

1. 緒 言

山地におけるトンネルやダム等の工事では、対象はほとんどが岩盤であるが、都市土木においても、地下鉄掘削などで岩盤に遭遇することがある。そしてこれが、弾性波伝播速度のあまり大きくない軟岩で、経済的に機械掘削を行なえる程度の硬さであるときには、機械や工法の選択のために、この硬さの程度を事前に数値的に知ることがぜひとも必要となる。しかしこの測定は、山地の場合と違って交通が非常に頻繁な場所であるために、調査地域を広くとることができず、弾性波測定のための小さな発破をかけることも、地表面では周辺の保安の面から、簡単に実施することができない。またノイズが多くて満足な記録が得られない。このように、普通の方法では実施が困難であるので、対象地域にボーリング孔を数本掘り、これに特殊な装置を施した孔中受震器を使用して、岩盤の弾性定数を求めることを、ある地下鉄掘削現場で実施した。このような、都市中心部における測定は、わが国ではあまり例がないものと思われるので、ここにその概略を説明する。

2. 孔中受震器による測定

地下の岩盤の原位置における性質を知るためには、まずボーリング孔を掘って成層状況を調べ、採取したコアを観察し、またそのコアについて実験室内で超音波測定を行なうことにより、その弾性的性質を求めることができる。しかしこれは、その地域全般の平均的な岩質を代表するものかあるいはその一地点の局所的な状況かの判断がつきにくいことがある。これを解消するためには、ある程度密にボーリングを行なわなければならないが、しかしそれよりもその一部をもう少し有効な調査方法にふりかえて、総合的な評価を下せるようにする方が、経費的にも望ましい。またコアについての超音波測定値は、割目や破砕部を織りまぜた全体としての岩盤の平均的な状況を代表していないこともあるが、土木工事においては、ある広がりをもった岩盤の平均的な値を知りたいことも多い。

このような、原位置における、かなりの範囲の平均的な状況を、能率的に求めるためには、弾性波による測定が有効である。しかし地表面からの測定では、狭い地域や障害物の多いところでは、深い部分まで正確に岩盤の弾性波伝播速度を求めるだけの十分に長い測線をとることがむずかしく、したがって誤差が大きくなり、また何よりも岩盤の弾性定数を求めるためのS波を検出することが、地表面近くの軟弱な表層に妨害されて、ほとんどできないという欠点がある。このためボーリング調査と平行して、その既掘ボーリング孔を保存利用し、これに孔中受震器を使用して、原位置における弾性波測定を実施することが考えられる。この孔中受震器は今のところ次の三つのタイプが使われる。

(1) 圧力型受震器(ハイドロホン)を2m間隔に12個連結した速度測定用ケーブル : これをボーリング孔中に垂下し、孔口近くの地表面で小さな発破をかけてその初動を記録し、ボーリング孔付近の地層の垂直方向の速度分布を求める(図-1はその記録例)。また他のボーリング孔から小さ

な発破をかけて、二つのボーリング孔間の平均速度が求められる。この測定は簡単であるので実用的であるが、受震器の型式上 S 波は記録されず P 波のみである。

(2) 任意深度固定型 3 成分孔中受震器 : 動線輪型の受震器を 3 個、上下・左右・前後 (V・T・L) の 3 方向に組み込み、円筒状の容器におさめたもので、ボーリング孔中に垂下し、測定しようとする深度に達すると、油圧により容器の上部と下部の 2 箇所からアームを張り出して、孔壁を押しつけることにより固定させる。これはケーシングが挿入されていないボーリング孔が望ましいが、少しでも孔壁が崩壊すれば、受震器の回収が不可能となるおそれがあるので、ビニールパイプのケーシングを入れ、ケーシングとまわりの岩盤との間にできるすきまは、グラウト注入などにより埋める。この受震器を孔中に固定し、別のボーリング孔から小さな発破をかけると、各深度ごとに、二つのボーリング孔間の水平方向の P・S 両波伝播速度を求めることができ、これから弾性定数を算出し得る。この記録の一例を図-2 に示す。

(3) 地中圧入型 3 成分孔中受震器 : 受震器の機構は前項と同じであるが、直接地中に圧入する方式をとる。この場合は地中に密着しているから原位置測定としては最も理想的で、図-3 のように非常にきれいな S 波の記録を得ることができるが、これは主として軟弱地盤の測定用であり、岩盤には圧入できないので、岩盤測定するときには間接的な方法をとる。

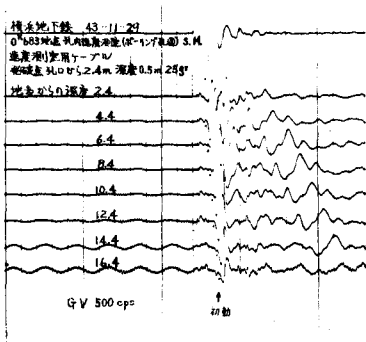


図-1

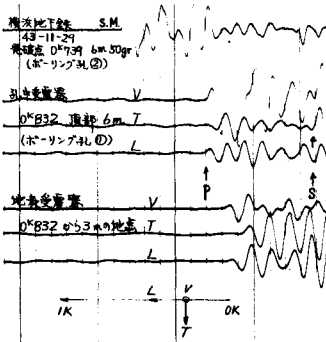


図-2

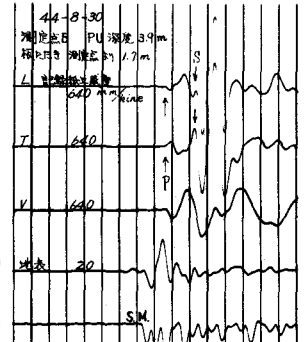


図-3

3. 地下鉄掘削現場における実施例

以上のうち (1) (2) のタイプの受震器を使用して、大都市 (横浜市) の地下鉄掘削現場で測定した例を説明する。この地下鉄計画路線付近の地質層序は図-5 のように上部から表土・沖積粘土・洪積粘土・洪積砂・砂利などがあって、その下に第 3 紀の砂質泥岩 (いわゆる土丹) が分布している。この土丹層は、最戸橋付近では地表面下 3 m ~ 5 m のところからすでにあらわれるほど浅くなっており、最戸橋の下の大岡川川底では一部土丹層が露出しているほどである。ところが、この地区では複雑構造が上下方向に 2 層となり、また計画深度も深いため、この地区の計画掘削量は最も多くなっている。そしてボーリングコアを観察すると、地表面下 8 m 付近にある砂利層より上の土丹層は割合軟かいが、砂利層より下の土丹層は堅硬で、機械掘削がはたして能率的に行なえるかどうか危ぶまれた。そのため、この付近の土丹層の平均的な硬さをかなりの範囲にわたって数値的に測定し、その上で施工法を検討する必要があるとされ、土丹層の弾性波伝播速度を測定し、弾性定数を求める作業を

行なりこととなった。現地は交通が頻繁な鎌倉街道上のため、深夜・早曉に測定を実施した。図-5の①②③はこの測定のためのボーリング孔、④は揚水試験のために掘ったものをあとで利用した。

〔I〕まず①②③で前節(1)に述べたケーブルを用い、ボーリング孔周辺の垂直方向の速度測定を行なり。このケーブルは2m間隔に圧力型受震器が固定されているので、まず孔底まで垂下して測定したのち、これを1m引き揚げ、再び測定を行なり。こうして1m間隔で測定し、浅い深度では孔と発破点との距離による遅れ分を補正して垂直方向の値にする。この結果を図-4に示す。ボーリングを行なったときの地質と対比すると、地表面下8m付近の砂利層より上の、比較的軟質の土丹層のP波伝播速度は1.3~1.6 km/secであるが、砂利層より下の比較的硬質の土丹層は1.8~1.9 km/secになっている。しかし①③では途中に1.0, 0.8 km/secの低速度区間がある。

〔II〕つぎに、孔①に前節(2)の3成分孔中受震器を垂下し、方向を決めたのち固定し、孔②に少量爆薬(30~50gr)を装填して発破する。S波発生をよりよくさせるために、特殊な成形爆薬も試用した。受震点と発破点の深度は同一とし、各深度ごとに①②間の水平方向の伝播速度を求めた。測定深度は孔底18.6mから始めて、1.6, 1.4, ..., 6, 4mと、2m間隔に

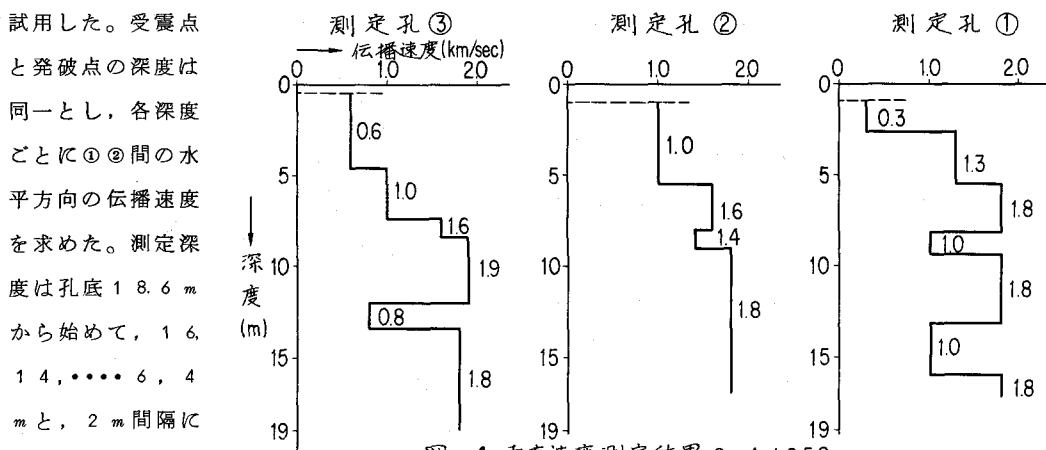


図-4 垂直速度測定結果 S = 1/250

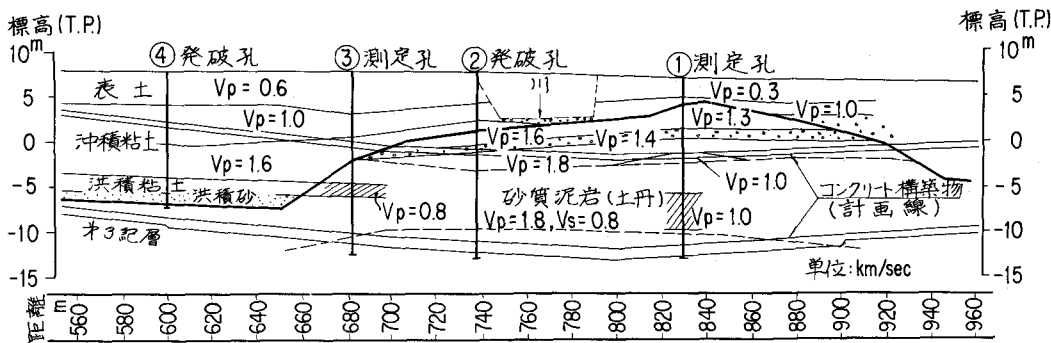


図-5 調査断面図および平面図 $\left\{ \begin{array}{l} H = 1/2,000 \\ V = 1/500 \end{array} \right.$

行なった。同様に、③に受震器を垂下し、①と④とを発破点として、①③、③④間の水平方向の伝播速度を求めた。各記録ともP波初動は明瞭である。S波は、測定深度によってかなり明らかなところと、そうでないところがあったが、これは〔I〕に述べたような軟質のはさみ層の影響を受けたものとみられる。しかしこのような市街地での測定にもかかわらず割合明らかな位相が読取れるので、同時に設置してあった地表測点の結果ともあわせてS波を認定した。この結果、砂利層より下の土丹層のP波伝播速度は $1.77 \sim 1.83 \text{ km/sec}$ 、S波伝播速度は $0.80 \sim 0.86 \text{ km/sec}$ となった。

〔Ⅲ〕孔⑥のボーリングコアについて実験室内で超音波伝播速度を測定した結果は、深度 $19.0 \sim 19.5 \text{ m}$ のものについて 1.83 km/sec 、 $19.5 \sim 20.0 \text{ m}$ のものでは 1.94 km/sec であった。

4. 測定結果の考察

以上の結果から判断すると、この地域の、地表面下 8 m ほどのところにある砂利層より下の土丹層は、垂直方向の測定結果からは途中に軟質のはさみ層が若干入っていることがわかるが、水平方向の測定結果からは、この軟質部のひろがりそれほど大きなものではないと考えられ、このような部分的なものを別とすれば、この土丹層のP波伝播速度は垂直・水平いずれの方向でも 1.8 km/sec 程度であり、またS波伝播速度は、測定誤差によるバラツキを考慮して整理すると、 0.8 km/sec と考えるとよいものと思われる。これから、密度を 2.2 ton/m^3 として各種弾性定数を算出すると、次のようになる。

ポアソン比： $\nu = 0.38$ 、剛性率： $\mu = 1.43 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ 、動弾性係数： $E = 3.95 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
これらの数値から、この土丹層は都市の地下鉄掘削に普通出現する地層に比してかなり硬質であると判断される。一般に土工工事では、P波伝播速度(V_p : 単位 km/sec)について、 $V_p < 1.2$ の岩質ならばリッパなどによる機械掘削が可能で、 $1.2 < V_p < 1.5$ の場合はその限界範囲、そして $V_p > 1.5$ になると、経済的能率的な機械掘削はむずかしい、という基準が経験的に認められている。これは明り掘削の場合であるが、地下鉄工事のように限られた作業現場の場合には、大型機械を入れることも簡単にはできない。上部土丹層は V_p の値が $1.3 \sim 1.6$ ですでに限界範囲とみられる。そして下部土丹層は V_p が 1.8 であるとともに、動弾性係数の値が、泥岩層の山岳トンネルでの測定値に近い値となっている。したがって、ある程度発破を用いて掘削することもやむを得ないのではないかと考えられた。

その後の掘削で上部土丹層まで来たとき、すでに掘削能率が落ちてきたので、下部土丹層の掘削方針をたてるために、各方面の許可を得て、ここで試験的に発破を行ない、その振動・騒音などもあわせて調査した。その結果はほとんど問題はなかったが、種々の関係でまだ発破による掘削を実施するに至っていない。この発破振動測定などについては省略する。

5. 結 言

都市土木においても今後岩盤力学上の問題が生ずる機会が多いと思われるが、山地の場合と違った環境上の制約を克服し、岩盤の性状を的確に把握するための一つの実験として紹介した。測定法や解釈について引き続き改善をはかりたい。終りに、種々の指導と助言を賜った京都大学教授吉川宗治博士(調査全般)、横浜国立大学教授若園吉一博士(火薬)、鹿島建設土木工務部長佐藤忠五郎博士に対して感謝する。また測定に際し協力して頂いた鹿島建設技術研究所田村計氏に謝意を表する。

Measurement of Dynamic Characteristics of Rock
with Specially Designed Pick-up Set in Bore-holes
in the Dense Traffic Area

Kajima Construction Co., Ltd.
Ken Zakō
Mitsuo Tōnishi
Disaster Prevention Research Institute
Masao Nishi

The material handled in works of tunnels, dams and so forth in the mountaineous area is mostly rock, but rock can be found in the dense traffic area as well, in subway excavation, for example.

When rock has reasonably low speed of elastic wave transmission and such hardness that mechanized excavation can be executed economically, it is by all means necessary to measure numerically the degree of hardness of rock beforehand in order to determine equipment and methods of excavation.

Unlike in the mountaineous area, however, measurement by ordinary methods is extremely difficult in the dense traffic area.

Measurement of modulus of elasticity of rock, using a specially designed pick-up set in bore-holes, was successfully made in a certain subway excavation job.