

講 座

施工例からみた土質工学 (その1)

このたび現場技術者が当面する土質工学上の諸問題を解決するに当り、原理や原則を各種の工事にいか
にして適用してゆくか、施工例および計算例をもって平易に解説し、なお参考文献も添えて理解を容易な
らしめた。
(農業土木試験場 守 谷 正 博)

項目と分担はつぎのとおり。

- | | | |
|------------------|-------------|---------|
| 1. 土質試験と結果の利用 | 愛知用水公団材料試験室 | 宇 梶 文 雄 |
| 2. フィルダムの土質工学 | 愛知用水公団設計二課長 | 藪 亀 淳 夫 |
| 3. 干拓工の土質工学 (I) | 東海農政局設計課長 | 藤 田 則 夫 |
| 4. 干拓工の土質工学 (II) | 農業土木試験場佐賀支場 | |
| | 干拓第2研究室長 | 宮 原 吉 秋 |

I. 土質試験と結果の利用

宇 梶 文 雄*

目 次

1. ま え が き
2. 土質試験の目的
3. 試験の順序
4. サンプルング (試験試料の採取)
 - (1) 試掘によるサンプルング
 - (2) ボーリングによるサンプルング
5. 土の判別・分類試験
 - (1) 試料のとりあつかいと調整
 - (2) 土の基本的性質に関する試験
 - (3) 粒 度 試 験
 - (4) 液性限界・塑性限界試験
 - (5) 有機物含有量の測定
6. 土の力学的性質を求める試験
 - (1) セン断試験
 - (2) 圧 密 試 験
 - (3) 透 水 試 験
 - (4) 締 固 め 試 験
7. 結果の一般的な利用
 - (1) 土の判別・分類試験結果の利用
 - (2) 土の力学試験結果の利用
8. あ と が き

I. ま え が き

最近土質工学の分野は次第に専門化してきており、これに伴って土質試験もまた、対象とする構造物によって試験項目、試験方法などは相違するものであり、われわれが取り扱う農業土木構造物においても、その種類によって土質試験法はおのずと細分化して論議されなければならない。例えばフィルダムや干拓堤防のための土質試

験、水路構造物のための土質試験というふうにある。

したがって画一的に「土質試験と結果の利用」を述べることが適切なものではないが、ここではきわめて一般的で共通的な試験項目のみを取り上げ、もっぱら農業土木構造物の計画、設計、施工に必要とする実用上の面から記述したので、あらかじめその点をお含みおきいただきたい。

II. 土質試験の目的

基礎地盤または築堤材料に関する土の安定性や適性の判定は、工事の設計、施工に大きな影響をおよぼす。その意味から安全かつ経済的に工事を施工するためには、必ず地質調査が伴い、それに併行して土質試験が行われる。土質試験をその目的から大別すると次のようになる。

- (1) 土の判別・分類のための試験
- (2) 土の力学的性質を求めるための試験
- (3) 施工を管理するための試験

これらは、その要求する目的と精度によって室内または現場において、標準的な方法 (主として JIS に定める方法)、改良方法 (標準方法を設計、施工条件に合うように改良した方法)、簡便法など適宜の方法で行われる。土の判別・分類のための試験には、物理試験すなわち比重、含水量、粒度、コンシステンシーなどの諸試験が行われる。土の力学的性質を求める試験には、構造物の安

* 愛知用水公団材料試験室

表-1 土質試験項目一覧表

試験項目	区分	計画段階		設計段階		施工段階		試験法規格
		基礎地盤	材料	基礎地盤	材料	基礎地盤	材料	
		必ず	適宜	必ず	適宜	必ず	適宜	
土の判別・分類試験	比重	○		○		○		JISA 1202
	含水量	○		○		○		JISA 1203
	粒度	○		○		○		JISA 1204
	単位体積重量	○		○		○		土質工学会
	液性限界		○	○		○		JISA 1205
	塑性限界		○	○		○		JISA 1206
	収縮限界					○		JISA 1209
	遠心含水当量					○		JISA 1207
	現場含水当量					○		JISA 1208
	有機物含有量		○		○	○		土質工学会
可溶成分含有量		○		○	○		土質工学会	
PH値の測定		○		○	○			
PF値の測定		○		○	○			
土を力学的に試験する	せん断	○		○		○		○ 一輪試験 JISA 1216
	圧密		○		○		○	○ JISA 1217
	透水		○		○		○	○ JISA 1218
	締固め		○		○		○	○ JISA 1210
現位置試験	CBR			○		○		○ JISA 1211
	標準貫入	○			○			○ JISA 1219
	平板載荷		○		○			○ JISA 1215
	サウンディング(ベーンデニング)		○		○			土質工学会
	現場透水	○			○			土質工学会

IV. サンプリング

(試験試料の採取)

土質試験が成功するかどうかの一つの鍵は、サンプリングの良否にかかっている。いかに注意して正確な試験を行っても、現場の状態を真に代表する試料について試験しなければ試験結果が無意味になるからである。したがって設計と施工条件を十分考慮して、真の代表試料を採取することがサンプリングの基本事項となる。サンプリングは試掘またはボーリングによって行われるのが普通であり、目的によって「乱した試料」または「乱さない試料」を採取する。

(1) 試掘によるサンプリング

① 乱した試料 主として築堤材料の試料採取のため

定性、支持力などの判定のための力学試験すなわちせん断試験、圧密試験などが行われる。また施工を管理するための試験には、主に含水量、密度、締固め試験が行われ、設計条件と現場の施工とが合致しているかどうかの判定資料を求める。

III. 試験の順序

土質試験は工事の計画、設計、施工段階において、それぞれの目的を達するよう、その方法、精度を考慮して順次行わなければならない。

① 計画段階における土質試験 工事計画に既応した土質の概要を知るためのもので、計画ないし予備設計に必要な精度をもった定量的試験を行う。

② 設計段階における土質試験 実施設計に応じ基礎地盤および築堤材料について、それぞれの目的に合致した方法と精度をもつ詳細な土質試験を行う。

③ 施工段階における土質試験 工事の施工に応じ管理試験を行う。

以上を総括し、各段階における土質試験項目を表-1に示す。

に行う。採取にあたっては、地層の変わると、または代表地点における試料を 20kg 程度かきおこし、これをビニール袋など気密の保てる袋に入れ、口を堅くして含水量が変わらないようにし、Sta No, 試掘 No, 深度、採取年月日など必要事項を記入しておく。

② 乱さない試料 基礎地盤や築堤材料など主に浅い位置における自然試料を採取するために行う。採取にあたっては、試掘坑の側壁または底面から 図-1 のような試料缶に入る大きさに土をていねいに削り取り缶に納める。そのままでは運搬中に土が乱されるので、缶と試料との間は同質の土でスキ間をつめ、含水量を変えないよう蓋をしてからビニールテープなどで密閉する。缶には Sta No, 試掘 No, 深度、採取年月日、試料の上下方向など必要事項を記入しておく。

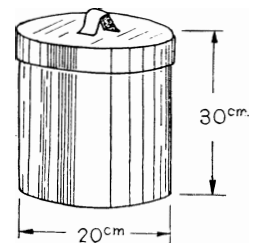


図-1 試料缶の一例

(2) ボーリングによるサンプリング

ボーリングによるサンプリング

表-2 各種のサンプラーとその適応

サンプラーの名称	分類	サンプルチューブ	断面積比	適応土性	必要な孔径
シンウォールサンプラー	固定ピストンサンプラー	径：約75mm 肉厚：1.1~1.3mm 材質：真チユウまたは鋼	7~11%	軟弱な粘性土 N値0~4	85mm以上
コンボジットサンプラー	固定ピストンサンプラー	径：約75mm 肉厚：1.3~3mm 材質：真チユウまたはプラスチック	30%±	やわらかい粘性土 ゆるい砂 N値0~8	85mm以上
追切りサンプラー	固定ピストンサンプラー	シンウォールサンプラーと同じ	7~11%	軟弱な粘性土 N値0~4	115mm以上
フォイルサンプラー	固定ピストンサンプラー	サンプルチューブ 径：70mm 肉厚：4.5mm 材質：鋼 フォイルチューブ 幅：12mm 肉厚0.1mm 材質：鋼	210%	軟弱な粘性土 N値0~4 とくに、表層から連続して軟弱な地層の分布するところ	通常はボーリングを必要としない。ボーリング孔を使用する場合には125mm以上
デニソン型サンプラー	オープンドライブサンプラー	一般には、シンウォールサンプラーと同じものを使用している	7~11%	やがやたい粘性土 N値4~20	100mm以上

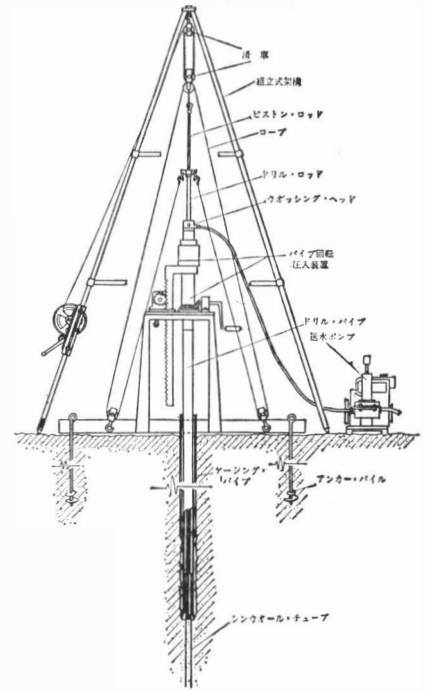


写真-1 ボーリング使用例（乱さない試料採取用）

リングは主に乱さない基礎地盤の自然試料を採取するために行う。その良否はサンプラーの性能と現場技術者の採取技術によって決まる。サンプラーには、それぞれ適応する土性があるから、予備調査で明らかになった結果から適切なサンプラーを表-2のように選定する。試料の採取個数は地盤の均一性によって決められるもので、層相の変化が激しければ密に採取する。採取した試料は含水量が変化しないように、ただちにシールし Sta No, Boring No, 深度, 採取年月日など記入しておく, 試料の運搬・保管にあたっては、サンプルチューブを傷つけたり、衝撃を与えたりしないよう慎重に取扱う必要がある^{1) 2)}。

ただし、わが国の火山灰土や有機質土は、土を乾燥させると物理的性質が自然のときと変わることがあるので、このような土を取扱う場合は、土を乾燥せず湿潤状態のまま調製する必要がある。

（2）土の基本的性質に関する試験
① 土粒子の比重試験（JIS A 120 2）JI Sの方法による土粒子の比重試験は、ピクノメーター（容量100cc以上の体積測定用フラスコ、または容量50cc以上のスト

V. 土の判別・分類試験³⁾

試験の種類は表-3に示すとおりで、ここではわれわれが取扱う主な試験の標準方法について、その要約と問題点などを述べる。

(1) 試料の取扱いと調製（JIS A 120 1）

試験試料の調製方法を定めて、つねにその方法で調製した試料について一定の試験を行うことは、すべての試験データが互いに有意義に比較でき、設計の資料として役立てることができるので大変重要なことである。とくに土の分類のために行う試験は同一条件のもとで調製した試料を用いたものでなければ価値がない。その意味から JI Sの方法は、土を乾燥させて調製するように規定してある。このように調製した試料を 2.0mm 網フルイでフルイ分け、通過部分を粒度試験、比重試験の試料とする。さらに残りを 0.42mm 網フルイでフルイ分け、通過部分をコンシステンシーなどの物理試験に使用する。

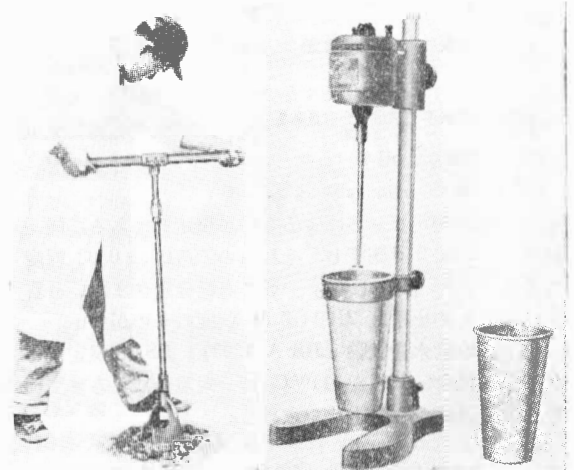


写真-2 オーガー・ボーリング使用例（乱した試料採取用）

写真-3 粒度試験・分散装置の一例

表-3 土の判別・分類試験の種類一覧表

試験の名称	試験結果から求める値	試料の状態	試験結果の利用	試験法の規格
一般観察	色、臭気、組織、構造、粒子の性質、コンシステンシー一般、乾燥強さ	乱した試料採取	土の簡易な判別 土質試験計画の決定	
土の基本的性質の試験				
含水量の測定	含水比 $W(\%)$	含水量が変化していない採取試料		JIS A 1203 土の含水量試験方法
湿潤密度の測定	湿潤密度 $\gamma_t(\text{g}/\text{cm}^3)$ 乾燥密度 $\gamma_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	乱さない採取試料	土の締固められた度合を示す単位として利用 水分分析の計算に必要	
土粒子の密度測定	土粒子の密度 $\gamma_s(\text{g}/\text{cm}^3)$ 間ゲキ比 e 飽和度 $S_r(\%)$	乱した採取試料		JIS A 1202 土粒子の比重試験方法
相対密度の測定	最大間ゲキ比 e_{max} 相対密度 I_p	乱した採取試料	自然状態の砂質土の安定性の判定	
粒度試験	粒径加積曲線 フルイ分析 水分分析 {有効径 $D_{10}(\text{mm})$ 均等係数 U_c	乱した採取試料	粒度による土の分類、材料としての土の規定	JIS A 1204 土の粒度試験方法*
コンシステンシー試験		乱した採取試料	コンシステンシーによる土の分類材料としての土の規定	
液性限界の測定	液性限界 $W_L(\%)$ 流動指数 I_f		W_L と I_p の関係から塑性図を描く	JIS A 1205 土の液性限界試験方法
塑性限界の測定	塑性限界 $W_p(\%)$ 塑性指数 I_p コンシステンシー指数 I_c タフネス指数 I_t		自然状態の粘性土の安定性の判定	JIS A 1206 土の塑性限界試験方法
収縮限界の測定	収縮限界 $W_s(\%)$ 収縮比 R 体積変化線収縮 $C(\%)$ 線収縮 $L_s(\%)$			JIS A 1209 土の収縮常数の試験方法
含水当量試験	遠心含水当量 $W_c(\%)$	乱した採取試料	A ASHO 法による土の分類	JIS A 1207 土の遠心含水当量試験方法
現場含水当量の測定	現場含水当量 $W_f(\%)$			JIS A 1208 土の現場含水当量試験方法
土の化学的性質の試験		乱した採取試料	土の安定処理方法の検討	
有機物含有量の測定	有機物含有量 (g) 強熱減量 (g) 分解度 (%)			
硫酸塩含有量の測定	硫酸塩含有量あるいは等級 (g)			
pH 値の測定	pH 値			

(注) * 土質工学会暫定改訂案による。

ッパ付き測定ビン) によるものが規定してある。同一試料について 3 コ測定し、それらの誤差は ± 0.02 程度であることが望ましい。一般に有機分を含まない砂質土、粘性土の比重は 2.60~2.80 程度のものが多い。

② 土の含水量試験 (JIS A 1203) JIS に規定する含水量試験は、試料を 110°C で一定重量になるまで炉乾燥し、次式から含水比を求める。

$$\text{含水比} = \frac{(\text{湿潤土} + \text{容器})\text{の重量} - (\text{乾燥土} + \text{容器})\text{の重量}}{(\text{乾燥土} + \text{容器})\text{の重量} - \text{容器の重量}} \times 100(\%) \dots\dots(1)$$

この方法は電気乾燥炉と長時間を必要とするので、測定時間を短縮したい場合、または電源のない場合には、簡便法(赤外線電球による乾燥、土をフライパンに入れ直接火で加熱する方法、土にアルコールをかけ燃焼させる方法、ピクノメーターによる方法など)によることがある。この場合は、前もって測定値を標準方法と比較しておく方がよい。一般に砂質土の含水比は 5~20% 程度であり、粘性土の含水比は 30~150% 程度のものが多い。

③ 単位体積重量試験 単位体積重量試験によって湿潤土の単位体積重量(湿潤密度)と土粒子のみの乾燥単位体積重量(乾燥密度)を測定する。湿潤密度測定は普通、成形法(試料を円柱または角柱に成形し、その成形供試体の寸法をはかって体積を算出し、同時にその重量をはかって単位体積重量を求める)による。乾燥密度は湿潤密度と含水比から次式によって求められる。

$$\text{乾燥密度} = \frac{\text{湿潤密度}}{100 + \text{含水比}} (\text{g}/\text{cm}^3) \dots\dots(2)$$

一般に砂質土、粘性土の湿潤密度(乱さない試料)は 1.5~2.2 g/cm³ 程度のものが多い。

(3) 粒度試験 (JIS A 1204)

JIS に規定する粒度試験は、2.0mm 網フルイを通過した試料を分散装置によって分散させ、比重計によって懸濁液の濃度を経過時間に対して測定する。その後試料を 200# (0.074mm) 網フルイで水洗いし、残った粗粒部分をフルイ分けて土粒子の粒径に対する通過重量百分率を求める。一方、細粒部分も測定した濃度から Stokes の法則によって粒径が求まるからおなじように粒径に対する通過百分率を求めることができ、粗細粒部分を

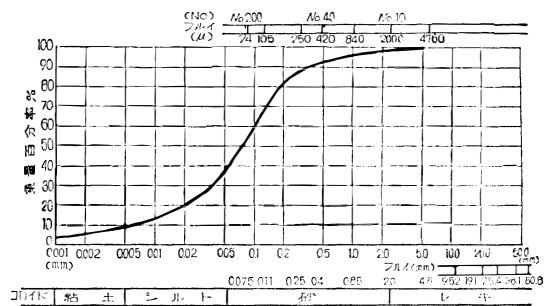


図 2 粒径加積曲線の一例

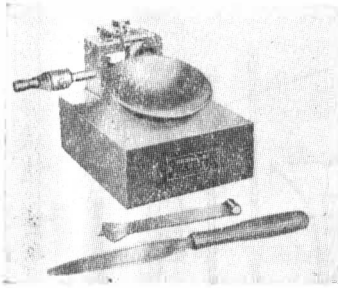


写真-4 液性限界測定装置の一例

や有機質土などの細粒土の分散処理法はとくに注意を要する。

(4) 液性限界・塑性限界試験 (JIS A 1205, 1206)

粘性土などでは含水比がある限度を越えて高くなると、強さはおろか流動に対する抵抗を失なって、まったく液体状になる。含水比が適当であれば加えた力に応じて自由に変形する塑性の状態になり、またある限界を越えてかわいた状態になると、土の体積が収縮すると同時にもろくなり塑性を失ってしまう。つまり粘性土の場合、水分の多少によって液性から塑性そして固体の状態に変化する。各状態のそれぞれの限界に達したときの含水比に相当するのが、液性限界であり、塑性限界である。なおこの外に土がある限界を越えて乾燥すると体積が収縮しない固体の状態に達する。この限界を収縮限界と称している。以上を総括すると次のようになる。

液性—(液性限界)—塑性—(塑性限界)—半固体—(収縮限界)—固体

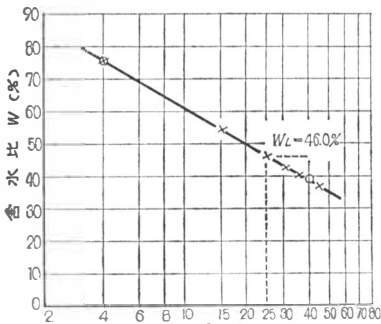


図-3 液性、塑性限界、流動指数の求め方

$W_L = 46.0\%$

$W_P = 20.2\%$

$I_P = 25.8$

$I_F = 35.6$

$$I_F = \frac{W_L - W_{40}}{\log_{10} 40 - \log_{10} 4} = \frac{74.6 - 39.0}{\log_{10} 40 / 4} = \frac{35.6}{1} = 35.6$$

合わせて粒徑加積曲線を描くことができる。その一例を 図-2 に示す。粒度試験において最も注意すべき点は、試料を分散させるための分散剤の選定であって、ある種の火山灰土

比をもつ土を入れたサラを 1 cm の落下高で落して土に刻み込んだミゾがとじるまで衝動させ、そのときの落下回数を求める。このような作業を順次含水比を変えた試料について行えば、落下回数に対する含水比は、ほぼ直線的に変化するので 25 回打撃のときの含水比を図から求めて液性限界の値とする。その一例を 図-3 に示す。

② 塑性限界試験 JIS に規定する塑性限界試験は、0.12mm 網フルイを通過した試料をまとめてガラス板上でころがし、ヒモ状にのぼしてヒモの直線が 3mm 程度になったとき、きれぎれになるような状態をもって塑性限界の値とする。塑性指数は次式から求める。

塑性指数 = 液性限界 - 塑性限界……………(3)

(5) 有機物含有量の測定

土質工学における土の化学試験には、有機物含有量の決定、硫酸塩含有量の決定および泥炭に対する分解度の決定などが主なものである。このうち、有機質土に対してとくに必要なものは、有機物含有量の測定である。測定法には (i) 重クロム酸法 (酸化滴定法) (ii) 強熱減量法 (iii) 過マンガン酸カリ滴定法 (iv) 過酸化水素法などがある。ここでは最も簡便な方法として強熱減量法を述べる。コンシステンシー試験と同じく 0.42mm 網フルイを通過した乾燥土をルツボに入れて試料とし、ガスバーナーの最強炎で 15 分間加熱して、そのとき消失した量を求めて次式から強熱減量を決定する (ガスバーナーの代わりに温度を 700°C~800°C に規整できる電気炉を用いてもよい)。

強熱減量 =

$$\frac{(\text{試料} + \text{ルツボ})\text{の重量} - (\text{焼却後の試料} + \text{ルツボ})\text{の重量}}{(\text{試料} + \text{ルツボ})\text{の重量} - \text{ルツボの重量}} \times 100(\%) \dots\dots(4)$$

VI. 土の力学的性質を求める試験³⁾

試験法の種類は 表-4 に示すとおりで、ここではわれわれが取扱う

主な試験の標準方法について、その要約と問題点などを述べる。

(1) セン断試験 (一軸圧縮試験: JIS A 1216)

① 試験の目的 土の変

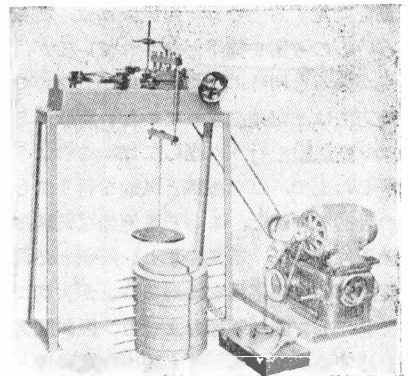


写真-5 直接セン断試験機の一部

表-4 土の力学的性質を求める試験一覧表

試験の名称	試験結果から求める値	試料の状態	試験結果の利用	試験法の規格
セン断試験 直接セン断試験	上下圧 $P(\text{kg/cm}^2)$ に応ずる セン断抵抗 $S(\text{kg/cm}^2)$ 内部摩擦角 $\phi(\text{度})$ 粘着力 $C(\text{kg/cm}^2)$	乱さない採取試料	基礎、斜面、擁壁などの安定の計算	
一軸圧縮試験	圧縮弾性係数 $E(\text{kg/cm}^2)$ 一軸圧縮強さ $q_u(\text{kg/cm}^2)$ 粘着力 $C(\text{kg/cm}^2)$ 鋭敏比 S_r	繰返した試料	現場的な簡易セン断試験法 粘性土の構造の判定	JIS A 1216 土の一軸圧縮試験方法
三軸圧縮試験	側圧 $\sigma_3(\text{kg/cm}^2)$ に応ずる 圧縮破壊強さ $\sigma_1(\text{kg/cm}^2)$ 内部摩擦角 $\phi(\text{度})$ 粘着力 $C(\text{kg/cm}^2)$			
室内ペーン試験	ペーンの回転角とトルク 粘着力 $C(\text{kg/cm}^2)$		粘性土の精密なセン断試験法	
圧密試験	間ゲキ比—荷重曲線 圧縮係数 $\alpha_v(\text{cm}^2/\text{g})$ 体積圧縮係数 $m_v(\text{cm}^2/\text{g})$ 圧縮指数 C_c 時間—圧密度曲線 透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$ 圧密係数 $C_v(\text{cm}^2/\text{sec})$	乱さない採取試料	粘土層の沈下量の計算 粘土の透水係数の実測 粘土層の沈下速度の計算	JIS A 1217 土の圧密試験方法
透水試験	定水位透水試験 透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$ 変水位透水試験 透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$ 水平毛管透水試験 透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$ 毛管上昇高さ $h_c(\text{cm})$	乱さない採取試料	透水関係の設計計算	JIS A 1218 土の透水試験方法
締固め試験	含水比—乾燥密度曲線 最大乾燥密度 $\gamma_{max}(\text{g}/\text{cm}^3)$ 最適含水比 $W_{opt}(\%)$	乱した採取試料	路盤および盛土の施工方法の決定、施工の管理 相対密度の算定	JIS A 1210 土の突固め試験方法
CBR 試験	CBR 値 (%)	乱したまたは乱さない採取試料	路盤の支持力の表示、タワミ性舗装板厚の算定	JIS A 1211 CBR 試験方法*

(注)* 土質工学会暫定改訂案による。

形と破壊に関するもろもろの現象は、土の力学において基本をなすもっとも重要な課題であり、斜面の安定、地盤支持力、土圧など、工学上重要な実際問題の解決に欠くことのできない土の基本的性質の一つである。その性質を測定する土のセン断試験には、機械や試験方法にいろいろの考案や提案がなされているが、それぞれ優れた点があると同時に欠点もまぬがれないので、標準的な試験方法はまだ確立されていない現状にある。したがってセン断試験を行うに当っては、このような現状をよく理解した上で、ただ漫然と試験を行うことなく、よく試験の目的を理解し、もっとも適当な試験機、試験方法、試験条件を選び、結果の正しい解釈と処理を行い、適切な実際問題への応用をはかることが大切である。

② セン断試験機およびセン断試験方法 試験の目的を達するためのもっとも適当な試験機と試験方法を選ぶためには、実際に起ると思われるセン断の現象とその条

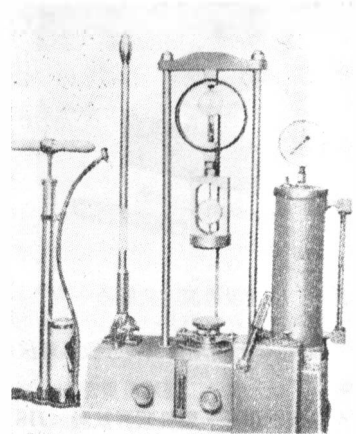


写真-6 一軸圧縮試験機の一例

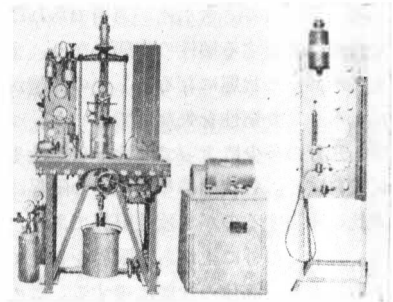


写真-7 三軸圧縮試験機の一例

件に近い試験条件となるかどうかを考慮すべきである。現在、普通に行われているセン断試験法には次のものがある。

(イ) 直接型のセン断試験 セン断面上

のセン断応力とセン断強さを直接測定しようとするもので、直接セン断試験(あるいは一面セン断試験)とペーンセン断試験がある。直接セン断試験は排水条件を完全に制御することがむずかしい欠点があるから、使用を誤まらないようにすることが大切である。この方法によれば「見かけの粘着力 C 」と「セン断抵抗角 ϕ 」を決めることができる。ペーンセン断試験は主として軟弱な粘性土のセン断強さを求めるもので、室内と現場試験に応用でき、粘着力 C に相当するセン断強さだけが求められる。

(ロ) 間接型のセン断試験 圧縮力などを加えて間接的にセン断応力を生じさせセン断強さを決定しようとするもので、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験がある。一軸圧縮強さは、そのまま、セン断強さを判定する目安となるものであり、飽和に近い粘性土では一軸圧縮強さの $1/2$ をもって粘着力 C に等しいとみなすことができる。三軸圧縮試験を行えば「見かけの粘着力 C 」と「セン断抵抗角 ϕ 」

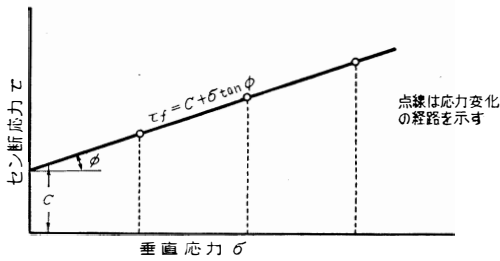


図-4 クーロンの法則

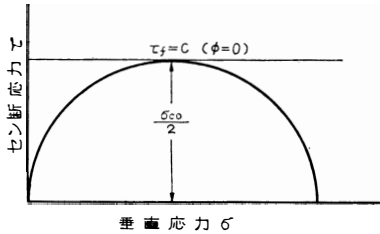


図-5 飽和した粘土の一軸圧縮強さ (σ_{co}) と粘着力 (C) の関係

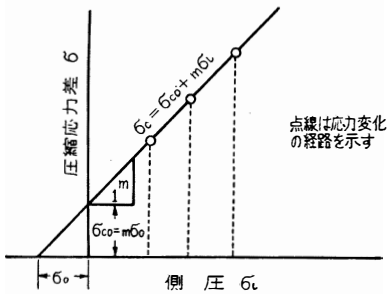


図-6 三軸圧縮試験結果の図示

を決定できる外「弾性係数」や「ポアソン比」に相当する変形に関する諸定数を決定することができる。その外「間ゲキ圧」や「体積変化」の細かい測定が可能であるなど、優れた点があるので最近非常によく使用されている。

③ セン断試験条件

土のせん断強さは試験条件によって大きく変わるので、試験目的に応じて適当した試験条件を与えて試験を行わなければならない。ふつう、次の三つの条件が使用される。これらのうち、どの試験方法を用いて試験を行うかは、試験の目的や土質とその状態および設計条件などによって選定されるものである。

(イ) 非排水試験 (U Test) 急速試験ともいわれるもので、土の間ゲキ中に含まれる水分が排出されないよう

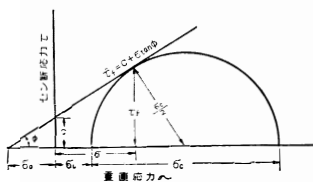


図-7 モール応力円を用いてせん断強さを決定する図解

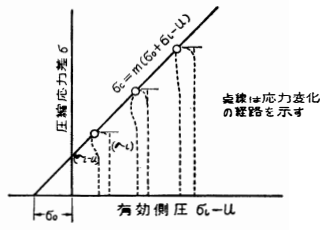


図-8 非排水三軸圧縮試験結果の図示

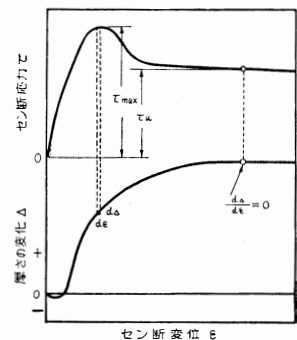


図-9 砂の直接せん断試験における応力と変位の関係

にして供試体に外圧を加え、非排水の状態ですせん断する。得られた定数は C_u, ϕ_u で表わす。この試験は、たとえば基礎地盤を構成する粘土層が施工中、圧密や含水量の変化をほとんど受けないと思われる場合、あるいは粘土からなる斜面の設計やスベリ出しの原因調査を行う場合などに適用される。厳密にいえば、この試験は三軸圧縮試験機によってのみ行うことができる。

(ロ) 圧密非排水試験 (C-U Test) 圧密急速試験ともいわれるもので、ある外圧 (設計荷重を考慮して決める) の下で圧密を行った後、供試体を非排水の状態ですせん断する。得られた定数は C_{cu}, ϕ_{cu} で表わす。この試験は、たとえば土が最終の荷重状態に達するまでに圧密作用や水分の浸入によって含水量に変化を生ずると思われたときや、アースダムの背後で急激な水位低下が起ったときの危険性を検討する場合などに適用される。

(ハ) 排水試験 (D Test) 緩速試験ともいわれるもので、供試体から自由に排水できる状態で圧密あるいは膨張が行われ、ついで間ゲキ圧が生じないようにゆっくりせん断を行う。得られた定数は C_d, ϕ_d で表わす。この試験は一般に透水性の砂質土について行われるが、粘性土に対しても、かなりの時間を経たのちにおけるアースダム、築堤、擁壁などの安定を調べる場合に適用される。

④ セン断強さの決定

せん断試験結果に基づいてせん断強さを決定する一般的な手順について概説する。
(イ) 直接せん断試験

せん断面の大きさを A (cm^2) 加えられたせん断力を S (kg) とすればせん断応力 τ (kg/cm^2) は

$$\tau = \frac{S}{A} \dots \dots \dots (5)$$

で表わされ、その最大値はせん断強さ τ_f を与える。試験中にせん断面の大きさが変化する場合、その補正をする必要がある。次にせん断面上に加えられる垂直圧力を P (kg) とすれば垂直応力 σ (kg/cm^2) は

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (6)$$

で与えられる。いくつかの垂直応力 σ に対するセン断強さ τ_f を実測して、両者の関係を図示すると、多くの場合に 図-4 に示すような、ほぼ直線的な関係が得られ、クーロンの公式 $\tau_f = C + \sigma \tan \phi$ (7) で与えられる。式中 C は「みかけの粘着力」 ϕ は「セン断抵抗角」であって図から決定できる。

(ロ) 一軸圧縮試験 軸圧縮力を P (kg), 供試体の断面積を A (cm²) とすれば、圧縮応力 σ (kg/cm²) は

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(8)$$

で与えられる。試験中、断面積が変化する場合は補正が必要である。圧縮応力の最大値は一軸圧縮強さ σ_{co} を与える。モールの応力円の考えを入れると、飽和に近い粘性土ではセン断抵抗角は 0 に近いので、近似的に

$$\tau_f = C = \frac{1}{2} \sigma_{co} \dots\dots\dots(9)$$

としてよいことがわかる。

(ハ) 三軸圧縮試験 いくつかの一定した側圧 σ_l (kg/cm²) に対して軸圧縮強さ σ_c (kg/cm²) をそれぞれ求めることができるから、両者の関係を図示して 図-6 のような直線関係があるならば、次式

$$\sigma_c = \sigma_{co} + m \cdot \sigma_l \dots\dots\dots(10)$$

から、一軸圧縮強さ σ_{co} および直線の傾き m を決定することができる。実際の決定は最小二乗法による。直線が原点の左で水平軸を切る点までの距離を σ_o (kg/cm²) とすると、 $\sigma_{co} = m \cdot \sigma_o$ となり、上式は

$$\sigma_c = m(\sigma_o + \sigma_l) \dots\dots\dots(11) \text{となる。}$$

ここでモール応力円の考え方が適用できれば、図-7 から

$$\left. \begin{aligned} \sin \phi &= \frac{\frac{1}{2} \sigma_c}{\sigma_o + \sigma_l + \frac{1}{2} \sigma_c} \dots\dots\dots(12) \\ C &= \sigma_o \tan \phi \end{aligned} \right\}$$

が得られ、その第1式から

$$\sigma_c = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} (\sigma_o + \sigma_l)$$

これを前の式 (11) とくらべると

$$m = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \text{すなわち } \sin \phi = \frac{m}{2 + m}$$

$$\text{したがって } \tan \phi = \frac{\sin \phi}{\sqrt{1 - \sin^2 \phi}} = \frac{m}{2\sqrt{1 + m}} \dots\dots\dots(13)$$

この値を (12) の第2式に入れると「見かけの粘着力 C 」を求めることができる。三軸圧縮試験で間ゲキ圧の測定を行って有効応力を求めたときは、有効側圧 $\sigma_l - u$ に対して軸圧縮応力 (主応力の差で間ゲキ圧には無関係) を 図-8 のようにプロットしてそれぞれの曲線に接する限界直線を引き、これから前の方法で σ_{co} , m , σ_o を求め、「有効応力による見かけの粘着力 C' 」および「有

効応力によるセン断抵抗角 ϕ' 」を計算できる。

⑤ セン断試験における問題点

(イ) 砂の直接セン断試験

(a) 下部可動型試験機による測定値の補正 直接セン断試験機には上部可動型のものと下部可動型のもの (現在使用されているものはこの型が多い) があって、下部可動型のはセン断時に密な砂が膨張するとき、これを妨げるように側面摩擦が働きます、結果として過大なセン断抵抗となる。したがってこの型式の試験機を使用した場合は、側面摩擦を除いた値をもってセン断強さとし、これに基づいてセン断抵抗角を求めなければならない。その補正値は次式から求める (図-9 参照)。

$$\tau'_{max} = \sigma \left(\frac{d \Delta}{d \epsilon} \right) \tau = \max + \tau_u \dots\dots\dots(14)$$

(b) 試料の径と厚さ 試料の径や厚さの影響については、密な砂の場合あまり差が見られないが、ゆるい砂では径や厚さが小さくなるほど大きなセン断抵抗角を与えることが報告されている。厚さの厚い試料では、垂直応力が小さくなると考えられるので、径が60mmの試料では、その全厚を10mm程度にして試験する方がよい。

(c) 三軸圧縮試験との比較 下部可動型の場合は、側面摩擦を補正してもなお、三軸圧縮試験による値よりかなり大きい。これに対して上部可動型の場合には、三軸圧縮試験によるものと大差なく、大体妥当な値を与えると考えられる。以上のことから、砂の直接セン断は上部可動型試験機か、あるいは下部可動型でもセン断箱の上半部が固定されていない構造のものを使う方がよい。

(ロ) 粘性土の直接セン断試験

(a) 三軸圧縮試験との比較 直接セン断試験機はその構造上、排水試験に適するものであるが、粘性土の直接セン断試験は、非排水または圧密非排水の条件で行う方が実用的意義が大きい。この場合、普通は間ゲキ水圧の測定ができないため、試験結果は間ゲキ水圧を含めた全応力でしか整理できない。とくに圧密非排水試験結果で求められるセン断抵抗角は、摩擦角的な取扱いはせず、あくまでも圧密によるセン断強さの増し方の尺度として考えるべきである。全応力で整理する際の粘性土の圧密非排水試験は、直接セン断試験でも三軸圧縮試験とはほぼ等しい結果を与えている。したがって少なくとも、粘性土の圧密非排水試験を全応力で整理する目的のみならば、直接セン断試験でもよいといえる。

引用文献

(1) 土質工学会 「土質調査法」 昭和39年5月
 (2) " 「土のサンプリング指針」 昭和39年10月
 (3) " 「土質試験法」 昭和39年3月

[1966. 6. 24. 受稿]