

温度變化에 의한 콘크리트 鋪裝道路의 構造 舉動 研究

Structural Behavior of Concrete Pavement due to Temperature Variations

趙 炳 琬 *
Jo, Byung Wan

요 약

콘크리트 포장도로의 일부구간에서 보이고 있는 심각한 균열파괴 현상은 주하중인 차량하중 외에 환경요소인 온도변화의 영향으로, 콘크리트 슬래브 상, 하면의 온도차이에 따라 위, 아래방향으로 오목하게 휘면서, 기초지반과 떨어지는 슬래브의 중앙 또는 줄눈부에 차량하중이 재하되어 발생된다. 이로 인하여 콘크리트 슬래브에 종적, 횡적 균열이 발생하여 Faulting, Ravelling, Spalling, Scaling...등 파괴 현상이 심회되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 강성행렬과 온도변화, 건조수축 등으로 인한 등가절점하중을 유도하여 전국 여러지방의 온도변화 특성에 따른 역학적 거동현상을 연구하였다.

Abstract

Some sections of concrete highway pavements have been viewed with great concern by highway officials and engineers due to the severe cracking and failure problems. This is mainly due to the traffic loads in addition to temperature variations between top and bottom of concrete slab, which cause the concrete slab to curl up and down depending on the thermal gradient, respectively.

Subsequently, a major consideration was given to the derivation of stiffness matrix and equivalent nodal loads due to the uniform gravity load, temperature and shrinkage of concrete. And the structural behavior of concrete highway pavement due to the temperature variations throughout the nations has been emphasized.

1. 서론

일반적으로 포장도로는 아스팔트(Asphalt or Flexible)포장 또는 콘크리트(Concrete or Rig-

id)포장으로 크게 구분된다. 아스팔트 포장도로는 잘 다져진 기초지반위에 보조기층, 기층과 표층으로 이루어지며, 콘크리트포장은 양질의 선택 재료를 이용한 노반위에 포트랜드 시멘트 콘크리트를

* 정회원, 한남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, 공학박사

** 이 논문은 1990년도 문교부 지원 한국학술진흥 재단의 자유공모과제 학술 연구조성비에 의하여 연구되었음.

이 논문에 대한 토론을 1991년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1992년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

약 30cm 정도 포설함으로써 이루어진다. 그러나 20세기에 들어서 석유자원의 고갈위험과 대체자원의 필요성 연구에 의해 기존의 아스팔트포장을 대신한 포틀랜드 시멘트 콘크리트포장은 세계 여러나라에서 많은 호응을 얻었고, 우리나라에서도 산업도로의 동맥인 중부고속도로, 88 올림픽 고속도로를 비롯하여 기존의 아스팔트포장인 경부고속도로를 일부구간에서 콘크리트포장으로 대체하는 등 콘크리트포장의 이용가능성은 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete)의 발전과 함께 더욱 커질 것이다.

그러나 콘크리트포장의 설계시방서에 따른 완벽한 설계 및 시공에도 불구하고, 일부 콘크리트포장에서는 차량하중의 과다적체, 과다한 온도변화 및 습도변화 등이 포장슬래브 길이, 연결조인트의 시공불량 및 강성부족, 배수층의 불투수성 등으로 콘크리트 슬래브의 균열과 침하, Pumping, Faulting, Spalling, Scaling, Raveling 등 심각한 포장구조의 파괴현상을 겪고 있다.

이러한 파괴현상은 주하중인 차량하중외에 환경요소인 온도변화의 영향으로, 슬래브 상하면의 온도차, 그리고 온도변화에 의한 콘크리트 슬래브의 팽창, 수축으로 인한 역학적 거동현상으로 이에 대한 연구는 콘크리트포장의 구조적 거동현상을 자세히 규명함으로써 콘크리트 포장도로의 설계에 새로운 지침을 제공할 뿐만아니라 앞으로 있을 고속전철의 기초 슬래브 연구에도 큰 도움을 줄 것이다.

2. 온도변화에 따른 포장슬래브 구조의 역학적 거동 현상

콘크리트 포장슬래브 구조의 역학적 거동현상 중의 하나인 수직방향 및 수평방향의 처짐 및 변위는 포장슬래브 내부의 온도변화에 기인하며, 이러한 온도변화에 의한 슬래브구조의 휨(Curling) 거동현상과 슬래브 줄눈부에서의 팽창 수축현상은 전체 콘크리트 포장 슬래브의 구조적 강성에 영향을 주어 주어진 차량하중에 대해 복잡한 역학적 거동현상을 보이고 있다. 이때 슬래브구조의

휨(Curling) 현상에 대한 방향과 크기 그리고 슬래브 줄눈부의 팽창 수축으로 인한 폐쇄정도는 하루 24시간의 온도변화에 따르며, 이로인한 슬래브의 구조적 강성 또한 기초지반의 강성변화와 함께 변하게 된다.

이렇게 하루 24시간 사이클 그리고 계절적으로 변하는 슬래브 내부의 온도는 슬래브 상, 하면의 온도차에 따라 콘크리트 슬래브 전체를 온도가 낮은 쪽(또는 찬쪽)으로 오목하게 휘게하며, 그림2(a)에 보인바와 같이 슬래브 상, 하면의 온도가 같을때 슬래브는 휘는 현상이 없이 편평함을 유지하며, 균일한 온도변화와 함께 슬래브 팽창, 수축현상으로 슬래브 줄눈부의 폐쇄정도만을 좌우하고, 한밤중이나 이른 아침에는 대기온도의 영향으로 슬래브 표면이 바닥보다 온도가 낮아 그림2(b)에 보인바와 같이 슬래브 위쪽으로 오목하게 휘게 된다. 그러나 해가 뜨면서 대기온도의 상승과 함께, 슬래브 표면의 온도가 높아지면서 낮동안에는 그림2(c)에 보인바와 같이 아래쪽으로 오목하게 휘게된다.

이러한 온도변화의 영향으로 인한 슬래브구조의 역학적 거동현상 연구는 1926년에 Westergaard(Ref.1)가 논문을 발표한 이후 Grinter(Ref.2), Harr and Leonards(Ref.3) 등에 의해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 미국의 Highway Research Board는 AASHTO Road Test에서 슬래브의 여러 깊이에서 내부 온도를 하루 24시간 사이클 그리고 계절적으로 측정하여 슬래브구조의 역학적 거동현상을 연구하였다.

1970년, 컴퓨터 산업의 급속한 발전과 함께 유한요소법을 이용한 온도하중에 의한 콘크리트 슬래브 거동현상의 연구는 많은 발전을 하였지만, 실제현장에서의 처짐 측정값과 비교할때 어느 정도의 오차가 발견되었으며, 이는 그림2(d), (e)에 보인바와 같이 기초 지반과 슬래브 사이의 고인물로 인한 콘크리트의 팽창과 콘크리트의 shrinkage등으로 인한 불균형 변형에 기인한 것으로 생각된다.

T_t = Surface Temperature
 T_b = Bottom Temperature

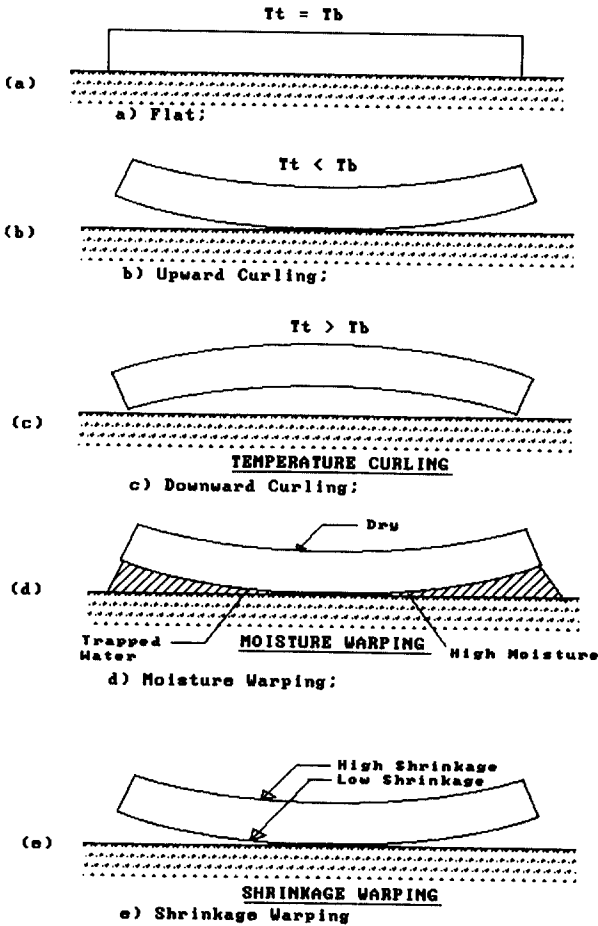


Fig. 2 : Curling and Warping of Pavement Slabs

3. 지역별 온도변화 특성

콘크리트 포장구조의 균열과괴 현상에 중요한 영향을 미치는 포장슬래브 내부의 온도 변화는 태양열, 바람, 습도 외에 대기의 온도변화와 밀접한 관계를 갖고 있다. 1989년 한국관상대 기상자료 (Ref.4)를 살펴보면 전국에 걸쳐 가장 추운 기온을 보이는 1월의 기온 특성은 속초, 대관령 등 영동 동해안과 서해안의 서산, 목포지방 등의 월평균 기온이 예년보다 2~3℃ 정도가 높은 1~5℃를 보였고 그의 서울 경기를 비롯한 충청, 경북 내륙

지방이 예년보다 3~4℃ 정도 높은 5~-2℃를 나타냈다. 월평균 최고기온도 전국적으로 3℃ 내외가 높아 서울을 비롯한 강원 내륙지방 등 중부 이북지방이 0~4℃, 영동동해안과 남부지방이 6~9℃, 제주도지방은 9~12℃, 그의 지방은 4~6℃의 분포였다.

또한 월평균 최저기온은 강원 내륙 및 산간지방과 경북 북부내륙을 비롯한 충청과 호남 내륙 일부 지방이 -9℃~-4℃, 포항, 울산 등 동해안 일부 지방과 남해안, 제주도, 울릉도 지방이 0~6℃, 그의 지방은 -4~0℃로 예년보다 2~6℃ 높은 정도였다. 반면에 가장 높은 온도를 보이는 8월의 전국 온도 분포 특성은 춘천, 서울, 대전, 대구, 광주 등이 월평균 최고 30℃ 정도로서 전국이 21~31℃ 정도를 보였으며, 월평균 최저기온은 울진과 포항 지방이 20~22℃, 대관령, 수원, 군산, 제주지방이 15~23℃, 그 밖의 지방은 19~23℃로 예년보다 0.1~1.7℃ 정도 낮았다. 특히 춘천지방의 1월 최저기온은 -15.3℃, 8월 최고기온은 35.1℃로서, 서울, 대구지역의 각 월별 최고, 최저기온의 변화를 그림3에 보였다.

이러한 대기온도에 따른 춘천지방 지중온도의 변화를 살펴보면, 추운 겨울 1월 지면온도가 0.3℃일때, 10cm 아래에선 0.6℃, 20cm 아래에선 1.5℃, 30cm 아래에선 1.8℃로서 30cm 정도의 슬래브 두께를 고려할때 약 1.5℃의 온도차이를 보였으며, 더운 여름 8월의 지면온도가 28℃일때 10cm 아래에선 27.4℃, 20cm 아래에선 26.9℃, 30cm 아래에선 26.6℃로서 약 1.4℃의 온도차이를 보이고 있다.

그러나 콘크리트 포장슬래브의 두께방향으로 각기 다른 깊이에서 온도변화를 열전쌍(Thermocouple)을 이용 실제 측정된 FDOT 보고서(Ref. 5)를 참조하면 Florida 지방의 콘크리트 포장슬래브의 표면과 바닥의 온도차이를 ΔT 라 할때, (+) ΔT 는 정오 12시부터 오후 3시 사이에 발생하며, 그 값은 10~25°F(5.5℃~14℃) 정도로서 오후 1시에 최대치에 도달하고, (-) ΔT 는 오전 5시와 오전 7시 사이에서 발생하며 그 값은 -3~-9°F(-2~-5℃) 정도로서 오전 6시에 최대치에 도달함을

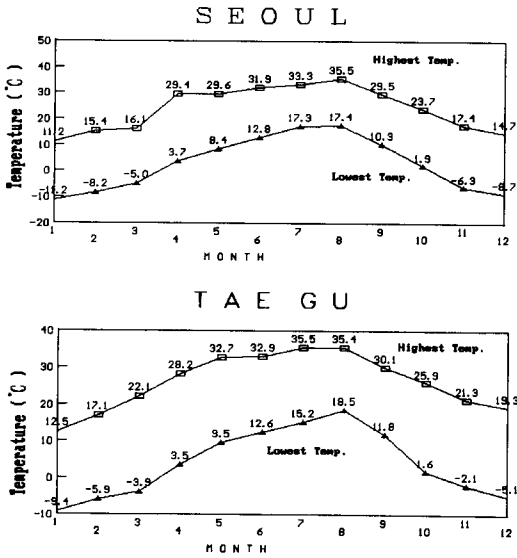


Fig. 3 : Monthly Air Temperature(SEOUL, TAEJU 1989.)

알수 있다.

4. 유한요소법의 이론 전개

포장구조의 균열과피에 중요한 영향을 미치는 온도변화는 대기온도와는 별도로 포장슬래브 상하면의 온도차에 의한 휨효과(Bending effect)로 생기는 인장축의 균열과 기온의 일교차, 월교차, 년교차로 인한 평면변위효과(Planar effect)가 있다.

이들의 온도변화에 의한 콘크리트 포장슬래브 구조의 역학적 거동현상을 이론적으로 해석하고자 유한요소법을 이용한 휨변위효과와 평면변위효과로 인한 등가절점하중과 강성행렬을 유도하고 컴퓨터 프로그램을 이용하여 각 지역별 온도변화 특성에 따른 포장구조의 역학적 거동현상을 연구한다.

4.1 강성행렬

평행사변형 유한요소는 Fig.4에 보인바와 같이 4개의 절점을 갖고, 한 절점에 수직변위(w)와 2개의 회전변위(θ_x, θ_y), 즉 3개의 자유도(Degree

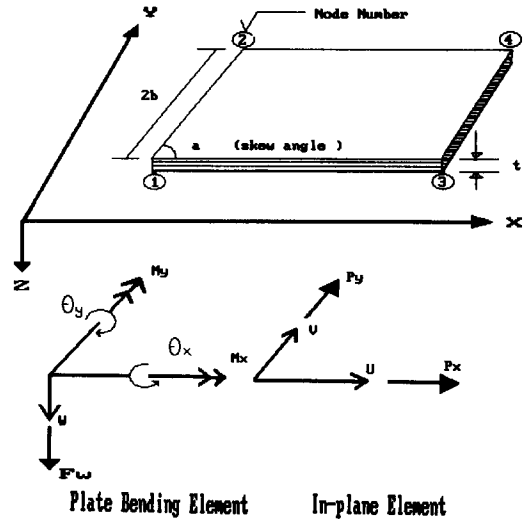


Fig. 4 : Dimension & Positive Direction of Skewed Element

of Freedom)를 가지고 한 요소당 12개의 자유도를 갖게 된다.

이때 절점변위와 그에 상응하는 절점하중은 다음과 같다.

$$Q_i = \begin{bmatrix} Q_{i1} \\ Q_{i2} \\ Q_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_i \\ \theta_{xi} \\ \theta_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_i \\ -dw_i/dy \\ dw_i/dy \end{bmatrix}$$

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{i1} \\ P_{i2} \\ P_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \end{bmatrix}$$

(여기서 $i=1, 2, 3, 4$ 는 절점번호)

유한요소법의 정의에 따라 가해진 변위함수는 다음식으로 주어지며

$$W = C_1 + C_2X + C_3Y + C_4Y^2 + C_5XY + C_6Y^3 + C_7X^3 + C_8X^2Y + C_9XY^2 + C_{10}Y^3 + C_{11}X^3Y + C_{12}XY^3$$

강성행렬(Stiffness Matrix) 공식은 다음과 같다.

$$K = \int_v [B]^T [E] [B] dV = t \cdot ab \cdot \sin(\alpha) \cdot \iint [B]^T [E] [B] dR \cdot dS$$

여기서 B 연산자는 형상함수의 미분함수로서, 절점 변위와 변형율의 관계를 나타내며, 위 행렬

식의 3차 곱셈을 거쳐 유도된 $[B]^T [E] [B]$ 를 Gauss Quadrature Method를 이용하여 강성행렬은 구해진다.(Ref. 6)

4.2 등가절점하중(Equivalent nodal load)

4.2.1 등분포 하중

평행사변형 요소에 W의 등분포하중이 작용할 때 각 절점에 작용하는 등가하중 공식은 다음과 같다.

$$F_w = A \int f^T W dA = W |J| \int f^T dR \cdot dS$$

$$= W ab \sin(\alpha) \int f^T dR \cdot dS$$

여기서 f는 형상함수로서 Gauss Quadrature Method를 이용하여 2차 적분하여 정리하면 다음과 같다.

$$F_w = 4 \cdot W \cdot ab \cdot \sin(\alpha) \begin{bmatrix} 1/4 \\ -b/12 \\ a/12 \\ 1/4 \\ b/12 \\ a/12 \\ 1/4 \\ -b/12 \\ -a/12 \\ 1/4 \\ b/12 \\ -a/12 \end{bmatrix}$$

4.2.2 온도 하중

콘크리트 포장 슬래브 내부의 온도변화를 표면에서 바닥까지 선형 변화 한다고 볼때 온도 차이 $dT = (\text{콘크리트 표면온도} - \text{콘크리트 바닥온도})$ 이고 판요소의 곡률과 등가 절점 하중은 다음과 같다.

$$\epsilon_0 = \begin{bmatrix} -d^2w/dx^2 \\ -d^2w/dy^2 \\ 2d^2w/dxdy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha dT/t \\ -\alpha dT/t \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서 $\alpha = \text{열 팽창계수}$, $t = \text{슬래브 두께}$

$$F^T = \int_A B^T E \epsilon_0 dA$$

$$= ab \sin(\alpha) \int f^T B^T E \epsilon_0 dR \cdot dS$$

$$= ab \sin(\alpha) \int f^T B^T \begin{bmatrix} D_x & D_x & 0 \\ D_1 & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\alpha dT/t \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} dRds$$

$$= Et^2 (\alpha dT) / 12 (1 - PR) \begin{bmatrix} -2 \cot(\alpha) \\ a/\sin(\alpha) \\ -b/\sin(\alpha) \\ 2 \cot(\alpha) \\ -a/\sin(\alpha) \\ -b/\sin(\alpha) \\ -2/\cot(\alpha) \\ a/\sin(\alpha) \\ -b/\sin(\alpha) \\ 2/\cot(\alpha) \\ -a/\sin(\alpha) \\ -b/\sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

4.3 Parallelogram In-plane Stress Element

콘크리트포장구조의 역학적 거동현상은 차량하중이나 슬래브자중 그리고 콘크리트 슬래브상하면의 온도차이에 의한 수직변위와 양쪽방향으로의 각 변위로 인한 슬래브의 휨효과와 콘크리트의 건조수축(Shrinkage), 슬래브와 지반과의 마찰(Subgrade Friction), 그리고 온도의 팽창과 수축으로 인한 평면변위효과가 있다.

이러한 콘크리트포장 슬래브의 평면변위효과를 역학적으로 해석하기 위하여 유한요소법을 이용한 평행사변형 평면응력요소(Parallelogram In-plane Stress Element)를 이용한다. 이는 Fig4에 보인 바와 같이, 4개의 절점(node)을 갖고 각 절점에서 X, Y 양방향으로의 수평변위로 인한 2개의 자유도(Degree of Freedom)로 인해, 총 8개의 자유도를 갖는 평행사변형요소이다.

여기서 절점변위 q는 2개씩 8개의 자유도로 인해

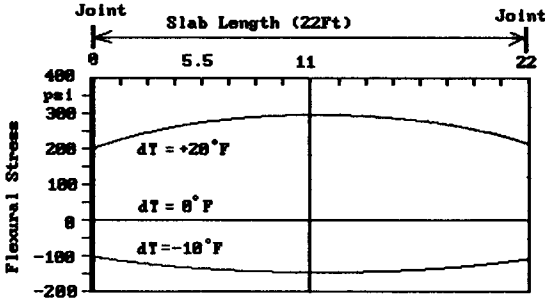


Fig. 5 : Initial stress due to thermal loads Along the Slab edge (1psi = .07kg/ cm²)

$$q = \{U_1, V_1, U_2, V_2, U_3, V_3, U_4, V_4\}^T \text{ 이고}$$

평행사변형 평면요소의 가정된 변위함수는 가우스 적분법을 이용하기 위해 -1부터 1까지의 μ, η 정규좌표계(normalized Coordinate system)를 사용하여

$$u = c_1 + c_2 \cdot \mu + c_3 \cdot \eta + c_4 \cdot \mu\eta$$

$$v = c_5 + c_6 \cdot \mu + c_7 \cdot \eta + c_8 \cdot \mu\eta \text{ 이다.}$$

x, y 方向에서의 미소변위를 u, v라 할때 x, y 方向에서의 변형률 ϵ_x, ϵ_y 와 전단변형률 ϵ_{xy}

$$\epsilon = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial v / \partial y + \partial v / \partial x \end{Bmatrix}$$

즉, $\epsilon = d u$

여기서 $u = \{u, v\}$

$$d = \text{미분연산자} = \begin{Bmatrix} d/dx & 0 \\ 0 & d/dy \\ d/dy & d/dx \end{Bmatrix}$$

초기변형을 ϵ_0 , 전체변형을 ϵ_T 라 할때 isotropic 재료의 Hooke's law는

$$\sigma = [E] \cdot \{\epsilon_T - \epsilon_0\}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-PR^2} \begin{bmatrix} 1 & PR & 0 \\ PR & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-PR}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

강성행렬(K)를 유도하기 위해 가상일의 원리를 에너지정리에 대입하면

$$K = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T E B dv = t \cdot ab \sin(\alpha) \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T E B d\mu \cdot d\eta$$

Gauss 적분법을 사용한 강성행렬이 Ref. 7에 주어졌다.

4.4 평면 응력요소의 등가절점하중

평행사변형 요소의 경계內에 作用하는 마찰하중, 건조수축하중, 온도의 팽창수축하중 등을 각 절점의 자유도에 상응하는 등가절점하중으로 유도하면 다음과 같다.

4.4.1 온도하중(Temperature loading)

콘크리트 슬래브내부에서의 온도변화는 슬래브 상면(surface)에서의 온도를 T_s , 슬래브 하면(Bottom)에서의 온도를 T_b , 슬래브 중간(middle)에서의 온도를 T_m , 기준온도(Reference Temperature)를 T_0 라 할때 2차함수로서 표시할 수 있다.

즉, $F(z) = A + Bz + Cz^2$

여기서 $A = T_m$

$$B = 1/t (T_b - T_s)$$

$$C = 2/t^2 (T_s + T_b - 2T_m)$$

이들을 초기변형에 의한 등가절점하중 공식에 대입하면

$$\{F \epsilon_0\} = - \int [B]^T [E] \cdot \{\epsilon_0\} dv$$

$$\alpha \int [B]^T [E] \begin{bmatrix} F(z) \\ F(z) \\ 0 \end{bmatrix} dx dy dz$$

온도변형 2차함수 $F(z)$ 를 슬래브두께 구간에서 적분하고 온도상수를 대입하면,

$$T = \int_{-t/2}^{t/2} F(z) dz = t [T_m - T_0 + (T_s + T_b - 2T_m)/6]$$

이를 Gauss 적분을 위한 -1부터 1까지의 정규구간으로 변환하면,

$$\{F \epsilon_0\} = \{F_i\} = \alpha \cdot a \cdot b \sin(\alpha) [B]^T [E] \begin{bmatrix} T \\ T \\ 0 \end{bmatrix} d\mu d\eta$$

4.4.2 건조수축(Shrinkage)하중

콘크리트의 건조수축으로 인해 콘크리트 슬래브에 평면변위가 있을때, 콘크리트 건조수축 변형량(ϵ_{shr})를 초기변형량(ϵ_0)와 같다고 놓을 때,

$$\{F \epsilon_0\} = - \int [B]^T [E] \cdot \{\epsilon_0\} dv$$

$$\{F_{shr}\} = - \int [B]^T [E] \cdot \{\epsilon_{shr}\} dv$$

$$= -t \cdot ab \sin(A) \cdot \{\epsilon_{shr}\} \iint [B]^T [E] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} d\mu \cdot d\eta$$

표5. Thermal Initial Stress

Location	dT (C)	Average Stress(kg/cm ²)	
		σ_x	σ_y
Along the Edge	0	0	0
	-5.5	-10.5	-0.5
	+11	21.5	0.9
Long.center	0	0	0
	-5.5	-12.5	-10.2
	+11	24.2	16.0
Joint	0	0	0
	-5.5	-10.2	-6.0
	+11	20.9	10.5
Cross at the mid-slab	0	0	0
	-5.5	-12.5	-6.7
	+11	24.3	9.1

5. 온도변화에 따른 포장슬래브의 역학적 거동

유한요소법을 이용한 콘크리트 포장슬래브의 컴퓨터 모델링은 슬래브의 연결 줄눈부에서 콘크리트를 구성하고 있는 자갈의 맞물림 또는 다월(Dowel)바가 있는 경우, 다월바의 강성에 의한 전단력과 모멘트의 저항으로 선형 스프링과 회전 스프링을 줄눈부의 각 절점을 따라 둘수 있으며 기초지반은 유한요소로 구성된 전체 슬래브의 각 절점에서 수직방향의 변위를 고려한 Winkler foundation으로 하여 3연속 슬래브를 대상으로 한 유한요소 구조해석 프로그램인 FEACONS V (Ref. 8)를 이용하여 온도변화에 따른 포장슬래브의 역학적 거동을 연구하였다.

콘크리트 포장슬래브의 입력치수는 중부고속도로의 폭인 3.6m 일차선에 슬래브 길이 6.7m인 3연속 슬래브, 두께 25cm, 단면으로 강섬유보강 콘

크리트를 사용한 경우, 탄성계수 계산식은 ACI Committee 544가 제안한 $E_c=(1-P) E_m + P \cdot E_f$, (E_c 는 섬유보강 콘크리트의 탄성계수, P 는 섬유혼입량, E_m 는 매트릭스의 탄성계수, E_f 는 섬유의 탄성계수)를 사용하여 $3.7 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 로 가정하였으며 포아슨비는 0.2이다.

콘크리트 포장슬래브 내부의 온도변화는 앞절에서 설명한 바와같이 슬래브 상, 하면의 온도차이를 dT 라 할때, 각 지역의 최대치를 고려하여 dT 를 0℃부터 2℃, 5℃, 7℃, 9℃, 11℃ 증가시키면 포장슬래브는 점점 아래를 향해 오목하게 휘게되며, dT 가 11℃인 경우 슬래브 내부에는 축방향으로 약 300psi(21kg/cm²)의 휨응력이 발생하며, dT 가 (-)인 경우는 콘크리트 슬래브의 바닥면이 온도가 높아 위를 향해 오목하게 휘게되며, dT 가 -5℃(10°F)인 경우 약 150psi(10.5kg/cm²)의 축방향 휨응력이 슬래브 중앙에 발생함을 알수 있다.

위와 같이 -5℃(10°F), +11℃(20°F)의 온도변화를 하는 경우, 슬래브의 가장자리를 따라 휨응력의 변화를 도시한 것이 그림5로서 슬래브 연결 줄눈부에서 최저치의 휨응력이 점차 증가하여 슬래브 중앙에서 최대가 됨을 알 수 있고, 표5에 주어진 바와같이 x, y방향에서의 휨응력의 크기가 슬래브 위치에 따라 온도변화의 크기에 거의 비례함을 알 수 있다.

6. 결론

일부 콘크리트 포장구간에서 보이고 있는 심각한 균열파괴 현상은 주하중인 차량하중의 대형화, 중량화 외에 환경요소인 온도변화의 영향으로 대기온도와 밀접한 관계를 갖고 있다. 전국적으로 가장 더운 8월의 월 평균기온은 30℃정도이며, 최고기온은 대구지방에서 35.5℃를 기록했고, 가장 추운 1월의 춘천지방 월 평균기온은 영하 11℃정도이고, 최근의 최저기온은 1986년에 기록한 영하 25.6℃였다. 대기온도의 변화에 따른 지중온도의 변화는 슬래브 두께 30cm를 고려한 30cm 지중에서의 온도는 약 2℃정도의 온도차이를 보이며, 콘크리트 슬래브의 상하면 온도차는 오후 1시경에

(+) 최대값 20°F(11°C)를 가지고 낮동안에는 아래방향으로 오목하게 휘며, 오전 6시경에는 (-) 최대값 10°F(5.5°C)를 가지고 밤동안에는 위방향으로 오목하게 휘어, 슬래브 중앙에서는 지반과 접촉되고 슬래브 연결 줄눈부에서는 지반과 뜨게 되어 차량하중에 따른 균열현상을 예상할 수 있고, 이때 발생하는 온도응력의 크기는 11°C 정도의 슬래브 상하면 온도차이에서 약 21kg/cm² 정도의 최대 휨응력이 발생하여 측정위치에 따라 온도 변화의 크기에 거의 비례함을 알 수 있다.

7. References

1. Westergaard, H.M., "Analysis of stresses in Concrete Pavements due to Variations of Temperature", Highway Research Board, Volume 6, 1926, pp.210-206.
2. Grinter, L.E., "Design of Reinforced Concrete Road Slab", Bulletin No.39, Texas Engineering Experiment Station, March, 1931.
3. Harr, M.E., and Leonards, G.A., "Warping Stresses and Deflections in Concrete Pavements", Highway Research Board, Proceedings, Vol 39, 1959, pp. 157-171
4. 한국중앙 기상대, "Monthly Weather Report", 1980-1990.
5. Tia, M., Armaghani, J.M., "Field Evaluation of Rigid Pavements for the Development of a Rigid Pavement Design System", Univ. of Florida Final Report, Submitted to FDOT, July, 1986.
6. Jo, Byung-Wan, "A Finite Element Analysis for the Concrete Highway Pavements with Skewed Joints", 대한토목학회 논문집 제8권 제4호, 1988, 12월.
7. Jo, Byung-Wan, "Development of Finite Parallelogram Element for the In-plane Analysis of Concrete highway Pavement., Computers & Structures", Britain, Vol. 36, No 4, pp.737-742, 1990.
8. Jo, Byung-Wan, "Development of Finite Element Analysis Program for the Concrete Pavement", 전산구조공학 제3권 제2호, 1990, 2월

(접수일자. 1991. 4. 16)