

도로 램프구간에 대한 파손형태 및 원인에 관한 연구

Study of Deterioration Phenomenon and Causes in Pavement of Ramp Area

황성도 Sung-Do Hwang | 정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail : sdhwang@kict.re.kr)
문성호 Sungho Mun | 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this paper is to understand the deterioration phenomenon and causes in the pavement of a ramp area.

METHODS : Ramp areas need to be sloped because of the centrifugal force, which depends on the vehicle speed and grade of the ramp area. As a result, vertical and horizontal forces are applied on the pavement surface of the ramp area. Furthermore, the horizontal force depends on the vehicle speed and grade of the ramp area. In order to analyze the pavement structure of a ramp area, a multi-layered elastic analysis program was used to evaluate the weakest link of fatigue cracking deterioration, according to the simultaneously applied vertical and horizontal forces.

RESULTS : From case studies related to the bonding conditions between the surface and base layer in a ramp area, it was found that the partially bonded cases resulted in a critical potential of fatigue cracking deterioration, in a comparison of 50%, 70%, and fully bonded cases.

CONCLUSIONS : According to the results of the case studies, the pavement structure system should be reinforced by upgrading the material or increasing the thickness compared to the general pavement areas, in order to provide a performance life similar to the mainline pavements in the ramp areas.

Keywords

pavement, deterioration, ramp, fatigue cracking, vertical force, horizontal force

Corresponding Author : Sungho Mun, Associate Professor
The Road Pavement Research Division, No.43, Seoul National
University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu,
Seoul-si, 01811, Korea
Tel : +82.2.970.9014
E-mail : smun@seoultech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Jan. 10, 2016 Revised Jan. 22, 2016 Accepted Jan. 27, 2016

1. 서론

램프구간 포장과 관련하여 현실적인 설계를 위해 공용성 등급(Performance Grade, PG), 두께, 교통량을 고려하여 설계기준이 필요하다. 램프구간은 교통의 수직하중뿐만 아니라 회전반경에 의한 원심력에 의해 발생하는 전단력이 추가적으로 발생하는 입체화된 도로이다. 이에 따라 균열과 관련된 파손이 빈번하게 발생됨을 국내외 사례에서 알 수 있었다(Fig. 1 참조).



(a) Domestic Case

(b) International Case

Fig. 1 Fatigue Cracking

특히 원심력에 따른 구심력의 크기는 회전반경이 적

고 횡단구배가 큰 구간이 크게 발생함에 따라 국내에서 최대 허용하는 구배는 8%로 이에 대한 관심이 요구된다. 또한 램프구간에 속도를 제한하고 있으나 중차량들의 가속으로 인해 더욱더 심하게 원심력에 따른 전단하중이 발생될 수 있어 내구성이 보장될 수 있는 램프설계가 요구된다.

국내의 램프구간 파손사례의 경우 밀림에 따른 균열 및 국부적인 소성변형의 형태인 파손이 발견되었다 (Fig. 1 참조). 이러한 점은 곡선부에 포장을 시공하고 횡방향으로 구배를 둘에 따라 중차량 이동 시 과도한 전단응력이 발생될 수 있는 여건이다. 또한 램프구간의 진출입에 따른 감속 및 가속이 이루어짐에 따른 전단응력이 본선과 달리 과도하게 발생될 수 있다는 점이다. 해외 사례의 경우 본선과 공용성을 같이 유지할 수 있는 최적화된 램프구간의 포장을 시공하고자 하는 노력이 보였다. 그리고 램프구간 포장과 관련하여 PG 등급, 두께, 그리고 교통량에 대한 고려를 하여 내구성에 중점을 두는 점도 살펴볼 만하다. 따라서 이번 논문에서는 램프구간의 경사 및 속도설계에 따른 전단하중이 어느 정도 발생하는지와 더불어 포장의 경계면의 부착정도에 따라 램프구간에 미치는 영향에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 램프구간의 피로균열 및 램프관련 미국사례

피로균열에 대해서는 밀림에 의한 균열현상이 다수 발견되었으며 이에 따른 종방향 형태의 치짐도 관찰되는데 이러한 현상에 대한 설명은 원심력에 따른 전단하중이 표면에 발생하게 되고, Fig. 2에서 보는 바와 같이 3가지의 파괴모드가 있는데 원심력 작용에 따른 전단하중에 의한 파괴는 모드(Mode) II로서 일반적인 피로균열의 모드인 I가 지배적이나 이 연구에서 다루는 램프구간에 대해서는 모드 I와 더불어 모드 II가 함께 존재하여 본선과 비교한다면 조기에 피로균열이 발생될 수 있는 점을 보여주고 있다. 따라서 이러한 두 가지 모드인

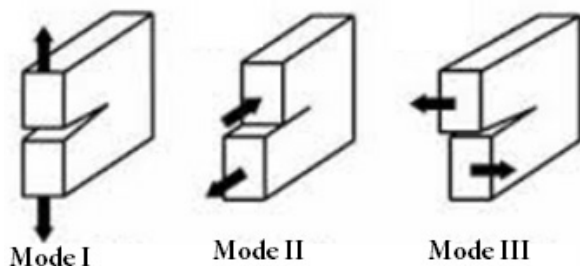


Fig. 2 Fracture Modes

I 및 II가 함께 발생하는 램프구간의 포장에 대해서는 본선과 다른 설계의 방법으로 접근해야 되며 충분히 보강된 포장단면을 설계해야 됨을 이해할 수 있다.

뉴저지 주의 경우 램프의 중요성을 강조하고 있다. 특히 주도로의 연결로서의 역할과 더불어 고속도로에서 많은 면적을 차지하고 있음을 강조하고 있다. 그러나 램프의 중요성을 인지하지 못하고 게다가 포장유지관리시스템(PMS)에서도 다루어지고 있지 않음을 보고하고 있다. 또한 뉴저지의 경우 램프의 포장은 본선과 비교해서 조기에 파손되는 경우가 종종 빈번하게 발생하고 있으며 이로 인해 운전자에게 많은 불편을 주고 있음을 보고하고 있다. 따라서 뉴저지 주의 경우 4,000개의 램프구간에 대해 PMS로 관리하고 있다(Khan et al., 2003).

조지아 주는 램프구간에 대한 조사를 통해 소성변형, 피로균열, 평탄성 불량한 구간이 다수 발견되었으며 포장의 내구성 증진을 위하여 강성포장으로 시공한 사례가 있음을 보고하고 있다. 특히 트럭의 큰 하중에 따른 아스팔트 포장구간의 소성변형과 더불어 밀림현상이 발생되어 램프구간 포장의 내구성에 문제가 발생되어 결국은 램프구간의 포장수명이 다하는 경우가 빈번하다(GDOT, 2005). 그리고 램프구간의 특성상 가감속이 급격하게 발생됨에 따라 횡구배를 고려했을 때 발생될 수 있는 전단응력 발생에 의해 일반 아스팔트혼합물로는 큰 하중의 전단응력에 제대로 저항할 수 없어 소성변형과 더불어 밀림현상이 발생됨을 보고하고 있다.

위스콘신 주의 경우에는 램프구간에 포장두께의 결정에 있어 램프구간의 교통량과 상관없이 반드시 삼각지의 노즈구간(Gore Region) 및 합류구간(Taper Region)은 본선과 동일하게 시공하는 것을 원칙으로 하고 있다(Wisconsin DOT, 2014). 위스콘신 주에 있어서 장수명 아스팔트포장의 설계의 경우 AASHTO의 역학적-경험적 포장설계법에 근거하여 설계하도록 되어 있다. 또한 본 설계법은 천만 ESAL(Equivalent Single Axle Load, 환산일축하중) 이하의 교통량에서 사용되도록 규정하고 있다. 특이한 점은 포장 골재의 최대입경을 층에 따라서 제시하고 있다는 점이다. 예를 들어, 하부 기층의 경우 19mm를 규정하고 있으며 상부층인 표층의 경우 12.5mm를 규정하고 있다. 또한 SMA 포장의 경우 12.5mm로만 규정하고 있다. 예외의 경우로 9.5mm 사용에 있어서는 교면포장 및 도심지 미관을 위해 사용될 수 있다고 규정하고 있다. 여기서 위스콘신 주의 설계법에서 주목해야 될 점은 PG 등급을 교통량의 정도, 주차장, 사거리 등의 열악한 구간에 대해서 다른 구간보다 좀

더 높이는 경향을 보여주고 있으며 위스콘신 주의 특성 상 겨울철의 혹독한 저온을 고려하기 위해 -34를 이용하는 것을 알 수 있다. 국내에서는 PG 등급의 저온은 -22까지 사용되는 점을 고려해 볼 때 상대적으로 물렁한 바이더를 사용하고 있다. 이러한 다양한 점을 토대로 램프구간에 대한 포장에 적용한다면 피로균열에 대한 저항성을 높이기 위해서는 고온의 등급을 높이는 것이 바람직하다.

위스콘신 주에서는 트럭교통량에 따른 분석을 위해 다음과 같이 FHWA(Federal Highway Administration)에 근거하여 양방향 차선수에 따른 트럭통행 분산을 고려한 설계에서 본선에 있어서 6차선의 경우 60%, 8차선의 경우 45%, 10차선의 경우 40%, 12차선의 경우 40%의 설계를 반영한다. 여기서, 램프의 경우는 트럭이동 하중에 대해 100%를 고려한다. 또한 위스콘신 주에서는 본선에서 교통량이 램프구간으로 빠져나가는 교통량은 25%로 간주하여 설계하게 된다. 따라서 양방향 6차선의 경우 본선과 램프구간의 비는 0.6:0.25로 계산하고, 양방향 8차선의 경우 0.45:0.25로 계산하며, 양방향 10차선 이상의 경우 0.4:0.25로 계산하게 된다.

이를 근거로 6차선의 경우 본선에서 통행하는 트럭에 대해서 램프는 42%를 고려하며, 8차선의 경우 56%를 고려하고, 10차선 이상의 경우 63%를 고려해야 된다. 결과적으로 본선의 교통량에 비해 램프의 교통량은 6차선, 8차선, 10차선 이상의 경우 각각 42%, 56%, 63%로 고려하여 설계해야 되며, 더불어 램프의 경우 회전반경과 속도에 따라서 전단응력이 본선에 비해 증가함에 따라 본선과 램프에 대한 포장단면은 같이 설계함이 타당하므로 향후 연구는 이를 보완 및 타당한 근거를 제시하는데 중점을 두고자 한다.

이러한 결과로 본선의 차선이 클수록 본선의 포장단면과 램프구간의 포장단면이 달리 적용이 되는 것이 바람직하지 않다는 결론을 얻을 수 있다. 예를 들어 양방향 10차선인 경우 위스콘신 주에서 고려하는 램프구간의 교통량이 본선의 25%로 가정할 때 63%가 램프구간으로 차량이 진입하고 이용함을 알 수 있다. 또한 위에서 언급한 것처럼 가감속 및 원심력에 따른 전단하중을 고려해 볼 때 본선과 같은 단면으로 설계하는 것이 타당하며 이와 더불어 표층에 대한 PG등급에서 고온등급을 한 단계 올리는 것이 바람직함을 알 수 있다.

뉴욕시(New York, 2002)에서는 최소 포장두께를 규정하여 표층 및 아스팔트 기층을 포함하여 15.5cm를 요구하고 있다. 특히 Table 1과 같이 램프포장은 반드시 등가단

축하중(Equivalent Single Axle Load, ESAL)에 따른 포장두께 설계를 하여야 된다고 규정하고 있다. 또한 램프구간 인근에 트럭의 터미널 혹은 트럭을 위한 주유소가 위치하면 포장두께를 크게 해야 된다고 규정하고 있다.

Table 1. Pavement Thickness Design in New York

Averaged daily vehicles	Percentage of truck	Subbase layer	Base	Surface
10,000	10% or above	30cm	15cm	9cm
	below 10%		12.5cm	
6,000 - 10,000	10% or above	30cm	12.5cm	9cm
	below 10%		10cm	
4,000 - 6,000	all	30cm	7.5cm	9cm
below 4,000	all	30cm	7.5cm	8cm

3. 램프구간의 전단하중계산

Fig. 3에서 보는 바와 같이 설계속도(V), 중력가속도(g), 마찰계수(f_s), 구배(e)에 따른 곡선반경을 알 수 있으며, 계산된 곡선반경을 이용하고 차량바퀴에 가해지는 질량무게(m), 속도를 통해 전단하중(F_c)을 계산할 수 있다. 또한 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙(국토해양부장관령 418호)에 따라 설계속도 및 회전에 따른 기울기에 따른 회전반경은 Table 2와 같이 규정하고 있다. 전단하중을 계산하기 위해 사용된 질량무게는 등가하중으로 사용되는 바퀴하중으로서 가해지는 40kN을 이용하였다.

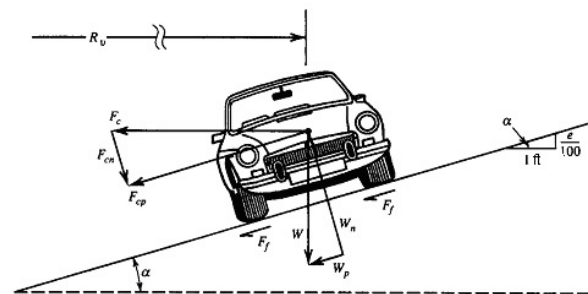


Fig. 3 Shear Force due to Centrifuge Phenomenon

Table 2. Designed Speed and Slope according to the Radius in Ramp Area

Designed speed (km/h)	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	
Radius (m)	6%	710	600	460	380	280	200	140	90	60	30	15
	7%	670	560	440	360	265	190	135	85	55	30	15
	8%	630	530	420	340	250	180	130	80	50	30	15

Fig. 4의 결과물은 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙(국토해양부장관령 418호)에 근거하여 설계속도, 구배, 곡선 반지름을 이용하여 원심력(전단하중)을 구한 것이다. 특이한 점은 모든 구배에서 차량의 속도가 30, 40, 50km/h에서 원심력이 크게 발생함을 알 수 있다. 원심력을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 구조해석에 있어서 차이는 전단응력 및 전단변형률이 발생하느냐 혹은 발생하지 않느냐는 결과물로 나타낼 수 있다. 일반적인 해석에서 원심력인 전단하중을 고려하지 않을 경우 전단응력 및 전단변형률이 발생하지 않으며, 전단하중을 고려한 경우에는 전단응력 및 전단변형률이 발생하게 된다.

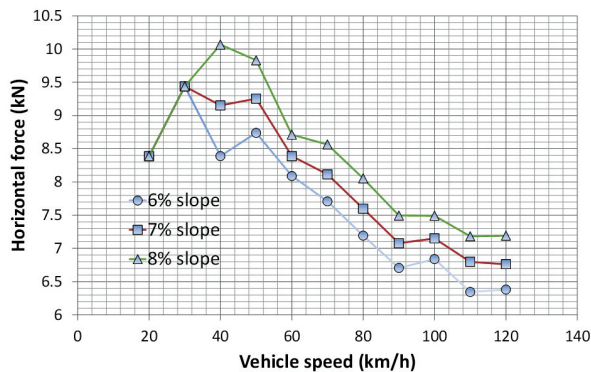


Fig. 4 Vehicle Speed vs. Horizontal Force

4. 층간 부착정도에 따른 구조해석

구조해석을 통한 변형률 매트릭스를 구하기 위해서는 다층탄성이론을 이용한 계산방법과 더불어 유한요소해석을 통해 구할 수 있다. 특히 여기서 요구되는 전단하중을 고려하기 위해서는 일반적으로 사용되는 다층탄성이론인 Boussinesq의 방정식과 함께 전단하중과 관련된 항목을 추가해야 된다. 또한 다층탄성이론은 하중축을 기준으로 대칭이 되는 해석을 하는 Axi-Symmetric 방법을 이용하여 원하는 위치의 응력 혹은 변형률을 구할 수 있으며 모든 위치에 대해 처짐값도 구할 수 있다. 그러나 일반적으로 알려진 많은 다층탄성이론에 기반한 프로그램은 전단하중을 고려하지 않아 GAMES(Manina and Matsui, 2005)라는 프로그램을 이용하여 전단하중 및 수직하중을 고려하여 해석을 수행하였다. GAMES 프로그램은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 하중(Load)인 수직하중 그리고 수평방향의 전단하중이 가해지고 θ 각도, r 의 거리, 그리고 깊이인 z 에 대해서 극좌표 개념을 이용하여 힘의 평행방정식을 세워 해답을 구하는 식이다.

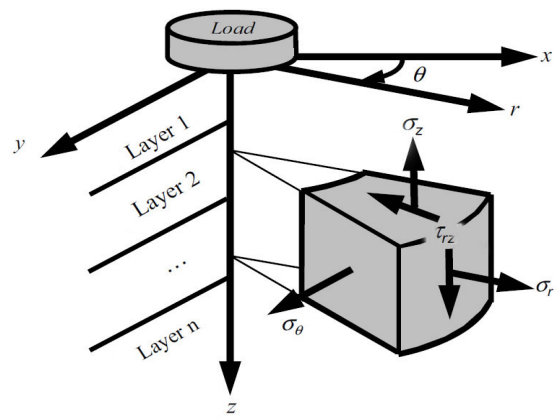


Fig. 5 Multi-layered System (Source: Manina and Matsui, 2005)

계산에 있어서는 아래의 조화방정식(Compatibility Equation)을 이용하여 이차조화방정식과 라플라스 계산자를 이용하여 완성하고 경계조건(Boundary Conditions)을 이용하여 다층탄성의 해를 구하는데, GAMES 프로그램은 계산의 속도를 빠르게 하기 위해 한켈변환(Hankel Transform)을 이용하여 한켈 영역의 처짐값을 닫힌 형태(Closed Form)의 해를 구성하고 극좌표 구간에 대한 해를 구하기 위해 역한켈변환(Inverse Hankel Transform)을 이용하여 우리가 구하고자 하는 처짐, 응력, 그리고 변형률을 구할 수 있다. 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla^4 \Phi = 0, \quad (1)$$

여기서,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (2)$$

∇^2 는 축대칭의 라플라스 계산자(Laplace Operator)이고, 응력함수인 Φ 는 이차조화방정식의 해이다. 전단

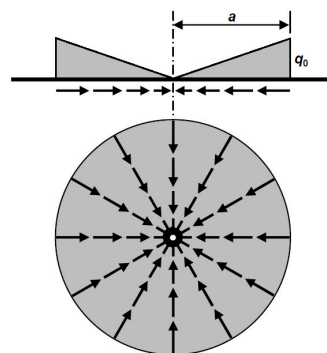


Fig. 6 Shear Force in Circular Load (Source: Manina et al., 2006)

하중을 고려하기 위해서는 Fig. 6과 같이 가정하여 해석을 수행한다.

따라서 수평방향의 하중을 모사할 수 있는 프로그램인 GAMES를 활용하여 Fig. 7부터 Fig. 12까지 아스팔트의 구조해석을 수행하였다. 이를 위해 사용된 입력변수들은 다음과 같이 기층의 탄성계수 5,000MPa, 노상의 탄성계수 138MPa, 포아송비는 모든 층에서 0.35의 값을 입력하였으며 두께는 표층이 5cm, 기층은 15cm, 노상의 깊이는 30cm로, 하부에는 암반 혹은 콘크리트 슬래브가 있는 것으로 가정하였다. 또한 표층의 탄성계수를 3,500MPa 혹은 8,500MPa로 각각 사용하였으며 이는 표층의 탄성계수가 낮은 경우와 강한 경우에 있어서 변형률이 어떻게 달라지는지를 알기 위해 시행하였으며 표층과 기층 사이의 접촉면에 있어서는 50% 부착손상, 70% 부착손상, 그리고 완전한 부착상태로 각각 구조해석을 수행하였다. 교통하중에 따라 가해지는 수직하중 및 수평하중은 각각 40kN 및 9kN를 사용하였다. 이는 FWD(Falling Weight Deflectometer)에서 가해지는 40kN의 수직하중과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 40km/h의 설계속도의 램프구간에서 발생될 수 있는 9kN의 수평하중을 사용하였다.

이번 구조해석프로그램의 수행에서 알 수 있는 현상으로는 표층의 탄성계수가 상대적으로 약한 경우에는 Fig. 7 그리고 Fig. 9에서 보는 바와 같이 표면에서 5cm 아래에 있는 왼쪽 부분에서 인장변형률이 발생함을 알 수 있다. 이는 균열이 상부에서 발생할 수 있는 가능성이 높음을 알 수 있고 Fig. 7부터 Fig. 10까지의 경우인 층간 접촉면이 완전하게 부착되지 않음에 따라서 접촉면에서 변형률의 불연속이 발생하게 되어 궁극적으로 손상을 발생시킬 수 있는 잠재력이 있음을 알 수 있다. 따라서 시공에 있어서는 표층을 상대적으로 온도에 둔감하고 강성이 강한 개질아스팔트를 시공하고 접촉면

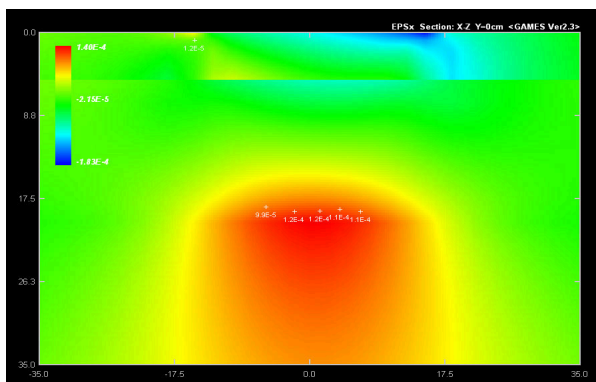


Fig. 7 3,500MPa for Surface Layer and 50% Bonding Case

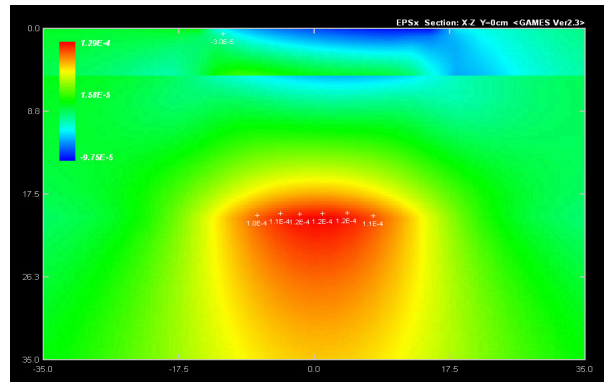


Fig. 8 8,500MPa for Surface Layer and 50% Bonding Case

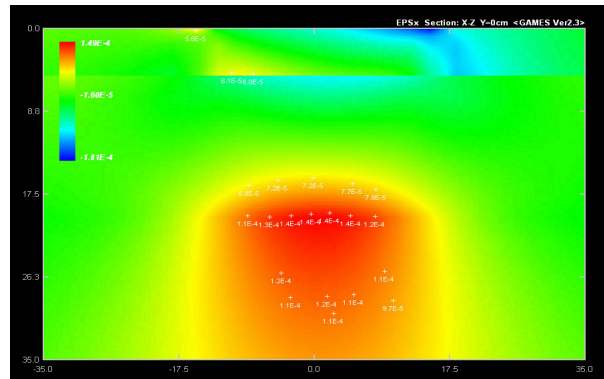


Fig. 9 3,500MPa for Surface Layer and 70% Bonding Case

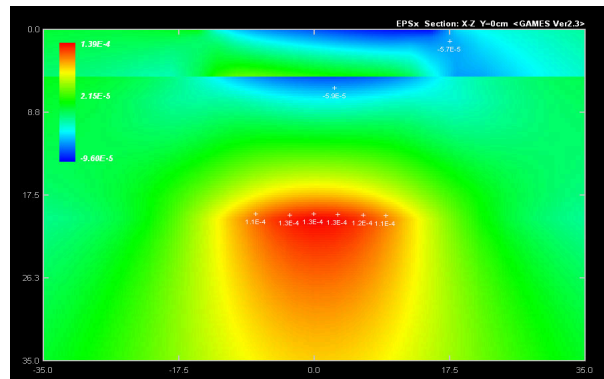


Fig. 10 8,500MPa for Surface Layer and 70% Bonding Case

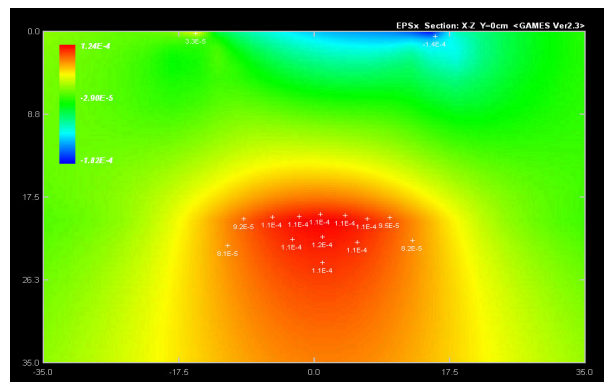


Fig. 11 3,500MPa for Surface Layer and Full Bonding Case

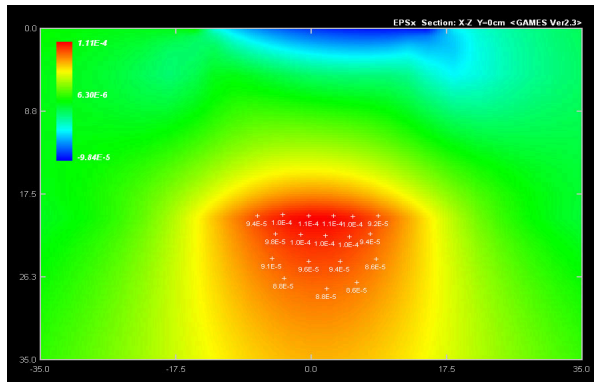


Fig. 12 8,500MPa for Surface Layer and Full Bonding Case

에 있어서는 우수하고 충분한 텍코팅 재료를 사용함에 따라서 향후 발생할 수 있는 피로균열에 대한 저항성을 높일 수 있음을 본 구조해석을 통해 알 수 있다.

5. 결론

램프구간의 포장에 있어 원심력 및 경사도에 따른 수평하중을 계산할 수 있었으며, 또한 이를 통해 40km/h의 설계속도 구간에서 수평하중이 상대적으로 다른 설계속도 구간보다 크게 나옴을 알 수 있었으며 이러한 구간에 대해서는 좀 더 보강이 된 포장단면설계 혹은 재료적인 측면에서 보강이 필요함을 알 수 있었다. 특히 표층과 기층 사이인 접촉면에서의 부착정도가 향후 공용 성능에 있어 중요하다는 점을 구조해석을 통해서 알 수

있었으며, 램프구간에 있어서는 수직 및 수평하중을 함께 받는 조건에 따라 접촉면의 부착을 확보할 수 있게 적절하고 충분한 텍코팅의 시공이 필수적임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2015-0779).

REFERENCES

- Georgia DOT. (2005). "Pavement Design Manual", GDOT.
- Khan, R. A., Helali, K., Ahmed, Z., Szabo, and Szabo, S. (2003). "Integration of Ramps with Pavement Management System Mainline Network Database", Paper prepared for presentation at the Roadway Inventory and Condition Rating Data for Effective Maintenance Decision-making Session of the 2003 Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- Manina, J. W., and Matsui, K. (2005). "Elastic Multi-layered Analysis Using DE-Integration", Publ. RIMS, Kyoto Univ., Vol. 41, pp. 853-867.
- Maina J. W., Fujinami, K., Matsui, K., and Inoue, T. (2006). "Elastic analysis of pavement structure with application of vertical and centripetal surface forces", ICAP: 10th Annual International Conference on Asphalt Pavements.
- New York. (2002). "Comprehensive pavement design manual", New York City.
- Wisconsin DOT. (2014). "WisDOT Pavement Engineering Software: WisPave 4", WisDOT.