

탄소섬유 Rod로 성능향상된 교량 바닥판의 피로거동

The Fatigue behavior of strengthened bridge deck with Carbon Fiber Rod

심종성^{*} 김민수^{**} 김영호^{***} 주민관^{***}
Jong-Sung Sim Min-Su Kim Young-Ho Kim Min-Gwan Ju

ABSTRACT

The use of carbon fiber rods is a promising technology of increasing flexural and shear strength of deficient reinforced concrete members. The purpose of this experimental study is to investigate the fatigue behavior and strengthening effects of the strengthened bridge deck with isotropic and orthotropic carbon fiber rod. This study shows a fatigue loading, compliance and S-N Curve between strengthened isotropically and orthotropically. Then estimate the effective fatigue behavior of RC slab using composite rods that are inserted in high special purposed polymer mortar.

1. 서론

그 동안 사용되어온 교량바닥판의 보강공법으로는 강판접착공법 그리고 최근에 각광받고 있는 섬유쉬트 접착에 의한 보강공법이 주를 이루고 있으나 이는 기존 구조체와의 일체성, 부착된 외부의 물리 화학적인 변화나 화재시 급속한 손상에 따른 강도저하의 문제점 등이 발생할 수 있다.

최근 기존 접착공법에서 발생가능한 문제점들을 해결할 수 있도록 바닥판 하면에 앵커볼트를 고정 한 후 탄소섬유 Rod(이하CFR)로 보강한 뒤 폴리머 몰탈을 타설하여 부식에 대한 보강재 피복효과 및 부재와의 일체성을 확보하고 단면중설에 대한 구조적 향상을 도모하는 탄소섬유 Rod 보강공법을 제시하였으며 그 정적실험에서 충분한 보강효과를 얻은 것으로 평가되었다.

따라서 본 연구에서는 정적실험에 대한 CFR보강의 피로 성능 효율성 평가를 위해 CFR을 각각 등방(SI) 및 이방성(SO)으로 보강한 후 재하반복횟수에 따른 하중-변위 관계, 최대변위 관계 그리고 S-N 곡선을 이용하여 피로성능 효과를 분석하였다.

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

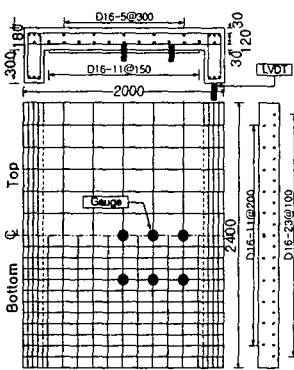
*** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

2. 실험

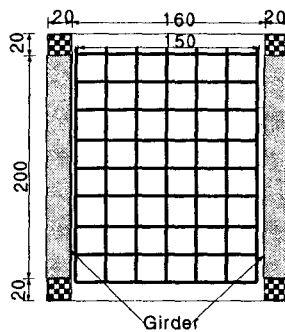
2.1 실험변수 및 재원

본 연구에 사용된 콘크리트는 재령 28일 강도가 240kgf/cm^2 인 레미콘 제품을 사용하였으며 주철근과 배력철근은 항복강도 3000kgf/cm^2 인 D16철근을 사용하였다. 하중가력은 차량 후륜의 접지면적과 동일한 $25 \times 50\text{cm}^2$ 의 재하판을 사용하였으며 변위측정계는 교량 바닥판의 중앙부, 1/4, 단부 그리고 거더에 설치하였다. 또한 상하부 주철근과 배력철근에 변형률계이지를 부착하여 하중 재하에 대한 변형률을 측정하였다.

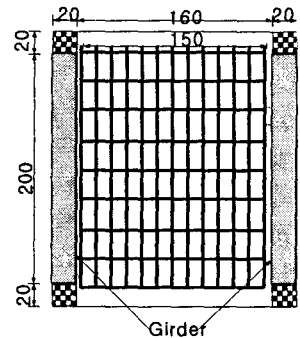
또한 사용하중 재하시 피로거동을 고찰하기 위하여 정적재하 시험의 파괴강도를 기준으로 60%, 70%, 80%의 하중을 각각 등방 및 이방성으로 보강된 시험체에 재하하였다.



(a) 시험체 재원



(b) SI 보강 시험체



(c) SO 보강 시험체

그림 2.1 시험체 재원 및 보강타입

표 2.1 시험체의 실험변수

구분	시험체명	반복 재하하중(tonf)	하중수준	정적시험시 파괴하중
등방보강	SI60	43	파괴하중의 60%	71.7tonf
	SI70	50	파괴하중의 70%	
	SI80	58	파괴하중의 80%	
이방보강	SO60	43	파괴하중의 60%	72tonf
	SO70	50	파괴하중의 70%	
	SO80	58	파괴하중의 80%	
무보강	CR-I-L40	26	파괴하중의 40%	64tonf
	CR-I-L70	45	파괴하중의 70%	
	CR-I-L90	58	파괴하중의 90%	

3. 실험결과

3.1 파괴형태

피로실험 결과 등방 및 이방성으로 보강된 시험체 모두 가력 초기에는 일방향 거동에 의한 균열이 발생하였고 하중반복횟수가 증가함에 따라 내력의 재분배가 진행되면서 배력철근 방향인 일방향 균열이 주철근 방향인 이방향 균열로 진전되어 점차 세망화되는 것으로 관찰되었다.

3.2 하중반복횟수에 따른 하중-증앙변위 관계

그림 3.1은 본 피로실험의 결과로서 하중반복에 대한 증앙변위와의 관계를 나타내는 그래프이다. 하중수준 60%를 제외한 모든 시험체에서 편칭전단파괴가 발생하였고, 초기재하시에는 다소 큰 비율의 영구변위가 발생하였으나 하중반복이 증가함에 따라 6~8mm까지의 비교적 일정한 영구변위가 측정되었다. SI60 시험체의 경우 100만회에 거의 근접한 피로횟수를 발휘했으며 영구변위는 0.15mm로 측정되었다. SO60시험체의 경우 영구변위가 각각 2.4mm와 4.27mm로 측정되었으며 그때 파괴변위는 각각 15.15mm와 17.96mm로 측정되었다. 다음 표 3.1은 각 시험체별 80만, 1만 1000회 때의 최대변위를 나타내는 표이다.

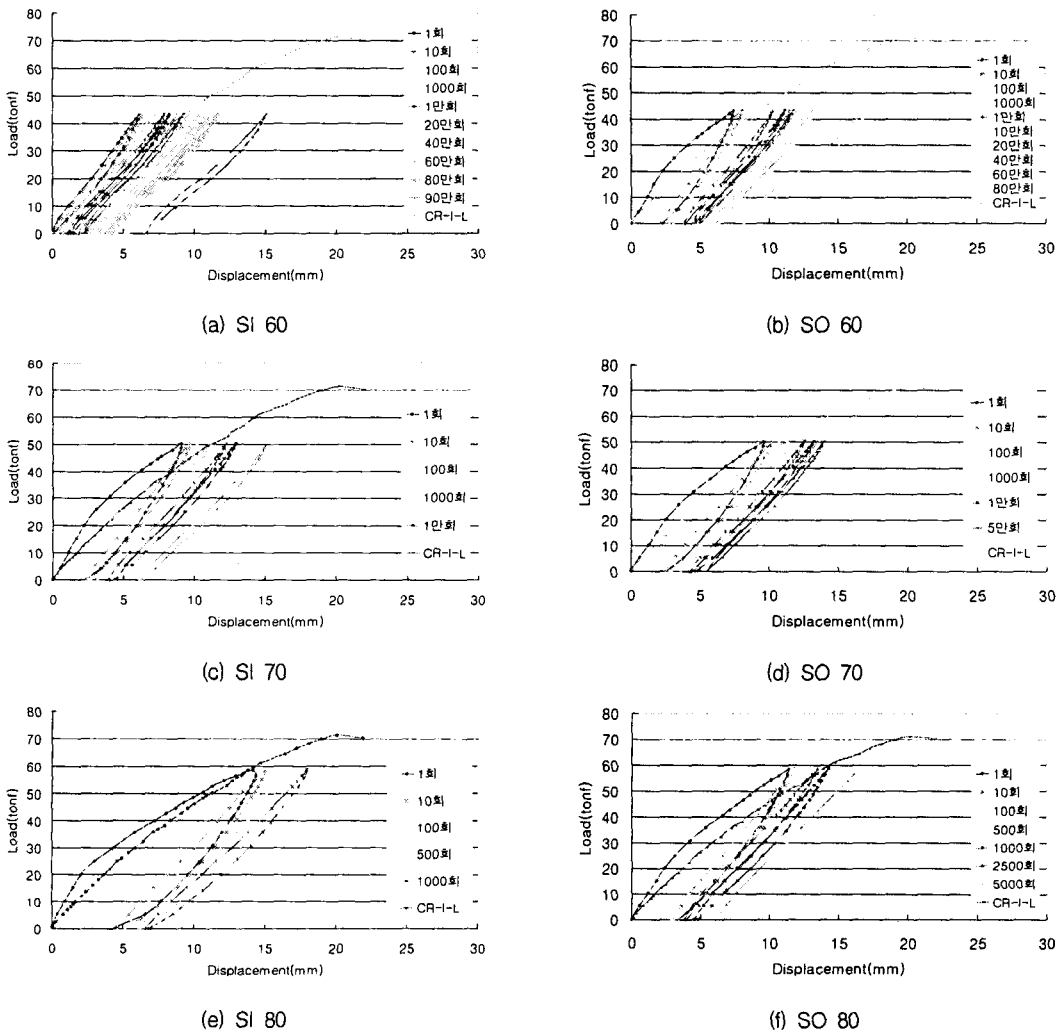


그림 3.1 시험체 변수별 하중-변위 곡선

3.2 반복횟수에 따른 컴플라이언스(Compliance) 변화

컴플라이언스는 균열신장의 함수로서 강성의 역수로 표현된다. 그림 3.2는 등방 및 이방성으로 보강

된 시험체의 컴플라이언스 변화를 나타낸 그래프이다. 두 시험체 모두 초기반복하중에서는 급격한 컴플라이언스의 변화를 보였으나 이후 강성이 점차 안정화됨을 나타냈다. 그러나 SI 시험체의 경우 10000회에서 갑작스런 컴플라이언스 증가를 보였다. 반면 SO시험체의 경우 기울기가 완만하고 일정값으로 수렴함으로써 SO시험체가 SI시험체보다는 균열신장제어측면에서 효과적임이 사료되었다.

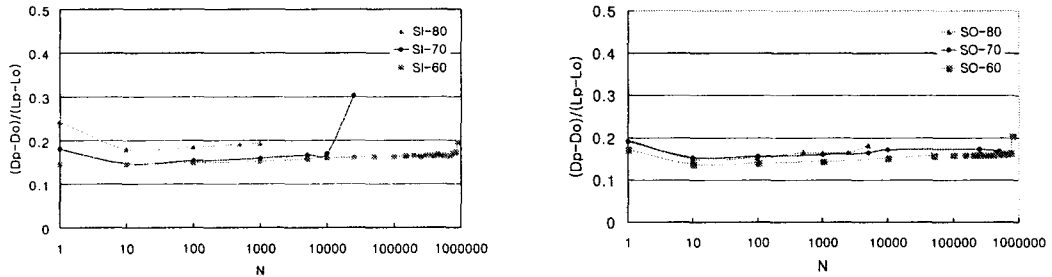


그림 3.2 등방 및 이방성 시험체의 컴플라이언스 변화

3.3 탄소섬유 Rod로 보강된 교량 바닥판의 실험적 피로수명 예측

그림 3.3은 등방 및 이방성 보강 시험체에 대한 S-N Curve를 나타낸다. 각 시험체의 회귀분석식은 다음과 같다.

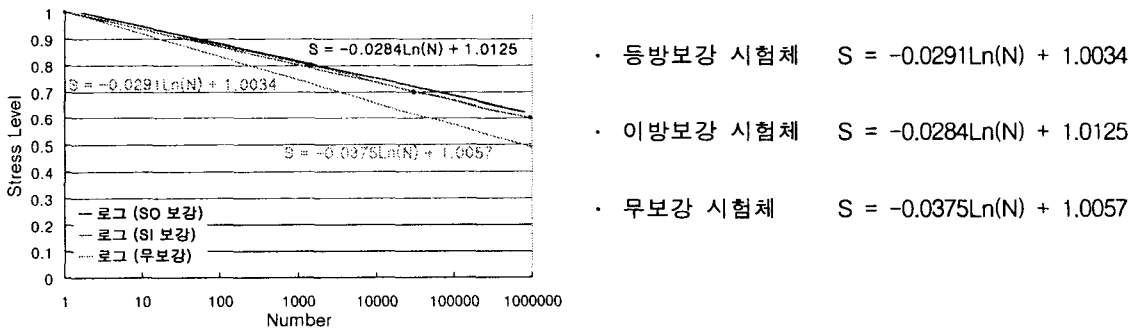


그림 3.3 S-N Curve

피로강도의 정의는 일반적으로 100만~200만회 사이에서의 Stress Level로 정의한다. 백만회를 기준으로 SO시험체의 경우 피로강도는 파괴하중의 62%로서 약45tonf로 나타났고 SI시험체는 43.5tonf로 그리고 무보강 시험체는 31.2tonf로 나타났다. 따라서 탄소섬유 Rod로 보강된 시험체는 무보강 시험체에 비해 약14tonf 정도 높은 피로성능을 보였으며 그 중 SO 보강 시험체가 SI 보강 시험체보다 2.5tonf 정도의 다소 높은 피로성능을 나타내었다.

3.3 반복횟수에 따른 에너지 소산비율

비탄성 구조체로서의 콘크리트 구조물은 탄성한계 이상의 하중을 받으면 영구변위를 일으키게 되고 하중의 증가 및 감소시 서로 다른 곡선을 그리며 거동하게 된다. 이때 하중증가 및 감소의 P-L 곡선상의 면적의 차를 이용하여 구조물의 손상정도를 파악할 수 있다. 그림 5.에서 G값으로 대비되는

에너지의 소산은 균열의 발생, 균열신장, 균열폭의 증가, 영구변위 그리고 구조체내에서의 항복 등에 기인하며 이를 통하여 구조물의 손상정도를 표현할 수 있다. 본 연구에서는 각각의 시험체에 대해 반복횟수에 따른 $P-\Delta$ 곡선상의 면적을 적분함으로써 G값을 구하여 반복횟수의 증가에 따른 에너지 소산량을 평가하였다. 또한 총 에너지 소산량은 그림 6.의 그래프의 면적을 적분함으로써 구하였다.

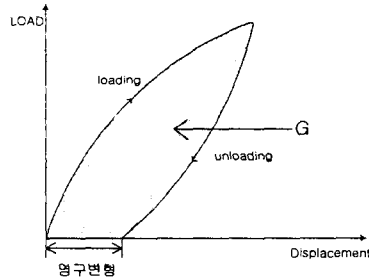
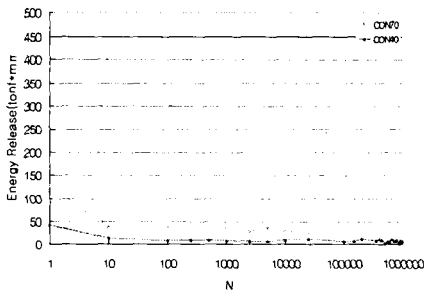
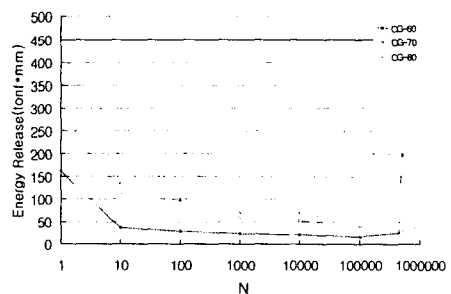


그림 6. 에너지 소산량(G)의 정의

모든 시험체가 초기에 큰 에너지 소산을 보이다가 반복횟수가 증가할수록 일정한 비율로 에너지가 소산됨을 알 수 있다. 무보강 시험체의 경우보다 보강 시험체의 경우가 에너지 소산량이 더 큰 것을 알 수 있다. 같은 응력수준인 CON70 시험체와 CG70의 시험체를 비교해보면, CG70 시험체의 경우 훨씬 큰 에너지 소산량이 있음을 알 수 있다. 이는 CON70 시험체의 경우 하중이 한곳에 집중이 되어 효율적인 하중 분배가 이루어지지 않았던 반면, CG70 시험체의 경우 하중이 분배가 잘 이루어 졌고 CON70 시험체보다 더 큰 변위가 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 하중의 분배가 잘 이루어짐으로써 균열의 진전도 다른 양상을 나타내었다. 무보강 시험체의 경우 주균열이 크게 발생한 반면, 보강 시험체의 경우 주균열의 크기가 줄어들고 미세균열의 발생이 증가하였다. 에너지 소산 측면에서 보강효과를 살펴보면, 무보강 시험체의 에너지 소산량에 비하여 보강시험체는 100% 이상의 에너지 소산량이 증가하였음을 알 수 있다. 격자형 탄소섬유 보강재에 의해 증가한 에너지 소산량은 약 100%이다.



(a) 무보강 시험체(CON)



(b) 보강 시험체(CG)

그림 7. 하중반복횟수에 따른 에너지 소산비율

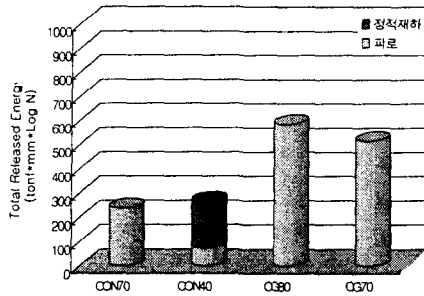


그림 8. 반복재하 종료시까지의 전체 에너지 소산량(G total)

표 1 시험체별 전체 에너지 소산량

Specimen	CON70	CON40	CG80	CG70
G total (tonf · mm · N)	239.6187	266.234	585.527	516.760

4. 결 론

본 연구에서는 다음과 같은 결론은 얻을 수 있다.

1. 하중변위선도에서는 각각의 시험체가 거의 유사한 거동을 보였다.
2. 컴플라이언스 변화량을 살펴보면 SI시험체는 각 하중수준별 그래프가 비교적 고르지 못한 반면 SO 시험체는 완만한 기울기를 유지하며 일정한 값으로 수렴함을 나타내었다. 이로서 SO시험체가 SI 시험체에 비해 균열신장제어 측면에서 효과적임이 입증되었다.
3. 탄소섬유 Rod로 보강한 시험체는 무보강 시험체에 비해 약 30%의 피로성능 향상효과가 있었으며 이 중 SO시험체가 SI 시험체에 비해 3.3%의 높은 피로성능을 나타내었다. 이 실험결과로서 등방보강보다는 적절한 이방성 보강이 효율적임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 (주)리폼시스템에서 주관하는 “고강도 폴리머 몰탈 및 섬유Rod를 적용한 콘크리트 구조물의 정·동적 시험에 의한 성능향상 효과분석”을 수행함으로써 얻어진 결과이며, 저자들은 (주)리폼시스템의 후원에 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. 심종성, “탄소섬유쉬트 보강공법을 적용한 콘크리트 구조물의 정적 및 피로거동 연구”, 한국카본.
2. 심종성, 오홍섭 외 1인 “일방향 섬유로 성능향상된 교량 상판의 파괴거동 및 항복선 이론을 적용한 해석적 연구” 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 13권 1호, 2001년 5월 pp 81-86.
3. 심종성, “콘크리트 교량 바닥판에 대한 보수·보강 공법의 효과분석 연구”, 한국도로공사.
4. Laura De Lorenzis and Antonio Nanni, “Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods, ACI Structural Journal, Jan.-Feb. 2001.