

복합소재를 활용한 곡면 패널의 부재단위 성능 평가

박희범, 박종섭, 강재윤, 정우태*
한국건설기술연구원 인프라안전연구본부

An Experimental Study on the Behavior of Curved Panel Parts Using Composite Materials

Hee Beom Park, Jong-Sup Park, Jae-Yoon Kang, Woo-Tai Jung*

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요 약 최근 구조물의 장수명화에 대한 관심이 증가하면서 내부식, 고내구성이 뛰어난 재료적 특성으로 인해 유지관리비용이 현저히 절감되는 FRP를 건설 구조물에 활용하기 위한 연구가 다방면에서 시도 되고 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 복합소재 패널은 곡선을 가지는 부재로서 터널 등의 구조물에 가장 많이 사용되는 아치형 부재이다. 최근 복합소재 곡면패널은 자동화 제작장치에 의해 고품질, 대량생산이 가능하게 되었으며 성형공정을 토대로 강화섬유의 공급 및 배열에서 최종 제품의 절단까지 일괄공정으로 이루어진다. 하지만 아직까지는 구조부재로서의 적용 빈도가 낮아 관련 설계기준 및 실험데이터가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 FRP 곡면패널의 구조부재로서의 성능을 검증하기 위하여 우선적으로 부재단위의 역학적 성능을 검토하는 것이다. 이를 위해 섬유방향 복합소재 패널로부터 시편을 제작하여 부재단위의 인장실험, 압축실험, 연결부 성능실험을 수행하여 FRP 패널에 적용된 부재의 역학적 특성을 파악하고자 한다. 인장 실험결과 곡률이 큰 시험체의 인장강도가 더 크게 나타났으며, 압축 시험결과 복합소재 단면이 콘크리트 단면보다 압축강도가 더 크게 나타났다. 마지막으로 연결부 성능 시험결과 연결부의 부착성능은 FRP 복합소재 패널의 강도보다 동등 이상의 강도를 가지고 있는 것으로 나타났다.

Abstract FRP is a new material that is lightweight, has high strength and high durability, and is emerging as a third construction material in many countries. The composite material panel targeted in this study was a curved member and is the most frequently used arch-shaped member of a structures, such as tunnels. Composite curved panels can be produced in high quality and large quantities through automation operations. On the other hand, the frequency of application is low, and the design criteria and experimental data are lacking. Therefore, this study examined the mechanical performance of the member unit first to verify its performance as structural members of the FRP curved panel. For this purpose, tensile, compression, and connection performance tests were carried out. The tensile tests showed greater tensile strength of specimens with larger curvature, and the compression tests showed that the composite section of a composite material has greater compressive strength than the concrete section. Finally, the test of the performance of the connection showed that the attachment performance of the connection was more than equal to that of the FRP composite material panel.

Keywords : connected member, curvature, curved FRP, panel, solid, void

1. 서론

최근 구조물의 장수명화에 대한 관심이 증가하면서 내부식, 고내구성이 뛰어난 재료적 특성으로 인해 유지

관리비용이 현저히 절감되는 FRP를 건설 구조물에 활용하기 위한 연구가 다방면에서 시도 되고 있다[1-3]. FRP는 섬유나 수지의 종류, 형상, 크기 등에 따라 다양한 형태로 개발되어 생산되고 있다. 1980년대 이후 건설 분야

이 연구는 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비지원(17SCIP-B128496-01)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Woo-Tai Jung(KICT)

Tel: +82-31-910-0580 email: woody@kict.re.kr

Received May 5, 2018

Revised (1st June 15, 2018, 2nd June 18, 2018)

Accepted July 6, 2018

Published July 31, 2018

에 도입된 이후, 전통적인 건설재료인 강재와 콘크리트를 대체하는 구조재로서 많은 부분에서 급속도로 활용이 증가하고 있다. 특히 콘크리트 구조물 보강분야에서 기존 콘크리트 구조물 보강분야에서 기존 콘크리트 등을 대체하는 보강재료로 크게 각광받고 있으며, 많은 콘크리트 구조물들이 FRP로 보강되었거나 현재도 보강되고 있다[4-6].

그러나 아직까지 터널이나 아치형 교량 등에 활용가능한 곡면형 FRP 건설자재에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있으며 현재까지 곡면 구조재에 대한 연구는 프리캐스트 콘크리트에 대한 연구가 주를 이루고 있는 실정이다[7].

본 연구에서 대상으로 하는 복합소재 패널은 곡선을 가지는 부재로서 터널 등의 구조물에 가장 많이 사용되는 아치형 부재이다. 최근 복합소재 곡면패널은 자동화 제작장치에 의해 고품질, 대량생산이 가능하게 되었으며 성형공정을 토대로 강화섬유의 공급 및 배열에서 최종 제품의 절단까지 일괄공정으로 이루어진다. 하지만 아직까지는 구조부재로서의 적용 빈도가 낮아 관련 설계기준 및 실험데이터가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 FRP 곡면패널의 구조부재로서 성능을 검증하기 위하여 우선적으로 부재단위의 역학적 성능을 검토하는 것이다. 이를 위해 섬유방향 복합소재 패널로부터 시편을 제작하여 부재단위의 인장실험, 압축실험, 연결부 성능실험을 수행하여 FRP 패널에 적용된 부재의 역학적 특성을 파악하고자 한다. 본 논문에서는 이러한 연구 내용 및 결과에 대해서 상세히 기술하였다.

2. 부재 단위 성능 실험

2.1 복합소재 패널 인장성능 실험

FRP는 사용재료, 제조방법, 섬유 함량비 등에 따라 물성변화가 크며 동일한 조건으로 제작된 제품이라도 효과적인 품질검증 및 재료물성 확보를 위해 기본 역학적 성능 실험이 필요하다. 따라서 생산된 FRP 패널로부터 섬유방향으로 시편을 제작하여 인장실험을 수행하고 FRP 패널에 적용된 부재의 역학적 특성을 파악하고자 한다. 인장실험은 FRP 재료실험 중 가장 대표적인 실험 방법으로 인장강도, 탄성계수 등을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 시험체에 곡률이 존재하기 때문에 순수인장강도 시험이 아닌 휨이 반영된 인장성능 실험을 수행하였다.

인장실험체의 제원은 폭 20 mm, 두께 10 mm, 길이 1 m를 가지도록 제작하였다. 정착장치 슬리브는 외경 42.7 mm, 두께 4.9 mm의 제원을 갖는 호칭 32A #60의 압력배관용 강관을 사용하였으며, 충전재는 에폭시 수지를 사용하였다. 대상 복합소재 패널은 곡률을 가지고 있기 때문에 곡률반경이 큰 패널의 상부, 하부에서 각 5개씩, 곡률반경이 작은 패널의 상부, 하부 각 5개씩 총 20개의 실험체를 제작하여 인장실험을 수행하였다. 제작된 실험체의 형상은 Fig. 1과 같다.

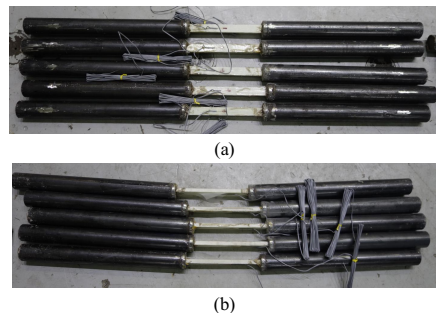


Fig. 1. Curvature specimens
(a) Big curvature (b) Small curvature

복합소재 패널의 부재단위 역학성능을 평가하기 위한 인장실험은 Fig. 2와 같은 980 kN 용량의 만능실험기를 사용하였으며, 하중재하는 KS M 3015[8]을 준용하여 5 mm/min 속도로 인장시험을 수행하였다. 시험체의 계측은 실험체 중앙에 변형률 센서를 부착하여 측정하였다.



Fig. 2. Tensile test

실험 결과 곡률이 큰 시험체의 경우 Fig. 3(a), (b)에 나타난 바와 같이 상부의 인장강도는 370 MPa로 하부의 인장강도는 280 MPa로 나타났다. 곡률이 작은 시험체는 Fig. 3(c), (d)에서 볼 수 있듯이 상부의 인장강도는 317 MPa, 하부의 인장강도는 266 MPa로 나타났다. 곡률 반경이 큰 시험체가 곡률 반경이 작은 시험체 보다

직선에 가깝기 때문에 편심의 영향을 적게 받아서 인장 강도가 더 크게 나온 것으로 판단된다. 시험체에서는 정착구와 FRP 사이의 부착파괴가 발생하였으며, 일부 시험체에서는 곡률에 의한 편심으로 FRP 섬유층과 에폭시 간의 층간 파괴가 발생하였다. 시험체 자체에 곡률이 존재하기 때문에 직접인장시 상·하면에 응력 차이가 발생하여 재료의 강도가 발휘되기 전에 파괴가 발생하므로 이에 대한 적절한 실험법 개발이 필요한 것으로 판단된다.

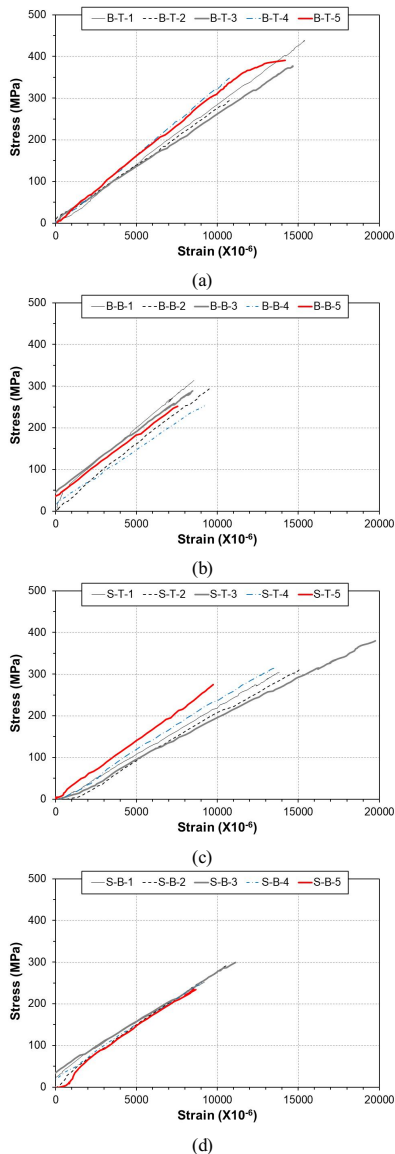


Fig. 3. Stress-strain curve (Tensile specimens)
 (a) Top (big) (b) Bottom (big)
 (c) Top (small) (d) Bottom (small)

2.2 복합소재 패널 압축강도 실험

압축강도 실험체의 실험변수는 콘크리트형, FRP 중공형, FRP+콘크리트 중실형으로 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 실험체 제원은 FRP 중공형, FRP+콘크리트 중실형 경우는 높이 300 mm, 단면은 150×150 mm, 콘크리트형 실험체는 높이 300 mm, 단면은 130×130 mm의 제원을 가진다.

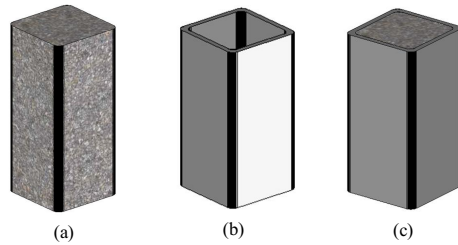


Fig. 4. Compressive test specimens
 (a) Concrete (b) Void (c) Solid

압축실험체는 콘크리트형 실험체 3개(R1~R3), FRP 중공형 실험체 3개(R4~R6), FRP+콘크리트 중실형 실험체 3개(R7~R9)로 구분된다. 실험은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 2,000 kN UTM을 사용하였으며, 하중 재하는 0.5 mm/min의 속도로 변위제어로 진행하였고, 초기에 약 4~5 kN의 하중을 재하한 상태에서 실험체 파괴까지 하중을 가력하였다. R1~R8 실험체는 가력다면 전체에 대한 압축강도를 확인하였으며, R9 실험체는 FRP를 제외한 내부에 타설된 콘크리트만 가력하여, FRP 패널에 작용하는 콘크리트 수평력을 확인하였다.



Fig. 5. Compressive test

콘크리트형 실험체는 실험체 중앙에 콘크리트 센서를 2단면에 각 1개씩 총 2개소 부착하였으며, FRP 중공형

실험체와, FRP+콘크리트 중실형 실험체는 콘크리트 센서 2개와 철근 센서 2개를 각 단면 중앙에 부착하였다. FRP+콘크리트 중실형 실험체 중 마지막 실험체인 R9 실험체의 경우는 실험체 내부의 콘크리트만 가력하여 외부의 FRP 패널에 작용하는 수평력을 측정하여야 하기 때문에 실험체 1/4지점에 콘크리트 센서 8개를 추가적으로 부착하였다.

콘크리트형 압축강도 실험체의 평균 파괴 하중은 약 270 kN이며, 실험결과는 Table 1과 같다. Fig. 6에서는 하중-변위 곡선을 나타내었다. 측정된 변형률의 평균은 1097 $\mu\epsilon$ 으로 나타났다. 콘크리트형 실험체의 단면제원은 130×130 mm으로 압축강도를 산출할 경우 약 16 MPa의 강도를 가진다. 타설된 콘크리트의 기준강도인 24 MPa과는 8 MPa 정도 차이가 발생하는데, 이는 시편 형상이 육면체이기 때문에 응력이 중앙에 모이지 않고 단면을 따라 응력이 전달되기 때문이다. 타설된 콘크리트의 압축강도를 확인한 결과 28일 강도는 23.05 MPa로 나타났다. 파괴형상은 중앙부 수직 균열에 의한 파괴가 발생하였다.

Table 1. Test results (concrete)

Group	Load (kN)	Displacement (mm)	Strain ($\mu\epsilon$)	Compressive Stress (MPa)
R1	289.3	3.14	-1092.0	17.1
R2	302.6	2.99	-1177.0	17.9
R3	220.0	3.47	-1022.5	13.0
Ave.	270.6	3.20	-1097.2	16.0

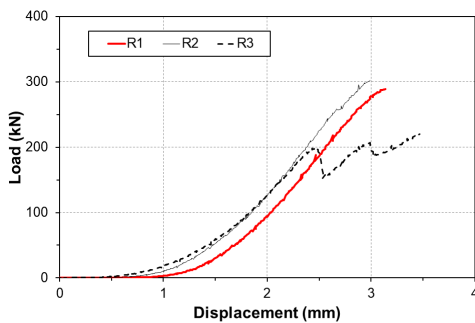


Fig. 6. Load-displacement curve (Concrete)

FRP 중공형 압축강도 실험체의 평균 파괴 하중은 약 664 kN이며, 실험결과는 Table 2와 같다. 측정된 변형률

은 평균 4292 $\mu\epsilon$ 로 나타났다. Fig. 7에서는 하중-변위 곡선을 나타내었다. FRP 중공형 실험체의 단면은 외경 150×150 mm, 내경 130×130 mm의 제원으로 압축강도를 산출할 경우 약 118.6 MPa의 강도를 가진다. 이는 콘크리트 강도 16 MPa에 비해 약 7.4배 큰 강도를 나타낸다. 파괴형상은 중앙부 수직 균열에 의한 파괴가 발생하였다.

Table 2. Test results (void)

Group	Load (kN)	Displacement (mm)	Strain ($\mu\epsilon$)	Compressive Stress (MPa)
R4	629.1	11.11	-3669	112.3
R5	666.1	10.89	-4447	119.0
R6	697.6	10.85	-4759	124.6
Ave.	664.3	10.95	-4292	118.6

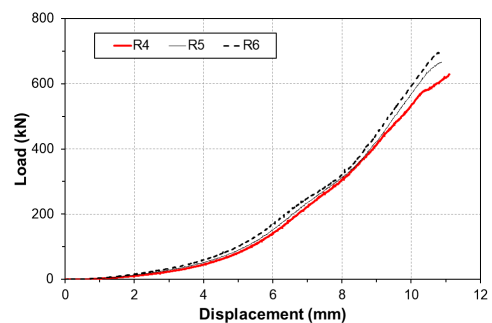


Fig. 7. Load-displacement curve (Void)

FRP+콘크리트 중실형 실험체의 압축강도 실험 결과는 Table 3에 나타내었으며, Fig. 8에서는 하중-변위 곡선을 나타내었다. 실험체 R7, R8의 평균 파괴 하중은 약 622.5 kN이며, 측정된 변형률은 평균 9575.4 $\mu\epsilon$ 으로 나타났다. R9의 파괴 하중은 269.2 kN으로 나타났으며 수직방향 변형률은 평균 150 $\mu\epsilon$ 으로 나타났다. R7, R8 실험체의 단면은 외경 150×150 mm 제원으로 합성단면에 의한 압축강도를 산출할 경우 약 27.7 MPa의 강도를 가지며, FRP를 콘크리트로 단면환산하여 압축강도를 산출할 경우 약 32.61 MPa의 강도를 가진다. R9 실험체의 경우는 FRP를 제외한 내부에 타설된 콘크리트 부분에만 가력하였기 때문에 단면은 130×130 mm 제원으로 압축강도를 산출할 경우 약 15.9 MPa의 강도를 가진다. 콘크리트 부분에만 하중을 재하하여 성능을 확인한 R9 실험

체는 상부에서는 평균 변형률이 991 $\mu\epsilon$ 로, 하부에서는 평균 변형률이 179.8 $\mu\epsilon$ 으로 나타났다. 또한 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 R2 실험체와 비교한 결과 콘크리트형 실험체의 강도와 유사한 결과를 나타내었다. R7, R8, R9 실험체 파괴형상은 중앙부 수직 균열에 의한 파괴가 발생하였다.

Table 3. Test results (solid)

Group	Load (kN)	Displacement (mm)	Strain ($\mu\epsilon$)	Compressive Stress (MPa)	
				Total	Transform
R7	614.0	22.13	-9642	27.3	32.17
R8	631.1	22.43	-9508	28.0	33.06
Ave. (R7, R8)	622.5	22.28	-9575	27.65	32.61
R9	269.2	3.51	-150	15.9	-

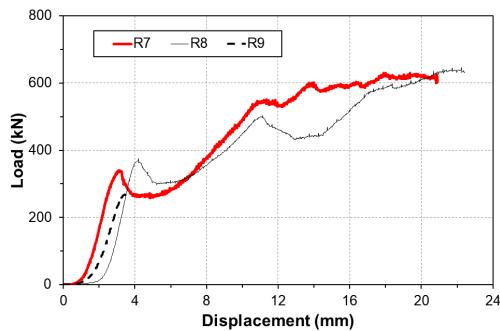


Fig. 8. Load-displacement curve (Solid)

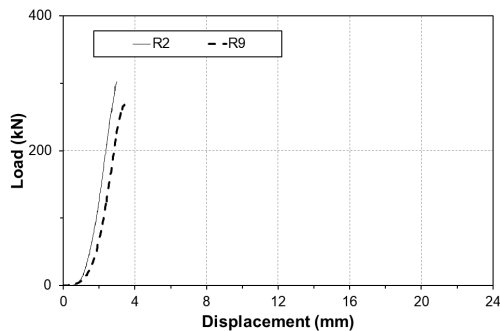


Fig. 9. Load-displacement curve (Concrete VS. Solid)

2.3 복합소재 패널 연결부 성능 실험

인발성형에 의해 제작되는 곡면패널은 그 규모에 따라 접합부가 필연적으로 발생한다. 제작된 제품의 도로 운반을 위해서는 차량제원 이하로 제품크기를 제한해야 하고 연속생산을 위해 인발성형은 완전한 원형제품 이전에 절단하여야 한다. 복합소재 곡면패널의 횡방향 연결은 암·수부를 가지는 연결부에 의해 결합된다. 연결부는 부착강도가 모재강도와 동등하거나 그 이상의 성능이 나타나도록 제작하여야 한다. 따라서 연결부 성능 실험을 통하여 그 성능을 검증하고자 한다.

연결부 인장실험체의 경우 2개의 셀을 접합하여 길이 900 mm, 단면 200×200 mm 실험체를 제작하였다. 인장 실험시 접합부의 파괴 이전에 인장봉에서의 국부파괴를 막기 위해 내부에는 에폭시 등의 충전재를 충전하였다. 실험체 세부 제원은 Fig. 10과 같다.

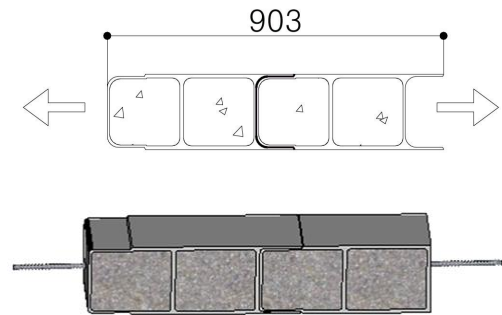


Fig. 10. Connected specimen dimension (unit: mm)

연결부 성능실험은 하중용량 1,000 kN UTM을 이용하여 수직하중을 재하하여 정적실험이 수행되었다. 하중 재하는 변위제어속도 1 mm/min로 약 4~5 kN의 초기하중을 재하한 상태에서 실험체 파괴까지 하중을 증가시켰다. Table 4에서는 연결부 성능실험 실험결과를 나타내었고, Fig. 11에서는 연결부 성능실험에 대한 하중-변위 곡선을 나타내었다. 실험결과 인장접합 실험체 3개의 하중은 평균 48.5 kN로 나타났고 UTM 변위는 평균 8.80 mm로 나타났다. 3개의 실험체 모두 연결부에서 파괴되었으며, 이때 파괴는 연결부의 부착에 의한 파괴가 아닌 연결부를 만들기 위하여 제작된 암·수 결합부의 FRP 복합소재 패널 단층의 두께가 작은 부분에서 파괴가 발생하였다. 이를 통해 연결부의 부착성능은 모재와 동등 또는 그 이상인 것을 알 수 있다. 또한 파괴 지점은 일률적

으로 곡면 상부의 연결부에서 인장파괴가 발생하였다. 향후 상부 연결부의 섬유배열을 하부와 동일하게 배열하거나 증가시킨다면 좀 더 안정적인 성능이 도출될 것으로 판단된다.

Table 4. Test results (connected part)

Group	Load (kN)	Displacement (mm)
Connect-1	58.9	15.75
Connect-2	49.0	5.36
Connect-3	37.5	5.29
Average	48.5	8.80

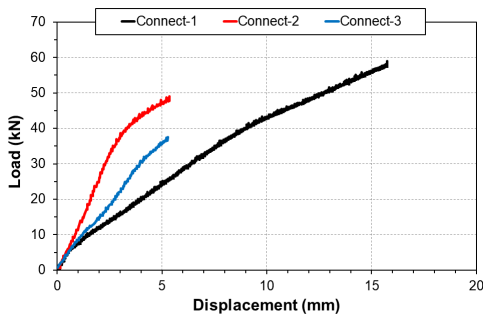


Fig. 11. Load-displacement curve (Connect)

3. 결론

복합소재 패널은 곡선을 가지는 부재로서 터널 등의 구조물에 가장 많이 사용되는 아치형 부재이다. 하지만 아직까지는 구조부재로서의 적용 빈도가 낮아 관련 설계 기준 및 실험데이터가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 FRP 패널의 기본적 성능 실험과, 부재단위의 인장실험, 압축실험, 연결부 성능 실험을 수행하여 FRP 복합소재 곡면패널의 역학적 특성을 파악하였다. 본 연구를 수행하여 도출한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 인장실험 결과 곡률이 큰 경우의 인장강도가 곡률이 작은 경우의 인장강도보다 크게 나타났다. 이는 곡률 반경이 더 큰 경우의 인장실험체가 곡률 반경이 작은 경우의 인장실험체 보다 직선에 가깝기 때문에 곡률에 의한 영향으로 분석된다. 시편 자체에 곡률이 있기 때문에 직접인장시 상·하면에 응력 차

이가 발생하여 재료의 강도가 발현되기 전에 파괴가 발생하므로 이에 대한 적절한 실험법 개발이 필요한 것으로 판단된다.

- 압축실험 결과 콘크리트형 실험체와 FRP 중공형 실험결과를 비교하여 볼 때 약 7.4배 이상의 강도 차이를 보였다. 또한 콘크리트형과 FRP+콘크리트 중실형을 비교할 경우 약 1.7배의 강도가 향상됨을 확인하였으며, FRP를 콘크리트로 환산한 단면을 비교한 결과는 약 2배 차이를 보였다. FRP 패널이 콘크리트를 구속하여 압축강도를 증가시킨 것으로 판단된다. FRP+콘크리트 중실형 실험체에 콘크리트에만 압축력을 가력한 R9의 결과는 콘크리트형 실험결과와 비슷한 결과를 보였다.
- 부재단위 연결부 실험 결과 실험체 3개의 부착강도는 평균 48.5 kN로 나타났으며 실험체 모두 연결부에서 파괴되었다. 이때 파괴 형상은 연결부의 부착에 의한 파괴가 아닌 연결부를 만들기 위하여 제작된 압·수 결합부의 FRP 복합소재 패널 단층의 두께가 작은 부분에서 파괴가 발생하였다. 이를 통해 연결부 부착성능은 FRP 복합소재 패널의 강도 보다 동등 이상의 강도를 가지고 있다고 판단된다.

References

- [1] Kim, D. H., "Composite Structure for Civil and Architectural Engineering", E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203474969>
- [2] Luc R. Taerwe & Stijn Matthys, "FRP for Concrete Construction : Activities in Europe", Concrete International, Vol 21, No 10, Oct. pp. 33-36., 1999.
- [3] L.C. Hollaway, "A review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties", Construction Building Materials, 24, 2419-2445, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.062>
- [4] Ji, H.S., Chunk, K.S., An Experimental Study on the Behaviour of Modular GFRP Deck for Use in Deteriorated Bridge Decks Replacement, Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 1, No. 2, pp. 44-50, 2010.
- [5] Benmokrane, B., El-Salakawy, E., El-Ragaby, A. and Lackey, T., Designing and testing of concrete bridge decks reinforced with glass FRP bars, Journal of Bridge Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 217-229, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:2\(217\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:2(217))
- [6] Jung, Woo-tai, Park, Jong-sup, Kang, Jae-yoon, Keum, Moon-seoung, and Park, Young-hwan, "Flexural

Behaviour of RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP NSM Tendon Using New Prestressing System”, International Journal of Polymer Science, Volume 2017, Article ID 1497349, 9 pages

- [7] MOLIT, Development of Precast Composite Panel and Technology for Using Water Tunnel, Ministry of Land Infrastructure and Transport, Korea, 2010.
- [8] KSA, KS M 3015: Testing methods for thermosetting plastics, Korea, 2013.

박희범(Hee Beom Park) [정회원]



- 2008년 2월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 : 경희대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 신진연구원

<관심분야>

토목구조, 구조물 유지관리, 보수·보강

박종섭(Jong-Sup Park) [정회원]



- 1995년 2월 : 명지대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 명지대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

유지관리, FRP, 구조재료

강재윤(Jae-Yoon Kang) [정회원]



- 1995년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 8월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 1995년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

<관심분야>

합성구조, 구조재료, 구조해석

정우태(Woo-Tai Jung) [정회원]



- 2000년 2월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2000년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

FRP 보강, FRC 포장, 구조재료