

포스트텐션 콘크리트 포장의 Gap Slab 설계 방안

Design Methodology of Gap Slab for Post-Tensioned Prestressed Concrete Pavement

박 희 범 Park, Hee Beom
김 성 민 Kim, Seong-Min
심 재 수 Shim, Jae Soo

비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : bambams@khu.ac.kr)
정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)
비회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : jsshim@khu.ac.kr)

ABSTRACT

This study was conducted to develop the design methodology of gap slabs for the post-tensioned concrete pavement (PTCP). The gap slabs were considered as unbonded, half bonded, and bonded types. According to the types of the gap slabs, the curling stresses were investigated first under the environmental loads. The stresses due to the vehicle loads were analyzed considering both the single and tandem axles. The method to calculate the prestressing amount was suggested by comparing the combined stresses due to both loads and the allowable tensile stress of concrete. The prestressing amount for the unbonded type gap slab could be designed by considering only the gap slab; however, for the half bonded and bonded gap slabs, the whole PTCP slab should be analyzed to properly design the prestressing amount.

KEYWORDS

post-tensioned concrete pavement, gap slab, prestressing, environmental loading, vehicle loading, design

요지

본 연구는 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Concrete Pavement) 공법의 Gap Slab 설계 방안을 구축하기 위하여 수행되었다. Gap Slab은 특징에 따라 Unbonded, Half Bonded, Bonded 방식으로 구분하여 고려하였다. 먼저 각 Gap Slab 방식에 따라 환경하중이 작용할 때 슬래브의 컬링에 의해 발생하는 인장응력을 산정하였으며, 차륜하중에 의한 응력은 단축과 복축 하중을 모두 고려하여 산정하였다. 환경 및 차륜하중에 의해 발생하는 혼합 최대 인장응력을 구하여 허용인장응력과의 비교를 통하여 Gap Slab에 도입하는 긴장량을 산정하는 방법을 제시하였다. Unbonded 방식은 Gap Slab 만을 고려하여 응력 분포를 분석함으로써 긴장량을 설계할 수 있으나, Half Bonded 및 Bonded 방식은 PTCP의 전체 슬래브의 거동을 분석함으로써 적절한 설계가 가능하며 이에 대한 방법론을 제시하였다.

핵심용어

포스트텐션 콘크리트 포장, gap slab, 긴장, 환경하중, 차륜하중, 설계

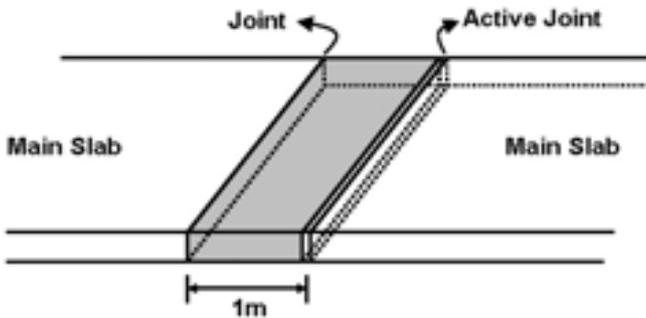
1. 서론

PTCP(Post-Tensioned Concrete Pavement)는 종방향 긴장 방법에 따라 Central Prestressing 방식과 Gap Slab 방식으로 나눌 수 있다(Friberg and Pasko, 1973; Brunner, 1975; Klunker, 1981; Powers and

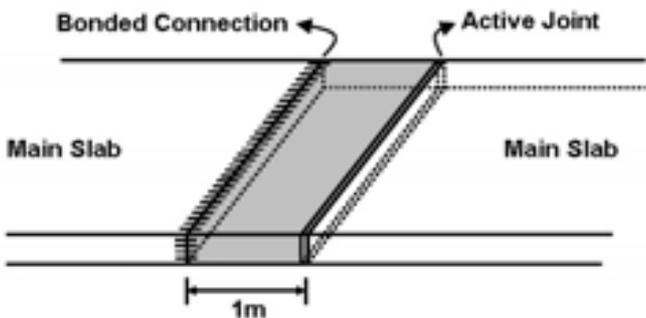
Zaniewski, 1987). Central Prestressing 방식은 메인 슬래브의 양단에 정착구를 설치하고 슬래브의 중간 지점에 포켓을 형성하여 이러한 포켓에서 강선을 긴장한 후 포켓을 그라우팅으로 채우는 방식이다(Merritt et al., 2000, 2002). 반면 Gap Slab 방식은 메인 슬래브 타설 후 슬래브의 한쪽

끝에서 긴장 작업을 하는 방식이다. 이때 긴장 작업에 필요한 약 1~1.5m 길이의 슬래브 사이 공간을 비워 두고 다음 메인 슬래브가 타설된다. 모든 메인 슬래브의 긴장작업이 끝나면 긴장 작업에 필요한 공간으로 비워 두었던 약 1~1.5m 정도의 공간에 콘크리트를 타설하게 된다. 이와 같은 슬래브를 Gap Slab라 부른다.

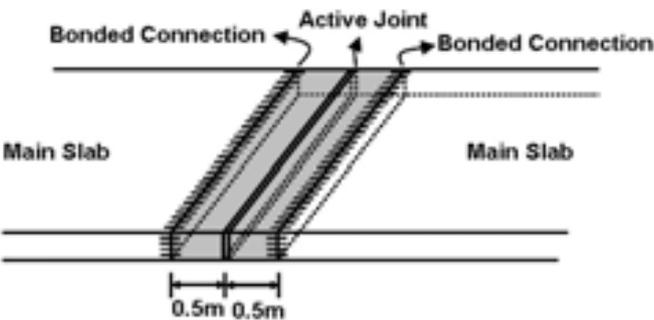
Gap Slab와 메인 슬래브와의 사이에는 조인트를 설치하게 되는데 조인트는 종방향 변위를 허용하는 Active 조인트 (Expansion Joint), 메인 슬래브와 Gap Slab가 연결 장치 없이 단순히 붙어있는 형태의 Construction 조인트, 또는 메인 슬래브와 Gap Slab가 철근 등에 의해 부착되어 있는 형태로 이루어진다. 이와 같은 Gap Slab 방식은 조인트 위치와 성질에 따라 Unbonded 방식, Half Bonded 방식, Bonded 방식으로 각각 설계 및 시공될 수 있다.



(a) Unbonded



(b) Half Bonded



(c) bonded

그림 1. Gab Slab 방식

Unbonded Gap Slab 방식은 그림 1(a)에서와 같이 Gap Slab 한 쪽에 Construction 조인트를 두고 다른 쪽에는 Active 조인트를 두는 것으로 Gap Slab 양단이 메인 슬래브와 부착되어 있지 않기 때문에 종방향 길이가 짧고 상대적으로 횡방향 폭이 긴 횡방향 보와 같은 거동을 하는 것이 특징이다. 즉, Gap Slab 길이가 상대적으로 작아 외부 하중으로 인한 응력발생에 있어서 횡방향 응력이 지배적일 것이고, 종방향 응력은 줄어들 것이다. 따라서 횡방향 긴장을 통해 발생 응력을 감소시키는 방식이다. Half Bonded Gap Slab 방식은 그림 1(b)와 같이 PTCP 슬래브와 Gap Slab 사이의 Active 조인트는 그대로 두고 반대쪽의 Construction 조인트를 철근을 이용하여 메인 슬래브와 일체화 시키는 방식이다. Bonded Gap Slab 방식은 그림 1(c)에서 보여주는 바와 같이 Gap Slab를 타설 할 때 Active 조인트를 설치하는 방식이다. 즉, Gap Slab의 양단의 Construction 조인트를 철근을 이용하여 메인 슬래브와 일체화시키고 타설되는 Gap Slab 중앙에 Active 조인트를 설치하는 방식이다.

이와 같은 여러 종류의 Gap Slab의 설계에 있어서 각각의 Gap Slab 방식에 따른 종방향 및 횡방향 발생응력을 분석하여 프리스트레싱의 필요성 및 긴장량을 산정할 수 있다. 따라서 본 연구는 이와 같은 세 종류의 Gap Slab 방식에 따른 응력분포 특성을 분석하여 각각의 방식에 적합한 긴장 설계 방안을 제시하기 위하여 수행되었으며 이러한 연구 내용을 본 논문에서 상세히 기술한다.

2. 환경 하중에 의한 응력 분포 분석

세 가지 방식의 Gap Slab 긴장 설계를 위해서는 슬래브에 작용하는 하중에 의한 거동을 분석하여야 한다. 이러한 하중은 온도와 수분변화 등의 환경하중과 차량에 의한 차륜 하중으로 구분할 수 있다. 먼저 환경하중에 의한 응력 발생을 분석하였다. 슬래브 상하부의 온도 차에 의한 컬링현상으로 슬래브에 발생할 수 있는 응력을 유한요소해석을 통하여 분석하였다(ABAQUS, 2007). 콘크리트 슬래브는 3차원 고체요소를 이용하여 모델링하였으며 하부지지층은 무인장 스프링으로 모델링하였다. 해석에 사용한 콘크리트 탄성계수는 30GPa, 프와송비 0.15를 사용하였다. 슬래브에 작용하는 온도구배(Temperature Gradient)를 1℃/cm로 하였고 Curl Up현상과 Curl Down현상 모두를 고려하였다.

2.1. Unbonded Gap Slab

Unbonded 방식에서 Gap Slab의 크기는 종방향 길이

1m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 15cm로 횡방향 보와 같은 거동을 나타낸다. 그림 2는 하부지반 강성이 100MPa/m일 때 Gap Slab의 Curl Up 거동을 나타낸 그림이다. 슬래브는 횡방향 보의 거동을 나타내기 때문에 전체 슬래브가 횡방향으로 많이 휘는 것을 알 수 있다. 그림 2(a)는 종방향 응력(S11) 분포를 나타낸 것으로 최대 응력이 중앙이 아닌 횡방향으로 약 1/4 되는 곳에서 대칭으로 나타났다. 그림 2(b)는 횡방향 응력(S22) 분포이고 슬래브 중앙에 최대 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 발생 최대 인장응력의 크기를 비교해 보면 횡방향 응력이 종방향 응력에 비해 13배 정도 크게 발생하여 횡방향 응력이 지배적인 것을 알 수 있다.

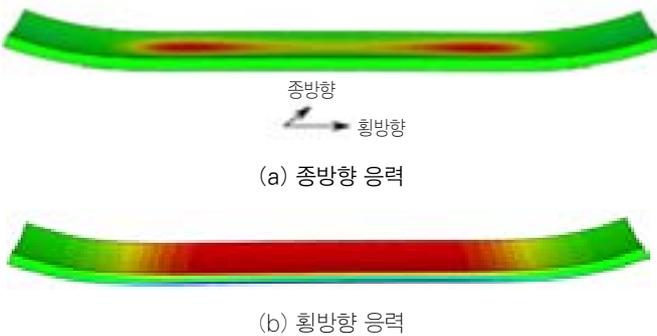
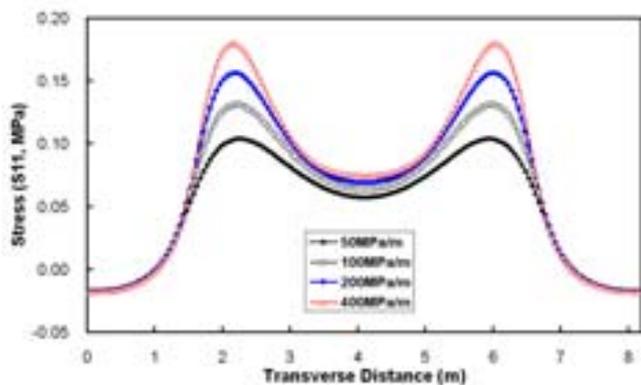


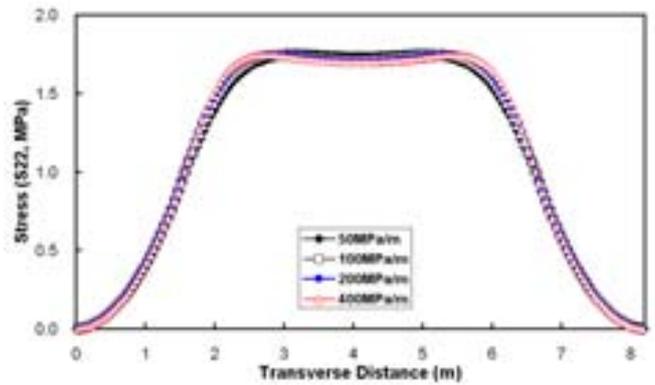
그림 2. Unbonded Gap Slab 컬링

그림 3은 Gap Slab 중앙에서 횡방향 길이 8.2m를 따라 발생한 종방향 및 횡방향 응력을 하부지반 강성에 따라 나타낸 것이다. 종방향 및 횡방향 응력 값 그래프의 세로축이 10배 정도 차이가 나듯이 횡방향 응력이 지배적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 크기가 작은 종방향 응력은 하부지반 강성이 커질수록 뚜렷이 증가하는 것을 알 수 있으나 횡방향 응력은 하부지반 강성의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.



(a) 종방향 응력

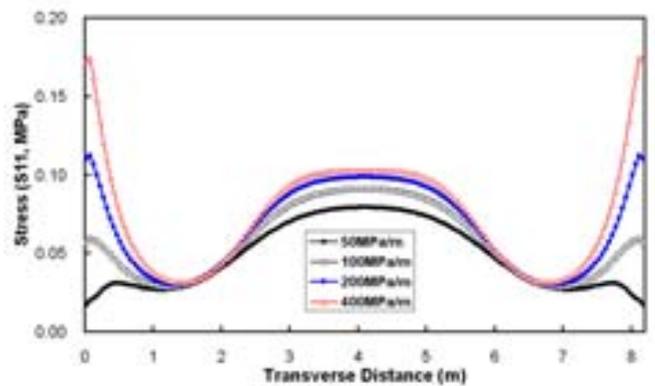
<그림 계속>



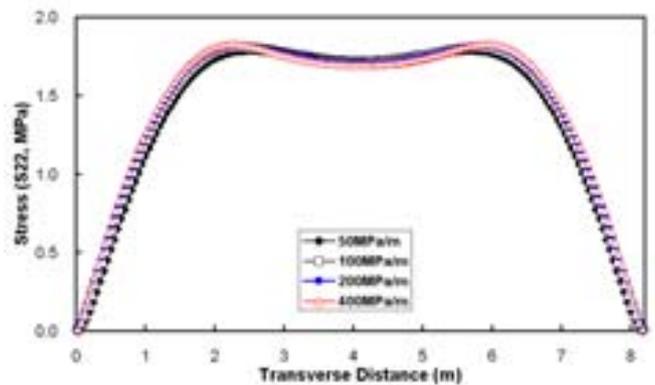
(b) 횡방향 응력

그림 3. Unbonded Gap Slab 컬링응력 분포(Curl Up)

그림 4는 동일한 조건에서 슬래브가 Curl Down했을 경우의 응력 분포를 나타낸 것이다. Curl Up에서는 인장응력이 슬래브 표면에서 발생하지만 Curl Down에서는 인장응력이 슬래브 바닥면에서 발생한다. Curl Up의 경우와 유사하게 응력의 크기가 작은 종방향 응력의 경우는 하부지반 강성에 따라 다소 차이가 발생하는 것을 알 수 있으며 횡방향 응력은 하부지반 강성의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.



(a) 종방향 응력



(b) 횡방향 응력

그림 4. Unbonded Gap Slab 컬링응력 분포(Curl Down)

2.2. Half Bonded Gap Slab

Half Bonded 방식에서의 Gap Slab는 120m 전체 슬래브가 환경하중에 의해 거동할 때 슬래브 끝단 1m 부분에서의 응력이 된다. 즉, 119m 슬래브와 1m의 Gap Slab가 철근에 의해 일체로 부착 연결되어 결국 120m의 슬래브가 된다. 따라서 슬래브와 일체된 끝단의 Gap Slab의 거동을 분석하기 위해 120m 슬래브의 끝단 1m 내에 컬링에 의해 발생하는 응력을 분석하여야 한다. 그림 5는 환경하중에 의해 컬링 현상이 발생하는 경우 120m 슬래브 끝단 1m의 종방향 및 횡방향 응력분포와 최대 발생응력을 나타낸 것이다.

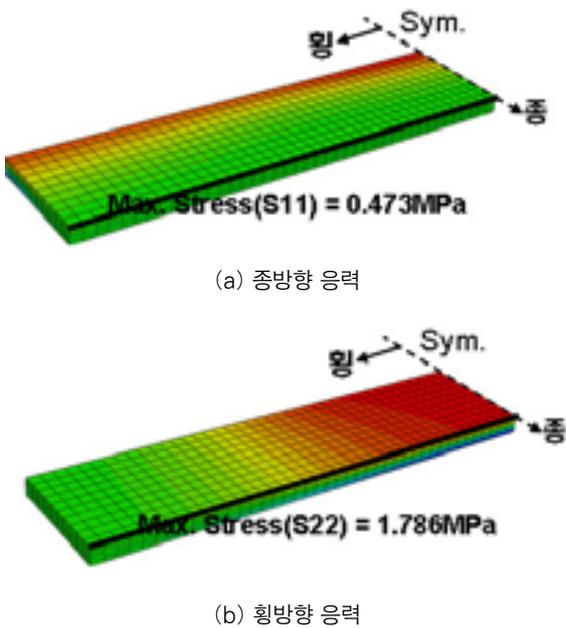


그림 5. Half Bonded Gap Slab 컬링 응력

전체 슬래브 크기는 120m×8.2m×0.15m를 사용하였고 횡방향으로는 대칭구조를 사용하여 절반인 4.1m만 나타내었으며 그림에서 횡방향 검은 실선은 슬래브 끝 단부를 나타낸 것이다. 슬래브 끝단에서는 종방향 컬링응력이 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있으며, 반면에 횡방향 컬링응력은 횡방향 중앙에서 가장 크게 발생한다.

2.3. Bonded Gap Slab

Bonded 방식에서의 Gap Slab는 Half Bonded 방식에서와 마찬가지로 120m 전체 슬래브와 일체화 하는 방법으로 Active 조인트를 Gap Slab 타설 시에 그 중앙에 제작되기 때문에 0.5m 길이의 대칭을 이루는 두 개의 Gap Slab를 분석하여야 한다. 0.5m 길이의 두 개의 Gap Slab는 각각 양쪽 120m 전체 슬래브의 좌, 우 끝단 0.5m가 될 것이고 이를 위해 전체 슬래브의 끝단 0.5m의 거동을 분석하였다. Half Bonded 방식에서의 조건과 동일하게 환경하중에 의한 컬링

응력 분포를 분석하여 그림 6에 나타내었다. Half Bonded 방식의 환경 하중에 의한 컬링 응력과 비교해보면 Gap Slab 크기가 절반으로 줄어들어 종방향 끝으로 점점 감소하는 종방향 응력은 확연히 줄어드는 것을 알 수 있지만 횡방향 중앙으로 점점 증가하는 횡방향 응력은 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다.

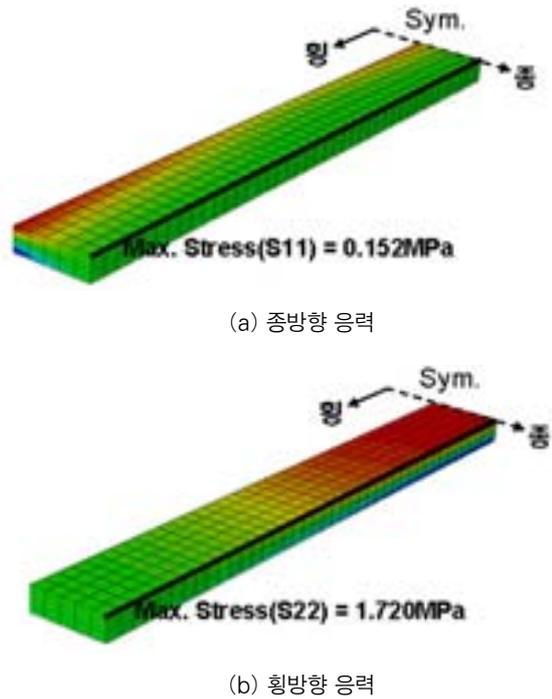


그림 6. Bonded Gap Slab 컬링 응력

3. 차륜하중에 의한 응력 분포 분석

Gap Slab의 차륜하중에 의한 응력 분포를 분석하기 위하여 설계 차륜하중 80kN/Axle을 가지는 단축 및 복축하중을 고려하였다. Unbonded Gap Slab 경우는 종방향 길이가 1m로 복축하중의 축간거리 약 1.3m보다 작기 때문에 단축하중만을 고려하였다. 하중은 그림 7에서와 같이 중앙, 종방향 및 횡방향 단부, 우각부에 차륜이 걸린 경우를 각각 고려하여 발생하는 최대응력을 산정하였다.

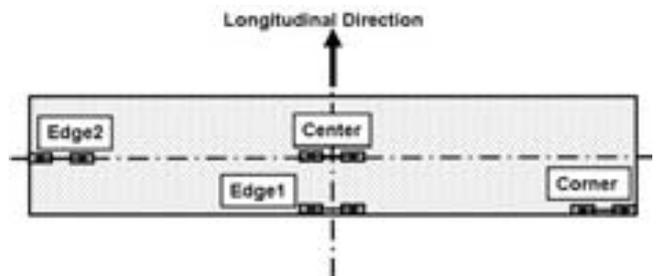
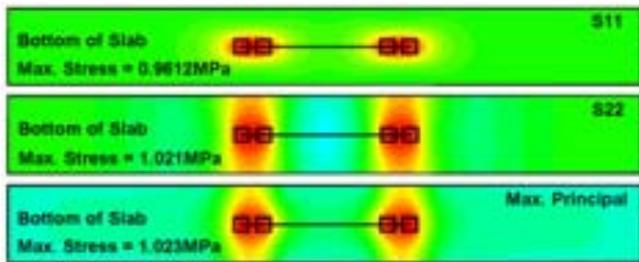


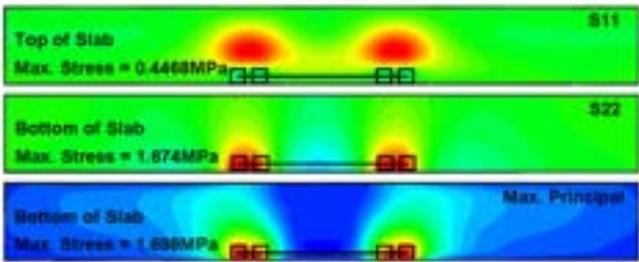
그림 7. 차륜 하중 재하 위치

3.1. Unbonded Gap Slab

그림 8은 Unbonded Gap Slab에 차륜하중이 작용할 경우에 응력의 분포를 나타낸다. 차륜하중에 의한 종방향 응력(S11)과 횡방향 응력(S22)을 살펴보면 슬래브 중앙(Center)과 단부2(Edge 2)에 차륜이 작용하는 경우는 슬래브 하부에서 최대 인장 응력이 발생하였고, 단부1(Edge 1)에 차륜이 작용하는 경우는 종방향 응력은 슬래브 상부, 횡방향 응력 및 주응력은 슬래브 하부에서 최대 인장 응력이 발생하였다. 그리고 우각부(Corner)에 차륜이 작용하는 경우에는 종방향 최대 인장응력은 슬래브 상부, 횡방향 최대 인장응력은 슬래브 상·하부에서 발생하였다.



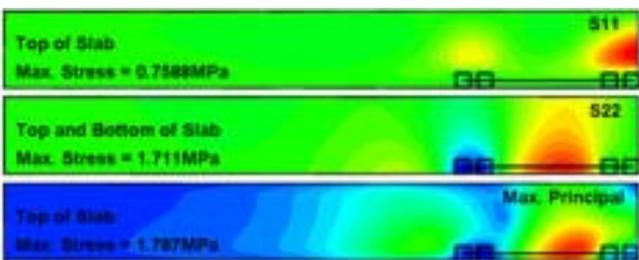
(a) 중앙



(b) 단부 1



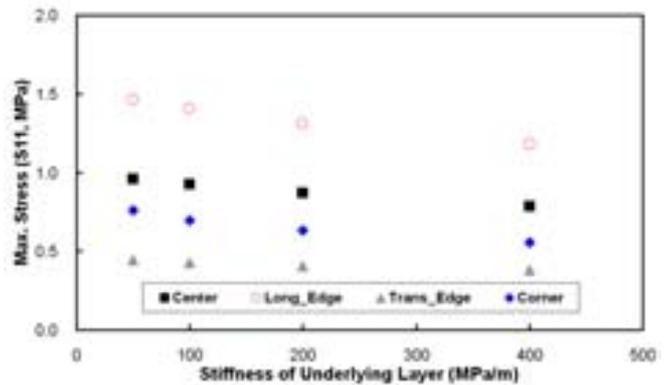
(c) 단부 2



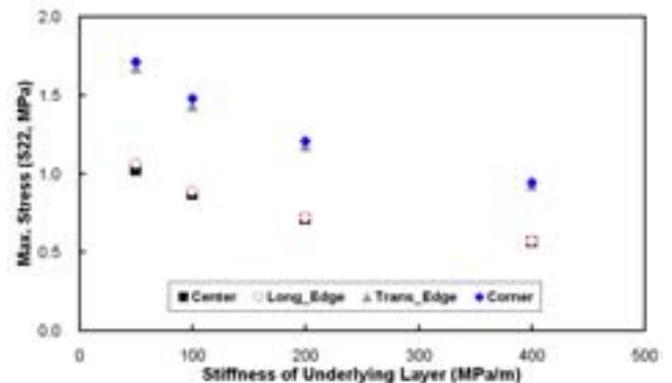
(d) 우각부

그림 8. 차륜하중에 의한 응력 분포

차륜하중에 의한 응력 역시 하부지반 강성이 50~200 MPa/m일 때 최대응력의 크기를 분석하였다. 일반적으로 차륜하중에 의해 발생하는 응력은 하부지반이 약할수록 크게 발생한다. 그림 9는 하부지반의 강성별로 발생하는 최대 인장 응력을 차륜 작용 위치별로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Gap Slab가 횡방향 보와 비슷하기 때문에 종방향 응력은 하부지반 강성의 크기에 영향을 많이 받지 않는 것을 알 수 있지만 횡방향 응력은 전형적인 포장 슬래브에서와 마찬가지로 하부지반 강성이 커지면 응력이 뚜렷이 감소하는 것을 알 수 있다.



(a) 종방향 응력



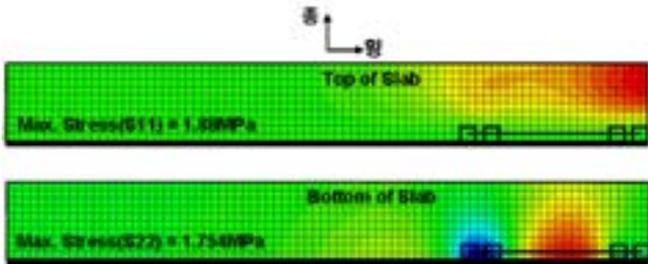
(b) 횡방향 응력

그림 9. 지반강성에 따른 최대 인장 응력

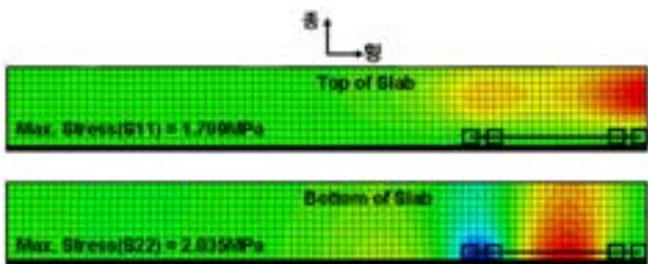
3.2. Half Bonded Gap Slab

차륜하중에 의한 Half Bonded Gap Slab의 최대 발생 응력을 분석하기 위해 단축과 복축 하중이 전체 120m 슬래브의 코너와 횡방향 단부(Edge 1)에 재하될 경우를 고려하였다. 그림 10은 전체 슬래브 코너에 각각 단축 하중과 복축 하중이 재하된 경우의 응력발생을 120m 슬래브 끝단 1m만을 종방향 및 횡방향 응력으로 나누어 나타낸 것이다. 그림에서 슬래브 아래쪽 검은 굵은 선은 슬래브 종방향 끝 Active 조인트를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 단축 및 복축하

중 모두 종방향 최대 인장응력은 슬래브의 상부에서 발생하였으며 횡방향 최대 인장응력은 슬래브 하부에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 종방향 최대 응력은 단축하중이 재하된 경우에서 더 크게 발생하였으며 횡방향 최대 응력은 복축하중에서 더 크게 발생한 것을 알 수 있다.



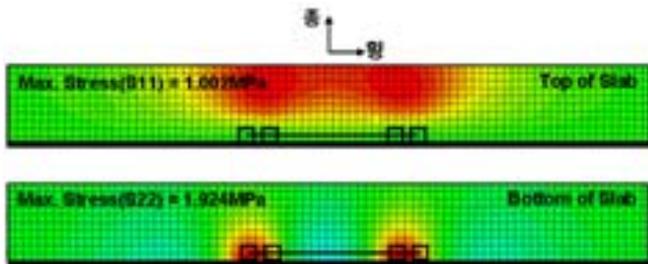
(a) 단축



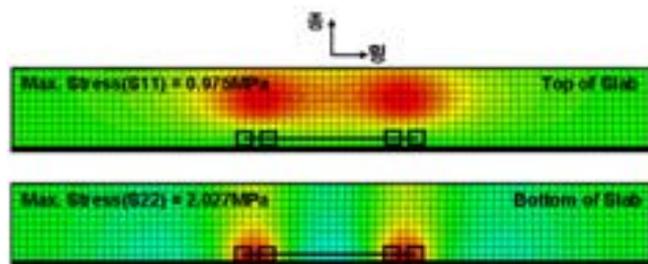
(b) 복축

그림 10. 우각부 차륜하중 재하 시 Half Bonded Gap Slab 응력분포

슬래브 끝 부분인 Active 조인트 부분에 차륜이 재하될 경우의 응력분포를 살펴보면 그림 11과 같다. 이러한 경우에도 종방향 최대 인장응력은 슬래브의 상부에서 발생하며 횡방향



(a) 단축



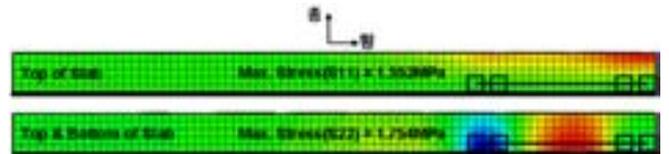
(b) 복축

그림 11. 단부 차륜하중 재하 시 Half Bonded Gap Slab 응력분포

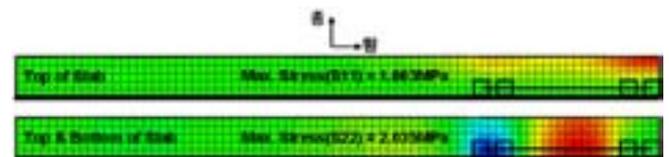
최대 인장응력은 슬래브의 하부에서 발생한다. 또한 단축과 복축하중에서의 발생 응력 크기는 그리 큰 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. Unbonded 방식과는 달리 Half Bonded 방식과 Bonded 방식의 Gap Slab에서는 중앙부와 단부 2에 하중이 작용할 때의 응력은 코너와 단부 1에 하중이 작용했을 경우에 비해 작기 때문에 그림으로 나타내지는 않았다.

3.3. Bonded Gap Slab

차륜하중에 의한 Bonded Gap Slab의 응력발생을 분석하기 위해 Half Bonded Gap Slab와 마찬가지로 단축과 복축하중이 전체 120m슬래브의 코너와 횡방향 단부에 재하될 경우를 고려하였다. 그림 12는 코너에 단축 및 복축 하중이 재하된 경우의 응력 분포를 보여준다. 횡방향 최대 인장응력은 Half Bonded 방식에서의 응력과 거의 유사하나 종방향 최대 인장응력은 감소하는 것을 알 수 있다. 슬래브의 단부에 하중이 작용했을 경우(그림 13)에도 횡방향 최대 인장응력은 Half Bonded 방식과 거의 일치하는 것을 알 수 있으며 종방향 최대응력은 다소 감소하는 것을 알 수 있다.

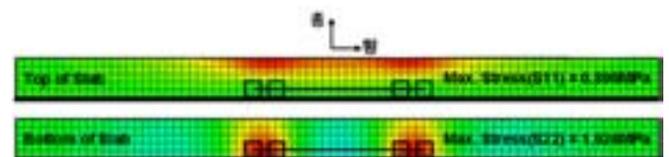


(a) 단축

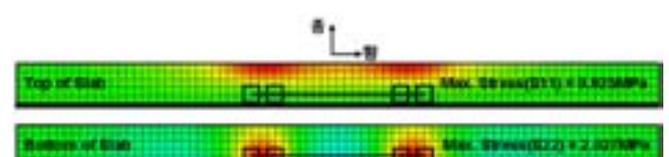


(b) 복축

그림 12. 코너 차륜하중 재하 시 Bonded Gap Slab 응력분포



(a) 단축



(b) 복축

그림 13. 단부 차륜하중 재하 시 Bonded Gap Slab 응력분포

4. 긴장 설계

Gap Slab의 긴장설계를 위해서는 Gap Slab에 작용하는 설계하중을 결정하여야 한다. 각각의 세 가지 Gap Slab들은 길이가 종방향 1m 내외, 횡방향 8.2m로 비교적 짧기 때문에 하부지반 마찰 및 긴장과 관련된 긴장력의 손실량은 무시할 수 있다. 설계 하중은 환경하중과 차륜하중을 모두 고려해야 하며 이러한 복합하중이 작용할 때 Gap Slab에 발생하는 최대 인장응력을 산정하여 이러한 응력을 감소시킬 수 있도록 긴장응력을 가해야 한다. 우선 환경하중에 의한 영향 분석에서 사용한 수직온도구배가 1℃/cm이었는데 이 경우 슬래브 상하부 온도차는 슬래브의 두께가 15m이므로 15℃ 차이가 된다. 이것은 매우 큰 온도차이며 30m두께의 포장에서도 발생하기 쉽지 않은 값이다. 따라서 온도구배를 0.5℃/m인 경우도 고려하였다. 차륜하중은 AASHTO에서 설계하중으로 제시하고 있는 80kN/축을 사용하였고 과적 차량이 다닐 수 있기 때문에 차륜하중을 1.5배로 크게도 작용시켜 보았다 (AASHTO, 1993). 따라서 다음과 같은 세 가지의 경우를 설계하중으로 고려하였다.

Case 1. Temperature Gradient 1℃/cm, Design Vehicle Load 80kN/Axle

Case 2. Temperature Gradient 0.5℃/cm, Design Vehicle Load 80kN/Axle

Case 3. Temperature Gradient 0.5℃/cm, Design Vehicle Load 120kN/Axle

위의 세 가지 Case별로 환경하중 및 차륜하중에 의한 Gap Slab의 최대응력을 구하여 그 값을 더한 후 그 값들의 최대 값을 긴장량 산정을 위한 기준값으로 결정하였다. 표 1은 하중 Case별 최대 인장 응력을 응력의 크기가 크게 발생하는 횡방향 중앙부와 우각부에서 Gap Slab 방식에 따라 나타내었다. Gap Slab 우각부에서는 환경하중에 의한 응력 발생이 작지만 차륜하중에 의한 응력 발생은 슬래브 중앙보다 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 슬래브 중앙에서의 횡방향 발생 응력은 환경 및 차륜하중에 의한 응력 모두가 크게 발생한다.

Gap Slab 방식의 긴장 간격 설계에서 중요하다고 볼 수 있는 항목 중 하나는 설계에 사용할 콘크리트의 허용 휨강도의 기준값을 결정하는 것이다. 즉, 콘크리트 재료 자체의 휨강도를 어느 정도 허용할지를 결정하는 것이다. 본 연구에서는 콘크리트의 허용 휨강도를 콘크리트 휨강도의 절반인 2,250kPa로 정의하였다. 이는 콘크리트 도로 포장에서 허용 휨강도를 휨강도의 절반 이하로 할 경우 피로에 의한 파손이 발생하지 않는다는 점에 바탕을 두어 선정하였다. 긴장응력은 환경하중 및 차륜하중에 의한 인장 응력에서 콘크리트 허

용 휨강도를 제외한 응력의 크기에 해당하는 응력이 슬래브에 가해지도록 식 (1)과 같이 산정할 수 있다.

표 1. 하중 Case별 발생 인장 응력

Case 1.	Location	Max. Tensile Stress (kPa)					
		Unbonded		Half Bonded		Bonded	
		S11	S22	S11	S22	S11	S22
Environmental Load	Transverse Center	116	1828	473	1786	127	1270
	Corner	175	485	394	298	152	144
Vehicle Load	Transverse Center	961	1674	1002	2027	925	2027
	Corner	1467	1566	1880	2035	1663	2035
Max. Stress	Transverse Center	1077	3502	1475	3813	1052	3297
	Corner	1642	2051	2274	2333	1815	2477

Case 2.	Location	Max. Tensile Stress (kPa)					
		Unbonded		Half Bonded		Bonded	
		S11	S22	S11	S22	S11	S22
Environmental Load	Transverse Center	58	914	236.5	893	63.5	635
	Corner	87.5	242.5	197	149	76	72
Vehicle Load	Transverse Center	96	1674	1002	2027	925	2027
	Corner	1467	1566	1880	2035	1663	2035
Max. Stress	Transverse Center	1019	2588	1238.5	2920	988.5	2662
	Corner	1554.5	1808.5	2077	2184	1739	2107

Case 3.	Location	Max. Tensile Stress (kPa)					
		Unbonded		Half Bonded		Bonded	
		S11	S22	S11	S22	S11	S22
Environmental Load	Transverse Center	58	914	236.5	893	63.5	635
	Corner	87.5	242.5	197	149	76	72
Vehicle Load	Transverse Center	1441.5	2511	1503	3040.5	1387.5	3040.5
	Corner	2200.5	2349	2820	3052.5	2494.5	3052.5
Max. Stress	Transverse Center	1499.5	3425	1739.5	3933.5	1451	3675.5
	Corner	2288	2591.5	3017	3201.5	2570.5	3124.5

긴장응력 ≥ 하중에 의한 인장응력

$$- \text{콘크리트 허용 휨강도} (2,250\text{kPa}) \quad (1)$$

긴장에 사용하는 강선은 KS D 7002/SWPC 7B로 극한 인장강도는 261kN, 항복강도는 222kN이다. 긴장 시 극한 인장강도의 80%, 항복강도의 94% 중 작은 값까지 긴장하기 때문에 208.7kN을 긴장하중으로 사용한다. 이 값을 기준으

로 차륜 및 환경하중에 의해 발생된 최대 인장응력과 비교로 긴장 간격을 결정한다. 세부적인 설계 방법을 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$\text{긴장응력} = \frac{\text{강선의 긴장하중}(208.7\text{kN}) \times \text{강선의 개수}}{\text{슬래브 긴장 단면적}}$$

≥ 하중에 의한 최대인장응력-콘크리트허용휨강도 (2)

세 가지 Gap Slab 방식별로 실제와 가장 가까운 설계하중 Case 2와 콘크리트 허용 휨강도를 이용하여 설계를 해보도록 한다. 설계 하중 Case 2에서 세 가지 Gap Slab 방식에서의 종방향 최대 발생응력(1,554.5kPa, 1,739kPa, 2,077kPa)이 콘크리트의 허용 휨강도(2,250kPa)보다 작은 것을 알 수 있다. 이는 Gap Slab에서 종방향 긴장은 필요하지 않다는 것을 의미한다.

다음으로 횡방향 긴장은 각 경우별로 나누어 앞의 수식을 이용하여 강선의 개수를 구하여 긴장응력을 산정할 수 있다. 먼저 Unbonded Gap Slab 방식의 횡방향 설계 예를 들어보면 식 (3)과 같다.

강선의 개수

$$= \frac{(2,588\text{kPa} - 2,250\text{kPa}) \times \text{슬래브 긴장단면적}(1\text{m} \times 0.15\text{m})}{\text{강선의 긴장하중}(208.7\text{kN})}$$

$$= 0.243\text{개} \quad (3)$$

Unbonded Gap Slab 방식의 횡방향 긴장 설계 결과 강선의 개수가 0.243개이므로 1개의 강선을 25%만 긴장해도 설계 수식을 만족한다. 따라서 Gap Slab에 1개의 강선을 횡방향으로 배치하여 긴장하면 긴장응력이 슬래브 발생 응력보다 더 크게 작용하여 충분히 안정된 설계가 될 수 있다.

Half Bonded 방식과 Bonded 방식의 Gap Slab 설계에서는 Gap Slab와 전체 슬래브가 일체화되어 있다는 것이 중요하다. 따라서 전체 슬래브의 횡방향 긴장 또한 함께 고려해야 주어야 한다. 전체 슬래브와 일체된 Gap Slab는 횡방향 긴장 설계에서 긴장 단면적(1m 또는 0.5m×0.15m)이 아니라 전체 슬래브의 긴장 단면적(120m×0.15m)이 될 것이다. 따라서 전체 슬래브의 횡방향 긴장 설계가 완료된 후 추가적으로 Gap Slab 부분에 긴장을 가했을 때 Gap Slab 부분에 발생하는 긴장응력을 이용하여 설계를 해야 한다.

예를 들어 전체 슬래브의 횡방향 긴장 설계 결과가 40개의 강선을 3m 간격으로 460kPa의 긴장응력이 작용하게 결정

되면 여기에 추가적으로 Gap Slab에 긴장을 가하여 전체 슬래브에서 Gap Slab 부분에 작용하는 횡방향 긴장응력을 구해야 한다. 즉, 횡방향으로 3m 간격으로 전체 슬래브에 강선을 배치하고 추가적으로 Gap Slab 중앙인 단부에서 0.5m 혹은 0.25m 떨어진 곳에 강선을 배치하여 긴장 하였을 때 Gap Slab에 작용하는 긴장응력을 가지고 Gap Slab의 횡방향 긴장을 설계할 수 있다.

그림 14는 3m 간격으로 횡방향 긴장이 작용하고 추가적으로 슬래브 끝단에서 0.5m 떨어진 곳에 Half Bonded 방식의 Gap Slab에 횡방향 긴장 강선 1개가 배치되어 긴장될 때의 횡방향 응력 분포를 나타낸 것이다. Gap Slab 횡방향 긴장에 사용된 1개의 강선은 전체 슬래브의 횡방향 긴장응력에 거의 영향을 주지 않고 Gap Slab 주위에만 횡방향 긴장응력을 추가적으로 발생시키는 것을 알 수 있다. 전체 슬래브에서 3m 간격의 횡방향 긴장으로 460kPa의 압축응력이 작용하고 Gap Slab에서 1개 강선으로 인한 압축응력이 추가로 작용해 Gap Slab에는 최소 1.09MPa의 긴장응력이 발생한다. Bonded 방식의 Gap Slab에서도 이와 같은 방법으로 1개의 강선으로 Gap Slab를 긴장할 경우 횡방향 긴장응력 분포를 그림 15에 나타내었다.

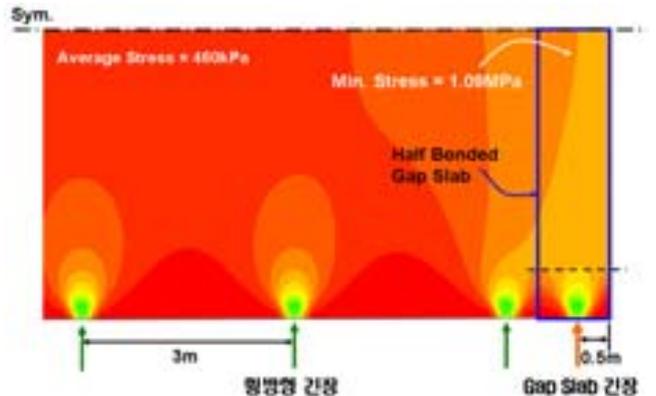


그림 14. 횡방향 긴장 응력 분포(Half Bonded 방식)

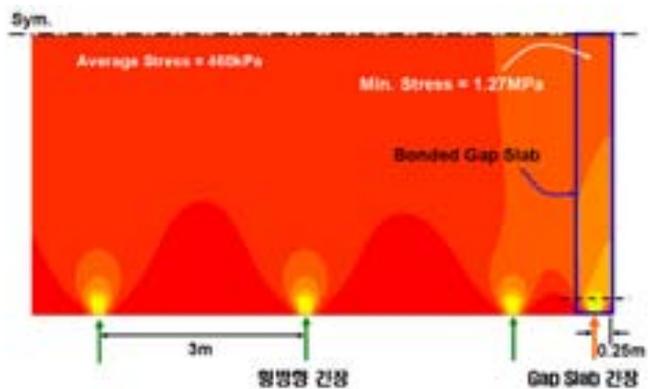


그림 15. 횡방향 긴장 응력 분포(Bonded 방식)

Half Bonded 방식과 Bonded 방식의 Gap Slab 횡방향 긴장 설계 결과를 나타내면 다음과 같다.

- Half Bonded Gap Slab 방식

$$\begin{aligned} \text{긴장응력} &= 1,270\text{kPa} \geq (2,662\text{kPa} - 2,550\text{kPa}) \\ &= 412\text{kPa} \dots\dots \text{O.K} \end{aligned} \quad (4)$$

- Bonded Gap Slab 방식

$$\begin{aligned} \text{긴장응력} &= 1,090\text{kPa} \geq (2,920\text{kPa} - 2,550\text{kPa}) \\ &= 670\text{kPa} \dots\dots \text{O.K} \end{aligned} \quad (5)$$

위에서 볼 수 있듯이 모든 Gap Slab 방식에서 횡방향 긴장은 1개의 강선으로 충분한 것으로 분석 된다. 만약 위 식을 만족하지 못할 경우 Gap Slab에 긴장 강선의 수를 추가하여 식(2)를 만족하도록 해야 한다.

5. Gap Slab 설계 방안

Gap Slab에 발생할 수 있는 최악의 하중조건을 고려하여 발생할 수 있는 최대 인장응력을 산정한 뒤 강선의 제원과 설계 하중 조합의 경우를 결정하고 콘크리트의 허용 휨강도 기준값을 이용하여 Gap Slab가 받을 긴장응력 및 Tendon의 개수와 긴장 간격을 구할 수 있다. Half Bonded 방식 및 Bonded 방식에서는 전체 슬래브의 횡방향 긴장응력에 추가적으로 Gap Slab에 긴장이 가해졌을 때 Gap Slab에 발생하는 긴장응력을 기준으로 설계가 이루어져야 한다. 이러한 과정을 그림으로 나타내면 그림 16과 같다.

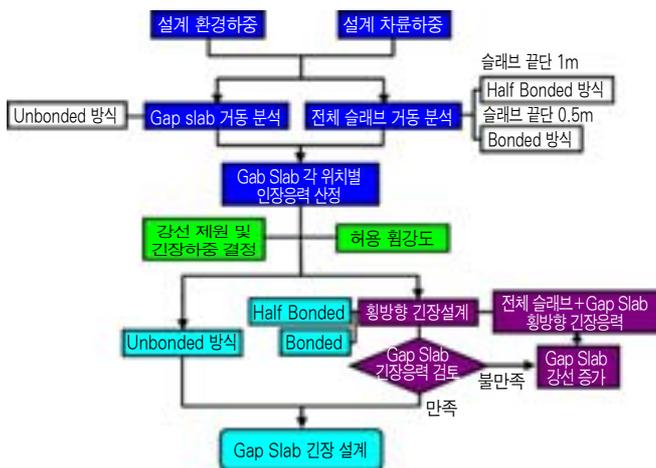


그림 16. Gap Slab 긴장 설계 방안

6. 결론

본 연구는 포스트텐션 콘크리트 포장 공법의 Gap Slab 설계에 대한 내용으로 Joint 제작과 시공 방법에 따라 Unbonded 방식과 Half Bonded 방식 및 Bonded 방식 등 세 가지 방식으로 분류하여 각각의 특징과 환경하중 및 차륜하중에 의한 거동을 분석하였다. 그리고 각각의 방식에 따른 긴장 설계를 수행하는 방안에 대하여 상세히 설명하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 환경하중에 의한 Gap Slab의 횡방향 인장응력은 하부 지지층의 강성에 그리 큰 영향을 받지 않으나 차륜하중이 작용할 때는 하부지지층의 강성이 높을수록 인장응력이 확연히 감소하는 것을 알 수 있다.
2. Unbonded 방식은 Gap Slab의 양쪽 끝에 조인트가 위치하여 전체 슬래브와는 분리된 거동을 하며 횡방향 보와 같은 구조물로 해석과 설계를 수행할 수 있으나, Half Bonded 방식과 Bonded 방식의 Gap Slab는 전체 슬래브와 일체화 되어 함께 거동하기 때문에 전체 슬래브를 분석하여 설계를 수행하여야 한다.
3. Gap Slab에서 종방향 응력은 차륜하중에 의해 지배적으로 발생하게 되며 슬래브의 우각부에서 최대 인장응력이 발생한다. 횡방향 응력은 환경하중과 차륜하중 모두에 의해 지배적으로 발생하게 되며 슬래브의 중앙부에서 최대 인장응력이 발생한다.
4. 환경하중 및 차륜하중에 의해 Gap Slab에 발생하는 최대 인장응력을 조합해 보면 횡방향 응력이 종방향 응력에 비해 매우 크게 발생하게 되며, 따라서 종방향으로는 프리스트레싱의 필요가 없는 것으로 분석되나 횡방향으로는 긴장에 의한 프리스트레싱의 도입이 필요시 된다.

참고 문헌

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, pp. 62-72.

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

Merritt, D. K., McCullough, B. F., Burns, N. H., and Schindler, A. K. (2000). "The Feasibility of Using Precast Concrete Panels to Expedite Highway Pavement Construction," *Report 1517-1*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

Merritt, D. K., McCullough, B. F., and Burns, N. H. (2002). "Construction and Preliminary Monitoring of the Georgetown, Texas Precast Prestressed Concrete Pavement," *Report 5-1517-1*, 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, pp. 1-11.

접 수 일 : 2010. 5. 20
심 사 일 : 2010. 5. 20
심사완료일 : 2010. 5. 31