

포스트텐션 콘크리트 포장 공법을 적용한 영업소 포장 설계

Toll Plaza Pavement Design Using Post-Tensioned Concrete Pavement

윤동주* · 김성민** · 김동호***

Yun, Dong Ju · Kim, Seong-Min · Kim, Dong Ho

1. 서론

PTCP(Post-Tensioned Concrete Pavement)는 하중에 의해 포장체에 발생하는 인장응력을 긴장력을 가하여 감소시키는 방식으로 텐션의 긴장에 의해 콘크리트 슬래브에 압축응력을 가하기 때문에 두께를 기존 콘크리트 포장에 비해서 반 이하로 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 줄눈 간격을 일반적으로 100m 내외에서 200m 이상까지도 가능하게 한다. 그림 1과 같은 PTCP의 설계 개념은 슬래브에 발생하는 응력을 콘크리트의 허용 휨강도보다 작도록 긴장력을 작용하는 것이다.

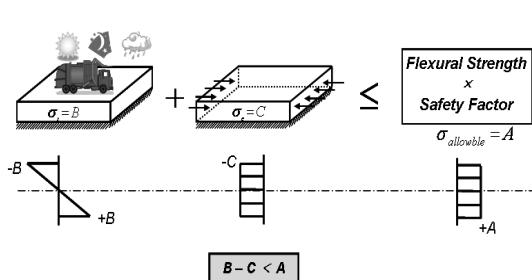


그림 1. PTCP 설계 개념

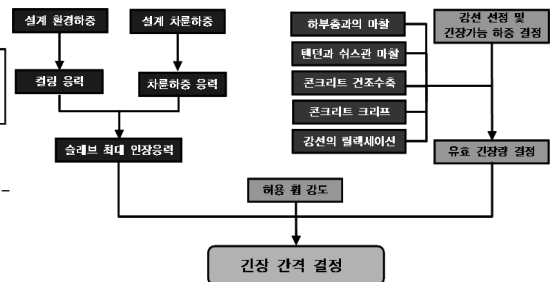


그림 2. PTCP 종방향 및 횡방향 긴장 설계 과정

영업소 포장에서 대부분의 파손유형은 종방향 및 횡방향 줄눈에서의 파손이다. 따라서 영업소 포장에 PTCP를 적용하여 줄눈의 수를 획기적으로 줄임으로써 영업소 포장의 고성능 고내구성을 가져올 수 있을 것이다. 본 논문에서는 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 36.2m, 슬래브 두께 15cm의 영업소 포장을 단일 슬래브로 시공하기 위한 안정성 검토와 종방향 및 횡방향 긴장 간격설계를 기술하였다. 단일 슬래브의 횡방향 폭이 JCP에 비해 10배가량 크게 결정되었기 때문에 2방향 슬래브로 종방향과 횡방향 발생응력 및 긴장량이 비슷할 것이다.

2. 응력 기준 설계 개념

PTCP의 긴장 설계는 최악의 하중조건을 고려하여 슬래브에 발생할 수 있는 최대 인장응력을 산정한 뒤, 강선의 제원과 하중 조합 경우를 결정하고 하부층과의 마찰로 인한 손실 등 각종 손실량을 구하여 실제 슬래브가 받을 압축응력 및 Tendon의 개수와 긴장 간격을 구함으로써 수행할 수 있다. 콘크리트의 허용 휨강도를 휨강도의 절반 이하로 고려할 경우에는 피로 파손이 일어나지 않기 때문에 긴장량 설계에 피로파손은 고려하지 않아도 된다. PTCP 종방향 및 횡방향 긴장 설계 과정을 그림 2에 나타내었다.

* 학생회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail: yowaa@khu.ac.kr) - 발표자
 ** 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사 · 교신저자(E-mail: seongmin@khu.ac.kr)
 *** 정회원 · (주)삼우아이엠씨 기술연구소 수석연구원 · 공학박사(E-mail: dhkim@hotmail.com)



3. 포장 설계

3.1 PTCP 종방향 설계

PTCP 영업소 포장 슬래브에 차륜하중 및 환경하중에 의한 발생응력을 분석하기 위해 FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건으로 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력을 산출 하였다(ABAQUS, ABAQUS 2007). 환경하중에 의한 발생응력은 수직 온도구배(Temperature Gradient)를 0.5°C/cm로 하여 Curl Up과 Curl Down을 모두 고려하였다. 실제 하부지층을 모사할 수 있도록 무인장(Tensionless)스프링을 사용하여 하부층을 모델링 하였다. 차륜하중에 의한 발생응력은 단축하중(82kN/Axle)을 사용하여 슬래브 중앙, 종방향 및 횡방향 단부, 우각부에 축 하중을 재하 하여 최대 응력을 산정하였다. 종방향 응력의 경우 복축하중보다 단축하중이 더욱 분리하기 때문에 복축하중은 고려하지 않았다. 환경 하중 및 차륜하중에 의한 발생응력을 슬래브 각 위치별로 구하여 전체 발생응력을 표 1에 나타내었다.

표 1. PTCP 영업소 포장 슬래브 종방향 발생응력

종방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa)
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	1201
	Bottom of Slab(Curl Down)	1278
Vehicle	Top of Slab	1880
	Bottom of Slab	2385
Total Max. Stress	Top of Slab	3081
	Bottom of Slab	3665

긴장 작업 도중이나 긴장 후에 여러 가지 원인에 의해 슬래브에 가한 긴장력에 손실이 발생하게 된다. 그 손실의 크기는 여러 가지 손실원인으로 인해 긴장 설계에 있어서 무시할 수 없으며 크게 다음 다섯 가지 손실을 고려할 수 있다.

- i) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)
- ii) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰(f_t),
- iii) 콘크리트 건조수축(f_s),
- iv) 콘크리트 크리프(f_{cr}),
- v) 강선의 릴랙세이션(f_r)

긴장 설계에서 중요한 요소 중 하나인 콘크리트의 허용 휨강도는 콘크리트의 휨강도 4.5MPa의 절반인 2.25MPa를 사용한다. 허용 휨강도를 휨강도의 절반 이하로 할 경우 피로에 의한 파손이 일어나지 않는다고 보기 때문에 이러한 값을 사용한다. PTCP 영업소 포장 슬래브에 발생하는 인장응력 및 각종 손실을 구하고 콘크리트의 허용 휨강도를 적용하여 세부적인 종방향 설계 수식을 다음 식 1, 2에 나타내었다.

$$\frac{\{\text{강선 인장하중}(208.7kN) - \sum \text{손실량}\} \times \text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{폭}(36.2m) \times \text{두께}(0.15m))} \geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨강도} \quad (1)$$

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

PTCP 영업소 포장 설계를 위해서 각종 인자들을 적용하여 실제 설계 결과를 아래에 나타내었다.

- $F_f = F_{\text{jackin}}(1 - \text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율}) = 208.7(1 - 0.9) = 20.87kN$
- $F_{\text{jackin}} = 222kN \times 0.94 = 208.7kN$
- $F_t = 208.7 \left(1 - \exp \left[- \frac{0.003 \times 120}{2} \right] \right) = 34.4kN$
- $F_{sc} = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$
- $F_r = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55 \right) \right] \times 155.4 = 12.6kN$

▷ 종방향 긴장 간격 및 강선의 개수 산정 ⇨ 긴장간격(s) = $\frac{208.7kN - (20.87 + 34.4 + 6.24 + 12.6)}{(3663kPa - 2250) \times 0.15} = 0.635m$
 강선의 개수(n) = $\frac{\text{슬래브 폭}(36.2m)}{\text{긴장간격}(0.635m)} = 56.999$ 개

3.2 PTCP 횡방향 설계

종방향 설계와 마찬가지로 PTCP 영업소 포장의 횡방향 설계를 수행하였다. 모든 조건은 종방향 설계와 동일하나 차륜하중에 의한 응력 분석 시에는 복측하중 재하 시에 횡방향 응력이 더 크게 나타나기 때문에 이를 이용하여 최대 발생응력을 산출하였다. 분석 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. PTCP 영업소 포장 슬래브 횡방향 발생응력

횡방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa)
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	1042
	Bottom of Slab(Curl Down)	1236
Vehicle	Top of Slab	1596
	Bottom of Slab	2027
Total Max. Stress	Top of Slab	2638
	Bottom of Slab	3263

PTCP 영업소 포장 슬래브의 횡방향 길이 36.2m는 기존 2차선 포장 8m에 비해 매우 크기 때문에 환경하중 및 차륜 하중에 의한 발생응력이 종방향 발생응력과 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 횡방향 긴장은 종방향 긴장만큼 많은 Tendon이 소요될 것이다. PTCP 영업소 포장의 횡방향 긴장 설계결과를 구해보면 다음과 같다. 긴장 간격이 1.03m로 산출되어 1m간격으로 120개의 강선을 사용하여 횡방향 긴장을 할 수 있다. 이는 횡방향 긴장응력 손실이 최소화되어 손실에 대하여 고려할 필요가 없을 것으로 판단된다.

▷ 횡방향 긴장 간격 및 강선의 개수 산정 ⇨ 긴장간격(s) = $\frac{208.7kN - (20.87 + 11.03 + 6.24 + 12.6)}{(3263kPa - 2250) \times 0.15} = 1.03m$
 강선의 개수(n) = $\frac{\text{슬래브 길이}(120m)}{\text{긴장간격}(1.03m)} = 115.44$ 개

4. PTCP의 피로파손 검토

PTCP 영업소 포장을 설계할 때에 가장 중요한 두 가지의 항목은 슬래브의 두께와 긴장응력의 결정이라고 할 수 있다. AASHTO 피로 파손 공식을 기준으로 긴장력을 산정하는 설계하는 개념은 PTCP가 어떠한 두께의 콘크리트 포장을 대신하여 건설되어질 것인지를 결정하고 이러한 포장에 차륜하중에 의해 발생하는 인장응력을 예측한다. 그 후 PTCP 슬래브의 두께를 결정하여 이러한 슬래브에 하중이 작용할 때의 응력을 구하고 이러한 응력을 감소시켜서 대체될 콘크리트 포장에 발생하는 응력과 같아질 수 있는 크기의 응력을 구해 긴장량을 산정한다. 이러한 PTCP 설계 개념을 그림 3에 나타내었다.

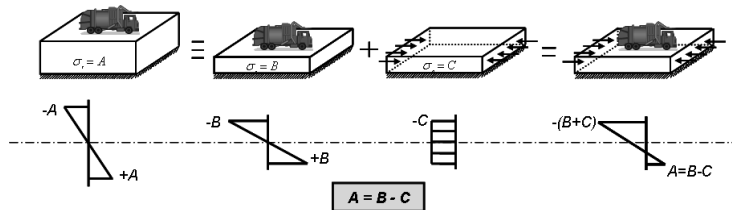


그림 3. 피로파손 기준 설계 개념



우선 영업소 포장 구간을 줄눈 콘크리트 포장(JCP)으로 가정하였을 때의 설계 결과를 구하였다. JCP는 ASHTTO 공용방정식에 의해 설계 두께를 구한다. 설계요소는 다음과 같으며 ASHTTO 공용방정식은 식 3과 같다. 또한 ASHTTO 공용방정식에 의한 결과와 단축하중 환산 교통량의 설계수명 20년, 40년일 때의 값으로 영업소 포장 슬래브의 두께를 산정할 수 있다.

영업소 포장을 JCP로 가정했을 때의 두께 산정이 끝나면 영업소 포장을 PTCP로 설계할 경우의 긴장량을 산정할 수 있다. JCP 설계에 의한 두께를 가지는 JCP 슬래브 단부에 차륜하중이 재하 될 경우의 응력을 FEM 프로그램을 사용하여 분석하였다. 이러한 방법으로 설계수명 20년과 40년의 JCP 슬래브의 단축하중에 의한 종방향 발생응력을 산출하여 표3에 나타내었다. 15cm 두께의 PTCP 슬래브에 차륜하중이 재하 된 경우의 발생응력에서 설계 수명 20년, 40년일 경우의 JCP 슬래브에 발생하는 응력을 뺀 만큼 긴장력을 가해주면 피로파손에 의해 설계된 JCP 슬래브와 등가를 이룰 수 있다.

표 3. 피로파손에 의한 PTCP 영업소 포장의 소요 긴장량

종방향 응력	JCP		PTCP
	Ø23.3cm(설계수명 20년)	Ø26.2cm(설계수명 20년)	Ø15cm
Vehicle	1.006MPa	0.846MPa	1.822MPa
소요 긴장량	0.816MPa	0.976MPa	-

※ 소요 긴장량 = $\sigma_{15cm} - (\sigma_{23.3cm} \text{ OR } \sigma_{26.2cm})$

PTCP 영업소 포장 긴장 설계를 피로파손에 의해 구하면 0.976MPa로 앞서 산정한 응력 기준 설계에 의한 긴장응력 1.478MPa보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 응력 기준 설계에 의한 PTCP 영업소 포장 슬래브가 피로파손에 의해서도 안정된 설계임을 보여준다.

5. 결론

- 영업소 포장에서 대부분의 파손유형은 줄눈에서의 파손이다. 따라서 영업소 포장에 PTCP를 적용하여 줄눈의 수를 획기적으로 줄임으로써 영업소 포장의 고성능 고내구성을 가져올 수 있을 것이다.
- PTCP 영업소 포장 슬래브의 횡방향 폭은 JCP에 비해 10배가량 크게 결정되어 종방향과 횡방향 발생응력 및 긴장량이 비슷한 2방향 슬래브와 같은 거동을 나타낸다.
- PTCP 영업소 포장의 응력 기준 설계 개념은 슬래브에 발생하는 인장응력에서 허용 휨강도를 뺀 만큼 긴장력을 작용하여 결과적으로 슬래브에 발생하는 최대 인장응력이 허용 휨강도 이내에 들도록 하는 것이다.
- 응력 기준 의한 종방향 설계 결과는 60개의 강선을 60cm간격, 긴장응력 σ_p 는 1.49MPa 이고 횡방향 설계 결과는 120개의 강선을 1m간격, 긴장응력 σ_p 는 1.053MPa 이다.
- 피로파손이 검토된 40년 수명의 JCP 슬래브 보다 응력 기준으로 설계된 PTCP 영업소 포장 슬래브가 더 안정된 설계임을 알 수 있다.

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.