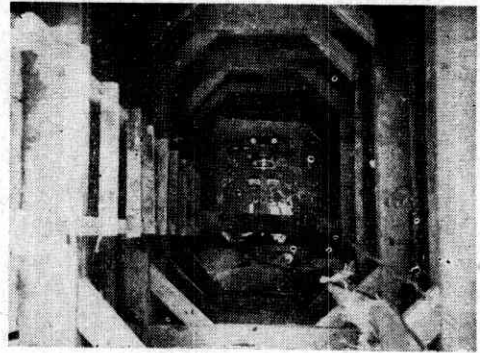


# 新しい東京地下鉄建設

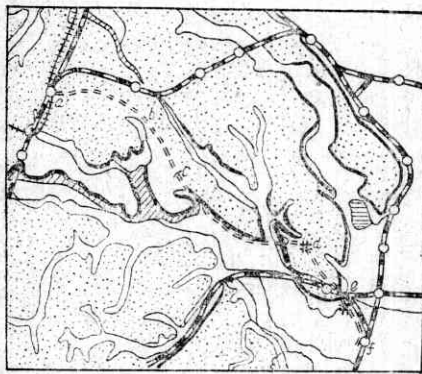
## 工事のための土質調査

三木五三郎



深さ 8 m の試験孔をのぞく  
(昌平橋試験地、水平載荷試験装置がみえる)

東京都内池袋神田間に新しく地下鐵道が建設されることになった。通過する路線の大略は第 1 圖に示す通りで、一口に地下鐵というが事實は工費の関係もあつて途中の地形を巧みに利用し地下部分が 5.5 km、地上部分が 2.2 km となつている。池袋から大塚辻町を経て清水谷までと眞砂町から本郷 3 丁目を経て聖橋北詰までの臺地部分は地下をくぐるが、その中間は臺地の下に出て地上を走り、また神田川を長さ約 50 m の橋で渡つてからは繁華な低地部の地下に入つて現在の地下鐵神田驛の西側に連絡する計畫である。



地 質		予 定 路 線	
	沖積層 粘土砂礫	=====	新地下鉄
	洪積層 □-ム	=====	地下鉄線
	粘土砂礫	=====	新地下鉄
		-----	地上線路
		a. 池袋	a. 本郷3丁目
		b. 大塚辻町	e. 昌平橋
		c. 清水谷	f. 神田
		#	土質調査地点

第 1 圖 地質圖と建設豫定路線

ところで地下に構造物を作るためにはあらかじめその部分の土の性質とか地下水の状態を知つて適當な設計と施工方法を決めねばならないが、このためにはまづ地質

學的な知識を活用して土地の構成を知り、その上でボーリングその他の工學的方法で個々の地點について土や水の性質を調査してゆく順序をふまなければならない。

そこで今上記の地下鐵建設工事の場合の土質調査に當つて地質學的な知識を借りるならば<sup>(1)</sup>、第 1 圖の地質圖から明らかなように臺地部分は一樣に關東ローム層(洪積層)でおおわれ、神田附近の低地部は沖積層、また現在の神田川は萬治 2 年(1659 年)に本郷から駿河臺に續く臺地を東西に掘割つてできたもので、下部に第 3 紀の粘土砂礫層が露出していることなどがわかる。

ではその關東ローム層とはどんな土がどんな順序でどの位の深さまであるものであろうか。この調査にはボーリング機械を使つて地表から直徑 10 cm 程度の堅孔を掘り地中から順次土を掘り上げれば大體の見當がつくので、今度の工事に當つても建設豫定路線に沿つて地下 30 m 位まで相當數實施された。しかし現在わが國で使われているボーリング機械によつて採取された土の試料は、採取に際してその自然状態の組織が完全に破壊されるか、それ程でなくても非常に攪亂されてしまうので、その土が地下に自然状態のまま存在しているときにどのような性質を示すかをその試料について判定することがほとんどできない。事實乾燥した砂を除いた普通の土の力學的な強さはその自然状態の土粒子の構成された組織、あるいは微細粒子のティキソトロピー(Thixotropy)の性質に支配されるもので、例えば自然状態のままの粘土の圓筒型試料の 1 軸壓縮強度は、一度その組織を壊してから圓筒型枠に詰めて作つた同形の試料の壓縮強度の 2~4 倍、極端な場合は 4~8 倍にもおよぶことが知られている<sup>(2)</sup>。關東ローム層の土であるいわゆる赤土もこの例外ではあり得ないので、できるだけ自然状態でのその力學的な性質を知ることが實際の工事には要求され、こんな次第でこの土質調査が地下鐵を建設する帝都高速度交通營團から當研究所に委託されたのであつた。

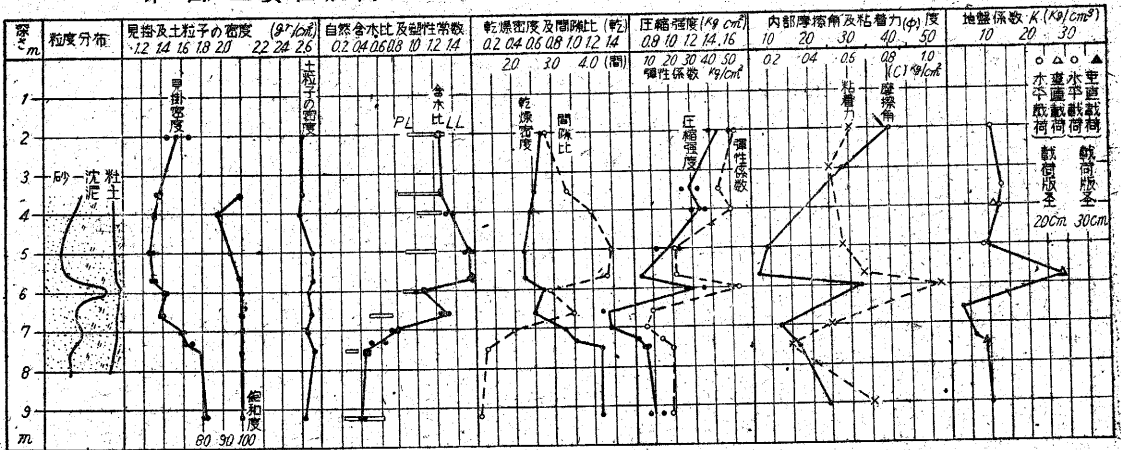
自然状態のままの土の性質を調査するのに地表から試料を採取することが思わしくないとすれば自分で地下に

(a) 本郷3丁目附近	0	(b) 昌平橋南詰附近
埋炭土	1	埋炭土
褐色□-△質土	2	
チョコレート色	3	赤褐色粘土
	4	黒色砂質沈泥
褐色□-△質土	5	青灰色砂質沈泥
地下水位	6	赤色砂
	7	褐色粘土質沈泥
褐色粘土	8	暗青色沈泥質砂
青灰色粘土	9	褐色砂質□-△
暗褐色砂質土	10	暗褐色砂
灰褐色粘土質□-△	11	チョコレート色砂
灰褐色粘土質砂	12m	暗青色砂
灰色粘土		青色砂
粘土質砂		青黒色砂
砂		
砂利		

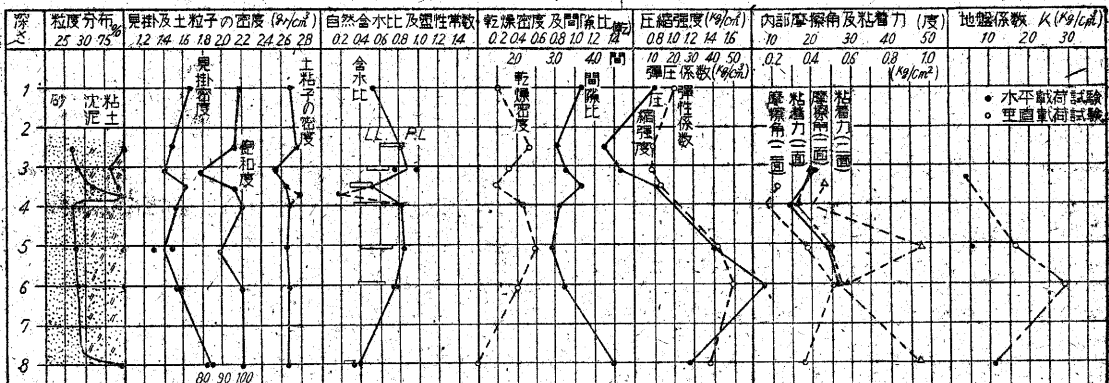
第 2 圖 土質柱狀圖

降りて調査することが確實である。そこで同層の代表的な地盤として本郷3丁目交又點附近に地下9mまで2m角の堅孔を掘り、次にこれは洪積層と沖積層の境の地盤として昌平橋南詰附近にも地下8mまで堅孔を下してその中で土の調査を實施した。

兩地點の孔壁における土質の觀察結果は第2圖に示した。まず本郷地點では地表から1mの深さまでは埋炭土があつて本來の土は置換えられているがその下に6.2mまで關東ロームまたは赤土とよばれる褐色のローム質土が存在し、その下は地下水のために粘土化した數層の土であるが廣義の關東ローム層とよばれるべきもので11mの深さまで達している。その下は砂礫層といわれる部分である(9m以上の深さの土は簡単なハンドオーガーで試料を採取した)。地下僅か5.2mの浅いところから存在する地下水は量もかなり豊富で文献(1)によればこの臺地上に廣く分布する上部帶水層からのものであり、これは最深部が少くとも地下約8mに達する地下鐵工事の施工には注目すべきものである。昌平橋南詰の地點では地下7.7mまでの沈泥質土の互層は沖積土であり、それ以下の砂質土の互層は文献(1)で第3紀上部層としている砂層である。本地點の沖積土中地下5m



第 3 圖 本郷試験地土質試験結果



第 4 圖 昌平橋試験地土質試験結果

以下は平面的に 15 m をへだてた神田川の水位より低いのであるがほとんど湧水なく、砂層に達してはじめて急激な地下水の流出を見た。

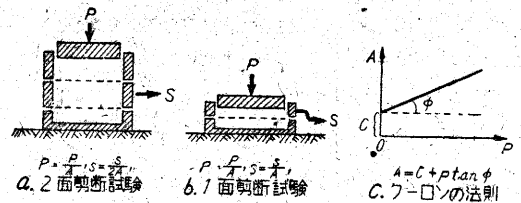
土の自然状態の性質として第一に調査したのは、深さと見掛密度および含水量の関係であつた。この試験には試験孔を掘り下げながらその底および側壁から直接試料を採取して実施したが、その結果は第3圖および第4圖に示す。土粒子の密度は 2.6~2.7 gr/cm<sup>3</sup> であるが自然状態の土には間隙があつてそこに空気や水が含まれているので見掛密度が 1.3~1.8 gr/cm<sup>3</sup> となる。一定容積の土に含まれる水の重さと土粒子の重さの比で計算する含水比は關東ホームでは 1.2~1.6 に達するが粘土または沈泥質の土では 0.4~1.0 で前者が如何に間隙部分が多くてそこに水を含んでいるかを示している。この間隙部分の容積と土粒子の容積の比が間隙比であり、間隙中に含まれる水の容積の全間隙中に占める割合を示すのが飽和度で、それぞれ土の種類が異なると特徴ある數値を示している。その他土の粒度、稠度、乾燥密度等も測定結果を記したが、これらの意味や試験方法は JIS に規定されているので興味を持たれる方は参照されたい。

上記の試験結果によつてわれわれの取扱つている土の物理的な大體の性格は掴むことができ、工事を実施するときの方針も従來の経験や工事報告に従つていわば定性的に大過なく進め得る段階には達したといえるのであるが、實際構造物の設計に際して定量的な計算を進めるには更に土の力學的な性質を知ることが必要となる。すなわち應用力學の一分科として最近に發達した土質力學という學問の分野の知識を活用するために、土の力學的性質を規定できると面白いのである。ところで土のこのような性質を考えるには、例えば土の表面に荷重が載つたために表面が沈下し地中に應力が生ずるような場合には弾性體的な性質を豫想するが、荷重が更に増加して破壊沈下を生ずる極限の安定性を考える場合には一面が生ずることを豫想する。この面に沿うに抵抗する單位面積當りの力  $s$  (kg/cm<sup>2</sup>) は土の性質だけでなく一面に垂直に働いている應力  $p$  (kg/cm<sup>2</sup>) にも影響されるとしてその関係を表わしたのが有名なクーロンの法則

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

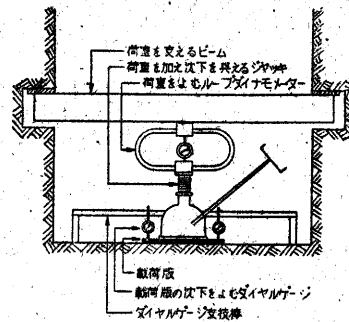
で、ここに  $c$  は粘着力 (kg/cm<sup>2</sup>)、 $\phi$  は内部摩擦角とよばれ土の力學的性質を決める常數と考えられる。しかし實際には自然状態の土がまさに破壊しようとしているときのこれらの常數値を、その中の一小部分を取出した試料について實驗室内で決めることは條件が相異なることのために非常に難しい問題で、それを求める方法は種々考えられて實施されてはいるが結果の適當な判定には常になやまされるのが現状である。

こんなわけで力學的性質の試験となるとなかなか難しいのであるが、われわれが實施したのは薄肉圓筒で採

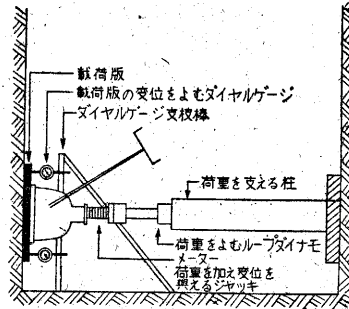


第 5 圖

取した直徑 6 cm 高さ 7 cm の自然土試料の 1 軸壓縮試験、薄肉角筒で採取した 4 cm 角高さ 5.1 cm の自然土試料の 2 面剪斷試験(第 5 圖 a)、肉薄圓筒で採取した直徑 5 cm 高さ 1.2 cm 自然土試料の 1 面剪斷試験(第 5 圖 b)、および試験孔底と孔壁を利用した垂直、水平載荷試験であつた。載荷試験とは第 6 圖または第 7 圖に示



(a) 垂直載荷試験装置



(b) 水平載荷試験装置  
第 6 圖 載荷試験装置

す要領で兩平面載荷版を地中に押込む際の荷重と變位の關係を記録するもので、その關係を示す曲線の傾きから地盤係數 (= 單位面積當りの荷重, kg/cm<sup>2</sup>) ÷ (その荷重に對應する沈下量, cm), 従つて單位は kg/cm<sup>3</sup> を求め、また破壊の傾向の認められる場合には破壊荷重を推定するものである。載荷版は直徑 30 cm および 20 cm の圓形鋼製版を用いた。普通には餘り實施されない水平載荷試験を試みたのは對重として片側の壁を利用でき

るこの方法が通常の垂直載荷試験に比し簡便なので、一般的な利用に備えて兩者を比較するためであつた。以上の試験結果は第 3 圖および第 4 圖に示してある。

上述の剪斷試験とは一面に直角な上下壓力  $p$  を加えながら土の剪斷を行う際の、 $p$  と剪斷抵抗  $s$  との關係からクーロンの法則を利用して最も端的に  $c$  および  $\phi$  を求めようとするものであるが(第 5 圖 c)、實際には試験機の特性とか試験方法の差によつて一定値を得ることが困難であることも知られている。われわれの場合も 1 面と 2

面の剪断試験結果には常に差異が認められ、粘着力では前者が小、内部摩擦角では後者が小の傾向があつた。

また 1 軸壓縮試験のときの破壊強度  $p_{max}$  と、 $c$  および  $\phi$  との関係は理論的には

$$p_{max} = 2c \tan\left(45^\circ + \frac{\phi}{2}\right)$$

で表わされるが、自然の粘性土の場合に面に沿つて有効に働かざる粘着力を求めるには経験上、更には簡便のため

$$c = \frac{p_{max}}{2},$$

すなわち前式で  $\phi = 0^\circ$  の場合から求めることが行われており、われわれの場合も 1 面および 2 面剪断試験から求めた  $c$  の平均値は大體 1 軸壓縮破壊強度  $p_{max}$  の半分に當るといふ結果を示している。

弾性係数  $E$ 、ポアソン比  $\mu$  なる弾性體の表面に半径  $r_f$  なる圓形剛平板をおいて載荷したときの單位面積當りの載荷重  $p_f$  と沈下  $d$  との関係は理論的に

$$d = \frac{1.57(1-\mu^2)}{E} p_f r_f$$

で表わされるが、Burmister は (文献-(3)) 實際の沈下量の 3/4 が表面から  $4r_f$  の深さまでに生ずることに着目し、上式を歪  $\varepsilon$  の形で示すと

$$\varepsilon = \frac{d}{4r_f} = \frac{1.57}{4} (1-\mu^2) \frac{p_f}{E}$$

となり、一方 1 軸壓縮試験の歪と載荷重  $p$  との関係が

$$\varepsilon = p/E$$

であることから

$$p_f = \left[ \frac{4}{1.57(1-\mu^2)} \right] p$$

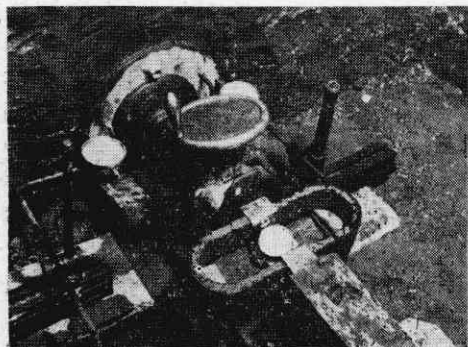
なる關係式を導いた。粘性土に對して  $\mu = 0.4$  とすれば

$$p_f = 3.02 p$$

となる。われわれの場合にも變位の小さい區間において  $p$  と例えば、30 cm の載荷版に對する  $p_f$  との間には大略

$$p_f = 30 p$$

なる關係が見られたが、これと上式の間には數值的に大きな開きがあり、その一つの大きな原因は載荷試験のときの  $E$  と 1 軸壓縮試験の際の  $E$  とが上述の假定内で



第 7 圖 水平載荷試験實施狀況

同一値だとすることにあると思われる。この問題のより精密な考察は實驗室で實際の載荷状態により近い 3 軸壓縮試験を実施することにより進展させるべきであらう。

上述のような考方をするときには土自體が水平方向と垂直方向に力學的な差を持たないときには、その二つの載荷試験結果も同一となるべきで、われわれの場合も見事に一致した結果を得た。このことから將來垂直載荷試験の代りに水平載荷試験を有効に利用できるものと確信する。大體載荷試験は實際構造物が施工されたときの状況を直觀的に示し規模からいつでも實物に近いために重用されるのであるが、この時間と經費のかかる方法の代りに上式の利用によつて更に非常に簡単な 1 軸壓縮試験結果が十分實用價值を持つことを知り得たのも今回の試験の一つの大きな収穫であつた。

このようにして知り得た土の力學的性質を使つて實際構造物の合理的な設計と施工方法の指示にまでタッチするのが委託研究の完成した姿かと思われるが、今回はこの分野はすべて工事實施者が擔當し、現に工事が進められつつある。なお本委託研究の一部として本郷試験地の赤土地山に深さ 1.5 m の溝を掘り、その肩に荷重を載せたときの側壁にかかる土壓の實測も實施したが、その結果の報告は紙數の都合で他日にゆずらねばならぬのは残念である。

#### 文 献

- (1) 「東京及横濱地質調査報告」, 復興局建築部, 1929 年 11 月
- (2) K. Terzaghi and R. B. Peck, "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley & Sons, New York, 1948.
- (3) D. M. Burmister, "A Method for Estimation the Load Settlement Characteristics and Bearing Value of Clays and Clay-soils from Unconfined Compression and Tri-axial Compression Tests", Proc., the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1948.

## 下 水 道 学

東京大学教授 工博・医博 廣瀬孝六郎著

A 5 判 500 頁 定価 600 円 送料 35 円

本書は、総論、水質、水量、下水排除、下水処分、下水処理、汚泥処理及び処分、総括及び雜の 8 章からなりさらに附録として法規、下水試験法、各種規格(解説附)等が採録されている。本書の長所としては下水道を衛生工学的見地から工学と衛生学の両面を渾然一体とし、しかもアメリカ、ドイツの下水道をかなり廣汎に紹介説明したところにあり、内外の文献、良心的な索引と共に本書のもつ價值は大である。今や我國でも漸くその社会的施設が問題となるとき、関係者の必携書として推薦する。

誠文堂新光社發行