



줄눈콘크리트 포장의 T형 균열 발생 원인 수치 해석

Numerical Analysis of T-Shape Cracking in Jointed Concrete Pavements

윤 동 주* 서 영 국** 김 성 민***
 Yun, Dong Ju Seo, Young Guk Kim, Seong-Min

Abstract

This study was conducted to investigate the causes that induce the T-shape cracks at the joints in the jointed concrete pavements(JCPs). The finite element models of JCP including dowel bars were developed and the stress distribution in the slab was investigated under environmental loads. To investigate the effect of dowel bars on the transverse stresses at the joints that induce the T-shape cracks, the slab curling behavior was analyzed with and without dowel bars. In addition, the stress concentration was investigated when the dowel bar was not installed at the mid-depth of the slab. The results of this study showed that the transverse stresses were not affected by the dowel bars if the dowel bars were installed at the mid-depth of the slab. However, if the dowel bars were not installed at the mid-depth, the transverse stresses were concentrated at the dowel bar locations when the slab curled. The stress concentration was dependent on the contact characteristics between the dowel bar and concrete, and was significantly large when the dowel bar not installed at the mid-depth was located far from the edge of the slab. Therefore, to mitigate T-shape cracking in JCP, dowel bars should be very carefully installed and leveled at the proper locations.

Keywords : jointed concrete pavement, T-shape crack, dowel bar, curling, stress, finite element analysis

요 지

본 연구는 줄눈콘크리트 포장의 줄눈부에서 종방향으로 발생하는 균열인 T형 균열의 발생 원인을 수치해석을 통해 분석하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 다웰바를 포함한 줄눈콘크리트 포장 슬래브의 유한요소해석 모델을 개발하였으며 이러한 모델에 환경하중을 재하하여 슬래브에 발생하는 응력 분포를 분석하였다. 슬래브의 컬링 시 다웰바의 영향을 분석하기 위하여 우선 다웰바가 없을 경우의 슬래브 컬링 거동을 분석하였다. 그리고 다웰바가 슬래브 컬링 시 T형 균열을 유발할 수 있는 횡방향 응력 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 시공오차로 인해 다웰바의 설치 깊이가 슬래브 중간 깊이에 위치하지 않을 경우 슬래브에 발생하는 응력 집중 현상에 대해서도 분석을 수행하였다. 연구 결과, 다웰바가 슬래브 중간 깊이에 제대로 시공되어 있을 경우에는 슬래브에 발생하는 횡방향 응력에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 하지만 다웰바가 슬래브 중간 깊이보다 표면 쪽으로 치우쳐 위치하게 되면 슬래브의 컬링에 의해 슬래브 표면에 횡방향 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 응력 집중은 슬래브와 다웰바의 접촉 성질에 따라 다르게 나타났으며 여러 다웰바들 중 높이가 다르게 장착된 다웰바의 위치가 슬래브의 안쪽에 존재할수록 이러한 다웰바 위치에서의 응력 집중현상이 매우 크게 나타났다. 따라서 줄눈콘크리트 포장에서 T형 균열 발생을 억제하기 위해서는 시공 시 다웰바가 설계위치에 정확히 장착되도록 주의를 기울여야 할 것이다.

핵심용어 : 줄눈콘크리트 포장, T형 균열, 다웰바, 컬링, 응력, 유한요소해석

* 비회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정
 ** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원
 *** 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 교신저자(E-mail: seongmin@khu.ac.kr)



1. 서론

줄눈콘크리트 포장(JCP: jointed concrete pavement)에서 다웰바(dowel bar)는 포장 슬래브 사이의 불연속면인 줄눈에 설치되어 한쪽 슬래브에 작용하는 차륜하중을 인접 슬래브로 전달하여 분산시켜주는 역할을 한다(Huang, 1993). 또한, 슬래브 간의 부등침하로 발생할 수 있는 단차(faulting)를 감소시켜 주기도 한다. 그러나 이러한 다웰바가 기능을 제대로 발휘하기 위해서는 다웰바가 설계위치에 정확하게 시공되어야 한다. 하지만 실제 시공현장에서는 포장 포설 중에 다웰바 또는 다웰바 어셈블리에 가해지는 하중때문에 시공 오차가 발생할 수 있다. 이러한 다웰바의 시공오차는 오히려 줄눈부를 구조적으로 취약하게 만들거나 온도와 습도 변화에 따른 슬래브의 건전한 거동을 방해하여 스폐링, 균열 등의 파손을 유도하여 포장 공용성의 저하를 가져오기도 한다. 따라서 다웰바의 정확한 시공은 줄눈콘크리트 포장의 설계수명을 보장하고 과다한 유지보수비용을 절감할 수 있는 중요한 요소라 할 수 있다.

근래에 중부내륙고속도로 상의 시험도로의 줄눈콘크리트 포장 구간에서 줄눈부의 다웰바 설치 위치에서 종방향으로 균열이 다소 발생된 것을 발견하였으며 이러한 균열 또한 포장의 공용성을 감소시킬 수 있는 또 다른 원인으로 지적되고 있다. 이러한 균열은 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 줄눈으로부터 한쪽 또는 양쪽 종방향으로 발생하기 때문에 줄눈을 기준으로 T자 모양을 하므로 T형 균열이라 일컫는

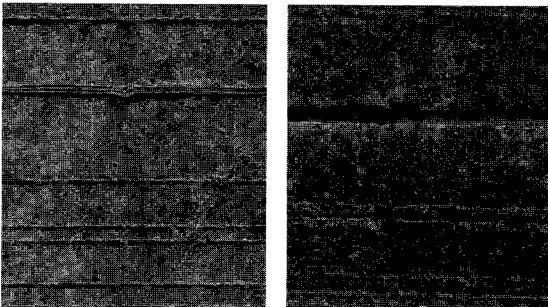


그림 1. 줄눈부 T형 균열

다. 대체적으로 T형 균열은 포장에 차륜하중이 작용하기 이전에 환경하중에 의해 시공 초기에 발생된 것으로 보고되고 있다. 따라서 이러한 T형 균열의 발생 원인을 파악하여 균열을 방지할 수 있는 방안을 마련하는 것이 중요시되고 있다.

본 연구에서는 줄눈콘크리트 포장을 유한요소법을 이용하여 모델링하여 이러한 포장에 환경하중이 작용할 때 줄눈부에서의 응력 분포를 분석하여 T형 균열의 발생 가능 원인을 파악하였다. 우선 다웰바가 설치되어있는 포장과 설치되어있지 않은 포장에서 슬래브가 컬링할 때 슬래브에 발생하는 응력 분포를 비교 분석하여 다웰바의 영향을 파악하였다. 그리고 일부 다웰바가 다른 다웰바들에 비해 높이가 다르게 설치되어있을 경우에 슬래브의 응력 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 분석을 통해 T형 균열을 야기할 수 있는 원인을 파악하였다. 본 논문은 이러한 연구 내용에 대해 상세히 기술한다.

2. 구조해석 모델

줄눈콘크리트 포장의 구조해석 모델을 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2007)를 이용하여 개발하였다. 줄눈콘크리트 포장 슬래브 하나의 크기는 가로 세로가 각각 6m와 4m로 하였으며 두께는 0.3m로 구성하였다. 그림 2는 이러한 포장 슬래브 모델을 보여준다. 슬래브는 두 개의 모델을 개발하고 줄눈부를 다웰바로 연결하였다. 다웰바의 제원은 직경 3cm, 길이 60cm로 하였으며 각 슬래브에 50cm 간격으로 8개가 장착되도록 하였다. 실제 다웰바 시공을 정확히 모델링하기 위해서 다웰바를 한 쪽 슬래브에는 콘크리트와 완전히 부착이 되도록 하였으며 맞은편 슬래브에서는 부착이 되지 않도록 하였다. 이러한 다웰바의 콘크리트와의 부착과 비부착은 슬래브 간에 하나씩 건너서 배치되도록 하였다. 즉 어느 슬래브에서 첫 번째 다웰바가 콘크리트와 부착이 되어 있으면 다음번의 다웰바는 비부착이 되도록 하는 것이다.

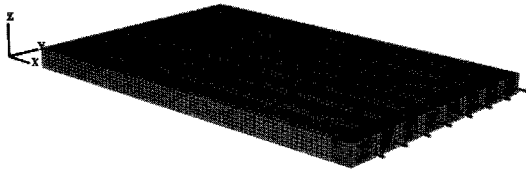


그림 2. 포장 슬래브 모델링

포장 슬래브를 지지하고 있는 하부층은 하나의 복합지지층으로 가정하여 탄성지반으로 모델링하였다. 콘크리트 포장 슬래브는 3차원 고체 요소를 사용하여 모델링하였으며 다웰바가 위치한 줄눈부에서 슬래브의 종방향으로 30cm와 다웰바 부근의 요소들은 세밀하게 요소망을 제작하여 해석의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다. 특히 다웰바의 유한요소들과 이러한 다웰바가 콘크리트와 접촉하는 부분의 슬래브의 유한요소들은 서로 일치하는 모양이 되도록 하여 접촉하는 부분의 유한요소망 모양이 같지 않아 발생하는 오차를 없앨 수 있도록 하였다. 따라서 다웰바에도 길이방향으로뿐만 아니라 둘레를 따라서도 유한요소망을 구축하였다. 그림 3은 다웰바와 다웰바가 장착될 슬래브 부분의 유한요소망을 보여준다. 해석에서 사용된 주요 입력 값은 표 1에 나타내었다.

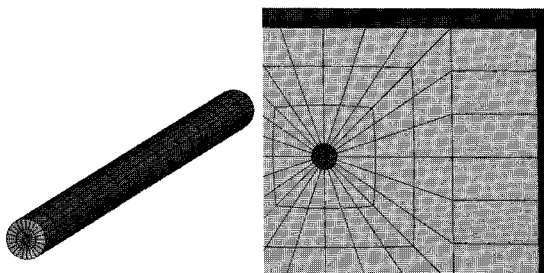


그림 3. 다웰바와 다웰바가 장착될 슬래브 부분 유한요소망

표 1. 해석에 사용된 입력값

변수	탄성계수(GPa)		포와송비		단위중량(kg/m ³)		하부지반 강성 (MPa/m)	온도 구배 (°C/cm)
	콘크리트	철근	콘크리트	철근	콘크리트	철근		
입력값	30	200	0.15	0.3	2,400	7,800	100	1

앞에서 언급한 바와 같이 T형 균열은 환경하중에 의해 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에 포장 슬래브에 가해지는 하중은 환경하중으로 가정하였다. 실제로 차륜하중이 줄눈부에 작용할 때는 다웰바에 의해 슬래브에 발생하는 응력의 크기가 다웰바가 없을 경우 보다 작아지게 되므로 차륜하중에 의해 T형 균열이 발생하지는 않는 것으로 판단된다. 환경하중은 온도와 수분 변화 등이 있는데 이러한 변화는 슬래브의 상하부에 다른 크기로 발생하여 슬래브의 컬링을 유도하게 된다. 슬래브가 컬링 할 때에는 다웰바가 슬래브의 컬링 거동을 방해하게 된다. 즉 컬링 현상으로 슬래브가 휨을 일으키려 하는데 다웰바는 반대로 이러한 휨을 제지하려고 함으로써 슬래브에 응력을 발생시킬 수 있으며 이러한 응력 분포는 다웰바의 배치와도 관련되리라 예상된다. 본 연구에서는 환경하중을 1°C/cm의 수직 선형 온도구배로 작용시켜 이에 따른 슬래브의 응력 분포를 분석하였다.

3. 줄눈부 컬링 응력 분포 분석

줄눈콘크리트 포장의 줄눈부에서의 컬링에 의한 응력 분포를 분석하기 위하여 우선 다웰바가 없는 단일 슬래브의 응력 분포를 살펴본 후 다웰바가 있을 경우의 응력 분포와 비교함으로써 다웰바가 슬래브의 컬링 현상에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

3.1 다웰바가 없는 슬래브의 컬링 응력

포장 슬래브에 다웰바가 없을 경우에 슬래브 컬링에 의한 응력 분포를 그림 4에 나타내었다. 줄눈부에서 발생하는 T형 균열은 종방향으로 발생하기 때문에 횡방향 응력(S22) 분포를 분석하였다. 그림에 나타난 응력 분포도에서 응력 분포의 범위는 그림에 함께 표시하였으며 이후 분석될 모델들과의 비교를 위하여 특별히 응력 범위가 표시된 경우를 제외하고는 이와 같은 동일한 응력 분포 범위를 적용하였다.

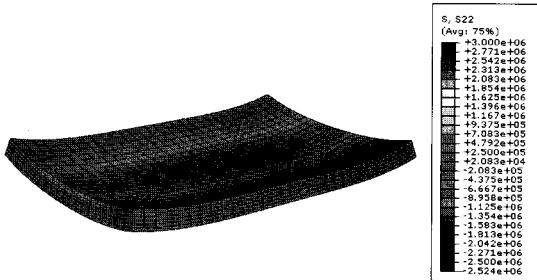


그림 4. 단일 슬래브의 컬링 응력 분포

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브의 상부온도가 하부온도보다 낮으면 슬래브가 위로 휘게 되는 현상인 컬링 현상이 발생하게 되며 이때에는 슬래브 상부에 인장응력이 발생하며 하부에 압축응력이 발생하게 된다. 응력의 크기는 슬래브 중앙부에서 가장 큰 것을 알 수 있으며 줄눈부에서도 횡방향으로 슬래브가 휘어져 있기 때문에 횡방향 응력이 줄눈부 중앙에서도 상당히 크게 발생하는 것을 볼 수 있다.

다음으로는 슬래브에 다웰바의 구멍만이 존재할 경우에 컬링에 의한 응력 분포를 살펴보았다. 그림 5는 이러한 응력 분포를 슬래브 전체에 걸쳐서 보여주며 또한 다웰바 구멍이 존재하는 줄눈부의 단부만을 확대하여서도 보여준다. 그림에서와 같이 슬래브 상부에 횡방향 인장응력이 발생하고 하부에 압축응력이 발생하는 전형적인 응력 분포를 보이는 것을 알 수 있으며, 슬래브에 생긴 다웰바 구멍으로 인해 응

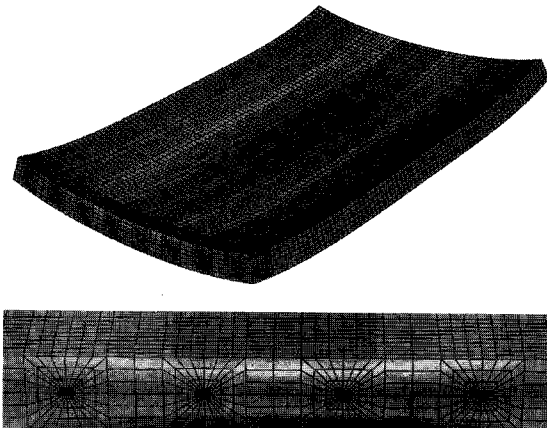


그림 5. 슬래브에 다웰바 구멍만 있을 경우 컬링 응력 분포

력 분포 모양이 다웰바 구멍이 없을 경우와 비교하여 매우 미소한 차이를 보이긴 하지만 사실상 거의 동일한 응력 분포를 나타낸다고 할 수 있다.

3.2 다웰바가 있는 포장 슬래브의 컬링 응력

줄눈콘크리트 포장의 줄눈부에 다웰바가 존재할 경우에 컬링에 의한 응력 분포를 분석하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 다웰바는 한쪽 슬래브에는 완전히 고정되어 있으며 다른 쪽 슬래브에서는 수평방향으로 움직임이 자유롭도록 하였다. 다웰바가 콘크리트와 완전한 부착을 유지할 경우에는 콘크리트와 다웰바 사이에 수직방향으로의 접촉을 Hard Contact으로 하고 수평방향의 접촉을 Rough로 하여 슬래브와 다웰바를 일체화 시켰다. 다웰바가 콘크리트 내에서 수평방향으로 움직임이 자유로울 경우에는 콘크리트와 다웰바 사이에 수직방향의 접촉은 Hard Contact으로 하지만 수평방향의 접촉을 Frictionless로 하여 두 슬래브의 신축, 이완이 자유롭게 이루어질 수 있는 실제 시공 상황을 모사하였다. 이러한 8개의 다웰바는 양쪽 슬래브에 Rough 성질의 접촉과 Frictionless 성질의 접촉이 번갈아가면서 교차되도록 모델링 하였다.

포장 슬래브에 수직 온도구배가 발생하여 컬링을 하게 되면 각각의 슬래브는 동일한 온도구배를 가져 같은 컬링거동이 나타나게 되며 각 슬래브의 횡방향 응력 분포는 그림 6과 같게 된다. 그림에서 다웰바들의 길이가 다르게 보이는 이유는 슬래브와의 접촉 성질이 각각 다르기 때문이다. 길이가 약간 길게 보이는 다웰바들은 Frictionless 성질로 슬래브와 접촉된 다웰바이기 때문에 수평방향으로 약간 밀려 나온 것이며 나머지 다웰바들은 슬래브에 Rough 성질로 슬래브에 고정되어 움직이지 않은 것이다. 다웰바가 두 슬래브를 연결하고 있을 경우의 전체적인 슬래브의 횡방향 응력 분포는 다웰바가 없는 경우와 거의 같은 것을 알 수 있다.

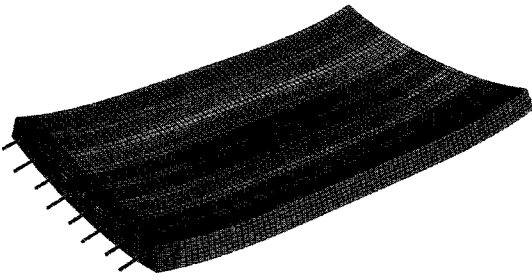


그림 6. 다웰바가 있는 경우 응력 분포

보다 세밀한 비교를 위하여 그림 7에 줄눈부에서 슬래브의 횡방향으로 표면을 따라 발생한 횡방향 응력을 나타내었다. 그림에서는 세 가지 경우를 비교하였는데 첫 번째로 슬래브에 다웰바와 다웰바 구멍 모두가 없을 경우(NO_HOLE)와 두 번째로 슬래브에 다웰바 구멍은 있으나 다웰바는 없는 경우(NO_DB), 그리고 세 번째로 다웰바 8개가 슬래브의 중간 깊이를 따라 배치되어 있을 경우를 비교하였다. 그림에서 가로축은 슬래브의 횡방향 길이(4m)이고 세로축은 줄눈부 슬래브 표면을 구성하는 유한 요소에서의 횡방향 응력(S22)이다. 가로축에 원으로 표시된 것은 다웰바의 위치이며 회색원은 다웰바가 슬래브에 완전히 부착되어 있는 것이며 흰색원은 다웰바의 수평 움직임을 허용하는 위치이다. 다웰바 구멍이나 다웰바가 있을 경우에는 유한요소의 크기가 횡방향을 따라 일정하지는 않기 때문에 각각의 응력값들의 간격이 동일하지가 않다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 다웰바가 중간 깊이에 제대로 장착되어 있을 경우에는 슬래브가 컬링할 때 다웰바의 유무에 따라 횡방향 응력 분포가 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

다웰바는 종방향으로 배치되어 있기 때문에 슬래브가 컬링 거동을 할 때 슬래브의 종방향 컬링을 제지하려 하며 이에 따라 슬래브의 종방향 응력 변화를 가져오게 된다. 즉, 줄눈부에서는 인접한 두 개의 슬래브가 서로 대칭되어 휘게 되며 이때에 다웰바는 이러한 휨을 방해하는 방향으로 휨모멘트를 가하는 것과 같은 영향을 미치기 때문에 종방향으로는 응력이 발생하게 되는 것이다. 반면에 횡방향으로는 두 개의

슬래브가 같은 방향으로 컬링하며 다웰바의 배치도 이러한 휨을 제지하려는 방향이 아니기 때문에 횡방향 응력은 다웰바의 존재 여부에 따라 거의 영향을 받지 않게 되는 것이다.

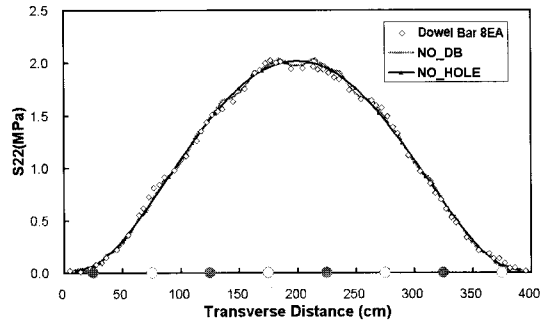


그림 7. 다웰바 유무에 따른 줄눈부 표면 응력 분포 비교

4. 다웰바 수직 위치와 컬링 응력 상호 관계 분석

앞에서 분석한 결과와 같이 다웰바의 유무에 따른 횡방향 응력 변화는 거의 없는 것으로 보아 다웰바가 슬래브 중간 깊이에 제대로만 시공된다면 줄눈 부분의 종방향 균열을 초래하는 원인이 되지 않는 것을 알 수 있다. 하지만 이러한 다웰바들 중 어느 하나의 다웰바가 제 위치를 벗어나 슬래브 위쪽이나 아래쪽으로 치우치게 되면 이로 인해 줄눈 부분에 응력 집중이 발생할 수도 있을 것이다. 이러한 영향을 알아보기 위해 그림 8에 나타난 바와 같이 슬래브 중앙 부분에 위치한 다웰바 하나를 수직방향으로 다른 다

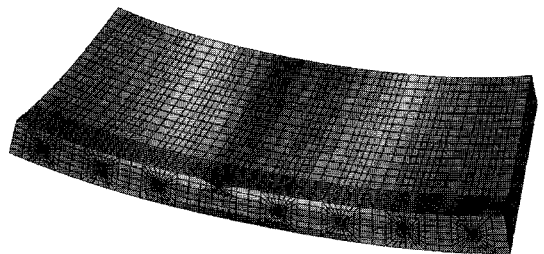


그림 8. 중앙부 다웰바가 위쪽에 배치된 경우 응력 분포

웰바에 비해 10cm 높게 위치하게 한 후 구조해석을 수행하였다. 슬래브의 컬링업과 컬링다운이 유사한 대칭 결과를 가져오기 때문에 컬링업에 대해서만 고려하였다.

그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 하나의 다웰바가 슬래브 표면 쪽으로 치우쳐 위치한 경우에는 그러한 다웰바 주변에서 슬래브에 횡방향 응력이 추가적으로 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 위로 치우쳐 위치한 다웰바가 슬래브의 컬링을 방해하여 슬래브를 평평하게 펴려고 하는 작용을 하며 이에 따라 다웰바 자체도 휘면서 슬래브의 다웰바 구멍 입구 쪽에서는 아래방향으로, 구멍 안쪽에서는 위쪽으로 콘크리트를 누르게 된다. 이로 인해 그림 9에서 볼 수 있는 것과 같이 다웰바 위쪽 슬래브가 휨 거동으로 인해 표면에 횡방향 인장응력이 집중적으로 발생하게 된다.

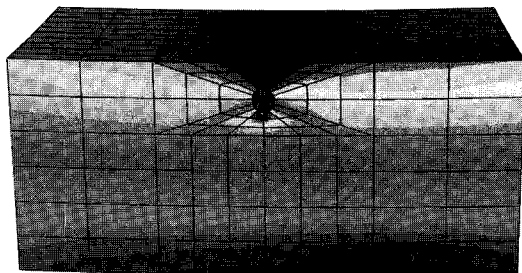


그림 9. 중앙부 다웰바가 위쪽에 배치된 경우 다웰바 부분 응력 분포

그림 9에 보인 경우는 위로 치우쳐져 위치한 다웰바가 슬래브와 Frictionless 성질로 접촉된 경우의 응력 분포이다. 전체적으로는 슬래브 표면이 인장, 슬래브 바닥면이 압축응력을 받지만 다웰바 구멍 위쪽 표면으로 큰 인장응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 이러한 슬래브에 균열이 발생한다면 다웰바 위의 슬래브 표면에서 시작될 가능성이 높게 된다. 이러한 다웰바의 반대쪽에 위치한 슬래브에서는 다웰바가 슬래브와 Rough 성질로 완전히 부착된 경우이며 이 경우의 횡방향 응력 분포를 살펴보면 그림 10과 같다. 다웰바가 콘크리트 슬래브와 일체화된 경우에도 슬래브 표면에서 추가 인장응력이 발생하

지만 다웰바 구멍 바로 위쪽에 그보다 더 큰 인장응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경우에는 균열이 발생한다면 다웰바로 부터 균열이 시작될 확률이 높게 된다.

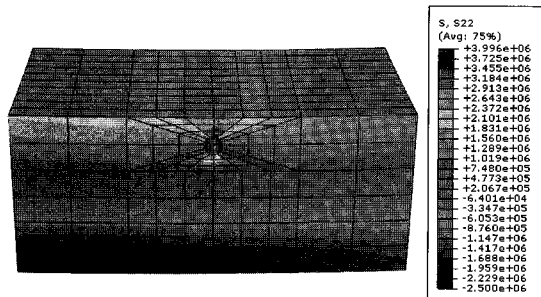


그림 10. 다웰바가 슬래브와 완전부착 되었을 경우 응력 분포

다웰바로 연결된 서로 마주하는 두 개의 슬래브에서 줄눈부 표면에서의 횡방향 응력을 그림 11에서 상세히 분석하였다. 그림에서 다웰바의 위치는 가로축 위에 나타내었다. 이중에 175cm 위치에 있는 다웰바는 슬래브 중간 깊이에서 10cm 위쪽에 배치된 다웰바이다. 슬래브 1과 다웰바와의 접촉 성질에 따라 다웰바를 회색 원과 흰색 원으로 나타내었다. 회색 원은 다웰바와 콘크리트가 완전히 부착되어 있는 상태이며 흰색 원은 다웰바와 콘크리트가 수평방향으로 미끄러짐을 허용하는 경우이다. 따라서 그림에서 25cm 위치의 다웰바는 슬래브 1과는 완전히 부착되어 있으며 반대로 슬래브 2와는 미끄러짐을 허용하는 연결이 되어있는 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 다웰바가 위로 치우쳐진 위치에서 슬래브의 표면 인장응력이 급격하게 증가하게 된다. 이러한 현상은 인접한 두 개의 슬래브 모두에서 발생하게 된다. 또한 다웰바가 슬래브 중간깊이에 설치된 경우에도 다웰바와 슬래브의 접촉 성질에 따라 같은 위치에서라도 슬래브에 발생하는 응력이 미소하나마 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 다웰바가 한쪽의 슬래브와는 완전히 부착되어 있고 또 다른 슬래브와는 수평방향으로 미끄러움을 허용할 때 두 슬래브에 작용하는 응력의 크기는 수평방향으로의 미끄러움을 허용하는

슬래브에서 다소 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

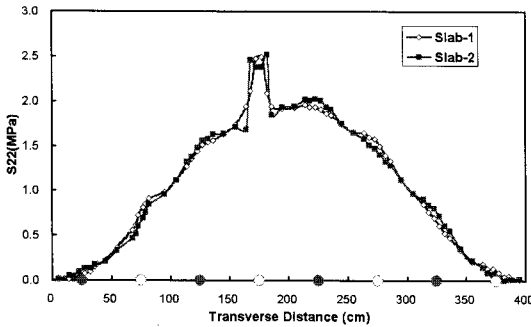
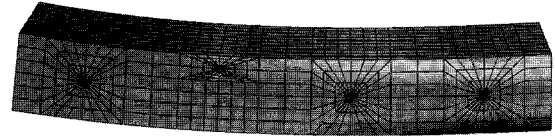


그림 11. 하나의 다웰바가 위쪽에 배치된 경우 줄눈부 표면의 횡방향 응력

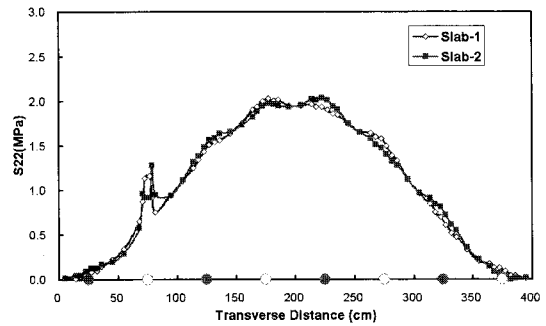
다웰바의 수직 위치 변화에 따른 슬래브의 응력 분포를 보다 더 세밀하게 분석하기 위하여 이번에는 슬래브의 바깥쪽 부분에 위치한 다웰바를 슬래브 중간 깊이에서 표면 쪽으로 10cm 높여서 배치하였을 경우의 응력 분포를 분석하여 그림 12에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 이러한 경우에도 슬래브 중앙부 다웰바를 표면 쪽으로 치우치게 위치시켰을 경우와 마찬가지로 다웰바를 높게 배치한 곳에서 슬래브에 추가 인장응력이 발생한다. 하지만 슬래브 바깥쪽 위치에서는 컬링에 의한 응력 자체가 작기 때문에 추가 인장응력에 의해 다웰바 배치 높이가 다른 부분에서 최대 인장응력이 발생하지는 않는다. 그 이외의 부분에서의 응력 분포는 이전의 경우와 같다고 할 수 있다.

이번에는 두 개의 다웰바가 제 위치에 있지 않고 슬래브의 표면 쪽으로 높게 배치되었을 경우에 슬래브의 응력 분포를 살펴보았다. 배치 높이가 다른 두 개의 다웰바는 앞에서 고려한 두 가지 경우의 조합으로 하였다. 그림 13은 이러한 경우의 응력 분포를 보여준다. 다웰바가 수직 방향으로 높게 배치된 곳에서는 슬래브의 인장응력이 국부적으로 증가하는 것을 알 수 있으나 이렇게 높게 배치된 다웰바의 수가 많다고 하여 슬래브 전체에 걸쳐 인장 응력의 분포가 크게 변화하지는 않는다. 즉, 슬래브의 최대 인장응력은 슬래브의 중앙부에 위치한 다웰바가 슬래브 중

간 깊이보다 높게 배치되었을 경우에 그 곳에서 발생하게 된다.

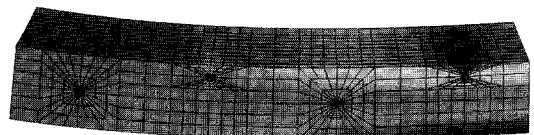


(a) 응력분포

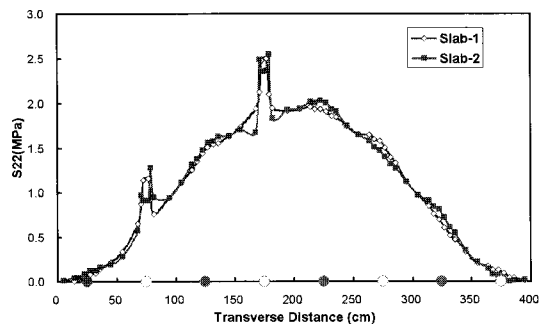


(b) 줄눈부 표면 횡방향 응력 분포

그림 12. 슬래브 바깥쪽 다웰바가 위쪽에 배치된 경우



(a) 응력분포



(b) 줄눈부 표면 횡방향 응력 분포

그림 13. 슬래브 중앙부와 바깥쪽 다웰바가 동시에 위쪽에 배치된 경우

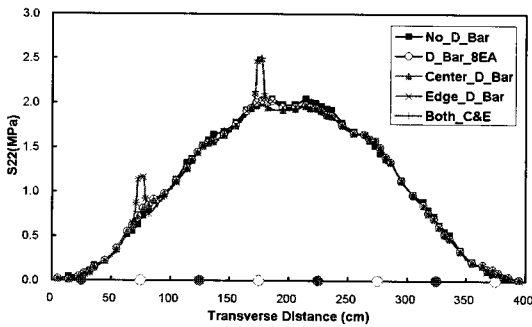
위에서 분석한 줄눈부 슬래브 표면의 횡방향 응력

분포를 각각의 경우별로 비교해 보면 그림 14와 같다. 그림에서 [No_D_Bar]는 다웰바 구멍만 있고 다웰바는 없을 경우, [D_BAR_8EA]는 다웰바 8개가 모두 슬래브 두께의 중립축에 정확하게 위치한 경우, [Center_D_Bar]는 중앙부 한 개의 다웰바가 제 위치에서 10cm 위에 배치된 경우, [Edge_D_Bar]는 바깥쪽 한 개의 다웰바가 10cm 위에 배치된 경우, [Both_C&E]는 중앙부 다웰바와 바깥쪽 다웰바가 동시에 10cm 위쪽에 배치된 경우이다. 그림 14(a)에서는 슬래브 1에서의 응력분포를 나타내기 때문에 다웰바와의 접촉 성질은 회색 원이 Rough 성질, 흰색 원이 Frictionless 성질을 나타내고, 그림 14(b)에서는 슬래브 2의 응력분포를 나타내며 회색 원과 흰색 원은 반대로 각각 Frictionless와 Rough 성질을 나타내게 된다. 그림에서 확연하게 볼 수 있듯이 다웰바의 위치가 슬래브 중간 깊이보다 위로 배치된 경우에는 그 곳에서의 인장응력은 뚜렷하게 증가되

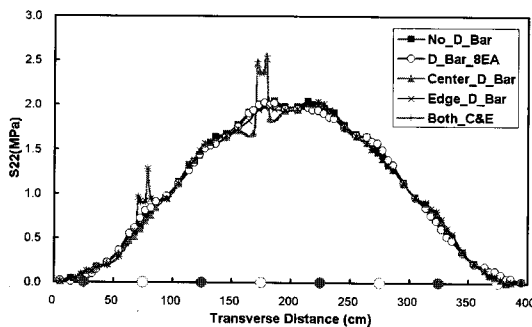
지만 슬래브의 다른 부분에서는 그 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결론

줄눈콘크리트 포장의 줄눈부에서 발생하는 T형 균열의 원인을 파악하기 위한 연구로서 다웰바를 포함한 줄눈콘크리트 포장의 모델을 유한요소해석 프로그램을 이용하여 개발하였으며 이러한 모델에 환경하중을 재하하여 슬래브에 발생하는 응력 분포를 분석하였다. 특히 다웰바가 슬래브 응력에 미치는 영향을 분석하였으며 시공 부주의 등에 의해 다웰바가 슬래브 중간 깊이에 위치하지 않을 경우 슬래브에 발생할 수 있는 응력 집중 현상에 대해서도 분석을 수행하였다. 이러한 연구를 통해 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.



(a) 슬래브 1



(b) 슬래브 2

그림 14. 슬래브 컬링에 의한 각 경우별 횡방향 응력 분포

- 포장 슬래브가 환경하중에 의해 컬링 할 때 다웰바가 슬래브의 중립축인 중간 깊이에 모두 위치할 경우에는 이러한 다웰바의 존재가 슬래브의 횡방향 인장응력 분포에 미치는 영향은 매우 미소하다. 이 경우 다웰바는 슬래브의 종방향 컬링을 제지하려 하기 때문에 종방향 응력을 변화시키지만, 횡방향으로는 다웰바로 연결된 두 슬래브가 같은 방향으로 컬링 거동을 하기 때문에 다웰바가 횡방향 컬링을 제지하려 하지는 않으며 따라서 횡방향 응력의 변화는 거의 없게 된다.
- 다웰바가 슬래브의 중립축인 중간 깊이에서 위쪽으로 치우쳐 배치되었을 경우에는 슬래브가 컬링할 때 그 부근에서 횡방향 응력의 집중 현상이 발생한다. 그 영향은 슬래브 중앙부분에 위치한 다웰바일수록 크게 나타난다.
- 슬래브와 다웰바의 접촉 성질에 따라 슬래브 컬링에 의한 응력 분포가 다소 다르게 나타난다. 다웰바가 슬래브 내에서 수평방향으로는 움직일 수 있을 경우에 슬래브 표면에 발생하는 인장응



력이 다웰바와 슬래브가 완전히 부착되어 있을 경우에 발생하는 인장응력에 비해 다소 크게 된다.

- 다웰바의 수직 위치가 중간 깊이보다 높게 배치 되었을 경우에, 다웰바가 슬래브 내에서 수평방향으로 움직일 수 있을 때에 슬래브가 컬업하면 슬래브 표면과 다웰바 구멍 바로 아래에서 횡방향 추가응력이 발생되며, 다웰바가 슬래브와 부착되어 있을 때는 다웰바 구멍 바로 위에서 발생하는 추가 횡방향 응력이 매우 커지게 된다.

참고 문헌

ABAQUS (2007). *User's Manual Version 6.7*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R. I.

Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

접 수 일 : 2009. 2. 12
심 사 일 : 2009. 2. 16
심사완료일 : 2009. 5. 27