

복합소재 바닥판 ‘델타데크’ 개발과 부산항 놀차교의 세계 최대규모 적용사례 연구

Development of Composite Deck 'Delta Deck' and its World Largest Application for Noolcha Bridge, Busan Port

이 성 우* · 홍 기 중** · 김 제 인*** · 조 남 훈****

Lee, Sungwoo · Hong, Kee-Jeung · Kim, Je In · Cho, Nam Hoon

ABSTRACT

Due to many advantages such as lightweight, high durability and speedy construction, increasing number of bridges of various girder types are being built recently with glass-fiber reinforced composite deck. A profile of the composite deck, called 'Delta deck', is developed which has 3 trapezoidal cells of 200mm depth. This paper introduces how to develop 'Delta deck' and its application to the world largest composite-deck bridge, which is 300m long and 35m wide and is currently under construction.

Keywords: Delta deck, GFRP, Composite deck, Pier-type bridge, World Largest

1. 서 론

토목 기반구조물에 적용된 복합재료를 중에 교량 바닥판이 가장 주목을 받고 있다. 기존의 일반적으로 사용된 콘크리트 교량 바닥판에 비해 복합소재 바닥판은 상당히 가볍고, 내구성이 강하며, 빠르게 시공이 가능하다. 이러한 장점들 때문에, 최근에는 여러 모양의 복합소재 교량바닥판이 전 세계적으로 개발되어 활발히 사용되고 있다. 복합소재 바닥판으로 만들어진 인도교를 포함한 수백 개의 교량이 현재 미국에서 사용 중인 것으로 알려져 있다(Keller 2006; ACMA 2006). 한국에서는 10여개의 복합소재 교량이 건설되었으며 그 수는 점점 증가하고 있다. 2007년에는 한국에 건설될 복합소재 교량바닥판의 총 면적이 13,000m²이 될 것으로 예측된다.

본 논문에서는 사다리꼴 단면형상을 가지도록 최근에 개발된 복합소재 데크인 '델타데크'에 대해 설명하고, 이의 구조성능을 현장실험을 통해 검증한다. 정적 및 동적 현장실험을 통해 검증된 델타데크는 세계 최대 규모의 복합소재 교량인 부산항 놀차교의 시공에 사용되어 2007년 중반에 완공 예정이다. 본 논문에서는 세계의 복합소재 교량 전문가들의 주목을 받고 시공되고 있는 이 교량의 설계 및 시공에 대해 소개한다.

* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 Email: swlee@kookmin.ac.kr

** 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 Email: kjhong@kookmin.ac.kr

*** 정회원 · (주)국민씨아이 부사장 Email: muzimi@kookminci.com

**** 정회원 · (주)국민씨아이 부장 Email: namhoon@kookminci.com

2. 델타데크

많은 연구를 통해 tongue-and-groove 연결부를 가진 '델타데크'라 불리는 테크 단면이 최근에 개발되었다 (이성우 2004; 이성우 2006). 그림 1에서 보이듯이, 이 테크는 200mm의 깊이를 가진 3개의 사다리꼴 셀로 이루어져 있다. 이 테크는 DB24 트럭하중(뒤틀림 하중 94.1kN)을 기준으로 일반적인 거더 폭 2.5m에 적용되도록 설계되었다. 인발 제작된 델타데크를 그림 2에 보이듯이 서로 접촉에 의해 연결하여 교량에서 바닥판으로 사용한다. 그림 3은 테크의 인발성형 공정을 보여주고 있다.

테크의 적층에는, 불포화 폴리에스터 수지와 함께 8800TEX(g/km)의 E-Glass 로빙을 테크 종방향에 사용하였고 다축(90°, ±45°) 섬유직포를 테크 횡방향에 사용하였다. 개발된 테크에 대해 휨시험, 압축파괴시험, 휨파괴시험, 전단연결재시험 및 현장재하시험을 수행하여 안전성과 사용성을 검증하였다. 현장재하시험에 대해 다음 절에서 소개한다.

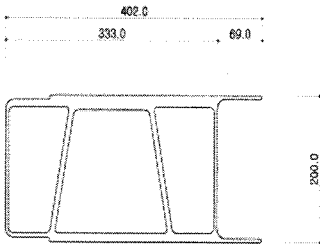


그림 1 델타데크 단면

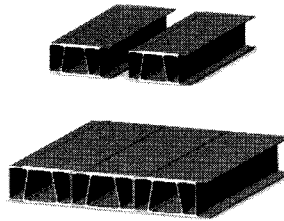


그림 2 델타데크 연결



그림 3 델타데크 인발성형공정

3. 델타데크의 현장시험

여러 시험을 거쳐 개발된 델타데크는 다수의 교량에 적용되었다. 이 절에서는 그 중 하나인 광양교에서 수행된 정적 및 동적 재하시험 결과에 대해 설명한다. 광양교는 150m 길이에 12m 폭을 갖는 플레이트 거더 교량이며, 5개의 지간으로 구성되었고, 각 지간은 30m이며 단순지지되어 있다. 횡방향으로는 6개의 거더가 2.0m 간격으로 설치되었다.

3.1. 현장시험 해석

재하시험에서는 활하중에 대한 측정만 가능하므로, 사하중을 포함한 하중에 대한 교량의 구조성능을 평가하기 위해서는 해석적 접근이 필요하다. 그림 4는 시험트럭(총하중=293.7kN)이 재하된 교량해석 모델이고 그림 5는 DB24 트럭하중(총하중=432kN)이 재하된 교량해석 모델이다. 시편시험에서 나온 복합소재의 재료특성을 해석에 사용하여 계산한 테크 중심의 발생 응력은 시험트럭의 경우 6.85MPa이고 DB24트럭의 경우 7.29MPa이다. 이 값들은 테크 종방향 극한강도 320MPa보다 훨씬 작다. 복합소재의 낮은 탄성계수와 높은 극한강도 때문에, 복합소재 테크가 사용성 기준을 만족할 때는 언제나 높은 안전성을 갖는다. DB24 트럭하중에 대한 테크의 최대 수직처짐은 1.45mm이다. 2m의 지간을 갖는 거더에 적용되는 허용처짐에 1/425의 기준을 사용하면 허용처짐은 4.71mm이 된다. DB24 트럭에 대한 허용처짐-처짐 비는 3.24이므로 사용성 기준

을 충분히 만족하는 것으로 나타난다.

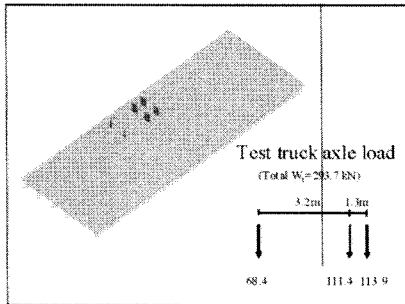


그림 4 시험트럭에 대한 해석모델

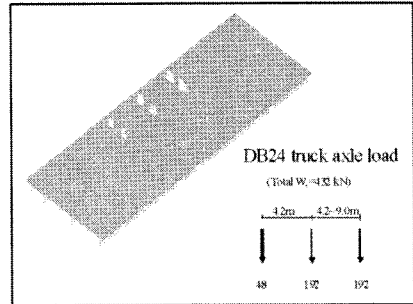


그림 5 DB24 트럭에 대한 해석모델

3.2. 정적 현장시험

시험트럭을 교량에 재하하여 정적 현장시험을 수행하였다. 그림 6은 시험에 사용된 교량의 단면과 게이지의 위치를 보여준다. 그림에서 문자 'L' 과 'T'는 변형률 게이지가 테크 튜브의 종(longitudinal)방향과 횡(transverse)방향으로 놓여 있음을 각각 나타낸다. 시험 결과를 평가한 결과 가장 작은 안전도는 L-4 게이지 위치(그림 6 참조)에서 발생하였다. 이 위치에서의 응력은 2.10MPa이고, 앞 절의 해석결과를 이용하여 DB24 하중에 대해 환산하면 이 위치에서의 응력은 5.61MPa이 된다. 충격계수 1.3의 DB24 트럭하중과 사하중이 동시에 재하된 테크에서는 테크튜브 횡방향의 극한강도 96.2MPa에 대한 안전율은 13.6이 된다. 이것은 강도설계 측면에서 매우 안전한 상태이다. 그러므로 앞서 언급했듯이 처짐에 대한 사용성 기준이 복합소재 교량 바닥판의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요인이 된다.

표 1은 정적 시험과 해석에서 구한 변위들을 보여준다. 이 표에서 시험트럭에 대한 테크의 최대 상대변위는 1.50mm로 측정되었으며 이는 해석값 1.70mm보다 13% 작은 값이다. 시험트럭과 DB24트럭에 대한 해석 변위들을 사용하여, 시험트럭에 대해 측정된 변위가 DB24트럭에 대한 등가의 변위로 근사하게 환산될 수 있다. 이렇게 환산된 DB24트럭에 대한 처짐은 1.28mm이며, 허용처짐-처짐 비는 3.67이 되고 이는 앞 절의 해석에서 구한 3.24와 크게 다르지 않다. 결과적으로, 정적재하시험과 해석에서 이 교량은 매우 높은 안전율과 충분한 사용성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

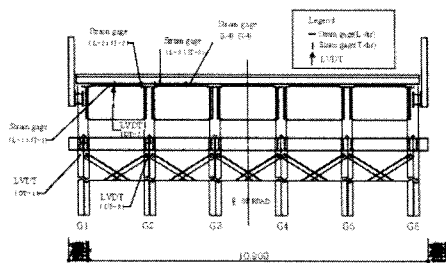


그림 6 교량 단면 및 게이지 위치

표 1 정적 시험과 해석의 처짐

위치	처짐, mm		허용 처짐기준
	시험	해석	
DT1 거더 G1의 중앙	5.1	12.4	4.71mm (2m/425)
DT2 거더 G1 & G2 사이	4.3	13.0	
DT3 거더 G2의 중앙	2.8	11.3	
시험트럭에 대한 테크의 상대변위 (DT2-DT3)	1.50	1.70	
DB24트럭에 대한 등가의 상대변위 [Deflection ratio]	1.28	1.45	[3.67] [3.24]

3.2. 동적 현장시험

교량의 동적특성을 조사하기 위해 동적현장재하시험을 수행하였다. 정적재하시험에서 사용하였던 동일한 시험트럭을 교량위에서 4개의 다른 속도(5km/h, 20km/h, 40km/h, 50km/h)로 달리도록 하였다. 최대휨응력은 느린 속도인 5km/h에서 3.04MPa로 측정되었고, 부모멘트의 최대휨응력은 40km/h 속도에서 거더 G2 부근에서 2.35MPa로 측정되었다. 이들 응력들은 복합소재의 강도에 비해 상당히 작은 값이므로 교량은 동적시험하중에 대해 매우 안전한 것으로 판단된다.

그림 7은 트럭속도가 50km/h일 때 교량의 처짐응답을 보여준다. 표 2는 동적재하시험에서 테크의 최대처짐을 보여준다. 표에서 보이듯이, 여러 트럭속도에 대한 최대처짐은 동적증폭을 보여주지 않는다. 최대처짐 1.49mm는 느린 속도인 5km/h에서 테크의 중앙부에서 생기며, 이 값은 정적시험에서 구한 1.50mm와 근사한 값으로서 사용성 기준을 만족한다. 결론적으로, DB24트럭을 동적재하한 경우에도 교량은 충분한 안전성과 사용성을 갖고 있는 것으로 판단된다.

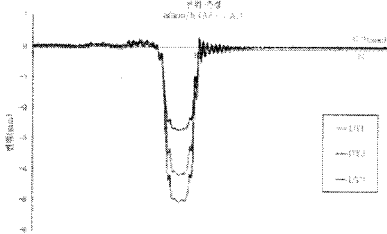


그림 7 속도 50km/h에서의 처짐 응답

표 2 동적재하시험의 최대 처짐

트럭속도	테크변위=DT2-DT3, mm		허용 치짐기준
	시험트럭	DB24 트럭	
5km/h	1.49	1.27 [3.70]	4.71mm (2m/425)
20km/h	1.47	1.25 [3.76]	
40km/h	1.46	1.24 [3.79]	
45km/h	1.46	1.24 [3.79]	
50km/h	1.47	1.25 [3.76]	

4. 세계최대규모의 복합소재 교량

한국의 남동쪽에 위치한 부산신항에 세계 최대의 복합소재 교량이 전 세계의 복합소재 교량 전문가의 주목을 받으며 현재 건설 중에 있다. 이 교량은 늘차교라 불리며, 300m 길이에 35m 폭을 갖고 있으며, 2007년 중반에 완공될 예정이다.

이 교량에서는, 강재의 해상파일 기초 위에 격자 형태로 만들어진 철근콘크리트 거더를 시공하고, 그 위에 복합소재 테크인 델타테크를 설치한다. 시공과 유지비용의 절감을 위해 복합소재 테크가 건설재료로 선택되었다. 경량인 복합소재로 인해 기초에 쓰이는 해상파일을 절감할 수 있고, 이로 인해 초기 시공비용이 상당히 감소되었다. 게다가 복합소재 테크의 해상 환경에 대한 고내구성은 평생주기비용을 상당히 절감한다.

그림 8은 이 교량의 조감도와 종단면도를 보여준다. 그림 9는 교량 남쪽 부분의 평면도와 단면도를 보여준다. 그림 10은 교량 북쪽에 위치한 기초의 해상 파일을 사진의 왼쪽부분에 보여주고 남쪽에 위치한 격자형태의 철근콘크리트 거더를 사진의 오른쪽에 보여준다. 철근콘크리트 거더가 교량의 남쪽 부분만 완성되었기 때문에 이 부분만 현재 복합소재 테크의 설치가 진행 중이다. 남쪽부분의 테크설치가 완료되면, 펌프차량이나 레미콘트럭이 완공된 테크 위에서 북쪽부분의 거더를 제작하기 위한 콘크리트 타설작업을 수행할 것이다. 이러한 시공방식에 의해 전체 시공속도를 상당히 빠르게 할 수 있으며, 이것이 복합소재를 건설재료로 선택한 또 하나의 이유가 된다. 그림 11은 테크패널을 작업장에서 들어 올려 교량 거더에 운반하는 과정을 보여준다. 거더 위에 설치된 테크 패널들은 옆으로 접착제에 의해 연결된다. 그림 12는 테크 패널들의 연결 전에

tongue-and-groove 부분에 에폭시 작업을 하고 있는 광경을 보여준다. 그림 13은 데크 간 연결이 완료된 교량 남쪽 부분의 광경을 보여준다. 그림 14는 거더 위에 설치된 데크의 측면을 보여준다. 이 사진의 오른쪽은 교량의 북쪽 부분으로서 앞으로 철근콘크리트 거더가 완성된 후에 데크가 설치될 부분이다. 데크 설치가 완료된 후에 전단연결재가 거더에 설치된다. 그림 15는 거더 위에 설치된 전단연결재를 보여준다. 전단연결재 설치 후에 건조수축하지 않는 콘크리트를 전단연결재를 둘러싸도록 타설하여 거더와 데크가 합성작용을 하도록 한다. 그 다음에 아스팔트 포장으로 마무리를 한다.

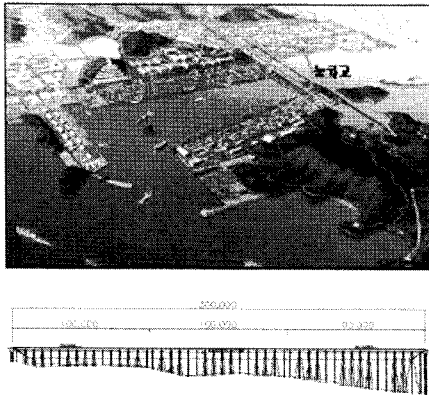


그림 8 늘차교 조감도와 종단면도

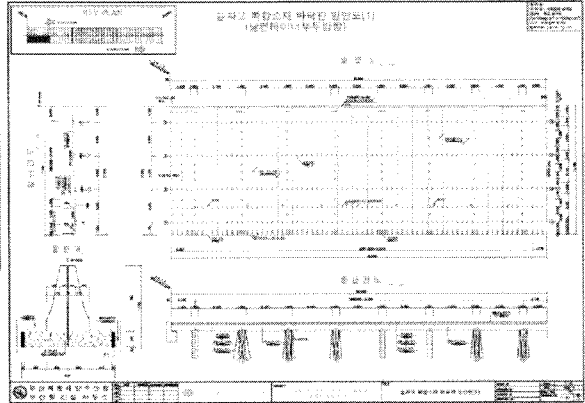


그림 9 늘차교의 남간테이너 부두방향 평면도와 종단면도

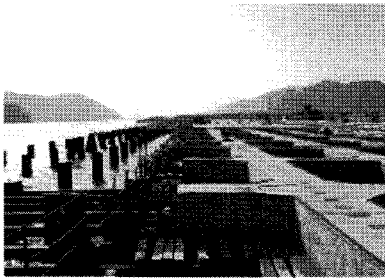


그림 10 해상파일 및 거더

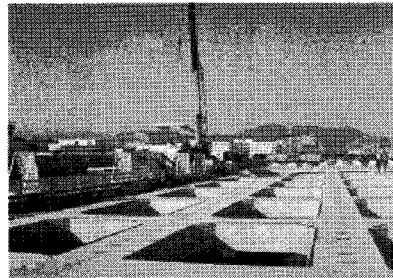


그림 11 데크패널의 운반

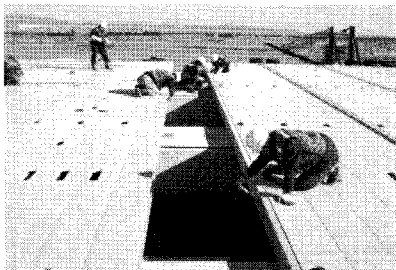


그림 12 에폭시 작업

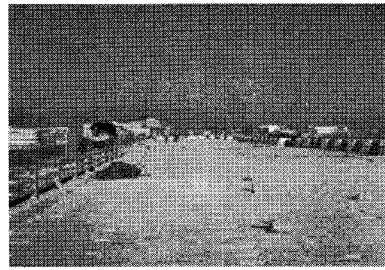


그림 13 데크 연결 완료

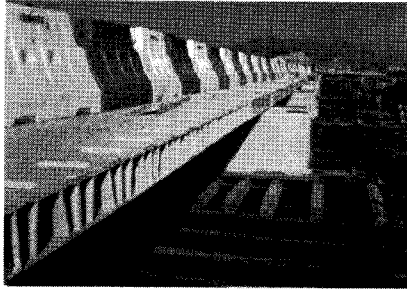


그림 14 연결된 데크의 측면

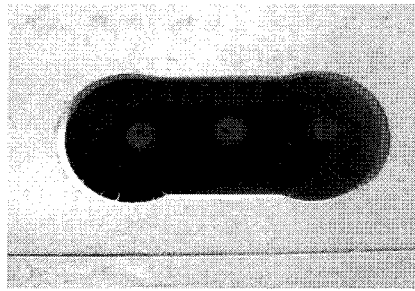


그림 15 전단연결재

5. 결 론

3개의 사다리꼴 셀과 tongue-and-groove 연결부로 이루어지도록 개발된 복합소재 데크인 델타데크를 소개하였다. 개발된 델타데크의 성능은 여러 가지 시험을 통해 검증하였고, 그중 현장재하시험을 통해 정적 및 동적하중에 대해 충분한 강도와 사용성을 가지고 있음을 확인하였음을 보여주었다. 이 델타데크는 여러 복합소재 교량에 적용되어 이미 시공하였거나 시공하고 있으며, 그 중 부산신항의 눈차교에 적용한 사례를 소개하였다. 이 교량은 세계 최대의 복합소재 교량으로서 300m 길이에 35m 폭을 갖고 있으며, 2007년 중반에 완공될 예정으로 세계 복합소재 교량 전문가들의 주목을 받으며 성공적으로 시공 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(특정기초:R01-2004-000-10696-0)과 건설교통부(건설핵심기술 연구개발 06-C04과 01-목적 A01)의 지원으로 수행되었으며, 한국과학재단과 건설교통부의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Keller, Thomas (2003) Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction, Structural Engineering Documents 7, IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering), Switzerland
- www.mdacomposites.org (2006) ACMA (American Composites Manufacturing Association), New York, USA
- 이성우 (2004) "신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구보고서", 건기평 연구보고서
- 이성우 (2006) "인발성형 중공단면 복합소재 교량바닥판의 구조적 특성 분석", 대한토목학회 논문집 제26권 제1A호