

고인장 합금재를 활용한 철근콘크리트 기둥의 내진보강공법 개발에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Development of a Seismic Reinforcement Method for Reinforced Concrete Columns using High-tensile Alloy Materials

김도연¹ · 장일영^{2*}

Do-Yeon Kim¹, Il-Young Jang^{2*}

¹Ph.D Candidate, Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea

²Professor, Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea

*Corresponding author: Il-Young Jang, jbond@kumoh.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: This study aims to develop brand new bolt fastening type of seismic retrofit using high tensile alloy materials for existing reinforced concrete columns. **Method:** A T-type cross-sectional seismic retrofit made of SUS304 and SS275, and the high-tensile bolt of SCM435 was analyzed for the effect of material properties on seismic performance through bending test. **Result:** The experiment using SUS304 shows a 7% higher maximum strength and 22% higher yield strength and shows a higher compressive stress of 360MPa. In addition, the change in the neutral axis is also smaller. **Conclusion:** Seismic retrofit using SUS304 is considered to be better in terms of yield strength, tensile strength, neutral axis change, and ductility, and it is considered necessary to experiment with RC column real experiments in future studies.

Keywords: Seismic Reinforcement, Bolt Fastened Type, Reinforced Concrete Column, High Tensile Alloy Material, Bending Test

요약

연구목적: 본 연구에서는 고인장 합금재를 활용하여 기존 철근콘크리트 기둥의 내진성능 향상이 가능한 새로운 형식의 볼트 체결식 내진보강재를 개발하고자 한다. **연구방법:** 고인장 합금재인 SUS304 및 일반 구조용 강재인 SS275를 이용하여 T형 단면 강판을 제작하고 이를 SCM435의 고장력 볼트로 체결한 내진보강재 실험체를 제작하여 휨 실험을 통해 재료적 특성이 내진 보강성능에 미치는 영향에 대해 비교 분석한다. **연구결과:** SUS304를 사용한 실험체가 7% 높은 최대 강도와 22% 높은 항복 강도를 보이며, 360MPa 더 높은 압축응력을 나타낸다. 또한 중립축의 변화도 더 미소하여 더 우수한 내력을 가진 것으로 판단된다. **결론:** 동일한 단면에서 SUS304를 사용한 내진보강재가 휨 강도, 항복강도, 인장강도, 중립축 변화, 연성능력 측면에서 더 우수한 것으로 판단되며 추후 연구에서 철근콘크리트 기둥 실물 실험체에 적용함으로써 기둥-보강재간 일체 거동에 대한 실험이 필요하다고 사료된다.

핵심용어: 내진보강, 볼트 체결식, 콘크리트 기둥, 고인장 합금재, 구조성능 실험

Received | 25 April, 2024

Revised | 14 May, 2024

Accepted | 16 May, 2024

 OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

서론

최근 전 세계적으로 지진 발생 빈도가 증가하는 추세다. 우리나라는 환태평양 조산대에 속하지 않아 그동안 지진으로부터 안전지대라고 평가되었으나 최근 5년간 규모 5.0 이상의 지진이 400회 이상 발생하였고 이 중 규모 7.0 이상의 강진은 70회에 달하였다. 특히 2018년과 2019년에는 국내에서 연평균 100회 이상의 지진이 발생하였고 2024년에는 가까운 일본에서 강진이 발생하여 우리나라 또한 지진에 의한 피해를 배제할 수 없는 실정이다(Korea Meteorological Administration, 2019).

한편 우리나라는 1988년 건축법 시행령에서 건축물에 대한 내진설계 의무 규정이 도입되었으며(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020) 1992년 도로교 표준시방서에서 신설되는 교량에 대한 내진설계 기준이 도입되었고 2000년에 개정된 도로교 설계기준에서 지진가속도계수가 향상되는 등 새로운 내진설계 요건이 추가되었다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 한편 신설된 구조물이 아닌 내진설계가 법적으로 의무화되기 이전에 시공된 구조물들은 내진설계 규정에 해당하지 않거나 사용 연수가 많이 지나 노후화가 진행되고 있어 충분한 내진성능을 발휘하지 못한다. 특히 우리나라와 같이 일부 지역에 도시화가 집중된 국가는 예상치 못한 지진이 발생하면 구조물이 붕괴될 때 인명 및 재산 피해 또한 막심할 것으로 예상되고 이로 인해 도시 전반의 마비 현상이 발생할 수 있다.

또한 국내에서는 최근 10년 동안 전례 없는 강진으로 피해가 막심하였으며 특히 다세대 주택에 이용되는 철근콘크리트 구조인 필로티 기둥의 붕괴가 극심하여 재산상의 손해까지 이어졌다. 2016년 9월 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진은 기상청이 지진 통보를 시작한 1978년 이래 최대 크기의 지진이었으며, 본진 발생 이후 비슷한 규모의 여진을 비롯하여 오랜 시간 피해가 지속되었다. 인근 지역의 인명 피해, 건물 균열, 도로 균열 등 당시 집계된 인명 및 재산 피해는 9,319건에 달한다. 이후 2017년 11월에 발생한 규모 5.4의 포항 지진은 경주에서 발생한 지진보다 규모가 작았음에도 불구하고 진원 깊이가 지표면에 더 가까워 체감되는 위력과 피해가 더 컸으며 약 850억 원의 재산 피해 및 2천여 명의 이재민을 야기했고 이듬해 2월에는 최대 규모 4.6의 여진을 발생시켰다(Korea Meteorological Administration, 2019). 이런 지진들로 인해 기둥으로 이루어진 필로티 형식의 구조물들이 다수 파손 및 붕괴되어 지진에 대한 경각심을 가지게 하는 계기가 되었다.

이처럼 국내외 다수의 재난 사례에서 향후 내진 보강이 필요할 것으로 파악된다. 이에 따라 본 연구에서는 내진 설계기준 도입 이전의 구조물 및 내진성능이 부족한 기존의 사각기둥 구조물에 적용 가능한 내진 보강재를 개발하여 지진에 대비하고자 하며, 내진성능 향상과 함께 공기 단축으로 인한 경제적 시공, 구조물의 안정성 증대 및 공용기간 연장이 가능하게 하는 새로운 형식의 내진 보강재 개발을 목표로 하였다.

내진보강재 개발을 위한 이론적 고찰

국내 내진보강 공법사례

국내 연구 사례로는 Byun(2020)의 연구에서 기둥의 연성화를 위해 다양한 실험을 수행하였고 사각단면 기둥의 횡방향 철근 구속 효과가 원형단면 기둥보다 부족하다는 결론을 도출하였다. Chae(2018)의 연구에서는 원형 기둥과 같은 단면적을 가지는 사각단면 기둥의 압축하중 용량이 원형단면 기둥보다 25% 낮은 결과를 보여 지진하중에 더욱 취약한 것으로 나타났으며 이러한 사각단면 기둥 구조물에 대한 안전성이 우선적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다. Kim(1999)은 철근콘크리트 기둥에 대한 강판 보강의 효과에 대해 실험적 연구를 수행하였으며, 부분 보강의 경우에도 전체 보강 실험체 최대 내력의

75~80%의 값을 보여 부분 보강에 의한 보강 효과를 기대할 수 있음을 입증하였다.

국외 내진보강 공법사례

국외 연구 사례로는 Mohamed et al.(2014)의 연구에서 축하중을 받는 FRP 철근, FRP 후프, 나선형 FRP 구속 콘크리트 기둥에 대해 성능 평가를 수행하였다. 이를 통해 CFRP와 GFRP는 보강시 기둥과 유사하게 거동하며 최대 하중의 85% 상승 부분에 대해 선형적인 하중-변형률 거동을 관찰하였다. 기존 콘크리트 실험체에 비해 CFRP는 약 2.2%, GFRP는 약 1.3%의 강도가 증가하였고 연성과 구속 효과 또한 미소하게 증가하였음을 파악하였다. Shamim et al.(1992)은 철근콘크리트 기둥의 횡방향 보강재 수가 많을수록 휨 강도와 연성능력이 증가하는 것을 파악하였고 동일한 양의 횡방향 철근일 때 배근 간격을 줄이면 발생하는 구속으로 인해 휨 강도와 연성이 증가함에 따라 휨 용량이 26% 상승함을 관찰하였다. Mander et al.(1988)의 연구에서는 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대해 실험을 수행하였으며, 모든 기둥 단면의 형상에 대해 응력-변형률 곡선에 가장 큰 영향인자는 횡방향 구속 철근량이고 구속 철근의 부피 비율이 증가함에 따라 강도가 증가함을 파악하였다. 또한 심부 콘크리트 구속 비율에 대한 강도 증진과 압축 변형률 모두에서 원형기둥의 성능이 사각기둥보다 더 우수함을 파악하였다.

기타 내진보강 공법사례

이외에도 콘크리트 피복 공법, 모르타르 부착 공법, 프리캐스트 패널 조립공법 등의 기둥 단면 확대 방식의 보강공법이나, 강판 피복공법, 유리섬유 공법, 탄소섬유 공법 등의 보강재 피복 방식의 보강공법이 있다. 또한 철근 삽입공법, PC 강봉 삽입 공법 등의 보강재 삽입공법과 벽 증설, 브레이스 증설 등의 부재 증설 공법을 확인하였다.

내진보강재 형상 결정

국내외 내진 보강 공법 사례에 대한 문헌 고찰을 통해 철근콘크리트 기둥의 횡방향 구속을 위한 다양한 내진보강 형식을 고찰하였다. Byun(2020) 및 Chae(2018)의 연구에 따라 횡방향 철근 구속 효과가 원형단면 기둥보다 적고, 같은 단면적에서 압축하중 용량이 25% 적어 상대적으로 지진하중에 취약하여 내진보강이 더욱 필요하다고 판단되는 사각단면 기둥을 대상으로 내진보강 형식을 개발하고자 하였다.

Kim(2010)의 연구에 따라 시공성이 좋고 유지관리에 용이한 니켈-크롬 합금강 재질의 강판을 2개의 고장력 볼트를 이용해 체결하여 기둥에 횡방향 구속력을 주고자 하였으며, 경제성을 고려하여 전체 기둥 보강이 아닌 부분 보강 형식으로 결정하였다. 이를 위해 선정된 단면으로는 기둥에 매립되는 부분을 가짐으로써 부착 성능이 향상된 내부 매립형의 T형 단면이다.

T형 단면은 크게 플랜지와 웹으로 구분할 수 있는데, 플랜지는 기둥을 감싸는 부분이고 웹은 기둥에 매립되는 부분이다. 플랜지를 보강부, 웹을 매립부라고 하였을 때 매립부의 두께와 깊이만큼 기존 철근콘크리트 기둥의 피복을 일부 제거한 후에 폭으로 정착하여 설치할 수 있다. 이를 통해 체결식 내진 보강재가 횡구속 철근의 역할을 하여 심부 콘크리트의 구속력을 높이고 지진 시 발생하는 횡방향 변위에 대한 구조물의 안정성을 향상시키는 방식이다. 내진보강재 매립부를 통해 기둥과의 부착 성능을 높여 거동의 일체 거동을 유도하고, 전체 단면의 보강이 아닌 국소 소성영역을 전략적으로 보강하여 더 간편하고 경제적인 시공을 가능하게 한다(Lee, 2020).

내진보강재에 사용되는 고장력 볼트는 개수가 증가할수록 횡방향 구속 효과가 뛰어나 것이다. 그러나 많은 볼트를 체결하기 위해서는 합금 강판의 너비가 확대되어야 하는데 이로 인해 과보강, 제작 비용 증가, 미관 저해 등의 문제가 발생할 수 있으므로 가장 기본적인 성능을 평가하고자 2개의 볼트만 사용하였다. 체결부에 하중이 가해졌을 때의 뒤틀림을 방지하기 위해 3개의 스티프너를 추가로 설치하고, 볼트 체결을 위한 여유 단면을 확보하여 실험의 편의성을 고려한 내진보강재의 상세 단면은 Fig. 1과 같다.

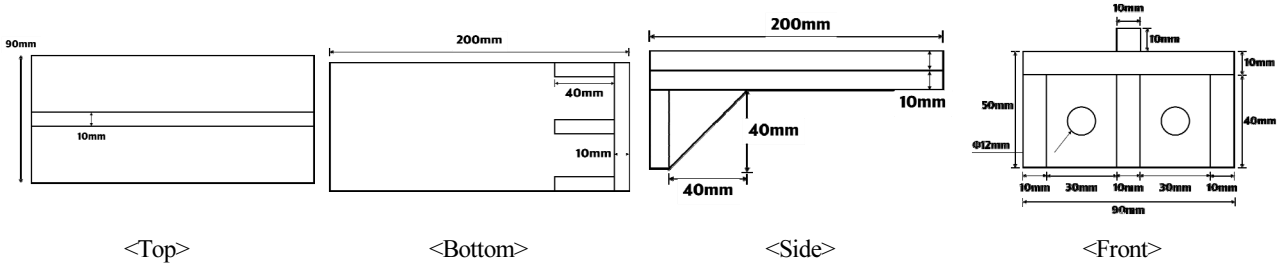


Fig. 1. Seismic retrofit specimen

실험 설계, 수행 그리고 결과

내진보강재 사용 재료

내진보강재의 재료로는 시공성 및 유지관리에 뛰어난 고인장 니켈-크롬 합금재인 SUS304, SUS304 대비 경제성이 좋은 일반 강재 SS275를 사용하여 동일 단면에서 각 재료에 대한 성능을 비교하고자 하였다. 체결에 사용된 볼트는 마찰 접합용 고장력 볼트다. 사용된 재료들의 기계적 성질은 Table 1과 같다. Table 1에서 확인할 수 있듯이, SS275의 연신율이 18%인데 비해 SUS304의 연신율은 40% 이상이며, 최소 인장강도 또한 SS275가 410N/mm²인데 비해 SUS304는 520N/mm²로 상회하는 값을 가지므로 더 높은 인장능력을 가지는 것을 파악할 수 있다.

Table 1. Material properties

Material	Tensile strength(N/mm ²)	Yield strength(N/mm ²)	Elongation(%)
SUS304	≥520	≥205	≥40
SS275	410~550	≥275	≥18
SCM435	≥985	≥835	≥12

내진보강재 실험체 제작

체결식 내진보강재의 상세 단면에 따라 실물 실험체를 Fig. 2와 같이 제작하였다. 강재별로 10mm의 강판을 단면 치수에 맞춰 절삭하고 브레이징 용접(Brazing welding)으로 용접하였다. 브레이징 용접이란 접합하는 모재를 녹이지 않고 높은 온도로 가열한 상태에서 전용 토치와 산소 절단기를 이용하여 용접봉을 녹여서 강재들을 이어 붙이는 작업을 의미하며 강재의 성질을 유지할 수 있어 일반 용접보다 강한 부착력을 가진다. 강판을 모두 용접한 후 보다 강판을 모두 용접한 후 보다 깔끔한

외관을 위해 전체 검은색으로 도색하였고 볼트 사이즈에 맞게 12mm의 구멍을 뚫은 후 좌우 대칭 실험체를 수평을 맞추어 고장력 볼트로 체결하였다.

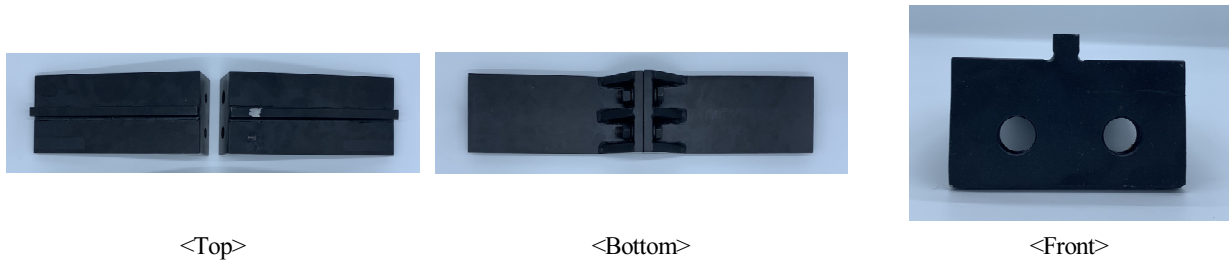
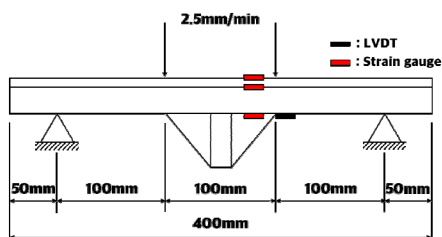


Fig. 2. Seismic retrofit specimen

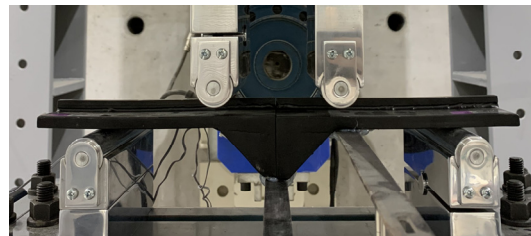
내진보강재 휨 실험 및 결과

하중-변위 관계

체결식 내진보강재가 적용된 철근콘크리트 기둥에 지진으로 인한 횡하중이 가해지면 기둥을 구속하고 있는 볼트와 기둥에 매립된 부분에 하중이 집중될 것으로 예상하였다. Shin(2011)의 연구에 따르면 철근으로부터 콘크리트 피복이 박리되면서 심부 콘크리트가 팽창하며 파괴되는데, 이로 인해 주철근이 좌굴하며 외부에 보강된 내진보강재의 단면 중 가장 가까운 매립부에 먼저 응력이 도달하기 때문이다. 따라서 실제 콘크리트 기둥에 내진보강재를 시공하여 지진하중에 의한 실험을 진행하기 전에 연구 환경의 한계 내에서 내진보강재의 성능을 먼저 파악하고자 하였으며, 지그의 가력을 통해 주철근의 좌굴에 의해 내진보강재에 가해지는 응력을 모사하고자 3등분법 휨 실험을 수행하였다. 휨 실험의 개요도와 실제 실험 전경은 Fig. 3에 나타내었다. 용량 100톤의 가력기에 실험체를 설치하였고 가력면이 실험체와 충분히 접촉할 수 있도록 분당 2.5mm의 속도로 하중을 재하하였다. 처짐을 파악하기 위해 실험체의 최하단에 LVDT를 설치하여 하중-변위 관계를 도출하고자 하였고, 매립부에 변형률 게이지를 부착하여 취득한 결과값과 하중을 통한 최대 휨 모멘트, 실험체의 단면과 도심거리를 바탕으로 휨 응력을 계산하여 응력-변형률 관계를 도출하고자 하였다.



<Schematic of bending test>



<Bending test>

Fig. 3. Bending test for seismic retrofit

실험 결과, 하중을 재하함에 따라 양단 가력 지점에서 휨 변위가 가장 크게 발생했다. Fig. 4의 하중-변위 관계에서 알 수 있듯이 SUS304를 사용한 내진보강재는 48.4mm 지점에서 33.075kN의 최대 하중을 나타냈고, SS275를 사용한 내진보강재는

44.94mm 지점에서 30.929kN의 최대 하중을 나타내 SUS304가 약 7% 더 높은 강도를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 항복 강도 측면에서도 SUS304가 7mm의 변위에서 22kN의 항복강도를 보이는 반면, SS275는 3.5mm에서 18kN의 항복강도를 보여 약 22% 더 높은 항복강도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

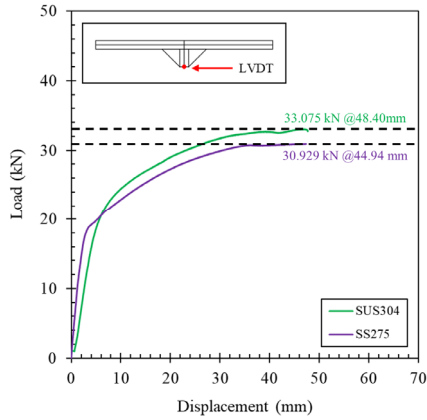


Fig. 4. Load-Displacement curve

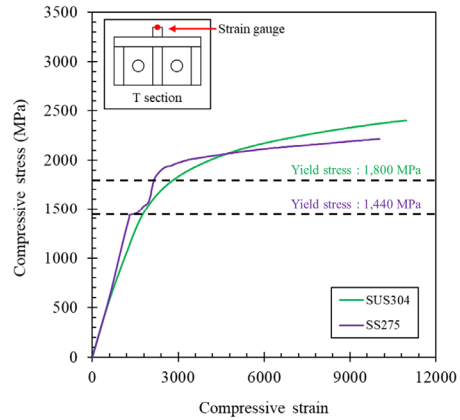


Fig. 5. Stress-Strain curve

응력-변형률 관계

응력-변형률 관계 관찰을 위해 부착한 변형률 게이지는 실험 도중 먼저 파단되었다. SUS304를 사용한 내진보강재의 경우 변위 23.9mm, 하중 29.4kN에서 파단되었고, SS275를 사용한 내진보강재는 변위 23mm, 하중 27.44kN에서 파단되어 파단된 지점에 측정된 변형률은 모두 비슷한 경향을 보였다. Fig. 5의 응력-변형률 관계에서 알 수 있듯이 동일한 단면에 서로 다른 재료를 적용했을 때 SUS304를 사용한 내진보강재가 SS275를 사용한 내진보강재보다 약 360MPa 높은 압축응력을 나타내었다. 특히 SS275를 사용한 내진보강재는 가력 초기 부분에 그래프가 주저앉으며 항복응력이 나타나는 경향을 보였는데, 이를 통해 하중이 가해짐에 따라 변형을 이기지 못해 쉽게 파괴되어 인장에 취약한 것으로 판단되므로 후기 연성능력에 있어서는 SUS304가 더 뛰어날 것으로 예상된다.

중립축 변화 분석

휨 실험을 수행한 후 단면이 변형됨에 따라 중립축의 위치도 변형되었을 것으로 예상하였다. 이에 따라 응력-변형률 관계에서의 변형률 값과 하중-변위 관계에서 항복점에서의 하중값에 따라 6, 12, 18, 24kN에서의 중립축 변화를 파악하였다. Fig. 6과 Fig. 7에서 변형률이 0인 지점의 y값을 구하기 위해 T형 단면의 최하단부터 높이 10mm까지 직선 구간에 대해 하중별 회귀식을 도출하였다. 도출된 식에 0을 대입하면 변형률이 0일 때의 중립축을 확인할 수 있다. 실험을 통해 수집된 중립축과 단순 계산을 통해 도출된 T형 단면의 이론적인 도심간 위치 차이를 아래 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

재료 중립축의 계산값과 실험값을 Fig. 8에 도식화하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 계산값보다 실험값에서 중립축이 더 낮은 경향을 보였다. 또한 가력에 따른 중립축의 변화를 이론값과 실험값간의 차로 비교해보면, 같은 단면에서는 SS275를 사용한 내진보강재가 SUS304를 사용한 내진보강재보다 중립축으로부터 0.28mm 더 멀어지는 경향을 보였다. 중립축이 상승했다는 것은 내진보강재 실험체가 일정 이상의 하중을 받아 인장되었음을 의미하고, 재료별 중립축변화가 미소

할수록 더 큰 하중을 받아야 항복할 수 있음을 의미하므로 SUS304를 사용한 내진보강재가 내력이 더 우수할 것으로 판단되어 보강 성능 또한 상대적으로 우수할 것으로 예상된다.

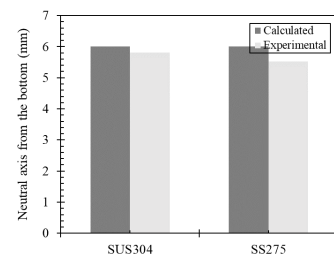
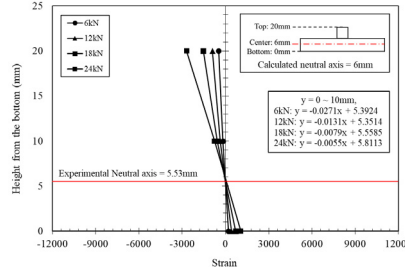
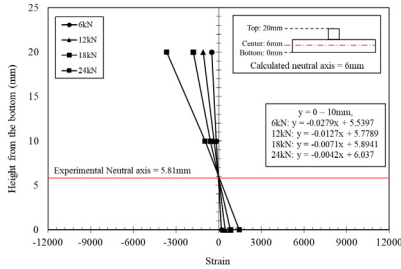


Fig. 6. Change of neutral axis of SUS304 Fig. 7. Change of neutral axis of SS275 Fig. 8. Comparison of neutral axis between Calculated and Experimental values

결론

본 논문에서는 고인장 합금재를 활용한 철근콘크리트 기둥의 내진보강재에 대해 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

힘 실험을 통해 도출된 하중-변위 관계를 확인한 결과 두 종류의 내진보강재 중 SUS304를 사용한 실험체가 더 높은 강도와 탄성 구간에서 기울기가 완만한 경향을 보여 연성 능력이 더 우수함을 파악하였다.

응력-변형률 관계를 통해 SS275를 사용한 실험체가 SUS304를 사용한 실험체보다 초기에 쉽게 파괴되는 경향을 보이므로 SUS304가 후기 연성능력이 더 뛰어날 것으로 판단된다.

동일한 단면에서 중립축의 변화를 비교해보았을 때, SUS304를 사용한 실험체가 SS275를 사용한 실험체보다 중립축의 변화가 적은 경향을 보였다. 중립축의 변화가 작을수록 내력이 강함을 의미하므로 더 큰 하중을 견딜 수 있어 SUS304의 성능이 더 우수함을 알 수 있었다.

본 연구에서 실시한 고인장 합금재 활용 내진 보강재에 대한 성능 평가를 기초로 이를 실제 철근콘크리트 기둥에 적용하여 지진을 모사한 실험을 수행한다면 더욱 정확한 내진 성능을 파악할 수 있을 것이다. 또한 기둥-내진보강재 간의 거동 일체화에 대해 실험적 혹은 해석적으로 확인해야 할 필요성이 나타났으며, SUS304와 SS275에 대한 Small scale 모델 제작으로 각 재료의 장단점을 파악할 수 있는 실험을 수행하여 실용화 가능성과 기존 내진보강 공법 대비 경제성 및 시공성에 대해 파악할 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

Acknowledgement

이 연구는 금오공과대학교 2021년도 대학 연구과제비로 지원되었으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Afifi, M.Z., Mohamed, H.M., Chaallal, O., Benmokrane, B. (2015). "Confinement model for concrete columns internally confined with carbon FRP spirals and hoops." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 9, 04014219.
- [2] Byun, H.S. (2020). Study on Displacement-Ductility and Load Bearing Capacity Enhancement Effect of Square Column with Continuous Transverse Reinforcements. Ph.D. Dissertation, Yonsei University.
- [3] Chae, K.S. (2018). Study on Method of Continuous Transverse Stirrup for ductility of Rectangular Cross-section RC Column. Master Thesis, Yonsei University.
- [4] Kim, J.B. (1999). An Experimental Study on Strengthening Effect of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Steel Plates. Ph.D. Dissertation, Konkuk University.
- [5] Kim, S.K. (2010). Anti-Seismic Reinforcement Performance Evaluation of Circular Pier by Helical Bar. Master Thesis, Kumoh National Institute of Technology.
- [6] Korea Meteorological Administration (2020). 2019 Earthquake Annals.
- [7] Lee, D.M. (2020). Seismic Capacity Analytical Evaluation of RC Columns Strengthened with NBR Method. Master Thesis, Kyungpook National University.
- [8] Mander, J.B., Priestley, M.J., Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- [9] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016). Bridge Construction Specification.
- [10] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016). Highway Bridge Design Standard (Limit State Design).
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020). Enforcement Decree of the Building Act.
- [12] Sheikh, S.A., Yeh, C.C. (1992). "Analytical moment-curvature relations for tied concrete columns." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 2, pp. 529-544.
- [13] Shin, M.J. (2011). A Study on the Seismic Performance of the Strengthened RC Column with Aramid Fiber. Master Thesis, University of Science and Technology.