

FWD 방향을 고려한 콘크리트 포장 하부 상태 평가

Evaluation of State of Concrete Pavement Sublayers Considering Direction of FWD

이재훈	LEE, Jae Hoon	정회원 · 인하대학교 토목공학과 공학석사 포스코건설 토목환경사업본부 설계그룹 차장 (E-mail : maple0917@hanmail.net)
이재훈	LEE, Jae Hoon	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : ranian74@ex.co.kr)
손덕수	Sohn, Dueck Su	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : mgsds@ex.co.kr)
유주호	Liu, Ju Ho	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : juminok3@empal.com)
정진훈	Jeong, Jin Hoon	정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this paper is showing that the state of pavement sublayers can be evaluated differently according to direction of FWD.

METHODS : The concrete pavement slabs above subgrade without anything, subgrade with cavity, and box culvert were modeled by finite element method(FEM). The modeled pavements were analyzed by changing the direction of falling weight deflectometer(FWD). The deflection results obtained from FEM were used to calculate radius of relative stiffness and composite modulus of subgrade reaction using AREA method. Then, the analyzed results were compared to the results of the test performed at the Korea Expressway Corporation(KEC) test road.

RESULTS : The composite modulus of subgrade reaction increased with subgrade elastic modulus, while radius of relative stiffness decreased. The pavement sections of pure earth showed the consistent results regardless of FWD direction. In case there was cavity, the radius of relative stiffness was larger and composite modulus of subgrade reaction was smaller when FWD was leaving the cavity than when approaching the cavity. This pattern became clear when the cavity got larger. In case of the section with box culvert, the pattern was opposite to the case of cavity. When the soil cover depth increased, the effect of box culvert got smaller. When the load was applied far from the cavity and box culvert, the effect was also declined. The test performed at the KEC test road showed identical results to those of finite element analysis.

CONCLUSIONS : The direction of FWD should be considered in evaluation of the state of pavement sublayers because it can be evaluated differently even under identical condition.

Keywords

FWD, concrete pavement, AREA method, pavement sublayers, cavity, box culvert

Corresponding Author : Jeong, Jin Hoon, Associate Professor
Department of Civil Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu,
Incheon 402-751, Korea
Tel : +82.32.860.7574 Fax : +82.32.873.7560
E-mail : jhj@inha.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Nov. 3, 2014 Revised Nov. 4, 2014 Accepted Nov. 21, 2014

1. 서론

도로포장은 시간이 경과함에 따라 교통하중 및 환경 하중에 의해 지지력이 저하되고 이에 따라 부등침하, 단

차 등의 문제점이 발생한다. 이러한 문제점은 포장의 공용성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 운전자의 안전까지 위협하므로 도로의 공용성을 유지하기 위해서는 포장체의

상태를 정확하게 평가하고 적절한 유지보수를 시행하여야 한다.

FWD는 포장하부 평가를 하기 위해 사용되는 포장구조 진단기로서 포장체에 하중이 가해질 때 발생하는 처짐을 측정하고 하중-처짐의 관계를 분석하여 포장하부의 상태를 평가한다. 하지만 포장하부에 공동이 존재하거나 박스암거 등의 지중구조물이 매설되어 포장하부의 지지력이 변화할 경우에는 동일지점에 하중을 가하더라도 FWD의 진행방향에 따라 센서가 놓이는 위치와 이에 따른 처짐의 형태가 달라져 포장하부의 상태가 다르게 예측될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 유한요소방법으로 순수 토공 구간, 공동이 존재하는 구간, 박스암거가 통과하는 구간의 도로포장을 모사하고 FWD의 진행방향을 바꾸며 해석을 수행하였다. 유한요소해석으로 계산된 포장의 처짐을 사용하여 상대강성반경(Radius of relative stiffness)과 합성노상반력계수(Composite modulus of subgrade reaction)를 AASHTO 98 설계지침에서 제시하는 AREA 방법으로 계산하고 비교하였다. 또한 한국도로공사 시험도로에서 2곳의 순수 토공 구간과 2곳의 박스암거 구간에 대한 현장실험을 실시하고 유한요소해석 결과와 비교하였다.

2. FWD를 이용한 포장체 물성의 계산

FWD는 도로포장에 충격하중을 가하고 이에 따라 발생하는 포장체의 처짐을 측정하여 강성을 예측할 수 있는 장비이다. Fig. 1과 같이 지름 300mm의 원형 재하 판으로부터 일정한 간격으로 떨어져서 배치된 다수의 센서로 콘크리트 슬래브 표면의 처짐을 측정한다.

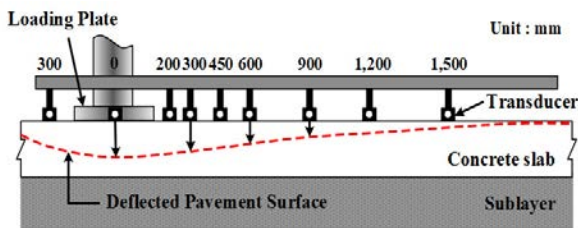


Fig. 1 Structure of FWD Located on Pavement (FHWA, 2000)

본 연구에서는 AASHTO 98년도 설계지침에서 제시된 AREA 방법에 따라 포장하부의 상태를 간접적으로 나타내는 상대강성반경과 합성노상반력계수를 계산하

였다. AREA 방법은 슬래브 중앙에 FWD 하중을 가하고 이때 발생한 슬래브 표면 처짐의 형태를 사용하여 포장체의 물성을 계산하는 방법이다(AASHTO, 1998). AREA 방법은 FWD 센서의 위치와 개수 등에 영향을 받으므로 AASHTO에서는 Table 1과 같이 사용되는 센서의 개수에 따른 위치를 제시하고 있으며, 본 연구에서는 선행연구(Yoo et al., 2002)에 따라 A4 유형을 사용하였다. A4 유형의 경우, AREA 값은 Eq. (1)과 같이 계산된다(AASHTO, 1998).

Table 1. Distance between Loading Plate and Sensors (AASHTO, 1998)

Number of sensor	Distance between loading plate and sensors (mm)
A3	300, 600, 900
A4	0, 300, 600, 900
A5	300, 450, 600, 900, 1500
A7	0, 200, 300, 450, 600, 900, 1500

$$AREA = 6 \left(\frac{d_0}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{300}}{d_0} \right) + 12 \left(\frac{d_{600}}{d_0} \right) + 6 \left(\frac{d_{900}}{d_0} \right) \quad (1)$$

여기서, d_i : 재하 지점에서 i mm 떨어진 슬래브 표면의 처짐(mm)

FWD 센서의 개수에 따른 Table 2의 계수와 Eq. (1)로 계산된 AREA 값을 사용하여 Eq. (2)와 같이 상대강성반경을 계산한다(AASHTO, 1998).

$$l_k = \left[\frac{\ln \frac{A - AREA}{B}}{C} \right]^D \times 25.4 \quad (2)$$

여기서, l_k : 상대강성반경(mm)

Table 2. Coefficients of Radius of Relative Stiffness by Number of Sensor (AASHTO, 1998)

Number of sensor	Coefficient			
	A	B	C	D
A3	24	662.272	-2.122	4.001
A4	36	1812.279	-2.559	4.387
A5	48	158.400	-0.476	2.566
A7	60	289.708	-0.698	2.566

계산된 상대강성반경을 사용하여 Eq. (3)과 같이 합성 노상반력 계수를 구하였다. 노상반력 계수는 Westergaard(1939)가 제시한 것으로 슬래브 중앙에 가해진 하중과 이 지점의 처짐을 측정하여 구할 수 있다.

$$k = \frac{P}{8d_0 l_k^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2l_k} \right) + \gamma - 1.25 \right] \left(\frac{a}{l_k} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

여기서,

- k : 합성노상반력계수 (N/mm³)
- P : FWD 하중 크기 (N)
- d_0 : 재하 지점에서의 처짐 (mm)
- l_k : 상대강성반경 (mm)
- a : 하중 재하판의 반경 (mm)
- γ : 오일러(Euler) 상수 (= 0.577215649)

이와 같이 FWD의 하중에 따른 포장 표면의 처짐을 측정하고 AREA값, 상대강성반경, 합성노상반력계수를 순서대로 구하여 포장하부의 상태를 평가하게 된다.

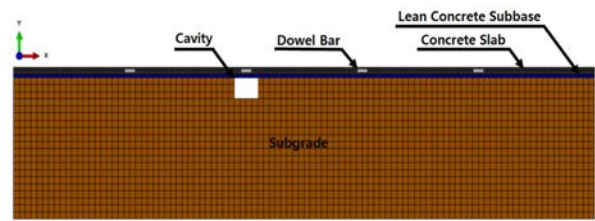
3. 유한요소해석

공동과 박스암거가 존재하는 콘크리트 포장에 대한 2차원 유한요소해석을 수행하여 FWD 진행방향과 포장하부의 상태에 따른 상대강성반경과 합성노상반력계수의 변화를 조사하였다.

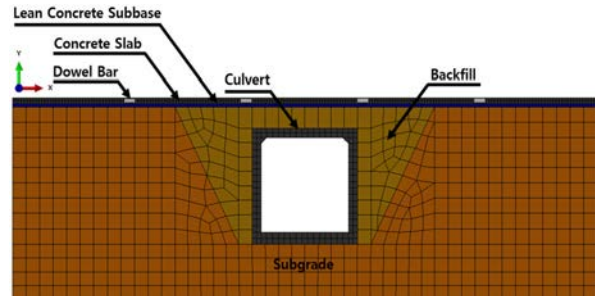
3.1. 유한요소모형

콘크리트 슬래브, 린 콘크리트 보조기층, 노상, 뒷채움부, 다웰바, 박스암거, 공동 등으로 Fig. 2와 같이 유한요소모형을 구성하였으며, 고속도로 표준도(KEC, 2009)를 참고하여 슬래브를 D32×L500의 다웰바로 연결하였다. 상용 프로그램인 ABAQUS(2008)의 4절점 Plane strain 요소(CPE4R), 3절점 Plane strain 요소(CPE3), 그리고 빔 요소(B21)를 사용하여 모형을 제작하였으며, 모형의 제원과 요소의 유형은 Table 3과 같다.

문헌조사를 통해 국내에서 많이 사용되는 포장체의 물성을 Table 4와 같이 모형에 적용하였다. 노상과 박스암거의 뒷채움 재료는 압밀이 완료된 상태로 가정하



(a) Pavement section with cavity



(b) Pavement section with box culvert

Fig. 2 Finite Element Model

Table 3. Size and Element Type of Finite Element Model

Model component	Size	Element type
Concrete slab	6m×0.3m	CPE4R
Lean concrete subbase	30m×0.15m	CPE4R
Subgrade	30m×6m	CPE4R
		CPE3
Dowel bar	D32×500	B21
Box culvert	4.5m×4.5m(0.5m thk.)	CPE4R
Backfill	-	CPE4R
		CPE3

고 Bowles(1996)와 Pimentel 등(2009)이 제시한 물성을 사용하여 Mohr coulomb plasticity 특성을 적용한 비선형으로 해석하였다. 박스암거는 도로암거표준도(MLTM, 2008)를 참고하여 내부의 크기가 4.5m×4.5m(두께 0.5m)인 중형의 암거를 사용하였다. 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층의 접촉면은 분리막에 의한 미끄러짐을 모사하기 위해 Contact 방법을 사용하였고, 린 콘크리트 보조기층과 노상의 접촉면도 마찰거동이 발생하도록 동일한 방법을 사용하였다. 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층의 접촉면에는 0.1, 그리고 린 콘크리트 보조기층과 노상의 접촉면에는 0.45의 마찰계수를 적용하였다(KGS, 2009).

Table 4. Material Properties of Finite Element Model

Model component	Material property	Value
Concrete slab	Elastic modulus (GPa)	28
	Poisson's ratio	0.18
	Density (t/m ³)	2.5
	CTE (microstrains/°C)	10×10 ⁻⁶
Lean concrete subbase	Elastic modulus (GPa)	15
	Poisson's ratio	0.2
	Density (t/m ³)	2.3
Subgrade	Elastic modulus (MPa)	70, 100, 120, 150
	Poisson's ratio	0.3
	Density (t/m ³)	1.9
	Friction angle (degree)	35
	Dilation angle (degree)	0.1
	Cohesion strength (MPa)	0.01
Dowel bar	Elastic modulus (GPa)	200
	Poisson's ratio	0.3
Box culvert	Elastic modulus (GPa)	31
	Poisson's ratio	0.15
	Density (t/m ³)	2.5
Backfill	Elastic modulus (MPa)	110
	Poisson's ratio	0.25
	Density (t/m ³)	2.0
	Friction angle (degree)	40
	Dilation angle (degree)	0.1
	Cohesion strength (MPa)	0

3.2. 해석결과에 미치는 공동의 영향

줄눈부의 린 콘크리트 보조기층 바로 아래에 공동이 존재하는 경우, 공동의 크기와 FWD의 진행방향에 따른 상대강성반경 및 합성노상반력계수의 변화를 유한요소법으로 해석하였다. Fig. 3과 같이 우수 침투의 영향이 가장 큰 줄눈 바로 아래에 공동이 발생한 것으로 가정하고, 공동에 인접한 슬래브의 중앙에 실제 사용되는 것과 동일한 크기인 FWD 하중 71.2kN을 가하였다. 원형 하중 재하판의 지름도 실제와 동일한 300mm로 모형화하였으며, 하중 재하판으로부터 0mm, 300mm, 600mm, 900mm 떨어진 위치의 처짐을 조사하였다.

유한요소해석을 Fig 3(a) 및 Fig. 3(b)와 같이 FWD가 공동에 가까워지는 방향과 공동으로부터 멀어지는 방향으로 구분하여 실시하였다. FWD가 공동에 가까워지는 방향일 때에는 Fig. 3(a)와 같이 처짐을 측정하는 센서는 하중 재하판을 중심으로 공동의 맞은편에 위치하며, 반대로 FWD가 공동에서 멀어지는 방향일 때에는 Fig. 3(b)와 같이 센서가 공동에 가깝게 위치한다.

이와 같이 FWD의 진행방향을 다르게 하여 센서의 위치에 따라 포장의 상대강성반경과 합성노상반력계수를 조사하였으며, Table 5와 같이 공동이 존재하지 않는 경우, 작은 공동이 존재하는 경우, 큰 공동이 존재하는 경우의 3가지로 나누어 공동의 크기에 따른 해석도 실시하였다. 또한 노상의 탄성계수를 70MPa, 100MPa, 120MPa, 150MPa로 변화시키며 해석을 수행하여 노상 탄성계수의 영향을 확인하였다. Fig. 4와 같이 공동에 인접한 슬래브의 중앙에 하중을 가한 Case 1과 그 옆의 슬래브의 중앙에 하중을 가한 Case 2에 대한 해석을 수행하여 FWD 하중과 공동 간의 거리에 따른 포장 물성의 변화를 조사하였다.

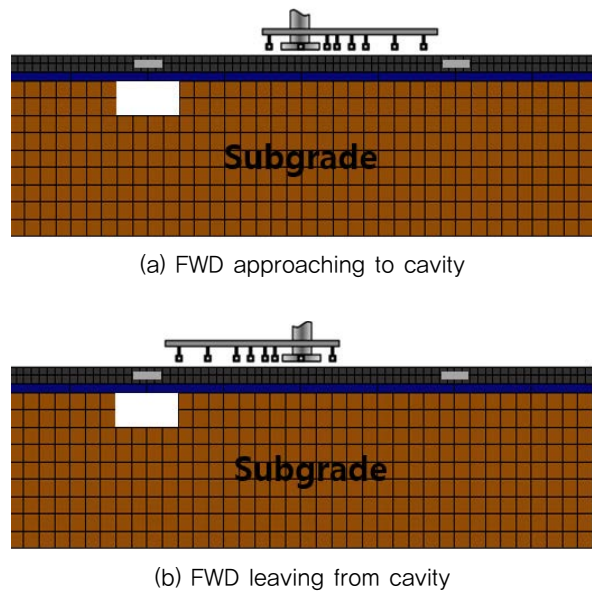


Fig. 3 Direction of FWD in Case of Cavity Existence

Table 5. Size of Cavity

Category	Size of cavity
No cavity	-
Small cavity	0.15m×0.075m
Large cavity	0.3m×0.15m

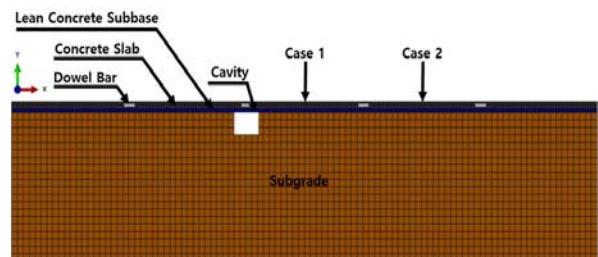
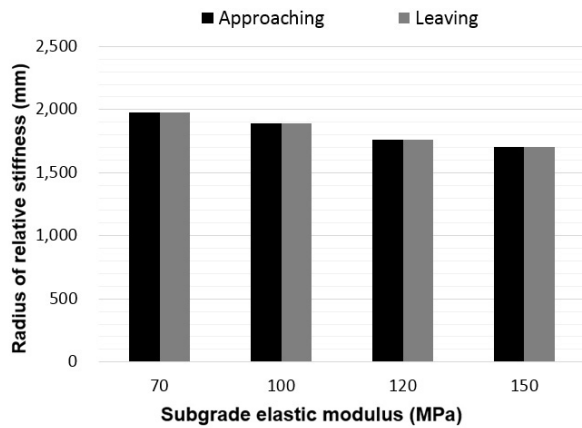
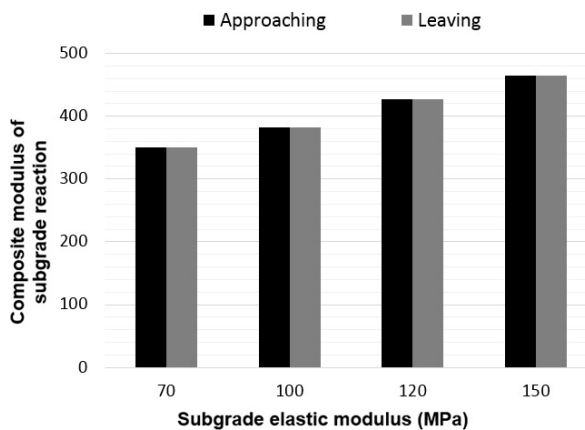


Fig. 4 Cases of FWD Loading for Cavity Section

공동이 없는 순수 토공 구간에 대해 FWD의 진행방향에 따른 해석을 실시하고 Eq. (1)부터 Eq. (3)까지를 사용하여 포장의 상대강성반경과 합성노상반력계수를 계산하였다. Fig. 5에서 보듯이, 상대강성반경과 합성노상반력계수는 FWD의 진행방향에 영향을 받지 않았고, 노상의 탄성계수가 증가함에 따라 상대강성반경은 감소하고 합성노상반력계수는 증가하는 경향을 보여 유효요소모형의 제작과 해석이 합리적으로 수행된 것을 확인하였다.



(a) Radius of relative stiffness

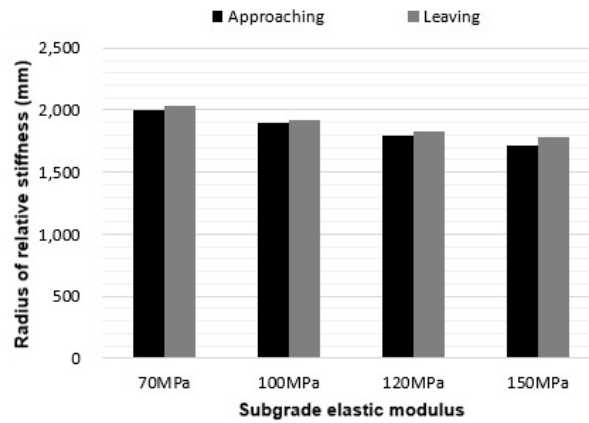


(b) Composite modulus of subgrade reaction

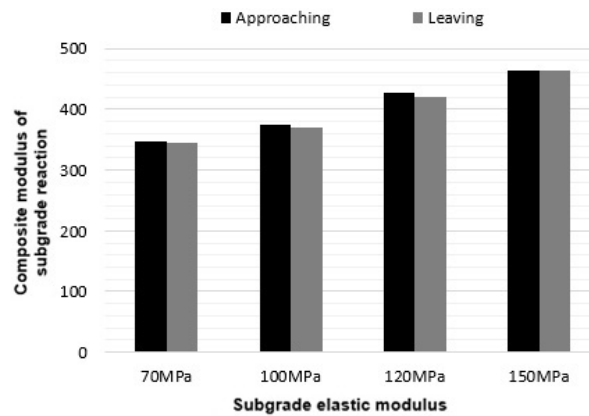
Fig. 5 Comparison of Results by Direction of FWD (No Cavity)

작은 공동에 인접한 슬래브의 중앙에 하중을 가한 경우(Case 1)에 대한 해석결과는 Fig. 6과 같으며 공동이 없는 순수 토공 구간과는 다르게 FWD의 방향에 따라 상대강성반경 및 합성노상반력계수가 다른 것을 확인할 수 있었다. FWD가 공동에서 멀어지는 방향일 경우, 센서들이 공동에 더 가까운 조건이 되므로 FWD가 공

동에 다가가는 방향일 경우에 비해 상대강성반경은 더 크고 합성노상반력계수는 더 작게 계산되었다. 공동이 없는 순수 토공 구간과 마찬가지로 노상의 탄성계수가 증가함에 따라 상대강성반경은 감소하고 합성노상반력계수는 증가하는 경향을 보였다.



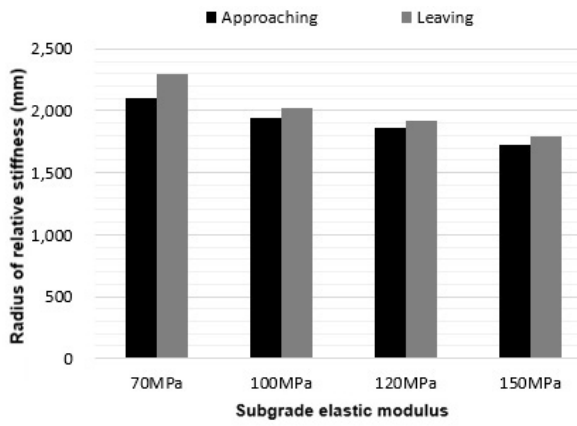
(a) Radius of relative stiffness



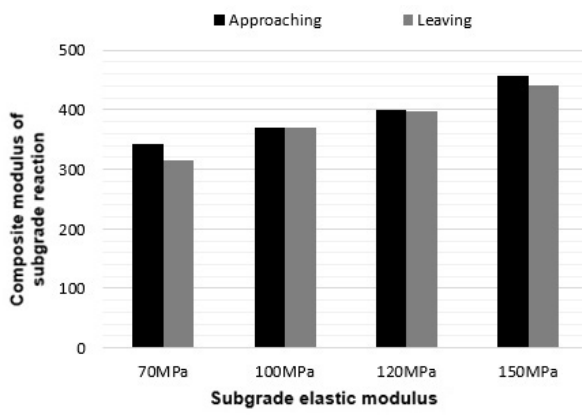
(b) Composite modulus of subgrade reaction

Fig. 6 Comparison of Results by Direction of FWD (Case 1, Small Cavity)

큰 공동에 인접한 슬래브의 중앙에 하중을 가한 경우(Case 1)에 대한 해석결과는 Fig. 7과 같다. 공동이 없는 순수 토공 구간과 같이 노상의 탄성계수가 증가함에 따라 상대강성반경은 감소하고, 합성노상반력계수는 증가하는 경향을 보였다. 작은 공동이 존재하는 경우와 같이 상대강성반경은 FWD가 공동에서 멀어지는 방향일 때 더 컸으며, 합성노상반력계수는 FWD가 공동으로 다가가는 방향일 때 더 크게 나타났다. 작은 공동이 존재하는 경우와 비교할 때 경향은 유사했고 FWD 방향에 따른 물성의 차이는 더 커졌다.



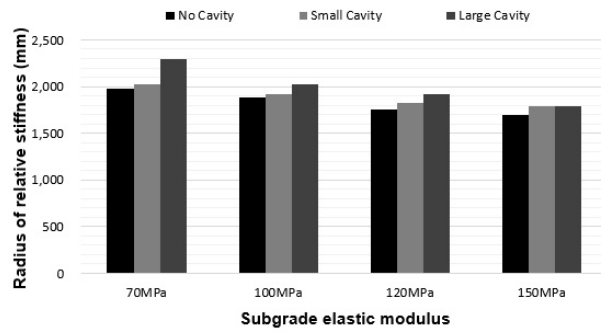
(a) Radius of relative stiffness



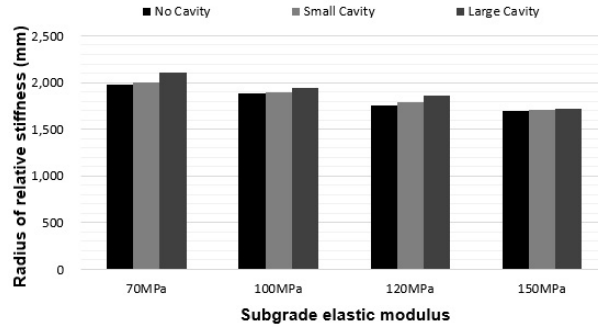
(b) Composite modulus of subgrade reaction

Fig. 7 Comparison of Results by Direction of FWD (Case 1, Large Cavity)

공동에 인접한 슬래브 중앙에서(Case 1) FWD가 공동을 향해 진행하는 방향과 공동으로부터 멀어지는 방향으로 구분하여 공동 크기 별로 노상의 탄성계수에 따른 상대강성반경과 합성노상반력계수의 변화를 다시 정리하였다. Fig. 8에서 보듯이, 포장의 상대강성반경은 FWD 진행방향에 상관없이 노상의 탄성계수가 클수록 감소하였고 공동의 크기가 클수록 증가하였다. 또한 FWD가 공동으로부터 멀어지는 방향일 때, 즉, 센서가 공동에 가까울 때 상대강성반경이 더 크게 나타났다. Fig. 9에서 보듯이, 합성노상반력계수는 FWD 진행방향에 상관없이 노상의 탄성계수가 커질수록 증가하였고 공동의 크기가 커질수록 감소하였다. 또한 FWD가 공동으로 다가가는 방향일 때, 즉, 센서가 공동에서 멀 때 합성노상탄성계수가 더 크게 나타났다.

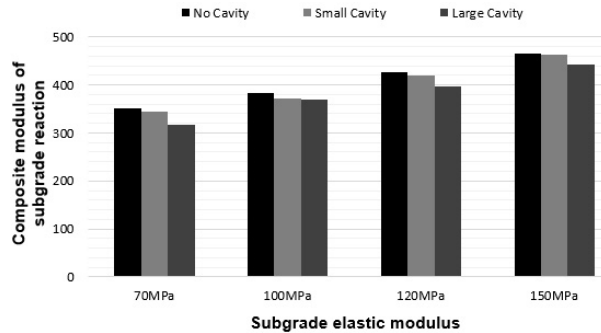


(a) Case of leaving from cavity

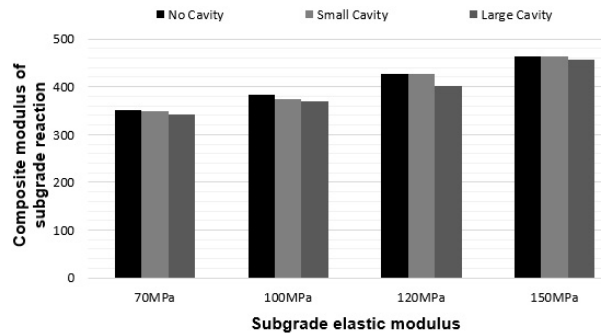


(b) Case of approaching to cavity

Fig. 8 Comparison of Radius of Relative Stiffness by Cavity Size and Subgrade Elastic Modulus (Case 1)



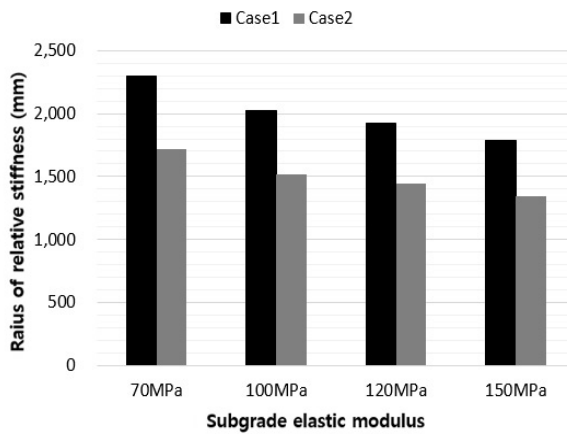
(a) Case of leaving from cavity



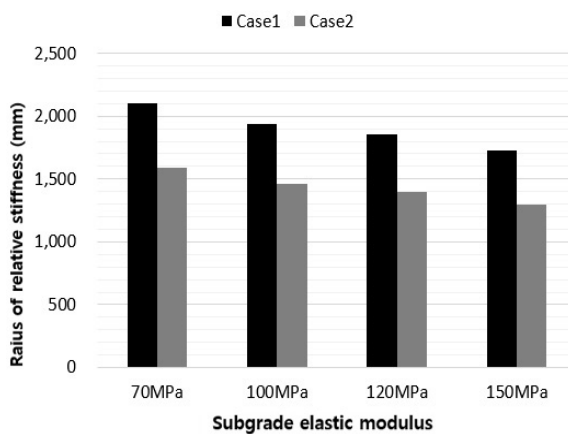
(b) Case of approaching to cavity

Fig. 9 Comparison of Composite Modulus of Subgrade Reaction by Cavity Size and Subgrade Elastic Modulus (Case 1)

FWD 하중을 큰 공동에 인접한 슬래브와 그 옆 슬래브로 옮기며 해석하여 공동과 하중의 거리에 따른 상대강성반경과 합성노상반력계수의 변화를 조사하였다. 상대강성반경은 Fig. 10과 같이 공동에 인접한 슬래브 중앙에 하중이 가해진 경우(Case 1)보다 그 옆의 슬래브 중앙에 하중이 가해져 공동으로부터 멀어진 경우(Case 2) 더 작아졌다. 또한 앞에서 설명한 것과 같이 FWD가 공동에서 멀어지는 방향일 때 상대강성반경이 더 크게 계산되었다. 합성노상반력계수는 Fig. 11과 같이 Case 1보다 Case 2의 경우 더 크게 계산되었고 FWD가 공동으로 다가가는 방향일 때 더 큰 값을 나타냈다. 앞에서 보인 것과 마찬가지로 노상의 탄성계수가 증가함에 따라 상대강성반경은 감소하고 합성노상반력의 계수는 증가하는 경향을 보였다.

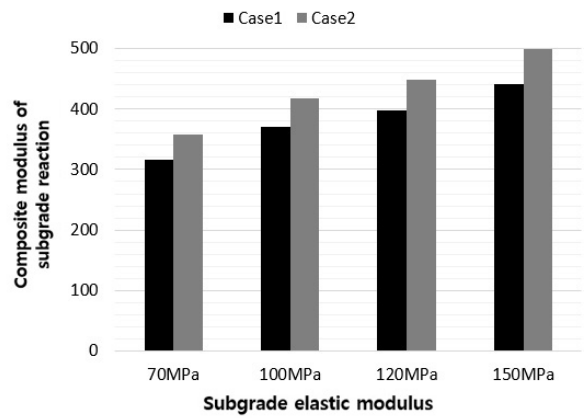


(a) Case of leaving from cavity

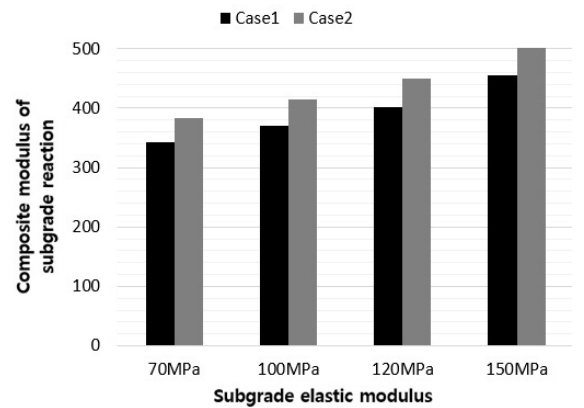


(b) Case of approaching to cavity

Fig. 10 Comparison of Radius of Relative Stiffness by Distance between FWD Load and Cavity (Large Cavity)



(a) Case of leaving from cavity



(b) Case of approaching to cavity

Fig. 11 Comparison of Composite Modulus of Subgrade Reaction by Distance between FWD Load and Cavity (Large Cavity)

3.3. 해석결과에 미치는 박스암거의 영향

박스암거가 포장하부를 통과할 때 FWD 진행방향에 따른 상대강성반경과 합성노상반력계수의 변화를 유한요소방법으로 해석하였다. 린 콘크리트 보조기층 하단부터 암거 상단까지의 거리를 토피고(Soil depth)로 정하고, 토피고를 0m부터 4m까지 변화시키며 해석을 수행하였다. Fig. 12와 같이 암거 위 2개의 슬래브 중앙에 각

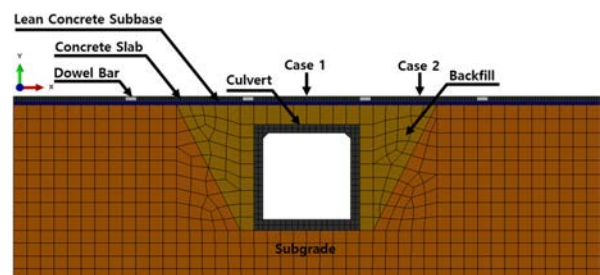
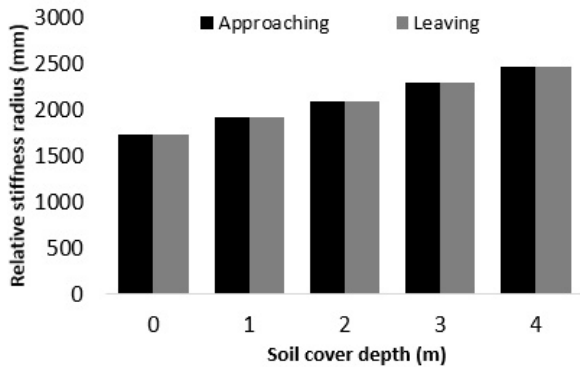


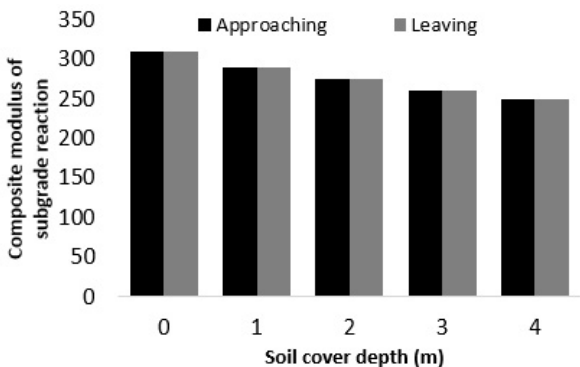
Fig. 12 Cases of FWD Loading for Box Culvert Section

각 FWD 하중을 가하고 상대강성반경과 합성노상반력계수를 계산하였다. 하중 재하판과 하중의 크기, 그리고 센서의 위치 등 측정방법은 앞에서 설명한 것과 같다.

그 결과 동일한 위치에 하중을 가하더라도 FWD의 방향에 따라 상대강성반경 및 합성노상반력계수가 상이하게 계산되었다. Fig. 13과 같이 암거 바로 위의 슬래브 중앙에 하중을 가하면(Case 1) 상대강성반경은 FWD의 방향에 영향을 받지 않고 동일하게 계산되었다. 토피고가 증가함에 따라 암거의 영향이 줄어들어 전체적으로 상대강성반경은 커지고 합성노상반력계수는 작아졌다. 바로 옆의 슬래브에 하중을 가한 결과(Case 2), Fig. 14와 같이 FWD가 암거에서 멀어지는 방향일 경우, 지반에 비해 강성이 큰 암거가 센서들에 더 가까운 조건이 되어 FWD가 암거에 다가가는 방향일 경우에 비해 상대강성반경은 더 작고 합성노상반력계수는 더 크게 계산되었다. 전반적으로 Case 2의 상대강성반경이 Case 1보다 컸고 Case 1의 합성노상반력계수가 Case 2보다 커서 지반보다 강성이 큰 박스암거의 영향을 올바르게 나타냈다. 또한 토피고가 증가함에 따라 FWD 진행방향에 의해 발생했던 물성의 차이도 점점 줄어들었다.

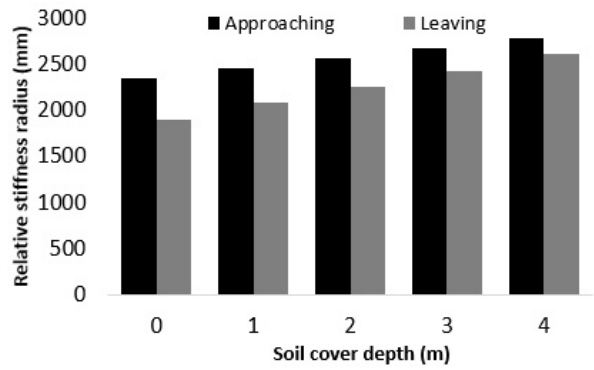


(a) Radius of Relative Stiffness

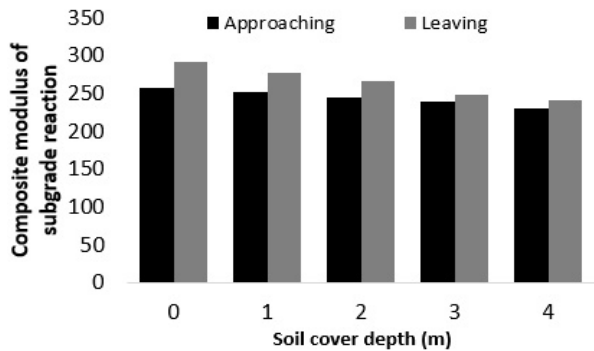


(b) Composite Modulus of Subgrade Reaction

Fig. 13 Comparison of Results by Direction of FWD (Case 1)



(a) Radius of Relative Stiffness



(b) Composite Modulus of Subgrade Reaction

Fig. 14 Comparison of Results by Direction of FWD (Case 2)

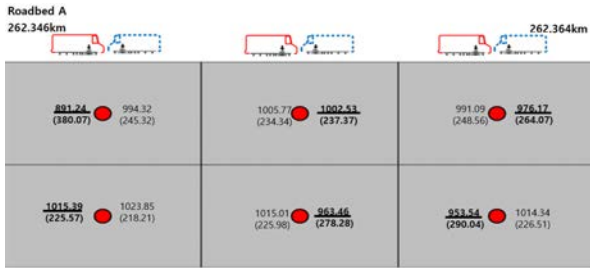
4. 현장실험을 통한 해석결과 검증

유한요소해석 결과를 검증하기 위하여 경기도 여주에 위치한 중부내륙고속 시험도로의 콘크리트 포장 구간 중 순수 토공 구간 2곳과 박스암거가 존재하는 구간 2곳의 총 4곳에서 현장실험을 실시하였다. FWD 진행방향 별로 하중에 따른 슬래브의 처짐을 측정하여 상대강성반경과 합성노상반력계수를 계산하였다.

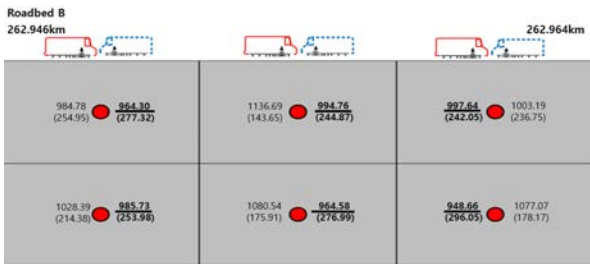
4.1. 순수 토공 구간

지중에 구조물이 없는 순수 토공 구간인 이정 262.346km~262.364km와 262.946km~262.964km의 2곳을 임의로 선정하여 2개 차로에 3개씩 총 6개의 슬래브에 FWD 진행방향 별로 하중을 가하였다. Fig. 15에서 보듯이, 슬래브 내부에 상대강성반경과 합성노상반력계수를 나타내고 FWD 진행방향 별로 비교하였다. 괄호 밖의 숫자는 상대강성반경, 괄호 안의 숫자는 합성노상반력계수이며, 지지력이 커서 상대강성반경이 작고 합성노상반력계수가 크게 측정된 방향을 굵은 글

씨와 밑줄로 표시하였다. 합성노상반력계수는 상대강성 반경 아래 괄호 안에 표기하였다. 그 결과 FWD 진행방향에 따른 상대강성반경과 합성노상반력계수의 뚜렷한 차이와 경향을 발견할 수 없었다. 이는 실험이 실시된 지점이 순수 토공부가 연속되는 구간 중에 있어 FWD의 진행방향이 달라진다고 하여 측정결과가 달라질 이유가 없었기 때문에 판단되었다.



(a) Section A (262.346km~262.364km)



(a) Section B (262.946km~262.964km)

Fig. 15 Comparison of Results Measured at Pure Earth Sections

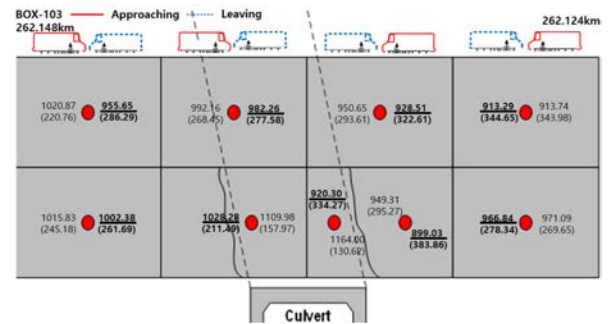
4.2. 박스암거 구간

Fig. 16과 같이 암거의 측면을 따라 포장 표면에 균열이 발생한 번호 103번과 104번의 중형 박스암거(내부 4.5m × 4.5m, 두께 0.5m)의 구간에서 현장실험을 실시하였다. 103번 암거가 속한 구간(이정 262,124km~262,148km)의 토포고는 최소가 1.6m로 맞은편 방향의 최대 5.2m보다 작은 특징이 있었고, 그 영향으로 암거의 양쪽 측면을 따라 외측 차로에 2개의 균열이 발생하였다. 이 구간에서 Fig. 16(a)와 같이 2개 차로에 4개씩 총 8개의 슬래브에서 총 9곳에 대해 측정을 실시하였다. 측정 결과, Fig. 13과 Fig. 14의 유한요소해석 결과와 동일하게 총 9곳 중 6곳에서 FWD가 박스암거로부터 멀어지는 방향일 때 박스암거로 가까워지는 방향에 비해 작은 상대강성반경과 큰 합성노상반력계수를 나타냈다.

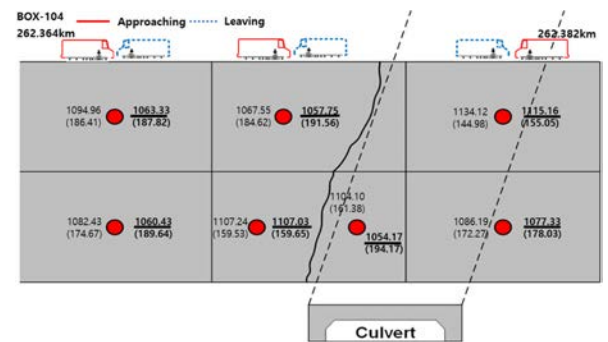
104번 암거가 속한 구간(이정 262,364km~

262,382km)의 토포고도 최소가 1.6m로 맞은편 방향의 최대 5.8m보다 작았고 그 영향으로 암거의 한쪽 측면을 따라 2개 차로에 걸쳐 1개의 균열이 발생하였다. 이 구간에서 Fig. 16(b)와 같이 2개 차로에 3개씩 총 6개의 슬래브에서 총 7곳에 대해 측정을 실시하였다. 측정결과, 7곳 중 5곳에서 예상대로 FWD가 박스암거로부터 멀어지는 방향일 때 작은 상대강성반경과 큰 합성노상반력계수를 나타냈다.

박스암거가 존재하는 2구간의 측정결과를 합하여 정리하면, 총 16곳 중 11곳에서 FWD가 박스암거로부터 멀어지는 방향일 때 상대적으로 작은 상대강성반경과 큰 합성노상반력계수가 계산되어 본 연구의 유한요소 해석결과가 적절한 것으로 나타났다.



(a) Box Culvert No. 103 Section (262.124km~262.148km)



(b) Box Culvert No. 104 Section (262.364km~262.382km)

Fig. 16 Comparison of Results Measured at Box Culvert Sections

5. 결론

1. 유한요소방법을 사용하여 순수 토공 구간, 공동이 존재하는 구간, 박스암거가 통과하는 구간에서 노상의 탄성계수를 변화시키며 해석을 실시하였다. AASHTO 98년도 설계지침에서 제시하는 AREA방법을 사용하여 FWD의 진행방향 별로 포장의 상대강

성반경과 합성노상반력계수를 계산하여 비교하였다. 유한요소해석 결과, 토공부에서는 FWD의 방향에 따른 결과의 차이가 없었다. 다만, 노상의 지지력계수가 증가함에 따라 상대강성반경은 감소하고 합성노상반력계수는 증가하는 것을 확인하였다.

2. 공동이 존재하는 구간의 유한요소해석 결과, FWD의 방향에 따라 포장의 상대강성반경과 합성노상반력계수가 다르게 계산되었다. 공동에서 멀어지는 방향일 때가 공동에 다가가는 방향일 때보다 상대강성반경은 더 컸고 합성노상반력계수는 더 작게 계산되었다. 이러한 경향은 공동이 커질수록 분명해졌다. 또한 노상의 탄성계수가 증가함에 따라 FWD의 방향에 따른 차이가 줄었으며, 공동에 가까운 곳에 하중이 가해진 경우의 상대강성반경이 먼 곳에 가해진 경우보다 컸고 합성노상반력계수는 반대의 경향을 나타냈다.
3. 박스암거가 존재하는 구간에서도 FWD의 방향에 따라 상대강성반경과 합성노상반력계수가 다르게 계산되었다. 공동의 경우와는 반대로 암거에서 멀어지는 방향일 때 상대강성반경이 더 작았고 합성노상반력계수는 더 크게 계산되었다. 토피고가 증가함에 따라 암거의 영향이 작아져서 FWD의 방향에 따른 차이가 줄었다. 하중이 암거에서 멀리 가해진 경우의 상대강성반경이 가까이 가해진 경우보다 컸고 합성노상반력계수는 반대의 경향을 나타냈다.
4. 한국도로공사 시험도로의 순수 토공 구간에서 현장 실험을 실시한 결과 유한요소해석 결과와 같이 FWD의 방향이 바뀌어도 포장의 상대강성반경과 합성노상반력계수에는 변화가 없는 것으로 나타났다. 박스암거가 존재하는 구간에서는 유한요소해석 결과와 동일하게 FWD의 방향에 따라 상대강성반경과 합성노상반력계수에 차이가 나타났으며 이를 통하여 본 연구의 유한요소해석 결과가 검증되었다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.: 2014R1A1A2055003)이며, 한국도로공사 도로교통연구원의 장비 지원으로 현장실험이 이루어졌으므로 감사를 드립니다

References

- AASHTO (1998) AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.
- ABAQUS (2008) Theory Manual Version 6.8. Hibbit, Karleson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, USA.
- Bowles, J. E. (1996) Foundation Analysis and Design. 5th Ed., McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
- FHWA(2000)LTPPManual for Falling Weight Deflectometer Measurements Operational Field Guidelines. Version 3.1, Federal Highway Administration, VA, USA
- KEC (2009) Material Quality and Test Standard for Expressway Construction. Korea Expressway Corporation, Korea
- KGS (2009) Structure Foundation Design basis Exposition. Korean Geotechnical Society, Goomi Book, Korea, p. 483.
- MLTM (2008) Handbook for Quality Inspection of Asphalt Pavement Production and Construction. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea.
- Piementel, M., Costa, P., Carlos, F., and Figueiras, J. (2009) "Behavior of Reinforced Concrete Box Culverts under High Embankments", Journal of Structure Engineering, Vol. 135, Iss, 4, pp. 366-375.
- Westergaard, H. M. (1939) "Stresses in Concrete Runways of Airports", Proceedings, Highway Research Board, Vol. 19, pp. 197-202.
- Yoo, T. S., Han, S. H., Seo, J. W., and Woo, J. W. (2002)Development of Subsurface Evaluation Technique for Concrete Pavement by nondestructive Testing. Research Report, Korea Expressway Corporation, p. 105.