

슬래브 두께에 따른 포스트텐션 콘크리트 포장 설계 비교 분석

Effect of Slab Thickness on Prestressing Design of Post-Tensioned Concrete Pavement

윤동주* · 김성민** · 배종오***

Yun, Dong Ju · Kim, Seong-Min · Bae, Jong Oh

1. 서론

PTCP(Post-Tensioned Concrete Pavement) 슬래브의 두께는 다른 포장 형식에서 대체적으로 사용하고 있는 30cm보다 얇도록 설계하며 그 차이가 커질수록 경제적이다. 하지만 슬래브 두께가 지나치게 얇아지게 되면 환경하중에 의해 슬래브에 발생하는 인장응력은 줄어들 수 있지만 차륜하중에 의한 인장응력 발생은 상당히 커지게 된다. 결과적으로 슬래브에 발생하는 인장응력이 증가하여 긴장력을 그만큼 많이 작용시켜야 한다. 반대로 슬래브가 두꺼워지면 차륜하중에 의한 응력은 감소하지만 환경하중에 의한 응력이 커지게 되어 전체 인장응력은 더 크게 발생할 수 있다. 또한 같은 크기의 인장응력이라 하더라도 두께가 두꺼우면 슬래브 단면적이 커져 발생 인장응력을 감소시키기 위해서는 긴장량이 더 커져야 하기 때문에 PTCP 포장에서는 두께가 두꺼울 경우에 오히려 긴장량이 커지게 되어 콘크리트와 강재 모두가 많이 필요하게 됨으로써 경제적으로 손실이 커질 수 있다. 따라서 이러한 두께에 따른 긴장 설계를 수행하여 결과를 비교 분석하였다.

2. 환경 및 차륜하중에 의한 응력 분포 분석

PTCP 설계를 위해서는 슬래브에 작용하는 하중에 의한 거동을 분석하여야 한다. 먼저 온도와 수분변화 등의 환경하중에 의한 거동을 살펴보기 위해 슬래브 상하부의 온도 차에 의한 켈링현상으로 슬래브에 발생할 수 있는 응력을 구조해석을 통하여 분석하였다(ABAQUS, ABAQUS 2007). 슬래브 크기는 길이 120m, 폭 8.2m, 두께 15cm, 20cm, 25cm로 하여 그림 1과 같이 대칭 모델을 사용하여 슬래브의 1/4만 모델링 하였다.

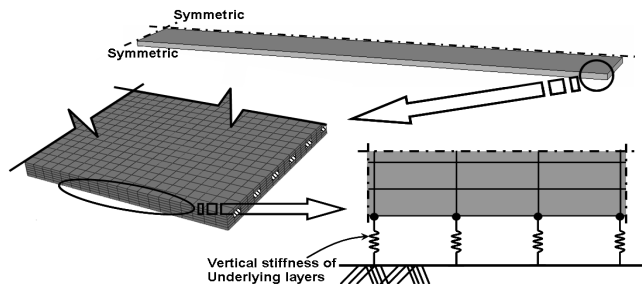


그림 1. 구조해석 모델

* 학생회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 (E-mail : yowaa@khu.ac.kr) - 발표자

** 정희원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

*** 정희원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, (주)삼우아이엠씨 기술연구소 소장(E-mail : jobae@samwoomc.com)

슬래브에 작용하는 온도구배(Temperature Gradient)를 $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 로 하였고 Curl Up과 Curl Down현상 모두를 고려하였다. 그림 2는 슬래브 두께에 따른 발생 최대 인장응력 분포를 나타낸 것으로 Curl Up에서는 슬래브 상부 표면에서 최대 인장응력이 발생하고 Curl Down에서는 슬래브 바닥면에서 최대 인장응력이 발생한다. 최대 발생 인장응력은 슬래브 길이가 길기 때문에 하부지반 강성에는 크게 영향을 받지 않게 나타났다.

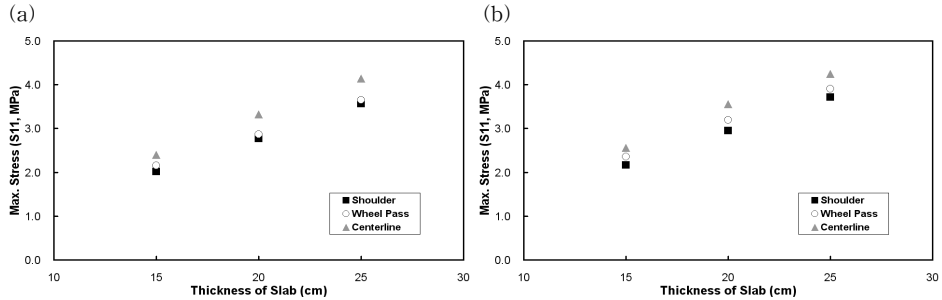


그림 2. 슬래브 두께에 따른 최대 인장 응력: (a) Curl Up, (b) Curl Down

차륜하중에 의한 응력 분포를 분석하기 위하여 설계 차륜하중이 80kN/축을 가지는 단축과 복축 두 경우를 고려하였다. 슬래브 두께별로 그림 3에서와 같이 슬래브 중앙, 단부, 우각부에 차륜이 걸린 경우를 각각 고려하여 발생하는 종방향 최대응력을 산정하였다.

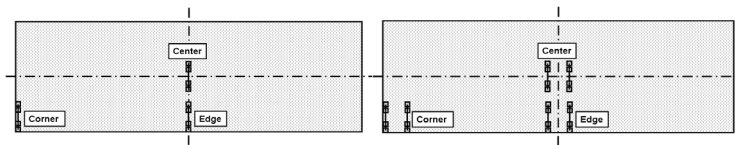


그림 3. 차륜 하중 제하 위치(단축, 복축)

종방향 응력을 살펴보면 슬래브 중앙과 단부(Edge)에 차륜이 작용하는 경우는 슬래브 하부에서 최대 인장 응력이 발생하였고, 우각부에 차륜이 작용하는 경우에는 슬래브 상부에 최대 인장 응력이 발생하였다. 종방향 응력의 경우에는 단축의 경우가 복축의 경우보다 크게 나타났다. 환경하중의 경우와는 다르게 슬래브 두께가 증가 할수록 차륜하중에 의해 슬래브에 발생하는 인장응력은 줄어드는 것을 알 수 있다. 슬래브 두께에 따른 발생 최대 인장응력을 그림 4에 나타내었다. 하부지반 강성은 발생응력이 가장 크게 되도록 가장 약한 하부지반을 사용하였다.

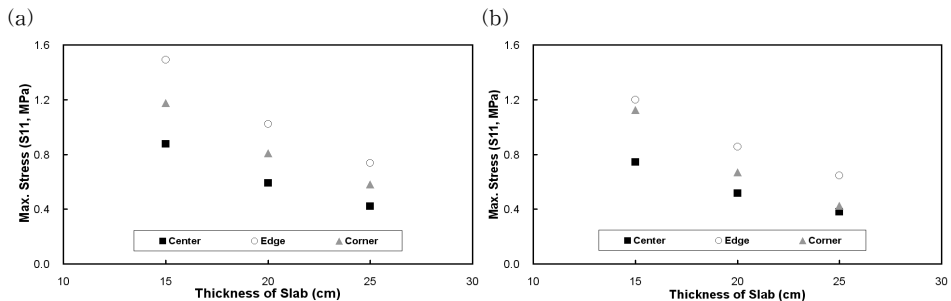


그림 4. 슬래브 두께에 따른 최대 인장 응력: (a) 단축, (b) 복축

환경하중 및 차륜하중에 의한 응력을 조합하여 슬래브에 발생 할 수 있는 최대응력을 산정하였다. 우선 환경하중에 의한 영향 분석에서 편의상 사용한 온도구배가 $1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 이었는데 이 경우 슬래브 상하부 온도차

는 슬래브의 두께가 15cm이므로 15℃ 차이가 된다. 이것은 매우 큰 온도차이며 30cm두께의 포장에서도 발생하기 쉽지 않은 값이다. 따라서 온도구배를 0.5℃/cm인 경우도 고려하였다. 차량 하중은 AASHTO에서 기준하중으로 제시하고 있는 80kN/Axle을 사용하였고 과적 차량이 다닐 수 있기 때문에 차량 하중을 1.5 배로 크게 작용시켜 보았다(AASHTO, 1993). 따라서 표 1과 같은 세 가지의 경우를 설계하중으로 고려하였다.

3. 두께별 종방향 긴장 간격 설계

긴장력으로 산정될 각 하중 Case별로 발생한 최대 인장응력을 슬래브 두께별로 표 1에 나타내었다. 슬래브 두께가 증가함에 따라 환경하중에 의한 응력 발생은 크게 증가하지만 차륜하중에 의한 발생응력은 상대적으로 적게 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 온도구배가 1℃/cm인 Case 1은 두께 증가와 함께 전체 발생응력이 증가하지만 온도구배가 0.5℃/cm인 Case 2와 Case3은 슬래브 두께가 증가함에 따라 발생응력은 감소하는 것을 알 수 있다.

표 1. 하중 Case별 최대 인장 응력

Temperature Gradient		1℃/cm	0.5℃/cm	0.5℃/cm
Design Vehicle Load		80kN/Axle	80kN/Axle	120kN/Axle
Max. Stress(S11)	슬래브 두께	Case 1.	Case 2.	Case 3.
	15cm	4746.6kPa	3566.1kPa	4758.9kPa
	20cm	4829.9kPa	3234.2kPa	4053.4kPa
	25cm	5113.2kPa	3159.7kPa	3762.7kPa

종방향 긴장 간격 설계에서 중요하다고 볼 수 있는 항목 중 하나는 설계에 사용할 콘크리트의 허용인장 응력의 기준값을 결정하는 것이다. 본 연구에서는 콘크리트의 허용 휨강도는 콘크리트 휨강도(4.5MPa)의 절반 이하인 2MPa로 정하였다. 미국 ACI 기준에 의하면 콘크리트의 허용 휨강도를 휨강도의 절반 이하로 할 경우 피로에 의한 파손이 일어나지 않기 때문이다. 따라서 긴장응력은 환경 및 차륜하중에 의한 인장 응력에서 콘크리트의 허용 휨 강도를 제외한 응력의 크기에 해당하는 긴장 응력이 슬래브에 가해지도록 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\text{긴장응력} \geq \text{하중에 의한 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨강도}(2\text{MPa})$$

앞에서 선정된 각각의 하중 Case와 콘크리트의 허용인장응력 기준값에 따라 종방향 긴장 간격을 설계하였다. 긴장에 사용하는 강선은 KS D 7002/SWPC 7B로 극한 인장강도는 261kN, 항복강도는 222kN이다. 긴장 시 극한인장강도의 80%, 항복강도의 94% 중 작은 값을 기준으로 긴장하기 때문에 208.7kN을 긴장하중으로 사용한다. 여기서 각종 손실로 인한 손실량을 뺀 뒤 차륜 하중 및 환경하중에 의해 발생된 최대 인장응력을 기준으로 긴장 간격을 결정한다. 세부적인 설계 방법을 간단히 수식으로 나타내면 다음 식 1, 2와 같다.

$$\frac{\{\text{강선 긴장하중}(208.7\text{kN}) - \sum \text{손실량}\} \times \text{강선 개수}(n)}{\text{슬래브 종단면적}(8.2\text{m} \times \text{슬래브 두께})} \geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨강도} \quad (1)$$

$$\text{긴장 간격}(s) = \frac{\text{강선의 인장하중}(208.7\text{kN}) - \sum \text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨강도}) \times \text{슬래브 두께}(0.15\text{m})} \quad (2)$$

강선의 개수는 슬래브 폭을 긴장간격으로 나누어 주면 된다. 가장 실제와 가까운 하중 Case 2를 가지고 각각의 긴장 손실량을 산정하는 인자들을 가정하여 설계 예를 들어보면 다음과 같다.



- 하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율 = 0.9
- $F_{jacking} = 261kN \times 0.8 = 208.8kN, 222kN \times 0.94 = 208.7kN$
- $F_f = F_{jacking} (1 - \text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율}) = 208.7kN(1 - 0.9) = 20.87kN$
- $F_t = F_{jacking} \left(1 - \exp \left[-\frac{KL}{2} \right] \right) = 208.7 \left(1 - \exp \left[-\frac{0.003 \times 120}{2} \right] \right) = 34.4kN$
- $F_{sc} = \epsilon_{ai} \cdot E_s \cdot A_s = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$
- $F_r = \left[\frac{\log t}{10} \left(\frac{F}{F_y} - 0.55 \right) \right] F = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55 \right) \right] \times 155.4 = 12.6kN$
- 슬래브 두께 15cm인 경우 \Rightarrow 긴장 간격(s) = $\frac{208.7kN - (20.87 + 34.4 + 6.24 + 12.6)}{(3566.1kPa - 2000) \times 0.15} = 0.573m$
 강선의 개수(n) = $\frac{\text{슬래브 폭}(8.2m)}{\text{긴장 간격}(0.573m)} = 14.31$ 개
- 슬래브 두께 20cm인 경우 \Rightarrow 긴장 간격(s) = $\frac{208.7kN - (20.87 + 34.4 + 6.24 + 12.6)}{(3234.2kPa - 2000) \times 0.2} = 0.545m$
 강선의 개수(n) = $\frac{\text{슬래브 폭}(8.2m)}{\text{긴장 간격}(0.545m)} = 15.04$ 개
- 슬래브 두께 25cm인 경우 \Rightarrow 긴장 간격(s) = $\frac{208.7kN - (20.87 + 34.4 + 6.24 + 12.6)}{(3131.2kPa - 2000) \times 0.25} = 0.476m$
 강선의 개수(n) = $\frac{\text{슬래브 폭}(8.2m)}{\text{긴장 간격}(0.476m)} = 17.23$ 개

설계 결과를 간단히 표로 나타내면 표 2와 같다.

표 2. 슬래브 두께별 종방향 설계 결과

하중 조합	허용 휨강도	구 분	슬래브 두께		
			15cm	20cm	25cm
Case 2.	2000kPa	긴장 간격(s)	0.573m	0.545m	0.476m
		강선의 개수(n)	14.3개	15.04	17.23
		긴장응력(σ_p)	1.57MPa	1.23MPa	1.13MPa

따라서 슬래브 두께가 증가하여 최대 발생응력이 감소하더라도 긴장 간격은 줄어들고 강선의 개수는 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 슬래브 두께가 증가하면 발생인장응력은 다소 감소하지만 결과적으로 긴장해야 할 단면적(슬래브 폭×두께)이 증가하기 때문에 결과적으로 긴장량은 커지게 되는 것이다. 따라서 긴장량 설계에 있어서는 슬래브 두께는 작을수록 경제성 및 시공성에서 유리한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

- 현실적으로 가능한 최소 PTCP 슬래브 두께는 15cm로 이는 Tendon의 최소 피복두께 확보와 피로파손에 의한 안정성이 확보된 범위 안에서 가장 경제적인 두께이다. 슬래브 두께 15cm, 20cm, 25cm를 이용하여 종방향 긴장설계를 실시하여 그 결과를 비교해 보면 15cm 두께 선정의 타당성을 검증할 수 있다.
- 환경하중에 의한 발생 응력은 일정한 온도구배를 가지는 슬래브에서 두께가 증가할수록 크게 발생된다. 반면 차륜하중에 의해 발생하는 응력은 슬래브 두께가 커질수록 작게 발생한다.
- 슬래브의 각 위치별로 하중 경우를 조합하여 발생 최대 인장응력을 산정하면 환경하중에 의한 응력이 클 때에는 슬래브 두께 증가와 함께 발생응력도 증가한다. 하지만 환경하중에 의한 응력이 그리 크지 않을

- 때에는 두께가 증가 할수록 발생응력은 감소한다.
- 긴장 설계에 있어서 슬래브 두께가 증가함에 따라 전체 발생응력은 줄어들더라도 슬래브 두께증가로 인해 슬래브의 긴장력 작용 단면적이 커지기 때문에 전체 긴장량은 증가한다.
 - 종방향 긴장 설계에 있어서 최소한의 슬래브 두께를 사용하는 것이 경제성 및 시공성에서 유리한 것으로 판단되며 15cm의 두께가 적절한 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. ABAQUS (2007). *User's Manual Version 6.7*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R. I.