

섬유시트로 보강된 RC 슬래브의 실험적 연구

An Experimental Study on RC Slab Strengthened with Fiber

이 지 용* · 최 형 석** · 김 성 도*** · 정 진 환****

Li, Zhi-Yong · Choi, Hyoung-Suk · Kim, Seong-Do · Cheung, Jin-Hwan

ABSTRACT

Recently, Fiber sheets have been used for strengthening the deteriorated reinforced concrete RC slabs because of its resistant capacity of corrosion and repairing works. The purpose of this study is to carry out the experimental studies on thirteen kinds of RC slabs and to investigate the behavior of RC slabs from the experimental results. Test parameters are the strengthening material, the number of sheet layer and strengthening direction. The behavior of strengthened RC slabs is represented by crack, load-deflection curves and maximum load. And the parametric study based on the nonlinear FEM analysis are performed and its results are discussed.

Keywords: *Fiber sheets, corrosion, RC slab, strengthening, load-deflection*

1. 서 론

RC 슬래브 바닥판은 차량하중에 의해 손상을 받을 뿐 만 아니라 연결된 주형의 강성 및 내하력의 저하에 의하여 바닥판의 응력분배가 변화하게 되어 바닥판의 추가적으로 손상이 발생하게 된다. 손상의 가속화에 의하여 현재 공용중인 많은 교량들에서 즉각적인 제시공 및 보수·보강을 필요로 하는 바닥판의 손상이 발견되고 있으며, 교량 바닥판에 대한 성능향상 공법의 적용 필요성이 점차 증가하고 있는 상태이다.

그러나 현재 적용되고 있는 바닥판의 설계는 일방향 해석에 의해 수행됨으로써 실제 구조물의 내하력 산정이 불가능하다. 따라서 대부분의 교량 바닥판 보강은 정확한 손상도 평가 또는 필요 내하력을 산정하지 않은 상태에서 일방향 설계에 의하여 주철근방향 보강량만 설계하고 배력철근 방향 보강량은 균열형태 등에 따라 주철근방향 보강량의 일정비율을 보강하는 방법이 적용되고 있다. 그러나 이와 같은 방법으로 보강된 많은 교량들에서 추가적인 손상이 발생하거나 보강재가 조기에 박리되는 조기파괴 현상이 발생되고 있기 때문에 구조물의 성능향상공법에 대한 불신이 증대되고 있다(오홍섭, 2001).

* 학생회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 Email: jiyong2828@naver.com

** 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 Email: ttajoo@chol.com

*** 정회원 · 경성대학교 토목공학과 교수 Email: sdkim@ks.ac.kr

**** 정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수, Email: cheung@pusan.ac.kr

본 연구에서는 철근 콘크리트 슬래브 교량 바닥판을 일방향 섬유보강제인 섬유쉬트(CFRP, GFRP)를 사용하여 표면 부착공법으로 휨 성능 향상시키는 경우의 설계변수별 보강효율성과 정적 파괴 메카니즘을 실험을 통해 분석하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

교량 바닥판 실험에 사용된 콘크리트는 압축강도는 31.7MPa로 측정되었다. 철근은 항복응력 400MPa인 D13철근이다. 사용재료의 역학적 성질은 표 1에서 나타내었다.

2.2 시험체 제작

실제 교량 바닥판과 유사한 일방향과 이방향 파괴메카니즘을 모사하기 위해 시험체의 교축방향과 교축직각방향 강성이 실제 교량과 유사하도록 제작하였다. 따라서 시험체의 교축직각방향 폭은 현재 공용중인 교량 바닥판의 폭과 유사하도록 두께는 150mm, 폭과 길이는 각각 1,900mm와 2,000mm인 시험체 단면을 산정하였고, 교축방향으로 배력철근을 배근하였다. [그림 1 참조]

표 1 재료의 역학적 성질 (MPa)

물성 재료	항복 강도	압축 강도	인장 강도	탄성 계수
콘크리트	-	31.7	3.17	2.57×10^4
철근	400	-	-	2.0×10^5
CFRP	3,550	-	3,550	2.35×10^5
GFRP	576	-	576	2.1×10^4

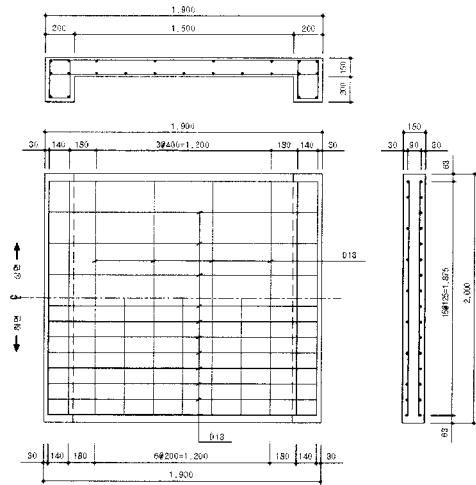


그림 1 시험체 제원

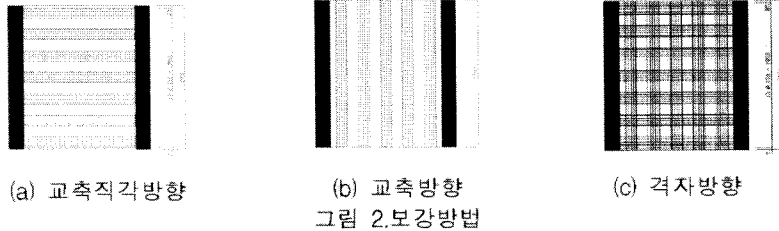
2.3 실험변수 및 보강방법

시험변수를 보강제 종류, 보강방향과 보강겹수로 하여 수행하였으며 교축직각방향(주철근 방향), 교축방향(배력철근 방향)과 격자방향(주철근 방향, 배력철근 방향)으로 보강하였다. 보강겹수는 섬유시트 1겹, 2겹의 strip 형식으로 부착하여 총 13개 시험체를 제작하였다.[그림 2 참조]

2.4 하중재하 및 측정방법

슬래브의 정적 성능평가를 위하여 정적하중재하 실험을 수행하였으며, 1,000kN 용량의

actuator(미국 MTS)를 이용하였다. 차량 하중을 모사할 수 있도록 차량 윤하중 접지면적과 같은 $200 \times 500mm$ 강판을 시험체의 중앙에 설치한 후 $2mm/min$ 방법으로 가력 하였으며 바닥판 상부에는 하중재하면적과 동일한 크기의 고무판을 두어 국부파괴를 방지하였다.



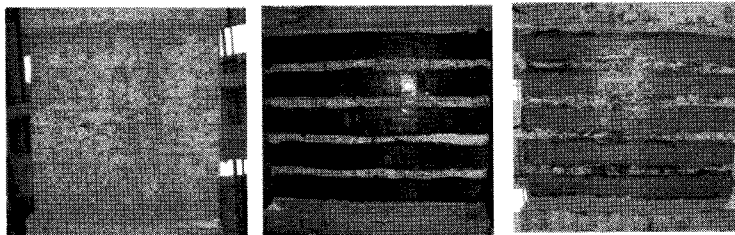
3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열 및 파괴형태

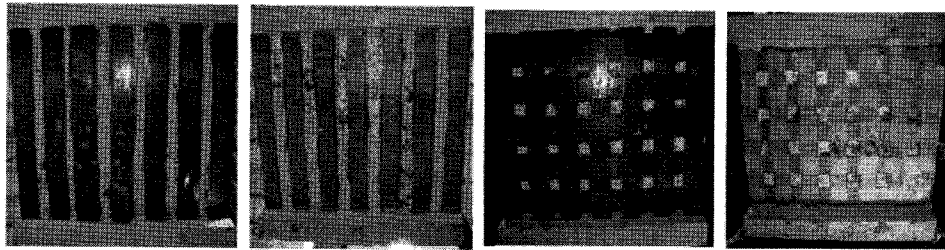
무보강 시험체의(S-CON-1) 파괴형태는 초기 재하하중에 의해 양단의 콘크리트 거더와 평행한 일방향 균열이 발생하였으며, 하중이 증가하면 균열폭이 증가하여 철근의 소성변형과 콘크리트의 부착력 감소 등에 의한 균열이 발생하였다. 특히 거더와 평행한 배력철근 방향의 강성이 감소함으로 교축 직각방향으로 새로운 균열이 발전하는 것으로 관찰되었다. 일방향 교축방향(배력철근 방향)으로 보강된 시험체(S-C1-L, S-C2-L, S-G1-L, S-G2-L)의 균열형태는 무보강 시험체의 이방향 균열성장과는 다르게 섬유부착면을 따라 균열이 계속적으로 진전되었으며, 슬래브 하면의 섬유시트와 섬유시트사이의 콘크리트 면으로 균열이 세망화 되는 복합적인 균열성장으로 나타났다.

교축직각 방향(주철근 방향)으로 보강된 슬래브시험체(S-C1-V, S-C2-V, S-G1-V, S-G2-V)는 바닥판 하면 보강재 사이에서 균열이 발생하였고, 기준 시험체와 유사한 균열형태로 관찰되었다. 교축방향(배력철근 방향)으로 보강된 시험체보다 이방향 균열이 바닥판 하면 전체에 고루 분포함으로써, 상대적으로 효율적인 균열분산 효과가 나타났다.

교축직각방향(주철근 방향) 및 교축방향(배력철근 방향)의 격자형태로 보강된 시험체(S-C1-C, S-C2-C, S-G1-C, S-G2-C)는 일방향 보강 시험체와 비교하여 상대적으로 효율적인 등방성 응력 분배에 의하여 이방향 균열이 시험체 전체에 고루 분포함으로써 효율적인 균열억제 효과가 나타났다. 재하하중이 증가하여도 주균열의 성장은 발생하지 않았으며, 균열폭을 효율적으로 제어하는 것으로 관찰되었다. [그림 3 참조]



(a) S-CON-1 시험체 (b) S-C1-L 시험체 (c) S-G2-L 시험체



(d) S-C2-V

(e) S-G1-V

(f) S-C2-C

(g) S-G1-C

그림 3

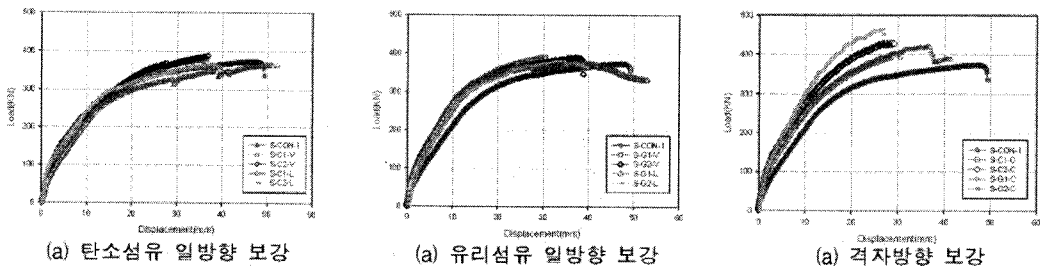
보강된 슬래브 시험체는 파괴단계에서 콘크리트 모체와 섬유시트 사의 부착-슬립에 의하여 보강재의 계면박리가 일어났으며, 파괴하중에 도달하면서 편칭 전단파괴가 일어났다. 최종파괴시 섬유시트의 파단은 발생하지 않았다.

3.2 하중-변위 관계

무보강 슬래브의 초기균열은 약 90kN에서 발생하고 주철근이 312kN에서 항복된 것으로 관찰되었다. 탄소섬유시트로 일방향 보강된 시험체의 항복하중은 기준 시험체와 거의 차이가 없고 강성의 증가는 미소하였으나 중앙부 처짐은 기준 시험체보다 약 10~13mm 가량 감소하였다. 이는 일방향으로 보강된 시험체는 강도증가는 없지만 강성은 증가하는 것으로 판단된다. 유리섬유시트로 일방향 보강된 시험체의 경우 기준 시험체에 비하여 주철근 항복하중의 변화는 없는 것으로 관찰되었다.

일방향 보강의 경우가 최대하중에 미치는 영향이 거의 없는 것은 보강된 방향에서 보강재에 의한 강성 및 내하력이 보강되지 않는 방향 보다 상대적으로 크기 때문에 균열부의 응력을 충분히 분배시켜주지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

격자방향으로 보강된 시험체(S-C1-C, S-C2-C, S-G1-C, S-G2-C)의 경우 효율적인 응력분배에 의하여 교축직각방향 보강재와 교축방향 보강재가 충분히 성능을 발휘하는 것으로 나타났으며, 이는 격자방향으로 보강된 보강재에 의해 균열이 분산되고 균열부의 응력집중현상이 최소화되었기 때문인 것으로 판단된다. [그림 4 참조]



(a) 탄소섬유 일방향 보강

(a) 유리섬유 일방향 보강

(a) 격자방향 보강

그림 4

3.3 파괴하중

시험체의 파괴하중은 표 2~3에 나타내었으며, 파괴하중을 근거로 하여 보강효과를 살펴보면 교축직각방향으로 보강된 시험체는 4.3% 이하의 보강효과가 나타나며, 교축방향으로 보강된 시험체

에서는 거의 보강효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 격자방향 보강시험체는 파괴하중에서 6.1~23.8%의 보강효과를 나타냈으며, 일방향 보강시험체와 비교하여 내하력 향상효과가 크며, 또한 격자방향 보강시험체중에서 1겹보다 2겹으로 보강된 시험체가 보다 효율적인 보강방법으로 나타났다.

표 2 파괴하중 및 보강효과(CFRP)

시험체명	항복강도		인장강도	
	하중	보강효과	하중	보강효과
S-CON-1	312KN	-	312KN	-
S-C1-V	325KN	4.2%	377KN	0.8%
S-C2-V	341KN	9.3%	388KN	3.7%
S-C1-L	292KN	-	365KN	-
S-C2-L	297KN	-	366KN	-
S-C1-C	353KN	13.1%	397KN	6.1%
S-C2-C	380KN	21.8%	397KN	14.2%

표 3 파괴하중 및 보강효과(GFRP)

시험체명	항복강도		인장강도	
	하중	보강효과	하중	보강효과
S-CON-1	312KN	-	312KN	-
S-G1-V	346KN	10.9%	190KN	4.3%
S-G2-V	339KN	8.6%	388KN	3.7%
S-G1-L	322KN	3.2%	374KN	-
S-G2-L	310KN	-	382KN	2.4%
S-G1-C	373KN	19.5%	417KN	11.5%
S-G2-C	404KN	29.5%	463KN	23.8%

4. R/C 슬래브 유한요소해석

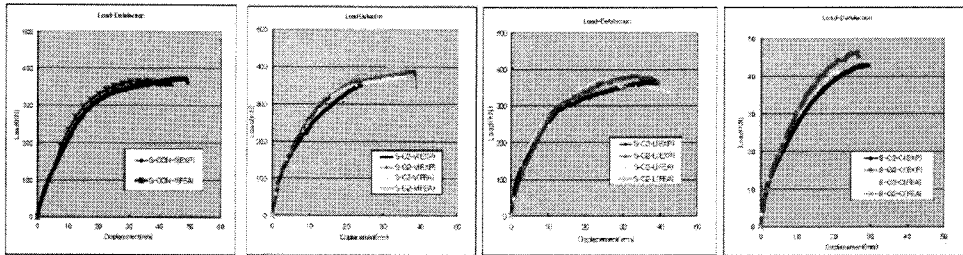
4.1 해석모델

본 연구에서 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 비선형해석을 수행하였다. 적용된 콘크리트 압축 모델은 Kent and Park의 모델을 사용하였다. 콘크리트의 인장부 콘크리트 최대압축응력의 1/9까지 선형적으로 증가하고 이후의 거동은 인장강화효과(Tension Stiffening)가 있는 것으로 하였다. 모체 콘크리트와 보강재를 접착시키는 에폭시는 접착 요소(cohesive element)를 사용하여 모델링하였다. 철근은 변형률 경화를 고려한 비탄성모델을 적용하였으며, 보강재는 항복응력까지 선형적으로 증가하고 이후에는 파단되는 완전 취성재료로 가정하였다. 교량 바닥판 시험체의 해석은 3차원 solid요소와 truss요소로 사용하였으며 보강재는 shell 요소를 사용하여 콘크리트와 접착하도록 모델링하였다.

4.2 실험결과 및 FEM해석결과 비교

무보강시험체인 경우 시험체 콘크리트 균열하중인 100KN까지는 시험결과와 거의 같고 균열하중이후의 곡선도 시험결과와 유사한 것으로 나타나 본 연구에서 적용된 모델이 실제 시험체 해석에 적합한 것으로 판단된다. 보강시험체의 경우에도 실제시험체의 거동과 비슷한 것으로 관찰되었으나 단 균열하중이후의 해석에 의한 강성이 상대적으로 크게 나타났다. 최대하중 작용시 처짐은 다소 조금 작게 평가되는 것으로 나타났다.

이것은, 시험체의 내측 거더 지점부에서 응력집중이 발생하여 콘크리트의 국부파괴가 발생하였으며 이로 인한 실제 시험체의 강성이 저하되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 해석기법은 콘크리트 모체와 보강재 사이의 부착이 완벽하다는 가정하에 FEM 해석을 수행해서 얻은 결과이며, 실험은 항복하중이후 연성구간에서 슬래브 하면에 하중 집중부에 응력 집중현상으로 콘크리트 모체와 섬유시트 사이의 계면부착파괴가 진행되므로 해석해의 결과와 시험체의 처짐은 차이가 있는 것으로 판단된다. 해석에 의한 최대하중을 비교한 결과 0.96~1.04로 해석결과는 잘 일치한 것으로 나타났다. 그림 5과 표4에 실험과 해석결과를 비교하였다.



(a) 기준시험체 (b) 교축직각방향보강 (c) 교축방향 보강 (d) 격자방향 보강

그림 5

표 4 실험결과와 FEM해석결과 비교

시험체명	최대하중(KN)		실험결과/ FEM해석결과
	실험결과	FEM해석결과	
무보강시험체	374	361	1.04
S-G2-V	388	392	0.98
S-G2-L	382	375	1.02
S-G2-C	463	478	0.96
S-C2-V	388	372	1.04
S-C2-L	366	364	1.00
S-C2-C	427	415	1.03

5. 결론

본 연구에서는 바닥판 슬래브의 성능향상을 위해 섬유시트로 보강된 총 13개 교량 바닥판 시험체의 정적구조성능평가를 수행하였다. 격자방향으로 보강한 시험체에서는 효율적인 등방성 응력분배에 의하여 이방향 균열이 시험체 전체에 고루 분포함으로써 효율적인 균열억제 효과가 나타난 것으로 판단된다. 보강시험체는 파괴단계에서 콘크리트 모체와 섬유시트사이의 계면부착파괴가 일어났으며 보강재의 파단은 발생하지 않았다. 이는 보강재가 충분히 성능을 발휘하지 않는 것으로 계면박리 파괴를 방지하기 위해, 정착장치를 설치하면 보강효과가 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다. 파괴하중의 경우에는 일방향으로 보강한 시험체에서 4.3%이하의 보강효과가 나타났으며, 보강재와 보강접수에 상관없이 보강효과가 미미한 것으로 판단된다. 격자방향으로 보강한 시험체는 6.1~23.8%의 보강효과가 나타났으며, 보강량이 증가할수록 보강효과가 향상되는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 박정용 (2006) 단조 반복하중 하의 탄소섬유시트 보강 RC보의 거동에 관한 연구, 구조물진단학회지, 10(4), pp183~190.
- 심중성 (2001) 일방향 섬유로 성능향상된 교량 상판의 파괴거동 및 항복선 이론을 적용한 해석적 연구, 한국콘크리트학회 봄 학술발표회논문집, pp81~86
- 오홍섭 (2001) 탄소섬유시트로 성능개선된 교량 바닥판의 보강설계기법, 한양대학교 대학원.
- 장준환 (2000) 섬유-강관 복합재료(GSP)로 보강된 RC보의 진단거동에 관한 실험적 연구, 구조물진단학회지, 11(1), pp130~140.