路盤の経年変形がコンクリート舗装の 疲労破壊に及ぼす影響

竹内 康1・小梁川雅2・西澤辰男3・木村 慎4

¹正会員 農修 東京農業大学講師 生産環境工学科 (〒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 生産環境工学科 (〒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 建設省土木研究所 道路部舗装研究室 研究員 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

コンクリート版と路盤の力学特性を検討するために、1997年8月に建設省土木研究所で実物大コンク リート舗装を用いた載荷実験が実施された.本研究では、この実験結果から繰返し載荷に伴う路盤K値の 低下がコンクリート舗装の疲労抵抗に及ぼす影響について検討した.力学解析には平板FEMを用い、疲労 解析にあたっては舗装要綱および破壊確率に基づく疲労曲線を用いた.その結果、路盤K値の低下によっ てコンクリートの疲労が進行すること、舗装要綱の疲労曲線は破壊状況の実状をあらわしていないことが わかった.

Key Words : concrete pavement, granular base course, fatigue failure, K-value

1. 緒 言

コンクリート舗装の設計指針には、大別してセメ ントコンクリート舗装要綱¹⁾(以下、舗装要綱と略 す)とコンクリート標準示方書²⁾(以下、標準示方 書と略す)の二つがある。何れの設計指針において も、応力解析はWinkler地盤上の弾性平板モデル、 いわゆるWestergaardモデルを用いて行っている。

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によってのみ行ってい る.このとき、応力度の算定は岩間(1964)³に よって実験的に修正されたWestergaard公式を用いて いる.一方、標準示方書では、ある限界値以下のた わみ量の範囲で疲労解析、IRIによる乗り心地解析、 エロージョンによって生じる目地部段差解析から総 合的に版厚を決定する.このとき、たわみ量、応力 度の算定はWestergaard公式もしくは有限要素法に よって行われる.標準示方書において設けられるた わみ量の限界値は、設計耐用期間中に路盤面に過度 な変形が生じないよう考慮したものであるが、これ は経年変形の影響を推定ができないことによる簡便 法である.また、路盤の経年変形によるコンクリー ト版の支持力低下は、版に発生する応力を増大させ、 疲労破壊を早める原因となると考えられる. これら のことより、何れの設計法においても路盤面での経 年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.

1997年8月に建設省土木研究所で行われた実物大 コンクリート舗装での静・動載荷試験が実施された. 筆者らは、この実験結果を用いて路盤の経年変形と 路盤K値の変動について検討を行った⁴⁾. その結果、 繰返し載荷によって路盤面に残留変形が生じている ことが測定結果から確認された.また、測定結果か らWestergaard理論を用いて路盤K値を算出したとこ ろ、載荷に伴って低下する傾向にあることはわかっ たものの、版内温度差の影響があったため路盤K値 の経時変化を正確に把握することができなかった. そこで、本研究では載荷実験で測定されたコンク リート版のひずみと路盤K値の計算結果に基づく力 学解析結果とを比較し、計算された路盤K値の検証 を行うとともに、路盤K値の経時変化がコンクリー ト版の曲げ応力とコンクリートの疲労度に及ぼす影 響について検討することを目的としている.なお. 力学解析にあたっては、 西澤によって開発された平 板FEM解析プログラム^{5.0}を利用し、路盤K値の経時 変化の検討では,設計耐用期間内ではK値が変化し ないとする従来の設計法に基づいた解析結果を比較 対象とした.

2. 路盤K値の経時変化^{4,7,8)}

筆者らは、同実験において測定された路盤面圧力
 と載荷重からWestergaardのたわみ公式とWinklerの
 公式から導かれる(1)式を用いてK値(*Kprs*)の低下状況を求めた.

$$0.370F \cdot a \cdot \alpha^{-1} \cdot Kprs^{0.75} - 0.441F \cdot Kprs^{0.5}$$
(1)
+ $P \cdot \alpha^2 = 0$
 $\subset \subset \mathcal{C},$

F:荷重 (kgf) a: 載荷半径 (cm) P: 路盤面圧力 (kgf/cm²) $E_c: コンクリートの弾性係数 (kgf/cm²)$ $\nu_c: コンクリートのポアソン比 (-)$ h: コンクリート版厚 (cm)



ただし、静載荷実験結果から、Westergaardモデル を用いて路盤面圧力を検討する場合、(2)式に示す Vesicらの指摘事項に基づいてK75を求める必要があ ることがわかった.

$$K75 = Kprs / 2.37$$
 (2)

 $\langle \alpha \rangle$

図-1は、動載荷実験結果から計算されたK75と版 内温度差との関係を示している. 図中の実線がK75 を示しているが、これは(1)および(2)式を用いて計 算された値である. この図からわかるように、K75 は温度差が上昇したときに低下し、最終的には初期 値の1/3~1/4まで低下していた.

路盤面圧力は土圧計とコンクリート版との接触に より検出されるため、路盤面圧力の低下は路盤面-コンクリート版間の空隙の進行を意味していると考 えられる. なお、以降の動載荷実験の解析において は、図-1に示すK値を用いた.

3. 実験方法

(1) 実験の概要

載荷実験は、1997年8月8日~13日まで、茨城県つ くば市の建設省土木研究所内に図-2に示す実物大コ ンクリート舗装の試験区を作製し、屋外載荷実験装 置を用いて行われた.なお、載荷位置は図-1に示す 横目地自由縁部である.

コンクリート版と上層路盤は、同年3月に新規打 設したものであるが、ト層路盤および路床は既設の ものを利用した.また、各々の版はダウエルバーで 連結されている.

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る.アクチュエー タは、静的では10000kgfまで、動的では5000kgfで 5Hzまでの載荷能力を有する.また、載荷装置は、





- 94 -

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.

(2) 使用材料

表-1は載荷実験のために新設した路盤とコンク リートの材料特性を示している.路盤材料は、上層 路盤材として最も多く用いられている粒度調整砕石 (M-30)を用いた.表-1中のK75は、図-1に示した位 置での平板載荷試験によって得られたK30を2.2で除 した値の平均値である.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 測定されたものである.

(3) 実験条件

静載荷実験は、0-7000kgfの範囲で1000kgfおきに 行われた.また、動載荷実験は静載荷実験終了後に 行われ、載荷条件は最大荷重5000kgf,最小荷重 100kgf,載荷周期2Hzであった.また、載荷に伴う

MATERIAL	PARAMETERS	VALUE	UNIT
CONCRETE	Density	2.4	(g [°] cm ³)
	Bending Strength	62.00	(kgf cm ²)
	Young's Modulous	320000	(kgf'cm ²)
	Poisson's Ratio	0.2	(-)
	Coeff. of Linear Expansion	0.00001	(/degC)
GRANULAR	Maximum Dry Density	2.255	(g'cm ³)
	Modified CBR	105	(%)
	Degree of Compaction	95.7	(%)
	K75	8.5	(kgf cm ³)

表-1 使用材料の特性

3(cm) 3(cm) 5(cm) Chair Concrete slab 5(cm) Chair Concrete slab 5(cm) Chair Granular base 3(cm) Granular base 図-3 埋め込みゲージ埋設位置

版内のひずみ及び温度分布測定は、図-3に示すよう に温度センサを内蔵した円筒状の埋め込みゲージを 版内に設置して行われた.また、ひずみ測定に関し ては、埋め込みゲージの他に版表面に箔型ひずみ ゲージを貼り付けて行われた.

温度はデータロガーで、載荷重およびひずみは、 動ひずみ計からA/D変換機を介してコンピュータで1 時間おきに計測された.また、動載荷実験の解析に あたっては、波形解析プログラムを用いて除荷状態 (最小荷重)から始まる1周期分のデータを対象と した.このデータはループを描くが、本研究では図 -5に示すように荷重のピークにあわせてひずみを抽 出した.なお、版上下面の温度差は、測定データを 2次曲線で近似して推定した.

4. 解析方法

FEM解析^{5,6)}

FEM解析領域は図-2に示す試験区のセンターラインで線対称になるよう区切った.解析に用いた要素分割の一部を図-4に示す.

平板FEMプログラムでは、WinklerとVlasovの2種 類の路盤モデルについて解析することができるが、 本研究では、K値の経時変化の検討において



図-5 測定された動載荷データ例



図-4 FEM要素分割図

Westergaard理論を用いたことから、路盤モデルとし てWinklerモデルを用いた.また、解析を行うのに 必要なコンクリートに関する入力パラメータは表-1 の値を用いた.入力した路盤K値は、静載荷解析時 には表-1に示すようにK75=8.5kgf/cm³とし、動載荷 解析では図-1に示したようにK値が変化した場合と 表-1の値から変化しない場合の2種類とした.また、 版内の上下面温度差は実測値からの推定値を入力し た.

(3) 疲労解析

疲労解析方法は舗装要綱および標準示方書に従い、 (3)式のマイナー則によって定義される疲労度を計算 し、これが1.0を超えたときにひび割れが生じると した.^{1,2)}

$$Fd = \sum_{i=1}^{m} \frac{n_i}{N_i} \tag{3}$$

ニニで,

Fd:曲げ疲労度
ni:荷重 iの繰返し数
Ni:荷重 iに対する許容繰返し数
m:荷重分割数

また,疲労度の算出にあたっては,舗装要綱に示 されている疲労曲線と小梁川⁹らによって示された 疲労曲線を使用した.ただし、小梁川らによる疲労 曲線は、コンクリートの破壊確率によって異なるた め、幾つかの破壊確率について検討した.

5. 静載荷実験解析

(1) 実験結果

静載荷実験によって得られた荷重直下での荷重-ひずみ直線を図-6に示す.版表面の貼付けゲージの



値は実測値を示しているが、埋め込みゲージでの値 は、実測値を版底面および表面まで直線で外挿して 求めた.また、静載荷実験は、日差しの強い日中を 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、測定されるひずみ はコンクリート版のそり変形による影響を殆ど受け ていないと言える.また、実験結果では、表面ゲー ジによるひずみと底面ひずみはほぼ対称的であった.



図-9 静載荷FEM解析結果(外挿底面ひずみ)

Measured Strain ($\times 10^{-6}$)

(2) FEM解析結果

FEM解析結果と測定結果を比較したものが図-7~ 9である.当然のことながら、表面貼付けゲージと 表面まで外挿した埋め込みゲージでの値は圧縮側で あるため、負の値を示す.なお、図中に示した直線 は、FEM解析結果と測定結果が同じ値であるときの 関係を示している.

図-7.8は表面ひずみの比較であるが、埋め込み ゲージから外挿した圧縮側の結果は、FEM解析結果 と乖離していたが、表面貼付けゲージでの値はFEM と良く一致していた.

埋め込みゲージによる推定値は、設置時のゲージ の僅かな移動もしくは載荷時のひび割れの進行に よって変動すると考えられる.仮に載荷時にひび割 れが進行していたならば、図-6に示した中立軸付近 と引張側での値はばらつくはずである.しかし、何 れのデータもある程度高い再現性を有していること から、外挿した圧縮側の結果がFEM解析結果と乖離 したのは、埋め込みゲージが所定の埋め込み位置よ りも僅かに引張側に設置されたことが原因であると 考えられる.また、中立軸付近でのひずみがゼロに ならずに載荷に伴って変化したのも、圧縮側の埋め 込みゲージと同様に、所定の埋め込み位置よりも僅 かに引張側に設置されたことが原因であると考えら れる.

外挿した引張側の値は、表面貼り付けゲージの結 果と同様に、FEM解析結果と良く一致していること が図-9より認められる.また、引張側の値は表面 ゲージの値とは符号が反対であることから、コンク リート版は載荷に伴い純曲げ状態にあることがわか る.また、FEMでは表-1に示したK値を用いて解析 したことから、載荷初期段階の路盤K値は平板載荷 試験より求めた値にほぼ等しいことがわかった.

6. 動載荷実験解析

(1) 実験結果

動載荷実験期間中における降雨はなく、日中の舗 装表面温度は40~46℃であった。また、約430000回 載荷のときに、載荷部直下で縦方向のクラックを確 認した。そのため、約430000回載荷までを解析の対 象とした。動載荷によるひずみと版内温度差の経時 変化を図-10に示す。

動載荷実験期間中における版内温度差は、-1-+8℃ の間で変化していた.日中の舗装表面温度が40~ 46℃と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. ただし、版内温度差の推定には中央部、横目地部で の測定結果を利用して推定したものである.これは、 アクチュエータとコンクリート版間の局所的な発熱 により、載荷部での温度差のみが0℃を下回ること がなかったためである.

ひずみに関しては、埋め込みゲージでの測定結果 のみを示した.これは、表面貼付けゲージが載荷初 期に剥離し、測定不可能であったためである.なお、 図中に示した埋め込みゲージでの値は、静載荷結果 と同様に実測値を版底面および表面まで直線で外挿 して求めたものである.また、写真-1は、約430000 回載荷のときに載荷部直下で確認されたクラックを 撮影したものである.このクラックは、自由縁部か





写真-1 載荷点でのひび割れ発生状況

ら載荷板中央まで延びており、かつ版底面から表面 まで通っていた.また、このクラックは、埋め込み ゲージの埋設位置を横切って発生していたため、 ゲージでの測定結果に影響を及ぼすと考えられる. これに関して、ひずみは何れの埋め込みゲージにお いても約280000回載荷以降に大きな変動を示してい た.このことは、約430000回載荷のときに確認した ひび割れは、実際には約280000回の載荷で生じたこ とを示唆しているといえる.

(2) FEM解析結果

動載荷実験のFEM解析においては、図-1に示した 路盤K値を入力して行い実験結果と比較した.また、 通常のコンクリート舗装の設計では、路盤K値は設 計耐用期間内では変化しないとするため、K値が K75=8.5kgf/cm³から変化しない場合についても解析 し、K値が低下した場合との比較を行った.ただし、 ひび割れが生じたと考えられる約280000回載荷まで を比較の対象とした.これらを図-11~13に示す.

図-11より、底面ひずみは、FEM解析結果と良い 一致を示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、横目地で隣接する 版とダウエルバーで連結されているのみであるため、 検出される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⁹.このことより、図-11 は路盤面圧力と載荷荷重から算出したK値の低下は、 実状をよくあらわしており、繰返し載荷による路盤 K値の低下が確認できたといえる.これに対し、図-12の表面ひずみはFEM解析結果とは全く一致してい なかったこれは、圧縮側の埋め込みゲージが、何 らかの原因により載荷および温度差に伴う変形に追 従できなかったためと考えられる.

図-13は、図-1に示したK値の低下状況を入力して 解析した結果とK値が表-1内に示した値から変化し ないとした場合の解析結果との関係を示している. この図より、K値が低下した場合のひずみは、K値 が一定である場合に比べて大きいことがわかる.こ れは、路盤K値が変化しないとする従来の設計法で は、応力が小さく見積もられることを示している.

(3) 疲労解析結果

疲労解析結果を図-14,15および表-2に示す.図-14 および図-15は、それぞれ舗装要綱の疲労曲線およ び小梁川によるコンクリートの破壊確率に基づく疲 労曲線を用いた解析結果を示している.ただし、小 梁川による疲労曲線は、破壊確率が10%のときのも のである.また,何れの疲労解析も埋め込みゲージ での測定結果から求めたひずみにコンクリートの弾 性係数を乗じて算出した応力およびFEM解析結果を 用いて行った.特にFEMの結果を用いた疲労解析は, 路盤K値の低下の影響を把握するために,K値が変 化した場合と一定の場合について行った.また,表 -2は各疲労曲線を用いた解析結果において,疲労度 Fdが1に達した載荷回数と埋め込みゲージでの測定



図-13 K値の変化による解析ひずみの差

- 98 -

結果からひび割れが発生したと認められる約280000 回載荷での疲労度を示している.ただし、小梁川に よる疲労曲線を用いた解析結果のうち、K値が一定 の場合では、疲労度が1に達したときの載荷回数は 記入されていない.これは、図-15からわかるよう に、解析の範囲内では疲労度が1に達しなかったた めである.

図-14,15より疲労度の経時変化に注目すると、何 れの図においても版内温度差の上昇に伴って疲労度 は急激に上昇しているのがわかる.また、図-1に示 したように版内温度差の上昇によってK値が低下し ていたことから、FEM解析結果に注目すると、何れ の図においてもK値が低下したあとにFEMによる疲 労度に差が生じていた. 西澤ら¹⁰によると路盤K値 がコンクリート版のそり応力に及ぼす影響は小さい ことから、それぞれの図において生じた疲労度の差 はK値の低下による影響であるといえる.これらの ことから、コンクリート版の疲労度は、温度応力の 増加と路盤K値の低下によって上昇したものと考え られる.

表-2より、舗装要綱の疲労曲線を用いた解析では、 全ての解析結果において約120000回載荷のときに疲 労度が1に達していることがわかる.これは、約 120000回載荷のときにひび割れが生じることを示し ているが、実際には約280000回の載荷で疲労破壊が 生じていたことがわかっている. したがって、舗装 要綱の疲労曲線は実状を示しておらず、これを用い て設計した場合には、過大設計になると考えられる. また、小梁川による疲労曲線を用いた解析では、実 験から求めた応力と路盤K値が変化した場合のFEM での結果から算出した疲労度は約270000~280000回 載荷で1に達していた。これに対し、K値が一定の場 合の疲労解析結果では、載荷回数が400000回に達し た場合でも疲労度が1にならない.このことより、K 値の低下がコンクリート舗装の疲労破壊に及ぼす影 響は大きいといえる.

6. まとめ

本研究では、路盤K値の低下がコンクリート舗装 の疲労破壊に及ぼす影響について、K値は設計耐用 期間内では変化しないとする従来の設計法と比較す ることで検討した、得られた主な結果をまとめると 以下の通りである.

1) 路盤面圧力と載荷重から求めた路盤K値は、路盤



図-15 小梁川の疲労曲線による疲労解析結果

舗装要綱 小梁川 (P_f=10%) 載荷回数 載荷回数 Fd Fd K值低下 119516 1.00 277933 1.00 280000 280000 5.23 1.77 K值一定 126193 1.00 1.00 280000 3.14 0.64 280000 測定結果 122838 1.00 269180 1.00 280000 5.38 280000 2.17

表-2 疲労解析結果

面の経年変形による低下状況をよく表現しており、 繰返し載荷による路盤K値の低下が確認された.

- 2) 路盤K値の低下によって、コンクリート版内に発 生する応力が大きくなることが実験結果とFEM解 析結果から明らかになった.
- 3) 舗装要綱による疲労曲線を用いて疲労解析を行った場合、算出される疲労度は実際よりも大きくなることがわかった。
- 4) コンクリートの疲労度は、温度応力の増加と路盤 K値の低下によって上昇していたことがわかった。
 5) K値の低下がコンクリート舗装の疲労破壊に及ぼ

す影響は大きいことが明らかになった.

謝辞:データ解析にあたっては、東京農業大学農業 工学科4年生高橋香澄君の御協力を得た.記して感 謝の意を表するものである.

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書「舗装編」, 土木学会, 1996.
- 2) セメントコンクリート舗装要綱、日本道路協会、 pp. 12-13, 1984.
- 3) 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)
- 4) Takeuchi, Y., M. Koyanagawa, T. Nishizawa, E. Noda, K. Kubo : An experimental study on the properties of granular base course deformation in concrete pavement under cyclic loads, 4th International Workshop on Designtheories and their verification of concrete slabs for pavement and railroads, 1998 (印刷中)
- 5) 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,東北大学博士論文,1990

- 6) 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.
- Huang, Y.H.: Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc. 1993
- Vesic, A. S., S. K. Saxena, "Analysis of structural behavior of AASHO road test rigid pavements." NCHIRP Report 97 (1970)
- Koyanagawa, M., H. Yoneya, T. Fukuda : Flexural fatigue curve for concrete pavement slab design in consideration of probabilistic properties, Concrete library of JSCE, No.19, pp.131-144, 1992.
- 10) 西澤辰男、田村三知行、熊坂光史:ダウエルバーで連結されたプレキャストコンクリート舗装のトンネル内 道路への適用性、舗装工学論文集, Vol.2, pp.63-71, 1997.

INFLUENCE OF GRANULAR BASE COURSE DEFORMATION TO FATIGUE FAILURE OF CONCRETE PAVEMENT UNDER CYCLIC LOADS

Yasushi TAKEUCHI, Masashi KOYANAGAWA, Tatsuo NISHIZAWA and Makoto KIMURA

The static and dynamic loading tests were conducted on a test concrete pavement with actual size at the Public Works Research Institute in August, 1997. In this paper, the influence of base course deterioration due to cyclic loads on fatigue damage of the concrete pavement was examined. In the mechanical analysis of the concrete pavement, the plate FEM was utilized. And two types of fatigue curves were utilized in the fatigue analysis of the concrete pavement. One is taken from the manual for design and construction of concrete pavement and the other is one which had been developed by one of the authors based on failure probability. As a result of the examination, it was found that the accumulation of the fatigue analysis by the fatigue curve of the manual is not able to explain the real condition which was observed in the test pavements.