

犬挟トンネル坑内
切羽前方地質検出実験報告書

平成 7 年 1 月

犬挟トンネル現地適用グループ

〔建設省土木研究所
株式会社 熊谷組
日本物理探鑛株式会社
復建調査設計株式会社〕

「Copyright © (1995) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

犬狹トンネル坑内 切羽前方地質検出実験報告書

建設省土木研究所	環 境 部	部 長	竹林 征三
	環境部 地質研究室	室 長	中村 康夫
		主任研究員	稲崎 富士
株式会社熊谷組	技術本部応用技術部 地質基礎グループ	研 究 員	倉橋 稔幸
		副 部 長	三谷 哲
		係 長	飯酒孟久夫
日本物理探鉱株式会社	開 発 部	副 部 長	渡辺 文雄
		技 術 主 任	河村 茂樹
		課 長	原口 強
復建調査設計株式会社	東京事務所地質調査課 技術研究所 地質調査部	主任研究員	西 邦正
		主 任	松木 宏彰

要 旨

本報告書は、建設省土木研究所が民間11社と平成5年度より取り組んでいる共同研究「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」のうち、犬狹トンネル現地適用実験グループが平成5年度に実施した2回のトンネルHSPの現地検証実験の結果をとりまとめたものである。

犬狹トンネルは、建設省が一般国道313号の鳥取・岡山の県境部に掘削中の総延長2,500mの道路トンネルである。本トンネルでは、事前調査の段階で推定された断層破碎帯及び熱水変質帯区間に対して、当初設計パターンは側壁導坑先進掘削工法(DⅢb)を計画していた。本検証実験は、トンネルHSP法探査による当該不良地質の確認と、施工中調査としての同法の適用性、すなわち探査結果の施工への反映法についての検討を目的として実施したものである。

探査実験位置は、坑内で実施した2回の水平ボーリング調査に合わせて設定した。解析処理については、トンネル軸に対して斜交した反射面の傾斜・位置を復元するため、二次元マイグレーション処理を行ない、解析断面を求めた。また、坑内水平ボーリング結果と切羽観察記録等の資料をもとに地質状況を復元し、復元地質と解析断面上の反射面および施工実績との対比を行ない総合的な考察を加えた。

キーワード：トンネルHSP法、犬狹トンネル、現地実験、地質復元、切羽前方予測

ま え が き

建設省土木研究所が、民間企業11社とともに平成5年度より3カ年計画で実施している共同研究「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」では、新しい切羽前方探査法であるトンネルHSP法探査技術の確立を目指して解析技術の開発、現地調査実験、基準化作業等を推進している。共同研究のサブグループである犬伏トンネル現地適用実験グループでは、その一環として平成5年度に計2回にわたって現地検証実験を行なった。

犬伏トンネルは、建設省中国地方建設局倉吉工事事務所が、一般国道313号の鳥取・岡山県境部で掘削中の総延長2,500mの道路トンネルである。NATMによる上半先進ショートベンチ工法で、平成6年12月末日現在で坑口から1840mまで掘削されている。本トンネルでは、事前調査で想定された破碎帯・変質ゾーンの確認のために、坑内から長尺水平ボーリングを計2回実施しており、これらのボーリングで確認された地山不良部を探査対象として、1回目のHSP現地探査実験を平成5年10月9～10日に、2回目を同年12月18～19日に実施した。

本報告書は、犬伏トンネルにおけるHSP法の解析結果と地質状況や施工実績との対比や、測定・解析処理の検討課題についてとりまとめるとともに、同トンネルの工事状況、設計施工上の問題点、坑内地質、設計変更の検討経緯などを記載することで、トンネルHSP法の適用性について総合的に報告する。

土木研究所が実験・調査計画の立案・指導と総括を、熊谷組が設計・施工計画と掘削実績についての分析を、日本物理探査がトンネルHSP法の現地探査・解析を、復建調査設計が切羽観察結果の解析と掘削実績の地質面からの解析を、それぞれ分担した。

平成7年1月

地質研究室長

中 村 康 夫

目 次

まえがき

1. 工事概要	1
2. トンネル周辺の地形・地質	2
2.1 地形概要	2
2.2 地質分布	2
2.2.1 地質概要	2
2.2.2 地質構造	2
2.2.3 分布地質の特徴	6
3. 当初設計および事前調査	7
3.1 当初設計の概要	7
3.2 坑内水平ボーリング	7
3.2.1 調査概要	7
3.2.2 水平ボーリングの調査結果	8
3.2.3 室内調査・試験結果	8
3.3 切羽観察結果	27
3.3.1 探査対象範囲の地質	27
3.3.2 地質構造の方向性	27
3.3.3 水平ボーリングとの関係	27
4. 設計変更および施工実績	32
4.1 設計変更	32
4.1.1 基本的考え方	32
4.1.2 補助工法の選定	32
4.1.3 1回目水平ボーリング結果を受けた掘削工法の検討	35
4.2 施工実績	37
5. トンネルHSP	42
5.1 探査目的	42
5.2 測定方法	42
5.2.1 起振方法	42

5.2.2	受振方法	45
5.2.3	記録方法	45
5.3	解析方法	47
5.3.1	屈折法による解析	47
5.3.2	HSPによる解析	47
5.4	解析結果	49
5.4.1	屈折法による解析結果	49
5.4.2	HSPによる解析結果	51
6.	考 察	67
6.1	トンネルHSP解析結果と地質状況の関係	67
6.1.1	第1回計測結果との地質対比	67
6.1.2	第2回計測結果との地質対比	68
6.2	測定方法についての検討	68
6.2.1	測定ジオメトリ	68
6.2.2	オフセット距離	77
6.2.3	薬 量	85
6.2.4	測定機器	85
6.2.5	モード変換波	86
6.2.6	波動の波長とS波探査	87
6.3	処理方法についての検討	89
6.3.1	基本処理フローにおける検討項目	89
6.3.2	今後の課題について	91
7.	まとめ	92
7.1	トンネルHSPの適用範囲	92
7.2	問題点と課題	92
7.3	施工管理に取り込んだトンネルHSP	93

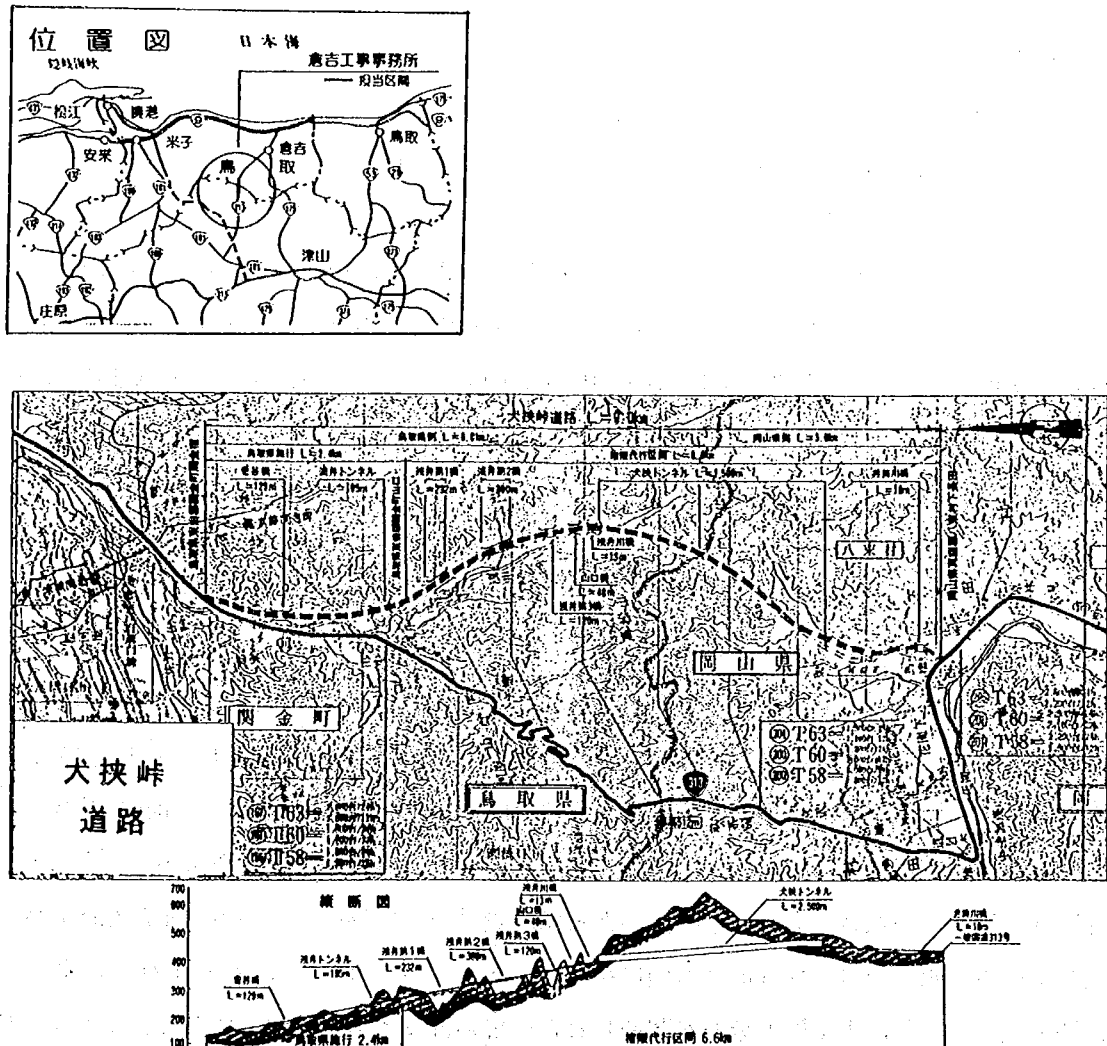
参考文献

1. 工 事 概 要¹⁾

一般国道313号は、鳥取県倉吉市を起点とし、岡山県勝山町・高梁市を経由して広島県福山市に至る総延長175kmの路線で、昭和45年4月に陰陽連絡幹線道路網の一部として国道に昇格した。

この路線のうち鳥取・岡山県境にある犬挟峠付近の現道は、地形が急峻で約4kmの区間で標高差300mを上下しなければならないため縦断・平面線形が非常に悪くまた幅員も狭いことから、交通安全上早期改良が望まれていた。また冬季における交通確保、中国地方の中部生活圏における山陽側への最短道路線としての位置づけからも本区間の整備が強く望まれていた。このため、昭和57年度より調査が行われ、昭和62年度から峠部の総延長9.0km区間が事業化された。

犬挟トンネルは、犬挟峠の東方約3.0km付近の高松山（標高574.5m）と仏ヶ仙（標高743.5m）のほぼ中間点を貫き、岡山県側の蒜山高原に至る延長2,500mのトンネルである（図-1.1）。中国地方建設局管内の供用中及び建設中のトンネルの中では、一般国道2号の防府第3トンネル（延長1,833m）を凌ぎ、最も長いトンネルとなる。



2. トンネル周辺の地形・地質

トンネル施工前に、事前調査として地表踏査、ボーリング調査および弾性波探査等が実施されている。ここではこれらの調査報告書²⁾³⁾と文献⁴⁾を参考にして、トンネル周辺地域の地形・地質について概述する。

2.1 地形概要

トンネル施工地域周辺の特徴的な地形として、鳥取・岡山県境を画して東西に延びる中国山地のうち、蒜山三座～高松山～仏ヶ山を連ねる標高600～1,000mの山稜地形をあげることができる。この山稜を境として両側の地形は大きく異なっている。すなわち、鳥取県側には急峻な山地地形が発達するが、岡山県側には盆地が発達し、標高400m前後の平坦面とその縁辺部に段丘・丘陵性地形が認められる。

鳥取県側の山地は、下刻が進み南北・東西方向の狭長な谷地形が発達する。とりわけ地域内を流下する小鴨川支流は水量も多く、かつ河床勾配が大であり谷頭での侵食・上部流出が顕著である。

2.2 地質分布

2.2.1 地質概要

トンネル周辺の広域地質図を図-2.1に、トンネル地域の地質層序とトンネルルート沿いの地質縦断面図を表-2.1、図-2.2に示す。

トンネル周辺地域の地質は、中生代白亜紀～新生代古第三紀にかけ遡入した鳥取花崗岩を基盤にしており、これを貫いて高松山を形成する流紋岩類、蒜山盆地を構成する蒜山原層、下位～高位の段丘面基底に分布する段丘堆積物及び大山火山噴出物等で成り立っている。また、山麓部及び沢部にかけて崖錐性の堆積物が分布する。

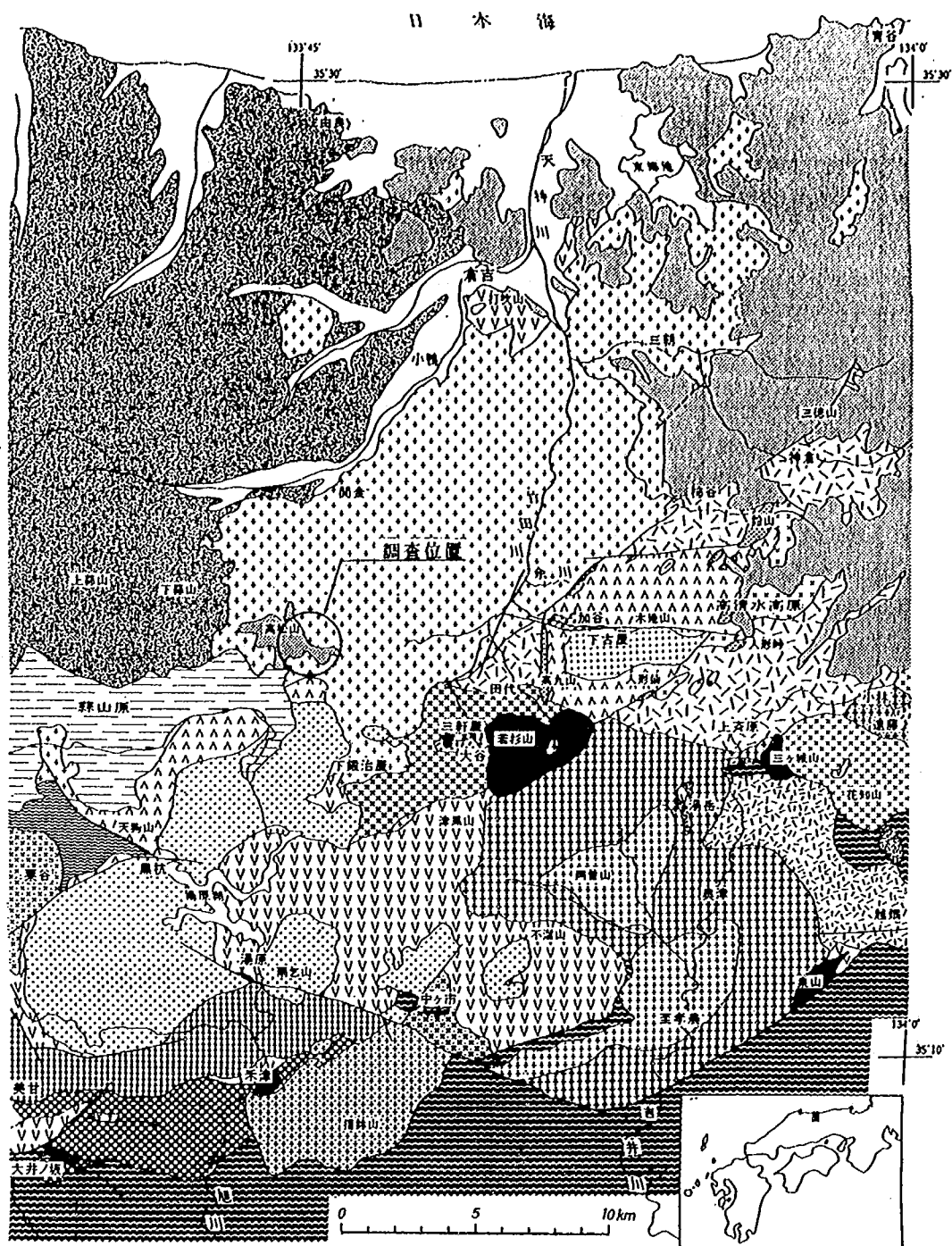
2.2.2 地質構造

花崗岩と流紋岩の地質境界は、鳥取県側の地表露頭および岡山県側坑口付近（測線位置No.75+10m）で実施されたボーリングにより確認されている。

鳥取県側の地質境界は、路線測点No.60+20m付近の地表斜面に認められ、概ね標高610m前後の遷急線近傍にあるものと推定される。この境界は地表部では約35°で南に傾斜しており、境界付近の流紋岩の最下位部約20mは灰白色の石英安山岩質の流紋岩からなり、その上位で赤褐色流紋岩に変わっている。境界部には幅数cmの灰白色粘土が介在するとともに、流紋岩中に花崗岩が捕獲される。岩相境界付近は風化変質が顕著であり、土砂化が進んだ変質ゾーンを形成している。また花崗岩は赤褐色に変色している。両岩相の境界は旧地形面に相当し、後述するようにトンネル坑内での水平ボーリング、切羽観察で一部に古土壌の分布が認められた。境界面は大きく起伏しており、トンネル坑内では約8°の南落ちであった。

表-2.1 地質層序

地質年代		地 層 名	記 号	層 相 及 び 分 布
第 四 紀	沖 積 世	河床堆積物	R d	現河床に分布するマサ土及び巨礫
		崖錐性堆積物	d t	沢・山腹緩斜面に分布する崩積土
		段丘堆積物	T d	段丘面下に分布、砂礫層
	洪 積 世	大山火山噴出物	L	黒ボク・ローム、凝灰質粘土・浮石
		蒜 山 原 層	H	砂質土（固結シルト）、細砂～微細砂 シルト・細砂互層、凝灰質粘土
第 三 紀	鮮 新 世 ～ 始 新 世	高松山流紋岩	R y 1	赤褐～淡赤紫、石英・長石・黒雲母の斑晶を含む、流理構造
			R y 2	灰白石英安山岩ないし石英斑岩状
	始 新 世 ～ 暁 新 世	貫 入 岩 類	D k	アプライト・安山岩質岩脈
第 三 紀	暁 新 世	鳥取花崗岩	G r	優白色粗粒黒雲母花崗岩、風化に伴ってマサ深層風化



凡 例			
	沖積層		鳥取花崗岩
	大山・群火山岩類		高清水花崗岩
	群火山岩類		人形峠花崗岩
	新第三系		黒谷花崗岩
	湯原沖文象岩		檜林山花崗岩
	下古層花崗岩		所瀬花崗岩
	鉛山文象岩		三軒屋花崗閃綠岩
	古第三紀火山岩類		小林花崗閃綠岩
			細粒黒雲母花崗岩(未区分)
			中々市花崗閃綠岩
			阿曾山花崗岩
			奥津花崗閃綠岩
			越後花崗岩
			赤川花崗閃綠岩
			湯原北花崗閃綠岩
			湯原南石英斑れい岩
			奥津質斑状岩類
			斑れい岩・石英斑れい岩類
			白雲紀火山岩類
			三郎更成岩類

図-2.1 三朝・奥津・湯原地域の地質図⁴⁾

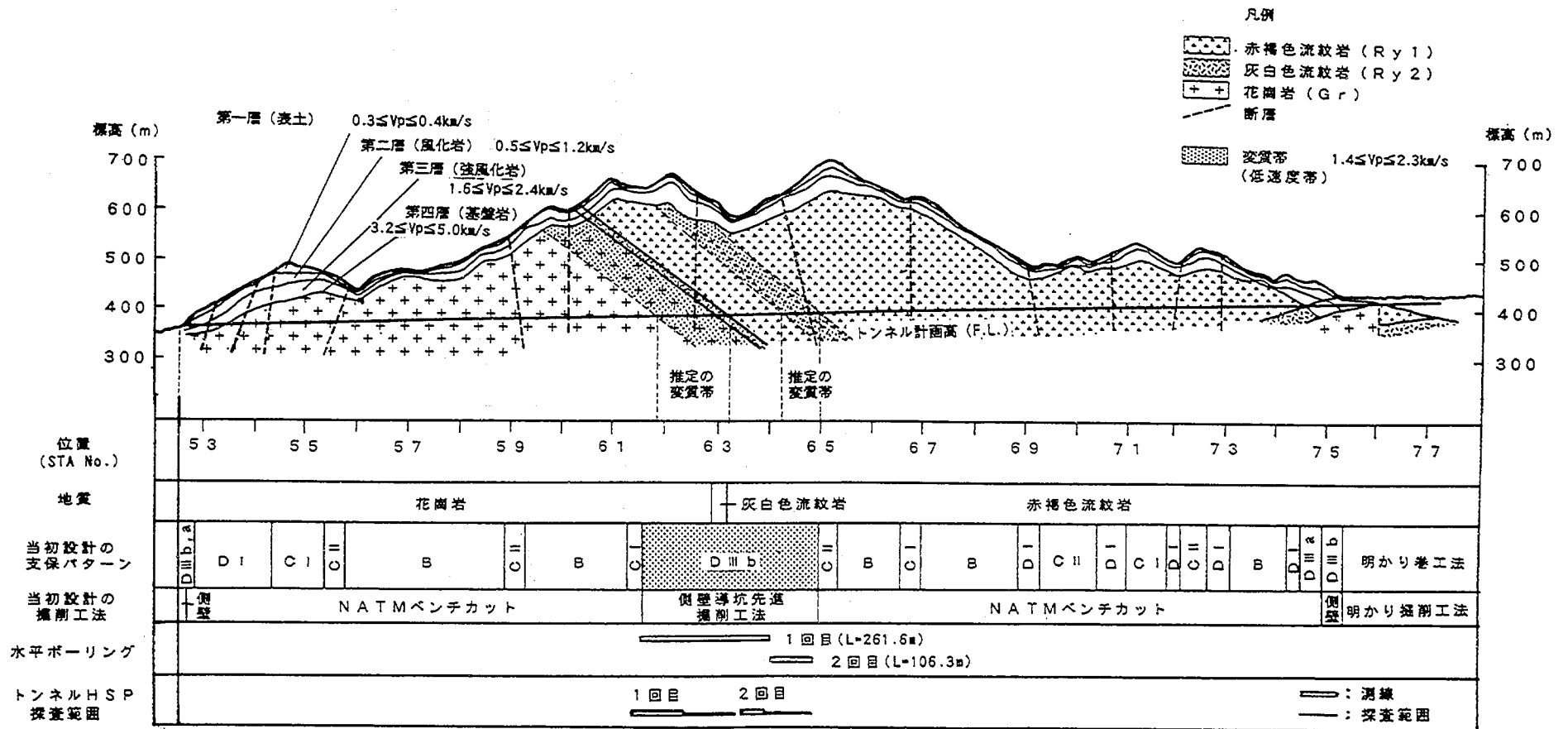


図-2.2 事前調査段階での犬伏トンネルルート沿いの地質縦断図

岡山県側の地質境界は、路線西側の農道切土面で確認される。マサ化の進んだ花崗岩を覆って赤茶色の流紋岩が分布する。境界部は凹凸があり、石英安山岩質流紋岩相は欠如する。

断層破碎帯は空中写真判読からのリニアメント抽出や地表踏査・弾性波探査などからトンネル区間内で10数本が推定されている。

2.2.3 分布地質の特徴

トンネル区間に出現する地質は、図-2.2に示すように鳥取花崗岩（Gr）、高松山流紋岩（Ry）を主体とし、一部に貫入岩類が分布している。

1) 鳥取花崗岩（Gr）

基盤岩として主にトンネル路線の鳥取方に分布する。粗粒の黒雲母花崗岩（アダメロ岩）を主体とし優白色の塊状岩盤を呈する。地表部では風化変質に伴ってマサ状風化帯を形成し、地表面下数10mに及ぶことも稀でない。トンネル坑内では、カククラサイト化した赤茶色を呈する細粒花崗岩が卓越するが、岩相変化が認められ緑泥石化した細粒斑礫岩や熱変質をあまり受けていない石英閃緑岩質斑岩が出現する。

2) 流紋岩（Ry）

大山・蒜山火山と前後して噴出した火山岩と考えられる。赤茶～赤紫色の紫蘇輝石を含有する流紋岩（Ry 1）、灰白色の石英斑岩ないし石英安山岩質流紋岩（Ry 2）の2種類の岩相が認められ、前者がその主体をなす。石英、斜長石、黒雲母を斑晶として含み、一部では溶結して流理構造が認められる。

堅岩部は塊状の新鮮岩であるが、花崗岩に比較して軟質でありハンマーの強打で割れる。風化変質に伴って土砂化が顕著であり砂～粘土状を呈する。破碎質ゾーンでは断層粘土を挟在している。

3) 貫入岩類

花崗岩中に脈岩として分布する暗灰～暗緑灰色のひん岩を主体とする。厚さは概ね1.0～2.0m程度である。トンネル軸に対して低角で斜交するものが卓越しており、花崗岩体中に観察された亀裂の方向性とは調和的ではない。幅1.0m未満のアプライト質の小岩脈もしばしば認められた。岩脈自体は極めて堅固であるが、網目状に貫入していることが多く、全体としては亀裂が発達した岩盤となっている。

3. 当初設計および事前調査

3.1 当初設計の概要

本トンネルの当初設計は図-2.2に示すとおりであるが、トンネルの施工上、最も懸念されていた問題は、事前調査によってトンネル測点のNa61+80m～Na65+00m (L=320m) 付近に予測されていた断層破碎帯および花崗岩・流紋岩境界部の変質ゾーンの取扱いである。この区間には地表からの弾性波探査で幅約60mの低速度帯も確認されていた。また、土被りが250m程度あることから地山の塑性化による大きな地圧と高圧湧水の発生が懸念されていた。これら断層破碎帯及び変質ゾーンは地表踏査と弾性波探査からの推定であり、その位置や性状が十分に把握されていた訳ではない。

従って、当初設計の段階⁵⁾では、土被りの大きい破碎帯及び変質ゾーンであるため塑性地圧を考慮して、この区間の岩質区分はDⅢbとされ、側壁導坑先進上部半断面掘削工法で設計されている。また、Na63+35m～Na64+15mの80m間は、弾性波速度 $V_p=5.0\text{km/s}$ の硬岩であるが、破碎帯・変質ゾーンに挟まれた区間でその位置が定かでないこと、段取り換えが生じることの理由により、全区間がDⅢbとして計画されている。

3.2 坑内水平ボーリング

トンネル測点Na61+80m～Na65+00m (L=320m) 区間の破碎帯・変質ゾーンの詳細は、事前調査の段階では明確にされておらず、前項に述べた通り課題が残されたままで当初設計がなされた。この区間は、

- ① 地山の熱水変質に起因する支持力の不足、地山の塑性化
- ② 高圧集中湧水を伴う切羽崩壊の発生

などが懸念された。このため、実施設計を施工の段階で最終的に決定することを目的として、坑内から水平ボーリングを実施した。

3.2.1 調査概要

坑内水平ボーリングは、平成5年9月～10月（削孔長 $\ell=261.6\text{m}$ ）と平成5年12月末～1月初旬（削孔長 $\ell=106.3\text{m}$ ）の2回に分けて実施した（図-2.2、表-3.1参照）。

当初の計画では、一度にNa61+60m～Na65+00m（穿孔長 $\ell=340\text{m}$ ）区間の削孔を予定していたが、破碎状地山を削孔時に孔壁崩壊が生じ、 $\ell=261.6\text{m}$ で一旦中止せざるを得なかった。初期のボーリング基地は、右側壁Na61+34m～Na61+60m (L=26.0m) 区間に設置された非常駐車帯の下半を利用し、Na61+60.5m地点からトンネル軸のやや外側に向けて上向き 2° で削孔した。一旦ボーリングマシンを撤収した後、約10mのオーバーラップ長を残したNa64+12.5mから再度削孔を開始し、 $\ell=106.3\text{m}$ 地点で終了した。この時は正月の切羽作業停止期間であったため、上半切羽にボーリングマシンを設置することが可能であり、トンネル進行方向に向けて上向き 2° で実施した。

1回目の調査で確認された不良地質は、 $\ell \approx 128\text{m}$ の断層破碎帯（幅2m）と $\ell \approx 260\text{m}$ 付近の破碎状地山であった。2回目の調査では、ボーリング位置が平面的に異なっていたため、1回目 $\ell \approx 260\text{m}$ 付近で確認された破碎状地山はすぐには出現せず、 $\ell \approx 94\text{m}$ （No65+6.5m）付近で破碎状地山（幅2.5m）が確認されて、硬質溶結性凝灰角礫岩が現れた（表-3.1）。

ボーリングマシンは、オイルフィード式ロータリー型（能力1,200m・動力200kv）を使用し、ワイヤーライン工法で削孔した。

1回目水平ボーリングの削孔径は、孔口から170mまでHQ（ $\phi 98\text{mm}/\text{m}$ ）、それ以深はNQ（ $\phi 75\text{mm}/\text{m}$ ）であり、2回目は孔口より29.5mまでP（ $\phi 123\text{mm}/\text{m}$ ）、71.7mまではHQ（ $\phi 98\text{mm}/\text{m}$ ）、それ以深はNQ（ $\phi 75\text{mm}/\text{m}$ ）を用いた。また、孔曲がり測定は村田式を使用した。

3.2.2 水平ボーリングの調査結果

1回目の調査では、削孔長 $\ell = 261.6\text{m}$ 付近まで、ほとんど細粒斑礫岩と花崗岩を主体とし、一部にアプライトとひん岩が認められた。 $\ell \approx 128\text{m}$ 付近は橙褐色を呈するひん岩の破碎ゾーンである。また、 $\ell \approx 260\text{m}$ 付近では砂状の破碎コアとなり、孔壁が崩壊した。

細粒斑礫岩のうち、孔口から115m付近までは、新鮮な部分では長石は透明～半透明であり、有色鉱物（黒雲母、角閃石）は黒色を呈する。これに対し、孔口から130m以深の花崗岩はカリ長石が淡桃色、斜長石が淡緑色を示すと共に、有色鉱物も暗緑色の緑泥色化が認められる。造岩鉱物全体に同様な変質が認められることから、広範囲にわたる変成作用があったと推定される。

湧水量は図-3.1に示す通り、深度250m付近までは、ほぼ100 $\ell/\text{分}$ 以下であったが、それ以深の260m付近では400 $\ell/\text{分}$ に急増し、湧水圧（●印）が9 kgf/cm^2 となった。また、孔曲がりの測定結果を表-3.2、図-3.2に示す。したがって、表-3.1の距離程は実際の切羽位置とは若干異なる。

2回目の調査結果では、1回目水平ボーリングの $\ell \approx 260\text{m}$ で認められた破碎状地山は、オーバーラップ長分を削孔した後にも出現しなかった。これは、不良地山がトンネル軸に対して斜交しているためと考えられる。

孔口より花崗岩が分布しているが、 $\ell \approx 94\text{m}$ 付近に幅約2.5mの破碎状地山が出現し、その後、硬質溶結性凝灰角礫岩が現れている。孔口湧水量は少なく、孔尻で40 $\ell/\text{分}$ 、湧水圧2 kgf/cm^2 が確認されたのみである。

3.2.3 室内調査・試験結果

1) 岩石薄片鑑定

坑内の分布地質を明らかにする目的で、水平ボーリングのコアおよび切羽で採取した岩石について顕微鏡鑑定を行なった。以下にその結果を示すが、1回目のボーリングの掘進方向がトンネル軸とずれているため、コア試料採取位置は実際の切羽位置と多少異なっている。

なお、岩石薄片の鑑定に関しては、島根大学名誉教授三浦清先生の御指導を受けた。

表-3.1 低速度区間の地質調査結果と支保パターン

注) 距離程は実切羽位置とは異なる

距離程	No. 61 +60.5																																																		
	+70					+80					+90					No. 62 +10					+20					+30					+40					+50															
深度 (m)	0					10					20					30					40					50					60					70					80					90					
岩 種	マイクロギャプロ (細粒斑礫岩)										マイクロギャプロ (細粒斑礫岩)										マイクロギャプロ (細粒斑礫岩)																														
コアの状況	①④	②				④				①	③				⑤	③	①	③				①	③				⑤	①	⑤	④				②	④	②				②	④				①	③	①	③			
変更パターン	C II																																																		
実施パターン	C I										C II																																								

距離程	No. 63																																																							
	+50				+60				+70				+80				+90				+100				+110				+120				+130				+140				+150				+160				+170				+180			
深度 (m)	90				100				110				120				130				140				150				160				170				180																			
岩 種	礫岩	ひん岩	マイクロギャプロ (細粒斑礫岩)				ひん岩				硬砂岩	花崗岩	ひん岩	花崗岩				ひん岩	花崗岩				ひん岩	花崗岩				ひん岩	花崗岩																											
コアの状況	③	①	④	④				⑤	②	④	④	⑥	⑥	④	④	⑨	①	②	①				②	①	①	⑤	③	④	⑤	②	①																									
変更パターン	C II		D I (+フォアパイリング等)														D I (部分的にフォアパイリング)																																							
実施パターン	C II						D I						(+ 注入7+7パイリング等)												D I (部分的にフォアパイリング)																															

距離程	No. 64																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	+40	+50				+60				+70				+80				+90				+10				+20				+30																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
深度 (m)	180	190				200				210				220				230				240				250				260				270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
岩 種	花 崗 岩								ひん岩		花崗岩		ひん岩		花 崗 岩																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
コアの状況	①	①			⑤		⑤			③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑤		⑤~⑦		①~③		⑤		⑤~⑦		①~③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③		③~⑦		③			

距 離 程	No. 65																				
	+30	+40		+50		+60		+70		+80		+90				+10	+20				
深 度 (m)	270	280		290		300		310		320		330		340		350	360				
岩 種	花 崗 岩														破 砕 岩 ?	破 砕 岩 ?	溶結性凝灰角礫岩				
コアの状況	③-①-③	③~⑤~⑨		③	⑤~⑦	①~③		⑤	③~⑤		①	③	①	③	⑤~⑨①	③~⑤	①~③	⑨	⑨	①	③
変更パターン																					
実施パターン	D I (部分的にフォアパイリング)																				

凡 例

「コアの状況」: (棒 状)←②→(短柱状)←③→(岩片状)←④→(角礫状)←⑤→(土砂状)

表-3.2 孔曲がり測定結果

孔 番 号	測定深度 (m)	方 位	角 度
1 回 目	0.0	S 50° W	上 向 き 2°
	175.0	S 48.5° W	上 向 き 4°

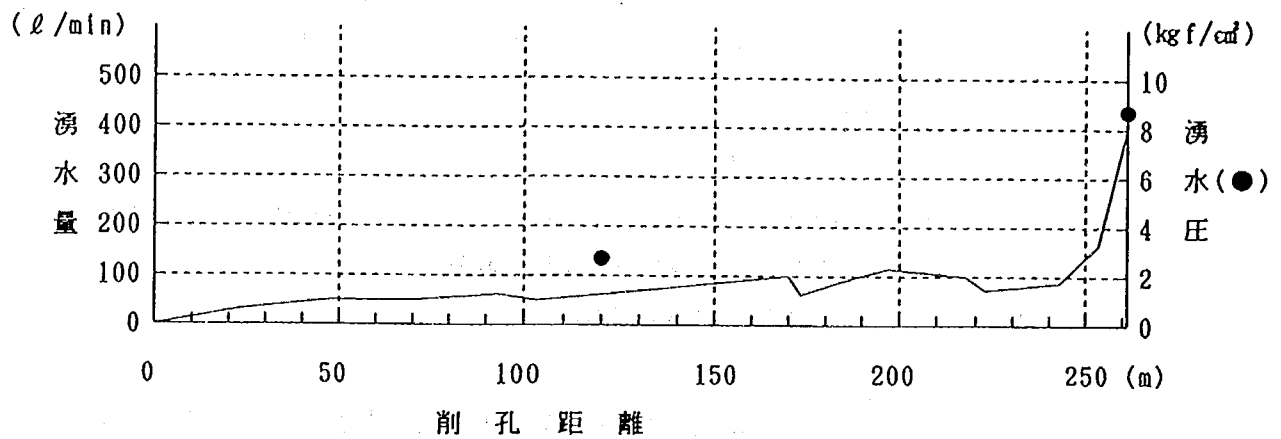


図-3.1 湧水量及び湧水圧測定結果 (1回目)

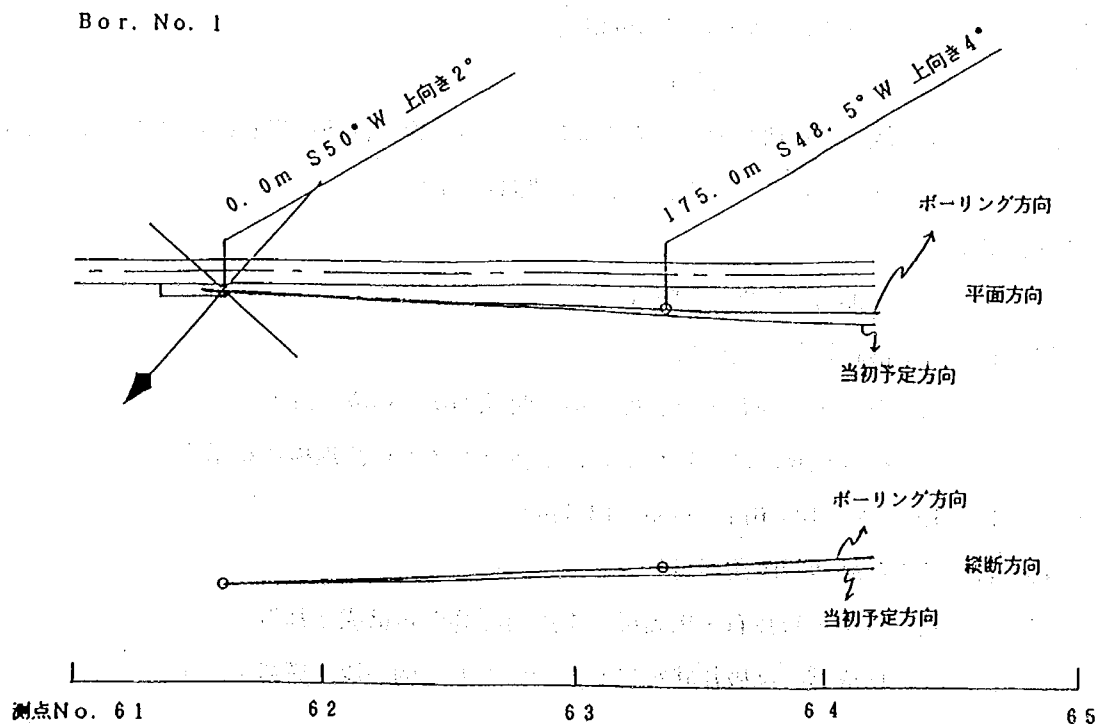


図-3.2 孔曲がり測定結果

① 1 回目水平ボーリング

- No. 1 - 52m ($\ell = 52\text{m}$ No.62 + 12.5m 相当)

岩石名：マイクロギャブロ（細粒斑縞岩）

記載：斜長石・石英・カリ長石・緑泥石・緑簾石・方解石から構成される。

波動消光を示す微細な石英が石基の主体をしめる。斑晶は変質が著しく、オリジナルな組織を失っている（写真-3.1）。

- No. 1 - 80m ($\ell = 80\text{m}$ No.62 + 40.5m 相当)

岩石名：ひん岩

記載：短冊状の斜長石が弱い流理配列を示す。斑晶と思われる部分は変質している。

石英分が少なくアルカリ岩質であると考えられる（写真-3.2）。

- No. 1 - 121m ($\ell = 121\text{m}$ No.62 + 81.5m 相当)

岩石名：ひん岩（石英閃緑斑岩）

記載：微細な短冊状の斜長石が認められる。変質は他の岩石に比べて弱く、熱変質は受けていないと考えられる（写真-3.3）。

- No. 1 - 132m ($\ell = 132\text{m}$ No.62 + 92.5m 相当)

岩石名：花崗岩

記載：石英、カリ長石が主体である。岩石の組織は破碎されカタクラサイト状となっているが、鉱物は熱変質を受けていない。組織的には狭義の花崗岩に相当すると思われる（写真-3.4）。

- No. 1 - 147m ($\ell = 147\text{m}$ No.63 + 7.5m 相当)

岩石名：ひん岩（石英閃緑斑岩）

記載：微細な短冊状の斜長石が認められる。変質は他の岩石に比べて弱く、熱変質は受けていないと考えられる（写真-3.5）。

② 2 回目水平ボーリング

- No. 2 - 98m ($\ell = 98\text{m}$ No.65 + 10.5m)

岩石名：溶結性凝灰角礫岩

記載：石英・斜長石・黒雲母・不透明鉱物から構成される。

構成鉱物は破片状を呈し、全体として弱い流理構造を示す。

- No. 2 - 100.6m ($\ell = 100.6\text{m}$ No.65 + 13.1m)

岩石名：溶結性凝灰角礫岩

記載：石英・斜長石・黒雲母・不透明鉱物から構成される。

構成鉱物は破片状を呈し、全体として弱い流理構造を示す。

③切羽試料

●サンプルNo.K-1 (No.62+41.2m付近 切羽中央)

岩石名：ひん岩

記載：波動消光を示す石英が主体である。斜長石は変質のため再結晶が著しい。

採取試料の中では熱変質の影響が大きいことから、構成岩類のうちでは初期に形成されたものと考えられる。

●サンプルNo.K-2 (No.62+41.2m付近 切羽左側)

岩石名：ひん岩

記載：K-1と同じ組織の岩石であるが、原岩構造はK-1より残っている。

波動消光を示す石英が主体であり、斜長石・角閃石は変質のため一部再結晶する。

緑泥石・方解石が認められる。ひん岩～石英安山岩質の岩脈と考えられる（写真-3.6）。

●サンプルNo.K-3 (No.64+1.15m付近 切羽)

岩石名：ひん岩

記載：K-2, 3と類似組織の岩石であるが、原岩構造はK-2よりも残っている。

波動消光を示す石英が主体であり、斑晶としては斜長石・角閃石が認められ黒雲母・緑泥石・方解石が存在する（写真-3.7）。

●サンプルNo.K-4 (No.65+9.7m付近 切羽の不整合面より上部)

岩石名：溶結性凝灰角礫岩

記載：石英・斜長石・黒雲母・不透明鉱物から構成される。

構成鉱物の組織は破片状を呈し、全体として弱い流理構造を示す。

組織としてはNo.2-98mとNo.2-100.6mと同様である（写真-3.8）。

●サンプルNo.K-5 (No.65+9.7m付近 切羽の不整合面より上部)

岩石名：溶結性凝灰角礫岩

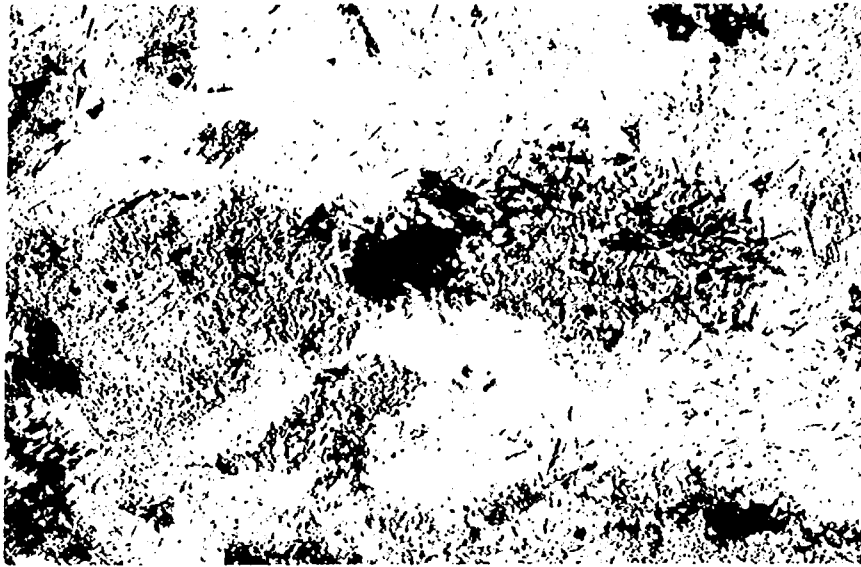
記載：石英・斜長石・黒雲母・不透明鉱物から構成される。

構成鉱物は破片状を呈し、全体として弱い流理構造を示す。

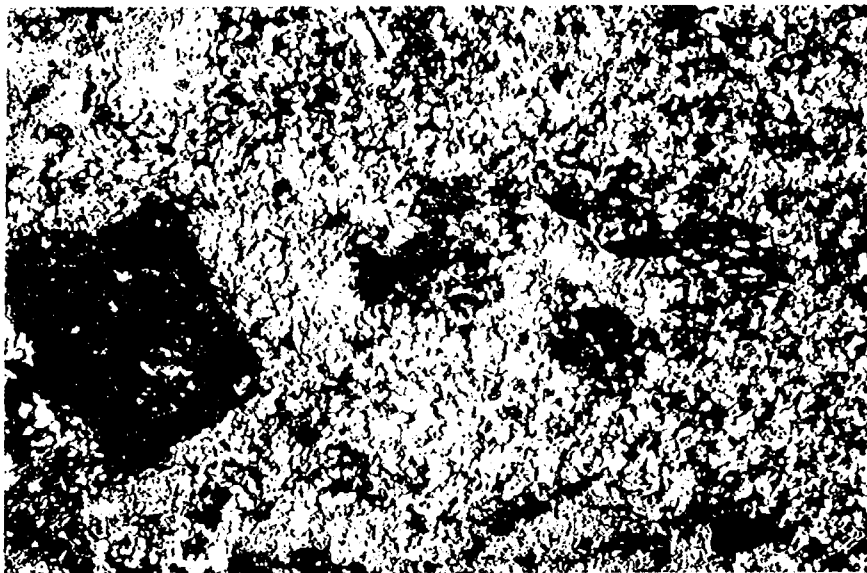
肉眼観察では石英の部分はガラス質に見えた岩石で、鏡下の観察では岩石組織はNo.2-98mとNo.2-100.6mと同様であるが不透明鉱物の量が少ない（写真-3.9）。

2) X線回折

水平ボーリングコアおよび切羽から、変質の認められる箇所の試料を採取して、X線回折により粘土鉱物を同定した。同定には全岩試料と水ひ試料を用いた。解析結果を表-3.3~3.4（コア）、表-3.5~3.6（切羽）に示すが、多くの試料にスメクタイトが同定されている。



オープンニコル



クロスニコル

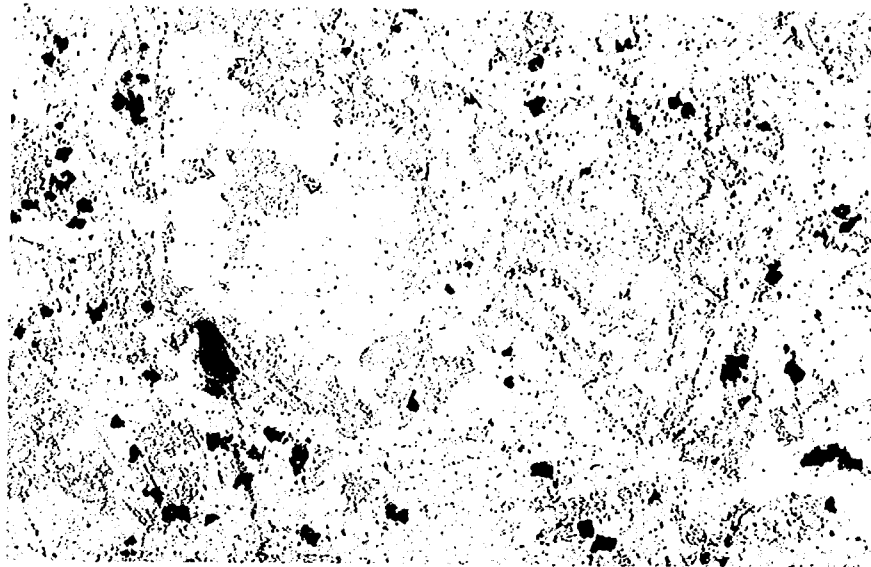
0.5 mm

写真-3.1

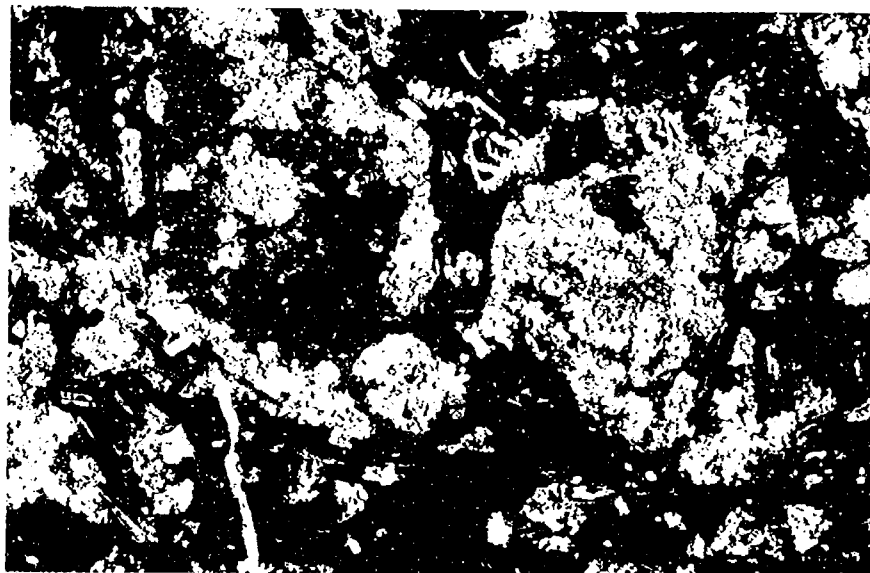
・水平ボーリングNo.1-52m 岩石名：マイクロギャブロ

構成鉱物：斜長石、石英、カリ長石、緑泥石、緑れん石、方解石

波動消光を示す微細な石英が石基の主体をしめる。斑晶は、変質が著しく、オリジナルな組織を失っている。



オープンニコル



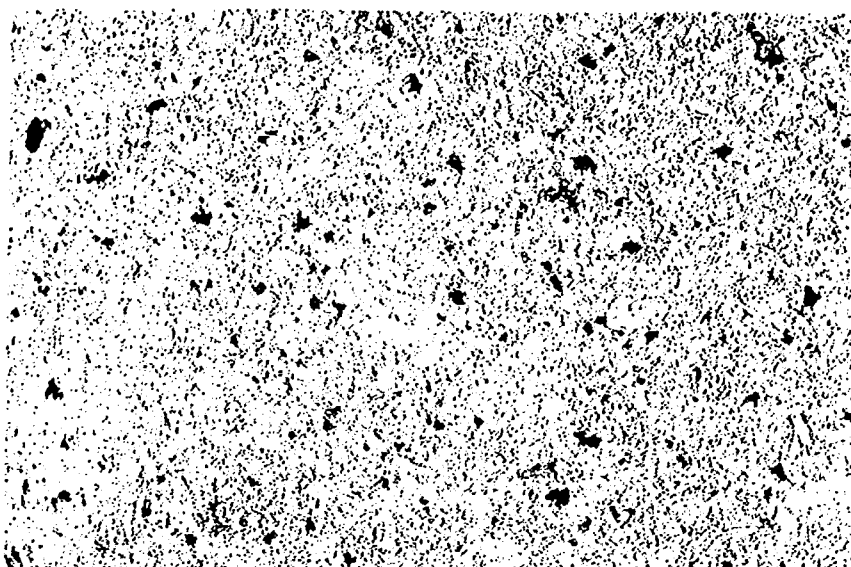
クロスニコル

0.5 mm

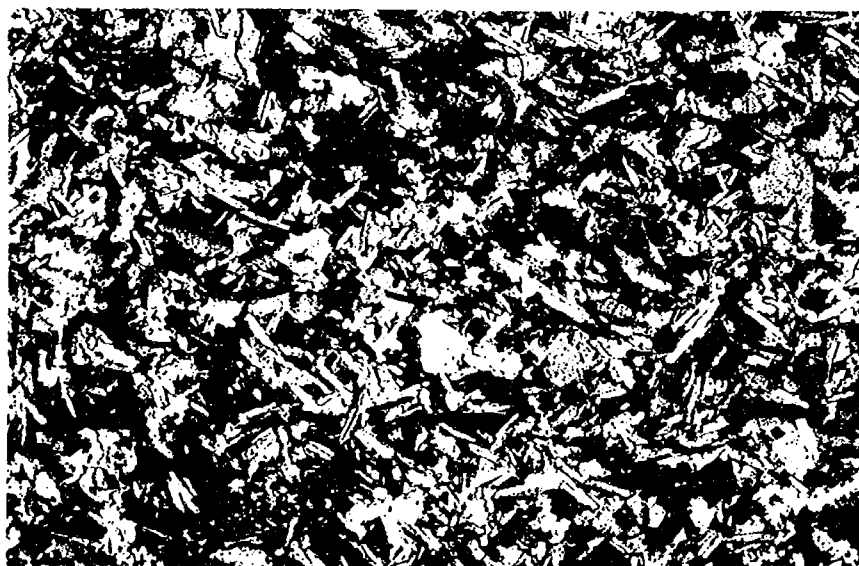
写真-3.2

・水平ボーリングNo. 1-80m 岩石名：ひん岩

短冊状の斜長石が弱い流理配列を示す。斑晶と思われる部分は変質している。
石英分が少なく、アルカリ岩質であると考えられる。



オープンニコル



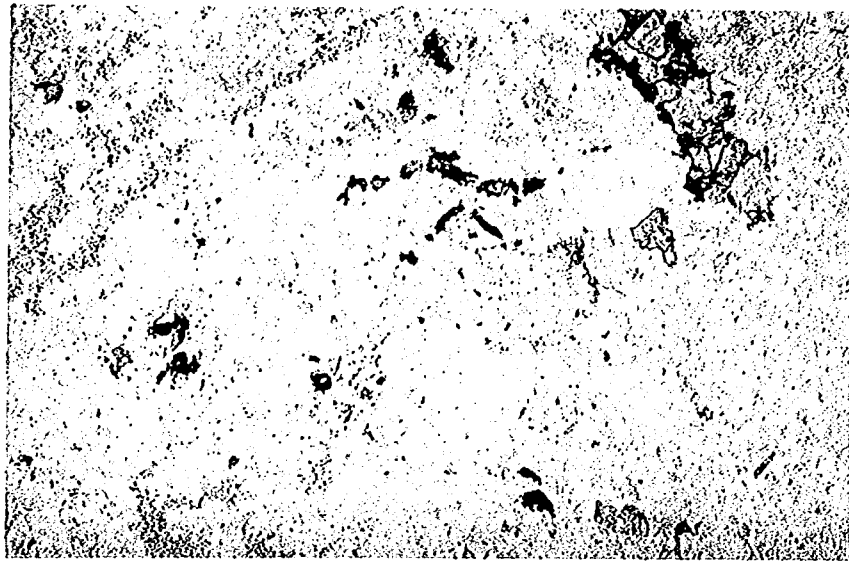
クロスニコル

0.5 mm

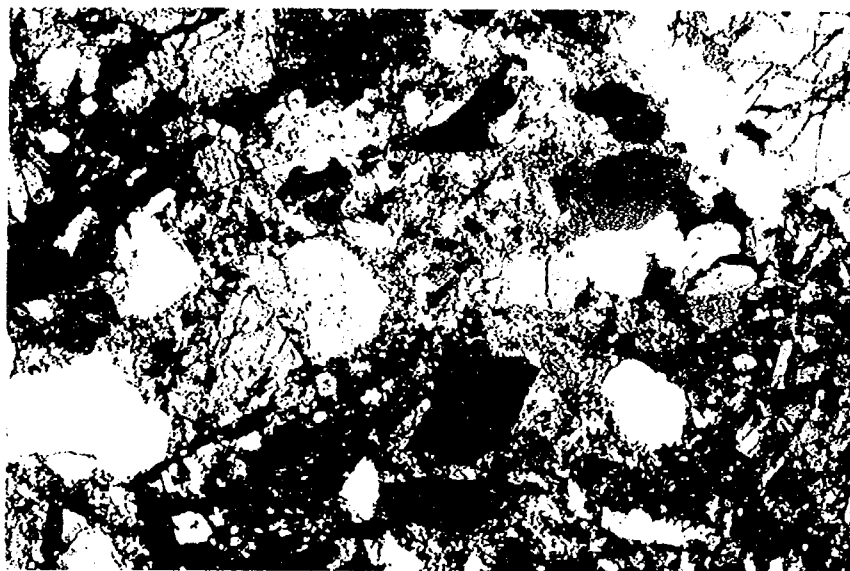
写真-3.3

・水平ボーリングNo.1-121m 岩石名：ひん岩（石英閃緑斑岩）

微細な短冊状の斜長石が認められる。変質は他の岩石に比べ弱く、熱変質は受けていないと考えられる。



オープンニコル



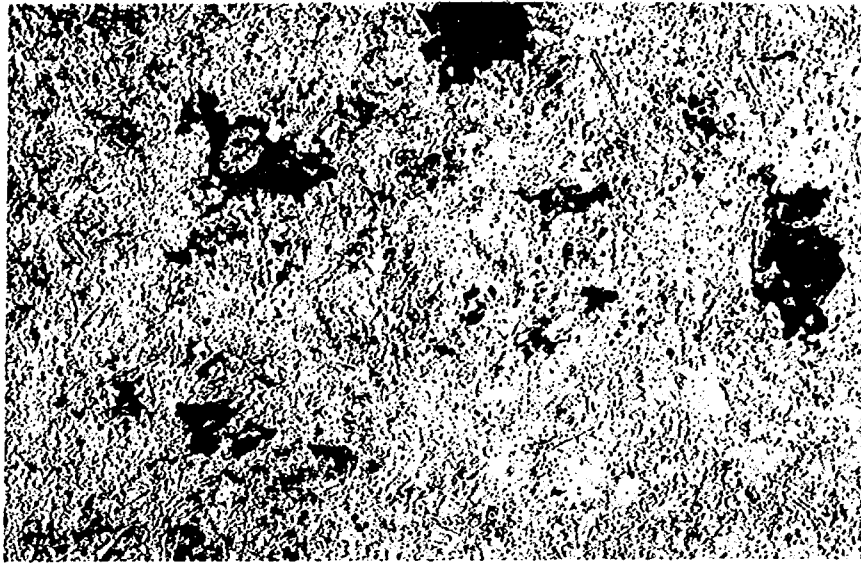
クロスニコル

0.5 mm

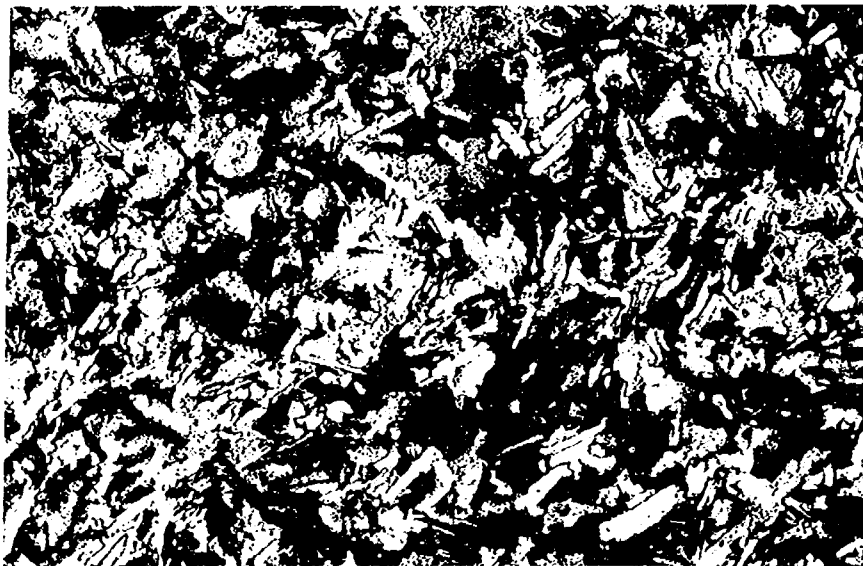
写真-3.4

・水平ボーリングNo.1-132m 岩石名：花崗岩

石英、カリ長石が主体である。岩石の組織は物理的に破碎され、カククラサイト状となっているが、鉱物は熱変質を受けていない。組成的には狭義の花崗岩に相当すると思われる。



オープンニコル



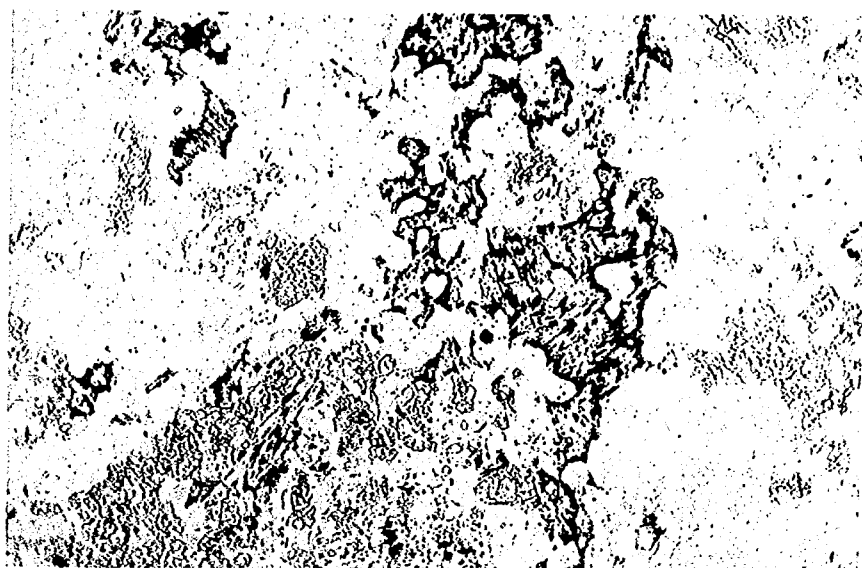
クロスニコル

0.5 mm

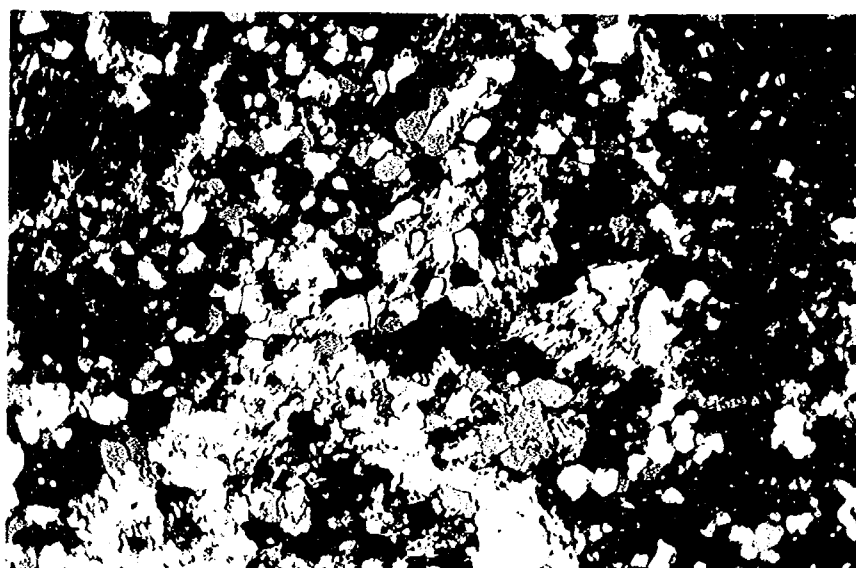
写真-3.5

・水平ボーリングNo.1-147m 岩石名：ひん岩（石英閃緑斑岩）

微細な短冊状の斜長石が認められる。変質は他の岩石に比べ弱く、熱変質は受けていないと考えられる。



オープンニコル



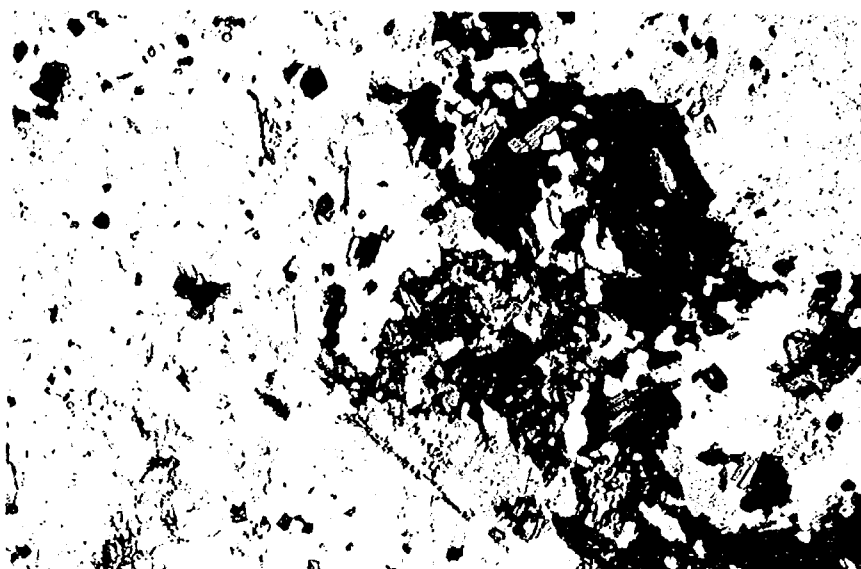
クロスニコル

0.5 mm

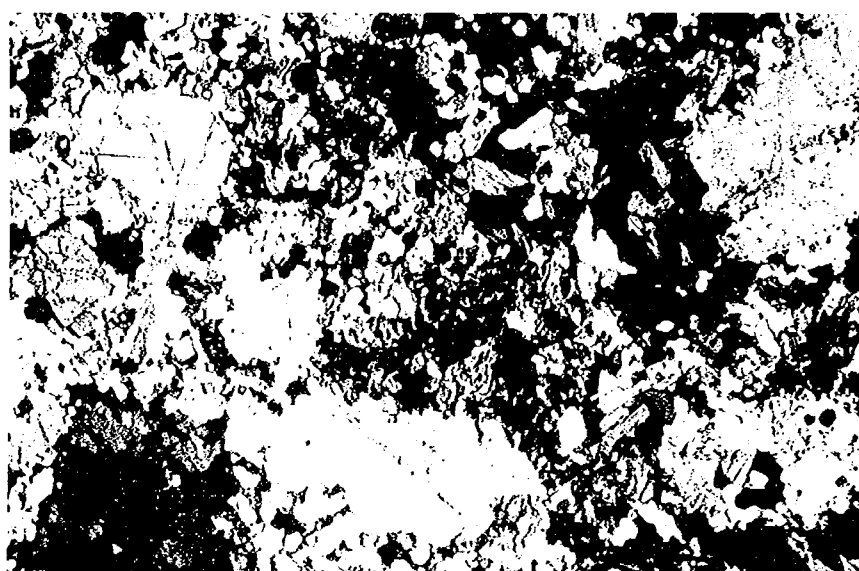
写真-3.6

・サンプルNo. K-2 (T.D. 986.5 m付近切羽左側) 岩石名: ひん岩

波動消光を示す石英が主体であり、斜長石・角閃石は変質のため一部再結晶する。
緑泥石・方解石が認められる。ひん岩～石英安山岩質の岩脈と考えられる。



オープンニコル



クロスニコル

0.5 mm

写真-3.7

・サンプルNo.K-3 (TD. 1146, 45 m付近切羽) 岩石名: ひん岩

K-2, 3と類似組織の岩石であるが、源岩構造はK-2よりさらに残っている。

波動消光を示す石英が主体であり、斑晶としては斜長石・角閃石が認められ、黒雲母が分布する。

緑泥石・方解石が存在する。



オープンニコル



クロスニコル

0.5 mm

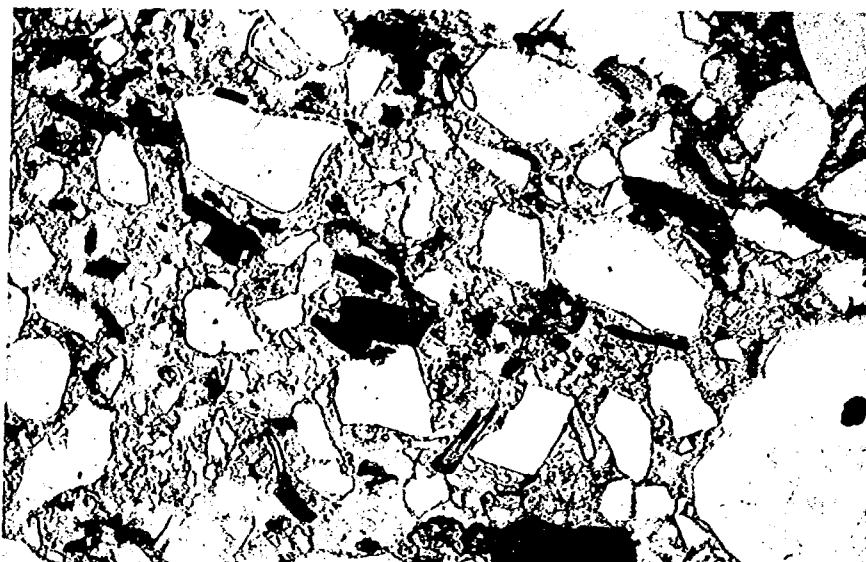
写真-3.8

・ サンプルNo. K-4 (T.D. 1255 m付近の切羽, 不整合面より上部)

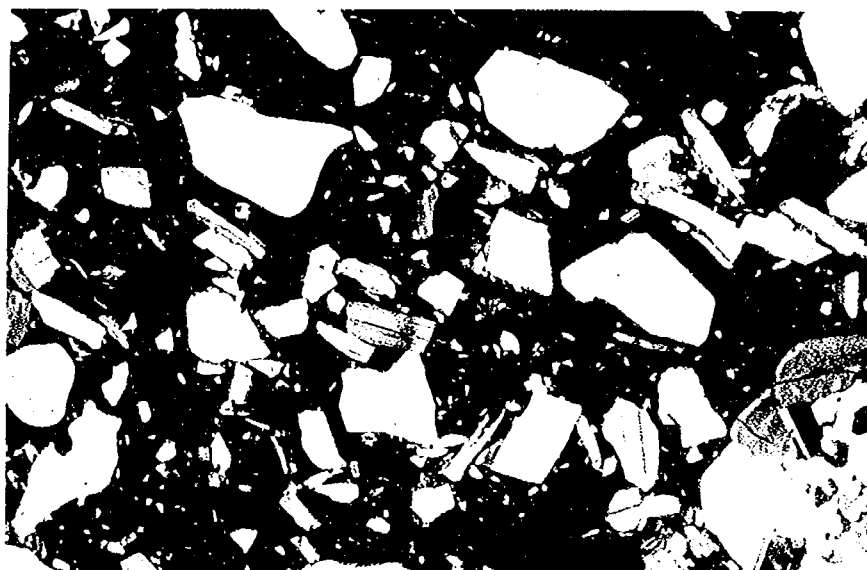
岩石名: 溶結性凝灰角礫岩

構成鉱物: 石英、斜長石、黒雲母、不透明鉱物

構成鉱物の組織は破片状を呈し、全体として弱い流理構造を示す。



オープンニコル



クロスニコル

0.5 mm

写真-3.9

・サンプルNo. K-5 (TD. 1255m付近の切羽, 不整合面より上部)

岩石名: 溶結性凝灰角礫岩

構成鉱物: 石英、斜長石、黒雲母、不透明鉱物

構成鉱物は破片状を呈し、全体として弱い流理構造を示す。

肉眼観察では石基の部分はガラス質に見えた岩石で、鏡下の観察では岩石組織はK-4のサンプルと同様であるが、不透明鉱物の量が少ない。

表-3.3 X線回折結果一覧表 (コア全岩試料)

試料番号	採取位置(STA.)	Qz	Pl	Kf	Cp	Cl	Dl	Sm	MS	Mi	Ka
10	No. 62 +40.70 相当	◎				○		・			
1-1	No. 62 +83.95 相当	○		・		○	○	△			△
1-2	No. 62 +87.65 相当			△		◎		○			△
9	No. 62 +88.40 相当	△				◎		○			
1-3	No. 63 +77.55 相当	◎	○	○		・		・	・		△
15	No. 63 +96.60 相当	◎	○	○							
粘土介在	No. 64 +11.50 相当	◎	△	○							
13	No. 64 +21.50 相当	◎	△	△	・			・			
1-4	No. 64 +21.55 相当	◎	○		△			△		・	
2-1	No. 64 +47.45	◎	○	△				△		・	
2-2	No. 65 +8.45	◎	◎	△				△		△	

Qz : 石英 Pl : 斜長石 Kf : カリ長石 Cp : 沸石鉱物 (斜プチロル沸石?)

Cl : 方解石 Dl : ドロマイト Sm : スメクタイト MS : 雲母/スメクタイト混合層鉱物

Mi : 雲母鉱物 Ka : カオリン 量比 : ◎ > ○ > △ > ・

表-3.4 X線回折結果一覧表 (コア水ひ試料)

試料番号	採取位置(STA.)	S m	MS	M i	K a
1 0	No. 62 +40.70 相当	◎			
1-1	No. 62+83.95 相当	◎			○
1-2	No. 62 +87.65 相当	◎			○
9	No. 62 +88.40 相当	◎			
1-3	No. 63 +77.55 相当	○	・		○
1 5	No. 63 +96.60 相当	N. A.			
粘土介在	No. 64 +11.50 相当	N. A.			
1 3	No. 64 +21.50 相当	◎			
1-4	No. 64 +21.55 相当	◎		・	
2-1	No. 64 +47.4	◎		・	
2-2	No. 65 + 8.4	◎		・	

S m : スメクタイト

MS : 雲母/スメクタイト混合層鉱物

M i : 雲母鉱物

K a : カオリン

N. A. : 同定不能

量比 : ◎ > ○ > △ > ・

表-3.5 X線回折結果一覧表 (切羽全岩試料)

試料番号	採取位置(STA.)	Qz	Pl	Kf	Cp	Cl	Dl	Sm	MS	Mi	Ka
58	No. 58 +90.50	○	△	△	・						
1152-緑	No. 64 + 6.00	○	△	△				○			
1152-茶	No. 64 + 6.00	○	△	△				△			

Qz : 石英 Pl : 斜長石 Kf : カリ長石 Cp : 沸石鉱物 (斜プチロル沸石?)

Cl : 方解石 Dl : ドロマイト Sm : スメクタイト MS : 雲母/スメクタイト混合層鉱物

Mi : 雲母鉱物 Ka : カオリン

量比 : ◎ > ○ > △ > ・

表-3.6 X線回折結果一覧表 (切羽水ひ試料)

試料番号	採取位置(STA.)	Sm	MS	Mi	Ka
58	No. 58 +90.50	◎			
1152-緑	No. 64 + 6.00	○			
1152-茶	No. 64 + 6.00	○			

Sm : スメクタイト

MS : 雲母/スメクタイト混合層鉱物

Mi : 雲母鉱物

Ka : カオリン

量比 : ◎ > ○ > △ > ・

3) 岩石試験

ボーリング観察結果によれば、岩石コアは変質の程度によって、非変質部、弱変質部、強変質部の3つに区分できる。この3区分を代表する岩石の各1試料と溶結性凝灰角礫岩1試料の計4試料の室内岩石試験を行った。採取した各試料の状況は次の通りであり、試験の結果を表-3.7に示す。

- No.1-1 (1回目ボーリング 5.60~5.90m No.61+66.15~66.45m相当)

非変質部より採取。概ね堅硬な棒状コアであるが、ヘアークラックが発達する。

- No.1-2 (1回目ボーリング 130.60~130.90m No.62+91.15~91.45m相当)

弱変質部より採取。見掛けは良好な棒状コアを呈する。

- No.1-3 (1回目ボーリング 240.20~240.60m No.64+0.75~1.15m相当)

強変質部より採取。圧砕されて再固結しており、岩石組織は礫岩質のカタクラサイト状を呈する。

- No.2-1 (2回目ボーリング 54.20~54.50m No.64+66.65~66.95m)

強変質部より採取。圧砕されて再固結しており、岩石組織は礫岩質のカタクラサイト状を呈する。

- No.2-2 (2回目ボーリング 105.60~105.80m No.65+18.05~18.25m)

溶結性凝灰角礫岩より採取。概ね堅硬な棒状コアであるが、ヘアークラックが発達する。

非変質部の試料は、圧縮強度は低い、P波速度は新鮮な岩石の値を示す。変質部では、密度、P波速度、圧縮強度共に低い値を示す。又、溶結性凝灰角礫岩はヘアークラックの影響で圧縮強度は低い、密度・P波速度は概ね良好である。

表-3.7 室内岩石試験結果一覧

試料番号	採取位置(STA.)	密度(g/cd)	P波速度(Km/s)	圧縮強度(kgf/cd)
No. 1-1	No. 61 +66.15 ~66.45 相当	2.73	5.6	311
No. 1-2	No. 62 +91.15 ~91.45 相当	2.55	3.8	207
No. 1-3	No. 64 + 0.75 ~ 1.15 相当	2.43	2.1	182
No. 2-1	No. 64 +66.65 ~66.95	2.38	2.0	63
No. 2-2	No. 65 +18.05 ~18.25	2.39	3.6	142

3.3 切羽観察結果

3.3.1 調査対象範囲の地質

地質状況の復元のためには、専門の地質技術者が施工中に各切羽ごとの地質状況を観察し、記録を残すことが望ましいが、時間や経費の点から地質技術者の配置ができなかった。しかし、2回のHSP調査実施区間では、それぞれを網羅する区間でトンネル坑内からの水平ボーリングが実施されている。また、現場技術者による切羽観察記録と切羽写真が残されており、これらの資料と調査実験の際に我々が実施した切羽状況の観察をもとに地質の復元を行なった。

その結果を図-3.3および図-3.4に示す。

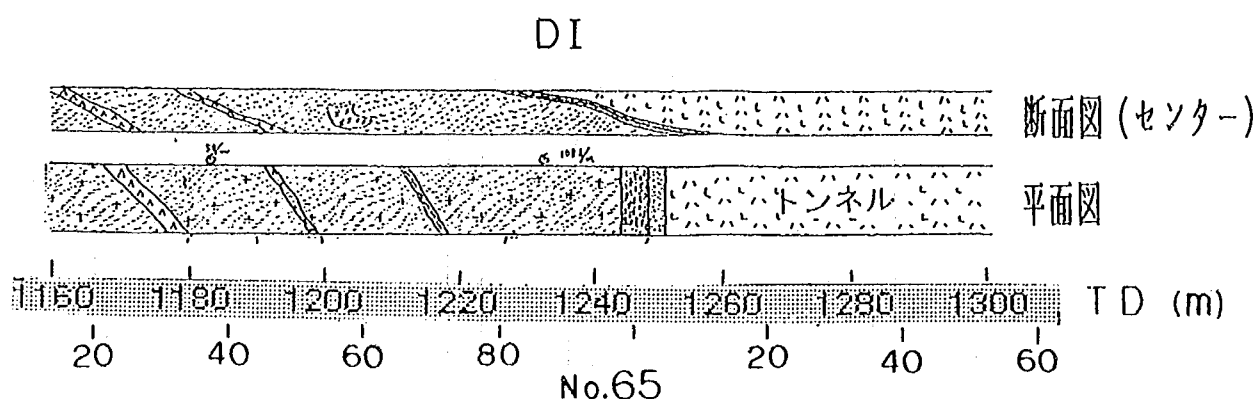


図-3.3 第1回調査区間の地質状況

3.3.2 地質構造の方向性

調査実験の際の切羽での亀裂面および変質脈の走向傾斜の測定結果、切羽での地層の走向傾斜の測定および切羽観察記録に残された走向傾斜の測定データをシュミットネットに投影することにより、地質構造の方向性を把握することとした。結果をそれぞれ図-3.5および図-3.6に示す。それによれば、NW-S E方向に亀裂面が集中する傾向がある。断層・粘土脈については、測定データが少なく特徴的な傾向を見いだしにくい、低角・流れ盤方向で切羽に斜交するものが多い。測定区間では、切羽の進行方法は緩くカーブしているが、参考としてN38°W方向とみなした場合の大門を投影図にあわせて表示している。

以上から、測定区間の亀裂は、NW-S E方向が卓越しており、切羽に対してやや受け盤状の方向性を有すると判断される。

3.3.3 水平ボーリングとの関係

図-3.7に今回の調査区間の1回目水平ボーリングと坑内地質状況の対比図を示す。ここではボーリングコアと解析断面の対比に関して、コアの亀裂状況に着目し、礫状コアおよび土砂状コアの区間

犬伏トンネル地質状況図

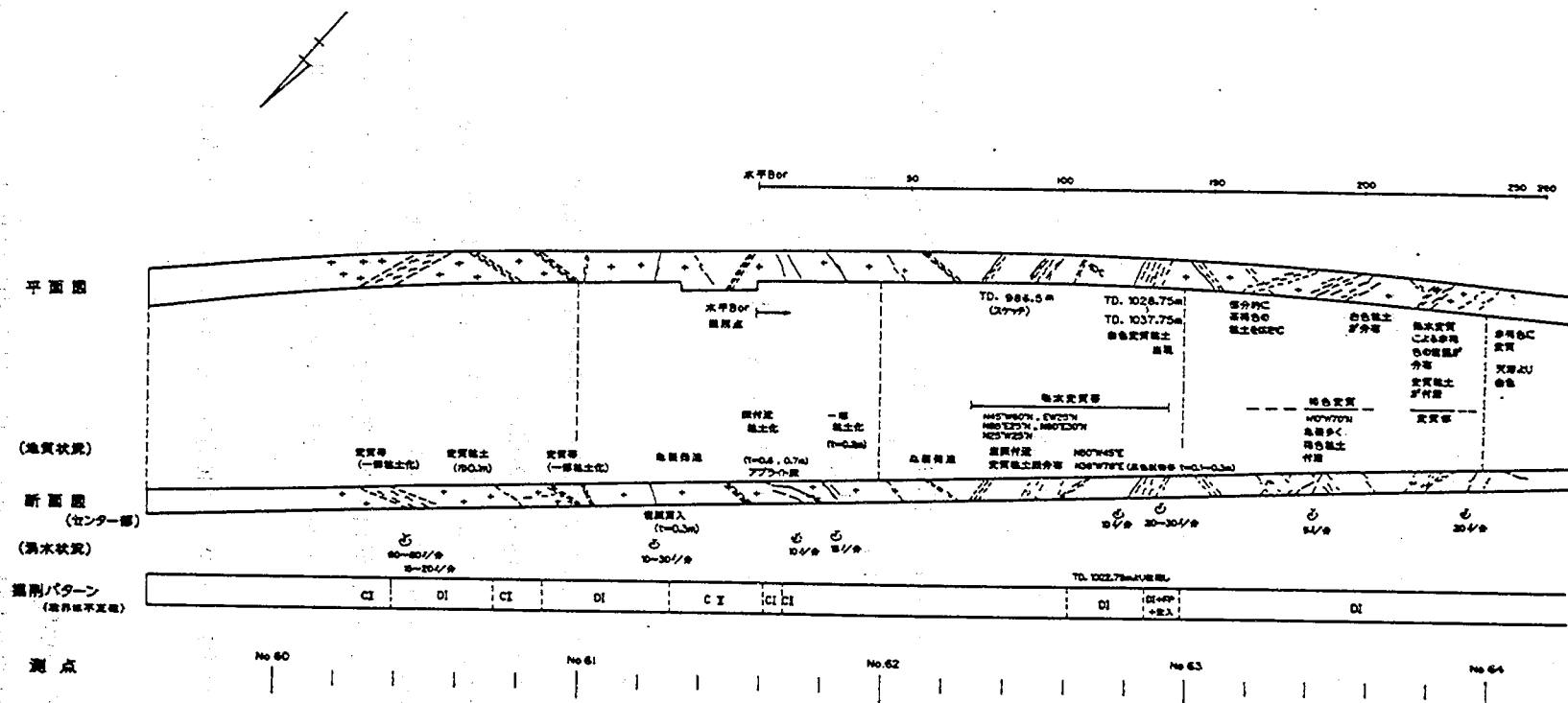


図-3.4 第2回調査区間の地質状況

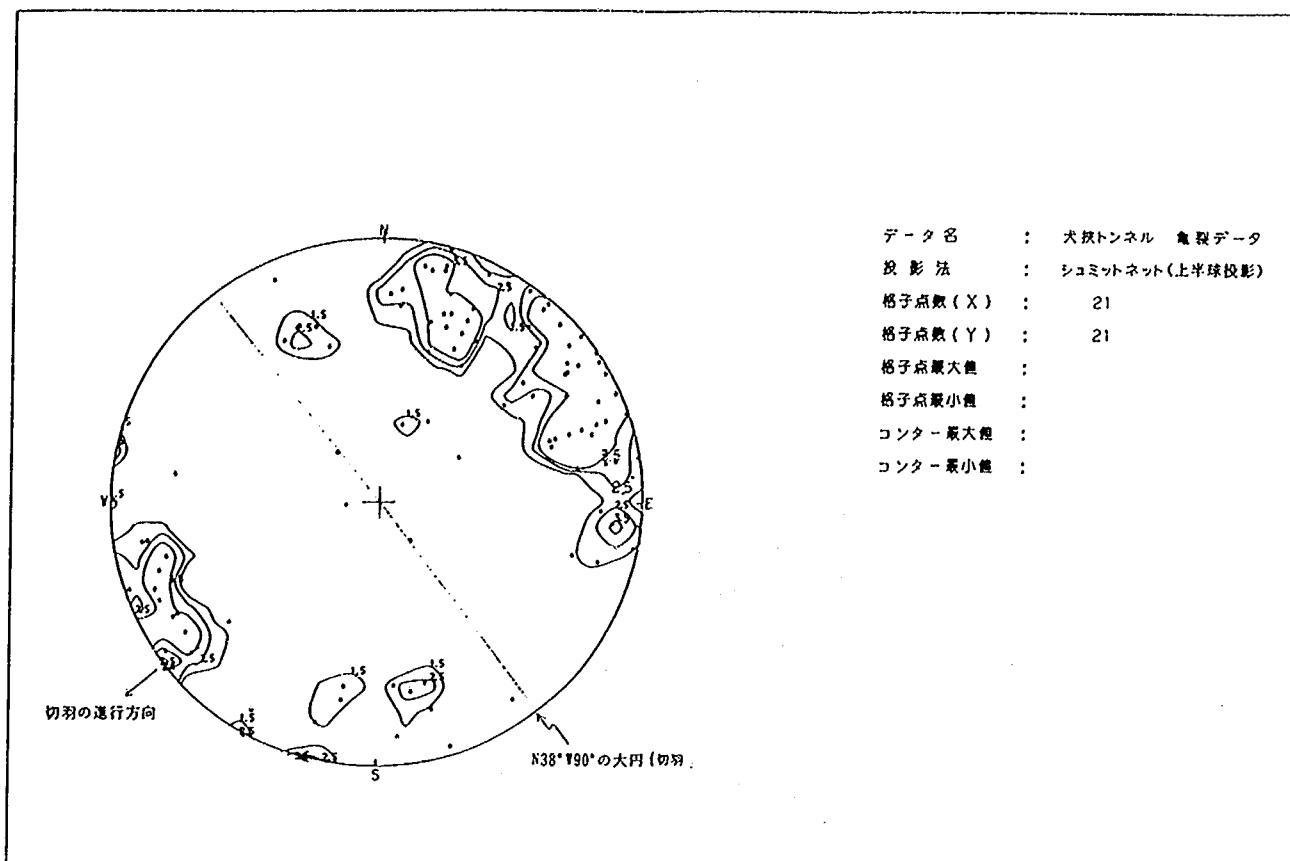


図-3.5 ステレオ投影

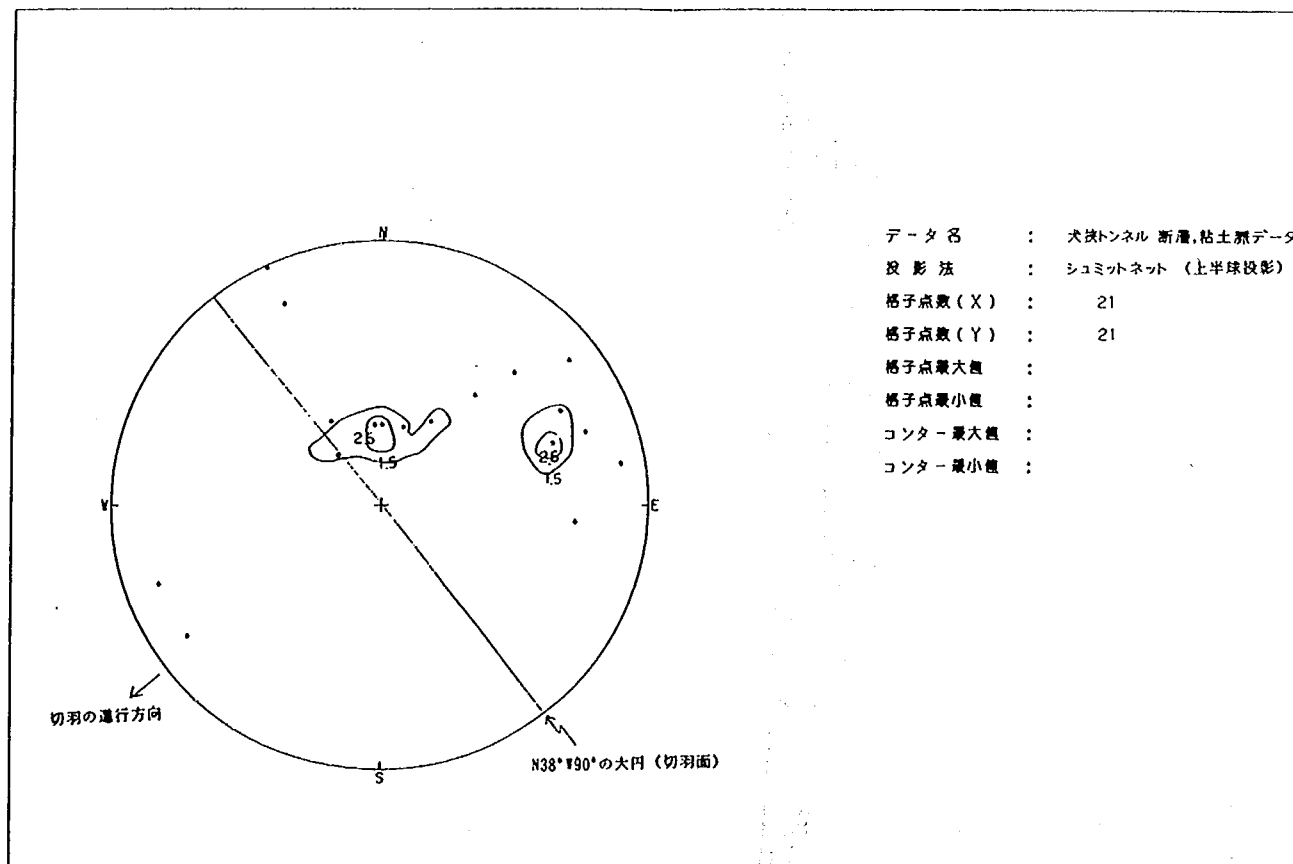


図-3.6 ステレオ投影

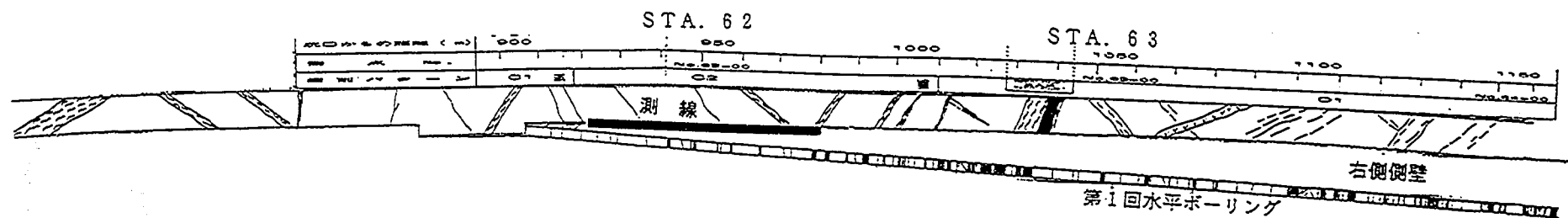


図-3.7 水平ボーリング地点の地質状況

を斜線部および黒塗り部で表示した。一方白色の区間は、亀裂の少ない良好なコアの分布域を示す。

Na62+90.0m付近には、幅約3.0mの断層粘土部を有する約10.0m程の断層破碎帯が出現した。後述するトンネルHSP探査記録にも、この断層破碎帯は明瞭にとらえられている。また、Na63+50.0m付近より終点側の区間では、岩石組織に破碎された形跡（カタクラサイト花崗岩）が残されており、地下深部で圧砕作用を受けたことを示唆するとともに全体に弱変質を受けて亀裂が発達する。

4. 設計変更および施工実績

4.1 設計変更

4.1.1 基本的考え方

当初設計では、No.61+80m～No.65+00m区間は、支持力不足、地山の塑性化、高圧湧水が懸念されることから、側壁導坑先進上部半断面掘削工法を採用している。

しかし、側壁導坑先進工法は、本来矢板工法が主体であった時期に地盤支持力が低く劣化した地質で、湧水の多い箇所などでの対策工法として開発・実施されたきた工法である。地盤条件のうち支持力のみ問題があり、大きな塑性変形などが生じない場合には適した工法であるが、NATMを標準工法として大型機械などを導入して施工性及び安全性の向上を図っている現在では、主としてトンネル坑口部近傍で劣化した地山が存在し地盤支持力が不足する場合に採用される工法である。坑口部以外の土被りが比較的大きく地山が脆弱な区間で側壁導坑掘削方式を採用する場合には、切羽の自立性を確保するため上半掘削時にも様々な補助工法を併用して施工する必要があるが生じる。また側壁導坑自体が変形するような大きな地圧が発生する場合には、導坑断面が小さいことから適切な支保の施工が困難となり、縫い返しを余儀なくされるなど経済性・安全性確保の点からも効果的ではない。したがって、本掘削工法を、当トンネルのように土被りが大きく、かつ地山が塑性化すると予想される区間で採用することには問題がある。

すなわち、計画区間は熱水変質によって生成された粘土が多い地山と予想され、また土被りも250mを越える。変質帯に膨潤性粘土鉱物が多く含まれているので、掘削時の変形は極めて大きくなると推定され、狭い導坑断面からの必要な支保の施工は不可能となる。また、導坑掘削で縫い返しを繰り返すとトンネル周辺地山を大きく乱すことになり、上半掘削時の切羽は一層不安定化して、より大きな支保や補助工法の追加が必要となる。

このような観点から、表-4.1に示す項目について両工法の比較検討を行ない、基本的には現状設備・機械が利用でき、かつ必要な支保作業や補助工法の採用が可能な大きな作業空間が確保できる上半先進ショートベンチ掘削をベースとした掘削工法での施工が最良であるとの結論を得た。

4.1.2 補助工法の選定

上半先進ショートベンチ工法での施工を前提として、想定される様々な地山現象に対してどのような補助工法が有効であるか検討した。表-4.2は地山現象別に作成した対策工の一覧表であるが、これらの現象は必ずしも単独で生じることはなく、一般に複合して生じることが多い。このうち支配的な現象が何で、その規模がどの程度かを事前の水平先進ボーリングのみから判断するのは困難である。このため、表-4.3に示す対策工法総括表を基本にして変更設計を行ない、最終的には掘削しながら計測結果や切羽観察結果に基づき適宜最適な工法を選定するものとした。

水平ボーリングの調査結果と変更設計の支保パターンは表-4.1に概括している。

表-4.1 不良区間におけるトンネル掘削工法の比較

掘削工法名 対策項目	側壁導坑先進掘削工法	上半ベンチカット工法
施 工 性	①小断面の導坑内では大型機械が使用できないので、施工性は悪い。	①掘削断面が大きくとれるので大型機械の効率的使用が可能である。
適 応 性	①施工断面が小さいことから地山状況に応じた適用可能な補助工法は限定されるため、予想以上の変状には対処できない場合もある。	①地山状況に応じた段階的な補助工法の採用が可能で、適応範囲が広くかつ融通性が高い。
(切羽自立性の低下)	・小断面の導坑掘削が可能なのが前提条件となる。 ・上半断面については先進導坑内からの薬液注入または上半での補助工法が必要。 なお、ここでは導坑掘削により上半部地山が緩むことから大きな補助工法が必要となる可能性が高い。	別表に示すように、状況に応じた各種補助工法の採用が可能で、大型機械による施工が行える。
(支持力不足)	・上半掘削に先行して側壁コンクリートを施工する方式で対処するが、底盤幅が著しく不足する事態になると対処は困難になる。	同 上
(膨張性地圧)	・導坑内では2～3mの短尺ボルトしか打設できないので、変形が大きくなる場合には縫返して対処するしかない。 ・膨張性が高い場合には、上半掘削、全断面閉合までに側壁押し出しなどの変状を生じ、補修の可能性もある。	同 上
(湧 水)	・導坑が先行するので水抜き坑ともなり、湧水対策としての確実性は高い。	同 上
安 全 性	①トンネル内で切羽が複数となり、見通しもよくないので管理面での問題点も多くなる。	①切羽は上下半のみで、見通しも良く、管理が容易である。
経 済 性	①地質が大きく変化する区間で採用することになるが、大きな段取替が必要となる。	①大きな段取替もなく、工程的にも経済的にも無駄がない。 ②地質が比較的良好な場合には経済的な施工法選定が可能。

表-4.2 トンネル現象別対策工

現 象	ボ ー リ ン グ 結 果	対 策 工
切羽自立性低下	・ RQDが低い ・ 破碎度が著しい ・ 粘土化が著しい	(1) フォアパイリング (2) 切羽吹付け、切羽ボルト (3) ウレタン注入、薬液注入 (4) 長尺先受け工法 (5) 多段ベンチ工法、中央導坑工法
	・ 湧水が多量、高圧	(1) 水抜きボーリング (2) 水抜き坑
支持力低下	・ 地山強度が低い ・ 粘土化が著しい	(1) 上半インバート仮閉合 (2) サイドパイル、フットパイル (3) ウイングリブ付鋼製支保工
膨 張 性	・ 地山強度が低い ・ 粘土化が著しい ・ 膨張性粘土鉱物の含有率が高い	(1) 長尺ボルト、吹付厚増加 (2) 上半インバート仮閉合 (3) 変形余裕量設定、サイドパイル (4) 中央導坑先進工法

表-4.3 対策工法 総括表（土被りが250m程度で、多量・高圧湧水があると考えられる場合）

地山状況		支保 パターン	地山状況により発生する現象			
			切羽自立性低下		支持力不足	膨張性
			多量・高圧湧水が原因	地山脆弱化が原因	地山脆弱化が原因	地山脆弱化および膨張性鉱物が原因
良 好	C II	上半切羽からの 水抜きボーリング	長尺ボーリング が必要	フォアバイリング ↓ 鏡吹付・鏡ボルト	根足ボルト ↓ 鋼製支保工底盤拡大 (シートパイル等使用)	増しボルト・増し吹付
	D I		拡幅部からの 水抜き ボーリング	リングカット ↓	支保工脚部補強 (吹付)	
	D II			注入式フォアバイリング (ウレタン・ミルク) ↓ 薬液注入	上半仮インバート閉合 (下半インバートも 必要な場合がある)	上半仮インバート閉合 (下半インバートも 必要な場合がある)
				岩盤固結工法 ↓	サイドパイル ↓ フットパイル	長尺ボルトおよび吹付厚増加 変形余裕量設定・変更
不 良	(D III a)	ボーリング 本数の増加	ボーリング 本数の増加	長尺先受け工法 ↓	ウィングリブ付鋼製支保工 ↓ 上半仮インバートおよび 下半インバートの閉合	サイドパイル
	E			多段ベンチ工法へ変更 ↓ 中央導坑方式へ変更		中央導坑方式に変更
極めて 不良				トンネル断面の円形化		トンネル断面の円形化

4.1.3 1 回目水平ボーリング結果を受けた掘削工法の検討

1) No61+60.5m～No62+55.0m区間 (L=94.0m)

No61+60.5mから開始された水平ボーリング調査結果によると、構成地質は花崗閃緑岩あるいは花崗岩を主体とし、コアのRQD値はやや低く短柱状・岩片状の区間が多い。岩質は比較的硬質であるが、節理や亀裂が非常に発達していることから、全般的には上半部に鋼製支保工を有するCⅡパターンに相当する地山と判断した。検討を行なった段階では、既にNo62+40.0m付近まで掘削が終了していたが、実際にもCパターンで施工されており特段の変状も発生していなかった。

2) No62+55.0m～No62+90.0m (L=35.0m)

コア状況は岩片状～角礫状を主体とし、部分的に破碎帯あるいは粘土化した変質部分もあることから、CⅡパターンよりも1ランク大きなDⅠパターンが適当と評価した。また、切羽の自立性確保・天端崩壊防止を併せた補助工法が必要との判断から、表-4.4に示す切羽安定対策工について検討を行なった。実施に当たってはフォアパイリング工から注入式フォアパイリング工、岩盤固結工法と切羽状況が深刻化するのにしたがって段階的に施工し、このうち注入式フォアパイリング工区間については注入材料をセメント系から途中でレジン、ウレタン系への変更を検討した。

3) No62+90.0m～No63+54.0m (L=64.0m)

前述した室内試験結果からは、変質部は非変質部に比べると見かけが同程度であっても岩級区分は1ランク下げるほうがよいことが示唆される。当該区間は比較的ボーリングコア状態が良いものの、室内試験で判明しているように熱水変質を受け潜在性の割れ目が卓越しており、強度が低下している。そこで、DⅠパターンでの施工が適当と判断した。

4) No63+54.0m～No64+2.5m (L=48.5m)

本区間ではボーリングコアが岩片から角礫状に破碎されており、土被りも約300mあることからDⅠ-iパターン（部分的にフォアパイリング）が適当と考えられた。

ただし、インバート施工については、地山の緩み状況を判断して採用を決定した。

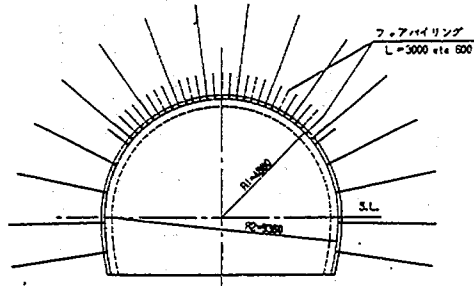
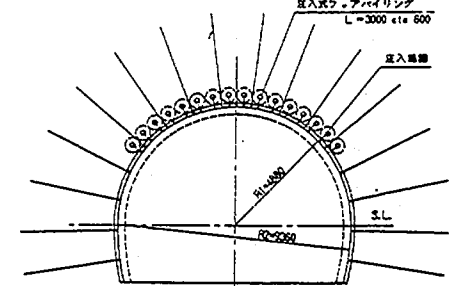
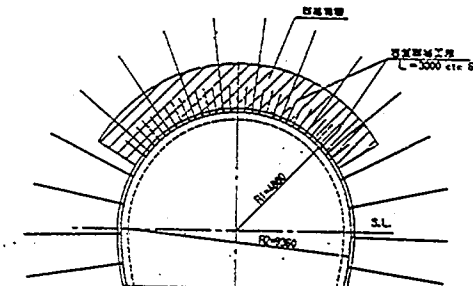
5) No64+2.5m～No64+20.5m (L=18.0m)

コアは、熱水変質によって造岩鉱物のほとんどが変質し土砂状を呈するため、DⅢa-1パターン（通常のDⅢaパターンに $\ell=4$ mのロックボルトを付加施工）とした。

6) No64+20.5m以降

水平ボーリングで最終部分は約1.0m程度が完全に土砂化（粘土を含む）しているため、DⅢa-1パターンよりさらに大きなパターンが必要となる可能性が高い。このため、掘削パターン及び補助工法の組合せは、現状での判明事項から表-4.3に示す「不良～極めて不良」の地山としての対応となるため、太線以下の補助工法の組合せが必要と考えられた。

表-4.4 (D)パターンでの切羽安定対策工

工 法 名	フォアパイリング工	注入式フォアパイリング工	岩盤固結工法
要 図	 ※ただし、打設範囲は地質条件等により異なる。	 ※ただし、打設・注入範囲は地質条件等により異なる。	 ※ただし、固結範囲は地質条件等により異なる。
工法概要	削岩機などで切羽天端部に一定間隔で穿孔し、先受け工としてロックボルト・異形棒鋼などを挿入する。なお、ボルトの打設角度は10～20°程度である。 ボルトを挿入する前に、ボルト孔内に定着剤としてモルタルなどを充填しておく。湧水が多い場合には、ロックボルト打設と同様に水抜き孔の穿孔またはカプセル型モルタルの使用を行う。	フォアパイリング工と同様に、この工法も削岩機などで切羽天端部に一定間隔で穿孔するが、挿入するボルトは中空ボルトである。なお、ボルトの打設角度は10～20°程度である。また、穿孔後にボルト孔壁が崩れて孔荒れが起きる場合には、自削孔型(中空)ボルトを使用する。 このボルトを通じて注入材をボルト周囲に圧入し切羽前方の地山を強化改良する工法である。 使用する注入材としては、急結性セメントミルク・シリカレジン系(SR)・ウレタン系などがある。	注入式フォアパイリングと同様に、削岩機などで切羽天端部に一定間隔で穿孔し、中空ボルト挿入する。なお、ボルトの打設角度は20～35°程度である。また、穿孔後にボルト孔壁が崩れて孔荒れが起きる場合には、自削孔型(中空)ボルトを使用する。 このボルトを通じて2液成分で構成されたウレタン系の注入材をボルト周囲に圧入し切羽前方の地山を固結させて地盤改良を行う工法である。
特 徴	①補助工法としては最も標準的な先受け工法であり、工事費は安価である。 ②ロックボルト打設と同様の設備により容易に施工でき、工程的な影響も比較的小さい。 ③切羽ボルト・切羽吹付などの補助工法を併用する必要があることも多い。	①注入用の中空パイプはボルトの強度を有しており、先受け部材としても効果を発揮する。 ②当区間のように、ボーリングコアの状態が岩片状・角礫状となるなど地山内の亀裂が非常に発達している地質では、注入材の充填は確実であり、有効である。 ③注入材の中で、強度の高さおよび強度発現の安定性についてはウレタン系・シリカレジン系はほぼ同様であるが、急結性セメントミルクは地下水の影響を受けやすいことから確実性の面で劣る。 ④材料費については急結性セメントミルクが最も安価であり、次いでシリカレジン系・ウレタン系の順に高価となる。	①岩盤固結工法の注入剤は固結すると一軸圧縮強度40kgf/cm²程度あること、および発泡性による地山内の空隙への充填性が高い。 ②当区間のように、ボーリングコアの状態が岩片状・角礫状となるなど地山内の亀裂が非常に発達している地質では、注入材の充填は確実であり、改良効果は最も高い。 ③注入用の中空パイプはボルトの強度を有しており、先受け部材としても効果を発揮する。
問 題 点	①ボルトとモルタルの接着効果のみによる切羽前方地山の補強であるため、地山状況が著しく脆弱あるいは亀裂が非常に発達している場合には、天端崩落などを抑止できないことがある。 ②上記の場合に、打設間隔の短縮で対処しても、削孔水により地山を荒らしたままであることから、逆効果となりさらに崩壊を招く場合もある。	①注入材の価格の差が大きいことから、地山条件に応じた注入材選定に際しては、十分な検討が必要となる。 ②岩盤固結工法よりも改良範囲が薄いため、補助工法としての効果は岩盤固結工法より劣る。	①脆弱な地山条件に対応するため固結範囲を大きくするため、注入材の使用量が多量であることから、効果は高いものの工事費は他の工法と比較して高価である。
効 果	中	やや大	大
経済性	安価	やや高価	高価

4.2 施工実績

掘削実績から復元した坑内地質および実績支保パターンを図-3.3, 図-3.4に, また水平ボーリング結果と支保パターンの関係を表-3.1に示す。また, 図-4.1は掘削時の火薬使用量と支保パターンを示したものである。同図には, トンネルHSP測線区間(受振器設置区間)を併せて表示してある。

図-3.3, 表-3.1に示すとおり, 測点No61+60.5mからNo61+80m付近にかけて, 細粒斑礫岩中に, 緩い受け盤傾斜で幅0.6m, 0.7mの赤褐色アプライト脈2本が出現した。アプライト脈の境界付近には白色の粘土が存在しており, No61+70m付近で10ℓ/分の湧水とともに肌落ちが頻繁に生じ, 図-4.1のとおり火薬使用量が0.02kg/m²に急減した。この段階で支保パターンがCⅠ→CⅢに変更された。

これ以降は次第に火薬使用量は増加するが, 0.7kg/m²をピークにして, No62+45mまでの間で再び減少している。この付近の地質状況は, 全体的に熱水変質に伴うマフィック鉱物の緑泥石化が認められ, 切羽全体が緑灰色を呈していた。岩質は比較的堅硬であったものの, シームや節理面にはスメクタイト含有量の多い熱水性粘土が挟在し, 周辺岩盤はやや脆弱化していた。湧水はパターン変更後10m位まで15ℓ/分位が生じたが, それ以降は滴水程度であった。切羽の安定性は, 発破振動や緩みに伴って鏡面や天端から岩塊の抜け落ちが生じる程度であった。

No62+45m付近からの火薬使用量は, 0.2kg/m²程度を上下しながら漸減している。切羽地質は全体的に緑灰色～褐色を呈し, 変質程度はやや強くなっていた。岩質はやや硬質であるが, 潜在性のヘークラックが多数分布しており, 分離面は緑泥石が付着し緑色を呈していた。節理系は右側壁から出現し左側壁に消える方向性を持ち, 急傾斜のものが多く認められた。シームや節理面には熱水変質性の粘土が充填フィルム状に挟在しており, 亀裂系が切羽に対して流れ盤状やくさび状となった時には岩塊が経時的に崩落した。湧水は滴水程度であったが, 第1回水平ボーリングのℓ≒128m付近で確認された断層破砕帯の出現が近いと想定し, No62+60.45mからCⅡ→DⅠへの支保パターン変更を行なった。

DⅠパターン変更後15m程で切羽状況が悪化し始め, 軽い衝撃で土砂状に崩落をするようになり, 最大2m²程度の岩塊が鏡面から抜け落ちた。そこで, リングカットと鏡面吹付で対処するとともに, フォアパイリングと注入式フォアパイリング(セメントミルク)を切羽状況に合わせて交互に施工した。その後10m程度切羽が進行した段階で, 右側壁からスリッケンサイドが多数分布する断層破砕帯が出現した。この断層破砕帯はN20~30W/60~80N E方向の流れ盤構造であり, トンネルと水平ボーリングとの関係は図-3.7, 図-4.2に示すとおりである。断層内物質は, 含水比が高い軟質な白色粘土を主体としており, 図-4.3の模式図に示すように約3.0mの幅を有していた。また突破するまでの間常に切羽は湿潤状態であったが, 湧水は最大でも30ℓ/分程度にとどまった。施工法としては, 発破を使用せずバックホーによる機械掘削を行ない, リングカット, 鏡面吹付, 注入式フォアパイリングの補助工法を併用した。切羽の自立性は極めて悪く, 湧水に伴った崩壊が頻繁に発生し, 鏡面の右側が最大1支保工分進行方向に抜け落ちた。しかし, フォアパイリングの効果が発揮されたために, 天端が抜け落ちることはなかった。また, 右側壁の吹付コンクリートに長さ3m, 開口幅1cmのクラックがトンネル軸と直交方向に発生したが, 支保工数基分を一体化させるとともに増しボルト・増吹きで対処したところクラッ

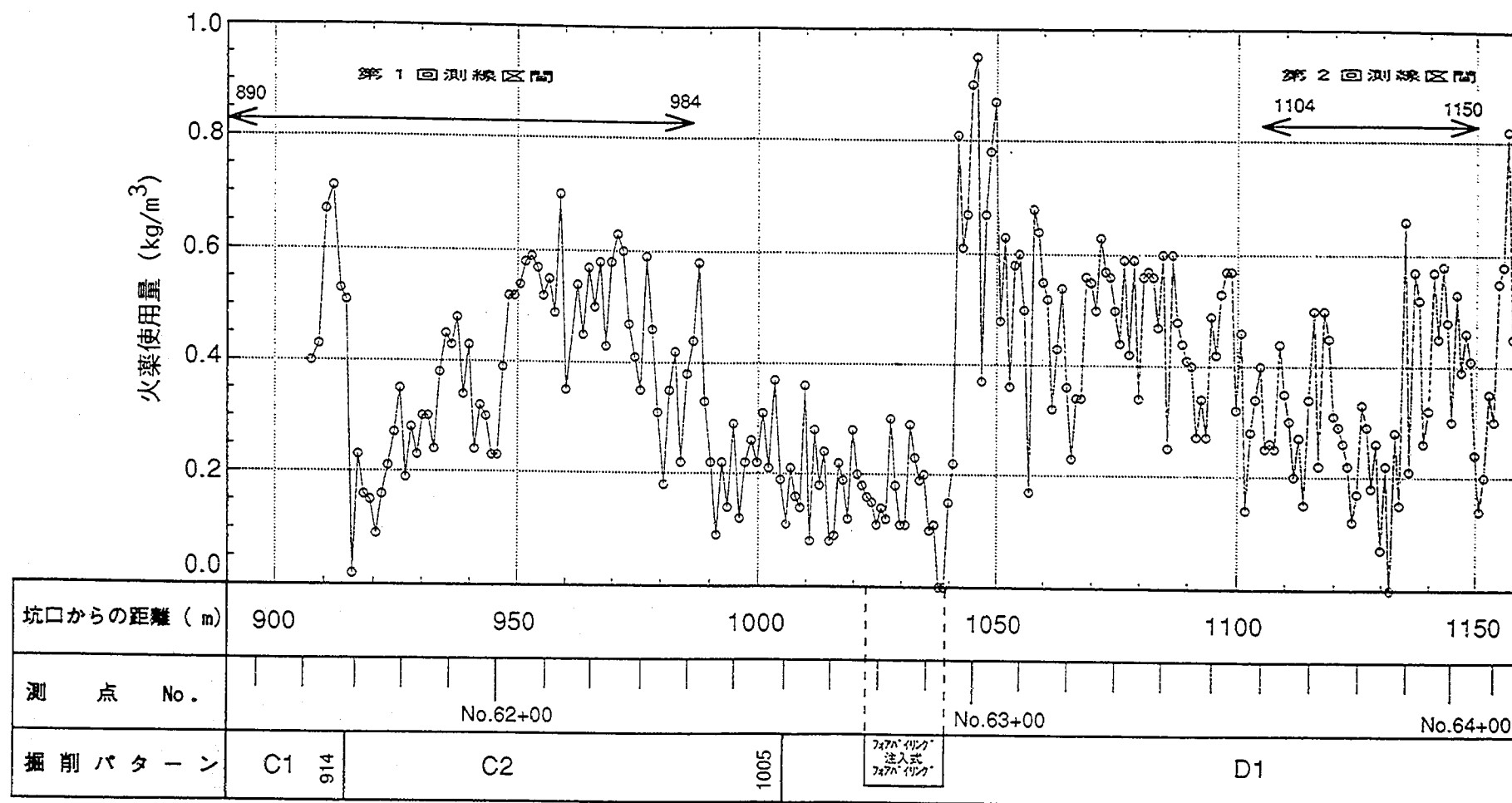


図-4.1 掘削時の火薬使用量

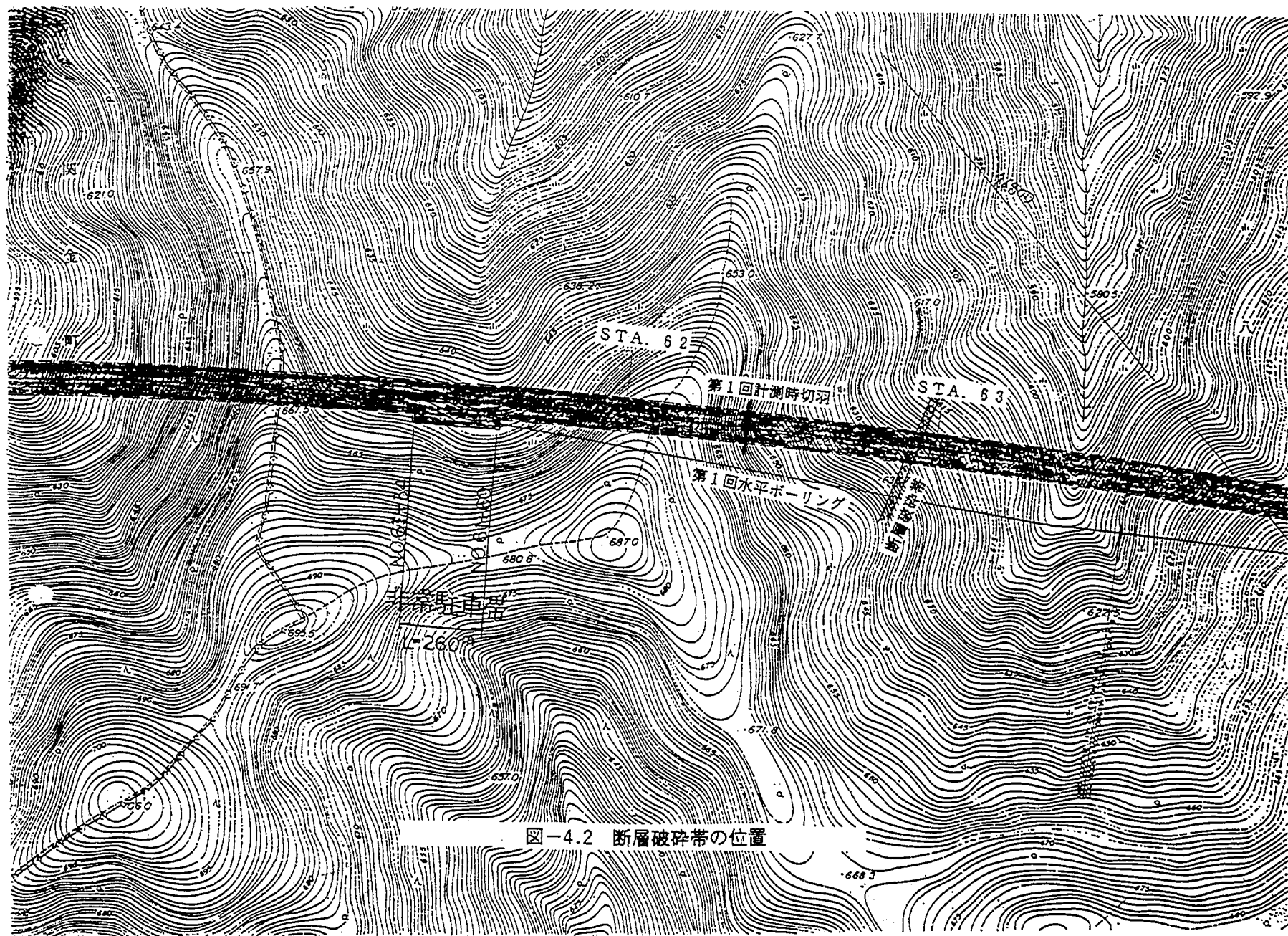


図-4.2 断層破砕帯の位置

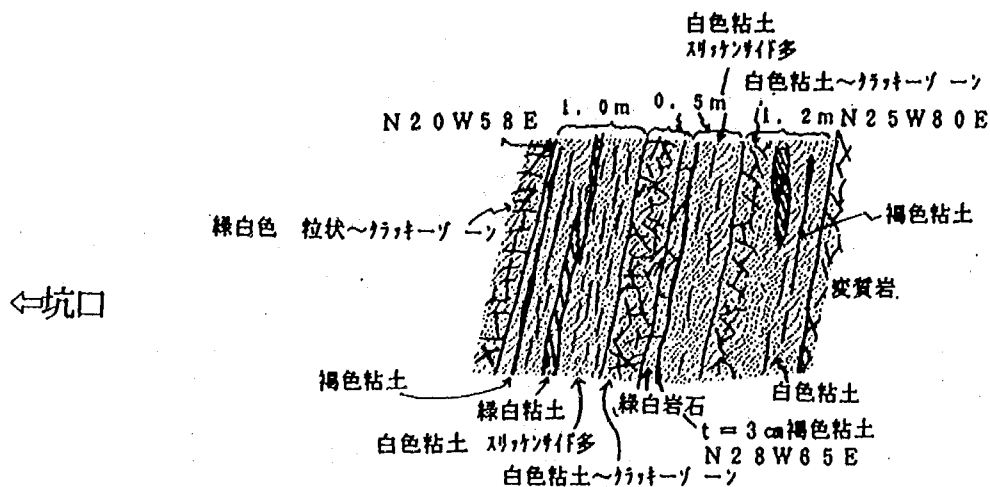


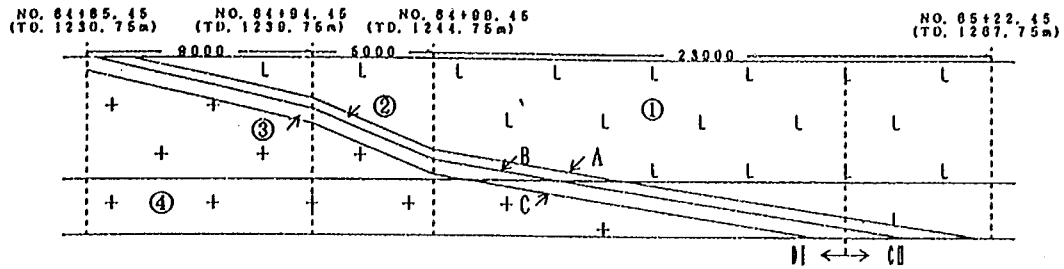
図-4.3 断層破碎帯の模式図

クの伸展は停止した。

断層破碎帯を抜けた後は、火薬使用量の増加として現われているように比較的良好な岩盤状況であったが、No.63+87m付近では変質程度が強くなり、無発破で掘削を行なった。また、亀裂が頻繁に出現したことや1回目の水平ボーリングが削孔不能となった $\ell=260\text{m}$ (No.64+21m) 付近で破碎状地山が出現する可能性があり、引き続きD Iパターンで掘削を継続した。

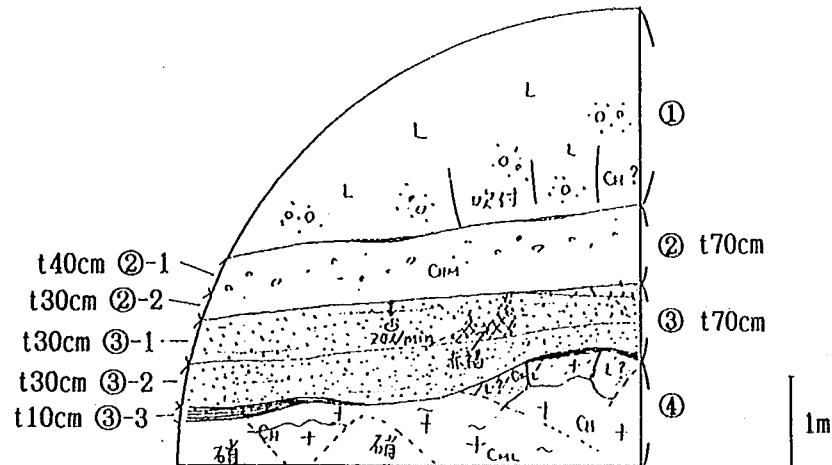
第2回目水平ボーリングでは、 $\ell=94\text{m}$ (No.65+7m) 付近に幅約2.5mの不良地質が確認され、それ以後には硬質な火山碎屑岩が認められた。コア観察からこの不良地質は当初断層破碎帯と推定されていたが、切羽観察結果から、旧地形面を被覆する溶結性凝灰角礫岩の変質部であり、その上位に硬質の溶結性凝灰角礫岩が分布する不連続面であることが判明した(図-4.4, 図-3.4)。この不連続面は、鏡面に対しほぼ平行な走向を有し、切羽に対して約8°の緩勾配で受け盤構造として分布していた。また、旧地形面の不整合面は大きくうねっており、一部に古土壌の分布が認められた。この不良地質は、水平ボーリングでの確認位置より20m程手前のNo.64+85m付近でまず天端部に出現し、次第に高さを減じて切羽中央部に移り最終的にNo.65+16m付近でインバート部に消失した。湧水は20 ℓ /分程度で切羽の自立性はあまり悪くなかったため、当該区間ではD Iパターンで掘削を行ない、切羽全面が硬質の溶結性凝灰角礫岩でしめられるようになった時点でC IIパターンへ変更した。

【調査切羽付近地質縦断図】



【TD. 1244.75切羽スケッチ】

NO. 85118.45
(TD. 1261.75m)



【岩相】

①暗青灰色溶結性凝灰角礫岩（硬質）（ボーリングNO. 2 101.0～）

シャープな節理は認められない。トンネル軸方向、右側壁急傾斜の割れ目が0.1m程度で存在。

②桃灰白色溶結性凝灰角礫岩（一部溶結）（ボーリングNO. 2 96.3～101.0）

φ1mm程度のBI, Qの斑晶を桃色、白色基質中に含む。有色鉱物はBIが圧倒的に多い。

②-1 縞状（流状）構造不明瞭。数mm～数cmの淡緑灰色～白色の粘土化部をスポット状に含む。

②-2 縞状。灰白色部と桃色部が縞状。BIはこれに沿って配列。

③溶結性凝灰角礫岩（③-3は古土壌）

Q, BIを粒状に残し長石部が粘土化し全体として軟弱なD級岩盤となっている。また、有色鉱物の縞状構造は残存しており、見掛けは上位の②と似ている。

③-1 灰白色を呈す。（ボーリングNO. 2 94.6～96.3）③-2との境界は明瞭である。

③-2 赤桃色を呈す。

③-3 縞状構造が顕著。灰白色部と赤桃色部が1cm程度ピッチ。 }（ボーリングNO. 2 91.4～94.6）
最下部にフォルトフラク～赤褐色の細粒緻密（比較的硬質）な部分をもつことあり。

④桃色カタクラサイト花崗岩（ボーリングNO. 2 ～91.4）

中～粗粒完晶質花崗岩。有色鉱物（BI>変質Hb）はφ1mm程度で少ない。この花崗岩の上部には優白色部分が存在することがあり、この場合桃色部分との界面（うねっている）に赤褐色～暗赤桃色膜状縁が認められる場合がある。また、③との境界付近には、暗緑灰色石英安山岩質な部分を岩塊状に含んでいる。

【構造】

地質境界 A, B, Cは切羽鏡を8°程度の緩傾斜で差す。（流紋岩の縞状構造もこれと調和的である。）

A ややうねっており白色粘土化部が断続。

B 非常にシャープな平面で、上盤の②下面にはフォルトフラク色の粘土（数mm）が貼り付いている。（含水してオレンジ色の懸濁液を滴下している場合もある。）この面にトンネル軸方向とはほぼ平行な条痕が認められる場合がある。

C 大きくうねっている。このうねりは③-1と③-2の境界面ではすでに解消している。また、花崗岩上部は下部に比べ小岩塊化している。

図-4.4 不整合面の地質状況

5. トンネルHSP

5.1 探査目的

第1回目のトンネルHSP探査は、1回目水平ボーリングの実施中に行ったものであり、 $\ell \approx 128\text{m}$ 付近の断層破砕帯が確認された時点で、主にこの断層探知を目的として実施したものである。また、第2回目の探査では、2回目水平ボーリング実施前に行い、1回目孔壁崩壊部の不良地質と花崗岩・溶結性凝灰角礫岩境界部の探知を目的として実施した（図-2.2参照）。

5.2 測定方法

実験作業は犬伏トンネルの本坑内において2回実施した。表-5.1に測線の概要を、また図-5.2（a）～（b）に測線配置図を示す。さらに、測定の概念図を図-5.2に示す。

表-5.1 測線の概要

実験回数	測定坑	測線位置 (T.D. m)	切羽位置 (T.D. m)	測線長 (m)	受振点 間隔 (m)	受振点数	起振点数	備考
第1回	本坑	890～984	985.5	94	2	48	7	VSPモード測定
第2回	本坑	1104～1150	1152.0	46	2	48	8	左右両側側壁測定

5.2.1 起振方法

1) 第1回目実験

起振はダイナマイト（2号梗）の発破により行なった。VSPモードにおける起振点位置は、右側側壁の距離程784, 834, 886, 914, 937, 984mおよび左側側壁の距離程の計7箇所である。ダイナマイトは路盤より約20～40cmの高さに、 $\phi 42\text{mm}$ 、長さ2～3m程度の発破孔を削孔し、その孔内において発破させた。地震計を展開し測定機器をセットした後、各起振点においてダイナマイトの発破により側壁を起振し、その際発生する弾性波振動を測定する。

なお、発破孔には水を注入して発破の効果をよくするとともに、発破時には防爆シートを使用して小石等が飛散しないよう努めた。

2) 第2回目実験

起振は第1回目実験と同様、ダイナマイト（2号梗）の発破により行なった。起振点位置は、距離程1,050mと1,104mの床盤中央部および距離程1,104, 1,127, 1,150mの左・右両側側壁の計8箇所である。起振方法は第1回目実験と同様である。

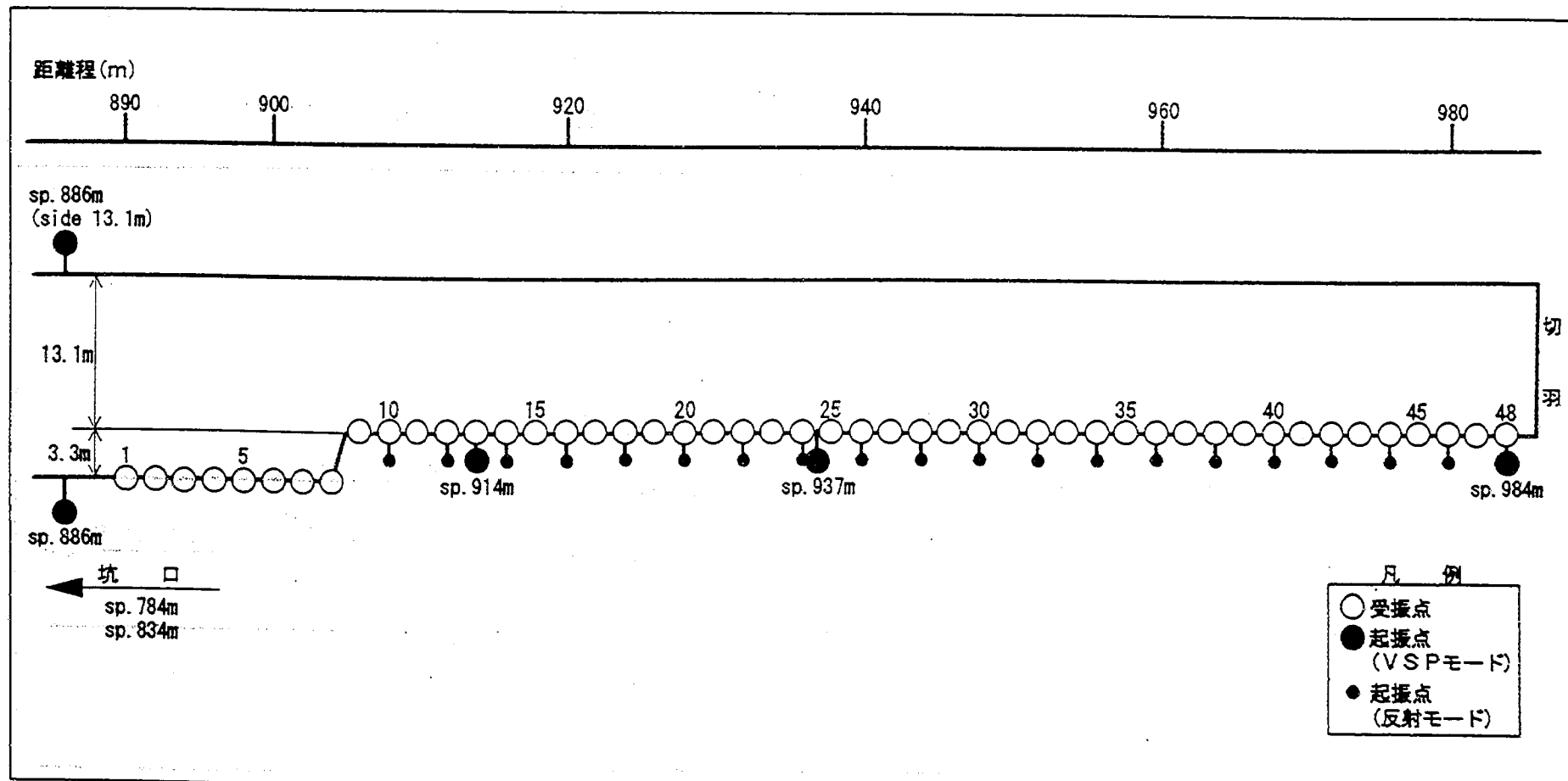


図-5.1 (a) 測線配置図 (第1回目)
平面図 (縮尺 1:400)

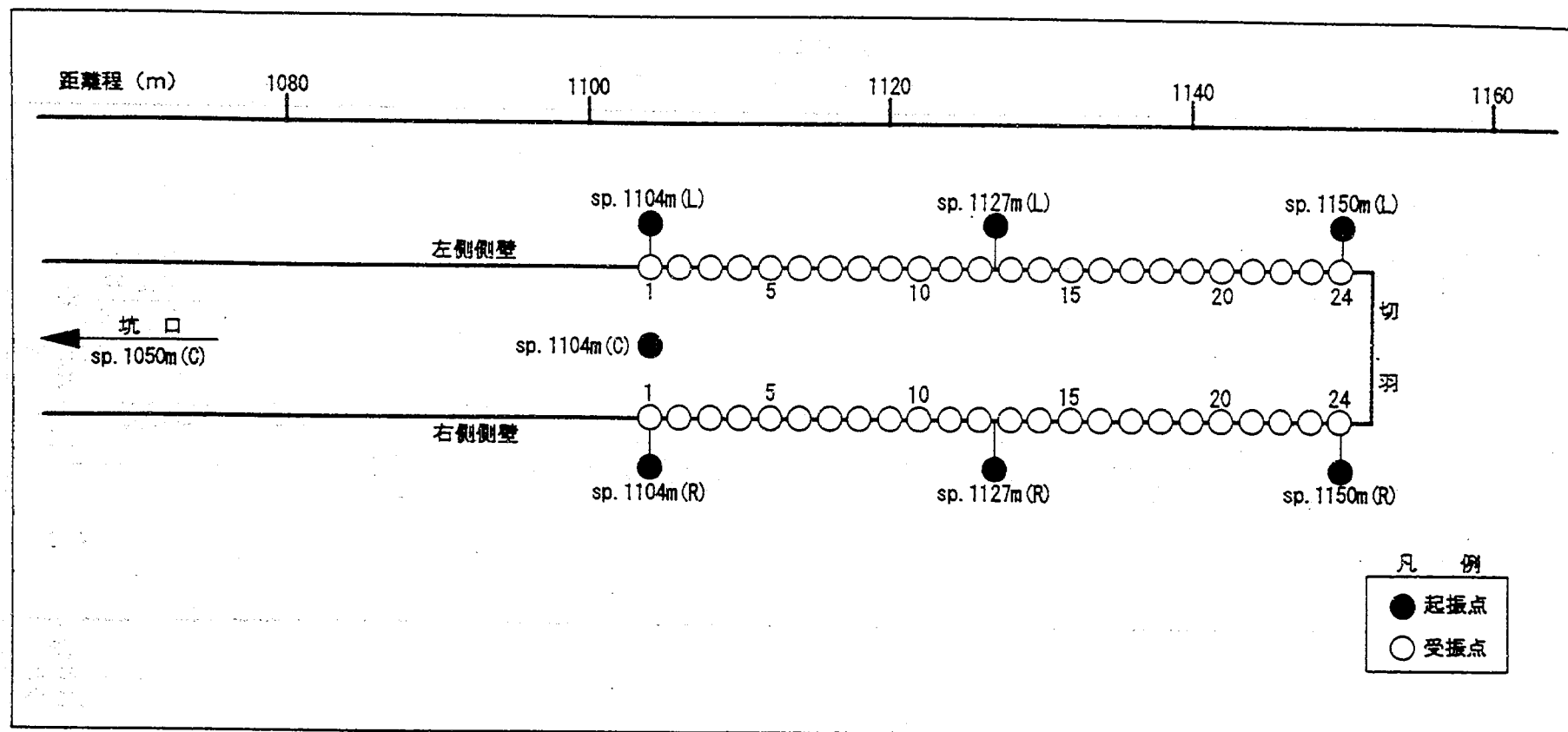


図-5.1 (b) 測線配置図 (第2回目)
平面図 (縮尺 1:400)

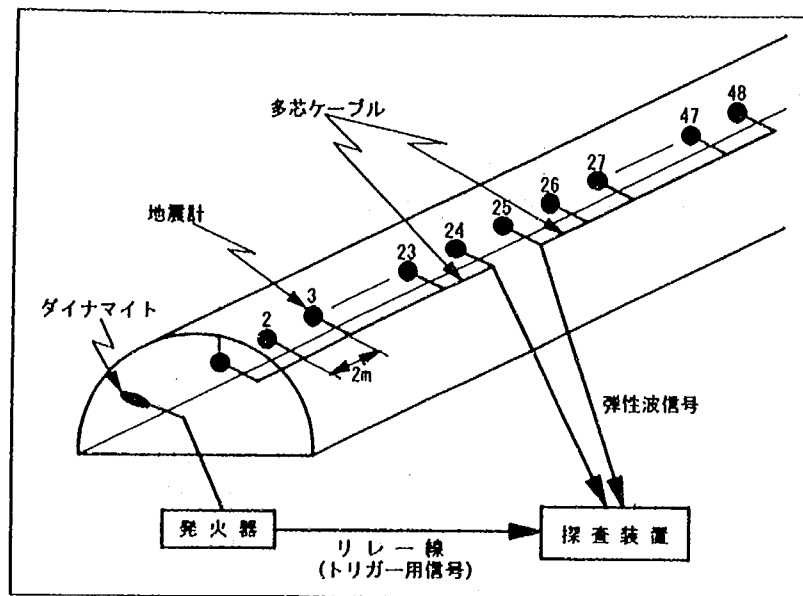


図-5.2 坑内弾性波測定の実験系

5.2.2 受振方法

第1回目実験ではトンネル坑内の右側側壁に測線長94mの測線を設定した。また、第2回目実験では左・右両側側壁に各々測線長46mの測線を設定した。両実験とも路盤上約0.5～1.5mの高さに測線を設け、2m間隔で受振器を設置した。

今回の測定では固有周波数40 Hzの速度型地震計を使用した。地震計は、吹付コンクリートに $\phi 1$ cm、長さ10cm程度の小孔を削孔して、地震計のピン部分を押し込んで固定するとともに、石膏を用いて吹付コンクリートとの密着性の改善に努めた。また、各受振点には地震計を2個ずつ設置し、各々を直列に接続してグルーピングを行なった。

地震計の出力は、1本あたり24成分の端子をもつ受振用ケーブルを2本使用して、探査装置に接続した。探査装置は48チャンネルであるため、1回の起振により設置した全受振器の測定記録が得られる。

5.2.3 記録方法

探査装置では増幅器によって増幅した電気信号をA/D変換器に入力し、デジタル信号に変換する。今回使用した探査装置は、電気信号の大きさによって自動的に増幅器のゲインを切替えるIFP (Instantaneous Floating Point) 機能を内蔵しており、この機能を利用することにより計測作業の大幅な効率化が図られた。

デジタル・データは探査装置内蔵のハード・ディスクに収録した。A/D変換時のパラメータは以下のとおりである。

サンプリング間隔 0.125ms

データ長 2kword/ch (2,048 data points/ch)

記録波形は現地において、探査装置のディスプレイ上にプロットするとともに、プリンタに波形記録を出力し、記録品質の良否を確認した。測定作業に使用した機器の一覧表を表-5.2に示す。

表-5.2 測定作業使用機器一覧表

機 器 名	個数	主 たる 仕 様
地 震 計	91個	固有周波数 40 Hz
デジタル探査装置 (探 鉱 器)	1台	チ ャ ネ ル 数 48 プリアンプ利得 34dB 同相入力除去比 >100dB @ <100Hz 周 波 数 範 囲 3Hz~60% of f_{Nyq} フ ィ ル タ ー ローカット 11段切替 アンチ・エイズ・フィルター ハイカット 3段切替 ノッチ 4段切替 down -80dB @ f_{Nyq} A / D 変 換 器 18-bit 最大入力シグナル 300mVp-p @ 34dB gain I F P 24dB single-stage IFP タ イ ミング・レシオ 138dB(Theoretical) 113dB(Measured) @ 2ms サンプ・リング・レート 31.25, 62.5, 125, 250, 500, 1000, 2000 μ s レ コ ー ド 長 1024~24000 samples ス タ ッ カ ー 32-bit register プレビュー機能あり トリガディレイ 0~9.999s 出 力 型 式 32-bit fixed point 20-bit floating point SEG-2 standard format 出 力 媒 体 3.5"FPD 1.44MB Hard Disk 120MB Optional(SCSI-2) MO(128MB), HD(120MB) インターフェイス RS-232C, VGA adaptor, keyboard, Centronics, SCSI-2 マイクロ・プロセッサ IBM-compatible, 80486 based computer ディスプレイ 640×480 dots LCD(VGA compatible) モ ニ タ full waveform noise monitor プリンタ、プロッタ サーマルプロッタ幅 640dots, 11cm
電気発火器・通信器	2台	発 火 方 式 高 圧 蓄 電 方 式 通 信 方 式 有線電話呼出信号付 ショットマーク 発火電流発信方式

5.3 解析方法

5.3.1 屈折法による解析

屈折法による解析は地山の弾性波速度およびゆるみ層の速度・層厚を得る目的で行なった。この解析において得られる初動走時はHSP等の解析作業あたって重要なデータとなる。また、ここで得られたゆるみ層の深度走時は、HSP処理において静補正量として用いられる。

測定作業によって得られた振動記録から初動走時を読み取り、各測定箇所ごとに走時曲線を作成する。走時曲線の勾配は、各層を伝播した波動の速度を示すことになる。しかし、坑壁付近のゆるみ層の厚さが場所によって一定でないことや、坑壁の凹凸の影響により走時曲線は凹凸を示し、走時曲線の勾配から直接速度を求めることはできない。

そこで、ハギトリ法（あるいは表層除去法ともよばれる）によって、表層の厚さの影響による走時の凹凸を取除いた走時曲線であるT'曲線（ハギトリ線ともいう）を作成して速度を求める。走時曲線において、原走時曲線の走時とT'曲線の走時との差が深度走時であって、この深度走時を各層ごとに分割し、その走時と各層の速度値から各層の厚さが求められる。

5.3.2 HSPによる解析

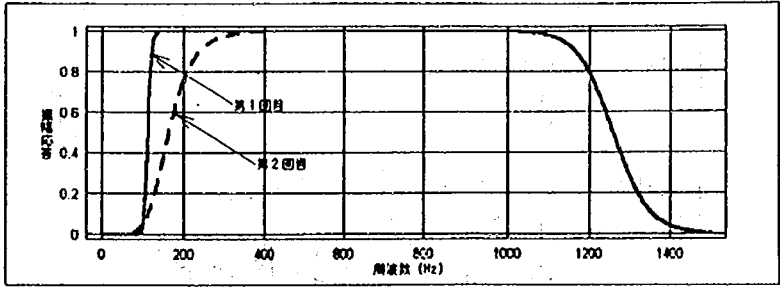
測定作業によって得られた測定記録（オリジナル・データ）に対して、切羽前方からの反射波の存在を見出し、反射面の位置を求めることを目的としてHSP処理を行なった。

HSP処理の概略的な流れを図-5.3に示す。以下に、各処理の内容についての概要を述べる。

1) 前処理

前処理として、表-5.3に示した処理を行なった。また、屈折法による解析から得られた各受振点での深度走時を用いて、各トレースに対して静補正を行なった。

表-5.3 前処理における処理とパラメータ

処 理 内 容	第1回目実験	第2回目実験
バンドパス・フィルター	 バンドパス・フィルターの周波数特性	
A G C	window length=50ms	な し
ミュート	初動位置まで	初動位置まで
テーパ・ウィンドウ	記録の終わり25ms, コサイン型	記録の終わり25ms, コサイン型

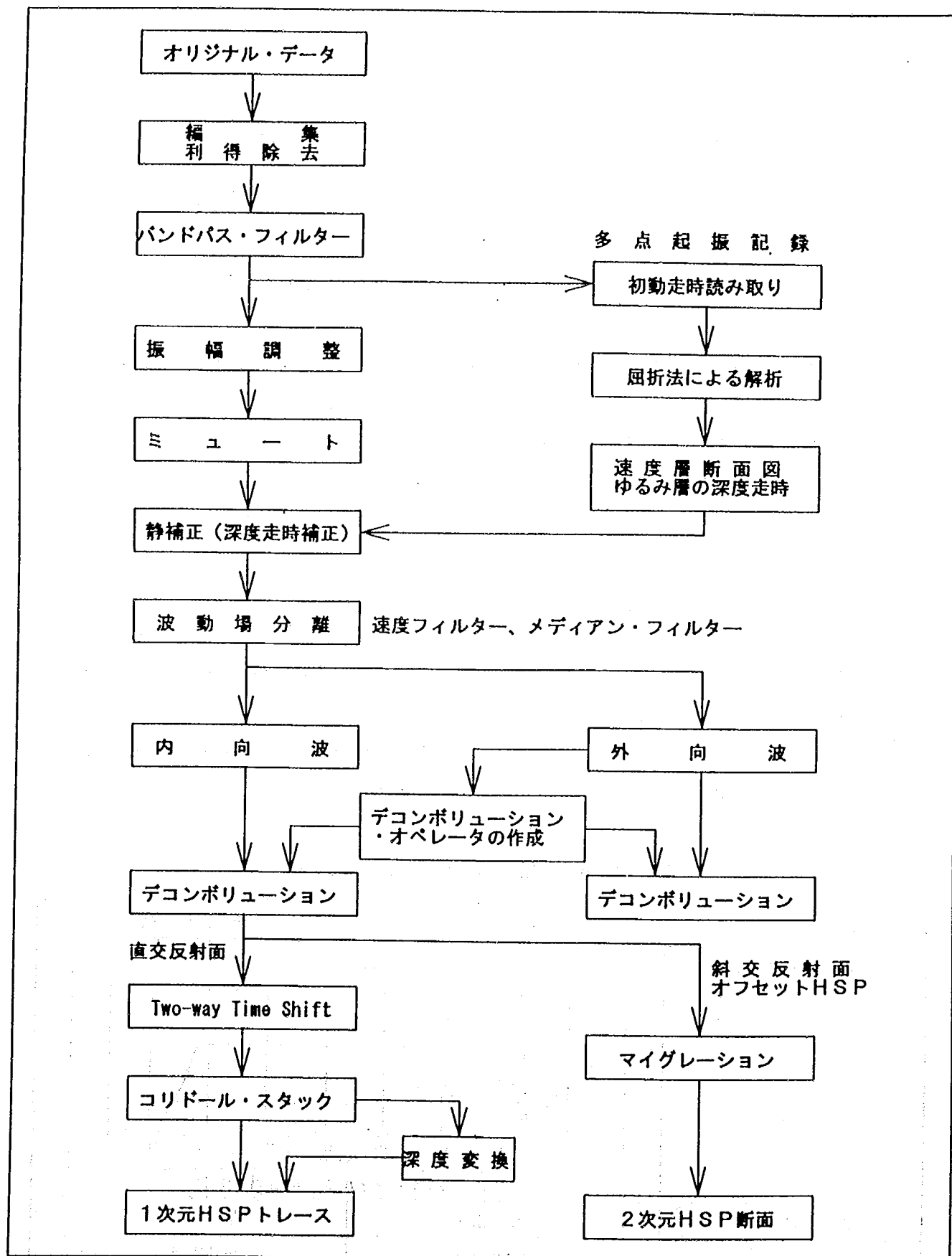


図-5.3 HSP処理の概略的な流れ

2) 波動場の分離

今回の測定のように横坑内におけるHSPでは、振源から遠ざかる方向に進む波を外向波(outgoing wave), ある種の反射波のように振源に向かって進行する波を内向波(incoming wave)と呼んで区別することにする(図-5.4)。

ここで言う波動場分離とは、外向波と内向波が含まれている記録から内向波あるいは外向波成分のみを抽出する処理である。波動場の分離処理法としては速度フィルターおよびメディアン・フィルターを用いた。図-5.5に速度フィルターにより波動場の分離を行なうための処理手順を示す。

3) デコンボリューション

第1回目の実験では、メディアン・フィルターにより分離された外向波成分からデコンボリューション・オペレータを作成し、これをメディアン・フィルターにより分離された外向波成分および速度フィルターにより分離された内向波成分に適用した。

デコンボリューション・オペレータの作成においては、以下のパラメータを使用した。

(a) 自己相関関数の計算 初動から125msの時間範囲

(b) オペレータ長 25ms

4) 後処理

波動場の分離処理によって得られた内向波および外向波成分に対して、必要に応じてバンドパス・フィルターをかける。特に、メディアン・フィルターでは高周波のノイズ(whisker)が生じるため、ハイカットのフィルターをかける必要がある。

5) マイグレーション処理

速度フィルターによって分離された内向波成分に対して、マイグレーション処理を行なって2次元平面上でのHSP断面を得る。マイグレーションはトンネル軸に斜交した反射面にも対処できる処理法であり、この処理の結果から得られるHSP断面は2次元平面上における反射強度の分布を表わしたものである。

マイグレーション法としては一般化ラドン変換(Generalized Radon Transform, 以下略してGRTと記す)による方法を用いた。また、マイグレーション時の速度構造は、屈折法の解析によって得られた地山弾性波速度を用いた。

5.4 解析結果

5.4.1 屈折法による解析結果

1) 第1回目実験

走時曲線を図-5.6(a)に、屈折法の解析により得られた速度層断面図を図-5.7(a)に示す。

屈折法による解析の結果、地山弾性波速度は距離程890~984mの全測線区間での値が得られた。また、ゆるみ層は弾性波速度値が程度であり、その層厚は3m以内である。

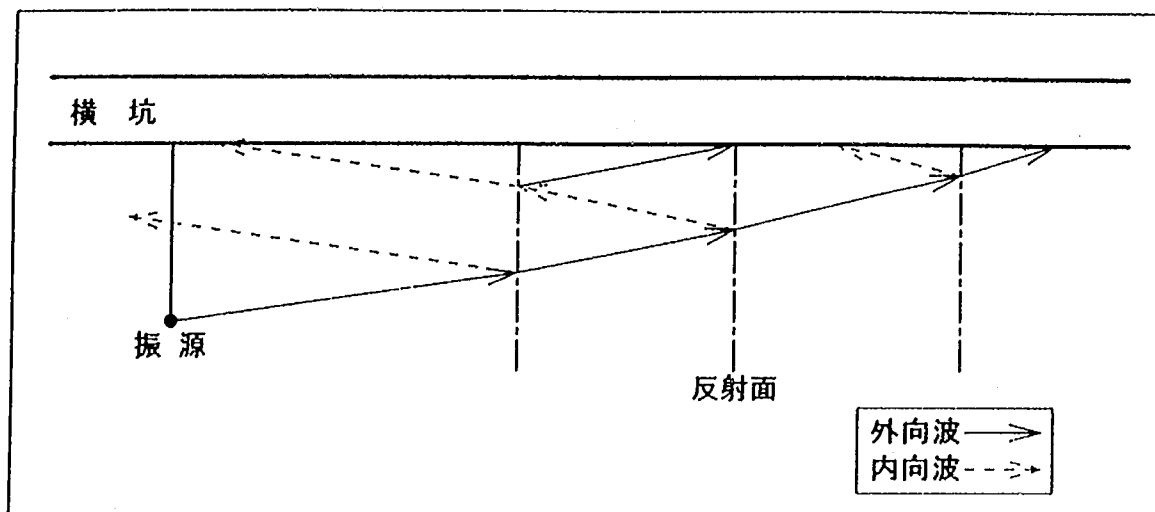


図-5.4 横坑における波動の種別

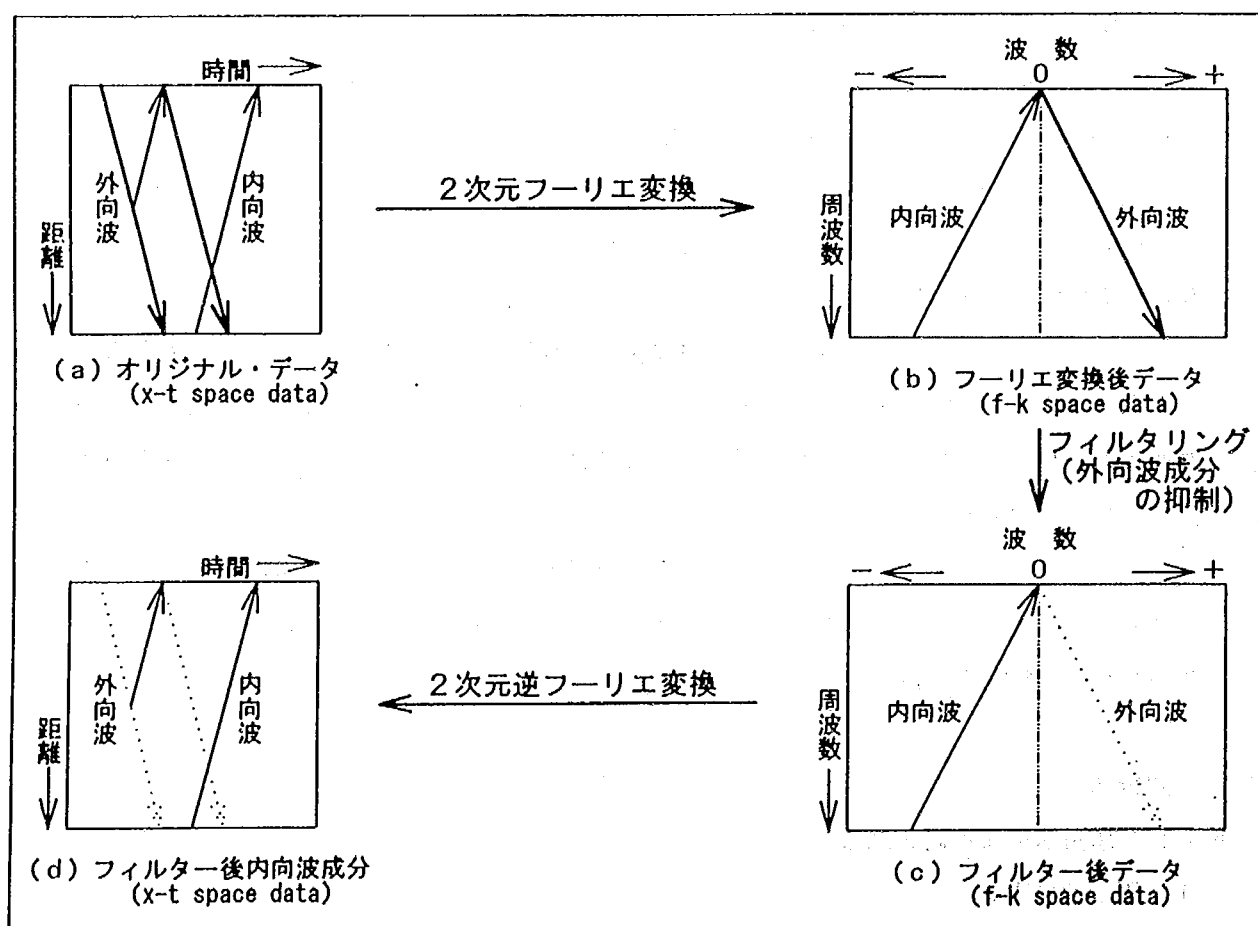


図-5.5 速度フィルターによる波動場分離処理の流れ

2) 第2回目実験

走時曲線を図-5.6 (b) ~ (c) に、屈折法の解析により得られた速度層断面図を図-5.7 (b) に示す。

屈折法による解析の結果、地山弾性波速度は左側側壁において距離程1,104~1,126mで4.1km/s, 1,126~1,150mで5.0km/sの値が得られた。また、右側側壁での地山弾性波速度は、距離程1,104~1,134mで4.2km/s, 1,134~1,150mで5.0km/sの値が得られた。ゆるみ層は弾性波速度値が2.0km/s程度であり、その層厚は左側側壁で1~3m程度、右側側壁で1~2.5m程度である。

5.4.2 HSPによる解析結果

1) 第1回目実験

第1回目実験のVSPモード測定では、右側側壁の距離程784, 834, 886, 914, 937, 984mおよび左側側壁の距離程886mの計7点で起振を行なった。HSPの解析に用いたのは、屈折法解析用の距離程984mの起振点を除いた6起振点による記録である。解析に用いた記録の諸元を表-5.4に示す。

オリジナル記録に対して、前処理を行なった後、屈折法による解析から得られた各受振点での深度走時を用いて静補正を行なった。各受振点における深度走時を表-5.5に示す。ただし、左側側壁の起振点距離程886mのデータについては、地山弾性波速度を5.1km/sとして計算した理論走時との差を補正量と仮定して静補正を行なった。

前処理後データに対して、波動場の分離法として速度フィルターを適用して内向波成分のみを抽出した。また、速度フィルター時に速度の絶対値で4.0km/s以下の成分を除去した。

速度フィルターによって抽出された内向波成分は、two-way time shift (各トレースを初動走時の分だけ時間の+方向にシフトする処理) によって同一時刻上には並ばず、反射面から離れるに従って (すなわち、距離程が小さくなるに従って) 時間の早い方向にシフトする傾向が見られる。このことは、反射面がトンネル軸に対して斜交していることを示唆している。

斜交した反射面の位置および傾斜角を求める目的で、速度フィルターによって抽出された内向波成分に対してデコンボリューションを行なった後、GRTによる方法を用いてマイグレーション処理を行なった。地山の弾性波速度値は屈折法による解析結果を考慮して全区間5.1km/sとした。

6起振点について、マイグレーション処理の結果得られた2次元HSP断面を図-5.8 (a) ~ (f) に示す。図において縦軸の0~10mの範囲がトンネル位置に対応し、0~-90mの範囲は右側側壁より右側の岩盤に対応する。また、図-5.9に図-5.8 (b) の起振点距離程834mによるHSP断面を最終結果として示す。ここで、起振点距離程834mによるHSP断面を用いた理由は以下のとおりである。

(a) 距離程784mの起振点ではダイナマイトの薬量を多くするため、保安上の理由からダイナマイトを2孔に分けて装薬した。明確にこれが原因とはいえないが、測定記録の初動付近で

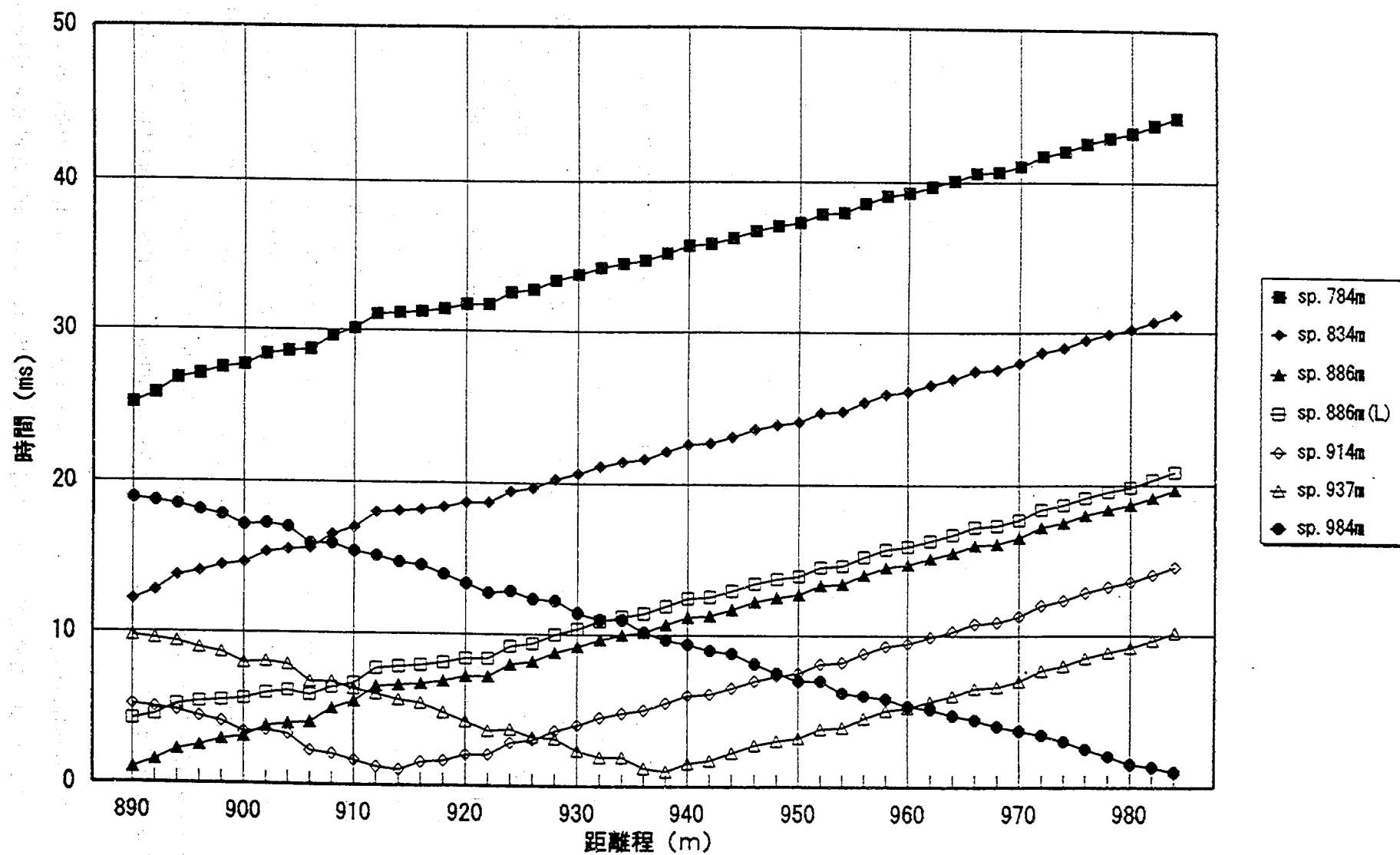


図-5.6 (a) 走時曲線 (第1回目)

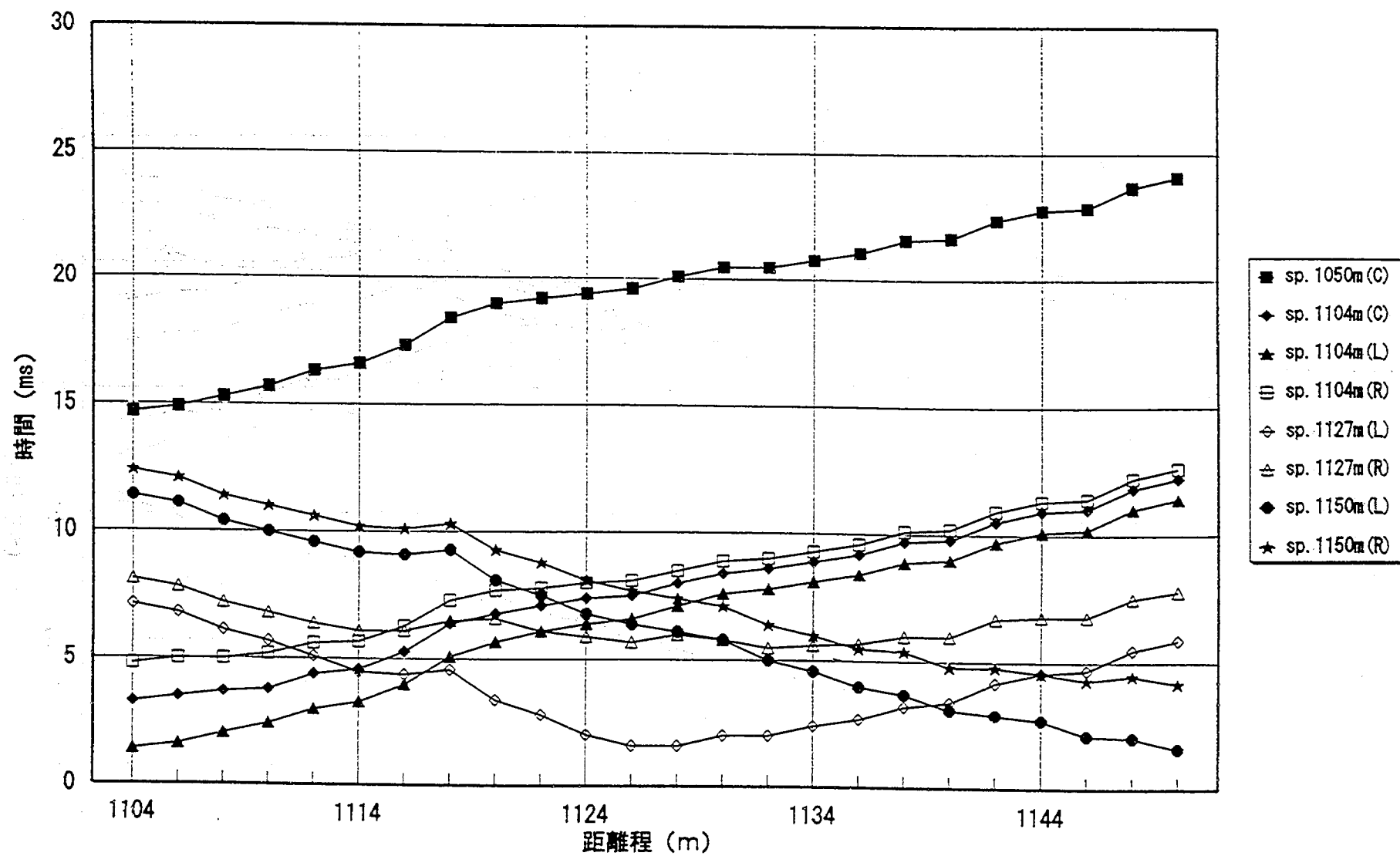


図-5.6 (b) 走時曲線 (第2回目、左側側壁)

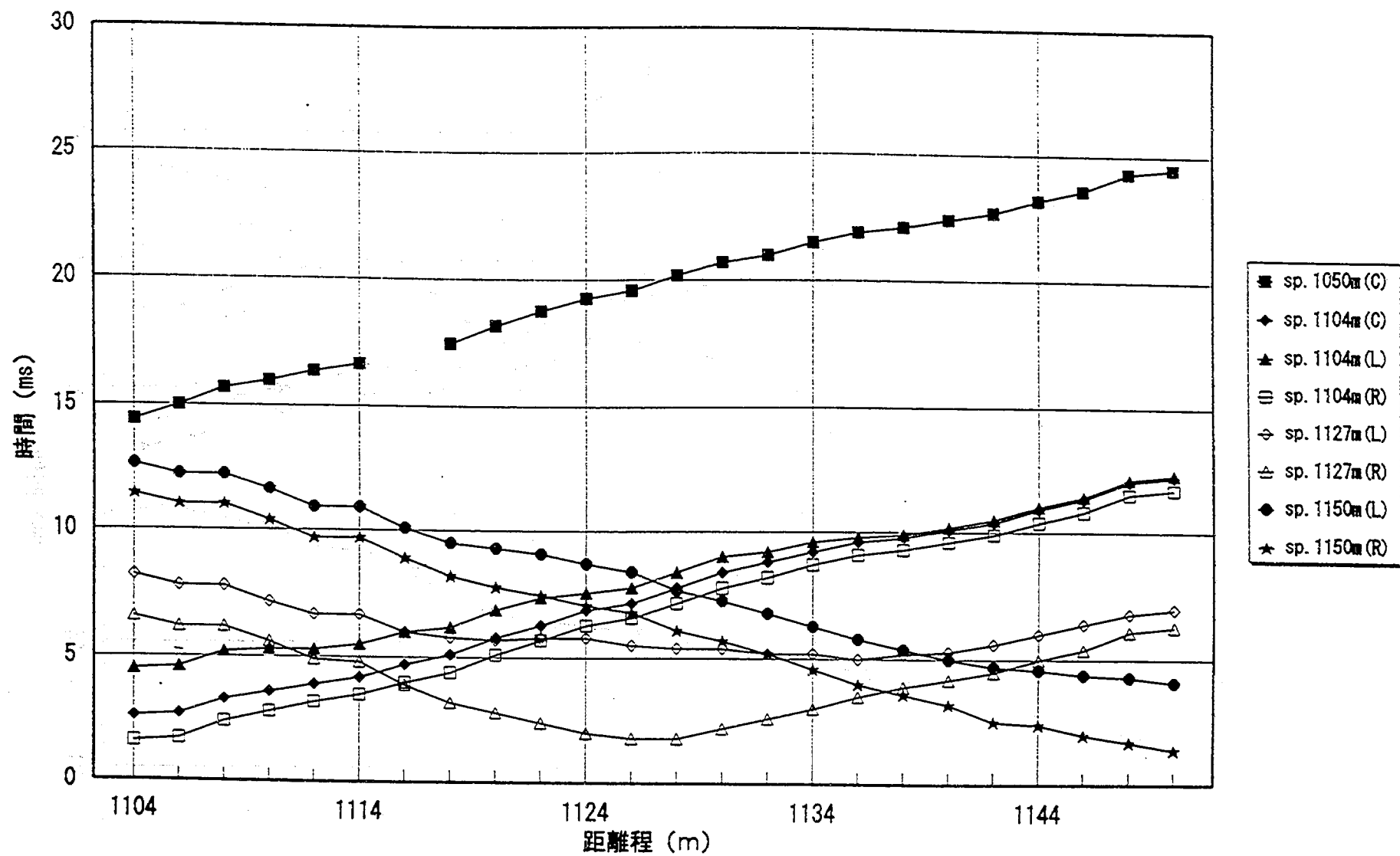


図-5.6 (c) 走時曲線 (第2回目、右側側壁)

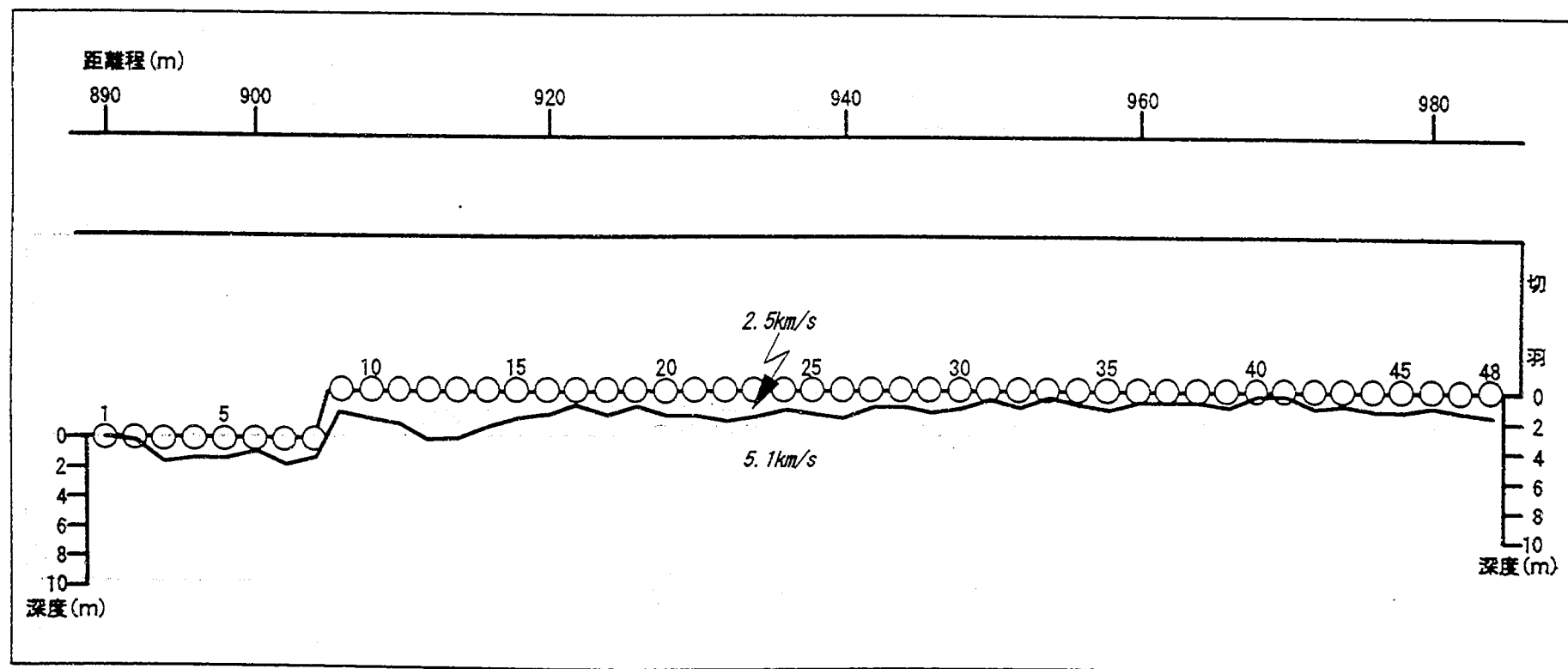


圖-5.7 (a) 速度層断面圖 (第 1 回目)
(縮尺 1/400)

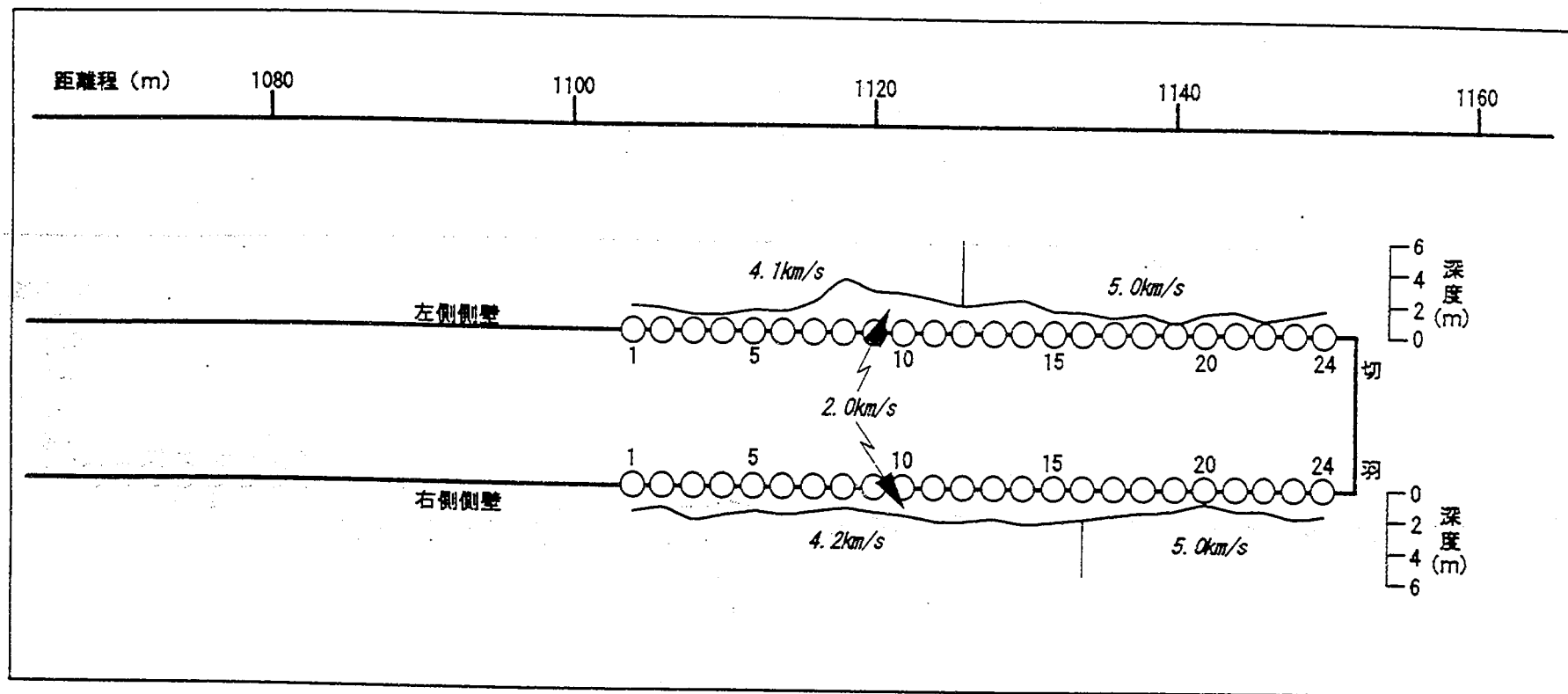


图-5.7 (b) 速度層断面图 (第2回目)
(縮尺1/400)

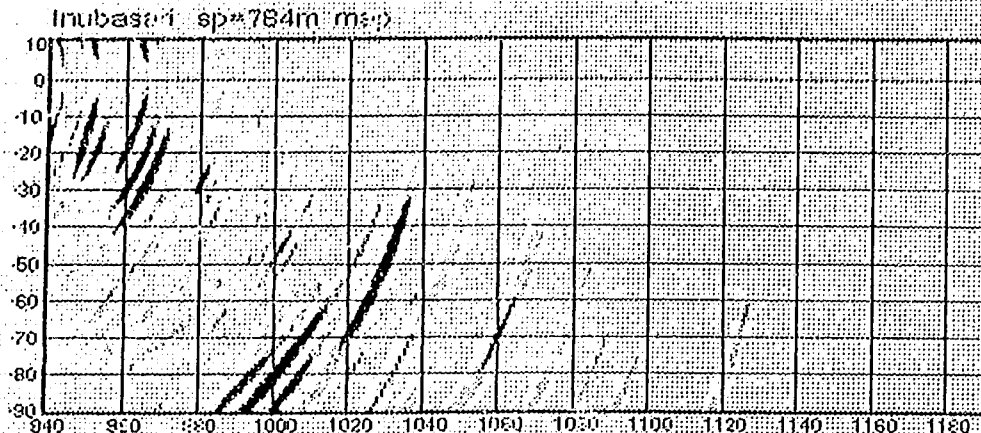
表-5.4 HSP解析に用いた記録の諸元 (第1回目)

起振点 距離程 (m)	受振点 距離程 (m)	受振点 間隔 (m)	トレース数	データ数 (1トレース)	サンプリング 間隔 (ms)	備 考
784 (右側側壁)	890~ 984 (右側側壁)	2.0	48	2048	0.125	
834 (右側側壁)	890~ 984 (右側側壁)	2.0	48	2048	0.125	
886 (右側側壁)	896~ 984 (右側側壁)	2.0	45	2048	0.125	
886 (左側側壁)	890~ 984 (右側側壁)	2.0	48	2048	0.125	
914 (右側側壁)	924~ 984 (右側側壁)	2.0	31	2048	0.125	
937 (右側側壁)	948~ 984 (右側側壁)	2.0	19	2048	0.125	

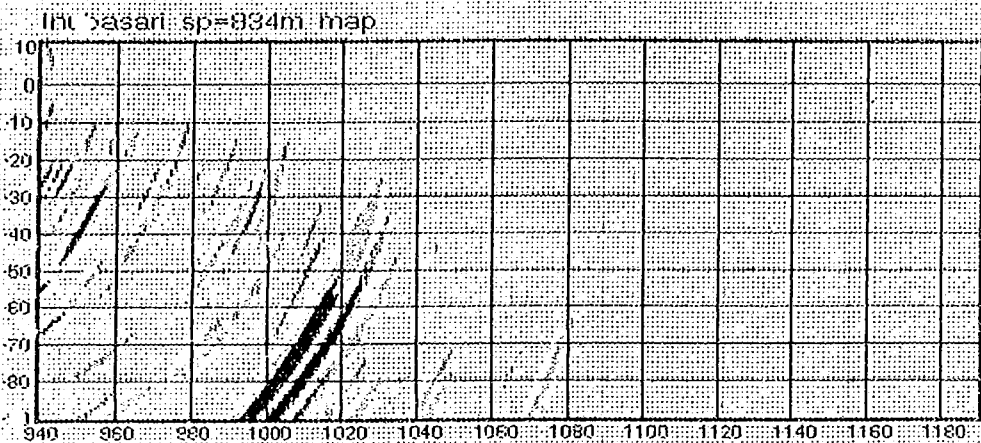
表-5.5 各受振点における深度走時 (第1回目)

受振点距離程 (m)	890	892	894	896	898	900	902	904
深 度 走 時 (ms)	0.000	0.000	0.590	0.500	0.510	0.321	0.631	0.442
受振点距離程 (m)	906	908	910	912	914	916	918	920
深 度 走 時 (ms)	0.152	0.663	0.773	1.384	1.094	0.805	0.615	0.526
受振点距離程 (m)	922	924	926	928	930	932	934	936
深 度 走 時 (ms)	0.136	0.547	0.357	0.567	0.578	0.668	0.599	0.409
受振点距離程 (m)	938	940	942	944	946	948	950	952
深 度 走 時 (ms)	0.520	0.630	0.341	0.351	0.462	0.372	0.183	0.393
受振点距離程 (m)	954	956	958	960	962	964	966	968
深 度 走 時 (ms)	0.103	0.314	0.424	0.235	0.245	0.256	0.366	0.077
受振点距離程 (m)	970	972	974	976	978	980	982	984
深 度 走 時 (ms)	0.087	0.398	0.308	0.419	0.429	0.340	0.450	0.560

(a)起振点 sp. 784 m



(b)起振点 sp. 834 m



(c)起振点 sp. 886 m

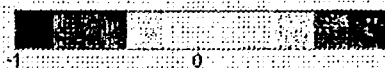
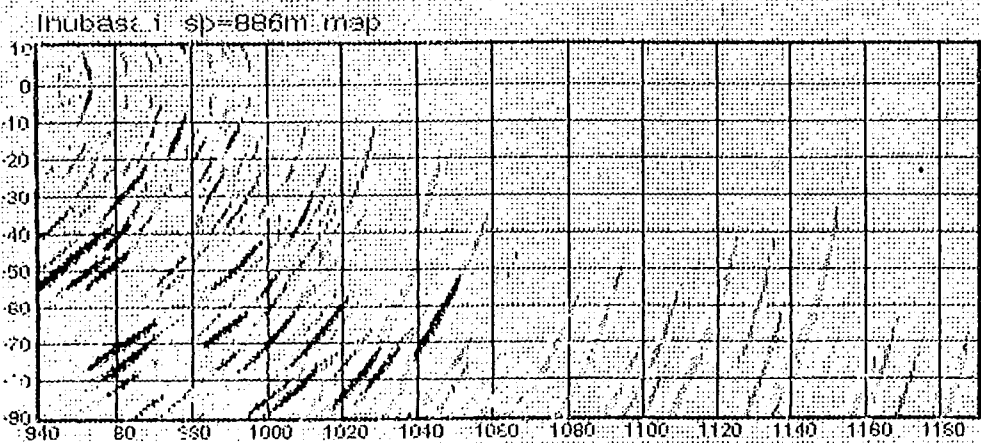
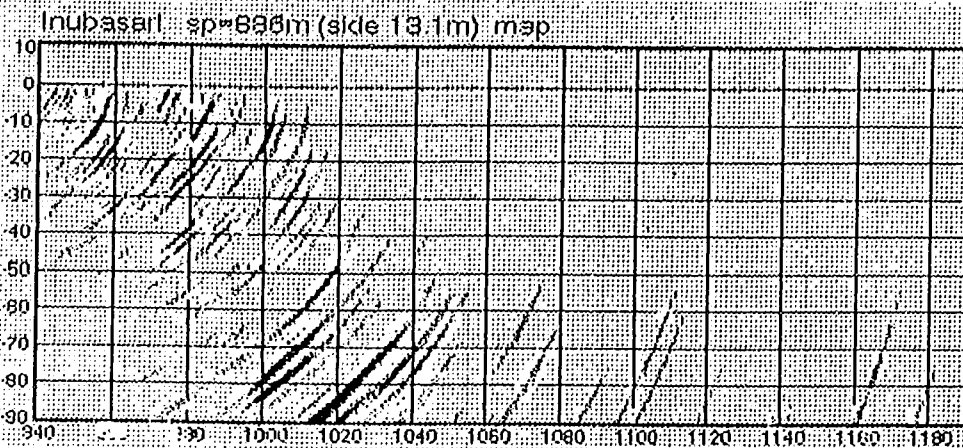
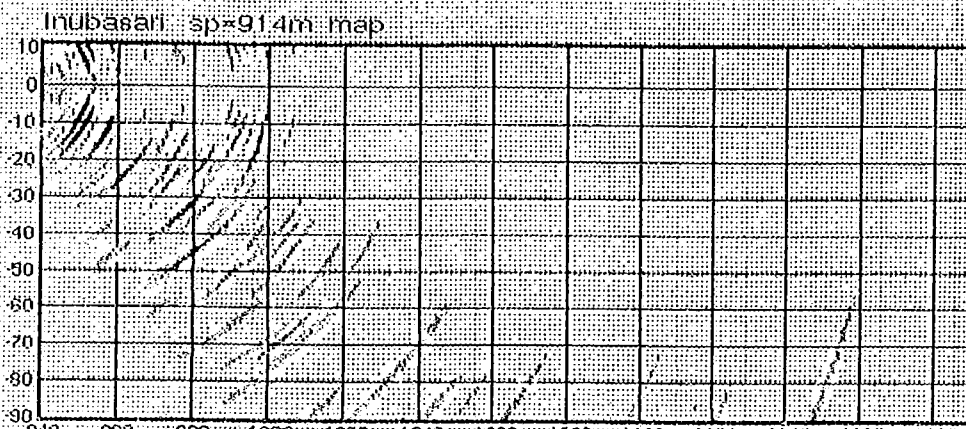


図-5.8 マイグレーション後HSP断面

(d) 起振点 sp. 886 m (side 13.1m)



(e) 起振点 sp. 914 m



(f) 起振点 sp. 937 m

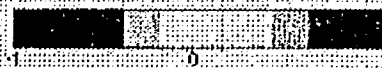
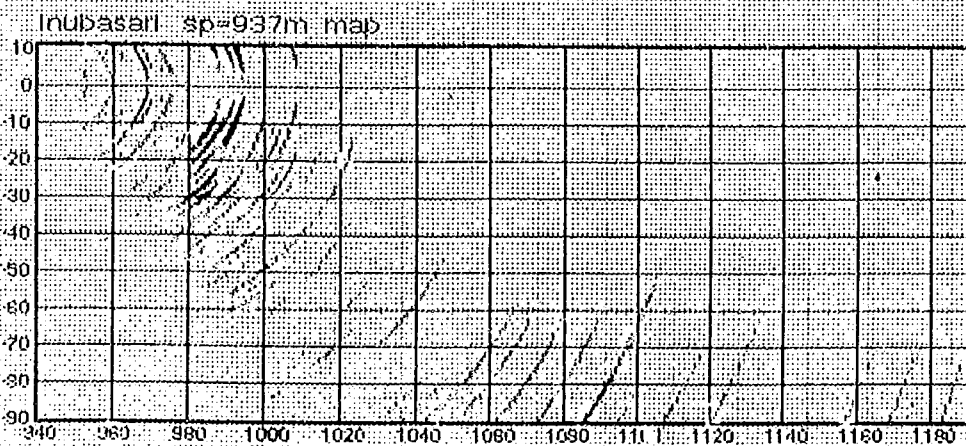


図-5.8 マイグレーション後HSP断面

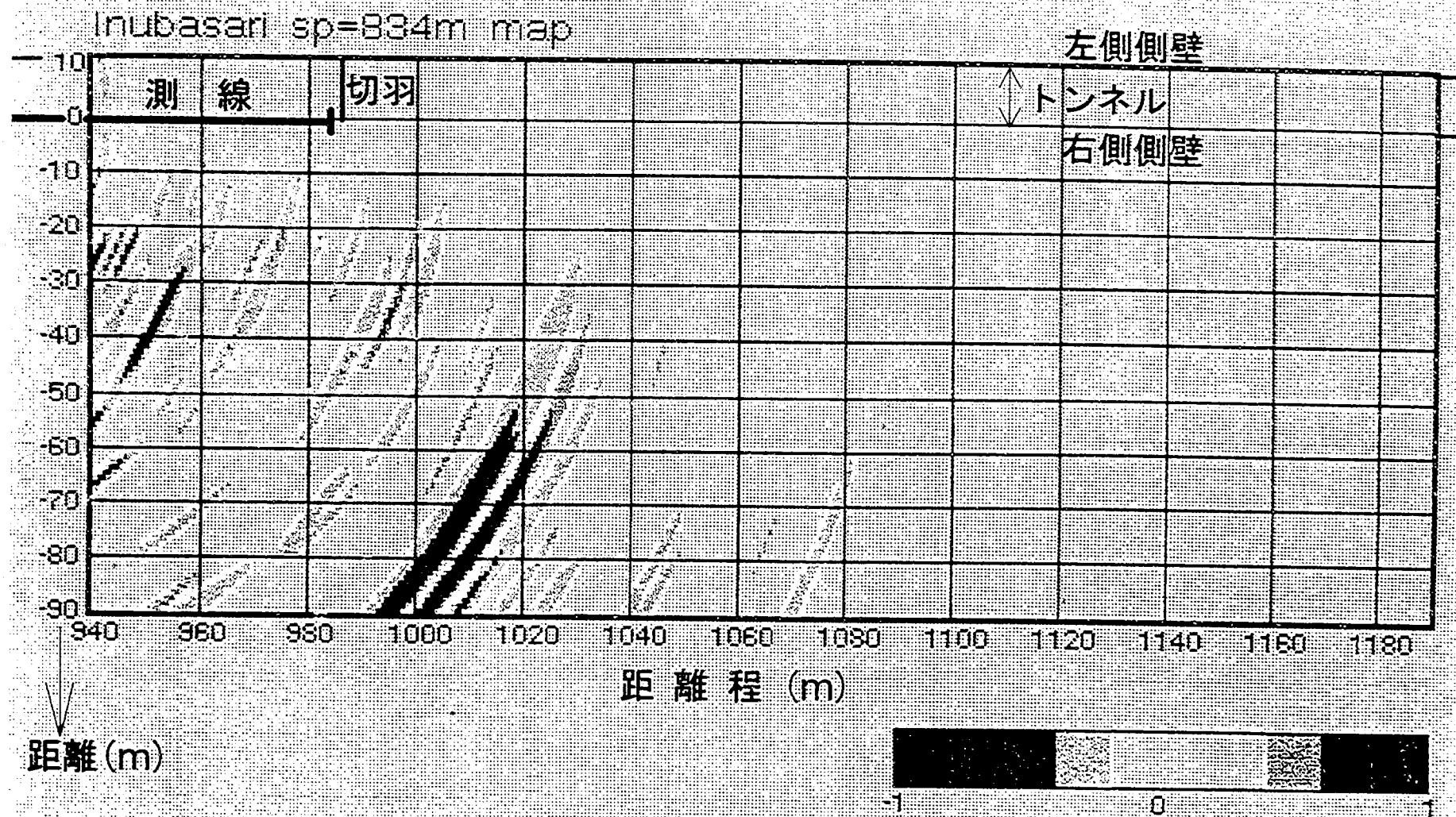


図-5.9 HSP断面（最終結果）（第1回目）

は初動部分よりもその約4ms後に見られる後続波の振幅の方が大きい。このため、距離程784mの起振点によるHSP断面は用いなかった。

- (b) 距離程886(左右両側側壁), 914, 937mの4起振点によるHSP断面では、切羽前方の約50m以内における反射面の数がかなり多く見られる。これらの反射面は必ずしも真の地質不連続面からの反射波とは考えられない。また、速度フィルター後の内向波成分では、一般に波動の卓越周波数が高く、ノイズが目立つように見受けられるとともに、起振点784, 834mの内向波成分に見られるような卓越した反射波位相がこれらの内向波成分には見られない。

以上の点から、距離程886(左右両側側壁), 914, 937mの4起振点によるHSP断面は用いなかった。

2) 第2回目実験

第2回目実験の測定では、距離程1,050mと1,104mの床盤中央部および距離程1,104, 1,127, 1,150mの左・右両側側壁の計8点で起振を行なった。HSPの解析に用いたのは、屈折法解析用の距離程1,150mの起振点および切羽に近い距離程1,127mの起振点を除いた4起振点による記録である。解析に用いた記録の諸元を表-5.6に示す。

オリジナル記録に対して、前処理を行なった後、屈折法による解析から得られた各受振点での深度走時を用いて静補正を行なった。各受振点における深度走時を表-5.7に示す。ただし、起振点と受振点アレイが同じ側壁上にない場合には、屈折法による解析から得られた地山弾性波速度を用いて理論走時を計算し、その走時と観測走時との差を補正量と仮定して静補正を行なった。

前処理後データに対して、波動場の分離法として速度フィルターを適用して内向波成分のみを抽出した。また、速度フィルター時に速度の絶対値で 3.5km/s 以下の成分を除去した。

トンネル軸に対して斜交した反射面の位置および傾斜角を求める目的で、速度フィルターによって抽出された内向波成分に対して、GRTによる方法を用いてマイグレーション処理を行なった。地山の弾性波速度値は屈折法による解析結果より全区間での平均的な速度値 4.5km/s を用いた。

4起振点および左・右側側壁の受振点アレイそれぞれについて、マイグレーション処理の結果得られた2次元HSP断面を図-5.10(a)~(h)に示す。また、距離程1,050mの起振点により左・右側側壁の受振点アレイそれぞれで得られた2つのHSP断面(図-5.10(a)および(b))をスタックして得られた断面を最終結果として図-5.11に示す。

表-5.6 HSP解析に用いた記録の諸元 (第2回目)

起振点 距離 (m)	受振点 距離 (m)	受振点 間隔 (m)	トレース数	データ数 (1 トレース)	サンプリング 間隔 (ms)	備 考
1050 (床盤中央)	1104~1150 (左側側壁)	2.0	24	2048	0.125	
	1104~1150 (右側側壁)	2.0	24	2048	0.125	
1104 (床盤中央)	1114~1150 (左側側壁)	2.0	19	2048	0.125	
	1114~1150 (右側側壁)	2.0	19	2048	0.125	
1104 (左側側壁)	1114~1150 (左側側壁)	2.0	19	2048	0.125	
	1114~1150 (右側側壁)	2.0	19	2048	0.125	
1104 (右側側壁)	1114~1150 (左側側壁)	2.0	19	2048	0.125	
	1114~1150 (右側側壁)	2.0	19	2048	0.125	

表-5.7 各受振点における深度走時 (第2回目)

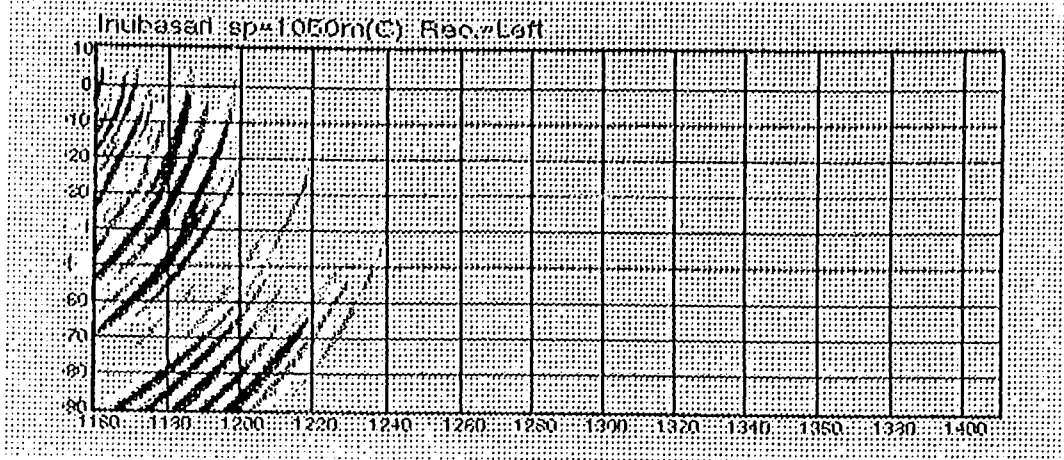
(a) 左側側壁

受振点距離程 (m)	1104	1106	1108	1110	1112	1114	1116	1118
深 度 走 時 (ms)	0.70	0.65	0.50	0.50	0.60	0.55	0.85	1.50
受振点距離程 (m)	1120	1122	1124	1126	1128	1130	1132	1134
深 度 走 時 (ms)	1.20	1.10	0.90	0.80	0.90	1.00	0.70	0.65
受振点距離程 (m)	1136	1138	1140	1142	1144	1146	1148	1150
深 度 走 時 (ms)	0.50	0.60	0.35	0.60	0.70	0.45	0.80	0.80

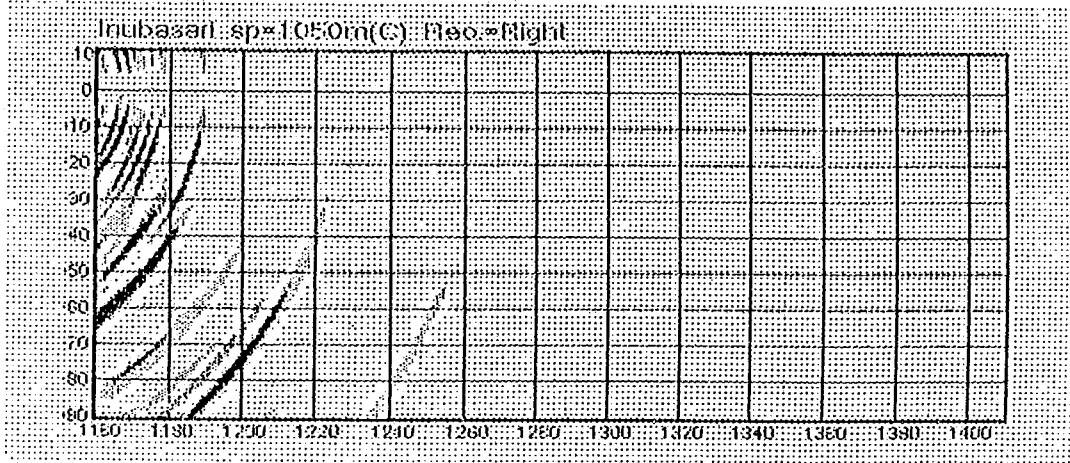
(b) 右側側壁

受振点距離程 (m)	1104	1106	1108	1110	1112	1114	1116	1118
深 度 走 時 (ms)	0.75	0.60	0.95	0.85	0.70	0.85	0.70	0.55
受振点距離程 (m)	1120	1122	1124	1126	1128	1130	1132	1134
深 度 走 時 (ms)	0.70	0.85	0.95	0.95	0.90	1.00	0.95	0.90
受振点距離程 (m)	1136	1138	1140	1142	1144	1146	1148	1150
深 度 走 時 (ms)	0.80	0.70	0.65	0.45	0.65	0.65	0.85	0.80

(a)起振点：s p.1050m (床盤中央)，受振点アレイ：左側側壁



(b)起振点：s p.1050m (床盤中央)，受振点アレイ：右側側壁



(c)起振点：s p.1104m (床盤中央)，受振点アレイ：左側側壁

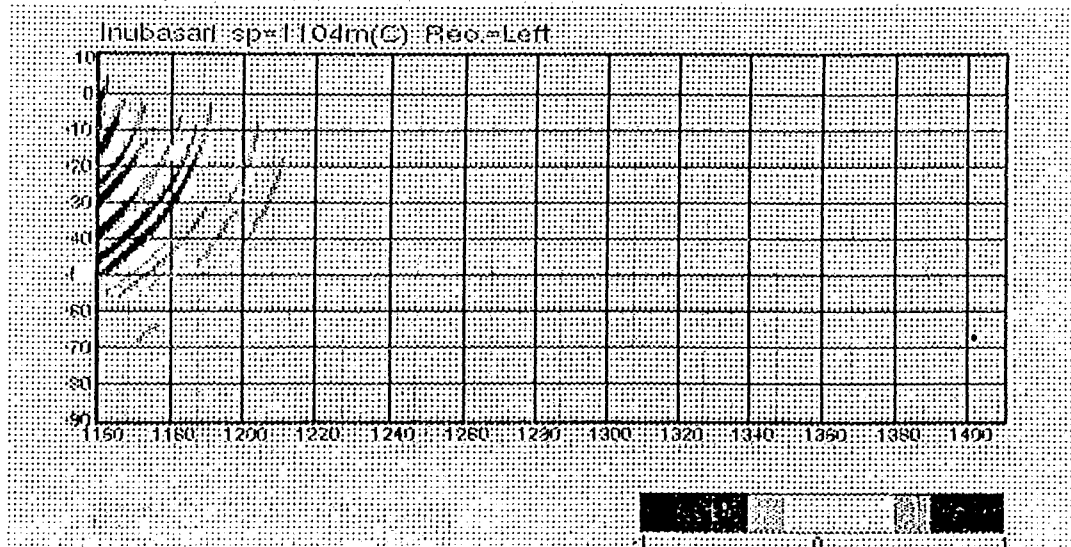
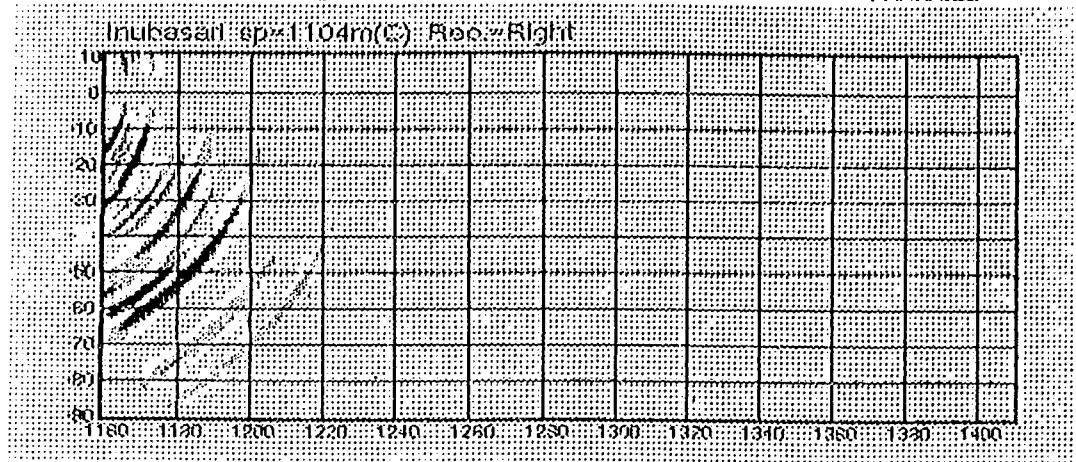
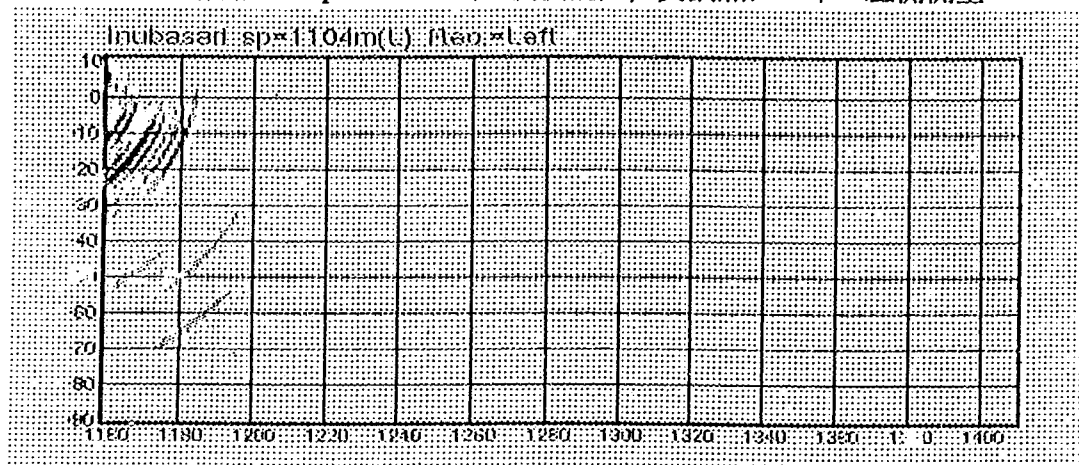


図-5.10 マイグレーション後HSP断面

(d)起振点：s p.1104m（床盤中央），受振点アレイ：右側側壁



(e)起振点：s p.1104m（左側側壁），受振点アレイ：左側側壁



(f)起振点：s p.1104m（左側側壁），受振点アレイ：右側側壁

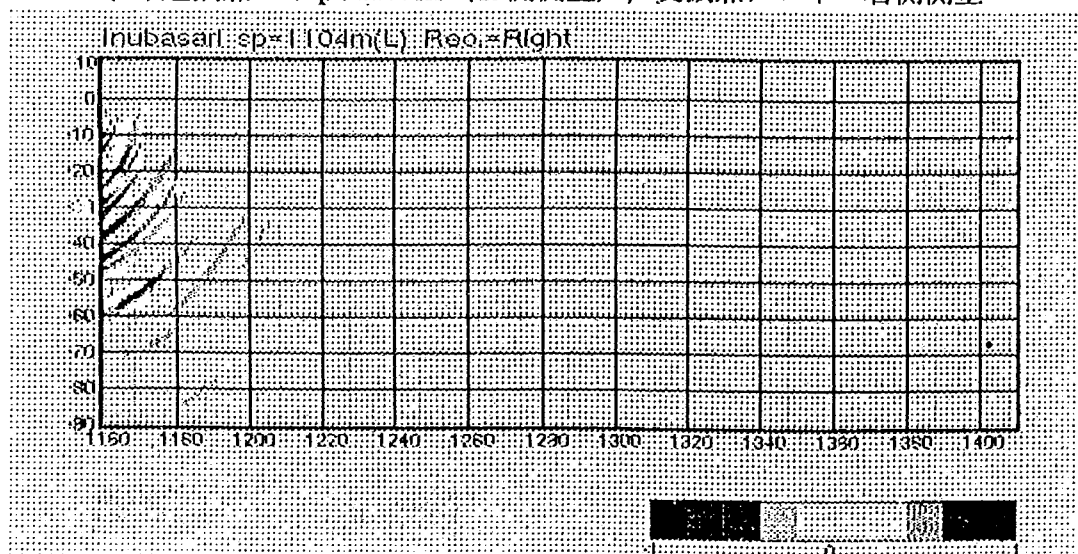
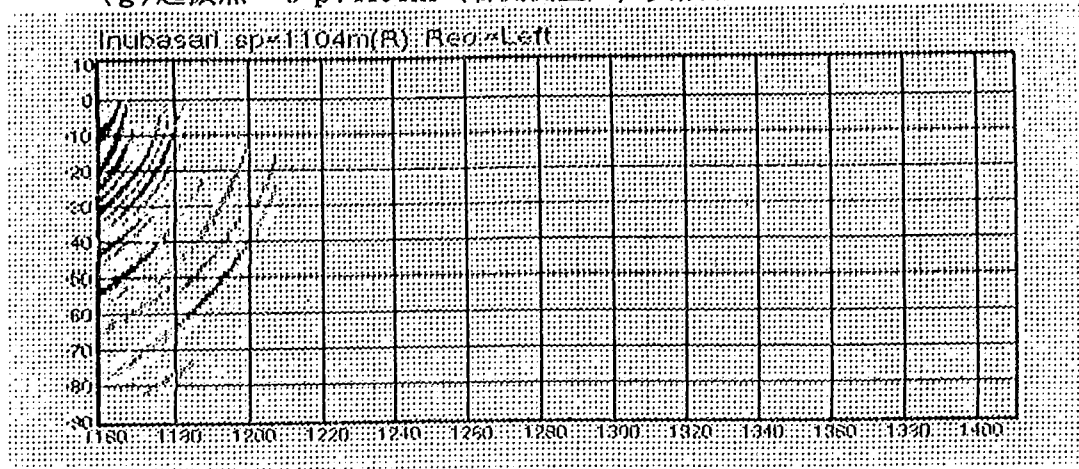


図-5.10 マイグレーション後HSP断面

(g)起振点：s p.1104m (右側側壁)，受振点アレイ：左側側壁



(h)起振点：s p.1104m (右側側壁)，受振点アレイ：右側側壁

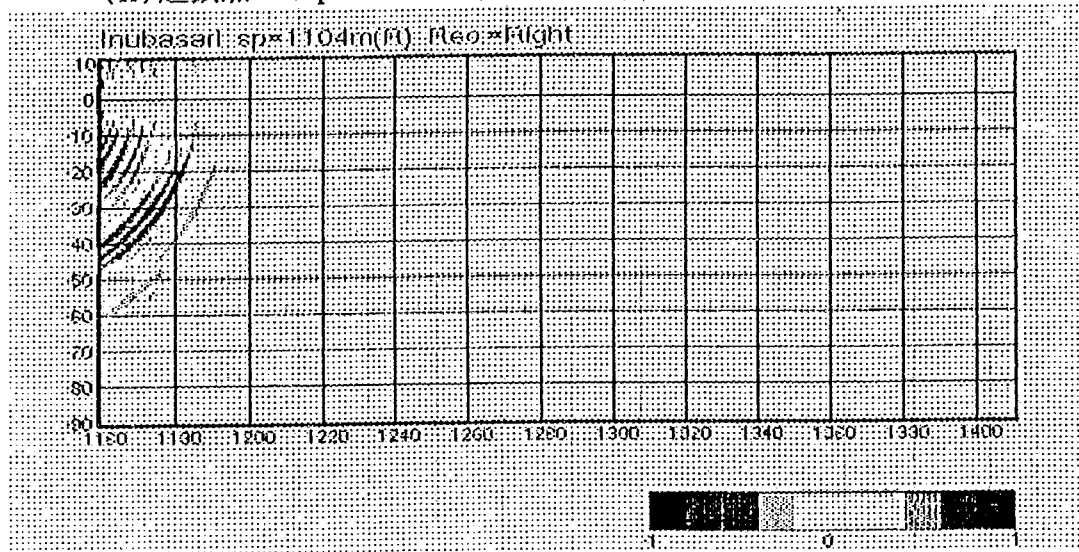


図-5.10 マイグレーション後HSP断面

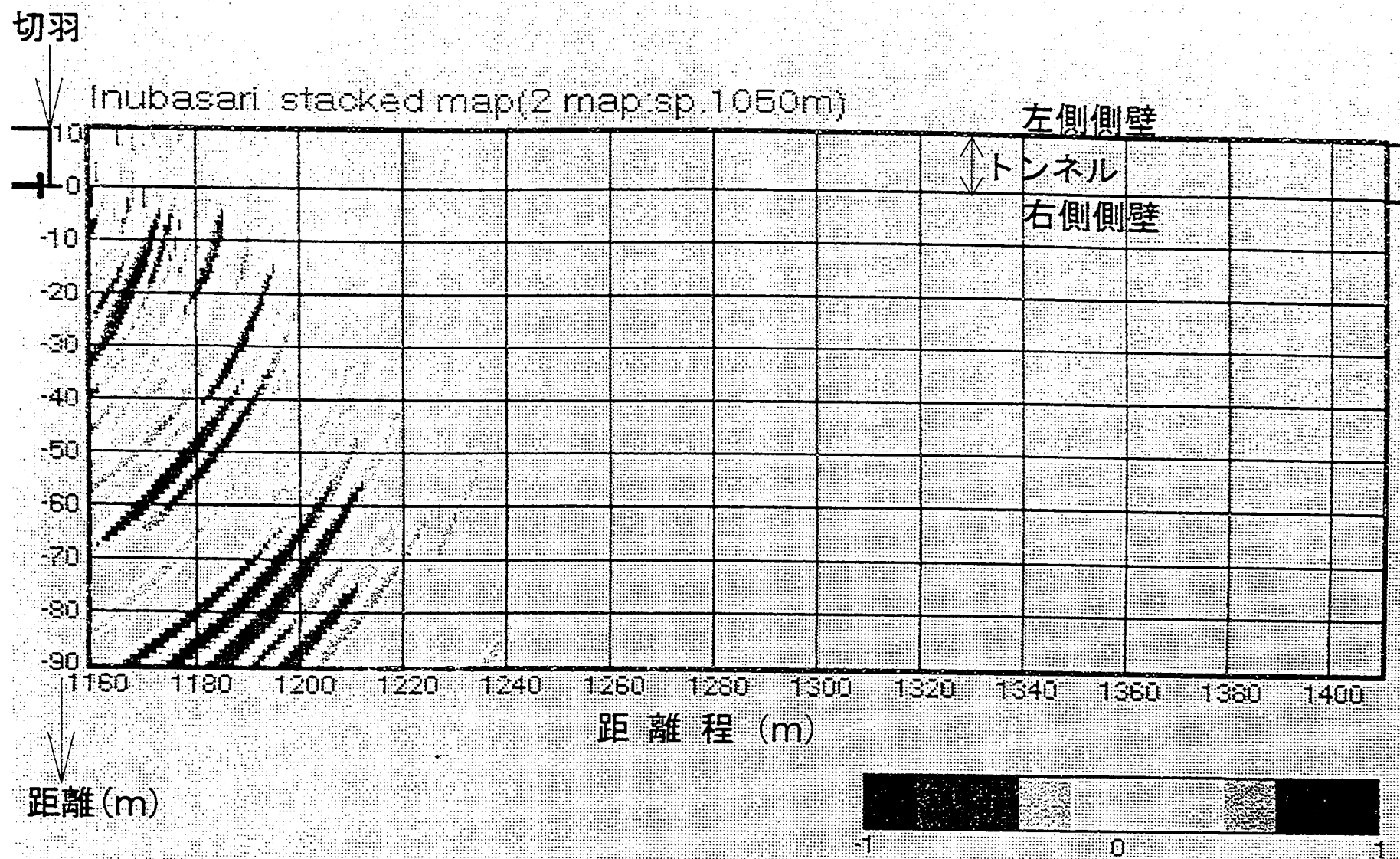


図-5.11 HSP断面(重石断面)(第2回目)

6. 考 察

6.1 トンネルHSP解析結果と地質状況の関係

解析結果と地質状況の関係を検討する上では、トンネルHSPの精度や適用範囲に対する現状認識が必要である。その精度や適用範囲を次に概説する。

1) 反射P波の振幅およびその極性は次の反射係数 γ によって表せる。直接波の極性と比べて、それと同じ極性の反射波であれば軟質→硬質、逆の極性であれば硬質→軟質の境界面からのものとみなすことができる。

$$\gamma = (\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1) / (\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1)$$

ここに、

ρ_1 : 密度

v_1 : 弾性波速度

$\rho_1 v_1$: 音響インピーダンス (坑口側)

$\rho_2 v_2$: 音響インピーダンス (坑奥側)

2) 反射P波の振幅表示は、断面毎に振幅の絶対値で規格化して、振幅値を $[-1, +1]$ の範囲で表している。

振幅値の大小は相対表示であり、その比較は同じ解析断面内のみでしか行なえない。

3) 反射面の出現位置は、屈折法で求められた地山速度で推定している。

4) 解析区間が重複する部分では、起振点からの距離の短い方の結果が信頼性が高い。

5) 反射面の走向は、その反射面のうちで振幅の絶対値が大きい部分の接線から求められる。

6) $8 \sim 20^\circ$ といった緩傾斜の反射面は現在のVSPモードの処理では扱えない。

7) 岩盤内を伝播する波動は単一のインパルスではなく、ある時間幅をもつ複雑な波形である。解析断面において、+あるいは-の振幅が大きい部分を1つ1つの反射面とみなすことには注意を要する。

6.1.1 第1回計測結果との地質対比

第1回目解析断面の図-6.1では、Bで表された赤色反射波(軟質→硬質、実線)が最大の振幅値であり、音響インピーダンスの差が最も大きい。このことは、岩盤強度(ρ , v)が軟質部から硬質部へ急激に変化したことを示している。掘削時の火薬使用量を示した図-4.1は、断層破碎帯を抜けたNo62+93mで急激に増加しており図-6.1で示す実績地質とも良く対応している。したがって、B反射波はこの断層破碎帯の坑奥側境界に一致すると考えられる。一方、Aの青色反射波(硬質→軟質、点線)は、色調からいって振幅絶対値が $[B > A]$ であるもののかなり明瞭な反射波である。さらに、A, B間距離は約10mであり、影響ゾーンを含めた断層破碎帯の幅とはほぼ一致している。このことから、A反射波は断層破碎帯の影響ゾーンの坑口側境界を表していると考えられる。また、C反射波はそれより坑奥の小断層に相当する可能性もあるが、B反射波の後続波とも考えられる。

このように、HSP断面によるB反射波の推定出現位置は、実際の切羽出現位置より約20m坑奥側

である。解析に当たっては地山速度 $V_p = 5.1 \text{ km/s}$ を使用しているが、火薬使用量から判断すれば断層破砕帯の坑口側はそれよりも低い速度であると推定できる。したがって、実際の出現位置に合わせて逆算すると、平均的な地山速度は $V_p = 4.5 \sim 5.0 \text{ km/s}$ 程度であると考えられる。

A～C以外の反射波は、1本ずつ実地質と対比することは困難であり、反射帯として捉えたと傾向が若干認められる。その対比結果を図-6.2、表-6.1に示す。

6.1.2 第2回計測結果との地質対比

第2回目解析断面内には図-6.3の通り、カタクラサイト花崗岩と溶結性凝灰角礫岩との不整合面が約 8° の受け盤構造で出現している。このような緩勾配の地質構造からの反射波は、現在のVSPモードの処理では扱えず、波動場分離の段階で除去されている筈である。しかし、同図には不整合面に対応すると思われる反射帯群⑨が認められる。この理由は一概に述べられないが、可能性としては、不整合面の傾斜が地山内で高角度で傾斜していた場合の反射帯や不整合面自体の凹凸からの反射帯であることは考えられる。

これを含めた対比結果は表-6.1に一覧されている。

6.2 測定方法についての検討

6.2.1 測定ジオメトリ

測定ジオメトリとはトンネル坑内における起振点および受振点の幾何学的配置、すなわち測定パターンをいう。トンネル坑内という限定された空間において、どのように起振点と受振点を探索目的に対して有効に配置するかは非常に重要な問題である。

図-6.4に測定ジオメトリの例を示す。図-6.4中の(a)～(c)の測定パターンのうち、(a)および(b)については実際に現場で実施しており、犬伏トンネルにおける実験では第1回目は(a)、第2回目は(b)のパターンで測定を行っている。

HSPの測定・処理を通じて現在問題とされている項目は以下のとおりである。

- (1) HSPによる処理断面から反射面（地質構造）の傾斜方向を一意的に決めることができない。
- (2) HSPによる処理断面には一般に多くの境界面が見出されるが、それぞれが何に対応するのか判定することができない。計測された反射波の中で施工に関係のある反射波のみを拾出す必要がある。
- (3) 振源オフセット距離により、処理断面における反射面の特徴が異なる。
- (4) 先進ボーリングのように切羽前方の岩石の劣化状況を把握できない場合には、そのP波弾性波速度を適切に把握する手法がない。

以上の(1)～(4)の問題のうち、(1)および(3)は、測定ジオメトリとの関連性が深い。

(1)の問題は直線状のトンネル軸近傍での起振点・受振点配置から二次元あるいは三次元的な構造を再構成することができないということであり、トンネル軸の直交方向に如何にオフセットをとっ

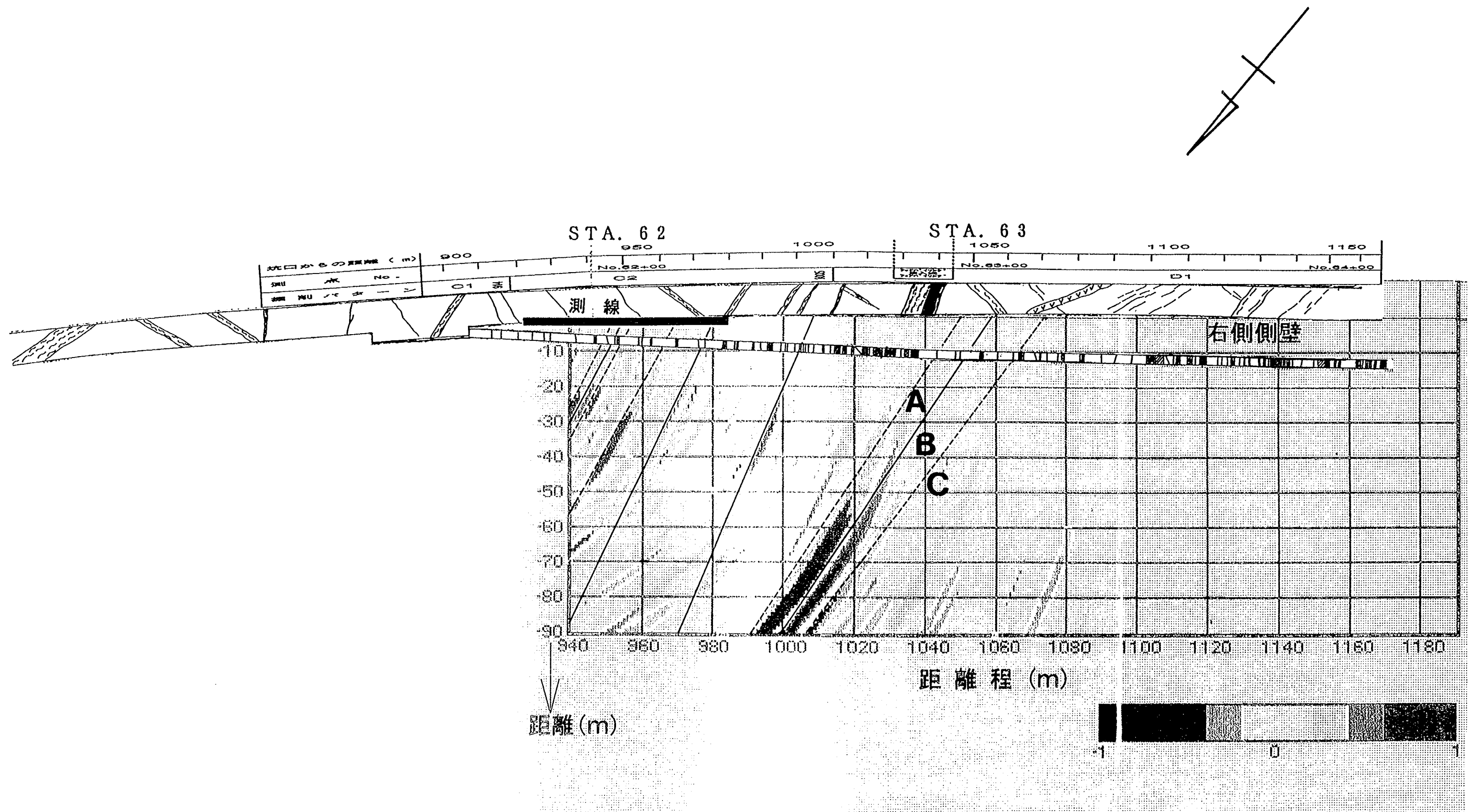


図-6.1 顕著な反射波と地質の関係

断面図 (センター)

平面図

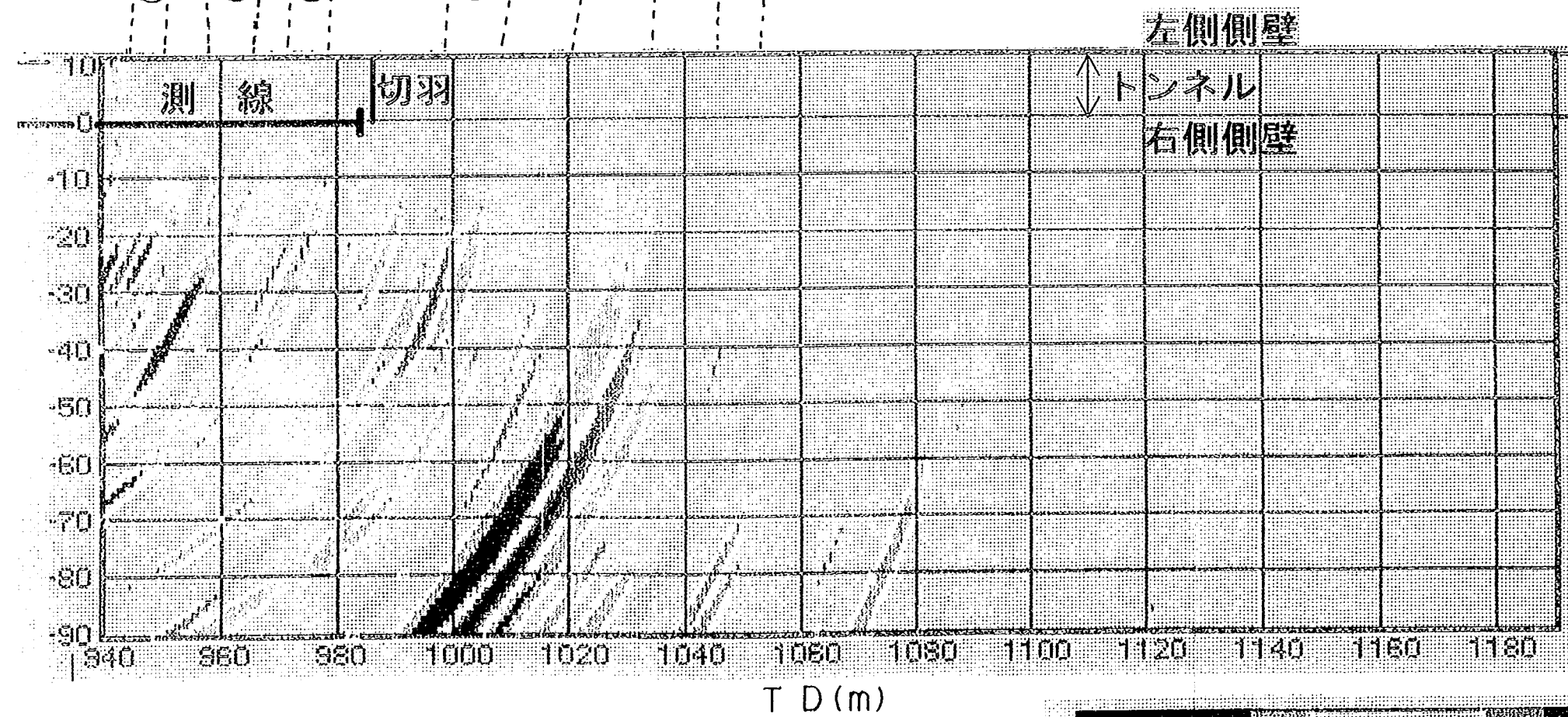
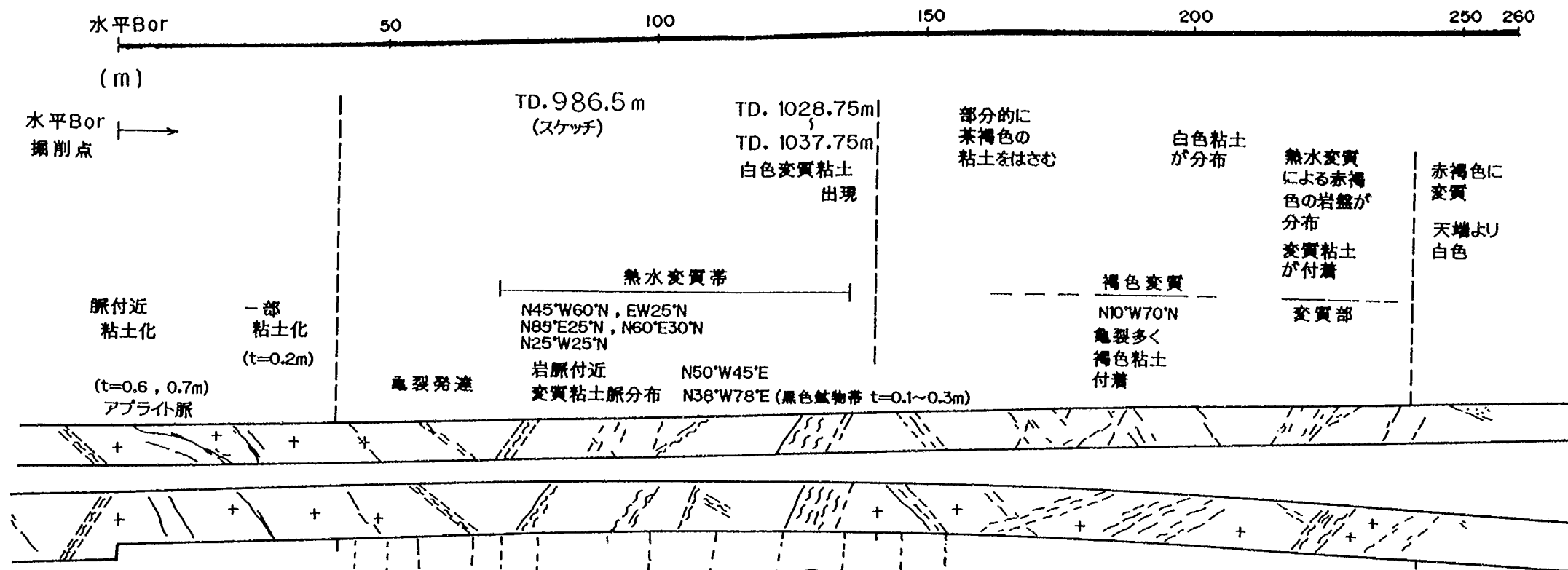
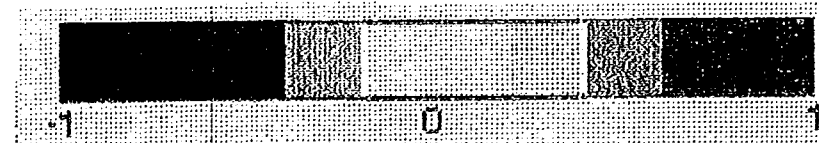


図-6.2 坑内地質状況とHSP記録との対比



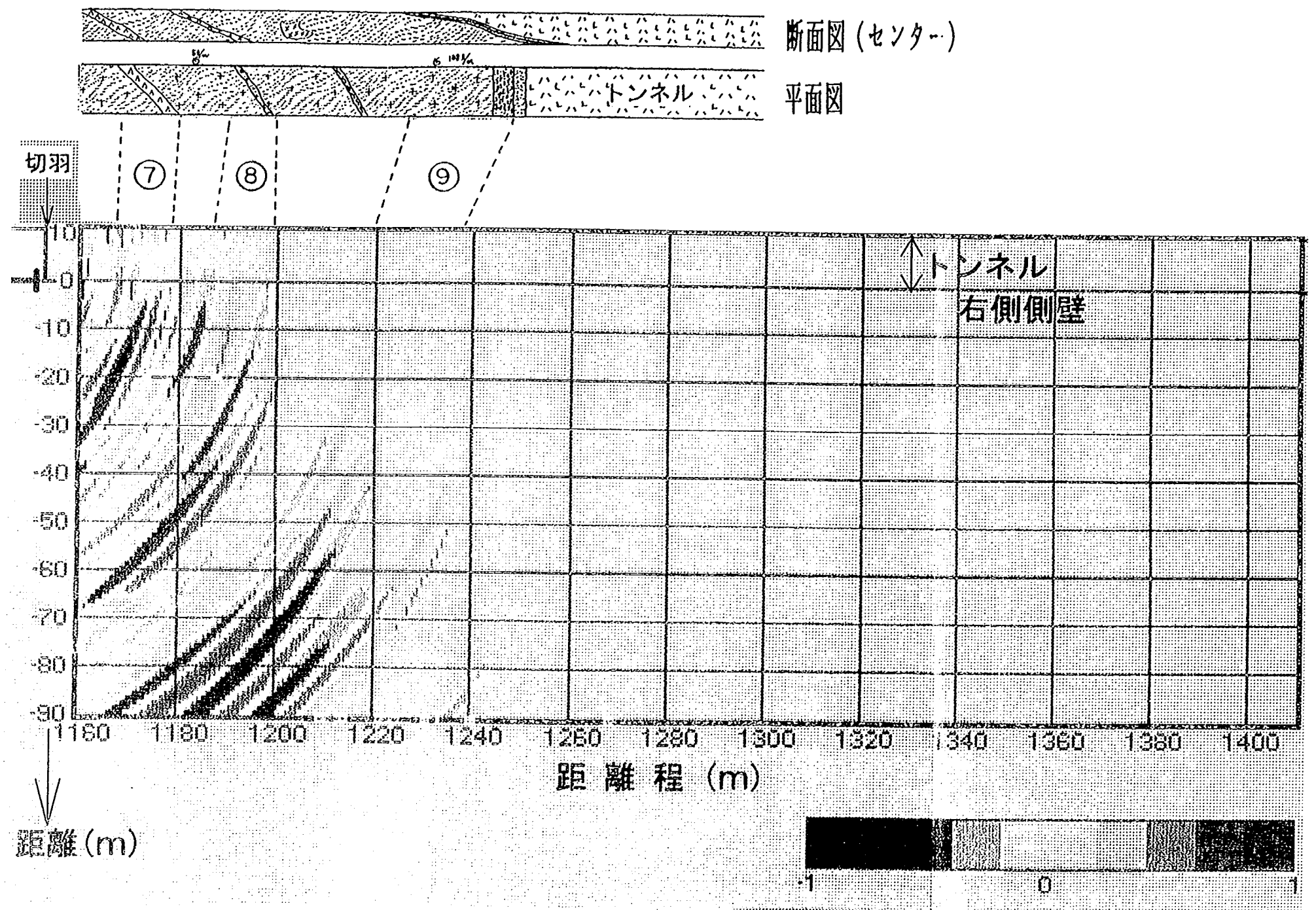


図-6.3 坑内地質状況とHSP記録との対比

表-6.1 反射面と地質状況の対応

反射面番号	位置 (T D, m)	地 質 状 況
1	950付近	ひん岩が分布し亀裂発達し、一部粘土化する。
2	960付近	ひん岩が分布する亀裂の発達部で変質粘土脈が存在する。
3	975付近	ひん岩が分布し、変質粘土脈が複数分布する。
4	1000付近	ひん岩が分布し、変質粘土脈が複数分布する。
5	1050付近	断層破碎帯で、白色の変質粘土部が分布する。ボーリングコアでは土砂状を呈する。
6	1050付近	カタクラサイト花崗岩中にひん岩が貫入し、部分的に茶褐色の粘土を挟む。
7	1170付近	カタクラサイト花崗岩中にアプライト脈が貫入し、部分的に茶褐色に弱変質する。
8	1195付近	岩種は不明であるが、岩脈が分布。
9	1220～1240 付近	花崗岩と溶結性凝灰角礫岩との低角度の不整合面が存在する。

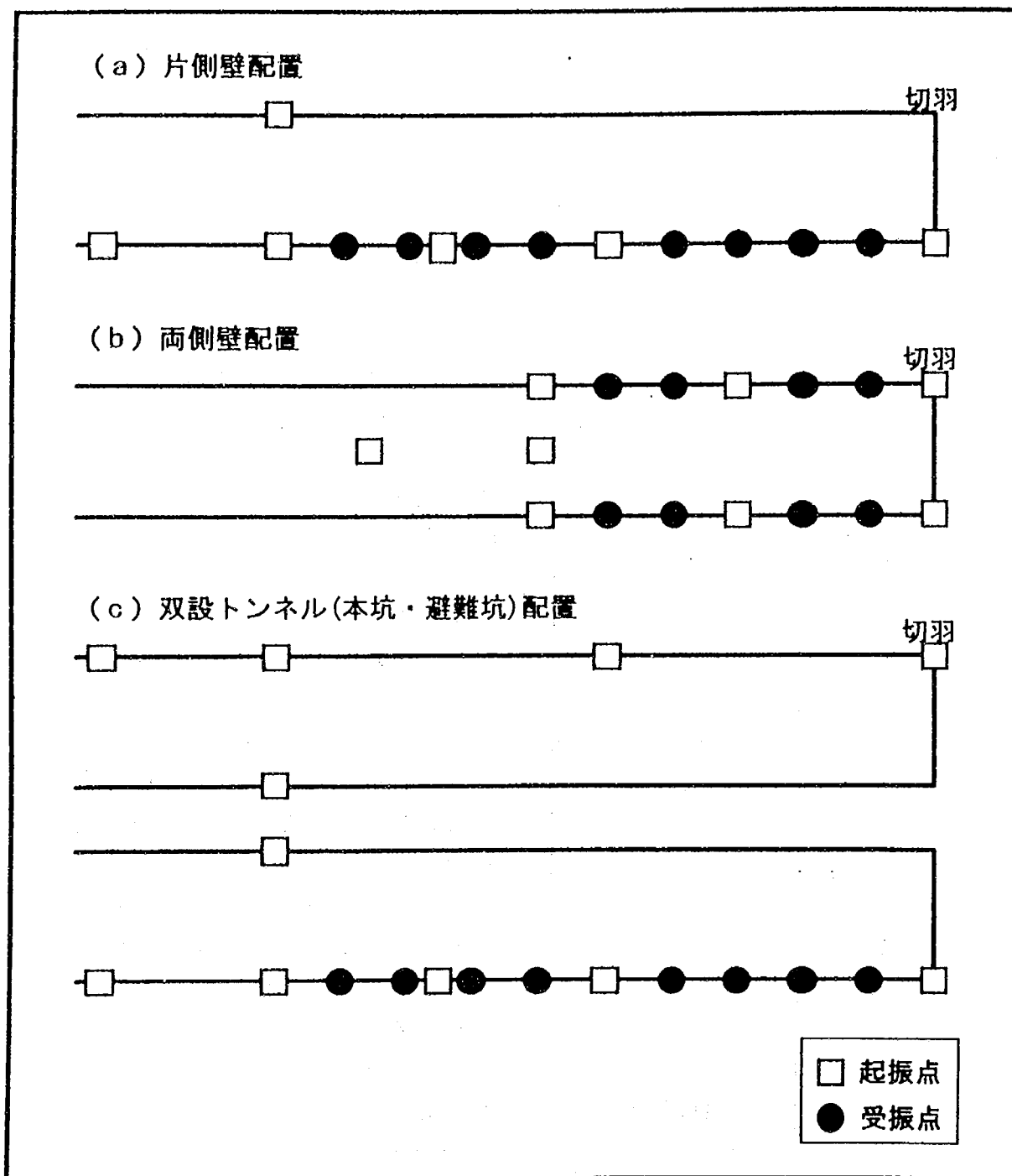


図-6.4 基本的な起振点・受振点配置

て、二～三次元的な起振点・受振点配置がとれるかが問題解決において重要となる。現状では有効な方法がないため、測定前に概略の地質構造を調査し、前もって波線分布を把握する等して、測定パターンを決定することが望ましい。なお、この問題は坑壁のゆるみ層以深に3成分受振器を設置して測定を行なうことにより解決できる可能性もある。

また、(3)の問題については、例えば切羽前方100mまでの予測を目的とした場合、最適な振源オフセット距離はどの程度であるかを検討する必要がある。この問題については、下記で再び議論する。

6.2.2 オフセット距離

1) 反射波の振幅に対する検討

HSP処理では、現在最小オフセット距離を基本的に10m程度としている。また、P波とS波あるいは境界波の分離を目的として、遠隔起振の記録も処理に用いている。

起振点からのオフセット距離が小さい場合、直接波の振幅が大きいため必然的に増幅器のゲインが抑えられることになる。一方、切羽前方からの反射波を考えると、現在の測定パターンでは起振点に最も近い受振点が反射面から最も遠いことになる(図-6.5)。このことは、直接波と切羽前方からの反射波の振幅比が大きくなることを意味する。したがって、測線展開内からの反射波の検出を目的とする場合は別として、切羽前方からの反射波の検出においてはオフセット距離が小さい受振点は不利となる。

オフセット距離が小さい受振点のデータは、直交反射面を仮定した処理であるコリドール・スタックにおいて後半部分が範囲に含まれないことから、スタック結果には影響を及ぼさないと考えられる。しかし、AGC (Automatic Gain Control)等の振幅調整処理を行なった場合はノイズ成分の振幅が大きくなり、特に速度フィルタのような波動場分離法において内向波に影響を及ぼす危険性は否定できない。

2) HSP断面への影響について

トンネル坑内において切羽前方の地山状況を予測する場合、トンネル軸に対して地質構造が直交しているという条件はまず成り立たない。したがって、HSP処理により切羽前方の地山状況を予測するにはトンネル軸の直交方向に対して斜交した反射面を扱うことができる処理法(例えば、マイグレーション処理)を用い、二次元的な断面を再構成する必要がある。

このような処理によって、如何に適切な断面を再構成することができるかは、前項で述べた測定ジオメトリと反射面の位置および傾斜角の関係が効いてくるものと考えられる。まず、これらのパラメータにより波線および反射面上の反射点の分布がどのように変化するかを考慮しなければならない。

そこで、表-6.2に示すモデルに対して、反射波の波線のシミュレーションを行なった。結果を図-6.6(a)～(f)に示す。シミュレーション結果からわかることは以下のとおりである。

(1) 同一起振点では、反射面が遠くなるほど反射面上の反射点分布の長さは短くなるととも

に、測線延長線の直交方向での距離が長くなる。

(2) 同一の反射面位置および傾斜角では、起振点が反射面から離れるほど反射面上の反射点分布の長さは長くなるが、測線延長線の直交方向での距離も長くなる。

(3) 反射面の傾斜角が 60° 程度有的时候には、特に起振点が反射面から離れている場合VSPモードでの処理だけでは不十分であり、反射モードでの処理も必要となる。

一般に、切羽前方の反射面の位置（トンネル軸上での位置）および傾斜角を適切に把握するためには、反射面上での反射点がある程度広く分布していることが必要であり、またトンネル軸の直交方向での距離があまり長くない方が望ましい。この要件を考慮して起振点・受振点位置を決定することが望ましく、また反射面の傾斜角をもとにVSPモードと反射モードを使い分ける必要がある。

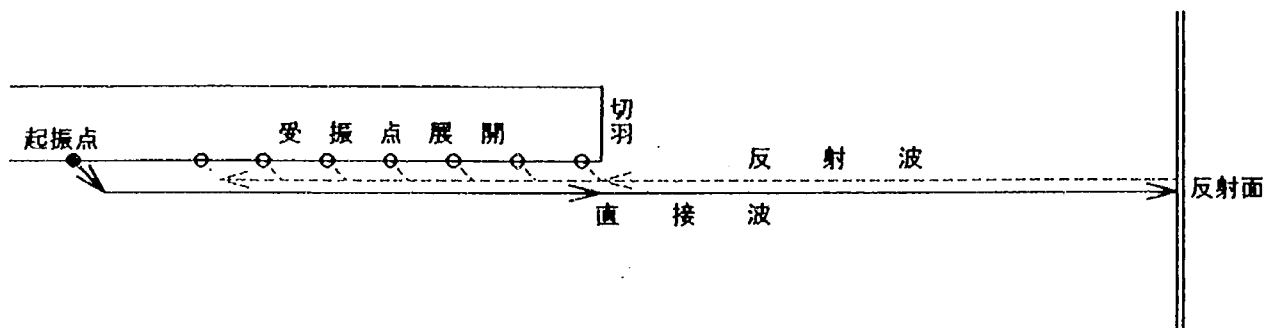
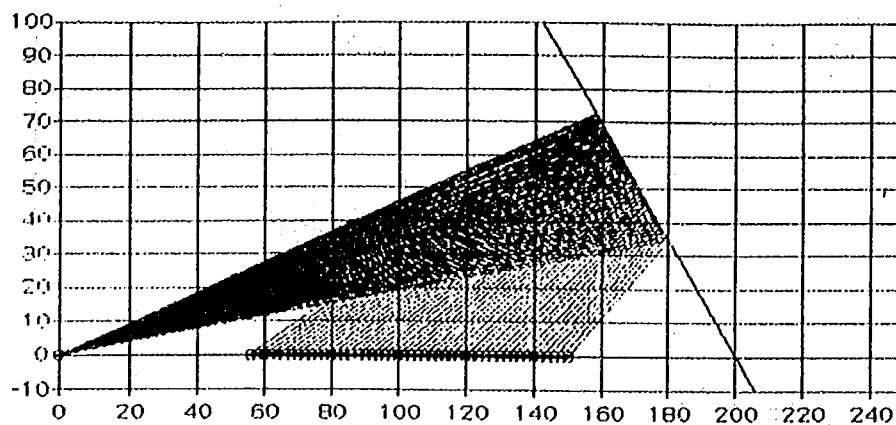


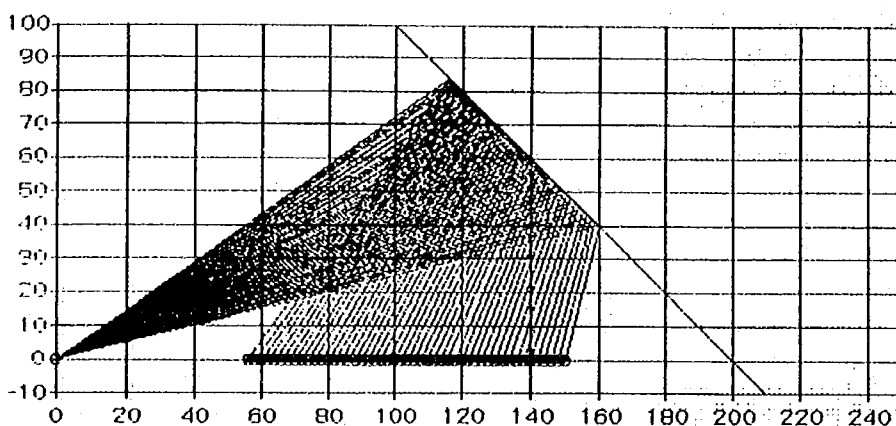
図-6.5 オフセット距離と反射面からの距離

表-6.2 シミュレーションに用いたモデルの概要

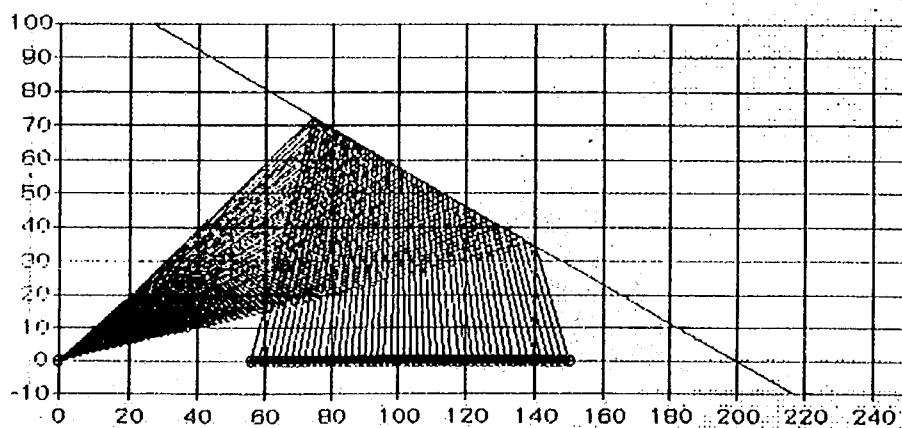
切羽位置	150m	
起振点位置	0m, 56m, 103m	
受振点位置	56~150m	ただし、各ケースで起振点より切羽側の受振点のみを考慮
反射面位置	200m, 250m	切羽からの距離は各々50m, 100m
反射面傾斜角	30° , 45° , 60°	傾斜角はすべて測線延長線の直交方向と反射面のなす角で定義する



起振点位置 = 0 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 30°

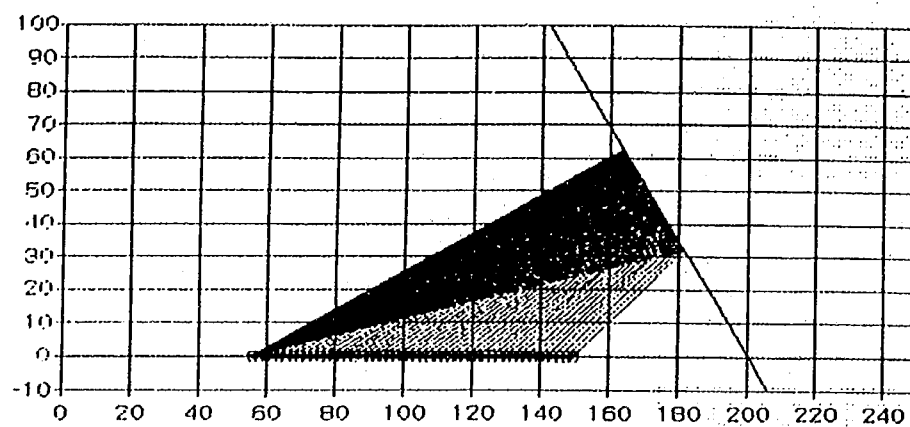


起振点位置 = 0 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 45°

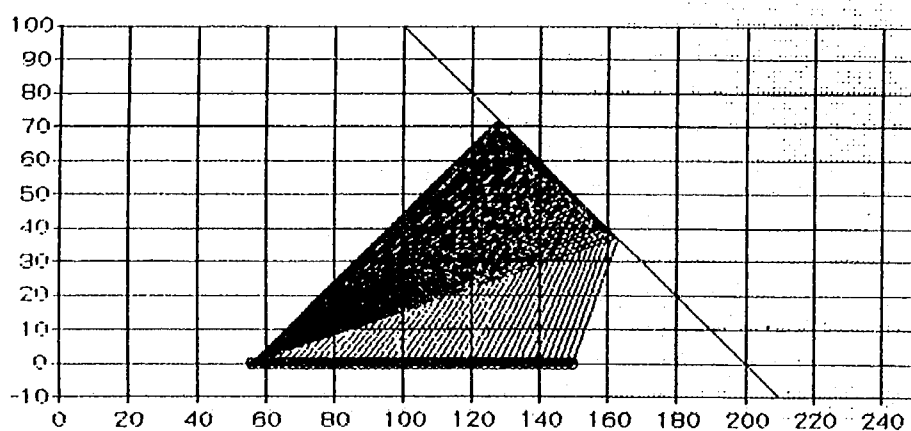


起振点位置 = 0 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 60°

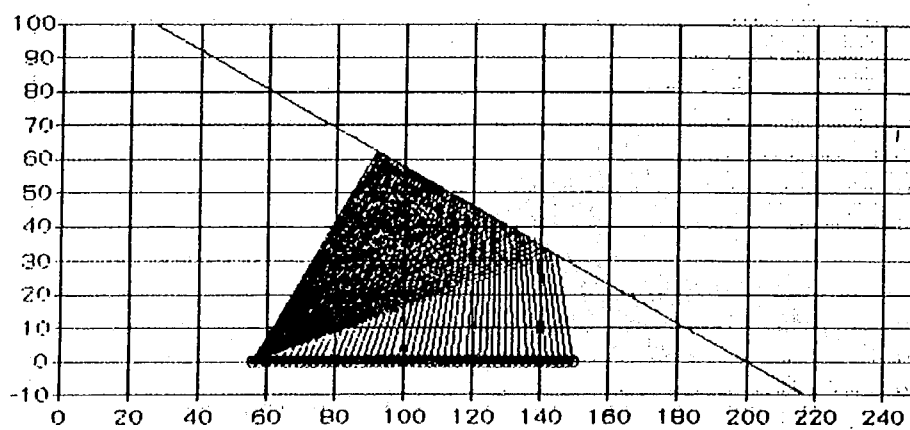
図-6.6.(a) シミュレーションによる波線分布図
(起振点位置 = 0 m, 反射面位置 = 200 m)



起振点位置 = 56 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 30°

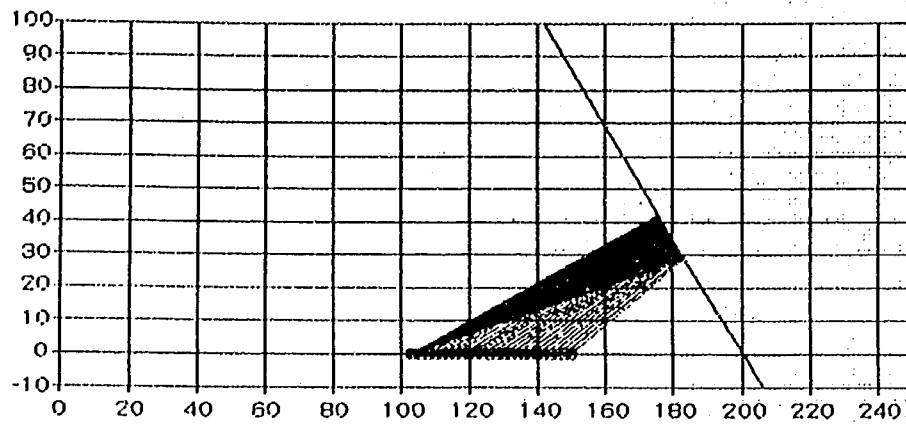


起振点位置 = 56 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 45°

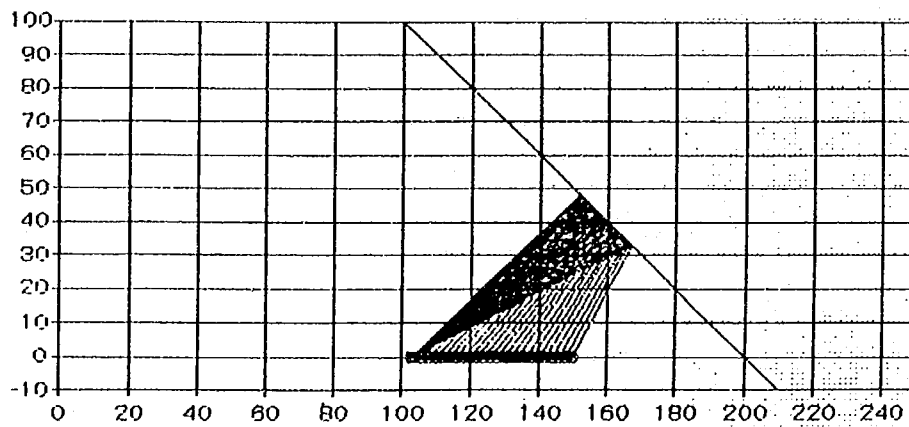


起振点位置 = 56 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 60°

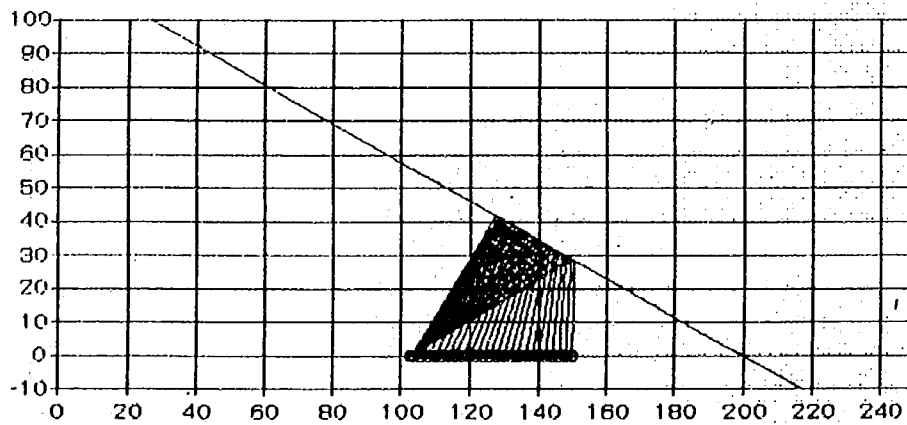
図-6.6 (b) シミュレーションによる波線分布図
(起振点位置 = 56 m, 反射面位置 = 200 m)



起振点位置 = 103 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 30°

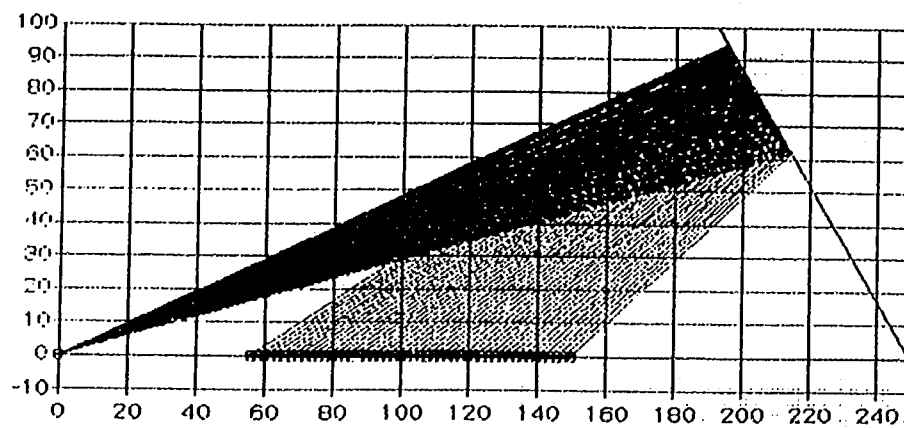


起振点位置 = 103 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 45°

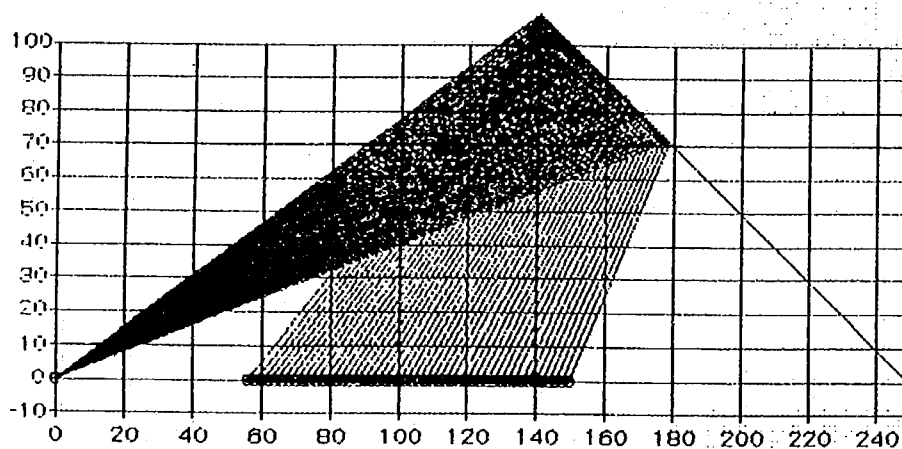


起振点位置 = 103 m 反射面 : 位置 = 200 m、傾斜角 = 60°

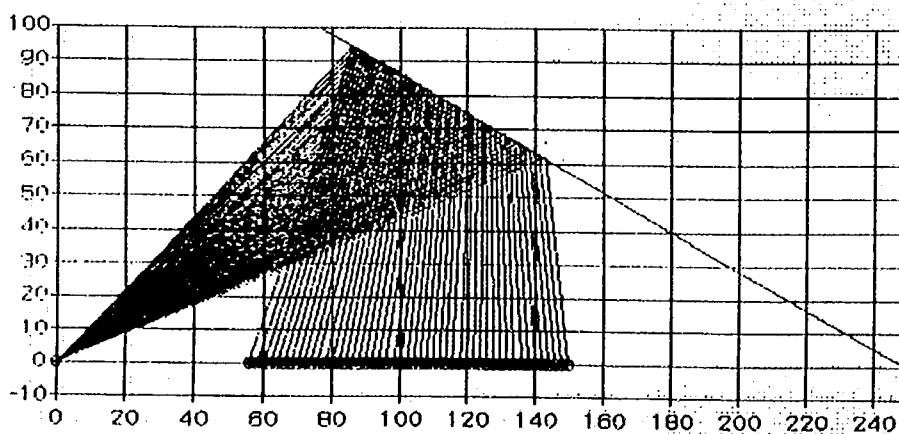
図-6.6 (c) シミュレーションによる波線分布図
(起振点位置 = 103 m, 反射面位置 = 200 m)



起振点位置 = 0 m 反射面 : 位置 = 250 m、傾斜角 = 30°

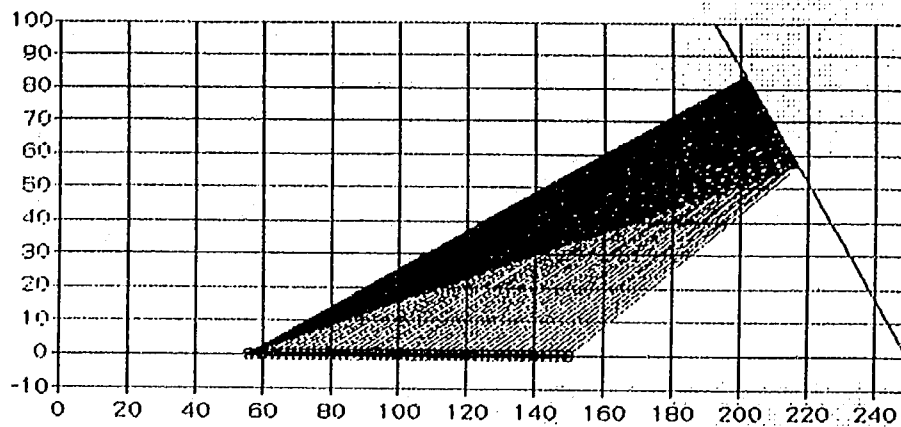


起振点位置 = 0 m 反射面 : 位置 = 250 m、傾斜角 = 45°

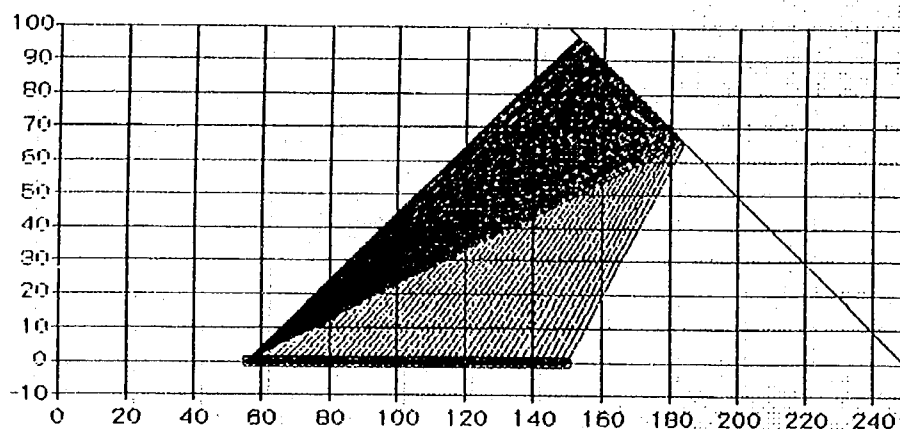


起振点位置 = 0 m 反射面 : 位置 = 250 m、傾斜角 = 60°

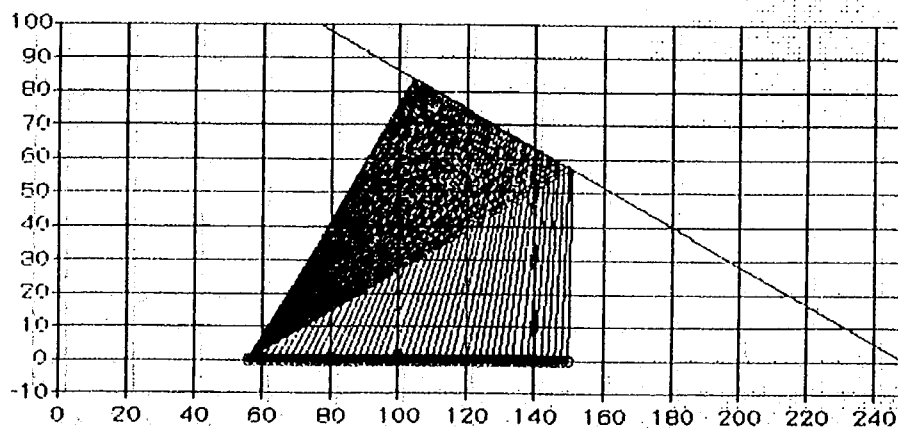
図-6.6 (d) シミュレーションによる波線分布図
(起振点位置 = 0 m、反射面位置 = 250 m)



起振点位置 = 56 m 反射面 : 位置 = 250 m、傾斜角 = 30°

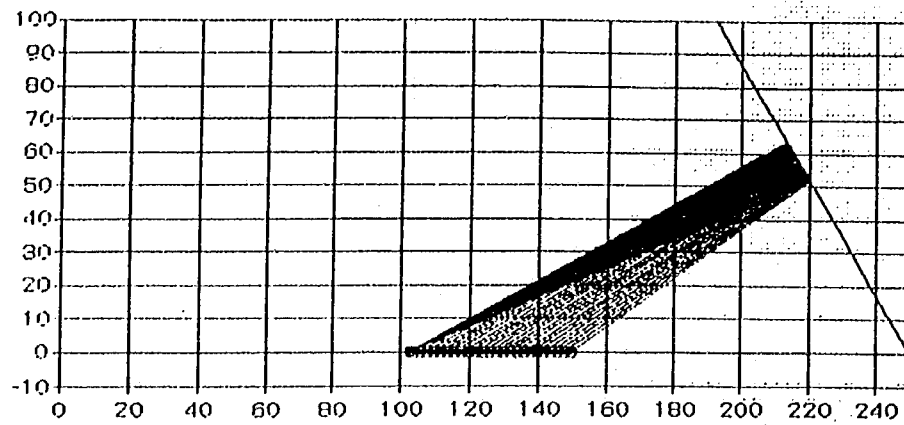


起振点位置 = 56 m 反射面 : 位置 = 250 m、傾斜角 = 45°

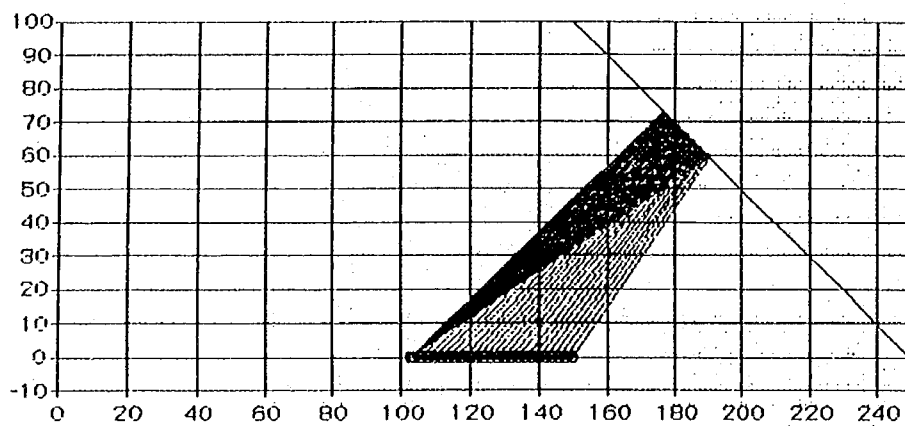


起振点位置 = 56 m 反射面 : 位置 = 250 m、傾斜角 = 60°

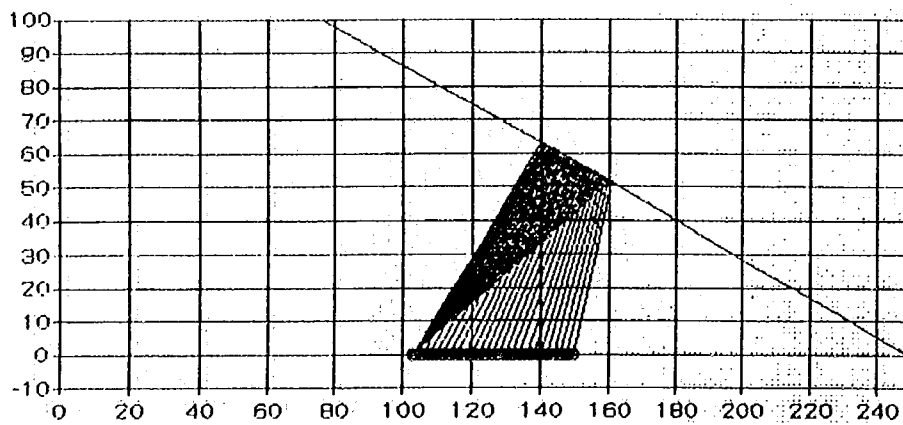
図-6.6 (e) シミュレーションによる波線分布図
(起振点位置 = 56 m, 反射面位置 = 250 m)



起振点位置 = 103m 反射面：位置 = 250m、傾斜角 = 30°



起振点位置 = 103m 反射面：位置 = 250m、傾斜角 = 45°



起振点位置 = 103m 反射面：位置 = 250m、傾斜角 = 60°

図-6.6 (f) シミュレーションによる波線分布図
(起振点位置 = 103m, 反射面位置 = 250m)

6.2.3 薬量

今までの現場測定の実験では、保安上の理由からダイナマイトの薬量を抑えていることもあり、測定記録において初動が明瞭に読取れるのは程度以内である。この距離を越えると記録のS/N比が低下し、ノイズ成分が目立つようになる。

HSP処理において、特にP波速度が速い媒質で信号の周波数が高い場合には初動走時を正確に読取り、深度走時補正（いわゆる静補正）を精度良く行なう必要がある。また、HSP処理で対象となる反射波はその初動走時は必要ではないが、直接波よりも伝播距離が長いことから、ある程度振幅を大きくし、S/N比を改善するためにも振源の効きをよくしておく方が有利である。

ダイナマイトの薬量は保安上の措置を十分に行なうことにより増やすことが可能であり、これによりオフセット距離を大きくしてP波と振源近傍から発生するS波や境界波を測定記録の段階である程度分離することができるものと考えられる。

6.2.4 測定機器

現在用いている測定システムでは、前述したオフセット距離やダイナマイトの薬量のほか、受振器の周波数特性・設置方法、探査装置の性能といった測定機器の仕様が重要なファクターとなる。以下に、これらの事項について検討する。

1) 受振器

現在までのHSP探査では、受振器として速度型地震計（ジオフォン）を使用している。その他の受振器としては高感度加速度計、ハイドロフォン等が考えられるが、HSP探査で使用した経験はない。将来的にはこれらの受振器の使用を検討する必要があると考えられる。

速度型地震計（以下単に地震計と呼ぶ）の固有周波数については、現在まで40Hzとの2種類の地震計を用いている。

起振点、受振点とも岩盤あるいは吹付コンクリートに直接設置しており、また対象地山も硬岩であることから、測定記録におけるP波、S波の卓越周波数は高い。固有周波数40Hzの地震計を使用し、振源と受振点との距離100m以内では直接波のP波で500~1,000Hz、S波で300~550Hz程度である。これらの卓越周波数は、今までの実績では固有周波数の地震計を使用した場合は低くなる傾向にある。

また、測定記録の中には、共振現象のように後まで尾を引いたような記録が見られることがある。これは吹付コンクリートへの地震計の設置が完全でないことに起因すると考えられる。そこで、各受振点に2個ずつ地震計を設置して、各々をグルーピングする方法を用いた。この結果、共振現象を示す記録が少なくなりグルーピングが有効であることが確認されている。

さらに、受振器展開において注意すべきことは受振点間隔であり、空間的エリアジングを考慮して決定する必要がある。

2) 探査装置

6.2.2のオフセット距離の項でも述べたように、直接波と反射波の振幅比が大きい場合、固定ゲインの増幅器は非常に不利である。また、現場作業においては、HSP処理を目的とした場合記録をサチュレートさせることができず、一方記録系のダイナミックレンジを考慮した場合振幅が小さすぎることも適切ではない。したがって、同じ起振点で何回か記録を取直すことが必要となり、現場作業の効率化の点でも不利となる。

以上の点から探査装置としては、IFP機能内蔵で高ダイナミック・レンジを有するデジタル探査装置を使用する必要がある。

また、前述したような増幅器の問題とともにA/D変換器の特性（分解能、入力アナログ電圧範囲、最大スループット等）が問題になる。今回使用した探査装置のA/D変換器の分解能は18ビットバイナリであり、現状では十分であると考えられる。

さらに、現場測定時にはサンプルレートについても考える必要がある。前述したように硬岩地山での直接P波の卓越周波数は1,000 Hzに達することがあり、エリアジングを避けるためにはサンプリング・インターバルとして0.5 ms 以下を選択する必要がある。

6.2.5 モード変換波

1) P波とS波の分離

今までの測定結果では、測定記録の段階でP波初動の後続波として強いS波成分が認められる。P波のHSP処理を対象とした場合、P波とS波の分離方法を大別すると以下の2項目が挙げられる。

(a) 現場での測定記録の段階での分離、あるいはS波成分の抑制

(b) データ処理の段階での分離

(a) については前述したように、オフセット距離を大きくしてP波とS波を分離する方法や制御起振（発破）によってS波の発生を抑制する方法が考えられる。これらの方法は振源近傍から発生するS波に対しては有効であるが、振源から離れた（例えば、測線展開内）境界面から発生するPS変換波に対しては対処できない。

通常用いられているP波振源では、多くの場合S波を発生していることが多く指摘されており、またP波の地表面における反射や地下の境界面における透過・反射で、変換波としてのS波も発生することが知られている⁶⁾。

服部(1976)⁷⁾は火薬振源の空間的特性の制御によってP波・S波の振幅に与える影響を調べている。この研究では、いくつかの角度で開端させた鉄パイプ内で火薬を爆発させているが、いずれの制御振源によっても効果的に波動エネルギーの指向性をコントロールすることはできないとしている。また、開端させない鉄パイプを用いた振源が、最も効果的にSV波を発生するとしている。

以上のことから、爆薬振源の制御によってS波成分を抑制することは難しいものと思われる。

一方、(b)についてはP波とS波の周波数成分の違いを利用した周波数フィルターや速度差を利用した速度フィルターなどがある。一般に、VSP処理で用いられている波動場分離法をP波・S波分離に用いることができる。鶴ほか(1987)⁸⁾は各種のVSPデータの波動場分離法をP波・S波分離に適用し、その有効性を比較している。その結果を表-6.3に示す。

なお、外向性の後続波にはS波成分の他に坑壁表面に沿って伝播する境界波成分が含まれている可能性がある。この種の波動を抑制するには発破孔深度を大きくすることが有効である。

2) 3成分測定

受振器として3成分内蔵の受振器を用いることの利点は、受振器を坑壁の壁面のようなゆるみ層内に設置するのか、あるいはゆるみのない領域に設置するのかによって異なる。

受振器を坑壁の壁面に設置した場合には、坑壁付近にゆるみ層が存在するために直接波あるいは反射波の波線は図-6.7(a)に示すようになるものと考えられる。坑壁の壁面に垂直な成分をVとすると、V軸と波動進行方向がなす角 θ は臨界屈折波を考えた場合、ゆるみ層の速度 v_1 と地山速度 v_2 から決まり

$$\theta = \sin^{-1} (v_1/v_2) \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

となる。例えば、P波速度を $v_1=2.0\sim 2.5\text{km/s}$ 、 $v_2=5.7\text{km/s}$ とすると、このとき θ は $20\sim 26^\circ$ 程度となる。

v_1 と v_2 の比によって θ は異なるが、一般には θ が低角になるものと考えられる。したがって、屈折法やHSP処理を目的としたときに1成分受振を行なう際には、P波初動部分の明瞭さからV方向が最も適していると考えられる。

一方、受振器をゆるみ層以深に設置した場合には、直接波あるいは反射波の波線は図-6.7(b)に示すようになるものと考えられる。このときには反射波の到来方向を3次的に把握し、反射面の方向を決定することができる可能性がある。これより、反射面の傾斜方向を一意的に決定することが可能となり、非常に有効な方法となる。さらに、座標変換を行なうことにより、S波成分を強調してS波速度についての情報を得ることも考えられる。

6.2.6 波動の波長とS波探査

現在HSP処理で処理対象としている波動はP波であり、今までの計測例ではP波速度値は 5km/s 程度、卓越周波数は $500\sim 1,000\text{Hz}$ 程度である。その結果、波長は短く見積もっても 5m となり、その程度の分解能や位置精度しか期待できない。

分解能、位置精度を上げるには波長を短くする必要があるが、現状よりもさらに高い周波数帯域の利用、あるいはS波の利用が考えられるが、それに伴う新たな問題も発生する。すなわち、周波数を上げた場合、起振あるいは受振状態の再現性が確保できるか、またデータ処理中に現れるゴーストと真

表-6.3 Summary of the Effects of Several Separation Methods for Synthetic Zero-offset VSP Data (P&S Waves)

Method/Effect	Separation	Relative Amplitude	Wavelet Distortion
Median Filter	fair	good preservation	small
F-K Filter	fair	fair preservation	large
Cross Correlation	no good	fair preservation	very large
K-l. Transform	fair	fair preservation	very large
τ -p Transform	good	fair preservation	large

鶴ほか(1987)による

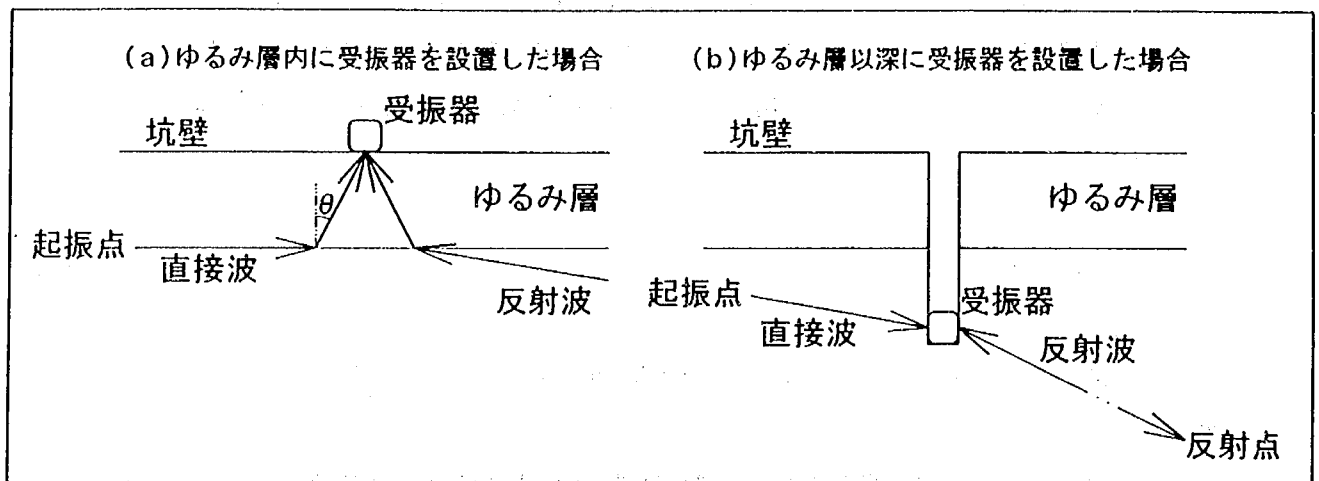


図-6.7 ゆるみ層内とゆるみ層以深における波動の伝播方向

のデータを見極められるか等に注意を払わなければならない。弾性波探査に使用している受振器は速度型地震計であって内部の機械的な振動を検知しているが、1,000 Hz を越えるような周波数に回答可能かどうか、やや疑問が残る。

S波の速度は、硬質な岩盤では実験的にみると

$$\sigma = [(v_p/v_s)^2 - 2] / \{2[(v_p/v_s)^2 - 1]\} \quad \dots\dots\dots (6.2)$$

において、 $\sigma = 0.2 \sim 0.3$ の値を代入した程度である。したがって、P波速度を 5 km/s とした場合、S波速度は $2.7 \sim 3.1 \text{ km/s}$ で、P波と同じ周波数ならば波長は短くなり分解能は向上する。また、直接的な物性把握の点からも、S波探査が重要である。

しかし、あらゆる地域の硬質な岩盤内でS波を確実に発生させることは一般に難しく、P波と同じ卓越周波数のS波を発生させることも困難である。さらに、トンネル坑内において高エネルギーのS波成分のみを発生させることも非常に難しい。

6.3 処理方法についての検討

6.3.1 基本処理フローにおける検討項目

図-10.1に示した「HSP処理の概略的な流れ」において、今後検討すべきであると考えられる項目は以下のとおりである。

- (1) 振 幅 調 整
- (2) 波 動 場 分 離
- (3) マイグレーション

以下(1)～(3)の項目について検討を加える。

1) 振幅調整

振幅調整は波動伝播による幾何減衰(球面発散)や非弾性減衰・透過損失等の各種減衰作用を補償して、理想的には反射面の反射係数に反射波の振幅が比例するように補正する処理である。しかし、この処理を理想的に行なうことは難しく、地表反射法探査で用いられるAGC法を主に用いてきた。

AGC法は、ある与えられた時間幅の中でパワーを一定にするように振幅を補正する方法で、相対的に振幅の小さい部分を強調する処理である。通常の反射法探査は構造解析を主目的とすることから、反射波の振幅が必ずしも反射係数に正確に比例している必要がないため、AGC法のような振幅調整法でもよい。しかし、HSPにおいては切羽前方の弱層や断層破碎帯の程度を把握して施工に生かすという観点から、反射係数に比例した反射波振幅の再構成が必要になる。

波動場分離処理前のHSPのデータには、外向波と内向波の両方が含まれている。外向波は起振点から離れるに従って、波動の減衰により振幅が小さくなる。逆に、内向波は起振点方向に伝播するに従って振幅が小さくなる。したがって、外向波と内向波の両方が含まれているデータに対して振幅調整を行なうことは難しい。すなわち、振幅の補正係数なるものが、起振点と受振点および反射点の位置に関係するとともに、外向波あるいは内向波といった波動成分にも関係してくるためである。

この問題を解決するための1つの方法としては、波動場分離前の振幅調整は最低限に抑えるか、あるいは行わないで、波動場分離後の内向波(あるいは外向波)成分に何らかの振幅調整を行なうことが考えられる。この場合には、振幅調整と波動場分離の効果について検討しておくことが必要であると思われる。

2) 波動場分離

HSP処理に限らずVSP処理においても、最もよく用いられる波動場分離法は速度フィルターとメディアン・フィルターである。

ゼロオフセットVSPデータのデータ処理において、最も有効と考えられる分離法はメディアン・フィルターである⁹⁾。メディアン・フィルターは非線形フィルターであることに注意を要するが、実際の測定データに適用しても有効な手法であると考えられる。しかし、メディアン・フィル

ターは反射波についてはtwo-way time領域で適用することから、反射面が測線に対して直交していることを仮定している。反射面が斜交している場合には、反射波がtwo-way time領域で同一時刻上に並ばないため、メディアソフ・フィルターによって内向波成分が十分に分離しうる確証がなくなる。この問題を避けるには、フィルター項数を少なくして、同一時刻上からのずれの効果を小さくする方法が考えられる。ただし、フィルター項数を少なくするとフィルター効果が十分でなくなる怖れがある。

以上の問題点から、HSP処理においては波動場分離法として速度フィルターを用いるのが適当と思われる。ただし、速度フィルターではエリアジングを起こした場合には分解能力が著しく低下するため、エリアジングの問題について注意を払う必要がある。特に、受振点間隔に関係した空間的エリアジングについて考慮しなければならない。

以上2つの分離法の他にエリアジングに強く、オフセットVSPデータに適用した場合に有効な分離法として $\tau-p$ 変換を用いる方法がある⁸⁾。 $\tau-p$ 変換を用いる方法は非常に有力な分離法であるが、計算時間がかかるという欠点がある。

3) マイグレーション

トンネル軸上の受振点アレイに対して、起振点はその延長線上にあり（すなわち横方向のオフセットがない、いわゆるゼロオフセットHSP）、かつ対象としている反射面がトンネル軸に直交している場合には、反射点はトンネル軸と反射面の交点の同一点上に分布する。このとき、データ処理法としては、two-way time領域でコリドール・スタックを行なうことにより反射面位置を垂直往復走時で求めることができる。

しかし、起振点が横方向にオフセットをもつ（いわゆるオフセットHSP）場合やゼロオフセットHSPでも反射面が斜交している場合には、各受振点毎の反射点が反射面上で2次元的に分布する。HSP処理におけるマイグレーションは、このような反射点のバラつきを考慮して、波動場分離によって得られた内向波成分から2次元平面上での反射強度分布を再構成する処理である。

オフセットVSPのデータ処理に用いられる一般的なマイグレーション手法はキルヒホフ積分による方法である。また、キルヒホフ積分による方法と同じく、比較的データ量が少なくても安定した手法であるGRTによる方法も用いられてきている。これらの方法はプレスタック・マイグレーションと呼ばれるもので、CDP重合をせずに行なうため断層等がある複雑な構造に対して有効である。

現在はマイグレーション手法としてGRTによる方法を用いている。HSPのデータ処理にこの手法を用いるのは、現状では適切であると考えられる。しかし、今後以下の項目について開発を行なうことが必要であると思われる。

(1) 媒質の速度変化を考慮に入れ、波線屈折の影響もレイ・トレーシングを用いて評価する。

このとき速度モデルを反復的に変更しながら最適な断面を再構成する処理が必要になることも考えられる。

(2) マイグレーションの3次元への拡張と振幅補正ファクターについての検討

6.3.2 今後の課題について

今までに述べた検討および開発項目の他に、以下に示す項目が今後の課題であると考えられる。

- (1) 2次元的な地山速度構造、特に切羽前方の速度分布の把握
- (2) HSP断面に現れた反射面の位置および傾斜方向の自動判定
- (3) 直接的に物性を把握するための方法の開発

例えば、ウェーブレット処理と合成音響インピーダンスログによる切羽前方のP波速度あるいは音響インピーダンス分布の把握

現在地山の弾性波速度については屈折法による解析から測線内の速度値を求め、その速度値を切羽前方に延長して用いている。(1)の項目については、現状では有効な方法がない。将来的には切羽前方の弾性波速度を把握する方法の開発が求められるものと考えられる。

7. ま と め

7.1 トンネルHSPの適用範囲

大挾トンネルでの現地適用実験の結果、トンネルHSPの適用にあたって、以下のことが明らかになった。

①探査範囲

探査できる範囲は切羽から約100m前方まで可能で、5 m単位で断層破碎帯の位置を予測できる。

②測線の配置

弾性波の初動が明瞭に読みとれる震源から地震計までの距離の限界は、250mである。そのため、探査測線のレイアウトは、この範囲に収める必要がある。

③反射波の出現位置

密度変化の大きい部分で明瞭な反射波が見られたため、地質構造と調和的である。特に1,030mでの粘土を介在する幅3mの断層破碎帯の反射波は顕著であった。

④探査モードの選択

シュミレーションの結果から、地層がトンネル軸に対して直交または平行にある方が明瞭な反射波が得られることが明らかとなった。そのため、探査の前に地質構造をある程度把握することが必要で、トンネル軸に弱層が直交する場合にはVSPモードで、平行な場合には反射モードで行うなど使い分ける必要がある。また、反射波の入射角と反射角を考慮すると探査対象となる断層などは近いほど広範囲に線として捕らえられ二次元的評価が可能である。

7.2 問題点と課題

解析結果を施工に役立てるためには、地質構造や劣化状況と反射波を対応させる必要がある。地質を観察するのに空間的な制約のあるトンネルでは、反射波との対応は既施工区間で行わざるを得ない。そのため、坑内での綿密な地質観察が不可欠である。また、適用する地質条件によるところが大きいと考えられるため、徐々に地質が悪くなる条件（ミラージ層）などで試した時の反射波の振幅および波形や、弾性波の伝播速度が遅い軟岩でのデータの質なども検証する必要がある。以下の問題点を踏まえて今後実験の事例を増やし検証する必要がある。

①弱層での弾性波速度（ V_p ）

現在の反射波の位置は、既施工区間内の岩盤を伝わる V_p と時間を基に算出されている。しかし、断層破碎帯などの低速度帯では速度が著しく低下することが予想されるため、結果として V_p を大きく見積もり実際には弱層が予測位置よりも手前に出現することになる。また、探査区間の岩盤の状況が悪い場合にはその逆も考えられる。

②地層の走向・傾斜

地層の走向・傾斜は、2ウェイトタイムシフトやマイグレーション処理をして求められているが、探

査のジオメトリが一次元の直線で、地震計が一成分であるため二次元で表現するには限界があり、走向・傾斜が二通りの解釈がある。本論に載せている走向・傾斜は周囲の地質構造から判断しての傾きである。

③施工へ影響する反射波

反射波の振幅から施工への影響度を判定する必要がある。しかし、現状では反射波が多数見られるが、全て対比されている訳ではなく、施工へ関係する反射波の抽出が必要である。それを定量的に評価できない理由の一つに反射波の振幅の算出にも問題があるからである。反射波の振幅は切羽から離れる程、減衰すると考えられる。そのため、本適用実験での振幅は、距離に対して反比例し減衰するとの仮定の下で算出された。今後、このような減衰率の設定が望ましいのかどうか、検証する必要がある。

7.3 施工管理に取り込んだトンネルHSP

トンネルの施工を安全に進めるために、切羽前方の地質評価のニーズは高い。トンネルHSPは計測準備に半日、計測に半日必要であり、切羽を用いての現場作業が一日と短く済む。切羽作業の休止している日曜日などに探査が可能で、通常の施工サイクルに十分に組み込める。また、解析には二日を要し探査できる範囲も100mと広範囲なため、二カ月分の施工範囲の予測が可能と考える。

現状の地質観察ではスケッチや岩判定の評価が不十分な点が多いため、綿密な地質観察によるデータが不可欠である。この地質観察は通常行われている施工管理につながっている。トンネルHSP共同研究では単なる地質調査法の技術開発にとどまるものではなく、施工管理全体での評価についての見直しを考えている。

本実験にあたり、現地での測定準備および測定作業に関して、建設省中国地方建設局倉吉工事事務所、熊谷・森本特定建設工事共同企業体犬狹トンネル作業所の関係各位より多大なる御協力を頂いた。また、岩石鑑定に当たっては、島根大学名誉教授三浦清先生の御指導を仰いだ。ここに記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 建設省中国地方建設局倉吉工事事務所(1993): 犬狹峠道路パンフレット.
- 2) 川崎地質株式会社(1988): 犬狹地区地質調査業務報告書, 65p.
- 3) 川崎地質株式会社(1991): 犬狹トンネル地質調査業務報告書.
- 4) 笹田政克, 山田直利, 先山勝, 上田薫(1979): 東中国, 三朝・奥津・湯原地域の白亜紀後期〜古第三紀火成岩類, 地質学論集, 第17号, pp.19-34.
- 5) 株式会社ヒロコン(1992): 平成3年度一般国道313号 犬狹峠道路犬狹トンネル設計業務設計報告書, 307p.
- 6) 村山隆平, 内田真人, 梅戸在明(1987): 3成分受振器を用いたVSP調査で見られるS波, 物理探査学会第77回(昭和62年度秋季)学術講演会講演論文集, pp.58-63.
- 7) 服部定育(1976): 火薬震源の制御と地震波動, 地震波の生成・伝搬に関する実験(地震探鉱実験グループ), pp.27-38.
- 8) 鶴哲郎, 和知登, 天野博, 田村八州夫(1987): VSPデータの波動場分離法—各種分離法の比較—, 物理探査学会第77回(昭和62年度秋季)学術講演会講演論文集, pp.52-57.

犬伏トンネル坑内
切羽前方地質検出実験報告書

I S S N 0386-5878

共同研究報告書第117号

平成7年1月(1995)

環境部地質研究室 室長 中村康夫, 主任研究員 稲崎富士
研究員 倉橋稔幸

要 旨

本報告書は、建設省土木研究所が民間工社と平成5年度より取り組んでいる共同研究「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」のうち、犬伏トンネル現地適用実験グループが平成5年度に実施した2回のトンネルHSPの現地検証実験の結果をとりまとめたものである。

犬伏トンネルは、建設省が一般国道313号の鳥取・岡山の県境部に掘削中の総延長2,500mの道路トンネルである。本トンネルでは、事前調査の段階で推定された断層破砕帯及び熱水変質帯区間に対して、当初設計パターンは側壁導坑先進掘削工法(DⅢb)を計画していた。本検証実験は、トンネルHSP法探査による当核不良地質の確認と、施工中調査としての同法の適用性、すなわち探査結果の施工への反映法についての検討を目的として実施したものである。

探査実験位置は、坑内で実施した2回の水平ボーリング調査に合わせて設定した。解析処理については、トンネル軸に対して斜交した反射面の傾斜・位置を復元するため、二次元マイグレーション処理を行ない、解析断面を求めた。また、坑内水平ボーリング結果と切羽観察記録等の資料をもとに地質状況を復元し、復元地質と解析断面上の反射面および施工実績との対比を行ない総合的な考察を加えた。

キーワード：トンネルHSP法、犬伏トンネル、現地実験、地質復元、切羽前方予測

郵便はがき

3 0 5 - □ □

50
円切手
をはって
下さい。

茨城県つくば市旭一番地

建設省土木研究所

環境部地質研究室 行

No. _____

共同研究報告書第117号

No. _____

配布先氏名

配布先住所



共同研究報告書第117号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏名

印

共同研究報告書第117号