

論 說 報 告

第 27 卷 第 1 號 昭和 16 年 1 月

地 之 面 の 形

(昭和 15 年 4 月 3 日 第 4 回 工 學 會 大 會 講 演 會 に 於 て)

會 員 工 學 博 士 安 藏 善 之 輔*

1. 緒 言

地之面の形は未だ明瞭でない。之を Fellenius の假定の如く圓筒面とすれば簡単であるが、傾斜が急で斜面の長さが大なる場合實際と少し違ふ様である。寧ろ Rösäl や Cain の説に従つて斜面に平行な面を之面とする方が實際に近い。然し是等の人々の研究でも未だ之面の全形は明瞭になつて居ない。蓋し之面の機構は可成複雑であつて張力に因る地割れを伴ふ場合が多いから、之面の全形を知らんと欲せば、土の凝集力に因る抗剪力の外に抗張力をも考慮に入れなければならぬ。著者は先づ理論から之面の形を出し、別に簡単な實驗を爲して之面の形を求め大略理論の不當でない事を確めた。最後に地之防止策に觸れてみた。

2. 地之發生を左右する七要素と其の相互關係

地之發生を左右する要素としては種々なものが擧げられるが力學的見地からすれば次の七つに歸着すると思ふ。

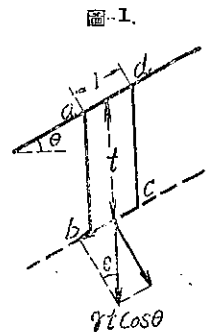
(1) 土地の傾斜 θ , (2) 斜面の長 l , (3) 斜面を構成する風化土砂の鉛直深 t , (4) 土砂の單位容積重量 γ , (5) 土砂の内部摩擦角, (6) 凝集力に因る土の抗剪力 K_s , (7) 同上抗張力 K_t 。

上記諸要素中 (1) から (4) は地之發生を促し、殘は之に反して發生阻止の作用をなすものである。地震の際或は豪雨の直後地之の多く發生を見るのは前者の場合では θ, t, γ の値が瞬間的に増加される爲であり、後者にあつては雨水が地中に滲透して γ を増加し一方 φ, K_s, K_t の値を減ぜしむる結果に外ならない。

是等諸要素の相互關係を求むる爲に圖-1 に於て鉛直深 t なる土層の安定を考へてみる。今此の土層の一部分 $abcd$ が這り落ちない爲には次式が成立しなければならぬ。

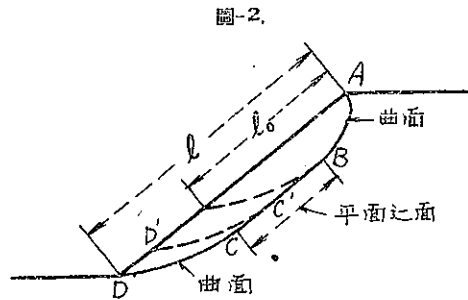
$$\gamma t \cos \theta \sin \theta < \gamma t \cos \theta \tan \varphi + K_s \quad \text{或は} \quad t < \frac{K_s \cos \varphi}{\gamma \cos \theta \sin (\theta - \varphi)} \quad (= t_0) \quad \dots (1)$$

上式は地之が發生するか否かの限界深を示すものであるが、又 K_s, φ, γ, t の五要素の相互關係を示す式でもある。尙 l, K_t の二要素は上式中にはないが之面の一部份の形に影響を與へるものなる事以下に述べる通である。



3. 傾斜面の長 l と之面の形

上述の如く l が或一定値 l_0 よりも大となれば圖-1 の bc 面が之面となつて地之が必ず起る。此の之面は表面に平行であるが圖-2 に示す如く之面の上下兩端附近で曲面をとり地表に出てくる事は實際に認められる所である。此の曲面部分の形に就いては以下に論ずるが l には無關係である。然し平面部分 BC の長は l と共に變化し、 l が l_0 に短縮すれば平面之面の部分は無くなり全部曲面之面となる。此の l_0 は地之發生を可能ならしむる斜面長の最小限度である。即ち斜



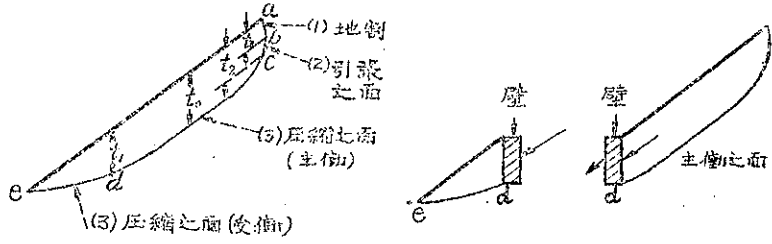
* 九州帝國大學教授

面長が若し之よりも小なれば假令 l が l_0 以上であつても此面の形成を不可能ならしめて地之は起らない(此の事は後述實驗に依て確められる)。依て斜面長を小にする事は地之防止策の一であつて l_0 が其の重要役割をなすのである。此の l_0 の大きさを求めるには是非曲面此面の形を突き止めなくてはならぬ。

4. 此面の機構

上記の理論によれば此面は一般に平面部と二つの曲面部とから成つて居る。此面の最大深は l_0 に等しく斜面長 l には無關係である。此の點圖端此面と異なる所である。又此面に働く直應力は壓力であると一般に考へられて来たが此面の最上端に地割れが生ずる以上少くも其の部分には張力が働いて居るに相違ない(圖-8 参照)。今此の直應力の種類及大きの如何に依て此面を三つの部分即ち (1) 地割れ、(2) 引張此面、(3) 壓縮此面に區別すれば此面の形を求める際の説明が便利である。第一の地割れとは圖-3 (a) 中 ab で示された部分で、 K_0 に等しいか或は少しく大なる張力が働いた爲に口があいたのである。第二の引張此面とは bc で示された部分で口こそあいて居ないが K_0 よりも小さな張力が働いて居る。最後の壓縮此面とは壓力が働いて居る普通の此面である。此の部分をも更に cd , de の二つに分ける事が出来る。前者は圖-3 (e) に示す如く恰も d の位置に壁があるとす夫れが押倒された時生ずる此面に等しいから主働此面と名付けた。又後者は (b) に示す如く d にある壁を押しした時に生ずる此面に等しく依て受働此面と名付けた。是等此面各部分の形を順次求めれば此面の全形を知り得る理である。

圖-3.



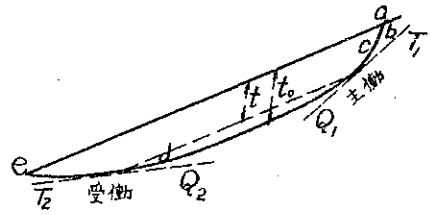
面に區別すれば此面の形を求める際の説明が便利である。第一の地割れとは圖-3 (a) 中 ab で示された部分で、 K_0 に等しいか或は少しく大なる張力が働いた爲に口があいたのである。第二の引張此面とは bc で示された部分で口こそあいて居ないが K_0 よりも小さな張力が働いて居る。最後の壓縮此面とは壓力が働いて居る普通の此面である。此の部分をも更に cd , de の二つに分ける事が出来る。前者は圖-3 (e) に示す如く恰も d の位置に壁があるとす夫れが押倒された時生ずる此面に等しいから主働此面と名付けた。又後者は (b) に示す如く d にある壁を押しした時に生ずる此面に等しく依て受働此面と名付けた。是等此面各部分の形を順次求めれば此面の全形を知り得る理である。

5. 主働及受働此面の形の求め方

圖-4 (b) に示す如く先づ y 軸上に K_0 に相當する長を取り、 A より水下と φ なる角を爲す直線 AM を引く。次に原點 O より x 軸と θ を爲す直線 ON を引き其の上に P 點を取り $OP = \gamma l \cos \theta$ とす。今 P を通過し水平軸上に中心を有し、 AM に切する圓を畫けば一般に二つある。之等二圓の中心を O_1, O_2 とし AM への切點を夫々 T_1, T_2 、 ON との交點を Q_1, Q_2 とすれば Q_1T_1 は l なる深の所の主働此面の方向を示し Q_2T_2 は同じく受働此面の方向を示す事圖-4 (a) の如し。

圖-4.

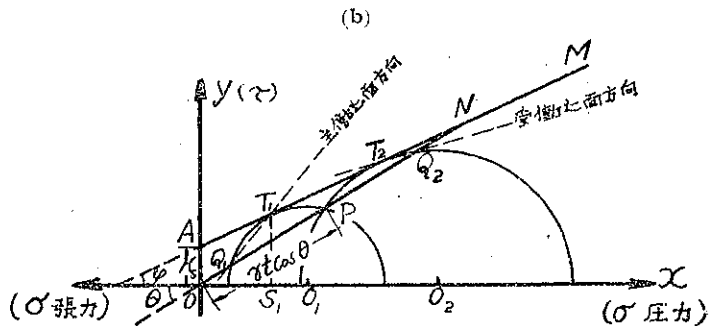
(a)



何となれば是等二圓 O_1, O_2 は夫々主働及受働壓力を求むる場合の Mohr の應力圖であつて、 x 軸は直接應力 (σ)、 y 軸は切面力 (τ) を示すものである。 Q_1T_1 に平行な面に働く直應力は O_1S_1 、切面力は T_1S_1 に相當し圖中明かに $\tau = \sigma \tan \varphi + K_0$ なる極限釣合條件を満足して居る故に此の斷面が此面となるわけである。

斯の如く任意の深さに對する此

面の方向を知る事が出来るから之等を適當に繋ぎ合せば此面の全形を求め得、



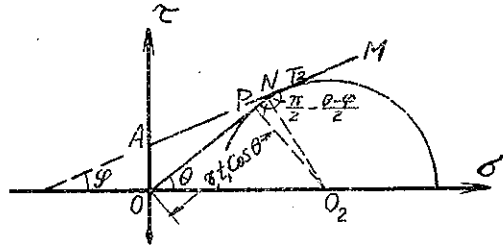
主働及受働面の境の點 d に於ては受働應力圓が主働應力圓に變ずるのであるから圖-4 (b) 中 Q₁ が P に重なり圖-5 に示す如く應力圓は二直線 ON, AM と夫々 P₁, T₂ に於て切する事になる。依て d 點の鉛直深 t₁ は圖より明かに

$$t_1 = \frac{OP}{\gamma \cos \theta} = \frac{OO_2}{\gamma}$$

然るに $OO_2 = ON \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta - \varphi}{2})}{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{\theta + \varphi}{2})} = \frac{K_s \cos \varphi \cos \frac{\theta - \varphi}{2}}{\sin(\theta - \varphi) \cos \frac{\theta + \varphi}{2}}$

$$\therefore t_1 = \frac{K_s \cos \varphi}{\gamma (\sin \theta - \sin \varphi)} \dots \dots \dots (2)$$

圖-5.



6. 引張面の形の求め方

圖-4 (b) に於て t が小となれば T₁ は次第に A に近づく、t が t₂ となつた時に T₁ が A に重つたとすれば面に働く直接應力 σ は零となる。t が t₂ よりも更に小となれば σ は張力となつて所謂引張面の部分に入る。今引張及壓縮面の境の點 C の鉛直深 t₂ を求めるには直線 OP の方程式 τ = σ tan θ と應力圓の方程式 τ² + (σ - K_s tan φ)² = K_s² sec² φ から τ を消去すれば σ 即ち P の横距を求める事が出来る。

$$\sigma = K_s \cos \theta \{ \tan \varphi \cos \theta + \sqrt{\tan^2 \varphi \cos^2 \theta + 1} \} = OP \cos \theta$$

然るに $OP = \gamma t_2 \cos \theta, \therefore t_2 = \frac{\sigma}{\gamma \cos^2 \theta} = \frac{K_s}{\gamma} (\tan \varphi + \sqrt{2 \tan^2 \varphi + 1}) \dots \dots \dots (3)$

引張面に於ては σ が張力であるから壓縮面に用ひた極限釣合條件 τ = σ tan φ + K_s は最早適用出来ない。A. Leon¹⁾ 氏の説に従へば此の部分の應力圓は圖-6 に示す如く AB を繋ぐ曲線外に食み出す事は出来ない。そして此の曲線は次の如く σ と τ の二次式で表はす事が出来る。

圖-6.

$$\tau^2 = A\sigma^2 + 2B\sigma + C \dots \dots \dots (4)$$

上式中 A, B, C の三係数は次の條件から決定される。

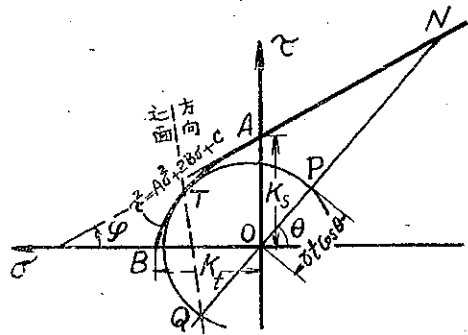
(i) σ = 0, τ = K_s, ∴ C = K_s²

(ii) σ = 0, $\frac{\partial \tau}{\partial \sigma} = \tan \varphi, \therefore B = K_s \tan \varphi$

(iii) σ = -K_s, τ = 0 ∴ $A = \frac{K_s}{K_t} \left(2 \tan \varphi - \frac{K_s}{K_t} \right) = m(2 \tan \varphi - m)$

従つて (4) 式は $\tau^2 = m(2 \tan \varphi - m)\sigma^2 + 2K_s \tan \varphi \sigma + K_s^2$

となる。かく AB 曲線の形がわかれば前同様 x 軸上に中心を有し AB 曲線に切する應力圓を畫き、此の切點 T と直線 OP との交點 Q を結べば之れ深さ t なる所の引張面の方向を示すものである (圖-6 参照)。



7. 地割れの深さと其の形の求め方

地割りに於ては σ = K_t, τ = 0 なる事は明かである。従つて地割上各點の應力圓は皆 B 點に於て AB 曲線に切する

¹⁾ A. Leon; "Über die Rolle des Trennbruches im Rahmen der Mohr'schen Anstrengungshypothese." Bauing., Hft. 31/32, 1934, S. 318-324.

圖-8. (b) 地割, 引張断面及主働断面

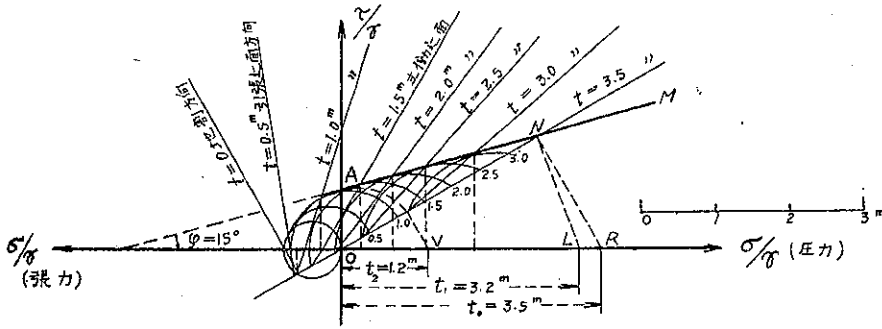
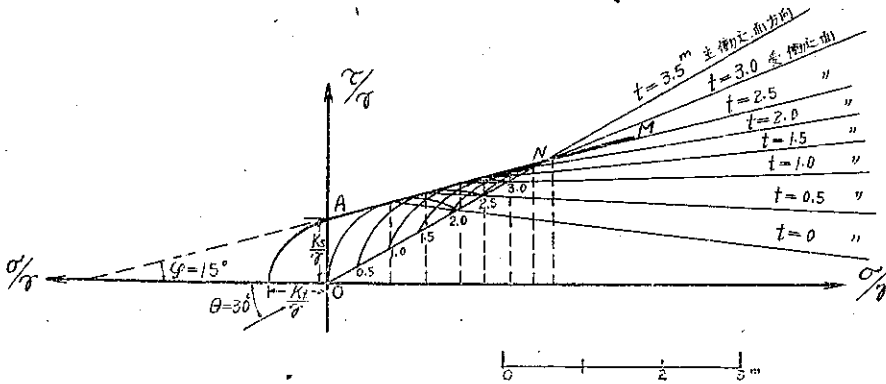


圖-8. (c) 受働断面



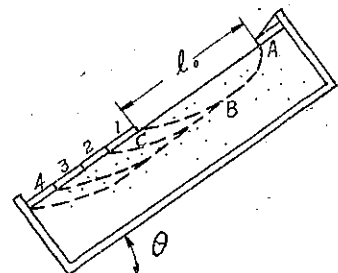
此の場合圖-8 (b), (c) に示す如く縦軸、横軸には單に τ, σ をとらないで $\tau/\gamma, \sigma/\gamma$ として長さの dimension を持つたものを用ひた方が便利である。かくすれば t_1, t_2, t_3 などが圖上簡單に求められる。即ち圖-8 (b) に於て N から ON に立てた垂線及角 ONM の二等分線が水平軸と交る點を夫々 R, L とすれば $OR=t_1, OL=t_2$ である。又 A 點に於て AM に切する應力圓が ON と交る點より ON に垂線を立て水平軸と交る點を V とすれば $OV=t_3$ である。

又同圖に於て各應力圓の AM 上の切點の位置が判れば其の豎距及横距から断面に働く τ 及 σ を求め得。かくして断面の全形と同時にそれに働く τ, σ の分布状態をも求め得るのである (圖-8, (a) 参照)。

9. 實 験

今内法 130 cm, 幅 22 cm, 高 37 cm の木箱を作り一方の側を硝子張にして置く。其の中に濕つた砂を填充す。砂の表面の一部には圖-9 の如く短い板 (1, 2, 3, ...) を載せる。是等の板は取外し出来るが箱を傾けても落ちない様に取付けて置く。右上端にも小さな板があるが之れは其の下側に砂紙を張り其の真下にある砂を押へて移動を妨げ其の板の下端 A から断面が始まる様にしたのである。今箱を徐々に傾け或角度 θ に達すると急に ABC の断面を作つて切り落る。之れ AB 間の距離が θ に對應する l_0 に等しくなつたからである (圖-9 及圖-10 参照)。

圖-9.



次に傾きを其の儘にして 1, 2, 3, ... の板を順次に取外せば落ちさうになつて板で喰止められて居た砂は次々に切り落る。然し断面を調べて見ると第 3 節に述べた如く上下の曲面の形には變化なく只之等曲面間に表面に平行なる平面断面の部分が入つて來ただけである。従つて断面の深さも變らない (圖-11 参照)。

圖-10.

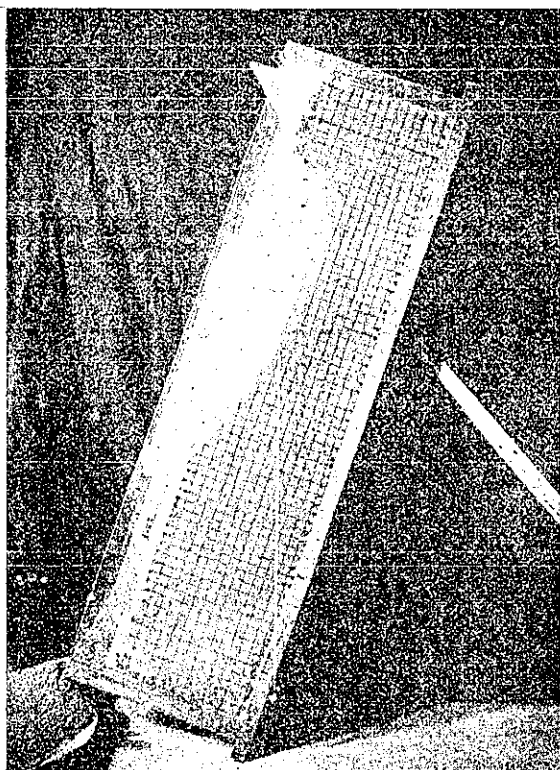


圖-11.

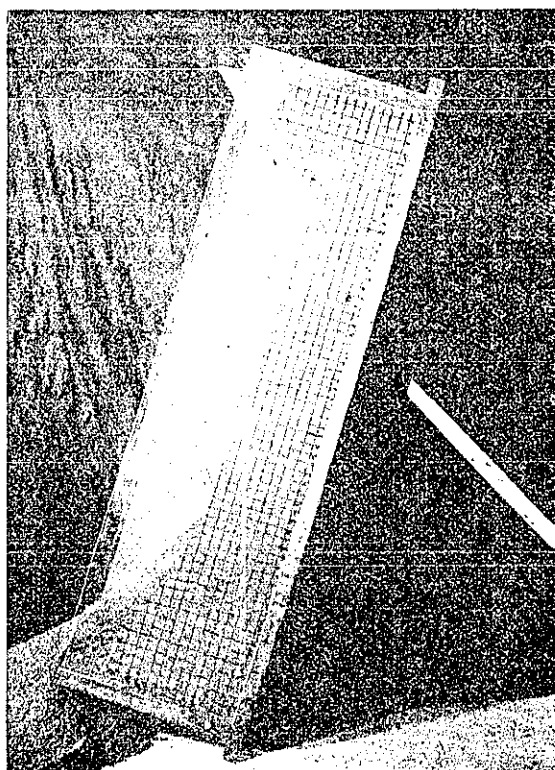


圖-12.

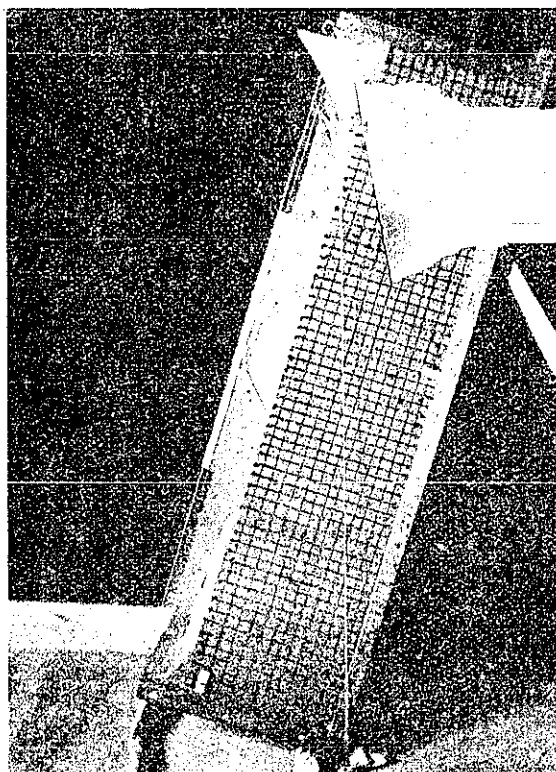
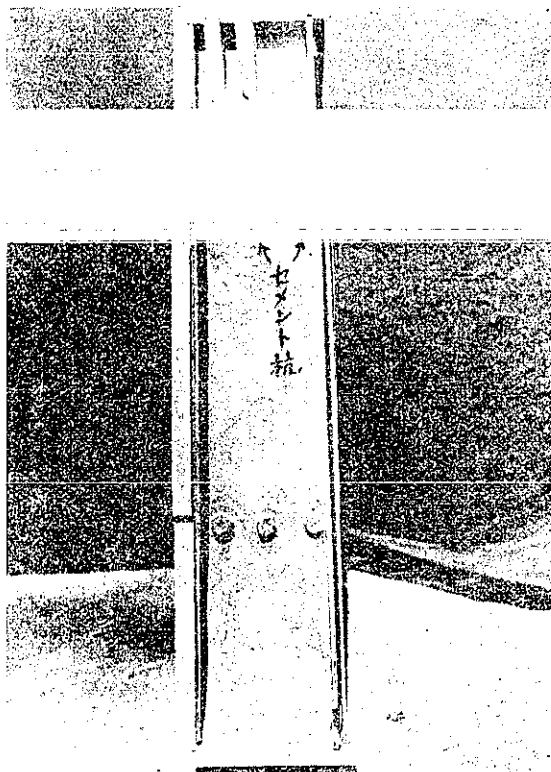


圖-13.



次に同じ砂の中に直径 3 cm の穴を 6 本あけた中にセメント糊を填め其の凝固するのを待つて前同様箱を傾ける。今度は傾斜角を前よりも大にしても中の砂は崩れ落ちない。之れはセメント杭が之面の形成を妨害して居るからである(圖-12, 13 参照)。

上記の箱を更に傾け続けると殆ど直立に近い傾きに達した時中央部セメント杭間の砂がこぼれ落ちた。之れはセメント杭間の距離が新傾斜角 θ' に對應する l' に等しくなつたからである(圖-14 参照)。

10. 地之防止策

上述理論及實驗から地之防止策の根本方針として次の二つが考へられる。

(A) 地之要素をして其の發生を不可能ならしむる事

(B) 之面の形成を妨害する事

(A) は第一節 (1) 式を成立せしむる事であつて次の諸方法が擧げられる。

(i) 山腹土覆りの厚さ t を小にする事、

$$\text{即ち } t < \frac{K_s \cos \varphi}{\gamma \cos \theta \sin(\theta - \varphi)}$$

(ii) 土の重さを軽減させる事、即ち $\gamma < \frac{K_s \cos \varphi}{t \cos \theta \sin(\theta - \varphi)}$

其の爲には土の含水量を少くすべし。又積雪、根の浅い樹木、轉石等山腹上の荷重は孰れも γ 或は t を増加したと同じ意義を持つものであるから避けなければならぬ。但し山麓に近い斜面上の荷重は此の限に非ず(後述参照)。

(iii) 山腹の傾斜を緩にする事、即ち $\sin(2\theta - \varphi) < \sin \varphi + 2K_s \cos \varphi / \gamma t$

(iv) 内部摩擦角 φ を大にする事、即ち $\tan \varphi > \tan \theta - K_s t \cos^2 \theta$

此の目的の爲には斜面を善く保護して雨水の滲透を防ぎ、山頂に貯水池、水口等滲透水の原因となるべきものゝ存在を避け同時に排水をよくすべし。

(v) 土の抗剪力 K_s を増大せしむべし、即ち $K_s > \gamma t \cos \theta \sin(\theta - \varphi) / \cos \varphi$

前同様上の含水量を少くする事必要なれども適度の濕氣は却つて K_s を大にする場合あり。

次に (B) の之面形成を妨害する方法として擧げらるべきもの次の如し。

(i) 斜面の長さを l よりも小にする事(第 3 節参照)。

(ii) 單一斜面とせず圖-15 の如く階段式斜面とする。但し每段斜面長は l よりも小ならしむる事言ふ迄もない。又階段幅は少くも $l \cdot \cot \theta$ よりも大にすべし。尙階段式斜面全體の長さが平均傾斜角 θ' に對應する最小斜面長 l_0' よりも大であれば折角階段に切つても圖-15 に示す如き之面をとつて全體がこぼれ出す懼れがある。

(iii) 斜面に杭を打込み或は樹木を植ゑて之面の形成を妨害する事。此の場合杭或は樹木間の距離は前同様 l 以下にすべきは勿論であるが杭の深さ、樹木の根が l よりも浅いと (A) (ii) に述べたと同じ理で山腹上の荷重となる支けて害あつて益ないものとなる。杭の頭は地之と同理の積雪防止に併用するのでなければ地上に出して置く必要はない。却つて樹木の如く地上に出て居る部分が多いと風の爲に揺り動かされ根元の土を緩め水の滲透を容易ならしむる懼がある。其の他木杭は腐蝕する缺點もあるから前節實驗に行つた様に穴をあけて中にコンクリートを填充する方法が有效であらうと思ふ。又砂質の所ではセメント注入なども得策と考へられる(圖-16, 17 参照)。

圖-14.

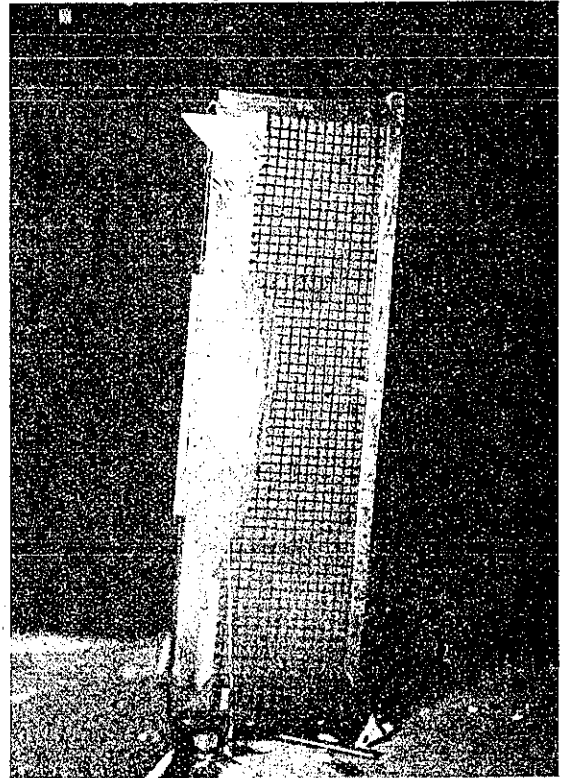


圖-15.

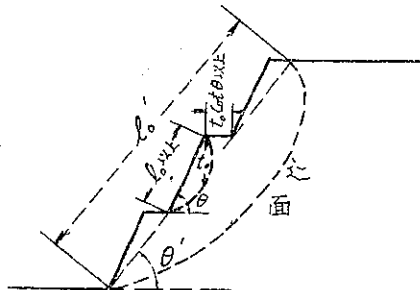


圖-16.

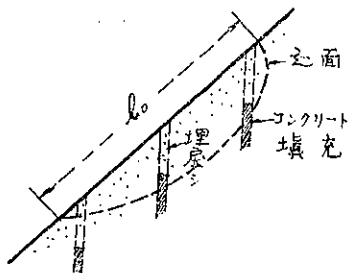


圖-17.

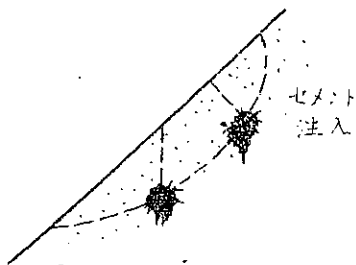
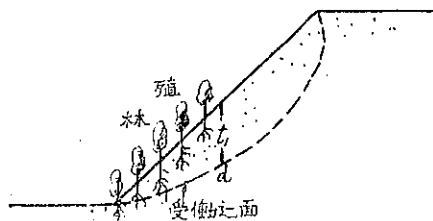


圖-18.



(iv) 山麓附近の斜面上に荷重を載せれば受働土面の形成を妨げるに效がある。此の意味で殖林は山麓に行へばよい。即ち成長の過程でも地之を防ぐ荷重となり、少しく根が張れば浅い受働土面を突抜け得て地之阻止の目的に役立つのである(圖-18 参照)。

11. 結 言

上述理論の結果を要約すれば次の如し。

- (1) 地之発生を左右する要素は七つある。
- (2) 地之面の全形及之れに働く應力分布は圖上簡単に求められる。
- (3) 地之面は形の上から見れば一般に二つの曲面部と平面部とから成立つて居る。
- (4) 曲面部は土面の上下兩端を形成し其の形は斜面の長さには関係がない。
- (5) 平面部は二曲面部の間に介在し、斜面に平行にして斜面の長さと共に増減す。
- (6) 土面の深さは斜面の長さには無関係である。
- (7) 地之面はそれに働く直應力の如何に依つて地割、引張土面、主側壓縮土面、受働壓縮土面の四つの部分に分つ事が出来る。
- (8) 地之防止策の根本方針として地之発生機構の阻止及土面の形成妨害の二つが考へられる。

附記、本研究は日本學術振興會第4(災害)特別委員會の委員の一人として同會の援助を受けて行つたものである。