FWDデータを用いたコンクリート舗装の 構造評価に関する研究

村上由貴¹・竹内 康²・小梁川雅³・牧 恒雄⁴・谷口 聡⁵

 ¹正会員 農修 福島県 相馬北部用水改良事務所 (〒160-0004 福島県相馬市中村字高池前6番地) E-mail:murakami_yoshitaka_01@pref.fukushima.jp
 ²正会員 工博 東京農業大学 地域環境科学部 助教授(〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1)
 ³正会員 工博 東京農業大学 地域環境科学部 助教授(〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1)

⁴正会員 農博 東京農業大学 地域環境科学部 教授 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1) ⁵正会員 工修 独立行政法人土木研究所 主任研究員 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

本研究では,FWD試験データを用いた逆解析によるコンクリート舗装の構造評価手法を提案することを 目的としている.逆解析は,コンクリート版の弾性係数を固定した条件と変動させた条件の2つとした. その結果,コンクリート版の弾性係数を固定した逆解析手法が有効であることが確認された.また,この 逆解析結果と静載荷試験でのコンクリート版曲げ応力および粒度調整砕石のレジリエントモジュラスを用 いて,FWD試験から得られる弾性係数の速度効果について検討した.その結果,路盤,路床の層弾性係数 に低減係数を乗じることで,速度効果を解消できることがわかった.この評価方法を用いて目地縁部での 荷重伝達率の再現性について検討した.その結果,この評価方法の妥当性が確認された.

Key Words : FWD, concrete pavement, structural evaluation, back calculation, load transfer

1.はじめに

コンクリート舗装は,比較的剛性の低い路盤上に 剛性の高いコンクリート版が載った構造となってお リ、その代表的な力学解析モデルには、路盤以下を バネ地盤で表したWestergaardモデル,路盤以下を単 層および多層の弾性地盤で表したBoussinesgモデル およびBurmister モデルがある.このうち, Westergaardモデルは,応力計算が簡便であることか らコンクリート舗装設計の疲労解析^{1),2)}に多く用い られている.しかし,Westergaardモデルでは路盤以 下を一次元のバネとして扱っているため³⁾, 土質材 料の応力状態の変化にともなう弾性係数の非線形性 を考慮することはできない.またVesicら⁴⁾は,コン クリート版の曲げ応力が等しくなる地盤条件で WestergaardモデルとBoussinesqモデルでの解析たわ みを比較し,両モデルでの結果が異なることを指摘 している.これについて竹内ら⁵⁾は,実物大コンク リート舗装での載荷試験結果から弾性地盤モデルの たわみが実測たわみとよく一致することを確認して

いる.これらのことから,合理的にコンクリート舗装を設計するには,路盤以下を多層弾性体として捉える必要があると言える.

コンクリート舗装を多層弾性体として解析する場 合,各層の弾性係数,ポアソン比などの材料定数が 必要となる.これらの材料定数は,室内実験あるい は現場試験結果に基づいたデータベースから求める ことになるものと考えられる.土質材料に関する室 内実験としては,路盤材・路床土のレジリエントモ ジュラス試験方法⁶⁰があげられる.また,現場試験 結果に基づいたデータベースとしては,FWD試験 の逆解析結果の利用が適していると考えられる.

コンクリート版には,版上下面の温度差によって そり変形が生じる.そり変形は,当然のことながら FWD試験によって測定されるたわみに影響を与え る.そのため,コンクリート舗装各層の弾性係数の 逆解析結果が試験実施温度によって大きく変動し, 特にコンクリート版の弾性係数が過大に評価される ことが報告されている⁷⁾.これに対して小梁川ら⁸⁾は, そり変形によってコンクリート版自体の弾性係数は





図-2 埋込みゲージ埋設パターン

変化しないとした逆解析法を提案している.しかし, この方法はWestergaardモデルを用いて載荷直下のた わみの逆解析であり,BoussinesqモデルやBurmister モデルといった弾性地盤モデルでの適応性を確認し ていない.また,設計時のコンクリート舗装の応力 計算の妥当性は,基本的に静的載荷によって確認さ れたものであるため,FWD試験のように衝撃荷重 を与えたときに解析される弾性係数は,載荷速度の 影響を受け,静載荷での値よりも大きく見積もられ る可能性がある.特に土質材料では,その傾向が顕 著であると考えられる.

このように,FWD試験の逆解析結果をコンクリ ート舗装設計法へフィードバックするには,逆解析 方法に関する検討課題が残されている.そこで,本 研究では,FWD試験結果をコンクリート舗装の設 計にフィードバックすることを目的に,コンクリー ト舗装におけるFWDによるたわみ測定データおよ び静載荷試験結果,路盤材料の繰返し三軸試験結果 を用いてコンクリート版に発生する曲げ応力に着目 したFWD試験結果の逆解析方法およびその妥当性 について検討を行うものである.なお,コンクリー ト舗装でのFWD試験結果,静載荷試験結果および 路盤材料の繰返し三軸試験結果は,建設省土木研究 所(当時)にて測定したデータを用いた.また,逆 解析には松井らの開発した多層弾性プログラム AAMES⁹⁾をコアとした逆解析プログラム



図-3 コンクリート版内部の温度分布計測例

BALM'99¹⁰⁾を使用し,コンクリート版中央部の曲 げ応力解析にはAAMES,コンクリート版縁部の曲 げ応力解析および荷重伝達率解析には西澤¹¹⁾によっ て開発された三次元FEMプログラムパッケージ Pave3Dを使用した.

2.実物大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6日から同月8日まで,茨 城県つくば市の建設省土木研究所(現在の独立行政 法人土木研究所)内の実物大コンクリート舗装を対 象としておこなった.実物大コンクリート舗装の舗 装断面ならびに載荷位置を図-1に示す.コンクリー ト版と路盤の上面から200mmの部分は1997年に新規 打設したものであるが,それ以外の路盤および路床 は既設のものである.FWD試験は図-1に示すよう に,コンクリート版中央部および目地縁部を対象と して24時間1時間ごとにそれぞれ行った.また FWD試験は,1回の測定につき4回の載荷をおこな っており,荷重の変動率が10%以内であったことか ら¹²⁾,2回目以降の測定データをそれぞれ 平均し, たわみの荷重補正を行った.

静載荷試験は中央部および自由縁部を対象として, 中央部で0~69kN,自由縁部では0~49kNの荷重を 9.8kNおきに数回の載荷をおこなった.

静載荷試験では,コンクリート版の温度勾配によ るそり応力の影響を考慮して版内温度差が小さくな る夕方に実施した.また,静載荷試験におけるコン クリート版内部のひずみおよびFWD試験時の温度 分布は,温度センサが内蔵された円筒形埋込みゲー ジを図-2のように埋設して測定した.温度の測定は,

表-1 使用材料の材料特性

材料	材料特性値		
	密度	2.4 g/cm^3	
コンクリート	曲げ強度	6.1 MPa	
	弾性係数	31400 MPa	
	ポアソン比	0.2	
	線膨張係数	0.00001 /°C	
	最大乾燥密度	2.26 g/cm^3	
粒状路盤	締固め度	95.70%	
	K ₇₅	8.3 ×10 ⁻² N/mm ³	

表-2 AASHTO の推奨値

	弾性係数初期値 (MPa)
セメントコンクリート	35000
アスファルト混合物	3500
セメント安定処理路盤	4100
砕石路盤	200
粘性土	50
セメント安定処理土	350
石灰安定処理土	140

時間毎に1回それぞれの測点でのデータをデータロ ガーで記録した.載荷状態のコンクリート版は純曲 げ状態になることから,埋込みゲージでの測定結果 を直線で外挿し,版底面での曲げ応力を算出した. 埋込みゲージにより測定された温度データは,図-3 に示すように非線型に分布していたことから,測定 データを2次曲線で近似し⁵⁾,上面ならびに下面温度 を推定した.ただし,温度差は版下面に比べて上面 のほうが高いときが正である.

(2)使用材料

実験に使用したコンクリートと路盤の材料特性を 表-1に示す.コンクリートの力学特性は,試験開始 直前まで試験区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ものである.

また,路盤材料には粒度調整砕石(M-30)を使 用し¹³⁾,表-1に示した*K*₇₅は平板載荷試験から得ら れた*K*₃₀を2.2で除して算出した³⁾.

3. FWD試験結果の逆解析方法

本研究の逆解析で使用したBALM'99は,各層間 のすべりを考慮した多層線形解析ソフトAAMESを 順解析部分に使用しており,層間のすべりを逆解析 においても考慮することが可能である.通常,コン クリート舗装では,コンクリート版打設時に石粉や 路盤紙を用いて,コンクリート版と路盤を分離させ

表-3 逆解析条件

		<i>E</i> _c	<i>E</i> _c 固定
	弾性係数	35000 MPa	31400 MPa
コンクリート版	ポアソン比	0.2	
	版厚	160 mm	
	弾性係数	200 MPa	
路盤	ポアソン比	0.4	
	版厚	600 mm	
	弾性係数	友 50 MPa	
路床	ポアソン比	0.4	
	版厚	∞	
載荷荷重		49 kN	
載荷半径		150 mm	

る¹⁾.よって,BALMでは,コンクリート版と路盤 の境界面の状態を考慮した逆解析が可能となる.な お,自由縁部でのFWD試験は実施できなかったた め,中央部での逆解析のみを行う.

(1) 逆解析条件

FWDたわみを用いた逆解析は,舗装各層に対し て目安となる弾性係数初期値を仮定し,測定された たわみ形状と計算されたたわみ形状がほぼ一致する まで各層の弾性係数を変化させた繰返し計算を行い, 各層の弾性係数を推定するものである.この弾性係 数初期値について,AASHTOでは表-2に示す値を推 奨している¹²⁾.この推奨値に関して,我が国の FWD研究会も,これまでの研究成果として同様の 値を推奨しており,両者ともにコンクリート版弾性 係数を含む全ての層の弾性係数を変化させ解析を行 うこととしている.

本研究では、コンクリート版弾性係数初期値が逆 解析結果へ与える影響を検討するために、2パター ンの逆解析を行いその結果を比較した.ひとつは、 表-2に示すAASHTOの推奨値を各層の弾性係数初期 値として、舗装各層の弾性係数を推定した逆解析 (以下、 E_c 変動)である.他方は、そり変形が発生 してもコンクリート版弾性係数は変化しないとした 小梁川らの指摘に基づき、AASHTOの初期値を基本 としコンクリート版の弾性係数のみを固定して、コ ンクリート版以外の各層の弾性係数を推定した逆解 析(以下、 E_c 固定)である.また、逆解析における 適切化手法としては、打ち切り特異値分解を使用し た¹⁰⁾.逆解析に使用した解析条件をまとめて表-3に 示す.なお、 E_c 固定のコンクリート版の弾性係数は、 表-1に示した室内実験結果を用いた.

松井ら¹⁴⁾は載荷直下のたわみであるD₀を含むすべ



てのたわみを用いた逆解析結果の信頼性が低いこと を指摘している.そのため,本研究においてもD₀を 除いて逆解析を行うこととした.

(2) 逆解析結果

FWDたわみの逆解析結果のうち,コンクリート 版弾性係数を図-4に,路盤,路床の弾性係数を図-5 に示す.図-4示すようにEc変動の場合ではコンクリ ート版の弾性係数が,実測値である*E*。固定の場合の 弾性係数よりも大きな値で変化した.また,図-5に 示すように,*E*。変動,*E*。固定とも路床の弾性係数 はほぼ同じ値を示していたが,*E*。固定の路盤の弾性 係数は大きく変動した.これは,コンクリート版上 下面の温度差により発生したそり変形の影響が,*E*。 変動ではコンクリート版の弾性係数に,*E*。固定では 路盤の弾性係数に表れたものと考えられる.

松井ら¹⁵⁾は,コンクリート舗装でのFWDの逆解析 結果は,アスファルト舗装に比べて不安定で,その 原因がそり変形によるものであるか,数値計算上で の問題であるかが明らかでないとして,たわみデー



表-4 曲げ応力の計算条件および計算結果

コンクリート版	弾性係数	31400 MPa	
	ポアソン比	0.2	
	版厚 160 mm		
路盤K値		8.3×10^{-2} N/mm3	
載荷荷重		49 kN	
載荷半径		150 mm	
曲げ応力		2.3 MPa	

タに誤差があった場合のコンクリート版の弾性係数 について検討している.松井らの検討結果では,版 厚が薄い場合(200mm)は弾性係数は誤差の有無に よらずほぼ同程度の値に収束するが,版厚が厚くな る(320mm)と収束しなくなるとしている.今回の 解析結果は,それほど不安定ではないと考えられる. したがって,図-4での逆解析結果の変化は,コンク リート版のそり変形によるものと考えられる.また, 図-5での路盤の弾性係数の変化は,コンクリート版 の弾性係数を固定したことで,そり変形の影響が路 盤の弾性係数に反映されたものと考えられる.

次に逆解析の初期条件が逆解析結果へ与える影響 を調べるため,各条件での逆解析によって求めた各 層の弾性係数をそれぞれAAMESの入力条件として, コンクリート版の曲げ応力を算出し,逆解析結果の 妥当性について検討した.

コンクリート版中央部での曲げ応力解析結果を 図-6に示す.図-6に示すように*E*。変動と*E*。固定で は推定される曲げ応力は対照的な傾向を示した.

温度差が正に大きくなる日中では,コンクリート 版がそり変形を起こし中央部が上に凸の状態となり, 版の自重によって版下面に引張力が作用するため, 版に発生する曲げ応力は増加する.図-6において, *E*。変動での曲げ応力は,これとまったく逆の傾向を 示したが, *E*_c固定ではこの傾向をよく表現している. したがって, *E*_c固定の逆解析結果は*E*_c変動に比べ コンクリート版のそり変形の影響をよく表現してい ると考えられる.

次に, 逆解析結果を用いてコンクリート版曲げ応 力での検討を行った.具体的には,FWD試験は版 中央部で行ったことから, 逆解析結果を用いた AAMESによる曲げ応力と式(1)に示す版中央での Westergaardの応力式¹⁶に測定結果を代入して算出さ れる値を比較した.Westergaardの応力式では,当然 のことながら温度応力は加味されていないため,比 較対象としたAAMESでの解析結果は、温度勾配が 0.01 /cmと最も小さかった17:00のものとする. Westergaardの応力式での解析条件および結果は表-4 に示す通りである.図-6からわかるように, AAMESでの解析結果は17:00で1.9MPaであるのに 対し,Westergaardの応力式では2.3MPaであった. Westergaardの応力式では,同じ荷重条件で曲げ応力 が小さくなる原因としては,コンクリート版の弾性 係数の増加,路盤反力係数の増加が挙げられる. AAMESでは、コンクリート版の弾性係数は Westergaardの応力式と同一の値を使用していること から,解析結果の相違は,路盤以下の弾性係数の増 加によるものと考えられる.これに関して,関根ら は¹⁷⁾,同一盛土上で,衝撃荷重(HFWD)によって 求めたK値が静的荷重によるK30よりも大きくなる という結果を得ている.これは,同じ荷重レベルで も衝撃荷重による変形は静的荷重の場合よりも小さ い, すなわち弾性体として考えるのであれば, 衝撃 荷重によって求められる弾性係数は静的荷重の場合 よりも大きいことを意味している.つまり,FWD 試験は動的荷重であるのに対し,今回の逆解析は静 的荷重として各層の弾性係数を推定しているため, 路盤,路床の弾性係数が大きく見積もられたものと 考えられる.

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot (1 + v_c) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot h_c^2} \cdot \left(\ln \frac{l}{b} + 0.6159 \right)$$
(1)

ここに, σ_i: コンクリート版曲げ応力(MPa) P: 載荷荷重(kN)

$$v_c$$
: コンクリートのホアソンE
b:載荷半径による定数
 $b = a$ (a 1.724・ h_c)
 $b = \sqrt{1.6 \cdot a^2 + h_c^2} - 0.675 \cdot h_c$
(a<1.724・ h_c)
l: 剛比半径(mm)

表-5 路盤,路床の相対剛比

		E _c 変動	<i>E</i> _c 固定	実測値
相対剛比	f	2.60	4.31	4.50

表-6 低減係数を乗じた層弾性係数

低減係数	路盤(MPa)	路床 (MPa)
1.0	395	92
0.9	355	82
0.8	316	73
0.7	276	64
0.6	237	55
0.5	197	46
0.4	158	37
0.3	118	27
0.2	79	18
0.1	39	9

$$l = 4 \sqrt{\frac{E_c \cdot h_c^3}{12 \cdot \left(1 - v_c^2\right) \cdot K}}$$

ここに, E_c: コンクリートの弾性係数(MPa) K:路盤K値(10⁻²N/mm³)

コンクリート舗装の路盤厚の設計は,路床面と路 盤面での実測K値からそれらの比を求めて行われる. 竹内ら¹⁸⁾は,式(2)路盤,路床のK値の比と変位係数 Fの関係を用いた層弾性係数の推定法を提案してい る.このとき,変位係数Fに関しては,Odemarkの 簡易式にポアソン比の変化を考慮するため,式(3) に示す相対剛比を定め,式(4)のように拡張してい る.そして,式(4)の妥当性を確認するために,405 種類の h_1 , E_1 , v_1 , E_2 , v_2 の組み合わせについて検 討を行い,その妥当性を確認している.

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{1}{F} \tag{2}$$

ここに, K₁:路盤のK値(10⁻²N/mm³) K₂:路床のK値(10⁻²N/mm³) F:変位係数

$$f = \frac{E_1 \left(1 - v_2^2\right)}{E_2 \left(1 - v_1^2\right)}$$
(3)

ここに, *E*₁, *E*₂:路盤,路床の弾性係数(MPa) v₁, v₂:路盤,路床のポアソン比

$$F = \frac{1}{\sqrt{1 + n_1^2 (h_1/a)^2 f^{2/3}}} + \frac{1}{f} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + n_2^2 (h_1/a)^2}} \right) \quad (4)$$

ここに, h₁:路盤厚(mm) a:載荷板半径(mm) n₁, n₂:修正係数

そこで,逆解析初期条件が路盤,路床の逆解析結 果に与える影響を調べるため,式(3)の相対剛比¹⁵⁾に よる検討をおこなった.相対剛比は,逆解析結果の うちコンクリート版の温度勾配が0.01 /cmと最も 小さかった17:00のデータを用いて算出し,竹内ら ¹⁹⁾が平板載荷試験をもとに算出した相対剛比を実測 値として比較した.*E*_c固定,*E*_c変動の逆解析条件 から算出された相対剛比を表-5に示す.表-5に示す ように,*E*_c変動での相対剛比は実測値と比較してか なり小さい値となったが,*E*_c固定での相対剛比は, 実測値とよく一致した.このことより,載荷速度の 影響により路盤と路床の弾性係数は大きく見積もら れるものの,路盤,路床の弾性係数の比率は静的な 場合の実測値と変わらないことがわかった.

以上の結果より, Ec固定の方がEc変動に比べて コンクリート版のそり変形の影響を定性的に表して いいることがわかった.したがって,コンクリート 舗装においてFWD試験の静的逆解析を行う場合, 小梁川らが行ったようにE。固定の方がよいといえる. また, Ec固定条件での解析結果から得られた路盤と 路床の弾性係数の比率(相対剛比)は,実測データ より求めた値とほぼ一致していたが,地盤材料は, 線形弾性体ではなく、レオロジー的性質を有してい るため,今回の解析結果で得られた相対剛比の一致 は,解析結果の妥当性を示すものではない.しかし, 関根ら¹⁷⁾の盛土上での実験結果では,衝撃荷重 (HFWD)によって求めたK値と静的荷重によるK₃₀ にはばらつきはあるものの,直線関係が認められる ことから,実測データによる相対剛比とFWD試験 の逆解析結果から得られた相対剛比には何らかの因 果関係があるものと考えられる.これについては, 今後も引き続きデータを収集し検討する必要がある ものと考えられる.

4. FWD試験の速度効果の検討

一般に,粘性のある物質の力学的性質は載荷速度に依存する(速度効果)ことが知られている²⁰⁾.前



述したように,FWD試験では重錐の自由落下によ る衝撃荷重を与えてたわみを測定することから,こ れを静的荷重としてE_c固定で逆解析を行った場合に は,路盤,路床の弾性係数が大きくなる.しかし, 本研究での逆解析結果は,路盤,路床の弾性係数の 比率は静的な場合の実測値と変わらなかった.この ことから,逆解析結果の速度効果の影響を低減する ために,路盤,路床の層弾性係数に対して1.0から 0.1の値をとる低減係数を乗じて,応力レベルなら びに荷重伝達率の再現性について検討をおこなった.

(1)静載荷試験結果による検討

静載荷試験は,温度勾配が殆ど生じない夕方にお こなっていたことから,*E*。固定での逆解析結果のう ち,温度勾配が最も小さい17:00のデータをピック アップし,路盤,路床の層弾性係数にそれぞれ低減 係数を乗じた.低減係数を乗じた層弾性係数を表-6 に示す.次に,表-6に示した層弾性係数を用いて, コンクリート版中央部はAAMESで,版自由縁部は Pave3Dで曲げ応力を算出し,静載荷試験結果と比 較した.コンクリート版中央部での比較結果を図-7 に,自由縁部での結果を図-8にそれぞれ示す.なお, 図中のWest.のプロットは平板載荷試験から得られ たK値を用いてWestergaardモデルで算出した曲げ応 力である.

図-7,8に示すように、コンクリート版中央部, 自由縁部ともに低減係数0.3を乗じた場合の曲げ応 力がそれぞれ若干のばらつきはあるものの,実測値 とほぼ一致している.また,特に自由縁部に関して, 低減係数0.3を乗じた曲げ応力は,Westergaardモデ ルでの曲げ応力ともよく一致している.このことよ り,低減係数0.3を乗じた層弾性係数を用いた解析





図-8 自由縁部でのコンクリート版曲げ応力

結果は,コンクリート版の曲げ応力をよく再現して いると判断される.しかし,この検討は温度勾配が ない時間帯でのデータを使用したものであり,今後 は,温度勾配がある場合での応力レベルでの検討を 行うことが今後の課題である.

(2) 繰返し三軸圧縮試験結果による検討

繰返し三軸圧縮試験から得られるレジリエントモ ジュラス*M*_Rの回帰式を用いて,室内実験レベルで のFWD試験の速度効果に関する検討をおこなった. *M*_Rは,拘束圧および軸圧により変化する,いわゆ る応力依存性がある.そこで本研究では,試験区に 用いた路盤材料の繰返し三軸圧縮試験結果から得ら れた*M*_Rを主応力和の関数としてまとめた回帰式(5) ¹⁹⁾を使用した.また,主応力和は,温度勾配が小さ い時間帯のデータをピックアップし,AAMESによ り新設した路盤の中央(路盤面から下に100mm)の 部分について計算した. ここに, M_R : レジリエントモジュラス (MPa) θ : 主応力和 ($\sigma_1+2\sigma_3$)

低減係数を乗じた路盤の層弾性係数とMRの回帰 式との比較を図-9に示す.この図は横軸に主応力和, 縦軸に層弾性係数ならびにMRをとり,両対数で表 したものである.また,ここでは低減係数を乗じた 層弾性係数のうち低減係数1.0および0.3での値を示 した.図-9に示すように,低減係数1.0の層弾性係 数は,主応力和が阿部ら²¹⁾の示した応力範囲にある にもかかわらず, MRの曲線から大きく乖離してい る.一方で,低減係数0.3の場合はほぼ曲線と一致 していた.このことから,コンクリート舗装での FWD試験の静的逆解析結果に低減係数を乗じるこ とでレジリエントモジュラスと静的逆解析との関係 を示すことが可能となった.しかし,コンクリート 舗装におけるFWD試験結果と粒状材料の繰返し三 軸試験結果を比較した例は数少ないことから,今後 は様々な舗装構造および路盤材料に対する試験デー タを蓄積してゆく必要があると考えられる。

(3)荷重伝達率の検討

コンクリート舗装におけるFWD試験では,横目 地部の荷重伝達率についても測定を行い,目地部の 健全度を把握している.目地部の荷重伝達率は,ダ ウエルバーの有無,路盤の荷重支持能力によって変 化する.また,コンクリート舗装では横目地部での ひび割れも多く見られる²²⁾ことから,コンクリート 舗装横目地部での荷重伝達率を解析的に把握するこ とは,横目地部での疲労解析を行う上でも重要であ る.そこで,低減係数を乗じた層弾性係数を用いた 場合の横目地部の荷重伝達率の速度効果とその影響 についても検討をおこなった.ただし,温度勾配が 最も小さい17:00でのデータを用いて横目地部のた わみ形状を推定し,式(6)により荷重伝達率を求め, 横目地部でほぼ同時刻に測定したFWDたわみから 算出される実測荷重伝達率と比較した.

$$e_{ff} = \frac{D_{30}}{(D_0 + D_{30})/2} \times 100 \quad (\%) \tag{6}$$

ここに, *e_{ff}*:荷重伝達率(%)

 $D_0:$ 載荷板中心のたわみ(mm)

D₃₀:目地をはさんで載荷板中心と等距離



表-7 P	ave3D	の解析	条件
-------	-------	-----	----

ダウエルバー	弾性係数	210000 MPa
	ポアソン比	0.3
	長さ	600mm
	直径	20mm
コンクリート版の	K	20000 MPa
<u>ダウエルバー支持力係数</u>	C	20000 1114
目地要素バネ係数	k_s , k_t , k_n	2.85 N/mm ³
コンクリート版-路盤面	k_s , k_t	0
の境界面要素バネ係数	k_n	100 N/m^3
目地幅		3mm

の非載荷側でのたわみ(mm)

目地部の構造解析にはPave3Dを使用した. Pave3Dでは,横目地部の荷重伝達機構をダウエル バー機能とコンクリート版側面のかみ合わせ機能に 分けて表現し,目地部およびコンクリート版と路盤 の境界面を図-10示すように境界面要素によりモデ ル化する²³⁾.ダウエルバー機能は,式(7)に示すコン クリート版のダウエルバー支圧係数K_cから求めら れ,コンクリート版弾性係数と版厚,ダウエルバー の径より計算される.また,かみ合わせ効果による 荷重伝達は路盤K値の影響を受けることから,荷重 伝達率とかみ合わせ係数,K値の関係を式(8)のよう に近似的に導いている²⁴⁾.これらの係数はすべて 表-1に示した値を用いて計算し,かみ合わせ係数に 関しては,計算された値を境界面要素の各方向バネ 係数とした.その結果およびその他の解析条件をま とめて表-7に示す.なお,コンクリート版と路盤面 の境界面要素のバネ係数は、各方向のバネ係数を変 化させコンクリート版中央部の曲げ応力を推定し, Westergaardの応力式と最もよく一致した値とした.



図-11 低減係数と荷重伝達率の関係

$$K_{c} = \frac{8.0(1 - \nu_{c})E_{c}}{(1 + \nu_{c})(1 - 2\nu_{c})(h_{c} - \phi)}$$
(7)

ここに, K_c :ダウエルバーの支圧係数(MPa/mm) E_c :コンクリートの弾性係数(MPa) v_c :コンクリートのポアソン比 h_c :コンクリート版厚(mm) φ :ダウエルバー直径(mm)

$$\frac{\log_{10} k}{K} = 0.55 \frac{e_{ff}^2 - 183e_{ff} + 3383}{e_{ff}^2 - 100e_{ff} - 749}$$
(8)

ここに, K: 路盤K値(10⁻²N/mm³) *e*_{ff}:荷重伝達率(%)

比較結果を図-11に示す.図-11に示すように,乗 じる低減係数が小さくなるほど荷重伝達率が増加す ることがわかる.しかし,それぞれ推定される荷重 伝達率の差は最大で4.0%以上あるものの,実測値 と比較した場合その差は最大2.0%程度の差である. また,低減係数0.3での結果は,実測値と比較して 1.7%程度の差である.これらのことより,横目地 部の荷重伝達率は,あくまで載荷側と非載荷側のた わみの相対的な割合であることから,両者にほぼ同 様の速度効果が現れることで,その影響は殆ど無視 してよいと判断される.

5.まとめ

本研究では,1997年に実物大コンクリート舗装を 対象におこなったFWD試験結果および静載荷試験 結果,路盤材料の繰返し三軸試験結果を用いて,コ ンクリート版に発生する曲げ応力に着目したFWD 試験結果の逆解析方法およびその妥当性について検 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.

- *E_c* 変動, *E_c* 固定の2つの条件下での逆解析結果 より,コンクリート版中央部での曲げ応力および路盤,路床の相対剛比について検討を行ったところ,載荷速度の影響によって路盤,路床の弾性係数は高く見積もられるものの,コンクリート版のそり変形の影響および路盤と路床の相対剛比を良くあらわしていたことから, *E_c* 固定の方がFWD試験の静的逆解析条件として合理的であることがわかった。
- ・ E_c 固定条件での逆解析結果に対して低減係数を 乗じ、コンクリート版曲げ応力を算出し、静載 荷試験結果と比較したところ、低減係数0.3を乗 じた層弾性係数を用いた解析結果は、コンクリ ート版曲げ応力をよく再現していた。
- 低減係数を乗じた層弾性係数と繰返し三軸試験 結果を比較したところ,静的逆解析結果に対し て低減係数を乗じることでMRと静的逆解析との 関係を示すことが可能となった。
- FWDたわみの静的逆解析結果から推定されるコンクリート舗装横目地部の荷重伝達率に対する 速度効果について検討したところ,荷重伝達率に与える速度効果の影響はほとんど無く,静的 逆解析結果を用いて再現が可能であることがわかった.

以上の結果から、コンクリート舗装におけるFWD たわみデータの逆解析は、コンクリート版弾性係数 初期値を実測値に固定しておこない、こうして推定 された逆解析結果には、FWD試験の速度効果を考 慮して路盤、路床の層弾性係数に低減係数を乗じる 必要があるといえる、しかし、低減係数を決定する ためには、今後、粒状材料の試験データを蓄積して 行く必要があると考えられる、また本論文で行った 検討は、温度勾配がほとんど無い場合の逆解析結果 のみを対象としており、温度勾配がある場合の解析 手法を構築して行くことが今後の課題である、

謝辞:本研究に使用した貴重な実験データを提供し ていただいた関係各位に対して,ここに記して感謝 の意を表します. 参考文献

- 1) (社)日本道路協会:セメントコンクリート舗装要 綱第18版,1993.
- 2) (社)土木学会:コンクリート標準示方書舗装編, 2002.
- 3) (社)土木学会:舗装工学第1版, 1995.
- Vesic, A.S. and Saxena, S.K. : Analysis of structural behavior of AASHO road test rigid pavement, NCHRP Report 97, 1970.
- 5) 竹内康,小梁川雅,西澤辰男,野田悦郎,久保和 幸: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,土木学会論文集,No.704/V-55,pp.117-127,2002.
- 6) (社)日本道路協会:舗装試験法便覧別冊, 1996.
- 7) 阿部俊幸,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 回年次学術講演会概要集,pp.42-43,1996.
- 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.88-89,1997.
- 9) 山峰明哲,山本和也,松井邦人:軸対象多層弾性構造の解析ソフト AAMESの開発,土木学会第54回年次学術講演会概要集,pp.404-405,1999.
- 10) 黒林功,松井邦人,井上武美,董勤喜:静的逆解析 によるアスファルト舗装の構造評価診断システムの 開発,土木学会第55回年次学術講演会概要集,2000.
- 11) 西澤辰男:3次元 FEM に基づいたコンクリート舗装 構造の解析パッケージの開発,土木学会論文集, No683/V-52,2000.
- 12) FWD 研究会: FWD に関する研究, 2000.
- 竹内康,小梁川雅,牧恒雄,丸山暉彦,木村慎:コンクリート舗装における路盤 K 値と弾性係数の換算式に関する実験的研究,土木学会論文集,No.669/V-50,pp.17-25,2001.
- 14) 松井邦人,佐藤直俊:逆解析弾性係数におよぼす荷 重分布と層間すべりの影響,土木学会論文集, No.451/V-17, pp.333-336, 1992.
- 15) 松井邦人,黒林功,西山大三:FWD 試験による弾性 係数推定の精度向上に関する検討,土木学会舗装工 学論文集,Vol.3,pp.39-47,1998.
- Huang, Y.H. : Pavement analysis and design , Prentice Hall Inc , 1993.
- 17) 関根悦夫,村田修,阿部長門,丸山暉彦:FWD によ る鉄道盛土の締固め管理に関する研究,土木学会舗 装工学論文集,Vol.1,pp.121-128,1996
- 18) 竹内康,西澤辰男,小梁川雅,丸山暉彦:コンクリ ート舗装における層弾性係数推定方法に関する研究, 土木学会第55回年次学術講演会概要集,2000.
- 19) 竹内康:路盤の支持力変化を考慮したコンクリート 舗装設計法に関する研究,長岡技術科学大学学位論 文,2000.
- 20) 石原研而:土質動力学の基礎,鹿島出版会,1976.
- 21) 阿部長門, 雑賀義夫, 丸山暉彦: 粒状路盤材・路床 土のレジリエントモジュラス, 土木学会第48回年次 学術講演会概要集, pp.878-879, 1993.
- 22) Fukuda, T., Koyanagawa, M. and Murai, S.: Condition survey of concrete pavements and its evaluation, Proceeding of 3rd international conference on concrete pavement design and rehabilitation, 1985.

- 23) 西澤辰男:3 次元 FEM に基づいたコンクリート舗装 横目地におけるダウエルバーモデル,土木学会論文 集, No.683/V-52, 2001.
- 24) 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,1989.

STUDY ON STRUCTURAL EVALUATION OF CONCRETE PAVEMENT USING FWD DATA

Yoshitaka MURAKAMI, Yasushi TAKEUCHI, Masashi KOYANAGAWA, Tsuneo MAKI and Satoshi TANIGUCHI

Objective of this study is to propose the structural evaluation method of concrete pavement based on back-calculation of FWD measurement data. Back-calculation has been carried out under the two conditions. One was under the condition that the elastic modulus of concrete slab was fixed and the other was varied. As the result, it was confirmed that the back-calculation method under fixed condition was effective. And, velocity effects of the back calculated elastic moduli were examined using static loading result of the concrete slab and cyclic tri-axial testing results of mechanical stabilized base course material. Consequently, it was found that the velocity effects could be neglected by multiplying the reduction coefficient to the elastic moduli of subgrade and base course. And a reproducibility of load transfer ratio at the transverse joint was examined using this evaluation method. As the results, validity of the evaluation method proposed in this study was confirmed.