



## 환경하중과 차량하중에 의한 줄눈콘크리트포장의 극한인장응력 특성 분석

김성민<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>경희대학교 토목건축대학 토목공학전공

## Features of Critical Tensile Stresses in Jointed Concrete Pavements under Environmental and Vehicle Loads

Seong-Min Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>College of Architecture and Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

**ABSTRACT** This research was conducted to analyze the features of the critical tensile stresses at the top and bottom of the concrete slab in the jointed concrete pavement (JCP) when subjected to both the environmental and vehicle loads. First, the stress distribution in JCP was analyzed when the system was subjected to only the environmental loads or the vehicle loads by using the finite element model of JCP. Then, the stresses were analyzed when the system was subjected to the environmental and vehicle loads at the same time. From this study, it was found that the critical tensile stresses at the slab bottom under the vehicle loads were almost constant regardless of the loading positions once the loads were applied at the positions having some distance from the transverse joint. The critical tensile stresses at the slab bottom could be obtained using the model consisting of normal springs for underlying layers by adding the critical stresses due to the environmental loads and the vehicle loads for the curled-down slab, and by subtracting the critical stress due to the environmental loads from that due to the vehicle loads for the curled-up slab. The critical tensile stresses at the top of the slab could be obtained using the model consisting of tensionless springs for underlying layers by adding the critical stress due to the environmental loads and the stress at the middle of the slab under the vehicle loads applied at the joint for the curled-up slab. An alternative to obtain the critical stresses at the top of the slab for the curled-up slab was to use the critical stresses under only the environmental loads obtained from the model having normal springs for underlying layers.

**Keywords :** jointed concrete pavement, environmental load, vehicle load, critical stress, curling

### 1. 서 론

줄눈콘크리트포장은 온도 변화 및 습도 변화 등의 환경 하중에 의해 응력을 받게 된다. 일반적으로 낮에는 슬래브 표면의 온도가 하부의 온도보다 커지기 때문에 슬래브의 중앙부가 위로 솟고 줄눈부 (또는 단부)가 아래로 내려가는 형태의 휨인 켈다운 현상이 발생하게 되고 밤에는 반대로 표면의 온도가 하부보다 낮아져서 슬래브의 중앙부가 아래로 내려가고 줄눈부가 위로 올라가는 형태의 휨인 켈업 현상이 발생하며 이러한 현상을 켈링 현상이라 부른다. 이때 슬래브가 아무런 구속 조건이 없으며 자중도 무시하면 슬래브는 이러한 온도 변화에 의해 아무런 응력도 받지 않게 된다. 그러나 슬래브는 켈링할 때 자중에 의한 응력이 발생되며, 또한 하부층과의 수

평 수직 상호 관계와 줄눈부에서의 구속에 의해 응력을 받게 된다. 따라서 이러한 환경 하중에 대한 콘크리트포장의 거동 및 공용성 분석에 대한 연구가 매우 중요시 되고 있다.<sup>1,2)</sup>

환경 하중과 더불어 줄눈콘크리트포장은 차량 하중에 의해서도 응력이 발생된다. 콘크리트포장에서 차량 하중에 대한 응력은 Westergaard 방정식<sup>3)</sup> 등을 이용하여 구하기도 하지만 이러한 방법은 한 개의 차량 하중이 작용할 때의 포장의 최대 응력을 구할 수 있는 방법이기 때문에 실제 차량 하중인 복륜 또는 다축 하중이 작용할 때의 최대 응력을 제대로 구할 수 없을 뿐만 아니라 포장에 발생하는 전체적인 응력분포도 구할 수 없다. 따라서 차축수와 차륜수를 고려한 포장의 응력을 분석하는 연구도 중요하다고 할 수 있다.<sup>4)</sup>

일반적으로 콘크리트포장은 환경 하중과 차량하중을 동시에 받게 된다. 따라서 이러한 하중이 조합되었을 경우에 포장의 거동을 제대로 분석하는 연구가 미흡하였으

\*Corresponding author E-mail : seongmin@khu.ac.kr

Received November 16, 2006, Accepted April 30, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

며 포장의 피로 파손 등 장기 공용성 예측에는 반드시 필요시 되는 사항이다. 특히 콘크리트포장의 균열은 인장응력과 직접적인 연관이 있으므로<sup>5)</sup> 이러한 하중에 의한 최대 인장응력의 크기와 발생 위치 등을 파악하여 포장의 장기 공용성을 예측할 수 있도록 하는 것이 중요시 된다. 예를 들어 슬래브의 상부에 걸리는 인장응력은 누적되면 상부 발생 균열 (top-down crack)을 일으킬 수 있으며 반대로 슬래브 하부에 생기는 인장응력은 누적되어 하부 발생 균열 (bottom-up crack)을 야기할 수 있다.

본 논문에서는 줄눈콘크리트포장의 유한요소 수치해석 모형을 개발하여 포장에 차량하중과 온도 하중이 작용할 때 슬래브 상하부에 발생하는 최대 인장응력의 특성을 분석하였다. 먼저 온도 하중 또는 복륜 차량하중만이 작용할 때 줄눈콘크리트포장의 응력을 분석하였으며, 그 후 온도 하중과 차량하중이 동시에 작용할 때의 거동을 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 줄눈콘크리트포장의 슬래브 상하부에 생기는 최대 인장응력을 적절하게 산출하는 방법을 도출하였으며 본 논문에서 이러한 연구 내용을 상세히 기술한다.

## 2. 구조 해석 모형

줄눈콘크리트포장의 거동을 분석하기 위하여 유한요소 해석 프로그램<sup>6)</sup>을 사용하여 Fig. 1과 같은 구조 해석 모형을 개발하였다. 실제 줄눈콘크리트포장은 슬래브가 종방향으로 연속적으로 놓여있으나 해석의 편의를 위해 그림에서 볼 수 있듯이 종방향으로 세 개의 콘크리트 슬래브와 횡방향으로 두 개의 슬래브를 모델링하였다. 따라서 해석 결과는 중앙에 위치한 슬래브를 기준으로 분석하였다. 횡방향 줄눈부는 다웰바로 종방향 줄눈부는 타이바로 연결하였다. 콘크리트 슬래브는 평면 쉘 요소를 사용하여 모델링하였으며 다웰바와 타이바는 보 요소를 사용하여 모델링 하였다. 타이바는 콘크리트 슬래브에 완전히 부착되도록 연결시켰으며, 다웰바는 한쪽은 슬래브에 부착되고 다른 한쪽은 수평 방향 미끄럼을 허용하도록 무한대의 강성을 지닌 수직 스프링 요소만을 사용하여 연결시켰다. 본 연구에서 사용된 모형은 전형적인 줄눈콘크리트포장 설계에 따른 크기 및 재료 성질을 가지

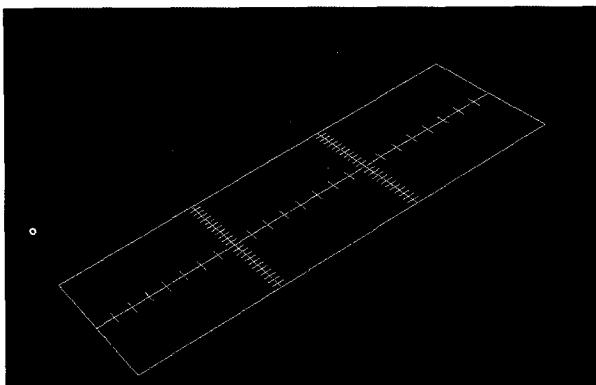


Fig. 1 Finite element model of jointed concrete pavement

도록 하였다<sup>7,8)</sup>. 따라서 슬래브 두께 0.3 m, 종방향과 횡방향 줄눈 간격 6 m와 3.6 m, 콘크리트 탄성계수 30 GPa, 지반 탄성계수 110 MN/m<sup>3</sup>, 다웰바와 타이바 지름 25 mm와 16 mm, 다웰바와 타이바 탄성계수 200 GPa, 다웰바 간격 0.3 m, 타이바 간격 0.75 m, 푸아송비 0.15, 콘크리트 열팽창계수 0.00001/°C의 값을 가진 것으로 가정하였다. 참고로 본 논문에서 보여주는 거동 및 결과는 전형적인 것이며 사용한 변수 값을 변화시켜도 그러한 양상은 같다는 것을 확인하였다.

콘크리트포장의 하부층은 대체로 스프링을 이용하여 모델링을 한다<sup>9,10)</sup>. 이때 일반적인 스프링을 사용하면 슬래브가 컬링을 하여 슬래브의 일부분이 하부층과는 실제로 분리되어 있어도 모델에서는 항상 스프링이 붙어있게 되기 때문에 이러한 스프링은 인장력을 지니게 되며 슬래브를 아래로 잡아당기는 현상을 야기한다. 이러한 구조 해석은 슬래브의 응력을 과다하게 예측하도록 한다. 예를 들어 새벽에 포장 표면의 온도가 하부보다 낮아져서 슬래브의 중앙부가 내려앉는 모양의 컬링이 생겼다고 하면 줄눈 부분의 하부층을 표현한 스프링이 슬래브의 줄눈 부분을 아래로 잡아 당겨서 슬래브의 중앙부 표면에 생기는 응력은 실제보다 커질 수 있게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 무인장 스프링 (tensionless spring)을 이용하여 하부층을 모델링할 수 있다<sup>11)</sup>.

무인장 스프링을 사용하여 하부층을 모델링하였을 때와 일반적인 스프링을 이용하여 모델링하였을 때의 슬래브 거동의 차이를 Fig. 2에 나타내었다. 슬래브가 컬링을 하면 슬래브 양단의 슬래브와 하부층 사이에 공간이 생길 수 있으며 Fig. 2(a)에 보인 것과 같이 일반 스프링은 공간이 있음에도 불구하고 항상 슬래브에 붙어있어야 하기 때문에 결과적으로 슬래브를 아래로 당기게 된다. 따라서 슬래브 상부의 양단, 즉 줄눈 폭 (joint width)은 실제보다 줄어들게 된다. 또한 중앙의 상부는 양단의 스프링이 아래로 잡아당김으로 인해 인장응력이 발생하여 실제 인장응력 보다 큰 인장응력이 생기게 된다. Fig. 2(b)

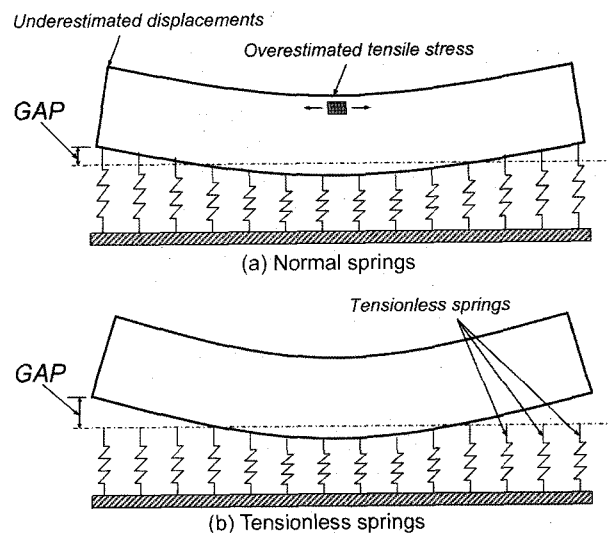


Fig. 2 Modeling of underlying layers

에 나타낸 것과 같은 무인장 스프링을 사용하면 슬래브와 하부층 간의 공간을 제대로 모델링할 수 있어서 줄눈 폭은 커지게 되고 슬래브를 양단에서 잡아 내리는 힘이 줄어들어 슬래브 중앙 상부의 응력은 감소하게 된다. 슬래브 상부의 온도가 하부의 온도보다 클 때는 쉐어링 현상이 반대로 생기며 이때는 슬래브와 하부층과의 공간이 슬래브의 중앙 부분에 생기게 되며 무인장 스프링을 사용하지 않으면 슬래브 하부의 인장 응력이 과대평가되어 진다.

유한요소해석에서 무인장 스프링을 사용할 때의 해석 방법으로는 일단 일반 스프링으로 가정을 하고 해석한 후에 스프링에 인장력이 생기면 그러한 스프링을 제거한 후 다시 또 해석을 반복적으로 수행하여 스프링에 인장력이 하나도 생기지 않을 때까지 반복 해석을 수행하여 결과를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 하부층을 일반 스프링과 무인장 스프링 두 가지로 모델링하여 비교 분석하였다.

### 3. 환경 하중에 대한 거동 분석

슬래브의 상부와 하부의 온도차 (temperature gradient: TG)가 생길 때 줄눈콘크리트포장의 일반적인 변형 모습 및 응력분포를 Fig. 3에 나타냈으며, 온도차가 2°C일 때의 무인장 스프링을 사용한 모델과 일반 스프링을 사용하여 하부층을 구성한 모델을 이용하여 구한 응력분포를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 무인장 스프링을 사용하면 슬래브와 하부층 사이에 공간이 생기는 부분이 생겨서 시스템이 비선형적으로 반응하기 때문에 쉐어링과 쉐리다운의 형태가 달라질 수 있지만 일반 스프링을 사용하면 쉐어링이나 쉐리다운 일 때 응력분포가 부호만 다르고 크기는 같기 때문에 두 가지의 형태로 따로 표현할 필요가 없다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 상하부 온도차가 작으면 일반 스프링을 사용하였을 때와 무인장 스프링을 사용하였을 때의 응력분포가 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 슬래브의 휨 현상이 크게 생기지 않으므로 슬래브와 하부층 간의 공간이 거의 생기지 않아서 무인장 스프링

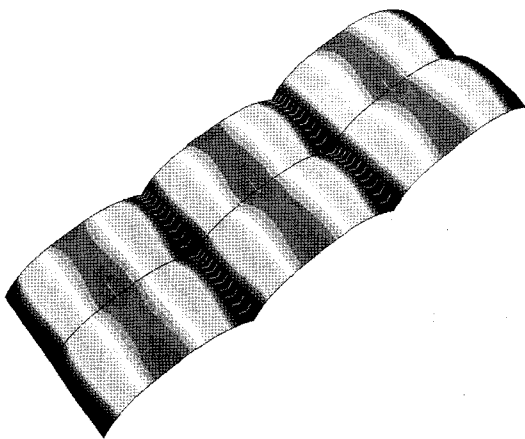


Fig. 3 Deflected shape under environmental loading

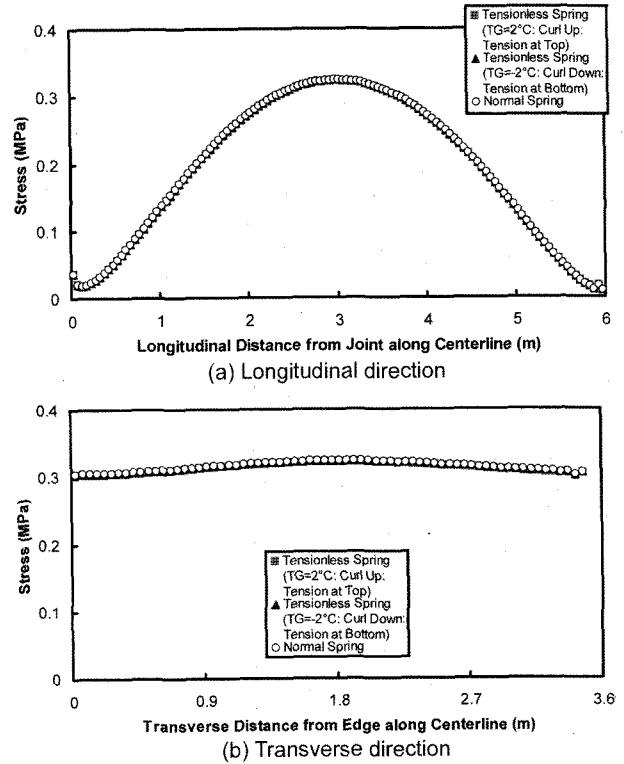
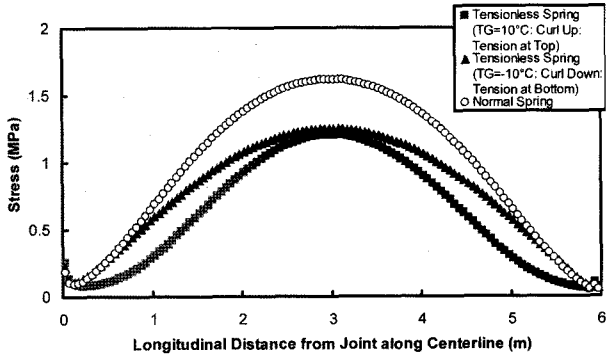


Fig. 4 Longitudinal stress distribution when temperature gradient (TG) is 2°C

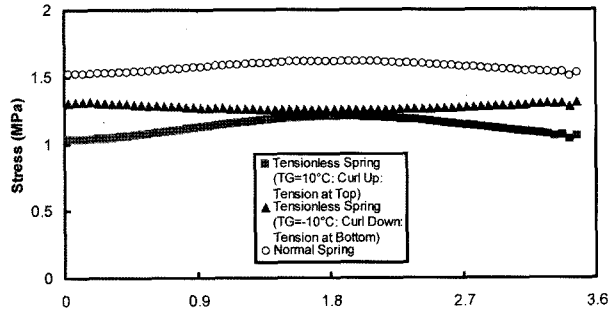
프링과 인장 스프링의 차이가 없기 때문이다. 콘크리트의 종방향 응력은 슬래브의 중앙에서 가장 크며 양쪽 줄눈부에서는 거의 없는 것을 알 수 있다. 슬래브 중앙부에서 횡방향을 따라 종방향 응력분포는 Fig. 4(b)에서 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 횡방향을 따라서는 응력의 차이가 크지는 않지만 횡방향으로도 슬래브의 중앙부에서 최대 응력이 생기는 것을 알 수 있다.

슬래브 상하부의 온도 차이가 10°C일 때 슬래브 중앙에서 종방향과 횡방향을 따라 응력의 분포를 살펴보면 Fig. 5와 같다. 온도차가 클 때는 일반 스프링을 사용하였을 때의 응력이 무인장 스프링을 사용하였을 때의 응력 보다 현저히 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 무인장 스프링을 사용하였을 때에 쉐어링과 쉐리다운 상태의 응력분포는 다르지만 최대 응력은 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 그림에서 응력은 슬래브의 상부 또는 하부의 표면 응력이며 쉐어링일 때는 상부가 인장이며 하부는 압축, 쉐리다운일 때는 반대로 상부가 압축 하부가 인장을 나타낸다. 그림에서는 인장 또는 압축의 구별 없이 크기만을 나타내어 서로 비교하기 편리하도록 하였다. 횡방향을 따라서는 종방향 응력의 변화가 그리 크지는 않지만 무인장 스프링을 사용하였을 때에 쉐리다운 시는 최대 응력이 중앙부가 아니라 슬래브의 양단 부분에서 발생하는 것을 알 수 있다.

온도차에 따른 응력이 일반 스프링을 사용하였을 때와 무인장 스프링을 사용하였을 때 얼마나 차이가 나는지를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 온도차가 약 4°C일 때 까지는 응력의 차이가 거의 없으나 온도차



(a) Longitudinal direction



(b) Transverse direction

Fig. 5 Longitudinal stress distribution when TG is 10°C

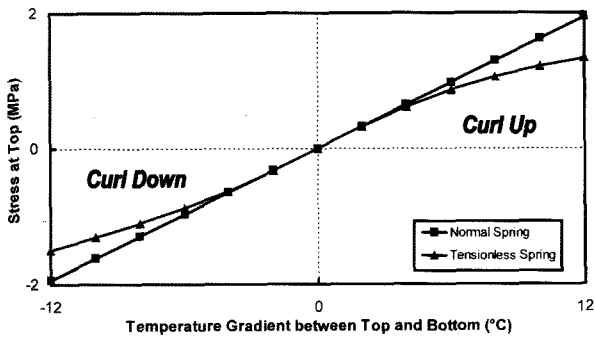


Fig. 6 Comparison of maximum stresses when normal and tensionless springs are used

가 커질수록 차이가 확연히 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 무인장 스프링을 사용하였을 때의 최대 응력에 대하여 일반 스프링을 사용하였을 때 어느 정도 최대 응력을 과대 예측하는지를 보여준다. 온도차가 커질수록 차이가 크게 나며 결업일 때의 차이가 더 큰 것을 알 수 있다. 결업일 때는 상하부 온도차가 12°C이면 최대 응력의 차이는 거의 50%나 되는 것을 알 수 있다. 따라서 온

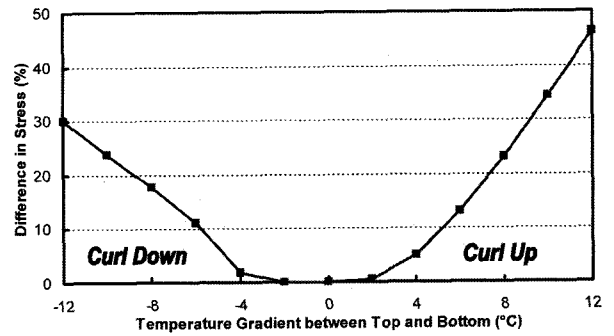


Fig. 7 Differences in maximum stresses when normal and tensionless springs are used

도 하중이 작용할 때 상하부 온도차가 크면 무인장 스프링을 사용하여 모델링하여야 응력을 정확히 예측할 수 있다. 하지만 온도차가 작으면 일반 스프링을 사용하여도 응력의 오차가 크지 않은 것을 알 수 있다.

#### 4. 차량하중에 대한 거동 분석

줄눈콘크리트포장에 환경 하중은 작용하지 않고 차량 하중만 작용할 때의 거동을 분석하기 위하여 복륜 단축과 복륜 복축 하중을 고려하였다. Fig. 8은 줄눈콘크리트 포장의 변형된 모습과 응력분포를 단축 하중 중 한쪽의 차륜이 단부에 접하여 작용할 때를 보여준다. 차량하중에 의한 응력은 슬래브 안쪽에 하중이 작용할 때 보다 슬래브의 단부에 작용할 때 더 크기 때문에 단부의 하중을 고려하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 단축 하중이 줄눈부에 작용할 때는 슬래브의 변형 모습이 상부에 인장응력을 발생시키는 모습이고 점점 줄눈에서 멀어질수록 하부에 인장응력을 발생시키는 모습으로 바뀌는 것을 알 수 있다. 참고로 해석에서 사용한 차량의 축하중 및 차륜 간의 거리는 전형적인 덤프트럭을 기준으로 하였으며 축하중의 크기는 50 kN을 사용하였다. 차륜 접지면은 사각형으로 가정하였으며 종방향 접지 길이 0.1 m, 횡방향 접지 길이 0.2 m, 복륜간격 0.3 m, 좌우 차륜 간격 1.9 m를 사용하였다.

Fig. 9는 종방향을 따라 단축 하중이 줄눈에서부터 슬래브의 중앙부까지 이동할 때의 응력분포를 보여준다. 단축 하중이 줄눈부에 매우 가까이 있을 경우는 슬래브 하부에 압축응력이 생기게 되며 하중이 슬래브의 줄눈에서부터 멀어질수록 하부에 인장응력이 생기게 된다. 최대

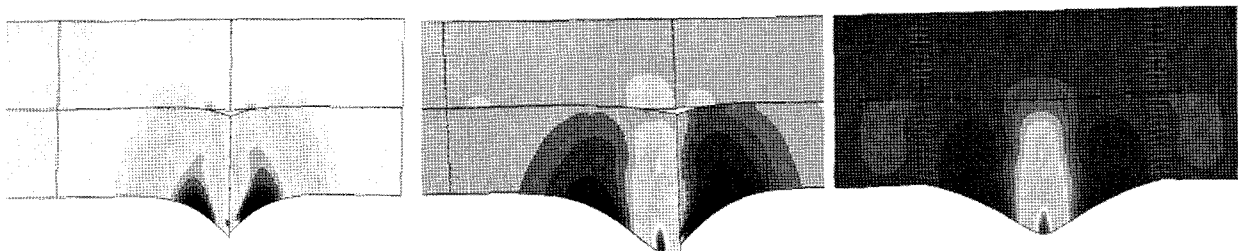


Fig. 8 Deflected shape and stress distribution under single-axle loads

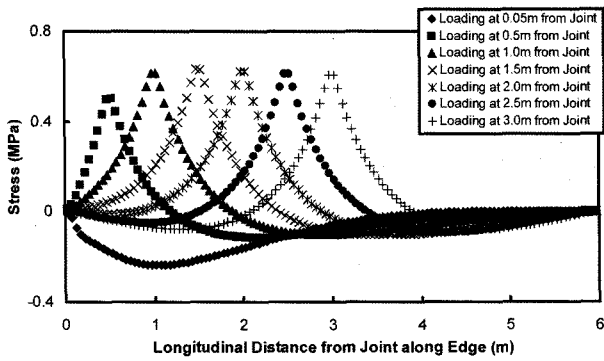


Fig. 9 Longitudinal stress distribution along the longitudinal direction under single-axle loads

응력은 하중이 어느 정도 줄눈부에서 멀어지면 위치에 관계없이 거의 같아지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 지반 탄성계수가 변해도 줄눈부 부근의 하부 압축응력이 작용하는 거리에는 영향을 주지만 하부 최대 인장응력은 역시 하중이 줄눈부에서 어느 정도 멀어지면 거의 같아지게 된다. 최대 응력이 발생하는 위치에서 횡방향을 따라 종방향 응력분포를 살펴보면 Fig. 10과 같다. 횡방향 상에서 종방향 응력은 단부에서 훨씬 크며 차륜의 위치에서는 증가하는 것을 알 수 있다.

복축 하중에 의한 줄눈콘크리트포장의 변형된 모양과 응력분포는 Fig. 11에서 보여준다. 한쪽 차량축이 줄눈부에 있을 때는 슬래브의 최대 응력은 줄눈부에서 멀리 있는 차량축의 슬래브 단부에 작용하는 차륜의 위치에서 생기며 복축 하중이 줄눈부에서 멀어질수록 각 차량축의 슬래브 단부에 작용하는 차륜의 위치에서 큰 응력을 받는 것을 알 수 있다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 최대 응력은 복축 하중이 줄눈에서 어느 정도 슬래브의 내부로 이동하였을 때 생기지만 일단 복축 하중이 줄눈부에서

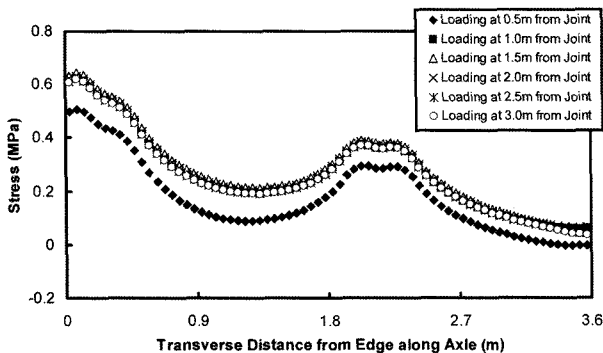


Fig. 10 Longitudinal stress distribution along the transverse direction under single-axle loads

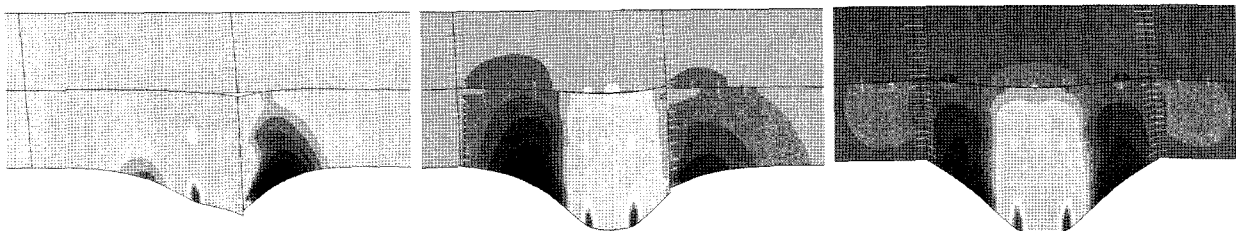


Fig. 11 Deflected shape and stress distribution under tandem-axle loads

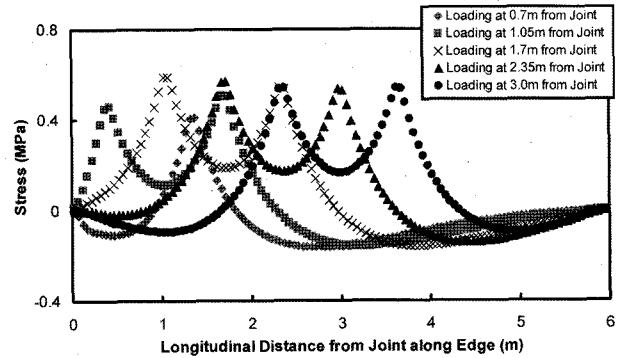


Fig. 12 Longitudinal stress distribution along the longitudinal direction under tandem-axle loads

어느 정도 멀어지면 단축 하중에서와 같이 최대 응력은 거의 일정한 것을 알 수 있다. 그림에서 복축 하중의 위치는 줄눈에서 복축의 중심까지의 거리를 나타내며 축간 거리는 1.3 m이다. 본 논문에서 그림으로 보여주지는 않지만 각 하중축의 위치에서 횡방향을 따라 변하는 종방향 응력분포는 단축 하중이 작용할 때와 같은 현상을 보인다. 따라서 차량하중에 의한 줄눈콘크리트포장의 슬래브 하부 최대 인장 응력은 한쪽 차륜이 슬래브 단부에 작용하며 축하중이 줄눈부에서 어느 정도 이상 떨어져 있을 경우 발생한다는 것을 알 수 있다.

## 5. 차량과 환경하중을 동시에 받을 때의 거동 분석

일반적으로 도로 포장은 차량하중과 환경하중을 동시에 받기 때문에 이때의 응력분포를 분석하는 것이 매우 중요하다. 먼저 일반 스프링으로 하부층을 모델링했을 때 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮아서 슬래브가 쪼일 것이고 복축 차량하중이 작용할 때의 응력분포를 Fig. 13(a)에서 보여준다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브가 쪼일 되었을 때는 슬래브의 상부에 인장응력이 발생하고 하부에 압축응력이 발생하는데 반해 슬래브 단부의 중간 부분에 작용한 차량하중은 슬래브의 상부에 압축응력 그리고 하부에 인장응력을 발생시키기 때문에 차량하중은 온도차에 의해 생긴 응력을 대체적으로 줄여주는 역할을 한다. 하지만 차량하중이 줄눈부 가까이 작용할 때에는 슬래브 중간 부분의 상부에 인장응력을 그리고 하부에 압축응력을 발생시켜서 슬래브 중간 부분의 온도에 의한 최대 응력을 미소하게 증가시켜주는 역할을 한다. 하부층을 무인장 스프링으로 모델링 하였을 때에는 Fig. 13(b)에 나타낸 바와 같이 온도 만에 의한 응력은

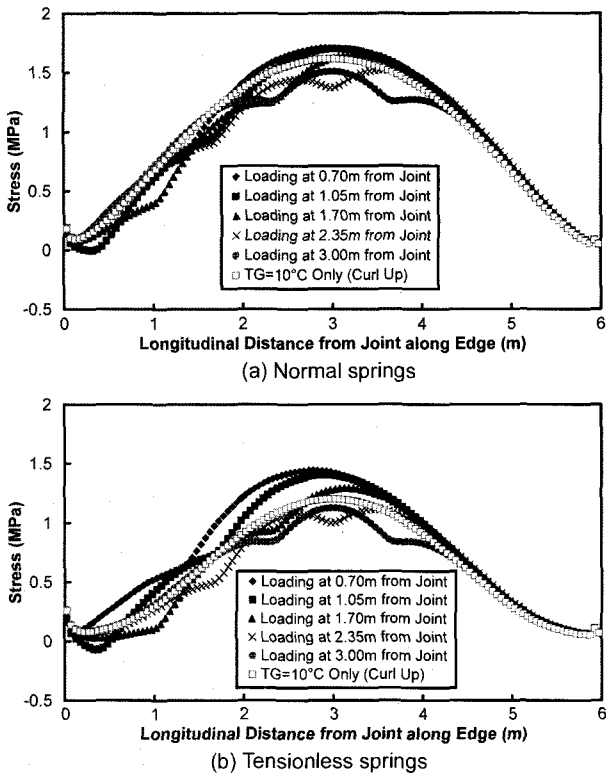


Fig. 13 Stress distribution under tandem-axle loads when slab is in curled-up position

차량하중이 줄눈부 근처에 작용했을 때 응력의 합보다 뚜렷이 작아지며 따라서 차량하중이 줄눈부에 있을 때 슬래브는 최대 응력을 받게 된다.

포장의 상부 온도가 더 커서 슬래브가 툄다운 상태에 있을 경우는 차량하중이 Fig. 14에 보인 바와 같이 응력을 더욱 커지게 만든다. Fig. 14(a)는 하부층 일반 스프

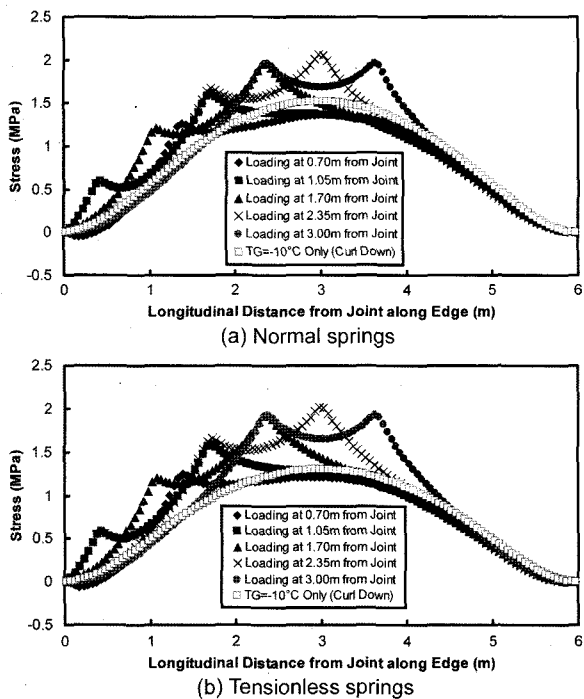


Fig. 14 Stress distribution under tandem-axle loads when slab is in curled-down position

링을 사용하였을 때 온도 하중과 복측 차량하중이 함께 작용할 때의 단부를 따라 생기는 응력분포이며 이때의 응력은 온도 하중에 의한 응력과 차량하중에 의한 응력을 단순히 더하면 전체 응력이 나오게 된다. 최대 응력은 차량 하중 중의 하나의 축이 슬래브의 중간에 작용할 때이다. Fig. 14(b)에 보인 것과 같이 하부층 무인장 스프링을 사용하였을 경우도 그 거동은 일반 스프링을 사용하였을 때와 비슷하지만 온도 하중 만에 의한 응력과 온도와 차량하중을 합하였을 때의 응력의 차이가 더 커진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 15는 하부층을 일반 스프링과 무인장 스프링으로 모델링 하였을 경우에 슬래브에 최대 응력이 생길 때의 응력분포를 보여 준다. 킬업 상태에서는 Fig. 15(a)에 보인 바와 같이 일반 스프링 보다 정확한 해석 방법이라고 말할 수 있는 무인장 스프링을 사용하였을 때의 차량하중과 온도 하중의 조합에 의한 응력은 온도 하중만을 고려한 무인장 스프링을 사용한 경우보다는 확실히 크며 일반 스프링을 사용하고 온도 하중만을 고려한 경우보다는 다소 작은 것을 알 수 있다. 툄다운 상태에서는 Fig. 15(b)에서 보여주는 바와 같이 온도와 차량하중이 합쳐지면 일반 스프링을 사용하였을 경우와 무인장 스프링을 사용하였을 경우의 응력분포가 거의 일치되는 것을 알 수 있다. 따라서 툄다운 상태에서는 온도와 차량하중을 동시에 고려할 경우에는 일반 스프링을 이용한 선형 모형을 사용해도 무방하다는 것을 알 수 있다.

분석 결과를 정리하면 Fig. 16에 보인 바와 같이 툄다운 상태에서의 슬래브 하부 최대 인장응력은 일반 스프링을 사용한 모델을 이용하여 온도에 의한 최대 응력과 차량하중에 의한 최대 응력을 구하여 더하면 된다. 킬업 상태에서는 차량하중에 의한 최대 응력과 온도 하중에

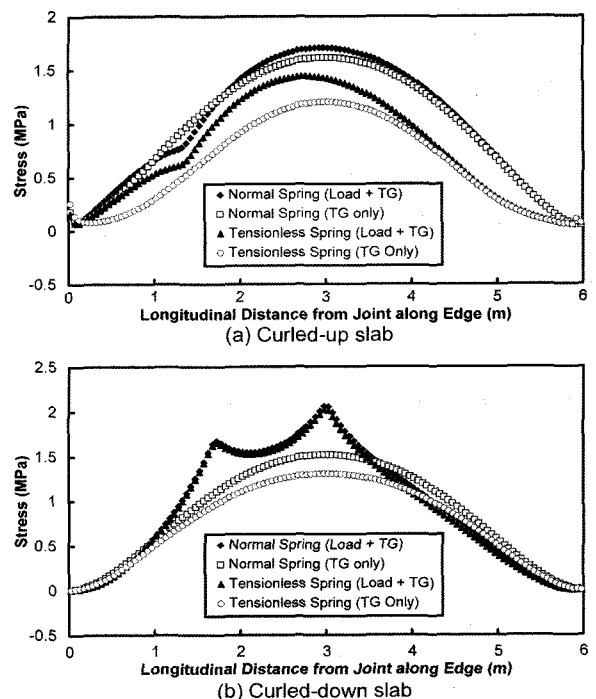


Fig. 15 Stress distribution when maximum stress occurs

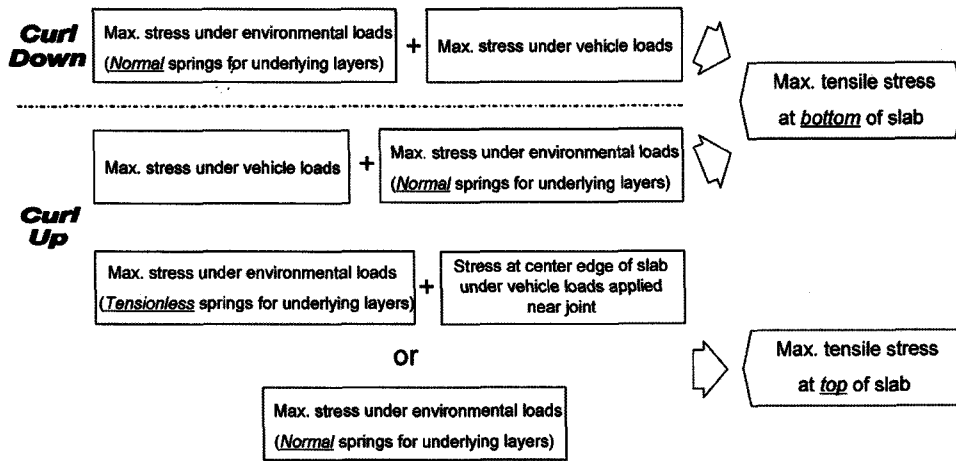


Fig. 16 Methodology to predict maximum stresses

의한 최대 응력 중에 차량하중에 의한 응력이 더 크면 슬래브 하부의 최대 인장응력은 차량하중에 의한 응력에서 온도 하중에 의한 응력을 감하면 그것이 최대 응력이 된다. 왜냐하면 온도 하중에 대해서는 슬래브의 하부에 압축응력이 발생하고 차량하중에 의해서는 슬래브의 하부에 인장응력이 생기기 때문이다. 이때 온도 하중에 의한 응력이 차량하중에 의한 응력 보다 작다는 것은 쉘업이 매우 조금 생겼다는 것이므로 일반 스프링을 사용한 모델을 이용하여도 무방하다. 만약 쉘업 상태에서 온도 하중에 의한 최대 응력이 차량하중에 의한 최대응력보다 클 때에는 슬래브 상부에 인장응력이 발생하며 이때의 최대응력은 무인장 스프링을 이용한 모델을 사용하여 온도 하중에 대한 최대 응력을 구하고 차량하중이 줄눈부에 작용할 때 슬래브 중앙부의 최대 응력을 구해서로 합하면 구할 수 있다. 또는 정확성은 떨어지더라도 선형 모델인 일반 스프링을 사용하여 차량하중은 무시하고 온도 하중에 대한 최대 응력을 구하여 이것을 슬래브 상부의 최대 인장응력으로 사용할 수도 있다. 선형 모델을 사용하면 하중의 크기와 응력이 비례하기 때문에 하나의 온도 하중에 대한 결과를 이용하여 다른 온도 하중에 대한 결과를 쉽게 예측할 수 있으나, 하부층 무인장 스프링을 사용하면 온도 하중이 바뀔 때 마다 새로운 해석을 수행해야 한다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 줄눈콘크리트포장의 유한요소해석 모형을 이용하여 포장에 차량하중과 온도 하중이 작용할 때 슬래브 상하부에 발생하는 최대 인장응력의 특성을 분석하였다. 먼저 온도 하중 만이 작용할 때 줄눈콘크리트포장의 거동을 분석하였으며, 또한 차량하중만 작용할 때의 거동도 분석하였다. 그리고 온도와 차량하중이 동시에 작용할 때의 거동을 분석하였으며 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 온도 하중이 작용할 때 슬래브 상하부 온도차가 크

면 하부층 무인장 스프링을 사용하였을 때와 일반 스프링을 사용하였을 때의 응력 차이가 커지게 되지만 온도차가 작으면 응력 차이는 거의 없게 된다. 추가적인 실험 등을 통해 하부층 스프링 모델에 대한 검토가 필요시 된다.

- 2) 차량하중에 의한 슬래브의 최대 응력은 하중이 어느 정도 줄눈부에서 멀어지면 위치에 관계없이 거의 같아지게 된다.
- 3) 온도 하중에 의해 슬래브가 쉘업 되었을 때는 차량하중이 줄눈부에 작용할 때 슬래브의 상부에 최대 인장응력이 발생한다.
- 4) 온도 하중에 의해 슬래브가 쉘다운 되었을 때는 차량하중의 한 축이 슬래브의 중앙에 작용할 때 슬래브 하부에 최대 인장응력이 발생한다.
- 5) 쉘다운 상태에서 슬래브 하부 최대 인장응력은 일반 스프링을 사용한 모델을 이용하여 온도에 의한 최대 응력과 차량하중에 의한 최대 응력을 합하여 구할 수 있다.
- 6) 쉘업 상태에서 슬래브 하부 최대 인장응력은 일반 스프링을 사용한 모델을 이용하여 차량하중에 의한 최대 응력에서 온도 하중에 의한 최대 응력을 감하여 구할 수 있다.
- 7) 쉘업 상태에서 슬래브 상부 최대 인장응력은 무인장 스프링을 이용한 모델을 사용하여 온도 하중에 대한 최대 응력과 차량하중이 줄눈부에 작용할 때 슬래브 중앙부의 최대 응력을 합하여 구할 수 있다.
- 8) 쉘업 상태에서 슬래브 상부 최대 인장응력은 하부층 일반 스프링을 사용하여 차량하중은 무시하고 온도 하중에 대한 최대 응력만을 구하여 이것을 최대 인장응력으로 사용하는 실용적인 방법이 있다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Kim, S. M. and Nelson, P. K., "Experimental and Numerical Analyses of PCC Overlays on PCC Slabs-on-Grade Subjected to Climatic Loading", *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier Science Ltd., Vol.41, Issue3-4, 2004, pp.785~800.
2. Kim, S. M. and Won, M. C., "Horizontal Cracking in Continuously Reinforced Concrete Pavements", *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, Vol.101, No.6, 2004, pp.784~791.
3. Westergaard, H. M., "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis", *Public Roads*, Vol.7, 1925, pp.25~35.
4. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., "Dynamic Stress Response of Concrete Pavements to Moving Tandem-Axle Loads", *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, No.1809, 2002, pp.32~41.
5. Nam, J. H., Kim, S. M., and Won, M. C., "Measurement and Analysis of Early-Age Concrete Strains and Stresses: Continuously Reinforced Concrete Pavement under Environmental Loading", *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, No.1947, 2006, pp.79~90.
6. ABAQUS, *User's Manual Version 6.5*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I., 2005, pp.1.1.1~24.1.1.
7. Huang, Y. H., *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, New Jersey, 1993, pp.1~90.
8. Dossey, T. and McCullough, B. F., *Characterization of Concrete Properties with Age*, Report No.1244-2, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1992, pp.1~40.
9. Liu, C., McCullough, B. F., and Oey, H. S., "Response of Rigid Pavements due to Vehicle-Road Interaction", *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol.126, No.3, 2000, pp.237~242.
10. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., "Dynamic Stress Response of Concrete Pavements to Moving Tandem-Axle Loads", *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, No.1809, 2002, pp.32~41.
11. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., *Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Continuously Reinforced Concrete Pavements*, Research Report 1831-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2000, pp.1~76.

**요약** 본 연구는 줄눈콘크리트포장에 환경 하중과 차량하중이 작용할 때 콘크리트 슬래브의 상하부에 발생하는 최대 인장응력의 특성을 분석하기 위하여 수행되었다. 유한요소법을 이용한 줄눈콘크리트포장의 수치해석모형을 개발하여 우선 포장이 환경 하중 또는 차량하중 만을 받을 때의 응력 특성을 분석하였다. 그 후 환경 하중과 차량하중을 동시에 받을 때 슬래브 상하부의 응력 특성을 분석하였다. 연구 결과, 차량하중에 의한 슬래브 하부의 최대 인장응력은 하중이 어느 정도 줄눈부에서 멀어지면 위치에 관계없이 거의 같아지게 되는 것을 알 수 있었다. 환경 하중에 의해 슬래브가 쪼그라들었을 때는 차량하중이 슬래브의 중앙에 작용할 때 슬래브 하부에 최대인장응력이 발생하며, 슬래브가 쪼그라들었을 때는 차량하중이 줄눈부에 작용할 때 슬래브의 상부에 최대인장응력이 발생한다. 슬래브 하부 최대인장응력은 쪼그라들 상태에서는 하부층 일반 스프링을 사용한 모델을 이용하여 환경 하중과 차량하중에 의한 각각의 최대응력을 더하여 구할 수 있으며, 쪼그라들 상태에서는 차량 하중에 의한 최대 응력에서 온도 하중에 의한 최대 응력을 감하여 구할 수 있다. 반면에 슬래브 상부 최대인장응력은 쪼그라들 상태에서 하부층 무인장 스프링을 이용한 모델을 사용하여 환경 하중에 대한 최대응력과 차량하중이 줄눈부에 작용할 때 슬래브 중앙부의 최대응력을 더하여 구할 수 있으나, 하부층을 일반 스프링으로 모델링하여 환경 하중에 대한 최대응력 만을 구하여 사용하는 실용적인 방법도 있었다.

**핵심어** : 줄눈콘크리트포장, 환경 하중, 차량하중, 최대 응력, 쪼그라들