

# 시험도로 연속철근콘크리트 포장에서의 수평균열

## Horizontal Cracking in CRCP on KHC Test Road

김성민\* · 권순민\*\* · 조병휘\*\*\*

Seong-Min Kim · Soon-Min Kwon · Byoung Hooi Cho

### 1. 서론

포틀랜드 시멘트 콘크리트(PCC) 도로 포장의 두 가지 형태로 줄눈콘크리트 포장(JCP)과 연속철근콘크리트 포장(CRCP)이 주로 사용되고 있다. CRCP는 전반적인 성능이 매우 우수함에도 불구하고 가끔 단면에서 생기는 손상 때문에 실제 수명이 다하기 전에 보수가 이루어져야 하는 경우가 있다. 전형적으로 편치아웃과 스폐링은 CRCP의 주요한 손상들이다. 하지만 시멘트 안정기층의 사용, 슬래브 두께의 증가, 그리고 Tied-shoulder의 건설 등에 따라 편치아웃의 빈도는 최근 급격히 저하되고 있다. 대신 심각한 스폐링이 CRCP의 주요한 손상이 되고 있다. 비록 몇몇 이론들이 스폐링의 메커니즘을 설명해 줄 수 있지만 (McCullough, et al., 1979; Senadheera, et al., 1994) 그 이론들은 스폐링의 깊이가 슬래브 두께의 절반정도 되는 심각한 스폐링을 설명하지는 못한다. 하지만 최근 이 심각한 스폐링이 철근이 배근되어 있는 슬래브의 중간깊이에서 형성된 수평균열과 관계되어있다는 것이 발견되었다.

수평균열 때문에 발생한 포장의 손상은 미국 텍사스주 Paris지역에 있는 30번 고속도로(IH-30)의 CRCP 구간에서 처음 발견되었다. 1986년에 시공된 이 CRCP의 단면은 250mm의 두께를 가지고 있으며 전형적인 손상의 형태는 popouts와 철근이 배근되어있는 중간깊이에서의 편치아웃이었다. 이러한 손상구간을 보수하기 위하여 슬래브를 들어내면서 슬래브의 중간깊이에 수평균열이 발생해 있음을 알 수 있었다. 이러한 수평균열은 굵은골재 주변을 따라 발생한 것으로 보아 초기균열로 짐작된다. 또한 미국 텍사스주 Waco지역의 IH-35에서 아직 개통하지 않은 새로 건설된 CRCP에서도 철근깊이에서의 수평균열이 발견되었다. 그 외 미구의 몇몇 다른 지역에서도 수평균열의 발생이 보고되었다.

한국도로공사는 중부내륙 고속도로의 여주 부근에서 시험도로를 운영하고 있다. 시험도로에는 여러 다른 설계변수를 가진 도로포장이 건설되어 있으며 이러한 도로의 성능을 주기적으로 분석하고 있다. CRCP도 철근비가 0.6, 0.7, 0.8%인 세계의 구간이 건설되어 있다. 시험도로의 CRCP구간에서 성능평가를 위한 연구를 수행하면서 우리나라에서도 처음으로 수평균열이 CRCP에 존재한다는 것을 발견하였다. 본 논문에서는 시험도로에서 발견한 수평균열을 분석하고 원인규명을 위한 수치해석을 수행한 결과를 기술하고자 한다.

### 2. 수평균열의 분포

수평균열의 발생여부와 진전된 정도를 조사하기 위하여 시험도로 CRCP구간 중 3곳의 횡방향 균열이 발생한 위치에서 총 9개의 수직방향의 코어를 채취하였다. 그림 1에 나타낸 것과 같이 I로 표시한 횡방향 균열의 위치에서 수직방향으로 각각 2개와 5개의 코어를 채취하였고, II로 표시한 횡방향 균열에서 2개의 수직방향 코어를 채취하였다. I 위치의 횡방향 균열과 II 위치의 횡방향 균열은 약 1년의 시간 차이를 두고 발생한 균열이며 II 위치의 균열이 더 늦게 발생하였다. 그림 1은 코어를 채취한 위치를 보여주며 그림 2는 채취된 코어 C와 D의 사진이다.

I 위치에서 수평균열은 코어A와 C에서는 횡방향 균열의 좌측부분(그림 1에서 빗금친 부분)에서

\* 정희원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 조교수 · 공학박사

\*\* 정희원 · 한국도로공사 도로교통기술원 시험도로운영센터 연구원

\*\*\* 경희대학교 토목건축대학 토목공학과 석사과정



발견되었으며 코어D와 H에서는 전단면에 걸쳐 수평균열이 발견 되었다. 하지만 II위치에서는 수평균열이 확인되지 않았다. 이것은 수평균열은 주로 콘크리트 타설 후 발생한 초기 횡방향 균열부근에서 발생하는 반면 뒤늦게 발생한 횡방향 균열에서는 수평 균열이 존재하지 않는다는 것을 보여준다. 하지만 횡방향 균열에서 약간 벗어난 곳에서 채취한 코어B와 E에서는 수평균열이 발생하지 않은 것으로 보아 수평균열이 슬래브 내부로 많이 진전되지는 않은 것으로 보인다. 그리고 같은 횡방향 균열에서도 코어 H에서는 수평균열이 관찰되지만 I에서는 수평균열이 없는 것으로 보아 수평균열이 아직은 광범위하게 진전하지 않았고 불규칙하게 분포한다는 것을 알 수 있었다.

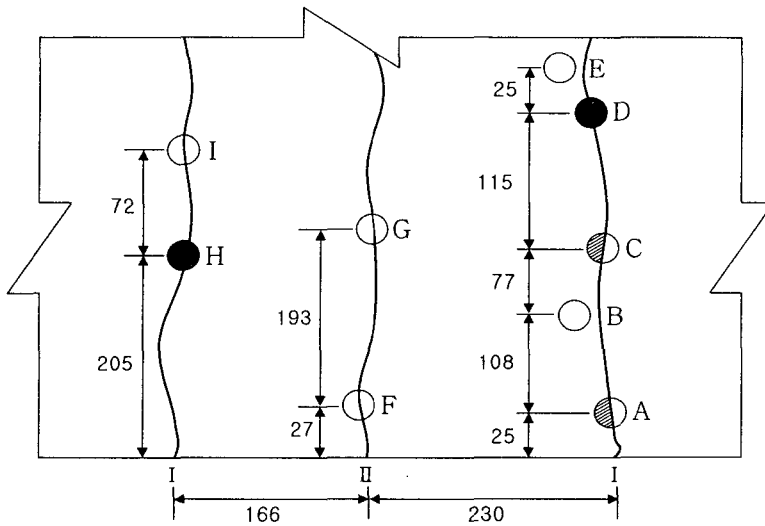
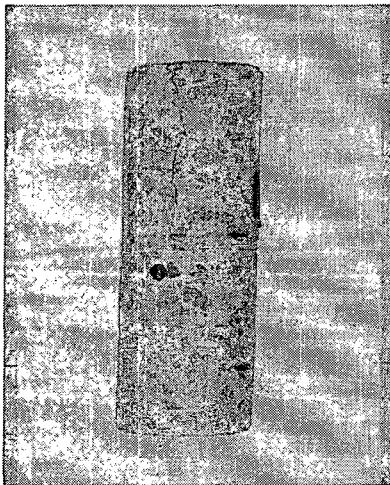
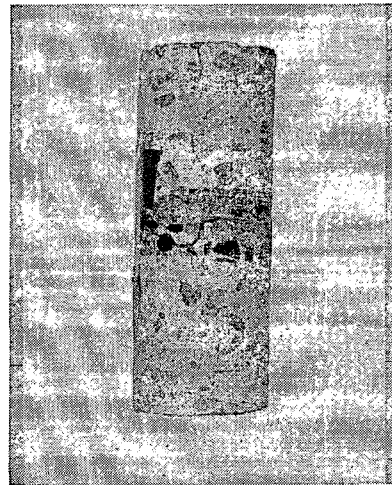


그림 1. 균열 및 코어 평면도



(a) 코어 C



(b) 코어 D

그림 2. I 위치의 횡방향 균열부위에서 채취한 수직방향 코어

### 3. 수치 해석

수평균열의 진행에 대한 현장조사로부터 얻은 사실들을 확증하기위해서 환경하중과 온도 및 습도변수로



인한 슬래브내의 응력상태를 CRCP의 2차원 유한요소모델(Kim, et al., 1997, 1998, 2003)을 사용하여 수치적 방법으로 분석하였다. 그림 3은 이번 해석에 사용한 CRCP의 유한요소모델이다. CRCP가 환경하중의 영향을 받으면 CRCP의 거동은 두 개의 인접한 횡방향 균열로 이루어진 슬래브 중간부분(두개의 인접한 횡방향 균열의 중앙부분)에 대해 대칭이라고 가정할 수 있으며, 따라서 슬래브의 반만 고려하여 수치해석 모델을 만들 수 있다. 콘크리트 슬래브는 인접한 두개의 종방향 철근 사이의 거리를 유한요소두께로 갖는 2차원 평면 요소를 사용하여 모델링 한다. 종방향 철근은 프레임요소를 사용하여 모델링 하였고, 종방향 철근과 콘크리트사이의 부착은 종방향의 활성 자유도를 갖는 접촉위치에서 절점들을 연결하는 수평 스프링 요소를 사용하여 모델링하였다. 콘크리트 슬래브의 밑면과 하부층 사이에서 발생하는 마찰에 의한 부착도 수평 스프링 요소를 사용하여 모델링하였다. 하부층은 curling 효과를 고려하기 위하여 인장력을 받지 못하는 수직 스프링 요소를 이용하여 모델링하였다. 유한요소 모델의 경계 조건들은 정확한 결과를 얻기위해 제대로 정의되어야 한다. 횡방향 균열에서 콘크리트는 구속이 없으며 종방향 철근은 수평방향 변위와 회전변위가 없다고 가정하였다. 즉, 횡방향 균열에서 콘크리트에 수직방향 전단력과 모멘트가 전달되는 것이 무시되었다. 슬래브의 중간에서는 수직방향 자유도는 존재하고 수평방향 변위와 회전변위는 구속되었다. 유한요소에서 응력은 적분점(integration points)에서 계산되고 각각의 요소에서 평균값이 사용되었다. 이번 연구에서 사용한 평면 유한요소의 크기는 25×25mm이다. CRCP의 유한요소 모델링에 대한 이전의 연구에서 요소의 크기가 38mm미만일 때 분석결과가 잘 수렴(Kim, et al., 1997)한다는 것을 보여준다. CRCP에 대한 2차원 유한요소모델의 정확도는 3차원 모델과 비교한 이전의 연구에 의해 조사되었으며 2차원 분석과 3차원 분석에 의한 결과가 충분히 일치된다는 사실이 관찰(Kim, S. M. et al., 2000a, 2000b)되었다. 유한요소모델의 해석은 유한요소해석프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 1998)를 이용하였으며, 입력 값은 Table 1에 나타내었다. 수평균열은 도로를 개통하기 이전에 발생하기 때문에 이번 연구에서는 외부의 차량하중은 고려하지 않았다. 하지만 외부의 차량하중이 수평균열을 진전시킬 수 있다.

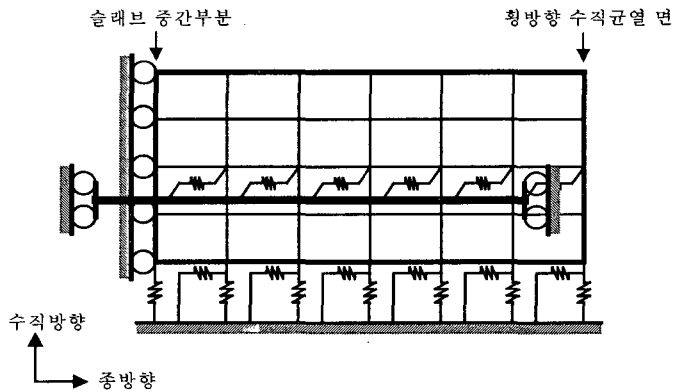


그림 3. CRCP 유한요소모델

Table 1. 해석에 사용한 입력 값

균열 간격	3 m
콘크리트 탄성계수	27.56 GPa
콘크리트 열팽창계수	7.2 microstrain/°C
Modulus of subgrade reaction	0.107 MPa/mm
철근비	0.66 %
슬래브 두께	355 mm
종방향 철근간격	165 mm
철근 크기	#7
기준 온도	32.2 °C
슬래브 위와 아래부분 온도	Top: 4.4 °C; Bottom: 26.7 °C



CRCP에서 환경하중에 의한 횡방향 균열에서 콘크리트내에 휨 모멘트는 없다. 하지만 휨 모멘트는 횡방향 균열에서 멀어질수록 다소 빠르게 증가한다. 그리고 전단응력은 횡방향 균열 근처에서 가장 높다. 이러한 사실들은 그림4에서 보여지며 이 그림은 철근깊이에서 종방향을 따라 콘크리트내의 전단응력과 수직방향 응력분포를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 전단응력과 수직방향 응력은 횡방향 균열부근에서 가장 크며 횡방향 균열로부터 멀어짐에 따라(횡방향 균열로부터 30cm 이내) 응력이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 만약 전단응력이나 수직방향 인장 응력이 콘크리트의 전단강도와 인장강도와 같아지면 수평균열이 발생한다. 이 분석은 수평균열의 크기에 대한 현장관측을 입증하며 횡방향 균열 근처에서의 수평균열의 발생을 입증한다. 휨 모멘트와 그에따른 응력은 콘크리트 슬래브의 깊이에 따라 변화하는 체적변화에 의한 것이기 때문에 이와 같은 체적변화를 일으키는 변수들이 콘크리트 슬래브의 응력상태를 결정할 것이다. 이 변수들에는 다음과 같은 것들이 포함된다. (1) 환경하중, (2) 콘크리트 열팽창계수, (3) 콘크리트 탄성계수.

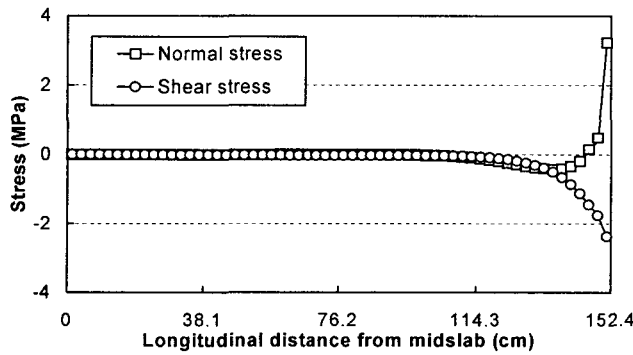


그림 4. 종방향 철근깊이에서 응력분포

### 3.1 환경하중

수평균열을 일으키는 전단응력과 수직방향 응력에 대한 환경하중의 영향을 조사하였다. 건조수축은 등가의 온도변화로써 표현할 수 있기 때문에 온도변화만을 여기서는 고려하였다. 그림 5는 횡방향 균열에서 슬래브 깊이를 따라 발생한 전단응력과 수직방향 응력의 분포를 보여준다. 이 분석에서 표면온도가 각각 17°C와 28°C만큼 감소하는 경우를 고려하였다. 슬래브 깊이에 따른 온도변화는 선형으로 가정하였으며 두 경우에서 슬래브 하부의 온도는 같다고 가정하였다. 그림에서 보는바와 같이 CRCP에서 최대 전단응력과 최대 수직응력은 철근이 존재하는 중간깊이 부근에서 발생하였으며 이러한 최대응력은 높은 온도감소에서 증가하였다. 그러므로 과도한 환경하중은 수평균열을 발생시킬 수 있는 중요한 요소라 할 수 있다.

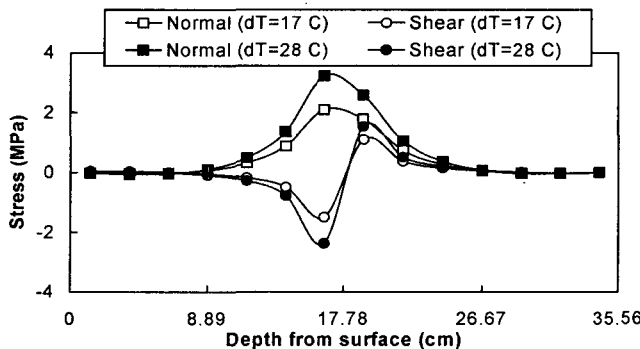


그림 5. 슬래브 깊이에 따른 응력분포에 대한 온도의 영향



### 3.2 콘크리트 열팽창계수

콘크리트의 열팽창계수가 응력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 7.2 와 14.4 microstrain/°C의 두개의 열팽창계수를 고려하였다. 그림 6은 횡방향 균열에서 슬래브 깊이에 따른 전단응력과 수직응력의 분포를 보여준다. 예상한 바와 같이, 높은 열팽창계수는 높은 전단응력과 수직응력을 야기 시킨다. 이것은 전단응력과 수직응력에 콘크리트의 열팽창계수가 얼마나 중요한 영향을 미치는지 보여준다. 또한 이러한 해석결과는 실리카를 함유한 강자갈을 굵은 골재로 함유한 콘크리트와 같은 높은 열팽창계수를 갖는 콘크리트에서 부순 석회암을 굵은 골재로 가지는 콘크리트와 같은 열팽창계수가 상대적으로 낮은 콘크리트보다 더 많은 수평균열이 일어나는 이유를 설명해 준다.

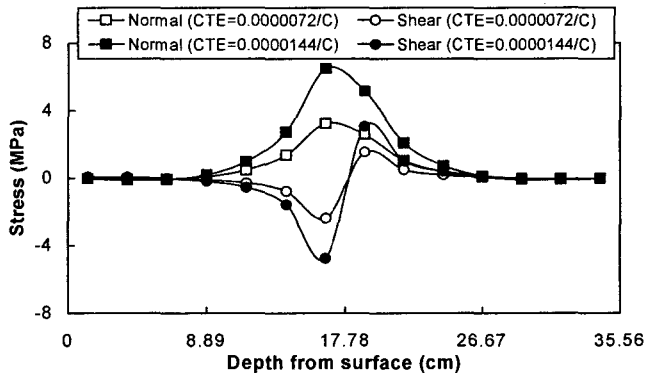


그림 6. 슬래브 깊이에 따른 응력분포에 대한 열팽창계수의 영향

### 3.3 콘크리트 탄성계수

부순 석회암 굵은골재와 경량골재를 사용한 콘크리트의 전형적인 탄성계수 값(13.78 와 27.56 GPa)을 이용하여 콘크리트의 탄성계수가 응력에 미치는 영향을 조사하였다. 비록 각기 다른 탄성계수를 가진 콘크리트는 열팽창계수와 같은 다른 물질 특성도 다른 값들을 가지도록 하지만, 콘크리트 탄성계수의 영향을 확인하기 위해 콘크리트 탄성계수를 제외한 모든 물질 특성들은 같다고 가정하였다. 그림 7은 슬래브 깊이에 따른 전단응력과 수직응력을 나타낸다. 콘크리트 탄성계수가 27.56 GPa인 CRCP는 13.78 GPa인 CRCP보다 50%높은 수직응력과 전단응력을 유발한다. 이 사실은 수평균열에 콘크리트의 탄성계수가 영향을 미친다는 것을 말해주고 왜 단단한 골재를 섞은 콘크리트가 연약한 골재를 섞은 콘크리트보다 더 쉽게 수평균열을 유발하는지 설명해 준다.

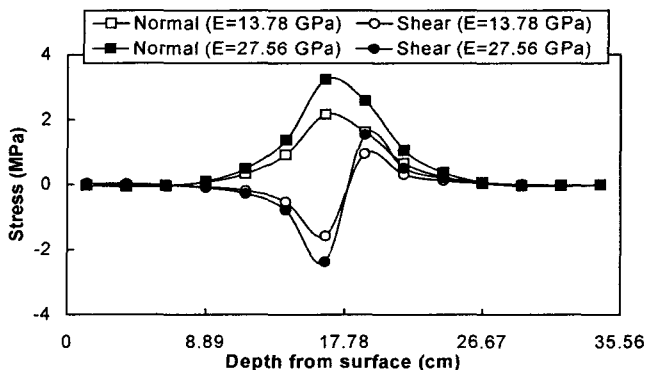


그림 7. 슬래브 깊이에 따른 응력분포에 대한 콘크리트 탄성계수의 영향



#### 4. 결론

연속철근콘크리트 포장에서 수평균열의 발생을 현장실험을 통해 확인하였고 그 원인을 수치해석을 이용하여 분석하였다. 유한요소법을 사용하여 응력분포를 조사하기 위한 CRCP의 수치해석 모델을 개발하였으며, 분석결과를 이용하여 현장에서 얻은 결과들을 입증하는데 사용하였다. 그 결과들은 다음과 같다.

- 수평균열은 횡방향 균열의 위치에서 철근이 배근된 깊이에서 발생하여 진전되지만 슬래브 내부로 심각하게 확장되지는 않는 것으로 보인다.
- 수형균열은 초기에 발생한 횡방향 균열에서 시작되며 횡방향 균열이 더 많이 생겨서 균열간격이 줄어들면 수평균열은 발생확률이 감소한다.
- 수치해석결과
  - 전단응력과 수직인장응력은 횡방향 균열의 철근이 배근된 깊이에서 가장 크게 발생한다. 하지만 이 응력들은 횡방향 균열 부근에서 멀어질수록 그 크기가 급격히 줄어든다. 이러한 사실은 현장에서 관찰된 수평균열의 진전 정도로 확인할 수 있다.
  - 전단응력과 수직인장응력은 온도 및 습도변화가 크고, 콘크리트의 탄성계수와 열 팽창계수가 클수록 더욱 커진다. 수평균열의 발생은 이러한 변수들이 큰 값을 가질 때 발생한 과다응력이 원인이 된다.
- 수평균열을 최소화하기위해 다음과 같은 방법들을 제안할 수 있다.
  - 콘크리트는 일일 기온변화가 매우 클 때에는 타설하지 않는다.
  - 높은 초기건조수축을 피하기 위해 효과적인 양생방법을 도입한다.
  - 콘크리트가 너무 높은 열팽창계수와 탄성계수를 갖지 않도록 굵은골재 선정에 주의한다.

#### 감사의 글

본 연구 내용 중 일부는 한국도로공사의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. McCullough, B. F., Ma, J. C. M., and Noble, C. S., "Limiting Criteria for the Design of CRCP," *Report No. 177-17*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Tex., 1979.
2. Senadheera, S. P., and Zollinger, D., "Framework for Incorporation of Spalling in Design of Concrete Pavements," *Transportation Research Record*, No. 1449, Transportation Research Board, National Research Council, 1994, pp. 114-122.
3. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., "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, Tex., 1997.
4. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., "Numerical Modeling of Continuously Reinforced Concrete Pavement Subjected to Environmental Loads," *Transportation Research Record*, No. 1629, Transportation Research Board, National Research Council, 1998, pp. 76-89.
5. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., "Mechanistic Modeling of Continuously Reinforced Concrete Pavement," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 5, September-October 2003, pp. 674-682.
6. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., "Three-Dimensional Analysis of Continuously Reinforced Concrete Pavements," *Transportation Research Record*, No. 1730, Transportation Research Board, National Research Council, 2000, pp. 43-52.
7. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F., "Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Continuously Reinforced Concrete Pavements," *Report No. 1831-1*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Tex., 2000.
8. ABAQUS, *User's Manual Version 5.8*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I., 1998.