사각 연속횡보강 선조립철근으로 단부횡보강된 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계

김 희 도¹ · 이 승 현² · 조 재 희² · 김 성 현³ · 강 수 민^{4†}

¹숭실대학교 건축학부 석박사통합과정, ²숭실대학교 건축학부 학사과정,
³서울대학교 건설환경종합연구소 연수연구원, ⁴숭실대학교 건축학부 부교수

Moment-Curvature Relationship of RC Structural Walls with Confined Boundary Elements Using Pre-Fabricated Rectangular Continuous Hoops

Hui-Do Kim¹, Seung-Hyun Lee², Jae-Hui Cho², Sung-Hyun Kim³ and Su-Min Kang^{4†}

¹Graduate Student, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

²Undergraduate Student, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

³Researcher, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

⁴Associate Professor, School of Architecture, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

Abstract

Because boundary confinement details proposed in the current design standards are significantly inferior in workability and production quality, it is necessary to develop boundary confinement details of RC structural walls that are capable of ensuring seismic performance and workability. With the recent development of the wire rod manufacturing technology, various pre-fabricated continuous hoop details can be manufactured. In this study, an analysis was conducted on the moment-curvature relationship of RC structural walls to which the pre-fabricated continuous hoop details were applied. According to the nonlinear cross-section analysis, the RC structure wall to which the details of the pre-fabricated continuous hoop details are applied can ensure seismic performance as the area of the pre-fabricated continuous hoop increases. Based on these research results, when applying the pre-fabricated continuous hoop in detail, it is necessary to secure the area of the pre-fabricated continuous hoop as much as the area of the existing boundary confinement.

Keywords : RC structural wall, pre-fabricated continuous hoop detail, MATLAB algorithm, area of boundary confinement

1. 서론

벽식구조 공동주택(아파트)은 국내에서 주거건축물의 대부분을 차지하며, 해외 고층건물과는 달리 순수벽식으로 이루어진 독특한 구조형식을 지니고 있다. 건축평면 계획상 공간 구획을 주로 RC(Reinforced Concrete) 벽체로 구성하며, RC 구조벽체 하부에 재하되는 축력이 벽체의 단위면적당 압축강도의 15% 이내로 구성되는 경우가 많다. 그러나 최근 벽식구조 아파트는 도시과밀화에 대응하여 30~40층 까지 고층화되어 35층 내외의 순수 벽식 아파트의 건설이 일반화되고 있으며 공간 구성의 가변성 확보와 공사비 절감을 위하여 평면내부의

구조벽체의 벽량을 가급적 최소화하는 추세이다. 따라서 RC 구조벽체 하부에 재하되는 축력이 과거에는 단위면적당 압축강도의 15% 이내였지만, 최근에는 벽식구조 아파트에 사용되는 벽체의 단위면적당 압축강도가 벽체 압축성능의 20~30%에 해당하는 고축력을 재하 받는 경우가 상당히 많이 발생하고 있다(Jeon and Park, 2019).

벽식구조 아파트가 고층화되면서, 벽식구조 아파트의 주요 부재인 RC 구조벽체가 높은 축력과 철근비가 사용되었는데 국내의 연구들(Adebar, 2013; Yu *et al.*, 2019; Kang *et al.*, 2015)에 따르면 축력과 철근비가 큰 RC 구조벽체의 내진성능 특히, 변형성능이 급격하게 저하되는 것으로 알려져 있다. Kim 등(2021)의

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-820-0665; E-mail: kangsm@ssu.ac.kr

Received December 3 2021; Revised December 20 2021;

Accepted December 20 2021

© 2022 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.

Fig. 1 Effect of boundary confinement detail on concrete compressive strain(Kim *et al.*, 2021)

Fig. 2 Decrease in workability and quality due to boundary confinement detail

연구에 따르면 압축연단에 횡보강이 없는 RC 구조벽체의 경우, 벽체 압축연단의 극한변형률이 $0.002(\epsilon_{c0})$ 에서 파괴가 일어나고 단부횡보강 상세를 사용할 경우, 극한변형률이 1.19~3.36 배 증가하는 것을 보여준다. 따라서 국내와 같이 단부횡보강을 사용하지 않는 고축력, 고절근비 벽체의 경우, 벽체의 최종 파괴가 0.002 내외의 극한변형률에서 발생하는 것으로 예상된다(Fig. 1 참고).

현재 설계기준(KBC 2016(AIK, 2016))의 특수구조벽체 설계에 있어서 단부횡보강을 요구하는 극한변형률이나 일반적인 휨설계의 극한변형률이 0.003임을 고려했을 때, 단부횡보강이 없는 경우, RC 구조벽체의 조기 압축파괴로 인하여 내진 성능확보가 어렵다. 현재 내진설계기준에서 135도 갈고리, 폐쇄형 후프, 매우 조밀한 횡보강근 배치간격 등의 단부횡보강을 실시하여 특수구조벽체의 내진성능을 확보할 수 있다. 하지만 기준에서 제시한 단부횡보강 상세를 두께가 얇은 RC 구조 벽체로 구성된 국내 벽식구조 아파트에 적용할 경우, 시공성 및 생산품질이 현저히 떨어져서 현장적용성이 매우 저하된다(Fig. 2 참고). 따라서 특수구조벽체 설계기준에서 제시하는 내진성능을 확보하면서 시공성과 생산품질을 확보할 수 있는 RC 구조벽체의 단부횡보강 상세 개발이 필요하다.

Fig. 3 Various pre-fabricated continuous hoop details by the development of wire rod manufacturing technology(Kang *et al.*, 2013)

Fig. 4 Pre-fabricated rectangular continuous hoops applied to RC wall

최근 선재(線材) 제작기술의 발전으로 다양한 선조립 철근의 제작이 가능해지고 있으며 특히 다양한 연속횡보강 철근 상세의 제작이 가능하게 되었다(Fig. 3 참고). 따라서 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 발전된 선조립 철근의 제작 기술을 바탕으로 직사각형 단면의 벽체에 배치하기 적합한 사각 연속횡보강 선조립철근 단부횡보강 상세의 적용성을 검토하고자 한다.

RC 구조벽체에 적용할 사각 연속횡보강 선조립 철근 상세는 기존 현장에서 수행되는 복잡하고 오랜 시간이 소요되는 내진상세 배근을 배제하고 철근 주근에 사각 연속횡보강 상세를 적용하여 기존 분절된 사각형태의 횡보강근 보다 탁월한 횡보강 성능 및 연성능력을 확보하여 RC 구조벽체의 내진성능을 향상시킬 수 있는 것으로 기대된다. 또한 Fig. 5와 같이 주근과 사각 연속횡보강 상세를 동시에 공장에서 제작하고 현장에서는 단위 단부횡보강 개체로 RC 구조벽체 이음부에 시공하여 현장 작업의 최소화, 단부횡보강 철근의 품질 확보 및 공기단축 등의 RC 구조벽체의 시공성 향상이 기대된다.

본 연구에서는 RC 구조벽체에 대해 제안된 사각 연속횡보강 선조립철근 단부횡보강 상세의 적용성을 검토하고 설계 시 고려해야 할 다양한 변수의 영향을 면밀히 분석하기 위해 비선형 수치해석을 수행하였다. Kang과 Park(2003)의 연구를 통해

(a) Construction conditions of lower wall and slab(exposed splice length of pre-fabricated hoops) (b) Placement of Pre-fabricated rectangular continuous hoops (c) Placement of shear reinforcement and concrete

Fig. 5 Construction method of RC wall with pre-fabricated rectangular continuous hoops

단부형보강된 벽체의 모멘트-곡률관계를 정의하는 방법을 사용하여 사각 연속형보강 선조립철근 단부형보강된 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계를 산출하였다. 또한 제안된 상세의 극한거동 및 내진성능 개선을 위하여 사각 연속형보강근의 상세 및 배치 간격, 형보강 영역 비율 등을 변수로 한 해석모델의 모멘트-곡률 관계를 분석하여 사각 연속형보강 선조립철근 상세 설계 적용의 타당성을 분석하였다. 비선형 수치해석을 통해 산출된 사각 연속형보강 선조립철근으로 단부형보강된 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계와 현 설계기준에서 제시한 특수구조벽체의 모멘트-곡률 관계를 비교·분석하여 제안된 방법의 설계 적용 시, 고려해야할 사항을 제안하였다.

2. 해석 방법

본 연구에서는 사각 연속형보강 선조립철근 단부형보강 상세를 적용한 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계를 연구하기 위하여 비선형 수치해석을 수행하였으며 이를 위해 MATLAB을 이용하여 Fig. 6과 같이 부재의 모멘트-곡률 관계 알고리즘을 사용하였다. 최근 연구(Yoo *et al.*, 2015)에 의하면 휨지배 RC 구조벽체의 극한거동을 파이버(Fiber) 모델로 효율적으로 묘사할 수 있는 것으로 알려지고 있다. 따라서 본 연구에서도 RC 구조벽체의 단면을 여러 개의 파이버 요소로 나누어 비선형 수

치해석을 진행하였다. RC 구조벽체에서 콘크리트의 파이버 요소는 부재의 단면을 5mm의 두께로 분할하였으며 철근의 파이버 요소는 배근된 철근의 위치에서 각 철근의 단면적으로 분할하였다. 모멘트-곡률 관계 산출 알고리즘은 초기 곡률(ϕ_0)과 압축대 깊이(c_0)를 가정하여 파이버 요소의 변형률(ϵ_{ci} , ϵ_{si})과 응력(σ_{ci} , σ_{si})을 통해 단면에 작용하는 힘과 모멘트의 평형관계가 만족시킬 때까지 반복 계산하도록 작성하였다. 반복계산을 통해 힘과 모멘트의 평형관계가 만족하는 RC 구조 벽체의 압축대 깊이가 산정되면 곡률을 증가시켜 RC 구조벽체의 모멘트를 산출하여 부재의 모멘트-곡률 관계를 분석할 수 있다 (Fig. 6 참고). 따라서 본 연구에서는 위와 같은 MATLAB 알고리즘을 사용하여 사각 연속형보강 선조립철근 단부형보강 상세를 적용한 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계를 산출하였다.

2.1 재료모델

본 연구에서 수행되는 비선형 단면해석에서 가장 중요한 것 중 하나는 단부형보강 상세로 인한 RC 구조 벽체의 횡구속효과를 좀 더 정확하게 묘사하는 것이며 이를 위해 횡구속, 비횡구속 콘크리트와 철근의 재료 비선형성을 고려하여 재료모델을 적용하였다. Mander 등(1988)의 연구결과에 의하면 RC 구조벽체의 단부를 형보강하는 경우, 형보강 영역은 횡구속 효과로 인하여 비횡보강 콘크리트보다 콘크리트의 강도와 연성도가 크게 증가한다. RC 구조벽체의 단부형보강 효과를 정확히 평가하기 위해서 Mander 등(1988)의 연구에서 제안한 형보강된 콘크리트의 재료모델을 적용하였으며 이를 통해 형보강으로 인한 콘크리트의 강도와 연성도 증가를 적절히 나타내었다. Fig. 7은 비횡보강 콘크리트와 형보강된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 비교하고 있다. 단부 형보강 효과로 인해 형보강 콘크리트의 압축강도와 연성도가 기존 비횡구속 콘크리트보다 크게 증가하였다. 철근의 재료 비선형 모델은 Fig. 8과 같이

Fig. 6 Process of moment-curvature relationship algorithm

Stress-strain relationship of concrete($f_{ck}=24\text{MPa}$)

Fig. 7 Material model for concrete

Stress-strain curve for steel($f_y=400\text{MPa}$)

Fig. 8 Material model for steel

Fig. 9 Prototype walls for numerical analysis

삼선형 곡선으로 나타내었다.

본 연구에서는 단부에 수직철근을 집중적으로 배근하는 방식과 수직철근을 단면 전체에 균일하게 배근하는 방식의 RC 구조 벽체를 대상으로 하였으며 Fig. 9와 같이 벽체의 길이 h 는 6,000mm, 두께 b 는 200mm, 피복 두께 c_v 는 20mm이며 압축력은 $0.2A_gf_{ck}$ 이다. 단부집중배근을 사용하는 경우, 단부에서 0.1l의 구간에 단부배근을 하였으며 이 구간의 수직철근비는 $\rho'_v = 0.011$ 이며 균등배근 경우에는 수직철근비 $\rho_v = 0.0013$ 이다. 형보

강을 실시하는 경우, 형보강근의 수직간격은 50mm로 통일하였으며, 형보강 철근의 직경과 항복강도는 D13, 400MPa로 가정하였다. 또한 수직철근 배근은 기존연구(Kang and Park, 2003)와 동일하게 설정하였으며, 사각 연속형보강근을 사용할 경우, 동일한 휨강도를 가지도록 수직철근량을 조절하였다.

2.2 해석프로그램 검증

본 연구에 적용한 비선형 수치해석 프로그램의 검증을 위하여 Kang과 Park(2003)의 벽체 모델을 MATLAB 알고리즘을 이용하여 모멘트-곡률관계를 산출하고 이를 기존결과와 비교하여 MATLAB 알고리즘의 신뢰성을 검증하였다.

Fig. 10은 단부에 수직철근을 집중적으로 배근했을 때, 단부형보강 길이(l_c)에 따른 벽체의 모멘트-곡률 관계, Fig. 11은 수직철근을 단면 전체에 균일하게 배근했을 때, 단부형보강 길이(l_c)에 따른 벽체의 모멘트-곡률 관계를 보여준다. Fig. 10과 Fig. 11(a)는 Kang과 Park(2003)의 대표적인 해석의 예이며 (b)는 MATLAB 알고리즘을 통해 산출된 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계이다. 단부집중배근인 경우에서 항복강도 이후에 일정한 강도를 유지하다가 특정지점에서 강도가 급격하게 감소하는 취성적인 파괴 형태와 형보강 영역 증가에 따른 변형능력

(a) Analysis results(Kang and Park, 2003)

(b) MATLAB algorithm

Fig. 10 Variation of behavior with length of boundary confinement(Concentrated boundary re-bars)

Fig. 11 Variation of behavior with length of boundary confinement(Uniform re-bars)

의 증가를 동일하게 보여주고 있다(Fig. 10 참고). 균등배근인 경우에도 강도의 감소가 비교적 완만하게 일어나는 것과 횡보강 영역의 증가에 따른 변형능력 증가와 최대 강도 이후에 거동을 거의 동일하게 평가함을 알 수 있다(Fig. 11 참고). 따라서 본 연구에서는 기존 비선형 수치해석 연구와 거의 동일한 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계를 보여주는 MATLAB 알고리즘을 사용하여 사각 연속횡보강 선조립철근으로 단부횡보강된 RC 구조 벽체의 모멘트-곡률 관계를 산출하였다.

2.3 해석변수

현재 설계기준(KBC 2016)에서는 특수구조벽체의 내진성능을 확보하기 위해 압축단부에서 압축대 깊이의 50%를 특수 경계요소를 설정하여 단부횡보강하도록 되어있다. Fig. 12(a)는 RC 구조벽체에 대하여 일반적인 상세의 단부 횡보강 적용에 따른 압축대 깊이, 극한변형률, 곡률의 변화를 보여준다. Fig. 12(a)에서 알 수 있듯이 비횡보강된 RC 구조벽체를 하나의 횡보강 영역으로 보강할 경우, 압축연단의 극한변형률($\epsilon_{c,max}$)이 증가하게 되어 벽체가 발휘할 수 있는 곡률성능이 개선된다($\Delta\phi_1$). 또한 횡구속된 콘크리트의 압축강도가 늘어나기 때문

Fig. 12 Effect of boundary confinement

에 비횡구속벽체에 비해 압축대가 줄어들게 되고(Δc) 이하여 추가적인 곡률성능확보($\Delta\phi_2$)가 가능하다. 따라서 벽체 압축단부에 횡보강을 실시할 경우, 극한변형률의 증가와 압축대 크기 감소로 인하여 벽체의 곡률성능 즉 변형성능이 개선된다고 할 수 있다($\Delta\phi_1 + \Delta\phi_2$). 이러한 곡률성능의 개선은 Fig. 12(b)에서 볼 수 있듯이 사각 연속횡보강 상세의 적용으로 유사하게 발현될 것으로 판단된다.

다만 사각 연속횡보강 상세(Fig. 12(b))를 적용할 경우, 일반적인 횡보강 상세(Fig. 12(a))와는 배치형태와 횡구속 효과의 차이가 나기 때문에 곡률성능개선효과를 면밀히 분석할 필요가 있다. Fig. 12(b)에서 볼 수 있듯이 개별 사각연속횡보강의 배치간격에 따라 연속횡보강근 사이에 횡보강되지 못한 비횡보강 콘크리트 영역이 존재할 수 있다. 이러한 비횡보강 영역은 초기 압축응력 손실로 인하여 곡률성능 개선에 부정적 영향을 미칠 수 있다. 반면 사각 연속횡보강상세를 사용할 경우, 일반적인 보강상세와 동일한 직경과 간격의 철근으로 횡보강할 경우, 면외방향으로 보강철근량을 보다 손쉽게 확보할 수 있기 때문에 횡보강 영역에서의 더 큰 구속효과를 기대할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 제안된 사각 연속횡보강근으로 단부 횡보강 상세를 적용한 RC 구조 벽체가 현 설계기준에서 제시하는 일반적인 상세와의 내진성능(또는 곡률성능)을 비교·분석하기 위하여 비횡보강 RC 구조벽체(기준벽체), 일반적인 횡보강 상세의 RC 구조벽체 그리고 제안된 사각연속횡보강 상세를 적용한 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계를 비교하고자 하였다.

일반적인 횡보강 상세를 적용한 RC 구조 벽체는 단면마다 횡구속 효과가 다르기 때문에 벽체에 작용하는 횡구속 콘크리트 응력을 평균적으로 산출한다. 따라서 본 연구에서도 제안된 상세의 횡보강 영역을 동일 평면 내에 놓여있다고 가정하여 횡구속 콘크리트 응력을 산출하였다. 또한, RC 구조 벽체의 횡보강

영역을 압축대 깊이의 25%와 50%로 설정하여 내진설계기준을 만족하는 경우와 부분적인 형보강을 실시하는 경우에 대한 곡률성능을 검토하였다. 마지막으로 사각연속형보강을 사용할 경우, 일반적인 형보강상세 즉 하나로 형보강된 RC 구조벽체와의 내진성능을 비교하기 위해 여러 개의 형보강 영역을 분할하고 40mm, 80mm, 120mm, 160mm의 형보강 영역의 간격을 설정하여 RC 구조 벽체의 모멘트-곡률 관계를 비교·분석하였다.

3. 수치해석결과

3.1 단부집중배근, 압축대 깊이의 25%

MATLAB 알고리즘을 통해 비형보강된 단부집중배근 RC 구조 벽체의 압축대 깊이는 1,600mm이며 형보강 영역은 압축대 깊이의 25%인 400mm로 설정하였다. Fig. 13은 압축대 깊이의 25%만큼 형보강영역을 고정하고 단부집중배근된 RC 구조 벽체의 모멘트-곡률 관계를 보여준다. 형보강된 RC 구조벽체와 연속형보강된 RC 구조벽체는 벽체 단부의 형구속효과로 인해 비형보강된 RC 구조벽체보다 강도가 증가하였으며 연성 거동을 확인하였다. 연속형보강근의 간격이 40mm인 경우는 연속형보강근 사이의 비형보강 영역에서 응력손실이 발생하더라도, 연속형보강근의 우수한 형보강 효과로 인하여 이러한 응력손실을 만회하여 곡률성능이 일반적인 형보강상세의 벽체보다 우수한 것으로 나타났다. 반면 연속형보강의 간격이 120mm 이상인 경우에는 비형보강 영역의 응력손실을 만회하지 못하여, 일반적인 형보강 상세를 적용한 RC 벽체에 비해 곡률성능이 떨어지는 것으로 나타났다.

Fig. 13 Moment-curvature relationship of concentrated boundary re-bars(Confined boundary: 400mm)

Fig. 14 Moment-curvature relationship of concentrated boundary re-bars(Confined boundary: 800mm)

3.2 단부집중배근, 압축대 깊이의 50%

비형보강된 단부집중배근 RC 구조 벽체의 압축대 깊이는 1,600mm이며 형보강 영역은 압축대 깊이의 50% 800mm이다. Fig. 14는 압축대 깊이의 50%만큼 형보강 영역을 고정하고 단부집중배근된 RC 구조 벽체의 모멘트-곡률 관계를 보여준다. 하나로 형보강된 RC 구조벽체와 연속형보강된 RC 구조벽체는 벽체 단부의 형구속효과로 인해 연성적인 거동을 확인하였다. 또한 연속형보강근의 간격이 160mm 이상으로 되었을 경우, 하나로 형보강하였을 때보다 벽체의 변형능력이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 연속형보강근의 간격이 40mm, 80mm, 120mm인 경우에는 연속형보강근의 우수한 형보강 효과로 인하여 곡률성능이 일반적인 형보강상세의 벽체보다 우수한 것으로 나타났다. 반면 연속형보강의 간격이 160mm인 경우에는 비형보강 영역의 응력손실을 만회하지 못하여 곡률성능이 하나로 형보강하였을 때보다 떨어지는 것으로 나타났다.

3.3 균등배근, 압축대 깊이의 25%

MATLAB 알고리즘을 통해 비형보강된 균등배근 RC 구조 벽체의 압축대 깊이는 2,000mm이며 형보강 영역은 압축대 깊이의 25%인 500mm로 설정하였다. Fig. 15는 압축대 깊이의 25%만큼 형보강 영역을 고정하고 균등배근된 RC 구조 벽체의 모멘트-곡률 관계를 보여준다. 단부집중배근된 RC 구조 벽체보다 연성거동을 보이며 강도저하가 완만하게 발생하는 것을 확인하였다. 연속형보강근의 간격이 40mm, 80mm, 120mm

Fig. 15 Moment-curvature relationship of uniform re-bars(Confined boundary: 500mm)

인 경우, 벽체의 곡률성능이 일반적인 횡보강상세의 벽체보다 유사하거나 우수한 것으로 나타났으나 연속횡보강근의 간격이 160mm인 경우에는 일반적인 횡보강 상세를 적용한 RC 벽체에 비해 곡률성능이 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

3.4 균등배근, 압축대 깊이의 50%

Fig. 16은 압축대 깊이의 50%인 1,000mm만큼 횡보강 영역을 고정하고 균등배근된 RC 구조 벽체의 모멘트-곡률 관계를 보여준다. 하나로 횡보강된 RC 구조벽체와 연속횡보강된 RC 구

Fig. 16 Moment-curvature relationship of uniform re-bars(Confined boundary: 1,000mm)

조벽체는 벽체 단부의 횡구속효과로 인해 비횡보강된 RC 구조 벽체보다 최대강도 이후 강도저하가 완만하게 일어났다. 또한 연속횡보강근의 간격이 160mm일 경우에는 강도와 변형능력이 감소하였다. 연속횡보강근의 간격이 40mm, 80mm, 120mm 인 경우, 벽체의 곡률성능이 일반적인 횡보강상세의 벽체보다 유사하거나 우수한 것으로 나타났으나 연속횡보강근의 간격이 160mm인 경우에는 일반적인 횡보강 상세를 적용한 RC 벽체에 비해 곡률성능이 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

4. 해석결과 분석 및 제언

4.1 파괴 메커니즘 분석

Fig. 17은 단부집중배근방식으로 하나로 횡보강 하였을 때와 연속횡보강된 RC 벽체의 강도가 떨어지는 지점에 대한 재료의 응력상태를 보여주고 있다. Fig. 17에서 알 수 있듯이 하나로 횡보강된 RC 구조 벽체의 강도가 떨어지기 시작하는 지점에서의 응력과 변형률 상태는 비횡보강 콘크리트의 최대 압축변형률이 ϵ_u 에 도달할 때이며(Kang and Park, 2003) 연속횡보강 상세를 적용한 RC 벽체도 유사하게 비횡보강 콘크리트의 최대 압축변형률이 ϵ_u 에 도달할 때 강도가 떨어지기 시작하였다. 횡보강영역을 압축대 깊이 25%로 설정하였을 때 하나로 횡보강했을 때와 연속횡보강근의 간격이 40mm인 경우, 곡률

Fig. 17 Strain-stress relationship in moment-curvature curve

(ϕ_B , ϕ_B')은 각각 0.0044와 0.0049로 연속횡보강 상세를 적용한 RC 벽체의 곡률능력이 일반적인 횡보강상세의 벽체보다 우수한 것으로 나타났다. 이는 하나로 횡보강하였을 때의 비횡보강 콘크리트 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B 가 연속횡보강 상세를 적용한 경우의 비횡보강 콘크리트 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B' 보다 길어서 벽체의 추가적인 곡률성능 확보가 작아 연속횡보강된 RC 벽체의 곡률이 더 우수한 것으로 판단된다. 반면 연속횡보강근의 간격이 80mm, 120mm, 160mm인 경우에는 곡률(ϕ_B)은 각각 0.0043, 0.0039, 0.0035로 비횡보강 콘크리트 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B 가 하나로 횡보강된 경우에서의 l_B 보다 컸으며 일반적인 횡보강 상세를 적용한 RC 벽체에 비해 곡률성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 횡보강영역을 압축대 깊이 50%로 설정하였을 때 하나로 횡보강했을 때와 연속횡보강근의 간격이 80mm, 120mm인 경우, 곡률(ϕ_B , ϕ_B')은 각각 0.0102, 0.0187, 0.012로 연속횡보강 상세를 적용한 RC 벽체의 곡률성능이 일반적인 횡보강 상세의 벽체보다 우수한 것으로 나타났다. 반면, 연속 횡보강근의 간격이 160mm인 경우, 곡률(ϕ_B)은 0.008로 비횡보강 콘크리트의 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B 가 하나로 횡보강하였을 때의 비횡보강 콘크리트 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B 보다 길어져서 추가적인 곡률성능 확보가 어려워 곡률성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 또한, 수직철근이 균등하게 배근된 벽체의 경우에도 단부집중배근된 벽체와 유사한 파괴 메커니즘을 보였다.

따라서 단부횡보강을 실시할 경우, 사각 연속횡보강 상세를 적용한 RC 벽체가 일반적인 횡보강 상세를 적용한 RC 벽체보다 추가적인 곡률성능을 높이기 위해서는 연속횡보강근의 간격을 조밀하게 설계해야 한다. 또한 시공성을 향상시키기 위해 연속횡보강근의 간격을 증가시킬 경우, 비횡보강 콘크리트 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B 와 일반적인 횡보강상세의 벽체에서의 영역 길이 l_B 를 비교하여 RC 벽체가 추가적인 곡률성능을 확보할 수 있도록 연속횡보강근의 간격을 고려해야 한다.

4.2 사각 연속 횡보강 영역 상세 제안

Fig. 14와 Fig. 16에 의하면 단부집중배근방식과 균등배근방식에서의 RC 구조벽체 횡보강 영역을 압축대 깊이의 50%로 사각 연속횡보강 선조립철근 상세를 적용한 경우, 연속횡보강 영역의 간격이 160mm를 제외한 나머지 연속횡보강 RC 구조벽체는 하나로 횡보강한 RC 구조벽체보다 벽체의 변형능력이 증가한 것을 알 수 있다. 이에 비해 압축대 깊이의 25%의 횡보강 영역에 연속횡보강 상세를 적용할 경우, 연속횡보강

Fig. 18 Determination of confined compressive strength ratio from lateral confining stresses(Mander *et al.*, 1988)

영역의 간격이 40mm를 제외한 나머지 연속횡보강 RC 구조벽체는 하나로 횡보강한 RC 구조벽체보다 벽체의 변형능력이 감소한 것을 알 수 있다. 이는 벽체의 고정된 횡보강 영역에서 연속횡보강 영역의 간격이 증가하면 횡보강 영역의 면적이 감소하게 되며 그로 인해 간격이 넓어진 연속횡보강 상세는 하나로 횡보강된 상세보다 횡구속 콘크리트의 횡구속효과가 감소하여 벽체의 변형능력 감소가 발생하는 현상이라고 판단된다. 따라서 연속횡보강근의 간격에 따른 벽체의 변형능력이 감소하는 원인을 분석하기 위해, RC 구조벽체에서 횡보강영역의 면적에 따른 횡구속 콘크리트의 횡구속효과를 분석하였다.

Fig. 18은 직사각형 단면의 횡구속효과로 증가한 횡구속 콘크리트의 압축강도를 산출하기 위해 횡구속 콘크리트와 비횡구속 콘크리트의 압축강도 비율을 구하는 그림이다(Mander *et al.*, 1988). 횡구속 콘크리트와 비횡구속 콘크리트의 압축강도 비율은 x, y방향의 구속효과로 인한 횡구속 응력을 구할 수 있으며 이때 x, y 방향의 횡구속 응력은 다음과 같다.

$$\rho_x = \frac{2A_b}{sh''_y}, \rho_y = \frac{2A_b}{sh''_x} \quad (1)$$

$$f'_{lx} = K_e \rho_x f_{yh}, f'_{ly} = K_e \rho_y f_{yh} \quad (2)$$

여기서, ρ_x 와 ρ_y 는 x, y방향의 횡보강철근비, A_b 는 횡보강근의 단면적, s 는 횡보강철근의 간격, h''_x 와 h''_y 는 x, y방향의 횡보강배근 길이, f'_{lx} 와 f'_{ly} 는 x, y방향의 횡구속 응력, K_e 는 횡보강계수, f_{yh} 는 횡보강근의 항복강도이다.

벽체의 단면에 직사각형의 횡보강을 적용할 경우, K_e 는 0.6, 사각 연속횡보강 선조립철근의 간격(s)은 50mm, 횡보강근은 D10으로 설정하였다. 제안된 사각 연속횡보강 상세를 적용할 경우, 횡보강 영역의 면적이 가장 큰 270mm²인 경우에 횡구속

콘크리트 강도 f_{cc} 는 55.2MPa, 일반적인 횡보강 상세를 적용할 경우, 압축대 깊이의 25%에서의 f_{cc} 는 45.6MPa, 43.2MPa, 압축대 깊이의 50%에서의 f_{cc} 는 39.6MPa, 38.4MPa로 산출되었으며 9.6~16.8MPa의 횡구속 콘크리트 압축강도의 차이가 발생하였다. 이는 x 방향의 횡구속응력 f_{lx} 는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 h''_y 가 160mm로 고정되므로 x방향의 횡구속응력은 모든 RC 구조벽체에서 동일하게 산출되지만 y 방향의 횡구속응력 f_{ly} 는 h''_x 가 횡보강 영역의 면적과 철근량에 따라 다르게 산출된다. 따라서 횡구속 콘크리트의 압축강도는 횡보강 영역의 면적과 철근량에 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. 횡구속 효과의 유효면적(A_{cc})은 다음 식 (3)으로 산정하였다.

$$A_{cc} = A_s \times \frac{f_{cc}}{f_c} \quad (3)$$

여기서, A_s 는 단부 횡보강영역, f_{cc} 는 횡구속 콘크리트의 압축응력, f_c 는 비횡구속 콘크리트의 압축응력이다.

내진설계기준에 의해 산정된 단부횡보강 영역에 횡구속 콘크리트와 비횡구속 콘크리트의 압축응력비를 곱하여 횡구속 효과의 유효 면적을 산정하였다. Table 1은 해석변수를 적용한 구조벽체의 횡보강 영역의 면적과 횡보강 응력비를 통해 횡구

Table 1 Area of effective confined concrete

		Area(mm ²)				
		Confined boundary	40mm	80mm	120mm	160mm
Concentrated re-bar	25%	760	792	736	644	552
	50%	1,320	1,512	1,344	1,232	1,104
uniform re-bar	25%	900	966	882	836	782
	50%	1,600	1,848	1,672	1,472	1,196

(a) Concentrated boundary re-bars(Confined boundary : 400mm)

(b) Concentrated boundary re-bars(Confined boundary : 800mm)

(c) Uniform re-bars(Confined boundary : 500mm)

(d) Uniform re-bars(Confined boundary : 1,000mm)

Fig. 19 Moment-curvature relationship of boundary confinement area

속 콘크리트의 횡구속 효과의 유효면적을 정리한 표이다.

Table 1에 의하면 압축대 깊이의 50%에서는 연속횡보강근의 간격 120mm, 압축대 깊이의 25%에서는 연속횡보강근의 간격 80mm 이상으로 증가하면 횡구속 효과의 유효면적이 하나로 횡보강된 영역의 유효면적보다 감소하는 것을 볼 수 있다. 횡구속 콘크리트의 유효면적의 차이는 사각 연속횡보강 영역의 간격이 증가할수록 크게 발생하며 그로 인해 횡구속 효과가 감소하여 벽체의 변형능력 즉 곡률능력이 떨어지는 것으로 판단된다.

Fig. 19는 사각 연속횡보강 영역의 면적과 하나로 횡보강된 영역을 동일하게 설정하였을 때의 모멘트-곡률 관계를 나타낸다. 사각 연속횡보강 상세를 적용한 구조벽체의 변형능력이 하나로 횡보강된 구조벽체보다 증가하는 것을 볼 수 있으며 사각 연속횡보강 영역의 유효면적의 합을 횡보강 영역의 면적과 동일하게 맞추면 하나로 횡보강된 구조벽체와 동일한 성능 또는 뛰어난 변형능력을 볼 수 있으며 연속횡보강 영역의 간격을 연속횡보강 영역의 크기만큼 증가시켜도 뛰어난 변형능력을 볼 수 있다. 따라서 사각 연속횡보강 선조립철근의 상세를 RC 구조벽체에 적용할 경우에는 횡구속 콘크리트의 유효면적 크기를 현 설계기준에서 제시한 횡보강 영역의 면적과 동일하게 설계하여 구조 벽체의 성능을 확보해야 한다. 또한 사각 연속횡보강 영역의 간격은 연속횡보강 영역의 크기만큼 띄워도 변형성능에는 큰 변화가 없으나 강도는 다소 떨어지기 때문에 상세 적용시 주의를 기울여야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 사각 연속횡보강 선조립철근 단부횡보강된 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계를 MATLAB 알고리즘을 통하여 비선형 수치해석을 수행하여 현 설계기준에서 제시한 특수구조벽체의 내진성능과 비교 분석을 진행하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 현 설계기준에서 제시한 단부횡보강 상세는 시공성과 생산 품질이 현저히 떨어지므로 내진성능과 시공성 및 생산 품질을 확보할 수 있는 사각 연속횡보강 선조립 철근의 상세를 제안한다.
- 2) 제안된 사각 연속횡보강근으로 단부횡보강 상세를 적용한 RC 구조 벽체가 현 설계기준에서 제시하는 일반적인 상세와의 내진성능(또는 곡률성능)을 비교·분석하였다. 횡보강영역을 압축대 깊이의 25%에서 단부집중배근된 RC 구조벽체는 사각 연속횡보강근의 간격이 40mm 인 경우, 압축대 깊이의 50%에서 연속횡보강근의 간격이 40mm,

80mm, 120mm인 경우에 곡률성능이 일반적인 횡보강 상세의 벽체보다 우수한 것으로 나타났다. 균등배근된 RC 구조벽체는 압축대 깊이의 25%에서 연속횡보강근의 간격이 40mm, 80mm 인 경우, 압축대 깊이의 50%에서 연속횡보강근의 간격이 40mm, 80mm인 경우에 우수한 곡률성능을 나타냈다.

- 3) 단부횡보강된 RC 벽체는 비횡보강 콘크리트의 최대 압축변형률이 ϵ_u 에 도달할 때 강도가 떨어지기 시작하였다. 연속횡보강근의 간격이 조밀할수록 비횡보강 콘크리트 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B 가 일반적인 횡보강상세의 벽체에서의 영역 길이 l_B 보다 짧기 때문에 추가적인 곡률성능을 확보할 수 있다. 따라서 단부횡보강을 실시할 경우, 사각 연속횡보강 상세를 적용한 RC 벽체가 일반적인 횡보강 상세를 적용한 RC 벽체보다 추가적인 곡률성능을 높이기 위해서는 연속횡보강근의 간격을 조밀하게 설계해야 한다. 또한 시공성을 향상시키기 위해 연속횡보강근의 간격을 증가시킬 경우, 비횡보강 콘크리트 응력을 발생시키는 영역의 길이 l_B 와 일반적인 횡보강상세의 벽체에서의 영역 길이 l_B 를 비교하여 RC 벽체가 추가적인 곡률성능을 확보할 수 있도록 연속횡보강근의 간격을 고려해야 한다.
- 4) 단부횡보강된 RC 구조벽체는 횡구속 콘크리트의 유효면적의 크기에 큰 영향을 받는다. 사각 연속횡보강근의 간격이 증가할수록 횡구속 콘크리트의 유효면적은 감소한다. 따라서 사각 연속횡보강 상세를 RC 구조벽체에 적용하는 경우, 현 설계기준과 동등한 내진성능을 확보하기 위해 단부횡보강 영역만큼의 횡구속 콘크리트의 유효면적을 증가시켜 벽체의 내진성능을 확보해야 하며, 사각 연속횡보강 영역의 간격은 연속횡보강근의 크기만큼 간격을 벌려도 RC 구조벽체의 변형성능에 큰 변화가 없으나 강도가 떨어지기 때문에 상세 적용시 주의를 기울여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 주관하는 중견연구자지원사업 (No. 2021R1A2C1012314)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Adebar, P. (2013) Compression Failure of Thin Concrete Walls During 2010 Chile Earthquake: Lessons for Canadian Design Practice, *Can. J. Civil Eng.*, 40(8), pp.711~721.

- AIK** (2016) Korean Building Code and Commentary (KBC-2016), Architectural Institute of Korea, Seoul.
- Jeon, S.H., Park, J.H.** (2019) Seismic Fragility Assessment of Ordinary RC Shear Walls Designed with a Nonlinear Dynamic Analysis, *J. Earthq.*, 23(3), pp.169~181.
- Kang, S.M., Jin, J.M., Lee, S.H., Park, H.G.** (2013) Reinforcement Method for Shortening the Construction Period of RC Building, *Mag. Korea Concr. Inst.*, 25(2), pp.29~33.
- Kang, S.M., Park, H.G.** (2003) Moment-Curvature Relationship of Structural Walls with Confined Boundary Element, *J. Korea Concr. Inst.*, 15(2), pp.323~334.
- Kang, S.M., Park, H.G., Kim, J.Y.** (2015) Early Crushing Failure of High-Rise Shear Walls with no Boundary Confinement, *Adv. Struct. Eng.*, 18(7), pp.1029~1042.
- Kim, S.H., Lee, E.K., Kang, S.M., Park, H.G., Park, J.H.** (2021) Effect of Boundary Confinement on Ductility of RC Walls, *Eng. Struct.*, 230. pp.111695.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.** (1988) Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE. 114(8), pp.1804~1826.
- Yoo, C.H., Kim, T.W., Park, H.G.** (2015) Comparison of Nonlinear Analysis Programs for Small-size Reinforced Concrete Buildings II, *J. Earthq. Eng.*, 19(5), pp.229~238.
- Yu, H.J., Kang, S.M., Park, H.G., Chung, L.** (2019) Cyclic Loading Test of Structural Walls with Small Openings, *Int. J. Concr. Struct. & Mater.*, 13(1), pp.1~14.

요 지

현 설계기준에서 제시한 단부형보강 상세는 시공성과 생산품질이 현저히 떨어지므로 내진성과 시공성을 확보할 수 있는 RC 구조벽체의 단부형보강 상세 개발이 필요하다. 최근 선재 제작기술의 발전으로 다양한 선조립철근의 제작이 가능해지고 있으며 특히 다양한 연속형보강 철근 상세의 제작이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 사각 연속형보강 선조립철근 단부형보강 상세를 적용한 RC 구조벽체의 모멘트-곡률 관계에 대한 분석을 진행하였다. 비선형 단면해석에 의하면 사각 연속형보강의 상세를 적용한 RC 구조벽체는 사각 연속형보강 영역의 면적이 증가할수록 내진성을 확보할 수 있다. 이러한 연구결과에 근거하여 사각 연속형보강 선조립 철근의 상세 적용시, 단부형보강 영역의 면적만큼 사각 연속형보강 영역의 면적을 확보해야 한다.

핵심용어 : 철근콘크리트 구조벽체, 사각 연속형보강 선조립철근, MATLAB 알고리즘, 형보강 영역