

FEM 解析に基づくコンクリート舗装版横目地のそり応力式

西澤辰男¹・蛭川 明²・福田 正³

¹工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒 929-03 河北郡津幡町北中条)

²工修 三菱重工業株式会社神戸造船所 (〒 652 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

³工博 東北大学教授 大学院情報科学研究科 (〒 980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

コンクリート舗装の設計においては、コンクリート版上下面の温度差によって生じるそり応力を、横目地縁部において計算する必要がある。しかしながら、その計算に使用できる適切な応力式はこれまで得られていない。そこで、FEM に基づいたコンクリート舗装版の横目地縁部のそり応力式を求めた。この FEM 解析では、コンクリート舗装は Winkler 基礎上の弾性平板、横目地は 3 種類の線形ばねモデルで表現した。この FEM による数値解に重回帰分析を適用することによってそり応力式を得た。この応力式と既往のそり応力式を比較することによってその正当性を確かめた。

Key Words : concrete pavement, warping stress, transverse joint edge, FEM analysis

1. はじめに

コンクリート舗装においてはコンクリート版内の温度勾配によってそり変形を生ずるが、自重によって変形が拘束されるために内部に曲げ応力が発生する。このような応力をそり応力と呼び、荷重による応力と合成されてコンクリート舗装の構造設計に用いられる。現在、わが国の道路舗装の設計に用いられているそり応力式は、コンクリート舗装版の自由縁部を対象として実験的に求められたものである¹⁾。しかしながら、現実的には交通量の多い道路においては横目地縁部が設計上のクリティカルな点という指摘があり^{2),3)}、既往の式ではその部分のそり拘束応力を計算することができない。コンクリート舗装は重交通道路に施工されることが多く、横目地縁部におけるそり応力式の開発が急務である。

わが国のコンクリート舗装の構造設計においては、荷重応力とそり応力の和である合成応力によって疲労計算を行い、コンクリート版の版厚を決定する。したがって、そり応力の算定は設計においてきわめて重要である。このために、Westergaard⁴⁾、Kelley⁵⁾、岩間⁶⁾等によって解析的、実験的に研究が行われた。しかしながら、これらの研究においては条件が限定されており、横目地縁部の設計においての使用に問題がある。

また、わが国の設計法では縦縁部の合成応力で版厚設計を行っており、そこで使用するそり応力式が提示されているが、前述したように条件によっては横目地縁部がクリティカルとなる。横目地縁部における荷重応

力に関しては、そこでの荷重伝達を考慮した応力式がすでに提案されている⁷⁾。そり応力に関しても、横目地縁部に適用可能で、いろいろな条件を考慮した汎用的なそり応力式が必要である。FEM はコンクリート舗装の応力計算に有用であるが、大量の繰返し計算を必要とする疲労解析に用いるにはコストが高い。そこで FEM による数値計算を行い、その結果に基づいた非線形重回帰によって簡便なそり応力式を導くことにした。

2. FEM 解析

(1) FEM 解析の定式化

温度を考慮したコンクリート舗装の剛性方程式は、以下のようなになる⁸⁾。

$$(\mathbf{K} + \mathbf{J}) \cdot \mathbf{d} = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_t - \mathbf{q} \quad (1)$$

ここに、

- \mathbf{K} : コンクリート版の剛性マトリックス
- \mathbf{J} : 目地あるいはひび割れ部の剛性マトリックス
- \mathbf{d} : 節点変位ベクトル
- \mathbf{f}_s : 交通荷重ベクトル
- \mathbf{f}_v : 自重ベクトル
- \mathbf{f}_t : 熱ひずみによる見かけの荷重ベクトル
- \mathbf{q} : 路盤反力ベクトル

である。

コンクリート版内に発生する熱ひずみによるみかけの荷重ベクトルは次式のように表される⁹⁾。

$$\mathbf{f}_t = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D}^e \epsilon_t dV \quad (2)$$

$$\epsilon_i = \mathbf{B} \mathbf{d}_i \quad (3)$$

ここに、

- \mathbf{B} : ひずみ-変位マトリックス
- \mathbf{D}^e : 弾性応力-ひずみマトリックス
- ϵ_i : 熱ひずみベクトル

さらに、 \mathbf{d}_i はそり変形による変位ベクトルで、 i 節点においては次のようになる。

$$\mathbf{d}_{i1} = \begin{Bmatrix} w_{ti} \\ \theta_{xti} \\ \theta_{yti} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w_{ti} \\ -\frac{\partial w_{ti}}{\partial y} \\ \frac{\partial w_{ti}}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

また温度勾配によるそり変形は次式で計算できる。

$$w_{ti} = -\frac{3M_i}{4h^3E}(x_i^2 + y_i^2) \quad (5)$$

ここに、

- M_i = $\alpha E \int_{-h/2}^{h/2} Tz dz$
- z : コンクリート版内の厚さ方向の座標
- α : コンクリートの線膨張係数
- T : コンクリート版内の温度分布
- h : コンクリート版の厚さ
- E : コンクリートの弾性係数
- x_i : 版中央を原点とした i 節点の x 座標
- y_i : 版中央を原点とした i 節点の y 座標

したがって、

$$\mathbf{f}_i = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D}^e \mathbf{B} dV \mathbf{d}_i \quad (6)$$

$$= \mathbf{K} \cdot \mathbf{d}_i$$

一方、路盤自体の荷重と変位(たわみ)の関係は次式で表される。

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{d} \quad (7)$$

ここに、 \mathbf{U} は路盤のたわみ性マトリックスである。式(7)を \mathbf{q} について解くと、

$$\mathbf{q} = \mathbf{U}^{-1} \cdot \mathbf{d} \quad (8)$$

以上より、式(6)、式(8)を式(1)に代入してまとめると以下ようになる。

$$\begin{aligned} (\mathbf{K} + \mathbf{J}) \cdot \mathbf{d} &= \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v + \mathbf{f}_i - \mathbf{q} \\ &= \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v + \mathbf{K} \cdot \mathbf{d}_i - \mathbf{U}^{-1} \cdot \mathbf{d} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで変位ベクトルを荷重変形成分とそり変形成分に分けて考える。すなわち、

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}_e + \mathbf{d}_i \quad (10)$$

ここに、 \mathbf{d}_e は荷重変位ベクトルである。

式(10)を式(9)に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} (\mathbf{K} + \mathbf{J} + \mathbf{U}^{-1}) \cdot \mathbf{d}_e &= \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v \\ &\quad - (\mathbf{J} + \mathbf{U}^{-1}) \cdot \mathbf{d}_i \end{aligned} \quad (11)$$

となり、この式が基礎となる剛性方程式である。

(2) 路盤との接合条件

路盤モデルは路盤による反力を線形ばねに置き換えた Winkler 基礎とし、コンクリート版は変位に比例する路盤反力を受けるものとする。ただし、温度勾配によりコンクリート版が路盤の上方にそり上がり、路盤の接合条件が変化する。そこで以下のような路盤との接合条件を設定した。

$$q = \begin{cases} k \cdot (w - w_0) & ((w - w_0) \geq 0 \text{ のとき}) \\ 0 & ((w - w_0) < 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (12)$$

ここに

- q : 路盤反力
- w : たわみ
- w_0 : 平板と路盤との隙間
- k : 路盤 k 値

w_0 は温度勾配によるそり変形によって生ずる部分的な路盤と平板との隙間を考慮するために導入した。このような路盤条件を仮定した場合、路盤の剛性マトリックスは平板のたわみの関数となり、剛性方程式(11)が非線形になる。そこで、式(11)を解くために Newton-Raphson 法を採用した。すなわち、平板のたわみを計算した後、式(12)の条件に従って路盤の剛性マトリックス \mathbf{U}^{-1} を構成しなおす。その後、改めて平板のたわみを計算し、式(11)が十分な精度で成り立つまでこのような計算を繰り返すのである。通常 3~4 回で収束して解が得られる。

(3) 横目地モデル

コンクリート舗装の横目地における荷重伝達は、せん断、曲げおよびねじりの 3 種類の線形ばねでモデル化した¹⁰⁾。すなわち、次式のように表現される。

$$\mathbf{f}_i - \mathbf{f}_u = \mathbf{K}_J (\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_u) \quad (13)$$

ここに、

- $\mathbf{f}_i, \mathbf{f}_u$: 載荷側および非載荷側の節点力ベクトル
- $\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_u$: 載荷側および非載荷側の節点変位ベクトル

$$\mathbf{K}_J = \begin{bmatrix} \kappa_w & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_t & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_n \end{bmatrix}$$

- $\kappa_w, \kappa_t, \kappa_n$: それぞれ、せん断、曲げ、ねじりに対する単位長さあたりのばね定数

通常の目地構造においてはせん断伝達が主で、連続鉄筋コンクリート舗装の微細なひび割れにおいては若干の曲げモーメントの伝達があるが、ねじりの効果、すなわち κ_n はほとんど無視できることが分かっている¹¹⁾。このようなことから、本研究においては κ_w, κ_t の値の影響について考察した。

表-1 計算に用いた諸数値

コンクリート版長 [L]	8 m
コンクリート版幅 [B]	4.5 m
コンクリート版厚 [h]	28 cm
コンクリートの弾性係数 [E]	300,000 kgf/cm ²
コンクリートのポアソン比 [μ]	0.17
コンクリートの線膨張係数 [α]	1.0 × 10 ⁻⁵ /°C
目地のせん断ばね係数 [κ _w]	1.0 × 10 ⁴ kgf/cm ²
目地の曲げばね係数 [κ _t]	0.0 kgf/cm
路盤 k 値 [k]	7 kgf/cm ³
上下面の温度差 [Δt]	4 ~ 16 °C

1 kgf/cm = 0.98kN/m, 1 kgf/cm² = 0.098MN/m², 1 kgf/cm³ = 9.8MN/m³

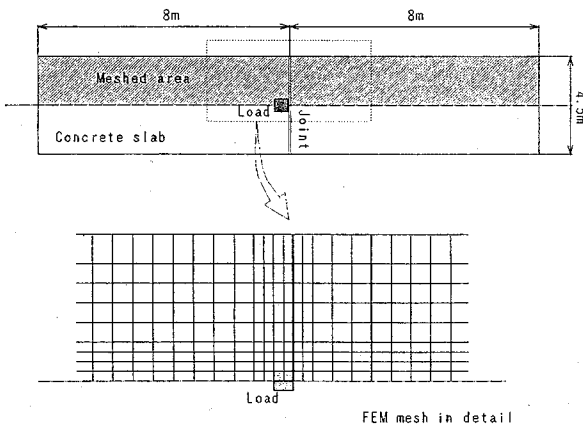


図-1 計算に用いた要素分割

(4) 合成応力状態の検討

コンクリート舗装の設計法においては、そり変形が生じているコンクリート舗装版に荷重が作用したとき、コンクリート版に生ずる応力はそり応力と荷重応力の重ね合わせになると考えられている。しかしながら、路盤との接触がない位置に荷重が作用した場合には、必ずしもそれら2つの応力の単純な重ね合わせにはならない恐れがある。そこで、ここではFEM解析によってこの問題について検討する。

計算において想定した条件およびFEM要素分割を表-1および図-1に示す。温度差を表に示すように変化させてそり変形の影響について調べることにした。また荷重条件としては、横目地縁部に5tf(49kN)の荷重を30×30cmの等分布荷重として作用させた。

図-2はコンクリート版全体のそり変形および応力の分布状態を示している。変形の様子をみると、一枚のコンクリート版ごとに中央部が持ち上がったそり変形となっている。版長が8mと長いため、そり応力はコンクリート版のなかで一様ではなく、コンクリート版中央部分のそり応力は縦方向に大きく、横目地縁部では

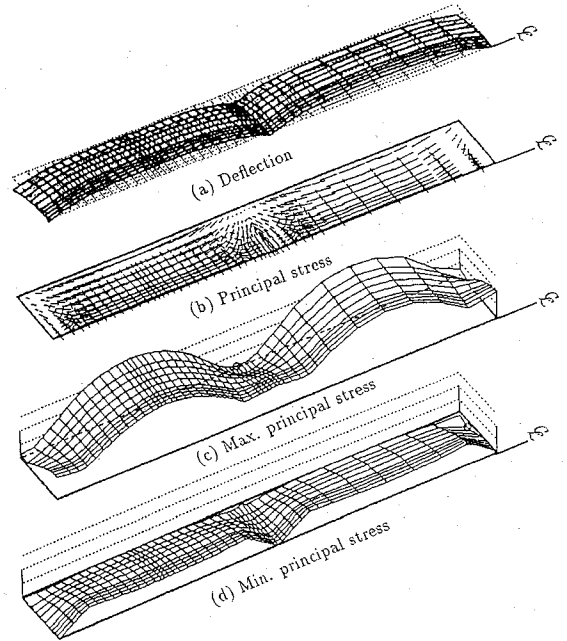


図-2 コンクリート版のそり応力分布

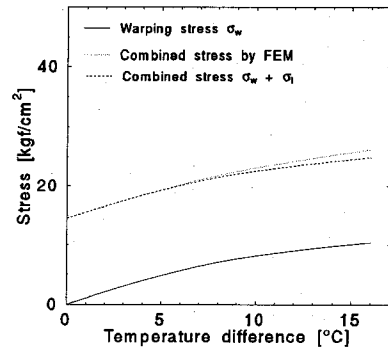


図-3 合成応力の検討(横目地縁部)

縁部方向に大きいことがわかる。また、この場合の最大そり応力は目地間の中央部に発生する縦方向の曲げ応力である。

そり変形を受けているコンクリート版について、その縁部の版幅中心位置におけるそり応力を σ_w 、その状態で荷重のみが作用した場合の合成応力を σ_c とする。一方、そり変形を受けていないコンクリート版に荷重が作用した場合の荷重応力を σ_l とする。図-3はこれらの応力をFEMにより計算した結果である。そり応力は温度差とともに増加していくが、完全な比例関係にはない。これは、版幅が4.5mであり長さによる拘束が比較的小さいためである。また現行の設計法で仮定される $\sigma_c = \sigma_w + \sigma_l$ は、温度差が大きい場合には、必ずしも成り立たず、合成応力は若干小さく求められていることが分かる。しかしその差はわずかであり、基本的

表-2 計算に用いた諸数値

コンクリート版長 [L]	5, 8, 10 m
コンクリート版幅 [B]	3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 m
コンクリート版厚 [h]	23, 25, 28, 30 cm
コンクリートの弾性係数 [E]	2.8, 3.0, 3.2 × 10 ⁵ kgf/cm ²
コンクリートのポアソン比 [μ]	0.17
コンクリートの線膨張係数 [α]	1.0 × 10 ⁻⁵ /°C
目地のせん断ばね係数 [κ _w]	1.0, 10.0, 100.0 × 10 ³ kgf/cm ²
目地の曲げばね係数 [κ _t]	0, 1.0, 10.0, 100.0 × 10 ⁴ kgf/cm ³
路盤k値 [k]	3, 5, 7, 10 kgf/cm ³
版上下面の温度差 [Δt]	4 ~ 16 °C

には単純な和による合成応力の考え方は妥当であるといえる。

3. FEM 解析データによる応力式の誘導

(1) FEM 解析の諸条件

コンクリート舗装版のそり応力の計算においては通常の道路舗装の条件を想定し、表-2に示すような諸数値を設定した。コンクリートの版長、版厚、弾性係数、路盤k値、温度差を変化させ、それらのすべてを組み合わせ合わせた合計192ケースの計算を実行し、それぞれの条件におけるそり応力を求めた。また、目地縁部のばね係数を変化させ、その影響についても検討することとした。

(2) FEM によるそり応力

従来のそり応力式は、縦縁部を対象としたものであることから、縦縁部と横目地縁部におけるそり応力の相違について検討した。図-4,5,6,7に縦縁部のそり応力を、図-8,9,10,11,13,14に横目地縁部のそり応力の解析結果を示す。これらの計算結果は、図中に表示されている以外の諸数値を表-2の下線の値に設定したものである。これらより次のようなことが分かる。

a) 縦縁部のそり応力

全体として、温度差とそり応力は比例的な関係にある。図-4より、コンクリートの弾性係数はそり応力にわずかながら影響がある。図-5をみると、版長が8m, 10mの場合には温度差と拘束応力はほぼ比例するが、5mにおいては温度差が大きくなってもそり応力はそれほど増加しない。これは、版長が短いと自重による拘束が相対的に小さくなるためである。また、図-6,7より、版厚、路盤k値の相違は拘束応力の値に影響を及ぼさないことが分かる。このことは岩間のそり応力式の中に版厚、路盤k値のパラメータが入っていないことに合致する。

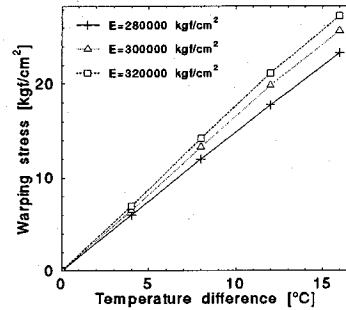


図-4 そり応力を弾性係数で比較 (縦縁部)

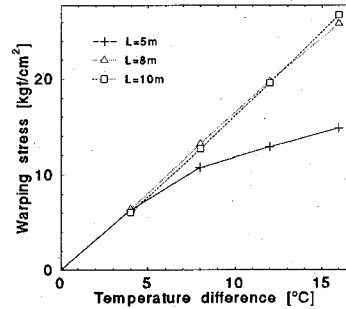


図-5 そり応力を版長で比較 (縦縁部)

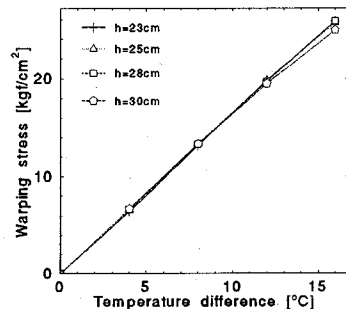


図-6 そり応力を版厚で比較 (縦縁部)

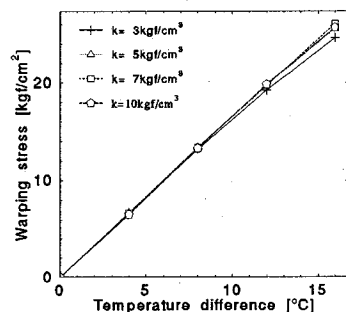


図-7 そり応力を路盤k値で比較 (縦縁部)

b) 横目地縁部のそり応力

横目地縁部の場合、縦縁部の場合と異なり、そり応力と温度差は比例関係にはない。図-8より、弾性係数は横目地のそり応力にほとんど影響を与えない。図-9か

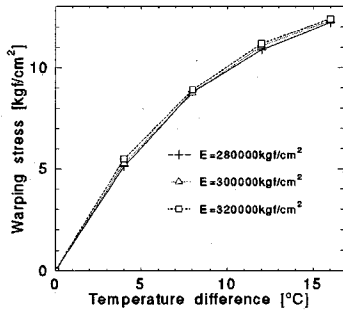


図-8 そり応力を弾性係数で比較 (横目地縁部)

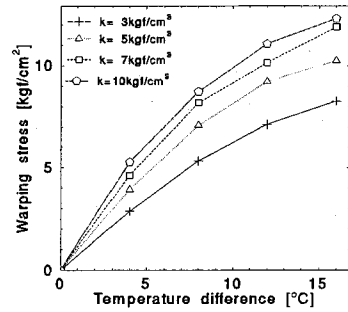


図-11 そり応力を路盤k値で比較 (横目地縁部)

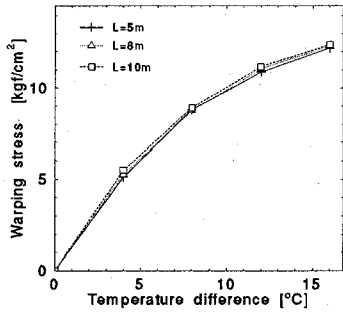


図-9 そり応力を版長で比較 (横目地縁部)

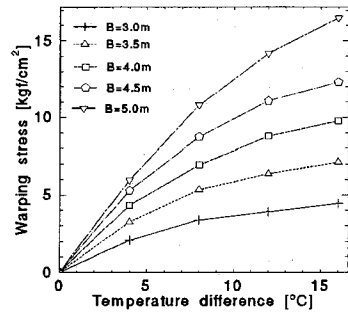


図-12 そり応力を版幅で比較 (横目地縁部)

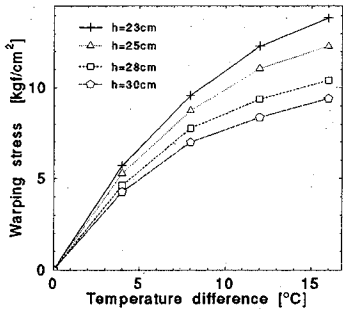


図-10 そり応力を版厚で比較 (横目地縁部)

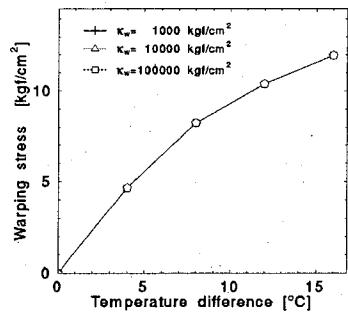


図-13 そり応力をせん断ばね定数で比較 (横目地縁部)

ら、版長はそり応力に影響があるが、縦縁部の場合ほど大きなものではない。また、図-10,11,12より、縦縁部とは異なり版幅、版厚、路盤k値がそり応力に大きく影響することが分かる。温度差が大きくなると、そり変形によって路盤との接触状態が変化するので、版厚や路盤k値といった構造的な要因が大きく現れてくるのである。図-13に示すように、目地のせん断ばね定数もそり応力にはまったく無関係である。これは、コンクリート版の温度差によるたわみが目地の両側で同一なので、せん断ばねが働かないからである。一方、目地においてはそりによるたわみ角が不連続になるので、その差だけ曲げばねが曲げモーメントを伝達する。図-14に現れている曲げばね係数のわずかな影響はそのためである。

以上の結果より、横目地縁部のそり応力式の変数と

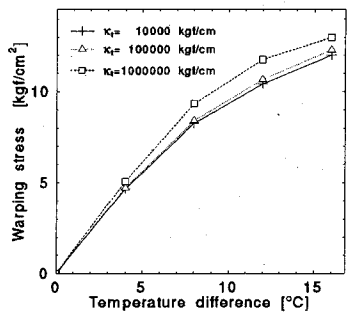


図-14 そり応力を曲げばね定数で比較 (横目地縁部)

して、コンクリート版上下面の温度差、版幅、版厚、路盤k値を選択し、コンクリートの弾性係数は考慮しないこととする。また、通常の日地構造では曲げモーメント伝達はわずかであり、曲げばね定数の影響も小さ

表-3 そり応力式の定数

定数	最小2乗法	修正値
c_0	4.5	5.0
c_1	0.662	0.65
c_2	-1.92	-2.0
c_3	2.94	3.0
c_4	0.44	0.5

いことから、曲げばね定数も変数には加えないことにした。

(3) 応力式の誘導

これまでの検討により、横目地縁部のそり応力に影響を与える因子は、版幅、版厚、路盤k値であることが分かった。そこで、横目地縁部のそり応力式を次のように仮定する。

$$\sigma_t = c_0 \cdot \Delta t^{c_1} \cdot h^{c_2} \cdot B^{c_3} \cdot k^{c_4} \quad (14)$$

ここに、

- σ_t : 横目地縁部における最大そり応力
(kgf/cm²)
- Δt : コンクリート版上下面の温度差 (°C)
- k : 路盤k値 (kgf/cm³)
- h : コンクリート版厚 (cm)
- B : 版幅 (m)
- $c_0, \sim c_4$: 定数

式(14)の両辺の対数をとることにより線形化し、FEM解析によって得られた数値計算に基づいて線形重回帰分析を行い、定数 $c_0 \sim c_4$ を決定した。その結果が表-3の第2欄の数値である。しかし、このようにして誘導された応力式は理論モデル式ではなく統計式であるので、定数値に厳密な意味は持たないことから、応力式はできるだけ単純な形であることが望ましい。そこでこれらの数値を区切りのよい数値に修正を行い、表-3の第3欄のように設定した。すなわちそり応力式はつぎのように表現される。

$$\sigma_t = \frac{5\Delta t^{0.65} B^3 \sqrt{k}}{h^2} \quad (15)$$

表-2に示した各種のコンクリート舗装構造と温度差について、式(15)とFEM解析による数値計算の結果を比較すると、図-15のようになる。両者は良く一致しており、式(15)は横目地のそり応力式として実用的に適用することが可能であることを示している。

(4) 横目地縁部におけるそり応力の分布

設計の際のコンクリート舗装の合成応力に基づいた疲労計算は、横目地縁部における車輪荷重の最頻走行

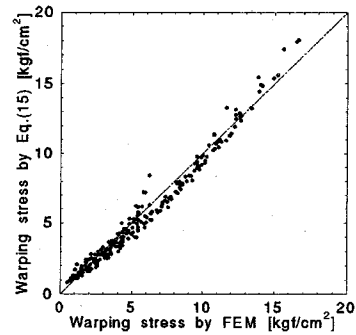


図-15 応力式とFEMによる計算値との比較

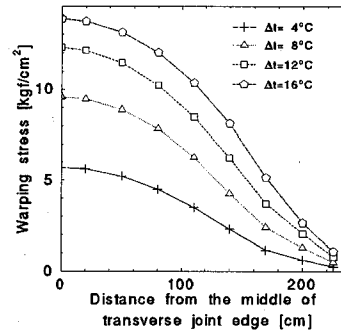


図-16 そり応力の横目地縁部に沿った分布

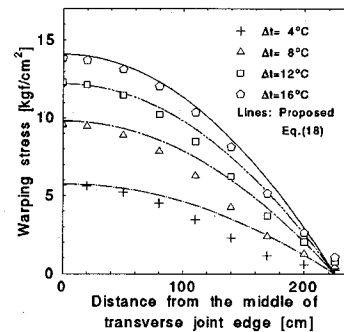


図-17 誘導したそり応力式とFEMによる計算値との比較

位置で行われるが、この位置は必ずしも横目地縁部の中央ではない。したがって、横目地縁部の車輪走行位置におけるそり応力が必要になる。そこで、横目地縁部に沿った任意の位置のそり応力を算定する式を最大そり応力から誘導することを検討した。

図-16に版幅中央を原点として横目地縁部に沿ったそり応力の分布を示している。そり応力は横目地縁部に沿って一定とはならず、車輪走行位置によってそり応力は異なってくる。したがって、このようなそり応力の分布を考慮するために、次式を仮定した。

$$\sigma_t(x) = a \cdot x^2 + \sigma_{tmax} \quad (16)$$

表-4 比較の計算に用いた諸数値

コンクリートの版長 [L]	8 m
コンクリートの版幅 [B]	4.5 m
コンクリートの版厚 [h]	25 cm
コンクリートの弾性係数 [E]	300,000 kgf/cm ²
コンクリートのポアソン比 [μ]	0.17
路盤k値 [k]	7 kgf/cm ³
コンクリートの線膨張係数 [α]	1.0 × 10 ⁻⁵ /°C
C _w (式(19))	0.85 (L=5m に対応)
C _y (式(20))	0.75 (L=4.5m に対応)

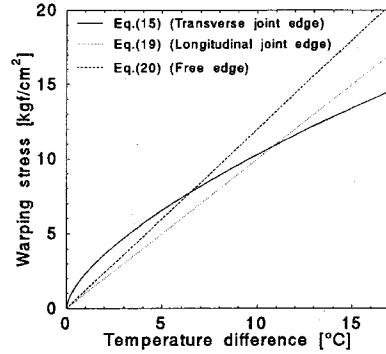


図-18 本研究で提案したそり応力式と既往の応力式の比較

ここに、

σ_{tmax} : 式(15)により求められるそり応力

a : 定数

x : 版中心からの距離 (m)

横目地の隅角部においては $\sigma_t(x) = 0$ であるから、この条件を式(16)に適用すると

$$a = -\frac{4}{B^2} \sigma_{tmax} \quad (17)$$

B : 版幅 (m)

となるから、横目地縁部に沿ったそり応力式として次式を得る。

$$\sigma_t(x) = \sigma_{tmax} \left(1 - \frac{4}{B^2} x^2\right) \quad (18)$$

図-17は式(18)とFEMによる計算値を比較したものである。横目地縁部の中央から約1.5m付近の車輪走行位置において式(18)の値はやや大きな値となるが、設計上安全側の評価となるため、実用上十分と考えられる。

4. 既往の応力式との比較

横目地縁部におけるそり応力について、既往の応力式と本研究において提案したそり応力式との比較を図-18に示す。既往の縁部そり応力式として岩間の式およびKelleyの式の2つと比較することにした。ただし、岩間の式は内部応力を含めた温度応力式である。以下にそれらの式を示す。

(a) 岩間の式

$$\sigma_t = 0.35 \cdot C_w \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta t \quad (19)$$

(b) Kelleyの式

$$\sigma_t = \frac{C_y \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2} \quad (20)$$

ここに、 C_w はそり拘束係数、 C_y は版長 L と剛比半径 l で決定される係数である。計算に用いた諸数値は表-4に示すとおりである。

本研究で提案するそり応力式は、温度差が7°C付近より小さい領域では若干大きい値を与えるが、温度差がこれより大きい領域では、温度差が大きくなるに従って既往のKelly式などよりも小さな値を与えるようになる。これは次のような理由による。式(15)の基礎となったFEM解析においては、温度差が大きくなり、それに伴ってそり変形が大きくなると、そり上がった部分のコンクリート版と路盤の接触が失われていくため、逆に路盤による拘束が小さくなるのである。

5. むすび

わが国の現行のコンクリート舗装の構造設計においては、荷重応力とそり応力の合成応力によってコンクリート版の疲労計算を行い、版厚を決定する。この設計法が作られた当時の交通条件から、コンクリート版の疲労計算は縦縁部において行われている。しかしながら、近年の交通条件の変化から、コンクリート版の破損は横目地縁部から縦びびわれが多くなっていることが、著者らの調査の結果から判明している。したがって、コンクリート版の疲労計算は横目地縁部で行う必要があるが、これまでに横目地縁部におけるそり応力式は適当なものがない。

そこで、本研究においては、FEM解析による計算結果を用いた重回帰分析によって、コンクリート版の横目地縁部を対象としたそり応力式を誘導して提案した。この式によれば、版幅、版厚、路盤k値などをパラメータとして温度勾配によるコンクリート版の横目地縁部におけるそり応力を計算することができる。さらに、設計時において任意の車輪走行位置を考慮できるように改良を行った。FEMによる計算結果や既往の式などと比較を行い、この式の実用性を確かめた。この式は単純な形をしており、現在のセメントコンクリート舗装要綱の疲労解析にもそのまま適用することができる。

本研究で提案したそり応力式は説明変数に関して統

計的に帰納された回帰式であって、力学的な意味はない。実験式の場合と同様に、これらの適用は解析で対象とした構造条件、温度条件の範囲に限定される。しかしながら、提案した応力式は FEM 解析に基づいており、舗装構造、交通条件などの変化や今後の新たな研究成果に基づいて容易に修正することが可能である。

参考文献

- 1) 日本道路協会: セメントコンクリート舗装要綱, 1990.
- 2) Fukuda, T., Koyanagawa, M. and Murai S.: Condition Survey of Concrete Pavements and Its Evaluation, *Proc. of 3rd Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, pp.519-523, 1985.
- 3) 西澤辰男: コンクリート舗装版のひびわれ評価システムに関する研究, 土木学会論文集, 第 420 号/V-13, pp.163-172, 1990.
- 4) Westergaard, H.M.: Analysis of Stresses in Concrete Roads Caused by Variation of Temperature, *Public Road*, Vol. 8, 1927.
- 5) Kelley, E.F.: Application of the Results of Research to the Structural Design of Concrete Pavement, *Public Road*, Vol. 20, 1939.
- 6) 岩間 滋: コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究, 土木研究所報告, 第 112 号, 1962.
- 7) 小松誠司, 武山 泰, 福田 正: FEM 解析に基づくコンクリート版横目地縁部応力式, 土木学会論文集, 第 414 号, V-12(ノート), pp.221-224, 1990.
- 8) 蛭川 明, 西澤辰男, 福田 正: そり変形を受けたコンクリート舗装版の荷重応力に関する検討, 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集, V-443, pp.912-913, 1993.
- 9) 矢川元基, 宮崎則幸: 有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, 1985.
- 10) 西澤辰男, 福田正, 松野三朗: コンクリート舗装版の横目地における力学的挙動の解析, 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, pp.185-193, 1987.
- 11) Nishizawa, T., Matsuno, S. and Fukuda, T.: A Mechanical Model for the Rational Design of CRCP, *Proc. of 3rd Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, pp.341-350, 1985.

(1995.4.5 受付)

WARPING STRESS EQUATION AT THE TRANSVERSE JOINT EDGE OF CONCRETE PAVEMENT SLAB BASED ON FEM ANALYSIS

Tatsuo NISHIZAWA, Akira HIRUKAWA and Tadashi FUKUDA

In the design of concrete pavement, warping stresses caused by temperature differences of concrete slab should be calculated at the transverse joint edge. However, any such an equation has been not developed in the past. Accordingly, the authors developed a warping stress equation based on the stress analysis by finite element method (FEM). In this FEM analysis, concrete pavement and its transverse joint were expressed by means of a thin plate-Winkler foundation model and a spring joint model, respectively. Multi-regression analysis was applied to the results of the FEM numerical calculations, and consequently, a warping stress equation was obtained. After the comparison between calculated results of the proposed equation and the warping stress equations developed in the past, it was confirmed that the equation was valid and practical.