

착탈결구식 연결구조 복합소재 데크의 거동특성 분석

Structural Characteristics of 스냅핏 Type Composite Deck Panel

이성우* · 정규상** · 조성환*** · 심영식****
 Lee, Sung-Woo · Jeong, Gyu-Sang · Cho, Sung-Hwan · Sim, Young-Sik

ABSTRACT

Owing to its special features of light weight, high durability, corrosion-resistant, composite material used in civil infrastructure can not only solve fundamental problems of deterioration and corrosion, but also reduce both construction and maintenance cost significantly. Composite deck panels of 스냅핏 type connection previously designed and fabricated have been redesigned herein. The sensitivity of gaps between snap-fits and tip angles was investigated. Stacking sequence of plies was scrutinized in order to facilitate pultrusion process. Deck panels of redesigned configuration due to bending has been analyzed. A comparison between the preliminary and modified deck design has been made.

keywords : 스냅핏, composite, deck panel, pultrusion

1. 서론

복합소재는 경량·내부식·고강도 특성을 보유한 첨단 우주항공 신소재로서, 최근 건설분야에서도 콘크리트의 열화와 강재의 부식을 근본적으로 해결할 수 있는 제 3의 건설소재로 대두되었다. 현재 차도교통 복합소재 데크는 주로 압수형태로 수평으로 연결하여 접착하고 있다(이성우 등, 2003). 본 연구진은 (주)국민씨아이와 공동으로 개발한 바 있는 복합소재 교량상판을 국내 여러 차도교에 적용시켜 왔으며, 현재 시공중인 놀차교는 실교량에 복합소재 바닥판을 시공한 세계 최장의 교량으로 평가되고 있다. 그림 1.1에서는 놀차교의 종단면 및 횡단면도를 보여주고 있으며, 사진 1.1에서는 놀차교에 시공될 바닥판이 야적된 상태를 보여주고 있다.

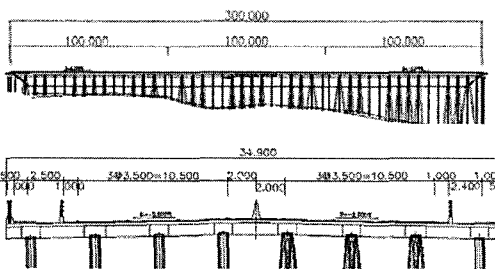


그림 1.1 놀차교 종/횡단면도

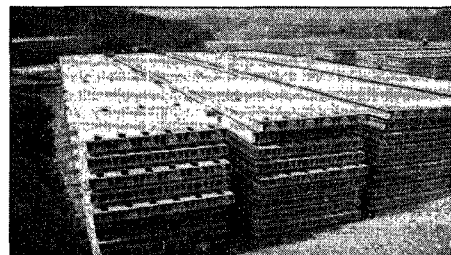


사진 1.1 놀차교에 시공될 복합소재 교량바닥판

한편, 기존의 복합소재 교량상판의 수평접합방식은 거더와 바닥판을 전단연결재로 연결하는데 걸리는 시공 시간이 길고 접착부의 내구성에 대해 검증자료가 아직 미흡하므로 새로운 연결방식에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 보도교통 복합소재 데크와 그 연결부에 대한 연구 또한 외국에서는 활발하게 진행되고 있다.

- * 정희원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 E-mail: swlee@kookmin.ac.kr
- ** 정희원 · 국민대학교 구조안전연구소 상임연구위원 E-mail: gsjeong@kookmin.ac.kr
- *** 정희원 · 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정 E-mail: mr_bear79@hotmail.com
- **** 정희원 · 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정 E-mail: fkrj2@hanmail.net

본 연구진은 Maunsell사와 Strongwell사에서 연구개발된 조립식 보도교 데크의 힌지방식 연결부의 단면이 휨 및 전단에 취약하다는 사실에 주목하고 그 연결부 단면을 획기적으로 개량하기 위하여 새로운 개념의 착탈결구식 수직연결구조 복합소재 데크를 설계, 제작하고 성능시험을 수행한 바 있다(정규상 등, 2005). 이와 같이 데크패널의 연결방식에 대해 전통 목구조 결구방식을 적용하고 또한 복합소재의 탄성복원력을 이용하여 전혀 새로운 형식의 연결구조를 개발함으로써, 교량바닥판 뿐만 아니라 대형 토목/건축 구조물을 조립식으로 시공할 수 있는 기틀을 마련하고자 한다. 본 논문에서는 설계된 데크 연결부의 결합 및 이탈과 착탈결구식 복합소재 데크의 휨에 대해 해석적 검증에 시도하였다.

2. 데크패널 연결부 결구형상 설계

스냅핏 연결부에 대해 유한요소해석을 수행하여 스냅핏의 결합 및 이탈시 최대응력이 작용하는 위치를 파악하였으며, 선형 및 비선형 해석을 각각 수행하여 그 결과를 비교하였다(정규상 등, 2005). 복합소재 중공바닥판의 물성치를 구하기 위하여 플랜지, 웹 등으로부터 시편을 절취하고 인장, 압축, 전단, 휨 시험을 수행한 결과, 시편시험으로 구한 횡방향 물성치들의 정확성에 관해서는 의문의 여지가 많았으며, 그 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다:

1. 데크의 횡방향으로 쿠펀 절취가 불가능함
2. 제작공정(인발성형)의 특성상 섬유 굴곡(fiber undulation)이 불가피함
3. 쿠펀 절취시 off-axis 섬유에 의해 현저한 edge effect 발생
4. 인장강성과 압축강성의 값이 상호간 현저하게 다름
5. 비대칭구조로 인하여 휨강성과 축강성의 값이 영향을 받음

인발성형 단면은 적층(lamination lay-up)을 통하여 생산되지 않기 때문에 직접적인 재료시험보다는 데크에 대한 거동실험을 통하여 횡방향 물성치를 역으로 추적하는 것이 더 효율적이라고 판단되었다. 또한 스냅핏 목부위 및 데크 단면 전체에 걸쳐서 섬유굴곡현상이 현저하고, 곡율이 큰 스냅핏 목부위의 두께방향 물성치를 측정하기가 난해하므로 최대응력기준(maximum stress criterion)을 사용하여 파괴해석을 수행하였다(Vallee, 2004). 본 연구에서는 ESAComp[®]를 사용하여 Laminate의 등가강성을 구하였으며, 이 때 축강성은 축 하중이 주어질 때, 휨강성은 휨 모멘트가 주어질 때의 강성이다. 스냅핏 형상을 해석하기 위하여, 일정한 단면을 유지하면서 길이가 긴 구조물의 해석에 유용하게 사용될 수 있는 3D Solid Element를 이용하여 모델링하였다.

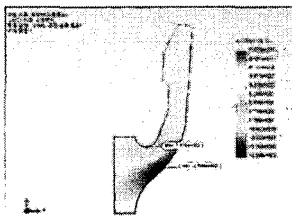


그림 21 강제변위 1.5mm의 수평방향
응력분포(모델1)

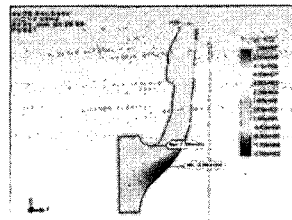


그림 22 수평하중 1.4ton/m의 수평방향
응력분포(모델2)

모델의 경계조건은 고정단으로 하였으며 스냅핏 목부분에서의 응력을 검토하였다. <모델 1>에서는 H(단차)에 해당하는 강제변위 1.5mm 를 주었으며 (그림 21), <모델 2>에서는 하중 100kgf 를 가하여 변위를 살펴본 후 1.5mm 변위를 일으키는 하중을 추정한 결과 하중이 1.4ton/m 일때 1.5mm 변위가 일어났다(그림 2.2). 표 2.1은 모델 1, 모델2 및 결합모델의 최대응력을 보여주고 있다.

표 2.1 하중에 따른 응력 및 변위

Load	인장응력(kgf/cm ²)			압축응력(kgf/cm ²)			수평방향 변위
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	τ_{xy}	
1.5mm 강재변위	742	964	397	260	728	326	1.5mm
1.4ton/m강재하중	740	933	396	260	723	325	1.5mm
결합모델	798	778	396	296	649	346	1.5mm

표 2.1에서 결합시 스냅핏의 목부위에 걸리는 최대인장응력은 798kgf/cm²이며, 횡방향 인장강도가 1500kgf/cm²이므로 안전율 SF=1500/798=1.88이다. 비접착식 테크패널을 접착제로 연결할 경우에 대비하여 스냅핏 연결부간 틈(gap)을 허용하였다.

초기단면의 테크는 제작하는 과정에서 어려움이 많았다. 제작을 용이하게 하기 위하여 스냅핏 곡율을 키우고 목길이를 증가시켜서 단면을 제설제하였다. 초기설계단면을 경우 1, 수정된 설계단면을 경우 2라고 하면 단면변화 상세내역은 표 2.2와 같다.

표 2.2. 단면변화 상세내역

모델	경우 1(mm)	경우 2(mm)	변화율(%)
길이	28	37.08	75.52
목부위 곡률	2.25	5.42	41.51
목두께	5.74	10	57.4

표 2.3 스냅핏 결합시 응력 및 변위

Load	인장응력(kgf/cm ²)			압축응력(kgf/cm ²)			수평방향 변위
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	τ_{xy}	
2.5ton/m	772	1116	545	1097	989	515	1.45mm

표 2.3에서는 경우 2의 결합시 응력을 보여주고 있다. 표 2.1(경우 1)과 비교할 때 안전율 SF는 약간 증가하여 SF=1500/772=1.94이다. 표 2.4에서는 경우 2의 이탈시 응력을 보여주고 있다. 간편해석에 의하여 테크패널의 단위길이당 결합시 하중과 이탈시 하중을 구해보면 다음과 같다.

표 2.4 스냅핏 이탈시 응력 및 변위

Load	인장응력(kgf/cm ²)			압축응력(kgf/cm ²)			수평방향 변위
	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ_x	σ_y	τ_{xy}	
7.5ton/m	560	1395	632	708	1905	1025	1.45mm

$P = 2828 \text{ kgf}$

$P_{1,결합하중} = 1029 \text{ kgf}$ 대략, 1.0 ton

$P_{2,이탈하중} = 6065 \text{ kgf}$ 대략, 6.1 ton

표 2.5에서는 간편해석에 의해 구한 값과 유한요소 해석을 통해 구해진 값을 비교하였다.

표 2.5 결합 및 이탈하중 비교

모델		간편해석(ton/m)	유한요소해석(ton/m)
결합하중(20°)	경우 1	1.2	1.15
	경우 2	1.0	2.0
이탈하중(65°)	경우 1	7.0	5.2
	경우 2	6.1	7.5

3. 데크패널 설계 해석 및 시험

제작용 바닥판에 대해 지점부에 평행한 방향으로 선하중을 재하하고 유한요소해석을 수행하였다(그림 3.1). 바닥판의 구조 성능을 보기 위하여 그림3.1 a)와 같은 폭이 40cm이고 지간거리가 2m인 모델을 구성하였고, 그림3.1 b)와 같이 폭이 140cm이고 지간거리가 2m인 복합소재 데크패널 3개를 스냅핏으로 서로 연결한 해석 모델을 구성하였다.

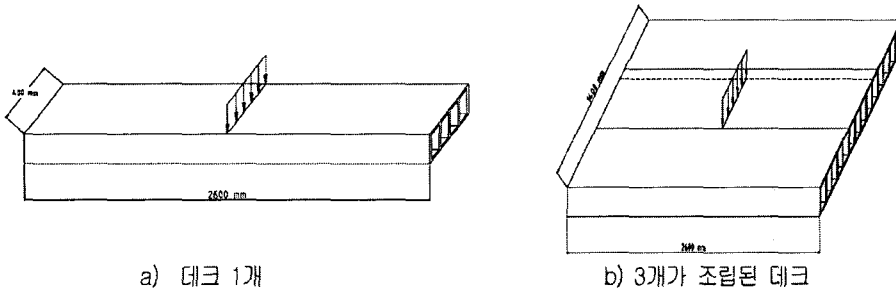


그림 3.1 2m 실험체 모델

인발성형으로 제작된 복합소재 보도교 바닥판과 착탈식 연결부의 휨에 대한 거동 특성을 검증하기 위하여 비접착식 연결부와 접착식 연결부 시험체에 대하여 각각 휨시험을 수행하였다(사진 3.1).



사진 3.1 휨시험 하중재하 및 실험체 거치

스냅핏으로 연결된 실제 패널의 거동을 확인하기 위하여 그림 3.2과 같이 패널 3개가 연결된 폭이 140cm이고 지간거리가 2m인 모델을 구성하여 가운데 패널의 중앙부에 선하중을 재하하여 거동을 확인하였다. 그림 3.3과 그림 3.4은 하중재하에 의한 처짐 및 응력 분포를 나타내었고 그 값은 표 3.2에 기록하였다.

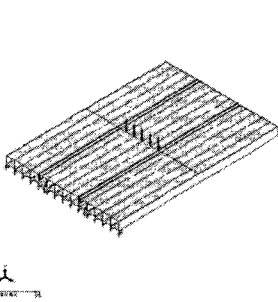


그림 3.2 기존 단면 해석모델

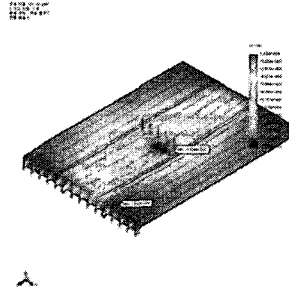


그림 3.3 처짐 분포 확인

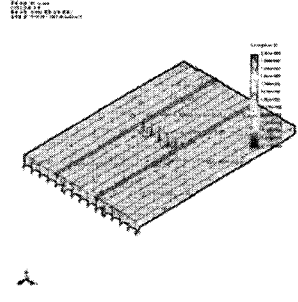


그림 3.4 응력 분포 확인

표 3.2 3개가 조립된 데크의 최대처짐 및 최대수평응력(초기설계)

하중	상판의 최대처짐	하판의 최대처짐	Sigma X
3 ton	16.54 mm	14.49 mm	1010 kgf/cm ²
6 ton	32.68 mm	28.58 mm	1875 kgf/cm ²
9 ton	49.60 mm	43.46 mm	3031 kgf/cm ²

스넵핏의 연결로 인하여 발생하는 단차는 하부에서 최대로 발생되었고 그 값은 표 3.3에 나타내었다.

표 3.3 3개가 조립된 데크의 단차 및 이격거리(초기설계)

하중	수직 단차	수평 단차	이격거리
3 ton	0.076 mm	0.123 mm	0.145 mm
6 ton	0.100 mm	0.265 mm	0.283 mm
9 ton	0.110 mm	0.358 mm	0.374 mm

수정된 단면은 flange부와 web부의 치수는 동일하고 스넵핏의 형상만 수정하였다. 수정된 스넵핏 단면이 적용된 3개가 조립된 데크 모델을 구성하여 해석을 실시하였다. 표 3.4에 하중의 증가에 따른 값을 기록하였다.

표 3.4 3개가 조립된 데크의 최대처짐 및 최대수평응력

하중	상판의 최대처짐	하판의 최대처짐	Sigma X
3 ton	14.92 mm	12.89	1000 kgf/cm ²
6 ton	29.83 mm	25.77	1850 kgf/cm ²
9 ton	44.74 mm	38.66	3012 kgf/cm ²

스넵핏의 연결로 인하여 발생하는 단차는 하부에서 최대로 발생되었고 그 값은 표 3.5에 나타내었다.

표 3.5 3개가 조립된 데크의 단차 및 이격거리

하중	수직 단차	수평 단차	이격거리
3 ton	0.049 mm	0.140 mm	0.148 mm
6 ton	0.100 mm	0.280 mm	0.298 mm
9 ton	0.150 mm	0.428 mm	0.454 mm

그림 3.5에서 경우 2의 최대변위는 경우 1과 비교할 때 6톤 하중하에서 상판 최대처짐이 32.68 mm에서 29.83mm로, 스넵핏 최대수평응력이 1875kgf/cm²에서 1850kgf/cm²으로 각각 소폭 감소하였으며, 이격거리는 0.283mm에서 0.298mm로 소폭 상승하였다.

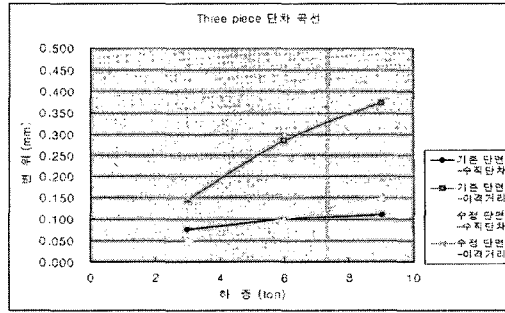
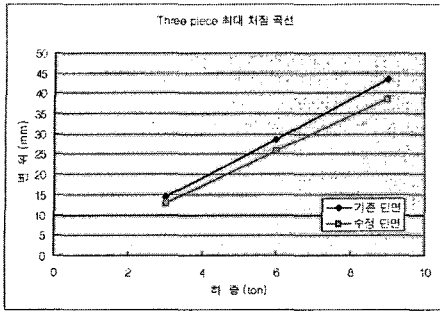


그림 3.5 기존단면과 수정단면 데크패널의 최대처짐 및 단차 비교

본 연구진에서는 경우 1의 단면을 보도현수교의 바닥판에 적용한 바 있으며(그림 3.6, 사진 3.2), 경우 2의 단면에 대해서는 현재 제작을 시도하는 중이다.

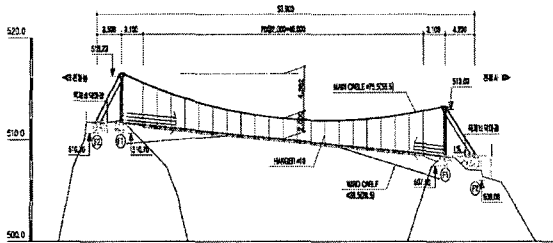


그림 3.6 월출산 보도현수교 종단면도

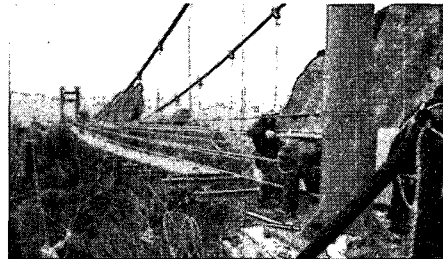


사진 3.2 바닥판 설치중인 월출산 보도현수교

4. 결론

본 논문에서는 설계, 제작 및 성능실험이 수행되었던 착탈식 연결구조 복합소재 데크패널에 대하여 단면을 수정하여 그 구조특성을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 스패릿 연결부의 틈(gap)은 초기설계시 0.5mm였으나 1.0mm로 수정하여 단면을 설계한 결과 스패릿 목부위에 걸리는 수평응력에 대하여 안전율 SF=1.94를 확보하였다.
- 2) 스패릿 이탈시 틈(gap)이 없으면 이탈각의 변화에도 불구하고 스패릿 목부위에 과도한 응력이 발생하였다. 최소한의 단차만 허용하기 위해서는 틈이 없도록 설계하였다.
- 3) 섬유유 골공, 비대칭적층순서 등으로 인하여 정확한 물성치를 유한요소해석과정에서 입력하는 것이 불가능하므로 두께방향 물성치의 변화는 무시하였으며 파괴해석시 최대응력기준을 사용하였다.
- 4) 제작을 용이하게 하기 위해 단면을 수정한 결과 최대변위는 전과 비슷하나 단차는 더 작았다. 추후 제작 및 성능실험을 거쳐 최종적인 성능을 검증하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(특정기초:R01-2004-000-10696-0)의 지원으로 수행되었으며, 과학기술부의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

이성우 외 (2003) 신속시공, 경량, 고내구성 복합소재 교량바닥판 산업화 연구. 건설교통부 연구보고서.
 정규상, 이성우 (2005) 착탈결구식 복합소재 바닥판의 연결부 거동분석, 복합재료학회 추계학술대회.
 Till Vallee (2004) *Adhesively Bonded Lap Joints of Pultruded GFRP Shape*, ph.D. dissertation, EPFL.