



환경하중에 의한 연속철근콘크리트포장의 균열 발생 및 진전 특성 분석

Numerical Analysis of Crack Occurrence and Propagation in Continuously Reinforced Concrete Pavements under Environmental Loading

김 성 민*

Kim, Seong-Min

Abstract

The objective of this study was to investigate features of transverse crack occurrence and propagation in continuously reinforced concrete pavement(CRCP) when subjected to environmental loading. The finite element model of CRCP was developed and the element removal method was implemented to predict the crack propagation process. To investigate the effect of the type of environmental loading on the CRCP behavior and cracking aspects, the following three different cases were considered: (1) the temperature gradient between top and bottom of the slab does not vary and the constant temperature drop throughout the depth occurs; (2) the temperature at the slab bottom does not vary and the temperature gradient increases; and (3) the temperature between the mid-depth and the bottom of the slab is the same and does not vary and the temperature at the top decreases. The analysis results showed that the crack occurrence and propagation through the depth of the slab in CRCP were significantly affected by the type of environmental loading. The changes in stress distribution and displacements during the crack occurrence and propagation process could also be investigated.

Keywords : *continuously reinforced concrete pavement, environmental loading, transverse crack, crack occurrence, crack propagation, tensile strength, stress*

요 지

본 연구는 연속철근콘크리트포장(CRCP)에 환경하중이 작용하여 횡방향 균열이 발생하고 진전되어가는 과정을 분석하기 위하여 수행되었다. 이러한 분석을 위하여 CRCP의 유한요소 모델을 개발하고 균열의 발생과 진전을 예측할 수 있는 요소삭제 방법을 도입하였다. 여러 다른 형태의 환경하중이 작용할 때 CRCP의 거동 및 균열 진전 특성을 분석하기 위하여 세 가지의 경우를 고려하였다. 먼저 CRCP의 콘크리트 슬래브 상부 표면과 하부 표면의 온도차가 선형으로 유지되면서 깊이에 관계없이 일정하게 온도가 계속 떨어지는 경우이다. 다음으로 슬래브 하부의 온도는 일정하게 유지되며 상부의 온도만 감소하는 경우이다. 이 경우는 슬래브 상하부의 온도차가 계속 증가되는 경우라 할 수 있다. 또 다른 경우는 슬래브의 중간 깊이에서 하부까지는 같은 온도가 유지되고 슬래브 상부의 온도만 계속 감소하는 경우이다. 해석 결과 CRCP의 균열발생 및 깊이 방향으로의 진전정도는 환경하중의 형태에 따라 크게 좌우되는 것을 알 수 있었으며 균열의 발생 및 진전에 따른 CRCP의 응력 및 변위의 재분포 과정도 분석할 수 있었다.

핵심용어 : 연속철근콘크리트포장, 환경하중, 횡방향 균열, 균열 발생, 균열 진전, 인장강도, 응력

* 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수



1. 서론

연속철근콘크리트포장(CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement)은 온도 및 습도 변화 등의 환경하중에 의해 차량하중이 재하되기 이전에 횡방향 균열(transverse crack)이 발생하게 된다. 이러한 횡방향 균열과 연관된 균열간격(crack spacing) 및 균열폭(crack width) 등은 CRCP의 초기 거동 및 장기공용성에 영향을 미치는 인자로 알려져 있다(Suh et al., 1992). 일반적으로 CRCP의 균열에 대한 조사를 수행할 때는 표면에 발생한 균열을 육안으로 조사하게 되며 이러한 균열은 콘크리트 슬래브를 완전히 관통한 것으로 가정한다. 하지만 CRCP의 횡방향 균열은 포장의 표면에서 하부까지 완전히 관통하지 않는 경우가 상당히 있는 것으로 알려져 있다. CRCP가 많이 건설되어 있는 미국의 텍사스 주에서도 이러한 현상이 보고되었으며 우리나라에서도 시험도로 CRCP 구간 및 고속도로 여러 곳에서의 횡방향 균열에서의 코어를 채취해 본 결과 상당수의 균열이 철근이 위치한 슬래브의 중간 깊이 근처까지만 진전되어 있는 것이 확인되었다. 따라서 CRCP의 균열은 표면에서 균열이 관측된다 하더라도 그러한 균열이 콘크리트 슬래브를 완전히 관통하였다고 단정할 수는 없는 것이다.

하지만 기존의 CRCP 구조해석 연구에서는 균열이 발생하면 그러한 균열은 슬래브를 완전히 관통하는 것으로 가정하고 해석을 수행하였다(McCullough et al., 1975; Won et al., 1991, 1995; Kim et al., 2001a, 2001b). 가장 최근에 개발된 연속철근콘크리트포장 구조해석 전용 컴퓨터 프로그램인 CRCP-10에서도 콘크리트 슬래브의 상부나 하부에서 일단 균열이 발생하면 그 균열은 슬래브를 완전히 관통하는 것으로 가정한다(Kim et al., 2001c, 2001d, 2003). 이러한 구조해석은 CRCP의 균열 거동을 단순화시킨 것으로 실제 CRCP의 균열 거동을 예측하고 이해하기에는 미비한 점이 있다.

본 연구의 목적은 CRCP의 횡방향 균열이 환경하

중에 의해 발생하여 진전되는 과정을 분석할 수 있는 구조해석 방법을 도입하여 CRCP 균열 진전의 특성을 분석하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 CRCP의 유한요소 모델을 개발하고 여기에 균열 진전을 예측할 수 있는 기법을 도입하여 여러 다른 형태의 환경하중이 작용할 때 CRCP의 거동 및 균열 진전을 분석하였다. 본 논문에서 이러한 과정을 자세히 설명하였다.

2. 균열 진전을 고려한 구조해석 방법

균열의 진전을 고려한 수치해석을 수행하기 위하여 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2006)를 사용하여 CRCP 모형을 개발하였다. 기본적인 모형은 이전의 CRCP 모형에서 사용한 평면유한요소를 이용하였으며(Kim et al., 1997, 1998, 2000) 본 연구를 위해 개발된 모델을 그림 1에 나타내었다. 모형에서 콘크리트 슬래브는 평면요소를 사용하였으며 종방향 철근은 프레임요소를 사용하였다. 콘크리트와 철근과의 부착 및 콘크리트 슬래브와 하부층의 마찰은 수평스프링요소를 사용하여 모델링하였으며 하부층의 지지력은 수직스프링요소로 모델링하였다. 모델을 만들 때 매우 중요한 부분은 경계조건을 적합하게 지정해야 한다는 것이다. 그림에서 오른쪽과 왼쪽 부분인 균열부에서는 콘크리트는 아무런 제약 조건이 없으며 철근

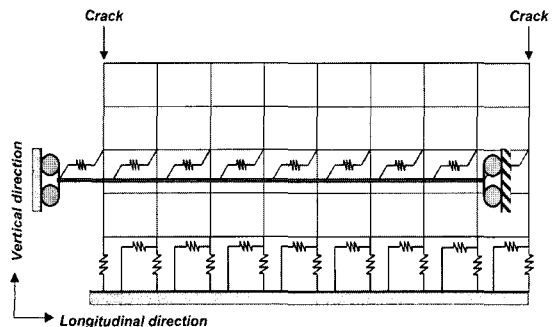


그림 1. CRCP 유한요소 모델

은 종방향 변위와 회전변위가 제한되어 있다.

균열은 콘크리트의 인장응력이 인장강도에 다다랐을 때 생기며 이러한 균열이 발생하면 균열에서는 콘크리트가 연속체가 되지 않기 때문에 CRCP의 구조적 모델은 재구성되어야 한다. 재구성된 모델을 다시 분석하여 콘크리트의 인장응력이 인장강도보다 큰 부분이 다시 생기면 그곳을 불연속으로 처리한 후 모델을 또다시 재구성하여 분석한다. 이러한 과정을 콘크리트의 인장응력이 인장강도보다 모든 곳에서 작게 나올때까지 계속적으로 반복하면 균열의 진전 과정과 특정한 하중 하에서의 균열의 상태를 분석할 수 있다.

유한요소법을 이용하여 CRCP의 균열 진전을 예측할 수 있는 방법으로는 유한요소 절점(node)이 균열이 생김에 따라 분리되는 절점분리방법과 절점이 아닌 요소를 삭제해 나가는 요소삭제방법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 요소삭제방법을 도입하였으며 이러한 방법을 설명하기 위해서 그림 2(a)에 보인 두 개의 횡방향 균열로 구성된 CRCP 모델을 가정한다. 요소삭제방법을 사용하기 위해서는 가능한 유한요소의 크기를 작게 분할하여야 한다. 만약 유한요소의 크기가 너무 크면 삭제하는 부분이 커지게 되기 때문에 정확성이 떨어질 수 있게 된다. 그림 2에서는 균열이 발생하여 진전되는 과정을 요소를 삭제해 나가며 모델링하는 방법을 보여준다. 먼저 그림 2(a)에 나타난 모델을 분석하여 인장응력이 가장 큰 곳이 요소 A이고 이러한 응력이 인장강도보다 크다고 가정하면 요소 A의 위치에 균열이 생길 것이며 이러한 균열이 생긴 CRCP를 다시 모델링하기 위해서 구조해석 모델을 그림 2(b)에 보인 것과 같이 재구성 한다. 이렇게 재구성한 모델을 다시 분석하여 최대인장응력이 인장강도보다 크며 요소 B에서 발생한다면 이번에는 요소 B에 균열이 진전될 것이며 구조해석 모델은 그림 2(c)에 보인 바와 같이 된다. 이러한 과정을 계속적으로 반복함으로써 결국 그림 2(d)에 나타난 것과 같은 균열의 상태를 예측할 수 있게 된다.

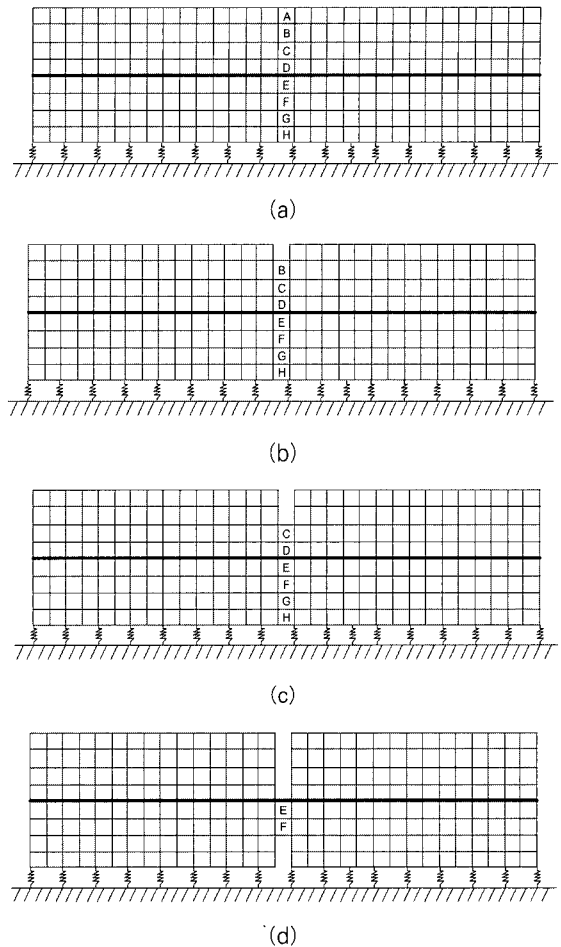


그림 2. 요소삭제에 의한 균열진전 예측 방법

요소삭제에 의한 균열진전 예측 방법을 이용하여 환경하중에 의한 CRCP의 균열 발생 및 진전을 어느 한 시점에 건설한 상당히 긴 구간의 CRCP에서 예측하기 위한 방법을 그림 3에 보인 CRCP 유한요소를 예로 들어 설명한다. 먼저 콘크리트 인장강도를 모든 유한요소에서 동일하다는 가정하에 해석하는 방법과 인장강도가 위치에 따라 조금씩 다르다고 가정하여 해석하는 방법으로 구분할 수 있다. 만약 강도가 일정하다고 가정하면 최대인장응력을 구해 그 값이 인장강도보다 큰지 작은지를 비교하여 응력이 큰 경우에는 그 곳에서 균열이 발생한다고 보면 된다. 하지만 인장강도가 유한요소마다 조금씩 다르다고 가정하고 요소마다 인장강도를 정의해주면 인장응력이



인장강도보다 크게 나오는 위치 중에서 그 차이가 가장 큰 곳에서 먼저 균열이 발생하게 된다. 균열이 발생하면 그 곳을 위에서 설명한 방법을 이용하여 처리한 후 CRCP 모델을 다시 재구성한다. 이러한 과정을 반복하면 긴 구간에서의 균열발생 및 진전과 균열의 상태를 분석할 수 있다. 그림 3은 CRCP의 균열상태를 이러한 방법을 통해 분석하는 과정을 보여 준다.

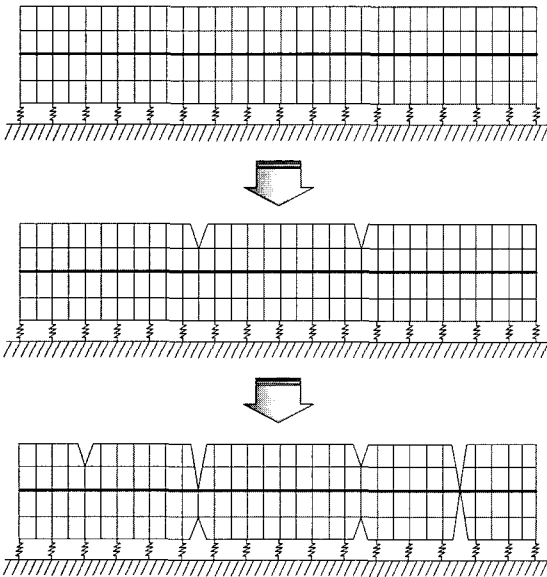


그림 3. CRCP 균열발생 및 진전예측 방법

본 연구에서는 콘크리트의 인장강도는 모든 곳에서 동일하다고 가정하고 구조해석을 수행하였다. 구조해석 과정에서 유한요소를 삭제하기 위해서는 모델 자체를 다시 구성하는 방법을 사용할수도 있지만 그러한 방법은 많은 시간과 노력을 필요로 함으로 경제적이지 못하다. 따라서 가장 간편하게 요소를 삭제하는 효과를 낼 수 있는 방법은 모델은 항상 일정하지만 삭제할 요소의 탄성계수를 0에 가까운 값으로 지정하는 것이다.

본 연구에서 구조해석에 사용한 CRCP의 재료특성 및 설계변수를 표 1에 나타내었다. 균열이 발생하여 진전되는 과정을 분석하기 위하여 초기의 균열간

격은 4.5m로 하였으며 유한요소는 한 변의 길이가 1.5cm인 정사각형 요소를 사용하였다. 건조수축 등의 수분변화에 의한 변형률은 온도변화에 따른 변형률로 환산할 수 있기 때문에 본 연구에서의 온도변화라함은 온도와 수분변화를 모두 포함한 환경하중을 의미한다.

표 1. 구조해석에 사용한 값

Properties	Value
Coefficient of thermal expansion of concrete	0.0001/°C
Elastic modulus of concrete	27.56GPa
Tensile strength of concrete	3.7MPa
Subbase friction	40MPa/m
Vertical stiffness of underlying layers	136MN/m³
Steel bar diameter	19mm
Steel bar spacing	158mm
Percent reinforcement	0.6%
Elastic modulus of steel bar	200GPa
Concrete slab thickness	30cm

온도변화는 세 가지의 경우를 고려하였다. 첫째, CRCP의 콘크리트 슬래브 상부 표면과 하부 표면의 온도차가 선형으로 일정하게 유지되면서 온도가 계속 떨어지는 경우이다. 둘째, 슬래브 하부의 온도는 일정하게 유지되며 상부의 온도만 감소하는 경우이다. 이 경우는 상하부의 온도차가 계속 증가되는 경우이다. 셋째, 슬래브의 중앙부에서 하부까지는 온도차가 없이 온도가 일정하게 유지되고 슬래브의 중앙부에서 상부까지의 중간 깊이까지는 온도차가 있지만 이러한 온도차가 선형으로 일정하게 유지되며 상부의 온도만 계속 감소하는 경우이다.

3. 슬래브 깊이별 일정 온도감소에 따른 균열 발생 및 진전

콘크리트 슬래브의 온도가 상하부 모두 일정하게



감소할 때의 균열의 발생 및 진전에 대하여 해석을 수행하였다. 상하부의 온도차는 10도이며 상하부간의 온도변화는 선형으로 가정하였다. 이러한 상하부의 온도차를 유지하면서 슬래브의 온도가 감소할 때 균열의 발생을 살펴보면 그림 4에 보인 바와 같다. 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮으므로 슬래브 상부의 콘크리트 인장응력이 하부보다 크게 되며 따라서 그림은 슬래브 표면에서의 인장응력을 보여준다.

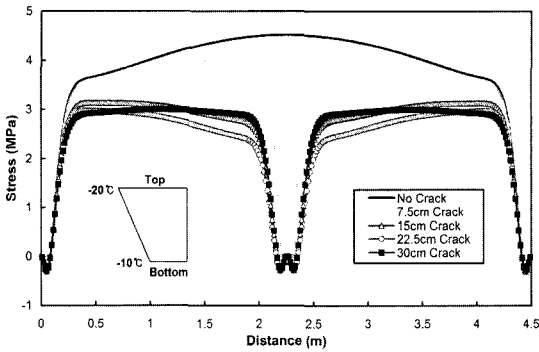


그림 4. 상하부 온도감소에 의한 초기균열 발생

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 온도변화가 슬래브에 작용하면 슬래브 표면의 인장응력은 균열간격의 중간 부분에서 가장 커지게 되며 이때의 응력이 인장강도보다 크면 그곳에서 균열이 발생하게 된다. 본 연구에서는 표 1에 보인 바와 같이 인장강도를 3.7MPa로 가정하였으므로 균열간격의 중간 부분에서의 인장응력은 이보다 크며, 따라서 이 부분에서 균열이 발생하게 된다. 일단 균열이 발생하여 균열이 슬래브의 깊이방향으로 진전되면 균열부분의 슬래브 표면에서의 콘크리트 응력은 0이 되며 응력은 그림에서 보인 바와 같이 균열 진전에 따라 재분배된다. 균열이 상부에 조금만 생겼을 경우에는 콘크리트의 응력이 기존의 균열부근보다는 새로 발생한 균열 부근에서 더 크지만 균열이 깊이방향으로 진전함에 따라 콘크리트의 응력은 기존의 균열부분에서 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 균열이 슬래브의 깊이까지 완전히 관통하게 되면 균열이 관통한 후 콘크리트 슬래브의 표면 인장응력은 기존의 균열과 새로 발생한

균열의 중간 부분에서 다시 최대값을 가지게 된다. 하지만 새로운 균열이 발생한 후 콘크리트의 인장응력은 이전보다 대폭 감소한 것을 알 수 있으며 인장강도보다 작아져서 이러한 온도분포에서는 더 이상의 균열이 발생하지 않게 된다.

그림 5에 보인 바와 같이 슬래브 상하부의 온도가 다시 더 감소하게 되면 슬래브 표면의 응력은 이에 따라 증가하게 되며 결국 최대응력이 다시 인장강도에 다다르게 된다. 본 해석에서는 두 개의 균열간격 중에 좌측에 보인 균열간격 내의 콘크리트 응력이 먼저 인장강도에 다다르며 따라서 새로운 균열이 이 부분에서 다시 발생하게 된다.

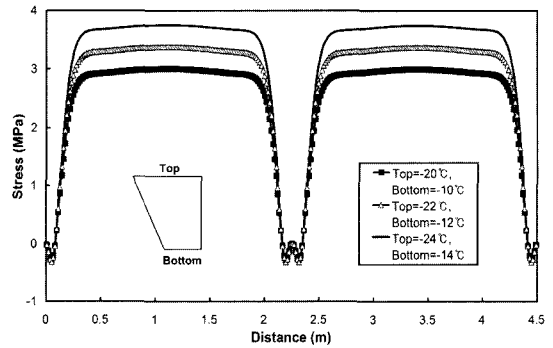


그림 5. 초기 균열 후 온도감소에 따른 응력 증가

또 다른 새로운 균열이 발생하여 깊이방향으로 진전함에 따른 슬래브 표면에서의 콘크리트 응력의 변화는 그림 6에서 보여준다. 균열이 깊이방향으로 진전함에 따른 균열 좌우 슬래브의 콘크리트 응력 재분포 모양은 초기 균열 발생 시와 유사하다. 이러한 균열의 발생은 균열이 발생하지 않은 인접한 슬래브의 응력도 함께 감소시키게 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 우측의 균열간격에서는 새로운 균열이 발생하지 않았음에도 좌측의 균열 간격에 생긴 새로운 균열이 깊이방향으로 진전할수록 슬래브 표면의 콘크리트 응력이 감소하는 것을 뚜렷이 볼 수 있다. 하지만 새로운 균열의 진전이 끝난 후의 응력은 균열 간격이 넓은 우측의 균열간격 사이에서 최대값을 나타내는 것을 알 수 있다.

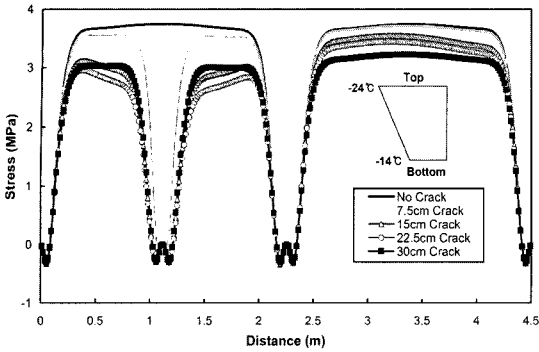


그림 6. 상하부 온도감소에 의한 두 번째 균열발생

온도가 다시 더 감소하게 되면 응력은 또다시 증가하게 되며 그림 7에 보인 바와 같이 이번에는 우측의 균열간격이 큰 곳에서의 최대응력이 인장강도에 먼저 다다르게 되며 이곳에서 또다시 균열이 발생하게 된다. 이러한 균열의 진전에 따른 응력의 재분포도 그림 8에 나타난 것과 같이 이전의 균열진전에 따른

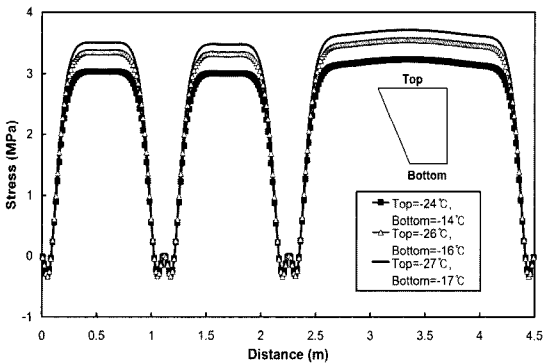


그림 7. 두 번째 균열 후 온도감소에 따른 응력 증가

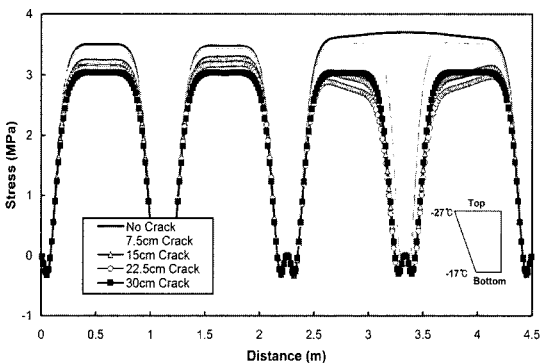


그림 8. 상하부 온도감소에 의한 세 번째 균열발생

응력의 재분포와 비슷하며 역시 다른 균열간격에서의 응력을 함께 감소시키는 것을 볼 수 있다.

본 해석결과 이러한 온도변화를 받는 CRCP의 균열은 그림 9에 보인 바와 같이 모두 슬래브를 완전히 관통하였으며 균열간격은 그림에 보인 바와 같게 된다.

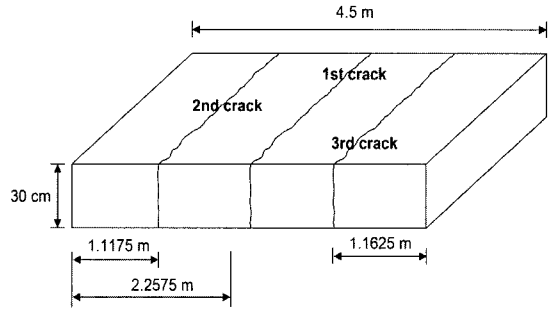


그림 9. 상하부 온도감소에 의한 균열발생 결과

균열이 발생하고 진전함에 따른 CRCP 표면의 콘크리트 응력뿐만 아니라 슬래브 전체에 생기는 응력 분포를 살펴보면 그림 10과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 균열이 진전되지 않고 있을 경우에는 균열간격

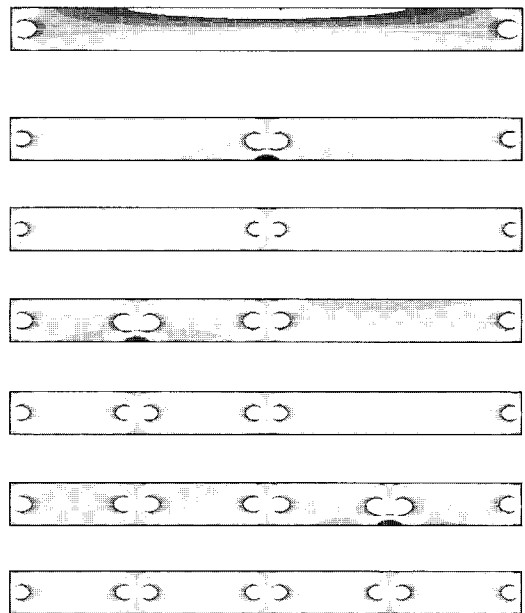


그림 10. 균열 발생 및 진전에 따른 CRCP 응력 분포

의 중간 부분의 슬래브 표면에서의 콘크리트 응력이 가장 커지는 것을 알 수 있으며 균열이 진전되는 동안은 균열의 끝단에 있는 콘크리트에서 응력이 큰 것을 알 수 있다. 그림 11은 균열이 발생하고 진전함에 따른 CRCP의 변형 모습을 매우 뚜렷이 보여준다.

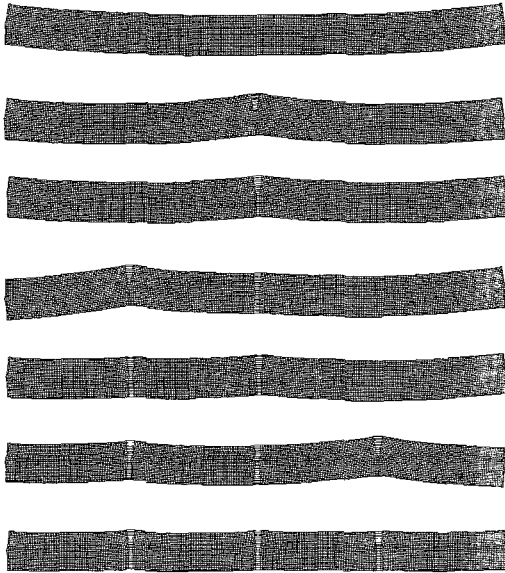


그림 11. 균열발생 및 진전에 따른 CRCP 변형 모습

4. 슬래브 상하부 온도차 변화에 따른 균열 발생 및 진전

슬래브의 하부온도는 일정하게 유지되며 상부의 온도가 감소하여 결국 상하부 온도차가 증가할 때의 균열발생 및 진전에 대해 분석하였다. 상하부의 온도 변화는 선형으로 가정하였다. 그림 4에 보인 바와 같이 초기 균열이 발생한 후 슬래브 하부의 온도는 -10도로 고정시키고 상부의 온도를 감소시키면 응력은 그림 12와 같이 증가하게 되며 결국 인장강도에 다르게 된다. 본 해석에서는 좌측의 균열간격 사이에서 최대응력이 발생하였고 이러한 지점에서 새로운 균열이 발생하게 된다.

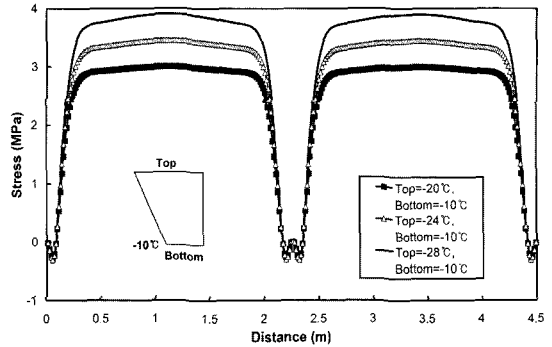


그림 12. 초기 균열 후 상하부 온도차 증가에 따른 응력 증가

두 번째 균열이 발생하여 진전함에 따른 슬래브 상부에서의 응력변화는 그림 13에 나타내었다. 균열이 깊이방향으로 진전함에 따라 응력이 감소하는데 이러한 온도차에 의한 균열은 슬래브를 완전히 관통하지는 않고 하부의 약 1.5cm 정도에서 멈추었다. 따라서 균열발생 후 응력의 분포는 대칭이 아니며 기존의 균열부분에서 가까운 곳에서 최대치를 갖는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 경우에도 인접한 슬래브의 응력이 함께 감소하지만 감소하는 정도가 그다지 크지는 않은 것을 알 수 있다.

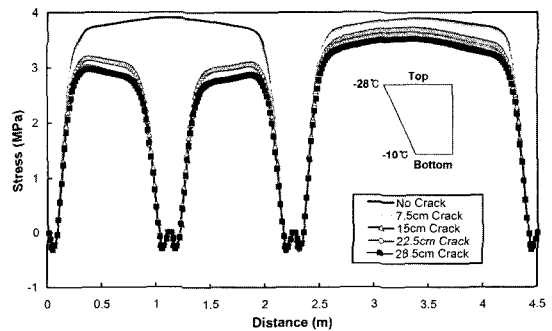


그림 13. 상하부 온도차 증가에 의한 두 번째 균열 발생

일단 균열이 발생하여 콘크리트의 응력이 모두 인장강도보다 작게 되면 더 이상의 균열은 발생하지 않는다. 하지만 그림 14에 나타낸 것과 같이 상부온도가 다시 계속 감소하면 응력이 다시 증가하게 되며 결국 우측 균열간격 중 응력이 가장 큰 곳이 인장강도에 다다르면 다시 균열이 발생된다. 그림 15는 이러한 균열의 진전에 따른 응력재분포를 보여 주며 이



균열도 하부 1.5cm에서 멈추게 되었다. 이번 균열은 기존 균열간격의 중간부분보다는 훨씬 왼쪽으로 치우친 부분에서 발생을 하였는데 이는 양쪽 균열의 깊이방향 진전 정도가 다름으로 인해 생긴 슬래브의 비대칭이 원인이다.

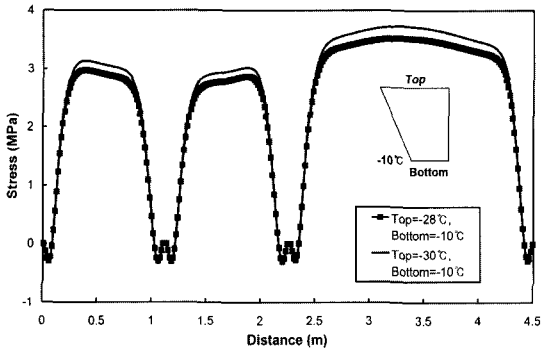


그림 14. 두 번째 균열 후 상하부 온도차 증가에 따른 응력 증가

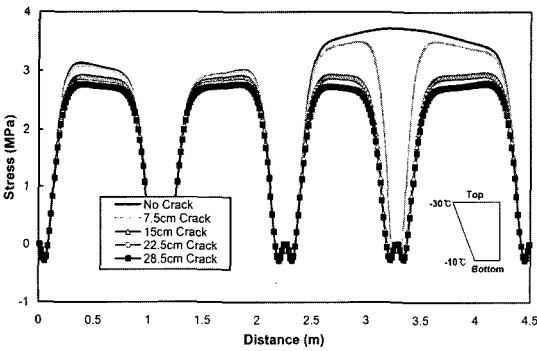


그림 15. 상하부 온도차 증가에 의한 세 번째 균열발생

그림 16은 이러한 온도변화에 대한 균열의 발생 및 진전정도를 보여준다. 이미 설명한 바와 같이 균열은

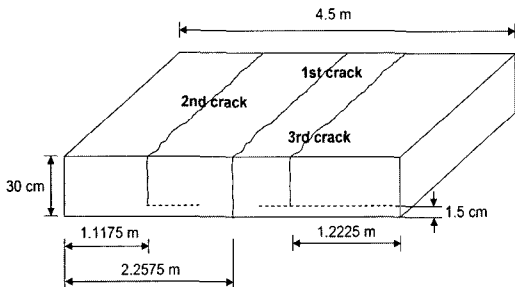


그림 16. 상하부 온도차 증가에 의한 균열발생 결과

슬래브 하부 1.5cm를 남기고 진전이 되었으며 균열의 간격도 어느 정도 차이가 있는 것을 볼 수 있다.

5. 슬래브 상부 온도감소에 따른 균열발생 및 진전

콘크리트 슬래브의 건조수축은 표면에서 급격히 일어나고 슬래브의 내부에서는 그리 크지 않기 때문에 이의 모델링을 위하여 온도감소가 슬래브 상부에서 크게 발생하는 경우에 대한 분석을 수행하였다. 슬래브의 표면에서 깊이방향으로 슬래브 두께의 1/4 깊이까지는 선형으로 온도가 변하며, 1/4 깊이 지점의 온도감소는 7.5도로 고정을 시켰다. 또한 1/4 깊이 지점에서 중간 깊이까지도 선형으로 온도가 변화하지만 중간 깊이에서의 온도감소는 5도로 고정했다. 슬래브의 중간 깊이 이하의 온도는 중간 깊이의 온도감소인 5도 감소로 일정하게 유지시켰다.

그림 17은 초기균열이 발생하여 진전함에 따른 응력의 재분포 모양을 보여준다. 이러한 온도하중에 대하여 균열은 슬래브를 완전히 관통하지 않고 슬래브 하부로부터 4.5cm(상부로부터 25.5cm) 지점에서 멈추었다. 균열 바로 근처에서의 콘크리트의 응력도 앞의 경우에는 약간의 압축응력을 볼 수 있었는데 이번 경우에는 균열 바로 근처에서도 모두 인장응력이 발생하는 것을 알 수 있다.

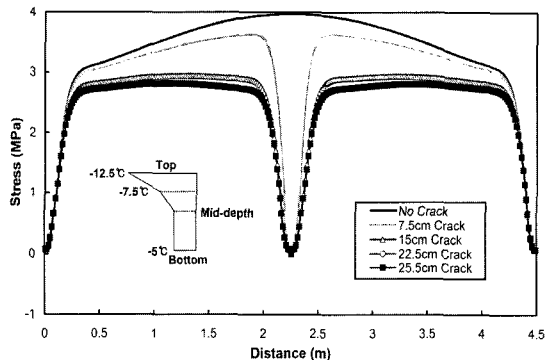


그림 17. 상부 온도감소에 의한 초기 균열발생



초기균열 후에 상부의 온도를 계속 감소시키면 그림 18에 보인 바와 같이 콘크리트의 응력은 증가하게 되며 결국 최대인장응력이 인장강도에 다시 다르게 된다. 본 해석에서는 왼쪽의 슬래브에서 최대 인장응력이 발생하며 새로운 균열이 이곳에서 발생한다.

그림 19는 균열이 발생하여 진전됨에 따른 슬래브 표면에서의 응력재분포를 보여준다. 새로운 균열도 슬래브를 완전히 관통하지 않고 하부 4.5cm 지점에서 진전을 멈추었다. 이 경우에도 앞에서의 경우와 마찬가지로 새로운 균열의 진전에 의해 인접한 슬래브에서도 응력의 감소가 발생하게 된다. 하지만 이번엔 고려한 온도하중은 인접한 슬래브의 응력을 그리 크게 감소시키지는 않는다.

두 번째 균열이 발생하여 진전이 되고 난 후 다시 슬래브 상부의 온도를 더욱 감소시키면 콘크리트의

응력은 그림 20에서와 같이 증가를 하여 또다시 최대인장응력이 인장강도에 다르게 되고 새로운 균열이 발생한다. 그림 21은 새로운 균열이 발생하여 진전되면서 일어나는 콘크리트의 응력재분포를 보여준다. 이때에도 균열은 슬래브 하부 4.5cm 지점에서 멈추었다.

그림 22는 슬래브 상부 온도가 감소하면서 발생하

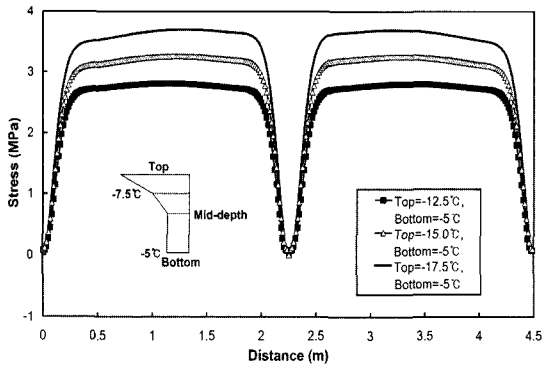


그림 18. 초기균열 후 상부 온도감소에 따른 응력 증가

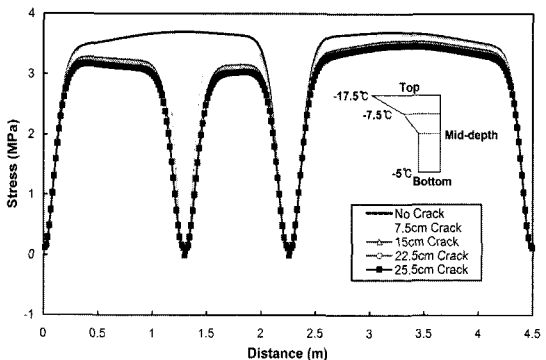


그림 19. 상부 온도감소에 의한 두 번째 균열발생

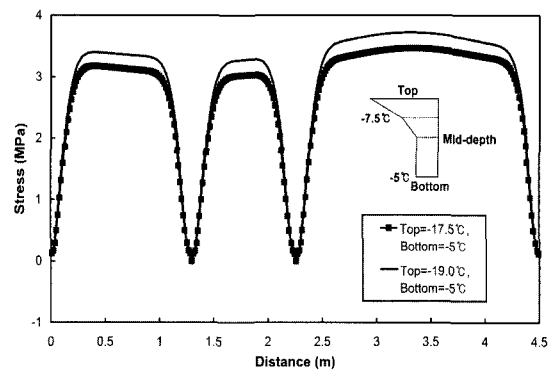


그림 20. 두 번째 균열 후 상부 온도감소에 따른 응력 증가

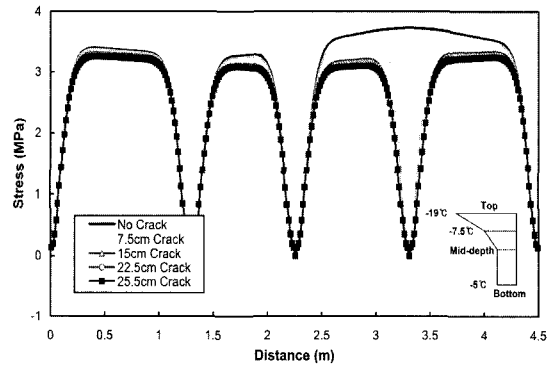


그림 21. 상부 온도감소에 의한 세 번째 균열발생

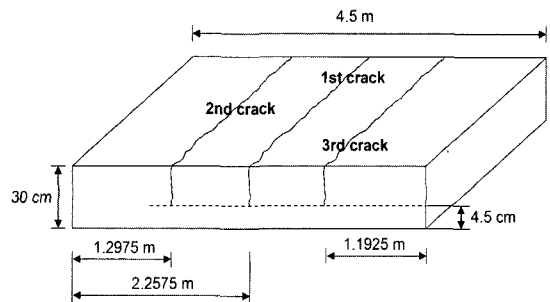


그림 22. 상부 온도감소에 의한 균열발생 결과

는 균열의 상태를 보여주며 그림 23은 세 개의 균열이 발생하여 진전을 멈춘 후의 응력분포 및 변형된 모습을 보여준다. 세 개의 균열 모두 하부 4.5cm에서 진전을 멈추었으며 균열간격도 조금씩 다른 것을 알 수 있다.

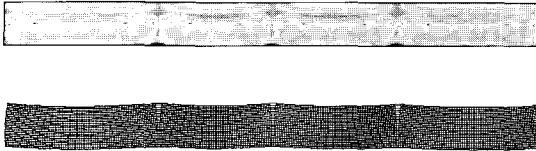


그림 23. 균열발생 후 CRCP 응력분포 및 변형 모습

6. 결 론

본 연구는 CRCP에서 환경하중에 의해 횡방향 균열이 발생하여 진전되는 과정을 분석하기 위하여 수행되었다. CRCP의 유한요소 모델과 균열진전 예측 방법인 요소삭제 방법을 이용하였으며 여러 가지 형태의 환경하중이 CRCP에 작용할 때 균열발생 및 진전의 특성을 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- CRCP의 균열발생 및 진전을 예측하기 위하여 유한요소 모델을 이용하여 점진적으로 균열이 발생하는 부분의 유한요소를 삭제해 나가는 요소삭제 방법을 적용함으로써 균열에 따른 CRCP의 거동을 효과적으로 분석할 수 있었다.
- 균열발생 및 진전은 환경하중이 CRCP에 어떠한 방식으로 작용하는지에 따라서 좌우되는데, 슬래브 하부에 비해 상부의 온도감소가 급격할 때 생긴 균열은 대체적으로 슬래브의 두께를 관통하지 않으며, 슬래브 상하부의 온도감소가 비슷하게 일어날 때 생기는 균열은 슬래브를 관통하게 된다.
- CRCP에 균열이 발생될 때는 새로 발생한 균열을 포함하는 기존의 균열간격 사이에서만 응력이 감소

하는 것이 아니라 주변의 다른 균열간격의 응력도 함께 감소하게 되는데 이의 감소량은 온도하중의 특징에 따라 좌우된다.

- 균열이 슬래브를 항상 관통하는 것은 아니며 균열이 슬래브 깊이로 진전된 정도가 온도하중의 특징에 따라 달라지기 때문에 콘크리트의 인장강도와 탄성계수 등의 콘크리트 재료 성질이 일정하다 하더라도 새로운 균열은 기존 균열간격의 중간에서 항상 발생하지는 않게 되며 따라서 균열간격이 서로 다른 균열들이 발생하게 된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통기술원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- ABAQUS (2006). *User's Manual Version 6.6*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
- Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (1997). "Development of a finite element program for continuously reinforced concrete pavements," *Report No. 1758-S*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (1998). "Numerical modeling of continuously reinforced concrete pavement subjected to environmental loads," *Transportation Research Record*, No. 1629, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 76-89.
- Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (2000). "Three-dimensional analysis of continuously reinforced concrete pavements," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No. 1730, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 43-52.



- Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (2001a). "CRCP-9: Improved computer program for mechanistic analysis of continuously reinforced concrete pavements," *Report No. 1831-2*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (2001b). "CRCP-9 computer program user's guide," *Report No. 1831-3*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (2001c). "CRCP-10 computer program user's guide," *Report No. 1831-4*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. (2001d). "Transformed field domain analysis of pavements subjected to moving dynamic tandem-axle loads and integrating their effects into the CRCP-10 program," *Report No. 1831-5*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Kim, S. M., Won, M. C. and McCullough, B. F. (2003). "Mechanistic modeling of continuously reinforced concrete pavement," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 5, American Concrete Institute, pp. 674-682.
- McCullough, B. F., Ayyash, A. A., Hudson, W. R. and Randall, J. P. (1975). "Design of continuously reinforced concrete pavements for highways," *Report No. NCHRP 1-15*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Suh, Y. C., Hankins, K., and McCullough, B. F. (1992). "Early-age behavior of continuously reinforced concrete pavement and calibration of the failure prediction model in the CRCP-7 program," *Report No. 1244-3*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Won, M. C., Dossey, T., Easley, S., and Speer, J. (1995). *CRCP-8 Program User's Guide*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Won, M. C., Hankins, K., and McCullough, B. F. (1991). "Mechanistic analysis of continuously reinforced concrete pavements considering material characteristics, variability, and fatigue," *Report No. 1169-2*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

접 수 일: 2007. 2. 15
심 사 일: 2007. 2. 27
심사완료일: 2007. 3. 19