

ボーリング孔を利用した原位置試験
について

— 検層を中心とした話題 —

(有) タカイ地盤計測

木 村 伸 一

○ 地質調査の種類

・ 地表地質踏査

地表露頭に見られる地質情報から一定の区域内の地質状況を推定するもの。

・ 物理探査

地盤の物理量（弾性波速度・比抵抗等）を測定し、その物理量より一定区間の地質情報を推定するもの。

・ ボーリング調査

ボーリングマシンにより、その地点の地質状況を把握するもの。

地質状況を確認するための試料を採取する。

原位置試験実施のための試験孔を掘削する。

・ サウンディング調査

貫入抵抗（あるいは回転・引き抜き抵抗）により、地盤の強度を調べる。

標準貫入試験（ボーリング孔を利用する）

スウェーデン式サウンディング試験

オランダ式二重管コーン貫入試験

3成分コーンあるいは電気式コーン（土質の推定も可能）

他

・ その他

岩盤試験・室内土質試験等

○ ボーリング孔を利用した原位置試験

地盤の強度を測定するもの

- ・標準貫入試験
- ・孔内水平載荷試験（エラストメータ，LLT等）

透水性や地下水に関する情報を測定するもの

- ・現場透水試験
 - ・揚水試験
 - ・湧水圧試験（JFT）
 - ・ルジオン試験
 - ・孔内微流速測定
 - ・地下水検層
 - ・地下水流向流速測定
- 地盤の透水性
- 地下水の流動性

その他の物理量等を測定するもの

- ・物理検層
 - 速度検層
 - 密度検層
 - 孔径（キャリパー）検層
 - 電気検層
 - 温度検層
 - 他
- ・ボアホールカメラ
- ・常時微動測定
- 他

○ 速度検層（P波検層、P S検層）

1. 何を測るのか？

地盤の弾性波速度を測る。

弾性波とは？

P波（縦波）…… 進行方向と同じ方向に揺れる（水中も伝播）

S波（横波）…… 進行方向の直交方向に揺れる（水中は伝播しない）

表面波 …………… 物質の表面を伝わる

2. 弾性波速度で何がわかるか？

速い・遅いが地盤状況推定の1つの指標となる。

地盤定数（弾性定数）を求め、耐震設計をする際に利用する。

3. 測定方法

①ダウンホール法

孔中に受振器を挿入し、地表で起振し弾性波速度を求める。

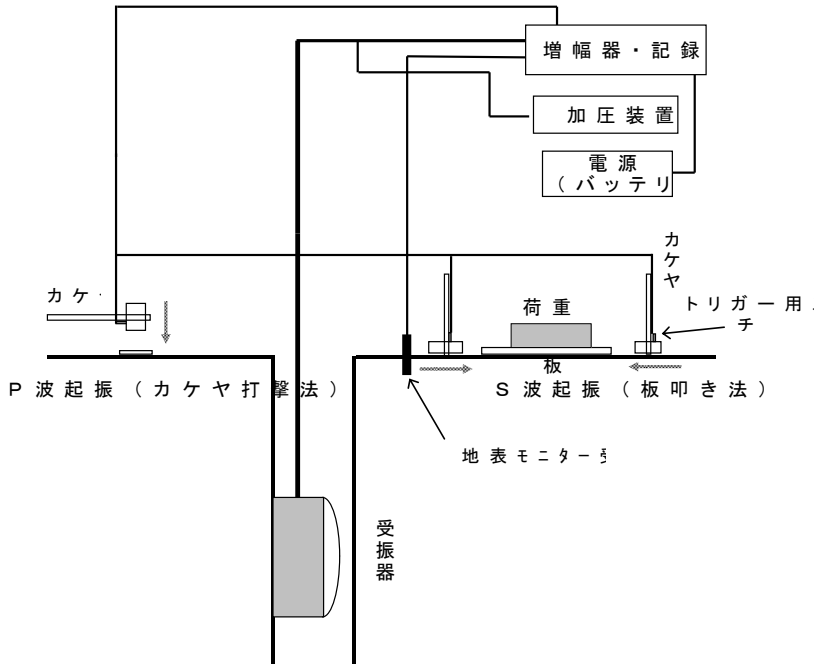
②孔内発振孔内受振法（サスペンション法他）

孔内に受振器・発振器が搭載されたゾンデを挿入し、測定を行う。

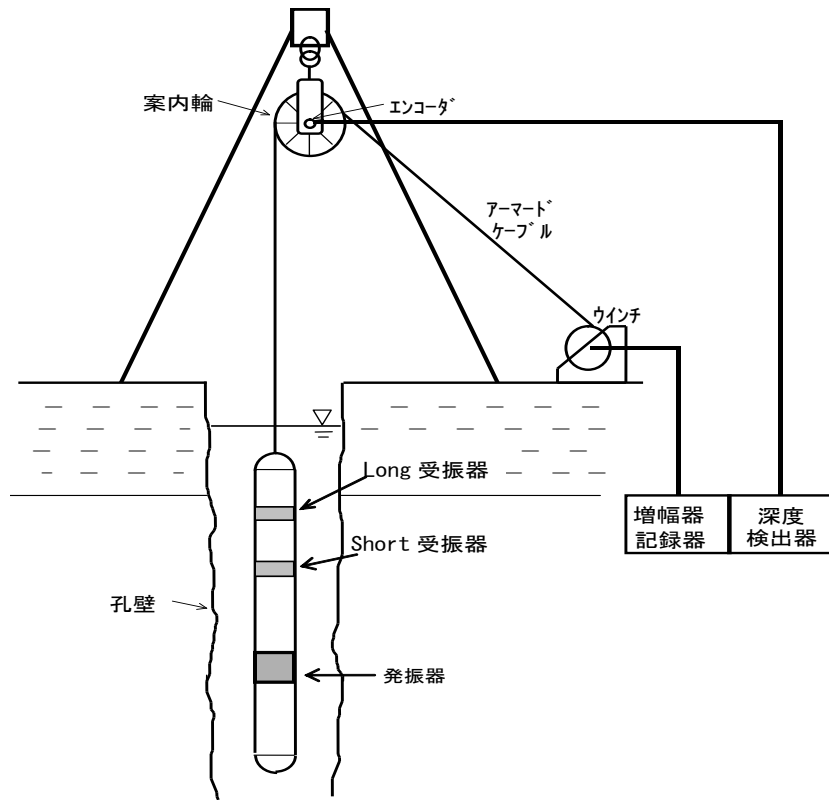
地盤他のP波速度・S波速度・密度値

| 媒質の種類 | | P波速度 v_p (m/s) | S波速度 v_s (m/s) | ポアソン比 ν | 密度 ρ (g/ml) |
|------------------|--------------------|-------------------------------|--|----------------|--|
| 沖積層 | 粘性土 粘砂 | 250~700 (1500)* | 80~160 60~200 250~350 | 0.35~0.50 | 1.3~1.7 1.6~2.0 1.8~2.1 |
| | 関東ローム 粘性土 粘砂 | 1000~2000 (1500)* ~2000 | 140~200 160~250 200~350 300~600 | | 1.2~1.6 1.4~1.8 1.7~2.1 1.8~2.2 |
| 岩 | 泥岩 砂岩 | 2000~3000 2000~3500 | 600~1000 700~2000 | 0.30~0.40 | 2.2~2.6 2.5~2.7 |
| | 花崗岩 玄武岩 | 4000~5700 4400~6700 | 2100~3300 2500~3800 | 0.25~0.35 | 2.6~2.8 2.8~3.0 |
| 上部マントル | | 7500~8000 | 4800~4600 | ≈ 0.25 | ≈ 3.3 |
| 空気(乾燥, 0°C, 1気圧) | | 331 | — | — | 0 |
| 水(蒸留, 23~27°C) | | 1500 | — | — | 1.0 |
| 氷 | | 3230 | 1600 | 0.338 | 0.338 |
| コンクリート | | 3100 | 1960 | 0.167 | 2.3 |
| 鉄 | | 5950 | 3240 | 0.289 | 7.86 |

*飽和土の場合



ダウンホール法速度検層概念図



サスペンション法速度検層概念図

○ P波検層

1. P波速度を測定して何がわかるか？

P波速度が遅いことから想定される事

- ・岩盤では割れ目が多い。
- ・割れ目が開いている。
- ・軟質である。
- ・軟岩あるいは破碎・風化等により軟質化している。
- ・地下水が無い。(不飽和：地盤中の空隙が地下水で満たされていない)

P波速度が速いことから想定される事

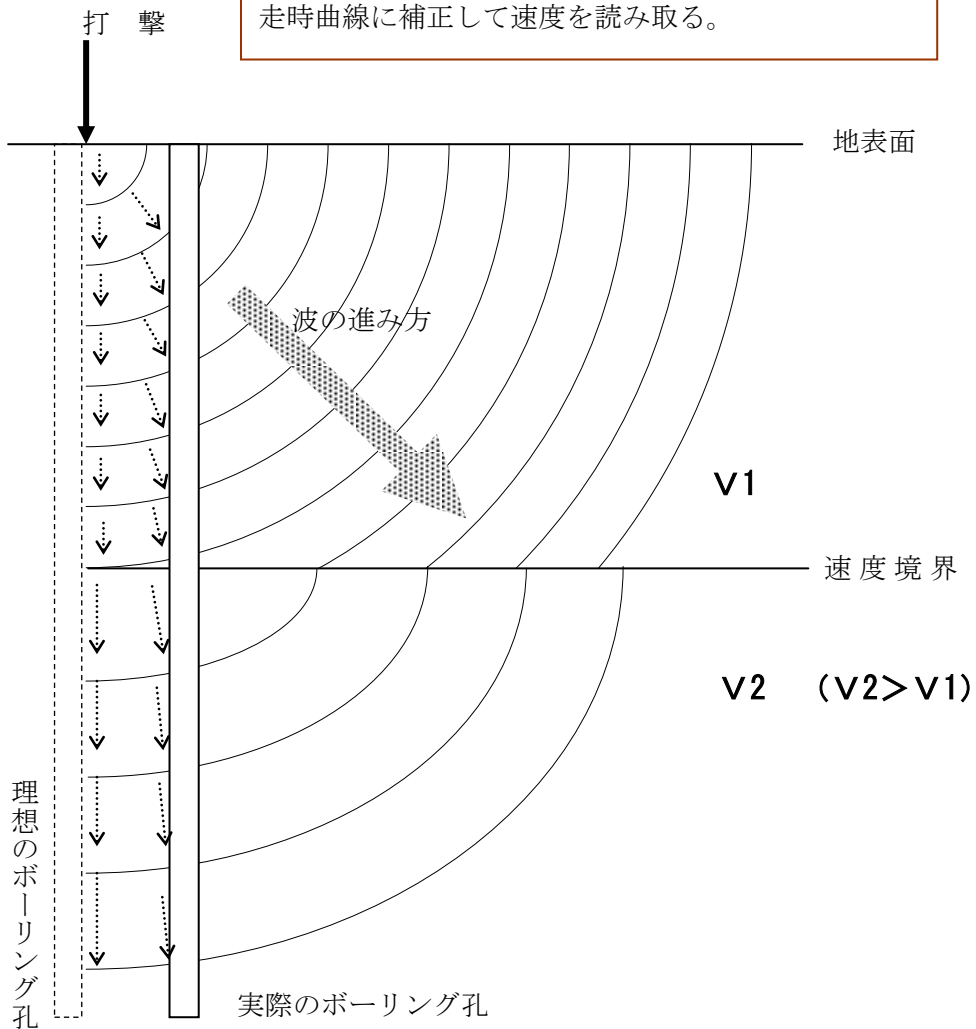
- ・割れ目が少ない。
- ・割れ目があっても密着している。
- ・硬質である。
- ・飽和状態である。(ただし、軟弱地盤でも飽和土の場合は 1.5km/s を示す事が多い)

2. P波速度を何に使うか？

- ・ P波速度・S波速度・密度より弾性定数を求める。
ポアソン比、ヤング率、剛性率、体積弾性率
- ・ 岩盤中のゆるみ区間を推定する。
(岩盤がゆるむと割れ目が開きP波速度が遅くなる。)
- ・ 岩盤分類を行う際の1指標とする。
たとえば、トンネル地山分類
たとえば、道路切土の岩盤区分

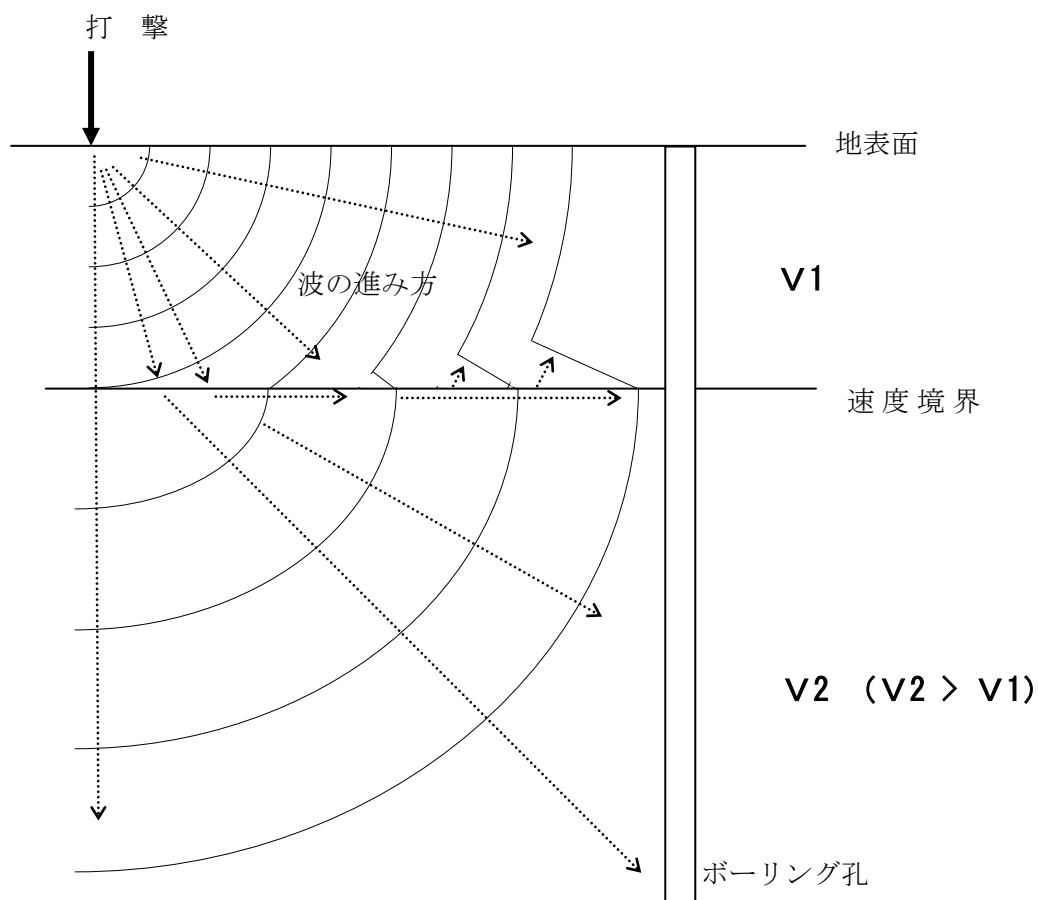
伝播のイメージ 1

ボーリング孔の真上で起振出来るのが理想であるが、やや離れた地点で起振する方がデータが良い。解析時に起振距離でデータを補正し、孔口で起振した走時曲線に補正して速度を読み取る。



地表部打撃後の波形伝播のイメージ

伝播のイメージ 2



起振位置がボーリング孔から離れた時の伝播イメージ

振源位置が離れていることにより境界面から屈折波が生じている

(振源距離が離れていなくても $V2 \gg V1$ の時、屈折波が生じやすい)

○ P S 検層

P波速度およびS波速度を求める手法である。

P波速度同様、S波速度は地盤が良いと速くなり、悪いと遅くなる。

P波と異なり水中は伝播しないので、地下水位以下の軟弱地盤においても速度の変化が認められる。

S波速度を何に使うか？

- ・ P波速度・S波速度・密度より弾性定数を求める。
ポアソン比、剛性率、体積弾性率

- ・ 耐震設計の際に用いる。

S波速度より工学的基盤を決定する。

(工学的基盤を地震動解析の際の基盤とし、地盤種別や表層での卓越周期、地盤増幅特性等を求める。)

例として

| | |
|--------|----------------|
| 道路橋示方書 | S波速度 300m/s 以上 |
| 建築基準 | S波速度 400m/s 以上 |
| 原子力 | S波速度 700m/s 以上 |

工学的基盤

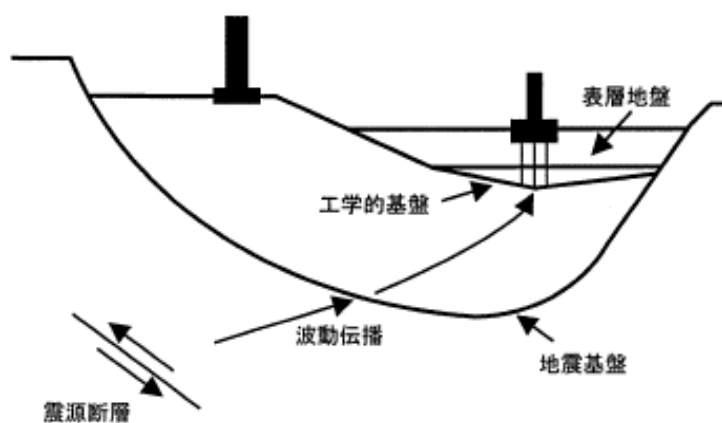
最近の建築あるいは土木構造物等の調査において、この工学的基盤（多くはS波速度 400m/s 以上で層厚 5m 以上）を確認して調査終了とするものが多い。

今までの経験から、S波速度 400m/s 以上の目安としては、砂礫層では N 値 50 以上である。砂層では N 値 50 以上でも 400m/s に達しない例が多く、確実に 400m/s 以上となると N 値 50 以上で貫入量数 cm 程度の締まり具合が必要と思われる。

コンサルタント等の調査担当者は、ボーリング終了のための S波速度 400m/s 以上ばかり注目して、その上の区間にあまり注目していない事が多い。しかし、設計にはその上位の S波速度が重要となる。ボーリング掘削の際には全区間で S波速度測定が出来る様な環境をつくってもらえると、測定者としてはありがたい。

工学的基盤と地震基盤

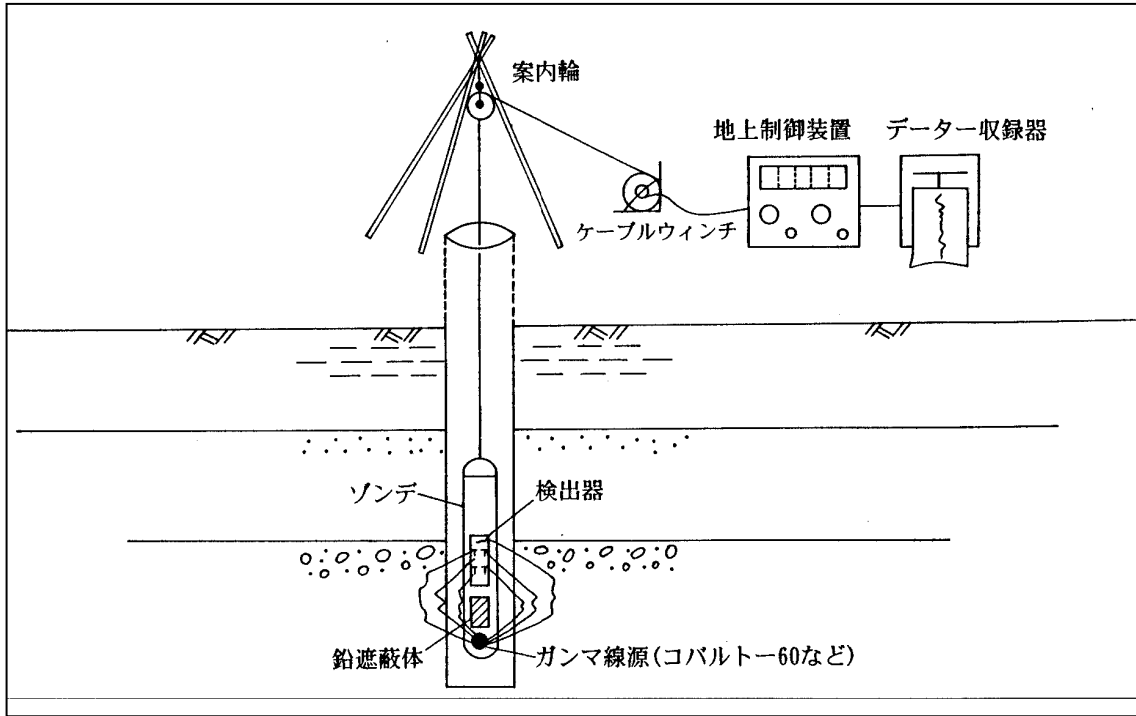
超高層ビル、長大橋等の長大構造物や重要構造物では、通常地震動ほかに周期 10 秒程度までの「やや長周期地震動」の重要性が認識されるようになってきている。この場合地震基盤（S 波速度 3km/s 以上）を考慮して表層の増幅特性を評価する。



工学的基盤と地震基盤

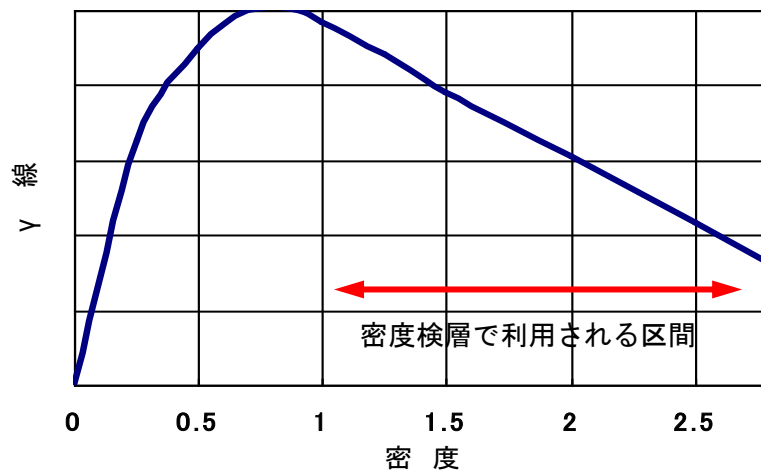
○ 密度検層

放射線のガンマ線 (γ 線) を利用し、その反射から地盤の密度を推定する方法である。



密度検層概念図

γ 線は物質の中で反射 (散乱) を繰り返しエネルギーを失っていく。この散乱現象は密度に比例するので、 γ 線を計測することにより密度が推定出来る。



検出される γ 線と密度の関係 (イメージ)

短所

- ・ γ 線の放射は放射性物質の崩壊により起こる。崩壊は一定でなくランダムに起きるので、線源が小さいほど崩壊（放射）がばらつき誤差が大きくなる。
- ・ 計測される γ 線には地盤中から放射される自然放射線も含むため、補正のため孔内の自然 γ 線測定が必要である。
- ・ γ 線源は半減期により小さくなり、小さくなるほど誤差が大きくなる。密度検層の線源としてはコバルト 60 あるいはセシウム 137 が用いられ、その半減期は以下の通りである。
 ^{60}Co で約 5.3 年 ^{137}Cs で約 30 年
- ・ 検出される γ 線はボーリングの孔径が変わると値が変わる。このため、実際の調査では孔径補正のため孔径（キャリパー）検層を行う必要がある。
- ・ 泥水濃度が変わると検出される γ 線の値も変わる。

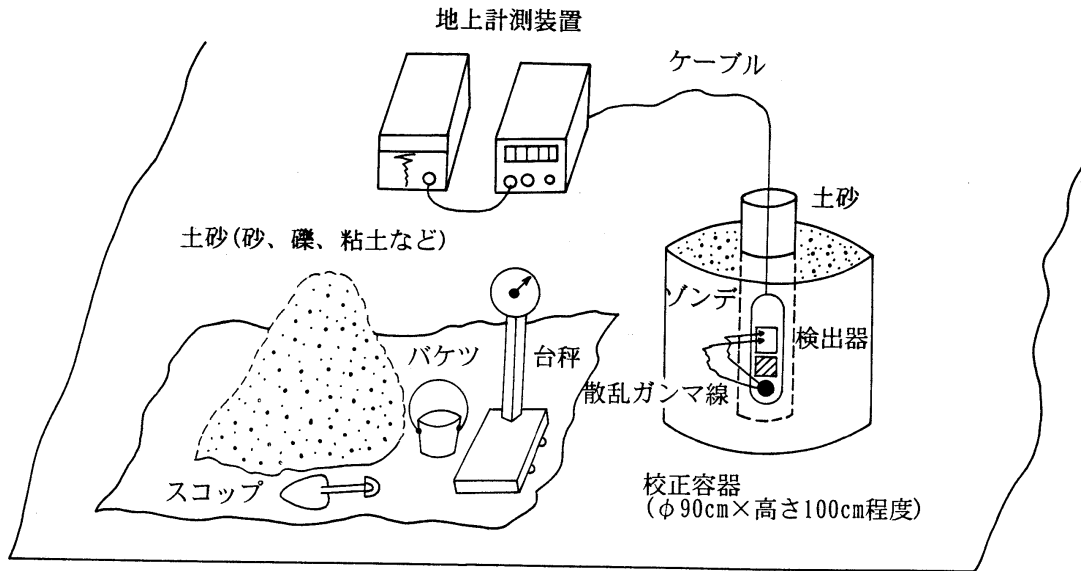
長所

- ・ 原位置での密度が推定出来る。
- ・ 深度方向に連続的な密度の変化が把握できる。
- ・ 観測孔が出来ていれば、何回でも測定出来る（経時変化を測定出来る）。

密度検層校正試験

- 得られた γ 線測定値から密度に変換するには校正試験を行う必要がある。

ドラム管より大きな容器に土質試料を詰めて、その密度および検層器による γ 線測定値から校正曲線をつくる。 γ 線測定値から密度への変換はこの校正曲線を用いて行う。

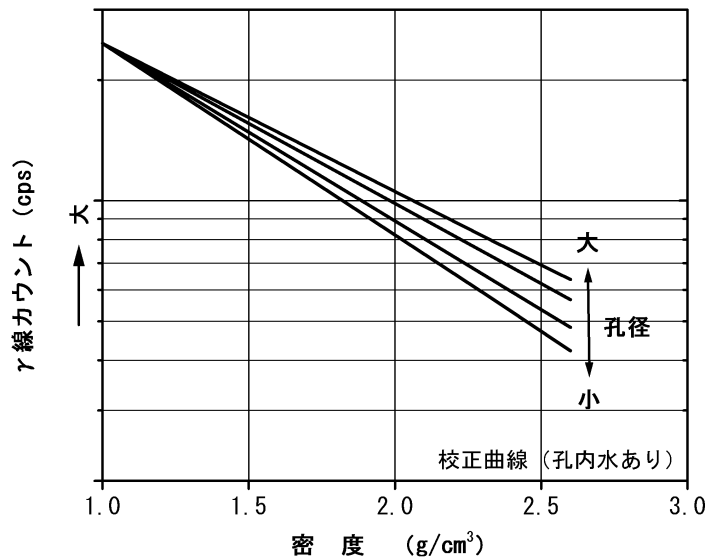


密度検層校正試験概念図

- 校正曲線は、ボーリング孔の孔径変化に対応するため数種の孔径で作製し、ケーシング挿入状態で測定を行う場合はそのケーシングを用いた校正試験を実施する必要がある。

密度への
線から γ
び孔径を
求める。

変換は、校正曲
線測定値およ
内挿・外挿して



○ 孔径（キャリパー）検

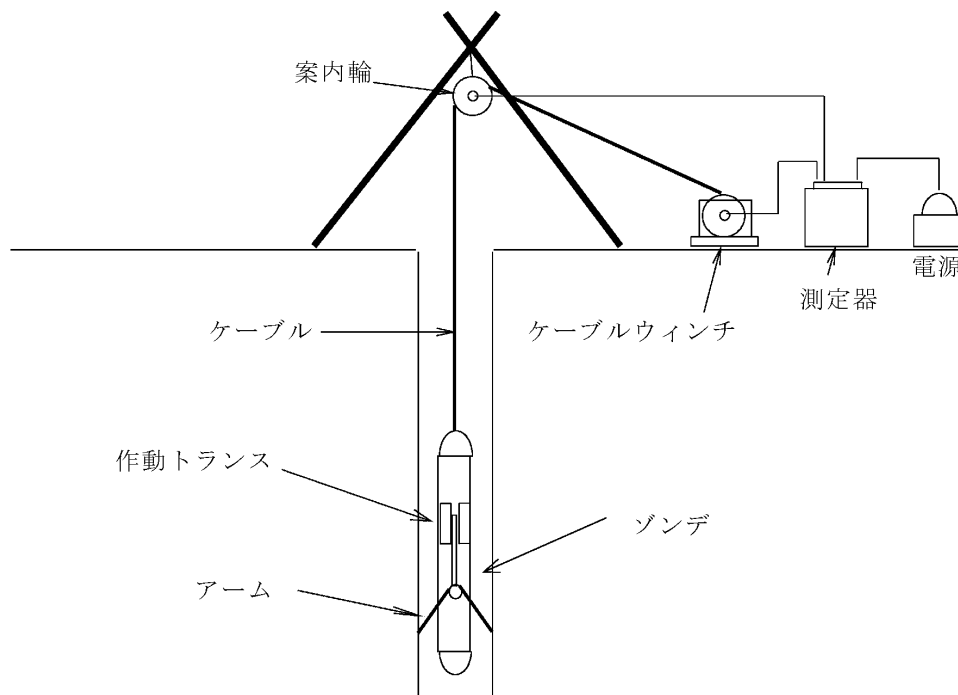
密度検層校正曲線の例（イメージ）

層

ゾンデのアームの開き具合から孔径を測定する検層である。

密度検層や他の検層の補正用に用いられる事が多い。また孔径の変化より崩壊しやすい地層であるかの確認に用いられることもある。

使用されるアームは1本～4本が多く、1～2本では1方向の孔径を測定し、4本では2方向の孔径を測定することになり孔径の再現性が良くなる。

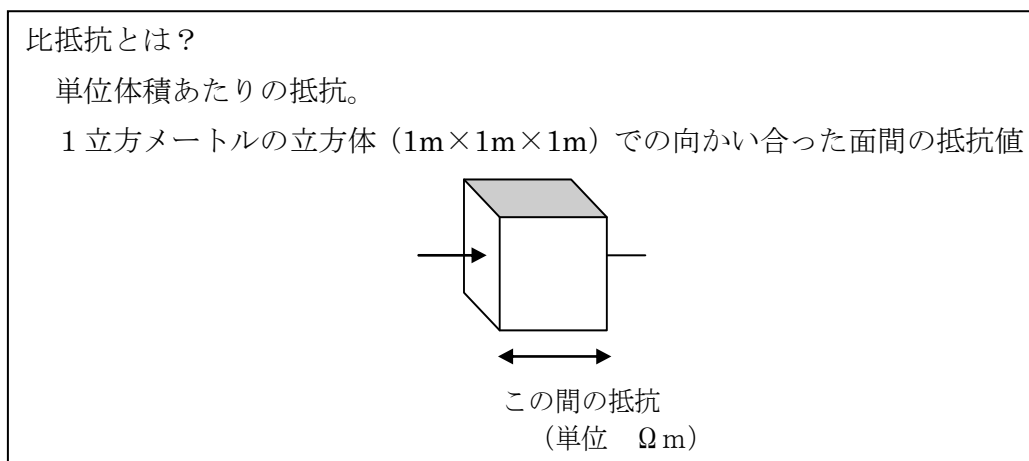


孔径検層測定概念図

○ 電気検層

ボーリング孔周辺における地盤の比抵抗および自然電位を測定する方法である。岩盤における地層対比や井戸掘削工事においてストレーナ位置決定の際に利用される。

おもに利用されるのは比抵抗である。



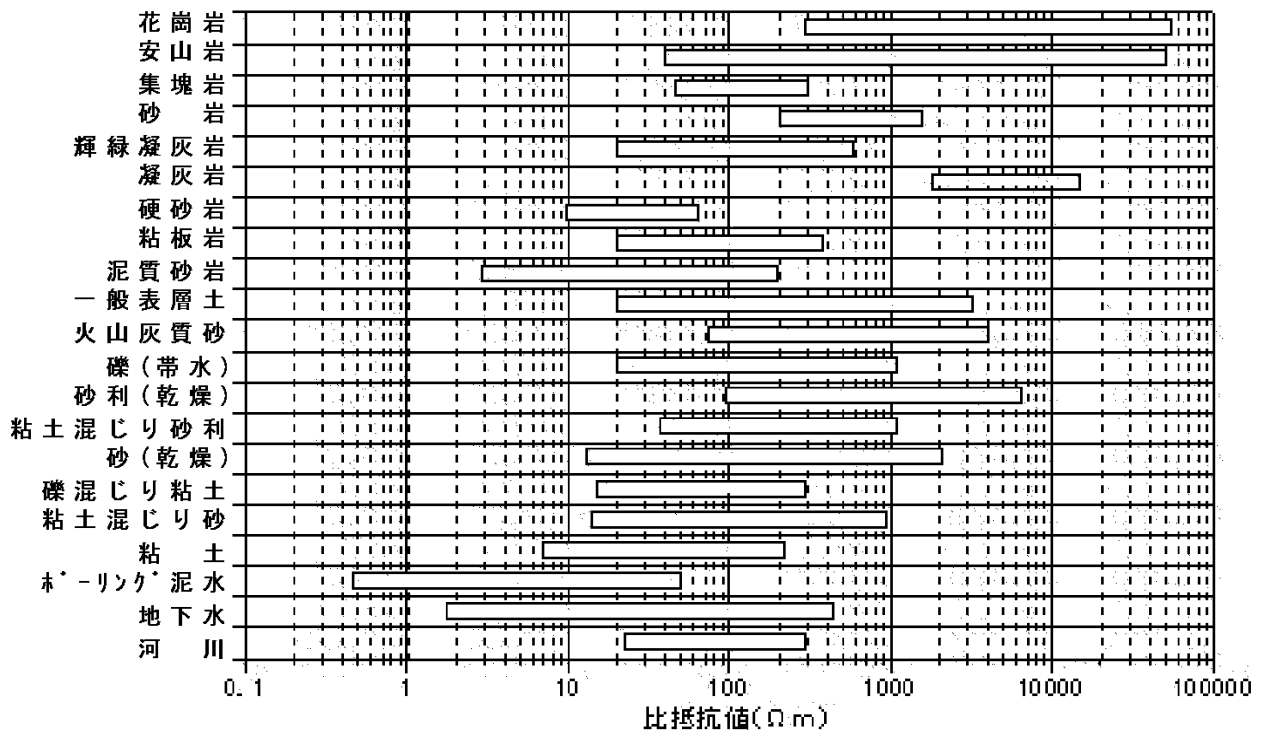
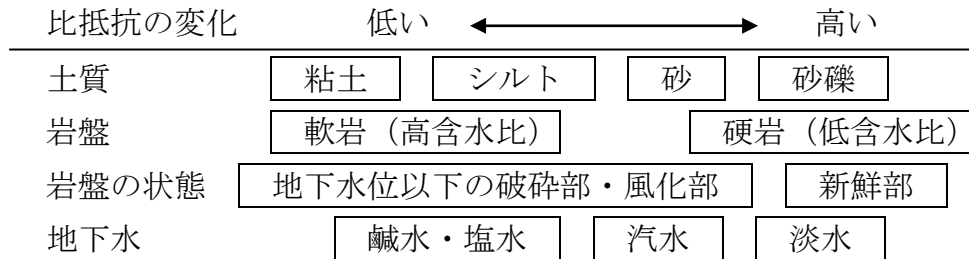
1. 比抵抗から何がわかるか？

地盤の状況と比抵抗変化

| 状 態 | 岩石・土の比抵抗の変化 | | | 備 考 |
|-------------|-------------|---|---|----------|
| | 低 | ⇒ | 高 | |
| 地下水・間隙水の比抵抗 | 低 | ⇒ | 高 | 塩分濃度、塩水楔 |
| 水飽和度 | 高 | ⇒ | 低 | |
| 間隙率(飽和状態) | 大 | ⇒ | 小 | |
| 粘土分 | 多 | ⇒ | 少 | |
| 風化・変質程度 | 強 | ⇒ | 弱 | |
| 温度 | 高 | ⇒ | 低 | 地熱 |

※イメージとしては、比抵抗が小さいほど地盤中に水が多い（空隙が多く、空隙が水で満たされている）。また地盤中の水の塩分濃度が高いほど比抵抗が小さくなる。

実際の地盤では



地質・土質と比抵抗の関係

(基礎地盤コンサルタント(株)ホームページより)

- 孔内に挿入するA、M極は土木関係では電極間隔 25cm・50cm・100cm の3種類で行うことが多く、通常は自然電位を含め同時測定を行う。
井戸関係の掘削では電極間隔は 40cm・80cm が多い。
- 電極間隔によって地盤内の探査深度が異なり、得られた比抵抗は概ね電極間隔と同じ深度までの比抵抗分布を反映している。
- 土質による比抵抗曲線の特徴として、一般的には以下の事があげられる。
 - 粘土・シルトでは、数十 Ωm 以下を示し、各電極間隔の比抵抗曲線間の差（セパレーション）はほとんど無い。
 - 砂・砂礫では、数十 Ωm ～数百 Ωm 程度を示し、セパレーションが認められる。砂礫では礫の混入に伴い比抵抗曲線の出入りが現れる。
- 井戸掘削でストレーナ位置決定に電気検層を用いる場合に比抵抗から得られるものは、地下水情報ではなく地盤情報の1指標であり、比抵抗変化より地下水が賦存している可能性のある地層を見つけることである。このためストレーナ位置決定には掘削時の情報（逸水情報やスライム等による地層変化など）が不可欠である。