



횡방향 긴장에 따른 프리스트레스트 콘크리트 포장의 거동 분석

Behavior of Prestressed Concrete Pavement Under Transverse Post Tensioning

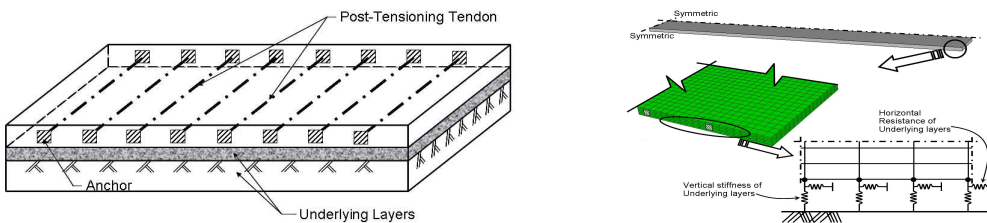
김성민* 윤동주** 김동호***
 Kim, Seong-Min Youn, Dong-Ju Kim, Dong Ho

1. 서론

프리스트레스트 콘크리트 포장은 슬래브에 프리스트레싱 기법을 도입하여 건설하는 포장으로 콘크리트 포장에서 발생하는 인장응력을 프리스트레스트로 감소시켜 균열 발생을 억제하여 고성능 고내구성을 기대할 수 있다. 이러한 프리스트레스트 콘크리트 포장은 미국등의 선진국에서는 수 십년 전부터 사용하여 왔으나 우리나라에서는 초기 도입단계에 있는 실정이다(Powers et al, 1987; Mendoza-Diaz et al, 1986). 본 연구의 목적은 PTCP(Post Tensioned Concrete Pavement)의 횡방향 프리스트레싱을 위한 최적의 횡방향 정착구 간격을 선정하기 위하여 구조해석을 통하여 정착구 간격에 따른 횡방향 프리스트레싱에 대한 응력 분포를 분석고 횡방향 정착구 간격을 선정할 수 있는 설계 방안을 제시하는 데 있다.

2. 구조해석 모델

PTCP의 횡방향 긴장에 의한 거동을 분석하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2007)를 사용하여 구조해석 모델을 개발하였다. <그림 1>에서 보인 바와 같이 하부지층 위에 놓인 콘크리트 슬래브를 횡방향으로 프리스트레싱을 가하였을 경우에 응력 분포를 구할 수 있도록 하였다.



(그림 1) PTCP 횡방향 프리스트레싱 개념도 및 구조해석 모델

콘크리트 슬래브는 3차원 고체요소를 사용하여 모델링 하였으며 요소의 크기는 종방향, 횡방향으로 0.1m, 수직방향으로 0.025m로 하였고 하부층은 마찰저항 및 전단저항을 가지는 수평방향의 일반 스프링과 지반의 복합수직강성을 가지는 수직방향 무인장(tensionless) 스프링을 사용하여 모델링 하였다. 횡방향 프리스트레싱은 포장 슬래브의 측면에서 중립축을 따라 횡방향으로 작용하도록 하였으며 긴장력은 정착구의 전단면적에 등분포 하중으로 작용하도록 모델링

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수 · 공학박사 · 031-201-3795(seongmin@khu.ac.kr)
 ** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정 · 031-201-3799(yowaa@khu.ac.kr)
 *** 정회원 · (주)삼우아이엠씨 기술연구소 수석연구원 · 공학박사 · 02-402-2795(dhkim1327@hotmail.com)

하였다. 슬래브의 모델이 종방향 및 횡방향으로 모두 대칭이기 때문에 슬래브의 1/4만 고려하여 모델을 개발하였다. 대칭을 이용한 해석이므로 대칭면에서 대칭면과 수직되는 방향의 자유도를 구속하였다.

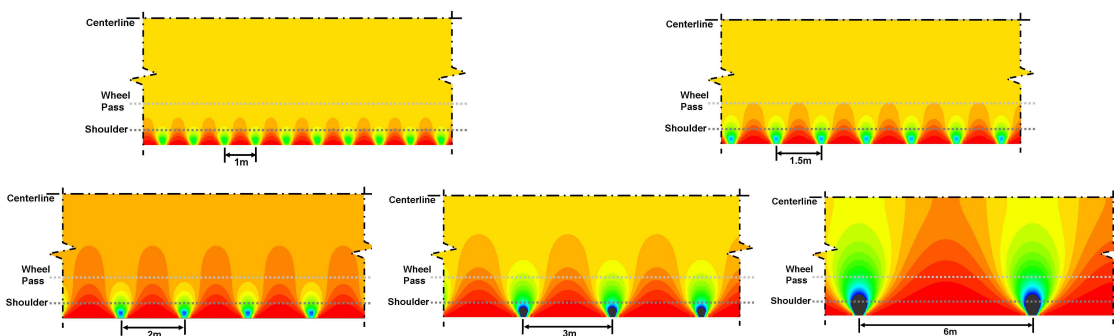
해석에 사용된 PTCP의 제원 및 재료 특성의 입력값은 <표 1>에 나타내었다. 대칭 모델을 사용할 때에 횡방향으로의 전체 긴장력의 크기는 9,000N으로 선정하였다. 따라서 슬래브의 측면에 횡방향으로 가해지는 총 하중을 슬래브 측면 단면적으로 나누면 평균 응력이 1kPa이 나오게 된다. 구조해석이 선형탄성을 가정한 해석이기 때문에 이러한 하중 크기는 확정적인 값이 아니며 PTCP의 응력과 변형 등의 거동이 하중 크기에 선형 비례하므로 하중 크기가 변하면 응력과 변형 등의 결과를 같은 비율로 바꾸어 사용하면 된다.

<표 1> 해석에 사용된 입력값

변 수	입력값
콘크리트 탄성계수(GPa)	27
콘크리트 포와송 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 긴장 간격 영향 분석

PTCP의 설계 및 시공에 있어서 가장 중요한 요인으로 횡방향 정착구 간격을 들 수 있다. 횡방향 정착구의 간격이 작을수록 긴장력을 가할 때 응력 분배를 확실하게 할 수 있고 정착구 사이에 발생할 수 있는 압축 응력 손실 범위를 줄일 수 있다. 또한 긴장력을 가하여 얻고자 하는 압축응력의 크기가 일정하다면 정착구 간격이 작을수록 정착구 당 가해야 하는 긴장력의 크기는 작아지게 된다. 반대로 정착구 간격이 넓으면 하나의 정착구에 가해야 하는 긴장력은 커지게 된다. 이로 인해 정착구 주변에 응력 집중이 발생되며 슬래브에 고르게 압축응력을 분배하기가 어렵게 된다. 정착구 간격에 따른 영향을 분석하기 위하여 정착구 사이의 간격을 다르게 하며 해석을 수행하여 횡방향 응력 분포를 분석하였다. <그림 2>는 정착구의 간격이 1, 1.5, 2, 3, 6m일 때의 슬래브 상하부 표면에 발생하는 횡방향 응력 분포이다. 종방향 길이가 길고 동일한 응력분포가 연속되기 때문에 보다 세밀하게 분석하기 위하여 슬래브 내부 약10m 길이 구간을 선택하여 각 경우를 나타내었다.



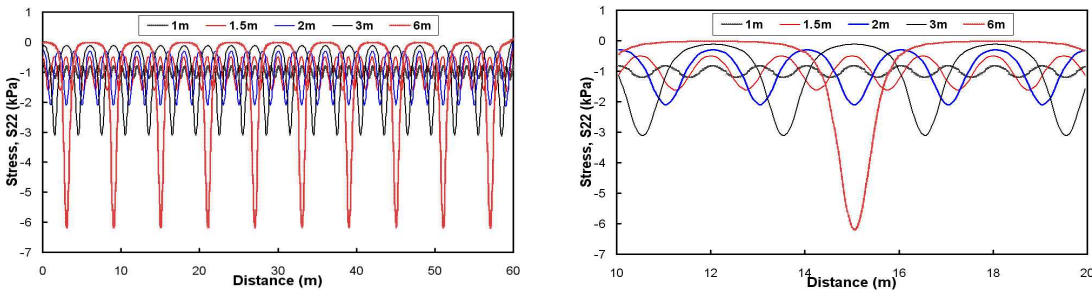
<그림 2> 횡방향 응력분포 분석



정착구 간격이 6m일 경우를 보면 정착구에 큰 응력이 집중되는 것을 볼 수 있으며 응력 분배가 잘 이루어 지지 않아 전체 슬래브에 횡방향 응력이 큰 차이를 보이는 것을 발견할 수 있다. 반면 정착구 간격이 1m인 경우를 보면 정착구 근처를 제외하고는 슬래브 전체가 거의 일정한 응력을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 정착구 간격이 좁을수록 (정착구 개수가 많을수록) 슬래브에 응력 분배가 잘 되는 것을 알 수 있다.

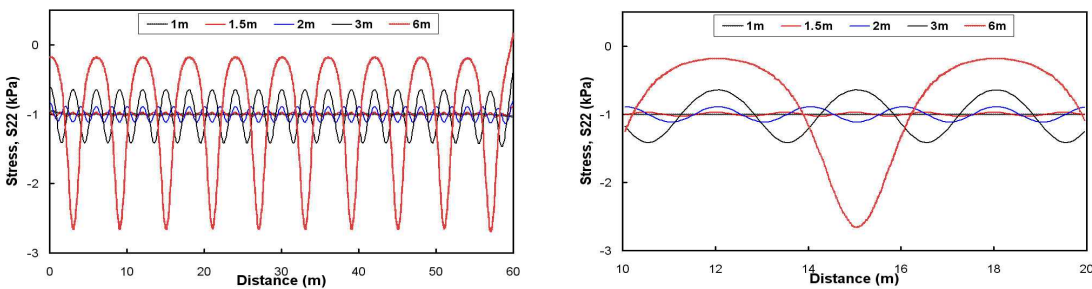
그림에서 Shoulder라고 표시된 점선은 슬래브 폭 4.1m에서 3.6m의 본선 구간을 제외한 길어깨 경계인 바깥쪽 단부로부터 0.5m 지점을 나타낸 것이며, Wheel Pass라고 표시된 점선은 차륜 하중의 바깥쪽 Wheel이 지나가는 부분을 나타낸 것이다. 정착구와 정착구 사이에서는 압축응력이 제대로 전달되지 않으며 이러한 현상은 정착구 간격이 넓을수록 더욱 뚜렷해진다. 길어깨 부분을 기준으로 살펴보면 정착구 간격이 1m일 경우에는 응력 손실 부분이 대부분 길어깨 바깥부분에 존재하기 때문에 슬래브의 구조적 안정성에는 크게 문제가 되지 않는 것이다. 하지만 정착구 간격이 넓어짐에 따라 길어깨 부분 뿐 만 아니라 본선 내에도 응력 손실 부분이 상당히 존재하게 되어 가해진 압축응력의 전달율이 떨어지게 된다.

종방향을 따라 Shoulder 부분에서의 응력을 <그림 3>에 나타내었다. 그림에서 응력의 음의 부호는 압축응력을 의미한다. 정착구의 간격이 좁아질수록 Shoulder 부분에서의 응력이 변화하는 크기가 작은 것을 알 수 있으며 정착구 간격이 넓으면 정착구 위치에서는 압축응력이 크게 걸리지만 정착구 사이에서는 응력의 손실이 크게 발생하여 정착구 간격이 3m이상일 경우에는 정착구 사이의 응력이 거의 0에 가까워지는 것을 알 수 있다.



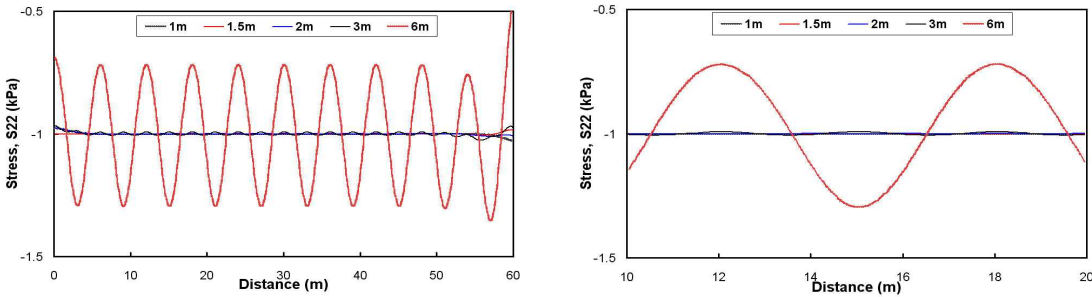
<그림 3> Shoulder 부분의 횡방향 응력분포(전체, 일부)

Wheel Pass 부분의 응력 분포는 <그림 4>에서 보여 준다. Wheel Pass는 Shoulder 부분에 비해 슬래브 내부에 존재하기 때문에 정착구 간격에 따른 압축응력의 변화 폭이 대폭 감소한 것을 알 수 있다. 이 경우에는 정착구 간격이 1m, 1.5m일 때는 응력의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있으나 정착구 간격이 6m 정도일 경우에는 응력 변화가 다소 커지는 것을 볼 수 있다.



<그림 4> Wheel Pass 부분의 횡방향 응력분포(전체, 일부)

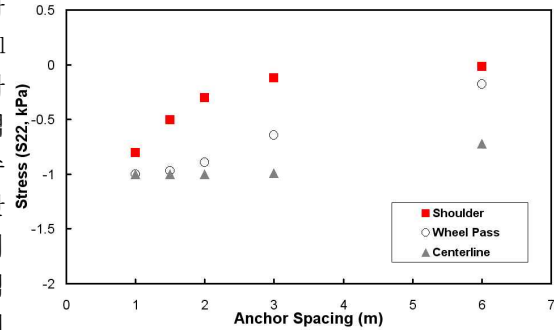
〈그림 5〉는 8.2m 폭 슬래브의 중앙부분(종방향 대칭축, 〈그림 2〉에서 Centerline)을 따라 횡방향 응력의 변화를 보여 준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브의 중앙부에서는 압축응력의 변화 양상이 정착구 간격이 6m 이상일 경우에 다소 커지는 것을 알 수 있다.



〈그림 5〉 중앙 부분의 횡방향 응력분포(전체, 일부)

4. 횡방향 긴장 간격 설계 방안

PTCP의 공용성은 프리스트레싱을 가했을 때 압축응력이 가장 작은 최소응력과 관련되기 때문에 Shoulder 부분과 Wheel Pass 및 중앙부분의 최소 응력의 변화를 정착구 간격에 따라 비교 분석하여 〈그림 6〉에 나타내었다. 일반적으로 정착구 간격이 넓어질수록 최소응력의 크기가 점점 감소하는 것을 알 수 있다. Shoulder 부분에서는 정착구 간격이 작더라도 정착구 간격의 변화에 따른 최소응력의 변화가 큰 것을 볼 수 있으며 Wheel Pass 부분에서는 정착구 간격이 2m 이상일 때 최소응력의 변화가 급격해 진다. 중앙부분에서는 정착구 간격이 3m까지는 최소응력이 거의 일정한 것을 알 수 있다.



〈그림 6〉 정착구 간격에 따른 횡방향 최소 응력 변화

〈그림 6〉에 보여준 최소응력을 표로 나타내면 〈표 2〉와 같으며 이러한 응력값을 이전에 언급한 산술적으로 구한 평균 응력이 -1.0kPa이기 때문에 응력값 자체가 평균응력과의 비율이 된다.

〈표 2〉 정착구 간격에 따른 횡방향 최소응력(kPa)

정착구 간격(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

이러한 값들을 이용하여 횡방향 정착구 간격 및 이에 따른 하중의 크기를 결정할 수 있는 설계를 수행할 수 있다. 환경하중 및 차량 하중에 의한 슬래브의 각 위치별 최대 인장응력을 구할 수 있으며 그 응력을 허용인장응력까지 감소시키기 위해 프리스트레싱을 가하게 된다. 이때 슬래브 각 위치에서의 최대 인장응력 또한 〈표 2〉의 정착구 간격에 따른 횡방향 최소응력 비율을 이용하여 검토 하여야 한다.



5. 결론

- 횡방향 정착구의 간격이 작을수록 긴장할 때 응력 분배를 확실하게 할 수 있고 정착구 사이에 발생할 수 있는 압축 응력 손실 범위를 줄일 수 있다. 반대로 정착구의 간격이 넓으면 정착구 주변에 응력 집중이 발생되며 슬래브에 고르게 압축응력을 분배하기가 어렵게 된다.
- 슬래브의 각 위치(Shoulder부분, Wheel Pass, 중앙부분)에서의 횡방향 응력 분포는 정착구 간격이 넓을수록 평균응력과 차이가 크게 나타나고 그 차이 폭은 슬래브 내부로 향할수록 작아진다.
- 일반적으로 정착구 간격이 넓어질수록 최소응력의 크기가 점점 감소하는 것을 알 수 있다. Shoulder부분에서는 정착구 간격의 변화에 따른 최소응력의 변화가 큰 것을 볼 수 있으며 Wheel Pass 부분과 중앙부분으로 갈수록 그 변화 폭이 작아진다.
- 횡방향 긴장 간격을 설계할 경우 긴장에 의한 최대 응력을 고려할 뿐만 아니라 각 위치에서의 응력 비율 또한 검토하여야 한다.

참고문헌

1. ABAQUS, User's Manual Version 6.7, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I., 2007.
2. Powers, R., and Zaniewski, J., "Nine Year Performance Evaluation of Arizona's Prestressed Concrete Pavement," Transportation Research Record 1136. Washington, D.C., 1987.
3. Mendoza-Diaz, A., McCullough, B. F., and Burns, N., "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, 1986.