

土の判別試験法の自動化

Automatic Testings for Soil Identification

三木 五三郎*

Gosaburo MIKI

最近土木や建築の現場で出会う土を、土質工学的にとり扱うと非常に有益な場合が多いことがわかってきたが、それにはまず素材としての土の性質を試験することが大切で、しかも迅速に大量に個人差のない試験をこなすには、手作業によるのではなく自動化された試験法の確立が要求されてきた。ここでは、そのような目的で開発が進められている土の判別試験法の例として、粒度・含水量・液性限界などの新しい測定法を紹介する。

1. まえがき

土木や建築の現場で出会う土は、工事材料として持ちこまれている場合もあれば、基礎地盤としてもともとそこに存在していることもあるが、いずれにしてもいろいろの種類のものであり、それぞれに異なる工学的性質もっている。

そこで土をあらかじめ特徴をもついくつかの群に分類しておいて、実際に出会う土がそのどれに属するかを簡単な判別試験結果から決めることができれば、その後の土に関する工事の進行を予測することができて便利であり、有用である。

この判別試験の手段としては、現在では粒度試験とコンシステンシー試験（液性限界試験と塑性限界試験）が主として用いられ、その結果を使った分類システムとしては統一分類法が広く行なわれている¹⁾。そしてこのように分類された各土群には、一般にどのような土質工学的特性があり、工事に対する適性があるかを示す一覧表が別に準備されているのである²⁾。

ところが現在の判別試験のやり方は、もともと実験室の中でのんびりと手作業で行なっていた時代のものがほとんどで、最近の機械化土工による盛土施工現場でのように、早く大量に試験をこなすという要請には応じきれなくなりつつある。すなわち実用的な土質試験方法として、この分野でもその自動化が強く求められるようになってきたのである。

このような時代の推移に即応するため、日本建設機械化協会の中に土質試験自動化委員会が初めて設けられたのは昭和 38 年度であった³⁾。そこでまず手がけたのは土の含水量の自動測定であったが、以後液性限界の測定、粒度の測定とわずかずつながら成果をあげてきた。そこで以下にはその委員会活動の歩みを振り返って概要を紹介するとともに、さらに広く土質試験の自動化全般についての意義や今後の進むべき方向などについても簡単に触れてみることにする。

2. 判別試験の進め方

ここでは土を一つの工事材料と考え、少量の試料土を現場で採取して実験室に運びこみ、判別試験を行なつて分類するまでのことを考える。

それには試料土をまず空気乾燥してときほぐし、粒度試験を行なって粗粒土であるか細粒土であるかを定める。74 μ フルイ通過分が 50% 以上の細粒土については、つぎに液性限界を求める試験を行なってその結果を塑性図上にプロットすることにより分類名が決まる。74 μ フルイ残留分が 50% 以上の粗粒土については、数種のフルイを使ってフルイわけ試験を行ない、粒度加積曲線を描いてその形から分類名を決めるが、細粒分を 12~50% も含むときには細粒分だけのコンシステンシー試験を行なってそれが粘土質なのかシルト質なのかをも決める必要がある。

いずれにしても上記の判別試験を実施するのにまず必要なのは粒度試験であり、つぎに液性限界試験と塑性限界試験とであるが、後者の試験結果は含水量によって示されるので、土の含水量を求める試験も欠かすことができない。すなわち判別試験の自動化の対象となるのはとりあえず上記 4 種の試験と考えるとよいのである。

3. 粒度の測定

一般に粒体や粉体の粒度を求める試験方法には種類が

表 1 粒度試験法のおもな種類

| 原 理 | | 測 定 法 | |
|------------|-----------------|---|-----------------------------------|
| 計数法 | 顕 微 鏡 | 光学顕微鏡法, 電子顕微鏡法 | |
| | 電気抵抗変化 フルイわけ | Coulter Counter 法 乾式フルイわけ法, 湿式フルイ分け法 | |
| 沈降法 | 重 力 | 液相 | ピペット法, 沈降天ビン法, 比重計法, 比重天ビン法, 光透過法 |
| | | 気相 | 風篩法, Micromerograph 法 |
| | 遠 心 力 | 液相 気相 | Whitby 法 Bahco 法 |
| 比 表 面積法 | 透 過 面 積 法 | 空気透過法, 流体透過法 気相吸着法, 液相吸着法 | |

* 東京大学生産技術研究所第 5 部

多く、表 1 にはその主要なものを示した。その中で土の粒度試験方法としては、従来は粒径が 74μ 以上のものはフルイわけ法、 74μ 未満のものは水中重力沈降法の中の比重計法が多く用いられ、JIS の標準方法もその両者

を採用している。

フルイわけ試験の行ない方には大別して次の 2 種がある。すなわちその第 1 は、 74μ フルイ通過分の重量百分率だけを測定して、その値からその土が細粒土なのか粗粒土なのかだけを区別するために行なう。この場合にはたとえば ASTM D 1140-54 の試験法規格に示すように、湿式フルイわけによってごく簡単に行なえばよく、わが国にも 2 段重ねのフルイ (下段が 74μ フルイ) を振トウしながら水洗できる能率のよい機械ができています。土質試験自動化委員会でも本年度はこの装置をとりあげ、試験法規格の整備とあわせて実用化をはかりたいと考えている。

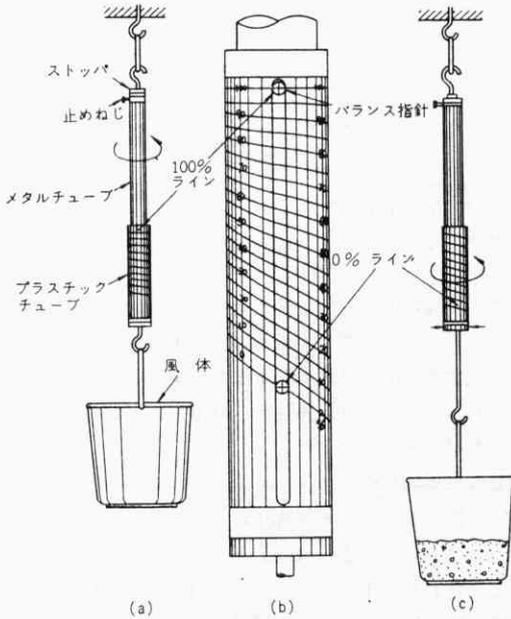


図 1 パーセンテージバランス

〔使用法〕

1. 風体だけをつり下げてから止めネジをゆるめて、バランス指針がプラスチックチューブの 100% ラインに一致するまで金属チューブをまわし、止めネジを締める。
2. 風体に全試料を入れ、バランス指針が 0% ラインに一致するまでプラスチックチューブをまわす。
3. 風体に入れた試料の重量百分率は、そのときのバランス指針のプラスチックチューブ上の読みから直接読みとれる。

第 2 の方法はすでに粗粒土に分類された土について、数段のフルイを用いてその粒度を測定することである。細粒土の粒度とは異なって、粗粒土の粒度をフルイを用いて機械的にふるいわけた測定結果には信頼性があり、また求められた粒度加積曲線の形によって、その粗粒土の性質を推定する可能性も大きい。

この粗粒土のフルイわけ試験結果を簡単に計量・計算するためには、図 1 に示したパーセンテージバランス (スイス特許) の使用が簡便である。この標準型では $4.5\sim 10\text{kg}$ の試料土をふるいわけたフルイ上の残留試料の百分率を、直接つぎつぎに百分率目盛りをきざんだプラスチックチューブ上のバランス指針の読みから求めることが可能である。

土質試験自動化委員会ではまた、フルイ振トウ機と上ガラ直視天ビンとを組合わせて、ふるいわけられた試料重量の加積百分率を直ちに読みとる装置の設計・試作を昨年度実施した。図 2 にその概要を示す。

細粒土の粒度試験を比重計法によって行なう場合には 2~3 日を要するのが普通であるが、これを迅速に実施するため、最近では同じ液相重力沈降法でも比重計法とは測定原理が異なる光透過法を利用しようとする試みなどが行なわれている⁹⁾。ところがその結果を JIS の方法と比較すると、 2μ 程度以下の粒子の含有量が両者で著しく異なって求められることがわかり、これは比重計法ではメスシリンダー中の土粒子懸濁液の対流の影響

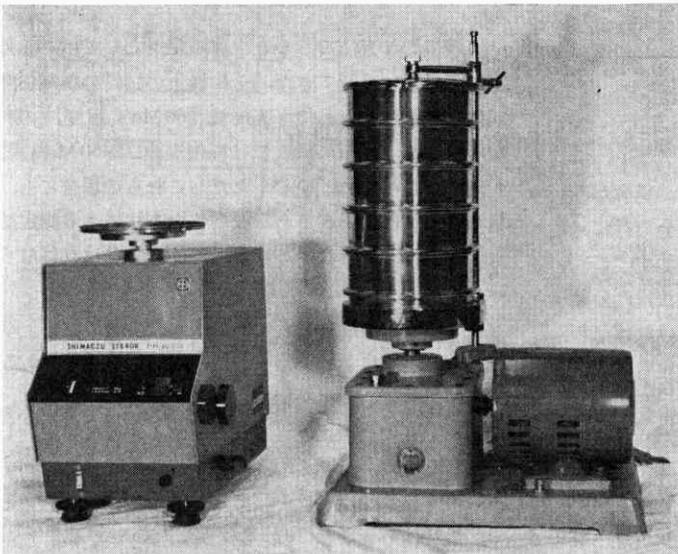


図 2 加積百分率直読式フルイ分け粒度測定機

〔使用法〕

1. 5 個のフルイを左側の天ビンにのせてゼロ点を合わせる。
2. フルスケール (100g または 100%) になるまで試料土をフルイに入れる。
3. フルイを右側のフルイ振トウ機にかけてふるい分ける。(5~15 分)
4. フルイを振トウ機からはずしてふたたび天ビンにのせる。
5. 1 番上のフルイ (1) をはずして、容器重量消去ハンドルを (1) にまわし、そのときの加積百分率を読む。
6. 以下同様の操作を繰り返して各フルイに相当する加積百分率を読む。
7. 個々のフルイの残留重量百分率を知るためには、容器重量消去ハンドルを (5) に合わせて、個々のフルイをのせ、目盛りを読めばよい。

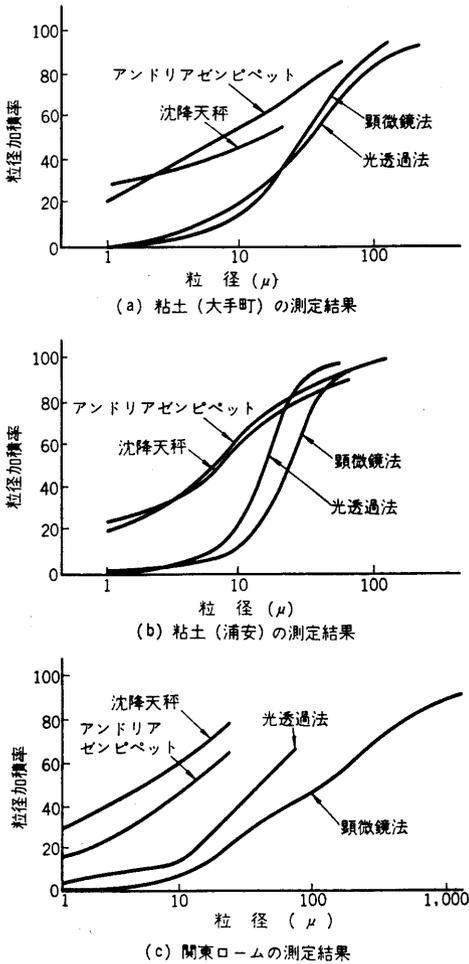


図 3 粒度の各種方法による測定結果

響で、含有量が過大に求められているのだとの見解がうちだされた⁶⁾。図 3 には土質試験自動化委員会で行なった比較実験データをも含むその試験結果例を示す。こうなると細粒土に関する現行の JIS の粒度試験法は、分散剤の使用法なども含めて根本的に再検討しなければならないものと思われる。

4. 含水量の測定

土の含水量を求める方法にもその種類が多く、一般には表 2 に示すようなものが考えられ、ときに応じて使い分けられている。その中で JIS の標準方法としては、もっとも安定した実験方法として乾燥温度を 110°C とした恒温乾燥炉法が採用されており、その他の方法によるときには標準方法と比較して、測定結果に相異がみられるときには注意しなければならないわけである。

ところでこの乾燥による標準方法によるときには、試験結果がわかるまでに 20 時間程度を要するのがふつうなので、室内におけるコンシステンシー試験などでも測定後ただちに結果を知ることができないし、現場の施

表 2 含水量試験法のおもな種類

| 原 理 | | 測 定 法 |
|-------|------------------|---|
| 物理的方法 | 乾 燥 | 恒温乾燥炉法、熱風法、フライパン法、アルコール燃焼法、赤外線法、超短波法、高周波法 |
| | 体 積 測 定 | ピクノメータ法、ポイヤンシーメータ法 |
| | 間ゲキ水圧測定 | テンシヨメータ法 |
| | 強 さ 測 定 | プロクターニードル法、ドロップテスト |
| 化学的方法 | 反応ガス圧測定 | カーバイト法 |
| | 抽出溶液測定 | アルコール溶液比重測定法、屈折率測定法、誘電率測定法 |
| 電気的方法 | 電気抵抗測定 電気容量測定 | |
| 放射線法 | 中性子検出 | 表面型水分計、地中型水分計 |

工管理試験などで早急に含水量を知りたいときにも利用できない。すなわち含水量のより急速な測定のために表 2 に示すその他の各種の測定法が提案されているとも考えられ、その信頼性、迅速性、経済性などが比較検討されるわけである。

現在現場的な簡易法としてよく用いられるのは、フライパン法とアルコール燃焼法であるが、後者の迅速性はすぐれている⁷⁾。また 1950 年ころより放射線法が米国などで使われるようになり、土工現場では表面型水分計が表面型密度計とともに実用段階に入った。しかしキャリブレーションになお多くの問題が残っているようである。

実験的な方法でしかも急速測定用としては、赤外線法が多く用いられてきた。その後土の試料の誘電加熱方式による乾燥法として、高周波 (60Mc/s 程度) の利用が考えられ、さらに最近では極超短波 (2450Mc/s 程度) の応用が試みられている。ただしこれらの場合にも、試料が高温になり過ぎると、標準乾燥法による測定結果と異なってくる場合があることに注意しなければならない。

ところで土質試験自動化委員会が、少量の試料土の重量が急速乾燥によって減少して一定値に収れんするのを、電気的なサーボ機構を用いて自動的に測定して、その結果を直接含水比として読みとれるような装置として開発したのは、まずその高周波乾燥法の場合についてであった⁸⁾ (図 4 参照)。そしてこのときの試料土重量として、最初はちょうど 10g を採用したのである。

しかし一般には含水量測定用試料の必要重量として、その最大粒径に応じて表 3 が与えられている。そこで試

表 3 含水量測定に必要な試料の量

| 土粒子の最大粒径 (mm) | 試料の必要量 (g) |
|---------------|------------|
| 約 5 | 約 50 |
| 約 20 | 約 250 |
| 約 40 | 約 500 |

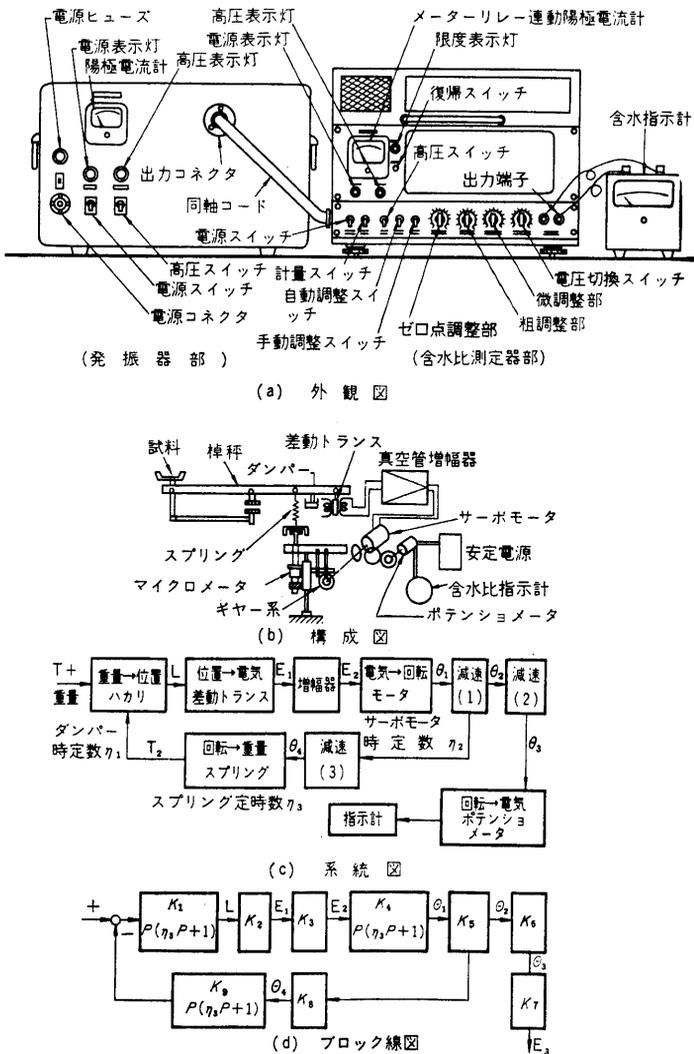


図 4 高周波乾燥による土の含水比自動測定装置

料土重量が 50g までの場合は高周波乾燥法の改良で対処したが、その後、より大量の試料土を使いたい場合のために超短波乾燥法の利用の検討が始められている⁹⁾。

なお含水比自動測定装置によって乱さない試料土の含水量を測定する場合には、乾燥時間と含水比の漸減傾向との関係を簡単に図示できるので、その曲線の形からその土の物理的ないし力学的性質を推定できるのではないかとの方考^{10), 11)}もでてきている。

5. 液性限界の測定

土の液性限界は、丸底のサラに入れた試料土をまずミゾ切りで左右に 2 分し、サラに一定の衝撃を与えることによって、土がミゾの両側から流れ出して合流するような状態の含水比であると定義している。もともとスウェーデンの土壌学者アッターベルクが 1911 年ころ提案した方法を、1920 年代に米国の道路技術者が土の工学的な判

別試験法としてとり入れたもので、最初は手で横に軽く 10 回たたいていたのを、キャサグランデが機械的な装置を考案して、従来と同等の衝撃として、サラを 1 cm の高さから 1 秒間に 2 回の割合でかたいゴムの台の上に 25 回落下させることとし、これが ASTM の規格にも採用されて、現在は世界的な標準方法となっている。ところがこの方法には、本来土の静力学的な特性だと思われる液性限界値を、動力学的に求めるという無理があるほか、装置の細部にも多くの問題点があるので、最近ではフォールコーン法に代える提案が行なわれるようになった¹²⁾。すなわち先端角 60°、重さ 60g のコーンが、自重でちょうど 10mm だけ試料土中に貫入するときの含水比が、従来の液性限界値とちょうど一致することがわかってきたので、土質試験自動化委員会でもこの手法による液性限界の自動化測定を考えたのである¹³⁾。この試験装置として現在では図 5 に示すようなロータリテーブル型の機械を試作しているが(a)、ここでは気乾試料土に加水して準備した試料のカラー付き容器内での練りませ(b)、その試料の振動を用いた容器内へのセット(c)、カラーの衝撃の除去による平たんな試料表面の整形(d)、フォールコーンの落下貫入量の測定(e)、試料のとり出しという一連の操作を断続的に実施(f)しようとしている。なお本装置の前半部の機構は、自動的な試料調製法として、土の他の判別試験にも適用できるものであることはいうまでもない。

6. 塑性限界の測定

現在土の塑性限界は、粘性土のかたまりを手のひらでスリガラス板上にころがしながらひも状に伸ばして、きれぎれになることなくちょうど 3mm の太さになるような含水比として求められている。すなわち判別試験法のなかでもっともプリミティブなこの試験法には個人差の介入なども考えられ、それに代わる自動化に適した試験方法の検討が進められている。最近提案されたドロップテスト利用法など¹⁴⁾が一般性をもつのであれば、その測定の自動化が試みられることになる。

7. 土質試験自動化の意義と今後の問題点

一般的に考えた場合の土質試験の自動化とは、ある試験方法について試料土の準備から試験操作までを機械化

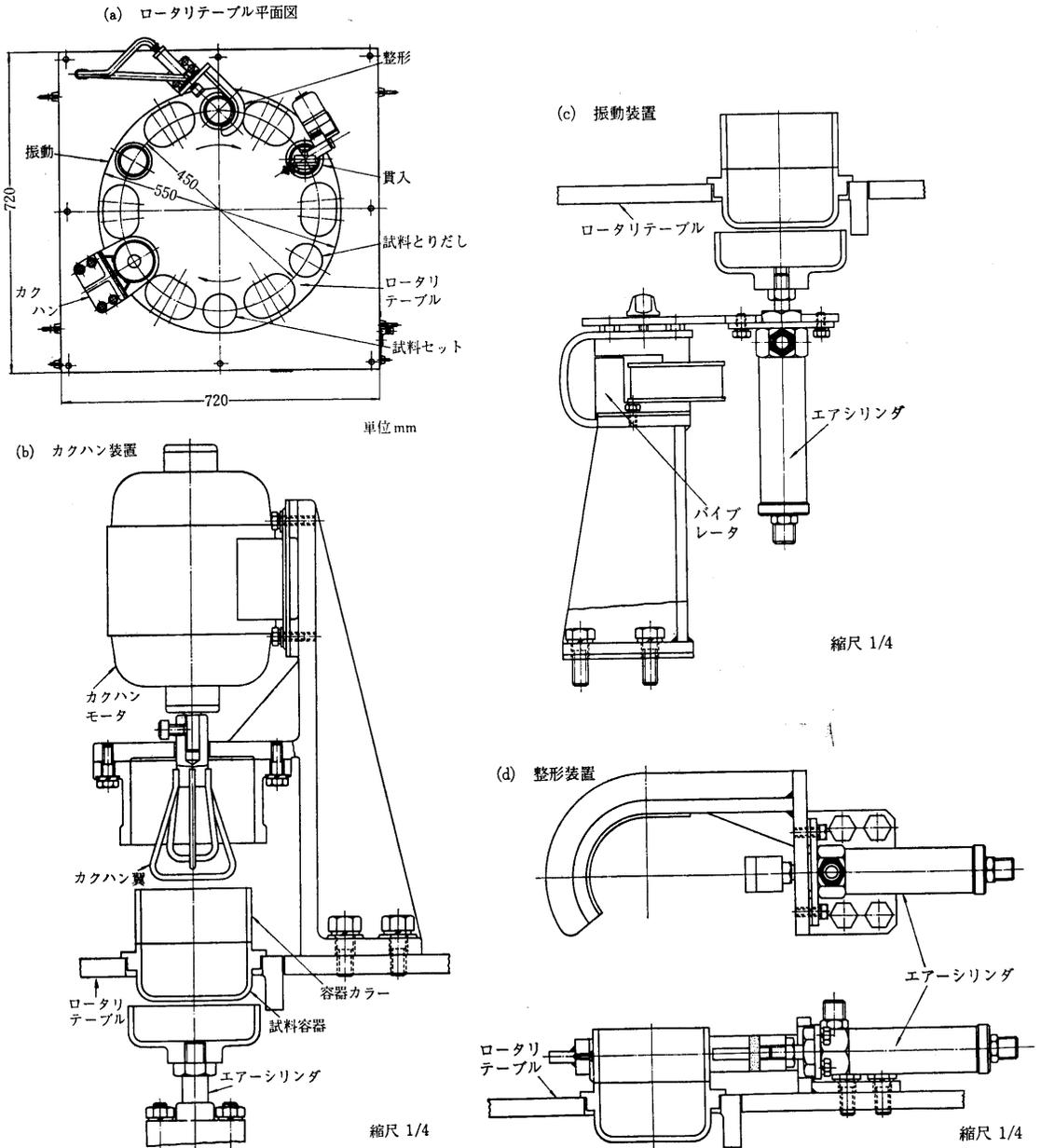


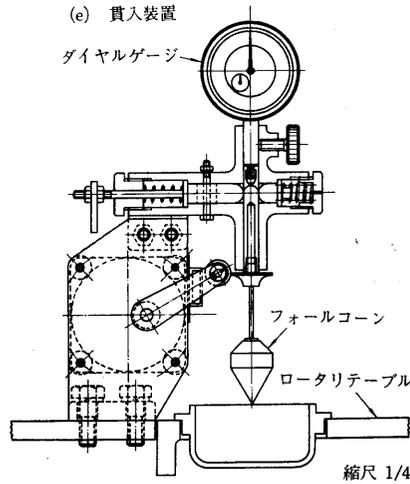
図 5 液性限界自動測定装置 (その 1)

するとともに、測定値を整理・計算して求めた試験結果を、直接的に数値または図として示すことである。これによって試験の迅速化と省力化が実現し、手作業による測定の個人差が除かれる。ただ現状では自動化の程度を高めるとただちに装置のコスト高に結びつくので、開発した試験機に市場性をもたせるためには、おのずから自動化の段階に限度があることも止むを得ない。

土質調査をも含めた広義の土質試験は、現場における試料土の採取や原位置強さの測定などから始まって、実験室における土の判別試験や力学的性質の試験まで、その種類を数えれば枚挙にいとまがない。今までにも原位置

におけるサウンディング調査関係では、土中に押しこんだロッドの下端における貫入抵抗を電氣的に測定・記録するといったかなり高度の自動化試験機も開発されてきているが^{15), 16), 17)}、実験室内の試験に関しては上述した諸方法は目新しいものなどといえる。今後は試料土のサンプリング方法や、採取された乱さない土の力学的試験方法などについても、試験法の自動化が進められるであろう。

ところで土質試験法の全般についてその自動化を考えると、一つの問題は今までに述べてきたように個々の試験法を改良して、自動化しやすい型へ移行させながら



(f) 装置作動関係図

| 動作 | 試料のセット | カクハン | 振 | 動 | 整 | 形 | 貫 | 入 | 試料の取り出し | | |
|----|----------|---------|------|----|-----|----|-----|----|---------|----|---------|
| 位置 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | | | |
| 時間 | 60 | | 120 | | 180 | | 240 | | 300 | | 360 sec |
| 1 | ロータリテーブル | 動作 | 停止 | 動作 | 停止 | 動作 | 停止 | 動作 | 停止 | 動作 | 停止 |
| 2 | 装カクハン置 | エアシリンダ | 上昇 | 停止 | 下降 | | | | | | |
| | | カクハンモータ | カクハン | | | | | | | | |
| 3 | 振動装置 | エアシリンダ | | 上昇 | 停止 | 下降 | | | | | |
| | | パイプレータ | | | 振動 | | | | | | |
| 4 | 装整形置 | エアシリンダ | | | 上昇 | 停止 | 下降 | | | | |
| 5 | 貫入装置 | モータ | | | | | | 回転 | | | |
| | | コーン | | | | | | 貫入 | | | |

図 5 液性限界自動測定装置 (その 2)

らその実現をはかることであるが、また各種の試験法を組織的に組合わせて、全体として有効に実施するための段取りと設備を工夫することも大切で、たとえば現場での施工管理試験が、最近のようにひんぱんに大量に行なわれる場合、電源装置や計算機まで内蔵した土質試験車の開発・活用なども考えねばならない。

土質試験法に関する他の問題としては、また測定結果の整理の迅速化の重要性が考えられる。たとえば粒度試験や圧密試験では数多くのデータシートが与えられて、結果の計算が大変にめんどうである。そこで最近では電子計算機によるデータ整理の自動化の試みが行なわれている¹⁰⁾。試験結果を単に数値として求め、単位の換算を行なうばかりでなく、その図示まで進められればさらに便利となる。

もっとも電子計算機をもちだすならば、それをただの計算機代わりに用いるのはもったいない話で、実は当面

する土または基礎工事の設計・施工に必要な土質調査・土質試験の種目・数量に関する計画の段階からそれを活用するように考えるべきであろう。一方ではすでにわが国に実在する地盤構造のパターンを考える試みなども進んでいるので¹⁰⁾、やがて土質調査の計画から土質試験の実施と結果の呈示までを自動的に処理できる日がくるものと考えられる。

もっとも最近の土質工学は、とり扱う素材がふつうの粘土や砂ばかりとは限らず、きわめて有機質の泥炭土や、一方ではまた粒径の大きなレキや玉石までがその対象となってきた。また考える現象が静力学的な問題ばかりではなく、振動や地震といった動力学的なものも重要になりつつある。それに伴って土質試験はますます複雑化し、その自動化の問題もいよいよ多岐をきわめることを覚悟しなければならない。

生熱量が大きくなることは、Ca 交換とともに電場の強さが大きくなることを示している。

ここで、イオン交換率が低い場合、Na 型とほぼ同じ値を示すことは次のように考えられる。Breck²⁾、Shoemaker³⁾ によれば、ホージャサイト型ゼオライトのカチオンサイトには3種類あって

- 1) 角落し立方八面体 (truncated cuboctahedron) を結ぶ六方柱の内部
- 2) 結合していない六方面の表面
- 3) チャンネル内の任意の位置

単位胞について、1) のサイトは 16 個、2) のサイトは 32 個存在する。SiO₂/Al₂O₃=3.25 のゼオライトでは、単位胞に 73 個のカチオンサイトがあり、イオン交換が、1) のサイトから起こるとすれば、交換率 43.8% までは、2) 3) のサイトは Na イオンのままである。1) のサイトは、酸素の六員環により形成される 2.2 Å の細孔によりチャンネルと結ばれているため、それ以下の分子径を有す分子としか相互作用を有さない。したがって、たとえ 1) のサイトが Ca 交換し電場の強さが増大

しても、1-ニトロプロパンへの浸せきではその効果が観察されないことになる。これは、実験結果と完全に一致している。

このように、Na 型ゼオライトを Ca 交換しその交換率を数十%以上にすれば、強い静電場が形成されることが実験的にも説明され、Rabo の説は支持される。しかし、活性点についての説明のうち、固体酸説、静電場説は、互いに相反する考え方ではなく、表面の静電場により水分子などの分極が起こり、プロトンが形成されて固体酸になる可能性も考えられる。(1968年5月21日受理)

文 献

- 1) J. A. Rabo, P. E. Pickert, D. N. Stamires & J. E. Boyle, 第2回国際触媒会議, Sec. II. No. 104 (1960) パリ.
P. E. Pickert, J. A. Rabo, E. Dempsey & V. Schomaker 第3回国際触媒会議, Sec. I. No. 43 (1964) アムステルダム.
J. A. Rabo, C. L. Angell, P. H. Kasai & V. Schomaker Disc. Faraday Soc., 41, 328 (1966)
- 2) D. W. Breck, J. Chem. Educ. 41, 678 (1964)
- 3) G. R. Eulenberg, D. P. Shoemaker & J. G. Keil J. Phys. Chem. 71, 1812 (1967)



(p. 27 よりつづく)

8. あとがき

以上には土の工学的性質を測定する問題に関連して、試験法の自動化の試みについて概観してきたが、そのほとんどは現在筆者がその委員長を務めている前述した土質試験自動化委員会の活動の紹介ともいえるものである。ここに記して非常に広い専門分野からお集まり願って協力していただいている同委員会の委員諸氏に謝意を表する次第である。(1968年6月17日受理)

文 献

- 1) たとえば、日本道路協会：道路土工指針，pp. 29~31, 昭. 42. 7
- 2) たとえば、同上，pp. 32~35
- 3) 最上武雄：土質試験の自動化の必要性，土質工学会第10回シンポジウム，p. 61, 昭. 40. 11
- 4) 三木五三郎：判別分類試験，「土質調査試験結果の解釈と適用例」，土質工学会，pp. 121~154, 昭. 43. 3
- 5) 佐々木康：土の粒度分布の迅速測定について，土木学会第22回年次学術講演概要第Ⅲ部，Ⅲ-62, 昭. 42. 5
- 6) 牟田明德・渡辺薫樹：関東ロームと粘土の正しい粒度分布（液中沈降粒度分布測定法の問題点について），第20回コロイド化学討論会講演予稿集，pp. 81~82, 昭. 42. 8.
- 7) 松尾新一郎：土試料の迅速脱水・乾燥方法，土質工学会第10回シンポジウム，pp. 57~59, 昭. 40. 11
- 8) 最上武雄・川崎浩司：土の含水比測定装置の自動化，土

- 質工学会第10回シンポジウム，pp. 69~72, 昭. 40. 11
- 9) 川崎浩司・児玉吉洋：土の U. H. F 乾燥と V. H. F 乾燥との比較，第3回土質工学会研究発表会講演集，土質工学会，pp. 305~310, 昭. 43. 6
- 10) 川崎浩司：含水比自動測定装置による土性の測定，第2回土質工学会研究発表会講演集，土質工学会，pp. 13~18, 昭. 42. 11
- 11) 川崎浩司：土の乾燥性と圧密性との相関性，第3回土質工学会研究発表会講演集，土質工学会，pp. 147~152, 昭. 43. 6
- 12) 三木五三郎：土の“液性限界”試験法の変遷と問題点，生産研究，Vol. 15, No. 11, pp. 444~448, 昭. 38. 11
- 13) 箭内寛治：土の液性限界測定装置の自動化，土質工学会第10回シンポジウム，pp. 63~67, 昭. 40. 11
- 14) 箭内寛治・西堀高弘・五味貞夫：塑性限界を求める二つの近似簡便法，第3回土質工学会研究発表会講演集，土質工学会，pp. 299~304, 昭. 43. 6
- 15) 福田秀夫：連続記録式原位置試験車について，土と基礎，Vol. 9, No. 2, pp. 25~30, 昭. 36. 4
- 16) 矢野謙介・鎌田正孝：S-I コーンペネトロメーター車について，土と基礎，Vol. 11, No. 4, pp. 8~16, 昭. 38. 4
- 17) 小川充郎・山下憲一・一本英三郎・今泉光明・藤岡靖雄：F式自動コーン試験機，土質工学会第10回シンポジウム，pp. 79~84, 昭. 40. 11
- 18) P. C. Knodel: "Soils tests computer programs", A Water Resources Technical Publication, Research Report No. 3, 144 p., 1966
- 19) 日本住宅公団建築部：「基礎工法選定要領及び解説」，30p., 昭. 41. 12