

개선된 부착슬립 모델을 적용한 부분 CFST 기둥의 수치해석

황 주 영¹·곽 효 경^{2†}

¹한국과학기술원 건설및환경공학과 연구조교수, ²한국과학기술원 건설및환경공학과 교수

Numerical Approach for a Partial CFST Column using an Improved Bond-Slip Model

Ju-young Hwang¹ and Hyo-Gyoung Kwak^{2†}

¹Research Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 34141, Korea

²Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon, 34141, Korea

Abstract

In this study, a numerical approach for evaluating the resisting capacity of a partial concrete-filled steel tube (CFST) column is introduced. By strengthening the plastic hinge part of a traditional reinforced concrete column with a steel tube, a partial CFST shows a similar bending moment capacity as that of a full CFST column but with reduced material cost. To conduct an elaborate numerical analysis of a partial CFST column, an improved bond-slip model is applied to a finite element (FE) model at the interface between the steel tube and in-filled concrete. This numerical model is verified through the results of a double curvature bending-compression test. A parametric study with the proposed numerical model is used to obtain the load moment interaction diagrams for evaluating the resisting capacity based on various dimensions. Finally, the required strengthening length is estimated for each degree of thickness of the steel tube, and the failure mechanism of the partial CFST column based on the dimensions of the steel tube are identified.

Keywords : bond-slip effect, partial CFST column, double curvature bending-compression test, P-M interaction diagram

1. 서론

강관의 내부를 콘크리트로 채우는 CFST(Concrete Filled Steel Tube) 기둥 구조는 외부 강관이 내부 콘크리트를 구속하면서 얻어지는 여러 우수한 역학적 성능으로 인해 최근 건축 및 토목 구조물에 대한 다양한 적용법이 연구되고 있다. 외부 강관의 구속효과로 인해 발생하는 내부 콘크리트의 강도, 강성, 연성 등 재료적 특성 향상은 많은 연구자들에 의해 실험적으로 증명되어 왔다(Moon and Lee, 2014; Choi *et al.*, 2017).

그와 동시에 실험연구의 시간적, 금전적 제약과 숙련도 등에 따른 결과의 불확실성을 극복하기 위해 많은 연구자들이 해석적인 접근법에 대한 연구도 수행하였다. 특히 CFST 기둥의 거동을 보다 정밀하게 예측하기 위해 실험적으로 밝혀진 외부 강관과 내부 콘크리트의 합성구조 거동을 수치해석적으로 모사하기 위한 다양한 노력이 있어 왔다. 초기에는 강관과 콘크리트 계면에 적절한 마찰계수를 가정하여 슬립이 발생하도록

하는 연구가 많이 진행되었으나, 이러한 해석모델은 콘크리트와 강관 사이의 응력전달을 모사하는 것이 불가능해, 재료모델의 조정을 통해 구속효과와 부착력을 별도로 고려해 주어야 하는 치명적인 단점이 있었다(Hu *et al.*, 2010). 이후에 제안된 gap element 모델은 계면에서 콘크리트의 절점과 강관의 절점을 물리적인 부피를 갖지 않는 가상의 요소를 이용해 연결함으로써, 응력전달과 슬립 거동을 모두 모사할 수 있게 만들었다(Goto *et al.*, 2010). 다만, 이 모델은 각 절점을 일대일 대응시켜야 했기에 모델링과 해석에 시간이 오래 걸린다는 단점이 있었다.

본 연구에서는 외부 강관과 내부 콘크리트 사이의 계면에 대한 개선된 수치모델의 적용을 통해 기존의 연구자들이 제시한 CFST 해석방법의 단점을 극복하고자 하였다. 이에 더해 보다 효율적인 CFST 구조의 적용을 위해 RC (Reinforced Concrete) 기둥의 소성힌지부를 강관으로 보강하는 부분 CFST 기둥 구조의 디자인 컨셉을 제시하고 실험과 해석을 통해 검증하였다.

[†]Corresponding author:

Tel: +82-42-350-3661; E-mail: kwakhg@kaist.ac.kr
Received February 17 2020; Revised February 25 2020;
Accepted February 26 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 부분 CFST 기둥 구조

2.1 부분 CFST 기둥 디자인 컨셉

RC에 비해 CFST 기둥은 구조적 이점이 명확하지만, 건설 시 발생하는 높은 소요비용으로 인해 일반적으로 사용되기에는 어려움이 있다. 특히, 상대적으로 높은 강재의 재료비용은 기둥의 전장을 강관으로 둘러싸야 하는 완전 CFST 기둥의 명확한 한계점으로 지적되고 있다. 본 연구에서는 이러한 부분에 대한 개선책으로 RC 기둥에서 가장 큰 모멘트가 발생할 것으로 예상되는 부분을 강관으로 보강하여 모멘트 저항력을 증대시킨 부분 CFST 기둥의 적용성을 평가해 보고자 한다. 완전 CFST 기둥의 경우 기존 RC 기둥과 비교해서 축방향 하중에 대한 저항력도 증가하지만, 상대적으로 휨모멘트 저항력이 훨씬 크게 증가한다. 이러한 구조적 이점을 보다 효율적으로 활용하기 위해 RC 기둥에서 소성힌지가 발생할 것으로 예상되는 부분을 강관으로 보강하여 축방향하중은 기존의 RC 기둥의 저항력을 이용하고, 최대휨모멘트저항력은 CFST 단면에 따를 수 있도록 하는 복합기둥 구조를 생각하였다. 부분 CFST 기둥으로 명명할 수 있는 이러한 복합기둥구조는 충분한 구조적 성능을 확보하면서도, 최소한의 재료사용으로 인해 기존의 완전 CFST 기둥에 비해 훨씬 효율적인 디자인이 될 것으로 예상된다. 이렇게 제안된 캔틸레버(cantilever)형식의 부분 CFST 기둥구조에서는 Fig. 1에 나와 있는 것처럼, RC 기둥의 고정단부를 CFST로 치환함으로써 소성힌지의 발생을 지연시켜 수평하중과 반복하중에 대해 보다 높은 저항력을 발현할 것을 기대할 수 있다.

2.2 개선된 부착슬립 모델

부분 CFST 기둥의 거동을 모사하기 위해서는 외부 강관과 외부 콘크리트 계면에 대해 적절한 가정을 통한 수치모델링이 수반되어야 한다. CFST 부분에서 외부 강관과 내부 콘크리트 사이에 응력전달은 발생하지만, 부착슬립효과에 의해 각각 변

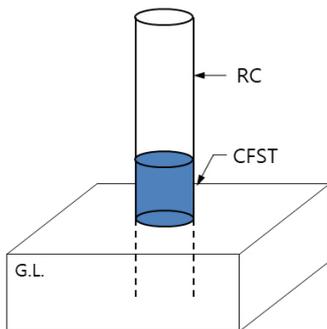


Fig. 1 Basic concept of the partial CFST column

형에서 차이를 보일 것으로 예상되므로 모든 절점의 변위가 일치해야 하는 완전부착 가정으로는 부분 CFST 기둥의 거동을 모사하기에는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 일부 연구자들은 외부 강관과 내부 콘크리트의 각 절점을 bond-link 요소로 연결하는 방법(Kwon *et al.*, 2005; Yin and Lu, 2010)을 제시하였다. 이 모델은 응력전달을 발생시키면서 완전부착가정과는 달리 슬립거동도 모사할 수 있지만, 강관과 콘크리트의 이종절점을 일대일로 연결시키는 과정에서 구조적 복잡성이 증가해 모델링과 해석에 소요되는 시간이 길다는 또다른 문제점을 안고 있다. 기존 모델들의 한계점을 극복하기 위해 본 연구에서는 슬립효과를 강관의 등가탄성계수로 치환해서 적용할 수 있는 개선된 부착슬립 모델을 적용하여 부분 CFST 기둥에 대한 수치해석을 진행하였다. 완전 CFST 기둥에서 적용성이 검증된 본 모델(Kwon *et al.*, 2015; Hwang *et al.*, 2018)을 부분 CFST 기둥의 수치해석에 적용함으로써 보다 효율적으로 외부 강관과 내부 콘크리트 계면에서의 합성구조 거동을 모사할 수 있다.

3. 이중곡률 휨-압축 시험 및 해석모델 검증

부분 CFST 기둥의 적용성을 확인하고 수치해석모델을 검증하기 위해 이중곡률 휨-압축 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 부분 CFST 기둥의 구조적 세부사항은 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 실제 거동해석에 사용된 부분 CFST 기둥의 총 길이는 960mm이고, 강관으로 보강한 길이는 590mm이다. 단부의 회

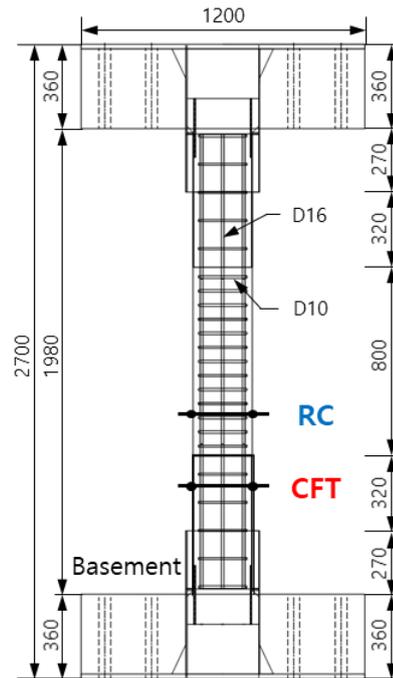


Fig. 2 Configuration of test specimen

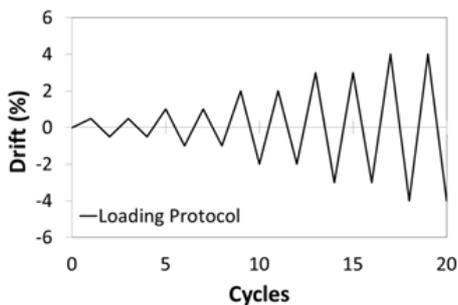
전변위 구속을 통해 시험 중에 발생가능한 오차를 최소화할 수 있도록 이중곡률 휨-압축 시험을 수행하기 위해 사용된 전체 구조물은 시험 대상 구조물이 상하대칭으로 들어가도록 제작하였다(Moon and Lee, 2014). 강관으로 보강한 CFST 부분의 단면 직경은 250mm이고, 사용된 강관의 두께는 3.2mm이다. 본 시험에 적용된 콘크리트의 압축강도는 28MPa, 강관의 항복강도는 235MPa이었으며, 콘크리트 내부에는 400MPa의 항복강도를 가지는 연강이 철근비 3.24%만큼 배근되어 있다.

시험체 상부에는 연직방향으로 P=200kN의 하중이 전체 시험동안 일정하게 재하되었고, 수평하중은 Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 것과 같이 평행사변형 가력장치를 통해 시험체의 중간지점에서 하중을 가하면 시험체의 상부를 통해 전달될 수 있도록 하였다. 이러한 수평하중 가력 방식은 가력기에 의해 시험체 상부에서 의도하지 않게 발생하는 회전 변위를 막아주어 보다 오차가 적은 실험 결과를 얻을 수 있게 한다. 수평하중은 Fig. 3(b)에 나온 것과 같은 변위이력을 갖도록 서서히 증가시키며 반복하중 형태로 재하하였고, 전체 구조물이 파괴에 이를 때까지 시험을 진행하였다.

상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Abaqus, 2014)를 이용해서 대상 시험체에 대한 수치모델링을 진행하였다.



(a) Test set-up



(b) Applied displacement history

Fig. 3 Double curvature bending test

8-node 3-D solid element(C3D8R element in ABAQUS)를 적용하였고, 메쉬 크기는 수렴성을 고려한 최적화 과정을 거쳐 20mm의 사각형 요소로 구성하였다. 경계조건은 시험체와 동일하게 하단부를 고정단으로 가정하였고, 상단부에 P=200kN의 연직하중과 Fig. 3(b)의 변위를 갖도록 하는 수평하중을 재하하였다.

수치해석을 통해 얻어진 모노토닉 하중-변위관계를 시험을 통해 얻어진 결과와 비교한 내용을 Fig. 4에 나타내었다. 제안된 부착슬립 모델이 적용된 경우(Bond-slip in Fig. 4) 시험결과(Experiment in Fig. 4)와 상당히 비슷한 결과를 보여준다. 반면, 부착슬립을 무시한 완전부착가정(Perfect bond in Fig. 4)에 따른 수치해석 결과는 실제보다 기둥의 휨모멘트 저항력을 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 시험 결과와 해석에 따른 내부 콘크리트와 외부 강관 사이의 슬립 거동은 Fig. 5(a)와 (b)에 나타난 것

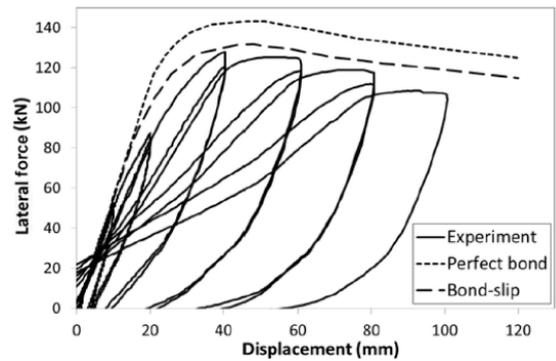
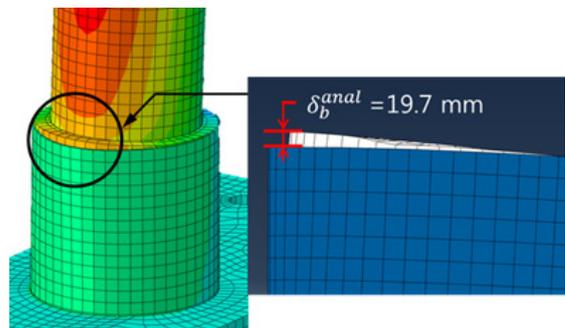


Fig. 4 Load-displacement relationship



(a) Slip result by experiment



(b) Slip result by numerical analysis

Fig. 5 Slip behavior of test specimen

과 같다. 수평하중에 따른 슬립에 의한 영향으로 CFST 부분의 인장구역에서 내부의 콘크리트가 강관 위로 들러 올라간 형상을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 시험과 해석 모두에서 동일하게 나타나고 있으며, 슬립양 역시 시험에서 $\delta_s^{xp}=19.8\text{mm}$, 수치해석 결과 $\delta_s^{xp}=19.7\text{mm}$ 로 거의 비슷하게 나타났다. 따라서, 제안된 수치모델이 실제 시험과 비교하여 하중변화에 따른 전체 거동을 잘 예측하면서도 강관과 콘크리트 계면에서의 부착슬립 거동을 충분히 모사하고 있음이 검증되었으므로, 향후 다양한 제원의 부분 CFST 기둥의 거동 또한 보다 효과적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 부분 CFST 기둥 수치해석 예제

제안된 부분 CFST 기둥에서 구조적으로 유효한 의미를 갖는 강관 보강길이를 알아보기 위해 앞서 검증된 수치모델을 바탕으로 매개변수 연구를 수행하였다. 직경(D) 165.2mm를 가지는 원형 단면에 대해 강관의 두께(t) 0.5mm와 1mm를 고려하였고, 전체길이(L)는 L/D=4, 15, 30의 세가지 값에 대해 모델링 진행하였다. 각각의 경우에 대해 강관 보강길이 H=0.2L, 0.3L, 0.4L, 0.5L를 가정하여 총 24가지의 모델을 구성하여 수치해석을 수행하였다. 콘크리트는 압축강도는 35MPa를 갖는

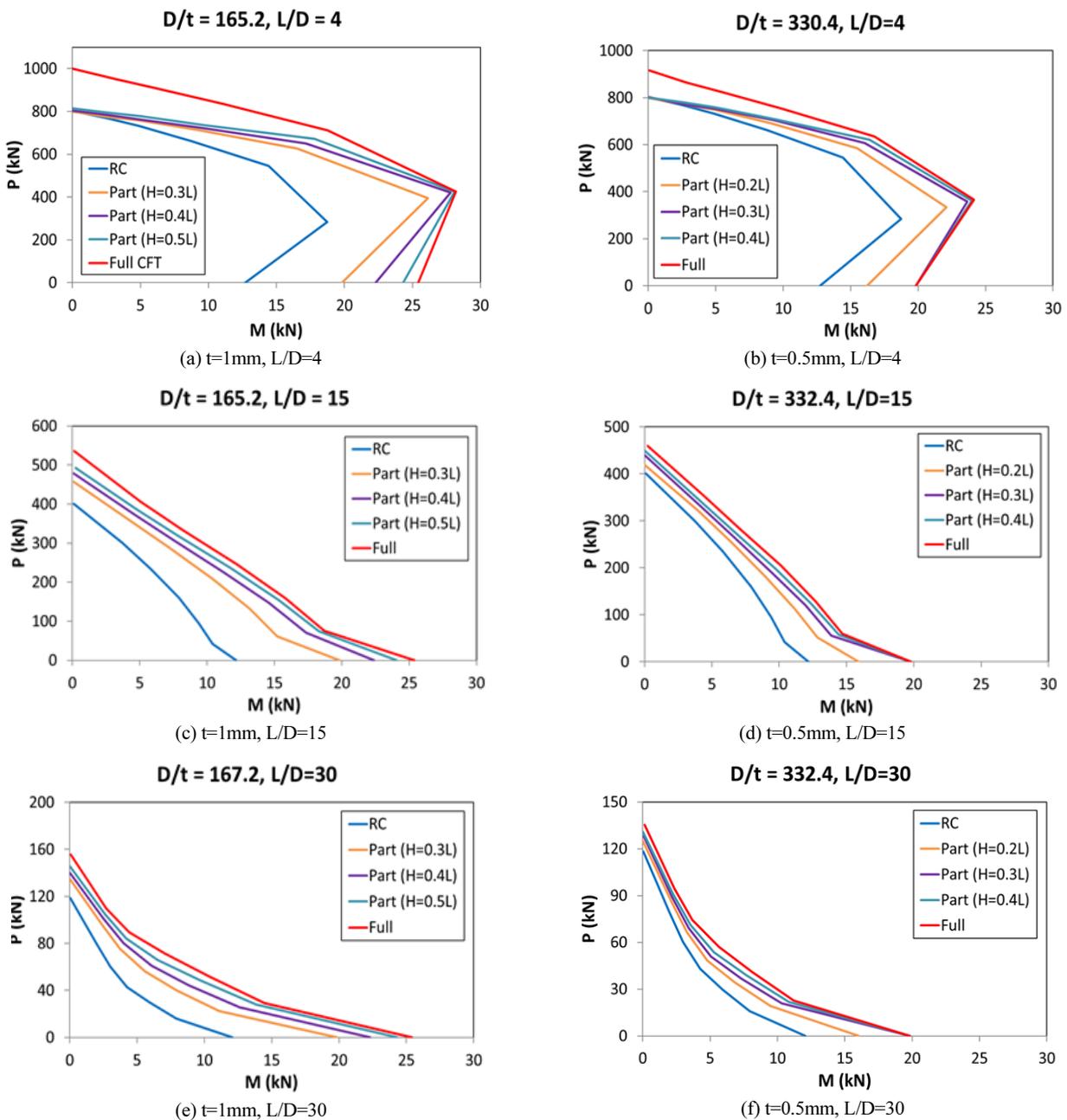


Fig. 6 P-M interaction diagram of partial CFST columns

damaged plasticity 모델을 사용하였으며, 강관은 400MPa의 항복강도와 200GPa의 탄성계수를 갖는 linear-plastic 가정을 적용하였다. 수치모델링에 사용된 요소는 앞서 시험 검증에 적용한 것과 동일한 조건으로 해석을 수행하였다. 부분 CFST 기둥의 휨모멘트 저항력을 확인하기 위해 AISC Specification에 제안된 4점법(AISC, 2012)을 이용하여 P-M 상관도를 작도하였으며, 각각의 경우에 대해 같은 재료의 RC 기둥 및 완전 CFST 기둥의 해석 결과와 비교하였다.

수치해석 결과는 Fig. 6에 그려진 P-M 상관도에서 확인할 수 있다. 모든 경우에서 RC 기둥보다 부분 CFST 기둥의 휨모멘트에 대한 저항력이 크게 나타났으며, 강관으로 보강된 길이가 길어질수록 휨모멘트에 대한 저항력이 완전 CFST 기둥의 저항력과 점점 비슷하게 되도록 증가하는 경향을 보이고 있다. 이를 통해 어떠한 길이의 강관이라도 보강되어 있는 부분 CFST 기둥이 휨모멘트에 대한 저항력 증대 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 낮은 세장비(L/D=4)에서는 부분 CFST 기둥의 축방향 저항력이 RC에 비해 전혀 개선되지 않지만, 높은 세장비(L/D=15, 30)에서는 축방향 저항력 또한 일부 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전체 구조물의 길이가 길어져서 발생하는 2차 모멘트 효과로 인한 축방향 저항력 감소를 보강된 강관이 일부 막아주고 있기 때문인 것으로 생각된다.

순수 휨모멘트에 대한 저항력의 증가를 보면, 강관 두께가 1mm 인 경우에는 강관 보강길이 H=0.5L 이상이 되어야 완전 CFST 기둥과 비슷한 저항력을 가지게 된다. 강관 두께가 0.5mm로 더 얇은 경우에는 보강길이 H=0.3L만 되어도 완전 CFST 기둥과 비슷한 저항력을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 특히 모든 경우에서 일정 길이 이상으로 보강하지 않으면 부분 CFST 기둥의 순수 휨모멘트에 대한 저항력은 완전 CFST 기둥의 저항력에 미치지 못한다는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 아무리 두껍고 항복응력이 큰 강관으로 보강을 한 부분 CFST 기둥이라 할지라도 실제 거동에서는 Fig. 7에 나타난 것과 같이 보강되지 않은 RC 부분에서 먼저 파괴가 발생하기 때문이다. 즉, 수평하중에 의해 기둥에 작용하는 모멘트로 CFST 단면이 항복하기 전에 RC 부의 끝단에서 파괴가 발생하지 않도

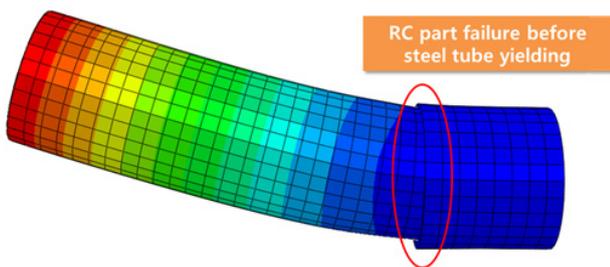


Fig. 7 Failure shape of the partial CFST column

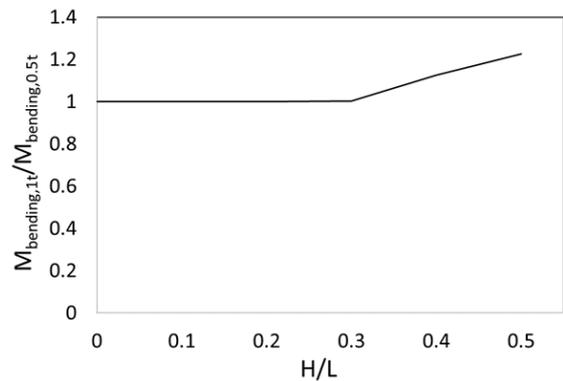


Fig. 8 Difference in bending moment capacity between t=1mm and 0.5mm according to the length of steel tube

록 하는 강관 보강의 최소요구길이가 존재한다는 사실을 확인할 수 있으며, 본 수치해석 예제에서는 D/t=165.2일 때는 H=0.5L, D/t=330.4일 때는 H=0.3L의 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 또한, 같은 이유로 인해 CFST 단면이 항복하지 않는 짧은 보강길이(H=0.2L 이하)를 갖는 부분 CFST 기둥에서 강관의 두께 증가(t=0.5mm, 1mm)에 따른 휨모멘트 저항력 증가가 거의 발생하지 않음을 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 RC 기둥의 소성힌지부를 강관으로 보강한 부분 CFST 기둥에 대한 디자인 컨셉을 제안하고, 개선된 부착슬립 모델을 적용하여 수치 해석적으로 전체기둥을 예측하는 방법을 이중곡률 휨-압축 시험과의 비교를 통해 검증해 보았다. 수치 해석결과를 시험결과와 비교했을 때, 하중-변위곡선을 통해 전체 구조거동이 비슷하게 나타난다는 것을 확인했으며, 동시에 외부 강관과 내부 콘크리트 계면에서 발생하는 슬립거동 또한 비슷하게 모사하고 있음을 알 수 있었다. 또한 부분 CFST 기둥의 휨모멘트 저항력이 RC에 비해서는 증대되고, 완전 CFST 기둥보다 적은 양의 강재를 쓰면서도 거의 비슷한 성능을 낼 수 있다는 것을 확인하였다. 매개변수 연구를 통해 부분 CFST 기둥의 강재 보강길이와 강관 두께가 휨모멘트 저항력 증대에 미치는 영향도 알아보았다. CFST 부분에서 발생하는 항복으로 기둥구조의 파괴가 발생하기 위해서는 강관의 두께가 1mm일 경우에는 강재 보강길이가 0.5L 이상, 강관의 두께가 0.5mm일 경우에는 강재 보강길이가 0.3L 이상이어야 하였다. 또한 보강길이가 일정한 경우, 일정 두께 이상의 강관 보강으로는 추가적인 휨모멘트 저항력 증대를 기대할 수 없었다. 향후 보다 심화된 매개변수 연구를 수행한다면, 강재의 보강길이와 강관의 두께, 부분 CFST 기둥의 휨모멘트 저항력 사이의 구체화된 상관관계를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(과학기술정보통신부) 선도연구센터(ERC) 사업(과제번호: 2017R1A5A1014883)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

ABAQUS (2014) Abaqus Analysis User's Manual version 6.14, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

American Institute of Steel Construction (AISC) (2012) Specifications for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10), Chicago.

Choi, I.R., Chung, K.S., Kim, C.S. (2017) Experimental Study on Rectangular CFT Columns with Different Steel Grades and Thicknesses, *J. Constr. Steel Res.*, 130, pp.109~119.

Goto, Y., Kumar, G.P., Kawanishi, N. (2010) Nonlinear Finite-Element Analysis for Hysteretic Behavior of Thin-Walled Circular Steel Columns with In-Filled Concrete, *J. Struct. Eng.*, 136, pp.1413~1422.

Hu, H.T., Su, F.C., Elchalakani, M. (2010) Finite Element Analysis of CFT Columns Subjected to Pure Bending Moment, *Steel & Composite Structures*, October, 10(5), pp.415~428.

Hwang, J.Y., Kwak, H.G., Kwon, Y. (2018) A Numerical Model for Considering the Bond-Slip Effect in Axially Loaded Circular Concrete-Filled Tube Columns, *Adv. Struct. Eng.*, 21(12), pp.1923~1935.

Kwon, S.H., Kim, Y.Y., Kim, J.K. (2005) Long-term Behaviour under Axial Service Loads of Circular Columns Made from Concrete Filled Steel Tubes, *Mag. Concrete Res.*, 57, pp.87~99.

Kwon, Y., Kwak, H.G., Hwang, J.Y., Kim, J.K., Kim, J.M. (2015) An Improved Bond Slip Model of CFT Columns for Nonlinear Finite Element Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 28(2), pp.213~220.

Moon, J., Lee, H.-E. (2014) Experimental Evaluation of Flexural behavior of Partially Embedded Circular CFST Pier-to-Coping Connection, *J. Railway Conf.* 2014, pp.1387~1392.

Yin, X., Lu, X. (2010) Study on Push-out Test and Bond Stress-slip Relationship of Circular Concrete Filled Steel Tube, *Steel Compos. Struct.*, 10, pp.317~329.

요 지

본 논문에서는 부분 CFST (concrete-filled steel tube) 기둥에 대한 수치해석적 저항력 평가 방법에 대해 소개하고 있다. 기존 RC (reinforced concrete) 기둥에서 소성힌지가 발생할 것으로 예상되는 부분을 강관으로 보강함으로써 완전 CFST 기둥보다는 적은 재료를 사용하여 비슷한 휨 모멘트 저항력을 가지는 부분 CFST 기둥의 디자인 컨셉을 제시하였다. 부분 CFST 기둥에서 외부 강관과 내부 콘크리트 사이의 계면에서 거동을 수치해석적으로 모사하기 위해 개선된 부착슬립모델을 적용한 유한요소모델을 구축하고, 이중곡률 휨-압축시험결과와 비교를 통해 타당성을 검증하였다. 검증된 수치모델을 바탕으로 매개변수 연구를 통해서 P-M 상관도를 그려 단면 조건에 따른 최대 저항력을 평가하였다. 또한, 강관 두께별로 필요 보강길이를 산출하고, 보강 조건에 따른 부분 CFST 기둥에서의 파괴메커니즘을 분석하였다.

핵심용어 : 부착슬립효과, 부분 CFST 기둥, 이중곡률 휨-압축 시험, P-M 상관도