



土質基礎の回顧と点描

14. 土質試験法と調査法の歴史

ふく おか まさ み
福 岡 正 巳*

土質試験法と調査法の歴史

土質試験法と調査法の種類は非常に多いので、それらのすべてについて述べることはできない。また、限られた時間で文献を調べることも容易ではないので、記憶をたどりながら、あるいは電話でいろいろな方々にお聞きする程度で書かなければならなかった。そのために多くの間違いをしている可能性もある。それらは読者の方々のお教えにより将来訂正したい。

1. 土質試験法

1.1 土の物理的性質試験

土の物理的試験のなかで最も一般的に行なわれているのは粒度試験とアッターベルグ試験である。これらの試験法は今世紀の初頃に確立されたものと思われる¹⁾。アッターベルグは1911年に試験法を発表している。これらの試験法がはじめてわが国の土質基礎工学界で使用されたのは1920年代になってからであろう。特に昭和の初め、有名な土質調査委員会が鉄道省内に設置されたところからである。細粒土分の分析法としては淘汰法と沈降法が主として用いられていた。淘汰法としては Schöne-Kopetky または Krauss 式、A.S.K. 土壤淘汰法などが用いられた。これらの方法は水流のなかで土粒子を浮遊させ、流速の遅速によって土粒子を分けるものであるが、流速の調整がむずかしいので精度はあまりよくない。沈降法は土粒子を容器中の水の中に分散させ、沈降速度により粒度を分けるものである。沈降法にはビーカー法とピペット法の2種類がある。ハイドロメーターを用いる比重計法は、Bouyoucos, Casagrande らが研究したが、その結果は1938—9年に AASHO, ASTM に採用された。わが国では1951年にアメリカ軍が飛行場の土質調査を依頼するため現在の建設省土木研究所に持ちこんだのが初であろう。1950年に他の物理試験法と共に JIS に規定された。

液性限界の試験は皿を手でたたく方法が Casagrande の研究によって器械的な方法に改良され、試験の精度が向上した。ASTM の器械と方法を参考にして、粒度試験法と同時に、JIS が制定された(1950年)。

1944—50年ころによく読まれたホーゲントグラ著「土の工学的性質」(宇都宮寿夫訳、初版昭和19年1月発行)にアメリカの Bureau of Public Roads の土の分類法があり、土を A—1~8, B—1~3 に分けるのに必要な試験法として、粒度、アッターベルグの液性ならびに塑性限界、収縮限界、遠心含水当量、野外含水当量試験があった。これらは1944年以前にもわが国で用いられていたが、AASHO, ASTM の方法を参考にして討議の末 JIS に制定された(1950年)。路床土支持力比試験方法(CBR)、道路の土質調査ならびに試料採取方法、アースダムの土質調査のための試料採取方法、現場における土の乾燥単位体積重量試験方法、道路の平板載荷試験方法が JIS に制定されたのは1953年のことであった。戦後アメリカ軍が建設省土木研究所(当時は内務省土木試験所)に持ち込んだ土質試験器械器具と試験方法をもとにして、同研究所の高田昭²⁾、谷藤正三、増村啓一郎、筆者らは、東大の最上武雄、星埜和、三木五三郎らと共に土質試験法制定のための委員会を結成し、新しい方法を研究したが、その後多くの人々の参加を得てここに JIS となったのである。

1.2 路床土関係の試験法

1945年以後の土質試験はアメリカ軍の持ち込んだ器械器具によって大きな変化をしたのであるが、彼らの使用していたものは主として飛行場関係のものであった。飛行場の舗装と道路の舗装とは試験法自体はほぼ同一である。路床土の試験としては、CBR、平板載荷試験、単位体積重量、突固め試験がある。施工中の試験としては貫入試験として、プロクター・ニードル、コーンペネトロメーターがある。これらの試験用の器械器具のうち、あるものはわが国でも以前から造られていたが、あるものは全く目新しいものであった。平板載荷試験方法はアメリカでは直径 30 in (76 cm) の円形載荷板を用いていたが、載荷板が大きくなると試験が困難だということで、谷藤正三が 30 cm のものを用いるようにした。そして JIS にもこのサイズのもので採用された。建築、ダムなどにもこの載荷板が用いられていた。

単位体積重量試験には従来カッター法もしくは直接サン

1) Dr. Ing. Karl Terzaghi : Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage, 1925.

2) 人名の敬称略、以下同じ。

* 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

講 座

プルを切り出すような方法が用いられていたが、砂置換法が輸入された。

突固め試験法は1930年ころアメリカの Proctor が考案したが、わが国では1939年ころ星埜和が研究した。しかしこの試験法が用いられるようになったのは CBR 試験と同時代であった。プロクター・ニードル、コーンペネトロメーターのうち後者は1947年ころ鉄道研究所の斎藤迪孝が三沢飛行場で使用したのがわが国で広く用いられるようになった最初のものである。

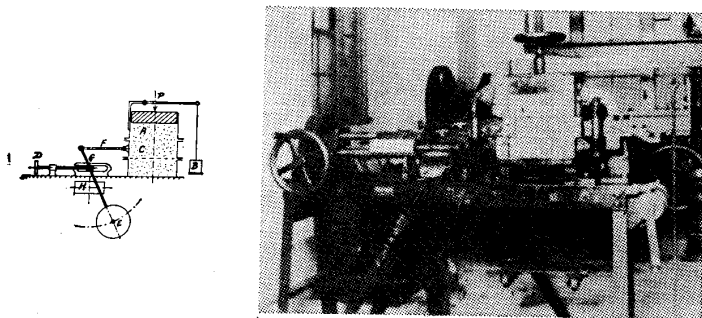
1945年ころには路床土の強度を試験するために動的貫入試験が用いられていた。土研式貫入試験機というのがそれである。これは直径 3 cm, 先端角 45° のコーンを先端に付け、貫入に用いる重錘は重量 5 kg である。平板載荷試験や現場 CBR 試験の代わりに動的試験としての I-value test が浅井新一郎によって発明された。衝撃の反発力の大きさと土の性質を知ろうとするもので、振動が自記録されるようになっている。

1.3 力学試験

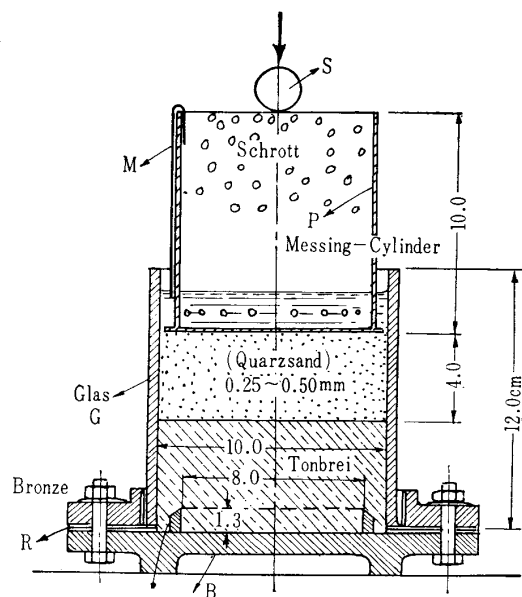
(1) 箱型セン断試験

土のセン断抵抗について最初に研究し、これを公式化したのはフランスのクーロン (Coulomb, 1773) であるが、彼はまたセン断試験機を造った (土と基礎 199 号 参照)。

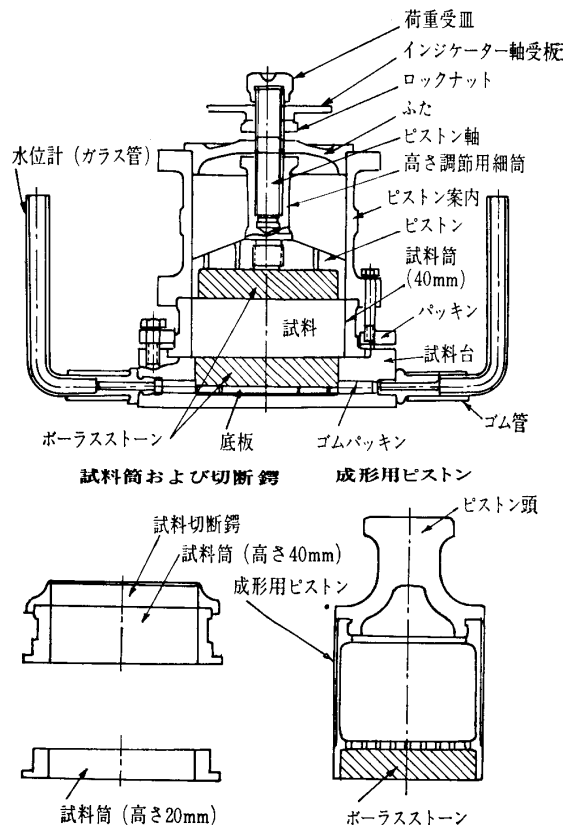
1930—35年ころ、ドイツのクライ (Krey) の造ったセン断試験機を DEGEBO で見たが、一面セン断で、土をはさむ上下の板には歯形が付けてあり、ここで土と板とがすべらないようにしてあった。セン断力は重りによって加えられた。わが国においては、1931年ころ松尾春雄が砂の内部摩擦角係数を測定するために、一面セン断試験を行なった。これは 20 cm×20 cm, 高さ 5 cm の箱の中に砂を詰め、その上に内径 10 cm, 高さ 5 cm の円形のわくに砂をつめたものを載せ、この円形わくを水平に重りで引張るものであった。山口昇の二面セン断試験機 (写真—1) は1935年ころ製作され、1936年には米国で開催された第 1 回国際土質基礎工学会議論文集にも発表されたが³⁾、その後国内では約10年間広く用いられていた。1948年ころに造られた箱形



写真・図—1 1935年ごろに山口氏により製作された二面セン断試験機



図—1 圧縮試験機 (テルツァーギによる)



図—2 圧密試験機 (石井靖丸による)

セン断試験機は一面セン断形で、上箱を固定し、下箱がローラーの上をすべるようなもので、応力はヒズミリングによって測定する定ヒズミ式のものであった。筆者がこの形のもので、粗粒材料を含んだダム土質試験をするため直径 1 m の大形一面セン断試験機を造ったのは1950年ころであった。

(2) 圧縮試験

圧縮試験のなかで最も古いものはテルツァーギが行なっ

たものであろう。図-1は Erdbaumechnik に載っている実験装置で, Tonbrei と示されたところに試験材料が入れてあり, 上から Schrott と示されているところに荷重を加えて加圧した。これが次項で述べる圧密試験の初まりである。

(3) 圧密試験

圧密試験機は渡辺貫らによって国産化された。この機械においては荷重を加えるアームがダブルレバー式で, 軽い錘で大きな圧力が加えられるようになっていた。サンプルの容器は台に固定されていて, いわゆる, 固定リング式であった。1947年ころ石井靖丸は大阪の地盤沈下地帯の粘土の圧密試験をするため, 図-2に示すような圧密試験機を造ったが, これはフローティングリング式である。この型の試験機はその後長年にわたって用いられた。

(4) 透水試験

農業土壌学の方面においては透水性が重要なものであるから, 恐らく古くから透水試験が行なわれていたことであろう。アメリカの Cold Spring Dam の材料試験として, 厚さ 100 cm の締め固めた土のサンプルの透水試験が行なわれた。Erdbaumechnik には図-3に示すような透水試験機が載っている。これは Lehm と示された部分に土のサンプルを入れ, Druck と示されたところに荷重を加え, Gläsernes Standrohr と示されたガラス管内の水位が, 一定時間に低下する長さを読んで透水係数を求める, いわゆる, 変水位透水試験機である。

砂のようなものの透水試験には定水位透水試験機を用いる。ローム質の土の透水試験ではサンプルを入れる円筒の器壁に沿う水流の除去をする必要があるが, 鉄道省土質調査委員会では, 直径 20 cm の円筒に入れたサンプルの中を通る水のうち, 中央部分の水のみを集めるような透水試験機を作成した。1936年ころには高圧下の透水試験機, 1932年ころには毛管上昇試験, 1956年ころにはサクシヨンの試験装置などが造られた。

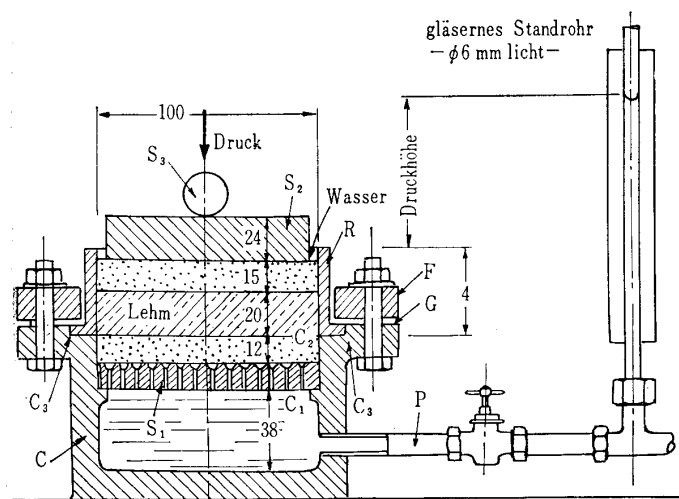


図-3 透水試験機 (テルツァーギによる)

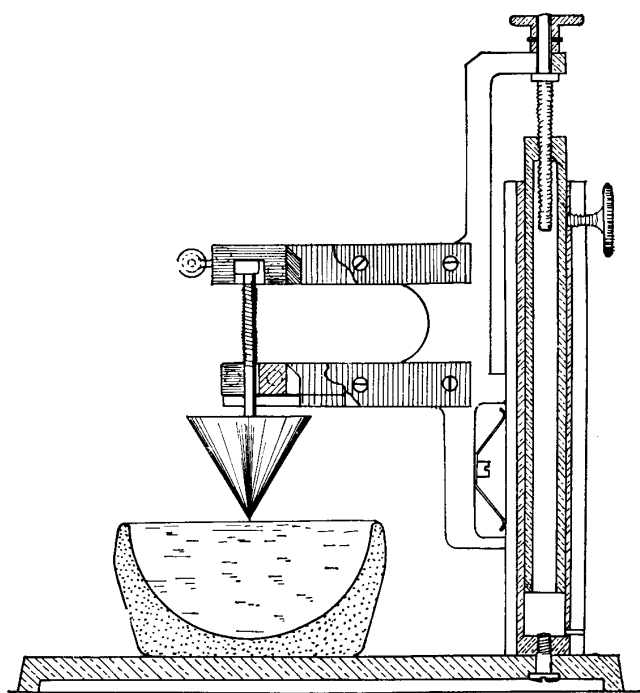


図-4 コーンテスト (スウェーデン土質調査委員会による)

(5) ねじり試験

ねじり力を加えることによって土のサンプルにヒズミを生ぜしめ, 土の粘弾性を測定する実験が石本巳四雄によって行なわれた(鉄道省土質調査委員会報告)。これは内外二つの円筒の中に土のサンプルを詰めて行なわれた。リング状の箱に土のサンプルを詰めて一面セン断をするリングねじりセン断試験は1930年代に外国で実施された。その後この型の試験がときどき実施されている。

(6) 単純セン断試験

サンプルをゴム円筒の中に入れ, その外側を薄い数多くのリングで補強し, 上下を板ではさみ, 上下板を圧縮し, 上板を下板に対して移動させると, サンプルにセン断ヒズミが生じる。このような型のセン断試験は SGI (Swedish Geotechnical Institute) のチェルマンが1940年ころに始め, スウェーデンでは今もこのような方法のセン断試験が行なわれている。

(7) コーンテスト

スウェーデンの国有鉄道では1912年に土質調査委員会が設置され, 有名なフェレニウス(W. Fellenius)などもそのメンバーになっていた。この報告書は鉄道省土質調査委員会によって翻訳され, わが国に紹介された。スウェーデンの試験のうち最も特徴のあるものの一つにコーンテストがある。粘土のサンプルのコーン貫入抵抗力を測定し, 抵抗係数からセン断抵抗力を求めようとするものである。図-4はコーン試験器である。普通コーンの重さは 60 g, 先端角は60°である。フェレニウス(B. Fellenius)(W. Felleniusの子)は電磁石を用いてコーンを自由落下させるようにした。わが国でも鉄道省などで用いられていたが, 最近では

講 座

また Casagrande 法に代わる液性限界試験法として内外で注目を集めている。

(8) Laboratory vane test

ベーンテストの羽根は 2 枚の四角い鉄板を組合わせて造ったもので、この羽根を土の中に押し込み、つぎに回転することによってせん断するものである。これは 1928 年にスウェーデンで考案されたものである。その後外国で広く使われている。わが国では 1952 年国鉄の斎藤迪孝がはじめて野外用のベーン試験機を造ったのがきっかけとなり広く使われた。室内用のベーンテストは野外用のものを小型にしたものである。

(9) 一軸圧縮試験

内務省土木試験所(現在の建設省土木研究所)は、1922 年に道路材料(主としてアスファルト)の試験をするために設立された。1929 年に高田昭が土質安定剤を混合した土のサンプルの一軸圧縮試験を行なっている。1935 年に山田元は締固めた土の圧縮試験を行なった。1943 年ころに石井靖丸らは軟弱地盤の土の一軸圧縮試験を行なった。

乱さない試料を採取するためのサンプラーが製作されて後、軟弱地盤の土質の粘着力を調べる方法として、一軸圧縮試験が大幅に採用されるようになったのは、テルツァーギ・ペックの *Soil Mechanics in Engineering Practice* が世に出てからであろう。1950 年ころスウェーデンではオートメ化した機械が造られた。イギリスでは手動式で自記記録装置のついたポータブルな機械が造られた。この機械は 1953 年ころわが国でも造られた。稲田倍穂は一軸圧縮試験方法について研究し、JIS の原案の作成を行なった際、付属の器具類を提案した。JIS の制定されたのは 1958 年であった。

(10) 三軸圧縮試験

円筒形のサンプルをゴム膜で包み、これを円筒の中に入れて液圧を加え、上下方向からピストンによって荷重を加える形式の試験には三軸圧縮試験とセル試験がある。両者の大きな相違は前者が側圧を一定に保って上下圧を変化させるのに対し、後者は側圧を変化させるという点である。この形式の試験について一番先に論文を発表した人はアメリカのセイフォート (Seifort) であろう (1933)。この論文によれば円筒形の粘土の試料を圧密するために側面の摩擦を除いた試験機を造ったのは Prussian Waterways Experiment Station だ。現在の形の三軸圧縮試験機を造ったのはドイツのレンドリック (Rendulic, 1936) である。セル試験はオランダのヘーゼ (Geuze), ソ連のゲレスバノフ (Gersevanoff) が独立して、1936 年に発表している。内務省土木試験所でこの種の試験機が造られたのは上記の論文が発表されてから間もないころである。その後約 10 年間にアメリカではハーバード大学と MIT を中心にして研究が行なわれ、実際に三軸圧縮試験機が使用されるようになった。1951 年星埜和ならびに筆者は三軸圧縮試験機を造った。筆者は、乱さない軟弱粘土のサンプルを圧力円筒内にセッ

トするため、圧力を加え始めるまで二つ割りにできる円筒でサンプルを保護して置くような仕掛け、サンプルにゴムスリーブをかぶせる道具などを造った。1955 年にはダム用の粗粒材料試験をするため、直径 30 cm, 高さ 60 cm のサンプルが試験できるような大形三軸試験機を造った。

セルテスト型の試験機はその後衰微していった。しかしながら路床土の試験機の一つであるカリフォルニア州の Hveem の Stabilometer は今でも、同州で CBR と同様な目的に使用されている。

三軸圧縮試験機の側圧を一定に保つこと、間ゲキ水圧を測定すること、ピストンの摩擦を除くこと、容積変化を正確に測ること、などについてその後いろいろな考案がなされた。

動的三軸圧縮試験はシード (Seed) が 1963 年ころに始め、わが国では大崎順彦らが研究した。現在はこの種の試験機による砂の液状化の試験研究が盛んに行なわれている。

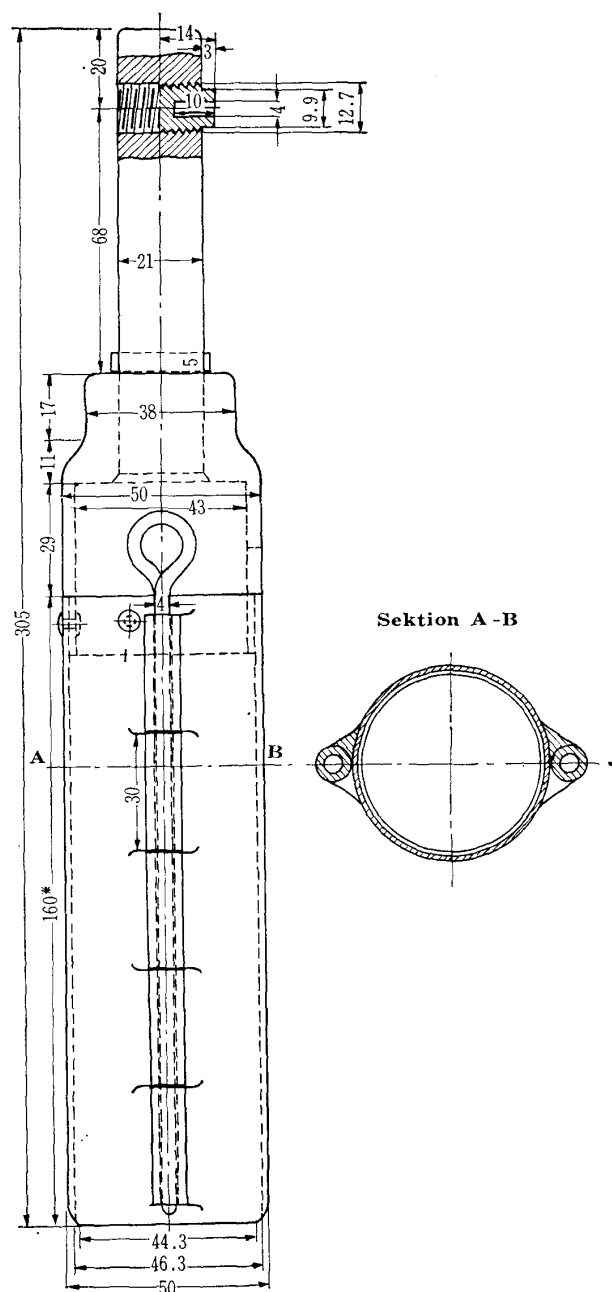
2. 土質調査法

2.1 試料採取法

わが国では古くから上総掘という井戸を掘るための技術があり、明治、大正のころの地盤調査はもっぱらこれに頼っていた。昭和になっても 24, 5 年ころまでは実施されていた。この方法は竹ひごの先にビットを取り付け、人力によってこれを上下し、孔を掘り、孔底からサンプルを採取するものである。孔壁の崩壊を防ぐために粘土水を用いる。

土の試料を採取する最も簡単な方法は鉄のパイプを地中に打ち込み、その中に入ったサンプルを集めるもので、実際、昔はこのような試料採取方法が用いられたようである。スウェーデンの土質調査委員会では図-5 に示すような粘土のサンプラーを造った。サンプルの径は 50 mm, 長さ 150 mm である。サンプラーの肉厚は 1.75 mm である。サンプラーチューブは中央のピンを抜くことによって二つ割りにできるようになっている。乱した試料の採取のためにスクリーオーガーを造っている。さらにまた、スクラブボールという名のオーガーを造った。図-6 に示すように 2 枚のスコップを合わせたような形で、ハンドルを回転することにより孔が掘削され、土は 2 枚のスコップの間に抱き込まれる。オーガーを地上に取りあげ、スコップを開いて土を取り出す。

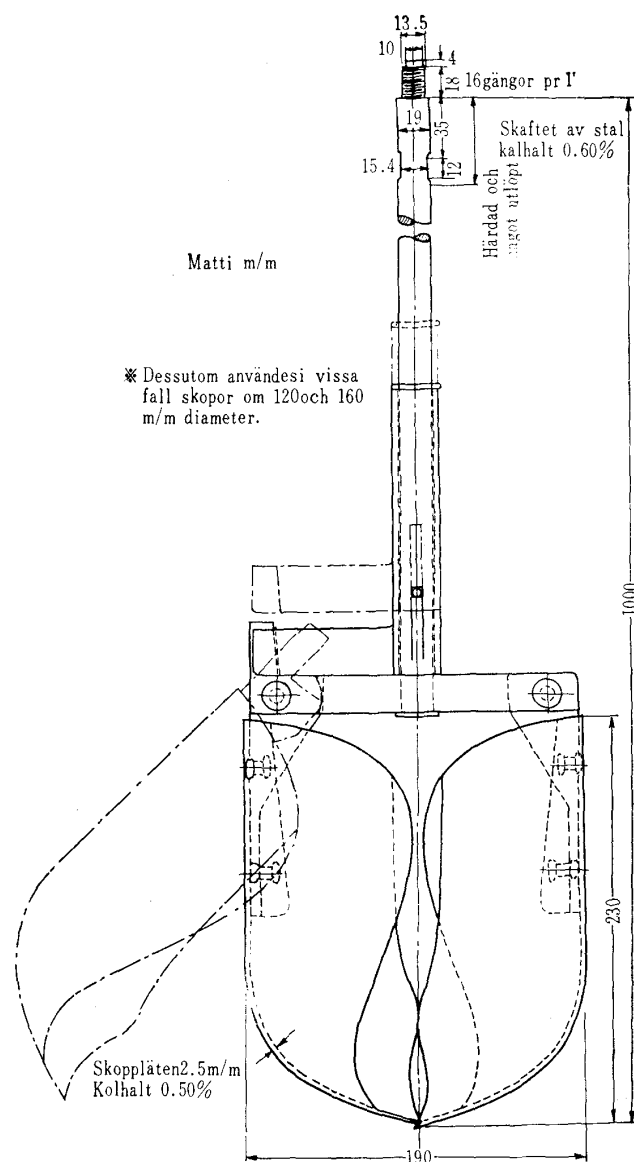
海や湖の底の試料を採取するため図-7 のようなものが造られた。ワイヤーの先に重りとコーンを組合わせた、図のようなものを吊して水底に沈めると、コーンが底の泥に突き刺さり、その上方に泥のサンプルが入る。引き揚げるときにふたがなされ、引揚げ途中でサンプルが流失しないようになっている。SGI (Swedish Geotechnical Institute) が 1945 年ころに発足して以来、チェルマン (Kjellman), カルステニウス (Kallstenius), バーゲル (Wager) らが新しい形式のサンプラーを数多く造った。その中に二重管



図一5 粘土のサンプラー（単位mm）
（スウェーデンの土質調査委員会による）

式固定ピストンサンプラー、フォイルサンプラーなどがある。二重管式サンプラーはサンプルを収容するコアチューブと、これを保護すると共に土を切り出すためのカッチングエッジが付いている。ピストンはサンプリング作業開始以前にボーリング孔底にたまった土のクズがサンプラー内に入って来ないようにするためのもので、ドリリング作業をしないで、押込み作業だけでサンプリングしようとするスウェーデン方式では絶対に必要なものである。この方法はもともと土質調査委員会のジョンオルソン (John Olsson) が考案したものだといわれている。この人はスウェーデン式サウンディングなど数多くの発明をしているが、その名はあまり外国では知られていない。

わが国では鉱山のボーリングが基礎地盤のボーリングに



図—6 スコップオーガー
(スウェーデン土質調査委員会による)

先行したようである。鉄道省土質調査委員会ではダブルコアチューブにより良質のサンプルを採る方法が考案された。この方法はスウェーデン法と違い、ドリリング作業の際、泥水を内外チューブの間を通し、外のチューブの先端に付けたカッチングエッジで硬い土を掘り、孔の掘進をし、内側のチューブ内にコアを収容しようとするものである。内外のチューブがロッドの回転に伴って同時に回転するようになっていた。この形式のサンプラーは中程度の硬さの粘性土のサンプリングに適している。

アメリカの Bureau of Reclamation では内側のチューブが回転しないようにし、スプリングによって圧力を加え、またシンウォールチューブとした。そして Denison Sampler や Pitcher Sampler を造った。

サンプリング技術の発展に最も大きな貢献のあったのは、アメリカの Hvorslev である。彼は 1938—48 年の間に研

講 座

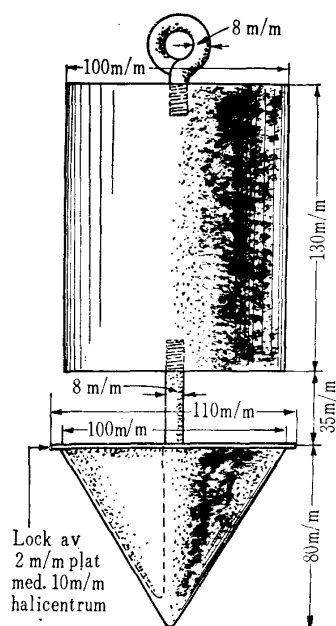


図-7 水底のサンプラー(スウェーデン土質調査委員会による)

究した成果をまとめて, “Subsurface Exploration and Sampling of Soils” (1949) という大著作を発表した。彼の Stationary Piston Sampler は径 3 in, チューブの肉厚は 2 mm である。この形のサンプラーは現在ではわが国の最も標準的なものとなっている。この他 Shelby 型薄肉サンプラーというのがあるが, これはピストンがなく, サンプラーをボーリング孔底から引揚げるときにサンプルが落下しないようにするため, サンプラーヘッドにボールとバルブが取り付けられている。ボシュレフはこの他, サンプルが乱されないようにするため, 内径比, 面積比, 径と長さの比などのようなものの定義ならびに範囲を定めた。

わが国に諸外国のサンプラーが輸入された歴史について述べる。1950年に石井靖丸がプリンストン大学に留学した際, はじめて乱さない試料採取法について学んだ。当時ボシュレフの研究成果が注目をあびていたところであった。中央開発(株)は土質調査専門の会社として最も古く1946年の創業であるが, 積極的に新しい機械を用いた。その中で1952年に森博ははじめてシンウォールサンプラーを使用した。このころから国内でも乱さないサンプル採取が行なわれるようになった。

スウェーデン式のサンプラーは1948年の第2回国際土質基礎工学会議において報告されたが, わが国では注目されなかった。1953年筆者は SGI に留学中, 土質調査試験, 特にサンプリング技術を学んだ。そこではフォイルサンプラー, ロータリーフォイルサンプラー, ニューマチックピストンサンプラー, 連続打込み式 disturbed sampler などを使用した。1961年にフォイルサンプラーを輸入し, ついで技術提携により国産できるようにした。国鉄での使用が盛んになってから一般に普及した。スウェーデンでは二重

管式ピストンサンプラーの標準型が造られて以来, サンプリングの研究が行なわれなくなったと聞く。土質工学会のサンプリング委員会でも1968年ころスウェーデンの標準型と固定ピストン式シンウォールサンプラーとの比較試験を行ない, 標準型がすぐれていることを認めた。

1957年の第4回国際土質基礎工学会議で Soil Sampling の Subcommittee が設立され, 筆者も Kallstenius, Hvorslev らと共にそのメンバーに選ばれた。これに応じて, International Group of Soil Sampling (IGOSS), 土質工学会内にサンプリング委員会が置かれた。委員会では粘土の乱さないサンプリング指針を造った。砂の乱さないサンプラーとしてビショップ (Bishop) のサンプラー (1948年発表), 森博のサンドサンプラー, 鉄研型のサンプラーなどの試験をした。

オスターバークは水圧によってサンプラーを押し込む薄肉固定ピストンサンプラーを造った。1955年ころ森博はわが国で初めてこれを使用した。

シンウォールサンプラーは引揚げの際の真空作用のため乱れを生じるとして, シンウォールサンプラーを孔底に押し込んだ後, その外側の土を掘りながら外側のパイプをさげ, 内外のパイプを一体として取り上げる追切りサンプラーを, 港湾研究所の藤下利男, 応用地質(株)の陶山国男らが製作した。

海や湖の底のサンプルを採取するためのサンプラーはスウェーデンなどで造られたものがあつた(既述), その中でクーレンベリー (Kullenberg) のサンプラー (ノルウェーの海洋研究所) のものは, サンプラーが海底に着くと同時に錘の重量がサンプラーの押し込み力として作用するというものであつた。このサンプラーにフォイルサンプラーを組合わせることによって, 長さ 3 m 程度の粘土のサンプルが採取できるようになった (1954年)。

本州四国連絡橋の調査において深度 50 m の海底のボーリングが鋼管を垂直に立て, アンカーをとることによって固定した足場の上において施工された(1960年)。海底に機械のユニットを沈め, リモートコントロールによって掘進するものも利根ボーリング(株)によって造られた。

2.2 サウンディング (静的サウンディング)

コーンをロッドの先端につけ, これを地中に押し込む際の抵抗力によって, 地盤土の硬軟を測定する方法を一般に Dutch Cone といっている。この方法がどの国の誰によって発明されたかは明らかでない。名称からはオランダで発明されたものようであるが, スウェーデンでも古くから用いられていたようである。1928年にテルツァーギはジェット式貫入試験ポイントを製作している。押し込み用ロッドの摩擦抵抗を除くためのスリーブが1930年に用いられている。ドイツではムス (Muhs) が振動弦を用いた荷重計をコーンとロッドの間に置き, コーンだけの抵抗力を測定する機械を造った。1948年にオランダのヴェルミアイデン

(Vermeiden) はフリクシヨンスリーブのついたポイントを発表している。最近、これらのポイントを機械力で自動的に押し込み、かつ深度と抵抗力が自動的に記録されるようにしたものがある。また押し込み力も 20t という大型のものがある。カルステニウスは自動車のエンジンを動力に使うてコーンを回転しながら押し込み、自動的に記録をとる機械を 1950 年ころに造っている。1965 年ころ鹿島建設、フジタ工業などでも車に積んだサウンディング機械を造った。

コーンの先端付近にフリクシヨンスリーブの他に間ゲキ水圧計、音波探知機をつけたものが 1974 年の European Symposium on Penetration Testing (ESOPT) に発表され、注目を浴びた。地表面付近の土の堅さを調べるための手動式コーンペネトロメータは 1940~45 年にアメリカの WES で造られ、戦後わが国に導入され、広く用いられた。

2.3 サウンディング (動的サウンディング)

静的サウンディングは堅い地盤には貫入できないので、ドロップハンマーによる動的貫入試験機が用いられている。この起源も明らかでない。わが国では最上武雄らが 1944 年ころ締固めた土の強さを測定するため、小型の動的貫入試験機を造った。これが土研式簡易貫入試験機の始まりである (既述)。

動的貫入試験を自動的に操作して記録のできる機械がスウェーデン、フランスなどで造られ、ESOPT に展示されていた。

2.4 標準貫入試験

標準貫入試験と動的貫入試験との最も大きな相違は、サンプルを採取するかしないかである。標準貫入試験ではコーンの代わりにスプリットサンプラーを使用する。これは恐らく 1940 年代にアメリカのレーモンド基礎工事(株)がクイの支持力調査のために造ったのが最初であろう。テルツァーギ・ベックらの教科書には標準貫入試験の結果得られた N 値の利用方法が豊富に掲載されている。このことが、この試験法を世界的なものとしたといっても過言ではなかろう。1952 年森博が使用したのがわが国における最初のものであったようだ。1961 年には JIS が制定された。マイヤーホフ (Meyerhof) は N 値を用いたクイの鉛直支持力判定法を発表し、宇都一馬と筆者は N 値とクイの横抵抗の関係を研究した (1958)。

2.5 スウェーデン式貫入試験 (Swedish Weigh: Sounding)

この方法もスウェーデン土質調査委員会の報告書に載っている。多分オルソン (J. Olsson) の考案したものであろう。コーンの代わりにスクリュエポイントがあること、錘りで貫入できないような地層に対してはロッドに回転を与えろというの大きな特徴である。わが国には 1954 年に持ち込んだ。上田嘉男、稲田倍穂、筆者らによって N 値、粘着力 c との関係が求められた。

2.6 ベーン試験

Laboratory Vane 1.3(8) 参照。

2.7 イスキュメーター (Iskymeter)

この方法はワイヤーにつけた鉄製のビーム状の羽根を引き抜くときの抵抗力を測定するものであり、押し込み式のサウンディングのようにアンカーが不要であるので便利である。1930 年代にチェルマンの発明したものである。鉄道技術研究所の室町忠彦が 1961 年、わが国ではじめて使用した。

2.8 透水試験

現場透水試験の方法としては、ボーリング孔または井戸を利用する汲上げ試験、注水試験、トレーサーを利用する方法、ボーリング孔内の流速を流速計で測定する方法などいろいろある。透水の問題は地下水の利用、ダム止水工事、農業方面でも重要なものであるから、土質工学の固有のものとはいいがたい。そのため試験の方法も他部門で開発されたものを利用するケースが多かった。松尾新一郎らは試験池や水路を利用して透水係数を求める方法を 1952 年に発表している。中央開発(株)ではウェルポイントを円形に配置して井戸の代わりとして汲上げ試験を行なった (1957 年ころ)。ボーリング孔内にパッカーを取り付け、ボーリング孔内に流入する水量を測定する JFT 試験、高い圧力で水を注入する注水試験によって透水係数の代わりにルジオン値を求める試験などがダム工事で実施されている。

2.9 Pressure Meter Test

ボーリング孔内にゴム円管を入れ、内側に満たした液体に圧力を加え、孔壁に圧力を作用させて変形を調べる試験は 1933 年にケグラ (Kögler) が行なった。これとは独立に筆者は 1954 年に阪神電車の淀川橋りょうの位置でわが国で始めてボーリング孔を利用した K 値試験を実施した。そしてその結果を用いて地震時におけるクイの横抵抗の計算を行なった。このころフランスのメナール (L. Ménard) が研究を開始し、Prossimeter という名称をつけ、各国に広めた。わが国でも 1963 年に森博が技術導入し、試験を開始した。筆者の土研式は、応用地質(株)の陶山国雄らによって改良され、LLT 法と名付けられた。川崎地質(株)の三木幸蔵はゴム円筒の代わりに金属の載荷板をジャッキで押すような孔内載荷試験法を発明した (1966)。

2.10 物理探査法

物理探査法は地表探査法 (地震探査、音波探査、電気探査) 孔内探査法または物理探査法 (速度検相、PS 検層、反射検層、電気検相、放射能検層) の 2 種類がある。地震探査は 1930 年ころからトンネルの調査などに用いられている。また電気探査は 1930 年ころ、萩原尊礼、表俊一郎が地スベリ調査に用いている。戦後横河電機(株)製の L-10 型の電気探査機がよく使われた。音波探査は海底の工事が実施されるに伴い海外から導入され、特に 1955~60 年代になって本四連絡橋、青函トンネルなどの調査に大いに用いられた。孔内探査は石油、石炭など鉱山関係では古くから用

講座・技術手帳

いられていたが、建設工事関係では比較的新しい（1960年ころから）。

2.11 載荷試験

この試験の歴史は古く、誰が始めたかは全く不明である。重量構造物を大量に造ったアメリカが最初ではなかろうか。わが国で皇居の造営のための調査用として初めて用いられたのが明治14年（1881年）ころであったことについては、土と基礎 No. 189 に興味深く述べられている。

2.12 クイ載荷試験

クイに直接荷重をかけた載荷試験を行なったのは古いものであろう。筆者が見た最初の載荷試験機は Kallstenius の造ったもの（1950年ころ）で、4本のクイを反力に使ひ、中央のクイにジャッキで載荷するものであった。クイの横抵抗の式についてはチャン（Chang）の式が有名であり、横抵抗の試験も1930年代に行なわれたものと思われる。クイの動的横抵抗試験は1954～5年ころに前述した阪神淀川橋りょうにおいて田原保二らが実施したのが筆者の見た最初のものであったが、あるいはもっと早くから実施されて

いたかもしれない。

2.13 RI 関係の測定試験

1952年ころに RI が輸入されるようになってから、自然放射能の測定、密度と含水比の測定、地下水などに広く利用されるようになった。

む す び

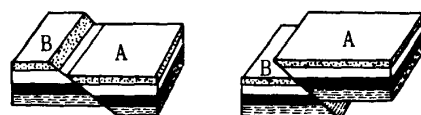
試験法とか調査法はこれらに用いる機械器具、化学薬品などと密接な関係があり、これらについても触れなければならない。しかしこれは割愛せざるを得なかった。試験法、調査法はその範囲が広く、最近になると種類もきわめて多くなっているので十分に説明することがなかった。またいろいろなあやまちを犯し、関係の方々にご迷惑をかけるのではないかと恐れている。どうかご叱正を願いたい。本稿の執筆にあたりご協力を賜わった方々、特に斎藤迪孝、室町忠彦、森博、瀬古新助、戸部兼雄の諸氏に対し深くお礼申し上げる次第である。（原稿受理 1974. 11. 18）

技術手帳

衝 上 断 層 と ト ン ネ ル

たか はし ひこ り
高 橋 彦 治*

山が削られ、低所にタイ積が行なわれ、地球が自転しているなどの営力が地球の内部構造の仕組みと複雑に関連しあつて、地球表面の地殻には造陸運動や造山運動とよばれる地殻変動が現われる。造陸運動が長い地質時代にわたり、地質構造に変化を与えないで広範囲に及ぶ緩慢な陸化運動を起こしているのに対して、短い期間に急激に起こり、狭い範囲の地質構造に複雑な変化を与えるような地殻変動は造山運動または造構造運動とよばれている。造構造運動を受けた地域の地質構造は、地層が変位・変形し、あるいは断層で食い違ったり、地層が急傾斜したり、しゅう曲したりというように複雑に変化している。



(a) 正断層 (b) 逆断層
図—1 断層 (A: 上盤, B: 下盤)

断層とは地殻の表面に発生した断裂で、多少とも面に沿って変位の認められるものと定義されているが、スベリ運動に際してセン断破壊を起こし、破碎帯を伴うことが多い。

断層には正断層と逆断層がある（図—1）。正断層は断層面に沿って上盤がずり落ちたような形式のものであり、逆断層はこれと反対に上盤がずり上がったような形式のものである。実際には断層面を境にして上下盤のいずれが滑動したかを定めるのは困難なことが多く、上下方向だけでなく相対的に水平移動（左横ズリまたは右横ズリとよばれる）を行なっているのが普通である。また滑動側の盤（上盤側であることが多い）がより多く破碎しているだろうと考えられている。衝上断層は逆断層にほかならないが、断層面の傾斜が45°よりゆるいものを特に押しかぶせ断層とよんでいる。

衝上断層は、成因的には横圧力のもとでしゅう曲構造と共に発達した逆断層であるが、その発生条件としては相対的な最大圧縮の方向が水平であり、断層面の傾斜が45°より大きいものに限定すれば、最大伸長の方向が垂直であるような地殻の部分的な短縮であることができる（アンダーソン＝Anderson, 1951）²⁾。

日本列島は造山帯であるだけに断層が多い。地質学上の2大構造線である中央構造線とフォッサマグナは断層による特殊な地体構造を示すことで知られている。これによって日本列島は地学上、西南日本と東北日本および内帯と外

*理博 鹿島建設技術研究所次長