

FRP Box와 판으로 보강된 교량 바닥판 콘크리트의 휨거동

남정훈* · 정상균** · 윤순중*** · 김병석**** · 조근희*****

Flexural Behavior of Bridge Deck Concrete Reinforced with FRP Box and Plate

J. H. Nam*, S. K. Jeong**, S. J. Yoon***, B. S. Kim****, K. H. Cho*****

Key Words: bridge deck concrete, FRP Box, FRP Plate, GFRP Re-bar, CFRP Grid

Abstract

In recent years, the deterioration of reinforced concrete structures has become a serious problem in civil engineering fields. This situation is mainly due to corrosion of steel reinforcing bars embedded in concrete. Recently, there has been a greatly increased demand for the use of FRP (fiber reinforced plastic) in civil engineering field due to their superior mechanical and physical properties. This paper presents an experimental study on the behavior of concrete bridge deck reinforced with FRP Box, FRP Plate, and FRP Re-bar. In the study, mechanical properties of FRP Box, FRP Plate, GFRP Re-bar, and CFRP Grid have been investigated. Full scale one-way deck slab was tested under four point lateral load (equivalent to actual wheel load of DB-24 including impact). Load-deflection and load-strain data were collected through LVDT's and strain gages attached to the specimen.

1. 서론

기존 교량 바닥판은 차량하중을 직접 받고 동결융해, 습윤건조를 반복하며, 염화칼슘 등 열화 및 부식 촉진재료와 접촉하여 콘크리트와 철근의 부식이 발생하게 되므로 교량의 주요 구조부재 중 가장 수명이 짧은 부분이다⁽¹⁾.

본 연구는 이러한 교량 바닥판의 단점을 보완하기 위해 한국건설기술연구원에서 수행하고 있는 "장수명 합리화 교량 바닥판 개발(2차년도)"에 관한 연구의 일부로 부식되기 쉬운 강재를 사용하지 않고 섬유보강플라스틱(fiber reinforced plastic, FRP)만으로 콘크리트를 보강한 바닥판을 개발하는데 목적을 두고 있다.

FRP는 기존 구조용 재료에 비해 단위 중량당 강도가 크고, 비자성, 비전도성이며, 특히 부식에 대한 저항성이 매우 크다는 장점을 가지고 있기 때문에 현재 건설분야에서 보수보강용 재료로 사용이 증대되고 있으며, 선진국을 중심으로 건설 구조용 신소재로 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 건설 구조물에 있어서 기존의 건설재료(콘크리트, 강재)보다 경량이고, 큰 인성과 내구성을 가지는 FRP의 활용이 점진적으로 늘어가는 추세이다.

본 연구와 관련하여 앞서 수행한 GFRP Re-bar로 보강한 바닥판의 휨거동에 대한 연구결과⁽²⁾, 모든 실험체에서 처짐이 과도하게 발생하며 전단 파괴되는 거동을 나타내었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 GFRP Box와 GFRP Plate로 인장보강하여 휨강성을 증가시키고, CFRP (carbon fiber reinforced plastic Grid를 사용하여 전단보강한 콘크리트 교량 바닥판 실험체를 실제 현장에서 적용되는 치수로 설계, 제작하고 휨실험을 수행하여 결과를 분석하였다.

* 홍익대학교 토목공학과 대학원 박사과정
** 정회원, 홍익대학교 과학기술연구소 연구원
*** 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수
**** 한국건설기술연구원 수석연구원
***** 한국건설기술연구원 선임연구원

2. 재료의 역학적 성질

교량 바닥판 재료로 본 연구에 사용된 FRP Box, FRP Plate, FRP Re-bar, CFRP Grid, 콘크리트 재료의 역학적 성질을 조사하고 이를 설계에 반영하였다.

2.1 FRP Box의 역학적 성질

본 연구에서 사용된 FRP Box (75×75 mm, 두께 6.5 mm)는 유리섬유(glass fiber)와 폴리에스터(polyester)를 사용하여 인발성형(Pultrusion) 방법으로 제작되었다.

보강섬유가 배치된 부재의 길이방향을 1방향, 그 직각방향을 2방향이라 정의하고, 재료의 성질 방향 1에 대해서는 인장 및 압축시험(시편수 각 5개)을 수행하였으나, 재료의 성질방향 2에 대해서는 시편의 길이를 확보할 수 없었기 때문에 압축시험(시편수 5개)만을 수행하였다.

인장시험은 ASTM D3039-00에서 제시한 방법으로 시험하였고, 압축시험은 Yoon (1993)이 고안한 압축시험장치⁽³⁾를 제작하여 시험하였다.

Table 1. Tensile and compression test results

Property	Longitudinal direction		Transverse direction
	Tensile	Compression	Compression
Strength (MPa)	530	480	108
Modulus of Elasticity (MPa)	31,770	31,870	12,945
Poisson's Ratio	0.335	0.322	0.154

Table 1은 재료의 역학적 성질 시험결과의 평균값을 나타낸 것으로 표에서 보여주고 있는 바와 같이 1방향에 대한 인장시험결과와 압축시험결과의 평균값이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 2방향에 대한 역학적 특성은 1방향과는 다를 수 있으나, 1방향에 대한 인장 및 압축거동이 유사하게 나타난 점을 고려하여 2방향에 대한 인장특성을 압축시험 결과로부터 추정할 수 있을 것으로 생각된다.

2.2 FRP Plate의 역학적 성질

본 연구에서는 거푸집으로서의 활용과 주 인장재로 배치된 FRP Box를 고정시키기 위한 목적으

로 FRP Plate를 바닥판 실험체의 하단에 설치하였다. FRP Plate는 수적층법(Hand Lay-up)으로 제작되었으며, 총 48층([(45/0/-45/90)₆]_s)으로 6.24 mm의 두께로 적층하였다. FRP Plate의 적층 방법이 대칭이며 적층수가 많은 경우 재료의 성질을 등방성으로 간주할 수 있다는 연구결과⁽⁴⁾에 따라 본 연구에서는 인장시험을 통해 FRP Plate 길이방향의 인장특성만을 조사하였다.

5개의 시편을 시험한 결과 FRP Plate의 인장강도는 평균 240 MPa이고 탄성계수는 평균 14 GPa을 나타내었다.

2.3 FRP Re-bar의 역학적 성질

본 연구에서 사용한 FRP Re-bar는 유리섬유와 비닐에스터(vinylester)를 사용하여 공칭지름이 9.53 mm가 되도록 국내에서 인발성형하여 생산된 것이다. 인장시험은 ASTM D3916에서 규정하고 있는 방법이 있으나, 1993년 Faza와 GangaRao의 연구결과⁽⁵⁾에 따르면 시험규정이 실제 시험에 적용하기가 어려운 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 1998년 Castro 등에 의해 연구된 결과⁽⁶⁾를 참고하여 5개의 시편을 제작하고 시험하였다.

시험결과, 인장강도는 평균 735 MPa이었으며 탄성계수는 평균 24.4 GPa을 나타내었다.

2.4 CFRP Grid의 역학적 성질

전단보강재로 사용된 탄소섬유그리드(CFRP Grid)는 grid 사이의 간격은 100 mm이며 grid 단면적은 평균 25.4mm²로 제작된 것을 사용하였다. 사용된 CFRP Grid의 역학적 성질은 이미 수행된 연구결과⁽⁷⁾를 사용하였다.

설계에 반영한 CFRP Grid의 평균 인장강도는 1,667 MPa이며, 탄성계수는 90.2 GPa이다.

2.5 콘크리트의 압축강도 시험

바닥판 실험체의 제작에 사용된 콘크리트 공시체의 압축강도시험은 KS F 2405 시험법에 따라 3일, 7일, 15일(바닥판 콘크리트 휨실험), 그리고 28일에 각각 3개씩 시험하였다. 시험결과 바닥판 실험체의 휨실험을 수행할 때(재령 15일)의 콘크리트의 압축강도는 약 32.4 MPa이었으며, 이 결과를 사용하여 바닥판의 휨거동에 대한 이론적

인 해석을 수행하였다.

3. FRP Box와 판으로 보강된 교량 바닥판의 휨실험

3.1 바닥판 실험체의 제작

바닥판의 휨실험에 사용된 실험체는 일반적인 교량 바닥판의 크기(폭:1 m, 높이:250 mm)로 하였고, 3.3 m의 길이(경간: 3 m)로 총 7개의 시편을 제작하였다.



Fig. 1. Details of bridge deck specimen

바닥판 실험체의 FRP Box 보강량은 ACI Committee 440R에서 제안한 방법⁽⁸⁾을 사용하여 결정하였다. 충격을 포함한 DB-24 후륜하중 ($P=122.4$ kN)에 의한 최대휨모멘트에 저항하기 위한 FRP Box 인장보강량을 계산한 결과 6개 이상 배치할 경우 강도에 대한 한계상태를 만족하였다. 본 연구에서는 Fig. 1(a)에서 보여주고 있는 바와 같이 6개의 FRP Box를 FRP Plate 위에 등간격으로 배치하여 부착하고 표면에는 콘크리트와의 부착강도를 증가시키기 위하여 규사와 예폭시를 사용하여 코팅을 한 후 일주일간 양생하였으며, 전단보강재를 설치하여 콘크리트를 타설하고 증기양생 하였다.

전단보강재는 Fig.1(b)에서 보여주고 있는 바와 같이 CFRP Grid와 FRP Re-bar를 이용하여 제작하였는데, 본 연구에서는 전단보강 효과를 검토하기 위하여 전단보강하지 않은 시편 1개, 보강간격이 200mm인 시편 3개, 간격이 400mm인 시편 3개를 제작하였다.

3.2 바닥판 실험체의 휨실험

바닥판 휨실험은 실험체를 15일간 양생한 후 실시하였다. 바닥판 휨실험에 사용된 하중장치는 MTS사의 100톤 용량 Actuator(최대변위: 500 mm)를 사용했다. 데이터 수집은 TDS-303을 사용하였

고, 실험체 중앙의 각 재료 표면에 strain gage와 LVDT(linear variable differential transformer)를 설치하였으며, 재하된 하중과 변위는 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다.

하중재하는 Fig. 2에 보여주고 있는 바와 같이 바닥판 실험체 중앙에 강판을 설치하여 후륜하중의 접지면적만큼 분포하중이 작용하도록 하였다⁽⁹⁾.



Fig. 2. Installation flexural test specimen

3.2 휨실험 결과비교 및 분석

휨실험 결과 Fig. 3(a)에서 보여주고 있는 바와 같이 모든 실험체에서 균열이 하중 증가에 따라 바닥판 중앙부부터 지점부로 등간격으로 분포하였는데, 이는 하중재하에 따른 부재내의 응력분포가 양호함을 나타낸다.

각 실험체의 균열형상은 CFRP Grid 간격이 200mm인 경우에는 이론적으로 예측한 파괴하중에 도달할 때까지 전단균열의 진전없이 휨균열이 전 부재에 걸쳐 고르게 분포하였으며, 실험체가 파괴되는 하중에 가까워짐에 따라 전단균열이 점차 진전하였다. CFRP Grid 간격이 400mm인 경우와 CFRP Grid를 배근하지 않은 경우에는 하중이 증가함에 따라 전단균열이 크게 진전하였고 이 균열의 진전이 실험체의 파괴를 유도한 것으로 생각된다.

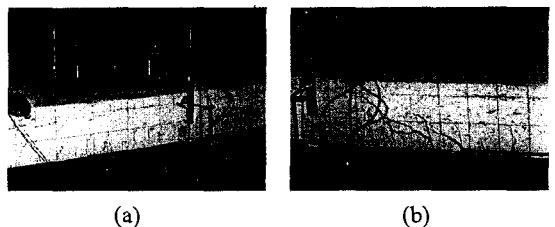


Fig. 3. Flexural test

바닥판 실험체의 최종 파괴양상은 전단보강 간격이 200mm인 실험체 중에서 1개만이 콘크리트 상단 압축부에서 파괴가 발생하였고, 나머지 실험체는 Fig. 3(b)에서 보여주고 있는 바와 같이 모두 FRP 인장보강재와 콘크리트의 부착면이 파괴되면서 동시에 전단파괴와 압축파괴의 조합으로 인한 취성파괴를 보였다. 이러한 현상은 본 연구에서 휨실험체를 설계, 제작할 때 콘크리트와 FRP 사이의 부착파괴를 고려하여 FRP Box와 FRP Plate 표면에 규사코팅을 했음에도 확실한 부착효과를 거두지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 향후 수행될 연구에서는 FRP와 콘크리트 사이에 보다 확실한 부착효과를 갖는 물리적, 기계적 전단연결재의 개발과 활용에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

Figs. 4와 5는 휨실험으로부터 얻은 대표적인 하중-처짐관계를 전단보강량에 따라 분류하여 이론식에 의한 결과와 비교한 것으로, 실험체의 휨거동은 공통적으로 하중재하 초기에는 선형으로 증가하다가 콘크리트에 균열이 발생하면서 그 기울기가 감소하여 점차 비선형 거동을 보였는데, 이는 실험체의 거동이 콘크리트의 비선형거동에 의해 지배를 받기 때문인 것으로 생각된다.

본 연구의 휨실험체는 DB-24 후륜하중 하에서 최대휨모멘트에 저항하도록 설계되었는데, Figs. 4와 5에서 보여주고 있는 바와 같이 최대하중이 설계하중의 약 4.8~5.9배로 안전측에 있음을 알 수 있었다.

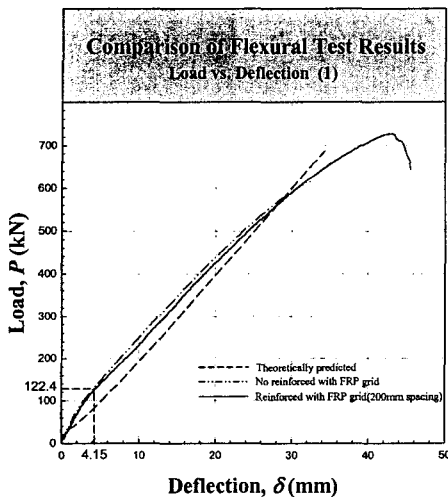


Fig. 4. Comparison of flexural test results(1)

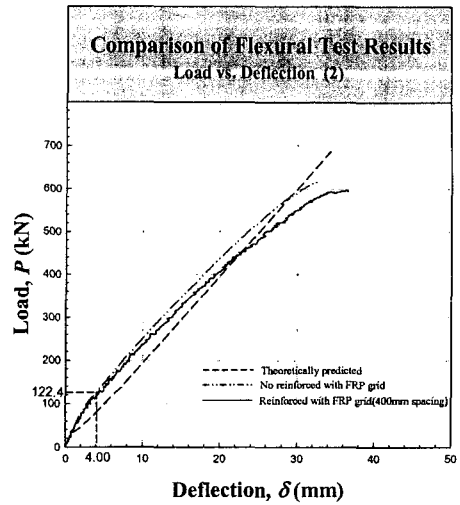


Fig. 5. Comparison of flexural test results(2)

Fig. 4는 전단보강 간격을 200 mm로 배근했을 경우, 전단보강하지 않은 경우와 이론식에 의한 하중-처짐관계와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보여주고 있는 바와 같이 200 mm 간격으로 전단보강한 경우와 전단보강하지 않은 경우를 비교할 때 하중재하 초기는 유사한 거동을 보였으나 파괴강도는 크게 나타났다. 400 mm 간격으로 전단보강한 경우는 Fig. 5에서 보여주고 있는 바와 같이 전단보강하지 않은 경우와 파괴강도가 거의 같게 나타났다.

바닥판 실험체의 휨실험 결과 FRP Re-bar를 주 인장보강재로 사용한 실험체에 비해 인장균열수가 적었으며 균열 폭 또한 작게 나타났다. 또한, 사용하중상태에서의 최대처짐은 약 4.00~5.55 mm(L/540~L/750)로 나타났는데, 이는 FRP를 사용하여 제작한 교량의 처짐제한에 대한 연구결과 (L/400)⁽¹⁰⁾와 비교하면 사용성을 만족하지만, AASHTO 시방서⁽¹¹⁾의 차량하중이 작용하는 구조물에 일반적으로 적용하고 있는 처짐규정(L/800)을 만족하지는 못한다. 따라서, FRP 보강 콘크리트 바닥판의 처짐을 감소시키기 위한 연구와 함께 이러한 부재의 처짐제한 규정을 확립하기 위한 연구가 좀 더 수행되어야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 FRP보강 콘크리트 바닥판의 휨거동에 관한 실험적 연구로서, FRP Box, FRP Plate 부착판으로 인장보강하고 CFRP Grid로 전단보강된 교량 바닥판 실험체를 실물 크기로 설계, 제작하여 휨실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) FRP Box의 인장 및 압축시험을 수행한 결과 1방향(보강섬유 배치방향)에 대해서는 인장 및 압축에 대한 역학적 성질이 유사한 것으로 나타났다.

(2) FRP Box로 보강한 교량 바닥판은 부식에 대한 염려가 없으며, 교량의 자중을 감소시키는 효과가 있다. 그리고 본 연구에서 DB-24 후륜하중(충격포함 122.4 kN) 하에서 최대휨모멘트에 저항하도록 FRP Box의 보강량을 결정하였는데, 최대하중이 설계하중의 약 4.8~5.9배로 안전측에 있음을 알 수 있었다. 또한, AASHTO 규정에 의한 처짐에 대한 사용한계⁽¹⁾는 만족시키지 못한 결과를 얻었으나 이 규정은 철근콘크리트 교량에 대한 규정이므로 FRP 보강 교량의 처짐제한에 대한 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

(3) CFRP Grid의 전단보강 간격을 변화시켜 바닥판의 휨실험을 수행한 결과 전단보강재의 간격이 바닥판의 유효깊이 이하인 경우 휨강도를 증가시키는 효과(11% 이상)가 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원의 "교량용 장수명 합리화 바닥판 개발(II)"과제의 연구비 일부를 지원받아 수행된 것으로 이 지원에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) 문한영, 김성수, 김홍삼 (2001). "우리나라 콘크리트 구조물의 철근 부식 현황," *콘크리트학회지*, 한국콘크리트학회, 제13권, 5호, pp. 58-63.
- (2) 윤순중 (2002). "FRP 보강 콘크리트 바닥판의 거동에 관한 연구," *연구보고서*, 홍익대학교부설 과학기술연구소.
- (3) Yoon, S. J. (1993). "Local Buckling of

Pultruded I-Shape Columns," *Ph. D. Thesis*, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.

- (4) Barbero E. J. (1999). *Introduction to Composite Materials Design*, Taylor & Francis, Inc., Philadelphia.
- (5) Faza, S. S. and GangaRao, H. V. S. (1993). "Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete," in *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, Developments in Civil Engineering, Vol.42, A. Nanni, Ed., Elsevier, Amsterdam, pp.167-188.
- (6) Castro, P. F. (1998). "Tensile and Non-destructive Testing of FRP Bars," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, No. 1, February, pp. 17-27.
- (7) 김학균, 정재호, 정상균, 윤순중 (1999). "탄소섬유그리드 보강 콘크리트 부재의 거동에 대한 수치해석적 연구," *추계학술발표대회 논문집*, 한국복합재료학회, pp. 143-148.
- (8) ACI Committee 440 (2000). *Guide for the Design Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar*, American Concrete Institute, U.S.A.
- (9) *도로교 설계기준* (2002). 건설교통부.
- (10) Demitz, J. R., Mertz, D. R., and Gillespie, J. W. (2003). "Deflection Requirements for Bridges Constructed with Advanced Composite Materials," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, vol. 8, No. 2, March, pp. 73-83.
- (11) American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1994). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) Bridge Design Specification*, 1st Ed., Washington, D.C.