

프리스트레스를 받는 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝의 휨거동 해석

정흥진¹, 백규호^{2*}

Analysis on Flexural Behavior of Hollow Prestressed Concrete Filled Steel Tube Piles

Heung-Jin Chung¹, Kyu-Ho Paik^{2*}

Abstract: A nonlinear finite element analysis was conducted in order to examine the moment capacity and flexural behaviour of hollow prestressed concrete filled steel tube(HCFT) piles which compose hollow PHC piles inside thin wall steel tubes. The parameters investigated in this study were various contact conditions between concrete and steel tube, thickness of concrete tube and various PC strands. A simple method is proposed to determine the ultimate flexural strength based on plastic stress distribution method. In order to verify the proposed method, calculated moment capacity of various HCFT piles are compared with the experiment and numerical analysis results.

Keywords: Hollow concrete filled steel tube pile, Prestressed concrete pile, Ultimate moment capacity

1. 서 론

휨모멘트를 받는 강관에 콘크리트를 충전하여 합성부재를 구성하는 경우 일반적으로 강관에 의한 인장부 보강효과에 더하여 강관구속효과에 의한 콘크리트의 압축강도증가, 내부 충전 콘크리트로 인한 강관의 국부좌굴 방지효과 등으로 휨강도가 크게 증가한다. 지진하중을 받는 말뚝과 같이 수평하중에 대한 저항력과 연성이 필요한 경우, 상대적으로 휨내력이 작은 콘크리트말뚝이나 가격이 비싼 강관말뚝을 대체할 수 있는 다양한 형태의 강관-콘크리트 합성말뚝이 개발되고 있다.

콘크리트 충전 강관(CFT, Concrete Filled steel Tube)구조는 강관 내부에 콘크리트를 충전한 것으로, 강관이 내부에 충전된 콘크리트의 변형을 구속해서 콘크리트의 압축강도가 커지고 강도가 커진 콘크리트는 다시 강관의 형상변화나 압축영역에서 발생하는 국부좌굴을 지연 또는 억제함으로써 강관이나 콘크리트 단일구조에 비해 휨, 전단 및 압축에 대한 저항 성능이 우수하고 뛰어난 연성(ductility)을 갖는 것으로 알려

져 있다(Chin et al., 2009; Kang et al., 2011).

CFT부재의 휨거동에 대해 많은 연구가 진행되었는데, Chin et al.(2009)은 CFT거더의 휨시험을 통해 강관에 충전되는 콘크리트의 강도가 커지고 내부에 프리스트레스를 도입할수록 그리고 강관 내벽에 강관과 콘크리트 사이에 미끄러짐을 방지하는 전단연결재를 설치할수록 CFT거더의 휨내력이 증가한다는 시험결과를 보고하였다. Elchalakani et al.(2004)은 직경 100 mm의 원형 CFT보에 대한 휨시험을 통해 CFT보는 속이 빈 강관보에 비해 3~37%의 휨내력 향상이 있었으며, 강재와 충전 콘크리트 사이의 미끄러짐은 CFT보의 휨내력에 영향을 주지 않을 정도로 매우 작다고 보고하였다. 한편, 콘크리트 충전 강관이 휨을 받을 때, 인장부에서 발생하는 콘크리트의 균열은 강관의 구속효과에 의한 휨내력 증대효과를 감소시키는 역할을 한다. 이를 극복하기 위해 Zhan et al.(2016)은 콘크리트충전 강관에 프리스트레스를 도입하여 강도, 강성, 연성 등의 성능을 향상시킬 수 있다고 보고하였다.

최근 들어 Pagoulatou et al.(2014)은 구조용 기둥부재에 콘크리트 충전 강관을 개선한 콘크리트 충전 겹강관(CFDST, Concrete-Filled Double skin Steel Tube)을 개발하였고, 기존의 합성부재에 비해 강성과 효율면에서 우수한 것으로 보고하였다. 그리고 기둥의 바깥지름, 안지름, 콘크리트와 강관의 압축강도 및 항복강도에 따른 거동을 분석하고 겹강관 및 홑강관의 성능을 비교함으로써 중앙이 비어있는 겹강관이 중앙을 콘크리트로 채운 홑강관보다 작은 압축강도를 보였으나,

¹정회원, 전주대학교 토목환경공학과 교수

²정회원, 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: pkh@cku.ac.kr

Dept. of Civil Eng., Catholic Kwandong University, Gangwon-do, 25601, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

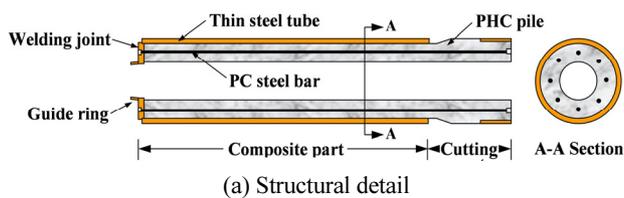
무게는 덜 나가는 것으로 보고하였다. 또한, Pagoulatou et al.(2014)은 해석결과에 근거해서 겹강관에 대한 새로운 설계 식을 제안하였다.

현재 연구/개발되고 있는 대부분의 CFT부재는 강관 내부 전면적에 콘크리트가 충전된 중실형으로, 이런 형태의 부재는 휨하중을 받았을 때 합성효과에 의해 중립축이 압축부로 이동하는 것을 고려하면 휨하중에 대한 저항효율은 떨어진다고 할 수 있다. 본 연구에서는 강관 내부에 콘크리트가 중공형으로 충전되고 콘크리트에 프리스트레스를 도입한 중공형 콘크리트 충전 강관(HCFT, Hollow prestressed Concrete Filled steel Tube)말뚝에 대한 수치해석 모델을 작성하고 다양한 수치실험을 통해 휨하중에 대한 거동을 규명하였다.

2. HCFT말뚝의 구조 및 휨강도 시험

2.1 HCFT말뚝의 구조

프리스트레스를 도입한 중공형 콘크리트 충전 강관(HCFT) 말뚝은 두께가 5~6 mm인 얇은 강관 내부에 프리스트레스를 도입한 PC강봉을 설치하고 콘크리트를 타설한 후 원심성형을 통해 강관말뚝 내에 프리스트레스를 도입한 중공형의 PHC말뚝을 합성한 것으로, Fig. 1과 같이 강관 내부에 PHC말뚝이 결합된 합성부와 강관 없이 PHC말뚝으로만 구성되고 0.5~1.0 m의 길이를 갖는 절단부로 구성된다. 합성부는 하부 PHC말뚝의 두부에 연결되어 수평하중이나 휨하중을 지지하는 역할을 하고, 절단부는 지표면 상부에 노출되어 말뚝의 향타 및 경타에 사용되고 말뚝 시공이 완료되면 구조물 기초와 말뚝의 연결을 위해 절단 및 제거되는 부분이다. 특히 절단부



(a) Structural detail



(b) HCFT piles

Fig. 1 Structural detail and picture of HCFT piles

에는 PHC말뚝 외부에 강관을 피복하지 않음으로써 재료비를 절감하고 동시에 구조물 기초와의 연결을 위한 두부보강 시 말뚝 두부의 절단작업이 용이하도록 하였다.

특히 합성부는 두께가 12 mm인 강관말뚝에 비해 강재 사용량을 50% 이하로 줄여서 가격이 저렴하고, 강관의 단면적 감소에 따른 강도 저하를 강관 내부에 충전된 콘크리트로 보강하는 구조를 갖고 있다. 또한 PHC말뚝을 감싸는 얇은 두께의 강관이 PHC말뚝을 구성하는 콘크리트의 변형을 억제해서 콘크리트의 강도를 향상시키고 동시에 강도가 커진 콘크리트는 강관의 형상 변형과 국부좌굴을 억제함으로써 기존 PHC말뚝 및 강관말뚝에 비해서 휨내력이 향상되는 특징을 갖고 있다(Chin et al., 2009).

2.2 휨강도 시험방법 및 결과

말뚝에 대한 휨강도시험은 KSF 4306(2003)에 규정된 방법에 준해서 수행하였다. Fig. 2와 같이 말뚝 양쪽 단부로부터 안쪽으로 1 m 떨어진 곳에 지지점을 설치하고, 말뚝 중앙에서 양쪽으로 0.5 m 떨어진 두 지점에 각각 P/2의 압축하중을 작용하는 방법으로 진행된다.

본 연구에서는 HCFT말뚝과 그 구성요소인 PHC말뚝 및 강관말뚝, 그리고 두께가 12 mm인 강관말뚝에 대한 휨강도시험을 수행하였고, 시험 결과를 이용하여 수치해석 모델의 정확도를 검증하였다. Table 1은 휨강도시험이 진행된 말뚝 부재 중 수치해석에 필요한 사항등을 정리한 것이고, Fig. 3은 HCFT말뚝의 단면구성을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 직경이 450 mm와 500 mm인 HCFT말뚝의 경우 강관 내벽에 전단연결재를 설치한 것과 설치하지 않은 것의 휨

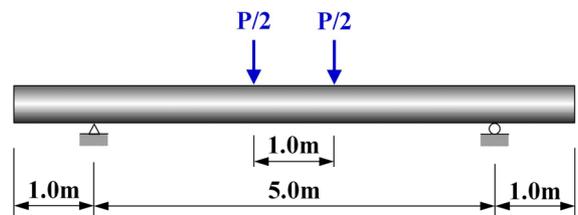


Fig. 2 Test methods for measuring flexural strength

Table 1 Summary of test program(part)

Test indicator	Diameter (mm)	Pile components	Material property
HCFT-D500	500	Steel pipe(6T) + PHC	SKK400 + F_{ck} 80 MPa
ST-D500-6T	500	Steel pipe(6T)	SKK400
PHC-D500	500	PHC	F_{ck} 80 MPa
ST-D500-12T	500	Steel pipe(12T)	SKK400

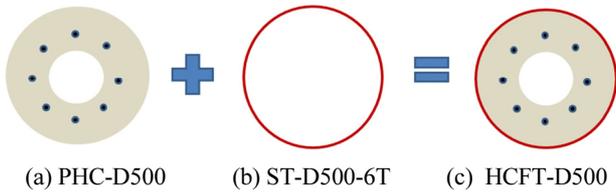


Fig. 3 Structural component of HCFT pile

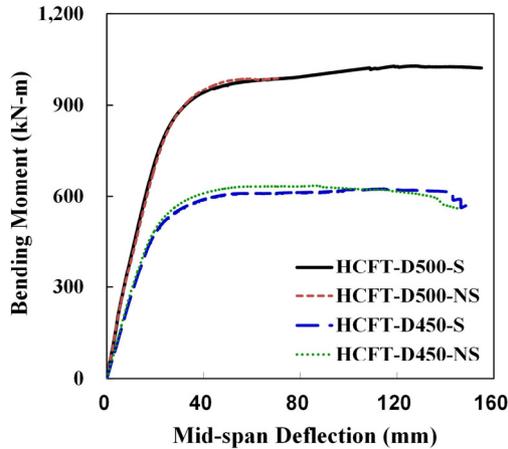


Fig. 4 Flexural test results of HCFT piles with and without shear key

강도시험 결과(휨하중-중앙부 처짐량 곡선)를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 휨하중 재하 초기단계인 탄성구간은 물론 항복점 이후의 극한구간에서도 강관 내벽에 전단연결재를 설치한 말뚝과 설치하지 않은 말뚝의 휨거동은 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한 휨강도시험이 종료될 때 HCFT말뚝의 합성부와 절단부의 경계에서 강관과 강관 내부에 합성된 PHC말뚝간에 미끄러짐 발생 여부를 육안으로 확인한 결과 강관 내부에 전단연결재를 설치한 말뚝과 설치하지 않은 말뚝 모두 합성부에서 강관과 PHC말뚝 사이에서 미끄러짐 현상이 발생하지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 원형 CFT부재에 휨하중 작용 시 강관과 내부 충전 콘크리트 사이에 미끄러짐 현상이 발생한다는 Chin et al.(2009)의 시험결과와 상반되는 것으로, Chin et al.(2009)이 사용한 CFT부재는 강관 내부에 중력식으로 콘크리트 타설해서 강관과 충전 콘크리트 간에 부착력이 크지 않아 그 경계면에서 미끄러짐 현상이 발생했지만 HCFT말뚝은 강관에 콘크리트를 충전한 후 원심성형을 함으로써 강관과 충전 콘크리트 간에 부착력이 매우 커서 그 경계면에서 미끄러짐이 발생하지 않았을 것으로 추정된다.

Fig. 5 및 Table 2는 HCFT말뚝과 HCFT말뚝을 구성하는 강관 및 PHC말뚝에 대한 휨하중-중앙부 처짐량 곡선과 시험결과에서 결정된 극한휨강도를 정리한 것이다. 직경 500 mm HCFT말뚝의 극한휨강도는 990.5~1030.7 kN·m로 HCFT말

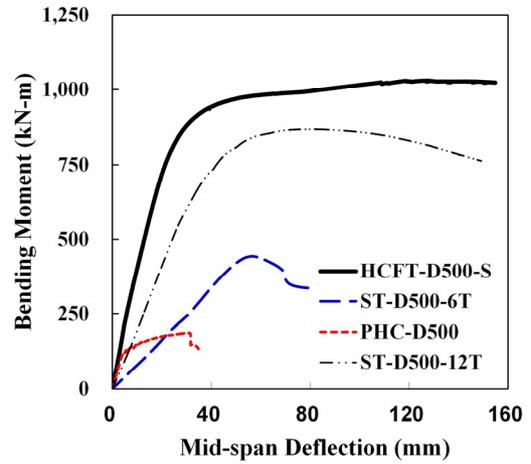


Fig. 5 Flexural test results of HCFT pile and its component parts

Table 2 Results of flexural tests

Test indicator	Ultimate flexural strength(kN·m)	
	D450	D500
HCFT-D000-S	629.1	1030.7
HCFT-D000-NS	640.0	990.5
ST-D000-6T	-	444.5
PHC-D000	-	191.7
ST-D000-12T	-	870.0

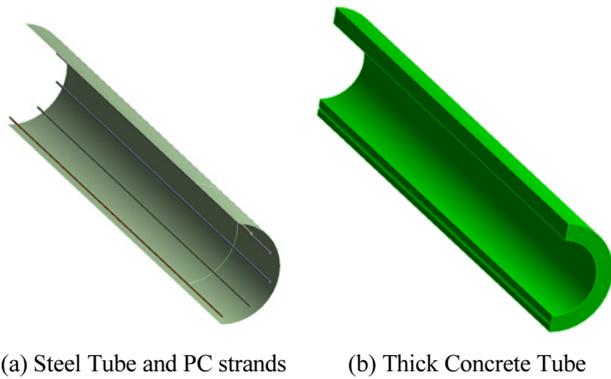
뚝을 구성하는 강관과 내부 합성 PHC말뚝 각각의 극한휨강도를 단순 합산한 것(636.2 kN·m) 보다 큰 것으로 나타났다 (Table 2 참조). 이는 강관의 인장저항에 따라 중립축의 압축부측으로 이동이 제한되어 콘크리트의 압축면적이 증가했고 여기에 강관자체가 좌굴이 제한되어 휨저항능력이 커지고 강관의 콘크리트 구속에 의한 콘크리트의 압축강도가 증가되었기 때문으로 판단된다.

3. HCFT말뚝의 수치해석 모델 및 거동 분석

3.1 유한요소해석 모델

본 논문에서는 HCFT말뚝의 거동을 분석하기 위해 비선형 유한요소해석 모델을 작성하였고 모델의 적정성을 검증하기 위해 실험 시험결과와 비교하였다. HCFT말뚝은 PHC말뚝과 강관의 합성구조로 되어있어 Fig. 6과 같이 강관부, PC강봉부, 중공형 콘크리트부로 나누어 모델링 하였다.

강관은 SKK400강재를 사용하여 PC강봉과 함께 탄소성 모델을 적용하였고, 중공형 콘크리트는 압축강도 80 MPa, 탄성계수 $4700\sqrt{f'_c}$ (MPa)를 갖는 William et al. (1974)의 콘크리



(a) Steel Tube and PC strands (b) Thick Concrete Tube

Fig. 6 Parts of numerical model of HCFT pile(a quarter model)

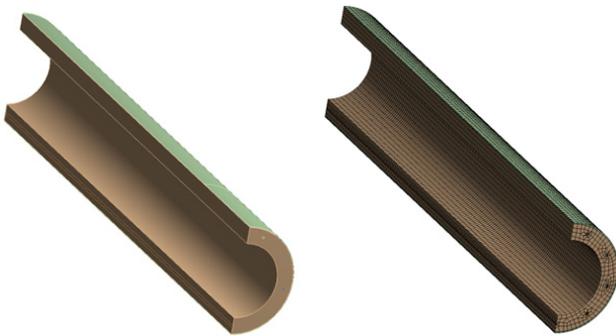


Fig. 7 HCFT pile model and Finite Element Mesh(a quarter model)

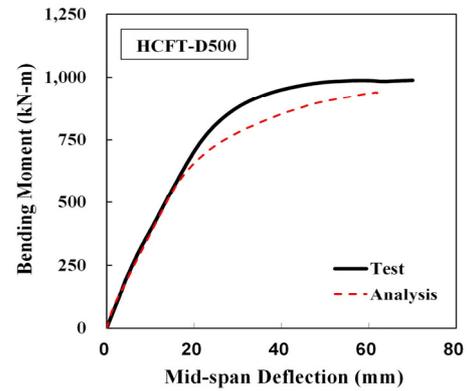
트 파괴규준모델을 적용하였다. 강관 내부표면과 중공형 콘크리트의 외부표면의 접촉부는 완전부착 및 마찰접촉 조건을 사용하여 모델링하였고 PC강봉과 콘크리트는 완전부착으로 가정하였다.

휨해석을 위해 대칭을 고려해서 경계조건을 포함하는 1/4 모델로 구성하였으며, 콘크리트에는 3방향 인장 및 압축파괴를 고려할 수 있는 콘크리트용 입체요소를 사용하였고, 강관과 PC강봉에는 각각 쉘요소와 일반 입체요소를 적용하였다 (Fig. 7참조).

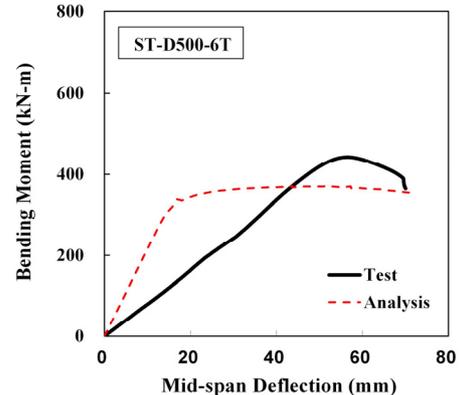
3.2 시험결과와 비교

해석모델의 적정성을 검증하기 위해 Table 2와 같이 직경이 500 mm인 HCFT말뚝과 이 말뚝을 구성하는 PHC말뚝, 강관말뚝을 각각 해석하였고, 해석결과를 시험결과와 각각 비교하였다. HCFT말뚝의 경우 해석결과가 실제 거동과 유사한 해석결과를 보이고 있으며, 극한휨강도는 시험결과 990.5~1030.7 MPa에 대하여 해석결과 965.2 MPa로 평가하고 있다(Fig. 8 참조).

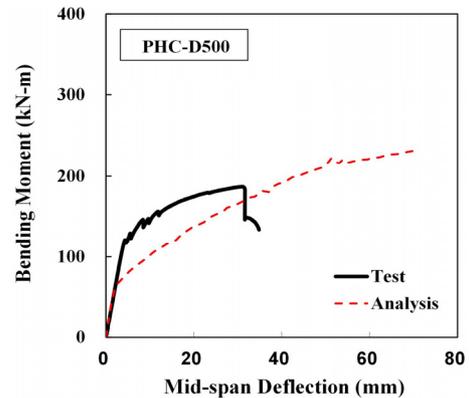
그러나 각 구성요소에 대한 개별해석에서는 초기거동에서 차이를 보이는데 강관의 경우 실제 휨시험에서 발생한 원형 단면의 찌그러짐 현상을 수치해석의 변위제어조건에서 반영하지 못한 결과인 것으로 분석된다. 또한 PHC말뚝의 경우에



(a) HCFT pile



(b) Steel tube



(c) PHC pile

Fig. 8 Flexural test and numerical analysis results of HCFT piles and Its component parts

는 초기 휨하중에 의한 콘크리트 인장강도가 수치해석에서 실제보다 작게 고려되어 초기 거동에 차이를 보이는 것으로 판단된다. 반면 각 구성요소가 합성된 경우에는 PHC말뚝에 의한 강관말뚝의 단면 찌그러짐 억제효과와 좌굴방지 등의 합성효과가 반영되어 해석결과가 시험결과에 근접한 것으로 보이며, 이를 통해 HCFT말뚝에 대한 해석모델은 적정한 것으로 판단된다.

3.3 강관-콘크리트 접촉 조건에 따른 거동분석

HCFT말뚝은 일반적인 CFT 구조가 갖는 구조적 장점을 가지고 있으므로 수치해석 모델에서 강관과 콘크리트간의 부착 거동의 반영방법에 따라 거동의 차이가 있을 수 있다. 본 절에서는 HCFT말뚝의 수치해석 모델에서 접촉조건을 달리하면서 해석을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 접촉조건은 두 재료가 완전히 부착(Bonded)된 경우, 미끄러지지 않지만 분리 허용(Rough)하는 경우, 마찰이 있는/없는 미끄러짐을 허용(Frictional/Frictionless)하는 경우의 4가지로 나누어 해석하였다. 특히 마찰이 있는 경우의 마찰계수는 Baltay et al.(1990)이 제시한 0.47을 적용하였다(Table 3 참조).

Fig. 9는 HCFT말뚝을 구성하는 강관과 충전 콘크리트 사이에 적용한 경계조건에 따른 해석결과와 시험결과를 비교한 것이다. 미끄러짐을 허용하지 않는 경우에는 경계조건과 무관하게 해석결과가 거의 동일하였고, 이러한 해석결과는 실제 시험에서 관찰된 결과에 매우 근접한 것으로 나타났다. 이런 현상은 원심성형방식으로 제작되고 고강도 콘크리트를 사용하는 HCFT말뚝의 특성상 콘크리트와 강관의 접촉면에 작용하는 부착강도가 두 재료사이에 작용하는 전단응력보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 HCTF말뚝에 대한 해석 모델에서는 완전접촉이나 미끄러짐을 허용하지 않는 접촉조건을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 마찰 없는 접촉조건으로 해석한 경우는 실제 시험에서 관찰되지 않는 강관의 국부적 좌굴과 단부에서 두 재료간의 단차가 발생하여 실

Table 3 Contact conditions

Contact Condition	Gap open/close	Sliding
Bonded	No	No
Rough	Yes	No
Frictional	Yes	Yes(with friction, 0.47)
Frictionless	Yes	Yes(without friction)

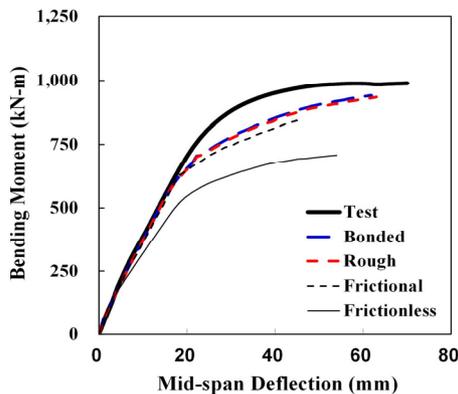


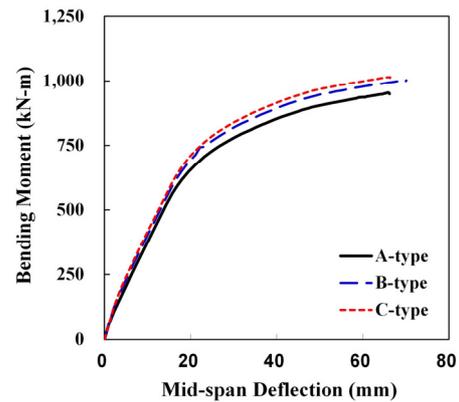
Fig. 9 Flexural analysis results of HCFT piles with different contact condition

제 거동과는 차이를 보였다.

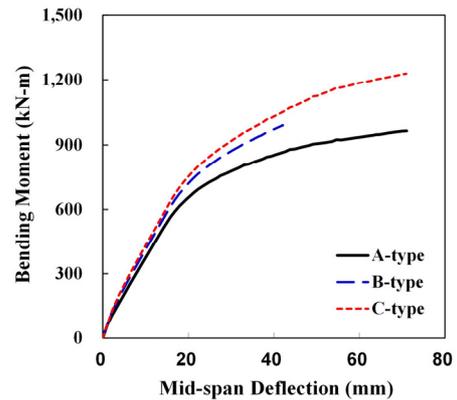
3.4 PC 강봉의 배치에 따른 거동 분석

PHC말뚝은 PC강봉으로 보강하는 구조로 PC강봉에 의한 유효프리스트레스의 크기에 따라 각각 A-type(3.92 MPa), B-type(7.85 MPa), C-type(9.81 MPa)으로 나누어지며 이에 따라 휨강도도 달라진다. 본 절에서는 프리스트레스의 크기가 HCFT말뚝의 휨강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 각 형식 별로 동일한 PC강봉제원에 유효프리스트레스를 달리한 경우와, 유효프리스트레스에 따라 단면적이 증가된 PC강봉을 추가로 고려한 경우에 대한 해석을 수행하였다. PC강봉의 단면적은 A-type에 비해서 B-type은 2배, C-type은 2.5배 증가시킨 것으로 하였다. 여기서 유효프리스트레스는 하중재하전에 콘크리트의 단면에 균일한 압력을 가해 고려하였다.

유효프리스트레스만을 증가시킨 경우에는 유효프리스트레스의 증가에도 불구하고 휨강도의 증가에 미치는 영향을 상대적으로 작았다(Fig. 10(a) 참조). 반면, PC강봉의 제원을 반영한 경우에는 인장부 PC강봉의 역할에 따라 휨강도가 크게 증가되는 것을 볼 수 있다(Fig. 10(b) 참조). 다만 B-type의



(a) Numerical analysis results with different effective stresses



(b) Numerical analysis results with different effective stresses and PC bars

Fig. 10 Flexural analysis results of HCFT piles with different prestress

경우, 극한상태까지 해석이 수행되지 않는 결과를 보이고 있어 수치해석상의 불안정 때문인 것으로 판단되며 추가적인 검증이 필요하다.

3.5 콘크리트 두께에 따른 거동 분석

본 절에서는 HCFT말뚝의 구성요소인 PHC말뚝의 콘크리트 두께에 따른 거동을 분석하기 위해 일반적으로 사용되는 두께인 80 mm와 완전히 채운 경우(250 mm), 및 그 중간두께인 경우(160 mm)로 나누어 해석을 수행하였다.

콘크리트 두께에 따른 휨강도의 증가는 상대적으로 작았는데, 이는 HCFT말뚝의 특성상 휨거동시 중립축이 압축측으로 이동하게 되고 이에 따라 두께효과가 반감되기 때문인 것으로 분석된다. PC강봉의 효과가 작은 경우에 중립축의 이동이 커지므로 이러한 현상은 더 두드러지게 나타날 것으로 판단된다(Fig. 11 참조).

4. HCFT말뚝의 휨강도 산정

본 연구에서는 중공형 콘크리트 충전 강관(HCFT)말뚝의 휨강도를 추정하기 위해 AISC(2009)에서 제시하는 소성응력

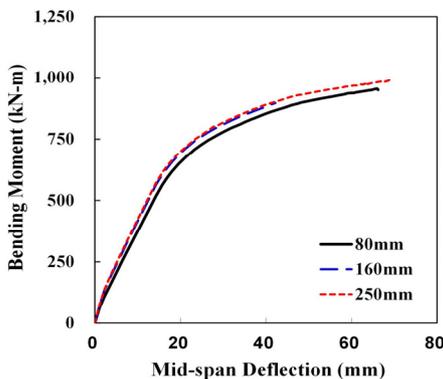


Fig. 11 Flexural analysis results of HCFT piles with different concrete thickness

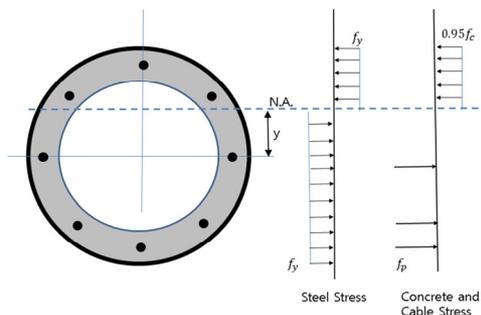


Fig. 12 Basic assumptions for plastic stress distribution method

분배법(Plastic Stress Distribution Method)을 적용하였다(Fig. 12 참조).

일반 CFT 또는 철근이나 PC강봉으로 보강된 CFT에 적용할 수 있는 휨강도 산정식들은 있지만 중앙이 비어 있는 경우는 이를 고려한 새로운 산정식이 필요하다. 본 장에서는 강관, 일부 충전콘크리트, PC강봉을 소성상태로 가정하여 축력을 산정하였고 중립축은 다음과 같이 인장부와 압축부의 평형조건으로 결정하였다.

$$C_1 + C_2 = T_1 + T_2 \quad (1)$$

여기서 C_1 은 압축부 강관의 힘, C_2 는 일부 충전된 압축부 콘크리트의 힘, T_1 은 인장부 강관의 힘, T_2 는 인장부 PC강봉의 인장력을 각각 나타내며 극한상태를 가정한 경우이므로 강봉에 의한 프리스트레스효과는 생략하였다.

압축부 강관의 힘 및 인장부 강관의 힘은 각각 다음식과 같이 계산할 수 있다(Fig. 13 참조).

$$C_1 = t r_{co} f_y (\pi - 2\theta_{co}) \quad (2)$$

$$T_1 = t r_{co} f_y (\pi + 2\theta_{co}) \quad (3)$$

여기서 f_y 는 강관의 항복응력이다. 일부 충전된 압축부 콘크리트의 힘, C_2 는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$C_2 = \frac{0.95 f'_c c_{co}}{2} [(\pi - 2\theta_{co}) r_{co}^2 - 2 y c_{co}] - \frac{0.95 f'_c c_{ch}}{2} [(\pi - 2\theta_{ch}) r_{ch}^2 - 2 y c_{ch}] \quad (4)$$

여기서 f'_c 는 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. PC강봉의 인장력을 산정하기 위해 강봉을 강봉의 위치에 환산 두께 t_b 로 연속된 띠모양으로 구성된 튜브로 가정하였고 다음 식으로 산정할 수 있다(Fig. 14 참조).

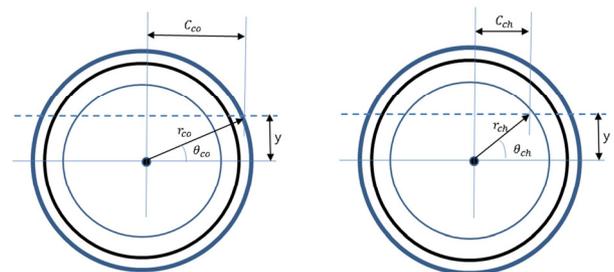


Fig. 13 Geometry of HCFT pile section for concrete

$$T_2 = t_b r_b f_p (\pi + 2\theta_b) \quad (5)$$

여기서 f_p 는 PC강봉의 극한강도이고 환산두께 t_b 는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$t_b = \frac{n A_{ps}}{2\pi r_b} \quad (6)$$

여기서, n 은 PC강봉의 개수, A_{ps} 는 강봉의 단면적이다.

한편, 중공형 콘크리트 충전 강관(HCFT)말뚝의 휨강도는 각 구조요소별로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (7)$$

여기서, 압축부 콘크리트의 모멘트, M_1 , 강관의 모멘트 M_2 , PC강봉의 모멘트 M_3 는 각각 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_1 = 0.95 f'_c c_{co} \left[(r_{co}^2 - y^2) - \frac{c_{co}^2}{3} \right] - 0.95 f'_c c_{ch} \left[(r_{ch}^2 - y^2) - \frac{c_{ch}^2}{3} \right] \quad (8)$$

$$M_2 = 4 t r_{co} f_y c_{co} \quad (9)$$

$$M_3 = 2 t_b r_b f_p c_b \quad (10)$$

Table 4에서는 3.4절에서 사용한 3가지 형식의 단면에 대하여, 위에서 유도한 HCFT 말뚝의 휨강도 산정식을 사용하여

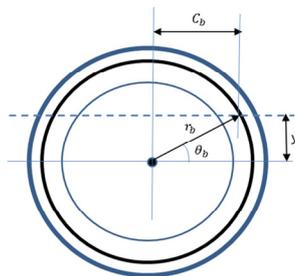


Fig. 14 Geometry of HCFT pile section for PC strands

Table 4 Results of calculated flexural strength

Type	Effective prestress(MPa)	y (mm)	Flexural strength(kN-m)		
			Equation	Analysis	Test
A	3.92	158.0	951.2	965.2	990.5
B	7.85	141.5	1083.5	988.7	-
C	9.81	133.0	1146.6	1244.4	-

중립축의 위치와 휨강도의 변화를 정리하였다.

시험결과가 있는 A-type의 경우 시험결과 및 해석결과보다 산정식이 작게 평가되었다. 중립축의 경우 PC강봉이 약할수록 압축축으로 이동하는 것을 알 수 있다. 해석결과 및 시험결과와 비교해 보면 HCFT 휨강도 산정식의 적용이 가능할 것으로 판단된다. 다만 B-type의 경우에 대한 해석결과는 3-4절에서 언급한 바와 같이 해석상의 불안정이 결과에 영향을 미친 것으로 판단되며 추가적인 검증이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 중공형의 PHC말뚝과 강관말뚝을 합성한 중공형 콘크리트 충전 강관(HCFT)말뚝의 거동분석을 위한 수치해석 모델을 개발하였고 휨강도시험에 적용하여 모델의 타당성을 검증하였다. 다양한 해석조건별로 거동을 분석하여 합성효과를 규명하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) HCFT말뚝의 거동을 분석하기 위해 비선형 유한요소해석 모델을 작성하였고 모델의 적정성을 파악하기 위해 실험 시험결과와 비교하였다. HCFT를 구성하는 PHC 말뚝 및 강관말뚝을 각각 해석하여 합성작용에 의한 휨강도 증가를 확인하였다.
- 2) HCFT말뚝을 구성하는 PHC말뚝과 강관말뚝의 접촉면에 다양한 접촉조건을 적용하여 수치해석을 수행하였고 미끄러짐을 허용하지 않는 접촉조건이 실험시험의 결과를 반영하는 것으로 나타났다. 이는 원심성형으로 제작되는 HCFT말뚝의 특성상 접촉면의 부착강도가 강해서 특별한 전단연결재가 없어도 미끄러짐이 발생하지 않기 때문이라고 판단된다.
- 3) 해석모델을 활용하여 수치해석을 한 결과, HCFT말뚝에 적용되는 PC강봉에 의한 프리스트레스는 휨강도 증가에 크게 기여하지 못하는 것으로 나타났으며, 이는 프리스트레스에 의한 콘크리트의 초기 인장균열을 막아주는 역할만을 하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 PC강봉 자체의 인장저항능력 때문에 극한휨강도를 일정부분 증가시키는 것으로 나타났다.
- 4) 콘크리트 두께에 따른 휨강도의 증가는 상대적으로 작았는데, 이는 HCFT말뚝의 특성상 휨거동시 중립축이 압축축으로 이동하게 되고 이에 따라 두께효과가 반감되기 때문인 것으로 분석된다. PC강봉의 효과가 작은 경우에 중립축의 이동이 커지므로 이러한 현상은 더 두드러지게 나타날 것으로 판단된다.
- 5) AISC(2009)에서 제시하는 소성응력분배법(Plastic Stress Distribution Method)을 적용하여 HCFT말뚝의 휨강도 산

정식을 제안하였다. 제안된 HCFT말뚝 휨강도 산정식을 이용하여 다양한 PC강봉 조건에 따른 중립축 및 극한휨강도를 계산하였고 이를 시험결과 및 수치해석결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

본 연구의 결과는 향후 다양한 제원의 HCFT말뚝의 최적 설계 및 거동분석에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 해석모델과 휨강도 산정식의 검증을 위해서는 다양한 조건의 시험 결과가 필요하므로 다수의 추가시험이 필요하며 접촉면의 부착강도를 자세히 모델링할 수 있는 해석모델 및 강관의 구속효과를 고려하는 휨강도산정식이 추가적으로 필요하다.

References

American Institute of Steel Construction (2005), Specification for structural steel buildings, AISC, Chicago. IL.

Baltay, P., and Gjelsvik, A. (1990), Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress, *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 2(1), 46-49.

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*, 29(2A), 109-118.

Elchalakani, M., Zhao, X. L., and Grzebieta, R. (2004), Concrete - filled Steel Circular Tubes Subjected to Constant Amplitude Cyclic Pure Bending, *Engineering Structures*, 26, 2125-2135.

Kang, H. K., Lee, C. H., and Rha, C. S. (2011), Flexural Strength of Concrete-filled Steel Tubular Members Subjected to Pure Bending Moment, *Journal of Architectural Institute of Korea*, 27(4), 11-21.

KS F 4306 (2003), Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles, 53p.

Pagoulatou, M., Sheehan, T., Dai, X. H., and Lam, D. (2014), Finite Element Analysis on the Capacity of Circular Concrete-filled Double-skin Steel Tubular (CFDST) Stub Columns, *Engineering Structures*, 72, 102-112.

Willam, K. J. and Warnke, E. P. (1974), Constitutive Model for Triaxial Behaviour of Concrete, *Seminar on Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses*, International Association of Bridge and Structural Engineering Conference, Bergamo, Italy, 174.

Received : 12/13/2017

Revised : 12/21/2017

Accepted : 12/28/2017

요 지 : 본 연구에서는 중공형의 PHC말뚝과 강관말뚝을 합성한 중공형 콘크리트 충전 강관(HCFT)말뚝의 거동분석을 위한 수치해석 모델을 개발하였고 휨강도시험에 적용하여 모델의 타당성을 검증하였다. 개발된 비선형 유한요소해석 모델의 적정성을 파악하기 위해 실험 결과와 비교하였고 이를 활용하여 HCFT말뚝에 적합한 접촉조건, PC강봉의 제원에 따른 효과, 콘크리트 두께에 따른 효과 등을 분석하였다. 소성응력분배법을 적용하여 HCFT말뚝의 휨강도 산정식을 제안하였고 시험 및 해석결과와 비교하여 활용성을 검증하였다. 본 연구의 결과는 HCFT말뚝의 최적설계 및 거동분석에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 영문용어 중공형 콘크리트 충전 강관말뚝, 프리스트레스 콘크리트, 극한휨강도
