

土圧計の試作と検定に関する実験的研究

大原 資生*・山本 哲朗**・岡 孝***

Experimental Study for the Trial Making and Calibration of the Earth Pressure Cells

Sukeo O-HARA, Tetsuro YAMAMOTO and Takashi OKA

Abstract

This paper describes experimental studies on the performance of the earth pressure cells designed in our laboratory.

These earth pressure cells were calibrated under air pressure and soil pressure. Under air calibration, the calibration curves became nearly stable line. Under soil calibration, however, the calibration curves draw hysteresis loop during one cycle loading and unloading.

We have newly introduced the nondimensional parameters E and H, for error of the calibration factor and for the hysteresis respectively. E and H are correlated with the rigidities, the diameters of the cells and the physical properties of the soils, and some of their relations are shown quantitatively for the practical use.

1. 緒 言

土圧の測定は、空気圧や水圧の測定と異なり、土圧計や土圧計の置かれる場所の状態によって測定値が著しく、異なることが一般に知られている。

これらの多くは、土圧計を置くことによる土の挙動に起因すると考えられ、そのため、このような土の挙動の究明に関する様々な研究や、精度のよい土圧計の設計のための多くの試作がなされてきた^{1),2),3),4)}。

当研究室においても、振動台を使った土圧実験が行なわれており、実験に用いる精度のよい小型土圧計が必要であったのと、真の土圧に近い値を得るための土圧換算の方法を確立する目的で、土圧計に関する研究を行なっている^{5),6),7)}。

今回は、土圧計を数種、試作し、試料厚を変えながら、土圧検定実験を行なった。

結果の整理を行なう際に、土圧計の精度や土の挙動を知る目安となる気圧値との誤差、あるいはヒステリシスの大きさを定量化するために、E量、H量という無次元量を定義した。

本論文では、土圧計受圧板のたわみ量および受圧板有効径と精度の関係、さらに、粒径や粒度分布、密度、間隙水などに注目して考察した。これらの結果より、アーチングの影響や、供試体必要高さの検討を行なった。

2. 土 圧 計

今回、試作した土圧計は、Fig. 1のように、径の違う3種の土圧計にそのうちの2種と受圧板の肉厚(t)のみ異なる2種を加え、計5種とした。

材質はステンレスで、構造は5種ともダイヤフラム型である。

5種の土圧計番号をTable 1のように、外径の大きさによって定め、外径35mmの土圧計は受圧板厚が0.2mmを(35-1)、0.5mmを(35-2)とした。また、外径75mmの土圧計は厚さ0.4mmを(75-1)、1.0mmを(75-2)とした。

各土圧計内部には、Fig. 2に示すような超小型荷重変換器が受圧板の裏側中央で点接触となるようステンレス板に固定して置かれ、圧力が作用したときの受圧板のたわみ量を検出するようになっている。このように、土圧計内部に受圧器を入れて、間接的に、受圧板のひずみを測定する間接作動型としたのは、Fig. 3に

* 土木工学科

** 工業短期大学部土木工学科

*** 下関中央工業高等学校

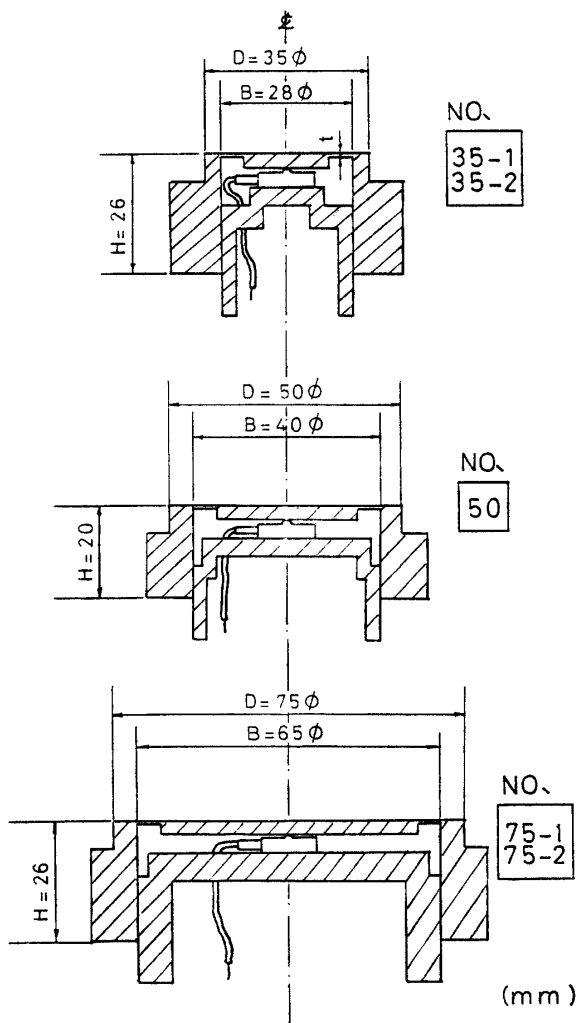


Fig. 1 Earth pressure cells.

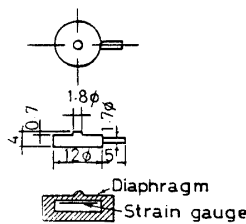


Fig. 2 Miniature load cell.

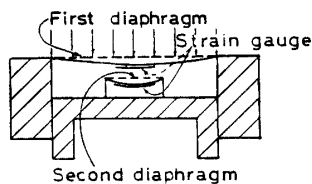


Fig. 3 Explanation of indirect action type.

示したように受圧板のひずみ量が小型荷重変換器に拡大される利点があるからである。

このような方法によって、受圧板のたわみ量を小さ

くする理由は、受圧板のたわみが土圧測定における誤差原因となるからである。そこで、単位圧力当りの受圧板中央のたわみ量 ($d\Delta/dp$) をダイヤルゲージで直接測定し、測定結果を Table 1 に示した。Trollope と Lee は、($d\Delta/dp$) の基準として、次式を定めた。

$$d\Delta/dp \leq (1.0 \sim 2.0) \times 10^{-4} \text{ cm/kgf/cm}^2 \quad \dots (1)$$

今回の試作では、式 (1) を満たした土圧計はなかった。また、たわみ量 ($d\Delta/dp$) を土圧計有効径 (B) で除した、たわみ度比 ($d\Delta/dp/B$) の値も求めた。

3. 試料

検定には試料として、豊浦砂、新宮砂、真砂土、しらすおよび宇部粘土を用いた。

土圧計 No. (50) の検定の場合、前4者を気乾状態で使い、宇部粘土は圧密によって、ほぼ飽和状態にあるものを使用した。No. (50) 以外の土圧計では、気乾状態の豊浦砂、新宮砂、宇部粘土を使用した。さらに、No. (35-2), (75-2) の土圧計については、湿潤状態の豊浦砂も用いている。

各試料の物理定数および粒径加積曲線を Table 2, Fig. 4 に示した。これより、豊浦砂、新宮砂は粒径が比較的大きく、均等度のよい試料であり、宇部粘土は粒径が小さく粒度分布のよいことがわかる。また、真砂土としらすについては、両者の中間的分布をしていることがわかる。

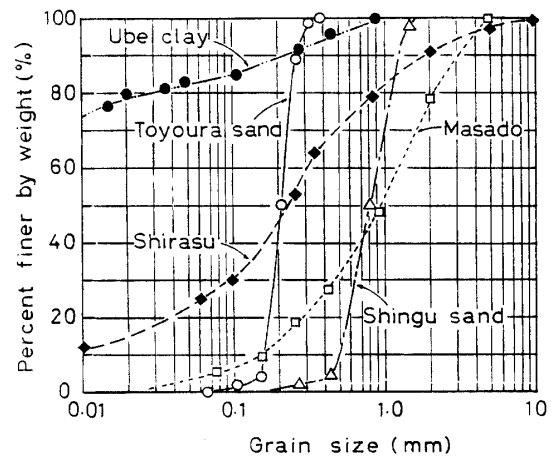


Fig. 4 Grain-size distribution curve.

4. 検定装置および検定方法

検定装置は Fig. 5 に示すように、三軸セル室と類似した圧力セル室である。また、供試体上面に置かれ

Table 1 Form & performance of earth pressure cells.

Earth pressure cell number		35-1	35-2	50	75-1	75-2
Diameter (D) (mm)		35	53	50	75	75
Effective diameter (B) (mm)		28	28	40	65	65
Thickness (H) (mm)		26	26	20	26	26
Maximum applied pressure (kgf/cm ²)		1.0	1.0	1.0	0.16	1.0
Air calibration factor (Ka) (gf/cm ² /μ)		0.571	1.325	1.282	0.0564	0.922
Thickness of diaphragm (t) (mm)		0.2	0.5	0.3	0.4	1.0
$d\Delta/dp$ (cm/kgf/cm ²)		3.3×10^{-3}	7.0×10^{-4}	6.0×10^{-4}	2.8×10^{-2}	1.9×10^{-3}
$d\Delta/dp/B$ (cm ² /kgf)		1.2×10^{-3}	2.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}	4.3×10^{-3}	2.9×10^{-4}
Capacity of miniature load cell (kgf)		1.0	1.0	5.0	1.0	1.0
Input & output resistances (Ω)		350	350	350	350	350
Gauge factor		2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Table 2 Physical properties.

	Toyoura sand	Shingu sand	Shirasu	Masado	Ube clay
G_s	2.63	2.64	2.36	2.63	2.67
D_{50} (mm)	0.21	0.79	0.23	0.90	0.002
U_c	1.38	1.70	56.7	7.3	—
e_{max}	0.96	0.89	1.67	1.21	1.61
e_{min}	0.60	0.54	0.84	0.58	0.91

る載荷板には、外気に通じるビニル管が取付けられるようになっており、載荷時に、供試体内に発生する過剰間隙圧が消散し、セル圧や軸圧が有効応力として作用する。

検定は、土圧計を底板にツライチとなるように取付けたのち、その上にゴムスリーブに包まれた供試体を作製する。飽和宇部粘土の場合には、ワイヤーソーによって、あらかじめ円柱状に成形したものを使用した。

各実験で試料密度があまり変化しないように、実験ごとに、密度の測定を行なった。また、供試体の高さは、5 cm～13 cm 程度まで変化させた。

セル室をセットすると、セル室内の気圧をハンドポンプによって、0 から 0.1 kgf/cm² ごと 1.0 kgf/cm² まで上昇させ、その後、0.1 kgf/cm² ごと 0 まで下げた。このような圧力の上昇および下降のくり返しを 2

回および 10 回行なった。各気圧での土圧計のひずみは、静ひずみ計によって読み取り、空気圧は 0.3 kgf/cm² までは、水銀マンメーター、0.3 kgf/cm² 以上はブルドン管で測定した。

5. 検定結果および考察

5.1 気圧検定実験

土圧による検定を行なう前に気圧による検定を行なった。検定曲線は、各土圧計とも、ほぼ良好な直線性を示した。No. (75-1) の土圧計は、ひずみが大きく出過ぎるために、0.16 kgf/cm² までしか、気圧を加えられなかった。これらの気圧検定曲線の平均的な直線を引き、気圧直線とした。気圧直線は、土圧検定の際の基準として、土圧検定曲線の図中に示した。気圧直

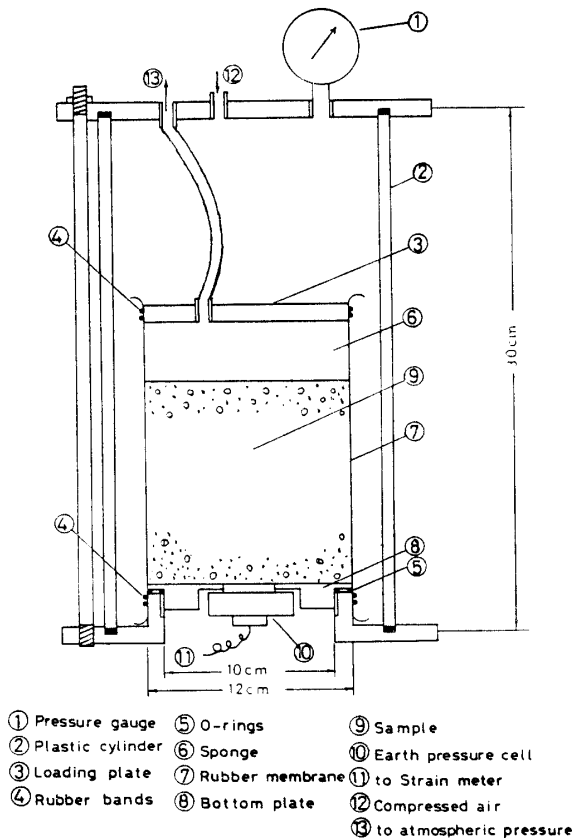


Fig. 5 Calibration apparatus.

線の勾配を求めて、その値を気圧直線の較正係数 (K_a) とした。

5.2 土圧検定実験

No. (50) の土圧計を用いた検定結果から、豊浦砂、新宮砂、真砂土、しらすおよび飽和宇部粘土の検定曲線の一般的形状を Figs. 6 (a), (b)~Fig. 10 に示した。

くり返し回数 (N) は飽和宇部粘土を除いて、10回とし、飽和宇部粘土は3回とした。図中には、供試体の高さ (h) を土圧計有効径 (B) で割った値 (h/B) を書き込んである。飽和粘土を除いて、他の4試料は (h/B) の値の大きいものと小さいものとを (a) と (b) に分けて示した。

図から、豊浦砂、新宮砂の検定曲線は (h/B) の値の大きい場合、くり返し回数 (N) によって、勾配が次第に大きくなっている。これは、各くり返し載荷ごとに供試体の密度が増加するためと考えられる。 (h/B) が小さい場合には、くり返し回数 (N) によって必ずしも勾配は急にならず、その変化は小さい。これは、くり返し載荷による密度変化の影響が小さいためと思われる。

次に、(h/B) の大きい検定曲線で気圧直線よりも勾

配が緩くなっているものがある。これは、Trollope と Lee による説明⁸⁾ では、土粒子が完全な球形でないために、硬いダイヤフラム上では、土粒子間をかみ合せ効果による局所的なアーチングを生じ、応力分布が均

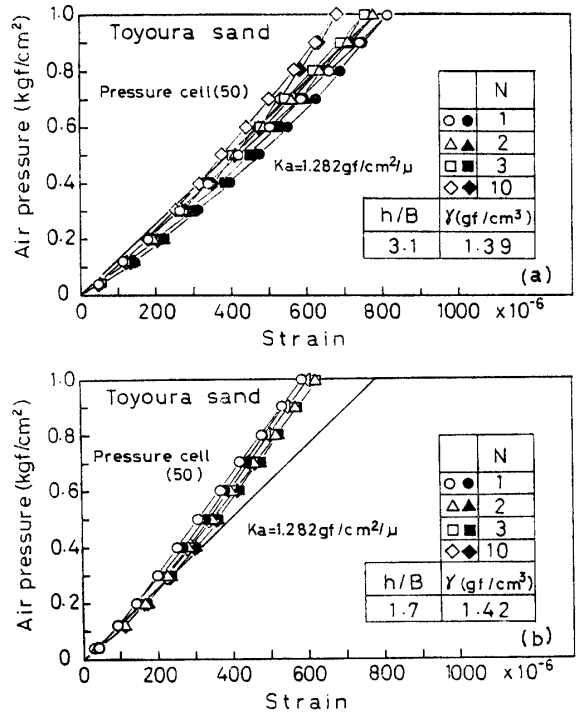


Fig. 6 Influence of repeated loading (Toyoura sand).

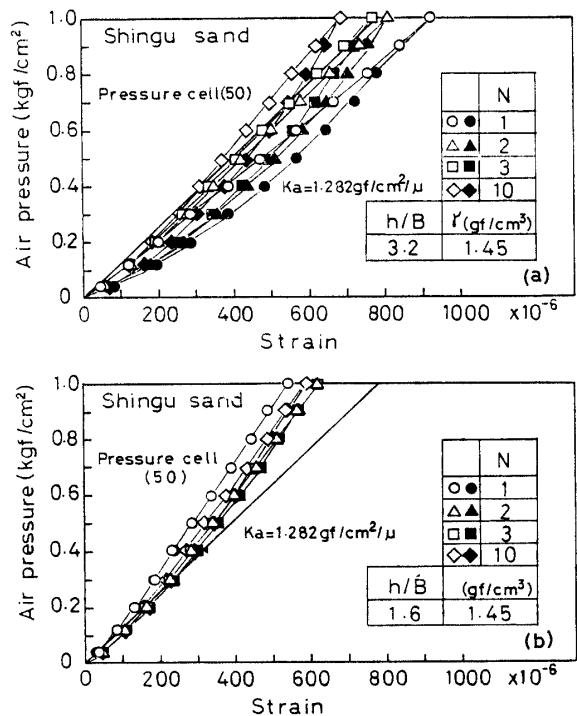


Fig. 7 Influence of repeated loading (Shingu sand).

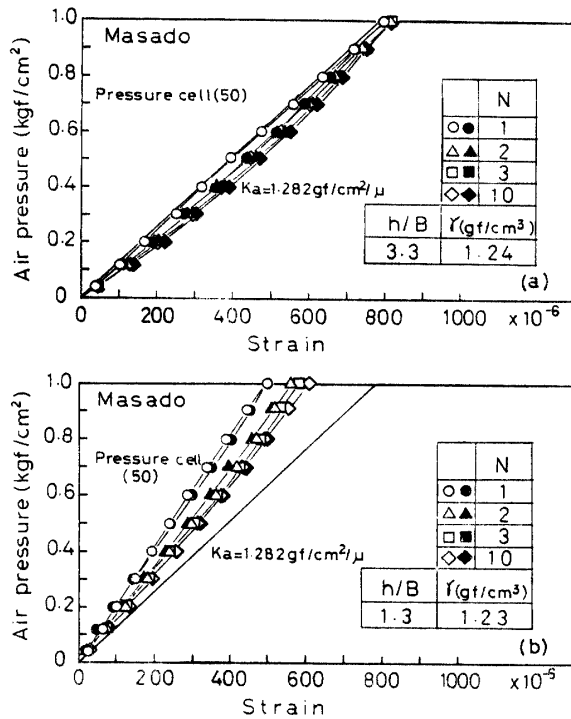


Fig. 8 Influence of repeated loading (Masado).

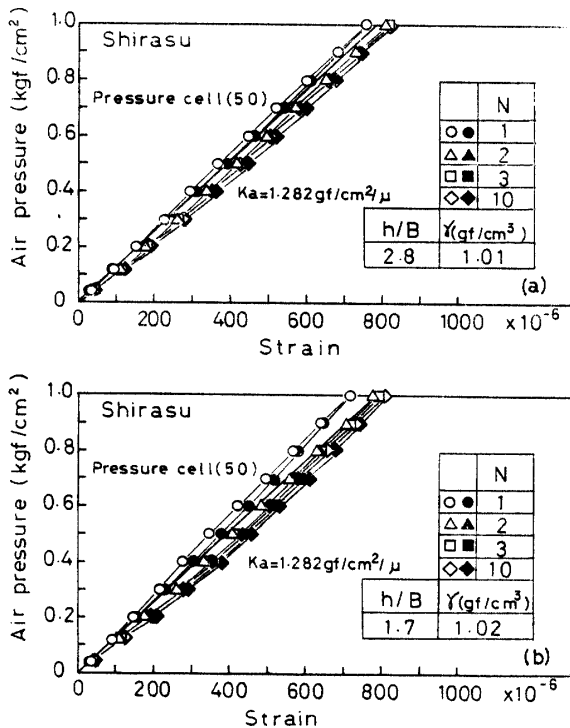


Fig. 9 Influence of repeated loading (Shirasu).

等でなくなり、応力集中を起こすためとされている。このようなアーチングをこれ以降、小アーチと呼ぶことにし、通常のダイヤフラムのたわみ変形によって生じるアーチングを大アーチとして区別した。

このように、砂圧による検定では、小アーチによる

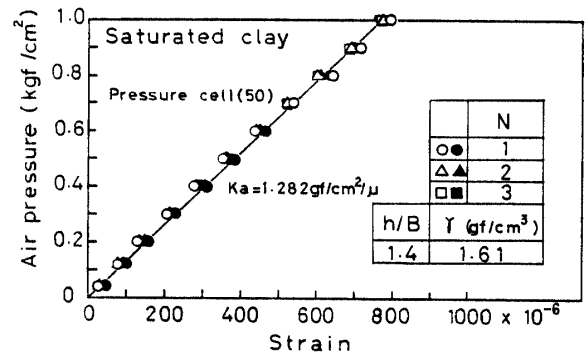


Fig. 10 Influence of repeated loading (Saturated clay).

応力集中と、大アーチによる応力低下とが共存していると考えられ、どちらが優越するかによって、検定曲線の勾配が定まってくると思われる。

真砂土、しらすの検定では、豊浦砂、新宮砂の検定曲線と異なり、くり返し回数(N)によって、さほど大きく変化せず、逆に、くり返し回数の増加にともなって、勾配が緩くなっている。これは、くり返し载荷による密度増加にともなって、試料のかみ合せ効果が増大し、応力集中を起こしやすくなるためと考えられる。

ここで、(h/B)の変化にともなう検定曲線の変化を調べるために、(h/B)を3段階に分けた図を、試料豊浦砂の場合についてのみ、Fig. 11に示した。図から、

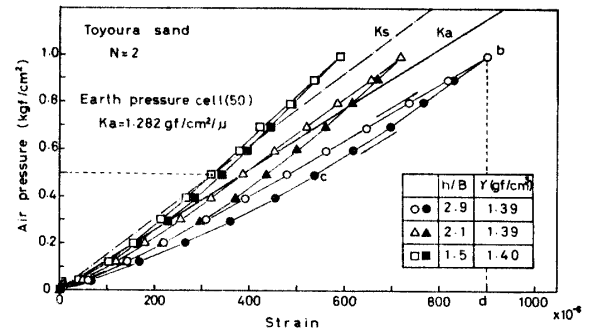


Fig. 11 Example of sand calibration curve.

検定曲線は、(h/B)の増加にともなって、勾配が緩やかになっている。従って、供試体の高さが低い程、大アーチの影響が強くなると思われる。また、ヒステリシスも(h/B)の増加にともなって、増大している。これは試料厚が増加するため、粒子間摩擦力が増大することが考えられる。このような傾向は、新宮砂、真砂土およびしらすにおいても同様であった。飽和宇部粘土については、(h/B)の増減にかかわらず、常に気圧直線に近い検定曲線となった。

次に、土圧計精度の目安として、検定曲線と気圧直

線の差の割合を示す E 量と、ヒステリシスの大きさを示す H 量を定義した。

Fig. 11 に示したように、 $N=2$ の検定曲線の空気圧が 0.5 kgf/cm^2 の圧力上昇点と原点とを結ぶ直線（一点鎖線）を引き、この直線の勾配を検定曲線の平均的な較正係数 (K_s) とした。 K_s と先に定義した空気圧の較正係数 (K_a) との誤差に相当する E 量を次式によって定義した。

$$E = \frac{K_s - K_a}{K_a} \times 100 (\%) \quad \dots\dots (2)$$

次に、 H 量は、式 (3) のように、面積 $abca$ つまり、ループの囲む面積と面積 $abda$ の三角形に近い面積との比によって定義している。

$$H = \frac{\text{Area } abca}{\text{Area } abda} \times 100 (\%) \quad \dots\dots (3)$$

E 量が零に近い程、検定曲線の勾配は気圧直線のそれに近づき、また、 H 量が零に近い程、ヒステリシスの小さい曲線となる。従って、 E 量、 H 量が零に近くなる土圧計程、土圧値が気圧値に近く、精度のよい土圧計といえる。

No. (35-1), (35-2), (75-1), (75-2) の土圧計を用いた検定では、各試料の相対密度が $30 \sim 40\%$ となるように、意図的な試料詰めを行なった。というのは、後で述べるが、密度によって、 E 量、 H 量は、かなり違ってくることがわかったからである。

Figs. 12 (a), (b) に試料によって E 量、 H 量がどのように異なるか、 (h/B) を横軸にとって、No. (35-2), (75-2) の土圧計のデータによって比較を行なった。

E 量は、新宮砂が一番高く、豊浦砂、宇部粘土の順になった。 H 量は新宮砂、豊浦砂でほぼ等しく、宇部粘土はそれよりも 50% 程小さかった。粘土の E 量は、

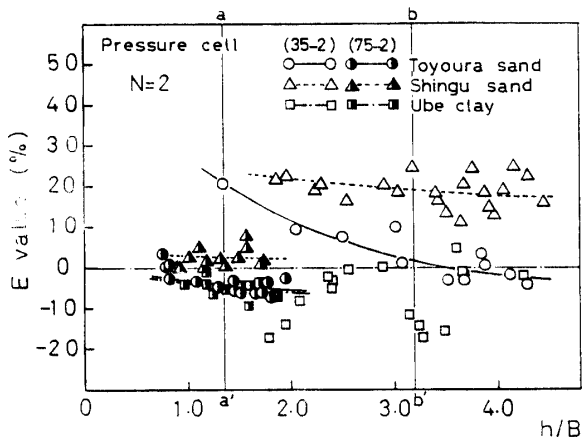


Fig. 12(a) Relationship between E value and h/B.

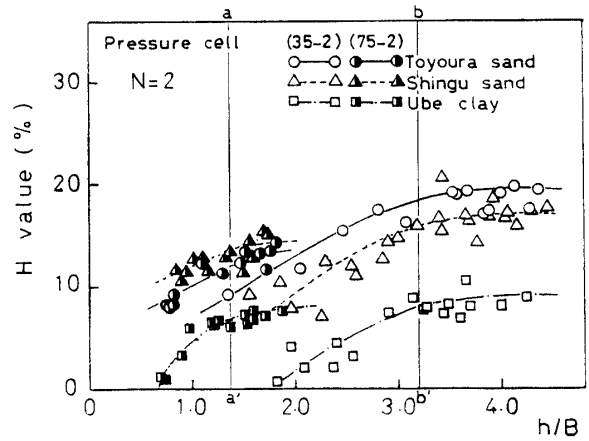


Fig. 12(b) Relationship between H value and h/B.

(h/B) の値にかかわらず、常に負の値を示した。これは粘土が小アーチ作用による応力集中を起こしやすい

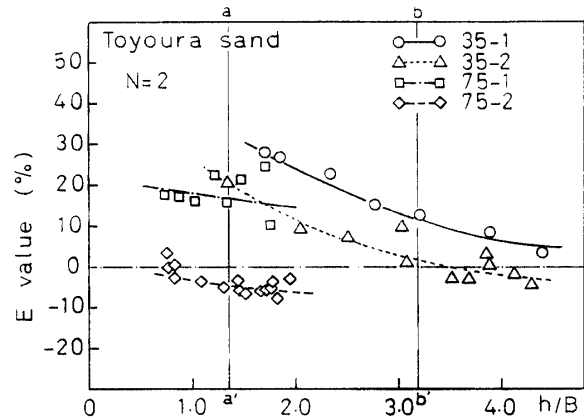


Fig. 13(a) Relationship between E and h/B (Toyoura sand).

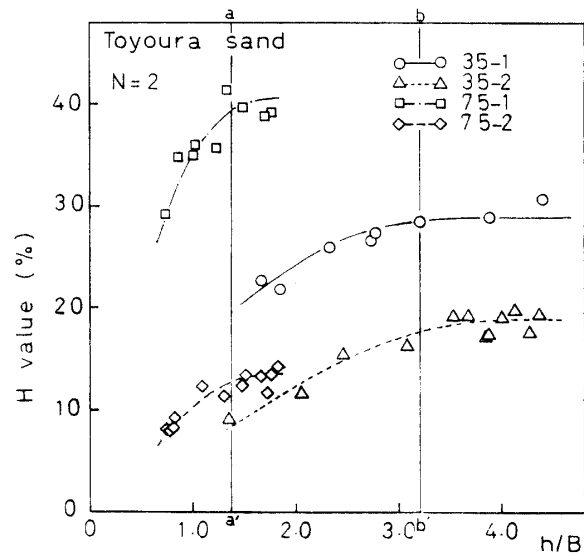


Fig. 13(b) Relationship between H and h/B (Toyoura sand).

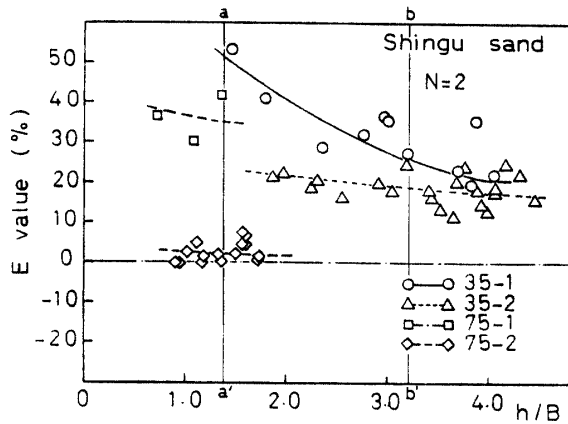


Fig. 14(a) Relationship between E and h/B (Shingu sand).

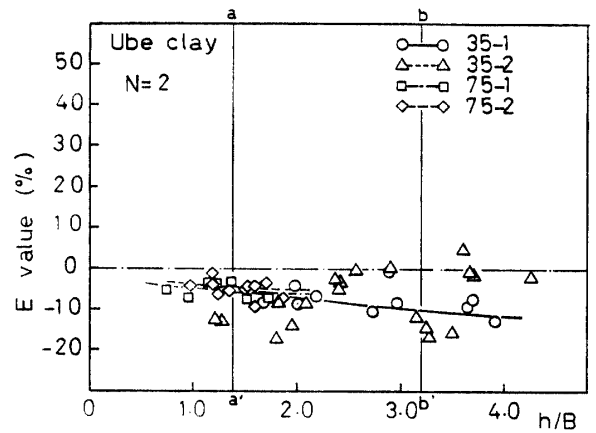


Fig. 15(a) Relationship between E and h/B (Ube clay).

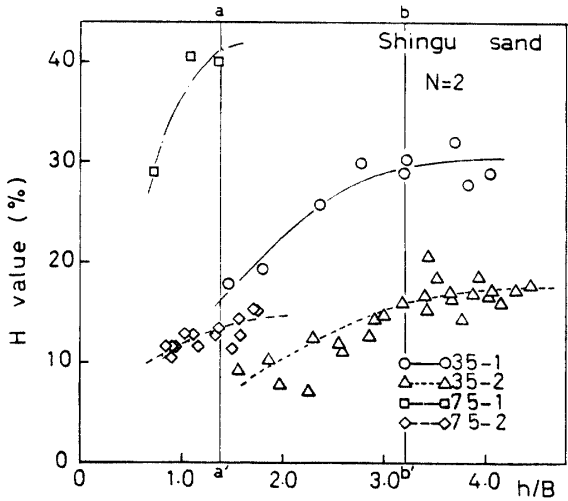


Fig. 14(b) Relationship between H and h/B (Shingu sand).

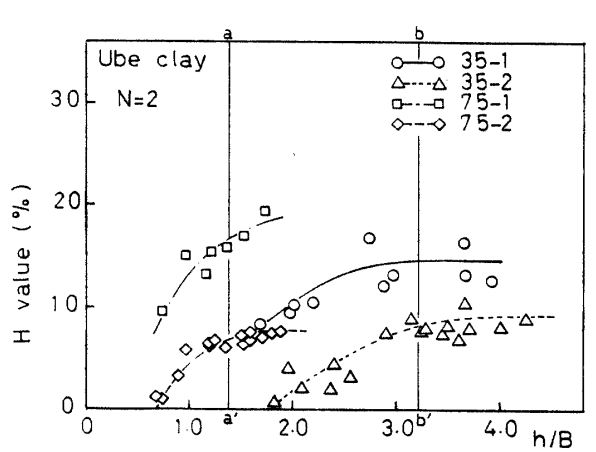


Fig. 15(b) Relationship between H and h/B (Ube clay).

ためと考えられる。No.(35-2)の粘土のデータはバラツキが多いので、プロットだけにとどめている。また、 E 量、 H 量とも (h/B) がある値以上で一定となっていることが注目される。このような E 量、 H 量に関する傾向は、No.(35-1)、(75-1)でも同様であった。

土圧計間で E 量、 H 量を試料ごとに比較すると、Figs. 13 (a), (b)~Figs. 15 (a), (b)のようになる。 E 量、 H 量がそれぞれ一定となる値は、豊浦砂や新宮砂では、土圧計 No.(75-2)、(35-2)、(35-1)、(75-1)の順に大きくなっていることがわかる。従って、この順番に土圧計の精度がよいと考えられる。宇部粘土の場合、 E 量は、 (h/B) による変化が小さく、土圧計間で、はっきりとした違いは認められなかった。また、全てが負の値となった。 H 量は、豊浦砂、新宮砂と同様に、No.(75-2)、(35-2)、(35-1)、(75-1)の順に各土圧計とも一定となった。

ここで、 E 量、 H 量が (h/B) の増加にともなって一

定となる原因を考察した。TrollopeとLeeは、ダイヤフラムが動くことによって、土中内部の応力状態が影響を受ける範囲を、土圧計有効径と約 60° の角度をなす円錐地域に限定し、それによって必要とされる試料厚は、直径の0.9倍であるとしている。しかし、本実験による検定結果では、 $(h/B)=0.9$ では一定とならなかった。そこで、底部部もある程度たわむと考えると、変形の起こる直径を Fig. 5に示したように、10cmと仮定すると、その影響範囲は、高さ約9cmに達する。この高さを供試体の必要高さと考えて、各土圧計ごとにその (h/B) を求めると、No.(35-1)、(35-2)が3.21、No.(75-1)、(75-2)が1.38となった。この値を E 量、 H 量の図中に、 $a-a'$ 線、 $b-b'$ 線として書き込んだ。再び、これらの図を見直すと、いずれの土圧計または、試料においても、 (h/B) の値が、これらの線分の値より大きくなると E 量、 H 量は急に一定となっている場合が多いように思われる。

ここで、一定状態における E 量および H 量を決定

Table 3 Constant value of E & H.

Pressure cell number	35-1		35-2		(50)		75-1		75-2	
	E (%)	H (%)	E (%)	H (%)	E (%)	H (%)	E (%)	H (%)	E (%)	H (%)
Toyoura sand	12	28	2	18	(-4)	(8)	17	39	-5	12
Shingu sand	26	29	19	16	(-8)	(10)	35	41	2	14
Masado Shirasu					(-2)	(1)				
Ube clay	-10	14	$\begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ -5 \end{pmatrix}$				-6	17	-5	7
Saturated clay					(3)	(1)				

する明確な基準がないため、 $a-a'$ 線、 $b-b'$ 線と交差する点で、それぞれ E 量、 H 量を一樣に読み取った。この値を Table 3 に示した。

試料密度によって検定曲線がどのように変化するか、試料豊浦砂で密度をさらに2通り変えた検定を土圧計 No.(50) を用いて行なった。検定結果は、Figs. 16(a), (b) に示したように、密度増加にともなって、 E 量、 H 量とも増加した。これは、密度が増加することによって、砂粒子が整然と配列するようになり、大アーチの影響を受けやすくなるのと、粒子同志の拘束が強まり、粒子間摩擦力が増大するためと考えられる。ま

た、 E 量は、ある程度密度が増加すると、あまり変化しなくなる。これは、ある程度締め固められると、粒子の配列がほぼ整ってしまい、密度増加による効果が小さくなるためと考えられる。このような密度増加による E 量、 H 量の増加は、豊浦砂のような粒径の比較的大きく、均等度の高い試料についてのみいえる結果であって、粘土などを用いた場合には、また違った結果となることが考えられる。

Figs. 17(a), (b) に試料の平均粒径と E 量、 H 量の

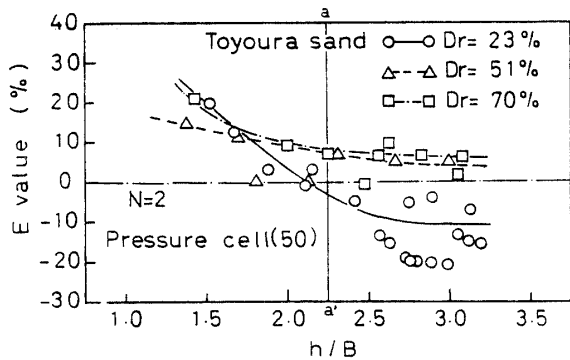


Fig. 16(a) Influence of relative density on E value.

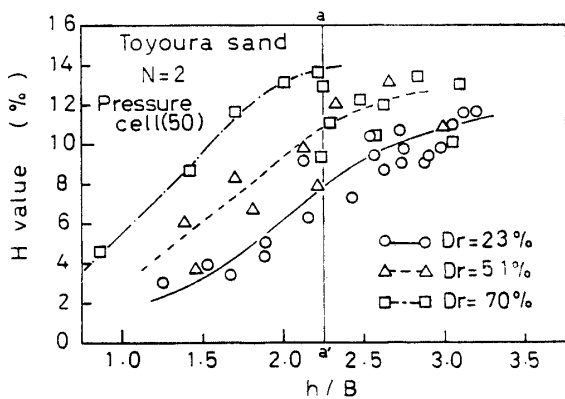


Fig. 16(b) Influence of relative density on H value.

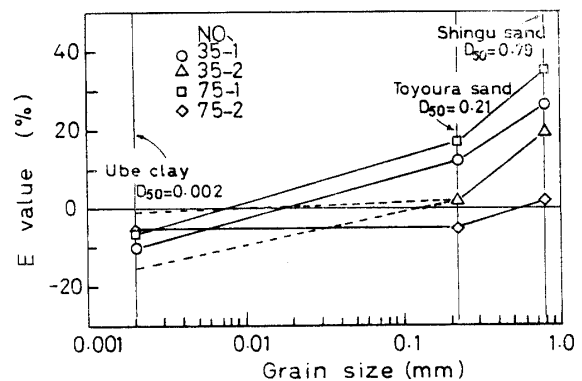


Fig. 17(a) Relationship between E and D_{50} .

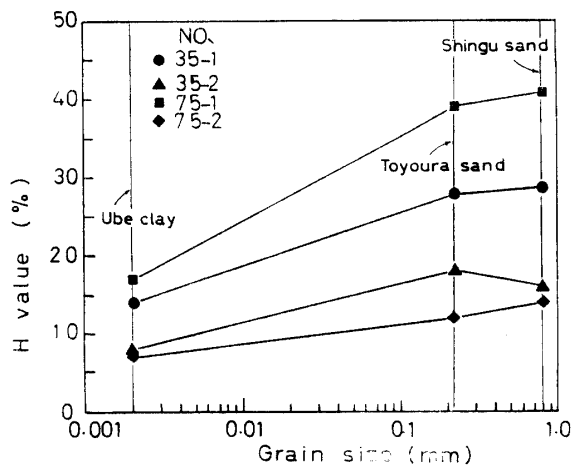


Fig. 17(b) Relationship between H and D_{50} .

関係を示した。E量およびH量はTable 3の読み取り値を使った。この図より、粒径の小さい試料ほどE量、H量が小さくなるのがわかった。また、豊浦砂と新宮砂のH量は、ほぼ等しいことがわかる。

先に求めたたわみ度比 ($d\Delta/dp/B$) とE量、H量の関係を Figs. 18 (a), (b) に示した。図から、たわみ度比の減少にともなって、E量、H量がほぼ一様に減少しており、土圧計精度は、たわみ度比によって、一義的に定まると考えられる。

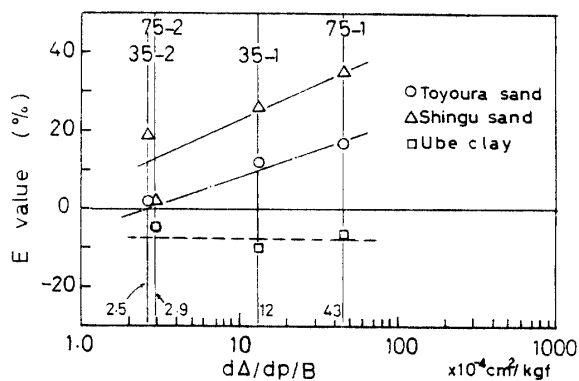


Fig. 18(a) Relationship between E and $d\Delta/dp/B$.

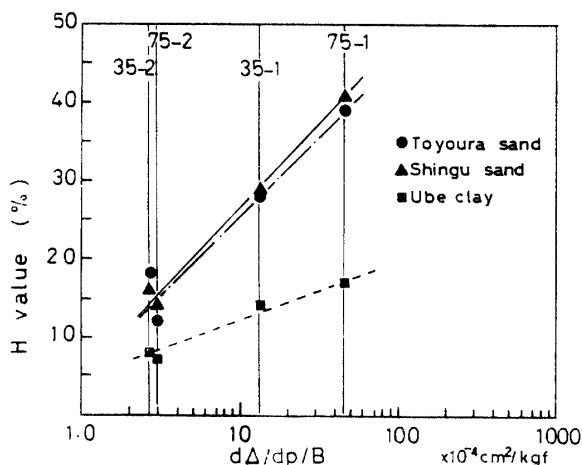


Fig. 18(b) Relationship between H and $d\Delta/dp/B$.

ところで、今回試作した土圧計の内部に固定されている超小型荷重変換器の性質が No. (50) を除いて、ほぼ等しいと考えられるところから、気圧検定によって読み取られるひずみ量が土圧計受圧板のたわみ量に比例すると考えると、($d\Delta/dp$) が気圧の較正係数 (K_a) の逆数に比例すると推定される。この推定によって、各土圧計間の相対的な ($d\Delta/dp/B$) の関係を導き、Figs. 18 (a), (b) と同様に E 量、H 量の関係を調べると、Figs. 19 (a), (b) のようになる。この図からは、粘土を除き、はっきりとたわみ度比の減少にともなって、E

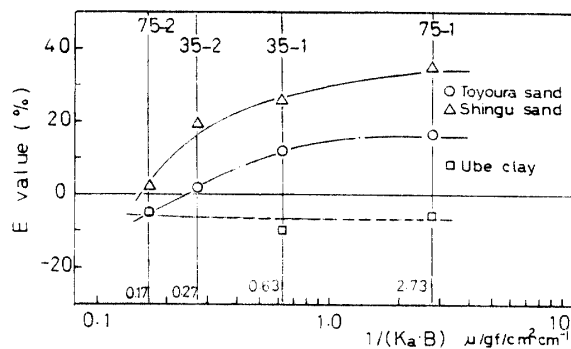


Fig. 19(a) Relationship between E and $1/(K_a \cdot B)$.

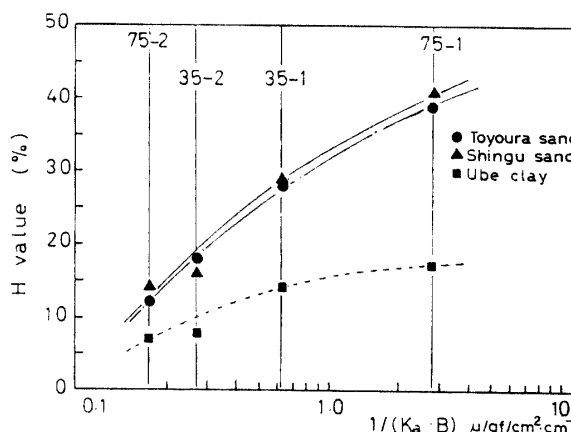


Fig. 19(b) Relationship between H and $1/(K_a \cdot B)$.

量、H量が減少していることが確認された。土圧計精度はたわみ度比によって一義的に決定されることが、これからもいえる。粘土のE量は、たわみ度比によってほとんど影響のないことも確認された。

豊浦砂を用いた水を含む検定は、乾燥密度が気乾状態のものより、かなり低いにもかかわらず、Figs. 20 (a), (b) のように、気乾砂とほぼ同じ検定結果となった。これは、土粒子中の間隙水の表面張力によって、

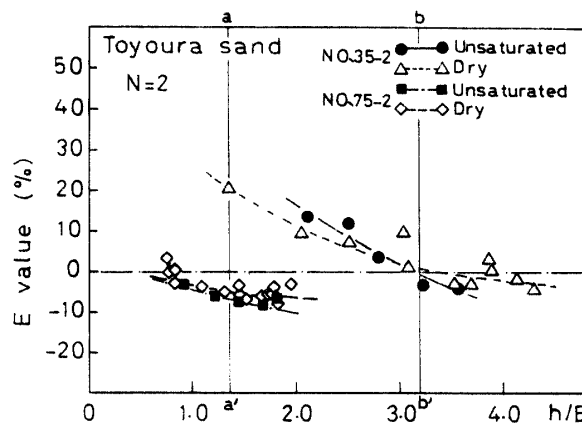


Fig. 20(a) Influence of pore water on E value.

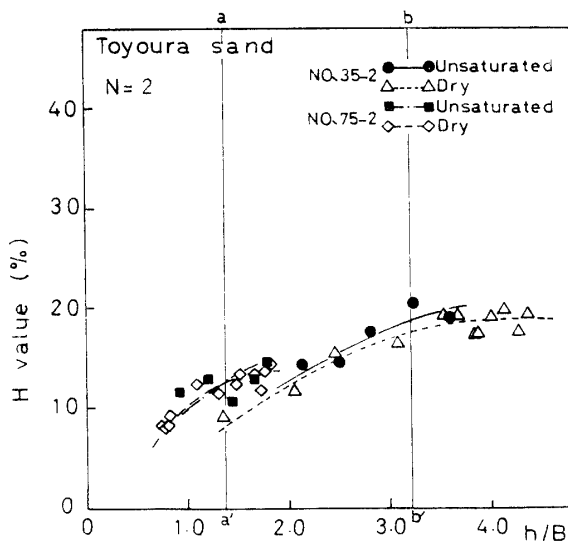


Fig. 20(b) Influence of pore water on H value.

供試体が締め固められたのと同じ状態になるためと考えられる。

6. まとめ

本研究を通じて、わかったことを要約すると以下のようになる。

(1) 供試体の必要高さは、供試体底面の受圧板変位の生じる範囲の直径によって、一様に定まると考えられ、今回試作した土圧計の検定実験においては、それを裏付けするような結果が得られた。

(2) 豊浦砂のような均等度の高い粒子を持つ砂の場合、供試体の密度が増加すれば、検定曲線の E 量および H 量も増加する。また、ある程度、密度が高くなると、 E 量の増加は小さくなる。

(3) 試料の平均粒径によって、 E 量、 H 量を比較すると、粘土のように粒径の小さいもの程、 E 量、 H 量は小さくなった。また逆に、豊浦砂や新宮砂のように、粒径が少し大きくなると E 量、 H 量も増加する。

これは、粘土試料が小アーチによって、応力集中を起こしやすく、粒子間摩擦力が小さいことと、豊浦砂、新宮砂が大アーチを形成しやすく、粒子間摩擦力が大きいことに起因していると考えられる。

(4) 受圧板たわみ量 ($d\Delta/dp$) を土圧計有効径 (B) で割ったたわみ度比 ($d\Delta/dp/B$) の減少にもなって、 E 量、 H 量も減少し、土圧計精度はたわみ度比 ($d\Delta/dp/B$) によって一義的に決定されると考えられる。

(5) 水を含む砂の検定では、間隙水が土の変形に抵抗し、密度増加のあったような挙動をするので、乾燥密度が気乾試料より低いにもかかわらず、 E 量、 H 量は気乾のものと同じ程度になる。

参考文献

- 1) D. H. Trollope and I. K. Lee: "The measurement of soil pressures", Proc. of the 5th Int. Conf. on S. M. F. E., Vol. II, pp. 493-499 (1961)
- 2) 市原松平、松沢宏、森富雄: 「土圧計の検定について」土木学会第33回年次学術講演概要集, 第3部, pp. 585-586 (1978)
- 3) 市原松平、松沢宏、森富雄: 「弱圧用小型土圧計の試作」土木学会第33回年次学術講演概要集, 第3部, pp. 587-588 (1978)
- 4) 市原松平、松沢宏、森富雄、尾崎師成: 「小型土中土圧計の作動特性」第13回土質工学研究発表会, pp. 881-884 (1978)
- 5) 大原資生: 「土圧計に関する実験的研究」土木学会論文集, No. 71, pp. 14-19 (1960)
- 6) 大原資生: 「土圧計に関する実験的研究(動的な土圧の場合)」土と基礎, 13-4, pp. 19-23 (1965)
- 7) 大原資生、山本哲朗、岡孝、中島文隆: 「土圧計の検定について」第15回土質工学研究発表会, pp. 1069-1072 (1980)
- 8) D. H. Trollope and I. K. Lee: "The performance of a laboratory earth pressure cell", Aust. Jour. Appl. Sci. 8, pp. 84-97 (1957)

(昭和57年3月27日 受理)