CFT 기둥과 DSCT 기둥의 휨거동 비교 실험 연구

Experimental Comparison for Flexural Behavior of Concrete Filled Tubular and Double-Skinned Composite Tubular Columns

한택희* · 홍혜민** · 이선호***

Han, Taek Hee*, Hong, Hyemin**, and Lee, Sonho***

Abstract

Quasi-static tests were carried out to compare the flexural behavior of CFT and DCST columns with equal diameter. One CFT column specimen and two DSCT specimens with 80% and 90% of hollow ratios were compared. One DSCT specimen was designed to use the same amount of steel as the CFT specimen and the other was designed to have equal second moment of inertia of the steel tube to that of the CFT specimen. As a result, the DSCT column specimens showed higher strength than the CFT column specimen. However, the CFT specimen showed larger ductility than the DSCT column specimens. Experimental results showed that the DSCT column should be designed and applied according to the priority of each performance such as strength and ductility in accordance with the required performance conditions. Considering the amount of material used, the DSCT column can be a considerably economical structure.

Key words : DSCT, CFT, Column, Composite, Bending Strength

요 지

동일 직경을 갖는 CFT 기둥과 DCST 기둥에 대해 준정적 실험을 수행하여 휨거동을 비교하였다. CFT 기둥 시험체 1기와 중공비가 각각 80%와 90%인 DSCT 시험체 2기를 비교하였다. DSCT 시험체 1기는 CFT 시험체와 동일 강재량을 사용하도록 설계하였으며, 다른 1기는 강관의 단면2차모멘트가 CFT 시험체의 강관과 동일하도록 설계하였다. 실험 결과 강도 측면에서는 DSCT 기둥 시험체가 더 큰 강도를 나타내었으며, 연성도 측면에서는 CFT 시험체가 더 큰 값을 보여주었다. 실험 결과는 DSCT 기둥의 적용시에는 요구성능 조건에 맞춰, 강도 및 연성도와 같이 각 성능의 우선순위에 따라 설계와 적용이 이루어져야 함을 보여주며, 사용재료량을 고려할 때, DSCT 기둥은 상당히 경제적인 구조로 판단된다.

핵심용어 : DSCT, CFT, 기둥, 합성, 휨강도

1. 서 론

철근콘크리트(RC: Reinforced Concrete) 구조는 현재까지 토목구조물의 주를 이루고 있으나, 구조물의 성능 향상을 위하여 강재와 콘크리트를 합성하여 사용하는 강-콘크리트 합성구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 적용

한 구조물 또한 증가세에 있다. 강-콘크리트 합성구조로서는 기둥에 주로 적용되고 있는 콘크리트 충전 강관구조(CFT: Concrete Filled Tubular)와 원자력발전소의 벽체구조에 적용되고 있는 강판콘크리트 구조(SC: Steel-Concrete)가 대표적인 것이라 할 수 있다.

CFT 기둥의 거동 특성에 대해서는 국내외적으로 많은

*정회원, ¹ 한국해양과학기술원 연안개발연구센터 책임연구원

² 한국해양대학교 해양과학기술융합과 교수(E-mail: taekheehan@kiost.ac.kr)

Member, ¹ Principal Research Scientist, Coastal Development Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

² Professor, School of Ocean Science & Technology, Korea Maritime & Ocean University

**정회원, 한국해양과학기술원 연안개발연구센터 연구원

Member, Researcher, Coastal Development Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

***교신저자, 정회원, (주)삼안 구조부 전무(Tel: +82-2-6488-8412, Fax: +82-2-6488-8409, E-mail: shlee1905@gmail.com)

Corresponding Author, Member, Senior Managing Director, Structural Division, Saman Corporation

연구가 수행되었으며(Hwang et al., 2003; Chung et al., 2003; Chung et al., 2004; Moon et al., 2012; Inai et al., 2004; Sakino et al., 2004; Xiao et al., 2005), 실험과 해석을 통하여 그 우수한 성능이 검증되었으나, 강관의 내부에 콘크리트가 완전히 충전되어야 하는 특성으로 인하여, 자중 증가와 재료비의 증가가 필연적이다.

SC구조의 경우, 원자력발전소 구조물 적용을 목적으로 연구가 활발히 진행되어 설계기준이 발간되었으며(Korean Electric Association, 2010), SC 구조 벽체의 거동(Chung and Lee, 2012)과 내력에 대한 평가(Chung et al., 2013)가 연구된 바 있으며, SC 구조는 벽체구조로 주로 적용되고 기둥구조로는 적용되지 않고 있다.

이중관 충전콘크리트(DSCT: Double-Skinned Composite Tubular) 구조는 Fig. 1과 같이, 동심을 갖는 두 관 사이에 콘크리트를 타설하는 구조로서 이의 단면은 SC구조와 동일하다고 볼 수 있는 구조이다. DSCT 구조는 Shakir-Khalil and Illouli (1987)에 의해 제시된 이후, 이를 적용한 기둥의 축강도에 대한 연구가 이루어져 왔으며(Wei et al., 1995a, 1995b; Zhao and Grzebieta 2002; Tao et al., 2004), 섬유보강 폴리머 (FRP: Fiber Reinforced Polymer)관을 적용한 하이브리드 기둥에 대한 연구도 수행된 바 있다(Teng et al., 2007; Yu et al., 2006). 구속효과를 고려한 DSCT 기둥의 비선형 재료모델과 휨거동에 대한 연구는 Han et al. (2010, 2013)에 의해 수행 되었으며, 그들은 DSCT 기둥의 파괴모드와 콘크리트의 재료모델을 제안하고(Han et al., 2010), DSCT 기둥의 비선형 해석 모델을 제안하고 휨거동을 분석하였다(Han et al., 2013). 최근에는 DSCT 구조를 적용한 풍력발전 타워에 대한 연구도 수행되고 있으며(Han et al., 2015; Han et al., 2016; Yi and Han, 2016; Hong et al., 2016a), 강관 이외에도 FRP관을 적용한 DSCT 풍력발전 타워에 대한 연구도 수행되고 있으며(Hong et al., 2016b), DSCT 구조의 적용 범위가 확대되고 있는 추세이다.

Fig. 1. Cross-Section of DSCT Column (Han et al., 2010)

DSCT 기둥은 CFT 기둥을 중공 단면으로 제작한 형태라고 할 수 있으며, 동일 외경의 기둥일 경우 DSCT 기둥은 CFT 기둥에 비하여 재료절감과 자중감소를 이룰 수 있다. 하지만, DSCT 기둥은 내부관으로부터 충분한 구속능력이 제공되지 않는다면 필연적으로 CFT 기둥에 비해 그 성능이

저하된다. 본 연구에서는 CFT 기둥과 DSCT 기둥의 휨성능 비교를 위하여 1기의 CFT 기둥 시험체(SP-C), 그리고 이와 동일 외경을 가지나 서로 다른 중공비를 갖는 2기의 DSCT 기둥 시험체(SP-D9, SP-D8)를 제작하여 총 3기의 시험체에 대해 휨거동 실험을 수행하였다. CFT 기둥 시험체와 동일 외경을 갖는 DSCT 기둥 시험체 중 1기는 CFT 기둥과 동일 양의 강재가 사용되도록 설계하였으며, 다른 1기는 적용강재가 CFT 기둥 시험체에 적용된 강재와 동일한 단면이차모멘트를 갖도록 설계하였다.

2. 시험체 설계

모든 기둥 시험체의 높이는 기초 상단으로부터 가력점까지 2,000 mm로 설계하였으며, 타설 콘크리트는 30 MPa로 설계하였다. 강재는 SS400을 적용하여 항복강도는 245 MPa, 극한강도는 400 MPa이다(Korean Society of Steel Construction, 2011). 실험결과와 비교를 위한 기준 시험체인 CFT 기둥(SP-C)의 직경은 600 mm로 설정하였으며, 콘크리트를 둘러싸는 외부강관의 두께는 3.5 mm로 설계하였다. 본 CFT 시험체 및 DSCT 시험체의 설계시에는 실험시 사용될 가력기의 용량을 고려하여, 콘크리트구조기준 해설(Korea Concrete Institute, 2012)의 17.4.2절에서 제시하고 있는 최소 강재 두께인 다음의 Eq. (1)을 적용하지 않았다. Eq. (1)에서 t 는 콘크리트 심부를 둘러싸는 외부강관의 두께, h_s 는 외부강관의 직경, f_y 는 외부강관의 항복강도, E_s 는 외부강관의 탄성계수이다.

$$t \geq h_s \sqrt{\frac{f_y}{8E_s}} \quad (1)$$

비교 기준 시험체인 CFT 기둥 시험체(SP-C)의 직경(=구속콘크리트의 외경, 외부강관의 내경: D)은 600mm이며, 외부강관의 두께(t_o)는 3.5 mm이다. SP-C 시험체와 비교를 위한 DSCT 시험체 중 하나인 SP-D8은 CFT 시험체와 동일한 직경을 가지며, 중공비는 0.8로서 중공단면의 직경(=내부강관의 외경: D_i)은 480 mm이다. 본 시험체와 CFT 기둥에 사용된 강재 양을 동일하게 적용하기 위하여, 외부강관의 두께(t_o)는 2 mm, 내부강관의 두께(t_i)는 2 mm로 설계하였다. SP-C의 외부강관의 단면적은 3,306.6 mm²이며, SP-D8의 외부강관과 내부강관 단면적의 합(A_s)은 3,391.2 mm²로서, 약 2.6%의 단면적 차이가 발생하나, 이는 SP-D8의 적용강관 두께가 2 mm로서, 용접 및 제작을 고려한 최소 두께임을 감안한다면 동일한 단면적을 갖는다고 보아도 무방할 것으로 판단된다. SP-D8의 제작에 사용되는 콘크리트 양은 SP-C 대비 36%이다.

다른 DSCT 시험체인 SP-D9은 적용된 내부관과 외부관의 단면2차모멘트가 SP-C에 사용된 강관의 단면2차모멘트와

Table 1. Geometric Properties of Specimens

Specimen		SP-C	SP-D8	SP-D9
Inner Diameter of Outer Tube, D (mm)		600	600	600
Diameter of Hollow Section, D_i (mm) (= Outer Diameter of Inner Tube)		-	480	540
Hollow Ratio, D_i/D (%)		-	80	90
Thickness of Outer Tube, t_o (mm)		3.5	2.0	2.0
Thickness of Inner Tube, t_i (mm)		-	2.0	2.0
Cross-Sectional Area of Steel Tube	Outer Tube, A_{so} (mm^2)	3,306.6	1,887.1	1,887.1
	Inner Tube, A_{si} (mm^2)	-	1,504.1	1,692.5
	Total, A_s (mm^2)	3,306.6	3,391.2	3,579.6
	Ratio (%)	100.0	102.6	108.3
Moment of Inertia of Steel Tube	Outer Tube, I_{so} ($\times 10^{-6} mm^4$)	149.7	85.2	85.2
	Inner Tube, I_{si} ($\times 10^{-6} mm^4$)	-	43.1	61.5
	Total, I_s ($\times 10^{-6} mm^4$)	149.7	128.3	146.7
	Ratio (%)	100.0	85.8	98.0
Cross-Sectional Area of Concrete	Quantity, A_c (mm^2)	282,600.0	101,736.0	53,694.0
	Ratio (%)	100.0	36.0	19.0
Moment of Inertia of Concrete	Quantity, I_c ($\times 10^{-6} mm^4$)	6,358.5	3,754.1	2,186.7
	Ratio (%)	100.0	59.0	34.4

동일하도록 설계한 시험체이다. SP-D9의 직경은 SP-C와 동일한 600 mm이며, 중공비는 0.9로서 중공단면의 직경은 540 mm이다. 외부강관과 내부강관의 두께는 모두 2 mm로 설계하였다. SP-D9의 내부강관과 내부강관의 단면2차모멘트 합(I_s)은 SP-C의 외부강관 단면2차모멘트에 비해 약 2% 작으나, 동일한 값으로 판단하여 시험체를 제작하였다. 이때 사용되는 콘크리트 양은 SP-C 대비 19%이다. Table 1에 각 시험체의 단면특성을 정리하여 나타내었으며, Fig. 2에 단면 제원을 표시하였다.

설계된 시험체를 콘크리트의 구속효과와 재료비선형성

을 고려하여 축력-모멘트 상관관계를 예측한 결과는 Table 2 및 Fig. 3과 같다. 축력-모멘트 상관관계(P-M Interaction) 분석은 CoWiTA(Korea Institute of Ocean Science & Technology, 2017)를 사용하여 이루어졌다. 각 SP-C, SP-D8, SP-D9 시험체의 최대 휨모멘트(M_b , Balanced Moment)는 각각 1072.7 kN-m, 599.6 kN-m, 485.7 kN-m로 산정되었으며, 순수 휨모멘트(M_0 , Pure Moment)는 각각 489.4 kN-m, 433.3 kN-m, 429.0 kN-m로 산정되었다. 최대 휨모멘트는 SP-C가 월등히 높은 값을 보였으나, 순수 휨모멘트의 경우 상대적으로 그 차이가 작게 나타났다. 실제 휨거동 시에는 외부강관의 좌굴이 발생하여 파괴될 수 있으나, 본 축력-모멘트 상관관계 분석은 외부강관의 좌굴은 고려되지 않은 결과이다.

Fig. 2. Definition of Geometric Properties

Table 2. P-M Interaction Analysis Result of Designed Specimen

Specimen	SP-C	SP-D8	SP-D9
Max. Axial Load (kN), P_0	14,776	5,756	3950
	100%	38.96%	26.73%
Pure Moment (kN-m), M_0	489	433	429
	100%	88.55%	87.73%
Balanced Axial Load (kN), P_b	5,976	1,831	936
	100%	30.64%	15.66%
Balanced Moment (kN-m), M_b	1072	599	485
	100%	55.88%	45.24%
Balanced Eccentricity (mm), e_b	179.4	327.1	518.2

Fig. 3. P-M Interaction Curves of Designed Specimen

해석시 적용한 재료모델은 Fig. 4와 같으며, Fig. 5는 시험체 설계도면이다. 강재의 응력-변형률 관계는 Han et al. (2013)이 제안한 Eq. (2)를 적용하였다. 여기서, f_s 는 강재에 작용하는 응력, f_y 는 강재의 항복강도, f_u 는 강재의 극한강도, ϵ_u 는 강재의 극한변형률, ϵ_y 는 강재의 항복변형률, ϵ_s 는

(a) Concrete Model

(b) Steel Model

Fig. 4. Applied Material Model

Fig. 5. Specimen(SP-D9) Dimension and Loading Direction

강재의 변형률이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 강재의 극한변형률은 0.16이며, 콘크리트의 극한변형률은 일반적인 비구속 콘크리트의 경우 0.003을 적용하나, 본 연구에서의 콘크리트 극한변형률은 콘크리트를 구속하는 강관의 파괴에 따라 변화하며, 구속 효과를 고려하였을 때 이론적으로 Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 0.0223을 갖는다.

$$f_s = f_y + \frac{f_u - f_y}{\sqrt{\epsilon_u - 1.5\epsilon_y}} \sqrt{\epsilon_s - 1.5\epsilon_y} \quad (2)$$

3. 시험체 제작 및 실험

설계 제원에 따라 시험체를 제작하였다. 시험체 제작을 위한 콘크리트는 30 MPa로 설계하였으며, 각 시험체별로 타설 콘크리트의 28일 경과후 가력시험 당일의 공시체 압축강도 측정값을 Table 3에 나타내었다. Fig. 6은 시험체 제작 전경이며, Fig. 7은 완성 시험체이다.

Table 3. Concrete Strength on Testing Day (after 28 days)

Specimen	Compressive Strength on Test-Day (MPa)			
	Mold 1	Mold 2	Mold 3	Average
SP-C	30.95	23.76	30.70	28.47
SP-D8	33.60	30.92	32.18	32.23
SP-D9	33.48	26.47	29.34	29.76

Fig. 6. Formwork and Steel Tube Setting

Fig. 7. Complete Specimen (SP-D8)

각 시험체에 대해 준정적시험(Quasi-Static Test)을 수행하여 각 시험체의 거동을 살펴보았다. 하중 가력을 위한 지그를 제작하여 기초 상단으로부터 2 m의 위치에서 변위 제어하여 정방향(+)과 부방향(-)으로 Fig. 8과 같이 계획된 Drift ratio에 따라 하중을 2회씩 반복하여 가력하였다.

Fig. 8. Loading History

적용 가력장치의 stroke는 ± 100 mm, 최대가력 하중 980 kN ($=1.96$ MN-m)으로 시험체의 예상 파괴변위와 내력을 상회하도록 하였다. 각 시험체의 하중단계별 drift level에 맞추어 실험을 실시하였으며, 시험체가 소성변형되어 작용 하중이 최대하중의 70%이하가 될 때 실험을 종료하였다. 실험 중에는 각 시험체별로 산정된 Balanced Axial Load가 일정하게 작용하도록 유지하였다.

실험시 발생하는 가력부의 횡방향 변위 측정을 위해 Fig. 9의 ①과 같이 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 실험 시 발생할 수 있는 시험체의 회전과 슬립을 제어하기 위해 변위계를 Fig. 9의 ②, ③, ④와 같이 설치하였다. 실험 도중에 회전이나 슬립은 발생하지 않았으며, Fig. 10은 설치된 변위계를 보여 준다.

Fig. 9. Specimen Setup and Setting of LVDT

4. 실험결과

각 시험체는 반복하중이 작용함에 따라, Fig. 11과 같이 소성힌지부의 외부강관이 좌굴되어 하중이 급격히 감소하였으며, 이에 실험을 종료하였다. Figs. 12 ~ 14는 각 시험체별 하중-변위 이력곡선을 나타낸다. 각각의 실험결과를 실제 측정된 공시체 강도를 반영한 해석결과와 비교하여 나타내었으며, 해석에는 CoWiTA를 사용하였다.

SP-C 시험체의 경우, 최대항력은 276.3 kN, 최대변위 64.8 mm로 측정되었으며, 항복변위 20.2 mm, 극한변위 52.0 mm, 그리고 변위연성도는 2.58로 계산되었다. 여기서, 항복변위 및 극한변위는 Park(1988)이 제안한 방법에 따라 산출되었다. Fig. 15에 나타낸 바와 같이 항복변위(Δ_y)는 최대하중(V_{max})의 75%($0.75 V_{max}$)에 해당하는 값을 갖는 점과 원점을 잇는 직선과 최대하중(V_{max})에서의 수평선이 만나는 점에 해당하는 변위값으로 정의하며, 극한변위(Δ_u)는

(a) for displacement (b) for slip control (c) for rotation control
Fig. 10. Attached LVDT

(a) SP-C (b) SP-D8 (c) SP-D9
Fig. 11. Buckled Outer Tub

Fig. 12. Load-Displacement Hysteresis Curve: SP-C

Fig. 13. Load-Displacement Hysteresis Curve: SP-D8

Fig. 14. Load-Displacement Hysteresis Curve: SP-D9

Fig. 15. Definition of Displacement Ductility (Park, 1988)

최대하중점을 지나 최대하중의 80% ($0.8 V_{\max}$)에 해당하는 변위값으로 정의하며, $0.8 V_{\max}$ 이전에 파괴된 경우에는 최대 변위값을 사용한다. 변위연성도(μ)는 극한변위와 항복변위의 비로 정의한다. 극한에너지(E_u)와 항복에너지(E_y)는 각각 극한변위와 항복변위에 도달할 때 까지 소산한 에너지를 의미하며, 에너지연성도(μ_E)는 극한에너지와 항복에너지의 비로 정의된다. Fig. 16에서와 같이 도형 ABDE의 면적은 극한에너지를, 도형 ABC의 면적은 항복에너지를 나타낸다.

Fig. 16. Definition of Ultimate Energy and Yield Energy (Park, 1988)

SP-C 시험체의 휨강도는 사전해석의 P-M 상관도에서 예측된 결과보다 상당히 낮게 측정이 되었는데, 이는 상대적으로 타 시험체보다 큰 축력에 의해 대변위 효과가 더 크게 반영되고 이에 따라 강관의 국부좌굴이 조기에 발생하는 현상이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 특히 본 시험체에 사용된 강관의 두께는 3.5 mm로서 좌굴에 매우 민감하여 이러한 거동이 나타난 것으로 판단된다. 해석 결과 또한 이러한 대변위효과가 고려되었기에, 실험결과와는 상당부분 일치하는 결과를 보여주고 있다. Fig. 17에 하중-변위 포락곡선을 나타내어 각 시험체의 실험결과를 비교하였으며, Table 4에 결과를 정리하여 나타내었다.

Fig. 17. Load-Displacement Envelope Curves

SP-D8 시험체의 최대휨력은 355.4 kN, 최대변위는 58.6 mm, 항복변위는 19.4 mm, 극한변위는 43.0 mm로 나타났으며, 변위연성도는 2.22로 계산되었다. SP-D9 시험체의 최대 휨력은 319.8 kN로 측정되어 예상보다 더 큰 강도를 보여주었다. 최대변위는 45.5 mm로 측정되어, 항복변위는 18.2 mm, 극한변위는 27.8 mm로 산출되었으며, 변위연성도는 1.53으로 계산되었다. 실험결과로 판단할 때, DSCT 기둥인 SP-D8과 SP-D9이 CFT 기둥인 SP-C와 비교하여 유사한 강재량과 더 적은 콘크리트를 사용함에도 16~29% 정도

큰 모멘트 강도를 갖는다는 점을 고려한다면 CFT 기둥에 대비 DSCT 기둥을 사용하는 것이 더 경제적인 방법이라고 판단할 수 있다.

Table 4. Test Result

Specimen		SP-C	SP-D8	SP-D9
Lateral displacement (mm)	Yield	20.2	19.4	18.2
		100%	96.0%	90.2%
	Ultimate	52.0	43.0	27.8
		100%	82.7%	53.5%
	Max.	64.8	58.6	45.5
		100%	90.4%	70.2%
Strength (kN, lateral load)	Yield	255.5	327.6	299.7
		100%	128.2%	117.3%
	At ultimate displ.	221.1	284.3	255.8
		100%	128.6%	115.7%
	Max.	276.3	355.4	319.8
		100%	128.6%	115.7%
Moment (kN-m)	Yield	510.9	655.2	599.5
		100%	128.2%	117.3%
	At ultimate displ.	442.1	568.7	511.6
		100%	128.6%	115.7%
	Max.	552.7	710.9	639.5
		100%	128.6%	115.7%
Energy (kN-m)	Yield	2.85	3.49	2.97
		100%	122.4%	104.0%
	Ultimate	13.83	15.20	9.43
		100%	109.8%	68.2%
Ductility	Displacement	2.58	2.22	1.53
		100%	86.2%	59.3%
	Energy	4.85	4.35	3.18
		100%	89.7%	65.5%

발생한 횡방향 변위의 경우, SP-C가 가장 큰 극한변위와 항복변위를 보여주었으며, 가장 큰 변위연성도를 나타내었다. SP-D8과 SP-D9의 경우 SP-C 대비 각각 약 10% 및 30% 정도 감소된 변위연성도를 보여주었다. 극한에너지의 경우 SP-D8이 SP-C 보다 약 9.8% 큰 에너지를 소산하여 가장 큰 값을 나타내었으나, 에너지연성도는 SP-C 대비 10.3% 낮은 값을 보여주었다. 특히, SP-D9의 경우, 변위연성도와 에너지연성도가 SP-C 대비 각각 13.8%, 40.7% 작은 값을 나타내어, 연성도 측면에서 가장 불리한 것으로 나타났다. 따라서 강도측면에서는 DSCT 기둥이 더 우수한 성능을 보여주었지만 연성도 측면에서는 CFT 기둥이 더 우수한 성능을 보여주었다.

DSCT 기둥인 SP-D8과 SP-D9이 CFT 기둥인 SP-C 보다 더 낮은 연성도 값을 갖는 것은 최대강도 발현 때까지 SP-C

보다 더 큰 강성을 유지하기 때문으로 판단된다. 따라서 DSCT 기둥의 적용시에는 요구성능 조건에 맞춰, 강도 및 연성도와 같이 각 성능의 우선순위에 따라 설계와 적용이 이루어져야 할 것으로 판단된다. SP-D8의 경우, SP-C와 거의 동일한 양의 강재가 사용되고 콘크리트는 SP-C 대비 36%만이 사용되었음에도 28.6%의 강도 증가와 10.3%만의 에너지연성도 감소가 발생하였다는 점을 고려한다면 상당히 경제적인 구조로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 동일 직경을 갖는 CFT 기둥과 DCST 기둥에 대해 준정적 실험을 수행하여 휨거동을 비교하였다. CFT 기둥 시험체 1기와 DSCT 시험체 2기를 비교하였으며, 콘크리트 사용량을 최소화하기 위하여 각각 중공비를 80%와 90%로 정하였다. DSCT 시험체 1기는 CFT 시험체와 동일 강재량을 사용하도록 설계하였으며, 다른 1기는 강관의 단면2차모멘트가 CFT 시험체의 강관과 동일하도록 설계하였다. 실험 수행 후 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) DSCT 기둥이 CFT 기둥과 비교하여 유사한 강재량과 더 적은 콘크리트를 사용함에도 16~29% 정도 큰 모멘트 강도를 갖는다는 점을 고려한다면 CFT 기둥에 대비 DSCT 기둥이 더 경제적인 구조로 판단된다.
- (2) 기둥시험체에 균형축력이 작용하였을 경우에는 강도 측면에서는 DSCT 기둥이 더 우수한 성능을 보여주었지만 연성도 측면에서는 CFT 기둥이 더 우수한 성능을 나타내었다. 하지만, CFT 기둥의 균형축력이 DSCT 기둥의 균형축력에 비해 상당히 큰 값을 가지므로, 이를 고려한 설계와 적용이 필요하다.
- (3) DSCT 기둥의 적용시에는 요구성능 조건에 맞춰, 강도 및 연성도와 같이 각 성능의 우선순위에 따라 설계와 적용이 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- (4) 중공비 80%인 DSCT 기둥의 경우, CFT 기둥과 거의 동일한 양의 강재가 사용되고 콘크리트는 CFT 기둥 대비 36%만이 사용되었음에도 28.6%의 강도 증가와 10.3%만의 에너지연성도 감소가 발생하였다는 점을 고려한다면 상당히 경제적인 구조로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원(과제번호 12기술혁신E09) 및 한국해양과학기술원(KIOST)의 “해상풍력단지 에너지발전단가(LCOE) 최적화 원천기술 개발(PE99634)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Chung, C.H., and Lee, H.J. (2012) Evaluation of Structural Behavior of SC Walls in Nuclear Power Plant with Openings. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5A, pp. 277-287. (in Korean)
- Chung, C.H., Jin, B.M., Kim, I.G., and Kim, S.W. (2004) Experiments on Circular Steel Tubes and Concrete Filled Circular Steel Tubes in Bending. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 4A, pp. 807-816. (in Korean)
- Chung, C.H., Jin, B.M., Kim, I.G., and Park, S.J. (2003) Nonlinear Analysis of Concrete Filled Steel Tube Subjected to Pure Bending. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 5A, pp. 877-887. (in Korean)
- Chung, C.H., Jung, R., Moon, I.H., and Lee, J. (2013) Evaluation of Structural Capacity of SC Walls in Nuclear Power Plant Accounting for the Area Lost to Openings. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2181-2193. (in Korean)
- Han, T.H., Lee, S., Won, D., and Kim, J.J. (2016) Performance Evaluation of Joint Connectors for Modular DSCT Wind Turbine Tower. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 5, pp. 209-220. (in Korean)
- Han, T.H., Park, Y.H., Won, D., and Lee, J.H. (2015) Design Feasibility of Double-Skinned Composite Tubular Wind Turbine Tower. *Wind and Structures*, Vol. 21, No. 6 pp. 727-753.
- Han, T.H., Stallings, J.M., and Kang, Y.J. (2010) Nonlinear Concrete Model for Double-Skinned Composite Tubular Columns. *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 12, pp. 2542-2553.
- Han, T.H., Won, D.H., Kim, S., and Kang, Y.J. (2013) Performance of A Double-Skinned Composite Tubular Column Under Lateral Loading: Analysis. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 65, No. 2, pp. 121-135.
- Hong, H., Kim, S., and Han, T.H. (2016a) Section Design of DSCT Tower Supporting Wind and Tidal Power Turbines. *OCEANS 2016 MTS/IEEE*, Monterey, USA.
- Hong, H., Kim, S., and Han, T.H. (2016b) Standard Section Design of FRP DSCT Tower Supporting 3MW Wind Turbine. *3rd Australasia and South East Asia Conference in Structural Engineering and Construction (ASEA-SEC-3)*, Kuching, Malaysia.
- Hwang, W.S., Kim, D.J., and Jung, D.A. (2003) Ultimate Strength of CFT Short Columns Considering the

- Confining Effect of Concrete. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 5A, pp. 1011-1018. (in Korean)
- Inai, E., Mukai, A., Kai, M., Tokinoya, H., Fukumoto, T., and Mori, K. (2004) Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Beam Columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp.189-202.
- Korea Concrete Institute (2012) *Concrete Structure Design Code*, p. 371.
- Korea Institute of Ocean Science & Technology (2017) *CoWiTA Manual Version 2.15*.
- Korean Electric Association (2010) *Structures in Nuclear Facilities: Steel Plate Concrete Structures Korea Electric Power Industry Code*. KEPIC-SNG-10. (in Korean)
- Korean Society of Steel Construction (2011) *Korean Steel Structure Design Code and Commentary: Load and Resistance Factored Design*. Korean Society of Steel Construction, p. 41.
- Moon, J., Ko, H., and Lee, H.E. (2012) Development of Non-linear Finite Element Modeling Technique for Circular Concrete-filled Tube (CFT). *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3A, pp. 139-148. (in Korean)
- Park, R. (1988) Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing. *Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 8, Tokyo, Japan.
- Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S., and Nishiyama, I. (2004) Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 2, pp.180-188.
- Shakir-Khalil, H. and Illouli, S. (1987) Composite Columns of Concentric Steel Tubes. *Proceeding of Conference on the Design and Construction of Non Conventional Structures*, Vol. 1, London, pp. 73-82.
- Tao, Z., Han, L.H., and Zhao, X.L. (2004) Behavior of Concrete-Filled Double Skin (CHS Inner and CHS Outer) Steel Tubular Stub Columns and Beam Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, No. 8, pp. 1129-1158.
- Teng, J.G., Yu, T., Wong, Y.L., and Dong, S.L. (2007) Hybrid FRP-Concrete-Steel Tubular Columns: Concept and Behavior. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 4, pp. 846-854.
- Wei, S., Mau, S.T., Vipulanandan, C., and Mantrala, S.K. (1995a) Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Analysis. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 12, pp. 1815-1821.
- Wei, S., Mau, S.T., Vipulanandan, C., and Mantrala, S.K. (1995b) Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Experiment. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 12, pp. 1806-1814.
- Xiao, Y., He, W., and Choi, K.K. (2005) Confined Concrete-Filled Tubular Columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 3, pp.488-497.
- Yi, J.H., and Han, T.H. (2016) Reliability Analysis on Wind Turbine Tower Structures with Composite Section. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 4, pp. 185-194. (in Korean)
- Yu, T., Wong, Y.L., Teng, J.G., Dong, S.L., and Lam, E.S.S. (2006) Flexural Behavior of Hybrid FRP-Concrete-Steel Double-Skin Tubular Members. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 10, No. 5, pp. 443-452.
- Zhao, X-L., and Grzebieta, R. (2002) Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS Inner and SHS Outer) Tubes. *Thin-Walled Structures*, Vol. 40, No. 2, pp. 199-213.

Received ■ August 9, 2017

Revised ■ August 10, 2017

Accepted ■ March 6, 2018