

コンクリート舗装における FWD たわみに 及ぼす温度勾配の影響

小関 裕二¹・唐 伯明²・丸山 暉彦³

¹正会員 工修 大林道路株式会社 技術研究所 (〒336-0027 埼玉県浦和市沼影 2-12-36)

²正会員 工博 中国重慶市 公路局 (中国 400067 重慶市南岸区四公里街 131 号)

³正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

コンクリート舗装はコンクリート版内で温度勾配がある場合、コンクリート版がそり変形を生じる。そり変形が生じたコンクリート版で FWD を用いてたわみ測定を行うと、たわみがそり変形の影響を受けるため、構造評価を適切に行うことができない可能性がある。本研究はコンクリート版に温度勾配によるそり変形が生じている時に荷重を与え、温度勾配がたわみに与える影響を解析した。温度勾配があるコンクリート版に 49kN の荷重を載荷した時のたわみを有限要素法で解析することによって、コンクリート舗装の構造評価に FWD を使用する場合の限界たわみ量について、温度勾配を考慮する方法を示した。

Key Words : FWD, FEM, jointed concrete pavement, critical deflection, erosion damage, temperature gradient

1. はじめに

舗装マネジメントシステムを運用するためには、舗装の状態を適切に評価することが重要である。日本道路協会が発行する“道路維持修繕要綱”¹⁾には、コンクリート舗装の維持修繕要否判断の目標値として、段差、縦断凹凸、ひびわれ度などの数値を示している。しかし、これらの値は路面の破損を意味し、支持力を評価することはできない。また、この“道路維持修繕要綱”には、構造的な評価として、ひびわれ度とベンケルマンビームのたわみから、構造的な修繕工法を導くグラフが掲載されている。しかし、コンクリート版の厚さや交通量などが考慮されていないため、過大または過小に評価される可能性がある。

舗装の健全度を構造的な観点から評価する場合、FWD の測定たわみを使用して非破壊で行うことが可能である。コンクリート舗装を FWD のたわみで評価する方法として、AASHTO²⁾で定義している AREA という指標がある。AREA と最大たわみから有効動的 k 値を導き、この有効動的 k 値と AREA および版厚からコンクリート版の弾性係数を導くものである。また、米国ではアンダーシーリングが必要なコンクリート版の隅角部のたわみの規準を定めている州がある³⁾。一方、筆者らは有限要素法の解析によって、コンクリート舗装の構造評価に FWD を使用する場合の限界たわみ量を検討した⁴⁾。この限界たわ

み量は日本道路協会が発行する“セメントコンクリート舗装要綱”⁵⁾に定められている設計交通量別の舗装構造に対して、路盤がエロージョンによって支持力低下を起こした場合のたわみ量を解析によって求めたものである。限界たわみ量は、ネットワークレベルでコンクリート舗装を評価する場合に使用でき、修繕箇所を特定することができる。しかし、AREA やたわみの規準および限界たわみ量は、コンクリート版の温度勾配を考慮していないため、FWD の測定時の温度勾配がない場合しか適用できないと考えられる。

コンクリート版の温度勾配が FWD の測定たわみに影響を及ぼし^{6),7)}、そのたわみが路盤の弾性係数や路盤支持力係数の逆解析結果に大きく影響する^{8),9)}ことは、コンクリート舗装の構造評価の障壁となっている。これは、コンクリート版に温度勾配がある場合、すなわち版の上下面に温度差があると、コンクリートの熱膨張の差によって版がそり変形を起こすためである。そり変形を起こした版に FWD の荷重を載荷した場合、版が上に反っていれば、路盤の支持力が小さく見積もられ、適切な構造評価ができない。

温度勾配によるコンクリート版の変形が FWD たわみに与える影響を考慮する手法として、動的逆解析¹⁰⁾や 3 次元有限要素法¹¹⁾を用いた研究が報告されている。しかし、これらの解析手法は詳細な修繕工法等を検討するプロジェクトレベルでの評価には適しているが、修繕箇所

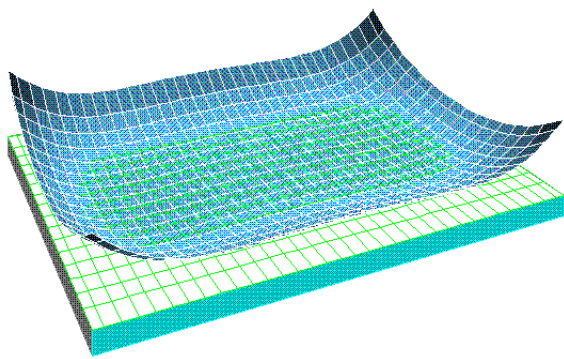


図-1 そり変形の形状（温度勾配が負の場合）

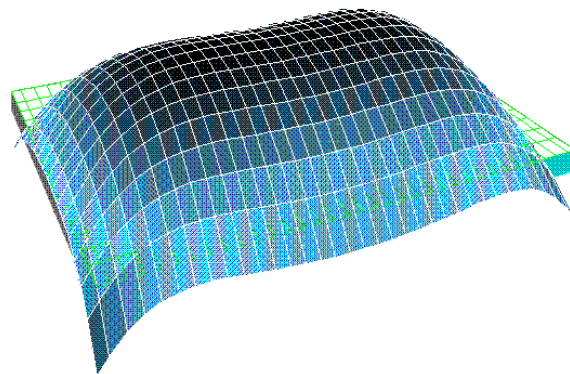


図-2 そり変形の形状（温度勾配が正の場合）

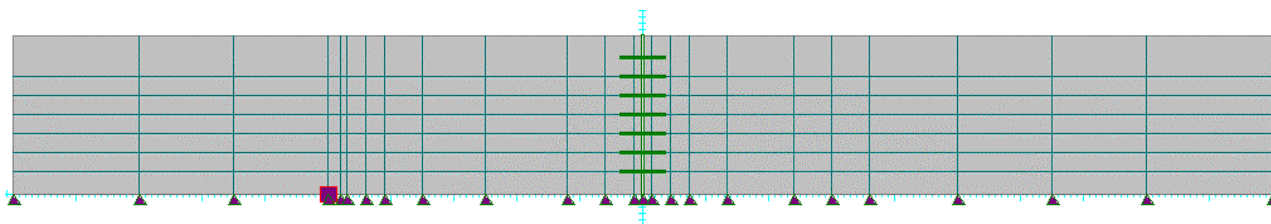


図-3 有限要素法のメッシュ図

を特定するためのネットワークレベルの評価では必要ないと考えられる。したがって、本研究では、ネットワークレベルの評価でできるように、コンクリート版に温度勾配がある場合のコンクリート舗装における FWD の測定たわみを解析した。ただし、路盤の健全度のみを考慮し、コンクリート版のそれは考えず、路盤支持力が低下したと考えられる限界たわみ量を求めた。また、限界たわみ量は、コンクリート版に荷重を載荷する位置や幅員で異なるため、載荷位置、幅員別に検討した。

なお、本研究では解析に石川工業高等専門学校の西澤が開発したコンクリート舗装の構造モデルをバネ路盤の Winkler モデルとした有限要素法¹²⁾を用いた。

2. コンクリート版のそり変形

コンクリートは温度によって膨張するので、コンクリート版の上下面に温度差がある場合、膨張量の差によってそり変形を起こす。図-1 は、コンクリート版の上面の温度が下面より低い場合（温度勾配は負）、図-2 は、その逆の場合（温度勾配は正）のそり変形の形状を有限要素法プログラムを使用して図示したものである。一般にコンクリート版のそり変形の形状を図示する場合、断面図をアーチ型および逆アーチ型で示し説明する¹³⁾ことが多いが、解析結果はコンクリート版のそり変形が、縦横断方向に反り、さらに自重により中央部がくぼんだ形状となる。つまり、温度勾配によるコンクリート版の変形は単純ではなく、複雑な形状となり、温度勾配が負の場合は中央部、正の場合は隅角部以外、コンクリート版は路盤に接していない状態になる可能性がある。

このように、コンクリート版に複雑なそり変形が生じ

ている時に FWD でたわみを測定した場合、たわみはそり変形の影響を受けることは明らかである。したがって、温度勾配を考慮しなければ、測定たわみだけでコンクリート舗装の健全度を評価することは困難である。

3. 解析方法

(1) たわみの算出方法

解析に用いたプログラムは、上下面の温度差によるそり変形量や荷重によるたわみ量を算出することができる。ただし、荷重を載荷しない場合のコンクリート版の自重による変位も含めて出力するので、FWD のたわみだけを抽出するために以下に示す方法を行った。

荷重を載荷しない状態でコンクリート版の上下面に温度差を与えた場合、版は自重とそりにより変形する（以下、荷重なしの変形と称す）。この変形している状態に荷重を与えるとさらに荷重によるたわみ量加わる（以下、荷重ありの変形と称す）。荷重ありの変形量から荷重なしの変形量を差し引くことで、荷重のみでたわむ変形量（以下、荷重のみの変形と称す）を算出した。これは FWD 測定値と等価になる。

例えば、図-3 は幅員 5m、目地間隔 10m のコンクリート版がダウエルバーで連結され、左側の版中央部に荷重を載荷した場合の有限要素法のメッシュ図を示したものである。この条件で温度差を与えたとき、荷重なしの変形は図-4、荷重ありの変形は図-5、荷重のみの変形は図-6 に示すようになる。

このような方法で、温度差があるコンクリート版に対して、荷重を与えた時に荷重のみで変形するたわみ量を算出した。

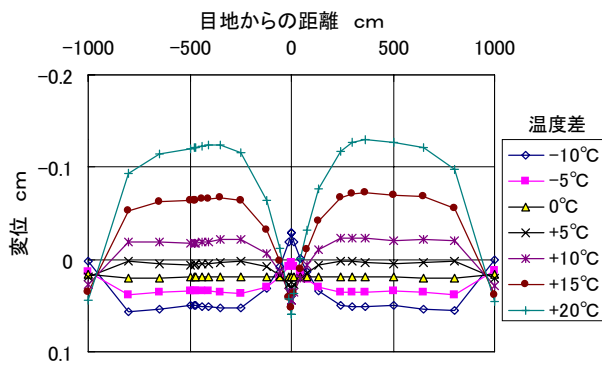


図-4 荷重なしの変形

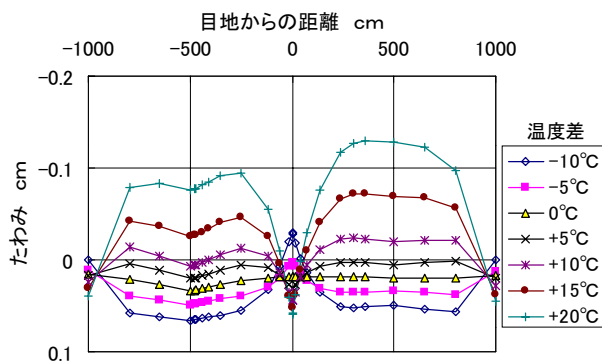


図-5 荷重ありの変形

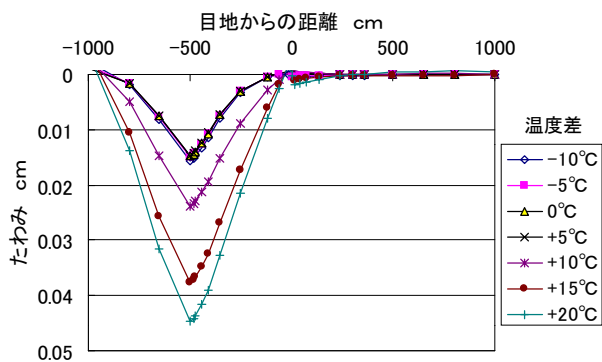


図-6 荷重のみの変形

(2)解析方法の検証

この解析方法の検証として、コンクリート舗装版の温度がFWDたわみに与える影響を実測した結果¹⁴⁾を用いた。FWDでたわみ測定を実施したコンクリート舗装は、厚さ28cm、幅員4.75m、目地間隔10mで、目地部(図-7の)に荷重を載荷している。測定を行ったコンクリート舗装は、NO.1~3が転圧コンクリート舗装、NO.4,5が普通コンクリート舗装である。しかし、本研究では、目地部をダウエルバーで補強された普通コンクリート舗装の結果を使用した。

表-1に示す解析条件で、載荷直下のたわみと荷重伝達率を算出した結果と実測値を比較したものを図-8、図-9に示す。なお、本研究における荷重伝達率は直径30cmの載荷板直下のたわみ D_0 と目地を挟んで目地から等距

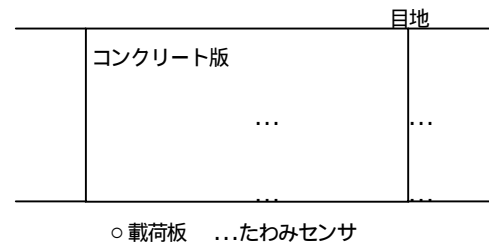


図-7 荷重載荷位置

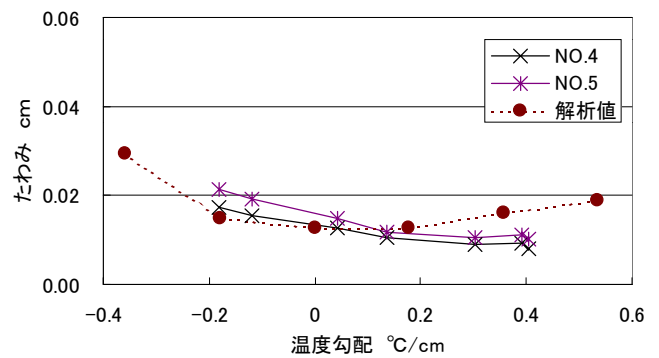


図-8 たわみの実測値と解析値

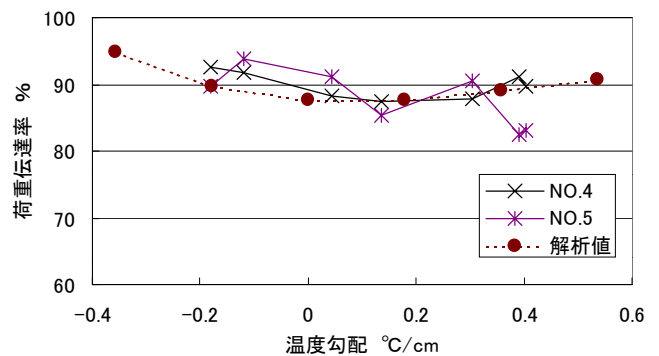


図-9 荷重伝達率の実測値と解析値

表-1 解析条件

舗装構造パラメータ	解析値
版厚	28cm
コンクリートの弾性係数	29.4GPa (300,000kgf/cm ²)
目地部のせん断パネ定数	19.6MN/m (20,000kgf/cm)
路盤支持力係数 K_{75}	98MN/m ³ (10kgf/cm ³)
コンクリートの熱膨張係数	$10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

離にあるたわみ D_{30} を用いて $D_{30}/D_0 \times 100(\%)$ で算出したものである。

温度勾配が大きくなるとたわみは実測値より解析値の方が大きくなるが、それを除けば、たわみも荷重伝達率も精度良く一致している。

温度勾配が大きくなると実測値より解析値のたわみが

表-2 解析条件

入力条件	入力値
荷重	49kN
接地圧	693kPa(7.07kgf/cm ²)
目地間隔	10m
版厚	20,25,28,30cm
幅員	3,4,5m
コンクリートの弾性係数	29.4GPa (300,000kgf/cm ²)
目地のせん断バネ定数 K_w	0,0.98,980MN/m (0,10 ³ ,10 ⁶ kgf/cm)
路盤支持力係数 K_{75}	34,67,147,294MN/m ³ (3.5,7,15,30kgf/cm ³)
コンクリート版上下面の温度差	-10,-5,0,5,10,15,20
コンクリートの熱膨張係数	$10 \times 10^{-6} \text{ } ^{-1}$

大きくなるのは、コンクリート版全体の温度が影響していると思われる。ほとんどの場合、温度勾配が大きい時、コンクリート版全体の平均温度も高くなるため、コンクリート版全体の膨張によって目地幅が狭くなり、かみ合わせ効果による目地の荷重伝達機能が向上することが考えられる。つまり、目地部は、温度によってコンクリート版のそり変形だけでなく、荷重伝達機能も影響を受ける。

したがって、厳密な検討を行うには、コンクリート版全体の温度も考慮し、温度が高い時は目地のせん断バネ定数も大きくする等の解析が必要となると考えられる。しかしながら、本研究では路盤の支持力低下を評価する限界たわみを検討したものであり、荷重伝達率は65%以上（荷重伝達機能は健全）とした。後述するが、支持力低下した路盤上のコンクリート舗装の目地の荷重伝達率は、温度勾配による変化が少ないので、本研究では、目地のせん断バネ定数は温度で変化しないものとして解析した。

4. 解析結果

筆者らは既に温度勾配がない場合の限界たわみ量について、図-7に示した4箇所の測定位置で検討した結果を報告している⁴⁾。4箇所の測定位置は以下に示すとおりである。

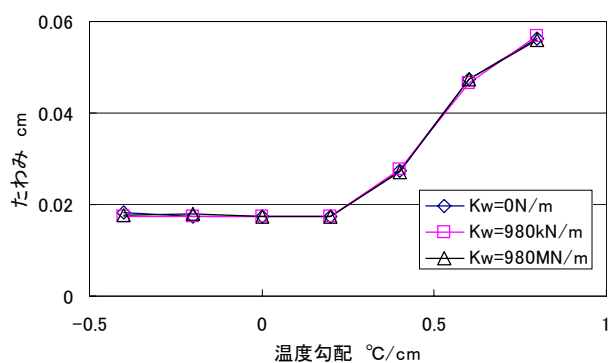
縦断目地縁部の中央（自由縁部）

隅角部

横断目地縁部の中央（横断目地縁部）

中央部

本研究では、一般の道路でFWDが容易に使用できる荷重位置とについて、各種パラメータの影響を含めて温度勾配がたわみに与える影響と限界たわみ量を検討した結果を報告する。荷重位置とについては、一般の道路ではFWDの測定が困難な場合があるが、同様に限界たわみ量を検討した結果を報告する。

図-10 温度勾配と中央部のたわみの関係 (K_w 別)

解析は、図-3に示したように2枚のコンクリート版がダウエルバーで接続されているものとして、表-2に示す解析条件で行った。通常、コンクリート舗装はアスファルト舗装に比べて、たわみが小さいため、測定時に与える荷重は98kN（10t）で行われることが多いが、国内のFWDには最大荷重49kNの機種があること、支持力が低下したコンクリート舗装では49kN荷重で大きなたわみを得られることなどから、荷重は49kNで行った。また、コンクリート版内の温度勾配は、実際にはそのほとんどが-0.3～0.6 /cmの範囲にある^{15),16)}ため、版厚20～30cmのコンクリート版上下面の温度差は、-10～20の範囲で行った。

以下に、温度勾配と各種パラメータがコンクリート版の各位置に荷重させた時のFWD荷重直下のたわみに与える影響と限界たわみ量について述べる。

(1) コンクリート版中央部荷重におけるたわみ

a) 目地のせん断バネ定数の影響

目地部をダウエルバーで連結されたコンクリート版において、目地のせん断バネ定数と温度勾配がコンクリート版中央部のたわみに及ぼす影響を調べた。図-10に路盤支持力係数 K_{75} が34MN/m³(3.5kgf/cm³)、コンクリート版の厚さが25cm、幅員が5m、目地のせん断バネ定数 K_w が0～980MN/m(0～10⁶kgf/cm)の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。コンクリート版中央部では、目地のせん断バネ定数はたわみに影響せず、温度勾配が0.2 /cm以下の場合、コンクリート版中央部は路盤上に支持されているため、たわみに変化がないが、温度勾配が0.2 /cm以上になるとそり変形によって中央部が路盤から離れるため、温度勾配の増加とともにたわみが大きくなる。これはコンクリート版の厚さが違って同様の傾向となる。

b) 路盤支持力係数の影響

路盤支持力係数と温度勾配がコンクリート版中央部のたわみに及ぼす影響を調べた。図-11にコンクリート版の厚さが30cm、幅員が5m、目地のせん断バネ定数 K_w が980kN/m(10³kgf/cm)、路盤支持力係数 K_{75} が34～

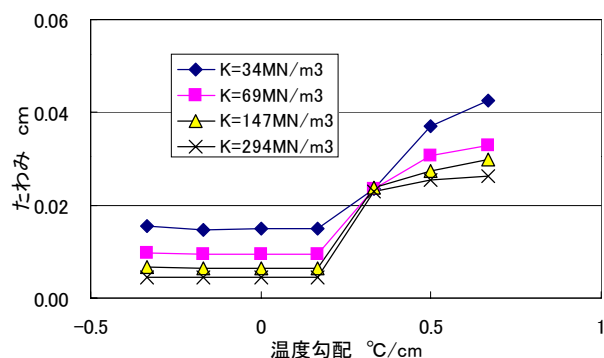


図-11 温度勾配と中央部のたわみの関係 (K_{75} 別)

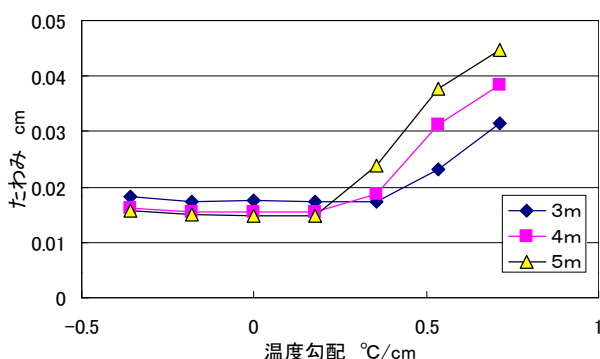


図-12 温度勾配と中央部のたわみの関係 (幅員別)

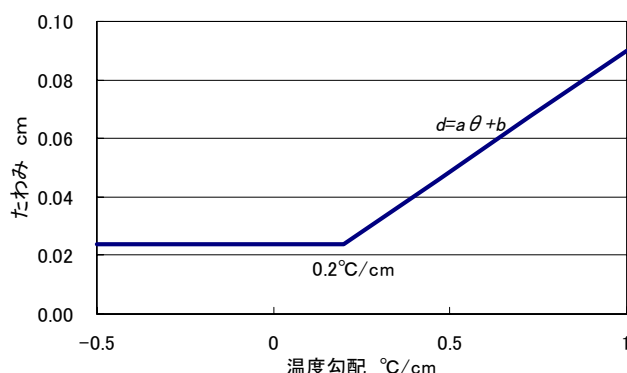


図-13 温度勾配とたわみの関係 (中央部載荷)

294MN/m³(3.5 ~ 30kgf/cm³)の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。温度勾配が0.2 /cm 以上になると温度勾配の増加とともにたわみが大きくなり、 K_{75} 値の増加によりたわみは小さくなる。これはコンクリート版の厚さが違っても同様の傾向となる。図-11 で温度勾配 0.3 /cm 付近のたわみが変わらない状態になる。これは路盤支持力が大きくなると温度勾配が同じでもコンクリート版の自重による変形の影響を受けるため、そり変形の形状が異なり、温度勾配 0.3 /cm 付近で荷重が加わった時のたわみが変わらない状態になっているのではないかと考えられる。このように、温度によるそり変形を考慮すると温度勾配とたわみの関係に線形性が見られなくなる。

表-3 49kN(5tf)荷重 FWD の限界たわみ量

(中央部載荷)		θ : 温度勾配(/cm)		
版厚 cm	幅員 m	0.2 /cm 未満 mm	0.2 /cm 以上 mm	R
20	3	0.26	0.26 $\theta+0.21$	0.94
	4	0.24	0.56 $\theta+0.13$	0.98
	5	0.24	0.78 $\theta+0.08$	0.95
25	3	0.20	0.21 $\theta+0.16$	0.93
	4	0.18	0.48 $\theta+0.07$	0.99
	5	0.17	0.69 $\theta+0.03$	0.99
28	3	0.18	0.23 $\theta+0.14$	0.88
	4	0.16	0.43 $\theta+0.06$	0.98
	5	0.15	0.54 $\theta+0.05$	0.99
30	3	0.16	0.24 $\theta+0.12$	0.90
	4	0.14	0.43 $\theta+0.05$	0.98
	5	0.14	0.50 $\theta+0.06$	0.99

c) 幅員の影響

幅員と温度勾配がコンクリート版中央部のたわみに及ぼす影響を調べた。図-12 にコンクリート版の厚さが28cm、目地のせん断バネ定数 K_w が0N/m(0kgf/cm)、路盤支持力係数 K_{75} が34MN/m³(3.5kgf/cm³)の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。幅員でたわみ量が多少異なり、温度勾配が0.2 /cm 以上になると温度勾配の増加とともにたわみが大きくなり、たわみが大きくなるとともに大小の傾向が逆転する。これはコンクリート版の厚さが違っても同様の傾向となる。

d) まとめ

コンクリート版中央部に載荷した場合の載荷直下のたわみの解析結果をまとめると以下になる。

- ・温度勾配が0.2 /cm 未満の場合、たわみは温度勾配の影響を受けない。
- ・温度勾配が0.2 /cm 以上の場合、温度勾配の増加とともにたわみも大きくなる。
- ・たわみは目地のせん断バネ定数の影響を受けない。
- ・路盤支持力係数の増加とともにたわみは小さくなる。
- ・幅員でたわみが異なる。
- ・幅員によるたわみの差は、温度勾配が0.2 /cm 以上になると大きくなり、大小の傾向が逆転する。

以上のことから、温度勾配がある場合のコンクリート版中央部のたわみは図-13 に示すように表される。つまり、温度勾配が0.2 /cm 未満の場合、たわみは変わらず、0.2 /cm 以上の場合に温度勾配の増加とともにたわみは直線的に大きくなる。この直線を式(1)のように表し、中央部載荷について路盤支持力が低下した場合の49kN(5tf)荷重 FWD の限界たわみ量は、温度勾配と幅員を考慮して表-3 に示すようになる。なお、目地間隔は10m、支持力が低下した路盤支持力係数 K_{75} は34MN/m³(3.5kgf/cm³)とした⁴⁾。これはコンクリート舗

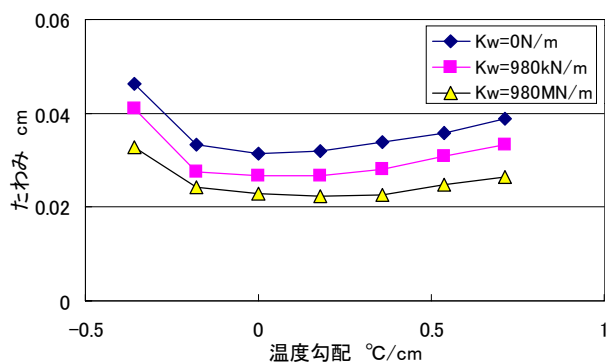


図-14 温度勾配と目地部のたわみの関係 (K_w 別)

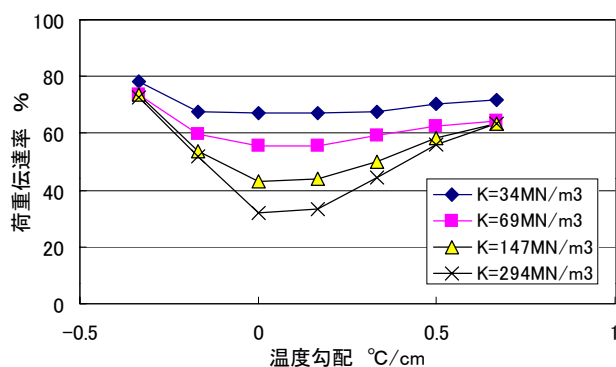


図-16 温度勾配と荷重伝達率の関係 (K_{75} 別)

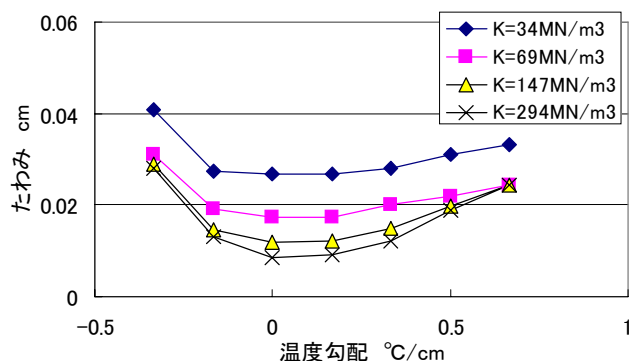


図-15 温度勾配と目地部のたわみの関係 (K_{75} 別)

装の設計時に用いる K_{75} が 67MN/m^3 (7kgf/cm^3) であり⁵⁾、支持力係数が半減した時にエロージョンの可能性があると²⁾からである。

なお、表-3の R は、表-2に示した各条件で式(1)の a 、 b を導いた時の相関係数である。

$$d = a\theta + b \quad (1)$$

ここに、 d : たわみ量(mm)

θ : 温度勾配($^{\circ}\text{C/cm}$)

a 、 b : 版厚と幅員より決まる定数

表-3を用いることによって、温度勾配から限界たわみ量を導き、コンクリート舗装における版中央部の路盤の健全度を評価することが可能である。

(2) 横断目地縁部載荷におけるたわみ

a) 目地のせん断バネ定数の影響

目地部をダウエルバーで連結されたコンクリート版において、目地のせん断バネ定数と温度勾配がコンクリート版横断目地縁部のたわみに及ぼす影響を調べた。図-14に路盤支持力係数 K_{75} が 34MN/m^3 (3.5kgf/cm^3)、コンクリート版の厚さが 28cm 、幅員が 5m 、目地のせん断バネ定数 K_w が $0 \sim 980\text{MN/m}$ ($0 \sim 10^6\text{kgf/cm}$) の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。横断目地縁部では、目地のせん断バネ定数はたわみに影響を与え、せん断バネ定数が小さくなるとたわみは大きくなる。さらに温度勾配 0

$^{\circ}\text{C/cm}$ のときにたわみが最も小さい。これは縦断方向だけでなく、横断方向にもそり変形を起こしているためだと考えられる。これはコンクリート版の厚さが違ってても同様の傾向となる。

b) 路盤支持力係数の影響

路盤支持力係数と温度勾配が横断目地縁部のたわみに及ぼす影響を調べた。図-15にコンクリート版の厚さが 30cm 、幅員が 5m 、目地のせん断バネ定数 K_w が 980kN/m (10^3kgf/cm)、路盤支持力係数 K_{75} が $34 \sim 294\text{MN/m}^3$ ($3.5 \sim 30\text{kgf/cm}^3$) の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。温度勾配 0 $^{\circ}\text{C/cm}$ のとき、たわみが最も小さく、さらに K_{75} が大きくなるとたわみが小さくなる。また、 K_{75} が大きくなると温度勾配がたわみに与える影響の度合いが大きくなる。つまり、支持力係数が小さくなると温度勾配がたわみに与える影響も小さくなることを示しており、路盤が堅いほどそりの影響が顕著になるためだと考えられる。これはコンクリート版の厚さが違ってても同様の傾向となる。

また、図-16に図-15と同条件における荷重伝達率の算出結果を示す。荷重伝達率も K_{75} が小さくなると温度勾配による影響が少なくなる。図-16では、路盤支持力係数が大きいほど、荷重伝達率が小さくなっているが、これはコンクリート舗装の構造モデルがバネ路盤の Winkler モデルであるためだと考えられる。つまり、荷重はダウエルバーおよびせん断バネのみで伝達され、路盤支持力が大きい場合、路盤がほとんどの荷重を支持するため、たわみが小さくなるとともに、たわみが伝わりにくくなるためだと考えられる。

c) 幅員の影響

幅員と温度勾配が横断目地縁部のたわみに及ぼす影響を調べた。図-17にコンクリート版の厚さが 25cm 、目地のせん断バネ定数 K_w が 980kN/m (10^3kgf/cm)、路盤支持力係数 K_{75} が 34MN/m^3 (3.5kgf/cm^3) の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。幅員でたわみ量と温度勾配による変化傾向が多少異なる。これはコンクリート版の厚さが違ってても同様の傾向となる。

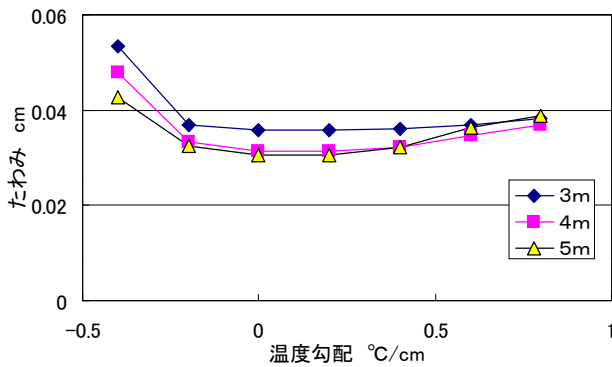


図-17 温度勾配と目地部のたわみの関係（幅員別）

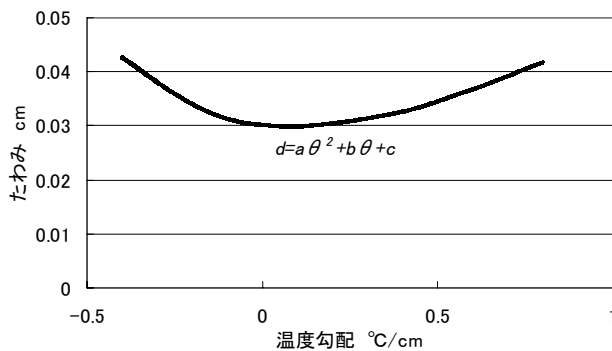


図-18 温度勾配とたわみの関係（目地部載荷）

d)まとめ

横断目地縁部に載荷した場合の載荷直下のたわみの解析結果をまとめると以下ようになる。

- ・温度勾配 0 /cm のとき、たわみは最も小さくなる。
- ・たわみは目地のせん断バネ定数の影響を受ける。
- ・路盤支持力係数の増加とともにたわみは小さくなる。
- ・路盤支持力係数の低下とともに温度勾配がたわみと荷重伝達率に与える影響は少なくなる。
- ・幅員でたわみが異なる。

以上のことから、温度勾配があるコンクリート版目地部のたわみは図-18 に示すように表される。つまり、温度勾配とともにたわみは式(2)に示すような曲線で近似できる。したがって、目地部載荷については、路盤支持力が低下した場合の 49kN 荷重 FWD の限界たわみ量は、温度勾配と幅員を考慮して表-4 に示すようになる。なお、目地間隔は 10m、荷重伝達率は温度勾配で変化するので 65～80%（荷重伝達機能は健全）、支持力が低下した路盤の支持力係数 K_{75} は 34MN/m^3 (3.5 kgf/cm^3)とした⁴⁾。表-4 の R は、表-2 に示した各条件で式(2)の a 、 b 、 c を導いた時の相関係数である。

$$d = a\theta^2 + b\theta + c \quad (2)$$

ここに、 d ：たわみ量(mm)

θ ：温度勾配(/cm)

a 、 b 、 c ：版厚と幅員より決まる定数

表-4 49kN(5tf)荷重 FWD の限界たわみ量

(目地部載荷) θ ：温度勾配(/cm)

版厚 cm	幅員 m	限界たわみ量 mm	R
20	3	$0.25\theta^2 - 0.17\theta + 0.44$	0.87
	4	$0.28\theta^2 - 0.15\theta + 0.40$	0.90
	5	$0.30\theta^2 - 0.13\theta + 0.39$	0.92
25	3	$0.33\theta^2 - 0.21\theta + 0.36$	0.88
	4	$0.37\theta^2 - 0.19\theta + 0.31$	0.88
	5	$0.30\theta^2 - 0.12\theta + 0.31$	0.93
28	3	$0.36\theta^2 - 0.20\theta + 0.32$	0.86
	4	$0.37\theta^2 - 0.18\theta + 0.28$	0.89
	5	$0.39\theta^2 - 0.17\theta + 0.27$	0.88
30	3	$0.43\theta^2 - 0.22\theta + 0.30$	0.84
	4	$0.33\theta^2 - 0.16\theta + 0.26$	0.88
	5	$0.39\theta^2 - 0.16\theta + 0.25$	0.91

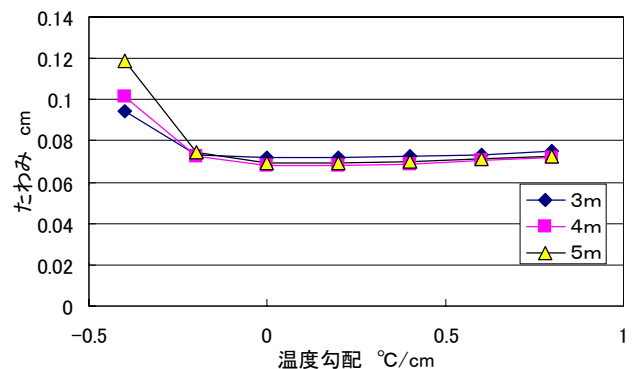


図-19 温度勾配と隅角部のたわみの関係（幅員別）

表-4 を用いることによって、温度勾配から限界たわみ量を導き、コンクリート舗装における横断目地縁部の路盤の健全度を評価することが可能である。ただし、荷重伝達率が 65%以上の場合であり、荷重伝達率が 65%未満の場合は、たわみはさらに大きくなるので、路盤の支持力不足だけでたわみが大きくなったと限定できない。しかし、荷重伝達率が小さくなる原因は、路盤のエロージョンが考えられる。したがって、荷重伝達率が 65%以上の場合に表-4 のたわみを上回っている場合は路盤の支持力低下が予想されるので、修繕で支持力を回復させ、荷重伝達率が 65%未満の場合は、修繕で荷重伝達機能を回復させるとともに路盤支持力を回復させる修繕も必要であると考えられる。

(3)隅角部載荷におけるたわみ

隅角部においても中央部や目地部と同様の解析を行った。図-19 にコンクリート版の厚さが 25cm、目地のせん断バネ定数 K_w が 980kN/m (10^3 kgf/cm)、路盤支持力係数 K_{75} が 34MN/m^3 (3.5 kgf/cm^3)の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。幅員でたわみ量と温度勾配による変化傾向が多少異なる。これはコンクリート版の厚さが違って同様の傾向となる。

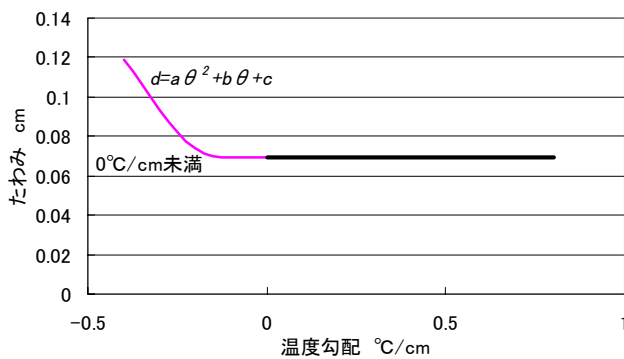


図-20 温度勾配とたわみの関係(隅角部)

表-5 49kN(5tf)荷重 FWD の限界たわみ量

(隅角部載荷) θ : 温度勾配(°/cm)

版厚 cm	幅員 m	0 /cm 以上 mm	0 /cm 未満 mm	R
20	3	0.90	$1.85 \theta^2 + 0.36 \theta + 0.90$	1.00
	4	0.88	$2.59 \theta^2 + 0.39 \theta + 0.88$	1.00
	5	0.90	$3.76 \theta^2 + 0.57 \theta + 0.90$	1.00
25	3	0.72	$0.24 \theta^2 + 0.40 \theta + 0.72$	1.00
	4	0.69	$3.04 \theta^2 + 0.38 \theta + 0.69$	1.00
	5	0.69	$4.91 \theta^2 + 0.71 \theta + 0.69$	1.00
28	3	0.65	$3.02 \theta^2 + 0.47 \theta + 0.65$	1.00
	4	0.60	$3.51 \theta^2 + 0.47 \theta + 0.60$	1.00
	5	0.60	$4.51 \theta^2 + 0.47 \theta + 0.60$	1.00
30	3	0.61	$2.85 \theta^2 + 0.40 \theta + 0.61$	1.00
	4	0.56	$3.85 \theta^2 + 0.53 \theta + 0.56$	1.00
	5	0.55	$4.84 \theta^2 + 0.51 \theta + 0.55$	1.00

したがって、温度勾配があるコンクリート版の隅角部のたわみは図-20に示すように表される。つまり、温度勾配が0 /cm 以上の場合、たわみはほとんど変わらず、0 /cm 未満の場合、温度勾配の減少とともにたわみは横断目地縁部と同様、式(2)に示すような曲線で近似できる。したがって、目地部や中央部と同様に限界たわみ量をまとめると表-5に示すようになる。なお、各条件等については、中央部、目地部と同じである。

また、隅角部の限界たわみ量も目地部と同様に、荷重伝達率とともに評価する必要がある。

(4)縦断目地縁部(自由縁部)載荷におけるたわみ

自由縁部においても同様の解析を行った。図-21にコンクリート版の厚さが25cm、目地のせん断バネ定数 K_w が980kN/m(10^3 kgf/cm)、路盤支持力係数 K_{75} が34MN/m³(3.5kgf/cm³)の場合の温度勾配とたわみの関係を示す。幅員でたわみ量と温度勾配による変化傾向が多少異なる。これはコンクリート版の厚さが違って同様の傾向となる。

温度勾配があるコンクリート版の自由縁部のたわみは図-18に示した目地部と同様に、式(2)に示すような曲線で近似できる。目地部や中央部と同様に限界たわみ量を

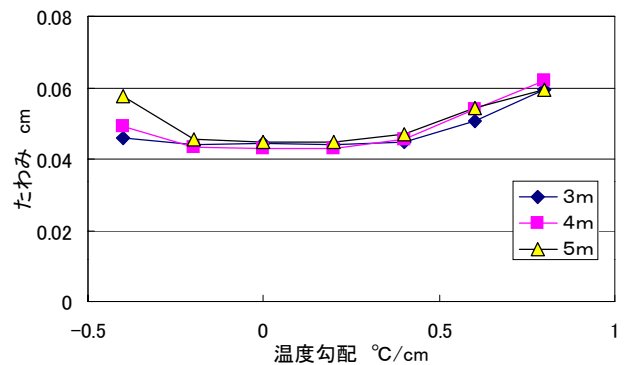


図-21 温度勾配と自由縁部のたわみの関係(幅員別)

表-6 49kN(5tf)荷重 FWD の限界たわみ量

(自由縁部載荷) θ : 温度勾配(°/cm)

版厚 cm	幅員 m	限界たわみ量 mm	R
20	3	$0.16 \theta^2 - 0.01 \theta + 0.59$	0.98
	4	$0.29 \theta^2 - 0.08 \theta + 0.59$	0.99
	5	$0.32 \theta^2 - 0.19 \theta + 0.63$	0.91
25	3	$0.21 \theta^2 + 0.01 \theta + 0.44$	0.96
	4	$0.32 \theta^2 - 0.02 \theta + 0.43$	0.99
	5	$0.39 \theta^2 - 0.11 \theta + 0.45$	0.96
28	3	$0.22 \theta^2 + 0.01 \theta + 0.39$	0.93
	4	$0.32 \theta^2 + 0.02 \theta + 0.37$	0.97
	5	$0.39 \theta^2 - 0.05 \theta + 0.38$	0.98
30	3	$0.21 \theta^2 + 0.02 \theta + 0.36$	0.93
	4	$0.31 \theta^2 + 0.04 \theta + 0.34$	0.96
	5	$0.41 \theta^2 - 0.03 \theta + 0.34$	1.00

まとめると表-6に示すようになる。自由縁部の限界たわみ量は、中央部の場合と似たような傾向がある。なお、各条件等については、中央部、目地部と同じである。

5. コンクリート舗装の評価と修繕工法

コンクリート舗装では、通常の破損の種類は、段差、ひびわれであり、交通荷重によって、路盤にエロージョンが生じ、支持力が低下し、たわみ量が増加する。路盤支持力の低下を FWD によって非破壊で評価することができれば、舗装の維持修繕計画に有用である。

本研究では、コンクリート版の中央部・横断目地縁部・隅角部・自由縁部に49kN荷重を載荷した時、コンクリート版に温度勾配がある場合の限界たわみ量について検討した。ただし、コンクリート版自体はひびわれがないものとして、路盤支持力の低下のみを考慮したものである。つまり、ひびわれが発生したコンクリート版については、温度勾配による変形が複雑になり、ひびわれパターンも多様なので、限界たわみ量を導くことは困難であると考えられる。なお、温度勾配は実測することが望ましいが、コンクリートの版厚、測定時刻、舗装表面温度、日平均気温から推定する¹⁵⁾ことも可能である。

表-7 限界たわみ量を上回った場合の修繕工法の例

載荷位置	荷重伝達率	修繕工法の例
中央部 自由縁部	-	アンダーシーリング
目地縁部 隅角部	65%以上	アンダーシーリング
	65%未満	アンダーシーリング+ パーステッチ

たわみ測定時の温度勾配から、表-3～6 に示した値または式を用いて限界たわみ量を導き、コンクリート版下の路盤を評価することができる。

たわみ量によって、コンクリート舗装の健全度を評価する場合、ネットワークレベルの調査とし、修繕工事の優先順位のランク付けを行うことを主な目的とする。プロジェクトレベルの調査は、修繕工法や修繕断面を詳細に検討するために行うものなので、文献 4)で報告したような構造評価式や逆解析等を行う必要がある。ただし、構造評価式等を使用する場合、温度勾配の影響を受けたたわみを使用すると適切な評価はできないので、温度勾配の影響を受けていないたわみを使用する必要がある。ちなみに、文献 15)の温度勾配推定式から温度勾配が 0 /cm 付近となる時刻は午前 8 時前後と午後 8 時前後である。

限界たわみ量を上回ったコンクリート舗装の修繕工法の例を表-7 に示す。アンダーシーリングは、注入工法またはサブシーリングとも呼ばれ、コンクリート版下に生じた空隙をセミブローンアスファルトやセメントグラウトなどで充填させる工法で路盤支持力の回復が期待できる。パーステッチは、コンクリート版のひびわれまたは目地部を鉄筋等で連結することで、荷重伝達機能の回復が期待できる工法である。ただし、詳細な修繕工法の検討はプロジェクトレベルの調査結果を考慮すべきである。また、表-7 に示した修繕工法を行うより打換えを行った方が経済的な場合もあるので、修繕計画は費用対効果も検討することも重要である。

6. 結論

本研究では、コンクリート舗装における FWD たわみに及ぼす温度勾配の影響について有限要素法を用いた解析によって調査し、路盤支持力が低下したコンクリート舗装の限界たわみ量に温度勾配を考慮できる式を導いた。本研究結果をまとめると以下ようになる。

- (1)温度勾配によるコンクリート版のそり変形は、縦横断方向のそりだけでなく、コンクリート版の自重も影響するため、複雑な形状となる。
- (2)有限要素法によって、温度勾配の影響を受けて変形したコンクリート版に荷重を与えた時のたわみを解析することは可能であると考えられる。
- (3)コンクリート版中央部に載荷した時の載荷直下のたわみの解析結果は、温度勾配が 0.2 /cm 未満の場合、たわ

みは温度勾配の影響を受けず、0.2 /cm 以上の場合、温度勾配の増加とともにたわみも大きくなる。また、たわみは路盤支持力係数や幅員の影響を受ける。

(4)横断目地縁部に載荷した時の載荷直下のたわみの解析結果は、温度勾配 0 /cm で最も小さくなり、目地のせん断バネ係数、路盤支持力係数、幅員の影響を受ける。

(5)路盤支持力が低下した時、コンクリート版の隅角部に載荷した場合の載荷直下のたわみは、温度勾配が 0 /cm 以上でほとんど変化せず、0 /cm 未満で温度勾配の減少とともに大きくなる。

(6)路盤支持力が低下した時、コンクリート版の縦断目地縁部(自由縁部)に載荷した場合の載荷直下のたわみは、中央部載荷時と似た傾向で温度勾配の影響を受ける。

7. おわりに

コンクリート舗装において FWD 試験を行う場合に温度勾配がたわみに与える影響について検討し、路盤支持力が低下したコンクリート舗装の限界たわみ量と温度勾配の関係を示した。しかしながら、本研究はコンクリート版全体の温度による膨張の影響を考慮していない。FWD によるたわみをさらに詳細に検討するには、コンクリート版全体の膨張による縁部条件の変化等を考慮した解析を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路維持修繕要綱，1978.
- 2) AASHTO：AASHTO Guide for Design of Pavement Structures,1993.
- 3) Taha,R., Selin,A., et al.: Evaluation of Highway Undersealing of PCC Pavements, Pre-print of the 73rd annual meeting of TRB, Washington D.C., 1994.
- 4) 小関裕二，唐伯明，丸山暉彦：FWD たわみに基づくコンクリート舗装の構造評価に関する一検討，第 3 巻，舗装工学論文集，pp.85-92，1998.
- 5) (社)日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱，1984.
- 6) Tang,B., Maruyama,T., Takahashi,O. and Sugano,K. : Temperature Effects on FWD Measurements of Concrete Pavements, Proceedings, 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance, pp.127-138, 1997.
- 7) 野田悦郎 唐伯明 東滋夫：コンクリート舗装における FWD たわみに及ぼす版温度の影響，土木学会第 51 回年次学術講演会概要集，pp.44-45，平成 8 年 9 月。
- 8) 岡部俊幸，千葉博敏，西澤辰男：コンクリート舗装における FWD の逆解析に及ぼす版温度の影響，土木学会第 51 回年次学術講演会概要集，pp.42-43，平成 8 年 9 月。
- 9) 小梁川雅，竹内康，井上博，西澤辰男：平板 FEM によるコンクリート舗装の逆解析，土木学会第 52 回年次学術講演会概要集，pp.88-89，平成 9 年 9 月。

- 10) 金井利浩, 東滋夫, 松井邦人: 動的逆解析によるコンクリート舗装の構造評価, 土木学会第 54 回年次学術講演会概要集, pp.402-403, 平成 11 年 9 月.
- 11) Shoukry, S.N. and Selezneva, O.: Effect of Nonlinear Thermal Gradient on JPCP Subjected to FWD Load, Finite Element for Pavement Analysis and Design, Proceedings of the First National Symposium on 3D Finite Element Modeling for Pavement Analysis & Design, pp.11-25, 1998.
- 12) CP-コンクリート舗装構造解析プログラムパッケージ Windows95 版 (<http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/pave/hoso-ml/download.html>)
- 13) 例えば, 土木学会: 舗装工学, pp.109, 1995.
- 14) 中川伸一, 島多昭典, 小関裕二, 西澤辰男: コンクリート舗装目地での荷重伝達率に及ぼす舗装版温度の影響について, 土木学会第 51 回年次学術講演概要集, pp.46-47, 平成 8 年 9 月.
- 15) 唐伯明, 丸山暉彦, 高橋修, 西澤辰男: セメントコンクリート舗装内の温度勾配推定法, 第 6 回日加寒冷地舗装会議発表論文集 - 日本側発表論文 -, pp.101-108, 1996 年 10 月.
- 16) 小関裕二, 唐伯明, 東滋夫, 西澤辰男: コンクリート舗装版の温度勾配予測式の検証, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集, pp.92-93, 平成 10 年 10 月.

INFLUENCE OF TEMPERATURE GRADIENT OF CONCRETE PAVEMENTS UPON FWD DEFLECTION

Hiroji KOSEKI, Boming TANG and Teruhiko MARUYAMA

The temperature gradient of concrete slab affects FWD deflections of concrete pavements. The warping is occurred due to the temperature gradient of concrete slab. The deflection of warping slab can not be used for the accurate evaluation of concrete pavements. Therefore, we studied influence of temperature gradient on concrete pavements by using FEM analysis. Furthermore, the critical deflection values of concrete pavements under 49kN FWD loading condition were proposed with concerning temperature gradient.