



# 하부층 모델링에 따른 지반 위 콘크리트 슬래브의 환경하중 하의 컬링 거동 분석

## Effect of Underlying Layer Modeling on Curling Behavior of Concrete Slabs on Grade under Environmental Loads

김 성 민\*      심 재 수\*\*      윤 동 주\*\*\*  
Kim, Seong-Min      Shim, Jae Soo      Yoon, Dong Joo

### Abstract

This paper presents the differences in the analysis results according to the underlying layer modeling methods when analyzing the curling behaviors of the concrete slabs on grade under environmental loads. The models of the slab on grade system considered in this study included a three-dimensional (3D) model, a model composed of 3D slab and springs for underlying layers, and a model composed of 2D slab and springs for underlying layers. First, when the underlying layer consisted of one layer, the curling behaviors according to the different models were compared. Then, the underlying layers that consisted of two different materials and thicknesses were considered. The results of this study showed that the tensionless spring model for the underlying layer gave very accurate results when the underlying layer consisted of one layer. However, when the underlying layers consisted of two layers, the spring model for the underlying layers could overestimate the displacements and underestimate the maximum stress with a large elastic modulus of upper underlying layer, a small elastic modulus of under underlying layer, and thick underlying layers.

*keywords: concrete slab, underlying layer, curling, curl up, curl down, finite element*

### 요 지

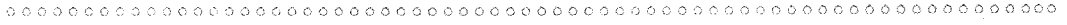
본 논문은 지반위에 놓인 콘크리트 슬래브가 환경하중에 의해 컬링 할 때의 거동을 해석할 경우에 하부층의 모델링 방법에 따른 해석 결과의 차이를 분석한 내용을 기술하였다. 지반위에 놓인 슬래브 시스템을 전체 3차원 모델, 3차원 슬래브와 하부층을 스프링으로 구성한 모델, 그리고 2차원 슬래브와 하부층을 스프링으로 구성한 모델 등으로 개발하여 해석을 수행하였다. 먼저 하부층이 단일 층으로 구성되어 있을 경우에 하부층 모델링 방법에 따른 컬링 거동의 차이를 분석하였다. 그리고 하부층이 서로 다른 재료와 두께로 구성되어있는 복층일 경우에 하부층 모델링에 따른 컬링 거동의 특성을 비교 분석하였다. 연구결과 하부층을 무인장 스프링으로 모델링 하면 하부층이 단층일 경우에는 일반적으로는 상당히 정확한 해석결과를 얻을 수 있으나, 하부층이 복층일 경우에는 상위하부층의 탄성계수가 클 때, 하위하부층의 탄성계수가 작을 때, 그리고 상위하부층과 하위하부층의 두께가 두꺼울 때는 컬링 시에 슬래브의 수직변위 차이를 과대평가하게 되며 최대응력은 과소평가하게 된다.

**핵심용어:** 콘크리트 슬래브, 하부층, 컬링, 컬업, 컬다운, 유한요소

\* 정희원, 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 조교수

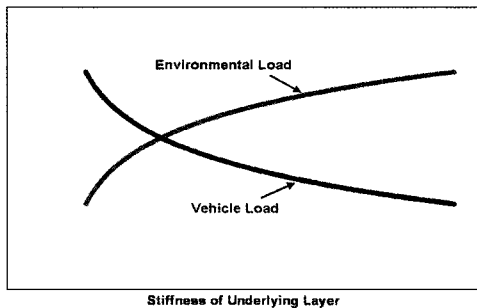
\*\* 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수

\*\*\* 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정



# 1. 서론

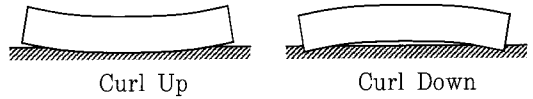
콘크리트 도로 포장 시스템은 상부의 콘크리트 슬래브와 이를 지지하는 하부층의 복합 구조물로 표현된다. 이러한 콘크리트 포장의 거동이라 할 수 있는 슬래브의 응력 및 변형 그리고 성능이라 할 수 있는 슬래브의 균열 등의 파손은 하부층의 구성에 따라 영향을 받게 된다. 콘크리트 포장에 작용하는 하중은 차량에 의한 하중과 온도 및 습도변화 등에 의한 환경하중으로 구분할 수 있다. 콘크리트 슬래브에 차륜하중이 작용할 때의 응력은 Westergaard 방정식(Westergaard, 1925)을 이용하여 대략적으로 구할 수 있으며 환경하중이 작용할 때의 응력은 Bradbury 방정식(Bradbury, 1938)을 이용하여 대략적으로 분석할 수 있다. 이러한 단순 공식을 이용하여 슬래브의 응력과 하부 지지층 강성과의 관계를 분석하면 <그림 1>과 같은 경향을 발견할 수 있다. 즉, 하부층의 지지력이 증가하면 차륜하중에 의한 응력은 감소하게 되지만 환경하중에 의한 응력은 반대로 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 따라서 하부층의 강성이 높다고 하여 콘크리트 포장의 성능을 항상 향상시킬 수 있는 것은 아니기 때문에 적절한 하부층의 설계가 필요시 되며 이에 따른 하부층의 적합한 해석 모델에 대한 이해가 필요시 된다.



<그림 1> 슬래브 응력과 하부층 강성과의 관계

환경하중에 의한 콘크리트 포장의 거동은 특히 콘크리트 포장의 초기 균열 등의 초기 거동을 지배하기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다 (Jeong and Zollinger, 2004; Kim et al., 1998; Nam et al., 2006). 콘크리트 포장은 낮에는 슬래브 상부의 온도가 하부의 온도보다 크기 때문에 슬래브 양단이 아

래 방향으로 휘게 되며 반대로 새벽에는 슬래브의 상부 온도가 하부 온도보다 작게 되기 때문에 슬래브 양단이 위로 솟게 된다. 이러한 환경하중에 의한 슬래브의 거동을 컬링현상이라 부른다. <그림 2>에 나타난 바와 같이 컬링은 슬래브의 휨 양상에 따라 컬업과 컬다운 현상으로 구분된다. 슬래브의 컬링 거동은 하부 지지층의 강성에 따라 영향을 받기 때문에 이에 대한 분석이 요구된다.



<그림 2> 슬래브 컬링 현상

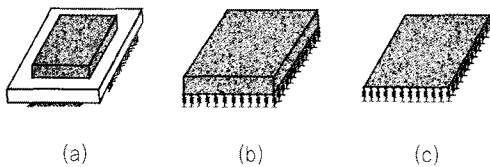
콘크리트 포장은 하부층의 강성이 콘크리트 슬래브의 강성에 비해 일반적으로 현저하게 작기 때문에 하부층 전체를 통합하여 복합 탄성지반으로 가정하여 구조해석을 수행하는 것이 일반적이다 (Huang, 1993; Westergaard, 1925). 이러한 탄성지반은 대체로 스프링을 이용하여 모델링을 한다(Kim et al., 2002, 2003; Liu et al., 2000; Westergaard, 1925). 따라서 이러한 모델링 방법이 하부층의 구성에 관계없이 항상 적절한 방법인지에 대한 분석이 필요시 된다.

본 연구의 목적은 콘크리트 도로 포장의 기본적인 시스템으로 볼 수 있는 지반위에 놓인 콘크리트 슬래브에 대하여 환경하중에 의해 슬래브가 컬링할 때 하부층의 영향을 분석하고 이러한 하부층의 모델링 방법에 따른 컬링 거동의 차이를 분석하는 것이다. 우선 하부층이 단일 재료로 구성되어 있을 경우에 하부층 모델링 방법에 따른 컬링 거동을 분석한 후, 하부층이 다른 재료의 복합적인 형태로 구성되었을 경우의 하부층 모델링에 따른 컬링 거동의 특성을 비교함으로써 모델링 방법에 의한 거동 예측 시 발생할 수 있는 오차에 대하여 분석을 수행하였다. 본 논문은 이러한 연구 내용 및 결과에 대하여 상세히 기술한다.

## 2. 단일 하부층 모델링에 따른 거동 분석

슬래브의 컬링 거동을 적절히 예측할 수 있는 구조해석 모델을 구성하고 하부층 모델링에 의한 거동을 분석

하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS (ABAQUS, 2007)를 사용하여 분석을 수행하였다. 슬래브 및 하부층의 모델링 방법으로는 <그림 3>에 보인 바와 같이 세 가지의 경우를 고려하였다. 첫 번째는 슬래브와 하부층 모두 3차원 고체 요소를 이용하여 구축한 모델이며, 두 번째는 슬래브는 3차원 고체 요소를 이용하여 모델링하고 하부층은 스프링 요소를 이용하여 모델링하는 것이다. 다른 하나는 슬래브를 2차원 쉘 요소를 이용하여 모델링하고 하부층을 스프링 요소로 모델링하는 것이다. 이러한 모델에서 슬래브와 하부층 간의 부착은 생기지 않도록 하여 실제 거동에 가깝도록 모델링을 하였다. 슬래브의 탄성계수는 30GPa 포아송비는 0.15를 사용하였으며 쉘링을 야기하는 온도구배는 1°C/cm이며 선형으로 가정하여 해석을 수행하였다.

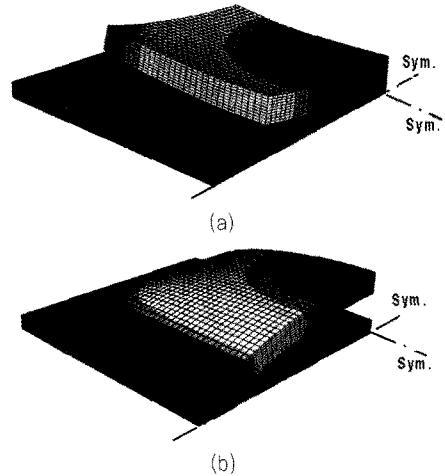


<그림 3> 슬래브 및 하부층 모델링: (a) 3D 모델, (b) 3D 슬래브+ 하부층 스프링, (c) 2D 슬래브+하부층 스프링

3차원 모델<그림 3>-(a)를 사용하여 슬래브의 쉘링 현상을 분석한 예를 <그림 4>에 나타내었다. 구조해석 시 슬래브가 온도 하중을 받을 때의 거동은 종횡 양방향으로 대칭이므로 슬래브의 1/4 만 모델링하였다. 본 연구에서는 슬래브의 크기를 실제 줄눈콘크리트 포장과 유사하며 가로 세로 비율에 따른 영향은 포함되지 않도록 가로 세로 6m 두께 0.3m로 하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브가 쉘링할 때 슬래브와 하부층 사이에 공간이 생길 수 있으며 하부층을 스프링으로 모델링할 경우에는 이러한 현상을 제대로 모사하기 위해서 무인장 스프링을 사용하였다.

하부층을 일반 스프링(NS: normal spring)으로 모델링 하였을 경우와 무인장 스프링(TLS: tensionless spring)으로 모델링 하였을 경우<그림 3>-(b) 이용에 슬래브가 쉘링 할 때의 해석 결과의 차이를 <그림 5>에서 보여준다. 그림에서 가로축은 대칭축인 슬래브의 중앙에서부터의 거리를 나타낸다. 일반 스프링이란 스프

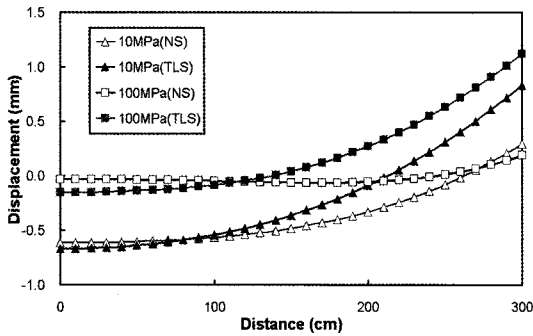
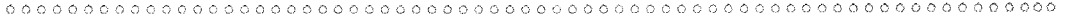
링이 항상 슬래브에 부착되어 있는 경우를 의미하며 무인장 스프링이란 슬래브가 스프링을 누를 때는 스프링이 슬래브에 부착이 되어있지만 슬래브가 들릴 때는 스프링이 슬래브와 부착이 되지 않도록 하여 스프링은 항상 압축력만을 지지하도록 모델링한 스프링이다. 그림에서 볼 수 있듯이 무인장 스프링을 사용하지 않고 일반 스프링을 사용하면 슬래브 중앙과 단부와의 수직변위 차이를 과소하게 예측하게 되며 응력은 과대하게 예측하게 되는 것을 알 수 있다. 이는 일반 스프링을 사용하면 슬래브가 쉘링 할 때 스프링이 슬래브에 부착되어 있기 때문에 슬래브가 위로 들리려는 움직임을 방해하기 때문이다.



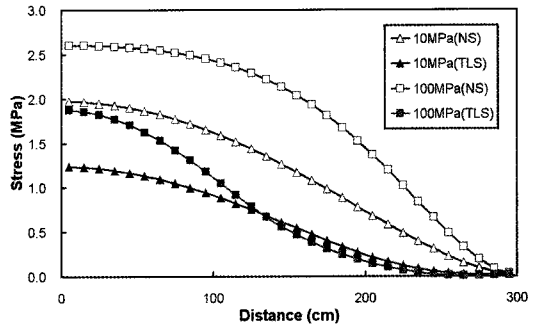
<그림 4> 모델 거동 형상: (a) 쉘링, (b) 컬다운

하부층의 강성에 따른 슬래브의 쉘링 거동을 분석하기 위하여 3차원 모델을 사용하여 하부층의 강성을 다르게 하여 해석을 수행하였으며 <그림 6>에서 결과를 보여 준다. 슬래브의 변위를 살펴보면 하부층의 강성이 증가하면 슬래브가 하부층에 파묻히는 정도가 감소하게 되며 슬래브의 중앙과 단부와의 수직변위의 차이가 감소하는 것을 알 수 있다.

이는 하부층의 강성이 증가할수록 쉘링 시 슬래브와 하부층과의 사이에 공간이 더 많이 발생하게 되며 하부층과 분리된 슬래브의 자중은 쉘링을 억제하기 때문에 일어나는 현상으로 분석된다. 슬래브의 응력은 하부층의 강성이 증가할수록 슬래브의 중앙 부분에서 증가하는 것을 알 수 있다.

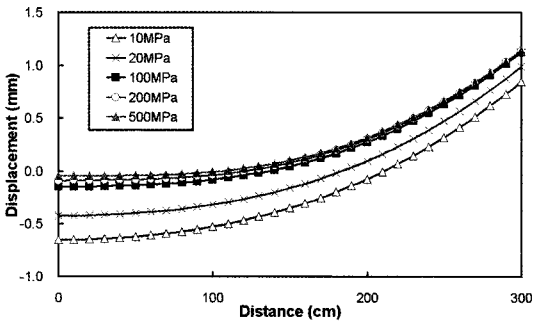


(a)

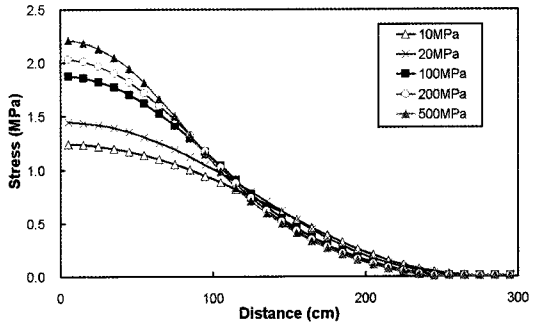


(b)

〈그림 5〉 무인장스프링과 일반스프링으로 구성된 모델의 거동 차이: (a) 변위, (b) 응력

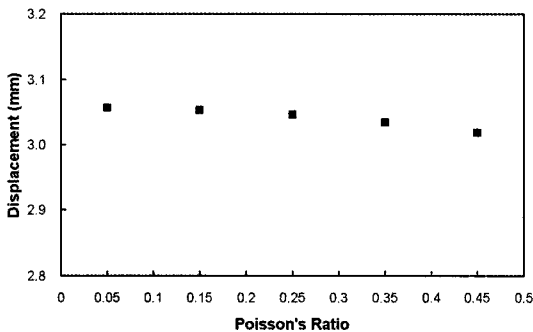


(a)

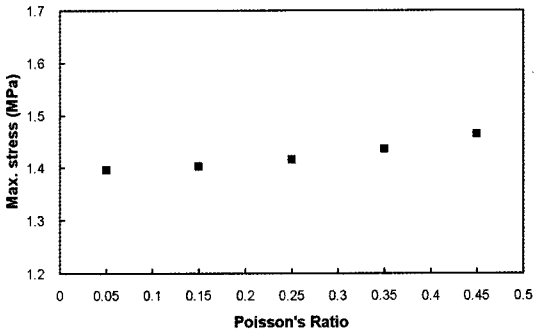


(b)

〈그림 6〉 하부층 강성에 따른 컬링 거동: (a) 변위, (b) 응력



(a)



(b)

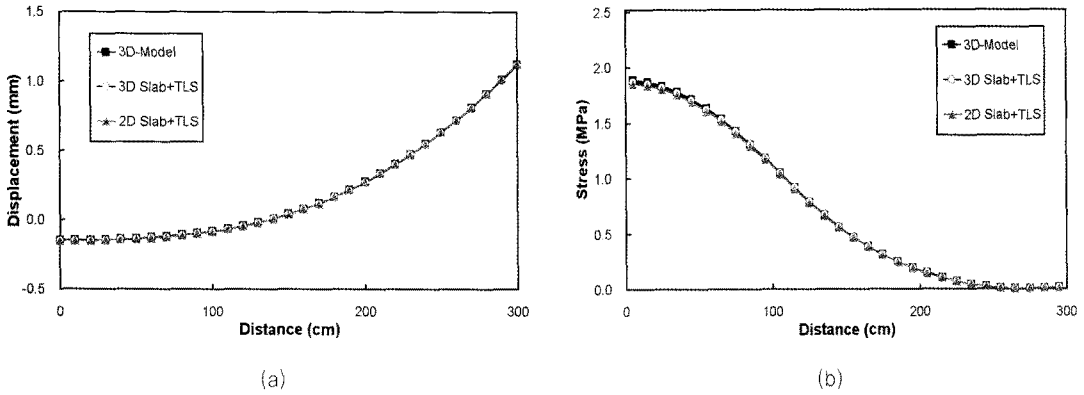
〈그림 7〉 포아송비의 영향: (a) 변위차이, (b) 응력

하부층의 포아송비가 슬래브의 컬링 거동에 미치는 영향을 하부층 두께 1.2m, 탄성계수 100MPa로 가정하여 분석한 결과를 〈그림 7〉에 나타내었다.

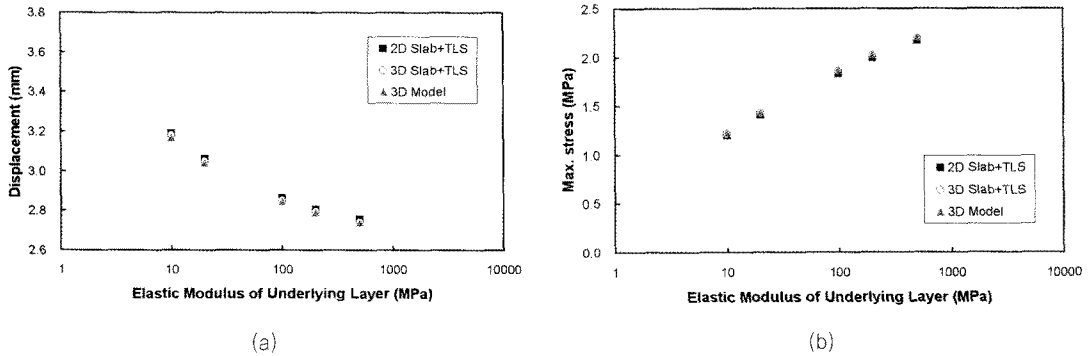
그림에서 수직축의 변위는 슬래브의 중앙과 단부와의 상대 변위인 변위차이를 나타낸다. 하부층의 포아송비

가 증가하면 변위차이가 미소하게 감소하며 슬래브 중앙에서의 최대 응력은 다소 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 이러한 하부층 포아송비의 영향은 매우 작은 것을 알 수 있다.

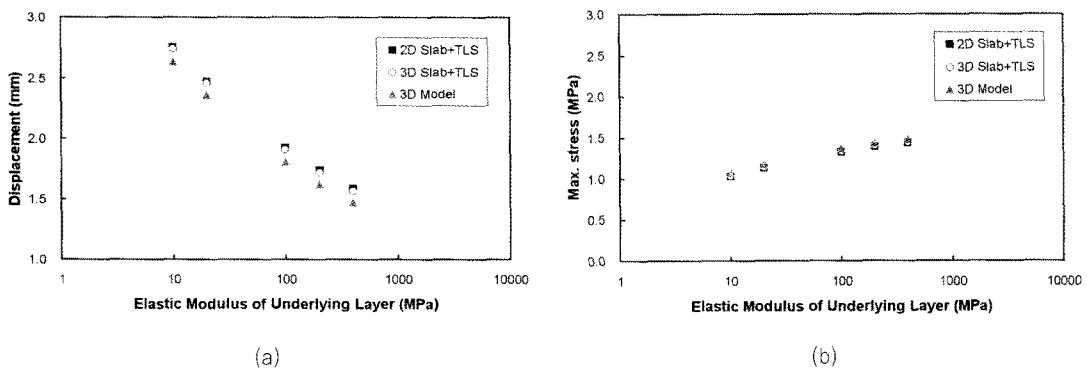
앞에서 설명한 서로 다른 모델을 사용하여 슬래브의



〈그림 8〉 서로 다른 모델에 의한 결과: (a) 변위, (b) 응력



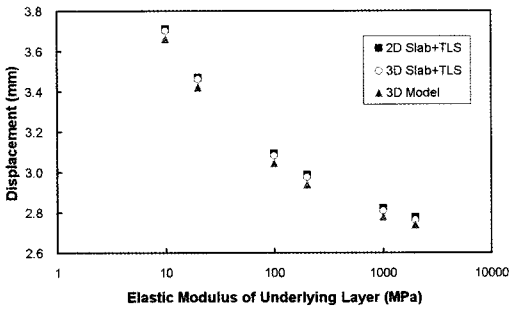
〈그림 9〉 하부층 탄성계수의 영향 (하부층 두께=0.2m): (a) 변위차이, (b) 응력



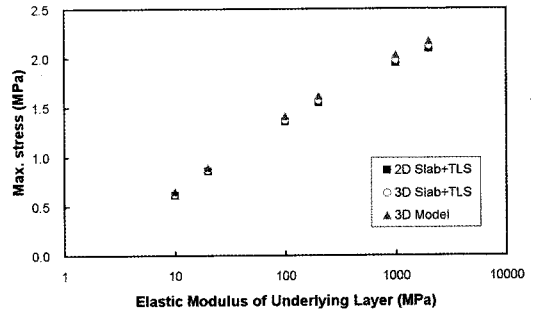
〈그림 10〉 툄다운 시 하부층 탄성계수의 영향 (하부층 두께=0.2m): (a) 변위차이, (b) 응력

킬링 거동을 분석하여 〈그림 8〉에 나타내었다. 하부층의 두께는 0.2m, 하부층의 탄성계수는 1000MPa, 하부층의 포아송비는 0.25를 사용하였다. 하부층을 스프링으로 모델링 할 때 스프링의 단위면적당 강성은 하부층

의 탄성계수를 하부층의 두께로 나누어서 구한 값을 사용하였다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브의 변위와 응력이 세 가지 다른 모델을 사용했을 때 거의 일치하는 결과가 도출되는 것을 알 수 있다. 따라서 슬래브를

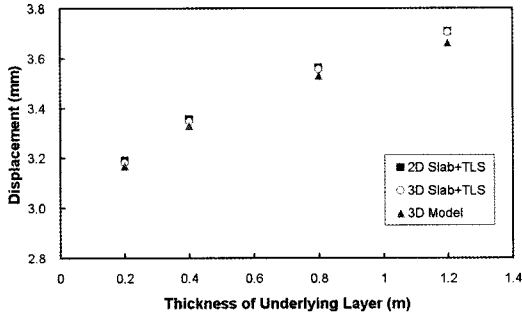


(a)

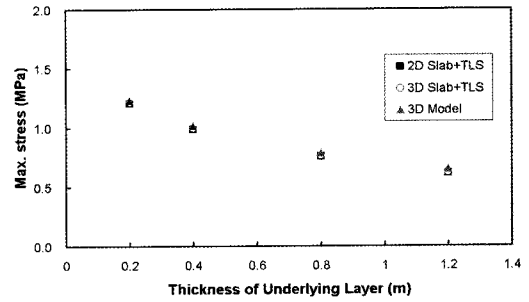


(b)

〈그림 11〉 하부층 탄성계수의 영향 (하부층 두께=1.2m): (a) 변위차이, (b) 응력

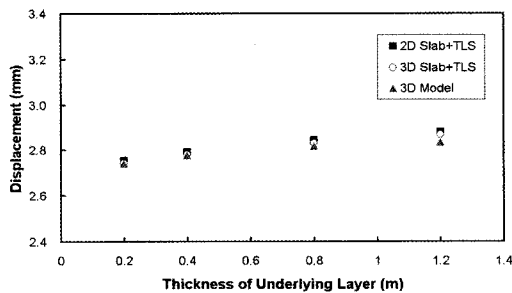


(a)

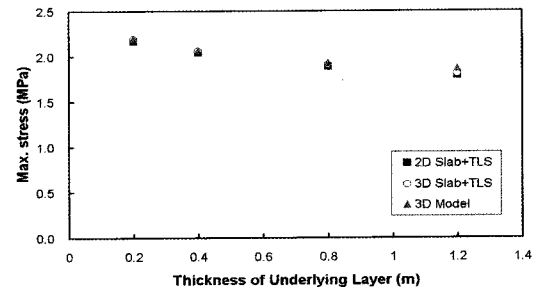


(b)

〈그림 12〉 하부층 두께의 영향 (하부층 탄성계수=10MPa): (a) 변위차이, (b) 응력



(a)



(b)

〈그림 13〉 하부층 두께의 영향 (하부층 탄성계수=500MPa): (a) 변위차이, (b) 응력

2차원 셀 요소를 이용하여 모델링하고 하부층을 무인장 스프링으로 모델링하는 것이 가장 경제적인 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 선형 온도구배를 사용하였는데 만약에 비선형 온도구배를 고려할 경우에는 셀 요소

를 이용할 때 수직 변위는 평형 선형 온도구배를 이용하여 구할 수 있지만 응력의 분포는 3차원 슬래브를 이용하여야 정확히 구할 수 있다.

각각의 모델에 의한 컬링 거동의 차이를 보다 정밀하



계 분석하기 위하여 하부층의 탄성계수와 두께를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 켈링 거동에서 변위에 대한 거동은 슬래브 중앙과 단부의 수직 변위 차이를 구하여 분석하였으며 응력은 슬래브 중앙에서의 최대 응력을 고려하였다. 우선 하부층의 두께가 0.2m로 얇을 경우에 하부층의 재료 성질인 탄성계수가 변화할 때의 켈링 거동을 <그림 9>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 2차원 슬래브와 하부층 스프링 요소로 구성된 모델의 결과는 3차원 슬래브와 스프링으로 구성된 모델의 결과와 완전히 일치하게 되며, 3차원 모델에서의 변위차이는 미소하나마 다른 모델에 비해 작은 것을 볼 수 있으나 응력은 다른 모델과 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 슬래브 하부층의 두께가 얇을 경우에는 하부층의 탄성계수에 관계없이 모든 모델이 사실상 같은 결과를 가져온다고 볼 수 있다. 슬래브가 켈다운 할 때도 <그림 10>에 보인 바와 같이 켈링 경우와 같은 결과를 보여준다고 할 수 있으나 3차원 모델에서의 변위차이가 작게 나타나는 현상은 더욱 뚜렷해지는 것을 알 수 있다.

하부층의 두께가 1.2m로 두꺼울 경우에 하부층의 탄성계수가 슬래브 켈링 거동에 미치는 영향을 분석하여 <그림 11>에 나타내었다. 하부층 두께가 얇을 경우와 마찬가지로 대체적인 거동은 서로 다른 모델 간에 매우 유사하다고 할 수 있으나, 3차원 모델에서의 변위차이가 다른 모델에 비해 다소 작게 발생하며 응력은 하부층 탄성계수가 증가할수록 미소하나마 다른 모델에 비해 커지는 것을 알 수 있다.

하부층의 탄성계수가 일정할 때 하부층의 두께를 변화시켜가며 켈링 거동을 분석하여 <그림 12>와 <그림 13>에 결과를 나타내었다. <그림 12>와 <그림 13>은 각각 하부층의 탄성계수가 매우 작을 경우와 클 경우이다. 하부층의 두께가 두꺼워질수록 지지 강성이 줄어들기 때문에 변위차이는 증가하며 응력은 감소하는 것을 볼 수 있다. 3차원 모델에서의 변위차이는 하부층의 두께가 두꺼워질수록 다른 모델에 비해 다소 감소하며 응력은 미소하나마 증가하는 것을 알 수 있다.

따라서 하부층이 단일 재료로 구성되어 있을 경우에는 하부층을 무인장 스프링으로 모델링 하여 분석하여도 사실상 3차원 해석의 결과와 거의 일치한다는 것을 알

수 있다. 이때 스프링의 단위면적당 강성은 하부층의 탄성계수를 두께로 나누어 구한 값을 사용하는 것이 적절하다. 더욱 세밀하게 분석하면 이러한 스프링을 이용한 하부층의 모델은 3차원 모델에 비해 켈링 시 미소하나마 슬래브 중앙과 단부의 변위차이를 크게 예측하여 결과적으로는 최대응력을 작게 예측하는 결과를 가져올 수 있다. 이러한 현상은 하부층의 탄성계수가 크며 하부층의 두께가 두꺼울 경우에 더욱 뚜렷해지게 된다.

### 3. 복층 하부층 모델링에 따른 거동 분석

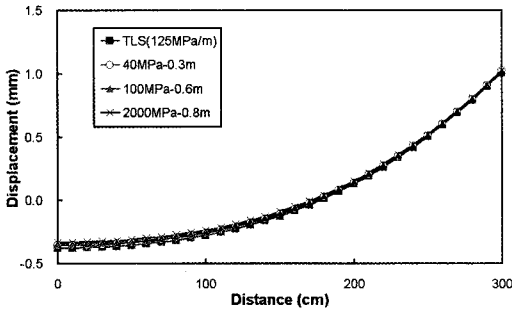
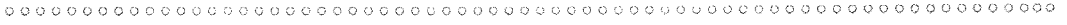
콘크리트 포장의 하부층은 일반적으로 여러 개의 층으로 구성되어 있다. 이러한 하부층의 지지력 또는 강성은 보통 복합 지지력을 산정하여 설계와 해석에서 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 각 하부층을 3차원 모델로 구성하였을 경우와 하나의 복합 하부층으로 고려하여 스프링 요소로 모델링 하였을 경우의 켈링 거동에 대하여 비교 분석을 하였다.

콘크리트 슬래브는 모두 3차원 요소를 사용하였으며 하부층은 두 개의 서로 다른 재료와 두께를 가지는 층으로 구성된 것으로 가정하여 모델링을 하였다.

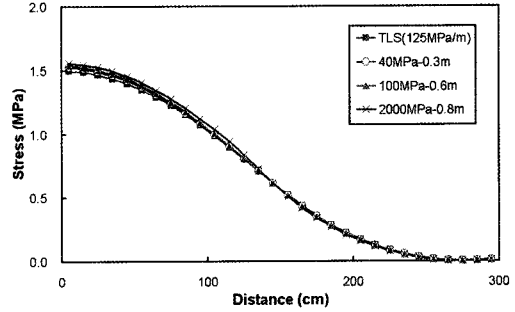
복합 하부층을 스프링으로 모델링 할 경우에 단위면적당 스프링 강성은 각 층의 탄성계수를 두께로 나누어서 구한 스프링 강성을 직렬로 연결했을 경우의 강성을 구하여 사용하였다.

먼저 복층 하부층의 복합 강성은 일정하지만 탄성계수와 두께 등의 구성이 다를 경우에 켈링 거동에 대하여 분석을 실시하였다. 상위하부층의 두께는 0.2m로 동일하지만 탄성계수가 다르게 하였으며 하위하부층은 탄성계수가 100MPa로 일정하지만 두께를 다르게 하여 결국 복합 강성은 125MPa/m로 같아지도록 하였다. 상위하부층과 하위하부층의 포아송비는 각각 0.25와 0.4로 가정하였다.

<그림 14>는 복합 강성을 스프링을 이용하여 모델링 한 경우와 각각의 하부층을 3차원으로 모델링 한 경우의 켈링 거동을 보여준다. 그림에서 3차원 하부층의 모델을 40MPa-0.3m 등으로 표시하였는데 앞의 숫자는 상위

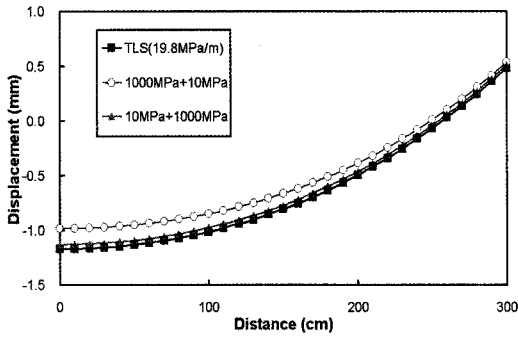


(a)

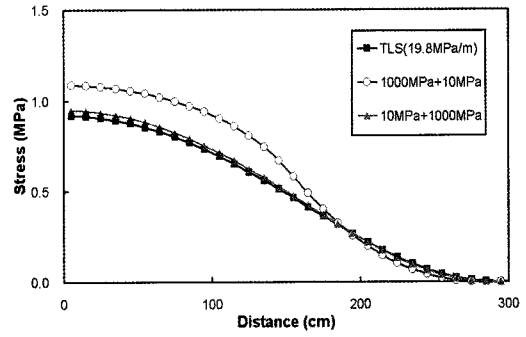


(b)

〈그림 14〉 복층 하부층일 경우 거동 (하부층 복합강성=125MPa/m): (a) 변위, (b) 응력

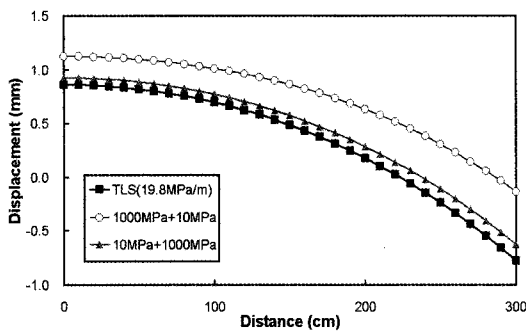


(a)

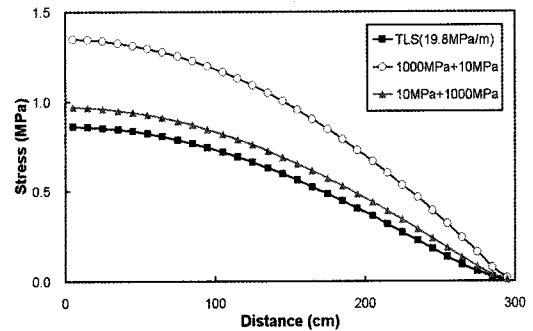


(b)

〈그림 15〉 복층 하부층일 경우 거동 (하부층 복합강성=19.8MPa/m): (a) 변위, (b) 응력



(a)



(b)

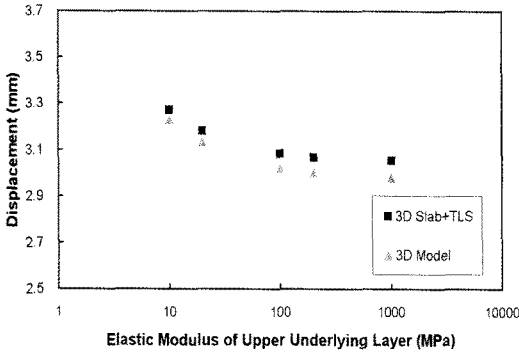
〈그림 16〉 복층 하부층일 경우 쉘다운 거동 (하부층 복합강성=19.8MPa/m): (a) 변위, (b) 응력

하부층의 탄성계수를 의미하며 뒤의 숫자는 하위하부층의 두께를 나타낸다. 즉, 3차원으로 하부층을 모델링 한 세 가지 경우 모두 복합 강성은 125MPa/m가 된다.

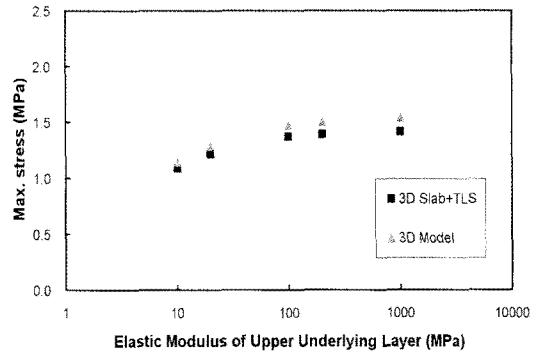
그림에서 보여주는 결과는 모델에 따라 쉘링 거동에

큰 차이가 없는 것으로 보이지만 세밀하게 살펴보면 스프링으로 하부층을 모델링 하였을 경우에 슬래브 중앙에서의 수직 처짐이 가장 크게 생기며 단부에서의 변위는 거의 일치하여 결국 슬래브 중앙과 단부의 변위차이가



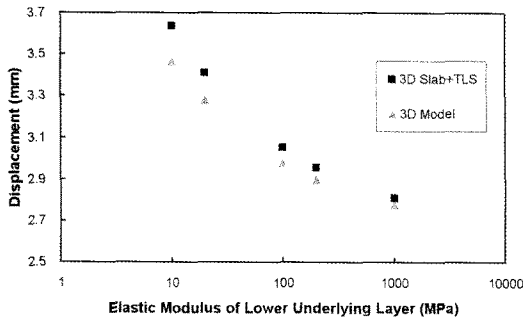


(a)

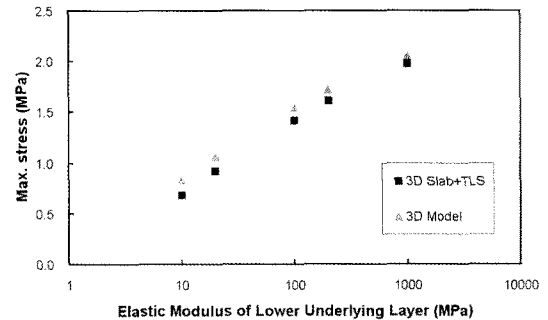


(b)

〈그림 17〉 상위하부층 탄성계수의 영향 (상위하부층 두께=0.2m, 하위하부층 두께=1m, 하위하부층 탄성계수=100MPa): (a) 변위차이, (b) 응력

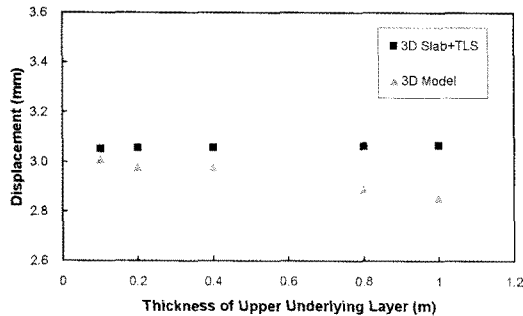


(a)

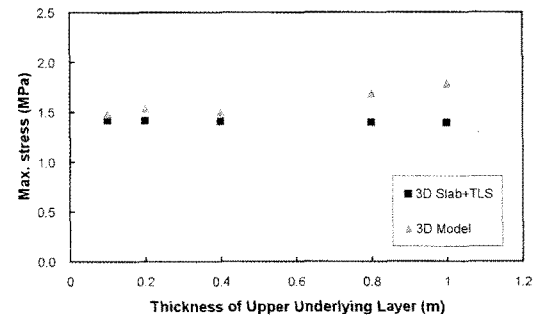


(b)

〈그림 18〉 하위하부층 탄성계수의 영향 (상위하부층 두께=0.2m, 하위하부층 두께=1m, 상위하부층 탄성계수=1000MPa): (a) 변위차이, (b) 응력



(a)



(b)

〈그림 19〉 상위하부층 두께의 영향 (하위하부층 두께=1m, 상위하부층 탄성계수=1000MPa, 하위하부층 탄성계수=100MPa): (a) 변위차이, (b) 응력

가장 크게 된다. 최대응력은 스프링 모델의 경우에서 가장 작은 것을 알 수 있다.

3차원 모델에서는 상위하부층의 탄성계수가 증가할

수록 미소하지만 수직 변위차이가 감소하며 최대응력은 증가하는 경향을 볼 수 있다.

하부층의 복합 강성이 〈그림 14〉의 경우 보다 작을



경우에 컬링 거동을 보다 더 정밀하게 살펴보기 위하여 두 개의 하부층의 두께를 0.5m씩으로 가정하고 탄성계수의 차이를 크게 두어 컬링 거동을 분석하여 <그림 15>에 결과를 나타내었다.

그림에서 볼 수 있듯이 상위하부층의 탄성계수가 클 때 슬래브 중앙과 단부와의 수직변위 차이는 감소하며 슬래브의 응력은 더 커지는 것을 뚜렷이 볼 수 있다.

슬래브가 쪼그라든 할 때는 <그림 16>에서와 같이 이러한 경향이 더욱 확연히 나타나며 결과적으로 복합 강성이 같은 하부층의 구성일지라도 슬래브의 컬링 거동은 상위하부층의 재료 성질에 영향을 받게 되며 따라서 복합 강성을 이용하여 스프링으로 하부층을 모델링 하였을 경우에는 슬래브의 최대 응력을 상당히 과소평가할 수 있게 된다.

하부층이 복층으로 구성되어 있을 경우에 하부층의 모델링 방법에 따른 컬링 거동의 차이를 보다 면밀히 분석하기 위하여 상위하부층 및 하위하부층의 탄성계수와 두께를 변화시켜 가며 분석을 수행하였다. 기준 모델은 상위하부층의 두께가 0.2m 탄성계수가 1,000MPa 그리고 하위하부층의 두께는 1m 탄성계수는 100MPa로 가정하였다.

먼저 상위하부층의 탄성계수가 변화할 때의 컬링 거동을 분석하여 <그림 17>에 나타내었다.

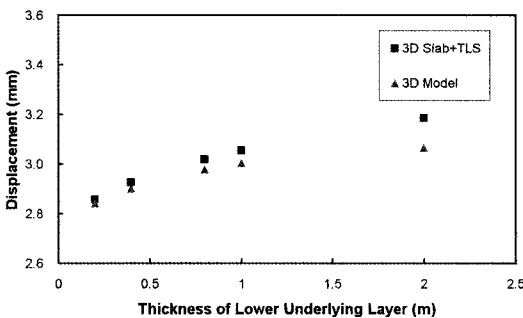
상위하부층의 탄성계수가 작을 때는 3차원 모델과 스프링을 이용한 모델의 컬링 거동이 매우 유사하나 상

위하부층의 탄성계수가 증가할수록 슬래브의 중앙과 단부의 변위차이는 스프링 모델에서 더 커지며 따라서 최대응력은 스프링 모델에서 더 작게 된다.

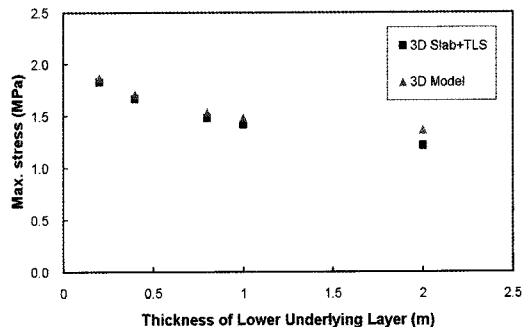
<그림 18>은 하위하부층의 탄성계수가 변화할 때 3차원 모델과 하부층을 스프링으로 구성한 모델의 컬링 거동을 비교 분석하여 보여준다. 상위하부층 탄성계수의 영향과는 반대로 하위하부층의 탄성계수가 클 때는 두 가지의 모델이 거의 같은 컬링 거동을 보여주지만 하위하부층의 탄성계수가 감소할수록 두 모델의 컬링 거동 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 경우에도 스프링으로 하부층을 구성한 모델의 변위차이가 더 크며 최대응력은 더 작아지게 된다.

상위하부층의 두께에 대한 영향은 <그림 19>에 나타내었다. 하부층을 스프링으로 모델링하면 상위하부층의 두께는 컬링 거동에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되지만 3차원 모델을 사용하면 상위하부층의 두께가 증가할수록 변위차이는 감소하며 최대응력은 증가하는 것을 볼 수 있다. 두 모델간의 차이도 상위하부층의 두께가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다.

하위하부층의 두께가 달라질 때 두 모델 간의 컬링 거동을 분석하여 <그림 20>에서 보여준다. 하부층을 스프링으로 모델링 하였을 경우에는 3차원 모델에 비해 변위차이는 더 크게 예측하며 최대응력은 더 작게 예측하게 된다. 이러한 경향은 하위하부층의 두께가 얇을 때는 미소하나 두께가 증가할수록 매우 뚜렷해진다.



(a)



(b)

<그림 20> 하위하부층 두께의 영향 (상위하부층 두께=0.2m, 상위하부층 탄성계수=1000MPa, 하위하부층 탄성계수=100MPa): (a) 변위차이, (b) 응력



하부층이 여러 개의 층으로 구성되어 있을 경우에는 하부층의 복합 강성을 이용하여 하부층을 스프링으로 모델링하면 하부층을 모두 3차원으로 모델링 하였을 경우에 비해 슬래브의 수직변위를 과대평가할 수 있으며 최대응력은 과소평가할 수 있다. 이러한 경향은 상위하부층의 탄성계수가 클 때, 하위하부층의 탄성계수가 작을 때, 그리고 상위하부층과 하위하부층의 두께가 두꺼울 때 매우 뚜렷해진다. 따라서 이러한 경우에는 복합강성을 이용한 스프링으로 하부층을 모델링 하는 것 보다는 3차원으로 모델링 하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 지반위에 놓인 콘크리트 슬래브가 환경하중에 의해 컬링 할 때의 거동을 구조해석을 통해 분석할 경우에 하부층의 모델링 방법에 따른 거동의 차이를 분석하기 위하여 수행되었다. 지반위에 놓인 슬래브 시스템은 3차원 모델, 3차원 슬래브와 하부층을 스프링으로 구성한 모델, 그리고 2차원 슬래브와 하부층을 스프링으로 구성한 모델을 개발하여 해석을 수행하였다. 먼저 하부층이 단일 재료로 구성되어 있을 경우에 하부층 모델링 방법에 따른 컬링 거동의 차이를 분석하였으며, 그 후 하부층이 복층이며 서로 다른 재료와 두께로 구성되어 있을 경우에 하부층 모델링에 따른 컬링 거동의 특성을 비교 분석하였으며 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 슬래브가 컬링 할 때 하부층의 강성이 증가하면 슬래브의 중앙과 단부의 수직변위 차이가 감소하며 최대응력은 증가하게 된다.
- 하부층의 포아송비가 증가하면 컬링 시에 수직변위 차이가 감소하며 최대응력은 증가하게 되지만 그 영향은 매우 미소하다.
- 지반위의 슬래브가 선형 수직 온도구배를 받을 때 3차원 슬래브와 스프링 하부층으로 구성한 모델의 컬링 거동은 2차원 슬래브와 스프링 하부층으로 구성한 모델의 거동과 일치하게 된다.
- 하부층이 단일 재료로 구성되어 있을 경우에는 하부

층을 무인장 스프링으로 모델링 하여 컬링 거동을 분석하면 3차원 하부층 모델을 이용한 해석 결과에 비해 미소하나 수직변위 차이를 크게 예측하며 최대응력은 작게 예측한다. 이와 같은 현상은 하부층의 탄성계수가 클 때와 하부층의 두께가 두꺼울 경우에 뚜렷해지지만 이러한 차이는 무시할 정도로 작기 때문에 하부층을 무인장 스프링으로 단순화하여 모델링하여도 해석 결과의 정확도가 매우 높다고 할 수 있다.

- 하부층이 복층으로 구성되어 있을 경우에는 복합강성이 일정할지라도 상위하부층의 재료 성질에 따라 컬링 거동이 영향을 받게 된다.
- 하부층의 복합 강성을 이용하여 하부층을 스프링으로 모델링하면 하부층을 모두 3차원으로 모델링 하였을 경우에 비해 슬래브의 수직변위를 과대평가할 수 있으며 최대응력은 과소평가할 수 있다. 이러한 현상은 상위하부층의 탄성계수가 클 때, 하위하부층의 탄성계수가 작을 때, 그리고 상위하부층과 하위하부층의 두께가 두꺼울 때 더욱 현저하게 나타나기 때문에 이러한 경우에는 복합강성을 이용한 스프링으로 하부층을 모델링 하면 최대응력을 상당히 과소평가하게 된다.

#### 참 고 문 헌

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

Bradbury, R. D. (1938). *Reinforced Concrete Pavements*, Wire Reinforcement Institute, Washington, D.C.

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

Jeong, J. H. and Zollinger, D. Z. (2004). "Early-age curling and warping behavior: Insights from a fully instrumented test-slab system," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No.1896, National Research Council, pp. 66-74.

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. (2002). "Dynamic Stress Response of Concrete Pavements to Moving Tandem-Axle Loads," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No. 1809, National Research Council, pp.32-41.
- 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.
- Liu, C., McCullough, B. F., and Oey, H. S. (2000). "Response of Rigid Pavements due to Vehicle-Road Interaction," *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 3, pp.237-242.
- Nam, J. H., Kim, S. M. and Won, M. C. (2006). "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*, No.1947, National Research Council, pp. 79-90.
- Westergaard, H. M. (1925). "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis," *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25-35.

접 수 일 : 2008. 7. 28  
심 사 일 : 2008. 7. 30  
심사완료일 : 2008. 8. 13