

반복하중을 받는 CFS로 보강된 R/C 보의 휨 강성 평가

Estimation of Flexural Rigidity of R/C Beam
Strengthened with CFS subjected to repeated loadings

김 충 호*
Kim, Chung-Ho

장 종 완**
Jang, Jong-Wan

Abstract

The deterioration of the flexural capacity by progressive crack and over deflection in R/C bridges is developed actually from the dynamic repeated loading due to vehicle traffics. Such a fact suggest a necessities of confirmation and estimation of the data acquired from monotonic incremental loading test. Therefore, this study carry out the monotonic incremental loading test and dynamic repeated loading test in R/C beams strengthened with CFS. By dynamic repeated loading test, the experiments confirmed the validities and fitness of the results acquired from monotonic incremental loading test and estimated the characteristics of the moment-curvature, degradation of the flexural rigidity, crack and failure.

요 지

R/C교량에서 진행성 균열과 과도한 처짐에 의한 휨 내력의 저하는 차량하중에 의한 동적 반복하중으로부터 발생한다. 이러한 사실은 정적인 단조증가 하중 재하실험으로부터 획득한 자료의 동적 반복하중에서의 확인과 평가의 필요성을 제기한다. 따라서, 본 연구는 CFS로 보강된 R/C보를 단조증가하중 재하실험과 반복하중 재하실험을 동시에 수행하였다. 동적 반복하중 재하실험에 의하여, 단조증가하중 재하실험에 의한 결과의 타당성 및 적합성을 확인하고 반복하중에 의한 모멘트-곡률, 휨 강도의 감소, 균열 및 파괴 특성 등을 평가하였다.

Keywords : CFS(carbon fiber sheet), Monotonic incremental loading test, Repeated loading test, Degradation of flexural rigidity.

핵심 용어 : 탄소섬유시트, 단조증가하중 실험, 반복하중 실험, 휨강성 저하

* 정희원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수

** 학생회원, 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정

E-mail : chkim@star.ks.ac.kr 016-580-4751

•본 논문에 대한 토의를 2004년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 언

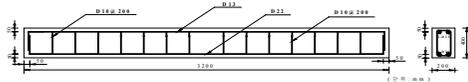
R/C보는 노후화에 따른 내력손실과 사용하중의 증가로 인한 손상의 가속화가 원인이 되어 심각한 균열, 과도한 처짐 등이 발생하게 된다. 이러한 보를 CFS(carbon fiber sheet)로 보강하는 공법은 경제성, 공기, 미관, 보강효과의 직접성 등의 여러 측면에서 보강효과와 신뢰성이 확보되면서 시공사례와 연구가 증가하고 있다.

그러나, 보강보에 대한 대부분의 연구가 에폭시 수지의 접착능력, 극한거동, 파괴형태 등을 정적인 단조증가 재하실험에 의존해서 규명한 것이 대부분이다.^{(2),(4),(5),(6),(7),(10)}

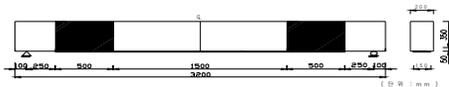
R/C 교량은 차량의 통행에 따른 동적 반복하중에 의해서 균열이 진전되며, 이로 인한 내하력의 저하로 처짐이 증가하면서 급작스럽게 파괴되는 취성파괴의 특성을 갖게된다.

이는 단조증가 재하실험에서 획득된 자료를 동적 반복 재하실험에서 적합성을 확인하고 평가 해야할 필요성을 제기한다.^{(1),(3),(8),(9)}

본 연구는 CFS로 보강된 R/C보를 단조증가 재하실험과 반복 재하실험을 동시에 실시하였다. 보의 휨거동을 상호 비교하여 단조증가 재하실험에 의한 결과의 적합성을 확인하고 반복재하에 의한 모멘트-곡률, 휨 강성의 저하, 균열 및 파괴 특성 등을 평가하였다.



(a) 실험체의 제원



(b) CFS의 보강형태

Fig. 1 실험체의 제원 및 보강형태

2. 실험계획

2.1 실험체 재료 및 제작

2.1.1 재료

콘크리트는 일반성을 확보하기 위해서 레미콘을 사용하였다. 6개의 공시체에 대한 압축시험 결과 압축강도는 31.164MPa, 탄성계수는 2.587×10^4 MPa 이었다. 탄소섬유의 인장강도는 3479MPa, 탄성계수는 2.303×10^5 MPa, 설계두께는 0.00167m 이었다. 철근은 SD35를 사용하였다.

2.1.2 실험체의 제작

R/C보는 0.2m×0.4m×3.2m의 복철근 보로서 구체적 치수와 형상은 Fig. 1(a)와 같다. 탄소섬유시트는 보의 바닥에 길이 2.5m, 폭0.15m로 섬유길이 방향과 보의 축을 일치시켜 부착하였으며, 보강형태는 Fig. 1(b)와 같다. 보강접수와 정착부의 U형 보강밴드의 유무 및 재하속도 등에 따른 실험체의 일람표와 명칭은 Table 1 및 Fig. 2 와 같다.

Table 1 실험체 일람표

재하형태	실험체명	보강접수	U밴드 유무	갯수	
단조증가 하중	1P-NU-02/S	1	무	1	
	1P-U-02/S	1	유	1	
	3P-U-02/S	3	유	1	
반복 하중	재하속도 2mm /min.	1P-NU-02/R	1	무	1
		1P-U-02/R	1	유	1
		3P-U-02/R	3	유	1
	재하속도 20mm /min.	1P-NU-20/R	1	무	1
		1P-U-20/R	1	유	1
		3P-U-20/R	3	유	1

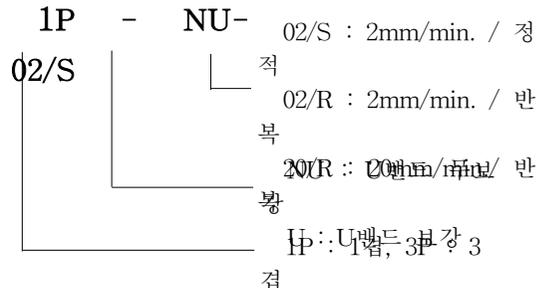


Fig. 2 실험체 표기명

2.2 가력 및 측정

2.2.1 하중가력

가력은 490 kN 용량의 Actuator를 사용하여 변위 제어 방식으로 2점 집중하중으로 Fig. 3과 같이 재하하였다. 재하속도의 완급에 따른 거동차이를 조사하기 위해서 재하속도를 2mm/min.와 20mm/min.의 2종류로 채택하였다. 변위 제어량은 단조증가 재하실험에서 획득된 항복하중에 대응하는 항복변위를 기준으로 정하였다. 하중단계는 항복 전에는 항복변위의 25%, 50%, 75%, 100%와 항복 이후에는 항복변위의 10%씩 증가시켜 보가 완전히 파괴될 때까지 재하하였다. 또한 각 하중단계에서 반복횟수는 10회이다.

2.2.2 측정

압축 측 콘크리트 표면에 변형률 게이지를 중앙부와 좌우 가력점 앞에 2개를 부착하였으며, 인장 측 탄소 섬유시트에도 같은 위치에 변형률 게이지를 2개 설치하여 보의 상측 과 하측에 4점의 변형률을 측정하였다. 한편 보의 처짐은 중앙부 및 가력점 하단에 2개의 LVDT를 설치하여 하중과 함께 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 하중-처짐곡선

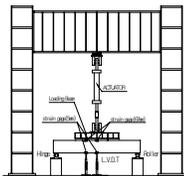


Fig. 3 재하 및 측정 장치

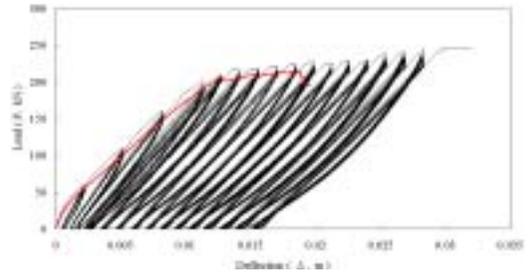
Fig. 4와 Fig. 5는 반복재하 실험에 의한 하중-처짐 곡선을 재하 속도별로 나타낸 것이다. 각 그림에서 굵은 선은 동일한 시험체의 단조증가 재하실험에 의한 하중-처짐 곡선을 도시한 것이다.

3.1.1 하중-처짐 곡선의 포락선

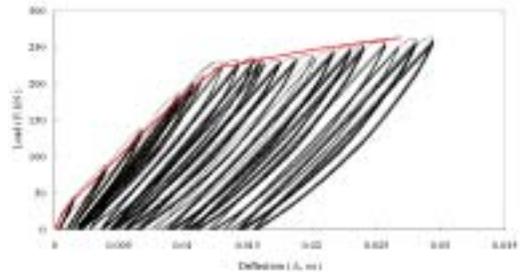
반복하중 재하시 하중-처짐 곡선의 포락선은 단조증가하중의 하중-처짐 곡선과 거의 일치하였다. 보강량의 증가에 따라 극한저항능력도 증가하고, 동일한 보강량에 대해서는 U형 보강밴드를 부착한 경우가 파단시 처짐 저항능력이 증가되어 종곡강도도 다소 향상되었다.

항복 후 연성구간은 3P-U-20/R 시험체를 제외하고는 예측과는 달리 모두 길었다. 이것은 항복변위의 25%에서 시작된 단계별 반복 재하가 특정부위의 응력집중을 방지하였기 때문으로 판단된다.

따라서, 단조증가 재하실험에서 구해진 하중-처짐 곡선의 형태와 극한거동은 반복 재하실험에서 얻은 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있다.



(a) 1P-NU-02/R

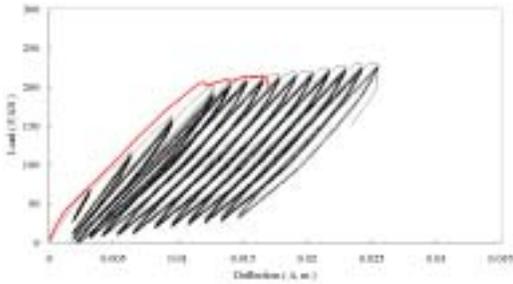


(b) 3P-U-02/R

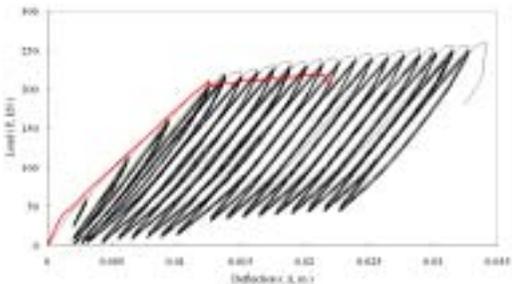
Fig. 4 하중-처짐곡선(재하속도=2mm/min.)

3.1.2 재하 속도별 거동

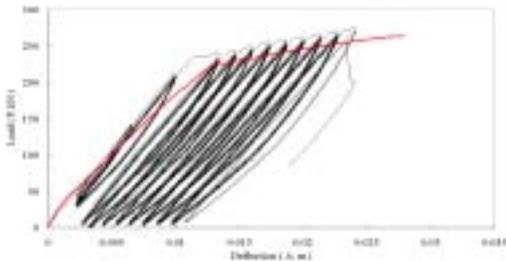
Fig. 4는 재하속도 2mm/min.이고, Fig. 5는 재하속도 20mm/min. 이다. 재하속도의 완급에 따른 항복강도와 최대강도의 변화는 크지 않고, 재하속도가 빠른 경우 항복 후의 연성구간이 짧고 파단시의 처짐량이 작았다. 재하속도가 빠르면, 균열성장 속도도 증가하고, 따라서 취성과파괴로의 이행이 촉진되는 것으로 판단된다.



(a) 1P-NU-20/R



(b) 1P-U-20/R



(c) 3P-U-20/R

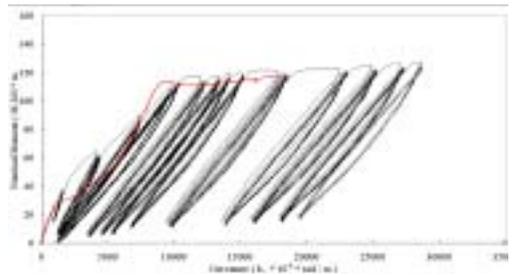
Fig. 5 하중-처짐곡선(재하속도=20mm/min)

3.2 모멘트-곡률 특성 및 강성도 저하

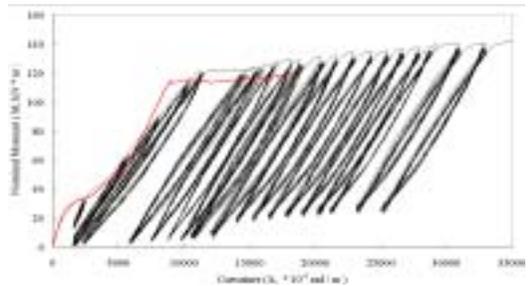
3.2.1 모멘트-곡률 특성

Fig. 6는 재하속도 20mm/min.로 실시된 반복 재하실험의 모멘트-곡률 곡선이다. 그림에서 사용된 곡률 χ 는 다음 식으로 계산하였다.

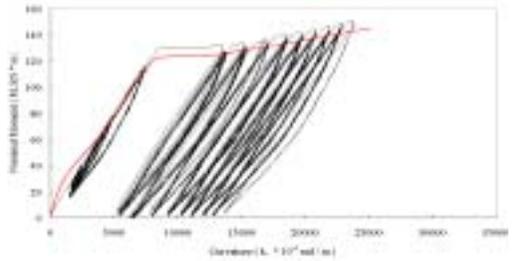
$$\chi = \frac{\epsilon_c}{c} \quad (1)$$



(a) 1P-NU-20/R



(b) 1P-U-20/R



(c) 3P-U-20/R

Fig. 6 반복하중의 모멘트-곡률 곡선

여기서, ϵ_c 는 상단의 콘크리트 압축변형률, c 는 압축 측 상단에서 중립축까지 거리이다. 중립축 거리 c 는 실험에서 측정된 상단의 콘크리트 압축변형률과 하단의 CFS의 인장변형률을 이용하여 변형률 적합조건으로 산정한 것이다.

포락선의 형상은 굽은 곡선으로 표시된 단조증가 재하시의 곡선과 큰 차이가 없지만, 초기균열에 의한 순간적인 곡률의 증가현상 및 항복에 의한 추가적인 균열발생에 대응하는 곡률의 증가 현상은 반복하중 곡선에 의해서만 곡률 루프의 불연속으로 분명히 표현할 수 있음을 알 수 있다.

U밴드 보강이 없는 1P-NU-20/R 실험체의 곡률 증가는 항복 이후에도 불연속적으로 발생하는 반면에 U밴드로 보강된 1P-U-20/R 실험체의 곡률 증가는 항복 이후에도 매우 안정적임을 보여준다. 이것은 U밴드 보강이 부착력의 확보와 더불어 균열의 발생을 제어하는 효과가 있는 것으로 생각된다.

3겹 보강한 3P-U-20/R 실험체의 경우, 초기균열의 발생보다는 항복직후의 균열발생에 의한 곡률 루프의 불연속 구간이 길었다. 즉, 항복에 의한 균열의 영향이 큼을 알 수 있다. 따라서, 항복과 더불어 급격한 곡률의 증가가 일어나고, 이후 파단시까지 곡률의 증가가 크지 않는 취성파괴의 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.2.2 강성도 저하

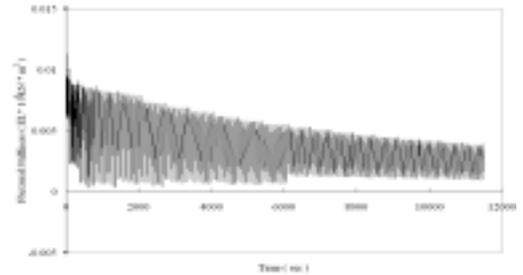
Fig. 7은 시간 경과에 따른 강성도의 저하현상을 나타낸 것이다. 강성도(EI)의 계산은 TDS-303과 Actuator에서 측정된 시간별 처짐과 하중을 사용하여 다음 식으로 산정하였다.

$$EI = \frac{Pa}{24\Delta} (3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

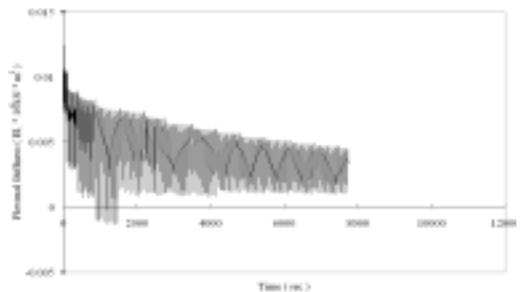
여기서, P 는 하중 및 변위로서 실측치, L 는 보의 지간, a 는 지점에서 가력점까지의 거리이다.

각 실험체 모두 초기균열과 항복직후 균열에서 강성도 저하가 급격히 발생하고, 시간의 증가와 더불어

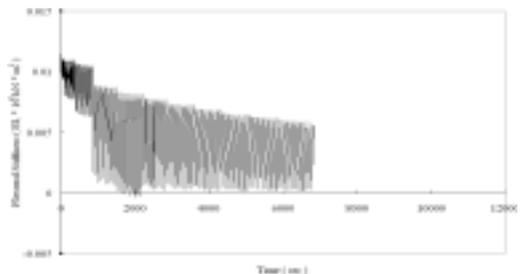
강성도 저하량은 적어지며 파단시까지 강성도 크기는 거의 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7의 (c)그림을 대비시켜 보면, 초기균열의 발생과 항복에 의한 추가적인 균열이 급격한 곡률 증가를 가져오고 이에 대응하는 강성도 저하현상이 분명히 나타남을 알 수 있다.



(b) 1P-U-20/R



(a) 1P-NU-20/R



(c) 3P-U-20/R

Fig. 7 시간 경과에 따른 강성도 저하 현상

Fig. 8은 반복횟수의 증가에 따른 강성도 저하곡선이다. 1겹 보강은 초기균열에서 저하량이 크고, 3겹 보강은 항복직후의 균열에서 저하량이 크다. 그러나 항복이후의 변화특성은 같은 경향을 보였다.

Fig. 9은 1겹 보강 U밴드가 있는 실험체의 재하 속도별 반복횟수에 따른 강성도 저하곡선이다. 재하속도가 빠를 때 초기저하는 크나, 항복이후의 거동은 거의 동일하였다.

3.3 균열 및 파괴 특성

3.3.1 단조증가 재하시 균열 및 파괴

단조증가 재하실험체의 균열의 발생 및 전파는 초기에 보 중앙에서 휨 균열이 시작되고, 하중증가가 계속됨에 따라 휨 균열 폭의 증가와 함께 재하점 아래까지 확대되었다. 이로 인하여 섬유시트와 R/C 보의 접촉면이 감소되어 중앙에서 섬유시트의 파단으로 보가 파괴되었다.

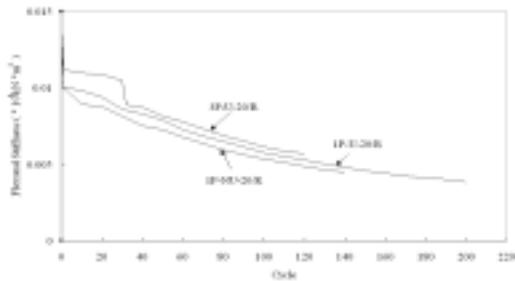


Fig. 8 반복횟수에 따른 강성도 저하곡선

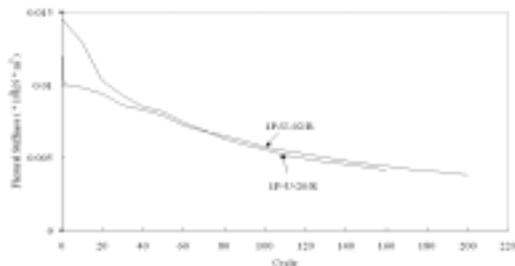
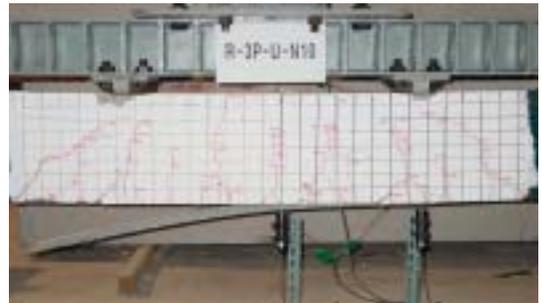


Fig. 9 재하 속도별 반복횟수에 따른 강성도 저하곡선

그러나, 보강량이 많은 3P-U-02/S 실험체의 경우는 항복 후 중앙부 균열의 진전과 함께 섬유시트의 박리가 시작되었고, 균열폭이 확대되면서 섬유시트는 U밴드 보강점을 지점으로 하는 인장타이 기능을 수행한 후 U밴드와의 접합부에서 Photo 1(a)와 같이 파단되었다. 결국, U형 보강밴드는 단부에서 파단이 발생할 때까지 보강 보의 수명을 연장시키는 것으로 관측되었다.



(a) 3P-U-02/S



(b) 3P-U-02/R



(c) 3P-U-20/R

Photo 1 실험체의 균열 및 파괴형태

3.3.2 반복하중 재하시 균열 및 파괴

1P-NU-02/R 실험체의 경우 재하와 동시에 휨 균열이 시작되고, 하중증가에 따라 지점부 전단균열의 발생과 함께 보의 중앙부 섬유시트 파단으로 보가 파괴되었다. 그러나, 1P-U-02/R의 경우는 휨 균열이 진전되어 중앙부 부착력 부족으로 중앙부의 섬유시트의 파단으로 보가 파괴되었다. 상대적으로 보강량이 많은 3P-U-02/R 및 3P-U-20/R 실험체는 항복 후 휨 균열의 진전과 더불어 중앙부 섬유시트의 박리가 시작되고, 단조증가 재하실험체와 같이 섬유시트가 U 밴드 보강점을 지점으로 하는 인장타이 기능을 수행한 후 부착부에서 섬유시트의 파단으로 보가 파괴되었다. 반복하중을 재하하는 상태에서 섬유시트 박리시점의 미세한 변화는 관찰은 가능하였으나, 변위나 강성의 크기로 시점을 정확히 표시하는 것은 불가능하였다.

Photo 1(b),(c)에서 보는 것처럼, 균열의 진행속도는 재하속도에는 직접적으로 영향을 받았지만, 파괴양상과 시험체의 거동은 재하속도에 의한 의미있는 차이는 없었다.

4. 결론

CFS로 보강된 R/C 보에 단조증가 재하실험 및 반복하중 재하실험을 수행하여 단조증가 재하실험에서 얻은 보강보의 극한거동 자료들의 반복하중에서의 적용성을 검토하고, 반복하중에서 보강보가 응답하는 휨 거동 특성을 평가하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 반복 재하실험에서 얻어진 하중-처짐 곡선의 포락선은 단조증가 재하실험의 하중-처짐 곡선과 거의 일치함을 확인하였다. 따라서, CFS 보강보의 극한 거동을 파악 하기 위하여 단조증가 재하실험의 결과를 적용하는 것은 타당성이 있는 것으로 판단 된다.
- 2) 하중-처짐 곡선의 항복 후 연성구간의 길이는 단조증가하중 보다 반복하중이 길었다. 이것은 각 하중단계에서 10회의 반복에 의한 응력의 재분배로 특정부위의 응력집중 현상이 방지되었기 때문

으로 판단 된다.

- 3) 반복재하 실험의 모멘트-곡률 곡선의 포락선은 단조증가 재하실험의 곡선과 거의 일치하였다. 그러나, 초기균열 및 항복 발생에 따른 휨 균열의 확대에 대응하는 곡률의 불안정한 변화특성은 반복 재하실험에 의해서만 알 수 있다.
- 4) 반복 재하실험에서 강도저하는 없었지만, 강성도저하는 발생하였다. 그러므로 CFS 보강보 설계시 강도저하는 고려하지 않더라도 강성도 저하에 따른 처짐의 증가는 고려해야 할 것으로 생각된다.
- 5) 재하속도가 빠를 때 초기 강성도 저하량이 많고, 파단까지 소요되는 시간은 짧았다. 그러나, 항복 이후의 거동은 재하속도의 완급에 의미있는 차이는 없었다.
- 6) CFS의 파단은 1겹 보강의 경우는 보의 중앙부에서, 3겹 보강은 U형 밴드와 접속부에서 발생하였다. 따라서, CFS의 보강량이 많으면 CFS 보강보의 파괴는 U 밴드 접속부의 부착력 부족으로 발생할 가능성이 큼을 유추할 수 있다.
- 7) U밴드 보강은 CFS의 부착기능을 높일 뿐만 아니라 항복후의 추가적인 균열의 발생도 억제하거나, 균질한 균열이 발생 토록 하는 것이 관측되었다.

감사의 글

본 논문은 2002년도 경성대학교 학술지원 연구비 지원에 의한 연구결과임을 밝히며 감사드립니다.

참고문헌

1. 강보순, 심형섭, 황성춘, “사용반복하중에 대한철근콘크리트 부재의 피로거동” 2001년도 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, pp.1161~1166.
2. 김광호, 김용희, 차희석, “탄소섬유시트를 사용한 상판 보강에 관한 실험적연구” 대한토목학회 학술발표회 논문집(1), 1995. 10, pp.215~218.
3. 김정섭, 조창호, 박영배, 조철희, “철근콘크리트 보의 탄소섬유시트 보강에 따른 피로거동에 관한 실험적 연구” 대한건축학회 논문집, 제18권, 제12호 pp.19~26.
4. 김지현, 나정민, 이윤택, 이리형, “탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트보의 휨보강에 관한 해석적 연구” 대

-
- 한건축학회지 제18권 제2호, 1998. 10.
5. 김영갑, 이우철, 조백순, 정진환, 김성도, “탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 구조물의 공칭 휨모멘트 산정에 관한 연구” 대한토목학회 논문집, 2002.11, pp.719~722.
 6. 신성우, 이한승, 탄소섬유쉬트 보강공법에 사용되는 Epoxy 수지의 특성 및 국내의 동향, 한국구조물진단학회 제2권 3호, 1998. 7, pp.24~36.
 7. 신영수, 홍기섭, 최완철, 홍영균, “탄소섬유쉬트로 밀면 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동” 대한건축학회지 제11권 8호 통권82호, 1995. 8, pp.249~257.
 8. 심종성, 오홍섭, 김진하, 김성엽, “반복하중을 받는 교량바닥판의 보강을 위한 탄소섬유쉬트의 적용성에 대한 실험적 연구” 2001년도 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, pp.757~762.
 9. 심종성, 배인환, 박성재, “손상된 R/C보의 보강후 피로 거동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제1-2호, pp.135~142, 1996.3.
 10. 심종성, 이정만, 배인환, “강판 및 탄소섬유 Sheet로 보강된 R/C보의 구조거동특성 연구” 대한토목학회 학술발표회 논문집(I), 1995. 10, pp.207~210.

(접수일자 : 2004년 2월 2일)