

講座



土質力学

土の工学的性質とその試験 (2)

正員 齋藤迪孝*

2. 土の剪断抵抗 (続き)

何れの剪断試験機を使用するも、垂直應力と剪断應力、或は2つの主應力から Mohr の包絡線を描き、内部摩擦角と粘着力を求めるのであるが、これは今迄考えられ或は取扱われていた程簡単なものではなく、土の種類、状態、試験方法等によつて異なることは以下述べる通りである。

b. 砂の剪断抵抗

乾燥砂では粘着力はなく、相対密度が大となるに従つて内部摩擦角は増し、Mohr の包絡線は稍と曲つて来るが、これは実際問題としては無視し得る程度である。この包絡線は次式であらわされる。

$$s = p \tan \phi$$

但し s は剪断抵抗、 p は垂直應力、 ϕ は内部摩擦角である。密度が疎な場合は砂の内部摩擦角は略と安息角に等しい。2kg/cm² 以下の圧力で十分締固めた砂の内部摩擦角はこれより 5~10° 大きい。それ故 ϕ の概略値は剪断試験を行わないで求めることができる。ある種の砂では炭酸カルシウムのような固結剤で結合されているのがある。又湿つた砂では見掛けの粘着力をもっている。これらの場合には粘着力を c とすれば次式であらわされる。

$$s = c + p \tan \phi$$

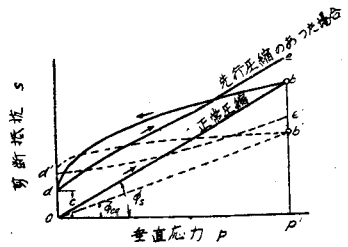
この何れの場合にも内部摩擦角は同じ空隙比で粘着力のない砂のそれに等しい。

水で飽和した砂の低速剪断試験の結果は乾燥状態の場合と殆んど同じで、内部摩擦角が 1~2° 小さいだけである。飽和した砂の迅速剪断で特に注目すべきことは容積変化である。垂直荷重一定の場合、密度が大きい時は膨脹し、小さい時は収縮し、中間に容積変化のない密度の場合がある。又密度一定の場合には、垂直荷重が小さいと膨脹し、大きいと収縮し、中間に容積変化のない場合がある。このように剪断の際に容積変化の生じない密度をその垂直荷重に対する 臨界密度 (Critical Density) と言い、垂直荷重の増大と共に増大する。臨界密度が問題になるのは砂層を挟む基礎地盤の上に堰堤を構築する場合等で、荷重がある程度以上大となり、湛水によつてこの砂層が飽和すると容積変化なしに剪断が起るので破壊の危険が生ずるのである。

c. 粘着力ある土の剪断抵抗

粘着力のある飽和した土の低速剪断の結果は砂の場合と同様に原点を通る直線であらわされる。先行圧縮を受けた粘土ではその効果が見掛けの圧力と言う形で残るので、同じ垂直圧力に対して大きい剪断抵抗を示し、図-5 如くなる。この場合の粘着力 c は砂の場合と違つて先行圧縮應力 p' が増大すると共に増大する。内部摩擦角は正常荷重を受けた場合より若干小さいが、

図-5 剪断各条件に於ける Mohr の包絡線



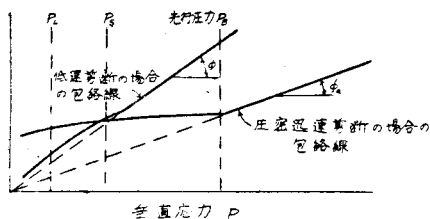
実線は低速剪断試験
点線は圧密迅速剪断試験

例外として 20° 位であることは注目すべきであり、我々の常識として粘土の摩擦角は 0 に近いと言うのは、後に述べるように迅速剪断によつて見掛けの摩擦角を求めているからである。尙最大剪断強サと最終剪断強サとの比は強塑性粘土で 2.5、沈泥質粘土で 1.4 位である。

粘着力のある土では透水度が小さいので、土中の水分に圧力を生じさせないで行う低速剪断は実施が面倒であり、又このような土の破壊は圧密迅速剪断に相当する場が多いので、これが又廣く用いられている。この場合は土中の水分に水圧が働くので粒子間の圧力が減じ、Mohr の包絡線は図-5 点線の如くなり、土によつて見掛けの内部摩擦角の正切が眞のその半分に近いものがある。見掛けの内部摩擦角から眞のそれを求めることは土中の水分の受けている圧力即ち中立應力を知らなければ不可能である。それ故この水圧を測定することのできる特殊の剪断試験機も使用されている。先行圧縮を受けた粘土では前項と同様に剪断抵抗が増大し、粘着力を生じ、内部摩擦角も変り、図-6 の如くなる。

* 鉄道技術研究所土質研究室

図-6 先行圧縮を受けた粘土の低速及び
圧密迅速剪断の場合の包絡線



d. 剪断抵抗に影響を與える因子

土の剪断抵抗に影響を與える因子は非常に多いが、その主なものを述べて見よう。

先づ剪断速度であるが、これによる影響は2通りある。その1は破壊前の排水量、換言すれば破壊の際の水圧であり、その2は塑性抵抗 (Plastic Resistance) と称するものである。前者は速度が小となると排水量が大きくなり水圧が減ずる爲に抵抗は増し、後者は速度が小となると減少する性質のもので、両者相反する傾向がある。

次に現場の土と採取した試料との相違である。採取に際して多少とも土を乱すこと、地中で受けていた荷重を一旦取除いて試験の際に再び荷重を加える爲に履歴効果を與えること、地下水面以下の土では土中の水分が水圧を受けていたのが取除かれ試料が膨脹する爲に水分の中に溶解していた気体が遊離されるが、試験の際に荷重を加へても再び溶解するには長時間を要する爲に地中の試料と相違すること等である。

この外コロイド現象、構造強サ、非等方性等数多くあるが省略する。

e. 試験結果の取扱ひ方

従来の剪断試験機を用い、試験結果から土の剪断強サを

$$\tau = c + p \tan \phi$$

と言う形であらわしても、粘土では通常この c 及び ϕ は一定でなく、先行圧縮、排水、その他の条件に応じて廣範囲に変わり得るものである。又 c 及び ϕ の一定の値を求める爲に低速剪断、又は水圧測定を可能にした圧密迅速剪断を行つた場合でも、剪断の際の条件、例えば側圧一定、或は容積一定等の相違によつて異つた結果を生じるのである。それ故試験結果を用いる際には、試験装置、試験の際の条件等を考慮しなければ誤つた結果を招來することになるから注意すべきである。

3. 土の突固メ特性

土の突固メ試験を最初に系統的に行つたのは R.R. Proctor である。彼の使用した装置及び試験方法が今日突固メの標準方法とされて居り、その後種々の修正案や別方法が提案されている。

a. 試験装置及び試験方法

Proctor の試験装置は径4吋、高さ4.59吋、容積 $1/30$ 立方呎の金属性ワックとこれに取付け取外しの出来る底板及び継足ワック、並に底面積3平方吋、重量5.5封度の突固メ棒とこれに附属した導管とから成立つて居る。この型ワックの中に土を等しい厚サの3層に分けて詰め、各層共突固メ棒を12吋の高サから25回落下

させて突固める。余分の土を削り取り重量を測つて濕潤密度を求め、土の含水量を測定して、乾燥密度を出す。試料としては空氣乾燥をした土の内4番篩を通過するものを用い、土の含水量を逐次増加させて、乾燥密度が極大値を通り越して減少する迄行う。この極大値を最大密度 (Maximum Density)、この時の含水量を最適含水量 (Optimum Moisture Content) と言う。以上の方法が Proctor の標準方法であつて、これに對して土を5層にし、突固め棒の重量を10封度、落下高を18吋にした修正 AASHO 方法、或は2000封度/平方吋の静荷重をかける O. J. Porter の方法等種々の試験方法がある。

b. 土の突固メ特性

土の突固メ効果は、全体としての空隙を小にして含み得る最大含水量を小にすること、土粒子間の水膜の厚さを減じて粒子間の結合を増加することである。普通突固メ効果を乾燥密度で示すが、同一試料にあつては最適含水量に近い程、最初の空氣乾燥程度が大なる程、温度が高い程、繰返し回数が多い程、突固メエネルギーが大なる程、大きい乾燥密度が得られる。又異つた試料にあつては、粒度の適正な材料程、ソイルバインダー (粒径 0.42mm 以上) の性質が良好な程粘土質より砂質に近づく程最大密度が大となる。その外最適含水量で突固めて得られた最大密度の試料と比較して、これより稍と少い含水量で突固めた試料の方が飽和した時の剪断抵抗は大であり、これより稍と多い含水量で突固めた試料は透水係数が急激に減少すると言う様な結果も出されている。

4. 土の透水性

土の透水性は土中の空隙水が土の特性に及ぼす影響と、土中を流れる水そのものとの両面から重要な意義がある。

a. 試験装置及び試験方法

定水位型と変水位型との區別があり、前者は一定の水位の下で滲透する水量を測る方法であり、後者は滲透水量があまり少い場合に水位の低下速度から求めようとする方法である。適用範囲は透水係数が前者では 10^{-3} cm/sec 以上、後者では 10^{-4} cm/sec 以下であるが、 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ cm/sec の範囲では変水位型はあまり信用出来ず、むしろ水平毛細管試験が好結果を與えることとされている。

b. 土の透水性と他の特性との關係

Darcy の法則によれば、土中の水の流速は動水勾配に比例する。比例常数を透水係数と称し、この法則に基いて試験結果から透水係数を計算して求めるのであるが、これについて一寸興味のある事項を若干述べることにする。

透水係数はある簡単な假定を置くことにより次式であらわされる。

$$K = D_s^2 \frac{\gamma_w}{\mu} \frac{e^3}{1+e} c$$

但し K は透水係数であり、他の記号は説明を兼ねて次にのべる。

- i) K は平均粒径 D_s の自乗に關係する。
- ii) 空隙中の液体の比重 γ_w 、及び粘性係数 μ に關係する。
- iii) 空隙比 e に関する。 c はある常数で、ある程度空隙比に關係するから、 $e^3/(1+e)$ は空隙比効

果をあらわす。

- iv) 空隙の形と配列とに関係する。 c を複合形状因子と言う。
 v) 對れには出ていないが、空隙中に残つている気体の量に関係する。

次に空隙中の水の流れが層流から乱流に移れば、この関係は成立しなくなるが、その限界は Fancher, Lewis 及び Barnes の研究によれば次の通りである。

$$v D_s \gamma_w / \mu g \leq 1$$

Hazen の透水係数概算式を用い、動水勾配を 1 とすれば $D_s \leq 0.5 \text{mm}$ となる。このことを考慮に入れて試験を行う必要がある。

5. 結語

土の研究に関する最近の著しい進歩は、従来個々に求められていた土の諸性質が相互に逐次関係つけられて来たことである。例えば圧密により剪断抵抗が増大すると共に空隙が減少し透水係数が小さくなるのか数量的に示される。次に砂から粘土に到る迄のすべての

土を包含して漠然と考えていた土の諸性質が、土を分類することにより夫々明確なワクの中に入れられるようになって来たことである。それは程度の差が質の差にまで発展したと見るべきであらう。例えば剪断強さは砂と粘土とは求め方、解釈の仕方等はずきりと区別する方がよいのではないか。又同じ粘土でも粘土礦物によつて区別して取扱う方向に進んでいる。

一方ふりかへつて我々の現状を見ると、考え方から試験装置に到る迄、すべてが土質力学の搖籃期からあまり進んでいないのではないかと、さきか心細くなる。この際先ず爲すべきことは、土質力学の現状、特に今迄に解明された事実をはずきりと認識すること、及び新しい解釋に基いた試験装置を備え、土そのものから目を外さないことであらう。

土の工学的性質としてはこの外に述べたい事項もあつたが、紙面の都合で割愛した。以上の散漫な内容について諸賢の御批判、御叱責は甘受する覚悟で居ります。

(45頁より)

G. Murphy 著

Advanced mechanics of materials.

McGraw-Hill.(New York)1946.307.p.\$4.25.

最近の応用力学の進歩、現在研究されつつある問題等について、理論的というよりはむしろ実験による解析を主にして、新制大学上級生にわかりやすく解説してあるのが特色の一つである。穴又は切欠きのある棒の引張りの問題でも、穴の位置による応力の変化又は穴に填充物を入れた場合の強さ等について巧妙に面白く説明してあるほか、モールの円を丁寧に且つ平易に説明している。従来教科書が基本的問題にとらわれすぎていた傾向から脱却し、応用力学の学徒に問題の所在を明かにし、研究に大きなエネルギーを供給している点は高く評價してよいと思つている。著者は

Iowa 州立大学の応用力学の教授である。

I. S. Sokolnikoff 著

Mathematical theory of elasticity

McGraw-Hill (New York), 1946. 373p. \$4.50

Los Angeles の California 大学の数学科の教授である著者が、たくみに数学を応用して応用弾性学を説明してあるが、そうかといつて特別数学くさい所がなく反つて概念を明確にしている点は敬服する。特に従来ややもすると不明確に定義されていた最小仕事式を変分法を用いて明瞭に説いてあるのはこの本のすぐれた点でもある。内容はひずみの解析、応力の解析、応力とひずみの関係、はりの引張り、ねじり、曲げ、変分法等であるが、大体各節に参考書練習問題をのせてあり、応用弾性学の理解を一段と助けている。

(久保慶三郎)

アメリカ通信

先月 19 日桑港着陸以來シカゴ、デトロイトを経て 5 月 6 日名にし負う世界の首都ニューヨークに到着した。さて米国土木学会訪問の模様を取敢ず御知らせする。5 月 8 日当地 33w 39th Street の学会事務室に事務局長ケリー氏を訪問し、吾学会に與えられた従来厚誼を深謝し、尙將來もよろしく御願ひする旨申上げたが、同氏は吾学会に対し非常なる好意を持つて居られた。吉田会長よりの御手紙と記念品を贈呈したが非常に喜ばれ、小生読書室で種々調査中態々足を運ばれ重ねて感謝の意を表された。同氏は氣合のかゝりし迫力ある人物で、小生のたどたどしい質問に対しても親切に長時間応答され恐縮した。同学会は会員 28000 名、地方支部 (Local Section) 69、学生支部 (Student

chapter) 127 を算へ、又副会長は 4 名、理事は 19 名、事務局幹部は局長ケリー氏の外、副局長 2 名、経理部長 1 名とから構成され職員は 65 名である。ケリー氏の説明によれば同学会の財政的基礎は頗る強固にて、1949 年度 (年度は 9 月 30 日に終る) の収入額は 749 000 弗で約 380 000 弗は会費収入、残余は出版物及び動産不動産の収入だが、不動産よりの収益丈でも 52 000 弗という豪勢なおその外に銀行株券その他の資産が約 100 000 弗と言う次第で寄附金などは考えた事なしとの景氣の良い話で、吾学会に引き較べ当然とは言え聊か慚然たりし次第である。併し会費は正員 1 年 20 弗、準員 10 弗で当地の物價等より考えれば決して高くはなく、その一は技術部 (Technical Divisions) の活動である。同部は次の部門に分たれる。航空輸送