



프리스트레스트 콘크리트 포장의 횡방향 긴장 설계방안

Design Methodology of Transverse Post-Tensioning for Prestressed Concrete Pavements

김 성 민* 윤 동 주** 배 종 오***
 Kim, Seong-Min Yoon, Dong Joo Bae, Jong Oh

Abstract

This study was conducted to develop the design methodology of transverse post-tensioning for the prestressed concrete pavement (PSCP). The transverse stress distribution was analyzed when the transverse anchor spacing changed. The tensile stress distribution in the PSCP slab due to the environmental and vehicle loads was also investigated. The reasonable methods were discussed to determine the design loads including environmental and vehicle loads and the PSCP allowable tensile stress used for the basis of the selection of the stress application amount from the tensioning. The results of this study showed that as the transverse anchor spacing increased, the range of the stress loss became larger and the stress loss was significant near the shoulder. The design of the transverse post-tensioning can be performed by obtaining the stresses under the design loads and by considering the allowable tensile stress; however, the tensile stresses at different locations such as the shoulder, wheel pass, and slab interior should also be checked and kept below the allowable tensile stress.

Keywords : *prestressed concrete pavement, transverse tensioning, design, environmental loading, vehicle loading, allowable tensile stress*

요 지

본 연구는 프리스트레스트 콘크리트 포장(PSCP)의 횡방향 긴장 설계방안을 구축하기 위하여 수행되었다. 우선 PSCP에 횡방향 긴장을 가했을 경우에 긴장간격에 따른 슬래브의 응력분포를 분석하였다. 또한 환경하중과 차륜하중이 PSCP 슬래브에 작용할 때 슬래브에 발생하는 인장응력의 분포도 분석하였다. 이러한 환경 및 차륜하중 등의 설계하중과 긴장응력을 결정하는 기준인 슬래브의 허용인장응력을 합리적으로 선정하는 방법에 대하여 논의하였으며 이러한 기준의 선정이 횡방향 긴장 설계에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과, 긴장간격이 커질수록 긴장응력의 손실을 가져오는 범위가 넓어지며 특히 Shoulder 부분에서의 응력손실이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 따라서 횡방향 긴장 설계는 설계하중에 대한 슬래브의 응력을 산출한 후 슬래브가 허용인장응력 이내의 응력을 받도록 평균긴장응력을 산출하여 긴장간격 및 긴장량을 결정하면 되지만, 이때 Shoulder, Wheel Pass, 중앙부 등 슬래브의 여러 다른 위치에서의 응력 또한 반드시 검토하여 적절한 긴장간격을 선정하여야 한다.

핵심용어: *프리스트레스트 콘크리트 포장, 횡방향 긴장, 설계, 환경하중, 차륜하중, 허용인장응력*

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
 ** 비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정
 *** 정회원 · (주)삼우아이엘씨 연구소장



1. 서론

현재 국내 콘크리트 도로포장은 여러 가지 형태의 파손양상을 나타내고 있으며 이에 대한 보수, 보강 및 유지관리가 중대한 문제로 부각되고 있다. 예를 들어 줄눈콘크리트 포장에서 발생하는 대표적인 형태의 파손인 횡방향과 종방향 균열, 스폴링, 표면결함 등은 승차감을 저하시킬뿐만 아니라 유지보수에 따른 심각한 교통장애를 유발하기도 하며 사용자의 안전운행을 방해하는 원인이 되기도 한다.

프리스트레스트 콘크리트 포장(PSCP: Prestressed Concrete Pavement)은 차륜 및 환경하중에 의해 포장체에 발생하는 인장응력을 프리스트레싱 기법을 도입하여 감소시킴으로써 포장체의 우수한 장기공용을 보장할 수 있도록 하는 포장형식으로써 우리나라에서는 근래에 관심이 증가하고 있는 상황이지만 선진 외국에서는 이미 오래 전부터 이러한 도로포장을 사용하며 발전시켜 오고 있다(Friberg and Pasko, 1973; Brunner, 1975; Klunker, 1981; Powers and Zaniewski, 1987). PSCP는 콘크리트 슬래브의 두께를 기존 콘크리트 포장의 두께에 비해서 반 이하로 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 줄눈 간격을 일반적으로 100m 내외에서 200m 이상까지도 가능하게 한다. 따라서 줄눈콘크리트 포장의 줄눈과 비교하였을 경우에 줄눈 수가 1/20 이하로 감소하게 되어 이에 따른 잦은 줄눈부분의 손상을 방지할 수 있으며 보수가 필요없다는 특징이 있다. 또한 횡방향으로도 프리스트레싱을 가함으로써 모든 콘크리트 포장에 적용되는 종방향 줄눈도 생략할 수 있다. 이러한 대폭적인 줄눈의 감소는 포장체의 유지보수를 크게 줄여 우수한 장기공용성을 보장할 수 있게 된다. 궁극적으로 PSCP는 프리스트레싱 도입에 의한 인장응력의 감소로 포장체의 피로파손을 줄여 내구성을 보장할 수 있으며 줄눈의 감소로 이와 연계된 손상 또한 감소시킬 수 있는 우수한 포장형식이라 할 수 있다.

초기의 PSCP는 일반적인 콘크리트 포장과 같이 종방향 줄눈을 두는 대신에 횡방향으로는 프리스트레싱을 가하지 않았다. 하지만 종방향 균열이 발생하는 경우가 종종 관찰됨에 따라 근래에는 횡방향으로도 프리스트레싱을 가하고 있다(Mendoza-Diaz et al., 1986; Medina-Chavez and Won, 2005). 이러한 횡방향으로의 긴장은 설계기준이 확립되어 있지 않은 상황이다. 횡방향으로의 긴장은 긴장간격을 줄일수록 고성능 포장체를 보장할 수 있지만 긴장과 관련된 요소의 추가적인 설치에 따른 시공비용 증가를 가져오기 때문에 경제성은 감소하게 된다. 따라서 최적의 횡방향 긴장 설계가 매우 중요시되고 있는 실정이다. 본 연구는 PSCP의 횡방향 프리스트레싱을 위한 최적의 횡방향 긴장 설계방안을 제시하기 위하여 수행되었으며 본 논문에서는 이러한 연구 내용을 상세히 설명한다.

2. 횡방향 긴장에 따른 응력분포

PSCP의 횡방향 긴장에 대한 설계를 위해서는 우선 횡방향으로 긴장을 가했을 경우에 슬래브에 발생하는 응력의 분포를 파악해야 한다. 이러한 분석을 위하여 PSCP의 수치해석 모델을 유한요소해석 프로그램을 이용하여 개발하였다(ABAQUS, 2007). 기본 모델은 콘크리트 슬래브의 종방향 길이를 120m, 횡방향 길이는 2차선과 노선을 합쳐서 8.2m, 그리고 두께는 대부분의 PSCP에서 사용되고 있는 0.15m로 하여 구성하였다. 해석에 사용된 물성치는 콘크리트 탄성계수 27GPa, 포아송비 0.15, 정착구 면적 0.1m×0.1m로 하였으며 그 이외의 물성치는 경우에 따라 변화를 시켜가며 해석을 수행하였다. 횡방향 긴장에 의한 횡방향으로의 전형적인 응력 분포는 그림 1에서 보여 준다. 화살표로 나타낸 정착구 주변에는 큰 압축응력이 분포하며 슬래브의 중앙 부분으로 갈수록 압축응력이 고루 분포되게 된다. 정착구와 정착구 사이의 슬래브 단부(edge) 부분에서



는 압축응력이 제대로 전달되지 않는 것도 볼 수 있다. 따라서 긴장간격을 작게 할수록 이러한 정착구 간의 압축응력 감소부분을 줄일 수 있으며 또한 고른 압축응력을 가져올 수 있는 정착구로부터의 거리도 감소시킬 수 있다.

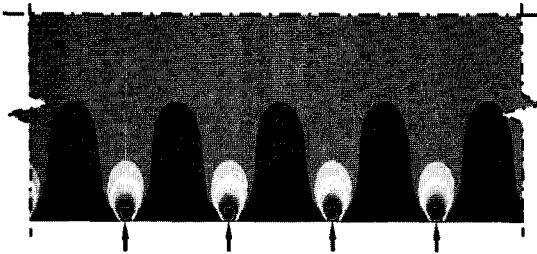


그림 1. 횡방향 긴장에 의한 횡방향 응력분포

횡방향으로 긴장할 때는 긴장간격을 종방향에서와 같이 매우 촘촘히 하기는 쉽지 않다. 만약에 100m 길이의 슬래브를 횡방향으로 0.5m마다 긴장을 한다고 하면 한쪽 면에 200개씩의 정착구가 필요하게 되며 이는 시공비용의 과대한 증가를 가져오게 되어 경제적인 면에서 적용성이 떨어지게 된다. 따라서 횡방향 응력분포를 분석하여 PSCP의 횡방향 긴장을 설계할 때 슬래브의 모든 부분을 고려하는 것 보다는 실제로 슬래브가 사용되는 부분을 선정하여 고려하는 것이 합리적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 차륜하중이 실제로 작용할 수 있는 슬래브에서의 가장 바깥 부분이라 할 수 있는 노건과 본선의 경계 부분(Shoulder 경계라 칭함), 차륜하중이 작용하는 Wheel Pass 부분, 그리고 슬래브의 중앙부분으로 슬래브의 응력분석위치를 선정하였다. 즉, 슬래브 단부로부터 Shoulder 경계는 0.5m, Wheel Pass는 1.36m 떨어진 곳에 위치하게 된다.

그림 2는 횡방향 긴장에 의한 슬래브의 횡방향 평균 압축응력(S22)이 1kPa이 되도록 긴장력을 작용한 경우 슬래브 각 위치별 긴장간격에 따른 최소응력 변화를 나타낸다. 슬래브 중앙부(Centerline)에서의 최소응력은 정착구 간격변화에 따라 변화가 그리 크지 않으며 평균 압축응력인 1kPa에 가까운 것을 볼

수 있지만 Wheel Pass와 Shoulder 경계부분에서는 정착구 간격이 넓어짐에 따라 횡방향 최소 압축응력이 뚜렷이 감소하는 것을 볼 수 있다. 특히 슬래브 단부에서 가까운 Shoulder 경계부분에서는 정착구 간격의 증가에 의한 최소응력의 감소가 매우 큰 것을 알 수 있다.

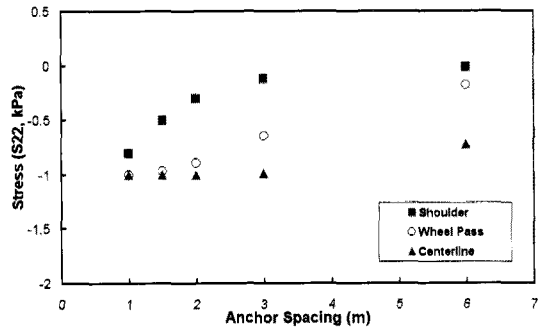


그림 2. 긴장간격에 따른 횡방향 최소응력변화

표 1에서는 긴장간격에 따른 횡방향 최소압축응력의 절대값을 각 위치별로 나타내었다. 평균 압축응력이 1kPa이기 때문에 각 위치에서의 응력값 자체가 결국 평균응력과의 비율이 된다. 이러한 값들은 횡방향 긴장 설계에 있어서 매우 중요한 기준이 된다. 왜냐하면 환경 및 차륜 하중에 의해 슬래브에 발생한 응력은 각 위치별로 차이가 날 것이며 이러한 위치중에 가장 큰 응력이 발생한 위치를 기준으로 긴장량을 산정하여 긴장하므로, 이 때 긴장에 의한 다른 위치에서의 긴장응력도 그 위치에서 하중에 의해 발생한 응력을 충분히 감소시킬 수 있어야 하기 때문이다. 이에 대한 추가적인 설명은 이후에 횡방향 설계방안에서 다시 구체적으로 하도록 한다.

표 1. 긴장간격에 따른 횡방향 최소응력 절대값(kPa)

긴장간격(m)	1	1.5	2	3	6
Shoulder	0.806	0.502	0.302	0.122	0.018
Wheel Pass	0.999	0.972	0.891	0.642	0.180
Centerline	1.000	1.000	1.000	0.993	0.719



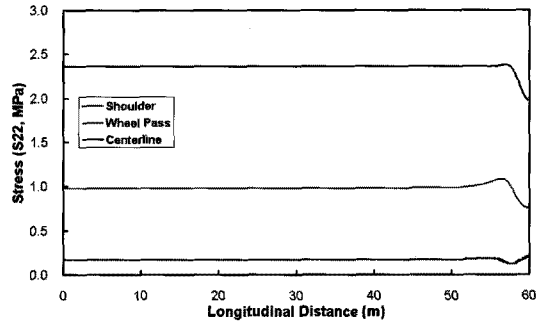
3. 환경하중에 의한 인장응력

PSCP의 횡방향 긴장 설계를 위해서는 환경하중에 의해 슬래브에 발생하는 횡방향 인장응력의 분포를 분석하여야 한다. 환경하중으로는 슬래브의 온도와 수분 변화를 들 수 있으며 이러한 환경하중은 슬래브에 수평 방향으로 변위를 가져오게 할 뿐만 아니라 슬래브 상하부의 온도차에 의한 슬래브의 컬링현상을 야기하게 된다. 슬래브의 수평방향으로의 변위는 하부층과의 마찰이 존재할 경우에 슬래브에 응력을 야기하게 되며, 횡방향으로는 슬래브의 길이가 길지 않기 때문에 수평방향으로의 변위에 의한 응력은 그리 크지 않을 것으로 가정하여 일반 콘크리트 포장의 해석에서와 같이 본 연구에서는 고려하지 않았다. 따라서 슬래브의 컬링에 의해 발생하는 응력이 환경하중에 의한 주요 횡방향 응력이 되며 이를 구조해석을 통하여 분석하였다.

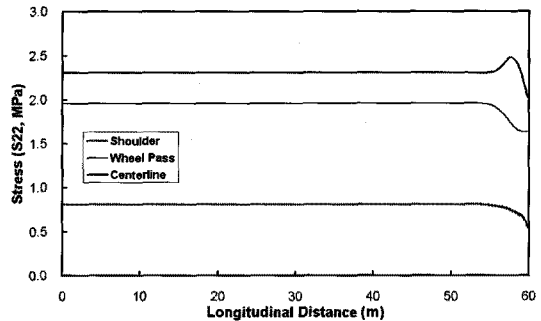
슬래브 하부의 지지층은 복합수직강성을 가지는 무인장(tensionless) 스프링을 사용하여 모델링하였으며 슬래브에 작용하는 온도구배(Temperature Gradient)를 1℃/cm로 하였다. 슬래브의 컬링 거동은 슬래브의 단부가 위로 솟고 중앙부는 내려앉는 모양의 컬업(Curl Up)현상과 그 반대의 컬다운(Curl Down)현상을 모두 고려하였다. 컬링현상에 의한 응력은 슬래브 상하부에 압축과 인장이 대칭으로 발생하기 때문에 상하부 표면에서 발생하는 최대 인장응력을 고려하였다.

그림 3은 하부층의 복합수직강성이 100MPa/m인 경우에 Shoulder 경계, Wheel Pass, 슬래브 중앙부에서 종방향을 따라서 발생하는 횡방향 인장응력 분포를 보여준다. 그림에서 가로축인 종방향 길이가 0인 지점이 슬래브의 중앙이며 60m인 지점이 슬래브의 한쪽 끝인 조인트 부분이다. 그림에서와 같이 횡방향으로의 응력분포는 조인트에서 약 5m 이내의 부분을 제외하고는 종방향 위치에 따라서는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 각 위치별 최대 횡방향 인장응력은 컬업과 컬다운에 따라서 차이가 나는 것을 볼 수 있으나 그 크기는 인장응력이 일정한 부분에 비해

그다지 큰 차이를 보이지는 않는다. 또한 컬업과 컬다운 시의 슬래브 중앙부분에서의 횡방향 응력은 매우 비슷한 양상을 보이지만 Wheel Pass와 Shoulder 경계부분에서는 컬다운 시의 응력이 컬업 시의 응력에 비해 뚜렷이 큰 것을 알 수 있다.



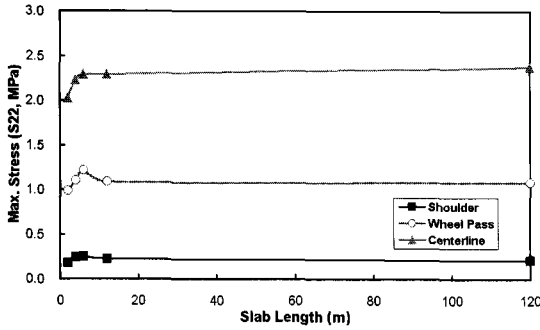
(a) Curl Up



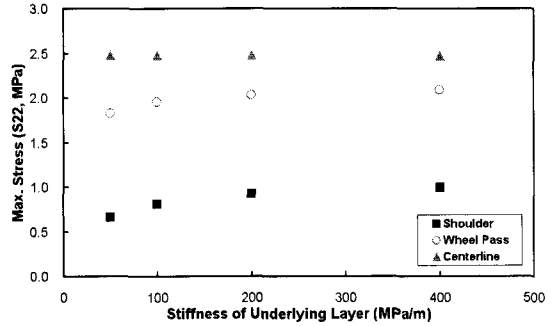
(b) Curl Down

그림 3. 환경하중 하에 종방향을 따라 발생하는 횡방향 응력분포

PSCP의 조인트 간 거리, 즉, 종방향으로의 슬래브 길이에 따른 환경하중 하의 횡방향 최대 응력변화를 그림 4에 나타내었다. 슬래브의 길이가 약 10m 이하이면 일반적으로 슬래브의 길이가 길어질수록 횡방향 응력이 증가하는 경향을 볼 수 있으나 슬래브의 길이가 약 10m 이상이 되면 슬래브의 길이에 관계없이 횡방향 최대응력이 거의 일정한 것을 알 수 있다. 따라서 PSCP에서 고려하는 정도의 매우 긴 슬래브 길이에 대해서는 횡방향 최대응력은 슬래브 길이의 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

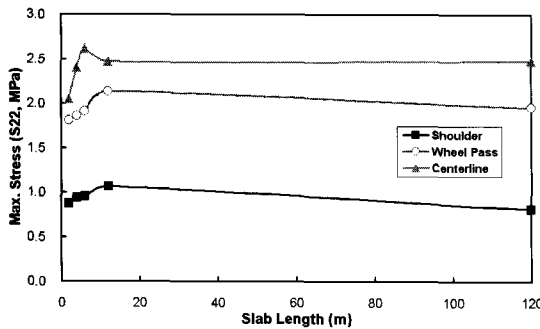


(a) Curl Up



(b) Curl Down

그림 5. 하부층 강성에 따른 횡방향 최대응력



(b) Curl Down

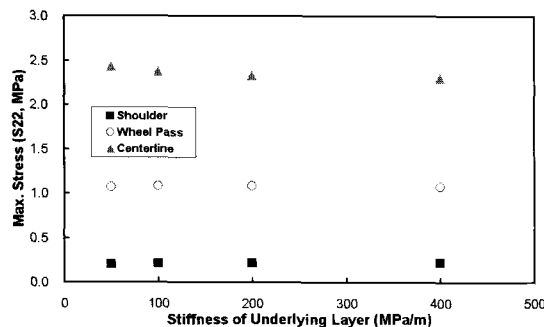
그림 4. 슬래브 길이에 따른 횡방향 최대응력

환경하중에 의한 PSCP 슬래브에 발생하는 응력이 하부층의 수직강성에 따라 어떠한 영향을 받는지 분석하여 그림 5에 나타내었다. 슬래브가 쉘다운할 때 Shoulder 경계와 Wheel Pass 부분에서는 하부층의 수직강성이 비교적 작을 경우에는 수직강성이 증가하면 응력이 다소 증가하는 경향을 볼 수 있

다. 하지만 대체적으로 하부층의 수직강성은 환경하중에 의한 슬래브의 횡방향 최대응력의 크기에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

4. 차륜하중에 의한 인장응력

환경하중과 더불어 PSCP 슬래브에 인장응력을 발생시키는 하중으로는 차륜하중을 들 수 있다. 차륜하중에 의한 PSCP 슬래브의 응력을 분석하기 위하여 단축과 복축하중을 고려하여 그림 6에서와 같이 슬래브의 중앙부, 단부, 우각부에 차륜하중이 작용할 경우를 고려하여 응력을 분석하였다. 차륜하중의 크기는 축당 50kN으로 가정하여 분석하였으나 차륜하중의 크기가 변화하면 응력 또한 이에 비례하여 변화시키면 된다.



(a) Curl Up

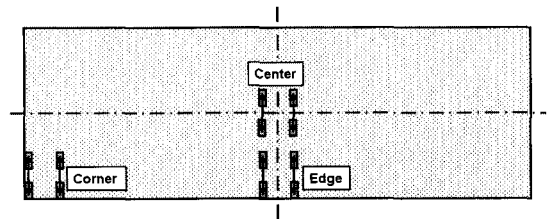


그림 6. 차륜하중 재하위치

그림 7은 PSCP 슬래브에 그림 6에 나타난 위치에서 복축하중을 재하한 경우에 슬래브에 발생한 응력



분포를 보여준다. 그림은 하중이 재하된 위치 주변에서 발생하는 최대주응력과 종방향 및 횡방향 응력 분포를 슬래브의 상하부면 중 최대인장응력이 발생한 면을 기준으로 나타낸 것이다. 그림에서 하중 근처의 진하게 표시된 부분이 최대인장응력이 발생한 부분이다. 각 경우에서 최대 인장응력은 최대주응력 분포에서 관찰할 수 있으나 그 크기는 중앙부와 단부에서는 종방향 최대 인장응력과 비슷하며 우각부에서는 횡방향 최대인장응력과 비슷해지는 것을 알 수 있다. 횡방향 응력을 보다 세밀히 살펴보면 슬래

브 중앙부에 차륜하중이 작용하는 경우에는 슬래브 하부에서 최대인장응력이 발생하였고, 단부에 차륜하중이 작용하는 경우에는 슬래브 상하부 면에서 거의 비슷한 최대인장응력이 나타났으며, 우각부에 차륜하중이 작용하는 경우에는 슬래브 상부에서 최대인장 응력이 발생하였다. 결과를 그림으로 나타내지는 않았으나 최대주응력과 종방향 응력은 단축하중이 재하된 경우가 복축하중의 경우보다 다소 더 컸으나 반대로 횡방향 응력은 복축하중이 재하된 경우에서 다소 더 크게 나타났다.

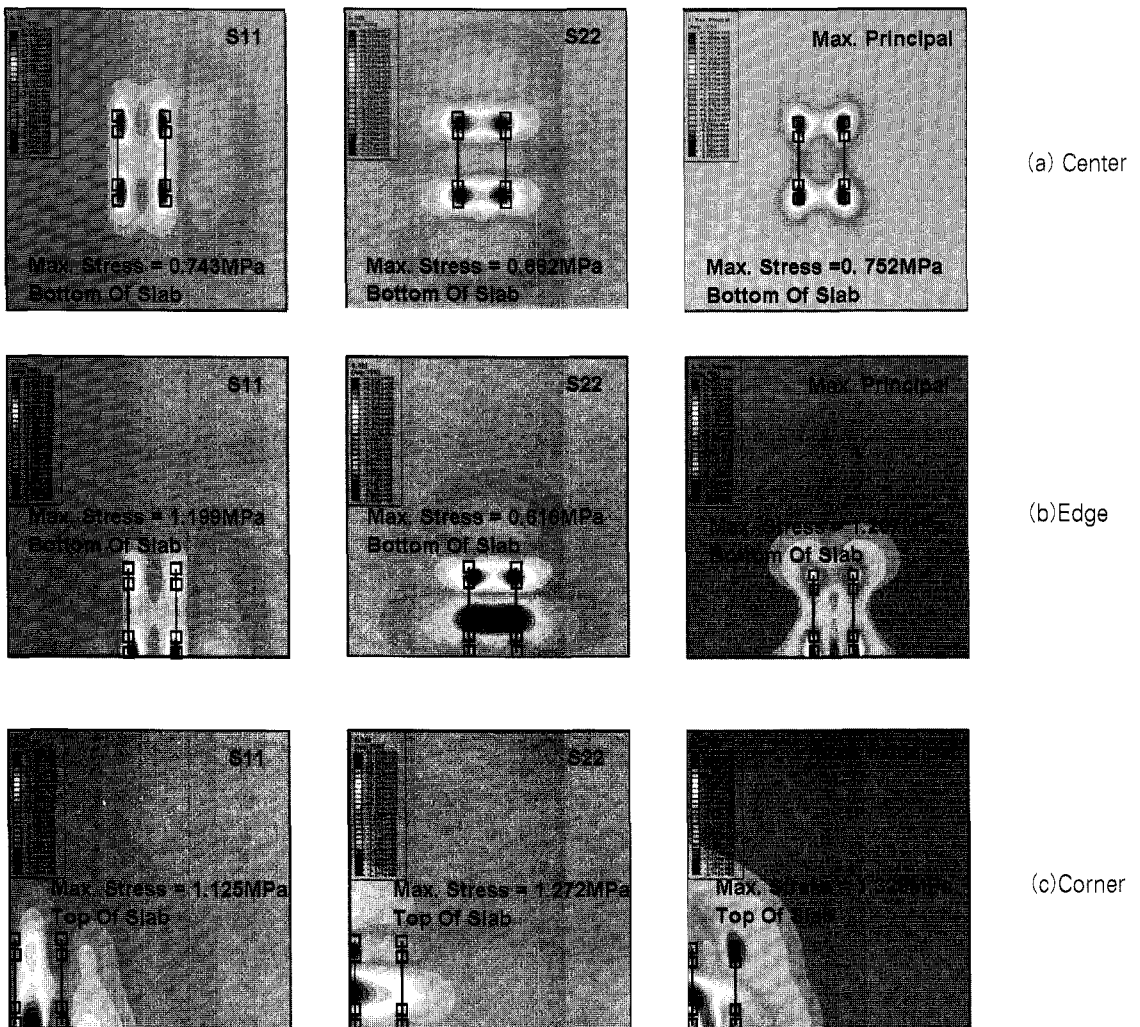
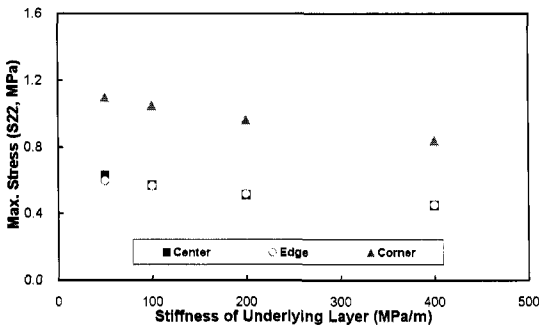


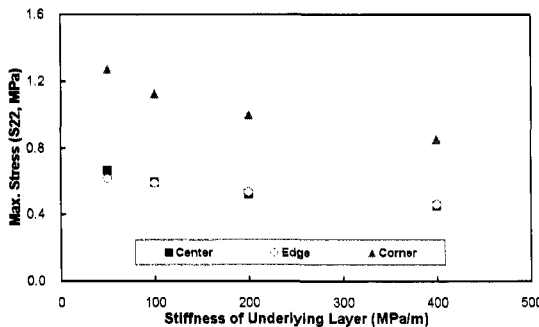
그림 7. 복축하중 재하에 따른 응력 분포



환경하중 하에서는 하부층 수직강성이 슬래브의 응력에 미치는 영향이 매우 미소하였으나 차륜하중 하에서는 그림 8에 나타난 것과 같은 결과를 보여준다. 일반적으로 차륜하중에 의해 발생하는 슬래브의 응력은 하부 지지층이 약할수록 그 크기가 커지게 된다. 횡방향 최대응력은 단축과 복축하중 하에서 그 크기가 서로 매우 비슷한 것을 알 수 있으나 슬래브의 중앙부분에서는 하부층 수직강성이 다소 약할 경우에는 복축하중에 의한 횡방향 응력이 단축하중에 의한 응력보다 확연하게 더 커지는 것을 볼 수 있다.



(a) 단축하중



(b) 복축하중

그림 8. 차륜하중 하의 하부층 강성에 따른 횡방향 최대응력

5. 설계하중 및 허용인장응력

PSCP의 횡방향 긴장 설계를 위해서는 PSCP에 작용하는 설계하중을 결정하여야 한다. 설계하중은

환경하중과 차륜하중을 모두 고려해야 하며 이러한 복합하중이 작용할 때 슬래브의 인장응력을 산정하여 이러한 응력을 감소시킬 수 있도록 긴장응력을 가해야 한다. 우선 환경하중이라 할 수 있는 슬래브의 수직 온도구배를 고려해 보면, 이전의 분석에서 사용한 1℃/cm는 두께 15cm의 슬래브에서 슬래브 상하부 온도차를 15℃가 나도록 한다. 이것은 매우 큰 온도차이며 일반적인 콘크리트 포장의 두께인 30cm 두께의 포장에서도 발생하기 쉽지 않은 온도차이다. 하지만 설계하중은 어느 정도 과대한 예측이 필요시되므로 이러한 1℃/cm의 온도구배를 설계 환경하중으로 고려하였으며 이와 더불어 좀 더 실제에 가까운 0.5℃/cm의 온도구배 또한 고려하였다. 차륜하중은 AASHTO에서 기준하중으로 제시하고 있는 축당 80kN을 설계 차륜하중으로 고려하였으며 과적차량에 의한 영향 또한 고려하기 위하여 설계 차륜하중이 1.5배 증가된 축당 120kN일 경우도 고려하였다. 따라서 이러한 환경 및 차륜하중을 조합하여 다음과 같은 세 가지의 경우를 설계하중으로 고려하였다.

Case1: 온도구배 1.0℃/cm, 차륜하중 80kN/축

Case2: 온도구배 0.5℃/cm, 차륜하중 80kN/축

Case3: 온도구배 0.5℃/cm, 차륜하중 120kN/축

이러한 세 가지 Case별로 설계 환경하중 및 차륜하중에 의한 슬래브 상하부의 횡방향 최대인장응력 및 이러한 응력의 합을 위치별로 각각 구하여 표 2에 나타내었다. 하부층 수직강성은 환경하중 하에서는 응력에 민감하지는 않으나 수직강성이 증가할수록 응력이 미소하나 증가하는 경향이 있으므로 환경하중에 의한 응력을 구할 때는 하부층 강성을 400MPa/m로 높게 가정하여 응력을 크게 예측하도록 하였다. 반대로 차륜하중에 대해서는 하부층 강성이 감소할수록 응력이 증가하기 때문에 차륜하중에 의한 응력을 구할 때는 응력이 크게 발생하도록 약한 수직강성(50MPa/m)을 사용하였다. 차륜하중에 의한 Wheel Pass 부분에서의 슬래브 상하부 최대인장



응력을 구할 때는 슬래브 하부에서의 최대인장응력은 슬래브 중앙부에 하중이 작용할 때의 응력과 같은 것으로 하였으며 슬래브 상부에서의 최대인장응력은 하중이 단부에 걸렸을 경우에 슬래브 상부에서 발생할 수 있는 최대인장응력으로 가정하였다. Shoulder 경계 부분에서는 슬래브 상하부에 발생하는 최대인장응력을 하중이 단부에 걸렸을 경우에 슬래브 상하부에서의 최대인장응력으로 가정하였다. 따라서 이와 같이 구해서 표에 나타난 인장응력은 어느 정도는 과대평가된 응력이라 할 수 있다. 표에서 진하게 표시된 응력값이 각 Case별로 발생할 수 있는 최대복합인장응력이다.

표 2. 설계하중 Case별 횡방향 인장응력(kPa)

Case 1	Slab Top or Bottom	Shoulder	Wheel Pass	Centerline
Environmental	Top of Slab (Curl Up)	216.0	1081.0	2434.0
	Bottom of Slab (Curl Down)	921.0	2035.0	2479.0
Vehicle	Top of Slab	985.9	985.9	338.2
	Bottom of Slab	985.9	1059.5	1059.5
Max. Sress(S22)	Top of Slab	1201.9	2066.9	2772.2
	Bottom of Slab	1906.9	3094.5	3538.5
Case 2	Slab Top or Bottom	Shoulder	Wheel Pass	Centerline
Environmental	Top of Slab (Curl Up)	108.0	540.5	1217.0
	Bottom of Slab (Curl Down)	460.5	1017.5	1239.5
Vehicle	Top of Slab	985.9	985.9	338.2
	Bottom of Slab	985.9	1059.5	1059.5
Max. Sress(S22)	Top of Slab	1093.9	1526.4	1555.2
	Bottom of Slab	1446.4	2077.0	2299.0
Case 3	Slab Top or Bottom	Shoulder	Wheel Pass	Centerline
Environmental	Top of Slab (Curl Up)	108.0	540.5	1217.0
	Bottom of Slab (Curl Down)	460.5	1017.5	1239.5
Vehicle	Top of Slab	1478.9	1478.9	507.4
	Bottom of Slab	1478.9	1589.3	1589.3
Max. Sress(S22)	Top of Slab	1586.9	2019.4	1724.4
	Bottom of Slab	1939.4	2606.8	2828.8

횡방향 긴장 설계에서 가장 중요하다고 할 수 있는 항목은 설계에서 사용할 슬래브의 허용인장응력을 결정하는 것이다. 본 연구에서는 허용인장응력을 네 가지의 경우로 구분하여 고려하였다. 우선 슬래브에 인장응력을 전혀 허용하지 않는 경우, 슬래브의 인장응력을 콘크리트의 인장강도만큼은 허용하는 경우, 그리고 콘크리트 인장강도의 1/2과 2/3만큼의 인장응력을 허용하는 경우를 고려하였다. 콘크리트의 인장강도는 일반적으로 압축강도의 약 1/10에 해당하므로 본 연구에서는 3MPa을 콘크리트의 인장강도로 가정하였다. PSCP의 횡방향 긴장응력은 설계하중에 의한 슬래브의 인장응력에서 이러한 허용인장응력을 제외한 크기에 해당하는 응력이 슬래브에 가해지도록 하여 산출할 수 있으며 다음과 같이 서로 다른 허용인장응력에 따라 긴장응력을 산출할 수 있다.

기준값 ① : 긴장응력 ≥ 설계하중에 의한 인장응력 (허용인장응력 = 0)

기준값 ② : 긴장응력 ≥ 설계하중에 의한 인장응력 - 콘크리트 인장강도 (허용인장응력 = 인장강도)

기준값 ③ : 긴장응력 ≥ 설계하중에 의한 인장응력 - 콘크리트 인장강도 × 1/2 (허용인장응력 = 인장강도 × 1/2)

기준값 ④ : 긴장응력 ≥ 설계하중에 의한 인장응력 - 콘크리트 인장강도 × 2/3 (허용인장응력 = 인장강도 × 2/3)

6. 횡방향 긴장 설계방안

앞에서 선정된 각각의 설계하중 Case와 허용인장응력 기준값에 따라 횡방향 긴장에 대한 설계를 하도록 한다. 본 연구에서는 긴장에 사용하는 강선을 KS D 7002/SWPC 7B로 하며 이러한 강선이 받을 수 있는 인장하중은 261kN이다. 일반적으로 긴장 시 강선 인장하중의 85%까지 긴장하기 때문에



221.85kN을 긴장하중으로 사용하도록 한다. 일반적으로 종방향 강선에 가해진 긴장하중은 마찰 등 여러 가지 원인에 의해 약 20%의 손실이 발생하는 것으로 알려져 있다(AASHTO, 1993). 하지만 횡방향 긴장에서는 긴장 거리가 매우 짧으므로 마찰 등의 영향이 매우 작아 이러한 손실을 고려하지 않는 것으로 가정하였다. 횡방향 긴장 설계방법을 간단히 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\text{강선인장하중}(261kN) \times 0.85 \times \text{강선 개수}(n)}{\text{슬래브 횡단면적}(120m \times 0.15m)} \geq \text{설계하중에 의한 인장응력-허용인장응력} \quad (1)$$

앞에서 고려한 설계하중 Case 중에 가장 실제와 근접하다고 볼 수 있는 하중 Case 2를 설계하중으로 하여 횡방향 긴장간격을 설계하면 다음과 같다.

기준값 ① ⇨

$$\text{강선개수}(n) \geq \frac{2299kPa \times 120m \times 0.15m}{261kN \times 0.85} = 186.5\text{개}$$

$$\text{긴장간격}(s) \geq \frac{\text{슬래브길이}(120m)}{\text{강선개수}(n)} = 0.643m$$

기준값 ② ⇨

강선개수(n) ≥

$$\frac{(2299kPa - 3000kPa) \times 120m \times 0.15m}{261kN \times 0.85} < 0\text{개}$$

$$\text{긴장간격}(s) \geq \frac{\text{슬래브길이}(120m)}{\text{강선개수}(n)} = \text{긴장불필요}$$

기준값 ③ ⇨

강선개수(n) ≥

$$\frac{(2299kPa - 1500kPa) \times 120m \times 0.15m}{261kN \times 0.85} = 64.8\text{개}$$

$$\text{긴장간격}(s) \geq \frac{\text{슬래브길이}(120m)}{\text{강선개수}(n)} = 1.852m$$

기준값 ④ ⇨

강선개수(n) ≥

$$\frac{(2299kPa - 2000kPa) \times 120m \times 0.15m}{261kN \times 0.85} = 24.3\text{개}$$

$$\text{긴장간격}(s) \geq \frac{\text{슬래브길이}(120m)}{\text{강선개수}(n)} = 4.938m$$

따라서 횡방향 긴장간격은 허용인장응력의 기준에 따라 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 허용인장응력이 작으면 고성능 포장체를 보증할 수는 있지만 긴장을 많이 해야 하기 때문에 경제성에 문제가 있으며, 반대로 허용인장응력이 크면 횡방향으로의 긴장을 소홀히 할 수 있으나 만약의 경우에 발생할 수 있는 균열 등의 파손을 방지하기가 쉽지 않게 된다. 궁극적으로 허용인장응력은 콘크리트 인장강도의 편차를 고려하여 선정하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

이와 같은 횡방향 긴장간격의 설계는 Shoulder 경계, Wheel Pass, 슬래브 중앙부 등의 위치 중에 가장 큰 응력이 발생하는 위치를 기준으로 설계를 수행한 것이다. 따라서 긴장을 통해 가장 큰 응력이 발생하는 부분의 응력을 원하는 만큼 감소시킬 수는 있으나 이때에 다른 위치에서 발생한 응력도 함께 감소시킬 수 있어야 한다. 이러한 검토는 표 1을 이용하여 수행할 수 있다.

예를 들어 위의 설계에서 기준값 ③을 사용하였을 경우의 설계검토를 수행하도록 한다. 우선 강선의 개수를 65개로 설계하였을 경우에 슬래브의 평균 긴장응력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{평균긴장응력}(\sigma) = \frac{261kN \times 0.85 \times 65}{120m \times 0.15m} = 801.1kPa \quad (2)$$

표 1에서 각 위치별 응력비율은 긴장간격이 커질수록 서로 간의 차이가 더 커지기 때문에 위에서 설계한 긴장간격 1.852m의 검토를 위해서는 이보다 크며 표에서 제시하고 있는 2m를 기준으로 검토하면



된다. 표에서 제시하고 있는 슬래브 중앙부, Wheel Pass, Shoulder 경계에서의 긴장응력의 비율은 1:0.891:0.302이다. 따라서 다음과 같은 식을 이용하여 각 위치에서의 설계하중에 의한 최대인장응력이 긴장에 의해 가해지는 응력에 의해 허용인장응력보다 작아지는가를 검토할 수 있다.

$$\text{위치별 최대인장응력} < \sigma \times \text{응력비율} + \text{허용인장응력} \quad (3)$$

각 위치별 응력을 검토하면 다음과 같다.

중앙부:

$$2299.0kPa < 801.1kPa \times 1 + 1500 = 2301.1kPa \quad (\text{OK})$$

Wheel Pass:

$$2077.0kPa < 801.1kPa \times 0.891 + 1500 = 2213.8kPa \quad (\text{OK})$$

Shoulder 경계:

$$1446.4kPa < 801.1kPa \times 0.302 + 1500 = 1741.9kPa \quad (\text{OK})$$

만약에 어느 특정 위치에서 위의 식을 만족하지 못하면 설계에서 구한 긴장 간격을 줄여서 모든 위치에서 식 (3)을 만족할 수 있도록 하여야 한다. 이러한 횡방향 긴장 설계 방안을 그림으로 나타내면 그림 9와 같다.

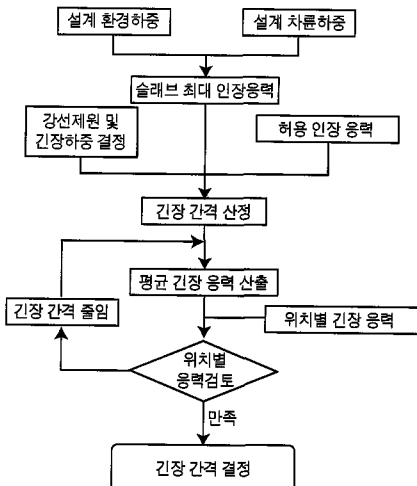


그림 9. 횡방향 긴장 설계 방안

7. 결론

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 포장의 횡방향 긴장 설계방안을 개발하기 위하여 우선 긴장 시에 슬래브에 가해지는 응력분포와 환경하중 및 차륜하중에 의해 슬래브에 발생하는 인장응력분포를 분석하였다. 이러한 응력분포와 허용인장응력을 기준으로 횡방향 긴장 설계를 수행하는 방안에 대하여 상세히 설명하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 횡방향 긴장에 의한 슬래브 내부 최소응력의 크기는 정착구 간격이 넓어질수록 감소하는 것을 알 수 있다. Shoulder 경계부분에서는 정착구 간격의 변화에 따른 최소응력의 변화가 큰 것을 볼 수 있으며 Wheel Pass 부분과 중앙부분으로 갈수록 그 변화 폭이 작아진다.
- 포장 슬래브에 환경하중이 작용하면 컬링현상에 의해 슬래브 표면 또는 바닥면에서 최대인장응력이 발생하며, 슬래브 길이가 긴 PSCP에서는 하부지지층의 강성과 슬래브의 길이는 환경하중에 의한 최대인장응력의 크기에 영향을 거의 미치지 않는다.
- 차륜하중에 의한 PSCP 슬래브의 응력은 복측하중보다 단측하중인 경우에 종방향 응력이 다소 크게 발생하며 횡방향 응력은 반대로 복측하중인 경우에 다소 크게 발생한다. 이러한 응력은 하부 지지층이 약할수록 크게 나타난다.
- 횡방향 긴장간격을 설계할 경우 설계하중에 의한 슬래브의 최대인장응력을 기준으로 긴장간격을 설계한 후에 Shoulder 경계, Wheel Pass 등 여러 다른 위치에서의 긴장 시 응력비율 또한 검토하여 최대인장응력을 기준으로 설계된 긴장 간격의 타당성을 검증하여야 한다.
- 횡방향 긴장 설계를 위하여 적절한 설계하중 및 허용인장응력의 기준을 결정하는 것이 매우 중요하다. 설계하중은 실제 발생할 수 있는 하중조건



에 어느 정도의 가산치를 더하여 산정하고, 허용 인장응력은 콘크리트 재료의 인장강도 편차를 고려하여 선정하는 것이 합리적이다.

참고문헌

AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABAQUS (2007). *User's Manual Version 6.7*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R. I.

Brunner, R. J. (1975). "Prestressed Pavement Demonstration Project," *Transportation Research Record*, No. 535, Transportation Research Board.

Friberg, B. F. and Pasko, T. J. (1973). "Prestressed Concrete Highway Pavement at Dulles International Airport," *Highway Research Record*, No. 466, Highway Research Board, pp. 1-19.

Klunker, F. (1981). "Status and Developments in the Construction of Prestressed Concrete Runways in European Airport," *Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete*

Pavement Design, Session 6: Airport Pavement, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Medina-Chavez, C. I. and Won, M. (2005). "Design Standards, Special Specifications, and Monitoring Plan for PCP in Texas," *Research Report 5-4035-01-1*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin. pp. 1-50.

Mendoza-Diaz, A., McCullough, B. F., and Burns, N. (1986). "Design of the Texas Prestressed Concrete Pavement Overlays in Cooke and McLennan Counties and Construction of the McLennan County Project," *Research Report 555/556-1*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

Powers, R. and Zaniewski, J. (1987). "Nine Year Performance Evaluation of Arizona's Prestressed Concrete Pavement," *Transportation Research Record*, No. 1136, Transportation Research Board.

접 수 일: 2008. 10. 16
 심 사 일: 2008. 10. 16
 심사완료일: 2008. 12. 2