

1/2 축소된 원형교각의 GFRP 래핑 내진보강

Seismic Retrofit of 1/2 Scale-down Circular RC Columns with GFRP Wrapping

염광수* 최영민** 이영호*** 권태규**** 김정호***** 황윤국*****

Youm, Kwang-Soo Choi, Young-Min Lee, Young-Ho Kwon, Tae-Gyu Kim, Jung-Ho Hwang, Yoon-Koog

ABSTRACT

This paper presents experimental studies on investigating the seismic retrofit performance of reinforced concrete circular columns with poor lap-splice details using GFRP wrapping. Four 1/2 scale-down model columns have been tested. The as-built column is expected to suffer brittle failure due to the bond failure of lap-spliced longitudinal reinforcement. The retrofitted columns using GFRP wrapping showed significant improvement of seismic performance.

1. 서론

2005년 3월 한반도전역에서 감지된 일본 후쿠오카 지진 등 날로 우리사회에 위협으로 다가오는 지진에 대처하기 위하여 내진설계기준이 마련되기 이전에 건설된 기존교각의 경우에는 추가적인 내진보강의 방법이 마련되어야 한다. 비내진상세를 가지는 교각의 경우 대부분 300 mm의 횡방향 철근 간격과 종방향 철근의 겹침이음 구간을 가진다. 전자는 내부 콘크리트를 충분히 구속하지 못하기 때문에 휨파괴가 발생하게 된다. 반면에 후자는 겹침이음 구간의 마찰면을 따라서 적절한 구속능력을 제공하지 못하기 때문에 종방향 철근의 미끄러짐 현상(Sliding mechanism)이 발생하여 급작스런 파괴가 일어난다. 이렇게 파괴된 많은 교각들을 최근에 일어난 지진(1989 Loma Prieta, 1994 Northridge, and 1995 Kobe) 현장에서 관찰되었다. 이에 대한 대책으로, 섬유복합재료(Fiber Reinforced Polymer, FRP)나 강판피복(Steel jacket)을 이용한 보강법에 대한 연구가 광범위하게 수행되어 왔다.

본 연구에서는 소성힌지내에 종방향 철근의 겹침이음이 존재하는 기존 교각에서의 부착파괴를 방지하기 위해 연속 GFRP 래핑을 사용한 보강실험을 수행하였다. 보강 높이를 변화시키면서 보강효과를 실험적으로 검증하였다. 보강된 GFRP의 구속력에 의해서 겹침이음된 종방향 철근의 변형률을 계측하여 항복여부를 검증하였다. 실제 공용중인 국도상의 비내진 교량의 겹침이음 원형교각을 대상으로 선정하여, 총 4개의 1/2 축소실험체를 제작하였다. 보강 전후의 내진성능은 변위연성(Displacement ductility)이 아닌 변위비(Drift ratio)을 증가시키는 준정적 실험(Quasi static loading test)을 통해 보강 전후의 내진성능을 평가하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 Post-Doc.

** 정회원, 자람기술 대표

*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

**** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원

***** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원

***** 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 부장

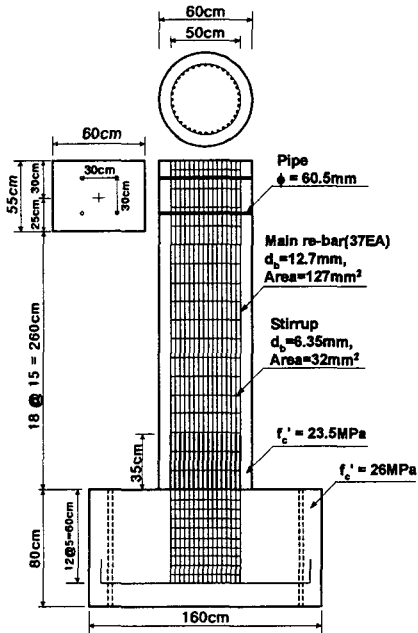


그림 1 1/2축소 실험체 상세

표 2 실험체 분류 및 GFRP보강 상세

Specimens	Details	GFRP layout	
		Thickness	Height
1	350 mm 겹침이음	-	-
2	연속철근	-	-
3	350 mm 겹침이음	8.0 mm	450 mm
4			900 mm

표 3 GFRP 재료물성

	GFRP
Elastic modulus	28,994 MPa
Ultimate strength	373.3 MPa
Ultimate strain	0.0129
Layer thickness	1.0 mm

실험체의 내진성능을 평가한 후 보강설계를 실시하였다. 겹침이음이 없는 일체형으로 가정한 실험체의 휨성능은 Priestley 등에 의해 제안된 방법에 따라 모멘트-곡률해석 결과를 기초로 평가하였다. 종방향 철근이 항복할 때의 기둥의 변위(Δ_y')는 10.5 mm로 예측된다. 여기서, H_e 는 기둥의 유효높이다. 이론 휨성능에서의 항복변위(Yield displacement at ideal flexural capacity, Δ_y)는 17.13 mm로 계산된다. Seible 등은 FRP의 팽창변형률(Dilation strain)을 $1000\mu\epsilon$ 로 제한한 후, 식(1)와 같은 겹침이음 구속에 필요한 FRP의 두께를 계산하는 방법을 제안하였다. 이 제안식으로 계산된 실험체에 필요한 GFRP의 두께는 7.5 mm 이며, 실험체는 8 mm로 보강하였다.

$$t_j = 500 \frac{D(f_t - f_h)}{E_{uj}} \quad (1)$$

GFRP의 보강높이를 변화시키면서 이에 따른 실험체의 거동을 비교하였다. 일반적으로 FRP의 보강높이는 겹침이음 길이(L_s)와 같다고 제안되었지만, 본 논문에서는 겹침이음 길이의 1.3배(450mm)와 2.4배(900mm)로 보강한 실험체의 성능을 비교하였다.

교각의 내진성능 평가를 위한 준정적 실험에서 최대한 실제 하중효과를 반영할 수 있도록 실험대상 교량의 상부구조에 의한 중량 380.1 kN을 재하하였으며, 동시에 횡방향의 지진하중을 고려하기 위해 최대 스트로크(stroke) ± 250 mm, 최대하중 1000 kN인 가력기를 실험체의 가력부분과 동일한 높이로

2. 1/2 규모 축소실험체 상세 및 겹침이음 보강설계

본 연구에 사용된 실험체는 1979년 완공된 후 현재 사용중인 국도상의 8경간 연속 슬래브교로서, 교각 중 P4 교각을 실험대상으로 선정하였다. 상사법칙을 통한 축소모형 교각의 설계에 있어서 축소모형 교각과 실제 교각 사이에 존재하는 하중-변위 관계의 유사성을 상사비의 결정기준으로 하였다. 이 유사성을 보장하기 위해서 최소한 1:4 보다 작은 상사비의 사용을 권장하는 연구결과를 바탕으로 1:2의 상사비를 채택하여 원형단면 교각의 축소모형을 설계하였다(Abrams(9)). 표 1에 실험체 분류 및 GFRP보강 상세를 정리하였다.

본 실험을 위해 제작된 실험체는 총 4개이며, 교각 직경은 600 mm, 높이는 2850 mm 이다. 그림 1에서와 같이, 실험체에 1.69%의 종방향 철근비에 해당하는 37개의 D13 ($d_b = 12.7$ mm)을 배근하였다. 종방향 철근의 겹침이음 길이는 350 mm 이다. 횡방향 철근으로 D6 ($d_b = 6.35$ mm)이 150 mm 간격으로 배근하였다. 실험체의 설계에 사용된 철근은 SD30 ($f_y = 294.1$ MPa)이며, 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 23.5 MPa 이다. 설계 압축력은 380.1 kN으로, 축하중비는 5.7 %이다. 표 2에 flat coupon test를 통해서 얻은 GFRP의 물성치를 정리하였다.

내력벽에 설치하였다. 수평하중 재하방식은 실험체의 높이에 대한 수평방향의 변위에 대한 비인 변위비(Drift ratio)를 0.25%씩 증가시켜 2 cycles씩 반복하는 변위제어 방식을 사용하였다. 극한변위(Ultimate displacement)는 수평방향 최대하중을 지난 후 최대하중의 20%가 저하되었을 때의 변위로 정의하였다. FRP 래핑은 1.2m 높이로 자동화 FRP 래핑장비를 이용하여 실내 실험실에서 작업하였다. FRP 보강방법은 유리섬유를 에폭시 수지에 함침시킨 후 교각에 직접 감아주는 방식으로 보강하였다.

3. 실험 결과 및 분석

접침이음된 교각의 파괴 후 형상과 이력곡선은 각각 그림 2(a)와 그림 4에 도시하였다. 변위비(Drift ratio)가 0.50 % (14.2mm)일 때 교각 하부에 횡방향 균열이 발생하였고, 1.0 % (28.4mm)일 때 하부에 연직방향 균열이 발생하였다. 1.25 % (35.5mm)에서 최대 횡하중에 도달한 후 급격한 강도감소가 발생하였다. 이 부근에서 종방향 철근의 부착파괴(Bond failure)가 발생하기 시작했다. 일체형 교각의 이력곡선과 파괴 후 형상은 각각 그림 2(b)와 그림 5에 정리하였다. 전형적인 휨파괴 거동이 일어났으며, 변위비 3.5%에서 콘크리트의 박리 후 종방향 철근의 좌굴이 발생하여 실험을 종료하였다.

그림 2(a)와 (b)는 각각 GFRP로 보강된 실험체의 실험종료 후 모습이며, 그림 6과 그림 7은 각각의 이력곡선이다. 휨파괴 거동은 발생하지 않았으며, GFRP 보강된 상부에서 에폭시 균열이 발생하였지만, 실험종료 후 전반적인 GFRP의 손상은 미미하였다. 보강높이가 각각 450mm와 900mm를 보강한 실험체들은 거의 같은 이력거동과 유사한 최대 횡하중 및 극한변위를 가지며, 보강높이에 따른 효과는 매우 적음을 보여준다. 그림 8에 각 실험체들의 하중-변위 포락곡선을 정리하였다.

GFRP로 보강된 실험체들의 파괴양상은 접침이음된 종방향 철근의 슬립에 의한 부착파괴가 지연된 형태로 나타났다. 비록 부착파괴를 방지하고 휨파괴를 유도하지는 못했지만, 실험체 1과 같은 급격한 취성파괴는 피할 수 있다. 지연된 부착파괴로 판단한 근거는 종방향 철근의 항복으로 가정하였지만, 그림 9와 10의 실험결과 항복하지 않았다. 이는 종방향 철근의 항복을 가정한 항복변위를 결정할 수 없기 때문에 변위연성(Displacement ductility, μ_d)을 사용하지 못함을 의미한다. 대신에 식(1)에서 구한 일체형 교각의 이론 항복변위(16.4mm)를 이용한 추정 변위연성(Estimated displacement ductility, $\bar{\mu}_{est}$)을 정의한 후 표 3에 정리하였다. 접침이음 파괴가 발생한 실험체의 추정 변위연성이 2.7인데 반하여, 보강된 실험체들의 경우 5.4~5.8로 증가하였다.

4. 결론

실제 공용중인 국도상의 비내진 교량의 접침이음 원형교각을 대상으로 선정하여, 총 5개의 실험규모의 실험체를 제작하였다. 제안된 설계법으로 연속 GFRP 래핑으로 보강한 후 보강 전후의 내진성능을 준정적 실험을 통해 평가하였다. 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 종방향 철근의 접침이음으로 인해 급격한 부착파괴가 일어난 실험체를 GFRP를 사용하여 보강한 결과, 최대하중과 극한변위가 증가하였고 안정적인 이력거동을 보여 주었으며, 내진성능이 매우 향상되었다.
- 2) 접침이음 구간(870 mm)내에 있는 starter bar와 main bar에서 항복은 일어나지 않았으며, GFRP 보강 실험체의 파괴양상은 접침이음된 종방향 철근의 슬립에 의한 부착파괴가 지연된 형태로 나타났다. 종방향 철근의 항복을 가정한 항복변위를 결정하기 어렵기 때문에 변위연성을 사용할 수 없으며, 또한 실험방법에서도 변위연성을 이용한 방법보다는 본 연구에서 사용한 변위비(Drift ratio) 증가법이 타당하다고 판단된다.

참고문헌

1. Abrams, D.P. "Scale relations for reinforced concrete beam-column joint." ACI Structural

2. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M. Seismic design and retrofit of bridges, John Wiley & Sons, New York, 1996, 686 pp.



그림 2 (a) 겹침이음 실험체

(b) 일체형 실험체

그림 3 (a) 450 mm 보강

(b) 900 mm 보강

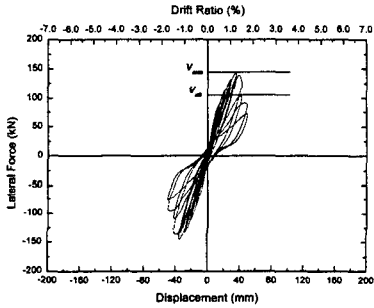


그림 4 이력곡선-겹침이음

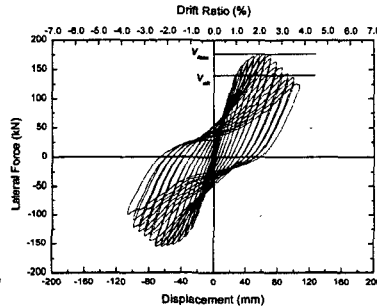


그림 5 이력곡선-일체형

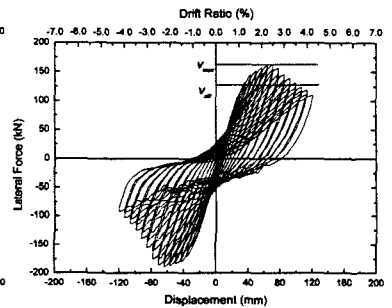


그림 6 이력곡선-450 mm 보강

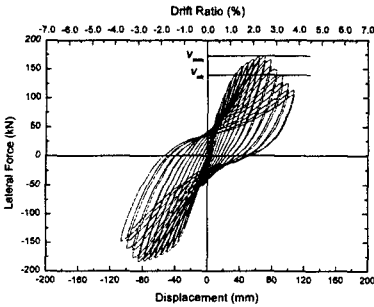


그림 7 이력곡선-900 mm 보강

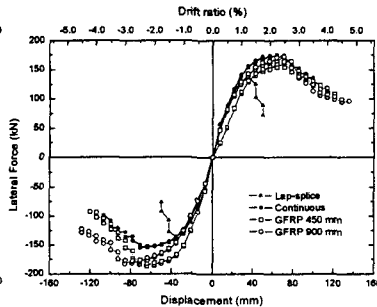


그림 8 하중-변위곡선 비교

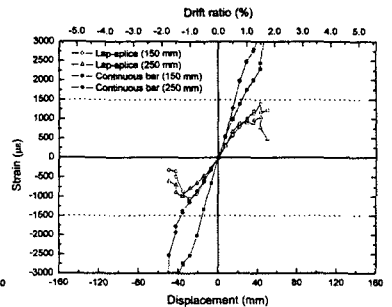


그림 9 종방향철근 변형률 비교

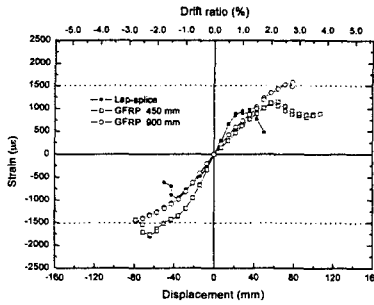


그림 10 종방향철근 변형률-보강실험체

표 4 실험결과

Specimens	V_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	V_{ult} (kN)	Δ_{ult} (mm)	$\bar{\mu}_{est}$
1	144.4	35.2	103.9	40.9	2.4
2	176.0	64.2	143.0	84.6	4.9
3	162.2	70.6	131.2	99.5	5.8
4	172.3	69.9	138.6	92.4	5.4