

일방향 섬유로 성능향상된 교량 상판의 파괴거동 및 항복선 이론을 적용한 해석적 연구

A Study on the Failure Behavior and the Application of Yield-Line Theory on the Bridge Decks Strengthened by Directional Fiber Plastic

심 종 성^{*} 오 흥 섭^{**} 류 승 무^{***}
Sim, Jongsung Oh, Hongseob Ryu, Seungmoo

ABSTRACT

The concrete bridge decks are in need of replacement and rehabilitation due to decreasing load carrying capacity. In this study, to propose a strengthening technique that improves usability and structural performance of the bridge deck and to propose an efficient strengthening design technique which satisfies both the strength and serviceability of the bridge deck, this paper shows the failure characteristics of the strengthened bridge decks and proposes an empirical yield criterion. Therefore, strengthening efficiency was proposed based on the experiment and yield line analysis result. The yield line theory which adopts the modified criteria of Johansen is considered to predict the ultimate strength about all strengthening material(Carbon Fiber Sheet, Carbon Fiber Rod, Grid Type Carbon Fiber).

1. 서론

1.1 연구배경

공용중인 교량 구조물의 경우 사용연한의 경과에 따라 열화 및 구조적 손상 등으로 인한 내하력 부족, 차량 하중의 증가 및 환경의 변화 등으로 인하여 설계시의 교량등급을 향상시켜야 하는 경우가 발생한다. 특히 차량에 의한 하중을 직접 받는 교량 상판은 손상의 가속화로 인하여 많은 교량들에서 국부적인 파손 현상이 많이 발생한다[3]. 또한 교량상판이 이방향 거동을 함에도 불구하고 보강된 교량 상판은 일방향 보 구조물의 거동특성만을 고려한 기법이 대부분이다. 특히 현장에서 적용되고 있는 교량 상판의 성능향상 기법은 교량 상판을 일방향 슬래브로 가정하여 섬유보강재를 일방향으로 보강하는 공법이 주로 적용되고 있으며, 이방향으로 보강하는 경우에도 상판의 이방향 거동 특성을 고려한 해석을 수행하지 않은 상태에서 경험에 기초한 시공을 하고 있는 실정이다.

-
- * 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수
 - ** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사수료
 - *** 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

1.2 연구목적

본 연구에서는 첫째로 교통하중의 증가로 인하여 과거에 공용하중 DB18로 설계된 교량을 DB24교량으로 향상시키기 위하여 교량 상판을 성능 향상 시켰을 때, 각 보강공법에 대한 파괴거동 및 보강효과를 실험적으로 검증하고자 하였으며, 둘째로 실험결과와 Johansen의 항복선 이론에 의한 해석결과를 비교하여 상한치 이론을 적용한 교량상판의 해석기법을 제안하고자 하였다.

2. 정적시험

2.1 시험변수 및 제원

시험에 사용한 콘크리트의 재령28일 압축강도는 240kgf/cm^2 로 나타났으며, 주철근과 배력철근은 철근의 항복응력 3000kgf/cm^2 인 DI6철근을 배근하였다. 시험체는 현재 공용중인 내하력 DB18의 교량과 동일한 강성을 갖도록 도로교 구조설계기준에 의하여 설계, 제작 하였다(그림 1). 정적시험시 하중가력은 차량 후륜의 접지면적과 동일하도록 $25 \times 50\text{cm}$ 의 재하판을 제작하여 정적 가력하였다. 또한 변위측정기는 교량 바닥판의 중앙부, 1/4, 거더부에 설치하였으며, 상하부 주철근과 배력철근에 변형률계이지를 부착하여 변형률을 측정하였다(그림 1). 보강재는 탄소섬유(CFS)와 탄소섬유Rod, 격자형 탄소섬유 보강재를 사용하였으며, 본 연구에서는 실험변수로 손상하중, 보강재 및 보강방향을 적용하였다(표 1, 그림 2). 하중조건은 균열하중인 15tonf을 사전재하하여 기손상을 가한후에 보강을 실시하였다. 실험변수와 보강재의 역학적 성질은 표 1과 같다.

표 1 시험변수 및 역학적 성질

시험체	Type	기손상	Dimension	보강재료의 역학적 성질		
				항복강도(kgf/cm^2)	극한강도(kgf/cm^2)	탄성계수(kgf/cm^2)
CON-DB18	무보강	15tonf	D=16mm	3000	-	2000000
CS-I-L	2방향 등방보강	15tonf	T=0.11mm	15560	35500	2350000
CR-I-L	2방향 등방보강	15tonf	D=6.0mm	7200	10000	2000000
CG-I-L	2방향 등방보강	15tonf	T=4mm	10080	14000	1000000

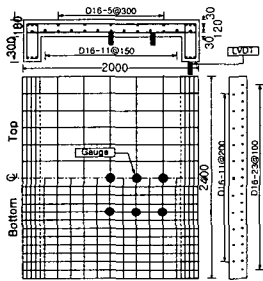
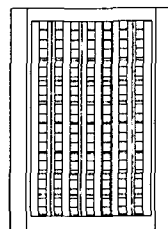
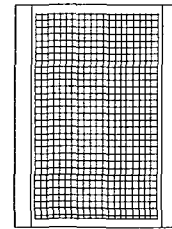


그림 1 시험체 제원(mm)



CS-I-L



CR-I-L, CG-I-L

그림 2 시험체별 보강변수

2.2 시험결과

그림 3과 그림 4에는 무보강 시험체와 각각의 보강변수로 성능향상된 시험체의 하중-변위관계와 하중-변형률관계를 나타내고 있다. 무보강 시험체의 경우에는 15tonf에서 초기균열이 발생하였으며, 배력철근방향으로 일방향 균열발생이후에 약 45tonf과 약 60tonf에서 주철근과 배력철근이 각각 항복하였다. CR-I-L 시험체와 CG-I-L 시험체의 경우에는 균열 및 파괴양상이 무보강 시험체와 유사하게 나타났다. CR-I-L 시험체는 하중-변형률관계에서 파괴까지 거의 선형으로 거동 하였으며, 약 70tonf에서 항복하였다. CG-I-L 시험체는 CR-I-L 시험체와 마찬가지로 주철근 및 배력철근이 항복한 이후

에 편칭파괴가 발생하였으며, 파괴하중은 약 71tonf이다.

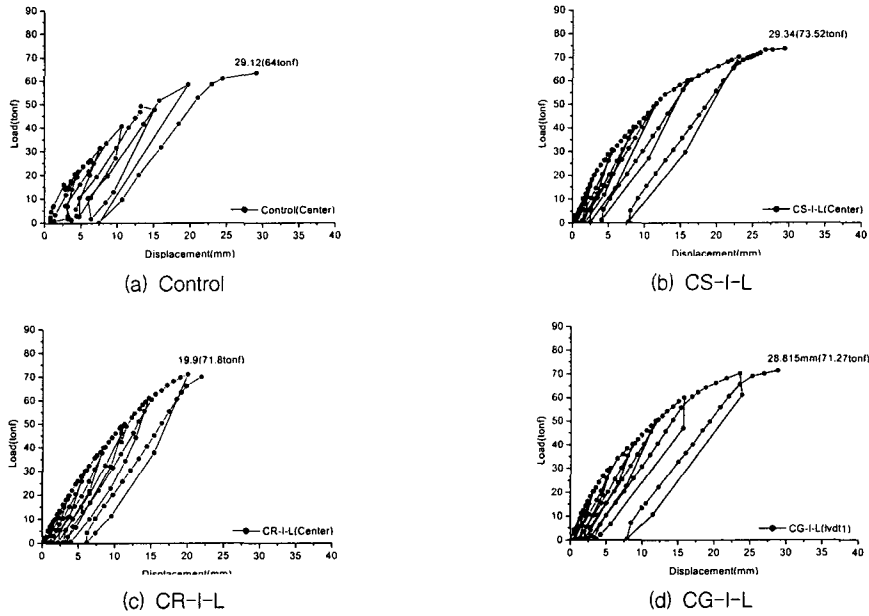


그림 3 시험체별 하중-변위관계

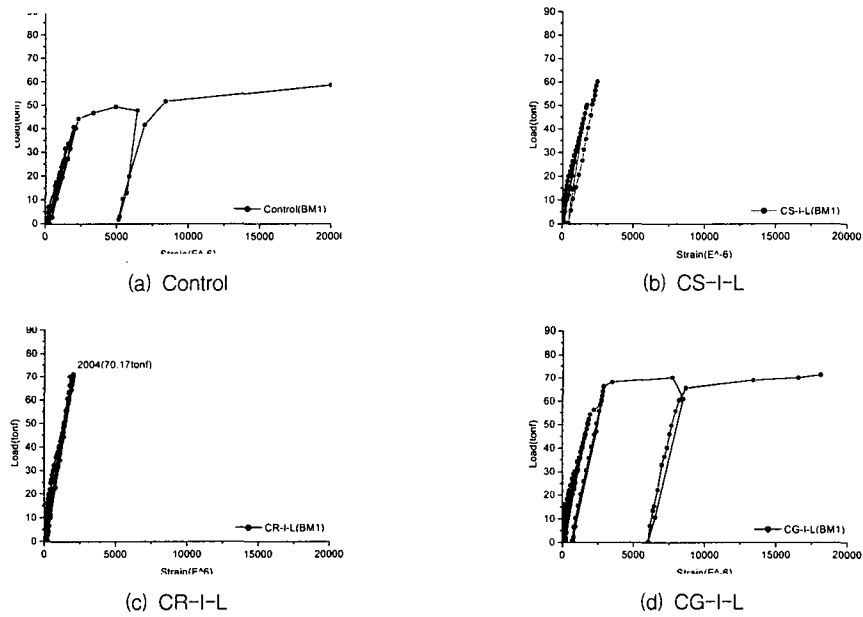


그림 4 시험체별 하중-변형률관계

시험체의 내하력의 효과는 무보강 시험체의 파괴하중에 대한 보강 시험체의 파괴하중의 비로 평가하였으며, 대체로 111%~115%정도로 나타났다. CS-I-L 시험체는 배력철근 방향으로 먼저 균열이 발생하였으며, 50tonf부터 주철근 방향으로 균열이 발생하였다. 60tonf에서부터 보강섬유 계면을 따라

균열발생후 섬유 보강재 계면이 탈락하면서 파괴되었다. 그리고 주철근 항복이후에 편칭파괴가 되었으며, 파괴하중은 73.50tonf이다.

3. 항복선 이론을 적용한 보강시험체의 해석

본 장에서는 성능향상된 교량 상판의 해석 및 설계기법을 개발하기 위하여 Johansen에 의해 개발된 항복선이론을 적용하여 성능향상된 교량 상판의 내하력을 판정하고, 이를 시험결과와 비교 검증하고자 하였다. Johansen의 항복기준에 의하면, 교량 상판의 주철근과 배력철근이 모두 항복하는 하중에서 교량상판은 강도한계상태에 도달하였다고 할 수 있으며, 보강된 교량 상판의 경우도 이와 같은 기준을 적용하여 구조물의 내하력을 예측할 수가 있다[4]. 여기서 강도한계상태는 보강재의 항복강도를 기준으로 해석할 수 있지만, 탄소섬유와 같은 재료는 항복점을 뚜렷하게 갖고 있지 않기 때문에 일반적으로 CFS의 항복강도는 휨 시험 등을 통하여 경험적인 항복강도를 사용한다. “강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 휨해석 및 설계기법 연구”[배인환, 1998]에서는 탄소섬유의 항복강도를 파단시의 인장강도 72%로 정의하고 있으며, 본 연구에서도 이를 적용하여 각각의 보강재별 내하력을 예측하였다.[1]. 항복선 이론은 상한치 이론에 의한 해석결과로써 실제 내하력보다 과대 계산이 되지 않도록 하기 위해서는 모든 파괴모드에 대하여 해석을 수행해야한다. 본 연구에서는 그림 5와 같이 4가지의 파괴모드에 대하여 해석을 수행하였다. 그리고 항복선 이론의 적용은 주철근과 배력철근비가 동일한 등방슬래브에서 적용할 수 있으므로, 본 연구에서 제안된 교량 상판의 경우는 Affinity Theorem을 적용하여 직교배근된 슬래브를 등방성으로 환산하여 내하력을 산정하였다.

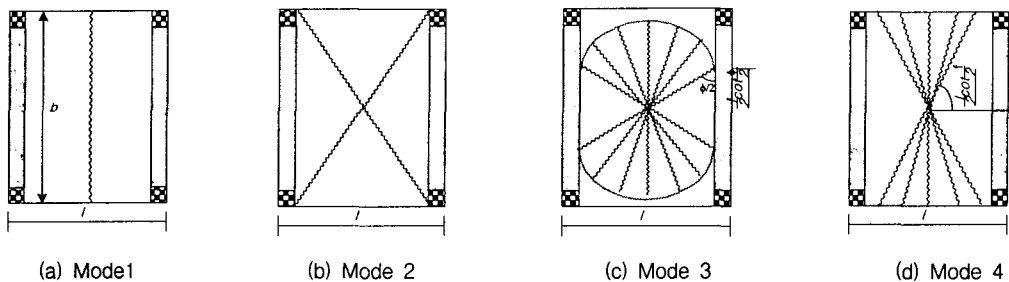


그림 5 성능향상된 교량 상판의 파괴모드[1]

성능향상된 교량상판의 각 항복 모드에 따른 극한집중하중 P_u 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$(a) \text{ Mode 1 : } P_u = 4(m_u + m'_u) \frac{b}{l} \quad (1)$$

$$(b) \text{ Mode 2 : } P_u = 8(m'_u + m_u) \quad (2)$$

$$(c) \text{ Mode 3 : } P_u = 4(m'_u + m_u) \cot \frac{\phi}{2} + 2(m'_u + m_u) \phi \quad (3)$$

$$(d) \text{ Mode 4 : } P_u = 2(m'_u + m_u) \frac{\delta}{0.5l} \cdot b \cdot \cot \frac{\phi}{2} + 2m_u \cdot \phi \quad (4)$$

여기에서 m_u , m'_u 는 각각 단위폭당 극한 정·부모멘트, $\cot \frac{\phi}{2} = \sqrt{\frac{m'_u}{m_u}}$ 로써 라디안으로 정의된다.

극한저항모멘트는 철근 및 보강재 방향의 단위폭당 극한 저항모멘트 m_{ux} 와 m_{uy} 의 향으로 표현할 수 있다[Johansen]. 또한 그림 6과 같이 면내전단응력으로 인하여 균열면이 Splitting이 발생하게 되어 실제 강도보다 작은 응력에서 섬유가 파단되므로 균열면에서의 섬유의 강도저하를 고려하여 시험체의 내하력을 해석하였다.

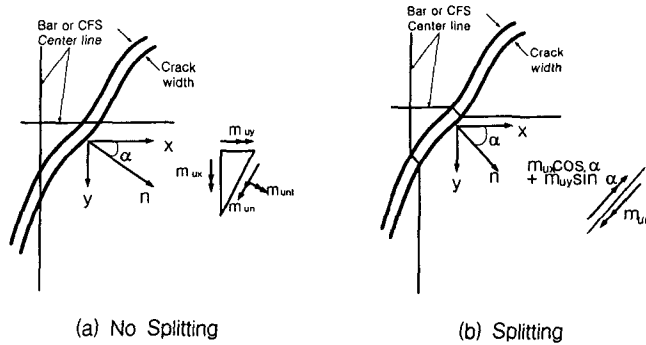


그림 6 균열면에서의 철근과 일방향 섬유 Splitting 현상[1]

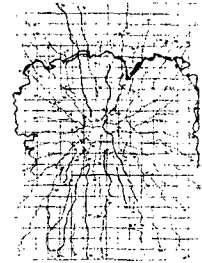
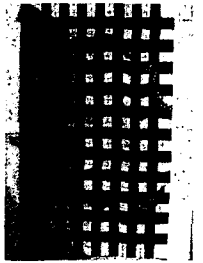
$$m_{ux} = A_s \cdot f_y (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{cfs}}{f_{ck}}) + b_p \cdot t_p \cdot f_{cfs} (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{cfs}}{f_{ck}}) \quad (5)$$

$$m_{uy} = A_s \cdot f_y (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{cfs}}{f_{ck}}) + b_p \cdot t_p \cdot f_{cfs} (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{cfs}}{f_{ck}}) \quad (6)$$

$$m_{ux} = A_s \cdot f_y (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{u,cfs} \cdot \cos \alpha}{f_{ck}}) + b_p \cdot t_p \cdot f_{u,cfs} \cdot \cos \alpha (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{u,cfs} \cdot \cos \alpha}{f_{ck}}) \quad (7)$$

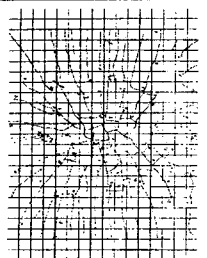
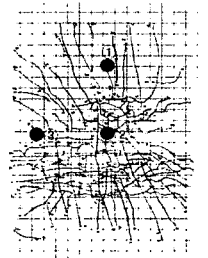
$$m_{uy} = A_s \cdot f_y (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{u,cfs} \cdot \sin \alpha}{f_{ck}}) + b_p \cdot t_p \cdot f_{u,cfs} \cdot \sin \alpha (d - 0.59 \frac{A_s \cdot f_y + b_p \cdot t_p \cdot f_{u,cfs} \cdot \sin \alpha}{f_{ck}}) \quad (8)$$

여기에서, m_{ux} , m_{uy} 는 단위폭당 극한 저항모멘트, A_s , f_y 는 단위폭당 철근의 면적 및 항복응력, b_p , t_p 는 단위폭당 CFS의 폭과 두께, f_{cfs} , $f_{u,cfs}$ 는 철근 항복시의 CFS의 응력 및 CFS의 항복응력

	항복하중	44.28tonf		항복하중	50.20tonf
	항복선 해석	44.80tonf		항복선 해석	48.90tonf
	파괴하중	64.00tonf		파괴하중	73.50tonf
	Mode	Mode 3		Mode	Mode 3
	내하력 효과	100%		내하력 효과	115%

(a) Control Specimen

(b) CS-I-L Specimen

	항복하중	71.20tonf		항복하중	54.28tonf
	항복선 해석	65.50tonf		항복선 해석	53.90tonf
	파괴하중	71.70tonf		파괴하중	71.00tonf
	Mode	Mode 3		Mode	Mode 3
	내하력 효과	112%		내하력 효과	111%

(c) CR-I-L Specimen

(d) CG-I-L Specimen

그림 7 성능향상된 교량상판의 파괴양상 및 실험결과와 해석결과 비교

모든 보강 시험체에서 111~115%의 내하력 증진이 되었으며, 각 보강 시험체가 무보강 시험체와 유사한 거동을 나타내었고, 보강 후 강성이 증대되었다. 항복강도의 경우 실험결과와 해석결과가 대부분 유사하게 계산되었으며, CR-I-L 시험체의 경우 실험 결과값에 비하여 해석결과가 다소 작게 나타났다. CR-I-L 보강 시험체의 경우는 파괴 직전까지 탄성거동을 하는 것으로 나타났다. 전체 시험체가 그림 7에서 나타나는 것과 같이 파괴양상과 유사한 Mode 3의 형태로 나타났다. 보강변수별 내하력 계산은 철근항복 이전 단계에서는 철근 및 보강재의 Splitting 현상을 고려하지 않았다(그림 7).

4. 결론

본 연구에서는 일방향 섬유보강재로 성능향상된 교량 상판의 구조거동을 평가하기 위하여 정적 구조시험을 수행하였으며, 항복선 이론을 적용한 이론적 접근을 시도하였다. 구조시험결과 일방향 섬유보강재로 교량상판을 보강한 경우 일반 교량상판과 유사한 거동양상을 보였으며, 일정량의 강성증대 및 연성을 확보하는 것으로 나타났다. 항복선이론을 이용한 이론해석연구에 있어서 4개의 파괴모드에 대한 극한 내하력을 산정하였으며, 대체로 본 연구의 파괴모드 3에서 시험체가 파괴되는 것으로 나타났다. 또한 항복선 이론을 적용한 결과 해석된 내하력은 실제 시험결과에 부합되는 것으로 나타났으며, 이는 파괴모드의 가정이 적합하고 일방향 섬유의 splitting을 적절히 고려하였기 때문인 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국도로공사에서 주관하는 “콘크리트 교량 바닥판에 대한 보수·보강공법의 효과분석 연구”를 수행함으로써 얻어진 결과이며, 저자들은 한국도로공사와 한국카본, 리폼 시스템, MS-ASIA의 후원에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) 배인환, “강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 휨해석 및 설계기법 연구”, 한양대학교 박사학위논문, 1998.
- (2) 심종성, “콘크리트 교량 바닥판에 대한 보수·보강 공법의 효과분석”, 한국도로공사, 2000.
- (3) 심종성, 오홍섭, “항복선 이론을 적용한 성능향상된 철근콘크리트 교량상판의 해석적 연구”, 대한토목학회 2000년 가을학술발표회논문집, 2000, pp.67-70
- (4) Park, R., Gamble, “Reinforced Concrete Slabs”, 2nd Edition, Wiley, 2000.