

중공단면 복합소재 교량 바닥판의 시험을 통한 구조적 특성 분석

Experimental Study on the Composite Bridge Deck of Hollow Section

이 성 우* 김 병 석* 홍 기 증**
Lee, Sung-Woo Kim, Byung-Suk Hong, Kee-Jeung
(논문접수일 : 2005년 1월 6일 ; 심사종료일 : 2006년 10월 19일)

요 지

본 논문에서는 설계와 해석을 거쳐 인발성형으로 제작된 중공단면 복합소재 교량 바닥판에 대해 휨 성능시험, 바닥판-거더 연결부시험, 바닥판-방호벽 연결부시험 등을 통해 구조적 특성을 분석하였다. 휨시험체에 시간 증상에 변위계와 상·하부판의 주요부에 변형률계를 부착하여 파괴하중 재하시까지 거동을 계속하고 그 결과를 분석하였다. 휨시험체에 대한 유한요소해석도 실시하여 시험결과와 비교분석하였으며, 휨에 대한 극한 내하력을 추정하였다. 또한, 시범시공된 복합소재 바닥판 플레이트 거더 교량에 대한 현장 재하시험결과와 현장적용사례를 기술하였다.

핵심용어 : 복합소재, 교량 바닥판, 휨 성능시험, 거더 연결부시험, 방호벽 연결부시험, 현장재하시험

Abstract

In this paper, flexural test, girder-connection test and barrier-connection test for the pultruded composite bridge deck of hollow section, were carried out and its structural characteristics were evaluated. In the flexural test specimen, deflection was measured at center of the span and strains were measured at various locations to see the structural behavior up to the failure. In addition, finite element analysis was performed for the flexural test specimen and the results were compared with experiments, and load carrying capacity was evaluated. Also, field load test was conducted for the demonstration plate girder bridge and other field applications were described.

Keywords : composite, bridge deck, flexural test, girder-connection test, barrier-connection test, field load test

1. 서 론

복합소재 교량 바닥판은 경량·고강도·고내구성과 신속시공 이점으로 인해 미국을 비롯한 해외 선진국에서는 많은 연구개발이 이루어지고 있으며, 미국에서는 이미 실용화 단계에 있고(Defence Advanced Research Projects Agency, 2000 ; Brusel, 2000) 근래 국내에서도 활발한 연구가 진행되었다(한국건설기술연구원, 2004). 본 논문에서는 이러한 복합소재의 이점으로 인해 기존의 콘크리트 교량 바닥판을 대체하기 위해 연구 개발된 중공단면 복합소재 바닥판에 대해 설계, 해석을 통해 인발성형으로 제작된 바닥판의 구조

성능시험 결과를 기술하였다(이성우, 2004 ; 2005). 또한, 이러한 검증시험을 거쳐 시범시공된 복합소재 바닥판 교량의 현장재하시험결과와 현장적용사례에 대해서도 기술하였다.

2. 복합소재 바닥판 단면 형상

현재 세계적으로 가장 많이 현장 시공된 복합소재 교량 바닥판 단면 형상은 미국 MMC사의 2셀 사다리꼴 단면이다. 이 단면은 독창적이긴 하지만 단면의 웹 사이의 거리가 커 상부판의 국부변형이 크고 국내의 DB24 하중에 대해 사용성을 만족하지 못해 국내 실정에 맞는 단면의 개발이 요구되

† 책임저자, 정회원·국민대학교 건설시스템공학부 교수
Tel: 02-910-4696 ; Fax: 02-918-1979
E-mail: swlee@kookmin.ac.kr

* 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원

** 정회원·국민대학교 건설시스템공학부 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

었다(이성우, 2004). 본 연구에서는 복합소재 바닥판에 대한 선행기초연구(이성우, 2005)를 바탕으로 DB24하중에 적합한 그림 1과 같은 중공 단면 형상의 복합소재 바닥판을 설계, 제작하였다. 그림 1의 바닥판 단면은 종방향 및 횡방향 강성이 우수한 사다리꼴 형상의 3개의 중공 단면으로 구성되어 상부하중의 지지 및 전달에 유리한 형태이다. 본 논문에서는 해석적 평가를 거친 본 단면에 대해 각종 구조성능시험을 통해 거동특성을 분석하고자 한다.

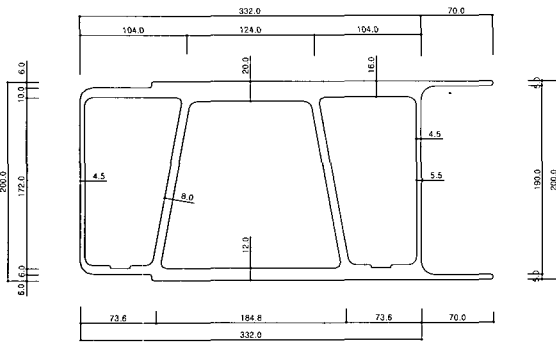


그림 1 유리섬유 복합소재 바닥판 튜브의 단면도

3. 구조성능시험

3.1 휨 성능시험

3.1.1 시험 개요

설계, 제작된 복합소재 바닥판의 성능을 평가하기 위해 단순지지조건의 바닥판 휨시험체에 대해 3점 휨시험을 수행하였다. 실제 교량의 경계조건은 단순조건이 아닌 연속지지이나 여기서는 단순지지조건에 대해 시험 평가하였다. 연속지지와 캔틸레버 등이 있는 실제교량에 대한 안전성은 이 시험에서 비교 검증된 해석모델을 통해 해석적으로 구하게 된다. 시험은 최종 파괴시까지 하중을 재하하여 파괴하중으로부터 바닥판의 휨 내하력을 평가하고 변위계로부터 측정된 바닥판의 하중-변위 관계로부터 바닥판의 처짐을 평가하였다. 또한 변형률 게이지를 바닥판의 상부판 및 하부판에 부착, 설치하여 변형률을 측정하였다. 1000kN용량의 MTS 유압 액츄에이터로 하중재하하였으며, 하중집지면은 도로교설계기준의 윤하중 면적인 580mm×230mm의 크기에 100mm 두께의 네오프렌 단성 고무판을 통해 재하하였다. 또한 하중재하는 변위제어방식으로 재하속도를 2mm/min으로 하였다. 시험체의 지점간 거리는 2,250mm이며, 휨시험체는 폭 1,000mm, 길이 2,970mm의 크기로 3개의 바닥판 튜브를 접착 연결하여 제작하였다. 사진 1에서는 휨시험체에 대한 변위계 부착 모습과 하중재

하 모습을 보여주고 있다.

시험시 바닥판의 수직변위는 지간 중앙에 3개소 설치한 변위계로 측정하였으며, 변형률은 상부판 및 하부판에 각각 16개소에 부착, 설치한 변형률 게이지로 측정하였다. 그림 2에는 휨시험체의 지간 중앙부에 설치된 변위계의 위치도를 보여주고 있으며 각각 단부에서 250mm, 500mm, 750mm 떨어진 위치에 부착하였다. 그림 3에서는 휨시험체의 상부판(T) 및 하부판(B)에 설치된 변형률 게이지의 위치도를 보여주고 있다. 변형률 게이지는 바닥판 튜브의 종방향인 차량진행 방향을 T방향으로 하여 설치하였다. 게이지 표식에서 BL은 하부판 L방향, BT는 하부판 T방향, TL은 상부판 L방향, TT는 상부판 T방향 게이지를 나타낸다.

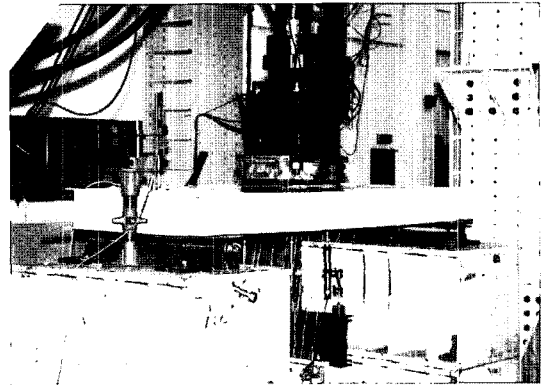


사진 1 휨시험체에 대한 하중재하 모습

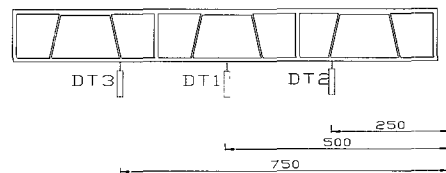


그림 2 휨시험체의 지간 중앙부에 설치된 변위계의 위치도

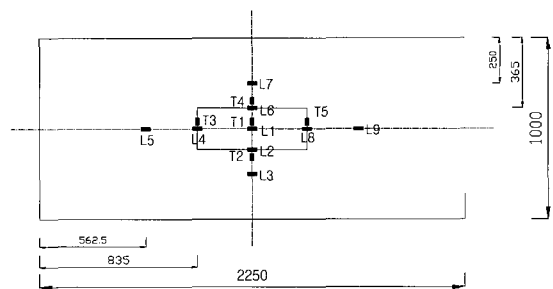


그림 3 휨시험체의 상부판 및 하부판에 설치된 변형률 게이지의 위치도

3.1.2 시험결과

시험체의 파괴시까지 하중을 재하하여 시험한 결과, 최대 하중은 420kN이며, 이때 최대 수직변위는 35.6mm로 나타났다. 하중-변위 관계는 파괴시까지 선형적인 추세를 보이며, 최종 파괴시 상부판의 재하부에서 국부적인 편칭파괴가 발생하는 파괴모드를 보였다(사진 2). 그림 4에는 휨시험결과, 하중-변위곡선을 보여주고 있다. 충격계수 1.3을 포함한 DB24 차량 후륜 축하중이 124.8kN이므로 파괴하중에 대해 폭 1m 시험체의 윗하중 분포폭을 고려하지 않더라도 안전율이 3.36(420/124.8)이며, 축하중의 윗하중 분포폭 1.6을 고려하면 휨에 대한 안전율은 5.37로 계산된다. 그림에 DB24 하중에 해당하는 124.8kN을 선으로 표시하였다. 처짐에 대한 안전율은 교량의 실제 경계조건과 상이하므로 여기서는 강도에 대한 안전율만 평가하였다.

그림 5 및 그림 6에서는 상부판에 설치된 변형률 게이지로부터 측정된 L방향 및 T방향의 하중-변형률 곡선을 각각 보여주고 있다.

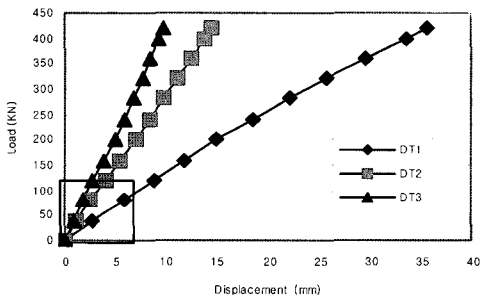


그림 4 하중-변위 곡선

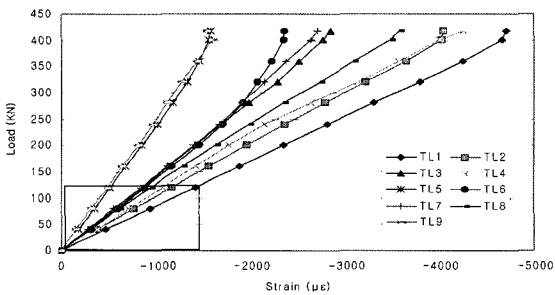


그림 5 상부판 L방향 하중-변형률 곡선

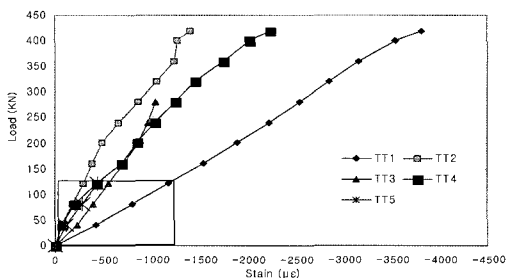


그림 6 상부판 T방향 하중-변형률 곡선

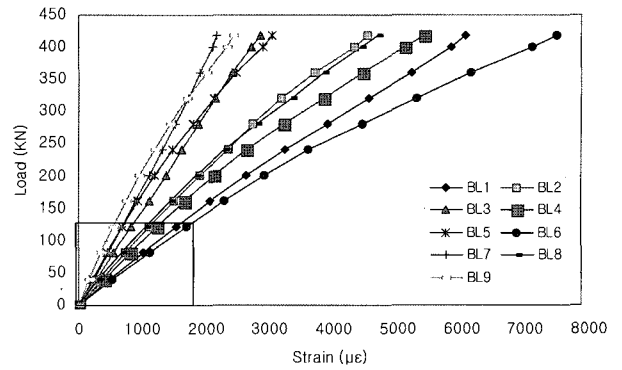


그림 7 하부판 L방향 하중-변형률 곡선

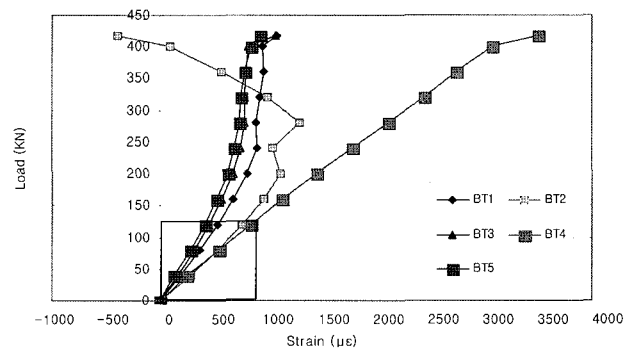


그림 8 하부판 T방향 하중-변형률 곡선

표 1 최대응력에 대한 안전율 검토

구분	상부L	상부T	하부L	상부T
변형률 (με)	-1,475	-1,235	1,950	870
응력 (MPa)	-25.2	-25.0	41.3	12.7
최대강도 (MPa)	-261.0	-162.1	303.2	158.8
안전율	10.35	6.48	7.34	12.50

- 응력은 표 2의 탄성계수로 계산

그림 7 및 그림 8에서는 하부판에 설치된 변형률 게이지로부터 측정된 L방향 및 T방향의 하중-변형률 곡선을 각각 보여주고 있다. 그림 8의 BT2 게이지는 측정 중 손상을 입은 것으로 추정되어 신뢰할 수 없는 값으로 보인다. DB24 하중에 대한 상부판 및 하부판의 L방향 및 T방향으로 측정된 최대응력에 대해 안전율을 검토해 정리하면, 표 1과 같은 안전율을 가지고 있는 것으로 계산되며, 이 역시 윗하중 분포폭을 고려하면 더 큰 안전율로 계산될 수 있다. 이러한 안전율은 사실 강도설계 측면에서 본다면 너무 과다하게 보인다. 그러나 복합소재는 탄성계수 값이 작아 사용성(특히 처짐)에 대한 설계가 우선되어야 하고, 5절에서 기술하듯이 실제 현장시험에서 사용성에 대해 2.4정도의 안전율을 가지므로 강도에는 꽤 큰 여유를 가질 수밖에 없다.

휨시험체의 최종 파괴모드는 사진 2에서 보여지듯이 상부

판 하중재하부의 국부적인 손상파괴로, 이러한 휨시험체의 파괴모드는 실제 차량 윤회중에서는 발생할 수 없는 파괴모드로서 복합소재 바닥판의 전체적인 휨내하력에 대해서는 훨씬 큰 안전율을 가지고 있는 것으로 평가된다.

3.1.3 휨시험체의 유한요소해석

해석적 검토를 위해 복합소재 바닥판의 휨성능시험과 동일한 조건으로 유한요소해석을 실시하여 시험결과와 비교 분석하였고, 최대 파괴하중인 420kN에 대해 Tsai-Wu 파괴해석을 수행하였다.

사용된 해석 프로그램은 복합소재 적층판의 모델링 및 해석이 가능한 범용 유한요소해석 프로그램인 COSMOS/M이며, 재료의 물성치는 제작된 복합소재 바닥판의 시편시험결과(이성우, 2005)를 사용하였다. 해석 모델링에서는 복합소재 물성치 입력이 가능한 쉘요소를 사용하였다. 표 2에서는 유한요소해석에 사용된 복합소재 바닥판의 물성치를 보여주

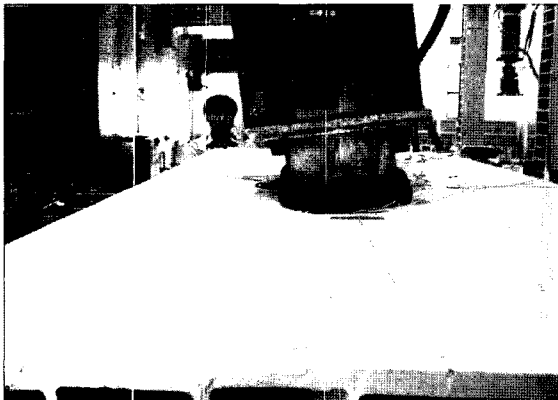


사진 2 상부판 하중재하부의 국부적인 손상파괴 모습

표 2 유한요소해석에 사용된 복합소재 바닥판의 물성치

항 목		상 판	하 판	복부판
탄성계수	Ex (MPa)	17,097	21,210	18,933
	Ey (MPa)	20,190	14,616	15,636
포아송비	vxy	0.182	0.182	0.174
	vyx	0.153	0.153	0.210
전단탄성계수	Gxy (MPa)	13,868	11,115	11,217
X-인장강도	$\sigma_{x,t}$ (MPa)	204.3	303.2	234.2
X-압축강도	$\sigma_{x,c}$ (MPa)	261.0	334.5	267.8
Y-인장강도	$\sigma_{y,t}$ (MPa)	156.0	158.8	146.8
Y-압축강도	$\sigma_{y,c}$ (MPa)	162.1	121.3	105.4
면내전단강도	τ_{xy} (MPa)	44.3	44.5	55.1
평칭전단강도	τ_{xz} (MPa)	114.9	114.9	114.9

X: 바닥판 패널 종방향 (차량진행직각방향)

Y: 바닥판 패널 횡방향 (차량진행방향)

표 3 시험, 해석결과의 응력, 변형을 비교(하중 124.8 kN)

상부판 게이지 번호	시험결과			해석결과
	변형률 ($\mu\epsilon$)	탄성계수 (MPa)	응력 (MPa)	응력 (MPa)
L1	-1,475	17,097	-25.2	-26.5
L2	-1,203	17,097	-20.6	-22.7
L6	-923	17,097	-15.8	-22.7
T1	-1,235	20,190	-25.0	-31.5
T2	-316	20,190	-6.4	-10.4
T4	-377	20,190	-7.6	-10.4

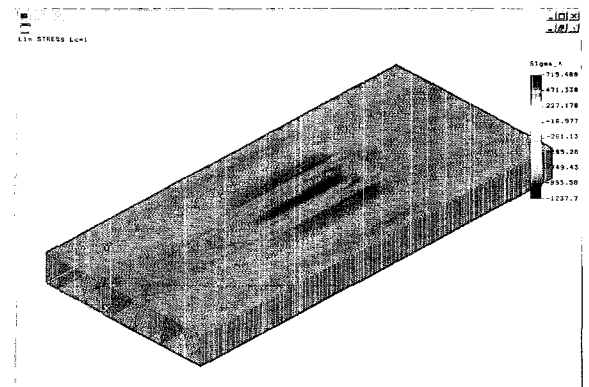


그림 9 420kN 하중 재하시 X방향(차량진행직각방향) 발생응력

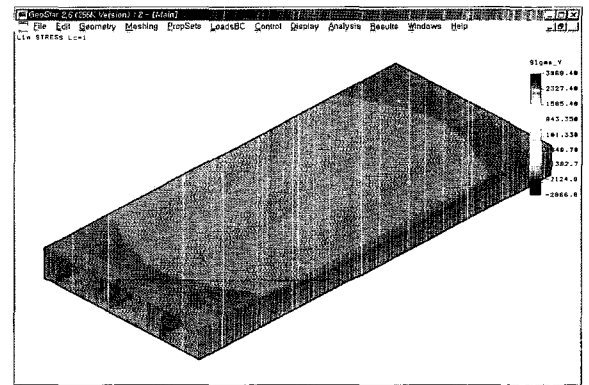


그림 10 420kN 하중 재하시 Y방향(차량진행방향) 발생응력

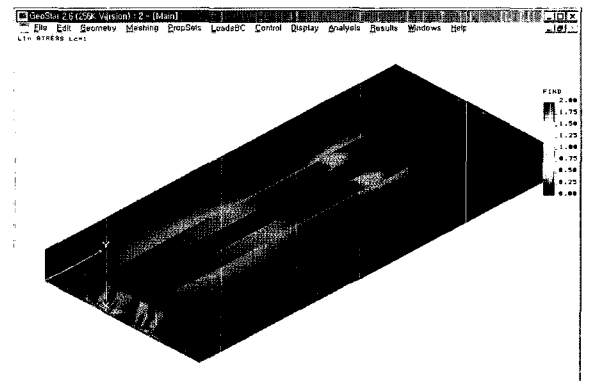


그림 11 Tsai-Wu 파괴해석 결과 파괴지수 분포

표 4 휨시험체의 게이지 위치별 Tsai-Wu 파괴지수

구 분	게이지 번호	Tsai-Wu 파괴지수	구 분	게이지 번호	Tsai-Wu 파괴지수
상부판	1	0.23	하부판	1	0.41
	2	0.18		2	0.26
	3	0.04		3	0.18
	4	0.12		4	0.28
	5	-0.02		5	0.06
	6	0.01		6	0.36
	7	0.04		7	0.19
	8	0.05		8	0.18
	9	-0.02		9	0.07

고 있다.

표 3에서는 충격계수 1.3을 포함한 DB24 후륜 축하중 124.8kN이 재하되었을 때 중앙하중 재하부의 최대응력 발생부에 대한 시험결과와 해석결과와 응력, 변형률을 비교하여 보여주고 있다. 여기서, 응력값을 구하기 위한 탄성계수는 표 2의 재료시험으로부터 구해진 값을 사용하였다. 표에서 보는 바와 같이 시험결과와 해석결과가 비교적 근접하는 것을 알 수 있어 해석결과가 실제거동을 비교적 근사하게 묘사하는 것으로 평가되어 바닥판 해석모델이 적절한 것으로 판단된다. 시험결과에 대한 안전을 검토는 전기 표 1에 수록하였다.

표 4에는 파괴하중 420kN을 재하하여 파괴해석을 수행하였을 때 휨시험체의 게이지 위치별 Tsai-Wu 파괴지수를 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 최대응력 발생지점인 하중 재하부의 최대 파괴지수가 0.41로써, 휨시험시 상부판의 국부 파괴가 발생하는 파괴하중인 420kN에서 해석적으로는 복합소재 바닥판은 파괴되지 않고 있는 것을 알 수 있다. 이를 볼때 순수 휨파괴는 420kN의 2.44배인 1,020kN에서 발생될 것으로 추정되어 실제로는 훨씬 큰 휨 안전율을 보유하고 있는 것으로 판단된다. 그림 9 및 그림 10에는 시험시 최대하중인 420kN를 재하한 경우 X방향 및 Y방향의 발생응력을 보여주고 있다. 하중재하부의 게이지 부착위치에 대한 응력값은 표 3에 수록한 바와 같다. 그림 11에서는 Tsai-Wu 파괴해석 결과 파괴지수의 분포를 보여주고 있으며 게이지 부착위치의 값을 표 4에 발췌하여 수록하였다.

3.2 거더 연결부 전단시험

3.2.1 시험 개요

복합소재 바닥판 합성형 교량의 거더-바닥판 연결부 설계시 필요한 전단 연결재의 허용전단력을 구하기 위하여 거더-바닥판 연결부에 대한 전단시험을 수행하였다.

연결부 전단시험에 있어 고려될 수 있는 변수로는 전단 연결

재의 지름, 채움재의 압축강도 및 베딩층의 두께로서, 사용된 시험체는 본 연구에서 개발된 설계 및 시공지침(이성우, 2004)에서 규정하는 전단 연결재와 무수축 몰탈 채움재로 제작하고, 베딩층의 두께는 20mm로 하여 제작하였다. 그림 12에서 보여주는 바와 같이 시험체는 양측에 복합소재 바닥판이 연결된 강재 거더를 가력하여 시험하였으며, 양측 패널 내부에는 각 2개소에 전단 포켓을 형성하고 채움재를 주입하여 합성부를 제작하였으며, 전단 연결재의 간격은 33cm, 총 4개 스티드를 설치하였다. 또한 그림 13에서 보여주는 바와 같이 전단 연결재의 거동특성을 파악하기 위해 전단 연결재의 길이방향으로 인장부 및 압축부의 용접부 상단에 변형률 게이지를 설치하였으며, 재하하중은 시험체 파괴시까지 재하하였다. 사진 3에서는 연결부 전단시험 모습을 보여주고 있다.

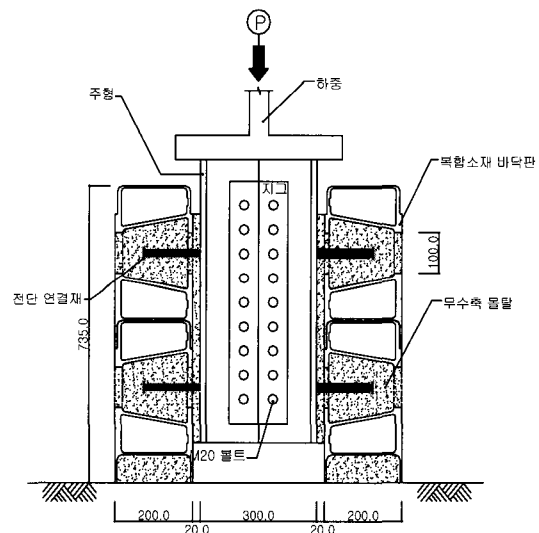


그림 12 연결부 전단시험 개요

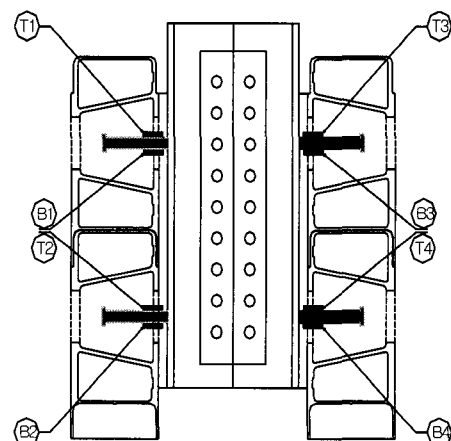


그림 13 전단 연결재의 변형률 게이지 설치위치도

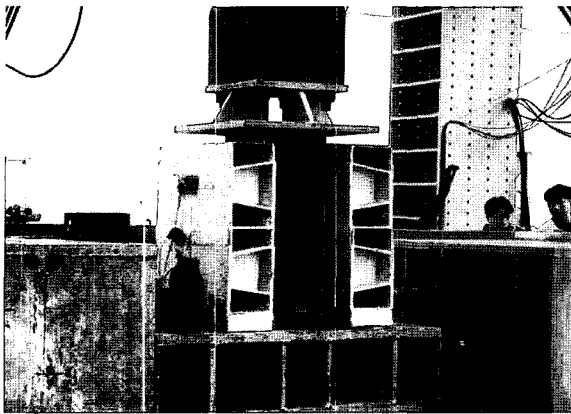


사진 3 복합소재 바닥판의 연결부 전단시험 모습

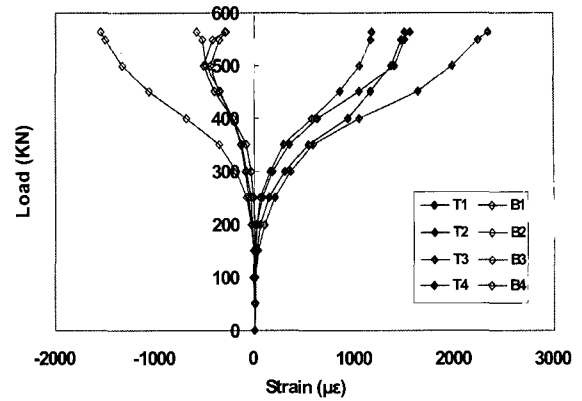


그림 15 전단 연결재에 설치된 변형을 게이지로부터 측정된 하중-변형률 곡선

3.2.2 시험결과

시험체에 대한 연결부 전단시험을 수행한 결과, 재하하중 560kN에서 모재인 복합소재 바닥판의 복부판과 하부판 연결부의 층간전단파괴가 발생하였다. 사진 4에서는 시험 후, 채움재를 제거한 상태에서 전단 연결재의 변형된 모습을 보여주고 있다.



사진 4 시험 후 전단 연결재의 변형된 모습

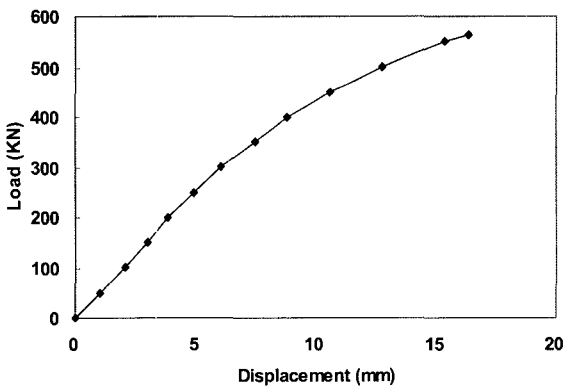


그림 14 시험결과, 연결부 전단시험체의 하중-변위 곡선

모재 파괴시 전단 연결재는 이미 항복이 발생한 상태로 4개의 전단 연결재의 평균 항복강도를 기준으로 허용전단력을 산정하고자 한다. 그림 14에는 시험결과, 하중계로 측정된 전단시험체의 수직방향 하중-변위 곡선을 보여주고 있으며, 그림 15에는 전단 연결재에 설치된 변형을 게이지로부터 측정된 하중-변형률 곡선을 보여주고 있다.

3.2.3 전단 연결재의 허용전단력 산정

도로교설계기준에서는 합성형 강판형교의 전단 연결재의 허용 전단력 및 극한 전단력의 계산식을 제시하고 있다. 설계기준에 따르면, 전단 연결재의 허용 전단력 및 극한 전단력은 다음 식 (1) 및 식 (2)로부터 계산할 수 있다.

$$Q_a = 948 d^2 \sqrt{f_{ck}} \quad (H/d \geq 5.5) \quad (1)$$

여기서, Q_a : 전단연결재의 허용 전단력(N)

H : 스테드의 전 높이(cm)

d : 스테드의 줄기의 지름(cm)

f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도(MPa)

$$Q_u = 40 d^2 \sqrt{f_{ck} E_c} \leq 100 A_{sc} f_u \quad (2)$$

여기서, Q_u : 전단연결재의 극한강도(N)

E_c : 콘크리트의 탄성계수(MPa)

A_{sc} : 전단연결재의 단면적(cm^2)

f_u : 전단연결재의 인장강도(MPa)

식 (2)의 극한 전단력을 식 (1)의 허용 전단력으로 나누는 것을 전단 연결재의 파괴를 기준으로 한 설계 안전율로 볼 수 있으며, 이는 전단 연결재의 최대 인장강도를 기준으로

한 것이다. 그러나 전단 연결재의 파괴 이전에 모재의 파괴가 발생한 거더-바닥판 연결부 거동특성을 반영하기 위해서는 전단 연결재의 항복강도를 기준으로 하여 허용 전단력을 산정할 필요가 있다. 따라서, 식 (3)으로부터 전단 연결재의 항복을 기준으로 한 연결부 전단력을 계산할 수 있으며, 전단연결재 지름이 22mm이고, 무수축 몰탈의 압축강도가 40 MPa일 경우 식 (1)의 허용 전단력에 대한 전단 연결재의 극한강도 및 항복강도에 대해 계산된 설계 안전율은 표 4와 같다. 전단 연결재의 항복강도는 도로교 설계기준을 따라 240 MPa를 사용하였다.

$$Q_y = 100A_{sc}f_y \quad (3)$$

표 5에서 보여주는 바와 같이 전단 연결재의 항복강도를 기준으로 전단 연결재를 설계할 경우 안전율 3.7을 고려하여 전단 연결재의 허용 전단력을 계산할 수 있다. 표 5에서 제시한 설계 안전율은 최소 안전율로서 허용 전단력을 산정하기 위해서 설계 안전율 4.0을 적용한다.

표 5 전단 연결재의 극한강도 및 항복강도에 대한 설계 안전율

구분	극한강도 기준 (콘크리트 바닥판)	항복강도 기준 (복합소재 바닥판)	비고
최대 전단력 (kN)	152	109	F.S. = 최대 전 단력/허용전단 력
허용 전단력 (kN)	29		
설계 안전율 (F.S.)	5.3	3.7	

도로교 설계기준에서는 전단 연결재의 항복을 항복점 또는 변형률 0.2% 내력으로 정의하고 있으며, 안전측으로 항복변형률 ($\epsilon_y = \sigma_y / E_s = 240 / 204,000 = 0.0012$)에서의 계측된 전단력(그림 15참조)을 기준으로 계산하였다. 그림 15의 계측 그래프에는 0.0012 이전에서 직선으로 그려지지 않았으나 변곡되는 점을 항복점으로 고려하였다.

표 6 전단 연결재의 항복기준 ($\epsilon_y = 1200 \mu\epsilon$) 전단력(그림 15참조)

게이지 구분	전단력 (4개 전단 연결재) [kN]	전단연결재 1개 당 전단력 [kN]
T1	461	115
T2	566	140
T3	413	103
T4	472	118
평균	478	119

표 6에서 보여주는 바와 같이 전단 연결재의 항복시 ($\epsilon_y = 1200 \mu\epsilon$) 전단 연결재 1개당 평균 전단력은 약 119kN이다. 따라서, 표 5의 항복강도 기준에 따라 전단 연결재 1개의 허용 전단력은 식 (4)와 같이 약 29kN로 볼 수 있다.

$$Q_{a, stud} = \frac{\text{항복기준전단력}}{\text{설계안전율}} = \frac{119}{40} = 29kN \quad (4)$$

4. 바닥판-방호벽 연결부 성능시험

4.1 시험개요

복합소재 바닥판에 설치 시공되는 콘크리트 방호벽의 연결부 성능검증을 위해 다양한 충격시험을 거쳐 설계가 이미 표준화된 콘크리트 방호벽(한국도로공사 표준도)에 따라 방호벽 시험체를 제작하고 연결부 성능시험을 실시하였다.

시험체는 폭 1,333mm 복합소재 바닥판에 콘크리트 방호벽을 설치한 그림 16과 같은 모양으로 제작하였다. 방호벽은 설계강도 $f_{ck} = 24\text{MPa}$ 인 콘크리트(한국도로공사 표준도 기준)를 타설하여 제작하였다. 방호벽과 바닥판은 철근콘크리트로 합성하였고, 방호벽이 설치된 바닥판은 하부주형에 전단 연결재로 합성시켰다. 콘크리트 방호벽의 철근량은 한국도로공사 표준도에 따라 배근하였다.

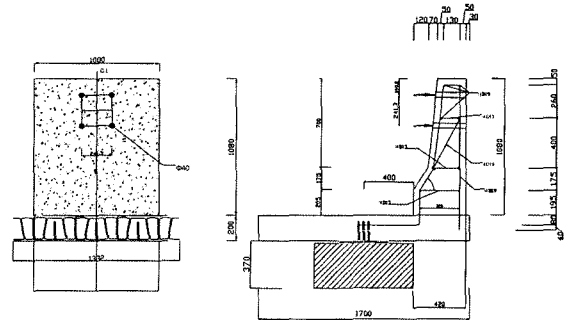


그림 16 방호벽 시험체 단면도

방호벽 연결부 성능시험은 500kN용량의 MTS 만능시험기를 사용하였으며, 2mm/min의 변위제어로 방호벽 상부를 가력하여 수행하였다.

그림 17에서는 방호벽 시험개요도를 보여주고 있으며, 그림 18 및 그림 19에서는 시험체의 변위계 및 변형률 게이지 설치 위치도를 보여주고 있다. 그림 18에서 변위계는 DT, 철근에 부착한 변형률 게이지는 Sc(압축), St(인장)으로 표기하였다. 그림 19에서 복합소재에 부착한 변형률 게이지는 상부를 P(T) 하부를 P(B)로 표기하였다. 사진 5에는 연결부 성능시험모습을 보여주고 있다.

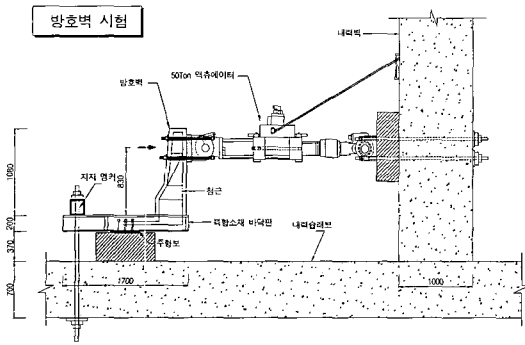


그림 17 방호벽 연결부 성능시험 개요도

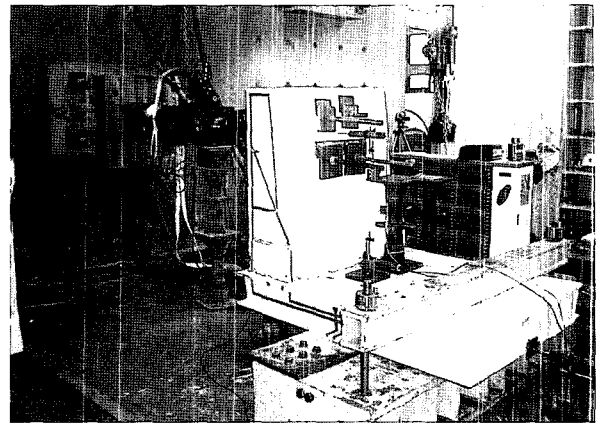


사진 5 복합소재 바닥판-콘크리트 방호벽 연결부 성능시험모습

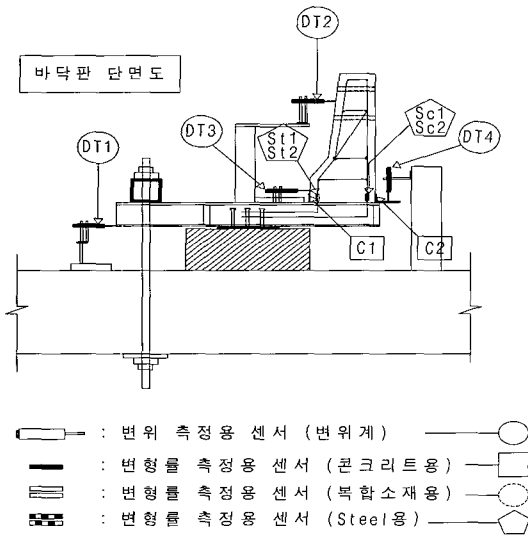


그림 18 시험체의 변위계 및 변형률 게이지 설치 위치도(단면도)

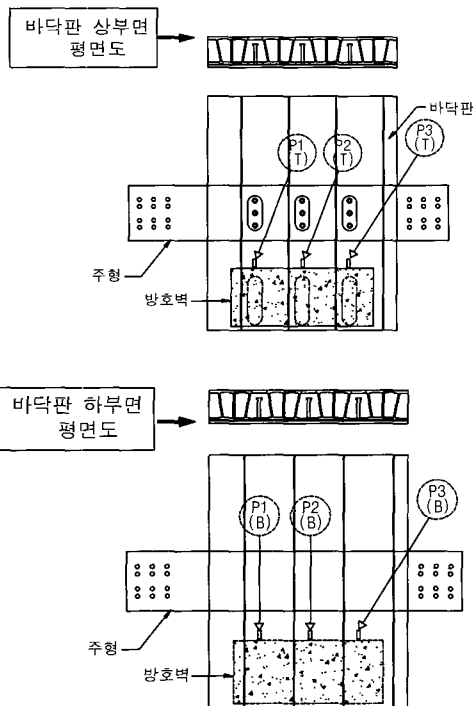


그림 19 시험체의 변위계 및 변형률 게이지 설치 위치도(평면도)

4.2 콘크리트 방호벽의 휨내하력과 수평재하하중

복합소재 바닥판과 콘크리트 방호벽 연결부의 성능평가를 위한 수평하중은 방호벽 표준도에 의한 콘크리트 방호벽의 휨모멘트 내력을 산정하여 결정하였다. 계산된 휨모멘트 내력을 발생시키는 수평하중을 산정하여 시험시 이 하중이 가해졌을 때 연결부의 손상 유·무, 바닥판의 응력변화를 확인하고자 하였다.

계산 결과 콘크리트 방호벽 표준단면 하부의 휨모멘트 내력은 107.9kN-m이었고, 높이 83cm에서 가력할 때, 이 모멘트를 발생시키는 상당수평하중은 130kN으로 계산되었다.

4.3 시험결과

방호벽 하단으로부터 83cm 높이에서 수평하중 150kN까지 가력하여 방호벽 연결부 성능시험을 수행하였다. 시험결과, 최대 하중하에서 방호벽과 복합소재 바닥판 연결부 어느 곳에서도 손상이 발견되지 아니하였다. 이는 방호벽 하단에서 최대 휨모멘트가 발생될 때에도 연결부에 문제가 없는 것으로 평가할 수 있다.

수평하중 130kN을 재하하였을 때 바닥판 단부의 수직처짐(DT4)은 19mm이고, 최대 시험하중인 150kN을 재하하였을 때 바닥판 단부의 수직 처짐(DT4)은 24mm였다. 하중 재하시험 후 하중을 제거하였을 때 복합소재 바닥판은 거의 완전히 원상으로 회복되었으며, 이때에도 연결부에서 아무런 이상이 발견되지 않아 바닥판 연결부의 문제점은 전혀 없는 것으로 확인되었다.

최대 시험하중인 150kN 재하시 콘크리트 방호벽 하단이 복합소재 바닥판으로부터 분리되는 현상이 관찰되었고(사진 6), 이때 방호벽 하단의 콘크리트의 인장측 게이지(C1)로부

터 측정된 응력은 이미 분리가 되어 있으므로 거의 미미하고 압축측 게이지(C2)의 최대발생응력은 6.7MPa로 나타났다. 방호벽의 분리현상으로 추정컨대 최대 하중에서 이미 철근이 항복한 것으로 보였다.

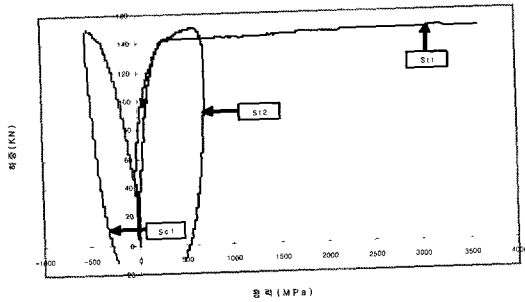


그림 20 하중-응력도(중앙 철근)

그림 20에는 방호벽 중앙부 철근의 변형률 게이지로부터 계측된 변형률로 계산된 하중-응력도를 보여주고 있다. 그림 20에서 알 수 있는 바와 같이 인장철근인 St1, St2가 계산에서 예측했듯이 140kN 정도에서 응력값이 300MPa이상으로 계측되어 이때 항복응력에 도달한 것임을 알 수 있었다. 이는 이 하중에 방호벽의 휨모멘트 최대 내력이 발생하고 있음을 보여주는 증거이다. 한편 압축철근인 Sc1도 140kN 부근에서 항복하고 있는 것을 알 수 있었다.

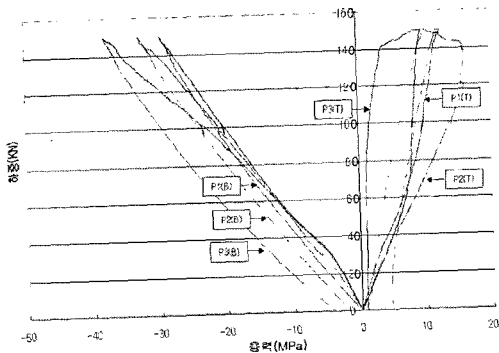


그림 21 하중-응력도(복합소재 바닥판)

그림 21에서는 복합소재 바닥판에서 계측된 하중-응력도로써 그림에서 알 수 있는 바와 같이 복합소재 바닥판의 인장응력 발생부인 상부판 P1(T), P2(T), P3(T)에서 하중 130kN 일때 변형률과 탄성계수로 계산된 응력은 최대 15MPa, 압축응력 발생부 P1(B), P2(B), P3(B)인 하부판에서는 최대 -33MPa가 발생하였다. 이 응력은 상부판 L방향 인장강도 204.3MPa, 하부판 L방향 압축강도 344MPa의 1/10수준보다 작은 응력값으로 방호벽 연결부의 바닥판은 구조적으로

전혀 문제가 없음을 확인하였다. 또한 하중을 제거했을 때 응력이 0으로 복원되므로 방호벽 연결부의 바닥판이 완전 원상으로 회복됨을 알 수 있어 연결부의 문제점이 전혀 없는 것으로 확인되었다.

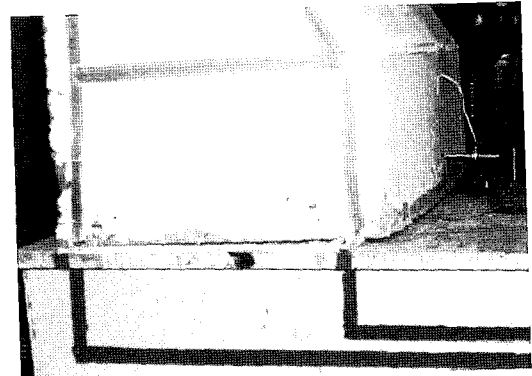


사진 6 최대 시험하중 150kN에서 콘크리트 방호벽과 복합소재 바닥판 연결부 모습

5. 현장재하시험 및 적용사례

전술한 바와 같이 구조해석과 각종 실내 구조성능시험을 거친 복합소재 바닥판을 국내의 수개소 현장에 적용하였다.

사진 7은 경부고속도로 부산-언양간 고속도로 확장구간의 형주교에 복합소재 바닥판을 시범시공한 후 현장재하시험(이성우, 2004)을 하는 모습을 보여주고 있다.

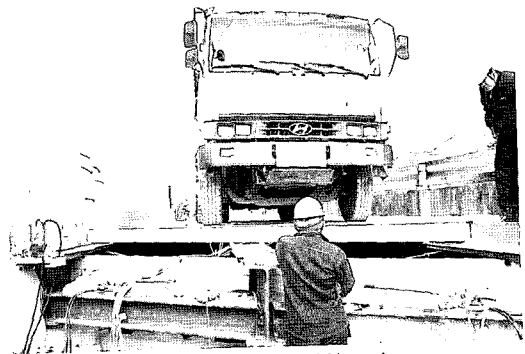


사진 7 현장재하시험 모습

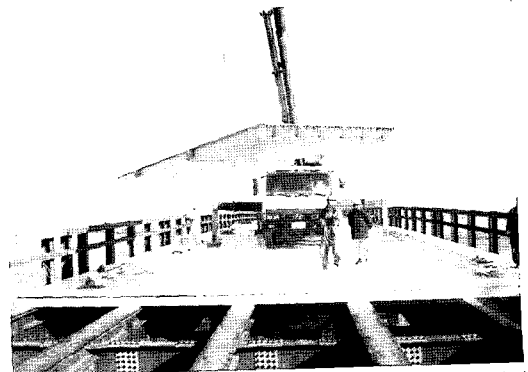


사진 8 광양항 진입도로 교량의 복합소재 바닥판 설치



사진 9 광양항 진입도로 교량의 복합소재 바닥판 설치 완성 모습

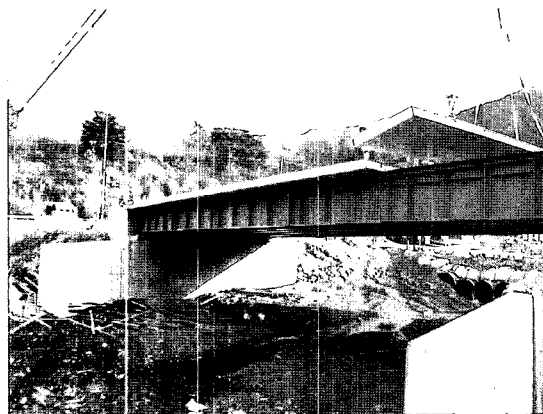


사진 10 국도 13호선 개정교의 복합소재 바닥판 설치

현장재하시험 결과, 복합소재 바닥판의 사용성은 도로교설 계기준의 바닥판 최대허용 처짐기준을 대비하여 평가하였다. 계측대상 복합소재 바닥판의 처짐기준은 $4.7\text{mm} (L/425 = 2000/425)$ 로 계측결과, 재하하중에 의한 바닥판 최대 처짐의 5회 측정 평균값은 1.92mm 로서 2.4정도의 안전율을 가지는 것으로 평가되었다. 시험 차량하중의 축중량이 230kN 이므로 해석에 의해 DB24 하중으로 환산한 안전율은 약 2.9로 평가되어 처짐 사용성 기준을 충분히 만족시키는 것으로 확인되었다(이성우, 2004). 또한, 바닥판 하부의 교축방향 최대응력에 대해서는 파괴강도대비 안전율이 최소 39이상을 확보하고 있어 시공된 바닥판은 충분한 구조적인 안전성을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

사진 8과 사진 9는 광양항 가호안 진입 도로에 복합소재 바닥판을 적용한 사례로 교장 150m, 교폭 12m인 복합소재 바닥판 플레이트 거더교에 바닥판을 설치하는 모습과 설치가 완성된 모습을 보여주고 있다. 사진 10에는 국도 13호선상의 개정교인 교장 25m, 교폭 11m의 플레이트 거더교에 바닥판을 설치하는 모습을 보여주고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 인발성형으로 제작된 중공단면 복합소재 교량 바닥판에 대해 구조성능시험을 통해 구조적 특성을 분석한 결과를 기술하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 휨시험결과, 최종파괴하중은 420kN 로 하중-변위 관계는 파괴시까지 선형적인 추세를 보였으며, 최종 파괴모드는 상부판 하중재하부의 국부적인 손상파괴로 나타났다. 시험체 파괴하중의 DB24 하중에 대한 안전율은 3.36에서 5.37로 계산되었다.
- 2) 파괴하중에 대한 Tsai-Wu 파괴해석결과, 최대 파괴지수가 0.41로써 휨시험 상부판의 국부파괴가 발생하는 파괴하중인 420kN 에서 해석적으로 복합소재 바닥판은 파괴되지 않고 있는 것을 알 수 있어 순수 휨파괴는 420kN 의 2.44배인 $1,020\text{kN}$ 에서 발생할 것으로 추정되어 힘에 대해 보다 큰 안전율을 보유하고 있는 것으로 판단된다.
- 3) 복합소재 바닥판의 거더-바닥판 연결부에 대한 전단시험을 통해 전단연결재의 항복전단력을 구하여 전단연결재의 허용전단력을 산정하였다.
- 4) 바닥판-방호벽 연결부 성능시험 결과, 최대수평하중인 150kN 에서 복합소재 바닥판 연결부 어느 곳에서도 손상이 발견되지 않았으며, 하중을 제거했을때도 방호벽 연결부의 바닥판이 완전 원상으로 회복됨을 알 수 있어 연결부의 문제점이 전혀 없는 것으로 확인되었다.
- 5) 복합소재 바닥판은 경량, 고강도, 고내구성 특성 뿐만 아니라 교통통제 최소화 및 신속시공을 가능케하는 여러 가지 이점으로 인해 교량 신설 및 성능개선 공사시 앞으로 활발히 보급될 것으로 전망된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 산·학·연 공동연구개발사업(목적A01)으로 수행되었으며, 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 이성우 (2004) 신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구, 건설교통부 연구보고서, 건설기술평가원.
- 이성우 (2005) 중공단면 복합소재 교량 바닥판의 제작성, 내구성 및 구조거동 평가, 한국전산구조공학회 논문집, 18(4), pp.427~434.

이성우 (2005) 필라멘트 와인딩과 인발성형 제작 복합소재 교량 바닥판의 휨 특성 비교분석, 한국전산구조공학회 논문집 18(2), pp.191~200.

한국건설기술연구원 (2005) 장수명 합리화 바닥판 개발, 한국건설기술연구원 연구보고서, 한국건설기술연구원.

Brusel, B. P. (2000) Product Selection Guide: FRP

Composite Product for Bridge Applications, The Market Development Alliance of the FRP Composite Industry.

Defence Advanced Research Projects Agency (2000) Advanced Composites for Bridge Infrastructure Renewal - Phase II, Martin Marietta Composites.