

タイトル	小型FWD による接地圧の簡易な推定方法に関する研究
著者	上浦, 正樹; KAMIURA, Masaki
引用	工学研究 : 北海学園大学大学院工学研究科紀要(14): 3-7
発行日	2014-09-30

# 小型 FWD による接地圧の簡易な推定方法に関する研究

上 浦 正 樹\*

## A STUDY ON SIMPLIFIED ESTIMATION FROM CONTACT PRESSURE DISTRIBUTION OF LOADING PLATE WITH PORTABLE FWD

Masaki KAMIURA\*

### 概要

小型 FWD を用いて動的逆解析により複数層の弾性係数を推定する上では、載荷時の載荷板における接地面での接地圧分布の種類を確定することと小型 FWD 本体とそれに付随する外部センサを用いることが必要である。従って、この方法で動的逆解析を行うには多くの圧力センサが組み込まれた接地圧測定装置が不可欠となる。しかし現段階では小型 FWD に付随する外部センサは製品化されているが、接地圧を測定するために汎用性のある装置はない。そこで接地圧測定装置の開発を容易にするため、本研究では載荷荷重から得られる平均接地圧と接地圧測定箇所数 1 か所の接地圧を用いて接地圧分布の種類を推定する方法を構築し、試作した接地圧計による測定結果による検討を行った。これら結果、接地圧分布の種類を推定できることが明らかになった。

**Key Words:** portable FWD, back-calculation, contact pressure, loading weight, stress distribution

### 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<sup>1)</sup>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。そこで従来から用いられている平板載荷試験は現位置試験の一種であるが、測定時に多くの手間と時間を要している。これに代わるものとして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小型 FWD が開発された。我が国に小型 FWD が開発されてから 20 年以上経ている<sup>2)</sup>が、この間に KPFWD 値から K30 値を推定しようとする基準化なされた<sup>3),4)</sup>。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<sup>5)</sup>は Bousinesq 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、FWD 本体と外部センサを使用して、多層弾性理論に基づく逆解析により複数の層の各弾性係数を推定することができる。そこで、近年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<sup>6)</sup>。だが小型 FWD は剛体の載荷板が直に路盤などに接するため載荷板の接地圧分布の影響を受けやすい。そのため小型 FWD 試験結果から動的逆解析を行った場合、精度向上のために接地圧分布が等分布や載荷板中央が端部よりも大きな分布（パラボリック分布）など適正な接地圧分布を選ぶことが必要とされている<sup>7)</sup>。

以上のように、小型 FWD により動的逆解析を用いて複数層の弾性係数を推定する上では載荷時の載荷板における接地面での接地圧分布の確定と外部センサを用いる必要がある。しかし、このような方法を行うには汎用的な接地圧測定装置の開

\* 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

発とすでに市販されている複数の外部センサの入手が不可欠となる。しかし現段階では小型 FWD に付随する外部センサは製品化されているが、接地圧を測定するために汎用性のある装置はない。

そこで本研究では上記の要望に応えるための第1段階として、接地圧測定個所数を減少して1か所とし、載荷荷重から得られる平均接地圧を用いて接地圧分布の種類を推定する方法を確立することを目的とする。

## 2. 接地圧分布に理論的検討

### 1) 背景

載荷時に載荷板が地盤などから受ける反力によって発生する接地圧分布を推定する場合、現状では汎用している装置はない。既往の研究ではそれぞれ試作した接地圧測定装置を使用して接地圧分布を推定している<sup>8)</sup>。一方、多層構造である舗装の各層に対して小型 FWD 試験で得られる荷重曲線と変位曲線を用いて逆解析により各層の弾性係数を推定するにあたり、この接地圧分布は重要な入力パラメータとなる。動的逆解析ではこの接地圧分布の種類を弾性論から導かれる関係式や測定結果から得られた経験式を用いて中心からの距離における接地圧を推定して解析に利用している。そこでこれらの解析を普及させるためには、容易に接地圧分布の種類を推定することが必要となる。その方策として接地圧測定を簡略化し、コストを抑えて入手しやすくすることが考えられる。そこで本研究では、土の種類によって異なるそれぞれの接地圧分布を示す変数を有し、しかも一般式としては共通して成り立つ関係式を構築することとする。これから最少の接地圧データから、この式によって接地圧の種類に関する係数を特定し、中心からの距離における接地圧を推定することとする。

### 2) 各種接地圧分布に共通する式の構築

既往の研究から土の種類に対応して、以下の3種類からなる接地圧分布の関係式が提案されている<sup>9)</sup>。

#### a) インバースパラボリック分布

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

#### b) 等分布

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

#### c) パラボリック分布

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

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),  $a$ : 載荷板半径 (ここでは 15 cm)

一方、本研究では接地圧分布が鉛直方向の軸対象である点に着目した。そこで式(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。

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

式(4)により、式(2) (等分布) と式(3) (パラボリック分布) を以下に示すことができる。

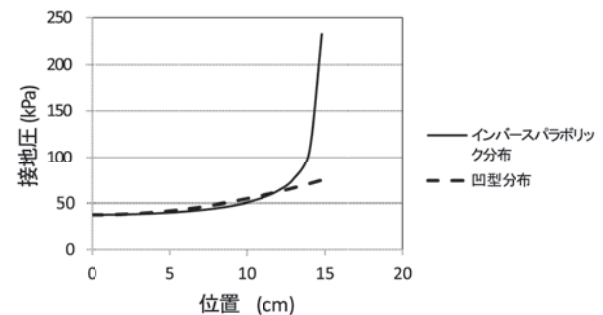


図-1 インバースパラボリック分布と凹型分布

等分布では

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

$$p_0(t) = 0$$

ここで  $p_{avg}(t)$ : 接地圧の平均値 (MPa) とする。

パラボリック分布では

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

しかし、式(1)(インバースパラボリック分布)は式(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として導入する。

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

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。

### 3) インバースパラボリック分布と凹型分布の比較

図-2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 0.02s 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。接地圧分布として、式(1)~(3)と式(7)用い、載荷により得られる応答を比較した。

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シミュレーションデータを作成し、それぞれについて、接地圧がインバースパラボリック分布または凹型分布である場合として逆解析により各層の弾性係数と粘性係数を求めた結果を示す(表-1, 表-2)。なお、逆解析の結果は初期値の影響を受けるため、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

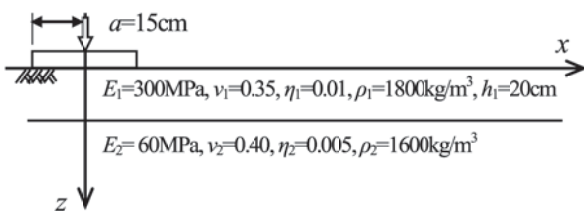


図-2 計算モデル (2層構造)

表-1 インバースパラボリック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	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-2 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

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-1および表-2により、シミュレーションデータを作成したときと同じ接地圧分布を仮定して、逆解析を行うと、概ね図-2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。

### 3. 実際の測定による検証

#### 1) 試験用土槽と接地圧測定装置

試験用土槽(長さ 1 m×幅 1 m×高さ 1 m) (図-3)で小型 FWD に接地圧測定装置(図-4)を取り付け小型 FWD 試験を行った。この接地圧測定装置は 10 個の超小型圧力計(直径 6.5 mm, 厚さ 1 mm, 容量 1 MPa)を円形の載荷板(直径 30 cm,



図-3 試験用土槽

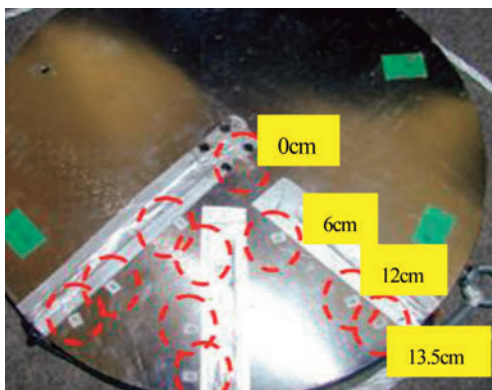


図-4 接地圧測定装置

厚さ 25 mm) の 1/4 円内に位置に取り付けたもの (破線で示す円) である<sup>10)</sup>。

実際の試験ではこの装置を用いて接地圧分布を測定し、次に各接地圧で共通の関係式である式(4)によって接地圧分布を推定する場合には載荷板中央で測定される接地圧のみとした。

## 2) 接地圧分布の推定方法

接地圧を接地面積により積分した結果は載荷荷重と等しいと仮定すると式(4)から式(8)が成り立つ。

$$\overline{PP}(t) = \int_0^a p_c(t) \times 2\pi r dr + \int_0^a p_0(t) \times \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right) \times 2\pi r dr \quad (8)$$

これから載荷荷重は式(9)となる。

$$p(r, t) = \alpha(t) + \beta(t) \left(\frac{r}{a}\right)^2 \quad (9)$$

ここで式(4)を

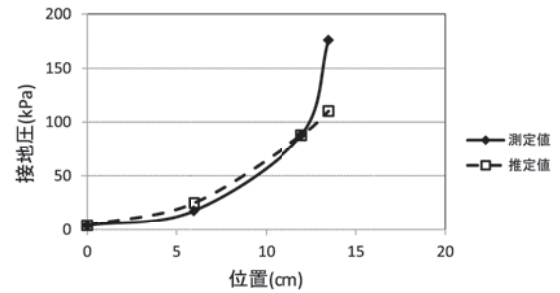


図-5 測定値と推定値の比較（粘土層）

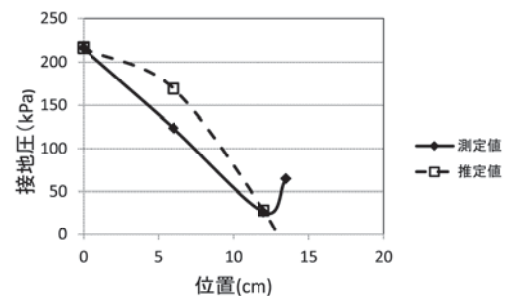


図-6 測定値と推定値の比較（砂層）

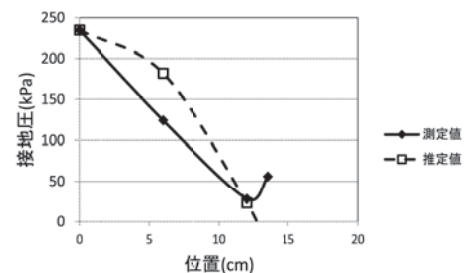


図-7 測定値と推定値の比較（礫層）

$$\overline{PP}(t) = \left( p_c(t) + \frac{p_0(t)}{2} \right) \times \pi a^2 \quad (10)$$

とおく、測定した載荷板中心の接地圧  $p_c(t)$  と載荷荷重  $\overline{PP}(t)$  から式(11)と式(12)により  $\alpha(t)$  と  $\beta(t)$  が定まる。

$$\alpha(t) = 2 \frac{\overline{PP}(t)}{\pi a^2} - p_c(t) \quad (11)$$

$$\beta(t) = 2 \left( \frac{\overline{PP}(t)}{\pi a^2} - p_c(t) \right) \quad (12)$$

この式(10)より接地圧を推定する方法を以下では2次関数法とする。

## 3) 試験結果と推定値との比較

試験用土槽に含水比45%のローム系粘土を用いて突き固めによって厚さ50 cmの試験路盤を構築した。この地盤上に本装置を置き、最大載荷

荷重 7.1 kN による载荷試験によって接地圧分布を求めた。同様に砂材、礫材を用いた模擬路盤では厚さ 1 m の試験地盤を作り、载荷により接地圧を求めた。ここで砂材は D50 が 21.2 mm, 含水比は 27% のものを使用し、この路盤に最大载荷荷重 7.0 kN で小型 FWD 試験を行った。また礫材では D 50 が 21.2 mm, 含水比 4% のものを使用し、最大载荷荷重 6.8 kN で同様の試験を行った。

粘土層 (図-5) では 2 次関数法で推定された結果は凹型分布であった。これは測定結果とのほぼ一致している。砂層 (図-6)) と礫層 (図-7) では 2 次関数法ではパラボリック分布と推定された。測定結果でも同様にパラボリック分布と推定された。

#### 4. まとめ

小型 FWD を用いて動的逆解析を行う場合、载荷時の载荷板における接地面での接地圧分布の種類が確定が必要であるが、現状では接地圧を測定するために汎用性のある装置はないことから、本研究では、汎用性のある装置を開発するための第 1 段階として、接地圧測定箇所数を減少して 1 か所とし、载荷荷重から得られる平均接地圧を用いて接地圧分布の種類を推定する方法を検討した。そのため、既往の研究から示されている 3 種類の接地圧分布に対して共通する 2 次関数を用いた関係式を提案した。これを用いて粘土層、砂層、礫層における接地圧分布を推定し、実際の接地圧測定結果と比較した。その結果、本研究で示した 2 次関数による接地圧分布の推定方法が実際の結果と一致した。

今後は、一般的な土質に対して本研究による関係式の適用範囲を検討する予定である。

#### 【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, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.2, pp.253-266, 2008.
- 2) 笠原篤, 古川真男, 伊藤保彦: ハンディなフォーリング ウェイト デフレクトメータの開発, 第 19 回日本道路会議論文集, pp.314-315, 1991.
- 3) 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.
- 4) 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, 舗装工学論文集, Vol.14, pp.122-124, 2009.
- 5) C. v. Gulp, 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 における動的逆解析に与える接地圧分布の影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学) (投稿中) 2014.
- 8) 例えば, 桑野基史, 上浦正樹, 董勤喜: 小型 FWD と平板载荷の剛性評価に関する一考察, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-041, pp.79-80, 2009.
- 9) Michael A. Mooney, Patrick K. Miller: Analysis of Lightweight Deflectometer Test based on in situ stress and strain response, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering of ASCE, pp.202-203, 2009.
- 10) 前出 4), p.125.