

土圧計の特性と動間げき水圧の測定

ON RELATION BETWEEN CHARACTERISTIC OF CELL AND MEASUREMENT OF DYNAMIC PORE WATER PRESSURE

大原 資生*

By Sukeo Ohara

要 旨 地震時に、岸壁裏込めの間げき水が動水圧を発生するか、どうかという事柄は耐震工学上非常に重要なことはもちろんであるが、土質工学のうえからも興味のあることである。

この間げき水による動水圧（以後、動間げき水圧と呼ぶ）の測定は通常の動水圧の測定以上にむずかしい点をふくんでおり、このために、この動間げき水圧の存在については種々異論が持たれている。

著者は、この原因はこの実験結果に対する見解の相違にあり、その実験結果を整理する場合に土圧計の特性を考慮しているか、いないかということにもあるように思う。ここでいう特性とはつぎのようなことである。すなわち、受圧面変位型の通常用いられている土圧計で飽和砂の圧力を測定する場合を考える。この場合には通常、受圧面には土圧と間げき水圧とが作用している。いま、間げき水圧が増加すると、そのために受圧面の変位が生ずる。この変位は微小ではあるが、このために受圧面は土より逃げることとなるので、それに作用している土圧は減少する。結局、この土圧の減少と水圧増加とが互いに打ち消し合って、この場合の土圧計の測定値は真の水圧と測定値の関係とかけはなれたものとなる。

また、間げき水圧が減少する場合は受圧面の変位は減少し、このため、受圧面は土を押し出すこととなるので、それに作用している土圧は増加することとなり、この場合も土圧の増加と水圧の減少とが互いに打ち消し合うこととなる。極言すれば、土圧計の受圧面に水圧と土圧とが一緒になって作用している場合に得られる測定値はその水圧が変わるときは土圧も乱されて、なんの圧力を測定しているかわからない無意味な測定値となると考えられる。

この意味から、われわれは動間げき水圧の測定は土圧計の前面にスクリーンをつけて受圧面には水圧のみが作用できるようにして行なったのである。

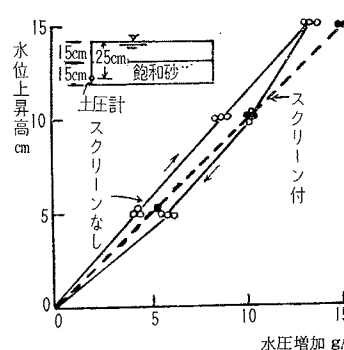
飽和砂の振動圧力の実験では、この土圧計の特性は必ず考慮されなければならないにもかかわらず、ややもすれば忘れられ勝ちであると思う。

著者は、この考えが正しいか、どうかということを明らかにするために、この特性を実験的にしらべてみた。その結果について述べる。

1. 緒 言

まず、図-1 に示す実験結果について考えてみる。これは深さ 30 cm、幅 60 cm、長さ 100 cm の砂箱に 15 cm の深さまで飽和砂を入れ、つぎに、その水深を 15 cm（砂面と同じ深さ）から 30 cm（砂箱の上端）までの間、変動させたときの水位と圧力計の測定値との関係を示したものである。

図-1 飽和水位と測定値との関係



たものである。圧力計は箱の底から 5 cm の高さの所につけてある。実線には土圧計の前面にスクリーンをつけない場合の値であり、点線は土圧計前面にスクリーンをつけて

て、水圧のみが土圧計に作用する状態での結果である。

点線では水位と測定値とが妥当な関係を示しており、水位上昇時、下降時とも同一直線となっているのに対し、実線では水位上昇時では水位増加に相当する値よりいくぶん小さい測定値が得られ、水位下降時は履歴が残ることがわかる。

この原因についてはつぎのように考えることができる。スクリーン付の方は水圧のみが作用しているのであるから問題はないが、スクリーン付でない場合は受圧面には土圧と水圧とが作用しているのであるから、水位が上昇すると、それに対応して受圧面は変位を生ずる。

この変位のために、いままでのこの受圧面に作用していた土圧は減少することとなる。これは土留壁の変位がそれに作用している土圧に影響する現象と同じである。図-1 の実線（水位上昇時）と点線との差がこの土圧減少量に相当するものと考えられる。

水位下降時では、水位上昇時に受圧面が後退した際にいくぶん受圧面の方に移動した砂粒子が、受圧面を押し出すこととなって、それに作用する土圧は水位下降とともに増加することとなり履歴が表われるものと考えられる。

結局、土圧計に水圧と土圧と一緒に作用している状態で、水圧が変化する場合に得られる測定値から正しい間

* 正員 工博 山口大学教授 工学部土木工学教室

げき水圧変化を求めることはできないのである。

著者がこのことに気づいたのはつぎのような実験結果を得たからである。すなわち、砂箱の中に飽和砂を入れて振動台により水平振動を与え、その際に振動方向に直角な側壁に作用する振動圧力を測定し、地震時岸壁に作用する飽和砂の振動圧力についての実験を行なって、図-2に示される結果を得た。これは前論文¹⁾にも掲げたものであるが、土圧計の前面にスクリーンをつけずに測定した全飽和および全排水のそれぞれの場合の圧力振幅の差が、土圧計の前面にスクリーンをつけ水圧のみが測れるようにして測定された動間げき水圧の振幅より小さい

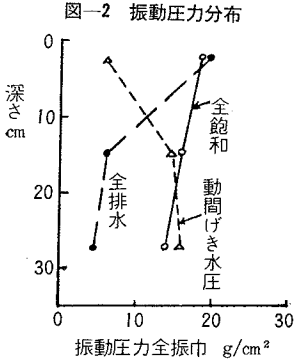


図-2 振動圧力分布

ということが問題であった。著者が、このことを土圧計の特性によるものと解釈したことは前論文¹⁾にも明らかである。

飽和砂の振動圧力についての実験はほかに運輸省港湾技術研究所および電力中央研究所にもある。

電研の畑野博士は深さ 50 cm の砂箱の下半分に厚さ 25 cm の飽和砂をおき、その上半分 25 cm より 50 cm の間は水だけとした場合、飽和砂の部分の圧力振幅より水だけの部分の圧力振幅が大きいという実験結果等を得られたことから、飽和砂の振動圧力に対して著者と異なる解釈をしておられる²⁾。しかし、この実験では土圧計にはスクリーンをつけて動間げき水圧を測定しないこと、土圧計受圧面のたわみ度 $4/R$ (4 は単位圧力当たりの受圧面の中心のたわみ量、 R は受圧面の径) がかなり大きい(著者の使用したものの約3倍)*等のために、前述の土圧計の特性が原因となって飽和砂の部分の測定値が水の部分の測定値より小さくなっているのではないかと著者は考える。

著者の所で土圧計にスクリーンをつけて行なった、これと類似の実験結果は図-3で、動水圧分布は飽和砂の

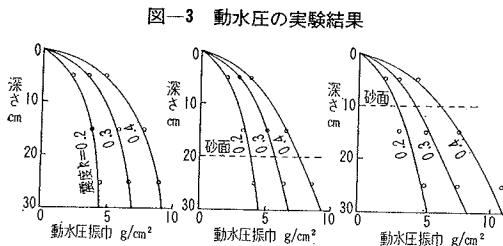


図-3 動水圧の実験結果

* 著者の土圧計の $4/R$ は図-2の実験(九大)等に用いたもので $0.28 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{kg}$ 、現在用いているもので $0.11 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{kg}$ であるのに対し、電力研のものは $0.75 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{kg}$ となっている。

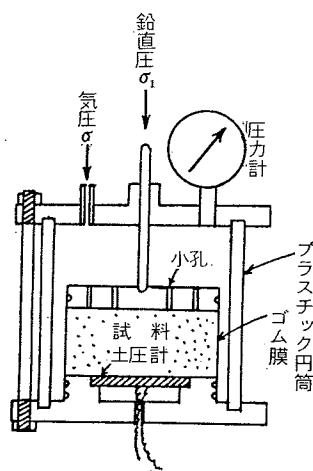
部分が小さいというようなことはなかった。

以上のように飽和砂の圧力測定の実験では土圧計の特性が非常に関係すると思われるので、これを実験的にしらべてみたのである。

2. 実験装置

実験装置としては、図-4に示す三軸試験と類似のものを用いた。これは著者が先に土圧計に関する実験的研究³⁾に使用したものである。この中に径 12 cm、高さ 5 cm で、周囲をゴム膜で包まれた円筒形の試料を作る。

図-4 検定装置



下部加压板の中心には土圧計が取り付けられている。また、上部加压板には径 2 mm の小孔が多数うがってある点が三軸試験と異なる。すなわち、ピストンを通じ上部加压板より鉛直圧を加え、土圧計に一定の土圧を作用させ、つぎに圧力室内の気圧を増減すると、この気圧は上部加压板の小孔を通して試料内に入って間げき圧として

土圧計に作用することとなる。この気圧によって土圧が作用している状態での土圧計の検定を行なうのである。

以上のように、この装置により、飽和砂の圧力を測定する際に、土圧計に土圧と水圧とが一緒に作用しているとき、間げき水圧が増減するという状態と同じ状態に土圧計をおくことができる。

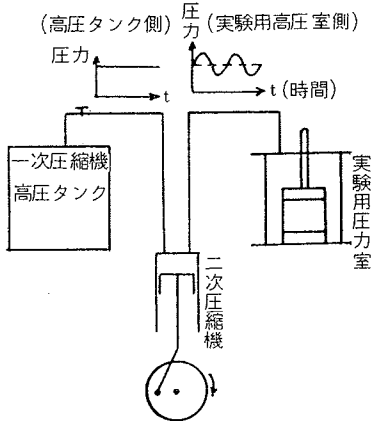
圧力室内の圧力、すなわち間げき圧の値はブルドン管圧力計によって測定し、鉛直圧力は応力制御型の三軸試験の荷重装置によって、散弾荷重を直接ピストンに加え試験中一定となるようにした。

この実験では間げき圧が静的に変化する場合と、振動的に変化する場合とを考慮して、圧力室の圧力を静的に変化させての実験と、ある振幅をもって振動的に変化させての実験とを行なった。前者では圧縮機のタンクから直接高压の空気を圧力室に送り込んで圧力室内の気圧を段階的に増加、減少したのであるが、後者では図-5に示すように圧縮機のタンクからの高压空気をもう一つの圧縮機のシリンダー内に送り込んでから圧力室内に入れている。

このようにすると、圧力室内の気圧を、たとえば最低 0.2kg/cm^2 から最高 0.5kg/cm^2 の範囲にある周期ではほぼ正弦的に変化することができる。本実験に用いた周期は 1.4 秒で、このときの圧力室内の気圧変化はブルドン

管圧力計のブルドン管に貼付されたひずみゲージによって、検定される土圧計の測定値変化とともにペン書インクに同時に記録される。

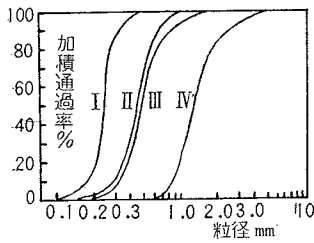
図-5 動的検定装置



また、本実験に使用した土圧計の構造は前論文³⁾にも図示してあるので省略するが、受圧面はダイアフラムとなっているもので、圧力値は膜面の中心位置に接着したひずみゲージによって測定される。

本実験においては、この構造の土圧計で受圧面の径およびたわみ度がそれぞれ3段階に変化した、計9個の土圧計を用い、これらによって前述の土圧計の特性がどのように変化するかをしらべた。

図-6 粒度曲線



また、試料としてもつぎの4種の砂を用い、粒度配合の影響もしらべた。以後、平均粒径の小さいものからI, II, III, IVの試料と呼ぶ。

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とりつける。その上に試料を作る。この場合、特別に突固めるようなことはせず、自然につまる程度とした。

つぎに鉛直圧 σ_1 を 0.1 kg/cm^2 とし、静的試験の場合には、気圧を 0.2 kg/cm^2 ずつ最高 1.0 kg/cm^2 まで段階的に増加し、つぎに減少して、そのつどの土圧計の測定値をよみとる。

また、動的試験の場合には圧縮機を始動して、ブルドン管圧力計の針の動きをみながらタンクのcockを調節して気圧の下限値を 0.2 kg/cm^2 , 0.4 kg/cm^2 としたときの記録をとる。以後、順次 σ_1 を $0.2, 0.3 \text{ kg/cm}^2$ として同様の測定をくり返す。

以上の実験が終わったならば試料を入れずに圧力室を密閉して、受圧面に気圧のみが作用する状態での測定を行なう。この場合、静的試験中にダイアルゲージで単位圧力当たりの受圧面の変位量を測定して各土圧計のたわみ度 $4/R$ を求めた。

以上の測定を受圧面たわみ度および径の異なる計9個

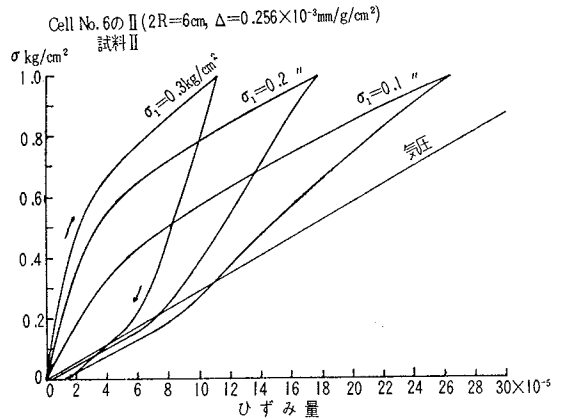
の土圧計につき、前述の4種の試料について行なった。

4. 実験結果

(1) 静的試験

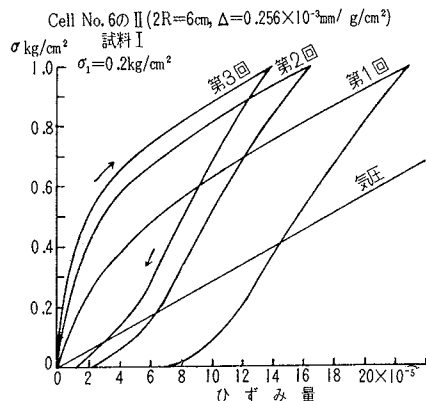
図-7は実験結果の一例を示したもので、 σ_1 がそれぞれ $0.1, 0.2, 0.3 \text{ kg/cm}^2$ である場合、すなわち、それぞれ $0.1, 0.2, 0.3 \text{ kg/cm}^2$ の土圧が作用している状態での間げき圧が増減するときの土圧計の測定値を示すものである。図-7のそれぞれの測定値はいずれも同一状

図-7 測定結果の例



態、たとえば $\sigma_1 = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ の曲線は σ_1 が 0.1 kg/cm^2 であるときの3回目の気圧増減の際の測定値より得たものである。これは図-8で示されるように、第1回目より第2回目、第2回目より第3回目といったように気圧増減の回を重ねるにしたがって、その測定値が小さくなり、第3回目以後はほぼ一定の値を示すようになるからである。

図-8 測定結果の例



これは初期には砂粒子の移動が生ずるためと思われる。なお、図中、気圧と記した直線は気圧のみが測定したときの測定値を示す。

図-9は砂の粒度のちがいがよる影響をみるために同

図-9 (a) 測定結果の例

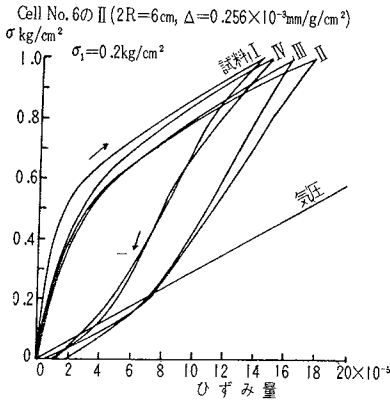
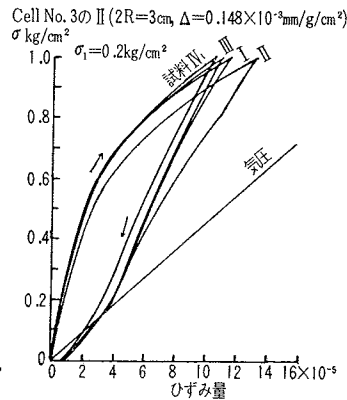


図-9 (b) 測定結果の例



なお、図-10の気圧および σ_1 のそれぞれの場合の曲線はこの図のように同時に記録できるものではなく、実験では気圧計の曲線に対しのおのが一つずつ対応する形で記録されるが、これらを見やすいように編集したものである。

この記録より静的試験の場合と同じような気圧と土圧計測定値との関係を書いたのが図-11である。

動的試験の場合においても、その初期では砂粒子の移動のために、同一の気圧振幅を保っているにもかかわらず

土圧計の測定値の振動中心が測定値が大きくなる方にずれ、しかもその振幅が次第に小さくなって行く傾向が見えるので、それらが落ち着くのを待って記録をとった。

一の土圧計での同一条件での4種類の砂についての測定値をまとめて示したものである。

(a)は受圧面径6cm, (b)は受圧面径3cmの土圧計の、いずれも $\sigma_1=0.2\text{ kg/cm}^2$ の場合の実験結果である。これより粒度のちがいによる影響はあまりないように見える。

(2) 動的試験

まず、図-10に動的試験によって得られた記録の例を示す。最上の曲線がブルトン管に貼付されたひずみゲージによって得られた圧力室内の気圧変化であり、その気圧変化に対する土圧計の測定値の変化曲線がその下の

図-10 (a) 動的実験の記録の例

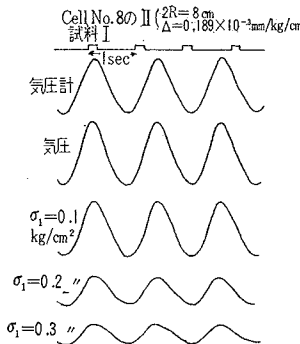
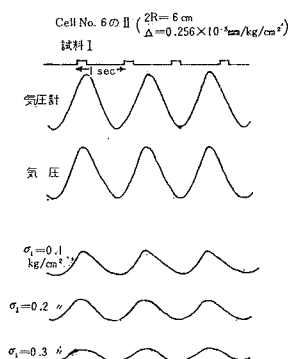


図-10 (b) 同上



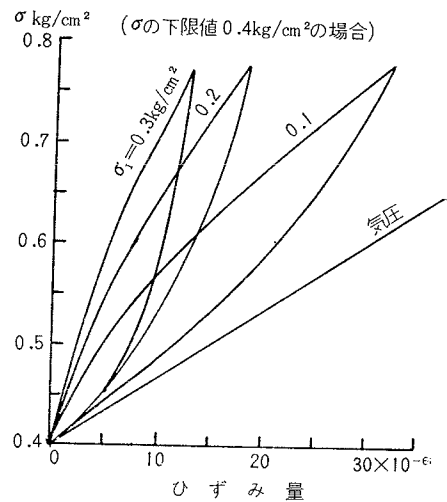
4本の曲線である。その中の気圧と記してあるのは、圧力室の中に試料砂を入れない、すなわち土圧計の気圧のみによる検定の際の記録で、以下 $\sigma_1=0.1, 0.2, 0.3\text{ kg/cm}^2$ とあるのが、それぞれの土圧が作用している状態での測定値曲線である。このときの圧力室の気圧は最低 0.2 kg/cm^2 , 最高 0.57 kg/cm^2 として変化している。

図-10より、作用している土圧値が大きくなると、同一の間げき圧振幅に対応する土圧計の測定値振幅は小さくなるのがわかる。これは静的試験の場合と同じである。

図-11 動的実験結果

Cell No. 6のI (2R=6cm, Δ=0.126x10^-3 mm/g/cm^2)

(a) 試料I



(b) σ kg/cm^2 (σの下限值0.2kg/cm^2の場合)

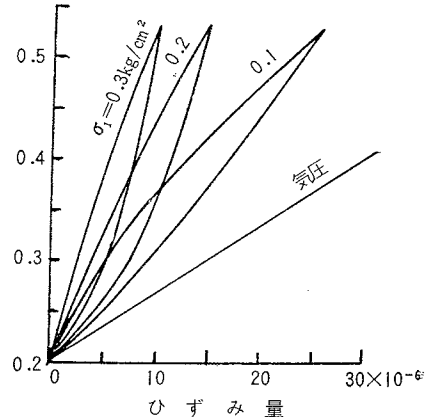


図-11 は気圧の下限値を (a) は 0.4 kg/cm^2 に、(b) は 0.2 kg/cm^2 としたときの結果である。

5. 実験結果の考察

以上の実験によって、土圧計による間げき圧変化量の測定値はその受圧面に土圧も一緒に作用している場合と、いない場合とでは異なり、このちがいは主として土圧計の受圧面のたわみ度 $4/R$ が大きいほど、また、土圧値 σ_1 が大きいほど大きくなると考えることができる。図-7~9 の結果をみると、いずれの測定値曲線でも σ の値が大きくなるにしたがって曲線の勾配が気圧曲線のそれに等しくなる傾向が見える。また、 σ の減少の際も σ が大きい間は測定値曲線は一つの直線を形成し、さらに σ が小さくなると急速に O 点に近づく別の直線が形成される。この原因についての著者の考察を 図-12 によって説明する。OA' の間では間げき圧の増加によって土圧計の受圧面のたわみが増加するので、

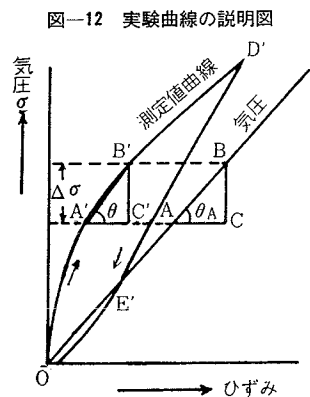


図-12 実験曲線の説明図

いままで作用していた土圧が減少して行く過程である。それで曲線 OA' と気圧曲線との水平距離、たとえば AA' に相当するひずみ量が減少した土圧量に相当するひずみ量と考えられる。この状態は最初に土圧計に作用してい

た土圧による土の圧縮量が、間げき圧増加に対応して増加する受圧面のたわみ量によって回復されるまで、すなわち両者が等しくなるまで続き、それ以後は受圧面たわみ量の増加による土圧の減少は生じないので、単位間げき圧増加に対する土圧計の測定値は気圧のみが作用しているときと同じになり、測定値曲線には気圧曲線と平行となる B'D' なる部分があらわれるのである。

結局、A'B' の間に土の圧縮量と受圧面のたわみが等しくなる点があると考えられる。各測定値曲線の A'B' の部分のあらわれる σ の値が土圧値 σ_1 に比例して大きくなっていることは前述の考えを裏付けるものと思う。

圧力減少時には、B'D' の間にいくぶん砂の移動が生じているので、受圧面のたわみ量の減少によって受圧面に作用する土圧が増加することとなり、測定値に履歴が生じ D'E' なる直線部分を形成する。そして E' 付近となると、間げき圧が D' 点から E' に減じたために生じた受圧面の復元力が受圧面を押している砂を押しもどして急速に O 点に近づくものと考えられる。動間げき水圧の測定において最も重要なことは気圧直線（これを通常検定曲線という）と測定値曲線の勾配のちがいであって、これを示す量として、それぞれの勾配角の余接の比

図-14 σ と $\cot \theta / \cot \theta_A$ との関係(動的実験)

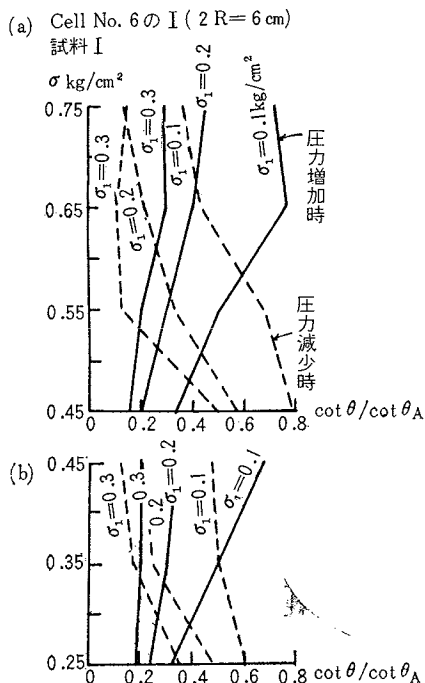
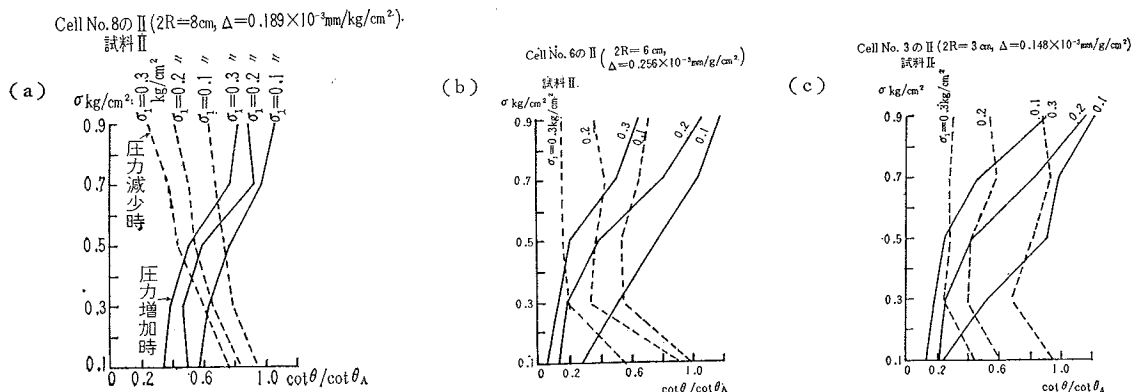


図-13 σ と $\cot \theta / \cot \theta_A$ の関係の例(静的実験)



$\cot \theta / \cot \theta_A$ (図-12 参照) をとり、これが σ および σ_1 によってどのように変わるかをしらべてみた。その結果の例を図-13,14 に示す。図-13 が静的試験、図-14 が動的試験の結果で、実線が圧力増加時、点線が圧力減

少時のものである。

すべての場合、土圧値 σ_1 が大きいほど気圧曲線との勾配のちがいが大きくなり、圧力増加時では σ が大きくなるにしたがって気圧曲線との勾配のちがいが小さくな

図-15 $\sigma_1 d/R$ と $\cot \theta / \cot \theta_A$ との関係 (静的試験)

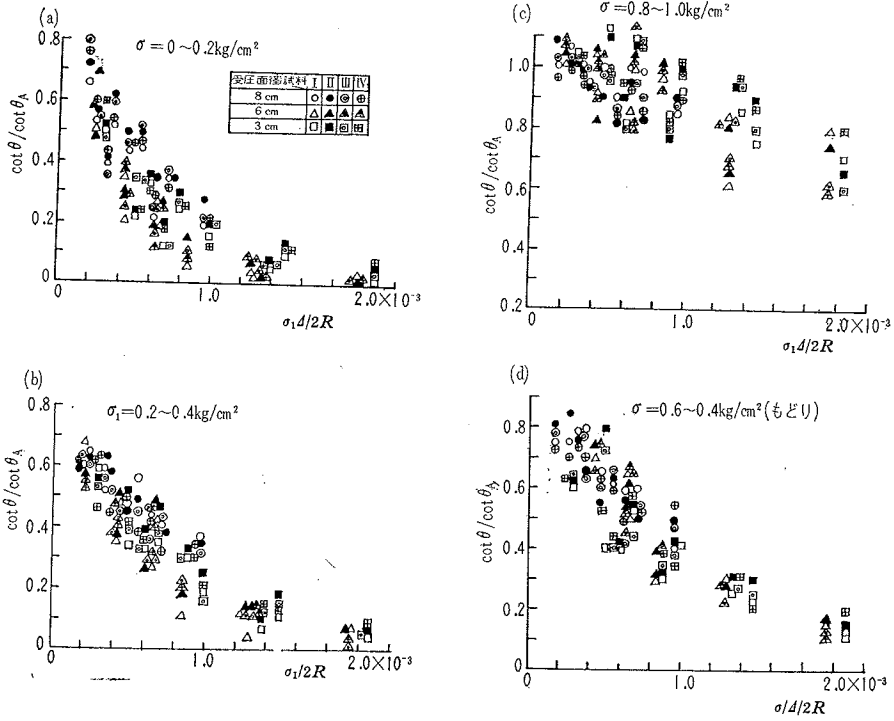
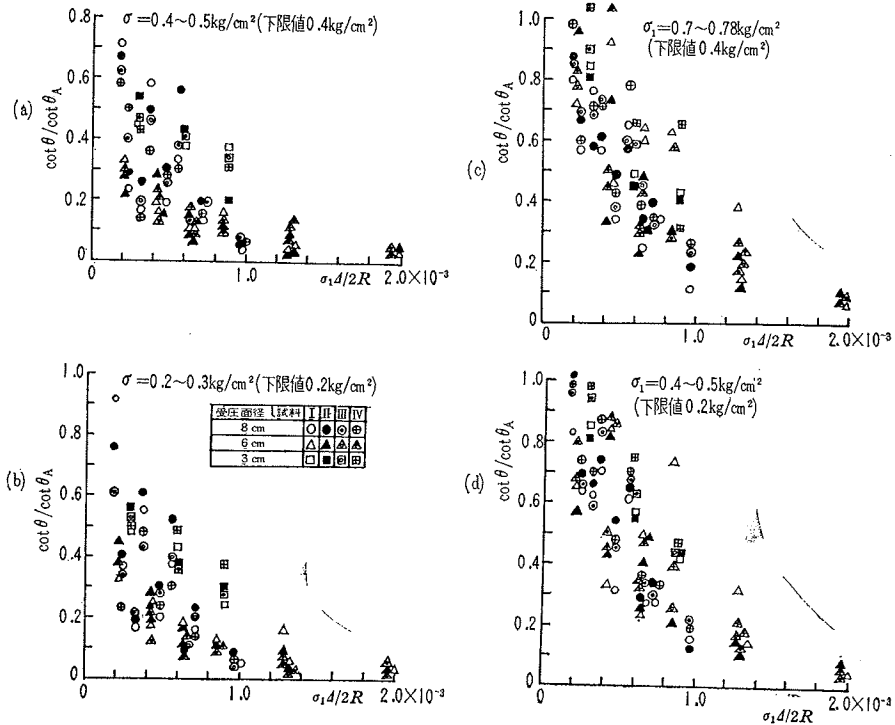


図-16 $\sigma_1 d/R$ と $\cot \theta / \cot \theta_A$ の関係 (動的試験)



る点が明確にわかる。

また、図-14において、(a)、(b)は σ の下限値がそれぞれ 0.4 kg/cm^2 、 0.2 kg/cm^2 である場合の結果であるが、圧力増加時(実線)において、(a)の $\sigma=0.45 \text{ kg/cm}^2$ の所の実線の値と(b)の $\sigma=0.25 \text{ kg/cm}^2$ の所の値はほぼ等しく、また、(a)の $\sigma=0.75 \text{ kg/cm}^2$ の所の値と(b)の $\sigma=0.45 \text{ kg/cm}^2$ の所の値とはほぼ等しくなっている点は興味がある。

これはほかの土圧計の場合でもみられることで、図-11の(a)、(b)において測定値曲線の圧力増加時の部分の勾配は互いにほぼ等しく見えることから推定できる結果である。結局、 $\cot \theta / \cot \theta_A$ の値は σ の値より σ の初期値からの変化量によって変わることを示しているのであって、これは測定値曲線と気圧曲線とのちがいが受圧面のたわみそのものではなく、たわみが変化することによって生ずることから同意できる事柄である。

最後に、土圧計のこのような特性がどのような量によって、どのように変わるかを見るために $\cot \theta / \cot \theta_A$ と一つの無次元量 $\sigma_1/2R$ との関係を作ってみた。図-15が静的試験結果であり、図-16が動的試験結果である。いずれもかなりばらついてはいるが、 σ の範囲が定めれば $\cot \theta / \cot \theta_A$ の値は $\sigma_1/4R$ によってほぼ定まることがわかる。

図-15と図-16とを比較して静的と動的とにちがいがあらかうかしらべてみる。 σ の初期値からの増加量が同じ場合について比較するというので、図-15の(a)と図-16の(a)、(b)、図-15の(b)と図-16の(c)、(d)とを比較すると、両者はほぼ等しいことがわかる。

6. 結 語

以上、著者が飽和砂の振動圧力を測定し、その結果を整理している際に気づいた土圧計の特性について実験および考察を行なった結果について述べた。

その結果、飽和砂において、間げき水圧または動間げき水圧の測定を行なうには、通常、受圧面の前にスクリーンをつけて土圧計を水圧のみが作用する状態にして測定を行なわなければ正しい間げき水圧測定値を得ることはできないことが実証された。本実験結果より、前述の土圧計の特性によってスクリーンがつけられていない土圧計を使用しての飽和砂の振動圧力の測定値は、受圧面のたわみ度がかかなり微小な場合でも、真の振動圧力値より小さいものとなることは明らかであり、そのために図-2に示したような実験結果が得られるのだと思う(受圧面のたわみ度の値によってはさらに極端な実験結果を得ることも想像できる)。ゆえに、そのような測定値をもって動間げき水圧の大きさやその存在を検討することはできないと思う。

終りに本実験を手伝ってもらった本学学生原田幸郎君に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 大原資生：“飽和砂の振動圧力について”，土木学会論文集 99号，1963. 11
- 2) 畑野 正：“固定壁に対する砂の振動圧”，土木学会論文集 80号，1962.4
- 3) 大原資生：“土圧計に関する実験的研究”，土木学会論文集 71号，1960.11

(1964.3.3・受付)