

CFS로 보강된 모형 RC슬래브 교량의 실험적 연구

An Experimental Study on Half Scale RC Slab Bridges Strengthened with Carbon Fiber Sheet

심종성^{*} 김규선^{**} 김경민^{***}
Sim, Jongsung Kim, Gyuseon Kim, Kyoungmin

ABSTRACT

The design methodologies for carbon fiber sheet(CFS) strengthening of RC structures are not well established yet because the structural behavior of strengthened RC structures is more complex than that of unstrengthened ones. Even though the research for the methods using CFS has been studied, the strengthening effects and structural behaviors of strengthened structures are not systematized yet. The purpose of this study is to carry out the experimental studies on three kinds of half scale RC slab bridges and to investigate the behavior of RC slab bridges from the experimental results. Typical flexural failure occurs in the non-strengthening slab like general RC slab bridges, and also the flexural failure occurs in the all area strengthened slab with sudden rip-off failure of strengthening material by punching shear. For the case of strip type strengthened slab, flexural failure occurs with rip-off of second strip at the base of loading point. Strengthening effect on the slab using CFS is that the strength is increased upto 7~15 percent and the crack pattern is changed.

1. 서론

현재 국내에서는 탄소섬유 시트(Carbon Fiber Sheet:이하 CFS)나 탄소섬유 보강판(Carbon Fiber Reinforced Plastics), 유리섬유 보강판(Glass Fiber Reinforced Plastics)등을 이용하여 구조물 내력을 증가시키는 공법에 관련된 많은 실험과 이론적 연구가 진행 중에 있다.^{2,3)} 그러나 이러한 섬유보강판(Fiber Reinforced Plastics:이하 FRP)을 이용하여 실구조물을 보강한 경우의 보강효과 및 거동 특성에 관한 국내의 연구는 체계화 되어 있지 않은 실정이다.

특히 RC구조물 중 슬래브 교량은 CFS 보강공법을 적용하는데 있어서 적합한 토목 구조물이지만 실제 구조물에 보강한 경우 거동 특성 및 보강효과에 대해서는 알려진 바가 없다. 현재 국내에서는 CFS 보강공법을 적용한 RC구조체의 거동에 관련된 많은 실험이 수행되어 왔지만, 실험실 여건상 소규모의 시험체 실험에 국한되어 왔다.^{2,3)} 그러므로 탄소섬유보강공법이 슬래브교량의 성능개선에 폭넓게 적용되기 위해서는 섬유보강판으로 보강된 실 슬래브교량의 보강효과 및 구조적 거동을 파괴실험을 토대로 파악하는 것은 필수적인 선행요건이라 하겠다. 본 연구에서는 CFS로 보강된 모형 RC 슬래브교량의 보강 전·후 거동을 고찰하기 위하여 3개의 시험체(무보강, 전면보강, 스트립보강)를 제작한 뒤 실험적 연구를 수행하였으며, 이를 토대로 모형 RC슬래브교량의 거동을 비교·고찰하였다.

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 산업과학연구소 선임 연구원

*** 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계강도가 270kgf/cm^2 인 레미콘제품을 사용하였고, 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 실험결과 276 kgf/cm^2 으로 측정되었으며, 슬럼프 값은 15cm 정도로 나타났다. 철근의 응력-변형률 관계를 알기 위하여 만능시험기(Universal Testing Machine)을 이용하여 인장 시험을 수행하였다. 시험체의 배근에 사용된 철근은 항복응력이 4600kgf/cm^2 인 D25, D16, D10 철근이다. 실험에 사용된 재료의 역학적 성질은 표 1과 같다.

2.2 시험체 제작

본 실험의 모형 슬래브교량은 왕복 2차선 RC교량의 1/2규모로 시험체를 제작하였다. 슬래브폭은 도로교 시방서의 설계차선폭인 3.6m로 하였고, 교축방향 연장은 5.4m, 지간은 5m로 하였다. 슬래브 높이는 40cm로 하여 총 3개의 시험체를 제작하였다. 철근 콘크리트 슬래브 시험체의 단면치수 및 배근상세는 그림 1과 같다. 철근량은 최대철근비, ρ_{\max} 의 31%를 배근하였고 인장철근 18D-25, 압축철근 10D-16, 배력철근 18D-16을 사용하였으며, 전단스터립으로는 D10철근을 사용하였다. 파괴실험시 지점에서 발생 가능한 파괴방지와 실험교량에 가까운 지점조건을 충족하기 위해 지점에 두께 25mm이고 $450\text{mm} \times 360\text{mm}$, $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 면적을 가진 강관을 각각 3개씩 삽입하여 타설을 실시하였다.

2.3 실험변수

본 실험에서는 모두 3개의 시험체를 제작하였으며 이중 1개를 기본 시험체로 하고 나머지 시험체에 탄소섬유쉬트 공법을 적용하여 보강을 하였다. 보강은 시험체 하면에 1점으로 전면 보강하는 방법과 1점으로 전면을 보강하였을 경우와 동등한 보강량을 가지지만 45cm의 폭을 가지는 스트립으로 2점 보강하는 방법 2가지를 적용하여 보강하였다. 본 실험에 사용된 변수를 표 2에 나타내었다.

표 1. 실험에 사용된 재료의 역학적 성질

물 성 재 료	항복강도 (kgf/cm^2)	압축강도 (kgf/cm^2)	인장강도 (kgf/cm^2)	탄성계수 (kgf/cm^2)
콘크리트	-	276	27.6	2.49×10^9
철근	4,600	-	6,540	1.97×10^9
CFS	35,500	-	35,500	2.35×10^9

표 2. 실험 변수

변수 보강여부	보강재료	보강량 (m^2)	보강층수	시험체명
무보강	-	-	-	S-CON
전면보강	CFS	15.5	1층	S-LAY1
스트립보강	CFS	15.5	2층	S-LAY2

2.4 재하 및 측정방법

본 연구에서는 교량의 구조특성상 편심하중이 거동을 지배하므로, 프레임에 고정된 유압잭을 사용하여 편심재하를 실시하였으며, 재하 하중량을 측정하기 위하여 유압잭 하부면에 로드셀을 설치하고, 보시험체의 변위를 측정하기 위하여 슬래브 하면 3곳에 변위계를 설치하였다. 그리고, 현장조건을 고려하기 위하여 양지점에 탄성받침 6개를 사용하였다. 사용된 탄성받침은 허용하중이 50tonf이고 크기가 $210 \times 300 \times 88(\text{mm})$ 이며, 이동변위량은 32mm인 기존 제품을 사용하였다. 탄성받침은 수평변위의 경우 고무의 전단 변형에 의하여 변위를 흡수하며, 회전변위에 대해서는 고무의 탄성에 의하여 이를

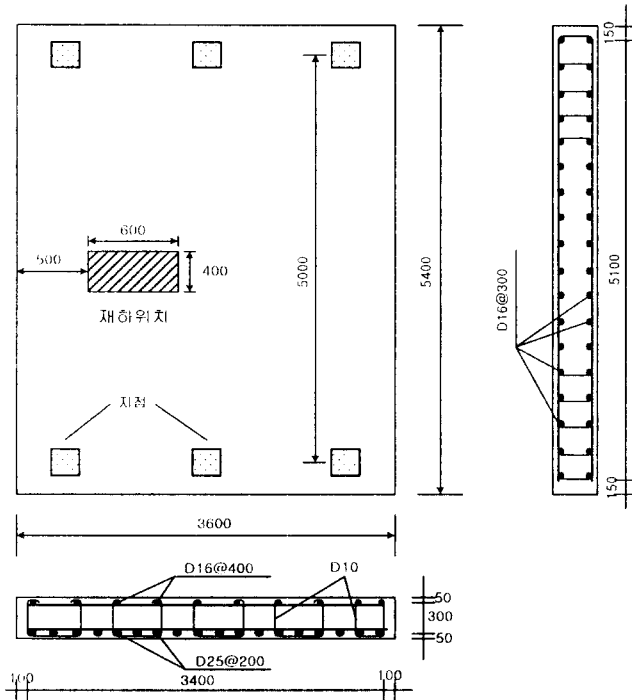


그림 1. 시험체 형상 및 제원 (단위:mm)

흡수하도록 하고 있다. 그리고 인장 철근의 항복여부를 판단하기 위해 슬래브 하면의 주철근과 배력철근에 철근 게이지를 모두 18개씩 타설전에 설치하였으며, CFS의 변형률을 측정하기 위해 각각의 CFS에 strain 게이지를 섬유 방향으로 설치하였다. 이와 같이 설치한 센서로부터 나오는 데이터를 TDS 601로 받아들여 컴퓨터를 이용하여 데이터를 정리하였다.

그림 2와 3은 철근과 보강재에 부착한 게이지의 위치를 나타내었다.

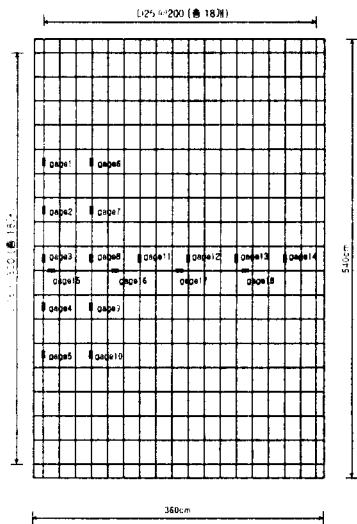
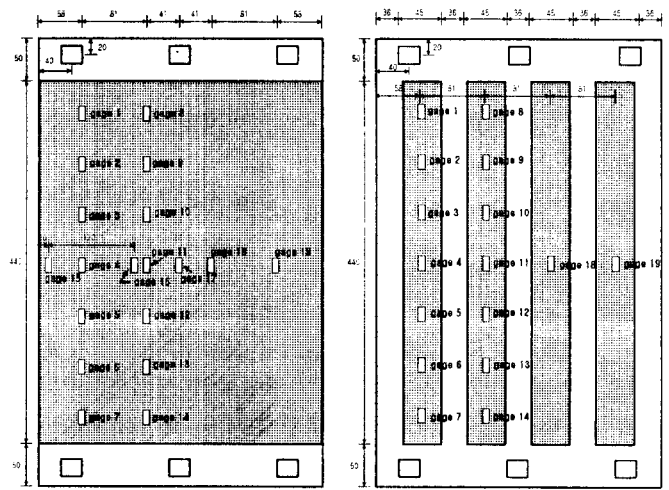


그림 2. 철근 게이지 부착위치도



(a) 전면 보강의 경우

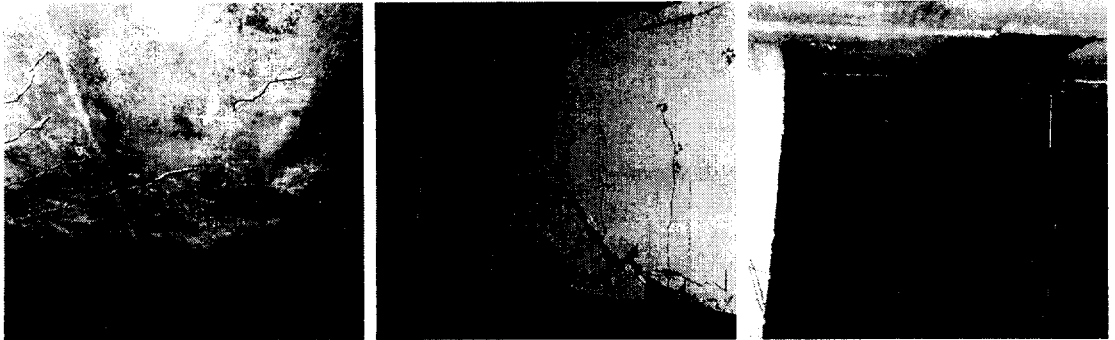
(b) 스트립 보강의 경우

그림 3. 보강재의 게이지 부착위치

3. 실험결과 고찰

3.1 파괴양상

무보강 시험체인 S-CON은 편심재하된 시험체의 측면에서 휨균열이 발전하면서 각 지점으로 균열이 진전되는 양상을 나타내며 파괴되었다(그림 4. (a)). 그러나 전면보강 시험체 S-LAY1의 경우 주철근이 항복한 이후 탄소섬유쉬트가 어느정도 내력을 분담하다가 하중재하판을 연결하는 편칭전단 균열이 발생하면서 급작스런 전단파괴가 발생하였다. S-LAY1 시험체의 초기 균열양상은 무보강 시험체인 S-CON과 거의 유사한 양상을 보였지만 종국에는 보강재가 시험체의 편칭전단으로 인하여 박리되면서 파괴되었다(그림 4. (b)). 스트립보강 시험체인 S-LAY2는 휨균열이 이후 내력이 증가되다가 무보강 시험체의 파괴하중인 100tonf 부근부터 탄소섬유쉬트가 박리되는 파괴음이 발생하기 시작하였으며 하중재하점 하면의 전단변형이 커지면서 최외측에 보강된 탄소 섬유쉬트의 중앙부에서 교축방향으로 섬유가 찢어지며 중앙부가 박리되기 시작하였다. 동시에 지점 부근의 탄소섬유쉬트도 일부 박리되었으며 결국, 하중 재하 위치의 하단에 부착한 탄소섬유쉬트 스트립이 먼저 박리파괴되고 이후 추가적으로, 내측 탄소섬유쉬트 스트립이 박리되면서 결국 시험체가 파괴되었다(그림 4. (c)).



(a) 무보강 시험체

(b) 전면보강 시험체

(c) 스트립보강 시험체

그림 4. 시험체의 파괴양상

3.2 파괴거동 비교·고찰

각 시험체의 파괴하중을 토대로 보강효과를 검토해 보면 무보강 시험체에 비해 전면 보강의 경우가 약 7%, 스트립으로 보강한 경우는 약 15%정도 보강효과가 있었다. 전면보강 시험체의 경우 편칭전단 파괴됨으로써 파괴하중만으로 스트립보강 시험체와 보강효과를 비교하는 것은 무리가 있는 것으로 판단되며 하중-처짐관계 또는 하중-변형률 관계를 토대로 한 동일한 하중하에서 강성 보강 및 처짐제어 효과 등의 비교가 필요하다고 본다.

1번 변위계는 가력점에서 가장 가까운 위치에 설치하였으며, 2번 변위계는 중앙, 3번은 최외측에 설치하였다. 각 변위계별로 하중-변위 관계를 분석해 보면 전형적인 교량의 횡방향 하중-처짐관계를 나타내고 있다. 그러나, 1축 편심재하가 이루어 졌기 때문에 2번, 3번 변위계에서 획득된 하중-처짐 관계는 시험체별로 큰 차이가 없게 나타났지만, 편심재하가 가해진 쪽의 1번 변위계에서 획득된 하중-처짐 관계를 살펴보면 기본 시험체보다는 전면보강이, 전면보다는 스트립으로 보강한 S-LAY2가 강

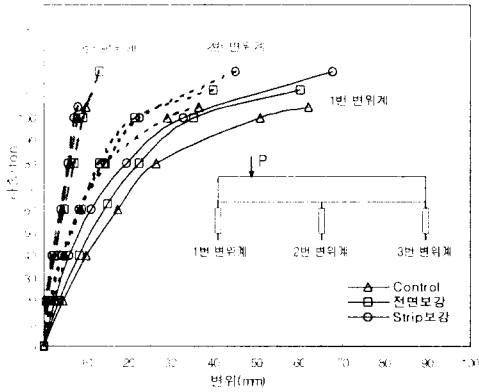


그림 5. 하중-처짐 관계

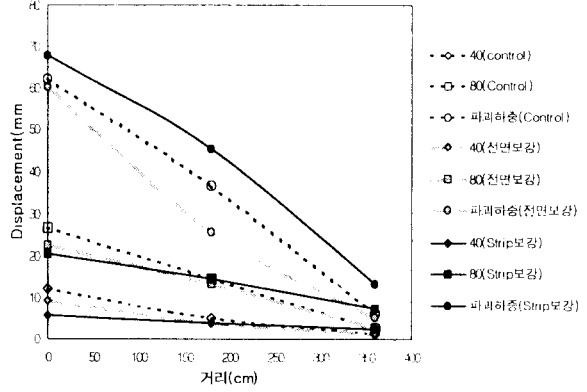


그림 6. 변위계 위치별 하중-처짐관계

상 및 보강효과가 더 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 큰 강성을 가지는 슬래브교량 특성상 시험체 전단면을 고려할 경우 보강 단면적은 동일하지만, 국부적인 편심하중이 가해지는 부위에 집중적으로 큰 변위가 발생하므로 편심하중이 가해지는 파괴지역만 고려해 볼때는 그림 5에 나타난 것과 같이 S-LAY2가 탄소섬유시트가 2겹으로 보강된 성능을 발휘하는 것으로 판단된다.

그림 6에는 무보강, 전면보강, 스트립보강 시험체의 각 하중단계와 변위관계를 변위계 위치별로 나타내었다. 하중은 40tonf, 80tonf, 그리고 파괴하중 단계별로 나누었으며, 변위계의 위치는 1번 변위계를 기준으로 거리를 나타내었다. 초기 하중단계에서는 거의 유사한 거동을 보이지만, 하중이 증가할수록 보강 시험체들이 보강재의 처짐제어 효과로 인하여 처짐이 제어되는 현상을 나타내고 있다. 특히, 편심하중이 재하되는 1번 변위계에서 측정된 처짐을 살펴보면 CFS로 인한 처짐제어 효과가 확실하게 나타나고 있다. 이러한 처짐제어 효과는 보강재 단면 자체가 구조물에 기여하는 단면2차모멘트의 증가로 인한 처짐제어 기여도 보다는 구조물에 발생하는 균열을 억제함으로써 처짐을 제어하는 효과가 더 큰 것으로 판단된다. 그림 7은 무보강, 전면보강, 스트립보강 시험체의 주철근에 부착한 게이지 중에서 횡방향 위치별 3번과 8번 게이지(중앙지간)의 하중-변형률 관계를 나타내었으며, 경향은

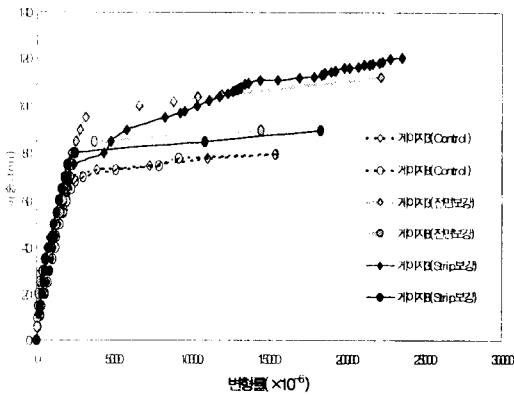


그림 7. 주철근의 하중-변형률 관계

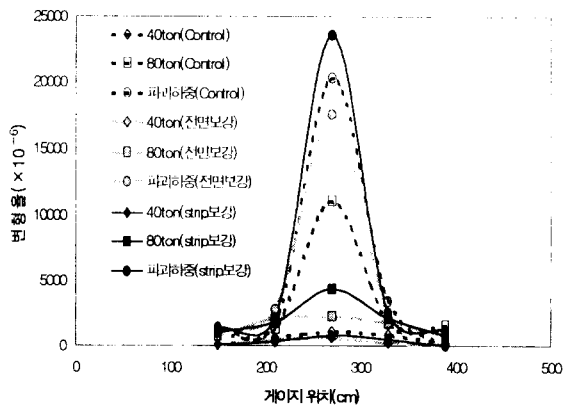


그림 8. 외측주철근의 교축방향 변형률 분포

하중-치짐선도와 유사하게 나타났다. 전반적으로 무보강 시험체에 비해 보강시험체의 철근항복 하중이 크게 나왔으며, CFS에 의해 주철근이 부담하는 하중이 감소하였기 때문인 것으로 사료된다. 그림 8은 외측주철근의 주요 하중에 대한 변형률을 게이지 위치별로 나타내었다. 가력점 하단의 게이지(3번 게이지)의 변형률이 가장 크게 나타나고 있으며, 하중단계별로 철근의 변형률이 증가하고 있음을 알 수 있다. 전면 보강의 경우 파괴하중에 대한 변형률이 무보강 시험체보다 작게 나오는데 이는 펀칭전단으로 인한 콘크리트의 전단변형에 의한 보강재의 박리때문이라고 판단된다.

4. 결론

CFS로 보강된 모형 RC슬래브교량의 보강 전·후 거동을 비교 고찰하기 위한 실험적 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) CFS를 이용하여 모형 RC 슬래브교량을 보강한 결과는 전체적으로 7~15%의 보강효과를 보였고, 전면보강과 스트립보강 시험체의 경우 모두 무보강 시험체에 비해 균열제어와 파괴하중 증가효과를 보였다. 스트립보강 시험체는 편심재하로 인해 집중하중이 작용하는 가력점 바로 밑의 스트립보강재가 2겹 전면보강 효과를 보여 1겹 전면보강된 시험체보다는 편심거동에 유리한 것으로 나타났다.
- (2) 파괴양상은 무보강 시험체의 경우 일반적인 RC 슬래브교량의 파괴형상인 휨파괴양상을 보였으며, 가력점으로부터 지점방향으로 균열이 진전되는 양상을 보였으며, 전면보강 시험체는 초기 하중하에서 휨균열이 진전되었으나, 종국에 가서는 갑작스런 펀칭전단으로 인해 보강재가 박리되어 파괴되었다. 스트립보강 시험체의 경우에는 휨파괴 양상을 보였는데, 가력점 바로 밑의 보강재가 먼저 박리되고, 그 다음 두 번째 보강재의 박리가 일어나면서 최종적으로 휨파괴되었다.
- (4) 효율적인 균열제어와 보강효과를 얻기 위해서는 배력철근방향으로의 적절한 보강이 이루어져야 하며, 이에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에 주관하는 “96 건설기술 연구개발과제”를 수행하여 얻어진 결과이며, 저자들은 건설교통부와 쌍용 ENG., SK 케미칼의 후원에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 김기봉 외 다수, “국도상 노후교량의 성능개선기법 개발에 관한 연구”, 건설교통부, 1997. 12.
2. 심종성 외 다수, “철근콘크리트 구조물의 보수·보강 신기술 개발”, 건설교통부, 1996. 10.
3. 심종성, 정영수, 윤성원, 김규선, “R/C 라멘교에 적용된 CFRP의 보강효과, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제8권, 제1호(통권 제 14집), 1996. 5, pp. 328-333.
4. Kaiser, H., “Strengthening of Reinforced Concrete with Epoxy Bonded Carbon-Fiber Plastics”, Ph. D. Thesis, ETH, Zurich Switzerland(in German), 1989.