

인발성형 복합소재 교량 바닥판의 실험적 거동분석 Experimental Study on Pultruded Composite Bridge Deck

이 성 우* 김 제 인** 김 병 석*** 배 두 병**** 박 성 용*****
Lee, Sung Woo Kim, Je In Kim, Byung Suk Bae, Doo Byung Park, Sung Yong

ABSTRACT

In the conventional reinforced-concrete bridge deck, concrete and steels are likely to be deteriorated and corroded under the influence of noxious environment. To cope with these problems caused in the conventional reinforced-concrete bridge deck, pultruded composite bridge deck having light weight, high strength, corrosion resistance and durability is developed. For the DB24 truck load pultruded composite bridge deck is designed and fabricated. For the fabricated and assembled deck panel, structural testing such as flexural test, local fatigue test, flexural fatigue test are conducted to verify the deck capacity experimentally. In this paper design for deck profile, details of connection and experimental results of composite bridge deck are presented.

1. 서 론

복합소재는 경량·고강도·고내구성 특성을 보유한 첨단 우주항공 신소재로서, 최근 건설 분야에서 콘크리트의 열화와 강재의 부식을 근본적으로 해결할 수 있는 제3의 건설소재로 대두되었다. 해외에서는 복합소재의 건설분야 적용을 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있으며, 그복합소재 프리캐스트 교량 바닥판은 교량분야의 첨단기술로 구미에서 이미 실용화 단계에 있다. (주)국민씨아이에서는 국내 최초로 복합소재 프리캐스트 교량 바닥판을 자체기술로 개발하였으며, 건설교통부 신기술 제374호로 지정받아 기존의 콘크리트 바닥판을 대체하여 교량 신설 및 성능개선시 적용하고자 한다.

복합소재 교량 바닥판은 기존의 현장 타설로 인해 공기가 많이 소요되는 콘크리트 바닥판과는 달리 공장에서 미리 제작된 프리캐스트 교량 바닥판 패널로서 교통량이 많은 도심구간에 교량건설이나 보수시 프리캐스트 교량 바닥판 패널을 사용하면 공기 단축 및 교통통제 시간을 최소화할 뿐만 아니라 교통혼잡으로 인한 간접비를 대폭 절감할 수 있다. 복합소재 바닥판은 콘크리트 바닥판처럼 열화하지 않고 강재처럼 부식하지 않으므로 교량의 수명을 대폭 늘릴 수 있으며, 공용 중에도 유지관리 비용이 거의 들지 않는다. 또한 콘크리트 바닥판에 비해 중량이 1/5이하이므로, 교량의 자중을 경감하여 교각 기초나 거더를 경제적으로 건설할 수 있으며, 교량의 성능개선시 기존의 거더나 교각기초를 보강하지 않고 자중을 경감한 만큼 통과 차량 하중을 크게 할 수 있으므로 교량 등급을 높일 수 있어서 현저한 공기단축과 공사비 절감을 도모할 수 있다^[2]. 그림 1.1에서는 복합소재 교량 바닥판의 특성을 요약하여 보여주고 있다.

* 정희원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-910-4696 (E-mail:swlee@kookmin.ac.kr)
** 정희원 · (주)국민씨아이 부사장 · 공학석사 · 02-3420-8591 (E-mail:muzimi@kookminci.com)
*** 정희원 · 건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 · 031-910-0124 (E-mail:bskim@kict.re.kr)
**** 정희원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-910-4697 (E-mail:dbbae@kookmin.ac.kr)
***** 정희원 · 건설기술연구원 선임연구원 · 공학석사 · 031-910-0140 (E-mail:sypark@kict.re.kr)

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 단면설계 및 연결부 구조상세 개발내용을 기술하였고, 휨성능시험, 압축피로시험 및 휨피로시험을 통한 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 성능평가 결과를 기술하였다.

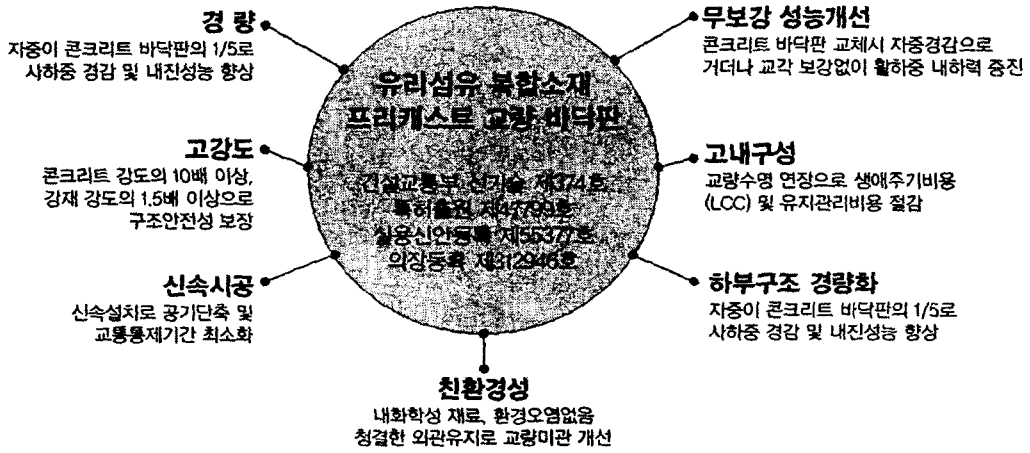


그림 1.1 복합소재 교량 바닥판의 특성 요약

2. 단면설계 및 연결부 구조상세

복합소재 모델 바닥판에 대한 선행기초연구를 바탕으로 국내 도로교시방서 기준에 따른 DB24하중에 적합한 복합소재 바닥판 패널 단면을 설계하였다. 설계된 복합소재 바닥판 단면은 종방향 및 횡방향 강성이 우수한 3개의 제형(사다리꼴)을 가지는 중공 단면을 기본 단면형상으로 하며, 상부판, 하부판 및 복부판으로 구성되어 상부하중의 지지 및 전달에 유리한 형태를 가지도록 설계되었다. 또한, 각 구성부재별로 최적화된 적층설계를 수행하였다. 사용성 및 구조 안전성의 해석적 검증을 위하여 설계 바닥판을 적용한 강관형교에 대한 유한요소해석을 실시하여 도로교 시방서의 DB24하중에 대한 바닥판 처짐, 국부응력 및 파괴지수를 검토하였으며, 설계단면 복부판의 좌굴 안전성을 검증하였다^[1]. 그림 2.1에서는 복합소재 바닥판 튜브의 단면형상 및 패널간 연결개념을 보여주고 있다.

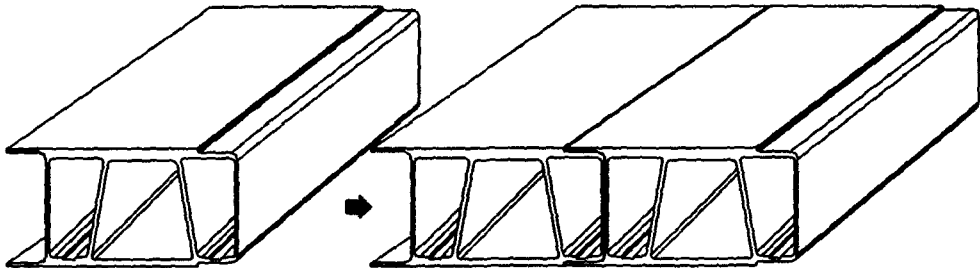


그림 2.1 바닥판 튜브의 단면 형상 및 패널간 연결개념

복합소재 바닥판과 거더 및 복합소재 바닥판과 방호벽의 연결부 구조상세는 거더 또는 교량 부대공과 복합소재 바닥판의 일체화를 도모함과 동시에 설계하중을 충분히 지지할 수 있도록 개발하였다^[3]. 거더-바닥판 연결부는 합성형 연결부에 대한 상세와 비합성형 연결부에 대한 상세를 함께 개발하였으며, 합성형 연결부의 경우 중공 단면의 바닥판 패널에 전단 포켓을 형성하고 전단 연결재를 설치한 후 무수축 몰탈을 충전하여 합성연결부를 시공하여 거더-바닥판의 합성효과를 얻을 수 있다. 방호울타리의 설치를 위한 구조상세에서는 각종 방호울타리와 바닥판과의 연결을 위해 합성형 거더-바닥판 연결방식과 유사한 무수축 몰탈 충전 및 합성 방식을 사용한다. 그림 2.2에서는 복합소재 프리캐스트 바닥판과 강재 거더의 합성 연결부 상세를 보여주고 있으며, 그림 2.3에서는 복합소재 프리캐스트 바닥판과 콘크리트 방호벽의 설치상세를 보여주고 있다.

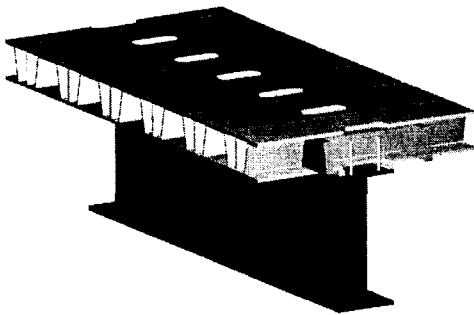


그림 2.2 바닥판-강재 거더 합성 연결부 상세

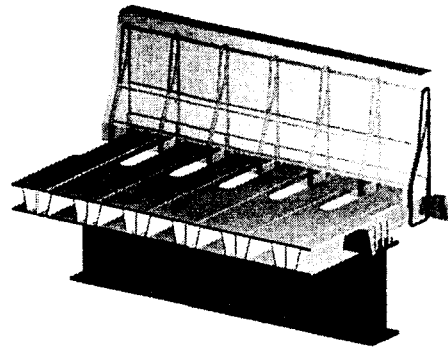


그림 2.3 콘크리트 방호벽의 설치 상세

3. 복합소재 교량 바닥판의 구조성능시험

3.1 휨성능 시험

휨성능 시험은 최종 파괴시까지 하중을 재하하여 파괴하중으로부터 바닥판의 휨 내하력을 평가하고 변위계로부터 측정된 바닥판의 하중-변위관계로부터 바닥판의 휨거동을 확인하였다. 또한 변형을 게이지를 바닥판의 상부판 및 하부판에 부착설치하여 변형율을 측정하였다. 100tonf 용량의 MTS 유압 액츄에이터로 하중재하 하였으며, 하중접지면은 도로교 시방서에 의해 580mm×230mm의 면적으로 100mm 두께의 네오프렌 탄성고무판을 통해 재하하였다. 또한 하중재하는 변위제어방식으로 재하속도를 2mm/min으로 하였다. 지점간 거리는 2,250mm이며, 휨시험체는 폭 1,000mm, 길이 2,970mm의 크기로 3개의 바닥판 튜브를 접착 연결하여 제작하였다. 사진 3.1에서는 복합소재 교량 바닥판의 휨성능 시험 모습을 보여주고 있다.

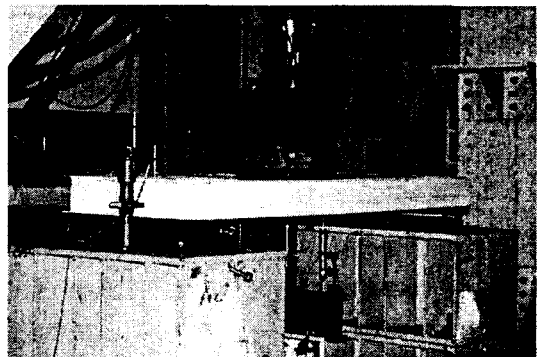


사진 3.1 휨성능시험 전경

시험체의 최종 파괴시까지 하중을 재하하여 시험한 결과, 최대하중 42tonf이며, 이때 최대 수직변위는 35.6mm로 나타났다. 그림 3.1에서 보여주는 바와 같이 하중-변위 관계는 파괴시까지 선형적인 추세를 보인다. 시험체

의 파괴는 국부 편칭파괴에서 발생하여 실제적인 휨내하력의 해석적 검증을 위해 복합소재 바닥판의 휨성능시험과 동일한 조건으로 유한요소해석을 실시하였으며, 시험결과 최대파괴하중인 42tonf에 대한 복합소재 바닥판의 수직변위와 국부응력해석을 통한 Tsai-Wu 파괴해석을 수행하였다.

사용된 해석 프로그램은 복합소재 적층판의 모델링 및 해석이 가능한 범용 유한요소해석 프로그램인 COSMOS/M이며, 재료의 물성치는 복합소재 바닥판의 시편시험결과를 사용하였다. 해석결과, X방향, Y방향 응력 및 전단응력과 이에 대응하는 재료의 강도를 고려한 Tsai-Wu 파괴해석에서 파괴기준이 1.0인 것을 고려할 때 최대응력 발생지점인 하중재하부의 최대 파괴지수가 0.41로써 휨시험시 상부판의 국부파괴가 발생하는 파괴하중인 42tonf에서 해석적으로 복합소재 바닥판은 파괴되지 않고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 순수 휨파괴는 42tonf의 2.44배인 102tonf에서 발생될 것으로 예측되어 훨씬 큰 휨 안전율을 보유하고 있는 것으로 판단되었다. 그림 3.2에서는 Tsai-Wu 파괴해석 결과 파괴지수의 분포를 보여주고 있다.

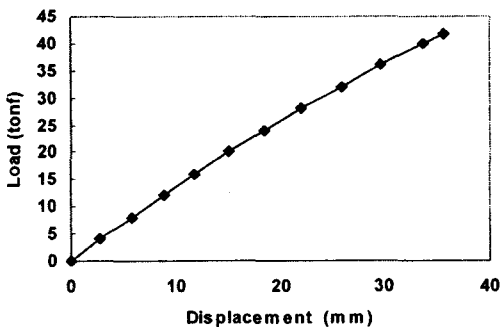


그림 3.1 시험결과 하중-변위 곡선

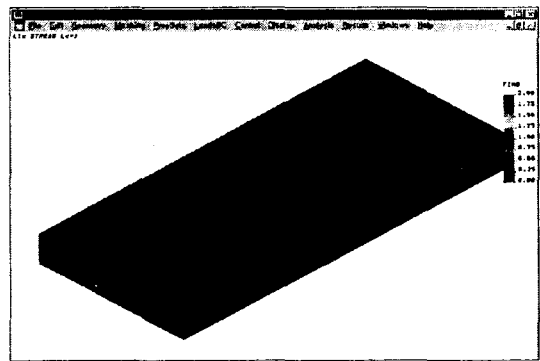


그림 3.2 Tsai-Wu해석 결과 파괴지수의 분포

복합소재 바닥판의 휨시험 결과와 구조해석결과를 이용하여 실제 복합소재 바닥판의 유효하중분포폭을 산정하였고 그에 따라 복합소재 바닥판의 휨내하력 평가를 수행하였다. 복합소재 바닥판의 휨내하력 평가에서는 복합소재 바닥판과 동일한 두께를 가지는 등가이방성 슬래브 모델을 이용하였으며, 5주형 판형교에 DB24 하중재하시 프레임 해석결과와 등가판 모델의 유한요소해석 결과를 비교하여 하중분포폭을 계산하고 시험체의 휨내하력으로부터 실제 바닥판의 휨내하력을 평가하였다.

해석대상 교량의 최대 정모멘트가 발생하는 지점의 연속보 모멘트와 등가판 모멘트의 비인 유효하중분포폭(E)은 1.83m로 휨시험체에서 충격을 포함한 DB24 하중 12.48tonf에 해당되는 재하하중은 상기 하중을 분포폭 1.83m로 나누어 6.82tonf이 된다. 한편, 시험체의 국부 편칭파괴 최대하중은 42tonf이고 모멘트는 하중에 비례 ($M=PL/4$)하므로 휨모멘트에 대한 안전율은 $42/6.82$ 로 6.16이 된다. 그러나 전술한 바와 같이 Tsai-Wu 해석결과를 유추해 볼 때 순수 휨파괴는 102tonf에서 발생될 것으로 예측되므로 이 경우는 휨모멘트에 대한 안전율은 14.96이 되어 설계, 제작된 복합소재 바닥판은 충분한 휨내하력을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.

3.2 압축피로 시험

압축피로시험은 복합소재 바닥판에 대한 반복적인 유효하중의 피로영향을 평가하기 위한 것으로 도로교시방서의 DB24 차륜하중을 재하하였으며, 주형위에 유효하중이 작용할 경우 반복압축응력으로 인한 복합소재 바닥판의

피로성을 검증하였다. 압축피로시험의 시험체는 두 개의 바닥판 튜브를 접착 연결하여 폭 740mm, 길이 900mm의 크기로 제작하였으며, 반복재하하중은 DB24하중에 대해 충격계수(0.3)를 고려하여 12.48tonf으로 하였다. 하중은 도로교 시방서의 윤하중 분포폭 580mm×230mm의 면적에 재하하였으며, 총 200만 회의 반복하중을 5Hz의 재하속도로 가력하였고, 초기, 50만, 100만, 150만, 200만회 반복하중시험후 각각 정적 재하시험을 수행하였다. 변형을 게이지는 재하면 아래와 경계부에 부착설치하여 하중에 대한 변형율을 계측하였다. 또한 바닥판 내부의 국부처짐을 측정하기 위해 내부 중앙에 변위계를 설치하였다. 사진 3.2에서는 복합소재 바닥판의 압축피로시험 모습을 보여주고 있다.

정적하중 재하시험 결과, 바닥판 내부의 변위계로부터 계측된 국부처짐의 경우 충격을 고려한 DB24 윤하중인 12.5tonf을 재하하였을 때 상부판에 초기에는 0.88mm의 국부처짐이 발생하였고 이후 200만회까지 1.12mm에서 1.24mm 정도로 수렴하는 추세를 보이며, 변형을 게이지로부터 계측된 하중반복횟수에 따른 변형율에 있어서도 100만회에서부터는 반복하중의 증가에 따라 그 증가폭이 적어 전반적으로 피로하중에 대해 안정화되는 피로거동을 보였다. 200만회의 반복하중 후에도 시험체에는 외관상 손상이 발견되지 않아 피로하중에 대한 손상이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그림 3.3에서는 반복하중횟수에 따른 하중-변위 선도를 보여주고 있다. 또한, 200만회의 반복하중시험 후 정적재하시험을 수행한 결과 상부판의 탄성계수를 이용하여 게이지별 최대 변형율로부터 발생응력을 구하고 이에 대해 부재의 파괴강도로부터 안전율을 계산한 결과를 <표 3.1>에서 보여주고 있다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 DB24의 공용하중 하에서 200만회의 반복하중 이후 발생응력은 게이지 8에서 가장 크게 발생하며, 이때 파괴강도에 대한 안전율은 13.1로써 복합소재 바닥판 단면은 도로교시방서에서 요구된 200만회의 피로하중에 대하여 충분한 내피로성을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.



사진 3.2 복합소재 바닥판의 피로시험 모습

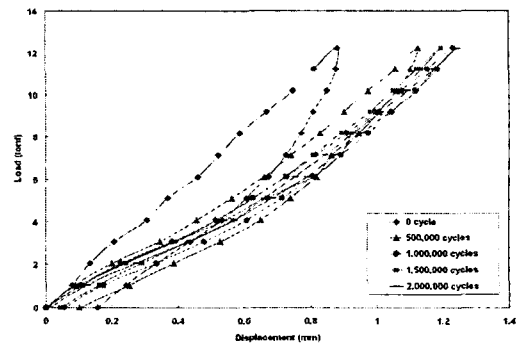


그림 3.3 반복하중횟수에 따른 하중-변위 선도

3.3 휨피로 시험

주형에 합성으로 시공설치된 복합소재 바닥판의 반복적인 윤하중에 대한 내피로성을 평가하기 위하여 도로교시방서의 DB24 차륜하중에 대한 200만회 휨피로시험을 수행하였다. 피로시험의 시험체는 3개의 인발성형된 바닥판 튜브를 접착 연결하여 폭 1,000mm, 길이 2,800mm의 크기로 제작하였다. 그림 3.4에서는 복합소재 바닥판의 휨피로시험의 개요도를 보여주고 있다. 또한, 반복피로하중 하에서 주형-바닥판 연결부에 발생하는 부모멘트에 의한 연결부 안전성을 평가하기 위해 내측의 주형-바닥판 연결부를 합성형으로 제작하였으며, 외측을 클램프로 고정하였다.

<표 3.1> 피로시험 결과, 게이지별 발생응력 및 안전율

Gage 위치	200만 사이클의 변형율($\mu\epsilon$)	재료시험결과 탄성계수 (kgf/cm^2)	발생응력 (kgf/cm^2)	파괴강도 (kgf/cm^2)	안전율 (F.S.)
1	-181	71,992	-13.03	-1,621	124.4
2	-1245	71,941	-89.57	-2,610	29.1
3	-289	71,992	-20.81	-1,621	77.9
4	127	201,904	25.64	2,043	79.7
5	171	201,904	34.53	1,560	45.1
6	589	201,904	118.92	1,560	13.1
7	331	201,904	66.83	1,560	23.3
8	206	201,904	41.59	1,560	37.5
9	307	170,972	52.49	2,043	38.9
10	-170	71,941	-12.23	-1,621	132.5

시험체의 유효중분포폭을 고려한 DB24하중은 7.8 tonf으로, 200만 회의 반복하중을 5Hz의 재하속도로 가력하였다. 초기, 50만, 100만, 150만, 200만회 반복하중시험 후 각각 정적 재하시험을 수행하였다. 사진 3.3에서는 휨피로시험의 전경을 보여주고 있다.

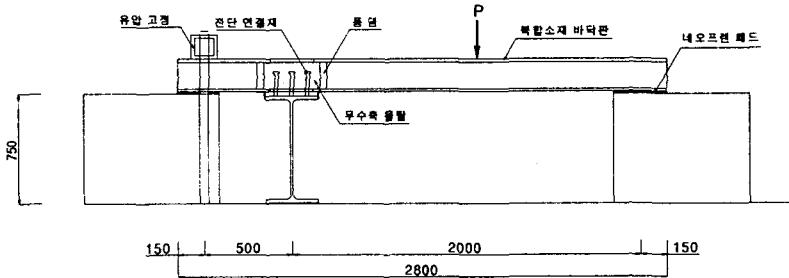


그림 3.4 휨피로시험 개요도

초기, 50만, 100만, 150만, 200만 사이클 피로시험 후 수행한 정적하중 재하시험 결과, 변형율 게이지로부터 계측된 하중 반복횟수에 따른 변형율에 있어서 반복하중의 증가에 따라 그 증가폭이 적어 전반적으로 피로하중증가에 따라 안정화되는 피로거동을 보였다. 또한, 200만 사이클 피로시험시까지 피로로 인한 무수축 모르타르 채움재의 분리, 전단 연결재와 채움재의 분리, 채움재 균열 등 바닥판-거더 연결부 손상이 전혀 발생하지 않으며, 최대 정모멘트부와 부모멘트부의 바닥판 손상 및 패널 연결부 분리 등 바닥판의 피로손상도 발생하지 아니하였다.

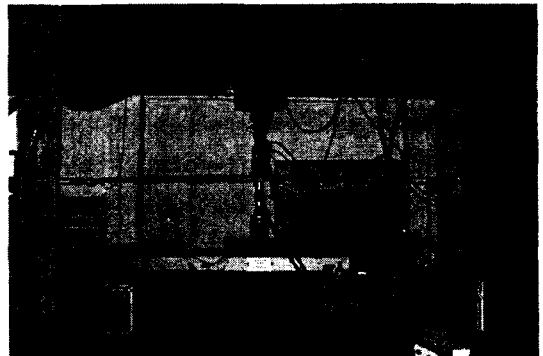


사진 3.3 휨피로시험의 시험전경

계측결과 변형율을 이용하여 <표 3.2>와 <표 3.3> 및

<표 3.3>에서는 탄성계수를 이용하여 각 게이지별 발생응력을 구하고 이에 대해 부재의 파괴강도로부터 안전율을 계산한 결과를 보여주고 있다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 DB24의 공용하중 하에서 200만회의 반복하중 이후 발생응력은 차량진행 직각방향의 바닥판인 경우 최대 152.71kgf/cm²(BG 7)의 응력이 발생하고, 차량진행 방향의 바닥판인 경우에는 최대 96.75kgf/cm²(BG 8)의 응력이 발생하였다. 또한 전단 연결재의 경우에는 최대 423.32kgf/cm²의 응력이 발생하였다. 이때 파괴강도에 대한 안전율은 바닥판의 경우 19.8 및 8.3 이고 전단 연결재의 경우 3.3으로써 복합소재 바닥판 및 전단 연결재는 도로교시방서에서 요구된 200만회의 피로하중에 대하여 충분한 내피로성능을 보유한 것으로 평가된다.

<표 3.2> 바닥판 게이지별 발생응력 및 안전율(차량 진행 직각 방향)

Gage 위치		200만 사이클의 변형율($\mu\epsilon$)	탄성계수 (kg/cm ²)	발생응력 (kg/cm ²)	파괴강도 (kg/cm ²)	안전율 (F.S)
상부판	TG 5	-422	71,992	-30.38	-2,610	85.9
	TG 7	-665	71,992	-47.87	-2,610	54.5
	TG 10	-299	71,992	-21.52	-2,610	121.2
	TG 17	-284	71,992	-20.44	-2,610	127.6
	TG 19	-570	71,992	-41.03	-2,610	63.6
하부판	BG 5	571	212,101	121.10	3,032	25.0
	BG 7	720	212,101	152.71	3,032	19.8
	BG 10	311	212,101	65.96	3,032	45.9
	BG 17	660	212,101	139.98	3,032	21.6
	BG 19	590	212,101	125.13	3,032	24.2

<표 3.3> 바닥판 게이지별 발생응력 및 안전율(차량 진행 방향)

Gage 위치		200만 사이클의 변형율($\mu\epsilon$)	탄성계수 (kg/cm ²)	발생응력 (kg/cm ²)	파괴강도 (kg/cm ²)	안전율 (F.S)
상부판	TG 6	-475	71,941	-34.17	-1,262	36.9
	TG 8	-	71,941	-	-1,262	-
	TG 9	-584	71,941	-42.01	-1,262	30.3
하부판	BG 6	387	146,159	56.56	808	14.2
	BG 8	662	146,159	96.75	808	8.3
	BG 9	354	146,159	51.74	808	15.6

<표 3.4> 전단 연결재 게이지별 발생응력 및 안전율

Gage 위치	200만 사이클의 변형율($\mu\epsilon$)	탄성계수 (kgf/cm ²)	발생응력 (kgf/cm ²)	항복강도 (kgf/cm ²)	안전율 (F.S)
S11	-20.65	2,040,000	-42.12	2,400	57.0
S12	12.20	2,040,000	24.88	2,400	96.5
S21	-142.78	2,040,000	-291.27	2,400	8.2
S22	-92.96	2,040,000	-189.63	2,400	12.7
S31	-91.08	2,040,000	-185.80	2,400	12.9
S32	54.46	2,040,000	111.13	2,400	21.6
S41	32.86	2,040,000	67.03	2,400	35.8
S42	207.51	2,040,000	423.32	2,400	5.7
S51	-22.53	2,040,000	-45.96	2,400	52.2
S52	9.39	2,040,000	19.15	2,400	125.3

4. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 개발된 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 단면설계 및 연결부 구조상세 개발내용을 기술하였고, 휨성능시험, 압축피로시험 및 휨피로시험을 통한 복합소재 교량 바닥판의 성능평가 결과를 기술하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 설계, 제작된 복합소재 교량 바닥판의 휨성능 시험결과, 시험시 국부파괴 기준 휨모멘트에 대한 안전율은 6.16이나 Tsai-Wu 파괴해석을 통한 순수 휨파괴 기준 휨모멘트에 대한 안전율은 14.96으로 충분한 휨내하력을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.
- DB24하중에 대한 압축 및 휨 피로시험결과, 200만회 반복하중 후에 시험체 및 연결부의 어떠한 손상도 발견되지 아니하였으며, 200만회 반복하중 후의 정적 재하시험 결과, 충분한 강도대비 안전율을 보유하고 있어 복합소재 교량 바닥판은 우수한 내피로 성능을 보유하고 있는 것으로 평가되었다.
- 복합소재 교량 바닥판은 경량, 고강도, 고내구성 특성 뿐만 아니라 교통통제 최소화와 신속시공을 가능케하는 여러 가지 이점으로 인해 교량 바닥판 신설 및 성능개선 공사이 앞으로 활발히 보급될 것으로 전망된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 산학연 공동연구개발사업(목적A-01)으로 연구되었으며 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이성우, 신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구, 산학연 공동연구개발사업 최종보고서, 2003
- [2] 이성우, 이선구, 김병석, 박성용, 경량·고내구성 복합소재 바닥판을 이용한 교량 성능개선 및 신설, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002
- [3] 이성우, 김병석, 박신전, 박성용, 김성태, 인발성형 복합소재 교량 바닥판의 개발 및 현장적용, 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 2003
- [4] Sung Woo Lee, Sun Goo Lee, Byung Suk Kim, Sin Zeon Park (2002), "Fabrication and Experiments for Glass Reinforced Composite Bridge Deck", Proceedings of ASSEM'02