

복합소재 교량 바닥판 ‘델타데크’의 구조적 특성과 현장적용 Structural Characteristics and Field Application of ‘Delta Deck’ Composite Bridge

이 성 우* 박 신 전** 김 병 석*** 정 규 상****
Lee, Sung Woo Park, Sin Zeon Kim, Byung Suk Jeong, Gyu Sang

ABSTRACT

To substitute conventional reinforced-concrete bridge deck, glass composite precast bridge deck - Delta Deck™, which possesses advantages of light weight, high strength, corrosion resistance and durability, is developed for the DB24 truck load. Pultruded composite bridge deck is designed and fabricated. To verify serviceability and structural safety, finite element analysis, structural testing such as flexural test, local fatigue test, flexural fatigue test and field tests are conducted. In this paper structural characteristics of developed deck and its field application in Korea is presented.

1. 서 론

건설분야의 첨단 신소재로 떠오르고 있는 경량, 고강도, 고내구성 특성의 복합소재를 이용하여 국내 최초로 개발된 복합소재 교량 바닥판 ‘델타데크’는 교량의 성능개선 및 신설시 기존의 현장타설공법으로 시공되는 콘크리트 바닥판 공법을 대체하기 위해 개발되었다.

교량의 성능개선 및 신설시 복합소재 교량 바닥판 ‘델타데크’를 사용하면, 차량통제기간을 최소화시켜 차량지체로 인한 에너지 비용의 낭비를 현저히 절감하고 시민불편을 최소화시키며, 공기단축으로 공사비를 대폭 절감할 수 있을 뿐만 아니라 내부식, 고내구성 특성으로 인해 콘크리트 열화로 인한 문제점을 근본적으로 방지하고, 내구연한을 현격히 증대시킬 수 있어 수명기간 대비 실질 투자비용이 크게 감소한다. 또한 경량 특성으로 사하중을 감소시켜 거더 및 하부구조 보강 없이 교량의 승급이 가능하므로 초기 공사비가 대폭 절감되며, 운송 및 시공장비의 경량화가 가능하고 자중경감에 의해 내진성을 크게 향상시킨다^[1]. 그림 1.1에서는 ‘델타데크’가 설치된 콘크리트 거더교의 개요도를 보여주고 있다.

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 유리섬유 복합소재를 이용한 프리캐스트 교량 바닥판인 ‘델타데크’의 설계와 구조해석, 실험을 통한 성능검증내용을 기술하였

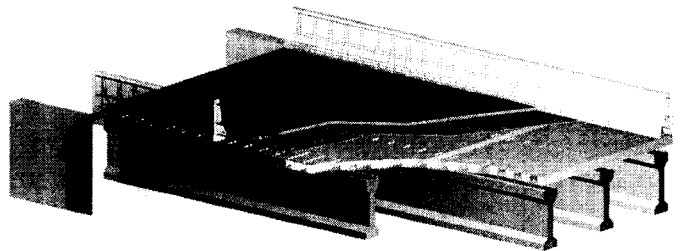


그림 1.1 ‘델타데크’가 설치된 콘크리트 거더교의 개요도

* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-910-4651 (E-mail:swlee@kookmin.ac.kr)
** 정회원 · (주)국민씨아이 기술개발팀 과장 · 공학석사 · 02-539-3664 (E-mail:sinzeon@kookminci.com)
*** 정회원 · 건설기술연구원 연구위원 · 공학박사 · 031-910-0124 (E-mail:bskim@kict.re.kr)
**** 정회원 · 국민대학교 구조안전연구소 상임연구위원 · 공학박사 · 02-910-4658 (E-mail:gyusangjeong@yahoo.co.kr)

으며, 교량의 성능개선 및 신설시 현장적용 현황을 기술하였다.

2. 단면설계 및 구조해석

복합소재 교량 바닥판에 대한 선행기초연구를 바탕으로 국내 도로교시방서 기준에 따른 DB24하중에 적합한 복합소재 교량 바닥판 단면을 설계하였다. 설계된 ‘델타데크’ 단면은 종방향 및 횡방향 강성이 우수한 3개의 제형(사다리꼴)을 가지는 중공 단면을 기본 단면형상으로 하며, 상부판, 하부판 및 복부판으로 구성되어 상부하중의 지지 및 전달에 유리한 형태를 가지도록 높이 200mm, 상부판 두께 16mm, 하부판 두께 12mm를 가지는 단면을 설계하였다^[4]. 설계된 ‘델타데크’ 단면에 대한 복합소재 적층설계는 상부판, 하부판 및 복부판으로 구분하여 실시하였으며, 적층설계시 구성재료의 물성치는 유리섬유와 불포화 폴리에스터 수지의 재료특성을 사용하였다. 적층설계시 강화섬유는 종방향(0°), 경사방향(±45°), 횡방향(90°)으로 모든 방향성을 가지도록 배치하였으며, 로빙형태의 종방향 유리섬유와 횡방향 및 경사방향 보강을 위한 다축 유리섬유 직포를 사용하여 적층구조를 설계하였다. 그림 2.1에서는 ‘델타데크’ 바닥판 튜브의 단면도를 보여주고 있으며, 그림 2.2에서는 ‘델타데크’ 상부판의 복합소재 적층구조를 보여주고 있다.

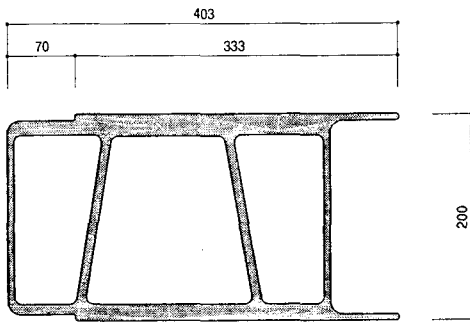


그림 2.1 델타데크 바닥판 튜브의 단면도

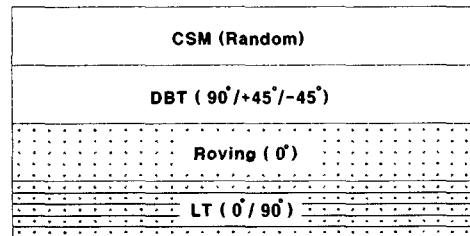


그림 2.2 델타데크 상부판의 복합소재 적층구조

개발된 ‘델타데크’ 단면에 대한 사용성 및 구조 안전성의 해석적 검증을 위하여 설계 바닥판을 적용한 강판형교에 대한 유한요소해석을 실시하여 도로교 시방서의 DB24하중에 대한 바닥판 처짐, 국부응력 및 파괴지수를 검토하였으며, 설계단면 복부판의 좌굴 안전성을 검증하였다^[1]. 해석대상 교량은 총 시간장이 30m, 거더간 간격이 2.5m인 5주형 단순판형교로 하였다.

‘델타데크’를 이용한 복합소재 바닥판 교량의 구조해석에서는 1등급 설계하중인 DB24하중 재하시 계산된 해석결과를 이용하여 Tsai-wu 파괴기준에 의한 바닥판의 구조 안전성을 검토하고, 바닥판의 처짐으로 사용성을 검토하였으며, 또한 고유치해석을 통하여 복부판의 좌굴 안전성을 검토하였다. 그림 2.3에는 해석 대상 교량의 유한요소해석 모델을 보여주고 있으며, 그림 2.4에서는 바닥판의 수직방향처짐 분포를 보여주고 있다.

구조해석 결과 응력, 처짐, 파괴지수, 좌굴에 대한 결과를 정리하면 다음 <표 2.1>과 같다. 처짐규정에 대해서는 2.53의 충분한 여유를 보유하여 사용성을 만족시키고 있고 파괴지수에서도 10.42 및 복부판 좌굴에 있어도 10.67의 안전율을 가지고 있어 ‘델타데크’ 단면은 사용성 및 구조 안전성을 모두 충족하는 것으로 평가되었다.

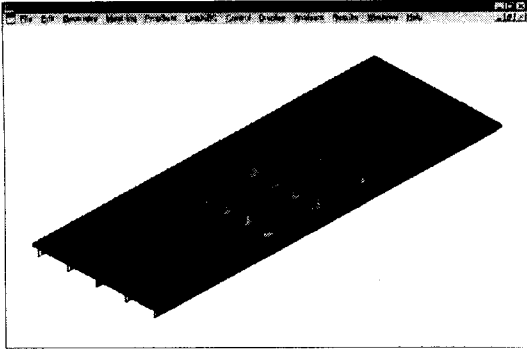


그림 2.3 해석대상 교량의 유한요소해석 모델 및 하중재하위치

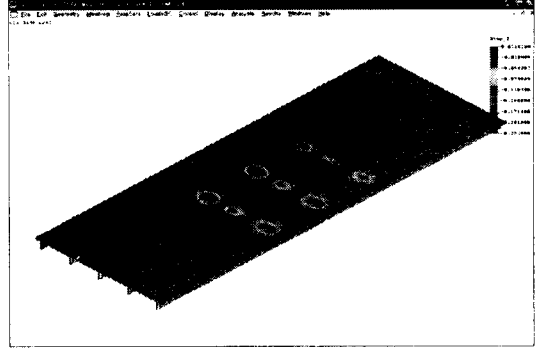


그림 2.4 복합소재 바닥판의 수직방향 처짐분포

<표 2.1> 설계 복합소재 바닥판 교량의 구조해석 결과 (DB24 하중재하시)

항 목	최대응력 (kgf/cm ²)				Tsai-Wu 파괴지수	최대처짐	좌굴고유치
	상부판		하부판				
	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y			
결과치	-143.5	-160	177	73.4	0.096	2.32 mm	14.22
안전율	18.19	10.13	17.13	11.01	10.42	2.53	10.67

X:바닥판 패널 종방향 (차량진행직각방향), Y:바닥판 패널 횡방향(차량진행방향)

3. 델타테크의 실험적 성능검증

3.1 재료성능시험

인발성형 공정으로 제작된 '델타테크' 패널의 재료적 특성을 평가하기 위하여 제작된 패널로부터 시편을 채취하여 재료시험을 수행하였다. 인장, 압축 및 전단의 기계적 특성에 대한 시험은 '델타테크'의 상부판, 하부판 및 복부판에 대하여 종방향 및 횡방향으로 구분하여 수행하였으며, 열팽창 시험 등의 물리적 특성 및 내약품성 시험 등의 내구특성 검증을 위한 시험을 수행하였다. <표 3.1>에서는 '델타테크' 시편의 강도특성 재료시험결과를 보여주고 있으며, <표 3.2>에서는 '델타테크' 시편의 열팽창시험 및 내약품성시험 결과를 보여주고 있다.

<표 3.1> 델타테크 시편의 강도특성 재료시험결과

시험항목	시험기준	시험편 위치	시험결과 (단위: kgf/cm ²)
인장강도	KS F2241	상부판	2,043
		하부판	3,032
		복부판	2,342
압축강도	ASTM D695	상부판	2,610
		하부판	3,345
		복부판	2,678
면내 전단강도	KS F2248	상부판	443
		하부판	445
		복부판	551
편칭 전단강도	KS M3019	상부판	1,149

<표 3.2> '델타테크' 시편의 열팽창시험 및 내약품성시험 결과

시험항목	시험기준	시험결과 (단위: 1/℃)		
열팽창 계수	KS M3015	4.0 - 6.0 × 10-6		
시험항목	시험기준	약품명	시험결과	
			무게변화율 (%)	외 관
내약품성	KS F3083	황산 (3%)	- 0.04	이상없음
		질산 (10%)	- 0.12	이상없음
		메탄올 (96%)	0.53	이상없음
		에탄올 (95.5%)	0.18	이상없음
		벤젠 (99.5%)	0.29	이상없음
		염화나트륨 (3%)	0.11	이상없음
		수산화나트륨(10%)	0.29	이상없음

3.2 구조성능시험

설계, 제작된 '델타테크'의 구조안전성 및 사용성의 실험적 검증을 위해 각종 구조성능시험을 수행하였다^[3]. 휨내하력 평가를 위한 3점 휨시험은 폭 0.9m, 지점간 길이 2.25m인 휨시험체에 대해 수행하였으며, 시험결과, 최대 파괴하중은 42ton으로 등가판 해석에 의해 하중분포폭으로 고려하고 활하중을 포함한 DB24하중에 대한 순수 휨내하율은 15로 설계 바닥판은 강도면에서 충분한 안전율을 보유하고 있는 것으로 평가되었다(사진 3.1 참조). 또한, 반복적인 차륜하중에 의한 국부 피로영향을 평가하기위해 DB24하중의 200만회 압축피로시험을 수행하였다. 시험결과, 200만회 반복하중 후에도 시험체에는 외관상 손상이 전혀 발생하지 아니하였으며, 최대 발생응력이 부재의 파괴강도 대비 13이상의 안전율을 보유하여 우수한 내피로 성능을 입증하였다(사진 3.2참조).

'델타테크'를 이용한 복합소재 교량 바닥판 공법에서 합성형 교량의 거더-바닥판 연결부는 중공단면의 바닥판 패널 내부에 전단포켓을 형성하고 전단 연결재를 용접설치한 후 무수축 몰탈을 충전하여 합성부를 시공하게 된다. 따라서, 합성형 교량의 거더-바닥판 연결부 설계시 필요한 전단 연결재의 허용전단력을 산정하기 위한 시험으로 거더-바닥판 연결부에 대한 전단시험을 수행하였다. 시험결과, 전단 연결재의 항복강도 기준으로 설계 안전율을 4.0으로 결정하고 시험체의 항복기준 전단력으로부터 전단 연결재 1개의 허용전단력을 2.9tonf로 결정하였다(사진 3.3).



사진 3.1 휨성능시험

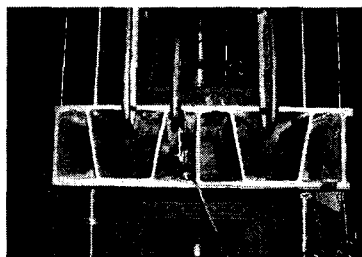


사진 3.2 압축피로시험



사진 3.3 연결부 전단시험

거더와 합성으로 시공설치된 '델타테크'의 반복적인 운하중에 의한 내피로성능을 검증하기 위해 DB24하중의 200만회 휨피로 시험을 수행하였으며, 200만회 반복하중 후에 연결부 및 바닥판 손상없이 바닥판 강도대비 8.3,

전단연결재 항복강도 대비 3.3이상으로 충분한 내피로 성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었다(사진 3.4). ‘델타데크’의 교면 포장부는 바닥판 상면과 포장층과의 부착을 양호하게 할 수 있도록 아스콘 접착공법을 사용하였으며, 포장전단시험 및 포장부착시험을 통해 그 성능을 확인하였다. 포장전단시험 결과 한국도로공사에서 제시하고 있는 허용전단응력인 1.5kgf/cm²에 대해 16배 이상의 전단성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었으며, 포장부착시험 결과 허용접착강도인 6kgf/cm²에 대해 약 20%이상 상회하는 부착성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었다(사진 3.5). ‘델타데크’에 설치 시공되는 콘크리트 방호벽의 연결부 성능검증을 위해 방호벽 시험체를 제작하고 방호벽과 바닥판간 연결부 성능시험을 수행하였다. 시험은 설치된 콘크리트 방호벽의 최대 휨모멘트 내력을 산정하고 이 휨모멘트를 발생시키는 수평하중을 가하여 이때 연결부의 손상유무 및 응력변화를 확인하였다. 시험결과, 방호벽의 휨내력 기준 수평하중인 13tonf 보다 큰 15tonf에서 연결부 손상이 발생하지 아니하였으며, 이때 계측된 바닥판의 최대 발생응력이 파괴강도 대비 10이상의 큰 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다(사진 3.6).

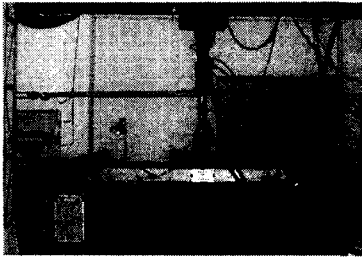


사진 3.4 휨피로시험

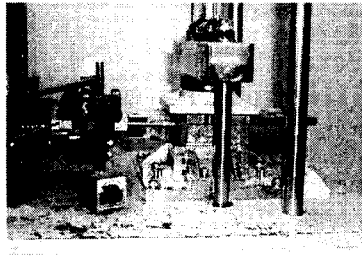


사진 3.5 포장부 전단강도시험

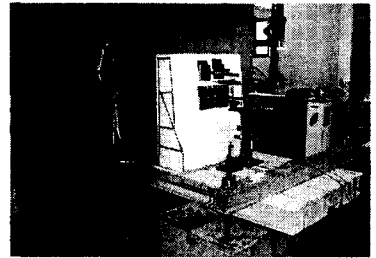


사진 3.6 방호벽 연결부 성능시험

4. 시험시공 및 현장재하시험

경부고속도로 부산-연양간 고속도로 확장공사 제2공구 형주교에 설계, 제작된 ‘델타데크’를 시범시공하였으며, 시공된 바닥판의 구조안전성 및 사용성 평가를 위해 현장재하시험을 수행하였다. 대상 교량의 제원은 교장 11m, 교폭 4.3m의 2차선 교량으로서 고속도로 확장공사용 교량이며, 강주형에 복합소재 교량 바닥판을 합성한 교량이다. 복합소재 프리캐스트 바닥판은 미리 공장에서 제작한 후 현장에서 복합소재 프리캐스트 바닥판과 주형과의 합성을 위하여 바닥판-주형 연결에는 전단 스티드를 바닥판 내부의 그라우트 포켓에 매립하는 방법을 사용하였다. 사진 4.1에서는 시공된 바닥판의 현장재하시험 모습을 보여주고 있다.

공용중 교량 상부 활하중에 대한 ‘델타데크’의 사용성 및 구조안전성을 분석하고 바닥판과 강주형의 합성거동을 파악하기 위하여 정적재하시험을 실시하였으며 현장재하시험하중에 의한 바닥판 및 주형의 변형율, 처짐 등을 실측하였다.

‘델타데크’의 사용성은 시방서상 바닥판의 최대허용 처짐기준을 대비하여 평가하였다. 계측대상 복합소재 프리캐스트 바닥판의 처짐기준은 4.7mm(L/425=2000/425)으로 계측결과, 현장재하하중에 의한 바닥판의 최대 처짐 5회 측정된 평균값은 1.92mm로서 2.4정도의 처짐 안전율을 가지는 것으로 평가되었다.

시험 차량하중의 축중량 23톤의 DB24하중에 대한 추정 처짐 안전율은 약 2.9로 평가되어 처짐 사용성 기준을 충분히 만족시키는 것으로 확인되었다. <표 4.1>은 현장재하시험의 처짐 결과를 정리한 것이다. 다음 <표 4.2>에는 DL+1.3LL(충격 0.3포함)시의 DB24하중에 대한 해석치와 재하시험 차량을 DB24하중으로 환산한 계측치에 대해 발생응력과 최대강도를 대비하여 구조안전성을 평가한 결과를 보여주고 있다. 여기서 실측응력의

DB24 환산응력은 유한요소해석 결과 실제 재하 활하중 하의 해석응력과 DB24활하중 하의 해석응력의 비로 실측응력을 할증하여 계산하였다. DB24 환산응력을 이용한 실측 DL+1.3LL의 경우 바닥판 최대 단면력 발생시 바닥판 하부의 교축방향 응력에 대한 안전율이 최소 39이상을 확보하고 있으므로 시공된 '델타테크' 바닥판은 충분한 구조적인 안전성을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.



사진 4.1 현장재하시험 모습

<표 4.1> 처짐계측결과

항 목	위치별 개측결과 (mm)		비고
	바닥판 1지간	바닥판 2지간	
재하시험결과 [안전율]	-1.46 [3.21]	-1.92 [2.44]	처짐기준 4.7mm (2000/425)
DB24 (환산) [안전율]	-1.21 [3.88]	-1.59 [2.95]	

<표 4.2> 유한요소해석과 실험결과와의 비교

게이지 번호	해석응력(kg/cm ²)					실측응력(kg/cm ²)				최대 강도 (kg/cm ²)
	DL	LL (재하 하중)	LL (DB24)	DL+1.3LL*		LL (재하하중 실측)	LL (DB24 환산)	DL+1.3LL**		
				응 력	강도대비			응 력	강도대비	
1	-6.78	-31.73	-43.86	-63.80	18.81	-10.38	-14.35	-21.23	56.5	1,200
2	-6.68	-30.00	-32.26	-48.62	24.68	-22.11	-23.78	-30.46	39.4	1,200
3	-0.93	-20.70	-25.36	-33.90	59.0	-13.60	-16.66	-17.59	113.7	2,000
4	-0.99	-34.83	-26.58	-35.54	56.27	-42.82	-32.68	-33.67	59.4	2,000
5	1.73	29.98	38.42	51.68	38.70	27.98	35.86	37.59	53.2	2,000

* DL:해석 사하중 응력, LL:DB24 해석응력

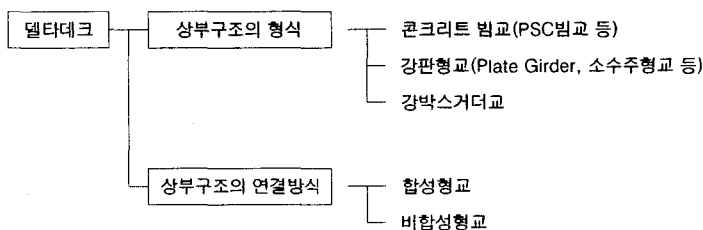
** DL:해석 사하중 응력, LL:DB24환산 실측응력

5. 현장적용

복합소재 교량 바닥판 '델타테크'는 교량의 성능개선 및 신설시 기존 현장타설방식의 철근 콘크리트 바닥판을 대체하여 사용될 수 있으며, (주)국민씨아이에서는 국내 최초로 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판 기술을 건설교통부 신기술 제374호로 지정받아 현장적용이 활발히 이루어질 전망이다.

'델타테크'는 상부구조의 형식에 따라 콘크리트 빔교, 강판형교, 강박스 거더교 등에 따라 그 시공방법을 달리 할 수 있으며, 상부구조와의 연결방식에 따라 합성형 또는 비합성형으로 구분할 수 있다^[2]. <표 5.1>에서는 델타테크의 적용 교량형식을 보여주고 있다.

<표 5.1> 델타테크의 적용 교량형식



노후 교량의 성능개선시 기존의 콘크리트 바닥판으로 재시공하는 경우 하부구조 및 거더를 보수 및 보강하여야 하나 복합소재 교량 바닥판인 '델타데크'를 이용하는 경우에는 상부자중 감소로 보강없이 바닥판을 단순 교체 시공함으로써 단기간에 교량의 성능개선이 가능하게 된다. 특히, '델타데크'의 경량특성으로 인해 거더의 형고를 축소시킬 수 있어 교량의 성능개선과 더불어 홍수시 기존 교량의 형하공간 확보가 가능하게 된다. 그림 5.1에서는 강판형교의 '델타데크'를 이용한 기존 교량의 성능개선 예로써 국도 13호선 개정교의 횡단면도를 보여주고 있으며, 그림 5.2에서는 강재거더와 '델타데크'의 연결부 개요도를 보여준다.

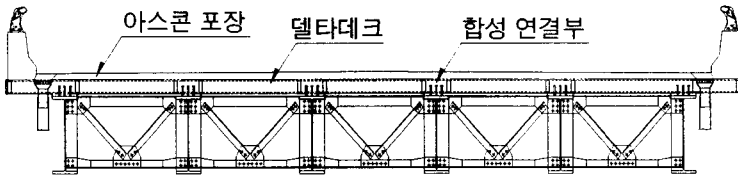


그림 5.1 강판형교에 대한 델타데크 적용(국도 13호선 개정교)

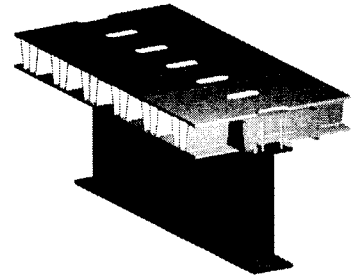


그림 5.2 강재거더와의 연결부 개요

교량 신설시에는 복합소재 교량 바닥판인 '델타데크'의 내부식, 고내구성 특성으로 교량의 내구연한을 현저히 증대시킬 수 있으며, 공기단축이 가능하고, 상부자중 경감으로 교각기초 및 거더의 경제적 건설로 공사비 절감을 도모할 수 있다. 그림 5.3에서는 PSC빔교의 '델타데크'를 이용한 교량 신설 예로써 평택항 진입교량의 횡단면도를 보여주고 있으며, 그림 5.4에서는 콘크리트 거더와 복합소재 바닥판의 연결부 개요도를 보여준다.

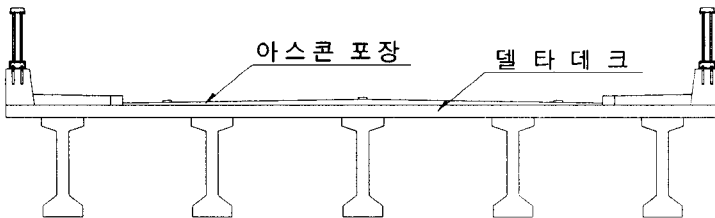


그림 5.3 PSC빔교에 대한 '델타데크'의 적용(평택항 진입교량)

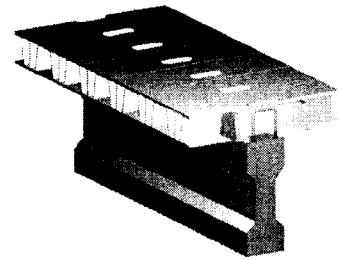


그림 5.4 PSC거더와의 연결부 개요

복합소재 교량 바닥판 '델타데크'는 교량의 성능개선 및 신설 뿐만 아니라 보도교 바닥판으로도 이용이 가능하며, 이 경우 보도부 하중을 경감시킴으로써 교량의 경제적 설계와 도심지에서의 신속시공이 가능한 장점이 있다. 그림 5.5에서는 강재빔 상에 비합성형으로 '델타데크'를 설치한 청계천 복원공사의 3공구 비우교의 보도부 횡단면도를 보여주고 있다.

현재, '델타데크'는 홍수위 여유고 확보가 필요한 기존 국도교량의 성능개선 및 고부식 환경하의 해상교량, 도심지 건설 교량 등 복합소재 교량 바닥판의 적용이 빠르게 확산되고 있다. <표 5.2>에서는 복합소재 교량 바닥판 '델타데크'를 이용한 대표적인 시공 및 설계교량 목록을 보여

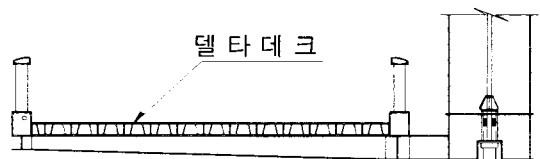


그림 5.5 보도교에 대한 복합소재 교량 바닥판 적용(청계천 복원공사 비우교)

주고 있다.

<표 5.2> 복합소재 교량 바닥판 ‘델타테크’를 이용한 대표적인 시공 및 설계교량 목록

교량명	교량형식	교량연장	교 폭	교량명	교량형식	교량연장	교 폭
번천교 (중부고속도로)	ST.빔교	8	3.0	광양항 집입교량	ST.빔교	150	10.0
형주교 (경부고속도로)	ST.빔교	11	4.0	화수교 (국도 24호선)	PSC빔교	64.2	10.0
개정교 (국도 13호선)	ST.빔교	25.0	11.0	진위교 (국도 1호선)	PSC빔교	25.0	17.5
비우교 (청계천 복원공사)	ST.빔교 (보도교)	44.5	9.0	현동교 (국도 36호선)	RCT빔교	96.0	8.5
평택항 집입교량	PSC빔교	70.0	11.9	송포교 (국도 19호선)	PSC빔교	50.0	19.0

6. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 복합소재 교량 바닥판인 ‘델타테크’의 설계와 구조해석, 실험을 통한 성능 검증내용을 기술하였으며, 교량의 성능개선 및 신설시 현장적용 현황을 기술하였다. 복합소재 교량 바닥판 ‘델타테크’는 설계, 제작된 바닥판에 대한 구조해석, 각종 구조성능시험 및 현장재하 시험을 통해 충분한 사용상과 구조안전성을 보유하는 것으로 검증되었으며, 현재 시공 및 설계를 통한 복합소재 교량 바닥판 기술의 보급이 활성화되고 있다.

복합소재 교량 바닥판 ‘델타테크’는 경량, 고강도, 고내구성 특성 뿐만 아니라 교통통제 최소화와 신속시공을 가능케하는 여러 가지 이점으로 인해 홍수위 여유고 확보가 필요한 기존 국도교량의 성능개선 및 고부식 환경하의 해상교량, 도심지 건설 교량 등 복합소재 교량 바닥판의 적용이 빠르게 확산되고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2001년 건설핵심기술연구개발사업(목적A-01)으로 연구되었으며 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이성우, 신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구, 2001년 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서, 2004
- [2] 이성우, 김제인, 김병석, 박성용, 김성태. 경량·고내구성 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판의 개발과 현장적용, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2003
- [3] 이성우, 김제인, 김병석, 배두병, 박성용, 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 실험적 거동분석, 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 2003
- [4] Sung Woo Lee, Sun Goo Lee, Byung Suk Kim, Sin Zeon Park (2002), "Fabrication and Experiments for Glass Reinforced Composite Bridge Deck", Proceedings of ASSEM'02