



반복 횡하중이 작용하는 강재 클립형 연결장치로 결속된 철근 콘크리트 기둥의 비선형 유한요소해석

김 용 주¹·최 병 정^{2†}

¹경기대학교 일반대학원 건축공학과 박사과정, ²경기대학교 건축공학과 교수

Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Columns with Steel Clip-Type Implements Subjected to Cyclic Lateral Loading

Yong Joo Kim¹ and Byong Jeong Choi^{2†}

¹Graduate Student, Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea

²Professor, Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea

Abstract

Both ends of the hoop reinforcement in the reinforced concrete (RC) columns subjected to lateral loading must necessarily be bent by 135° so as to ensure a sufficient level of ductility. However, as this reinforcement is extremely difficult to construct, this requirement is often not satisfied at construction sites. This study entailed an experimental investigation on RC columns subjected to cyclic lateral loading equipped with steel clip-type implements that were developed to replace the complicated 135° hoop reinforcement details. Four RC column specimens were manufactured, and the main test parameters included the use of high-strength concrete and steel clip-type implements. Furthermore, three-dimensional finite element models were employed to evaluate the structural performances of the test specimens via nonlinear analyses. The results of the test and finite element analyses indicate that the RC columns with the steel clip-type implements exhibit structural performances equal to or better than those with the 135° hoop reinforcement details. Further, the finite element analysis results agree well with the test results.

Keywords : reinforced concrete column, hoop reinforcement, lateral loading, hysteresis behavior, steel clip-type binding implement, nonlinear finite element analysis

1. 서 론

최근 발생한 2016년 경주지진 및 2017년 포항지진 이후 우리나라도 지진 재해에 대한 안전지대가 아니라는 사회적 인식이 확산되고 있을 뿐만 아니라 지진에 의한 피해를 줄일 수 있는 내진 설계 기술에 대한 관심이 점점 증가하고 있다. 건물의 구조설계에 보편적으로 가장 많이 적용되고 있는 철근 콘크리트 구조의 경우 수직하중을 담당하는 기둥 부재에 연직하중을 담당하기 위한 주근 뿐만 아니라 횡하중에 효과적으로 저항할 수 있도록 띠철근을 배근하도록 하고 있다(MOLIT, 2022a). 건설설계기준(Korean Design Standard)은 띠철근의 횡하중에

대한 연성능력 확보를 위해 띠철근의 양 단부를 135°로 구부리고, 띠철근 직경의 6배 및 최소 75mm 이상 연장하도록 규정하고 있다(MOLIT, 2021).

이러한 띠철근 갈고리 상세의 시공은 현장에서 일반적으로 미리 양쪽 갈고리를 135°로 굽힌 뒤 기 배근된 기둥 주근 상부로부터 끼워 넣거나, 한쪽만 135°로 구부린 띠철근을 측면 방향에서 기둥 주근에 끼운 뒤 다른 단부를 135°로 마저 구부리는 방식 중 하나를 선택하게 된다. 그러나 이 두 가지 방식 모두 작업과정이 수월하지 않아 편의상 띠철근의 양쪽 끝을 135°가 아닌 90°로 구부려 시공함으로써 기준을 제대로 준수하지 않는 경우가 종종 발생하고 있다.

[†]Corresponding author:

Tel: +82-31- 249-9702; E-mail: bjchoi@kyonggi.ac.kr

Received June 16 2023; Revised June 20 2023;

Accepted June 21 2023

© 2023 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.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 표준 띠철근 갈고리 상세 대신 강재 클립형 연결장치로 띠철근의 양 단부를 결속하는 기술이 개발되었다(Park and Yun, 2020). 기준에서 규정하고 있는 표준 갈고리 상세의 시공성 개선을 위하여 한쪽 단부 135° 갈고리 대신 90° 갈고리로 가공 후 Fig. 1(a)와 같은 원터치 방식의 강재 클립형 연결장치로 고정하는 기술을 제안하였다. 이 장치는 Fig. 1(b)에 나타난 것과 같이 두 개의 띠철근을 하나로 묶기 위하여 ‘ㄷ’자 형태로 만들어져 있으며, 장치의 상하 넓은 면에 두 개의 띠철근이 삽입된 후 빠지지 않게끔 띠철근을 고정하는 클립을 각각 설치하였다. 따라서 이와 같은 강재 클립형 연결장치를 사용할 경우 띠철근 단부를 135°로 구부리는 번거로움 없이 띠철근 갈고리 상세를 대체할 수 있으며, 강재클립용 강재로 주로 공업용으로 이용되는 SK5M-S강을 활용하여 제작하고 최종적으로 열처리 작업을 통해 완성하였다.

이와 같이 개발된 강재 클립형 연결장치가 표준 135° 갈고리 띠철근 상세와 동등한 구조적 성능을 발휘하는지 여부를 확인하기 위해 다양한 연구가 수행되었다. 제안된 강재 클립형 연결장치 상세를 활용한 콘크리트 실험체에 대해 다양한 종류의 인발실험을 수행하고 정착성능을 검증하였다(Kim *et al.*, 2021). 또한, 강재 클립형 연결장치 상세로 보강된 보통강도 및 고강도 콘크리트 기둥 실험체에 대한 압축실험을 수행하고 그 구조적 성능을 평가하였다(Park *et al.*, 2021).

본 연구에서는 반복 횡하중이 작용하는 강재 클립형 연결장치가 설치된 철근 콘크리트 기둥에 대해 실험적 성능평가를 수행하였다. 콘크리트 강도 및 띠철근 단부 상세를 실험변수로 설정하였으며 이들 변수가 실험결과에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 대상 구조물에 대해 3차원 유한요소해석모델을 개발하고 이에 대한 비선형 해석을 수행하였으며, 해석 및 실험 결과를 비교하고 분석하였다. 그 결과 강재 클립형 연결장치가 설치된 콘크리트 기둥이 반복 횡하중에 대해 기존의 표준갈고리 상세를 지닌 콘크리트 기둥과 동등한 혹은 그 이상의 성능을 지니고 있으며, 개발된 유한요소해석모델이 실험결과를 정확히 잘 예측하는 것으로 나타났다.

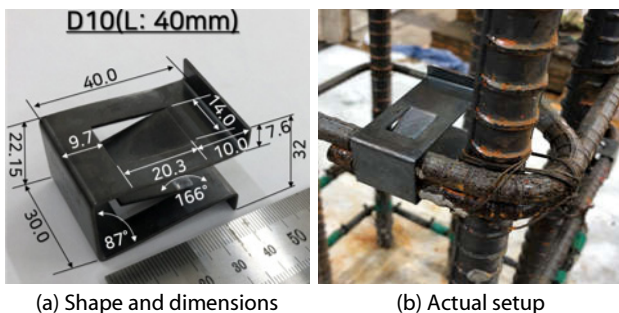


Fig. 1 Details of the steel clip-type implement

2. 실험계획

본 장에서는 강재 클립형 연결장치로 결속된 철근 콘크리트 기둥의 횡방향 반복가력실험에 대한 실험계획 및 방법에 대해 기술하였다.

2.1 실험체 및 재료물성

강재 클립형 연결장치로 결속된 철근 콘크리트 기둥의 내진 성능을 평가하기 위해 단면 400mm × 400mm의 정사각형 콘크리트 기둥 실험체 총 4개를 제작하였다. 모든 실험체는 동일한 형상 및 크기를 지니며 실험체의 자세한 형상 및 치수는 Fig. 2 및 Fig. 3에 제시되어 있다. 그림에 나타난 것처럼 단면 400mm × 400mm, 높이 1,500mm의 콘크리트 기둥은 1,500mm × 1,500mm × 900mm 크기의 콘크리트 기초 상단 중앙에 연결되어 있으며, 콘크리트 기초는 실험동 하부 바닥면에 단단히 고정되어 횡력에 충분히 저항할 수 있게 하였다. Fig. 2에 나타난 것과 같이 콘크리트 기둥 내 직경 25mm 주근 8개와 직경 10mm의

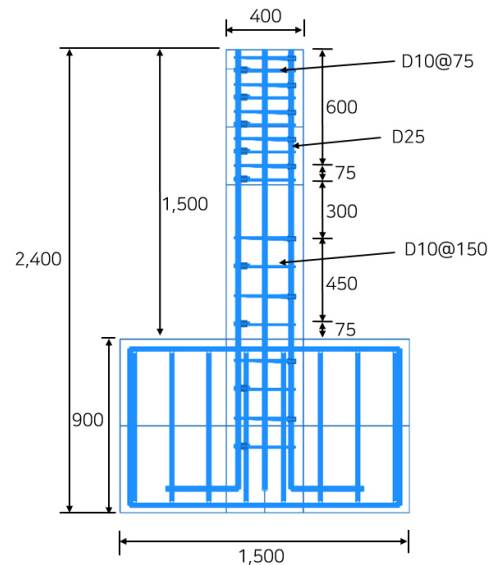


Fig. 2 Details of column specimens (unit: mm)

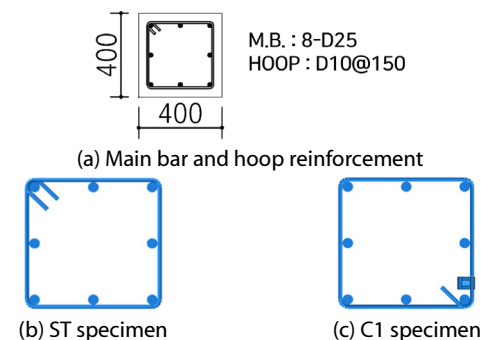


Fig. 3 Details of the steel clip-type implement

띠철근을 150mm 간격으로 기둥 하부 소성 예상구간 525mm 내에 배치하였다. 150mm 간격은 건설설계기준(MOLIT, 2021)이 요구하는 최소 띠철근 간격 200mm보다 50mm 작다. 기둥 단면 내 주근에 대한 연결철근(cross-tie)은 따로 설치하지 않았다.

주요 실험변수는 강재 클립형 연결장치 및 고강도 콘크리트 사용 여부이다. 강재 클립형 연결장치 사용 여부와 관련해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 횡철근 양단부 표준 135° 갈고리 상세를 사용한 실험체(ST)와 한쪽 단부 135° 갈고리 대신 90° 갈고리로 가공 후 강재 클립형 연결장치로 고정한 실험체(C1)의 두 종류로 나뉜다. 고강도 콘크리트 사용 여부와 관련해 압축강도 30MPa의 보통강도 콘크리트(N) 사용 실험체와 압축강도 60MPa의 고강도 콘크리트(H) 사용 실험체의 두 종류로 나뉜다. 따라서 총 실험체의 개수는 $2 \times 2 = 4$ 개이며, 실험체명 표기법을 Fig. 4에 정리해 나타내었다.

2.2 실험 방법 및 재료 물성

실험체 셋팅은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 2,000kN 용량의 액추에이터를 하부 콘크리트 기초 상단면으로부터 1,100mm 높이에 설치하여 횡방향 반복가력 실험을 수행하였다. 콘크리트 기둥에 가해지는 연직하중을 모사하기 위해 $0.1A_g f_{ck}$ 에 해당하는 축력을 실험 내내 일정하게 작용시켰다. 여기서 A_g 는 콘크리트 기둥의 전 단면적, f_{ck} 는 콘크리트 기준압축강도를 의미한다.

횡하중의 반복가력 프로토콜은 Fig. 6에 제시된 것과 같이 정가력 부가력 방향 모두 동일하게 2mm/min의 일정한 속도로 변위제어 방식으로 가력하였다. 반복가력 프로토콜에서 변위비 $\pm 0.25\%$ 를 시작으로 최대 변위비 $\pm 3.5\%$ 에 이르기까지 점진적으로 증가시켰으며 동일 변위비를 각각 3주기씩 적용시켰다. 작용한 횡력은 액추에이터에 내장된 로드셀로 계측하였으며, 로드셀로 계측된 횡력에 대한 변위값과 비교하기 위하여 실험체 기둥 밑단 양면에 X자 형태로 변위계 LVDT(Linear Vertical Displacement Transducer)를 설치하여 추가적으로 횡변위를 계측하였다.

콘크리트의 압축강도 산정을 위해 공시체 보통 및 고강도 콘크리트 공시체 각각 3개씩 총 6개의 공시체에 대해 압축강도

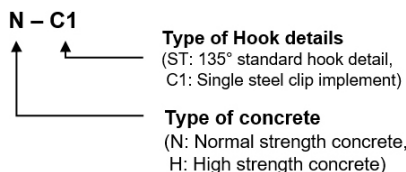


Fig. 4 Specimen identification

시험을 KS F 2405에 따라 수행하였으며, 평균 압축강도는 보통강도 콘크리트의 경우 30MPa, 고강도 콘크리트의 경우 60MPa로 나타났다. 철근의 경우 KS D 3504에 따라 측정된 주근(D25) 및 띠철근(D10)의 평균 항복강도는 각각 649MPa 및 546MPa로 확인되었으며, 강재 클립형 연결장치에 사용된 SK5M-S강의 평균 항복강도는 460MPa이다.

3. 유한요소해석모델링

본 장에서는 제작된 4개의 실험체에 대해 3차원 비선형 유한요소해석 수행하기 위한 모델링 방법에 대해 자세히 기술하였다.

3.1 해석모델 형상 및 경계조건

실험결과와의 비교 및 검증을 위해 3차원 비선형 유한요소해석을 수행하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus (2018)를 이용하였다. 유한요소(Finite Element) 해석모델에 사용된 요소망 및 경계조건을 Fig. 7에 나타내었다. 요소망 구성을 위해 콘크리트는 2차 육면체 요소(C3D20), 철근은 2차 트러스 요소(T3D3)를, 강재클립 모델링을 위해 곡면 셸요소(S80)를 사용하였으며, 트러스 및 셸 요소는 삽입 옵션(embedded region)을 통해 콘크리트 영역에 일체화시켰다. Fig. 8에 유한요소해석모델에 사용된 철근 및 강재클립의 형상을 나타내었다.

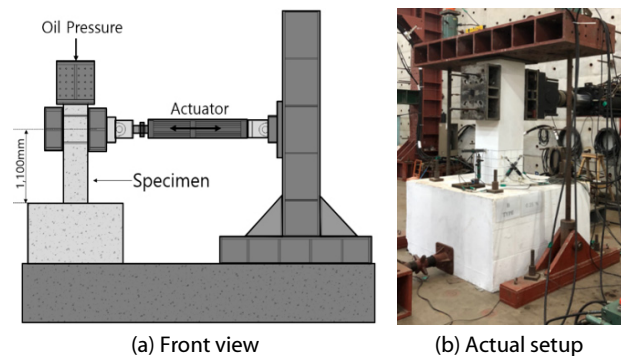


Fig. 5 Test setup of specimens

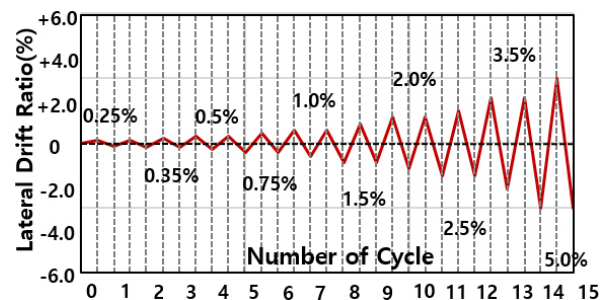


Fig. 6 Cyclic loading protocol

하중은 실험의 경우와 동일하게 연직하중은 $0.14g_{ck}$ 에 해당하는 축력을 일정하게 적용시키면서 액추에이터의 중심선을 기준으로 점진적으로(monotonically) 변위제어 방식으로 작용시켰다. 가력면의 모든 절점들을 하나의 제어점과 연결하기 위해 MPC(Multi-Point Constraints) 링크를 적용하였다. 이는 제어점(control point)과 구속된 절점(slave nodes)의 거리를 일정하게 유지하면서 변위가 공유되며 회전 자유도를 고려할 수 있다. 실험체의 콘크리트 기초 하부면은 x, y, z 축 세 축 방향 전부 다 변위를 구속하였다. 실험결과와 비교하기 위한 하중과 변위는 해석결과의 제어점의 반력 및 변위로 각각 측정하였다.

3.2 재료모델

콘크리트의 압축 거동에 대한 모델은 콘크리트 손상소성모델(concrete damaged plasticity model)을 사용하였다. 모델의 변수는 팽창각 35도, 편심률 0.1, 응력비 1.16, K_c 변수는 0.667로 적용하였고, 점성(viscosity)은 고려하지 않았다. 콘크리트

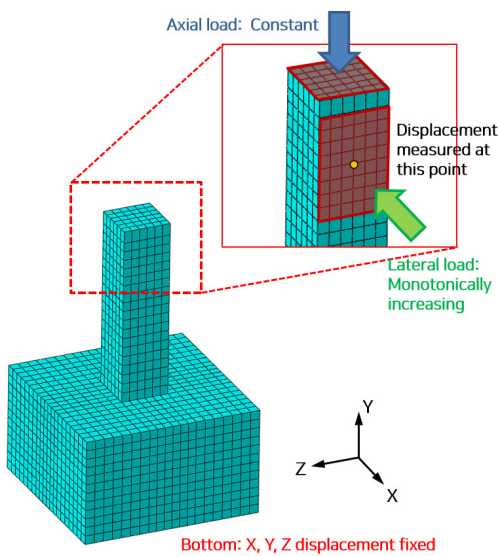


Fig. 7 Mesh and boundary conditions of the FE model

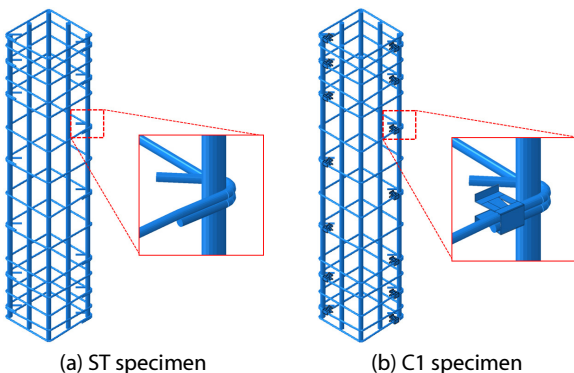


Fig. 8 Reinforcement details of the FE model

의 압축에 대한 재료모델로 Fig. 9에 나타난 Hognestad 모델(Hognestad, 1951)을 활용하였으며, 이에 필요한 재료물성치는 2.2장에 제시된 공시체의 압축강도시험으로부터 측정된 값을 이용하였다. 극한변형률 ϵ_{cu} 이후에도 선형적인 응력-변형률 그래프를 유지하여 비선형 해석의 수렴을 용이하게 하였다.

콘크리트의 인장 거동에 대한 모델은 Fig. 10에 나타난 바와 같이 이선형 인장 모델(bi-linear tensile model)을 적용하였다. 기준 인장강도 f_t 로 $0.21\sqrt{f_{ck}}$ 를 선택하였으며, 포아송비는 0.167을 적용하였다. 해석의 수렴을 위해 $5\epsilon_t$ 이후 변형률 0.001에 도달할 때까지 응력을 천천히 선형적으로 감소시켰다.

철근은 완전 탄소성 모델(elastic-perfectly plastic model)을 사용하여 항복강도에 도달 이후 변형률이 무한대로 증가하도록 하였다. 재료물성치로 2.2장에 제시된 실험에 의한 값들을 적용하였으며, 포아송비는 0.3을 사용하였다.

4. 실험 및 해석결과 비교·분석

본 장에서는 내진클립 장착 콘크리트 기둥 실험체의 실험 및 해석결과를 비교·분석하였다. 또한 건설설계기준이 제시하는 공칭 전단강도와와의 비교 및 분석을 통해 제안된 강재 내진클립의 횡구속 및 전단성능 기여도를 평가하였다.

4.1 파괴양상 및 하중-변위 그래프

모든 실험체는 동일한 파괴양상을 보였으며, 거의 유사한 균열 발생시기 및 진전 패턴을 보여주었다. 4개의 실험체 전부

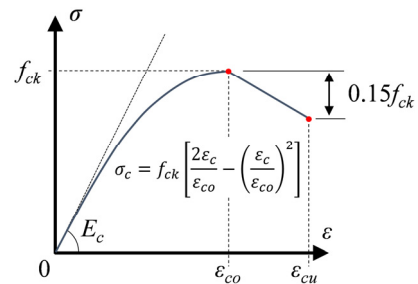


Fig. 9 Compressive stress-strain curve of concrete

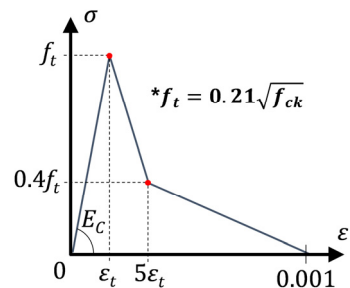


Fig. 10 Tensile stress-strain curve of concrete

다 대략 층간변위비 0.35% 시점에서 기둥 소성예상구역인 하부위치에 휼균열이 발생하기 시작하였으며, 층간변위비 1.0% 시점에서 대각 방향으로 사인장균열이 나타나기 시작하였다. 이후 사인장 균열의 개수 및 길이가 점차 증가하였고, 변위비 3.5 %에서 균열 폭이 크게 커지고 강도가 감소하면서 최종 파괴에 도달하였다. 이와 같은 파괴양상 및 균열 진전 패턴으로부터 분석한 결과, 모든 실험체는 최종적으로 전단에 의하여 파괴된 것으로 판단된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 최종파괴 시 보통강도 및 고강도 콘크리트 기둥 실험체의 균열 패턴을 보여주는 사진이다. 표준 갈고리 상세 적용 실험체(ST)와 강재 클립형 연결장치로 고정된 실험체(C1)의 최종 균열 패턴이 거의 유사함을 알 수 있다. 또한 보통강도 및 고강도 실험체 사이의 균열 패턴도 마찬가지로 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 각각 유한요소해석으로부터 얻은 최대 하중 도달 시 보통강도 및 고강도 실험체의 von Mises 응력분포를 보여주는 그림이다. 실제 실험과 달리 유한요소해석에서는 단조가력하중을 작용시켰기 때문에 한쪽 방향으로만 대각 응력분포가 나타나기는 하지만, 균열발생 위치 주변에 높은 응력이 분포하여 해석결과가 실험결과와 대단히 비슷함을 알 수 있다. 고강도 실험체의 경우도 보통강도 실험체 대비 전반적으로 높은 응력이 작용하기는 하지만 그 분포 자체는 매우

유사하다.

Fig. 15와 Fig. 16은 각각 최종파괴 시 보통강도 및 고강도 콘크리트 기둥 실험체의 표준 갈고리 및 강재 클립형 연결장치 주변 상세를 보여주는 사진이다. 강재 클립형 연결장치가 띠철근에 잘 부착되어 있어 최종파괴 발생 시점까지 구속효과를 잘 발휘하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 17과 Fig. 18은 각각 유한요소해석으로부터 얻은 최대하중 도달 시 보통강도 및 고강도 실험체의 표준 갈고리 및 강재 클립형 연결장치 주변 von Mises 응력분포를 보여주는 그림이다. 보통강도 및 고강도 실험체의 경우 모두 강재 클립형 연결장치에 띠철근 대비 높은 응력이 작용하고 있어 135° 표준 갈고리 상세를 대신해 콘크리트 구속효과를 발휘하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 19와 Fig. 20은 각각 보통강도 및 고강도 콘크리트 기둥 실험체의 실험에 의한 이력곡선 및 비선형 유한요소해석에 의한 하중-변위 그래프를 정리해 나타낸 것이다. 횡방향 반복하중을 작용한 실험과 달리 유한요소해석은 단조가력 하중으로 정가력 및 부가력 방향 모두 동일하게 대칭인 그래프를 나

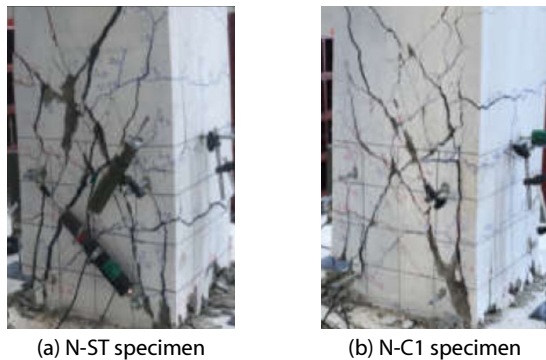


Fig. 11 Final crack patterns of normal strength concrete specimens

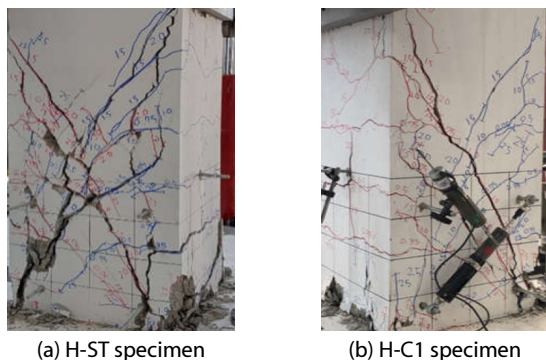


Fig. 12 Final crack patterns of high strength concrete specimens

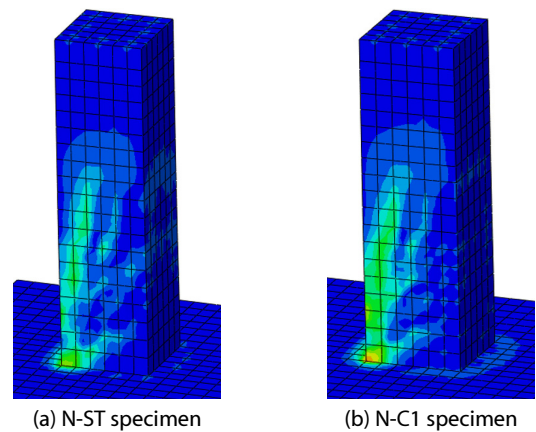


Fig. 13 Stress distribution of normal strength concrete specimens by FE analysis

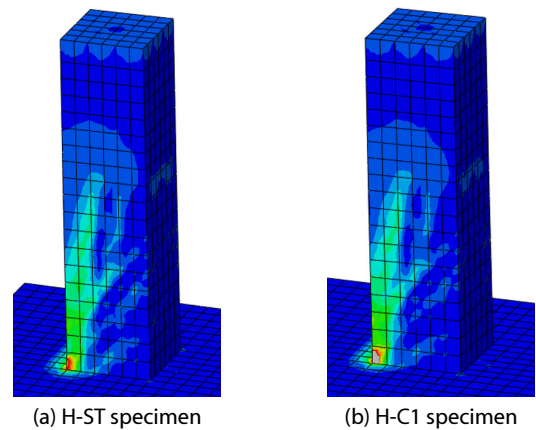


Fig. 14 Stress distribution of high strength concrete specimens by FE analysis

타내었다. 총 4개의 실험체의 정가력 및 부가력 방향 실험 최대 하중 및 유한요소해석에 의한 최대하중, 그리고 실험 평균 최대하중 대비 유한요소해석에 의한 최대하중의 상대오차 절대값을 Table 1에 정리해 나타내었다. 실험결과에서 정가력 및 부가력에 의한 최대하중에 약간의 차이가 있으며 이의 평균값을 해석에 의한 최대하중과 비교하여 나타내었다.

Fig. 19와 Fig. 20에 나타난 실험과 해석에 의한 하중-변위 그래프로부터 선형 탄성구간의 기울기에 해당하는 초기강성을

을 계산해 Table 2에 나타내었다. 초기강성은 대개 하중-변위 그래프가 선형 탄성범위 내에 있는 최대하중의 20%인 점과 원점을 연결한 직선의 기울기로 정의하였으며, 정가력 하중에 대한 실험결과 및 유한요소해석에 의한 하중-변위 그래프로부터 초기강성을 각각 계산하여 표에 정리하였다. 실험에 의한 초기강성값에 대한 해석에 의한 초기강성값의 상대오차 절대값 또한 표에 기재하였다.

그림 및 표의 결과에 나타난 바와 같이 실험 및 유한요소해

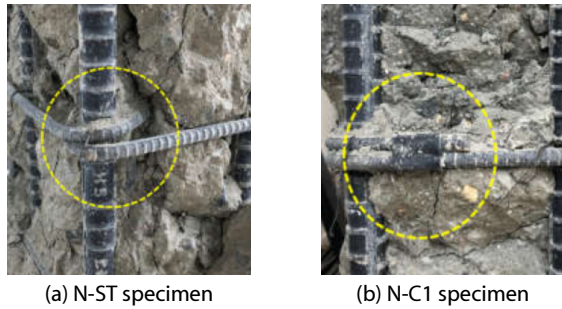


Fig. 15 Hoop reinforcement details of normal strength concrete specimens at final stage

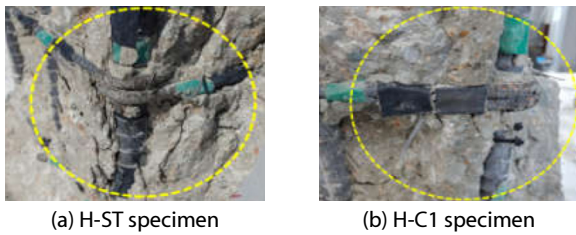


Fig. 16 Hoop reinforcement details of high strength concrete specimens at final stage

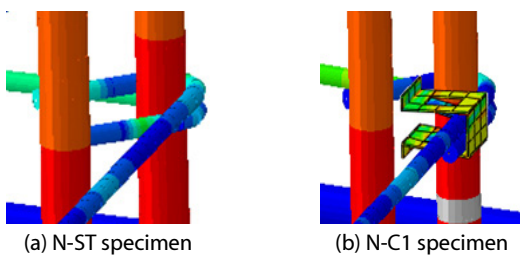


Fig. 17 Stress distribution of hoop reinforcement details for normal strength concrete specimens

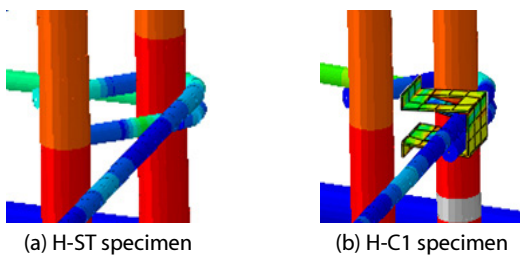


Fig. 18 Stress distribution of hoop reinforcement details for high strength concrete specimens

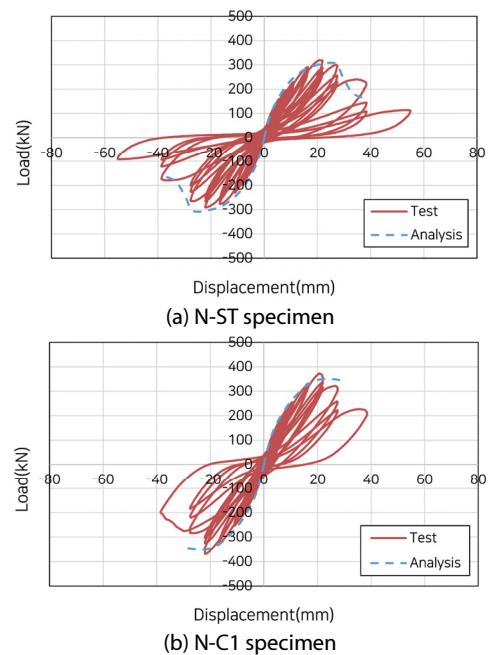


Fig. 19 Hysteresis curves of normal strength concrete specimens

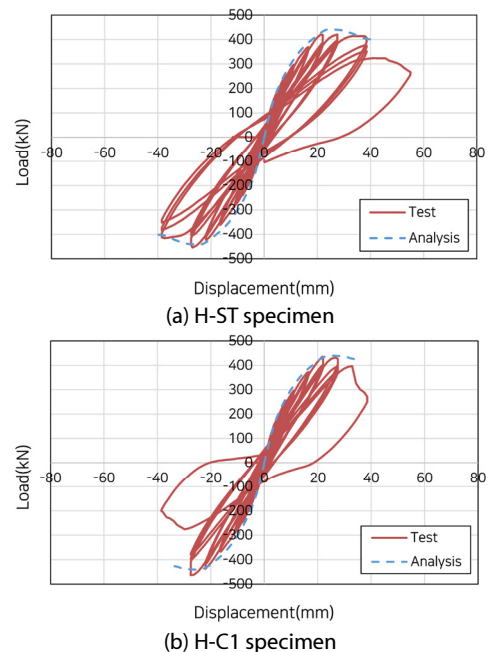


Fig. 20 Hysteresis curves of high strength concrete specimens

Table 1 Comparison between the peak loads from the FE analysis and test results for each specimen

Specimen	Peak load by FE analysis (kN)	Peak load by test (kN)			Relative error between the FE and test peak loads (%)		
		Positive direction	Negative direction	Average	Positive direction	Negative direction	Average
N-ST	308.5	310.0	278.0	294.0	0.5	11.0	4.9
N-C1	350.6	368.2	365.8	367.0	4.9	4.2	4.5
H-ST	440.7	451.8	444.6	448.2	2.5	0.9	1.7
H-C1	442.6	436.1	463.2	449.6	1.5	4.5	1.6

Table 2 Comparison between the initial stiffnesses from the FE analysis and test results for each specimen

Specimen	Initial stiffness by FE analysis (kN/mm)	Initial stiffness by test results (kN/mm)	Relative error (%)
N-ST	43.2	43.7	1.3
N-C1	45.2	45.5	0.6
H-ST	49.8	51.3	3.0
H-C1	48.3	50.0	3.3

석 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. Table 1의 결과에 나타난 것처럼 보통강도 콘크리트 실험체가 고강도 콘크리트 실험체보다 실험 및 해석에 의한 최대하중의 차이가 상대적으로 큰 편이기는 하지만 그 값도 약 5% 정도에 불과하다. 또한 보통강도 및 고강도 실험체 모두 강재 클립형 연결장치로 고정된 실험체(C1)가 표준 135° 갈고리 상세를 사용한 실험체(ST) 보다 더 크거나 유사한 최대하중 값을 지녀 강재 클립형 연결장치 충분한 구속효과를 발휘함을 알 수 있다.

해석 및 정가력에 대한 실험의 초기 강성값 비교 결과도 역시 마찬가지로 Table 2에 나타난 것처럼 상대오차 절대값이 최대 3% 약간 상회하는 수준에 불과하여 서로 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 최대강도와 유사하게 초기강성의 측면에서도 강재 클립형 연결장치로 고정된 실험체(C1)가 표준 135° 갈고리 상세를 사용한 실험체(ST)와 서로 동등한 성능을 보유하고 있음을 알 수 있다.

4.2 설계기준 전단강도와와의 비교 분석

4.1장에서 논의된 바와 같이 파괴양상으로부터 분석해 볼 때 모든 실험체에서 전단파괴가 발생한 것으로 판단되어, 본 장에서는 국토교통부에서 제정한 건설설계기준에 제시되어 있는 철근 콘크리트 기둥의 전단강도식에 의한 강도값과 실험 결과를 비교하였다.

건설설계기준의 철근 콘크리트 기둥의 전단강도(V_n)는 식 (1)에 나타난 것처럼 콘크리트에 의한 전단강도(V_c) 및 띠철근에 의한 전단강도(V_s) 기여분의 합으로 표현된다(MOLIT, 2022b). 여기서, b_w 는 기둥의 폭, d 는 기둥의 종방향 인장철근의 중심에서 압축콘크리트 연단까지 거리, A_s 는 인장철근의

Table 3 Comparison between the test peak load and nominal shear strength for each specimen

Specimen	$V_{n, test}$ (kN)	$V_{n, KDS}$ (kN)	Relative ratio
N-ST	294.0	330.8	0.889
N-C1	367.0		1.109
H-ST	448.2	436.8	1.026
H-C1	449.7		1.029

단면적, f_{yt} 는 철근의 항복강도, s 는 띠철근의 간격이다. 콘크리트에 의한 전단강도 기여분은 식 (2)로 표현되는데 기둥에 작용하는 압축력(N_u)에 의한 전단강도 증가분이 고려되어 있다. 띠철근에 의한 전단강도 기여분은 균열각도 45°를 가정하고 식 (3)과 같이 유도되었다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \left(1 + \frac{N_u}{14A_g} \right) \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_s f_{yt} d}{s} \quad (3)$$

실험에 의한 최대하중 및 건설설계기준의 전단강도식 (1)~(3)에 의해 계산된 전단강도값을 Table 3에 정리하였다. 실험의 최대하중은 정가력 및 부가력 방향의 최대하중의 평균치로 계산한 값이다. 표의 결과로부터 보통강도 콘크리트로 제작한 양단부 표준 135° 갈고리 상세 실험체(N-ST)가 건설설계기준의 전단강도값 대비 최대하중이 비교적 낮게 나온 것을 제외하고는 실험 및 기준에 의한 전단강도가 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 시공이 까다로운 콘크리트 기둥의 135° 표준 갈고리 상세를 대체하기 위해 강재 클립형 연결장치가 적용된 철근 콘크리트 기둥에 대해 횡방향 반복가력 실험을 수행하고 그 구조적 성능을 평가하였다. 총 4개의 실험체가 제작되었으며 주요 실험변수는 강재 클립형 연결장치 및 고강도 콘크리트 사용 여부이다. 또한 대상 구조물에 대해 3차원 유한요소해석

모델을 개발하고 이에 대한 비선형 해석을 수행하였으며, 해석 및 실험결과를 비교하고 분석하였다. 본 연구를 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 모든 실험체는 동일한 파괴양상과 함께 거의 유사한 균열 발생시기 및 진전 패턴을 보여주었다. 층간변위비 약 1.0% 시점에서 대각 방향으로 사인장균열이 나타나기 시작하였고, 이후 사인장 균열의 개수 및 길이가 점차 증가하면서 변위비 3.5%에서 균열 폭이 크게 커지고 강도가 감소하면서 최종 파괴에 도달하였다. 이와 같은 파괴양상 및 균열 진전 패턴으로부터 모든 실험체는 최종적으로 전단에 의하여 파괴된 것으로 판단된다.
- 2) 보통강도 및 고강도 실험체 모두 강재 클립형 연결장치로 고정된 실험체가 표준 135° 갈고리 상세를 사용한 실험체 보다 더 크거나 유사한 최대하중 값을 지녀 강재 클립형 연결장치가 충분한 구속효과를 발휘하였다. 초기 강성의 측면에서도 강재 클립형 연결장치로 고정된 실험체가 표준 135° 갈고리 상세를 사용한 실험체와 서로 동등한 성능을 보유했다.
- 3) 실험 최대하중과 건설설계기준의 전단강도 예측치가 서로 잘 일치하였다. 보통강도 콘크리트로 제작한 표준 135° 갈고리 상세 실험체가 기준 전단강도값 대비 최대하중이 비교적 낮게 나온 것을 제외하고는 실험 및 기준에 의한 전단강도가 잘 일치하였다.
- 4) 실험 및 유한요소해석 결과가 매우 잘 일치하였다. 보통강도 콘크리트 실험체가 고강도 콘크리트 실험체보다 실험 및 해석에 의한 최대하중의 차이가 상대적으로 큰 편이나 약 5% 정도에 불과하였으며, 초기 강성값 비교 결과도 역시 마찬가지로 상대오차 절대값이 최대 3% 약간 상회하는 수준에 불과하였다.

향후 다양한 강재클립의 종류, 갈고리상세 등 변수를 추가하여 해석을 수행하는 것이 거동이해에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 판단됩니다.

감사의 글

본 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No.2020R1A2C110233111). 이에 감사드립니다.

References

- Abaqus** (2018) *User's Manual Ver.6.17*, H.K.S. Inc.
- Hognestad, E.** (1951) *A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members*, Univ. of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Bulletin. No.399.
- Kim, E.Y., Kim, Y.J., Choi, S.M., Kim, D.J., Park, K.Y.** (2021) Bond and Anchorage Composite Behavior of RCC Device for Substitution Seismic Hook thorough Pull-Out Experiment, *J. Korea Soc. Adv. Compos. Struct.*, 12(2), pp.469~480.
- MOLIT** (2021) *Details of Reinforcement Design for Concrete Structure (KDS 14 20 50)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- MOLIT** (2022a) *Flexure and Compression Design for Concrete Structures (KDS 14 20 20)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- MOLIT** (2022b) *Shear and Torsion Design for Concrete Structures (KDS 14 20 22)*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (In Korean)
- Park, K.Y., Yun, H.D.** (2020) Clip-Type Binding Implement Effect on Anchorage Behavior of 90-Degree End-Hooked Transverse Reinforcement in Reinforced Concrete Columns, *J. Korea Struct. Maint. & Insp.*, 24(4), pp.72~80.
- Park, K.Y., Yun, H.D., Hong, S.-G.** (2021) Effect of a Steel Clip-Type Binding Implement on the Axial Compressive Behavior of Reinforced Concrete (RC) Columns Confined by 90-Degree End-Hooked Hoops, *J. Korea Concr. Inst.*, 33(5), pp.469~480.

요 지

횡하중에 작용하는 철근 콘크리트 기둥은 연성능력 확보를 위해 띠철근의 양 단부를 135° 구부려 시공하는 상세가 요구된다. 그러나 이러한 띠철근 상세는 시공이 매우 까다로와 실제 현장에서는 제대로 시공이 되지 않기도 한다. 이를 대체하기 위해 본 논문에서는 강재 클립형 연결장치가 적용된 철근 콘크리트 기둥에 대해 횡방향 반복가력 실험을 수행하고 그 구조적 성능을 평가하였다. 총 4개의 실험체가 제작되었으며 주요 실험변수는 강재 클립형 연결장치 및 고강도 콘크리트 사용 여부이다. 또한 대상 구조물에 대해 3차원 유한요소해석 모델을 개발하고 이에 대한 비선형 해석을 수행하였으며, 해석 및 실험결과를 비교하고 분석하였다. 그 결과 강재 클립형 연결장치가 설치된 콘크리트 기둥이 반복 횡하중에 대해 기존의 표준갈고리 상세를 지닌 콘크리트 기둥과 동등한 혹은 그 이상의 성능을 지니고 있으며, 개발된 유한요소해석 모델이 실험결과를 정확히 잘 예측하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 철근 콘크리트 기둥, 띠철근, 횡하중, 이력거동, 강재 클립형 연결장치, 비선형 유한요소해석