KOSACS

J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc.
Vol.1, No.2, pp.44-50, June, 2010

노후교량 바닥판 대체용 Modular GFRP 바닥판 거동에 관한 실험 연구

An Experimental Study on the Behaviour of Modular GFRP Deck for Use in Deteriorated Bridge Decks Replacement

지효선 Ji, Hyo-Seon*† · 천경식 Chunk, Kyung-Sik**

(Received April 15, 2010 ; Revised May 6, 2010 ; Accepted June 4, 2010)

ABSTRACT

The behaviour of Modular GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymers) decks for use in deteriorated bridge decks replacement are investigated experimentally in this study. As for the performance evaluation of bridge decks, experimental studies on the 3 test specimens with 1/5 scale of full size were carried out. Three specimens were sandwich plates with box tube cores. The constituents of bridge decks were glass fiber preforms and epoxy resin. The experimental results of all the specimens were summarized for maximum strength, stiffness and deformation capacity. A finite element analyses were compared to verify validity of experimental results.

요 지

본 연구에서는 노후교량 바닥판 대체용으로 단품(Modular) GFRP 바닥판 구조에 대한 거동분석을 실험을 통행 실시하였다. 그 바닥판의 성능평가로서 축소모형(1/5)의 시험편 3개에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 시험편은 박스튜브를 갖는 샌드위치 판이다. 교량바닥판의 구성재료는 유리섬유와 에폭시 레진이다. 모든 시험편에 대한 실험결과로서 최대강도, 강성 및 변형능력으로 나타내었다. 실험적 결과의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석을 하여 비교하였다.

Key Words: modular GFRP deck(단품 GFRP 데크), deteriorated bridge decks((노후 교량바닥판), performance evaluation (성능평가), sandwich plate(샌드위치판), glass fiber(유리섬유)

1. 서 론

최근 교량 구조물의 노후화, 특히 강재의 부식으로 인한 사용성 및 안전성의 저하는 유지·보수비용과 함께 커다란 사회적 관심으로 대두하게 되었다. 이러한 사회의 요구에 부응하여 건설산업에서 복합신소재의 출현과 적용은 위의 문제를 해결할 수 있는 새로운 재료로서 높은 관심을 모으고 있다. 복합신소재는 비강성, 비강도가 기존의 콘크리트나 강재에 비해 상대적으로 높고 비부식성, 경량성, 비전기성 등 재료적 장점과 방향성을 이용하여 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있으며, 다양한 형태로 만들 수 있는 뛰어난 성형성을 가지고 있다. 복합신소재를 단순히 기존의 재료에 대한 대체 재료로서가 아니라 비등방성 재료의 특이한 물성을 응용한 구조물의 주재료로 사용하기 위하여 이론연구 및 실험자료의 축적이 필요하다.

최근 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 섬유강화 복합신소재를 교량 건물 관로 등의 건설분야에 응용하려는 연구가 10여년 전부터 활발히 진행되어 왔다. 특히 복합신소재의 높은 활용 가능성과 엄청난 잠재 시장성 때문에 복합신소재산업뿐만 아니라 적용기술 개발에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 미국토목학회(ASCE)에서 FRP 구조 설계지침서를 1984년에 제정하였으며, 유럽에서는 1996년에 복합신소재 구조물 설계, 제작, 시공법에 관한 표준지침서(EUROCODE)를 제정하였다(Clarke, 1996). 특히 교량건설에 대한 복합신소재의 응용은 이미 시작되었다. 이처럼 선진 각국은 복합신소재를 교량 상부구조 등에 이용하는 기술을 개발하여 시험 적용하였으며, 국내에서도 교량 바닥판용으로 복합신소재 바닥판이 개발되어 영구교량에 적용하는 등 연구가 활발히 이루어지고 있으며(이성우 등, 2001) 인발공법(pultrusion)으로 제작하는 실용화 연구가 수행 중에 있다. 2002년에는 수적층된 복합신소재 패널(pannel) 면재(Facings)와 콜루게이트(Corrugate) 형태의 복합신소재 심재(Core)로 구성된 완전 복합신소재 교량이 법정도로에 가설되어 지금 공용중에 있으며 정기적으로 공용중 재하시험을 통하여 복합신소재 교량에 대한 장기성능에 대한 각종 데이터를 수집중에

*† 정회원, 대원대학 철도건설과 부교수, 교신저자(hsji@daewon.ac.kr)
** 정회원, (주)바우컨설턴트 차장, 공학박사, 토목구조기술사

있다(지효선 등, 2002; Ji et al., 2007). 최근에는 하이브리드 복합신소재 바닥판 개발 연구가 실용화를 목표로 수행 중에 있다(박설아 등 2005; Ji et al., 2009). 교량의 공용연수 증대와 중차량 교통량의 증가에 따른 중·소형교량 열화손상이 심하여 안전에 관한 문제가 야기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 교량유지관리는 주로 교량 상부구조물의 유지보수에 집중되어 왔으며, 상부 구조물을 보강하더라도 내하력 부족으로 인해 차량 통행이 어려워 기존의 가설된 교량을 불가피하게 모두 철거하여 신설하는 방식으로 교량을 관리하여 왔다. 이와 같이 기존의 교량을 부분적으로 보수 또는 전면적인 철거 후 재 가설하는 방법은 경제적, 시간적으로 많은 손실을 가져오고 있다. 국내의 가설된 교량 중 85%가 교량 지간이 짧은 중·소형 규모의 교량으로서, 그 대부분이 콘크리트 교량으로 가설되어 있어 차량 증가에 따른 노후화가 위험 상태에 도달하고 있다. 따라서 수년 내에 이들 교량을 불가피하게 교체할 수밖에 없다. 여기서 기존의 노후화된 교량을 재 가설하는 방법에 있어서, 상부구조만 철거하고 하부구조를 재 사용한다면 적은 비용으로도 교량을 신속히 재 가설하여 차량 통행을 원활히 할 수 있으며 교량수명을 극대화할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 요구에 충족될 수 있는 교량건설에 대한 복합신소재의 응용을 위하여 우선 기존의 노후 소형 강 및 콘크리트 거더교의 바닥판 대체용으로 단위조각(Modular) GFRP 개념을 도입시켜서 Modular GFRP 바닥판 구조형식을 개발하였으며 휨실험을 통하여 복합신소재 바닥판의 휨거동을 분석하였으며 그 결과를 범용유한요소 프로그램인 LUSAS(1999)를 이용하여 비교검토하여 해석 및 설계자료를 얻고자 하였다.

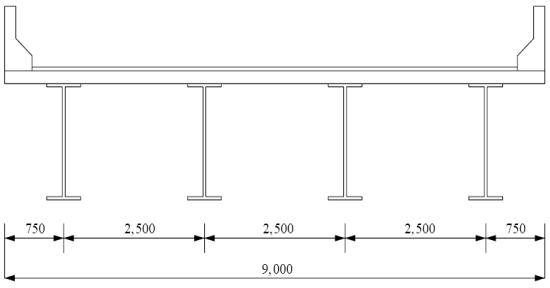

Fig. 1 기본설계 교량의 횡단면도(단위; mm)

2. GFRP 바닥판 설계

2.1 설계 개요

본 연구에서 설계대상 교량형식은 Fig.1의 단면도와 같이 지간 30m, 교폭 9m인 단경간 플레이트 거더교를 선정하였다. 플레이트 거더는 4개이고 거더간격은 2.5 m이다. 거더와 GFRP 바닥판은 전단연결재에 의해 합성된 것으로 가정하였다. 복합신소재 바닥판 설계에서 주요 설계변수가 바닥판의 처짐이다. 국내외적으로 복합신소재 바닥판의 처짐에 관한 제한 규정이 미 정립된 관계로 AASHTO LRFD 설계시방서의 처짐제한인 L/425을 적용하였다(AASHTO 1995). 여기서 L은 거더간격을 의미한다.

2.2 설계하중

본 연구에서 설계대상 교량 해석시 고려한 활하중은 도로교설계기준의 표준트럭하중(DB-24)이며, 이 때 충격을 고려하기 위해 충격계수 0.3을 적용하였다. 이와 같은 차륜하중은 Fig.2와 같이 차륜의 접지면적에 대한 규정에 근거하여 유한요소 모델링시 반영하여 구조해석하였다(도로교설계기준, 1999).

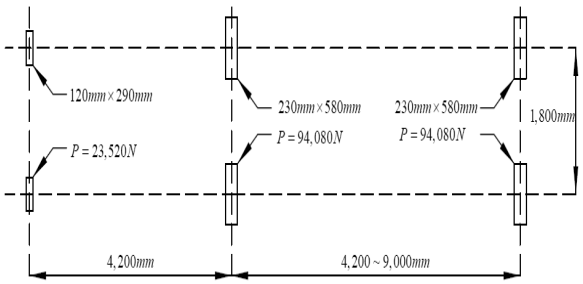

Fig. 2. 표준트럭하중(DB24) 및 타이어 접지면적

2.3 바닥판 기본단면

현재까지 국내외적으로 샌드위치 타입의 단면형상을 가진 복합신소재 바닥판이 개발되어 교량에 적용되고 있다. 본 연구에서는 이발성형공정을 통해 제작된 정사각형 복합신소재 튜브(tube)를 심재(core)로 하고 수적층 패널(panel)을 심재로 하는 제작이 용이한 샌드위치 단면형상을 갖는 단품(Modular) GFRP 패널이다. 본 단품 GFRP 패널을 접착제 접합으로 바닥판을 제작할 수 있다.

2.4 재료 및 적층설계

복합신소재는 레진과 섬유로 구성되어 있어 재료설계가 중요하다. 재료설계에 있어서 가장 중요한 요구사항 중 하나가 원하는 구조부재 두께를 계산하기 위해서 사용하는 레진과 섬유재료의 중량과 관계가 있다. 선택하는 각 재료의 중량에 대한 두께의 값으로부터 섬유가 레진에 함침된 Lamina의 두께를 계산할 수 있다. Lamina 의 적층형태를 나타내고 있다. Lamina의 적층형태는 섬유방향인 0°, 섬유직각방향 90° 그리고 섬유사선방향 ±45°로 일반적으로 나타낼 수 있다. Lamina를 사용하여 설계자는 복합신소재 구조부재의 두께에 맞추어 섬유방향의 다양한 형태의 적층설계를 설계할 수 있다. 복합신소재의 물성은 섬유의 분포

나 배열에 따라 크게 좌우된다. 재료물성을 추정하는 방법에는 재료역학적인 방법인 혼합법(rules of mixture)과 변분의 원리를 이용한 방법 등이 있으나, 본 기사에서는 섬유와 수지의 함량에 따라 계산되는 혼합법을 이용하여 Lamina의 재료 물성을 유도하고 자한다. 복합신소재의 물성은 섬유의 분포나 배열에 따라 크게 좌우된다. 복합신소재의 물성은 섬유의 분포나 배열에 따라 크게 좌우된다. 재료 물성을 추정하는 방법으로 많이 사용되는 재료역학적인 방법인 혼합법을 이용하였으면 사용된 식은 다음과 같다(Kim, 1995).

$$V_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\left\{\frac{w_f}{\rho_f}+\frac{w_m}{\rho_m}\right\}} \tag{1a}$$

$$V_m = 1 - V_f \tag{1b}$$

여기서, w_f, w_m은 섬유와 수지의 무게비를 나타내며, ρ_f, ρ_m은 비중을 나타낸다. 혼합법을 이용하여 계산되는 Lamina의 재료물성은 식 (2)와 (3)으로 구할 수 있다.

Table 1 Lamina 물성치

	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	V_f	V_m
혼합법	30823	6222	2201	0.323	0.393	0.607

Table 2. glass/epoxy 시편의 시험결과

구분	각도	극한하중 (N)	극한강도 (N/㎟)	탄성계수 (N/㎟)	비고
인장강도	0°	48236.46	670.28	36930.77	ASTM D 3039
	90°	2164.92	38.05	10175.42	
압축강도	0°	34911.67	1234.56	34512.15	ASTM D 695
	90°	5166.14	183.58	11220.67	
휨강도	0°	2998.87	1072.36	-	ASTM D 790
	90°	148.86	78.55	-	
전단강도	0°	2979.65	66.49	3341.62	ASTM C 1292-95
	90°	1142.57	42.86	2286.52	

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \tag{2a}$$

$$E_2 = \frac{1}{\left\{\frac{V_f}{E_f}+\frac{V_m}{E_m}\right\}} \tag{2b}$$

$$G_{12} = \frac{1}{\left\{\frac{V_f}{G_f}+\frac{V_m}{G_m}\right\}} \tag{3a}$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \tag{3b}$$

윗 식에서, E_1, E_2 는 각각 Lamina의 섬유방향 및 섬유직각방향의 탄성계수를 말하며 G_{12}, ν_{12}는 lamina의 면내 전단탄성계수 및 프와송 비를 나타낸다. 혼합법을 사용하여 계산된 값과 실험값의 비교를 Table 1과 같이 나타내었다.

복합신소재 바닥판 휨 실험체 제작에 사용된 복합신소재의 역학적 성질을 파악하기 위해 시편의 시험 규격에 따라 가공하여 만능시험기와 해당되는 치구를 이용하여 시험하였다. 시험의 결과는 Table 2와 같다.

3. 실 험

3.1 시험체의 설계 및 제작

본 연구에서 복합신소재 교량 바닥판의 단면설계는 복합신소재의 제작공정을 고려하여 설계하였다. 여기서 시험체의 크기는 실제 복합신소재 교량의 동일한 형상을 유지한 경간이 $L = 1m$, 폭 $B = 375mm$로서 (주)한국화이버에서 제작하였다. 시험체 구조는 모든 요소를 접착제로 접합 제작한 모델 A와 접착제 및 기계적 접합으로 제작한 모델 B인 두가지 경우이다. 두 가지 모두 웨브코아를 갖는 샌드위치 구조로서 휨에 저항하는 상부 플랜지와 전단력에 저항하는 웨브로 구성되어 있다. 모든 재료는 Glass fiber/Epoxy 재료를 사용하여 교량 바닥판 시험체를 제작하였으며, 설계단면의 형상과 단면은 Fig 3, 4와 같으며 해당하는 제원은 Table 3, 4 와 같으며 총 3개의 시험체를 제작하였다. 각 구성요소의 복합신소재 두께를 축척 1/5축소두께로 제작하는 경우에는 두께가 매우 얇아지고, 1 ply의 두께를 고려할 때 정확한 두께를 얻을 수 없을 것으로 예상된다. 따라서 휨시험이 가능한 적절한 두께로 제작하였다. 제작방법에 있어서, 코아요소는 펄트루젼(인발공법) 제조공법을 이용하였으며, 면재(facings)는 hand lay-up(수적층) 방법을 이용하였다. 이렇게 하여 하나의 Modular GFRP 바닥판을 제작하였다. 코아요소를 펄트루젼으로 제작에 따른 면재와의 층간분리현상(delamination)을 막기 위해 제작에 주의를 하였다.

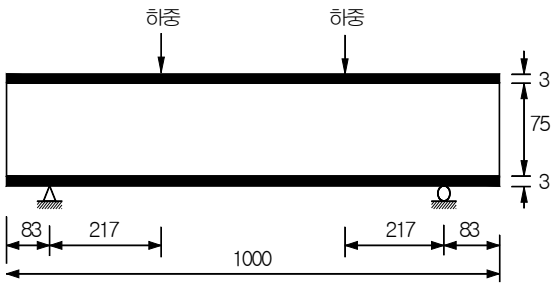

Fig. 3. Modular FRP 데크지간

Table 3. 사용된 복합신소재의 재료적 성질 ($10^9 N/m^2$)

재 료	E_1	E_2	ν_{12}	G_{23}	G_{13}	G_{12}
Glass/Epoxy	36.905	10.065	0.33	2.0	2.9	2.9

Table 4. Modular FRP 데크의 구성요소

	적층패턴	한층두께	층수	총두께
Upper Facing	0/90/0/90/0/90	0.5mm	6ply	3mm
Core	U.D	0.5mm	13ply	6.5mm
Lower Facing	0/90/0/90/0/90	0.5mm	6ply	3mm

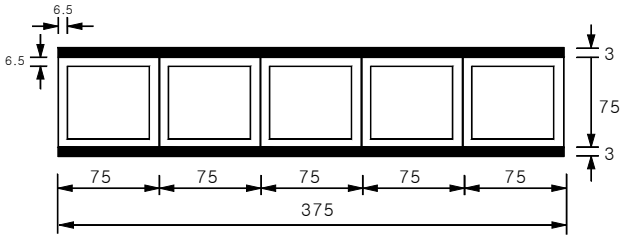

Fig. 4. Box튜브 코아를 갖는 Modular GFRP 데크 단면 형상

3.2 가력 및 측정방법

실험은 대원대학 구조실험실에서 4점 휨시험을 실시하였다. 이것은 순수휨(pure bending) 상태하에서 GFRP 바닥판의 일정한 휨모멘트만 작용할 때 휨거동을 조사하기 위한 것이다. 가력장치는 Fig. 5과 같이 구조모형틀 시험기를 사용하여 행하였다. 단순지지 되는 시험체의 좌우 지지된 길이는 83.4cm되도록 하였으며 양지지점에서 8.3cm 여유가 있도록 하였다, 하중은 시편의 L/4, 3L/4 지점에 가력하였다. 변형률 및 중앙부의 수직 처짐을 측정하기 위해 Fig. 6과 같이 스트레인 게이지와 변위계를 부착하여 하중에 따른 시험체의 거동을 측정하였다. 바닥판의 좌우를 지지부와 하중을 가하는 가압부에서 접촉에 의한 국부손상을 최대한 방지하기 위하여 시험치구를 가동 제작하였다. 처짐은 중앙부위를 측정하였으며, 변형률은 다음 Fig. 6과 같이 지간 중앙부 3개의 점에서 측정하였다.

Fig. 5. 가력장치 및 가력방법

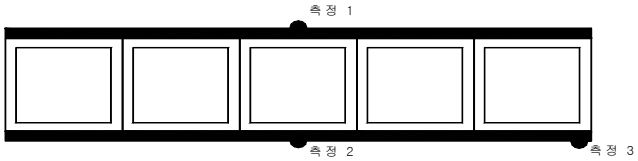

Fig. 6. 변형률 측정 위치 (지간 중앙부)

4. 실험결과

처짐은 Fig. 6과 같이 측정 2의 위치에서 측정하였으며, 변형률은 지간 중앙부 3개의 점에서 측정하였다. 4점 휨시험으로부터 얻은 시험체의 실험결과를 Table 5과 Fig. 7, 8, 9, 10에 나타내었다. Fig. 7은 하중-변위 관계를 Fig. 8, 9, 10은 하중-변형률 관계를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 하중의 크기가 증가함에 따라 처짐의 크기는 비례하여 선형적으로 증가하였다. 처짐은 작용

하는 하중과 재료의 강성, 그리고 단면의 관성모멘트 및 데크의 길이에 관계된다고 볼 수 있다. 재료의 변형이 선형거동을 하는 범위에서는 하중과 처짐도 선형적인 관계를 나타내었다.

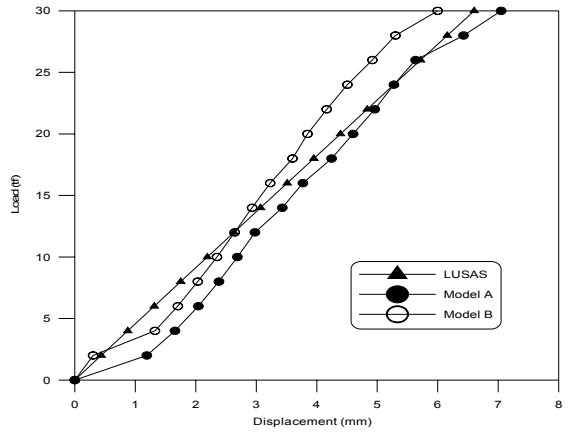

Fig. 7. 유한요소해석결과와 처짐 비교

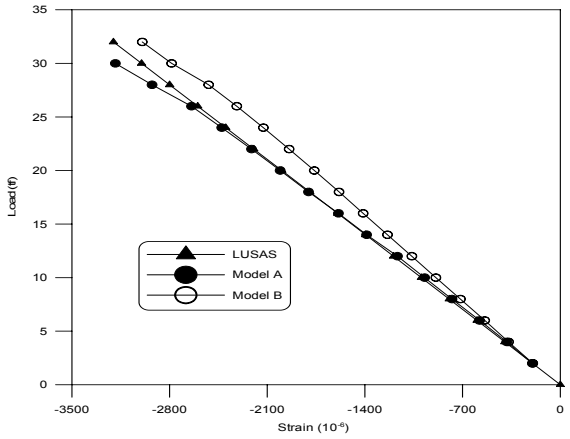

Fig. 8. 측정 1에서의 하중-변형률 관계

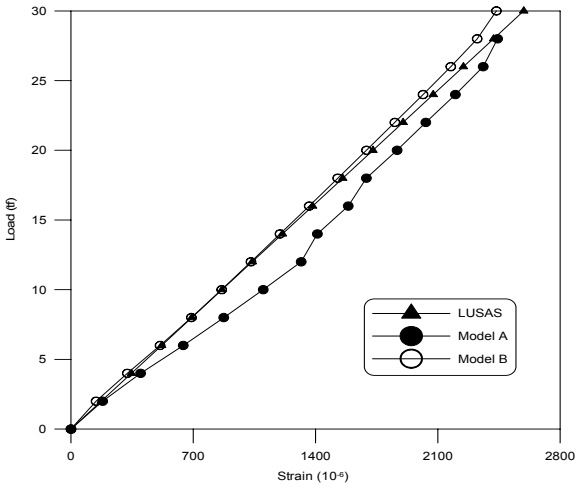

Fig. 9. 측정 2에서의 하중-변형률 관계

5. 분석 및 고찰

Box 튜브 코아를 갖는 샌드위치 Modular GFRP 바닥판의 시험편에 대한 4점 휨시험에서 구한 하중과 처짐값(측정 3)의 비교를 Table 6과 Fig. 7에 각각 나타내었다. Fig. 7에서 하중의 크기가 증가함에 따라 처짐의 크기는 비례하여 선형적으로 증가하였다.

Table 5. 접합형식 요소별 변형률 비교

구조 형식	파괴 하중 (tf)	측정변형률 (μ ε)		파괴변형률 (μ ε)	
		인장 플랜지	웨브	인장 플랜지	웨브
Model B	30	4358	1333	19317	4000
Model A	30	5017	1166	19317	2500

Table 6. 파괴하중(30tf)하에서 중앙점의 처짐값 비교

구분	Model A		Model B		비고
	실 험	LUSAS	실 험	LUSAS	
파괴하중	30tf		30tf		LUSAS 파괴하중
처짐 (mm)	7.04	6.60	5.99	6.60	
응력 (tf/㎠)	160.92	206.13	185.24	231.43	

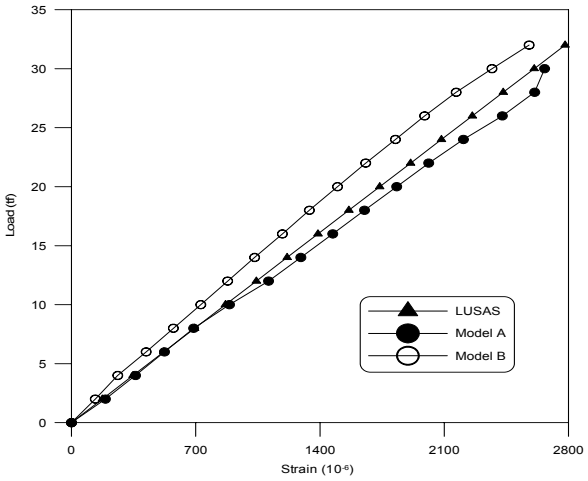

Fig. 10. 측정 3에서의 하중-변형률 관계

접착제 접합을 하여 제작한 Model A보다 접착제, 기계적접합(볼트)을 하여 제작한 Model B 바닥판이 처짐에 있어서 14.9% 정도 낮게 나타났다. 그리고 Table 6과 같이 파괴변형률에 비하여 Model A, B의 측정변형률이 매우 안전한 것으로 나타났는데 이것은 발생 응

력은 매우 안전한 것으로 판단된다.

4점 휨시험에 대한 비교로서 휨강성(b D_{11})에 의한 최대 처짐을 다음 일반 비등방성 적층보 처짐 식 (4)으로 구하여 간편하게 비교할 수 있다.

$$\delta_{\max} = \frac{5PL^3}{384bD_{11}} \tag{4}$$

여기서 P는 집중하중이고, L 은 보의 지간이다. 그리고 b D_{11}은 휨강성이다. D_{11} 은 일반 적층판이론로부터 쉽게 구할 수 있다. 여기서 상, 하층면재(Face)가 동일한 두께이면 다음 식 (5)로 나타낼 수 있고, 두께가 일치하지 않으면 다음 식 (6)으로 구할 수 있다.

$$D_{11} = \frac{E_x h_c^2 t_f}{2(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \tag{5}$$

$$D_{11} = \frac{E_{x,1} h_c (belowNA)^2 t_{f1}}{2(1-\nu_{xy,1}\nu_{yx,1})} + \frac{E_{x,3} h_c (abovNA)^2 t_{f3}}{2(1-\nu_{xy,3}\nu_{yx,3})} \tag{6}$$

여기서 첨자 1, 3은 각각 샌드위치 상, 하층면재를 가리킨다. 구조형식별 전단변형에 의한 처짐이 차이가 있지만 전체 휨거동에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 따라서 설계시 코아의 전단강성 영향을 반드시 고려해야 할 것이다. 처짐은 작용하는 하중과 재료의 강성, 그리고 단면의 관성모멘트 및 바닥판의 길이에 관계된다고 볼 수 있다. 재료의 변형이 선형거동을 하는 범위에서는 하중과 처짐도 선형적인 관계를 나타내었다. 보다 큰 하중이 작용하게 되면서 처짐은 비선형거동을 나타내었고, 하중이 최대값에 도달하면서 바닥판의 웨브 구성요소가 일부 파괴되면서 하중이 감소하게 되었다. 최대내력에 도달하였음에도 불구하고 하중의 증감없이 변형만 지속하는 매우 안정적인 연성적 거동을 나타내었다. 특히 파괴하중에 근접하면서 부분적으로 보강섬유가 파단되면서 하중이 감소되는 현상을 볼 수 있었다. 휨시험은 양단이 단순지지 되어 있는 바닥판 시험편 L/4, 3L/4 지점에 집중하중이 작용하는 형태이다. 바닥판은 휨모멘트에 의한 수직응력뿐만 아니라 전단하중에 의한 전단응력이 발생하므로, 바닥판의 내부에 존재하는 웨브코아가 전단하중의 대부분을 충분히 지지하는 것을 볼 수 있었다. 또한 실험결과의 타당성을 검증하고자 범용유한요소 해석프로그램인 LUSAS를 사용하여 해석을 수행하여 Table 6와 같이 나타냈다(LUSA, 1999). 요소는 Thick Shell 요소를 사용하였으며, 기하학적 비선형 해석을 수행하였다. 이렇게 Model B 가 높은 하중 하에서 견디는 이유는 시험체를 만들 때 접착 및 실험의 불확실성 때문에 볼트 및 리벳 연결로 인하여 휨강성이 증대되었기 때문이며, 또한 적용한 복합신소재의 물성값이 상이하기 때문인데, 즉 이론 해석 시 적용하였던 물성값은 UD (Uni-directional Ply)값이지만 실제 시험체는 보강섬유가 기지(Matrix)와 함께 합침된 구조체이므로 훨씬 더 내력이 강하게 나오는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 노후교량 바닥판을 대체용으로 GFRP 바닥판을 적용하기 위해 설계 개발한 샌드위치 단면형태를 갖는 복합신소재 바닥판의 휨 실험을 실시하였으며 유한요소해석 상용프로그램을 이용한 해석모델과 비교검토하였으며 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최대하중이 이후에도 급격한 하중의 증감없이 변형만 증가하는 매우 연성적인 거동을 나내었다.

(2) 기존에 중소형 노후교량의 바닥판을 단위조각(Modular) GFRP 바닥판으로 교량바닥판으로 대치할 때 사하중을 줄이면서 내하력을 충분히 확보할 수 있고 신속하게 가설할 수 있다는 장점이 있음을 알 수 있었다.

(3) 처짐에 있어서 허용처짐 이내로 들어옴을 확인할 수 있었으며, 응력보다는 처짐조절이 중요하므로 실제 교량 바닥판을 설계시에는 처짐 증가요인을 가미하여 보완하여야 함을 알 수 있었다.

(4) 본 연구의 구조실험 결과와 유한요소해석의 해석결과를 비교한 결과 처짐은 거의 일치하였으나 응력은 차이를 보고 있다. 해석 모델링시 적층설계보다 샌드위치 면재 제작시 추가로 일방향 유리섬유(UD)를 사용한 것으로 판단된다.

(4) 복합신소재 바닥판 거동은 응력보다는 처짐이 주요 제한 요인임을 감안할 때 교량바닥판을 설계시에는 샌드위치 단면형태가 역학적으로 유리한 형식이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 도로교 설계표준시방서 (1999) 건설교통부
2. AASHTO (1998) LRFD Bridge Design Specifications 2nd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials.
3. 지효선, 손병직, 장석윤 (2001) 노후화된 교량 바닥판 대체용 복합신소재 교량 바닥판의 거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집 제13권 6호 pp631-640
4. 이성우, 이선구, 김정현 (2001) 경량 고내구성 복합소재 교량바닥판의 개발, 대한토목학회학술발표회논문집
5. 지효선, 손병직, 장석윤 (2001) 교량적용을 위한 복합신소재 바닥판의 휨거동, 대한토목학회학술발표회논문집

6. 박설아, 신동구, 조근희, 김병석 (2005) FRP-콘크리트 합성바닥판의 단기 구조거동 분석, 대한토목학회 논문집 제25권 제5A호 ,pp729-739
7. Ji, H.S., Son, B.J., and Ma Z. John (2009) Evaluation of Composite Sandwich Bridge Decks with Hybrid FRP-Steel Core, *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, Vol.14, No.1, pp36-44
8. Ji, H.S., Son, B.J., and Chang, S.Y. (2007) Field Testing and Capacity-Ratings of Advanced Composite Materials Short-Span Brige Superstructures, *Composite Structures* Vol.78, pp299-307
9. Whintney, N. J. (1973) Stress Analysis of Thick Laminated Composite and Sandwich Plates, *J. of Comp. Mater*., Vol.6, pp.426-440
10. Allen, H. G. (1969) Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, *Pergamon, Oxford*
11. Clarke, J.L.(ed.) (1996) Structural design of polymer composite-EUROCOMP design code and handbook, *E&FN Spon, London, England.*
12. J.G. Rodriguez (1997) Test and Evaluation Plan for the Composite Bridge, *INEL/EXT-97-00359.*
13. Kim, D.H.(1995) Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, *E&FN Spon*
14. LUSAS Ver 13.2 (1999), FEA Ltd.1.