

# 土圧計の検定に関する実験的研究\*

EXPERIMENTAL STUDIES ON CALIBRATION OF EARTH PRESSURE CELLS

市原松平\*\*・古川清\*\*\*

By Matsuhei Ichihara and Kiyoshi Furukawa

## 1. 緒 言

近年土質力学の発展とともに、土中の応力状態を知るために土圧計を用いることが多くなった。ところが衆知のごとく、土中の真の応力を計測することはきわめて困難である。この困難性の主因として、受圧板の可とう（撓）性による受圧板上のアーチング、ならびに計器と土との応力変形特性の相違などによる計器への応力集中があげられる。

これらの現象は土の諸性質がもたらす現象であり、水のような流体下では考慮を必要としないものである。したがって、土中に埋設された土圧計においてはこれらの現象が不可避のものであることから、土圧計の検定は、土中と同一の状態で行なわなければならないと考えられる。ところが、市販の土圧計は流体圧のみによる検定曲線を与えており現状である。また、受圧板に土を通して力を加える検定（土圧検定）の必要性についても、さほど注視されてはいない。

もっとも諸外国においては、土中土圧計<sup>1)</sup>について後述するいくつかの研究がなされている。しかしそれらの研究は、個々の性質（たとえば受圧板の可とう性）に対して行なわれたものであり、土圧計を使用する面に対しての総合的研究に欠けている。しかもそれらはわれわれの使用する計器に対して行なわれたものではないため、新たに現在使用されている計器の検定ならびに検定時の諸現象に関する研究が必要となった。

そこで筆者らは、計器を検定する土槽（検定土槽）を作成し、土中土圧計および試料をそれぞれ2種類使用してこの研究を行なった。これによって土圧検定の必要性を明確にするとともに、検定時における検定土槽内の計器据え付け位置を求めた。

## 2. 実験装置

### (1) 検定土槽

これは図-1に示した土槽であり、内径75cm×深さ45cmの円筒形をした軟鋼製のタンクと、3cmの厚さをもつ半球形のふたから成っていて、重さは約0.5tである。

\* 概要是第20回土木学会年次学術講演会において発表

\*\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 日本港湾コンサルタント KK（前名古屋大学 助手工学部土木工学科）

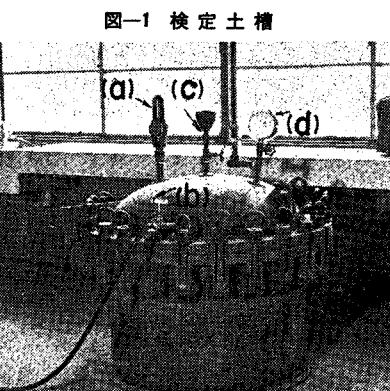


図-1 検定土槽

使用に際しては、タンクのてんぱまで試料を入れてから、中詰め土表面にゴム布を敷き、その上に水圧あるいは空気圧を加える。この操作によって中詰め土中に上向きに据え付けた計器に、鉛直土圧を作用させることになる。これに用いたゴム布は、厚さ3.0mm、直径85cmで、パッキングの役目と土圧計の受圧板に土圧のみを作成させる目的で使用したが、十分にその役目を果たしていることが検証された。

この土槽は20kg/cm<sup>2</sup>の圧力まで耐えうることができ、ふたの上部に取り付けられた安全弁(a)によって危険から回避できるように作られている。また土槽の気密性については、タンク周辺の24本のロックボルトによって完全に保持されている。

載荷圧（加圧力）、除荷圧（減圧力）は、土槽のふたに取り付けられた加圧用弁(b)、空気抜き用弁(c)によって、それぞれ任意に調節できるようになっている。なおこれらの加、減圧力は、ふた上部のブルドン管圧力計(d)によってよみとれる。

### (2) 土圧計

表-1に示した実用に供する土圧計A、Bの2種類を用いた。これら両計器のうち、土圧計Aを主体として使用し、付随的に土圧計Bを用いた。

表-1 使用土圧計の諸元および指示方式

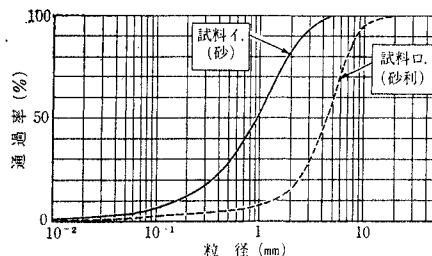
使用 土圧計	外径(D) × 厚さ(2H) (mm)	受圧板有 効径(d) (mm)	受圧板有効径(d) 中央たわみ量(δ) (mm)	最大計 測 圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	指示方式
土圧計 A	170×30	90	10 000 (公称)	5	不平衡電流 (mA)
同 B	180×34	160	53 000 ( )	5	電気抵抗比 (%)

この土圧計Aは、筆者らの研究室において開発したものであり、すでにかなりの現場に埋設されている。

### 3. 実験に使用した土

図-2 の粒度曲線に示す試料イ（以下砂と記す）、試料ロ（以下砂利と記す）のそれぞれの空気乾燥試料ならびに試料イの最適含水比である含水比 9% 湿潤砂を用いた。

図-2 試料土の粒度曲線



湿潤砂を用いた理由は、最適含水比までの含水比状態が計測値における変化の有無を検討するためである。この含水比は、実験中を通じて常に一定に保つように心がけた。

この実験に最も多く使用した試料は乾燥砂であり、その諸性質はつぎのようであった。内部摩擦角  $\phi = 39^\circ$  (一面直接せん断試験による), 真比重  $G_s = 2.64$ , 最適含水比  $w_0 = 9.2\%$ 。

なお、全実験を通じての中詰め土の初期密度は、乾燥砂では  $\gamma_d = 1.745 \sim 1.760 \text{ g/cm}^3$ , 湿潤砂では  $\gamma_d = 1.870 \sim 1.900 \text{ g/cm}^3$ , 砂利では  $\gamma_d = 1.820 \sim 1.835 \text{ g/cm}^3$  のそれぞれの範囲内におさめた。

### 4. 実験方法

#### (1) 空気圧検定

前述の2種の土圧計を実験に使用するに先だって、一般に行なわれている方式でもってそれぞれの計器の空気圧検定を行ない、その直線性ならびにループの有無を調べた。その結果は両計器ともに非常に良好であった。

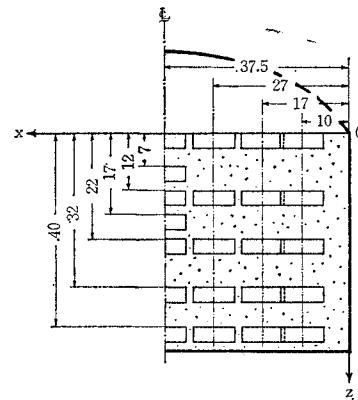
これらの空気圧検定は実験中にたびたび行なって、検定曲線の安定性を検証した。

#### (2) 土槽内の土圧計据え付け

検定土槽内の側壁摩擦の影響範囲を求め、また応力集中度の変化状態を調べるために、図-3に示した合計 22 カ所の測点を土槽内に設けた。

すなわち、水平方向には、土槽側壁から  $x=10, 17, 27, 37.5 \text{ cm}$  の各点に計器の中心を置き、また鉛直方向には、タンクてんばから  $z=0, 12, 22, 32, 40 \text{ cm}$  の各点に計器の受圧面が位置するように据え付けた。ただし、土槽中央 ( $x=37.5 \text{ cm}$ ) では側壁摩擦の影響が少ないと考えられることから、この箇所で計測値の諸現象を

図-3 土圧計据え付け位置



正確につかむために、 $z=7 \text{ cm}$  と  $17 \text{ cm}$  の 2 測点を加えた。以上の測点は、1 個の土圧計で順次据え変えて測定した。

計器の据え付けに際しては、各試料とともに  $10 \text{ cm}$  の層ごとに所定の測点の深さまで締め固めたのち、計器を正確な位置でかつ水平に設置するように細心の注意を払って据え付けた。この操作ののち、再び各層  $10 \text{ cm}$  の厚さで計器面上の試料を締め固め、タンクてんばにおいて中詰め土をいくぶん余盛りして水平にならした。

なお各試料の締め固めは、実験のたびに中詰め土の密度をほぼ一定に保ちうるように、つぎの方法で行なった。

乾燥砂に対しては手製の手動砂落し機を使用して、各締め固め表面から  $50 \text{ cm}$  の高さから砂を  $10 \text{ cm}$  ごとに自由落下させ、その後に箱バイブレーター（振動部  $12 \times 15 \text{ cm}$ ）を用いて各層ごとに均等に締め固めた。また湿潤砂および砂利に対しては、締め固め後に  $10 \text{ cm}$  の層を成すに必要な試料の量をあらかじめ決めた。そして各層とも、その一定量をできるだけ均等に土槽に入れてから、湿潤砂に対してはタコを使用し、砂利に対して箱形バイブレーターと棒状バイブルーター（振動部  $2.5 \phi \times 45 \text{ cm}$ ）を併用して、各層の厚さが  $10 \text{ cm}$  となるまで締め固めた。

#### (3) 土槽内の圧力測定

前節の方法で計器を据え付けたのち、中詰め土てんば面をゴム布でおおい、ロックボルトで土槽を完全に気密にした。

この状態で各測点とも空気圧を用いて、計器の最大加圧力  $5 \text{ kg/cm}^2$  まで徐々に加圧していき、加圧過程中において  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  ごとに指示計のよみをとった。同様に、 $5 \text{ kg/cm}^2$  から徐々に減圧して載荷圧を取り除き、その過程中におけるよみを  $0.5 \text{ kg/cm}^2$  ごとによみとった。この加、減圧速度は、速度変化の計測値における影響を調べたのちに、 $1 \text{ kg/cm}^2/\text{分}$  で行なうこととした。

これらの実験は全測点とも、1 回の実験を終了するた

びに中詰め土を土槽から取り出して、再び計器を据え直して行なった。なお1回の実験に対しては、5回連続的に加、減圧をくり返して、第1回目、第2回目、第5回目の加減圧過程における指示計のよみをとった。

## 5. 実験結果ならびに考察

全実験を通して 土槽内の所定の位置に計器を置いてから、計器を土でおおう前にその初期よみをよみとり、その値をもとにして得られた計測値を整理した。

土圧計Aを用いた場合の乾燥砂における実験結果の一例を示すと、図-4(a), (b), (c), (d) のようになる。

図-4(a)は土槽中央で深さ12cm、(b)は土槽中央で深さ40cm、(c)は土槽端部で深さ12cm、(d)は土槽端部で、深さ40cmの各測点においてくり返し載荷、除荷を行なったときの加圧力と指示計のよみとの関係(すなわち検定曲線)を示したものである。

これらの各図ともに、第1回目、第2回目、第5回目のそれぞれの載荷(加圧)、除荷(減圧)の過程における計測値および水圧検定値を同時に図示した。

図-4の縦軸のよみはいずれも初期よみを基準にした値であり、この程度の土かぶりでは、たとえ締め固めた土であっても、計器のよみはほとんど移動しなかった。この事実から推定して、この計器は受圧板の圧縮性の少ないものであることが推察されよう。

図-4(a)から、土槽中央で深さ12cmの位置では、加圧と減圧とのよみは同一値を示し、またその検定曲線

は直線となるが、水圧検定曲線に比してその傾斜が大きいことがわかる。ところが、同図(b), (c), (d)では、検定曲線はループを描いている。そしてこれらのループの一般的傾向は、加圧過程が直線で減圧過程が上に凸の曲線を示している。

このようなループは、土槽の砂表面の位置と、土槽中央の鉛直線上における深さ7cmおよび12cmの位置を除く、すべての位置において土圧計で観察された。しかもこれらの計測値は、図-4(a)～(d)に示すように、加、減圧の回数をくり返すにしたがって、ときには最大8%程度減少する。しかしその減少も、第5回目の加減圧過程ではほぼ落ち着くことが全実験を通じてわかった。そして、このくり返しの回数に基づく計測値の減少にもかかわらず、各加減圧過程のループの量には本質的な差はほとんどみられなかった。

つぎに、各測点における計測値を概観すると、土圧計の据え付け位置が土槽の側壁に近づくにつれて、また深さが増すにつれてループの量が大きくなり、各圧力に対するよみの値は水圧検定値よりも減少する。

以上の諸現象は、土圧計Bにおいても同様に観察された。図-5には、土圧計Bを用いたときの土槽端部で深さ32cmの位置での乾燥砂における実験結果の一例を示した。

ところで、土圧計は土槽内のどの位置においても、土圧検定値と水圧検定値は同じ値を示し、さらにまた、加減圧両過程においても同じ値を示すはずである。ところ

図-4(a) 土圧計Aにおける砂圧検定曲線

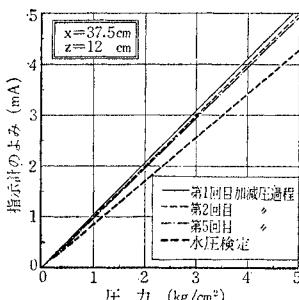


図-4(c) 土圧計Aによる砂圧検定曲線

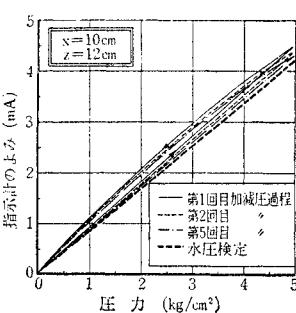


図-4(b) 土圧計Aによる砂圧検定曲線

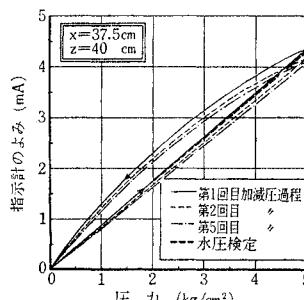


図-4(d) 土圧計Aによる砂圧検定曲線

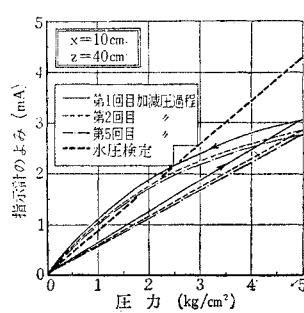
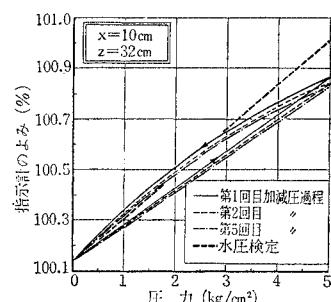


図-5 土圧計Bによる砂圧検定曲線



が上記のように、土圧計の据え付け位置によって、計測値は異なる値を示しその検定曲線がループを描く箇所がある。

そこでこれらの現象をもたらしている原因を考察してみるとつぎのもののがあげられる。

(i) 受圧板の可とう性が適当でないために、受圧板上にアーチングが生じループを描かせる。

(ii) 計器に隣接した土の応力-変形特性が計器のそれとは異なるために、計器に応力が集中して作用し、水圧検定値よりも大きな値を示す。

(iii) 検定土槽内の側壁摩擦が、計器に作用する力を減少させ、ループを描かせる。

上記の3点をもとに考察を進めていくことにする。その前に、過去の土中土圧計に関する研究を見わたしてみると、つぎの結果が報告されている。

まず U.S.W.E.S. (1944)<sup>2)</sup> は、使用計器の径を変化させて実験を行ない、これらの現象に起因する誤差を最小にするためには、計器の直径と厚さの比が 5 以上で、直径と中央たわみ量との比が 2000 以上であればよいと結論している。

つぎに Peattie と Sparrow (1954)<sup>3)</sup> は、計器の直径、厚さ、剛度、受圧板径を変化させて実験を行なっている。その結果によると、ダイヤフレーム型<sup>1)</sup>の計器について、直径約 10 cm の計器では、受圧部の圧力を計測する有効面積と計器前面の全面積との比は 0.45 より小さくすべきであり、また計器と土との剛性比は 10 以上にすることが、計器誤差を少なくする点で望ましいとしている。

近年の研究では、Trollope と Lee (1957, 1961)<sup>4), 5)</sup> が、受圧板と中央たわみ量との比は 2000 以上であれば、計器面上に生ずるアーチングの影響は無視してよいとしている。また彼らは、計器作動が土中と同じ状態すなわち受圧板上にアーチングが生ずるに必要な土かぶり高は、受圧板を底とする正円錐形が形成される範囲すなわち受圧板有効径の 0.9 倍より深い位置であるとの理論解を示している。これと同時に、載荷、除荷をくり返すたびに土圧計のよみが幾分異なるのは、計器と土との剛性比（応力-変形係数の比）が変化するためであることをも理論的に導いている。

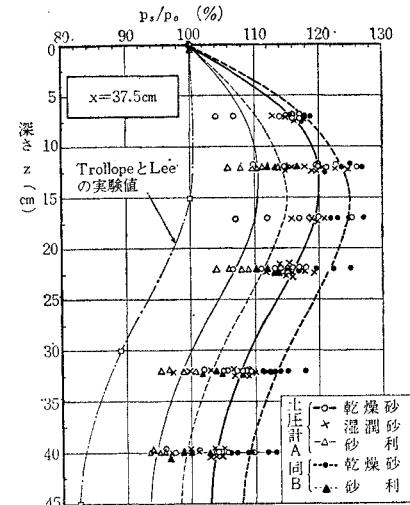
以上の過去の研究結果を参考し、筆者らの実験結果を考察すれば以下のように考えられる。

まず計測値に対するアーチングの影響については、筆者らの使用した土圧計 A, B の受圧板有効径と中央たわみ量との比が、それぞれ公称 10 000 と 53 000 であり、上述の Trollope と Lee のいう 2 000 以上を十分満足していることから、この影響については無視してもよいと思われる。さらにまた、土圧計 A, B の受圧板上にアーチングが生ずるに必要な土かぶり高は、それぞれ 8.1 cm, 14.4 cm であり、もしこの土かぶり高以深においてアーチングが生じているとすれば、その検定曲線は高圧時の加圧下で曲線を描き、また減圧過程がループを描くことになる。ところが、土圧計 A を例にとってみると、図-4 (a) に示したように、深さ 12 cm の測点においてさえもその傾向は全くみられない。

これらのことから、使用した両計器においては、アーチングの影響は考えなくてもよいとの確信を得た。ただし、極度の回数のくり返し荷重については不明である。

したがって実験結果に現われた前記の現象は、計器へ

図-6 土層中央における鉛直方向の計測結果



の応力集中と土槽側壁の摩擦に起因していると考えられる。そこでこれらの現象を定量的に求めるための手段として、各水平方向の測定位置ごとにつぎのような図を作成した。すなわち、砂表面への加圧力を  $p_0$ 、計器の示したよみを水圧検定値から換算した圧力を  $p_s$  として、最大加圧力 5 kg/cm<sup>2</sup> の圧力下における  $p_s$  と  $p_0$  の比を横軸にとり、計器の据え付け深さを縦軸にとった図を作成した。その代表的一例を示すと 図-6 のようになる。

この図は、土槽中央 ( $x=37.5\text{ cm}$ ) において、土圧計 A を用いた場合の乾燥砂、湿潤砂、砂利についての結果および土圧計 B による乾燥砂、砂利の結果を示したものである。前述したように、1 回の計器埋設において 5 回の加、減圧をくり返すと、5 つの異なる値が得られるが、この図にはそれらのうちの第 1 回目と第 5 回目の値を示してある。またこの図には、Trollope と Lee (1961)<sup>5)</sup> の側壁摩擦だけを求めた実験結果をもあわせて図示した。

彼らは、内径約 90 cm × 高さ約 45 cm の検定土槽の底部を、一連の同心円で 5 枚のリングに分割してこの実験を行なっている。

これらのおのののリングは、全円周を 3 等分した位置につけられた 3 本の支柱によって支持されていて、土槽の底に加わる力は、それぞれの支柱に張り付けられた直線型振動線ひずみ計によって計測された。

実験に際しては、中詰め土の深さを 15 cm, 30 cm, 45 cm に変化させ、それぞれに加圧している。そして、液体圧によってリングに受けた 3 本の支柱による平均圧力を  $p_0$  とし、砂を通して底面に作用する圧力を  $p_s$  として、 $p_s/p_0$  (以下においてはこれを  $p_{ST}/p_0$  と記すことにする) の半径方向についての変化の状態を、上記の砂の深さ別に 3 本の曲線で示した。

図-6 から、土圧計と土の種類によって  $p_s/p_0$  の分布が異なり、また乾燥砂と湿潤砂ではほとんど差がないことがわかる。

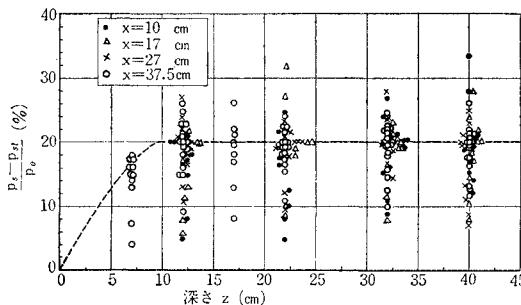
これらの現象は、他の水平位置 ( $x=10\text{ cm}$ ,  $x=17\text{ cm}$ ,  $x=27\text{ cm}$ )においても同様にみられた。

したがってこれらのことから、検定曲線は同一計器においても、土の種類によって変化すること、ならびに最適含水比までの砂であれば、検定曲線はその含水比によって変化しないことが導かれる。さらにまた同図において、試料別、計器別に表わした  $p_s/p_0$  の分布曲線はある深さ以深においてはそれ平行であり、それらの曲線は Trollope らの  $p_{ST}/p_0$  曲線とも平行である。

これらの現象も他の水平位置において同様に得られた。このことは、筆者らが使用した程度の試料では、Trollope らが使用した土槽と筆者らのそれにおける側壁摩擦量の差、ならびに試料の相違から生ずる側壁摩擦量の差は、計測値に関する限り考慮しなくてもよいことを明示している。それと同時に、土槽の端部および底部に近づくほど小さな計測値が得られた原因として、側壁摩擦が起因していることをも明らかにしている。

上記のことから、筆者らの実験結果と Trollope らの  $p_{ST}/p_0$  曲線との差は、計器と土との応力-変形特性の相違がもたらした計器への応力集中度であると考えられる。そこでこの応力集中度の水平方向ならびに深さ方向に関する変化の有無を調べる指針として、図-7 を示した。

図-7 土圧計 A を用いた場合の砂における応力集中度



この図は各深さにおける計測値  $p_s/p_0$  からその深さでの Trollope らの  $p_{ST}/p_0$  を差し引いた値を、深さ  $z$  に対して図示したものである。図には、土圧計 A を用いての砂（乾燥砂および湿潤砂）における値を示してある。

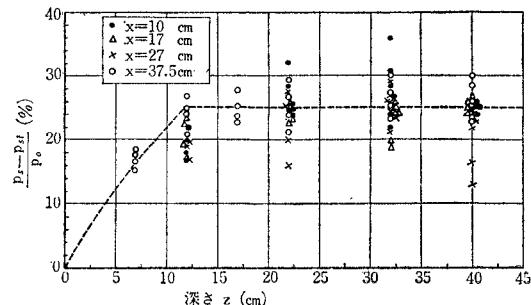
図-7 では、これらの値は水平方向、深さ方向ともにかなりの幅をもって散乱している。この散乱は中詰め土の締め固め度の相違によるものと考えられる。しかしながらその散乱の範囲は、深さ  $z=10\text{ cm}$  程度より深い所ではほぼ等しくなっている。

したがって応力集中度は、砂表面からの深さが  $10\text{ cm}$  位までは漸増するが、それ以深においては一定であるとみなしてよいものと思われる。なお図-7の場合、その

一定値は点線で示したように、約 20% のところに密集している。土圧計 A を用いての砂利に関しても同様な結果が得られ、 $z=10\text{ cm}$  程度以深においては一定値を保った。ただ、その一定値が砂の場合とは異なった。

一方、土圧計 B についてこれと同様な整理を試みると、図-8 のようになる。この図は乾燥砂における結果であるが、やはりある深さ以深において  $(p_s - p_{ST})/p_0$  の値は一定となる。そしてこの計器におけるその深さは約  $z=12\text{ cm}$  である。

図-8 土圧計 B を用いた場合の砂における応力集中度



ここで、前述した Peattie と Sparrow の研究を補足すると、彼らは応力集中に関する Taylor の理論式(1947)<sup>6)</sup>（この式は文献<sup>7)</sup>にあるものと同じである）に基づいて、土の性質に関する要素の比を  $K$  として表わし次式を示した。

$$\frac{p_e}{p_0} = \left[ \frac{K(1 - E_s/E_g)}{1 + \frac{H}{D} \cdot E_s/E_g \cdot K} \right] \frac{H}{D} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $p_e$  は計測された値から水圧検定値を差し引いた値、したがって  $p_e/p_0$  は応力集中度を表わす。また、 $E_s$  は土の弾性係数、 $E_g$  は計器の弾性係数、 $H$  は土圧計の厚さの半分、 $D$  は土圧計の計器の直径である。

上式の右辺において  $E_g$  が  $E_s$  に比してかなり大きい場合には、 $E_s/E_g$  の値は 0 に近い値となる。さらに  $H/D$  が小さい場合には  $H/D \cdot E_s/E_g$  の値はますます小さくなり、上式の右辺の [ ] 内の値は  $K$  に接近する。したがって、土圧計の応力集中度と計器寸法との関係が次式で与えられるとした。

$$\frac{p_e}{p_0} = C_A \cdot \frac{H}{D} \quad \dots \dots \dots (2)$$

式中の  $C_A$  は、土の性質ならびに土の弾性係数に関する定数で、土圧計作動係数と称され、1.0~2.5 程度の値を有すると Peattie らは報告している。

しかしながら、経験的事実から推測しても、土かぶりがきわめて浅ければ、応力集中は起こりえないはずである。筆者らの実験結果 図-7, 8 によると、きわめて浅い所では、応力集中は深さに比例して増大していくものと思われる。

したがって、検定土槽内のきわめて浅い所では、次式

が成立するとみなしうる。

ここに、 $k(1/cm)$  は土の性質のみによる定数である。  
 $z=0$  では応力集中度はありえないから、上記の仮定の妥当性がうなづかれる。

いま、式(3)の土かぶり高  $z$  が大きくなり、ついに応力集中度が一定値を保つ深さに達したとすると、そのときには式(2)と式(3)は等しくなるから、応力集中度が一定値となる限界深さ  $z_0$  は次式で表わされる。

図-7, 8 の秒の結果ならびに同様な整理を行なった砂利の結果から式中の  $C_A/k$  を求めると、いずれの計器、試料においても、 $C_A/k$  は 120 (cm) 付近の値をとる。このように計器別、試料別によって、この値が一定値を有することは、分母分子ともに土の性質に関する定数であることによるものと考えられる。

したがって、野外と同一状態の計器作動を与えるに必要な最小土かぶり高  $z_0$  は次式によって求められる。

$$z_0 \doteq 120 \frac{H}{D} (\text{cm}) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

いまちなみに、応力集中度が一定となる深さ以深における試料別、計器別のおよその応力集中度ならびに  $C_A$  を求めると、つぎのようになる。

$$\begin{aligned} \text{土圧計 A} & \left\{ \begin{array}{l} \text{砂 (乾, 濡)} : \frac{p_e}{p_0} = 20\%, C_A = 2.3 \\ \text{砂利} : \frac{p_e}{p_0} = 12\%, C_A = 1.4 \end{array} \right. \\ \text{土圧計 B} & \left\{ \begin{array}{l} \text{乾燥砂} : \frac{p_e}{p_0} = 25\%, C_A = 2.6 \\ \text{砂利} : \frac{p_e}{p_0} = 15\%, C_A = 1.6 \end{array} \right. \end{aligned}$$

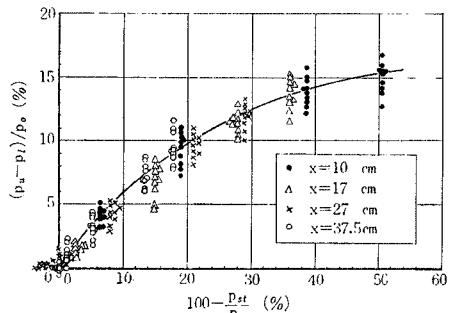
このように試料別で応力集中度に差が生じたことは、前述の  $C_A$  が土の性質のみによるとする簡略法が必ずしも妥当でないことを示している。すなわち  $C_A$  には式(1)で無視した  $E_s/E_a$  が含まれているものと思われる。

しかしながら衆知のように、土の応力-変形特性、これと計器に隣接した土のそれを定量的に求ることは不可能であることから、計器への応力集中度は、現場に使用する土を用いてしかも施工密度に近い密度下において、式(5)に示した土かぶり以深に計器を据え付けて求める以外に方法はない。さらにまた、図-7, 8からわかるように、同一計器を用いて同一試料の検定を行なった場合でさえ、その応力集中度は中詰め土の状態によって一定値を保ちにくいことから、検定曲線は、数回の検定を行なったのちに、その平均値を採用すべきであると警告されよう。

つぎに、土槽の側壁および底部に近づくにつれてループを描く原因について調べてみる。

このループの原因として、アーチングの影響と側壁摩擦

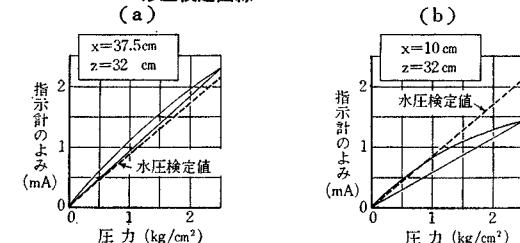
図-9 ループ量と側壁摩擦量との関係



擦の影響を最初にあげた。そして実験に使用した計器については、アーチングは無視してよいとの結論をすでに導いた。したがって計測値がループを描くのは、側壁摩擦の影響によるものと考えられ、このことを確証するために図-9を示す。

図-9 は最大加圧力  $5 \text{ kg/cm}^2$  までの加減圧過程の途中において、最大加圧力の半分の  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  の圧力下における減圧時の圧力  $p_u$ （減圧時に指示計に示されたよみを水圧検定値から換算した圧力）から、同圧力下の加圧時の圧力  $p_t$  を差し引いた値と、砂表面への最大加圧力  $p_0$ （すなわち  $5 \text{ kg/cm}^2$ ）との比を縦軸にとり、横軸に各水平位置の各深さにおいて 100% から Trollope らの  $p_{ST}/p_0$  を差し引いた値をとってある。すなわち、縦軸にループの量を示し、横軸に側壁摩擦の量を示した。

図-10 最大加圧力を  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  としたときの  
砂圧検定曲線

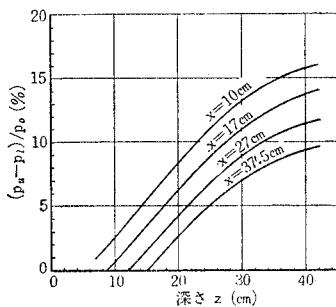


なおこの図の作成に先んじて、図-10 (a), (b) に示すように、最大加圧力を  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  までとしてくり返し加減圧を行ない、上記のループ量の表わし方が正しいことを確かめた。ここに示した 図-10 (a) は、土槽中央で深さ 32 cm, (b) は土槽端部で深さ 32 cm の各測点における乾燥砂を用いた場合の土圧計 A の検定曲線である。

いま、この最大加圧力の半分に当る  $1.25 \text{ kg/cm}^2$  のもとでの (a), (b) の  $(p_u - p_l)/p_0$  の値を求めるとき、それぞれ  $8.0\%$ ,  $13.5\%$  である。これらの値は、最大加圧力  $5 \text{ kg/cm}^2$  までの加減圧過程における  $2.5 \text{ kg/cm}^2$  時の  $(p_u - p_l)/p_0$  の値とほぼ等しくなり、このことからループ量の表わし方が正しいことが確証された。

図-9 は、ループ量が側壁摩擦に起因するものである

図-11 鉛直深さとループ量との関係



ことを明示しているとともに、側壁摩擦量は土槽の端部および底部に近づくほど大きく、その量の増大とともにループ量も横軸を主軸とする放物線的な増大を示すことを表わしている。

上記のことから、筆者らの使用した程度の計器においてループが生じた場合には、検定土槽の側壁摩擦が計器上に作用していることになる。

なお土圧計Aによる砂利の実験結果を図-9と同方法で整理を行なったところ、同じ曲線となった。これによって、試料の相違による計測値に対する側壁摩擦の影響は考慮しなくてもよいとする前述の図-6から導いた結論がより確かとなった。

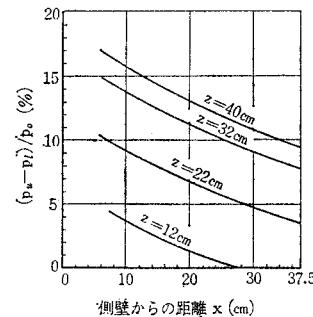
そこで図-9に示した各測定群の平均値を通る実線をもとに、水平方向、鉛直方向別にループ量を求める図を描くと、図-11、12のようになる。図-11、12はそれぞれ砂表面からの深さ、土槽側壁からの距離を横軸にしている。これらの両図から、土圧計の検定時に側壁摩擦の影響のおよばない箇所を読みとくことができる。

筆者らの使用した土槽では、土圧計Aを土槽の中央( $x=37.5\text{ cm}$ )に据え付けたとき、計器の中心から計って受圧部有効径の2/3すなわち計器中心から3 cmに、計器上の平均側壁摩擦の影響すなわち1%が作用するものとし、検定曲線に1%のループ量を許すならば、図-11あるいは12から、砂表面から $z=16.5\text{ cm}$ までの深さの範囲であれば、側壁摩擦の影響は考慮しなくてもよいことになる。

ところで、この鉛直深さに関してはすでに求めたように、計器への応力集中が野外と同一になるに必要な土かぶり高さ $z=120 \cdot H/D(\text{cm})$ 、すなわち土圧計Aでは10 cmが必要である。したがって上記の場合には、土槽中央で鉛直深さ10 cmから16.5 cmの範囲に計器を据え付ければよい。

このように図-11、12のいずれかを用いれば、使用検定土槽の内径と使用計器径をもとに、側壁摩擦の影響範囲を知ることができる。そこでこの求められた範囲と応力集中が一定となる最小許容深さ、ならびに受圧板の可とう性に起因するアーチングが生ずるに必要な最小深

図-12 水平距離とループ量との関係



さの3つの必要条件を満足する範囲を求めて、正しい検定位置を知ることができる。なお図-11、12は、より大きな検定土槽に対しても、曲線を延長することによって使用できる。

## 6 結 語

この研究は、内径75 cm × 深さ45 cmの検定土槽を用いて土圧検定を行ない、土中土圧計の検定時における諸現象を論じるとともに、土槽内における計器据え付け位置を求めたものである。従来の諸外国における研究は、主として受圧板のたわみに関する実験的研究のみであった。

今回の実験では、これに応力集中と土槽の側壁摩擦を加えることができた。この研究から得た結果は、土圧計測法を規格化しようとする動向にある現在、非常に重要な資料を提供したことになるものと考える。

この実験から得られた現象ならびに結論を要約するところである。

(1) 検定土槽内の端部および底部に近づくにつれて、土圧計検定曲線のループは次第に大きくなり、同一圧力における指示計のよみは小さくなつて、水圧検定値よりも小さくなる場合がある。

(2) 同一計器を用いた場合においても、土の種類と締め固め度によって検定曲線は変化する。

(3) われわれの使用する一般の計器( $d/\delta \geq 10000$ )では、アーチングの影響は無視してもよい。ただし極度のくり返し荷重については不明である。

(4) 同一砂の乾燥砂と湿潤砂については、最適含水比までの含水比状態では、両者の検定曲線は同じとみなしうる。

(5) 検定曲線の試料による変化は、計器と土との応力-変形特性の相違に起因する計器への応力集中のためである。

(6) 応力集中度はある深さ $z_0 = 120 \cdot H/D(\text{cm})$ ( $H$ は計器厚さの半分、 $D$ は計器径)までは深さに比例して増大するが、 $z_0$ 以深における計器では一定値を保つ。この $z_0$ 以深が野外と同一の計器作動を与えることになる。

(7) Peattieらが示した土圧計作動係数 $C_A$ は、従来土の性質のみによるとされてきたが、この簡略法は必ずしも妥当ではなく、 $C_A$ には計器と土との応力-変形係数の相違も影響しているものと思われる。

筆者らの使用した2種類の土圧計ならびに試料では、応力集中度のおよその値は、砂で20~25%, 砂利で12~15%であった。

(8) 検定曲線は、現場に使用する土を用いて施工密

度に近い密度下で数回の検定を行ない、それらの平均値を採用すべきである。

(9) 上述の計器で検定土槽の端部、底部に近づくにつれて検定値が小さくなりループを描くのは、土槽の側壁摩擦の影響による。この側壁摩擦量の増大とともに、ループ量は図-9のような増大を示す。

(10) 同一深さでの計測値における側壁摩擦量は、筆者らの試料に関しては、試料の相違によって変化しない。

(11) 土圧計を検定土槽内に据え付けて検定をするには、土圧計の可とう性ならびに、応力集中が野外と同じ状態になる位置で、側壁摩擦の影響を受けない位置に計器を据え付けなくてはならない。受圧板の可とう性に起因するアーチングが生じるに必要な最小土かぶり高は、土圧計有効径  $d$  の 0.9 倍、応力集中度が一定となる最小土かぶり高  $z_0$  は  $120 \cdot H/D$  (cm)、側壁摩擦の影響を受けない範囲は、図-11, 12 から求めればよい。この両図は異なった大きさの検定土槽にも使用できる。

終りに当って、実験を手伝った本学学生の伊藤克彦君ならびに文部技官の大石良三、七沢和男、木下保博の諸

君に深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 市原松平：“土圧計ならびに土圧計測法”，pp. 273～301，土質調査法，1964。
- 2) Osterberg, J.: Soil Pressure Cell Investigation”, Tech. Memor. U.S. Waterw. Exp. Sta., No. 210, 1944.
- 3) Peattie, K.R. and Sparrow, R.W.: “The Fundamental Action of Earth Pressure Cells”, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 2, pp. 141～155, 1954.
- 4) Trollope, D.H. and Lee, I.K.: “The Performance of a Laboratory Earth Pressure Cell”, Aust. J. Appl. Sci., Vol. 8, pp. 84～97, 1957.
- 5) Trollope, D.H. and Lee, I.K.: “The Measurement of Soil Pressures”, Proc. 5 th. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 2, pp. 493～499, 1961.
- 6) Taylor, D.W.: “Earth Pressure Cell Investigations and Pressure Distribution Data”, U. S. Waterw. Exp. Sta., Vicksburg, 1947.
- 7) Tsitovitch, N.A. and Baranov, D.S.: “On the accuracy of the method for direct pressure measurements in soils”, Proc. 5 th. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 3, pp. 337～338. 1961.

(1966.3.9・受付)