

砂の運動機構に就て (I)

正會員 工學博士 最上 武雄*

内容梗概 今迄乾燥砂の運動に就て研究して來たが、今回は濕つた砂に就ても、其の運動を調べた。其結果乾燥砂の場合と本質的には其程の差異無きを知つた。尙今回の報告では、定常運動のみならず不定常運動に對しても其考察の第一歩を踏み出した。

目 次

第1章 總 說	(i) 實驗材料 (ii) 實驗結果
第2章 今年度に於て實施せる剪斷試験	第3節 じり現象に就て
第1節 實驗方法	第3章 不定常運動
第2節 實驗結果	第1節 總 說
第1項 乾燥相馬標準砂	第2節 剪斷試験より見たる不定常運動
第2項 乾燥久味浦標準砂	第1項 砂の不定常運動の特徴
第3項 乾燥川砂	第2項 モデル的考察
第4項 含水せる相馬標準砂	第3項 不定常運動の分類及び其考察
第5項 相馬標準砂と久味浦標準砂と を混合せるもの	第4項 “一種のじり運動” に就て
	第4章 在來の砂の剪斷試験に就て

第1章 總 說

乾燥砂の運動機構に就て、今迄種々考察をして來たが、乾燥砂の定常運動に對しては、實驗的並びに理論的研究が一段落になつた。尤も、理論的考察に於ては、未だ充分に盡されぬ所のあるのは残念であるが、此點に關しては將來に譲る他ない。是迄の報告に於ては、一樣な粒よりなる乾燥砂を研究の對象として來たが、本報告に於て述べる如く、粒の揃つてゐない砂、及び濕つた砂に於ても、定常運動の際の力學的性質は、乾燥した一樣な粒よりなる砂の場合と、大體に於て、同様である事が分つた。猶ほ理論的研究の場合の運動方程式（未知量が、速度成分と平均壓力であるもの）には粒の一樣性と云ふ條件が入つて居ないのだから、一樣な粒から出來てゐない場合に對しても、基礎方程式が使へると考へられるのである。古典的土壓論に於て要求されてゐる法則は、定常運動をなす砂に於て充分満足されてゐる如きものであり、土壓論に於て今後問題となるものは、砂の不定常運動なのである。是迄、多くの人達に依つて、古典的土壓論的に研究されて來た諸現象も、實は不定常運動に關する充分の研究を経なければ説明出來ないものを、無理に古典的土壓論に依つて解釋しやうとされて來たものが可成りに多いのである。

本報告に於ては、先づ、粒の一樣な砂、粒の一樣でない砂、混つた砂に關する剪斷試験結果を示し、今迄の理論的考察が、此等の砂に對して適用し得る事を明らかにし、次いで、砂の不定常運動に對して行つた研究を示し度いと思ふ。

第2章 今年度に於て實施せる剪斷試験⁽¹⁾

前年度に於ては、相馬標準砂と海岸砂に就て剪斷試験を行つたが、今年度に於ては、相馬標準砂、久味浦標準

* 東京帝國大學助教授

1) 今年度の實驗に於ても學生諸君の御助力を仰いだ。

砂、多摩川砂、相馬標準砂と久味浦標準砂とを混合せるもの、含水相馬標準砂等に就て剪断試験を行つた。其れは今迄の考察を確かめる爲めと、粒の様でないもの、含水せるもの等の性質を調べる爲めの兩目的からであつた。

第 1 節 實驗方法

實驗は總べて、小型剪断試験機(断面 7 cm×7 cm)により、著者の新剪断試験法により實施した。

砂を填めるには匙で少しづつ剪断箱に洗し込み、各層毎に 25 回づつ、直径 1.5 mm の突棒で突いた。但し、久味浦標準砂の場合は 25 回では極めて粗填めになるので、各層毎 100 回突く事にした。含水相馬標準砂の場合には、後に述べる如く適當に水を含ませ混合せるものを、匙で三杯入れて平らに均らし、直径 1.5 mm の硝子棒で、各層 50 回づつ一様に突き、再び平らに均した後、剪断箱の上蓋で二三回軽く押しつけ更に上に填め、上層 3 cm になる迄繰返へした。

載荷方法は、毎分の移動量が一定になる様にし、1 分毎に載荷を中止して、移動量、剪断力、浮上量、浮上力等を測定した。但し、久味浦標準砂及び含水相馬標準砂の場合には、載荷速度が大きい時、滑りの現象があつたので、此の場合には、滑りの止まつた所で各々の量を測定した。

剪断速度は、0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm/分 とした。前と同様に、試験前に豫かじめ、鉛直に 9.82 kg の力を上蓋に掛けて置き、それから出發した。

使用した多摩川砂は、稻田登戸附近から採集したもので、試料 200 gr の篩分析に依る結果は、

網 篩	8 番に残留するもの	15.60 %
" "	8 番を通過し 16 番に残留するもの	30.15 %
" "	16 番 " " 30 番 " "	28.05 %
" "	30 番 " " 50 番 " "	16.70 %
" "	50 番を通過するもの	9.10 %

であつた。

含水相馬標準砂に就ての剪断試験の場合の含水比は、0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 20.0, 25.0 % の 12 種とした。水を含ませるには、容器に砂を規定量だけとり、此れに夫々の含水比に對應する量の水を注射器に依り注入し、一樣になる迄、匙で手早く混合した。含水比が大になると、實驗中に漏水するので、剪断箱の外側にグリースを塗つた。含水比 25 % のものは、水が非常に多い状態にあるので、上蓋と剪断箱の側壁との間にグリースを塗つた。相馬標準砂と久味浦標準砂との混合せるものゝ剪断試験に於ける混合比は、重量で 5:100, 10:100, 20:100, 40:100, 60:100, 80:100, 100:100, 60:40, 80:20, 90:10, 100:8, 100:6 等であつた。

第 2 節 實驗結果

第 1 項 乾燥相馬標準砂

去年行つた實驗の場合に比して、今年の實驗に於ては、稍や密填め状態に對して實驗した事になる。傾向的に見て先年の實驗結果と同様であるが、特に今回の實驗に於ては、剪断速度の影響を調べ、之れを明らかにした。最大剪断力の大きさは、實驗に於ける範囲内に於ては、剪断速度に依り殆ど變らず、速度が大きい時でも小さい時でも、剪断力が最高値に達してから、剪断力-移動量曲線は大體に於て一致してゐる。最大浮上力は、剪断速度に依つていくらか變り、これは剪断速度大なる程僅かではあるが、下がる傾向がある。浮上量は速度極めて大なる時、可成りに大きくなるが、0.2~1 mm/分の範囲では、略ぼ一定である。浮上力/剪断力も此範囲内では、剪断速度の影響殆どなしと言つて良い。 $\alpha = (\text{移動量}/\text{平均浮上量})$ の最小値は移動量 3~4 mm の處で生じ、其値には多少の差

圖-1.

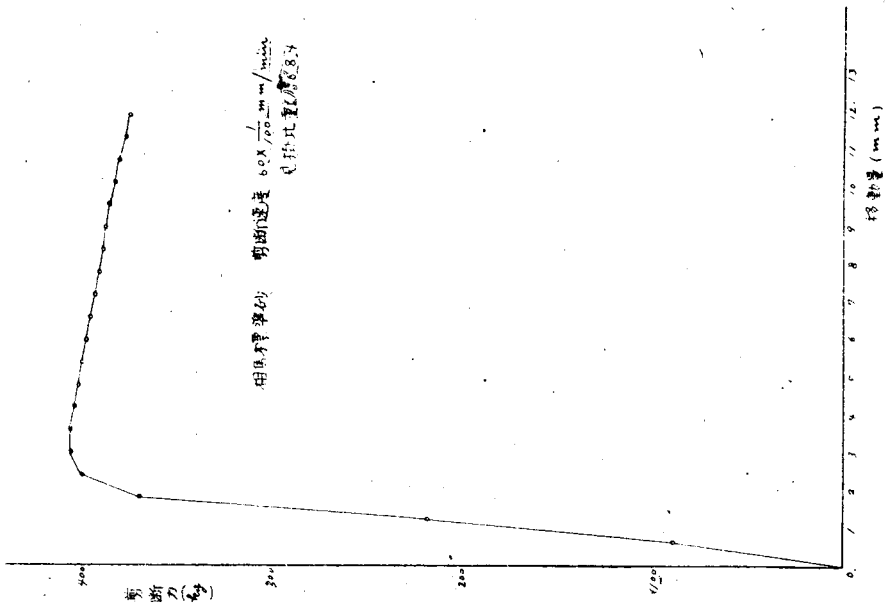


圖-2.

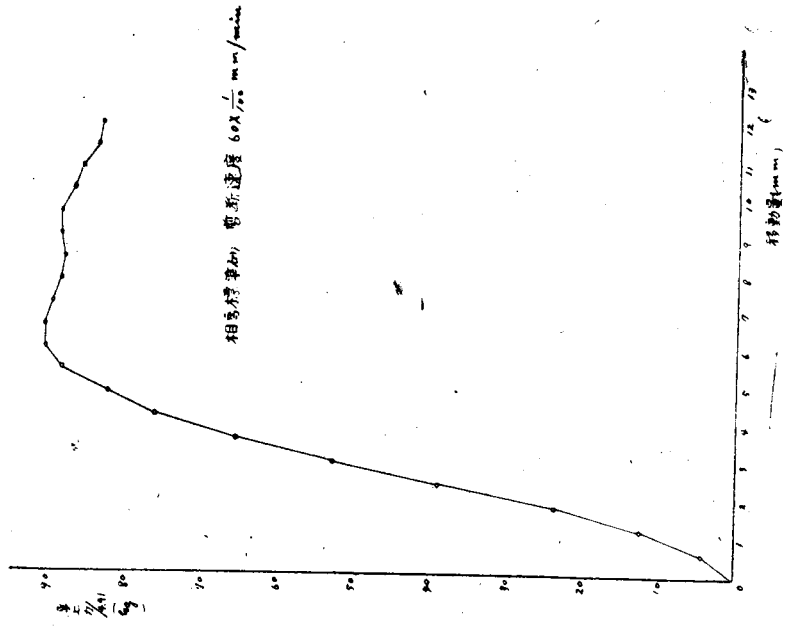


圖-3.

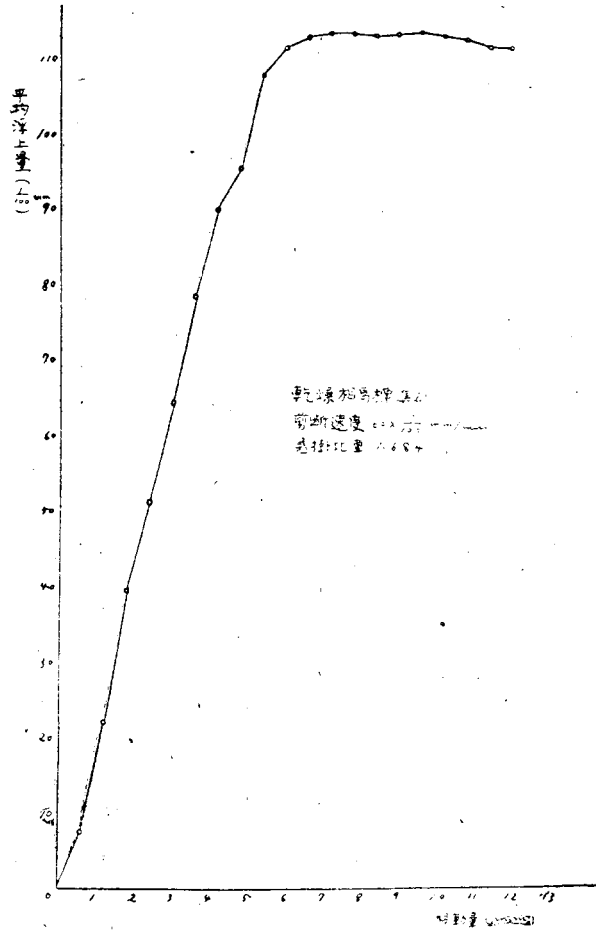


圖-4.

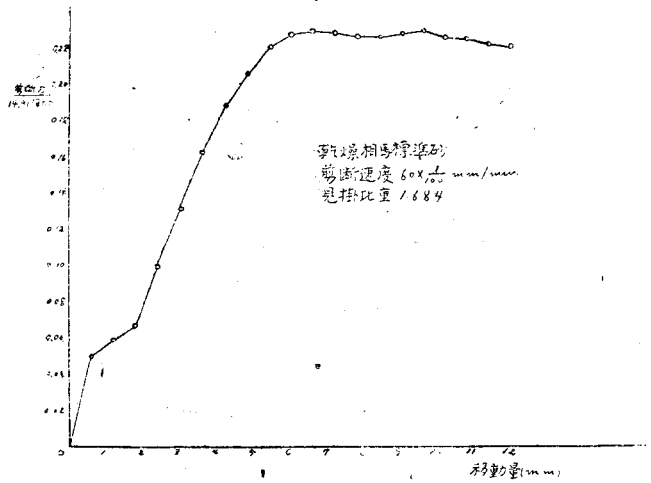


圖-5.

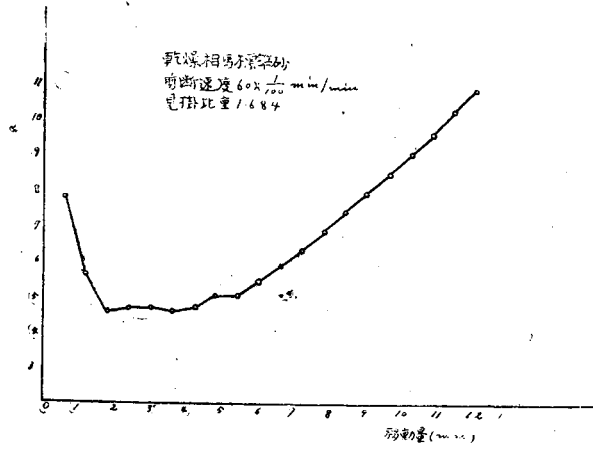


圖-6.

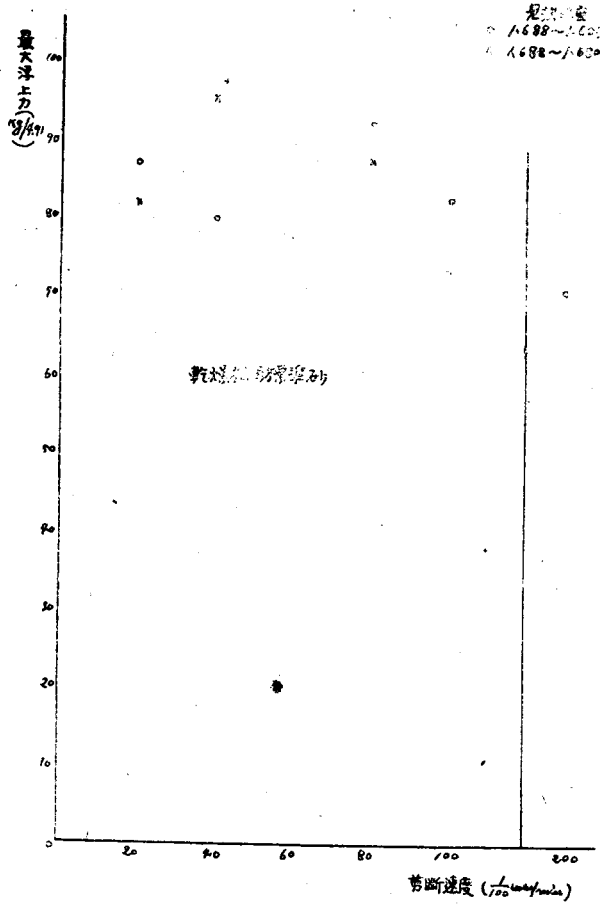


圖-8. 剪断力—移動量の比較 (1)

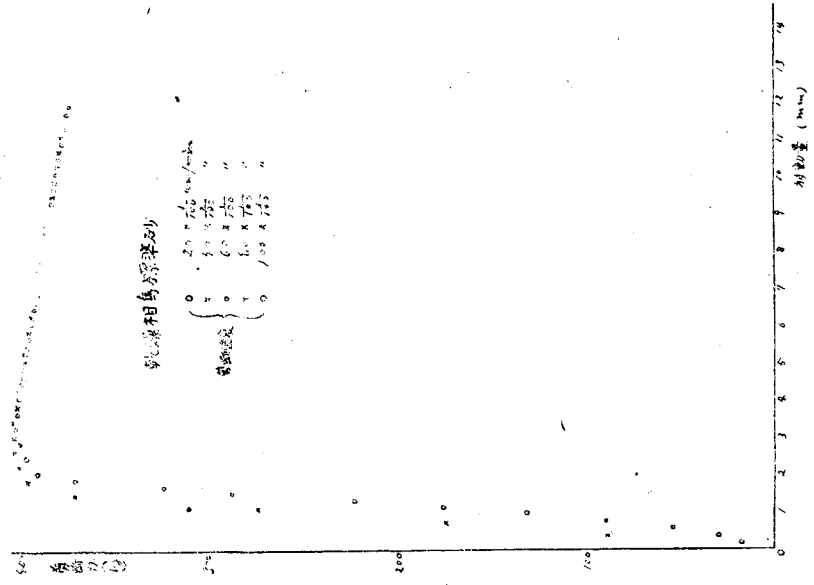


圖-7.

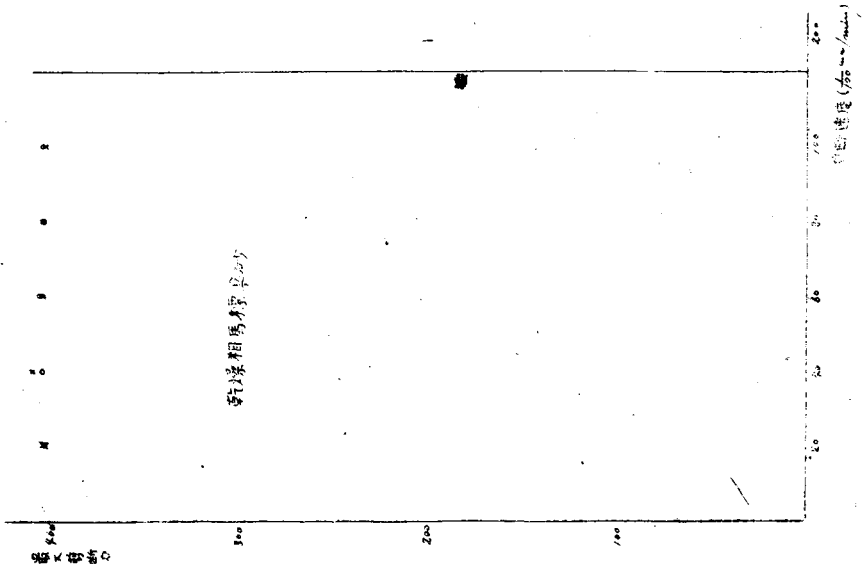
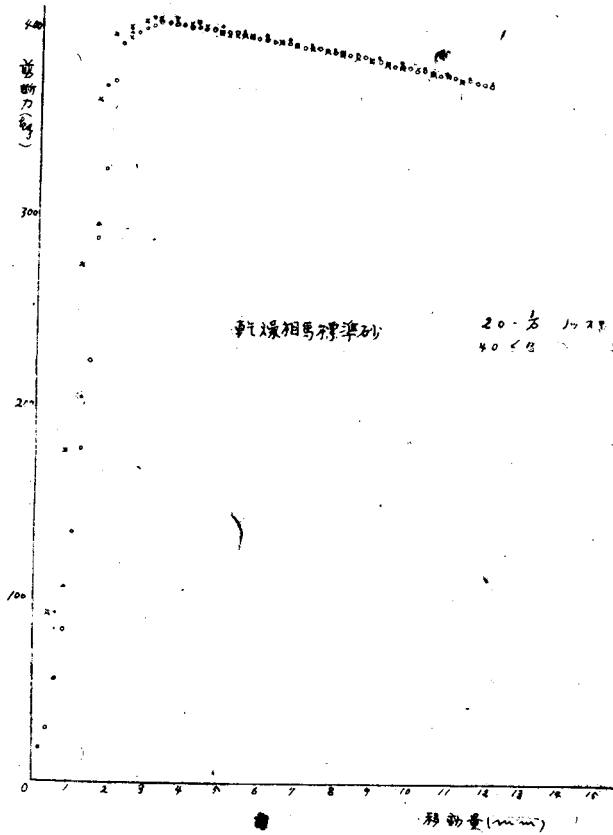


圖-9.



あるも、0.2~1.0 mm/分の剪断速度の範囲では殆ど一致し、移動量が 6 mm 即ち、浮上力略ぼ一定となつた後の α -移動量曲線は殆ど一致して居る。 $q = \{(1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)\} p$ の関係から求めた内部摩擦角 ϕ の値も、剪断速度に依る規則的變化を示してゐない (圖-1~9)。

第 2 項 久味浦標準砂

浮上力、浮上量が相馬標準砂の場合に比して著しく小さいのが特徴である。初期の間には、浮上量が負となる事が多い。其等の點を除けば、定性的には相馬標準砂の場合と同一傾向を示す。浮上力、剪断力が最大値に達する順序は、相馬標準砂の場合と逆で、浮上力の方が先きに最大値をとる。又、試験中亡りの現象が現はれ、移動量が急激に増大する事があつた。しかし此現象の生じた後の諸量は、此現象がなかつた場合にたどつたであらう経過をたどるものと如くであつた。

久味浦標準砂の場合には、見掛比重は、1.45~1.56 位の範囲であるから、間隙率は可成り大きい。亡りの現象の生じた際には、此事の影響が最も大きいものと想像される (圖-10~15)。

第 3 項 乾燥川砂

此場合には見掛比重は、1.733~1.778 の範囲に入つてゐた。傾向から言へば相馬標準砂よりも久味浦標準砂に近い性質を示すが、試験中には亡りの現象はなかつた。大體の傾向は今迄のものと同様である (圖-16~19)。

圖-10.

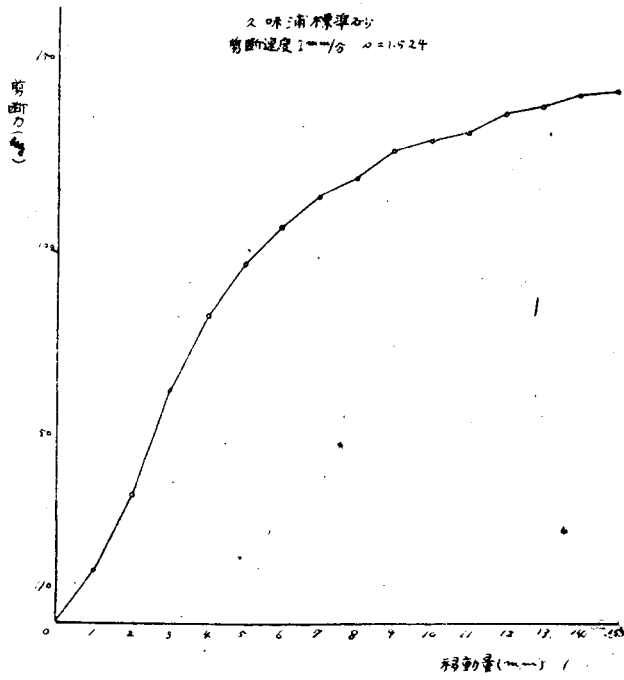


圖-11.

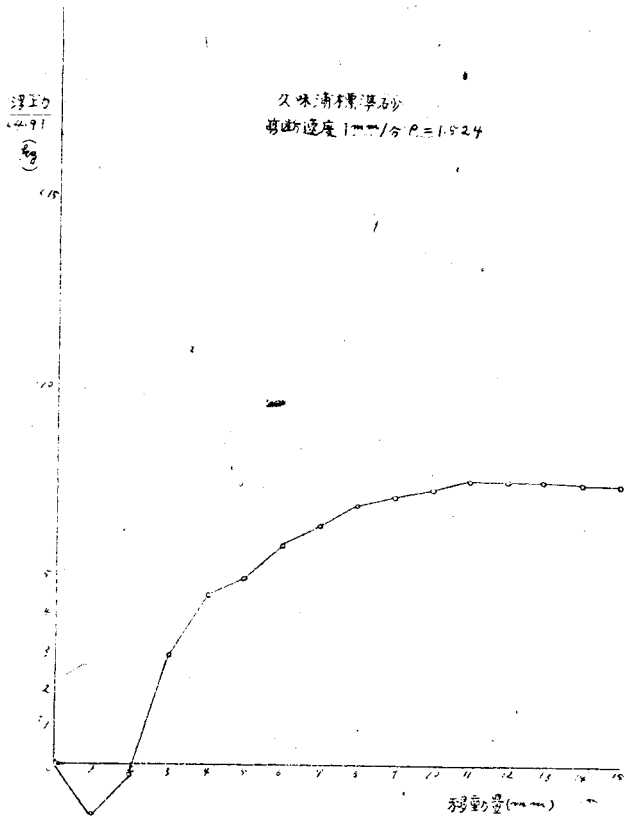


圖-12.

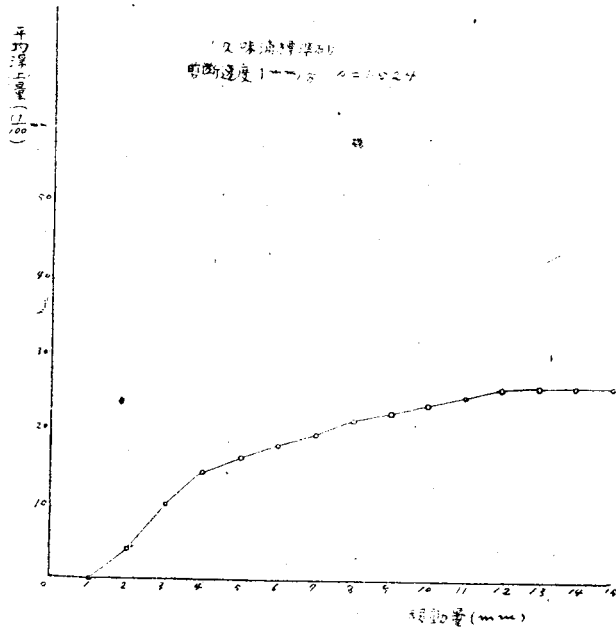


圖-13.

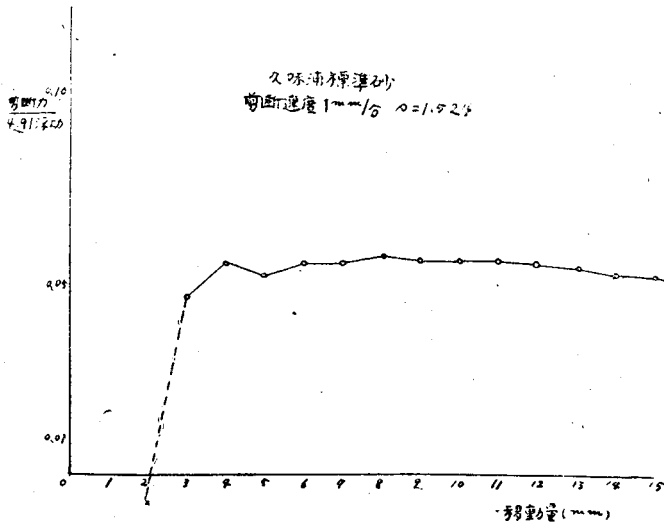


圖-14.

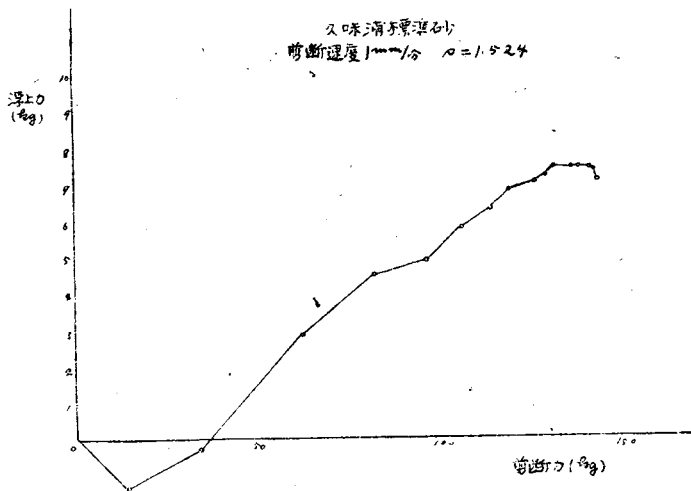


圖-15.

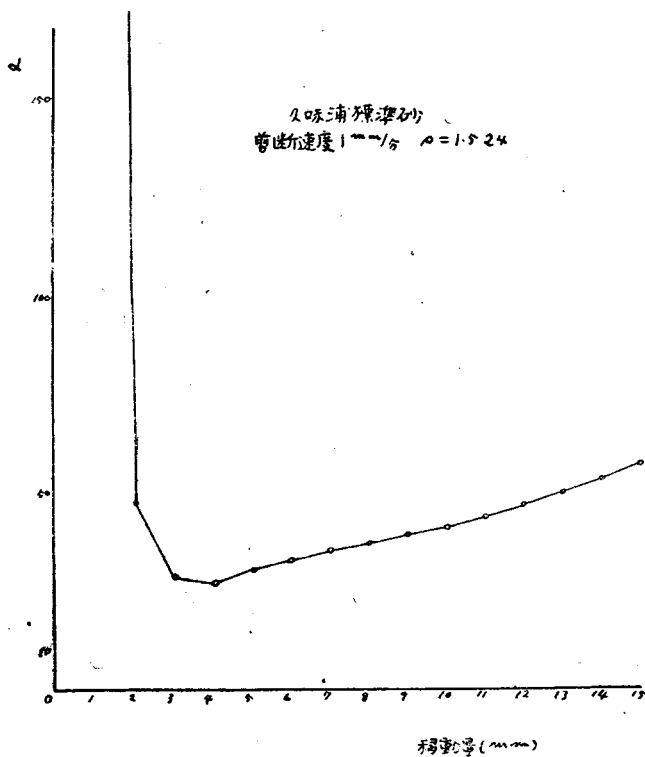


圖-16.

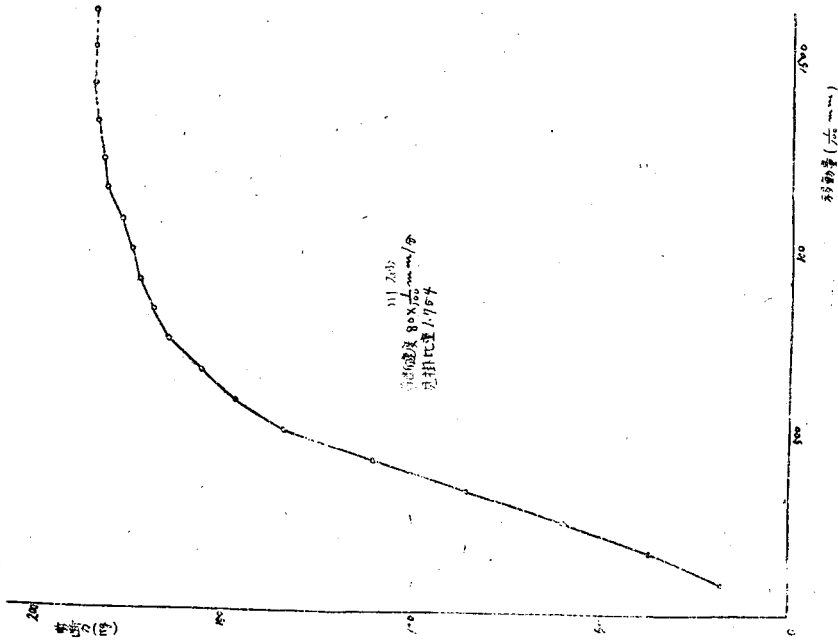


圖-17.

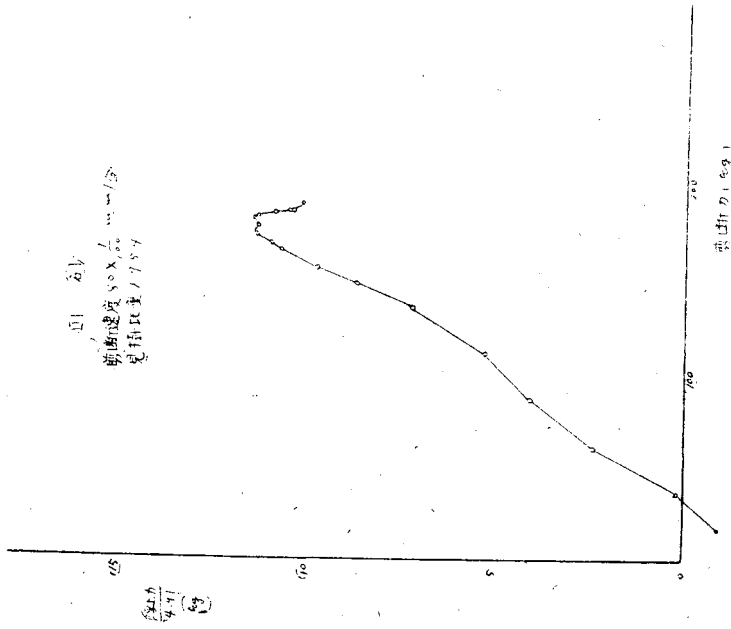


圖-19.

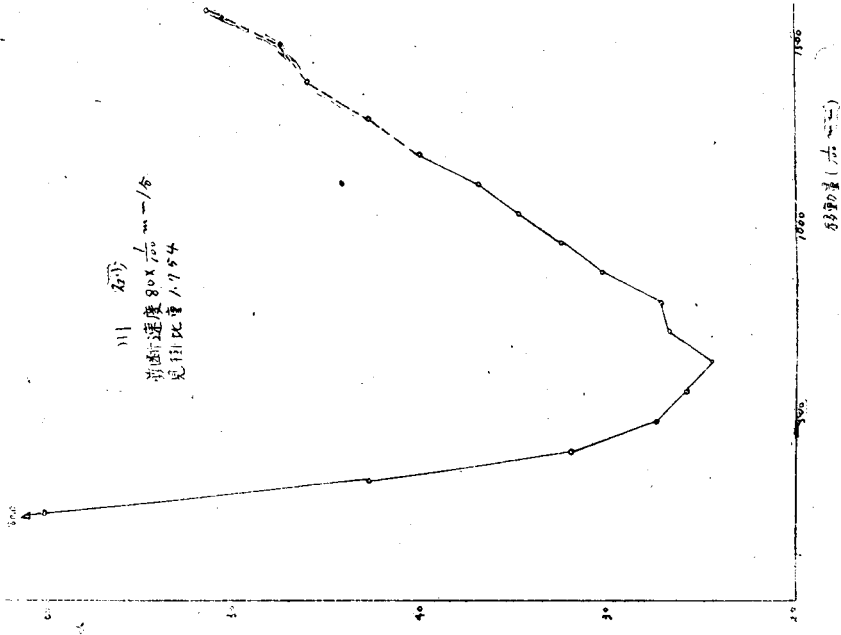
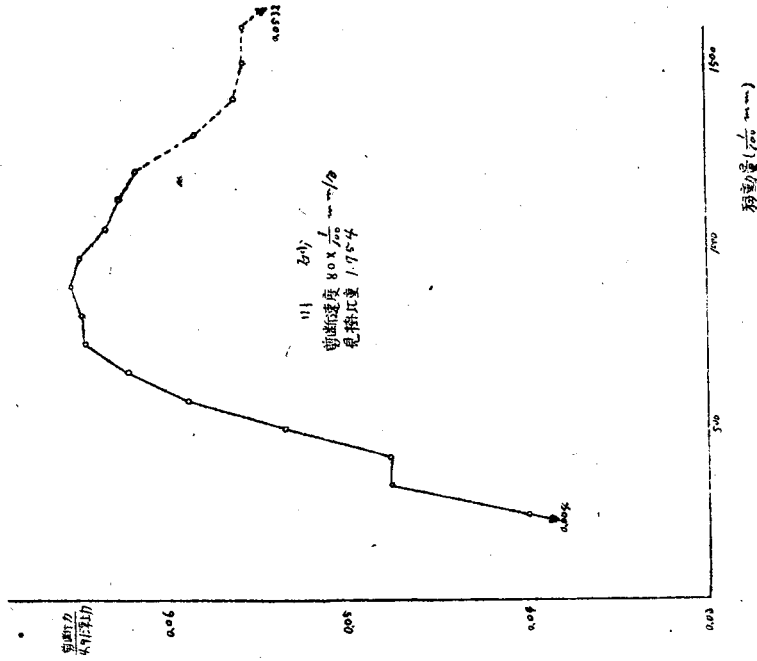


圖-18.

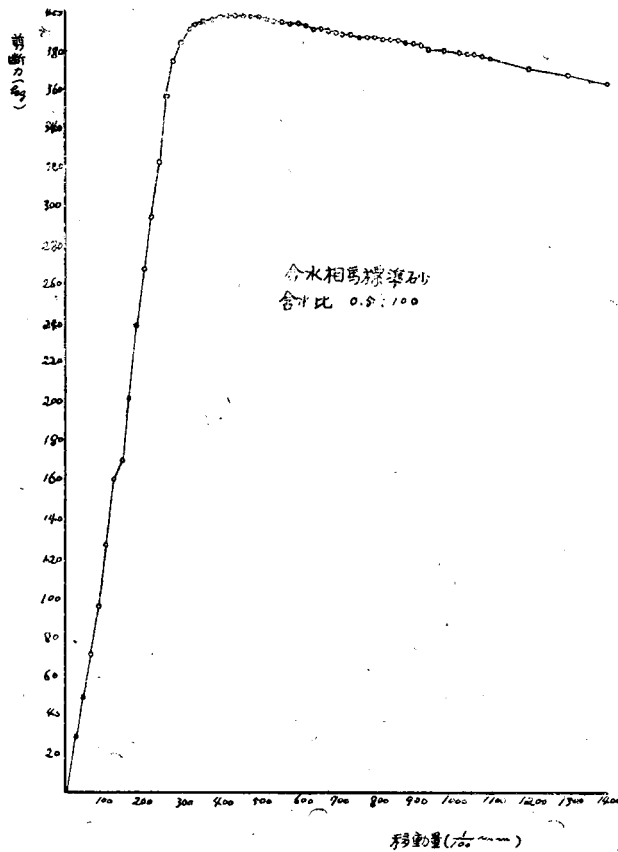


第4項 含水せる相馬標準砂

表-1.

含水比	見掛比重	最大剪断力 (kg)	最大浮上力 (kg)	最大平均浮上量 (l/100 mm)	最大浮上力 / 最大剪断力	最小移動量 / 平均浮上量
0.5	1.610	382	22.85	89.1	0.0642	5.92
1.0	1.630	392	31.04	96.5	0.0827	5.34
2.0	1.617	394	31.63	58.0	0.0830	8.81
4.0	1.656	397	40.85	65.25	0.1069	9.09
6.0	1.701	395	41.99	82.0	0.1085	6.49
8.0	1.738	399	43.58	85.5	0.1170	4.96
10.0	1.775	398	47.03	96.5	0.1202	4.44
12.0	1.809	400	56.62	77.5	0.1472	6.90
14.0	1.840	397	42.82	70.75	0.1110	6.40
16.0	1.904	397	40.87	90.8	0.1058	5.76
20.0	1.978	402	59.03	84.25	0.1493	5.65
25.0	1.912	175	10.74	37.8	0.0695	17.10

圖-20.



大體の傾向は乾燥せるものと同様であつたが、試験中に沁りの現象があり、乾いたものに比し最大浮上力、平均浮上量は小さかつた。沁りがあると剪断力が最大に達する迄の移動量は大となる。又沁りとともに、浮上量も急に下がるが、次いで再び急激に上つて、沁る前の値と略々等しい値となる。

含水比を變へた時の種々の量の變化の様子は表-1 に示す。尤も、含水比異なる場合に、同時に見掛比重も變り、其方の影響の方が大きいと思はれるから、簡単に論ずる譯には行かない。

尙ほ、含水比 25% の時は、最大剪断力、最大浮上力、最大平均浮上量共格段に小さく最大(移動量/平均浮上量)が格別に大きいのは、此場合は、砂が水で飽和してゐるからと思はれる(圖-20~29)。

第 5 項 相馬標準砂と久味浦標準砂を混合せるもの

大きさの異つた粒よりなる砂の剪断に對する特性を明らかにする目的で、本實驗を行つた。猶ほ、此場合には、實驗に先き立つて根本的に考慮すべき事情が存するのである。それは、嘗て、“砂の組成偏差に對する數學的考察”²⁾ に於て述べた如く、篩分析に依る粒度と、砂の各部の實際の粒度と差異ありや、又砂の運動に依り各部の粒度に變化を生ずるや否やと言ふ問題である。此事に關して一應の實驗は行つたのであるが、都合に依り別の機會に報告する事にするが、或る程度運動に依り粒度が變化する様であつた。そして、粒度の偏差の生ずる生じ方は、理論の示

圖-21.

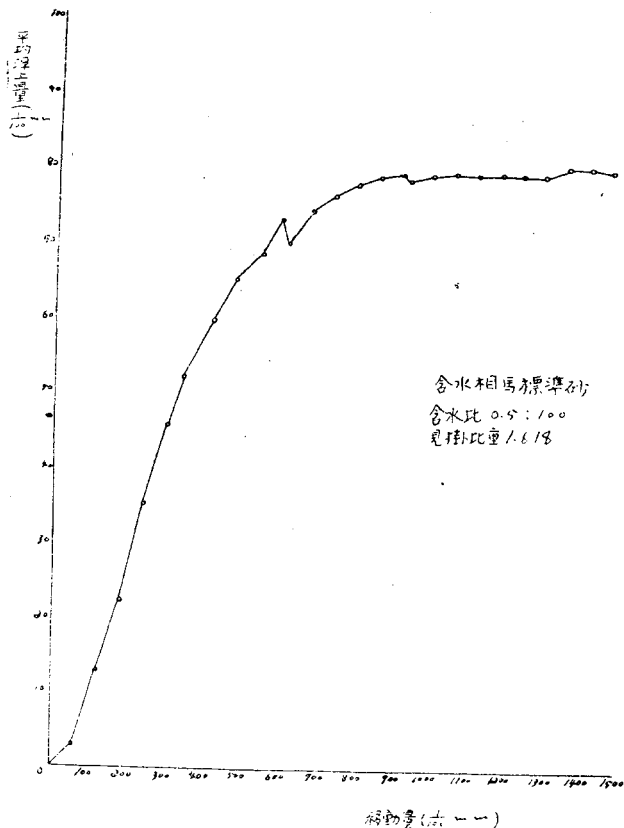


圖-23.

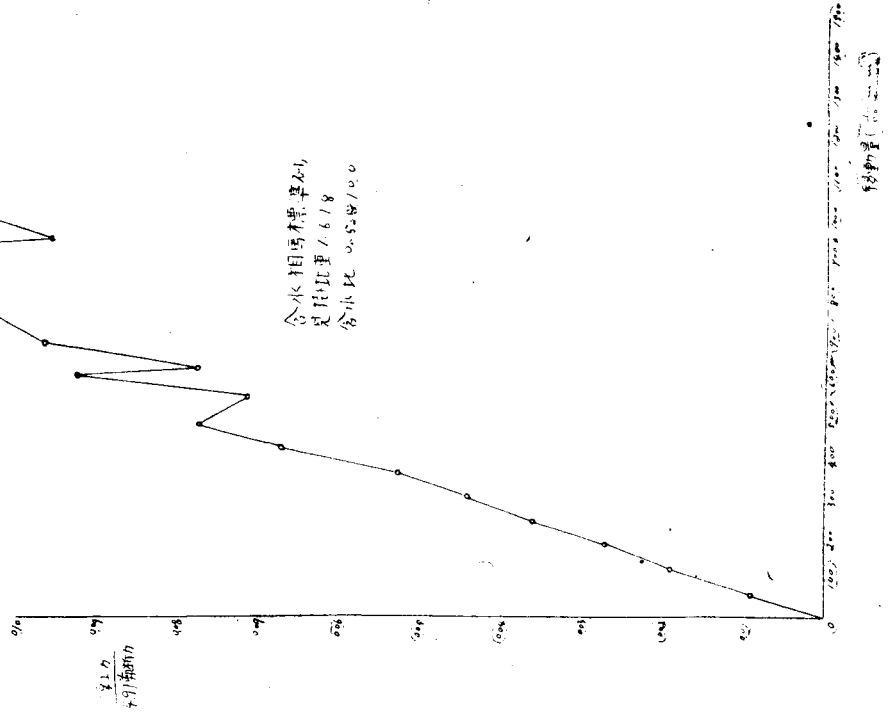


圖-22.

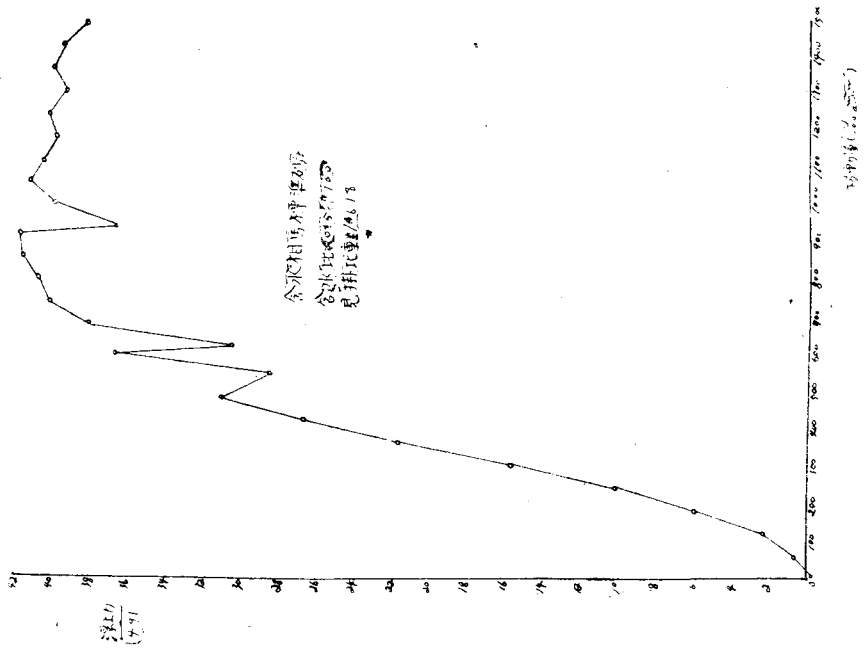


圖-24.

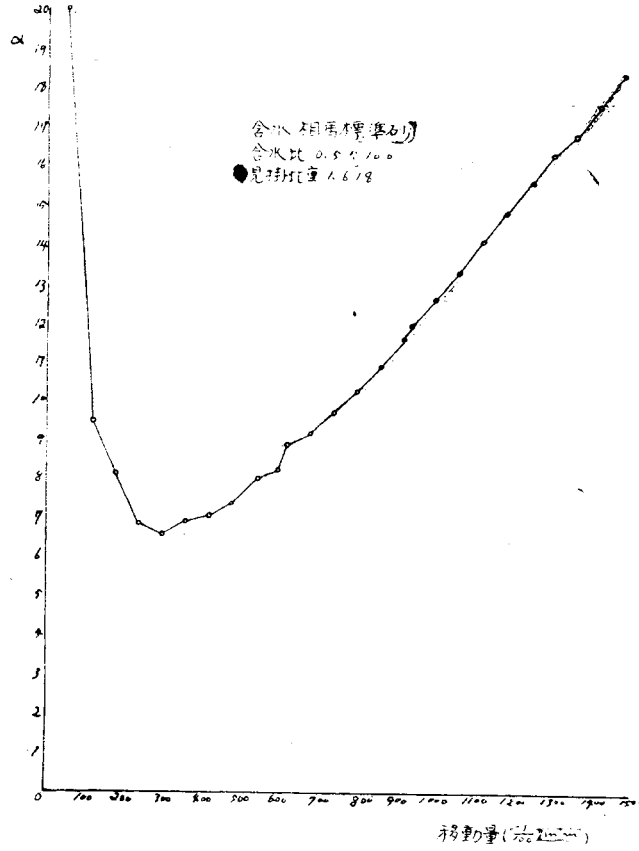


圖-25.

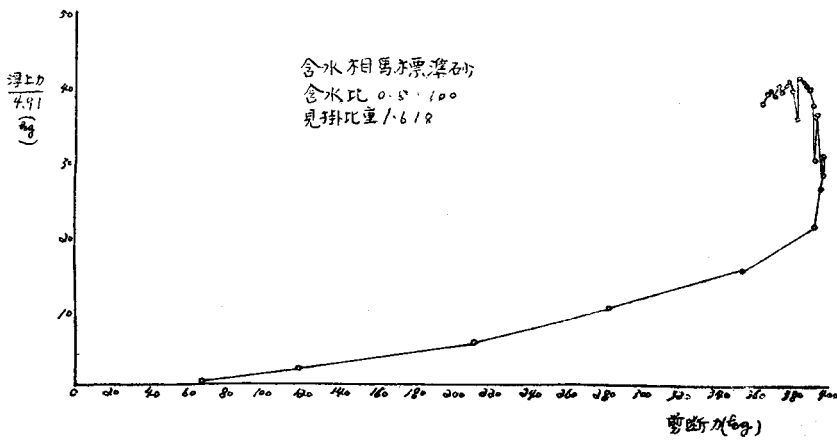


圖-26.

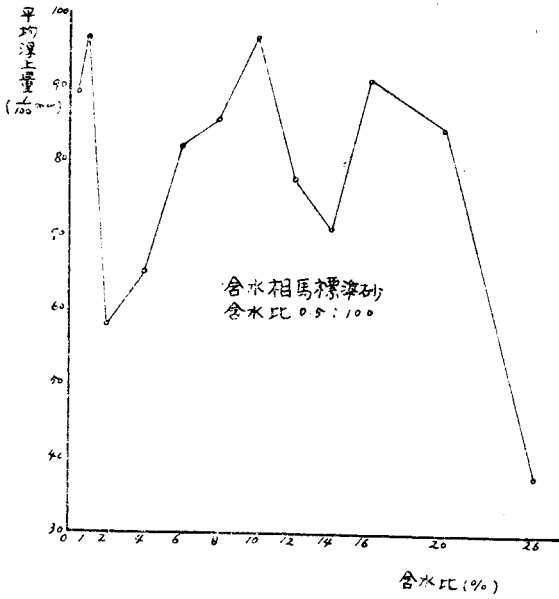


圖-27.

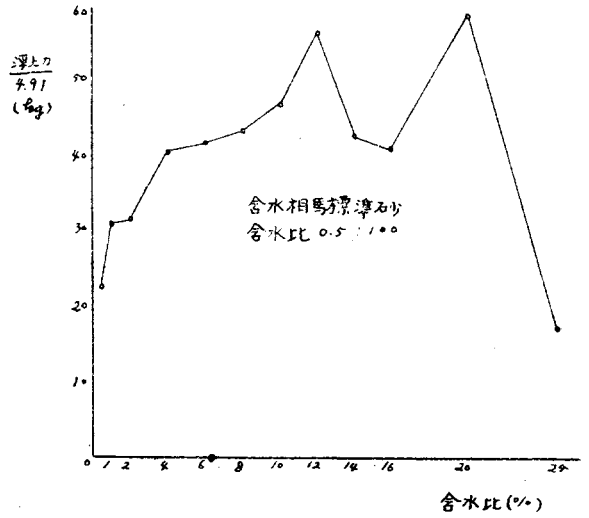


圖-28.

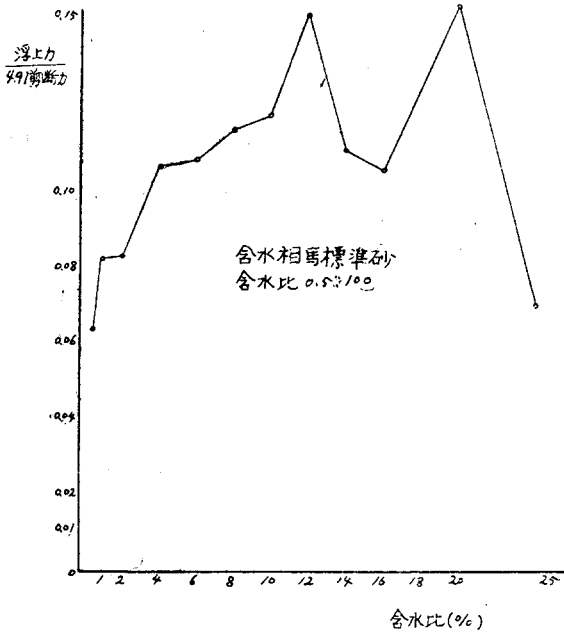
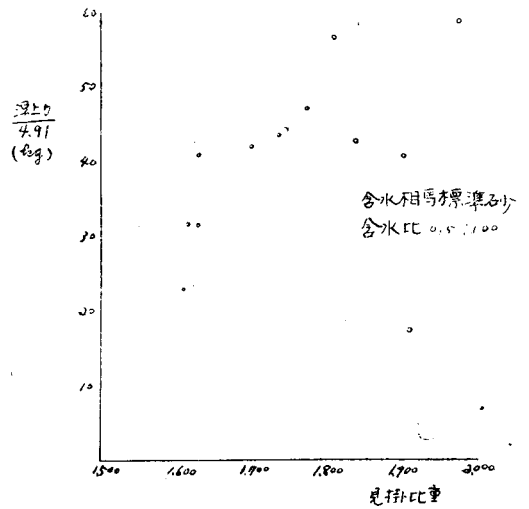


圖-29.



すものより遙かに平たく、偏差は廣い範圍に亙つて存在する様であつた。一應此様な豫備實驗を行つた後、題記の如き二種の砂の混合物の剪斷試驗を行つた。

(i) 實驗材料

兩種の砂の混合比率は表-2 の如くである。参考のため、大體の粒數比をも併記した。

表-2.

重量比 $\left(\frac{\text{相馬標準砂}}{\text{久味浦標準砂}}\right)$	粒數比 $\left(\frac{\text{相馬標準砂}}{\text{久味浦標準砂}}\right)$	重量比 $\left(\frac{\text{相馬標準砂}}{\text{久味浦標準砂}}\right)$	粒數比 $\left(\frac{\text{相馬標準砂}}{\text{久味浦標準砂}}\right)$
5 : 100	0.1 : 99.9	100 : 100	4.5 : 95.5
10 : 100	0.3 : 99.7	60 : 40	4.6 : 95.5
20 : 100	0.6 : 99.4	80 : 20	10.6 : 89.4
40 : 100	1.6 : 98.4	90 : 10	21.3 : 78.7
60 : 100	1.8 : 98.2	100 : 8	27.0 : 73.0
80 : 100	2.3 : 97.7	100 : 6	34.2 : 65.8

圖-30.

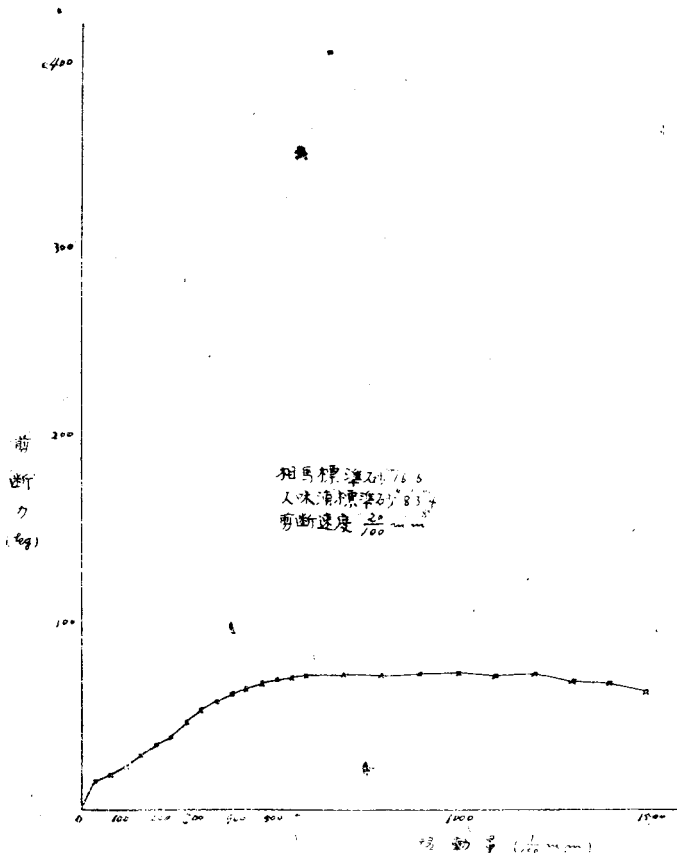


圖-31.

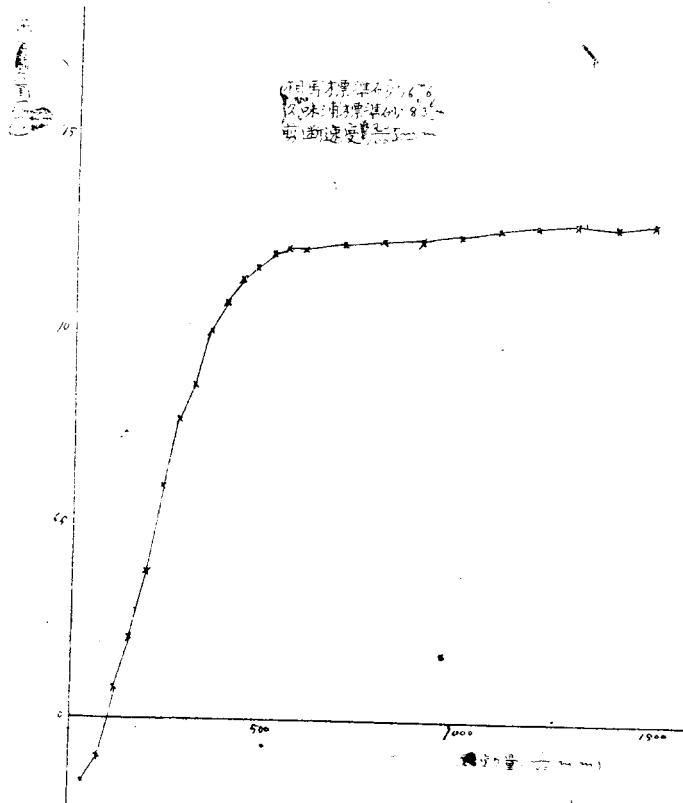


圖-32.

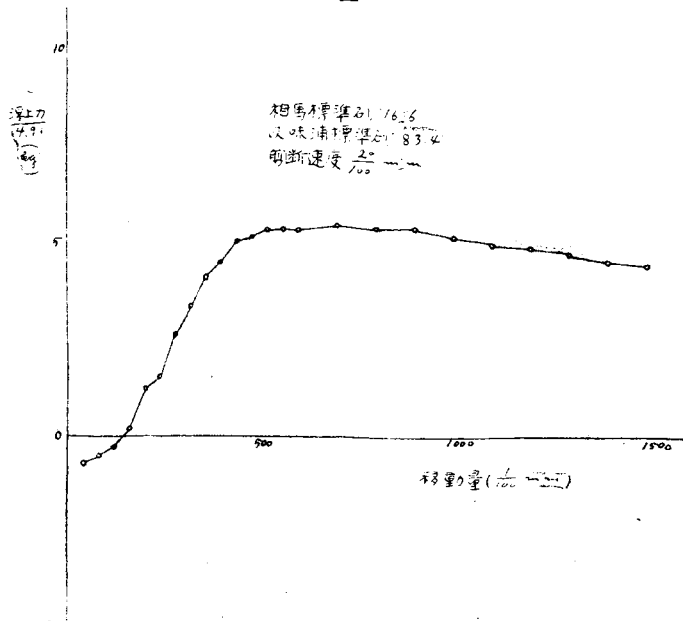


圖-33.

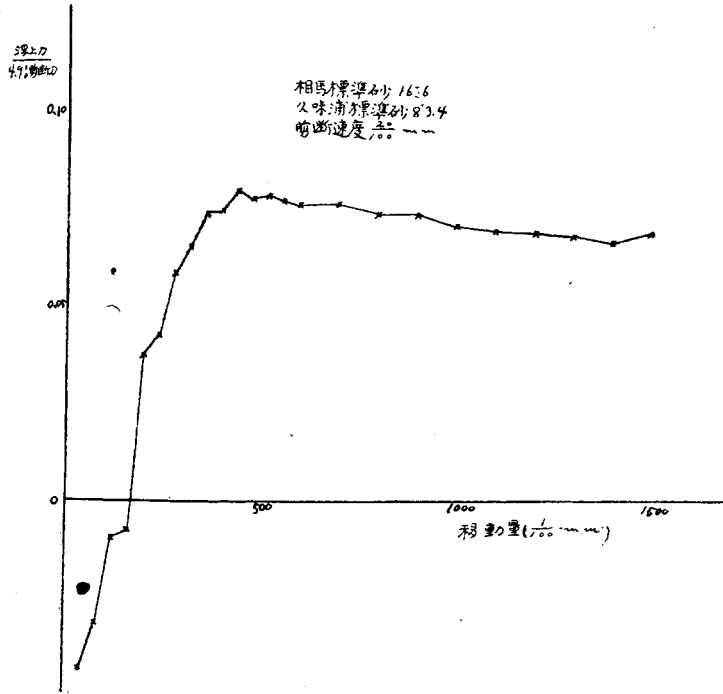


圖-34.

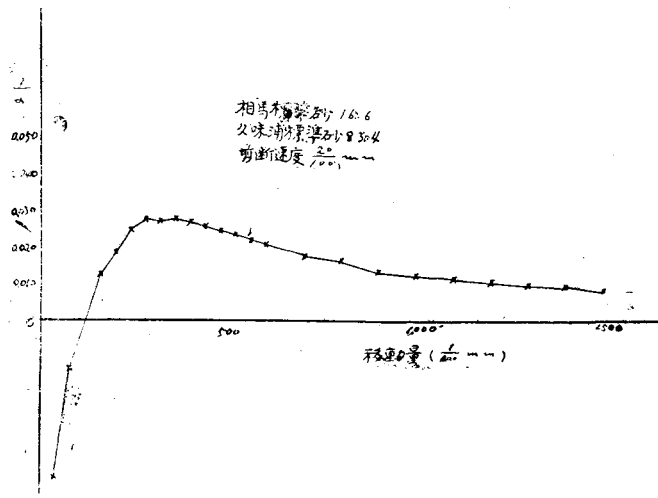


圖-35.

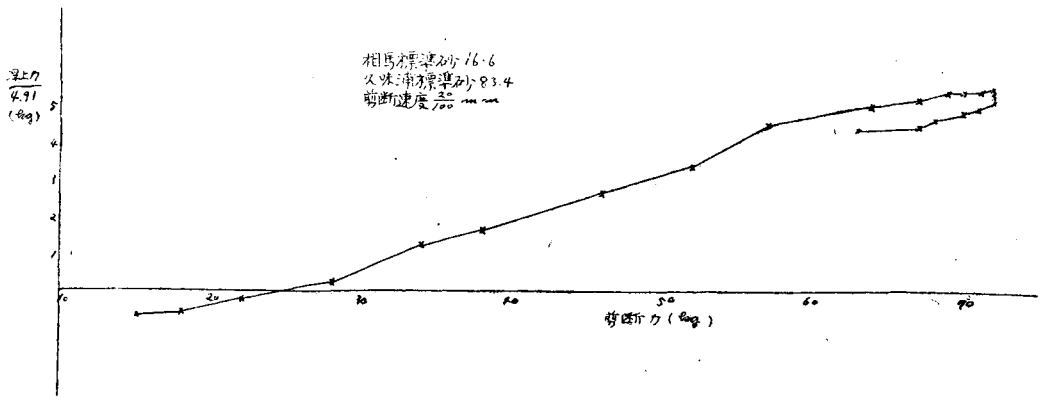


圖-36.

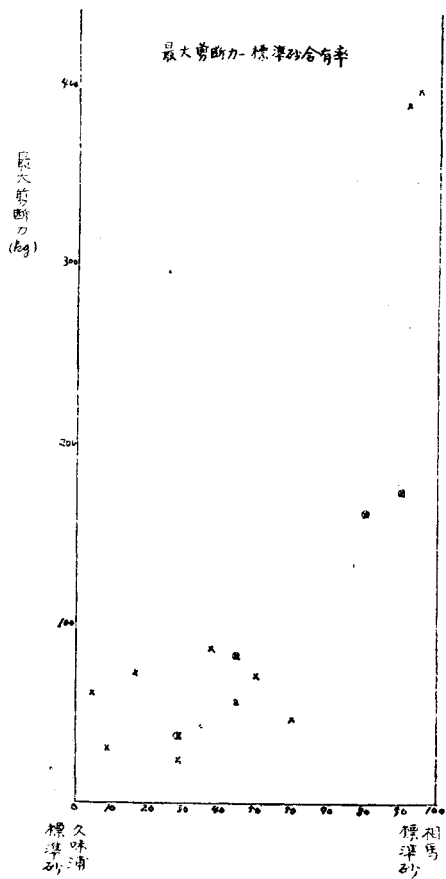
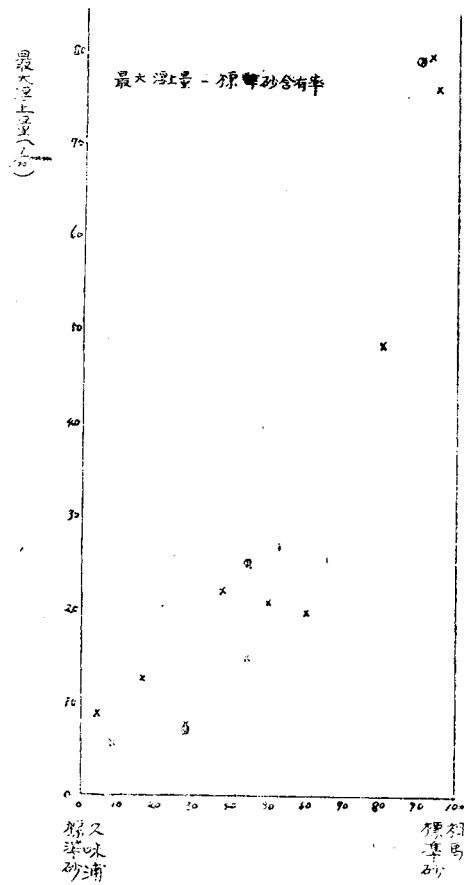


圖-37.



(ii) 実験結果

大體の傾向は、今迄行つた剪斷試験結果と一致してゐるが、特に考慮すべき事は下の如くである。

兩種の砂を混合する場合に於て、豫備的に行つた實驗に依つても想像される如く、一樣に混合する事は中々困難と思はれた。他に方法もないので、容器に適當量の兩種の砂を入れ、匙で適當に混合し、3層に分けて剪斷箱に詰め、各層徑約 1.2mm の突棒で突いたのである。

扱て、表-2 を見れば分かる如く、重量比を可なり變へた積りでも、粒數比は極く僅かしか變つてゐなかつたのである。従つて、其様な事情が實驗結果に現れて來た。通常かゝる混合物の混合比率を言ふ場合に、重量比を重要視するが、以上の事實を忘れてはならないと思はれた。

圖-38.

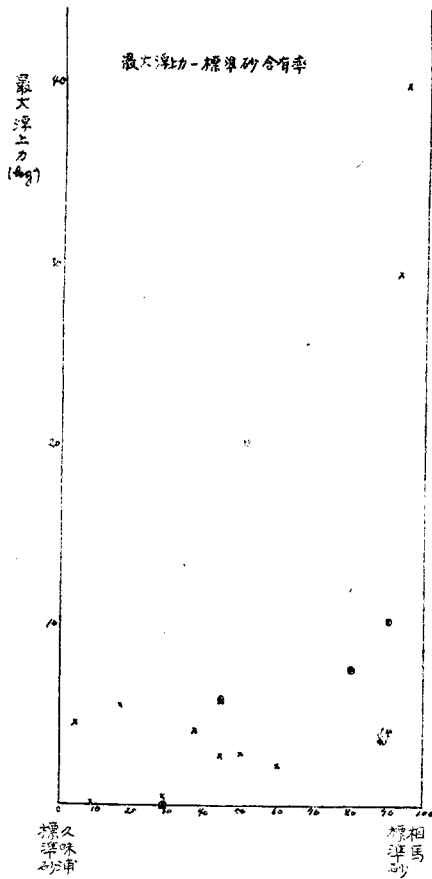
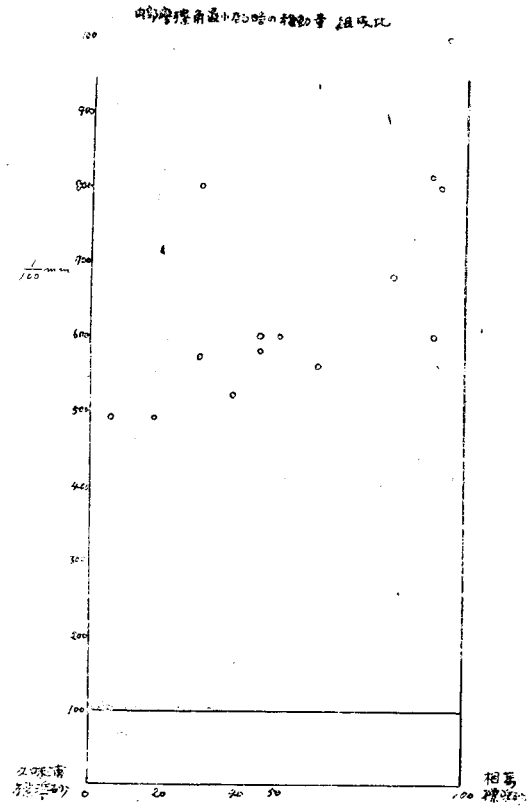


圖-39.



最大剪斷力は、重量比 60 : 100 (相馬標準砂/久味浦標準砂、以下同様) 位迄は、組成影響なく、其以上になり初めて影響があらはれて來る。これは粒數に於て久味浦標準砂が絶対に多い事から、久味浦標準砂の性質が大きく効いて來るものと思はれる。久味浦標準砂の性質が効いてゐる事は、此際に迂りの現象が相當に現はれて來た事からも窺はれる。相馬標準砂では、移動量 300 mm 位の時剪斷力が最大値に達するが、久味浦標準砂が混ざると最大剪斷力に達する迄の移動量が大きくなり、相馬標準砂含有率 0~90% 迄は、移動量 5 mm で初めて剪斷力最大

となる。

浮上量は久味浦標準砂混合の影響大であつて、相馬標準砂含有率 90% 迄は、初期に於て相當の沈下を示す。

浮上力/剪断力は、移動量と λ もに次第に大となり、最大値を経て極く僅か減少する。此最大値の處で内部摩擦角最小を示すが、これに至る迄の移動量を見るに、相馬標準砂が増加するにつれて、この移動量が大きくなる。

又相馬標準砂が少いと、剪断力の方が浮上力に比し早く最大値に達し、相馬標準砂が多くなると、浮上力の方が早く最大値に達する (圖-30~圖-39)。

第 3 節 迂り現象に就て

今年度實施した剪断試験に於て見出した最も著しい現象は迂り現象であつた。迂りの現象は、久味浦標準砂及び含水相馬標準砂、久味浦相馬兩標準砂の混合物の剪断試験の際に現はれたのである。其上、前述の砂の場合に常に起つたとは限らないのである。概して言へば見掛比重の小さいものに多い様に思はれた。此現象は、前論文に於て展開した理論的考察の基礎を揺がせる様に思はれる。少くとも、定常運動の特性として指摘した、運動が全體に見て連続的であると言ふ事と抵觸する様に思はれる。しかし、此の迂り現象が常に現れるとは限らぬ事及び其れの現れる場合は概して粗填めの場合なる事を考へると、今迄行つて來た理論を根底から覆へすものではないと言へると思ふ。理論展開の際に述べて來た様に、著者の理論は、粒子間の力の概念に基いて、粒の力學を築かんとする努力を行ひ乍ら、途中に於て却つて現象論的方向、流體力學的方向を辿る事になつたのである。此意味に於て運動の連続性と云ふものが重要な要素になつて來たのである。従つて、此處に非連続的な迂り現象を考察せざるを得なくなつたと言ふ事は、更に粒子的立場に就て今一段深い考察をしなければならなくなつたと言ふ事だと考へる。即ち、迂り運動がある運動の場合に、それに依る不規則部分を除去つた平均運動としての連続的運動を、今迄の理論的考察が對象とし、これに關する限り、粒を取扱ひ乍ら粒的特性は、はつきりは現れず、迂り現象は、この平均運動からの外れであつて、これは粒子的特性が最も端的にあらはれたものである。この様に考へて良いか悪いかを明確に言明する事は今の處出來ないが恐らく此様な事が言へるのだと思つてゐる。此事に關しては將來突き進んだ研究をして行き度いと考へてゐる。

第 3 章 不定常運動

第 1 節 總 說

不定常運動の特性を調べる事の重要な事は既に詳しく述べた所であるが、從來此方面の研究が比較的閉却されてゐた所以は、古典的土壓論は主として限界状態のみを問題とし、其れに至る過程に對する研究が行はれなかつた事、従つて支持力理論等に於ても、其れが重要なにも拘らず、研究方法は依然として古典的土壓論の乃至は弾性論的であるかを出なかつたのである。一面、此現象が複雑な事が其研究の促進を妨げてゐた事も言を俟たぬ所である。

従つて著者の之れに關する研究も、不定常運動研究の第一歩である。しかし、此れに依つて今迄不明であつた事を稍々明瞭になし得た所も少くないと思はれる。

第 2 節 剪断試験より見た不定常運動

第 1 項 砂の不定常運動の特徴

砂の剪断試験の際定常状態に至るまでには、種々複雑な事情の存在し得べき事は、既に屢々述べた所である。不定常運動の際には、Reynolds の所謂 Dilatancy の性質が効いて來る事、Coulomb の内部摩擦法則が成立しない

圖-40.

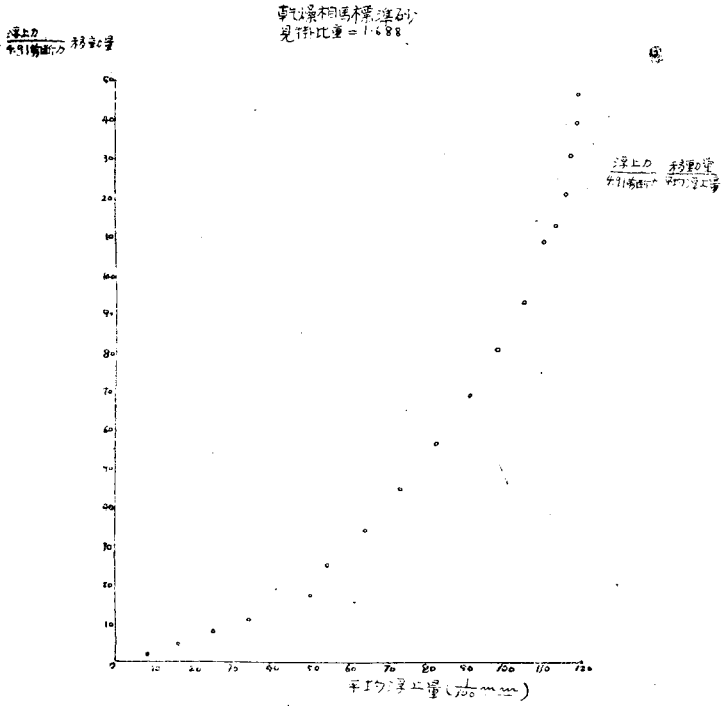


圖-41.

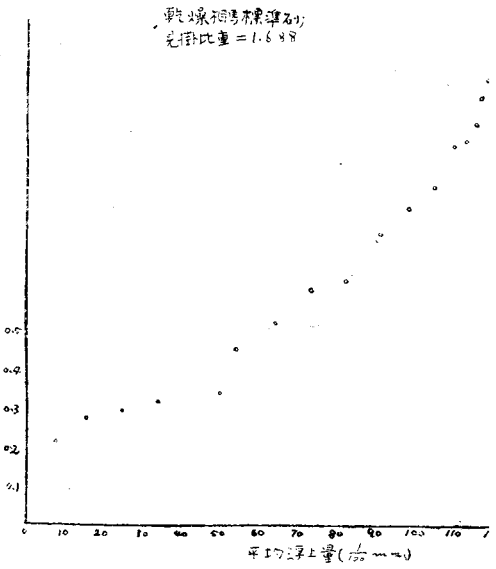


圖-42.

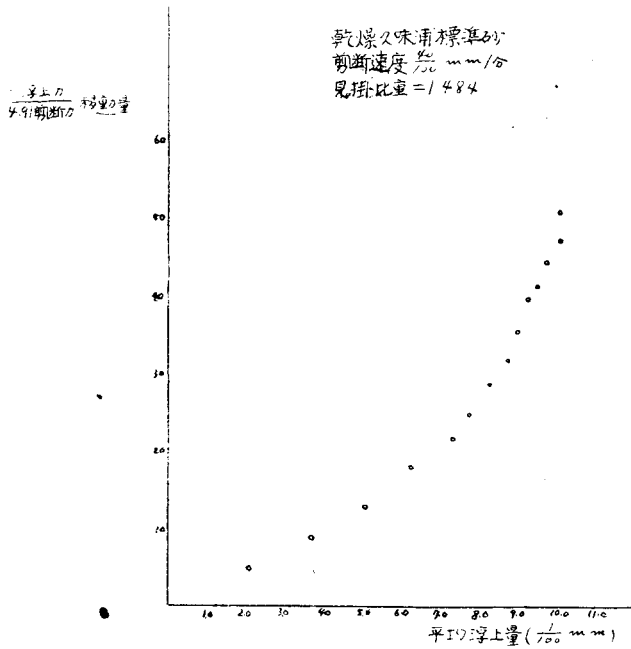


圖-43.

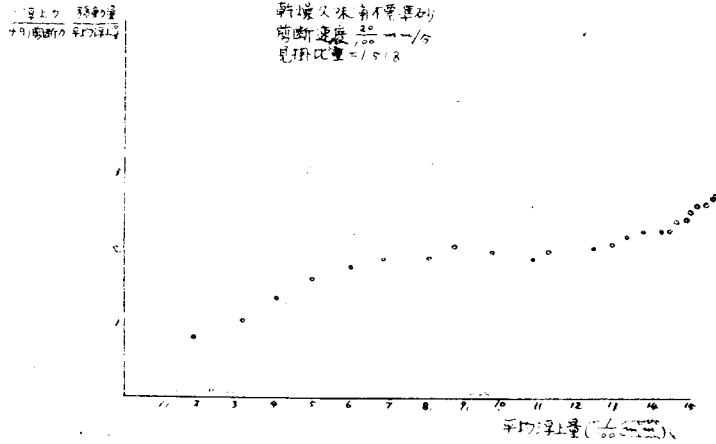
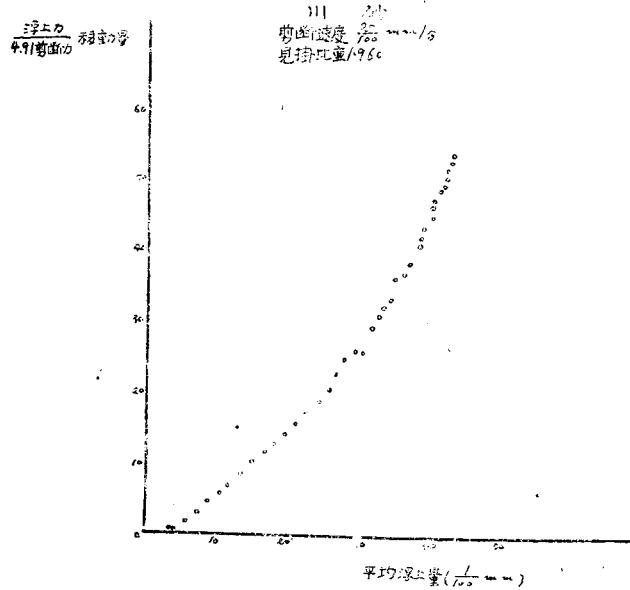


圖-44.



事及び不連続的運動の有り得べき事を其の大きな特徴として考へたのであつた。此等の性質を今一段深く考へて見やう。

剪断試験の結果に基づいて次の如き量を計算する。

$$\kappa_1 = \frac{Nu_0}{SA} \dots\dots\dots (1)$$

但し N : 浮上力 S : 剪断力 u_0 : 移動量
 λ : 平均浮上量

そして κ_1 と λ との關係を圖示したものが圖-40~圖-48 である。處が、斯くの如くして計算した κ_1 なる量

圖-45.

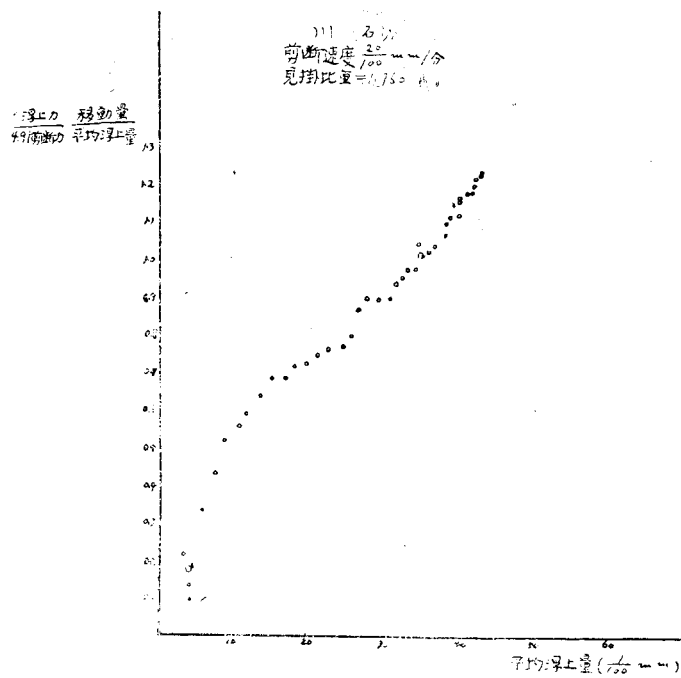


圖-46.

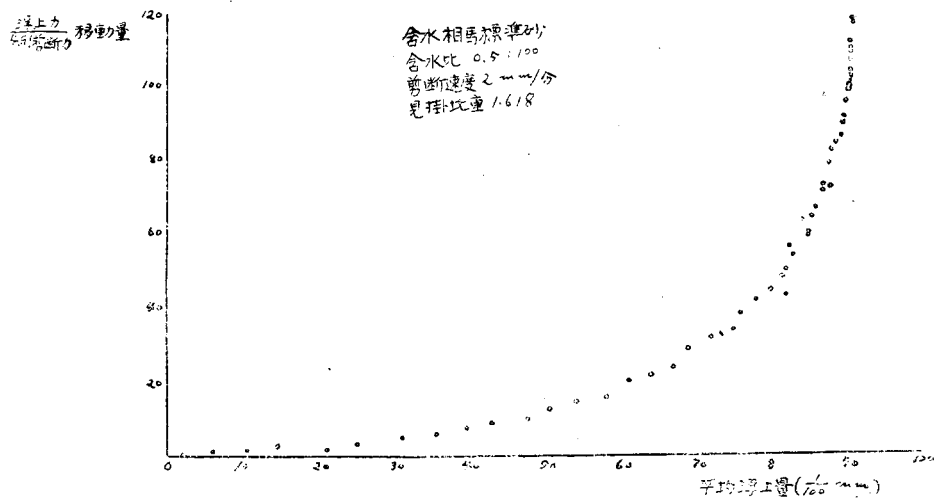


圖-47.

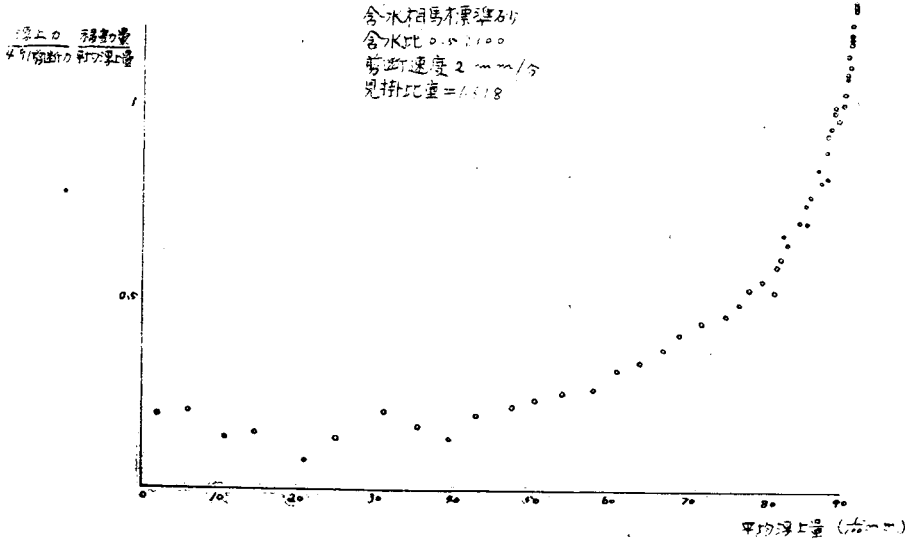
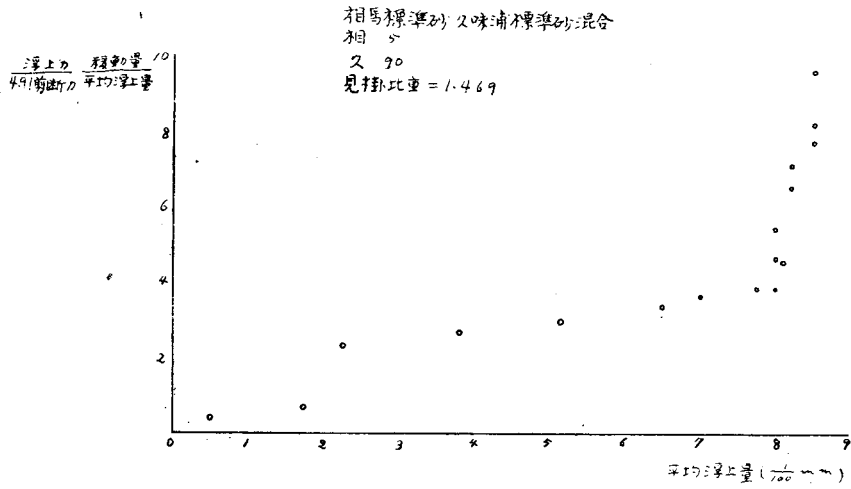


圖-48.



の意味を考へる。極く大ざつばに考へて

$$N \propto \text{平均壓力} \propto \text{容積膨脹} \propto \text{平均浮上量 } \lambda$$

$$S \propto \text{剪断歪} \propto \text{移動量 } u_0$$

であると思はれるから

$$N = \kappa \lambda \quad S = Gu_0$$

と考へて見る。κ, G は夫々體積彈性係數、剛性率に對應するものである。そうすれば

$$\kappa_1 = \frac{Nu_0}{S\lambda} = \frac{\kappa}{G}$$

即ち、κ₁ は體積彈性係數と剛性率との比に對應するものをあらはしてゐる。圖に於て、κ₁ の値が剪断が進むにつれて大きくなつてゐる事は、剪断につれて、容積變化が形狀變化(剪断變形)に比して行はれ難くなる事を示してゐる。尙ほ、圖面により明らかに見る如く、曲線が波形をしてゐる、κ₁ が剪断とともに週期的に變化しながら増加してゐるのが認められる。これは、前記兩種の變形の難易度、従つて粗密が週期的に變りながら剪断運動が生じてゐる事を示してゐる。此の現象は前論文“乾燥砂の運動機構に就て(1)”³⁾に於て報告した砂中の運動傳播に於ける粗密順送り現象と對應するものと考へられる。κ₁ なる値が急激に大になる處は、運動が不定常から定常になる所である。

此の曲線の模様は、砂の種類に依つて特徴があり、其等の砂の不定常運動の特徴を示してもゐるのである。此事を研究するために、次のモデル的考察を行つて見る。

第2項 モデル的考察

嘗つて剪断層の模型的考察を行つたが、あの模型を採用すれば、其時の計算を利用して(圖-49)

$$\left. \begin{aligned} \text{浮上力} &= \frac{\cot \theta}{4} \\ \text{剪断力} &= 4 \end{aligned} \right\}$$

$$\text{浮上量} = 2a (\cos \theta_0 - \cos \alpha)$$

$$\text{移動量} = 2a (\sin \alpha - \sin \theta_0)$$

但し、θ, α は圖-49 に示す角、θ₀ は θ の初めの値、a は球の半徑

である。此等の式に依つて a=5 mm, θ=30° として種々の關係を圖示すれば、圖-50~52 の如くである。

一方 Ball Bearing (直径 5 mm) の球を丁度このモデルの様な型式に填めて剪断試験を行ひ、對應する圖を書いて見ると、大體の傾向は似て來るが、總べてに於て、モデル的考察では、移動量は極く小さくて、二球の相對位置關係は變らぬとしてゐるが、實際には極く小さい移動量の場合に對しても、一球が他球の上を乗り越えると言ふ事情が生ずるから、この様な單純な理論から豫想されるより、實際の移動量は遙かに大きいのだと思はれる。其れにも拘らず、種々の量間の關係が、單純な理論に於て移動量を其場合よりも大にすれば、比較的簡單に傾向的に説明されると言ふ事は面白い事である。

α と移動量との關係を示すモデル理論的曲線は、移動量と共に、α の値は極く僅か上昇する傾向がある事になるが、實驗に於ける曲線は著しく其傾向を異にしてゐる。しかし先きにも述べた如く、球と球とが其接觸を次ぎ次ぎと變へて行く現象(一種の迂運動)があり、移動量は單純な理論の場合よりも遙かに大きい筈である。かく考

圖-49.

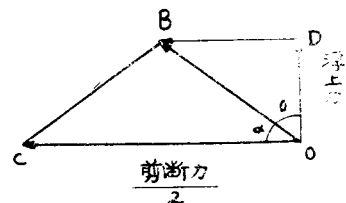


圖-50.

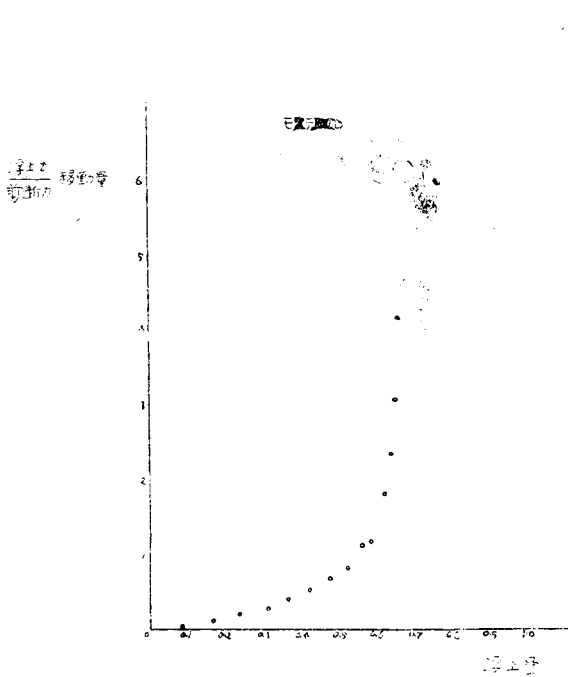
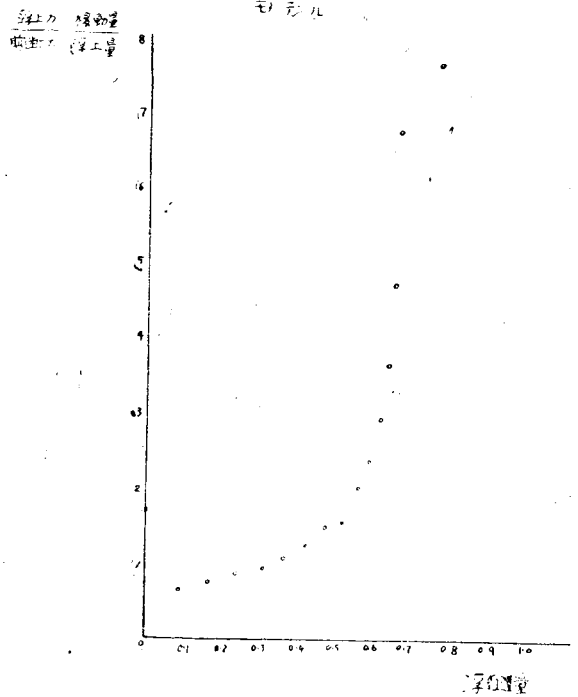


圖-51.



へれば α なる量は

$$\alpha = \frac{\text{移動量}}{\text{平均浮上量}}$$

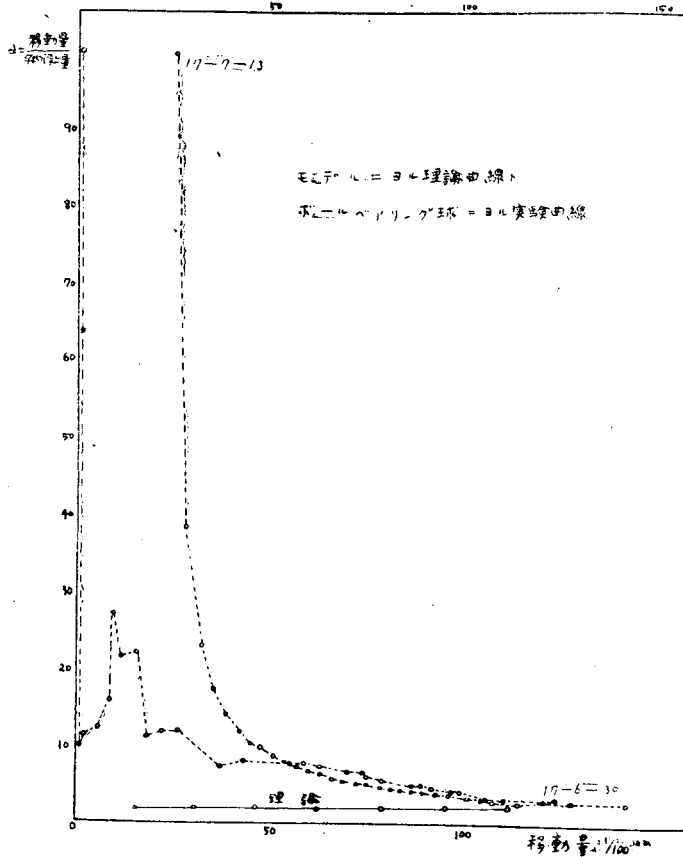
なるものであるから、實驗と單純な理論との喰ひ違ひは一應説明出来る事になる。猶ほ、砂の場合に於ても、かくの如くに考へれば、此様なモデル理論に依る傾向と同じ様な關係が諸量の間、そして剪斷初期に於て存立する事が分かる。

第 3 項 不定常運動の分類及び其考察

α なる量と移動量との關係を示す曲線より、前にも屢々述べた如く、移動量が小なる中は、移動量と共に α は急激に減少し、最小値に達してからは略ぼ直線的に増加する。一方モデル的考察に於ては、移動量と共に α の値は、殆ど直線的に増加する一方である。處が α の定義から直ちに分る様に、 α の値が大きい事は平均浮上量に比して移動量が大きい事を意味する。従つて、剪斷試験の初期に於ては、粒同士のなじみ合ひが生じ、或程度落ち付く迄其現象が續く。此の間には、ダイレイタージは餘り効かない。次ぎに、比較的規則的な運動が生ずるのであると想像される。嘗つて側方の壁を外方に倒して行く實驗の場合⁴⁾に考へた k の値が、壁を倒すに従つて減少する一方であつたのも、斯くの如くに考へれば、良く理解出来る。即ちあの場合には、粒同士のなじみ合ひが比較的すみやかに行はれるであらう事は常識的に想像されるからである。従つて剪斷試験の場合の不定常運動を 2 種に分ける事が出来る。即ち、

4) 乾燥砂の運動機構に就て (I) 土木學會誌 28 卷 5 號
 " " " " " " 12 號
 (II) " " " " " "

圖-52.



(1) 第 1 種不定常運動

極く初期に生ずるもので、粒同士のなじみ合ふ迄の不定常運動である。

(2) 第 2 種不定常運動

粒同士がなじんで、モデル的考察に於けるが如き運動と沁りとの共存する如き運動である。

さうして、砂の運動を考察する際に重要なのは、どちらかと言へば第 2 種不定常運動の方であると思はれる。

モデル的考察に於て、前項の α_1 の値に對應する量を計算して、圖示して見ると圖-51 の如くであり、剪斷試験の結果に於ける α の最小値を過ぎてからの運動、即ち、第 2 種不定常運動の場合に良く似てゐるのである。此等の諸考察から次の如くに言つても大した誤りはあるまいと思はれる。

(a) 第 2 種不定常運動の機構は、單純なモデル理論に一種の沁り運動的補正を加へたものゝ如くであると思はれる。

(b) α が最小値を採る處は、粒の配列はモデル的配列状態に近い状態になつて居るのであらう。即ち、剪斷層附近は最も密な粒の配列に近い状態であらう。

(c) 従つて、第 1 種不定常運動に於ては、粒の堆積の組織が變化し、段々に落ち付いて行くのであらう。

(d) 第 2 種不定常運動は、粒の配列状態が、最も密に近い状態から、段々に緩な状態に移行する過程であるが、
 此場合には、運動の各瞬間に於ける粒の配列状態は、其の状態の生じ得る確率が比較的大きい様な配列をなし
 いはゞ準定常の状態に於て運動が行はれてゐるのであらう。 α の曲線等が比較的平滑な規則的の形状をとつて
 る事から、此事が想像されるのである。

第 4 項 “一種の迂り運動” に就て

前項に考へた一種の迂り運動の存在は、モデル考察と實驗結果の兩者の考察に依つて導入されたものであるが、
 實際に剪断試験を行つた後に、剪断層附近の砂粒が破碎されてゐたり、表面が異常に平滑になつてゐるのを發見す
 る事のある事實等から考へても疑ふ餘地はあるまいと思はれる。此の様な一種の迂り運動は、嘗つて考へた不連続
 運動の概念と密接に關聯せるものと考へられる。即ち、不連続運動は密度の不連続より生じ、

$$\text{體積變化率} \left(\frac{dv}{v} \right) \propto \text{平均浮上量} (\lambda)$$

$$\text{剪断歪} (\gamma) \propto \text{移動量} (u_0)$$

$$\therefore \alpha = \frac{1}{k} = \frac{u_0}{\lambda} \propto \frac{\gamma}{dv/v}$$

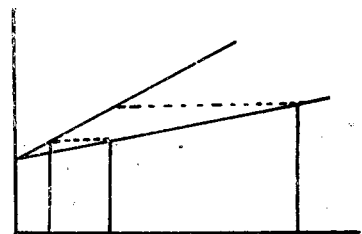
であるから、 α が大きくなるにつれて、單位容積の膨脹が小さくなる。 α が小さい程單位容積の單位の剪断歪に
 依る膨脹が大いのであるから、密度の不連続が出來易い譯である。依つて、迂り現象は α の値の小さい附近又
 は極端に大きな處に多いと思はれるが、事實、此附近の運動状態が可成りの不規則性を示す事は剪断試験結果の示
 す通りである。

此等の事情から考へると、乾燥砂の運動機構 (I)⁵⁾ に於て報告した、箱の一方の壁を外側に倒して行く場合の砂
 の運動に於て現れた不連続運動も、かくの意味での迂りであらうと思はれる。殊にあの場合に、壁を倒す極く初期
 に於ては不連続運動は現はれず、暫くしてから、頻繁に現れた事も、かくの如く考へる事に依つて良く説明出来る
 のである。

第 4 章 在來の砂の剪断試験に就て

在來の剪断試験法に於ける缺點に就ては既に述べ、特に試験機の壁の摩擦の影響が無視されるには餘りに大き
 い事は、剪断試験の際に現はれる降伏現象に關する説明⁶⁾ に於て明らかにしたが、今一段と考察を深めれば、益々
 其感を深くする次第である。即ち、在來の剪断試験法に依る剪断試験結果より、 α と移動量との關係を圖示すれ
 ば、圖-53 の如くになつて、これからも明らかに分かる如く、 α が最小値になる迄は我々の方法に依る實驗結果と
 略ぼ似た傾向を持つてゐるが、其れから後の α の變化の様子は、迂りを
 許さないモデル理論の傾向と相似てゐる。これはモデル理論に於て考へ
 てゐる粒の配列状態の方に寧ろ近い状態に、粒の配列がなつてゐる爲め
 と考へられる。即ち、迂りの現象が比較的許されぬ程上から壓へつけら
 れてゐる事を示してゐる。此事は壁の摩擦が充分効いてゐて、粒の配列
 が緩む事を妨げてゐる事を示すものと思はれる。従つて、實際には、垂
 直力は錘に依つて加へられてゐる力よりも、遙かに大きい筈である。故

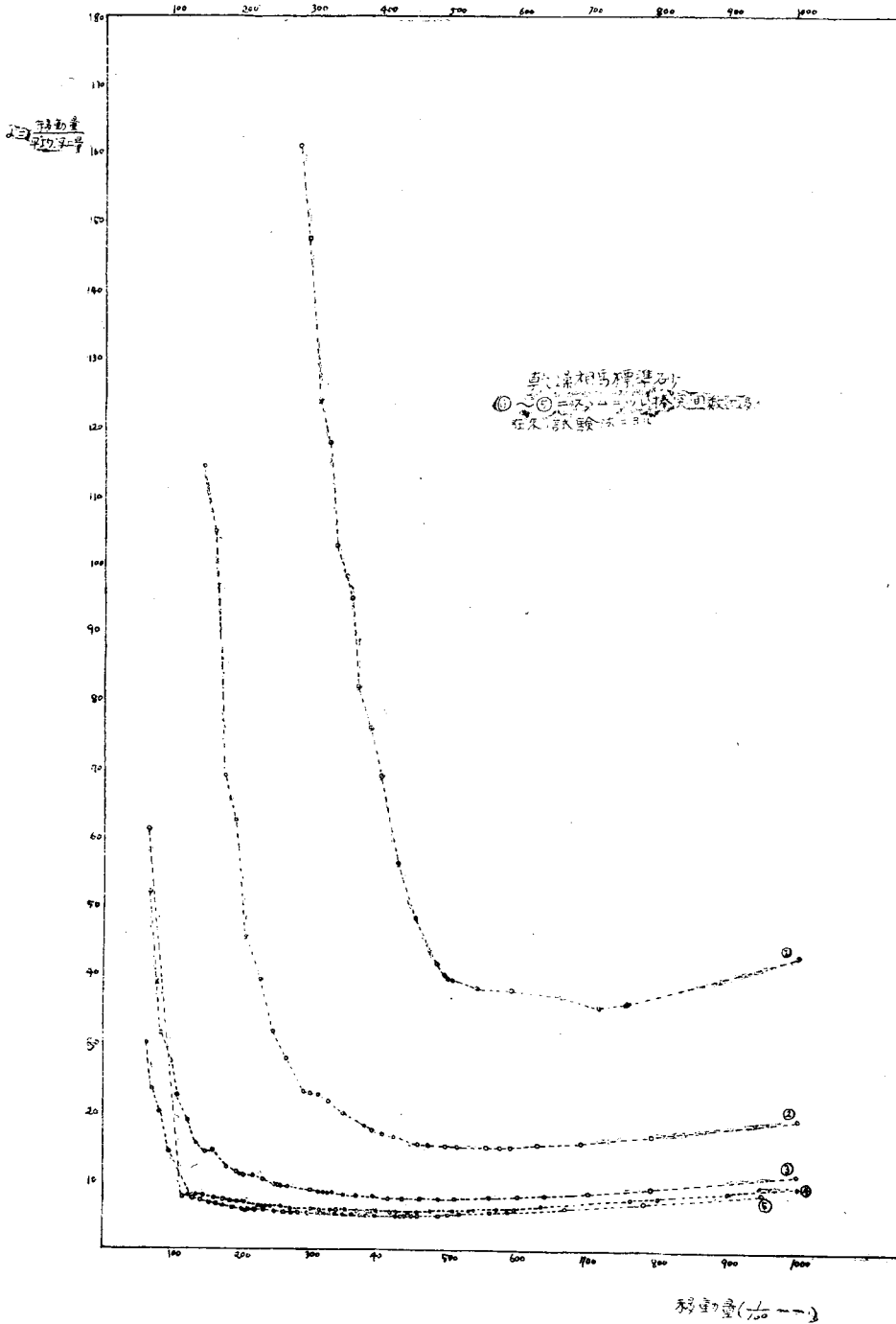
圖-54.



5) 前 出

6) 乾燥砂の運動機構及び砂の内部摩擦角測定法に就て、土木學會誌 27 卷 8 號

圖-53.



に、在來の剪斷試験法に依り摩擦角を 求める圖式方式に於ける直線は、圖-54 に於ける如く、實驗に依つて求められたものよりも、緩傾斜になる筈である。依つて、在來の剪斷試験法に依る内部摩擦角の値は、息角に比して、可成りに大きくなる可き事が結論される。これは實際にも、さうなのである。我々の試験法に依つても、内部摩擦角として、息角に近い値は得られるが、息角よりも、いくらか大き目の値が出て來るのは、之れと同様な意味を持つてゐるものと思はれる。

尙ほ、此等の事柄と關聯して、内部摩擦角の意味に就て考察すべき事が大分考へられるが、其等に對しては將來研究を進め度いと思つてゐる。

(昭. 19. 1. 29. 受付)