

고강도 폴리머 모르타르 및 탄소섬유 봉(Rod)으로 보강된 교량 바닥판의 보강성능

심종성^{1)*} · 문도영¹⁾ · 주민관¹⁾

¹⁾ 한양대학교 토목·환경공학과

(2003년 10월 10일 원고접수, 2004년 2월 28일 심사완료)

Strengthening Capacity of Bridge Deck Strengthened with Carbon Fiber Rod and Polymer Mortar

Jongsung Sim^{1)*}, Do-Young Moon¹⁾, and Min-Kwan Ju¹⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environment Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea

(Received October 10, 2003, Accepted February 28, 2004)

ABSTRACT

This paper deals with an enhanced structural capacity of reinforced concrete bridge deck strengthened with carbon fiber rod (CFR) which is subjected to monotonic and cyclic loads. Strengthening variables considered in this test were evenly and unevenly strengthening type. To evaluate strengthening capacity for these two strengthening types, load-carrying capacity and crack and failure pattern from the failure test were analyzed and fatigue response were examined.

According to the test results, all the strengthened specimens showed punching shear failure as a result of premature failure of bonding interface between mortar and concrete. In the case of strengthening capacity, it was observed that the strengthened specimens was more effective in strength, stiffness and fatigue endurance limit than the unstrengthened specimen. In addition, the unevenly strengthening method (CR-UE) was more effective than the evenly strengthening method (CR-E).

Keywords : carbon fiber rod, punching shear, evenly strengthening(CR-E), unevenly strengthening(CR-UE)

1. 서 론

최근 철근 콘크리트 구조물의 보강에 주로 적용되는 공법으로 외부에 신소재섬유를 부착하여 휨 및 전단력에 대한 내하성능을 향상시키는 외부 부착 시트(sheet)형의 보강공법이 널리 사용되고 있다. 이와 같은 섬유부착 보강공법은 추가 고정사하중의 부담이 적고 시공이 간편하기 때문에 기존의 강판보강공법을 대체하는 공법으로 사용되고 있다. 대표적인 섬유부착공법으로는 탄소섬유시트(carbon fiber sheet, CFS) 및 유리섬유보강 플라스틱(glass fiber reinforced plastic, GFRP)이 사용되고 있는데, 이는 주로 거더, 슬래브 및 교각에 사용되는 공법으로 각 보강재의 부착특성이 보강성능을 크게 좌우한다¹⁾⁻³⁾. 그러나 이와 같은 보강공법은 보강재 및 접착면이 외부에 노출되어 있기 때문에 부착력의 손실 및 보강재의 손상에 의해 구조적인 문제가 발생할 가능성이 있다.

본 연구의 “고강도 폴리머모르타르와 탄소섬유봉(carbon fiber rod, CFR)을 적용한 보강공법”은 철근보다 상대적으로 가볍고 극한강도가 큰 고강도의 CFR⁴⁾이 주 보강재인 보강공법이다. 우선 원형의 CFR 표면을 가넷⁴⁾으로 함침시킴으로서 이형철근의 부착력과 거의 동일한 효과를 얻을 수 있으며, CFR보강 후 폴리머모르타르로 보강면을 덧씌움(overlay)으로써 외부 물리·화학적 작용에 대한 보강재의 부착력을 확보하고 내구성을 향상시킬 수 있다.

또한 모르타르와 기존 콘크리트 면과의 부착성을 증대시키기 위하여 앵커볼트를 보강면에 정착하여 보강재와 기존 구조체와의 일체성 및 단면증설에 의한 구조적 효율성을 확보함으로써 보강효과를 획득할 수 있도록 고안되었다.

따라서 본 연구에서는 기존 보강공법의 문제점을 극복할 수 있는 보강공법, 즉 폴리머 모르타르와 CFR을 적용한 보강공법을 제안하고 보강된 바닥판의 정적 및 피로시험을 통해 보강성능을 검증하였다.

* Corresponding author

Tel : 031-418-7430 Fax : 031-418-7430

E-mail : jssim@hanyang.ac.kr

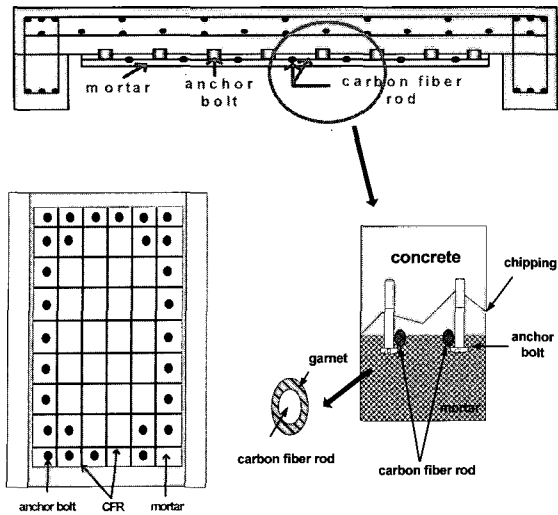


Fig. 1 Schematics of strengthening method

2. 연구동향

교량바닥판에 대한 정적 및 피로실험 수행 결과는 단면을 관통해서 발생한 균열이 교량 바닥판의 손상에 중요한 영향을 미치는 것을 보여준다. 주철근 방향으로 발생된 관통균열은 비교적 짧은 간격으로 발달되며 교량 바닥판의 연속성을 잃게 하여 이후 편칭전단파괴 되는 것이 교량 바닥판의 파괴메커니즘이다. 교량 바닥판의 손상은 최종적으로 휨내력의 부족 때문이 아니라 주로 관통균열의 발생, 균열면의 골재 맞물림 작용(aggregate interlocking)감소 등에 의한 전단저항력의 저하 등에 기인한다⁵⁾.

탄소섬유로 보강된 시험체의 보강성능 연구 결과 일방향 보강에 비해 이방향 strip 보강형태가 성능향상에 유리한 것으로 연구된 바 있다³⁾. 또한 1/6 축소모델 바닥판에 대해 피로실험을 수행한 결과 바닥판의 내하력 저하 현상은 초기하중 가력에서 콘크리트의 강도저하를 제외하고는 극히 미미한 것으로 나타났으며, 잔류 편칭전단강도는 초기 극한내하력과 유사한 것으로 연구되었다⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 CFR로 보강된 바닥판의 우수한 보강형식으로 평가된 이방향 보강에 대해 검토하고 바닥판의 주 파괴양상인 편칭전단에 대해서도 분석하였다.

3. 실험개요

3.1 시험체 제작

정적성능 검토를 위해 무보강 시험체(C-NS)와 보강 제어 시험체(CR-E)를 각각 1개씩 제작하여 정적실험을 수행하였다. 또한 피로에 대한 보강성능을 분석하기 위해 무보강 시험체 3개(C40, C70, C90)와 등방성(CR-E) 및 이방

성(CR-UE)으로 보강된 바닥판 시험체를 각각 3개씩 제작하여 정적과피로하중의 60%, 70%, 80%의 하중으로 피로 실험을 수행하였다.

3.1.1 사용재료

본 연구에 사용된 콘크리트는 압축강도 24Mpa를 사용하였으며, 주철근과 배력철근은 항복강도 300Mpa인 D16 철근을 사용하였다. Fig. 2와 3에는 각각 고강도의 탄소섬유 봉(rod)와 보강면의 부착성능을 향상을 위하여 도입된 앵커볼트를 나타내었다. G&W 모르타르(가넷접착 모르타르)⁴⁾은 시멘트계 고강도 모르타르이며 각 보강재 및 콘크리트의 역학적 성질은 Table 1과 2에 나타내었다.

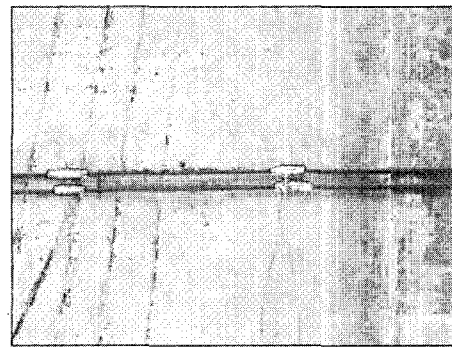


Fig. 2 carbon fiber rods

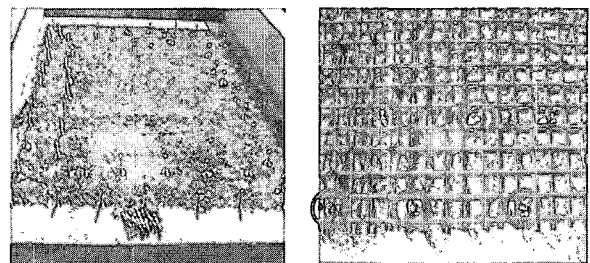


Fig. 3 Anchor bolts

Table 1 Properties of concrete and mortar

	Elastic modulus (Mpa)	Bond strength (Mpa)	Compressive strength (Mpa)	Ultimate strain
Concrete	2.3×10^4	-	24	0.003
G & W Mortar	1.08×10^4	2	45	-

Table 2 Properties of rebar and CFR

	Elastic modulus (Mpa)	Yield strength (Mpa)	Ultimate strength (Mpa)	Ultimate strain
Rebar	20×10^4	300	570	0.0029
CFR	12×10^4	-	2,171	0.0115

3.1.2 무보강 시험체

도로교 설계기준에 입각하여 실교량과 유사한 일방향 및 이방향 거동을 보이도록 설계 2등급 DB18 시험체를 설계, 제작하였다. 바닥판 두께는 180mm로 설계하였고 폭과 길이는 각각 2000mm, 2400mm로 제작하였다. 주철근은 인장과 압축 각각 $\phi D16@100$ (직경 16mm 철근 100mm 간격)로 배근하였고 배력철근은 인장과 압축 각각 $\phi D16@150$ 과 $\phi D16@300$ 로 배근하였다. 또한 배력철근의 경우 도로교설계기준에 의거하여 주철근의 67% 이상의 철근비를 갖도록 배근하였다. 변위측정계는 교량 바닥판의 중앙부, 1/4지점, 단부 그리고 거더에 설치하였다. 또한 상하부 주철근과 배력철근에 변형률 게이지를 부착하여 하중 재하에 대한 변형률을 측정하였다. Fig. 4는 무보강 시험체의 제작상세를 보여준다.

3.1.3 보강설계

Table 3은 주철근비 및 보강비에 따른 보강단면의 파괴모드를 나타낸 것이다. A, B, C의 세가지 보강영역은 보강재의 완전탄성거동으로 인하여 부재가 취성파괴되는 양상을 보일 것으로 예상되는 영역이지만 구조물의 전체적인 거동에 대한 안전여유도를 확보할 수 있는 A영역으로 설계하는 것이 바람직하다⁷⁾. 따라서 보강단면에 적합한 보강비를 선정하기 위하여 A영역에 대해 보강설계를 실시하였다. 최대철근 및 보강재비를 사용하여 보강설계를 실시하였으며 각 보강비는 Table 4에 나타내었다.

3.2 실험변수

교량바닥판의 보강에 대한 문헌고찰 결과 바닥판의 거동특성은 이방향 거동이 중요한 영향인자이기 때문에 본 보강방식을 선정할 때 Fig. 5와 같이 보강재의 보강량을 교축 및 교축 직각방향으로 서로 달리한 이방향 보강공법이 선정되었다. 모르타르는 30mm의 두께로 증설하였으며 각 방향의 철근 및 CFR의 보강비는 다음의 Table 5에 나타내었다.

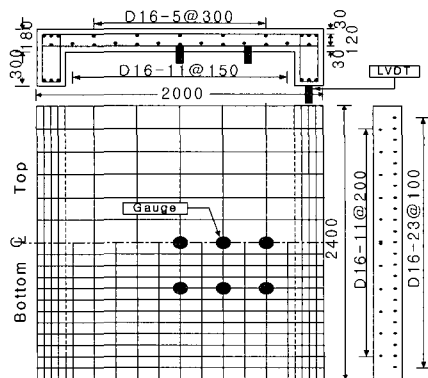


Fig. 4 Details of control specimen (mm)

피로하중을 받는 실제의 교량 바닥판은 설계내하력보다 낮은 사용하중 상태하에 있게 되며 피로하중이 지속됨에 따라 바닥판의 손상이 누적되게 된다. 본 연구에서는 이러한 사용하중재하에 대한 피로거동 상태를 모델링하기 위하여 정적구조 시험체의 파괴하중을 기준으로 재하하중을 선정하였다. 반복하중의 크기는 등방(CR-E) 및 이방성(CR-UE) 보강 시험체에 대해 정적파괴 하중의 60%, 70%, 80%를 재하하였다.

Table 3 Failure condition of strengthened specimens

Area	Failure condition
A	under-reinforcement
B	Reinforcement rupture & concrete crushing
C	Over-reinforcement

ρ_s : strengthening ratio of main rebar
 ρ_b, ρ_{max} : balanced and maximum ratio of main rebar
 ρ_p : strengthening ratio of the FRP
 $\rho_{b,p}, \rho_{max,p}$: balanced and maximum strengthening ratio of FRP

Table 4 Strengthening ratio of the specimen

	Strengthening ratio
Steel	$\rho_b = \frac{0.00217f_{ck}}{(0.003 + \lambda\varepsilon_p^*)} \frac{h_p}{d} f_y$
CFR	$\rho_{b,p} = \frac{0.00217f_{ck}}{(0.003 + \lambda\varepsilon_p^*)} \frac{h_p}{d} \lambda f_p^*$

ρ_b = balanced steel ratio
 $\rho_{b,p}$ = balanced strengthening ratio
 ε_p^* = ultimate strain of CFR
 f_p^* = tensile strength of CFR
 h_p = distance from top slab to center axis of CFR

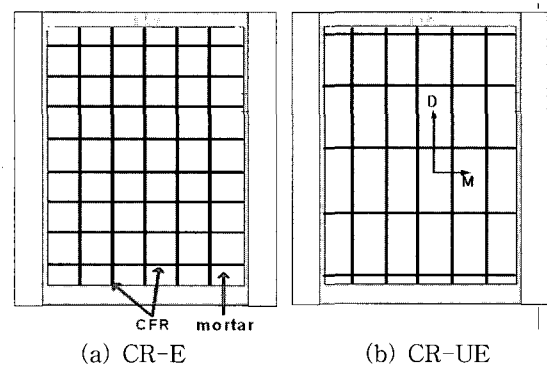


Fig. 5 Strengthening details of specimens

Table 5 Strengthening ratio of steel and CFR

Specimen	Spacing of CFR (mm)		CFR strengthening ratio (×E-2)		Steel strengthening ratio (×E-2)		Total strengthening ratio (×E-2)	
	M	D	M	D	M	D	M	D
	CR-E	30	30	5.0	3.77	1.27	0.61	6.27
CR-UE	60	30	2.56	3.77	1.27	0.61	3.83	4.38

M : main rebar direction
D : distributing rebar direction

하중재하 장비는 98 KN 용량의 하중가력기를 사용하였다. 또한 각 하중단계별 탄성회복 정도를 측정하기 위하여 49KN 간격으로 하중재하와 하중제거를 반복하였다. 콘크리트 교량 바닥판의 동적주기는 대체적으로 30 m 지간인 경우 2~3.7 Hz이다. 따라서 본 연구에서는 동적하중 주기를 2 Hz로 설정하였다. 피로한계는 통상적으로 200 만회까지를 피로한계로 정의하나 본 연구에서는 바닥판의 피로한계의 확률이 50%정도인 100 만회를 기준으로 하여 피로한계를 정의하였다⁸⁾. 또한 최대변위 및 변형률을 보다 정밀히 측정하기 위하여 정적재하시 최대하중 부근을 전후로 하중의 증가 및 감소량을 달리하였다. 즉, 최대하중의 80%까지는 49 KN로 하중재하한 후 그 이후부터는 2 mm씩 변위제어를 실시하여 구조적 거동을 측정하였다. Table 6, 7은 정적 및 피로실험에 사용된 변수이다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 정적 재하시험 결과 및 분석

4.1.1 균열 및 파괴양상

무보강 시험체 C-NS의 경우 147KN에서 초기균열이 발생하였다. 294 KN까지는 배력철근 방향으로 균열이 진전되다가 510 KN에서 주철근이 항복하면서 이방향 균열로 진전되었다. 588 KN에서 지점부 국부파괴 및 배력철근의 항복이 일어났으며 627 KN에서 편칭파괴 되었다. 편칭파괴시 파괴각은 45°가 일반적이지만 본 시험체는 45° 이하에서 파괴가 발생된 것으로 관찰되었다. Fig. 6은 무보강 시험체의 상·하부 연단의 편칭전단 파괴의 모습을 보여준다. CR-E 시험체의 균열양상은 무보강 시험체와 유사하였으며 무보강 시험체와 마찬가지로 편칭전단 파괴가 발생하였다. 단, CR-E 시험체의 파괴양상은 증설된 고강도 폴리머 모르타르에 집중된 응력에 의해 보강면이 탈락됨과 동시에 편칭전단파괴 되었다. 이와 같은 파괴는 시트(sheet)형 보강재로 보강된 바닥판의 계면박리에 의한 편칭전단 파괴와 유사한 양상이다²⁾. 그러나 본 공법에서는 보강재인 CFR이 충분한 하중분담을 하기 전에 계면의 조기탈락에 의한 편칭전단이 발생한 것으로 분석되었다.

Table 6 Static test results

Specimen	Failure load (KN)
C-NS	627
CR-E	688

C-NS : control specimen, E : evenly strengthening method
CR : strengthened specimen with CFR

Table 7 Fatigue test specimens

Specimen Index	Applied Load (KN)	Stress level	Failure load in static test
C-NS40	255	40%	627KN
C-NS70	441	70%	
C-NS90	568	90%	
CR-E60	412	60%	688KN
CR-E70	892	70%	
CR-E80	549	80%	
CR-UE60	412*	60%*	-
CR-UE70	892*	70%*	
CR-UE80	549*	80%*	

* Based on the static failure load of CR-E

4.1.2 하중-변위관계

C-NS 시험체는 초기균열하중 147 KN에서 1차 강성저하가 나타났으며 주철근이 항복할 때 392 KN 부근에서 Fig. 8과 같이 2차 강성저하를 보인 후, 처짐 30mm에서 편칭 전단파괴되었다. CR-E 시험체는 Fig. 6에서와 같이 C-NS 시험체와 유사한 균열양상을 보였으며 뚜렷한 강성저하 없이 파괴하중에 근접함에 따라 보강 모르타르 계면의 급속한 탈락에 의해 편칭전단 파괴되었다. Fig. 8에 나타났듯이 C-NS 시험체는 항복 후 철근의 변형률 연화현상이 나타나면서 비교적 연성거동 후 파괴된 것에 반하여, CR-E 시험체는 파괴시까지 철근의 항복이 발생하지 않고 탄성거동을 보였다. 실험 결과, 보강 시험체의 강성이 무보강 시험체에 비해 45% 향상된 것으로 나타났다. 다음의 Table 8에는 무보강 및 보강 시험체의 강성 및 극한하중의 증진효과를 나타내고 있다.

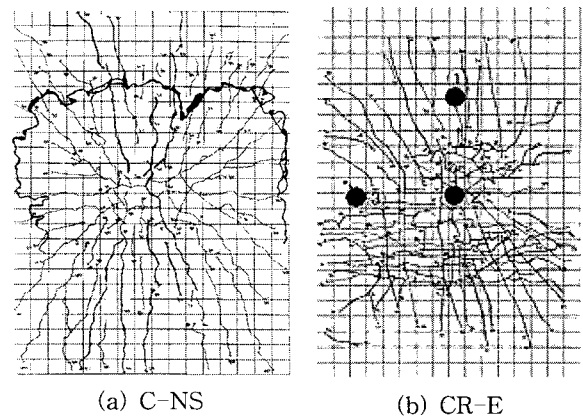


Fig. 6 Crack and failure pattern of static test specimens

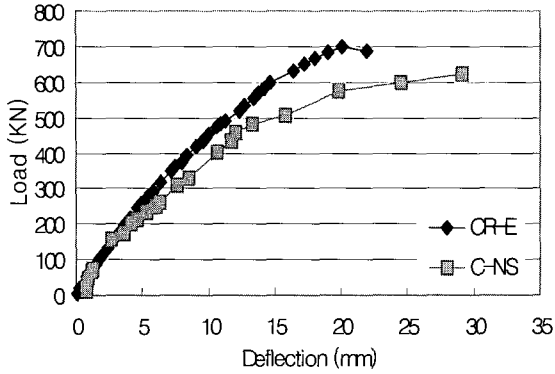


Fig. 7 Load-deflection curve of bridge deck specimen

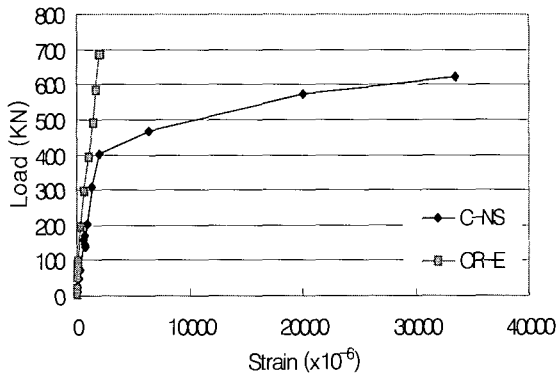


Fig. 8 Load-strain curve of main rebar

Table 8 Effect of strengthening

	C-NS	CR-E	strengthening effect (%)
Stiffness (KN/mm)	2.2	3.2	45.0
Failure load (KN)	627.0	688.0	9.7

4.2 CFR로 보강된 바닥판의 편칭전단강도 예측

보강된 바닥판의 편칭전단강도는 식 (1)과 같이 제안된 바 있으며 소성편칭전단강도 모델을 사용하여 일반 콘크리트 바닥판의 편칭강도 해석방법, 주철근 이하에서의 콘크리트 박리(spalling)강도(f_{sl}), 등가보강재비 등이 고려되었다³⁾. 그러나 보강된 바닥판의 편칭강도식은 외부부착된 시트형 보강형식에 대해 제안되었으므로 본 봉(rod)형 외부부착 보강형식에 직접적으로 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 봉(rod)형 보강재를 제안된 소성식에 적용하기 위하여 다음과 같은 사항을 수정하여 적용하였다.

첫 번째, 주철근 이하 콘크리트의 편칭전단 내력을 산정할 때 증설된 고강도 폴리머 모르타르의 영향을 고려하기 위하여 탄성계수비($n = E_{mortar}/E_{concrete}$)가 적용되었다. 두 번째, CFR의 영향을 고려하기 위하여 철근에 대한 탄성계수비($n = E_{CFR}/E_{steel}$)를 보강비 산정 시 적용하였으며, 모르타르 내에 배치된 CFR의 면적을 단위면

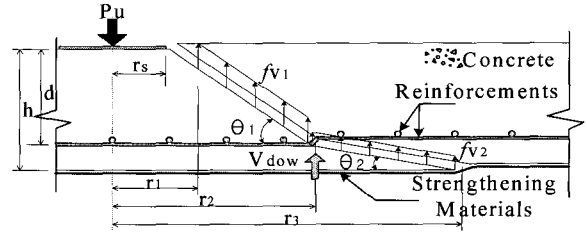


Fig. 9 Punching shear diagram. (cross section)

적으로 나누어 layer 개념으로 적용하였다. 편칭전단에 대한 도식화는 다음 Fig. 9와 같다. 보강된 바닥판의 편칭전단강도는 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$V_{pun} = V_{c1} + V_{c2} + V_{dow} \quad (1)$$

여기서,

$$V_{c1} = \pi (r_1 + r_2) s_1 f_{v1} = \pi (r_1 + r_2) s_1 f_{sp}^{2/3} \xi \mu \eta$$

로서 주철근 이상에서의 편칭전단내력이고

$$V_{c2} = \pi (r_2 + r_3) s_2 f_{v2} = \pi (r_2 + r_3) s_2 f_{sl}^{2/3} \xi \mu \eta$$

로서 외부부착공법 적용에 따른 주철근 이하 단면에서의 콘크리트 편칭전단내력이며

V_{dow} 는

$$V_{dow} = \frac{1}{2} \sum^{bars} \phi_s^2 \sqrt{f_{cb} f_y (1 - \zeta^2)} \sin \theta_1 \quad (2)$$

로서 바닥판의 주철근 및 배력철근에 의한 dowel action에 의한 전단내력이다.

여기서,

$$r_1 = r_s + 0.1 d \cot \theta_1, \quad r_2 = r_s + d \cot \theta_1$$

$$r_3 = r_2 + d \cot \theta_2$$

$$s_2 = \sqrt{(r_3 - r_2)^2 + (h - d)^2}$$

$$\xi = \begin{cases} -0.1\rho^2 + 0.46\rho + 0.35 & \rho < 2\% \\ 0.87 & \rho \geq 2\% \end{cases}$$

$$\mu = 1.6 (1 + d/d_a)^{-1/2}$$

$$\eta = \begin{cases} 0.1 (r_s/h)^2 - 0.5 (r_s/h) + 1.25 & r_s/h < 2.5 \\ 0.625 & r_s/h \geq 2.5 \end{cases}$$

f_{sp} 는 $0.3 f_c^{2/3}$ 으로서 조괸인장강도(Splitting Strength)를 나타낸다.³⁾ 또한 θ_1 은 주철근 이상에서의 균열경사각이다. ξ, μ, η 은 각각 주철근비(%)의 영향, 크기효과(Size Effect) 그리고 재하영역의 영향을 반영한 것으로, 변수연구를 통하여 도출된 값들이다³⁾. Table 9은 수정된 물성치를 적용하여 무보강(C-NS), 등방보강(CR-E) 및 이방보강(CR-UE) 실험체에 대한 편칭전단 예측강도를 나타내고 있다. 해석결과 무보강 시험체의 경우 편칭파괴하중과 제안된 식에 의한 해석값이 유사한 것으로 나타났으나, CR-E보강 시험체의 경우 약 10% 크게 산정되었다.

4.3 피로실험 결과 및 분석

4.3.1 균열 및 파괴양상

무보강 교량 바닥판의 피로실험 결과 모든 시험체에 있어서 정적거동의 균열양상과 유사한 양상을 보였다. 파괴양상은 모두 바닥판의 펀칭전단파괴가 발생하였으며 응력수준이 증가할수록 파괴각은 커지나 펀칭 반경(cone)은 작아지는 경향을 나타내었다. 파괴횟수는 C-NS70과 C-NS90의 경우 각각 68,834회와 10회에서 파괴되었으며, 다음 Fig. 10은 C-NS70 및 C-NS90 시험체의 파괴양상을 보여준다. Fig. 11와 12는 각각 CR-E70 및 CR-UE70 보강시험체의 파괴양상이다. 두 시험체 모두 보강재의 항복전에 단면중설재인 폴리머 모르타르와 콘크리트 면에 집중된 응력에 의해 중설된 모르타르 계면이 모체 콘크리트와 탈락되고 동시에 펀칭전단파괴가 발생하였다. 균열의 상태는 CR-E 시험체의 경우 CR-UE 시험체에 비해 다수의 이방향 균열이 발생하였고 균열의 세망화가 하중 가력점에 집중적으로 형성되었다. Table 5와 같은 등방보강의 경우, 상대적으로 주철근 방향의 전체보강비(철근+CFR)가 과대하여 배력철근 방향으로의 하중분배가 상대적으로 원활하지 않은 반면에, CR-UE 보강시험체는 주철근과 CFR의 합성 보강비가 전체적으로 등방성 거동을 보이도록 보강비를 적용하였기 때문에 적절한 하중분배로 인하여 일방향 거동이 지배적으로 나타난 것으로 분석되었다.

4.3.2 반복하중에 의한 하중-변위관계

Fig. 13은 각 보강변수별 하중-변위관계를 나타내고 있다. 모든 시험체가 일반적인 구조체의 거동과 마찬가지로 가력 초기에는 큰 소성변위를 보이다가 그 이후 파괴까지 소성변위량이 점차 감소하는 경향을 나타내었다.

정적파괴하중의 60%로 반복재하한 CR-E60 과 CR-UE60 시험체는 모두 피로한계인 100만회에 육박한 반복횟수에서 파괴되었다. 또한 파괴에 임박함에 Fig. 16(a)와 (b)와 같이 급격한 영구변위를 보인 것으로 나타났다. 파괴하중의 70%로 반복재하된 CR-UE70 시험체의 경우 영구변위는 5.51 mm와 파괴에서 최대변위 13.94 mm를 보인 반면, CR-E70시험체는 각각 6.26 mm와 15.15 mm를 보임으로써 CR-E70 보강에 비해 CR-UE70 보강이 변위제어 및 강성증진에 있어 효과적인 것으로 판단된다. CR-E70 시험체는 CR-UE70 시험체에 비해 최종 파괴 직전 급격한 소성변위 증가를 보였다. 이는 다른 하중수준의 경우에도 거의 유사한 경향을 보였다.

Table 9 Prediction of punching shear failure load

Specimen	Failure load (KN)	Predicted punching shear (KN)
C-NS	627.0	599.0
CR-E	688.0	762.0
CR-UE	-	751.0

4.3.3 에너지 소산량

콘크리트 구조물은 비탄성 구조체로서 탄성한계 이상의 하중을 받으면 영구변위를 일으키게 되고 하중의 재하 및 제거시 기울기가 서로 다른 비선형 curve를 따라 거동하게 된다. Fig. 13에서 보인 것처럼 $P-\Delta$ 곡선상에서 하중제거시의 면적과 하중제거시의 면적의 차를 이용하여 파괴 에너지 개념으로서 구조물의 손상정도를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 피로실험시 얻어진 각 변수별 피로 $P-\Delta$ 곡선상의 면적을 적분하여 파괴에너지 G 값을 계

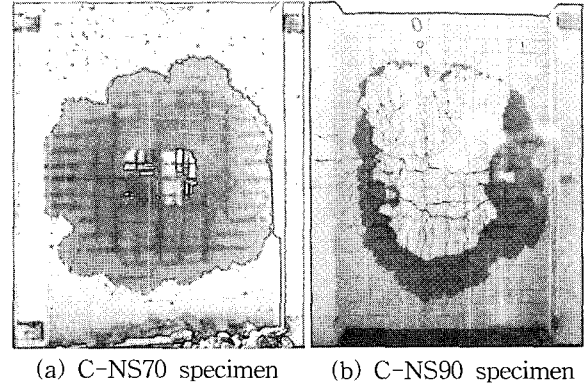


Fig. 10 Crack and failure pattern of unstrengthened specimens

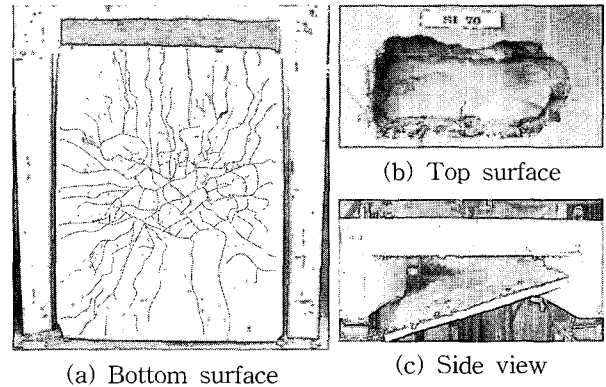


Fig. 11 Crack and failure pattern of CR-E70 specimen

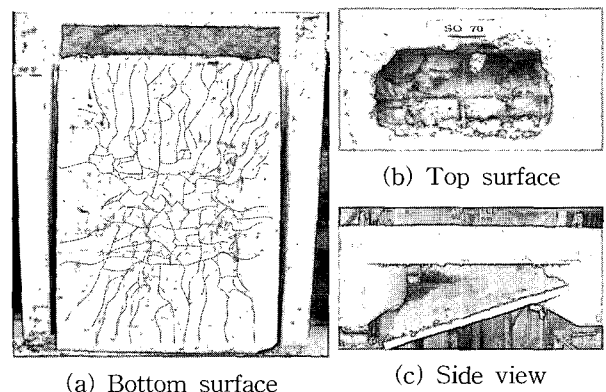


Fig. 12 Crack and failure pattern of CR-UE70 specimen

산한 후 이를 각 보강형식별 시험체와 비교하여 그 영향을 분석하였다. Fig. 14에 나타난 해석결과 전반적으로 CR-UE 시험체가 CR-E 시험체보다 에너지 소산량이 적게 측정되었다. 이는 CR-E 시험체에 비해 CR-UE 시험체가 탄성회복능력이 뛰어난 것으로 판단되어 구조물의 사용성 측면에서 효율적인 것으로 판단된다.

4.3.4 피로강도

피로한계는 통상적으로 200만회까지를 피로한계로 정의하나 본 연구에서는 바닥판의 피로한계의 확률이 50% 정도인 100만회를 기준으로 하여 피로한계를 정의하였다⁸⁾. 적용된 3set의 응력수준(stress level) 별로 파괴횟수에 해당하는 3개의 점을 도시하여 선형 회기분석을 이용한 피로곡선을 도출하였다. Fig. 15는 응력수준(S)-반복횟수(N) 관계를 나타내고 있으며, 이로부터 산정된 피로한계는 CR-UE 시험체의 경우 파괴하중의 64%로서 약 441KN, CR-E 시험체는 62%인 426KN, 그리고 무보강 시험체는 49%인 306KN로 나타났다.

또한 CFR로 보강된 시험체는 무보강 시험체에 비해 약 44% 정도 높은 피로성능을 보였으며 그 중 CR-UE 보강 시험체가 CR-E 보강 시험체보다 3.4% 정도의 다소 높은 피로성능을 나타내었다.

5. 결 론

- 1) 등방성 보강시험체(CR-E)와 이방성 보강시험체(CR-UE) 시험체의 파괴양상을 살펴보면 모든 시험체가 보강재의 항복전에 보강 모르타르의 계면탈락에 의한 편칭전단 파괴를 보였다. 따라서 본 보강에 대해 충분한 구조적 거동을 확보하기 위해서는 보강계면에 대한 심도 있는 안전성 분석이 필요할 것으로 판단되며, 이에 대해 보강면에서의 보강두께, 앵커볼트의 정착 깊이, 간격 및 chipping 면에 의한 부착성능 평가가 필요하다.
- 2) 모르타르와 CFR의 특성을 고려하여 보강된 바닥판의 편칭전단 강도식을 적용한 결과, 실험결과에 비해 편칭전단 이론에 의한 강도값이 약 10% 크게 평가되었다. 그러나 이는 보강면의 완전부착을 가정하여 해석한 보강시험체가 실제로는 실내하력에 도달하기 전에 계면탈락에 의한 조기파괴가 발생하였기 때문인 것으로 분석되었다.
- 3) 계면탈락에 의한 조기파괴 이전의 제한된 시험결과로부터 보강성능을 분석한 결과, 정적시험을 통해 CFR 보강공법의 강성 및 내하성능향상을 확인하였다. 또한 피로시험을 통해 약 44%의 피로성능이 향상되었다. 바닥판에 효율적인 보강방법에 대한 분석결과, 배력철근 방향의 보강비를 다소 크게하는 이방보강이 양방향의 보강비를 동일하게 하는 등방보강에 비하여 우수한

성능을 나타내었다. 따라서 CFR 보강재를 바닥판에 적용시 교축 및 교축 직각방향에 대하여 동일한 CFR 보강량을 적용하는 것보다는 주철근 및 배력철근의 보강량을 고려하여 전체적으로 등방성 거동을 하도록 보강하는 이방성 보강이 유효한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 산·학·연 공동 연구 개발사업(2003)의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

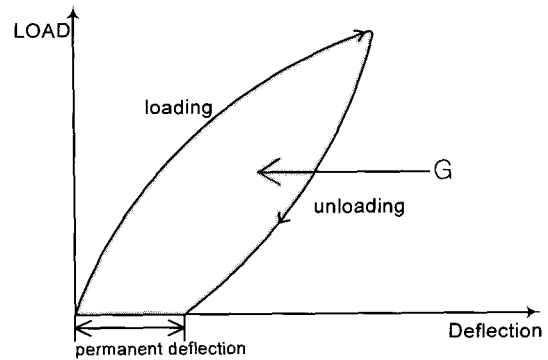


Fig. 13 Definition of energy release rate

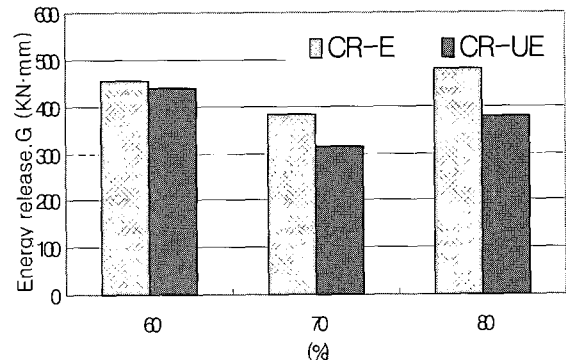


Fig. 14 Comparison of G of strengthened specimens

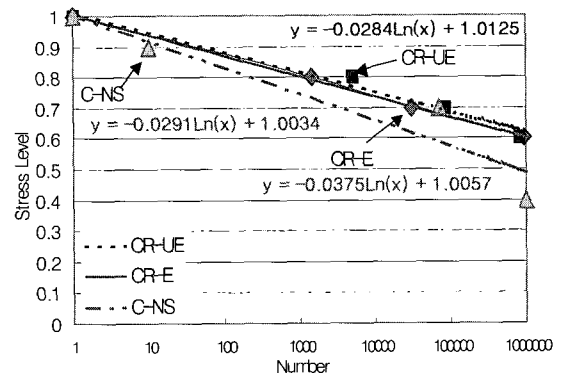


Fig. 15 S-N curve

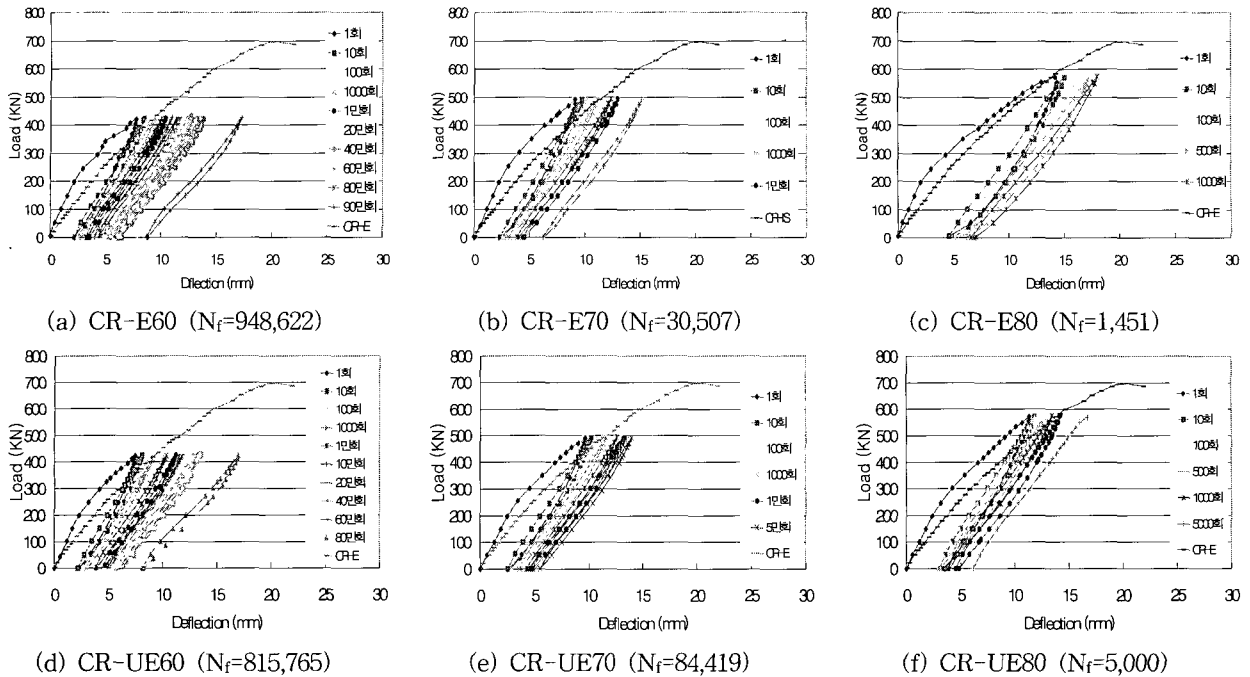


Fig 16 Load-deflection curves under cyclic load

참고 문헌

1. 심중성, "고강도 폴리머 몰탈 및 섬유Rod를 적용한 콘크리트 구조물의 동적시험에 의한 성능향상 효과분석 보고서", 한양대학교, 2001, pp.1~127.
2. 심중성, "탄소섬유쉬트 보강공법을 적용한 콘크리트 구조물의 정적 및 피로거동 연구 보고서", 한양대학교, 2001.
3. 오홍섭, "탄소섬유쉬트로 성능개선된교량 바닥판의 보강설계기법", 공학박사학위논문, 한양대학교, 2001.
4. 리폼시스템 외2 "표면에 가넷이 압력살포된 아라미드 섬유봉(Rod)를 이용한 철근콘크리트 구조물의 휨보강공법", 신기술지정보고서, 2003.
5. P. Menétey, R. Walther and T. Zimmermann, "Simulation of Punching Failure in Reinforced-Concrete Structures," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.123, No.5, 1997. pp.652~659.
6. B. Batchelor, E. Brain, P. Hewitt, Csagoly, P., and Holowka, M. "Investigation of the Ultimate Strength of Deck Slabs of Composite Steel/Concrete Bridge," *Transportation Research Record*, No.664, Transportation Research Board, 1978. pp.162~170.
7. 배인환, "강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 해석 및 설계기법연구", 공학박사학위논문, 한양대학교, 1998.
8. N.M. Hawkins, "Fatigue Design Consideration of Reinforcement in Concrete Bridge Decks," *ACI Structural Journal*, Vol.73, ACI, 1976, pp.104~115.
9. W.F. Chen, "Plasticity in Reinforced Concrete," McGraw-Hill, New York, USA, 1982. pp.328~333.
10. 유재명, "교량바닥판의 편칭전단강도 및 임계보강재비의 산정", 공학석사학위논문, 한양대학교, 2001.
11. ASCE-ACI Committee, "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members-Slabs," *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol.100, No.8, 1974. pp. 1543~1591.
12. M. Arduini, and A. Nanni, "Parametric Study of Beams with Externally Bonded FRP Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.5, 1997, pp.493~501.
13. M.P. Nielsen, "Limit Analysis and Concrete Plasticity 2nd Edition," CRC Press, New York, USA, 1998.
14. R. Park and T. Paulay, "Reinforced Concrete Structures," John Wiley & Sons, Inc. Toronto, Canada, 1975.

요 약

본 논문은 신공법인 carbon fiber rod로 보강된 교량 바닥판의 정적 및 피로성능개선 효과에 대한 것이다. 이 연구의 실험에서 적용된 보강변수는 등방성 및 이방성 보강이며, 보강성능을 평가하기 위하여 보강된 바닥판 시험체에 대해 정적 및 피로실험을 실시하여 그에 따른 내하성능, 균열 및 파괴양상 등을 분석하였다.

실험결과, 보강된 모든 시험체가 증설된 모르타르와 콘크리트와의 계면이 조기에 탈락하여 편칭전단 파괴되는 양상을 보였다. 보강성능을 살펴보면, CFR로 보강된 바닥판은 무보강 시험체에 비해 극한강도, 강성, 피로수명 등에서 우수한 것으로 나타났다. 또한 보강형식 측면에서는, 이방성 보강(CR-UE)이 등방성 보강(CR-E)보다 우수한 것으로 나타났다.

핵심용어 : carbon fiber rod(CFR), 계면탈락, 편칭전단, 등방성보강(CR-E), 이방성보강(CR-UE)