

역타공법에 적용되는 팔각 콘크리트충전 강관의 압축성능을 위한 원심모형실험

김동관¹, 이승환^{2*}

¹청주대학교 건축공학과, ²(주)센벡스

Centrifuge Tests on Compression Performance of Octagonal Concrete Filled Tube Column to be applied to Top-Down Construction Method

Dong-Kwan Kim¹, Seung-Hwan Lee^{2*}

¹Department of Architectural Engineering, Cheongju University

²SENVEX

요약 콘크리트 충전 강관 기둥을 개선한 팔각 콘크리트 충전 강관 기둥 (OCFT 기둥)이 개발되었다. 본 연구에서는 시공성 및 경제성 측면에서 장점을 갖는 OCFT 기둥을 역타(Top-Down) 공법에 적용하기 위하여 원심모형실험 장비를 활용하여 압축성능을 검증하였다. 12 g의 원심가속도가 작용하는 상태에서 말뚝으로 시공된 OCFT 기둥의 시공하중에 대한 지지가능 여부와 토사가 굴토되었을 경우 말뚝의 좌굴안전성 등을 관찰하기 위하여 압축강도에 대한 실험을 수행하였다. 천공 후, OCFT 기둥과 H 형강이 말뚝기초로 시공되고 뒷채움으로, 지반에 완전히 묻힌 실험체의 경우와 반만 묻힌 경우에 대하여, 약 13,000 kN의 공칭강도의 45% 시공하중을 재하한 결과 모든 실험체가 탄성상태에서 거동하였다. 하중재하실험 종료 후, 풍화암과 말뚝하부를 관찰한 결과 풍화암이 손상되지 않았으며, 이로부터 3.5 MPa로 조성된 풍화암은 600 x 600 mm OCFT 기둥의 공칭강도의 45%도 안정적으로 지지할 수 있는 것으로 판단된다.

Abstract To improve concrete-filled tube (CFT) columns, an octagonal concrete-filled tube (OCFT) column was developed. Because the OCFT column requires a small boring diameter, the OCFT column is suitable for Top-Down construction method. In this study, the compression performance of OCFT column to be used as Top-Down pile foundation was verified using centrifuge equipment. Under 12 g centrifugal acceleration, the bearing capacities of the pile foundations of OCFT and H-shaped sections were tested. When the pile foundations were embedded in soil of full depth, 45 % of the design strength, which was assumed to be the construction load, was supported by the OCFT and H-shaped sections in the elastic states. When the pile foundations were embedded in soil of half depth, the buckling of the pile foundations was not investigated. After the loading test, the rock at the bottom of pile foundation, which had a strength of 3.5 MPa, was not damaged due to 45 % of the design strength.

Keywords : Centrifuge Test, CFT, OCFT, Pile foundation, Top-Down Construction Method

1. 서론

1.1 연구의 배경

구조물을 수직으로 지지하는 기둥은 건축구조물의 안전성 측면에서 가장 중요한 요소 중에 하나이다. 기둥을

형성하는 방법으로는 현장타설 철근콘크리트(RC) 기둥, 공장제작 철근콘크리트 (PC) 기둥, 철골기둥 등이 주로 사용되고 있다. 또한 강재를 최외각에 배치하여 단면을 효율적으로 사용하고, 현장에서 콘크리트 타설이 용이한 콘크리트 충전 강관 기둥 (Concrete Filled Tube, CFT)

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 연구과제(16TBIP-C092528-02)로 수행되었음.

*Corresponding Author : Seung-Hwan Lee (SENVEX)

Tel: +82-2-2629-3117 email: shlee@senkuzo.com

Received May 2, 2017

Revised (1st June 13, 2017, 2nd June 14, 2017)

Accepted July 7, 2017

Published July 31, 2017

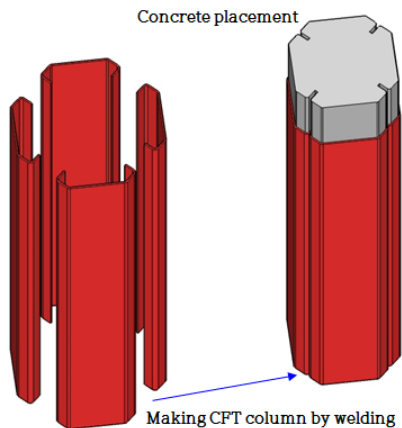


Fig. 1. Octagonal Concrete Filled Tube Column (OCFT)

이 사용되고 있다. 다만, 각형의 CFT 기둥은 콘크리트 타설시 측압에 의하여 배부름 현상이 발생하고, 외부 철판의 관폭두께비가 제한되며, 강축과 약축에 따라 강관의 두께를 조절할 수 없는 단점이 있다. 이러한 CFT 기둥의 약점을 보완하기 위하여 본 연구진은 Fig. 1과 같이 양 단부에서 경사지게 절곡된 4개의 유니트 강관을 기둥 모서리에서 상호 결합하여 강관이 전체적으로 8각형을 이루도록 하는 8각 콘크리트충전 강관기둥 (Octagonal Concrete Filled Tube Column, 이하 OCFT기둥 명기)을 개발하였다.

OCFT 기둥은 유니트 강관이 절곡되어 한 변의 순지 지지거리가 줄어들어 콘크리트 타설측압 및 관폭두께비에 유리하다. 또한 강축과 약축 방향에 따라 다른 유니트 강관을 적용하여 경제적인 설계가 가능한 장점이 있다.

현행 건축시공분야에서 골조공사의 공기를 단축하기 위하여 Fig. 2와 같이 역타 공법이 많이 적용되고 있다. 역타 공법은 지하구조물의 골조를 형성하기 위하여 터파기 및 흙막이를 하지 않고, 지표면에서 바로 말뚝을 시공하고, 이를 지하구조물의 기둥을 사용하여 공기를 단축하는 공법이다. [1, 2]

역타공법에서는 Fig. 3과 같이 말뚝기초의 근입을 위한 천공이 요구된다. 최소 천공직경은 근입되는 말뚝이 크기와 관련 있으며, 예를 들어 500 x 500 mm 크기의 사각단면을 근입하기 위하여 800 mm 직경이 천공되어야 한다.

하지만, 동일한 500 mm 변을 갖는 OCFT 기둥의 경우, 양 단부에서 경사지게 절곡되어 직경 700 mm 로 천

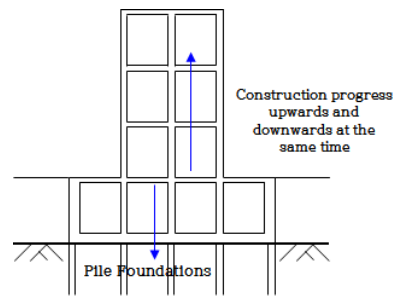


Fig. 2. Top-Down Construction Method



Fig. 3. Pile Foundation

공이 가능하다. 따라서 OCFT 기둥이 역타공법에 적용될 경우, 시공성 및 경제성을 확보할 수 있다.

1.2 연구의 목적

이러한 시공성 및 경제성 측면에서 장점을 바탕으로 OCFT 기둥을 역타 공법이 적용된 공사에 적용하기 위해서는 구조적 성능이 검증되어야 한다. 즉, 말뚝으로 시공된 OCFT 기둥이 시공하중에 대한 지지가능여부와 토사가 굴토되었을 경우 말뚝의 좌굴안전성 등이 검증되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 원심모형시험기를 사용하여 OCFT 기둥을 기초구조로 사용할 수 있는 재하실험을 수행하여 압축성능을 검증하고자 한다.

2. 실험체 설계

2.1 원심모형실험

OCFT 기둥을 말뚝기초로 사용하기 위한 구조성능을 검증하기 위해서는 선단지지압반, 토사 등이 동시에 고려되어야 한다. 이에 대하여 실제 크기에 대한 실물실험을 하는 것이 가장 정확하지만, 실제 기둥에 작용하는 시공하중 크기로 가력할 수 있는 장치가 없으므로 실제 크



Fig. 4. KAIST Centrifuge Equipment in Korea

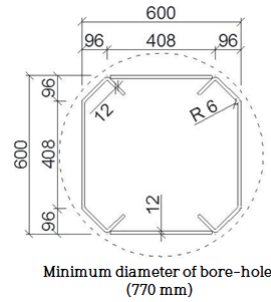
기에 대한 실험이 불가하다 [3]. 따라서 본 연구에서는 최근 지반공학분야에서 널리 사용되는 원심모형시험기를 사용하여 OCFT 기둥의 구조적 성능을 검증하였다. Fig. 4는 정지상태의 원심모형시험기를 나타낸다. 원심모형시험기는 중앙부 기둥, 회전팔, 그리고 바스켓으로 구성된다. 중앙부 기둥을 중심으로 회전팔이 회전하면, 원심력이 유발되고 유발된 원심력에 의해 힌지로 연결된 바스켓이 회전팔에 직각으로 부양하여 바스켓에 큰 원심력이 작용된다. 이와 같이 회전하는 장비의 바스켓에서 원심력을 가하여 지구중력의 20~80 배를 가하여 지반 등 대규모의 구조체의 응력상태를 축소모형을 구현하여 실험할 수 있는 장비이다. 따라서 이러한 원심모형실험 장비의 활용은 본 연구와 같이 대규모의 실험조건이 요구되는 경우에 적합하다. 이러한 원심모형시험기를 활용한 실험에서 축소모형설계를 위한 상사법칙(scaling laws)은 Table 1과 같으며, 이에 따라 실험체를 계획하였다.

Table 1. Scaling laws of centrifuge test [4]

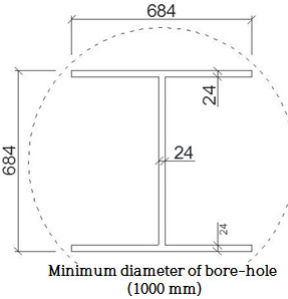
Quantity Name	Scaling Factor (Model / Prototype)
Density	1
Gravity	N
Stress, Pressure, Moduli	1
Length, Displacement	1/N
Mass	1/N ³
Force	1/N ²

2.2 축소모형 실험체

원심모형실험을 위하여 Table 2와 같이 실제 OCFT 기둥의 크기를 정하고 적용되는 원심가속도에 따라 축소



(a) OCFT section



(b) H-shaped section

Fig. 5. Dimensions of Prototypes and minimum diameters of bore-hole

모형 실험체를 설계하였다. 원형(Prototype)의 OCFT 단면의 크기는 600 × 600 × 12 (가로 × 세로 × 강관두께) 이고, 12 g의 원심가속도를 적용하여 실험체는 50 × 50 × 1 로 축소되었다. 충전되는 콘크리트는 30 MPa의 강도를 갖도록 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하여 시멘트:모래=1:2.5의 질량비, 물시멘트비율은 0.50으로 배합하였다. 시멘트 모르타르로 설계하였고, SM490 강재를 사용하였다. OCFT 단면의 공칭강도는 KBC 2016에 의해서 식 (1) 과 같이 13,089 kN로 계산되었다 [5].

$$\phi P_n = \phi \times P_{n0} \times 0.658 \left(\frac{P_{n0}}{P_c} \right) \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 합성기둥의 강도감소계수, $P_{n0} = F_y A_s + 0.85 f_{ck} A_c$ = 세장효과를 고려하지 않은 공칭압축강도, P_c 는 탄성 좌굴저항, F_y 는 강재의 설계항복강도, A_s 는 강재의 면적, f_{ck} 는 콘크리트의 설계항복강도, A_c 는 콘크리트의 면적이다.

역타공법에 적용되는 OCFT 단면에 대조군으로 H형 강을 적용하였다. OCFT와 동일한 내력을 갖는 H형강은



Fig. 6. Making and validating weathered rock for pile foundation

원형 조건에서 $684 \times 684 \times 24 \times 24$ 이고, 12 g의 원심 가속도를 적용하여 실험체는 $57 \times 57 \times 2 \times 2$ 로 축소되었다. H형강의 공칭강도는 식 (2)와 같이 계산되었다.

$$\phi P_n = \phi \times A_s \times 0.658 \frac{F_c}{F_y} \times F_y \quad (2)$$

여기서, ϕ 는 철골기둥의 강도감소계수, F_y 는 강재의 설계항복강도, F_c 는 강재의 탄성좌굴응력, A_s 는 강재의 면적이다.

Table 2. Test specimens

		OCFT	H-Shaped section
Section	Prototype	600×600×12 (H×B×thickness)	684×684×24×24
	Model	50×50×1	57×57×2×2
Height	Prototype	7,200 mm	7,200 mm
	Model	600 mm	600 mm
Strength (Prototype)		13,089 kN	13,108 kN
Boring diameter (Prototype)		770 mm	1,000 mm

동일한 내력을 갖는 OCFT와 H형강을 역타공법에 적용하기 위하여 H형강은 1,000 mm가 천공되어야 하며, OCFT 단면은 770 mm가 천공되어야 한다. 실험체 기둥의 높이는 600 mm이고, 원심가속도 12 g에서 실험되어 원형의 높이는 7.2 m로 약 지하 2층에 대한 실험으로 판단할 수 있다.

3. 실험체 제작

3.1 풍화암 조성

원심모형시험기 토조 내에서 하부 풍화암을 조성한 절차는 Fig. 6과 같다. 풍화암을 조성하기 위한 시멘트 모르타르를 배치하고, 단단한 붓을 사용하여 치밀하게 다짐을 수행한다. 다짐된 풍화암 모형에 대한 수평도를 검측하고, 이와 동시에 시편을 채취하였다. 약 20 일 동안 경화된 풍화암 모형에 대하여 시편 압축강도 시험을 수행하고, 이에 대한 파괴양상이 Fig. 6(d)로 나타났다. 모형으로 조성된 풍화암은 약 3.5 MPa의 압축강도가 발현되었으며, 이는 단단하지 않은 암반의 수준으로 판단된다.

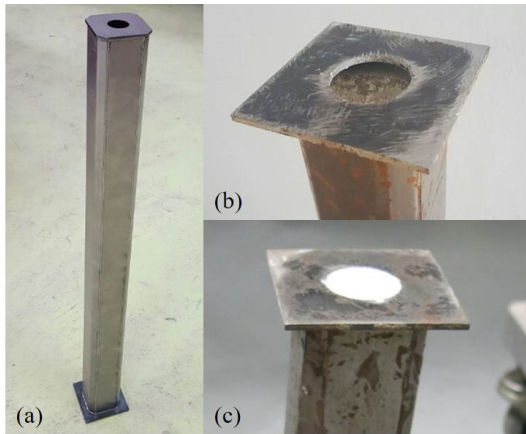


Fig. 7. Small-scale test specimen
(a) Before mortar pouring;
(b) Contraction of mortar;
(c) Filling reinforcing paste

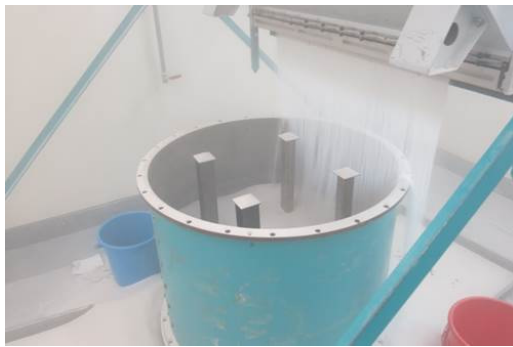


Fig. 8. Making backfill soil condition

3.2 축소모형 실험체 제작

OCFT 축소실험체 제작과정은 Fig. 7과 같다. 전술한 바와 같이 단위 강관을 절곡하고, 이를 만나는 변을 용접하여 팔각형의 OCFT 단면을 구성하였다. 이때 본 축소 실험에서 사용된 강재의 두께가 1 mm로서 매우 얇기 때문에 정밀한 레이저 용접으로 실험체가 제작되었다. 압축력을 가력하기 위하여 제작된 팔각형 단면의 상하부에 철판을 용접하였다. 완성된 축소모형에 시멘트 모르타르를 채워 팔각형의 CFT 기둥을 완성한다.

시멘트 모르타르가 타설된 축소모형실험체는 시멘트 모르타르의 건조, 수축으로 인하여 OCFT 축소실험체의 상부 강관과 유격이 발생하였다. 이러한 유격은 압축력을 전달하는 기둥에 대한 실험시 발생되면 안 되는 시공상의 문제이다 [6]. 따라서, 이에 대하여 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 건조, 수축이 적은 보강재를 주입하고 유

격을 보완하여 압축력을 전달하는 기둥의 실험이 수행되도록 수정하였다.

3.3 말뚝과 지반실험체 조성

원심모형실험을 위한 토조 내에 말뚝 및 지반실험체를 조성한 과정은 다음과 같다. 지반 내에 완전히 묻힌 H형강과 OCFT 기둥에 대한 실험과 1/2 묻힌 H형강과 OCFT 기둥에 대한 실험을 수행하기 위하여 총 4개의 실험체가 토조 내에 배치되었다. 이에 대하여 Fig. 8과 같이 주문진 규사를 낙사하여 굴토 후 되메움 되는 지반조건을 형성하였다.

4. 원심모형실험 수행 및 결과

4.1 원심모형실험 수행

원심모형실험기에서 수행된 실험은 Fig. 9와 같다. 지구중력의 12 배인 12 g의 원심력이 가해지는 상태에서 말뚝 두부에 하중을 가하여 역타 공법의 말뚝기초로서 활용성을 평가하였다. 실험시 가력 로드셀에서 가해진 하중이 측정되고, 말뚝 상부의 좌우에서 LVDT로 변위를 측정하였다.

완전히 묻힌 H형강과 OCFT 기둥에 대한 압축실험을 수행하고, 지반을 굴토하여 1/2만 묻힌 지반조건에서 H형강과 OCFT 기둥에 대한 압축실험을 수행하였다. 이로부터 역타 공법에 적용된 OCFT 기둥의 좌굴 등에 대한 시공안전성을 검증할 수 있다.

본 연구에서 H형강과 OCFT 기둥의 용도는 역타공법의 시공하중을 지지하기 위함으로 OCFT와 H형강 단면 공칭강도의 약 45 %에 해당하는 5,800 kN을 가력하여 말뚝기초로 활용된 기둥의 압축성능과 기초 하부 암반의 손상을 관찰하였다.

4.2 하중-변위 곡선

원심모형실험기를 활용하여 수행된 H형강 및 OCFT 말뚝기초의 실험결과는 Fig. 10과 같다. 12 g의 원심력이 가해지는 상태에서 말뚝 두부에 하중을 가력하여 수행된 실험은 상사법칙에 의해 Table 3과 같이 환산하여 실험결과를 분석할 수 있다.

OCFT 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2 m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면이어서 말뚝이 완전히 묻힌 경우에 대한 실험결과는 Fig. 10(a)와 같다.

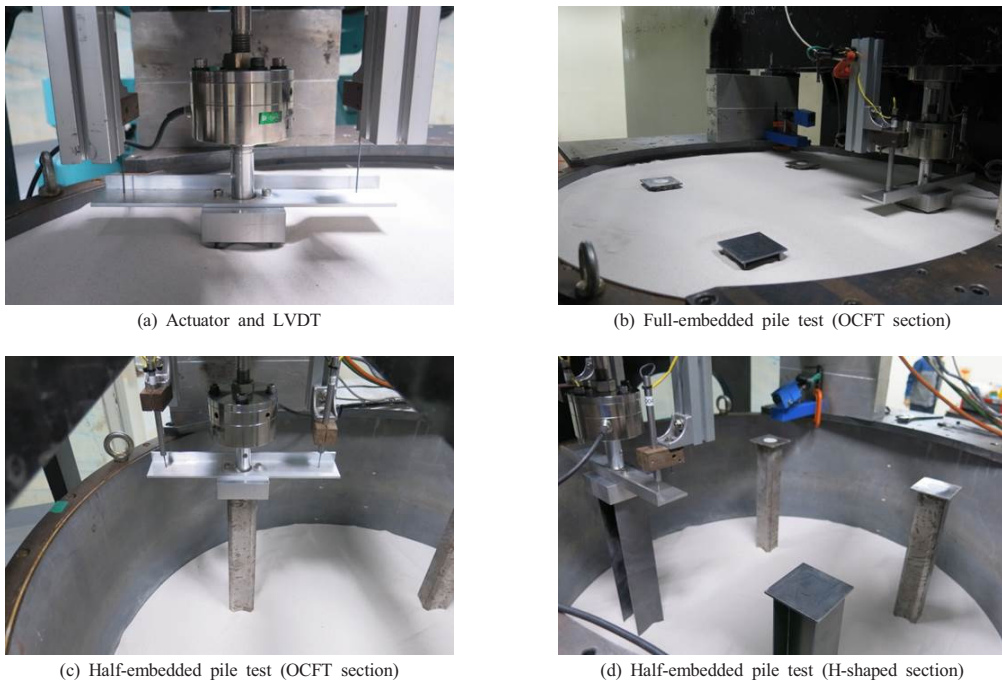


Fig. 9. Performing centrifuge test

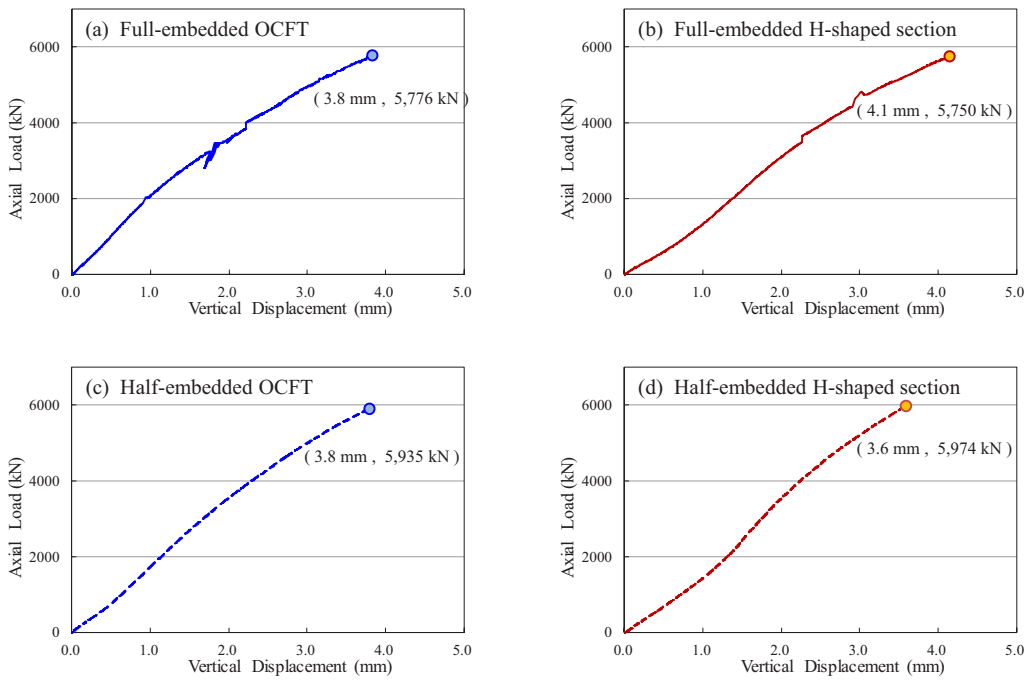


Fig. 10. Load - displacement result



(a) Bottom of OCFT pile



(b) Bottom of H-shaped pile

Fig. 11. Non-damaged rock

5,776 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 3.8 mm 변형이 발생하였으며, H형강 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2 m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면이어서 말뚝이 완전히 묻힌 경우에 대한 실험결과와 Fig. 10(b)와 같다. 5,750 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 4.1 mm 변형이 발생하였다.

OCFT 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2 m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면에서 3.6 m 이하로서 말뚝이 지반에 1/2만 묻힌 경우에 대한 실험결과와 Fig. 10(c)와 같다. 5,935 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 3.8 mm 변형이 발생하였다. H형강 말뚝기초가 지표면으로부터 7.2 m 깊이에 선단지지 되고, 지반의 표고가 지표면에서 3.6 m 이하로서 말뚝이 지반에 1/2만 묻힌 경우에 대한 실험결과와 Fig. 10(d)와 같다. 5,974 kN이 가력되었을 때, 말뚝은 약 3.6 mm 변형이 발생하였다.

Table 3. Centifuge test result

Test specimen	Load (kN)	Displacement (mm)	Strain (mm/mm)	Stiffness (kN/mm)
Full-embedded OCFT	5,776	3.8	0.000528	1520
Full-embedded H-shaped section	5,750	4.1	0.000569	1402
Half-embedded OCFT	5,935	3.8	0.000528	1520
Half-embedded H-shaped section	5,974	3.6	0.000500	1659

하중-변위곡선으로부터 Table 3과 같이 압축력을 받는 구조물의 변형율을 도출할 수 있다. OCFT 말뚝기초와 H형강 말뚝기초의 변형율은 0.0005~0.000569 로

SM490 강재의 항복변형율인 0.001625 의 31~35 % 수준으로 본 실험에서 수행된 말뚝기초는 단면의 공칭강도의 45 % 시공하중에 대하여 탄성적으로 거동함을 알 수 있다.

4.3 OCFT와 H형강 말뚝기초의 강성 비교

하중-변위 곡선으로부터 Table 3과 같이 등가강성을 도출하여, OCFT 말뚝기초의 강성과 H형강 말뚝기초의 강성을 비교하였다. OCFT 말뚝기초의 강성은 1520~1562 kN/mm 로 평균 1541 kN/mm 였고, H형강 말뚝기초의 강성은 1520~1562 kN/mm 로 평균 1531 kN/mm 였다. 따라서, OCFT 말뚝기초는 H형강 말뚝기초와 동등한 강성을 갖는 것으로 판단된다.

4.4 역타공법에 적용된 말뚝기초의 좌굴

역타공법에 적용되는 말뚝기초는 지반이 굴토된 경우에도 좌굴이 발생하지 않고, 시공하중을 지지해야한다. 따라서 본 연구에서는 말뚝기초가 지반에 완전히 묻힌 경우와 반만 묻힌 경우에 대하여 실험하여 좌굴의 발생 등을 관찰하였다. 단면크기 600 × 600 × 12 의 OCFT 말뚝기초와 단면크기 684 × 684 × 24 × 24 의 H형강 말뚝기초는 지하 1개층으로 가정된 3.6 m 가 굴토된 경우에도 좌굴이 발생하지 않고, 단면의 공칭강도의 45 % 로 가정된 시공하중을 지지하였다.

4.5 실험 후, 풍화암의 형상

OCFT 기둥이 말뚝기초로서 사용될 수 있는지 면밀히 관찰하기 위하여 하중재하 실험 종료 후, 말뚝기초와 풍화암 사이의 변형을 관찰하였다. Fig. 11과 같이 실험 후 토사를 걷어내고, H형강 말뚝 하부와 OCFT 말뚝 하

부 풍화암을 관찰한 결과, 3.5 MPa로 조성된 풍화암은 600 x 600 mm OCFT 기둥의 공칭강도의 45%도 안정적으로 지지할 수 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 시공성 및 경제성 측면에서 장점을 갖는 OCFT 기둥을 Top-Down 공사에 적용하기 위하여 원심모형실험 장비를 활용하여 구조적 안전성을 검증하였다. 즉, 말뚝으로 시공된 OCFT 기둥의 시공하중에 대한 지지가능여부와 토사가 굴토되었을 경우 말뚝의 좌굴안전성 등을 관찰하기 위하여 압축강도에 대한 실험을 수행하였다. 이에 대한 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 말뚝기초가 지반에 완전히 문힌 실험체의 경우, 약 13,000 kN의 공칭강도를 갖는 H형강과 OCFT 기둥단면에 약 45 % 의 시공하중을 재하한 결과 두 실험체 모두 탄성 상태에서 거동하였다.
- 2) 하중-변위곡선으로부터 OCFT 말뚝기초의 강성은 H형강 말뚝기초의 강성과 동등하였다.
- 3) 말뚝기초가 지반에 1/2만 문힌 실험체의 경우, 좌굴 등의 구조적 불안전성이 발견되지 않고, 완전히 문힌 실험체와 동일한 내력이 계측되었다.
- 4) 하중재하실험 종료 후, 풍화암과 말뚝하부를 관찰한 결과 풍화암이 손상되지 않았으며, 이로부터 3.5 MPa로 조성된 풍화암은 600 x 600 mm OCFT 기둥의 공칭강도 45 % 의 시공하중을 안정적으로 지지할 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구의 실험결과를 바탕으로 H형강을 대체하여 OCFT 기둥은 역타공법의 말뚝기초로 활용될 수 있는 것으로 판단된다.

References

- [1] C. W. Park, S. Y. Moon, S. H. Yun, "A Study on the Sub-elements of the Top-down Construction Method Selection Model using Weighting Factor in Downtown Area", Journal of the Korea Institute of Building Construction. 8, 4, pp. 61-69, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.5345/JKIC.2008.8.4.061>
- [2] H. Y. Cheong, S. S. Kim, K. S. Kim, "Evaluation on Axial Resisting Capacities of Embedded Steel Column Base to be applied to Top-Down Method", Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 16, 5, pp. 45-52, 2000.
- [3] D. J. Kim, Y. Choo, J. H. Kim, S. Kim, D. S. Kim, "Investigation of Monotonic and Cyclic Behaviors of Tripod Suction Bucket Foundations for Offshore Wind Towers using Centrifuge Modeling", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE., 140, 5, 04014008, 2014.
- [4] A. N. Schofield, "Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations", Geotechnique. 30, 2, pp. 227-267, 1980.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1980.30.3.227>
- [5] AIK, "Korea Building Code", p. 789, Kimoondang, 2016.
- [6] Y. D. Lee, S. J. Jung, "A Study on Void Check for Top-Down Column Joint by Field Experiment", Journal of the Korea Institute of Building Construction. 5, 1, pp. 105-109, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.5345/JKIC.2005.5.1.105>

김 동 관(Dong-Kwan Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 원 건축학과 (건축공학석사)
- 2013년 8월 : 서울대학교 공과대학 원 건축학과 (건축공학박사)
- 2015년 3월 ~ 2017년 2월 : (주)센백스 연구팀장
- 2017년 3월 ~ 현재 : 청주대학교 건축공학과 조교수

<관심분야>

건축구조, 합성구조, 지진공학

이 승 환(Seung-Hwan Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 공과대학 건축학과 (학사)
- 2003년 8월 : 코오롱 건설 프로젝트 평가팀 대리
- 2006년 5월 : Cornell Johnson Graduate School of Management, MBA
- 2008년 11월 ~ 현재 : (주)센백스 이사

<관심분야>

건축구조, 합성구조, 건축시공