



유한요소해석을 이용한 교면포장의 방수층에서의 응력해석

Stress Analysis in Waterproof Layer on Steel Bridge Deck Pavement Using Finite Element Analysis

우 영 진* 이 현 중** 박 희 문*** 최 지 영****
 Young Jin Woo Hyun Jong Lee Hee Mun Park Ji Young Choi

Abstract

The behavior of pavement and waterproofing layer on the steel bridge deck system under traffic loading was analyzed using a finite element method in this paper. In the finite element analysis, the orthotropic steel bridge deck is represented by equivalent plate using solid element instead of shell element and the interface is assumed perfect bonding state. The effects of several parameters such as thickness of deck, Young's modulus of deck, thickness of pavement, different braking loading, and temperature on the stresses and strain in the interface are investigated for bridge deck pavement. The shear stress of waterproof layer increases with decrease of bridge deck thickness and stiffness. The change of shear stress is negligible when the bridge deck thickness is greater than 150mm and stiffness is greater than 2×10^6 MPa. As the pavement thickness and temperature decrease, the shear stress in the waterproof layer tends to be increased. The tensile strain at the bottom asphalt layer decreases as the temperature and thickness increase.

Keywords : *waterproofing layer, finite element analysis, bridge deck pavement, shear stress*

요 지

본 논문은 하중재하시 강상판교의 방수층과 교면포장에서 발생하는 거동을 유한요소해석을 통하여 분석하였다. 포장표면에 연직방향으로 작용하는 차량하중과 수평방향으로 작용하는 차량의 제동하중의 크기에 따른 포장체와 방수시트에 발생되는 응력을 산정하였다. 그리고 강상판 두께 및 강성, 포장층 두께, 차량제동하중, 온도 등의 변수가 포장체의 응력변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 분석하였다. 방수층의 전단응력은 강상판의 두께가 얇아지고 강성이 감소할수록 증가하였으며, 강상판의 두께가 150mm 이상의 경우와 탄성계수가 2×10^6 MPa 이상의 경우에는 그 영향이 미비하였다. 또한 교면 포장의 두께가 얇아지고 온도가 낮아질수록 방수층의 전단응력이 증가하였다. 포장체 하부에서 발생하는 인장변형률은 고온에서 최대가 되었으며 두께가 증가할수록 감소하였다.

핵심용어 : 방수층, 유한요소해석, 교면포장, 전단응력

- * 정회원 · 대림산업 기술연구소 토목설계지원팀 과장
- ** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수
- *** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 선임연구원
- **** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 연구원



1. 서론

교면포장의 기능은 단순히 차량의 소통을 위한 포장층의 역할뿐만 아니라 교량상판을 보호하는 기능도 수행되어야 하기 때문에 교면포장의 내구성 확보는 교량의 내구성 확보를 위해 중요한 문제이다. 특히 교면포장은 진동 및 충격, 혹독한 기상조건에 그대로 노출이 되어 일반 토공부 포장보다 더 큰 파손요인이 상존하고 있으며, 유지·보수시 교통이 심하게 정체되는 문제 등으로 인하여 일반 토공부에 비해 고가인 공용성이 우수한 포장재료로 포장을 시행하고 있다. 또한, 현재 국내의 교면포장의 설계 및 시공은 대부분 과거의 경험을 바탕으로 이루어지고 있어 기관별 설계기준이 마련되어 있지 않을 뿐만 아니라 교량별 적용되는 설계 및 시공기준도 상이한 실정이다. 이러한 요인들로 인하여 현재 국내 교면포장의 공용성은 선진국에 비해 현저히 떨어지는 것으로 파악되고 있어 교면포장의 공용성 개선을 위한 연구가 시급히 수행되어야 할 것으로 판단된다.

교면포장의 파손은 크게 변형과 균열, 수분손상 등이 있으며, 그림 1과 같은 교면포장과 방수층 또는 방수층과 교량상판의 접착력 상실로 인한 포장의 밀림은 앞서 언급한 교면포장의 파손을 가속화시키는 주된 요인으로 작용한다. 교량상판과 방수층 그리고 교면포장이 완전히 부착되어 일체로 거동하여야 이러한 밀림현상을 억제할 수 있다. 그러나 시공상의 문제로 인하여 초기부착이 완전하지 않은 경우가 자주 발생한다. 현재 국내외적으로 교면포장과 교량상판의 부착성을 검증하기 위하여 주로 실내시험(2000, 한국도로공사)에 의존하고 있으나 이러한 현상이 발생하는 메커니즘에 대한 해석적인 노력은 거의 전무하다할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 포장표면에 연직하중 방향으로 작용하는 차량하중과 수평방향으로 작용하는 차량의 제동하중에 따른 포장체와 방수시트에 발생하는 응력을 포장의 두께와 대기온도 등에 따라 분석하여 교면포장의 파손 메커니즘을 규명함에 따라 포장체의

두께선정과 공용성 예측 그리고 포장재료의 품질기준 설정을 위한 기초적인 자료를 제공하는데 가장 큰 목적이 있다.



그림 1. 교면포장의 파손 예

2. 유한요소 모델링

본 연구에서는 상업용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Hibbit et al., 2000)를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 하중과 경계치 조건은 그림 2와 같이 연직방향의 차량하중(DB24)을 차량의 접지면적만큼 적용하였고 교축방향으로 제동하중을 식 (1)과 같이 적용하였다. 여기서 제동하중계수 b 값은 미국 도로교시방서 규정에 따라 식 (2)에 의하여 결정된다. 제동하중에 관한 우리나라 규정에 의하면 제동하중은 차량의 속도와 제동거리에 관계없이 차량하중의 10%를 교면상 1.8m되는 위치에 차량의 진행방향으로 작용하게 되어 있으나 이는 미국 도로교시방서 규정과 비교해 보았을 때 낮게 규정되어 있다. 미국 시방서 규정을 기초로 하여 차량의 속도가 90km/h이며 제동거리가 122m일때 식 (2)에 의해 제동하중은 차량하중의 26%로 산정된다. 본 연구에서는 다양한 경우의 해석을 위하여 연직차량하중의 10%, 20%, 30%를 적용하였다.

$$F_b = bW \quad (1)$$



여기서, F_b 는 제동하중, W 는 차량의 중량이며 b 는 제동하중계수이다.

$$b = \frac{1}{2} \left(\frac{V^2}{g^s} \right) \quad (2)$$

여기서, g 는 중력가속도, V 는 차량속도, s 는 제동거리를 나타낸다.

해석을 위한 적절한 모델의 산정을 위하여 다음과 같은 해석변수에 대한 검토를 수행하였다.

- 바닥판 두께
 - 등가판 모델의 등가두께에 따른 전단응력변화 검토
- 바닥판 탄성계수
 - 바닥판의 탄성계수에 따른 전단응력변화 검토

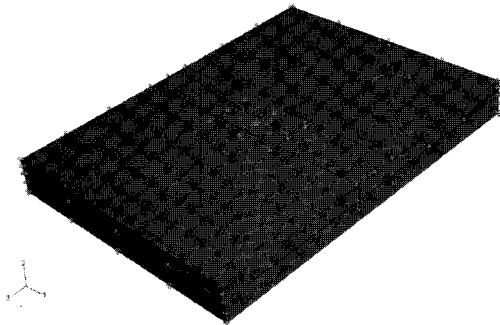


그림 2. 해석에 사용된 하중과 경계치 조건

표 1은 수치해석에서 사용된 강상판, 방수시트 및 교면포장체의 재료물성치를 나타내고 있다. 교면포장에 사용되는 아스팔트는 온도에 따라 강성이 변화되는 점탄성 재료이다. 따라서, 본 연구에서는 Witzczak(2001)의 실험 데이터와 이현중(2000)의 실험 데이터를 사용하여 온도에 따른 아스팔트 혼합물과 방수시트의 탄성계수값을 표 1과 같이 계산하여 수치해석에 적용하였다. 수치해석에 적용되는 접지압은 $7.03\text{kg}/\text{cm}^2$ 이며 접지폭 51cm와 접지길이 22cm인 직사각형으로 가정하여 사용되었다. 강상판, 방수층 및 교면포장은 완전한 부착(perfect bonding)으로 가정하였으며 그림 3은 유한요소해석에 사용된 모델을

나타낸다. 이러한 검토결과들을 기초로 포장두께(40mm~100mm), 포장체의 온도(-5℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃), 포장체 깊이에 따른 효율적 유한요소해석을 수행하였다.

표 1. 해석에 사용된 교면포장재료의 역학적 물성

Temperature(℃)	E_1 (MPa): 포장체	E_2 (MPa): 방수시트	E_3 (MPa): 강상판
-5	20000	600	210000
0	17000	180	210000
10	11000	30	210000
20	6000	6	210000
30	2000	1.2	210000
포아송비	0.35	0.4	0.3

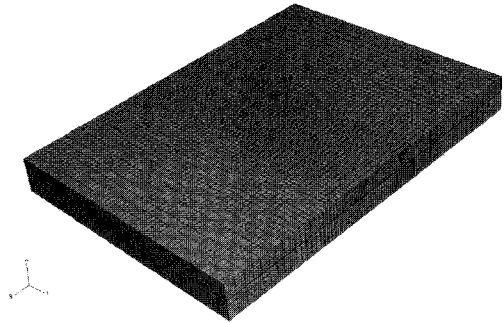


그림 3. 유한요소모델

직교이방성(orthotropic) 강상판형교(steel plate deck bridge)는 바닥강판, 종리브, 횡리브로 이루어진 강상판과 여러 형태의 주형부재들에 의해 구성된 형교로써, 포장층과 방수층에 발생하는 응력해석을 위한 유한요소해석에 있어서 강상판의 복잡한 기하학적 특성, 경계조건과 하중조건을 완전히 모델링하는 것은 비효율적이며 해석시간의 낭비를 초래한다. 따라서 강상판형교와 같이 종방향과 횡방향으로 강성강화 부재를 갖는 판 구조물을 그림 4와 같이 적절한 등가판(equivalent plate)으로 모델화하여 유한요소해석을 수행하였다. 등가판 등가두께(t_e , equivalent thickness)산출을 위하여 판 이론에 의한 강상판의 종방향 휨 강성과 등가판의 종방향 휨 강성을 식 (3)의 우항과 좌항과 같이 각각 나타낼 수 있다. 여기서 비틀림 강성은 무시하였다. 표 2는 리브의 종류에 따



라 식 (3)을 이용하여 산정된 등가판의 등가두께를 나타내고 있다.

$$\frac{E_{deck}t_e^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{E_{deck}t^3}{12(1-\nu^2)} + \frac{E_{deck}te_y^2}{(1-\nu^2)} + \frac{E_{deck}I_n}{a} \quad (3)$$

여기서, a 는 리브 간격, e_y 는 판의 중앙면으로부터 단면 중립축까지의 거리, I_n 은 중립축에 대한 보강재(종리브)의 단면 2차 관성 모멘트, E_{deck} 은 강상판의 탄성계수, ν 는 강상판의 포아송비를 나타낸다. 등가판의 횡방향(교축직각방향) 길이는 그림 4와 같이 주형 거더의 위치에 따라 주형 사이의 거리만큼, 종방향(교축방향) 길이는 횡리브 간격 길이만큼만 모델링함으로써 횡리브 휨 강성의 영향은 고려하지 않아도 되게 하였다. 등가판 산출을 위한 유한요소해석모델은 그림 5와 같다. 또한 연직하중 작용시와 연직하중과 제동하중이 동시에 작용할 때에 있어 실제모델과 등가판의 방수시트내 발생하는 최대전단응력을 표 3과 같이 비교하였다. 여기에서 제동하중은 차량 접지압의 10%를 적용하였다. 두 하중조건에서 모두 등가판 모델이 실제모델에 비해 발생하는 전단응력이 각각 8%(연직하중)와 6%(연직하중+제동하중) 큰 것으로 나타났으나 비틀림 강성을 무시한 것을 고려한다면 적당한 모델이라고 할 수 있다. 이와 같은 결과를 토대로 응력 해석에 영향을 미치지 않는 범위(오차율:10%) 내에서 그림 3과 같은 적절한 등가판 크기와 경계치 조건을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

표 2. 리브의 종류에 따른 등가두께(t_e)

Closed rib	t_e	Open rib	t_e
320*240*6	156.43	180*9.5	109.94
320*260*6	162.76	200*10	117.44
320*240*8	156.43	230*11	128.26
320*260*8	162.76	250*12	135.23

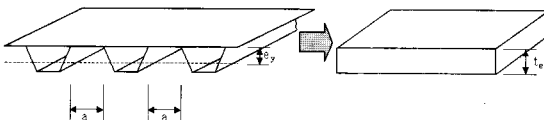


그림 4. 등가판(Equivalent plate) 산출

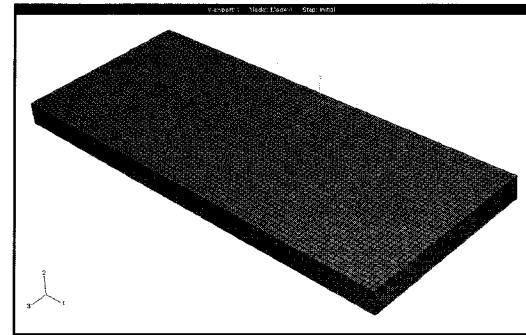
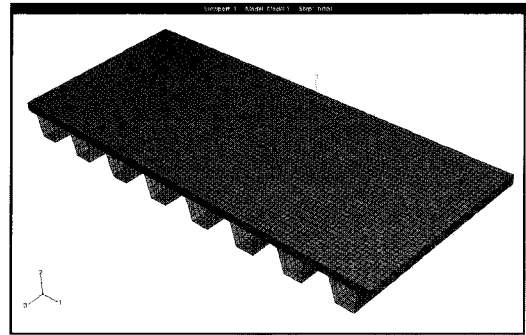


그림 5. 등가판(Equivalent plate) 산출을 위한 유한요소해석모델

표 3. 실제모델과 등가판의 방수시트내 최대전단응력 비교

하중조건	방수시트내 최대전단응력	
	실제모델(320*240*6)	등가판($t_e=150\text{mm}$)
연직하중	7.36kPa	7.95kPa
연직하중 + 제동하중	8.99kPa	9.53kPa

그림 6은 등가판의 두께에 따른 전단응력의 변화를 보여준다. 이 결과를 통해 등가판의 두께가 150mm 이상일 경우에 등가판의 두께가 전단응력에 미치는 영향은 미미하므로 방수층에 발생하는 응력해석에 150mm의 등가두께를 사용하였다. 강상판의 두께가 얇을 경우 방수층에 미치는 영향이 크게 증가하므로 점하중(point loading)과 같은 큰 집중하중이 보강재가 없는 지점에 작용할 경우를 고려해서 등가판의 두께가 150mm이 아닌 실제 강상판의 두께($t=14\text{mm}$)만을 갖는 판의 경우 또한 고려되어야겠다.

강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 미치는 영

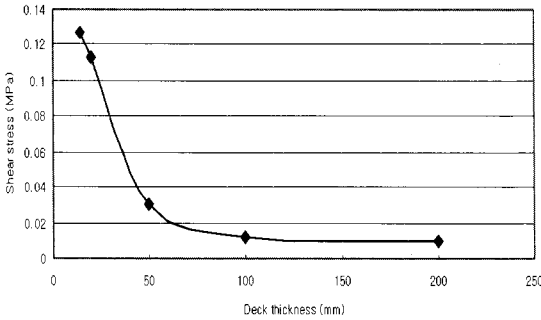


그림 6. 강상판 두께의 영향

향을 조사하기 위하여 두 다른 하중조건에 대한 유한 요소해석을 수행하였다. 여기서 두 다른 하중조건은 차량접지압만 적용한 경우(s)와 차량접지압과 제동하중을 같이 적용한 경우($s+v$)를 뜻한다. 여기서 제동하중은 차량접지압의 10%를 적용하였다. 그림 7은 강상판 탄성계수에 따른 방수시트에 발생하는 최대전단응력을 나타내고 있다. 바닥판의 강성이 증가함에 따라 최대전단응력은 급격히 감소하다가 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ 이후 완만한 기울기로 감소하여 일정해짐을 알 수 있다. 즉, 강상판의 강성이 적정한 값에 도달한 이후에는 강상판의 강성이 전단응력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 현재 국내에 사용되는 강상판의 탄성계수는 대부분 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ 이상이 되기 때문에 강상판의 탄성계수 변화에 따른 영향을 무시하고 해석을 수행하여도 무방하다고 사료된다. 물론, 이 결과는 교면포장과 방수시트의 다른 물성치나 두께에 따라 조금은 다른 결과를 낼 수는 있으나 기본적인 경향은 같을 것으로 예상된다.

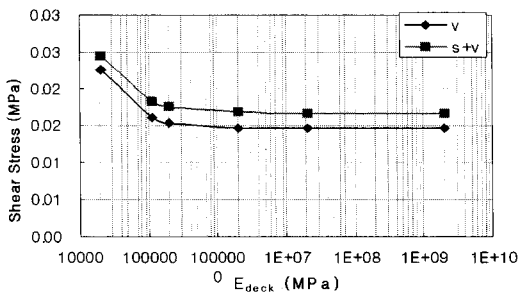


그림 7. 강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 미치는 영향

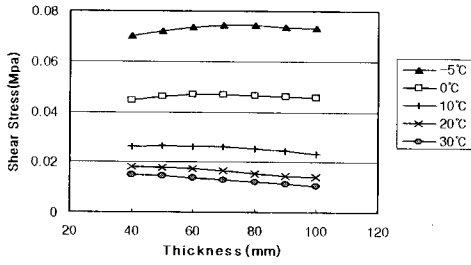
3. 수치해석결과

차량하중의 급제동, 급출발에 의해 발생하는 아스팔트 혼합물의 밀림에 대한 방수층의 저항성을 조사하기 위해서 4가지 다른 하중조건을 고려하여 전단응력에 대한 분석을 실시하였다. 그림 8(a)는 포장표면에 연직인 방향으로 차량하중만 작용하는 경우의 결과로써, 두께에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그림 8(b), 8(c), 8(d)는 포장표면에 연직인 방향으로 작용하는 하중과 수평방향으로 작용하는 차량의 제동하중을 작용시켰다. 차량 급제동 정도를 고려하기 위하여 앞에서 설명되었듯이 수치적으로 연직하중의 10%, 20%, 30%를 각각 제동하중으로 사용하였다.

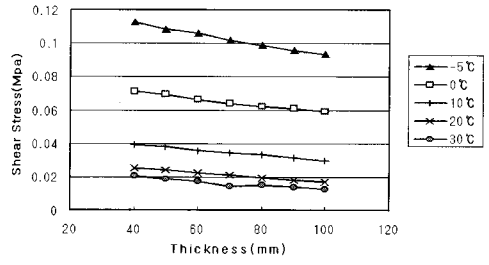
그림 8(b), 8(c), 8(d)에서 보는 바와 같이 포장층의 온도가 감소할수록 방수층에 발생하는 최대전단응력은 증가함을 알 수 있다. 한국도로공사에서 수행한 실내시험결과에서도 비슷한 경향을 보인 것으로 나타났다. 또한 교면포장의 두께가 감소할수록 방수층에 발생하는 최대전단응력은 증가하였으며 따라서, 포장층이 너무 얇을 경우에는 이러한 전단응력에 의해 포장층과 교량상판 사이에 분리가 발생하여 밀림현상이 발생할 가능성이 높은 것을 알 수 있다.

한국도로공사에서 수행한 실내시험결과에 의하면 20°C 강판과 아스팔트혼합물 사이에 시트방수재를 사용한 방수층의 전단강도는 5.41kgf/cm^2 (0.541MPa) ~ 7.48kgf/cm^2 (0.748MPa) (수직하중에 따라 증가)로써 수치해석결과보다 5배에서 10배 이상 크므로 수직하중과 제동하중에 의해 발생하는 밀림에 대하여 안전한 것으로 사료된다. 이와 같이 실험을 통한 방수시트의 전단강도와 수치해석결과를 비교해 방수시트의 밀림현상 발생유무를 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 9는 전단응력분포도를 나타낸다.

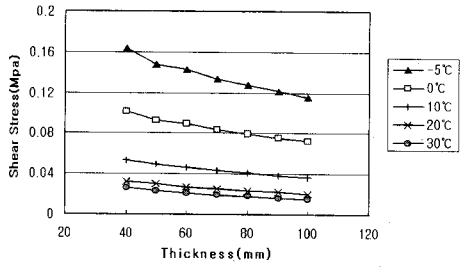
그림 10은 하중이 접지압만 작용할 경우에 대한 깊이와 온도에 따른 포장체와 방수시트에 발생하는 전단응력의 변화를 보여준다. 포장체내의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 증가하고, 방수층의 전단응



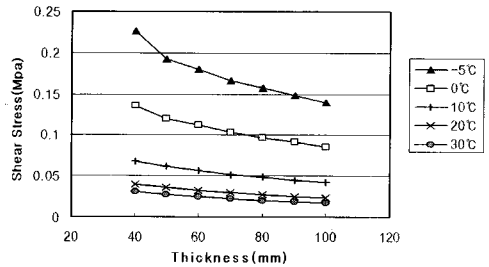
(a)차량하중



(b)차량하중과 제동하중(차량하중의 10%)



(c)차량하중과 제동하중(차량하중의 20%)



(d)차량하중과 제동하중(차량하중의 30%)

그림 8. 방수층에 발생하는 최대전단응력

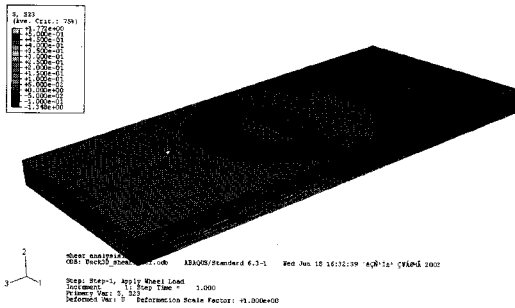


그림 9. 전단응력 분포도

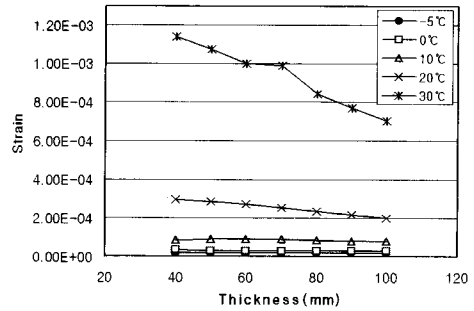


그림 11. 연직 차량하중과 수평제동하중(차량하중의 10%)을 동시에 고려했을 때 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률

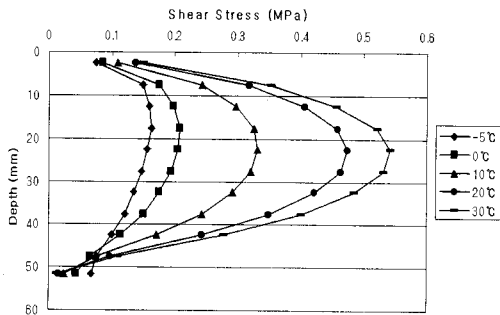


그림 10. 수직하중(점지압)에 대한 전단응력분포

력은 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있으며, 포장체내에서 최대전단응력은 중간지점임을 확인할 수 있다.

차량의 반복하중에 의한 교면포장체의 피로균열을 조사하기 위하여, 교면포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률을 조사하였다. 그림 11은 두께와 온도에 따른 최대 인장변형률을 보여준다. 이 그림들을 통해 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률은



온도가 증가할수록 증가하고 두께가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 또한 저온(-5℃, 0℃)에서는 두께에 따른 최대 인장변형률의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 교면포장과 교량상판 사이에 발생하는 파손메커니즘을 규명하기 위하여 유한요소해석에 의한 포장체와 방수시트에 발생하는 응력을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

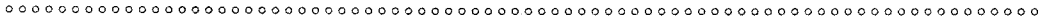
1. 유한요소해석을 위한 등가판 모델을 결정하고 등가판의 등가두께를 결정하였으며 등가판의 두께의 영향도 조사하였다.
2. 강상판의 강성이 적절한 값($2 \times 10^5 \text{MPa}$)에 도달한 이후에는 강상판의 강성이 방수층의 전단응력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.
3. 포장체와 방수시트 포장층의 온도가 감소할수록 방수층에 발생하는 전단응력은 증가함을 알 수 있다. 또한 교면포장의 두께가 감소할수록 방수층에 발생하는 전단응력은 증가하였으며 따라서, 포장층이 너무 얇을 경우에는 이러한 전단응력에 의해 포장층과 교량상판의 분리가 발생하여 밀림현상이 발생할 가능성이 높은 것을 알 수 있다. 특히 구조해석상에서 강상판, 방수층 및 교면포장은 완전한 부착(perfect bonding)이라는 가정하에 수행되었으나 공용에 따른 실제 교량상판에서 접착층은 노화와 손상으로 인해 방수층의 전단강도를 완전히 발휘하지 못하므로 저온에서의 파괴발생 가능성이 크다고 볼 수 있다.
4. 포장체내의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 증가하고, 반대로 방수층의 전단응력은 온도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.
5. 포장체 바닥면에 발생하는 최대 인장변형률은 고온에서 최대가 되고 두께가 증가할수록 감소함을

알 수 있다. 또한 저온(-5℃, 0℃)에서는 두께에 따른 최대 인장변형률의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

이와 같이 본 해석결과를 기초로 하여 연직 차량하중과 수평제동하중을 적용시켰을 때 방수층에 전달되는 전단응력은 기존의 방수층의 전단강도 측정방법에 의하여 측정된 전단강도의 1/5 이하로 작으므로 교면포장과 교량상판 사이에 밀림에 의한 파손이 발생하지 않아야 한다. 그러나 그림 1에서도 보여주었듯이 실제 현장에서는 제동하중에 의한 밀림으로 인한 파손이 다수 발생하고 있다. 이는 기존의 전단강도 실험방법에 의해 산출된 교면포장과 교량상판의 전단강도값이 실제 값보다 크게 측정된 것으로 판단되며 본 연구에서 사용된 유한요소 모델에 있어 각 층간에 발생할 수 있는 밀림현상에 의한 영향을 고려하지 않음으로 인한 영향도 있는 것으로 사료된다. 또한 실험이 실제 교면에서의 상황을 나타내기 어려우며, 시공상의 문제점, 그리고 실험 중 공시체에서 포장체의 변형으로 인해 순수한 접착체의 전단강도가 산출되지 않았기 때문이라고 할 수 있겠다. 또한, 교면포장과 방수층 사이에 존재하는 체류수 등에 의한 부착력 약화 등을 실험적으로 모사할 수 없는 한계 등에 기인한다고 할 수 있다. 따라서 좀 더 현실적인 전단강도산출을 위하여 새로운 실험방법의 개발과 유한요소 모델링에 있어 interface element의 개발이 요망된다고 사료된다.

참고문헌

남광현, 교면포장의 설계와 시공, 2002.
 세종대학교, 교면포장 공용성 예측 및 교량상판과 교면의 상호작용 해석 연구, 2002.
 이현종 등, SBS PMA(슈퍼팔트)의 공용성 및 경제성 평가연구, 최종보고서, 강릉대학교 공학연구소, 2000.
 한국도로공사, 교면포장재료 및 모사시험기 개발 연구, 도로연구소, 도로연00-18, 2000.
 Hibbit, H. D., Karlsson, B., and Sorensen, P.,



ABAQUS Version 6.1, *Inc. Pawtucket, RI*, 2000

Timoshenko, S., and Woinowsky-Krieger, S.,
Theory of Plates and Shells, 2nd ed., *McGraw-Hill, New York, 195*

Price, R. A., Waterproofing of Concrete Bridge
Decks: Site Practice and Failure, *Research
Report RR317*, 1991

접 수 일: 2007. 10. 12

심 사 일: 2007. 10. 29

심사완료일: 2008. 2. 25

Smith, S. T. and Teng, J.G., Interfacial stresses in
plated beams, *Engineering Structures, Vol. 23*,
2001, pp857-871