

가도용 착탈조립식 복합소재 리그매트의 구조거동 분석

Structural Behaviour of Composite Rigmats with Snap-fit connection

이성우* · 홍기증** · 조남훈*** · 김인태****

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

ABSTRACT

Since glass-fiber reinforced composite decks have high-strength, light-weight and high durability, many researches on the composite decks for bridges are currently performed and many composite decks are developed. Some of the developed composite decks can be applied as rigmats for temporary roads such as oil-developing temporary roads. In this paper, a composite deck for rigmat is developed and studied. Structural behavior of the developed composite deck for rigmat is verified by both analysis and experiment.

Keywords: GFRP, Composite deck, Snap-fit connection, Rigmat, Temporary road

1. 서론

복합소재는 경량·고강도·내부식·고내구성 특성으로 기존의 건설재료인 콘크리트의 열화와 강재의 부식 문제를 근본적으로 해결할 수 있고, 유지관리 비용을 현저히 절감할 수 있으며, 경량특성으로 획기적으로 자중을 줄여 줄 뿐만 아니라, 공기를 대폭 단축시켜 공사비 절감을 도모할 수 있다. 그중 복합소재 데크는 미국을 중심으로 한 구미 선진국에서 활발히 연구개발되어 현재 실용화 단계에 있다(DARPA, 2000; Keller, 2003). 본 연구진은 기존 연구결과를 토대로 콘크리트 교량바닥판을 대체할 수 있는 복합소재 교량바닥판을 해외 선진국보다 앞선 수준으로 개발하였다(이성우, 2004; 이성우, 2006; 이성우 외, 2006; 이성우 외, 2006; 이성우 외, 2006). 본 연구에서는 본 연구진이 보유한 이러한 복합소재 교량바닥판 기술을 더욱 향상, 발전시키고 응용범위를 확대하여, 현재 해외시장 특히 유가급등으로 오일샌드 유전개발이 가속화 되고 있는 캐나다의 유전개발현장에서 진입도로 가포장용으로 종래에 사용하고 있는 무겁고 비효율적인 목재 가도 매트를 대체할 수 있는 효과적인 경량 리그매트(가도매트)에 대한 폭증되고 있는 수요에 부응하여 고부가가치, 수출 주도형 전략기술인 신개념의 조립식 경량 복합소재 리그매트를 개발하고자 한다.

본 연구에서는 기존의 복합소재 바닥판 결합기술인 수평방향의 암수 접착 결합방식을 획기적으로 변환시켜 국제적으로 기술을 선도할 수 있는 완전히 새로운 개념을 도입한 수직방향의 착탈 조립식 결합방식을 이

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

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

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

**** 정회원 · (주)국민씨아이 과장 Email: totoro@kookminci.com

용하여 유전개발용 복합소재 리그메트를 개발한다. 수직 조립식 테크를 비접착식으로 사용할 경우에는 테크의 조립, 해체가 용이하고 테크 간에 접촉이 필요 없어 기존의 테크로는 이용이 거의 불가능했던 분야인 사용 후 철거나 재사용이 필수적인 가도용 매트, 긴급복구용 교량, 가교, 복구판 등에 활용될 수 있는 길이 열려질 것으로 전망된다.

2. 수직결합형 리그메트

2.1. 단면형상 설계

리그메트 테크의 기본형상은 기존에 개발된 수직결합형 복합소재 교량바닥판과 매우 유사하다. 다만 중장비들에 의한 리그메트 상판의 국부변형을 방지하기 위해 충분한 상판 두께를 사용한다. 연결방식을 수직결합식으로 하기 위하여 연결부가 스냅핏(snap-fit) 결합이 되는 단면형상을 채택하였다(이성우 외, 2006). 연결부의 결합단차(H) 0.7mm에 대하여 두께(h) 5.5mm와 캔틸레버 길이(L) 35mm로 결정하였다. 그림 1은 이렇게 설계된 연결부의 단면 형상을 보여주고 있다. 수직결합형 연결부가 적용된 리그메트 테크의 형상은 사각형 튜브 4개가 하나의 테크로 구성되도록 설계하였다. 리그메트는 좌우에서 결합이 가능하도록 테크의 외측에 스냅핏의 연결부가 있도록 하였다. 그림 2는 설계된 복합소재 리그메트 테크 단면형상을 나타내고 있다. 단면의 높이는 75mm로, 복부판의 간격은 100mm로 정하였으며 상하부판과 복부판의 두께는 모두 동일하게 5.5mm로 설계하였다.

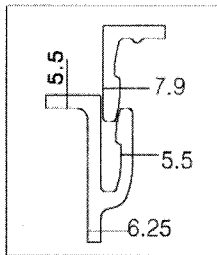


그림 1 연결부 형상

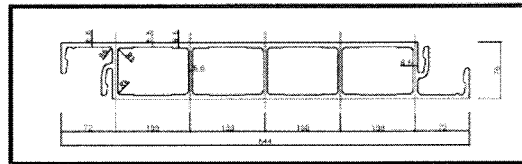


그림 2 복합소재 리그메트 단면도

표 1 복합소재 구성재료의 물성치

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

표 2 DBT450/M300 1장의 방향별 섬유량

섬유방향	섬유 방향				
	0°	+45°	-45°	90°	MAT
방향별 섬유량 (g/m ²)	-	120	120	240	300
*방향별 두께 (mm)	-	0.111	0.111	0.222	0.278

* 섬유무게비 60% 기준

표 3 적층해석 결과에 의한 구성부재 특성치

항목	탄성계수(GPa)		진단탄성계수(GPa)	포아송비	두께(mm)
	E _x	E _y			
특성치	26.58	9.25	2.93	0.278	5.5

주) X:테크 종방향, Y:테크 횡방향

2.2. 적층설계

설계된 수직결합식 복합소재 리그매트에 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 5.5mm에 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 DBT450/M300 섬유를 사용하였다. 표 2는 DBT450/M300 섬유 1장의 방향별 섬유량을 보여주고 있으며 표 3에서는 적층해석 결과에 의한 부재 특성을 보여주고 있다.

3. 리그매트의 유한요소해석

3.1. 단일데크 해석

리그매트의 성능을 판단하기 위하여 단일 데크에 대한 유한요소해석을 수행한다. 지점간의 거리 2m로 양 단 현지/플러의 단순지지된 데크의 중앙부에 선하중을 가한다. 그림 4.11은 유한요소해석모델을 보여준다. 처짐에 대한 기준식 $L/300$ 이 적용될 경우 지간거리 2m에 대한 처짐한계는 6.67mm이며 선형해석의 경우 처짐한계를 유발하는 하중은 6.0kN이 된다. 표 4는 처짐한계시의 최대응력 및 가정된 강도에 대한 안전율을 나타내고 있다. 처짐한계시에 대한 안전율은 4.8로 나타났으며, 이는 복합소재 리그매트가 처짐한계 상황에서 충분한 내하력을 보유하고 있음을 보여준다.

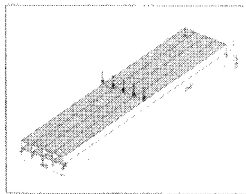


그림 3 단일데크 해석모델

표 4 처짐한계시의 응력 및 안전율

항 목	데크 종방향	데크 횡방향
응력	56.27MPa	19.53MPa
강도	270MPa	150MPa
안전율	4.8	7.7

3.2. 조립데크 해석

조립데크의 해석은 세 개의 데크를 접착과 비접착으로 결합하여 지점거리 2m의 단순지지조건을 부여하고 연결부의 가운데 데크의 중앙부에 선하중을 가하여 해석을 실시하였다. 접착데크는 shell 요소를 사용하여 모델을 구성하였으며, 비접착데크는 연결부형상을 구현하기 위하여 연결부만 solid요소를 적용하고 그 외의 부분은 shell요소를 사용한 모델을 사용하였다. 다음 그림 4와 5는 접착데크와 비접착 데크의 유한요소해석모델을 각각 나타내고 있다. 표 5에는 해석결과 계산된 접착데크와 비접착데크의 최대응력을 비교하였다. 지간거리 2m의 조립된 데크에 대하여 처짐에 대한 기준식 $L/300$ 이 적용될 경우 처짐한계는 6.67mm이며 처짐한계를 유발하는 하중은 접착데크는 8.5kN이고 비접착 데크는 8.2kN이다. 표 4.7은 처짐한계시의 최대응력 및 가정된 강도에 대한 안전율을 나타내고 있다. 처짐한계시의 접착데크와 비접착데크의 안전율은 각각 4.17과

4.58이므로 조립 리그메트는 치집한게시에 충분한 내하력을 보유하고 있음이 확인된다.

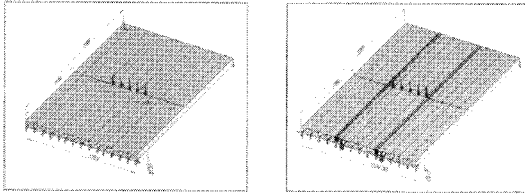


그림 4 접착데크 해석모델 그림 5 비접착데크 해석모델

표 5 치집한게시의 응력 및 안전율

항 목	최대응력	강도	안전율
집착 데크 종방향	64.69MPa	270MPa	4.17
데크 데크 횡방향	26.89MPa	150MPa	5.58
비접착 데크 종방향	58.91MPa	270MPa	4.58
데크 데크 횡방향	27.70MPa	150MPa	5.42

4. 리그메트의 휨시험

4.1. 단일데크 시험

단일 리그메트 데크의 구조적 성능을 확인하기 위하여 인발 제작된 단일 데크에 대한 구조성능시험을 실시하였다. 치집거리 2m의 단순지지조건을 구현하여 그 위에 단일데크를 거치한 후, 하중집지는 데크의 중앙부에 강봉을 위치하여 500kN 용량의 유압 액츄에이터의 하중이 강봉을 통해 신하중으로 재하되도록 하였다. 수직변위를 측정하기 위한 변위계는 시간 중앙에 설치하여 계측하였으며, 발생응력을 측정하기 위한 변형률 게이지는 상부판 및 하부판의 6개소에 부착 설치하여 계측하였다. 그림 6은 단일 리그메트 데크의 시험 전경을 보여주고 있다.

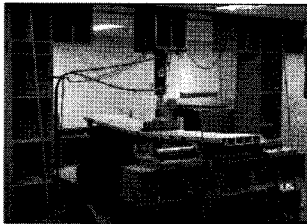


그림 6 단일 리그메트 데크 휨시험

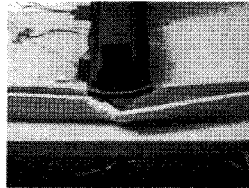


그림 7 단일데크의 파괴형상(1)

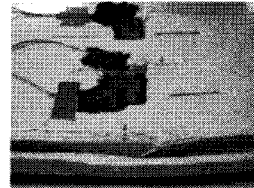


그림 8 단일데크의 파괴형상(2)

표 6 단일 데크 시험결과

항 목	하중	σ_L	σ_T
치집한게시	7.4kN	28.3MPa	11.2MPa
파괴시	60.3kN	270MPa	150MPa
안전율	8.15	9.54	13.39

데크의 파괴시까지 시험을 실시한 결과 단일 리그메트 데크는 60.3kN의 하중에서 파괴가 일어났으며 이때 하판의 중앙부의 최대 수직 치집은 60.2mm가 발생하였다. 이 때 하중에 의한 데크 상판의 휨파괴와 웹의 국부 좌굴파괴 형태가 나타났다. 그림 7과 8은 상판의 하중가력부에서 발생한 파손을 나타낸다. 표 6은 단일데크의 시험결과를 정리하여 나타낸다. 치집한게 6.67mm(L/300) 발생시의 하중 크기는 7.4kN으로 유한요소해석에서 계산된 6.0kN보다 더 크다. 이는 데크의 실제 치집 강성이 유한요소 모델보다 다소 큰 값을 갖고 있

음을 나타낸다. 처짐한계시 실제 파괴하중 60.3kN에 대한 안전율은 8.15이며 이는 σ_L 에 대한 안전율보다 다소 작다. 이러한 차이는 하중이 커질에 따라 증가하는 기하비선형의 영향에 의한 것으로 보인다. 결과적으로, 단일테크는 처짐한계시 충분한 내하력을 가지고 있음을 유한요소해석 결과와 동일하게 확인하였다.

4.2. 조립테크 시험

수직결구식 연결부의 결합성능을 검증하기 위하여 연결부에 의해 조립이 완료된 세 개의 복합소재 테크패널에 대하여 연결부가 이탈되도록 가운데 테크의 중앙부에 선하중을 재하한 시험을 수행하였다. 선하중을 재하하기 위하여 조립된 3개 테크 중 가운데 테크의 4개 튜브 중앙부 상판에 강봉을 위치하여 액츄에이터의 하중이 강봉을 통해 재하되도록 하였다. 시험체는 연결부에 에폭시를 이용해 집착한 본딩 시험체와 연결부의 기계적 결합에 의해 수직결합된 언본딩 시험체 두 가지로 구분하여 시험을 수행하고 비교하였다. 테크의 수직변위를 측정하기 위한 변위계는 지간 중앙에 설치하였으며 발생응력을 측정하기 위하여 상하부판 7개소와 연결부 복부위에 변형률 게이지를 설치하여 계측하였다. 그림 9는 연결부 성능시험의 전경을 보여주고 있다.



그림 9 연결부 성능시험

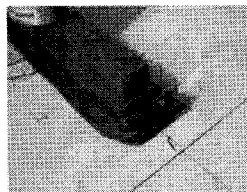


그림 10 본딩 테크의 파괴형상

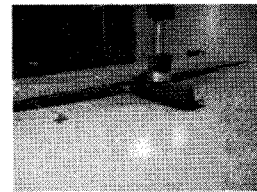


그림 11 언본딩 테크의 분리형상

시험은 테크의 파괴 또는 분리시까지 진행하였으며 표 7은 연결부 성능시험 결과를 정리하여 나타내었다. 본딩 테크의 파괴형태는 하중가력부에 의한 복부판과 상판의 섬유가 찢기는 국부적인 전단파괴형태가 발생하였으며, 언본딩 테크는 50kN의 하중 재하시 상판의 분리가 발생하기 시작하여 54.68kN의 하중에서 완전한 테크간의 분리가 발생하였다. 연결부 분리 후 테크의 상태를 살펴본 결과 외관상 테크의 파손 흔적은 보이지 않았다. 그림 10과 11은 접착테크와 비접착 테크의 파괴 및 분리형상을 각각 나타내고 있다.

표 7 조립테크 시험결과 정리

항 목		하중	σ_L	σ_T
접착 테크	처짐한계시	14.68kN	46.2MPa	17.1MPa
	파괴시	91.1kN	270MPa	150MPa
	안전율	6.21	5.84	8.77
비접착 테크	처짐한계시	13.6kN	51.4MPa	15.9MPa
	분리시	54.68kN	270MPa	150MPa
	안전율	4.0	5.25	9.43

표 7은 처짐한계(6.67mm)에서의 실제 파괴하중 및 강도에 대한 안전율을 나타내었다. 접착테크에서는 실제 파괴하중에 대한 안전율이 6.21로서 강도에 대한 안전율 5.84보다 크게 계산되었다. 이는 접착체에 의한 연결부 접착이 조립된 테크의 실제 거동에 대한 안전성을 증가시키는 역할을 하고 있음을 보여준다. 반면에,

비접착테크에서는 실제 파괴하중에 대한 안전율이 4.0으로서 강도에 대한 안전율 5.25보다 작게 계산되었다 이는 기계적 결합에 의한 연결부 조립이 조립된 테크의 실제 거동에 대한 안전성을 다소 감소시키는 역할을 하고 있음을 보여준다. 그럼에도 불구하고, 접착 및 비접착테크 모두 처짐한계시 내하력에 대하여 충분한 안전성을 보유하고 있음을 시험을 통하여 확인할 수 있다.

5. 결 론

기존의 가도용 매트를 대체하기 위하여 수직결합형 복합소재 리그매트 테크를 설계하고 유한요소해석 및 성능시험을 통해 구조적 안전성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 단일테크의 유한요소해석 결과, 처짐한계시 파괴에 대한 단일테크의 안전율은 4.8로서 충분한 내하력을 보유하고 있다.
2. 조립테크의 유한요소해석 결과, 처짐한계시 파괴에 대한 조립테크의 안전율은 접착식테크 4.17와 비접착식테크 4.58로서 충분한 내하력을 보유하고 있다.
3. 단일테크의 휨시험 결과, 60.3kN에서 파괴되었고 최대처짐은 60.2mm가 발생하였다. 처짐한계시 파괴에 대한 안전율은 9.54로서 단일테크가 충분한 내하력을 보유함을 확인하였다.
4. 조립테크의 연결부 성능시험을 실시한 결과, 접착테크는 91.1kN에서 파괴가 발생하였고, 비접착테크는 54.68kN에서 분리가 발생하였다. 처짐한계시 파괴에 대한 조립테크의 안전율은 접착식테크 5.84와 비접착식테크 5.25로서 충분한 내하력을 보유함을 확인하였다.

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
- 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 테크의 거동특성 분석", 전산구조공학회 학술발표 논문
- 이성우, 홍기중, 이영기, 심영식 (2006) "보도교용 복합소재 테크패널의 착탈결구식 연결부 개발" 대한토목학회 학술발표 논문
- 이성우, 홍기중, 조성환 (2006) "착탈결구식 복합소재 보도교 테크패널의 해석적 거동 분석" 대한토목학회 학술발표 논문