



횡방향 긴장에 의한 프리스트레스트 콘크리트 포장의 거동분석

Numerical Analysis of Prestressed Concrete Pavements Subjected to Transverse Post Tensioning

김 성 민* 윤 동 주** 김 동 호***
Kim, Seong-Min Yoon, Dong Joo Kim, Dong Ho

Abstract

This study was conducted to investigate the stress distribution in the prestressed concrete pavement (PSCP) when the transverse post tensioning was applied. By performing the structural analyses using a finite element model of PSCP, the effect of anchor spacing and the relationship between the longitudinal and transverse post tensioning were evaluated. The analysis results showed that as the anchor spacing became smaller, the stresses were more uniformly distributed and the ranges of the stress losses were reduced; however, the economy should be considered. As the anchor spacing became larger, the difference between the average transverse stress and the transverse stresses at various locations such as shoulder, wheel pass, and center of the slab, increased. The transverse post tensioning induced the additional tensile forces in the longitudinal tendons, but the magnitude was negligibly small, and the longitudinal and transverse post tensioning could be designed independently. The use of the transverse stress distribution for the design of the post tensioning was also discussed in this paper.

Keywords : prestressed concrete pavement, transverse tensioning, stress, finite element, anchor spacing

요 지

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 포장에 횡방향으로 프리스트레싱을 가할 때 포장체에 발생하는 응력분포를 분석하여 긴장간격에 따른 특성을 파악하고 종방향과 횡방향 긴장의 상호 영향을 분석하기 위하여 유한요소 모델을 개발하여 구조해석을 수행하였다. 연구결과 횡방향 긴장간격은 작을수록 응력분배를 적절하게 할 수 있고 압축응력의 손실범위를 줄일 수 있으나 경제성 문제를 제고하여 적절한 긴장간격을 선정하여야 한다. 포장체의 노면, 주행위치, 중앙부 등의 여러 위치에서 분석한 횡방향 응력분포는 긴장간격이 넓을수록 평균응력과의 차이가 커지며 그 차이는 슬래브 중앙부로 갈수록 감소하게 된다. 횡방향 긴장을 가하면 종방향으로도 추가 긴장력이 발생하게 되지만 그 크기는 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 종횡방향 긴장 설계는 독립적으로 수행하여도 타당하다. 또한 횡방향 긴장 설계 시 이러한 긴장에 의한 응력분포를 이용하는 방안에 대해서도 본 논문에서 언급하였다.

핵심용어: 프리스트레스트 콘크리트 포장, 횡방향 긴장, 응력, 유한요소, 긴장간격

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
** 비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정
*** 정회원 · (주)삼우아이엠씨 기술연구소 수석연구원



1. 서론

우리나라에서 폭넓게 사용되고 있는 줄눈콘크리트 포장은 조인트에서의 스폐링과 벌어짐 현상으로 인한 잦은 유지보수를 초래함으로써 교통체증과 교통사고원인을 제공하고 있으며 예산낭비와 함께 사용자의 불편을 가중시키는 문제를 내포하고 있다. 또한 제한적으로 사용하였던 연속철근콘크리트 포장도 마찬가지로 종방향 조인트 파손과 균열부에서의 파손 및 편치아웃 등으로 인해 유지보수가 불가피한 실정이다. 이에 반해 국내에서는 시공경험이 없으나 미국 등 선진외국에서는 수십년 전부터 사용되고 있는 프리스트레스트 콘크리트 포장(PSCP: Pre-stressed Concrete Pavement)은 장기 공용기간동안 파손과 유지보수없이 사용되고 있는 포장형식이다(Powers and Zaniewski, 1987; Mendoza-Diaz et al., 1986). 따라서 국내에서도 이러한 프리스트레스트 콘크리트 포장에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이다.

콘크리트 포장 슬래브에는 환경 및 차량하중에 의한 응력이 다양하고 복합적인 형태로 작용하게 되며 이로 인해 발생하는 과대 인장응력은 슬래브에 균열을 야기한다. 프리스트레스트 콘크리트 포장은 프리스트레싱 기법을 도입하여 발생 가능한 인장응력을 감소시켜 균열발생을 억제하고 고성능 고내구성 등의 장기공용성을 기대할 수 있는 포장형식이다. 이러한 프리스트레스트 콘크리트 포장은 프랑스의 프레시네(Freyssinet)가 파리의 울리 국제공항에 1946년 처음 적용하였으며 그 후로 건설이 계속적으로 진행되어 왔다(Klunker, 1981). 프리스트레스트 콘크리트 포장은 종방향으로는 긴장을 가하지만 횡방향으로는 긴장을 가하기도 하고 가하지 않기도 한다. 따라서 이러한 횡방향 긴장에 대해서는 연구가 미비한 실정이나 미국에서 최근에 건설되고 있는 프리스트레스트 콘크리트 포장은 대체적으로 횡방향으로 긴장을 가하고 있다(Medina-Chavez and Won, 2005). 참고로 프리스트레스트 콘크리트 포장은 현

장 타설 콘크리트를 이용하는 방법과 프리캐스트 슬래브를 이용하는 방법으로 구분되며, 본 연구에서 고려하는 포장형식은 현장 타설 콘크리트를 사용하여 긴장을 가하는 방식으로 PTCP(Post Tensioned Concrete Pavement)라 불리기도 한다.

본 연구의 목적은 프리스트레스트 콘크리트 포장에서 횡방향으로 긴장을 가할 때 긴장간격에 따른 응력의 분포특성을 분석하고, 종방향 긴장과 횡방향 긴장의 상호영향을 파악하며, 횡방향 긴장 설계 시에 검토해야 할 사항을 분석하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 프리스트레스트 콘크리트 포장의 구조해석 모델을 개발하여 횡방향 긴장에 의한 거동을 분석하였으며 본 논문엔 연구내용을 상세히 기술하였다.

2. 구조해석 모델

PTCP의 횡방향 긴장에 의한 거동을 분석하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2007)를 사용하여 구조해석 모델을 개발하였다. 그림 1에서 보인 바와 같은 하부지지층 위에 놓인 콘크리트 슬래브를 횡방향으로 프리스트레싱을 가할 경우에 슬래브의 응력분포를 구할 수 있도록 하였다.

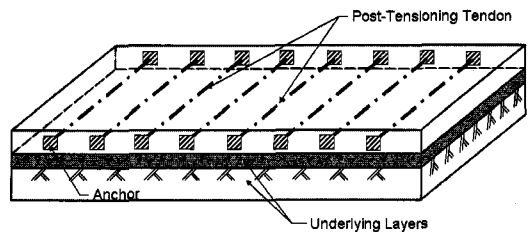


그림 1. PTCP 횡방향 프리스트레싱 개념도

그림 2에서 보인 바와 같이 콘크리트 슬래브는 3차원 고체요소를 사용하여 모델링하였으며 요소의 크기는 종방향, 횡방향으로 0.1m, 수직방향으로



0.025m로 하였다. 따라서 유한요소의 형상비는 4:1
로써 5:1 이하로 유지하여 유한요소해석을 수행할
때 요소의 형상비에 의한 오차가 크지 않도록 하였
다. 슬래브를 지지하는 하부층은 마찰저항 및 전단저
항을 가지는 종방향 및 횡방향의 스프링과 지반의 복
합수직강성을 가지는 수직방향 무인장(tensionless)
스프링을 사용하여 모델링하였다. 하부층의 수직강
성 크기는 본 해석에서는 횡방향 프리스트레싱 하중
만을 고려하기 때문에 수직방향으로의 하중은 자중
밖에 없으며, 따라서 의미가 없게 된다. 횡방향 프리
스트레싱은 포장 슬래브의 측면에서 중립축을 따라
횡방향으로 작용하도록 하였으며 압축력은 정착구의
전단면적에 등분포하중으로 작용하도록 모델링하였
다. 슬래브의 모델이 종방향 및 횡방향으로 모두 대
칭이기 때문에 슬래브의 1/4만 고려하여 모델을 개
발하였다. 대칭을 이용한 해석이므로 대칭면에서 대
칭면과 수직되는 방향의 자유도는 구속하는 경계조
건을 사용하였다.

해석에 사용된 PTCP의 제원 및 재료특성의 입력
값을 표 1에 나타내었다. 대칭 모델을 사용할 때 횡
방향으로의 전체 프리스트레싱 하중 크기를 9,000N
으로 가정하였으며 따라서 슬래브의 측면에 가해지
는 총 하중을 슬래브 측면 단면적으로 나누면 평균응
력이 1kPa이 나오게 된다. 구조해석이 선형탄성을
가정한 해석이기 때문에 이러한 하중 크기가 변화하
면 응력 및 변형 등의 거동도 하중 크기에 선형 비례
하도록 변화시키면 된다.

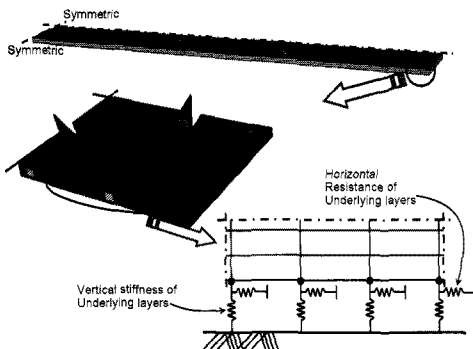


그림 2. PTCP 횡방향 프리스트레싱 구조해석 모델

표 1. 해석에 사용된 입력값

변 수	입력값
콘크리트 탄성계수(GPa)	27
콘크리트 포아송 비	0.15
슬래브 크기(m): 종, 횡, 두께 (괄호안은 대칭을 이용한 모델)	120×8.2×0.15 (60×4.1×0.15)
하부층 수직저항(MN/m ³)	100
횡방향 총 긴장하중(N) (대칭모델)	9,000
정착단 면적(m×m)	0.1×0.1
정착구 간격(m)	1, 1.5, 2, 3, 6

3. 횡방향 긴장간격 영향 분석

PTCP의 설계 및 시공에 있어서 매우 중요한 인자
중의 하나로 횡방향 긴장(정착구)간격을 들 수 있다.
횡방향 긴장간격이 작을수록(정착구 개수가 많을수
록) 프리스트레싱을 가할 때 응력분배를 확실하게
할 수 있고 정착구와 정착구 사이에 발생할 수 있는
응력손실 범위를 줄일 수 있다. 또한 프리스트레싱을
가하여 얻고자 하는 압축응력의 크기가 일정하다고
하면 정착구의 간격이 작을수록 정착구 당 가해야 하
는 긴장력의 크기는 감소하게 된다. 반대로 정착구의
간격이 넓으면 하나의 정착구에 가해야 하는 긴장력
은 커지게 된다. 이로 인해 정착단 주변에 응력집중
이 발생되며 슬래브에 고르게 압축응력을 분배하기
가 어렵게 된다. 하지만 정착구의 개수는 시공비용과
크게 관련이 있기 때문에 구조적 안정성과 경제성 간
의 상반된 관계로 인해 횡방향 정착구 간격의 적절한
선정이 매우 중요시된다.

긴장간격에 따른 영향을 분석하기 위하여 정착
구 사이의 간격을 다르게 해서 해석을 수행하여 횡
방향 응력분포를 분석하였다. 그림 3은 정착구의
간격이 1, 1.5, 2, 3, 6m일 때의 슬래브 상하부
표면에 발생하는 횡방향 응력분포이다. 이미 언급
한 바와 같이 횡방향으로 가해지는 총 재하하중의
크기는 일정하게 유지하였기 때문에 정착구 당 가



해지는 긴장력의 크기는 정착구 간격에 따라 달라진다.

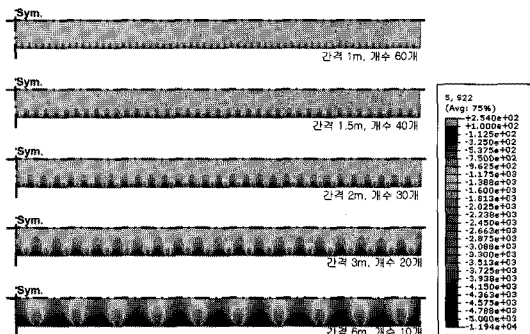


그림 3. 긴장간격에 따른 횡방향 응력분포

그림에서 일점쇄선은 전체 크기의 1/4만 모델링 되었기 때문에 대칭을 의미하는 것이다. 정착구 간격이 6m일 때를 보면 정착단에 큰 응력이 집중되는 것을 볼 수 있으며 응력분배가 잘 이루어지지 않아 전체 슬래브에 횡방향 응력의 차이가 큰 것을 쉽게 발견할 수 있다. 반면에 정착구 간격이 1m인 경우를 보면 정착구 근처를 제외하고는 슬래브 전체가 거의 일정한 응력을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 정착구 간격이 좁을수록 또는 정착구 개수가 많을수록 슬래브에 응력분배가 잘 되는 것을 알 수 있다.

그림 3에 나타난 응력분포를 슬래브 일부분의 약 10m 길이 구간을 확대하여 그림 4에 나타내었다. 그림에서 Shoulder라고 표시된 점선은 슬래브 폭 4.1m에서 3.6m의 본선구간을 제외한 길어깨 경계인 슬래브 바깥쪽 단부로부터 0.5m 지점을 나타낸 것이며, Wheel Pass라고 표시된 점선은 차륜 하중의 바깥쪽 Wheel이 지나가는 부분을 나타낸 것이다. Wheel Pass를 구할 때 차륜의 폭은 전형적인 복륜 복축 하중에서의 1.88m를 사용하였으며 슬래브 바깥 단부로부터 횡방향으로 1.36m 또는 길어깨 경계로부터 0.86m 안쪽에 위치하게 된다.

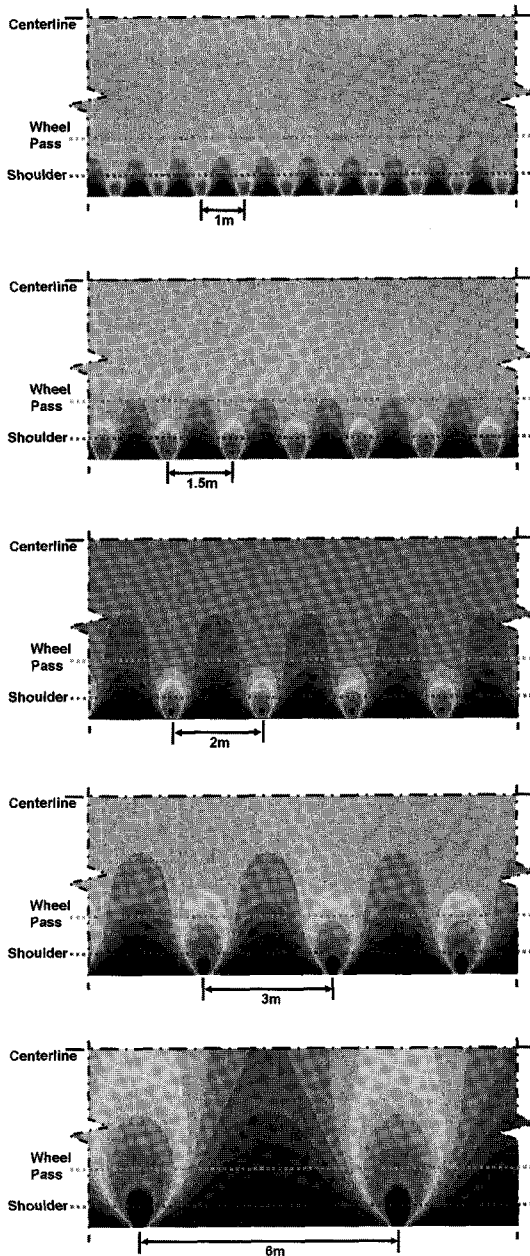


그림 4. 횡방향 응력분포 분석

그림에서 볼 수 있듯이 정착구와 정착구 사이에서는 압축응력이 제대로 가해지지 않으며 이러한 현상은 정착구 간격이 넓을수록 더욱 뚜렷해진다. 길어깨 부분을 기준으로 살펴보면 정착구 간격이 1m일 경우에는 응력감소부분이 대부분 길어깨 바깥부분에 존



재하기 때문에 슬래브의 구조적 안정성에는 문제가 되지 않는다. 하지만 정착구 간격이 넓어짐에 따라 길어깨 부분뿐만 아니라 본선내에도 응력감소부분이 상당히 존재하게 되어 가해진 압축응력의 효율성이 떨어지게 된다.

종방향을 따라 Shoulder 경계부분인 바깥쪽 단부에서 0.5m 위치에서의 응력을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 응력의 부호는 마이너스가 압축응력을 의미한다. 정착구의 간격이 좁아질수록 길어깨 경계 부분에서의 응력이 종방향 위치에 따라 변화하는 크기가 작은 것을 알 수 있으며, 정착구 간격이 넓어질수록 정착구 위치에서는 압축응력이 크게 걸리지만 정착구 간의 사이에서는 응력의 감소가 크게 작용하여 응력이 거의 0에 가까워지는 것을 알 수 있다.

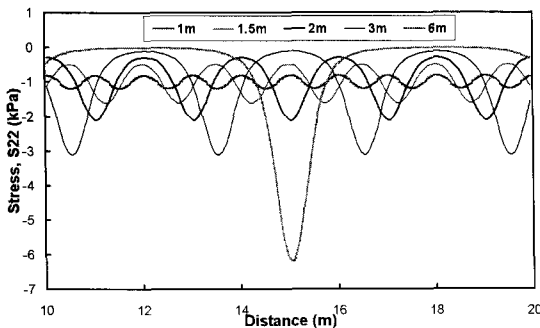


그림 5. Shoulder 경계부분의 횡방향 응력분포

Wheel Pass 부분의 응력분포는 그림 6에서 보여 준다. Wheel Pass는 길어깨에 비해 슬래브 내부에 존재하기 때문에 정착구 간격에 따른 압축응력의 변화폭이 대폭 감소한 것을 알 수 있다. 이 경우에는 정착구 간격이 1m일 때는 응력의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있으며 1.5m인 경우도 응력변화가 매우 미소한 것을 알 수 있다.

그림 7은 8.2m 폭 슬래브의 중앙부분 또는 구조해석에서 종방향 대칭축(그림 4에서 Centerline)을 따라 횡방향 응력의 변화를 보여 준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브의 중앙부에서는 압축응력의 변화양상이 정착구 간격이 3m 이하인 경우에는 거의

없는 것을 알 수 있으며 응력값이 평균응력인 1kPa 이 되는 것을 알 수 있다.

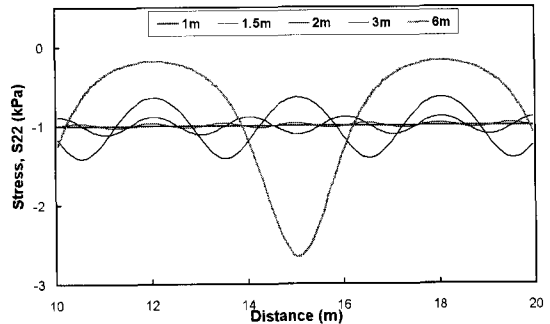


그림 6. Wheel Pass 부분의 횡방향 응력분포

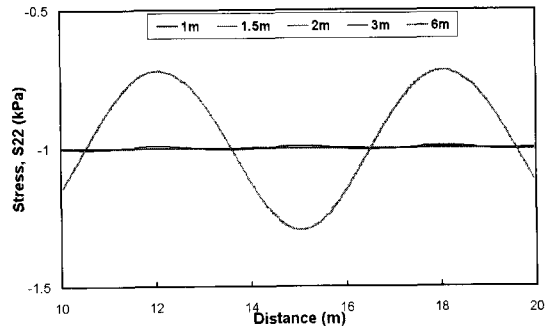
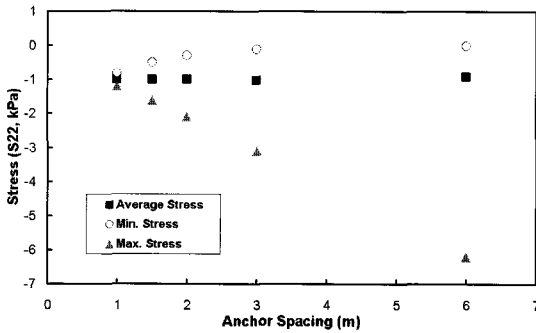
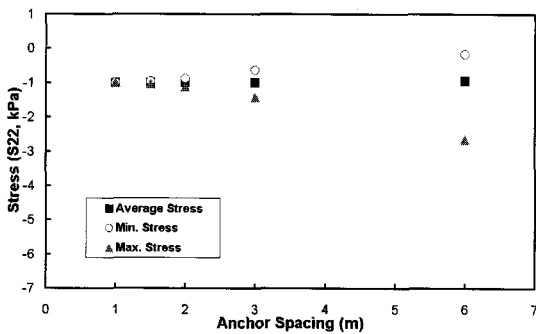


그림 7. 중앙부분의 횡방향 응력분포

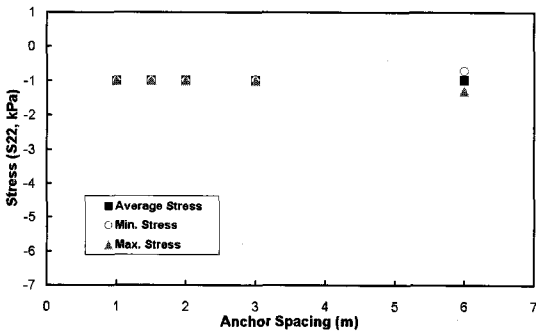
PTCP에서 슬래브에 횡방향 프리스트레싱을 가할 때 압축응력이 대부분 제대로 가해졌다고 하더라도 어느 부분에서 압축력이 제대로 전달되지 않았다면 그 부분에서 균열 등의 파손이 발생될 확률이 높게 된다. 따라서 위에서 분석한 응력분포에서 정착구 간격 및 위치에 따라 압축응력이 가장 큰 값, 평균값, 가장 작은 값을 고려하여 그림 8에 나타내었다. Shoulder 경계부분과 Wheel Pass 부분 그리고 슬래브 중앙부분에서 모두 평균응력값은 정착구의 간격에 관계없이 거의 일정한 것을 알 수 있다. 정착구 간격이 커질수록 최대 압축응력은 증가하나 최소응력은 감소하여 0에 가까워지는 것을 알 수 있다. 최대응력과 최소응력의 차이는 슬래브 바깥쪽에서부터 중앙부 쪽으로 위치가 이동함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) Shoulder



(b) Wheel Pass



(c) 중앙부분

그림 8. 정착구 간격에 따른 횡방향 최대, 최소 및 평균응력 변화

4. 종방향과 횡방향 긴장 상호 영향분석

PTCP에서는 일반적으로 종방향 프리스트레싱을 먼저 한 후에 횡방향 프리스트레싱을 가하게 되므로

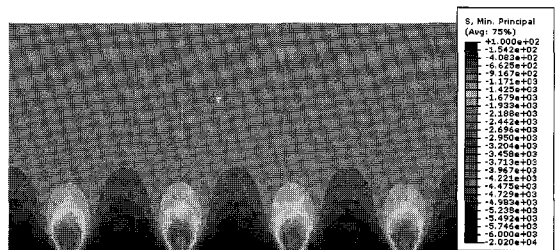
종방향 프리스트레싱이 존재할 때 횡방향 긴장에 따른 응력분포와 종방향 프리스트레싱을 고려하지 않았을 때 횡방향 긴장에 의한 응력분포를 비교하여 종방향과 횡방향 긴장의 상호 영향분석이 필요하다.

PTCP에 횡방향 긴장을 가할 때 종방향 긴장이 있을 경우와 없을 경우로 구분하여 횡방향 긴장에 의한 횡방향 응력분포를 비교·분석하였다. 표 2는 종방향 긴장과 관련된 입력값을 보여준다. 종방향 총 긴장하중의 크기는 횡방향 긴장하중의 크기 산정 시와 같이 긴장에 의해 콘크리트가 받는 종방향 평균응력이 1kPa이 되도록 선정하였다.

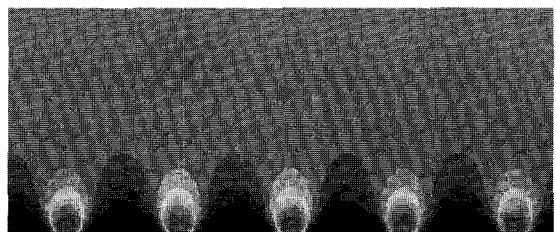
표 2. 종방향 긴장 관련 입력값

변 수	입력값
종방향 총 긴장하중(N) (대칭모델)	615
정착구 면적(m×m)	0.1×0.1
종방향 정착구 간격(m)	0.6

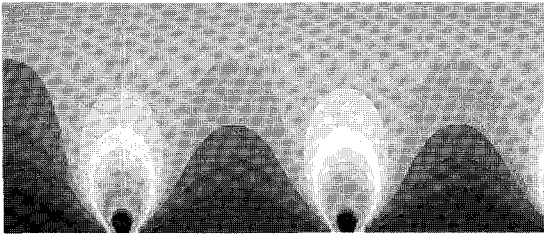
그림 9는 종방향 긴장력이 있을 경우와 없을 경우에 횡방향 긴장에 의한 횡방향 응력분포를 슬래브의 일부분에서 보여주고 있다. 그림에서와 같이 전체적으로 볼 때 두 경우의 응력분포에서 특별한 차이를 발견할 수 없음을 알 수 있다.



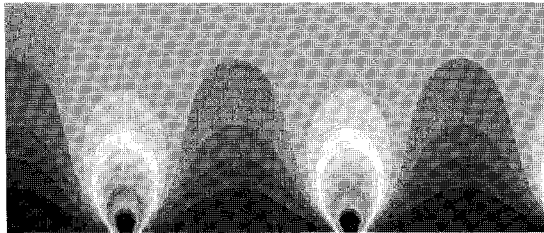
(a) 긴장간격 1.5m, 종방향긴장 : 무



(b) 긴장간격 1.5m, 종방향긴장 : 유



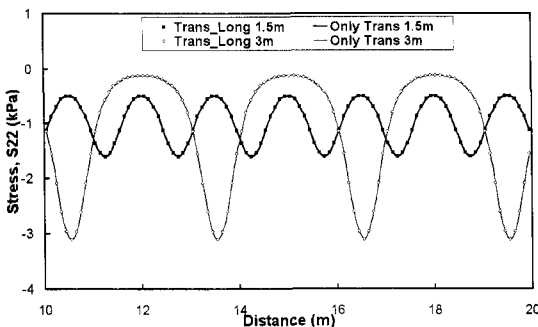
(c) 긴장간격 3m, 종방향긴장 : 무



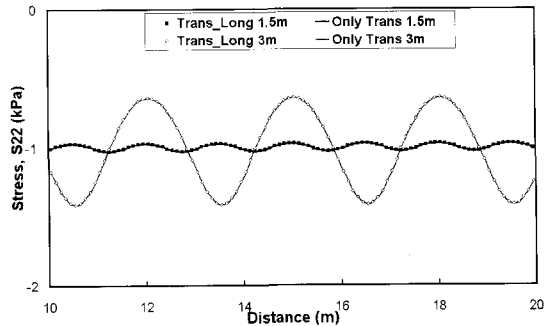
(d) 긴장간격 3m, 종방향긴장 : 유

그림 9. 횡방향 응력분포 비교

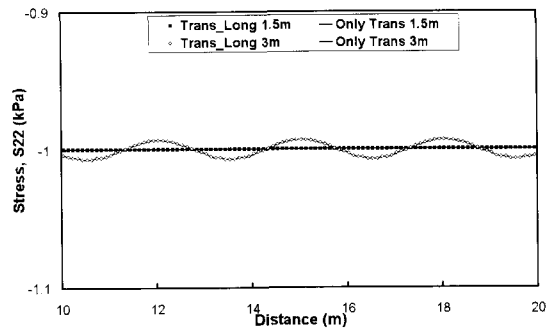
그림 10은 Shoulder, Wheel Pass, 중앙부에서 횡방향 긴장간격이 1.5m와 3m일 때 종방향 긴장력의 유무에 따른 횡방향 응력의 분포를 보여준다. 그림에서 Trans_Long으로 표시된 결과는 종방향과 횡방향의 긴장이 모두 존재할 경우이며 Only Trans로 표시된 결과는 종방향 긴장이 없고 횡방향으로만 긴장을 가했을 경우의 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 위치에서 횡방향으로의 응력분포는 종방향 긴장이 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 횡방향 긴장에 의한 횡방향으로의 응력분포는 종방향 긴장의 유무에 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.



(a) Shoulder



(b) Wheel Pass



(c) 중앙부분

그림 10. 종방향 긴장 유무에 따른 횡방향 응력분포

일반적으로 종방향으로 긴장을 가하는 모델링은 횡방향으로 긴장을 가할 때와 마찬가지로 정착구 면적에 등분포 하중을 재하하면 된다. 하지만 실제로는 슬래브에 종방향 하중을 가하는 것은 텐던이며 이러한 텐던에 가해진 긴장이 슬래브에 압축력을 전달하게 되는 것이다. 종방향 긴장 후에 텐던과 쉬스관을 그라우팅 하기 전에 횡방향 긴장을 수행하는 것이 일반적이며 또한 쉬스관을 사용하지 않고 비부착 텐던을 사용하는 경우에는, 횡방향 긴장에 의해 포아송비의 영향으로 종방향으로 슬래브의 길이가 증가하려고 하며 이는 종방향 텐던에 추가적인 인장응력을 가져와서 결과적으로는 슬래브에도 종방향으로 추가적인 압축응력을 가하게 되는 현상이 발생하게 된다. 따라서 포아송비에 의한 횡방향 긴장 시 종방향으로의 거동을 그림 10을 참고로 하여 역학적으로 분석



해 본다.

그림 11(a)에 보인 바와 같이 횡방향 긴장에 의한 종방향으로의 거동은 대칭이 되기 때문에 종방향 길이의 반만을 고려하여 콘크리트 슬래브와 텐던의 초기상태를 나타내었다. 만약에 콘크리트와 텐던이 완전히 분리되어 있다면 그림 11(b)에서와 같이 횡방향 긴장에 의한 포아송비에 따른 콘크리트 슬래브의 종방향으로의 길이 증가량인 δ_c 는 자유롭게 발생할 수 있을 것이다. 하지만 슬래브와 텐던은 조인트 부분에서 서로 연결되어 있기 때문에 슬래브의 길이가 증가하려는 경향을 텐던이 억제하여 실제의 종방향 길이 변화는 δ_c 보다는 작게 되며 이러한 현상을 그림 11(c)에 나타내었다.

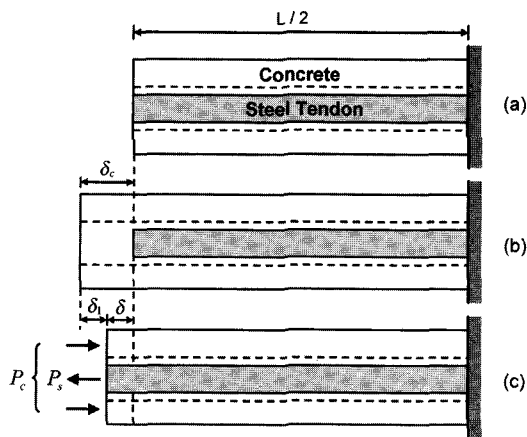


그림 11. 종방향 인장변위에 의한 추가긴장력 산정 개념도

그림에서 알 수 있는 바와 같이 하중에 대한 평형 방정식(equilibrium equation)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_c = P_s = P \quad (1)$$

변위에 대한 적합방정식(compatibility equation)은 다음의 식으로 구한다.

$$\delta_1 = \delta_c - \delta \quad (2)$$

슬래브와 텐던에 대한 하중과 변위의 관계식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_1 = \delta_c - \delta = \frac{P}{E_c A_c} \frac{L}{2} \quad (\text{슬래브}) \quad (3)$$

$$\delta = \frac{P}{E_s A_s} \frac{L}{2} \quad (\text{텐던}) \quad (4)$$

여기서 E_c 와 E_s 는 각각 콘크리트와 텐던의 탄성계수이며, A_c 와 A_s 는 각각 슬래브와 텐던의 단면적이다. 위의 식들을 이용하여 δ_c 와 종방향 하중과의 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_c = \frac{PL}{2} \left(\frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_s A_s} \right) \quad (5)$$

따라서 종방향으로의 하중은 다음의 식과 같이 구한다.

$$P = \frac{2\delta_c}{L} \frac{E_c A_c E_s A_s}{E_c A_c + E_s A_s} \quad (6)$$

여기서 횡방향으로 긴장 시 종방향으로의 자유변위인 δ_c 를 구해 본다. 횡방향으로의 총 긴장력을 P_T 라 하고 슬래브의 두께를 T 라 하면 횡방향 긴장에 의한 슬래브의 횡방향 압축응력 σ_T 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_T = \frac{P_T}{L \cdot T} \quad (7)$$

이때 횡방향으로의 변형률은 Hooke의 법칙에 의해 다음과 같이 구한다.

$$\epsilon_T = \frac{\sigma_T}{E_c} \quad (8)$$

이러한 횡방향으로의 변형은 포아송비 ν 에 의해 종방향으로도 변형을 가져오게 되며 이때 종방향으로의 인장변형률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_L = \nu \epsilon_T \quad (9)$$



이러한 종방향 인장변형률에 길이를 곱하면 변위가 나오게 되며 본 해석에서는 종방향 대칭을 이용하므로 길이의 반만을 곱하여 종방향 변위를 다음과 같이 구한다.

$$\delta_c = \epsilon_L \frac{L}{2} = \nu \epsilon_T \frac{L}{2} = \nu \frac{\sigma_T}{E_c} \frac{L}{2} = \frac{\nu P_T}{2TE_c} \quad (10)$$

식 (6)과 식 (10)으로부터 슬래브의 폭이 W 일 때 횡방향 긴장에 의한 종방향 긴장 하중의 증가량을 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$P = \frac{\nu P_T}{L} \frac{WE_s A_s}{E_c TW + E_s A_s} \quad (11)$$

예를 들어 표 1과 2에서의 슬래브의 제원을 이용하여 횡방향 긴장에 의한 종방향으로의 긴장 하중의 추가 증가량을 구하면 다음과 같다.

$$P = \frac{\nu P_T}{L} \frac{WE_s A_s}{E_c TW + E_s A_s} = \frac{0.15 \times 18,000}{120} \frac{8.2 \times 200 \times 14 \times 0.0001387}{27 \times 0.15 \times 8.2 + 200 \times 14 \times 0.0001387} = 2.13 \quad (12)$$

이러한 결과를 살펴보면 횡방향 긴장에 의해 포아송비 때문에 발생하는 종방향 하중의 증가량인 2.13N은 횡방향 긴장력의 약 0.012%에 불과하며 종방향으로의 총 긴장하중이 1,230N인 것과 비교하면 약 0.17%로 매우 미비하다는 것을 알 수 있다.

식 (12)에서 종방향 추가 긴장력을 횡방향 긴장력으로 나누면 서로 간의 비율을 구할 수 있으며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{P}{P_T} = \frac{\nu}{L} \frac{WE_s A_s}{E_c TW + E_s A_s} \quad (13)$$

위의 식에서 각각의 변수에 대하여 종방향 추가 긴장력에 어떠한 영향을 미치는지 분석해 보도록 한다. 우선 종방향 길이는 추가 긴장력에 반비례하는 것을 알 수 있으며 예를 들어 슬래브 길이를 120m의

1/10로 줄이면 추가 긴장력이 10배가 되지만 그래도 이러한 추가 긴장력은 횡방향 긴장력의 약 0.12%에 불과하게 된다. 포아송비는 추가 긴장력에 비례하는데 예를 들어 최대 포아송비인 0.5를 위의 식에 대입하더라도 추가 긴장력의 비율은 0.04%에 지나지 않는다. 슬래브의 폭을 두 배로 늘리더라도 비율은 약 0.012%가 되며 슬래브 두께를 반으로 줄이더라도 비율은 약 0.023%가 된다. 콘크리트의 탄성계수를 반으로 줄이면 긴장 하중의 비율은 약 0.023%가 되며 텐던의 탄성계수를 10배로 높여도 하중비율은 약 0.107%가 된다. 텐던의 단면적을 10배로 크게 하면 하중비율이 약 0.107%가 된다. 따라서 극한적으로 하중비율을 높일 수 있는 경우가 합쳐진다 하더라도 그 비율은 상당히 작기 때문에 횡방향 긴장에 따른 종방향 긴장하중의 추가 증가는 무시할 수 있음을 알 수 있다.

5. 횡방향 긴장 설계방안

PTCP의 공용성은 프리스트레싱을 가했을 때 압축응력이 가장 작은 최소응력과 관련되기 때문에 Shoulder 부분과 Wheel Pass 및 중앙부분의 최소응력의 변화를 정착구 간격에 따라 비교·분석하여 그림 12에 나타내었다. 일반적으로 정착구 간격이 넓어질수록 최대 압축응력의 크기가 점점 감소하는 것을 알 수 있다. Shoulder부분에서는 정착구 간격이 상대적으로 작더라도 정착구 간격의 변화에 따른 최소응력의 변화가 큰 것을 볼 수 있다.

그림 12에 보여준 최소응력을 표로 나타내면 표 3과 같으며 이러한 응력값을 이전에 언급한 산술적으로 구한 평균응력인 -1.0kPa에 대한 비율로 나타내면 표 4와 같다. 즉, 정착구 간격이 예를 들어 1m인 경우 길어져 경계에서의 응력은 평균압축응력의 0.806 크기에 해당하는 응력이 발생한다는 것이다. 따라서 이러한 응력비율의 역수의 값을 표 5와 같이 구하면 정착구 간격과 위치 등 원하는 조건에



서의 응력이 요구되는 평균응력이 나오도록 하는 하중의 크기가 된다. 예를 들어 정착구 간격이 1m이며 길어깨에서의 응력이 요구되는 평균응력이 나오게 하려면 하중을 1.241배 증가시켜서 가해야 한다는 것이다.

생 인장응력을 충분히 감소시킬 수 있어야 한다. 이러한 검토를 표 4에 나타난 응력비율을 이용하여 수행할 수 있다.

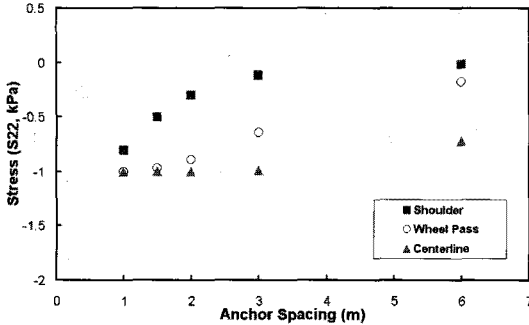


그림 12. 긴장간격에 따른 횡방향 최소응력 변화

표 3. 긴장간격에 따른 횡방향 최소응력(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

표 4. 평균응력과 횡방향 최소응력과의 비율

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

표 5. 평균응력 성취를 위한 하중 증가비율

긴장간격(m)	1	1.5	2	3	6
Shoulder	1.241	1.992	3.311	8.197	55.556
Wheel Pass	1.001	1.029	1.122	1.558	5.556
Centerline	1.000	1.000	1.000	1.007	1.391

횡방향 긴장설계를 위해서는 우선 환경하중 및 차륜하중에 의한 응력분포를 구한 후 가장 큰 인장응력이 발생한 위치를 기준으로 긴장량을 산정하게 된다. 이때 다른 위치에서의 긴장응력도 그 위치에서의 발

6. 결론

본 연구에서는 프리스트레스트 콘크리트 포장에 횡방향 긴장이 가해질 때 긴장간격에 따른 응력분포 특성을 분석하였으며 종방향과 횡방향 긴장의 상호영향도 분석하였다. 또한 횡방향 긴장설계 시 검토해야 할 사항에 대해서도 설명하였다. 본 연구를 수행하며 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 횡방향 긴장간격이 작을수록 긴장할 때 응력분배를 확실하게 할 수 있고 정착구 사이에 발생할 수 있는 압축응력 손실범위를 줄일 수 있다. 반대로 긴장간격이 넓으면 정착구 주변에 응력집중이 발생하며 슬래브에 고르게 압축응력을 분배하기 어렵게 된다.
- 슬래브의 각 위치(Shoulder부분, Wheel Pass, 중앙부분)에서의 횡방향 응력분포는 긴장간격이 넓을수록 평균응력과의 차이가 크게 나타나고 그 차이 폭은 슬래브 내부로 갈수록 작아진다.
- 횡방향 긴장을 할 때 종방향으로는 이미 텐던에 긴장이 주어져 있기 때문에 포아송비의 영향에 의해 추가적인 종방향으로의 긴장이 가해지게 되지만 이러한 크기는 무시할 수 있을 정도로 작다.
- 횡방향 긴장은 종방향 긴장을 마감한 후에 하기 때문에 횡방향 긴장에 관련된 설계에 있어서 종방향 긴장의 영향은 고려하지 않아도 된다.
- 횡방향 긴장간격을 설계할 경우 환경하중 및 차륜하중에 의한 최대인장응력의 발생 위치에서 긴장에 의한 응력을 고려해야 할 뿐만 아니라 다른 위치에서의 응력비율 또한 검토하여야 한다.



참고문헌

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

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, Washington, D. C.

접 수 일: 2008. 9. 19

심 사 일: 2008. 10. 10

심사완료일: 2008. 12. 3