

コンクリート舗装における路盤面の 残留変形特性に関する実験的研究

竹内康¹・小梁川雅²・西澤辰男³・野田悦郎⁴・久保和幸⁵

¹正会員 工博 東京農業大学講師 地域環境科学部 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1)

²正会員 工博 東京農業大学助教授 地域環境科学部 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1)

³正会員 工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒929-0392 河北郡津幡町北中条)

⁴正会員 日本道路(株)技術研究所 第二研究室 (〒146-0025 東京都大田区多摩川 2-11-20)

⁵正会員 国土交通省 総合政策局 建設施工企画課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-3)

本研究では、1997年8月に建設省土木研究所(当時)で実施したコンクリート舗装の静・繰返し載荷実験によって得られたコンクリート版のたわみ量、ひずみ、路盤面圧力から、Westergaardモデルを用いて路盤面の変形特性に関する検討を行った。静載荷実験結果より、Westergaardモデルによってたわみ量及び路盤面圧力を求める場合には、Vesicが示したように Boussinesqモデルとの比較結果に基づいて路盤反力係数(K値)を修正する必要があることがわかった。また、繰返し載荷実験結果からは、載荷によって路盤面に残留変形が生じており、残留変形の進行に伴いK値が低下していることが確認された。

Key Words : concrete pavement, static loading test, cyclic loading test, K-value, Westergaard's model, permanent deformation

1. 緒言

コンクリート舗装の力学解析に用いられる代表的な解析モデルには、路盤以下を一次元バネであらわした Winkler 地盤上に弾性平板(薄板)が載った Westergaardモデル¹⁾と、路盤以下を半無限の広がりを持つ弾性体としてあらわした Boussinesq 地盤上に弾性平板が載った Boussinesqモデル、路盤以下を半無限の広がりを持つ多層弾性体としてあらわした Burmister 地盤上に弾性平板が載った Burmisterモデルの3つ^{2), 3)}がある。これらのうち Westergaardモデルは、Winkler地盤のバネ定数である路盤反力係数を平板載荷試験より直接的に求めることができ、計算も比較的容易であるという理由から、設計時の力学解析に多く利用されている。

現在、日本のコンクリート舗装の設計方法は、日本道路協会のセメントコンクリート舗装要綱⁴⁾(以下、舗装要綱と略す)と土木学会のコンクリート標準示方書舗装編⁵⁾(以下、標準示方書と略す)の二つに大別できる。舗装要綱では、コンクリート版厚の決定を主として自由縁部における疲労解析で行っており、応力度の算定は1964年に岩間⁶⁾によ

って実験的に修正された Westergaardの公式(正確には Teller-Sutherlandにより修正された Westergaard)を用いている。一方、標準示方書では、限界たわみ量の範囲内での疲労解析、IRIによる乗り心地解析、エロージョンによる目地部段差推定式から総合的に版厚を決定するが、たわみ量、応力度の算定は Westergaard公式もしくは Westergaardモデルに基づいた FEM⁷⁾によって行われている。

標準示方書において設けられるたわみ量の限界値は、交通荷重や雨水によるエロージョンによって設計耐用期間中に路盤の荷重支持能力が低下し、コンクリート舗装の早期劣化を防ぐよう配慮されたものであるが、これは路盤の荷重支持能力の低下を定量的に把握できていないことによる簡便の処置である。これに関して Tangら⁸⁾は Westergaardモデルを用いて構造設計を行った場合の限界たわみ量と維持修繕にかかわる限界たわみ量を計算的に示した。Tangらの示した構造設計時の限界たわみ量は、舗装要綱の設計例に基づいて FEM解析により求めたものであるが、修繕にかかわる限界たわみ量は、1986年の AASHOTOガイド⁹⁾にしたがって路盤のエロージョンによる路盤反力係数の低下を反映させ

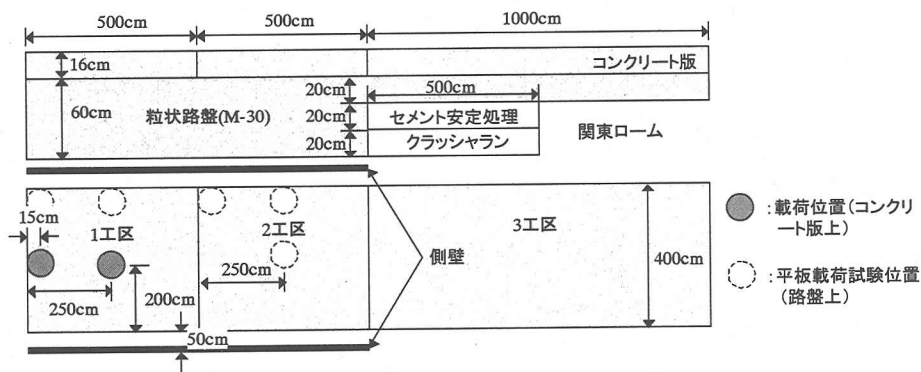


図-1 コンクリート舗装試験区の概要

て求めたものである。

1984年に米国ポルトランドセメント協会(PCA)の設計法¹⁰⁾にエロージョン解析が採り入れられたことからわかるように、路盤のエロージョン現象の定量的把握に関する研究は、多く行われている^{11), 12), 13)}が、繰返し荷重による路盤および路床の塑性変形に関する研究は少ない。

Roesler and Barenberg¹⁴⁾は、過去に行われたコンクリート版の疲労試験結果の要点を整理し、室内において地盤上でのコンクリート版の疲労試験を行っている。Roeslerらの実験では、荷重に伴うたわみ量の増加が確認されたが、最終的には試験結果を土質材料の塑性変形を含めた全面支持(fully supported)コンクリートの疲労曲線としてまとめるに止まっており、土質材料の塑性変形を直接的に扱っていない。また、Roeslerらの求めた疲労曲線は、通常設計に使用している単純支持(simply supported)状態下での疲労曲線とは異なるものであるため、現状の設計にフィードバックすることは難しいと考えられる。

路盤および路床材料の塑性変形によって路盤面に生じる残留変形は、エロージョンと同様にコンクリート版の曲げ応力を増大させる。そのため、路盤面の残留変形とそれに伴うコンクリート舗装の荷重応答特性を検討することは、舗装の長期的な挙動を予測する上で重要であると言える。

筆者らは1997年から1999年にかけて茨城県つくば市の建設省土木研究所で実物大コンクリート舗装を用いた静荷重および繰返し荷重実験を行った^{15), 16), 17)}。本論文では、これらの実験結果のうち1997年8月に行った自由縁部における静・繰返し荷重試験結果および中央部での静荷重実験結果から、Westergaardモデルを用いてコンクリート舗装の解析を行う場合の路盤反力係数と路盤面圧力およびたわみ量との関係を把握し、路盤面の残留変形に伴う路盤反力係数の変化について検討することを目的と

表-1 使用材料の材料特性

材料	材料特性値	
粒状路盤	最大乾燥密度	2.255 g/cm ³
	修正CBR	105 %
	締固め度	95.7 %
	K ₇₅	8.3 × 10 ⁻² N/mm ³
コンクリート	密度	2.4 g/cm ³
	曲げ強度	6.1 N/mm ²
	弾性係数	31.4 kN/mm ²
	ポアソン比	0.2
	線膨張係数	0.00001 /°C

している。

2. コンクリート舗装載荷実験

(1) 実験の概要

載荷実験は、1997年8月8日から同月13日まで、茨城県つくば市の建設省土木研究所内に図-1に示す実物大コンクリート舗装の試験区を作製して行った。コンクリート版と上層路盤は、同年3月に新規で打設したものであるが、下層路盤および路床は既設のものを利用した。

載荷実験装置は、油圧制御によるアクチュエータとこれを支持する剛性梁とから成り、試験区を挟む側壁上に設けられたレールによって移動することができる。また、アクチュエータは、静荷重では最大98kN(10tf)、繰返し載荷では最大49kN(5tf)の載荷能力を有し、繰返し載荷波形はサイン波のみで、最高5Hzで載荷することができる。

静荷重実験は図-1に示した1工区の自由縁部および中央部の2箇所、繰返し載荷実験は1工区の自由縁部のみで行った。静荷重実験は自由縁部では0kNから49kN(5tf)まで、中央部では0kNから68.6kN(7tf)までの荷重を9.8kN(1tf)おきに作用

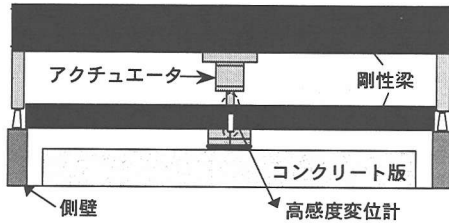


図-2 たわみ量測定の概要

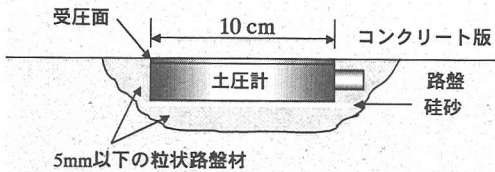


図-4 土圧計の設置状況

させた。また、繰返し載荷実験では、2Hzのサイン波で最小荷重 2 kN (0.2tf)、最大荷重 49kN (5tf) の荷重を約 80 万回作用させた。

静載荷実験は、コンクリート版上下面の温度差(以下、版内温度差と称す)によるそり応力の影響を取り除くために、版内温度差が小さくなる夕方を選んで実施し、静載荷実験終了後に繰返し載荷実験を行った。なお、アクチュエータの載荷直径は 30cm である。

(2) 使用材料

表-1 は、実験に使用した路盤とコンクリートの材料特性を示している。なお、路盤材料には粒度調整碎石 (M-30) を用い、路盤反力係数の K_{75} は、図-1 に示したように、1,2 工区の白抜きの円で記された個所において、直径 30cm の平板を用いた平板載荷試験で得られた K_{30} を 2.2 で割って換算した²⁾ものである。また、コンクリートの力学特性は、試験開始直前までテストピット敷地内でコンクリート版と同じ条件で養生した供試体を用いて測定した。

図-1 中のセメント安定処理材料およびクラッシュランは、既設のものであったため、その材料特性は不明であった。また、路床材料は土木研究所周辺の表層地質図¹⁸⁾を調べたところ、関東ロームのひとつである下末吉ローム上部相当層であることがわかった。

(3) 測定方法

静載荷実験および繰返し載荷実験では、コンクリート舗装の荷重応答特性値として載荷に伴うコンクリート版のたわみ量、ひずみ、載荷時の温度と路

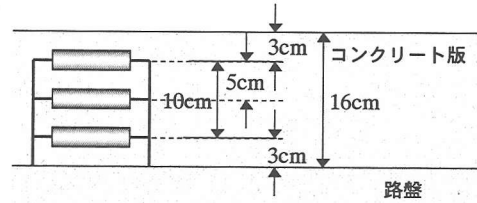


図-3 埋込みゲージの埋設位置と埋設パターン

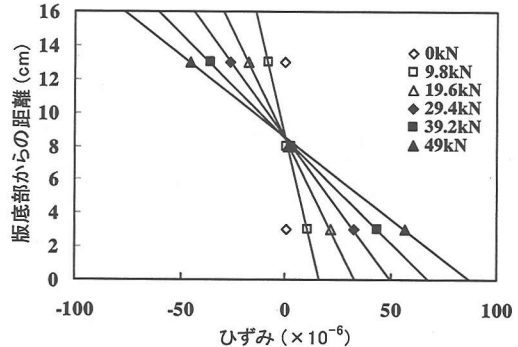


図-5 埋込みゲージからの版上下面のひずみの算出

盤面圧力の4項目に注目して測定を行った。

たわみ量は図-2に示すように、試験区の側壁に鋼製の剛性梁を渡し、その中央部にマグネットスタンドで差動トランス式の高感度変位計を取り付けて測定した。また、ひずみおよび版内温度分布は、温度センサが内蔵された円筒状埋込みゲージを図-3に示すように、等間隔に設置して測定した。なお、埋込みゲージでの測定結果の確認は、研磨されたコンクリート版の表面にエポキシ系樹脂をプライマとして貼り付けた箔型ひずみゲージを用いて行った。

路盤面圧力は、図-4に示すようにコンクリート版と土圧計の受圧面(圧力を測定する面)が路盤紙を介して接するように土圧計を設置して測定した¹⁹⁾。また、載荷時の温度測定はデータロガーで、載荷荷重、ひずみ、たわみ量および路盤面圧力は動ひずみ計を介してコンピュータで記録した。

データ計測は、静載荷実験では載荷実施ごとに、繰返し載荷実験では載荷開始から1時間ごとにインターバルタイマーを用いて行った。なお、たわみ量、ひずみおよび温度分布は、自由縁部、中央部の両載荷位置で測定したが、路盤面圧力は自由縁部でのみ測定した。

(4) 解析用データの作成

a) 静載荷実験

図-3からもわかるように、埋込みゲージは版内部に配置されているため、Westergaardモデルでの計

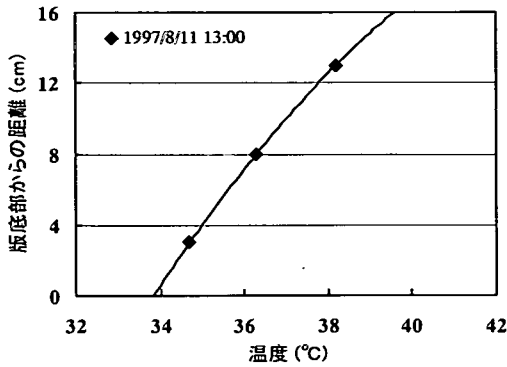


図-6 版内温度分布の計測例

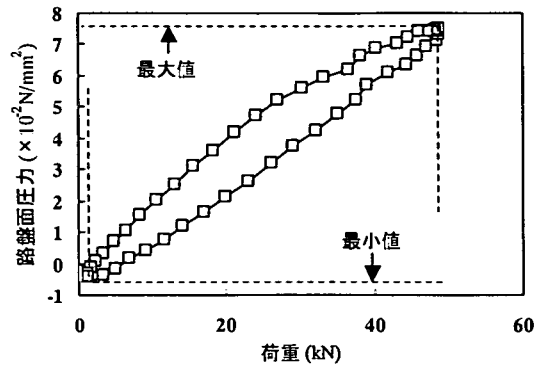


図-7 測定された載荷-除荷データの一例

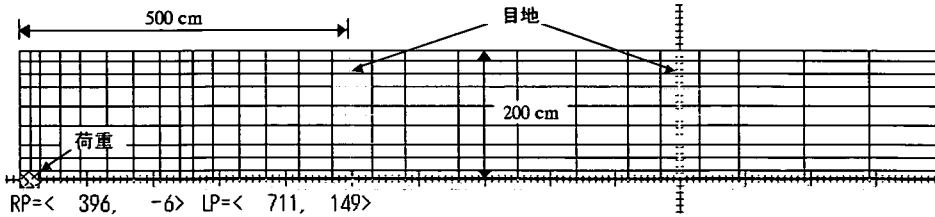


図-8 平板 FEM 解析での線対称要素分割

算結果と比較するためには、実測ひずみから版底面あるいは表面のひずみを求める必要がある。本実験で得られたひずみデータは、図-5に示すように版内部で直線的に変化していたため、測定結果を直線で外挿して版底面でのひずみを求めた。

コンクリート版のそり変形および温度応力の算出に用いられる版上下面の温度差は、図-6に示すように非線形で分布していたことから、測定データを2次曲線で近似して推定した。ただし、温度差は版下面の温度に比べ上面の方が高いときが正とした。

b) 繰返し載荷実験

たわみ量、ひずみおよび路盤面圧力は、1時間ごとに計測された1秒分のデータから波形解析プログラムを用いて除荷状態から始まる1周期分のデータを抽出し解析の対象とした。なお、1周期分の繰返し載荷データはヒステリシスループを描くが、たわみ及び路盤面圧力の解析にあたっては図-7に示すように荷重の最大、最小値にあわせて変位計および土圧計の最大、最小値を抽出した。その後、最大値と最小値の差を算出して解析用データを作成した。なお、ひずみに関しては荷重の最大値にあわせてデータを抽出した。その後、FEM解析によるデータ検証を行うために中立軸から圧縮・引張側の埋め込みゲージのデータを直線で外挿し、版表面と底面のひずみを求めた。

3. 解析方法

(1) 静載荷実験

Vesic and Saxena²⁰⁾は、コンクリート版中央部において Boussinesq モデルと Westergaard モデルで計算されるコンクリート版の曲げ応力が等しくなるように、半無限地盤の弾性係数と路盤反力係数 K_{75} の換算式を示した。

このとき Vesic らは換算式を用いて K_{75} から弾性係数を求め、Westergaard モデルと Boussinesq モデルで版中央部でのたわみ量と路盤面圧力を比較し、Westergaard モデルでの解析結果は Boussinesq モデルでの結果よりも小さくなることを指摘している。さらに、Vesic らは版中央部において Westergaard モデルによるたわみ量、路盤面圧力が Boussinesq モデルでの結果と等しくなる時の路盤反力係数をそれぞれ K_D 、 K_P とすると、 K_{75} と K_D 、 K_P には式(1)に示す関係があることを示し、縁部においても同様に考えられるとしている。しかし、Vesic らは式(1)の関係を実験的に確認したわけではない。

$$K_{75} = \frac{K_D}{0.42} = \frac{K_P}{2.37} \quad (1)$$

これに対して Ioannides ら²¹⁾は、Westergaard モデルによって得られる曲げ応力、たわみ量は実用上妥当であるとしている。確かに、疲労解析に基づくコンクリート舗装の設計においてたわみ自体は重要で

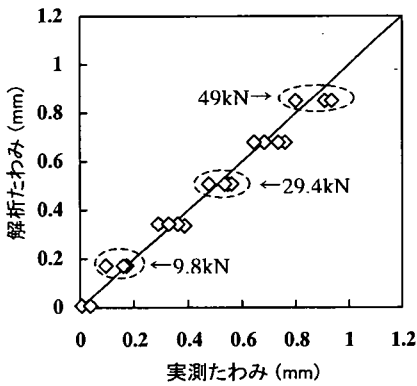


図-9 実測たわみと解析たわみの関係 (自由縁部)

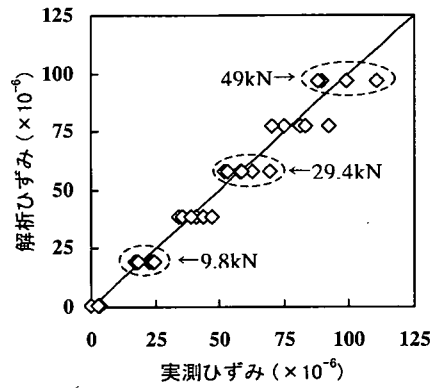


図-10 実測ひずみと解析ひずみの関係 (自由縁部)

はないため、実測した K_{75} を用いて曲げ応力、たわみ量を求めても問題はないと言えよう。しかし、本研究では K_{75} と路盤面圧力およびたわみ量との関係を把握するために、 K_{75} と K_D 、 K_P を用いて得られるひずみの解析結果と実測結果を比較し、式(1)の妥当性について検討することとした。

ひずみの解析にあたっては、西澤によって開発された平板 FEM 解析プログラム⁷⁾を使用し、図-8に示すように線対称の要素分割を行った。また、解析時のパラメータは表-1にしたがって入力した。

(2) 繰返し载荷実験

繰返し载荷による路盤 K 値の変化を捉えるためには、FEM によって路盤面圧力の実測結果から K 値を求めるよりも、FEM と同じ結果が得られる Westergaard の公式に実測結果を入力し、直接的に K 値を算出の方が効率的である。

Westergaard モデルでの路盤面圧力は、Winkler 地盤の仮定に従い、式(2)によって算出される。

$$P = K \cdot \Delta_e \quad (2)$$

ここに、
 Δ_e : 版のたわみ量(mm)
 K : 路盤支持力係数(N/mm³)
 P : 路盤面圧力(N/mm²)

また、Westergaard のたわみ公式は、式(3)に示す通りである。

$$\Delta_e = \frac{0.441F}{K \cdot l^2} \left[1 - 0.84 \left(\frac{a}{l} \right) \right] \quad (3)$$

ここに、
 F : 荷重(N)
 a : 载荷半径(mm)
 E_c : コンクリートの弾性係数(N/mm²)

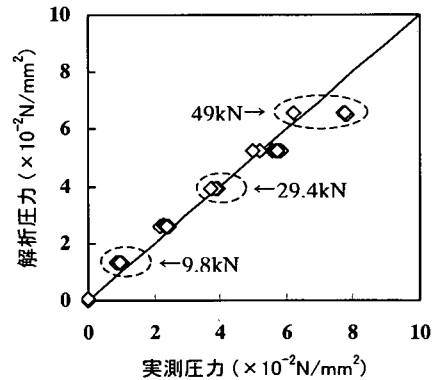


図-11 実測圧力と解析圧力の関係 (自由縁部)

h : スラブ厚さ(mm)
 ν_c : コンクリートのポアソン比
 l : 剛比半径(mm)
 $\left(= \sqrt[4]{E_c \cdot h^3 / 12(1 - \nu_c^2) K} \right)$

式(2)および式(3)を用いて、測定した载荷荷重とたわみ量、载荷荷重と路盤面圧力から、式(1)に示した K_D および K_P を求めることができる。 K_D は、式(3)を K について展開した式(4)によって容易に計算することができる。

$$K_D = \left[\frac{-0.370F \cdot a \cdot \alpha^{-1} + (0.1369F^2}{2\Delta_e \cdot \alpha^2} \cdot \frac{a^2 \cdot \alpha^{-2} + 1.764\Delta_e \cdot \alpha^2 \cdot F}{\cdot} \right]^4 \quad (4)$$

ここに、
 $\alpha = \sqrt[4]{E_c \cdot h^3 / 12(1 - \nu_c^2)}$

また、 K_P は、式(2)に式(3)を代入して得られる式(5)から求めることができる。

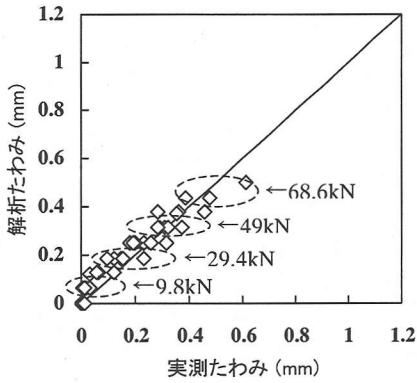


図-12 実測たわみと解析たわみの関係 (中央部)

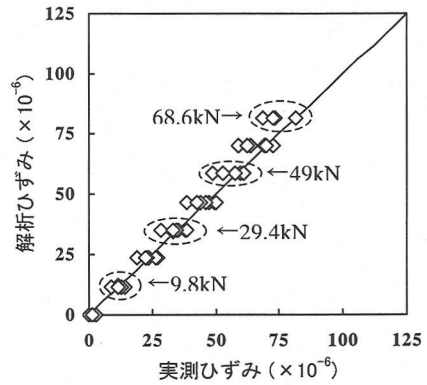


図-13 実測ひずみと解析ひずみの関係 (中央部)

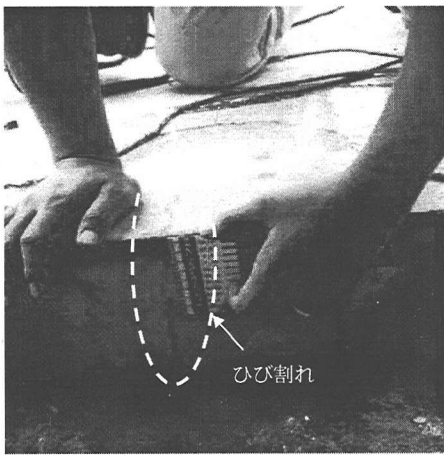


図-14 自由縁部載荷直下で確認されたひび割れ

$$0.370F \cdot a \cdot \alpha^{-1} \cdot (K_p)^{0.75} - 0.441F \times (K_p)^{0.5} + P \cdot \alpha^2 = 0 \quad (5)$$

なお、式(5)の解は、Windows 上で作動する数式処理ソフトウェアである Mathematica²²⁾を利用して求めた。なお、上記の方法で算出した路盤 K 値の変化をコンクリート版のひずみから検討するために、平板 FEM 解析を行った。このときの要素分割は静載荷実験と同様にして行った。

4. 載荷実験解析

(1) 静載荷実験

静載荷実験は、日差しが強い日中を避けて行ったため、載荷時の版内温度差は 0.25℃と小さい値を示した。したがって、試験結果は版のそり変形による影響を殆ど受けなため、FEM 解析時の版上下面

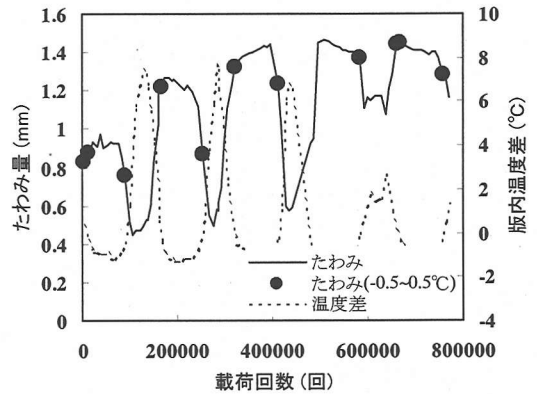


図-15 載荷に伴うたわみ量と温度差の変化

温度差を 0℃とした。

自由縁部でのたわみ量、ひずみ及び路盤面圧力の実測結果と解析結果との関係を図-9~11 に、中央部でのたわみ量及びひずみの実測結果と解析結果との関係を図-12, 13 に示す。なお、曲げひずみを計算するときには K_{75} を用い、たわみ量および路盤面圧力を計算するときには、式(1)に従って K_{75} を K_D および K_p に補正して解析した。また、図中の直線は、実測結果と解析結果が等しいときの関係を示している。これらの結果より、自由縁部および中央部の何れの載荷箇所においても、実測結果と解析結果は良く一致しているのがわかる。このことから、Westergaard モデルを用いて、静的なたわみ量及び路盤面圧力を解析する場合、Vesic らが示した式(1)の関係をを用い、路盤 K 値を補正する必要があると言える。

(2) 繰返し載荷実験

繰返し載荷実験期間中における降雨はなく、日中の舗装表面の最高温度は 40~46℃で、版内温度差

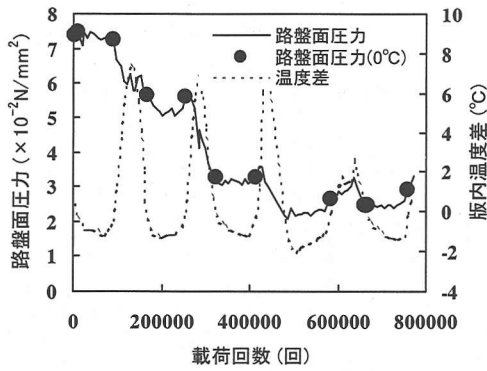


図-16 荷荷に伴う路盤面圧力と温度差の変化

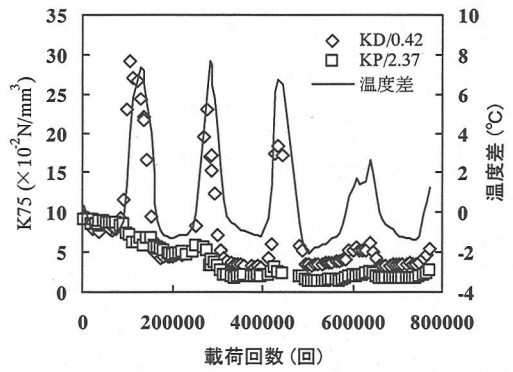


図-17 荷荷に伴う路盤反力係数の変化

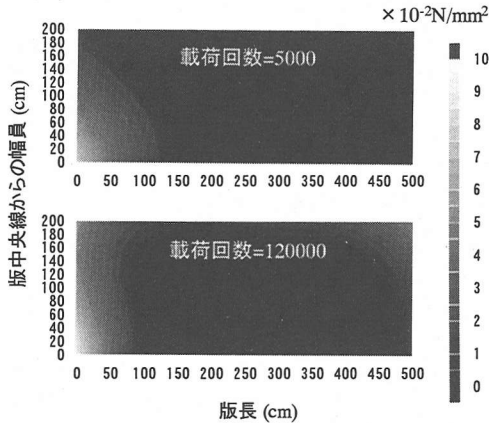


図-18 平板FEMによる路盤面圧力の分布

は $-1\sim+8^{\circ}\text{C}$ の間で変化していた。日中の舗装表面温度が高いにもかかわらず、版内温度差が比較的小さいのは、版厚が 16cm と薄かったためと考えられる。また、約 430000 回荷荷のときに荷荷部直下で図-14に示す縦方向のクラックを確認した。このクラックは、荷荷板中央から版端に向かって発生しており、版底面から表面まで通っていた。

a) たわみ量・路盤面圧力からの検討

荷荷に伴うたわみ量と版内温度差の変化を図-15に、同様に路盤面圧力と版内温度差の変化を図-16に示す。両図における凡例の黒丸は、版内温度差が $-0.5\sim+0.5^{\circ}\text{C}$ のときのデータをプロットしたもので、コンクリート版のそり変形の影響を殆ど受けていない状態でのデータである。

図-15に示すように、温度差が $-0.5\sim+0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲でのたわみ量は、荷荷初期では静荷荷実験と同様に 0.8mm 程度であったものが、温度差が大きくなった後に増加し、 200000 回付近で $1.2\sim 1.3\text{mm}$ 、 400000 回付近では $1.3\sim 1.4\text{mm}$ に達していた。また、版内温度差が正に大きいときには、縁部でのたわみ

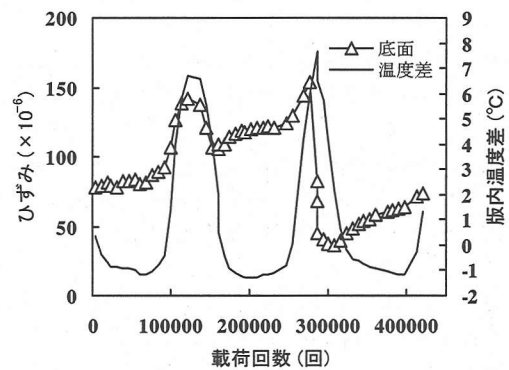


図-19 荷荷に伴うひずみの変化

量は小さくなる傾向にあった。版上下面の温度差が正に大きくなったときに、縁部・隅角部でのたわみ量が減少する傾向にあることは、FWD試験結果²³⁾からも報告されており、とりわけ、隅角部では顕著²⁴⁾に見られる。この現象は、土質材料、特に路盤材料の拘束圧依存性に起因していると考えられるが、本研究では路盤以下をWinkler地盤として扱っているため、拘束圧依存性を考慮することはできない。したがって、今回の横自由縁部での温度差あるいは温度勾配とたわみ量の関係についての詳細な検討は今後の課題とした。

舗装において、土質系材料の残留変形を直接的に測定することは難しく、アスファルト舗装のわだち掘れ量などは、土質系材料とアスファルト混合物の残留変形量を合計することによって推定される。しかし、コンクリート版は剛性が高く、アスファルト混合物のように土質材料の局所的な残留変形に追従しない。そのため、コンクリート舗装において路盤面に残留変形が生じた場合、コンクリート版と路盤面の間に隙間が生じることになる。この隙間の発生は、路盤面のコンクリート版に対する荷重支持能力を低下させることから、最終的に荷荷に伴うたわみ

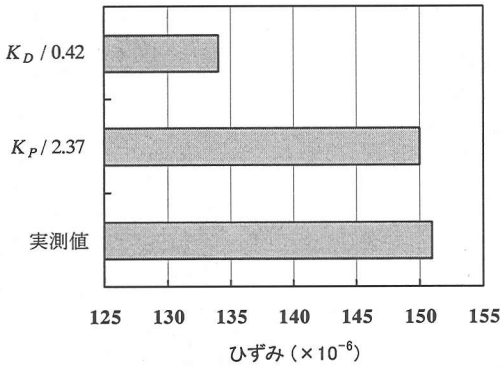


図-20 実測ひずみと各種路盤 K 値を用いた解析ひずみの比較

量が大きくなる。そこで、本研究では荷重開始時からのたわみ量の増分を路盤面に生じた残留変形量とした。

既に述べたように、荷重初期のたわみ量が約 0.8mm で荷重終期のたわみ量が 1.3~1.4mm であったことから、実験期間中に路盤面に 0.5~0.6mm 程度の残留変形が生じたことがわかる。

図-16 に示すように温度差が $-0.5\sim+0.5^{\circ}\text{C}$ の範囲での路盤面圧力は、図-11 の 49kN のデータと比べてもわかるように、荷重初期には $0.07\text{N}/\text{mm}^2$ 程度で静荷重実験と同等であったものが日中（版内温度差が負から正に移行するとき）に低下し、最終的には初期の $1/2$ 以下の値を示していた。路盤面圧力はコンクリート版と土圧計の接触によって検出されることから、路盤面の残留変形によって土圧計受圧面とコンクリート版との間に空隙が生じ検出圧力が低下したものと考えられる。

これらの結果より、たわみ量、路盤面圧力ともに版内温度差が正に大きくなったときに変化していることから、路盤面の残留変形はコンクリート版のそり変形と密接に関連していると考えられる。

たわみ量、路盤面圧力ともに、荷重初期段階において静荷重実験時とほぼ同じ値を示していたことから、今回の実験条件下では荷重初期段階のたわみ量および路盤面圧力は静的なものと変わらないと言える。そこで、式(4)及び式(5)を用いて算出した K_D および K_P を式(1)の関係に基づいて補正し、見かけの路盤反力係数を計算した。

繰返し荷重試験における見掛上の路盤反力係数の経時変化を図-17 に示す。凡例の $K_D/0.42$ は K_D から求めた K_{75} を、 $K_P/2.37$ は K_P から求めた K_{75} を示している。

版上下面の温度差が負から正に移行したときにはまったく一致しなかったが、 0°C 以下のときには K_D

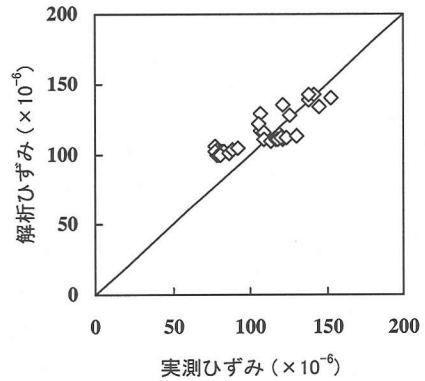


図-21 実測ひずみと解析ひずみの関係

および K_P から算出される K_{75} の間の差は殆ど無かった。このことから、温度差が小さいときのたわみ量、路盤面圧力の測定結果は信頼できるものと考えられる。

また、温度差が 0°C 付近での結果に注目すると、荷重初期段階では算出された K 値は表-1 の実測値と同程度の値を示しているが、荷重回数の増加に伴って低下し、最終的には初期値の $1/3\sim 1/4$ まで達していた。

図-18 は荷重回数が約 5000 回のときと約 120000 回のときのそり変形と荷重によって生じる路盤面圧力の分布を示している。これは、平板 FEM によって求めたもので、路盤反力係数には K_P を用いた。また、5000 回のときの圧力分布は版内温度差が 0°C 付近でそり変形の影響を殆ど受けない場合、120000 回のときは版内温度差が最大でコンクリート版に碗を伏せたようにそり変形が生じている場合を示している。

図-18 より、荷重位置（版長方向 $0\sim 30\text{cm}$ 、幅員方向 $0\sim 15\text{cm}$ の長方形）周辺に注目すると、路盤面圧力が $0.08\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であることを示す白い部分の面積は、5000 回のときは殆ど無いが 120000 回のときには版長方向に $0\sim 25\text{cm}$ 、幅員方向に $0\sim 60\text{cm}$ の範囲に広がっていることがわかる。この変化は、コンクリート版のそり変形によるものであることから、今回の実験で確認された路盤面の残留変形は、コンクリート版のそり変形と密接に関連していることが解析的にも確認できる。

b) ひずみによる K 値の確認

図-19 に荷重に伴う底面ひずみと温度差の変化を示す。表面ひずみは荷重中に異常な値を示していたことから、本研究では解析の対象としなかった。

図-19 より、底面ひずみは版内温度差の変化に追従しながら徐々に増加していることがわかる。底面

ひずみの温度差変化への追従は、コンクリート版に生じた温度応力によるものと考えられる。

また、版上下面でのひずみは約 280000 回載荷以降に大きな変動を示していた。図-14 のクラックは、埋め込みゲージの埋設位置を横切って発生していたことから、約 430000 回載荷のときに確認したひび割れは、実際には約 280000 回の載荷で生じたために、ひずみの測定結果に影響を及ぼしたものと考えられる。なお、表-1 に示したコンクリートの曲げ強度と弾性係数より、破壊に至るひずみは 200×10^{-6} 程度であり、実測されたひずみはそれ以内であることから、この破壊は疲労によるものであることがわかる。更に、コンクリート版は 2 回目の版内温度差がピーク付近のときに破壊していることから、温度応力がコンクリートの疲労破壊に及ぼす影響は大きいことがわかる。

ひび割れが発生したと考えられる 280000 回以降のたわみ量、路盤面圧力は、図-15, 16 からわかるように、ひずみ程の極端な変化は見られなかった。本実験で確認された載荷位置でのひび割れは、載荷板中央から版端に向かって発生しており、載荷板下のコンクリート版がひび割れによって完全に分断されていなかったことが、ひび割れがたわみ量、路盤面圧力に及ぼす影響が小さかった原因と考えられる。しかし、コンクリート版のひび割れがたわみ量および路盤面圧力に及ぼす影響について把握しているわけではないため、今後の課題としたい。

次に実測ひずみから図-17 に示した路盤反力係数の低下状況の検証を行う。なお、路盤反力係数の変動に伴うひずみの算出は平板 FEM を用いて行った。また、図-19 に示したように、ひずみは約 280000 回載荷以降に大きな変動を示していたことから、ひずみに関しては 280000 回までのデータを解析の対象とした。

図-20 は、第 1 回目に温度差がピークになったときの各 K 値での FEM 解析結果と実測結果を比較したものである。この図より、 $K_p/2.37$ (K_p から求めたもの) での結果が実測結果と最も近い値を示していることがわかる。これは、 K_D から求めた路盤反力係数は温度差が大きくなったときに増加し、これによって載荷重応力の計算結果が小さく見積もられたためである。また、路盤反力係数として $K_p/2.37$ を用い、約 280000 回載荷までのひずみ解析を行った。これを図-21 に示す。

図-21 より、実測結果と解析結果は良く一致していることがわかる。本研究で解析の対象としているコンクリート版は、横目地と隣接する版とダウエル

バーで連結されているのみであるため、温度応力はそり応力が支配的であると考えられる。これに関して、平板 FEM によるそり応力解析は、十分な精度を有していることが西澤らによって明らかになっている²⁵⁾。

K_D および K_p から求めた繰返し載荷実験時の路盤反力係数は、版内温度差が小さいときは一致していたが、温度差が正に大きいときは大きく乖離していた。これに関して、実測ひずみから路盤反力係数の低下状況について検討したところ、温度差が正に大きいときの路盤反力係数は、路盤面圧力から求めたように増大しないことがわかった。

5. まとめ

本研究では、建設省土木研究所で行った実物大コンクリート舗装の静および繰返し載荷実験から、Westergaard モデルを用いてコンクリート舗装における路盤面の残留(永久)変形特性について検討を行った。得られた主な結果をまとめると以下の通りである。

- ・本研究での実験条件の範囲内では、Westergaard モデルを用いたたわみ量及び路盤面圧力を解析する場合、Vesic らが示した式(1)の係数を用い、路盤 K 値を補正する必要があることが確認された。
- ・繰返し載荷に伴うたわみは、版内温度差が正に大きくなったときに増加し、実験期間内で 0.5~0.6mm の残留変形が生じていた。また、路盤面圧力も残留変形の影響で版内温度差が正に大きくなったときに低下する傾向にあった。これらの結果は、版上下面の温度差が正のときのそり変形が載荷位置付近の路盤面圧力を増大させたためであることが平板 FEM 解析から推察された。
- ・繰返し載荷実験より、載荷初期段階では算出された路盤反力係数は実測値と同程度の値を示していたが、残留変形の進行に伴って低下することがコンクリート版のひずみ解析から確認された。

路盤 K 値の低下はコンクリート版の支持能力の低下を意味していることから、路盤面の残留変形はコンクリート版に生じる曲げ応力を増大させ、疲労破壊を早める原因であると考えられることから、更に疲労破壊との関係について検討していく必要がある。また、既に述べたように、ひび割れの進行がたわみ量および路盤面圧力に及ぼす影響、横縁部におけるたわみ量と温度勾配の関係についても今後検討を行っていく必要があると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり，土木研究所舗装研究室室長（当時）の故・池田拓哉氏には大変お世話になった。また，本研究をまとめるにあたって，文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)(1)（研究代表者：西澤辰男，課題番号：12555130）の補助を受けたことを付記し，関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) Westergaard, H. M.: New formulas for stresses in concrete pavements of airfields, Trans. of ASCE, Vol.113, 1948.
- 2) 土木学会：舗装工学第1版，土木学会，1995.
- 3) Huang, Y.H. : Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1993.
- 4) 日本道路協会：セメントコンクリート舗装要綱第18版，1993.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書舗装編，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，土木研究所報告，建設省，No.117, 1964.
- 7) 西澤辰男：コンクリート舗装版の荷重伝達機構とその解析法に関する研究，東北大学学位論文，1990.
- 8) Tang, B., Maruyama, T. and Takahashi, O.: Deflection criteria for concrete pavement structural design and evaluation, J. Materials, Conc. Struct., JSCE, No.592/V-39, pp.197-204, 1998.
- 9) AASHTO guide for design of pavement structures, AASHTO, 1986.
- 10) Portland Cement Association: Thickness design for concrete highway and street pavements, Portland Cement Association, 1984.
- 11) Darter, M. I., Becker, J. M. and Snyder, M. B.: Concrete pavement evaluation system (COPEs)—nationwide prediction model demonstration, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue, pp.453-468, 1985.
- 12) Wu, C. L., Mack, J. M. Okamoto, P. A. and Packard, R. G.: Prediction of faulting of joints in concrete pavements, Proc. of the 5th Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Volume2, Purdue, pp.53-70, 1993.
- 13) Darter, M. I., Hall, K. T., and Kuo, C. M.: Support under Portland cement concrete pavements, NCHRP Report 372, 1995.
- 14) Roesler, J. R. and Barenberg, E. J.: Fatigue and static testing of concrete slabs, TRR 1684, TRB, pp.51-60, 1999.
- 15) 小森谷一志,小梁川雅,木村慎：セメントコンクリート舗装版の輪荷重応力に関する一考察，土木学会第53回年次学術講演会概要集，第5部，pp.102-103, 1998.
- 16) 乾達雄,竹内康,小梁川雅：コンクリート舗装における路盤面応力に関する実験的研究，土木学会第53回年次学術講演会概要集，第5部，pp.114-115, 1998.
- 17) 竹内康,小梁川雅,西澤辰男：コンクリート舗装における粒状路盤の動的変形特性に関する一考察，土木学会第53回年次学術講演会概要集，第5部，pp.116-117, 1998.
- 18) 全国国土調査協会：日本の自然と土地利用，Ⅲ関東，1979.
- 19) 竹内康,小梁川雅,乾達雄,牧恒雄：路盤面に作用する荷重強さの予測に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会概要集，第5部，pp.108-109, 1997.
- 20) Vesic, A. S. and Saxena, S. K.: Analysis of structural behavior of AASHO road test rigid pavements, NCHRP Report 97, 1970.
- 21) Ioannides, A. M., Thompson, M. R. and Barenberg, E. J.: Westergaard solutions reconsidered, TRR 1043, TRB, pp.12-23, 1985.
- 22) Wolfram, S., "Mathematica TM, A system from doing mathematics by computer 2nd ED" Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1991.
- 23) 菅野克美,島多昭典,伊藤薫：コンクリート版の温度勾配とFWDたわみ量について，土木学会第52回年次学術講演会概要集，第5部，pp.92-93, 1997.
- 24) FWD研究会：FWDに関する研究，1999年度報告書，1999.
- 25) 西澤辰男,野田悦郎,福田正：プレキャストコンクリート舗装の温度応力に関する基礎的検討，土木学会論文集，No.508/V-26, pp.101-107, 1995.

(2001. 5. 9 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON PERMANENT DEFORMATION OF BASE COURSE SURFACE IN CONCRETE PAVEMENT

Yasushi TAKEUCHI, Masashi KOYANAGAWA, Tatsuo NISHIZAWA,
Etsuro NODA and Kazuyuki KUBO

In this study, the permanent deformation at base course surface was examined using the Westergaard's model based on the results of the static and the cyclic loading tests with a concrete pavement at the Public Works Research Institute in August 1997. The analytical results of the static loading test showed that, for precise calculation of the deflection or pressure, the base course reaction modulus should be modified based on the Boussinesq's model as Vesic had suggested. And in the cyclic loading test, the development of a permanent deformation of base course surface with cyclic loads was observed, and the decreasing of reaction modulus due to the permanent deformation was confirmed.