

この資料は川口市内の構造設計者様対象にした講習会において、講習会用のテキストとして作成したものを一部改変したものです

土質柱状図の読み方と 各種試験方法の話

構造実務者様を対象として

講演者 竹下良美

株式会社 総合地質コンサルタント代表

目 次

1. ボーリングは何を教えてくれる？の話
 - 1.1 N値50は最良の支持層？の話
 - 1.2 杭の水平抵抗力を決める地盤のK値の話
 - 1.3 土質試験が必要な項目と実際の利用の話
 - 1) 圧密の話
 - 2) 液状化判定に必要な土の判読の話
 - 3) 一軸・三軸圧縮試験結果の判読の話
2. スウェーデン式サウンディング試験(Ss)結果の利用法と限界の話
3. 地盤の平板載荷試験の話

難しい用語が出ましたら、話の途中で質問されて結構です。

1. ボーリング柱状図は何を教えてくれる？の話

柱状図を見る前に大事なことがあります。

それは一緒にある土質標本(箱に柱状図も入っています)を見て、土質名と土を観察して、地盤に対するイメージを作ることです。
皆さんが思っている「粘土」「砂」「砂礫」と一緒かどうか確認してから、柱状図を判読することが重要になります。

それは、土質名には観察者の主観(経験)が多く入り込んでいるためです。

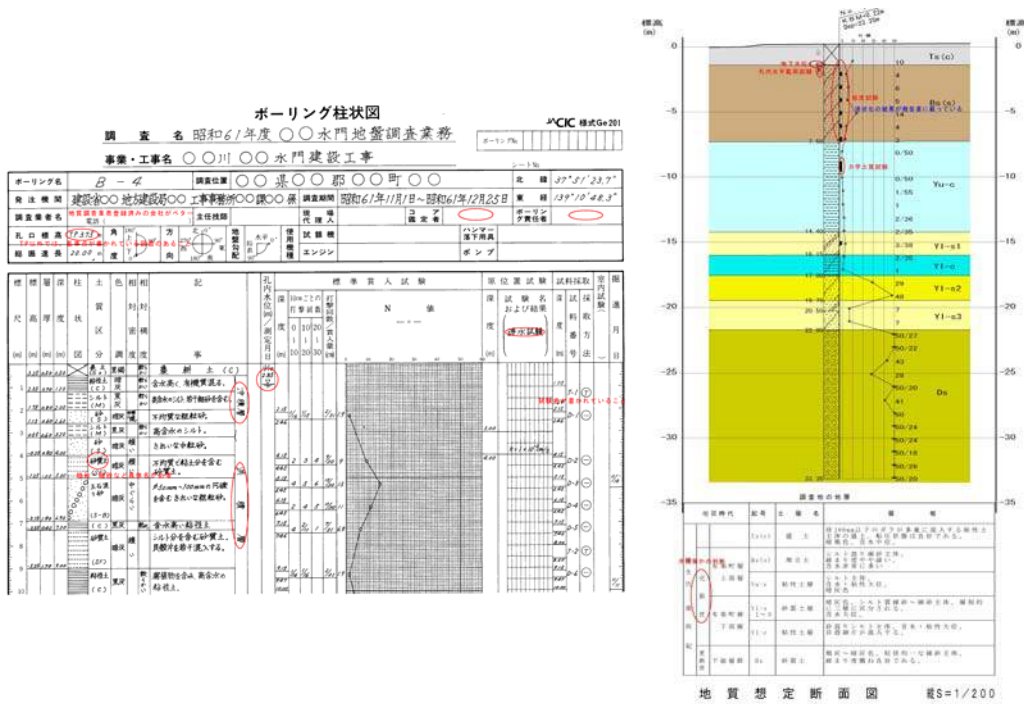
また、土質試験結果を重視して、柱状図の名称が異なる(おかしい)とおっしゃる方もいられますが、試験による名称と柱状図の土質名は一緒ではありません。
異なっても、どちらも正解の場合があります。

土質試験にはJIS規格が有り、試験による分類は**粒径毎の重量比**でかつ締まった土は調整のために**細かく粉碎**しますが、**柱状図の「土質名」は体積比**でかつ現地(現状での固結状態)での観察で分類することが条件だからです。

これは「土質学」と「地質学」の違いから来ています。

今回の話は、基礎的な話より実践を主体にします。そのため理解し難い部分については、後日時間があればお話しします。

まず、柱状図と断面図の概要を説明します



1.1 N値50は最良の支持層？の話

多くの皆さんが、N値は、建物の支持層として利用する最も重要な指数と考えられているかもしれませんが。

でもそれは、本当の話？の「話」をします。

私だけの意見では、信憑性がないので、「建築基礎構造設計指針(1988,2001)」に載っている話を転用させていただきます。

まずこの表です。

この表(対象土質は洪積粘土層)を見ると杭は必要悪(殆ど必要ない)と読み取れます。

N値と建物規模と基礎形式の関係(対象土質は洪積粘土層)

N 値	建 物 規 模		
	低層 (2F)	中層 (5F)	高層 (6F 以上)
$N \geq 10$	直 接	直 接	直 接
$10 > N \geq 5$	直 接	直 接	直 接・杭
$5 > N \geq 2$	直 接	直 接・杭	直 接・杭
$2 > N$	直 接・杭	杭	杭

支持層とN値の関係の話の前に、N値自体の問題点について、指摘されている話をします。

—N値は土の性質や設計への利用などの点で、非常に利便性が高い調査方法であることから、地盤調査すなわち標準貫入試験を指すとの誤解とか、この試験を実施しておけば他の方法による調査や土質試験は一切不要であるというような標準貫入試験万能的な考えや、N値の適用性に関する吟味なしでN値のみを単純に利用するなど、現状ではかなり濫用されている傾向にあることも否定できない。

例えば、N=5という値は砂質土では非常に緩い状態を意味し、液状化の可能性の大きい不安定な地層であるが、同じN値の粘性土はかなり硬く、地表面近くに存在する洪積層では10 t/m²以上の地耐力を有する一応安定した地層であるというように、砂質土と粘性土とでは、N値の持つ意味が非常に異なる点に注意して評価することが大切である。—

この文章の意味することは、N値は「柱状図」作成するため一つの指標であって、値そのものに絶対的な意味を有していないということです。

次に「中間土の話」。土の殆どが「砂」と「粘土」の両方の粒度を持ち、砂と粘土の中間の粒度組成を持つ土を「中間土」と呼びます。日本の場合は〇〇混りとか〇〇質という「中間土」の割合が非常に多いですが、現在の技術水準では無理くりどちらかに区分して、設計を行う必要があることに特に留意する必要があります。

すなわち、「中間土」に関してはどちらに区分した方が安全側か、危険側か、対象・目的によって異なりますので、「土の性状」を判断して、個々の事例で判断するしかありません。

また、一かつては、基礎構造に対する設計技量が未熟な時代があり、基礎の支持層をN値50以上のよく締まった砂礫質土層や砂層に求め、やみくもに支持杭基礎を多用する風潮が見られた。

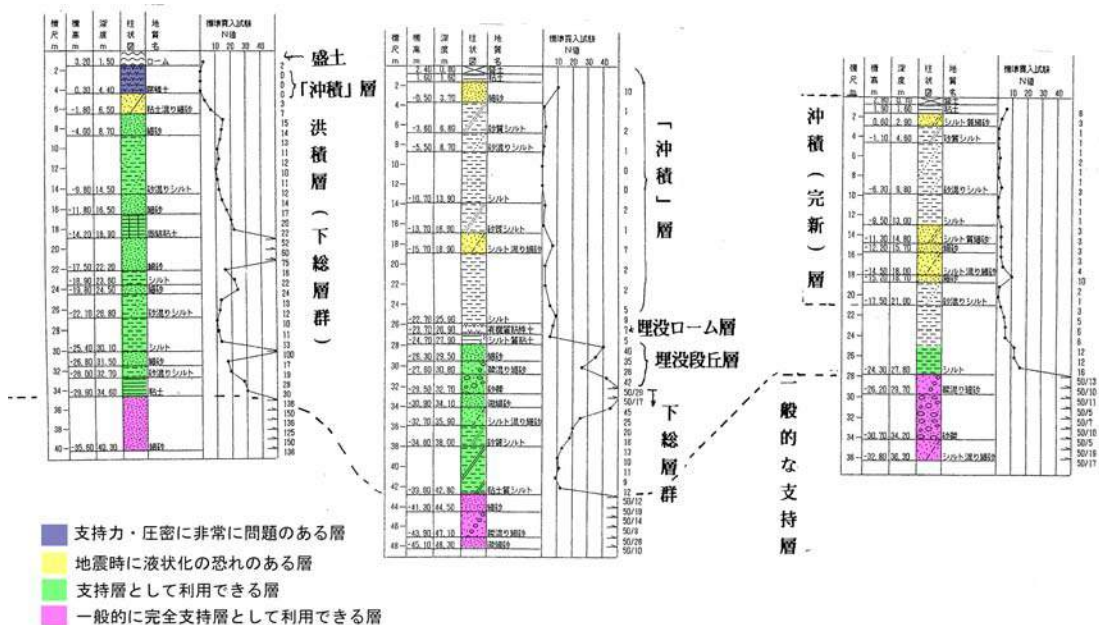
わが国の都市部はほとんど沖積平野部に位置し、このような強固な洪積層が出現する深度はかなり深いことから、かなり長尺の支持杭が出現し、地下水くみ上げによる地盤沈下から、杭の抜け上がりや負の摩擦力による杭体の損傷や不同沈下等の不具合が多発し、「支持杭に頼らない基礎」が叫ばれた。

また、1987年に発生した宮城県沖地震や1995年の兵庫県南部地震で報告された杭基礎被害事例の中には、表層地盤が硬質でありながらN値が50に満たないという理由や、杭基礎と見なすには杭長が不足しているため、等の理由で硬い砂礫層中に無理やり深く杭を貫入させたために、地盤の硬軟境界部で地盤からの強制変位の影響を集中的に受け、杭体が破損した例が含まれており、無理やり杭基礎とすることの耐震上の弊害も指摘されている。

さらに、洪積層で、N値が30~50以上の非常によく締まった砂層や砂礫層に層厚1~2mの粘性土層が挟在する場合、この粘性土層のN値は通常10前後であることが多いので、「一見」N値の分布はこの粘性土層で極端に低下した形になる。

このような場合、N値の適用を誤って、この粘性土層は弱くて不安定なものだと判断し、上部の砂層が十分支持層になり得るのに、これを支持層としないで、支持層を下部の砂層に求めるなどは、N値の適用を誤った基礎設計の典型的な悪例である。一と記載されています。

ボーリング柱状図から見た構造物の支持層



すなわち、支持層や中間支持層という概念は「良好な地盤」「やや良好な地盤」ではなく、目的建築物に対して支持力と沈下を許容できる地盤と解釈すべきだと思います。一般的に両者(支持力・沈下量)を合わせた強度を地耐力と呼んでいます。

杭の支持層による支持力と建物の支持形式による地耐力とは別物と考えて、基礎全体での安定性を得られる手段と考えて基礎形式検討すべきだと思います。

この考え方は、建築物が大きくなり、いわゆる支持層の強度及び深度が水平的に変化している場合、杭一本あたりの支持力を同じくするように杭長を変化させるか、同一支持層(N値は異なる)に杭先端を置いて、杭1本あたりの支持力を変化させて検討するかの違いになります。

地盤の多くが連続的に変化していることから考えると、建物荷重を均等に分散させるためには、前者の考え方になり、現在多くの鋼管杭の打ち止めがトルク値で管理されていることは、この考え方に基づいていると思います。

設計段階においては、杭(翼)径の2~5倍程度の下位の地盤が、杭の支持地盤と決めた地点のN値と平均的に同じなら、支持層の圧密・沈下・変形に関して問題ないと判断できます。

これは各メーカーが国土交通省の認定を取得する際の数多くの杭の載荷試験のデータから裏付けされています。

1.2 杭の水平抵抗力を決める地盤のK値の話

杭に加わる水平力は、上部構造物から伝達すると考えると、最大荷重は杭頭部分になります。一般に杭頭はフーチング内に20cm程度は収まっていますので、実際には杭径より大きなフーチングが一番の荷重を受けます。しかし、計算上は杭頭が土に接しているとして安全側に考慮しています。

そのため、杭に加わる水平力は杭頭から $1/\beta$ までの地盤の強度を加重平均的に採用しています。

一般的には杭頭から杭径の10倍下までの平均値になりますが、調査段階では杭径が不明なことが多いため、3~5m下までの平均値で代表させることが多いようです。

ただし、自然地盤は浅所程低強度であることが一般的ですから、杭頭付近で代表させるのが合理的と考えます。そのため、粘性土では三軸圧縮(UU)による変形係数E50か砂質土や互層の場合はLLT試験で地盤の変形係数を求めることとなります。

なお、LLT試験では、地表に浅いところの試験では、理論解析状若干無理がありますので、地表から約1.5m(試験区間長が1m程度のため)以深で実施することが望めます。

一軸圧縮による場合のK値(E50)は側圧が無い状態すなわち、根切りの土留め杭等に利用されています。

なおどちらにしても、解析上両者とも1割程度の有効誤差が含まれておりますので、有効数字は二桁と考えて間違いありません。

1.3 土質試験が必要な項目と実際利用の話

1) 圧密の話

圧密とは、土の構造が壊れて(変化して)構造水が逃げだすことで、変形は土の構造のゆがみで構造水は閉じ込められています。ですから、土の構造が出来ていない盛土の沈下は転圧不足と言います。

圧密による問題点は、盛土によるものの他、支持杭において、圧密作用により杭に負の摩擦力が働き、杭材強度以上に鉛直支持力が働き、杭が座屈する事件が起きたことにより、かつて話題になりました。その時代の背景として、日本全体の地盤地下が起きた時代で、昭和30年代頃からの工業の発達や天然ガスの採取により、無制限で地下水が汲み上げられた結果です。

その後、昭和40年代に地下水採取規制法が施行され、地下水は徐々に回復し現在ではほぼ前の状況に復元しています。東京駅の地下水上昇による浮力対策アンカーは、よくご存じだと思います。

圧密作用は地下水低下の影響で著しく促進され、現在もその結果が残っていますから、海岸付近の埋め立て地を除くと殆どの地区が有効土被り荷重に対して過圧密状態になっています。

特に、地下水が低下した上部は過圧密状態が大きく、建物荷重は下位に従い分散するので、正規圧密地盤までに達することは少ないため、最近は大きな問題になっておりません。

圧密試験結果で、利用に当たったの問題点は、まず供試体が小さいことで、圧密層は一般的に層厚が厚く、層を代表させるには1試料では精度的に物足りなさがあります。

また、試験値は圧密層の深度的中心位置と考えるため、圧密層を区分する際、常にそれぞれの中心で試料を採取する必要がありますので、1本のボーリングで試料まで採取する場合には精度的な問題があります。

また、圧密の場合は、剪断強度と違い下部程圧密度が小さくなる傾向があります。前述したように地下水が一時的に低下したことによる影響です。そのため、浅所での試験値は過圧密になり易い傾向にあります。

また、圧密で一番問題になる腐植土層については、一般的な「e-log曲線による解析」では、沈下量が実際より著しく少なくなることが知られています。経験的に圧密降伏応力を0とした圧縮指数Ccによる方法がより実際の沈下量に近似していました。また、春日部あたりの圧密沈下地帯でも2階程度の建物荷重による圧密沈下量が許容値を超える計算結果が得られたことはありません。この理由の一つとして、圧密層は一般的な即時沈下の地盤より深い位置での減少であり、絶対沈下量が多くても応力分散を考えると不同沈下(相対沈下)が小さくなるためです。

この付近の圧密による地盤沈下は、地下水低下によるものが大きいと考えられます。但し、数m以上の高盛土は荷重的に一般住宅よりも遙かに重く、圧密沈下が発生しています。

杭形式における圧密の問題は、摩擦杭と支持杭では大きく異なります。摩擦杭は、圧密沈下に対して許容値以内に納めることを目的として打設する杭です。ですから、如何に建物荷重を均等に分散させる位置に配列するかが、最も重要な点になります。何回も地盤の連続的変化について述べていますが、端的に表れる基礎工法です。摩擦杭では最低2本の調査ボーリングで変化が少ないことを確かめる必要があります、変化が大きい場合は基礎形式を変更する覚悟が必要です。

支持杭における支持層の下位に分布する粘性土は、一般的に洪積地盤より古い地層で、過圧密状態になっております。そのため、沈下に対して問題になるのは変形特性に起因するいわゆる即時沈下です。直接基礎の例での即時沈下量を求め、許容値に収まるかの検討を行えば良いと思います、その際、杭先端までのDf効果が働いていますので、杭先端荷重からDf分の荷重(杭体積分の地盤重量)は低減できると思います。具体的に検討したことがありませんが、認定杭では各種地盤で載荷試験を実施して支持力検討式が提案されているので、認定範囲の支持力では即時沈下が問題になることは無いと思います。

なお、**増加荷重により圧密・変形により地盤が絶対的に沈下しないことはありません。その量が許容値に収まっているかが問題なのです。**一般的な建物においては許容値以下の不同沈下が防げれば、目的は達していると思います。それを防ぐためには、荷重を均一に分散させて良好な地盤に伝達させることです。直接基礎では、同一性状地盤に載るようにし、杭においては硬い支持層に数少なく施工するので無く、安定した地盤に数多くの杭を敷設することです。(地盤には水平・鉛直とも連続変化が有り、有限な地盤データでは把握できないためです。)

2) 液状化判定に必要な土の判読の話

柱状図から液状化検討用の試料を選ぶ基準(日本建築学会)では次のとおりです。

1. 地下水面以下で、GL-20m以浅の沖積層の砂質土(〇〇混りや〇〇質〇砂)
2. 概ねN値が15以下で、N値が測定された試料であること

なお、判定に必要な土質試験は通常の地盤では粒度(フルイ)だけで可能ですが、人工地盤(埋土盛土)の場合は液塑性試験及び粒度(沈降)・土粒子の密度も必要になります。なお、土木では粒度(フルイ)と液塑性試験が必要になります。

なお、計算には単位体積重量を入力する必要がありますが、地下水面以下の砂質土の単位体積重量測定は実際には困難で、各種書籍に載せられている値や経験値の方が実務的でその誤差は一割以下と考えられます。(良くP管と称する標準貫入試験で試料を採取して単位体積重量を測定していますが、この方法は規格外でかつ誤差が大きすぎる事が知られています。)

さらに、一律に粒度(フルイ+沈降)・液塑性試験・土粒子の密度の試験を行っている報告書を見受けませんが、柱状図に自信が持てない技術者のレポートか土木基準の一部を間違えて取り入れていると考えられます。

(なお、土質試料の判定に際して、一番やっかいなのが、沖積層の概念です。調査地が高台や黄褐色の砂質土はN値が小さくても、まず洪積層です。

詳細に話をすると、長くなるので、信頼できる人物(会社)に検討を依頼することです)

3) 一軸・三軸圧縮試験結果の判読の話

三軸圧縮試験には使用目的に合わせて4通りの方法がありますが、ここでは、短期(荷重増加直後)の支持力に関する非圧密・非排水(uu)条件に限定して話します。

土は基本的に粘着力と剪断抵抗角の組み合わせで強度が決まります。

それなのに、内部摩擦角が測定できない一軸試験が利用されているかと言えば、それは試験が簡単(費用が安く)でかつ、沖積粘性土のように内部摩擦角が小さくなる場合は三軸圧縮試験結果と同じになるためです。また、杭の周面摩擦力を求めるときに、昔からの実験例が多いためです。

すなわち、基準や告示式に試験方法が記載されていない場合には、精度を高めるために三軸圧縮試験の方を利用することが望まれます。

但し前述したように、**一軸は三軸圧縮の側圧を0にした時**ですから、その条件に合った場合には適した試験です。

また、一軸による**変形係数E50**はよく知られておりますが、三軸圧縮による変形係数E50もあります。杭のように側面が地盤に拘束された状態の変形係数は三軸圧縮による値の方がより適していると考えています。

なお、建築基礎構造設計指針(1988)には、「沖積粘性土ではN値=0という値が測定されることも多いが、それでも一軸圧縮強さ20~60kN/m²程度の値を持っていることがあり、N値から沖積粘性土の強さを判断することは難しいのが普通である。」の記載があり、**N=0は強度の無い土の概念を捨てる**ことが必要です。

私は、最近ではN値が10以下の場合には大崎の式 $q_u=40+5N$ の式が、この付近の軟弱粘性土には適合していると考えています。

2. スウェーデン式サウンディング試験(Ss)結果の利用方法と限界の話

本試験は、ボーリング調査の補間として出発した調査方法で、本来地盤強度を求める試験ではありませんでした。そのため、結果の利用方法は日本独自のものです。

本来一軸強度を推定する試験としては、**コーンタイプ**のものが主体で、この試験は特に軟弱な粘性土の調査に利点が多く、貫入抵抗値からかなり高い精度で強さが推定できます。また、砂質土でもN値と貫入抵抗値の間にも密接な関係のある標準貫入試験よりすぐれていることが分かっています。但し、試料の採取が不可能な点と、ある程度以上硬い地層を貫入することができない点、および礫を含む地層には不相当であるなどの欠点をもっている。

利用にあたっては、コーン試験タイプで求められた貫入抵抗値から、機械的に地盤の強さを推定するのではなく、土質試験結果などを参考に、その地盤に適した換算値を用いる必要があります。

以上のことから、さらに施工的に標準貫入試験の方が優位になることが多く、広く利用されていません。

簡単に言うと、**Ssから得られた結果は、コーン試験より精度が遙かに落ちるので**、詳細設計に利用できる精度を有していないと言うことが、本当の話です。これは、1宅地5本の結果を見て頂ければ、如何に値がばらついているかが判ります。地盤に変化があるとしても、この値程変化していたら調査の意味がありません。特に最近の**自動機は機械によっては、メンテナンスが悪いと安全側に大きく誤差が生じます**。長年手動器で実施した経験から、自動機は軟弱地盤ではより低強度に、ガラ等の地盤があると非常に大きな抵抗値を示す傾向にあるかと思えます。

時折、他社のSsの報告書を見ていると、表層の強度が機械が搬入できない程の低強度記載されているの、散見されます。測定者が「地耐力とSsの値の相」を知らないで、試験しているとしか考えられません。

しかし、上部に締まった地盤が無い自然の軟弱粘性土地盤(N値3以下程度)においてSs試験結果による一軸圧縮強度の推定値は、N値よりも精度が高いことが多く、その結果、その値から、 $c=qu/2$ の関係を用いて地耐力が算出されています。経験的に、この値は適切と判断されますが、安全側の現在の基準とは異なります。(現在の基準では盛土も含んでいるためで、その点も考慮すると妥当です)。

スウェーデン式サウンディング結果による一軸圧縮強度からの推定支持力

Wsw 及び Nsw		支持力
粘性土	砂質土	
$Wsw \leq 0.50$	$Wsw \leq 0.50$	30kN/m ² 以下
$Wsw \leq 0.75$	$Wsw \leq 0.75$	30kN/m ²
$Wsw \leq 1.0, 0 < Nsw < 8$	$Wsw \leq 1.0, 0 < Nsw < 16$	40kN/m ²
$Wsw \leq 1.0, 8 \leq Nsw$	$Wsw \leq 1.0, 16 \leq Nsw$	50kN/m ² 以上

しかし、国土交通省告示第1113号(平成13年改訂)により、より安全側の換算式が公表されました。

そのため、現在ではこれが主体になっております。

Nsw(基礎底面から下方2m以内のNswの平均値)が0以上で、かつ下方2~5m間に0.5kN自沈が認められない場合には、次式で長期の地盤許容応力度(qa)が算出できるとされています。

$$qa = 30 + 0.6Nsw \quad \text{kN/m}^2$$

すなわち、自沈があった場合地耐力は算定できず、三軸圧縮(UU)試験で確認する必要があります。そのため、荷重的に不必要と思われるような場合でも地盤改良が流行しています。

本調査の一番の欠点は、硬い層に当たった時はそれ以深が確認できないことです。すなわち、前述の告示式で、5m以浅で硬い層に遭遇した場合は、どれだけ地盤が良くても地耐力が算定出来ない、すなわち、地盤の地耐力が求められないことです。

次の欠点は、土層が把握できないことで、特に強度的に小さくてもロームや粘着力の強い土質に遭遇した場合、機械構造的にスクリュウポイントが地盤に食込めず、それ以上の貫入が出来ないため「砂質土」と表現されている場合があります。

なお、 S_s は名前の通りに試験であって、地質調査の中の1手法ですから、本来「値」よりむしろ「解析方法(値の解釈)」が重要になります。

そのためには、調査地を含む全体の地形状況(最近Yahoo!の地図検索の中の「地形図」・「水系図」は非常に利用度の高い)から地盤状況を考えて、試験値が持つ意味を考えることが肝心です。

皆さんは、例えば一軸強度が知りたくなった時でも、直接「土質試験所」に依頼することは無いと思います、それと一緒に、「 S_s の専門業者」は試験屋さんですから、試験屋さん「コンサルタント業務を含む調査」を依頼すること自体が問題だと思えます。

なぜボーリング調査というかと、ボーリングの結果(柱状図)の中には、標準貫入試験(N値)・土層判定・地下水観測・各種試験結果等の試験結果を総合した検討結果が記載されているからです。

Yahoo!の地図検索の中の「地形図」・「住宅地図」



川口市新井宿付近の住宅地図



川口市新井宿付近の地形図

色の濃さで、低地・崖・台地が明瞭に区分できます。矢印の意味はありません

3. 地盤の平板載荷試験の話

地盤の支持力が、地盤の種類に関係なく直接測定できることが、最大の利点です。最大の欠点は、一般的な調査法の中で一番広い敷地が必要となることです。

利用に当たっての留意点：

- ・**載荷試験もSs同様に「試験」**ですから、試験結果のみで地盤の地耐力を把握することは出来ません。
- ・試験地盤以深の土が、試験地盤より強度が小さくないことを確認する必要があります。
- ・本試験で得られる支持力は、載荷板下の約1mの範囲の加重平均値的な値です。
- ・重機等の大きな反力が必要となります。
- ・各種サウンディングとの併用は、非常に有効です。
- ・1.5mより深い場所の試験では、土留め工又は法が必要になります。
- ・建物の基礎地盤としての地耐力は、国土交通省告示第1113号(平成13年改訂)によると、本試験の支持力にDF効果による地耐力を加えた値になります。
- ・土質試験による地耐力算定と同じように、**地盤の変形係数及び基礎の形状から許容沈下量を求めて、地耐力を算定する必要があります。**

著者について

株式会社 総合地質コンサルタント 代表
埼玉県川口市戸塚東1-25-33 TEL048-294-6976

新潟大学農学部農芸化学科入学－理学部地質鉱物学科 S49卒

その後、現在に至るまで地質コンサルタント～地質調査業務の会社に勤務。
H6現在の会社を設立。

地質調査及び鉱物の結晶形態学に関する著書・論文・特許等多数。

参考・引用文等

「土」の役割と建築物の関係(地盤の講習会資料)竹下良美(10年程前)
建築基礎構造設計指針 日本建築学会(1988,2001)
小規模建築物等の液状化マップと対策工法 液状化対策検討委員会
ぎょうせい(1994) 土質工学数式入門 地盤工学会(1984)
小規模建築物基礎設計指針 日本建築学会(2008)
技術手帳－実務に役立つ土質工学用語の解説－地盤工学会(1978)
Yahoo!の地図検索
AQパイル工法(国土交通省認定杭)カタログ AQパイル協会
AQUAラフト工法カタログ AQパイル協会