

タイトル	感圧紙を用いた小型FWD による路盤の変形係数推定法に関する研究
著者	上浦，正樹；Kamura, Masaki
引用	工学研究：北海学園大学大学院工学研究科紀要(15): 27-35
発行日	2015-10-30

感圧紙を用いた小型 FWD による路盤の 変形係数推定法に関する研究

上 浦 正 樹*

ESTIMATION OF ROADBED ELASTIC MODULUS USING A PRESSURE MEASUREMENT FILM LOAD

Masaki Kamura*

概 要

小型 FWD による動的逆解析によって路盤・路床などの変形係数を求める場合、接地圧分布の種類を定める必要がある。しかし試作した接地圧測定装置には測定範囲に限りがあることから、本研究では市販されている感圧紙を用いて 0.01 mm 以下の間隔で接地圧分布を推定した。この結果を動的逆解析に反映させるため典型的な接地圧分布に対する共通する式を導き、これに基づき感圧紙で得られた接地圧分布を推定する方法を提案した。以上の成果を踏まえて動的逆解析プログラム (Wave BALM) の一部を改良し、現場試験より改良前の結果に対し有意差があることを確認した。

Key Words: portable FWD, contact pressure, back-calculation, base course material

1. はじめに

土の剛性は締固め度、乾燥密度、粒度、粒径、粒子形状などに依存している¹⁾ことを考慮すると、剛性に関する情報を得るには、現場で載荷し地盤の変形を直接求める原位置載荷試験が望ましい。原位置載荷試験のうち平板載荷試験は、反力フレームを現場に持ち込む必要があるうえ、測定時に多くの手間と時間を要していることから、車載タイプの FWD と小型 FWD が開発された。この小型 FWD は反力フレームを用いずに重錘を自由落下させ、載荷荷重と地盤の変位を自動計測することで効率よく地盤などの剛性を推定できる。

我が国に小型 FWD が開発されてから 20 年以上経ている²⁾が、この間に小型 FWD 試験で推定される KPFWD 値から平板載荷試験による K 30 値を推定しようとする基準化がなされた^{3),4)}。欧州では地盤や路盤の剛性を変形係数 (E) で評価するのが一般的であり、Gurp ら⁵⁾は Boussinesq の弾

性解に基づき小型 FWD の最大載荷荷重と最大変位から変形係数を推定する方法を提案している。

一方、多層弾性理論に基づき、車載タイプの FWD の測定結果から逆解析により複数の層の各変形係数を推定することができる。近年、これらの測定結果のうち最大値のみを用いる静的逆解析では十分な精度は得られないとして時刻歴データを活用する動的逆解析に関する研究が進んできている⁶⁾。だが、FWD の載荷板における接地面にゴム材が張り付けられているのに対し、小型 FWD にはゴム材はなく、載荷板が直に路盤などに接している。そのため載荷板の接地圧分布が土の種類によって異なることから、本研究で使用する動的逆解析プログラムは、種々の接地圧分布に対応できるように改良した Wave BALM⁷⁾である。従って、この動的逆解析の入力条件に適する載荷板の接地圧分布を推定することが重要となる。

このように小型 FWD の測定データにより動

* 北海学園大学大学院工学研究科建設専攻 (社会環境系) 教授・博士 (工学)
Graduate School of Engineering (Civil & Environmental Eng.), Hokkai-Gakuen University

的逆解析を行うには、接地圧測定方法の開発が不可欠であるが、現段階では小型 FWD に取り付ける接地圧を測定する汎用性のある方法は見当たらない。そこで試作した接地圧測定装置を用いている⁸⁾が、この接地圧測定装置は超小型圧力計を用いているため測定密度などの面から測定範囲に限りがある。そこで解像度 300 dpi（各点の間隔は 0.063 mm）で接地圧分布を推定することができ、加えて一般に入手可能な方法として感圧紙を用いることとした。以上から本研究の目的は、感圧紙を用いて上下、左右それぞれ 0.063 mm 間隔により 2 次元の平面で測定される接地圧分布から直径方向の 1 次元での接地圧分布を推定し、この結果

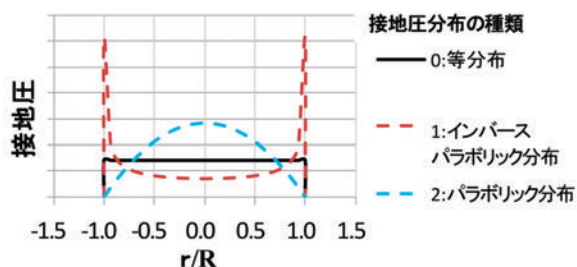


図-1 接地圧分布の種類

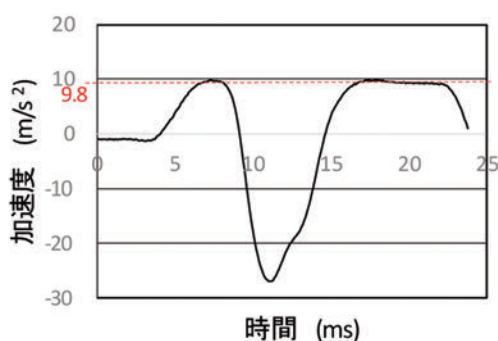


図-2 加速度測定結果（外部センサ）

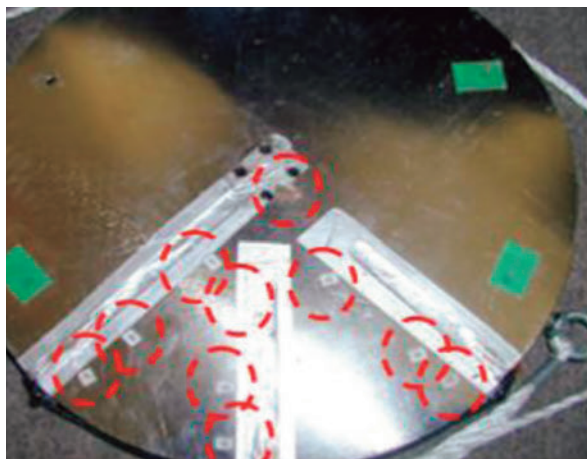


図-3 接地圧測定装置

を動的逆解析で使用される接地圧分布の種類に反映させる方法を検討し、さらに現場試験で動的逆解析によって得られた変形係数と求められた接地圧分布の種類との妥当性を確認することにある。

2. 接地圧の種類に対する動的逆解析の感度

(1) 接地圧分布の形状

接地圧分布に関する既往の研究のうち、Venapusa と White は Terzaghi らを参考として小型 FWD の剛な載荷板の接地圧分布形状の 3 種類に分類（図-1）している⁸⁾。接地圧分布は動的逆解析の入力条件になっており、入力しやすいように、等分布を「0」、インバースパラボリック分布を「1」、パラボリック分布を「2」としている。（以下ではこの 3 種類を典型接地圧分布とする）。それらの式で表したものを以下に記す。

・等分布

$$p(r, t) = \frac{P(t)}{\pi R^2} \quad (1)$$

・インバースパラボリック分布

$$p(r, t) = \frac{P(t)}{2\pi R \sqrt{R^2 - r^2}} \quad (0 < r \leq R) \quad (2)$$

・パラボリック分布

$$p(r, t) = \frac{2(R^2 - r^2)P(t)}{\pi R^4} \quad (0 < r \leq R) \quad (3)$$

ここで $p(r, t)$ ：接地圧， r ：中心からの距離 (cm)， t ：時間 (ms)， $P(t)$ ：載荷荷重 (kN)， R ：載荷板半径 (cm)

既往の研究⁹⁾では、載荷荷重を載荷板の面積で除した平均接地圧 (p_{mean})、載荷板中心付近の接地圧 (p_0)、載荷板端部内側付近の接地圧 (p_1) に着目し、上記の接地圧分布の特徴を 1) 等分布では $p_0 = p_1 = p_{mean}$ 、2) インバースパラボリック分布では $p_0 < p_{mean}$ かつ $p_1 < p_{mean}$ 、3) パラボリック分布では $p_0 > p_{mean}$ かつ $p_1 > p_{mean}$ としている。小型 FWD に対応する動的逆解析プログラム Wave BALM⁷⁾では接地圧の入力条件が図-1 の「0」、「1」、「2」のいずれかであることから、本研究では、上記の典型接地圧分布として 1) ～ 3) を接地圧分布の種類を推定する判断基準（以下では「判断基準」と略する）とする。

(2) 载荷試験と動的逆解析

小型 FWD の外部センサのうち、地盤などの測定対象物上に接着せずにセットし载荷によって対象物が沈下するときの加速度を測定し、これを 2 回積分してその変位を算出するものがある。この方式では载荷時に対象物の沈下加速度が自然落下による加速度 (9.8 m/s^2) を超えるとそれ以上の測定はできない。この例である図-2 では $17.8 \text{ ms} \sim 22.2 \text{ ms}$ では本来 9.8 m/s^2 を超えると想定されるがピークカットされた台形のような波形が見られる。その結果、出力された変位は実際よりも小さい。一方、小型 FWD 本体ではこの現象が生じないため、本研究では小型 FWD 本体の変位のみを用いた。

次に、試作した接地圧測定装置とは 10 個の超小型圧力計（直径 6.5 mm、厚さ 1 mm、容量 1 MPa）を円形の载荷板（直径 30 cm、厚さ 25 mm）における中心角 90° の扇形内に中心と半径方向に 6 cm、12 cm、13.5 cm の各位置に取り付けたものである¹⁰⁾（図-3）。この図の円形の破線は超小型圧力計の位置を示す。

(3) 動的逆解析の感度

表-1 に示す A～F までの 6 ケースの路盤で小型 FWD 試験を行い、これによる動的逆解析において典型接地圧分布の違いが与える変形係数の変動を検討した。ここで A、B、E 及び F は典型的な粒状体であり、接地圧分布はパラボリック分布と想定される。これは接地圧測定装置による試験でも確認された。一方、接地圧測定装置により C はインバースパラボリック分布、D は等分布と判定された⁸⁾。典型接地圧分布の中から接地圧測定試験で得られた接地圧を基本接地圧分布とする。これにより動的逆解析を実施し各層の変形係数を求めた（これを各層の基本変形係数とする）。次に、3 種類の典型接地圧分布から基本接地圧分布以外の接地圧分布に対し、他の入力条件を全て同一にして動的逆解析を行い、各層の変形係数を推定した（これを各層の暫定変形係数とする）。ここで、それぞれの層について基本変形係数を分母として暫定変形係数との比を動的逆解析の感度として、この比を求めた。

この結果から暫定変形係数は基本変形係数に対して 0.5～2 倍程度のかかりのばらつきが発生す

表-1 解析対象の路盤・地盤

A			B		
2層			3層		
	種類	層厚(cm)		種類	層厚(cm)
路盤	砂	28	路盤	礫	17
地盤	ローム層		路盤	砂	28
			地盤	ローム層	

C			D		
3層			4層		
	種類	層厚(cm)		種類	層厚(cm)
路盤	アスファルト再生骨材	20	路盤	コンクリート再生骨材	20
	礫まじり砂	80	路盤	アスファルト再生骨材	20
地盤	ローム層			礫まじり砂	80
			地盤	ローム層	

E			F		
2層			3層		
	種類	層厚(cm)		種類	層厚(cm)
路盤	礫まじり粘土	50	路盤	礫	33
地盤	ローム層			礫まじり粘土	50
			地盤	ローム層	

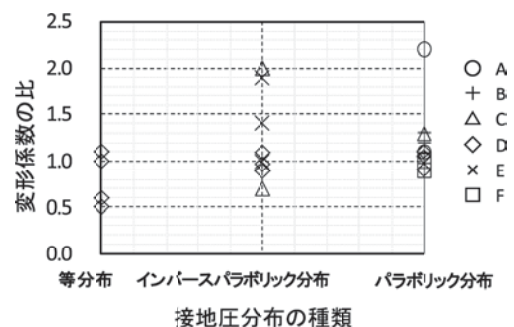


図-4 基本接地圧分布と暫定変形係数の比

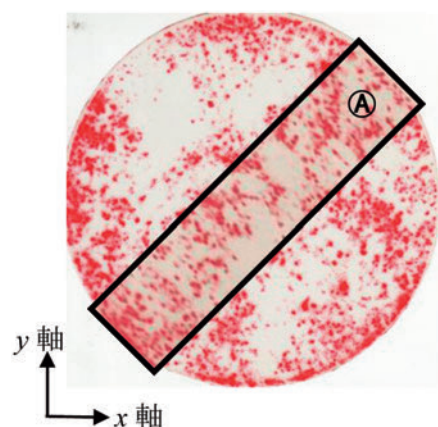


図-5 接地圧分布の測定例（感圧紙）

ることが明らかになった(図-4)。以上から、接地圧分布の選定が Wave BALM による動的逆解析の精度を向上する上で重要であることが明らかになった。

3. 感圧紙による接地圧分布の推定

小型 FWD を用いた動的逆解析を普及させるにあたり、前述の接地圧測定装置は試作段階のみで実用化に至っていないが、感圧紙は市販されていて容易に入手できる上に、0.063 mm 間隔で面的に接地圧分布の形状を求めることができるので実用化の可能性が高い。

(1) 感圧紙の選定

小型 FWD は载荷時間が短時間のうにに接地圧の範囲は最大 400 kPa と比較的小さいことから、これらの条件を満たし国内で入手可能な感圧紙を検討した。その結果、富士フィルムプレスケール（圧力測定フィルム）が適当と考え、そのうち 2 種類のツーシートタイプ（極超低圧用：600 kPa～200 kPa、微圧用：200 kPa～50 kPa）を採用した。これは、発色剤を塗布した A フィルムと顕色剤を塗布した C フィルムの 2 種類から構成されていて、発色剤と顕色剤の塗布面を合わせて使用するタイプである。これに圧力が作用すると、発色剤層のマイクロカプセルが破壊され、中の発色剤が顕色剤に吸着して反応し圧力の程度に応じて赤く発色する度合いが変化する。だが小型 FWD の荷重の最大値までに要する時間（0-P 時間）が 5 ms～10 ms に対し、この感圧紙の測定圧の到達時間で、5 s かかるとしていた。しかし、これはタイヤなどの柔らかい材料の接地圧も対象に入っていることから、剛体と見なされる小型 FWD 用载荷板の接地圧における測定圧の到達時間にかなりの差があることが想定された。そこで実際に使用して接地圧の発現状況を検討することとした。

(2) 感圧紙による圧力分布の推定方法

感圧紙による接地圧測定では路盤の予備载荷を行ってから小型 FWD の载荷板に感圧紙を張り付ける。その後小型 FWD を路盤上にセットし载荷する。ここで得られた濃淡で示される感圧紙の

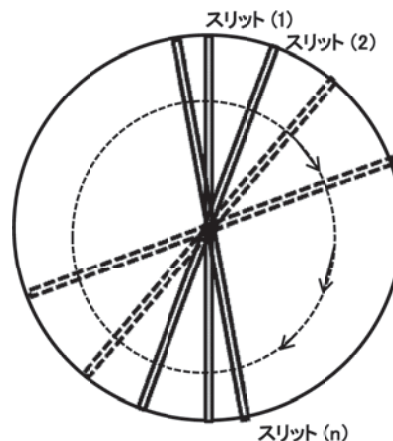


図-6 スリットに分割する例

表-2 接地圧測定結果の例

		短軸方向 (cm)					
長軸方向 (cm)		0.00	0.006	0.013	0.019	…	平均
	5.000	7.00	7.00	7.00	6.07	…	6.91
	5.006	6.07	6.07	6.07	6.07	…	7.30
	5.013	4.21	5.14	5.14	6.07	…	7.04
	5.019	3.29	3.29	4.21	5.14	…	7.17
	5.025	2.36	3.29	4.21	5.14	…	7.55
	5.032	2.36	2.36	3.29	4.21	…	7.70
	5.038	2.36	9.29	9.29	3.29	…	7.88
	5.044	3.29	9.29	9.29	2.36	…	7.75
	5.051	6.36	7.43	7.43	4.43	…	7.69
	5.057	6.36	7.43	7.43	4.43	…	7.31
	5.063	6.36	7.43	7.43	4.43	…	7.05
	5.070	6.36	7.43	7.43	4.43	…	7.16
	5.076	6.36	7.43	7.43	4.43	…	6.98
	5.082	6.36	7.43	7.43	4.43	…	6.63
	5.089	6.36	7.43	7.43	4.43	…	6.90
	5.095	6.36	7.43	7.43	4.43	…	7.03

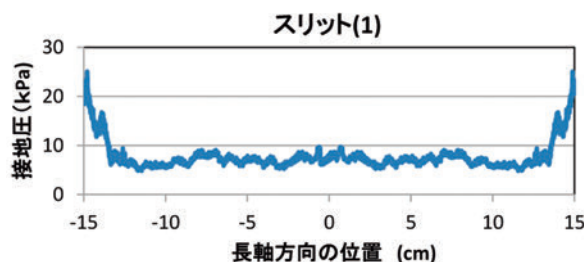


図-7 スリット内の接地圧分布の例

データをスキャナで取り込み、二値化処理により圧力段階を 255 段階に分類する。また、最大 200 kPa 対応の感圧紙における各段階での圧力の分解能は 0.8 kPa である。二値化処理は市販のソフトを使用した。载荷板は路盤の剛性に応じて直径

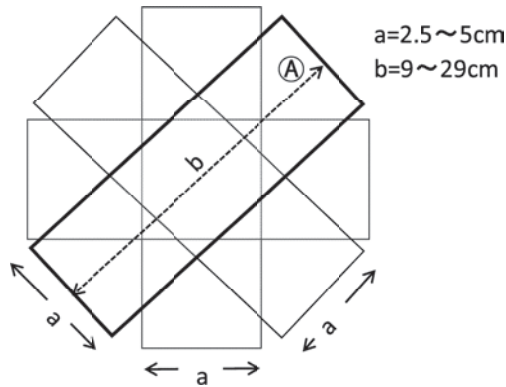


図-8 接地圧分布の推定範囲

10 cm, 20 cm, 30 cm のものを使用した。

ここでは試験土槽（幅 1 m × 長さ 1 m）内で深さ 50 cm の砂質ロームを締固めて K_{30} 値が 112 MN/m^3 とした地盤（含水比 12%, 湿潤密度 1.63 g/cm^3 ）で、直径 10 cm の載荷板を用いた小型 FWD による載荷試験（載荷荷重 850 N）を行った微圧用（200 kPa～50 kPa）の感圧紙のデータを示す（図-5）。ここで直径 10 cm の載荷板を使用する場合、解像度 300 dpi では約 1 万画素のデータが得られる。これから中心を通る円上の接地圧分布を推定して接地圧分布を推定するためには、半径方向で微小な幅 Δ として半径 r と半径 $r + \Delta$ の中空半円上の接地圧を平均する必要がある。実際には路盤面等は完全な水平面でないことから載荷すると半円部分は残りの半円部分より接地圧が大きくなる傾向となる。ここで半円としているのは、接地圧を平均して偏圧を補正する措置とした。しかし、現段階ではこのような平均値を求める方法が確立していない。

そこで本研究では載荷板中心を通る n 個の長方形のスリットに着目してそれぞれのスリットの短軸方向で接地圧を平均し長軸方向の位置に対する接地圧とし、これらの n 個のスリットの接地圧を平均して全体の値とすることとした（図-6）。例として直径 30 cm の載荷板で感圧紙により測定された接地圧の結果からスリット(1)内にある接地圧の値の一部を模擬的に示す。ここで長軸方向の位置に対して短軸方向の接地圧を平均する（表-2）。この操作により全体の接地圧分布は模擬的に示す（図-7）。同様にスリット(2)でも同じような接地圧分布図が求まり、徐々に回転しながらスリット(n)までの n 個の接地圧分布図を求めることができる。これらの接地圧分布を長軸方向の位置に対する接地圧を平均した結果から典型接地圧分布

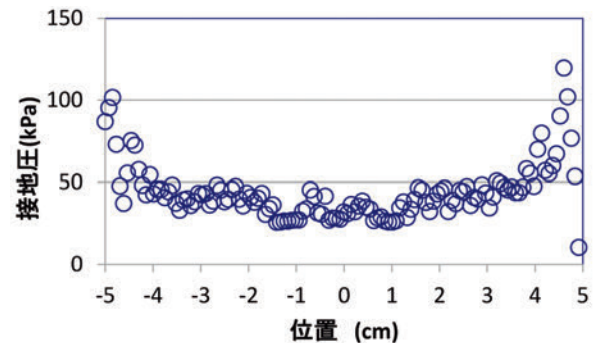


図-9 接地圧分布の推定結果例

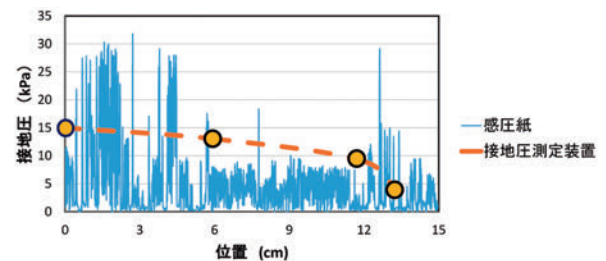


図-10 感圧紙と接地圧測定装置の関係（例）

を推定することができる。本研究では接地圧分布の種類を推定することを主眼におくことから、スリット数を 4 とし、スリットの幅を載荷板の直径が 30 cm では 5 cm, 10 cm では 2.5 cm とした。また、画像を x 軸方向, y 軸方向, $\pm 45^\circ$ 回転した 4 方向において、長方形（短辺 2.5 cm × 長辺 9 cm）の範囲において中央で交差する 2 軸を設け、長軸方向の位置に対して短軸方向の接地圧を求めて平均することとした（図-8）。なお、図-5 と図-8 に示した①は $+45^\circ$ 回転した事例を示している。また直径が異なる載荷板では、その大きさに応じてこの長方形の範囲を拡大した（例えば直径 30 cm の載荷板では短辺 5 cm × 長辺 29 cm とした）。ここで図-5 では圧力シート（微圧用）の適用範囲の下限値よりも小さいが、「判断基準」から粘土の圧力分布であるインバースパラボリック分布に近いことから感圧紙による接地圧分布の推定が可能であると考えられる¹¹⁾。

(3) 感圧紙と接地圧測定装置との比較

セメント系固化材によって路床改良された路床（密度： 1700 kg/m^3 , 平均含水比は 25% 程度）について載荷し接地圧を感圧紙と接地圧測定装置を用いて測定した。その結果、載荷中心付近の接地圧と載荷端部付近の接地圧に着目すると「判断基準」

より判定することにより全体の形状は感圧紙と接地圧測定装置とも同じ基準に入ること示している（図-10）。よって本研究で用いた感圧紙は接地圧分布の傾向を示すことができると判断した。

4. 非典型接地圧分布の対処方法

単一な材料ではなく土の種類が混合しているケースなどでは「判断基準」によらない接地圧分布がある（以下では非典型接地圧分布とする）。そこで非典型接地圧分布も式で示せるように、接地圧分布の全体に共通する式を検討することとした。

(1) 各種接地圧分布に関する共通式の構築

本研究では接地圧分布が鉛直方向の軸対象であ

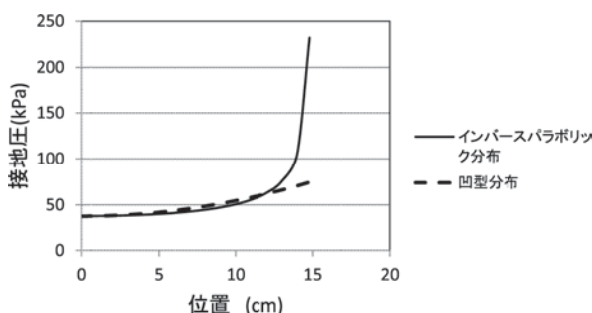


図-11 インバースパラボリック分布と凹型分布

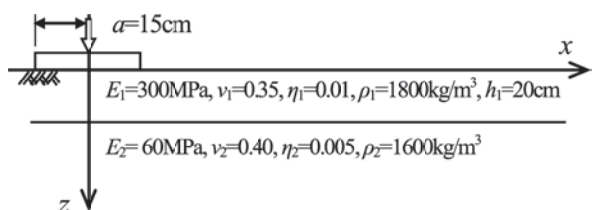


図-12 検討用地盤モデル

表-3 インバースパラボリック分布データの逆解析結果

(a) 弾性係数

	弾性係数 (MPa)		粘性係数 (MPa * s)	
	第1層目	第2層目	第1層目	第2層目
インバースパラボリック	309	60	3.00	0.30
凹型分布	339	60	3.25	0.30

(b) 変動係数

	弾性係数		粘性係数	
	第1層目	第2層目	第1層目	第2層目
インバースパラボリック	0.010	0.002	0.006	0.003
凹型分布	0.003	0.002	0.001	0.002

表-4 凹分布のデータを逆解析した結果

(a) 弾性係数

	弾性係数 (MPa)		粘性係数 (MPa * s)	
	第1層目	第2層目	第1層目	第2層目
インバースパラボリック	309	60	3.00	0.30
凹型分布	283	61	2.76	0.31

(b) 変動係数

	弾性係数		粘性係数	
	第1層目	第2層目	第1層目	第2層目
インバースパラボリック	0.003	0.002	0.002	0.001
凹型分布	0.014	0.003	0.014	0.006

る点に着目した。そこで式(1)（等分布）と式(3)（パラボリック分布）より式(4)に示すように、位置による変化はないとみなした接地圧成分に関する係数 $(p_0(t))$ と位置によって変化するとみなした成分に関する係数 $(p_c(t))$ の2つの独立した係数を導入し、これらを用いた2次関数を使用することとした。

$$p(r, t) = p_c(t) + p_0(t) \times \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) \quad (4)$$

また、式(2)（インバースパラボリック分布）に対しては近似式として式(4)を用いることとした。また、式(2)（インバースパラボリック分布）に対しては近似式として式(4)を用いることとした。

a) 等分布とパラボリック分布

式(4)により等分布では、式(1)より式(5)を導くことができる。

$$p(r, t) = \frac{P(t)}{\pi R^2} = p_c(t) = p_{avg}(t) \quad p_0(t) = 0 \quad (5)$$

ここで $p_{avg}(t)$ ：接地圧の平均値 (MPa) とする。

また、同様にパラボリック分布では、式(3)より式(6)が得られる。

$$p(r, t) = \frac{2(a^2 - r^2)P(t)}{\pi a^4} = 2\left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)p_{avg}(t) = \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right)p_0(t) \quad (6)$$

b) インバースパラボリック分布

インバースパラボリック分布の式(2)からは、そのまま式(4)で示すことができない。そこで2次関数による凹型分布(式(7))をインバースパラボリック分布の近似(凹型分布とする)として導入する。

$$p(r, t) = \frac{1}{2} p_{avg}(t) + p_{avg}(t) \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (7)$$

ここで式(4)と式(7)の関係は

$$p_c(t) = \frac{3}{2} p_{avg} \quad p_0(t) = -p_{avg}$$

となる（図-11）。

(2) インバースパラボリック分布と凹型分布の妥当性

図-10の地盤モデルを対象とした解析例を示す。載荷条件は、最大荷重を 10 kN とし、載荷波形を周期 0.02 s のハーバーサイン波で与えた。なお、載荷板の半径は、15 cm とした。この計算モデルを対象として接地圧をインバースパラボリック分布または凹型分布と仮定して順解析により荷重変位データを作成した。次に、荷重条件をインバースパラボリック分布とし順解析で求めたインバースパラボリック分布による変位データを使用して逆解析を行い、各層の変形係数を求めた（表-2）。また同様に凹型分布についても同様な方法で各層の変形係数を求めた（表-3）。なお、逆解析における入力条件として初期値の値が結果に影響を与えるため、初期値を 50 セット設定し、それぞれについて逆解析を行って、得られた結果の平均を求めた。弾性係数の初期値の設定範囲は、1 層目を 100～500 MPa、2 層目を 20～100 MPa とし、減衰係数の初期値は、1 層目は弾性係数の 1 %、2 層目を弾性係数の 0.5 % とした。

表-2 および表-3 により、図-10 の計算モデルで設定した弾性係数が得られていることがわかる。また、凹分布を仮定した場合には、インバースパラボリック分布に比べて、変動係数が小さくなっている。ここで図-12 の検討用地盤モデルにおいて、載荷条件は全てが同一になるように等分布とし、以上の逆解析結果である弾性係数と粘性係数のみを取り換えて順解析を行った。その結果、載荷中心において深さ方向で 0～60 cm の範囲で鉛

直応力のレンジは平均値の 1 % 以下であり、鉛直ひずみの最大値のレンジは平均値の 2 % 以下であった。これにより弾性係数と粘性係数のばらつきは小さいものと考えられる。以上から式(7)が有効であることを確認した。

(3) 接地圧分布の近似式と変形係数の推定法

a) 接地圧分布の近似式

小型 FWD 試験で感圧紙を用いると最大接地圧での分布を測定することとなる。そこで式(4)の共通式において、載荷荷重が最大となる時間 ($t = t_{max}$) における接地圧分布 $p(r)$ を $p_c(t_{max}) = A$ とし、 $p_0(t_{max}) = B$ とすると式(4)は式(8)となる。

$$p(r) = A + B \times \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (8)$$

よって、感圧紙のデータから得られる接地圧分布に対して、この式から r の 2 次関数による最小二乗法から係数 A と係数 B を求めることで、「判断基準」により接地圧分布の近似式を推定できる。ここで式(8)に等分布に関係している要素 α を付け加える。

$$p(r) = A + \alpha + B \times \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (9)$$

従って、係数 A 、 B 、 α によって「凹型分布＋等分布」または「パラボリック分布＋等分布」の可能性が存在することとなる。

以上から「判断基準」を式(9)に従って書き直し（表-5）、「新判断基準」とする。

b) 動的逆解析プログラム (Wave BALM) の一部の改良

本研究では、3 種類の典型接地圧分布に加え、以上の成果を踏まえた「凹型分布」と「凹型分布＋等分布」の各接地圧分布に対応できるように 5 種類の接地圧分布に対応する動的逆解析プログラムの一部を改良した（以下、新 Wave BALM とする）。ここで「凹型分布」は「インバースパラボリック分布」との比較に加え、等分布の要素 α の効果を確認するために使用する。なお「インバースパラボリック分布」と「凹型分布＋等分布」は粘性土系の地盤などで一般的に見られる接地圧分布である。

以上から感圧紙で推定された接地圧分布から、これらの 5 種類の中より選択できるようになっ

表-5 新判断基準

	接地圧分布の種類	新判断基準
1	等分布	$B=0$
2	パラボリック分布	$A=0$
3	凹型分布	$B = -(2/3) \times A$ かつ $\alpha = 0$
4	凹型分布＋等分布	$B = -(2/3) \times A$ かつ $\alpha > 0$
5	パラボリック分布＋等分布	$(A + \alpha) > 0$

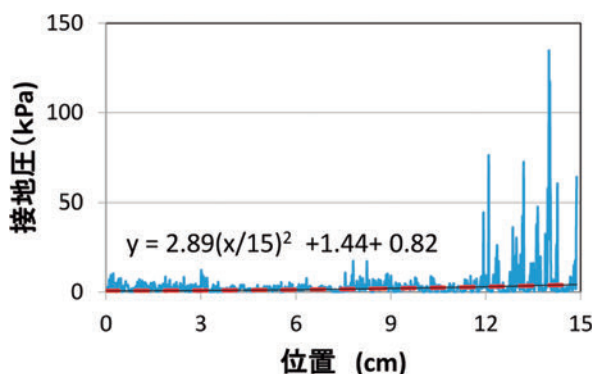


図-13 感圧紙による接地圧測定結果の例

た。この結果、動的逆解析では接地圧分布を入力条件としていることから、接地圧分布の選択肢が増えることで、粘性土系の地盤等でより詳しく変形係数の検討が可能となった。

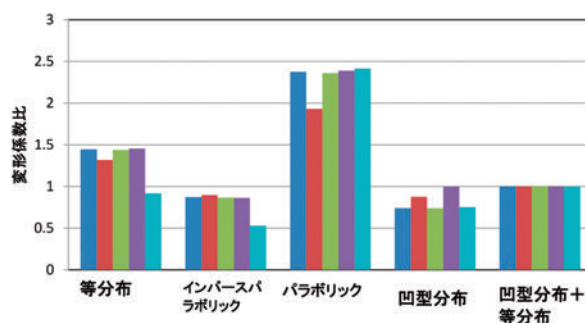
5. 実際の適用例

北海学園大学校内で地盤上に礫まじりロームからなる埋め土（層厚 80 cm）上に砂質ローム層（層厚 20 cm）で構成されている 2 層の模擬路盤を対象に小型 FWD による载荷試験と接地圧試験を行った。ここで砂質ロームの平均含水比 38%，密度 1.62 g/cm^3 であった。この模擬地盤に半径 15 cm の载荷板を用いて小型 FWD により最大荷重 100 N により 3 回（予備载荷 6 回）载荷して変位を測定した。その後、同じ条件で接地圧試験を行った。接地圧試験では接地圧測定装置と幅 5 cm で長さ 20 cm の感圧紙（富士フィルムプレススケール LLLW タイプ：最大 0.6 MPa ）を使用した。この結果の例を図-13 に示す。また、最小二乗法によって接地圧推定式を求め、式(9)に従って式(10)に示す。

$$p(r) = 4.34 + 0.82 - 2.89 \left(1 - \left(\frac{r}{15}\right)^2\right) \quad (10)$$

これから図-13 の接地圧分布に対し「判断基準」により分類すると「インバースパラボリック」となる。

一方、「新判断基準」では $A=4.34$, $B=-2.89$, $\alpha=0.82$ より「凹型分布+等分布」となる。また、新 Wave BALM を用いて 5 種類の全てに接地圧分布について各層の変形係数を求めた。これらのうち砂質ローム層の結果を示す（図-14）。ここで今回の接地圧推定式による「凹型分布+等分布」を接地圧分布の条件として得られた変形係数を基準（分母とする）に、残りの 4 種類の接地圧分布

図-14 接地圧分布別変形係数比較
（「凹型分布+等分布」を基準）

により推定された変形係数の比を示す。この結果から「凹型分布」は「インバースパラボリック分布」とは、ほぼ同一と見なすことができるが、その他については有意差が認められた。以上から、粘性土系の接地圧分布に対して感圧紙によって接地圧分布の種類は区分されるが、小型 FWD 用の新 Wave BALM でも同様に区分されることが明らかになった。

6. まとめ

小型 FWD によって路盤・路床などの変形係数を求める動的逆解析では接地圧分布の推定が必須である。しかし既往の研究で試作した接地圧測定装置は測定範囲に限りがあることから、本研究では感圧紙により連続的に接地圧分布を測定し「判定基準」を定めることで、この結果を動的逆解析に反映させる方法を検討した。以上を総括すると次のようになる。

- (1) 接地圧の分布を推定した感圧紙と接地圧測定装置とはほぼ同じ分布を示すことを確認した。
- (2) 加速度から変位を測定する小型 FWD の外部センサでは重力加速度より大きい加速度を測定できないことを示した。従って本研究の動的逆解析では小型 FWD 本体の変位波形のみを使用した。
- (3) 感圧紙で求めた接地圧分布の形状を近似式で示すため、3 種類の典型接地圧分布に対する共通式を提案した。この際、2 次関数による「凹型分布」が「インバースパラボリック分布」と同等に扱えることを示した。
- (4) この共通式に基づき、最小 2 乗法により接地圧分布の近似式を求める方法を提案した。

- (5) 小型 FWD 用の動的逆解析プログラム Wave BALM は 3 種類の典型形状の接地圧分布に対応しているが、今回の成果を踏まえ、Wave BALM を改良した(新 Wave BALM)。これは「インバースパラボリック分布」の比較のための「凹型分布」と「凹型分布＋等分布」の 2 種類の接地圧分布を追加したものである。以上から、粘性土系の接地圧分布に対して感圧紙によって連続的に接地圧の分布を推定した結果を小型 FWD 用の新 Wave BALM に反映できたものとする。

今後は、粒状体の路盤等の接地圧分布で予想される「パラボリック分布＋等分布」にも対応できるように小型 FWD 用の新 Wave BALM を改良していく計画である。

参考文献

- 1) 平川大貴, 川原園美幸, 龍岡文夫: 砂礫盛土材の変形強度特性に与える締固め条件の影響, pp.253-266, 土木学会論文誌 C, Vol.64, No.2, 2008.
- 2) 土木学会舗装委員会編: FWD および PFWD 運用の手引き, 土木学会, pp.73-74, 2002.
- 3) 田附伸一, 島峰徹夫, 関根悦夫, 阿部長門: FWD を用いた鉄道盛土の急速施工管理について, 第 33 回地盤工学研究発表会概要集, pp.2093-2094, 1998.
- 4) Kamiura, M., Sekine, E., Abe, N and Maruyama, T.: Stiffness evaluation of the subgrade and granular aggregates using the portable FWD, Unbound Aggregates in Road Construction, pp.217-237, 2000.
- 5) C. v. Gorp, Groenen, J. and Beuving, E., Experience with various types of foundation tests. Proceedings of the 5th International Symposium on Unbound aggregates in roads, Nottingham, pp.239-246, 2000.
- 6) 竹原和也, 小澤良明, 尾本志展, 松井邦人: FWD 試験データの波形を考慮した力学モデルに関する検討, 土木学会舗装工学論文集, 第 14 巻, pp.139-145, 2009.
- 7) 上浦正樹, 川名 太, 松井邦人: 小型 FWD 用接地圧測定装置による地盤の変形係数評価, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol.70, No.3, pp. I_57- I_64, 2014.
- 8) Vennapusa, P. K. R. and White D. J.: Comparison of Light Weight Deflectometer Measurements for Pavement Foundation Materials, ASTM Internationals, Geotechnical Testing Journal, Vol.32, No.3, pp.1-13, February 2009.
- 9) 上浦正樹, 桑野基史: 小型 FWD を用いた粒状路盤の剛性評価に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第 14 巻, pp.123-129, 2009.
- 10) 小澤良明, 篠原裕貴, 松井邦人, 東 滋夫: 波動理論を用いた逆解析による粘弾性多層体の構造評価, 土木学会論文報告集 E, Vol.64, No.4, pp.533-540, 2008.
- 11) 山口柏樹: 土質力学 (全改訂), p.341, 1969.