윤하중을 받는 강바닥판 교면포장의 변형특성에 대한 수치해석적 연구

A Numerical Study for Deformation Characteristics of the Wearing Surface on a Steel Plate Deck under Wheel Loads

김 해 나 래* 옥 창 권** 김 문 영* Kim, Hae-Na-Rae Ock, Chang-Kwon Kim, Moon-Young

요 지

강바닥판 교량의 교면포장은 차량의 윤하중을 상판에 고르게 분포시켜 교량 상판을 보호하는 역할을 한다. 하지만 교량 의 장대화가 가속화됨에 따라 포장체와 강바닥판의 두께가 얇아지고 이 때문에 교면포장의 횡방향 균열이 빈번하게 발생 한다. 본 연구에서는 강바닥판 교면포장의 파손원인 규명과 저감 방안을 모색하기 위해 윤하중을 받는 강박스형 거더를 가 진 강바닥판의 유한요소해석을 수행하였다. 다양한 구조적 매개변수 변화에 따른 교면포장 상면 변형도를 조사한 결과 해 석결과에서 공통적으로 웹 상단에서 큰 인장변형이 발생하였고, 이것이 교면포장의 구조적인 파손의 주요 원인이 되는 것 을 알 수 있다.

핵심용어: 강바닥판, 교면포장, 방수층, 유한요소해석, 탄성비

Abstract

Longitudinal cracks due to traffic truck loadings that are caused by local deformations of steel orthotropic bridge decks are sometimes observed in the wearing surface. So, underlying causes of the longitudinal pavement crack induced by structural behaviors of steel decks are investigated in this study. For this purpose, The rational finite element model of the steel deck and the pavement having the box girder is developed and a parametric study is performed by varying thickness or elastic modulus ratios of both the steel deck plate and the pavement. As a result, a large tensile strain above the webs of the u-rib and the box girder, which becomes the main cause of the cracks of the pavement, is detected from variation of the normal strain component of the wearing surface in the transverse direction.

Keywords: steel plate deck, wearing surface, protection layer, finite element analysis, elastic modulus ratio

1. 서 론

최초의 강바닥판 교량인 Kurpfalz교가 1950년 독일 Mannheim에 건설된 이래로 용접기술의 발달과 고도화된 구 조해석 기술의 발전에 따라 강바닥판의 연구도 크게 발전해 왔 다. 최근에는 장대교량의 필요성이 급증하면서 사장교, 현수교 등 장대교량의 형식에 경량구조이면서도 휨과 비틀림에 대한 저항이 크며 하중분배 효과가 좋고 바닥판 자체가 높은 극한강 도를 가진 강바닥판을 주요 바닥판 형식으로 채택하는 사례가

늘고 있으며 국내외에서 강바닥판 교량의 연구가 활발히 이 루어지고 있다(공병승 등, 2004; Luo 등, 2010; Zhang, 2011).

강바닥판 교량의 교면 포장체는 차량의 주행성을 양호하게 하고. 차량의 윤하중을 상판에 고르게 분포시켜 교량 상판에 서 발생될 수 있는 과도한 응력집중을 저감시키고 교량 상판 을 보호하는 역할을 한다. 반면에 강도나 변형에 대한 저항 성이 강재에 비하여 상대적으로 아주 낮은 교면포장은 중차 량의 통행 시 웹(web) 직상이나 교축방향 리브 직상에서 횡

E-mail: kmye@skku.ac.kr

[†] 책임저자, 종신회원·성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 Tel: 031-290-7514 ; Fax:031-290-7548

^{*} 정회원·성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정

^{**} 한국도로공사 도로교통연구원 포장연구팀 과장

[•]이 논문에 대한 토론을 2011년 10월 30일까지 본 학회에 보내주 시면 2011년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.



그림 1 강바닥판 교면포장의 종방향 균열

방향으로 직접적인 균열이 빈번하게 발생하는 것이 보고되고 있다(그림 1). 뿐만 아니라 루팅(rutting), 강바닥판과 포장 사이의 접착력 유실 등의 문제들로 인해 다른 재질 바닥판의 교면포장에 비해서 내구연한이 상당히 작다. 또한 최근 교통 량증가, 윤하중 크기의 증가로 인해 교면포장의 파손이 더심각해지고 있다(Medani 등, 2009).

현재 국내 교면포장의 설계 및 시공은 대부분 과거의 경험을 바탕으로 이루어지고 있어 교면포장의 공용성 개선을 위한 연구가 시급히 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 강바닥판 교량의 설계 시 강바닥판은 구조기술자, 포장은 재료기술자가 나누어 설계하여 강바닥판과 포장을 각각 독립적인부분으로 고려해 왔다. 하지만 두 기술의 공유가 제대로 이루어지지 않았고 포장의 잘못된 설계는 강바닥판의 큰 응력을, 강바닥판의 잘못된 설계는 강바닥판의 큰 응력을 강바닥판의 잘못된 설계는 고면포장의 파손을 야기했다. 이러한 이유로 최근 강바닥판과 포장을 단일구조시스템으로 해석하는 시도가 이루어지고 있다(Tang. 2010).

본 연구에서는 강바닥판 교면포장의 파손원인 규명과 저감 방안을 모색하기 위한 기초적인 자료를 제공하고자 한다. 이 를 위하여 윤하중을 받는 강박스형 거더를 가진 강바닥판 및 교면포장의 유한요소해석을 수행하고, 다양한 구조적 매개변 수 변화에 따른 교면포장 상면의 변형도 특성을 조사, 분석 한다.

2. 수치해석 모델링

2.1 유한요소해석 모델링

본 연구에서는 폐단면 종리브를 갖는 강상자형 거더교의 강바닥판 교면포장을 대상으로 선정한다. 그림 2와 표 1은 각각 강상자형 강바닥판 교량의 정밀유한요소해석 모델과 모델 제원을 나타낸다. 아울러 종리브 중심간격, 박스거더 웹과종리브 중심간 거리는 각각 640mm, 330mm이다.

1개 윤하중의 영향을 조사하기 때문에 교축방향으로 2.5m 간격으로 4개의 가로보 구간을 고려하며 유한요소해석을 통하여 그림 3과 같은 세 가지 유형의 가로보 제작방식에 따른 포장의 변형특성을 조사한다.

강바닥판과 포장의 변형에 대한 정밀한 해석을 위해 범용 프로그램, ABAQUS 6.8.1을 사용하였다. 이 때 강바닥판과

표 1 유한요소해석 모델 제원

부 재			치수(mm)	두께 (mm)	포아송비	
방수층			8540×2500	1	0.4	
폐단면 종리브			320×240	8		
	중앙부	웹	1940×500	10		
가로 보		플렌지	1940×300	12		
	날개부	웹	1360×300	14	0.3	
		플렌지	1360×500	14	0.5	
박스 거더		웹	1800×7500	10		
		플렌지	2180×7500	14		
		다이아프램	1940×1800	12		

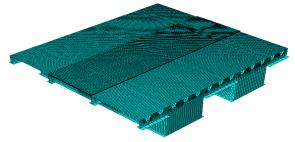


그림 2 강상자형 거더교의 유한요소해석 모델링



(a) 스캘럽과 벌크헤드를 무시한 가로보



(b) 스캘럽만 고려한 가로보



(c) 스캘럽과 벌크헤드를 모두 고려한 가로보 그림 3 스캘럽(scallop)과 벌크헤드(bulk head) 유무에 따른 가로보 모델링 유형

방수층은 사각형 쉘요소이면서 한 요소당 절점이 8개인 S8R 요소로 모델링하고, 포장체는 육면체 고체요소이면서 한 요 소당 절점이 20개인 CD20R요소로 모델링한다. 또한 강바 닥판, 포장, 방수층의 경계면는 완전 접착상태로 가정하여 해 석을 수행한다.

포장체와 방수층은 윤하중이 직접 재하되는 교직방향 중앙부에만 배치되었으며 측면부보다 메쉬를 5배 더 조밀하게 나눈다. 강바닥판 교량 모델링의 총 요소개수는 포장의 두께가 20 mm, 40mm, 50mm, 60mm, 80mm일 때 각각 약 90,000개, 103,000개, 116,000개, 116,000개, 129,000개이다.

2.2 적용 윤하중

윤하중을 직접적으로 받는 강바닥판의 경우 하중재하면적 및 접지압이 횡방향 거동에 미치는 영향은 매우 크다. 본 연구에서는 한국도로공사의 연구보고서(2005)에 따라 표 2와같은 240kN 트럭하중 중에서 가장 큰 값으로 측정된 4축하중 제원을 1축하중으로 환산하여 사용한다. 또한 타이어 접지폭은 230mm이므로 도로교설계기준(2008)의 차륜접지면적(12500×P)/9mm²을 계산하면 접지면은 230×90mm이고 접지압은 0.71963MPa인 1축 하중을 사용한다.

표 2 240kN 덤프트럭 제원 및 축하중

구분	전장	전폭	1축	2축	3축	4축
240kN	8825	2495	100.55	108.58	114.56	116.52
Z4UKIN	(mm)	(mm)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)

임동준(2010)은 강바닥판 교면포장 종방향 균열제어를 위한 수치해석적 연구에서 9가지 경우의 윤하중위치를 조사하여 그림 4의 3 가지 재하위치가 상대적으로 큰 교직방향 곡률을 유발시킨다는 분석결과를 제시하였고, 강바닥판에 미치는 윤하중 효과는 폐단면 종리브 때문에 교축직각 방향으로 국부적인 영역에 국한된다는 결론을 얻었다.

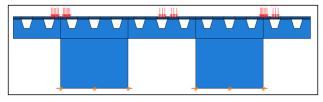


그림 4 하중재하 위치

따라서 이 연구에서는 임동준(2010)의 연구성과를 반영하고 해석결과를 효과적으로 나타내기 위하여, 그림 4와 같이 강박스형 거더를 가진 강바닥판에 가장 크게 영향을 주는 세위치 즉, 강상자 웹 직상, 종리브 웹(web) 직상, 그리고 강상자 바로 옆 종리브 웹 직상에 각각 1축 윤하중을 재하하여 유한요소해석을 수행한다.

2.3 매개변수 해석방법

본 해석을 위하여 스캘럽과 벌크헤드의 유무조건, 강바닥판의 두께, 포장두께, 그리고 강바닥판과 포장체의 탄성비를 매개변수로 선정하였다. 이들 매개변수의 표준적인 크기는 표 3, 매개변수의 변화되는 크기는 표 4에 각각 나타내었다. 단, 표 4의 각 Case에서 변화하는 매개변수를 제외한 나머지 매개변수는 표 3의 표준크기를 적용한다.

강바닥판 용접상세의 피로응력을 저감시키려는 목적으로

표 3 매개변수들의 표준크기

종류	표준크기	
스캘럽, 벌크헤드의 유무조건	스캘럽, 벌크헤드가 없는 경우	
강바닥판 두께, 프아송비	14mm, 0.3	
포장체 두께, 프아송비	50mm, 0.35	
탄성비(n)의 변화	100	
방수층 두께 및 탄성계수	1mm, 10MPa	

스캘럽 및 벌크헤드에 대한 많은 연구가 이루어졌다(공병승, 2004: 신재철, 2006: 선창원 등, 2008). 이 연구에서는 포장균열과 관련하여 스캘럽 및 벌크헤드의 유무에 따른 포 장변형을 조사한다. 또한 탄성비 변화는 표준크기를 기준으로 동절기, 하절기의 영향을 반영한다.

3. 매개변수 해석결과 및 분석

이 장에서는 2.3 절에서 언급한 바와 같이 4가지 Case에 대한 해석결과를 제시한다. 그림 4의 세 가지 윤하중을 가로 보 사이에 재하하고, 해석결과를 효과적으로 분석하기 위하여 재하위치에서 교축직각방향으로 포장체 상면의 교축방향 변형도, 교축직각방향 변형도, 그리고 중력방향 변형도의 변화를 각각 도시한다.

표 4 매개변수들의 변동 크기

종류	변화치				
	유형 A(스캘럽과 벌크헤드가 없는 경우)				
Case 1	유형 B(스캘럽만 고려한 경우)				
	유형 C(스캘럽, 벌크헤드를 고려한 경우)				
		12mm			
Case 2	강바닥판 두께	14mm			
		16mm			
		20mm			
Case 3	포장 두께	40mm			
Case 5		60mm			
		80mm			
		10			
Case 4	탄성비(n)	100			
Case 4	인 8 비(II <i>)</i>	500			
		1000			

3.1 Case 1

그림 5는 스켈럽과 벌크헤드가 없는 경우(유형 A), 피로 응력 저감을 위하여 스켈럽만 설치한 경우(유형 B), 그리고 스켈럽과 벌크헤드를 모두 설치한 경우(유형 C)의 해석결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 스켈럽과 벌크헤드의설치 유무에 따른 포장상면의 변형도의 변화는 관찰되지 않았다. 따라서 이들의 영향은 포장체의 변형거동에 그다지 영

향을 주지 않는 것으로 판단된다.

그림 5(a)의 교축방향 변형도는 가로보와 가로보 사이에 윤하중이 작용하기 때문에 전체적으로 압축을 받으며, 교축 방향으로 거더의 휨강성이 종리브 강성보다 매우 크기 때문에 거더 웹위치에서는 크기가 작고 종리브의 양쪽 웹 사이에서 큰 압축변형이 발생함을 알 수 있다.

또한 윤하중 중심이 거더 웹에 대칭으로 작용하는 경우를 제외하면 그림 5(b)의 교직방향 변형도는 웹 직상 교면포장이 위로 볼록해지는 곡률변화로 인하여 거더 웹과 종리브 웹위치에서 인장이 발생하고, 박스 웹과 폐리브 웹사이 혹은 종리브 웹 사이에서 압축을 받는 것을 알 수 있다. 특히 거더 또는 종리브 웹 직상에 발생하는 큰 인장변형은 포장체의 종방향 균열발생 시키는 요인으로 작용하므로 보다 세심한 분석이 요구된다.

그리고 그림 5(c)의 중력방향 변형도는 교직방향 변형도 와는 반대로 웹에서 압축을 받고 이외의 위치에서 인장을 받는다. 전체적으로 변형도의 크기가 교직방향에 비해서 작은 것을 확인할 수 있다.

3.2 Case 2와 Case 3

그림 6은 강바닥판 두께를 변화시키는 Case 2의 경우로 국내 도로교설계기준에서 강바닥판 최소 두께인 14mm를 기준으로 고정하중 경감을 위해 고려할 수 있는 두께12mm와 상대적으로 두꺼운 16mm일 때 강바닥판 교면포장의 변형도 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 강바닥판의 두께가 두꺼울수록 교면포장의 변형도는 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

한편 그림 7은 포장체 두께 변화에 따른 Case 3의 경우로 표준 교면포장 두께 50mm를 중심으로 더 얇거나 더 두 꺼울 경우에 대한 교면포장 상면의 변형도를 측정한 해석결과를 보여준다. 교면포장 두께에 따른 변형도 해석결과는 강바닥판 두께에 따른 변형도의 해석결과와 마찬가지로 교면포장 두께가 두꺼울수록 교면포장의 변형도가 작아지는 것을 알 수 있다.

3.3 Case 4

그림 8은 겨울철과 같이 온도가 낮을 때 포장체의 탄성계수가 커지는 것을 고려한 탄성비 10을 적용한 경우, 보통 콘크리트 포장의 탄성비인 100을 적용한 경우, 그리고 여름철과 같이 온도가 높을 때 포장체의 탄성계수가 작아지는 현상을 고려하여 탄성비 500, 1000을 적용한 경우의 교면포장

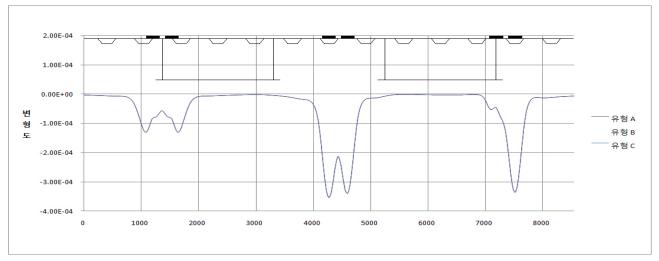
상면의 변형도를 비교한 해석결과를 보여준다. 여기서, 탄성비는 강바닥판과 교면포장 사이의 탄성계수 차이를 비율로 표현한 수치로서 강바닥판 탄성계수에 교면포장 탄성계수를 나누어 준 것이다. 그림 8의 해석결과에 따르면 탄성비는 다른 매개변수의 변화에 비하여 교면포장 변형에 상당히 민감하게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

탄성비가 10과 100일 경우에 그림 8(a)의 교축방향 변형 도는 전체적으로 압축을 받는 반면에 하절기의 탄성비에 대응하는 500, 1000인 경우는 상자형 거더의 웹 직상에서 인장 변형도가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 한편 그림 8(b)의 교직방향 변형도는 교축방향 변형도와는 달리 모든 경우에 대해서 탄성비가 커짐에 따라 비례적으로 변형도가 커지는 안정적인 형상을 보였다. 마지막으로 그림 8(c)의 중력방향 변형도의 경우는 탄성비가 10과 100일 경우보다 탄성비가 500, 1000일 때 교면포장 상면의 압축변형도가 5배에서 8배이상으로 급증하는 경향을 보인다.

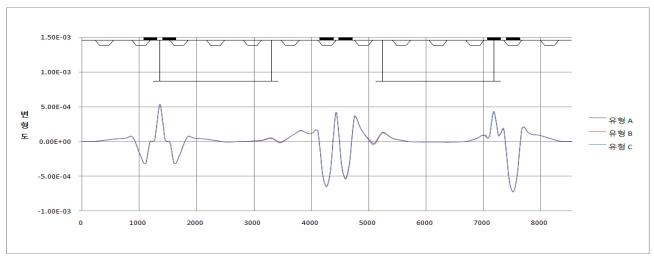
4. 결 론

본 연구에서는 폐단면 리브를 가진 강상자형 거더에 대하여 스캘럽과 벌크헤드의 유무 혹은 강바닥판 두께, 포장의 두께, 그리고 탄성비의 변화와 같은 매개변수 변화에 따른 유한요소해석을 통하여 강바닥판 포장체 상면의 변형도 분석결과를 제시하다.

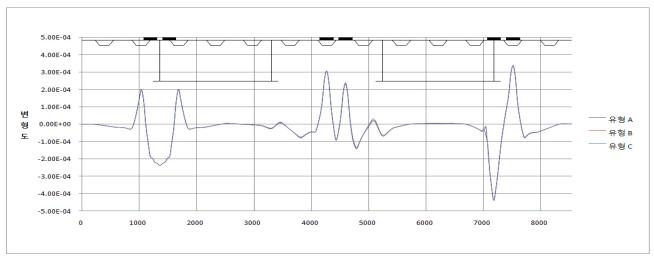
- ① 해석결과에 따르면 종리브와 가로보의 용접부의 피로균 열 저감을 위한 스캘럽과 폐단면 종리브의 뒤틀림을 억 제하기 위한 벌크헤드는 강바닥판 용접부의 피로응력의 경우와는 달리 강바닥판 교면포장의 변형에 미치는 영 향은 크지 않다.
- ② 강바닥판 두께와 포장의 두께가 두꺼울수록 강바닥판 및 포장체의 휨변형이 적게 발생하기 때문에 웹과 강바 닥판 사이의 응력집중이 완화되는 것을 수치적으로 확 인할 수 있다.
- ③ 강바닥판과 포장체의 탄성계수비가 100일 때 까지는 비교적 변형이 크지 않지만 계수비가 1000에 접근하면 교직방향의 변형은 약 2배, 중력방향의 변형은 수배에 달하는 큰 변형이 발생하여 교면포장의 파손 발생가능성이 높아진다.
- ④ 윤하중을 받는 강바닥판과 포장체의 매개변수 변화에 따른 유한요소해석 결과에서 웹 직상의 포장체에서 교 직방향의 큰 인장변형이 공통적으로 발생하였고, 이는 실제 교면포장에 발생하는 횡방향 인장 균열의 발생지 점과 일치한다.



(a) 가로보 모델링 형태에 따른 교축방향 변형도

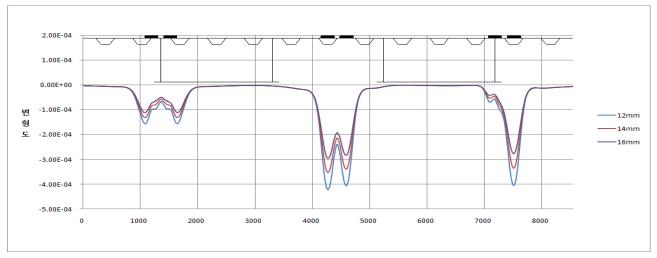


(b) 가로보 모델링 형태에 따른 교직방향 변형도

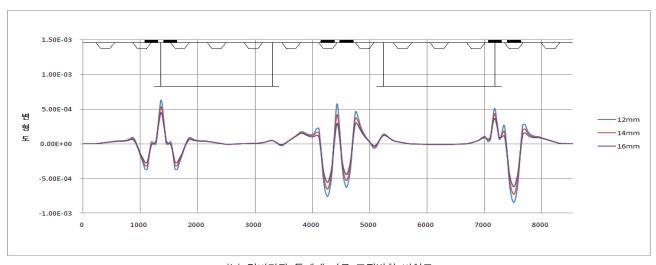


(c) 가로보 모델링 형태에 따른 중력방향 변형도

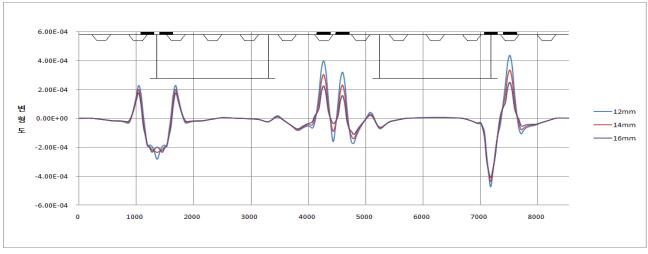
그림 5 스켈럽과 벌크헤드 유무를 고려한 가로보 모델링 형태에 따른 변형도



(a) 강바닥판 두께에 따른 교축방향 변형도

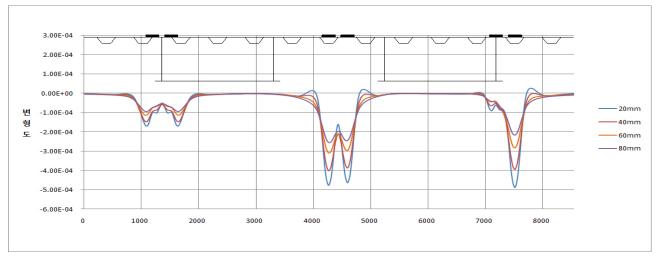


(b) 강바닥판 두께에 따른 교직방향 변형도

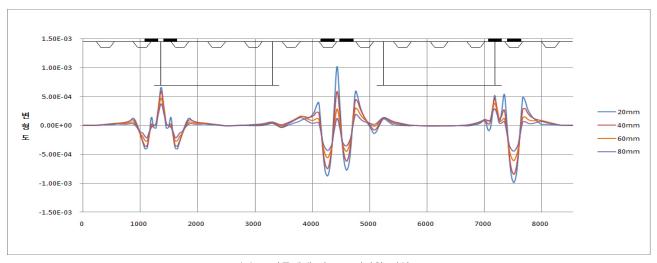


(c) 강바닥판 두께에 따른 중력방향 변형도

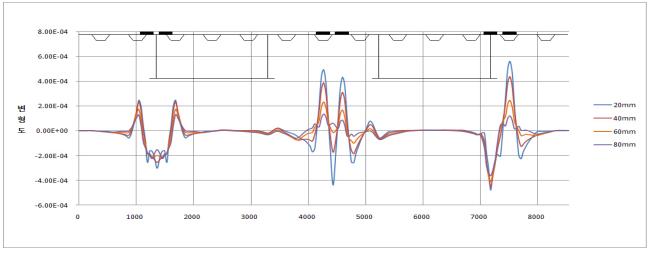
그림 6 강바닥판 두께에 따른 변형도



(a) 포장두께에 따른 교축방향 변형도

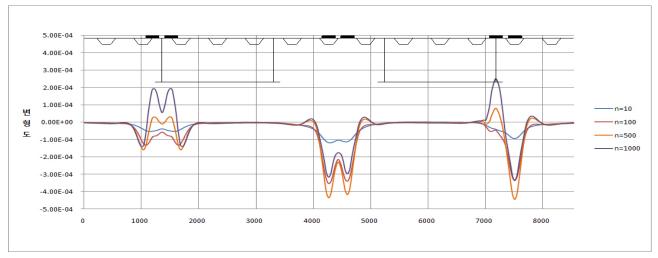


(b) 포장두께에 따른 교직방향 변형도

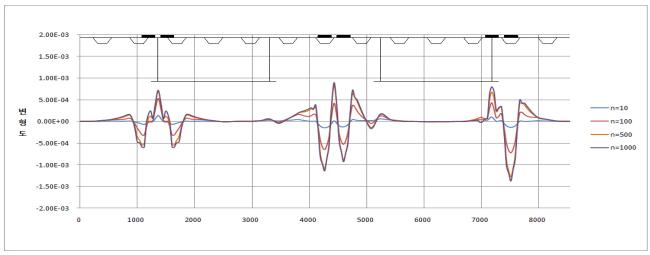


(c) 포장두께에 따른 중력방향 변형도

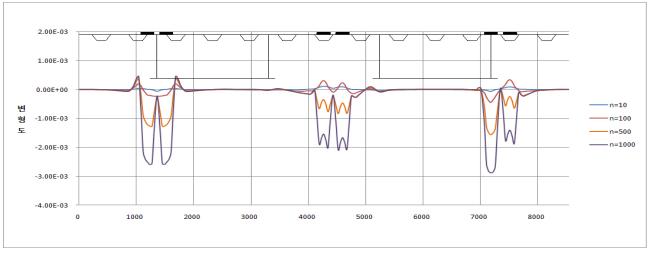
그림 7 포장두께에 따른 변형률 변화



(a) 탄성비에 따른 교축방향 변형도



(b) 탄성비에 따른 교직방향 변형도



(c) 탄성비에 따른 중력방향 변형도

그림 8 탄성비에 따른 변형도

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 '강바닥판 교면 포장 파손저감을 위한 강바닥판 상부구조 상세 구조해석'연 구의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 공병승 (2004) 벌크헤드 플레이트가 부착된 강바닥판교의 피 로상세 개선 연구, 한국해양학회 논문집, 18(1), pp.22~ 27.
- **공병승, 배두병** (2004) 강바닥판교의 종리브-횡리브 교차연결 상세변화에 따른 최적설계방안의 수치해석 연구, 한국전산 구조공학회 논문집, 17(3), pp.333~340.
- 대한토목학회 (2008) 도로교설계기준.
- 선창원, 박경진, 경갑수, 김교훈 (2008) 세로리브 내부 보강 상세에 따른 강바닥판 연결부의 피로거동 특성에 관한 해석 적 연구, 한국강구조학회 논문집, 20(1), pp.105~119.
- 신재철 (2006) 강바닥판의 스캘럽·다이아프램 설치 유무에 따 른 교차부·컷아웃부 응력집중. 한국강구조학회 논문집. 18(3), pp.289~299.
- 옥창권 (2005) 아스팔트 교면포장의 내구성 증진을 위한 방수 층 평가기준 및 강상판 설계기준 연구, 한국도로공사 도로 교통기술원 연구보고서.
- 임동준 (2010) 강바닥판 교량의 교면포장 종방향 균열제어를 위한 수치해석적 연구, 석사학위 논문, 성균관대학교,

p.87.

- Luo R.D., Ye M.X., Zhang Y.Z. (2010) Study on Influences of Thickness of Flange of U rib on Mechanical Behaviors of Orthotropic Monolithic Steel Bridge Deck System, Advanced Materials Research, 163-167, pp.122~126.
- Medani T.O., Liu X., Huurman M., Scarpas A., Molenaar A.A.A. (2009) Characterisation of Surfacing Materials for Orthotropic Steel Deck Bridges, International Journal of Pavement Engineering, 11, pp.237~265.
- Tang M.C. (2011) A New Concept of Orthotropic Steel Bridge Deck, Structure and Infrastructure Engineering, 7, pp.587~595.
- Zhang Y. (2011) Research of Stress Concentration and Retrofitted Methods for Orthotropic Steel Bridge Decks, Advanced Materials Research, 163~ 167, pp.3511~3516.
 - 논문접수일 2011년 7월 1일
 - 논문심사일

1차 2011년 7월 7일 2차 2011년 7월 21일

● 게재확정일 2011년 7월 29일