

連続鉄筋コンクリート舗装の温度応力に関する研究

西澤辰男¹・七五三野茂²・小松原昭則³・小梁川雅⁴

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

²正会員 工修 日本道路公団試験研究所 舗装研究室長 (〒194 東京都町田市忠生 1-4-1)

³正会員 日本道路公団試験研究所 舗装研究室 主任研究員 (〒194 東京都町田市忠生 1-4-1)

⁴正会員 工博 東京農業大学講師 農学部農業工学科 (〒156 東京都世田谷区桜丘 1-1-1)

連続鉄筋コンクリート舗装(CRCP)の構造設計においては、荷重応力とともに温度応力の算定が必要となる。本研究においてはCRCPの試験舗装において温度ひずみを実測し、その結果に基づいて温度応力について検討した。実測した温度ひずみを平面成分、そり成分および非線形成分に分離し、おのおのについて検討を行った。その結果、設計において重要な横断方向の温度応力はそり成分が卓越するが、非線形成分の影響によってコンクリート版底面において最大値で約75%程度に減少することが分かった。これらの結果を踏まえてCRCPの温度応力算定法を提案した。

Key Words : continuously reinforced concrete pavement, thermal stress, FEM analysis, thermal stress equation

1. はじめに

連続鉄筋コンクリート舗装(以下CRCP)の設計は、横ひび割れを制御するための鉄筋量の決定と、供用後の交通荷重に抵抗するための版厚の決定とから成る。前者については佐藤ら^{1),2)}の研究があり、我が国のコンクリート標準示方書舗装編³⁾にもその成果が盛り込まれている。後者では、CRCPの力学的挙動の正確な予測に基づいて横ひび割れ縁部の荷重応力と温度応力を算定し、それらを用いて縦ひび割れを対象とした疲労解析を行う必要がある。しかしながら、横ひび割れを有するCRCPの構造は不連続となるため力学的な取り扱いが難しく、適切な応力算定法が確立されていない。

このようなことから、著者らは有限要素法に基づいた解析モデルの開発を進めてきた^{4),5)}。このモデルは、コンクリート版をWinkler地盤上の弾性平板によってモデル化したもので、CRCPの横ひび割れは3つの線形ばねモデルに基づいた目地・ひび割れ要素で対応する。横ひび割れの荷重伝達能力を表すパラメータであるばね定数については、載荷実験における実測とFEM解析によって同定し、その概略値を明らかにした⁵⁾。また、この解析モデルが荷重応力に対して十分な精度を持つことを確認している。しかしながら、CRCPの温度応力については依然明確な算定手段がなく、コンクリート舗装の温度応力式を準用せざるをえない^{6),7)}。このようなことから、CRCPの温度応力についての検討が急務であり、温度応力算定法の開発が本研究の目的で

ある。

本研究においては、高速道路に施工されたCRCP区間の一部に計測装置を埋め込んだ試験区間を設け、コンクリート版内のひずみと温度を連続して測定した。これらのひずみを平均、そりおよび非線形成分に分離し、おのおのの成分について温度との関係を調べて温度応力の検討を行った。特にそり成分については、FEMモデルによる解析を行い、このモデルが温度応力の算定においても有用であるかどうかについても検討した。さらに、これらの検討結果に基づいてCRCPの温度応力算定式を提案した。

2. コンクリート舗装の温度応力

温度変化によってコンクリート版に生ずる温度応力は以下のように表される⁸⁾。

$$\{\sigma_t\} = [D_e] \cdot (\{\epsilon\} - \{\epsilon_t\}) \quad (1)$$

ここに、

- $\{\sigma_t\}$: 温度応力ベクトル
- $[D_e]$: 弾性応力-ひずみマトリックス
- $\{\epsilon\}$: 全ひずみベクトル
- $\{\epsilon_t\}$: 温度ひずみベクトル

コンクリート版内の応力状態は平面応力状態と考えることができる。したがって、コンクリート版面内にx、

y 座標をとれば次式のように表される.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{Bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\mu)/2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに,

- α : コンクリートの線膨張係数
- E : コンクリートの弾性係数
- μ : コンクリートのポアソン比
- T : コンクリート版の温度

全ひずみと温度を計測することによって, 式(2)から温度応力を算定することができる.

コンクリート版の温度応力のうちそり応力については, Bradbury が, Westergaard の考え方に基づいた Winkler 路盤上の弾性平板モデルを用いて, 次式を提案している⁹⁾.

- 自由縁部に対して:

$$\sigma_t = \frac{CE\alpha\Delta T}{2} \quad (3)$$

- 中央部に対して:

$$\sigma_t = \frac{E\alpha\Delta T}{2} \left(\frac{C_x + \mu C_y}{1 - \mu^2} \right) \quad (4)$$

ここに,

- σ_t : そり応力
- C, C_x, C_y : 境界条件により定まる係数
- E : コンクリートの弾性係数
- μ : コンクリートのポアソン比
- ΔT = 上下面の温度差

係数 C, C_x, C_y は, コンクリート版の幅 L_x , 長さ L_y および剛比半径 l から求めることができる. ここに, $l = \sqrt{Eh^3/12/(1-\mu^2)/k}$, h は版厚, k は路盤 K 値である.

一方, 我が国のコンクリート舗装版の実用的な温度応力式としては岩間の式がある⁶⁾. この式は, 実物大の試験舗装における実測に基づいて式(3)を修正して導かれたものであり, コンクリート舗装の構造設計に用いられている⁷⁾. 岩間の式は縦縁部を対象としており, 次式のようなものである.

$$\sigma_t = 0.35 \cdot C_w \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (5)$$

そり拘束係数 C_w は, 目地間隔によってその値が定められている. 岩間は内部応力の影響を考慮すると, 温度応力全体としてはそり応力の約 70% になることを見だし, 式(3)に 0.7 を乗じて式(5)を提案した.

この式を CRCP に適用するには, 以下のような問題点がある.

表-1 試験区間の断面とコンクリートおよび路盤の性状

項目	数値	
コンクリート版	版幅 [m]	4.5
	版厚 [mm]	250
	縦方向鉄筋間隔 [D16, mm]	125
	鉄筋比 [%]	0.64
	横方向鉄筋間隔 [D16, mm]	500
路盤	弾性係数 [MPa]	3.47×10^4
	ポアソン比	0.134
路盤	セメント安定処理層 [mm]	150
路盤	路盤 k_{30} 値 [MN/m ³]	430

1. 中央部や縦縁部を対象としているが, CRCP の設計において必要なのは横ひび割れ縁部を対象としたものである.
 2. C_w の値は実験的に定められており, CRCP に直接適用できるという保証がない.
 3. 横ひび割れの影響を考慮できない.
- このようなことから, 本研究では試験舗装による実測に基づいて CRCP に適用可能な温度応力算定の手法を検討することにした.

3. 温度ひずみの測定

(1) 試験舗装の概要

CRCP の試験舗装区間は, 山陽自動車道吹田山口線の兵庫県三木市の約 1.8km の上下区間である. その一部に載荷試験および温度応力測定用にひずみゲージを設置した試験区間を設けた. 上りの調査区間は版厚 22cm であり, 作業の都合上, 登坂車線に設定されたため版幅は 3m と狭い. 下りの調査区間は版厚 25cm で, 走行車線に設定されており, 版幅は通常の 4.5m ある. 測定は上下区間で行ったが, 上りの車線幅は狭く横断方向の拘束が通常の舗装と異なることから, 本論文では取り上げないこととする. 表-1に下りの測定区間の諸元を示す.

この区間は 1995 年 11 月に施工され, ひずみ測定を開始した時点において横ひび割れが発生していた. ひび割れスケールを用いた目測によれば, ひび割れの開きは 0.05 mm から 0.1 mm と微細であった. 試験区間におけるコンクリートの材料試験および路盤における平板載荷試験を実施し, 解析に必要なコンクリートの弾性係数, ポアソン比, 路盤 K 値を得た. その結果は表-1に示す通りである.

(2) ひずみ測定の概要

この試験区間において, 1996 年の比較的気温の低い 2 月中旬から 3 月上旬にかけて 1 回目のひずみ測定を, それよりも気温の高い 4 月下旬から 5 月中旬にかけて 2

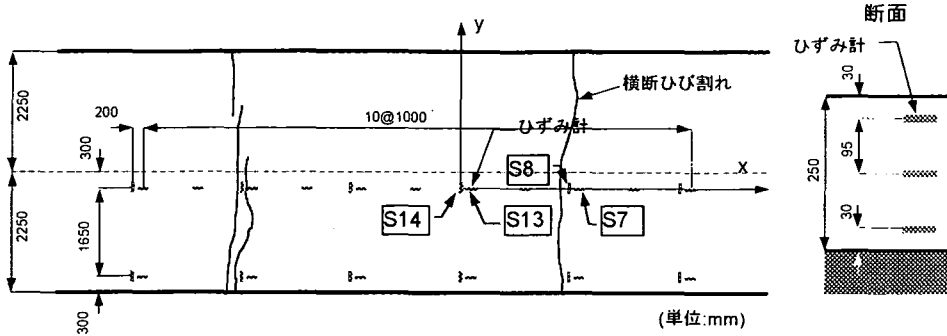


図-1 荷重と埋め込みひずみゲージの位置

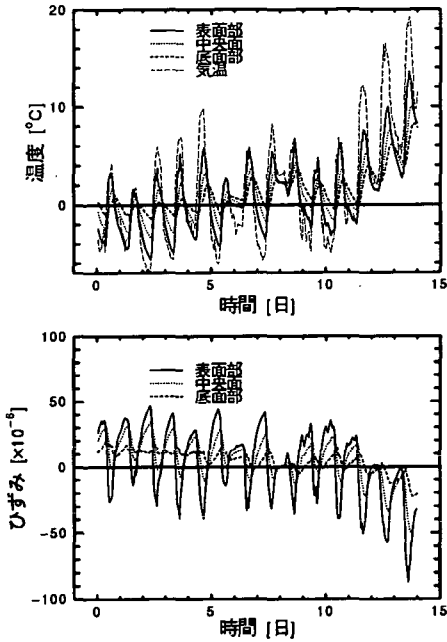


図-2 温度およびひずみの経時変化(第1回目)

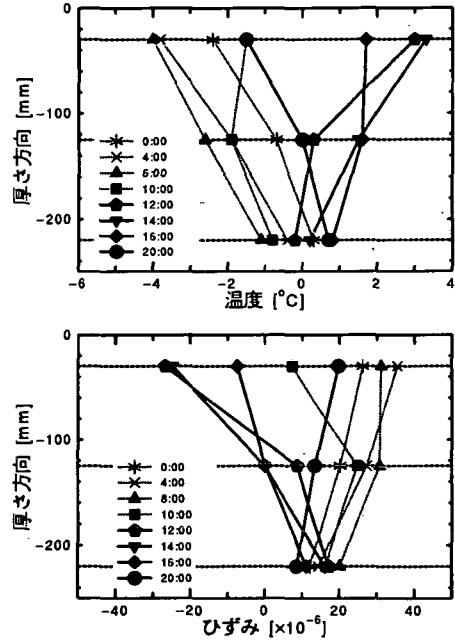


図-3 温度およびひずみの厚さ方向分布(第1回目)

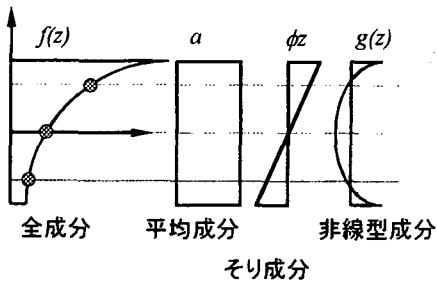


図-4 深さ方向の温度とひずみ分布の分離

回目のひずみ測定を実施した。図-1はひずみゲージの位置を示している。ひずみゲージは熱電対を内蔵した埋込み型のもので、ひずみと温度を同時に計測できる。

自然なひび割れを発生させるために、特別なひび割れ誘導措置はとらなかった。したがって、ひずみゲージを埋め込む段階においてはひび割れ発生位置が予測できなかったため、ひずみゲージを広い範囲に設置しておいた。ひずみゲージは1個所につき、コンクリート版上面、中央面、下面に埋め込み、断面方向のひずみ分布、温度分布を計測できるようにした。測定時の試験区間においても、CRCP特有の横ひび割れが発生していた。これらのひび割れの発生状況も図に示してあるが、その発生位置はひずみゲージを埋め込んだ場所に近く、温度応力に及ぼすひび割れの影響の検討が可能となった。ただし、施工後3ヵ月から5ヵ月の時点でのひび割れ間隔は約6mであり、時間が経過した通常のCRCPのそれよりやや大きい。

それぞれの測定においては、2週間にわたって1時間

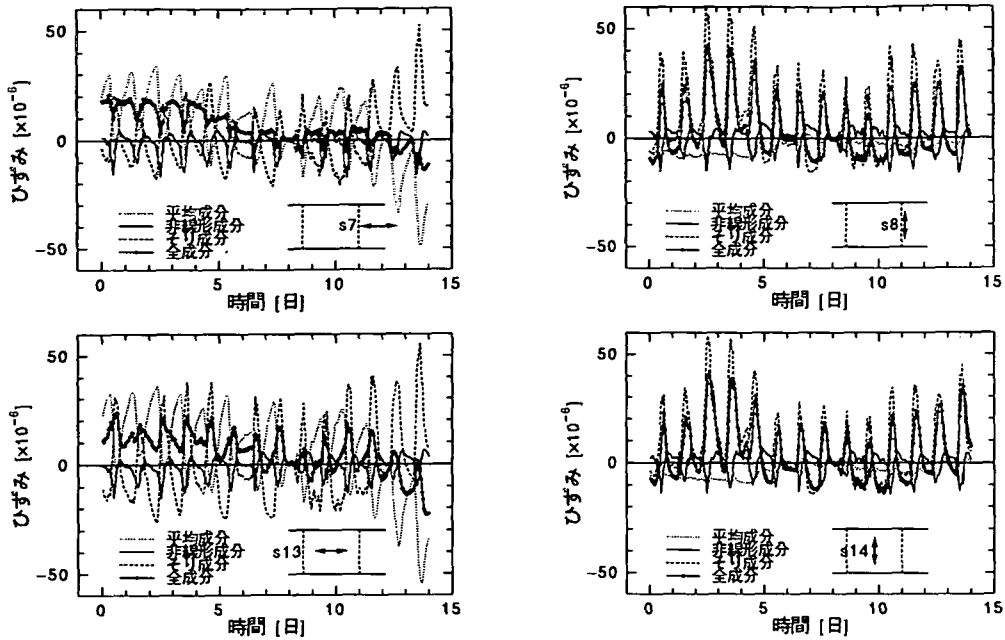


図-5 各ひずみ成分の経時変化(1回目)

ごとにひずみと温度を同時に計測し、その結果をデータロガーにいったん保存して、測定が終了した時点でそれを回収して解析した。測定に際しては、開始時にひずみゲージの零補正を行ったため、測定されたひずみはその時点からの相対的な値となる。そこで、コンクリート版全体にわたって上中下面の温度がほぼ一定のときのひずみを起点とし、その時点からのひずみと温度の変化量として整理した。起点としたときのコンクリート版の平均温度は、1回目と2回目の測定においてそれぞれ4.8℃および15.1℃であった。また、ひずみについてはコンクリートの線膨張係数 $\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ として全ひずみから温度による自由ひずみを差し引いた拘束ひずみの形で整理した。

測定は図-1に示されたすべてのゲージで行ったが、以降においてはその中でも代表的な図中のs7, s8, s13, s14のデータを取り上げる。s7, s8は横ひび割れ縁部の長手方向と横断方向のひずみ、s13, s14は中央部の長手方向と横断方向のひずみである。

図-2は1回目の実測結果の1例であり、ひび割れの間にある長手方向のひずみゲージs13の点における上中下面の温度および拘束ひずみの経時変化を示している。ひずみの表示は引張を正としている。日中はコンクリート版の表面温度が上昇し、それに伴って表面の圧縮ひずみが増加する。これは、コンクリート版の中央部分が上下面の温度差によってそりがろうとするが、自重によって拘束されるために、圧縮ひずみとなるのである。夜間はこれと反対の挙動を示している。第

1回目の測定の後半には全体的に温度が上昇し、それに伴って拘束ひずみも圧縮側に増加していく。このことから、CRCPのコンクリート版は長手方向にはかなり拘束されていることが分かる。残念ながら今回の測定ではそれぞれ2週間しか連続してデータを取ることができず、季節変動については十分考察することができなかった。

図-3は温度およびひずみの深さ方向分布の1日の変化を示している。深さ方向温度およびひずみ分布は、必ずしも直線ではなく、特に日射が当たりはじめる午前中や日射が弱まる午後には、表面温度の変化に深い部分の温度が追従できず、非線型成分が大きくなるのがわかる。

測定された拘束ひずみおよび温度を図-4に示すように、深さz方向について、平均成分、そり成分および非線形成分に分離して整理することにした^{10),11)}。すなわち、深さ方向の分布を次式のように表す。

$$f(z) = a + \phi z + g(z) \quad (6)$$

ここに、

- $f(z)$: 温度あるいはひずみの深さ方向の分布
- a : 平均成分(軸方向成分)
- ϕ : 深さ方向の勾配
- $g(z)$: 非線形成分

拘束ひずみの平均成分は軸方向成分とも呼ばれ、コンクリート版の平面方向の伸縮が路盤との摩擦や内部の鉄筋によって拘束されるために生ずる。そり成分は、コンクリート版の厚さ方向の温度勾配によるそり変形が

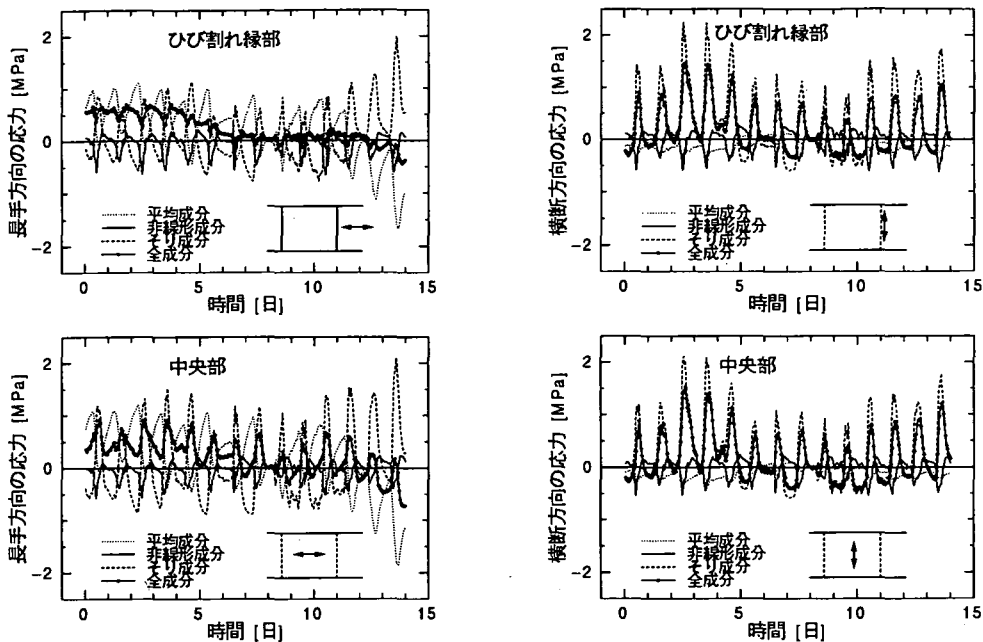


図-6 各応力成分の経時変化(1回目)

自重によって拘束されるために生じ、この拘束ひずみに起因する温度応力はそり応力と呼ばれる。非線形成分は、厚さ方向の温度分布が直線でないために生ずる内部応力である。

本研究においては、実測値を深さ方向の2次式で近似し、平均成分とそり成分の和を1次式で近似することにする。2次式の3つの係数はコンクリート版の上中下面に埋め込まれた計器の実測値から決定した。また、1次式の2つの係数は次式に示されるような非線形成分の自己平衡条件より決定した。

$$\int_{-h/2}^{h/2} g(z) dz = \int_{-h/2}^{h/2} \{f(z) - (a + \phi z)\} dz = 0 \quad (7)$$

$$\int_{-h/2}^{h/2} g(z) z dz = \int_{-h/2}^{h/2} \{f(z) - (a + \phi z)\} z dz = 0 \quad (8)$$

(3) 各ひずみ成分の経時変化

図-5は各成分が拘束ひずみが全体の中でどのように係わっているかを経時的に示したものである。これらの図で示されたひずみの値は、設計において問題となるコンクリート版底面における値である。s7, s13は長手方向のひずみであり、s8, s14は横断方向のひずみであるが、ひずみの方向によってその傾向がはっきりと異なっている。

長手方向については以下のようなことが分かる。平均成分とそり成分はほぼ同時刻の12時から14時ごろに、それぞれ圧縮側および引張側の最大値となる。一方、非線形成分は平均成分やそり成分よりもやや早い

午前中に圧縮側の最大値に到達する。全体として平均成分がやや卓越しているが、全成分の和はそりや平均の成分単独の振幅よりは小さい。このように、長手方向のひずみはそれぞれの成分の位相が微妙にずれ、やや複雑な様相を呈してはいるが、全体としてはほぼ1日周期の変化となっている。また、この測定期間中の後半は全体の温度が上昇していく傾向があり、それに伴って平均成分は圧縮側に増加していく。しかしながら、ひずみ全体としては平均成分とそり成分が相殺されるため、わずかな圧縮側への変化にとどまっている。

これに対して、横断方向においては平面方向の拘束が小さく、そり成分が卓越しており、全体のひずみとしてはほぼそり成分と同じ位相で変化している。しかし、非線型成分とそり成分はでは位相が異なるため、これらが相殺し合って拘束ひずみ全体としてはそり成分より小さい。

コンクリート版の長手方向をx座標、横断方向をy座標にとれば、s7とs8およびs13とs14のひずみはそれぞれひび割れ縁部と中央部の ϵ_x , ϵ_y となるから、式(2)を用いて温度応力を算定することができる。

図-6はこのようにして計算された温度応力を各成分について示したものである。長手方向と横断方向のひずみがポアソン比を介して相互に関連しあうが、基本的な傾向はひずみの場合と同様である。CRCPの設計においては横ひび割れの間を生ずる疲労縦ひび割れを対象にしており、その際に問題となるのは横ひび割れ近傍の横断方向の温度応力である。この応力は図から

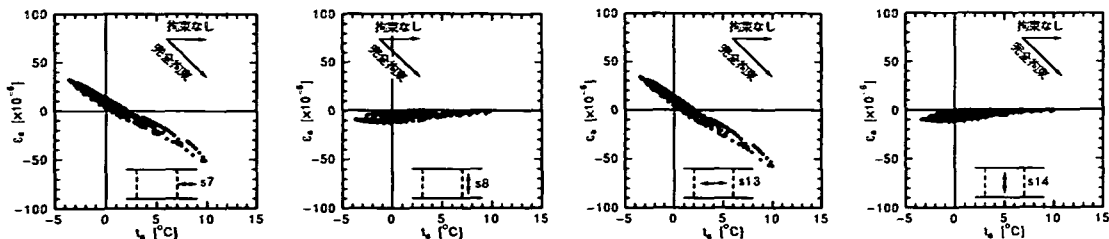


図-7 コンクリート版の平均ひずみ ϵ_a と平均温度 t_a の関係(1回目)

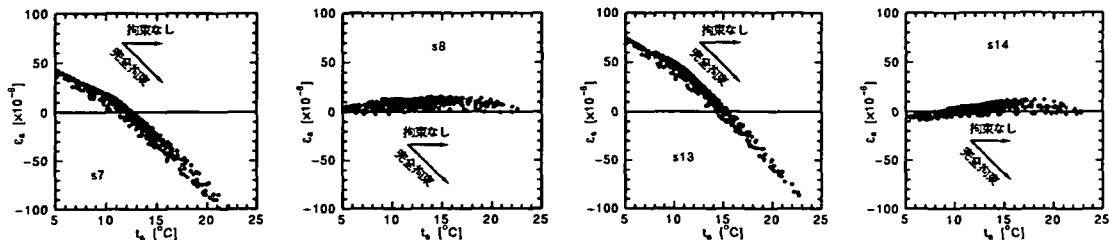


図-8 コンクリート版の平均ひずみ ϵ_a と平均温度 t_a の関係(2回目)

わかるように、ほぼそり成分と同様の位相で推移しているが、位相が異なる非線形成分と相殺しあって全体の最大値はそり成分単独よりも小さい。非線形成分がそり成分を相殺する割合はほぼ一定している。また、長手方向に比べ平均成分の寄与分が小さく、ほとんど無視できる。

以上の考察から、CRCPの温度応力は長手方向と横断方向ではその傾向が異なることが明らかとなった。また、平均成分とそり成分の値はコンクリート版内の温度が高い日中に大きく、コンクリート版内の温度が低い夜間は小さいという明確な周期が観測され、全体の中に及ぼす影響も大きい。一方、非線形成分のピーク到達時間は他の成分と異なり、必ずしもコンクリート版内の温度が高いときに大きくなるとはかぎらず、コンクリート版内温度分布の非線形な形状に依存している。したがって、非線形成分をコンクリート版の平均温度や温度勾配といった単純な指標によって表現することは難しい。ただし、横断方向の応力においては、非線形成分の影響は一定の割合として取り扱うことが可能である。そこで、次項において温度と拘束ひずみの関係を平均成分とそり成分について定量的に考察し、温度応力全体への非線形成分の影響についてはある割合の低減効果として取り扱うこととする。

4. 平均成分

図-7および図-8は拘束ひずみの平均成分 ϵ_a と平均温度 t_a の関係である。図に示すように、この関係が傾きを持つ場合にはコンクリート版が平面方向に自由に動くことができないことになり、傾きがなければその方

向に自由に移動できて拘束がないこととなる。

長手方向のs7とs13においては温度の上昇に伴って圧縮ひずみが増加しており、この方向の拘束が認められる。とくに比較的温度の高い2回目の測定においては平均温度が10°C以上になると、その傾きがほぼコンクリートの線膨張係数に等しく完全拘束の状態にある。したがって、長手方向のひずみの平均成分に対する拘束の程度は温度によって異なることがわかる。これは、気温が高くそれに伴ってコンクリート版内の温度も高いとひび割れ幅が狭くなり、コンクリート版がひび割れを介して一体となるためであろう。ひび割れ近傍に設置されたs7とひび割れから離れた場所に設置されたs13のひずみに差がないことから、拘束の状態はひび割れの有無には影響を受けない。

一方横断方向についても、ひび割れ近傍に設置されたs8とひび割れから離れた場所に設置されたs14のひずみは、温度が上昇しても変化はなく、この方向の拘束はほとんどないといってよい。したがって、この方向の拘束状態もひび割れの有無には影響を受けないといえる。

以上のことから、CRCPの温度応力の算定にあたっては平均成分の長手方向の拘束のみを考慮すればよく、温度が高いとその拘束状態はほとんど完全拘束と考えることができる。式(2)によれば、横断方向の温度応力の平均成分は以下のように表される。

$$\sigma_{average} = \frac{E}{1-\mu^2}(\epsilon_a^y + \mu\epsilon_a^x) \quad (9)$$

ここに、 ϵ_a^x および ϵ_a^y はそれぞれ長手方向および横断方向の拘束平均ひずみである。上の議論から、 $\epsilon_a^y \approx 0$ およ

び $\epsilon_a^c \approx -\alpha t_a$ であるから、

$$\sigma_{average} \approx -\frac{\mu E \alpha t_a}{1 - \mu^2} \quad (10)$$

となる。測定区間のコンクリートのポアソン比 μ は 0.134 と小さいので、 ϵ_a^c が大きくても $\sigma_{average}$ の値は比較的小さい。

5. そり成分

(1) FEM 解析

本研究においては、そり成分について弾性平板理論に基づいた FEM による CRCP のモデルによって解析を行った。このモデルにおいては、コンクリート版を 4 節点の 12 自由度の平板要素に分割し、路盤を 1 次元のばねモデルである Winkler 基礎とする。横ひび割れは、その荷重伝達機能を線形ばねでモデル化したひび割れ要素に置き換える。このようなモデル化にに基づいたコンクリート舗装の剛性方程式は、次式のようになる⁵⁾。

$$(\mathbf{K} + \mathbf{J} + \mathbf{H}) \cdot \mathbf{d}_e = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v - (\mathbf{J} + \mathbf{H}) \cdot \mathbf{d}_i \quad (11)$$

ここに、

- \mathbf{K} : コンクリート版の剛性マトリックス
- \mathbf{J} : ひび割れ部の剛性マトリックス
- \mathbf{d}_e : 荷重および自重による節点変位ベクトル
- \mathbf{d}_i : そりによる節点変位ベクトル
- \mathbf{f}_s : 荷重ベクトル
- \mathbf{f}_v : 自重ベクトル
- \mathbf{H} : 路盤の剛性マトリックス

である。

さらに、 \mathbf{d}_i は、 i 節点においては次のようになる。

$$\mathbf{d}_{ii} = \begin{Bmatrix} w_{ii} \\ \theta_{xii} \\ \theta_{yii} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} w_{ii} \\ -\frac{\partial w_{ii}}{\partial y} \\ \frac{\partial w_{ii}}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

また温度勾配によるそり変形は次式で計算できる⁸⁾。

$$w_{ii} = -\frac{3M_i}{4h^3 E} (x_i^2 + y_i^2) \quad (13)$$

ここに、

- $M_i = \alpha E \int_{-h/2}^{h/2} T z dz$
- 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

ばねモデルである Winkler 基礎においては、コンクリート版は変位に比例する路盤反力を受ける。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。

$$q = \begin{cases} k \cdot (w - w_0) & ((w - w_0) \geq 0 \text{ のとき}) \\ 0 & ((w - w_0) < 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (14)$$

ここに

- q : 路盤反力
- w : たわみ
- w_0 : コンクリート版と路盤との隙間
- 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コンクリート版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、剛性方程式 (11) が非線形になるため、Newton-Raphson 法によって解いた。

CRCP の横ひび割れ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⁴⁾、次式のように表現する。

$$\mathbf{f}_i - \mathbf{f}_u = \mathbf{K}_J (\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_u) \quad (15)$$

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

(2) 実測値と計算値の比較

図-9 と図-10 はコンクリート版の温度勾配 ϕ_T と拘束ひずみの勾配 ϕ_c の関係を示したものである。温度勾配はコンクリート表面の温度が高い場合を正とし、ひずみ勾配はコンクリート底面に引張応力が発生する場合を正として表示している。丸印が実測値、実線は FEM による計算値である。FEM 計算においては、ひび割れの剛性、(κ_w [MPa], κ_t [MN/m]) を、($5 \times 10^3, 10^4$), ($5 \times 10^4, 10^7$), ($5 \times 10^7, 10^9$) と 3 種類に変化させて計算を行った。なお、 κ_n の影響は少ないことから、その値を 0 MN/m とした。

実測値をみると、ややばらつきがみられるが温度勾配が上昇するにつれひずみ勾配も比例的に増加する傾向が明らかである。2 回目の測定時における温度勾配、ひずみ勾配の最大値は、それぞれ $\phi_T = 0.6^\circ\text{C}/\text{cm}$, $\phi_c =$

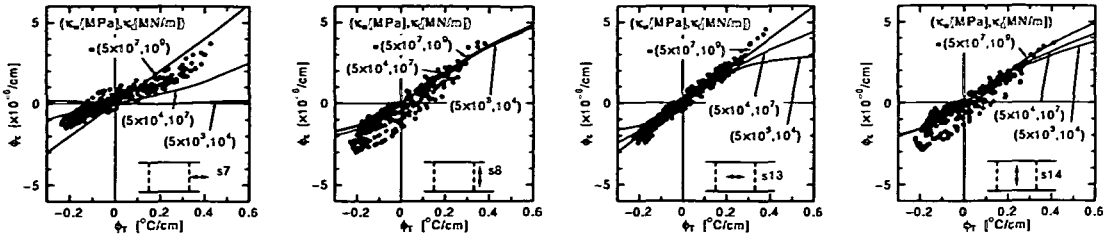


図-9 コンクリート版の温度勾配 ϕ_T とひずみ勾配 ϕ_e の関係 (1 回目)

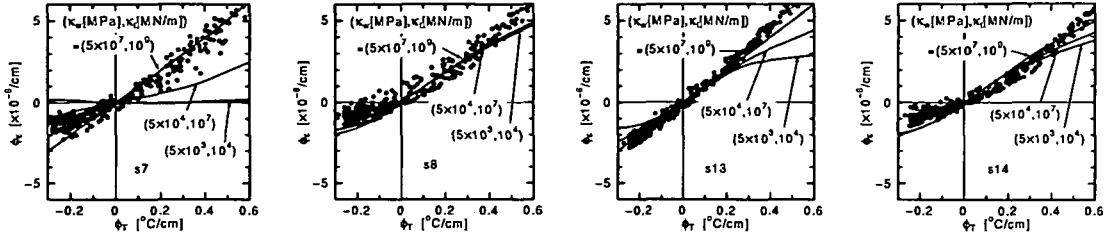


図-10 コンクリート版の温度勾配 ϕ_T とひずみ勾配 ϕ_e の関係 (2 回目)

$6 \times 10^{-6}/\text{cm}$ となり、1 回目のそれらよりも大きい。2 回目においてはコンクリート版内の温度が高くひび割れ幅も狭くなるため、長手方向のひずみはほとんど直線的に増加する。その傾きはほぼコンクリートの線膨張係数と同じとなり、完全拘束の状態にある。このことは平均成分の長手方向でも見られたことで、横ひび割れ幅が狭く CRCP が長手方向に一体化しているためであろう。

一方横断方向においては、温度勾配が正のときには直線的であるが、負のときにはその勾配がわずかに緩くなる傾向が伺える。これは夜間温度が低くなるとコンクリート版が収縮しひび割れ幅が開き、その結果として拘束が弱まるためであろう。この方向の平均拘束ひずみは非常に小さいので、このそり成分が拘束ひずみ全体の大きな部分となる。

FEM の結果によれば、ひび割れの剛性が増加するに従って同じ温度勾配に対するひずみ勾配は増加する。特に、長手方向のひずみにおいてその傾向が顕著である。ひび割れの剛性が低い場合にはひび割れの間のコンクリート版が独立して変形するためその拘束の程度が小さくなり、剛性が高い場合にはコンクリート版全体が一体で変形するため拘束が大きくなるのである。このことはコンクリート版内の温度が高くなりひび割れ幅が狭くなって、その結果ひび割れでの噛み合わせ効果が高まることと対応している。横断方向はそのような影響はなく、拘束の程度はひび割れの剛性にほぼ無関係となる。ひび割れの剛性が高い場合の計算値と実測値が一致することから、CRCP におけるひび割れはそ

り変形に対してかなりの拘束効果があるといえる。したがって、そり応力算定にあたっては、ひび割れの剛性 (κ_w [MPa], κ_s [MN/m]) を $(5 \times 10^7, 10^9)$ と高く設定しておくことが必要となる。

6. 温度応力式の検討

これまでの考察に基づいて、本研究においては、温度応力の算定法として岩間と同様のアプローチをとる。すなわち、コンクリート版内の平均温度と温度勾配から平均成分とそり成分の温度応力を予測してそれらの和をとり、その結果を非線形成分による相殺分だけ低減するのである。このようなアプローチを採用した理由は、この方法が現在の設計法に採用されており温度勾配の頻度分布などのデータが蓄積されていること、非線形成分については温度勾配から直接推定することは困難なことによる。そこで、CRCP の横ひび割れ縁部の温度応力を以下のように算定する。

$$\sigma_t = A(\sigma_{\text{curling}} + \sigma_{\text{average}}) \quad (16)$$

ここで、 σ_{curling} は FEM によって計算する横ひび割れ縁部のそり応力であり、 σ_{average} は平均成分の寄与分である。A は、非線形成分による低減効果を考慮するための定数である。 σ_{average} は式 (10) で表されるから、式 (16) は以下ようになる。

$$\sigma_t = A \left(\sigma_{\text{curling}} - \frac{\mu E \alpha t_a}{1 - \mu^2} \right) \quad (17)$$

A は次のようにして定めた。まず、 $A = 1.0$ とおいた式 (17) による温度応力と、実測された温度応力を比

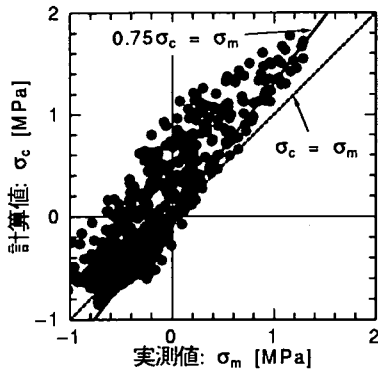


図-11 $A=1$ としたときの計算値と実測値の比較

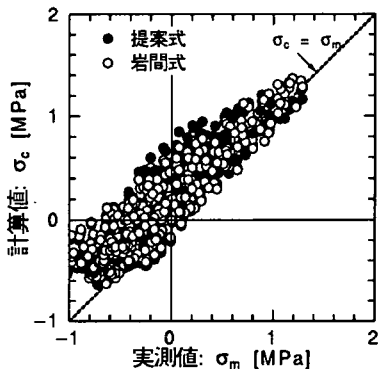


図-12 $A=0.75$ としたときの計算値と実測値の比較

較した。図-11はそのようにして比較した結果である。図から明らかなように、全体として計算値は実測値よりもやや大きな値を与える。そこで、原点を通る1次式で回帰を行ったところ、 A の平均は0.72、その標準偏差は0.02で相関係数が0.88という結果を得た。本研究では、実測値の下限側をカバーできるように、 A の値を95%上限値の0.75と設定した。

図-12は $A=0.75$ とした計算値と実測値を、式(5)とあわせて比較した結果である。黒丸は本研究による計算値との比較、白丸は $C_w=0.98$ とした場合の式(5)による計算値との比較である。ばらつきが大きいものの、実測値との対応は良好である。また、式(5)と本研究の提案式はほぼ同様の値を与えている。

今回の実測によれば、平均温度の日変化による第2項の値は比較的小さい。ただし、本研究ではそれぞれ2週間の測定期間内における起点からのひずみの変動を対象としており、第2項の長期にわたる影響については十分に検討するまでには至らなかった。

また、今回実測したCRCPのひび割れ間隔はやや大きく、ひび割れ部の挙動が通常のCRCPと異なること

も考えられる。しかしながら、今回のひび割れ幅は非常に狭く、実測から明らかなようにその拘束はかなり強い。ひび割れの有無は温度応力にあまり影響を与えていない。したがって、ひび割れ間隔が狭くてもひび割れ幅が狭ければ基本的な挙動は今回と変わらないと予想される。いずれにしろ長期にわたる温度応力に及ぼすCRCPのひび割れ部の影響については今後の課題としたい。

7. むすび

本研究においては、CRCPの温度応力について試験区間における実測結果から検討し、その議論に基づいて実用的な温度応力式を提案した。基本的な考え方は岩間が提案したアプローチと同様であるが、この算定式はFEMによるそり解析を基本とし、CRCPに特徴的な長手方向の拘束を加味した。さらに、内部応力の効果を0.75という低減係数によって考慮している。提案された温度応力式は、コンクリート舗装のそれと同様の値を与えるが、FEMを基本としていることから汎用性が高く、あらゆる構造条件に適用が可能である。

しかしながら、今回のような短期間の測定では長手方向の拘束の長期にわたる影響を十分考察することはできず、この点については課題として残された。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、日本道路公団大阪建設局神戸工事事務所長田中裕治氏、舗装工事長仲道義馬氏をはじめとする関係各位の多大な協力を頂いた。また、データ整理には石川工業高等専門学校の学生諸氏の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Sato, R., Hachiya, Y. and Kawakami, A.: Development of new design method for control of cracking in continuously reinforced concrete pavement, *Proc. of 4th Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, pp.431-443 1989.
- 2) 阿部洋一, 川上淳仁, 亀田昭一, 佐藤良一: 連続鉄筋コンクリート舗装のひび割れに関する研究, コンクリート構造物の体積変化によるひび割れ幅制御に関するコロキウム論文集, pp.61-70, 1990.
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書舗装編, 1996.
- 4) 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*, 1985.
- 5) 西澤辰男, 七五三野茂, 小松原昭則, 小栗川雅: 連続鉄筋コンクリート舗装横ひび割れの荷重伝達機能, 舗装工学論文集, 第1巻, pp. 73-80, 1996.
- 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, 1963.
- 7) 日本道路協会: セメントコンクリート舗装要綱, 1984.

- 8) 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, pp. 135-142, 1991.
- 9) Bradbury, R. D.: *Reinforced Concrete Pavements*, Wire Reinforcement Institute, Washington, D.C., 1938.
- 10) Harik, I.E., Jianping, P., Southgate, H. and Allen, D.: Temperature Effects on Rigid Pavements, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 120, No.1, pp. 127-143, 1994.
- 11) Choubane, B. and Tia, M.: Analysis and Verification of Thermal-Gradient Effects on Concrete Pavement, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 121, No.1, pp. 75-74, 1995.

(1997.3.19 受付)

STUDY ON THERMAL STRESSES IN CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT

Tatsuo NISHIZAWA, Shigeru SHIMENO, Akinori KOMATSUBARA and Masashi KOYANAGAWA

In the structural design of continuously reinforced concrete pavement (CRCP), thermal stresses should be properly taken into account. In this study, thermal strains and temperatures in a concrete slab were measured on a test section of CRCP. Measured strains were divided into average, curling and nonlinear components and each component was examined. It was found that the curling component is predominant in terms of transverse stress which is important in the structural design. However, the maximum of the thermal stress is reduced by 25 % due to the effect of the nonlinear component. Based on the results, a procedure for estimating the thermal stress in CRCP was proposed and verified by the measured data.