The Japanese Geotechnical Society

論　文

粘性土を対象とした室内せん断試験の変遷と展望

Historical and Prospective View of Laboratory Shear Testing on Cohesive Soils

三田地　利　之（みたち　としゆき）
北海道大学大学院教授　工学研究科

1.　はじめに

本稿の目的は，粘性土を主な対象として開発され発展してきた室内せん断試験の歴史を概観し，将来を展望することにあるが，最近約10年間の進展については昨年の本誌「講座」において詳細な紹介がなされている[1)]。したがって，ここではそれ以前におけるせん断試験の変遷を振り返り，実務におけるせん断試験の位置づけと現場への適用状況について述べたのち，将来展望を試みるものとする。

2.　室内せん断試験の変遷

2.1　せん断試験の目的

地盤工学においては，伝統的に地盤の変形と安定の問題を別個に扱ってきた。すなわち，変形を考えるときには等方弾性を仮定し，安定の問題では剛塑性体として設計している。弾（粘）塑性を基本とした構成モデルと有限要素法に代表される数値計算法により，変形から破壊までを一つの問題として解くアプローチも普及しつつあるが，実務の大半は前者の方法によっている。

したがって，設計に結びついたせん断試験の目的は，与えられた土試料の変形・強度特性を表すための土質パラメータを求めて地盤の変形解析や土圧，支持力，斜面安定等の安定解析に利用することである。試験の結果得られる土質パラメータは，試験方法（条件）の影響を受けない試料固有の定数であることが望ましいが，土の変形・強度特性に及ぼす影響要因は極めて多く，完全な構成モデルが存在しない現状では，土質パラメータの多くは少なからず試験方法の影響を受ける。歴史的に種々のタイプの試験方法が開発されて来たが，理論・実務両面からの要求を満足する万能のせん断試験方法は現在のところ存在しない。したがって，せん断試験の結果得られる土質パラメータを正しく現場問題に適用するには，試験方法・条件を統一するための試験基準が必要である。そして後述するように，設計体系とのバランスを勘案しながら適切なせん断試験方法を選択することが重要である。このように実務への適用を考える際に，試験基準の存在はきわめて重要であることから，本節では，まず，粘性土を主な対象として開発され発展してきた室内せん断試験の歴史を概観したのち，我が国におけるせん断試験規格・基準の制定状況を振り返ることとする。

2.2　せん断試験方法発展のあゆみ

室内せん断試験を分類すると，せん断面に垂直力とせん断力を直接作用させるせん断応力載荷型と，供試体の境界面を主応力面と規定し，主応力の大きさを制御して行う主応力載荷型せん断試験の二つのタイプに大別される[2)]。**表―1**はせん断試験方法の発展の歩みを大まかに整理したもので，表中にはせん断試験に関する我が国の規格・基準制定の状況も併せて示している。

歴史的にみると[3)]，最初のせん断試験は4 cm角の長い供試体の中央に直角方向に荷重を加えて2面でせん断するものであった[4)]。その後，せん断の進行とともにせん断面の面積が変化するなどの欠点を解決すべくねじりせん断試験が開発された（Hvorslev[5)]）。さらに，SGIはメンブレンとリングの組み合わせで側面を拘束した単純せん断試験機を開発し（Kjellman[6)]），その後NGIがこれをリングワイヤ入りのメンブレンを用いる方法に修正した[7)]。一方，Roscoe[8)]は剛板をヒンジで結合した形の単純せん断試験機を開発した。なお，1950年代前半には我が国鉄道省において，垂直応力の載荷可能な2面せん断試験機が用いられていたようである[9)]。

主応力載荷型試験の代表である三軸試験はほぼ同時期にドイツ・オランダ・アメリカ（たとえばHousel[10)]，Stanton & Hveem[11)]）で開発された。1962年にはBishop & Henkel[12)]の著書が出版され，三軸圧縮試験の方法に関する詳細な記述がなされて，技術者のみならず後続の研究者にとって，三軸試験のバイブル的存在となった。

3主応力を独立に制御できる試験として，Kjellman[6)]は1936年に早くも立方体の供試体を用いた試験結果を報告している。中空円筒供試体を用いて内外圧と軸方向応力およびねじり力を与える試験の原型は拘束圧を与えない形のものがCooling & Smith[13)]あるいはGueze and Tan[14)]によって用いられ，その後中空円筒供試体は三軸セルの中に入れられて，拘束圧を載荷するようになった。

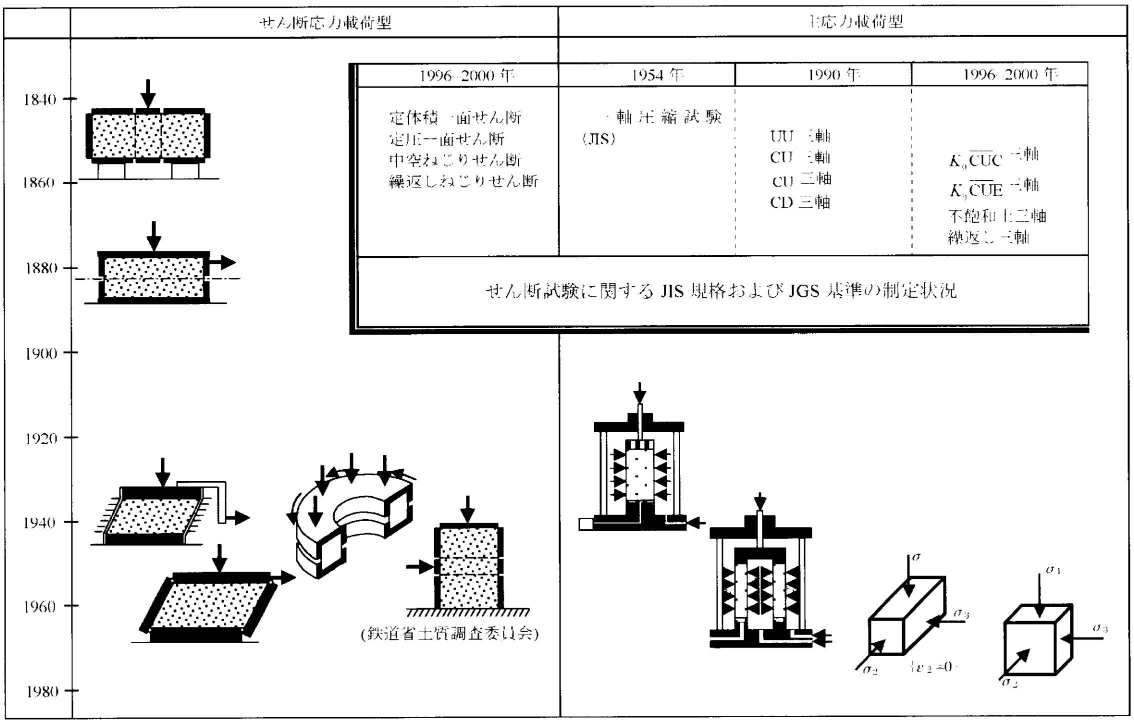
こうしてみると，1930年代から1950年頃までの間に，現在用いられているせん断試験機のほとんどすべてのタイプの原型がすでにできていたことになる。

2.3　我が国におけるせん断試験関係の規格・基準

地盤工学会（旧 土質工学会）創立の2年後（1954年）には，透水試験や圧密試験とともに，一軸圧縮試験のJIS規格を制定している。これらの力学試験の規格は国家規格としては世界に先駆けたものだった[15)]ようであ

NII-Electronic Library Service

表—1　せん断試験方法発展の歩みとせん断試験に関するJIS規格およびJGS基準の制定状況



る。

その後せん断試験方法に関する研究が大いに発展し，その成果は，「土質試験法」[16]やシンポジウム論文集[17]等に紹介されている。この頃に開催されたASTMのシンポジウムで，室内せん断試験に関する現況報告がなされている[18]。1979年には三軸圧縮試験方法に関する土質工学会基準案[19]が作成されているが，基準制定までには至らなかった。理論的な厳密さ，明解さの追求と，試験方法の簡便さの要求を両立させることの難しさが主たる理由であったようである。その後1990年には長年の懸案事項であった，せん断試験関係基準が一挙に整備された[20]。これを可能にしたのは，計測制御機器類の低廉化と高精度化によって，試験の自動化・省力化が図られるようになった[21]ことが大きい。この流れに沿って，1990年から2000年の10年間にせん断試験の学会基準の整備に拍車がかかり，1規格16基準に膨れあがった[2]。**表—2**はこのうち粘性土を対象とする試験法（供試体作製・設置に関する基準は除く）の規格・基準を整理したものである。特に最近は強度のみならず変形問題に対応する形での土質パラメータの提供が要求されるようになってきており，計測技術の急速な進歩と相まって変形特性を求めるための試験基準の整備が進んだ。また，古くから実用されていながら基準化に至らないまま経過してきた一面せん断試験の見直しが行われ[22]，従来指摘されてきた試験結果のばらつきの原因を追究し，これを克服する方法を提示した上で，新規に2基準が制定されている。

土のせん断特性は周知のように，試料の飽和度，現場の排水条件，圧密時の応力条件（等方，異方，K_0），せん断時の載荷モード（圧縮・伸張・単純せん断）や材料異方性，中間主応力の大きさ，主応力軸回転の影響など多くの要因の影響を受ける。なかんずく排水条件の違いの影響は粘性土においてきわめて大きく，土のせん断強度を一つの定数で規定できない理由の典型である。これらの要因の影響を反映させた設計計算が可能なように，地盤工学会では前述の各種試験基準を定めてきた。**表—2**はこれを一覧にして各試験の適用性を示したものである。**表—1**と対比してみれば，平面ひずみや三主応力制御型の試験を除くほとんどのタイプに対応した試験基準が整備されていることが分かる。選択肢がきわめて多いように見えるが，現場の排水条件，せん断モードを手がかりにし，さらに強度が目的か，変形特性（特に小ひずみレベルでの）かによって自ずと試験方法が絞り込まれることになり，この段階での技術的判断こそが地盤技術者の力の見せどころである。

以上のほか，すべての試験に共通の事項として，圧密時間の長さやせん断速度が強度のみならず変形特性にも影響を与えることから，各基準において選択の幅を与えている。なお，室内せん断試験によって地盤の強度パラメータを決定する際の前提は，乱れの少ない良好な試料が得られることである。したがって，試験に供される試料の品質評価がきわめて重要になる[23]。**表—2**のせん断試験の中では，一軸試験がもっとも乱れの影響を受けやすい。このことを十分に認識した上で補正を施す[24]ことを考えるか，それとも乱れの影響の少ない他の試験方法を選択するのかも技術者の裁量の範囲にある。

3.　実務におけるせん断試験の位置づけと現場への適用上の問題

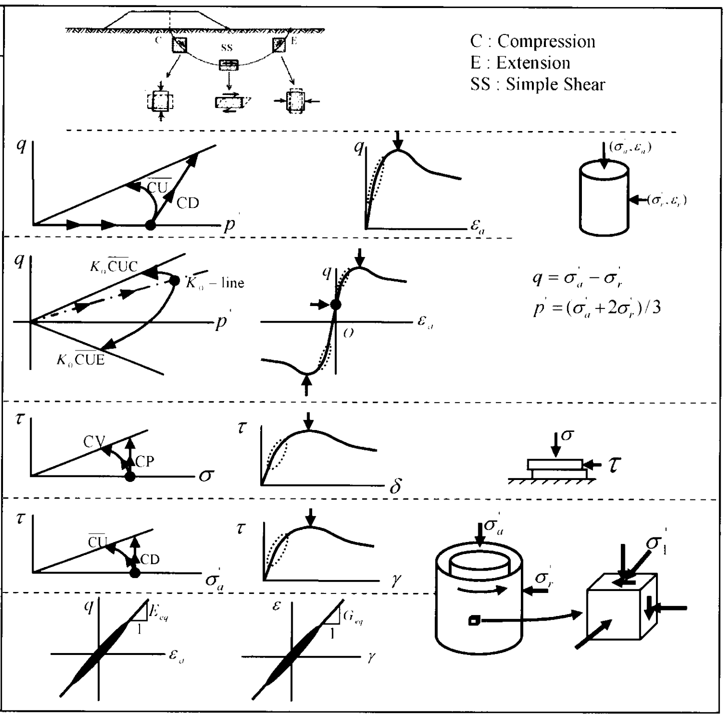
前述のように多様な条件に応えられるように各種の基

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

表―2　せん断試験基準の分類と適用

試験の種類	主目的[注1]	圧密条件[注2]	せん断モード
一軸圧縮試験	q_u	—	C
三軸圧縮試験			
非圧密非排水(UU)三軸圧縮	$(c_u,\ \phi_u)$	—	C
圧密非排水(CU)三軸圧縮	s_u/p	I	C
圧密非排水($\overline{\mathrm{CU}}$)三軸圧縮	s_u/p, $(c',\ \phi')$	I	C
圧密排水(CD)三軸圧縮	$(c_d,\ \phi_d)$	I	C
不飽和土の三軸圧縮	$(c_{net},\ \phi_{net})$	I	C
K_0圧密後の三軸			
K_0圧密非排水圧縮($K_0\overline{\mathrm{CU}}$C)	s_u/p, $(c',\ \phi')$	K_0, A	C
K_0圧密非排水伸張($K_0\overline{\mathrm{CU}}$E)	s_u/p, $(c',\ \phi')$	K_0, A	E
一面・ねじりせん断試験			
圧密定体積(CD)一面せん断	s_u/p	K_0	(SS)
圧密定圧(CV)一面せん断	$(c_d,\ \phi_d)$	K_0	(SS)
中空ねじりせん断試験 ($\overline{\mathrm{CU}}$&CD)	τ/σ_a'	I, A	SS
変形特性を求める試験			
繰返し(変形)三軸試験	$(E_{eq},\ h)$	I, A	C&E
繰返しねじりせん断試験	$(G_{eq},\ h)$	I, A	SS



注 1) 応力－ひずみ関係を含む。なお，Su：非排水せん断強さ，p：鉛直圧密応力.　注 2) I：等方状態，A：異方状態，K_0：K_0状態.

準が整備されているが，実務においてせん断試験はどのように用いられてきただろうか？　果たして役に立っているのであろうか？　この答えは設計マニュアルの内容にかかっていると筆者は考えている。1990年頃から2000年までの間にせん断試験法の基準化が急速に進んだが，建設工学上の設計規準類の中で設計用土質パラメータの決定法は現在どのように規定されているであろうか。結論から言えば，設計への反映においては，まだ発展途上にあると言って過言ではない。

たとえば，鉄道構造物設計標準[25]においては，粘性土の場合，通常の設計では一軸圧縮強度によることになっている。そして，「大規模かつ重要な構造物などで詳細な検討を要する場合には，乱さない試料による三軸圧縮試験を実施するのがよい」と規定されている。港湾施設の設計基準[26]ではどうであろうか？　通常の港湾構造物の施工条件は，ほとんどの場合 UU 条件に該当することから，「粘性土のせん断強さは非排水条件において算定することを標準とする」と規定している。その上で，非排水せん断強さの求め方として，(1)一軸圧縮強度 q_u の平均値，(2)q_u と三軸 CU 強度の併用，(3)一面せん断強度，(4)原位置ベーン強度の四つの選択肢を示している。

以上は数少ない例であり，多くの設計基準・指針類では土質分類に応じて強度パラメータの目安が与えられている程度である。したがって，事前調査で三軸圧縮試験などが実施されていても，よほど重要な構造物の場合を除いて，試験結果が設計に反映される機会は少ないと言わざるを得ない。

1990年以前は，一軸圧縮試験以外にせん断試験に関する規格はもちろん学会基準も存在しなかったが，現在は整理統合の必要性を感じるほどに選択肢が広がっている。筆者[27]は7年前に『今後各種設計基準・指針類の中で，設計体系に適合するように試験方法を適切に選択すべきことが規定されるようになると期待されるから，目的と対象となる土および現場の排水条件に応じて，適切なせん断試験方法を選択する技術者の判断力がより強く要求されるようになるであろう』と書いたが，現状はそれほど進んでいないようにみえる。

なお，鉄道構造物設計標準，港湾施設の設計基準とともに性能設計の概念を導入して現在再び改訂中とのことである。たとえば港湾施設の新しい設計基準では，性能設計の概念を取り入れる中で，地盤パラメータの特性値を求める段階で用いられる補正係数の設定を通じて，せん断試験方法の違いによる影響が反映されることになる。こうなると，試験方法の選択がより重要性を増して来る。

ところで，**表―2** に示されている基準類の主目的はピーク強度を求めることにあるが，地すべり斜面の安定解析にはピークを過ぎた大変形ののちの残留状態でのせん断抵抗角 ϕ_r' の評価が不可欠である。一面せん断試験と異なり，せん断中においてせん断面積が変化せず，しかも長いせん断ストロークが得られることから，リングせん断が残留強度の決定に有効であるとされてきた。しかし，不撹乱の試料を用いた試験の困難さ等の理由から，現実の対策工の設計にあたっては，せん断試験を実施することなく，いわゆる $c=d$ (c：kN/m^2, d：地すべり土塊の最大層圧（m））の仮定を用いて，ϕ を逆算する方法が用いられているのが実情[28]である。

4.　最新の計測・制御技術と今後の展望

土の構成モデルに関する研究およびコンピュータを駆

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

使した解析技術の発展とともに，強度のみならず変形問題に対応する形での土質パラメータ提供の必要性が叫ばれて久しい。研究面でのこの分野での近年の進展はめざましいものがあり，計測・制御の高精度化・自動化が格段に進んだ。その様子について，昨年4月から9月にわたって連載された本誌「講座」において詳しい紹介がなされている[1]。すなわち，最新のサーボモータやダイレクトドライブモータの導入による高精度の繰返し載荷や任意のひずみ履歴の制御によって，微小ひずみから大ひずみレベルに至る過程での各種変形係数が容易に求められるようになったこと。また，供試体の局所ひずみの測定技術，サクションの測定を伴う不飽和土のせん断試験，ベンダーエレメントの導入によるせん断弾性係数の測定，供試体のひずみ分布の画像解析技術などが，それらの技術の応用によって得られた成果（たとえば，年代効果，異方性，ポアソン比の評価，不飽和土のせん断挙動，時間依存性挙動）などとともに紹介されている。

一方で，これらの技術に支えられて変形特性を求めるための試験基準の整備が進んで来ている。繰返し変形特性を求めるための三軸試験および中空ねじり試験はその例である。**表―2**に示すせん断試験基準の多くは1980年代から90年代の技術を背景にしたものであるが，上述のような最新技術を取り入れることにより，既存の試験基準が大幅に高精度化されることは疑いない。

5. 展　望

上述のように，最新の技術の導入により高精度でかつ全自動の計測・制御が低コストで可能になった。これをうけて，実務につながる試験基準の関係では以下のようなことが考えられる。

1）たとえば$K_0\overline{\mathrm{CU}}\mathrm{C}$や$K_0\overline{\mathrm{CU}}\mathrm{E}$と$\overline{\mathrm{CU}}$三軸圧縮試験を一つの基準にするなどの，現行基準の整理統合。

2）現行の各基準で要求している（特に変位に関する）計測・制御精度を向上させることによる，小ひずみ域での変形特性評価の規定。

3）試験基準が高精度化するほど，試験結果への試料の初期状態の影響度が相対的に増大するから，試料の品質評価指標の確立が重要。

一方，研究面においては，

1）変形・強度特性に及ぼす異方性，年代効果，さらにはひずみ速度の影響やクリープなどの時間効果等々，従来からの課題について，高精度の計測・制御技術や可視化技術の応用[30]による新たな挑戦に加えて，

2）最新の各種分析技術を駆使した，粘土鉱物と水が関わる界面物理化学現象の解明を通して，粘土の真の強度定数とは何か？あるいは粘土の残留状態せん断抵抗角の意味は何か？といった基本問題に関するブレークスルーがあるかも知れない。

参 考 文 献

1）講座，地盤材料の室内せん断試験の基礎から応用まで，土と基礎，Vol. 53, No. 4～9, 2005.
2）地盤工学会編：土質試験の方法と解説（第一回改訂版），2000.
3）Sowers, G. F., Strength Testing of Soils, ASTM STP 361, pp. 3～21, 1965.
4）Collin, A., Experimental Investigation on Sliding of Clay Slopes, Paris, 1846.
5）Hvorslev, M. J., in Proc., ASTM, Vol. 39, pp. 999～1022, 1939.
6）Kjellman, W., Géotechnique, Vol. 2, No. 3, pp. 225～235, 1951.
7）Bjerrum, l. and Landva, A., Géotechnique, Vol. 16, No. 1, pp. 1～20, 1966.
8）Roscoe, K. H., in Proceedings, 3rd Int. Conf. on SMFE, Zurich, Vol. 1, p. 186, 1953.
9）斉藤迪孝：直接剪断試験，土と基礎，Vol. 9, No. 3, pp. 63～68, 1955.
10）Housel, W. S., in Proc., ASTM, Vol. 36, Part II, pp. 426～468, 1936.
11）Stanton, T. E. and Hveem, F. N., in Proc., 14th Annual Meeting of the Highway Research Bulletin, Vol. 14, Part II, pp. 14～54, 1934.
12）Bishop, A. W. and Henkel, D. J., The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, 2nd ed., Arnold, London, 1962.
13）Cooling, L. F. and Smith, D. B., Journal of the Institution of Civil Engineers, Vol. 3, pp. 333～343, 1935.
14）Gueze, E. C. W. A and Tan, T. T., in Proc. 2nd Int. Congress on Rheology Harrison, Ed., Oxford, 1953.
15）三木五三郎：土質工学20年のあゆみ―試験法―，土と基礎，Vol. 17, No. 2, pp. 28～30, 1969.
16）土質工学会編：土質試験法（第一回改訂版），1969.
17）第20回土質工学シンポジウム―一軸および三軸圧縮試験法とその応用―：土質工学会，1975.
18）Saada, A. S. and Townsend, F. C., State of the Art: Laboratory Strength Testing of Soils, ASTM STP 740, pp. 7～77, 1980.
19）土質工学会編：土質試験法（第二回改訂版），1979.
20）土質工学会編：土質試験の方法と解説，1990.
21）三軸試験方法に関するシンポジウム発表論文集：土質工学会，1991.
22）直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集：土質工学会，1995.
23）Tanaka, H. (2000): Sample quality of cohesive soils: lessons from three sites, Ariake, Bothkennar and Drammen, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 4, 57～74.
24）Mitachi, T. Kudoh, Y. and Tsushima. M.: Estimation of In-situ Undrained Strength of Soft Soil Deposits by Use of Unconfined Compression Test with Suction Measurement, Soils and Foundations, Vol. 41, No. 5, pp. 61～71, 2001.
25）鉄道構造物等設計標準・同解説―基礎構造物・抗土圧構造物―，丸善，1997.
26）日本港湾協会：港湾の施設に関する技術上の基準・同解説，1999.
27）三田地利之：地盤工学50年の歩みと展望―土質試験法―，土と基礎，Vol. 47, No. 11, pp. 34～37, 1999.
28）日本地すべり学会東北支部：地すべり安定解析用強度決定法，2001.
29）Otani, J. and Obara, Y.: X-ray CT for Geomaterials; Soils, Concrete, Rocks, A. A. Balkema, 2004.

（原稿受理　2005.11.10）

NII-Electronic Library Service