

격자형 탄소섬유로 성능 향상된 교량 바닥판의 피로 성능 효과 분석

An Investigation of the Strengthening Effects of the Strengthened Bridge Deck with Grid Typed Carbon Fiber Plastic for Fatigue Loading

심 종 성^{*} 오 흥 섭^{**} 유 재 명^{***} 최 광 민^{***}
Sim, Jong Sung Oh, Hong Seob Yu, Jae Myung Choi, Kwang Min

ABSTRACT

Considerable research was done to study the fatigue behavior of the reinforced concrete bridge deck which is strengthened by carbon fiber. The purpose of this experimental study is to investigate the fatigue behavior and strengthening effects of the strengthened bridge deck with grid type carbon fiber plastic. The results of this study show that the displacement and the total released energy of strengthened bridge deck are greater than the case of unstrengthened bridge deck. By strengthening of bridge deck, applied load is so distributed on whole deck member that crack concentration is efficiently controled.

1. 서론

최근 노후화된 교량 바닥판의 성능향상과 차량하중 증가에 의한 성능향상을 위하여 FRP 부착 보강공법과 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 이들 연구의 대부분이 정적인 구조시험 및 성능향상에만 국한되었다⁽⁴⁾. 그러나 실제 교량 바닥판의 거동은 반복하중으로 인한 피로누적 손상에 의해 발생하므로, 적절한 보강 공법을 제안하기 위해서는 피로 시험결과를 통한 구조거동 분석이 수행되어야 한다⁽¹⁾.

따라서 본 연구에서는 격자형 탄소섬유를 사용하여 성능 향상을 실시하였으며, 이를 피로성능 시험을 실시하였다. 시험체는 도로교 구조설계기준에 준하여 현재 사용되고 있는 실제 교량과 유사하게 제작하였다. 또한, 재하반복횟수에 따른 하중-변위 관계, 에너지소산비율등을 이용하여 탄소섬유 격자망 보강제로 성능향상된 교량 바닥판의 피로성능개선효과를 분석하였으며, S-N선도를 이용하여 성능향상된 교량 바닥판의 피로강도를 제시하였다.

2. 실험

본 연구에서는 사용하중 재하시의 피로거동을 모사하기 위하여 정적구조성능시험의 결과를 이용

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

** 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사후 연구원

*** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

하여 기준시험체 파괴하중의 크기를 고려하여 재하하중을 선정하였다. 선정된 반복하중의 크기는 기준 시험체(CON)의 경우 파괴하중의 90%, 70%와 40%의 하중을, 보강시험체(CG)의 경우 파괴하중의 80%, 70%와 60%의 하중을 시험체에 적용하였다.

시험체 사용한 콘크리트는 재령28일 압축강도가 240kg/cm²으로 설계된 레미콘제품을 사용하였으며, 슬럼프값은 12cm로 측정되었다. 주철근과 배력철근은 철근의 항복응력이 3000kg/cm²인 D16 철근을 배근하였다. 시험체는 현재 공용중인 내하력 DB18의 교량과 동일한 강성을 갖도록 도로교 구조설계기준에 의하여 설계, 제작하였다. 정적시험시 하중가력은 차량 후륜의 접지면적과 동일한 25×50cm의 재하판을 사용하였으며, 변위측정계는 교량 바닥판의 중앙부, 1/4, 거더 그리고 단부에 설치하였으며, 상하부 주철근과 배력철근에 변형률게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 보강은 바닥판 하면에 격자형 탄소섬유를 고정된 후 폴리머 모르타를 타설하여 단면 증설과 동시에 구조적 효율성을 획득하고자 하였다.

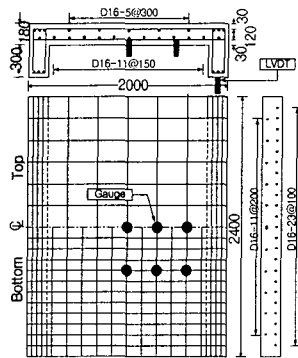


그림1. 시험체 제원(mm)

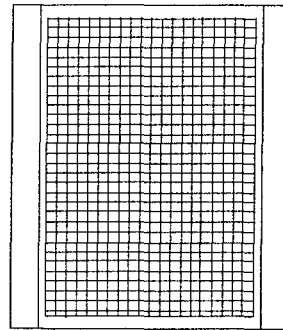


그림2. 시험체 보강

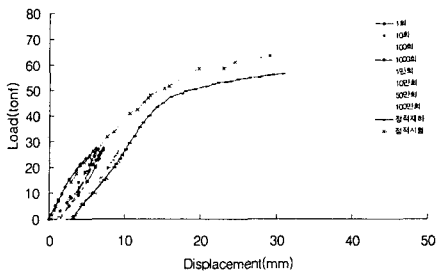
3. 실험결과

피로시험 결과에서는 하중반복횟수가 적은 경우 일방향 거동에 의해 외력에 저항하던 시험체는 하중반복횟수가 증가됨에 따라 균열의 개수가 증가하였고 균열폭이 증가하여 점차 이방향 거동을 보이는 것으로 나타났다. 보강 시험체의 피로시험 결과 무보강 시험체와 유사하게 배력철근 방향의 균열이 발생한 후, 균열이 진전되면서 주철근 방향의 균열이 발생하였다.

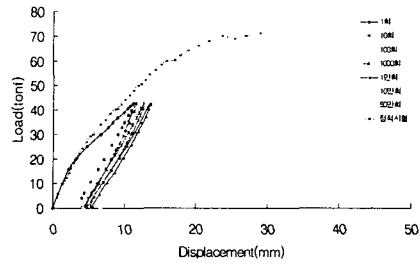
3.1 하중반복 횟수에 따른 하중-중앙변위 관계

모든 시험체에서 초기하중재하 이후에 큰 영구변위가 발생하였으나, 이후 반복재하에 의한 영구변위는 비교적 작은 비율로 증가하는 것으로 나타났다. CON40 시험체의 경우에는 100만회까지 재하후 정적재하시켜 시험체를 파괴시켰다. 이때의 처짐은 31mm로 나타났다. CON70 시험체의 경우 피로 편칭전단파괴 되었으며, 파괴시의 변위는 약 17mm 로 나타났다. CON90 시험체는 약 38mm에서 파괴되었다. CON40의 정적재하시 소성단계로 넘어갈때의 변위가 약 17mm로 CON70의 파괴시와 CON90의 소성단계시의 변위와 유사한 것으로 나타났다. 무보강 시험체의 정적시험시 소성거동 시작변위가 약 20mm인 것으로 나타나, 무보강 시험체의 경우 정적 시험에서보다 피로시험에서 파괴시의 변위가 더 작은 것으로 나타났다. 반면, 보강 시험체의 경우 정적시험에서 보다 피로시험에서 더 큰 변위에서 파

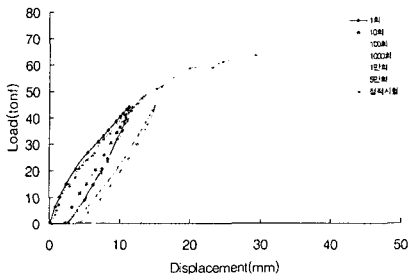
괴가 되는 것으로 나타났다. CG60 시험체의 경우 거더부의 철근이 바닥판보다 먼저 항복 하면서 시험체가 파괴되었다. 이는 재료적인 결함이 원인 것으로 사료된다. 정상거동을 하였다면 100만회까지 반복재하가 가능하였을 것으로 사료된다. 보강 시험체의 경우 파괴에 임박함에 따라 영구변위의 증가가 뚜렷하게 나타났다.



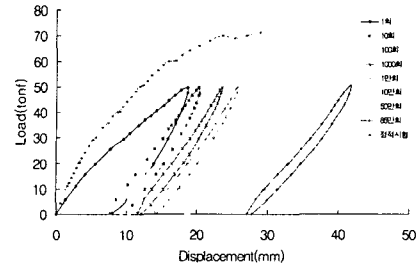
(a) CON40(100만회후 정적재하)



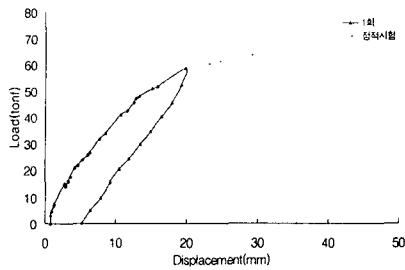
(a) CG60(Nf=501,982)



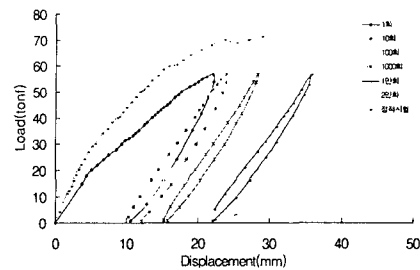
(b) CON70(Nf=68,834)



(b) CG70(Nf=864,408)



(c) CON90(Nf=10)



(c) CG80(20,023)

그림3. 무보강 시험체의 하중-중앙변위 관계

그림4. 보강 시험체의 하중-중앙변위 관계

3.2 하중반복횟수에 따른 최대변위의 변화

CON70 시험체의 경우 초기최대 변위가 약 12mm 정도로 크게 나타났으며, 이후 점차적으로 최대변위가 증가하면서 파괴되었으며, 약 5,000회 이후 최대변위 증가량이 커짐을 알 수 있었다. CON90 시험체의 경우 초기 재하후 변위가 급격히 증가하면서 파괴되었다. CG70 시험체의 경우 초기 최대변위 발생 후 약 1000회까지 증가량이 크지 않았으나, 그 후 최대변위 증가량이 커지면서 꾸준히 증가하였다. CG80 시험체의 경우 약 1000회 까지 최대변위 증가량이 일정하다가 그 후 최대 변위가 급격히 증

가하면서 약 2만회에서 파괴되었다. 파괴에 임박함에 따라 보강을 한 경우 변위의 증가가 뚜렷하게 나타났다.

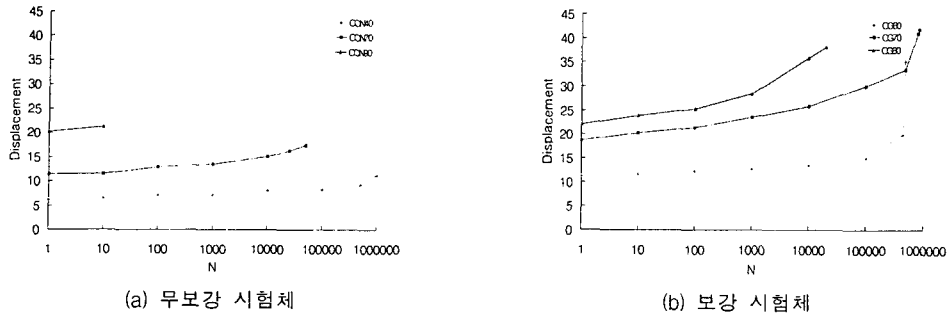


그림 5. 하중반복횟수에 따른 최대변위 관계

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 $P-\Delta$ 곡선상의 면적의 차를 이용하여 구조물의 손상정도를 파악할 수 있다. 그림 5에서 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 6의 그래프의 면적을 적분함으로써 구하였다.

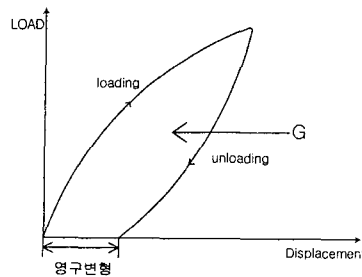


그림 6. 에너지 소산량(G)의 정의

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 소산측면에서 보강효과를 살펴보면, 무보강 시험체의 에너지 소산량에 비하여 보강시험체는 100% 이상의 에너지 소산량이

증가하였음을 알수 있다. 격자형 탄소섬유 보강재에 의해 증가한 에너지 소산량은 약 100%이다.

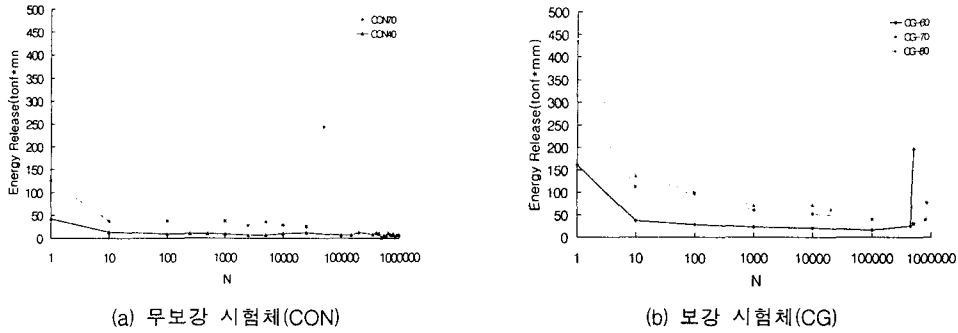


그림 7. 하중반복횟수에 따른 에너지 소산비율

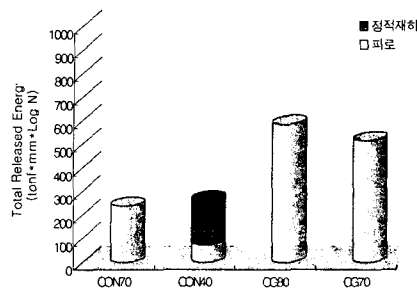


그림 8. 반복재하 종료시까지의 전체 에너지 소산량(G total)

표 1. 시험체별 전체 에너지 소산량

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

3.4 S-N선도 및 피로강도

기준 시험체와 보강 시험체의 피로수명을 예측하기 위해 피로실험을 수행하였다. 실험결과 기준 시험체와 보강 시험체의 S-N 선도에 의한 회귀분석식은 다음과 같다.

기준 시험체 : Stress Level(S) = -5.2113 log(N) + 95.221

보강 시험체 : Stress Level(S) = -6.1155 log(N) + 106.31

그림 8은 기준 시험체와 보강 시험체의 S-N 선도이다. 일반적으로 100만회~200만회에서의 S-N 선상의 Stress Level을 피로강도로 정의 하는데, 임의의 구조물이 피로강도 이하 반복하중을 받는 경

우 그 구조물은 피로에 대하여 안전한 것으로 밝혀진바 있다. 본 실험에서의 피로강도는 기준 시험체의 경우 62.38%~63.95%이고 보강 시험체의 경우 67.75%~69.59%정도로 나타났다. 따라서 탄소섬유 격자망을 이용하여 보강할 경우 피로강도는 약 5~6% 증가하는 것으로 나타났다.

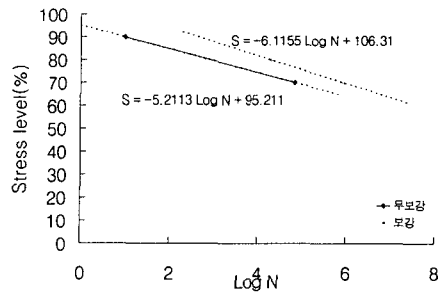


그림 9. 기준 및 보강 시험체의 S-N Curve

4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유 격자망으로 보강된 교량 바닥판의 피로성능을 검증하기 위하여 교량 바닥판 시험체에 대한 피로시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

하중-변위 선도에서 보강을 실시한 경우 더 큰 변위를 보임으로써 무보강에 비해 연성적인 거동을 함을 알 수 있었다. 또 최대 변위 분포에서 파괴에 임박함에 따라 영구변위가 급격히 커져 갑작스런 취성파괴를 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 에너지 소산은 보강을 한 경우 총에너지 소산이 더 큰 것을 알 수 있는데 이는 격자형 탄소섬유가 하중을 적절히 분배함을 보여준다. 총 에너지 소산정도가 약 100%정도 증가하였다. 피로강도의 경우 약 5~6%정도 증가하여 피로에 대해 충분한 보강 효과가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 MS-ASIA에서 주관하는 “NEF-MAC 보강공법을 적용한 콘크리트 교량 상판의 동적 시험에 의한 성능향상 효과분석”를 수행함으로써 얻어진 결과이며, 저자들은 MS-ASIA와 콘크리닉의 후원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 심종성 외 2명, “CFS로 성능 향상된 교량 상판의 피로거동 특성”, 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제 12권 2호, 2000. 11. pp. 701~704.
2. 심종성, “콘크리트 교량 바닥판에 대한 보수·보강 공법의 효과분석”, 한국도로공사, 2000.
3. 오홍섭, “탄소섬유유틸트르 성능개선된 교량 바닥판의 보강설계기법”, 한양대학교 대학원, 2001. 06.
4. 정영수, 김시봉, 이광명 외 5명, “국도상 노후교량의 성능개선기법 개발에 관한 연구”, 건설교통부, 1997. 12.