

土圧計に関する実験的研究

正員 大原 資生*

THE STUDY ON THE SOIL PRESSURE CELL

By Sukeo Ohara, C.E. Member

Synopsis: We have studied the characteristics of the soil pressure cells, by comparing with the differences between the observed strain of the cell by the soil pressure and by the air pressure.

A electrical strain gauge was used to measure the strain of the diaphragm or the beam of the cell that is introduced by the pressure.

要旨 本論文は現在、最も多く使用されている受圧面変位型の土圧計のうち、Piston型とDiaphragm型について土圧測定時にどの程度の誤差が生ずるかということを、実験的に調べた結果を述べたもので、その結果、この誤差は受圧面の単位圧力当たりの変位量（たわみ度）、受圧面の径、および試料砂の弾性常数によって定まるとの結果を得た。

1. 緒言

従来、土圧計として使用しているもの多くは受圧面が変位する普通の圧力計であり、水圧計、気圧計および土圧計とその使用分野について名称のみを異にし、その構造上にいちじるしい相違点はない。

しかるに、液体、気体においてはその物性がほとんど類似しており、同一構造の圧力計により、その圧力をほとんど正確に測ることができるが、これを土圧計として使用する場合、複雑な土の性質によって正しい計測値を得ることが困難となってくる。

著者は先に簡単な実験装置を用いて、この点についての実験を行ない、その結果を報告¹⁾したが、今回、種々の点を考慮して、より改良された装置を用いてさらに詳細な実験を行なったので、その結果を報告する。

2. 実験装置

実験装置としては図-1のように三軸圧縮試験と類似のものを製作して使用した。圧力室内に径 12 cm、高さ 9 cm で、周囲をゴム膜で包まれた円筒形の試料を作る。その下部加圧板の中心には土圧計が取付けてある。

すなわち、三軸試験機と同様に圧力室内の気圧を高めることによって、気圧に等しい土圧を作り、この土圧によって土圧計の検定を行なうのである。また、側圧を一定に保ち、上部加圧板より鉛直圧を加え、この鉛直圧によって生ずる土圧についての土圧計の検定も行なうことができる。

We have newly introduced the nondimensional parameters D and H , for the absorption of the energy in the soil and for the hysteresis, respectively.

D and H are correlated with the rigidities, the radii of the cells and the elastic constants of the soils, and some of their relations are shown quantitatively for the practical use.

これは同一の土圧計を地中の深い所に設置した場合と浅い所に設置した場合についてそれぞれ検定し得ることを目的としたものである。側圧の値は圧力室に取付けたブルドン管圧力計で測定し、鉛直圧はロッドの加圧力をひずみリングで測定する。また、本実験に使用した土圧計の構造は二種であって、それぞ

図-1 実験装置概略図

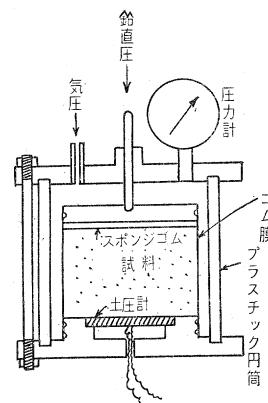
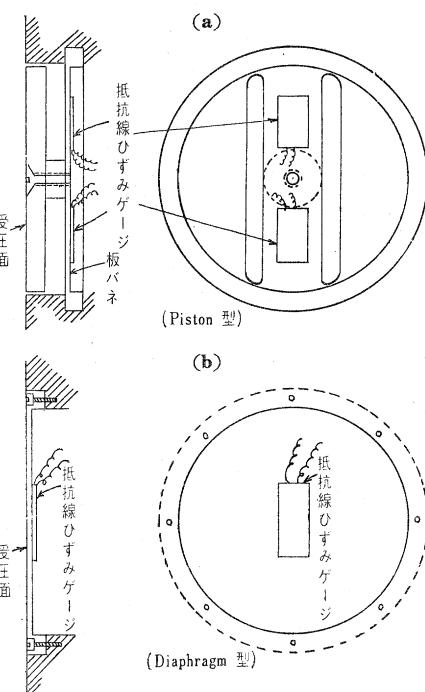


図-2 土圧計の構造



* 山口大学助教授、工学部土木工学科教室

れ、図-2 (a), (b) に示す。

(a) は受圧板がピストンとなっており、圧力が作用した場合、受圧面は一様に変位する型で、その圧力値は受圧板を支えている板バネのひずみで測定する。この型を Piston 型と呼ぶ。(b) は受圧面がダイアフラムとなっているもので、この場合の圧力値は膜面自身のひずみによって測定する。この型を Diaphragm 型と呼ぶ。

いずれもひずみを測定するには電気抵抗線ひずみゲージを貼付し、ひずみ量はひずみ計によって測定する。本実験においてはこれら二種の構造の土圧計で、受圧面径およびその単位圧力当たりの受圧面の変位量（ここでは受圧面たわみ度と呼ぶ）が、おのの3段階に変化したものを用意して、これらおよび砂の粒径等によってその測定値がどのように変化するかを実験した。

3. 実験方法

まず、装置の下部加圧板に検定せんとする土圧計を取付ける。その上に試料を作るのであるが、これは三軸試験のさいに乾燥砂の試料を作るのと全く同様の要領である。しかしこの場合は試料を突き固めることはせず、自然につまる程度とした。このときの間げき比等は表-1 に示した。このようにして準備された試料について、まず、圧力室内の気圧、すなわち、側圧 σ_3 を 0.2 kg/cm^2 ずつ最高 1.0 kg/cm^2 まで階段的に増加し、次に減少し、そのつどの土圧計の測定値（ひずみ）をよみとる。次に引きつづいて σ_3 を 0.2 kg/cm^2 に保ち鉛直圧 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を 0.15 kg/cm^2 ずつ最高 0.75 kg/cm^2 まで増加し、次に減少してそのつどの土圧計の測定値をよみとる。以後、順次 σ_3 を $0.4, 0.6, 0.8, 1.0 \text{ kg/cm}^2$ として同様の測定をくり返す。

以上の土圧についての実験が終ったならば、下部加圧

表-1

| 試料 | 粒度 mm | 真比重 g/cm^3 | 見掛け密度 g/cm^3 | 間げき比 | 内部摩擦角 (三軸による) |
|----|------------|-------------------------------|---------------------------------|------|------------------|
| 1 | 4.76~2.0 | 2.64 | 1.44 | 0.83 | 39° |
| 2 | 2.0~0.84 | 2.63 | 1.42 | 0.86 | 38°30' |
| 3 | 0.84~0.50 | 2.65 | 1.43 | 0.85 | 41° |
| 4 | 0.50~0.24 | 2.65 | 1.38 | 0.92 | 40°30' |
| 5 | 0.24~0.105 | 2.65 | 1.24 | 1.14 | 39° |

板にゴム膜のふたをかぶせて土圧計受圧面に気圧が作用するようにし、気圧による測定を行なう。そのさい、ダイアルゲージによって受圧面の変位量を測定する。

以上のような測定を受圧面たわみ度、径および構造の異なる計 18 個の土圧計について行なった。

また、これに使用した試料は表-1 に示した 5 種の気乾砂で、これは当地海岸の砂を各粒径ごとにフルイ分けたものである。その真比重、内部摩擦角等は表-1 のとおりで以後、粒径の大きいものから順に 1, 2, ..., 5 の試料番号を付して呼ぶ。

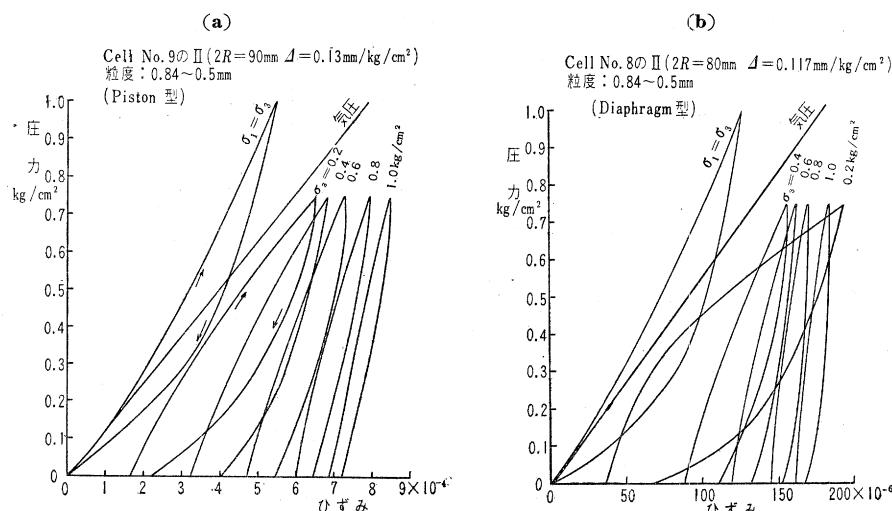
4. 実験結果

図-3 は実験結果の代表的なものを示したもので、図-3 の (a) は Piston 型の構造の土圧計についてのものであり、(b) は Diaphragm 型の構造の土圧計についてのものである。

図-3において $\sigma_1 = \sigma_3$ と記したものは鉛直圧を作用することなく、側圧の σ_3 を 0.2 kg/cm^2 ずつ増加、減少した場合、すなわち、試料の全周囲より σ_3 の気圧を加えた場合の測定値である。ゆえにこの測定値については図-3 の縦軸の圧力値は σ_3 の値を示している。

次に $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2, 0.4 \text{ kg/cm}^2$ 等と記入してある測定値は側圧をそれぞれ $0.2 \text{ kg/cm}^2, 0.4 \text{ kg/cm}^2$ 等に保ち、鉛直圧 $\sigma_1 - \sigma_3$ を増加減少した場合の測定値で、これ

図-3 実験結果の一例



らの測定値に対しては図-3の縦軸は $\sigma_1 - \sigma_3$ の値を示している。

図-3の中に気圧のみによる測定値も示したが、これと前記土圧による測定値とを比較してみると σ_3 が大きくなるにしたがって鉛直圧と測定値との土圧上昇時の勾配が急となり、気圧による測定値との差が大きくなることが明らかで、土圧測定においては試料の状態を考えなければならないことがわかる。

結局、このような土圧計について気圧によって圧力-測定値との換算曲線を求めて土圧測定を行なう場合、図-3に示される程度の誤差をともなうこととなる。

これらの測定値曲線のうち、 $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ のものは他のものと比較してかなり異なった勾配の曲線となっているが、これは表-1よりわかるように試料砂の内部摩擦角は 40° 程度であるので、 $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ で鉛直圧 $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.75 \text{ kg/cm}^2$ 程度となると試料砂にせん断破壊を生じ、塑性平衡状態となるためと考えられる。

このことは実験中に、この状態となると試料の鉛直ひずみが増大し、鉛直圧を 0.75 kg/cm^2 に保つのにかなり困難を感じたことより予測されたのであるが、このような状態についての測定値も欲しかったので、このまま実験を続けたのである。

5. 実験結果の整理

以上の実験結果を整理するには次のようにした。

図-4について説明すると、 ΔA および $\Delta A'B'C'$ の面積はそれぞれ Δp なる圧力上昇についての気圧および土圧が受圧面に与えた仕事量となっている。

図-3の結果よりわかるように θ は θ_A より大きく $\Delta A'B'C'$ の面積は ΔABC の面積より小さい。これは土圧の場合には受圧面に与えられるべき仕事量の一部が試料の内部によって消費されるためと考えられる。

この消費の原因については明確にできないが、試料の内部の変形にともなうもの、すなわち、粒子相互の摩擦アーチ効果等によるものと考えられる。

いま、土圧測定の場合に生ずる土圧値の気圧値からの差の程度を示す量として次の量を考え、これを土圧計の D 量と称する。

$$\frac{(\Delta ABC \text{ の面積}) - (\Delta A'B'C' \text{ の面積})}{\Delta ABC \text{ の面積}} = D$$

ゆえに

$$D = \frac{(\Delta p)^2 \cot \theta_A - (\Delta p)^2 \cot \theta}{(\Delta p)^2 \cot \theta_A} = 1 - \frac{\cot \theta}{\cot \theta_A}$$

次に図-3の実験結果よりわかるように土圧の場合にはかなりの履歴が残る。これは土圧測定に非常に問題となるので、この履歴の程度を示すに次に示す H 量を考えた。すなわち、図-4において $D'A'B'E'G'D'$ のループの囲む面積および三角形に近い $D'A'B'E'F'D'$ のかこむ面積を求め、この比を H 量とした。

$$H = \frac{(D'A'B'E'G'D' \text{ の面積})}{(D'A'B'E'F'D' \text{ の面積})}$$

D, H ともにその値が1に近いほど、気圧からの差および履歴が大きいことを示す。次に土圧計受圧面のたわみ度は前述の気圧による測定のさいにダイアルゲージによって測定した変位量より求めた。すなわち、受圧面の単位圧力当りの変位量を求め、これを A 量とした。この場合、Diaphragm 型の構造ではダイアフラムの中心部の変位量によって求めた。

以上の D, H を図-3に示したと同様な多くの実験結果より求め、 A および受圧面半径 R との関係をしらべてみた。

6. D 量の吟味

D 量に影響する量を考えてみると、ほぼ、次のようなものを上げることができる。まず、土圧計自体に関係する量として A と R 、試料に関係する量として粒径 d と弾性常数 E 、その他に σ_3 も一応上げておく。

すなわち、 $D = f(A, R, E, d, \sigma_3)$ とする。

土圧計に関係する量としてはこれらの他に受圧面の粗度、受圧面と試料との摩擦係数等も考えられるが、このような量は前記、 A, R に比して D への影響が小さいと考えて一応無視する。

以上の考え方により、実験結果について D と A/R との関係を調べてみた。その結果が図-5である。この図の(a), (b) はそれぞれ Piston 型および Diaphragm 型についての結果である。図-5で $\sigma_1 = \sigma_3$ と記入してあるのは、図-3の $\sigma_1 = \sigma_3$ の場合に相当する実験結果より $D - A/R$ の関係を求めたものであり、 $\sigma_3 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, 0.8 kg/cm^2 ……等記入してあるのは、同様に図-3のそれぞれの実験結果より求めたものである。

この中、 $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ の結果が省いてあるが、これは前述のように、この場合は試料が $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.75 \text{ kg/cm}^2$ のとき塑性平衡状態となるため他と非常に異なった結果となるので別途に考えるのが適当であるとして記入しなかった。

試料のつめ方等のため D 量はいくぶんばらつき、また σ_3 が同一の実験結果の中でも試料の粒径の影響が見られるが、 D と A/R との関係については一般的にほぼ次のことがいえる。

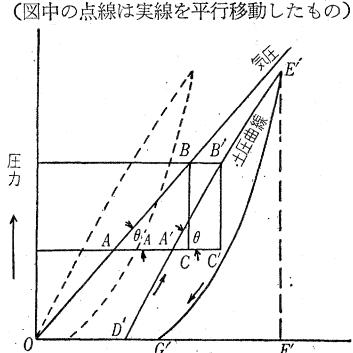
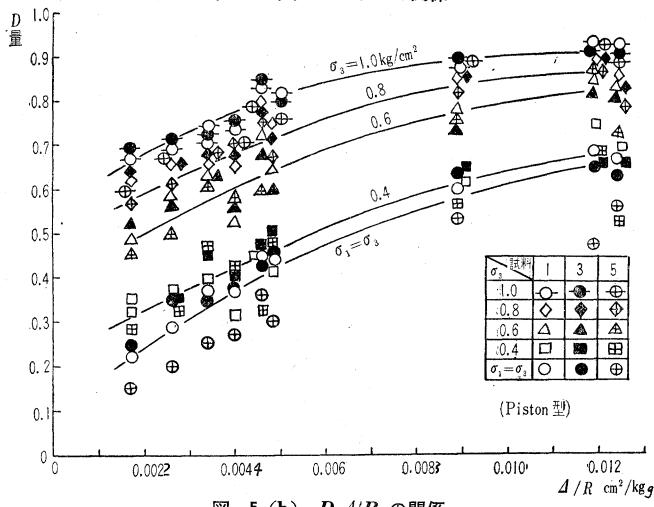
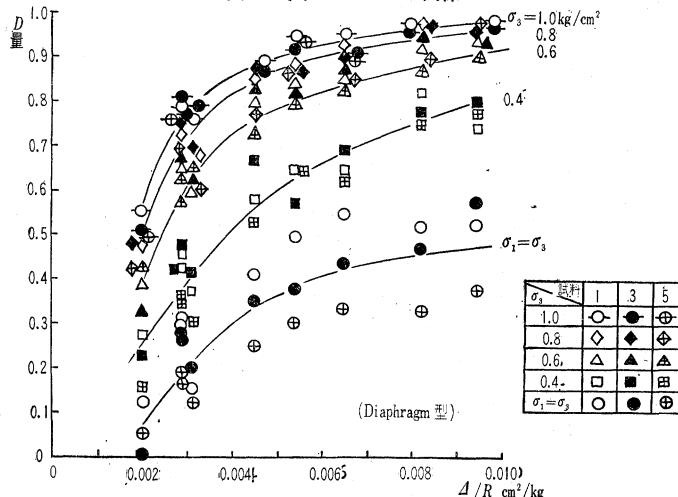
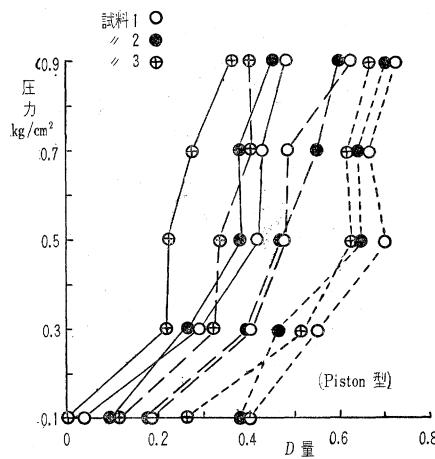


図-5 (a) $D-A/R$ の関係図-5 (b) $D-A/R$ の関係図-6 $\sigma_1=\sigma_3$ の実験における D 量の σ_3 による変化の状態
(a)

— Cell No.9のII($2R=90mm$, $A=0.128mm^2/kg/cm^2$)
— Cell No.6のII($2R=60mm$, $A=0.139mm^2/kg/cm^2$)
--- Cell No.4のII($2R=40mm$, $A=0.179mm^2/kg/cm^2$)



- 1) D は A/R に比例して増減する。
- 2) D は σ_3 に比例して増減する。

また、Piston型とDiaphragm型について比較するに、図-5より A/R の大きい所ではあまり差はないが、 A/R の減少とともに D 量の減少はDiaphragm型の方が急速であることがわかる。この原因については明らかでないが、周辺効果(edge effect)の有無によるものではないかと考えている。

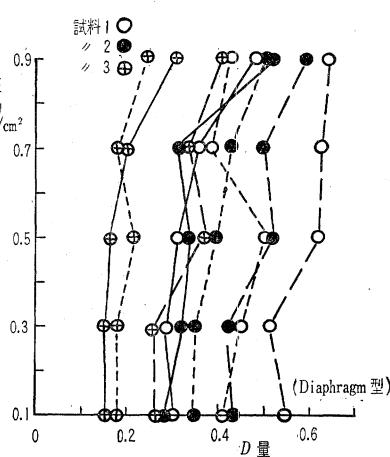
なお、図-5の $\sigma_1=\sigma_3$ の実験値は、図-3でもわかるように D は σ_3 によってかなり変化しているので、各 σ_3 での D の平均値としてある。すなわち、 D は $\sigma_3=0\sim0.2$ kg/cm^2 の間では $D=0$ となっており、その後 σ_3 の増大とともに D は増大している。その状況を示したのが図-6である。

以上、図-5において D 量は A/R の他に σ_3 に影響されることがわかった。これは σ_3 によって砂の性質が変化するためであろうと考えることができる。 σ_3 によって変化する砂の性質の中で σ_3 によって顕著に変化するものは弾性常数である。すなわち、次元解析より考えてみても A/R のかわりに $E A/R$ によって実験結果を整理する方が妥当であるとして D と $E A/R$ の関係を調べてみることを考えた。

この場合、著者の前論文²⁾において砂の弾性常数は σ_3 にほぼ一次的に比例して増大する結果を得ているので、ここでは一応 E のかわりに σ_3 を用いて $\sigma_3 A/R$ によって実験を

図-6 $\sigma_1=\sigma_3$ の実験における D 量の σ_3 による変化の状態
(b)

— Cell No.8のII($2R=80mm$, $A=0.117mm^2/kg/cm^2$)
— Cell No.6のII($2R=60mm$, $A=0.196mm^2/kg/cm^2$)
--- Cell No.3のII($2R=30mm$, $A=0.167mm^2/kg/cm^2$)



整理してみた。その結果が図-7である。

図-7において、Piston型では幾分 σ_3 の影響が残っているが、Diaphragm型ではかなりよくまとまった結果が得られた。以上の結果、試料が砂の場合においては土圧計のD量はほぼ $\sigma_3 A/R$ によって定まると考えてよいと思われる。

また、前述のように $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ で試料が塑性平

衡状態となる場合のD量をみてみると、図-8のようになる。

この場合のDは $\sigma_1 - \sigma_3$ が $0 \sim 0.75 \text{ kg/cm}^2$ の間の平均値をとっている。

図-8よりわかるように、この場合には $D=0$ 前後の値となっている。これは試料が塑性体となることを考えることにより説明できると思われる。

図-7 D- $\sigma_3 A/R$ の関係

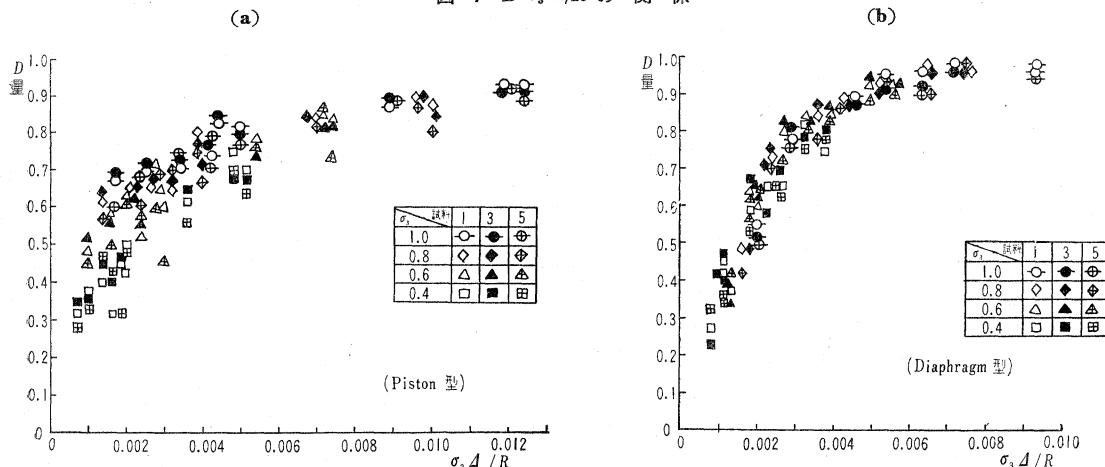


図-8 塑性平衡状態となったときの D-A/R の関係

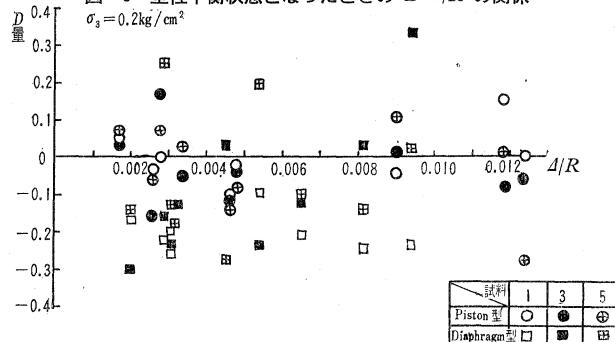
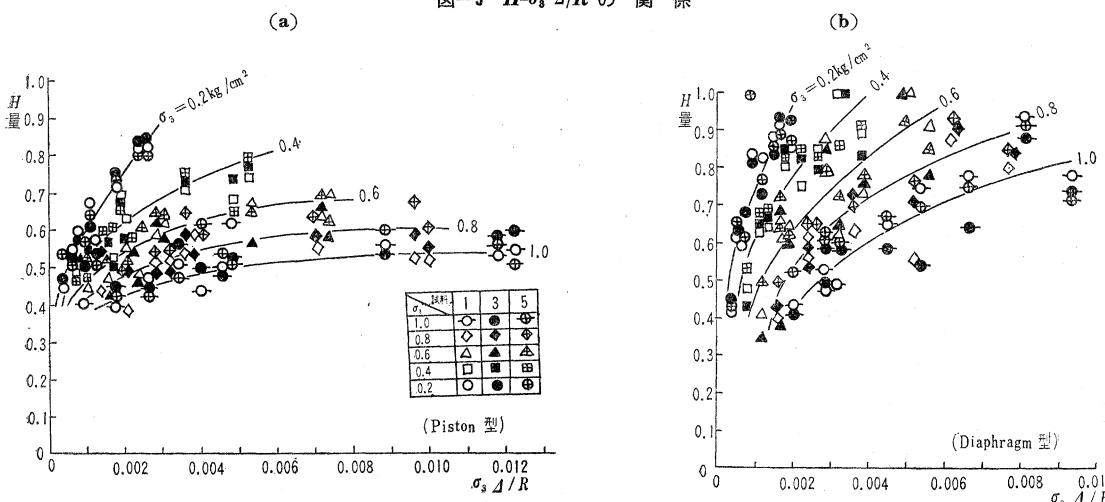


図-9 H- $\sigma_3 A/R$ の関係



7. H 量の吟味

H 量についても前記、 D 量の場合と同様に考えて H と $\sigma_s A/R$ によって実験値を整理してみた。その結果が図-9 である。図-9 よりわかるように H については、その値は $\sigma_s A/R$ だけによって定まらない。面積を求めるのにプランニメーターを用いたためもあるが、実験値にはらつきが目立つ。しかし、各実験値はほぼ σ_s によって分かれていることがわかる。

これより H 量は $\sigma_s A/R$ だけでなく、もう一つの σ_s に間接的に関係するパラメーターに影響されていると考えることができる。そのパラメーターが何であるかについては現在のところ、まだわからない。

8. 結 語

以上、受圧面変位型の圧力計を土圧計として用いる場合について、土圧をどの程度、正しく測定できるかという点について実験的に研究した結果について述べた。

すなわち、この種の圧力計を土圧計として用いる場合には試料の状態 (σ_s)、受圧面の径 (R)、およびそのたわみ度 (A) 等の影響によって土圧による測定値は必ずしも気圧による測定値と一致しない。

著者はこの差がどのように変化するかを実験的に求めてみたのである。そして、この差および土圧の場合に生ずる履歴の程度を示す量として D および H という新

しい定義量を導入して、これらと A 、 R 、 σ_s 等との関係をしらべてみた。その結果、

- 1) D 量は $\sigma_s A/R$ に比例して増減し、同一の $\sigma_s A/R$ に対してほぼ一定値となる。
- 2) H 量は $\sigma_s A/R$ の他に σ_s に関係するある量によって変わる。

ということがわかった。

D 、 H が A 、 R だけでなく、 σ_s によって変わるということは、その試料の状態、土圧が作用する状況等を土圧測定においては考えなければならないことを示すもので、今後、さらに研究しなければならない事柄と考えている。

また、Piston 型と Diaphragm 型とを比較した場合、 D 、 H の A/R または $\sigma_s A/R$ の減少は Diaphragm 型の方が急速であるので、この点については Diaphragm 型の方が有利であると考えることができるが、両者の値はあまり変わるものではない。

終りに、本実験には本学教室員、浜村信久君および学生、中原敏昭、芳賀信豪の諸君の助力を得たことを付記し感謝の意を表する。

また、本研究の一部に文部省科学研究費の援助を得たことを付記する。

参考文献

- 1) 土と基礎 4巻4号 p. 4
- 2) 土木学会論文集 58号 p. 82

(原稿受付: 1960.3.26)