

ボーリング孔を利用した坑道内の地震探査

京都大学防災研究所 正員 吉川 宗 治
鹿 島 建 設 正員 佐藤 忠五郎
阪 神 コンサルタンツ 正員 ○望 月 宏

1. 緒 言

青函トンネル 北海道方の掘進は、海底部に関しては作業坑掘進中に、昭和49年1月8日距離程32K747地点において、異常出水と崩壊事故を伴う事故発生以来、鋭意復旧と掘進に努力中であるが、既に一ケ年を経過せるにもかかわらず、作業坑、先進導坑ともに、事故地点に存在する断層のため、いまだにこの断層帯を突破できず、現在工事は非常に難行している。

本探査は昭和49年12月初～12月終にわたり実施したもので、探査の目的は、上述の施工状況にかんがみ、作業坑、先進導坑の切羽前方に存在する断層の実態を把握し、今後の両導坑と本坑の設計施工に関する基礎資料を得ることである。

探査箇所の地質は前回(1)とほぼ同様である。

2. 探 査 方 法

2-1. 探査に用いた機器

地震計： 米国GEO-SPACE社製HS-J型地震計。固有共振周波数は、作業坑では28Hz、先進導坑では14Hz。

増幅器： 作業坑では応用地質調査事務所製のTR-3型増幅器1台、先進導坑では北斗理研製作社製のGA-126S型増幅器2台。

記録器： 三栄測器株式会社製の300A型（作業坑）およびMR-101A型、MR-102B型（先進導坑）電磁オシログラフ。ガルバノメーターは同じく三栄測器株式会社製のG-300A型。なお、測定時のオシログラフの紙送り速度はすべて60 cm/secである。

測定系の総合特性を図-1に示す。

なお、ショットマークは、ボーリング孔内に装填した成型爆薬にリード線を巻き、爆発によりこのリード線が切れた瞬間を記録する方法をとった。

2-2. 作業坑切羽付近におけるボーリング孔を使った先進探査

① 探査位置

探査位置図を図-2に示す。

地震計設置点は、作業坑ではSR-1、SR-2、SR-3、SR-4の4箇所であり、先進導坑ではPR-1～PR-8の8箇所である。

以上の設置点においてはすべて地震計3成分（坑道または横坑の側壁に垂直な方向をV、側壁上で斜坑と切羽を結ぶ方向をL、側壁上でLに直角の方向をTとした）を設置した。

設置点の坑道底よりの高さは1.0m前後とした。

発破孔として用いたボーリング孔は、TOP-Lボーリング孔および復旧工事調査ボーリング孔の2孔である。

発破点深度は、TOP-Lボーリング孔では5.0、10.0、15.0、20.0、30.0、43.6、60.0、67.0、83.0、99.0 mであり、復旧工事調査ボーリング孔では5.0、10.0、15.0、38.0、49.3 mである。

なお、本調査においては、作業坑のボーリング孔の発破を作業坑および先進導坑で測定するため、両坑道の連絡用およびショットマーク用の電線を通す連絡坑が必要となるが、この連絡坑としては

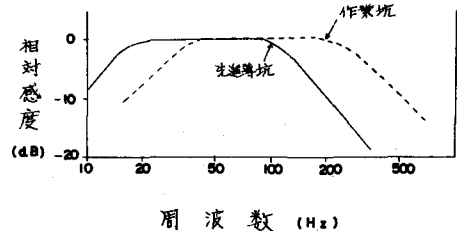


図-1 測定系の総合特性

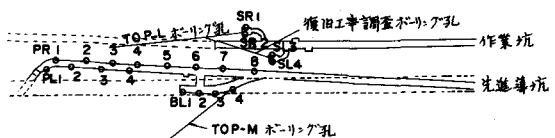


図-2 探査位置図 (平面図)

前回(1)と同様作業坑距離2550m付近の第2通気立坑を用いた。

② 地震計固着方法および③発破方法については前回(1)と全く同様である。

2-3. 先進導坑のTOP-Mボーリング孔を利用した先進探査

① 探査位置

地震計設置点は、先進導坑のPL-1～PL-4, BL1～BL-4の8箇所である。

これらの設置点においてはすべて地震計3成分を設置した。

発破孔として用いたボーリング孔はTOP-Mボーリング孔である。

発破点深度は10.0, 20.0, 30.0, 41.2, 53.0, 62.5 mである。

② 地震計固着方法および③発破方法については前回(1)と全く同様である。

3. 探査結果

3-1. 作業坑切羽付近におけるボーリング孔を使った先進探査

TOP-Lボーリング孔および復旧工事調査ボーリング孔で発破し、SR-1, SR-2, SL-3, SL-4で測定した記録を読み取って、発破点-測定点間のP波, S波の平均速度を求め一覧表にしたものの一例を表-1に示した。

これらの表をもとにして、TOP-Lボーリング孔で発破しSR-1およびSR-2で測定した結果を走時曲線として表現し図-3～図-4に、復旧工事調査ボーリング孔で発破しSL-3, SL-4で測定した結果を走時曲線として表現し図-5～図-6に示した。走時曲線の作成にあたっては、ボーリング孔の孔口と測定点とが同一平面上にないため、ボーリング孔の延長上に測定点より垂線をおろしこの点をボーリング孔の仮の0mとし、仮の0mと真の0mの間にはボーリング孔口近傍の地山と同一の地山が充填されているものと仮定した。

図-3～図-6より発破点深度によるP波とS波の速度分布を求め、速度分布図として表現したものの一例を図-7に示した。この速度分布図は作業坑平面としてあるが厳密にはTOP-Lボー

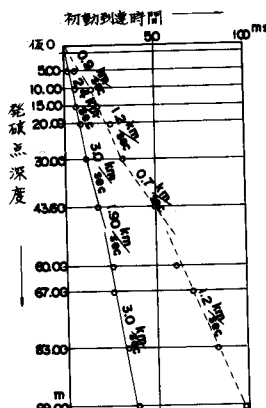


図-3 走時曲線
(TOP-Lの発破点→SR1)

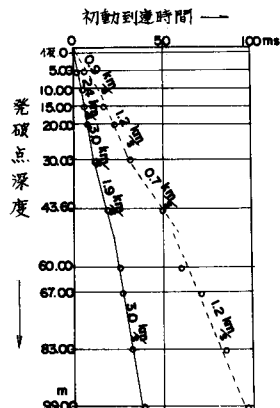


図-4 走時曲線
(TOP-Lの発破点→SR2)

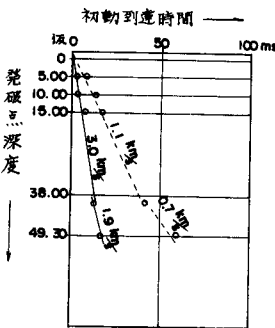


図-5 走時曲線
(復旧工事調査ボーリング孔の発破点→SL3)

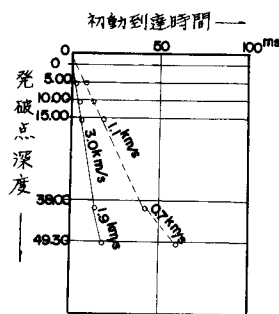


図-6 走時曲線
(復旧工事調査ボーリング孔の発破点→SL4)

表-1 速度および基礎物理定数表の一例
発破孔 TOP-L ボーリング孔
発破点深度 99.00 m

位置	VP (km/s)	Vs (km/s)	密度 (g/cm³)	ポアソン比	E (10⁹ dyne/cm²)	G (10⁹ dyne/cm²)	ケーシング 径 (mm)
右側注入口							
SR1	2.64	1.03	2.0	0.41	6.1	2.2	
SR2	2.65	1.04	•	0.41	6.2	2.2	
左側注入口							
SL3	2.52	1.07	•	0.39	6.5	2.3	
SL4	2.47	1.00	•	0.40	5.7	2.0	

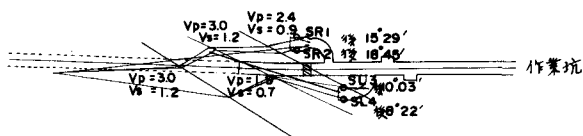


図-7 速度分布図 (作業坑平面)の一例

リング孔と復旧工事調査ボーリング孔を含む平面内の速度分布図のことである。速度分布図には、速度分布の他に各発破点から測定点までの波動の経路および3成分測定の結果得られた各測定点における波動の到達方向を示している。波動の到達方向は矢印で示し、「後」は矢印が紙面の裏に向うベクトルであることを示し、「前」は矢印が紙面の表に向うベクトルであることを示す。

次に、TOP-Lボーリング孔および復旧工事調査ボーリング孔で発破し、先進導坑のPR-1～PR-8で測定した記録を読み取って、発破点一測定点間のP波S波の平均速度を求め一覧表にしたものの一例を表-2に示した。

この表をもとに作業坑-先進導坑間のP波とS波の速度分布を求め、速度分布図として表現したものの一例を図-8に示した。この速度分布図の作成にあたって特筆すべきことは $V_p=1.9\text{km/s}$ 、 $V_s=0.7\text{km/s}$ のブロックの斜坑方の境界を決定する際にTOP-Lボーリング孔の10.0、20.0m、復旧工事調査ボーリング孔の10.0、38.0mで発破し、PR-1～PR-8で測定した記録の反射波を利用したことである。反射波の記録の一例を図-9に示す。この図を見ればわかるように、反射P波は比較的判別しやすいが、S波は地山の悪さを反映して減衰が激しく、反射S波は判別が困難である。したがってここで用いた反射波はP波のみである。今後S波の反射波をも利用できるようにするためには、発震源により一層の工夫を加えとか、記録をデーターレコーダーでとりその解析方法に工夫を加えとかが必要である。

3-2. 先進導坑のTOP-Mボーリング孔を利用した先進探査

TOP-Mボーリング孔で発破し、BL-1～BL-4、PL-1～PL-4で測定した記録を読み取って、発破点一測定点間のP波S波の平均速度を求め一覧表としたものの一例を表-3に示した。

これらの表をもとにして、TOP-Mボーリング孔で発破しBL-4で測定した結果を走時曲線として表現し図-10に示した。

図-10より発破点深度によるP波とS波の速度分布を求め速度分布図として示したものの一例を図-11に示した。この分布図によると、作業坑平面の速度分布図および作業坑-先進導坑縦断面の速度分布図にみられる $V_p=1.9\text{km/s}$ 、 $V_s=0.7\text{km/s}$ のブロックに相当するものと考えられる $V_p=2.0\text{km/s}$ 、 $V_s=0.7\text{km/s}$ のブロックがみられ、このブロックはTOP-Mボーリング孔深度53.0mの点から切羽方へ35m程度は先進導坑と平行に走っているようである。このブロックがさらに切羽方へどのようにのびているかは地震探査結果か

表-2 速度および基礎物理定数表の一例

発破孔 TOP-L ボーリング孔
発破点深度 99.00 m

位置	V_p (km/s)	V_s (km/s)	深度 (m)	ポアソン 比	E (10^9kg/cm^2)	G (10^9kg/cm^2)	ケーシング (mm)
PR1	2.72	1.14	2.0	0.39	7.4	2.7	
2	2.61	1.07	"	0.40	6.6	2.3	
3	2.64	1.06	"	0.40	6.4	2.3	
4	2.62	1.07	"	0.40	6.6	2.3	
5	2.55	1.00	"	0.41	5.8	2.0	105mm
6	2.50	1.00	"	0.41	5.8	2.0	
7	2.38	1.00	"	0.39	5.7	2.0	
8	2.43	1.01	"	0.40	5.8	2.1	

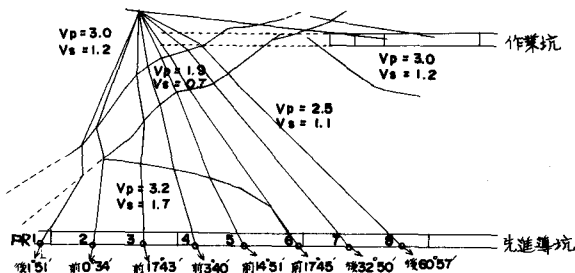


図-8 速度分布図(作業坑-先進導坑縦断面)の一例

作業坑頂部付近におけるボーリング孔を使った先進探査(先進導坑変遷)
発破点TOP-L 10.00m 49.12.14 DY 成室通風

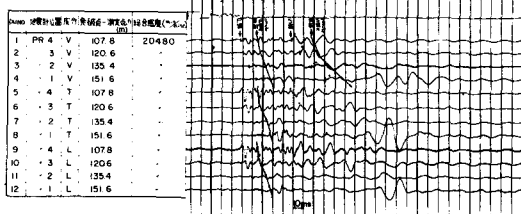


図-9 反射波の記録の一例

表-3 速度および基礎物理定数表の一例

発破孔 TOP-M ボーリング孔
発破点深度 62.54 m

位置	V_p (km/s)	V_s (km/s)	深度 (m)	ポアソン 比	E (10^9kg/cm^2)	G (10^9kg/cm^2)	ケーシング (mm)
BL1	2.56	0.99	2.0	0.41	5.6	2.0	
2	2.60	1.02	"	0.41	6.0	2.1	
3	2.64	1.05	"	0.41	6.4	2.3	
4	2.73	1.09	"	0.41	6.8	2.4	105mm
PL1	2.49	1.10	"	0.38	6.8	2.5	
2	2.54	1.04	"	0.40	6.2	2.2	
3	2.49	1.00	"	0.40	5.7	2.0	
4	2.77	1.21	"	0.38	8.3	3.0	

らは不明であるが、ボーリング調査結果および先進導坑迂回坑掘削結果からみると右側へ折れまがっているようである。この折れまがり点は不明であるし、また地震探査結果によるこのブロックと、ボーリング調査結果および先進導坑迂回坑掘削結果から推定したブロックとが同一のものかどうか不明である。

4. 探査結果による地山区分

表-4の基準により地山区分した結果を図-12～図-14に示した。これらの図において“ハッチ”で示した部分は地質的解釈により同一区分のものより若干悪い状態を示す。ただし区分Ⅴのみは若干良い状態を示す。

なお、ポアソン比と動弾性ヤング率が同じ区分に属さない場合はどちらか悪い方に区分した。

5. 結 言

以上の調査結果を総合的に取りまとめて、土木工学的に判断すれば次のようになる。

(イ) 作業坑におけるヘドロ層の突破に際しては、切羽において鏡が常時押されるであろうことを考慮に入れて、慎重に施工法を検討することが望ましい。(ロ) 本坑の掘削にあたってこのヘドロ層を突破するためには、地質の悪化に伴って真円断面の施工を考えれば、本坑の掘削断面積は120㎡あるいはそれ以上と考えられるので、いかなる工法によるにせよ、例えば上半施工法によるものとすれば上半部の掘削断面積が全掘削断面積の1/2以上となることが予想される。すなわち65～70㎡の上半掘削を実施する必要がある、ヘドロ層の突破のためには、より一層慎重で、かつ最も確実な施工法の検討が望ましい。(ハ) さらに先進導坑に平行に現われた $V_p=2.0\text{km/s}$ 、 $V_s=0.7\text{km/s}$ のヘドロ層の傾斜が極めて強く、直立に近いものであれば、本坑掘削時に、現在作業坑切羽で遭遇しているヘドロ層の出現位置以前にこのヘドロ層に遭遇する可能性が大である。

文献 (1)吉川宗治, 佐藤忠五郎, 望月宏:「青函トンネル北海道方坑道内の地震探査」, 第9回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要, 土木学会岩盤力学委員会, 1975

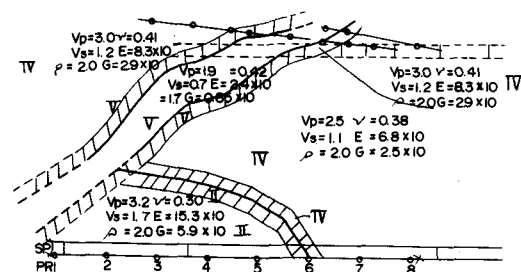


図-13 地山区分図

(作業坑-先進導坑縦断面)

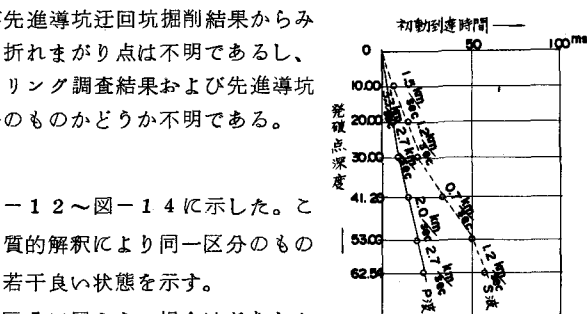


図-10 走時曲線

(TOP-Mボーリング孔の発破点
→BL4)

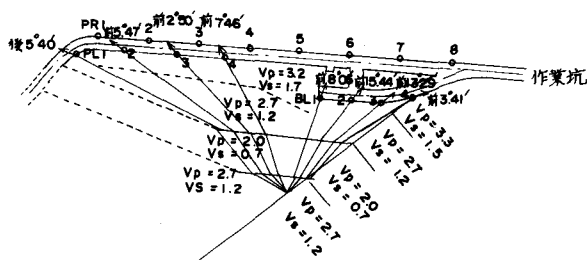


図-11 速度分布図(先進導坑平面)の一例

表-4 地山区分の基準

物理定数	区分Ⅰ	区分Ⅱ	区分Ⅲ	区分Ⅳ	区分Ⅴ
ポアソン比 ν	0.25	0.33	0.40	0.42	0.50
動弾性ヤング率 E ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)	15以上	~ 8	~ 4	4以下	

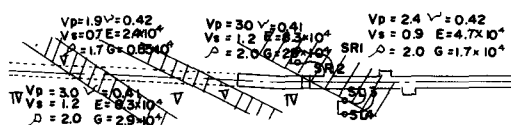


図-12 地山区分図

(作業坑平面, 施工基面)

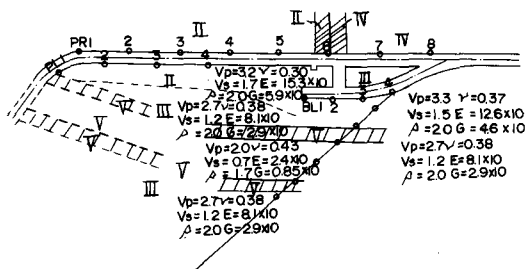


図-14 地山区分図(先進導坑平面)

Seismic Prospecting in Tunnels using Bore-holes

by Kyoto University
Sōji YOSHIKAWA

Kajima Corporation
Chūgorō SATOH

Hanshin Consultants
Hiroshi MOCHIZUKI

Authors executed seismic prospecting in Seikan Tunnel, Hokkaido side, using three bore-holes.

The purposes of this prospecting are as follows;

(1) predicting the conditions of faults where side service tunnel and pilot tunnel will be excavated,

(2) predicting the conditions of rock-masses where main tunnel, side service tunnel and pilot tunnel will be excavated.

Physical constants (Poisson's ratio, dynamic Young's modulus and rigidity) of rock-masses are obtained in and inter these tunnels, side service tunnel and pilot tunnel, and authors attained these purposes.

The features of this prospecting are as follows;

(1) observing three components (vertical, tangential and longitudinal component) of seismic waves,

(2) trying to use reflected waves from faults.

These results are explained in detail in this paper.