

タイトル	小型FWD用接地圧測定装置による地盤の変形係数評価
著者	上浦，正樹；KAMIURA，Masaki
引用	北海学園大学工学部研究報告(42)： 1-15
発行日	2015-01-15

小型FWD用接地圧測定装置による 地盤の変形係数評価

上 浦 正 樹*

Estimation of Elastic Modulus of Roadbed and Ground Using a Measurement Device for Contact Pressure

Masaki KAMIURA*

要 旨

多層弾性理論に基づいて逆解析により舗装における各層の変形係数を推定する評価法がある。近年FWD試験では動的载荷を用いていることから動的逆解析に関する評価の重要性が認識されつつある。一方、小型FWDにおける動的逆解析では载荷板の接地圧分布が入力の必須条件であるが、载荷板の接地圧を測定する汎用機器はまだ開発されていないなど動的逆解析に関する課題が多い。そこで本研究では、小型FWD試験のために試作した接地圧測定装置により粘土、砂、礫などの種類が異なる路盤で接地圧を測定し、接地圧分布の違いを明らかにし、この違いが動的逆解析で得られる変形係数に与える影響の程度を検討した。その結果、この方法で接地圧を分類して求められる変形係数は実用上問題がないことを確認した。

1. はじめに

小型FWDは現場で簡易に载荷荷重と変位を時刻歴データとして測定できることから普及が進みつつある。その主な使用目的に最大载荷圧力を最大変位で除したK値による剛性評価がある。このK値の評価で平板载荷試験では K_{30} 値、小型FWDでは K_{PFWD} 値として、 K_{PFWD} 値から K_{30} 値を推定しようとする試みがなされている。ここでは土の種類を粘土、砂、礫に分類し、経験的な実績に基づいて粘性土系では K_{PFWD} 値が K_{30} 値の1倍とし、砂系では K_{PFWD} 値が K_{30} 値の1.5倍、礫系では K_{PFWD} 値が K_{30} 値の2倍とする換算係数 γ を用いている¹⁾。このように小型FWDによる剛性

* 北海学園大学工学部社会環境工学科

* Department of Civil and Environment Engineering, Faculty of Engineering, Hokkai-Gakuen University

評価に土の種類が関係している原因について、動的載荷によるみかけの粘性や載荷板縁部付近の地盤の降伏状態などが考えられている²⁾。欧米における地盤の剛性評価でも、小型FWD試験からTerzaghiによる弾性理論に基づいた変形係数を推定し、土の種類によってこの値を補正している³⁾。Whiteは載荷板の接地圧分布を図-1に示す3種類((a):粘土,(b):砂,(c):砂まじり粘土)を用いて補正係数を定め、載荷による地盤内の応力分散に対する解析を行っている。そしてこの応力推定結果と土圧計を用いた実験結果が一致したとしている⁴⁾。なお、この図では矢印の長さで接地圧の大きさを示している。また、非粘性材料と粘性材料の接地圧分布が異なる点に着目して、礫地盤上の円形の直接基礎において端部近くで側方流動が発生して接地圧が減少しているとする研究がある⁵⁾。

一方、路盤などの剛性評価について一層のみでは下層の影響が懸念される場合、FWD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変形係数を推定することができる。さらに、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⁶⁾。一方、小型FWDの逆解析では剛体の載荷板が直に路盤などに接するために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う場合、精度向上のために適正な接地圧分布を選ぶことが必要とされている。

しかし小型FWD試験による動的逆解析が普及にする上で必須な載荷板の接地圧を測定する汎用機器は開発されていない。そこで本研究では試作した接地圧測定装置により土の種類が異なる路盤で接地圧分布を測定してその分布形状を分類することに加え、これに基づく動的逆解析から得られる変形係数を評価することを目的とした。

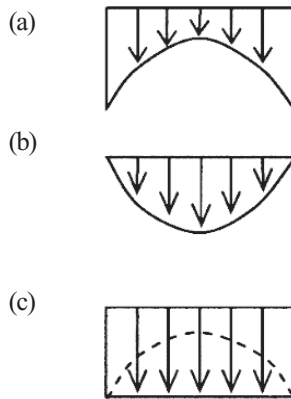


図-1 Whiteによる接地圧分布の種類⁴⁾

2. 接地圧分布を考慮した動的逆解析

(1) 接地圧分布

土質の種類によって異なる小型FWDにおける剛な載荷板の接地圧分布と剛なフーチング底部の接地圧分布について、スケールは異なるが同等と見なすと、TerzaghiとPeckの剛なフーチングの接地圧分布に関する研究には示唆に富む成果⁷⁾が見られる。そこでは剛なフーチング底面の接地圧分布において弾性的材料上では端部が増加する傾向を示し、乾いた粘着力にない材料上では理論的にも実験的にも中央が最大で端部が0に減少する傾向を示すとしている。また、地盤が完全に破壊されると接地圧は等分布となるとしている。Vennapusa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を等分布、Inverse parabolic, Parabolicの3種類の分布形状に分類している⁸⁾。それらを数式で記すと以下のようになる。

・ 等分布

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

・ Inverse parabolic分布

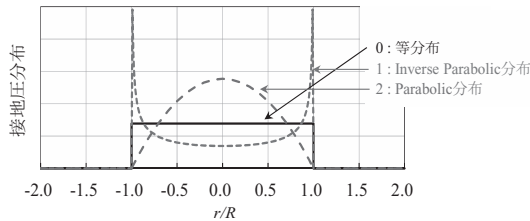
$$p(r, t) = \frac{P(t)}{\pi R^2 \sqrt{R^2 - r^2}} \quad (0 < r \leq R) \quad (2)$$

・ Parabolic分布

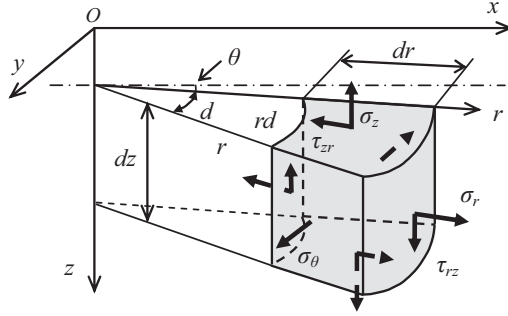
$$p(r, t) = \frac{(R^2 - r^2)P(t)}{\pi R^4} \quad (0 < r \leq R) \quad (3)$$

ここで凹型分布をInverse parabolic、凸型分布をParabolicと称している（図－2）。

本研究では、載荷荷重を載荷板の面積で除した平均接地圧（ p_{mean} ）、載荷板中心の接地圧（ p_0 ）、載荷板端部内側の接地圧（ p_1 ）に着目した。これらの接地圧を用いると、上記の3種類の接地圧分布には次の特徴を挙げることができる。



図－2 接地圧分布の種類



図－3 円柱座標

1) 等分布では $p_0 = p_1 = p_{mean}$, 2) 凹型分布では $p_0 < p_{mean}$ かつ $p_1 < p_{mean}$, 一方, 3) 凸型分布では $p_0 > p_{mean}$ である. $p_1 > p_{mean}$

よって本研究では, 接地圧測定結果にばらつきが見られる場合に p_{mean} , p_0 , p_1 を考慮して接地圧分布の種類を検討することとする.

(2) 軸対称分布荷重による波動伝播

半無限体表面に衝撃的な軸対称荷重が作用すると, 応力波は伝播する.

図－3 に示す円柱座標系 (r, θ, z) における応力 σ の平衡方程式は, 式 (4) で与えられる.

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4a)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (4b)$$

ここで, ρ は密度, t は時間である. 応力 σ と変位 u の関係は, 以下の通りである.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \left(E + F \frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} \bar{\lambda} + 2\bar{\mu} & \bar{\lambda} & \bar{\lambda} & 0 \\ \bar{\lambda} & \bar{\lambda} + 2\bar{\mu} & \bar{\lambda} & 0 \\ \bar{\lambda} & \bar{\lambda} & \bar{\lambda} + 2\bar{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{\mu} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \partial u / \partial r \\ u / r \\ \partial w / \partial z \\ \partial w / \partial r + \partial u / \partial z \end{Bmatrix} \quad (5a)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5b)$$

E はヤング係数と ν はポアソン比, F は減衰定数を表す. 境界条件は, 式 (6) に示す通りである. ここで舗装表面 $z=0$ では,

$$\begin{cases} \sigma_z(r, 0, t) = -p(r, t) & r \leq R \\ \sigma_z(r, 0, t) = 0 & r > R \end{cases} \quad (6a)$$

$$\tau_{rz}(r, 0, t) = 0 \quad r > 0 \quad (6b)$$

が成り立つ。また、多層構造の最下層においては、

$$w(r, z, t) = 0, u(r, z, t) = 0 \quad z \rightarrow \infty \quad (6c)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z(r, z, t) &= 0, \sigma_r(r, z, t) = 0, \\ \sigma_\theta(r, z, t) &= 0, \tau_{rz}(r, z, t) = 0 \quad z \rightarrow \infty \end{aligned} \quad (6d)$$

が成り立つ。ここで、 R は載荷板半径であり、 $p(r, t)$ は円形載荷板の接地圧分布である。

半無限大表面に作用する荷重は、3種類の接地圧分布（式（1）、式（2）、式（3））を対象とする。

次に支配方程式を解くため、ここでは2つの変位成分 $u(r, z, t)$ と $w(r, z, t)$ を2個のポテンシャル関数 $\Phi(r, z, t)$ と $\Psi(r, z, t)$ から式（7）を導くことができる。

$$u(r, z, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r \partial z} \quad (7a)$$

$$w(r, z, t) = \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \quad (7b)$$

式（7）に式（5a）を代入し、さらに式（4）に代入して整理すると $\Phi(r, z, t)$ 、 $\Psi(r, z, t)$ は調和関数であることが確認できる。

$\Phi(r, z, t)$ のフーリエ変換を $\hat{\Phi}(r, z, \omega)$ とし、 $\Psi(r, z, t)$ も同様に $\hat{\Psi}(r, z, \omega)$ として、これらの関数のハンケル変換を $\tilde{\Phi}(\xi, z, \omega)$ と $\tilde{\Psi}(\xi, z, \omega)$ で表す。これらのハンケル変換の式は式（8）の2階の複素微分方程式となり、容易に解くことができる。

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - \alpha^2 \right) \tilde{\Phi} = 0 \quad (8a)$$

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - \beta^2 \right) \tilde{\Psi} = 0 \quad (8b)$$

ただし、

$$\alpha^2 = \xi^2 - \frac{\rho \omega^2}{(\bar{\lambda} + 2\bar{\mu})(E + i\omega F)} \quad (8c)$$

$$\beta^2 = \xi^2 - \frac{\rho \omega^2}{\bar{\mu}(E + iF\omega)} \quad (8d)$$

ここで、表面における境界条件は、式（6a）にフーリエ変換、ハンケル変換を適用して式（9）となる。

$$\tilde{\sigma}_z(\xi, 0, \omega) = -\tilde{p}(\xi, \omega) \quad (9a)$$

$$\tilde{\tau}(\xi, 0, \omega) = 0 \quad (9b)$$

この結果に境界条件を考慮すると、式 (10) により変位成分、応力成分を求めることができる。

$$\tilde{w}(\xi, z, \omega) = \frac{-(\beta^2 + \xi^2)\tilde{p}(i\omega)e^{-\alpha z} + 2\xi^2\tilde{p}(i\omega)e^{-\beta z}}{2(E + i\omega F)\left\{(-\xi^2\bar{\lambda} + (\bar{\lambda} + 2\bar{\mu})\alpha^2)\frac{(\beta^2 + \xi^2)}{2\alpha} - 2\bar{\mu}\xi^2\beta\right\}} \quad (10)$$

また、式 (10) を逆フーリエ変換、逆ハンケル変換して式 (11) によりたわみを計算できる。

$$w(r, z, t) = \int_0^\infty r \left\{ \int_0^\infty \tilde{w}(\xi, z, \omega) e^{i\omega t} d\omega \right\} J_0(\xi r) d\xi \quad (11)$$

(3)逆解析

小型FWD試験では、外部センサを用いることで n 箇所の舗装表面のたわみの時系列データ $w_j(t) (j=1, \dots, n)$ を得ることができる。舗装を構成する層の層数が m の場合には、各々の層における変形係数と粘性係数が未知数となるため、未知数の総数は、 $2m$ となる。これらの未知数 X_i を設定すれば、既往の研究⁹⁾により小型FWD試験と同一の地点におけるたわみの時系列データ $z_j(X_i, t) (j=1, \dots, 2m)$ を算定することができる。いま、評価関数を式 (12) で与え、 J が最小となるような X_i を決定する。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \{w_j(t_k) - z_j(X_i, t_k)\}^2 \quad (12)$$

ここで、

$w_j(t_k)$ ：時刻 t_k における位置 j での計測たわみ

$z_j(X_i, t_k)$ ：時刻 t_k における位置 j での計算たわみ

X_i ：未知パラメータ（層の変形係数および減衰係数）

n ：計測たわみと計算たわみの比較位置の箇所数

l ：時系列データのデータ数

この関数の最小化には、Gauss-Newton法を用いている。なお、この問題は、非線形の最小化問題となるので、繰り返し計算が必要となる。未知パラメータは、以下の式に基づいて更新を行う。

$$\sum_{i=1}^{2m} \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n \frac{\partial z_j(t_k)}{\partial X_i} \frac{\partial z_j(t_k)}{\partial X_z} dX_i = \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n \left(w_j(t_k) - z_j(t_k) \right) \frac{\partial z_j}{\partial X_z} \quad (13)$$

(z = 1, \dots, 2m)

式（５）は、 $2m$ 個の $2m$ 元連立方程式となるが、この解法において、係数行列の条件数が大きくなることがあるので、ここでは、最適化手法として、打ち切り特異値分解を用いている。

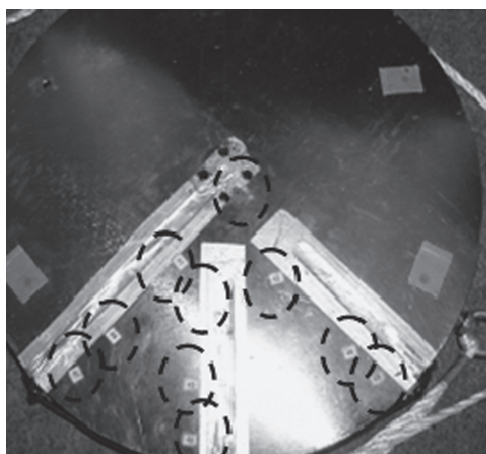
本研究で用いた動的逆解析プログラムは、上記の理論に基づいて開発された動的逆解析プログラムであるWave BALM¹⁰⁾を、種々の接地圧分布が考慮できるように改良したものである。以下では、この動的逆解析プログラムを用いて逆解析を行った。

３．接地圧の測定装置と実験方法の概要

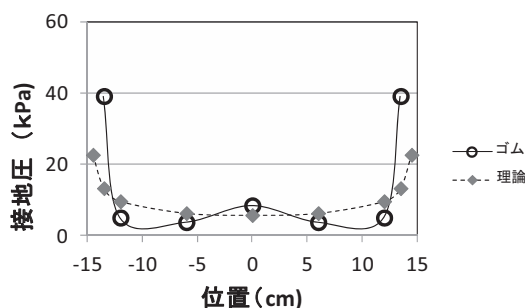
試作した接地圧測定装置は10個の超小型圧力計（直径6.5mm，厚さ1mm，容量1MPa）を円形の載荷板（直径30cm，厚さ25mm）の1/4円内に表－１の位置に取り付けたものである¹¹⁾。図－４は接地圧計を組み込んだ載荷板の接地面で、破線の円は超小型圧力計の位置を示している。この接地圧測定装置を用い地盤などの接地圧を測定した（この方法を圧力計方式と呼ぶ）。はじめに弾性体とみなした厚さ50cmゴム材（長さ80cm×幅80cm）を用いて圧力計方式の精度を検討した。その方法はコンクリートの上にこのゴム材を置き、その上に最大載荷荷重を7kNとして圧力計方式により載荷板の接地圧分布を測定するものである。これから本試験の接地圧分布の形状と理論曲線の形状とを比較した（図－５）。この理論曲線は式（２）を

表－１ 超小型圧力計の接地圧測定位置

中心からの 距離 (cm)	0	6	12	13.5
個数	1	3	3	3



図－４ 接地圧測定装置



図－５ ゴム材の接地圧分布と理論値との比較

用いたが、この式は、半無限体上に作用するものであり、コンクリート版上のゴム材上で剛版載荷するときの分布荷重と異なる。よって試験では載荷板端部で受ける反力が相対的に大きくなったと推測されるが、全体としては比較的一致しており、実用上可能と考えた。また、接地圧は1/4円内で測定された結果を、縦軸を境に左右対称と仮定して表示しているが、理論と実験結果はほぼ同じ種類として認められる。以上から本研究の測定方法によって接地圧を推定することが可能であると判断した。

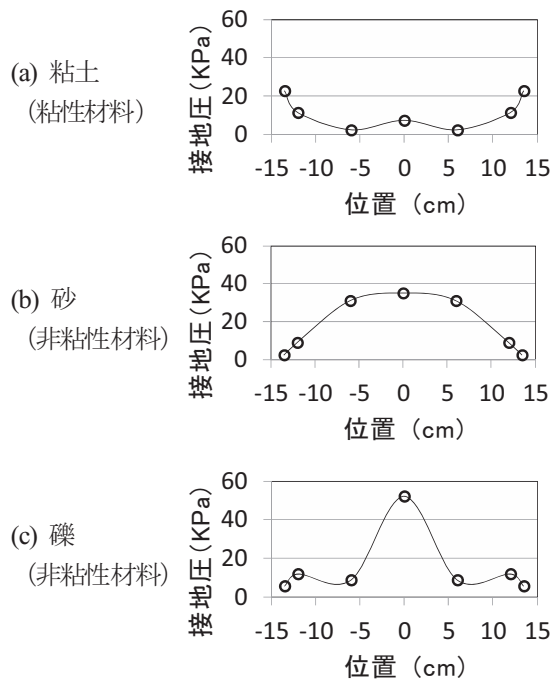
次にローム系粘土を用いて試験土槽（長さ1m×幅1m×深さ0.5m）に突き固めによって試験地盤を作り、この地盤上に本装置を置き、最大載荷荷重をおおよそ7kN（表－2）による載荷試験によって接地圧分布を求めた。同様に砂材、礫材も同じ方法で試験地盤を作り、本装置によって予備載荷3回、本試験6回の載荷試験を行い、各接地圧分布を求めた。この結果、図－6に示した接地圧分布の形状のうち、非粘性材である砂と礫では凸型分布に近似しているが粘性材である粘土では凹型分布に近いことが認められる。ここで各接地圧の変動係数は最大値でも15%前後であった。なお、この一連の試験における各材料の特性（表－2）と砂と礫の粒径加積曲線（図－7）を示す。ここでD50とは粒径加積曲線における50%を通過する粒径を示す。

4. シルトにおける接地圧分布の推定

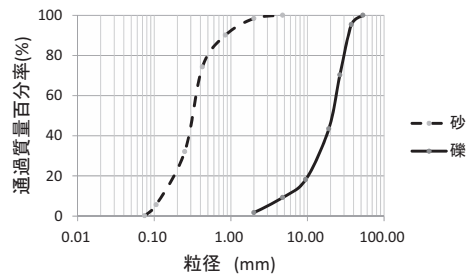
前章で取り扱った土は粘性材料または非粘性材料として容易に区分できるので、接地圧分布の形状を想定できる。しかしそれ以外の材料では接地圧分布を調べる必要がある。さらに同一

表－2 使用材料の特性と載荷条件

	D50 (mm)	含水比 (%)	載荷荷重 (kN)	載荷板半径 (cm)
ゴム	—	—	7.05	15
粘土	—	45	7.10	15
砂	0.32	27	6.99	15
礫	21.2	4	6.79	15



図－6 接地圧分布の比較（粘土，砂，礫）

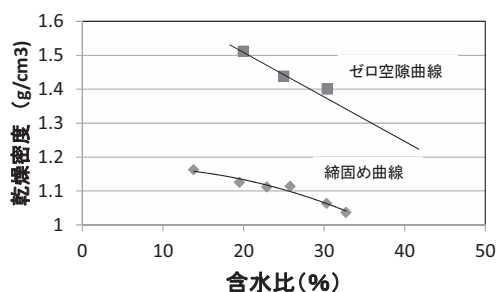


図－7 粒径加積曲線（砂・礫）

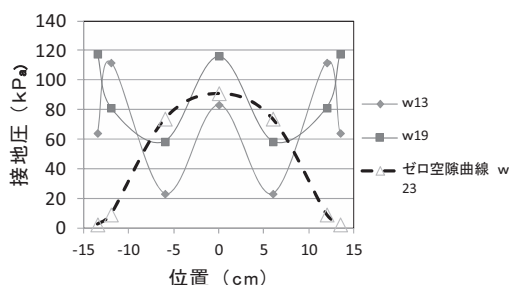
表－3 試料（シルト）の物理的性質

項目	数値	単位
D50	12.5	μm
5 μm 以下	26	%
最大粒径	30	μm
密度	2.65	g/cm^3

種類の土であっても，含水比などの物理的条件が異なると接地圧分布が異なる可能性がある．そこで本研究では，土粒子の大きさが粘性材料と非粘性材料の間にあり，成分が均一な材料であるシルトを用いて含水比などの物理的条件に対する接地圧分布を求めた．使用したシルトの物理的性質を表－3に示す．



図一 8 含水比と乾燥密度の関係 (シルト)



図一 9 接地圧分布の例 (シルト)

締固め曲線作成では、ゼロ空隙曲線作成のために抜気しながら圧密させた直径20cm×高さ20cmの供試体を使用した。また、締固め用の供試体は粉末状の材料に加水した試料を締固めて作製し、加水量を変えることで含水比と乾燥密度の関係を求めた。なお、締固めの方法はJIS A1210に基づいてモールド内径10cm、高さ12.7cm、ランマー質量4.5kg、突固め層数5層、1層あたり25回とした(図一 8)。この結果から所定の含水比を設定して接地圧分布試験用の供試体を作製した。この試験は接地圧分布のみを求める試験であるので、この供試体を砂地盤に埋め込んで全体を一体化させた。これに載荷板に取り付けた超小型圧力計がシルトの供試体上になるようにセットした。

小型FWDによる動的載荷では最大値で変動係数が4%程度のばらつきが認められたが、接地圧が載荷荷重に比例するとして荷重6kNに換算して載荷時の載荷板における接地圧分布を求めた。各含水比で締め固めて作成した供試体のうち図一 9は、含水比13%(w13とする)と含水比19%(w19とする)の2例と飽和度100%近くとしたゼロ空隙曲線試料含水比23%(w23とする)を示したものである。この図において締固め試料の接地圧分布は、突き固めの不均一の影響などではばらつきがあるものの凸型分布や凹型分布の傾向は見られない。一方、ゼロ空隙曲線試料の接地圧分布では凸型分布と考えられる。

以上のように同一のシルトであっても含水比などによって接地圧分布の種類が異なっていた。よって、一般の土に対して逆解析による変形係数を評価する場合には、含水比などの物理

的性質を確認した上で接地圧分布を測定する必要があると考えられる。

5. 実路盤への適用

札幌市内における宅地エリア内の道路改良工事において2層の路盤を再生骨材で打ち換える工事が行われた。この現場で小型FWD試験により載荷と変位を測定した。載荷回数は予備載荷3回、本載荷6回とした。このばらつきの程度は、載荷荷重の最大値で変動係数1.5%、変位の最大値で変動係数2.0%であった。また、圧力計方式によって接地圧分布を推定した。試験箇所のうち、試験箇所(1)では上層路盤まで完成していた。この上層路盤はコンクリート再生骨材で厚さ20cmあり、下層路盤はアスファルト再生骨材で厚さ20cmであった(図-10)。このアスファルト再生骨材は東上抑制層の機能も兼ねて下層路盤に用いるものである¹²⁾。また、試験箇所(2)では路盤施工の途中段階で下層路盤まで施工されていた。アスファルトの再生材の下層は礫まじりの良好な路盤であり、さらにその下はローム層であった。以上の再生材の物理的性質(表-4)とこれらの路盤・路床の層構成と試験箇所を示す(図-11)。上層路盤と下層路盤に対して載荷により圧力計方式を用いて接地圧分布の測定を行った。その結果から接地圧の平均値とばらつきを標準偏差($\pm\sigma$)により図-12と図-13に示す。これらの接地圧分布



図-10 上層路盤と下層路盤

表-4 再生材の物理的性質

	コンクリート 再生骨材	アスファルト 再生骨材
最大粒径 (mm)	37.5	31.5
0.075mm以下 (%)	5	5
D50 (mm)	9.5	11.5
乾燥密度 (g/cm^3)	1.585	1.975
含水比 (%)	12	5

層番号	層厚 (cm)	試験箇所(1)	試験箇所(2)
1層	20	上層路盤 コンクリート再生骨材	下層路盤 アスファルト再生骨材
2層	20		アスファルト再生骨材
3層	80		路床 礫まじり砂
4層			原地盤 ローム層

図-11 路盤・路床の構成

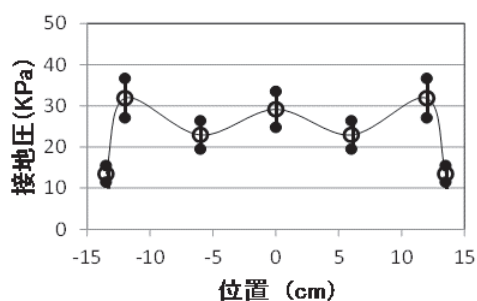


図-12 接地圧分布 (試験箇所(1))

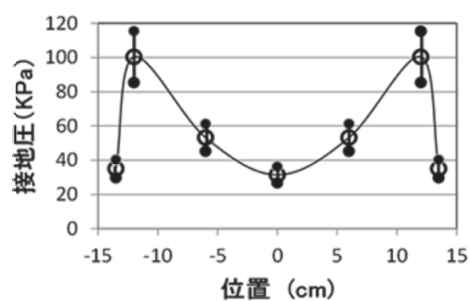


図-13 接地圧分布 (試験箇所(2))

は、一般的な砂や礫とは異なった分布形状をしていた。これらの図から試験箇所(1)の接地圧分布を等分布と見なすこととした。また試験箇所(2)の接地圧分布では凹型分布とした。

試験箇所(1)では、変形係数を1層ではE1とし、以下2層をE2、3層をE3、4層をE4とし、表-5に示す初期値を用い接地圧分布を等分布として、Wave BALMを用いた動的逆解析により各層の変形係数を求めた(表-6)。また、試験箇所(2)においても、変形係数を2層ではE4とし、以下3層をE5、4層をE6として表-7に示す初期値を用い、接地圧分布を凹型分布として各層の変形係数を求めた(表-8)。

ここでアスファルト再生骨材層と路床は試験箇所(1)と試験箇所(2)では上層路盤(層番号1層)の有無や測定場所が同じではないなどで条件が異なるものの、ほぼ同一時期に施工された

表－5 逆解析の初期値（試験箇所(1)）

層番号	変形係数 (MPa)		減衰係数 (MPa・s)	ポアソン比	層厚 (cm)	密度 (kg/m ³)
1 層	E 1	100	1	0.35	20	1637
2 層	E 2	100	1	0.35	20	1681
3 層	E 3	80	0.8	0.35	80	1685
4 層	E 4	30	0.15	0.4		1600

表－6 変形係数の推定結果(1)

層番号		変形係数 (MPa)
1 層	E 1	416
2 層	E 2	208
3 層	E 3	47

表－7 逆解析の初期値（試験箇所(2)）

層番号	変形係数 (MPa)		減衰係数 (MPa・s)	ポアソン比	層厚 (cm)	密度 (kg/m ³)
2 層	E 4	100	1	0.35	20	1681
3 層	E 5	80	0.8	0.35	80	1685
4 層	E 6	30	0.15	0.4		1600

表－8 変形係数の推定結果(2)

層番号		変形係数 (MPa)
2 層	E 4	201
3 層	E 5	46

ものであった。

変形係数の推定の結果では、下層路盤（層番号 2 層）の変形係数である E 2 と E 4 はほぼ同じ値であった。また路床（層番号 3 層）の変形係数である E 3 と E 5 でも同様であった。なお、最下層のローム層の変形係数は試験箇所(1)と試験箇所(2)ともほぼ 50MPa であった。

次に動的逆解析に対し接地圧分布での種類の違いが変形係数に与える影響を検討した。最初の下層路盤の変形係数の E 2 と E 4 の比を求め、変形係数の比（E 2 / E 4）とした。また路床の変形係数の E 3 と E 5 も同じく変形係数の比（E 3 / E 5）を求めることとした。接地圧分布の種類を表記する方法として図－2 に示した「0」（等分布）、「1」（凹型分布）、「2」（凸型分布）の 3 種類を用いる。試験箇所(1)と試験箇所(2)でこれらの 3 種類の接地圧分布の種類を組合せると 9 種類となる。ここで、例えば「試験箇所(1)の接地圧分布の種類を 0（等分布）とし、試験箇所(2)の接地圧分布の種類を 1（凹型分布）とする」と、この組み合わせを 0 / 1 として示す。こ

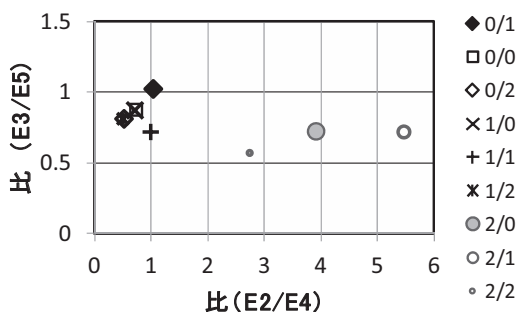


図-14 変形係数比の比較

のようにそれぞれの接地圧分布の種類を用いて組み合わせ、試験箇所(1)の変形係数と試験箇所(2)の変形係数の比を求める。これらをまとめた結果を図-14に示す。ここで変形係数の比 ($E2/E4$) が1に近ければそれだけE2とE4が近い値を示すことになる。また変形係数の比 ($E3/E5$) も同様である。よってこの図から本研究で用いた接地圧分布の組合せ (0/1) の変形係数比が最も1に近いことがわかる。したがって接地圧測定装置によって接地圧分布の種類が試験箇所(1)では等分布、試験箇所(2)では凹型分布と推定されたが、動的逆解析においても同じ種類の接地圧分布が最適であることが確認された。

6. まとめ

本研究は接地圧分布に関する基礎的なものであり、対象は粘土、砂、礫、シルト、再生骨材などに限られているが、総括すると次のようになる。

- (1)多層弾性理論において接地圧分布を考慮した動的逆解析の方法を示し、載荷板における接地圧分布の考え方と小型FWDを用いる場合の動的逆解析の方法を示した。
- (2)試作した接地圧測定装置によりゴム材で測定した接地圧分布は弾性理論で求まる理論上の接地圧分布と傾向がほぼ同様な傾向を示した。よって本研究の測定方法によって接地圧分布の種類を推定することが可能であることが判断された。
- (3)室内試験において粘土、砂、礫とは異なる粒径からなるシルトを用いて接地圧測定を行った。その結果、含水比などの物理的条件で接地圧分布が異なることが明らかとなり、一般の土の接地圧分布を測定するには含水比などの物理的条件を考慮する必要があることが示された。
- (4)再生骨材の路盤からなる現場試験では骨材であっても砂・礫とは異なった接地圧分布を示した。動的逆解析は接地圧分布の影響を受けることから、接地圧測定装置によって接地圧分布の種類を適切に選択することで動的逆解析における変形係数を精度高く求められることが明らかになった。

参考文献

- 1) 土木学会舗装工学委員会編：FWDおよび小型FWD運用の手引き，土木学会，pp.72-74，2002.
- 2) 上浦正樹，桑野基史：平板載荷試験と小型FWDによるせん断抵抗角の評価法の提案，土木学会舗装工学論文集，第15巻，pp.169-176，2010.
- 3) Gurp,C, Groenendijk, J. : Experience with various types of foundation tests. Proceedings of the 5th International Symposium on Unbound aggregates in roads, Nottingham, pp.241-242,2000.
- 4) White, D., Thompson, M. and Vennapusa, P. : Field Validation of Intelligent Compaction Monitoring Technology for Unbound Materials, Technical Report, MN/RC, pp.208-212., 2007.
- 5) A.S.Osman, M.D.Bolton : Simple Plasticity-based prediction of the settlement of shallow circular foundation, *Geotechnique* 55, No.6, pp.435-447, 2005
- 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) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. John Wiley & Son's, Inc. pp.322-323, New York, 1967.
- 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) 竹原和也，小澤良明，松井邦人：波動方程式の理論解に基づく空港舗装の逆解析，土木学会舗装工学論文集，第15巻，pp.161-168，2010.
- 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) 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.
- 12) 札幌市建設局管理部：札幌市工事等副産物リサイクルガイドライン&再生材施工マニュアル，札幌道路維持公社（現 札幌市下水道資源公社），p11，2003.