



변환영역 해석법을 통한 콘크리트 도로 포장의 다축 차량 하중에 대한 응력 분포 분석

김성민^{1)*} · 심재수¹⁾ · 박희범¹⁾

¹⁾경희대학교 토목건축대학

Stress Distribution in Concrete Pavements under Multi-Axle Vehicle Loads Obtained Using Transformed Field Domain Analysis

Seong-Min Kim^{1)*}, Jae-Soo Shim¹⁾, and Hee-Beom Park¹⁾

¹⁾College of Architecture and Civil Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-701, Korea

ABSTRACT The stress distribution and the critical stresses in concrete pavements were analyzed using formulations in the transformed field domains when dual-wheel single-, tandem-, and tridem-axle loads were applied. First, the accuracy of the transformed field domain analysis results was verified by comparing with the finite element analysis results. Then, the stress distribution along the longitudinal and transverse directions was investigated, and the effects of slab thickness, concrete elastic modulus, and foundation stiffness on the stress distribution were studied. The effect of the tire contact pressure related to the tire print area was also studied, and 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 multi-axle loads became larger as the concrete elastic modulus increased, the slab thickness increased, and the foundation stiffness decreased. The number of axles did not tend to affect the critical stress ratio except for a small foundation stiffness value with which the critical stress ratio became significantly larger as the number of axles increased. The critical stress location in the transverse direction tended to move into the interior as the tire contact pressure increased, the concrete elastic modulus increased, the slab thickness increased, and the foundation stiffness decreased. 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, transformed field domain, Fourier transform, stress

1. 서 론

콘크리트 도로 포장의 차량 하중에 의한 응력을 구하기 위하여 Westergaard 방정식¹⁾을 널리 사용해 왔다. 이러한 공식은 하나의 하중이 작용할 때의 콘크리트 포장의 최대 응력을 구할 수 있는 공식이기 때문에 실제 차량 하중인 복륵 또는 다축 하중이 작용할 때의 최대 응력을 제대로 구할 수 없으며 포장에 발생하는 전체적인 응력 분포도 구할 수 없다. 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 복륵(dual wheel)

을 사용하고 있으며 축 수는 하나에서 세 개 까지가 일반적이다. 따라서 콘크리트 포장이 이러한 복륵 단축(single axle), 복축(tandem axle), 또는 삼축(tridem axle) 하중을 받을 때의 응력 분포 및 최대 응력이 생기는 위치를 분석하여 다축 차량 하중에 대한 콘크리트 포장의 거동을 정확히 파악하는 것이 중요시 된다.

최근에는 수치해석법인 유한요소법을 이용한 콘크리트 포장의 모델을 사용하여 포장의 응력 분포를 구하는 것이 일반화 되어 가고 있다. 하지만 유한요소법을 이용하기 위해서는 상용 프로그램을 사용하거나²⁾ 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 복륵(dual wheel) 다축 하중을 고려하며 콘크리트 포장의 응력 분포 및 최대 응력을 빠르게 얻을 수 있는 해석 방법의 적용이 필요시 된다.

콘크리트 포장은 대부분 고속도로 등의 고급도로로 건

*Corresponding author E-mail : seongmin@khu.ac.kr
Received July 15, 2006, Accepted September 13, 2006
©2006 by Korea Concrete Institute

설되고 있기 때문에 일반적으로 본선과 연결된 길어깨 (tied shoulder)를 가지고 있는 경우가 많다. 따라서 불연속 부분인 균열이나 줄눈 부분 등을 제외하고는 차량 하중이 포장의 내부(interior)에 작용한다고 할 수 있으며, 불연속 부분에 하중이 작용할 때도 경우에 따라서는 연속체와 비슷한 거동을 보인다고 할 수 있다. 예를 들어 연속 철근콘크리트 포장의 횡방향 균열에서는 하중전달률이 매우 높아 차량 하중에 대해서는 이곳에서 연속체로 가정할 수 있으며³⁾ 줄눈 콘크리트 포장도 실제로는 줄눈부에서 하중전달이 상당히 크게 일어나기 때문에 극한적으로 이곳을 모서리나 코너 부분으로 고려할 필요성이 크지 않다. 따라서 차량 하중이 포장의 내부에 작용할 때 콘크리트 포장의 응력 분포를 폭넓게 이해하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 유한요소수치해석에 비해 해석 시간을 매우 짧게 줄일 수 있는 방법인 변환영역에서의 해석법을 사용하여 콘크리트 도로 포장의 내부에 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 등 복륵 다축 하중이 작용할 때 콘크리트 포장의 응력 분포를 분석하고 이러한 응력 분포가 포장의 두께, 재료의 성질, 또는 하부층의 지지력에 따라 어떠한 특성을 갖는지를 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 포장에 다축 차량 하중이 작용할 때의 응력 분포를 폭넓게 이해할 수 있는 연구를 수행하였다.

2. 해석 방법

일반적으로 콘크리트 포장의 해석은 Fig. 1에 나타낸 바와 같은 탄성지반위에 놓인 판으로 가정한 모델을 이용하여 수행하며^{4,7)} 본 연구에서도 이러한 모델을 사용하였다. 수평방향으로 콘크리트 슬래브는 무한대로 넓어서 경계영역의 상태에 따라서 하중에 의한 응력 분포가 영향을 받지 않도록 하였다. 종방향을 x 횡방향을 y 라 하

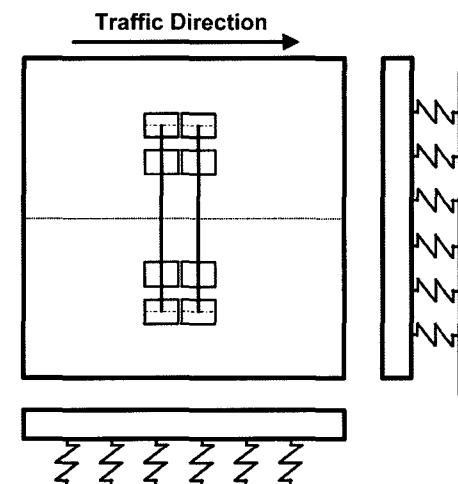


Fig. 1 Concrete pavement model and multi-axle loads

면 이러한 콘크리트 포장 모델의 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_p \left(\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} \right) + kw(x, y) = q(x, y) \quad (1)$$

여기서 w 는 수직변위이며 k 는 하부층을 모델링한 스프링의 탄성계수이고 q 는 하중이다. 콘크리트 슬래브의 휨강성은 다음과 같다.

$$D_p = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2)$$

여기서 E 는 콘크리트의 탄성계수이며 h 는 콘크리트 슬래브의 두께, ν 는 푸아송비이다. η 와 ζ 를 x 와 y 의 변환영역이라 가정하고 식 (1)의 W 와 Q 도 다음과 같이 가정한다.

$$W(\xi, \zeta) e^{i\xi x} e^{i\zeta y} \quad (3)$$

$$Q(\xi, \zeta) e^{i\xi x} e^{i\zeta y} \quad (4)$$

그러면 변환영역에서의 변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W(\xi, \zeta) = \frac{Q(\xi, \zeta)}{D_p(\xi^2 + \zeta^2)^2 + k} \quad (5)$$

결국 이중 푸리에 변환을 이용하여 수직변위를 다음과 같이 구한다.

$$W(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Q(\xi, \zeta)}{D_p(\xi^2 + \zeta^2)^2 + k} e^{i\xi x} e^{i\zeta y} d\xi d\zeta \quad (6)$$

그리고 종방향의 응력은 다음 식으로 유추할 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{E_z}{(1-\nu^2)(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\xi^2 + \nu\zeta^2)Q(\xi, \zeta)}{D_p(\xi^2 + \zeta^2)^2 + k} e^{i\xi x} e^{i\zeta y} d\xi d\zeta \quad (7)$$

횡방향의 응력도 비슷한 방법으로 구할 수 있으며 하중은 다음의 식으로 정의할 수 있다.

$$Q(\xi, \zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(x, y) e^{-i\xi x} e^{-i\zeta y} dx dy \quad (8)$$

만일 하중의 크기가 Q 로 일정하면 위의 식은 다음과 같이 다시 쓰여 진다.

$$Q(\xi, \zeta) = 4q \frac{\sin \frac{d_1 \xi}{2} \sin \frac{d_2 \zeta}{2}}{\xi \zeta} e^{-i\xi x_0} e^{-i\zeta y_0} \quad (9)$$

만약에 Fig. 1에 보인 복륵 복축 하중이 작용하면 이러한 하중은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q(\xi, \zeta) = 4q \frac{\sin \frac{d_1 \xi}{2} \sin \frac{d_2 \zeta}{2}}{\xi \zeta} e^{-i\xi x_0} e^{-i\zeta y_0} (1 + e^{-i\xi d_a}) \times (1 + e^{-i\zeta d_t} + e^{-i\zeta d_w} + e^{-i\zeta(d_t + d_w)}) \quad (10)$$

여기서 d_1 과 d_2 는 x 와 y 축 방향의 하나의 바퀴 접촉 길이이며 x_0 와 y_0 는 기준 하중의 x 와 y 축 방향의 좌표이다. 또한 d_a 는 축간의 중심거리이며 d_i 는 복륵에서 바퀴 간의 중심거리이고 d_w 는 좌우 바퀴간의 중심거리이다. 비슷한 방법으로 차륵의 수나 축의 수에 따라 변환영역에서의 하중을 구할 수 있다.

본 연구에서 차량하중은 Fig. 2에 보인 바와 같이 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 하중을 고려하였다. 좌우 축 바퀴 간의 거리와 축간 거리 등은 전형적인 덤프트럭을 기준으로 결정하였다. 바퀴 접지면적은 바퀴의 폭이 일정하다고 가정하고 하중과 바퀴의 공기압에 의해 결정되는 식 (11)에 나타난 종방향의 접지 길이를 이용하여 정의하였다.

$$L = P / (TP \times T) \quad (11)$$

여기서 P 는 하나의 바퀴에 걸리는 하중의 크기이며, TP 는 바퀴의 공기압이고, L 과 T 는 각각 종방향과 횡방향의 바퀴의 접지 길이이다. 따라서 식 (11)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 있다⁸⁾.

변환영역에서의 해석법을 이용하여 구한 결과의 정확성을 확인하기 위하여 유한요소법을 이용하여 구한 결과와 비교한 결과를 Fig. 3에서 보여준다. 그림은 복륵 단축 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 있다⁸⁾.

본 연구에서는 여러 가지의 변수에 의한 영향을 분석하기 위한 해석을 수행하였으며 해석에 고려한 변수 및 각 변수의 범위는 Table 1에 나타내었다. 각 변수의 값 중에서 중간 값을 대표 값으로 정의하였으며 해석 결과 분석 시 특별한 언급이 없으면 이러한 대표 값을 사용하여 해석한 결과를 나타내는 것이다. Fig. 4는 콘크리트 포장에 복륵 복축 하중이 작용할 때의 변형된 모습과 종방향 응력 분포를 보여 준다. 변형된 모습과 응력 분포

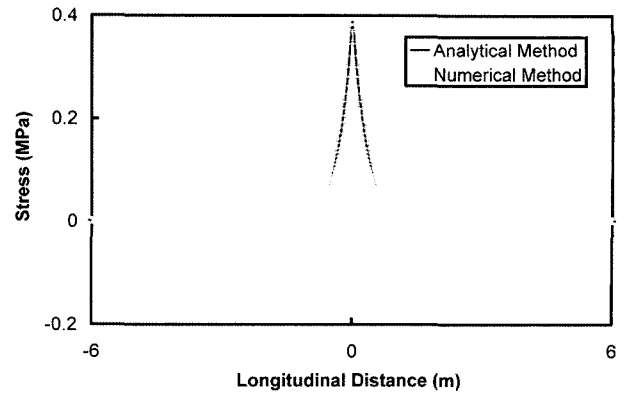


Fig. 3 Comparison of analysis results

는 두 축의 중간 위치를 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.

3. 응력 분포

단축, 복축, 삼축 하중이 작용할 때 최대 응력이 생기는 위치에서 종방향을 따라 종방향 응력 분포를 살펴보면 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 그림에서 가로 축의 종방

Table 1 Properties used in analysis

| 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 ³) | 20, 65, (110), 155, 200 |
| Tire contact pressure (MPa) | 0.356, 0.474, (0.711), 1.422 |
| Poisson's ratio | 0.15 |
| Load magnitude (kN/wheel) | 12.5 |

※ (): Control value

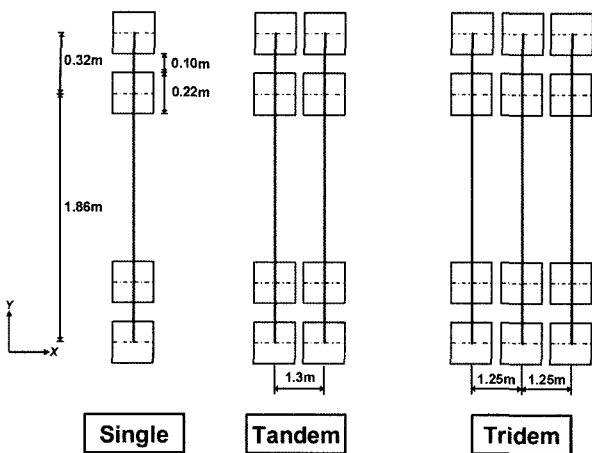


Fig. 2 Single- and multi-axle loads

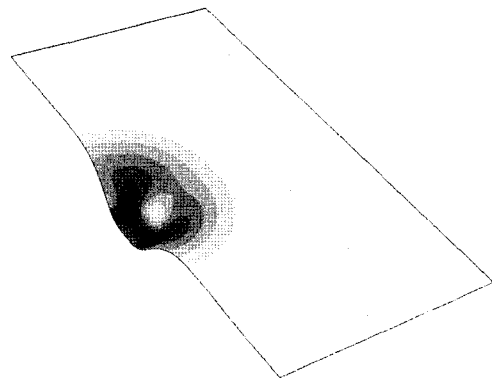


Fig. 4 Deflected shape and stress distribution under tandem-axle loads

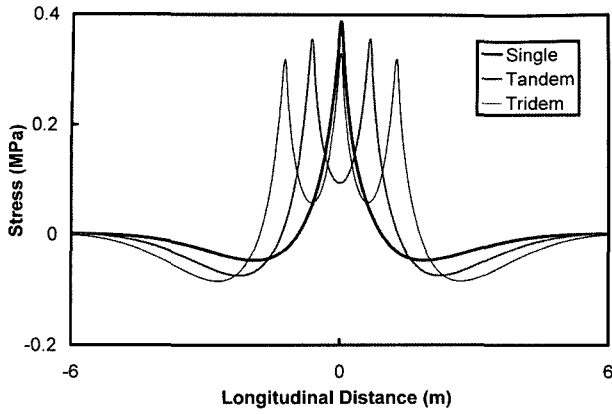


Fig. 5 Longitudinal stress distribution along the longitudinal direction under single- and multi-axle loads

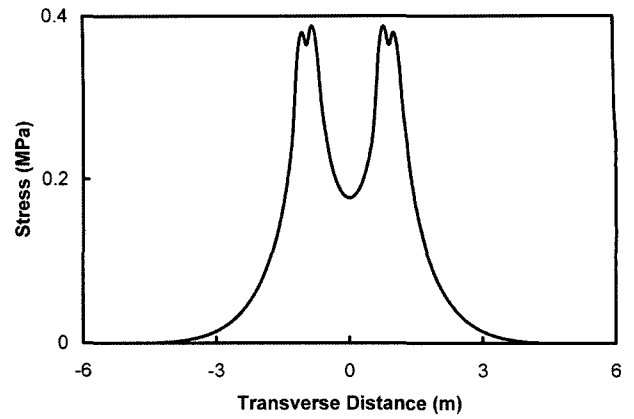


Fig. 6 Longitudinal stress distribution along the transverse direction

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

포장의 횡방향을 따라서 종방향 응력 분포를 살펴보면 Fig. 6과 같다. 그림에서 가로 축의 횡방향 거리(transverse distance) 0은 좌우 복륜의 중간 위치를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 각 바퀴의 위치에서 부분적으로 응력이 증가하는 것을 알 수 있으며 최대 응력은 복륜 중 안쪽 바퀴의 아래에서 발생하는 것을 알 수 있다.

콘크리트의 탄성계수, 슬래브의 두께, 그리고 탄성지반의 지지력이 단축 및 다축 하중에 의한 콘크리트 포장

의 응력 분포에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였다. Fig. 7은 콘크리트 탄성계수가 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 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 발생하는 것을 알 수 있다.

슬래브의 두께가 응력 분포에 미치는 영향은 Fig. 8에서 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

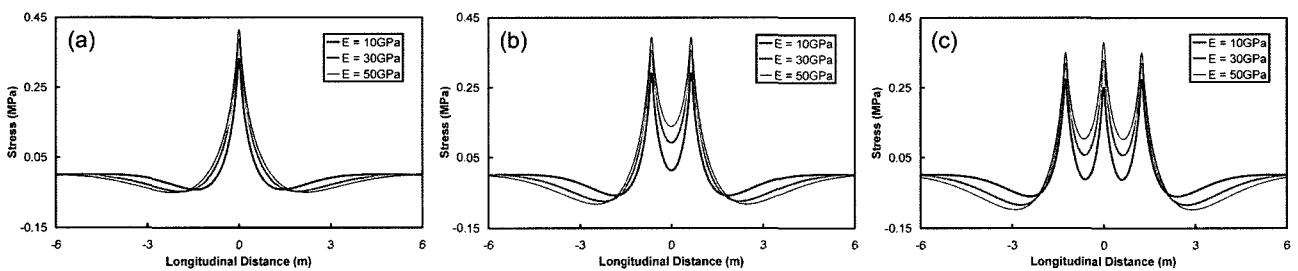


Fig. 7 Effect of concrete elastic modulus on stress distribution; (a) single- (b) tandem- (c) tridem-axle loads

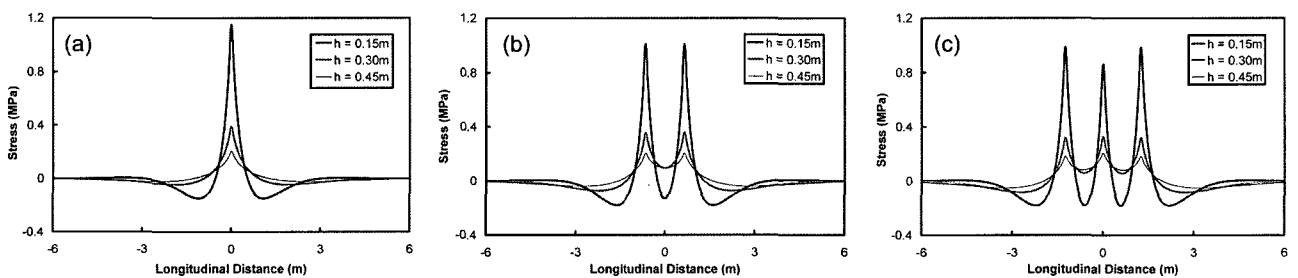


Fig. 8 Effect of slab thickness on stress distribution; (a) single- (b) tandem- (c) tridem-axle loads

부응력의 상태에 이르게 된다.

Fig. 9는 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.

4. 최대 응력 및 위치

콘크리트 포장이 단축 및 다축 하중을 받을 때의 최대 응력의 크기 및 이러한 최대 응력의 발생 위치에 대하여 분석하였다. Fig. 10은 단축 하중 하에서 콘크리트 탄성계수, 슬래브 두께, 지반 탄성계수가 변할 때 최대 응력의 변화를 보여주며 이러한 변화가 하중의 접지압에 따라 어떻게 달라지는 지를 분석하였다. 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리

고 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 탄성계수가 변화할 때와 지반 탄성계수가 변화할 때는 접지압에 따른 영향이 탄성계수의 크기에 따라 큰 차이가 없으나, 슬래브 두께에서는 두께가 얇을 때는 접지압에 따른 최대 응력의 변화가 뚜렷하나 슬래브의 두께가 두꺼워 질수록 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 Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 일정 접지압에서 최대 응력을 각 변수가 대표 값을 가질 때의 최대 응력으로 나눈 값을 비교하였다. 예를 들어, 콘크리트 탄성계수가 변수일 경우에 (Fig. 11(a)) 최대 응력을 그 대표

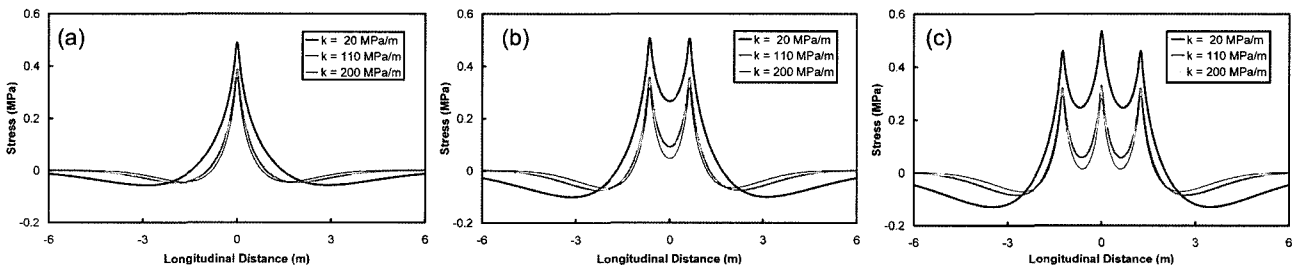


Fig. 9 Effect of foundation stiffness on stress distribution; (a) single- (b) tandem- (c) tridem-axle loads

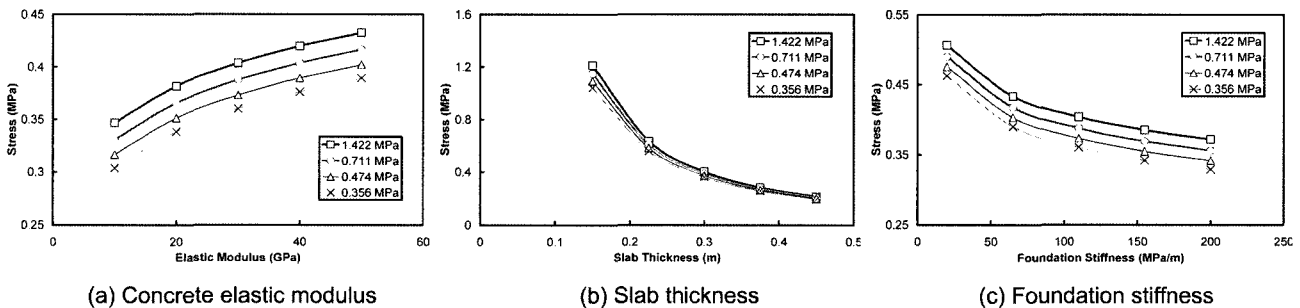


Fig. 10 Changes in critical stresses at given tire contact pressures

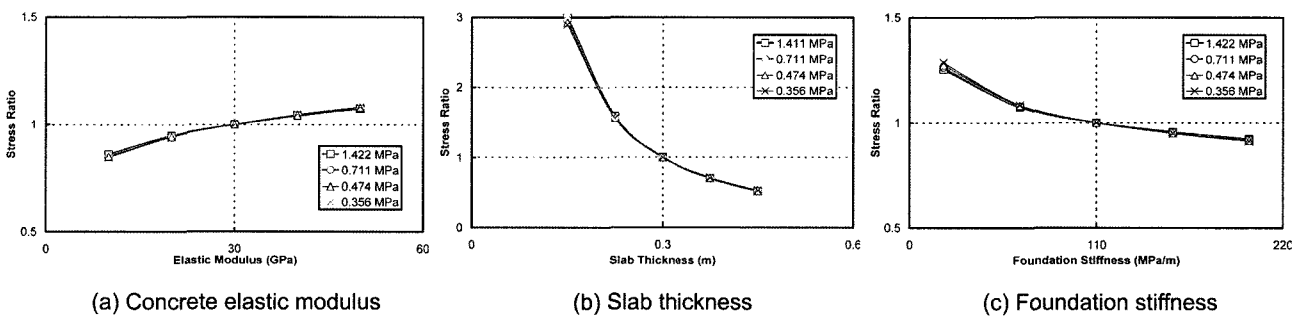


Fig. 11 Changes in critical stress ratios at given tire contact pressures

값인 30 GPa일 때의 최대응력으로 나누어 나온 값을 최대 응력 비율로 정하여 비교하는 것이다. 따라서 콘크리트 탄성계수가 30 GPa일 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 변화를 Fig. 12에서 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(Fig. 12(c)) 축수가 증가 할수록 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 크기 및 발생 위치가 콘크리트 포장의 거동 및 장기 공용성에 매우 중요한 인자이므로 이러한 최대 응력이 하중이 작용할 때 어느 위치에 생기는 지를 분석하였다. 먼저 단축 및 다축 하중에서 횡방향으로 어느 위치에 최대 응력이 생기는 지를 조사하였다. Fig. 13에서 보인 바와 같이 단축 하중일 경우, 콘크리트 탄성계수의 변화(Fig. 13(a))와 슬래브 두께의 변화에 따라서는 하중 접지압이 클 때는 최대 응력의 발생 위치가 변화없이 일정하다. 그림에서 세로축의 횡방향 거리는 가장 바깥쪽 바퀴의 끝에서 부터의 거리이다. 즉, 0.39 m는 가장 바깥의 접지면에서부터 0.39 m 안쪽이라는 것이다. 하나의 바퀴의 접지폭이 0.22 m이고 복륵 간의 공간이

0.1 m이므로 0.39 m는 안쪽 바퀴의 바깥쪽에서부터 70 mm 안쪽의 위치를 말한다. 하중 접지압이 작을 때는(또는 접지면적이 클 때는) 콘크리트 탄성계수가 증가하던지 슬래브 두께가 증가할수록 최대 응력의 횡방향 발생 위치가 바깥쪽에서 안쪽으로 변화하는 것을 알 수 있다. 지반 탄성계수 변화(Fig. 13(c))에 따라서는 최대 응력이 생기는 위치는 하중 접지압이 작을 때는 변화가 없지만 하중 접지압이 커지면 지반 탄성계수가 증가할수록 최대 응력이 생기는 위치가 안쪽에서 바깥쪽으로 변화하는 것을 알 수 있다. 전체적으로는 접지압이 증가하면 횡방향의 최대 응력 발생 위치가 바깥쪽에서 안쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다.

복축 하중에서도 Fig. 14에 나타난 것과 같이 최대 응력이 생기는 위치의 특성이 단축 하중의 경우와 거의 흡사하나 대체적으로 최대 응력이 생기는 위치가 미소하게 안쪽으로 더 이동되는 것을 알 수 있다. Fig. 15에서 보여주는 것과 같이 삼축 하중일 경우에도 최대 응력이 생기는 횡방향 위치의 특성은 단축 또는 복축 하중의 경우와 매우 비슷하지만, Fig. 15(b)와 (c)에서 볼 수 있듯이 하중의 접지압이 매우 작을 때는 슬래브 두께나 지반 탄성계수가 커지면 최대 응력 발생 위치가 안쪽으로 이동하다가 다시 바깥쪽으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 15(b)에서 접지압이 매우 클 경우에도 슬래브 두께가 커지면 최대 응력 발생 위치가 안쪽에서 바깥쪽으로 이동하다가 다시 안쪽으로 변화하는 것을 알 수 있다. 삼축 하중에서 이러한 일정하지 않은 결과가 나오는 이유는 Fig. 16에서 설명 되는 최대 응력이 발생하는 축의 위치가 달라지기 때문인 것으로 생각된다.

중방향 상의 최대 응력이 생기는 위치는 단축 하중일

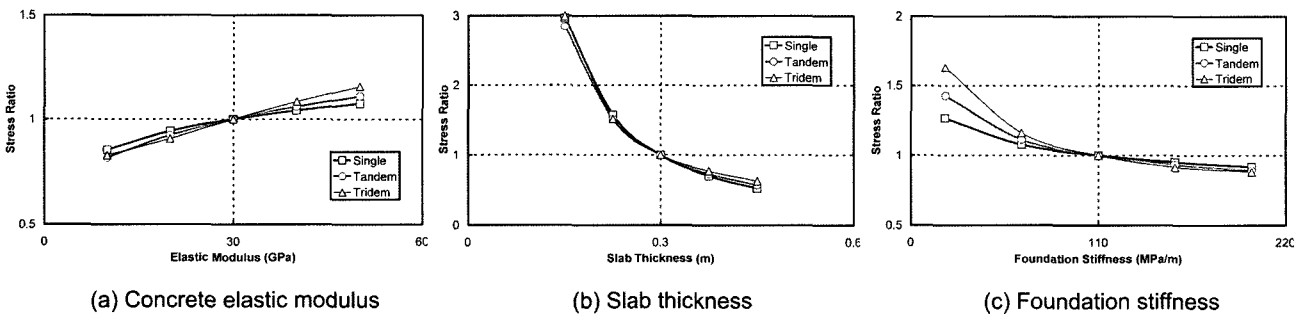


Fig. 12 Changes in critical stress ratios at given number of axles

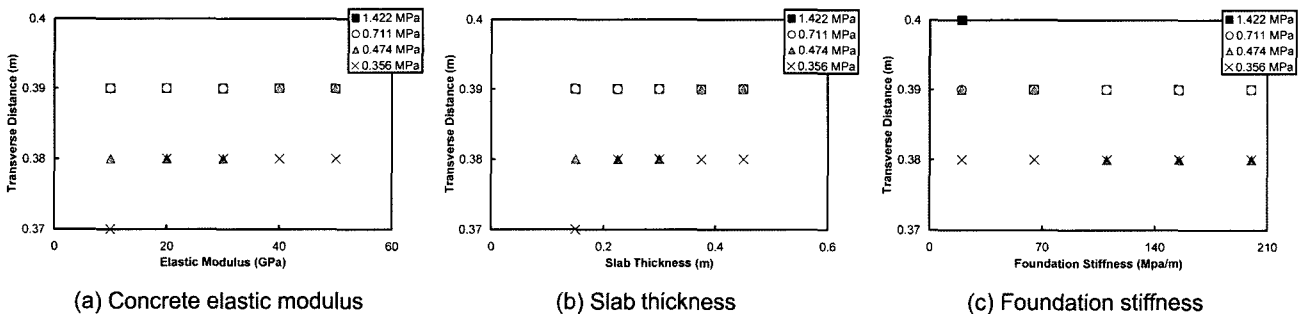


Fig. 13 Critical stress location in the transverse direction under single-axe loads

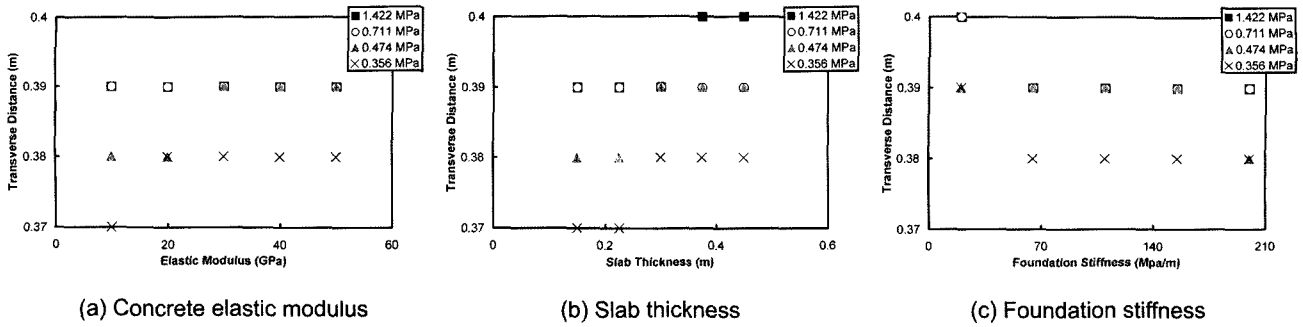


Fig. 14 Critical stress location in the transverse direction under tandem-axle loads

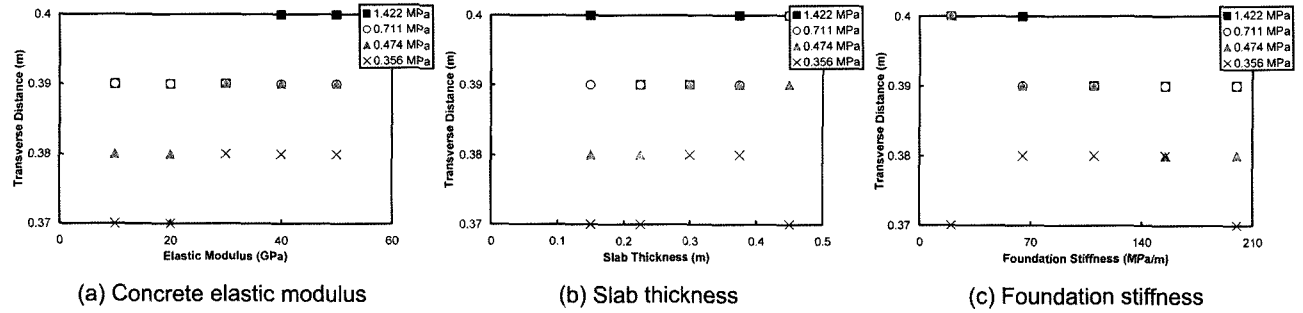


Fig. 15 Critical stress location in the transverse direction under taidem-axle loads

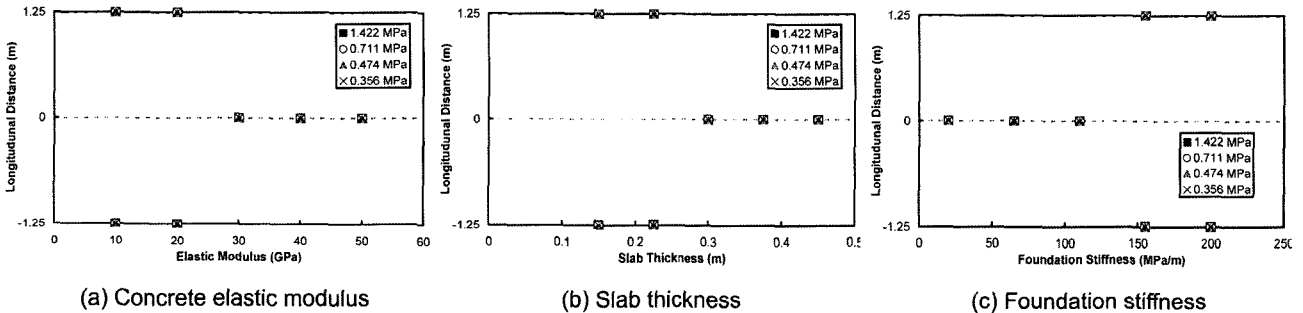


Fig. 16 Critical stress location in the longitudinal direction

경우는 당연히 축의 위치이며, 복축 하중일 경우는 종방향으로의 최대 응력은 두 축의 위치에서 같은 값을 가지게 된다. 삼축 하중일 경우에는 Fig. 16에 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. 결 론

본 연구에서는 변환영역에서의 해석법을 이용하여 콘크리트 포장에 차량 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 등 복륵 다축 하중이 작용할 때 콘크리트 포장의 응력 분포를 폭넓게 분석하였다. 먼저 변환영역에서의 해석법의 정확성을 분석하고 종방향과 횡방향을 따라 응력의 분포

형태를 분석하였다. 그리고 콘크리트 슬래브의 두께, 콘크리트 탄성계수, 지반 탄성계수 등이 응력 분포에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 하중 접지면적과 연관된 하중 접지압의 변화에 따른 콘크리트 포장의 응력 분포도 분석하였다. 특히 콘크리트 포장의 단기 거동 및 장기 공용성과 밀접한 관련이 있는 최대 응력 및 최대 응력 발생 위치에 대한 연구도 수행하였으며 이러한 연구 결과 다음과 같은 결론을 유출할 수 있었다.

- 1) 축하중의 크기가 일정할 때 축 수가 많아져서 전체 하중이 증가하더라도 콘크리트 포장이 받는 최대 응력은 축 수가 증가 할수록 감소한다.
- 2) 축하중 주변의 부응력은 축 수가 많아질수록 증가한다.
- 3) 콘크리트 포장의 최대 응력은 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리고 지반 탄성계수가 감소할수록 증가한다.
- 4) 하중의 크기가 일정할 때 하중의 접지압이 증가할

- 수록 최대 응력이 커진다.
- 5) 콘크리트 탄성계수, 슬래브 두께, 지반 탄성계수 등이 변할 때 축수에 따른 최대 응력 비율의 변화는 대체적으로 미소하지만 지반 탄성계수가 작을 때는 축수가 증가 할수록 최대 응력 비율이 급격히 증가한다.
 - 6) 일반적으로는 접지압이 증가하면 횡방향의 최대 응력 발생 위치가 바깥쪽에서 안쪽으로 이동한다.
 - 7) 일반적으로 콘크리트 탄성계수나 슬래브 두께가 증가하거나 지반 탄성계수가 감소할 때는 횡방향의 최대 응력 발생 위치가 바깥쪽에서 안쪽으로 이동한다.
 - 8) 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 바깥축에서 중간축의 위치로 바뀐다. 지반 탄성계수는 반대로 감소하면 최대 응력이 생기는 위치가 중간축이 된다.
 - 9) 하중 접지압은 종방향 상의 최대 응력 위치에는 영향을 미치지 않는다.

감사의 글

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

1. Westergaard, H. M., "Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis", *Public Roads*, Vol.7, 1925, pp.25~35.
2. ABAQUS, *User's Manual Version 6.5*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I., 2005.
3. 김성민, 조병휘, 권순민, "이동차량하중에 대한 연속철근 콘크리트포장의 거동 및 철근비의 영향", 한국도로학회 논문집, 8권 1호, 한국도로학회, 2006, pp.119~130.
4. Kim, S. M. and McCullough, B. F. "Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude", *Engineering Structures*, Vol.25, Issue 9, Elsevier Science Ltd., 2003, pp.1179~1188.
5. Kim, S. M., Won, M. C., and McCullough, B. F. "Dynamic stress response of concrete pavements to moving tandem-axle loads", *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, No.1809, 2002, pp.32~41.
6. Liu, C., McCullough, B. F., and Oey, H. S. "Response of rigid pavements due to vehicle-road interaction", *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol.126, No.3, 2000, pp.237~242.
7. Zaman, M., Taheri, M., and Alvappillai, A. "Dynamic response of a thick plate on viscoelastic foundation to moving loads" *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.15, 1991, pp.627~647.
8. 건설교통부, "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선 방안 연구", KPRP 2단계 2차년도 최종보고서, 2006, pp. F4-1~F4-103.

요약 본 연구는 콘크리트 포장에 복륜 단축, 복륜 복축, 복륜 삼축 등 복륜 다축 차량 하중이 작용할 때 포장의 응력 분포와 최대 응력을 변환영역에서의 해석법을 이용하여 분석하였다. 우선 변환영역에서의 해석법을 이용한 결과와 유한요소법을 이용한 결과를 비교하여 해석법의 정확성을 파악하였다. 그리고 종방향과 횡방향을 따라 응력의 분포 형태를 분석하고, 콘크리트 슬래브의 두께, 콘크리트 탄성계수, 지반 탄성계수 등이 응력 분포에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 하중 접지면적과 연관된 하중 접지압의 변화에 따른 콘크리트 포장의 응력 분포도 분석하였으며 콘크리트 포장에서 최대 응력이 어느 위치에서 발생하는지에 대한 연구도 수행하였다. 연구 결과 다축 하중에 의한 콘크리트 포장의 최대 응력은 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리고 지반 탄성계수가 감소할수록 증가하였다. 이러한 변수 등이 변할 때 축수에 따른 최대 응력 비율의 변화는 대체적으로 미소하지만 지반 탄성계수가 작을 때는 축수가 증가 할수록 최대 응력 비율이 급격히 증가한다. 횡방향의 최대 응력 발생 위치는 일반적으로는 접지압이 증가하면 바깥쪽에서 안쪽으로 이동하며 콘크리트 탄성계수나 슬래브 두께가 증가하거나 지반 탄성계수가 감소할 때도 최대 응력 발생 위치는 바깥쪽에서 안쪽으로 이동한다. 종방향 상의 최대 응력 위치는 하중 접지압에 영향을 받지 않으며 단축과 복축 하중일 경우는 축의 위치이며 삼축 하중일 경우에는 콘크리트 탄성계수나 슬래브 두께가 증가하던지 또는 지반 탄성계수가 감소하면 최대 응력이 생기는 종방향 위치가 양쪽 바깥축에서 중간축의 위치로 바뀌게 된다.

핵심어 콘크리트 포장, 다축하중, 변환영역, 퓨리에 변환, 응력