

土木学会第1回年次学術講演會講演

(応用力学之部 No. 11)

土の力学の最近の趨勢に就て

(On Recent Aspects of Soil Mechanics.)

會員 工学博士 山 口 昇*

1. 總 説 昨夏米國ハーバード大学 300 年祭の折開催した萬國土力学並に基礎工学会議¹⁾の報告に基づいて現時に於ける土の力学の趨勢を述べる。因に著者は不幸出席は出来なかつたが我邦の斯学の概況に就て一報告を送つた。報告書によると同會は出席者 200 名以上であつて 160 の論文が集まり理論、實地兩方面の専門家が約半々であつてこの兩者の連絡を兼ね極めて有效な結果を結んだといふことである。數理論的の寄書も二三あつたが主として實際に直ちに役立つ様な論文が多く見受けられる。

會議は下の 15 部門に分けて之を行つた。

- | | |
|----------------------------|-----------------------|
| (A)* 實驗室に於ける土の試験 | (B)* 天然土の状態の調査及試材の採取法 |
| (C)* 現地に於ける土質研究 | (D)* 土の剪断抵抗力及圧密透水 |
| (E)* 土中の応力分布 | (F)* 構造物の沈下 |
| (G)* 土工並に基礎の安定及堰堤堤防等の勾配の安定 | (H)* 杭の支持力 |
| (I)* 杭の支持力試験 | (J)* 擁壁矢板工隧道被覆等に及ぼす土圧 |
| (K) 地下水の運動及洩水問題 | (L) 道路と土の問題 |
| (M) 工事の爲の土の改良方法 | (N) 基礎の設計及構築に就ての新法 |
| (Z) 雜 | |

今此等の論文中土の力学に直接關係ある部門 (* 印付) に屬して目新しいと思つたものに就て極めて簡単に要旨を述べて見たい。

2. 土力学實驗室 日, 英, 米, 獨, 佛, オランダ, 塊, エジプトの 20 實驗室の内容及仕事に就ての報告あり, 何れも稍似たものであつて完全に一致はしてゐないが土の實驗室といふものはやゝ統制がとれてゐると見てよいであらう。勿論未知の問題が多々あることであるから各實驗室は異つたる發展を遂げることは想像せらるゝが基本的の設備其の他はほぼ大同小異であると思つてよいやうだ。

3. 天然のままの土の試験材採取 土の力学的研究をする上にその研究結果が直接實用に供せらるゝ爲には土の試験材を天然のままの状態で採取することが肝要なことは言を俟たないことで此の爲にはピットを掘つて人手で丁寧に細工して採取出来れば申し分はないが之は地下深い所の土を採取する場合には金がかゝつて常に行ふことは出来難い。従つて多くはボーリングによつて試験材を採取する。ボーリングによつて天然のままの土を採取するといふことは仲々に至難のことである。ボーリングよりも少し小さい径の採取用のパイプを押し込んで探るのが最もよい。その採取器も尖端の齒口のところを 1mm 位内側に肉附して厚くして押し込まれた土が採取パイプの壁に觸れて大なる摩擦を生じ變形することがないやうにしてある (Casagrande 式) のがよいやうである。尙採取用パイプの上端には水抜き孔を作つて置きこゝにゴム製の球を入れて引き揚げの際にはこれが蓋になつてパイ

* 東京帝國大学教授 (昭和 12 年 4 月 10 日講演)

¹⁾ The International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.

ブ内の土を吸ひ揚げ得るやうにしてある(図-1)。尙之を 図-2 の如き砲彈型の尖端を有する心棒に、はめて打ち込む案などは巧妙な案であると思ふ。

然し斯ういふ方法でも極めて軟弱な泥土や粘性の少い砂地では到底天然のままの土を採取することは困難である。砂の場合には薬品で一時堅めて採取した上、土の状態を変えずにその薬品を取り除くことを考へたものがある。

尙又地下から地表に取り出す迄に水や空気に觸れる爲試験材の中央の部分のみが天然のままに残ることやこの部分と雖も高压の地下から地表に出る爲に容積の変化が當然あり得ること(特に土中に瓦斯等の含まれてゐる場合は甚しい)等迄も考へられてゐる。

一方土の天然の儘の採取が困難なる爲、寧ろ地中に地上から尖端の円錐形の棒を立て、この沈下抵抗等を測定して土質を比較することも考へられてゐるがこの方は仲々に詳細な試験は困難である。

4. 土の實驗室内に於ける試験 土の力学的の性質と實驗室内で試験することは他の鉄やコンクリート乃至は木材石材等と同じであるが、只異なる點は土の性質は水の存在によつて之等の普通材料よりは著しく變つて來るといふ點が一つと時置の關係が又著しく働いてくるといふ 2 點にあると思ふ。水の問題の爲には恒温恒濕の室が必要であり、時間の問題には特別に考案された試験機械が必要となる。

各國で一樣に行はれてゐるのは剪断試験、圧密試験、透水試験であつてこの三者は何れも土の力学的性質を決定する基本的試験になつてゐる。この外に器械分析法や Atterberg の稠度試験も一般に行はれてゐることは勿論である。

剪断試験器は Krey の一面剪断器が一番多く行はれてゐるやうである。この用器の端部の影響を除く爲に輪狀の振り試験器の例があるが之は垂直荷重を懸けることが出来ないから粘着力 (cohesion) の値しか出ない。その上この方法では輪狀の断面に働く剪断応力の分布について疑點がある。

通常の圧縮試験によつて剪断強度を計算から出すことも行はれてゐる。図-3 に於てモールの円の示す如く純プラスチックの粘土ならば剪断強 (τ_B) は圧縮強 (σ_B) の $1/2$ で

$$\tau_B = \frac{\sigma_B}{2} = c \dots \dots \dots (1)$$

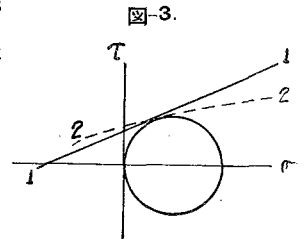
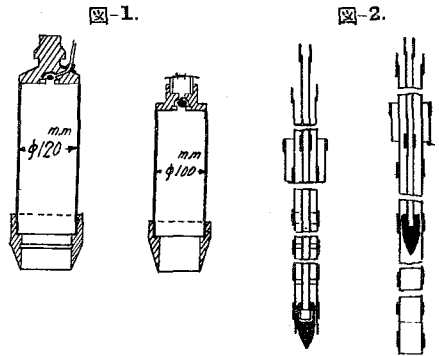
この値は粘着力 (c) に等しくなる。砂交り粘土では

$$\sigma_B = 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\theta}{2} \right) \dots \dots \dots (2)$$

なる故粘着力 (c) が内部摩擦角 (θ) の何れか一方が解れば圧縮強 (σ_B) から他の一方が計算出来る。然し、之は勿論 Coulomb の基本式

$$f = n \tan \theta + c \dots \dots \dots (3)$$

但し f : 剪断抵抗力強度, n : 垂直圧力強度, c, θ : 上の場合と同じく粘着力及内部摩擦角が正しいと假定しての上のことで、この場合には砂交り粘土の圧縮破壊の際に表れる切り面の交互の傾斜角が $90^\circ - \theta$ となるべき筈である(図-4)からこの方から内部摩擦角 θ が知れる故式 (2) から c が出るわけである。或

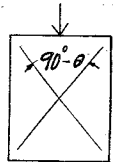


は c を求めるのに先の輪状振り試験を行つてもよい。

然し一方に Coulomb 式の c が必ずしも n に無関係の常數ではないといふ説がある。何となれば土中の間隙が圧力と共に減ずる爲この中の含水量等も変り當然その組織が緻密になつて來てその結果 c は變つて來るといふ。即ちこの場合には

$$f = n \tan \theta_w + f(w) \dots \dots \dots (4)$$

と書くのが至當だといふ説である。 $\theta_w, f(w)$ の w は含水量を示す。図-3 モールの円の破壊限曲線が Coulomb 式によれば (1) の如くに直線であるがこの場合には (2) の如く曲線になつて來る。こうなると 図-4 の切り面の交角も $90^\circ - \theta$ にはならない。こゝに問題が未解決で残つてゐる。

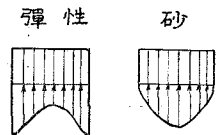


圧密試験は Terzaghi 式の一方向的 (1-dimension) のものが基本になつてゐるが之も必ずしも一方向のみに圧密さるゝ試験器のみの試験でよいかは疑問である。尙この試験とプラスチック流との割合が土塚堤の基礎の問題や重い建造物の沈下の問題に必要となつて來るがこの割合は仲々に解らない。尙圧密の問題は特に時間の変數と考ふべき問題でその點更に研究が必要であらう。

透水試験も一方向的の試験のみ行つてゐる。實驗の場合には土が層状をなしてゐることが多いから方向によつて透水係數が變つてゐやう。それも土の圧密度で變り得る。従つて之等の實驗室内の試験の結果を實用に供するには尙一段と色々なことを考へて試験を行ふ要があると思はれる。

5. 土中の圧力分布並に建物の沈下 地上にのせた荷重が土中に如何なる圧力分布を及ぼすかの問題は依然として Boussinesq の弾性論が多く使はれてゐる。砂の場合には之に多少の變形を施して近似值的に解いてゐるものがある。然し Kögler 等の實驗によれば之は全く異つた結果が出てゐる(図-5 参照)。尙 Boussinesq 論に反對論の有力なるものは Boussinesq 論には土の自重の考が脱落してゐるが土の自重が大なる惰性を有する故相當深い點ではその差異大となるといふ説である。

図-5.



そこでこの問題を單純に近似的に解く方がより實際的であるとの説が出て來て所謂 “Pressure bulb” (圧力球) の説が生れた。図-6 に示す如く同一強度の分布荷重が b 及 B の幅に働いてゐるとき圧力球の深さを各々 t 及 T とすれば

$$\frac{t}{T} = \frac{b}{B} \dots \dots \dots (5)$$

故に今沈下が bulb の径に比例すると假定すれば沈下は荷重面積に比例することゝなる。即ち 図-7 の如き直線となるわけである。之は尙地下に固い層等あるとき單杭には影響無きも群杭には影響を持ち得ることをも 図-8

図-6.

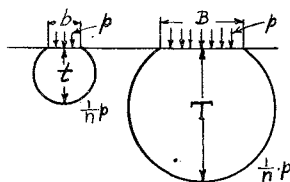


図-7.

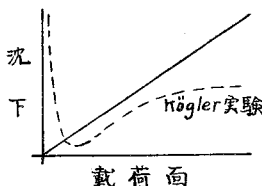
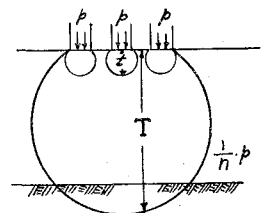


図-8.



の如く如實に示す點等面白い。然し之も Kögler 等の實驗によれば之程單純には行かぬらしい。

尙又實際の場合には 図-9 の如く基礎の土が下方に弱いか横方に弱いかによつて 2 様の全く異つた沈下現象を起す。従つて上述の如くに單純には行かぬ。

Terzaghi は沈下を 2 部分に分けて荷重の際直ちに起る部分と荷重後永い時間経いて起るものに分けてゐる。前者は弾性的のものであつて後者は之とは全く異つて土中の空隙を充たす水が圧縮によつて徐々に押し出される爲に生ずる土の収縮の結果であると云つてゐる。従つて後者には圧密透水の問題が入つて来る。この問題に就ての色々な場合が近來研究され始めてゐる。

尙其の他土が層状をしてゐる爲に一樣に均一と考へては實際と合はないこともあり得るし、未だ理論實際何れも共力を要する點多々ある問題であらう。

6. 法勾配の安定 Résal-Frontard のアカデミカルな理論よりも瑞典式の図解法の方が實際的であると考へられ、Petterson の円弧又は Rendulic の對數螺旋線が使はれてゐる(圖-10 参照)。之に地下水の影響を考へたものもある。

最近安藏教授の考案された假内部摩擦角を深さの函數と考へて求められた迂り面理論は單純にして妙を得たものと思考される。

米國の Fort Peck Earth Dam の基礎ではゼラチンや粘土の模型で応力を求めてゐるがその結果は上述のやうな曲面迂り面理論よりも寧ろ 圖-11 の如く堤下の土が塑性流を起して左右に押し出されてゐると考へる方が妥當であるといふ結論を出してゐる。

圖-10.

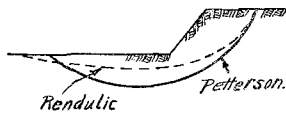
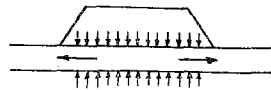


圖-11.



此等の問題は現場の性質に就て一々異つた性質の迂りが起るであらう。従つて凡ての場合に合致する單純なる一數式では實際問題は解けまいと思ふ。

7. 擁壁土圧 此の最も古い土力学の問題に就ては割合に論文が渺かつた。それも 最大最小土圧をねらつた通常の Coulomb 式土圧論は無く、例へば横に突張りを入れる爲に壁後の土に逆圧を加える場合の土圧力とか降雨の爲に地中水が滲みて行く場合等に就て論じてゐる。

突張りをかふ爲に壁後の土に逆圧を加へたときの擁壁土圧はその合力の大きさは Coulomb 土圧と等しく働點が擁壁の高さの下から 1/3 の點から 2/3 の點迄變るといふ結論が出てゐる。

降雨の爲、水が地中に滲み込んで行く場合の土圧には 圖-12 の如く先づ流水の模様を求めてこれから水平でない地下水の水圧を求めて土圧に加算する。

圖-12.

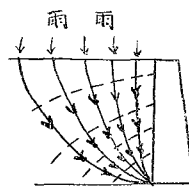
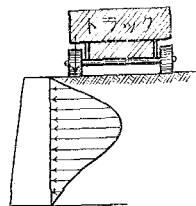


圖-13.

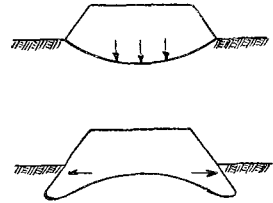


又地表面に部分的に分布された荷重がその近くにある擁壁に如何なる土圧となつて表れるかの問題は Boussinesq-Carothers の弾性論で解かれてゐる(圖-13 参照)。此等は何れも土圧論の特別の場合であつて實際問題としては必要な問題である。換言すれば土圧論も段々と分化して複雑化して來たのである。

8. 杭の支持力 この問題では我土木學會にも最近公式制定の委員會が出来た。

米國土木學會には御承知の通り既にこの特別委員會があつて鋭意この問題の解決に努力してゐる。萬國土力学會の際にもこれ等の委員が一タ集つて外國の専門家とこの問題を特に論じ合つてゐる。

圖-9.



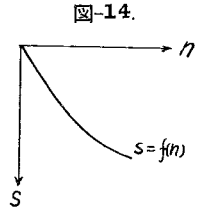
杭の公式に就ては静力学的のもの動力学的のもの何れも理論的論文が出てゐるが理論倒れの感が無きにしも非ずであつて寧ろ單純なる打止公式が實際的のやうである。

$$Re = \alpha QH \dots\dots\dots (6)$$

但 R : 支持力, e : 打止, Q : ハンマーの重量, H : ハンマーの落下高

α : エネルギー効率を示す係数 ≤ 1

α の値が問題であつて之を決定するのに打撃數 (n) と沈下 (s) との関係曲線 (圖-14) を實地についてとつてそれから出す方法が考へられてゐる。假りにこの曲線を拋物線と考へ



$$s^2 = 2a \cdot n \dots\dots\dots (7)$$

但 a : 曲線の parameter

a は $n-s$ 曲線の形によつて決まる。即ちこの内に土質やハンマーの大小, 杭の長短大小の影響等皆入つてゐるわけである。(6) 式から 1 回の打撃による沈下は

$$\frac{ds}{dn} = \frac{s}{a} \dots\dots\dots (8)$$

打止 e は曲線の最終點の (8) 式の値である。

$$\therefore R = \alpha \frac{a}{s} QH \dots\dots\dots (9)$$

尙式中 α の値は a の函數だが

$$a=0 \text{ の場合 (固き岩盤) では } \alpha=1 \quad a=\infty \text{ の場合 (極めて軟弱なる地) では } \alpha=0$$

とし中位の地盤ではその間にとる。

然し打止の公式には尙重大なる問題が残されてゐる。それは打込抵抗と靜かにかゝる荷重に對する抵抗との關係であつてこれは未だ皆目解らぬ。

尙杭に就ては此の外に横の抵抗の論文が二三あつた。單杭群杭の問題もあり既に 5 の所で述べた通りである。以上は主として會議の報告の極めて大ざつばな概要であるが實際問題に對して一々個々別々の扱ひ方を考へてゐる點は著しい進歩であつて千遍一律に一公式であらゆる場合を解かうとする初歩的といふか基礎的研究の時代からいよいよ多種多様な實際問題の場合に入つて行つてゐる點は注目すべきであらう。

尙此の外に土と道路との問題, 土質を薬品等で改良する問題等重要なものが多いが直接土力学に關係が無いから略す。