

タイトル	小型FWDと平板載荷の接地圧に関する研究
著者	上浦，正樹
引用	北海学園大学工学部研究報告，34：31-38
発行日	2007-02-20

小型FWDと平板載荷の接地圧に関する研究

上 浦 正 樹*

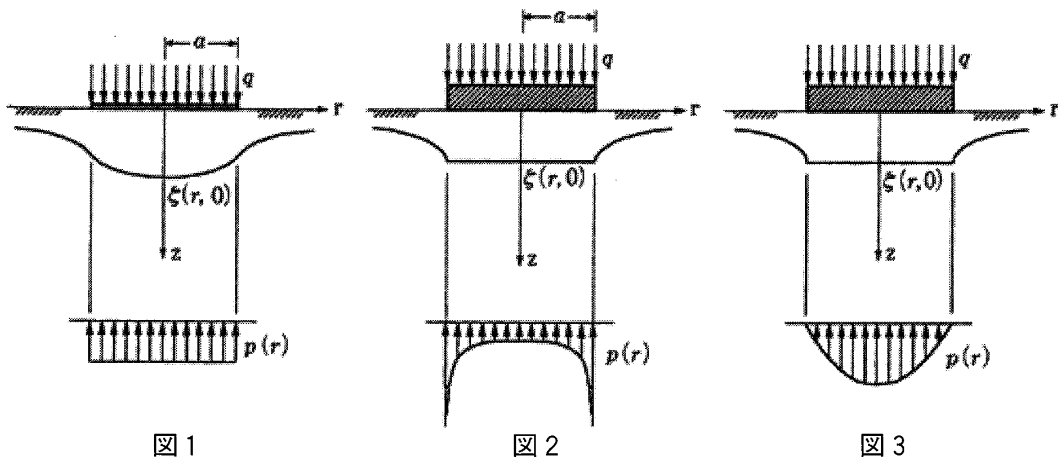
Difference Between Portable FWD Device and Plate Loading Device on Contact Pressure

Masaki KAMIURA*

1 はじめに

地盤に載荷することで地盤表面にはたわみとそれにともなって地盤反力が発生する。一様な載荷に対して地盤反力が一様に発生するケースでは載荷板が地盤表面のたわみ形状と一体となった変形が生じる。このような載荷方法をたわみ性載荷（図1）としている。一方、小型FWDの載荷板のように剛性の高い載荷板で載荷すると載荷面下の地盤表面（ $\xi(r, 0)$ ）は中央部も端部も同じたわみを生ずる（図2）。この条件よりBossinesqの弾性論を用いて接地圧 $p(r)$ は式1が導かれている。この結果を図（b）に示すが、この図からも縁端部では無限大に大きな応力が発生することとなる。

$$p(r) = \frac{aq}{2\sqrt{a^2 - r^2}} \quad (1)$$



* 北海学園大学工学部社会環境工学科

* Department of Civil and Environment Engineering, Hokkai Gakuen University

実際には、縁端部付近では降伏し逐次中央部へ応力が移り、砂地盤のように縁端部に側方の拘束がないときには図3のようになる。一方、粘土のように引張り力が高い土においては縁端部で側方への拘束によって図2に近い傾向にある¹⁾。このように剛性載荷では接触面での応力が地盤条件や載荷状態によって大きく影響を受けることが分かる。

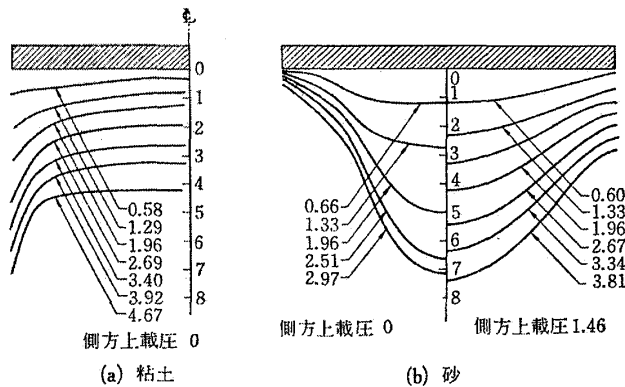


図4 Faberによる試験結果

このような傾向はFaberによって図4のような試験結果が求められている。ここで試験条件は半径15.6cmの剛性載荷板を用い、グラフ内の数字は平均応力(×100kPa)を示す²⁾。

次に図1では載荷板と地盤がおなじたわみ形状を示すことから両者の剛性が同じ場合であるが、載荷板にゴム板を貼り付けたわみ性載荷と同じような効果を期待するケースにつ

いて、弾性構造物が地盤に対する応力の算定方法が参考になる。円形等分布荷重の条件により式2で定義する相対剛性 K により接地圧を推定している(図5)³⁾。

$$K = \frac{(1-\nu^2)E_r H^3}{6(1-\nu_r^2)ER^3} \quad (2)$$

ここで E : 地盤の弾性係数 E_r : 載荷板全体の弾性係数 H : 載荷の換算厚さ R : 載荷板の半径

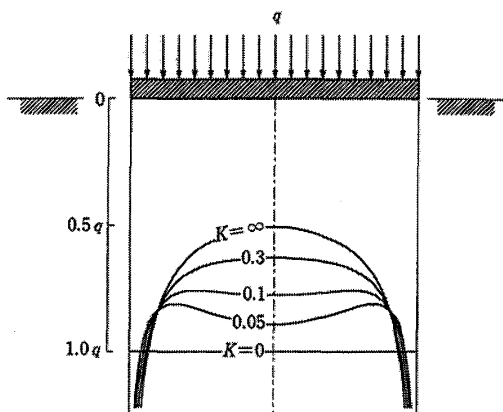


図5 載荷板の剛性を考慮した相対剛性

この図で $K = \infty$ とは、載荷板の剛性(E_r)が非常に高く、剛性載荷を意味している。地盤表面の応力が図(b)と同一の形状であることから論理的な連続性が認められる。よって、側方への拘束を考慮する必要がある粘土地盤などでは、図5は有効な示唆を与えてくれるものと考ええる。

一方、このような見方とは異なる見解が図6のようにフローリンによって示されている⁴⁾。そこには

載荷面の底部における応力分布は土の種類やその定量的特性(単位体積重量, 内部摩擦角, 粘着係数など)に関係しているだけでなく、底面の形状や荷重に大きさに関係している。また、実験的なデータの蓄積から載荷の大きさによって接地圧の変化を図のように推定している。ここでは、載荷荷重が地盤の剛性に対して相対的に小さいときは P_1 のような接地圧の分布を示し、載荷荷重が大きくなるにつれて P_3 のような分布を示すとしている。これに図4のFaberの結果に当て

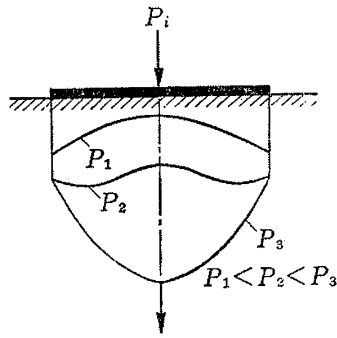


図6 フローリンの考え方

はめると、載荷板の端部における粘土地盤は図6の P_1 の挙動に対応し、砂地盤は P_3 に対応することになる。

以上の既往の研究成果は静的な荷重に対して構成された考え方である。一方、小型FWDを用いる場合は動的な載荷荷重に対して接地圧の理論を構築する必要がある。

2 動的載荷の発生原理

小型FWDの質量 m の重錘が落下高さ h から落下し、載荷板が地盤上で δ だけ沈下して止まったと仮定する。この時重錘が吐き出したポテンシャルエネルギー(U_p)は式(3)となる。

$$U_p = mg(h + \delta) \quad (3)$$

載荷荷重を P とし、応力を σ とする。ここで深さ D とし、ここで載荷板の面積(A)で円筒形に変形が発生するものとする。この沈下によって地盤の受け取った変形エネルギー(U_e)は、地盤内の(応力とひずみ)を積分したものである(式4)。

$$U_e = 1/2 \times P \times \delta = 1/2 \times \sigma A \times \sigma D/E = 1/2 \times AD/E \times \sigma^2 \quad (4)$$

ポテンシャルエネルギーがそのまま、変形エネルギーになるとすると、 $U_p = U_e$ から式(5)が導かれる。ここで $\delta = \sigma \times D/E$ である。

$$mg(h + \sigma \times D/E) - 1/2 \times AD/E \times \sigma^2 = 0 \quad (5)$$

ここで定数 β を次式とする。

$$\beta = \frac{mg}{A} \quad (6)$$

β を用いて(6)の2次方程式を解くと式(7)が得られる。

$$\sigma = \left[\beta \left(1 + \sqrt{1 + 2EAh/mgD} \right) \right] \quad (7)$$

ここで重錘質量10kg、載荷板半径15cm、地盤剛性(弾性係数)1000MPaを対象に式(7)を用いて重錘の落下高さに対する発生応力を求め、静的な応力である β との比を求めた。この比に重錘質量を掛けることは重錘の落下によって発生する載荷荷重と等価であるので、重錘の落下高さと載荷荷重の関係を求めた(図7)。この図から、重錘重量0.1kNであっても20cmの高さから落下させると100倍近い荷重が発生することが分かる。

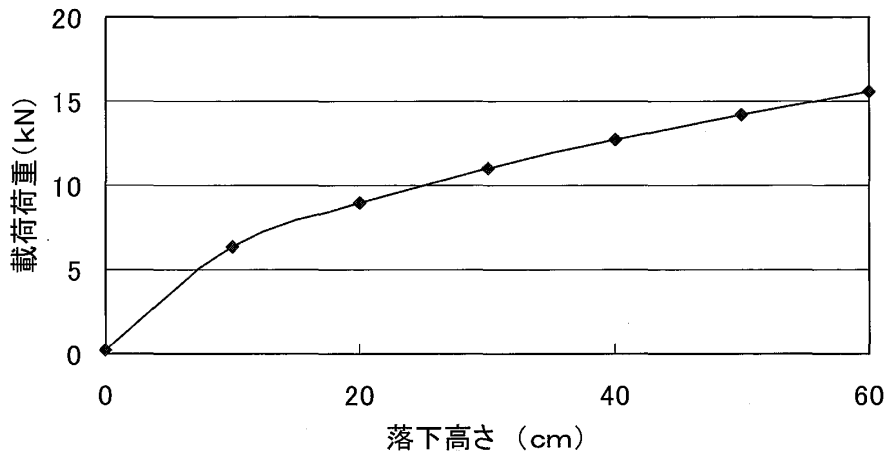


図7 重錘の落下高さと載荷荷重の関係

3 接地圧の分布に対するFEM解析

1で述べたBoussinesqの理論は，弾性体の仮定に基づき載荷面の変位を一定に保つためには縁端部で応力が集中する傾向を示すものである．しかし，土のような材料では実際に近いモデルとして粒状体の集合体として取扱いことができる．このような場合では，粘性を考慮した一般的な式（8）が成立つ．

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + C \frac{dz}{dt} + kz = 0 \quad (8)$$

この粘性を考慮すると載荷時の載荷板と地盤の沈下速度が関係してくる．また2次元表示のために式（7）のようにマトリクス表示をするが，基本的には式（8）の考え方を踏襲している．

$$\begin{aligned} M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) &= F(t) \\ u(0) &= 0 \quad \dot{u}(0) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここでM, C, Kはそれぞれ $N \times N$ の質量，減衰，剛性マトリクス，そして $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$, $u(t)$ では $N \times 1$ の加速度，速度，変位ベクトルである．また右辺の $F(t)$ は動的荷重ベクトルである．この数値解析にあたって本研究では減衰自由振動を対象としていることからモデルが簡単にするため始めに減衰マトリクス（C）が質量マトリクス（M）と剛性マトリクス（K）に比例するレーリー減衰（Rayleigh damping）を用いる（図8）．

FEM解析のように多くの要素を持ちかつ時刻歴データを取り扱うケースでは全体のマトリクスを小さくして解を求めることは最も有効な方法である．この目的のためリッツベクトルを固有ベクトルとして導入する方法は従来から動的問題を扱う構造解析に多く用いられてきた．しかし今までの方法は大きなマトリクスでは固有値が煩雑になるとして精度を犠牲にしてでき

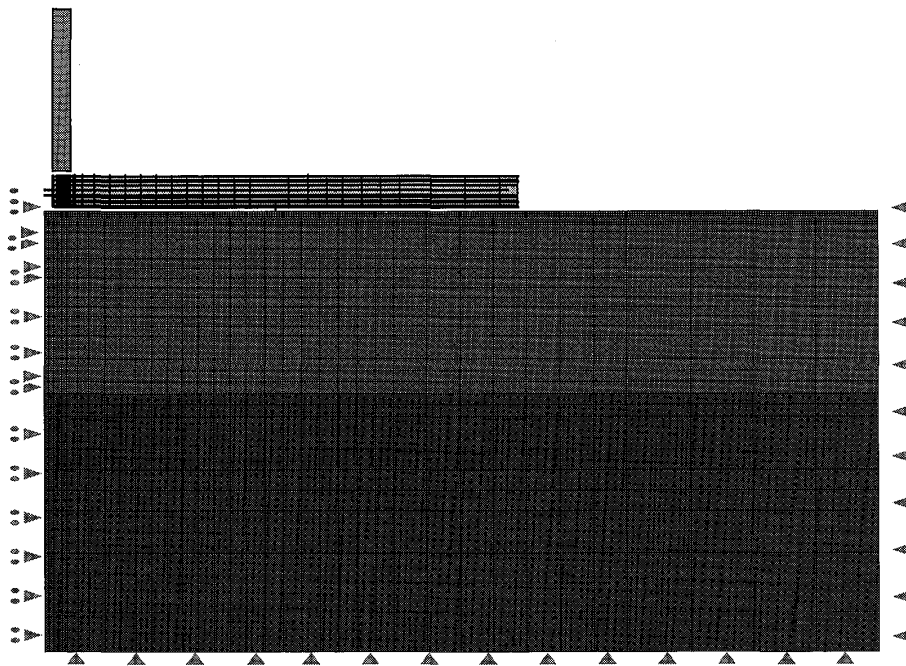


図8 FEM解析

るだけ少ない固有値で対処する傾向が見られた．そこで本研究ではリッツベクトルを固有ベクトルとして限定せずに直交ベクトルだけを条件として用いる方法を採用することとした．詳しくは文献⁷⁾を参照願いたい．

粘性の影響が載荷時間に影響することから小型FWDによる動的載荷によって得られえた載荷時間と載荷荷重の関係をこのプログラムに入力する．この出力結果により作成した地盤内のコンター図を図9に示す．

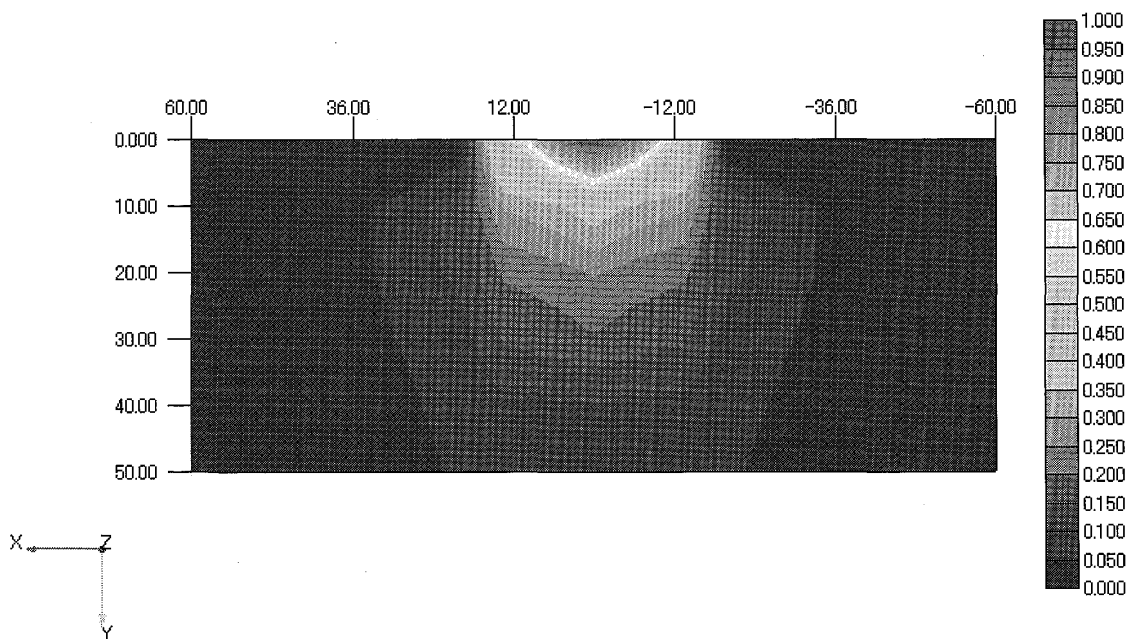


図9 FEM解析による応力コンター図

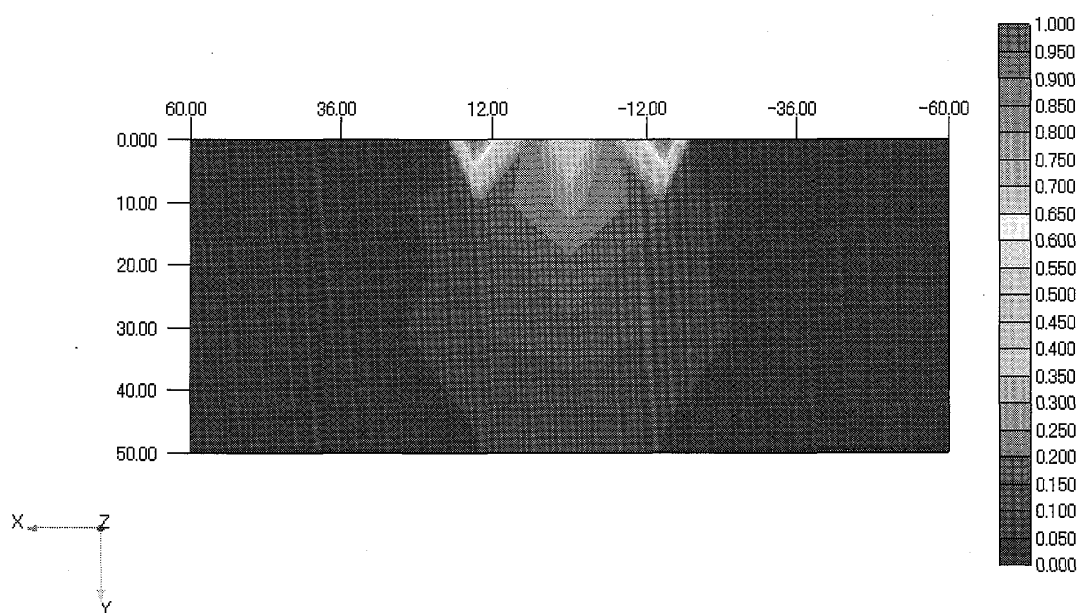


図10 FEMによるコンター図（載荷時間を5000倍に拡大）

この結果から分かるように、載荷面付近の地盤応力は載荷中央部で多くなる傾向を示し、端部では小さくなる傾向を示している。これは載荷時間の影響の影響が大きく左右するものと推定される。そこで載荷時間を5000倍に拡大して入力した結果を図10に示す。この結果から推測されるように載荷時間が長くなる粘性項であるCの影響が少なくなる。この結果、Boussinesqの理論解で示されている端部の影響が現れている。

4 接地圧分布の測定

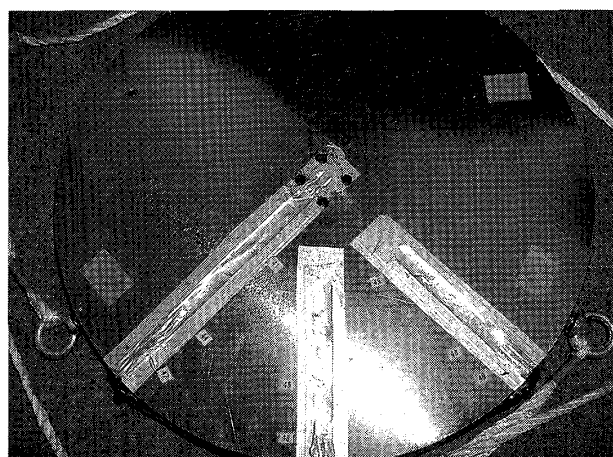


図11 圧力分布測定方法

半径15cmの載荷板の内部に圧力計を埋め込み、載荷時の圧力分布を測定することとした。ここで使用した圧力計の仕様は次の通りである。直径6.5mm、厚さ1mm、質量0.1g、最大容量1MPa

この圧力計を載荷点直下1箇所、載荷点中央から6cmに3箇所、12cmに3箇所、13cmに3箇所を1/4円内に同心円上に等間隔に接地したものである（図11）。

5 現場での測定

(1) 測定方法

平成18年11月JR貨物札幌貨物ターミナル内の敷地に試験用土槽として $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ に形状に掘削し（図12）そこに均一な粘土を敷き詰め転圧した（図13）。この状態での含水比は25%，湿潤乾燥密度 1.66 g/cm^3 ，乾燥密度 1.33 g/cm^3 であった。この状態で動的な載荷である小型FWD（図14）と平板載荷装置（図15）により載荷し，載荷面での圧力を測定した。

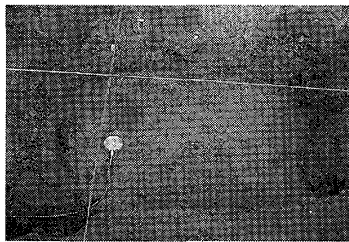


図12 試験用土槽

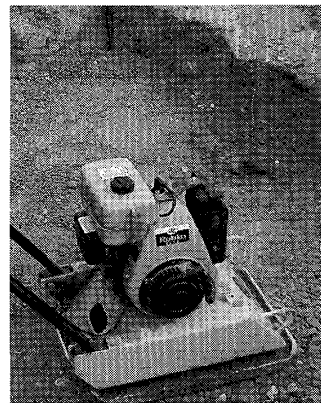


図13 粘土層の転圧

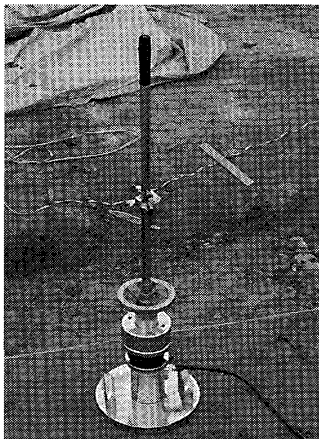


図14 小型FWD

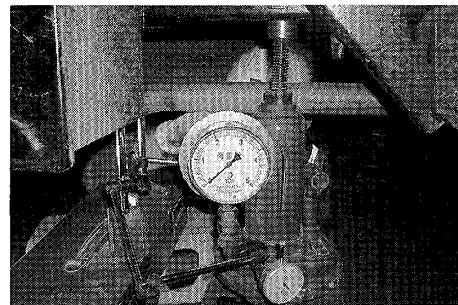


図15 平板載荷装置

(2) 測定結果

動的載荷である小型FWDの接地圧の測定結果を図16に示す。この結果から端部では圧力が小さく中央部では大きな傾向が得られた。一方，静的載荷である平板載荷での接地圧の分布の測定結果を図17に示す。この結果からは端部では圧力が大きくなる傾向が得られた。

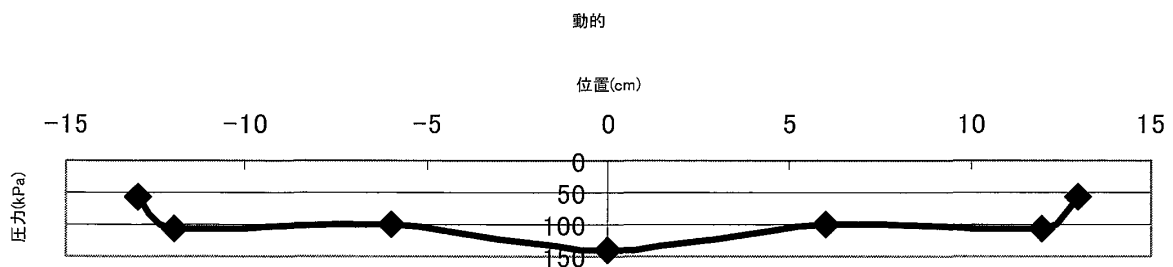


図16 小型FWD（動的載荷）の接地圧分布

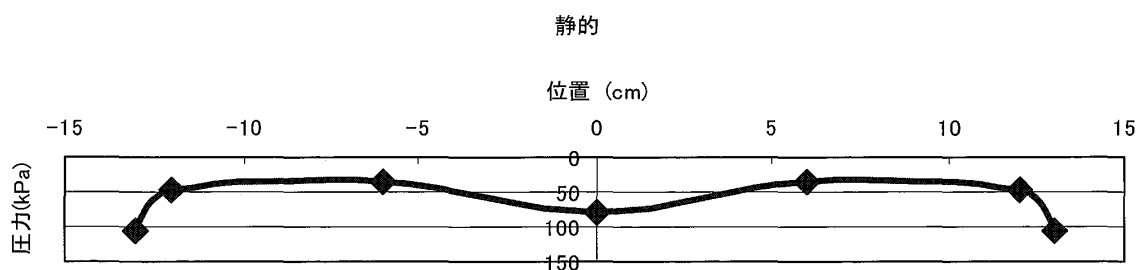


図17 平板載荷装置（静的載荷）の接地圧分布

以上から、動的載荷の結果と静的載荷の結果を比較すると図6に示したフローリンの考え方に近い推論が可能であることが明らかになった。

6 まとめ

接地圧について動的載荷と静的載荷について明らかな差異があることを測定実験から示した。この解釈は古典的な土質力学からは説明ができないが、フローリンの考え方に近い推論が可能であることが明らかになった。今後は、動力学の観点からこの現象を解明したいと思っている。

参考文献

- 1) 最上武雄編：土質力学 技報堂 1969.8 pp224-225
- 2) 山口柏樹：土質力学技報堂 1969.9 pp168-169
- 3) 土質工学ハンドブック土質工学会 1972.4 pp221-222
- 4) 赤井浩一監修：フローリンの土質力学 森北出版 1969.9 pp344-348
- 5) 柴田明德：最新耐震構造解析，最新建築学シリーズ森北出版 1981.2, pp69-72
- 6) Edward L. Wilson, Ming-wu Yuan John M. Dicks : Dynamic Analysis by direct superposition on Ritz vectors, Earthquake engineering and Structure Dynamics, vol.10, 1982.9, pp813-821
- 7) 上浦正樹ら：動的載荷による地盤応答に関する基礎的研究，北海学園大学工学部研究報告第32号，2005.2 pp203-220