

浸透力により地盤の有効応力を制御する 実験装置の基礎的研究

山本 春行*・富永 晃司*・佐原 守*

昭和62年6月30日 受理

Experimental Research on Controlling the Effective Stress in Sand by Means of Seepage Force

Haruyuki YAMAMOTO, Koji TOMINAGA and Mamoru SAHARA

In order to satisfy the similarity of scales between model and prototype of foundation structure, the test equipments using hydraulic gradient method were developed, and the results of load tests on model piles performed by the test technique were reported (e. g. Zelikson, 1969; Taito, 1977; Shimazaki, 1978). The hydraulic gradient method is used to create artificial gravity (increasing of unit weight) inside porous media like sand. In their tests, however, it is apprehended that the friction forces are caused on the inner surface of test cylinder and uniform distribution of unit weights is not created within sand.

This paper presents the data of fundamental test on the effect of the above friction force and the results of test reduced the friction resistance by using the layer of teflon sheets and silicon grease. These experimental data are compared with analytical results from finite element method. The ratio of horizontal to vertical effective stress within sand measured during the tests are also discussed.

§ 1 序

杭等の基礎構造物の挙動性状や支持力機構などを把握するためには、現場における実大実験が最も望ましいが、実験に要する労力や経済性などの面、あるいは地盤特性を制御し実験結果を比較するといった面から非常に困難となる場合が多い。これらの理由から、基礎構造物に関しては模型による実験研究がよく行われている。ただしその実験内容としては、現実の地中構造物（実大）との間の相似則を無視した模型実験が、そのほとんどを占めていると言える。

ここに、模型実験から得られた結果を実大のものに対応させるにあたっては、理想的には寸法の他、地盤の有効応力をも含めて相似則を満足させた模型実験を行うべきである。

一方、これらの点を解決するために遠心力载荷装置を用いた研究が行われている^{1)~3)}。しかし同装置は大がかりであり、かつ高価なため一般に普及した実験装置とは言いがたい。これに対して、水の浸透圧を利用して地盤の有効応力を比較的簡単に制御する実験装置も開発されており、この装置による単杭および群杭の支持力等に関する実験結果が報告されている^{4)~6)}。ただしこの装置では、

* 構造工学専攻

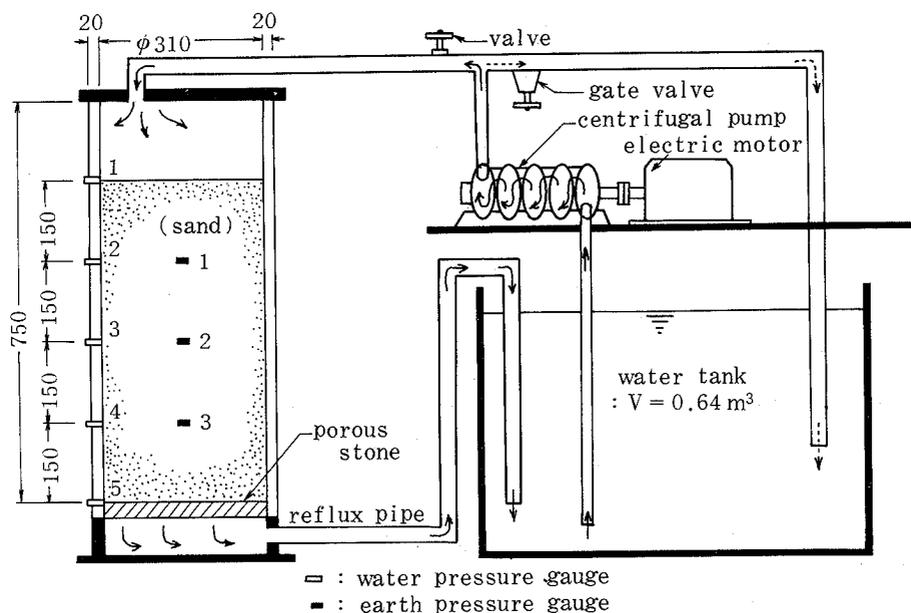


Fig. 1 Experimental apparatus (unit:mm)

浸透圧タンク内壁と地盤との摩擦が生じるため、実際の地盤中に作用している有効応力が平面的に均等であり、かつ深さ方向にもそれに対応したものになっていないことが考えられる。前述した既往の実験研究^{4)・6)}では、いずれもこの点を無視し、浸透力によって増加する有効応力が損失することなく想定した応力レベルに達しているものと見なした下で、その結論を導いている。

以上の点を踏まえて、筆者らは上述した浸透圧を利用し、地盤の有効応力を制御する実験装置の開発を目的とした基礎的な実験研究を行ってきた。すなわち、浸透圧タンク内壁と地盤間の摩擦が地盤に与える影響について調査すると共に、この摩擦を低減する方法としてテフロンシートとシリコングリスを互層にした膜を貼付けた条件⁷⁾での実験をおこなった。本論文は、これらの基礎的な実験を通じて得られた結果、および有限要素法による浸透流解析の結果に基づいてその考察を加えた内容について報告する。さらに、地盤中の鉛直有効応力と水平有効応力の比 $K (= \bar{p}_h / \bar{p}_v)$ に関して検討した結果について述べる。

§ 2 実験概要

実験装置の概要は、図1に示すごとくであって、浸透圧タンク（アクリル製円筒；内径：31 cm，内法高さ：75 cm），圧力送水用ヒューガルポンプ，電動モーター，水槽，還流管，および圧力調整用バルブから構成されて

Table 1 Physical properties of sand

Uniformity coefficient	$U_c = D_{60}/D_{10} = 1.56$
Specific gravity	$G_s = 2.63$
Maximum density	$\gamma_{max} = 1.641 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Minimum density	$\gamma_{min} = 1.341 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Relative density	$D_r \approx 90 \text{ (}\%)$

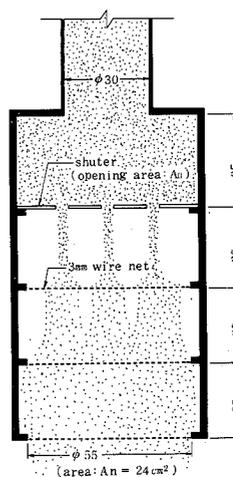


Fig. 2 Depositing implement for forming uniform beds of sand (unit:mm)

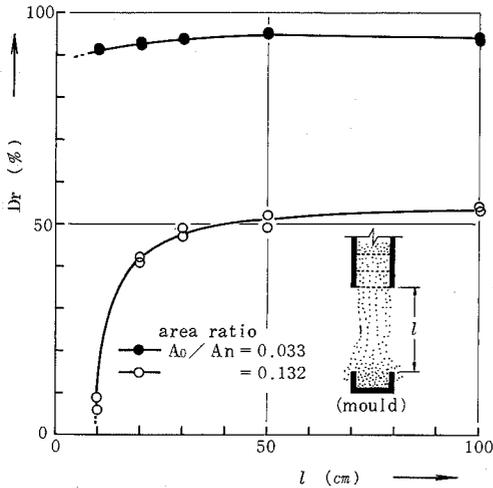


Fig. 3 Effect of variation in dropping height

いる。同装置は、電動モーターに直結したヒューガルポンプにより水槽内の水を還流管に送り込み、この加圧水で浸透圧タンク内の実験地盤の有効応力を増加（物体力を増加）させた後、浸透圧タンク下部のポーラス・ストーンから下部の還流管を経て、再び水を水槽内に戻す機構となっている。なお加圧水の調整は、還流管に設置した圧力調整用バルブの開閉により行う。

実験地盤には、表1に示す諸元をもつ「豊浦標準砂」を用いた。また実験に供する地盤は、均質でかつ目的とする相対密度をもつ地盤を作製する必要があるため、サンド・レイナー法^{8),9)}により実験地盤を作製することとした。なおこの方法は、多層の金網を通して砂を空中から落下させる方法であり、落下させる砂の量、落下高さおよび金網目の間隔等を変化させることによって目的とする地盤の相対密度が得られる。本実験を実施するまえに、これらの要因の変化によりどのような相対密度が得られるか、以下に述べるキャリブレーションを行った。

使用したサンド・レイナーは、図2に示すごとくであって、金網は3段設置してある。なお、金網目は3mmと規定した。同サンド・レイナーを用い、砂の落下高さ l および落下させる砂の量（図2に示すシャッターの開口面積と金網の面積との比で表し、これを以後開口比と称する）と相対密度 D_r の関係を調査した。図3に開口比を0.033および0.132とし、落下高さを変化させた結果を示す。この図より、全体的に開口比が大きい方が小さいものより D_r が低くなること、また落下高さ l が増大すると D_r は上昇する傾向にあるが、 l が30 cm以上になるとほぼ一定の値を示すことが読み取れる。図4に、 $l \geq 30$ cm を保持した条件での開口比と D_r の関係を示

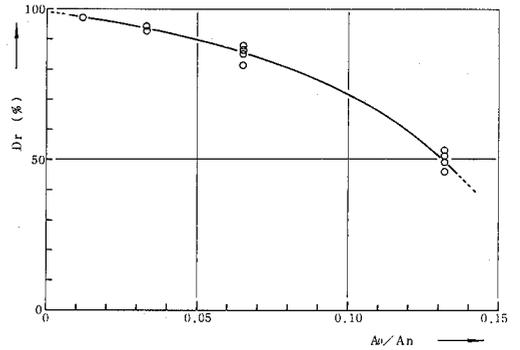


Fig. 4 Effect of variation in area ratio ($l \geq 30$ cm)

した。ただし、各開口比とも5回の実験（計20回）を行った。この図から、開口比が大きくなると D_r のバラツキが増加するのに対して開口比が小さくなるとほとんど同一の値に収束していることが分る。以上の結果に基づき、本実験地盤では密 ($D_r \approx 90\%$) でかつ D_r の安定度

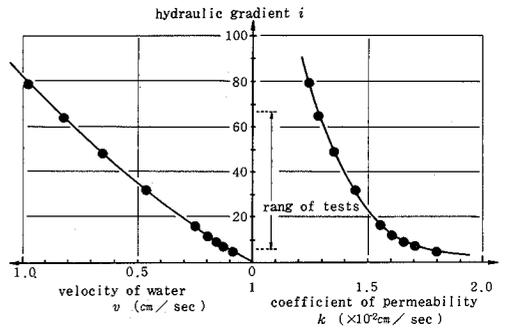


Fig. 5 Seepage characteristics

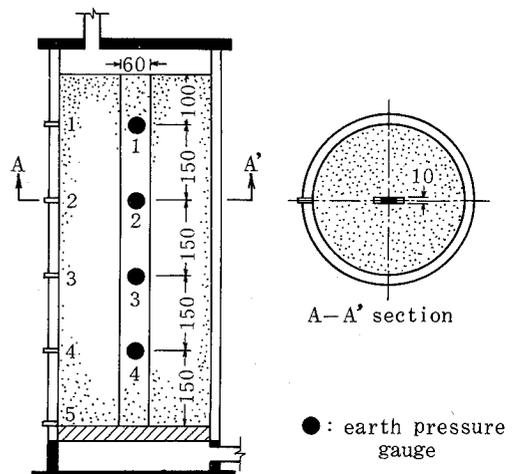


Fig. 6 Setting the horizontal earth pressure gauge (unit:mm)

の高い条件の地盤を対象とし、開口比0.033および落下高さ 30 cm 以上を保持する条件で実験地盤を製作することとした。

実験で用いる地盤の透水特性を把握するため、上記の条件で製作した地盤の定水位透水試験を実施した。得られた結果として、動水勾配 i 、透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$ 、流速 $v(\text{cm}/\text{sec})$ の関係を図5に示した。ただし、流速 v は単位時間の流量を試料断面積で割ったものである。またこれらの v, i, k の間には Darcy の法則が成立するものとして k を求めている。この図より、 i の変化に対して k が変化し、図中に示したように実際の実験で測定された i の範囲においては、 k が約1.3から 1.7(cm/sec) まで変動することが判明した。なおこの結果は、後述する浸透流の有限要素法解析の中で考慮されていることを付記しておく。

本実験は、浸透圧タンク内壁と地盤が直接接触した場合（以後、処理無と称する）、および内壁にテフロンシートとシリコングリスを互層にした膜を貼付けて摩擦力の低減を計った場合（以後、処理有と称する）の二種類の実験を実施した。なお圧力水による浸透圧は、いずれの実験とも約1.0, 2.0, 3.0および 4.0 kg/cm^2 の4段階に変化させることとした。実験時に測定した項目は、処理無の場合は地盤内の鉛直方向の全応力（全圧力）と間隙水圧、また処理有の場合は鉛直方向の全応力と間隙水圧、および水平方向の全応力と間隙水圧である。これら

は、それぞれ図1および図6に示すように浸透圧タンク中心位置の地盤内に設置した鉛直土圧計、地盤の中心位置に鉛直に置いた鋼薄板（厚さ 1 cm、幅 6 cm、高さ 70 cm、浸透圧タンクと同様に鋼薄板にも摩擦の低減処理を施している）に設置した水平土圧計、およびタンク壁面に設置した水圧計によって測定した。ただし地盤の層厚は、鉛直方向の全応力を測定する実験では 60 cm、水平方向では 70 cm とした。

§ 3 実験結果およびその解析

実験より得られた鉛直全応力 p_v と間隙水圧 u の深さ方向の分布値を、処理無および処理有の場合について、それぞれ図7(a)および(b)に示す。まず、全応力 p_v の実測分布について見れば、処理無の場合は多少のバラツキがあるが、減少傾向にある。これに対して、処理有の場合は深さに関係せずほぼ一定の値を示していることが分る。一方、間隙水圧 u は、処理無および処理有ともに深さ方向にほぼ直線的に減少している。これらの全応力 p_v と間隙水圧 u の実測値を基に、地盤の有効応力 $p_e (=p_v-u)$ を求め、図示したのが図8(a)および(b)である。なお、本実験範囲内において、流速 v は図5に示すように最大でも 1 cm/sec 程度であり、実測値に与える動水圧の影響はほとんど無視できることが分る。また同図中には、作用させた圧力水の水頭 H に対する物体力が地盤中で一様に発生し、かつタンク内壁と地盤間に摩擦

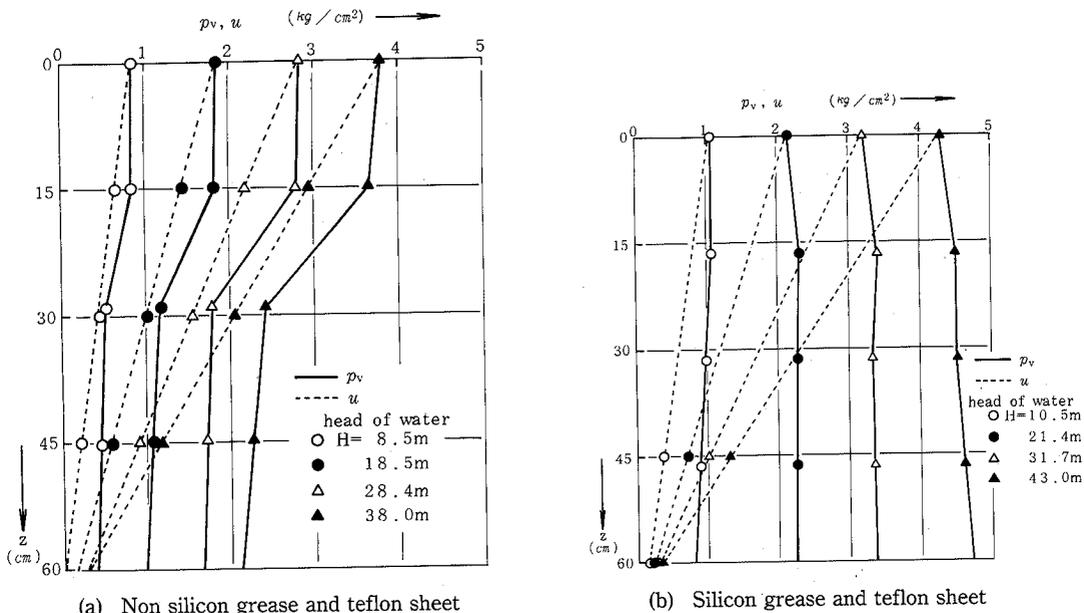


Fig. 7 Distribution of vertical total stress p_v and pore water pressure u

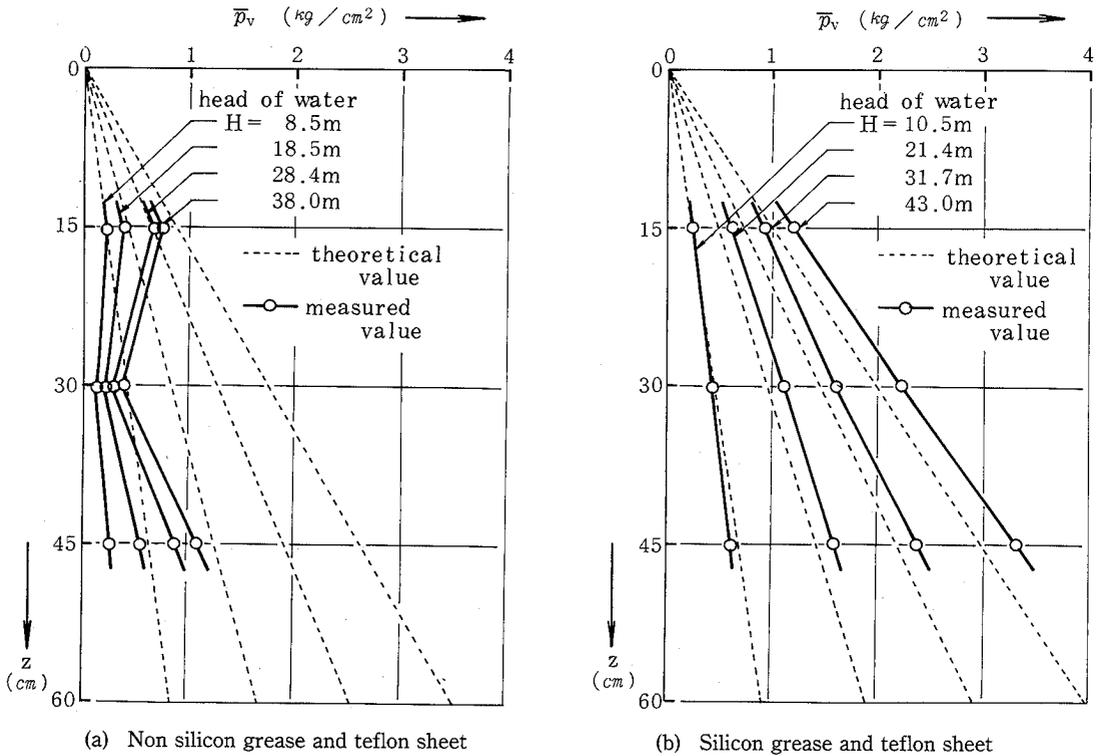


Fig. 8 Distribution of vertical effective stress

が働かないとみなした鉛直有効応力分布値を点線で記入してある。同図より、各浸透圧段階とも処理有の方が処理無よりはるかに大きな値を示すこと、また前者は後者と異なりほぼ直線的に増加する分布形を示し、かつ理論分布値にかなり近似した値を示すことが読み取れる。このことより、テフロンシートとシリコングリスの互層の膜で地盤と浸透圧タンク内壁間の摩擦がかなり低減されているものと判断できる。

以上のことをさらに詳しく検討するため、有限要素法 (F. E. M.) による解析を行った。同解析の概要は、Appendix に記したごとくである。実際の解析では、実測された地盤上下面の水頭差 ΔH を用いて定常浸透流解析を行い、ついでその動水勾配分布値より有効応力解析を行った。なお、同解析には軸対称 6 節点三角形要素を用い、図 9 に示すように分割数は 375 要素 (全 806 節点) とした。ただし土圧計は非透水であり、かつ実質的には剛体とみなせる。したがって、土圧計の位置では上下方向の流線の乱れおよび応力集中が予想されるので、この部分では細分割を行っている。また、浸透圧タンク底部と地盤間の境界条件には全てローラー支持を与え、側壁と地盤との間の境界条件としてはローラーおよびピン支持の二つの条件を与えた。すなわち、便宜的に側壁のロー

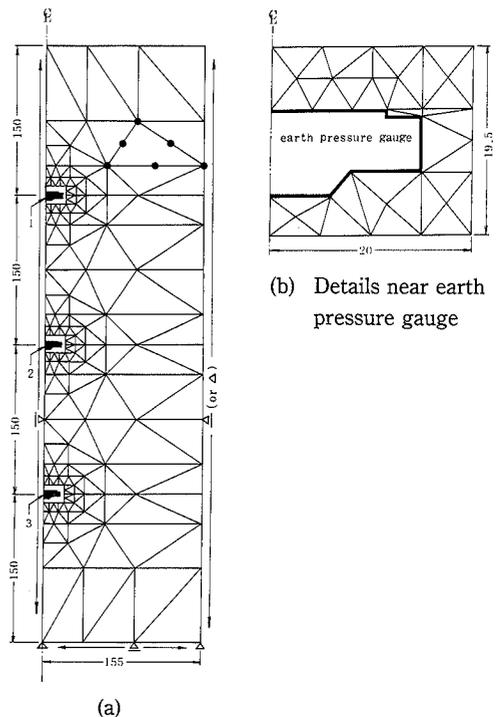


Fig. 9 Finite element idealization (unit: mm)

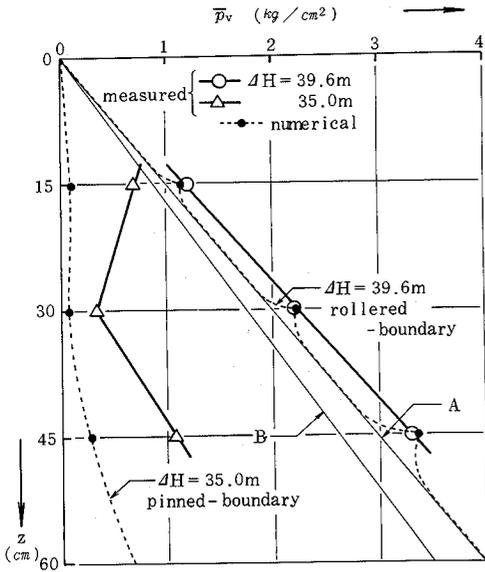


Fig. 10 Comparison between numerical and measured vertical effective stress

ラー支持は処理有に、ピン支持は処理無に対応させている(図9参照)。なお、ポアソン比を0.3として、地盤の弾性係数 E_s を10, 100, および 1000 kg/cm² の三種類想定して試算した結果、 E_s による違いはほとんど生じなかった。したがって、以後の考察では $E_s=100$ kg/cm² の場合についてのみ示すこととした。また、透水係数は図5の透水試験結果より、各動水勾配に対応する値を用い、等方等質と仮定して $k_1=k_2$ (一定)とおいた。

以上の解析結果の一部として、浸透圧差 ΔH の最大値(処理有では 3.96 kg/cm², および処理無では 3.50 kg/cm²)に対する結果を、有効応力の実測値と比較して図10に示した。なお、図中のAおよびB線は、図8中の破線とおなじくそれぞれ処理有および処理無における ΔH (地盤上面と下面の水頭差)に対応する理論上の鉛直有効応力分布である。この図より、以下のことが指摘できる。

処理有を想定したローラー支持の F. E. M. 解析値において、土圧計設置位置のところで理論上一致すべき理論A線より10%程度高い目の値を示しているが、これは地盤の剛性よりはるかに大きな剛性をもつ土圧計による応力集中の影響が、F. E. M. 解析に反映したためである。具体的には、図11に示すように F. E. M. 解析による土圧計上面の有効応力分布値(黒丸)が中央で低く端部で高くなっており、図10の F. E. M. 解析値として土圧計の受圧面全面に互っての平均値を採用しているため、理論A線より大きい値を示す結果となっている。

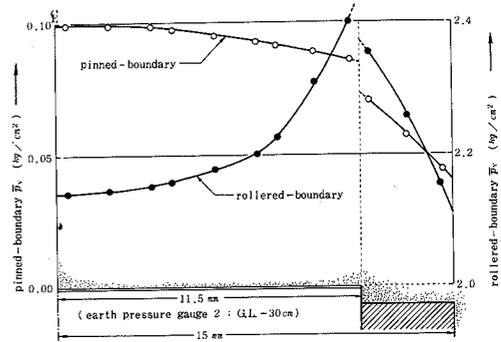
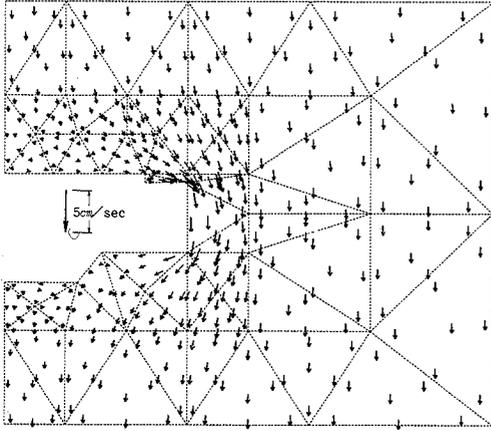


Fig. 11 Distribution of vertical effective stress on the surface of earth pressure gauge

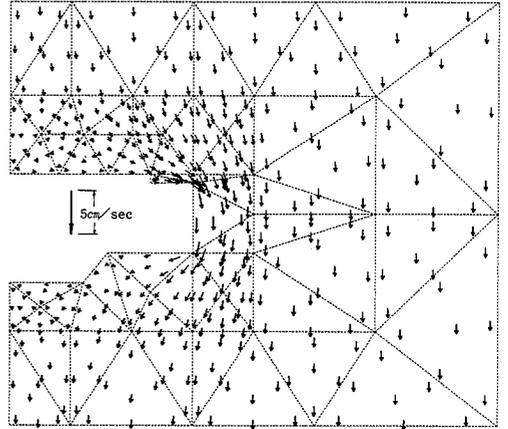
以上の点を考慮すれば、処理有を想定したローラー支持の F. E. M. 解析値は、実測値との近似性が非常に高く、前述したごとくテフロンシートとシリコングリスにより地盤と浸透圧タンク内壁間の摩擦が十分に低減されたと判断される。一方、処理無の場合には p_v の解析値が、実測値に対してかなり下廻った分布値を示している(図10)。すなわち、処理無の実測値がピン支持を仮定するほど摩擦力が発揮されていない結果を示しているが、摩擦が生じないとした理論B線よりかなり小さな分布値となっており、実験上無視できない程度の摩擦力が生じている。

つぎに、F. E. M. 解析で得られた土圧計近傍の流速分布の結果(G. L. -15 cm および -45 cm)を図12に、そして処理無および処理有の有効応力の主応力分布(G. L. -15 cm および -45 cm)を、それぞれ図13および図14に示した。これらの図より、流速分布において流れの乱れは土圧計の極く近傍のみで生じていることが分る(図12)。また主応力分布についてみれば、処理無(ピン境界)では壁面を支点とするアーチ状の主応力分布が発生し、地盤全体に互って応力の乱れが見られる(図13)のに対して、処理有(ローラー境界)の場合には、その乱れが土圧計の極く近傍のみに限られている(図14)。このことは、図11の土圧計受圧面上の有効応力分布において、処理有の場合とは逆に中央で高く、その値もかなり小さくなっていることにも現われている。

最後に、処理有における浸透圧が約1.0, 2.0, 3.0および 4.0 kg/cm² の各段階での間隙水圧 u と水平方向の全応力 p_h の深さ方向分布を、図15に示す。ただし水平圧測定用土圧計が、深さ 25 cm の位置では $H \geq 20.0$ m で、また深さ 10 cm の位置では $H=40.0$ m で絶縁不良となった。したがって、これらの測定値は図から除くと共に、以下の解析では対象としなかった。この図よ

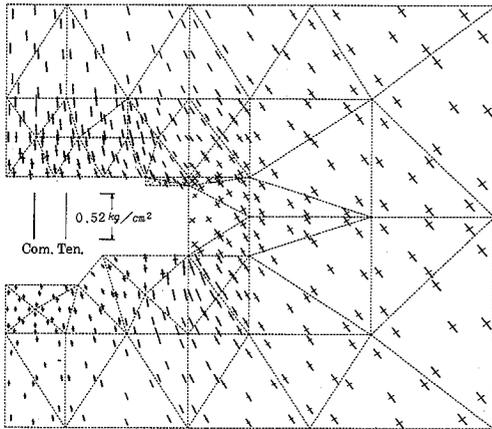


(a) Gauge 1 (G. L. -15 cm)

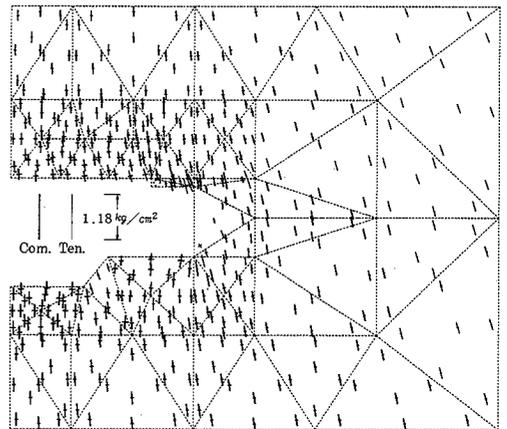


(b) Gauge 3 (G. L. -45 cm)

Fig. 12 Distribution of water velocity

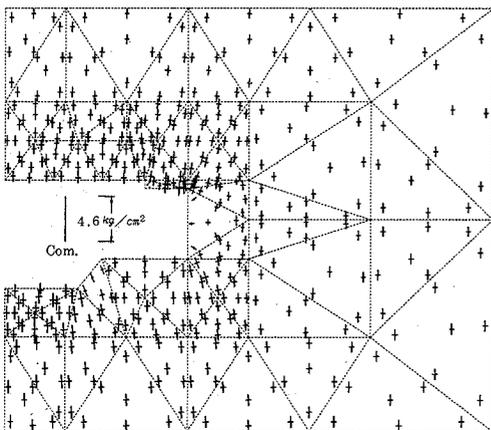


(a) Gauge 1 (G. L. -15 cm)

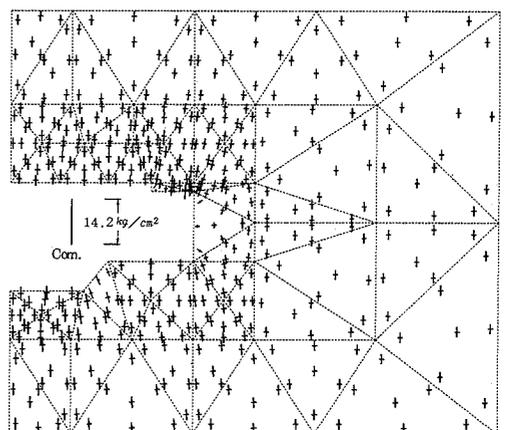


(b) Gauge 3 (G. L. -45 cm)

Fig. 13 Distribution of effective principal stress (pinned-boundary)



(a) Gauge 1 (G. L. -15 cm)



(b) Gauge 3 (G. L. -45 cm)

Fig. 14 Distribution of effective principal stress (rollered-boundary)

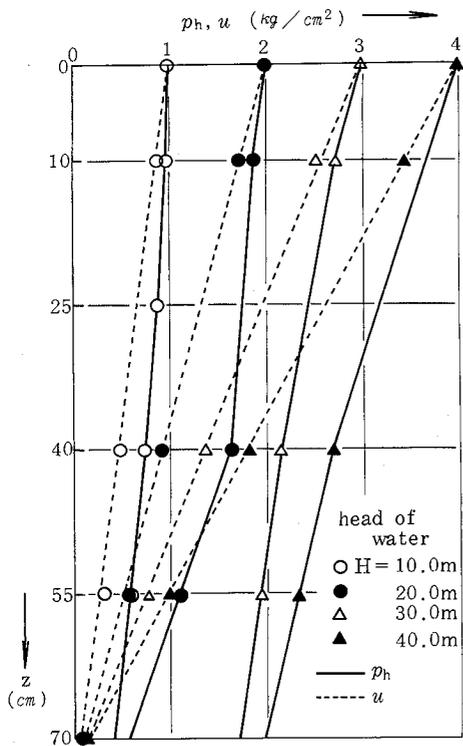


Fig. 15 Distribution of horizontal total stress p_h and pore water pressure u

り、他の実験結果と同様に、間隙水圧 u の深さ方向分布値は、最上部と最下部の u の値を直線で結んだ線上にほぼ位置しており、一様な地盤状態になっていることが読み取れる。

以上の測定値をもとに、鋼薄板に作用する水平有効応力 $\bar{p}_h (= p_h - u)$ を算定し、地盤内の鉛直有効応力 \bar{p}_v との比 K を求めることとした。ただし鉛直有効応力 \bar{p}_v としては、前述した処理有の対応する測定結果から摩擦がほとんど生じていないことが明らかであるので、 \bar{p}_v の理論分布値 ($\bar{p}_v = H - u$) を採用した。これらの結果を図16に示す。この図から、 $K = \bar{p}_h / \bar{p}_v$ の測定値は0.37~0.68に分布しており、平均的にみれば $K = 0.5$ の値となることが分る。したがって、この装置内の相対密度約90%の地盤に設置した構造物の鉛直面に作用する水平方向有効応力は、鉛直方向有効応力の約0.5倍で評価してよいものと言える。

§ 4 結 論

本研究を通して得られた結論を要約すれば、以下のとおりである。

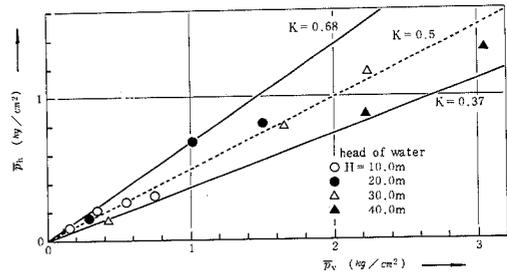


Fig. 16 Relationship between vertical and horizontal effective stress

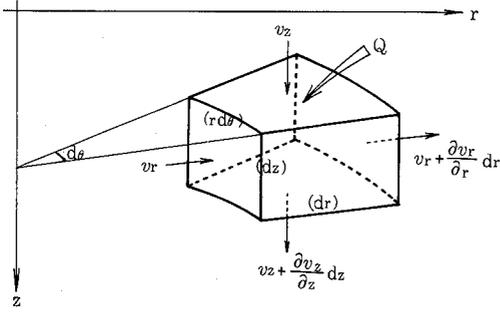
- 1) テフロンシートとシリコングリスの互層膜を実験タンク内壁と地盤間に設置すれば、その間の摩擦を十分に低減することができ、作用させた浸透圧はほとんど損失することなく有効応力として地盤に伝達することが確認できた。
- 2) 地盤よりはるかに大きな剛性を有する土圧計で地盤内応力を測定する際の応力集中の問題について、F. E. M. 解析により検討を加えることができた。
- 3) 地盤内の水平と鉛直の有効応力比 K は、ほぼ0.5前後の値となることが認められた。

謝 辞

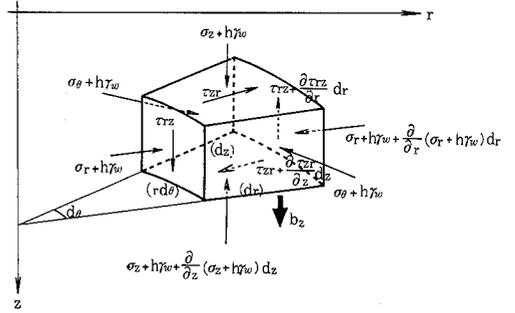
本実験装置は東京工業大学岸田研究室より移管されたものであり、快く移管を承諾下さった工博・岸田英明教授に感謝の意を表します。また本実験を実施するにあたり、文部技官・原田誠一氏に多大のご協力を頂いたことを感謝致します。

参 考 文 献

- 1) M. Mikasa et al.; "Centrifugal Model Test of a Rockfill Dam", Proc. 7th ICSMFE, Vol. 2, pp. 325~333, (1969)
- 2) P. J. Avgherinos et al.; "Drawdown Failures of Centrifuged Models", Proc. 7th ICSMFE, Vol. 2, pp. 497~505, (1969)
- 3) H. Yamaguchi et al.; "On the Influence of Progressive Failure on the Bearing Capacity of Shallow Foundations in Dense Sand", Soils & Foundations, Vol. 16, No. 4, pp. 11~22, (1976)
- 4) A. Zelikson; "Geotechnical Models Using The Hydraulic Gradient Similarity Method" Geotech 19, No. 4, pp. 495~508, (1969)
- 5) 帯刀清臣：浸透力を利用した杭の鉛直支持力実験，東京工業大学修士論文（1977）



Appended Fig. 1 Continuous condition



Appended Fig. 2 Equilibrium condition

- 6) 島崎和司：均一な砂地盤における単杭の鉛直支持力（浸透力を利用した模型実験），東京工業大学修士論文（1978）
- 7) 山肩邦男，他：鋼管で側方拘束された砂地盤における標準貫入試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 899~900, (1985)
- 8) P. Walker and Thomas Whitaker; "An Apparatus for Forming Uniform Beds of Sand for Model Foundation Tests", Geotech., Vol. 17, No. 2, pp. 161~167, (1967)
- 9) 土岐祥介，三浦清一：室内実験に用いる砂供試体の作製法について，第24回土質工学シンポジウム，pp. 173~180, (1979)

[Appendix]

1) 浸透流解析の概要

付図1に示すように，飽和状態における非圧縮定常流問題として，軸対称場における微小要素について考える。単位時間あたりの流入量と流出量を等しく置き，高次の微小項を無視すると共に，Darcy 則を仮定すると(付1)式のような支配微分方程式を得る。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot k_r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \cdot k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + r \cdot Q = 0 \quad (\text{付1})$$

ここに， r, z は付図1に示す軸対称場における座標であり， k_r, k_z はそれぞれ r, z 方向の透水係数， h は r, z の関数で表される水頭ポテンシャル， Q は単位体積中の単位時間あたりの湧水量である。

境界条件として，ある境界 S 面上での流速 \bar{v} が与えられる場合，境界条件式は(付2)式のようになる (l_r, l_z

はそれぞれ S 面上の法線の r, z 軸に対する方向余弦)。

$$k_r \frac{\partial h}{\partial r} l_r + k_z \frac{\partial h}{\partial z} l_z + \bar{v} = 0 \quad (\text{on } S) \quad (\text{付2})$$

ここで，(付3)式のような汎関数 Π を定義する。

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} \int_V \left\{ r k_r \left(\frac{\partial h}{\partial r} \right)^2 + r k_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - 2r Q h \right\} dV \\ & + \int_S (r \bar{v} h) dS \end{aligned} \quad (\text{付3})$$

変分原理より，この(付3)式を最小化すること (h に関する変分 $\delta \Pi = 0$ において停留値が存在すること)は，(付1)，(付2)の両式を満足させることと等価である。

2) 有効応力解析の概要

上述の浸透流解析によって水頭分布が決定できるので，動水勾配分布が自動的に求められる。この動水勾配によって生じる浸透力による物体力を重力による物体力に付加して，それを全物体力 (単位体積重量) とし，軸対称問題における弾性有効応力解析を行う。

付図2は浸透力を考慮した微小要素の釣合いを示したもので， r 方向および z 方向の釣合い条件式は，それぞれ(付4)，(付5)式となる。

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial h}{\partial r} \cdot \gamma_w = 0 \quad (\text{付4})$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} - b_z + \frac{\partial h}{\partial z} \cdot \gamma_w = 0 \quad (\text{付5})$$

ここに， b_z は重力による物体力， γ_w は水の単位体積重量であり， $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$ ，ならびに τ_{rz} は軸対称場における有効応力成分である。

上記の式中の $\frac{\partial h}{\partial r} \cdot \gamma_w$ および $-b_z + \frac{\partial h}{\partial z} \cdot \gamma_w$ が，それぞれ r 方向ならびに z 方向の全物体力を表している。