



모서리부 차량 다축하중에 의한 콘크리트 도로 포장의 응력 분포 특성

Stress Distribution of Concrete Pavements under Multi-Axle Vehicle Loads Applied at Pavement Edges

김 성 민* 조 병 휘** 이 상 훈***
 Kim, Seong Min Cho, Byoung Hooi Lee, Sang Hoon

Abstract

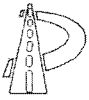
The stresses in concrete pavement systems are larger when vehicle loads are applied at pavement edges, and these large stresses significantly affect the behavior and performance of pavements. Therefore, in this study, the stress distribution and the critical stresses in concrete pavements were investigated using a finite element model when dual-wheel single-, tandem-, and tridem-axle loads were applied at pavement edges. First, the stress distribution along the longitudinal and transverse directions was analyzed, and then the effects of slab thickness, concrete elastic modulus, and foundation stiffness on the stress distribution were investigated. The effect of the tire contact pressure related to the tire print area was also studied. The location of the critical stress occurrence in concrete pavements was finally investigated. From this study, it was found that the critical concrete stress due to edge loads became larger as the concrete elastic modulus increased, the slab thickness increased, and the foundation stiffness decreased. The effect of the tire contact pressure on the critical stress was clear as the slab thickness became smaller. The critical stress location in the transverse direction was independent of the concrete elastic modulus and the foundation stiffness; however, it moved into the interior as the slab thickness increased. The critical stress location in the longitudinal direction was under the axle for single- and tandem-axle loads, but for tridem-axle loads, it tended to move under the middle axle from the outer axles as the concrete elastic modulus and/or slab thickness increased and the foundation stiffness decreased.

Keywords: concrete pavement, multi-axle loads, edge, stress, contact pressure

요 지

콘크리트 포장은 모서리(Edge) 부분에 차량 하중이 작용할 때 큰 응력을 받게 되며 이러한 응력은 포장의 거동 및 장기 공용성에 영향을 미친다. 따라서 본 연구는 콘크리트 포장의 유한요소 모델을 사용하여 콘크리트 포장의 모서리 부분에 복륜 단축, 복륜 복축, 복륜 삼축 등 복륜 다축 하중의 한쪽 차륜이 접하여 작용할 때 포장의 응력 분포와 최대 응력을 분석하기 위하여 수행되었다. 우선 종방향과 횡방향을 따라 응력의 분포 형태를 분석하였고, 콘크리트 슬래브의 두께, 콘크리트 탄성계수, 지반 탄성계수 등이 응력 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 하중 접지면적과 연관

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 교수
 ** 경희대학교 토목공학과 석사과정
 *** GS건설 기술연구소 선임연구원



된 하중 접지압의 변화에 따른 콘크리트 포장의 응력 분포도 분석하였다. 그리고 콘크리트 포장에서 최대 응력이 어느 위치에서 발생하는지에 대한 연구도 수행하였다. 연구 결과 모서리부 하중에 의한 콘크리트 포장의 최대 응력은 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리고 지반 탄성계수가 감소할수록 증가하였다. 하중 접지압의 변화에 따른 최대 응력은 콘크리트 탄성계수와 지반 탄성계수의 크기에 따라서는 거의 일정한 변화를 보였으나 슬래브 두께는 얇아질수록 접지압에 따른 최대 응력의 변화가 뚜렷이 보였다. 최대 응력이 생기는 횡방향의 위치는 콘크리트 탄성계수와 지반 탄성계수에는 무관하게 일정하다. 하지만 슬래브의 두께는 두꺼워질수록 최대 응력의 횡방향 상 위치가 모서리에서 내부로 이동한다. 종방향의 최대 응력이 생기는 위치는 단축과 복축 하중일 경우는 축의 위치이며, 삼축 하중일 경우에는 콘크리트 탄성계수나 슬래브 두께가 증가하던지 또는 지반 탄성계수가 감소하면 최대 응력이 생기는 종방향 상 위치가 양쪽 바깥측에서 중간축의 위치로 바뀌게 된다.

핵심용어: 콘크리트포장, 다축하중, 모서리, 응력, 접지압

1. 서론

콘크리트 도로 포장에 차량하중이 작용할 때 포장의 어느 위치에 하중이 작용하느냐에 따라 포장의 응력 상태가 달라진다. 포장의 내부 중앙부(Interior)에 하중이 작용하였을 때에 비해 포장의 모서리(Edge) 부분 또는 코너(Corner) 부분에 하중이 가하여 질 때 포장이 받는 응력은 더욱 커지게 된다(Westergaard, 1925). 콘크리트 도로 포장 중에 연속철근콘크리트 포장은 횡방향 균열에서의 하중전달율이 매우 높으므로(김성민 외, 2006) 코너로 가정할 부분이 없으며 따라서 포장이 차량하중에 의해 가장 큰 응력을 받을 경우는 한쪽의 바퀴가 모서리 부분에 작용할 때로 생각할 수 있다. 줄눈콘크리트 포장은 줄눈부에서의 하중전달이 거의 일어나지 않을 경우 줄눈과 모서리가 만나는 부분을 코너로 가정할 수 있으나 한쪽의 바퀴가 이러한 코너에 작용할 때의 응력 상태는 슬래브의 상부가 인장을 받는 Top-Down 균열을 유도할 수 있는 상태로 일반적인 차량하중에 의한 응력 상태인 슬래브 하부의 인장 응력 발생과는 다른 메커니즘으로 분리할 수 있다. 또한 실제로는 줄눈부에서 하중전달이 상당히 크게 일어나고 차량하중은 단일 하중이 아닌 축하중이기 때문에 한쪽 바퀴가 코너 부분에 작용할 때 상부의 인장 응력은 모서리 부분에 하중이 작용할 때의 슬래브 하부의 인장 응력에 비해 작은 값을 가지게 된다. 따라

서 차량하중이 모서리부에 작용할 때의 콘크리트 포장의 응력 분포를 폭넓게 이해하는 것은 차량하중에 의한 콘크리트 포장의 극한 응력을 이해하는데 있어서 매우 중요한 과정으로 볼 수 있다.

콘크리트 포장의 차량하중에 의한 응력 분포는 Westergaard 방정식(1925) 같은 한 개의 바퀴에 의한 응력 분포로 분석하기에는 적합하지 않다. 왜냐하면 콘크리트 포장은 강성이 높기 때문에 하나의 하중에 의한 응력의 분포가 상당한 거리까지 영향을 미치며 이러한 범위 내에 다른 바퀴에 의한 하중이 작용하므로 이러한 여러 개의 하중에 의한 응력의 합이 콘크리트 포장이 받는 응력이 되기 때문이다. 현재 대부분의 중차량은 복륜(dual wheel)을 사용하고 있으며 축 수는 하나에서 세 개 까지가 일반적이다. 따라서 콘크리트 포장이 이러한 복륜 단축(single axle), 복축(tandem axle), 또는 삼축(tridem axle) 하중을 받을 때의 응력 분포 및 최대 응력이 생기는 위치를 분석하여 차량의 다축 하중에 대한 콘크리트 포장의 거동을 정확히 파악하는 것이 중요시 된다.

본 논문에서는 콘크리트 도로 포장의 모서리부에 복륜 단축, 복륜 복축, 복륜 삼축 등 복륜 다축 하중의 한쪽 차륜이 접하여 작용할 때 콘크리트 포장의 응력 분포를 분석하고 이러한 응력 분포가 포장의 두께, 재료의 성질, 또는 하부층의 지지력에 따라 어떠한 특성을 갖는지를 유한요소법을 이용한 콘크리트



포장의 수치해석 모델을 사용하여 분석하였다. 또한 차량 바퀴의 공기압과 하중의 크기에 연관된 접지면적 변화에 따른 콘크리트 포장의 응력 분포 변화 및 최대 응력이 생기는 위치 등에 대한 분석도 수행하여 콘크리트 포장의 모서리부에 다축 차량 하중이 작용할 때의 응력 분포를 폭넓게 이해할 수 있는 연구를 수행하였다.

2. 수치해석

일반적으로 콘크리트 포장의 수치해석은 그림 1에 나타낸 바와 같은 탄성지반위에 놓인 판으로 가정한 모델을 이용하여 수행하며 (Zaman et al., 1991; Liu et al., 2000; Kim et al., 2002; Kim and McCullough, 2003) 본 연구에서도 이러한 모델을 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 모서리 부분을 제외한 다른 부분은 충분히 넓어서 경계영역의 상태에 따라서 하중에 의한 응력 분포가 영향을 받지 않도록 하였다. 유한요소해석을 위하여 콘크리트 슬래브는 평면셀 요소를 이용하여 모델링하였으며 탄성지반은 스프링 요소를 이용하여 구축하였다. 유한요소해석은 범용 프로그램인 ABAQUS(ABAQUS, 2005)를 이용하였다. 콘크리트 슬래브를 구성하는 유한요소는 가로와 세로가 2cm인 정사각형 요소를 사용하였으며 해석결과 수렴실험(convergence test)

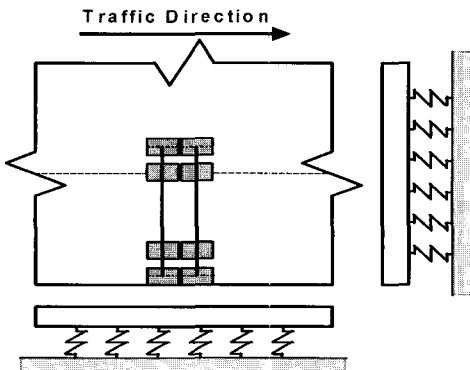


그림 1. 콘크리트 포장 모델 및 모서리부 하중

을 통하여 결과의 정밀도를 검증하였다.

차량하중은 그림 2에 보인 바와 같이 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 하중을 고려하였다. 좌우측 바퀴 간의 거리와 축간 거리 등은 전형적인 덤프트럭을 기준으로 결정하였다. 바퀴 접지면적은 바퀴의 폭이 일정하다고 가정하고 하중과 바퀴의 공기압에 의해 결정되는 식 (1)에 나타난 종방향의 접지 길이를 이용하여 정의할 수 있다.

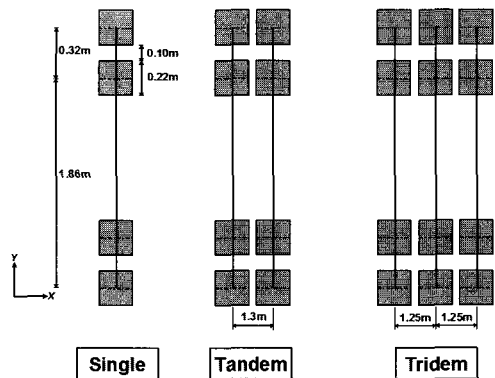
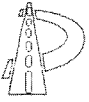


그림 2. 단축 및 다축 하중

$$L = P / (TP \times T) \quad (1)$$

여기서 P는 하나의 바퀴에 걸리는 하중의 크기이며, TP는 바퀴의 공기압이고, L과 T는 각각 종방향과 횡방향의 바퀴의 접지 길이이다. 따라서 식 (1)에서 나타낸 바와 같이 횡방향의 접지 길이인 T가 일정하다고 하면 종방향의 접지 길이인 L은 하중의 크기인 P가 커지거나 또는 바퀴 공기압인 TP가 감소하면 커지는 것을 알 수 있다.

수치해석에서 고려한 변수 및 각 변수의 범위는 표 1에 나타내었다. 각 변수의 값 중에서 중간 값을 대표 값으로 정의하였으며 해석결과 분석시 특별한 언급이 없으면 이러한 대표 값을 사용하여 해석한 결과를 나타내는 것이다. 그림 3은 포장의 모서리 부분에 복륵 복축 하중이 작용할 때의 콘크리트 포장 유한요소 모델의 변형된 모습과 종방향 응력 분포를 보여준다. 변형된 모습과 응력 분포는 두 축의 중간 위치



를 기준으로 대칭이므로 그림에서는 반 만을 보여주고 있다. 축하중을 받을 때 콘크리트 포장의 종방향 응력은 횡방향 응력보다 크기 때문에 본 연구에서는 종방향 응력 분포를 분석하였으며 특별한 설명이 없는 한 본 논문에서 응력이라 함은 종방향 응력을 표현하는 것이다.

표 1. 수치해석에 사용된 변수 값

Properties	Values
Slab thickness (m)	0.15, 0.225, (0.3), 0.375, 0.45
Concrete elastic modulus (GPa)	10, 20, (30), 40, 50
Foundation stiffness (MN/m ²)	20, 65, (110), 155, 200
Tire contact pressure (MPa)	1.422, (0.711), 0.474, 0.356
Poisson's ratio	0.15
Load magnitude (kN/wheel)	12.5

* 괄호안의 값은 대표 값 (Control value)

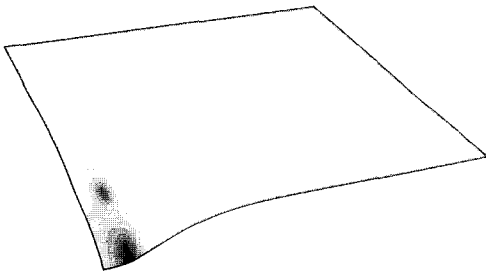


그림 3. 복축 하중에 의한 변형 모양 및 응력 분포

3. 응력 분포

단축, 복축, 삼축 하중이 모서리 부분에 작용할 때 최대 응력이 생기는 위치에서 종방향을 따라 종방향 응력 분포를 살펴보면 그림 4에 나타낸 바와 같다. 그림에서 가로 축의 종방향 거리(longitudinal distance) 0은 축하중의 중간 위치를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 응력은 축하중의 중간을 기준으로 대칭이며 축수가 많아지면 최대 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 각 축에 걸

리는 하중의 크기를 일정하게 하였으므로(즉, 단축의 하중이 50kN이면 복축의 전체 하중은 100kN) 축 수가 많아져서 전체 하중이 증가하더라도 콘크리트 포장이 받는 최대 응력은 감소한다는 것을 알 수 있다. 하지만 축하중 주변의 부응력(negative stress)은 반대로 축 수가 많아질수록 증가하는 현상이 있음을 알 수 있다.

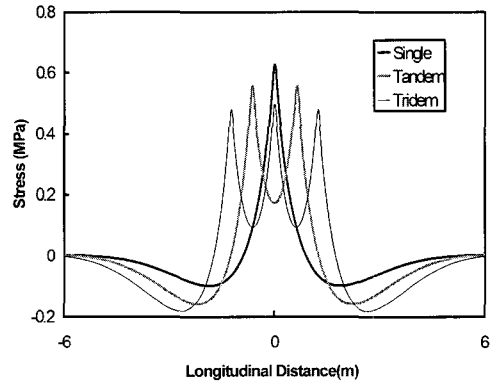


그림 4. 단축 및 다축 하중에 의한 종방향 상의 종방향 응력 분포

포장의 횡방향을 따라서 종방향 응력 분포를 살펴보면 그림 5와 같다. 그림에서 가로 축의 횡방향 거리(transverse distance) 0은 모서리 위치를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 각 바퀴의 위치에서 부분적으로 응력이 증가하는 것을 알 수 있으며 최대 응력은 모서리 부분으로부터 첫 번째 바퀴의 아래에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 모서리 부분의 응력이 안쪽 바퀴 위치의 응력보다 훨씬 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

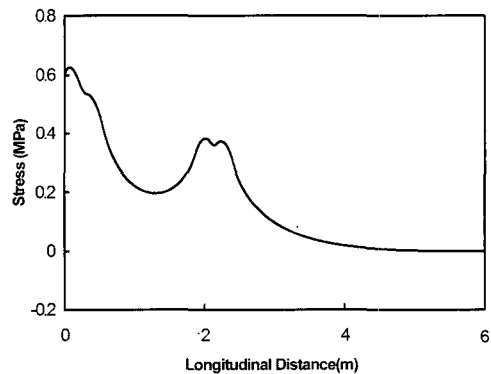
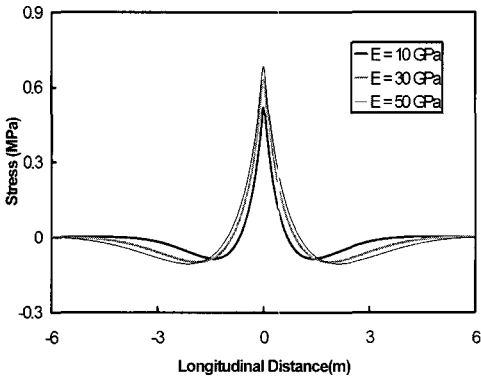


그림 5. 횡방향 상의 종방향 응력 분포

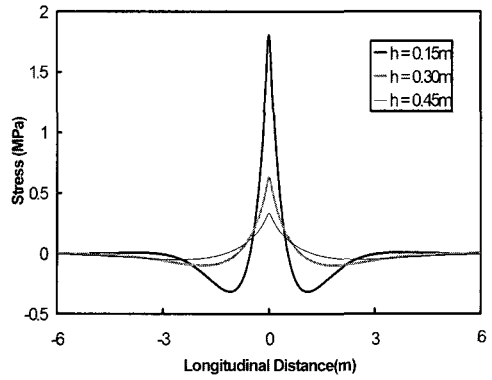


콘크리트의 탄성계수, 슬래브의 두께, 그리고 탄성 지반의 지지력이 모서리 부분의 단축 및 다축 하중에 의한 콘크리트 포장의 응력 분포에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하였다. 그림 6은 콘크리트 탄성계수

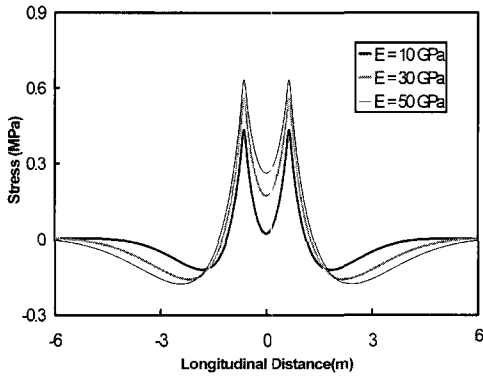
가 변화할 때 최대 응력이 생기는 위치에서 종방향을 따라 응력 분포를 보여준다. 콘크리트 탄성계수가 증가하면 최대 응력이 증가하는 것을 알 수 있으며 하중 위치의 양쪽 바깥부분에 생기는 부응력의 크기도



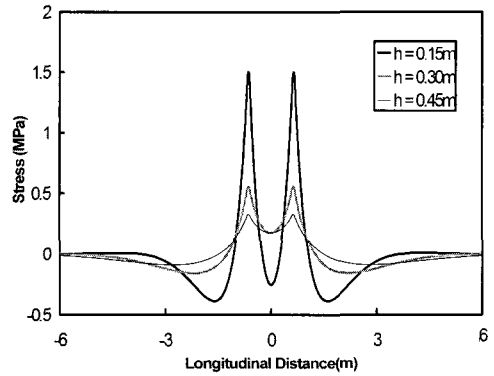
(a) 단축



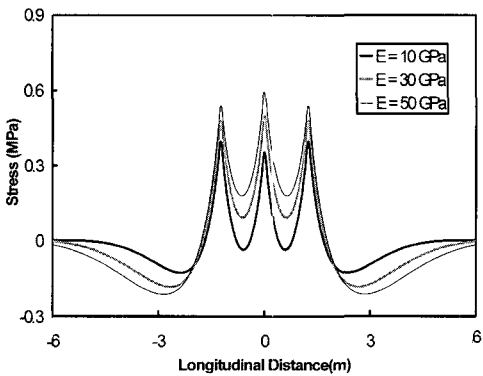
(a) 단축



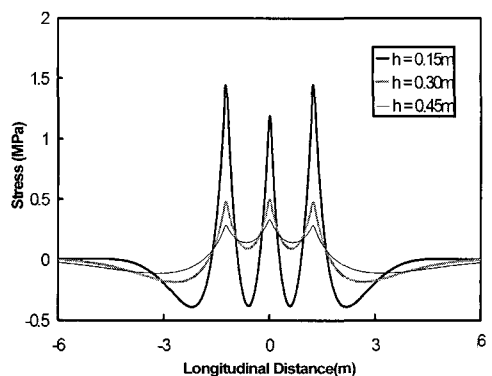
(b) 복축



(b) 복축



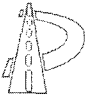
(c) 삼축



(c) 삼축

그림 6. 콘크리트 탄성계수에 따른 응력 분포

그림 7. 콘크리트 슬래브 두께에 따른 응력 분포

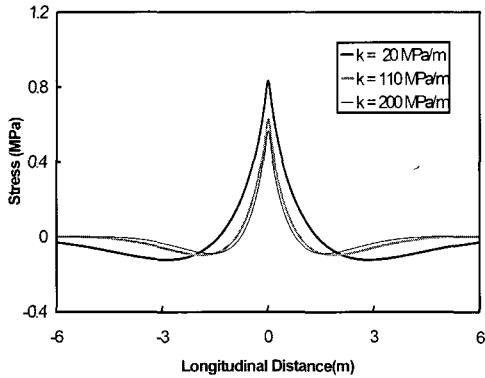


함께 증가하는 것을 알 수 있다. 특히 삼축 하중에서는 콘크리트의 탄성계수가 작을 때는 최대 응력이 양쪽 바깥축의 위치에서 발생하나 콘크리트의 탄성계수가 커지면 최대 응력이 중간축의 위치에서 발생하

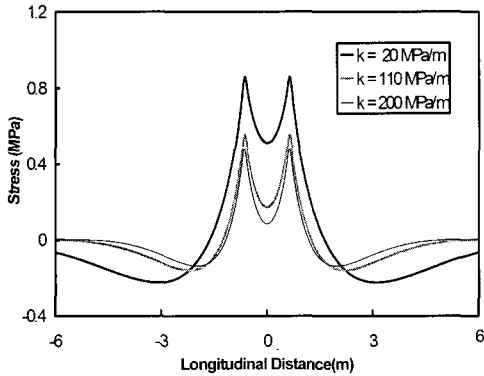
는 것을 알 수 있다.

슬래브의 두께가 응력 분포에 미치는 영향은 그림 7에서 보여준다. 슬래브의 두께가 두꺼워질수록 최대 응력과 부응력의 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 삼축 하중에서는 슬래브의 두께가 얇을 때는 최대 응력이 양쪽 바깥축의 위치에서 발생하며 슬래브 두께가 커지면 최대 응력이 중간축에서 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 복축과 삼축 하중에서는 슬래브 두께가 얇아지면 축과 축 사이의 콘크리트 포장에 생기는 응력이 급격히 감소하여 부응력의 상태에 이르게 된다.

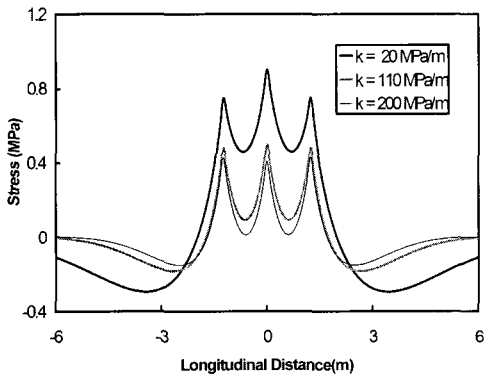
그림 8은 탄성지반의 지지력 또는 지반의 탄성계수(foundation stiffness)가 콘크리트 포장의 응력 분포에 미치는 영향을 보여준다. 지반의 탄성계수가 증가할수록 최대 응력이 감소하며 하중 바깥쪽의 부응력의 크기도 감소하는 것을 알 수 있다. 삼축 하중에서는 지반 탄성계수가 작을 때는 최대 응력이 중간축의 위치에서 발생하나 지반 탄성계수가 커지면 최대 응력은 양쪽 바깥축의 위치에서 발생하게 된다.



(a) 단축



(b) 복축

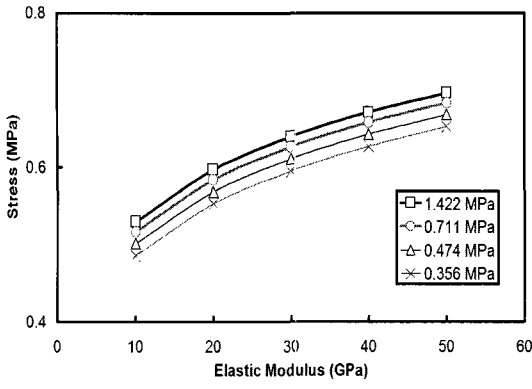


(c) 삼축

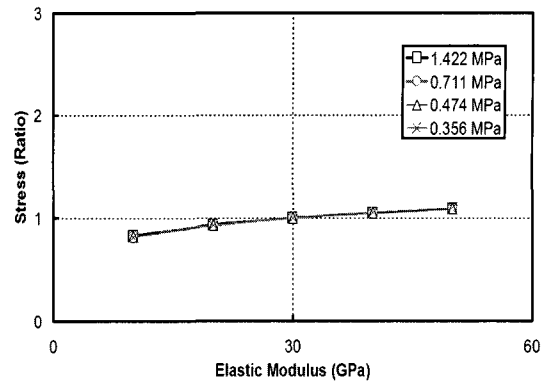
그림 8. 지반 탄성계수에 따른 응력 분포

4. 최대 응력

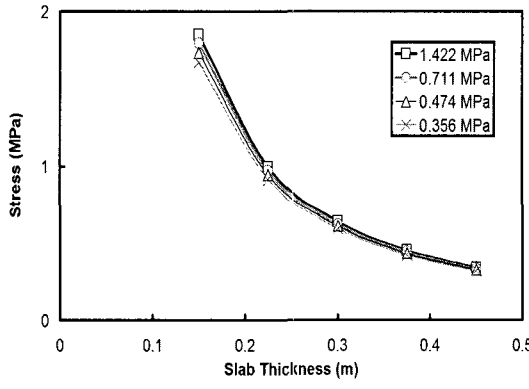
콘크리트 포장이 모서리부에서 단축 및 다축 하중을 받을 때의 최대 응력의 크기 및 이러한 최대 응력의 발생 위치에 대하여 분석하였다. 그림 9는 단축 하중 하에서 콘크리트 탄성계수, 슬래브 두께, 지반 탄성계수가 변할 때 최대 응력의 변화를 보여주며 이러한 변화가 하중의 접지압에 따라 어떻게 달라지는지를 분석하였다. 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리고 지반 탄성계수가 감소할수록 콘크리트 포장의 최대 응력은 증가하는 것을 알 수 있다. 하중의 크기는 일정하나 하중의 접지압이 다른 경우는 접지압이 증가할수록 최대 응력이 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 접지압이 증가하면 일정 크기의 하중 하에서는 접지면적이 감소하기 때문에 발생한다. 콘크리트의 탄성계



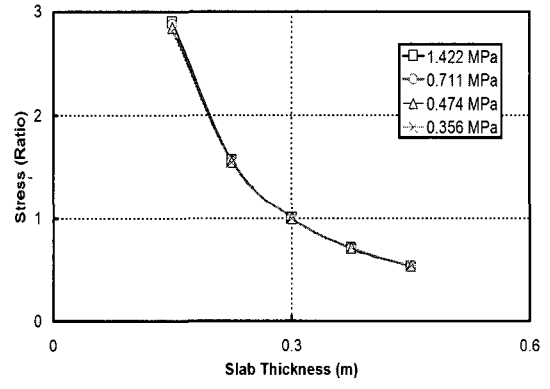
(a) 콘크리트 탄성계수에 대하여



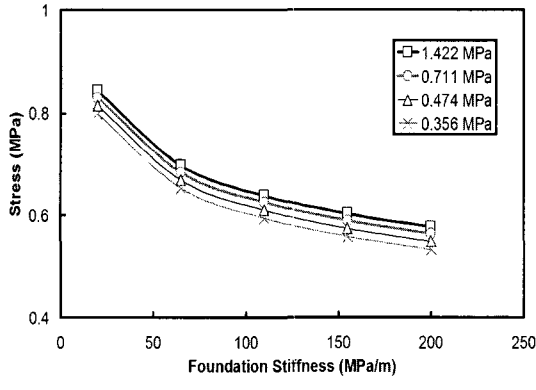
(a) 콘크리트 탄성계수에 대하여



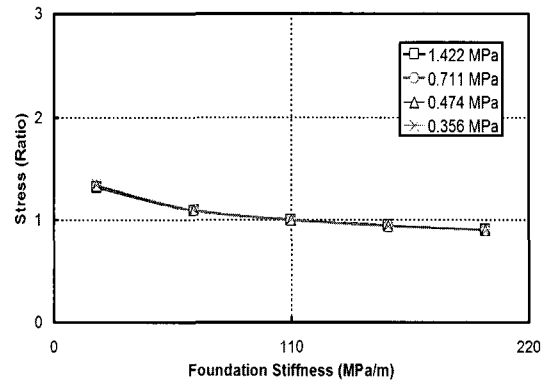
(b) 슬래브 두께에 대하여



(b) 슬래브 두께에 대하여



(c) 지반 탄성계수에 대하여



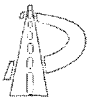
(c) 지반 탄성계수에 대하여

그림 9. 하중 접지압에 따른 최대 응력 변화

그림 10. 하중 접지압에 따른 최대 응력 비율 변화

수가 변화할 때와 지반 탄성계수가 변화할 때는 접지압에 따른 영향이 탄성계수의 크기에 따라 큰 차이가 없으나, 슬래브 두께에서는 두께가 얇을 때는 접지압

에 따른 최대 응력의 변화가 뚜렷하나 슬래브의 두께가 두꺼워질수록 접지압의 변화가 최대 응력에 미치는 영향이 미비해지는 것을 알 수 있다. 참고로 다축

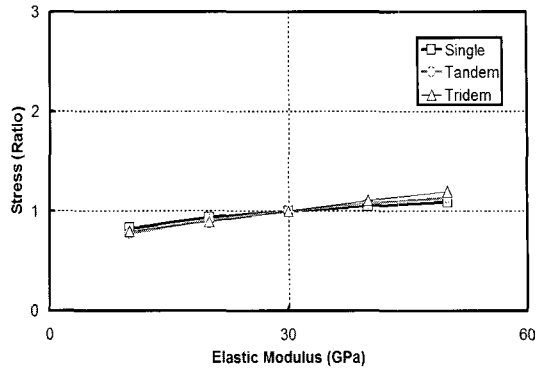


하중 하에서도 단축 하중에서의 결과와 같은 추세의 결과가 나오므로 본 논문에서는 단축 하중에 의한 결과만을 나타내었다.

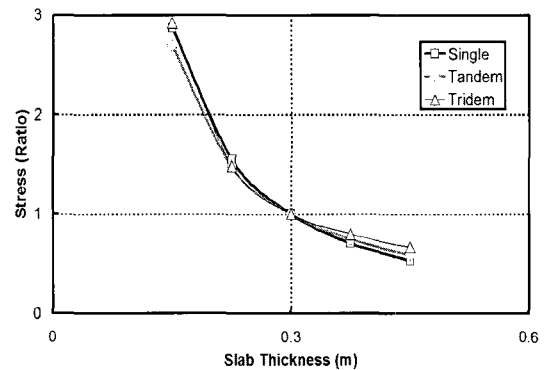
하중 접지압에 따른 최대 응력의 변화율을 살펴보기 위하여 그림 10에서 보여주는 바와 같이 일정 접지압에서 최대 응력을 각 변수가 대표 값을 가질 때의 최대 응력으로 나눈 값을 비교하였다. 예를 들어, 콘크리트 탄성계수가 변수일 경우에(그림 10(a)) 최대 응력을 그 대표 값인 30 GPa일 때의 최대 응력으로 나누어 나온 값을 최대 응력 비율로 정하여 비교하는 것이다. 따라서 콘크리트 탄성계수가 30GPa일 경우에는 최대 응력 비율이 1이 되는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 응력의 비율은 하중 접지압에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 다만 슬래브의 두께가 얇을 경우에는 하중 접지압이 최대 응력 비율에 미소하게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

단축, 복축, 삼축 등 하중의 축수에 따른 최대 응력 비율의 변화는 그림 11에서 보여준다. 콘크리트 탄성계수, 슬래브 두께, 지반 탄성계수 등이 변할 때 축수에 따른 최대 응력 비율의 변화는 매우 작은 것을 알 수 있다. 하지만 지반 탄성계수가 작을 때는(그림 11(c)) 축수가 증가할수록 최대 응력 비율이 급격히 증가하는 것을 발견할 수 있다. 즉, 축수가 많아지면 지반 탄성계수가 작을 때의 최대 응력은 지반 탄성계수가 클 때의 최대 응력에 비해 매우 큰 값을 가지게 되는 것이다.

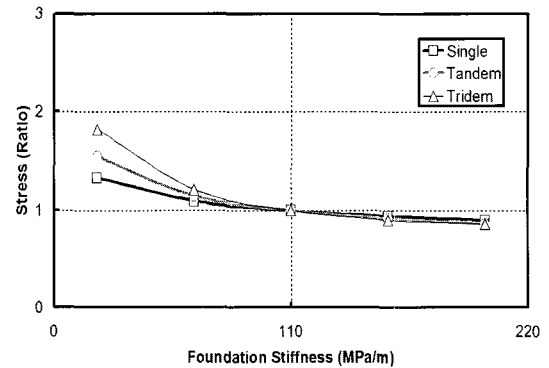
최대 응력의 크기가 콘크리트 포장의 거동 및 장기 공용성에 매우 중요한 인자이므로 이러한 최대 응력이 모서리부 하중이 작용할 때 어느 위치에 생기는지를 분석하였다. 먼저 단축 및 다축 하중에서 횡방향으로 어느 위치에 최대 응력이 생기는지를 조사하였다. 그림 12에서 보인 바와 같이 단축 하중일 경우, 콘크리트 탄성계수의 변화(그림 12(a))와 지반 탄성계수 변화(그림 12(c))에 따라서는 최대 응력이 생기는 위치는 변화가 없으며 모서리에서부터 7cm 내부로 들어온 지점에서 생기는 것을 알 수 있다. 하



(a) 콘크리트 탄성계수에 대하여



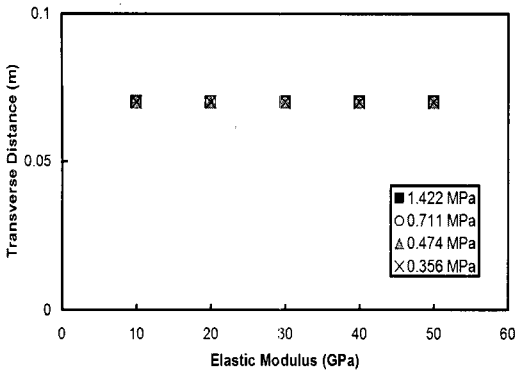
(b) 슬래브 두께에 대하여



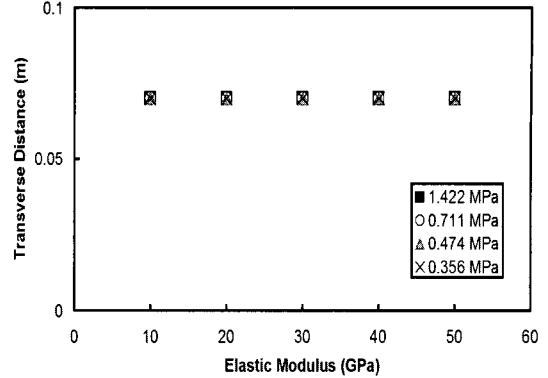
(c) 지반 탄성계수에 대하여

그림 11. 축수에 따른 최대 응력 비율 변화

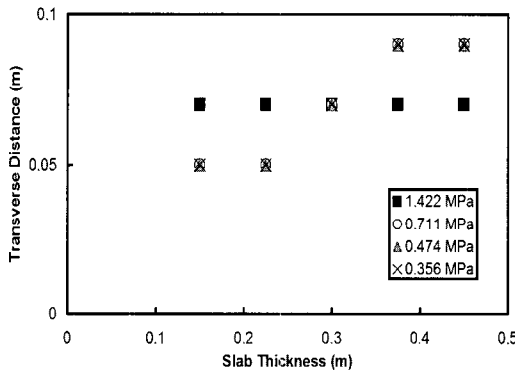
지만 슬래브의 두께가 변화할 때는(그림 12(b)) 하중 접지압이 매우 크면 최대 응력이 생기는 위치의 변화가 없지만 그 외의 접지압에서는 슬래브의 두께



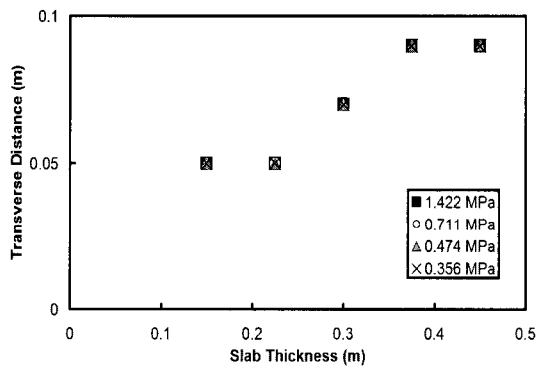
(a) 콘크리트 탄성계수에 대하여



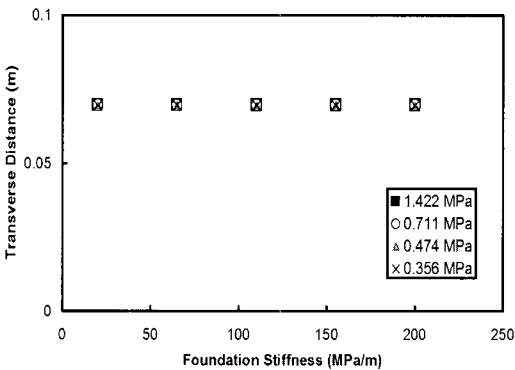
(a) 콘크리트 탄성계수에 대하여



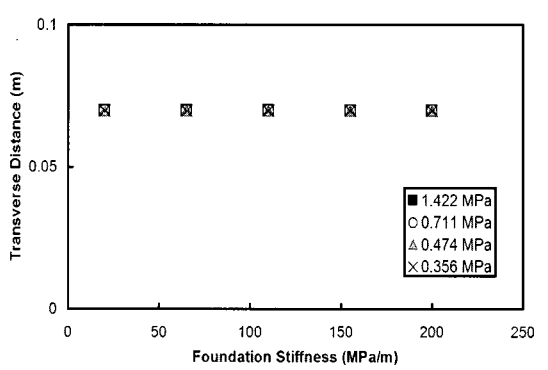
(b) 슬래브 두께에 대하여



(b) 슬래브 두께에 대하여



(c) 지반 탄성계수에 대하여



(c) 지반 탄성계수에 대하여

그림 12. 단축 하중에서 횡방향 상의 최대 응력 위치

그림 13. 복축 하중에서 횡방향 상의 최대 응력 위치

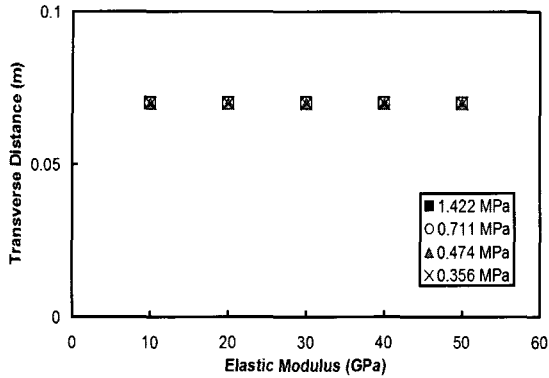
가 두꺼워질수록 최대 응력이 생기는 위치가 모서리에서 내부로 더 들어가는 것을 알 수 있다. 그림에서 최대 응력 발생 위치가 연속적으로 변화하지 않고 계

단식으로 변하는 것처럼 보이는 이유는 유한요소의 크기가 2cm이고 응력은 이러한 요소의 중앙점에서 산출되기 때문이다.

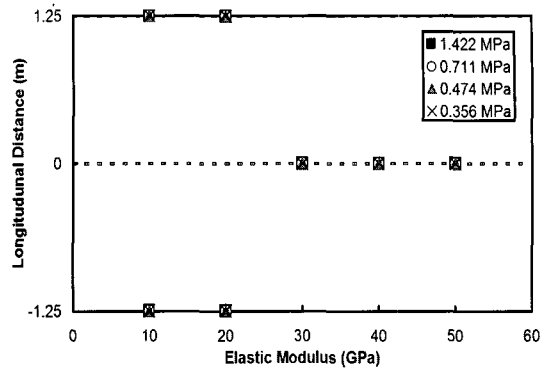


복축 하중에서는 그림 13에 나타난 것과 같이 최대 응력이 생기는 위치가 단축 하중의 경우와 거의 흡사하나 그림 13(b)에서 볼 수 있듯이 하중의 접지

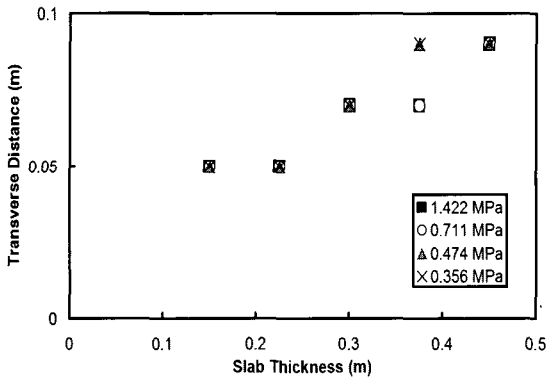
압이 매우 클 때도 단축 하중의 경우와는 다르게 슬래브의 두께에 따라서 최대 응력이 생기는 위치가 변화하는 것을 알 수 있다.



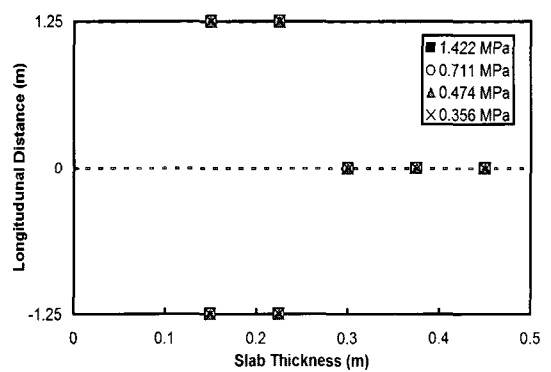
(a) 콘크리트 탄성계수에 대하여



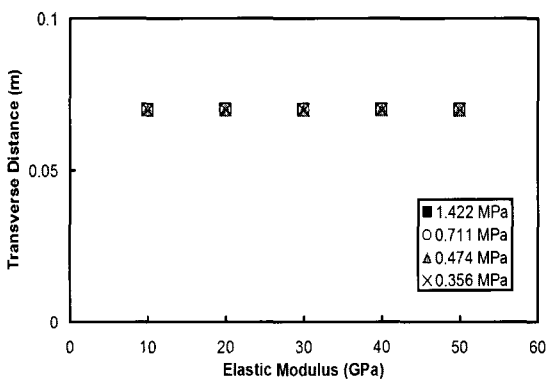
(a) 콘크리트 탄성계수에 대하여



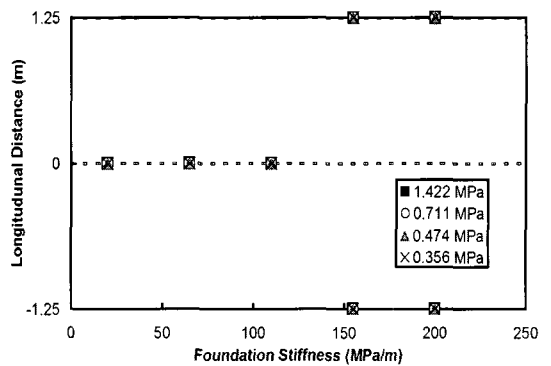
(b) 슬래브 두께에 대하여



(b) 슬래브 두께에 대하여



(c) 지반 탄성계수에 대하여



(c) 지반 탄성계수에 대하여

그림 14. 삼축 하중에서 횡방향 상의 최대 응력 위치

그림 15. 삼축 하중에서 종방향 상의 최대 응력 위치



그림 14에서 보여주는 것과 같이 삼축 하중일 경우에도 최대 응력이 생기는 횡방향 위치는 단축 또는 복축 하중의 경우와 매우 비슷하지만, 그림 14(b)에서 볼 수 있듯이 하중의 접지압이 클수록 슬래브 두께 증가에 따른 최대 응력이 생기는 횡방향 위치가 모서리에서 슬래브 내부로 변화하는 과정이 둔해지는 것을 알 수 있다. 예를 들어 접지압이 1.422와 0.711MPa 일 경우에 최대 응력이 생기는 위치는 모서리에서 7cm 떨어진 곳이지만 접지압이 0.474와 0.356MPa일 때는 최대 응력 위치는 이미 모서리에서 9cm 떨어진 곳이라는 것을 알 수 있다.

종방향 상의 최대 응력이 생기는 위치는 단축 하중일 경우는 당연히 축의 위치이며, 복축 하중일 경우는 종방향으로의 최대 응력은 두 축의 위치에서 같은 값을 가지게 된다. 삼축 하중일 경우에는 그림 15에 나타난 것과 같이 콘크리트 탄성계수가 증가하거나 슬래브 두께가 증가하면 최대 응력이 생기는 종방향 상의 위치는 양쪽 바깥축에서 중간축의 위치로 변하게 된다. 반대로 지반 탄성계수는 감소하면 최대 응력이 생기는 종방향 상의 위치가 중간축이 되는 것을 알 수 있다. 또한 하중 접지압은 종방향 상의 최대 응력 위치에는 영향을 미치지 않는다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용한 콘크리트 포장의 모델을 사용하여 콘크리트 포장의 모서리 부분에 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 등 복륵 다축 하중의 한쪽 차륜이 접하여 작용할 때 콘크리트 포장의 응력 분포를 폭넓게 분석하였다. 먼저 종방향과 횡방향을 따라 응력의 분포 형태를 분석하였고, 콘크리트 슬래브의 두께, 콘크리트 탄성계수, 지반 탄성계수 등이 응력 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 하중 접지면적과 연관된 하중 접지압의 변화에 따른 콘크리트 포장의 응력 분포도 분석하였다. 특히 콘크리트 포장의 단기 거동 및 장기 공용성과 밀접한 관

련이 있는 최대 응력 및 최대 응력 발생 위치에 대한 연구도 수행하였으며 이러한 연구 결과 다음과 같은 결론을 유출할 수 있었다.

- 축하중의 크기가 일정할 때 축 수가 많아져서 전체 하중이 증가하더라도 콘크리트 포장이 받는 최대 응력은 축 수가 증가할수록 감소한다.
- 축하중 주변의 부응력은 축 수가 많아질수록 증가한다.
- 콘크리트 포장의 최대 응력은 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리고 지반 탄성계수가 감소할수록 증가한다.
- 하중의 크기가 일정할 때 하중의 접지압이 증가할수록 최대 응력이 커진다.
- 하중 접지압의 영향이 콘크리트 탄성계수와 지반 탄성계수의 크기에 따라서는 큰 차이가 없으나 슬래브 두께가 얇아질수록 접지압에 따른 최대 응력의 변화가 뚜렷해진다.
- 단축 하중일 경우, 콘크리트 탄성계수의 변화와 지반 탄성계수의 변화에 따라서는 횡방향으로 최대 응력이 생기는 위치가 변화하지 않지만 슬래브의 두께가 변화할 때는 하중 접지압이 매우 클 때를 제외하고는 슬래브의 두께가 두꺼워질수록 최대 응력이 생기는 위치가 모서리에서 내부로 이동한다.
- 복축 하중에서 횡방향으로 최대 응력이 생기는 위치는 단축 하중의 경우와 거의 흡사하나 하중의 접지압이 매우 클 때도 단축 하중의 경우와는 다르게 슬래브의 두께에 따라서 최대 응력이 생기는 위치가 변화하는 것을 알 수 있다.
- 삼축 하중일 경우에 최대 응력이 생기는 횡방향 위치는 단축 또는 복축 하중의 경우와 매우 비슷하지만, 하중의 접지압이 클수록 슬래브 두께 증가에 따른 최대 응력이 생기는 위치가 모서리에서 슬래브 내부로 변화하는 과정이 둔해진다.
- 종방향 상의 최대 응력이 생기는 위치는 단축과 복축 하중일 경우는 축의 위치이며, 삼축 하중일 경우에는 콘크리트 탄성계수 또는 슬래브 두께가 증가하면 최대 응력이 생기는 종방향 위치는 양쪽 바



갈축에서 중간축의 위치로 바뀐다. 지반 탄성계수는 반대로 감소하면 최대 응력이 생기는 위치가 중간축이 된다.

- 하중 접지압은 종방향 상의 최대 응력 위치에는 영향을 미치지 않는다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김성민, 조병휘, 권순민 (2006). "이동차량하중에 대한 연속철근콘크리트포장의 거동 및 철근비의 영향", 한국도로학회 논문집, Vol. 8, No. 1, 한국도로학회, pp. 119-130
2. ABAQUS (2005). *User's Manual Version 6.5*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
3. Kim, S. M. and McCullough, B. F. (2003). "Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude," *Engineering Structures*, Vol. 25, Issue 9, Elsevier Science Ltd., pp. 1179-1188.
4. 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, pp. 32-41.
5. 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.
6. Westergaard, H. M. (1925). "Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis." *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25-35.
7. Zaman, M., Taheri, M., and Alvappillai, A. (1991). "Dynamic response of a thick plate on viscoelastic foundation to moving loads," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol 15, pp. 627-647.

접 수 일: 2006. 6. 8
 심사 일: 2006. 9. 29
 심사완료일: 2006. 11. 20