소성응력을 작용시키는 소성응력 분포법(plastic stress distribution method)으로 작도가 가능하다. 이들 두 가지 방법 중 소성응력 분포법이 상대적으로 계산이 더 간단하고 실무에서도 더 많이 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 소성응력 분포법을 이용해서 HCFT말뚝과 강관말뚝의 P-M 상관을 작도하였고, 이때 강재와 콘크리트는 Fig. 4와 같이 강소성의 응력-변형률 관계를 갖는다고 가정하였다.

2.3 말뚝의 구성요소별 극한축력 산정

(1) 강관의 축력

Fig. 5와 같이 한계상태에서 HCFT말뚝의 중립축이 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 $r_s \sin \psi$ 만큼 떨어진 곳에 위치할 때 선행응력을 고려한 강관의 압축부

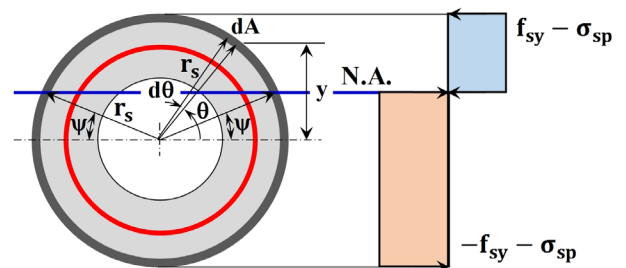


Fig. 5. Stress distribution acting on steel tube

와 인장부에 작용하는 축력인 $P_{s(c)}$ 와 $P_{s(t)}$ 는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$P_{s(c)} = 2 \int_{\psi}^{\frac{\pi}{2}} (f_{sy} - \sigma_{sp}) r_s t_s d\theta = 2(f_{sy} - \sigma_{sp}) r_s t_s \left(\frac{\pi}{2} - \psi \right) \quad (3a)$$

$$P_{s(t)} = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi} (-f_{sy} - \sigma_{sp}) r_s t_s d\theta = -2(f_{sy} + \sigma_{sp}) r_s t_s \left(\psi + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3b)$$

여기서 f_{sy} 는 HCFT말뚝을 구성하는 강관의 항복응력이고, σ_{sp} 는 강관에 가해진 선행응력, ψ 는 말뚝의 중심을 지나는 수평축을 기준으로 r_s 를 이용해서 중립축의 위치를 정의하는 회전각이다.

(2) PC강봉의 축력

HCFT말뚝의 중립축이 PC원형관 위, 즉 Fig. 3에서 영역 1, 2, 4에 해당하는 $-\beta \leq \psi \leq \beta$ 의 범위에 위치하면 한계상태에서 PC원형관에 작용하는 응력상태는 Fig. 6과 같고, 이때 PC강봉이 발휘할 수 있는 압축 및 인장 축력, $P_{b(c)}$ 와 $P_{b(t)}$ 는 다음과 같다.

$$P_{b(c)} = 2 \int_{\psi_b}^{\frac{\pi}{2}} (f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b d\theta = 2(f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b \left(\frac{\pi}{2} - \psi_b \right) \quad (4a)$$

$$P_{b(t)} = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_b} (-f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b d\theta = -2(f_{by} - \sigma_{bp}) r_b t_b \left(\psi_b + \frac{\pi}{2} \right) \quad (4b)$$

여기서 f_{by} 는 PC강봉의 항복응력이고 σ_{bp} 는 PC강봉에 가해진 선행응력이며, ψ_b 는 Fig. 6에서 보듯이 말뚝 중심을 지나는 수평축을 기준으로 r_b 의 함수로 중립축의 위치를 나타낸 각도로 식 (5)와 같이 표시될 수 있다.

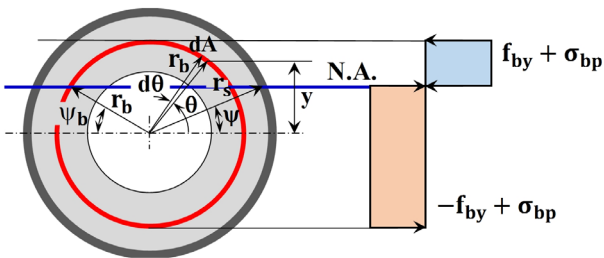


Fig. 6. Stress distribution acting on PC steel bars

$$\psi_b = \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_b} \sin \psi \right) \quad (5)$$

그리고 중립축이 PC원형관을 벗어난 지역 중에서 Fig. 3의 영역 3에 해당하는 $\beta \leq \psi \leq \pi/2$ 의 범위에 위치하면 모든 PC강봉에 인장력만 작용하므로 $P_{b(c)}$ 와 $P_{b(t)}$ 는 식 (6)과 같이 산정되고,

$$P_{b(c)} = 0 \quad (6a)$$

$$P_{b(t)} = -2\pi (f_{by} - \sigma_{bp}) r_b t_b \quad (6b)$$

영역 5에 해당하는 $-\pi/2 \leq \psi \leq -\beta$ 의 범위에 위치하면 모든 PC강봉에 압축력만 작용하므로 $P_{b(c)}$ 와 $P_{b(t)}$ 는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$P_{b(c)} = 2\pi (f_{by} + \sigma_{bp}) r_b t_b \quad (7a)$$

$$P_{b(t)} = 0 \quad (7b)$$

(3) 중공형 내부 합성 콘크리트의 축력

한계상태에서 강관 내부에 합성된 중공형 콘크리트에 의해 발휘되는 축력을 구하기 위해서는 계산의 편의성을 위하여 중립축이 말뚝의 중공부에 위치할 때와 중공부를 벗어나서 위치할 때로 구분하여 계산하는 것이 바람직하다. 먼저 중립축이 말뚝의 중공부 위를 지나갈 때, 즉 Fig. 3에서 영역 1에 해당하는 $-\alpha < \psi < \alpha$ 의 범위에 있을 때 내부 합성 콘크리트 중 압축력을 받는 영역의 면적 A는 Fig. 7과 같이 면적 A₁에서 면적 A₂와 A₃를 제거하는 방법으로 계산할 수 있다. 그리고 이때 내부 합성 콘크리트에는 Fig. 8에 보이는 압축 및 인장 응력이 작용하므로 이러한 응력상태를 고려해서 내부 합성 콘크리트에 작용하는 압축 및 인장 축력, $P_{c(c)}$ 와 $P_{c(t)}$ 를 산정하면 식 (8)과 같이 계산된다.

$$P_{c(c)} = 2(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_c} r dr d\theta - \int_{\psi_i}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_i} r dr d\theta - \frac{1}{2} r_c \sin \psi_c (r_c \cos \psi_c - r_i \cos \psi_i) \right] = (f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[r_c^2 \left(\frac{\pi}{2} - \psi_c \right) - r_i^2 \left(\frac{\pi}{2} - \psi_i \right) - r_c \sin \psi_c (r_c \cos \psi_c - r_i \cos \psi_i) \right] \quad (8a)$$

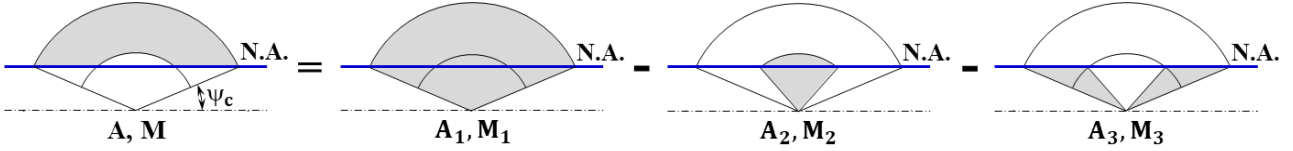


Fig. 7. Calculation of compressive axial force and bending moment on inside composite concrete when neutral axis is on hollow part of HCFT piles

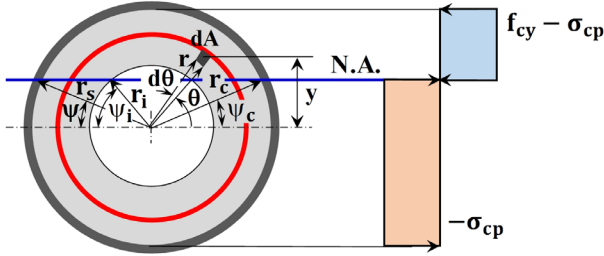


Fig. 8. Stress distribution acting on inside composite concrete

$$\begin{aligned}
 P_{c(t)} &= -2\sigma_{cp} \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c} \int_0^{r_c} r dr d\theta \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} r_c \sin\psi_c (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_i} \int_0^{r_i} r dr d\theta \right] \\
 &= -\sigma_{cp} \left[r_c^2 \left(\psi_c + \frac{\pi}{2} \right) - r_i^2 \left(\psi_i + \frac{\pi}{2} \right) \right. \\
 &\quad \left. + r_c \sin\psi_c (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) \right] \quad (8b)
 \end{aligned}$$

여기서 f_{cy} 는 내부 합성 콘크리트의 설계강도, σ_{cp} 는 내부 합성 콘크리트에 가해진 선형응력, r_c 는 HCFT말뚝을 구성하는 강관의 내부 반경, r_i 는 HCFT말뚝 중공부의 반경이며, ψ_c 과 ψ_i 는 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 각각 r_c 와 r_i 의 함수로 중립축의 위치를 나타내는 각도이다. 따라서 Fig. 8에서 보듯이 ψ_c 과 ψ_i 는 r_s 와 r_c , r_i 의 기하학적인 관계로부터 식 (9)와 같이 ψ 의 함수로 표시할 수 있다.

$$\psi_c = \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_c} \sin\psi \right) \quad (9a)$$

$$\psi_i = \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_i} \sin\psi \right) \quad (9a)$$

그리고 중립축이 말뚝의 중공부 위, 즉 Fig. 3에서 영역 2와 3에 해당하는 $\psi \geq \alpha$ 의 범위에 있을 때 $P_{c(c)}$ 와 $P_{c(t)}$ 는 다음과 같이 계산되고,

$$\begin{aligned}
 P_{c(c)} &= 2(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_c} r dr d\theta - \frac{1}{2} r_c^2 \sin\psi_c \cos\psi_c \right] \\
 &= (f_{cy} - \sigma_{cp}) r_c^2 \left[\left(\frac{\pi}{2} - \psi_c \right) - \frac{1}{2} \sin 2\psi_c \right] \quad (10a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{c(t)} &= -\sigma_{cp} \left[2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c} \int_0^{r_c} r dr d\theta + r_c^2 \sin\psi_c \cos\psi_c \right. \\
 &\quad \left. - \int_0^{2\pi} \int_0^{r_i} r dr d\theta \right] \\
 &= -\sigma_{cp} \left[r_c^2 \left(\psi_c + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{1}{2} r_c^2 \sin 2\psi_c - \pi r_i^2 \right] \quad (10b)
 \end{aligned}$$

말뚝의 중공부 아래, 즉 Fig. 3에서 영역 4와 5에 해당하는 $\psi \leq -\alpha$ 의 범위에 있을 때 $P_{c(c)}$ 와 $P_{c(t)}$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 P_{c(c)} &= 2(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_c} r dr d\theta + \frac{1}{2} r_c^2 |\sin\psi_c \cos\psi_c| \right. \\
 &\quad \left. - \int_0^{2\pi} \int_0^{r_i} r dr d\theta \right] \\
 &= (f_{yc} - \sigma_{pc}) \left[r_c^2 \left(\frac{\pi}{2} - \psi_c \right) + \frac{1}{2} r_c^2 |\sin 2\psi_c| - \pi r_i^2 \right] \quad (11a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{c(t)} &= -\sigma_{cp} \left[2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c} \int_0^{r_c} r dr d\theta - r_c^2 |\sin\psi_c \cos\psi_c| \right] \\
 &= -\sigma_{cp} r_c^2 \left[\left(\psi_c + \frac{\pi}{2} \right) - \frac{1}{2} |\sin 2\psi_c| \right] \quad (11b)
 \end{aligned}$$

2.4 말뚝의 구성요소별 극한휨내력 산정

(1) 강관의 휨내력

한계상태에서 HCFT말뚝이 발휘할 수 있는 압축 및 인장 축력은 모두 말뚝의 중심부에 작용하므로 말뚝의 휨내력은 미소면적에 작용하는 축력에 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 축력이 작용하는 미소면적의 도심까지 거리를 곱함으로써 계산될 수 있다. 이러한 방법으로 말뚝의 휨내력을 계산하면 말뚝의 중심에 작용하는 축력에 의한 휨력을 별도로 고려하지 않아도 되므로 말뚝의

휨내력을 손쉽게 산정할 수 있다. 따라서 한계상태에서 HCFT말뚝을 구성하는 강관에 작용하는 응력분포가 Fig. 5와 같은 점을 고려하면 압축 및 인장축력에 의해 발휘되는 휨내력, $M_{s(c)}$ 와 $M_{s(t)}$ 는 식 (12)와 같이 계산된다.

$$M_{s(c)} = 2 \int_{\psi}^{\frac{\pi}{2}} (f_{sy} - \sigma_{sp})(r_s t_s d\theta) y = 2(f_{sy} - \sigma_{sp}) r_s^2 t_s \cos\psi \quad (12a)$$

$$M_{s(t)} = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi} (-f_{sy} - \sigma_{sp})(r_s t_s d\theta) y = 2(f_{sy} + \sigma_{sp}) r_s^2 t_s \cos\psi \quad (12a)$$

여기서 y 는 말뚝의 중심을 지나는 수평축으로부터 축력이 작용하는 강관의 미소요소에 대한 도심까지 거리로 식 (13)과 같이 표시될 수 있다.

$$y = r_s \sin\theta \quad (13)$$

(2) PC강봉의 휨내력

HCFT말뚝의 중립축이 PC원형관 위, 즉 Fig. 3에서 영역 1, 2, 4에 해당하는 $-\beta \leq \psi \leq \beta$ 의 범위에 위치할 때 한계상태에서 PC강봉에 발휘되는 응력상태는 Fig. 6과 같으며, 이때 발생하는 압축 및 인장 휨내력인 $M_{b(c)}$ 와 $M_{b(t)}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$M_{b(c)} = 2 \int_{\psi_b}^{\frac{\pi}{2}} (f_{by} + \sigma_{bp})(r_b t_b d\theta) y = 2(f_{by} + \sigma_{bp}) r_b^2 t_b \cos\psi_b \quad (14a)$$

$$M_{b(t)} = 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_b} (-f_{by} + \sigma_{bp})(r_b t_b d\theta) y = 2(f_{by} - \sigma_{bp}) r_b^2 t_b \cos\psi_b \quad (14b)$$

그리고 중립축이 PC원형관의 위나 아래, 즉 Fig. 3에서 영역 3에 해당하는 $\beta \leq \psi \leq \pi/2$ 의 범위에 위치하거나 영역 5에 해당하는 $-\pi/2 \leq \psi \leq -\beta$ 의 범위에 위치하면 모든 PC강봉이 인장이나 압축을 받게 되므로 말뚝의 중심을 지나가는 수평축을 기준으로 작용하는 $M_{b(c)}$ 와 $M_{b(t)}$ 는 아래와 같이 모두 0이 된다.

$$M_{b(c)} = M_{b(t)} = 0 \quad (15)$$

(3) 중공형 내부 합성 콘크리트의 휨내력

한계상태에서 HCFT말뚝을 구성하는 내부 합성 콘크

리트에 의한 휨내력은 축력 산정 시와 마찬가지로 중립축이 중공부에 위치할 때와 중공부를 벗어나서 위치할 때로 구분해서 계산하는 것이 바람직하다. 먼저 중립축이 말뚝의 중공부를 지나갈 때, 즉 Fig. 3에서 영역 1에 해당하는 $-\alpha < \psi < \alpha$ 의 범위에 있을 때 내부 합성 콘크리트에 의해 발휘되는 압축 및 인장 휨내력, $M_{c(c)}$ 와 $M_{c(t)}$ 는 Fig. 7과 같이 휨내력 M_1 에서 휨내력 M_2 와 M_3 를 공제함으로써 식 (16)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} M_{c(c)} &= 2(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_c} (r dr d\theta) y - \int_{\psi_i}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_i} (r dr d\theta) y \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{3}(r_c \sin\psi_c)^2 (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) \right] \\ &= \frac{2}{3}(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[r_c^3 \cos\psi_c - r_i^3 \cos\psi_i \right. \\ &\quad \left. - (r_c \sin\psi_c)^2 (r_c \cos\psi_c - r_i \cos\psi_i) \right] \quad (16a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{c(t)} &= -2\sigma_{cp} \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c} \int_0^{r_c} (r dr d\theta) y + \frac{1}{3}(r_c \sin\psi_c)^2 (r_c \cos\psi_c \right. \\ &\quad \left. - r_i \cos\psi_i) - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_i} \int_0^{r_i} (r dr d\theta) y \right] \\ &= \frac{2}{3}\sigma_{cp} \left[r_c^3 \cos\psi_c - r_i^3 \cos\psi_i - (r_c \sin\psi_c)^2 (r_c \cos\psi_c \right. \\ &\quad \left. - r_i \cos\psi_i) \right] \quad (16b) \end{aligned}$$

그리고 중립축이 말뚝의 중공부를 벗어나서 Fig. 3에 보이는 영역 2와 3에 해당하는 $\alpha \leq \psi \leq \pi/2$ 의 범위나 영역 4와 5에 해당하는 $-\pi/2 \leq \psi \leq -\alpha$ 의 범위에 위치할 경우 $M_{c(c)}$ 와 $M_{c(t)}$ 는 식 (17)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} M_{c(c)} &= 2(f_{cy} - \sigma_{cp}) \left[\int_{\psi_c}^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{r_c} (r dr d\theta) y - \frac{1}{3}r_c^3 \sin^2\psi_c \cos\psi_c \right] \\ &= \frac{2}{3}(f_{cy} - \sigma_{cp}) r_c^3 \cos^3\psi_c \quad (17a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{c(t)} &= -2\sigma_{cp} \left[\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_c} \int_0^{r_c} (r dr d\theta) y + \frac{1}{3}r_c^3 \sin^2\psi_c \cos\psi_c \right. \\ &\quad \left. - \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\psi_i} \int_0^{r_i} (r dr d\theta) y \right] = \frac{2}{3}\sigma_{cp} r_c^3 \cos^3\psi_c \quad (17b) \end{aligned}$$

2.5 말뚝의 극한축력과 극한휨내력 산정

한계상태에서 HCFT말뚝의 중립축 위치, ψ 에 따라

말뚝이 발휘할 수 있는 극한축력은 말뚝을 구성하는 모든 요소들이 발휘할 수 있는 극한축력을 합한 값에 축력에 대한 저항계수 ϕ_P 를 곱함으로써 식 (18)과 같이 계산될 수 있다.

$$P = \phi_P (P_{s(c)} + P_{s(t)} + P_{b(c)} + P_{b(t)} + P_{c(c)} + P_{c(t)}) \quad (18)$$

그리고 한계상태에서 HCFT말뚝이 발휘할 수 있는 극한휨내력은 말뚝을 구성하는 모든 요소들이 발휘할 수 있는 극한휨내력을 합한 값에 휨내력에 대한 저항계수 ϕ_M 을 곱함으로써 식 (19)와 같이 계산될 수 있다.

$$M = \phi_M (M_{s(c)} + M_{s(t)} + M_{b(c)} + M_{b(t)} + M_{c(c)} + M_{c(t)}) \quad (19)$$

따라서 식 (18)과 (19)에 HCFT말뚝을 구성하는 재료의 강도특성(f_{sy} 와 f_{by} , f_{cy})과 제원(r_s 와 r_b , r_c , r_i)을 적용하면 중립축의 위치를 정의하는 각도, ψ 에 따라 한계상태에서 HCFT말뚝이 발휘할 수 있는 극한축력 P와 극한휨내력 M을 계산할 수 있다.

도로교설계기준해설(KIBSE, 2015)에서는 비항타말뚝의 경우 축력을 받는 강관말뚝에 대해 한계상태에서 저항계수 ϕ_P 로 0.8을 제시하였고, 휨력을 받는 모든 종류의 말뚝에 대한 저항계수 ϕ_M 로 1.0을 제시하고 있다. 따라서 HCFT말뚝을 구성하는 3가지 요소 중 강관과 PC 강봉의 재질이 강재인 점을 고려해서 식 (18)과 (19)를 이용해서 HCFT말뚝의 극한축력과 극한휨내력을 산정할 때 사용되는 저항계수 ϕ_P 와 ϕ_M 에 대해 각각 0.8과 1.0을 적용하였다.

3. HCFT말뚝의 P-M 상관도 작도

3.1 말뚝 구성요소의 강도특성

HCFT말뚝의 구성요소 중 내부 합성 콘크리트를 감

싸는 강관은 외경이 500mm이고 두께가 6mm이며, 항복강도 f_{sy} 가 275MPa이고 극한강도 f_{su} 가 400MPa인 STP 275 강재로 제작되었다. 구조물기초설계기준해설(KGS 2015)에 따르면 일반적인 조건의 지반에서 강관말뚝은 100년 동안 2mm가 부식되므로 현장에 시공된 강관말뚝의 내력 평가 시 이러한 부식공제를 반영하는 것이 필요하다.

HCFT말뚝에 선행응력을 가할 목적으로 설치한 PC강봉은 항복강도 f_{by} 와 극한강도 f_{bu} 가 각각 1,275MPa과 1,420MPa인 SBPD 1275/1420 강재로 제작(KS D 3505)되고, 직경이 500mm인 HCFT말뚝에는 직경 9.2mm의 PC강봉이 9개 설치된다. 따라서 9개의 PC강봉을 Fig. 2와 같이 단면적이 동일한 PC원형관으로 대체하면 말뚝 중심으로부터 PC원형관 두께의 중간지점까지 거리 r_b 는 210mm이고 PC원형관의 두께 t_s 는 0.44mm가 된다.

또한 콘크리트에 대한 설계강도는 일반적으로 $0.85f_{ck}$ 로 계산되며, 여기서 f_{ck} 는 콘크리트의 28일 압축강도를 의미한다. 그러나 HCFT말뚝의 경우에는 말뚝에 하중이 가해하면 강관이 내부에 합성된 콘크리트의 변형을 구속해서 콘크리트의 압축강도가 커지는 구속효과(confining effect)가 발생하고, 그로 인해 말뚝의 휨, 전단 및 압축내력이 커지는 것으로 보고되었다(Chin et al., 2009; Kang et al., 2011, Paik, 2018). 이러한 구속효과에 의한 HCFT말뚝의 휨내력 증가를 고려하기 위해 WDOT(2012)에서는 강관 내부에 합성된 콘크리트의 설계강도로 $0.95f_{ck}$ 를 사용할 것을 제안하였다. 따라서 기존의 연구결과를 반영하여 HCFT말뚝의 압축력과 휨내력 산정 시 콘크리트의 설계강도로 $0.95f_{ck}$ 를 사용하였고, HCFT말뚝에 사용되는 콘크리트가 고강도임을 고려하여 f_{ck} 에 80MPa을 적용하였다. 그리고 콘크리트의 인장강도는 0으로 처리하였다. 참고로 직경 500mm HCFT말뚝의 경우 말뚝을 구성하는 강관의 반경은 250mm이고 두께가 6mm이며, 내부 합성 중공형 콘크리트의 외부 반경 r_c 와 중공부의 반경 r_i 은 각각 244mm와 170mm이다. Table 1은 직경

Table 1. Strengths and dimensions used in calculation of P-M curve

Components	Strengths		Dimension (mm)	
	Criteria	Value (MPa)	Outside diameter	Thickness
Steel tube	f_y or f_u	275 or 400	500 ¹⁾	6 ¹⁾
PC steel bar	f_y or f_u	1,275 or 1,420	420	0.44
Composite concrete	$0.95f_{ck}$	76	488	74

1) Values not considering corrosion of steel

이 500mm인 HCFT말뚝에 대해 제안식을 이용해서 P-M 상관도의 계산할 때 사용한 HCFT말뚝의 3가지 구성요소별 강도특성과 제원을 정리한 것이다.

3.2 HCFT말뚝의 P-M 상관도 작도

직경이 500mm이고 두께가 6mm인 강관을 사용해서 제작된 HCFT말뚝에 대해 식 (1)과 (2)를 이용해서 말뚝의 중공부와 PC원형관의 크기를 정의하는 각도인 α 와 β 를 계산한 결과 $\alpha = 43.7^\circ$, $\beta = 58.6^\circ$ 로 결정되었다. 그리고 중립축의 위치(또는 각도 ψ)가 Fig. 3에서 영역 1 ($-\alpha \leq \psi \leq \alpha$), 영역 2($\alpha \leq \psi \leq \beta$), 영역 3($\beta \leq \psi \leq \pi/2$), 영역 4($-\beta \leq \psi \leq -\alpha$), 영역 5($-\pi/2 \leq \psi \leq -\beta$)에 있을 때 식 (3)~(17) 중에서 해당 조건에 적합한 P_s , P_b , P_c 와 M_s , M_b , M_c 을 선택해서 식 (18)과 (19)에 적용하면 한계상태에서 중립축의 위치(또는 각도 ψ)에 따른 HCFT말뚝의 극한축력과 극한휨내력이 계산된다. 정리하면 HCFT말뚝의 P-M 상관도는 ‘① 말뚝의 제원과 구성요소의 강도특성 결정 ② 식 (3)~(11)을 이용한 말뚝 구성요소별 극한축력 산정 ③ 식 (12)~(17)을 이용한 말뚝 구성요소별 극한휨내력 산정 ④ 다양한 ψ 에 대해 식 (18)과 (19)를 이용한 HCFT말뚝의 극한축력과 극한휨내력 산정 ⑤ ④단계에서 계산된 극한축력과 극한휨내력을 이용한 P-M 상관도 작도’의 순서로 그려질 수 있다. 그리고 강관말뚝(steel pipe pile, SP)의 경우에는 식 (3)과 (12)를 이용하면 한계상태에서 강관말뚝의 극한축력과 극한휨내력을 구할 수 있다.

Fig. 9는 직경이 500mm이고 두께가 6mm인 강관으로

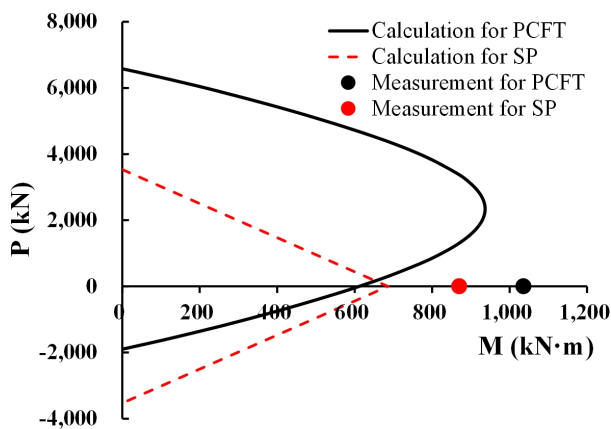


Fig. 9. Comparison of calculated and measured flexural strengths when using f_y for steel tube and PC steel bars of HCFT piles

제작한 HCFT말뚝과 직경이 500mm이고 두께가 12mm인 강관말뚝에 대해 식 (18)과 (19)의 제안식으로부터 얻어진 P-M 상관도와 휨강도시험에서 측정된 시험결과를 함께 나타낸 것이다. 제안식으로부터 계산된 결과와 휨강도시험 결과의 비교를 통해 제안식의 정확도를 평가하였고, P-M 상관도 계산 시 휨강도시험의 시험조건을 반영하기 위해 HCFT말뚝에 사용된 강관과 강관말뚝의 부식에 대한 두께 감소는 고려하지 않았다. 그리고 P-M 상관도 계산 시 사용된 말뚝 구성재료별 강도특성과 제원은 Table 1에 정리하였다. 그림에서 보듯이 강관말뚝은 압축 및 인장에 대한 강도특성이 동일하기 때문에 P-M 상관도가 직선의 형태를 보였고 인장부와 압축부의 P-M상관도가 수평축을 기준으로 대칭을 이루고 있다. 반면 HCFT말뚝은 강관말뚝과 달리 인장에 비해 상대적으로 압축강도가 큰 콘크리트가 강관 내부에 합성된 구조를 갖기 때문에 P-M 상관도가 PHC말뚝과 비슷하게 포물선 형태로 나타났고, 인장보다 압축하중에 더 크게 저항하는 형태를 보였다. 즉 축력이 작용하지 않는 순수 휨하중 상태에서 HCFT말뚝의 최대 휨내력은 612kN·m로 강관말뚝의 최대 휨내력인 686kN·m보다 작았다. 그러나 말뚝에 2,341kN의 압축력이 가해지면 HCFT말뚝의 최대 휨내력은 937kN·m까지 증가하지만 강관말뚝의 최대 휨내력은 231.3kN·m로 감소하는 것으로 나타났다.

4. P-M 상관도 계산법의 정확도 검증

4.1 휨강도시험 결과

직경이 500mm이고 두께가 6mm인 강관을 사용해서 제작한 HCFT말뚝과 직경 500mm, 두께 12mm의 강관말뚝에 대한 휨내력을 측정하기 위해 KS F 4306(2014)에 규정된 방법에 따라 휨강도시험을 수행하였다(Paik, 2018). Fig. 10은 HCFT말뚝과 강관말뚝에 대한 휨강도시험 결과를 말뚝 중앙부에 가해진 휨모멘트와 말뚝 중앙부에서 발생한 변위의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 HCFT말뚝과 두께가 12mm인 강관말뚝(SP)의 극한휨내력은 각각 1,030.7kN·m과 868.1N·m로 측정되어 HCFT말뚝은 강관말뚝 대비 118.7%의 극한휨내력을 발휘하는 것으로 측정되었다. 또한 대변위에서 강관말뚝은 단면이 찌그러지면서 단면계수가 감소하여 휨내력이 급격히 감소하였으나, HCFT말뚝은 내부 합성 콘크

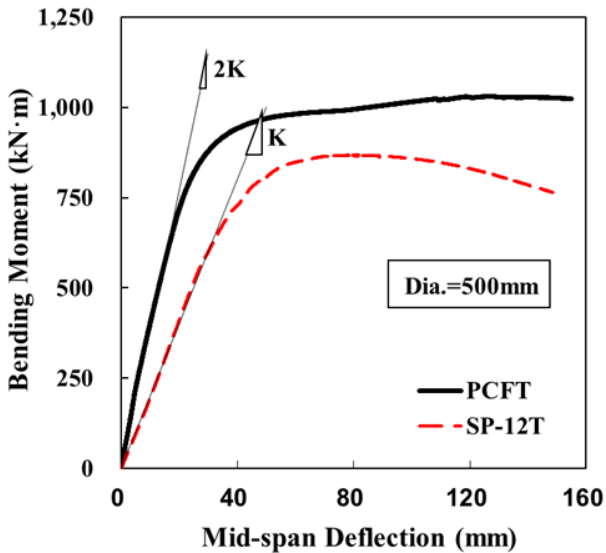


Fig. 10. Flexural test results for HCFT and SP piles with the same diameter

리트가 강관의 변형을 억제하여 휨내력이 유지되거나 오히려 약간 증가하는 변형경화 현상이 발생하는 것으로 나타났다.

4.2 제안식을 이용한 계산치와 측정치의 비교

제안식으로부터 계산된 HCFT말뚝과 강관말뚝에 대한 P-M 상관도를 휨강도시험 결과와 비교한 Fig. 9에서 보듯이 제안식은 압축력이 0인 순수 휨하중 상태에서 강관말뚝이 HCFT말뚝보다 12%의 휨내력을 더 발휘하는 것으로 계산하였으나, 실제 휨강도시험에서는 이와 반대로 HCFT말뚝이 강관말뚝보다 18.7% 큰 휨내력을 발휘하는 것으로 측정되었다. 또한 휨강도시험 결과와 비교할 때 제안식은 강관말뚝의 휨내력을 21.0% 그리고 HCFT말뚝의 휨내력을 41.9%나 과소평가하였다. 이처럼 P-M 상관도를 계산하기 위한 제안식이 강관말뚝보다 HCFT말뚝에 대해 휨내력을 더 과소평가하는 것은 휨내력을 계산할 때 HCFT말뚝을 구성하는 내부 합성 콘크리트의 인장강도가 전혀 고려되지 않은 반면, 강관말뚝은 단면의 찌그러짐에 따른 휨내력 감소가 고려되지 않았기 때문으로 판단된다.

4.3 극한강도를 사용한 P-M 상관도

Zhan et al.(2016)은 중실형의 콘크리트 충전 사각형 강관부재에 대한 휨강도시험을 통해 강관과 내부 합성

콘크리트의 합성효과로 인해 대변위에서 강관의 단면 찌그러짐이 발생하지 않고 동시에 극한휨내력이 유지되거나 변형경화로 인해 다소 증가한다는 결과를 보고하였다. 그리고 이러한 시험결과에 근거해서 한계상태에 놓인 중실형 콘크리트 충전 사각형 강관부재의 극한휨내력을 산정할 때 부재를 구성하는 사각형 강관에 대해 항복응력인 f_y 대신 극한응력인 f_u 를 사용할 것을 제안하였다.

본 연구에서는 Zhan et al.(2016)의 연구결과에 대한 타당성을 검증하기 위해 제안식을 사용해서 HCFT말뚝의 극한휨내력을 산정할 때 HCFT말뚝을 구성하는 강관과 PC강봉에 대한 강도 값으로 f_y 대신 f_u , 즉 각각 400MPa과 1,420MPa을 적용하였다. 그 결과 Fig. 11에서 보듯이 강관과 PC강봉의 강도로 f_y 대신 f_u 를 사용함에 따라 압축력이 0일 때 HCFT말뚝의 극한휨내력이 612kN·m에서 908kN·m로 48.4% 증가하였고, 2,341kN의 압축력이 작용할 때 말뚝이 지지할 수 있는 극한휨내력도 937kN·m에서 1,182kN·m로 26.1% 증가하였다. 또한 HCFT말뚝의 강재에 대해 f_y 를 적용했을 때 제안식은 휨강도시험 결과의 59.4%에 해당하는 극한휨내력을 제공하였으나 f_u 를 적용했을 때에는 휨강도시험 결과의 88.1%에 해당하는 극한휨내력을 제공하였다. 따라서 HCFT말뚝의 경우 Zhan et al.(2016)이 제안한 것과 같이 한계상태에서 휨내력을 산정할 때 강관과 PC강봉에 대해 f_y 가 아닌 f_u 를 강도 값으로 적용하면 제안식은 휨강도시험 결과에 근접한 계산치를 제공하는 것으로 나타났다.

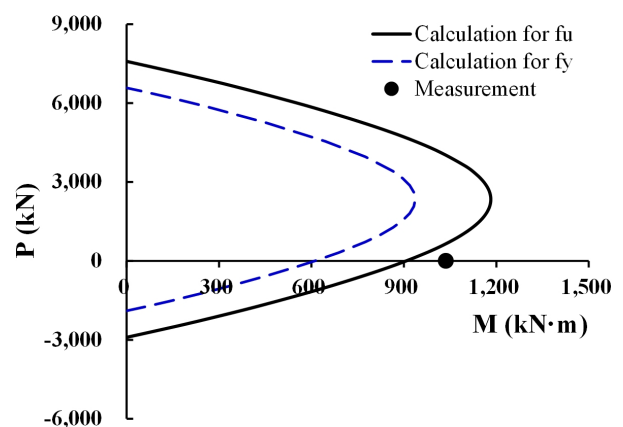


Fig. 11. Comparison of calculated and measured flexural strengths when using f_u instead of f_y for steel tube and PC steel bars of HCFT piles

5. 결 론

본 연구에서는 얇은 두께의 강관 내부에 PHC말뚝을 합성한 HCFT말뚝에 대해 한계상태에서 P-M 상관도를 계산할 수 있는 산정식을 제안하였고, 제안식의 결과를 휨강도시험의 측정치와 비교함으로써 제안식의 정확도를 검증하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 한계상태에서 HCFT말뚝의 P-M 상관도를 작도할 수 있는 산정식을 제안하였고, HCFT말뚝을 구성하는 강관과 PC강봉의 강도로 항복응력인 f_y 를 적용할 경우 제안식은 강관말뚝보다 HCFT말뚝의 극한휨내력을 더 과소평가하였다.
- (2) HCFT말뚝과 강관말뚝에 대한 P-M 상관도를 비교한 결과 인장축력을 받는 조건에서 HCFT말뚝의 극한휨내력은 직경이 동일한 두께 12mm의 강관말뚝에 비해 작지만 압축력을 받는 조건에서 HCFT말뚝의 극한휨내력은 강관말뚝에 비해 상당히 큰 것으로 나타났다.
- (3) 제안식은 휨강도시험에서 측정된 결과와 달리 축력이 0인 순수 휨하중 조건에서 HCFT말뚝보다 동일 직경의 두께가 12mm인 강관말뚝의 휨강도를 더 크게 예측하였으며, 이것은 제안식이 HCFT말뚝에서 콘크리트의 인장강도를 고려하지 못한 반면 강관말뚝에서는 휨하중 작용 시 단면의 찌그러짐에 따른 휨내력 저하가 고려되지 않았기 때문으로 사료된다.
- (4) HCFT말뚝을 구성하는 강관과 PC강봉에 대해 항복강도인 f_y 대신 극한강도인 f_u 를 사용했을 때 제안식은 휨강도시험 측정결과의 88.1%에 해당하는 휨내력을 제공함으로써 제안식의 정확도를 상당히 높일 수 있었다.
- (5) 본 논문에서 제안한 HCFT말뚝의 P-M 상관도를 계산하기 위한 산정식이 실무에 적용되기 위해서는 말뚝에 다양한 크기의 축력이 가해진 상태에서 얻어진 휨강도시험의 결과를 이용해서 제안식의 정확도를 추가로 검증하는 작업이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국토교통과학기술진흥원에서 주관하는 기술사업화지원사업(과제번호 19TBIP- C144438-02-000000)의 지원을 받아 수행한 연구결과로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Bang, J.W., Hyun, J.H., Lee, B.Y., Lee, S.S., and Kim, Y.Y. (2013), "Flexural Strength of PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete, Transverse and Longitudinal Reinforcements", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.1, pp.91-98.
2. Chin, W. J., Kang, J. Y., Choi, E. S., and Lee, J. W. (2009), "A Study on the Flexural behavior of Concrete Filled Steel Tube Girder in Parametrically Varied Filling and Composition", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.2A, pp.109-118.
3. Hyun, J.W., 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 Korean Society of Civil Engineers*, Vol.24, No.1, pp.71-78.
4. Kang, H. K., Lee, C. H., and Rha, C. S. (2011), "Flexural Strength on Concrete-filled Steel Tubular Members Subjected to Pure Bending Moment", *Journal of Architecture Institute of Korea*, Vol.27, No.4, pp.11-21.
5. KIBSE (2015), *Korea highway bridge design code (Limit state design) commentary*, Korean Institute of Bridge and Structural Engineers.
6. KS D 3505 (2019), *Steel bars for prestressed concrete*, 35p.
7. KS F 4306 (2014), *Pretensioned spun high strength concrete piles*, 53p.
8. KGS (2015), *Structural foundation design code commentary*, Korean Geotechnical Society, 894p.
9. KSSC (2014), *Steel structure design code by load and resistance factor design*, Korean Society of Steel Construction, 463p.
10. Paik, K. H. (2018), "Strength Characteristics of Hollow Prestressed Concrete Filled Steel Tube Piles for Hybrid Composite Piles", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.1, pp. 37-46.
11. Piletech, Doosan Heavy Industries & Const., Hanmac Eng., and Korea Eng. Consultants (2008), *Design and construction methods of bored hybrid composite pile that joins steel pipe and PHC piles using coupler*, New Excellent Technology No. 556.
12. WSDOT (2012), *Structural design recommendations of CFT and RCFT for bridge foundation*, Washington State DOT Design Memorandum, 30p.
13. Zhan, Y., Zhao, R., Ma, Z. J., and Song, R. (2016), "Behavior of Prestressed Concrete-filled Steel Tube (CFST) Beam", *Engineering Structures*, Vol.122, pp.144-155.

Received : October 21st, 2019

Revised : November 17th, 2019

Accepted : November 18th, 2019