



중양부와 모서리부 다축 차량 하중에 의한 콘크리트 도로포장의 응력 상관관계

Relationship between Concrete Pavement Stresses under Multi-Axle Interior and Edge Loads

김 성 민* 조 병 휘** 류 성 우***
Kim, Seong-Min Cho, Byoung Hooi Ryu, Sung-Woo

Abstract

The differences in the stress distribution and the critical stresses in concrete pavement systems were analyzed when the dual-wheel single-, tandem-, and tridem-axle loads were applied at the interior and the edge of the pavement. The effects of the concrete elastic modulus, slab thickness, foundation stiffness, and tire contact pressure were investigated. The stresses under the interior loads were calculated using the transformed field domain analysis and stresses under the edge loads were obtained using the finite element method. The critical stresses under the interior and the edge loads were compared with respect to various parameters and the equations to predict the ratio between the stresses under the edge and the interior loads were developed and verified. From this study, it was found that the trends of the changes in the critical concrete stresses under the interior and the edge loads were very similar and the critical stress locations under those loads were identical. The critical stress ratio, which was obtained by dividing the critical stress under the edge loads into that under the interior loads, decreased with increasing the number of axles. That ratio became larger as the concrete elastic modulus increased, the slab thickness increased, the foundation stiffness decreased, and the tire contact pressure increased.

Keywords: concrete pavement, multi-axle loads, edge load, interior load, stress, critical stress

요 지

본 연구는 콘크리트 도로 포장에 복륜 단축, 복륜 복축, 복륜 삼축 등 복륜 다축 하중이 포장의 중앙부와 모서리부에 작용할 때 포장의 응력 분포 및 최대 응력의 차이를 분석하고 이러한 응력의 차이가 콘크리트 탄성계수, 슬래브 두께, 그리고 지반 탄성계수에 따라 어떠한 특성을 갖는지를 분석하기 위하여 수행되었다. 변환영역에서의 해석법을 이용하여 중앙부 하중에 의한 응력을 구하였으며 유한요소법을 이용하여 모서리부 하중에 의한 응력을 구하였다. 여러 가지 변수에 대하여 중앙부 하중에 의한 최대 응력과 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 비교하였으며 이러한 최대 응력 비율을 예측할 수 있는 공식을 개발하였다. 이러한 공식을 이용하여 중앙부 하중에 의한 최대 응력에서 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 예측하여 최대 응력 비율 예측 공식의 정확성을 검증하였다. 연구결과 중앙부와 모서리부 하중에 의한 콘크리트 포장의 최대 응력 변화 경향은 매우 비슷하였으며 종방향 상의 최대 응력 발생 위치는 일치하였다. 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 중앙부 하중에 의한 최대 응력으로 나눈 최대 응력 비율은 하중 축 수가 많아질수록 감소하며, 콘크리트 탄성계수가 증가, 슬래브 두께가 증가, 지반 탄성계수가 감소, 그리고 하중 집지압이 증가할수록 커지게 된다.

핵심용어 : 콘크리트포장, 다축 하중, 모서리부 하중, 중앙부 하중, 응력, 최대 응력

* 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 조교수
** 비회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정
*** 비회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 박사과정



1. 서론

콘크리트 도로 포장에 차량하중이 작용할 때 콘크리트 슬래브의 응력은 일반적으로 세 가지의 경우로 나누어 분석한다. 첫째, 하중이 포장의 중앙부(interior)에 작용할 때, 둘째, 하중이 포장의 모서리부(edge)에 작용할 때, 그리고 셋째로 하중이 포장의 코너부(corner)에 작용할 때이다 (Westergaard, 1925). 콘크리트 도로 포장 중에 연속철근콘크리트 포장은 횡방향 균열에서의 하중전달율이 매우 높으므로 (김성민 외, 2006) 코너로 가정할 부분이 없으며 따라서 연속철근콘크리트 포장에서의 차량하중에 의한 응력은 크게 중앙부 하중에 의한 응력과 모서리부 하중에 의한 응력으로 분리할 수 있다. 단축 및 다축 하중에서 모서리부 하중이란 한쪽의 바퀴가 모서리에 접하여 작용하는 하중으로 구분할 수 있다. 줄눈콘크리트 포장은 줄눈부에서의 하중전달이 거의 일어나지 않을 경우 줄눈과 모서리가 만나는 부분을 코너로 가정할 수 있으나 실제로는 다웰바와 골재 만물림에 의해 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. 따라서 콘크리트 포장의 차량 하중에 의한 bottom-up 균열을 야기하는 응력은 크게 중앙부 하중과 모서리부 하중에 의한 응력으로 구분할 수 있으며 이러한 응력의 상관관계를 이해하는 것이 필요시 된다.

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 응력을 분석하여 차량의 다축 하중에 대한 콘크리트 포장의 거동을 정확히 파악하는 것이 중요시 된다.

콘크리트 포장의 모델을 사용하여 하중에 대한 응력 분포를 구할 때 수치해석법인 유한요소법을 이용하는 것이 일반화 되어 가고 있다. 하지만 유한요소법을 이용하기 위해서는 상용 프로그램 (ABAQUS, 2005)을 사용하던지 또는 프로그램을 개발하여 이용하여야 한다. 이러한 과정은 그리 쉽지 않으며 또한 해석 결과의 정확성을 높이기 위하여 유한요소의 수를 많게 하면 해석하는데 많은 시간을 들여야 한다. 따라서 콘크리트 포장의 응력 분포 및 최대 응력을 편리하고 빠르게 얻을 수 있는 해석 방법인 변환영역에서의 해석법을 사용하면 유한요소 해석의 단점을 극복할 수 있다 (Kim and Roesset, 1998; Kim and McCullough, 2002; Kim et al., 2002, 2003). 변환영역에서의 해석법은 공간에서 정의되는 콘크리트 포장 모델의 지배방정식을 푸리에변환 (Fourier Transform)을 이용하여 변환된 공간의 영역으로 치환하여 이러한 영역에서의 응력 또는 변위를 구한 후 다시 역푸리에변환 (Inverse Fourier Transform)으로 결국 공간에서의 응력이나 변위를 구할 수 있는 방법이다. 하지만 이러한 변환영역에서의 해석은 콘크리트 슬래브가 수평 방향으로 무한대라는 가정을 해야 하기 때문에 중앙부 하중에 의한 응력 분포를 구하기에는 적합하나 모서리부 하중에 의한 응력을 구하는 데는 사용할 수 없다. 그러나 중앙부 하중에 의한 응력과 모서리부 하중에 의한 응력의 상관관계를 유출할 수 있다면 변환영역에서의 해석법을 사용하여 모서리부 하중에 의한 응력도 예측할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 콘크리트 도로 포장의 중앙부와 모서리부에 복륜 단축, 복륜 복축, 복륜 삼축 등 복륜 다축 하중이 작용할 때 콘크리트 포장의 응력 분포



및 최대 응력의 차이를 분석하고 이러한 응력의 차이가 포장의 두께, 재료의 성질, 그리고 하부층의 지지력에 따라 어떠한 특성을 갖는지를 분석하였다. 중앙부 하중에 의한 응력은 변환영역에서의 해석법을 이용하여 구하였으며 모서리부 하중에 의한 응력은 유한요소법을 이용하여 구하였다. 여러 가지 경우에 대하여 중앙부 하중과 모서리부 하중에 의한 서로 간의 최대 응력의 비율을 비교하였으며 이러한 비율을 예측할 수 있는 공식을 개발하였다. 개발된 공식을 이용하여 중앙부 하중에 의한 최대 응력을 구하여 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 예측하던지, 또는 반대의 과정을 수행하여 최대 응력 비율 예측식의 정확성을 검증하였다. 본 논문에서 이와 같은 사항을 상세히 기술하였다.

2. 해석 방법

콘크리트 포장의 해석은 일반적으로 그림 1에 나타난 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 중앙부 하중을 고려할 때는 수평방향으로 콘크리트 슬래브는 무한대로 넓으며 모서리에 하중이 작용할 때는 모서리 부분을 제외한

다른 부분은 충분히 넓어서 경계영역의 상태에 따라서 응력 분포가 영향을 받지 않도록 하였다. 중앙부에 하중이 작용할 때의 응력 분포는 변환영역에서의 해석법을 사용하여 구하였으며 (Kim and Roesset, 1998) 모서리 부분에 하중이 작용할 때는 수치해석인 유한요소법을 사용하여 응력 분포를 구하였다. 유한요소해석을 위하여 콘크리트 슬래브는 평면셀 요소를 이용하여 모델링하였으며 탄성지반은 스프링 요소를 이용하여 구축하였다. 따라서 본 연구에서는 수치해석의 단순화를 위해서 비선형 및 전단변형에 의한 응력은 고려되지 않았으나 이러한 효과는 선행 연구에서 고찰된 바 있다 (Kim and Cho, 2006). 유한요소해석은 범용 프로그램인 ABAQUS (ABAQUS, 2005)를 이용하였다. 콘크리트 슬래브를 구성하는 유한요소는 가로와 세로가 2cm인 정사각형 요소를 사용하였으며 해석결과 수렴실험 (convergence test)을 통하여 결과의 정밀도를 검증하였다. 변환영역에서의 해석법을 이용하여 구한 중앙부 하중에 대한 응력 분포의 정확성을 확인하기 위하여 유한요소법을 이용하여 구한 결과와 비교한 결과를 그림 2에서 보여준다 (건설교통부, 2006). 그림은 복륵 복축 하중이 작용할 때 최대 응력 발생 위치에서 종방향 응력을 종방향을 따라 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 변환영역에서의 해석법과 유한요소해석법을 이용해 구한 결과는 일치하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 차량하중은 그림 3에 보인 바와 같이

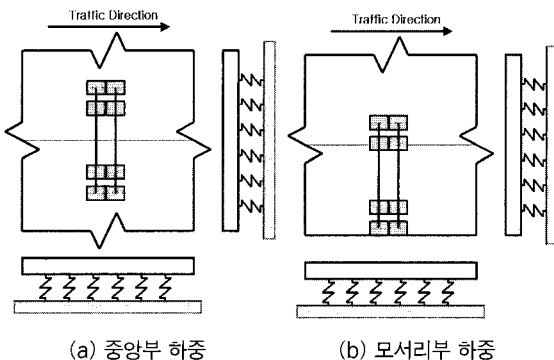


그림 1. 콘크리트 포장 모델

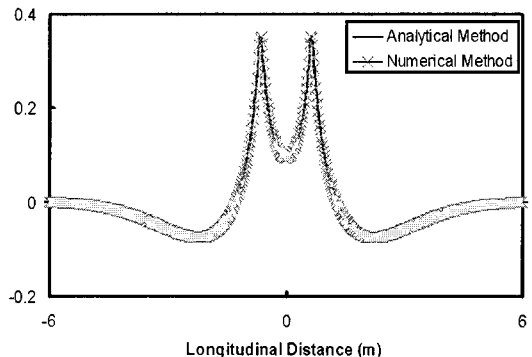
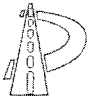


그림 2. 변환영역해석과 유한요소해석 결과 비교



복륜 단축, 복륜 복축, 복륜 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.

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

여기서 P 는 하나의 바퀴에 걸리는 하중의 크기이며, TP 는 바퀴의 공기압이고, L 과 T 는 각각 종방향과 횡방향의 바퀴의 접지 길이이다. 따라서 식 (1)에서 나타난 바와 같이 횡방향의 접지 길이인 T 가 일정하다고 하면 종방향의 접지 길이인 L 은 하중의 크기인 P 가 커지거나 또는 바퀴 공기압인 TP 가 감소하면 커지는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 여러 가지의 변수에 의한 영향을 분

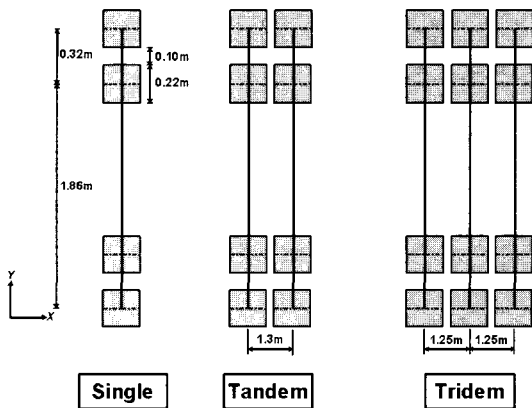


그림 3. 단축 및 다축 하중

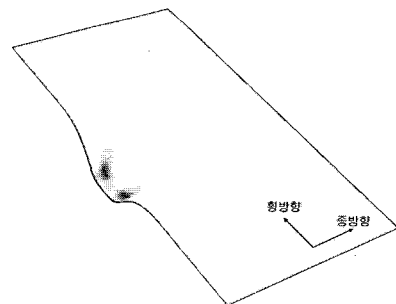
석하기 위한 해석을 수행하였으며 해석에 고려한 변수 및 각 변수의 범위는 표 1에 나타내었다. 각 변수의 값 중에서 중간 값을 대표 값으로 정의하였으며 해석결과 분석 시 특별한 언급이 없으면 이러한 대표 값을 사용하여 해석한 결과를 나타내는 것이다. 그림 4는 콘크리트 포장의 중앙부와 모서리 부분에 복륜 복축 하중이 작용할 때 포장의 변형된 모습과 종방향 응력 분포를 보여 준다. 중앙부 하중과, 모서리부 하

중에 대한 변형 모습과 응력 분포는 두 하중축의 중간선을 기준으로 대칭이므로 그림에서는 반만을 보여주고 있다. 축하중을 받을 때 콘크리트 포장의 종방향 응력은 횡방향 응력보다 크기 때문에 본 연구에서는 종방향 응력 분포를 분석 하였으며 특별한 설명이 없는 한 본 논문에서 응력이라 함은 종방향 응력을 표현하는 것이다.

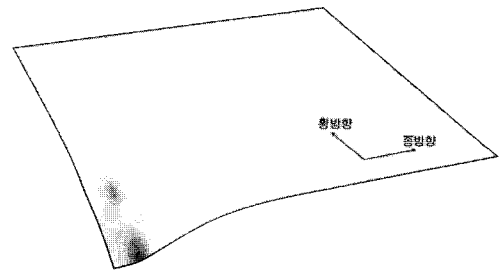
표 1. 해석에 사용된 변수 값

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)



(a) 중앙부 하중



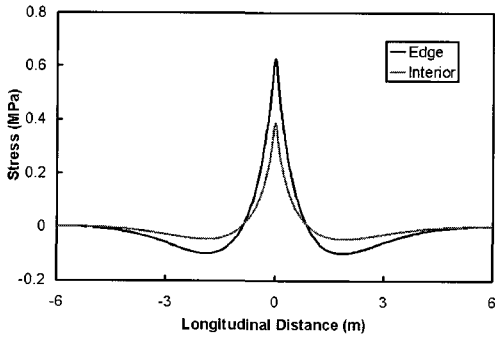
(b) 모서리부 하중

그림 4. 복축 하중에 의한 변형 모양 및 응력 분포

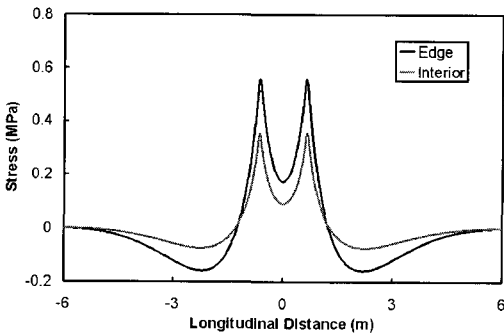


3. 응력 분포 및 최대 응력

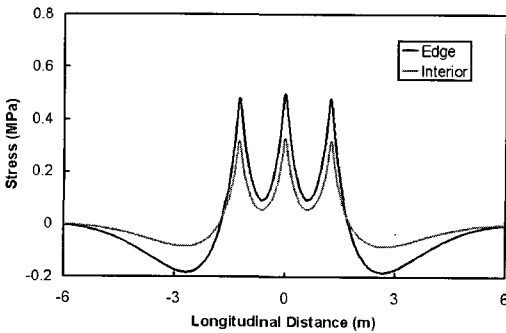
단축, 복축, 삼축 하중이 중앙부와 모서리 부분에 작용할 때 최대 응력이 생기는 위치에서 종방향을 따라 종방향 응력 분포를 살펴보면 그림 5에 나타난 바와 같다. 그림에서 가로 축의 종방향 거리 (longitudinal distance) 0은 축하중의 중간 위치



(a) 단축



(b) 복축



(c) 삼축

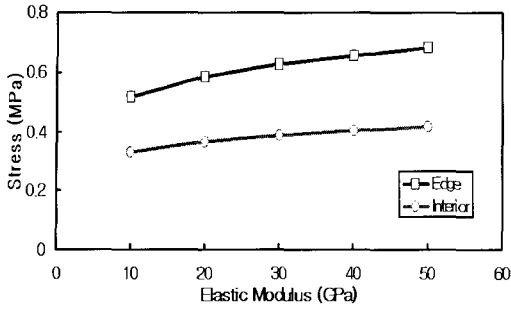
그림 5 중앙부와 모서리부 하중에 의한 종방향 상의 종방향 응력 분포

를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 응력 분포는 축하중의 중간을 기준으로 대칭이며 모서리부의 하중에 의한 응력이 중앙부 하중에 의한 응력에 비해 뚜렷이 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 응력이 분포된 모양은 서로 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 또한 하중 축 수가 많아지면 중앙부와 모서리부 하중에 의한 최대 응력이 모두 감소하는 것을 알 수 있다.

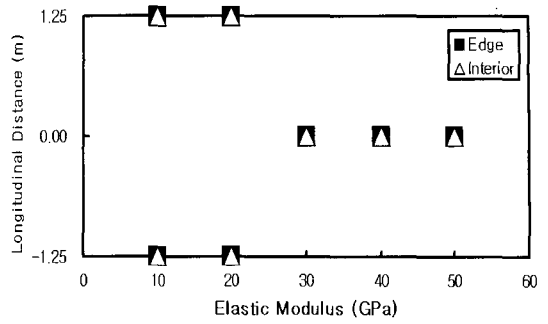
본 연구에서는 각 축에 걸리는 하중의 크기를 일정하게 하였으므로 (즉, 단축의 하중이 50kN 이면 복축의 전체 하중은 100kN) 축 수가 많아져서 전체 하중이 증가하더라도 콘크리트 포장이 받는 최대 응력은 감소한다는 것을 알 수 있다.

콘크리트의 탄성계수, 슬래브의 두께, 그리고 탄성지반의 지지력 (지반 탄성계수)이 중앙부와 모서리부분의 단축 및 다축 하중에 의한 콘크리트 포장의 최대 응력에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였으며 단축하중에 의한 최대 응력의 변화를 그림 6에서 보여준다. 전체적으로 살펴보면 모서리부 하중에 의한 최대 응력이 중앙부 하중에 의한 최대 응력에 비해 뚜렷이 큰 것을 알 수 있으나 콘크리트 탄성계수, 슬래브 두께, 지반 탄성계수 등의 변수가 변화할 때의 최대 응력의 변화 경향은 서로 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 콘크리트 탄성계수가 증가하면 최대 응력이 증가하는 것을 알 수 있으며 슬래브의 두께는 두꺼워질수록 최대 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 지반의 탄성계수도 증가할수록 최대 응력을 감소시키는 것을 알 수 있다. 참고로 다축 하중 하에서도 단축 하중에서의 결과와 같은 경향의 결과가 나오므로 본 논문에서는 단축 하중에 의한 결과만을 나타내었다.

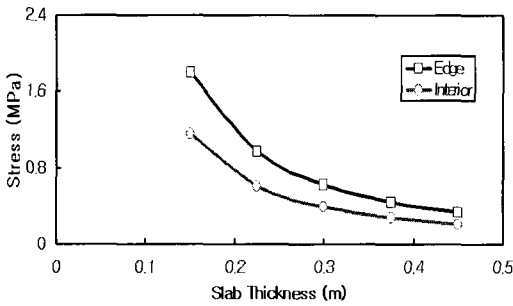
중앙부와 모서리부에 하중이 작용할 때 최대 응력의 크기 뿐만 아니라 최대 응력의 발생 위치에 대한 비교 분석도 수행하였다. 횡방향으로는 최대 응력이 발생하는 위치가 모서리부 하중일 경우는 모서리에 인접한 차륜의 위치에서 발생하며 중앙부 하중일 경우는 좌우의 차륜에서 동시에 발생하므로 횡방향 상



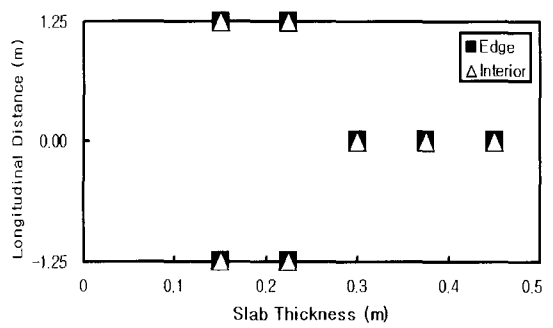
(a) 콘크리트 탄성계수



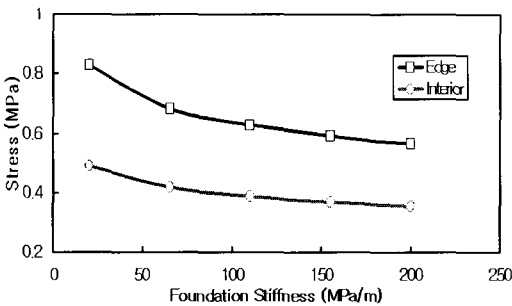
(a) 콘크리트 탄성계수



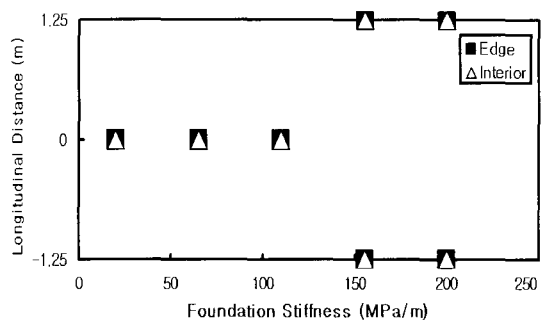
(b) 슬래브 두께



(b) 슬래브 두께



(c) 지반 탄성계수



(c) 지반 탄성계수

그림 6. 중앙부와 모서리부 하중에 의한 최대 응력 변화 비교

그림 7. 삼축 하중에서 종방향 상의 최대 응력 위치 비교

의 최대 응력 발생 위치는 비교 대상에서 제외하였으며 종방향으로의 최대 응력 발생 위치에 대하여 비교하였다. 단축 하중일 경우에 종방향 상의 최대 응력이 생기는 위치는 당연히 축의 위치이며, 복축 하중일 경우는 두 개의 하중 축의 위치에서 같은 크기의 최대 응력을 가지게 된다. 삼축 하중일 경우에는 그림 7에 나타낸 것과 같이 콘크리트 탄성계수가 증가

하거나 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. 그리고 모든 경우에 중앙부와 모서리부의 하중에 의한 이러한 종방향 상의 최대 응력 발생 위치는 동일한 것을 알 수 있다.



4. 응력 비율

앞에서 살펴본 것과 같이 콘크리트 포장이 중앙부와 모서리부에서 단축 및 다축 하중을 받을 때의 응력 분포 및 최대 응력의 변화 경향이 매우 비슷한 것을 알 수 있었으며 최대 응력의 발생 위치는 동일한 것을 알 수 있었다. 따라서 먼저 모서리부 하중에 의한 최대 응력과 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 비율을 분석하였다. 그림 8은 콘크리트의 탄성계수가 변할 때 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 중앙부 하중에 의한 최대 응력으로 나눈 비율을 하중 축수에 따라 보여준다. 모서리부와 중앙부의 최대 응력 비율은 콘크리트 탄성계수가 증가하면 커지는 것을 알 수 있다. 다시 말해 콘크리트 탄성계수가 증가하면 그림 6(a)에 보인 것과 같이 최대 응력이 커지므로 최대 응력 비율이 증가한다는 것은 모서리부 하중에 의한 최대 응력이 중앙부 하중에 의한 최대 응력에

비해 증가하는 정도가 더 크다는 것이다. 하중의 축수에 따라서는 단축일 때가 최대 응력 비율이 가장 크고 축 수가 많아질수록 비율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 다시 말해 하중 축 수가 작을수록 모서리부 하중에 의한 최대 응력과 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 차이가 더 커진다는 것을 의미한다.

슬래브의 두께가 두꺼워지면 그림 9에서 보여주는 것과 같이 최대 응력 비율이 증가한다. 즉, 슬래브 두께가 증가하면 모서리부 하중에 의한 최대 응력과 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 차이가 더 커지는 것이다. 슬래브의 두께가 증가하면 최대 응력의 크기는 그림 6(b)에 나타난 것과 같이 감소하지만 모서리부와 중앙부의 하중에 의한 최대 응력의 비율은 증가하는 것이다. 또한 단축이나 복축 하중에서는 최대 응력 비율이 거의 선형으로 변화하지만 삼축 하중일 경우에는 슬래브 두께가 얇을 때에 비해 두꺼울 때의 최대 응력 비율 변화가 더 커지는 것을 알 수 있다.

그림 10은 지반 탄성계수에 따른 최대 응력 비율의 변화를 보여준다. 지반 탄성계수가 증가하면 모서리부와 중앙부의 하중에 의한 최대 응력 비율은 감소하는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 지반 탄성계수가 증가하면 모서리부 하중에 의한 최대 응력과 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 차이가 줄어드는 것이다. 지반 탄성계수가 증가하면 최대 응력의 크기는 그림 6(c)에 나타난 것과 같이 감소하므로 모서리부와 중앙부의 하중에 의한 최대 응력의 비율이 감소한다는 것은 모서리부 하중에 의한 최대 응력의 감소량이 중

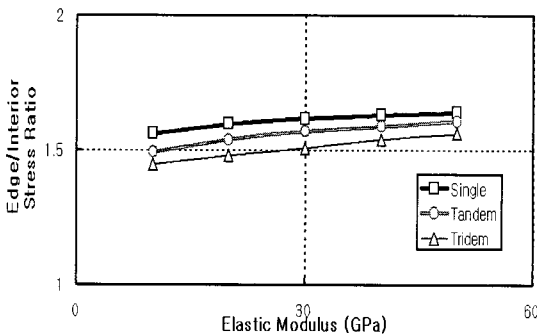


그림 8. 콘크리트 탄성계수 변화에 따른 최대 응력 비율 비교

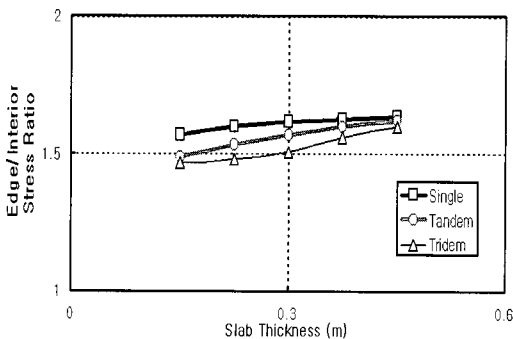


그림 9. 슬래브 두께 변화에 따른 최대 응력 비율 비교

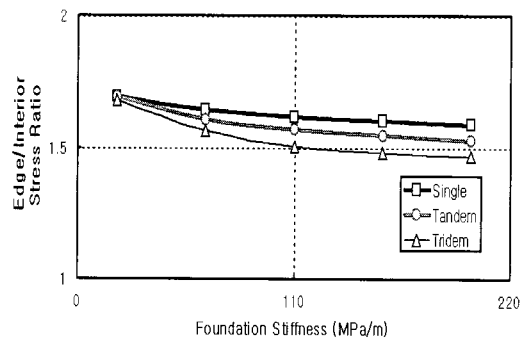


그림 10. 지반 탄성계수 변화에 따른 최대 응력 비율 비교



양부 하중에 의한 최대 응력의 감소량 보다 더 크다는 것이다. 또한 지반 탄성계수가 작아지면 하중 축수에 따른 최대 응력 비율의 차이가 감소하여 매우 작은 지반 탄성계수일 때는 하중 축수에 관계없이 최대 응력 비율이 거의 같아지는 것을 알 수 있다.

하중 접지압의 변화에 따른 최대 응력 비율의 변화를 그림 11에 나타내었다. 하중의 크기가 일정하므로 하중 접지압이 증가한다는 것은 접지면적이 감소한다는 것과 같은 의미이다. 그림에서 보인 바와 같이 하중 접지압이 증가하면 모서리부와 중앙부의 하중에 의한 최대 응력 비율이 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 하중 접지압이 증가하면 모서리부 하중에 의한 최대 응력과 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 차이가 더 커지는 것이다. 이러한 최대 응력 비율 증가량은 하중 접지압이 작을 때가 더 두드러지며 하중 접지압이 커지면 최대 응력 비율 증가량이 둔해지는 것을 알 수 있다. 또한 하중 축수에 따른 최대 응력 비율의 차이는 하중 접지압의 크기에 관계없이 거의 같은 것을 알 수 있다.

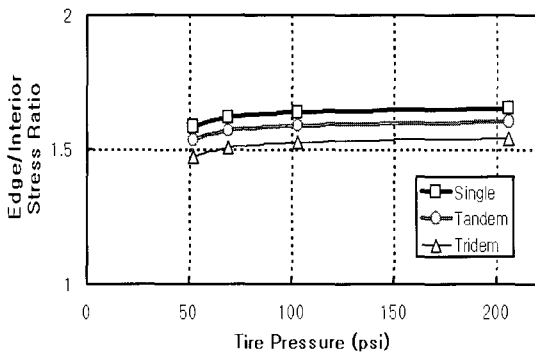
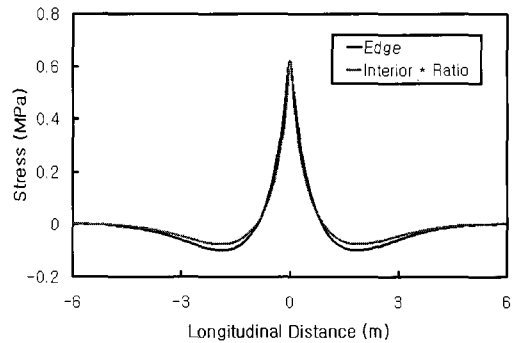


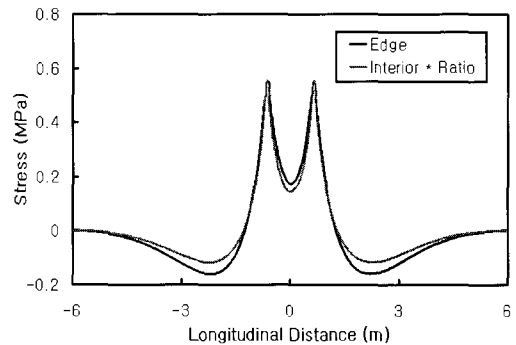
그림 11. 하중 접지압 변화에 따른 최대 응력 비율 비교

중앙부 하중과 모서리부 하중에 의한 최대 응력 비율을 전체 응력 분포에 적용했을 때의 결과를 그림 12에 나타내었다. 즉, 중앙부 하중에 의한 응력 분포에 최대 응력 비율을 전체적으로 곱하여 모서리부 하중에 의한 응력 분포와 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 응력 비율만큼 증가시킨 중앙부 하중에 의한 응력 분포는 모서리부 하중에 의한 응력

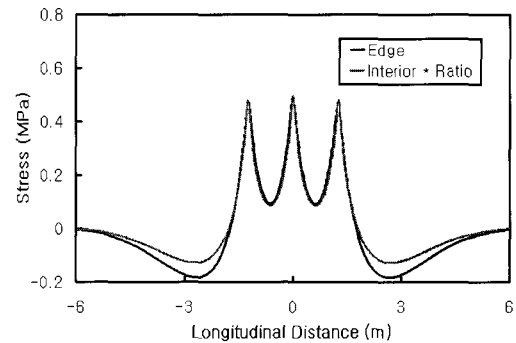
분포와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 부응력이 작용하는 하중의 바깥 부분에서는 모서리부 하중에 의한 부응력의 값이 일반적으로 약간 더 큰 것을 알 수 있다. 하지만 하중의 작용점 부분에서는 응력 분포가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 특히, 단축과 삼축의 하중 부분에서의 응력 분포는 거의 완벽히 일치하는 것을 볼 수 있다. 복축 하중일 경우에는 두 하중 축의



(a) 단축



(b) 복축



(c) 삼축

그림 12. 종방향 응력 분포 비교



사이에서의 응력 분포가 미소하게 다른 것을 알 수 있다. 따라서 최대 응력 비율은 중앙부 하중에 의한 최대 응력을 이용하여 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 유출할 때 사용할 수 있을 뿐 만 아니라 중앙부 하중에 의한 응력 분포로 모서리부 하중에 의한 응력 분포를 유출하는데도 사용할 수 있다. 다만 하중의 바깥 부분에서는 이렇게 유출한 값이 실제 응력의 크기를 약간 과소평가 한다는 것을 고려해야 한다.

중앙부 하중에 의한 최대 응력을 구하여 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 유출하기 위한 최대 응력 비율은 앞에서 살펴본 것과 같이 여러 변수에 의해 그 값이 변하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 최대 응력 비율을 각각의 변수가 변할 때 구하여 다음의 식 (2), (3), (4) 와 같은 예측 방정식을 각 하중 축 수 별로 구하였다. 예측식에서 E 는 콘크리트 탄성계수로 단위는 GPa 이며, h 는 슬래브두께로 단위는 m 이며, k 는 지반탄성계수로 단위는 MN/m^3 이고, P 는 하중 접지압으로 단위는 MPa 이다. 이러한 예측식을 이용하면 단축 또는 다축 하중이 콘크리트 포장의 중앙부에 작용할 때의 최대 응력을 구해 모서리부에 하중이 작용할 때의 최대 응력을 예측할 수 있다. 반대로 하중이 모서리부에 작용할 때의 최대 응력을 알면 이러한 예측식을 거꾸로 사용하여 하중이 중앙부에 작용할 때의 최대 응력을 유출할 수 있다.

- 단축 하중일 경우 최대 응력 비율

$$Ratio = -\frac{4.9}{100} \ln E - \frac{4.7}{100} \ln h + \frac{4.916}{100} \ln k + \frac{6.167}{100} \ln P + 1.729 \quad (2)$$

- 복축 하중일 경우 최대 응력 비율

$$Ratio = -\frac{4.9}{100} \ln E - \frac{7.3}{100} \ln h + \frac{7.206}{100} \ln k + \frac{0.121}{100} \ln P + 1.798 \quad (3)$$

- 삼축 하중일 경우 최대 응력 비율

$$Ratio = -\frac{4.7}{100} \ln E - \frac{9.4}{100} \ln h + \frac{7.146}{100} \ln k + \frac{0.113}{100} \ln P + 1.838 \quad (4)$$

이러한 예측식의 정확도를 분석하기 위하여 표 2에 나타난 것과 같이 예측식을 사용하여 구한 최대 응력 비율과 실제 해석에 의해 구한 최대 응력 비율을 비교 분석하였다. 표에서 최대 응력 (maximum stress) 또는 최소 응력 (minimum stress)이라 함은 변수들이 표 1에 나타난 범위 내에서 포장의 응력을 각각 최대 또는 최소로 만드는 조합으로 이루어졌을 때이다. 또한 최대 비율 (maximum ratio)과 최소 비율 (minimum ratio)은 변수들의 조합이 최대

표 2. 예측식의 정확도

Single									
Combination	pressure (MPa)	E (GPa)	h (m)	k (MN/m ³)	In-Stress (MPa)	Ed-Stress (MPa)	Actual Ratio	Formula	Error (%)
Maximum Stress	1.422	50	0.15	20	1.6439	2.6886	1.6355	1.6463	0.66
Minimum Stress	0.356	10	0.45	200	0.1487	0.2344	1.5767	1.5945	1.13
Maximum ratio	0.356	50	0.45	20	0.2577	0.4558	1.7685	1.7819	0.75
Minimum ratio	1.422	10	0.15	200	0.9557	1.3493	1.4118	1.4589	3.34

Tandem									
Combination	pressure (MPa)	E (GPa)	h (m)	k (MN/m ³)	In-Stress (MPa)	Ed-Stress (MPa)	Actual Ratio	Formula	Error (%)
Maximum Stress	1.422	50	0.15	20	1.5244	2.4218	1.5887	1.6144	1.62
Minimum Stress	0.356	10	0.45	200	0.1318	0.2004	1.5200	1.5311	0.73
Maximum ratio	0.356	50	0.45	20	0.3042	0.5479	1.8009	1.8152	0.8
Minimum ratio	1.422	10	0.15	200	0.9043	1.2358	1.3665	1.3303	2.65

Tridem									
Combination	pressure (MPa)	E (GPa)	h (m)	k (MN/m ³)	In-Stress (MPa)	Ed-Stress (MPa)	Actual Ratio	Formula	Error (%)
Maximum Stress	1.422	50	0.15	20	1.4312	2.1877	1.5286	1.6050	5.00
Minimum Stress	0.356	10	0.45	200	0.1193	0.1744	1.4619	1.4628	0.06
Maximum ratio	0.356	50	0.45	20	0.3572	0.6487	1.8159	1.7943	1.19
Minimum ratio	1.422	10	0.15	200	0.9001	1.2286	1.3650	1.2736	6.70



응력 비율을 최대와 최소로 만드는 조합으로 이루어졌을 때이다. 이렇게 최대와 최소 응력을 만드는 조합과 최대와 최소의 최대 응력 비율을 만드는 조합에 대하여 예측식의 오차를 분석하면 다른 조합의 오차는 이보다 작게 된다. 표에서 볼 수 있듯이 최대 오차는 단축 하중에서 3.34%, 복축 하중에서 2.65%, 그리고 삼축 하중에서 6.7%로 그리 크지 않은 것을 알 수 있다. 이러한 최대 오차는 모든 변수들이 각 범위의 극한값을 가질 때이므로 실제로 이러한 오차가 존재할 확률은 매우 희박하며 대부분 1% 내외의 오차 범위 안에서 결과가 도출된다.

5. 결론

본 연구는 콘크리트 도로 포장에 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 등 복륵 다축 하중이 포장의 중앙부와 모서리부에 작용할 때 포장의 응력 분포 및 최대 응력의 차이를 분석하고 이러한 응력의 차이가 콘크리트 탄성계수, 슬래브 두께, 그리고 지반 탄성계수에 따라 어떠한 특성을 갖는지를 분석하기 위하여 수행되었다. 변환영역에서의 해석법을 이용하여 중앙부 하중에 의한 응력을 구하였으며 유한요소법을 이용하여 모서리부 하중에 의한 응력을 구하였다. 여러 가지 변수에 대하여 중앙부 하중에 의한 최대 응력과 모서리부 하중에 의한 최대 응력의 비율을 비교하였으며 이러한 최대 응력 비율을 예측할 수 있는 공식을 개발하였다. 이러한 공식을 이용하여 중앙부 하중에 의한 최대 응력에서 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 예측하여 최대 응력 비율 예측 공식의 정확성을 검증하였다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 유출할 수 있었다.

- 축하중의 크기가 일정할 때 축 수가 많아져서 전체 하중이 증가하더라도 중앙부와 모서리부 하중에 의한 콘크리트 포장이 받는 최대 응력은 모두 축 수가 증가할수록 감소한다.
- 중앙부와 모서리부 하중에 의한 콘크리트 포장의

최대 응력은 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리고 지반 탄성계수가 감소할수록 증가한다.

- 중앙부와 모서리부 하중에 의한 종방향 상의 최대 응력이 생기는 위치는 모두 단축과 복축 하중일 경우는 축의 위치이며, 삼축 하중일 경우에는 콘크리트 탄성계수나 슬래브 두께가 증가하던지 지반 탄성계수가 감소하면 최대 응력이 생기는 위치는 양쪽 바깥측에서 중간측으로 이동한다.
- 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 중앙부 하중에 의한 최대 응력으로 나눈 최대 응력 비율은 하중 축 수가 많아질수록 감소한다. 다시 말하면 하중 축 수가 많아질수록 모서리부 하중에 의한 최대 응력과 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 차이가 감소한다는 것을 의미한다.
- 최대 응력 비율은 콘크리트 탄성계수가 증가할수록, 슬래브 두께가 증가할수록, 지반 탄성계수가 감소할수록, 그리고 하중 접지압이 증가할수록 커지게 된다.
- 중앙부 하중에 의한 응력 분포를 최대 응력 비율만큼 증가 시키면 모서리부 하중에 의한 응력 분포와 매우 유사해진다. 하중의 작용점 부분에서의 응력 분포는 거의 일치하며 부응력이 작용하는 하중의 바깥 부분에서는 모서리부 하중에 의한 부응력이 다소 크게 나타난다.
- 중앙부와 모서리부의 최대 응력 비율을 예측할 수 있는 공식을 개발하였으며 예측식의 정확성을 수치해석 결과와 비교하여 검증하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 건설교통부 (2006). "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 2단계 2차년도 최종보고서.



2. 김성민, 조병휘, 권순민 (2006). "이동차량하중에 대한 연속철근콘크리트포장의 거동 및 철근비의 영향", 한국도로학회 논문집, Vol. 8, No. 1, 한국도로학회, pp. 119-130.
3. ABAQUS (2005). *User's Manual Version 6.5*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
4. Kim, S.-M. and Cho, Y.-H. (2006) "Vibration and dynamic buckling of shear beam-columns on elastic foundation under moving harmonic loads." *International journal of solids and structures*, Vol. 43, Issue 3-4, Elsevier Science Ltd. pp. 393-412.
5. 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.
6. Kim, S. M. and Roesset, J. M. (1998). "Moving loads on a plate on elastic foundation," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 124, No. 9, pp.1010-1017.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Westergaard, H. M. (1925). "Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis." *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25-35.
11. 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
심 사 일: 2006. 7. 12
심사완료일: 2006. 9. 11