

와이어로프로 외부 보강된 RC 기둥의 반복거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Repeated Behavior of RC Columns Reinforced with External Wire-Rope

윤 승 조*

Yoon, Sung-Joe

Abstract

In this paper, an experiment was conducted to repeated behavior by introducing an external reinforcement method to the RC column used as a seismic reinforcement method. Therefore, the purpose of this study was to propose a reinforcement detail method, not proposed in the previous study and to evaluate the strength increase of shear reinforcement of RC columns. In the test method, the RC column reinforced with the wire rope and steel plate reinforced with the tension force were compared with the non-reinforced specimen. The experiment was conducted by repeatedly applying the lateral load under the condition of axial force of 2.0 ton. As a result, the ductility of RC columns reinforced with wire and steel plate was improved than non-reinforced specimens or reinforced with wire or steel plate specimens, and the cracks on the concrete surface were suppressed by improving adhesion between concrete and reinforcing specimens, which was effective in improving the strength.

키워드 : 와이어로프, RC 기둥, 반복거동, 외부보강

Keywords : Wire-rope, Reinforced concrete columns, Repeated behavior, Reinforced External

1. 서 론

1.1 연구의 목적

오랫동안 큰 규모의 지진이 없었던 우리나라에 최근 발생한 2017년 경주지진과 2018년 포항지진은 많은 국민에게 큰 충격과 공포로 다가왔다. 포항지진으로 약 754개의 건물에 크고 작은 피해가 발생하였다. 그 중에서 필로티 건축물, 내진설계가 되지 않은 아파트나 학교 건물, 건물 외벽에 설치된 치장 벽돌(비구조재)에 큰 피해가 집중되었다. 필로티 건물들을 조사한 결과, 대부분 건물에서는 이러한 특별지진하중을 적용하지 않았다. 연구결과 해당 건물들에 특별지진하중을 적용했다면, 피해가 대폭 경감되는 것으로 조사되었다. 포항지진 발생 이후, 많은 구조기술자와 인력을 급파하여 현장조사를 통해 건물들의 피해 정도를 조사하고 건물사용 가능 여부에 대한 판정과 긴급 보강안을 제시하였다. 하지만 긴급 보강안에 있어서 현장 상황에 맞는 적절한 보강공법 및 매뉴얼에 관한 기술이 요구되었다.¹⁾

본 연구에서는 철근콘크리트 필로티 기둥에 응급 및 내진 보강공법에 유용한 와이어로프를 이용하여 외부 보강공법을 적용하였다.^{2), 3)} 와이어로프를 이용한 외부 보강공법의 상세 매뉴얼 제안을 위한 기초적 자료 수집을

위하여 외부 보강된 RC 기둥의 횡 하중 거동에 따른 내력성능 평가를 수행하였다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 총 7개의 RC 기둥 실험체를 제작하여, 각 실험체의 동일한 축 하중 시의 횡 하중에 관한 수평전단 내력을 비교 검토하였다. 그리고, 보강 공법 및 손상 상태를 주 변수로 실험을 수행했다. 실험 결과를 바탕으로 내력 평가, 기존 제안 내력식과 비교, 최종파괴 양상, 와이어로프 및 주근의 변형률을 평가하였다.

2. 문헌고찰

2.1 RC 기둥의 전단강도

현재 와이어 및 강판 보강된 기둥의 전단강도 추정식에 관한 연구는 충분히 수행되어 있지 않다. 따라서 RC 기둥의 전단강도 추정식을 통하여 전단강도에 영향을 미치는 요인과 각각의 제안식이 전단강도 저항 요소를 어떻게 구분하고 있는지에 대해 분석하였다. 구조기준 및 이전 연구자들에 의하여 제안된 전단강도 Equation (1)⁴⁾과 (5)⁵⁾에 나타냈다.

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

* 한국교통대학교 건축학부 교수, 공학박사
2020년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

$$V_c = 0.17(1 + \frac{N_u}{14A_g})\sqrt{f_c}b_wd \text{ or } (0.16\sqrt{f_c} + 17\rho_w\frac{V_u d}{M_u})b_wd \quad (2)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s}, M_m = M_u - N_u (\frac{4h-d}{8}) \quad (3)$$

$$M_m = M_u - N_u (\frac{4h-d}{8}) \quad (4)$$

$$V_n = k(V_c + V_s) \quad (5)$$

$$V_c = (\frac{0.5\sqrt{f_c}}{a/d} \sqrt{1 + \frac{N_u}{0.5\sqrt{f_c}A_g}})0.8A_g, V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (6)$$

N_u : 축력, A_g : 단면적, F_c : 콘크리트 압축강도, b_w : 폭, d : 단면의 유효 깊이, $p_w = A_s / b_w d$ p_w : 주근 비, V_u : 전단강도 계수, A_s : 전단보강근의 단면적, h : 높이, A_v : 전단보강근의 단면적, f_{yt} : 스테럽의 항복강도, s : 전단보강근의 간격, k : 연성능력, A_e : 유효 단면적($0.8A_g$), D' : 전단보강근 외측에서 외측까지의 거리, c : 종립 축 깊이, a : 전단 스패

Equation (1) ACI 318-14(2014)에서는 기둥의 전단강도(V_n)를 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)와 횡보강근에 의한 전단강도(V_s)의 합으로 나타내고 있다. 여기서 콘크리트에 의한 전단 강도는 간략식과 정밀식으로 나누어 제시되고 있으며, 간략식의 경우 보의 전단강도 식에 축력에 따른 전단강도 증진효과를 반영하고 있다. 전단 보강근에 의한 전단강도 산정시 균열각을 45도로 가정하며, 전단 보강철근이 최대강도 도달 시 항복을 경험한다고 보고 있다.

Equation (5) ASCE 41-13(2014)에서는 Sezan(202, 204)의 연구결과를 반영하여 전단강도 식을 제시하였다. 이 식은 기둥의 전단강도(V_n)를 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)와 횡보강근에 의한 전단강도(V_s)의 합과 변위 연성비에 따른 계수(k)의 곱으로 보고 있다. 콘크리트가 저항하는 전단강도는 기둥에 작용하는 주응력이 콘크리트의 쪼갬 인장강도 도달 시 전단에 의한 파괴가 시작된다는 가정을 통하여 유도되었으며, 추가적으로 전단경간 비에 의한 영향을 반영하고 있다.

2.2 보강방법

Figure 1 (a)는 와이어로프를 이용하여 RC 기둥의 네 모서리에 긴장력을 도입한 기둥 단면의 응력분포를 예측하여 나타냈고, Figure 1 (b)는 와이어로프 보강 후, 강판으로 보강된 기둥 단면을 나타냈다. 와이어로프로 보강된 기둥의 단면은 외부응력으로 인하여 바깥쪽 주근에 응력이 집중되는 양상을 보이며, 와이어로프와 강판으로 보강된 경우는 주근의 위치에 따른 응력변화는 다소 크지 않을 것으로 예측 할 수 있다. 그리고, 와이어로프와 강판으로 보강된 부재의 경우 다소 높은 내력 향상을 기대 할 수 있다.

Figure 2는 보강된 RC 기둥의 외부형상을 나타냈다.

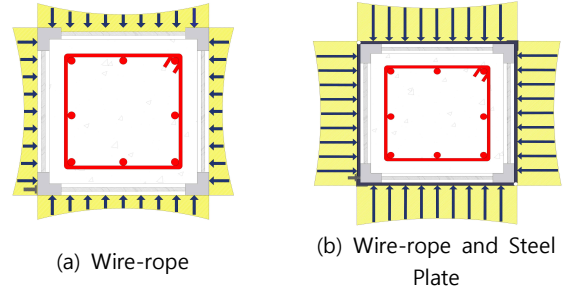


Figure 1. Shape of Section

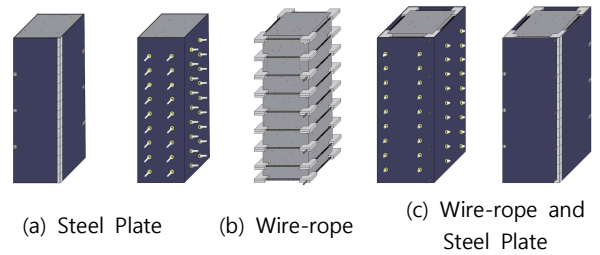


Figure 2. Shape of Reinforced External

3. 실험

3.1 보강재 재료실험

본 연구에서는 강판 보강공법은 기존의 고정형 강판보강공법과 응급보강에 유용한 클립형 강판보강공법으로 보강하였다. 고정형 강판보강공법은 강판 고정을 위하여 연단거리 150mm 이하로 볼트 접합 설계(강구조설계 2014 기준)하여 전산볼트로 고정하였다. 그리고, 클립형 보강공법은 양 모서리에 ㄱ자 강판에 힌지를 적용하여 2개의 ㄱ자 강판을 클립으로 고정하는 방식을 도입하였다.

강판 고정형 전산볼트와 콘크리트간의 부착강도 실험 결과를 Table 1에 나타냈다. 부착실험체 형상의 단면은 250mm × 250mm($b \times D$), 전체 높이 500mm으로 제작하였다. 부착구간을 주 변수($5d_b$, $10d_b$, $15d_b$, $20d_b$, $25d_b$)로 단순 인발 실험을 수행했다. 실험결과 전산볼트의 콘크리트의 부착 길이가 124.5mm(실험체 No. 3, $15d_b$)까지는 부착파괴가 발생하였고, 166mm(실험체 No. 4, $20d_b$)부터는 전산볼트의 파단이 일어났다.

Table 1. List of Test

No	F (MPa)	d_b (mm)	$b \times D$ (mm)	L (mm)	τ_{bu} (MPa)	Crack Pattern
1	24	8.3	250× 250	$5d_b$	6.4	Bond Failure
2				$10d_b$	6.7	Bond Failure
3				$15d_b$	7.4	Bond Failure
4				$20d_b$	-	-
5				$25d_b$	-	-

* F : Strength of Concrete, d_b : Bolt of Diameter, L : Bond Length,
 $\tau_{bu} = P_{max} / \phi \cdot L$, P_{max} : Maxium of Load, ϕ : re-bar of Diameter

3.2 실험체 계획 및 제작

Table 2는 실험체 일람표를 나타냈고, Figure 3은 실험체의 형상·치수 및 배근 상황을 나타냈다.

모든 실험체 형상의 단면은 $250\text{mm} \times 250\text{mm}(b \times D)$, 실험구간은 $800\text{mm}(H)$ 로 제작하였다. 실험체의 주철근은 D13으로 8개를 설계(주철근 비 0.017%) 하였다. 실험구간에서 전단 보강근의 배근 간격은 ACI 318-05의 요구 기준($H/4$ 이하)을 만족하도록 D6 100mm 간격으로 조밀하게 배근하였다.

상부 스티브 부분은 축하중 가력시 편심의 영향을 최소화하고, 축력과 횡력의 외력이 실험체에 원활히 전달하기 위하여 350mm 구간을 $800\text{mm} \times 415\text{mm}$ 단면으로 확대 계획하였다. 하부 스티브는 515mm 구간에서 불필요한 파괴 및 슬립 방지를 위하여 $1300\text{mm} \times 880\text{mm}$ 로 다소 크게 제작하였다.

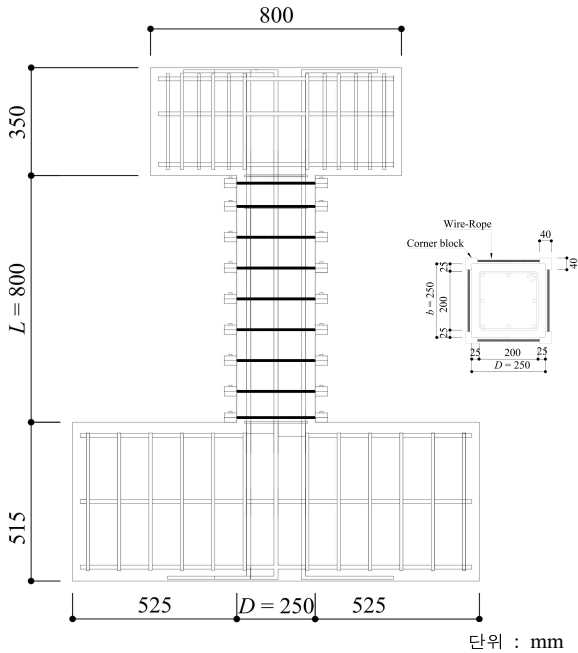


Figure 3. Details of test specimens

3.3 실험방법

Figure 4는 실험체 설치 상황을 나타냈다. 모든 실험체에 가하는 하중 적용방식은 동일하며 수직 방향 축하중의 경우 100kN 용량의 유압식 액추에이터를 사용하여 일정하게 23ton으로 고정하중을 가하고, 수평 방향의 수평하중은 Figure 5와 같은 방법으로 10초당 1mm 변위의 속도로 실험을 진행하였다.

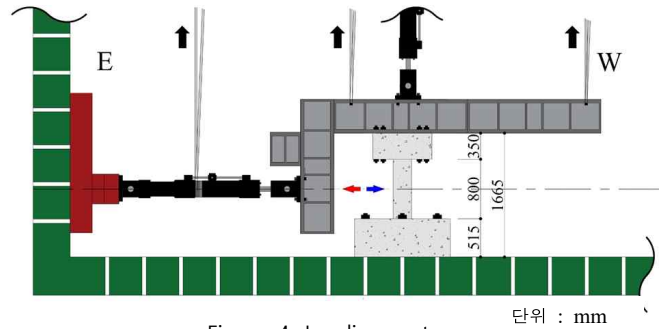


Figure 4. Loading system

본 실험에 적용한 부재의 변형 각 R 은 0.5 %에서 시작하여 최대 7.0 %까지 총 8단계로 계획하여 실험을 진행하였다. 각 Cycle 별 동일 변위로 2회씩 반복가력 하였으며, 최대 하중 이후의 Cycle에서 최대 하중보다 40% 이하로 하중이 감소하면 실험을 중단하였다. Figure 5는 횡력에 사용된 변위제어 프로그램을 나타냈다.

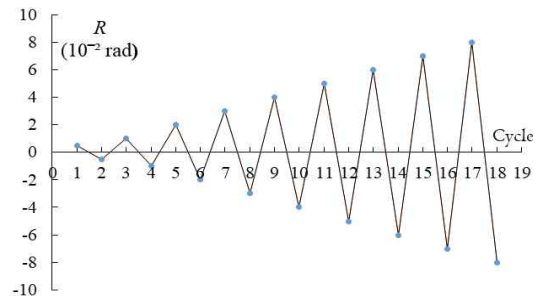


Figure 5. Loading Program

Table 2. List of Specimens

Specimens	F (MPa)	$b \times D$ (mm)	Main Bar	Stripe	Wire-rope (n_w)	Steel Plate Thickness (mm)	ε_{w0} (μ)	σ_r (MPa)	reinforce- ment ratio (%)	Axial stress is column
None	24	250×250	8-D13	9-D6	-	-	-	-	-	0.15
D2-W2					9	-	2,000	2	0.23	
W2					9	-	2,000	2	0.23	
FS3					-	3	-	-	2.40	
CS3					-	3	-	-	2.40	
FS3-W2					9	3	2,000	2	2.63	
CS3-W2					9	3	2,000	2	2.63	

* D2 : Damage Level, W2 : Wire-rope, FS3 : Fixed Steel Plate, CS3 : Clipse Steel Plate, F : Strength of concrete, ε_{w0} : Strain of Wire-rope, σ_r : Wire-rope of stress($=E_w \cdot \varepsilon_{w0} \cdot 2a_w \cdot n_w / b \cdot L$), E_w : Modulus of elasticity, $E_{w0} \cdot 2a_w$: Cross section, n_w : Number of Wire-rope, L : Reinforcement of Length, $P/F \cdot A_g$, P : Axial stress is column(N), A_g : Cross section of column(mm^2)

D2-W2 손상도 실험체의 경우 6 Cycle(무보강 실험체의 항복지점 기준) 가력 이후에 와이어로프로 보강하여 실험을 수행했다. 실험체의 횡 변위를 측정하기 위하여 실험구간의 3등분지점에 각각 200mm L.V.D.T 3개를 설치하였고, 원활한 실험을 위하여 상하부 스테브 부분에 각각 100mm L.V.D.T 2개를 설치하였다. 그리고, 와이어로프, 주근 및 전단보강근의 변형을 측정하기 위하여 와이어로프로 보강 ($\pm 10\%$ 오차 이내) 후 각 철근의 변형을 데이터로그에 저장 후, 실험을 진행하였다.

4. 실험 결과

4.1 균열 및 파괴모드

Figure 6은 대표적인 실험체의 최종파괴양상을 나타냈다. 무보강 None 실험체는 최대 하중 이후 급격한 하중저하를 보이면서 전형적인 전단균열이 커지는 양상으로 최종파괴되었다. W2 실험체는 정가력 11 cycle에서 급격한 균열을 보이는 양상을 보였지만, 전단 파괴와는 다른 양상을 보였다. FS3 실험체는 정가력 7 cycle에서 첫 균열이 발생과 동시에 하부 스테브 부분에서 발생된 전단 균열 양상을 보이면서 최종 파괴되었다. FS3-W3 실험체는 부가력 7 cycle 에서 상하부에서 발생된 큰 균열 양상을 보이면서 최종 파괴되었다. 와이어로프로 보강된 실험체의 경우, 무보강 및 강판으로 보강된 실험체보다 상대적으로 균열의 폭 및 급격한 파괴양상이 줄어들었다. 그리고 클립형 및 고정형 강판보강된 실험체의 경우 최종파괴 양상은 큰 차이를 보이지 않았다.

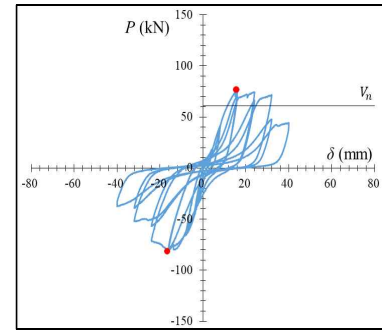


(a) None (b) W2 (c) FS3 (d) FS3-W3

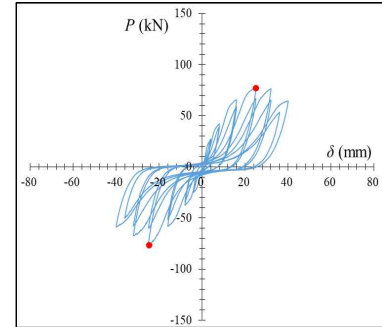
Figure 6. Final crack patterns

4.2 하중-변위 곡선

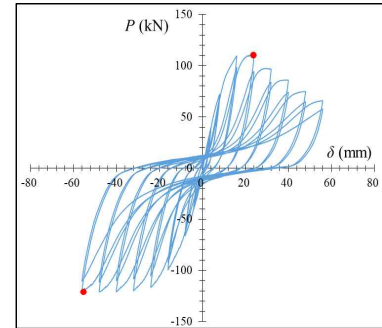
Figure 7은 각 실험체의 하중-변위 곡선을 나타냈다. 그림 8의 ●은 최대강도를 나타내고, 수평 직선은 Equation (1)에 의한 계산 값을 나타내고 있다. 무보강 None 실험체를 기준으로 정 가력 시의 내력 비는 D2-W2 실험체는 1.13배, W2 실험체는 1.46, FS3와 CS3 실험체는 1.42배, FS3-W2와 CS3-W2 실험체는 각각 1.60과 1.62배 증가하는 양상을 나타냈다. 고정형과 클립형의 강판보강 공법의 내력은 거의 동일한 내력을 나타냈고, 와이어로프와 강판으로 보강된 FS3-W2와 CS3-W2 실험체가 가장 높은 내력 값을 나타냈다.



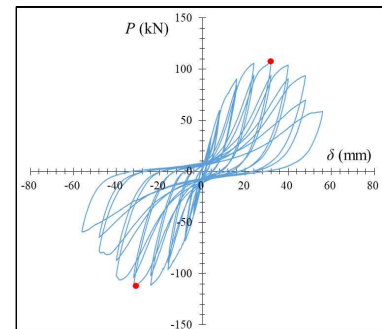
(a) None



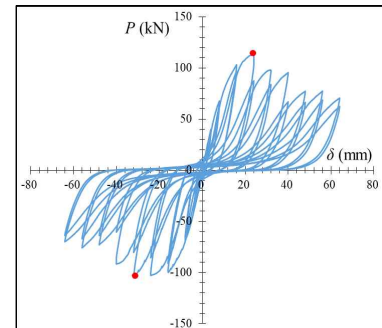
(b) D2-W2



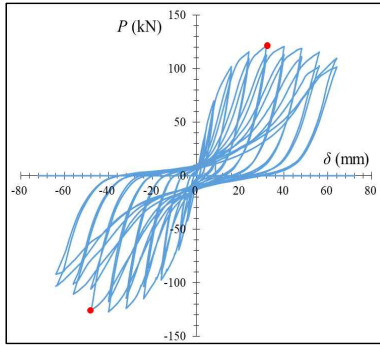
(c) W2



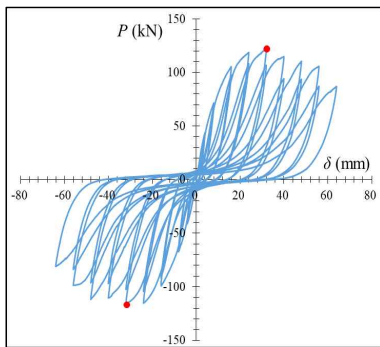
(d) FS3



(e) CS3



(f) FS3-W2



(g) CS3-W2

Figure 7. Load versus Displacement relations

4.3 주근의 위치에 따른 각 주근의 변형률 관계

실험체 단면에서 모서리와 중심에 위치한 주근의 변형률 관계를 Figure 8에 나타냈다. 코너 부분에 있는 주근의 변형률이 작은 값을 나타냈고, 무보강 및 강판으로 보강된 실험체의 경우 큰 차이를 보이지 않지만, 와이어로 보강된 실험체의 경우 다소 큰 차이를 보이고 있다.

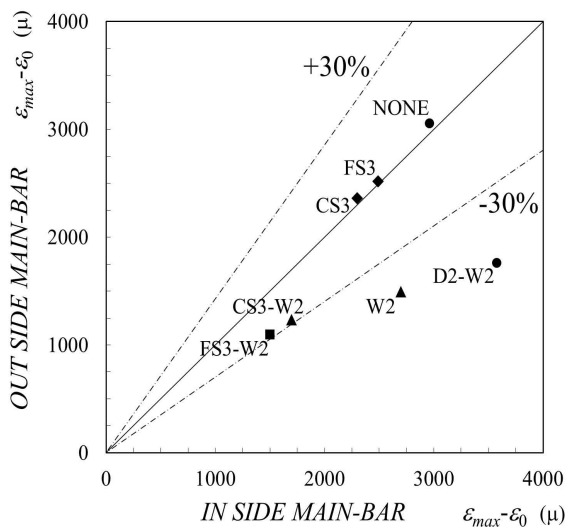


Figure 8. Main bar of Strain

4.4 와이어로프의 위치와 와이어로프의 변형률 관계

Figure 9은 와이어로프로 보강된 실험체의 와이어로프의 위치와 와이어로프의 변형률 관계를 나타냈다. 변형률은 최대하중 시의 변형률과 초기 와이어로프의 변형률 차로 나타냈다. 손상된 D2-W2 실험체의 변화가 가장 크게 나타났고, 와이어로프로 보강된 W2 실험체의 경우 강판이 추가 보강된 FS3-W2와 CS3-W2 실험체보다 다소 높은 변형을 나타냈다.

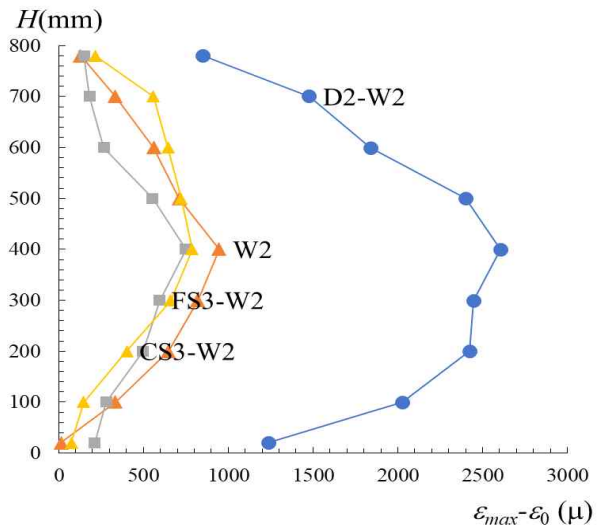


Figure 9. Wire-rope of Strain

Table 4. Test Results

Specimen s	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	ΔP_{max}	ΔD	ΔR	$P_{max}/(1)$
None	75.5	16.05	-	1.26	-	3.54
	-77.7	-16.04	-			
D2-W2	85.1	25.00	1.13	1.55	1.23	3.96
	-83.9	-24.02	1.08			
W2	110.4	24.06	1.46	1.69	1.34	4.53
	-120.8	-40.01	1.55			
FS3	106.9	32.00	1.42	1.60	1.27	4.04
	-113.1	-32.03	1.46			
CS3	107	19.44	1.42	1.55	1.23	4.51
	-105.1	-31.99	1.35			
FS3-W2	120.8	23.98	1.60	1.75	1.39	4.78
	-123.9	-31.85	1.59			
CS3-W2	122.2	31.98	1.62	1.74	1.38	4.89
	-115.9	-32.04	1.49			

* P_{max} : Maximum strength, δ_{max} : Displacement for Maximum strength, P_y : Yield strength, δ_y : Displacement for Yield strength, ΔP_{max} : Ratio of Maximum strength, ΔD : ratio of Ductility, ΔR : ratio of stiffness

5. 결론

본 실험에서 강판, 와이어로프 및 와이어로프와 강판으로 보강된 7개의 RC 기둥 실험체의 반복 횡가력에 따른 전단 내력 성능 실험을 수행하였다. 실험결과 및 분석한 내용은 다음과 같다.

1) 무 보강 실험체는 최종파괴에서 전형적인 전단 파괴 양상을 나타냈다. 하지만, 와이어로프로 보강된 W2 실험체의 경우는 전단 균열이 대폭 감소하는 양상이 나타났다. 이것으로부터 외부 응력도입에 의해 전단 파괴의 균열이 억제되면서 콘크리트와 철근과의 부착력 향상으로 취성적 파괴양상이 억제된다고 추측할 수 있다. 하지만, 강판 보강된 실험체의 경우 무보강 실험체보단 다소 적은 균열양상을 나타냈지만, 최대하중 이후 무보강 실험체와 유사한 파괴양상을 나타냈다.

2) 무 보강 실험체를 기준으로 정 가력 시의 내력 비는 손상 와이어 보강 실험체는 1.13배, 와이어 보강 실험체는 1.46, 고정형 강판 보강과 클립형 강판 보강 실험체는 1.42배, FS3-W2와 CS3-W2 실험체는 각각 1.60과 1.62배 증가하는 양상을 나타냈다. 고정형과 클립형의 강판보강 공법의 내력은 거의 동일한 내력을 나타냈고, 와이어로프와 강판으로 보강된 FS3-W2와 CS3-W2 실험체는 각각 120.8 kN과 122.2 kN으로 가장 높은 내력 값을 나타냈다.

3) 주근의 위치에 따른 주근의 변형률 검토에서 무보강 및 강판 보강된 실험체의 경우 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만, 와이어로프로 보강된 D2-W2와 W2 실험체의 경우 모서리에 위치한 주근이 내부에 위치한 주근의 변형률이 최대 35% 높게 나타났다. 이것은 와이어로프에 의한 구속효과가 모서리 부분에 응력이 집중되며 모서리에 위치한 주근에서 더 많은 보강효과가 있다고 판단된다.

4) 와이어로프로 보강된 D2-W2, W2, FS3-W2와 CS3-W2 실험체의 와이어로프의 위치에 따른 변형률 검토에서 손상된 D2-W2 실험체의 변화가 가장 크게 나타났고, 와이어로프로 보강된 W2 실험체의 경우 강판이 추가 보강된 FS3-W2와 CS3-W2 실험체보다 다소 높은 변형을 나타냈다.

5) 강판으로 보강하는 고정형과 클립형 FS3과 CS3 실험체와 FS3-W2와 CS3-W2 실험체는 횡력에 의한 전단거동에 있어서 큰 차이점이 나타나지 않았다. 이것으로부터 시공성이 우수한 클립형 보강공법이 응급 및 내진 공법 적용에 유용할 것으로 판단된다.

추후, 1차 실험 데이터 분석을 추가적으로 수행하고, 주근 및 전단 보강근의 항복점 고찰을 통하여 식 (1) ACI 318-14(2014)의 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)와 횡보강근에 의한 전단강도(V_s)의 관계를 세밀한 분석을 수행 할 예정이다.

REFERENCES

1. Kim, J. C. & Shin S. H. (2019). Damage Investigation of Pilotis Structures and Analysis of Damage Causes by Pohang Earthquake, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 35(2), 3-10
2. Ho, S. W., Kuroki, M. & Kikuchi, K. (2016). Splitting Bond Strength of Deformed Longitudinal Reinforcing Bars in R/C Columns Strengthened Laterally with External PC Rods, *Journal of Structural Construction Engineering of Japan*. 81(603), 131-138
3. Sim, J, Yang, G, & Byun, H. (2009). Flexural Capacity and Ductility of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Unbonded Wire Rope Units, *Concrete Institute of Korea*, 30(4), 493-494
4. ACI 318-14. (2014). *Building code requirement for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute. 74.
5. ACI 374-2R-13. (2013). Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic load, *American Concrete Institute*, 18.
6. ASCE/SEI 41-13. (2014). Seismic evaluation and retrofit of existing building, *American Society of Civil Engineering*, 41.
7. Korean Industrial Standards., (2007). KS B 0801.
8. Korean Industrial Standards., (2018). KS B 0802.
9. Hussain, M. A., & Driver, R. G. (2005), Experimental Investigation of External Confinement of Reinforced Concrete Columns by Hollow Structural Section Collars, *ACI Structural Journal*, 102(2), 242-251.