

砂層の崩壊に関する実験 (第一報)

所員 寺 田 寅 彦
所員 宮 部 直 巳

*Experimental Investigations on the Mechanism of
Formation of Step-Faults in a Pile of Sand*

By

Torahiko TERADA and Naomi MIYABE

(Abstract)

(1) The present investigation was initiated in connection with the authors' study on the phenomena of land-slide frequently observed in different parts of this country, either associated with earthquake, or apparently not. It is remarked that the familiar phenomena of step-faulting met with in cases of land-slide may faithfully imitated by a simple model consisting of a mass of sand filled in a rectangular box, of which one of the lateral wall is made to recede outwards.

(2) A discussion is made to the effect that the phenomena of faulting of the earth crust in a large scale may also properly be imitated by the miniature faulting of a sand mass, perhaps more properly than by an ordinary elastic mass, since in the actual crust the effect of gravity becomes predominant against which the elasticity recedes to background, as far as the slow process is concerned; what determines the rupture is *not* the *average* strength of the material.

(3) A close formal analogy between the phenomena of step-faulting and those of the formation of slip-band in over-strained metal mass is pointed out.

(4) The apparatus of the experiment consists of a rectangular box of which the longer side walls are of glass plate and the end walls are movable along the bed plate. Sand is filled in the box with a horizontal free surface, and the different layers are marked by a number of horizontal lines of white sand along the glass wall. On gradually receding one of the end walls, the sand mass adjacent to the wall slips down along a slip plane, or along two slip planes simultaneously in some stage. Photographs were taken at different stages of motion by exposing the photographic plates for a sufficient time such as to reveal the boundary of the moving and fixed portions of sand. The form of the slip line determined from the photograms was expressed by an empirical formula

$$y = Kx^n,$$

where x is the height of a point of the curve above the bed plate and y the

horizontal distance of the point from the moving side wall. Thus, large K means small angle of slope against the horizontal, while large n means conspicuous curvature of the curve. It is found that a slip line can be well represented by two branches, upper and lower, of curve of which each satisfies the equation above given. Thus, we obtain two values for each of K and n , for the upper and the lower layer respectively, i.e. K_1, K_2 and n_1, n_2 . The height of the discontinuity is found at about $1/3$ of the total depth from the bottom. The origin of the two separate branches may be explained by the settling of the upper layer which is limited to a certain depth, by the known property of sand contained in a vessel.

(5) The variation of K and n accompanying the motion of the movable wall is illustrated by Fig. 6, 8, 9, 10 and 11 for the cases of loose packing as well as of close packing.

(6) The initial value of K is less for the case of close packing than in the case of loose packing. This may be explained by the increase of the effective coefficient of friction by packing of sand grains.

(7) After the first slip plane has been formed, its value of K gradually increases, i.e. the slope flattens, suggesting a gradual loosening of packing. At a certain stage, the second slip plane appears and coexists with the first for a certain period. This period of simultaneous existence of two slip planes is more evident in the case of close initial packing than in the case of loose one. During this period, K of the second slip plane rather decreases, or at least does not increase. When K of the first slip plane has reached a certain value, the motion along it is stopped and that along the second plane continues with gradually increasing K . A third slip plane is developed in the same manner as the second one during the subsequent course of movement.

(8) In the case of loose packing the initiation of the second slip plane is nearly simultaneous with the stopping of the first.

(9) The variation of the height and length of different layers in front of the slip plane was measured, during a definite amount of motion of the moving wall (Table I and II). It is shown that the sand mass situated between the slip plane and the moving wall is actually elongated in horizontal direction. Apparent large discrepancy between the theoretical and experimental values of the ratio of the horizontal elongation to the vertical contraction is explained by the change of slope of the slip plane. It may be inferred that the slip plane is rotated backwards about an axis at a medium height, while its foot is drawn out forwards by the motion of the moving wall (Fig. 10).

(10) The mechanism of formation of the second slip plane and that of self-stopping action of the first is discussed, with some reference to the analogy of slip bands in deformed metal.

(11) The structure of the slip plane is detailed (Fig. 12) and attention is drawn to the existence of a thin layer of sand between the sand mass at rest

and the portion which is moving as a wedge-shaped mass of elastic body. This boundary layer behaves apparently as a layer of highly viscous fluid introduced between the two bodies.

(12) It is concluded that the step-faulting of sand mass is determined by the range of variation in the coefficients of friction of the granular mass. The breadth between consecutive fault lines is given by this range and the height of the layer.

緒 論

此の實驗を本所に於ける研究事項の一つとして選んだ理由に就て一言する。

大正十一年三月頃但嶋國美方郡照來村に大規模の山崩れがあつた。これに就ては山本武彦氏が「海と空」第二卷第五號に於て詳説され結局その直接原因としては積雪の急激な融解が主要なものであつた事が分つたやうである。此論文を讀んで興味を感じると同時に起こした考は、此種の直接原因や更に又山腹の地質土質に関する條件の外に、もつと第一次的な原因が作用して山崩れを決定するのではないかといふ事である。即ち地殼の緩徐な變形の爲に局部の地盤が或る力を受けるとか、或は寧ろ其のために地盤の緊迫が緩められ、山崩れを起し易き状態になるといふ事があるのではないか。若しさもなくば、同様な地質土質の山は同様な氣象状態の下には到所崩壊を起しさうであるのに、事實は必しもさうでないらしく見えるのである。

此様な考から、先づ手近な文献を涉獵して、山崩れに関する材料を集めて見た。此の調査の結果に就ては他日別に報告するつもりであるが、要するに、上の考が餘り不合理でないと思はれるには充分と思はれた。就中、震災豫防調査會報告第四十九號に於て「岩代半田銀山變動の沿革及山崩れ總説」と題する報文に於て、故神保教授が矢張同様な考を述べて居られるのを知つた。

其後偶然な機會で、ボール紙製の菓子折に細砂を入れたものを弄んで居た際に、次のやうな事實に注意した。即ち箱の横壁の中程を徐々に外方に引き曲げて行くと、其壁に接して居る部分の砂層は、壁の開くにつれて迂り落ちるのであるが、其際注意すべき事は迂り落ちる爲に生ずる砂の斜面が一つの平面とならず寧ろ幾段かの階段に近い形をなす事である（第一圖）。

次に外方に引いた側壁を徐々に押し戻して行くと砂面の形は決して元の水平面には復せず、しかも前に現はれた週期的段階も消之ずに波狀の畝となつて保存さ

る。此の側壁の運動を幾回も繰返すと此の波状の皺は寧ろ明瞭に發達するのである。

此の簡単な氣まぐれの實驗からヒントを得たので、もう少し進んで幾分系統的に砂層の崩れ方に關する實驗を行つて見たいと考へるに到つた。上記の段階的崩壊は、小規模には道路堤防等に於て日常目撃する處であり、又一方には極めて大規模に地殻の構造に現はれて居る。例へば山崎教授の調査された房總地方の構造(震災豫防調査會報告第百號乙第二六頁第五圖)の如き其の著しいものである。なほ此種類の斷層に就ては徳田貞一氏の論文「壓縮ブロックと展張ブロック」(地理學評論第一卷第九四六頁)中に多數の實例が擧げられて居る。又同様な段階的斷層は氷原にも現はれる。例へば Hobbs: Characteristics of Existing Glaciers の Fig. 79 がそれである。

尤も小規模の土壤崩壊の現象と地殻岩層の斷層の現象とを物理的に同一視するに就ては必ず異論のある事と思はれる。併しよく考へて見ると此の考へは見掛け程に不合理ではない、寧ろ却つて妥當な比較と考へるべき理由が多分にある。何とならば、地殻の如き大規模の彈性體に關する問題に於ては、彈力に對して重力の効果が重大な影響をもつ事となり、普通實驗室に於ける如き小規模の物體に於けるとは全然異つた取扱が必要となるのは明白である。例へば三寸角の豆腐は其形を保つ事が出来ても一里四方の豆腐は自分自身の重みで崩壊する外はない。以上の考だけからでも、重力による地殻の變形の小規模なモデルとしては彈性限の小さい物質を選ぶ方が妥當である事は了解される。

更に進んで考ふべき事は地殻の不均質な爲に起る彈性限の低下である。地殻は決して全部均質の彈性體ではなく局部的の差違の可也に著しいものと考へなければならぬ。そして其規模が大なれば大なる程彈性限の異同の範圍も擴張される筈である。此れは統計的異同の原理から當然期待されるべき事である。今此の如き不均質な彈性の場合に於て其の破壊を決定するものは決して「平均の彈性限」ではなくして「最小の極限值」であるべきである。若し地殻岩石が可也の深さ迄も joints や fissures の網目を有して居るものとすれば、¹⁾ 破壊に對する effective の彈性極限は完全無疵な試片について得られるものよりは著しく低いと考へられな

1) 地下深所に裂目の存在し得る事については Adams や King の研究がある。Journ. Geol., 20 (1912) 97, 137.

ければならない。否寧ろ地殻を彈性體と考へる事自身が不穩當であり、却つて個別々の粒子の集合、換言すれば砂層の如きものと比較する方が却つて適當であるかも知れないといふ事になる。(勿論以上は繼續時間の永い歪力に對する變形の問題に就て云ふのであつて、地震波の如きものに對する地殻の性能に就ては適用しない。)此の考は實驗の結果によつて有力に裏書きされる。即ち段階的斷層や upthrust や Deckfalten の現象の如き、砂層の模型によつて見事に再現される。又地質學書に示された岩層の皺襞の模様如き、普通實驗室に於て「彈性體」を用ゐて得らるゝ破壊や變形の狀とは類せず、却つて砂層の模型によつて得られるものと著しき肖似を示すのである。

又大理石其他古生の岩石に見らるゝ波狀の紋理等も、ゴムの如き物質の模型を用ゐる常壓で再現する事は殆んど不可能であるに反し、砂層の壓縮によれば容易にしかも驚くべき忠實さをもつて摸倣する事が出来るのである。恐らく地殻の深所に於て大なる歪力が作用する際に於ては少くも所謂 sial 層の全體としての性狀は常態に於ける砂層と極めてよく類似する點があるであらう。

如上の考へから、砂層或は砂塊の變形破壊に関する實驗的研究は地殻の物理學にとつて可也に重要なものとなり得るであらうと想像された。それで此の問題に関する文献に如何なるものがあるかに注意して見た。

砂層の横壁に及ぼす壓力、所謂土壓 (earth pressure) の問題に就いては、古い處から可也多數の文献があり、又近年に到つても理論的方面からも、實驗的方面からも、新しい研究が行はれて居るやうである。併し其等の研究は殆んど全部が所謂土壓の問題に連關してのみなされたものであつて、吾々の現在の立場とは全然別な立場からの研究であるので、吾々が最も興味を感ずる種類の問題には少しも觸れて居ないと云つても過言ではない。即ち從來の研究には主として崩壊の起る迄の事柄が問題となつて居るが、吾々の目的は變形が如何に進行するかを知るにあるからである。

一方又 Bailey Willis の有名な實驗や W. J. Mead の實驗がある。此れは地質構造を説明する目的で行はれたのであるから吾々の問題に觸れる處が甚だ多い。併し此等の人の實驗に用ゐられた物質は砂とは著しく性質を異にしたものであるから直接吾々の求める處に對しては満足な答解を與へてくれない。唯 H. M. Cadell (Transactions, Roy. Soc. Edinburgh, 35, 1888.) がスコットランドの構造

を説明する爲に行つた實驗は砂層を用ゐたものである。尙 Wisconsin 大學でも矢張地質の變動に關する實驗を行つて居る事が Leith の Structural Geology (p. 227) に述べてある。此書によるとなほ外にも類似の實驗が可也にあるやうである。

此等の實驗が既にあるにしても、此方面の實驗で、特に地震學上の立場から行つて見る必要のある新しい問題は殆んど無數に考へられるのである。

又一方此の砂層の變形に關する研究は寧ろ意外な方面の問題に對して有用となり得る見込がある。それは近來盛に研究されるやうになつた金屬の變形に關する諸問題である。

金屬が變形を受ける時に生ずる微細な slip bands の生成の模様が少くも形式上から吾々の砂層の段階的の崩落と酷似して居る。Rosenhain が嘗て鐵に就て調べた結果などでは此の段階は不規則であるが、近來單品の針金などで得られるものは可也に規則正しいものゝやうである。ところが此の slip の起る面の結晶學的的位置や、又其の上面の物理的性質に關する研究は色々あるに不拘、何故に此の如く有限數の slip plane にのみ變形が集中さるゝか、又如何なる因子が此の bands 間の間隔を決定するかに就ては、殆んど満足な答解は見出されて居ないやうに見える。(Richard Becker, Phys. ZS. **26**, 1925, 919-925 が張力の fluctuation を考へに入れたのが多少吾々の問題に觸れて居る。)

今此處で金屬結晶の分子格子の變形と砂粒の堆積の變形とを比較せんとするものがあば、人は其の無謀と迂愚を笑ふかも知れない。併し少し深く考へて見ると必しも兩者の間に本質的な formal analogy がないとは謂はれない。此點に關する議論は寧ろ他日別の機會に譲る方が適當であらうと思ふから此處には省略する。併し兎も角も後條に述べる砂層の段階的崩落の内部機巧と金屬の slip bands の機巧との間に何等かの類似のある事は恐らく多くの讀者にも承認されるであらうと思はれる。

以上の如き考へから兎も角も砂層の變形に關する實驗を稍系統的に行つて見度いと思つて昨年來此れに着手した。(實驗の遂行と、その結果の整理等は殆んど宮部が擔任した。) 實驗が存外時間のかゝる性質のものであるから、未だ結果の進捗は僅かであるが、現在迄に得た結果を一應纏めておく事が便利でもあり、又二三の方面で参考とする爲め此れの發表を望まれるやうであるから、不完全なが

ら豫備的の備忘録として此處に提出する事とした。

装 置

吾々が實驗に用ひた装置は、從來土木工學に於いて土壓の測定に屢々用ひられたものに類似した簡單なもので、第二圖に示す様なものである。圖に示された箱の(寫眞の上での)前後の面は硝子の壁である。箱の兩端にある BB なる二つの木板可動壁の間にある A の部分に砂層を積む、この砂層は B 壁の一方を、装置の外方に動かすことによつて崩される。 B なる壁を動かす爲の把柄として、この面に直角に固定された軸 D がある。これには螺旋が切つてある。互に直角に噛み合ふ二つの齒輪の一つの心軸に切つてある雌螺旋がこれに拮つてゐる。

今、もう一つの齒輪 E を C なる把柄で廻轉させれば、その廻轉の方向如何により、 D は壁 B を装置の内方又は外方に動かすことが出来る。 D に刻まれた螺旋のピッチは 2 mm. であるから、把柄 E を一廻轉すれば壁は 2 mm. 動くわけである。

又この廻轉速度を加減することによつて壁の動く速さを適當にすることが出来る。

可動壁と直角な側面は、前述の通り、硝子張りになつてゐて、この側面から寫眞をとることが出来る。この装置に用ひた硝子板の厚さは 1 cm. である。これは、砂層の側壓に堪へるためにかゝる厚いものを用ひたのである。

實際、薄い硝子板では、たとひ破壊するに至らないまでも、撓みのために種々なる不都合を生ずるのである。

この装置全體の大いさは、 A なる部分において、その最大容積が $20 \times 50 \times 20\text{ cm.}$ 位である。

實 験 の 方 法

吾々が實驗に用ゐた砂は普通の細かい川砂で、其の濕氣を去る爲に一旦焼いた上で、之を二種類の篩で篩ひ、其の目の大なるものと小なるものとの間に篩ひ出されたものを使用した。篩の目は、大きい方は 1 mm^2 で、小さい方は 0.5 mm^2 であるから、選ばれた砂粒の大いさは、大體、球にして直徑 1 mm. 乃至 0.5 mm. 位なものである。

かゝる砂の層の崩壊現象に伴ふ層の内部の移動を明瞭に觀察するために、白い

砂の水平な線を適当な間隔で数段に、但し寫真をとる側面の硝子に近い部分にのみ入れて置いた。第一、第二、第三、第八、第九、の各圖に見られる通りである。この砂は前と同様に篩で篩ひ、且つよく乾いたものを用ゐたことは勿論である。

砂層の積み方は、砂を蓄へた容器から、小さな椀で汲み出しては第二圖の A の部分に静かに入れ、適当な高さになると表面をかきならして白い砂の線を入れる。更にその上に次の砂層を入れる。表面をならすには、金屬板の片で静かに撫でて略平坦にするのである。それで、この場合の砂層内部の packing はごく弛い状態にある事は勿論である。併し又、砂層内部の packing を密にした場合も必要なので、その爲めの方法も色々試みたが、結局、實驗裝置の臺を振動させるのが最もよい方法である様に思はれた。振動源には unbalanced load を著けた motor を用ひ、それをこの裝置全部を載せた實驗臺の一隅に固定して廻轉させた。斯くすれば、大體、5分乃至6分位の後には、砂層は殆ど全く settle して、所謂 closest packing の状態となる。併し、この場合に種々な理由から、motor を廻轉させた時間を以て packing の程度の measure とするといふ譯にはゆかないので、最も loose な場合と、closest packing の場合との二つについてのみしか實驗することが出来なかつた。

寫真をとることは吾々の實驗に於ける主要な仕事の一つである。吾々の目的のためには、砂層の崩壊現象の進行する途中の刻々に於ける形態の連続的な系列が必要なので、それには、活動寫真を用ゐれば最も好都合であるが、現在では其處までには及んでゐない。

普通の寫真機を用ひてこの系列を撮らうとする場合に、最も簡単な方法は、動いて行く壁 B を色々な場所で止めては、その處の形象を撮影してゆけばよいのであるが、但し、一度止めて、そこから又動かして次の第二の距離で止めたのでは、最初から一息に第二の距離迄動かして行つたのと全然事情が違つてしまふ、それでは吾々の目的とする一と續きの崩壊現象を追跡することが出来ない。それで壁 B が進行してゐる間に週期的に寫真をとればよいが、併し、普通の寫真機では乾板の取換へに要する時間に制限があつて、一度の崩壊について充分多數の寫真を撮ることが出来ない。それで、結局は幾度も砂層を積み直して幾つかの系列を作り、其等を綜合して所要の系列に代用する外はなかつた。併し、なるべく積む回数を節約するために、最初に積んだ砂層については、壁 B の位置の、最

初の位置から 0.0 cm., 2.0 cm. 4.0 cm. 6.0 cm. の各場所に於いて寫眞を撮り、次の砂層については、0.2 cm. 2.2 cm. 4.2 cm. 6.2 cm. の各場所に於いて寫眞を撮り、順次斯の如くして得た 10 系列を合せて所要の一列に代用することにした。實際には、10 系列夫々砂層が多少づゝ違ふから、その爲めに生ずる異同によつて毎 2 mm. に相當する状態は完全な連續系をなさないことは勿論であるが、併し此れを系列と見做して ausgleichen すれば、其の結果は十個の連續系を平均したことになる、此の點では却つて好都合である。

寫眞の曝寫時間は常に丁度把柄を一廻轉する時間に相當させ、初めには、之を色々變へてみたが、實際に data としてとつたものは大體 10 秒乃至 13 秒位に統一した。把柄の廻し方の少しの異同位は現在の目的には度外視しても差支ない様に思はれる。

上述の如く、吾々がこの實驗に於いて制定した所の物理的條件は、(I) 砂粒の大きさは 0.5 mm. 乃至 1.0 mm. の直徑を持つ球に相當する様なものとした事、(II) 壁 B を動かす速さを $2/10$ 乃至 $2/13$ mm./sec. とした事、(III) 砂層の (settle して實驗した場合には settle しない前の) 見掛け上の容積並びに白い砂の線の高を毎回殆ど一定にした事、及び (IV), 寫眞の曝寫時間を 10 秒乃至 13 秒とした事等、是等の條件の下に、砂層を settle した場合としない場合との二つについて實驗したのである。

砂層が壁によつて押し縮められる場合については續いて實驗を進めるつもりである。

以上の如くして得た各系列の寫眞から色々な數量を測つてみたが、さしあたつて考へられる簡単なこととしては、次の如くして slip surface の推移を追跡することが、吾々の目的を満す最も手近かな方法であるかの様に思はれた。

Slip Surface の形と其の變化

第三圖に就て云へば壁 B を動かし始めると、圖の點線の右側に在る楔状の部分 A' が點線で示される面に沿ふて迂り落ちやうとする。點線の左側 A の部分は動かない、これはよく知られた事である。この點線が所謂 slip surface の断面である。slip surface (吾々の寫眞の場合には slip line) が正確に plane (寫眞では straight line) であるかないかといふことについては近頃二三論じられてゐる様

第三圖

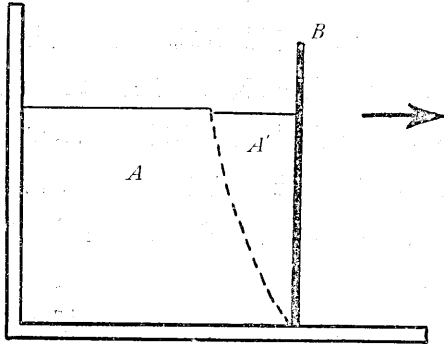


Fig. 3.

種の実験では、横壁の摩擦の影響が如何なるものであるか不明であるから、輕率に決定的な事は言はれない。併しいづれにしても吾々の実験は崩れ初めの場合でなく崩れの進行中の slip plane を見て居るのであるから寧ろ曲線となる方が當然のやうに思はれる(後條参照)。兎も角も、假りに茲では砂粒の大きさ、その形、質量、摩擦係數、砂層の packing の状態等から一つの曲線的な slip line が決定されるものとして進んで見る。そして slip line の式としては試に

$$y = Kx^n$$

或は

$$\log y = \log K + n \log x$$

とおいて見る。但し、 x, y は線上の點の直角坐標で y は可動壁から線上の點迄の水平距離 x は器底から同點迄の高さである。そして寫真に現はれた線から K 及び n を決定し、是等の常數が如何なる物理的因子によつて決定されるかを研究する事とした。 K 及び n を定めるには、寫真の上で測つた slip line の x, y の値を logarithmic section paper の上に記入して、それから容易に勘定することが出来る(例第七圖)。扨て、實際の寫真について、一つ一つこの方法で當つて見ると、 n の値は壁の位置の變化に對し可也に著しく不規則に變化するが、此に反して K の値は稍々系統的な變化を示す事が分つた。そして、 K の値が砂層の packing の状態によつて著しく影響される事は、第四圖及び第五圖の寫真を見ても明に知れる。即ち、最初に settle しない場合、即ち、packing が loose の時は slip line の垂直壁との角度が大きく、従つて K の値は大きく、最初に settle しておいた場合、即ち、packing が closest と見られる場合には、slip line の垂直壁との角

である。Alfred Strecke¹⁾ は、此の面が曲つて現はれるのは、壁を動かす時に、壁の面が鉛直面に對して傾くからであると論じてゐるが、彼の實驗だけでは、確かにさうであると斷定することは出来ない様に見える。恐らくそれには色々な factor が含まれてゐることであらう。吾々の装置の場合には、Alfred Strecke の擧げた様な effect はある様には思へない。この

1) Alfred Strecke, "Bauingenieur," Heft. 1 u. 2 (1926).

度は小さく、従つて K の値は小さい。これから見ると、砂層の崩壊に伴つて起る K の変化は或る度迄 packing の度の変化を示す一つの標準と考へる事が出来るのである。元來 slip plane は natural slope の面と垂直壁との大體中間に来るべきものであるから、packing によつて所謂摩擦係數が増し自然傾斜が急になると考へれば此れは寧ろ當然な事である。

第六圖は、loose packing の場合に、 B 壁の進行に従つて K の變化する模様を

第六圖 砂粒充填の粗なる場合

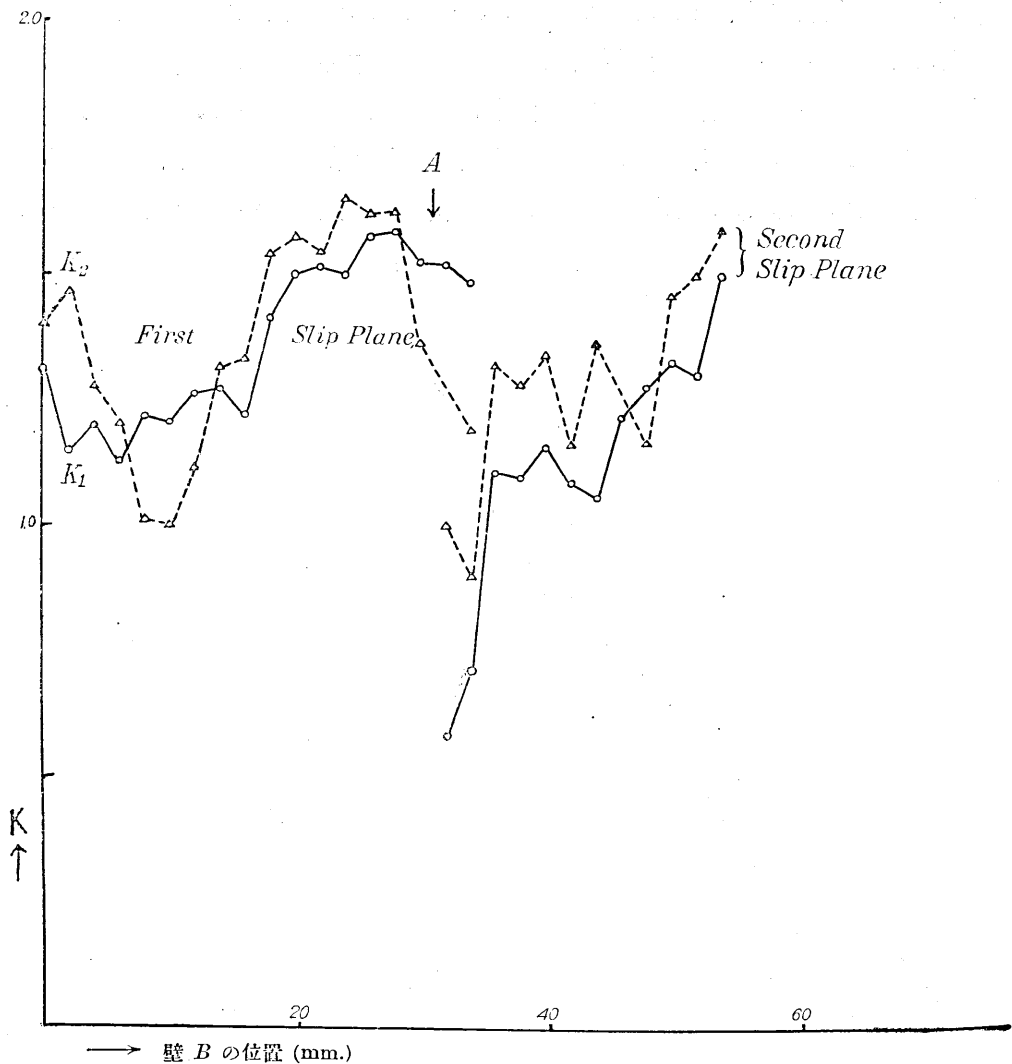
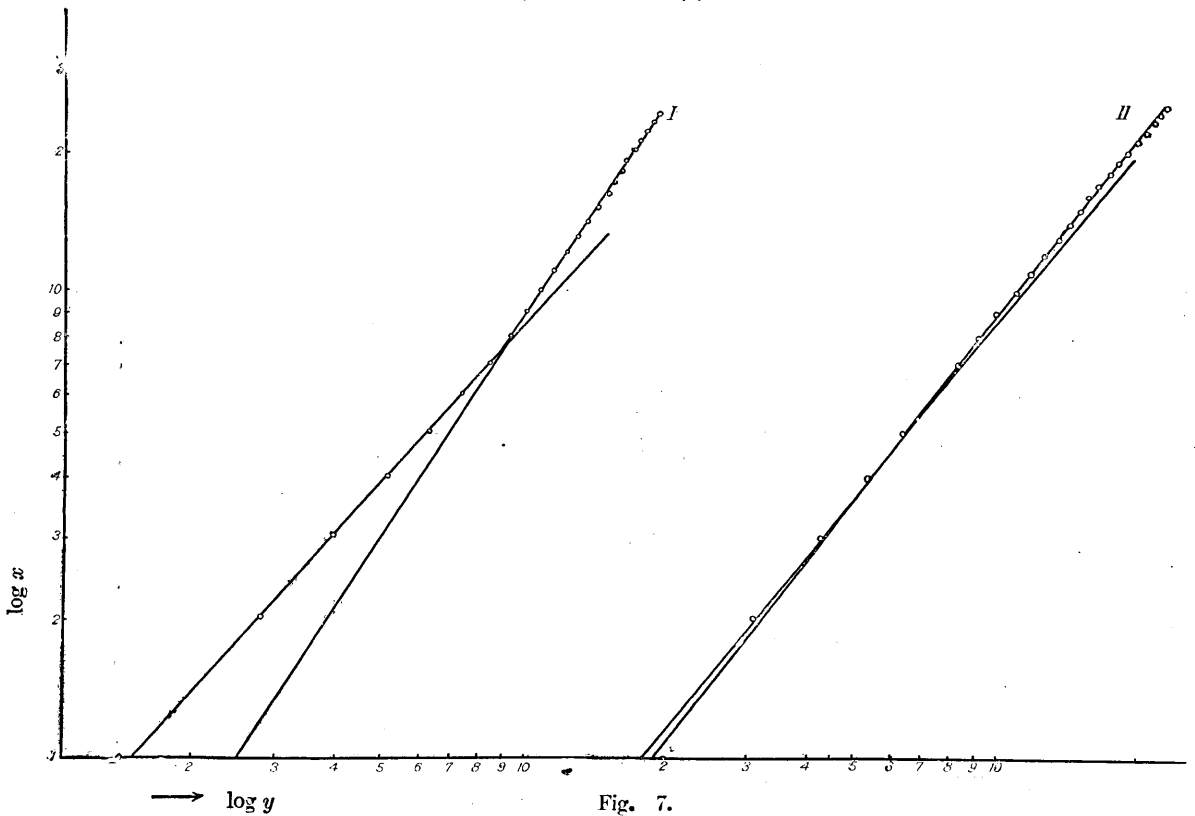


Fig. 6.. Loosely packed.

圖示したものである。横坐標は B の位置に相當し、縦坐標は此れに對する K の値である。横軸の 0 は壁の動き始めの位置を示し、以下數字はその位置から壁が外方へ動いた距離をあらはしてゐる。同様に、第八及び第九圖は最初に砂層を settle させておいた場合の K の變化を示すものである。

Logarithmic section paper の上に plot された x, y の點が、close packing の場合に、同一の直線上に乗らず、砂層の上部と下部とで著しく喰ひちがつた二つの直線の部分に區別されることが、第七圖の I に見る様に示されたので、loose packing の場合にも仔細に驗して見ると、やはり二つの直線に分けた方がよい様に思はれた。loose packing の場合に logarithmic paper の上に plot した例は第七圖の II である。斯様にすれば、自ら、一つの系列について、上層と下層とで二つ宛の K 及び n が得られるので、其等の K を第四乃至第六圖には實線 (K_1) と破線 (K_2) とに分けて記入したのである。併し、大體において、何れの場合でも

第七圖



K_1 と K_2 との間の parallelism は失はれてゐない様である。

何故に上記の曲線が上下二段に分れるかは後章で明になると思ふが、要するにこれは動揺によつて砂層の沈着する際、或る深さ以下では沈着が行はれず、上層のみが沈着する事を示すのである。實際上層では K が小さく、即ち密充填を示すのに、下層では反対に K が大きく、即ち粗充填を示して居るのである。

第八圖 砂粒充填の密なる場合

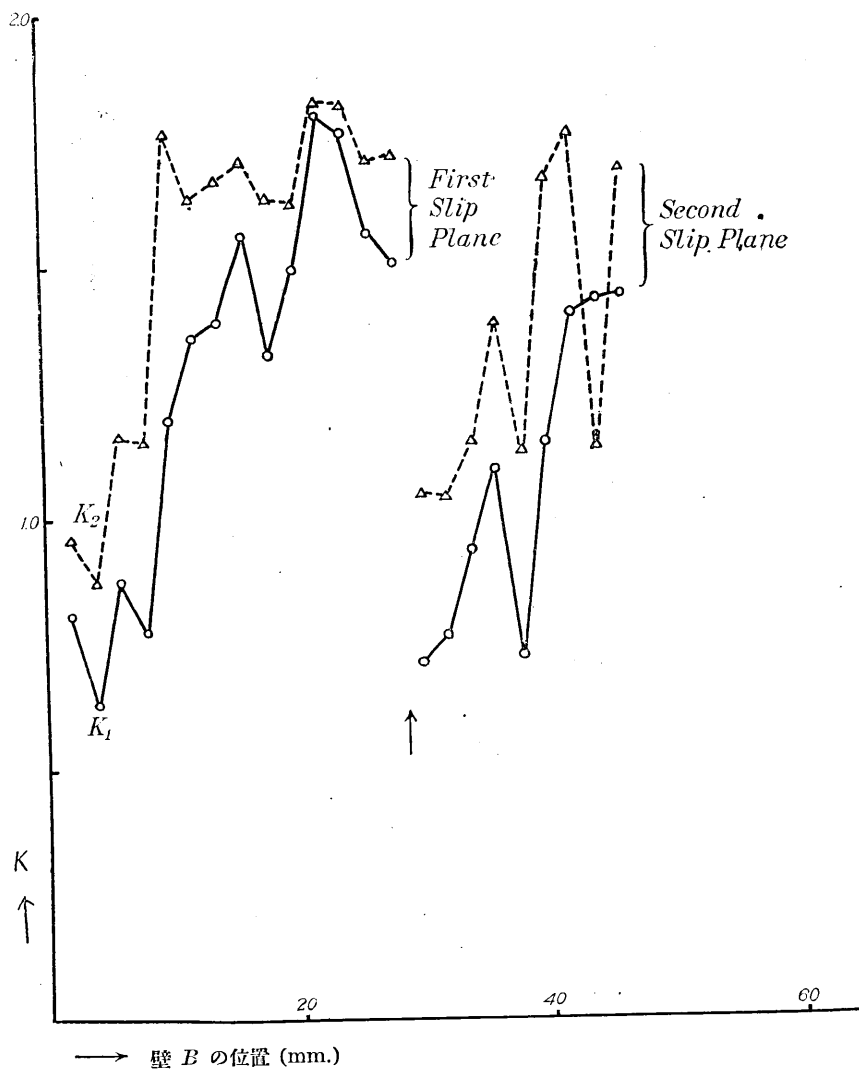


Fig. 8. Closely packed.

K の 變 化

上記の如く滑落面の傾度を示す係数 K が滑落の進行に従つて如何に變化するかが最も興味ある問題であるから、此れに就て少し詳しく述べる事にする。上記の如く滑落面の勾配の急な時は K が小さく、勾配が緩徐な時は K が大きいといふ事を記憶しておいて圖の説明にかゝる。

第九圖 砂粒充填の密なる場合

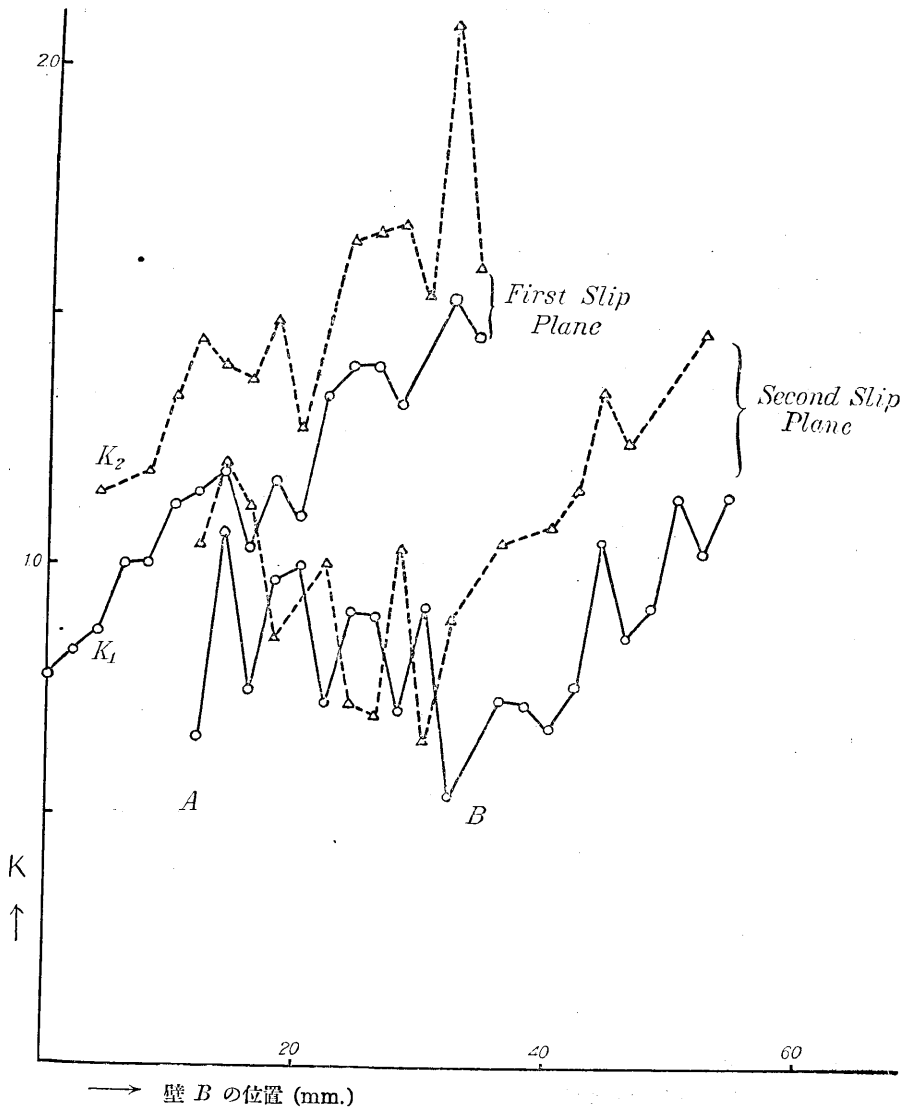


Fig. 9. Closely packed.

第六圖は充填の粗なる場合に於ける K_1 K_2 の變化を示すものである。横軸は左から右に可動壁の動いて行つた距離を示す。

先づ壁が動き始めて數秒又 1 粒位の間は K の價は減ずる傾向がある。即ち砂の充填が密になる傾向がある。これは滑落の爲めの動搖によつて附近に無理の出来て居たのが落着く爲かとも見られる。併しそれから可動壁が進行すると K は段々に増す。即ち段々 loose になる如く見える。これは次第に砂塊が歪を受けて來る事を示すかと考へられる。さうして圖で A の矢で示す處迄行くと第二の滑落面が発生し始める。しかし暫時は第一滑落面の運動も殘存して居る。此の場合に注意すべき事は、第二面が活動を始めると同時に第一面の K が減じ即ちその局部が密になり始める。一方で第二面の最初の K の價は第一面の最初の K よりもずつと小さかつたのが急に増大し始めるのである。即ち第一面の前方の砂塊は落下し又徐々に變形(後條に述べる)はしながら充填は密になりつゝあつた。それが第二面が截斷されるとその附近が急に砂の配列に無理を生じて K が大となるものと考へられる。かくして第二面の K が増長して又或る限界値に近よると、次の第三面の截斷が起るといふ順序である。此際第一面と第二面の最後の K の價が略同じである事は注意すべき事である。

次に第八圖第九圖は最初から砂を落着かせた密充填の場合である。此場合には、豫期される如く、 K は最初小さく、滑落の進行につれて増大する。そして第九圖に示されるやうに、第一滑落面が活動して居る途中(圖の A)から第二の滑落面が現はれて、暫時は第一第二が共存する。¹⁾ 此の期間にも第一面の K は増すが、第二面の K の方が寧ろ減少する傾向を示す位である。即ち第一面の區域の砂層は益々粗になりつゝある間に第二面附近は寧ろ密にならうとするやうに見える。此の事は前の第六圖の場合の初期の K の減少と丁度對應するものと考へれば一應は説明されるのである。

次に第一面の K が愈々増大して或度に達すると突然第一面の滑動は停止し(圖の B の處)、第二面が獨り滑落を續ける、同時に此の第二面の K は段々に増大する。此の後の狀況は大體第六圖の場合に同じである。

以上の現象を明瞭に説明するのは、今の處未だ困難であるが、大體の説明としては次のやうな事が考へられる。

1) 第八圖では此の共存部の第二面の K は略してあるが、大體の狀況は同じである。

最初に密充填の状態にあつたのが、第一滑落面が発生すると、其面の近傍の砂堆は擾亂されて幾分粗になる事は勿論である。従つて其の K は増大する。而してその擾亂は漸次其の附近に波及して行くものと考へられる。今第一滑落面の傾斜が緩くなりつゝある間にも其の面の最下端は、に常に進行中の壁の下端に交はつて居るといふ条件がある。それで結局(第十圖)滑落面は B 壁の進行につれて、或る高さの軸 C のまはりに後方へ廻轉して居るといふ事になる。今此の第一滑落面の傾斜が或る度に達すると(圖の $A'B'$)—即ち其砂の摩擦係数の最低限に相當する角度になると、其の面での滑落は不可能となる。従つて第二面(圖の $A''B'$)で滑落する外はなくなる。其の時の第二面の傾斜は勿論その部分の充填度によつて定まるのであるが、いづれにしても密充填の場合に近いものになる事は明である。

第十圖 A

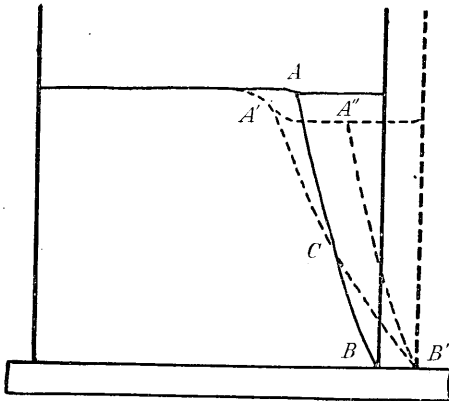


Fig. 10. A

AB or $A''B'$ corresponds to upper limit of friction
 $A'B'$ " " " " " lower " " "

第十圖 B 實際の寫眞により可動壁の位置 ABC に當する滑落面の形状を示す

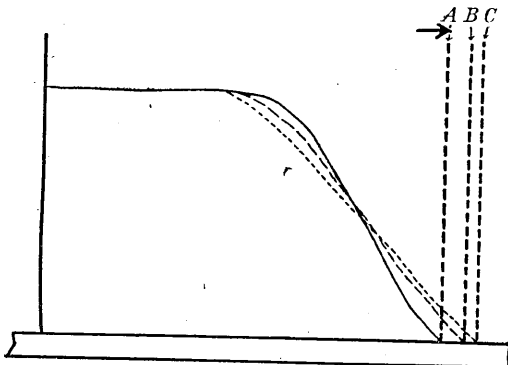


Fig. 10. B Actual positions of Slip-planes as three stages copied from photograms.

實際には $A'B'$ が停止する前に更に $A''B'$ が發生するのは、兩方共に滑落の條件を充たしてゐる事を意味する。此點を精細に論ずるには楔形の落下部内の變形を詳しく知る必要があるので、今の處此れ以上には述べられない。

要するに段階的斷層の幅を定めるものは第一に砂層の深さ、第二には砂層内部に於ける摩擦係数の最大限と最小限との差による K の變化の範圍である事は明

かであらう。

此れに連關して考へられる事は金屬の結晶の變形に際して生ずる slip band と現在の滑落面との機巧の類推である。

Slip band に就ては種々議論があるが、最近 H. J. Gough が Engineer, **143** (1927), 474 に出した現在學說通覽を見ても、兎に角 slip band は最初の弱點であつて、それが滑動の爲に硬化して所謂 self stopping の作用をなす事には疑ないやうである。その stopping の機巧は不明であるが Gough は一つの想像として slip plane が buckle する事を考へて居る。又相隣る微晶體の方向の差異をも考へて居る。

吾々の砂の場合に於ても slip plane が self stopping である點、又 slip plane が偽周期的間隔をもつて出現する事、少くも此の二つの重要な點に於て類似して居るから、その過程の機巧に於ても形式上のアナロジーのある事は明であると思はれる。従つて此の砂の場合の研究は金相學上の重要な問題と連關する事が可成に緊密であると思はれるのである。

n の 變 化

次に n の價に就て一言する。前述の如く n の價の變化は甚だ不規則であつて、可動壁の進行に伴ふて何等系統的の變化を發見し難い。併し第六回第九圖の場合について兎も角も其の變化も調べて見るとそれは第一一圖第一二圖のやうになる。(此圖では實測値を $y = (y_{n-1} + 2y_n + y_{n+1}) / 4$ の方式で滑かにした値が取つてある)。此の圖で云はれる唯一の事は第一滑落面に比して第二滑落面の方が n の價が一體に大きいといふ事である。loose packing の場合即第一一圖で云はれる事は、 n_1 と n_2 の差が前の close の時程著しくないといふ事、並に第一第二滑落面の n の差も餘り著しくない事である。第二滑落面の最初の n_1 が著しく大きいやうであるが、これは偶然であるかどうか今後の實驗で確めなければならない。

要するに此れだけの實驗では packing の度と n の價との關係は不明である。併し前記 K の變化と對照して見ると大體に於て K の大きい事と n の小さい事とが對應すると思はれる。此事は $K_2 > K_1$ であるのに $n_1 > n_2$ である事からも、又第二滑落面の初めの K が大きいのに、初めの n の小さい事からも云はれ得る。 n の大きいのは滑面の曲りの大きい事である。これは充填が密で即ち K の小

第一一圖 砂粒充填の粗なる場合

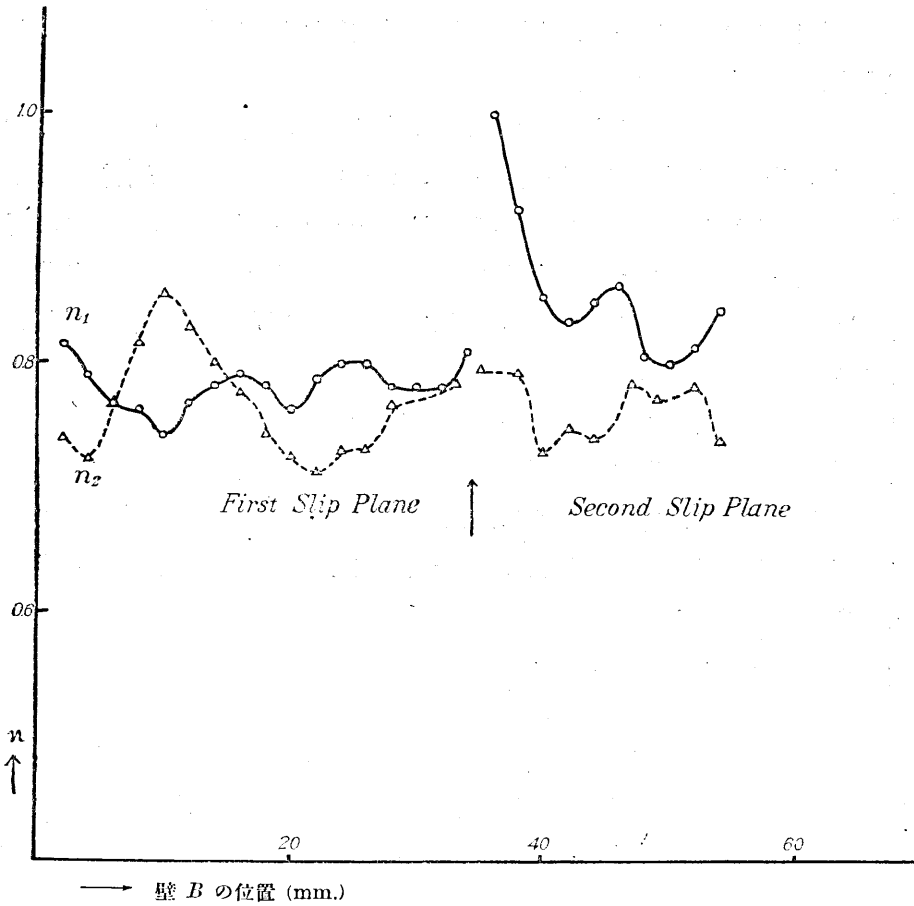


Fig. 11. Loosely packed.

い時に摩擦も増し其爲に曲りも著しくなると解釋する事も出来る。さう考へると、滑面の曲りは器壁の摩擦によるとも考へられる。

併し前記の結果を、正當に解釋し得る爲には K や n の物理的の意味をもつと明にしなければならぬ、併し此の點を明にする爲には容器の大きさや形状、砂の性質等を種々に變へて試験する必要があるので急には目的を達し難いから、今の處唯上の大體の説明に止める外はない。

唯此れに關して参考となるべき一つの事實を下に附記する。

滑落面即ち K や n の不連続を示す點の高さを測つて見ると極めて不規則ではあるが自ら一定の平均値がある。即ち第六圖の close packing の場合に就て云へ

第一二圖 砂粒充填の密なる場合

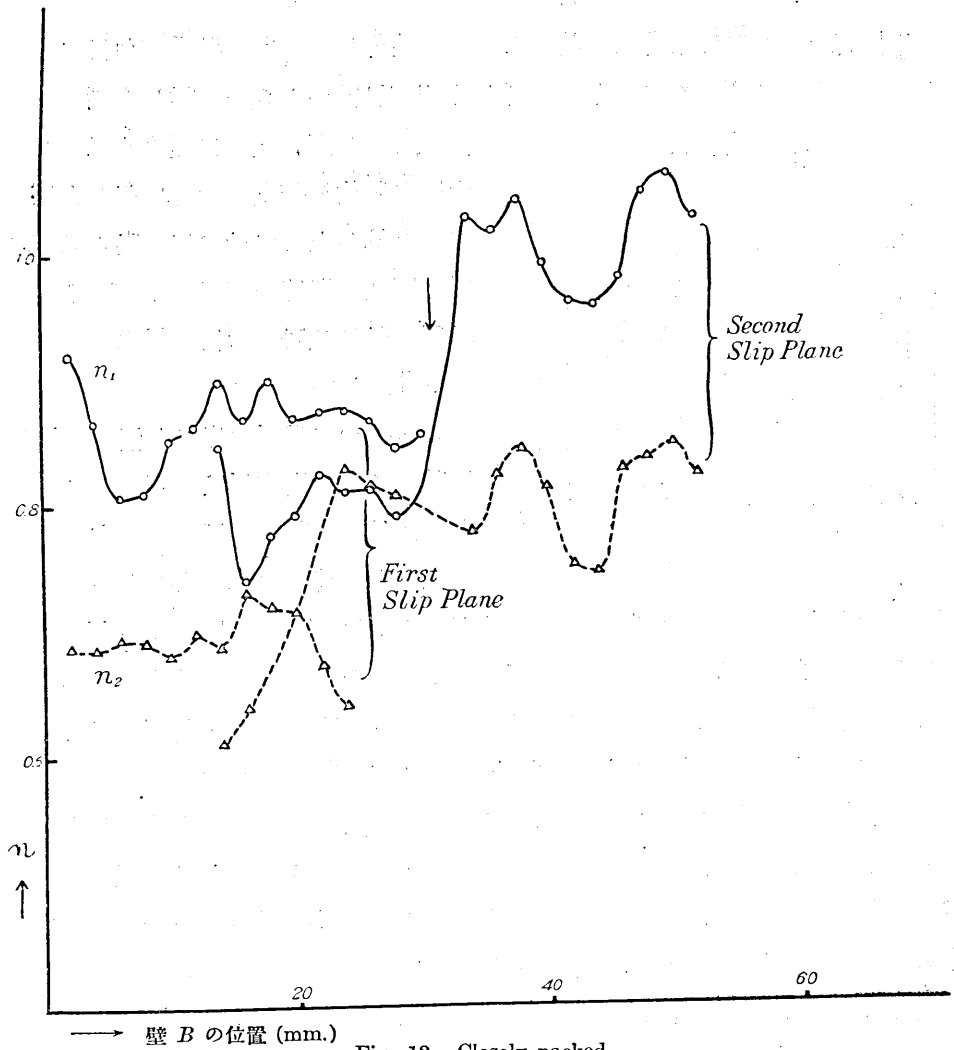


Fig. 12. Closely packed.

ば、第一滑落面で全高の 0.27 (器底から) 第二面で其の 0.30 の處にある。換言すれば器底から測つて砂層の厚さの約三分一の點の上下で滑落面が異なるといふ事になる。

此の不連続は多分横壁の摩擦に起因するものかと思はれる。併し直接に此の點を驗する事は困難である。間接の方法としては、砂層の厚さと長さを恒同とし、幅を系統的に變へ、それによつて上記不連続が如何に影響されるかを驗する事である。此れも將來の問題であると考へられる。

滑落面前方の砂層の變形

次に問題となるのは滑落面の前方にあつて墜落しつゝある砂層が如何なる變形を受けるかといふ事である。此れも詳しく調べればいくらでも詳しく調べられる

第一三圖

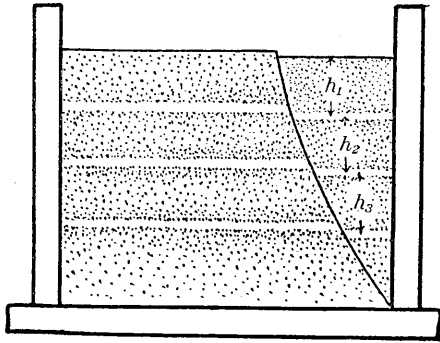


Fig. 13.

問題であるが、茲では最も簡単でしかも大體の状態を知るに都合の好い方法として、寫眞の上で白砂の線で限られた各砂層の厚さ、即第一三圖の h_1, h_2, h_3, h_4 が砂層の崩れる間に如何に變化するかを調べる事とした。

若し一つの砂層の崩れを活動寫眞的に追跡する事が出来れば便利であるが、現在では始めに斷つた通りの不完全な方法であるから精密な事は分らない。それで

唯異なる砂層の一つ一つに就て、可動壁が2 cm. 動く間に生じた h_i の變化 δh_i を測つて見た。此の δh_i も極めて不規則であつて個々の價に就て議論する事は困難である。實際は此の $\delta h_i / h_i$ の價は可動壁の動かし始めの頃と第二滑落面が生じる頃、又此れが生じた後では相違する筈であるが、現在の結果では其區別よりも箇々の實驗の誤差が大きいから識別する事が出来ない。それで此點を度外視して平均を取つて見ると次の表のやうになる。此表には尙各層の水平の長さ l_i とその延び δl_i との比も並べて見た。此の l_i と云ふのは滑落面から可動壁迄の長さを測つたものである。實際には滑落面は上半では後退し下半では前進して居るから l_i の變化には此の爲の變化と、同一砂塊の伸長によるものも兩方が現はれて居るが、先づわざと滑落面が最初のまま固定して居ると想像して見る。

第一表 Table I.

實驗 番號	Packing	$\frac{\delta h_1}{h_1}$	$\frac{\delta l_1}{l_1}$	$\frac{\delta h_2}{h_2}$	$\frac{\delta l_2}{l_2}$	$\frac{\delta h_3}{h_3}$	$\frac{\delta l_3}{l_3}$	$\frac{\delta h_4}{h_4}$	$\frac{\delta l_4}{l_4}$
IV	loose	-0.057	0.154	0.068	0.138	0.163	0.083	0.078	-0.061
V	close	0.052	0.275	0.067	0.107	0.118	0.104	—	—
VI	close	0.083	0.185	0.061	0.174	0.061	0.102	0.213	0.100

第 二 表 Table II.

i	$\left[\frac{\delta l_i}{l_i} / \frac{\delta h_i}{h_i} \right]_{IV}$	$\left[\frac{\delta l_i}{l_i} / \frac{\delta h_i}{h_i} \right]_{V}$	$\left[\frac{\delta l_i}{l_i} / \frac{\delta h_i}{h_i} \right]_{VI}$
1	-2.71	5.30	2.23
2	2.03	1.63	2.85
3	0.51	0.09*	1.67
4	-0.78	—	0.47

* V の場合に第三層に於けるものの値の小さいのは、この場合では第三層が他の場合の第四層即ち最下層に相當する部分であるためであらう。

即ち極めて粗略な言葉で云へば、各層は大體に於て上下の方向には縮む事が分る。それでもし砂の見かけの比重の變化を無視し、又滑落面の變化を一時無視すれば次のやうな關係が成立する譯である。

l = 層の長さ(可動壁の動く方向の)

δl = ,, ,, の變化(増加)

h = 層の厚さ

δh = ,, ,, の變化(減小)

$$hl = \text{const.}$$

$$\frac{\delta h}{h} = -\frac{\delta l}{l}$$

もし各層各均一に延長するとすれば $\delta h/h$ はそれぞれ l に反比例する。従つて下層では上層より遙に大きくならなければならない譯である。實際の結果は上の第一表の通り亂雑であつて此の關係を驗する事も困難であるが、いづれにしてもさうはなつて居ない。

第二表の $\delta l/l$ と $\delta h/h$ との比を見ると、若し滑落面が不動ならば、1 になるべき數が上層に就ては著しく大きく下層では著しく少なくなつて居る。此れは第一〇圖に示す如く滑落面が上部では後退し、下半では前進しつゝある事實によつて了解されるであらう。而して此の比が丁度 1 になるやうな深さが丁度第一〇圖の C 點に相當する譯である。

併しいづれにしても大體に於て h が可動壁の進行と共に減じるのは兎も角も各層が大體に水平方面に伸長しつゝある事を示す此れは一つの注意すべき事實と考へられる。

其 他 の 事 實

上記の解説では滑落面を簡単に幾何學的の面を考へて來たのであるが、實際には此の境界のところの一つの注意すべき構造がある。第一四圖の寫真に示すやうに、圖の左半の全く静止した部分と、右半の滑落しつつある楔形の部分との間には、圖で二つの點線に挟まれたやうな薄い特別な層がある。此の中間層は其左右の質地の間にある粘流動體の如く流動して居るかの如く見える。此際興味ある事は此の境界層の左の質地は剛體の如く、右側の地は少くも彈性固體の如く動きつつある間に、其の二地間の比較的薄き部分だけが、全體としての變動の大部分を引き受けて居る事である。これは他の方面でも云はれて居るやうな、彈性限を超へた場合の「變形の局部集中」といふ事の一例として注目すべきものと思はれる (G. Sachs u. E. Seidl: *Naturwissenschaft*, **13** (1925), 1032 参照)。此の層内に於ける砂粒の相互排列の變化が此の滑面の self-stopping action に多大の關係を有するものと推定される。

尙第一四圖の寫真は前圖よりも更に變形が進んだ後静止したときの寫真である。茲では上記の境界層が一層甚しく變形して居り、又既に第二段の滑落面が生成して居る事が示されて居る。

なほ注意すべき事は、此の境界層の横壁硝子面に接した處で、砂粒の間に隙間が出来て丁度龜裂のやうなものが出る事がある。又同様な龜裂が第二滑落面の生ずる前驅となつて現はれる事もあるやうである。寫真ではこれが明白に分らないが、實物については鮮明に見分けられる。第一五圖にはその大體の形と排置を白い曲折線で示してをく。これは兎も角も此の層の擾亂の甚しい事を示し、つまり loosening を表示するのであらう。

次には參考の爲に loose packing の砂層を沈着せしめる際に各層の沈下の度を測つて見た。これは簡単に考へれば各點の沈下は其當初の高さに比例する筈であるが、實驗の結果によると、表面に近い層の沈下が割合に大きい、これは恐らく矢張り器壁の影響によるものであり、而して又前述の滑落面の不連続と關聯して居ると考へられる。即ち下層の K が一般に大なのは、側壁の摩擦の爲に下層は settle し難い爲めであると解釋される。

以上は砂層の段階的崩落に關して今日迄に行つた實驗の結果の梗概である。此の問題はなほ續いて追究する心算であるから、他日更に幾分進んだ結果を報告す

機会があるであらうと思ふ。

摘 要

- (1) 段階的の山崩れや崖崩れの現象が砂層の崩落によつて模倣される事實に注意した。
- (2) 地殻の斷層生成の如き大規模の現象も亦砂層の模型によつて模倣され得る事を論じた。
- (3) 金屬の歪によつて生ずる slip band の現象と砂層の段階的崩落との間に形式上の類似のある事を指摘した。
- (4) 長方形の箱に盛つた砂層の側壁を徐々に外方に動かす際に生ずる滑落面を調べ、此の形を定める簡単な実験式を求め、其の式の常數が、砂層の充填の粗密によつて如何に變るか、又崩落過程の進行に際して如何に變化するかを調べた。
- (5) 一般に滑落面は二つの面の不連続な接合から成つて居る。
- (6) 砂層の充填が密な場合には粗な場合に比べて滑落面の傾斜が急である。
- (7) 第一段の滑落面が生じて後その面の傾斜は段々減ずる。密充填の場合には第一滑落面の滑落の進行中に第二の滑落面を生じ、暫時の間は兩者同時に進行する。その間に第二滑落面の傾斜は却つて急となる。次に第二滑落面の運動が停止すると、第二滑落面の傾斜は段々緩になる。
- (8) 充填の粗な場合は、第二滑落面の生成と殆んど同時に第一滑落面の運動は停る。
- (9) 滑落面の前方の砂層は前方に延長されて其厚さを減ずる。
- (10) 滑落面に沿ふて特別な薄層が存在し、此の層に主な歪が集中する。此層は二つの固體の間に挿まつた粘性流體であるかのやうに變形する。
- (11) 結論としては次の事が云はれる。即ち第一滑落面の下端は可動壁の下端に接して前進すると同時に上端は K の増大の爲に後退する。そして傾斜が最低限に達すると滑落不可能となる爲、その滑動が停止し、第二滑落面が滑落を擔當する。此の第二滑落面の K は小さいから此の面は傾斜が急である。それで第一滑落面の最後のものと第二面の最初のものとは一定の開きを有し、此れが段階的崩落の幅を決定する。即ち段階の幅は摩擦の最大限と最少限の差及び層の厚さによつて決定されるものである。

終に臨んで、土壓に關する文献に就て物部教授から種々有益なる指導を受けたに對して特に感謝の意を表し度い。又小藤教授が吾々の仕事に興味を懷かれ又有益な暗示を與へられた事を感謝する。

第一圖

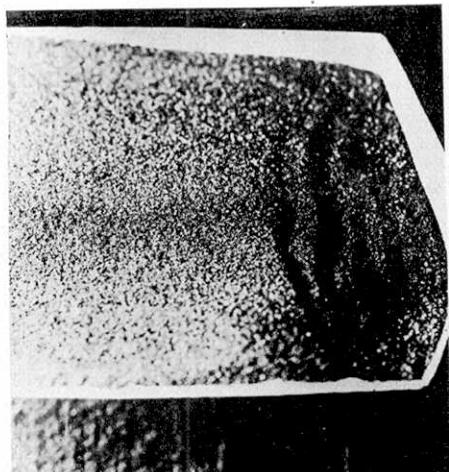


Fig. 1. Step-faults produced in sand by receding the side wall of a cardboard box.

第二圖

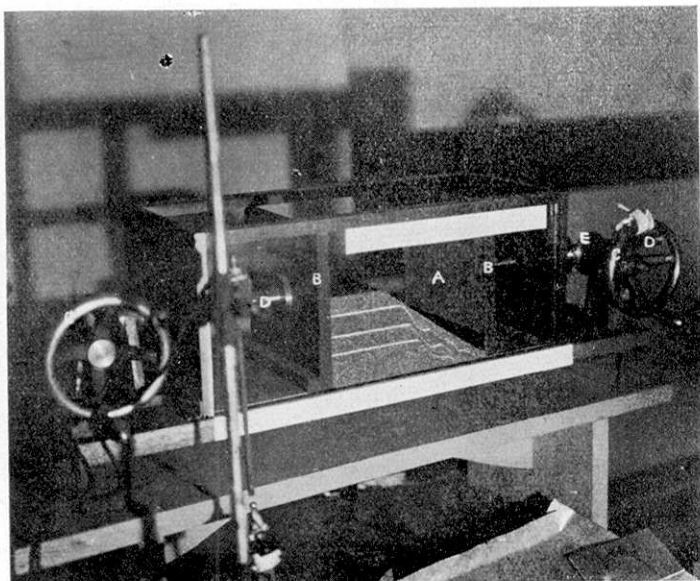
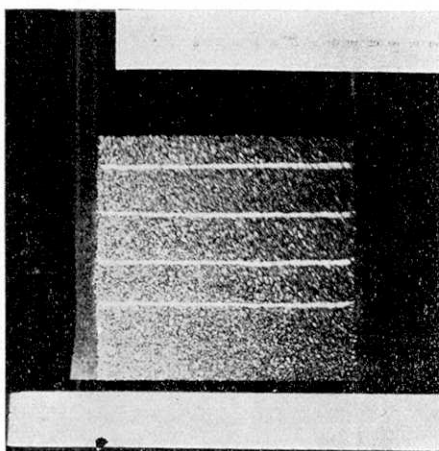


Fig. 2. Apparatus of experiment.

第四圖 (最初に settle しない場合)



(震研彙報第四號、圖版、寺田、宮部)

Fig. 4. Slip motion in the case of loosely packed sand mass.

第五圖 (最初に settle した場合)

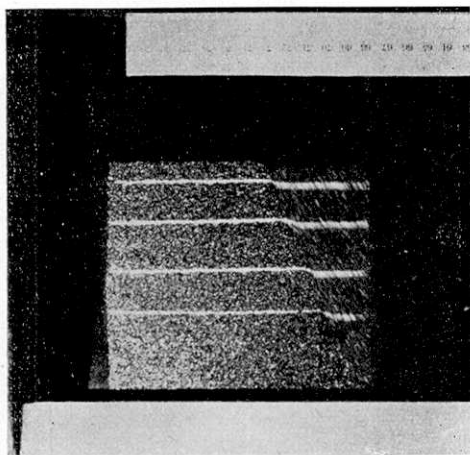


Fig. 5. The same in the case of closely packed mass.

第十四圖

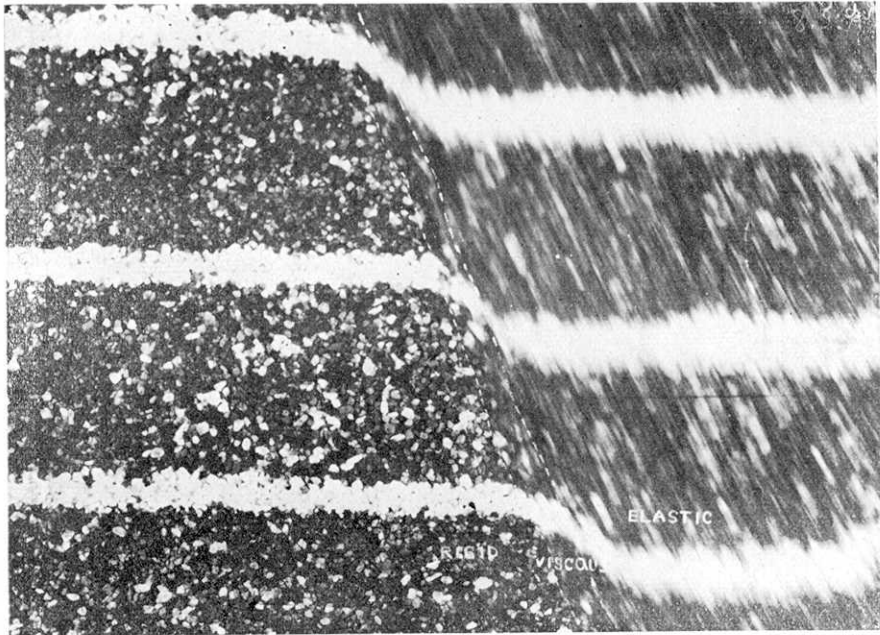


Fig. 14. The boundary between the solid, viscous and elastic parts are shown by dotted lines.

第十五圖

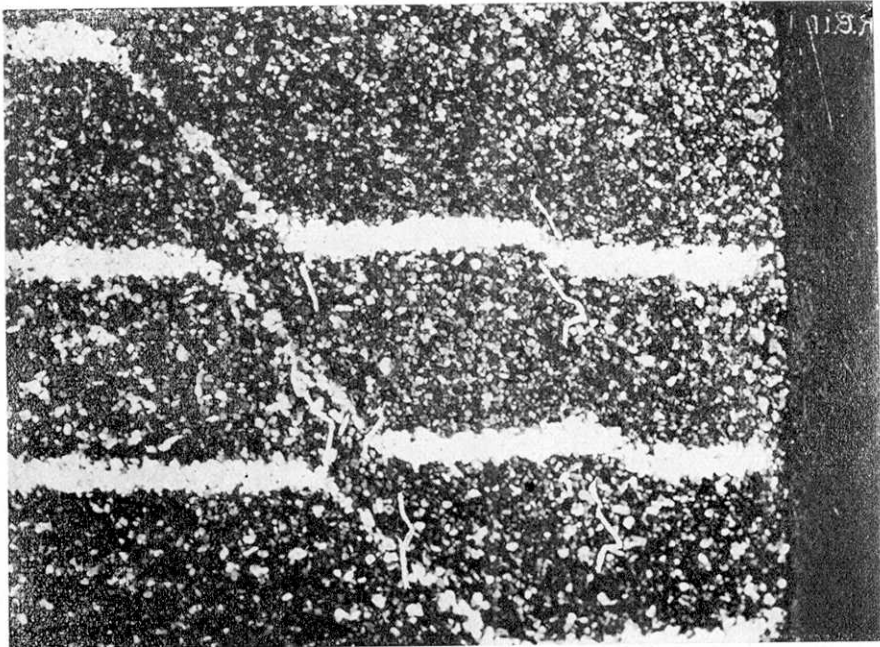


Fig. 15. Cracks in sand mass are marked by white streaks.

TERADA and MIYABE: Experiments on step-faults.