

적층해석 및 시편시험을 통한 착탈결합식 복합소재 데크의 물성치 추정

Determination of Material Properties of Gfrp Snap-Fit Deck by Laminate Analysis and Coupon Tests

홍기증* · 박진우** · 이성우***

Hong, Kee Jeung · Park, Jin Woo · Lee, Sung Woo

ABSTRACT

유리섬유 복합소재 바닥판은 고강도, 경량 그리고 고내구성을 가지고 있으므로, 현재 국내 및 해외에서 교량에 꾸준히 적용되고 있다. 국내외에서 기존에 사용하고 있는 복합소재 데크는 주로 수평방향의 압수 접착을 통한 결합을 실시하고 있으나 본 연구진에 의해 획기적인 착탈결합방식 연결이 가능한 복합소재 데크를 개발하였다. 복합소재 적층설계를 통해 설계된 복합소재 데크의 물성치를 ESAComp에 의한 적층 해석과 시편시험을 통해 추정하였다.

Keywords: 복합소재 바닥판, 착탈결합, 적층설계, 시편시험, ESAComp

1. 서론

경량이면서 고강도이고, 내부식성이 탁월한 섬유강화복합소재(FRP)는 샌드위치 구조의 형태로써 항만, 조선, 항공, 기계의 첨단소재로 사용되었다. 최근에는 복합소재가 가지고 있는 특성으로 콘크리트의 열화와 강재의 부식을 근본적으로 해결할 수 있는 제3의 건설소재로 대두되고 있다. 최근 건설 분야에 있어서 유리섬유 강화 복합소재(GFRP)는 역학적인 측면에서 여러 장점을 가지고 있다. 인발 성형되는 형태로 섬유의 배치 방향 및 섬유비를 다르게 함으로써 역학적인 방향성을 도입할 수 있게 되었다. 그러나 정교한 항공, 기계, 조선 분야와는 달리 비균질성의 복합소재 바닥판은 매트릭스의 물질에 일정한 방향을 가진 섬유를 첨가하여 일체화하는

이방성의 재료이므로 설계가 쉽지 않다. 이러한 복잡한 재료적 특성을 반영하여 합리적이며 체계적이면서도 경제적인 설계를 수행하기 위해서는 정확한 물성치를 얻는 것이 중요하다.

본 연구에서는 그림 1과 같이 결합방식을 획기적으로 변환한 착탈결합식 복합소재 데크를 개발하였다. 복합소재 적층 설계/해석 프로그램인 ESAComp를 이용하여 적층해석을 수행하였으며 시편시험 결과를 비교 분석하였다. 이때 상부판, 복부판, 하부판이 하나로 구성된 바닥판이 단위 모듈화되어 생산되지만 각 부위별 단면의 적층구성이 다르므로 각 부위별로 해석 및 시험을 수행하여 물성치를 추정하였다.

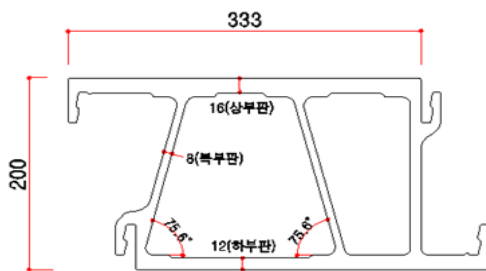


그림 1 200mm 교량 바닥판 단면

* 정 회 원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 E-mail: kjhong@kookmin.ac.kr
** 학생회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정 E-mail: josunpjw@naver.com
*** 정 회 원 · 국민대학교 총장 / 건설시스템공학부 교수 E-mail: swlee@kookmin.ac.kr

2. 단면설계를 위한 복합소재 적층설계

2.1. 적층설계에 사용된 복합소재 물성치

복합소재에 사용되는 섬유는 유리섬유, 탄소섬유 및 아라미드섬유가 주종을 이루고 이들을 결합시키는 수지로는 에폭시, 비닐에스터, 폴리에스터, 우레탄 등 여러 가지가 사용된다. 복합소재에 사용되는 섬유 중에서 탄소섬유와 아라미드섬유는 가격이 높아서 건설자재용으로 사용하기에는 아직 이르지만 유리섬유는 100% 국내 생산이 되고 상대적으로 가격이 저렴하므로, 본 연구진에서는 유리섬유와 불포화 폴리에스터 수지를 복합소재에 적용하여 사용하였다. 제작단면에 대한 섬유 무게비(W_f)는 인발성형공정으로 제작이 유리한 60%로 정하였다. 다음 표 1에는 적층설계에 사용된 유리섬유 및 불포화 폴리에스터 수지의 물성치를 보여주고 있고, Rules of Mixture를 이용하여 단층(lamina)의 물성을 표 2와 같이 계산하였다.

표 1 적층설계에 사용된 유리섬유 및 불포화 폴리에스터 수지의 물성치

	종방향 탄성계수	횡방향 탄성계수	전단 탄성계수	밀도	포아송비	직경
유리섬유 E-glass	E_{fx}	E_{fy}	G_f	ρ_p	ν_f	t
	72.3 GPa	72.3 GPa	30 GPa	2570kg/cm ³	0.22	0.01mm
폴리에스터	E_{px}	E_{py}	G_p	ρ_p	ν_p	t
	3.38 GPa	3.38 GPa	1.22 GPa	1240kg/cm ³	0.38	-

표 2 단층(Lamina)의 재료 물성치

인발성형 방향 탄성계수	인발성형연직방향 탄성계수	전단 탄성계수	포아송비	섬유 무게비
E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12}	ν_{12}	W_f (%)
32.36	5.64	2.05	0.30	60.0

2.2. 섬유적층 설계

부재 단면 및 섬유 적층설계는 사용자의 요구 및 구조부재의 특성에 따라 설계될 수 있다는 점이 복합재료의 가장 큰 장점중의 하나이다. 방향별 섬유분배율을 결정하는 적층설계를 통해 그림 3과 같이 상, 하, 복부관의 적층을 실시하였다. 단면설계에 사용된 CSM300(Chopped Strand Mat of weight 300g/m²)은 수백가닥의 필라멘트로 이루어진 E-glass 구성의 유리섬유를 일정한 길이로 잘게 절단하여 만든 제품으로 수적층 작업 및 연속성형의 작업을 향상시키기 위하여 사용되었다. DBT1150(Double Bias Transverse; Triaxial[45°/90°/-45°] reinforcement mat of weight 1150g/m²)와 LT1100(Longitudinal Transverse; Triaxial[0°/90°] reinforcement mat of weight 1100g/m²)은 직조된 섬유의 한 종류로서 실제 섬유적층을 다축방향으로 설계하기 위하여 동일산자(주)의 제품을 사용하였다. 튜브 종방향(0°)으로 배치되는 유리 장섬유 로빙의 경우 8800TEX(TEX=g/km)의 E-glass 제품을 사용하였다.

표 3 적층단면의 각 방향 섬유량

단면	섬유방향	섬유량(g/m ²)				
		45°(DB)	90°(T)	-45°(DB)	0°(L)	CSM
상부관		891	3459	891	10184	1800
복부관		594	2306	594	3918	1200
하부관		891	2880	891	6778	1500

방향	사용섬유	두께
상부판	DBT1150/CSM	1.36mm
중부판	Roving 8800TEX	1.60mm
하부판	LT1100/CSM	1.30mm
상부판	Roving 8800TEX	1.60mm
중부판	LT1100/CSM	1.30mm
하부판	Roving 8800TEX	1.60mm
상부판	DBT1150/CSM	1.36mm
중부판	Roving 8800TEX	1.60mm
하부판	LT1100/CSM	1.30mm
상부판	Roving 8800TEX	1.60mm
중부판	DBT1150/CSM	1.36mm

(a) 상부판:16mm

방향	사용섬유	두께
상부판	DBT1150/CSM	1.36mm
중부판	Roving 8800TEX	1.33mm
하부판	LT1100/CSM	1.30mm
상부판	Roving 8800TEX	1.33mm
중부판	DBT1150/CSM	1.36mm
하부판	Roving 8800TEX	1.33mm
상부판	LT1100/CSM	1.30mm
중부판	Roving 8800TEX	1.33mm
하부판	DBT1150/CSM	1.36mm

(b) 하부판:12mm

방향	사용섬유	두께
상부판	DBT1150/CSM	1.36mm
중부판	Roving 8800TEX	0.89mm
하부판	LT1100/CSM	1.30mm
상부판	Roving 8800TEX	0.89mm
중부판	LT1100/CSM	1.30mm
하부판	Roving 8800TEX	0.89mm
상부판	DBT1150/CSM	1.36mm

(c) 복부판:8mm

그림3 섬유적층 단면설계

3. ESAComp 해석 및 시편시험

ESAComp는 복합재료 적층 및 샌드위치 구조 적층형태로 만들어진 구조재료를 분석하고 설계하는 소프트웨어로서 개념적이고 일차적인 디자인에서부터 상세한 내용과 최종 요소 결과물의 후처리에까지 사용될 수 있다. ESAComp에 표 1, 표 2, 표 3의 정보를 입력하여 복합소재 데크 적층단면의 물성치를 계산하였다.

또한, 유리섬유 강화 플라스틱(GFRP)의 압축시험(ASTM D3410)과 인장시험(KS M 3381), 면내전단시험(KS M 3386)의 시험방법 규칙에 의거하여 시편 재료시험을 수행의 규격에 포함되지 않는 경우는 구하고자 하는 물성치를 최대한 정확히 구할 수 있도록 규격을 수정·적용하였다. 동일시편을 3개씩 제작하고 2mm/min의 하중재하속도로 시편의 인장 및 압축에 대한 강도 및 탄성율을 평가하였다. 각 3개 시편시험에 의해 구한 평균 물성치는 다음 그림 4, 5, 6, 7에 비교 정리하였다.

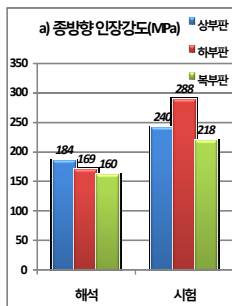


그림 4 인장강도

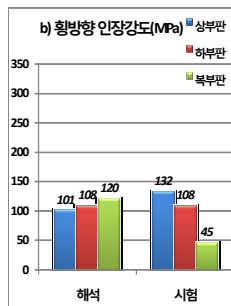


그림 5 압축강도

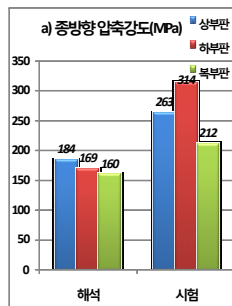


그림 6 면내전단강도

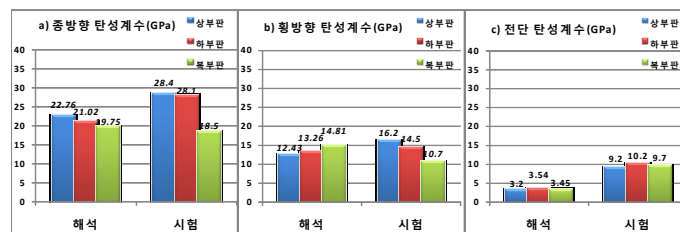


그림 7 방향별 탄성계수

4. 결론

표 3에서 상부판의 종방향 섬유량이 제일 많고 차례로 하부판, 복부판 순서로 섬유량이 많으므로, 해석 시 종방향 인장 및 압축강도가 상·하·복부판의 순서로 작아진다.(그림4a, 그림5a) 반면 시편 시험에서는 이러한 경향을 보이지 않는다. 그 이유는 상부판의 종방향 시편 시험시 그림부파괴 및 슬립현상에 의해 강도 측정에 오차가 발생했기 때문이다. 표 3을 통하여 알 수 있듯이 종방향의 섬유량이 횡방향보다 1.7~2.94 배 정도 더 많이 함유되어 있으므로 종방향의 인장 및 압축강도가 횡방향의 인장 및 압축강도보다 약 2~3배 정도 높게 나타났다. 또한 인장 및 압축시험시 테크의 인발성형 제작에서 발생하는 섬유굴곡현상 때문에 구겨진 섬유 대신 수지가 급격한 응력집중을 받아 시편에 균열이 발생하게 되므로 횡방향 강도가 종방향 강도에 비해 적게 나타났다. 횡방향 인장시험 시 파괴강도에 도달하기 전 급격한 변형률 변화구간이 존재하는데 이는 굴곡된 섬유가 펴지면서 변형이 생기는 것을 나타낸다.

해석 및 시험결과 모두에서 면내 전단강도가 종방향 및 횡방향 강도보다 작은 이유는 종방향 및 횡방향 섬유량에 비해 적은 양의 전단방향 섬유가 적층되었기 때문이다. 한편 DBT[45°/90°/-45°]와 CSM을 함께 밀착하여 적층함으로써 하나의 섬유층으로 작용하여 각 방향 유리섬유 사이에 힘을 전달할 수 있게 적층을 제작하였으나, ESAComp 해석에서는 두 개의 층을 분리하여 고려하므로 시편시험을 통해 구한 면내 전단강도(그림6) 및 전단 탄성계수(그림7c)가 해석값보다 크게 된다.

섬유량이 상대적으로 많은 상부판(16mm)의 종방향 압축강도가 하부판(12mm)의 종방향 압축강도보다 작은 이유는 상부판 시편에 사용된 그림부의 보강판이 시험하중을 견디지 못하고 미끄러져 파괴강도 측정에 상당한 오차를 유발시키기 때문이다. 또한 인장시험 시 큰 인장하중에 의해 그림부에 상당히 큰 하중이 발생하여 파괴되었기 때문에 인장시험에 어려움이 발생하였다. 이러한 문제점을 피하기 위해 더 적은 인장 하중에서 파괴가 일어나도록 시편 중앙부 옆면에 홈을 만들어 단면의 크기를 작게 하였다. 시편에 홈을 만들 때 시편 부위에 약간의 손상이 일어날 수 있기 때문에 시편시험시 측정된 파괴 강도는 실제 손상 없는 시편이 견딜 수 있는 강도보다 작게 나온 것으로 사료된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 시편을 더 넓은 면적으로 고정시킬 수 있는 그림 지그를 고안하여 사용할 필요가 있다. 대체적으로 해석결과보다 시험결과가 크게 나온 것을 확인할 수 있어 해석을 통해 구한 물성치를 시편시험을 통해 구한 물성치 대신 구조해석에 사용해도 안전한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부(건설핵심기술: 06건설핵심C04)의 지원으로 수행되었으며, 건설교통부의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Lawrence Colin Bank (2006) Composites for Construction: Structural Design with Frp Materials, WILEY
- 이성우 (2009) 유전개발용 리그메트 및 교량바닥판용 착탈조립식 경락 복합소재 테크개발, 건기평 연구보고서
- S. W. Lee and K. J. Hong (2007) Experiencing More Composite-Deck Bridge and Developing Innovative Profile of Snap-fit Connections, Proceeding of COBRAE Conference
- Markku Palantera (1999) Theoretical Background of ESAComp Analysis, Helsinki University of Technology
- 박진우(2009) A Specimen Test of GFRP Snap-fit Composite Deck for Pedestrian Bridges, 대한토목학회
- 나두훈 (2008) 75mm 조립식 복합소재 테크의 거동시험 및 해석, 국민대학교 석사논문