

# 콘크리트 포장의 중앙부와 모서리부 다축하중에 의한 응력 분포 비교

## Comparison of Stress Distribution in Concrete Pavements under Multi-Axle Interior and Edge Loads

김성민\*      박희범\*\*      조병휘\*\*\*  
Kim, Seong-Min   Park, Hee Beom   Cho, Byoung Hooi

### 1. 서론

콘크리트 포장의 차량 하중에 의한 bottom-up 균열을 야기하는 응력은 크게 중앙부 (Interior) 하중과 모서리부 (Edge) 하중에 의한 응력으로 구분할 수 있으며 이러한 응력의 상관관계를 이해하는 것이 필요시 된다. 콘크리트 포장의 차량하중에 의한 응력 분포는 Westergaard 방정식 (Westergaard, 1925) 같은 한 개의 바퀴에 의한 응력 분포로 분석하기도 하지만 실제 차량은 복륵 단축 (single axle), 복축 (tandem axle), 또는 삼축 (tridem axle) 하중을 포장에 작용시키기 때문에 이러한 하중을 받을 때의 응력 분포 및 최대 응력을 분석하여 차량의 다축 하중에 대한 콘크리트 포장의 거동을 정확히 파악하는 것이 중요시 된다. 본 연구에서는 콘크리트 도로 포장의 중앙부와 모서리부에 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 등 복륵 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 수치 해석적으로 검증하였다.

### 2. 해석 방법

콘크리트 포장의 해석은 그림 1에 나타낸 바와 같은 탄성지반위에 놓인 판으로 가정한 모델을 사용하였다 (Zaman et al., 1991; Liu et al., 2000; Kim et al., 2002; Kim and McCullough, 2003). 중앙부에 하중이 작용할 때의 응력 분포는 변환영역에서의 해석법을 사용하여 구하였다 (Kim and Roesset, 1998; Kim and McCullough, 2002; Kim et al., 2002, 2003). 모서리 부분에 하중이 작용할 때는 수치해석인 유한요소법을 사용하여 응력 분포를 구하였으며 유한요소해석은 범용 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. (ABAQUS, 2005)

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 <sup>3</sup> )	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)

\* 정희원, 경희대학교 토목건축대학 토목공학전공 조교수

\*\* 경희대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 경희대학교 토목공학과 석사과정

본 연구에서 차량하중은 복륵 단축, 복륵 복축, 복륵 삼축 하중을 고려하였다. 또한 여러 가지의 변수에 의한 영향을 분석하기 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. 축하중을 받을 때 콘크리트 포장의 종방향 응력은 횡방향 응력보다 크기 때문에 본 연구에서는 종방향 응력 분포를 분석 하였으며 특별한 설명이 없는 한 본문에서 응력이라 함은 종방향 응력을 표현하는 것이다.

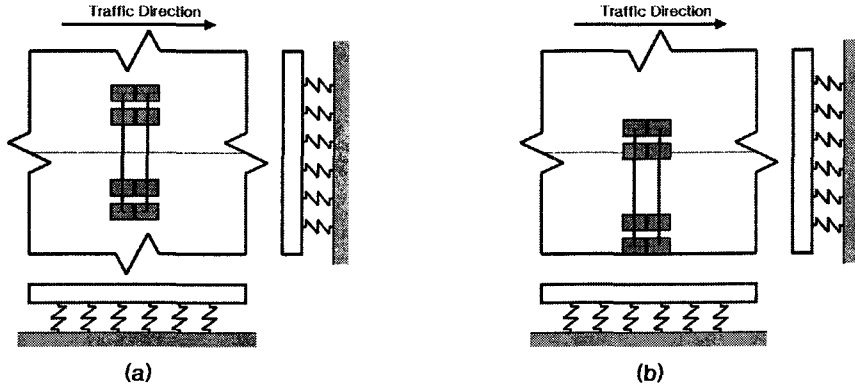


그림 1. 콘크리트 포장 모델: (a) 중앙부 하중, (b) 모서리부 하중

### 3. 축 수에 따른 응력 분포 및 최대 응력 비교

단축, 복축, 삼축 하중이 중앙부와 모서리 부분에 작용할 때 최대 응력이 생기는 위치에서 종방향을 따라 응력 분포를 살펴보면 그림 2에 나타낸 바와 같다. 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 각 축에 걸리는 하중의 크기를 일정하게 하였으므로 하중 축 수가 많아지면 중앙부와 모서리부 하중에 의한 최대 응력이 모두 감소하는 것을 알 수 있다.

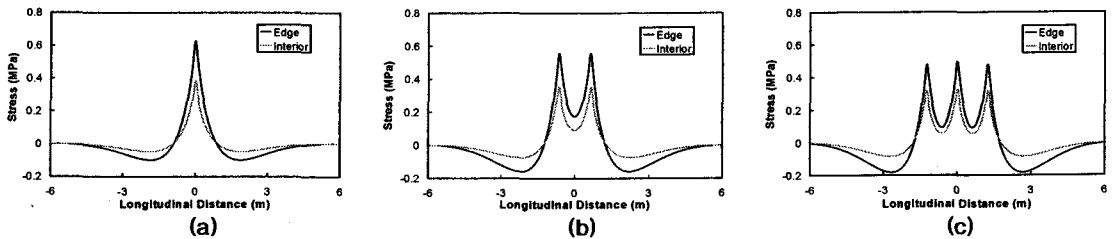


그림 2. 중앙부와 모서리부 하중에 의한 종방향 상의 종방향 응력 분포:

(a) 단축, (b) 복축, (c) 삼축

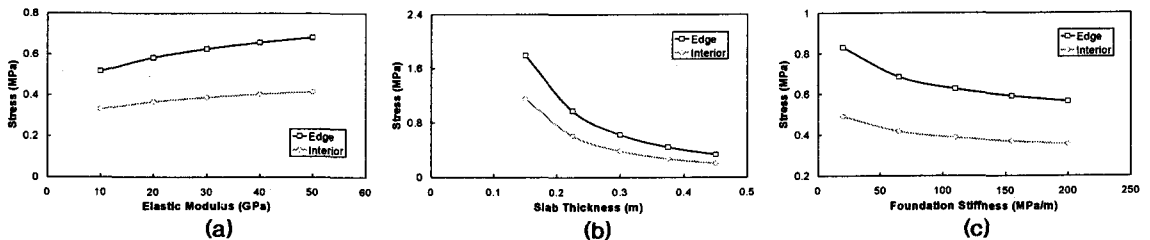


그림 3. 중앙부와 모서리부 하중에 의한 최대 응력 변화 비교:

(a) 콘크리트 탄성계수, (b) 슬래브 두께, (c) 지반 탄성계수

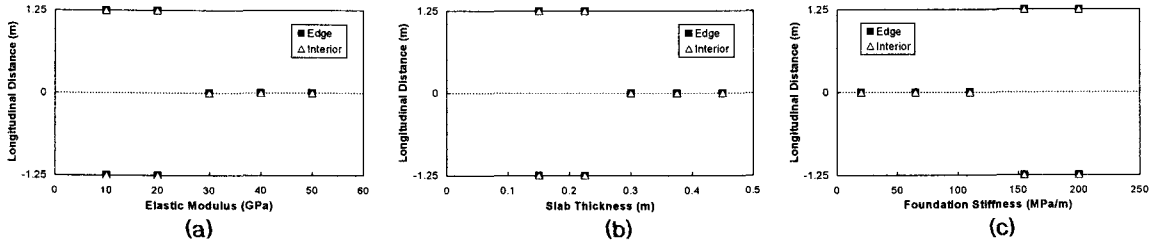


그림 4. 삼축 하중에서 종방향 상의 최대 응력 위치 비교:  
(a) 콘크리트 탄성계수, (b) 슬래브 두께, (c) 지반 탄성계수

콘크리트의 탄성계수, 슬래브의 두께, 그리고 탄성지반의 지지력 (지반 탄성계수)이 중앙부와 모서리 부분의 단축 및 다축 하중에 의한 콘크리트 포장의 최대 응력에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였으며 단축 하중에 의한 최대 응력의 변화를 그림 3에서 보여준다. 전체적으로 살펴보면 모서리부 하중에 의한 최대 응력이 중앙부 하중에 의한 최대 응력에 비해 뚜렷이 큰 것을 알 수 있으나 각각의 변수들이 변화할 때의 최대 응력의 변화 경향은 서로 매우 비슷한 것을 알 수 있다.

중앙부와 모서리부에 하중이 작용할 때 최대 응력의 크기 뿐 만 아니라 최대 응력의 발생 위치에 대한 비교 분석도 수행하였다. 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 4에 나타낸 것과 같이 콘크리트 탄성계수가 증가하거나 슬래브 두께가 증가하면 최대 응력이 생기는 종방향 상의 위치는 양쪽 바깥측에서 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. 중앙부와 모서리부 하중에 의한 최대응력 비율

먼저 모서리부 하중에 의한 최대 응력과 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 비율을 분석하였다. 그림 5는 콘크리트의 탄성계수가 변할 때 모서리부 하중에 의한 최대 응력을 중앙부 하중에 의한 최대 응력으로 나눈 비율을 하중 축 수에 따라 보여준다. 모서리와 중앙부의 최대 응력 비율은 콘크리트 탄성계수가 증가하면 커지는 것을 알 수 있다. 다시 말해 콘크리트 탄성계수가 증가하면 그림 3(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 축 수에 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.

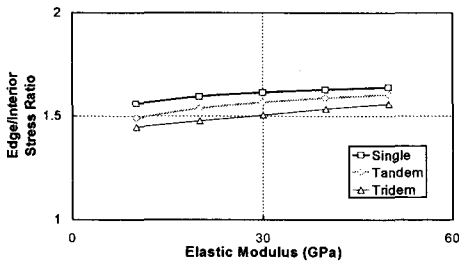


그림 5. 콘크리트 탄성계수 변화에 따른 최대 응력 비율 비교

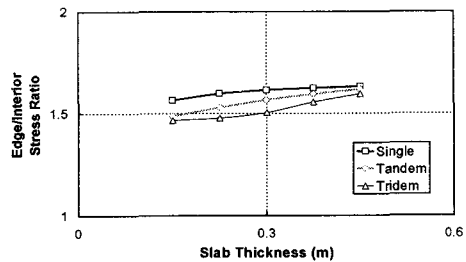


그림 6. 슬래브 두께 변화에 따른 최대 응력 비율 비교

슬래브의 두께가 두꺼워지면 그림 6에서 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 3(b)에 나타낸 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 7은 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 3(c)에 나타낸 것과 같이 감소하므로 모서리부와 중앙부의 하중에 의한 최대 응력의 비율이 감소한다는 것은 모서리부 하중에 의한 최대 응력의 감소량이 중앙부 하중에 의한 최대 응력의 감소량 보다 더 크다는 것이다. 또한 지반 탄성계수가 작아지면 하중 축 수에 따른 최대 응력 비율의 차이가 감소하여 매우 작은 지반 탄성계수일 때는 하중 축 수에 관계없이 최대 응력 비율이 거의 같아지는 것을 알 수 있다.

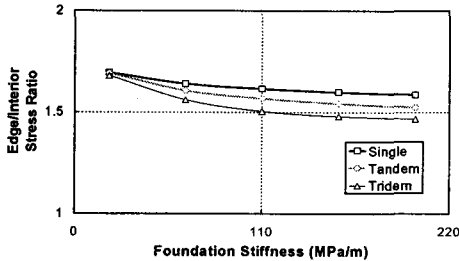


그림 7. 지반 탄성계수 변화에 따른 최대 응력 비율 비교

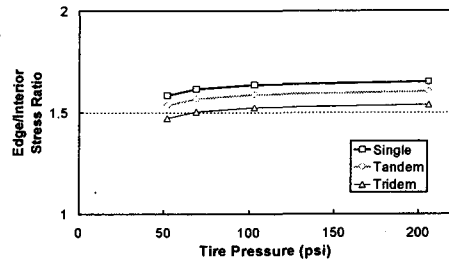


그림 8. 하중 접지압 변화에 따른 최대 응력 비율 비교

하중 접지압의 변화에 따른 최대 응력 비율의 변화를 그림 8에 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 축 수에 따른 최대 응력 비율의 차이는 하중 접지압의 크기에 관계없이 거의 같은 것을 알 수 있다.

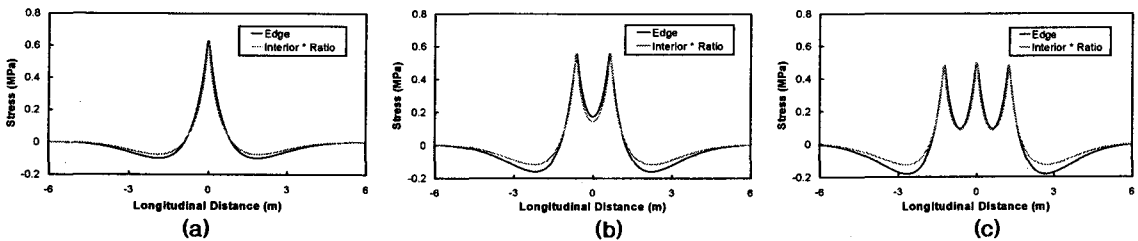


그림 9. 종방향 응력 분포 비교: (a) 단축, (b) 복축, (c) 삼축

중앙부 하중과 모서리부 하중에 의한 최대 응력 비율을 전체 응력 분포에 적용했을 때의 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 응력 비율만큼 증가 시킨 중앙부 하중에 의한 응력 분포는 모서



리부 하중에 의한 응력 분포와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 특히 하중의 작용점 부분에서는 응력 분포가 거의 일치하는 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 (1), (2), (3) 과 같은 예측 방정식을 각 하중 축 수 별로 구하였다. 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

$$Ratio = -\frac{4.9}{100} \ln E - \frac{4.7}{100} \ln h + \frac{4.916}{100} \ln k + \frac{6.167}{100} \ln P + 1.729 \quad (1)$$

- 복축 하중일 경우 최대 응력 비율

$$Ratio = -\frac{4.9}{100} \ln E - \frac{7.3}{100} \ln h + \frac{7.206}{100} \ln k + \frac{0.121}{100} \ln P + 1.798 \quad (2)$$

- 삼축 하중일 경우 최대 응력 비율

$$Ratio = -\frac{4.7}{100} \ln E - \frac{9.4}{100} \ln h + \frac{7.146}{100} \ln k + \frac{0.113}{100} \ln P + 1.838 \quad (3)$$

E (콘크리트 탄성계수): GPa, h (슬래브두께): m, k (지반탄성계수): MN/m<sup>3</sup>, P (하중접지압): MPa

이러한 예측식의 정확도를 분석하기 위하여 예측식을 사용하여 구한 최대 응력 비율과 실제 해석에 의해 구한 최대 응력 비율을 비교 분석하였다. 최대와 최소 응력을 만드는 조합과 최대와 최소의 최대 응력 비율을 만드는 조합에 대하여 예측식의 오차를 분석한 결과 최대 오차는 단축 하중에서 3.34%, 복축 하중에서 2.65%, 그리고 삼축 하중에서 6.7%로 그리 크지 않은 것을 알 수 있었다. 이러한 최대 오차는 모든 변수들이 각 범위의 극한값을 가질 때이므로 실제로 이러한 오차가 존재할 확률은 매우 희박하며 대부분 1% 내외의 오차 범위 안에서 결과가 도출되는 것을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

- 축하중의 크기가 일정할 때 축 수가 많아져서 전체 하중이 증가하더라도 중앙부와 모서리부 하중에 의한 콘크리트 포장이 받는 최대 응력은 모두 축 수가 증가 할수록 감소한다.
- 중앙부와 모서리부 하중에 의한 콘크리트 포장의 최대 응력은 콘크리트의 탄성계수가 증가할수록, 슬래브의 두께가 감소할수록, 그리고 지반 탄성계수가 감소할수록 증가한다.
- 중앙부와 모서리부 하중에 의한 중방향 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 중간축으로 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 매



우 유사해 진다. 하중의 작용점 부분에서의 응력 분포는 거의 일치하며 부응력이 작용하는 하중의 바깥 부분에서는 모서리부 하중에 의한 부응력이 다소 크게 나타난다.

- 최대 응력 비율을 예측할 수 있는 공식을 유도하였으며 수치 해석을 통해 예측식의 정확성을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 중앙대학교의 조윤희 교수와 류성우 학생에게도 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. ABAQUS (2005). *User's Manual Version 6.5*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
2. 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.
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. (2003). "Mechanistic modeling of continuously reinforced concrete pavement," *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 5, American Concrete Institute, pp. 674-682.
5. 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.
6. 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.
7. Westergaard, H. M. (1925). "Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis." *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25-35.
8. 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.