

## 講 演

## 土 壤 の 剪 断 抵 抗 力 の 測 定

(昭和五年十一月一日應川力學聯合大會に於て)

會 員 工 學 博 士 山 口 昇

On the Shearing Resistance of Soils

By Noboru Yamaguti, Dr. Eng., Member.

## 内 容 梗 概

土壤の剪断抵抗が其の崩壊の安定を支配すると云ふ考から、土壤の剪断に對する抵抗力を測定する自記式試験管を考案し、若干の土壤に就て行つた實驗の模様を述べしもので、併せて該試験器に依る土壤の理論を興へしものである。

## 目 次

第一章	緒 言	1
第二章	著者の實驗装置	2
第三章	角型二面剪断器の理論	4
第一節	砂の場合	4
第二節	粘土の場合	6
第三節	砂交り粘土の場合	7
第四章	實測の結果	7

## 第 一 章 緒 言

クローン以來土壓論は幾多の新説を出したにも係らず、土壤の崩壊に對する安定が其の剪断抵抗力に依つて保たれてゐるといふ考には變りがない。之れは土壤の剪断抵抗力の實測が如何に土壤力學上必要であるかを裏書きしてゐる。従つて從來此の實測を行つた人も少くないし、又之れに對して色々の測定器が考案せられてゐる。然し乍ら其の結果が工學上信頼し得べきやに就ては常に疑問が伴つてゐる。今其の主なる疑點を列記して見れば、以下の如くであらう。

(1) 從來行つた實驗の規模が餘り小であつて、其の結果は相當に不均一なる土壤に就ての平均値を果して出してゐるであらうか。

(2) 土壤の崩壊する時と同一機構の剪断作用を起すやうに測定器が考案されてゐるであらうか。

(3) 測定器の力及び變位の記録が果して信頼し得るであらうか。

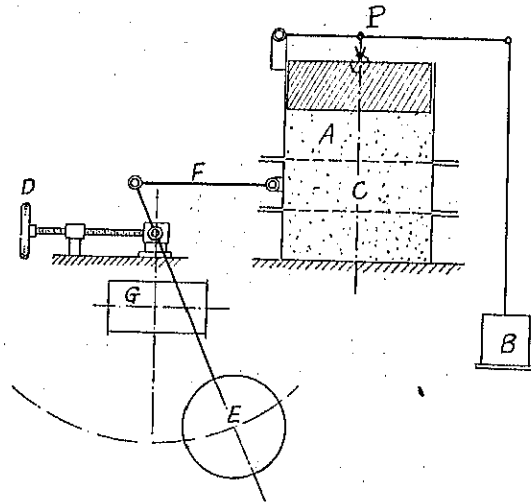
(4) 測定されたる結果が十分に一般的に各種の土壤に轉用せられる如くに整理せられてゐるであらうか。

著者は之れ等の疑點を可及的に除く爲に以下に述ぶるが如き装置を作つて實驗をした。尙ほ此の實驗は此の後引き續いて各種の土壤に就て行つて行く積りであるので、大方の御批判並に御指示を得たならば、此の後の實驗に大變幸なことと思ふ。

## 第二章 著者の實驗装置

著者の作つた實驗装置は第一圖の如きものであつて、A は胴體を三つ割にした正方形断面を有する箱で、此の中に土壤を天然の儘の状態で切り取つて來て靜かに充たす。之れをピストンによりBの重量を以て上方から色々の壓力で壓へる事を得るやうにしてある。Aの三つ割箱の中央部CはハンドルDを廻す事によつて振子Eを押し上げ、レバーFによつて横に押し出し、又は引き出す事が出来る。尙ほCの移動はドラムGの廻轉に依つて自記せられる。此のGに振子Eの振れをも併せて自記せしむるときは、之れによつてC部の移動を横軸に、剪断力を縦軸にとつた剪断力移動曲線 (shearing resistance-displacement diagram) が自記出来るわけである。

第一圖



從來此の種の實驗の缺點と考へられた (1) に對する爲、著者は相當大きな試驗器を作つた。其の性能は次の如くである。

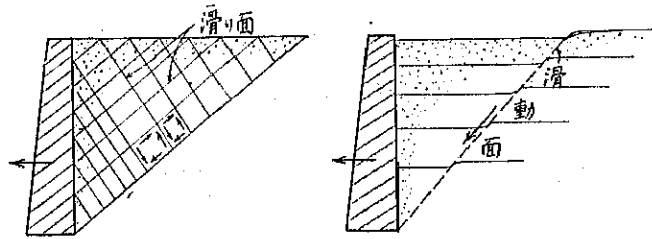
剪断面積	$20.3 \times 20.3 = 412 \text{ cm}^2$
上下壓 (最大)	330 kg.
剪断力 (最大)	300 "

力の感度はスケール 1mm の読み 6.25 kg になつてゐる。最大上下壓 330 kg は毎平方糎 802 gr に當り、通常の土壤で云ふならば凡そ 4~5m の深さの壓力に匹敵する。

此の剪断器を用ひて試みに砂を切つて見ると、上からの壓力を加へなければ上層に渦を生

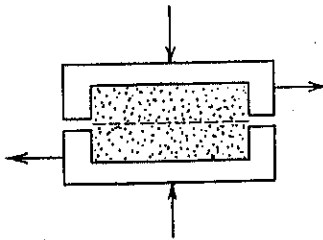
するが、上方から壓力を加へれば此の渦は消失して見事に二平面で切れる(寫眞第一参照)。従來擁壁の倒壊の際に起る土壤の破壊は壁後の楔型の土壤に無數の交錯した滑り面を生じて崩壊を起すものと想像されてゐた。其の爲に此の種の剪断器で起す剪断作用と土壤の崩壊の場合とは異つてゐる如くに考へられてゐたが、Forchheimer (Neues Jahrbuch für Mineralogie 1893) 及び寺田教授(地震研究所彙報第四號)に依れば、楔型土塊は寧ろ一塊として滑動すると見る可きである事が知れた。吾々の測定器の剪断作用と一致してゐることが解る(第二圖参照)。

第 二 圖



従來土壤に上下壓を加へつゝ、横に引き切る實驗は多くの人々に依つて行はれた。例へば

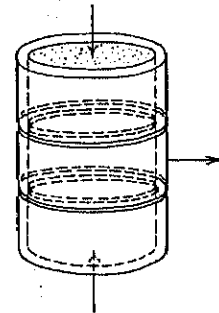
第 三 圖



第三圖の如く一面にて剪断するもの (Jaquinot and Frontard, Müller-Breslau の實驗等), 第四圖の如く圓筒三つ割箱による二面剪断 (A. L. Bell) 等があるが、之れ等の實驗法は剪断の機構が力學的に説明がついてゐなかつた爲に一般に不安の念を與へてゐて、斯くの如き要旨の測定器は眞の剪断抵抗を與へないと云はれてゐた。然し乍ら之れに代はるべき方法と

して今まで考案せられた諸方法、例へば米國土木學會基礎委員會の圓板を以て壓しつゝ、振るもの、Nils Westerberg の砂を容器より流出せしむる法、又は自然放置による息角の測定等の方法も、上記の方法に比して決して優越してゐるものとは云へない。著者の角型二面剪断法に就ては次の如く力學的に説明する事が出来る。此の説明は勿論近似的のものであるが、之れに依つて此の方法が剪断面の大きさの變化を無視し得る程度であるならば、剪断の速度を十分に小にすれば相等信頼し得べきものであると思ふ。

第 四 圖



### 第三章 角型二面剪断器の理論

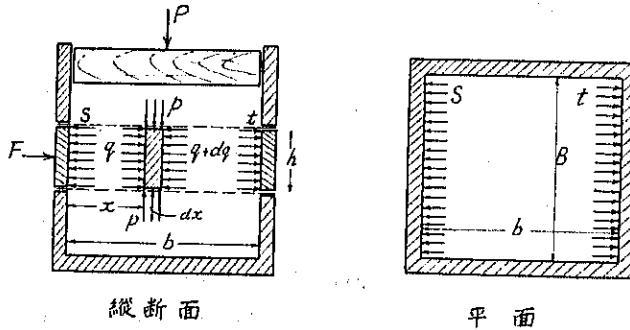
#### 第一節 砂の場合

角型剪断器に砂を入れ、剪断する場合下の事を假定する。

1. 砂自身の重量の差による二面の上下壓の違いを無視し得るものとす。
2. 剪断面上下の砂は全く移動せず、剪断部の砂も全く變形なく剪断さるゝものとす。
3. 剪断の進行による剪断面の大小の違いは全断面に比して無視し得るものとす。
4. 剪断は極めて徐々に起るものとす。

然るときは第五圖に於て要素部分  $Bh dx$  に働く横壓力強度を  $q$  及び  $q+dq$  とし、上下壓力強度を  $p$  とすれば、釣合の條件として

第五圖



$$Bh(q - q + dq) = 2 \tan \theta p B dx \dots \dots \dots (1)$$

但し  $\theta$ : 摩擦角

此の式の  $p$  と  $q$  とは假に主應力と等しいと近似的に假定すれば、 $p$  と  $q$  との間には第六圖に示すが如き関係がある。即ち張應力を横軸に、剪應力を縦軸にとつて、モールの圓を描き應力を示し、滑動を起す限界値を  $OA$  直線で示せば、 $OA$  が横軸となす角は即ち  $\theta$  であり、従つて

$$\frac{q-p}{q+p} = \sin \theta$$

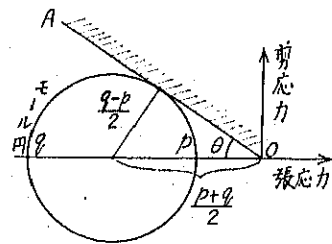
又は

$$p = \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} q \dots \dots \dots (2)$$

之れを (1) 式に代入して積分すれば、

$$\log q = 2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{x}{h} + C$$

第六圖



$x=0$  で  $q=s$  とすれば,

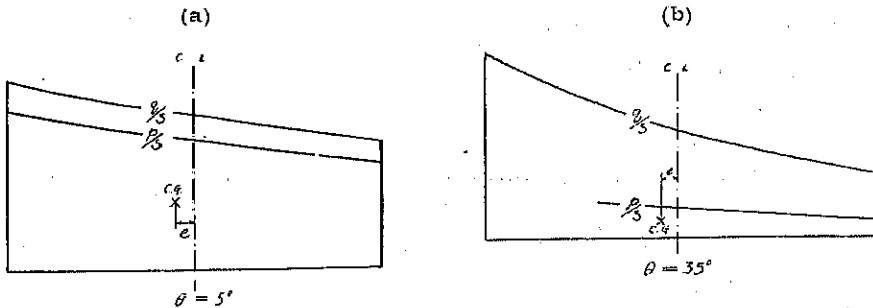
$$q = s e^{-2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{x}{h}} \dots \dots \dots (3)$$

又

$$p = \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} s e^{-2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{x}{h}} \dots \dots \dots (4)$$

$p, q$  何れも對數曲線をなし、其の模様は第七圖の如し。

第七圖



$x=h$  に於ける  $q$  の値即ち  $t$  は

$$t = s e^{-2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{h}{h}} \dots \dots \dots (5)$$

上下壓  $p$  の總和は  $P$  たる可きにより,

$$P = B \int_0^h p \, dx = \frac{s h B}{2 \tan \theta} \left\{ 1 - e^{-2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{h}{h}} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

故に面積  $A=Bb$  で割り、平均上下壓強度を出せば、

$$n = \frac{P}{A} = \frac{s h}{2 b} \frac{1}{\tan \theta} \left\{ 1 - e^{-2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{h}{h}} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

剪断力は

$$F = (s - t) B h$$

$$\therefore F = s B h \left( 1 - e^{-2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{h}{h}} \right) \dots \dots \dots (8)$$

故に断面の2倍  $2A$  で割り、平均剪断應力を出せば、

$$f = \frac{F}{2A} = \frac{s h}{2b} \left( 1 - e^{-2 \tan \theta \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{h}{h}} \right) \dots \dots \dots (9)$$

$$\therefore \frac{f}{n} = \tan \theta \dots \dots \dots (10)$$

となる。此の場合上方より加へる壓力  $P$  はピストンの中央に働き、之れに抗する上向の  $P$  は第七圖の  $p/s$  曲線によつて包む面積の重心を通る可きにより、上下の  $P$  の間に下式の如き喰ひ違ひを生ず。

$$e = \frac{b}{2} \frac{\int_0^h p x dx}{\int_0^h p dx} \dots\dots\dots(11)$$

此の式中の  $p$  に (4) 式を代入して積分すれば、

$$e = b \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2 \tan \theta} \frac{1 - \sin \theta}{1 + \sin \theta} \frac{b}{h} + \frac{b}{s} \frac{1}{t-1} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

此の喰ひ違ひの爲にピストンが多少傾いて上下縁に於て箱の内面に觸れ、此の爲めに水平に  $Q$  なる壓力を生ずるものとすれば、 $Q$  は

$$Q = \frac{P e}{a} \dots\dots\dots(13)$$

但し  $a$  : ピストンの厚さ

従つてピストンと箱の内面との間の摩擦係数を  $\mu_0$  とすれば、土壤にかゝる眞の壓力  $P_0$  は

$$P_0 = P \pm 2\mu_0 Q = P \left( 1 \pm 2\mu_0 \frac{e}{a} \right) \dots\dots\dots(14)$$

第一圖に於て示す剪断器では

$$b = 20 \text{ cm}, \quad h = a = 7.5 \text{ cm}, \quad \mu_0 = 0.65 \text{ (木と鑄鐵)}$$

なる故

$$\theta = 5^\circ \text{ に對して} \quad e = 0.02b, \quad P_0 = P(1 \pm 0.0035)$$

$$\theta = 35^\circ \text{ に對して} \quad e = 0.087b, \quad P_0 = P(1 \pm 0.0105)$$

となり、喰ひ違ひによる  $P$  の誤差は  $\pm 0.0035 \sim \pm 0.0105$  内外であり、實際上  $\theta$  及び  $Q$  の決定には大なる影響を與へない。

### 第二節 粘土の場合

粘土の場合には  $\theta = 0$  で、 $p$  は剪断力には無關係となる。剪断面の粘着力 (cohesion) を  $c$  とすれば、釣合の條件は

$$\begin{aligned} -h \, dq &= 2c \, dx \\ \therefore q &= \frac{2c}{h}(b-x) \dots\dots\dots(15) \end{aligned}$$

となり、直線型に變化し

$$\delta = \frac{2c}{h} b \dots\dots\dots(16)$$

$$t = 0 \dots\dots\dots(17)$$

剪断力は

$$\begin{aligned} F &= (s-t)h \, B = 2c \, A \\ \therefore f &= \frac{F}{2A} = c \dots\dots\dots(18) \end{aligned}$$

### 第 三 節 砂 交 り 粘 土 の 場 合

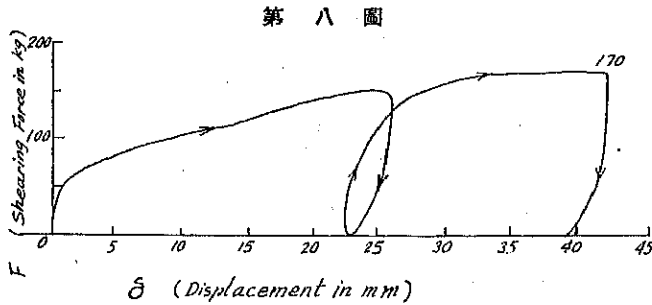
此の場合には

$$f = \tan \theta n + c \dots \dots \dots (19)$$

となる。之れクーロンが其の土壓論の立脚點として假定したる式と同一のものである。

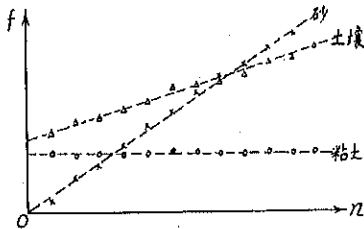
## 第 四 章 實 測 の 結 果

如上の剪断器を以てセメント用標準砂粘土及び通常の土壤に就て實驗を行ひ、剪断抵抗力變位曲線を自記せしめると**第八圖**の如きものが得られる。即ち初めの5mm位



は充分に剪断抵抗力が現れない、途中でサイクルを描くと見事に弾性ヒステリシスが描ける。斯くの如き曲線を上下壓  $P$  を色々變へて描かせ、略々 stationary の  $F$  の値をとつて、之れより  $f$  を計算し、之れと  $P/A$ 、即ち  $n$  とを兩軸として剪断應力上下壓強度曲線を描けば**第九圖**の如きものが得られる。之れ等はよく第三章の理論(10)式(18)及び(19)式と一致してゐる事が解る。尙ほ土壓論に應用する爲には天然の儘の土壤の剪断抵抗力を知ることが肝要であり、天然の儘の土壤を採取し、之れを運搬するのに**寫眞第二**の如きものを用ひてゐる。此の採取器及び運搬器の内法の大きさは凡て剪断器の内法の大きさと同一のものにしてあり、其の儘剪断にかけられるやうにしてある。尙ほ運搬器は内面にパラフィンを塗り、ゴムの

第 九 圖



パッキングをして充分に water-tight にしてある。

土壤の剪断抵抗を支配すると考へらるゝ要素は多々あれども、主なるものは砂と粘土との比並に含水量である。従つて従來行つた軟弱地盤の天然土壤に就て、此の三つを軸とした三角標で表はして見ると次表及び**第十圖**の如くなる。

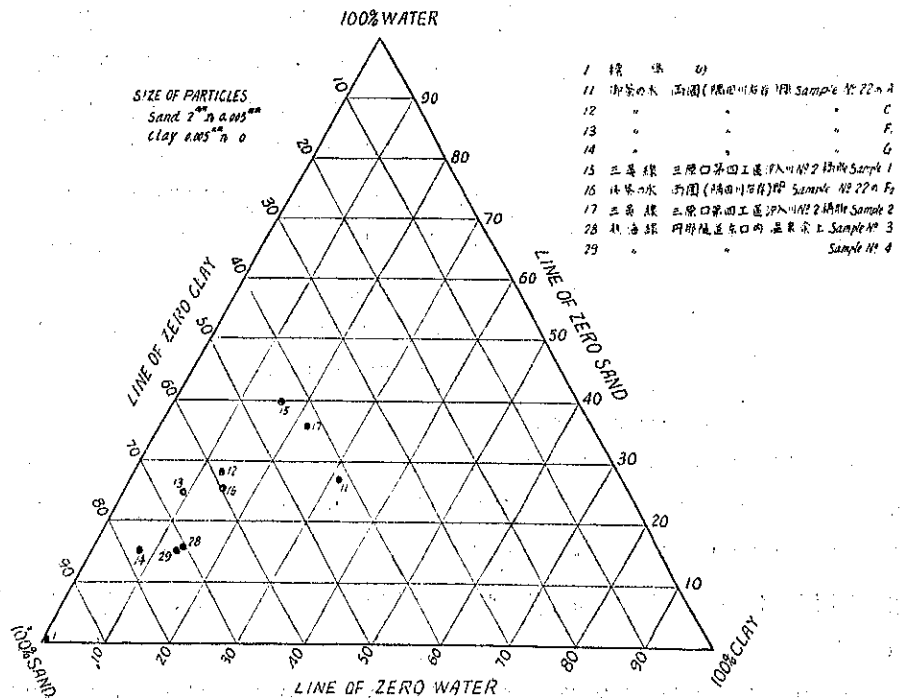
尙ほ摩擦係數  $\tan \theta$  及び粘着力  $c$  の値を此の三角標上にプロットすれば、**寫眞第三**及び**寫眞第四**の如し。

$\tan \theta$  は之れに依つて見れば、 $S$ (砂)100%の時最高で、 $C$ (粘土)及び  $W$ (水分)100%の方向に

土壤の剪断抵抗力表

番號	試験材採取場所	C (%)	S (%)	W (%)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\theta$ (in deg)
1	標準砂	—	100	—	0	21° 44'
11	御茶ノ水・兩國(隅田川右岸) Sample No. 22 の A	31.0	41.5	27.5	0.127	6 30
12	Sample No. 22 の C	12.6	59.1	28.3	0.169	5 20
13	Sample No. 22 の F <sub>1</sub>	9.8	65.5	24.7	0.127	6 30
14	Sample No. 26 の G	8.0	76.9	15.1	0.093	8 24
15	三呉線三原口第四工區沙入川 No. 2 橋脚根掘, Sample No. 1	15.7	45.0	39.3	0.152	3 36
16	御茶ノ水・兩國(隅田川右岸) Sample No. 22 の F <sub>2</sub>	14.8	59.8	25.4	0.190	7 30
17	三呉線三原口第四工區沙入川 No. 2 橋脚根掘, Sample No. 2	22.5	42.5	35.0	0.152	3 36
28	熱海線 丹那隧道東口温泉余 土 Sample No. 3	14.5	70.2	15.3	0.110	6 54
29	Sample No. 4	13.9	70.4	15.7	0.093	7 42

第十圖





傾ける一平面に近い面をなし、粘着力  $c$  は  $S : C : W$  の適當なる比の處に最高點を有する丘狀曲面をなすことが略々想像出来る。

此處に砂 ( $S$ ) 及び粘土 ( $C$ ) と云ふのは通常の器械分析法に依つたもので、土壤を水に溶して 11 cm の深さの水中に 8 分間静置し、底部より 3 cm 以上に浮遊してゐる部分を粘土とし、3 cm 以下に沈澱してゐる部分を砂としたのであつて、境界の粒徑は凡そ 0.005~0.002 mm 位と見ればよい。粘土は膠質 (colloidal) になつてゐるが、砂はなつてゐないので、上の區別法が使はれてゐる。膠質のものは剪断力に粘着力を與へ、砂は摩擦力を與へるものと考へたのである。

尙ほ此の外土壤の剪断力に直接關係あると想像せられるのは、土壤の粒子間の間隙の大きさ及び形狀であるが、之れは透水性とも直接關係ある故、上記の三角標の  $W$  の大小によつて多少加味せられるし、又見かけの比重と眞比重とを測れば、夫れから間隙の大きさは出るわけであるが、眞比重は通常の土壤粒子では 2.7 附近で大差ない故、見かけの比重を測れば夫れが直ちに間隙量の指針になつてゐる。

斯くの如くにして、天然の土壤を澤山に實驗して見て三角標上に完全に曲面が出来れば、最早一々實測せぬでも  $S : C : W$  の比及び見かけの比重位の測定に依り可成りに信頼し得べき摩擦角  $\theta$  及び粘着力  $c$  を得べく、斯くして土壓論的の基本的條件が整備する事になると思ふ。

本講演後次の質疑應答ありたり。

- 機械學會々員 中原君 (問) 同じ状態で押へつけば、max. shear stress に達すれば curve が一致すると思ふが、夫れに達する迄には curve が高いのも低いのも在ると思ふが如何か。
- 山口昇君 (答) 色々な速度で色々なものを引張つた。此の displacement は max. 5 cm で、之れを 1 分以上で引けば curve は重なつて來た。
- 中原君 (問) clay で compression test をやつて見たが、最後の壞れる處に達すると一定になるが、夫れに達する迄の curve が色々な異つた。
- 山口昇君 (答) 土壓では最後の割れる處が問題で、途中は何うでも良いが、夫れが大變面白い。
- 土木學會々員 松尾君 (問) curve が大變都合よくうまく出てゐるが、實際は傾いてゐる所が何處迄も続くのではないか。
- 山口昇君 (答) 實物を持つて來なかつたからいかぬが、今迄は奇麗に出來てゐる。
- 松尾君 (問) normal pressure が小なれば奇麗に出來て來ない。normal pressure を

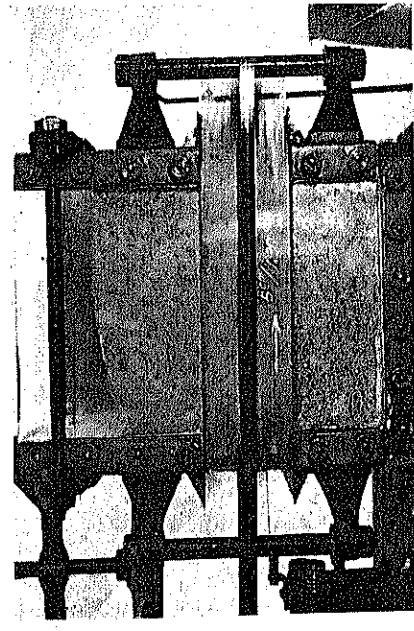
大きくしたから、左様にうまく出来たのか伺ひ度い。

- 山口昇君（答）今逆やつたのでは大抵うまく出来た。normal pressure が小さいと上の渦が消えないから、或る程度まで normal pressure を大にしなくてはならぬ。
- 建築學會々員 野村君（問）試験設備に就てお伺ひ致し度い。真中のが動くと加壓面が下へ下がると両側の重相ととの間の friction が在る爲に下に傳はらず、他に傳はり、normal pressure が實際よりは小さくはなりはしないかと考へるが如何ですか。
- 山口昇君（答）friction は negligible と assume したが、其の assumption が何の程度まで違ふか解らない。成可く少なくする爲に friction の面を小さくした。

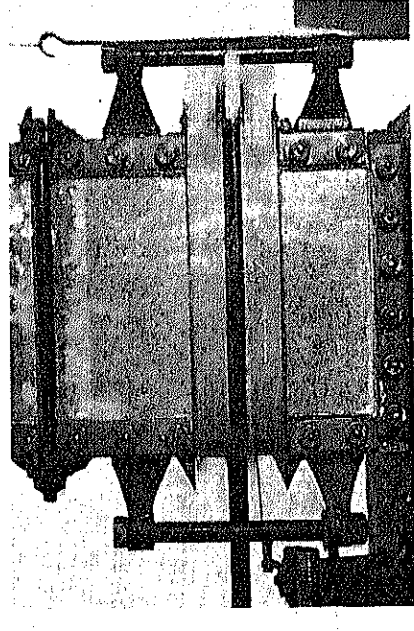
(以上)

寫真第一

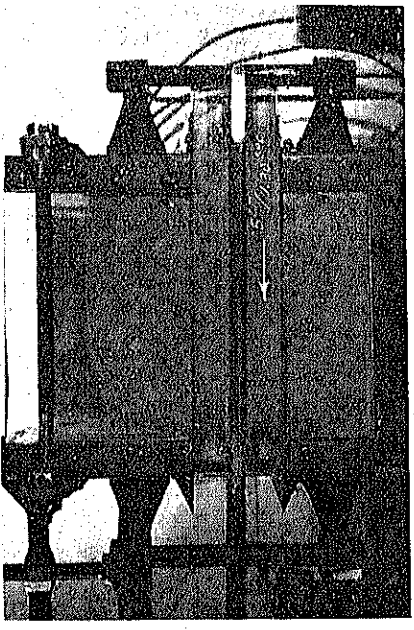
(1)



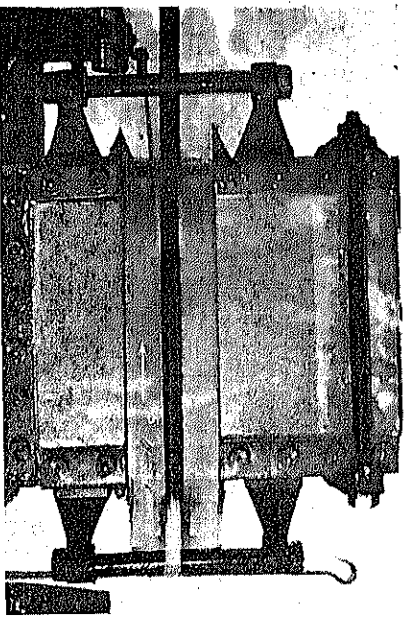
(3)



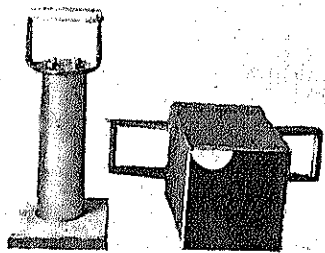
(2)



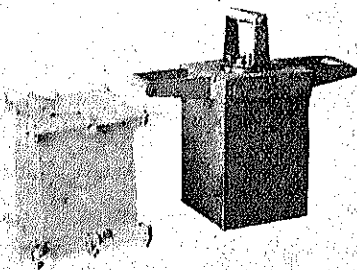
(4)



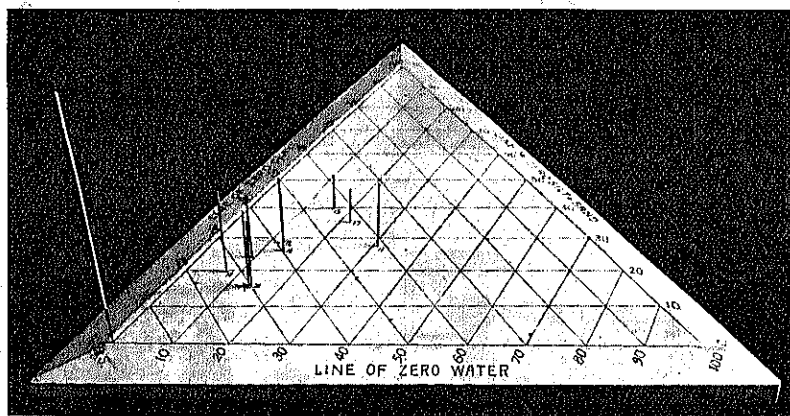
寫真第二(其一)



寫真第二(其二)



寫真第三



寫真第四

