

외측 횡 구속된 콘크리트 공시체의 내진 거동

Seismic Behavior of Concrete Cylinders Reinforced by Outside Lateral Hoops

최은수¹⁾ · 김병화²⁾ · 신재관³⁾ · 이도형^{4)*}

Choi, Eunsoo¹⁾ · Kim, Byeong Hwa²⁾ · Shin, Jae Kwan³⁾ · Lee, Do Hyung^{4)*}

¹⁾홍익대학교 토목공학과, ²⁾경남대학교 토목공학과, ³⁾배재대학교 토목환경공학과, ⁴⁾배재대학교 건설환경철도공학과

¹⁾Hongik University, Dept. of Civil Eng., ²⁾Kyungnam University, Dept. of Civil Eng., ³⁾Paichai University, Dept. of Civil and Environmental Eng.,

⁴⁾Paichai University, Dept. of Civil, Environmental and Railroad Eng.

/ A B S T R A C T /

This paper investigates experimentally the confinement effect on concrete. For this purpose, outside lateral reinforcement members made of stainless steel and GFRP were employed. Then, uniaxial compressive tests on concrete cylinders incorporating the members were conducted. A total of 30 cylinder specimens, specifically, 6 unconfined specimens, 12 specimens confined by stainless steel and 12 specimens confined by GFRP, were fabricated. The failure patterns of both unconfined and confined specimens were assessed and discussed based on experimental results. The results proved that the maximum stress and corresponding strains of the cylinders confined using the proposed hoops are increased in comparison with those of the unconfined. This supports that the current work can be used for retrofitting concrete members and structures and thus may lead to increased stability of such structures.

Key words: Lateral confinement, Stainless steel, GFRP, Uniaxial compressive test

1. 서론

횡 구속된 콘크리트가 일축압축응력을 받으면, 낮은 응력상태에서는 구속력이 발휘되지 않으나 압축강도에 도달하면서 횡 방향으로 팽창하게 되고, 구속재료에 의해 콘크리트에 구속력이 작용하게 된다. 이 경우 콘크리트가 삼축압축응력을 받고 있는 상태로 가정할 수 있다. 콘크리트의 횡 구속으로 인해, 삼축압축응력을 받고 있는 콘크리트의 경우에 압축강도와 극한 변형률이 크게 증가하는 것은 이미 널리 알려진 사실이다. 대부분의 철근콘크리트 기둥의 경우, 심부콘크리트의 횡 구속을 위하여 띠철근과 나선철근 등의 심부구속 철근을 사용하여 축방향 철근의 주위를 감싸 횡 구속하여 왔다. 하지만 소성힌지부의 연성도 확보를 위한 지나친 심부구속 철근의 사용은 복잡한 철근상세를 유발하여 시공성과 콘크리트의 강도발현에 방해요인이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 많은 연구자들이 새로운 재료와 공법으로 콘크리트를 효과적으로 횡 구속하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 특히 FRP(Fiber Reinforced Polymer)는 부식에 강하고 가벼운 중량을 가지면서 높은 강도와 강성으로 토목 분야에서 크게 주목받는 재

료로서, 국내외적으로 FRP를 토목 구조물에 적용시키기 위한 많은 연구가 수행되었다.

Mirmiran and Shahawy[6]는 FRP 튜브로 횡 구속된 콘크리트 공시체의 일축압축실험을 통하여 압축강도와 연성이 크게 증가함을 입증하였으며, Toutanji[9]는 탄소섬유시트와 유리섬유시트를 이용하여 콘크리트 공시체를 구속하여 일축압축실험을 통하여 구속효과를 입증하였고, 응력-변형률 모델을 제시하였다. 그리고 Lam et al.[5]은 탄소섬유 자켓으로 횡 구속된 콘크리트 공시체를 단조가력방법과 반복주기가력방법으로 일축압축 실험을 실시하여 구속효과의 입증과 함께 가력방법에 따른 응력-변형률의 차이를 규명하였다.

한편 국내의 연구자로 황진석[4]은 탄소섬유시트를 이용하여 콘크리트 공시체를 횡 구속하여 일축압축실험을 통해 단면의 형상과 보강매수에 따른 구속효과에 대한 연구를 수행하였고, 홍원기등[3]은 탄소섬유 튜브를 이용하여 섬유 방향 및 튜브의 두께에 따른 횡 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하였다. 또한 엄광수등[1]은 탄소섬유시트를 이용하여 콘크리트 공시체를 제작 한 후, 일축압축실험을 실시하여 구속효과의 입증과 함께 탄소섬유시트로 횡 구속된 콘크리트의 압축강도 추정식을 제안하였으며, 최은수와 안동준[2]은 강판과 유리섬유 튜브로 횡 구속된 콘크리트의 연성거동 능력을 평가하여 유리섬유 튜브로 횡 구속된 콘크리트 구속효과

*Corresponding author: Lee, Do Hyung

E-mail: dohlee@pcu.ac.kr

(Received 20 August 2013; Accepted 28 November 2013)

를 추정하는 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 철근콘크리트 기둥 단면의 최 외측에 보강재료를 배치하여 콘크리트를 횡 구속하는 시뮬레이션을 수행하기 위하여 콘크리트 공시체에 외측 횡 보강재료를 배치하여 일축압축실험을 통해 구속효과를 분석하였다. 외측 횡보강재의 경우 콘크리트 피복에 의해 보호 받을 수 없기 때문에 부식이 일어나지 않는 스테인레스강과 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer) 재료를 선택하였고, 이를 이용하여 무보강 콘크리트 공시체 6본과 스테인레스강 및 GFRP 폐합 원형띠 보강 공시체 12본씩을 각각 제작하여 일축압축실험을 실시하였다.

2. 실험계획 및 방법

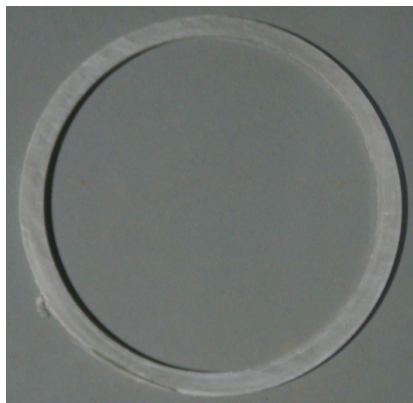
2.1 외측 횡보강재 제작

콘크리트 공시체의 외측 횡 구속을 위해, 스테인레스강과 GFRP를 이용하여 외측 횡보강재를 제작하였다. 지름이 3mm인 스테인레스강을 이용하여 외경이 150mm인 속이 빈 폐합 원형 강선을 용접으로 제작하였고, GFRP의 경우 내경과 외경이 각각 125mm와 140mm인 파이프형 GFRP를 공장에서 제작 후, 5mm 간격으로 절단하여 외측 횡보강재를 제작하였으며 Fig. 1에 나타내었다.

제작된 외측 횡보강재가 콘크리트 타설시에도 정확한 위치에 배치하기 위하여 시편당 3개씩의 목재 지지대를 120° 간격으로 설치하여 외측 횡보



(a) Stainless steel circular hoop



(b) GFRP circular hoop

Fig. 1. Outside lateral reinforcement members

강재를 지지하였고 완성된 외측 횡보강재의 공시체 몰드 내 배치도를 Fig. 2에 나타내었다.

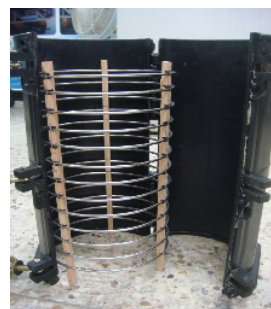
2.2 실험체 제작 및 실험 변수

본 연구에서는 스테인레스강 및 GFRP 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 콘크리트 공시체의 일축압축실험을 수행하기 위해 지름 150mm, 높이 300mm인 표준형 콘크리트 공시체를 한국산업규격 KS F 2403에 따라 제작하였다. 외측 횡보강재의 종류와 배치된 수직간격을 주요 변수로 하여 제작된 실험체는 총 30본으로 무보강 콘크리트 실험체 6본, 스테인레스강 폐합 원형띠 보강 실험체 12본, 그리고 GFRP 폐합 원형띠 보강 실험체는 12본을 제작하였고, 본 연구에서 제작된 실험체의 자세한 사항들은 Table 1에 나타내었다.

Table 1의 실험체명에서 Unconf는 무보강을, SSteel과 GFRP는 각각 스테인레스강과 GFRP 재료로 보강된 시편을 나타내고, 외측 횡보강된 실험체명의 숫자는 외측 횡보강재의 수직간격을 나타내며, 마지막 영문표기 m과 c는 각각 단조가력 및 반복주기가력의 가력방법을 나타낸다. 또한 반복주기 가력한 공시체중 3본 실험체는 각 변위가력 단계별 세 번의 반복주기이력을 가해 실험을 수행하였고, 나머지 실험체는 한 번의 반복주기이력을 가해 실험을 실시하였다. Fig. 3은 실험에 수행된 하중주기이력을 나타낸다.

2.3 실험 방법

본 실험을 위해 제작된 외측 횡보강된 콘크리트 공시체의 압축실험은 한국산업규격 KS F 2405에 따라 수행하였으며, 최대용량이 2000kN인 만능시험기(UTM)를 사용하였다. 가력은 변위제어 방식으로 무보강 실험체에 대해서는 무보강 실험체의 특성상 다소 느린 0.5mm/min의 가력속도로 재하하였고, 외측 횡보강된 실험체의 경우, 단조가력 압축실험은 1mm/min,



(a) Stainless steel

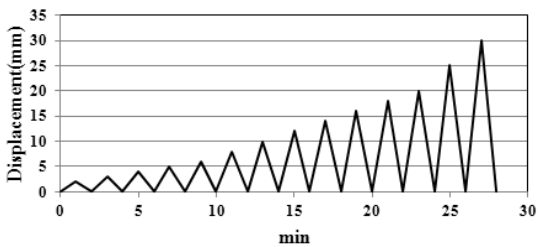


(b) GFRP

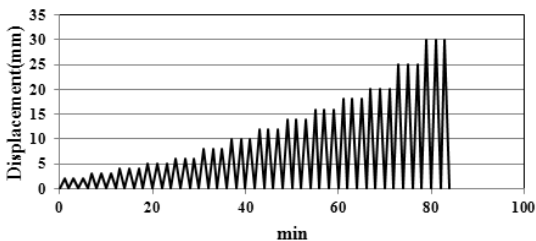
Fig. 2. Arrangement of outside lateral reinforcement members

Table 1. Details of Test specimens and loadings

Test specimen	lateral reinforcement	spacing(mm)	volumetric ratio	loading	loading speed	loading cycles
Unconf-m1				monotonic	0.5mm/min	-
Unconf-m2						
Unconf-m3						
Unconf-c1				cyclic		1 cycle
Unconf-c2						
Unconf-c3						
SSteel-10-m1	Stainless steel circular hoop	10	0.0154	monotonic	1mm/min	-
SSteel-10-m2						
SSteel-10-m3						
SSteel-10-c1				cyclic		1 cycle
SSteel-10-c2						
SSteel-10-c3						
SSteel-20-m1		20	0.0080	monotonic	1mm/min	-
SSteel-20-m2						
SSteel-20-m3						
SSteel-20-c1				cyclic		1 cycle
SSteel-20-c2						
SSteel-20-c3						
GFRP-20-m1	GFRP circular hoop	20	0.0383	monotonic	1mm/min	-
GFRP-20-m2						
GFRP-20-m3						
GFRP-20-c1				cyclic		1 cycle
GFRP-20-c2						
GFRP-20-c3						
GFRP-30-m1		30	0.0265	monotonic	1mm/min	-
GFRP-30-m2						
GFRP-30-m3						
GFRP-30-c1				cyclic		1 cycle
GFRP-30-c2						
GFRP-30-c3						



(a) For 1- and 2-numbered specimen



(b) For 3-numbered specimen

Fig. 3. Loading history

그리고 반복주기 가력 압축실험은 2mm/min의 가력속도로 무보강 실험체에 비해 다소 빠른 가력속도로 실험을 수행하였다. 하중은 만능시험기로부터 받아들이며, 축방향 변위는 20mm의 변위용량을 갖는 3개의 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)를 120° 간격으로 설치하여 측정하였고, 종방향 변형률을 측정하기 위해 Extensometer를 중앙부에 설치하였으며 원주방향 변위를 측정하기 위해 중앙부에 원주방향으로 Extensometer를 설치하였다. 본 실험에 사용된 실험장비, 변위 및 변형률 측정 장비 및 배치를 Fig. 4에 나타내었다.

3. 실험 결과 분석

3.1 실험체의 파괴거동

무보강 실험체의 경우, 초기 변위 단계에서 재하판 부근에 발생한 미세 균열이 변위가 증가함에 따라 공시체 전면에 걸쳐 균열의 폭이 확장되면서

큰 수직균열이 발생하는 전형적인 압축파괴가 발생하였다.

스테인레스강 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 실험체의 경우, 스테인레스강 폐합 원형띠가 위치한 곳에서 수평방향의 균열이 발생하기 시작하였고, 수평균열 사이로 수직균열이 발생하면서 피복탈락 현상이 발생하였다. 변위가 증가함에 따라 폐합 원형띠의 용접부위에서 파단이 발생하면서 급격한 하중저하를 나타내었으며 콘크리트 분쇄현상이 발생하였다. 이 현상은 외측 횡보강재의 간격이 클수록 심화되는 것을 알 수 있었다. GFRP 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 실험체의 경우, 균열의 진전은 스테인레스강 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 실험체와 유사하였지만, 비교적 넓은 영역의 콘크리트 피복탈락 현상이 발생하였고, GFRP 폐합 원형띠의 파단이 큰 파괴음의 발생과 함께 급격한 하중저하를 나타내면서 파괴가 발생하였다. 각 실험체별 대표적인 파괴형태를 Fig. 5에 나타내었다.

3.2 콘크리트 공시체의 응력-변형률

외측 횡보강된 콘크리트 공시체의 응력-변형률 검토에 앞서, 무보강 실험체의 최대압축강도 및 최대압축강도에 대응하는 변형률을 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 알 수 있는 바와 같이, 무보강 실험체의 최대압축강도 평균값은 목표 압축강도인 24MPa 보다 약간 낮게 측정되었지만 가력방법에 따라 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 하지만 최대압축강도에 대응하는 변형률은 반복주기가력방법에서의 변형률이 단조가력방법에서의 변형률보다 약 2배정도 크게 나타났다. 이는 가력방법에 따른 차이로 하중의 재하 및 제하를 반복하는 반복주기가력방법과 달리 단조가력방법에서는 하중이 지속적으로 재하되는 영향 때문인 것으로 판단된다.

외측 횡보강된 콘크리트 공시체에 대한 압축실험결과를 무보강 실험체

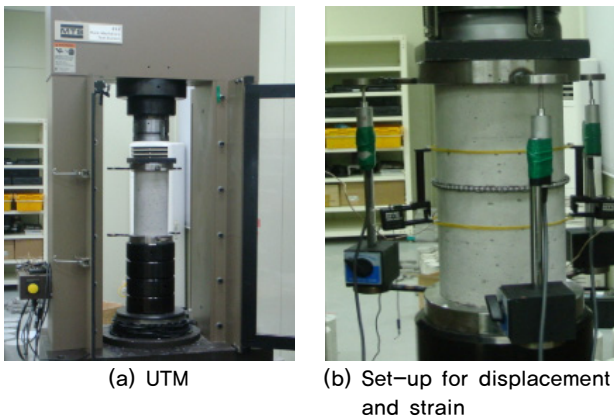


Fig. 4. Test machine and measurement set-up

의 값과 비교하여 Table 3에 나타내었으며, 압축실험으로 얻어진 응력-변형률 곡선은 무보강 콘크리트의 거동을 비교적 잘 나타낸 Unconf-3 실험체와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

Table 3과 Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이, 외측 횡보강된 실험체의 최대강도와 최대강도에 대응되는 변형률 모두 외측 횡보강재료의 우수한 구속력으로 인해 무보강 실험체에 비해 상당히 증가하는 것으로 나타났다.

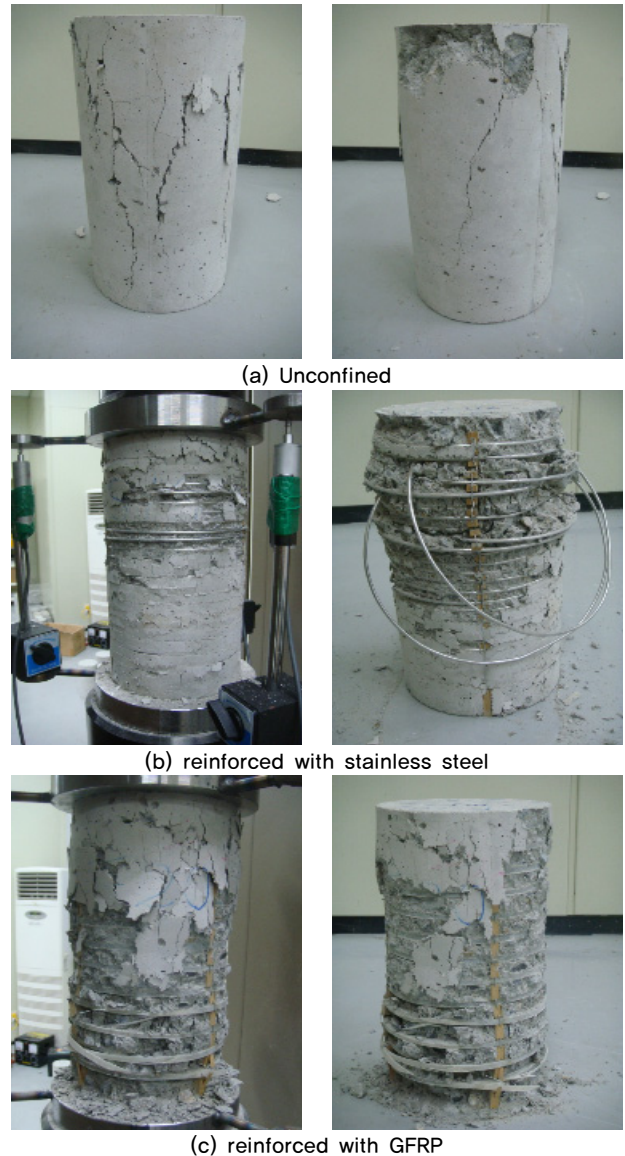


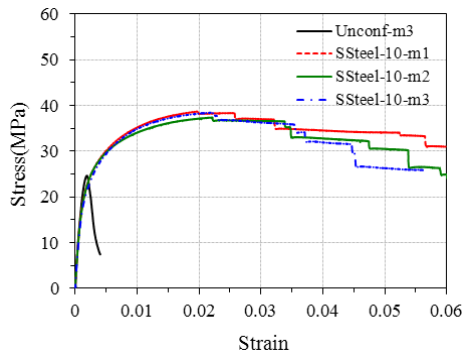
Fig. 5. Representative failure pattern of specimen

Table 2. Test results of unconfined concrete specimen

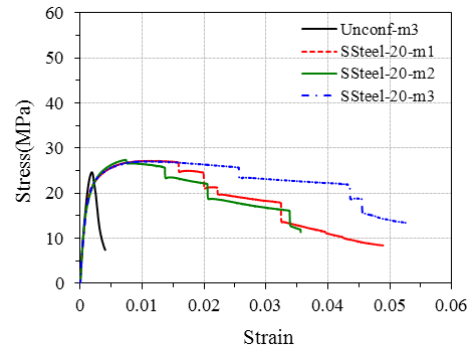
Test specimen	f'_{co} (MPa)	$f'_{co,ave}$ (MPa)	ϵ_{co}	$\epsilon_{co,ave}$
Unconf-m1	23.2	23.0	0.00237	0.0020
Unconf-m2	21.0		0.00174	
Unconf-m3	24.7		0.00188	
Unconf-c1	23.5	23.4	0.00321	0.0038
Unconf-c2	21.1		0.00443	
Unconf-c3	25.5		0.00373	

Table 3. Test results of confined concrete specimen

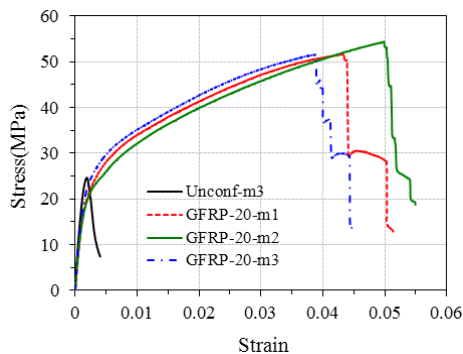
Test specimen	Volumetric ratio	f'_{cc} (MPa)	f'_{cc}/f'_{co}	ϵ_{cc}	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{co}$
SSteel-10-m1	0.0154	38.7	1.68	0.0198	9.9
SSteel-10-m2		37.4	1.63	0.0220	11.0
SSteel-10-m3		38.5	1.67	0.0222	10.1
SSteel-10-c1		41.5	1.77	0.0242	6.4
SSteel-10-c2		42.2	1.80	0.0205	5.4
SSteel-10-c3		42.4	1.81	0.0232	6.1
SSteel-20-m1	0.0080	27.2	1.18	0.0126	6.3
SSteel-20-m2		27.4	1.19	0.0072	3.6
SSteel-20-m3		27.1	1.18	0.0100	5.0
SSteel-20-c1		32.1	1.37	0.0085	2.2
SSteel-20-c2		30.2	1.29	0.0118	3.1
SSteel-20-c3		30.7	1.31	0.0085	2.2
GFRP-20-m1	0.0383	51.7	2.25	0.0432	21.6
GFRP-20-m2		54.4	2.37	0.0499	25.0
GFRP-20-m3		51.6	2.24	0.0388	19.4
GFRP-20-c1		56.2	2.40	0.0383	10.1
GFRP-20-c2		49.0	2.09	0.0305	8.0
GFRP-20-c3		53.5	2.29	0.0387	10.2
GFRP-30-m1	0.0265	38.3	1.67	0.0265	13.3
GFRP-30-m2		37.2	1.62	0.0272	13.6
GFRP-30-m3		41.2	1.79	0.0365	18.3
GFRP-30-c1		41.2	1.76	0.0299	7.9
GFRP-30-c2		41.6	1.78	0.0291	7.7
GFRP-30-c3		41.2	1.76	0.0262	6.9



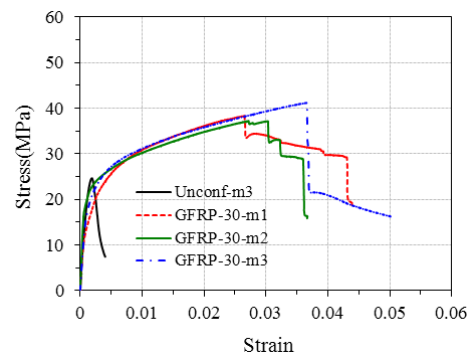
(a) SSteel-10-m series



(b) SSteel-20-m series



(c) GFRP-20-m series



(d) GFRP-30-m series

Fig. 6. Stress-strain relationship for concrete cylinders confined by outside lateral reinforcement members

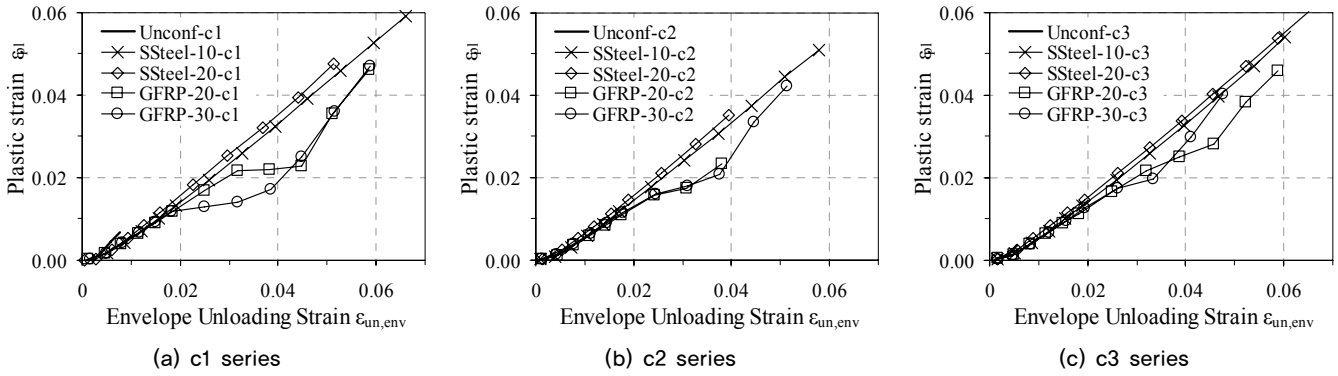


Fig. 7. Comparison of plastic strains for specimens subjected to cyclic loading

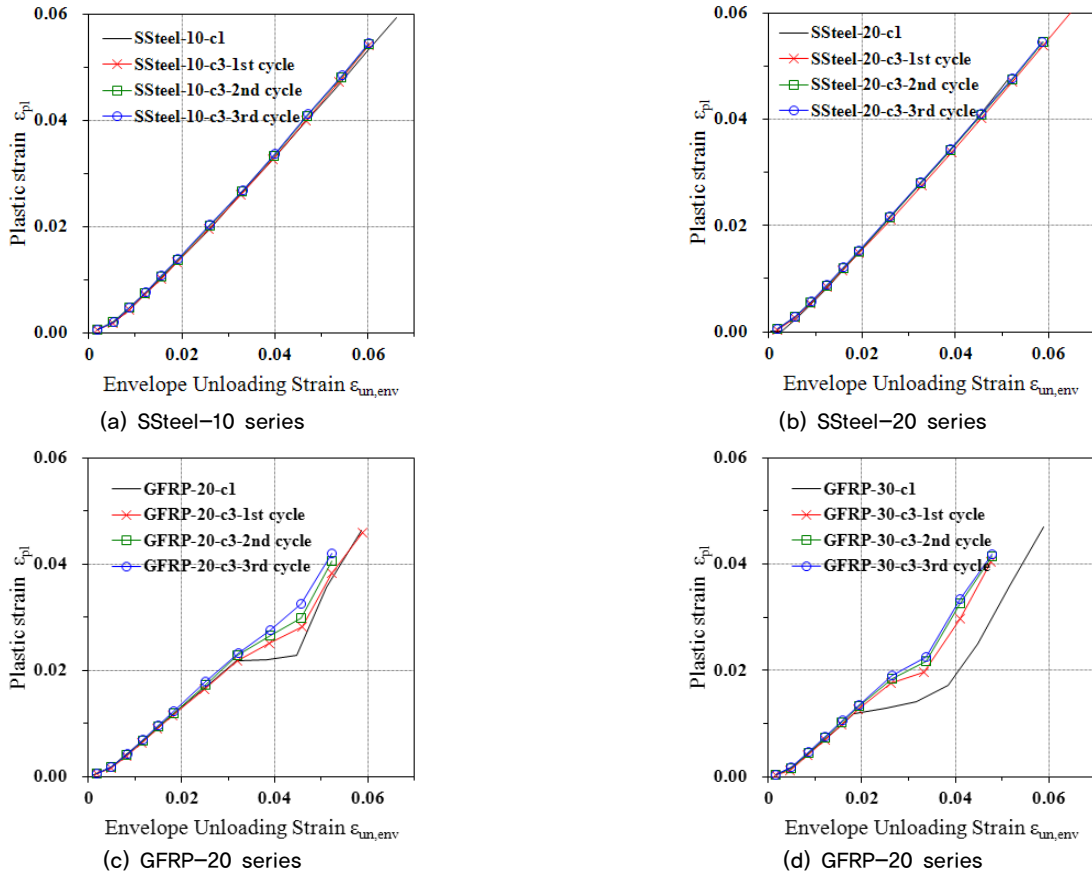


Fig. 8. comparison of plastic strains at each cycle

Table 3에서 확인할 수 있는 바와 같이, 최대강도는 무보강 실험체의 최대 강도에 1.18배에서 2.4배까지, 최대압축강도에 대응되는 변형률은 무보강 실험체에 비해 2.2배에서 25배까지 외측 횡 보강재료의 체적비에 비례하여 증가하였다. 또한 Fig. 6을 살펴보면 보강재료 별로 콘크리트 거동에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 스테인레스 강 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 실험체는 최대강도 이후의 강도의 저감이 비교적 완만하게 발생하였으며 체적비가 클수록 더 완만하게 발생하는 것으로 나타났지만, GFRP 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 실험체는 최대강도에 도달할 때 까지 복선형의 형태를 나타내며 최대강도 이후의 강도의 저감이 매우 급격하게 발생하는 특성을 보였다. 이는 항복 후 소성거동을 하는 스테인레스강과는 다르게 선형탄성적

거동을 하는 GFRP의 재료적인 특성으로 인한 차이로 사료된다.

3.3 소성변형률

콘크리트 공시체의 소성변형률은 반복주기가력으로 얻어진 응력-변형률 이력곡선에서 제하중이 발생하였을때, 제하중 곡선과 x축과의 교점의 변형률로 정의할 수 있다. 반복주기가력을 받는 콘크리트 공시체의 제하중이 발생하는 변형률과 x축과의 교점이 이루는 소성변형률과의 관계를 외측 횡 구속재료의 파단이 발생하는 시점까지를 기준으로 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이, 스테인레스 강 폐합 원형띠로 외측 횡

보강된 공시체의 경우 완전한 선형관계를 이루고 있는 반면에, GFRP 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 공시체의 경우에는 약간의 곡률을 가지고 있지만 선형관계에 근접한 관계를 이루고 있다. 이는 소성변형률의 증가에도 제하중 강성이 일정하게 유지되는 것으로 외측 횡보강재의 파단이 발생하기 전까지 적절한 구속력을 공시체에 지속적으로 제공하는 것을 알 수 있다. 또한 구속체적비가 비교적 작은 스테인레스강 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 공시체가 선형관계에 더 근접한 것으로 보아, 제하중 강성 및 제하중 곡선의 경로에는 구속체적비 보다는 횡 보강재료의 재료적 특성의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 Fig. 7(c)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 동일 변위하중이 세 번 반복되는 경우에도, 동일 변위하중이 한 번 반복되는 경우 (Fig. 7의 (a)와 (b))와 비교해 볼 때 그 차이가 그리 크지 않아 제하중의 거동 특성 즉, 강성 및 곡선의 경로 또한 동일 변위 반복주기하중의 수에 크게 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 이상으로 판단해볼 때, 본 연구에서 제안된 외측 횡 구속재 및 기법은 소성변형률이 증가할지라도 외측 횡 구속재의 파단이 발생하기 전까지 적절한 구속력을 지속적으로 제공하는 것을 입증해 주고 있다.

반복주기하중에 의한 소성변형률의 차이를 분석하기 위해, 동일 변위 반복하중의 수가 한 Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이, 스테인레스강 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 경우에는 동일 변위 반복하중의 수가 한 번인 경우와 동일 변위 반복하중의 수가 세 번인 경우에 사이클의 증가할 때마다 소성변형률이 다소 증가하였지만, 그 차이는 아주 미미하였으며, 체적비에 따른 선형관계 변화도 거의 일치하는 것으로 나타났다. 반면에 GFRP 폐합 원형띠로 외측 횡보강된 경우에는 동일 변위 반복하중의 수가 증가할수록 소성변형률이 증가하는 것으로 나타났으며 그 차이는 체적비가 작을수록 다소 증가하는 현상을 나타내었다. 또한 동일 변위 반복하중의 수가 세 번인 경우에도, 사이클이 증가할 때마다 소성변형률이 증가하여 선형관계에 근접하는 것을 알 수 있다. 이처럼 동일 반복하중이 세 번인 경우, 사이클의 증가로 소성변형률이 증가하여 누적손상이 커질 수 있음에도 불구하고 본 연구에서 제안된 외측 횡 보강기법은 매우 합리적인 범위내에서 구속효과를 지속적으로 제공하는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 무보강 실험체 6본, 스테인레스강과 GFRP로 외측 횡보강된 실험체 12본의 콘크리트 공시체에 대한 일축압축실험을 수행하였고, 실험 결과에 대한 분석으로 얻어진 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 외측 횡보강된 콘크리트 공시체의 응력-변형률 분석 결과, 외측 횡보강된 공시체의 최대압축강도는 무보강 실험체에 비해 1.18배에서 2.4배까지, 최대압축강도에 대응되는 변형률은 무보강 실험체에 비해 2.2배에서 25배까지 횡 보강재료의 보강체적비에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 외측 횡보강된 콘크리트 공시체의 거동을 살펴보면, 외측에 배치된 횡 보강재의 파단의 발생시에 강도의 저감이 스테인레스강으로 외측 횡보강된 실험체는 완만하게 발생하지만 GFRP로 외측 횡보강된 실험체는 강도의 저감이 매우 급격하게 발생하는 특성을 보였다. 이는 항복후 소성거

동을 하는 스테인레스강과 선형탄성적 거동을 하는 GFRP의 재료적 특성으로 인한 차이로 판단된다.

- 3) 소성변형률의 분석 결과, 소성변형률이 증가할지라도 외측 횡보강재의 파단이 발생하기 전까지 우수한 구속력을 지속적으로 제공하는 것으로 나타났다.

종합적으로, 본 연구에서 제안한 외측 횡보강 방법은 콘크리트 공시체의 압축강도, 소성변형률, 제하중 강성 및 소성변형률 증가에 따른 강도저감 완화 등에 매우 우수한 특성을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제안된 외측 횡보강재를 이용한 구속 방법으로 실제 구조물의 내진 설계 및 보강시에 구조적 안정성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

“이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0028552).” 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Youm KS, Lee YH, Park YJ, Lee HE, The behavior of concrete confined by carbon fiber sheet, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 2004;24(2A):259-265.
2. Choi ES, An DJ, Assessment of confining effect of steel and GFRP jackets for concrete, Journal of Korean Society of Steel Construction, 2009;21(4):385-392.
3. Hong WK, Kim HC, Yoon SH, Park SS, Strength characteristics of square concrete column confined by carbon composite tube, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2003;7(1):1-7.
4. Hwang JS, A study on the axial behavior of the concrete cylinders confined by carbon fiber sheets, Journal of Korea Institute for structural maintenance inspection, 2000;4(4):141-148.
5. Lam L, Teng JG, Cheung CH, Xiao Y, FRP-confined concrete under axial cyclic compression, Cement & Concrete Composites, 2006;28: 949-958.
6. Mirmiran A, Shahawy M, Behavior of concrete columns confined by fiber composite, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1997;123(5): 583-590.
7. Park R, Paulay R, Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New Zealand, c1975, p.17-30.
8. Saafi M, Toutanji HA, Li Z, Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes, ACI Materials Journal, 1999; 96(4):500-509.
9. Toutanji HA, Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite, ACI Materials Journal, 1999;96(3):397-404.
10. Xiao Y, Wu H, Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2000;12(2):139-146.