

FWDたわみによる コンクリート舗装の構造評価

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 埼玉県さいたま市沼影 2-12-36)

²非会員 工博 中華人民共和国重慶市公路局 (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)

本論文は、コンクリート舗装の構造評価に FWD(Falling Weight Deflectometer)を使用した研究について、過去の内容と問題点を述べ、特に温度勾配によって生じるコンクリート版のそり変形がたわみに与える影響が大きいことを示した。そこで、コンクリート版下の路盤支持力が低下した場合に、温度勾配によるたわみの変化が、荷重を載荷する位置によってその傾向が異なることを FEM の解析結果で示した。その解析結果からコンクリート版の載荷位置別の限界たわみ量を温度勾配、版厚および幅員から算出する式を導いた。また、ネットワークレベルでは限界たわみ量と荷重伝達率の限界値からコンクリート舗装を評価し、プロジェクトレベルでは構造評価式を用いて評価をする方法を示した。

Key Words : FWD, jointed concrete pavement, back-analysis, temperature gradient, critical deflection

1. はじめに

我が国の道路整備は、1954 年に始まる第 1 次道路整備 5 箇年計画から、1997 年に第 11 次が終了するまで、着実にその道路延長を伸ばしてきた。その延長は 1997 年現在で約 115 万 km に及び¹⁾、1998 年からは新たに新道路整備 5 箇年計画が開始された。しかし、建設された道路は、維持修繕を行わなければ、供用性が低下し、破壊することになる。我が国では、1980 年代中頃に舗装を効率的かつ経済的に管理するために不可欠である舗装マネジメントシステム(以下 PMS とする)の必要性が認識されはじめた²⁾が、欧米では既に 1970 年代から Haas らの著書³⁾にも見られるようにその重要性が認識されている。さらにアメリカでは 1993 年より PMS が義務付けられており⁴⁾、その重要性は明らかである。

PMS は、舗装の状態を適切に評価し、その評価結果から適切に長期または短期の維持修繕計画を検討できるものでなければならない。我が国では、アスファルト舗装を評価する場合、路面の破損状態から MCI や PSI などの評価値を算出してランク付けすることが日本道路協会が発行する“アスファルト舗装要綱”⁵⁾などに掲載されている。これらは、路面状況から数値化されるため、舗装

の構造的な評価は行うことはできない。そのため、舗装のたわみを測定することによって構造的な評価を行うことが諸外国で行われている⁶⁾。我が国でも、アスファルト舗装のたわみをフォーリング・ウェイト・デフレクトメータ(Falling Weight Deflectometer 以下 FWD とする)によって測定し、舗装の健全度を評価する方法⁷⁾がある。

一方、コンクリート舗装に関しても MCI や PSI による路面性状評価は、同様に行うことが可能だが、アスファルト舗装とは異なる構造および性質を持つため、舗装の構造的な評価を FWD の測定たわみから評価する場合、アスファルト舗装と同じ方法を用いることはできない。コンクリート舗装の構造的な評価をする場合、日本道路協会が発行した“道路維持修繕要綱”⁸⁾にコンクリート舗装版のひびわれ度とベンケルマンビームのたわみ量から修繕工法を導く方法が掲載されている。しかし、これは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。また、1996 年に土木学会で制定した“コンクリート標準示方書、舗装編”⁹⁾には、コンクリート舗装のたわみ量の限界値を示しているが、道路に関しては自由縁部に 90kN の荷重を与えた場合に限定されている。

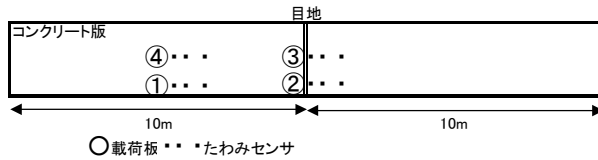


図-1 荷重載荷位置

そこで、本論文では、FWD の測定たわみ量からコンクリート舗装の構造評価を行う方法を既往の研究結果を用いてさらに検討した。特にコンクリート舗装のたわみに影響を与えるコンクリート版の温度勾配によるそり変形を考慮した限界たわみ量を導く方法を示し、さらに目地の荷重伝達率も含めてネットワークレベルおよびプロジェクトレベルの評価に適用できる方法を提案した。

2. 既往の研究

FWD の測定値を用いて、コンクリート舗装の構造評価を行う場合、以下に示す3手法が考えられる。

- ・たわみ評価指標による評価
- ・構造評価推定式による評価
- ・逆解析による評価

また、目地を有するコンクリート舗装の場合、荷重を載荷する位置でたわみ量が異なる。コンクリート版上に荷重を載荷する場合、図-1 に示すように以下の4箇所に分類される。

- 縦目地縁部の中央（自由縁部）
- 隅角部
- 横目地縁部の中央（横目地縁部）
- 中央部

は、FEM 解析の結果^{10),11)}から舗装版に最もクリティカルな応力が発生する載荷位置であり、は舗装版に最もクリティカルなたわみ量が生じる位置である。、はFWD による測定が容易にできる箇所である。

本章では、評価手法別に筆者らの研究も含めた既往の研究とその問題点について述べる。

(1) たわみ評価指標による評価

たわみ評価指標による評価とは、FWD のたわみから直接、舗装の健全度を評価するものである。前述した“道路維持修繕要綱”のベンケルマンビームのたわみや“コンクリート標準示方書、舗装編”のたわみの限界値がこれに相当する。また、アメリカでは、アンダーシーリングを必要とするコンクリート舗装版の隅角部のたわみを州毎に定めている¹²⁾。しかし、これらはコンクリート版の厚さについて明示されていないため、適切に評価できない可能性がある。

そこで、Tang ら¹³⁾は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をコンクリート版の厚さ別にFEM 解析を用いて導いた。この研究では、目地を有するコンクリート舗装版の自由縁部、隅角部、横断目地縁部のそれぞれに49kN の荷重を載荷した場合の載荷直下における限界たわみ量を示した。さらに、筆者ら¹⁴⁾は、コンクリート舗装版の中央部についても、路盤支持力が低下した場合とコンクリート版の強度が低下した場合のたわみ量を示した。しかし、これらの限界たわみ量は、コンクリート版の温度勾配の影響を考慮していないため、温度勾配がない場合にしか適用できないという問題がある。

(2) 構造評価推定式による評価

構造評価推定式による評価とは、FWD のたわみを計算式に代入し、その計算結果から舗装の健全度を評価するものである。AASHTO¹⁵⁾では、コンクリート舗装のオーバーレイを行う前にFWD によるたわみ測定を行うことを推奨しており、測定されたたわみ量は、式(1)に代入することによって、AREA を算出することとしている。

$$AREA = 6 \times \left[1 + 2 \left(\frac{d_{12}}{d_0} \right) + 2 \left(\frac{d_{24}}{d_0} \right) + \left(\frac{d_{36}}{d_0} \right) \right] \quad (1)$$

d_0 : 載荷直下のたわみ (インチ)

d_i : d_0 から 12, 24, 36 インチ離れた点のたわみ (インチ)

AREA は健全なコンクリートの場合、29 ~ 32 の範囲にある。さらに、チャート図を用いて、AREA と載荷直下のたわみから有効動的 k 値を、 k 値と AREA とコンクリート版厚からコンクリートの弾性係数を導いて、路盤とコンクリート版の評価を行うようにしている。ただし、FWD の荷重は9000 ポンド(40kN)としている。

しかしながら、コンクリート舗装の版厚が25cm 以上の場合は過去の実績より、荷重を98kN 以上とするのが良いと言われている¹⁶⁾。98kN 荷重のFWD 測定たわみを用いて構造評価を行うための式をFEM 解析値の回帰分析を行うことによって導いた結果がある^{17),18)}。この構造評価推定式は、コンクリート舗装の構造をWinkler モデル(バネ路盤)とBoussinesq モデル(弾性路盤)の2モデルで評価できる。Winkler モデルの場合、たわみからコンクリート舗装のコンクリート版の弾性係数と路盤支持力係数を、Boussinesq モデルの場合、コンクリート版と路盤の弾性係数を簡易に算出できる。さらに、これらの構造評価推定式は、荷重を載荷する位置で式が異なる。Winkler モデルで評価する場合、コンクリート版中央部における評価は式(2)、(3)で、横断目地縁部における評価は式(4)、(5)で行うことができる。Boussinesq モデルの場合、コンクリート版中央部における評価は式(6)、

(7)で、横断目地縁部における評価は式(8),(9)で行うことができる。

$$k = 9.8 \exp(4.56 + 25.0D_0^{-0.054} - 14.7SI^{0.303}) \quad (2)$$

$$E_c = 9.8 \times 10^3 \exp(5.61 + 0.01SI^{4.984}) kh^{-3.0} \quad (3)$$

$$k = 9.8 \exp(-21.63 + 17.62D_0 + 19.35SIJ^{-0.438}) LT^{-0.638} \quad (4)$$

$$E_c = 9.8 \times 10^3 \exp(-25.08 + 40.37D_0^{-0.028} + 0.016SIJ^{5.557}) k^{0.013} h^{-2.99} \quad (5)$$

$$E_0 = 98 \exp(3.60 + 24.03D_0^{-0.057} - 15.63SI^{0.222}) \quad (6)$$

$$E_c = 9.8 \exp(7.47 + 0.001SI^{6.763}) E_0 h^{-3.0} \quad (7)$$

$$E_0 = 98 \exp(-25.29 + 24.5D_0^{-0.056} + 12.38SIJ^{-0.491}) LT^{-0.0856} \quad (8)$$

$$E_c = 6.83 \times 10^6 \exp(-24.95 + 47.87D_0^{-0.055} + 0.002SIJ^{7.288}) E_0^{-0.947} h^{-2.944} \quad (9)$$

k : 直径 75cm 載荷板の路盤支持力係数 (MN/m³)

E_c : コンクリート版の弾性係数 (MPa)

E_0 : 路盤の弾性係数 (MPa)

D_0 : 載荷直下のたわみ (μm)

h : コンクリート版の厚さ (cm)

SI, SIJ, LT : 式(10)~(12)で算出

$$SI = (D_0 + D_{30} + D_{60} + D_{90}) / D_0 \quad (10)$$

$$SIJ = (D_{30} + D_{60} + D_{90}) / D_{30} \quad (11)$$

$$LT = D_{30} / D_0 \quad (12)$$

D_{30}, D_{60}, D_{90} : 載荷中心から 30, 60, 90cm 離れた位置のたわみ (μm)。

式(2)~(9)に示した構造評価推定式は、簡易にコンクリート版の強度や路盤支持力を逆解析するものであり、同様の研究は Yin ら¹⁹⁾によっても行われている。

さらに簡易にコンクリート舗装を評価する方法として、たわみの平均値およびたわみの傾きで評価する検討も行われている²⁰⁾。たわみの平均値 D_{av} は、FWD の各センサのたわみ D_i を合計し、センサ数 n で割った数値であり、式(13)で定義され、路床以下の品質を表す指標としている。たわみの傾き AD は FWD の 2 つのセンサの差であり、式(14)で定義され、コンクリート版、路盤の品質を表す指標としている。しかし、修繕が必要と判断される D_{av} や AD の具体的な数値については未検討である。

$$D_{av} = \sum_{i=1}^n D_i / n \quad (13)$$

$$AD = D_0 - D_{60} \quad (14)$$

構造評価式については AASHTO のように実用化されているものもあるが、いずれもコンクリート版の温度勾配の影響を考慮していないため、データの取り扱いには注意が必要である。

(3)逆解析による評価

FWD の測定たわみから、多層弾性理論や FEM を用いて、コンクリート版の弾性係数や路盤の弾性係数または支持力係数を逆解析した結果が報告されている^{21), 22)}。しかし、いずれの場合も FWD の測定を行った時刻やコンクリート版の上下の温度が異なると解析結果も異なる結果が得られている。これは、コンクリート版の上下で温度差があると、コンクリートの膨張量の差によって、版が反るためである。上に反り上がった部分で荷重を載荷すると、版が路盤と接していない可能性があるため、たわみが大きくなる²³⁾。このような場合、逆解析を行うと、路盤の強度は見かけ上小さく見積もられる。これは FEM による数値シミュレーションからもその影響を確認することができる²⁴⁾。

コンクリート版の上下の面で温度差がある場合、つまり温度勾配があるコンクリート版について、金井ら²⁵⁾は、舗装各層の減衰係数を考慮した動的逆解析を用いた方法を報告している。また、Shoukry ら²⁶⁾は、3次元有限要素法によって温度勾配が FWD のたわみと逆解析に与える影響について報告している。

厳密な解析を行う場合は、これらの逆解析手法は有効であると考えられる。しかし、解析費用(時間、手間)を考慮すると実務的な手法ではないと考えられる。

3. 温度勾配の影響

コンクリート版の上下の面に温度差があると版が反るため、コンクリート版内部には応力が発生する。この温度応力については、“セメントコンクリート舗装要綱”²⁷⁾付録のコンクリート版厚設計法でも考慮されているように周知の事実である。しかし、コンクリート版のたわみについては、温度勾配の影響を詳細に検討したものはあまり見られない。前章で述べたたわみ評価指標や構造評価推定式は、温度勾配を考慮していないため、温度勾配がある場合に適用するとコンクリート舗装を過大または過小に評価する可能性がある。

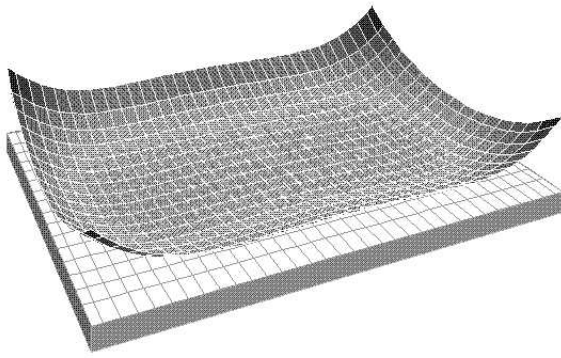


図-2 コンクリート版のそり変形（負の温度勾配）

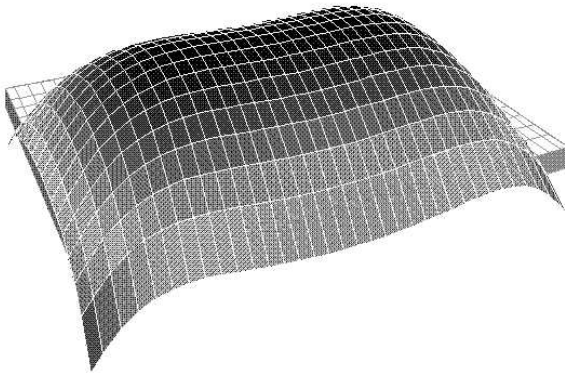


図-3 コンクリート版のそり変形（正の温度勾配）

コンクリート版に温度勾配がある場合、そり変形は、路盤支持力、コンクリート版の自重、目地の荷重伝達能力などの影響を受ける。そのため、荷重によるたわみ量は、コンクリート版の温度勾配および載荷位置によって複雑に変化する²⁸⁾。図-2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-3は、その逆の場合のそり変形の形状を、西澤²⁹⁾が開発した有限要素法プログラムを使用して図示したものである。なお、図-2は-0.5 /cm、図-3は1.0 /cmの温度勾配を20cm厚のコンクリート版に与えたものである。これらの図から、そり変形を起こしたコンクリート版でたわみを測定した場合、前述した～の載荷位置で、そりの影響を受ける程度や傾向が異なることは明らかである。

4．温度勾配の推定

FWDでコンクリート舗装のたわみを測定する場合、荷重の載荷位置と温度勾配は測定たわみに影響を与える。したがって、FWD試験時のコンクリート版の温度勾配は測定しておく必要がある。しかし、コンクリート版の温度勾配を測定するために、版の下面まで温度センサを設置する必要があり、作業に手間がかかる。そこで、コン

クリート版の温度勾配は、唐ら³⁰⁾が開発し、筆者ら³¹⁾が検証した式(15)を用いて推定することを推奨する。

$$\theta = \frac{0.062TS - 0.0727Y}{H^{0.165}} - \frac{1.167 + 0.236(TS - Y)}{H} \sin\left(\frac{X - 15}{12}\pi\right) \quad (15)$$

θ ：温度勾配（ /cm）

TS ：舗装の表面温度（ ）

Y ：日平均気温（ ）

X ：測定時刻（24時間制）

H ：コンクリート版の厚さ（cm）

式(15)を用いて、予想される日平均気温、舗装表面温度、測定時刻、コンクリート版の厚さから、FWDの試験中に温度勾配を推定することが可能である。

5．温度勾配を考慮したたわみ評価指標

FWDによるたわみの測定中には、温度勾配により発生するそり変形を考慮するために、コンクリート版の上下面の温度を実測するか、または式(15)を用いて推定する必要がある。筆者ら²⁸⁾は、健全なコンクリート版下の路盤支持力が低下した場合のたわみ量について検討し、版厚別および幅員別にたわみ量の温度勾配による補正式を導いた。この路盤支持力が低下した場合のたわみ量を限界たわみ量とした。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とした¹⁴⁾。これは、設計時の路盤支持力係数 K_{75} が“セメントコンクリート舗装要綱”²⁷⁾では、59MN/m³または78MN/m³としていることから、これらが半分程度に低下したときを限界と考えたものである。

図-1に示した4箇所の載荷位置において、コンクリート版および目地の荷重伝達機能が健全な場合、路盤支持力が低下したコンクリート舗装の載荷直下のたわみは、温度勾配によって図-4～6に示す傾向で変化する。図-4～6は温度勾配0 /cmのときのたわみを0として示した。図-4はコンクリート版の中央部、図-5は横断目地縁部および自由縁部、図-6は隅角部に荷重載荷した時の載荷直下のたわみの変化を示している。

これらの図に示した傾向は、コンクリート版の厚さや幅員が異なっても同様の傾向を示し、各測定位置における限界たわみ量を求めるための温度勾配による補正式は式(16)に示すようにすることができる。式(16)からFWD試験時の限界たわみ量を温度勾配から算出することができ、この限界たわみ量と測定値を比較することによって、コンクリート舗装の健全度を評価できる。

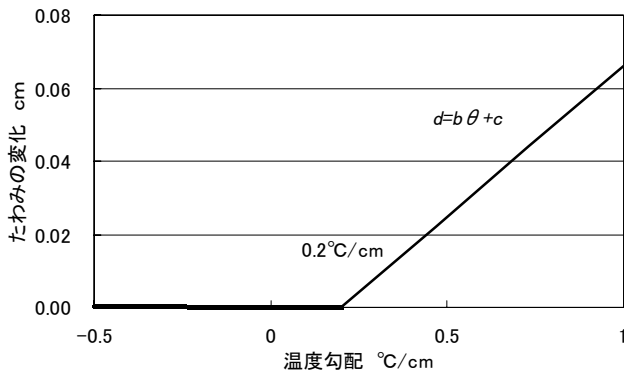


図-4 温度勾配とたわみの関係（中央部載荷）

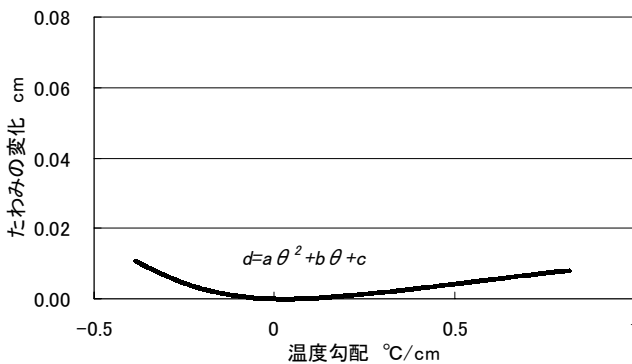


図-5 温度勾配とたわみの関係（目地縁部，自由縁部載荷）

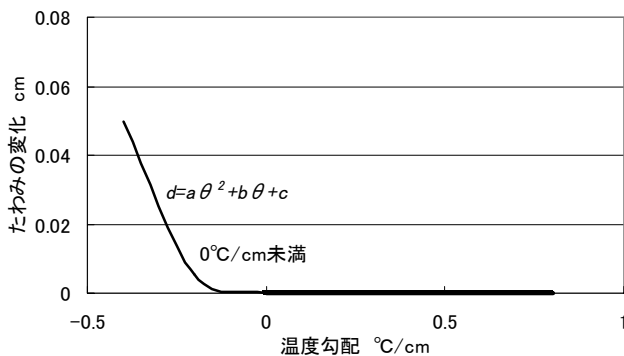


図-6 温度勾配とたわみの関係（隅角部載荷）

$$d = a\theta^2 + b\theta + c \quad (16)$$

d : 限界たわみ量(mm)

θ : 温度勾配(°/cm)

a, b, c : 載荷位置，版厚，幅員より決まる定数

ただし，コンクリート版中央部の限界たわみ量は，温度勾配が0.2 /cm 以下の場合， θ は0.2とし，隅角部では温度勾配が0 /cm 以上の場合， θ を0として算出する。

載荷位置別の a, b, c は，版厚 h (cm) と幅員 B (m) を用いて以下に示す式で算出する。これらの式は，版厚を20～30(cm)，幅員を3～5(m)の範囲で使用できる。

・コンクリート版中央部の場合

$$a = 0 \quad (17)$$

$$b = -0.015h + 0.2B - 0.048 \quad (18)$$

$$c = -0.0063h - 0.051B + 0.46 \quad (19)$$

・横断目地縁部の場合

$$a = 0.011h + 0.0013B + 0.052 \quad (20)$$

$$b = -0.0033h + 0.028B - 0.20 \quad (21)$$

$$c = -0.014h - 0.025B + 0.79 \quad (22)$$

・隅角部の場合

$$a = 0.12h + 1.3B - 4.9 \quad (23)$$

$$b = 0.00094h + 0.066B + 0.17 \quad (24)$$

$$c = -0.032h - 0.018B + 1.6 \quad (25)$$

・自由縁部の場合

$$a = 0.0054h + 0.089B - 0.2 \quad (26)$$

$$b = 0.01h - 0.051B - 0.097 \quad (27)$$

$$c = -0.026h + 0.0025B + 1.1 \quad (28)$$

式(16)および式(17)～(28)を用いることによって，コンクリート舗装の限界たわみを導くことができる。すなわち，コンクリート舗装のたわみ測定時刻を温度勾配の小さい夜間に限定しなくても評価することが可能である。

6. コンクリート舗装の構造評価

コンクリート舗装の破損は「路面性状に関する破損」と「構造に関する破損」に分類される⁸⁾。しかし，路面観察を行って，破損として目に見えるひびわれや段差などがある場合，FWD によるたわみ測定を行うまでもなく，修繕が必要であるのは明らかである。そこで以下に，コンクリート舗装の構造評価に，FWD を用いて非破壊で評価する方法について，荷重伝達率の限界値および評価手順を提案する。

(1) 荷重伝達率の限界値

目地を持つコンクリート舗装においては，通常の破損の種類は，ポンピング，段差，ひびわれであり，これらは全てエロージョンに起因する。交通荷重と供用期間の増加によって，路盤のエロージョンと目地破損が増加し，たわみ量が増加する。これは，路盤支持力と目地荷重伝達能力が低下することによって，力学的に説明できる。

“コンクリート標準示方書，舗装編”⁹⁾には，構造解析に用いる荷重伝達率は，ダウエルバーで補強した場合が70～90%とある。また，FEM で目地部のせん断バネ定数を変化させることによって，応力伝達率とたわみ伝達率を解析した結果は，設計時のたわみ伝達率は約75%であることを示した¹⁴⁾。さらに，アメリカではたわみ伝達率

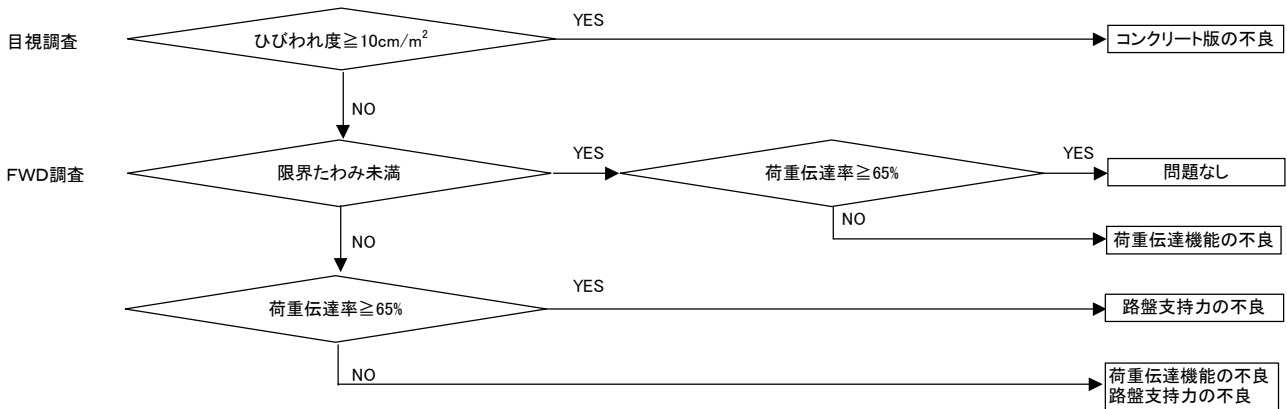


図-7 コンクリート舗装の評価の流れ

が65%未満の場合、アンダーシーリングを行うとする州もある³²⁾。本論文では、これらを考慮し、目地の荷重伝達機能が低下し、荷重伝達率が65%を下回った場合に修繕が必要であると考えた。

(2) 評価手順

既設のコンクリート舗装を調査する場合、その目的は2つに分けられる。1つはネットワークレベルの調査ともう1つはプロジェクトレベルの調査である。ネットワークレベルの調査は、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し、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である。

a) ネットワークレベルの調査

ネットワークレベルの調査の場合、アスファルト舗装では区間を代表するたわみで評価することができるが、通常のコンクリート舗装では、目地毎に舗装版が区切られるので、区間代表値で評価することは困難であると考えられる。したがって、コンクリート版の全枚数を調査することが理想的である。しかし、全ての中央部、横断目地縁部、自由縁部、隅角部を調査すると莫大な数量となるので、目的を明確にしてから調査を行い、調査を省力化する必要がある。したがって、FWDによる調査に先立ち、目視調査によりひびわれの存在を確認しておくことを推奨する。

コンクリート版のひびわれは、コンクリート舗装の破壊を意味し、その原因は交通荷重の繰返し载荷による疲労破壊や路盤支持力不足による。したがって、ひびわれたコンクリート版は、直ちに修繕する必要がある。ひびわれたコンクリート版の修繕には、バーステッチ工法、部分打換え、版の全面打換え等があるが、本論文では、既設コンクリートにコンクリート薄層オーバーレイを行う前に版の全面打換えを必要とする場合の判定基準³³⁾であるひびわれ度 10cm/m^2 をコンクリート版が不良であると考えた。したがって、ひびわれ度が 10cm/m^2 以上の場

合、版の全面打換えを行うべきと考えられる。ただし、詳細な修繕工法を検討するには、プロジェクトレベルの調査を行う必要がある。

ひびわれ度が 10cm/m^2 未満のコンクリート版の場合は、FWDによって、たわみを測定し、コンクリート版以外の健全度を限界たわみ量によって評価する。前述したように限界たわみ量は、载荷位置4箇所でも評価することが可能である。しかし、本論文ではFWDの測定が容易であり、荷重伝達機能の評価も可能な横断目地縁部での測定を推奨する。コンクリート版に温度勾配があっても前述した式(16)および式(20)～(22)を用いて限界たわみ量を導くことができるので、限界たわみ量と荷重伝達率から路盤支持力が不良か荷重伝達機能が不良かを判定する。

以上をまとめると図-7に示すようになる。すなわち、目視調査によって、ひびわれ度を調査し、コンクリート版の良否を判断し、たわみと荷重伝達率から路盤と目地の良否を判断する。図に示した判断から修繕工法を検討する場合、その代表的な工法を表-1に示す。ネットワークレベルの調査から修繕費用を概算する場合、表-1に示す工法を用いて算出することが可能である。

表-1 修繕工法の例

判断	修繕工法
コンクリート版の不良	版の打換え
荷重伝達機能の不良	バーステッチ
路盤支持力の不良	アンダーシーリング

b) プロジェクトレベルの調査

ネットワークレベルの調査によって、健全ではないと評価された舗装版については、プロジェクトレベルの調査を行う。プロジェクトレベルの調査では、開削調査が一般的に行われているが、FWDのたわみ測定結果を用いてもコンクリート舗装の詳細な評価が可能である。FWDでプロジェクトレベルの調査を行う载荷位置は、コンクリート版の中央部および横断目地縁部を推奨する。これ

らの載荷位置での測定値によって、コンクリート版の弾性係数、路盤の支持力、荷重伝達率を前述した構造評価式(2)～(12)によって導く。ただし、構造評価式で評価する場合、コンクリート版に温度勾配がない時にたわみ測定を行う必要がある。しかしながら、温度勾配がおよそ ± 0.1 /cm の範囲にあれば、たわみに対する温度勾配の影響は少ないので、夜間に測定を行えば、測定たわみは構造評価式に適用することが可能である。

構造評価式によって、コンクリート版の弾性係数、路盤支持力、荷重伝達率がわかれば、これらの値から修繕工法を詳細に検討することが可能である。

7. まとめ

本論文をまとめると以下のとおりである。

- ・コンクリート舗装の構造評価にたわみを使用した既往の研究について述べ、問題点を示した。
- ・コンクリート版の温度勾配がたわみに与える影響と温度勾配推定式を示した。
- ・ネットワークレベルの評価に適用できるコンクリート版の温度勾配を考慮した限界たわみ量を温度勾配と版厚と幅員から導く式を示した。
- ・コンクリート舗装の構造評価における荷重伝達率の限界値、評価手順および修繕工法を示した。
- ・ネットワークレベルでは、温度勾配を考慮して評価できるので、調査時刻は限定されないが、プロジェクトレベルの評価に構造評価式を適用する場合、温度勾配が少ない夜間に測定されたたわみを使用できる。

8. おわりに

本論文では、コンクリート舗装の構造評価について、既往の研究をまとめるとともに温度勾配を考慮した限界たわみ量、荷重伝達率の限界値などを利用して、コンクリート舗装の構造評価を行う方法を示した。しかしながら、構造評価式については、温度勾配の影響を考慮していないので、今後の課題として、温度勾配を考慮した構造評価式について検討を行う必要があると考える。

また、本論文で示した構造評価式や限界たわみ量などについて、検証が行われていないという問題もある。しかしながら、FWD 試験を行う場合、既にコンクリート版が破損していることが多く、本論文で述べた支持力低下による限界たわみ量の評価が適用できない。したがって、FWD 試験はコンクリート版が破壊した後に行うのではなく、破壊する前に行うことで健全度を評価することが大切であると考え。つまり、現在 FWD 試験はプロジ

ェクトレベルの調査で行われることが多いが、ネットワークレベルの調査で行うことも重要であると考え。

謝辞：本論文で使用した FEM 解析プログラムは、石川工業高等専門学校助教授・西澤辰男先生が開発されたものであり、プログラムの使用方法や解析方法についてご指導を賜りましたこと厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省道路局監修：道路統計年報 - 1998 年版 - , 全国道路利用者会議, 1998.
- 2) 菊川滋：日本の道路網への舗装管理システム(PMS)の適用について, 道路, 昭和 60 年 12 月号, pp.64-69, 1985.
- 3) Haas, R. and Hudson, W. R.: Pavement Management Systems, McGRAWHILL, 1978.
- 4) 笠原篤：舗装マネジメントシステム, 土木学会論文集, No.478/ -21, pp.1-12, 1993.
- 5) (社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱, 1992.
- 6) アスファルト舗装技術研究グループ：舗装の強化と維持に関する新技術, アスファルト, Vol.40, No.195, pp.46-66, 1998.
- 7) (財)道路保全技術センター：FWD 運用マニュアル(案), 1996.
- 8) (社)日本道路協会：道路維持修繕要綱, 1978.
- 9) (社)土木学会：コンクリート標準示方書, 舗装編, 1996.
- 10) Tang, B. : Study on deflection criteria for design of rigid pavement, Journal of China Civil Engineering, Vol.26, No.3, pp.32-39, 1993.
- 11) Y. H. Huang : Pavement Analysis and Design, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1993.
- 12) Taha, R., Selin, A., Hasan, S. and Lunde, B. : Evaluation of Highway Undersealing Practice of PCC Pavements, Pre-print of the 73rd annual meeting of TRB, Washington D.C., 1994.
- 13) Tang, B., Maruyama, T. and Takahashi, O. : Deflection Criteria for Concrete Pavement Structural Design and Evaluation, 土木学会論文集, No.592/ -39, pp.197-204, 1998.
- 14) 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, 土木学会舗装工学論文集, 第3巻, pp.85-92, 1998.
- 15) AASHTO : AASHTO Guide for Design of Pavement Structure, 1993.
- 16) 土木学会地盤工学委員会舗装工学小委員会コンクリート舗装 WG：コンクリート舗装 FWD 運用の手引き(案), 舗装工学研究小委員会報告書, 2000.

- 17) 真鍋和則, 唐伯明, 丸山暉彦: FEM 解析に基づいたコンクリート舗装構造評価推定式の提案, 土木学会舗装工学論文集, 第2巻, pp.73-80, 1997.
- 18) Maruyama, T., Tang, B., Manabe, K. and Koseki, H. : Jointed Concrete Pavement Back-analysis Using a Simple Regression Approach, 5th International Conference on the Bearing Capacity of Road and Airfields, Norway, 1998.
- 19) Yin, J., and Hachiya, Y. : Back-calculation for Structural Parameters of Pavement Slab on Winkler and Elastic Solid Subgrade, 土木学会論文集, No.606/-41, pp.165-169, 1998.
- 20) 土木学会地盤工学委員会舗装工学小委員会コンクリート舗装 WG: 新設のコンクリート舗装における FWD たわみの特性, 舗装工学研究小委員会報告書, 2000.
- 21) 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 の逆解析に及ぼす温度の影響, 土木学会第 51 回年次学術講演概要集第 5 部, pp.42-43, 1996.
- 22) 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 回年次学術講演概要集第 5 部, pp.88-89, 1997.
- 23) 野田悦郎, 唐伯明, 東滋夫: コンクリート舗装における FWD たわみに及ぼす温度の影響, 土木学会第 51 回年次学術講演概要集第 5 部, pp.44-45, 1996.
- 24) FWD 研究会: FWD に関する研究(その2), pp.212-215, 1995.
- 25) 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 回年次学術講演概要集第 5 部, pp.402-403, 1999.
- 26) 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.
- 27) (社)日本道路協会: セメントコンクリート舗装要綱, 1984.
- 28) 小関裕二, 唐伯明, 丸山暉彦: 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, 土木学会舗装工学論文集, 第 5 巻, pp.86-95, 2000.
- 29) CP-コンクリート舗装構造解析プログラムパッケージ Windows 版(<http://www.plan.civil.tohoku.ac.jp/pave/hosoml/download.html>)
- 30) 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.
- 31) 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 回年次学術講演概要集第 5 部, pp.92-93, 1998.
- 32) Taha, R., Selin, A., Hasan, S. and Lunde, B. : Evaluation of Highway Undersealing Practice of PCC Pavements, Pre-print of the 73rd annual meeting of TRB, Washington D.C., 1994.
- 33) 東北地建土木工事合理化委員会, 舗装技術研究会: コンクリート薄層オーバーレイ設計・施工指針(案), 1997.

CONCRETE PAVEMENT STRUCTURAL EVALUATION USING FWD DEFLECTION

Hiroji KOSEKI, Boming TANG and Teruhiko MARUYAMA

This paper describes a method for structural evaluation of concrete pavements using FWD deflections. The results obtained in the previous studies were reviewed in this paper. Especially, temperature gradient of concrete slabs affects FWD deflections of concrete pavements. Therefore, we examined the influence of the temperature gradient and loading positions on the concrete slab. On basis of these factors, structural evaluation, critical deflections of lower modulus of base course reaction were proposed. Furthermore, structural evaluation methods of concrete pavements were proposed for the network level and the project level.