小型 FWD の時系列データを用いた 路盤・路床の強度評価に関する一考察

巽 吉生¹·高橋 修²·丸山暉彦³

1学生会員 修(工) 長岡技術科学大学 材料工学専攻(〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)

²正会員 博(工) 長岡技術科学大学環境・建設系 助教授(同上) ³正会員 工博 長岡技術科学大学環境・建設系 教授(同上)

小型 FWD に関する既往の研究では,荷重と変位のピーク値のみを用いたある種の変形係数に基づいて路 盤・路床の強度を評価している.本研究では,小型 FWD の荷重と変位の時系列データを用いて静的解析お よび動的解析を行い,それぞれの解析に基づいて各層の弾性係数を推定した.これらの静的解析および動的 解析の結果を比較することにより,動的解析の有効性と問題点についてそれぞれ知見を得た.また,荷重と 変位のピーク値のみだけでなく,時系列データを使用した強度評価指標を新たに導入し,平板載荷試験の結 果と比較してその有効性について確認した.

Key Word : Handy-FWD, historical time data, dynamic analysis, static analysis, back calculation

1.はじめに

小型 FWD は、落錘によって衝撃荷重を路盤あるい は路床表面に作用させ、その時に発生する荷重と変 位の関係から地盤の強度評価を行う装置である.既 往の研究では、本来連続的な時系列データとして得 られる荷重および変位から、それらの最大値のみを 使用し、平板載荷試験でK値を求める場合と同等の データ処理により地盤の強度評価を行っている.

浅井は,約12kgの重錘を載荷板に落下させ,その 時の地盤のたわみ量を測定した¹⁾.そして,地盤の 最大たわみ量を I 値と定義し, I 値と平板載荷試験で 求めた支持力係数とは高い相関関係があると報告し た.このアプローチが現在の小型 FWD の原型になっ ている.阿部らは,室内の土槽および現場施工完了 時の路盤で小型 FWD 試験と平板載荷試験を行い 両 者の支持力係数を比較した.そして,両者の関係は 地盤の種類や路盤の厚さ等により異なると報告して いる²⁾. 鴨らは, 土槽内に強度の異なる地盤をいく つか構築して、小型 FWD 試験と平板載荷試験を行っ た³⁾.そして,両者の支持力係数の関係は,地盤の 強度が低い範囲ではほぼ 1:1 に,地盤の強度が高く なるにつれて 1:2 に近づくと報告している.佐藤ら は,同一地盤において小型 FWD 試験と通常の FWD 試験そして平板載荷試験を行い,支持力係数と弾性 係数の関連性について検討を行った⁴⁾.その結果, 弾性係数から支持力係数を推定できると報告してい る.小笠原は,土槽内で様々な強度の路盤を構築し て,各種地盤に適した測定方法およびデータ処理方 法を提案した⁵⁾.関根らは,平板載荷試験,普通の FWD,小型 FWD の各試験で得られた路床の支持力 の関係を求めた⁶⁾.このなかで,小型 FWD と繰り返 し平板載荷試験の除荷後の接線より求めた支持力係 数とは高い相関があると報告している.

以上のように 小型 FWD による地盤の強度評価法 については多くの研究が行われている.

しかしながら,小型 FWD 試験は,同一地点上で測 定したにもかかわらず,重錘落下高さやゴムバッフ ア,載荷板半径が異なれば測定結果が同じにならな いといった欠点が指摘されている⁷⁾.そのため,既 往のデータ処理方法では,荷重と変位のピーク値の みを使用して地盤の強度評価を行うため,重錘落下 高さやゴムバッファの違いに対応できない.

そこで本研究の目的は、小型 FWD の荷重と変位の ピーク値のみだけでなく、時系列データを使用した 強度評価指標を新たに導入して、平板載荷試験で求 めた支持力係数と関連づけ、地盤の強度評価法を新 たに提案することである.また、小型 FWD 試験で得 た荷重と変位の時系列データを使用して、静的逆解 析および動的逆解析法により路盤の弾性係数を推定 した.そして、両者の解析結果から、重錘落下高さ やゴムバッファの違いが解析値に及ぼす影響を調査 した.

2. 小型 FWD 試験および平板載荷試験

小型 FWD の荷重と変位の時系列データの形状は, ゴムバッファの硬度や形状,地盤の剛性等に依存す るため,荷重および変位のピーク値は異なる.その ため,ここでは重錘落下高さやゴムバッファに依存 しない指標を提案することについて検討した.そし て,その値と平板載荷試験の支持力係数とを関連づ け,新たな地盤の強度評価法を提案した.

(1) 試験条件

コンクリート土槽内にて道路舗装を想定した路床 と路盤を構築した.路床の材料としては一般的なマ サ土を,路盤の材料としては粒度調整枠石 M-40 を使 用した.事前に締固め試験を行ったところ,M-40 の 最適含水比は7.2%であった.よって,M-40 材料の 含水比が7.2%となるように調整して施工した.図-1 に土槽の概略図を示す.路床の厚さは200mmとし, 路盤については厚さが50,100,150,200mmとなる ように構築して4種類の断面を作成した.そして, 測点A~Cの同一地点において小型FWD試験と平板 載荷試験を行った.M-40 材上に衝撃荷重を与えても 地盤の特性に変化はなかった.そのため,小型FWD 試験は,同一測点上でゴムバッファ,載荷板直径, 落下高さをいくつか変化させ実施した.表-1に小型 FWDの試験条件を示す.



表-1 /	小型 FWD	の試験条件
-------	---------------	-------

重錘の質量	5kg
ゴムバッファ	写真-1 に示す2種類
載荷板直径	100mm, 200mm, 300mm
落下高さ	100~350mmの50mm間隔

(2) ゴムバッファと時系列データの関係

路盤厚さ 50mm の B 地点上において重錘落下高さ 100mm, 写真-1 に示す2種類のゴムバッファを用い て小型 FWD 試験を行った .各ゴムバッファの特性を 表-2 に示す.ゴムバッファの形状のみだけでなく, 硬度および材質も異なっている.図-2および図-3に 2 種類のゴムバッファを用いて測定した荷重と変位 の時系列データの結果を示す.時系列データの形状 は,ゴムバッファの硬度や形状に依存するため,荷 重および変位のピーク値は異なったものになってい る.そこで本研究では,ゴムバッファの違いに依存 しない値として時間積に着目した.時間積には荷重 と変位の2種類がある.ここでの荷重時間積とは, 図-4 に示すように荷重が発生してから最大値になる までの波形面積部分のことである.変位時間積も荷 重時間積と同様に変位が発生してから最大値に達す るまでの波形面積である.



写真-1 ゴムバッファ

表-2	ゴムバッファの特性	

		丸型バッファ	細長バッファ
碩	度	60度	65 度
权	質	JIS K 6386 種類 A	ネオプレンゴム



ゴムバッファのみを変えて,同一地点,同一条件 のもと6回の測定を行った.表-3に各測定条件で得 た時間積の平均値を示す.ゴムバッファが変わるこ とにより荷重と変位のピーク値は異なった.しかし, 時間積は同じ値であった.

つぎに,表-4に荷重時間積を変位時間積で割った ものと重錘落下高さの関係を示す.荷重時間積を変 位時間積で割った値は,重錘落下高さが変わっても ほとんど同じ値を示している.このことから,荷重 時間積を変位時間積で割った値を使用することによ り,重錘落下高さとゴムバッファの違いを考慮でき るものと考えられる.





表-3	ゴムバッファと時間積の関係
-10	

ゴムバッファ	落下高さ	荷重時間積	変位時間積
	(mm)	(N•s)	(µm• s)
丸型	150	14.5	0.5
細長	150	14.4	0.5
丸型	300	20.0	0.7
細長	300	20.3	0.7
丸型	450	24.7	0.8
細長	450	24.8	0.8

(3)時間積を用いた地盤の強度評価

平板載荷試験の支持力係数は,JISA1215より載荷 板直径300mmを使用して,地盤が1.25mm沈下した ときの荷重強さから計算されている.本研究で使用 した小型 FWD の載荷板直径は100mm,200mm およ び300mmの3種類である.支持力係数は載荷板の直 径と反比例の関係にあるため次に示す式(1)を用い て各種載荷板に適した沈下量を計算する必要があ る.

$$D = 1.25 \times \frac{R}{R_{300}}$$
 (1)

ここに

- D :小型 FWD を用いて支持力係数値を算出する
 ときの沈下量
- R₃₀₀:基準載荷板(300mm)の直径

R:小型 FWD の載荷板直径

式(1)より計算した各載荷板に適した沈下量を表 -5に示す.平板載荷試験の場合と地盤に作用する応 力状態が等しくなるように,小型FWD試験で蓄積し た変位のピーク値が表-5の値に近しデータのみに着 目し,その時の時間積と平板載荷試験の支持力係数 の関係を調べた.図-5は,時間積の比と支持力係数 の関係を示す.相関係数は0.78と大きく,所定の沈 下量付近の時間積から地盤の強度に関係なく高い精 度で支持力係数が推定できると考えられる.

表-4 落下高さと時間積の関係

	荷重時間積/変位時間積		
落下高さ	丸型バッファ	細型バッファ	
(mm)	(N/µm)	(N/µm)	
150	29	29	
300	29	29	
450	31	31	

表-5 所定の沈下量			
載荷板直径(mm)	所定の沈下量 (mm)		
100	0.417		
200	0.833		
300	1.250		



図-5 時間積と支持力係数の関係

静的解析による路床および路盤の 弾性係数の推定

路床および路盤の弾性係数を推定するために,こ こでは土槽内で収集した平板載荷試験と小型 FWD 試験のデータを使用して静的解析を行った.そして, ゴムバッファや重錘落下高さの違いが解析結果に与 える影響について検討した.

(1) 静的解析による路床の弾性係数の推定

解析手法により路盤の弾性係数を推定する場合に は,路床の弾性係数の違いが解析結果に与える影響 を的確に把握する必要がある.そのため,表-6に示 す2種類の路床の弾性係数を使用して路盤の弾性係 数を推定した.解析ソフトは,ELSA⁸⁾を使用した. ELSA は,層厚,弾性係数,ポアソン比等のパラメ ータが既知であるとき,多層弾性理論を用いて多層 弾性体の力学挙動を計算する解析ソフトである.解 析に使用した荷重と変位のデータは,路盤厚さ50mm のB地点,小型FWDの重錘落下高さ100mm,丸型 バッファを使用して計測したときの値である.図-6 に路床の弾性係数の違いが路盤弾性係数に与える影 響を示す.このことから,解析法により路盤の弾性 係数を推定する場合には,路床の弾性係数を固定し ておく必要がある.

そのため、マサ土の路床上で得た平板載荷試験の 荷重と変位のデータから、ELSA を用いて路床の弾 性係数を推定した.路床とコンクリート盤の2層モ デルを作成して、表-7に示す物性値を代入した.そ して、実験で得た変位と解析で求めた変位が同じに なるようにして路床の弾性係数を逆解析した.繰り 返し計算の結果、路床の弾性係数に10MPaを入れ静 的解析を行うと図-7に示すように実験値と解析の値 がほぼ同一の値となった.したがって、路床の弾性 係数を10MPaとし、以後の解析においてはこの値を 使用する.

(2)静的解析による路盤の弾性係数の推定

小型 FWD の荷重と変位の時系列データからピー ク値のみを使用して, ELSA により路盤の弾性係数 を推定した.解析モデルは,コンクリート盤と路床 および路盤の3層とした.解析に使用した物性値を 表-8 に示す.図-8 に路盤厚が50mmでB地点,2種 類のゴムバッファを使用して,落下高さを変化させ た場合の解析結果を示す.同一測点上で採取したデ ータにもかかわらず, 重錘落下高さとゴムバッファ が変化するだけで路盤の弾性係数がかなりばらつい ている.図-8に示したデータから変動係数を計算し た, 変動係数は, 17%であった, また図-9は, B地 点上で小型 FWD の重錘落下高さ 150mm, 丸型バッ ファを使用して測定したデータから求めた路盤弾性 係数と路盤厚の関係である、路盤厚さが薄いほど逆 解析した弾性係数が大きくなっている.図-9に示し たデータから変動係数を計算した.変動係数は.84% であった.静的解析では,同一材料で測定したデー タにもかかわらず,重錘落下高さやゴムバッファ, 路盤厚の違いにより路盤弾性係数が大きく異なった. これらの原因としては,本来連続的な時系列データ として得られる荷重および変位から,ピーク値のみ を使用して解析を行っているため,地盤の挙動を正 確に推測できず、ゴムバッファや重錘落下高さの違 いに対応できなかったものと考えられる。

 180
 150

 120
 120

 90
 120

 90
 0

 20
 50

 路床の弾性係数(MPa)

 図 -6
 路床の弾性係数の違いが路盤の

 弾性係数に与える影響

表-6 路盤弾性係数の推定に使用した物性値

弾性係数

(MPa)

*

20,50

30000

層厚

(mm)

50

200

半無限

舗装構成層

路盤

路床

コンクリート

ポアソン比

0.3

0.3

0.2

*:解析の際に仮定する.

表-7 静的解析の物性値 (2 層構造)				
舗装構成層	層厚	弾性係数	ポアソン比	
	(mm)	(MPa)		
路床	200	*	0.3	
コンクリート	半無限	30000	0.2	
			·	

*:解析の際に仮定する.



表-8 静的解析の物性値 (3層構造)					
舗装構成層 層厚		弾性係数	ポアソン比		
	(mm)	(MPa)			
路盤	50,100,150,200	*	0.3		
路床	200	10	0.3		
コンクリート	半無限	30000	0.2		
* 細长っ呶に/(ウナス					

_

*:解析の際に仮定する.





与える影響

4. 動的解析による路盤弾性係数の推定

前章では,既往の推定方法である静的解析によっ て路床・路盤の弾性係数を求めた.本章では,小型 FWD の荷重と変位の時系列データを用いて動的手 法により路盤の弾性係数を推定した.

(1) 動的解析のモデル

図-10 は小型 FWD の重錘落下高さ 200mm,丸型 バッファを使用して測定した場合の荷重の時系列デ ータである.静的解析では,荷重と変位のピーク値 のみで解析を行ったが,動的解析ではそれらの時系 列データをすべて入力して解析を行う.ここで使用 した解析ソフトは,汎用 FEM 解析プログラム NASTRAN である.

路盤厚さ 200mm の解析モデルを図-11 に示す.円 筒座標系,軸対称要素を用いて路盤と路床の解析モ デルを作成した.拘束条件は,回転軸は鉛直方向以 外を拘束,底面は完全拘束,側面は回転以外を拘束 とした.荷重は,等分布荷重として路盤の表面に作 用させた.動的解析に用いた各層の物性値を表-9 に 示す.路床の弾性係数は,前節で静的解析により推 定した値を使用した.減衰係数の値に 0.98MNs/m を 用いた.これは,董等の研究報告を参考にした²⁰⁾. 路盤と路床の密度は,密度試験により求めた値を使 用した.



図-10 荷重の入力波形



(2)動的解析の結果

図-12は、図-10に示した荷重の時系列データを入 力して解析を行ったシュミレート結果である.解析値 と実験値に位相差が生じたが、ピーク値は等しい. 図-13に路盤厚が50mmで2種類のゴムバッファを 用いて、落下高さを変化させた場合の解析結果を示 す.図-13に示したデータから変動係数を計算した. 変動係数は、5%であった.図-14は、B地点上で小 型 FWD の重錘落下高さ150mm、丸型バッファを使 用して測定したデータから求めた路盤弾性係数と路 盤厚の関係である.図-14に示したデータから変動 係数を計算した.変動係数は、24%であった.この ことから、動的解析では、静的解析と比較して、解 析結果に生じるばらつきが小さい.

表-9 動的解析に使用した物性値

構成層	弾性係数	層厚	密度	ポアソン比
	(MPa)	(mm)	(kg/m ³)	
胶般	*	50,100	2100	0.3
喧笛		150,200	2100	0.5
路床	10	200	1400	0.3



*:解析の際に仮定する.

図-12 動的解析のシュミレート結果





(3)静的解析と動的解析で求めた弾性係数の比較

静的解析と動的解析から求めた弾性係数を比較す ると,動的解析で求めた弾性係数が一桁小さい値と なっている.この原因としては,動的解析を行う際 に不連続な粒状路盤を連続体と仮定したためと考え られる.路盤の厚さ200mmのB地点において,載荷 板直径 300mm, 重錘落下高さ 200mmの小型 FWD に 外部センサーを設けて測定を行った,外部センサー は載荷板中央から 300mm 離れた箇所に設置した.図 -15 に外部センサーを使用した時の変位の時系列デ ータを示す,載荷板直下の変位を D0,載荷板直下か ら 300mm 離れた箇所の変位を D300 とする. D0 の みに変位が生じ、D300ではほとんど変位が発生しな かった.また, D0 と D300 がピーク値までに達する 時間を比較するとD300のほうが早く本来とは逆の 結果が得られた.図-15 に示した D0 と D300 の時系 列データを使用して静的解析と動的解析を行った. 表-10 に静的解析に用いた初期値を,表-11 に動的解 析に使用した初期値を示す.静的および動的解析と も実験で得た D0 と解析で求めた D0 が等しくなるよ うに路盤の弾性係数を初期値として入力する.そし て,実験値とそれらの解析で求めた変位とを比較し て地盤の挙動が正確にシュミレートできているか調 査した.図-16 に実験と静的解析で求めた変位を示 す.載荷板直下から 300mm 離れた箇所では実験値と 解析値に大きな違いが見られる.図-17 に動的解析 で求めた変位を示す.動的解析では,載荷板直下か ら 300mm 離れた箇所では変位が発生しなかった.こ のため,静的および動的のどちらの手法を用いても 地盤の挙動を正確にシュミレートできず,どちらの 解析手法も妥当とはいえない.また,動的解析の結 果からも, D0 と D300 がピーク値に達するまでの時 間を比較するとD300のほうが早かった.今後,この 原因についても明らかにする必要がある.



表-10	静的解析に使用した物性値	
18-10	時時時から这方したが主虐	

舗装構成層	層厚	弾性係数	ポアソン比
	(mm)	(MPa)	
路盤	200	88	0.3
路床	200	10	0.3
コンクリート	半無限	30000	0.2

表-11 動的解析に使用した物性	E値
------------------	----

構成層	弾性係数	層厚	密度	ポアソン比
	(MPa)	(cm)	(kg/m ³)	
路盤	7.2	20	2100	0.3
路床	10	20	1400	0.3



5. まとめ

本研究では、小型 FWD の荷重と変位の時系列デー タを用いて静的および動的解析を行い、動的解析の 有効性および問題点について確認した.また、荷重 と変位のピーク値のみだけでなく、時系列データを 使用した強度評価指標を新たに導入し、平板載荷試 験の結果と比較して妥当性を明らかにした.本研究 で得られた知見をまとめると以下のとおりである.

- (1)荷重および変位の最大値は,重錘の落下高さや ゴムバッファが異なると,測定結果が同じになら ない.しかし,荷重時間積/変位時間積は,重錘落 下高さやゴムバッファが異なってもほぼ同じ値と なる.
- (2)静的解析では,重錘落下高さやゴムバッファ, 層厚が異なると解析結果は大きくばらつく.しかし,動的解析では,静的解析に比べてその差はかなり小さい.
- (3)静的解析および動的解析で求めた路盤弾性係数 を比較すると,動的解析で求めた弾性係数が一桁 小さな値となった.

今後,個別要素法を使用して,粒状路盤を不連続 体と取り扱い解析を行いたいと考えている.

謝辞:本研究を行うにあたり実験,データ処理等に おいて多大なる協力をいただいた元長岡技術科学大 学(現大松建設)の小笠原浩氏に感謝の意を表する.

参考文献

- 1) 浅井新一郎: 衝撃による地盤支持力の測定について, 土木学会誌, Vol.42, No.5, pp.17-22, 1957.5.
- 2) 阿部長門,関根悦夫,鴨智彦,前原弘宣:FWD 測定 に基づく解析方法の違いが弾性係数に与える影響,土 木学会第54回年次学術講演会第V部門,pp.376-377, 1999.
- 3) 鴨智彦, 関根悦夫, 阿部長門, 丸山暉彦: FWD を用 いた盛土の剛性評価方法, 土木学会舗装工学論文集 第4巻, pp.47-52, 1999.
- 4) 佐藤研一,吉田信夫,田中秀明,出利葉敦,永谷謙治:
 FWD を用いた道路舗装の支持力評価,土木学会舗装 工学論文集 第3巻, pp.67-72,1998.
- 5) 小笠原浩:小型 FWD を用いた路床・路盤の構造評価方 法に関する研究,長岡技術科学大学工学部卒業論文 2003.
- 6) 関根悦夫,村田修,木幡行広,矢崎澄夫,阿部長門, 雑賀義夫,丸山暉彦:礫材を用いた鉄道盛土の転圧試 験(5),第31回地盤工学研究発表会,D-9,1174, pp.2347-2348,1996.

- 7) 久保寺貴彦,関根悦夫,桃谷尚嗣,姫野賢治:小型
 FWD に関する衝撃解析 載荷エネルギーの検討 ,
 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集,第V部
 門,pp.114-115,2001.
- 8) 姫野賢治:パソコン用多層弾性構造解析システム (ELSA)の開発,第18回日本道路会議論文集(4) 舗装部会, pp.338-339,1989.
- 9) 八谷好高:空港コンクリート舗装のマネージメントシステムに関する研究,港湾技研資料 No .698 ,pp.83-87, 1991.
- 10)金井利浩,東滋夫,岡部俊幸,松井邦人,渡辺規明: 時系列データを用いた動的 FEM による逆解析に関す る研究,土木学会舗装工学論文集第1巻,pp.39-48, 1996.
- 11) 阿部長門,関根悦夫,上浦正樹,三枝長生,丸山暉彦:
 FWD による路盤・路床の支持力評価方法,土木学会 舗装工学論文集第2巻,pp.135-143,1997.
- 12) 岡部俊幸,金井利浩,東滋夫,松井邦人:静的および 動的逆解析による舗装構造評価に関する一検討,土木 学会第53回年次学術講演会第V部門,pp.46-47,1998.

- 13)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め固め管理に関する研究,土木学会舗装工学論文集,第1巻,pp.121-128,1996.
- 14) 関根悦夫,杉本勝巳,須長誠,阿部長門,中西太:FWD
 を用いた鉄道路床・路盤の剛性評価,第32回地盤地 盤工学研究発表会講演集,pp.2213-2214,1996.
- 15) 植下脇:講座「舗装の力学」,舗装,8-6,pp.33-38, 1973.
- 16) FWD 研究会, FWD に関する研究(その2), 1995.
- 17) 亀山修一,松井邦人,笠原篤,姫野賢治:逆解析が不 安定となる舗装構造における最適センサー配置に関 する検討,土木学会舗装工学論文集第2巻,pp.89-94, 1997.
- 18)林信也,東滋夫,金井利浩,岡部俊幸:FWD 試験に おける測定たわみの温度補正システムの開発,土木学 会舗装工学論文集第2巻,pp.95-104,1997.
- 19)董勤喜,松井邦人,八谷好高,坪川将丈:動的荷重を
 受ける多層弾性構造の効率的有限要素解析と感度解析,土木学会論文集 No .731/I-63, pp.247-255, 2003.
 4.

STUDY ON EVALUATION METHOD OF ROAD BASE STIFFNESS BY USING HISTORICAL DATA FROM HANDY - FWD

Yoshio TATSUMI, Osamu TAKAHASHI and Teruhiko MARUYAMA

In this study, Handy-FWD tests and plate-bearing tests were carried out on the test base to discuss an appropriate data analysis. To know elastic modulus of base, we carried out static and dynamic analysis by using load and displacement historical data from handy-FWD. From these results, dynamic analysis has advantages and problem. In addition, a new indicator of strength of base by using the historical time data was introduced. We also justify validity of proposed procedure by comparing the result of the new procedure with one of the plate-bearing test.