

교량용 강·콘크리트 합성 바닥판의 실험적 구조성능

An Experimental Structural Performance of Steel-Concrete Hybrid Deck for Bridge

정연주* 정광희** 구현본** 김병석***
Jeong, Youn Ju* Jung, Kwang Hoe** Koo, Hyun Bon** Kim, Byung Suk***

Abstract

This paper presents a experimental structural performance of steel-concrete hybrid bridge deck, which has studs to connect steel plate and concrete and T beam to improve structural performance, by steel plate shape, studs and load location. It proved that steel-concrete hybrid deck has a high structural performance and lightweight due to the efficient use of steel plate as a structural member, which has only used as formwork. In failure mode, few specimen failed at punching shear and many specimen at concrete crushing, therefore proved it has sufficient stability to punching shear which is the most frequent damage of bridge deck. Steel-concrete hybrid deck of plane steel plate has a high structural performance, and that of corrugated steel plate has a high reduction of weight.

1. 서론

교량을 구성하는 부재중에서 바닥판은 반복적 차량하중을 직접적으로 받는 손상에 취약한 부재이므로 높은 하중저항성능과 피로내구성을 필요로 한다. 지금까지 비교적 경제적이고 용이한 시공 등의 이유로 교량 바닥판에 널리 적용된 RC(철근 콘크리트) 바닥판에 대해 최근 자동차 반복하중에 따른 손상 발생 등의 문제점이 지적되고 있으며, 이와 병행하여 교량의 구조형식도 점차 주형 구조를 간소화하는 소수주형교가 제안·적용되는 추세에 있다. 따라서, 미래의 교량 바닥판 형식은 날로 열악해지는 자동차의 반복하중과 소수주형교의 장시간화에 대응할 수 있도록 높은 하중저항성능과 피로내구성을 갖추고 합리적 시공성, 건설비 저감 등의 조건을 충족해야 한다.

강·콘크리트 합성 바닥판은 RC 바닥판에 비해 하중저항성능의 감소 없이 바닥판 두께를 얇게 하여 경량화 할 수 있으며, 합성효과 등으로 피로내구성을 향상시킬 수 있다. 또한, 바닥판 골조를 공장 제작하여 시공시 거푸집으로 이용하므로 현장에서의 거푸집, 지보공 작업이 불필요하고 철근배근 등의 현장작업 간소화에 따라 공기단축과 시공비 저감이 가능해지는 장점이 있다(日本 土木學會, 2000). 이러한 배경하에서 새로운 바닥판 형식으로 강재와 콘크리트를 조합시킨 합성형 바닥판이 개발되고 있으며 적용도 점차 증가하고 있다.

강·콘크리트 합성 바닥판은 미국, 유럽을 중심으로 장경간 교량의 바닥판 중량 감소 목적으로 처음 개

* 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

발되기 시작했으며, 미국에서는 I형강과 콘크리트를 합성한(I형강 매입형) 바닥판을, 프랑스에서는 강판과 콘크리트를 합성한(로빈슨형) 바닥판을 처음으로 개발하여 적용하였다. 이후, 일본에서는 I형강 매입형과 로빈슨형 바닥판을 신설 교량과 노후된 바닥판 교체 등에 적용하였다(日本 土木學會, 2000).

최근에는 소수주형화에 따른 바닥판의 장지간화와 현장시공의 간소화를 목적으로 I형강 매입형과 로빈슨형을 바탕으로 하는 다양한 형식의 강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 연구가 진행되고 있다. 이들의 대표적인 형식은 강판-횡방향 보강재-콘크리트(Watanabe 등, 2001), T형강-강판-콘크리트(Higgin 등, 2001), 절곡강판-콘크리트(Lee 등, 2001; Krige 등, 1995; Veljkovic, 1998, 2000) 등으로 구성된 합성 바닥판으로 이에 대한 정적거동과 피로거동을 바탕으로 합리적 설계법에 대한 연구가 진행되고 있다.

우리나라는 비교적 최근에 강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 연구가 시작되어 로빈슨형(이갑중, 1997; 김용희 등, 1997)과 I형강 매입형 바닥판(정영수 등, 1999; 이기승 등, 2000)에 대한 기초적 연구가 수행되었으며, 최근 들어 강박스형과 강주형 교량을 중심으로 절곡강판을 이용한 강재 판넬을 시공시 영구 거푸집으로 적용하는 추세가 점차 증가하고 있다. 그러나 강재 판넬을 시공시 거푸집 용도로만 활용하고 구조부재로는 활용하지 않은 실정인어서 재료의 활용성 측면에서 비효율적인 문제점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 강판과 콘크리트가 스테드에 의해 합성되고 구조성능을 향상시키기 위해 T형강이 삽입된 교량용 강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 정적 휨 파괴실험을 통해 구조성능 특성을 규명하고자 한다.

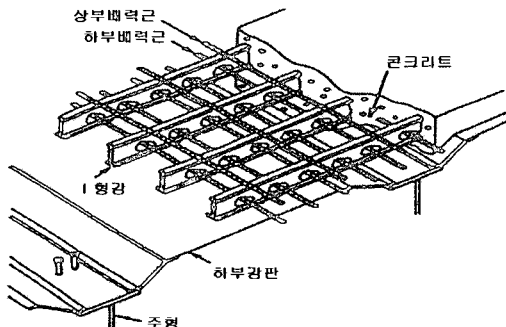


그림 1 I형강 매입형 합성 바닥판

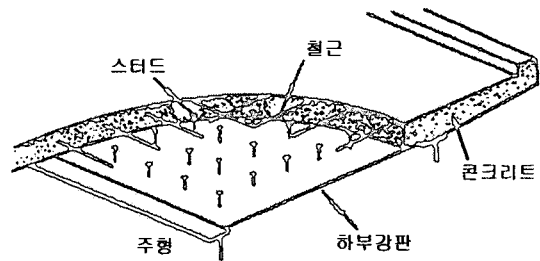


그림 2 로빈슨형 합성 바닥판

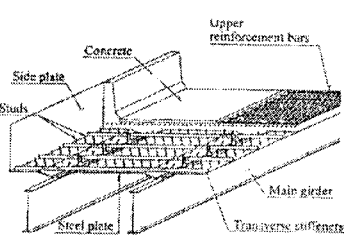


그림 3 SC-deck(Watanabe 등)

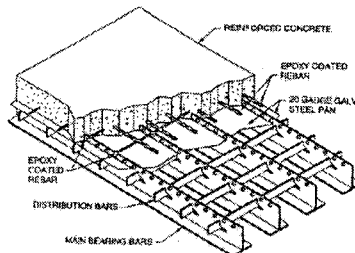


그림 4 Exodermic deck(Higgin 등)

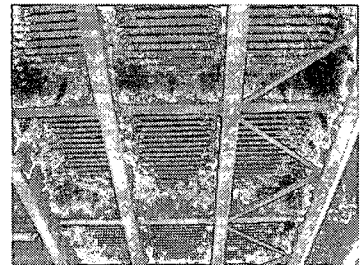


그림 5 국내 교량 바닥판 강재 거푸집

2. 교량용 강·콘크리트 합성 바닥판 형상 및 시험체

2.1 강·콘크리트 합성 바닥판 형상

기존에 국내외에서 개발된 강·콘크리트 합성 바닥판의 특징과 현재 국내에서 활용되는 강재 판넬 거푸집을 종합적으로 비교·분석하여 그림 6과 같은 교량용 합성 바닥판의 기본형상을 고안하였다.

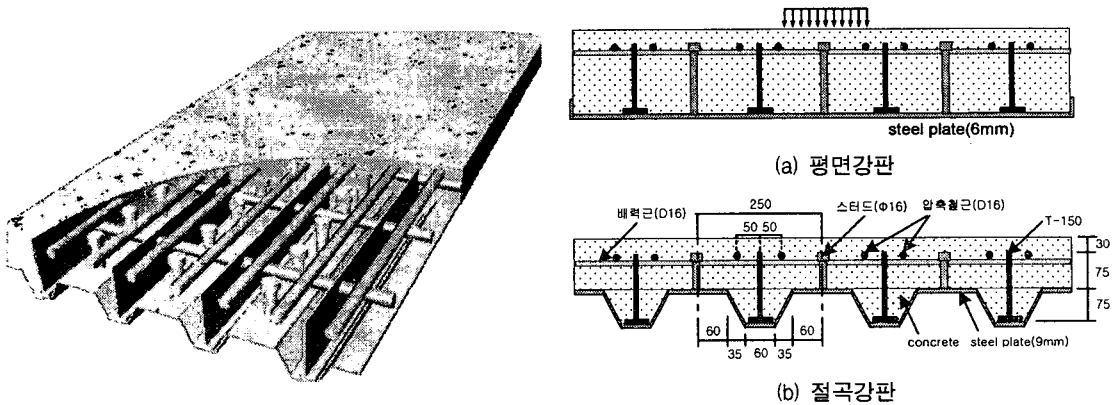


그림 6 강·콘크리트 합성 바닥판 형상

특징으로는 재료의 효율적 활용 측면에서 하부강판은 6~9mm의 적정 두께를 갖는 평면 또는 절곡의 강판을 이용하여 시공시 거푸집 역할뿐만 아니라 구조부재로 활용하여 인장력을 부담하고 배력근 설치를 최소화하도록 하였다. 또한 하부강판 위에 T형강을 설치하여 교량의 바닥판에서 필요로 하는 높은 하중저항성능에 대응하면서, I형강 매입형의 경우 I형강 상부 플랜지에 집중되는 높은 압축력을 분산시켜 이에 따른 피복두께 최소화 및 압축부 피로 손상 방지를 도모하였다. 또한, 콘크리트와의 접촉면적 증대에 따른 마찰력 증가로 합성력의 극대화와 전단연결재 설치의 최소화를 도모하였으며, 절곡강판을 이용한 경우는 인장부 콘크리트 제거에 따른 바닥판 중량 감소 효과도 얻을 수 있도록 하였다.

압축철근과 배력철근은 T형강 상부 플랜지에 이형철근 지름 만큼의 구멍을 천공한 후 배력철근을 삽입하고 이 위에 압축철근을 거치하는 손쉬운 방법으로 배근 작업에 소요되는 인력과 공정을 최소화하고 콘크리트와의 합성작용도 일부 담당하도록 유도하였다. 또한, 강제 거푸집과 콘크리트의 확실한 합성작용을 위해 하부강판에 일정한 간격으로 스테드를 부착하였으며, 이때 스테드의 높이는 압축철근 높이까지 이르도록 하여 압축부와 인장부의 원활한 합성이 이루어지도록 하였다(그림 7 참조).

2.2 시험체 종류 및 실험

정적 휨 파괴 실험의 시험체 종류는 표 1에 나타난 바와 같이 하부강판 형상, 하중재하 위치, 스테드의 3가지로 구분하였다. 하부강판 형상(평면, 절곡)이 바닥판의 거동과 성능에 미치는 영향을 규명하기 위해 하부강판이 평판인 경우(P)와 절곡된 경우(D)의 시험체를 각각 제작하였으며(그림 6(a), (b)), 절곡강판의 경우 요철부에 재하되는 하중위치의 차이가 하중 전달 메커니즘과 정적거동 특성에 미치는 영향을 규명하기 위해 하중이 T형강 사이에 재하되는 경우(T-T 재하)와 T형강 상부에 재하되는(T 재하) 시험체를 각각 제작하였다. 또한, 강제 거푸집과 콘크리트의 합성 작용이 합성 바닥판의 거동과 성능에 미치는 영향을 규명하기 위해 스테드가 양단에서 각각 6열(S6)과 4열씩(S4) 배치된 시험체를 제작하였다. 정적 휨 파괴 실험은 최대하중 350 tonff의 유압식 가력기를 이용하여 로올러 지지조건을 이용한 3점 재하 실험을 실시하였다(그림 8 참조).

표 1 실험변수와 시험체 종류

시험체	강판형상		스테드		재하위치		시험체	
	평면 (P)	절곡 (D)	6열 (S6)	4열 (S4)	T-T (D4)	T (D3)	폭 (m)	강판 (mm)
P4S6	○	-	○	-	○	-	1.00	6.0
D4S6	-	○	○	-	○	-	1.00	9.0
D4S4	-	○	-	○	○	-	1.00	9.0
D3S6	-	○	○	-	-	○	0.75	9.0
D3S4	-	○	-	○	-	○	0.75	9.0

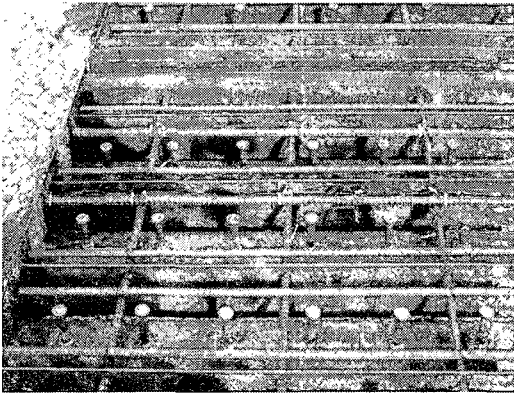


그림 7 강제 거푸집 제작



그림 8 정적 휨 파괴 실험

3. 실험결과 및 분석

3.1 구조성능

강·콘크리트 합성 바닥판의 정적 휨 파괴 실험에 따른 하중-처짐 관계는 그림 9, 표 2에 나타난 바와 같다. 하부강판 형상에 따른 실험 결과, 강도 측면에서는 평면강판을 이용한 P4S6의 항복하중이 약 119 tonf으로 절곡강판을 이용한 D4S6의 항복하중 93 tonf에 비해 약 28% 정도(약 26 tonf) 높게 나타났으며, 강성 측면에서도 평면강판의 경우가 보다 우수한 것으로 나타났다. 이것은 평면강판과 절곡강판 시험체를 동일한 구조성능으로 설계하였지만, 평면강판의 경우 설계단계에서는 고려하지 않은 인장부 콘크리트의 실질적 인장력 부담 능력(최대 압축응력의 약 10% 정도), 절곡강판의 경우 인장부 콘크리트 제거에 따른 단면계수 감소, 평면강판과 절곡강판의 형상 차이에 따른 교축 직각방향(배력근 방향) 휨 강성 차이, 스티드와 하부강판의 접합위치 차이에 따른 합성효과의 차이 등의 요인 때문인 것으로 판단된다.

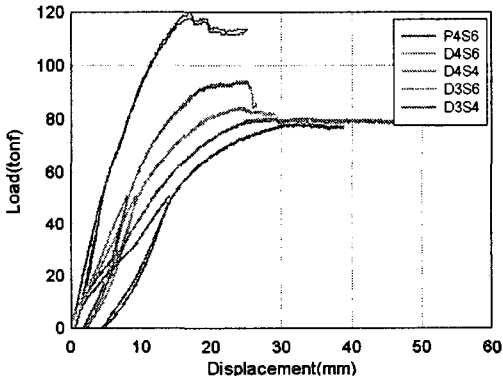


그림 9 하중-처짐 곡선

표 2 각 시험체의 항복하중

시험체	하부강판 (mm)	스티드	폭 (m)	Py (tonf)	변위 (mm)	파괴모드	비고 (%)
P4S6	평판-6.0	6열(S6)	1.00	119	17	상부압축	128.0
D4S6	절곡-9.0	6열(S6)	1.00	93	20	편칭전단	100
D4S4	절곡-9.0	4열(S4)	1.00	84	24	편칭전단	90.3
D3S6	절곡-9.0	6열(S6)	0.75	80	25	상부압축	100
D3S4	절곡-9.0	4열(S4)	0.75	78	30	상부압축	97.5

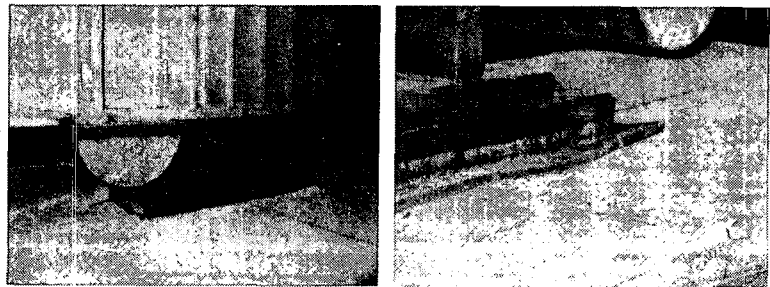
강재와 콘크리트의 합성작용을 담당하는 스티드에 따른 실험 결과, 강도 측면에서는 스티드를 6열로 배열한 D4S6과 D3S6의 항복하중이 각각 93, 80 tonf으로 스티드를 4열로 배열한 D4S4와 D3S4의 항복하중 84, 78 tonf에 비해 각각 약 3~10% 정도(약 2~9 tonf) 높게 나타났고, 강성 측면에서도 스티드를 6열로 배열한 경우가 보다 우수한 것으로 나타났다. 이것은 합성 구조체에서 일반적으로 강판과 콘크리트 사이의 합성작용이 우수할 수록 구조성능 측면에서 유리한 사실에 비추어 보면 6열 배치가 4열 보다 다

소 우수한 합성작용을 제공하기 때문인 것으로 판단된다(Velikovic, 1998). 그러나 스테드의 설치는 구조 성능뿐만 아니라 균열 발생, 시공성, 경제성 등과 밀접한 관련이 있으므로 향후 보다 심도 깊은 연구가 이루어져 전단연결재의 설치에 대한 적절한 기준이 설정되어야 할 것으로 생각된다.

하중재하 위치에 따른 비교·분석 결과, 강도 측면에서는 T-T 재하의 D4S6과 D4S4(폭 1.0m)의 항복하중이 각각 93, 84 tonf으로 하중이 T 재하의 D3S6과 D3S4의(폭 0.75m) 항복하중 80, 78 tonf에 비해 각각 약 8~16% 정도(약 6~13 tonf) 높게 나타났으며, 강성 측면에서도 T-T 재하의 경우가 보다 우수함을 알 수 있다. 그러나 하중 재하위치에 따른 두 시험체 그룹은 시험체 폭이 각각 1.0m와 0.75m로 서로 다르기 때문에 강도와 강성 측면에서의 직접적인 비교보다는, 파괴모드, 하중전달 메카니즘 등에서의 비교가 바람직하다.

3.2 파괴모드

파괴모드는 절곡강판의 T-T 하중 재하의 경우(D4S6, D4S4)에만 편칭 전단파괴를 나타내었고, 평면강판의 T-T 하중 재하(P4S6)와 절곡강판의 T 하중 재하(D3S6, D3S4)의 경우는 모두 콘크리트 압축파괴를 나타내었다(그림 10 참조). 이러한 파괴모드의 차이는 시험체의 폭에 차이가 있어 폭이 작은 D3S6과 D3S4의 경우가 휨에 불리한 측면도 있겠지만, 하중재하 위치와 하부강판 형상에 따른 하중전달 메카니즘의 차이가 주요한 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 편칭 전단파괴의 파괴모드를 나타내는 시험체는 소수이고(D4S6, D4S4) 이 경우도 편칭 전단파괴가 모두 바닥판의 항복이후에 발생하여 교량 바닥판의 가장 빈번한 손상인 편칭에 대해서 충분한 안전성을 확보하는 것으로 판단된다.



(a) 편칭 전단파괴(D4S6, D4S4) (b) 콘크리트 압축파괴(D3S6, D3S4)

그림 10 파괴형태

3.3 구조성능 비교·분석

기존의 RC 바닥판과 본 연구의 강·콘크리트 합성 바닥판(절곡강판, 평면강판)을 대상으로 중량, 이론적 휨 성능, 실험결과에 따른 항복하중 등의 기본 성능에 대한 비교·분석을 실시하였으며 그 결과는 표 3에 나타난 바와 같다.

표 3 바닥판 형식별 기본성능 비교·분석 결과

구분	중량			이론적 휨 성능			실험 결과	
	두께 (cm)	폭 (cm)	중량 (kgf/m)	f_y (kgf/cm ²)	f_{ck} (kgf/cm ²)	휨 성능 (tonf·m)	시험체 크기 (길이×폭, m)	항복하중 (tonff)
RC	25.0	25.0	156.5(1.00)	3,000	287	3.00(1.00)	2.2×2.2	50.0(1.0)
합성1	18.6	25.0	135.8(0.87)	2,400	300	7.00(2.33)	2.2×1.0	119.0(2.38)
합성2	18.9	25.0	119.5(0.77)	2,400	300	7.00(2.33)	2.2×1.0	93.0(1.86)

중량과 휨 성능에 대한 이론적·실험적 비교·분석 결과 평면강판의 강·콘크리트 합성 바닥판(합성1)은 RC 바닥판에 비해 약 13%의 중량 감소가 가능하면서 약 233~238%의 하중저항성능 향상 효과를, 절곡강판의 강·콘크리트 합성 바닥판(합성2) 약 23%의 중량 감소가 가능하면서 약 186~233%의 하중저항성능 향상 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 따라서 강·콘크리트 합성 바닥판은 RC 바닥판에 비해 경

량이면서 높은 하중저항성을 지녀 소수주형교 등 장지간의 바닥판에 적합할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 RC 바닥판에 비해 높은 하중저항성능, 간편한 시공성 및 경제성을 갖춘 강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 정적 휨 파괴 실험을 통해 이에 대한 기본적 구조성능 특성을 규명하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 본 연구의 강·콘크리트 합성 바닥판은 현재 거푸집 용도로만 활용되는 하부강판의 효율적인 구조부재 활용으로, 기존의 RC 바닥판에 비해 우수한 하중저항성능과 경량성을 나타내 장지간의 바닥판에 적합할 것으로 생각된다.

둘째, 파괴모드는 대부분의 경우 콘크리트 압축파괴를 나타내었고, 일부 경우에만 편칭 전단파괴를 나타내었다. 그러나 이 경우도 편칭 전단파괴가 바닥판의 항복이후에 발생하여 교량 바닥판의 가장 빈번한 손상인 편칭에 대해 충분한 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

셋째, 평면강판의 경우는 구조성능에서 우수한 결과를 나타내었고, 절곡강판의 경우는 인장부 콘크리트 제거에 따라 보다 큰 바닥판 중량 감소 효과를 얻을 수 있었다.

넷째, 많은 전단연결재의 설치는 강판과 콘크리트의 우수한 합성작용을 제공하여 하중저항성능을 향상시키지만, 전단연결재의 설치는 하중저항성능 뿐만 아니라 시공성, 경제성 등과 밀접한 관련이 있으므로 전단연결재의 설치에 대한 적절한 기준이 설정되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Higgins, C., Mitchell, H.(2001), "Behavior of Composite Bridge Decks with Alternative Shear Connectors", J. of Bridge Engng. 6(1), pp.17-22.
2. Krige, G.J., Mahachi, J.(1995), "Dynamic Behavior of Composite Floors", J. Construct. Steel Res. 34, pp.249-269.
3. Nakai, H., Matsui, S., Yoda, T., Kurita, A.(1998), "Trends in Steel-Concrete Composite Bridges in Japan", Struct. Engng. Int., pp.30-34.
4. Veljkovic, M.(1998), "Influence of Load Arrangement on composite Slab Behavior and Recommendation for Design", J. Construct. Steel Res. 45(2), pp.149-178.
5. Watanabe, H., Kaido, H.(2001), "Static Loading Test of Non-Prestressed Continuous Composite Girders with Steel Plate-Concrete Composite Deck(SC-Deck)", 1st Int. Conf. on Steel & Composite Struct., pp.1335-1342.
6. 大田孝二, 高木優任, 森寛司, 松井繁之(1997), "鋼少數主桁に適用する I形鋼格子床版の設計法に関する考察", 橋梁と基礎, 97(2), pp.35-44.
7. 日本土木學會(2000), "道路橋 床版の新技术 性能調査形 設計-第2片 合成床版", 日本土木學會 剛構造委員會, pp.131-162.
8. 김용희, 이갑중, 문태경(1997), "강·콘크리트 합성바닥판에 있어서 전단연결재 설계에 관한 기초적 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집, pp.153-156.
9. 정영수, 박창규, 김용곤, 이원표(2001), "I형강 합성바닥판의 정적성능 평가", 콘크리트학회 논문집, 13(5), pp.430-437.