

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

真鍋 和則¹・唐 伯明²・丸山 暉彦³

¹非会員 長岡技術科学大学大学院修士課程 建設工学専攻(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

²正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 環境・建設系(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

³正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

FWDによるコンクリート舗装の構造評価は、FWD測定たわみから、路盤支持力係数 K とコンクリート版の弾性係数 E_c を推定することによって行われている。その推定方法として、いくつかの方法があるが、測定データをその場で直ちに評価できないものであったり、解析に要する時間が非常に長いものが多い。本研究では、コンクリート版をFEMモデル化し、その数値解析結果に重回帰分析を適用して、コンクリート版の中央部、目地縁部および隅角部における路盤支持力係数と弾性係数に関する推定式を作成した。また、実測データを用いて、推定式の実用性を検討した。

Key Words : FWD, concrete pavement, radius of relative stiffness, load spreadability index

1. はじめに

道路舗装の非破壊評価は舗装管理システム(PMS)の発展に伴い、ますます重視されている。非破壊試験を用いれば道路舗装構造を連続的に測定することができるため、FWD(Falling Weight Deflectometer)をはじめ、これらの装置を利用して道路舗装構造を評価することが注目されている。FWDによる舗装の構造評価は、舗装表面に実際の交通荷重に類似した衝撃荷重を加え、その周辺の表面たわみを測定し、測定されたたわみに基づいて舗装の健全度を評価するものである¹⁾。この評価方法としては、多層弾性理論およびFEMに基づいて、測定たわみから舗装を構成する各層の弾性係数を求めるもの、いわゆる逆解析によるものが主体であり、最小二乗法などの最適法、データベース検索法、GA法および拡張ベイズ法などが挙げられる^{2,3)}。しかしながら、これらの解析方法は、測定後、直ちに評価できなかったり、解析に要する時間が非常に長いものが多い。また、これらはアスファルト舗装を対象としたものがほとんどであり、コンクリート舗装を対象としたものが少ない。一方、コンクリート舗装の構造評価

方法に関する研究もいくつか成されているが、版中央部の評価方法だけであり^{4,5)}、ひび割れなどで、最も重視されている目地縁部、隅角部に関する構造評価方法に関する研究は少ない⁶⁾。そこで本研究では、コンクリート版をFEMモデル化し、その数値解析結果に重回帰分析を適用して、コンクリート版中央部、重要視されている目地縁部、隅角部における路盤支持力係数 K と弾性係数 E_c についての構造評価推定式を作成した。また、実測データを用いて、作成した推定式の実用性を検討した。

2. FEMによるたわみ解析

(1) コンクリート版のFEMモデル化

FEM解析に際して、コンクリート版を平板とし、路盤はWinkler路盤としてモデル化した。図-1は本研究のFEM解析に用いたコンクリート版のモデルである。版の大きさは、一般的な $800 \times 400(\text{cm})$ 、要素分割は $30 \times 30(\text{cm})$ とした。目地は、せん断ばね係数のみを考慮した⁷⁾。また、載荷位置は中央部、目地縁部および隅角部である。

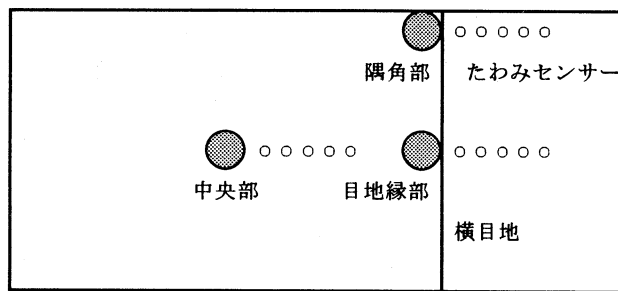


図-1 解析モデル

(2) 解析条件

重回帰分析に必要な計算たわみを得るため、通常の道路舗装の条件を考慮し、表-1 に示すパラメータの全ての組合わせについて解析を行った。中央部は 168 ケース、目地縁部と隅角部は 504 ケースの計算となる。

表-1 解析条件

載荷荷重(tf)	10
載荷荷重半径(cm)	15
コンクリート版厚(cm)	23,25,28,30,33,35
コンクリート版弾性係数(10^5 kgf/cm^2)	2.5,3.0,3.5,4.0
ポアソン比	0.15
目地のせん断ばね係数(kgf/cm^2)	$10^3, 10^4, 10^5$
路盤支持力係数(kgf/cm^3)	3,5,7,10,12,15,17

(3) 解析結果

たわみから路盤支持力係数と弾性係数に関する構造評価推定式を得るためには、FEM によって得られた計算たわみに路盤支持力係数、版厚、コンクリート版の弾性係数および目地のせん断ばね係数が、どのような影響を及ぼすかを明確にし、推定式に用いる因子を決定する必要がある。そこで、図-2 から図-5 に、それぞれが計算たわみに及ぼす影響を示した。これらの図は、版厚 28cm、コンクリート版の弾性係数 $3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、路盤支持力係数 10 kgf/cm^3 および目地のせん断ばね係数 10^4 kgf/cm^2 を基本とし、各々を変化させて求めたものである。

①全体的に見て、路盤支持力係数、版厚および弾性係数が大きくなれば、たわみは小さくなる事が分かる。路盤支持力係数の変化量に対するたわみの変化量は大きい、弾性係数の変化量に対するたわみの変化量は小さい。また、図-2 から、路盤支持力係数とたわみとは、非線型の関係になっていることが分かる。

②目地縁部、隅角部ともに、目地のせん断ばね係

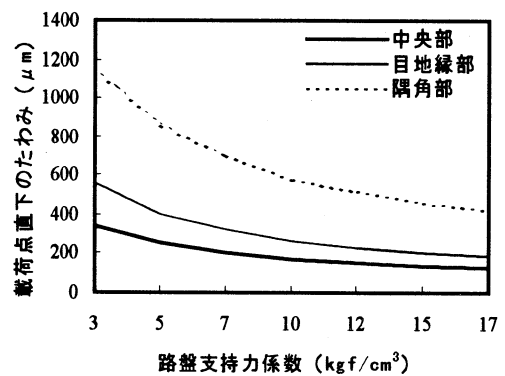


図-2 路盤支持力係数と載荷点直下のたわみの関係

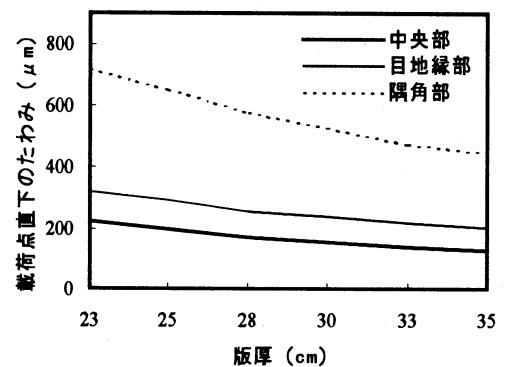


図-3 版厚と載荷点直下のたわみの関係

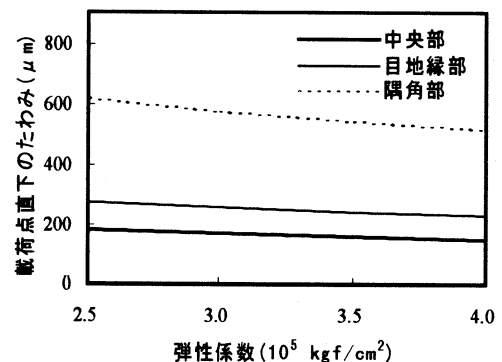


図-4 弾性係数と載荷点直下のたわみの関係

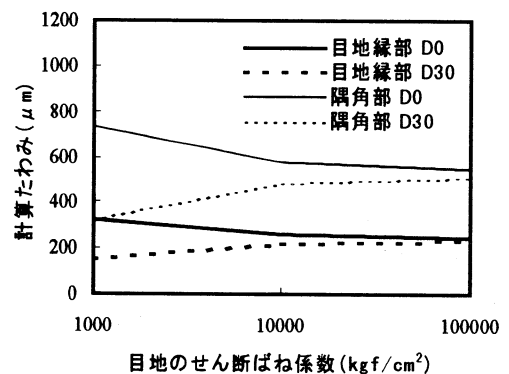


図-5 目地のせん断ばね係数と計算たわみの関係

数が大きいほど、載荷側の D_0 と非載荷側の D_{30} との差が小さくなり、たわみを効率よく伝達している。また、隅角部よりも目地縁部の方が、たわみを効率よく伝達していることが分かる。

3. 剛比半径と荷重拡散係数の関係

(1) 剛比半径について

コンクリート舗装におけるたわみの大きさや分布範囲は、コンクリート版の剛性や路盤支持力係数によって、大きく左右される。たわみの分布範囲は式(1)に示す剛比半径 $L(\text{cm})$ によって求められる。剛比半径とは、コンクリート版に荷重が作用した際に、たわみがどれくらいの範囲にまで広がるかという目安を、コンクリート版の弾性係数 E_c 、路盤支持力係数 K 、版厚 H およびポアソン比 ν を用いて算出する距離のことをいう。

(2) 荷重拡散係数について

FWD たわみから舗装の構造評価を行う際に用いる、たわみ曲線から得られる荷重拡散係数 A とは、コンクリート版に荷重が作用した際に、たわみがどれくらいの範囲にまで広がるかという目安を、たわみを用いて表す係数のことをいい、式(2)から式(5)に示す。これは、剛比半径と同様に、たわみの分布範囲を表す目安となっている。現在、我が国で用いられている FWD 装置は約 20 台であり、表-2 に示すように、それぞれの測定可能なセンサー位置については様々である。これら全ての FWD 装置に対応するのであれば、全ての FWD 装置における計測可能なセンサー位置のたわみについて重回帰分析する必要がある、推定式の数が非常に多くなる。この問題を解消するために、本研究で使用するたわみの位置は、我が国の保有する FWD 装置において、ほとんどが計測可能である D_0 、 D_{30} 、 D_{60} 、 D_{90} 、 D_{120} 、 D_{150} の 6 点に限定した。また、計測範囲も FWD 装置によって異なるため、中央部については D_0 、 D_{30} 、 D_{60} 、 D_{90} 、 D_{120} 、 D_{150} を用いる式(2)の A_{16} および D_0 、 D_{30} 、 D_{60} 、 D_{90} を用いる式(3)の A_{14} 、目地縁部、隅角部については D_{30} 、 D_{60} 、 D_{90} 、 D_{120} 、 D_{150} を用いる式(4)の A_{26} および D_{30} 、 D_{60} 、 D_{90} を用いる式(5)の A_{24} について検討した。なお、目地縁部、隅角部の荷重拡散係数については D_0 を用いていない。これは目地部分で、載荷側のたわみと、非載荷側のたわみが不連続となり、剛比半径との関係が得られなくなるためである。

$$L = \sqrt[4]{\frac{EcH^3}{12(1-\nu^2)K}} \quad (1)$$

$$A_{16} = \frac{D_0 + D_{30} + D_{60} + D_{90} + D_{120} + D_{150}}{D_0} \quad (2)$$

$$A_{14} = \frac{D_0 + D_{30} + D_{60} + D_{90}}{D_0} \quad (3)$$

$$A_{26} = \frac{D_{30} + D_{60} + D_{90} + D_{120} + D_{150}}{D_{30}} \quad (4)$$

$$A_{24} = \frac{D_{30} + D_{60} + D_{90}}{D_{30}} \quad (5)$$

- D_0 : 載荷点直下のたわみ (μm)
- D_{30} : D_0 から 30cm 離れた点のたわみ (μm)
- D_{60} : D_0 から 60cm 離れた点のたわみ (μm)
- D_{90} : D_0 から 90cm 離れた点のたわみ (μm)
- D_{120} : D_0 から 120cm 離れた点のたわみ (μm)
- D_{150} : D_0 から 150cm 離れた点のたわみ (μm)

表 - 2 同一機種(KUAB)FWD 装置のセンサー位置(cm)

機関 1	0,20,45,60,90,150,250
機関 2	0,20,30,45,60,75,90,120,150
機関 3	0,20,30,45,60,75,90,120,150,200

(3) 両者の関係

剛比半径と荷重拡散係数の両者は、たわみの分布範囲を表すものとして何らかの関係があると考えられる。そこで、中央部、目地縁部および隅角部における剛比半径と荷重拡散係数の関係を図-6 から図-8 に示す。これより、剛比半径と荷重拡散係数とは 1 対 1 に対応していることが分かる。すなわち、測定たわみを用いて算出する荷重拡散係数から、剛比半径を求めることができ、逆解析を用いないコンクリート舗装の構造評価が可能になる。

4. 重回帰分析

FEM によって求めた計算たわみから、中央部、目地縁部および隅角部における路盤支持力係数 K と弾性係数 E_c に関する推定式を提案するために、推定式で用いる因子について説明する。コンクリート版のたわみの大きさや、分布範囲は剛比半径に大きく左右される。そこで、剛比半径と相関の高い荷重拡散係数、最も確実に測定される D_0 お

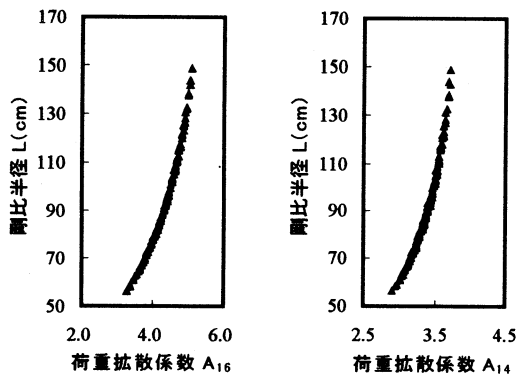


図 - 6 中央部の荷重拡散係数と剛比半径の関係

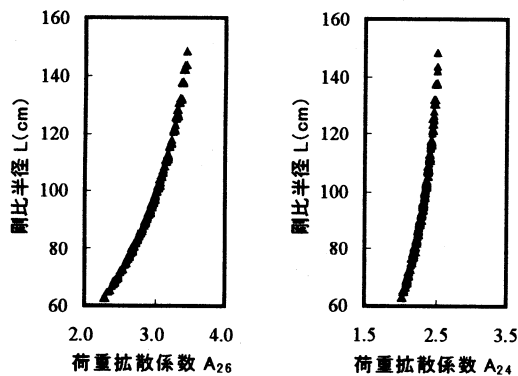


図 - 7 目地縁部の荷重拡散係数と剛比半径の関係

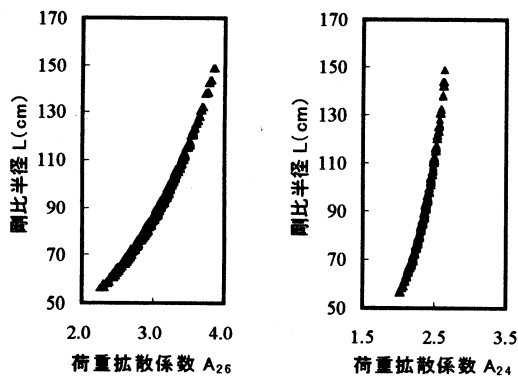


図 - 8 隅角部の荷重拡散係数と剛比半径の関係

よび目地縁部推定式，隅角部推定式に関しては，式(6)に示す荷重伝達率 LT も因子として用いた。

$$LT = \frac{D_{30}}{D_0} \quad (6)$$

以上より，FEM 解析によって得られた計算たわみから作成した中央部推定式を式(7)から式(10)，目地縁部推定式を式(11)から式(14)，隅角部推定式を式(15)から式(18)に示す。また，各推定式のデータ数，誤差および相関係数を表-3に示す。

$$K = \exp(3.93 + 24.30D_0^{-0.056} - 15.34A_{16}^{0.180}) \quad (7)$$

$$Ec = 10^5 \left\{ \frac{\exp(5.20 + 0.11A_{16}^{2.400})}{H^{3.000}} K \right\} \quad (8)$$

$$K = \exp(4.56 + 25.00D_0^{-0.054} - 14.70A_{14}^{0.303}) \quad (9)$$

$$Ec = 10^5 \left\{ \frac{\exp(5.61 + 0.01A_{14}^{4.984})}{H^{3.000}} K \right\} \quad (10)$$

$$K = \frac{\exp(-17.52 + 17.39D_0^{-0.103} + 13.56A_{26}^{-0.237})}{1 + LT} \quad (11)$$

$$Ec = 10^5 \left\{ \frac{\exp(-24.22 + 41.13D_0^{-0.031} + 0.02A_{26}^{3.773})}{H^{2.921}(1 + LT)} K^{-0.086} \right\} \quad (12)$$

$$K = \frac{\exp(-16.46 + 17.80D_0^{-0.096} + 13.72A_{24}^{-0.525})}{1 + LT} \quad (13)$$

$$Ec = 10^5 \left\{ \frac{\exp(-23.60 + 41.86D_0^{-0.035} + 0.002A_{24}^{7.847})}{H^{2.916}(1 + LT)} K^{-0.214} \right\} \quad (14)$$

$$K = \frac{\exp(-26.70 + 20.46D_0^{-0.093} + 21.37A_{26}^{-0.144})}{1 + LT} \quad (15)$$

$$Ec = 10^5 \left\{ \frac{\exp(-26.40 + 38.61D_0^{-0.021} + 0.65A_{26}^{1.538})}{H^{2.999}(1 + LT)} K^{-0.300} \right\} \quad (16)$$

$$K = \frac{\exp(-26.27 + 21.05D_0^{-0.087} + 21.91A_{24}^{-0.298})}{1 + LT} \quad (17)$$

$$Ec = 10^5 \left\{ \frac{\exp(-28.46 + 41.90D_0^{-0.021} + 0.15A_{24}^{3.530})}{H^{3.001}(1 + LT)} K^{-0.233} \right\} \quad (18)$$

表 - 3 各推定式の諸値

式番号	データ数	誤差	相関係数
(7)	168	0.232	0.998
(8)	168	8400	0.978
(9)	168	0.311	0.996
(10)	168	12800	0.948
(11)	504	0.179	0.999
(12)	504	9700	0.970
(13)	504	0.238	0.998
(14)	504	10200	0.967
(15)	504	0.371	0.967
(16)	504	3200	0.997
(17)	504	0.398	0.993
(18)	504	3500	0.996

5. 推定式の実用性検討

式(7)から式(18)に示す推定式は、全て FEM 解析によって得られたたわみを重回帰分析したものである。実測データを代入して確からしい路盤支持力係数、弾性係数が得られるかどうかは定かでない。そこで、コンクリート舗装における FWD 実測データを用いて、各載荷位置における推定式の実用性を検討した。本研究では、載荷荷重を 10tf で FEM 解析したたわみを用いて重回帰分析を行っているため、実際の様々な荷重により得られたたわみとの大きさに誤差が生ずる。そこで、理論上、載荷荷重とたわみとは線形関係があるため、載荷荷重 10tf に換算したたわみを用いた。

(1) 中央部推定式の実用性

中央部推定式の実用性を検討するため、実測データとして、栗橋テストピットのデータを用いた³⁾。舗装構造は、版厚 32.2cm、上層路盤(M-30)11.0cm および下層路盤(C-40)11.0cm である。図-9-(a)、(b)に測定時刻と 10tf 測定たわみの関係を、図-10 に測定時刻と温度勾配の関係を示す。冬場(1 月 18 日)に比べ、夏場(8 月 9 日)の方が、全体的にたわみが大きくなっている。また、夏場、冬場に関わらず、日中で最も気温の高い昼過ぎ、つまり、14

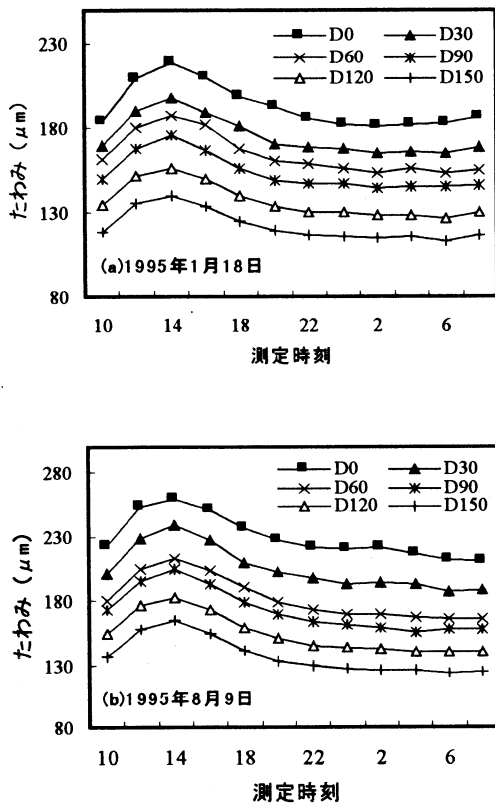


図 - 9 中央部の測定時刻と測定たわみの関係

時ごろにたわみが最も大きくなっている。これらは、温度勾配によるコンクリート版のそりに影響されていると考えられる。測定時刻と中央部推定式の式(7)、式(8)によって算出された路盤支持力係数、弾性係数の関係を図-11、図-12 に示す。図-11 より、推定式によれば、季節に関係なく、路盤支持力係数は約 3.5~5.5kgf/cm³の範囲内にあり、一般的な値が得られた。図-12 より、冬場における弾性係数は一般的な値よりも大きい値が得られた。逆に、夏場は一般的な値に近いものとなった。温度勾配が高い時刻の路盤支持力係数、弾性係数の値は、季節に関わらず小さくなるのが分かつ

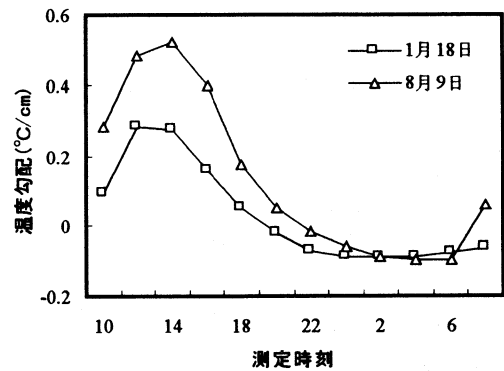


図 - 10 中央部の測定時刻と温度勾配の関係

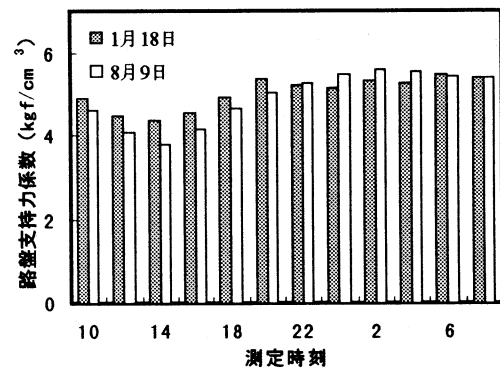


図 - 11 中央部の測定時刻と路盤支持力係数の関係

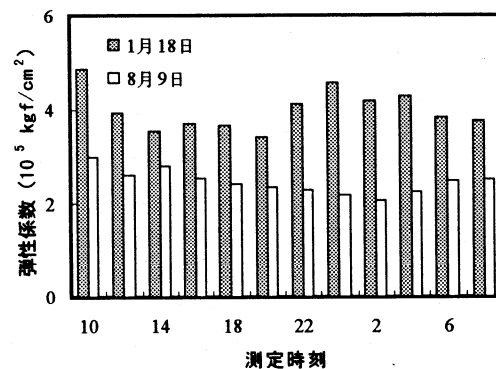


図 - 12 中央部の測定時刻と弾性係数の関係

た。推定結果の妥当性を確認するため、1月18日22時の測定たわみから求めた路盤支持力係数と弾性係数を用いてFEM解析した計算たわみを、測定たわみと比較したものが図-13である。図に示すように、両者はほぼ同じ結果となった。

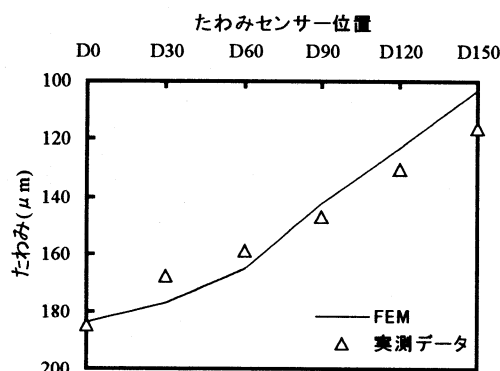


図-13 FEM解析したたわみと実測たわみとの比較

(2) 目地縁部推定式の実用性検討

目地縁部推定式の実用性を検討するため、実測データとして、富山・高岡バイパスのデータを用いた⁹⁾。舗装構造を図-14に示す。載荷荷重5tfのFWD測定データを式(13)により解析した結果を表-4に示す。表-4より、荷重伝達率および推定路盤支持力係数は、上り線の方が大きい結果となった。弾性係数は 10^6 kgf/cm^2 を超えるものがほとんどであり、大きすぎる値が得られた。

上り線(1983年施工)	下り線(1973年施工)
コンクリート版(30cm)	コンクリート版(25cm)
密粒アスコン(4cm)	密粒アスコン(4cm)
粒調碎石(15cm)	切込碎石(25cm)
路床	路床

図-14 富山・高岡バイパス舗装断面

表-4 富山・高岡バイパス目地縁部解析結果

		平均値	最大値	最小値
載荷点直下のたわみ (μm)	上り	113	131	97
	下り	148	192	94
荷重伝達率	上り	0.91	1.00	0.78
	下り	0.86	0.96	0.69
推定路盤支持力係数 (kgf/cm ³)	上り	6.38	7.62	5.19
	下り	4.98	7.19	2.92

(3) 隅角部推定式の実用性検討

ここでは、道路舗装における隅角部のFWDデータが少ないため、FWD研究会の第4回FWD共通試験羽田空港データを用いた²⁾。舗装構造は、版厚36.6cm、路盤(切込碎石路盤)が25cmである。空港舗装はその面積の広さから、縦目地、横目地を含む舗装である。しかしながら、本研究でモデル化したコンクリート版は、縦方向が自由縁部の一般的な道路舗装をモデル化したものである。そこで、推定式で用いる測定たわみの縦目地荷重伝達率に対する修正を式(19)のように行った²⁾。

$$\text{修正たわみ} = \text{実測たわみ} \times (1 + LT_{\text{縦目地}}) \quad (19)$$

図-15に測定時刻と測定たわみ(5tf FWD)の関係を、図-16に測定時刻と温度勾配の関係を示す。日中の最も気温の高い13時ごろにたわみが最も小さくなっている。これは、温度勾配によるコンクリート版のそりに影響されていると考えられる。温度勾配が大きくなると、コンクリート版はアーチ状に変形する。そのため目地縁部、隅角部は路盤に接触する部分となり、特に隅角部は強く路盤に押し付けられる形となる。その結果、路盤によ

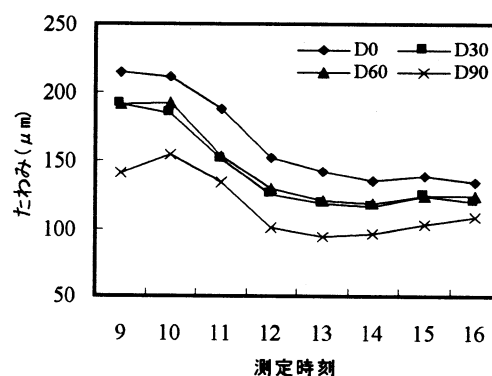


図-15 隅角部の測定時刻と測定たわみの関係

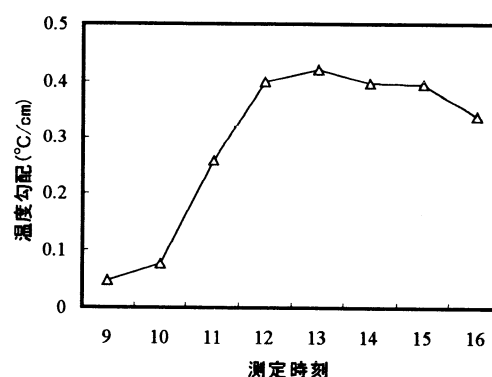


図-16 隅角部の測定時刻と温度勾配の関係

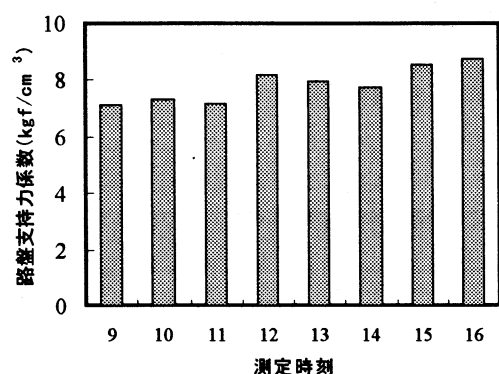


図 - 17 隅角部の測定時刻と路盤支持力係数の関係

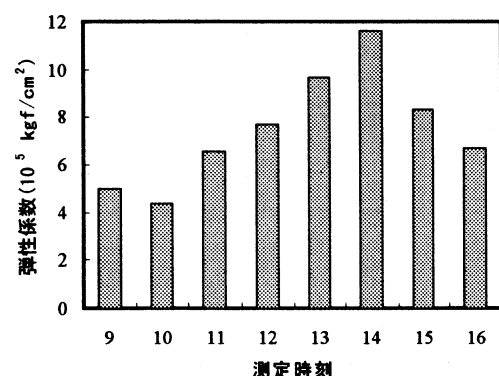


図 - 18 隅角部の測定時刻と弾性係数の関係

る支持が強められ、たわみが減少すると考えられる。図-17、図-18 に測定時刻と隅角部推定式の式(17)、式(18)によって算出された路盤支持力係数、弾性係数の関係を示す。推定式によれば、路盤支持力係数は約 8.0 kgf/cm^3 となり、妥当な値が得られた。弾性係数は約 $4.0 \times 10^5 \sim 11.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ と、やや高い値となった。特に、14 時の弾性係数については他よりも大きく算出された。おそらく、気温、温度勾配が高いことから版のそりが発生し、目地幅が狭くなり、荷重伝達率が大きくなったことに原因があると考えられる。これは、非載荷側のたわみが大きく測定され、荷重拡散係数 A_{24} が大きくなることから、弾性係数が大きくなったと考えられる。

以上の結果から、中央部推定式は実用性があると考えられる。目地縁部および隅角部の路盤支持力係数推定式は、特に問題のない結果となった。しかしながら、目地縁部および隅角部、特に目地縁部の弾性係数は非常に大きい値が算出される結果となった。この原因として、以下のようなことが考えられる。

①目地縁部と隅角部は、温度および温度勾配によ

る荷重伝達率、たわみ曲線形状の影響が大きい。しかしながら、理論モデルにおいては、以上を合理的に考慮することは困難である。

②FWD 装置のたわみセンサー自体の測定誤差による影響。羽田空港のデータに関しては、 $D_0 < D_{30}$ となるものが、いくつか含まれていた。実際の載荷位置は目地上であったり、目地からの距離が遠かったりと不確定であるため、荷重伝達率に影響を及ぼす。

③本研究の FEM 解析では、用いた荷重拡散係数を通常の範囲内に設定し解析を行った。しかし、目地縁部と隅角部の測定たわみによって得られた荷重拡散係数は、FEM 解析によって得られた荷重拡散係数よりも大きく、表-5 に示すように、推定式の実用範囲を超えていた。また、測定たわみ曲線は、理論たわみ曲線よりも平坦になるという Winkler 路盤 FEM モデルの限界が原因の一つとして考えられる。

表 - 5 FEM と実測による荷重拡散係数の比較

載荷位置	版厚 (cm)	FEM	測定	判定
中央部	30	$A_{16}=3.96 \sim 4.96$	$A_{16}=4.60 \sim 5.10$	範囲内
目地縁部	35	$A_{26}=2.25 \sim 2.52$	$A_{24}=2.53 \sim 2.90$	範囲外
隅角部	35	$A_{26}=2.32 \sim 2.64$	$A_{24}=2.55 \sim 2.70$	ほぼ範囲内

6. まとめ

本研究では、重回帰分析を用いてコンクリート版の中央部、目地縁部および隅角部における構造評価推定式を作成し、FWD 実測データを用いて推定式の実用性、評価結果の合理性について検討した。得られた結論を以下にまとめる。

①剛比半径 L と荷重拡散係数 A が、1 対 1 に対応していることが分かった。

②FEM から得られた路盤支持力係数、弾性係数推定式は、誤差が小さく、相関係数の高いものが得られた。

③実測データを用いて検討した結果から、中央部推定式は信頼できるものとなり、実用性のある推定式となった。目地縁部および隅角部推定式は、路盤支持力係数は一般的な値が得られるものの、弾性係数が中央部推定式よりも大きく算出された。今後は、荷重拡散係数の実用範囲を拡張するため、

FEM 解析の時点で弾性係数の条件範囲を広げ、再度、重回帰分析を行うことが必要であろう。

謝辞：本論文作成にあたり、FWD 研究会栗橋テストピット、富山・高岡バイパスおよび FWD 共通試験羽田空港の測定データを使用させて頂きました。ここに、FWD 研究会および建設省北陸地建富山工事事務所に対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1)丸山暉彦・阿部長門・雑賀義夫・姫野賢治：FWD による舗装の構造評価および補修設計システムの開発，土木学会論文集，No484/V-22，pp, 61-68，1994.
- 2)FWD 研究会：FWD に関する研究 1996 年報告書，1996.

- 3)FWD 研究会：FWD に関する研究(その 2)，1995.
- 4)M.I.Dater, K.D.Smith, K.T.Hall：Concrete pavement backcaluculation results from field studies, Transportation Research Record 1377, 1992.
- 5)AASHTO Guide for Design of Pavement Structures：AASHTO, Washington. D. C. 1993.
- 6)NCHRP Report 372：Support under Portland Cement Concrete Pavements, National Cooperative Highway Research Program, 1995.
- 7)Y.H.Huang：Pavement analysis and design, Prentive-Hall, Inc, 1993.
- 8)土木学会：舗装工学，1995.
- 9)富山・高岡バイパスコンクリート舗装修繕工法検討，委員会報告書，1996.

IN-SITU EVALUATION OF CONCREAT PAVEMENT MODULUS USING A SIMPLE REGRESSION APPROCH

Kazunori MANABE ,Boming TANG and Teruhiko MARUYAMA

FWD testing and backcaluculation (BC) have been proved to be useful in pavement structural evaluation. However, the greatest amounts of calculating time and engineering judgments are needed in using current BC programs. By applying regression analysis to FEM calculation results, a simple in-situ evaluation approach has been developed in this paper, which can be conveniently used to estimate the modulus of subgrade reaction and slab elastic modulus under slab interior, joint and corner FWD loading cases. Furthermore the evaluation results from several pavements are presented to investigate the validity and accuracy of the proposed procedures.