

줄눈콘크리트 포장의 줄눈부 종방향 균열 발생원인 분석

Numerical Analysis of Longitudinal Crack Occurrence at Joint in Doweled Jointed Concrete Pavements

김성민* · 윤동주** · 서영국***

Kim, Seong-Min · Yun, Dong Ju · Seo, Youngguk

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, 슬래브간의 부등침하로 발생할 수 있는 단차(faulting)를 감소시켜 주기도 한다. 그러나 이러한 다웰바가 기능을 제대로 발휘하기 위해서는 다웰바가 설계위치에 정확하게 시공되어야 한다. 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 줄눈으로부터 한쪽 또는 양쪽 종방향으로 발생하기 때문에 줄눈을 기준으로 T자 모양을 하므로 T형 균열이라 일컫는다. 현장 조사에 의한 T자형 균열의 발생위치는 교통하중이 주로 지나가는 휠 패스와 무관하며 줄눈 단부에서 중앙까지 골고루 분포하고 있다. 또한 T자형 균열은 콘크리트 포장 포설 후 교통 개방이 이루어지기 전에 발견된 사례도 있어 교통하중이 아닌 슬래브 내부의 온도 및 습도 변화로 발생하는 켈링과 와핑으로 발생하는 슬래브 거동과 다웰바 시공 상태와 같은 외적 요인에 의해 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 T형 균열의 발생 원인을 파악하여 균열을 방지할 수 있는 방안을 마련하는 것이 중요시 되고 있다. 본 연구에서는 줄눈콘크리트 포장을 유한요소법을 이용하여 모델링하고 이러한 포장에 환경하중이 작용할 때 줄눈부에서의 응력 분포를 분석하여 T형 균열의 발생 가능 원인을 파악하였다.

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. 슬래브는 두 개의 모델을 개발하고 줄눈부를 다웰바로 연결하였다. 다웰바의 제원은 직경 3cm, 길이 60cm로 하였으며 각 슬래브에 50cm 간격으로 8개가 장착 되도록 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.

포장 슬래브를 지지하고 있는 하부층은 하나의 복합지층으로 가정하여 탄성지반으로 모델링하였다. 콘크리트 포장 슬래브는 3차원 고체 요소를 사용하여 모델링하였으며 다웰바가 위치한 줄눈부에서 슬래브의 종방향으로 30cm와 다웰바 부근의 요소들은 세밀하게 요소 망을 제작하여 해석의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다. 해석에서 사용된 주요 입력 값은 표 1에 나타내었다.

* 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사(E-mail: seongmin@khu.ac.kr) - 발표자

** 학생회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · 교신저자(E-mail: yowaa@khu.ac.kr)

*** 정회원 · 한국도로공사 도로교통 연구원, 책임연구원 · 공학박사(E-mail: seoyg89@ex.co.kr)

표 1. 해석에 사용된 입력값

변수	탄성계수(GPa)		프와송비		단위중량(kg/m ³)		하부지반강성 (MPa/m)	온도구배 (°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. 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. 본 연구에서는 환경하중을 1°C/cm의 수직 선형 온도구배로 작용시키기에 따른 슬래브의 응력 분포를 분석하였다.

3. 줄눈부 컬링 응력 분포 분석

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

포장 슬래브에 수직 온도구배가 발생하여 컬링을 하게 되면 각각의 슬래브는 동일한 온도구배를 가져 같은 컬링거동이 나타나게 되며 슬래브의 횡방향 응력 분포와 줄눈부 표면의 응력 분포는 그림 1과 같게 된다. 그림 1(a)에서 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.

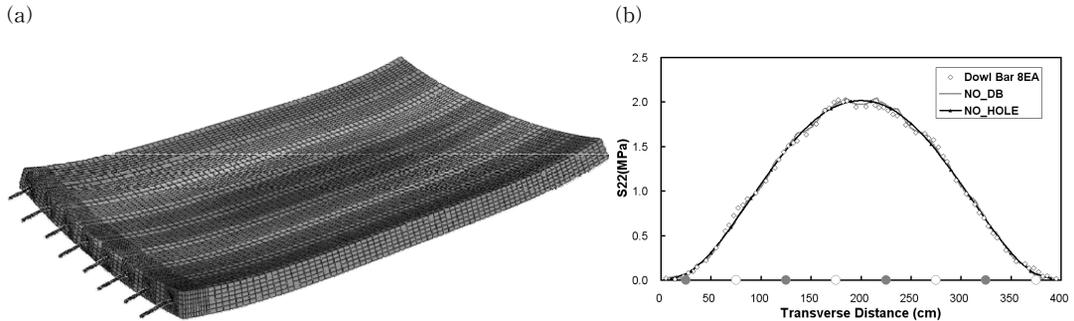


그림 1. 다웰바가 있는 경우 : (a)컬링 응력 분포, (b)줄눈부 표면 응력 분포

그림 1(b)에서는 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 간격을 따라 배치되어 있을 경우를 비교하였다. 그림에서 가로축은 슬래브의 횡

방향 길이(4m)이고 세로측은 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 응력 값들의 간격이 동일하지가 않다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 다웰바가 중간 깊이에 제대로 장착되어 있을 경우에는 슬래브가 컬링 할 때 다웰바의 유무에 따라 횡방향 응력 분포가 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

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 되지는 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.

4.1 하나의 다웰바가 위로 치우진 슬래브의 컬링 응력

다웰바가 제 위치를 벗어나 슬래브 위쪽으로 치우지게 될 경우의 거동을 알아보기 위해 그림 2에 나타난 바와 같이 슬래브 중앙 부분에 위치한 다웰바 하나를 수직방향으로 다른 다웰바에 비해 10cm 높게 위치하게 한 후 구조해석을 수행하였다. 슬래브의 컬링업과 컬링다운이 유사한 대칭 결과를 가져오기 때문에 컬링 업에 대해서만 고려하였다.

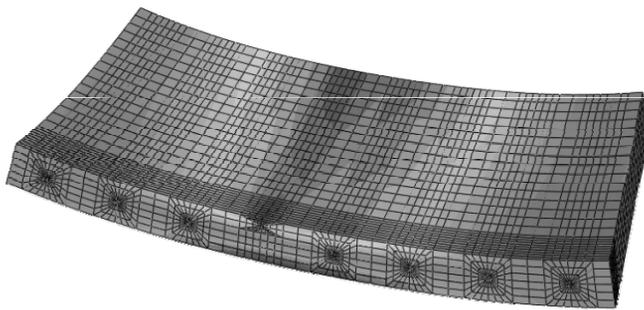


그림 2. 중앙부 다웰바가 위쪽에 배치된 경우 횡방향 응력 분포

그림에서 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 아랫방향으로, 구멍 안쪽에서는 위쪽으로 콘크리트를 누르게 된다. 이로 인해 다웰바 위쪽 슬래브가 휨 거동으로 인해 표면에 횡방향 인장응력이 집중적으로 발생하게 된다.

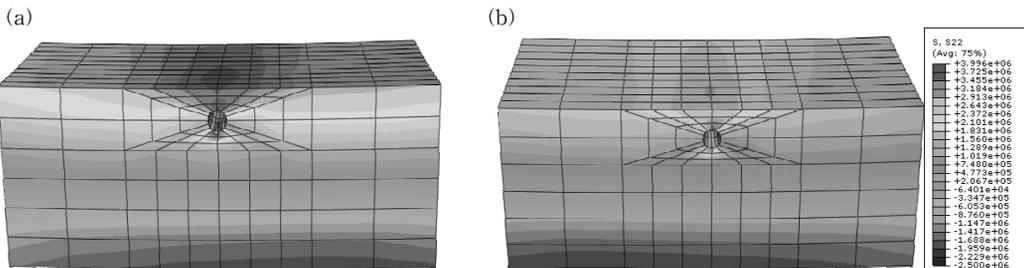


그림 3. 중앙부 다웰바가 위쪽에 배치된 경우 다웰바 부분 응력 분포 : (a)비부착, (b)완전 부착

그림 3(a)는 위로 치우쳐져 위치한 다웰바가 슬래브와 Frictionless 성질로 접촉된 경우의 응력 분포이다. 전체적으로는 슬래브 표면이 인장, 슬래브 바닥면이 압축응력을 받지만 다웰바 구멍 위쪽 표면으로 큰 인장 응력이 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 3(b)와 같다. 다웰바가 콘크리트 슬래브와 일체화된 경우에도 슬래브 표면에서 추가 인장응력이 발생하지만 다웰바 구멍 바로 위쪽에 그보다 더 큰 인장응력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경우에는 균열이 발생한다면 다웰바로부터 균열이 시작될 확률이 높게 된다.

그림 4는 슬래브 중앙의 다웰바(단부에서 175cm 떨어진 다웰바)와 바깥쪽 다웰바(단부에서 75cm 떨어진 다웰바)가 각각 슬래브 중간 깊이에서 10cm 위쪽에 배치된 경우의 응력분포이다. 다웰바로 연결된 서로 마주하는 두 개의 슬래브에서 줄눈부 표면에서의 횡방향 응력 발생을 분석하였다. 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.

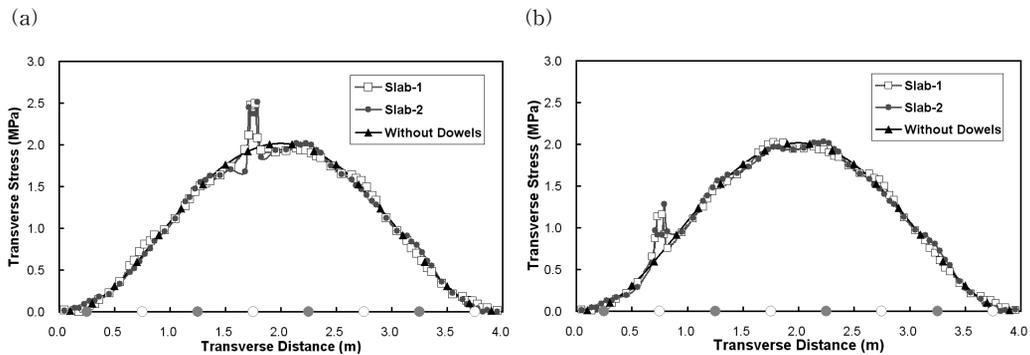


그림 4. 다웰바가 위쪽에 배치된 경우의 줄눈부 표면 횡방향 응력 분포
(a) 175cm, (b) 75cm 단부에서 떨어진 다웰바가 위쪽에 배치

슬래브 중앙의 다웰바가 위로 치우쳐진 위치에서 슬래브의 표면 인장응력이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 4와 같이 슬래브 중앙부 다웰바를 표면 쪽으로 치우치게 위치시켰을 경우의 응력 증가 폭이 가장 크게 발생하였고 슬래브 바깥쪽 다웰바를 표면 쪽으로 치우치게 위치시켰을 경우의 응력 증가 폭이 가장 작게 발생하였다. 또한 다웰바와 다웰바 구멍이 없는 경우와 비교했을 때 다웰바가 위로 치우진 곳을 제외하면 전체 응력 분포가 거의 같은 것을 알 수 있다. 그리고 다웰바의 수직 위치 변화에 의한 추가적인 응력 발생은 기존 슬래브의 킬링에 의한 발생 응력의 크기에 비례하여 발생하였다. 이러한 현상은 인접한 두 개의 슬래브 모두에서 발생하며 다웰바가 슬래브 중간 깊이에 설치된 경우에도 다웰바와 슬래브의 접촉 성질에 따라 같은 위치에서라도 슬래브에 발생하는 응력이 미소하나마 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

4.2 두개의 다웰바가 위로 치우진 슬래브의 킬링 응력

두 개의 다웰바가 제 위치에 있지 않고 슬래브의 표면 쪽으로 높게 배치되었을 경우에 슬래브의 응력 분포를 살펴보았다. 앞에서 한 개씩의 다웰바가 높게 배치되었을 경우중에서 응력 발생이 가장 큰 중앙의 다웰바를 기준으로 나머지 다웰바들과의 조합으로 하였다. 그림 5는 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 변화하지 않는다. 즉, 슬래브의 최대 인장응력은 슬래브의 중앙부에 위치한 다웰바가 슬래브 중간 깊이보다 높게 배치되었을 경우에 그 곳에서 발생하게 된다.

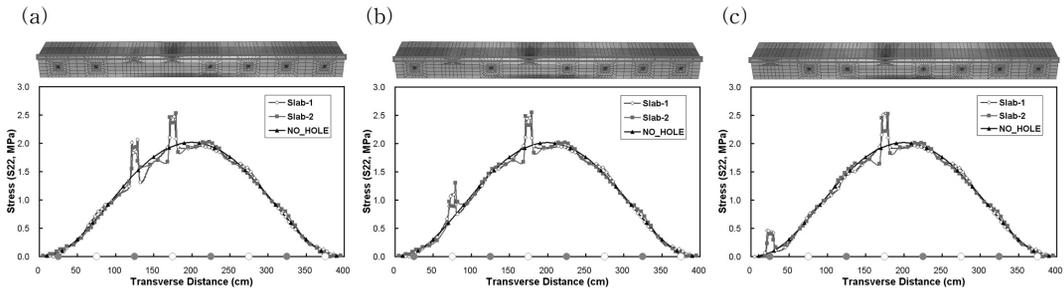


그림 5. 두 개의 다웰바가 위쪽에 배치된 경우의 횡방향 응력 분포
 (a) 175, 125cm, (b) 175, 75cm, (c) 175, 25cm 단부에서 떨어진 다웰바가 위쪽에 배치

5. 여러 인자의 영향

앞서 줄눈 콘크리트 포장 슬래브에서 다웰바가 위쪽에 배치된 경우에 발생하는 추가적인 횡방향 응력에 대해 살펴보았다. 이러한 추가적인 횡방향 응력에 영향을 미치는 인자 즉, 콘크리트의 탄성계수 및 열팽창계수, 하부지반 강성, 컬링을 일으키는 수직 온도구배 등에 대해 분석하였다. 분석을 위하여 추가 응력 발생이 가장 큰 슬래브 중앙의 다웰바를 위로 배치하였다. 그림 6은 여러 인자들의 영향으로 인해 발생하는 횡방향 최대응력의 분포를 나타낸 것이다. 앞의 해석에 사용한 여러 인자들의 기준값은 콘크리트 탄성계수 30GPa, 열팽창계수 0.00001/°C, 하부지반 강성 100MPa/m, 온도구배 1°C/cm이다.

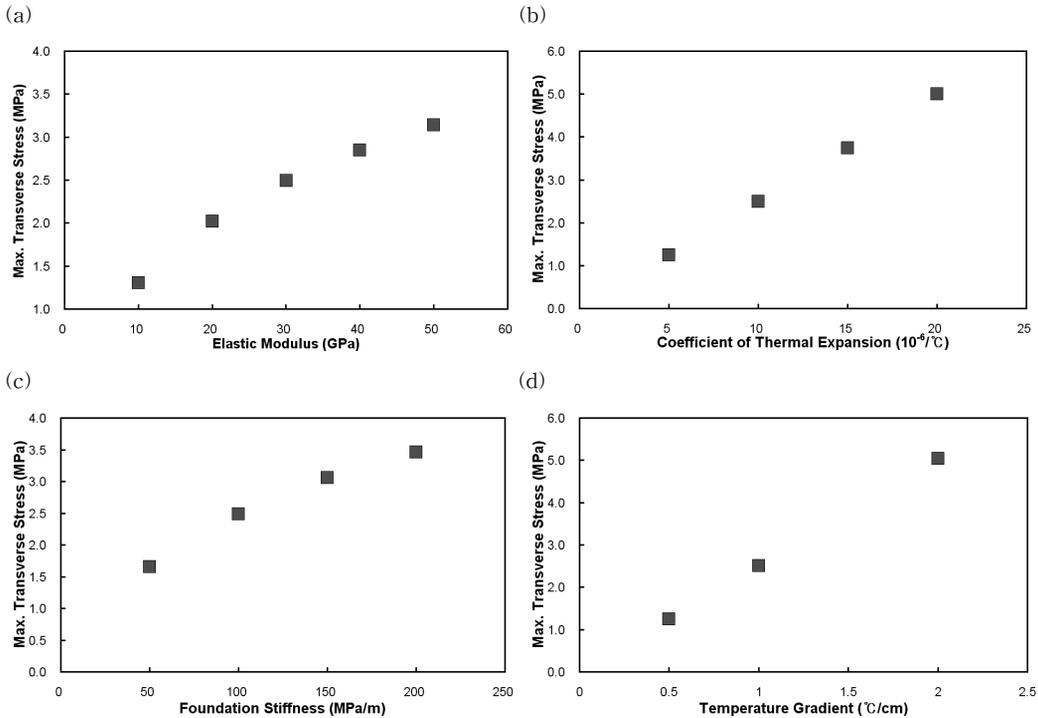


그림 6. 줄눈부 표면 횡방향 응력 발생에 영향을 미치는 인자
 (a) 콘크리트 탄성계수, (b) 콘크리트 열팽창계수, (c) 하부지반 강성, (d) 온도구배에 따른 최대응력분포

그림 6을 통해 줄눈 콘크리트 포장의 다웰바로 인한 줄눈부 표면의 추가적인 인장응력 발생은 콘크리트 탄성계수 및 열팽창 계수와 하부지반강성, 슬래브에 적용된 온도구배가 커질수록 정비례하여 증가 하는 것을 알 수 있으며 탄성계수와 하부지반 강성의 경우에는 그 증가폭이 미소하게 점점 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 다웰바를 사이에 두고 양쪽 슬래브에서 다웰바와의 접촉 성질에 따라 발생 응력 분포와 크기가 미소하게 차이를 나타내었다.

6. 결 론

줄눈콘크리트 포장의 줄눈부에서 발생하는 T형 균열의 원인을 파악하기 위한 연구로써 다웰바를 포함한 줄눈콘크리트 포장의 모델을 유한요소해석 프로그램을 이용하여 개발하였으며 이러한 모델에 환경하중을 재하 하여 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. 또한 이러한 현상으로 인한 응력 발생에 영향을 미치는 인자를 분석하였다. 이러한 연구를 통해 얻은 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 포장 슬래브가 환경하중에 의해 켤링 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 켤링을 제지하려 하기 때문에 종방향 응력을 변화시키지만, 횡방향으로는 다웰바로 연결된 두 슬래브가 같은 방향으로 켤링 거동을 하기 때문에 다웰바가 횡방향 켤링을 제지하려 하지는 않으며 따라서 횡방향 응력의 변화는 거의 없게 된다.
- 다웰바가 슬래브의 중립축인 중간 깊이에서 위쪽으로 치우쳐 배치되었을 경우에는 슬래브가 켤링 할 때 그 부근에서 횡방향 응력의 집중 현상이 발생한다. 그 영향은 슬래브 중앙부분에 위치한 다웰바 일수록 크게 나타난다.
- 슬래브와 다웰바의 접촉 성질에 따라 슬래브 켤링에 의한 응력 분포가 다소 다르게 나타난다. 다웰바가 슬래브 내에서 수평방향으로는 움직일 수 있을 경우에 슬래브 표면에 발생하는 인장응력이 다웰바와 슬래브가 완전히 부착되어 있을 경우에 발생하는 인장응력에 비해 다소 크게 된다.
- 다웰바의 수직 위치가 중간 깊이보다 높게 배치되었을 경우에, 다웰바가 슬래브 내에서 수평방향으로 움직일 수 있을 때에 슬래브가 켤링 하면 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.
- 다웰바가 슬래브 위쪽으로 배치되었을 때 발생하는 응력은 콘크리트의 탄성계수 및 열팽창계수, 하부지반 강성, 수직 온도구배, 다웰바가 슬래브 중립축으로부터 위쪽으로 배치된 거리가 클수록 크게 나타난다. 대부분의 경우 각 인자와 최대응력의 관계는 거의 정비례관계를 나타냈고, 양쪽 슬래브와 다웰바의 접촉 성질에 따라 양쪽 슬래브에 발생하는 최대응력은 미소하게 차이가 나타났다.

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.