

수직결합형 복합소재 데크 개발과 보도교 바닥판 적용 연구

Development of Composite Deck with Vertical Snap-Fit Connection for its Application to Pedestrian Bridges

이 성 우* · 홍 기 증** · 김 형 택*** · 조 성 환**** · 심 영 식*****

Lee, Sungwoo · Hong, Kee-Jeung · Kim, Hyoung Taek · Cho, Sung Hwan · Sim, Young Sik

ABSTRACT

Glass fiber reinforced composite decks have high-strength, light-weight and high durability. The composite decks having vertical snap-fit connections are designed for pedestrian bridges and their structural behaviour are studied. The existing connection method of the composite decks in horizontal direction is replaced by the developed snap-fit connection method in vertical direction. The section shape of the composite decks having the vertical snap-fit connection is designed. The safety of the vertical snap-fit connection is verified by finite element analysis.

Keywords: GFRP, Composite deck, Snap-fit connection, Pedestrian bridge

1. 서 론

우주항공용 첨단소재인 고강도·경량·내부식·고내구성 특성의 복합소재는 현재 여러 건설분야에서 신소재로서 활발히 연구 개발되어지고 있으며, 상하수관, 폐수처리시설, 해상 파일 및 교량 바닥판 등 활용영역이 점차 넓어지고 있다. 그중 복합소재 데크는 미국을 중심으로 한 구미 선진국에서 활발히 연구개발되어 현재 실용화 단계에 있다(DARPA, 2000; Keller, 2003). 복합소재 교량 데크는 내부식, 고내구성 특성으로 인하여 교량수명이 연장되고 생애주기비용 및 유지관리비가 절감되며 빈번한 교체가 불필요하게 된다. 특히, 경량특성으로 인하여 사하중이 경감됨에 따라 하부구조 건설비용이 절감되며, 노후교량을 성능개선하는 경우 하부보강 없이 내하력 증진이 가능해지며 내진성능 또한 향상된다. 또한 신속설치로 인하여 공기가 단축되며 고강도 특성으로 인하여 구조안전성을 보장할 수 있다.

국내외에서 현재 사용하고 있는 복합소재 데크는 주로 암수형태로 수평접착을 통하여 결합하고 있다. 이러한 결합방식은 전단연결체 설치시 시공성과 품질이 저하되고 접착체를 사용하게 되면 내구성에 대한 신뢰가 저하되는 경향이 있다. 본 연구에서는 기존의 수평결합방식이 갖는 여러 문제를 해결하기 위하여 결합방

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

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

*** 정희원 · (주)국민씨아이 대리 Email: kimht@kookminci.com

**** 정희원 · (주)국민씨아이 연구원 Email: hwan@kookminci.com

***** 정희원 · (주)국민씨아이 연구원 Email: simys@kookminci.com

식을 획기적으로 변환한 수직결합형 복합소재 바닥판을 개발하고 거동을 확인하였다.

2. 수직결합형 바닥판

복합소재 바닥판에 대한 선행기초연구(이성우, 2004; 이성우, 2006; 이성우 외, 2006; 이성우 외, 2006; 이성우 외, 2006) 결과를 토대로 수직결합식 복합소재 바닥판의 단면형상을 결정하였다. 바닥판 패널의 기본형상은 박스형으로, 4개의 사각형 셀로 구성되는 복합소재 튜브로 하였다. 단면의 단부에는 전체 테크 연결시 다수의 튜브가 수직방향으로 상호 연결되어 패널 형태로 연결되도록 수직결합식 착탈부를 설계하였다. 기존의 복합소재 테크 패널간의 연결인 접착을 통한 수평결합방식과 비교하여 본 연구에서 제안한 수직결합식 결합방식의 특징은 다음과 같다.

- 1) 기존 수평결합식 복합소재 바닥판은 패널을 결합하여 주형에 거치 후 상부에 형성한 바닥판 구멍을 통해 전단연결재를 설치한다. 이때 협소한 작업공간으로 인해 전단연결재의 시공 품질에 대한 신뢰성 및 작업능률의 저하, 그리고 공기가 길어지게 된다. 그러나 수직결합식 복합소재 바닥판은 패널을 수직으로 결합함으로써 거더에 미리 전단연결재를 설치한 후 패널을 조립, 거치할 수 있다. 이로 인하여 전단연결재의 설치가 용이하며 시공성을 향상시킬 수 있다.
- 2) 기존의 복합소재 바닥판에서는 전단연결재의 작업공간 확보를 위하여 복부판 사이의 간격이 길게 설계되었다. 복부판 사이가 멀어짐으로 인한 국부처짐을 보완하기 위하여 기존에는 상부판을 과설계하게 되었지만, 본 수직결합식 테크에서는 복부판 간격을 줄임으로써 국부처짐에 대한 안전율을 높여 상부판의 두께를 감소시킬 수 있다. 두께가 감소됨에 따라 단면적이 작아지고, 이로 인한 물량의 감소로 상당한 경제성이 확보된다.
- 3) 일정크기의 하중을 가하면 암수부가 완전 일치되는 스냅핏 결합 원리를 채택하여 접착제를 사용하지 않고도 결합이 가능하고, 보수보강시 패널교체가 용이하다. 또한 가설교량의 바닥판으로 사용될 시에는 신속한 시공 및 사용 후 철거나 재사용이 가능함으로 상당한 경제성이 확보된다.

다음은 수평결합방식과 수직결합방식을 그림을 통하여 나타내었다. 여기서, 수평결합방식은 (주)국민씨아이의 델타테크를 대상으로 나타내었다. 그림 1은 기존의 수평결합식 연결에 대한 개념도를 나타내고 있으며, 그림 2는 본 연구의 수직결합방식 테크에 대한 개념도를 나타내고 있다.

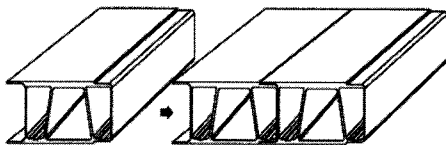


그림 1 수평결합 연결 개념도

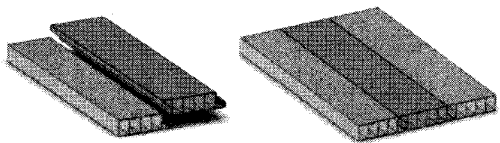


그림 2 수직결합 연결개념도

3. 단면설계

3.1. 연결부 형상설계

기존의 연결방식을 수직결합식으로 대체하기 위하여 연결부가 스냅핏(snap-fit) 결합이 되는 단면형상을 설계하였다. 연결부의 기본 개념은 전통적인 목재구조물의 결구시스템을 응용한 기계적 착탈 방식을 채택하였다. 연결부는 결합과 이탈을 위한 단차(H)를 두고 있는데 단차의 개념도는 그림 3에 보여주고 있다.

그림 4는 결합후의 형상 및 연결부의 설계와 해석에서 사용된 용어들을 보여주고 있다. 스냅핏 연결부의 단면형상을 결정하기 위하여 우선 캔틸레버의 처짐공식을 이용하여 약식으로 설계한 후, 이 단면형상에 대해 유한요소해석을 통해 추후 정밀 검토하였다. 초기 설계단면은 연결부의 결합단차(H) 0.7mm에 대하여 두께(h) 4.5mm와 캔틸레버 길이(L) 28mm로 결정하였다. 그림 5는 이렇게 초기 설계된 연결부의 단면 형상을 보여주고 있다.

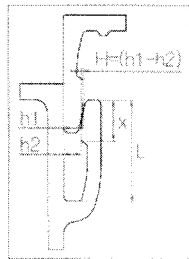


그림 3 단차(H) 개념도

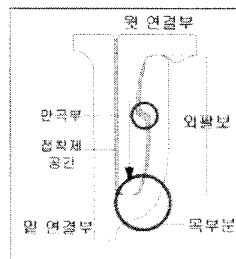


그림 4 연결부 용어 상세

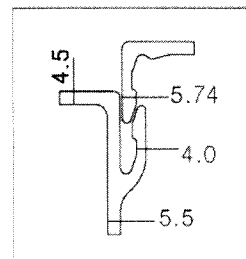


그림 5 연결부 형상

3.2. 바닥판 패널 형상설계

수직결합형 연결부가 적용된 바닥판 패널의 형상은 사각형 튜브 4개가 하나의 패널로 구성되도록 설계하였다. 데크는 좌우에서 결합이 가능하도록 패널의 외측에 스냅핏의 연결부가 있도록 하였다. 그림 6은 설계된 복합소재 바닥판 단면형을 나타내고 있다. 단면의 높이는 100mm로, 복부관의 간격은 100mm로 정하였으며 상하부관과 복부관의 두께는 모두 동일하게 4.5mm로 설계하였다.

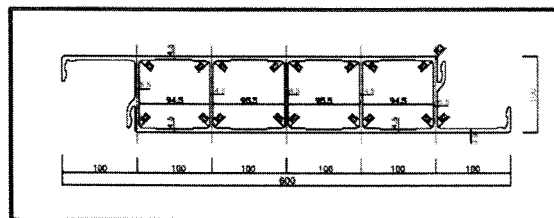


그림 6 복합소재 바닥판 단면도

3.3. 적층설계

설계된 수직결합식 복합소재 바닥판에 대하여 적층설계 및 적층해석을 실시하였다. 적층설계시 사용한 재료의 물성치는 유리섬유와 불포화 폴리에스터의 재료특성을 사용하였으며, 제작단면에 대한 섬유무게비는 인발성형공정으로 제작이 가능한 60%로 가정하였다. 강화섬유는 튜브 종방향(0°), 경사방향(±45°), 횡방향(90°)

으로 모든 방향성을 가지도록 배치하였으며, 종방향으로는 로빙형태의 유리섬유와 다축 유리섬유 직포를 사용하여 적층구조를 설계하였다. 적층설계 및 해석에는 복합소재 해석 프로그램인 ESAComp 3.4를 사용하였다. 표 1은 적층설계에 사용된 유리섬유 및 불포화 폴리에스터 수지의 물성치를 보여주고 있다. 적층판의 목표설계두께 4.5mm에 대하여 적층설계에 사용된 섬유는 튜브 종방향의 유리섬유 로빙의 경우 4400TEX(g/km)의 E-Glass 로빙을 사용하였으며, 횡방향 및 경사방향 보강을 위한 다축 유리섬유 직포의 경우 동일산자에서 제작되는 DBT800 섬유를 사용하였다. 표 2는 DBT800 섬유 1장의 방향별 섬유량을 보여주고 있으며 표 3에서는 적층해석 결과에 의한 부재 특성을 보여주고 있다.

표 1 복합소재 구성재료의 물성치

유리섬유	물성치
섬유직경	0.01mm (10 μ m)
단위중량	2,570 kgf/m ³
탄성계수	72.3 GPa
전단탄성계수	30 GPa
포아송비	0.2
폴리에스터 수지	물성치
단위중량	1,240 kgf/m ³
탄성계수	3.38 GPa
전단탄성계수	1.22 GPa
포아송비	0.38

표 2 DBT800 1장의 방향별 섬유량

섬유방향	섬유 방향			
	0°	+45°	-45°	90°
방향별 섬유량 (g/m ²)	-	199	199	389
*방향별 두께 (mm)	-	0.184	0.184	0.360

* 섬유무게비 60% 기준

표 3 적층해석 결과에 의한 구성부재 특성치

항목	탄성계수(GPa)		전단탄성계수(GPa)	포아송비	두께 (mm)
	E _x	E _y			
특성치	18.0	16.0	3.68	0.217	4.5

주) X:바닥판 패널 종방향, Y:바닥판 패널 횡방향

4. 연결부 해석

4.1 연결부 유한요소해석

스냅핏 연결부의 착탈시 안전성을 검증하기 위해 그림 7과 같은 착탈시험을 수행하였지만, 연결부 형상의 정확한 금형이 이루어지지 않아 연결부에 균열이 발생하는 문제점이 파악되어 현재 다시 금형을 수정 중에 있다. 본 논문에서는 스냅핏 연결부의 착탈시 거동해석을 위한 유한요소 모델링(그림 8)을 사용하여 연결부의 착탈시 안전성을 검증한다. 정확한 금형으로 제작된 스냅핏 연결부의 착탈시험이 앞으로 수행될 것이며 이를 통해 유한요소해석 결과를 다시 한 번 검증할 것이다.

스냅핏 연결부를 해석하기 위하여 접촉 문제 해석에 유리한 Solid Tetra10요소를 이용하여 연결부 결합 및 이탈시 거동에 대해 기하비선형을 고려한 해석을 수행하였다. 모델의 경계조건으로 밑 연결부의 왼쪽 면을 고정단으로 하였으며 윗 연결부에는 변위하중을 수직방향으로 완전한 결합 및 이탈이 이루어질 때까지 주었다. 비선형 해석은 해석 완료 시점을 20단계로 구분하였다. 솔리드 요소의 특성상 많은 요소가 생성되므로 모델의 단위 폭을 10mm로 정하였고, 연결부 폭 방향으로 변위가 생기지 않도록 고정하여 긴 테크의 한 단면에서의 거동을 나타내었다. 수직결합형 연결부의 결합시 최대응력은 연결부 목부위에서 최대응력(인장)이 발생하며 이탈시에는 연결부 만곡부에서 최대응력(압축)이 발생하였다. 다음 표 4는 연결부에 발생하는 최대응력을 정리하여 보여주고 있다.

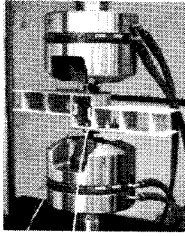


그림 7 착탈시험

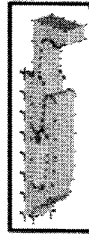


그림 8 해석모델

표 4 Snap-fit 연결부의 최대발생응력

모 델	최대발생응력(MPa)			
	최대주응력	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
결합시	85.28	32.66	4.01	24.96
이탈시	160.80	54.22	20.66	56.89

4.2 연결부 파괴해석

연결부의 결합 및 이탈에 대한 구조안전성을 확인하기 위하여 위의 응력 결과를 사용하여 복합소재 적층판의 파손 예측에 사용되어지는 Tsai-Wu 파괴해석을 수행하였다. 적층판의 강도특성과 유한요소해석을 통하여 구한 응력값을 Tsai-Wu 파괴조건식에 적용하여 파괴조건계수 및 파괴지수를 구하였다(Hyer, 1998). 표 5는 파괴해석에 사용된 부재의 강도를 나타내고 있다. 그림 9는 유한요소해석으로 구한 최대주응력을 Tsai-Wu 파괴 그래프에 표시하였다. 연결부의 결합시 파괴에 대해 약 2.8~4.4, 이탈시 파괴에 대해 약 2.2~2.7의 안전율을 확보하여 결합 및 이탈 시 과응력이 발생하여 파괴되지 않을 것으로 판단된다.

표 5 부재 강도특성

항목	X방향		Y방향		전단 강도
	인장강도	압축강도	인장강도	압축강도	
강도	270 MPa	270 MPa	150 MPa	150 MPa	44 MPa

주) X:바닥판 패널 종방향, Y:바닥판 패널 횡방향

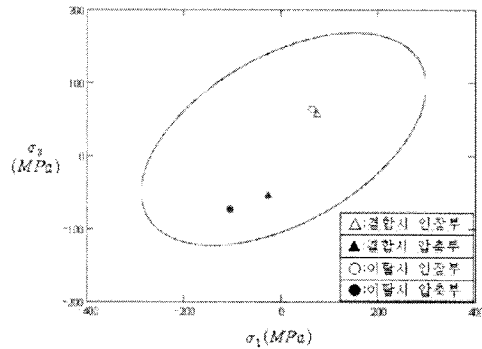


그림 9 Tsai-Wu 파괴그래프

5. 결 론

기존의 수평결합방식을 대체하기 위하여 수직결합형 복합소재 바닥판 데크를 연구, 설계 및 제작하였다. 수직결합형 연결부의 결합 및 이탈 시 기동을 유한요소해석을 통하여 확인하였다. 수직결합형 연결부의 결합 및 이탈에 대한 Tsai-Wu 파괴해석 수행결과 결합과 이탈시 파괴에 대한 충분한 안정성을 확인하였다. 바닥판이 이탈되지 않도록 하중에 대해 충분한 안전율을 두고 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

개발된 수직결합형 복합소재 바닥판은 월출산의 보도교용 현수교에 적용되었다(그림 10). 이 다리는 폭 1m, 길이 53.1m이며, 월출산의 환경 훼손을 최소화하면서 빠른 기간에 시공되었고, 2006년에 성공적으로 완성이 되어 현재 사용 중에 있다. 그림 11은 수직결합형 복합소재 바닥판이 적용된 오산천의 보도교용 다리를 보여주고 있다. 이 다리는 폭 5m, 길이 140m이며 주변환경과 어우러지는 형상을 갖도록 설계되었다. 이는

2007년 전반기에 완공 예정이다. 수직결합형 복합소재 바닥판은 충분한 안전성을 갖출과 동시에 데크 간 연결이 용이하여 빠른 시공이 가능하게 하므로 앞으로 더욱 많은 교량에 적용될 것으로 기대된다.

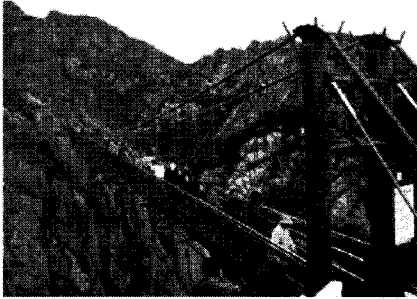


그림 10 월출산 보도교용 현수교

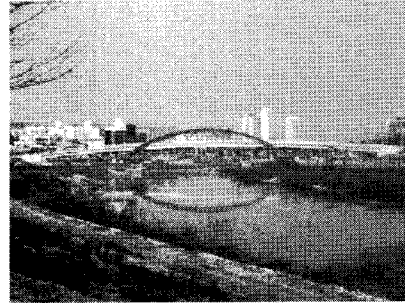


그림 11 오산천 보도교

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(특정기초:R01-2004-000-10696-0)과 건설교통부(건설핵심기술 연구개발 06-C04)의 지원으로 수행되었으며, 한국과학재단과 건설교통부의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- DARPA (2000) Advanced Composites for Bridge Infrastructure Renewal-Phase II Tasks 16- Modular Composite Bridge. *Defense Advanced Research Projects Agency*. Technical Report Vol. IV. USA, 2000
- Keller, Thomas (2003) Use of Fiber Reinforced Polymers in Bridge Construction. Structural Engineering Documents 7. *IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering)*. Switzerland
- Hyer, Michael W. (1998) Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials. *Mc Grav Hill*, Boston
- 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
- 이성우, 정규상, 조성환, 심영식 (2006) “착탈결구식 연결구조 복합소재 데크의 거동특성 분석”, 전산구조공학회 학술발표 논문
- 이성우, 홍기중, 이영기, 심영식 (2006) “보도교용 복합소재 데크패널의 착탈결구식 연결부 개발” 대한토목학회 학술발표 논문
- 이성우, 홍기중, 조성환 (2006) “착탈결구식 복합소재 보도교 데크패널의 해석적 거동 분석” 대한토목학회 학술발표 논문