

포장체의 강성이 강상판의 거동에 미치는 영향에 관한 기초연구

A Fundamental Study on the Effects of Pavement Stiffness
to the Structural Behavior of Orthotropic Steel Plate Deck

이 환 우*
Lee, Hwan-Woo

정 두 회**
Jung, Du-Hwoe

Abstract

The pavement stiffness is scarcely used in structural analysis to design the superstructure of bridge. It is reasonable not to consider it in the case of asphalt concrete pavement over concrete deck because the pavement stiffness compared with the concrete deck plate can be ignored. However, sometimes, the pavement materials have a similar amount of elastic modulus to concrete and are applied to the orthotropic steel deck plate which has relatively less stiffness compared with the concrete deck plate.

In this paper, the steel plate deck of a real bridge project was analyzed by considering the pavement stiffness by linear elastic FEM. It was assumed that a perfect bond between the steel plate deck and the pavement existed. The results indicated that the structural behavior of the orthotropic steel deck plate can be estimated enough to affect the evaluation result of structural capacity in some cases. Therefore, the investigations by experimental tests and more advanced numerical model are indispensable in figuring the design formula for considering the effects of pavement stiffness in the structural analysis of an orthotropic bridge.

keywords : pavement stiffness, orthotropic steel deck plate, linear elastic analysis, evaluation of structural capacity

* 정회원, 부경대학교 토목공학과 부교수, 공학박사
** 정회원, 부경대학교 토목공학과 부교수, 공학박사

E-mail : hwanwoo@pknu.ac.kr 051-620-1452

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 3월 31일까지 학회로 보내
주시면 2003년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

재료 강도의 신뢰성이 높고 그 역학적 거동도 상당 부분이 명확히 파악되어 있으며, 공장제작으로 품질 관리가 용이하다는 장점으로 인하여 우리나라에서도 1990년대 이후부터 장대교의 수요가 늘어나면서 여러 가지 형식의 강교량이 건설되고 있다(조선규, 1997). 특히 강상판(orthotropic steel plate deck) 교량은 (Troitsky, 1987) 용접기술의 발달과 고도화된 구조 해석 기술의 발전에 힘입어 최근에는 우리나라에서도 건설사태가 점점 더 증가하고 있는 교량 형식중 하나이다(한국강구조학회, 1995).

한편, 교량의 교면포장체는 차량의 주행성을 양호하게 하고, 차량의 축하중을 상판에 고르게 전달시켜 교량 상판에서 발생될 수 있는 과도한 응력집중을 저감시키는 역할을 하며, 마모나 우수로부터 상판을 보호하는 역할을 한다. 이와 같은 교면포장체의 기본적인 역할은 강상판의 경우에도 마찬가지로 요구되어 진다. 그러나 강상판의 경우는 콘크리트 상판에 비해서 강성이 작으므로 차량의 축하중에 의하여 국부적인 변형이 상대적으로 크게 발생한다. 이는 포장체의 공용성능에 유해한 요인이 될 수 있다. 따라서, Table 1 에서 보는바와 같이 우수한 공용성을 확보하기 위한 다양한 공법들이 현재 적용되고 있다.

강상판의 교면포장에 적용되는 포장체의 물리적 재료특성 중의 하나인 탄성계수는 포틀랜드 시멘트 콘크리트(이하 콘크리트)에 비해 약 1/100 정도에 지나지 않는 것부터 콘크리트와 비슷한 수준에 이르는 것까지 여러 종류가 있다. 평균 포장두께도 Table 1에서 보는 바와 같이 강상판의 두께(보통 12mm 혹은 14mm 정도)에 비해 3~4배 정도 크다. 그러므로, 강상판 교량의 경우에는 포장체의 강성이 강상판의 거동에 미칠 수 있는 영향을 무조건 무시할 수는 없을 것으로 본다.

일반적으로, 교량 바닥판의 구조설계시에 포장체는 비구조체로 간주되어 단지 고정하중으로서만 고려된다. 이는 포장체의 유동적인 물리적 재료특성과 구조체의 안전을 고려할 때, 구조설계시의 관점에서는 합리적인 접근으로 받아들여 질 수 있다. 그러나, 교량 구조체의 거동을 계측하고, 구조해석을 수행한 후, 서

로의 값들을 비교분석하여 교량의 잔존 내하력과 피로 수명을 평가하는 구조진단시의 관점에서, 강상판 교량의 경우에 포장체 강성의 고려여부는 포장체의 종류(강성크기)에 따라 평가결과에 영향을 줄 수 있을 것이다. 그러나, 지금까지 구조적 거동측면에서의 포장체 강성과 강상판과의 상호작용 효과에 관한 연구가 미비하였다. 본 논문은 이에 관한 기초연구로서, 선형탄성 재료로 가정한 포장체 강성이 강상판의 교축직각 방향(횡방향)거동에 미치는 영향도 분석을 통하여 향후 이 분야의 연구 필요성을 판단하는데 그 목적이 있다.

Table 1 국내·외의 대표적인 강상판 교면포장의 시공사례 (정두희 등, 2000)

지역	종류	개소	평균 포장두께	비고
국내	개질 아스팔트	4	35mm	서강, 정산 1, 청담, 성수, 영종대교 등의 상층부
	구스 아스팔트	3	43mm	정산 1, 청담, 영종대교 등의 하층부
	매스틱 아스팔트	5	45m	진도, 굴현, 형산대교
국외	개질 아스팔트	7	55mm	Luling Bridge(미국) 등
	매스틱 아스팔트	9	43mm	The Forth Bridge(영국) 등
	구스 아스팔트	4	40mm	하층부-구스아스팔트, 상층부-개질아스팔트의 형식이 주류, Yokohama Bay Bridge(일본) 등
	에폭시 아스팔트	16	50mm	Second Yangtze Bridge(중국) 등

2. 수치해석모델

2.1 구조모델

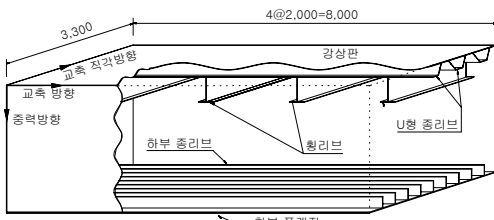
1) 모델크기의 결정

본 연구의 수치예제는 현재 시공중인 K 교량의 박스거더 단면 중, 강상판 단면을 대상으로 하였으며 단면의 대표적인 형상은 Fig. 1과 같다.

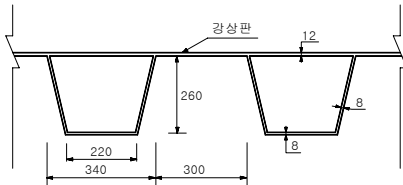
먼저, 해석모델의 교축방향(종방향) 범위와 경계조건을 결정하기 위해서 Fig. 2(a)와 같이 횡리브가 5

개가 포함된 길이 10m인 모델의 해석결과를 기준으로 횡리브의 개수가 각각 1개씩 점차적으로 줄어든 6.6m, 4.6m, 2.6m(Fig. 2(b)) 모델의 해석결과를 비교하였다. 이때 교축직각방향의 해석범위는 강상판과 강 박스(steel box)웨브의 접합면을 경계로 하였다. 하중은 본 해석에서 적용할 DB-24 후륜 축하중만을 재하시켰다. 해석결과, Fig. 2(b)의 2.6m 모델이면 본 연구의 목적을 고려할 때, 모델크기에 따른 교축방향의 거동차이를 무시할 수 있는 최소모델로 택할 수 있는 것으로 판단하였다. Fig. 3은 Fig. 2(a)의 10m 모델과 Fig. 2(b)의 2.6m 모델의 수직처짐에 대한 해석결과로서, 최대처짐의 차이비는

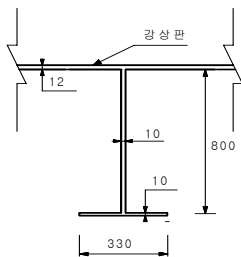
$$\frac{A_{10} - A_{2.6}}{A_{10}} = \frac{2.361 - 2.261}{2.361} = 0.042 \text{ 이었다.}$$



(a) 3차원 단면도

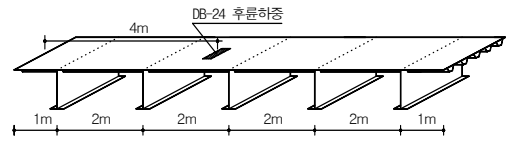


(b) U형 종리브 상세

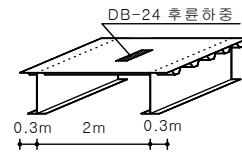


(c) 횡리브 상세

Fig. 1 K교량의 강상판 박스거더 (단위, mm)



(a) 10m 모델 형상



(b) 2.6m 모델 형상

Fig. 2 예비해석 모델

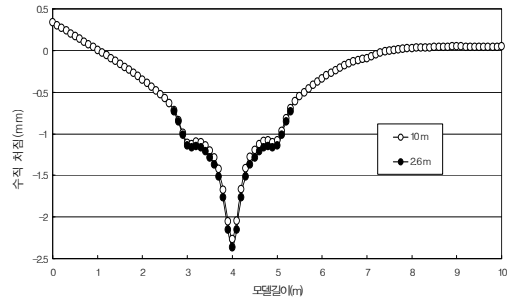
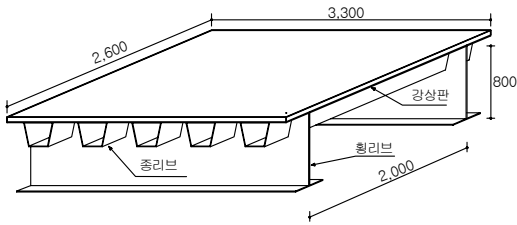


Fig. 3 예비해석의 교축방향 수직처짐

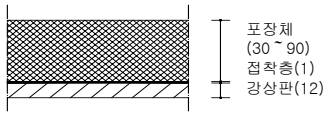
2) 수치 해석모델

예비해석을 통하여 결정된 본 연구의 수치해석 모델의 범위는 Fig. 4(a)와 같다. 그리고 예비 해석시에는 고려하지 않았던 포장층과 접착층은 Fig. 4(b)와 같다. 시방규정과 실제 시공사례에 의하면 일반적으로 포장체는 포장재료에 따라 50mm~80mm의 범위로 적용된다. 그리고, 접착층은 강성이 무시된 1mm의 재료로서 가정하였다. 한편, 강상판과 포장층의 수직방향 거동은 완전결합된 것으로 가정하였고, 미끌림의 영향은 본 해석에서 고려하지 않았다.

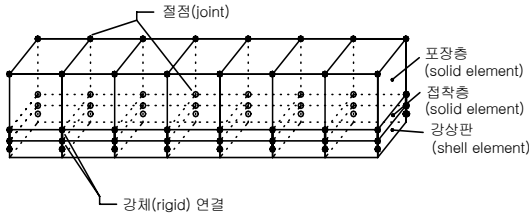
Fig. 4(c)에서 보느냐와 같이, 사용된 유한요소는 구조해석 프로그램 중의 하나인 SAP2000(CSI, 1988)에 내장된 4절점 쉘(shell)요소를 사용하여 강상판과 U형 종리브 및 횡리브를 모델링하였다.



(a) 해석범위



(b) 강상판과 포장체의 상세도



(c) 모델링 요소

Fig. 4 해석모델의 크기와 사용요소(단위, mm)

그리고 8절점 고체(solid)요소를 사용해서 포장층과 접착층을 각각 모델링하였다. 요소의 크기는 기본적으로 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 로 하였으나 부분적으로 연결 부분들은 더욱 조밀한 크기를 적용하였다. 한편, 포장층의 하부 절점(접착층의 상부절점)과 접착층의 하부절점을, 그리고 접착층의 하부절점과 강상판의 절점을 각각 강체(rigid)요소로 연결하였다.

경계조건은 Fig. 5에서 보는바와 같이 교축방향으로는 횡리브를 포함한 강상판과 강 박스웨브의 접합면의 절점들을 힌지(hinge)로 처리하였고 교축 직각방향의 강상판 단면은 자유단으로 처리하였다. 이는 예비해석 결과를 반영하고 포장체의 강성이 강상판의 횡방향 거동에 미치는 상대적인 영향도를 알아보는 본 연구의 구조해석 목적을 고려하여 결정하였다.

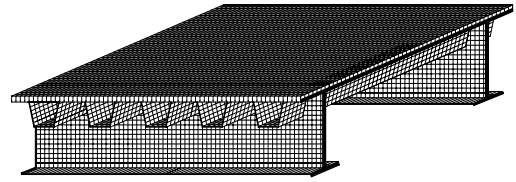


Fig. 5 해석 모델링 형상

2.2. 재료 모델

본 해석에서 사용된 재료는 강상판과 리브들에 사용된 강재(s)와 포장층에 사용된 아스팔트 콘크리트(p), 그리고 강상판과 포장층 사이의 접착층에 사용된 접착 재료(b)가 있다.

포장체는 그 물리적 재료특성이 일반 상온에서도 온도에 따라 변하는 점탄성 재료이다. 그러나, 이미 개발된 다양한 비선형 구조해석 모델에 적합할 정도의 물리적 재료특성 모델들이 모든 포장재료에 대하여 제시되어 있지는 않다.

한편, 구조진단시의 매 계층값은 포장체가 특정 온도때의 임의의 물리적 재료특성 값을 가지고 있을 때에 측정된 값이다. 이는 하중 재하와 계층에 걸리는 시간동안에 포장재료의 온도변화를 무시하여도 될 정도이기 때문이다. 이에 따라, 특정 하중하에서의 포장체의 강성효과를 판단하고자 하는 본 연구에서는 온도에 따른 비선형성까지 고려할 필요는 없었다. 또한, 보통 교량진단시에 이용되는 적용하중의 크기는 진단하는 구조체의 재료들에 탄성응력 범위내의 응력들이 발생되도록 재하된다. 따라서, 본 연구에서 적용된 모든 재료들은 등방성의 선형탄성 재료로 가정하였다.

강재는 탄성계수 E_s 가 $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 이고 포아손비 μ_s 는 0.3을 갖는 것으로 하였다. 그리고, 포장체의 경우는 온도변화에 따라 다양하게 분포할 수 있는 탄성계수의 크기에 따라 분류하고, 해석하였다. 즉, 아스팔트 콘크리트의 재료상수 값은 강상판의 교면포장에 사용되는 재료 중에 탄성계수가 가장 높은 것 중의 하나로 조사된 에폭시 아스팔트(Gopalatnam, 1999)의 값을 기준으로 약 50% 더 상회하는 값

($E_p = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$)에서부터 일반 개질 아스팔트가 높은 온도에서 가지는 탄성계수 값(김수일, 1998)을 약 50%이상 하회하는 값($E_p = 3.5 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$)까지 15단계로 변화시키면서 해석에 적용하였다.

Table 2에는 본 연구에 사용된 포장층의 탄성계수 값을 탄성계수비($n = E_s/E_p$)와 함께 정리하였다. 그리고 적용하중의 전달효과를 분명히 하고, 분석변수의 수를 감소시킬 목적으로 포장체의 포아슨 효과는 고려하지 않았다.

Table 2 해석에 적용된 포장층의 탄성계수 E_p

탄성계수비 n ($= E_s/E_p$)	E_p (kg/cm^2)
10	2.1×10^5
20	1.05×10^5
30	7.0×10^4
40	5.25×10^4
50	4.2×10^4
60	3.5×10^4
80	2.625×10^4
100	2.1×10^4
150	1.4×10^4
200	1.05×10^4
250	8.4×10^3
300	7.0×10^3
400	5.25×10^3
500	4.2×10^3
600	3.5×10^3

2.3 적용하중

구조모델에는 DB-24 하중의 후륜 축하중(9,600 kg)을 포장체 상부의 접지면적(20cm × 50cm)에 분포(대한토목학회, 1999)시켜 면하중으로 작용시켰다. 그 외 온도하중이나 포장체의 자중 등은 강상판의 상대적인 거동특성을 규명할 목적이므로 적용하지 않았다.

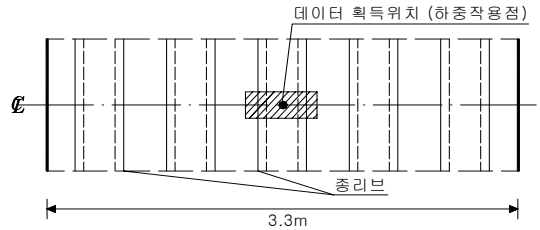
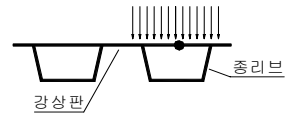


Fig. 6. U형 종리브 내부 경간의 중앙점(경우 1)

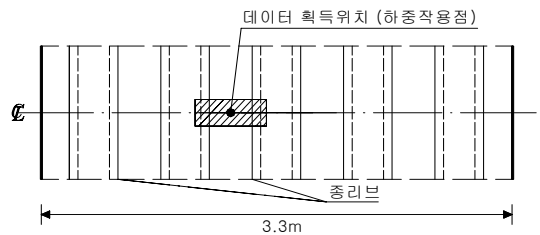
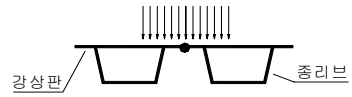


Fig. 7. U형 종리브 사이의 중앙점(경우 2)

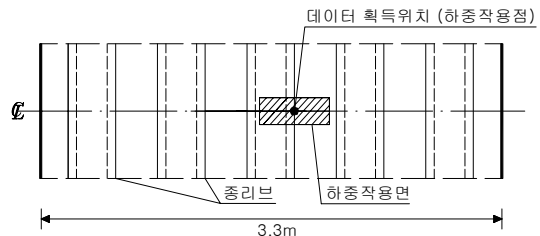
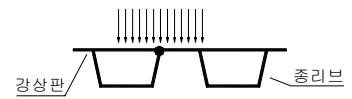


Fig. 8. U형 종리브의 경계점(경우 3)

Fig. 6~8에서는 각 경우의 적용하중들의 작용위치와 해석결과들의 획득위치를 보여주고 있다. 여기서, 경우 1이란 U형 종리브로 둘러싸인 내부 강상판의 중앙점에, 경우 2란 인접 U형 종리브들 사이의

강상판 중앙점에 그리고 경우 3은 U형 종리브의 용접선의 중앙점에 각각 적용하중의 합력점을 일치시켜 해석한 것을 말한다. 따라서, 각 경우에서 합력점의 작용위치와 해석결과의 획득위치는 일치한다.

3. 수치 해석결과

3.1 강상판의 수직처짐

Fig. 9~11은 포장체의 두께가 50mm일때 강상판과 포장층의 탄성계수비($n = E_s/E_p$)를 10, 100, 250, 600으로 변화시키면서 얻어진, 각 하중 경우 별 교축직각 방향의 수직처짐(δ_{ps})을 보여주고 있다. 이때 포장체가 없는 강상판에 하중을 직접 적용시킨 경우(δ_{ss})의 해석결과와 비교하여 나타내었다. 그리고 Fig. 12에는 각 경우 별 처짐비(δ_{ps}/δ_{ss})를 정리하였다.

Fig. 9~11을 통하여 탄성계수비 n 이 작을 때($n = 10$) 즉, 포장체의 강성이 매우 클 경우에 포장체의 강성을 고려하지 않고 평가된 처짐이 경우 1에서는 약 2.2배까지 과대하게 평가될 수 있고, 그 영향이 비교적 적은 경우 2에서도 상당한 차이를 갖고 평가될 수 있음을 확인할 수 있었다. 물론, 탄성계수비가 증가함에 따라 즉, 포장체의 강성이 감소함에 따라서 수직처짐이 포장체를 고려하지 않은 강상판의 처짐값(δ_{ss})에 수렴해 갔다. 한편, Fig. 12에서 볼 수 있듯이 탄성계수비가 증가함에 따라 수직처짐비(δ_{ps}/δ_{ss})는 곡선적으로 증가하였다.

본 연구에서 적용된 포장체의 탄성계수는 현재 실무에서 적용되는 포장재료들의 값들을 가능한 모두 포함할 수 있도록 충분한 범위를 가지고 가정되었다할 수 있다. 한편, 실제 교면포장 재료의 한 종류인 에폭시아스팔트는 탄성계수비가 높고 그 값이 14.5~29 (Gopalatnam, 1999)까지의 범위로 나타나고 일반 개질 아스팔트의 경우는 온도의 증감에 따라서 약 100~200(김수일, 1998)사이의 값을 가진다.

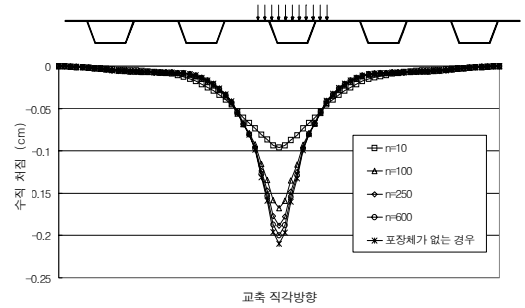


Fig. 9 포장체의 강성차이에 따른 수직처짐(경우 1)

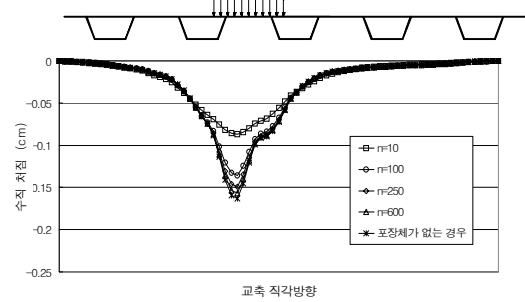


Fig. 10 포장체의 강성차이에 따른 수직처짐(경우 2)

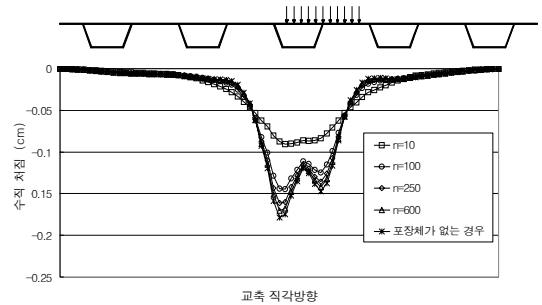


Fig. 11 포장체의 강성차이에 따른 수직처짐(경우 3)

이 값을 기준으로 Fig. 12의 경우 1에서 살펴보면 에폭시아스팔트의 경우는 포장체의 강성을 고려하지 않는 경우 강상판의 수직처짐이 약 1.6 배 이상 과대 평가될 수 있고, 일반 개질 아스팔트의 경우는 약 1.2 배 내외의 범위에서 과대 평가될 수 있는 것으로 나타났다.

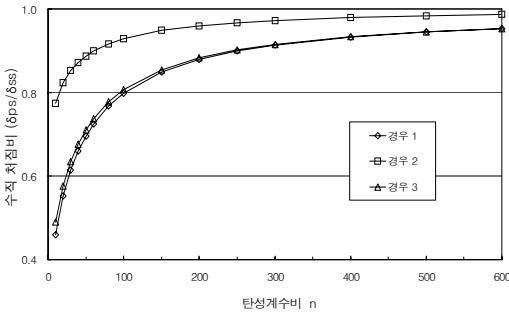


Fig. 12 각 경우별 수직처짐비(포장체 두께 ; 50mm)

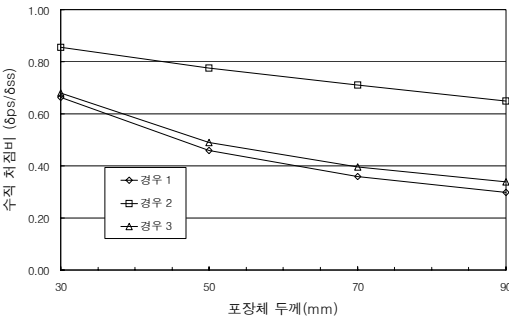


Fig. 13 포장체의 두께에 따른 하중경우별 수직처짐비

탄성계수비를 $n=20$ (에폭시 아스팔트의 범위)에 고정시키고 포장체의 두께를 30mm, 50mm, 70mm, 90mm로 변화시켜 해석을 수행하였다. 그 결과 Fig. 13과 같이 포장체 두께의 변화에 따라서는 거의 선형적으로 수직처짐비(δ_{ps}/δ_{ss})가 감소하는 것을 알 수 있었다.

U형 종리브를 지점으로 한 강상판의 횡방향 수직처짐은 포장재료의 공용성능에 큰 영향을 주는 인자이다. 이에 따라 일부 설계기준(日本道路協會, 2002)에서는 축하중에 의한 강상판의 처짐을 제어하기 위하여 강상판의 최소 두께를 일정 값 이상으로 하도록 규정하고 있다.

따라서, 경제적 단면설계의 측면에서 무시할 수 없을 정도의 강성을 갖는 포장체를 구조해석시에 고려하지 않는 것은 경우에 따라서는 비경제적인 강상판 두께가 결정될 수도 있을 것이다.

3.2 강상판의 휨 응력

Fig. 14는 포장체의 두께가 50mm인 경우 교축 방향의 최대 휨모멘트(교축직각방향을 휘게하는 모멘트)를 포장체의 강성이 고려된 경우(M_{ps})와 고려되지 않은 경우(M_{ss})의 비율(M_{ps}/M_{ss})로써 정리한 결과이다.

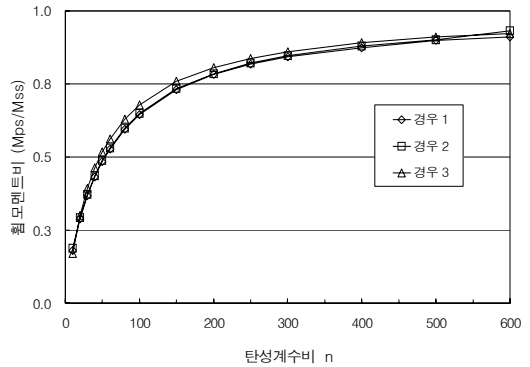


Fig. 14 각 경우별 최대 휨모멘트비(포장체 두께 ; 50mm)

Fig. 14에서 보는 바와 같이 강상판에 발생하는 휨모멘트(응력)도 수직처짐과 마찬가지로 포장체의 강성 차이에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있다. 다만, 휨응력의 경우는 수직처짐의 경우와는 달리 경우 1, 2, 3의 차이가 크게 없었다.

보다 현실적인 의미를 갖기 위하여 3.1절에서와 같이 탄성계수비에 따라 임의의 재료를 실제적인 포장재료의 명칭으로 가정할 때, 포장체의 강성을 고려하지 않는 경우에 에폭시 아스팔트가 가지는 실제의 강성의 범위에서는 약 1.7 배 이상, 개질 아스팔트의 범위에서는 약 1.3~1.5 배 정도로 강상판의 휨응력이 과대평가될 수 있을 것이다. 이 경우 포장체의 강성은 강상판의 휨응력 감소에 영향을 줄 수 있고, 이는 피로수명에 양호한 영향을 줄 수 있다. 즉, 포장체의 강성을 고려하지 않고 얻어진 강상판의 해석응력으로 추정된 피로수명은 실제보다 과소평가될 수도 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 현재 시공중인 K 교량의 강상판 단면을 대상으로, 선형탄성 재료로 가정된 포장체의 강성이 강상판의 거동에 미치는 영향을 해석하였다. 이때, 강상판과 포장층의 수직방향 거동은 완전결합된 것으로 가정하였고, 미끌림의 영향은 본 해석에서 고려하지 않았다. 해석결과의 검토는 포장체의 공용성능에 영향을 주는 강상판 교축직각방향의 수직처짐과 강상판의 피로수명 평가에 영향을 주는 휨응력에 대하여 분석하였다. 그 결과, 포장체의 종류와 온도에 따른 포장체의 물리적 재료특성을 감안할 때, 포장체의 강성은 계절과 시간대에 따라 강상판의 구조적 거동에 적지않은 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 개질 아스팔트보다 큰 강성을 갖는 포장체로 교면 포장된 강상판 교량의 내하력 평가와 피로수명 등의 평가시에 포장체의 강성을 무조건 무시할 수는 없을 것으로 본다. 이에 따라, 앞으로 강상판 교량의 내하력 평가시에 포장체의 강성을 적절히 고려할 수 있는 합리적인 설계식 등의 제시가 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 부경대학교 연구년 교수지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 김수일, 최준성, 임상빈, “아스팔트 콘크리트층의 유효탄성계수 결정에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제18권 제3-1호, 1998, pp.31~40.
2. 대한토목학회, “도로교표준시방서”, 건설교통부, 1999.
3. 정두희, 이환우, “강상판 교면포장 공법에 관한 연구”, 부경대학교 산업과학기술연구소, 2000, pp.145.
4. 조선규, “강교 설계시의 주요착안사항 및 대책”, 한국강구조공학회지, 제9권 제4호, 1997, pp.107~128.
5. 한국강구조학회, “강구조편람 제4권 강도로교의 설계”, 동양문화인쇄, 1995, pp.710.
6. 日本道路協會, “道路橋示方書·同解説”, 丸善株式會社 出版事業部, 2002, pp.273.
7. Computers and Structures, Inc., “SAP 2000 Nonlinear Analysis Reference”, California, 1988.
8. M. S. Troitsky, “Orthotropic Bridges”, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1987.
9. Vellore S. Gopalatnam, James W. Baldwin, and Jr. Wei-Min Cao, “Temperature-Dependent Performance of Polymer Concrete Wearing Surface System on the Poplar Street Bridge”, University of Missouri-Columbia, 1999.

(접수일자 : 2002년 6월 10일)