

|      |                         |
|------|-------------------------|
| タイトル | 動的载荷による接地圧の分類方法に関する研究   |
| 著者   | 上浦，正樹； KAMIURA, Masaki  |
| 引用   | 北海学園大学工学部研究報告(43)： 1-13 |
| 発行日  | 2016-01-14              |

# 動的載荷による接地圧の分類方法に関する研究

上 浦 正 樹\*

## Approach to a method of classification by varying contact pressure caused by dynamic loading

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試験では動的載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載荷板の接地圧分布が入力の必須条件であるが、載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と感圧紙を用いて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、その分類方法を検討した。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

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、この間に小型FWD試験で推定される $K_{\text{FWD}}$ 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、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>6)</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。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

---

\* 北海学園大学工学部社会環境工学科

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

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、小型FWDが開発された。この装置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。

次に、繰り返される輪荷重によって路盤などでは弾・塑性変形が発生する。この論文では載荷によって生ずる変位とひずみは鉛直方向に生ずることを前提とする。載荷によって発生するひずみ（載荷ひずみ： $\epsilon$ ）、除荷によって戻るひずみ（復元ひずみ： $\epsilon_r$ ）、除荷しても元に戻らないひずみ（永久ひずみ： $\epsilon_p$ ）とすると $\epsilon = \epsilon_r + \epsilon_p$ の関係がある。Sharpらは載荷・除荷を繰り返すことで発生する永久ひずみが増加しない状態を提唱した<sup>7)</sup>。これらの研究では概ね繰返し三軸圧縮試験を用いており、粒状体における繰返し載荷回数と永久ひずみの関係についてRange A, Range B, Range Cの3領域に分けてそれぞれの特性を求めている<sup>8), 9)</sup>。Werkmeisterらは交通荷重を繰返し受ける場合を想定して安定した試験条件として載荷試験では必要領域で行うべきであるとしている<sup>10)</sup>。またWolffは礫と碎石の繰返し三軸圧縮試験により必要領域を示す軸差応力は、最大せん断応力の0.58~0.98程度であることを述べている<sup>11)</sup>。一方、繰返し載荷試験結果を小型FWD試験結果と関連づけるためにAASHTO T307（0.1秒の載荷後0.9秒無載荷状態の保持を1サイクルとして最小で500サイクルのうちの100サイクルでの剛性の評価法）の結果と小型FWDによって推定した弾性係数を統計的に処理をする方法が提案されている<sup>12)</sup>。また、Gurpらは、小型FWDによる路盤など剛性評価では載荷によって締め固め過剰となるとの仮定で載荷回数を3回と8回とで得られる弾性係数をもとに剛性評価を提案している<sup>13)</sup>。上浦らは、粗礫52%、有効粒径 $D_{50} = 19.3\text{mm}$ 、平均現場密度： $1.57\text{g/cm}^3$ の礫地盤において3種類の載荷板（直径：10, 20, 30cm）を用いて小型FWDより落下高さを低い段階から漸増しながら繰返し載荷を行った。このうち載荷板直径30cmの結果では、荷重と変位の関係が線形の傾向でその領域内の挙動と判断できるが、載荷板直径20cmの結果では平板載荷試験で用いられているひずみレベルと同等の変位である0.83mm付近では荷重がほぼ一定で変位が増加する傾向が見られたとしている<sup>14)</sup>。この図から荷重がほぼ同じで変位が増加することは永久変位が増していることと判断されるので、この荷重条件では領域から外れている可能性があると考えられる。

以上のように小型FWDによる剛性評価において、Gurpらは載荷における応力レベルやひずみレベルの制限ではなく載荷回数によって規定する立場をとっている。一方、桑野らはひずみレベルを規定し土粒子が破壊されない前提で載荷回数が剛性評価に与える影響は少ないとの立場をとっている。いずれにしても適正な剛性評価のためには領域に着目した検討が必要である。

だが、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<sup>15)</sup>．ここで、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となることから小型FWDの時刻歴データを用いる動的逆解析を行うにあたり、載荷板の接地圧分布を推定すること<sup>16)</sup>が重要となる．

このように小型FWDの測定データにより動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<sup>17)</sup>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．そこで本研究では、試作した接地圧測定装置を用いているが、小型FWDによる動的逆解析を普及するために、一般的に入手可能な方法として圧力紙を用いることとした．以上から本研究の目的は、砂や礫などの典型的な接地圧分布を示す材料からセメント安定処理やアスファルト再生骨材のような接地圧分布を予想できないケースまでの路盤・路床、地盤における各種の材料について、接地圧分布の種類を分類する方法を確立するにある．

## 2. 接地圧の種類

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<sup>18)</sup>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．一方、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<sup>19)</sup>．それらを数式で記すと以下ようになる．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．

それらを数式で記すと以下ようになる．

・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.

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. 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  $p_0 > p_{mean}$  かつ  $p_1 > p_{mean}$  である.

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.

以上により, 本研究では接地圧分布をこの3種類に分類することとした. 接地圧分布の推定方法では試作した接地圧測定装置を用いた. これは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  $1/4$  円内の位置に取り付けたものである<sup>11)</sup>. また本研究で用いた動的逆解析プログラムは, Wave BALM<sup>10)</sup> 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

### 3. 軸対称分布荷重による波動伝播

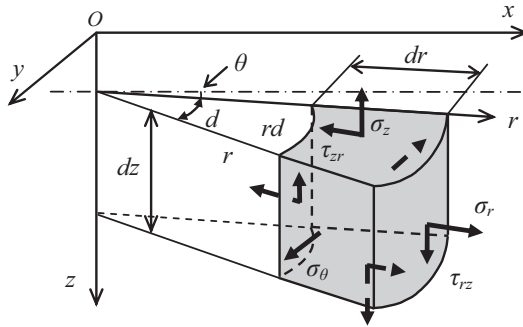


図-1 円柱座標

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-1 に示す円柱座標系  $(r, \theta, z)$  における応力  $\sigma$  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、 $\rho$ は密度、 $t$ は時間である。応力  $\sigma$  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 $\nu$ 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、

$$\begin{aligned} w(r, z, t) = 0, u(r, z, t) = 0 \quad z \rightarrow \infty \\ \sigma_z(r, z, t) = 0, \sigma_r(r, z, t) = 0, \end{aligned} \quad (6c)$$

$$\sigma_\theta(r, z, t) = 0, \tau_{rz}(r, z, t) = 0 \quad z \rightarrow \infty \quad (6d)$$

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つの変位成分と $\Phi(r, z, t)$ を2個のポテンシャル関数と $\Psi(r, z, t)$ から式 $u(r, z, t)$ (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．これらのヘ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．

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

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

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．

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

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．

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

### (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<sup>20)</sup>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 $z_j(X_{i,t}) (i=1, \dots, 2m)$ 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．

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

$(z = 1, \dots, 2m)$

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 BALM<sup>(21)</sup>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．

## 4. 接地圧の測定方法

### (1) 接地圧測定装置

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円内に取り付けたものである．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．この理論曲線は式（2）を用いたが、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。

## (2) 圧力紙

小型FWDは載荷時間が短時間のうゑに接地圧の範囲は最大400kPaと比較的小さいことから、圧力紙の選定にあたり、これらの条件を満たし国内で入手可能なもので検討した。その結果、富士フィルムプレスケール（圧力測定フィルム）を選び、このうち2種類のツーシートタイプ（極超低圧用：600kPa～200kPa、微圧用：200kPa～50kPa）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ものである。だが、この圧力紙に対し小型FWDの荷重の最大値までに要する時間（0－P時間）が5msに対し、この製品の測定圧の到達時間で、5秒かかるとしている点が懸案となった。とはいえ、本研究で使用する載荷板が剛体である一方、この製品はタイヤの接地圧などの柔らかい材料も対象にしていることから、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。

## 5. 不明確な分布の決定方法

対象の路盤や地盤などによっては、単一な材料ではなく土の種類が混合しているケースや土の種類を見分けることが困難なケースなどがある。そこで本研究では接地圧分布の種類に共通する式を検討することとした。

### (1) 各種接地圧分布に共通する式の構築

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。

$$p(r, t) = p_c(t) + p_0(t) \times \left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right) \quad (14)$$

式（14）により、等分布とパラボリック分布を以下に示すことができる。

#### a) 等分布

$$p(r, t) = \frac{P(t)}{\pi a^2} = p_c(t) = p_{avg}(t) \quad p_0(t) = 0 \quad (15)$$

b) パラボリック分布

$$\begin{aligned} p(r, t) &= \frac{2(a^2 - r^2)P(t)}{\pi a^4} = 2 \left( 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right) p_{avg}(t) \\ &= \left( 1 - \left( \frac{r}{a} \right)^2 \right) p_0(t) \end{aligned} \quad (16)$$

しかし、式(1)(インバースパラボリック分布)は式(14)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(17))をインバースパラボリック分布の近似として導入する。

$$p(r, t) = \frac{1}{2} p_{avg}(t) + p_{avg}(t) \left( \frac{r}{a} \right)^2 \quad (17)$$

ここで式(14)と式(17)の関係は

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

となる。

## (2) インバースパラボリック分布と凹型分布の比較

載荷条件は、最大荷重を10kN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、15cmとした。接地圧分布として、式(1)～(3)と式(17)を用い、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。

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100～500MPa、2層目を20～100MPa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。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。以上から式(14)が有効であることを確認した。

## 3) 接地圧分布の推定式と変形係数の推定法

式4で最大載荷荷重での接地圧分布を一般化すると係数AとBを用いて半径aにおける位置

$x$  の接地圧  $p(x)$  の推定式は式18で示すことができる．

$$p(x) = A + B \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right) \quad (18)$$

この式を用いることで圧力紙によって測定された接地圧を最小二乗法により求める．このケースは接地圧分布の種類のうち凸型の形状をしているのでパラボリックの要素と端部が0でないことから等分布の要素を含んでいる．このように接地圧推定式を用いると，3種類の接地圧分布のうち複数の組み合わせが生じる可能性がある．

一方，3種類の接地圧分布を用いて逆解析によって変形係数がそれぞれ求まるが，本研究ではまだ接地圧  $p(x)$  の推定式を用いて，変形係数を推定する逆解析の解析プログラムを開発していない．そこで3種類の接地圧分布に共通した路盤などの材料定数（変形係数，ポアソン比など）に関係しない指標を設定し，この指標と3種類の接地圧分布で求まる変形係数の関係式を導くこととした．これを定めることで，接地圧  $p(x)$  の推定式におけるこの指標の値を求め，この値を変形係数の関係式に代入することで変形係数を推定することとした．

#### (1)変形係数に関係しない指標の設定

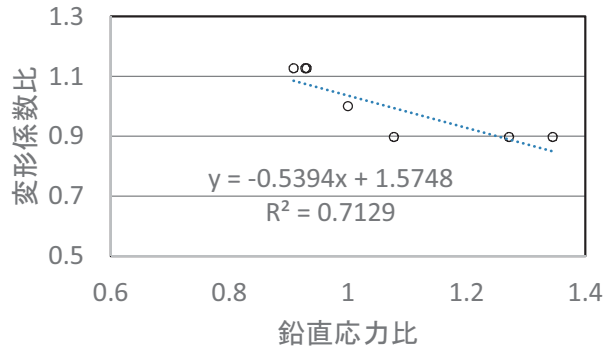
弾性3種類の接地圧分布により発生する地盤内応力のうち弾性論で材料定数に関係しない指標は鉛直応力（式19）があるのでこれを採用することとした．

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \times \frac{z^3}{r^5} \quad (19)$$

ここで，載荷荷重，載荷板の半径を同一にし，3種類の接地圧分布のそれぞれについて重ね合わせが成り立つと仮定して鉛直応力  $\sigma_z$  を求めることとした．この場合に深さ  $z$  は対象の層の中央とし，求めた鉛直応力を中央鉛直応力 ( $\sigma_{zc}$ ) とする．



図ー2 コンテナ置き場（JR貨物札幌貨物ターミナル）



図－3 鉛直応力と変形係数比

実際の手順を地盤上に砂路盤が構成されている2層を対象に示す。JR貨物札幌貨物ターミナルのコンテナ置き場の路床（層厚50cm）である（図－2）。この材料はローム系の地盤をセメント系固化材によって路床改良されている（密度：1700kg/m<sup>3</sup>，平均含水比は15%程度）。地盤はロームからなる粘性土（平均含水比18%，密度1630kg/m<sup>3</sup>）であった。この地盤に半径15cmの載荷板を用いて小型FWDにより最大荷重100Nにより3回（予備載荷6回）載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。接地圧試験では幅5cmで長さ20cmの圧力紙（富士フィルムプレスケールLLLWタイプ：最大0.6MPa）を使用した。接地圧分布を最小二乗法によって求めた（図－3）。

最大荷重の時間を $t_p$ とし、 $P(t)$ を載荷荷重の最大値 $P(t_{p,1})$ とする。同様に式（2）と式（3）において載荷荷重の最大値を $P(t_{p,2})$ ， $P(t_{p,3})$ とする。載荷試験で発生した実際の試験で得られた載荷荷重（ $P_{max}$ ）すると $P_{max} = P(t_{p,1}) = P(t_{p,2}) = P(t_{p,3})$ としてそれぞれの3種類の接地圧分布により載荷荷重が同じくなるように設定して、3種類の接地圧分布のそれぞれにケースで $Z=25\text{cm}$ における中央鉛直応力（ $\sigma_{zc}$ ）を求めた。また、同様に接地圧試験データの結果に基づく中央鉛直応力（ $\sigma_{zc}$ ）とこの推定式を用いた中央鉛直応力（ $\sigma_{zc}$ ）を求めた。次に3種類の接地圧分布を用いて動的逆解析により、それぞれの接地圧分布に対応する路床の変形係数を推定した。これらの3種類の接地圧分布の変形係数比と鉛直応力比の関係から1次の直線近似式を導いた。これから接地圧試験データの鉛直応力比を用いることで変形係数比を予測することができる。

#### 4. 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。しかし既往の研究の試作した接地圧測定装置は実用化されていないうえに、測定範囲に限りがあることから、本研究では載荷による接地圧の分類方法が検討した。

ここで得られた成果として、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。また、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。

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。最後に、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。

以上から、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。

## 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) Werkmeister, S. : Permanent Deformation Behaviour of Unbound Granular Materials in Pavement constructions. Final report in Dresden University of Technology, pp.4-1/5-8, 2003.
- 3) Werkmeister, S., Numrich, R. and Wellner, F. : Resilient and permanent deformation behaviour of unbound granular, Unbound Aggregates in Road Construction, pp.171-180, 2000.
- 4) Gulp, 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.
- 5) Lekarp, F., Isacsson, U. and Dawson, A. R. : Permanent Strain Response of Unbound Aggregates, J. of Trasp. Eng. ASCE, pp.76-83, 2000.
- 6) Gulp, C., Cillessen, R., Blom, S. and Groenen, J. : The use of LWD on granular bases and asphalt structures, 6<sup>th</sup> European FWD Users Group Meeting, pp.1-2, 2010.
- 7) Sharp, R. W. and Booker, J. R. : Shakedown and Fatigue of pavements under movement surface loads, J. of Trasp. Eng. ASCE, pp.1-14, 1984.
- 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) Werkmeister, S., Dawson, A. R. and Wellner, F. : Pavement Desing Model for Unbound Granular Materials, J. of Trasp. Eng. ASCE, pp.665-674, 2004.
- 10) Boateng, J. and Mgangira, M. : Evaluation of Test Methods for Estimating Resient Modulus of Pavement Geomaterials, Proceedings of the 28th South African Transport Conference, pp.245-254, 2009.
- 11) 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
- 12) Huhtalav, M., Dawson, A. R. and Mundy, M. J. : Unbound Granular Materials for Road Pavements, COST-337 and COURAGE, Workshop on Modelling and Advanced Testing for Unbound Granular Materials, pp.15-26, 2002.
- 13) Gulp, C., Cillessen, R., Blom, S. and Groenen, J. : The use of LWD on granular bases and asphalt structures, 6<sup>th</sup> European FWD Users Group Meeting, pp.1-2, 2010.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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E

- 1 (舗装工学), Vol.70, No. 3, pp. I\_57- I\_64, 2014.
- 17) 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  
文集, 第15巻, pp.169-176, 2010.
- 18) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : Soil Mechanics in Engineering Practice, 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Son's, Inc. pp.322-323,  
New York, 1967.
- 19) 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.
- 20) 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  
文集, 第15巻, pp.161-168, 2010.
- 21) 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.

