

## FRP-콘크리트 합성 바닥판의 최적설계에 관한 연구

### The Study of Optimal Design of FRP-Concrete Composite Deck

이 현 섭\*                  조 성 배\*\*                  박 장 호\*\*\*                  신 영 석\*\*\*\*  
Lee, Hyun-Sub              Cho, Soung-Bae              Park, Jang-Ho              Shin, Yung-Seok

---

#### ABSTRACT

The objective of this study is to optimally design FRP-concrete members of a bridge structure. Using the GENESIS7.0 that is a commercial optimization program, we performed an optimal design with design parameters that consist of height, width of FRP member, height of concrete. And we practiced an optimal design with the design variables, thickness of upper flange, bottom flange, and web. The results of these studies are summarized as follows : (1) Thickness of composite-concrete is proper at over 10cm. (2) FRP member reaches the optimal section when the width of the FRP member is 20cm, its height is 10cm and the height of the composite-concrete is 12cm.

---

#### 1. 서    론

교량 바닥판은 차량하중을 직접 받고, 동결·융해, 습윤·건조를 반복하며, 염화칼슘 등 열화 및 부식 촉진제와 접촉하므로 교량을 구성하는 주요 구조부재중 가장 손상이 많이 발생하고, 수명이 짧은 구조이다. 국내 교량 바닥판의 평균 수명은 13년 정도인 것으로 인식되고 있으며, 이는 일반적인 교량의 평균수명 50년에 비하여 매우 짧은 실정이다. 국내의 바닥판 시공개념은 일반적으로 동바리를 설치하고 현장타설 콘크리트로 시공하는 철근콘크리트 바닥판이 주종을 이루고 있으며, 이는 공기가 길고 콘크리트의 건조수축, 온도응력 등에 의해 비교적 초기균열이 많이 발생되는 단점이 있다. 이에 따라 선진 외국의 경우에는 바닥판의 중요성을 인식하고 이미 1980년대부터 재료적인 측면과 구조형식적인 측면에서 새로운 바닥판 시스템을 개발하고 새로운 기준을 작성하는 작업을 지속적으로 추진해 오고 있다. 일본의 경우 바닥판 품질향상 및 내구성 확보를 위해 프리캐스트 바닥판 및 연결부 개발, 강·콘크리트 합성바닥판 개발, FRP·콘크리트 합성 바닥판 개발 등에 대해 노력하고 있으며, 미국의 경우도 국가연구개발 사업을 통해 바닥판 개발에 대한 연구 및 시험시공을 지속적으로 추진하고 있다.

---

\*    학생회원 · 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

\*\*   학생회원 · 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

\*\*\*    정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 조교수

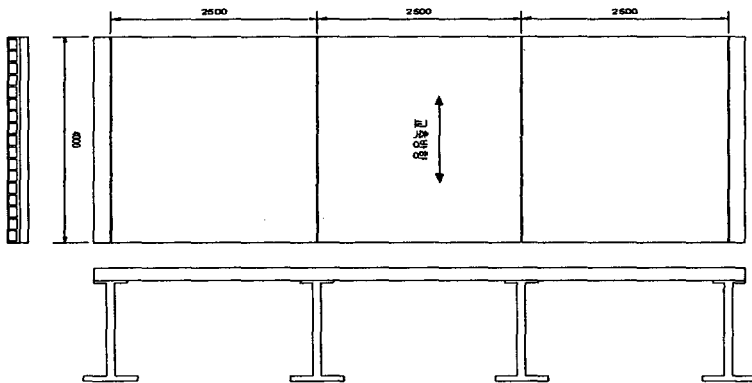
\*\*\*\*    정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 정교수

일반적으로 국내에서 사용하고 있는 콘크리트 바닥판은 거의 대부분 인장균열이 발생하고, 이러한 균열의 발생은 내부 철근의 부식을 초래하며, 이에 따라 바닥판의 강성저하를 초래한다. 특히 반도라는 지형적인 특징을 가지고 있는 우리나라의 경우 해안지역이 많고 동절기에 염화칼슘을 살포하는 지역도 많아 염분에 의한 바닥판의 손상이 심한 실정이다. 철근콘크리트 바닥판이 가지는 이러한 단점을 보완하기 위하여 한국건설기술연구원에서는 "BRIDGE 200" 이라는 사업 계획으로 바닥판 장수명화에 대하여 2002년부터 연구해오고 있다. 본 연구는 BRIDGE 200 사업의 일환으로써 FRP·콘크리트 합성바닥판에 대하여 FRP 부재의 최적설계를 그 목적으로 하며, 범용 최적설계 프로그램인 GENESIS7.0을 이용하여 최적설계를 실시하였다.

## 2. 최적설계 정식화

### 2.1. 해석모델

FRP-콘크리트 바닥판을 최적설계하기 위한 해석 모델은 그림 2.1과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 바닥판은 상부 콘크리트와 하부 FRP 합성 바닥판으로 주형간격은 2.5m, 폭 4m의 3경간 연속 바닥판으로 구성된다.



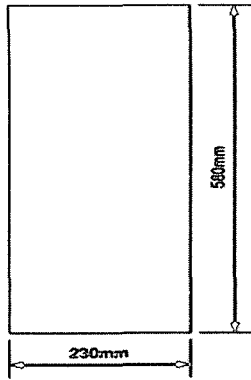
<그림 2.1 해석모델>

### 2.2. 경계조건

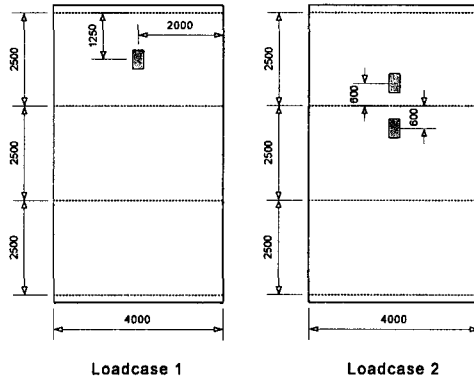
실질적으로 그림 2.1과 같이 거더를 포함하여 최적 설계하는 것이 바람직하다. 하지만 해석해야 하는 모델량이 많은 관계로 거더 모델링은 하지 않고 경계조건만 형성하기로 한다. 경계조건은 바닥판에서 거더의 상부 플랜지와 접촉하는 부분을 xyz 방향으로 구속하기로 한다. 여기서 회전자유도는 구속하지 않는다. 회전자유도까지 구속하면 너무 stiff하게 평가할 가능성이 있다. 또한 병진자유도를 다 구속하는 것은 수직 방향 자유도만 속할 경우 처짐에 대해서는 최악의 조건이 되지만, 응력에 대해서는 위험한 조건이 아닐 수 있기 때문이다.

### 2.3. 설계하중

설계하중은 DB-24하중(9600kgf)에 충격계수(0.3)를 고려하여 총 12480kgf의 하중을 사각형(교축방향:230mm, 교축직각방향:580mm) 영역에 9.36kgf/cm<sup>2</sup> 분포하중 재하 하였다. 하중 재하 방식은 그림 2.3과 같이 2가지 Load case에 대하여 최적 설계를 하였다. Load case1은 처짐에 대한 안정성을 검토하기 위해, Load case2는 응력에 대한 안정성을 검토하기 위해 고려되었다.



<그림 2.2 분포하중>



<그림 2.3 Load Case>

#### 2.4. 재료성질

<표 2.1 콘크리트 재료성질>

구 분	강도( $f_{ck}$ )	탄성계수( $E_c$ )	Poisson's Ratio	인장강도( $f_t$ )	허용인장강도( $f_{ta}$ )
콘크리트	400 kgf/cm <sup>2</sup>	253,450 kgf/cm <sup>2</sup>	0.18	40 kgf/cm <sup>2</sup>	8.4 kgf/cm <sup>2</sup>

<표 2.2 FRP 재료성질>

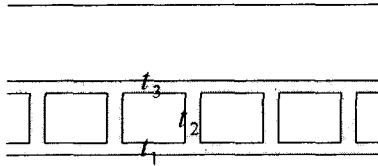
구 분	상부 플랜지	하부 플랜지	복부판
종방향 탄성계수 $E_L$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	230,000	230,000	180,000
횡방향 탄성계수 $E_T$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	150,000	150,000	110,000
전단탄성계수 $G_{LT}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	37,000	37,000	44,000
종방향 인장/압축 강도 $X$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	3,000	3,000	2,400
횡방향 인장/압축 강도 $Y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	1,500	1,500	1,400
면내 전단강도 $S$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	400	400	500

아래첨자 ( $L$ ) : 길이방향, 아래첨자 ( $T$ ) : 폭방향

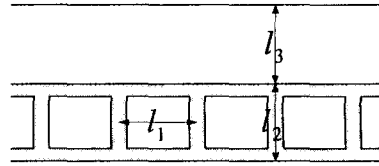
Poisson's Ratio - 0.32

#### 2.5. 최적화 변수 및 매개변수

최적 설계를 하는데 있어서 최적화 변수는 그림 2.4와 같이 FRP 박스의 상부 플랜지 두께, 하부 플랜지 두께, 복부판 두께 총 3가지로 한다. 다음으로 매개변수는 그림 2.5와 같이 복부판 간격, 복부판 높이, 콘크리트 높이를 변화시킴으로써 최적 설계를 수행한다. 복부판 간격은 100, 150, 200 mm 로 변화 시키고, 복부판 높이는 75, 100, 125, 150 mm 로 변화 시킨다. 마지막으로 콘크리트 높이는 60, 80, 100, 120 mm로 변화 시켜 총 48가지의 모델을 최적 설계한다. 최적설계는 FRP판의 부피가 최소가 되도록 설계하였다.



<그림 2.4 최적화 변수>



<그림 2.5 최적화 매개변수>

## 2.5. 제약조건

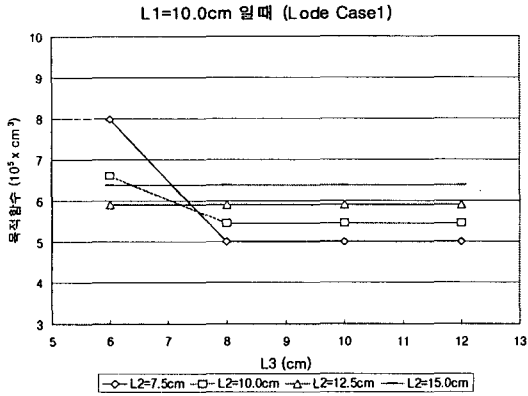
제약조건은 표 2.3에서 보는 바와 같이 처짐, 부재의 최소두께, Tsai-Hill 파괴 기준, 휨응력, 전단응력, Euler 좌굴, 전단 좌굴, 콘크리트 압축응력으로 구성된다. 콘크리트의 인장응력에 대한 제약조건은 FRP 두께에 대한 최적설계에 반영하기에는 큰 요소로 작용하기에 본 논문에서는 제외시키기로 한다. 좌굴에 대한 검토를 GENESIS7.0 프로그램을 이용하여 검토를 해야 정확한 결과를 도출할 수 있지만 본 연구에서는 John L. Clarke의 "Structural Design of Polymer Composites"를 이용해 설계 단면의 좌굴에 대한 안전성을 가지는 단면의 두께를 계산한 결과 FRP 최소 두께(0.6cm)보다 작다는 것을(0.295cm) 확인 할 수 있었다. 이 결과는 복부판의 최대높이(15cm)에서 수행한 것이므로 다른 높이에서도 안전하다는 것을 알 수 있다.

<표 2.3 제약조건>

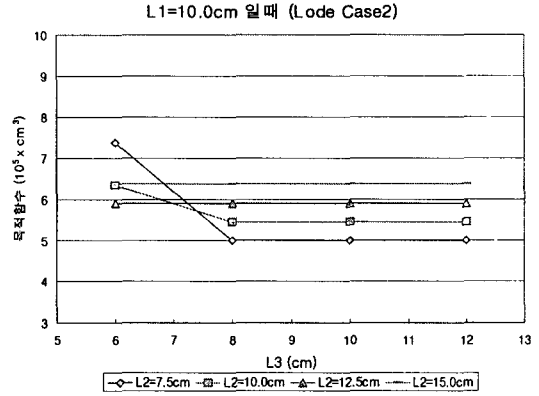
	제약조건	기호설명
허용 처짐	$\frac{\delta_{max}}{\delta_{allow}} - 1 \leq 0$	$\delta_{max}$ : 최대 처짐 $\delta_{allow}$ : 허용 처짐
상부 플랜지 최소두께	$\frac{f_{ut}}{t_{min}} - 1.0 \leq 0$	$f_{ut}$ : 상부 플랜지 두께 $t_{min}$ : 최소 두께 (0.6cm)
하부 플랜지 최소두께	$\frac{f_{dt}}{t_{min}} - 1.0 \leq 0$	$f_{dt}$ : 하부 플랜지 두께
복부판 최소두께	$\frac{w_t}{t_{min}} - 1.0 \leq 0$	$w_t$ : 복부판 두께
Tsai-Hill 파괴 기준	$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \times \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}}{S^2} \leq R^2$	X : 길이방향 강도 Y : 폭방향 강도 S : 전단응력 R : Tsai-Hill 파괴지수
FRP 하부 플랜지 휨응력	$\frac{f_{fb}}{f_a} - 1 \leq 0$ $\frac{f_a}{s_f}$	$f_{fb}$ : FRP 하부플랜지 휨응력 $f_a$ : FRP 허용 휨응력 $s_f$ : 휨응력 안전률(3.5)
FRP 복부판 전단응력	$\frac{\tau_w}{\tau_a} - 1 \leq 0$ $\frac{\tau_a}{s_r}$	$\tau_w$ : FRP 복부판 전단응력 $\tau_a$ : FRP 허용 전단응력 $s_r$ : 전단응력 안전률(3.5)
Euler 좌굴	$\frac{P_{FRP}}{P_{cr}} - 1 \leq 0$ $\frac{P_{cr}}{s_p}$	$P_{FRP}$ : FRP Euler 좌굴 응력 $P_{cr}$ : 임계 Euler 좌굴 응력 $s_p$ : Euler 좌굴응력 안전률(3.5)
전단 좌굴	$\frac{\tau_{FEM}}{\tau_{cr}} - 1 \leq 0$ $\frac{\tau_{cr}}{s_r}$	$\tau_{FEM}$ : FRP 전단 좌굴 응력 $\tau_{cr}$ : 임계 전단 좌굴 응력 $s_r$ : 전단 좌굴응력 안전률(3.5)
콘크리트 압축응력	$\frac{C_c}{C_{ca}} - 1 \leq 0$	$C_c$ : 콘크리트 압축응력 $C_{ca}$ : 콘크리트 허용 압축응력

## 2.5. 최적설계 결과

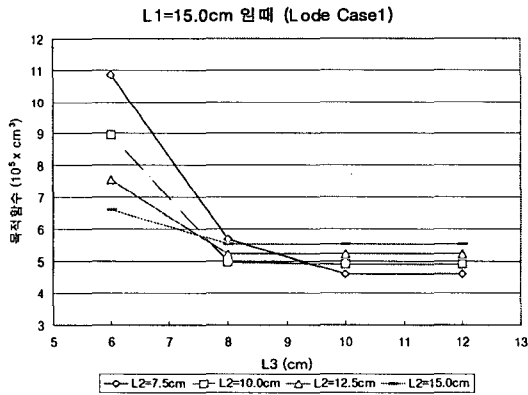
FRP-콘크리트 합성 바닥판에 대하여 GENESIS7.0을 사용, 총 48가지의 모델에 대해 최적 설계를 수행한 결과 그림 2.6 ~ 2.11과 같은 결과를 얻었다.



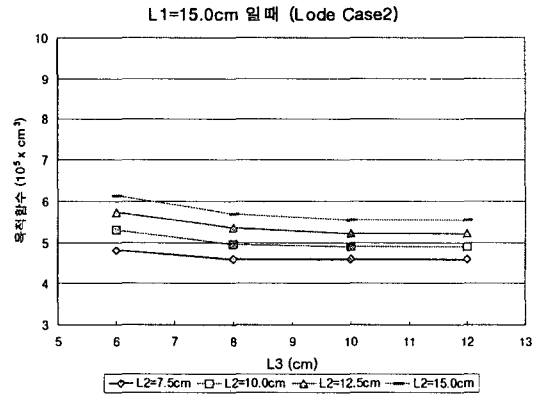
<그림 2.6 L<sub>1</sub> 10cm, Lode Case 1>



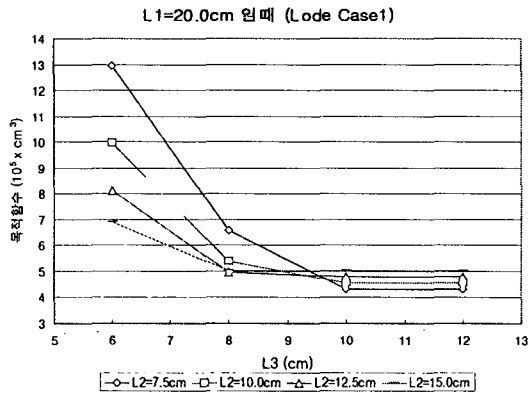
<그림 2.7 L<sub>2</sub> 10cm, Lode Case 2>



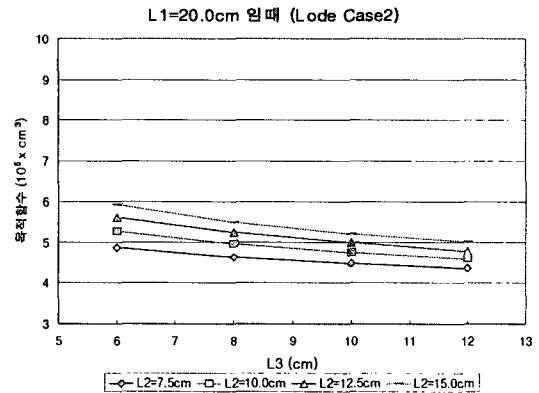
<그림 2.8 L<sub>1</sub> 15cm, Lode Case 1>



<그림 2.9 L<sub>2</sub> 15cm, Lode Case 2>



<그림 2.10 L<sub>1</sub> 20cm, Lode Case 1>



<그림 2.11 L<sub>2</sub> 20cm, Lode Case 2>

### 3. 결 론

본 연구에서는 FRP-콘크리트 합성 바닥판에 대하여 범용 최적설계 프로그램인 GENESIS7.0을 이용하여 최적설계를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 두 가지 하중조건하에서 최적 설계를 수행한 결과 복부판의 간격이 20cm일 때를 제외하고는 Lode case1이 Lode case2 보다 FRP 두께에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉 복부판의 간격이 10cm, 15cm 일 때는 처짐 조건이 활성화 조건이고 20cm 일 때는 복부판의 전단응력 조건이 활성화 조건이 된다.

2. 48개의 모델에 의해 최적 설계를 수행한 결과 합성콘크리트의 높이는 10cm 이상 적용하는 것이 바람직하다.

3. 최적 설계를 수행한 결과 복부판의 간격이 20cm, 복부판의 높이가 10cm, 콘크리트의 높이가 12cm 일 때 최소의 목적함수 값(FRP 부피:  $4.545 \times 10^5 \text{cm}^3$ )을 가지는 최적 단면으로 설계되었다.

### 참고 문헌

1. 건설교통부, 도로교설계기준·해설, 2003
2. VMA Engineering, GENESIS REFERENCE MANUAL, 1998
3. John L. Clarke, Structural Design of Polymer Composites, 1996
4. 조근희, 신동구, 김병석, 조정래, 진원중, “FRP-콘크리트 합성 바닥판의 설계”, 대한토목학회 2003년도 정기 학술대회 논문집, pp359~364
5. 류지영, 박문호, 박순용, 서한길, “FRP 콘크리트 직사각형 보의 최적설계”, 대한토목학회 2002년 학술 발표회, pp755~759