

振動時地盤内における深さ方向の動的土圧分布の実験的研究について

澤 田 知 之*・能 町 純 雄**・近 藤 崇***

On Experience Study for the Seismic-Earth-Pressure Distribution of Dynamic Ground

Tomoyuki SAWADA, Sumio G. NOMACHI and Takashi KONDO

要 旨

振動時地盤における動的土圧の分布状態は静止土圧分布と異なるが、耐震設計などにおいては震度法を根拠に震度分を割り増して線形に深さ方向に分布させるとしている。本稿では、振動台上の砂箱に標準砂によるモデル地盤を作成してその振動土圧を測定し、変位の発生しない側壁に対する動的土圧の深さ方向の分布を求めた。又、平面歪状態での動的二次元弾性解との比較検討も行ったものを報告する。

Abstract

In this paper, Some effects of model tests on shaking table, which are distribution of dynamic earth-pressure to the rigid-wall, are described. And the results are compared with a elastic analysis solution by means of two-dimentional plain strain state.

1. ま え が き

我が国は、世界の地震発生率の1/10を占める地震多発国である。例えば、1993年2月の釧路沖地震、同年6月の北海道南西沖地震や、1995年1月17日に発生した記憶にも新しい兵庫県南部地震（淡路・阪神大震災）など被害甚大な地震が相次いで起こっている。これら大地震に対する解析や免震・制震を含めた研究課題における1つの基礎分野として地震時地盤における動的土圧の解明は、耐震工学上の重要な課題と考えられる。本研究においては振動時地盤の剛な側壁に対する動的土圧分布をテーマと定め、モデル地盤による振動台実験による結果と2次元弾性論による地盤の動的解析結果の比較検討を行ったものを報告する。

2. 理 論 概 要

理論解析の詳細は前回¹⁾概に報告済みであるが概説すると次の通りである。つまり、図-1に示

す動的土圧の解析モデルにおいて、二次元弾性論の基本的釣り合い式にHookeの法則を代入し、 x 軸方向に有限Fourier-sine変換、 y 軸方向の釣り合い式で有限Fourier-cosine変換を施して進める。また、境界条件の両端($x=0, a$)で水平方向変位 $u=0$ と、地表面 $y=b$ で $\sigma_y=0$ と $\tau_{xy}=0$ 及び底部 $y=0$ で各水平、垂直変位が無い $u=0$ 、 $v=0$ の条件により、未知数を決定する。

よって、逆変換を施し、整理すると一般解として以下の変位と応力が求められる。

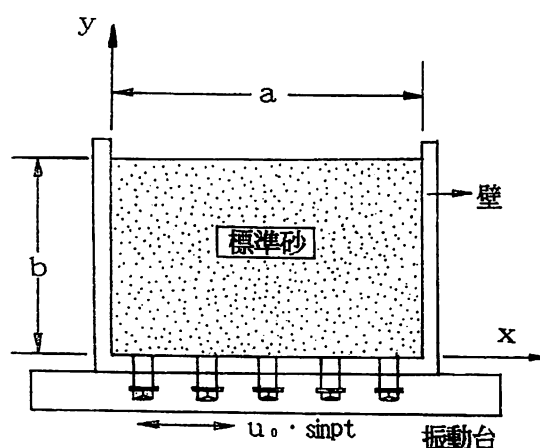


図-1 動的土圧の解析モデル

* 教授 環境都市工学科

** 名誉教授 北海道大学

*** 助手 環境都市工学科

基本式では次のように示される。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho u = \rho \ddot{u}_0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \rho v = -gp \quad (2)$$

u, v は各々 x 方向、 y 方向の相対変位で、 u_0 は振動台からの入力振動であり

$$\ddot{u} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad \ddot{v} = \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}, \quad \ddot{u}_0 = \frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}$$

である。

また、 $\frac{(2G+\lambda)}{\rho} = C_1^2$, $\frac{G}{p} = C_2^2$ であり、 ρ は砂の密度、 C_1 は弾性波の速度、 C_2 は剪断波速度となる。

又、Hookeの法則より、

$$\sigma_x = \rho C_1^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \rho (C_1^2 - 2C_2^2) \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \rho (C_1^2 - 2C_2^2) \frac{\partial u}{\partial x} + \rho C_1^2 \frac{\partial v}{\partial y} \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \rho C_2^2 \frac{\partial u}{\partial y} + \rho C_2^2 \frac{\partial v}{\partial x} \quad (5)$$

と表わされる。

(1), (2)式をフーリエ定積分変換すると、

$$\int_0^a \int_0^b \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho u = -\rho \ddot{u} \right\} L_1 dy dx \quad (6)$$

$$\int_0^b \int_0^a \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \rho v = -gp \right\} L_2 dx dy \quad (7)$$

ここで $L_1 = \sin(Mx)\sin(Ny)$, $L_2 = \cos(Mx)\cos(Ny)$ であり, $M = \frac{m\pi}{a}$, $N = \frac{n\pi}{b}$, $m, n = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdots$ である。

よって、(6)(7)と(3)(4)(5)および前述の境界条件による境界未知数を定める。次に逆変換を施すことにより解が以下のように求められる。

水平方向変位

$$\begin{aligned} u = & \sum_m \frac{\{1 - (-1)^m\}}{2} \sin(Mx) \\ & \times \left[\frac{4u_0}{b} \frac{be}{m\pi} \left\{ (1 - Q_m(\eta)) \frac{p^2}{\beta_m^2} + (Q'_m(\eta) - Q_m(\eta)) \sin \omega t \right. \right. \\ & - \frac{2hA_m e \pi}{b^3 p^2} \frac{b}{\pi} \{ 2(me)^3 (R'_m(\eta) - R_m(\eta)) - p'^2 R'_m(\eta) \} \\ & + \frac{2\beta_m e}{b p^2} \frac{b}{\pi} (me) \{ R_m(1 - \eta) - R'_m(1 - \eta) \} \left. \right] \\ & + u_0 \sin(\omega t) \end{aligned}$$

鉛直方向変位

$$v = \sum_m \frac{\{1 - (-1)\}}{2} \cos(Mx) \\ \times \left[\frac{4u_0}{b} \frac{be}{\pi} \left(\frac{\phi'_m(\eta)}{\beta'_m} - \frac{\phi_m(\eta)}{\beta_m} \right) + \frac{2hA_m e \pi}{b^2 p^2} \frac{b}{\pi} (me) \{ 2(\beta'_m \phi'_m(\eta) - \beta_m \phi_m(\eta) + \frac{p'^2}{\beta'_m} \phi'_m(\eta)) \right. \\ \left. - \frac{2\beta_m e}{bp^2} \frac{b}{\pi} \left\{ \frac{(me)}{\beta'_m} \phi'_m(1-\eta) - \beta_m \phi_m(1-\eta) \right\} \right]$$

x方向の応力

$$\frac{\sigma_x}{\rho C_1^2} = \sum_m \frac{\{1 - (-1)^m\}}{2} \cos(Mx) \\ \times \left[\frac{4u_0}{b} e \{ (1 - Q_m(\eta)) \frac{p^2}{\beta_m^2} + 2h \{ (Q'_m(\eta) - Q_m(\eta)) \} \right. \\ \left. + \frac{2hA_m e \pi}{b^2 p^2} me \{ -4(me)^2 (R'_m(\eta) - R_m(\eta)) + 2p^2 R'_m(\eta) + 2(1 - 2h)p^2 R_m(\eta) \} \right. \\ \left. + \frac{2\beta_m e}{bp^2} \{ 2h(me)^2 \{ R_m(1-\eta) - R'_m(1-\eta) \} + p^2 (1 - 2h) R_m(1-\eta) \} \right]$$

せん断応力

$$\frac{\tau_{xy}}{p C_2^2} = \sum_m \frac{\{1 - (-1)\}}{2} \sin(Mx) \\ \times \left[\frac{4u_0}{b} (2me^2 \left(\frac{\phi'_m(\eta)}{\beta'_m} - \frac{\phi_m(\eta)}{\beta_m} \right) + \frac{p'^2}{m \beta'_m}) - \frac{2hA_m e \pi}{b^2 p^2} \{ 4(me)^2 (\beta'_m \phi'_m(\eta) - \beta_m \phi_m(\eta)) + \frac{p'^4}{\beta'_m} \phi'_m(\eta) \right. \\ \left. + \frac{2\beta_m e}{bp^2} me \{ \beta'_m \phi'_m(1-\eta) - 2\beta_m \phi_m(1-\eta) + \frac{(me)^2}{\beta'_m} \phi'_m(1-\eta) \} \right]$$

ここで、各々の関数は以下のような閉じた形で示される。尚（ ）内は虚数の場合である。

$$Q_m(\eta) = \frac{\cosh \left\{ \beta_m \pi \left(\frac{1}{2} - \eta \right) \right\}}{\cosh \left(\frac{\beta_m \pi}{2} \right)} \quad \left(= \frac{\cos \left\{ \beta_m \pi \left(\frac{1}{2} - \eta \right) \right\}}{\cos \left(\frac{\beta_m \pi}{2} \right)} \right)$$

$$R_m(\eta) = \frac{\sinh(\beta_m \pi \eta)}{\sinh(\beta_m \pi)} \quad \left(= \frac{\sin(\beta_m \pi \eta)}{\sin(\beta_m \pi)} \right)$$

$$R_m(1-\eta) = \frac{\sinh \{ \beta_m \pi (1-\eta) \}}{\sinh(\beta_m \pi)} \quad \left(= \frac{\sin \{ \beta_m \pi (1-\eta) \}}{\sin(\beta_m \pi)} \right)$$

等々.

$$\phi_m(\eta) = \frac{\cosh(\beta_m \pi \eta)}{\sinh(\beta_m \pi)} \quad \left(= \frac{\cosh(\beta_m \pi \eta)}{\sinh(\beta_m \pi)} \right)$$

$$\phi_m(1-\eta) = \frac{\cos \{ \beta_m \pi (1-\eta) \}}{\sin(\beta_m \pi)} \quad \left(= \frac{\cos \{ \beta_m \pi (1-\eta) \}}{\sin(\beta_m \pi)} \right)$$

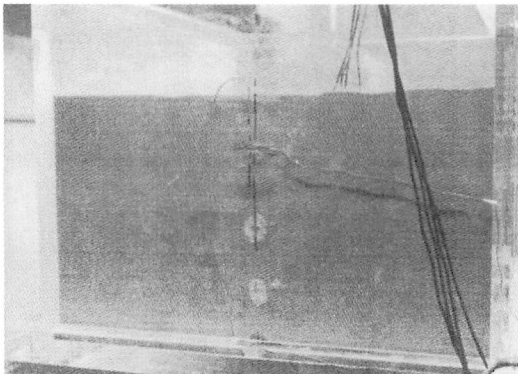
等々

3. 実験概要

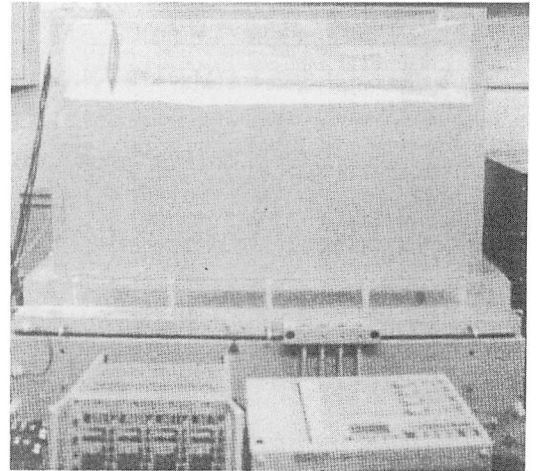
規則波による模型実験として振動時の最大土圧を測定し、その分布状況を考察する。本実験は、アクリル樹脂製の砂箱（縦70cm×横85cm×深さ55cm）に標準砂（豊浦産、単位体積重量 1.52 g/cm^3 、内部摩擦角 44° 、静止土圧係数 $K_0=0.4$ ）を40cmの深さに充填し、片側側面に砂の表面から、

8.5cm、20.5cm、30.5cm、38.5cmの各深さ位置に土圧計（Kyouwa BE2KC）を取りつける（写真－1）。

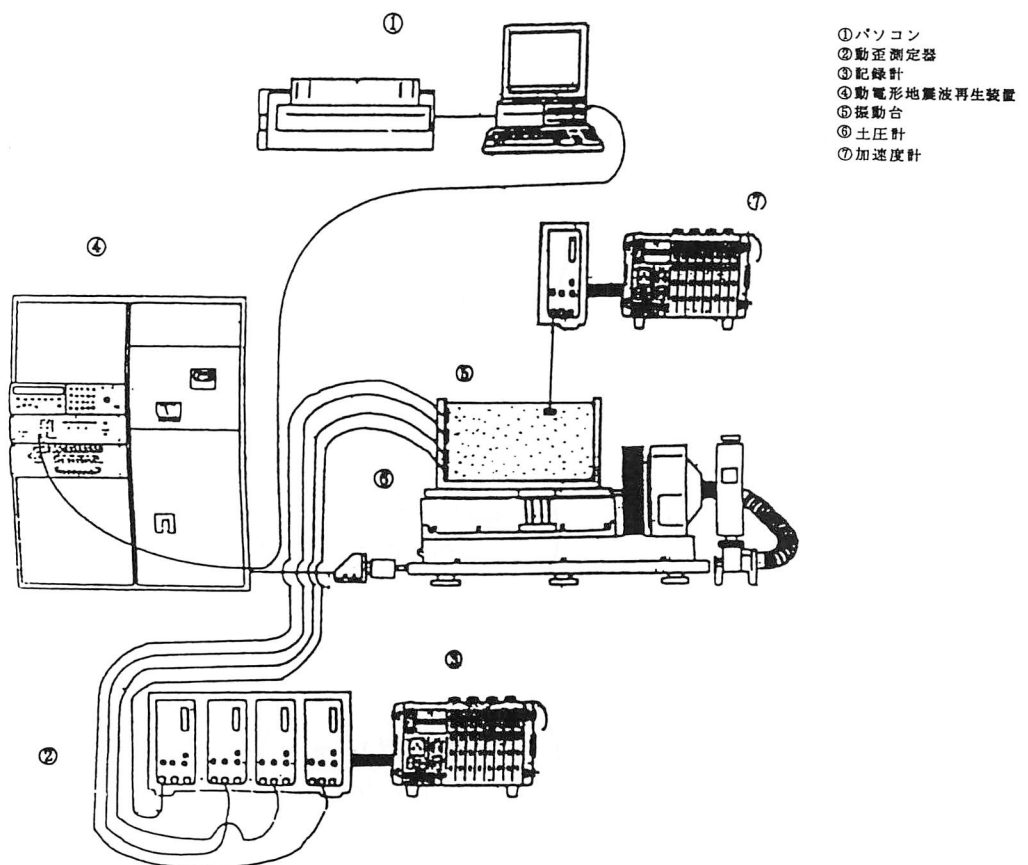
制御盤は、2Hz、3Hz、4Hz、5Hz、8Hz、10Hzの各周波数のsine波を入力し、各周波数で加速度を各々0.1G～0.6Gまで0.1Gずつ変化させ、静止土圧との比較も合わせて行った。砂層全体図は写真－2に実験装置全体は図－2と写真－3に各々示す。



写真－1 土圧計及び、ひずみゲージ位置



写真－2 砂層全体図



図－2 実験装置全体図

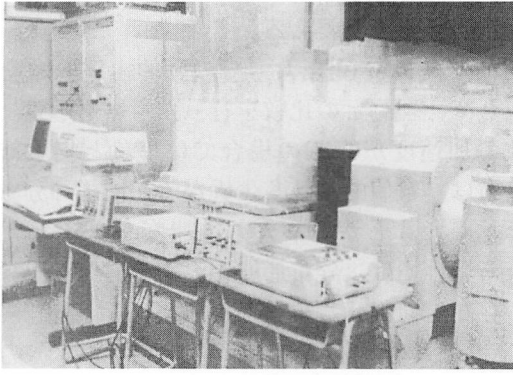


写真-3 実験装置全体図

4. 結果及び考察

予備実験として実験装置全体の周波数特性を調べたものを図-3に示す。これより、6.5Hzの時に卓越する傾向が見られ、6および7Hzでの実験が共振等の為に信頼性が低下すると考えその領域では実験を行わないこととした。各実験結果を図-4～図-9に示す。

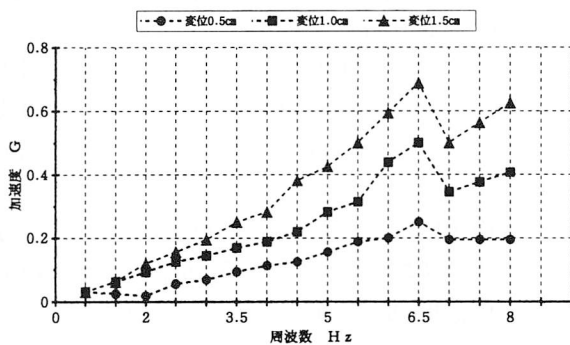


図-3 空箱時の周波数特性

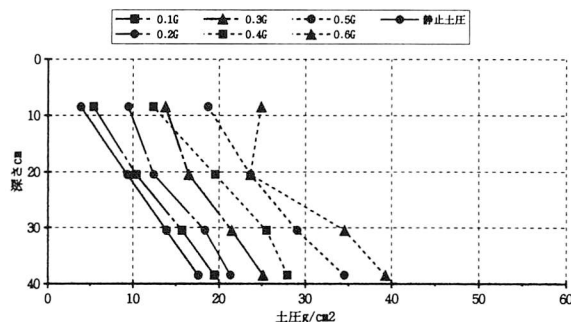


図-4 砂層厚40cm 2 Hz

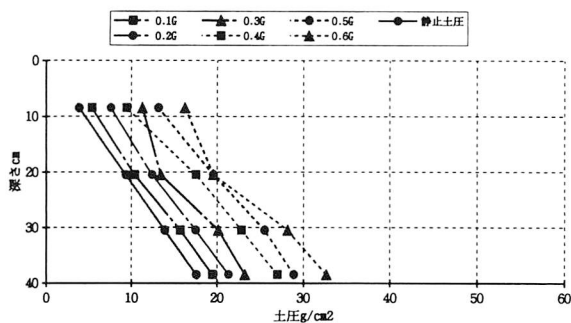


図-5 砂層厚40cm 3 Hz

域では実験を行わないこととした。各実験結果を図-4～図-9に示す。

これらの結果より以下の点が考察される。

- ①. 周波数が小さい時の方が、また加速度が大きい場合が土圧は大きく示され、工学的に妥当な傾向が示された。
- ②. 加速度が小さい時には深さ方向に土圧は一定となり、静止土圧との差で示される慣性力分布も一定となるような震度法を裏付ける分布形態を示す。一方、入力加速度が大きくなるに従って分布は非線形を呈し、2 Hzの入力波の場合では、縁応力の存在を伺せる3次のモードを呈した。10Hzの入力波では、中央部にピークが生じる2次モード分布となり、相違点が見られる。
- ③. 2 Hzの場合は変化が大きくなることから自由面での砂の動きも大きくなり、深さ方向の中間部分で一端減少する様な3次のモード又は、2次の

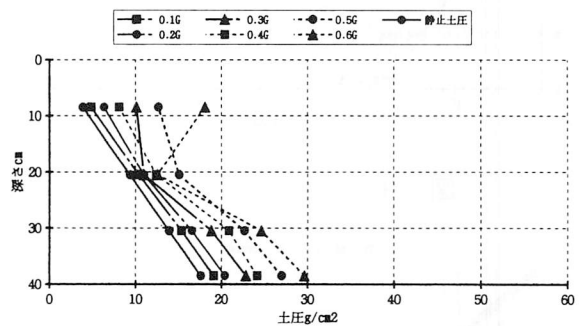


図-6 砂層厚40cm 4 Hz

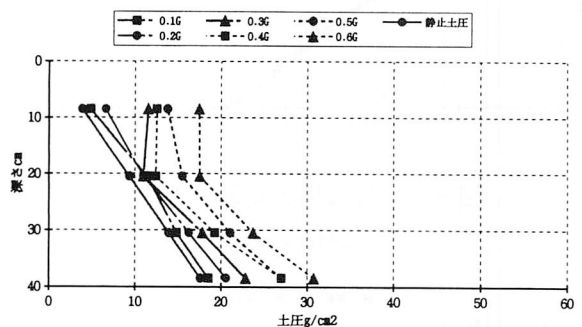


図-7 砂層厚40cm 5 Hz

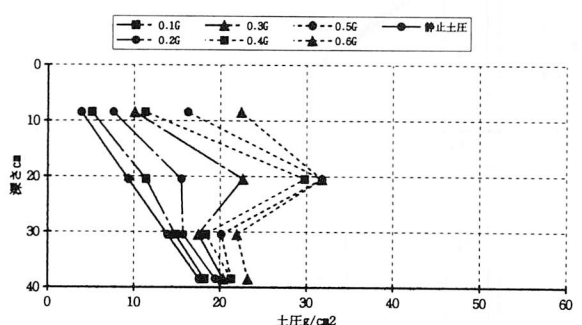


図-8 砂層厚40cm 8 Hz

モードの土圧分布を示すと考えられる。

④.入力周波数が8、10Hzと高い領域に進むにつれて自由表面での砂地盤の変位は小さくなり天端での壁面土圧は発生しないと考えられる。よって、加速度が小さい場合には周波数の変化に関係なく深さ方向にほぼ一定な動的土圧分布を示すので、耐震設計計算における震度法が適用可能と言えよう。加速度が大きくなる場合には上述のように非線形分布となり、震度法の適用は不適当ということが出来る。本実験結果からは、その入力加速度は0.3G程となりこの加速度内での震度法の

検証ができたと言える。

図-10、11に10Hz入力での動的土圧分布を取り出して、理論との比較を行ったものを示す。入力波の加速度が0.1Gの場合では理論と実験結果の分布は、数値的には多少異なるが同様の分布形態を示した。しかし、入力加速度が0.5Gと大きくなる場合では、分布形態が大きく異なり、縁応力の存在を伺わせる結果となった。

今後も、模型実験を様々な土質地盤、入力波形で実施し、数値計算との比較検討を重ね、定量的な考察を行うことが課題と考えられる。

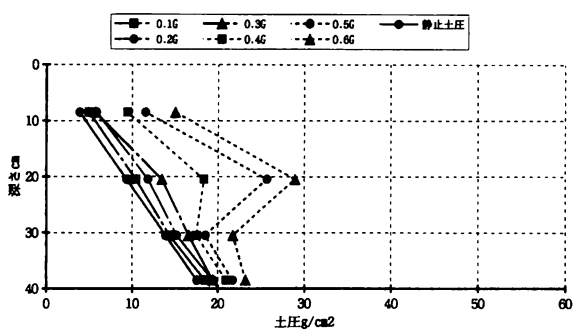


図-9 砂層厚40cm 10Hz

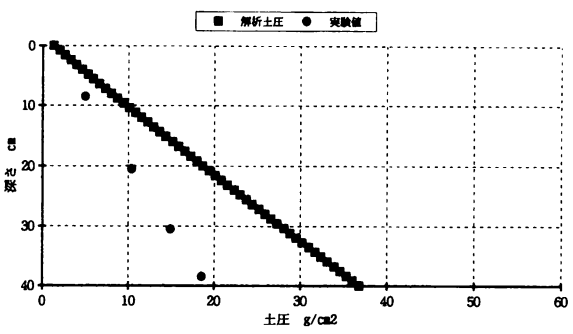


図-10 理論値と実験値の比較
(10Hz0.1G)

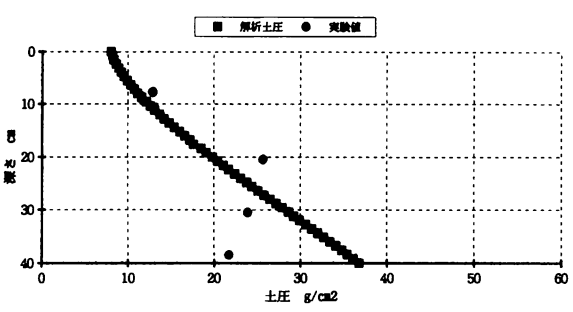


図-11 理論値と実験値の比較
(10Hz0.5G)

参考文献

1) Sawada, T., Nomachi, S.G. and Kondo, T.
：振動台上の砂箱内地盤モデルにおける動的応力と変位の弾性解, 苫小牧高専紀要, 第32号, pp.95-111, 1997.

2) 澤田・能町・近藤：地震時等における地盤の側壁土圧分布の振動台実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第53号 (A), I-30, pp.142-145, 1997.

3) 澤田・能町・近藤：振動時地盤の側壁土圧分布の模型実験, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, III-A147, pp.294-295, 1996.

(平成9年11月28日受理)