

# 인발성형 ‘델타데크’ 복합소재 교량바닥판의 국부처짐과 피로거동 분석

## Local Deflection and Fatigue Characteristics of ‘Delta Deck’ Composite Bridge Deck

이성우\*                      임병주\*\*                      양필승\*\*\*  
Lee, Sung Woo      Im, Byoung Joo      Yang, Pil Seoung

### 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, called Delta Deck, is developed.

In this paper, local deflection and fatigue characteristics of Delta Deck for DB24 truck load are evaluated through analysis and experiments.

### 1. 서 론

현재까지 교량의 바닥판은 주로 철근 콘크리트로 만들어져 왔으나 콘크리트의 열화와 철근의 부식으로 내구년 한이 15~20년 정도로 현격히 감소되고, 열화된 바닥판의 교체비용과 공용시 유지관리비용이 현저히 증대되는 문제점이 있어왔다. 경량·고내구성·고강도 특성의 복합소재 교량 바닥판은 이러한 문제를 근원적으로 해결할 수 있어 교량 바닥판의 새로운 대안으로 떠오르고 있다. 이에 따라 해외에서는 복합소재 바닥판에 대한 연구개발과 적용확대가 적극적으로 진행되고 있으며, 본 연구와 같은 복합소재 바닥판의 피로에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>1)</sup>

본 논문에서는 델타데크 복합소재 교량 바닥판 상부판의 국부 사용성을 해석적으로 평가하기 위해 복합소재 바닥판에 대한 유한요소해석을 실시하여 아스팔트 포장에 발생하는 변형한계 등에 대한 사용성을 평가하였다. 또한, 바닥판의 피로 영향을 평가하기 위해 지점부의 압축피로시험과 휨피로시험을 수행하여 피로특성을 분석하였다. 반복하중은 도로교설계기준에서 제시된 200만회까지 재하하였으며, 압축피로시험에서는 바닥판 자체와 바닥판 연결부에 대한 피로성능을, 휨피로시험에서는 바닥판과 주형연결부에 대한 피로성능을 검증하였다.

### 2. 델타데크 복합소재 교량 바닥판의 특성

시험대상 델타데크 복합소재 교량 바닥판은 국민대학교와 (주)국민씨아이에서 공동으로 개발되었다.<sup>2)</sup> 바닥판 단면은 3셀 중공형태로 상부판, 하부판 및 복부판으로 구성되어 있으며, 합성형 교량의 주형-바닥판 연결을 위해 전단 연결재가 설치되고 콘크리트가 충전될 수 있는 포켓 공간을 확보할 수 있는 형태로 제작되었다. 그림 2.1에서는 델타데크 복합소재 바닥판의 단면 제원을 보여주고 있다. 시험대상 복합소재 교량 바닥판

\* 정희원·국민대학교 건설시스템공학부 교수·공학박사·02-910-4696(E-mail:swlee@kookmin.ac.kr)

\*\* 국민대학교 건설시스템공학부 공학석사·02-910-5056(E-mail:bizuel@hanmail.net)

\*\*\* (주)국민씨아이·공학석사·02-539-3664(E-mail:ehrgod@kookminci.com)

은 고품질 대량생산에 적합한 인발성형(Pultrusion)공정으로 제작되었다. 이 공정은 강화섬유의 공급, 수지함침, 가열성형 및 절단까지 일괄공정으로 이루어지며, 현장설치용 바닥판 패널은 각각의 바닥판 튜브를 연결 접합하여 제작된다.

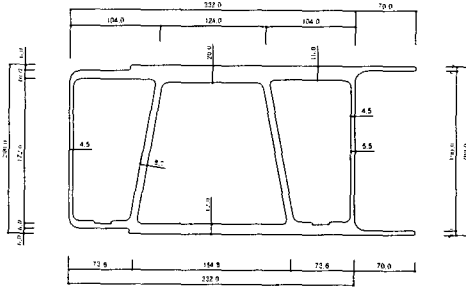


그림 2.1 델타테크 복합소재 바닥판의 단면 제원

### 3. 바닥판의 국부처짐 사용성 검토

델타테크 복합소재 바닥판의 상부판 국부 사용성을 해석적으로 평가하기 위해 복합소재 바닥판에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 포장의 내구성과 관련하여 한국도로공사에서 일본 연락교 교면포장 기준내용을 인용하여 발간된 보고서에 의하면 강바닥판에 대하여 차도부의 텍플레이트의 최소두께는 운하중에 의한 처짐을 경간(세로 리브 복판의 중심 간격)의  $L/300$ 이하가 되도록 규정하고 있다. 이 규정에 따르면 강바닥판의 경간 처짐이  $L/300$ 이하이면 포장의 내구성 저하에 영향을 미치지 않는 것으로 평가하고 있다. 따라서 포장의 내구성 저하에 영향을 주지 않는 복합소재 바닥판의 복부판 사이 국부처짐에 대한 허용기준은 상기 강바닥판의 기준을 원용하여  $L/300$ 을 적용하여  $0.41\text{mm}(124/300)$ 로 하였다. 해석은 폭 996mm(3개의 패널을 연결), 길이 900mm의 모델에 대하여 실시하였다. 국부처짐을 구하기 위해 복합소재 바닥판 상부의 웹과 웹사이가 가장 긴 중앙부 플랜지에 하중을 재하하였으며, 재하하중은 DB-24 하중에 대해 충격계수를 고려하여  $13.44\text{tonf}[9.6\text{tonf} \times 1.4(\text{충격계수})]$ 로 하였다. 여기서 충격계수는 국부변형에 따른 강바닥판의 판 두께 설계시 적용하는 0.4를 사용하였으며, 계산된 하중을 도로교 시방서의 운하중 분포폭 ( $580\text{mm} \times 230\text{mm}$ )의 면적에 재하하였다. 그림 3.1에는 해석 대상 모델링 및 하중 재하모습을 보여주고 있다.

구조해석 결과 복합소재 바닥판 상부 플랜지 중앙에서 최대 처짐은  $0.23\text{mm}$ 로 계산되었다. 그러나 복합소재 바닥판 상부 플랜지의 국부처짐은 근접 복부판의 처짐을 고려해야 하므로 근접웹의 처짐( $0.12\text{mm}$ )을 고려하면 복합소재 바닥판 상부 플랜지 중앙부의 순수 처짐은  $0.11\text{mm}$ 이다. 그림 3.2 및 그림 3.3에는 해석 결과 복합소재 바닥판의 처짐을 보여주고 있다. 구조해석 결과 복합소재 바닥판의 순수 국부처짐  $0.11\text{mm}$ 는 국부처짐 허용기준인  $0.41\text{mm}(L/300=124/300)$ 에 대해 약 3.7의 안전율을 보유하고 있는 것으로 확인되었다. 따라서 복합소재 바닥판은 차량하중이 재하되는 경우 국부처짐에 대해 충분한 안전율을 보유하고 있으며, 아스팔트 포장에 발생하는 응력 및 변형 등에 의한 내구성 저하에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

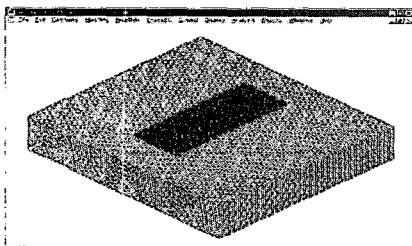


그림 3.1 해석 모델링 및 하중재하

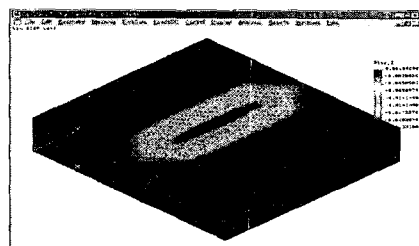


그림 3.2 해석결과에 대한 처짐 등고선

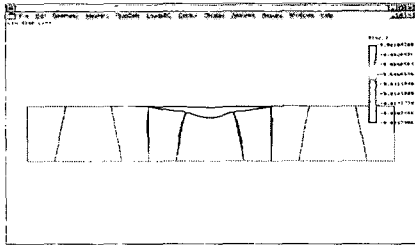


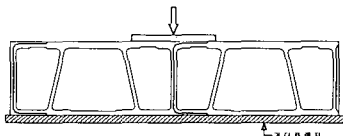
그림 3.3 해석결과 단면의 변형모습

<표 3.1> 복합소재 바닥판의 유한요소해석결과

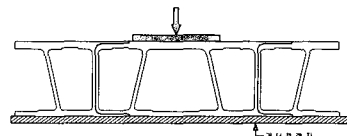
구 분	국부처짐 기준	해석 결과	안전율
상부 플랜지 절대 처짐	L/300 =124/300 =0.41mm	0.23mm	-
복부판 수직처짐		0.12mm	-
상부 플랜지 상대 처짐		0.11mm	3.73

#### 4. 압축피로시험 모델 해석

델타테크 복합소재 바닥판에 대한 거더 지점부에서의 피로거동을 파악하기 위해 압축피로시험을 수행하였다. 피로시험을 위한 운하중 재하위치는 그림 4.1과 같이 두 가지 경우에 대하여 유한요소해석을 수행한 후 해석결과 응력값을 비교하여 결정하였다. 하중경우 1은 접착재로 접합된 연결부의 복부판 상부에 운하중이 재하되는 경우이고, 하중경우 2는 연결부가 없는 포켓 공간위에 재하되는 경우이다. 유한요소해석 후 두 하중경우에 대해서 응력이 크게 발생하는 운하중 재하위치에서의 응력값을 비교하였다. 그림 4.2는 각 경우의 유한요소해석 모델을 보여주고 있다.

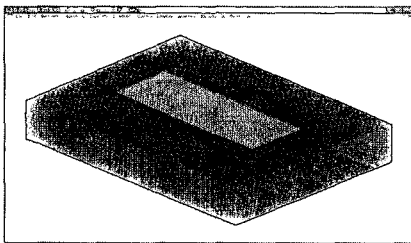


하중경우 1

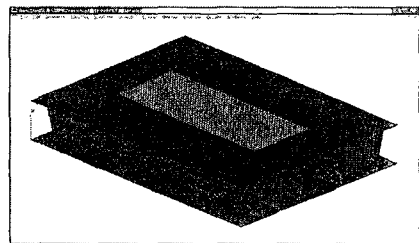


하중경우 2

그림 4.1 하중재하 모델



하중경우 1



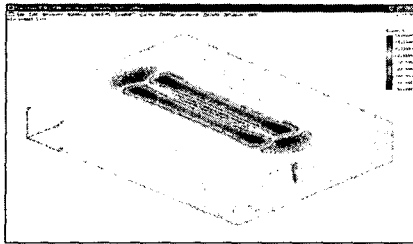
하중경우 2

그림 4.2 유한요소해석 모델

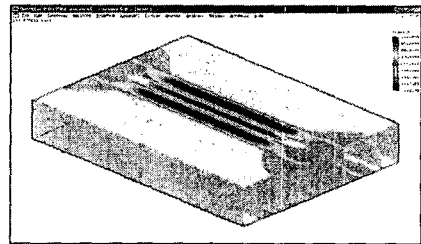
<표 4.1>에는 각 경우의 운하중 재하위치에서 발생한 응력값과 파괴강도 대비 발생응력비율을 보여주고 있다. 표에서 위치는 그림 5.1의 각 번호에 해당하는 변형을 게이지 부착 위치이다. <표 4.1>에서 알 수 있듯이 대부분의 위치에서 하중경우 1이 더 큰 응력값을 보이고 있다. 따라서, 하중경우 1이 더 지배적인 운하중 재하위치로 판단되었다. 또한, 하중경우 1로 재하할 경우 바닥판간 접착연결부에 대한 피로성능까지도 동시에 파악할 수 있어서 피로시험시 하중재하위치를 하중경우 1과 같이 설정하였다. 그림 4.3에서 그림 4.4에는 각 하중경우에 대한 해석결과인 방향별 응력 분포를 보여주고 있으며, 그림 4.5에는 각 하중경우에 대한 해석결과인 처짐도를 보여주고 있다.

<표 4.1> 각 경우의 해석결과 발생응력 및 파괴강도 대비 발생응력비율

위 치	파괴강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	하중경우 1		하중경우 2	
		발생응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	파괴강도/ 발생응력	발생응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	파괴강도/ 발생응력
1	-2,610	-34.61	75.4	-30.60	85.3
2	-1,621	-148.10	11.0	-128.8	12.6
3	-2,610	-33.48	77.9	-30.61	85.3
4	-1,621	-118.90	13.6	-128.9	12.6

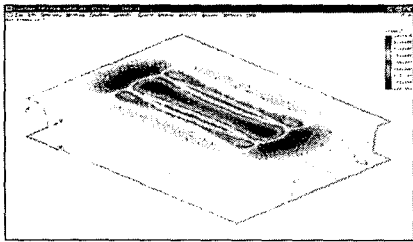


교축직각방향(X 방향)

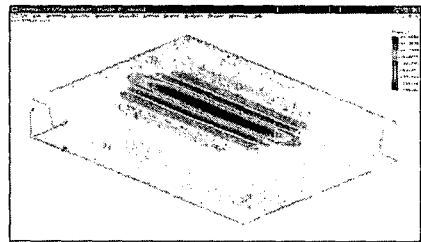


교축방향(Y 방향)

그림 4.3 하중경우 1의 해석결과 응력분포

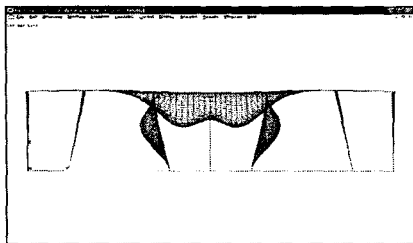


교축직각방향(X 방향)

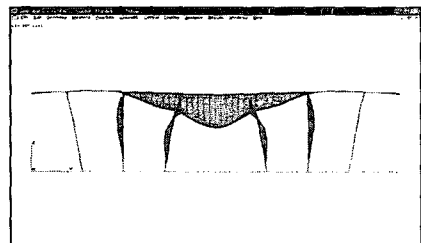


교축방향(Y 방향)

그림 4.4 하중경우 2의 해석결과 응력분포



하중경우 1의 처짐도



하중경우 2의 처짐도

그림 4.5 각 하중경우의 처짐도

## 5. 압축피로시험

압축피로시험시 반복재하하중의 크기는 도로교설계기준의 DB24 후륜하중인 9.6 tonf에 충격계수 1.3을 곱

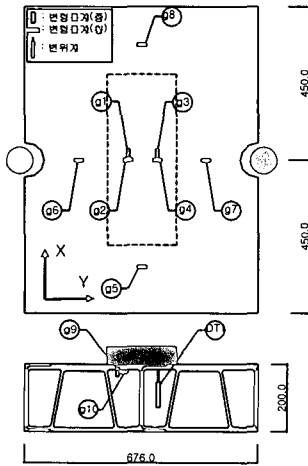


그림 5.1 시험체의 변형률 게이지 부착위치

한 12.48 tonf로 하였다. 바닥판 시험체에 대해 초기, 50만회, 100만회, 150만회, 200만회의 반복하중을 재하한 후 각각 정적 재하시험을 수행하였다. 시험체는 주형을 모사하기 위해 프레임에 클램프로 강결시켰고, MTS 장비 특성상 하부 액츄에이터에서 반복하중이 재하되므로 바닥판 시험체를 뒤집어서 설치하였다. 그림 5.1에는 시험체의 채원과 시험체에 부착한 변형률 게이지의 위치를 보여주고 있다.

그림 5.3에는 접착연결부가 없는 상부플랜지에 부착한 게이지 3번 위치에서 각 반복하중재하 후 정적재하시험을 실시한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 4.1 tonf의 하중재하까지는 선형변형을 보이는 반면, 그 이후 하중이 증가해도 더 이상 변형이 일어나지 않아 안정화되는 거동을 보였다. 그림 5.4에는 접착연결부의 복부판 바로 위측인 게이지 5번 위치에서 측정한 시험결과를 보여주고 있다. 이 위치는 복부판이 지지점이 되므로 예상한 바와 같이 하중에 대한 변형율은 거의 없는 것으로 나타났다. 피로거동은 다른 위치와 마찬가지로 초기반복하중에 의해서는 변형율의 증가량이 큰

반면 이후 반복하중에 대해서는 그 증가량이 적어 안정화되는 추세를 보였다. 그림 5.5에는 접착연결부가 없는 포켓부의 상부플랜지에 부착한 게이지 6번 위치에서 각 반복하중재하 후 정적재하시험을 실시한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 200만회 반복하중재하 후에도 변형율의 변화가 크게 발생하지 않았으며, 50만회 이후부터는 안정화된 피로거동을 보이고 있다. 이로부터 초기반복하중(50만회 이하)에서 복합소재 구조체의 강성변화가 일어난 후 이후 반복하중에 대해서는 그 변화가 적어 안정화되는 추세를 보이고 있는 것을 확인하였다. 그림 5.6에는 상부판의 하부에 부착된 게이지 10의 결과를 보여주고 있다. 이 역시 반복재하하중이 증가하여도 변형율의 변화폭이 적어 안정화되는 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 그 이외의 위치에 대한 분석결과는 참고문헌 3을 참조바란다. 200만회의 반복하중 재하 후 시험체의 손상여부를 관찰한 결과, 연결부가 없는 바닥판 자체에서는 상부플랜지나 하부플랜지, 복부판에서의 균열이나 각 적층판에서의 층간 분리, 섬유와 수지 사이의 파괴 등의 손상이 발견되지 않았다. 또한 접착연결부에서도 에폭시수지로 접착된 상부플랜지, 하부플랜지와 복부 부분에서 외관상 손상이 발견되지 않아 피로하중에 대하여 어떠한 외적 손상도 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 200만회의 반복하중 재하 후 정적 재하시험을 수행한 후 재료시험 결과에서 구한 상부판의 탄성계수를 이용하여 게이지별 최대 변형율로부터 발생응력을 구한 결과, DB24의 공용하중하에서 200만회의 반복하중 이후 발생응력은 게이지 6에서 가장 크게 발생하며, 이때 파괴강도대비 발생응력비율은 13.1로써 200만회의 반복하중 재하후에도 충분한 구조적 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단되었다.

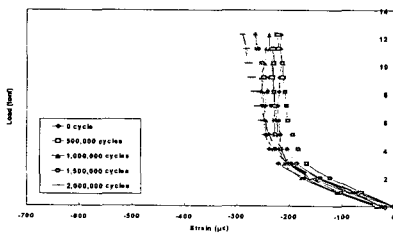


그림 5.3 하중-변형률 곡선 (Gage3)

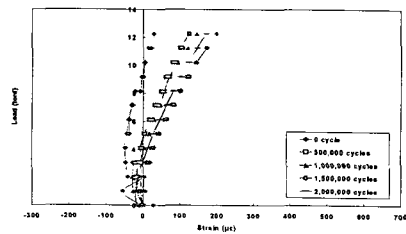


그림 5.4 하중-변형률 곡선 (Gage5)

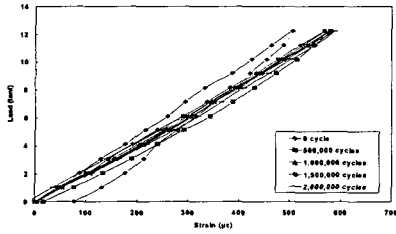


그림 5.5 하중-변형률 곡선 (Gage6)

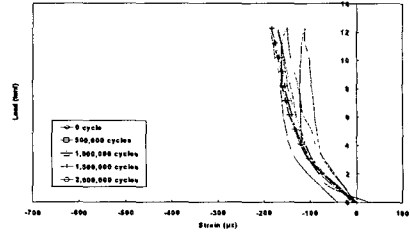


그림 5.6 하중-변형률 곡선 (Gage10)

## 6. 휨피로시험

지점부의 압축피로시험에 이어 주형에 합성으로 시공된 복합소재 교량 바닥판의 반복 운하중에 대한 내피로 성능을 평가하기 위하여 피로시험을 수행하였다. 폭 1m인 휨시험체에 재하할 하중은 충격을 포함한 DB24 하중 12.48 tonf에 해당하는 하중을 운하중분포폭 1.6으로 나눈 7.8 tonf으로 하였다.<sup>2)</sup> 초기, 50만회, 100만회, 150만회, 200만회의 반복하중 재하 후 정적 재하시험을 수행하였으며, 주형-바닥판 합성 연결부는 거더와의 합성구조를 위해 바닥판 패널 내부에 전단 연결재를 용접 설치하고, 무수축 모르타르를 포켓에 충전하였다. 그림 6.1에서는 휨피로시험의 개요도를 보여주고 있으며, 그림 6.2에서 그림 6.3에는 상부판과 하부판에 부착한 게이지의 위치도를 보여주고 있다.

그림 6.4에는 반복하중 재하 후 정적 재하시험시 경간 중앙에서 측정한 하중-변위 곡선(DT 1)을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 압축피로시험 결과와 마찬가지로 50만회 반복하중까지는 강성변화가 있었으나 그 이후 반복하중에서는 강성의 변화가 적어 안정화되는 추세를 보였다. 그림 6.5에서는 경간 중앙의 위치에서 하부플랜지에 부착된 교축직각방향 게이지(BG 7)의 하중-변형률 곡선을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 압축피로시험과는 달리 재하하중의 크기가 상대적으로 적어 하중반복횟수에 따라 측정한 변형율은 반복하중횟수의 증가에도 불구하고 그 변화폭이 적어 매우 안정화되는 피로 거동을 보였다. 그림 6.6에서 그림 6.7에는 상부판의 하중재하부에서 측정한 교축직각방향 게이지 TG 7과 TG 10의 하중-변형률 곡선을 보여주고 있다. 이 역시 그림 6.5와 마찬가지로 변형률의 변화폭이 적어 매우 안정화되는 피로 거동을 보였다. 200만회 반복하중시험 후 외관 관찰 결과, 최대 정모멘트부(경간중앙)와 부모멘트부(지점부)에서 복합소재 바닥판의 상·하부플랜지에 대한 손상이나 접착연결부의 분리 등의 손상이 발견되지 않았으며, 거더합성부에서 무수축 모르타르 채움재의 분리, 전단 연결재와 채움재의 분리, 채움재 균열 등과 같은 어떠한 손상도 발견되지 않았음을 확인할 수 있었다.

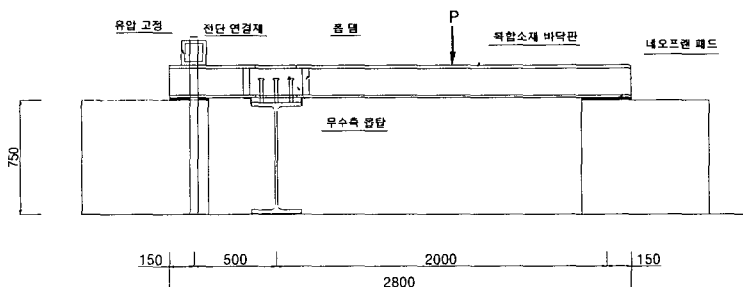


그림 6.1 휨피로시험 개요도

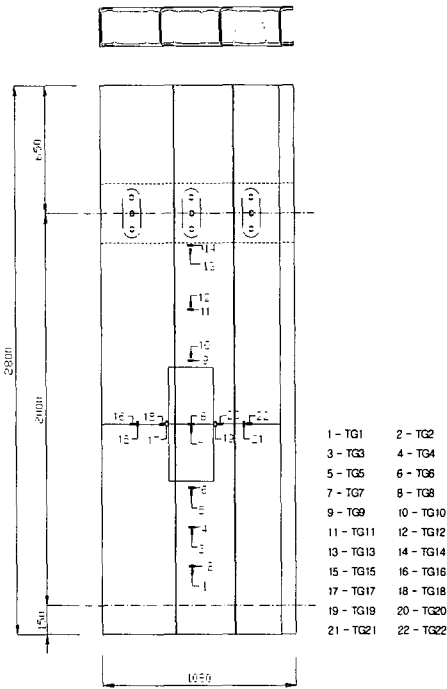


그림 6.2 상부판 게이지 부착위치도

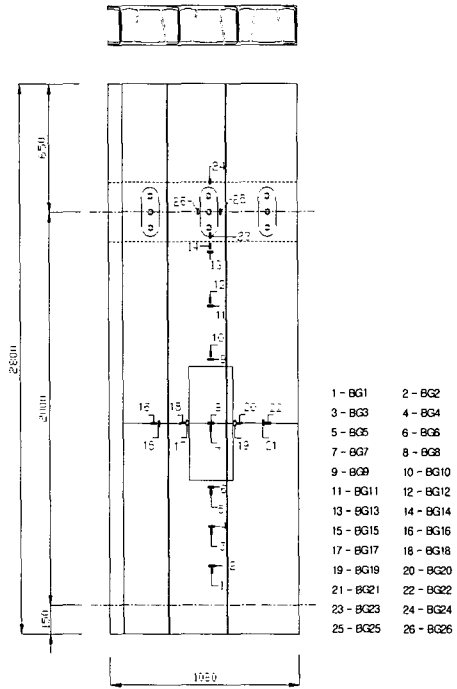


그림 6.3 하부판 게이지 부착위치도

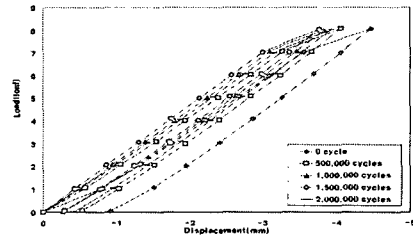


그림 6.4 하중-변위 곡선(DT 1-경간 중앙 변위계)

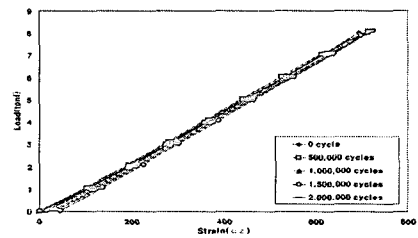


그림 6.5 하중-변형률 곡선(BG 7-경간 중앙 하부 플랜지의 교축직각방향 게이지)

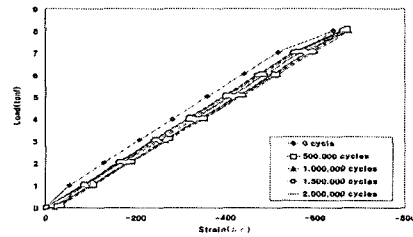


그림 6.6 하중-변형률 곡선(TG 7-경간 중앙 상부 플랜지의 교축직각방향 게이지)

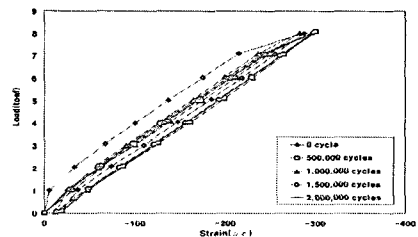


그림 6.7 하중-변형률 곡선(TG 10-경간 중앙 하부 플랜지의 교축직각방향 게이지)

## 7. 결론

본 논문에서는 인발성형공정으로 제작된 델타데크 복합소재 교량 바닥판에 대한 상부판의 국부 사용성에 대해 해석적으로 검증하고, 바닥판의 피로 영향을 평가하기 위해 압축피로시험 및 휨피로시험을 수행하여 피로

특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 국부변형에 대한 해석결과, 복합소재 바닥판은 차량하중이 재하되는 경우 국부처짐에 대해 충분한 안전율을 보유하고 있으며, 아스팔트 포장에 발생하는 응력 및 변형 등에 의한 내구성 저하에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

2. 지점부 압축피로시험 결과, 50만회에서 100만회 반복하중 재하시까지 대부분의 강성변화가 발생하고, 그 이후 200만회까지는 반복하중의 증가에 따른 변화폭이 적어 압축피로에 대해 안정화되는 추세를 보였다. 또한, 200만회 반복하중재하 후 외관 관찰 결과 균열, 층간 분리, 계면 파괴 등 어떠한 손상도 발견되지 않았음을 확인할 수 있었다.

3. 거더합성 시험체에 대한 휨피로시험 결과, 압축피로시험과는 달리 재하하중의 크기가 상대적으로 적어 반복하중의 증가에 따른 변화폭이 적어 휨피로에 대해서는 매우 안정화되는 피로 거동을 보였다.

4. 200만회 반복하중재하 후 외관 관찰 결과, 복합소재 바닥판 자체, 접착연결부와 거더합성부 등에 어떠한 손상도 발견되지 않아 200만회 피로하중에 대해 문제점이 없음을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 산·학·연 공동연구개발사업(목적A-01)의 지원으로 수행되었으며, 건설교통부의 연구지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Eckel, D. A (1999), "Static and Fatigue Response of Composite Decks Subjected to Wheel Loads", University of Delaware Center for Composite Materials Technical Report CCM 99-12.
2. 이성우외, "신속시공·경량·고내구성 복합소재 교량 바닥판 산업화 연구", 건설교통부 연구보고서, 2003
3. 임병주, "복합소재 교량 바닥판의 피로특성 분석", 국민대학교 건설시스템공학부 석사논문, 2004
4. 이성우, 박신전, 김병석, 정규상, "복합소재 교량 바닥판 '텔타테크'의 구조적 특성과 현장적용", 한국전산구조공학회 봄 학술발표회 논문집, 2004