

講座

基礎工(II)

2. 基礎地盤

最上 武雄*

土質工学の進歩とともに基礎工の問題に若干の寄与ができるようになつた。しかし、そうだからと言つて基礎に関するあらゆる問題が理論的に解かれるというではもちろんない。ここでは基礎の諸問題に土質工学を応用するには、どうするかという一般的なことがらを説明する。

地盤は誰も知るより複雑なものであるから、計画されている構造物を建造する敷地内の地盤がどんな構成を持つているかを知ることがまづ最初になすべき仕事である。そしてまづその地点の地質的性質、地形等が調べられる。これは場合によれば地質専門家に依頼して行われる。その結果つぎに行うべき地盤調査の精粗や将来地盤調査が行われたとき、その資料を批判すべき材料が得られる。第二には第一次地盤調査を行うのである。これは概略的に地盤の状況を調べるのが目的である。この場合普通行われる方法は sounding といわれるものであり、いくつかのやり方がある。日本で現在広く行われているものは、米国で発達した標準貫入試験といわれるものであり、一種の試料採取器を一定重量 (140 lbs) の重錐を一定高さ (30 in) から落下させることによりたたき込み、一定深さ (1 ft) にたたき込むに要する打撃数 (N) の値を記録する。 N の値が大きいほどその地層が堅硬なことを示す。一応の標準を下に記す。

砂	粘土
0—4 非常にゆるい	0—1 非常に軟かい
5—10 ゆるい	1—4 軟かい
11—30 しつかりしている	5—8 しつかりしている
31—50 密である	9—15 かたい
50以上 非常に密である	16—30 非常にかたい
	30以上 堅硬である

この標準貫入試験は村山、赤井、森田、龍城の諸氏¹⁾、三木助教授、福岡氏²⁾等により日本の地層についても検討研究され、大体使用に耐えることが明らかになつてゐる。sonding の方法にはこのほか種々のものがある³⁾。

* 正員 工博 東京大学教授 工学部土木工学教室

1) 土と基礎 第5号

2) 土と基礎 第9巻2号 1956

3) 土と基礎に近く記事がでる予定

例えば円錐を静的な力で押し込みそのときの力を測定するものも數種ある。打込みを用いるものについては理論的な公式が出しきいが、静的なものでは Prandtl の公式またはそれと類似の公式を利用して理論的検討が加えられ、この理論から内部摩擦角等を求めるようになつてゐる⁴⁾。しかし、それも厳密にあてはまる式ではないから、いづれも半經驗式といわざるを得ず、従つて各種の sounding の方法はいづれを上、いづれを下ともいいがたい。結局、なれて数多くのデーターを持つてゐるもののが良結果をうるのであろう。地盤に打ち込む場合は適当な方法で必要なところまで孔をあけ、よく底をさらつてから打ち込む。孔壁がくずれるおそれがあるときは、上方にはケーシングパイプを入れ、下方は粘土水でおさえる。孔の中と土中の水圧がつり合つていないと孔をくずすから、もし地層に圧力水のある場合にはそれを考えに入れて行わねばならない。底を十分にさらつてない場合には、底にたまつた土の貫入を行つては不正確な結果をうる。非常に孔が深くなるとロッドの重量も増し、打撃によりロッドが曲る等のことがある。

円錐を静的な力で押し込む方式で管を二重にし、土の摩擦を避け、外管と一緒に押し込むときと、円錐だけを押し込むときとの二力の差から粘着力の算出を便にしたものもある。

さて、いづれの方法にせよ sounding によって、地下の状況のあらましを知ることができるから、これを図示する。数カ所で sounding を実行すればその敷地内地層構成の概観が得られる。話が前後したが sounding の深さは少くとも構造物の最大幅の 1.5 倍くらい欲しいが、これは一律にいうべきではなく、例え、二、三本の sounding で問題の深さ以下が硬い層よりなることが明らかになれば、後はそれほど深く sounding する必要はない。もつともこれは建設すべき構造物の重量、持つべき性格によつて異なるのである。

まづ目安にすべきは構造物に対する地盤の支持力および沈下なのだから、この二点を頭において決定を行うべきである。なお基礎工施行中に生ずべき諸問題をも考える必要がある。 sounding の結果は大分して二つの場合がある。地層が大体水平で比較的入り込んでいない場合と非常に複雑な場合とである。前者はまづ楽なのだが後者は厄介である。地層の構成が複雑な場合にはさらに十分な調査をしなければならないからである。 sounding を行う場合、例えば砂層が出たというようなとき、それが水平にずっと続いているものなのか、部分的なものか等に注意する必要がある。

また電気地下探査、弾性波地下探査等で地下の模様を

4) 例えば J. Verdeyen: Méchanique du sol et Foundations, p. 168

調べることもあるが、これらだけでは危険のようである。

このようにして概略的に地層の状況を知つたとすると、つぎにこれに基づいて、大略の基礎型式を研究する。この場合に用いられる土質力学的基本法則をあげれば、まず地表面に加えられた圧力は地下深くゆくに従つて広く分布し拡がつて小さくなる。拡がつてゆく仕方には、Boussinesq や Westergaaid の理論も用いうるが、簡単には圧力は直線的に拡がり、深さ一定の所では一様とする。また鉛直圧力一定の所を結べば、ちょうど球根のような形になるので、これを圧力球根という。地表面載荷による沈下量が主として鉛直圧力によるものとすると、圧力球根は沈下のもととなるものの存在範囲を示していることとなる。

粘土層に圧力が加われば圧力によって粘土中の水がしぶり出され、それがいわゆる圧密沈下の原因となる。圧密沈下 S_c の量は粘土層の厚さ H に比例し次式であらわされる。

$$S_c = \frac{HC_c}{1+e_0} \log \frac{p_0 + A p}{p_0} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

この式の中で e_0 は粘土層の最初の間隙比, p_0 はそれに対する圧力, Δp は載荷による圧力増加, C_c は圧縮係数であり正しくは圧密試験で決定されるべき粘土の特性を示す常数であるが、近似的には

なる式で算出され、 w_L はその粘土の液性限界である。場合によると上の式で求めた C_c を用いて沈下を計算すると大きすぎることがある（くわしくは土質力学の書参照）。

粘土地盤上に載せた荷重に対する地盤の支持力は帶状荷重に対して

である。ただし粘土の粘着力を C としている。円形載荷に対しては水野教授の公式⁵⁾等がある。

正方形に対しては、

であり、矩形載荷の場合は(3)と正方形の場合(4)との間である。 h なる根入れがある場合には

$$f_c = 5.52 C \left(1 + 0.38 \frac{h}{b} + 0.44 \frac{b}{L} \right) \quad \dots \dots \dots (5)$$

となる。 b, L は矩形載荷面の辺長で $L > b$ である。

根入れ深さ D が十分大きい場合は、 F を安全率、 s を根切の底及び周辺の土の急速セン断におけるセン断強さとすると

とあらわされる⁷⁾。 p は地表載荷で N_c は D/B (B は

5) 水野高明: On the bearing power of soil under an uniformly distributor circulas load. Proc. 3rd Conf. on S.M. & F.E. Vol.1 p.446

幅)に対し表示されている。

砂地盤についての Terzaghi 公式は帯状荷重に対し、

$$\left. \begin{aligned} f_c &= r b \left(\frac{1}{2} N_{\tau} \right) + r d(N_q) && \text{(全般セン断)} \\ &= r b \left(\frac{1}{2} N_{\tau'} \right) + r d(N_q') && \text{(局所的セン断)} \end{aligned} \right\} (7)$$

である。円形荷重に対しては

とし、 N_r 、 N_g 等は内部摩擦に対して表示されている。

ここで局所的セン断と全般セン断とに区別しているが、局所的セン断というのは大体において地盤がゆるい場合に当り、載荷の際、局所的な破壊が生ずるものであるが、全般セン断とは地盤が全般的に一体となつて破壊する場合である。粘土の場合にも、砂地盤の場合と同様に二種の地盤に分けることはできる。鋭敏な粘土地盤、不鋭敏な粘土地盤がこれである。不鋭敏な粘土地盤が局所破壊を起す砂地盤に対応し、鋭敏な粘土地盤が全般破壊を生ずる砂地盤に対応する。しかし、粘土の鋭敏度といふものは、もともと圧縮強度に対し定義されたものである。すなわち粘土地盤から組織を壊さずにとり出した試料（後節参照）について圧縮試験を行つたときの圧縮強度を q_u 、この試料をこねかえし再び供試体を作つて行つた圧縮試験を行つたときの圧縮強さを q_{ur} としたとき、その粘土の鋭敏度 S は

$$S = \frac{q_u}{q_{ur}} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

で定義される。鋭敏度の大体の目安はつぎのとおりである。

$S > 4$	鋭敏度 高し
$4 > S > 2$	中位
$2 > S > 1$	低し
$1 > S$	不鋭敏

日本で從来測定された粘土の鋭敏比の一例をあげれば
 採集場所 四日市 八幡浜 尼ヶ崎 清水 横浜 (高島) 川崎
 鋭敏比 7~12 2~5 2~12 2~5 5~15 5~11
 のごとくである¹⁾。従つて粘土の鋭敏比なるものは粘土
 をこねかえたとき、どれくらい粘土が軟かくなるかと
 いうことを數字的に示す数字であり、基礎工にとつては
 かなり重要な役をする。

土の中を水が流れると水によつて土に力が加えられる。その大きさは土の単位重量当たり i_r に等しい。 r は水の単位容積当たりの重量で i は水頭勾配である。この力により土、特に砂はゆるめられて quick sand になることがある。また boiling を起すともいいう。このことは砂質

6) L. Bjerrum, および O. Eide: Stability of struttied excavations in clay, *Géotechnique* Vol.VI, No.1 March 1956.

7) 石井靖丸・倉田 進・藤下利男: 沖積粘土の工学的性質に関する研究 土木学会論文集 第 30 号, 1955.

地盤の根切りにおいては重要で、ときには矢板工の崩壊をきたすことがある。

粘土地盤において ABDE の重量が大きく DEC のような面に沿つたセン断抵抗が不足する場合には根切り底が持ち上り (heaving) を起すことがある (図-1)。

以上の諸原則および土圧の公式等は基礎の型式を定めたりその他基礎に関する種々のことを決定するのに役立つ。

さて sounding がすむと、それで明らかになつた資料にもとづいて基礎に関する大略のことを考える。

地盤が砂礫であつて十分締つており、構造物の荷重もそれほど大きくなく、支持力公式に照して(この場合安全率 3 くらいをとる) 支持力も十分あるときは一番簡単であり、地盤上ににただ載せるということも可能である。ただ表土の部分は多くの場合圧縮性のある有機質土のことが多いからはぎとらねばならない。表土をとらなかつたため不等沈下を生じた例はときどきある。支持力が十分だということと沈下をしないということとは別問題であるから、支持力は十分であつても沈下の検討をおこたるわけにはゆかない。砂礫層の場合にはちょっと厄介だが、載荷試験を行つてみるのも一法と思われる。砂質土ないし粘土質のときの接触沈下の検討もむづかしいが、乱されない試料をとり外圧を加えた圧縮試験の結果からも近似的に検討される。粘土の場合には圧密沈下について調べねばならぬが、乱されない試料について圧密試験を行えば圧密沈下に対する検討に当然なるが、接触沈下についての検討にもなることがある。圧密試験を行つて先行

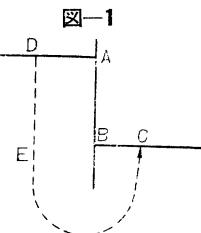
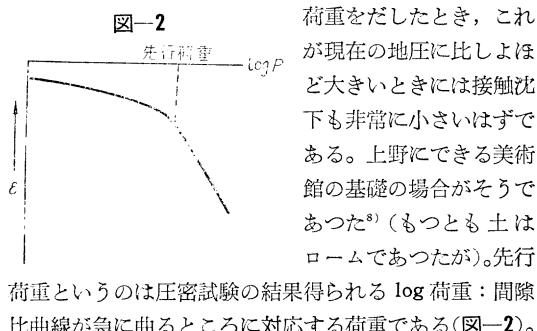


図-1



さて現在の例で地盤が砂礫層で、これがあまり締つていらない場合にはこれを適当な方法で締めてやることも一法である。締める方法としては compaction piles を打つこと、または vibroflotation による方法もある。vib-

roflotation⁹⁾ とは振動水締めの方法で筆者等も、二、三年來研究し、使用に耐えると思つている。締める深さは、締めた深さだけ基礎根入りができたとした場合に支持力が十分であり、締めたか所以下のゆるい層での沈下が制限を越えなければよい。深くなれば前述のごとく圧力は構造物直下の圧力よりは減ることを考慮の上検討する。

また前二者ほどの効果は望めないとと思うが、well-point 等で地下水を下げ、その部分の土の浮力を減ぜしめただけの荷重増加および下方へ向う水流の圧力を利用する方法も一応考えられはする。地盤上方が silt 地層で下方に砂層があるような場合、砂層に well-point を入れて水を引くことが考えられる。水を含む砂基礎上に捨てコンクリートを打ち、その下から水を well-point で引き支持力を猛烈に上げた例がある(池袋三越)。

ABCD が粘土質で CD なる硬層が比較的浅い場合を考えるに、まづ粘土質とはいっても相当硬く支持力が十分ある場合には圧密沈下が一番問題であろう。これに対しては乱されない試料をとつて圧密試験を行つてみる必要がある。この場合の圧密には構造物を造ることによるものほか、将来地下水位が下がることが予想されるときには、それも考慮する。支持力が不足の場合には、根入れを利用して支持力の増加をはかるか、地盤そのものを sand drain 等によつて強化するか¹⁰⁾、築堤のような場合には押え盛土をするか、築堤材料に軽量のものを用いるか等の方法も考えられる。

また CD 層が比較的浅いのであるから杭打ちによつて構造物の重量を直接硬層に伝えるのも結構である(支持杭)。

この場合に、もし将来この地盤の圧密が考えられる場合には negative friction も考えに入れるべきである。negative friction というのは杭 ABCD を支持杭とする(図-3)、土 ⑤ が圧密され矢の方向に動くと杭の周辺に下方に向うセン断応力が働く。これが意外に大きいことが認識され negative friction といわれるのである。

sand drain¹¹⁾ とは粘土地盤に砂で図のような柱を作り、粘土中の水を柱を通して抜くのである。粘土層は水平に層をなすことが多いので、鉛直方向よりも水平方向の方が透水性の大きいこと、同じ土の中を一定の長さを

chemical method については京都大学の村山教授等が研究している。

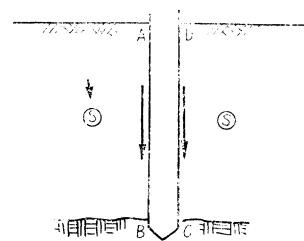
11) sand drain はすでに各所で利用され、土と基礎¹²⁾にもいくつかの例が報告されている。国鉄でも東海道線電化工事にともなつて実施され成功、東京ガス豊洲工場でも成功した。その他例はたくさんある。

8) 森 博: 土質基礎調査所に於ける調査報告

9) 一部の報告は渡辺 隆: バイプロフローテーション工法の実験、土と基礎 Vol.4 No.4 1956 または建設機械化研究論文集(昭和 30 年度日本建設機械化協会)中の最上の報告参照。

10) 粘土地盤改良法の一つである electro-osmosis または electro-

図-3



水が滲透するに要する時間は、距離の2乗に比例するから、短かい距離ABを滲透する方が長い距離ACを滲透するよりもはるかに短かい時間で行われることを利用したものであり、Aにおける水を移動せしめるのは地表面の載荷による。

well-point というのは特殊な先を持つた管を土中にジェットを用いて挿入し、同じ管を用いて排水するものである¹²⁾。

なお地盤の固化といふよりは、固化と一様化に役立つ工法に pre-loading 工法がある。これは地表面に設計荷重とほぼ同じ大きさの載荷を行い、地盤がおちつくるのを待つて荷重をとり去り、構造物を作るものである。

これら諸工法を行うについて過去の経験が大切なのはいうまでもないが、後に述べるような土質試験にもとづいた“設計”を行い、それによつて施工するのである。

さて、硬盤との間の軟層の厚さが大きいとするときには状況によつていろいろ異なるから簡単ではないが、例えば縦坑を行つて長い杭を打つとか、ウェルを下げるとか、ときに応じて考える。

逆に、上方に比較的硬い層が若干あり、下に軟かい粘土層をかんでいるようなことがある。このとき上の層だけを考えると、支持力の方は大丈夫と思われるが、粘土層が長期にわたつて圧密沈下を起して構造物に障害をおよぼすことがある¹³⁾。

地盤は複雑で個々別々に研究しなければないから、一般論としているのは困難である。上にはほんの一例を述べたのであるが、まず大体このようにして基礎の型式についてあらましの決定をしたらば、つぎには必要な資料を適当な場所から採集しなければならない。これはさらに突込んだ設計を行い、またそれを施工する場合に必要なデータを求めるためである。

ところで土の試料をとつて試験をするのであるが、基礎設計に必要な資料をうるには、地盤のそのままの状態ができるだけこわさないで採集する必要がある。このような目的で研究されてきたものが薄肉 sampler である。土の中に筒を押し込んだときに、土に与えるかく乱にはいろいろあるが、孔の中の圧力が減り下の土の中の圧力が減らないため、土の強度が弱いと筒の中に入り込む傾向があること、筒に土が押し込められると、筒の内壁の摩擦が土の入ることを妨げること、土の入った筒を抜くとき、下に真空ができるときはこれが障害になること、土を押し下げるとき、土を切るエッジが厚いと、

12) これも現在は常識的な工法になつてしまつた。例は非常に多い。

13) 大阪にその例が多い。

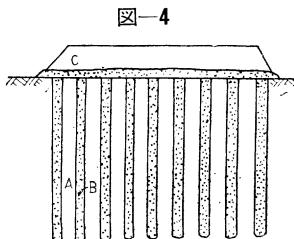


図-4

一つにはその下の土が下に押され土が乱されるほか、チューブと同体積の土がどこかにゆかねばならないために、土にかく乱が与えられる等のことからのために、筒の肉厚を可能なかぎり薄くし、先端を少ししづつたものが用いられ、また場合によつては筒の中にピストンを仕込んだものが使われる。この種の sampler を設計する場合の目安として用いられるものは、筒の内壁の摩擦をコントロールする inside clearance C_i 、外壁の摩擦をコントロールする outside clearance C_o および押し除けられる土の容積をコントロールする area kerf ratio であり次のとく定義される。

$$C_i = \frac{D_s - D_e}{D_e}, \quad C_o = \frac{D_w - D_t}{D_t}, \quad C_a = \frac{D_w^2 - D_e^2}{D_e^2}$$

これらの中に出でてくる D_s 等は 図-5 に示されている。

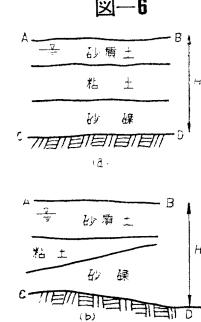
またこの薄肉 sampler を使う場合には十分な注意が肝要である。切角薄肉 sampler を用いても、使い方が適當でなければよい sample は得られず、従つてその sampler を用いて行つた試験の結果もあてにはならない。sampler が以上のようなものであるから、砂礫層や粘土質の土層でも礫をかんでいるときは sample をとることは不可能である。従つていかなる場合でも不かく乱試料が求められる等いうことはない。またかりに多少の小さな礫や貝ガラが入つている場合試料がとれたとしても、場合によつてはセン断試験や圧密試験が行えないこともある。また sampler を運ぶ際にも注意を要する。砂質土で含水率が多いとき、運搬のときの振動で土と水がわかれてしまうこともある。

また sampler のシーリングが悪いと水が抜けてしまう等のことがあるから、sampling から試験までは十分の監督の下に行われなければならない。

現在土質工学に対する常識の普及が不完全なために、試料のとり方に不適当な方法が行われていることもあるようなので、この点強調しておきたい。

ところで、前にかりにきめた基礎の型式並びに基礎地盤の状態によつて sampling の本数、位置等も定まって

くる。例えば 図-6 の (a) 硬い岩盤の上の地層が図のごくであり、粘土層をかんでいるときには当然粘土層の圧密がピンとくるのであるから粘土の乱されない試料をとつて圧密試験を行う必要がある。この場合もし圧密沈下の大きさそのものが問題であつて、その時間経過そのものはそれほど問題でないなら



ば C_c だけが大切である。従つて試験をすれば他の値もでるが、 C_c に重点をおかねばならない。(b)のように粘土層の厚さが変つていれば、粘土層の厚さが厚いところでは圧密沈下が大きいこととなり不平等沈下といふ、いやなものが出るから、もし可能ならば下の岩盤まで杭を打つてしまう方が賢明だろう。その代りいわゆる negative friction を生ずるおそれがあるから、これをチェックする必要がある。従つてこの場合の重要な試験は圧密試験ではなくて、セン断試験に重点をおくべきだろう。

杭打ちは地表面の荷重を地下の硬層に伝える方法として大いに役に立つ方法であるが、これには周知のように杭周辺の摩擦によって支持しようとする摩擦杭と硬層に先端をつけて硬層の支持力に頼ろうとする支持杭がある。昔からいわゆる杭打ち公式というものがあつて、現在でも利用されているが、今までに研究されたことから考えると、あまりよい結果は与えないようである。現在はむしろ静力学的の支持力公式を用いようとする方向に向つているようである。

粘土層に打つた摩擦杭の支持力は杭の周辺面積にその土の粘着力(この粘着力は単軸圧縮強度の1/2ととつたもの)をかけたものでよいといわれている(連研の研究)。

支持杭はその杭を支持する層およびそれ以下の層の性質によるが、一応次のような計算法もある。すなわち前にあげた正方形載荷板の耐荷力公式を用い、その一辺長として杭の先端の直径の9割を用いるのである。支持杭の場合硬層にただ乗つてゐるのでは具合よくない。少くとも1mくらい硬層に打ち込むべきである。

しかし、いづれにしても杭の支持力についてより明確な値をうるには、現在のところ杭の載荷試験を行つてみるのがよいといわれている。杭が多く打たれる場合については、群杭作用と称する効果が現われる。つまり一本の杭が例えれば15tの荷重を支えたとして100本の杭をまとめて用いたとき1500tの荷重に耐えるとはいえない。また粘土地盤の粘土がはなはだ鋭敏なときに杭打ちをするときには、よほど考える必要がある。杭を打てばその杭の容積だけの土はどこかにゆかねばならないのであるから、本数が多くなれば膨大な容積の土を動かすことになり、粘土をこねかえしてしまう¹⁴⁾。

こねかえせば鋭敏な粘土のセン断強度はうんと減るから危険となることがある。横浜のある場所で、多分この原因と思われることで隣接した土地が一度隆起し、ついで沈下し、家屋が傾いたことがある。またこれは常識的にすぎるが、木杭を地下水面上に出すことは厳に禁ずべきである。あるところの基礎板下の杭が、このような原因で腐り、基礎板が割れた例もある¹⁵⁾。またあるところでコンプレッサーの基礎が振動して困つていたところ、地下水を下げるとき振動が小さくなることを知つて下げようとしていたが、これは木杭を腐らせ、基礎のより大き

な破壊を起すであろうことを注意したことがある。

well, caisson 等も基礎としてしばしば用いられる。これらは荷重が大きく、沈下を許さないような場合に用いられてきているが、これらでも沈下を全くなくすということはできない。

well は橋梁の基礎にしばしば用いられるが、これは日本の河川は急流型で洪水時の洗掘に対する危険、地震時の水平抵抗の点から考えても有利と思われる。

日本では從来あまり斜杭を打つことが行われなかつたが、水平力に対する抵抗を考えるとき、斜杭はもつと使われてよいと思う。振動する器械、ことに横型のコンプレッサーの基礎の振動を斜杭で止めた例は、日本ではないが相當にある。well, caisson に対する土圧にはまだわからぬところが多いが、普通の土圧公式によつて計算している。東京電力、白石基礎で測つた例では普通の土圧公式で計算した値よりも、おちついたときには、低い土圧を示しているが、沈める期間には計算値くらいの値が出ていたと記憶する。

さて、基礎の設計を行う場合に、各部の沈下ができるだけ平等にすることは、いうまでもなく大切である。不等沈下のためにきれつの入つてゐる建物は数多い。古く建てた建物と新らしく建てるものとを結ぶようなときは、特に注意を要するし、構造物の各部で荷重強度のひどく違うことは避けたい。やむを得ないときにはえんを切つておくことが望ましいがこれが困難なこともあるようである。

基礎の施工の場合にも土質工学的考察、ときには管理が大切である。根切りをする場合に矢板に働く土圧とそれを受ける strut、地下水が高い場合には排水の問題、砂質の土では、地下水の圧力で根切り底がボイルする問題、周囲の土から水が締られたために周囲の地盤が沈下する問題、粘土質の土では heaving の問題があり、矢板の下を通る円形スベリ面に沿つて土が崩壊する問題、矢板の移動により外の地盤にきれつができたとき、これをふさがないと雨水が入り込み、矢板を崩壊せしめる問題、砂質土の場合なんらかの原因で土を逃すと、それがもとで周囲の地盤の沈下を起すことがあること等々、思いつく問題は数多くある。これらもある程度土の試験がしてあればあらかじめ打つ手は考えられる場合が多いのである。紙数の関係からこれらについてのくわしいことは省略するが、土質工学が進んだとはいいうものの、まだまだ経験にたよる分野が多いのであるから、将来の研究によりできるだけ合理的な面をふやしてゆきたい念願であることをつけ加えたい。

14) 杭打ちの振動のため強度を減ずるといわれることがあるが、これはそれほど大きくないようである。古藤田氏が貿易会館で振動を測つた例によつても最大15 gal くらいであり、これくらいの加速度でセン断強度がさがることは思われない。

15) 大阪駅にもこの例がある。