

박스형 암거와 보강슬래브에 의한 줄눈 콘크리트 포장의 거동

Behavior of Jointed Concrete Pavement by Box Culvert and Reinforced Slab

박주영	Park, Joo Young	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 공학석사 (E-mail: pjy0704@naver.com)
손덕수	Sohn, Dueck Su	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 · 공학석사 (E-mail: mgsds@ex.co.kr)
이재훈	Lee, Jae Hoon	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 · 공학석사 (E-mail: ranian74@ex.co.kr)
연우	Yan, Yu	정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail: yanyu0110@nate.com)
정진훈	Jeong, Jin Hoon	정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail: jhj@inha.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : Hollows are easily made, and bearing capacity can be lowered near underground structures because sublayers of pavement settle for a long time due to difficult compaction at the position. If loadings are applied in this condition, distresses may occur in pavement and, as the result, its lifespan can decrease due to the stress larger than that expected in design phase. Although reinforced slab is installed on side of box culvert to minimize the distresses, length of the reinforced slab is fixed as 6m in Korea without any theoretical consideration. The purpose of this paper is investigating the behavior of concrete pavement according to the cover depth of the box culvert and the length of the reinforced slab.

METHODS : The distresses of concrete pavement slabs were investigated and cover depth was surveyed at position where the box culverts were located in expressways. The concrete pavements including the box culverts were modeled by finite element method and their behaviors according to the soil cover depth were analyzed. Wheel loading was applied after considering self weight of the pavement and temperature gradient of the concrete pavement slab at Yeojoo, Gyeonggi where a test road was located. After installing pavement joint at various positions, behavior of the pavement was analyzed by changing the soil cover depth and length of the reinforced slab.

RESULTS : As the result, the tensile stress developed in the pavement slab according to the joint position, cover depth, and reinforced slab length was figured out.

CONCLUSIONS : More reasonable and economic design of the concrete pavement including the box culvert is expected by the research results.

Keywords

concrete pavement, box culvert, soil cover depth, reinforced slab, finite element analysis

Main Author : Park, Joo-Young
Department of Civil Engineering, Inha University,
100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon, 402-751, Korea
Tel : +82.32.873.5332 Fax : +82.32.873.7560
email : pjy0704@naver.com

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

보조기층과 노상의 품질은 시간이 경과함에 따라 저하되어 도로포장의 공용성에 영향을 미친다. 지반에 변

형이 생기면, 강성인 콘크리트 슬래브 또는 린 콘크리트 보조기층 하부와 지반 사이에 이격이 발생하기 쉬우므로 콘크리트 포장이 받는 영향은 매우 크다(Jeong 외,

2005). 도로 하부에는 여러 지중구조물이 매설되어 있는데, 설계 및 시공이 적절하지 못한 경우 포장의 거동과 공용성에 심각한 영향을 미칠 뿐 아니라, 지중구조물 자체에도 큰 손상을 줄 수 있다. 특히 지중구조물 주위는 시공 여건상 다짐이 어려워 장기침하가 발생하기 쉽고, 지중구조물과 지반의 강성 차이는 포장 지지력의 심한 변화를 유발한다. 여기에 환경하중과 교통하중이 재하되면, 지중구조물 바로 위의 콘크리트 슬래브에는 균열, 단차, 줄눈 벌어짐, 부등침하 등 공용성을 저하하는 다양한 문제가 발생한다(Han 외, 2000). 이러한 현상들은 유지관리 비용을 발생시킬 뿐 아니라 차량의 주행성과 안전에도 영향을 미친다.

콘크리트 포장의 줄눈은 하중으로 인한 슬래브 내부의 인장응력을 낮추어 무작위 균열 발생을 억제하는 역할을 한다. 따라서 지중구조물로 인해 포장 지지력이 변화하는 곳에 적절한 위치와 간격으로 줄눈을 설치하는 것은 포장 공용성 증가에 도움을 줄 것으로 예상된다. 하지만 토피고(cover depth)와 하중 위치 등에 따라 지중구조물이 포장 거동에 미치는 영향이 다르므로 줄눈의 위치와 간격을 결정하기 위해서는 다양한 상황을 고려해야 한다. 한편, 지중구조물의 하나인 박스 암거의 상단 측면에는 주변 지반의 침하와 지지력 저하에 의한 포장 파손을 최소화하기 위해 보강슬래브를 설치한다. 하지만 보강슬래브는 국내의 경우 명확한 이론적 근거 없이 길이 6m의 일률적인 길이로 시공되고 있으므로 이를 검토하고 보완할 필요가 있다.

본 논문에서는 국내 고속도로에 위치한 박스형 통로암거 위의 콘크리트 슬래브 파손을 조사하고, 고속도로 건설공사 표준도(KEC, 2009)를 참고하여 박스형 암거를 포함하는 콘크리트 포장의 유한요소 모형을 제작하였다. 줄눈의 위치와 토피고를 변화시키면서 하중조건에 따른 콘크리트 포장의 거동을 해석하고 보강슬래브의 적정길이를 예측하였다.

2. 현장 조사

콘크리트 포장 하부를 지중구조물이 통과하는 고속도로 구간 중 일부를 선정하여 현장 조사를 실시하였다. 조사 위치는 중부내륙고속도로에 위치한 2차로의 한국도로공사 시험도로 상행선 및 하행선 8곳과, 심각한 포장파손이 보고된 기타 고속도로의 5곳이었다. 조사된 총 13개소 중 암거의 내부 크기가 4.5m×4.5m(두께 0.5m)인 곳이 11개소, 6.0m×4.5m(두께 0.6m)와

2.0m×2.0m(두께 0.3m)인 곳이 각각 1개소였다. 이상의 13개 박스형 통로암거 위치에서 Table 1과 같이 수준측량으로 토피고를 측정하고 슬래브 균열 여부를 조사하였다. 도로에는 배수 등을 위한 횡단 경사가 있어 현장의 토피고를 결정하기 어려우므로, 편의상 본 논문에서는 측량이 용이한 길어깨 끝단과 암거 입구 상단 간의 높이 차이를 토피고(cover depth)로 정의하였다. 유한요소 해석에서는 린 콘크리트 보조기층의 하단부터 박스형 암거 상단까지의 거리를 매설깊이(soil cover depth)라고 정의하였다. 즉, 매설깊이는 콘크리트 슬래브 두께(300mm)와 린 콘크리트 보조기층 두께(150mm)를 제외한 암거 위에 존재하는 순수한 지반 두께로서 토피고보다 약 450mm 작다.

Table 1. Results of Cover Depth Survey and Crack Investigation

Route	Internal size of box culvert (Thickness)	Cover depth(m)	Cracking	Location of Crack in Slab	
				Center of culvert	Side of culvert
Joongboo Inland Expressway	4.5m×4.5m(0.5m)	0.876	O	-	O
	4.5m×4.5m(0.5m)	1.621	O	-	O
	4.5m×4.5m(0.5m)	1.597	O	-	O
	4.5m×4.5m(0.5m)	0.537	X	-	-
	4.5m×4.5m(0.5m)	4.095	X	-	-
	4.5m×4.5m(0.5m)	5.233	X	-	-
	4.5m×4.5m(0.5m)	5.803	X	-	-
Others	6.0m×4.5m(0.6m)	0.727	O	-	O
	2.0m×2.0m(0.3m)	1.020	O	O	-
	4.5m×4.5m(0.5m)	1.086	O	O	O
	4.5m×4.5m(0.5m)	0.453	O	O	O
	4.5m×4.5m(0.5m)	0.450	O	-	O

Table 1에서 보듯이 토피고가 2m 미만인 9곳 중 7곳에서 암거 측면 바로 위의 슬래브에 횡방향 균열이 발생하였다. 이 때 슬래브 줄눈은 암거 측면에서 약 1m~3m 떨어진 암거 바로 위에 위치하여, 마치 슬래브의 일부(약 1m~3m)는 강성인 암거 위에, 나머지는 상대적으로 연성인 지반 위에 올려진 것 형태가 되었다. 이에 따라 토피고가 상대적으로 작은 위치에서는 구조적으로 취약한 암거 측면 바로 위의 슬래브에 균열이 발생된 것으로 판단되었다. 토피고 2m 미만인 9곳 중 3곳에서는 박스암거 중앙 바로 위의 슬래브에 횡방향 균열이 발견되었는데, 이 위치에서 서로 맞닿은 콘크리트 중앙분리대가 어긋난 점으로 미루어 동결로 인한 포장 융기의 결과로 짐작되었고, 향후 이에 관한 해석이 필요하다고 판단되었

다. 반면 토포코가 상대적으로 큰 4m 이상의 구간에서는 균열이 발견되지 않았다.

3. 유한요소 모형

본 논문에서는 박스형 암거가 통과하는 콘크리트 포장을 유한요소 방법으로 모형화하고 수치해석을 수행하였다. 범용 유한요소 해석 프로그램 ABAQUS(2007)의 2차원 4절점 plain strain 요소인 CPE4R 등을 사용하여 Fig. 1 및 Table 2와 같이 콘크리트 슬래브, 린 콘크리트 보조기층, 박스형 암거, 보강슬래브, 뒷채움부, 노상으로 포장체를 구분하고 모형화하였다. 고속도로 건설공사 표준도(KEC, 2009)와 도로암거 표준도(MLTM, 2008)를 참고하여 박스형 암거와 보강슬래브 사이는 D25×L500의 다웰바로, 그리고 콘크리트 슬래브 간은 D32×L500의 다웰바로 각각 연결하였고, 보강슬래브가 얹히는 브라켓의 내민 길이는 300mm로 모형화하였다. 양방향을 합하여 박스형 암거 내부 폭의 14배를 넘어서면 지반과 구조물 간의 상호 작용이나 흙의 유효밀도에 변화가 없다는 Kim(2000)의 연구결과에 따라, 시험도로에 시공된 4.5m×4.5m(두께 0.5m)의 암거를 기준으로 전체 모형의 폭을 66m로 정하였다.

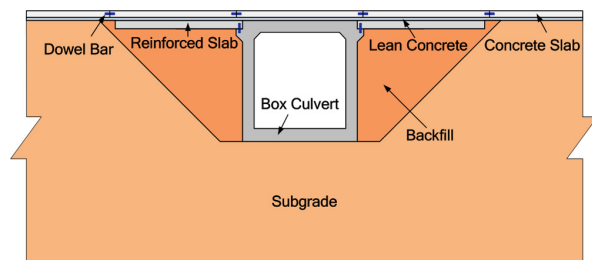


Fig. 1 Finite Element Model of Pavement

Table 2. Size and Element Type of Model Component

Model Component	Size	Element type
Concrete slab	6m×0.3m(11)	CPE4R
Lean concrete subbase	60m×0.15m	CPE4R
Subgrade	60m×15m	CPE4R
Box culvert	4.5m×4.5m(0.5m Thk.)	CPS4R
Reinforced Slab	6m×0.4m(2)	CPE4R
Dowel bar	D32×L500m(10) D25×L500m(2)	B21

콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층 사이는 분리막을 사용하여 미끄러짐을 허용하기 때문에 Contact 방법으로 모형화하였다. 깊은 곳에서는 흙이 구조물로부터 미끄러지려는 힘에 비해 토압이 훨씬 커서 고정되므로 접촉면에서의 마찰은 고려하지 않아도 된다고 알려져 있다(Kim 외, 2002). 그러나 본 연구의 박스형 암거는 린 콘크리트 보조기층 바로 아래의 비교적 얇은 곳에 위치하므로, 암거와 노상의 접촉면에서 흙이 마찰거동하는 Contact 방법으로 모형화하였다. 마찬가지로 린 콘크리트와 노상 사이도 Contact 방법으로 모형화하였다. 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층 사이는 0.1의 작은 마찰계수를 사용하였으며, 린 콘크리트 보조기층과 노상 사이는 0.45, 노상과 암거 사이는 0.4의 마찰계수를 적용하였다(KGS, 2009). 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층, 그리고 다웰바의 물성은 Table 3과 같이 포장 설계에 일반적으로 쓰이는 값을 사용하였다. 노상과 뒷채움 재료는 Bowles(1996)와 Pimentel 외(2009) 등이 제시한 물성을 Mohr Coulomb Plasticity 특성에 적용하여 비선형으로 해석하였다. 해석에 사용된 각 재료의 성질을 Table 3에 나타냈다. 간단한 해석을 위해 콘크리트의 시간 의존적 특성을 배제하였으며, 노상토는 압밀이 완료된 상태로 가정하였다.

Table 3. Material Property of Model Component

Model Component	Elastic Modulus(MPa)	Poisson's ratio	Density (t/m ³)	Friction angle (degree)	Dilation angle (degree)	Cohesion yield stress (MPa)	Thermal expansion coefficient(/°C)
Concrete slab	28,000	0.18	2.5	-	-	-	10×10 ⁻⁶
Lean concrete subbase	15,000	0.2	2.3	-	-	-	-
Subgrade (Pimentel etc., 2009)	70	0.3	1.9	35	0.1	0.01	-
Box culvert	31,000	0.15	2.5	-	-	-	-
Backfill materials (Bowles, 1996)	110	0.25	2.0	40	0.1	0	-
Dowel bar	200,000	0.3	-	-	-	-	-

콘크리트 슬래브, 린 콘크리트 보조기층, 박스형 암거, 노상의 자중을 고려하고, 시험도로가 위치한 경기도 여주 지역 두께 300mm 콘크리트 슬래브의 양과 음의 최대 온도구배를 한국형 포장설계법의 온도예측 프로그램 (MLTM, 2011)으로 구하여 온도하중으로 적용하였다. 설계에 일반적으로 사용되는 윤하중 40kN을 0.2m 간격으로 이동시키면서 콘크리트 슬래브에 발생하는 최대 인장 응력의 위치와 크기를 찾았고, 지중구조물 매설깊이와 보강슬래브의 길이를 변화시키면서 포장의 거동을 분석하였다. 앞서 정의하였듯이, 여기서 매설깊이는 린 콘크리트 보조기층 하단부터 박스형 암거 상단까지의 거리이다.

4. 토피고에 따른 포장 거동

콘크리트 포장 거동에 미치는 토피고의 영향을 알아보

기 위하여 박스형 암거의 매설깊이를 0m, 2m, 4m, 6m 그리고, 8m로 바뀌가며 유한요소 방법으로 해석하였다. 줄눈의 위치는 3가지로 정하였다. 먼저, 암거(4.5m × 4.5m, 두께 0.5m) 중앙 바로 위에 길이 6m 슬래브의 중앙을 일치시키고 이를 CASE 1으로 정하였다. 다음으로 현장조사 결과와 같이 슬래브의 줄눈을 암거 좌측면에서 우측으로 1.5m 떨어진 암거 바로 위에 설치하고 CASE 2로 정하였다. 마지막으로 암거 중앙 바로 위에 슬래브의 줄눈을 위치시키고 CASE 3으로 정하였다.

4.1. 자중+양의 온도구배+윤하중

자중이 고려되고 양의 온도구배가 발생한 상태에서 윤하중이 재하된 경우를 해석하였다. 시험도로가 위치한 경기도 여주 지역 두께 300mm 콘크리트 포장 슬래브의 양의 최대 온도구배인 $+0.17^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 를 온도하중으

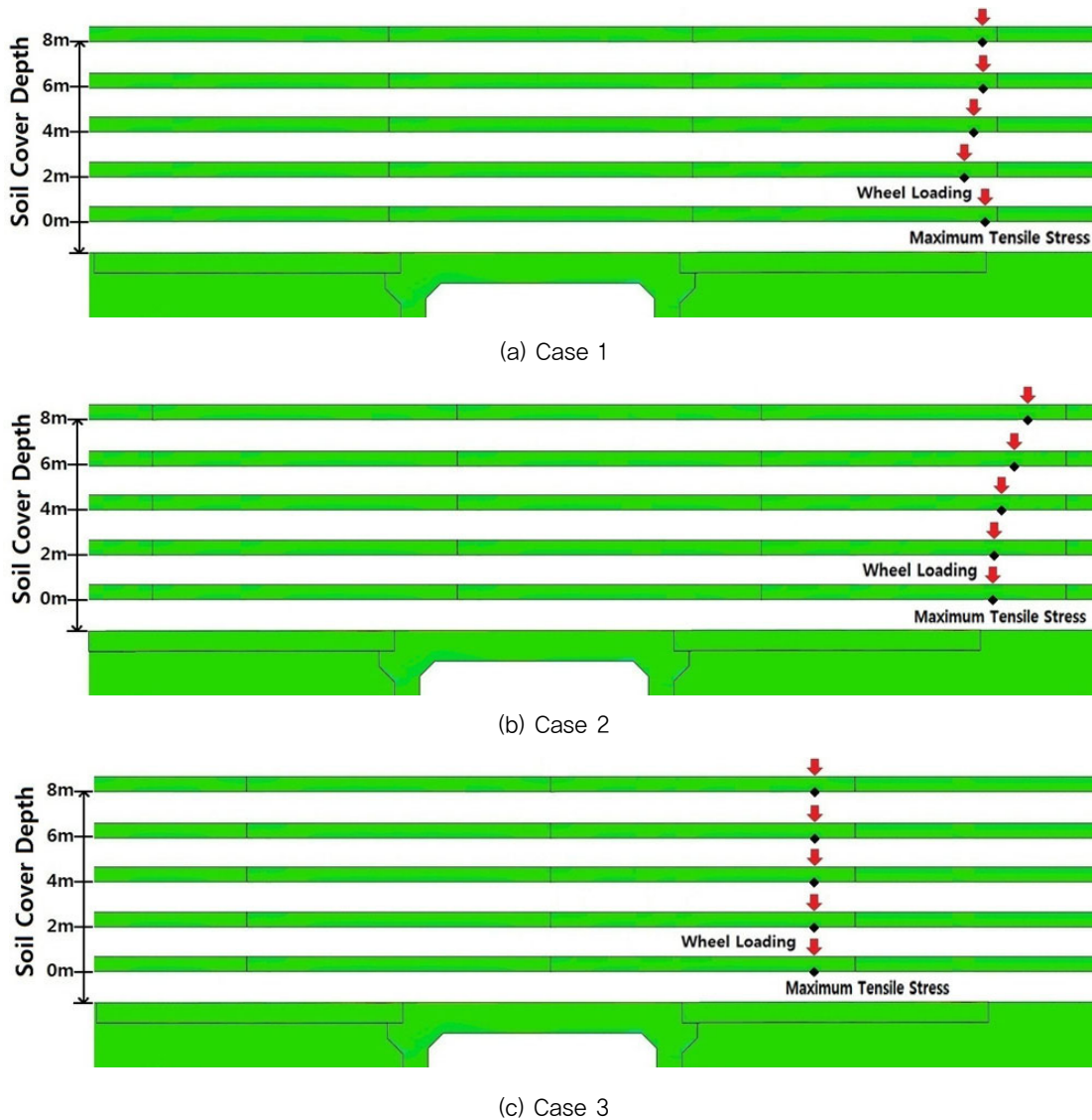


Fig. 2 Wheel Loading Position Where Tensile Stress of Slab is Maximized(Positive Temperature Gradient)

로 재하하여 하향컬링을 모사하였다. 이어서, 운하중 40kN을 좌측에서 우측으로 0.2m 간격으로 이동시키면서 각 하중 위치마다 발생한 슬래브의 최대인장응력을 비교하여 그중 가장 큰 최대인장응력의 위치와 그때의 운하중 위치를 Fig. 2와 같이 박스형 암거 매설깊이에 따라 나타냈다. 하향컬링의 영향으로 모든 CASE의 모든 매설깊이에 대하여, 운하중이 위치한 슬래브 하단에서 최대인장응력이 발생하였다. CASE 1과 CASE 2가 비슷한 경향을 나타냈으나 대칭인 CASE 1은 암거 양측의 보강슬래브가 끝나는 부근에, 그리고 CASE 2는 암거 우측의 보강슬래브가 끝나는 부근에 운하중을 재하했을 때 최대인장응력이 가장 컸다. 특히 CASE 2는 매설깊이가 깊어질수록 최대인장응력과 운하중의 위치가 보강슬래브를 벗어나 우측의 슬래브 줄눈 쪽으로 이동하였다. CASE 3은 매설깊이에 상관없이 보강슬래브 중간 위치인 슬래브 줄눈 근처에서 최대인장응력이 나타났다. CASE 1과 CASE 3은 박스형 암거를 중심으로 대칭이므로, 암거의 좌측에서도 우측과 동일한 결과가 나타났다. CASE 2에서는 박스형 암거 우측에 위치한 슬래브의 최대인장응력이 좌측에 위치한 슬래브보다 컸으나 그 차이는 작았다.

Fig. 3에서 보듯이, 매설깊이가 얇은 경우 슬래브 줄눈이 암거 중앙 바로 위에 위치한 CASE 3의 최대인장응력이 CASE 1과 CASE 2보다 훨씬 컸으나 매설깊이가 커지면서 3개 CASE의 최대인장응력이 유사해졌다. CASE 1과 CASE 2의 최대인장응력은 매설깊이에 상관없이 대체로 유사했으나, CASE 1의 매설깊이가 0m일 때 최대인장응력이 가장 작았다. CASE 1과 같이 슬래브의 중앙이 박스형 암거 중앙 바로 위에 위치하는 경우는 양의 온도구배로 인한 하향컬링 시 슬래브 중앙부가

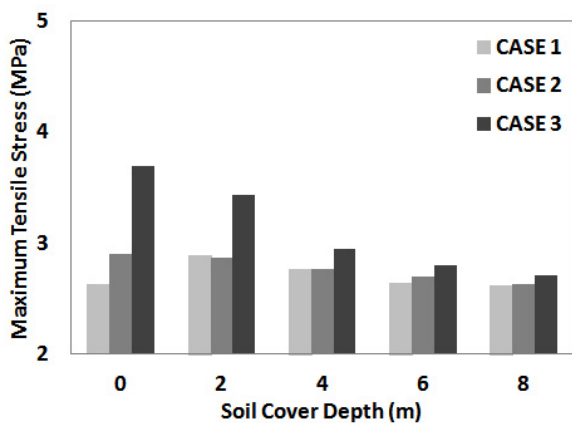


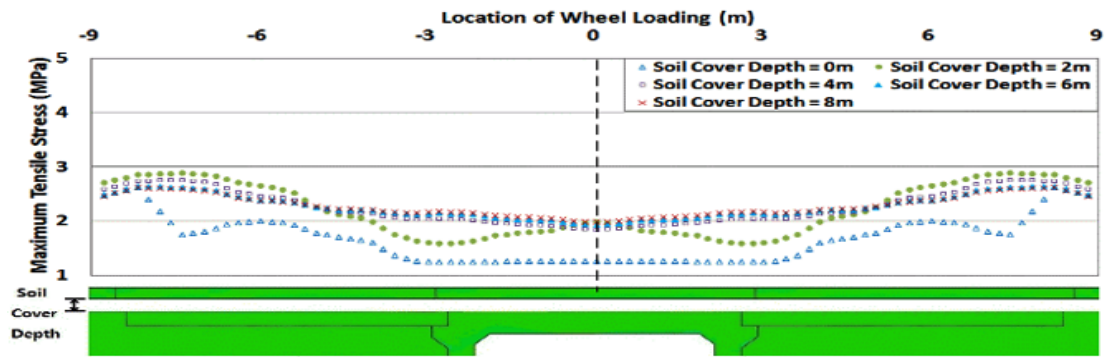
Fig. 3 Comparison of Maximum Tensile Stress of Slab According to Soil Cover Depth and Joint Position(Positive Temperature Gradient)

린 콘크리트 보조기층과 이격되어 운하중이 하부로 잘 전달되지 않으므로 바로 아래에 위치한 암거의 영향을 적게 받았으나, CASE 3의 경우에는 슬래브의 절반이 박스형 암거에 얹히는 구조로서 컬링보다는 암거의 영향이 컸던 것으로 판단되었다.

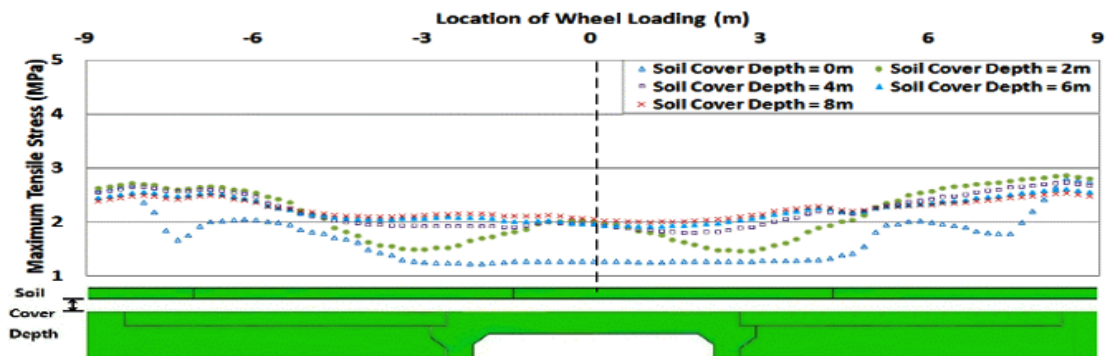
Fig. 4는 운하중에 따라 슬래브의 어떤 위치에 발생한 최대인장응력을 최대인장응력 위치가 아닌 운하중 위치에 표시한 것이다. 모든 CASE의 모든 매설깊이에서 보강슬래브가 끝나는 부근의 슬래브에 운하중이 재하되었을 때 최대인장응력이 가장 커졌고, 보강슬래브를 벗어나 재하되면서 점차 감소하였다. Fig. 4 (a)와 (b)에서 보듯이, CASE 1과 CASE 2는 비슷한 경향을 나타냈는데 매설깊이가 0m인 경우, 운하중이 암거 바로 위에 재하되거나 암거를 약간 벗어난 슬래브 줄눈에 재하될 때까지는 슬래브의 최대인장응력이 일정하게 낮았으나 운하중이 박스형 암거에서 멀어지면서 점차 커지는 경향을 보였다. 이와는 달리 CASE 3에서는 Fig. 4(c)와 같이 운하중이 암거가 끝나는 부근을 벗어나면서부터 최대인장응력이 급격히 증가하다가 줄눈을 넘어 인접한 슬래브에 재하되면서부터는 감소하는 경향을 보였다. 모든 CASE에서 매설깊이 4m부터는 매설깊이가 증가해도 운하중 위치에 따른 슬래브의 최대인장응력 크기에 큰 차이가 없었다. 또한, 매설깊이가 얇을 때에는 운하중 위치에 따라 최대인장응력의 차이가 컸으나 매설깊이가 깊어짐에 따라 차이가 줄어들었다.

4.2. 자중+음의 온도구배+운하중

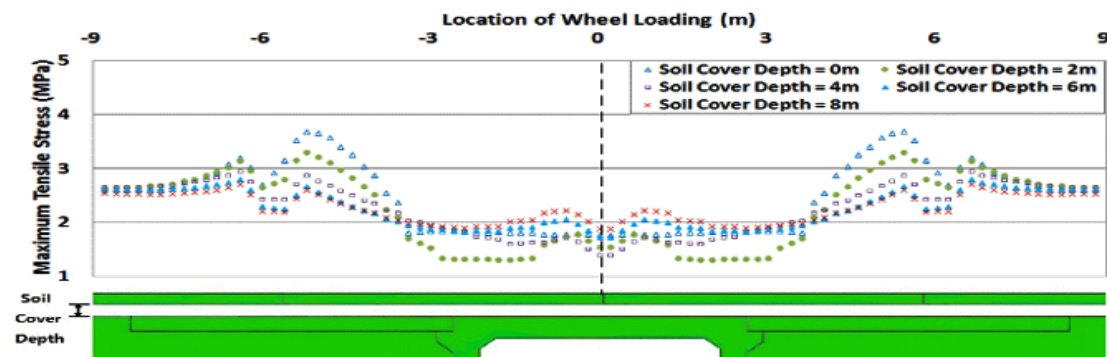
자중이 고려되고 음의 온도구배가 발생한 상태에서 운하중이 재하된 경우를 해석하였다. 음의 최대 온도구배 $-0.57^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 를 계산하고 이를 온도하중으로 재하하여 슬래브의 상향컬링을 모사하였다. 이어서 양의 온도구배의 경우와 동일한 방법으로 운하중을 재하하고 슬래브의 최대인장응력이 가장 커지는 운하중의 위치와 이 때 발생된 최대인장응력의 위치를 Fig. 5와 같이 매설깊이에 따라 계산하였다. 상향컬링의 영향으로 모든 CASE의 모든 매설깊이에서 슬래브 상부에 최대인장응력이 발생하는 것으로 나타났다. 매설깊이가 0m인 경우에는 강성인 암거와 연성인 지반의 급격한 강성 차이로 인해 암거 측면 바로 위의 슬래브 상부에서 최대인장응력이 발생하였다. 하지만 린 콘크리트 보조기층과 박스형 암거 사이에 놓인 노상토가 이 강성 차이의 영향을 완화하여 Fig. 5와 같이 매설깊이가 깊어짐에



(a) Case 1

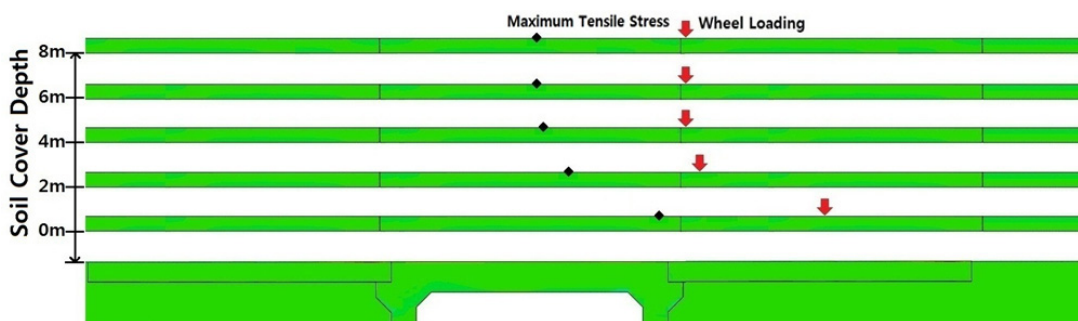


(b) Case 2



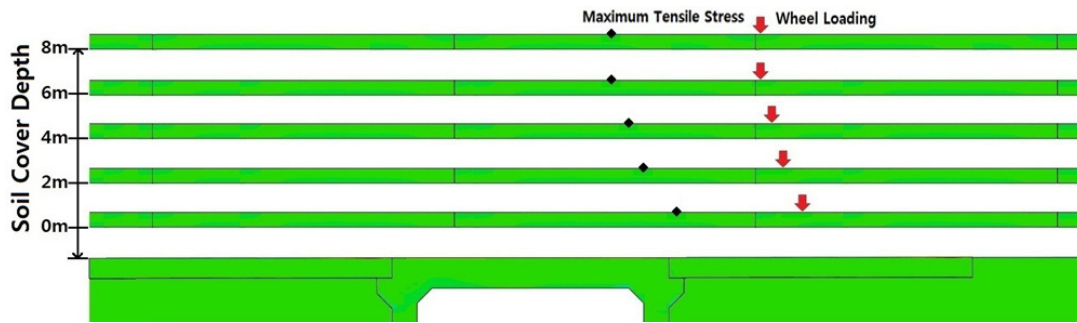
(c) Case 3

Fig. 4 Maximum Tensile Stress of Slab According to Wheel Loading Position and Soil Cover Depth (Positive Temperature Gradient)

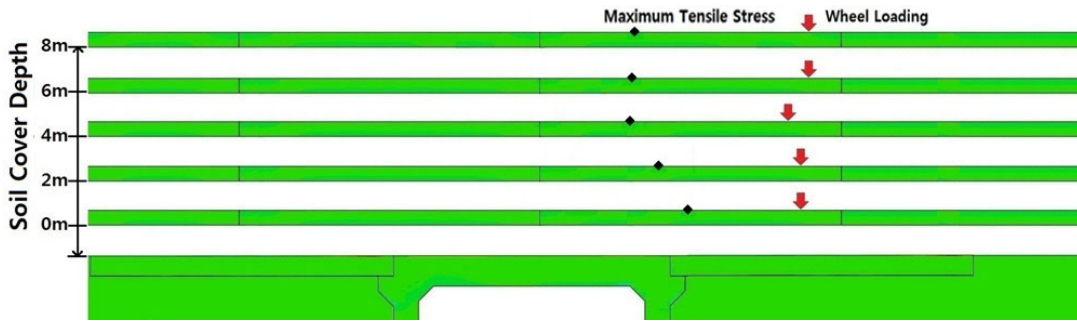


(a) Case 1

〈그림 계속〉



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 5 Wheel Loading Position Where Tensile Stress of Slab is Maximized (Negative Temperature Gradient)

따라 최대인장응력의 발생 위치가 암거 중앙 쪽으로 이동하였다. 양의 온도구배의 경우와 마찬가지로 CASE 1과 CASE 3은 박스형 암거를 중심으로 대칭이므로, 암거의 좌측에서도 우측과 동일한 결과가 나타났다. CASE 2에서는 박스형 암거 우측에 위치한 슬래브의 최대인장응력이 좌측에 위치한 슬래브보다 컸으나 그 차이는 작았다.

Fig. 6과 Fig. 3을 비교해 보면, 음의 온도구배의 경우가 양의 온도구배보다 최대인장응력이 전반적으로 더 큰 것을 알 수 있다. CASE 2와 CASE 3의 경우, 매설 깊이가 4m까지는 최대인장응력이 급격하게 감소하다가 이후로 변화가 매우 작았다. 매설 깊이가 얇을 때에는 암거와 지반 사이의 강성 차이가 슬래브의 거동에 영향을 크게 미쳤으나 매설 깊이가 깊어지면서 영향이 작아졌기 때문에 판단되며, 토피고가 작은 곳에서만 주로 균열이 발생한 현장조사 결과와도 일치한다. 반면 CASE 1에서는 매설 깊이가 0m일 때 오히려 최대인장응력이 가장 작았고, 매설 깊이가 4m까지 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 매설 깊이가 얇을 경우에는 암거 및 보강 슬래브가 구조적으로 슬래브 두께를 증가시키는 역할을 하는데다가 슬래브의 줄눈이 구조적으로 취약할 수 있는 암거와 보강슬래브의 연결부 사이 바로 위에 위치하여 최대인장응력이 작았던 것으로 판단되었다. 결국, 모

든 CASE의 매설 깊이가 4m 이상에서 비슷한 크기의 최대인장응력이 발생되었지만, 4m 미만에서는 CASE 1에서 가장 작은 최대인장응력이 계산되었고 CASE 3에서 가장 큰 최대인장응력이 계산되었다. 따라서, 매설 깊이가 4m 미만일 때는 CASE 1과 같이 줄눈을 설치하는 것이 가장 합리적인 것으로 나타났다.

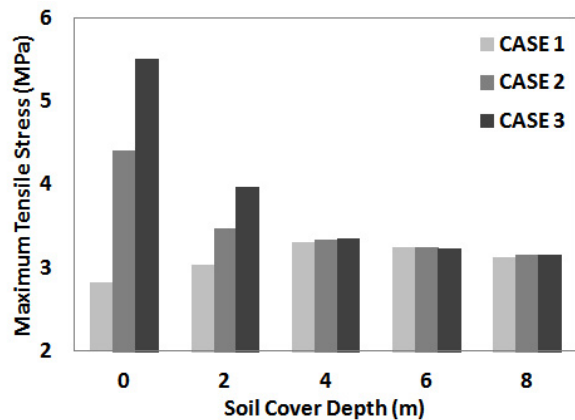
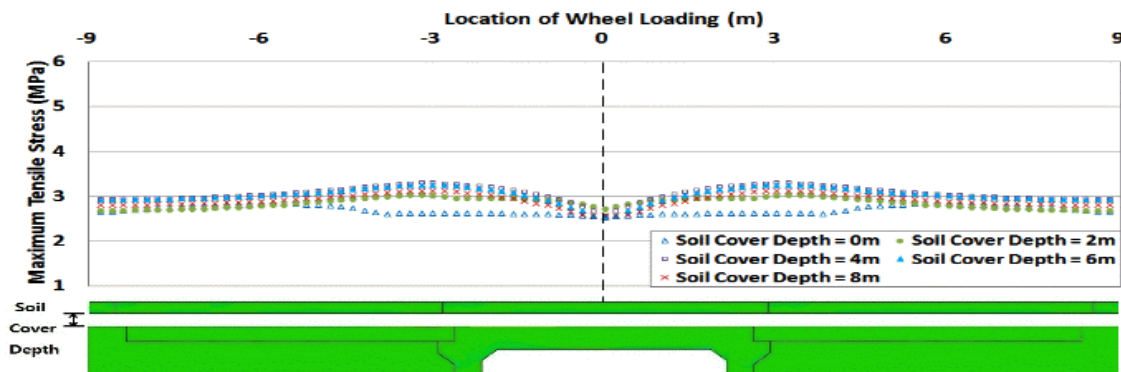


Fig. 6 Comparison of Maximum Tensile Stress of Slab According to Soil Cover Depth and Joint Position(Negative Temperature Gradient)

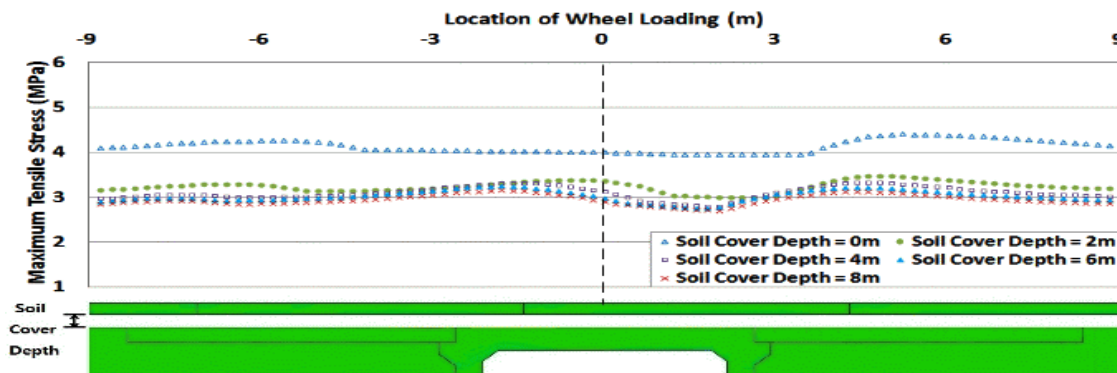
Fig. 7은 운하중에 따라 슬래브에 발생한 최대인장응력을 최대인장응력 위치가 아닌 운하중 위치에 표시한

것이다. CASE 1의 매설깊이 0m의 경우에는 Fig. 7(a)와 같이 암거 바로 위에 윤하중이 재하되었을 때 2.5MPa 내외의 일정한 최대인장응력을 보이다가, 암거 중앙을 기준으로 약 3m 떨어진 위치에 재하되었을 때부터 점차 증가하여 약 6m에 재하되었을 때 가장 커졌다. 매설깊이가 2m 이상이 되면서 암거 중앙부터 최대인장응력이 점점 커져서 암거 중앙에서 약 3m 떨어진 곳에서 가장 커졌다가 감소하는 경향을 보였다. CASE 2의 경우에는 Fig. 7(b)와 같이 매설깊이 2m 이상부터는 매설깊이 0m보다 크게 낮아진 최대인장응력

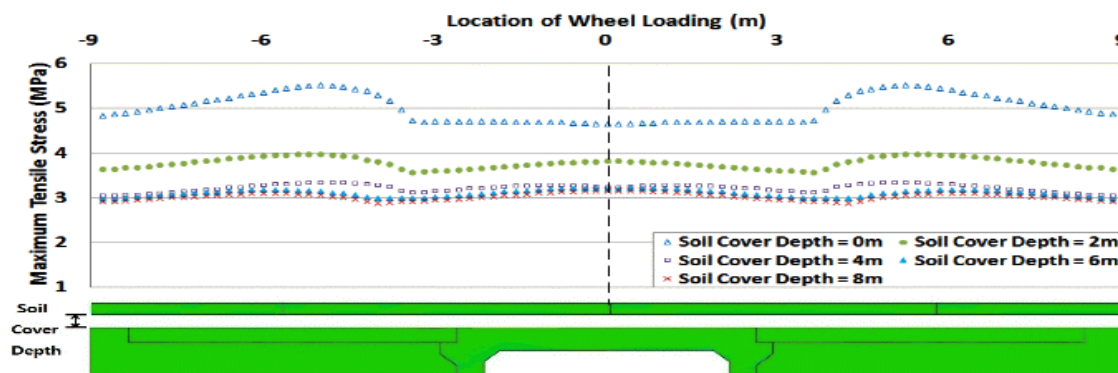
을 비슷한 크기로 유지했다. 따라서 매설깊이 0m일 때의 최대인장응력은 CASE 1과 경향은 유사했지만 크기는 1MPa 이상 컸고, 2m 이상부터는 CASE 1과 경향과 크기가 모두 비슷해졌다. CASE 3의 경우, Fig. 7(c)와 같이 매설깊이에 상관없이 암거 바로 위에 윤하중이 재하되었을 때 최대인장응력이 가장 작았으며, 암거 중앙에서 약 3~4m 떨어진 곳에서부터 급격히 증가하다가 약 5m부터 감소하였다. 다른 CASE보다는 매설깊이와 윤하중에 따른 최대인장응력의 변화가 가장 컸지만, 매설깊이 4m부터 변화가 크게 줄어들었다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

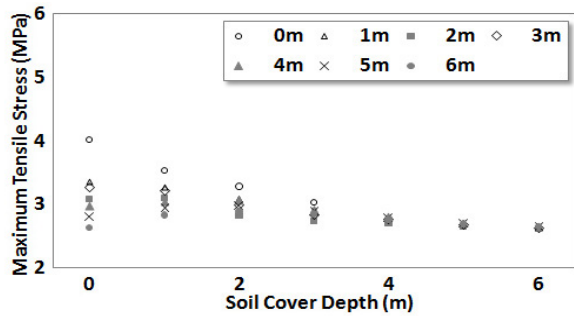
Fig. 7 Maximum Tensile Stress of Slab According to Wheel Loading Position and Soil Cover Depth (Negative Temperature Gradient)

5. 보강슬래브 길이에 따른 포장거동

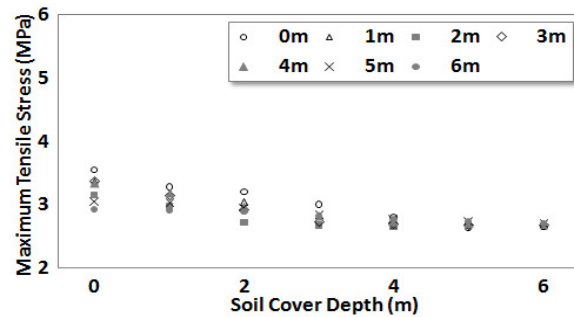
박스형 암거 상단 측면에 설치되는 보강슬래브는 주변 지반의 침하와 지지력 저하에 기인하는 포장 슬래브의 파손을 최소화하기 위해 설치된다. 이러한 중요성에도 불구하고 보강슬래브는 이론적 근거 없이 6m의 일률적인 길이로 시공되고 있다. 본 논문에서는 포장 슬래브에 발생하는 인장응력을 최소화하는 보강슬래브의 적정 길이를 예측하기 위해 토피고와 보강슬래브의 길이를 동시에 변화시키며 앞서 설명된 3개 CASE에 대해 유한요소 해석을 수행하였다.

5.1. 자중+양의 온도구배+윤하중

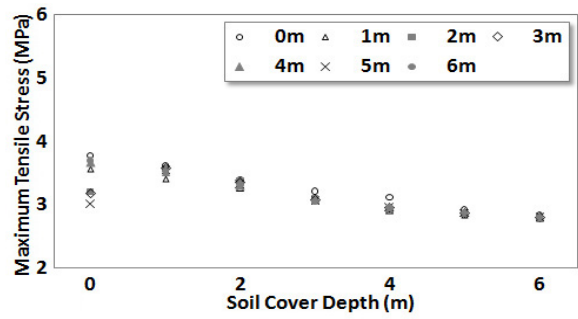
자중과 여주 지역 포장 슬래브의 최대 양의 온도구배를 고려한 후 윤하중을 재하한 경우에 대하여, 박스형 암거 매설깊이와 보강슬래브 길이를 동시에 변화시키며 해석을 수행하였다. Fig. 8에서 보듯이 암거가 깊어질수록, 그리고 보강슬래브가 길수록 슬래브에 발생하는 최대인장응력이 작아졌다. CASE 1의 매설깊이가 얇은 경우, 보강슬래브가 설치되지 않았을 때의 최대인장응력이 보강슬래브가 설치되었을 때보다 훨씬 크게 나타났으나, 매설깊이가 깊어지면서 그 차이가 크게 줄어들었다. 보강슬래브가 설치된 경우에는 보강슬래브 길이에 따른 최대인장응력의 변화는 크지 않았다. CASE 2와 CASE 3의 경우는 매설깊이가 얇은 경우에도 보강슬래브가 설치되지 않은 경우를 포함하여 보강슬래브 길이에 따른 최대인장응력의 변화가 크지 않았다.



(a) Case 1



(b) Case 2

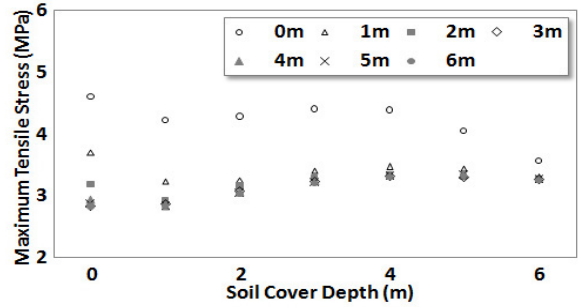


(c) Case 3

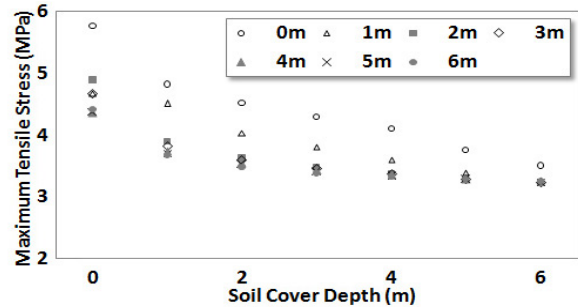
Fig. 8 Maximum Tensile Stress of Slab According to Soil Cover Depth and Length of Reinforced Slab (Positive Temperature Gradient)

5.2. 자중+음의 온도구배+윤하중

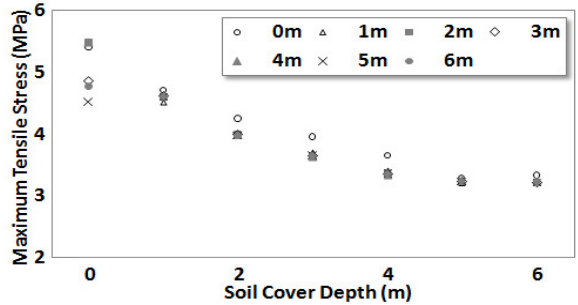
자중과 여주 지역 포장 슬래브의 최대 음의 온도구배가 고려된 상태에서 윤하중이 재하되는 경우를 해석하였다. Fig. 9와 같이 CASE 2와 CASE 3은 대체로 매



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 9 Maximum Tensile Stress of Slab According to Soil Cover Depth and Length of Reinforced Slab (Negative Temperature Gradient)

설깊이가 깊고 보강슬래브의 길이가 길수록 슬래브의 최대인장응력이 작아지는 경향을 보였다. 하지만 CASE 1은 보강슬래브의 길이가 길수록 최대인장응력은 작아졌으나 매설깊이에 대해서는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 최대인장응력의 전반적인 크기와 매설 깊이 및 보강슬래브 길이에 따른 변화는 양의 온도구배의 경우보다 큰 것으로 나타났다. 하지만 모든 CASE에서 보강슬래브 길이 2m 이상부터는 최대인장응력의 크기에 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다.

6. 결론

지중구조물 상부에 위치한 콘크리트 포장 슬래브의 파손 현황을 파악하기 위해 중부내륙고속도로의 시험도로를 포함한 국내 고속도로의 박스형 암거 13개소에서 조사를 실시하였다. 토피고가 얇은 암거 위의 슬래브에서 횡방향 균열이 빈번하게 발견된 반면, 토피고가 큰 곳에서는 발견되지 않았다. 암거 측면 부근의 슬래브에서 균열이 발생된 것으로 볼 때, 강성인 암거와 연성인 지반 사이의 지지력 차이에 기인한 균열로서 토피고가 작을수록 그 영향이 큰 것으로 판단되었다.

암거 중앙 바로 위에 길이 6m 슬래브의 중앙을 일치시킨 CASE 1, 균열이 발생된 시험도로 슬래브를 모사한 CASE 2, 그리고, 암거 중앙 바로 위에 줄눈이 위치한 CASE 3을 유한요소 방법으로 모형화하고 자중과 온도하중, 그리고 윤하중을 동시에 재하하여 최대인장응력을 계산하였다. 그 결과, 양의 온도구배의 경우보다는 음의 온도구배의 경우에 최대인장응력이 더 크게 나타났다. CASE 2와 CASE 3에서는 매설깊이가 깊어질수록 슬래브에 발생하는 최대인장응력이 감소하였다. 하지만 CASE 1에서는 매설깊이가 0m일 때 오히려 가장 낮은 최대인장응력이 계산되었고, 약 4m 이후에 다른 CASE들과 비슷한 크기의 최대인장응력을 나타냈다. 이에 따라 매설깊이가 얇은 경우에서는 CASE 1과 같이 암거 측면 바로 위에 슬래브의 줄눈을 설치하는 것이 가장 적합한 것으로 판단되었다.

박스형 암거 위의 포장 슬래브에 발생하는 인장응력을 최소화할 수 있는 보강슬래브의 적정 길이를 예측하기 위해, 토피고와 보강슬래브의 길이를 동시에 변화시키며 유한요소 해석을 수행하였다. 그 결과, 모든 매설 깊이에서 보강슬래브가 없는 경우 최대인장응력이 가장 크게 발생하였다. 보강슬래브의 길이가 2m 이상이 되면 매설깊이에 상관없이 보강슬래브 길이에 따른 최대

인장응력의 크기에는 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다. 이상의 결과를 바탕으로 박스 암거가 통과하는 콘크리트 포장에 대해 보다 합리적이고 경제적인 설계가 가능해질 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사의 지중구조물 상부 콘크리트 포장 보강설계 및 유지관리 기술개발 2차년도 연구비 지원에 의해 수행되어 이에 감사드립니다.

References

- ABAQUS, 2007. *Theory Manual Version 6.7*. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- Bowles, J. E., 1996. *Foundation Analysis and Design*. 5th Edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, pp. 589-623, pp. 781-782.
- Han, S. H., Kwon, S. M., and Eom, I. S., 2000. Enhanced Performance of Reinforced Concrete Pavement Slabs Adjacent to the Backfill of Box Culverts. *Research Report*, Highway Research Institute, Korea Highway Corporation.
- (한승환, 권순민, 엄인섭, 2000. 박스암거상부 콘크리트 포장체의 보강방안 개선 연구. 연구보고서, 한국도로공사 도로연구소.)
- Jeong J. H., Cho, S. M., Kim, H. J., Jeong, K. J., Park, J. K., and Kim, D. S., 2005. The Evaluations and Managements of Long-term Settlement for the Highway on the Soft Grounds. *Research Report*, Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation.
- (정종홍, 조성민, 김홍중, 정경자, 박중규, 김동승, 2005. 연약지반 구간 고속도로의 개통 후 침하평가 및 관리방안 연구. 연구보고서, 한국도로공사 도로교통기술원.)
- KEC, 2009. *Standard Drawings for Expressway Construction*. Korea Express Corporation.
- (한국도로공사, 2009. 고속도로 건설공사 표준도, 한국도로공사.)
- KGS, 2009. *Interpretation of Structure Foundation Design Code*. Goomi Book.
- Kim, J. W., 2000. *Three-dimensional Finite Element Analysis of Multilayered Systems*. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- (한국지반공학회, 2009. 구조물 기초 설계기준 해설. 구미서관.)
- Kim, K. and Yoo, C.H., 2002. Design Loading for Deeply Buried Box Culvert. IR-02-03, *Highway Research Center*, Auburn University, Auburn, AL.
- MLTM, 2008. *Standard Drawings of Culvert (Revision)*. *Special Specifications*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

(국토해양부, 2008. 도로암거 표준도(개정안), 전문시방서.

MLTM, 2011. *User Manual for Road Pavement Structure Design Program, KPRP Final Report*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

(국토해양부, 2011. 도로포장 구조 설계 프로그램 사용자 매뉴얼, 한국형 포장 설계법 최종보고서, 국토해양부.)

Pimentel, M., Costa, P., Carlos, F., and Figueiras, J., 2009. Behavior of Reinforced Concrete Box Culverts under High Embankments, *Journal of Structural Engineering*, Volume 135, Issue 4, pp. 366-375.

(접수일 : 2012. 9. 5 / 심사일 : 2012. 9. 17 / 심사완료일 : 2012. 11. 5)