소형 그라우트 충전 강관 부재의 횡방향성능에 관한 실험적 연구

Lateral Structural Performance of Small-Size Grout-Filled Tubular Members

정정식* · 이현기** · 김희정*** · 안진희****

Jeong, Jeong Sik*, Lee, Hyeon Gi**, Kim, Hee Jeong***, and Ahn, Jin-Hee****

Abstract

Concrete-filled tubular members exhibit improved structural performance without need for additional sectional improvement. Such enhanced structural performance can be attributed to improved compressive strain in the filled concrete arising from a confining effect developed by the external tube as well as reduction of local buckling in the external tube. In this study, lateral load tests were performed to confirm the change in the structural performance as grout is filled in a steel tubular member, similar to the sectional stiffness of small-size H-beams. To compare the effect of filling grout on the change in the structural performance of the small tubular member, its load resistant behavior was examined as functions of the existence of grout in the tube and change of curvature of the filled tube. In addition, comparisons were made with lateral load resistant behaviors of H-beams with similar stiffness.

Key words : Grout Filled Tubular, Small-size Steel Tube, Lateral Load Resistance, Loading Test

요 지

콘크리트 충전강관(CFT) 구조는 외부 강관의 구속효과에 따른 강관 내 충전 콘크리트의 압축변형률 향상과 강관의 국부좌굴 감소에 따라 부재의 단면증가 없이 부재의 구조성능이 향상된 부재이다. 본 연구에서는 콘크리트 충전강관과 같이 소형 H형강 수준의 단면강성을 가지는 소형 강관 부재에 그라우트를 충전함에 따라 나타나는 구조성능 변화를 확인하기 위하여 그라우트 충전 강관부재에 대한 횡방향 하중재하 실험을 실시하였다. 강관에 대한 그라우트 충전에 따른 강관부재의 구조성능 변화를 비교하기 위하여 강관에 대한 그라우트 충전유무와 충전강관의 곡률 변화에 따른 하중저항 거동을 평가하였으며, 유사한 강성을 가지는 H형강의 횡방향 거동특성까지도 비교하였다.

핵심용어 : 그라우트 충전강관, 소형 강관, 횡방향 하중저항, 하중 재하실험

1. 서 론

콘크리트 충전 강관 부재(Concrete Filled Steel Tube, CFT)는 강관에 콘크리트를 충전하여 콘크리트에 대한 강관의 구속효과로 충전된 콘크리트의 압축강도 향상과 충전 콘크리트에 의한 강관의 국부좌굴 저항 성능 향상으로 동일한

규격의 강관부재와 비교하여 외부 강관부재의 추가적인 단면증가 없이 콘크리트 충전 효과에 의한 합성효과를 통하여 강관의 하중저항 성능 향상을 기대할 수 있는 구조 형태이다(Park, 2006; Moon et al., 2012). 콘크리트 충전 강관 부재는 최근까지 다양한 해석 및 실험적 연구가 진행되어 왔으며, 콘크리트 충전 강관 부재가 가지고 있는 구조적 장점으로

*정회원, 경남과학기술대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: joj2058@naver.com)

Member, Master Course Student, Department of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science & Technology

**정회원, ㈜브리온랩 대표이사, 공학박사

Member, Ph.D., Representative Director, BRICON LAB CO., LTD.

*** (주)한국교량 기술연구소 소장, 공학석사

Chief Engineer, R&D Center, KOREA BRIDGE Corp. Master of Engineering

****교신저자, 정회원, 경남과학기술대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-55-751-3293, Fax: +82-55-751-3209, E-mail: jhahn@gntech.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science & Technology

토목 및 건축구조물에 다양한 형태로 적용되고 있다(Choi et al., 2012; Kim et al., 2013; Lee et al., 2014; Ma and Choi, 2017).

콘크리트 충전 강관 부재에 대한 연구들은 강재부재의 폭, 두께비 등에 따른 충전 부재의 축 방향 저항 성능이나, 강재와 콘크리트 합성에 따른 합성 효과를 고려하기 위한 휨 저항 성능, 지진하중에 대한 콘크리트 충전 강관 부재의 내진 저항성능 등에 대한 연구들이 주로 이루어져 왔다(Xiao et al., 2004; Cho et al., 2010). 대부분의 연구들이 거더 또는 기둥부재를 대상으로 하여 연구가 수행됨에 따라 소형 강관부재에 대한 충전 및 합성효과에 대한 연구들은 상대적으로 부족하다(Johansson and Gylltoft, 2001; Jeong et al., 2015). 또한 소형 강관부재의 경우 배합된 콘크리트의 골재 크기 및 유동성 등을 고려할 경우 다짐이나 재료분리 등에 대한 문제로 인하여 콘크리트 충전에 따른 효과를 기대하기 어려울 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 콘크리트와 동일한 압축강도를 가지며 골재의 재료분리 없이 강관과 합성효과를 기대할 수 있도록 무수축 그라우트를 소형 강관 부재에 적용 할 수 있지만, 소형강관 부재에 대한 그라우트 충전 효과에 대한 연구 등은 많이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 소형강관 부재에 대한 그라우트 충전효과를 실험적으로 평가하여 지름 200 mm 이하의 소형 원형 강관 부재에 그라우트를 국부적으로 충전한 강관과 비충진 강관에 대한 하중저항 성능을 비교·평가하고자 하였다. 횡방향으로 휨 하중을 재하하여 그라우트 충전에 따른 휨 강성 증가에 따른 거동특성변화를 확인하고자 하였다. 특히 본 연구에서는 그라우트 충전 강관 소형부재가 기둥부재로 적용하여 횡방향 하중이 작용하는 경우 발생하게 되는 콘크리트 매입부의 휨성능을 비교하기 위하여 외팔보 형태로 실험체를 제작하여 그라우트 충전 강관 소형부재의 휨저항 성능을 비교하였다.

2. 그라우트 충전 강관의 횡방향 하중 재하 실험

2.1 실험 개요 및 실험체

본 연구에서는 그라우트 충전 소형 강관 부재의 휨 방향

저항성능을 평가하기 위하여 소형 강관 부재를 대상으로 그라우트 충전 여부와 유사한 휨 강성을 가지는 H형강을 대상으로 횡 방향 하중재하 실험을 실시하였다. 본 연구에서의 그라우트 충전 소형 강관부재는 횡 방향 성능 및 기능적 특성 증진을 위해 일정한 곡률을 가진 원형강관 부재에 그라우트를 충전한 부재를 적용하고, 소형강관에 대한 그라우트 충전 효과와 휨 성능 증대, 곡률에 따른 성능변화 등을 평가하고자 하였다. 이를 위해 강관에 대한 그라우트 충전 여부, 강관부재의 곡률유무에 따라 실험 변수를 설정하고, 강관부재와 유사한 휨 강성을 가지는 H형강을 기준으로 횡 방향 하중에 대한 성능 및 거동특성을 비교·분석하였다.

본 연구를 위하여 Table 1과 같이 총 5개의 횡 방향 하중재하 실험 변수로 설정하였다. 소형강관부재는 SGT275강종의 지름 139.8 mm에 두께 6 mm의 강관부재를 적용하였으며, 충전 강관과의 비교를 위해 SM400강종의 H150 × 75 × 5 × 7의 H형강이 기준 시험체로 사용되었다. 충전강관 시험체의 경우 설계기준 강도 60 MPa 무수축 그라우트를 하부기초부에서 867 mm까지 충전하였다. 강관이 매입된 기초 콘크리트는 설계기준 강도(f_{ck}) 30 MPa이며, 강관 부재 및 H형강의 매입 깊이는 600 mm로 설정하였다. 그라우트 충전 강관 시험체의 경우 실험결과에 대한 정확성을 고려하기 위하여 동일한 조건의 시험체를 A와 B로 제작하였다.

Table 1에 소형강관부재와 H형강의 휨강성을 비교하여 평가하기 위하여 실험체별 단면적과 단면 2차 모멘트를 비교하여 나타내었다. 그라우트 충전 강관실험체의 단면 2차 모멘트의 경우 그라우트와 강관의 합성효과 및 각 재료의 강성을 반영하여 합성 단면에 대한 단면 2차 모멘트를 계산한 값이다.

하부기초부에 적용된 설계강도 30 MPa의 콘크리트는 Table 2와 같이 배합설계를 실시하였으며, 소형강관 충진을 위한 60 MPa의 무수축 그라우트의 기초 물성 및 배합비는 Table 3과 같다. 충전 그라우트의 유동성 평가 결과 플로우는 240 mm로 KS F 4044 수정성 시멘트 무수축 그라우트의 기준에 만족하는 것으로 확인하였다. 충전 강관은 강관을 수직으로 고정된 후 강관끝단을 부착물로 밀봉하였다. 강관 상부로부터 그라우트를 1차 충전한 후, 밀봉된 부착물을

Table 1. Type and Specification

Specimen	Dimension (mm)	Property		Filled grout		Remarks
		Area (mm ²)	Moment of inertia (mm ⁴)	f_{ck} (MPa)	Type	
H-150/75	H150 × 75 × 5 × 7	1,785	6,660,000	-	-	Reference specimen
GF-T6C60A	D139.8/t6.0	4,192	7,364,300	60	Non-shrinkage grout	Non-shrinkage grout filled tubular
GF-T6C60B	D139.8/t6.0	4,192	7,364,300	60	Non-shrinkage grout	Non-shrinkage grout filled tubular
CT-T6	D139.8/t6.0	2,552	5,660,000	-	-	Curved tubular
ST-T6	D139.8/t6.0	2,552	5,660,000	-	-	Straight tubular

제거하여 충전된 강관을 하부기초부 거푸집에 고정하여 2차적으로 하부 기초콘크리트를 타설하였다. 또한 충전강관 끝단은 하부기초 콘크리트부에 매립됨에 따라 단부가 폐쇄된 것으로 보고 CFT강관과 무수축 그라우트간의 슬립은 없는 것으로 판단하였다. 이에 따라 재령 28일 압축강도 결과는 하부 기초콘크리트 40.47 MPa, 무수축 그라우트 63.69 MPa로 나타내었다. 사용되는 콘크리트 및 그라우트가 설계 및 목표 강도 이상의 강도를 만족하는 것으로 확인하였다.

Table 2. Mix Proportion of Concrete

W/C (%)	S/C (%)	Unit weight (kg/m ³)				
		W	C	Fine agg.	Coarse agg.	Ad.
41.0	47.5	170	415	791	902	1.9

Table 3. Proportion and Properties of Grout

Ingredient	W/B	Unit weight (kg/m ³)		Flow (mm)	Bleeding (%)
		W	B		
Grout	16.5	330	2,000	225 ≤	5 ≥

2.2 실험방법

횡 방향 하중재하 실험은 하중재하 방법 및 재하 장비 특성을 고려하여 충전강관 실험체에 횡 방향으로 하중이 재하 될 수 있도록 제작된 실험체를 수평방향으로 고정하고 수직하중을 재하하여 횡 방향 하중이 가력되도록 설치하였

다. 하중재하는 200 kN 용량의 Actuator를 사용하였으며, Actuator의 압축하중이 강관 실험체에 전달 될 수 있도록 실험체 재하 위치에 두께 20 mm, 폭 400 mm의 가력지그를 설치하였다. 또한 기초 콘크리트 변위를 제어하기 위해 기초 콘크리트 상부에 고정용 지그를 설치하여 하부 바닥면과 볼트체결을 통해 고정하였다. Fig. 1은 그라우트 충전 강관 실험체의 상세를 나타낸 것이다.

하중재하에 따른 실험체의 하중저항 성능 및 변형률 특성을 평가하기 위하여 LVDT와 콘크리트 및 스트레인 게이지를 설치하여 실험체의 하중에 따른 변위 및 변형률을 측정하였다. LVDT 설치 위치는 재하지점, 최상단지점과 재하지점과 최상단지점의 1/2지점에 설치하였으며, 기초 콘크리트의 균열 및 변형을 측정하기 위해 콘크리트 표면 스트레인 게이지는 부착 위치는 기초 콘크리트 매입부의 상·하부에 부착하였다. 강재용 스트레인 게이지는 실험체의 상·하부 50 mm, 350 mm, 647.5 mm에 부착하였다. 또한, H형강의 경우 상·하부 50 mm의 플랜지 좌우에 국부좌굴을 확인하기 위하여 스트레인 게이지를 추가적으로 설치하였으며, 강관에는 ± 30°에 해당하는 위치에 강재용 스트레인 게이지를 부착하였다. 스트레인 게이지 및 LVDT 설치 위치는 Fig. 2에 나타내었다.

하중재하는 변위 제어로 3 mm/min의 속도로 하중을 재하하였으며, 하중위치는 단부로부터 648 mm 위치로 다른 시험체들과 비교하여 곡률이 있는 시험체의 곡률 영향을 최소화하기 위하여 곡률강관에 대한 하중가력점이 수직으로 재하 될 수 있도록 하였다. 실험체의 하중재하에 따른 거동특성을 비교하기 위해 디지털 카메라로 영상 촬영을 하여 파괴 양상 및 거동을 확인하였다.

Fig. 1. Test Specifications

(a) Test set-up and method

Fig. 2. Test Set-up and Instrumentation

(b) Instrumentation (LVDT and strain gauge)

3. 횡방향 하중 재하 실험결과

그라우트 충전 소형 강관 부재의 횡 방향 하중저항 특성 및 충전 효과를 검증하기 위해 비충진 강관 및 H형강 부재와 비교한 횡 방향 하중 재하 실험결과를 통해 도출된 하중-처짐, 변형률, 파괴형태로 구분하여 평가하였다.

3.1 하중 - 처짐 관계

소형 강관부재의 구조성능에 대한 그라우트 충전 효과를 확인하기 위해 곡률을 가진 소형강관에 대한 그라우트 충전 및 곡률 여부와 유사한 강성을 가지는 H형강 부재의 횡방향 하중-처짐 관계를 비교하고, 항복강도와 극한강도를 산정하여 비교·분석하였다. 다음 Fig. 3은 세척위치별 실험체의 하중-변위 그래프를 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 3은 모든 실험체의 하중제하 위치의 하중-처짐 관계를 비교하여 나타낸 것으로 무수축 그라우트 충전 강관 실험체인 GF-T6C60A와 GF-T6C60B 실험체가 비충진 강관 시험체 CT-T6, ST-T6와 비충진 강관과 유사한 강성을 가지는 H-150/75과 비교하여 횡 방향 하중에 대하여 항복하중과 극한강도가 증가하고 있음을 확인 할 수 있다. CT-T6, ST-T6 실험체의 경우 강관의 곡률유무에 따른 하중저항 성능을 비교한 것으로 두 실험체의 항복강도와 극한강도는 유사한 것으로 평가되며 휨 강성이 유사한 H-150/75도 유사한 하중저항 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

실험체 단부 외측과 중앙부 하중-변위를 나타낸 Figs. 3(b), (c)에서도 하중재하 위치에서의 하중-변위 관계와 유사한 거동을 가지고 있음을 확인할 수 있으며, 비충진 곡형강관의 경우 상대적으로 탄성 범위 내에서의 강성이 일정 수준 감소되지만 최대 하중은 유사한 수준을 나타내고 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 3(a)는 하중-변위 관계로부터 각 실험체의 항복하중과 극한강도를 평가하였다. 항복하중은 탄성구간과 극한강도의 기울기를 기준으로 탄성구간의 기울기와 변곡점이 후 극한강도의 기울기가 만나는 점을 항복하중으로 정의하였으며, 극한강도는 각 실험체의 최대하중으로 정의하였다.

(a) at Loading point

(b) at LVDT-1

(c) at LVDT-2

Fig. 3. Load-Displacement Relationship

그라우트 충전 여부에 따른 항복하중 및 극한하중 비교결과, 그라우트 충전 실험체인 GF-T6C60의 항복하중과 극한강도가 비충진 강관인 CT-T6 실험체와 비교하여 항복강도는 약 18.13%, 극한강도는 약 19.88% 향상되는 것으로 확인되었으며, 비충진강관과 비교하여 유사한 강성을 가지는 H-150/75와 비교한 경우 그라우트 충전 강관의 항복강도는 약 20.56%, 극한강도는 약 19.30% 증가하는 것으로 평가되었다.

Fig. 4와 Table 4는 H형강 실험체의 실험값을 기준으로 강관부재에 대한 항복강도와 극한강도를 비교하여 나타낸 것이다. 강관에 하중 가력부분 이상 높이까지 그라우트를 충전함으로써 강관부재의 항복강도 및 극한강도가 증가함을 알 수 있으며, 소형강관에 대한 그라우트 충전으로 강관부재의 구조적 성능을 향상시킬 수 있음을 확인 할 수 있다.

Table 4. Yield & Ultimate Load Ratio

Specimen	Yield Load (%)	Ultimate Load (%)
GF-T6C60A	120.56	119.30
GF-T6C60B	120.32	117.60
CT-T6	100.16	99.62
ST-T6	102.06	99.69
H-150/75	100.0	100.0

Fig. 4. Yield & Ultimate Load Level and Ratio

3.2 하중 - 변형을 관계

그라우트 충전 강관 부재와 비교 실험체에 대한 횡 방향 하중재하에 따른 부재의 변형률을 평가하기 위하여 각 위치에 따른 변형률을 Figs. 5 and 6에 비교하여 나타내었다. 강재 매입부 상하에 부착된 콘크리트의 변형률은 Figs. 5(a) and 5(b)와 같이 대부분 실험체에서 하중 증가에 따라 하중-처짐 그래프와 유사한 수준으로 변형률이 증가하며, 강재 매입부 하부의 압축 응력으로 인한 하부의 변형률이 증가하는 양상을 나타내었다.

강관부재와 H형강에 설치된 강재의 변형률은 Figs. 6(a) ~ 6(e)에 나타내었다. 대부분의 실험체가 기초 콘크리트와 가까운 위치에서 높은 변형률을 보이며, 하중-변형을 관계도 하중-처짐 결과와 유사하게 강관부재에 대한 그라우트 충전

(a) at Upper side of section

(b) at Lower side of section

Fig. 5. Strain on Surface of Concrete

(a) at ①-B-C section

(b) Strain at ①-T-C section

Fig. 6. Strain of Steel Members

(c) Strain at ②-B-C section

(d) Strain at ②-T-C section

(e) Strain at ③-B-C section

Fig. 6. (Continued)

효과에 따라 강관의 국부좌굴 등에 대한 강관의 저항능력이 증가하고, 이에 따라 횡 방향 하중 증가에 대한 변형을 또한 비교 실험체 보다 크게 증가하는 양상을 나타내었다.

3.3 파괴 모드

그라우트 충전 강관 부재와 비교 대상 실험체에 대한 횡 방향 하중재하 결과를 통해 실험체별 파괴양상을 하중재하 진행에서 최종 파괴까지 디지털 카메라를 통하여 확인하였다. Fig 7은 각 실험체의 최종 파괴특성을 비교하여 나타낸 것으로 변형을 측정 결과와 같이 대부분의 실험체에서 강재와 콘크리트 매입부 경계에서 국부좌굴 및 콘크리트 균열

(a) H-150/75

(b) GF-T6C60A

(c) GF-T6C60B

(d) CT-T6

(e) ST-T6

Fig. 7. Failure Modes of Each Specimen

진전으로 인해 실험체의 파괴가 발생하는 것으로 확인되었다. 그라우트 충전 강관 실험체에서는 GF-T6C60 콘크리트 경계부의 국부좌굴 없이 콘크리트 매입 경계부에서의 균열에 따라 파괴특성이 발생하는 것으로 나타났으며, 비충진 실험체의 경우 횡 방향 하중에 의하여 강관부재 하부의 국부좌굴에 의하여 실험체의 파괴가 발생하여 콘크리트 경계부의 균열이 발생함을 확인하였다. H형강이 매입된 실험체의 경우 기초 콘크리트에 매입된 H형강 플랜지 주변에서 콘크리트 균열이 발생하고 하중재하에 따라 균열확대 및 주위 콘크리트의 박락현상이 발생하며, 최대하중 이후 상부플랜지 부근 콘크리트의 파괴가 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 무수축 그라우트 충전 소형 강관 부재에 대한 횡 하중 저항 성능을 평가하기 위하여 충전 유무 및 곡률의 여부에 따라 구조적 거동을 비교하였으며, 유사한 강성을 가진 소형 H형강 부재와 횡 방향 저항성능을 비교하여 평가하였다.

소형 그라우트 충전강관 부재에 대한 횡방향 하중재하 실험결과, 소형원형강관의 그라우트 충진을 통한 합성효과로 횡 방향 하중에 대한 단면강성이 향상되고, 이를 통해 충전 부재에 대한 항복하중과 극한하중이 증가되는 것으로 평가되었다. 또한 그라우트 충전 강관부재는 합성효과에 의한 강성증가와 추가적으로 그라우트의 충전 효과와 강관 및 그라우트 각 재료의 구속효과로 인하여 충전 부재의 횡 방향 하중에 대한 저항성능 향상에 기여도가 높은 것으로 확인되었다. 강관의 곡률 유무는 부재의 휨성능에 크게 영향이 없음을 확인하였다. 비충진 강관부재의 경우 강관의 국부좌굴의 진전으로 항복 후 콘크리트부의 균열 확대 및 박락으로 파괴되지만 충전 소형강관부재는 충전 그라우트에 의하여 강관에 국부좌굴이 발생하지 않고, 매입 콘크리트부의 균열이 점진적으로 진전되어 파괴되는 양상을 나타내었다. 본 연구결과 소형강관부재에 대한 그라우트 충진을 통하여 기존 CFT 부재와 동일하게 강관의 하중저항성능 및 파괴거동이 향상되는 것으로 평가되었다. 따라서 본 연구의 그라우트 충전 효과의 평가를 기반으로 강관부재 단면과 충전 그라우트의 강도 등을 고려함으로써 경제적인 소형 CFT 부재로의 활용 가능성이 높아 향후 이에 대한 경제성 분석을 기반으로 한 실험적 연구 및 해석 등 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국토지주택공사에서 시행한 중소기업 기술개발 지원사업에 의하여 수행되었습니다.

References

- Cho, K.S., Kim, H.Y., Kim, H.J., Min, B.Y., and Kwon, I.K. (2010). Experimental study on fire resistance performance of CFT (Concrete Filled Tube) column according to cross section of steel, concrete compressive strengths and load ratios. *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 104-111.
- Choi, I.R., Chung, K.S., Kim, J.H., and Hong, G.H. (2012). Structural performance of high-strength concrete-filled steel tube steel columns using different strength steels. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 24, No. 6, pp. 711-723.
- Jeong, E.B., Yeom, H.J., and Yoo, J.H. (2015). Analytical study of shear capacity for large-diameter concrete-filled steel tubes (CFT). *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 27, No.5, pp. 435-445.
- Johansson, M., and Gylltoft, K. (2001). Structural behavior of slender circular steel-concrete composite columns under various means of load application. *Steel and Composite Structures*, Vol. 1, No. 4, pp. 393-410.
- Kim, S.H., Yom, K.S., and Choi, S.M. (2013). A study on the load carrying capacity and deformation capacity of the internal anchors welded cold formed concrete filled columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 25, No. 4, pp. 347-357.
- Lee, D.S., Kim, T.K., and Lee, S.C. (2014). Development and field application of portable tensioning system using segmental CFT member. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 3, pp. 965-975.
- Ma, S.J., and Choi, J.H. (2017). Evaluation of the flexural behavior of composite beam with tunnel steel rib support using circular concrete filled steel tube. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 29, No. 5, pp. 353-359.
- 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.
- Park, K.G. (2006). An experimental study on the compression behavior of the circular and square tubular steel pipe filled with concrete. *Journal of the Korean Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 6, No. 1, pp. 55-63.
- Xiao, Y., He, W., Mao, X., Choi, K.K., Shang, S., and

Guo, Y. (2004). Experimental studies of confined concrete filled steel tubular (CCFT) columns. *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vencouver, Canada, Paper No. 681.

<i>Received</i>	July 5, 2018
<i>Revised</i>	July 9, 2018
<i>Accepted</i>	November 21, 2018