

교량 바닥판 콘크리트의 시공을 위한 GFRP근의 활용

김지홍*·주형중*·김병석**·윤순종***

Application of GFRP Re-bar in Concrete Bridge Deck Construction

J. H. Kim*, H. J. Joo*, B. S. Kim**, S. J. Yoon***

Key Words : concrete bridge deck, GFRP re-bar, load-deflection characteristics, flexural behavior

Abstract

In this paper, we present the results of an experimental research on the load-deflection characteristics of full-scale concrete bridge decks reinforced with GFRP re-bars. Similar researches have been conducted in many countries to extend the service life of concrete bridge decks, which are under harsh environmental condition. Concrete bridge decks are one of the major concerns for the maintenance of bridges. GFRP re-bar available in the domestic construction market was investigated and the concrete deck reinforced with GFRP re-bars was tested under flexure to investigate the applicability of GFRP re-bar on the bridge deck construction.

기호설명

A_f	GFRP근의 공칭단면적
E_f	FRP근의 탄성계수
f_f	GFRP근의 응력
f_{fu}	FRP근의 설계인장강도
f_{ck}	콘크리트의 설계기준압축강도
$f_{f,ave}$	GFRP근의 인장강도의 평균값
I_e	콘크리트 휨부재의 유효단면2차모멘트
M_d	설계휨모멘트
ϵ_{fu}	FRP근의 설계인장변형률
ϵ_{cu}	콘크리트의 극한압축변형률
$\epsilon_{f,ave}$	GFRP근의 극한인장변형률의 평균값
ρ_b	FRP근의 균형보강비

1. 서론

건설분야에서 가장 널리 사용되고 있는 재료중의 하나인 콘크리트는 내구성이 우수하여 반영구적인 구조물의 축조에 주로 사용되어 왔으며, 철골 및 철근을 사용하여 콘크리트의 단점을 보완한 콘크리트 합성 철골 또는 철근콘크리트의 개발은 건설재료 분야의 혁신적인 성장을 가져왔다. 그러나 콘크리트 구조물이 장기간 공기중에 노출되어 중성화되거나 겨울철에 눈이나 얼음을 녹일 목적으로 사용되는 제설제(deicing salt, CaCl₂) 및 해양 환경으로 인한 염화물의 침투, 확산 등 여러 가지 유해요소로 인하여 철근 등의 보강재가 부식되어 구조물의 성능이 저하되고 수명이 단축되는 등 심각한 문제점이 지적되고 있다⁽¹⁾.

이러한 문제점을 보완하기 위해서 현재 건설분야에서 신소재로 연구되고 있는 대표적인 재료는 섬유보강플라스틱(fiber reinforced plastic, FRP)이다. 기술선진국의 경우 이미 FRP근이 활용단계에 있지만, 국내에서는 FRP근의 생산기술이 보편화

* 홍익대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

** 한국건설기술연구원, 수석연구원

*** 정회원, 홍익대학교 토목공학과, 부교수

되어 있지 않고 FRP근을 사용한 콘크리트 구조물의 거동에 대한 이해도 부족한 상태에 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 개발된 FRP근 보강 콘크리트 바닥판의 휨거동에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하여 FRP근 보강 콘크리트 바닥판의 설계규준을 확립하기 위한 근거자료를 제공하고자 하였다.

본 연구에서 사용한 FRP근은 국내에서 생산된 GFRP근(glass fiber reinforced plastic re-bar)이며 인장시험을 수행하여 GFRP근의 역학적 성질을 조사하였다. 또한, GFRP근으로 보강된 콘크리트 바닥판의 휨실험을 수행하고 ACI Committee 440 (2000)에 따른 이론적 해석을 수행하여 그 결과를 실험결과와 비교, 분석하였다^(3, 4).

2. GFRP근의 인장특성

본 연구에서 사용한 GFRP근은 현재 국내에서 생산되고 있는 제품으로서 매트릭스 수지는 비닐 에스터(vinylester)이고 보강섬유는 유리섬유(E-glass fiber)이다.

GFRP근의 인장시험은 25 tonf 용량의 UTM을 사용하여 변위제어방식(하중속도 5 mm/min)으로 수행하였다. 공칭지름이 9 mm인 GFRP근을 사용하여 총 5개의 시험시편을 제작하였으며, Fig. 2 는 제작한 시편을 보여주고 있다⁽²⁾.

게이지길이(gage length, 150 mm) 내의 길이 변화는 LVDT (linear variable differential transformer) 를 사용하여 측정하였으며, 측정 데이터는 Data Acquisition System을 통해서 Computer에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다.

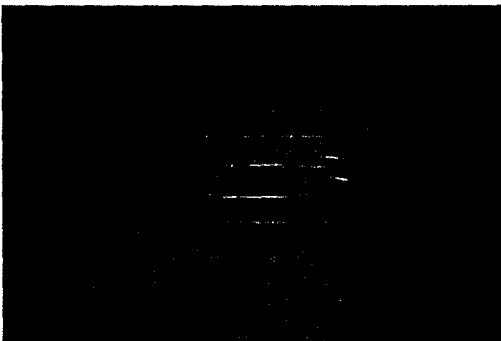


Fig. 1. Tensile test specimen of GFRP re-bar

Fig. 2는 인장시험결과 중 대표적인 시편 No. 3에 대한 응력-변형률 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

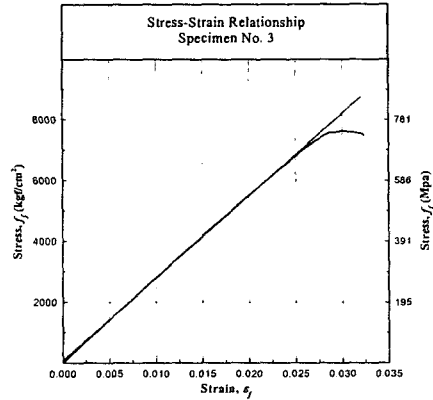


Fig. 2. Stress-strain relationship of GFRP re-bar (Tensile specimen No. 3)

인장시험결과로부터 GFRP보강 콘크리트 휨부재의 설계에 적용하기 위한 GFRP근의 설계인장강도(f_{fu}), 설계인장변형률(ϵ_{fu}) 및 탄성계수(E_f)는 다음 식으로부터 구할 수 있다^(4, 5).

$$f_{fu} = f_{fu,ave}^* - 3\sigma_f \quad (1a)$$

$$\epsilon_{fu} = \epsilon_{fu,ave}^* - 3\sigma_\epsilon \quad (1b)$$

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\epsilon_{fu}} \quad (1c)$$

식 (1a), (1b)에서 $f_{fu,ave}^*$ 와 $\epsilon_{fu,ave}^*$ 는 각각 인장시험으로부터 얻은 인장강도와 극한인장변형률의 평균값이고, σ_f 와 σ_ϵ 는 인장시험으로부터 얻은 인장강도와 극한인장변형률 각각의 표준편차이다.

Table 1은 인장시험으로부터 구한 GFRP근의 인장강도, 극한인장변형률과 식 (1)을 사용하여 계산한 설계기준값들을 정리하여 나타낸 것이다.

Table 1. Tensile test result

Specimen No.	1	2	3	4	5
f_{fu}^*	761	655	761	749	763
MPa (kgf/cm ²)	(7.782)	(6.681)	(7.761)	(7.683)	(7.784)
ϵ_{fu}^*	0.0305	0.0264	0.0298	0.0267	0.0277

$$f_{fu} = 588 \text{ MPa (6,008 kgf/cm}^2\text{)}, \epsilon_{fu} = 0.0228, E_f = 26,166 \text{ MPa (267,005 kgf/cm}^2\text{)}$$

GFRP근의 균형보강비(ρ_b)는 식 (1a), (1c)를 사용하여 구한 설계기준값들을 적용하여 다음 식 (2)와 같이 계산할 수 있다^(4, 5).

$$\rho_b = 0.85\beta_1 \frac{f_{ck}}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2)$$

여기서 β_1 은 콘크리트의 압축강도에 따라 결정되는 상수로서 철근콘크리트 휨부재에 적용하는 값과 같다. 또한 f_{ck} 와 ϵ_{cu} 는 콘크리트의 설계기준압축강도와 극한압축변형률이다.

3. GFRP근 보강 콘크리트 바닥판의 휨거동

3-1 휨실험

실험시편의 제작은 설계기준압축강도 270 kgf/cm²인 보통콘크리트를 사용하였으며, GFRP근의 보강량은 균형보강비(ρ_b)의 1.4배 이상이 되도록 결정하였다. Table 2는 시편의 크기와 보강량을 보여주고 있다.

Table 2. Specimen dimension and GFRP re-bar quantity

Specimen No.	Width (cm)	Height (cm)	Length (m)	A_f (cm ²)	ρ_f
Slab No. 1	25	100	4	12.85	0.0058
Slab No. 2	25	100	4	17.13	0.0078
Slab No. 3	25	100	4	21.43	0.0097

GFRP근의 변형률을 측정하기 위해 중앙에 변형률게이지(strain gage, 120 Ω)를 부착하고 피복하였다. 또한, 콘크리트와의 부착강도를 증가시키기 위해 지름이 9mm인 GFRP근을 3개씩 다발형태로 조립하여 배근하였다.

재하장치는 100 tonf 용량의 Actuator (MTS)를 사용하였으며, 모든 실험시편에 대해 삼등분점재하시험(third point bending test)을 실시하였다. 삼등분점재하를 위해 가력보를 설치하였고, 하중은 선형분포하중(폭방향)으로 재하하였다. Fig. 3은 실험장치 및 시편의 설치상태를 보여주고 있다.

하중은 변위제어방식으로 재하하였고 처짐이 30 mm까지 발생할 경우는 1.0 mm/min 로, 그 이상의 처짐이 발생하는 경우에는 2.5 mm/min 의 속도로 재하하였다. 처짐은 밀면의 중앙에 폭방향으로 3개의 LVDT를 설치하여 측정하였다. Fig. 4는 No. 3 시편의 최종파괴된 모양을 나타낸 것이다.

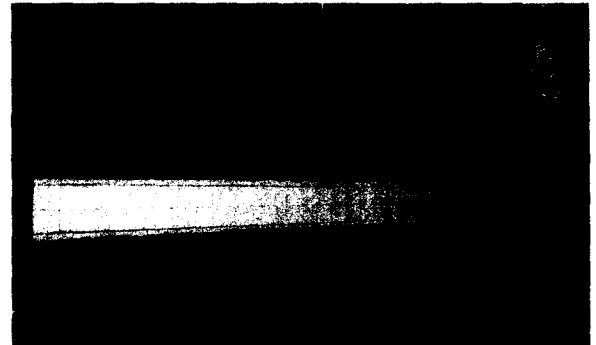


Fig. 3. Specimen setting (Slab No. 3)

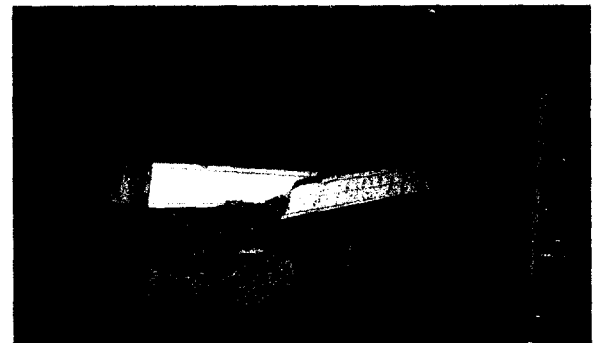


Fig. 4. Failure mode (Slab No. 3)

3-2 이론적 해석

본 연구에서는 GFRP근의 보강량이 균형보강비보다 크도록 모든 실험시편을 설계하였다. GFRP근의 보강비가 균형보강비보다 큰 경우 콘크리트의 압축파괴가 발생하며, 이와 같이 FRP근의 보강비가 균형보강비보다 큰 직사각형단면보의 응력과 변형률의 분포는 Fig. 5와 같다^(2, 3).

Fig. 5에서 A_f 는 GFRP근의 단면적이며, 콘크리트의 압축변형률이 극한압축변형률(ϵ_{cu})에 도달하더라도 GFRP근의 응력(f_f)은 설계인장강도(f_{fu})보다 낮은 응력상태에 있게 된다.

Fig. 5와 같은 직사각형단면보의 설계휨모멘트 (M_d)는 단면력의 평형조건으로부터 식 (3)과 같이 유도된다⁽⁴⁾.

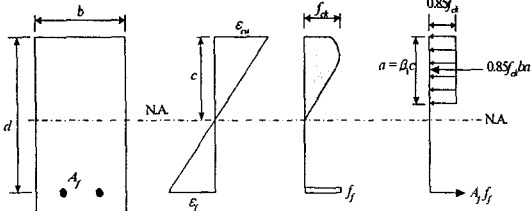


Fig. 5. Stress and strain distribution

$$M_d = \phi M_n = \phi A_s f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3)$$

철근콘크리트 휨부재와 마찬가지로 콘크리트를 탄성체로 가정하면 GFRP근으로 보강된 콘크리트 휨부재의 처짐은 부재의 단면2차모멘트에 반비례한다. 그러나 GFRP근의 탄성계수는 철근의 탄성계수에 비해 현저히 작고, GFRP근과 콘크리트의 부착강도가 철근과 콘크리트의 부착강도에 비해 상대적으로 작기 때문에 ACI Committee 440 (2000)에서는 철근콘크리트 휨부재에 적용하던 Branson이 유도한 유효단면2차모멘트 계산식을 수정하여 식 (4)와 같은 유효단면2차모멘트(I_e)식을 제안하였다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right\} I_{cr} \leq I_g \quad (4)$$

$$\beta_d = \alpha_b \left\{ \frac{E_f}{E_s} + 1 \right\} \quad (5)$$

E_s 는 철근의 탄성계수이며, α_b 는 콘크리트와 FRP근의 부착력과 관련된 계수로서, GFRP근의 경우 0.5를 사용하도록 권장하고 있다⁽⁴⁾.

본 연구에서는 식 (4)의 유효단면2차모멘트식을 사용하여 1방향 슬래브(one-way slab)의 탄성 처짐을 계산하였다.

3.3 결과비교

ACI Committee 440 (2000)에서 제안한 이론적

인 방법을 사용하여 해석한 결과와 실험결과를 비교, 분석하여 GFRP근 보강 콘크리트의 활용성을 검토하였다.

Table 3은 이론적으로 해석한 결과와 실험결과를 정리하여 나타낸 것이다. 이론식에 의해 추정된 최대하중은 실험으로부터 구한 최대하중의 82%~96%사이에 있었으며, 이론적으로 계산한 최대처짐은 실험으로부터 구한 최대처짐의 81%~107%사이에 있었다. Fig. 6은 3개의 시편중 No. 3 시편에 대한 하중-처짐관계를 나타낸 것으로 초기하중 구간내에서 직선으로 증가하다가 하중이 증가하여 콘크리트에 균열이 발생하면서 그 기울기가 급격히 작아짐을 알 수 있다.

Table 3. Comparison of results

실험시편 번호	Slab No. 1	Slab No. 2	Slab No. 3	
균열발생 하중 (P_{cr} , kN)	이론 (P_{cr} (theory))	40.67	40.67	40.67
	실험 (P_{cr} (experiment))	40.29	41.75	45.47
최대하중 (P_{max} , kN)	이론 (P_{max} (theory))	202.57	230.79	254.51
	실험 (P_{max} (experiment))	211.58	281.36	283.12
최대처짐 (δ_{max} , mm)	이론 (δ_{max} (theory))	99.27	94.22	88.05
	실험 (δ_{max} (experiment))	93.03	116.57	93.25

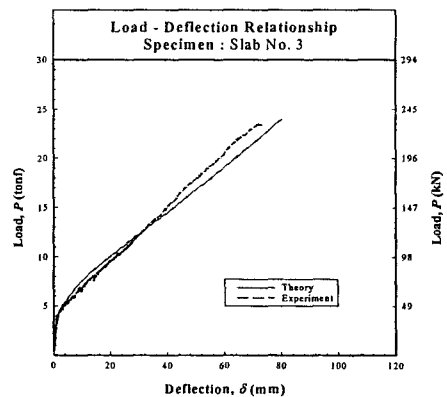


Fig. 6. Load-deflection relationship (Slab No. 3)

실험결과 모든 실험시편의 파괴양상은 과도한 처짐변형과 균열발생 후 지점으로부터 경간길이의 1/9정도 떨어진 곳에서 전단에 의해 발생한 균열이 압축부까지 진전되면서 갑작스런 파괴가

발생하였다.

Fig. 7은 GFRP근 보강량에 따른 최대공칭휨모멘트의 변화를 보여주고 있다.

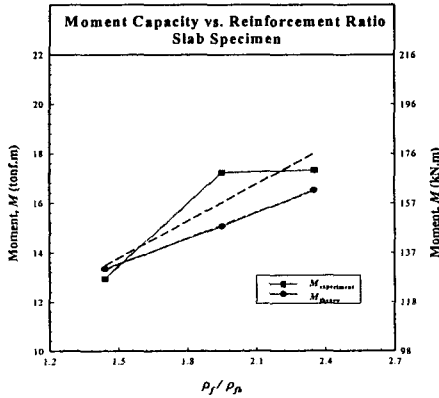


Fig. 7. Moment capacity vs. reinforcement ratio

5. 결론

본 연구는 GFRP근으로 보강한 콘크리트 바닥판의 거동에 관한 이론적, 실험적 연구로서 GFRP근으로 보강한 콘크리트 휨부재의 해석 및 설계방법에 대해 조사하였으며, 조사된 방법에 따라 GFRP근으로 보강된 시편을 실험 크기로 설계하고 제작하였다. 제작한 시편에 대한 휨실험을 수행하였으며, ACI Committee 440 (2000)에서 제안한 방법을 적용한 이론적 해석결과와 실험결과를 비교, 분석하였다. 본 연구의 수행을 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 국내에서 생산한 GFRP근의 인장특성을 조사한 결과, 설계인장강도는 약 600 MPa 이었으며, 최대인장변형률은 약 0.0228 이고, 탄성계수는 약 26,000 MPa 이었다.

(2) GFRP근으로 보강한 슬래브 실험시편에 대해 이론적으로 추정된 공칭휨강도는 실험결과와 5 ~ 20 %의 차이를 나타내었으며, GFRP근의 보강량이 증가할수록 최대휨모멘트는 증가하였다.

(3) 각 실험시편의 하중-처짐관계를 조사한 결과 콘크리트의 인장균열이 발생하는 점을 기준으로 서로 기울기가 다른 두 개의 직선관계(bilinear)를 나타내었으며, 균열발생 후 하중-처짐관계의 기울기가 급격히 작아지면서 처짐이 크게 증가하였다.

(4) ACI Committee 440 (2000)을 적용한 하중-

처짐 거동에 대한 예측은 실험결과와 잘 일치하였으며, GFRP근의 보강량이 균형보강비보다 큰 경우에 좀더 정확한 예측이 가능함을 확인하였다.

교량 바닥판 콘크리트의 보강재로서 FRP근을 활용하기 위해서는 강도에 대한 한계상태와 더불어 사용성에 대한 한계상태의 결정이 필요하다.

현재 일본, 미국, 유럽 등 기술선진국에서는 FRP근을 보통콘크리트의 보강재로서 뿐만아니라 프리스트레스트 콘크리트의 텐던(tendon)의 대체 재료로서도 사용되고 있는 실정이다. 따라서 우리나라에서도 FRP근에 대한 체계적인 연구가 계속적으로 수행되어 FRP근에 관한 설계규준을 확립해야만 FRP근의 건설분야에 대한 활용이 가능할 것으로 생각된다.

후기

본 연구는 한국건설기술연구원의 "교량용 장수명 합리화 바닥판 개발(I)"과제중 "FRP 보강 콘크리트 바닥판의 거동에 관한 연구"에 의한 연구비 지원과 (주)동원건설의 GFRP근을 지원받아 이루어진 것으로 두 기관의 지원에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) 문한영, 김성수, 김홍삼, "우리나라 콘크리트 구조물의 철근 부식 현황", 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제13권, 5호, 2001, pp. 58-63.
- (2) 윤순중, "FRP 보강 콘크리트 바닥판의 거동에 관한 연구," 연구보고서, 홍익대학교부설 과학기술연구소, 2002.
- (3) ACI Committee 440R. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, American Concrete Institute, U.S.A., 1996.
- (4) ACI Committee 440. *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar*, American Concrete Institute, U.S.A., 2000.
- (5) Nanni, A. "Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 11, November, 1993, pp. 3344-3359.