

弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する
共同研究報告書（3）

西会津トンネル坑内切羽前方地質検出実験

平成9年1月

建設省土木研究所
環境部地質研究室
住友建設株式会社
日本物理探鑛株式会社
復建調査設計株式会社

Copyright © (1997) 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。

弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する

共同研究報告書 (3)

西会津トンネル坑内切羽前方地質検出実験

建設省土木研究所 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

住友建設株式会社 土木本部 土 木 部 理 事 盛谷 智之

次 長 桑原 秀樹

日本物理探鉱株式会社 企画本部 開発二部 部 長 渡辺 文雄

主任技師 河村 茂樹

復建調査設計株式会社 技術研究所 所 長 福田 直三

横浜事務所 地質調査課 課 長 原口 強

*現 日本道路公団 静岡建設局 調査役

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3ヶ年計画で実施した共同研究「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、西会津トンネル現地適用グループが平成6年度に実施したトンネルHSPの現地検証実験の結果をとりまとめたものである。

西会津トンネルは日本道路公団が磐越自動車道の福島・新潟の県境部に建設中の延長1,016m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新第三紀層中に岩質劣化部の可能性がある第2低速度帯が推定されていた。本検証実験は、トンネルHSP法探査の軟岩地山での適用性全般の検証、特に同法による当該低速度帯の地質の確認、及び施工中調査としての同法の適用性の検討を目的として実施した。

探査実験の切羽位置は、前方の第2低速度帯が探査可能な150m手前に設定した。また、地層面が緩傾斜をなすことが予想されたため、VSPモードと反射モードの両方の測定解析を実施した。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い、解析断面を求めた。また、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い総合的な考察を加えた。

キーワード：トンネルHSP，西会津トンネル，軟岩地山，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カ年計画で実施した共同研究「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 (Horizontal Seismic Profiling) 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きた。共同研究のサブグループである西会津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6年度に現地検証実験を行った。

西会津トンネルは、日本道路公団仙台建設局会津若松工事事務所が、磐越自動車道の福島・新潟県境部の福島県西会津町で建設中の延長1,016mの道路トンネルである。掘削工法はNATMによる上半先進ショートベンチカット工法である。本トンネルでは、事前調査の段階で新第三紀層中に岩質劣化部の可能性がある第2低速度帯が推定されていた。本現地検証実験はトンネルHSP法探査の軟岩地山での適用性全般の検証、特に同法による当該低速度帯の地質の確認、および施工中調査としての同法の適用性の検討を目的として、平成6年12月11日～12日に実施した。

本報告書は、西会津トンネルにおけるHSP法の解析結果、それと地質状況や施工実績との対比、測定・解析処理の検討課題など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検討した結果を報告する。

土木研究所が実験・調査計画の立案・指導と総括を、住友建設が切羽観察の実施、および設計・施工計画と掘削実績についての分析を、日本物理探鉱がトンネル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9年1月

前地質研究室長

中 村 康 夫

目 次

まえがき

1. トンネルの概要と周辺の地形・地質	1
1. 1 トンネル概要	1
1. 2 地形概要	2
1. 3 地質分布	4
1. 3. 1 地質概要	4
1. 3. 2 地質構造	4
1. 3. 3 分布地質の特徴	7
2. 当初設計と既施工区間での実績	9
2. 1 事前調査及び当初設計	9
2. 1. 1 会津坂下地区地表地質調査	9
2. 1. 2 西会津トンネル第一次地質調査	9
2. 1. 3 西会津トンネル第二次地質調査	10
2. 1. 4 西会津トンネル詳細設計	11
2. 2 調査設計時の技術的課題	12
2. 3 既施工区間（第1低速度帯）での施工経緯	13
2. 3. 1 第1低速度帯での水抜きボーリング	13
2. 3. 2 設計変更の検討	14
3. 探査区間での施工実績	18
3. 1 切羽観察結果	18
3. 1. 1 切羽観察様式	18
3. 1. 2 切羽写真撮影要領	18
3. 1. 3 切羽観察結果	19
3. 2 施工実績	28
3. 2. 1 探査区間直前での水抜きボーリング	28
3. 2. 2 探査区間での施工実績	30
4. トンネルHSP	35
4. 1 探査目的	35

4. 2	測定方法	35
4. 2. 1	起振方法	35
4. 2. 2	受振方法	37
4. 2. 3	記録方法	37
4. 3	解析方法	39
4. 3. 1	屈折法による解析	39
4. 3. 2	VSPモードによる解析	39
4. 3. 3	反射モードによる解析	41
4. 4	解析結果	45
4. 4. 1	屈折法による解析結果	45
4. 4. 2	VSPモードによる解析結果	45
4. 4. 3	反射モードによる解析結果	53
5.	考 察	57
5. 1	トンネルHSP解析結果と地質状況の関係	57
5. 1. 1	第2低速度帯の位置・性状について	57
5. 1. 2	反射パターンと施工記録との対比	57
5. 2	測定・処理方法についての検討	64
5. 2. 1	VSPモードと反射モードの選定	64
5. 2. 2	振幅についての検討	68
5. 2. 3	各波動成分の周波数帯域	71
5. 2. 4	速度境界面における平面P波の反射と透過	79
5. 2. 5	反射面と反射波形の対比について	85
6.	まとめ	86
6. 1	解析結果のまとめ	86
6. 2	問題点と課題	86
6. 3	今後の取り組み	87
	参考文献	87

1. トンネル周辺の地形・地質

1.1 トンネルの概要

西会津トンネルは、日本道路公団仙台建設局の発注による磐越自動車道のうち、福島・新潟の県境の町、福島県西会津町に位置する延長 $L=1,016\text{m}$ の高速道路トンネルで、磐越西線野沢駅の東方約3km、国道49号線の北方1km付近を併走するものである。

本実験対象トンネルである西会津トンネルの概要を以下に示す。また、図-1.1に西会津トンネルの位置を示す。

(概 要)

- ・工事名 磐越自動車道 西会津トンネル工事
- ・施 主 日本道路公団 仙台建設局
- ・施工場所 福島県耶麻郡西会津町睦合字横沢～西会津町尾野本字西平
- ・工 期 平成4年7月28日～(当初)平成7年11月9日 (変更)平成8年11月3日
- ・受注形態 住友建設(株)・(株)地崎工業共同企業体
- ・工事内容 トンネル延長 1車線 $L=1,016\text{m}$
掘削断面積 $76\sim110\text{m}^2$ (非常駐車帯)
施 工 法 NATM ショートベンチ 発破・タイヤ工法

1.2 地形概要

ここでは、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。ここでは主としてこれらの調査報告書と文献^{1)・2)}を参考に、トンネル周辺地域の地形・地質について概述する。

西会津トンネル周旁 域の地形は、会津盆地西縁から西の野沢盆地までの間を占める中央部に分水嶺を持つ標高200～500mの南北に延びる丘陵地～山地からなる。この丘陵地～山地は、周囲を3つの河川で限られている。東側を只見川が北流し、北側を只見川と合流した阿賀野川が東から西に蛇行して流下し、西側を野沢盆地西会津北方で阿賀野川に合流する支川の一つの長谷川が南から北西に流下している。これらの河川に沿って、標高150～220m程の段丘が形成されている。

西会津トンネルは、丘陵地～山地の中央分水嶺の高まりから西方の山地縁辺に向かって緩く下る西側斜面の中の、標高380～395mのほぼ南北に延びる一つの尾根状部を東西に貫く形で計画されている。計画線の南方には長谷川右岸支流の不動川が東から西に流下しており、東側坑口付近には不動川右岸支流の横沢川が南北の谷を刻み、一方、西側坑口付近には不動川合流点の1km下流で、長谷川に合流する支流の塩ノ入川が分岐する谷をつくっている。図-2.1に西会津トンネル付近の地形図を示す。

トンネルを貫く尾根状部は、稜線が東に偏った一種のケスタ地形を呈している。尾根の東側斜面にあたる東側坑口が位置する横沢川の西側谷斜面は、25～30°程度のやや急峻な地形をなすが、西側坑口のある西側斜面は10～20°程度で緩く、かつ長く下っている。これは西二緩く傾く地層が層理面に沿って浸食された結果生じたものである。

西会津トンネル周辺域には多くの第三紀層地すべりの分布が知られ、本トンネルのある尾根状部も地すべり分布地として示されている³⁾。空中写真でみると稜線を界して、その東西の斜面に頭部の滑落崖と、その前面の移動地塊からなる地すべり地形が認められる。特に西側坑口部を含む一帯は、稜線の西側に生じた大規模な地すべり地形を示している。西側坑口付近の地山は、過去の地すべりで形成された崩積堆積物の地塊を含み、今回の工事で生じた坑口部の地すべりは、この再動に関連した可能性がある。

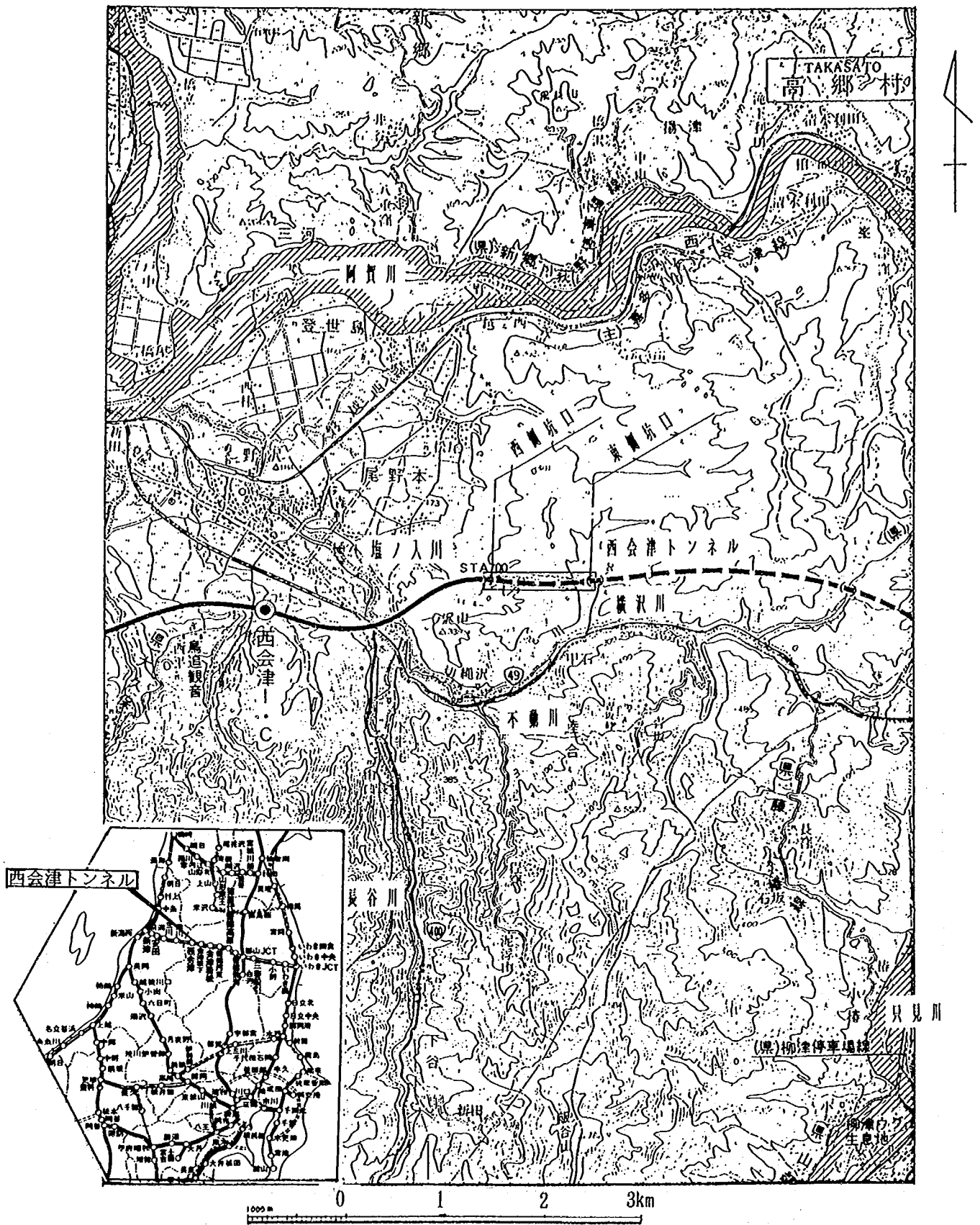


図-1.1 西会津トンネル付近地形図

1.3 地質分布

1.3.1 地質概要

西会津トンネル周辺地域の広域地質図を図-1.2に、トンネル区域の地層層序表とトンネル線形に沿った地質縦断面図を表-1.1、図-1.3にそれぞれ示す。トンネル周辺地域の地質は、花崗岩、古生層砂岩・粘板岩等を基盤とし、これを覆う新第三紀中新世以降の地層からなる。しかし、基盤岩類の分布はトンネル区間には認められない。トンネル区域には、下位から新第三紀中新世中期～後期にわたる荻野層（含浮石凝灰岩、凝灰質砂岩）、漆窪層（砂岩、泥岩）、及び塩坪層（砂岩、凝灰岩）が、また、一部に第四紀の段丘堆積物、湿地堆積物、崖錐堆積物が分布している。

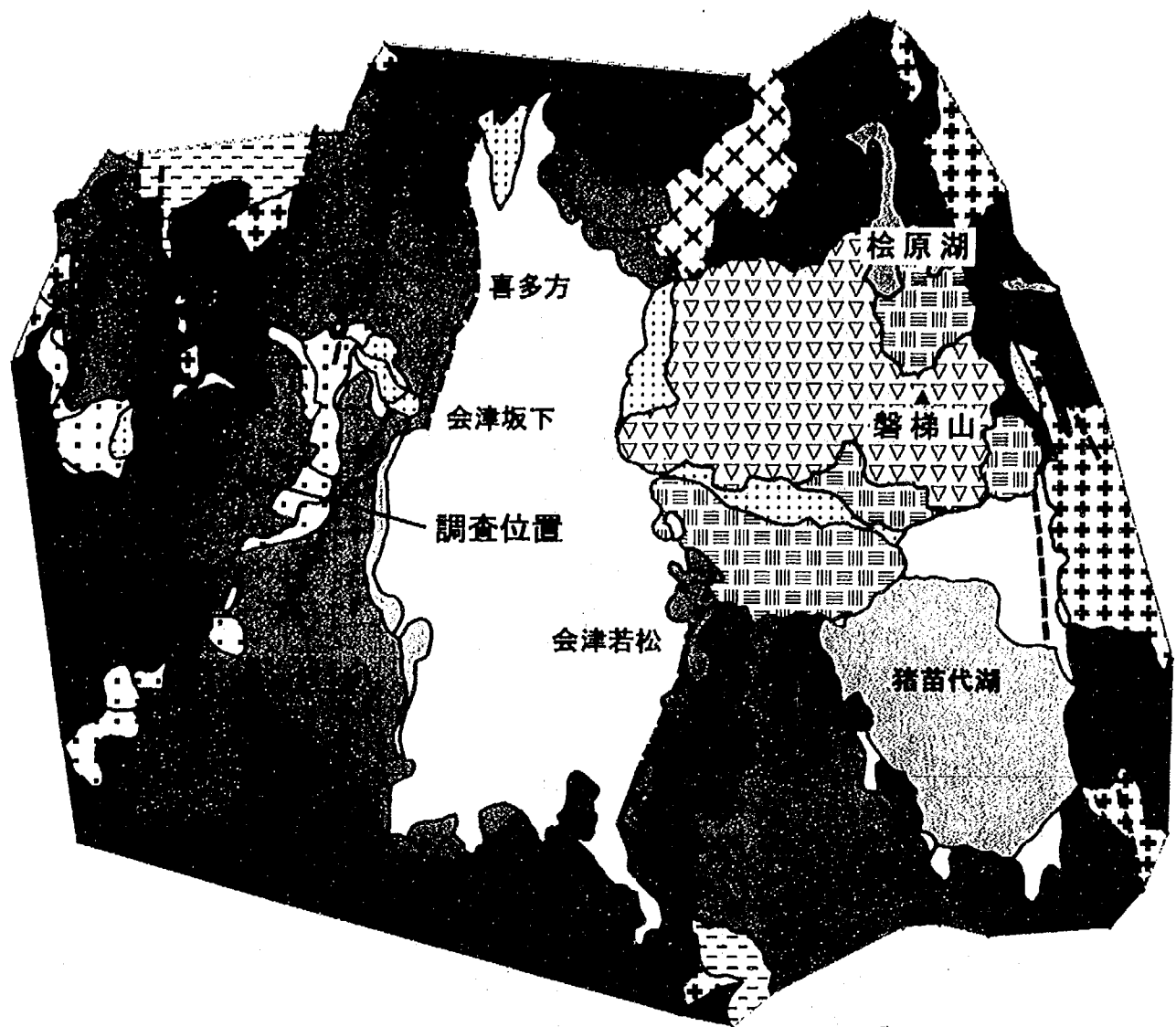
表-1.1 地層層序

時 代	地層名	岩 層	記号	摘 要
第 四 紀	完 新 世	崖錐堆積物	dl	・ 山腹緩斜面に分布し粘土、砂、角礫よりなる。 ・ ルーズである。
	更 新 世	湿地堆積物	sd	・ STA No. 695付近の台地上に分布し、湿地を形成する。
		段丘堆積物	ld	・ STA No. 691付近の尾根上に分布する。 ・ 花崗岩、チャート、頁岩、砂岩の風化円礫を主体とする。
新 第 三 紀	中 新 世 後 期	塩 坪 層	Sss	・ 全体に凝灰質で浮石を混入する。 ・ 新鮮部は凝灰質で固結度良好で硬い。 ・ 凝灰岩を伴う。
		漆 窪 層	Umd	・ 暗灰～黒灰色を呈する。 ・ 岩片は硬質であるが、亀裂が多く発達する。
			Uss	・ 泥岩とは漸移し、下位は淡緑色を帯びる。 ・ 岩片は硬質であるが風化部は亀裂が多く発達する。
	中 期	荻 野 層	Oss	・ 葉理が明瞭な凝灰質砂岩が主体で、緑色凝灰岩凝灰質礫岩と互層をなす。 ・ 亀裂沿いに風化が進む。
			Ogl	・ 浮石を多く含み、所々細粒凝灰岩を挟む。 ・ 比較的塊状硬質である。

1.3.2 地質構造

トンネル周辺地域の地質構造は、褶曲、断層により複雑な構造となっているが、巨視的にはほぼ南北性の走向を有し、ゆるやかな波状褶曲を繰り返している。断層は広域地質図^{1)・2)}では南北ないし北東-南西方向と、これに交わる北西-南東方向の2系統のものが示されている。

西会津トンネル区域は、東坑口付近の横沢川の谷のやや東を北北東-南南西に延びる軸を持つ背斜構造の西翼に位置する。横沢川の西側谷斜面頭部の稜線沿いに軸を持つ局部的で、緩い向斜部が認められているが、大局的には、地質構造は北北東-南南西の走向を持ち、西側に傾斜する単斜構造を呈している。このため、地層の傾斜は東側（会津若松側）坑口付近で20～30°とやや急であるが、西側（新潟側）坑口付近で10°前後と緩やかになる。



凡例

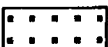
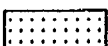
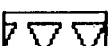
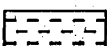
- | | |
|--|--|
|  冲積層 |  石英安山岩 |
|  沼沢軽石層 |  中部中新～鮮新統 |
|  段丘層 |  中部～上部中新統 |
|  溶岩・火山碎屑物 |  先第三系 |
|  火山泥流堆積物 |  花崗岩 |
|  中部更新統 |  変成岩 |
|  下部更新統 |  断層 |
|  上部中新～鮮新統 | |

図-1.2 広域地質図

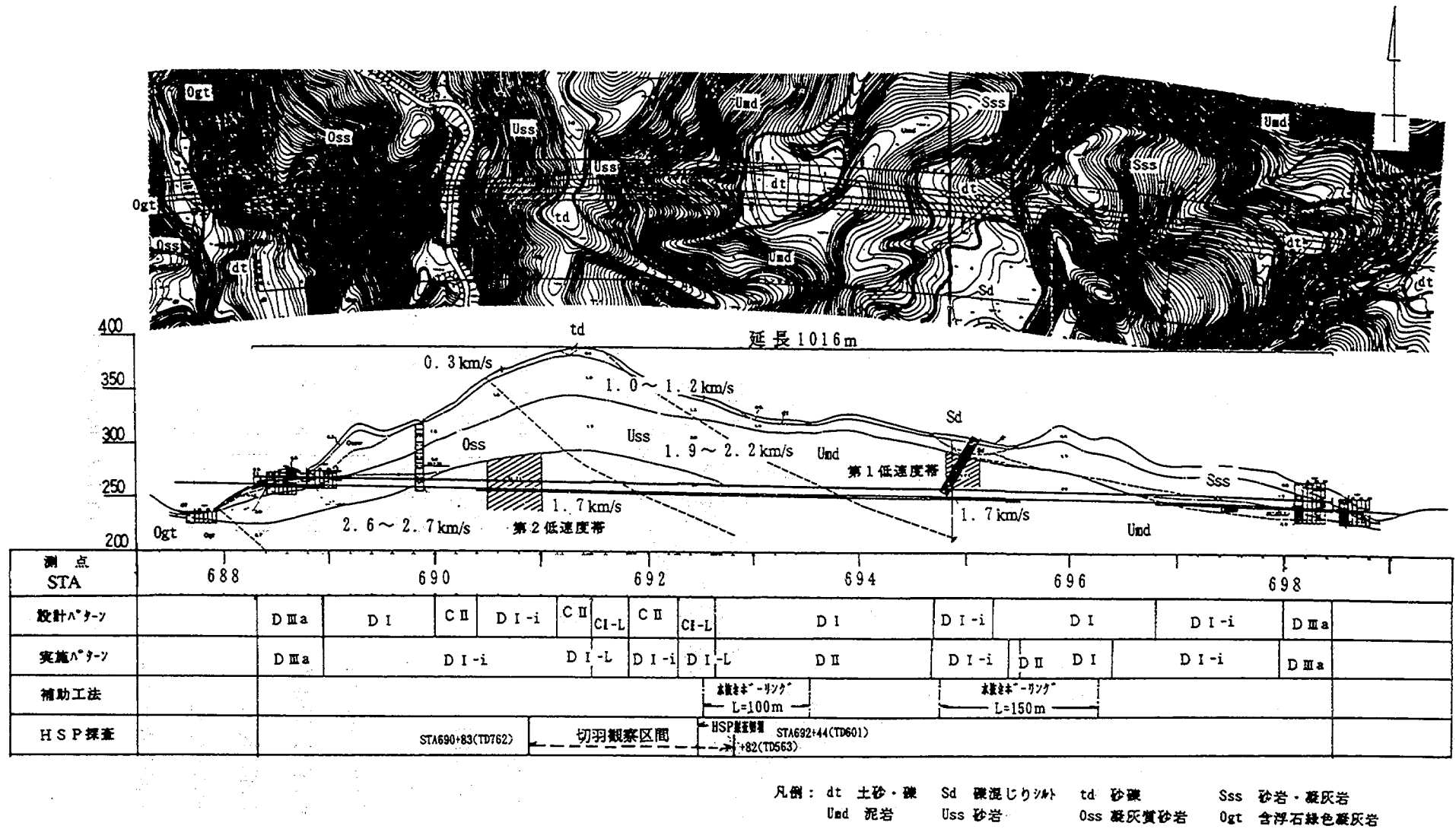


図-1.3 西会津トンネル地質平面・縦断図

断層は、西坑口から350m付近の湿地帯凹地を通る北北東－南南西方向のものが地表踏査から推定²⁾され、これは弾性波探査などでも低速度帯＝破砕帯として確認されている。尚、西坑口から770m付近にも弾性波で低速度帯が確認され、割れ目の多い岩質であろうと推定されている。

1.3.3 分布地質の特徴

トンネル区域の地質は、図-1.3に示すように、新第三紀中新世の荻野層、漆窪層、塩坪層および第四紀の段丘堆積物、崖錐堆積物等からなるが、ここでは各地層毎にその特徴・性状について述べる。

1) 荻野層

下位の含浮石凝灰岩(0gl)と上位の凝灰質砂岩(0ss)に区分される。含浮石凝灰岩(0gl)は、東側(会津若松側)坑口下の横沢川の沢沿いに分布する。所々浮石を混入した緑色凝灰岩で、全体に塊状、硬質であるが、表層の風化部は浮石が腐り抜け落ちており、脆弱化している。

凝灰質砂岩(0ss)は縄沢の林道沿いに露出しており、トンネル施工基面の会津側寄りに広く分布する。葉理が明瞭な緑色～青灰色の凝灰質砂岩で、層厚数10cm～数mの緑色凝灰岩、細粒礫岩を伴う。細粒礫岩は径10mm以下の泥岩角礫を多量に混入しマトリックスは緑白色凝灰岩からなる。凝灰質砂岩、緑色凝灰岩は割れ目が少なく、ハンマー軽打では割れ難いが、細粒礫岩は固結度が低くハンマーで割れる。

2) 漆窪層

下位の砂岩(Uss)と上位の泥岩(Umd)に区分される。砂岩(Uss)は、STA No. 691付近の尾根沿いに露出している。厚さ数cmの凝灰岩の薄層を挟在する。細粒で灰白色～淡緑色を呈し、やや凝灰質である。露頭しているものは風化して黄灰色を呈し、亀裂が多く、亀裂に沿ってブロック状に砕け易い。

泥岩(Umd)は、西側(新潟側)の沢沿いに露出しており、トンネル施工基面の新潟側に広く分布する。新鮮部の岩片は硬質であるが、亀裂が多くハンマーで叩くと細片状に割れる。西側坑口付近では、土砂化した風化帯(N値50以下)が厚くなっている。ボーリング調査結果から、風化帯と下位の新鮮岩との境界をなす凝灰岩には暗緑色を呈し、鏡肌を持つ粘土状破砕帯が認められる。また、泥岩に挟在している凝灰岩や凝灰質砂岩層が土砂状～角礫状に破砕されていることから、泥岩層(Umd)では、凝灰岩、砂岩の挟み層のみが選択的に劣化していると想定された。

3) 塩坪層

塩坪層(Sss)は、凝灰岩を伴う凝灰質細粒砂岩からなり、西側(新潟側)坑口付近の沢に多く露出している。岩片は硬質であるが、亀裂が発達しており、亀裂に沿って風化が進行している。

4) 段丘堆積物

段丘堆積物(td)は下位の新第三紀層を不整合に覆い、STA 691付近の尾根部に分布する。礫は花崗岩、頁岩、チャート、砂岩の風化円礫を主体とし、礫径10～100mm、礫の混入率は90%程度と礫分が多い。マトリックスは赤褐色のローム質粘土からなる。

5) 湿地堆積物

湿地堆積物(sl)は、段丘堆積物と同様に下位の第三紀層を不整合に覆い、STA 695付近の台地部に分布する。ボーリング調査結果によると、凝灰質粘土、礫混じりシルトから構成され、礫は径10mm程度の砂岩、凝

灰岩角礫を主体とし所々チャート円礫を混入する。必ずしも湿地性の堆積物ではないが、現在湿地を形成しているので便宜上「湿地堆積物」と区分したものである。

6) 崖錐堆積物

崖錐堆積物(d1)は、山腹の緩斜面に分布する。STA 701付近にやや厚く堆積する。基盤の砂岩、泥岩礫を混入する土砂よりなる未固結堆積物である。

2. 当初設計と既施工区間での実績

2.1 事前調査及び当初設計

西会津トンネルは、表-2.1に示す事前地質調査と詳細設計が実施されている。

表-2.1 事前地質調査・設計の概要

報告書	報告年月	調査目的	調査内容及び数量
①会津坂下地区地表調査報告書	昭和62年2月	・地質構成、工学的性質の把握 ・路線選定及び今後の調査、設計、施工のための基礎資料の収集	・地表踏査 18.8km×400m ・鉛直ボーリング 2箇所 延57m ・標準貫入試験 6回 ・物理試験・岩石試験 1式
②西会津トンネル第一次地質調査報告書	平成元年1月	・地質構成、地質構造、地質の工学的性質、水理状況の把握 ・トンネル設計の基礎資料の収集 ・地山区分、掘削工法・支保の提案	・弾性波探査 5測線 延1870m ・鉛直ボーリング 4箇所 延 70m ・標準貫入試験 59回 ・物理試験・岩石試験 1式
③西会津トンネル第二次地質調査報告書	平成2年2月	・両坑口の調査 ・低速度帯の性状把握	・鉛直ボーリング 4箇所 延138m ・斜めボーリング 1箇所 58m ・標準貫入試験 65回 ・物理試験・岩石試験 1式
④西会津トンネル詳細設計報告書	平成3年3月	・本体工の設計、地山区分、施工法の選定 ・坑門工の設計、施工設備計画 ・東側坑口の補助工法の提案	

以下、各報告書の中で、今回の切羽前方探査に関連する部分の概要を記す。

2.1.1 会津坂下地区地表地質調査

1) 地質情報について

- ・計画地周辺の概略地表踏査を実施している。
- ・STA 694+90付近に推定断層の存在(ランクC 地質構造、地質分布から推定)を指摘している。
- ・西坑口付近(新潟側)は土被りが薄く、下り線側へ偏圧地形になるため注意を要すると指摘している。
- ・トンネルの全体的な地山分類を提案している。
- ・両坑口部の追加ボーリング調査を提案している。
- ・地山分類は道路公団NATM暫定指針(1982年)を使用している。

2) 疑問点

- ・地表地質踏査結果として、西坑口部が崩落地形で崖錐堆積物が分布し注意が必要であることを指摘しているが、地質工学的問題として地すべりに対する注意を促していない。

2.1.2 西会津トンネル第一次地質調査

1) 地質情報について

- ・地質は起点側坑口(会津若松側)より、荻野層(含浮石緑色凝灰岩、凝灰質砂岩)、漆窪層(砂岩、泥岩)、塩坪層(砂岩、凝灰岩)が分布し、地質構造的には会津若松方より新潟方へ傾斜する単斜構造で

ある。

- ・弾性波探査により、周囲に比べて速度値の低い低速度帯が2箇所を確認された。1つはSTA 695付近(第1低速度帯と呼称する)で、地質は漆窪層の泥岩(Umd)である。ここでは弾性波速度2.2km/s層の中に1.7km/s層の低速度帯が検出されたが、この付近は地表踏査で断層が推定された箇所であり、低速度帯の原因は断層と推定された。ただし、周囲が2.2km/sに対して、1.7km/sと大差ないことから、土砂～粘土状に破碎された大規模な断層破碎帯である可能性は低いと予測している。どちらかと言えば、割れ目が多く発達し、割れ目沿いに風化を受けているものの、岩塊自体は新鮮で硬質な岩盤であろうと推定している。
- ・もう1つはSTA 690+50～STA 691付近(第2低速度帯と呼称する。今回のHSP探査計画区間)である。地質は荻野層の凝灰質砂岩(Oss)で2.6～2.7km/s層の中に1.7km/s層の低速度帯が検出された。低速度帯の原因については明らかでないが、地表踏査で特に断層が推定されていないため、風化部の落ち込み、構造運動による割れ目の発達したゾーンであると考えている。低速度帯の性状については、割れ目が多く発達し、割れ目沿いに風化した岩質が一部軟質化していると推定された。
- ・荻野層、漆窪層ともモンモリロナイトの含有量が少なく、粘土鉱物に起因する化学的な膨張の可能性は低いと想定された。但し、漆窪層の泥岩はやや吸水膨張率が高くスレーキングにも弱いため、今後の再検討が望まれた。
- ・荻野層、漆窪層とも一軸圧縮強度が大きく、強度不足に起因する膨圧の発生は低いと考えられた。
- ・トンネル部における地山状況、地山物性値、地下水位、透水性等が不明なため、代表的な箇所でのボーリングを実施し確認する必要があると指摘している。
- ・両坑口および2カ所の低速度帯の性状把握のため、追加ボーリング調査を提案している。
- ・地山分類は道路公団地山分類(設計要領第三集)を使用している。

2) 疑問点

- ・2カ所の低速度帯を確認し追加ボーリングを提案しているが、その位置を下り線側(上り線を暫定2車線として施工予定)としている理由が不明である。

2.1.3 西会津トンネル第二次地質調査

1) 地質情報について

- ・前回の弾性波探査により、STA 694+80～STA 695+10間に検出された第1低速度帯(1.7km/s)および推定断層の性状確認を目的として斜めボーリングが実施された。その結果、低速度帯に相当する泥岩は土砂状～粘土状に劣化している部分と、岩片は硬質であるが亀裂が多く発達している部分とが、互層状をなすことが判明した。
- ・また、ボーリング結果から断層は実質数mであり、大規模な破碎帯(断層粘土、断層角礫)を伴うものではないが、西坑口側は若干亀裂が多く凝灰岩沿いが破碎・風化していると考えられた。尚、ボーリング掘削時に口元で湧水が認められたことから、低速度帯の亀裂の多い泥岩層には、少なくとも地表面以上の水頭を持つ裂か水が存在するとしている。以上の第1低速度帯の詳細性状を把握

し、補助工法および水抜きボーリング（地質調査兼用）を提案している。

- ・両坑口部のボーリングによる詳細調査を実施をしている。
- ・地山強度比を算出し、地山分類に反映している。尚、地山分類は道路公団地山分類（設計要領第三集）を使用している。

2) 疑問点

- ・第2低速度帯（今回のH S P探査区間）についての調査ボーリングを実施しておらず、その理由が不明である。
- ・第一次調査では第2低速度帯をC IIに分類していたが、今回はD I地山に評価しており、その説明が不十分である。
- ・第1低速度帯の斜めボーリングを下り線側で行った理由が不明（今回の掘削ラインである上り線で実施するのが当然と思われるが）である。

2.1.4 西会津トンネル詳細設計

1) 地質情報について

地表地質踏査結果、既往の地質調査結果等から以下のことが言えるとしている。

- ・東側坑口（会津若松側）は崖錐堆積物も薄く比較的良質の地質であるが、西側坑口（新潟側）は坑口～坑奥185m間は風化された泥岩、凝灰岩の軟質な地山である。
- ・坑奥部は弾性波速度2.0～2.7km/sの地山で、一部風化している部分も存在するが岩質は比較的硬質である。但し、2箇所の低速度帯が存在するので地山の判定には注意が必要である。

特に2箇所の低速度帯については、以下のように評価している。

①STA 694+80～STA 695+20付近の第1低速度帯（1.7km/s）及び推定断層は、泥岩が土砂状～粘土状に劣化している部分と、岩片は硬質であるが亀裂が多く発達している部分とが互層状をなしている。ボーリング結果から、推定断層は深度45.0～53.2m間の土砂状～粘土状化した部分に該当すると考えられ、漆喰層泥岩と漆喰層砂岩との断層によるずれは確認できなかったことから、断層による変位はあまり大きくないものと推定された。また、トンネル位置以深から硬質で亀裂の少ない新鮮な泥岩が確認され、トンネル上部に礫混じり粘土の破碎帯部が位置していることから天端の崩壊には注意し、その対策としての補助工法が必要であると指摘している。更に、風化岩と新鮮岩の境界部、あるいは泥岩中に挟在する砂岩、凝灰岩層に沿って湧水の可能性が考えられるので、切羽の安定と施工中の仮排水に十分留意すべきとしている。

②第2低速度帯（STA 690+50～STA 691+00付近、今回のH S P探査計画区間）は、

- ・弾性波速度2.6～2.7km/sの凝灰質砂岩層の中の1.7km/s層の低速度帯であること。
- ・特に断層は推定されない。
- ・割れ目が多く発達し、目に沿った風化が推定される。
- ・膨張の可能性が少ない。
- ・風化した新第三紀の地質からなる。

以上から判断して、長期的な地山の安定性や供用後のトンネル本体の安定性に欠けることからインバートを設けるとしている。また、湧水や切羽が自立しないことの可能性は少ないが天端の安定性確保のため、フォアパイリング等を併用としている。

2) 疑問点

- ・フォアパイリングの採用を提案しているにも拘わらず、支保パターンに採用されていないのは状況に応じて補助工法を採用するように考えた結果なのか。
- ・湧水についての推定根拠が不明確。
- ・予想される現象とその対策についての検討が少ない。

2.2 調査設計時の技術的課題

前記、事前調査・当初設計時における内容を見直すと西会津トンネルでの技術的な課題は主に次の3点であると言える。

①STA 694+80～STA 695+20付近の第1低速度帯(西側坑口から325～365m付近)

- ・泥岩の地質で、推定断層が存在し、トンネル上部に礫混じり粘土の断層破碎帯が位置していることが確認されている。また、断層による変位はあまり大きくないが、最大2 l/minの湧水が生じる可能性があることも予想されている。

②STA 690+50～STA 691+00付近の第2低速度帯(西側坑口から745～795m付近 HSP探査区間)

- ・凝灰質砂岩の地質で、2.6～2.7km/s層の中に1.7km/s層の低速度帯が検出されている。特に断層は推定されていないが、割れ目が多く発達し、目に沿って風化した岩質は一部軟質化すると予想される。膨張性の可能性は少ない。当初設計ではDⅠ-iパターン(インバートあり)に補助工法としてフォアパイリング等を併用する事としている。

③STA 688+70～STA 688+75の低土被り区間(東側坑口から41～46m)

- ・東坑口部は、雨水などの浸食作用により土被りが薄く、最低土被りが3mとなっている。この区間の設計はDⅢaパターンによる支保を採用し、状況に応じて注入式フォアパイリングの採用を検討することとしている。

2.3 既施工区間(第1低速度帯)での施工経緯

2.3.1 第1低速度帯での水抜きボーリング

1) 目的・方法

事前地質調査結果からSTA 694+80～STA 695+20付近の第1低速度帯(西坑口から325～365m付近)については、泥岩地質で推定断層が存在しトンネル上部に礫混じり粘土の断層破碎帯があり、最大2 l/min程度の湧水の可能性を示唆していることから、当初設計では、D I-iパターン(インバート有)に補助工法としてフォアパイリング等を併用することで切羽の安定を確保し、加えて施工中の仮排水には十分留意すべきと指摘している。

従って、以下の事項を目的に、STA 696+28(消火栓箱抜き部)から水抜きボーリング(削孔長L=150m)を行った。

- ・事前に水抜きボーリング(ノンコア)を実施して、天端・鏡部の安定性、施工性の向上を図る。

- ・削孔水等により低速度帯付近の地質状況を確認し、補助工法等の検討資料を得る。

また、水抜きボーリング作業による切羽休止を回避し、湧水の流末処理を円滑に行うために切羽後方の消火栓箱抜き部から実施することとした。

2) 調査結果の概要

水抜きボーリングでの集水量及び地質状況を表-2.2、図-2.1に示す。

表-2.2 集水量及び地質状況

ボーリング長	位 置	集水量 (l/min)	地 質 状 況
0～80m	STA696+26～STA695+46	0	泥 岩
80～135m	STA695+46～STA694+91	30	泥 岩
135～140m	STA694+91～STA694+86	80～90	破碎質凝灰岩 (粘土を挟む)
140～150m	STA694+86～STA694+76	80～90	泥 岩

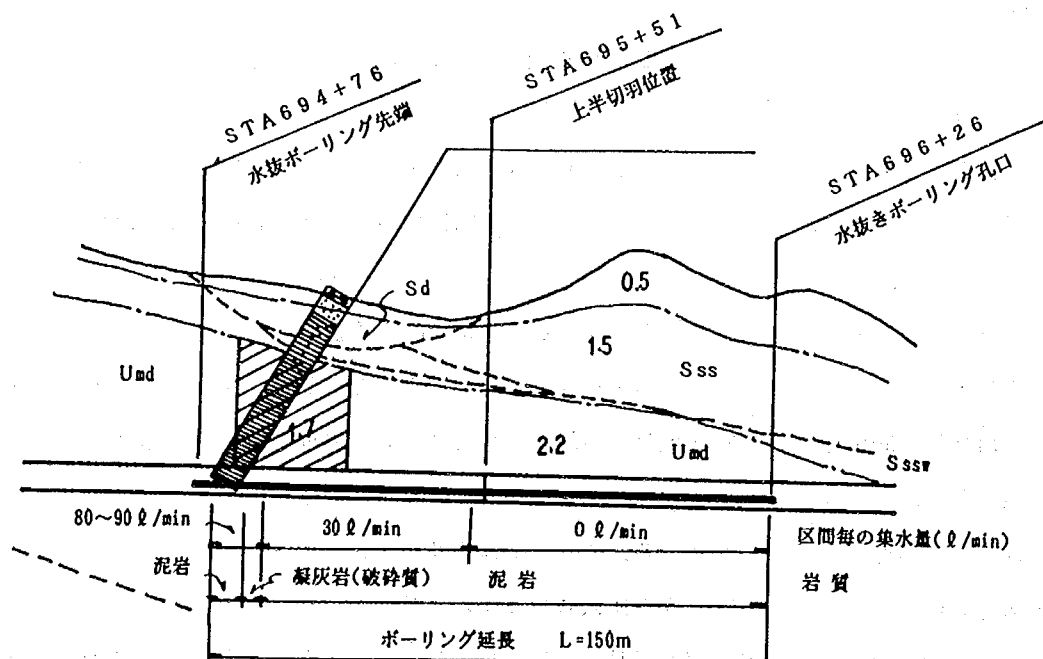


図-2.1 水抜きボーリング位置図

水抜きボーリング孔口での全集水量は120l/minでほとんど被圧されていない状況を呈した。調査区間ごとの集水量を見ると、STA695+46～STA694+91で $Q=30\text{l/min}$ となっており、事前調査での低速度帯の手前36m～断層面付近に位置している。削孔水から判断すると、この間の地質は泥岩であり、上半切羽状況（割れ目の発達した泥岩）を踏まえて考察すると地表の湿地帯付近の水が岩の割れ目に沿って集水されたものと考えられた。また、この区間の切羽状況は断層の影響で、現在の上半切羽よりも割れ目が卓越していると考えられ、当初設計以上の支保パターンが必要と想定された。

STA694+91～STA86の地質は粘土を挟んだ破碎質の凝灰岩で、集水量も $Q=80\sim 90\text{l/min}$ と多い。事前地質調査でもSTA694+90付近に断層面（余り大きくはない）が想定されており、この区間が断層と判断された。事前地質調査では断層破碎帯に粘性土の介在は少ないとしているが、今回の水抜きボーリング結果からは粘性土の介在が予想され、断層付近の掘削では天端・鏡部の崩壊や緩みに伴う大きな変位の発生・支保の変状が予想された。

2.3.2 設計変更の検討

1) 基本的な考え方

当初設計では、第1低速度帯（STA 695+25～STA 694+70 $L=55\text{m}$ ）にDⅠ-iパターン（インバートあり）が採用されている。事前地質調査では大きな変位の発生や膨圧の可能性は少ないとしているが、水抜きボーリング結果や一般的な断層破碎帯の施工実績などから、少なくともこれまで（坑口から第1低速度帯までの区間を指す）よりも大きな内空変位の発生、支保の変状や変位収束の遅れ等が懸念される。このため、支保の剛性を高め、変形余裕を見込んだ支保の採用が必要と判断された。

また、トンネル天端付近に破碎層が存在するため（水抜きボーリングでは確認できなかった）、掘削による天端付近の先行変位や湧水に起因して天端の安定性が著しく低下することが予想される。このため、天端安定のための補助工法の採用が必要であった。

2) 補助工法の選定

対策工の遅れを回避するために、トンネル着手前に図-2.2に示す補助工法選定フローを作成しているが、このフローは事後対策的な活用を終始しているのが実状である。

第1低速度帯の施工方法については、事前に施工法（補助工法）についての協議を行い、DⅡパターンの支保とフォアパイリングを採用することとしたが、適用区間については切羽状況や計測結果を総合的に判断して決定することとした。

・大きな断面変形 → DⅡパターン（変形余裕10cm）の採用

・天端・鏡部の自立 → フォアパイリング（必要に応じてウレタン圧入式フォアパイリング）

ところで、STA695+50付近（第1低速度帯の手前25m）で切羽天端の崩壊（崩壊土量 160m^3 ）が発生し、その復旧対策として、

・崩壊空洞の充填 → モルタル、エアモルタル

・天端の保護 → ウレタン圧入式フォアパイリング、デンカES注入式フォアパイリング

を行った。このとき、限定注入式フォアパイリング注入材の試験施工を兼ねたため、今後の注入材はウレタ

西会津トンネル 補助工法選定フロー

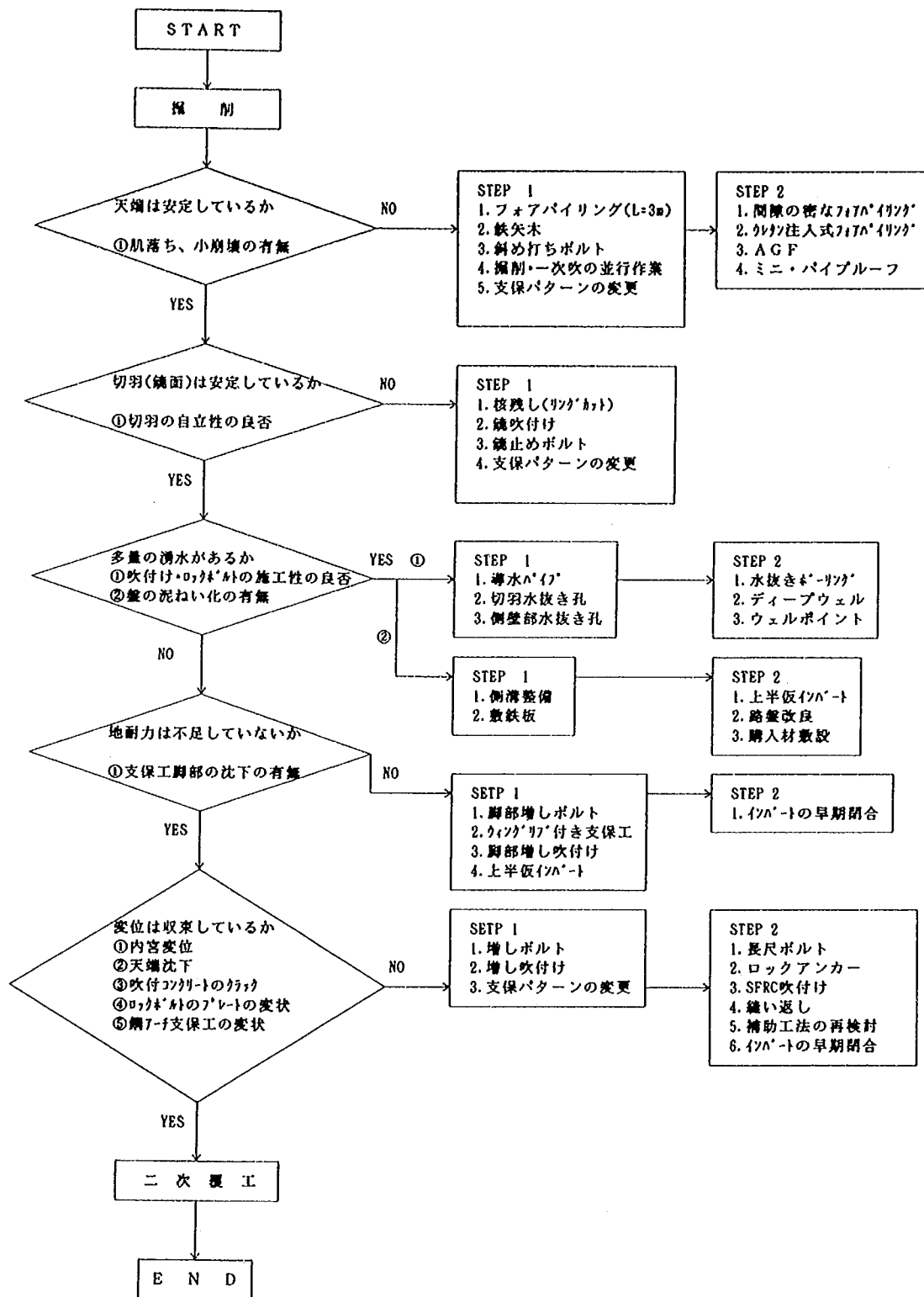


図-2.2 補助工法選定フロー図

ンを用いることとした。（表－2.3 注入材比較検討表）

3) 施工実績

図－2.3に施工実績を示す。掘削方式は発破掘削を採用しているが、第1低速度帯付近は補助機械（油圧ブレーカ）による掘削で行った。低速度帯はDⅠ-iパターンを採用したが、内空変位・天端沈下の収束が極端に遅いために

- ・上半増しロックボルト
- ・上半脚部増し吹付けコンクリート
- ・下半掘削後の本設インバートによる早期閉合

の対策工を実施してきた。

尚、STA 694+80付近から、切羽状況は少しずつ良くなってきてはいるものの、湧水量は増え（水抜き孔から50l/min程度）、内空変位・天端沈下が増大するのでDⅡパターンを採用した。この区間でも、DⅠ-iパターン同様に増しロックボルト、上半脚部増し吹付けコンクリート、上半仮インバートの採用を余儀なくされた。

* 切羽の進行は右から左へ進む

測 点		694+30	+40	+50	+60	+70	+80	+90	695+00	+10	+20	+30	+40	+50	+60	
設 計	支保ハーション	DⅠ				DⅠ-i（第1低速度帯区間）						DⅠ				
	予想した地質	泥 岩														天端崩壊箇所 ↓
実 績	支保ハーション	DⅡ				DⅠ-i						DⅡ		DⅠ		
	地質	泥岩（断層破砕帯）														泥 岩
積	補助工法	セメント注入（復旧対策）→														
		ST-6666注入（復旧対策）→														
		ゲリオン注入式717A [®] （復旧対策）→														
		717A [®] 4977 [®] （L=3.0m）10本/m→				ゲリオン注入式717A [®] （復旧対策）→										
		増しロックボルト・脚部吹付けコンクリート・上半仮インバートの施工														
								水抜き孔・ゲリオン（実施位置：STA696+26箱抜き部より、L=150m）								

図－2.3 施工実績

図- 2.3 注入材比較検討表

項 目	① 発砲ウレタン	② シリカレジン	③ デンカES(セメント系)	④ LW(水ガラス系)
施 工 性	・機械設備が簡便 ・切羽サツカに繰り込める ・バルクヘッドを必要としない	・機械設備が簡便 ・切羽サツカに繰り込める ・バルクヘッドを必要としない	・機械設備が簡便 ・バルクヘッドを必要としない	・機械設備が大規模 (プラント、スリッジが必要) ・専門業者による施工 ・注入圧力とパッカー効果に対するバルクヘッド(隔壁)が必要
	○	○	○	×
特 性	・固結時間調整と量的管理により限定注入が可能(改良範囲が小規模) ・土粒子・岩塊への付着性が良い ・地山への浸透性が良い ・改良強度が比較的高い($qu=40\text{kg}/\text{cm}^2$程度) ・多少の湧水でも施工可 ・強度発現が早いので注入後ただちに掘削可能 ・施工実績が多く、今回の採用に際しては最も信頼性が高い。	・固結時間調整と量的管理により限定注入が可能(改良範囲が小規模) ・土粒子・岩塊への付着性が良い ・地山への浸透性が良い ・改良強度はウレタンより劣る($qu=20\text{kg}/\text{cm}^2$程度) ・多少の湧水でも施工可 ・強度発現が早いので注入後ただちに掘削可能 ・高圧力では安全面ではウレタンに比べて問題がある。	・高濃度(富配合)なので地山への浸透性に不安が残る。$(qu=40\text{kg}/\text{cm}^2)$ ・ウレタンのような瞬結タイプではないので、初期強度に不安が残る。 ・施工実績がほとんど無く、今回の崩壊箇所の復旧に採用するには信頼性に劣る。 ・耐湧水に問題が残る。 ・トレンチ掘削に遅れをきたすことが懸念される。	・固結強度が低い($qu=20\text{kg}/\text{cm}^2$程度) ・広範囲の改良が必要となる。 ・崩壊した地山では間隙の大きい部分だけが改良され、局部的な改良が困難となる。 ・湧水により薬液が流出する可能性がある。 ・掘削のサツカには組み込まず、切羽を止める必要がある。
	○	△	×	×
施 工 性 (材料費のみ 工費・経費を 除く)	薬剤 1,450円/kg 1断面 19本 $\phi 40\text{kg}$ として 135万円/トンネルm 注入量の計算において 対象土量 $V=1.13\text{m}^3$ 注入率 $n=12\%$ 注入サツカ $L=4\text{m}$	薬剤 1,100円/kg 1断面 19本 $\phi 65\text{kg}$ として 165万円/トンネルm 注入量の計算において 対象土量 $V=1.64\text{m}^3$ 注入率 $n=12\%$ 注入サツカ $L=6\text{m}$ (ウレタンと同程度の効果を期待する)	薬剤 60円/ℓ 1断面 19本 $\phi 112\ell$ として 110万円/トンネルm 注入量の計算において 対象土量 $V=1.13\text{m}^3$ 注入率 $n=10\%$ 注入サツカ $L=4\text{m}$	薬剤 40円/ℓ 改良厚さ3mとして 110万円/トンネルm (ただし、切羽休止に伴う費用は別途)
	△	×	○	○
総 合 評 価	○	×	×	×

3. 探査区間での施工実績

掘削実績によれば、当初から懸念された第1低速度帯の影響が予想位置より手前30m程度から見られ、STA 695+50付近（第1低速度帯の手前25m）で切羽天端の大規模な崩落（崩落土量160m³）が発生している。その後、崩落した地質とほぼ同様な状況が継続し各種の対策工を併用しながらの施工を余儀なくされた。

今回のトンネルHSP法は、第1低速度帯での施工実績を踏まえて、第2低速度帯の性状把握を第一の探査目標として実施した。さらに、緩い傾斜の地層境界（Uss/Oss）の位置・形状を求める目的で、反射モードによる計測を行った。

3.1 切羽観察結果

3.1.1 切羽観察様式

切羽観察は、トンネルHSP法による反射波が軟岩地山での地質及び断裂系の性状にどのように再現されているかを詳細に対比するために行った。このため、詳細な切羽観察に基づく連続したトンネル地質状況の把握が必須となる。今回の観察では切羽観察図及びこれから得られる地質展開図、地質断面図等の作成を入念に行い、切羽地質WGで提案された切羽（坑壁）展開図、切羽スケッチ図、SLスライス平面図、トンネル縦断面図⁹⁾を作成し、HSP法の反射波や屈折処理による波動現象と地質状況での対応付けに留意した。

また、切羽観察に当たっては不連続面の抽出に重点を置き、割れ目は切羽全面に連続するものを主体とし、ヘアークラック等はコメントするに止めた。更に、割れ目の幅、充填物、粘土化の程度、性状、湧水状況、湧水量、地質構造及び断裂系の走向・傾斜の表記に努めた。尚、切羽状態の正確な把握と記録のため、スケッチとともに写真撮影も併せて行った。その際特に鮮明な写真画像となるよう工夫し、良い結果が得られた。参考までに次にその撮影要領をあげておく。

3.1.2 切羽写真撮影要領

1) 使用機器

- ・カメラ : キヤノン EOS1000S
- ・レンズ : キヤノン ズームレンズEF35-80mm 1:4-5.6
- ・フィルム : 富士フィルム フジカラーASA400
- ・その他 : 三脚、切羽照明用ハロゲンランプ(200V, 1KW, 左右1灯ずつ)

2) 撮影要領

①撮影時期

ずり出しが完了してから、約10分後(切羽付近の視界が良くなってから)。

②撮影要領

- ・カメラは結露防止のため、1時間ほど前から坑内に置いておく。
- ・ずり出し後、切羽付近の視界が良くなったのを確認する。

- ・切羽照明としてハロゲンランプを左右1灯ずつセットする。
- ・カメラを三脚にセットし、切羽から10～12m後方に据え付ける。この時カメラを覗いて、切羽全景がフレーム内に収まることを確認する。
- ・切羽撮影にフラッシュは使用しない。
- ・カメラのセルフタイマーにセットし、切羽写真を撮る。
- ・EOS 1000Sには、セルフタイマーで撮影すると被写体の明るさに応じて撮影時のシャッター速度と絞りの値の組み合わせを自動セットする機能がついている。

3) 備 考

- ①照明光源にフラッシュを用いると、反射や明るさのムラが生じたりして鮮明度が落ちる。このため、均等で十分な光量のハロゲンランプを使用した。しかし、カラー発色は自然色でなく、ややオレンジがかった色となる。鮮明度を得るため、写真の色はある程度犠牲にした。
- ②通常の1眼レフの場合、上記と同じような光源を用い、カメラを三脚にセットし、バルブ(露出開放機構)撮影で同等の鮮明度の写真が得られると思われる。

3.1.3 切羽観察結果

図-3.1にトンネルHSP法による探査区間前(38m手前)を含めた延長L=199m間の地質復元図を示す。以下、出現した切羽状況について概説を加える。尚、トンネルHSP探査時の切羽位置は、STA692+44である。

1) 全体的な地質構造

探査区間は、共に新第三紀の軟岩地山である砂岩(Uss)を主体とした漆窪層と、凝灰質砂岩(0ss)・含浮石凝灰岩(0gl)からなる荻野層の両地層及びその境界部に相当する部分である。地層は全体として南北走向で、西側に緩く傾斜している。トンネルは東西方向で西側から掘削している。このため切羽は、地層に対して流れ盤構造となり、上位の漆窪層から下位の荻野層へ掘り進む形となる。

掘削の結果、漆窪層の砂岩(Uss)は、HSP探査時切羽の風化軟質ゾーンから切羽前方20m付近で弱風化中硬質ゾーンへと移行し、前方60m付近から再び風化軟質ゾーンとなる。下位の荻野層相当層との境界付近は全体にイレギュラーとなり、前方80m付近より含浮石凝灰岩及び軟質凝灰岩が不規則に分布する。その後前方90m付近より下位の緑色凝灰岩・凝灰質礫岩のリズミカルな細互層が現れ、前方104m付近より粘土パッチを多く含む軟質緑色凝灰岩(岩質劣化部)となる。この部分の地層境界は低角度で、後述するように今回の探査目的である第2低速度帯の位置に一致するものと判断される。

2) 観察結果の概要

①STA692+82～STA692+70 (L=12m区間, HSP探査手前)

切羽は塊状ないし層状の砂岩が主体で、一部凝灰岩(白色, t=30cm)を挟在する。砂岩は割れ目が発達(開口が顕著)し、割れ目間隔も細かい(5～20cmが主体で部分的に5cm以下)。凝灰岩と砂岩との境界付近は細かく破碎され一部粘土化が見られる。

②STA692+70～STA692+53 (L=17m区間, HSP探査手前)

切羽は層状の砂岩が主体で、一部凝灰岩（灰色、暗灰色、 $l=10\text{cm}$ ）を挟在する。砂岩は割れ目間隔が細かい（ $5\sim 20\text{cm}$ が主体）。また、凝灰岩と砂岩との境界付近は破碎されている。岩塊の圧縮強度はロックシュミットハンマーによると概ね $10\sim 50\text{kgf/cm}^2$ 程度である。

③STA692+53～STA692+45（ $L=8\text{m}$ 区間、H S P 探索手前）

砂岩主体の切羽で、一部凝灰岩（黄金色、 $l=30\sim 60\text{cm}$ ）を挟在する。砂岩での割れ目は層状を呈し、特に天端付近に発達した割れ目（開口が顕著）が認められる。STA692+49～STA692+45の切羽では、破碎された凝灰岩と割れ目の発達した砂岩との境界で岩塊の崩落が生じた。STA692+46～STA692+41で鏡吹付け（ $l=10\text{cm}$ ），鏡ボルト（FRP）を施工。

④STA692+45～STA692+17（ $L=28\text{m}$ 区間、H S P 探索区間）

切羽の大部分は砂岩で構成され、岩塊の圧縮強度は概ね $60\sim 150\text{kgf/cm}^2$ 程度と広範囲に分布する。割れ目は部分的に開口しており、間隔は $20\sim 50\text{cm}$ 程度が卓越している。部分的に割れ目に沿って岩塊の抜け落ちが認められる。局部的に凝灰岩（暗灰色）を挟在する。また、切羽にはにじむ程度の湧水が見られる。

⑤STA692+17～STA692+05（ $L=7\text{m}$ ，H S P 探索区間）

切羽は砂岩が優勢で部分的に凝灰質砂岩から形成される。砂岩は全体が弱風化を受け、岩塊の圧縮強度は概ね $60\sim 100\text{kgf/cm}^2$ 程度である。割れ目の形態は層状を呈し、間隔は $5\sim 20\text{cm}$ 程度である。局部的に割れ目に沿って少量の岩塊の抜け落ちが見られ、滴水程度の湧水が認められる。

⑥STA692+05～STA691+72（ $L=33\text{m}$ ，H S P 探索区間）

切羽は砂岩と凝灰質砂岩から形成されている。砂岩は全体に弱風化を受け、岩塊の圧縮強度は $60\sim 100\text{kgf/cm}^2$ 程度である。割れ目の間隔は $20\sim 50\text{cm}$ 程度が卓越する。部分的に割れ目に沿って岩塊の抜け落ちが見られ、湧水はにじむ程度である。STA691+80付近から砂岩部に一部土砂化が認められる。凝灰質砂岩は、STA692+05～STA691+90では層状（ $20\sim 50\text{cm}$ 間隔）を呈し、局部的に粘土化している。

⑦STA691+72～STA691+58（ $L=14\text{m}$ ，H S P 探索区間）

この区間では、数m単位で各種の地質が切羽に出現し、かつ消失している。

STA691+72～STA691+68間 → 弱風化の砂岩、凝灰質砂岩

STA691+68～STA691+66間 → 弱風化の砂岩、凝灰質砂岩、緑色凝灰岩

STA691+66～STA691+64間 → 弱風化の砂岩、凝灰質砂岩、緑色凝灰岩、含浮石緑色凝灰岩

STA691+64～STA691+58間 → 弱風化の砂岩、凝灰質砂岩、含浮石緑色凝灰岩

このうち、割れ目の形態は概ね層状で、割れ目間隔は $5\sim 50\text{cm}$ と広範囲に分布する。また、部分的に開口部も認められ、局部的に粘土が介在している。天端・肩部からの岩塊の抜け落ちも見られた。岩塊の圧縮強度は概ね $50\sim 100\text{kgf/cm}^2$ 程度である。

⑧STA691+58～STA691+50（ $L=8\text{m}$ ，H S P 探索区間）

切羽は含浮石緑色凝灰岩が主体で、部分的に緑色凝灰岩と一部凝灰質砂岩から形成される。また、STA691+52付近から凝灰質礫岩が一部出現する。割れ目は概ね層状を呈し、割れ目間隔は含浮石緑色凝灰岩が $5\sim 50\text{cm}$ 程度、緑色凝灰岩は割れ目に沿って粘土を介在し岩塊の抜け落ちが見られる。岩塊の圧縮強度

は概ね50~100kgf/cm²程度である。

⑨STA691+50~STA691+25 (L=25m, H S P 探索区間)

切羽は緑色凝灰岩が主体で、部分的に含浮石緑色凝灰岩と薄層の凝灰質礫岩から構成される。STA691+44付近で含浮石緑色凝灰岩が消え、また、STA691+34付近から塊状の粘土が切羽に見られる。割れ目形態はほぼ層状を呈し、割れ目間隔は5~50cmと広範囲に分布する。また、岩塊に沿って抜け落ちが見られ、湧水は滴水程度である。岩塊の圧縮強度は50kgf/cm²未満が多い。

⑩STA691+25~STA691+20 (L=5m, H S P 探索区間)

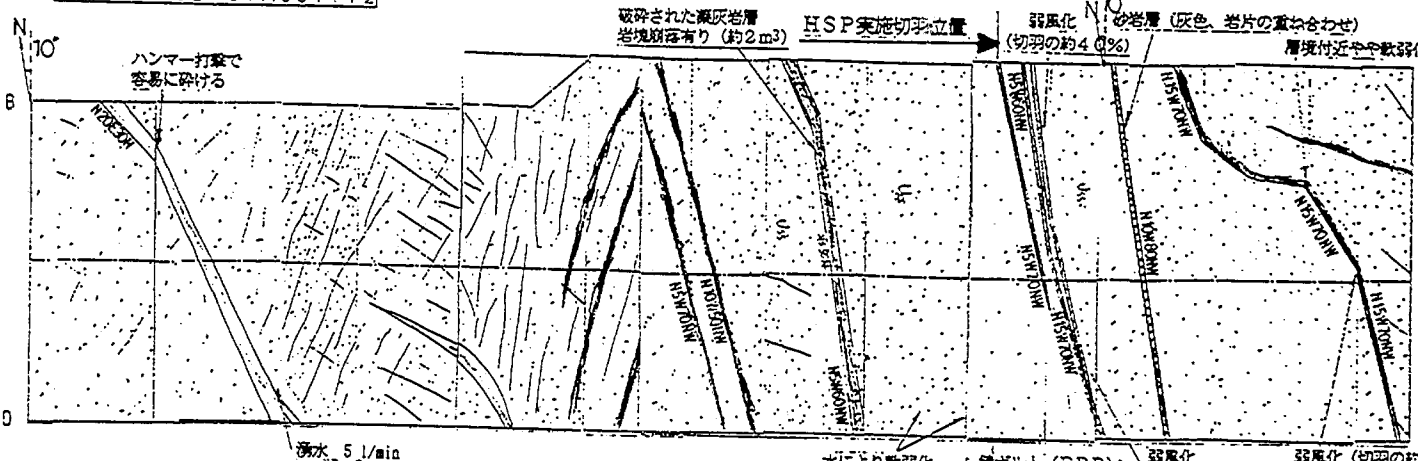
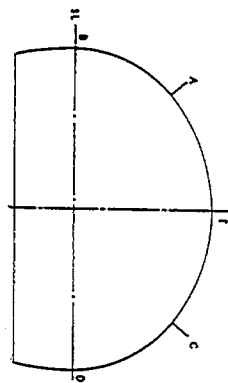
切羽は緑色凝灰岩が主体で、部分的に塊状の粘土を挟在する。割れ目形態は層状ないし塊状を呈し、細かい割れ目が発達している。このため、小規模な肌落ちが見られる。岩片はハンマー打撃で容易に細片化し、岩塊強度は概ね50kgf/cm²未満である。

⑪STA691+20~STA690+83 (L=37m, H S P 探索区間)

切羽は緑色凝灰岩が主体で、部分的に塊状の粘土を挟在する。緑色凝灰岩は細かい割れ目が発達し、切羽から肌落ちや岩塊の小規模な抜け落ちが見られる。岩片はハンマー打撃で容易に細片化する。湧水は滴水程度である。

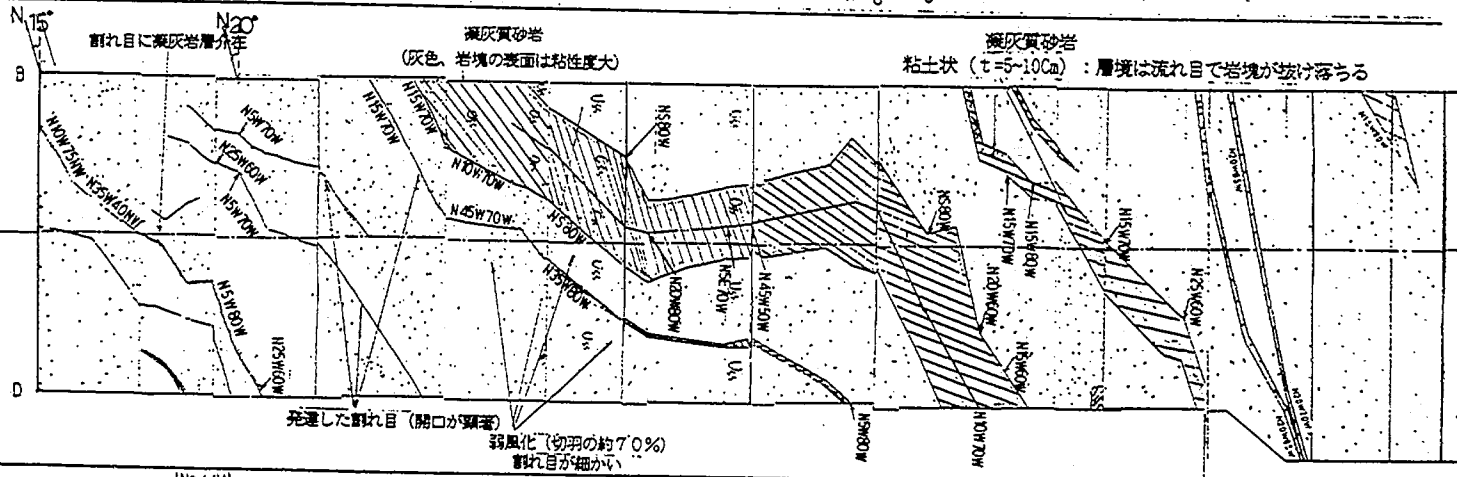
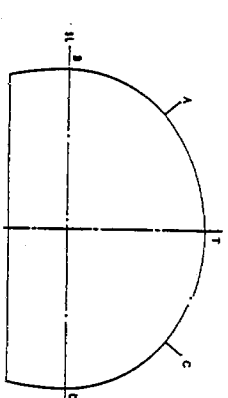
SLスライス平面図

STA692+82~STA691+72



- 凡 例
- 砂岩
 - 砂岩 (灰色)
 - 凝灰岩 (暗灰色)
 - 凝灰岩 (黄灰色)
 - 軟弱化 ($\sigma_c=50\text{kgf/cm}^2$ 未満)
 - ▨ 凝灰質砂岩

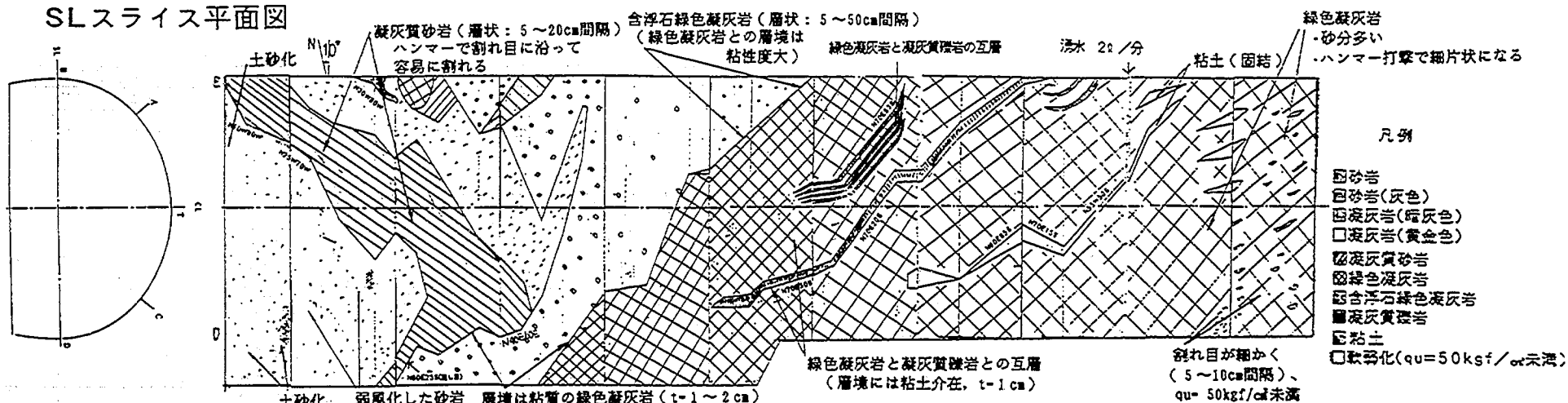
計測位置	No.40(A)				No.41(A)		No.42(A)		No.43(A)	
STA	692+82	+80	+70	+523	+60	+50	692+44	+40	+30	+279
坑口からの距離(m)	563	565	575	582.7	585	595	601	605	615	617.1
施工パターン	DI				DI-L					
ロックジュミットハンマー 打撃による一軸圧縮強度 (Kgf/Cm ²)										



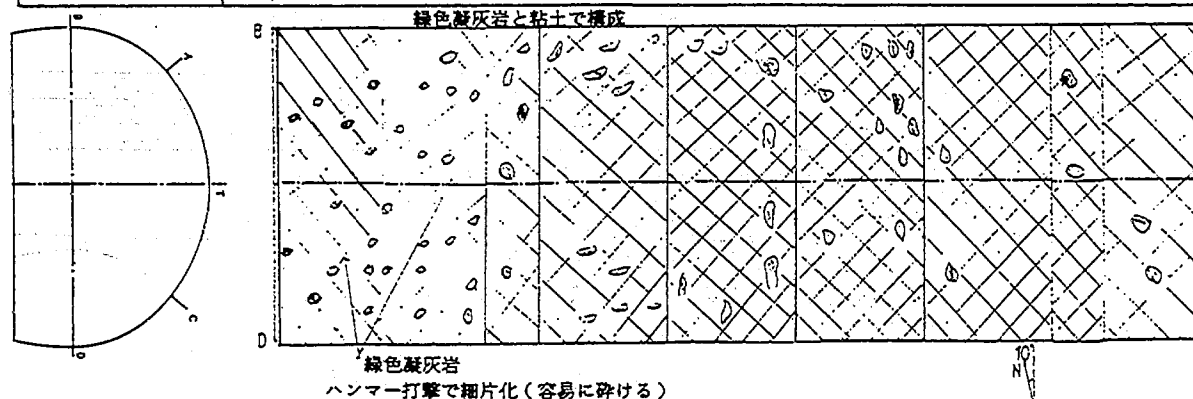
計測位置	[No.44(A)]		[No.45(A)]		[No.46(A)]		[No.47(A)]		[No.48(A)]	
STA	+279	+20	+10	692+00	691+90	+81.3	+72			
坑口からの距離(m)	617.1	625	635	645	655	663.7	673			
施工パターン	DI									
ロックジュミットハンマー 打撃による一軸圧縮強度 (Kgf/Cm ²)	200 100								DI-L ▲:地山試料試験	

図-3.1 地質復元図(1)

SLスライス平面図



計測位置		No.49(A)	No.50(A)	No.51(A)	No.52(A)	
STA	691+72	+60	+50	+47.2	+40	+20
坑口からの距離 (m)	673	685	695	697.8	705	715
施工パターン	D.I-L			D.I-i		
ロックシュミットハンマー 打撃による一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	200 100					



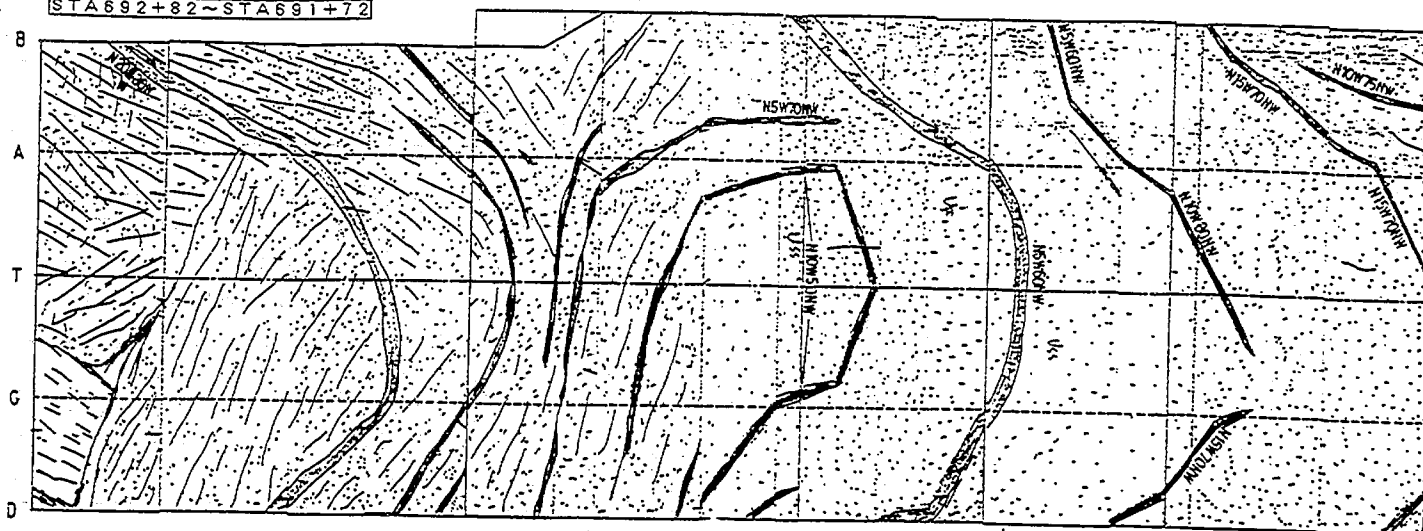
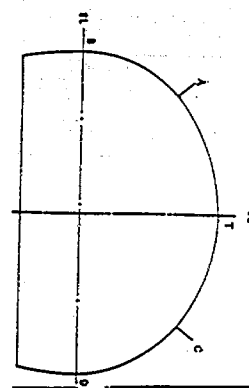
計測位置	No.53(A)	No.54(A)	No.55(AB)	
STA	691+20	691+10	690+0	690+90
坑口からの距離 (m)	725	735	745	755
施工パターン	D.I-i			
ロックシュミットハンマー 打撃による一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)	200 100			

▲: 地山試料試験

図-3.1 地質復元図 (2)

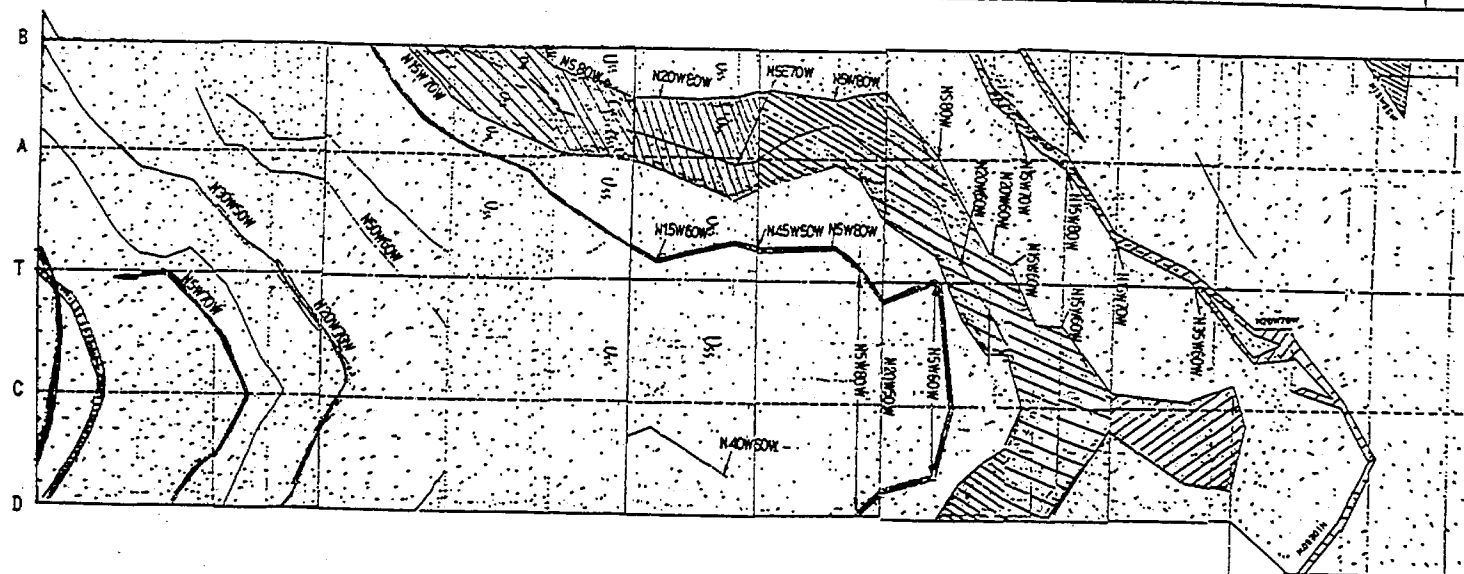
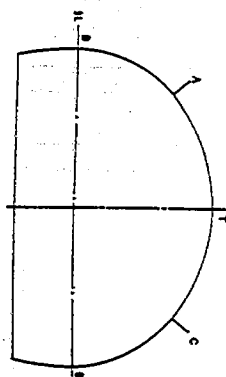
地質 (坑壁) 展開圖

STA692+82~STA691+72



- 凡 填
- ☒ 砂岩
- ☐ 砂岩(灰色)
- ☐ 凝灰岩(暗灰色)
- ☐ 凝灰岩(黄灰色)
- ☒ 凝灰质砂岩
- ☒ 绿色凝灰岩
- ☒ 含砾石绿色凝灰岩
- ☐ 致密性(95.50 kgf/cm^2 未测)

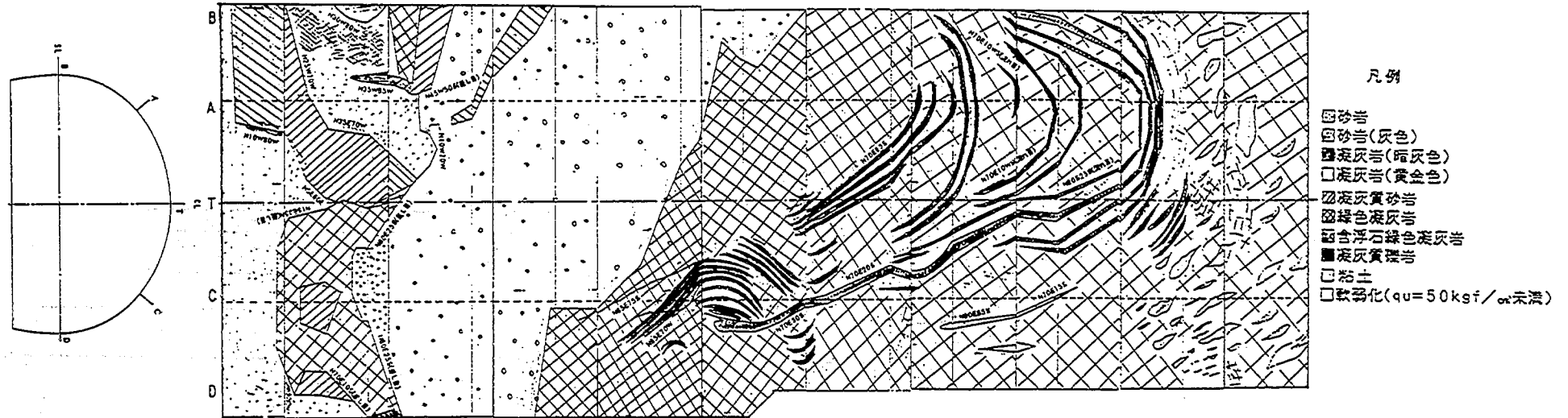
STA	692+32	-80		-70		+623	+50		-50		692+44	-40		-30	+279
坑口からの距離(m)	563	555		575		5527	525		555		601	605		615	617.1
施工パターン	DII					DI-L									



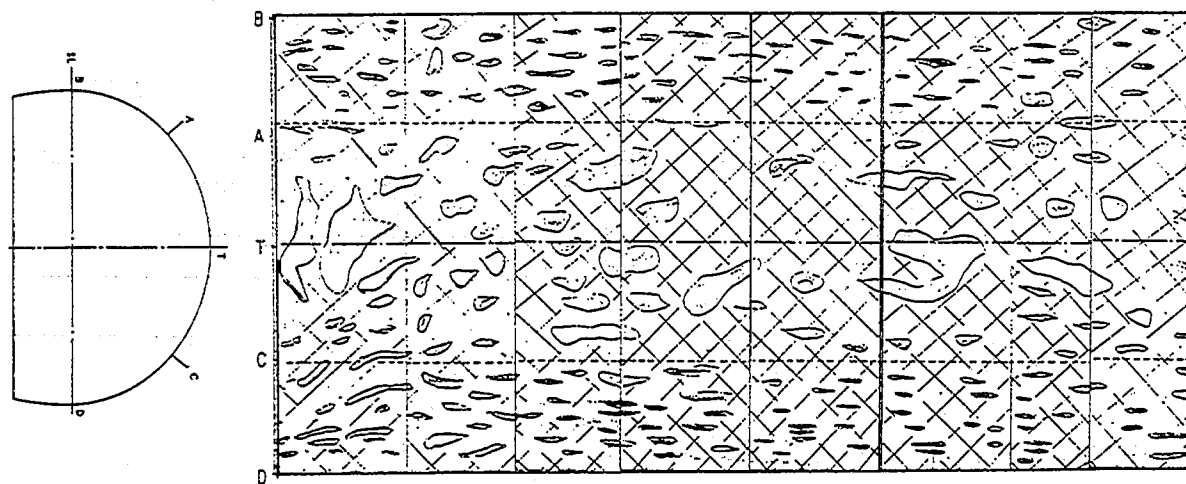
STA	692+279	+20	+10	692+00	691+90	+81.3	+72
坑口からの距離(m)	6721	625	635	645	665	663.7	673
施工パターン	DI						DI-L

圖-3.1 地質復元圖(3)

地質(坑壁)展開図



STA	691+72	+60	+50	+47.2	+40	+30	+20
坑口からの距離(m)	673	685	695	697.8	705	715	725
施工パターン	DI-L			DI-i			

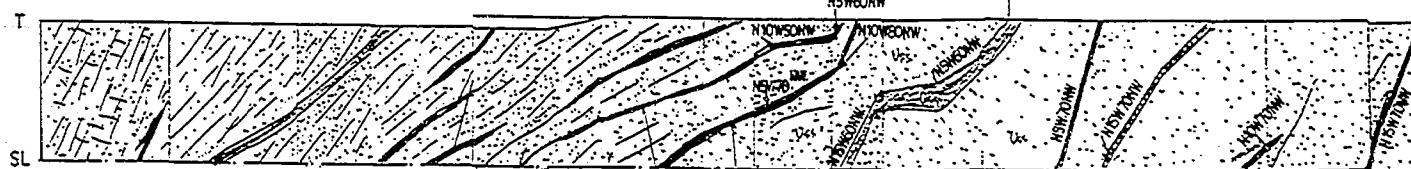
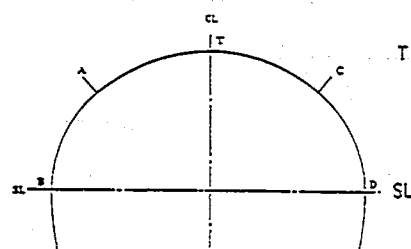


STA	691+20	691+10	690+0	690+90	690+83
坑口からの距離(m)	725	735	745	755	762
施工パターン	DI-i				

図-3.1 地質復元図(4)

縦断面図

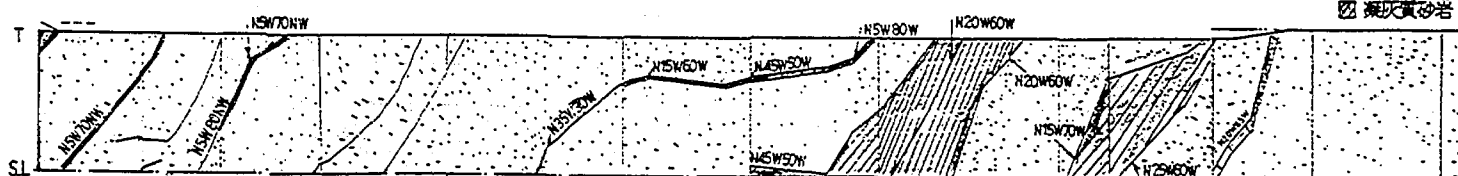
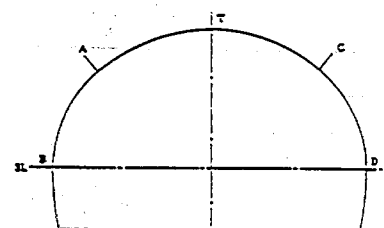
STA692+82~STA691+72



STA	692+82	+80	+70	+62.3	+60	+50	692+44	+40	+30	+279
坑口からの距離(m)	563	565	575	582.7	585	595	601	605	615	617.1
施工パターン	DI					DI-L				

凡 例

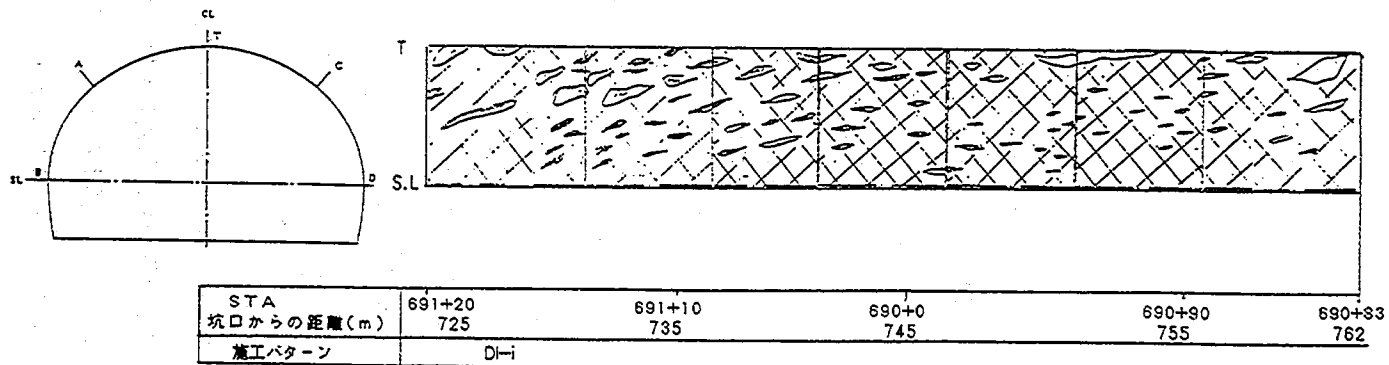
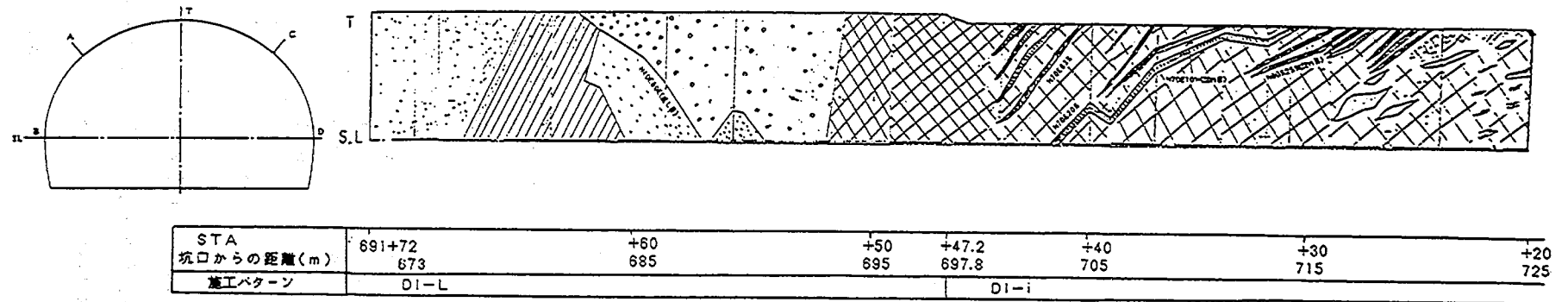
- 砂岩
- 砂岩 (灰色)
- 凝灰岩 (暗灰色)
- 凝灰岩 (黄灰色)
- 軟弱化 ($\alpha < 50 \text{ kgf/cm}^2$ 未満)
- 凝灰質砂岩



STA	692+279	+20	+10	692+00	691+90	+81.3	+72
坑口からの距離(m)	617.1	625	635	645	655	663.7	673
施工パターン	DI					DI-L	

図-3.1 地質復元図(5)

縦断図



凡例

- 砂岩
- 砂岩(灰色)
- 凝灰岩(暗灰色)
- 凝灰岩(黄白色)
- 凝灰質砂岩
- 緑色凝灰岩
- 含浮石緑色凝灰岩
- 凝灰質凝灰岩
- 粘土
- 軟弱化($q_u=50\text{ksf}$ /未達)

図-3.1 地質復元図(6)

3.2 施工実績

3.2.1 調査区間直前での水抜きボーリング

1) 目的・方法

前項で述べた第1低速度帯を通過後も脆弱な地山状況が継続し、STA694+68から設定したDⅡパターン支保（この水抜きボーリング開始時点でDⅡパターンは158m継続）でも、上半部の内空変位、天端沈下がそれぞれ100mm、120mm程度と依然として大きな値を示した。変位の抑制対策として上半部（STA693+50～STA693+10）では脚部増し吹付けコンクリートと上半仮インバートの施工を余儀されてきた。変位が大きい原因は、地山が脆弱であることに加えて、湧水による強度低下（スレーキング）が主因と考えられたので、以下に示す目的で水抜きボーリング（削孔長L=100m）を実施している。

尚、水抜きボーリングを実施した時点での上半切羽の位置はSTA693+10（H S P 調査切羽位置の手前66m）で、地質は泥岩・凝灰質砂岩である。

- ・湧水に伴う地山強度の低下を抑制する。
- ・変状対策などによる工程の遅れを回避する。
- ・湧水に伴う吹付けコンクリートやロックボルトの施工性・支保効果の低下を防止する。
- ・削孔水などにより前方地山の地質状況を確認し、補助工法等の検討資料とする。
- ・STA692+62.25以降の非常駐車帯の支保パターン等を検討する。

また、上半切羽を進行させながら水抜きボーリングを施工するため、ボーリング孔口の位置はSTA693+52の下半切羽としている。

2) 調査結果の概要

水抜きボーリングの集水量及び地質状況を表-3.1に、施工位置を図-3.2に示す。

表-3.1 集水量及び地質状況

ボーリング長	位 置	集水量 (l/min)		地 質 状 況
		1 本 目	2 本 目	
0～30m	STA693+52～STA693+22	0	0	砂岩(粗い)
30～50m	STA693+22～STA693+02	10	10	砂岩(Uss)
50～70m	STA693+02～STA692+82	20	20	凝灰質砂岩(Uss)
70～80m	STA692+82～STA692+72	0	400	砂岩(Oss)
80～90m	STA692+72～STA692+62	0	150	凝灰質砂岩(Oss)
90～100m	STA692+62～STA692+52	0	20	砂岩(Oss)
	全集水量 (l/min)	30	600	

1本目の水抜きボーリングの集水量(30l/min)や、切羽からの湧水量(200l/min)、及び空洞のような水道が切羽で観察されていること等から、急速2本目の水抜きボーリングを実施したところ、被圧を受けた湧水(max600l/min)を確認している。湧水が急激に多くなる位置はSTA692+82付近で凝灰質砂岩(Uss)と砂岩(Oss)との層境となっている。このことは上半切羽でも確認され、凝灰質砂岩が遮水層、砂岩が滞水層(透水層)となっていることによる現象と考えられた。

概ねSTA692+80付近以降は、砂岩(Oss)主体の切羽となり、沈下や内空変位はこれまでよりも少なくなる

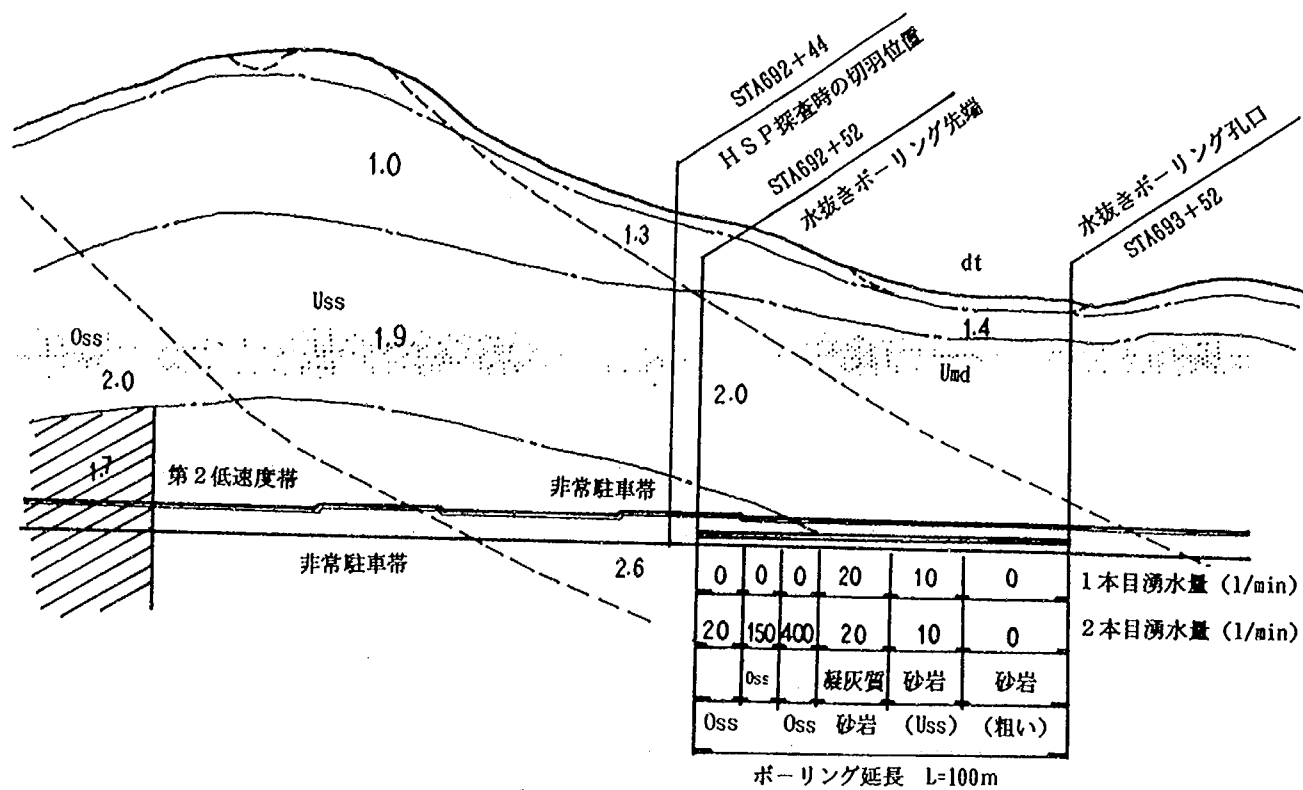


図- 3.2 水抜きボーリング位置図

と考えられた。(累計で50mm程度を予測)また、水抜きボーリングにより、地山強度の低下はこれまでよりも少なく、吹付けコンクリートやロックボルトの施工性も少なからず向上すると考えられた。更に、STA692+80～STA692+50付近については、特に補助工法は必要ないと想定されるが、非常駐車帯区間は断面が大きくなることによる変状対策が必要となることも考えられる。以上から非常駐車帯はD Iパターン程度の支保を予想した。

3.2.2 探査区間での施工実績

1) 支保パターンについて

H S P 探査区間の前後を含めた当初設計・実施工支保パターンは図-3.1に示した通りである。

西会津トンネルでは、支保パターンの選定に当り「判定委員会」を設置し、ここで実施工での支保パターンを決定している。すなわち、トンネル掘削の種別は共通仕様書の基準に基づいて監督員が判断している。この場合、切羽の状況や岩質・自立性・湧水等から判定することになり、数値的なものが根拠になりにくいとして、判定に当たっては、副所長をはじめ他の工事長など複数の人の意見を総合して、適正な評価・分類が出来るように、工事事務所に「判定委員会」を設置し統一した判断を行っている。

いずれにしても、支保パターンの変更は、施主側が独自に行う場合と企業体からの提案に基づき行う場合があり、いずれの場合も事前に「坑内観察調査」や「計測結果」など、判定に必要な資料は企業体が準備し「判定委員会」で審議の上、支保パターンの決定を行っている。

一例として図-3.3にSTA691+46.9で行った岩判定資料を示す。

2) 火薬の消費量について

図-3.4に探査区間での火薬消費量の実績を示す。

実績によると、上半での火薬消費量は以下に示す3つの区間に大別できる。

- | | | |
|----------------------|-------|-----------------------------------|
| ①STA692+65～STA692+26 | L=39m | 平均で約0.35kg/m ³ (火薬消費量) |
| ②STA692+26～STA691+79 | L=47m | 平均で約0.5kg/m ³ |
| ③STA691+79～STA690+81 | L=98m | 平均で約0.4kg/m ³ |

このうち、①の区間での地質は砂岩が主体で、一部凝灰岩を挟在した地質である。比較的割れ目が卓越し岩塊の圧縮強度も10～50kgf/cm²程度の部分も多く、これが火薬の消費量に反映された可能性がある。

②の区間の地質は砂岩が優勢で部分的に凝灰質砂岩が見られた箇所である。砂岩は弱風化を受け、部分的に割れ目に沿って少量の岩塊の抜け落ちが観察されているものの、岩塊の圧縮強度は概ね60～100kgf/cm²程度の部分がありこの辺りが微妙に火薬消費量に影響していると考えられる。

③の区間のうちSTA691+46～STA691+33のL=13m区間に火薬量のバラツキが認められる。この区間は、緑色凝灰岩が主体で、部分的に含浮石緑色凝灰岩と薄層の凝灰質礫岩から構成されるが、局部的に塊状の粘土が見られ、また、岩塊の圧縮強度も50kgf/cm²未満が多かった箇所でもあるので、火薬量のバラツキとして反映されたものと考えられた。また、全般的に③の区間は、①の地山性状に類似しているものと想定される。

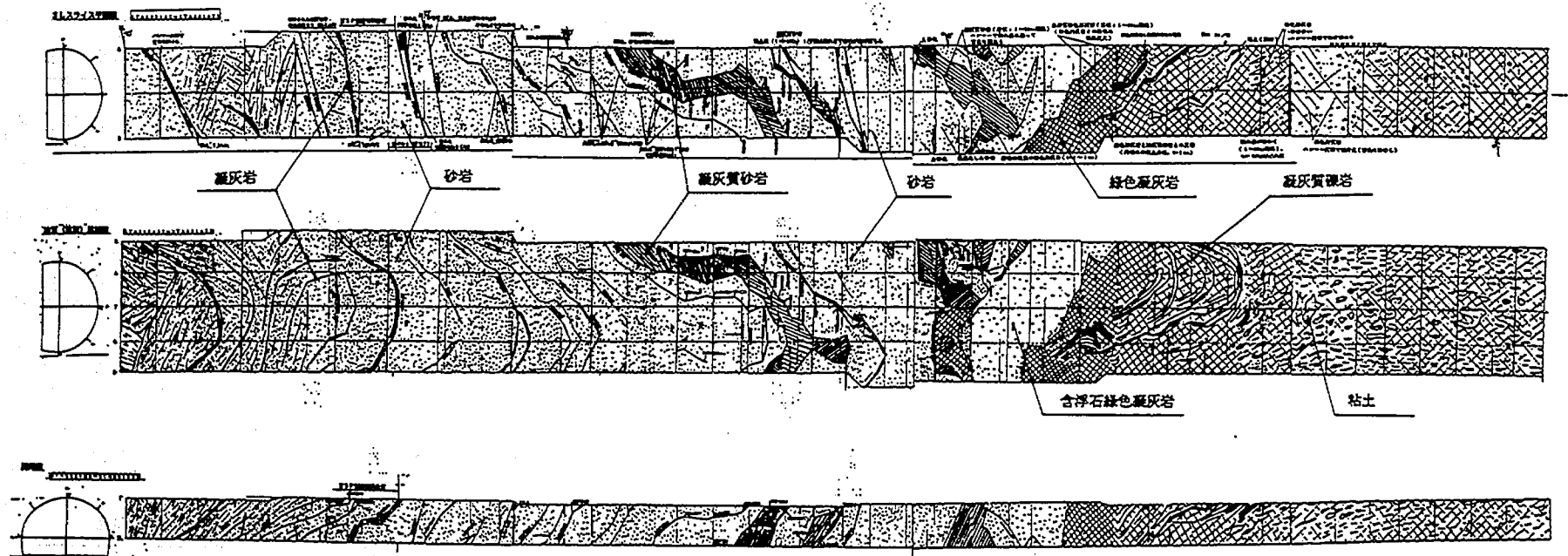
ところで、建設省積算基準における掘削区分ごとの火薬消費量は、地山等級Dの上半部で0.5kg/m³程度である。これに対して、実際の火薬消費量はいずれも、同等かそれ以下の消費量が示された。いま仮に施工条

トンネル掘削の種別判定

(工事名) 西会津トンネル工事		(位置) STA 691+46.9 (701基)				
(掘削方法) 発破掘削・機械掘削		(岩石名) 含浮石緑色凝灰岩				
切羽の地質状況			含浮石緑色凝灰岩を主体とした切羽			
			右肩付近は、凝灰質礫岩との互層となっている			
			天端から左肩付近で肌落ちがある			
掘削地点の地山状況	判定評価点	1	2	3	4	5
	A 切羽の状況	1. 自立している	2. 肌落ちがある	3. 核残しが必要である	4. 鏡は自立せず崩れる	5. 大規模な対策が必要
	B 岩石の強度	1. ハンマーがはね返る	2. ハンマーで容易に割れる	3. ハンマーで容易に崩れる	4. ハンマーがつきささる	5. 土砂状
	C 風化・変質	1. 未風化新鮮で堅硬	2. 目に沿って風化が認められる	3. 目以外の岩全体が風化している	4. 部分的・全体的に土砂化	5. その他粘性土など
	D 割れ目間隔 (cm)	1. 100 ≤	2. 100 ~ 50	3. 50 ~ 20	4. 20 ~ 5	5. 5 ≥
	E 割れ目の形態	1. 殆ど認められない	2. ランダム	3. 方向性あり (層状・片状・板状)	4. 土砂状・細片状・未固結	5. その他粘土状など
	F 割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 全体的に開口	4. 開口部が油目	5. 大規模に粘土を挟む
	G 湧水状況	1. 無し	2. 部分的に割れ目等からにじみ出る	3. 全体的に濡れている	4. 部分的に割れ目等から噴き出る	5. 特に多い

立会者											
	項目	評価点	判定点	地山総合評価点 (合計点/7)							
	A 切羽の状態	2	5 × 100 = 40	390 / 7 = 55.7							
	B 岩石の強度	2	5 × 100 = 40								
	C 風化・変質	3	5 × 100 = 60	備考							
	D 割れ目間隔	3.5	5 × 100 = 70								
	E 割れ目の形態	3	5 × 100 = 60								
F 割れ目の状態	3	5 × 100 = 60									
G 湧水状況	3	5 × 100 = 60									
合計		390									
支保パターンと地山総合評価点の目安値											
点数	10 20 30 40 50 60 70 80 90 100										
支保パターン	55.7										
B以上	備考										
C I											
C II											
D I											
D II以下											
掘削区分	測点	STA 691									
	設計区分	C II									
	実施区分	D I-L									
特記事項		判定結果: D I									
インバートの有無 (D I か D I-i の判断) に		鋼支保工 H-125									
については下半掘削時に判定する。		吹付コンクリート t = 150									
		変形余裕量 t = 0									

図-3.3 岩判定資料



凡例：□砂岩 □砂岩（灰色） □凝灰岩（暗灰色） □凝灰岩（黄灰色） □凝灰質砂岩
 □緑色凝灰岩 □含浮石緑色凝灰岩 □凝灰質礫岩 □粘土

STA	+623	+27.9	692+00	+81.3	45.9	+150	691+00
坑口からの距離 (m)	582.7	617.1		663.7	698.1	730	
当初設計パターン	D _r	C _{r-L}	C _r	C _{r-L}	C _r	D _{r-i}	D _{r-i}
施工パターン	D _r	D _{r-L}	D _{r-i}	D _{r-L}		D _{r-i}	

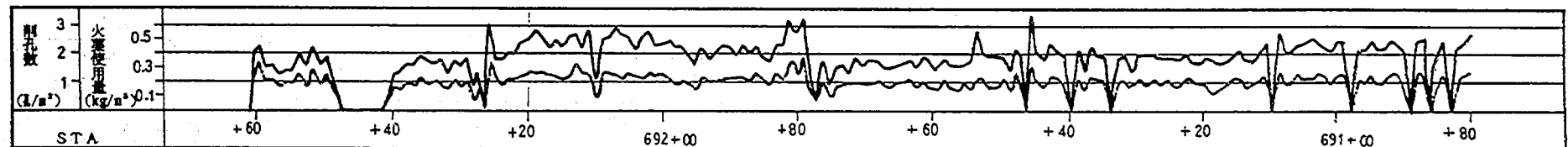


図-3.4 調査区間での火薬消費量

件が同一であれば、火薬消費量はマクロ的に見て地質の風化・変質の程度、岩盤強度、割れ目の状態等に対応すると考えられ、この面から実施支保パターン（CⅡ→DⅠ-iに変更）の選定は妥当と考えられた。

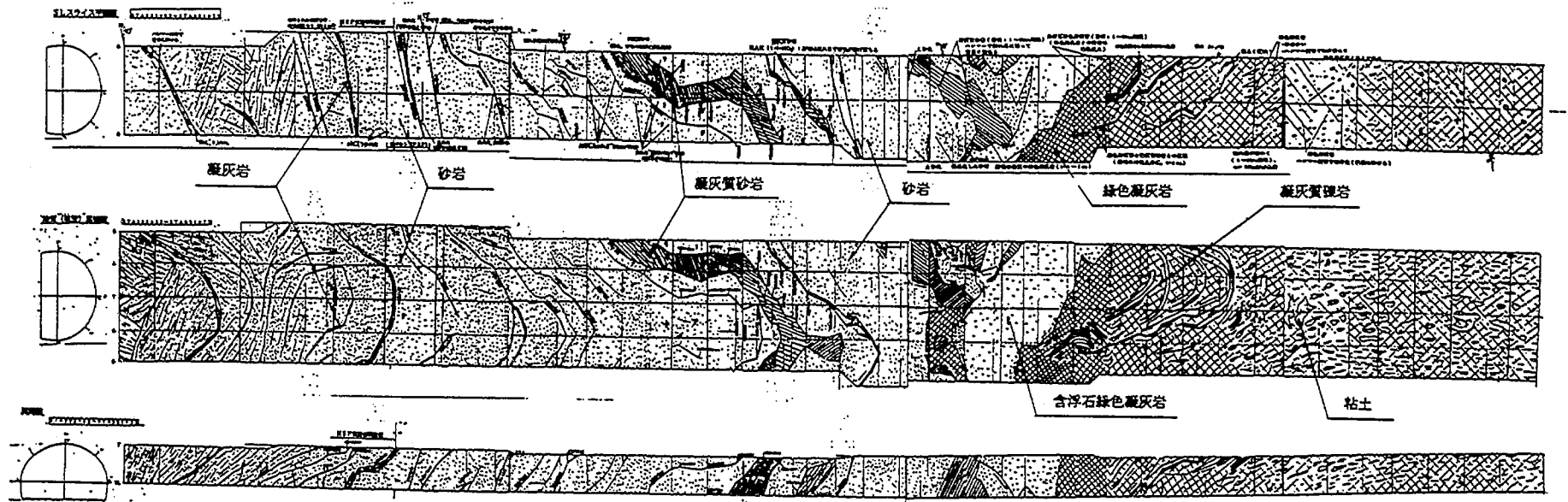
また、削孔数で見ると、概ね全区间とも1孔/m²程度の実績である。通常、地山等級がDの場合、削孔数は1.4～1.6孔/m²程度であり、削孔数を見てもDⅠ-i支保パターンは妥当と言えよう。

3) 計測結果について

図-3.5に内空変位・天端沈下測定結果を示す。

探査区間では、約10m程度の密な間隔で内空変位・天端沈下測定を行い、地質別の変位傾向の把握に努めた。また、この区間での支保パターンはDⅠ-iで施工している。

計測結果によると、内空変位・天端沈下の最終値はSTA690+98.5, STA691+18.5の位置で50～60mm見られたが、全体的には30mm以下の区間が多くトンネルの安定上問題となる箇所は無かった。50～60mm程度の内空変位・天端沈下が認められた箇所の地質は緑色凝灰岩の中に粘土が介在していたが、緑色凝灰岩自体の圧縮強度が比較的小さく、この辺りの影響が変位量に反映されたものと考えられた。更に、最大変位速度も、一部を除いて10mm/日以下を示すにとどまった。



凡例：□砂岩 □砂岩（灰色） □凝灰岩（暗灰色） □凝灰岩（黄白色） □凝灰質砂岩
 □緑色凝灰岩 □含浮石緑色凝灰岩 □凝灰質礫岩 □粘土

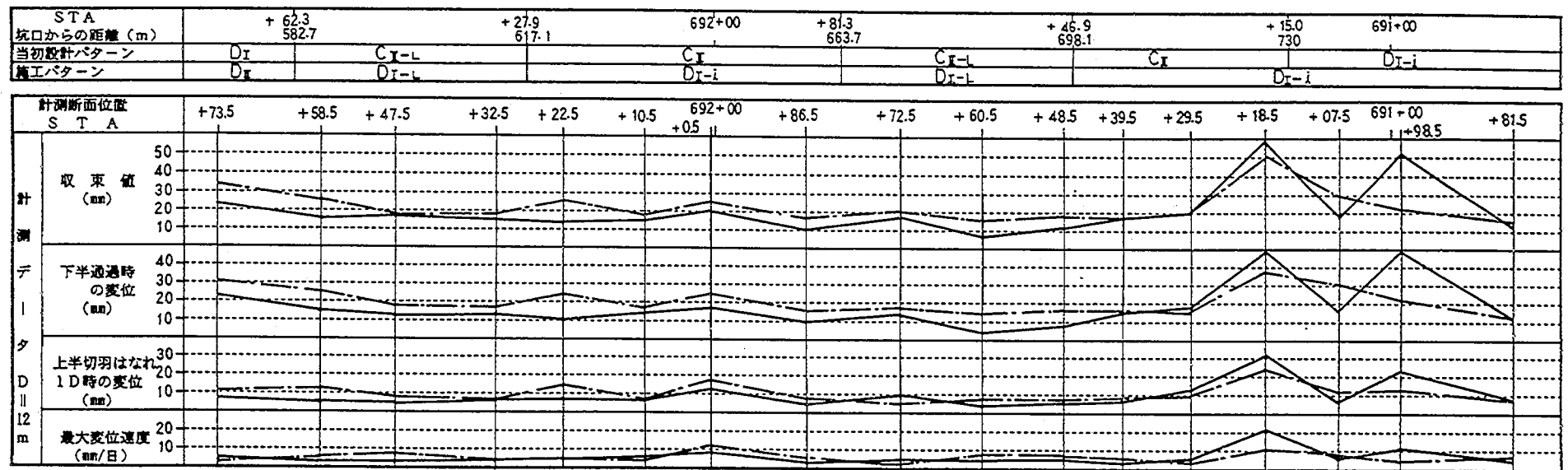


図-3.5 探査区間での内空変位・天端沈下

4. トンネルHSP

4.1 探査目的

本探査はトンネルHSP法を施工中の西会津トンネル坑内において実施し、トンネル切羽前方の地山状況をVSPモードによって把握することを目的とした。また、緩い傾斜の地層境界(0ss\Uss)の位置・形状を求める目的で、反射モードによる計測・処理も実施した。

4.2 測定方法

実験作業は西会津トンネルの本坑内において実施した。表-4.1に測線の概要を、また図-4.1に測線配置図を示す。さらに、測定概念図を図-4.2に示す。

表-4.1 測線の概要

測定坑	測線位置 (m) (坑口距離 TD. m)	切羽位置 (m) (坑口距離 TD. m)	測線長 (m)	受振点 間隔(m)	受振点 振数	起振点 振数	備考
本坑	0~94 (505.5~599.5)	95.5 (601)	94	2	48	22	坑壁用地震計 (右側側壁)
本坑	48~94 (553.5~599.5)	95.5 (601)	46	2	24	22	孔内用地震計 (右側側壁)

4.2.1 起振方法

起振はダイナマイトの発破により行った。起振点位置はすべて右側側壁で、図-4.1に示した22箇所である。

ダイナマイトは踏前部より約20cmの高さに、 $\phi 4$ cm、長さ2 m程度の装薬孔を削孔し、その孔内において発破させた。1回の起振に使用したダイナマイトの装薬量は33~200 gである。地震計を展開し測定機器をセッ

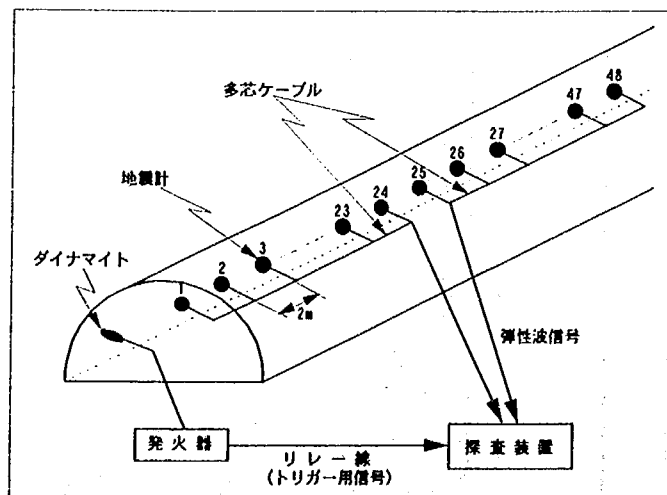


図-4.2 坑内弾性波測定の測定系

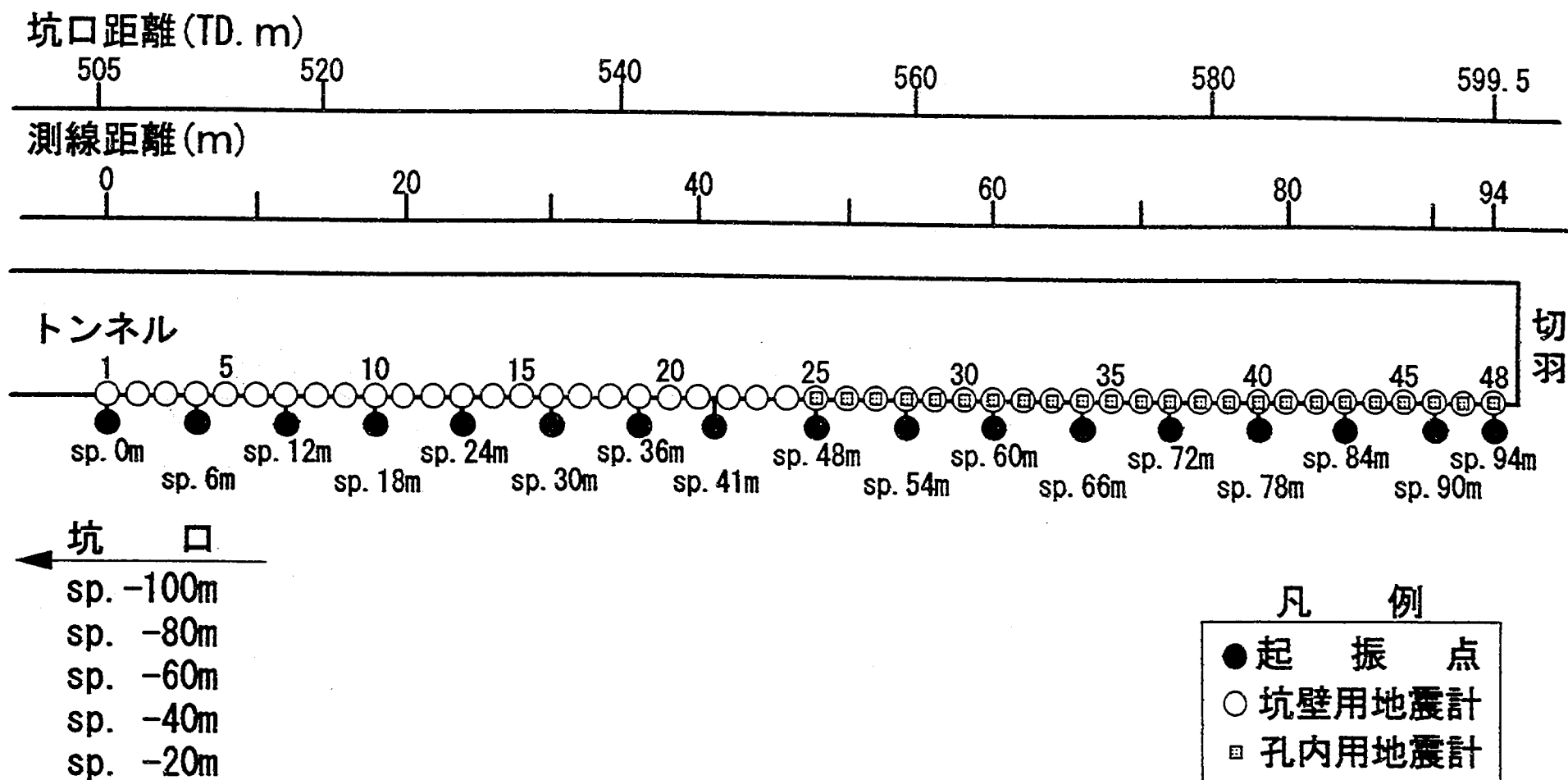


図-4.1 測線配置図
平面図 (縮尺 1:400)

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した。

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。

4.2.2 受振方法

測線は現地の地質構造、配管・高圧線等の坑内設備を考慮して右側側壁部に設定した。測線長は94mとし、掘削面上約1～1.5mの高さに測線を設け、2m間隔で受振器を設置した。

今回の計測では、坑壁用（固有周波数40Hz）と孔内用（固有周波数28Hz）の2種類の地震計を使用した。以下に、それぞれの地震計の設置方法について述べる。

①坑壁用地震計

トンネル右側側壁の吹付コンクリートに電気ドリルで、 $\phi 9\text{mm}$ 、長さ10cm程度の坑壁用地震計設置用の小孔を約20cm程度離して、2孔掘削した。これを1測点とし、切羽側の測線終点から2m間隔に48測点設けた。

坑壁用地震計の設置方法としては、掘削した小孔に地震計のピン部分を挿入し、それを石膏を用いて固定した。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。

②孔内用地震計

トンネル右側側壁の吹付コンクリートに電気ドリルで、 $\phi 30\text{mm}$ 、長さ80cm程度の孔内用地震計設置用の孔を掘削した。孔内用地震計の間隔は坑壁用地震計と同様に2mとし、切羽側の測線終点から24測点設けた。

孔内用地震計は上下動と水平動の地震計が別になっており、1測点あたり2個の地震計を用いた。これらの地震計は、水平動用をトンネル軸方向、上下動用を側壁と直交する方向に設置した。各地震計は挿入棒で方向を定めて受振孔内に挿入し、タamping粘土を用いて固定させた。

地震計の出力は、坑壁用地震計と同様に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。

4.2.3 記録方法

今回の計測作業では探査装置を2台使用し、1台に坑壁用地震計、もう1台に孔内用地震計の信号を入力した。探査装置は1台48チャンネルであるので、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。

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。このデジタル・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 0.125 ms

データ長 4 kword/ch (4096 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-4.2に示す。

表-4.2 測定作業使用機器一覧表

機 器 名	個数	型 式	主 たる 仕 様
坑 壁 用 地 震 計	96個	L-25E	固 有 周 波 数 40 Hz
孔 内 用 地 震 計	48個	GS-14-L3	固 有 周 波 数 28 Hz
デ ィ ジ タ ル 探 査 装 置	2台	StrataView™ R48	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-カット 11段切替 アンチ・エリアス・フィルタ- 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 ッ ク レ ン ジ 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 - 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

4.3 解析方法

4.3.1 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、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。

4.3.2 VSPモードによる解析

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VSPモードによるHSP処理を行った。

VSPモードの処理の概略的な流れを図-4.3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、以下の処理を行った。

(a) バンドパス・フィルター $(f_a, f_b, f_c, f_d) = (50\text{Hz}, 70\text{Hz}, 400\text{Hz}, 450\text{Hz})$ (図-4.4参照)

(b) データ・ウィンドウ 記録の終わり12.5ms, コサイン型

(c) 静補正 (深度走時補正)

(d) ミ ュ ー ト 初動位置まで

静補正は、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補正量として行った。

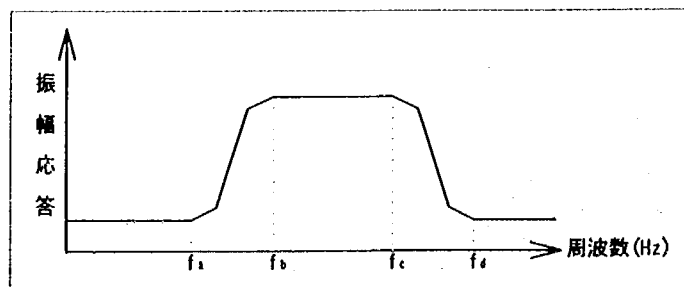


図-4.4 バンドパス・フィルターの特性概略図

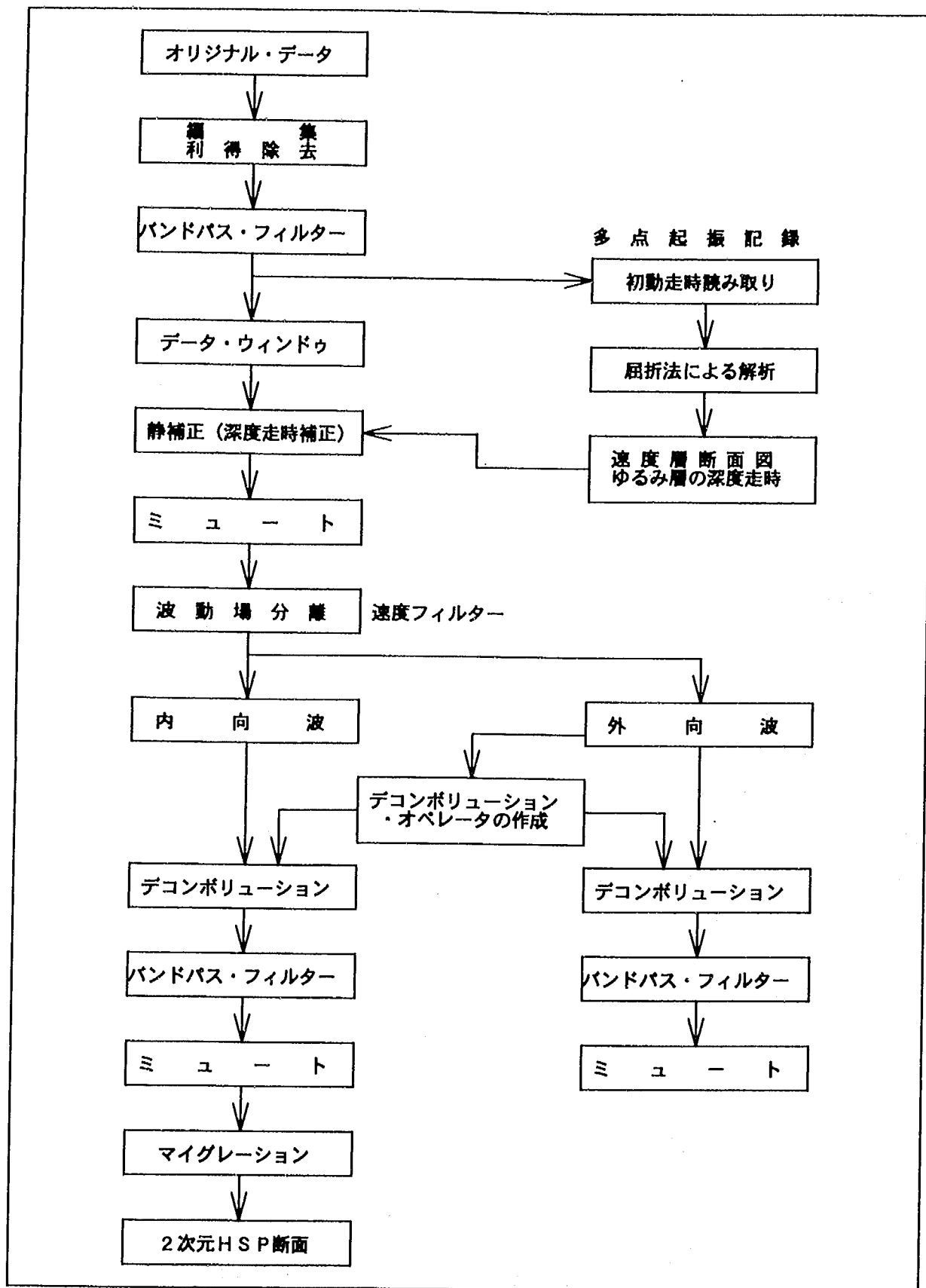


図-4.3 HSP処理 (VSPモード) の概略的な流れ

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-4.5)。

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を用いた。図-4.6に速度フィルターにより波動場の分離を行うための処理手順を示す。

3) デコンボリューション

速度フィルターによって分離された外向波成分からデコンボリューションのためのフィルター・オペレータを作成し、これを外向波・内向波成分の両方に適用する。

フィルター・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20msの時間範囲

(b)オペレータ長 10ms

また、デコンボリューション後、以下の処理を行った。

(a)バンドパス・フィルター $(f_a, f_b, f_c, f_d) = (50\text{Hz}, 70\text{Hz}, 250\text{Hz}, 300\text{Hz})$

(b)ミュー ト 初動位置まで

4) 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、デコンボリューションを行った内向波成分に対して、マイグレーション処理を行って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。

4.3.3 反射モードによる解析

反射モードによる解析は、トンネル軸と平行に近い反射面の位置を求めることを目的として行った。

VSPモードによる解析では切羽前方に存在し、かつトンネル軸と直交に近い反射面を主に対象としている。一方、反射モードによる解析では測線の区間内でトンネル軸と平行に近い反射面を主に対象とする。

反射モードでのデータ処理の概略的な流れを図-4.7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、以下の処理を行った。

(a)バンドパス・フィルター $(f_a, f_b, f_c, f_d) = (50\text{Hz}, 70\text{Hz}, 400\text{Hz}, 450\text{Hz})$ (図-4.4参照)

(b)データ・ウィンドウ 記録の終わり12.5ms, コサイン型

(c)静補正 (深度走時補正)

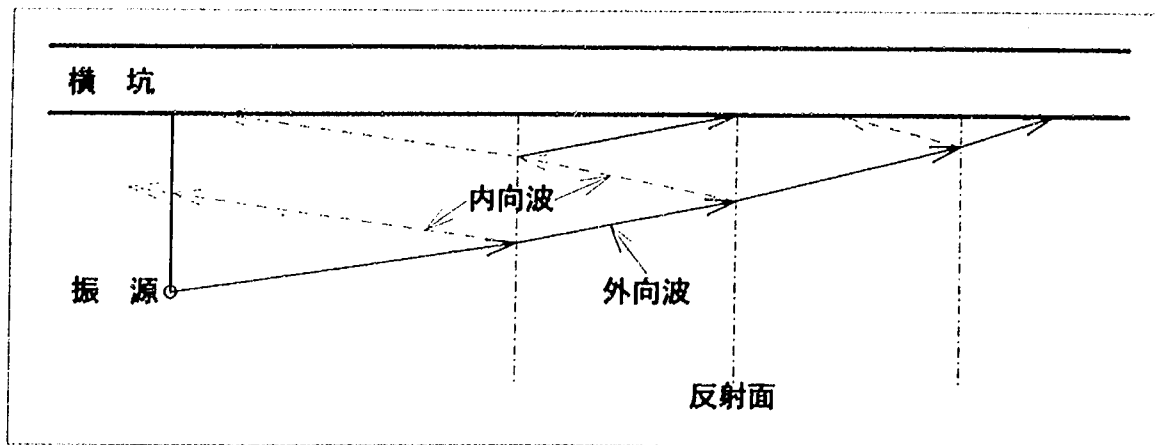


図-4.5 横坑における波動の種類別

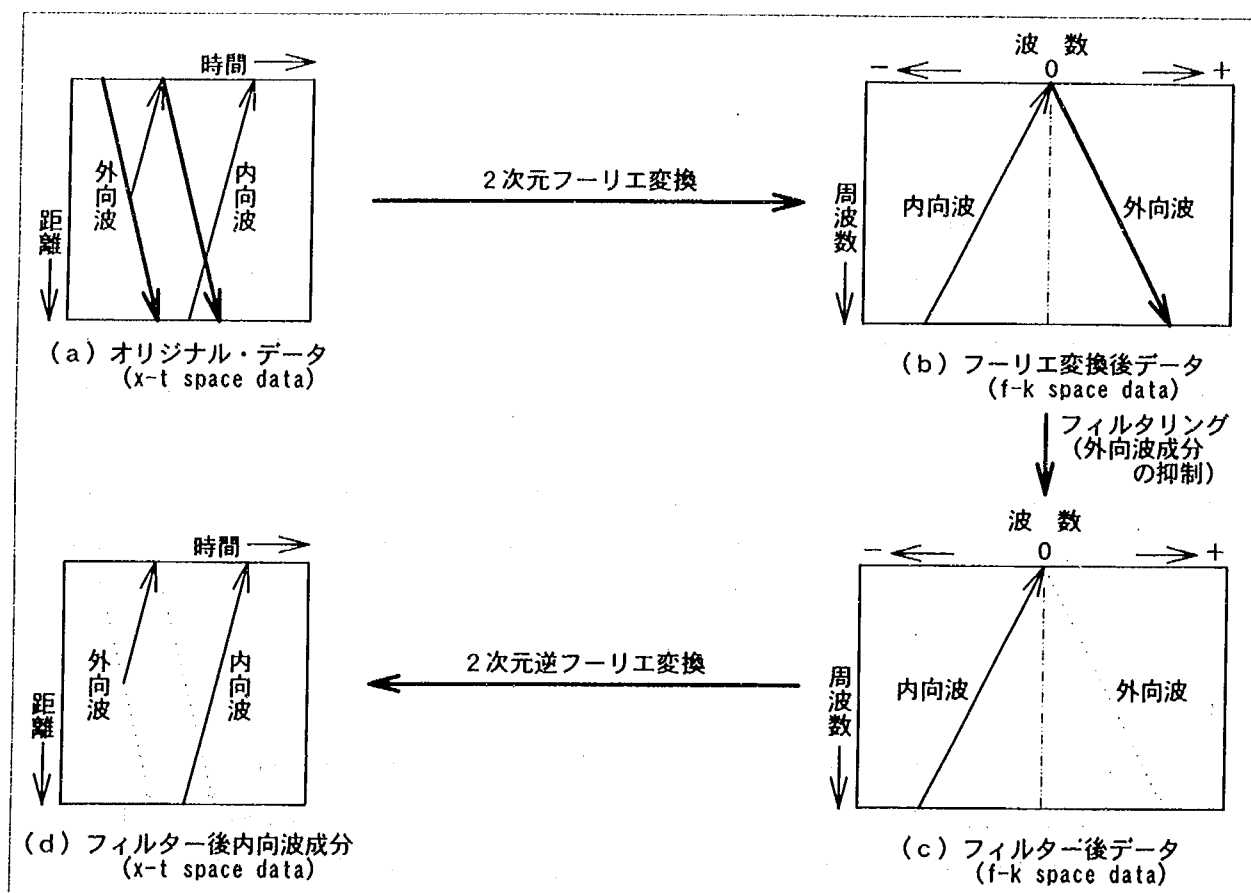


図-4.6 速度フィルターによる波動場分離処理の流れ (内向波成分の抽出)

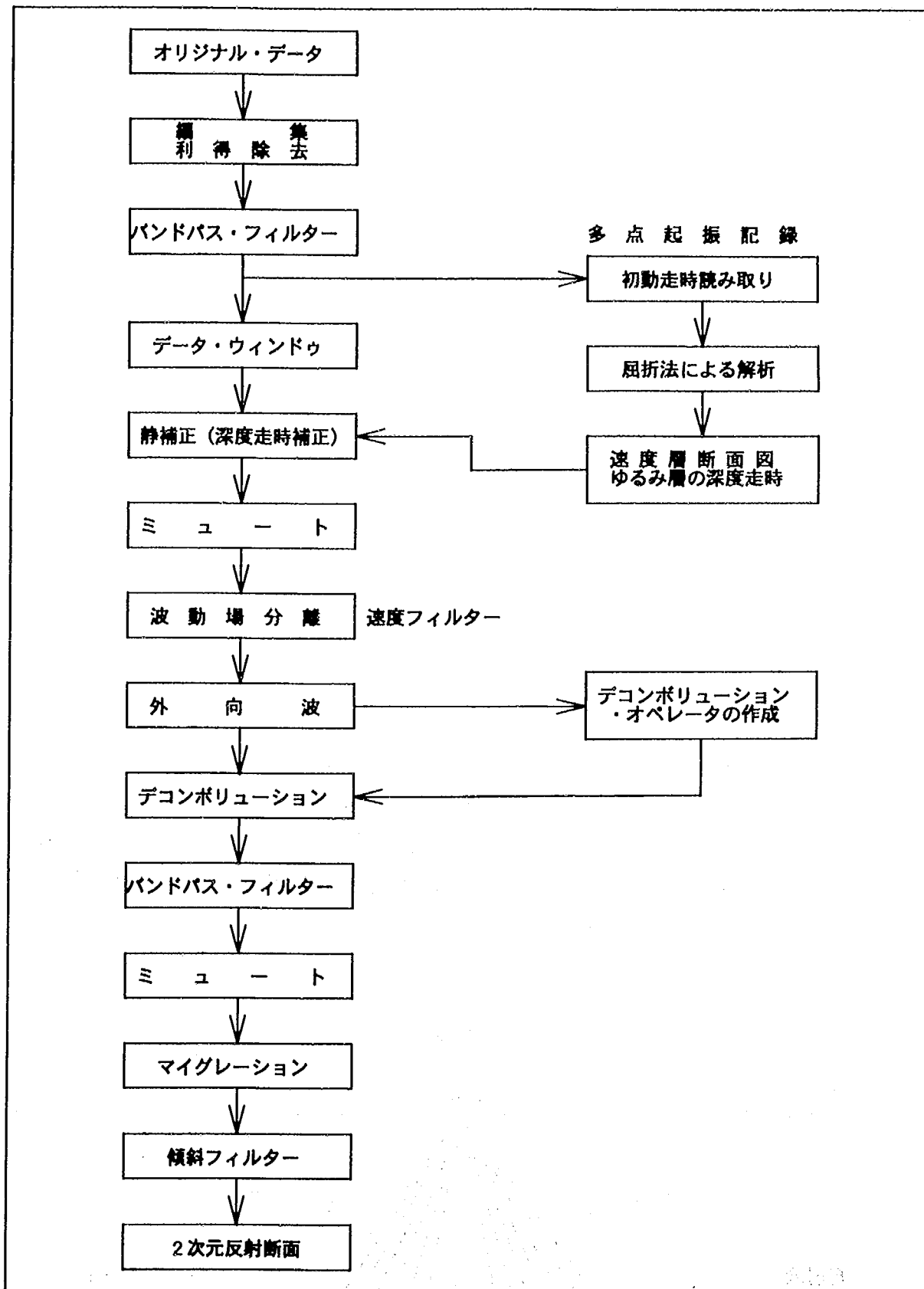


図-4.7 反射モードでのデータ処理の概略的な流れ

(d) ミ ュ ー ト 初動位置まで

静補正は、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補正量として行った。

2) 波動場の分離

反射モードでのデータ処理における波動場分離では、振源から遠ざかる方向に進む外向波成分のみを抽出することを目的とする(図-4.8)。この場合、処理対象とする反射波の他に直接波や境界波等も外向波とみなすことができる。

波動場の分離処理法としては速度フィルターを用いた。この際に、ある速度以上の波動成分を抽出することにより、境界波等の低速度成分を除去することができる。

3) デコンボリューション

速度フィルターによって分離された外向波成分からデコンボリューションのためのフィルター・オペレータを作成し、これを外向波成分に適用する。

フィルター・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20msの時間範囲

(b) オペレータ長 10ms

また、デコンボリューション後、以下の処理を行った。

(a) バンドパス・フィルター $(f_a, f_b, f_c, f_d) = (50\text{Hz}, 70\text{Hz}, 250\text{Hz}, 300\text{Hz})$

(b) ミ ュ ー ト 初動から10msの時間範囲

4) マイグレーション処理

最終結果として、デコンボリューション、バンドパス・フィルターおよびミュート処理を行った外向波成分に対して、マイグレーション処理を実施して2次元平面上での反射断面を得る。マイグレーション法としてはGRTによる方法を用いた。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。また、マイグレーション処理によって得られた2次元反射断面に対して、ある傾斜方向をもつ反射面を強調するために、必要に応じて傾斜フィルターを適用する。

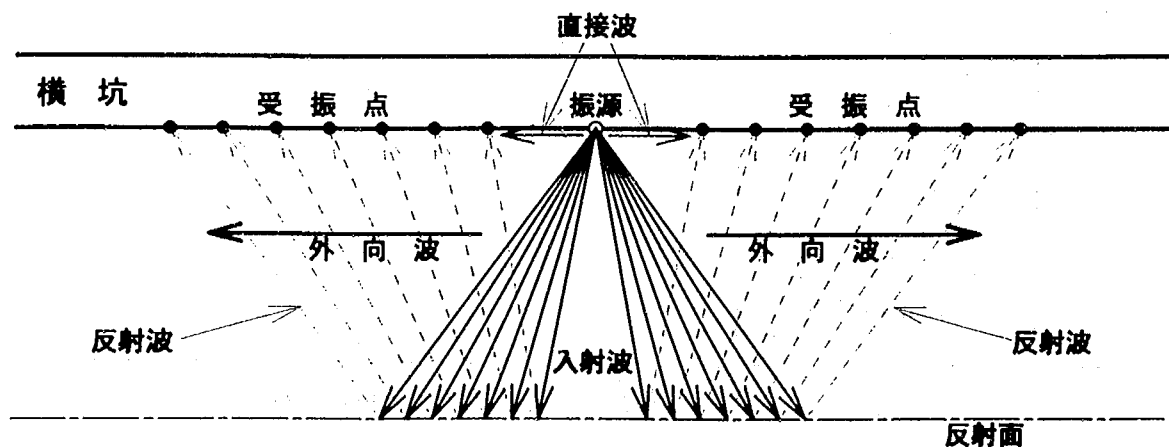


図-4.8 反射モードにおける反射波

4.4 解析結果

4.4.1 屈折法による解析結果

屈折法およびHSPの解析に用いた測定記録は、坑壁用地震計によるものである。坑壁用地震計の測線長は94mであり、測線距離として坑口側の始点を0m（坑口距離TD. 505.5m）、切羽側の終点を94m（坑口距離TD. 599.5m）とした。

走時曲線を図-4.9に、屈折法の解析により得られた速度層断面図を図-4.10に示す。

屈折法による解析の結果、地山弾性波速度は測線距離0～14mで2.2km/s、14～20mで1.8km/s、20～38mで2.2km/s、38～48mで1.8km/s、48～94mで2.1km/sの値が得られた。

坑壁近傍のゆるみ層は弾性波速度値1.0～1.3km/s程度であり、その層厚は3m以内である。ゆるみ層厚は、地山弾性波速度値1.8km/sを示す測線距離38～48mの区間で最も厚く、測線の中央部付近～終点で薄い傾向にある。

4.4.2 VSPモードによる解析結果

今回の測定では、第4.2.1項で述べた計22点で起振を行った。このうち、VSPモードの解析に用いたのは、遠隔起振点である測線距離-100m、-80m、-60m、-40mおよび-20mの5起振点による記録である。これらの起振点では、ダイナマイトの装薬量を100～200gとした。

解析に用いた記録の諸元を表-4.3に示す。解析には坑壁用地震計による測定記録を使用した。

オリジナル記録に対して、第4.3.2項で述べた前処理を行った。この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外向波および内向波成分のみを抽出した。なお、速度フィルター時には速度の絶対値で1.2km/s以下の成分を除去した。次に、速度フィルターによって抽出された外向波および内向波成分に対してデコンボリューションを行った。

斜交した反射面の位置および傾斜角を求める目的で、速度フィルターおよびデコンボリューション処理後の内向波成分に対してマイグレーション処理を実施した。マイグレーション法としてはGRTによる方法を用い、地山の弾性波速度値は屈折法による解析結果を使用し、切羽前方については2.1km/sとした。

表-4.3 VSPモードの解析に用いた記録の諸元

起振点 (測線距離) (m)	受振点 (測線距離) (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
-100	0～94	2	48	4096	0.125	坑壁用地震計 (右側側壁)
-80	0～94	2	48	4096	0.125	
-60	0～94	2	48	4096	0.125	
-40	0～94	2	48	4096	0.125	
-20	0～94	2	48	4096	0.125	

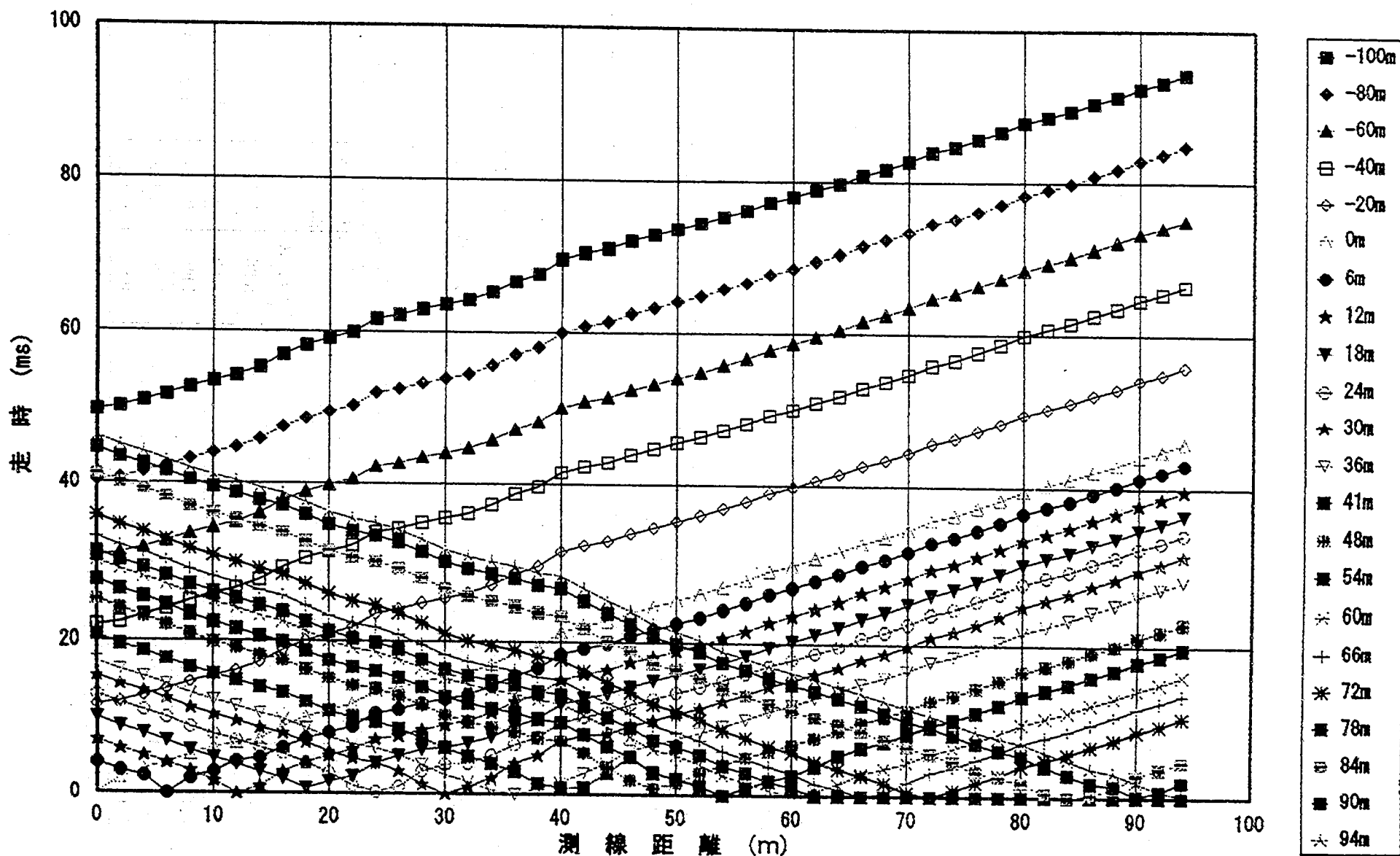


图-4.9 走時曲線 (坑壁用地震計)

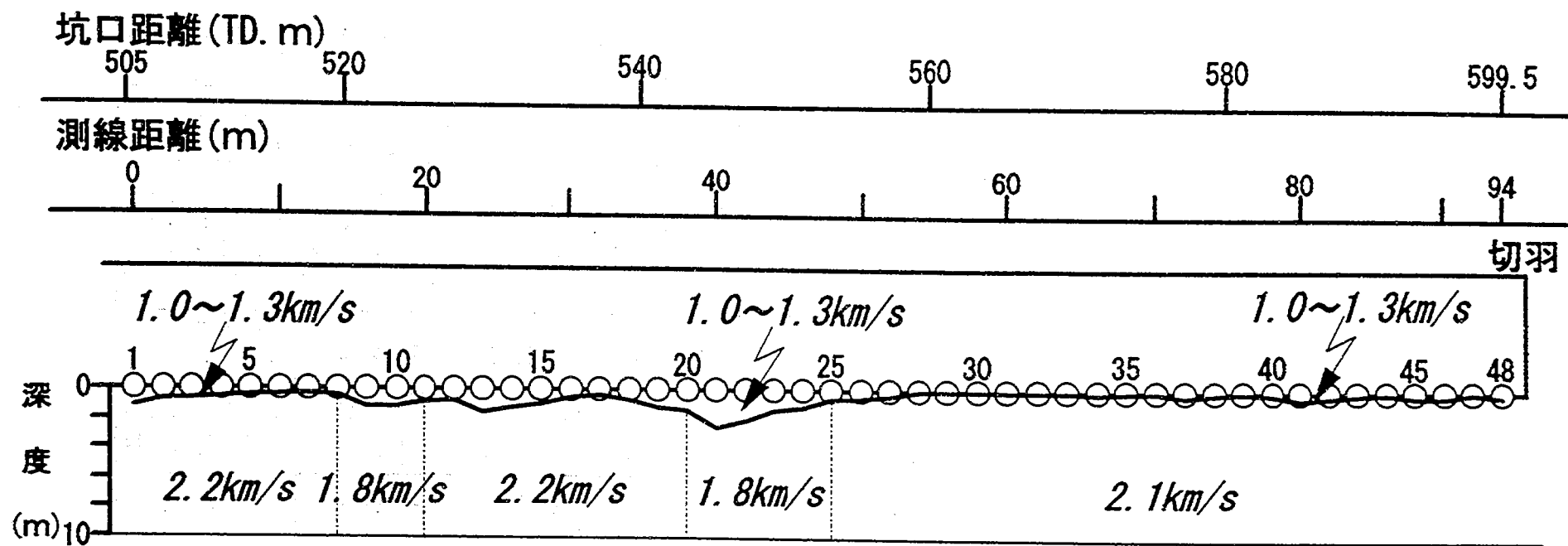


圖-4.10 速度層断面圖
(縮尺 1/400)

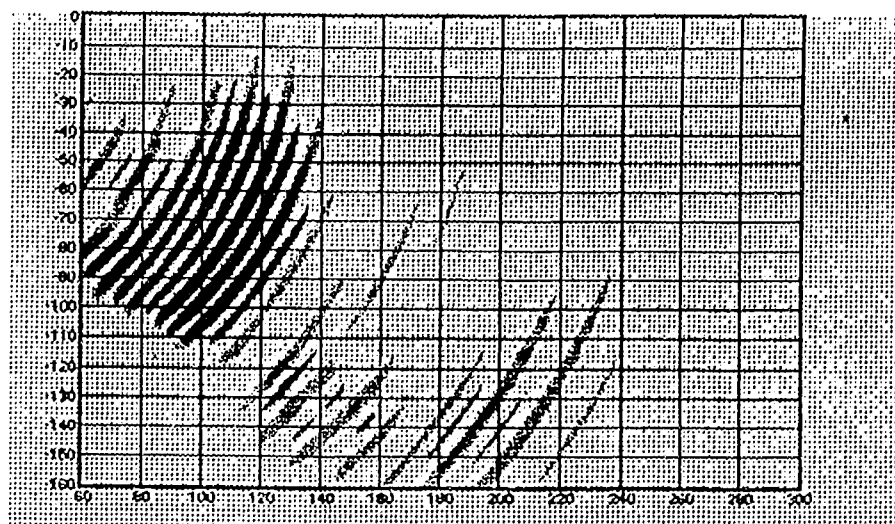
5起振点について、マイグレーション処理の結果得られた2次元HSP断面を図-4.11(a)～(e)に示す。この断面は、マイグレーション後の反射強度を振幅値に応じて色分けしたものである。HSP断面において、縦軸はトンネル軸に直交した方向であり、縦軸の0mが測線位置に対応している。また、横軸はトンネル軸に平行な方向であり、座標値として測線距離をとっている。

図-4.12に図-4.11(a)～(e)のHSP断面を重合した重合後断面を解析結果として示す。図-4.12において、実線および破線で示している線が反射面と考えられ、測線位置に相当する縦軸の0mの位置に出現するものと想定される。反射波振幅の極性から、実線で示している反射面は〔軟→硬〕、また破線で示している反射面は〔硬→軟〕の岩質変化を表わすものと考えられる。

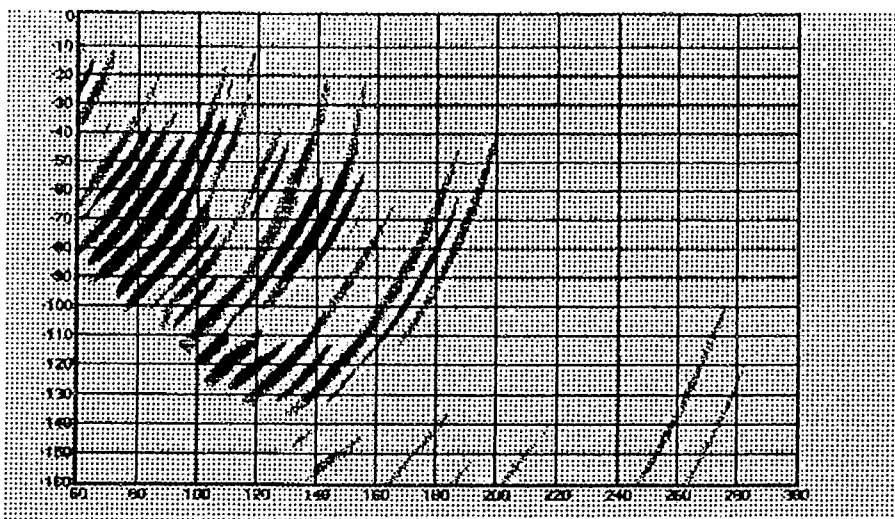
今回のVSPモードでのトンネルHSPの結果をまとめたものを表-4.4に示す。なお、反射面位置は右側側壁(測線位置)での距離を示している。

表-4.4 トンネルHSP (VSPモード) による解析結果のまとめ

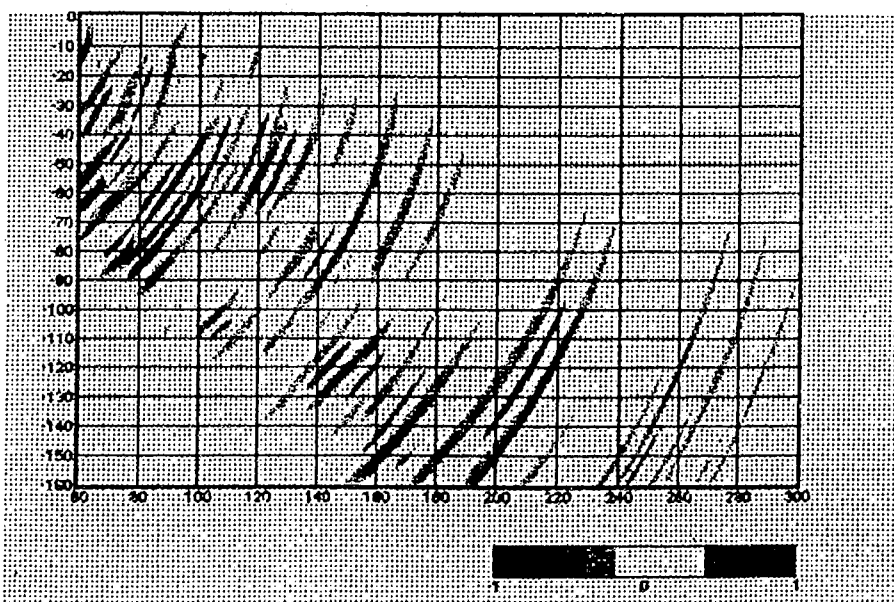
No.	測線距離 (m)	坑口距離 (T.D. m)	測点	硬・軟 の 変 化	備 考
1	64	569.5	STA 692+75.5	〔硬→軟〕	〔硬→軟〕の1つの反射面の可能性がある
	69	574.5	STA 692+70.5	〔軟→硬〕	
2	78	583.5	STA 692+61.5	〔硬→軟〕	〔硬→軟〕の1つの反射面の可能性がある
	83	588.5	STA 692+56.5	〔軟→硬〕	
3	87	592.5	STA 692+52.5	〔硬→軟〕	〔硬→軟〕の1つの反射面の可能性がある
	91	596.5	STA 692+48.5	〔軟→硬〕	
4	93	598.5	STA 692+46.5	〔硬→軟〕	振幅小(?)
5	118	623.5	STA 692+21.5	〔硬→軟〕	HSP断面中最も振幅が大きい反射面群である
	122	627.5	STA 692+17.5	〔軟→硬〕	
	128	633.5	STA 692+11.5	〔硬→軟〕	
	140	645.5	STA 691+99.5	〔軟→硬〕	
6	146	651.5	STA 691+93.5	〔硬→軟〕	反射面No. 5と同程度に振幅が大きい
	151	656.5	STA 691+88.5	〔軟→硬〕	
	156	661.5	STA 691+83.5	〔硬→軟〕	
7	192	697.5	STA 691+47.5	〔硬→軟〕	振幅はやや小さいが連続性がある反射面である
	197	702.5	STA 691+42.5	〔軟→硬〕	
	200	705.5	STA 691+39.5	〔硬→軟〕	
8	201	706.5	STA 691+38.5	〔軟→硬〕	振幅小(?)
9	226	731.5	STA 691+13.5	〔硬→軟〕	〔硬→軟〕の1つの反射面の可能性がある
	233	738.5	STA 691+06.5	〔軟→硬〕	
10	291	796.5	STA 690+48.5	〔軟→硬〕	〔軟→硬〕の1つの反射面の可能性がある
	299	804.5	STA 690+40.5	〔硬→軟〕	



(a) 起振点 sp. -100m

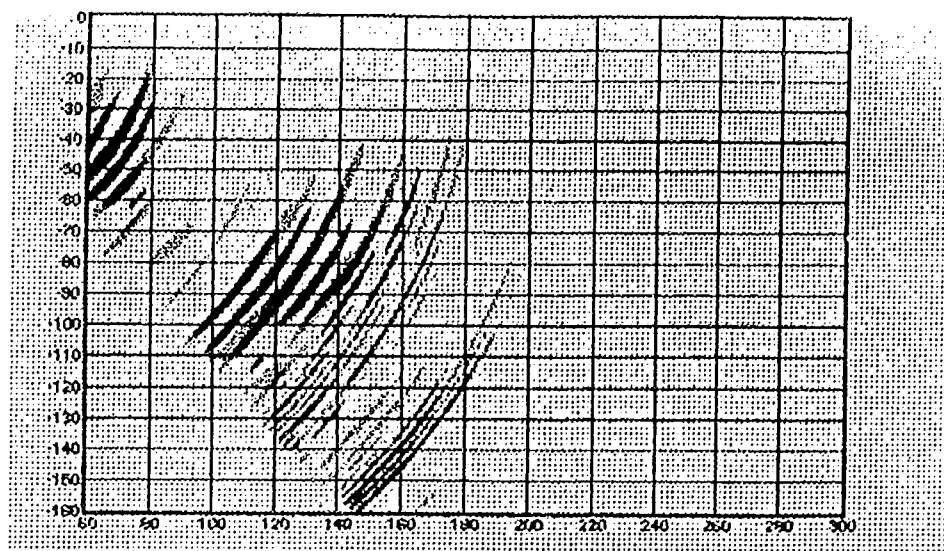


(b) 起振点 sp. -80m

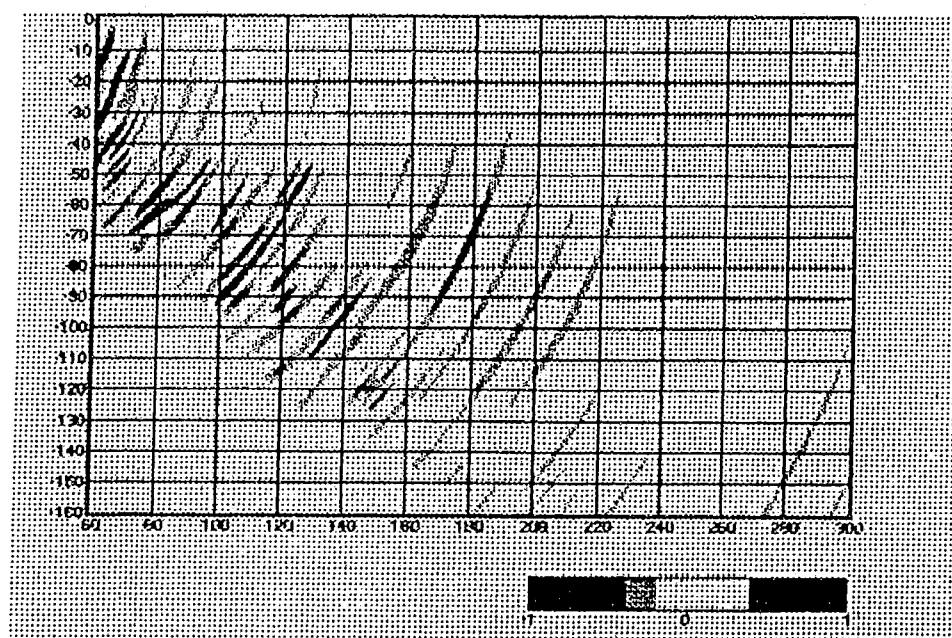


(c) 起振点 sp. -60m

図-4.11 マイグレーション後HSP断面



(d) 起振点 sp. -40m



(e) 起振点 sp. -20m

図-4.11 マイグレーション後HSP断面

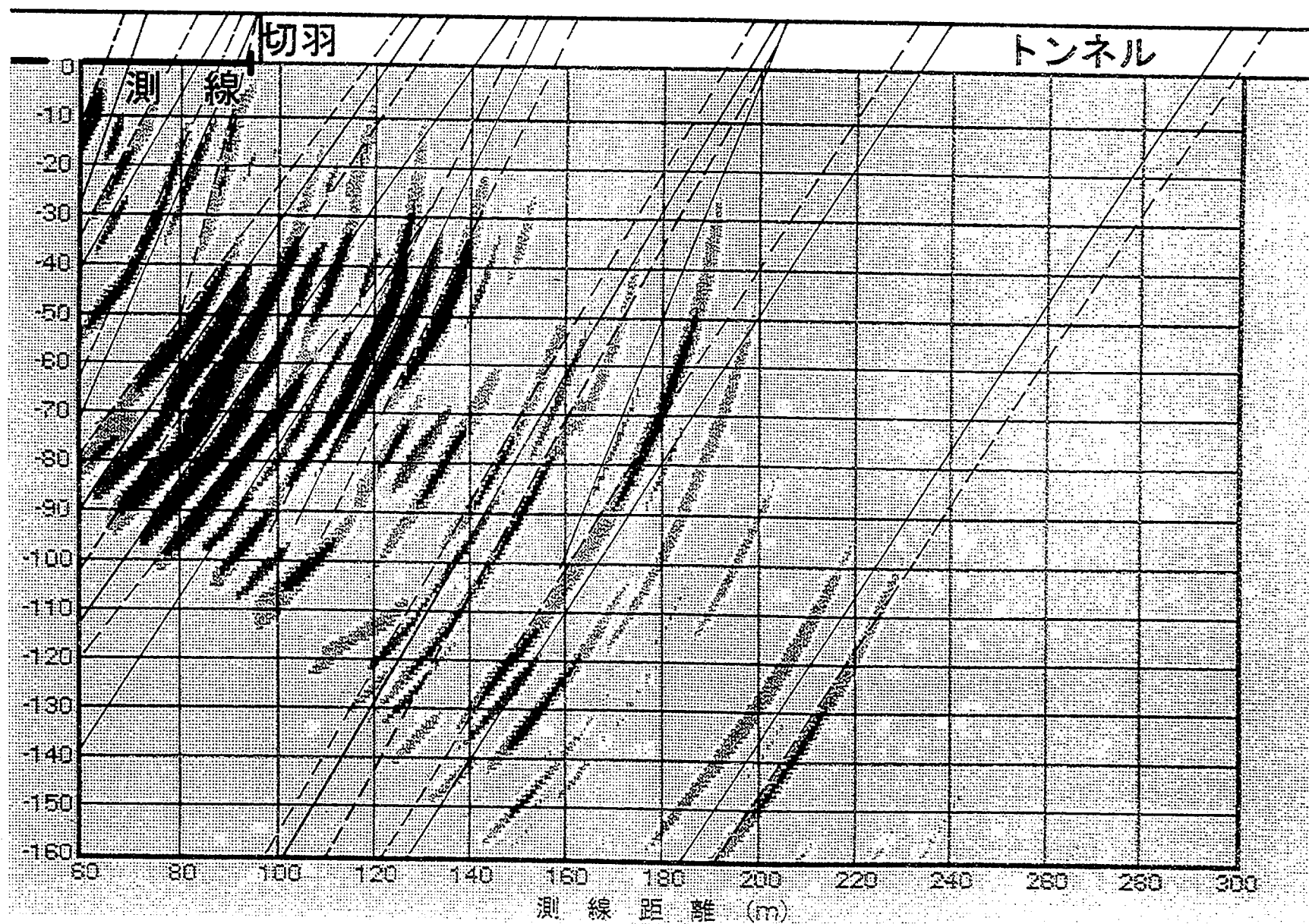


図-4.12 HSP断面 (重合断面)

4.4.3 反射モードによる解析結果

今回の反射モードの解析では、表-4.5に示す18起振点による記録を用いた。また、使用した測定記録は坑壁用地震計によって得られた記録である。

各起振点毎に48受振点分の測定記録が得られているが、起振点近傍の記録は振幅がサチュレートしているとともに、吹付けコンクリートを伝播してきたと考えられるノイズが初動に認められたため、起振点からの距離16m未満の記録は用いなかった。また、起振点からみて坑口側あるいは切羽側の記録数が6以下になる場合には、それらの記録も用いなかった。

オリジナル記録に対して、第4.3.3項で述べた前処理を行った。この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外向波成分のみを抽出した。なお、速度フィルター時には速度の絶対値で1.2km/s以下の成分を除去した。次に、速度フィルターによって抽出された外向波成分に対して、デコンボリューション、バンドパス・フィルターおよびミュートを行った。

今回の測線（測線距離0～94m、坑口距離TD.505.5～599.5m）内において、トンネル軸と平行に近い反射面の位置を求める目的で、速度フィルターおよびデコンボリューション処理後の外向波成分に対してマイグレーション処理を実施した。マイグレーション法としてはGRTによる方法を用い、地山の弾性波速度値は全区間2.1km/sとした。

表-4.5 反射モードの解析に用いた記録の諸元

起振点 (測線距離) (m)	解析に使用した受振点記録 (測線距離) (m)		受振点 間隔 (m)	解 析 に 使 用 し た 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
	坑 口 側	切 羽 側					
-40	—	0～94	2	48	4096	0.125	坑壁用地震計 (右側側壁)
-20	—	0～94	2	48	4096	0.125	
0	—	16～94	2	40	4096	0.125	
6	—	22～94	2	37	4096	0.125	
12	—	28～94	2	34	4096	0.125	
18	—	34～94	2	31	4096	0.125	
24	—	40～94	2	28	4096	0.125	
30	0～14	46～94	2	33	4096	0.125	
36	0～20	52～94	2	33	4096	0.125	
48	0～32	64～94	2	33	4096	0.125	
54	0～38	70～94	2	33	4096	0.125	
60	0～44	76～94	2	33	4096	0.125	
66	0～50	82～94	2	33	4096	0.125	
72	0～56	—	2	29	4096	0.125	
78	0～62	—	2	32	4096	0.125	
84	0～68	—	2	35	4096	0.125	
90	0～74	—	2	38	4096	0.125	
94	0～78	—	2	40	4096	0.125	

さらに、切羽前方でトンネル軸と交差する（すなわち、坑口距離の増加とともにトンネル軸に近づく）反射面を強調する目的で、マイグレーション処理の結果得られた2次元反射断面に対して傾斜フィルターを適用した。

上記の処理の結果、各起振点毎に18個の2次元反射断面が得られ、それらを重合して最終的な反射断面を求めた。この結果を図-4.13に示す。

この断面は、マイグレーション後の反射強度を振幅値に応じて色分けしたものであり、赤系統の色は+の振幅を、青系統の色は-の振幅を表わしている。反射断面において、縦軸はトンネル軸に直交した方向であり、縦軸の0mが測線位置に対応している。また、横軸はトンネル軸に平行な方向であり、座標値として測線距離をとっている。

断面には事前調査によって推定された漆窪層（Uss）と荻野層（Oss）の地質境界位置も併せて示した。

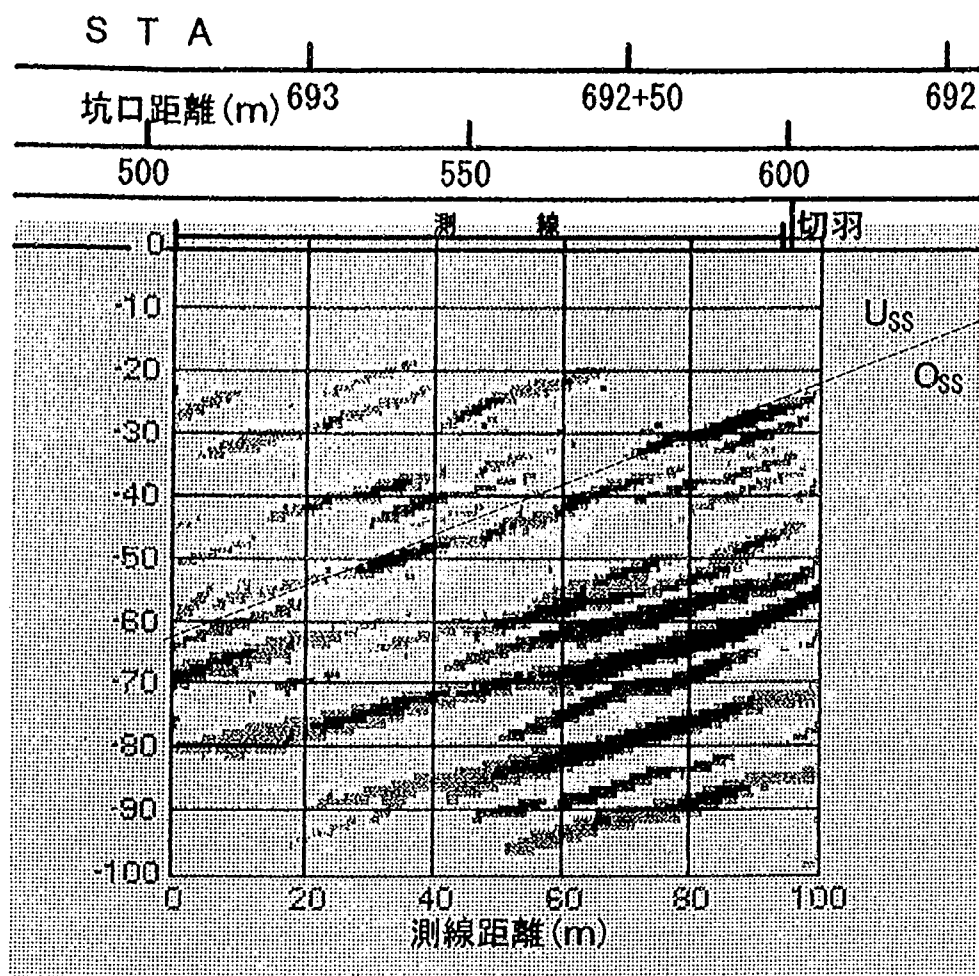


圖- 4.13 反射断面 (重合断面)

5. 考 察

5.1 トンネルHSP解析結果と地質状況の関係

本実験は、軟岩地山でのHSP適用が主目的である。その中で特に第2低速度帯（2.6km/s層の中の1.7km/s層）の位置を推定する事を目的として探査を行った。

事前調査結果と第1低速度帯の施工結果などから、第2低速度帯は地層境界付近の岩質劣化部の可能性もあり、その場合境界面は低角度となることが考えられた。このため、測定はVSPモードと反射モードの両方の測定解析が可能な測線配置、起振点配置として行った。

HSP実験後、探査対象区間の施工中に、施工者側で地質・岩盤状況の観察と記載を行った。その結果から、探査対象区間の地質の復元と施工データ（施工パターン、単位あたりの削孔数・薬量の変化、計測データ）をまとめた。これらの結果とHSP解析結果を対比し、VSPモードについて図-5.1に、反射モードについて図-5.2に示した。

5.1.1 第2低速度帯の位置・性状について

位置については、両モードの解析結果と施工記録から、第2低速度帯の出現位置は緑色凝灰岩・凝灰質礫岩のリズミカルな細互層の下位の層準にあたり、STA691+40（切羽前方104m）付近より出現する低角度地層境界に一致する。VSPモード、反射モード共に位置的な誤差を多少含むものの、ほぼその位置にイベントを見つけることができる。

性状については施工記録から、第2低速度帯はやや締まった粘土をレンズ状もしくはパッチ状に含む軟質緑色凝灰岩（岩質劣化部）に相当すると判断される。この層が全断面に現れるSTA690+23以降は、計測結果では収束値、下半通過時の変位、上半切羽はなれ1D時の変位および日当たりの最大変位速度が他の区間に比較し大きくなるゾーンに一致する。

岩質を細かくみれば緑色凝灰岩と長さ0.5～1.0m程度の粘土レンズの組合せとなるが、全体としてはあまり変化のない軟質なゾーンである。

5.1.2 反射パターンと施工記録との対比

図-5.1のVSPモードの解析結果から、反射波のパターンから探査対象区間は以下の4つのゾーンに分けられる。

- | |
|------------------------------|
| ①切羽前方20m～60mの強い反射面が卓越するゾーン |
| ②切羽前方60m～100mの反射面が殆どみられないゾーン |
| ③切羽前方100m～110mの反射面がみられるゾーン |
| ④切羽前方110mより奥の反射面少なくなるゾーン |

これらのゾーンは、それぞれ次のような岩質的な特徴がみられる。

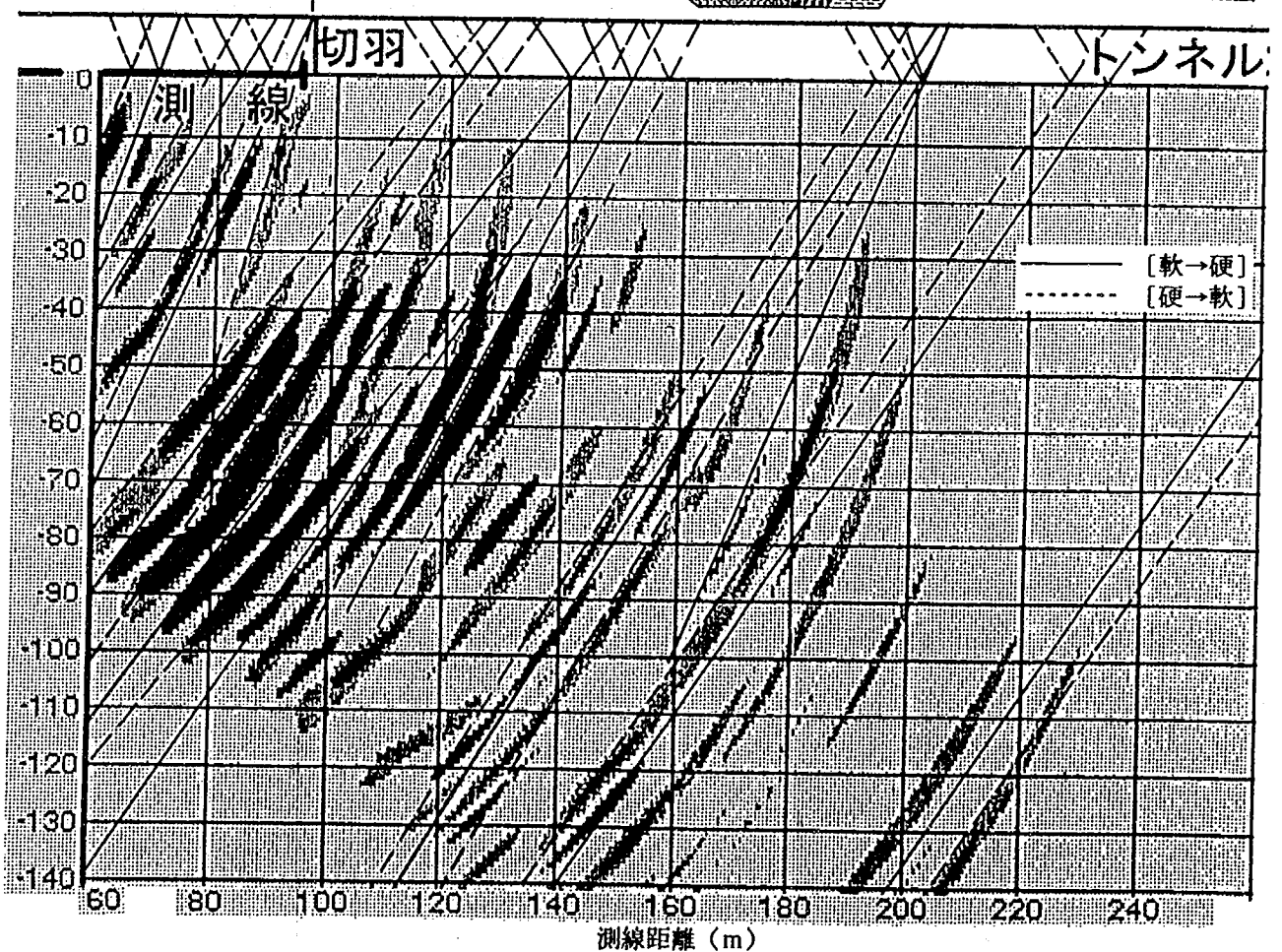
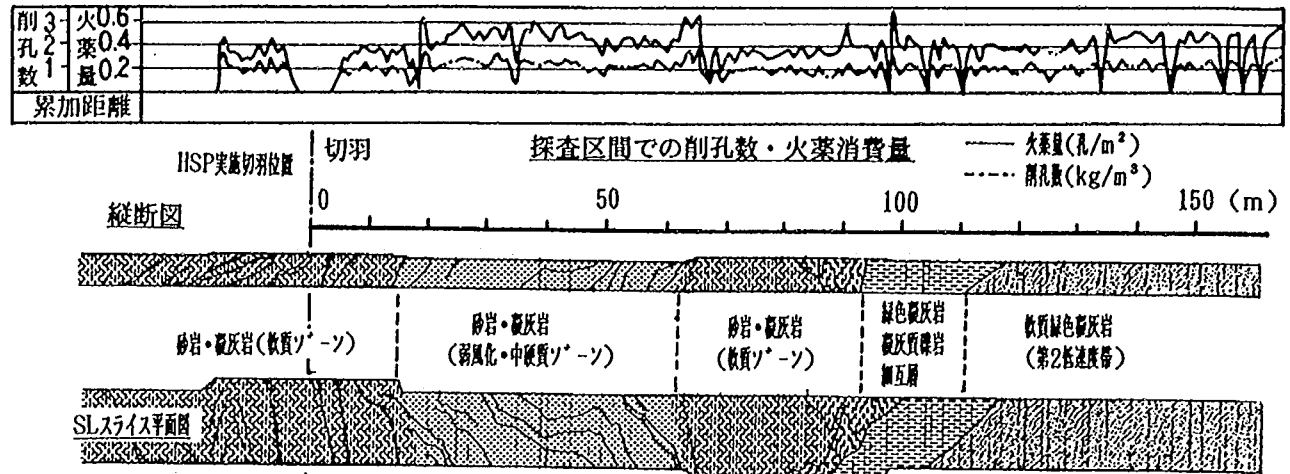
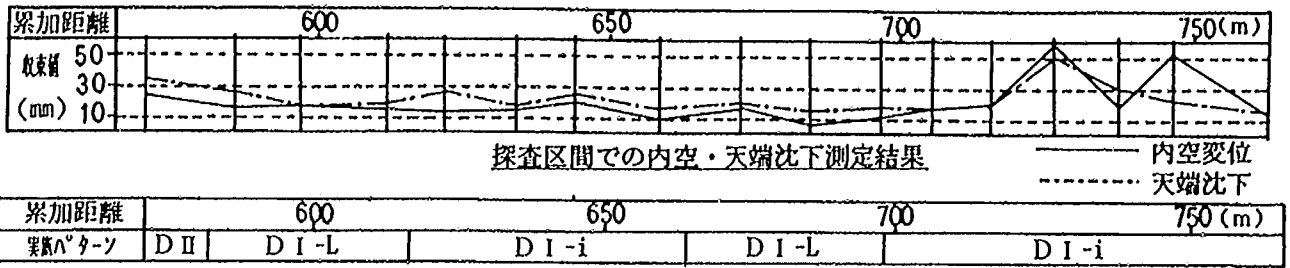


図-5.1 トンネルHSP解析結果と施工との関係図(VSPモード)

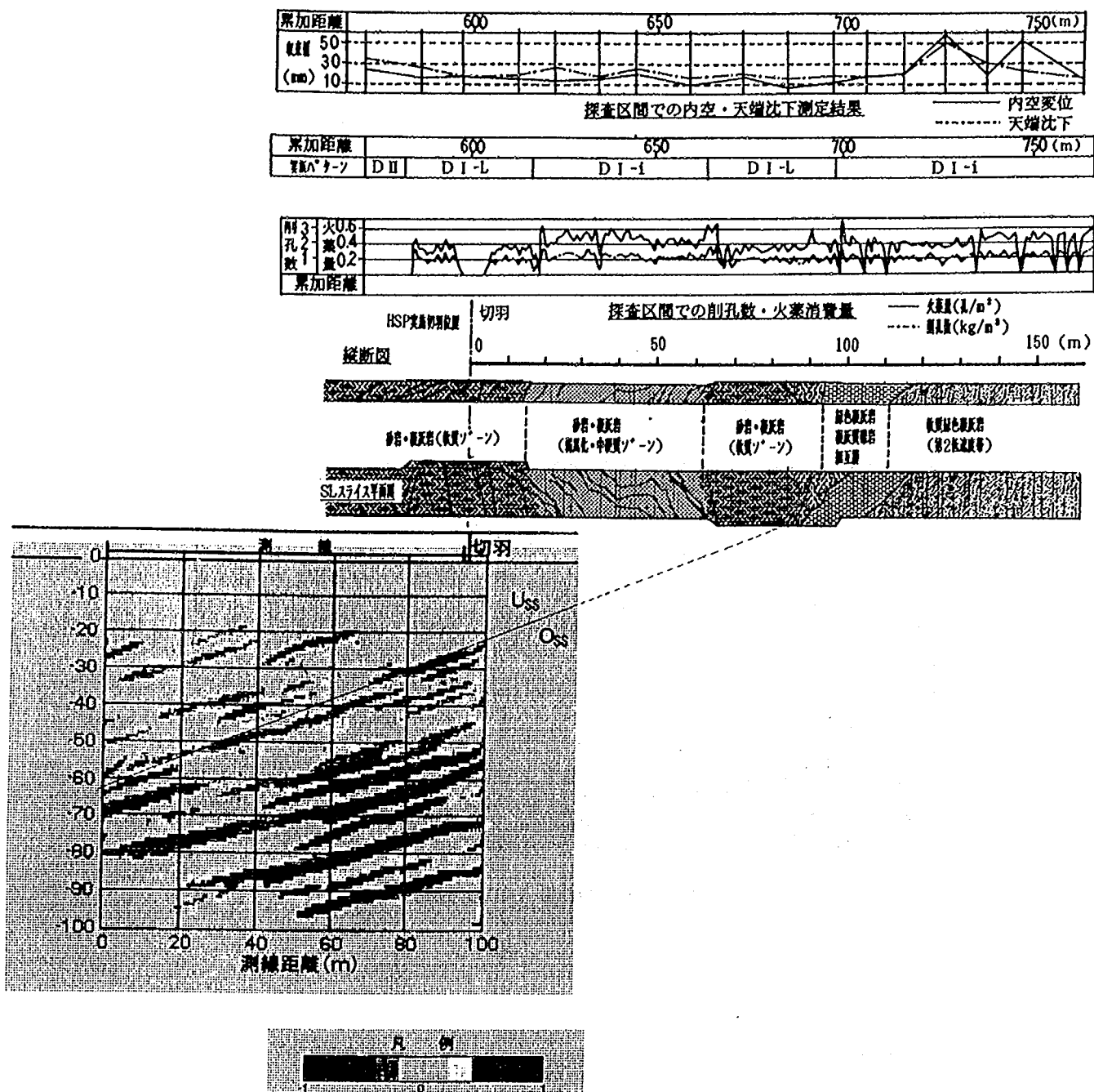


図-5.2 トンネルHSP解析結果と施工との関係図 (反射モード)

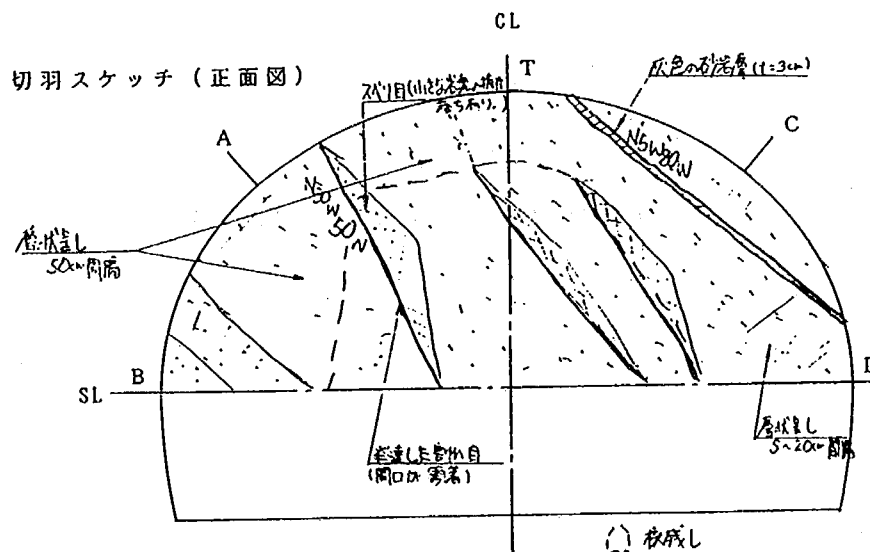
①切羽前方20m～60mの強い反射面が卓越するゾーン

硬岩地山的な面付き（写真－5.1，図－5.3）で，岩質的にはやや硬く，薬量も単位当たり0.5～0.6kgと多い。1～3m程度の間隔で大きな亀裂（節理）が発達し，これに沿って切羽では楔状に岩盤が抜け出し，小崩壊がみられ，切羽の安全面では問題となった区間である。

H S P解析断面の解釈として，亀裂の卓越ゾーンとして評価することができ，地山状況を反映していると判断される。



写真－5.1 切羽写真（STA692+22）

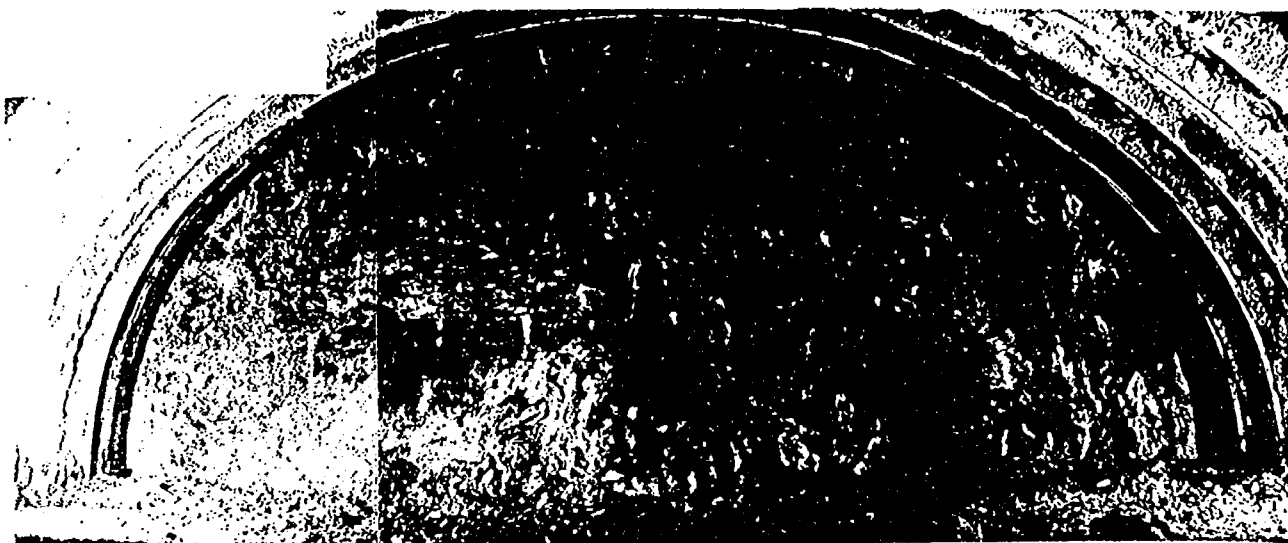


図－5.3 切羽スケッチ（STA692+22）

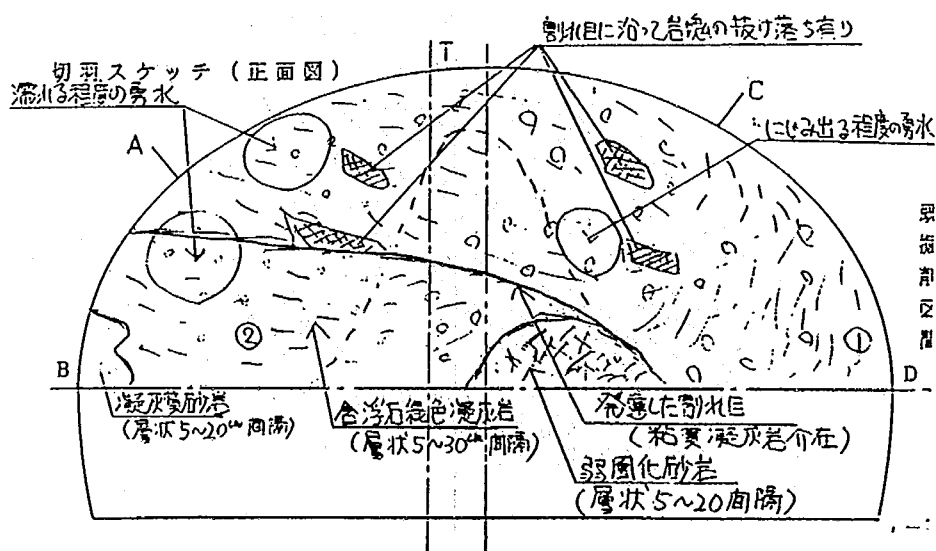
②切羽前方60m～100mの反射面が殆どみられないゾーン

含浮石緑色凝灰岩及び凝灰質砂岩が複雑に入り組んで分布し、全体に軟質となる。亀裂などの不連続面が少なく、軟質ではあるが変化が少ない全体として塊状の安定した地山（写真－5.2、図－5.4）となる。

HSP解析断面の解釈として、反射面の殆どみられない亀裂の少ないゾーンとして評価することができ、地山状況を反映していると判断される。



写真－5.2 切羽写真（STA691+57）

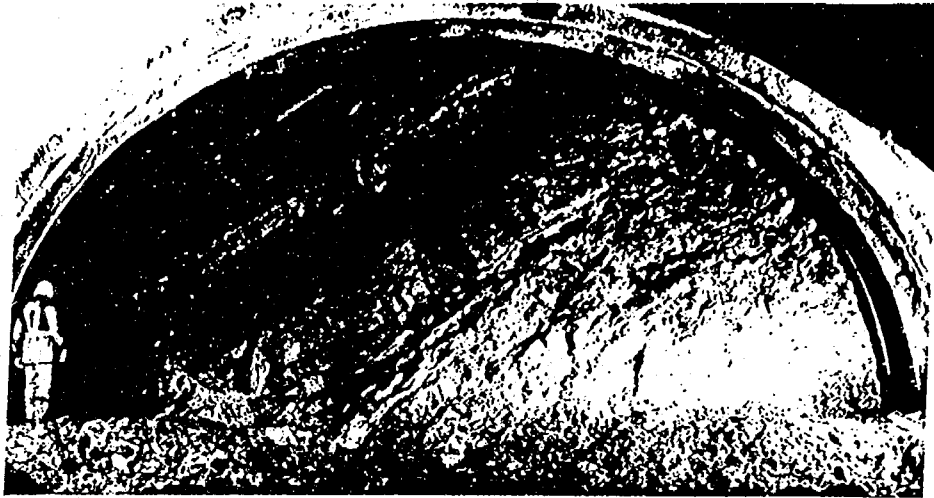


図－5.4 切羽スケッチ（STA691+57）

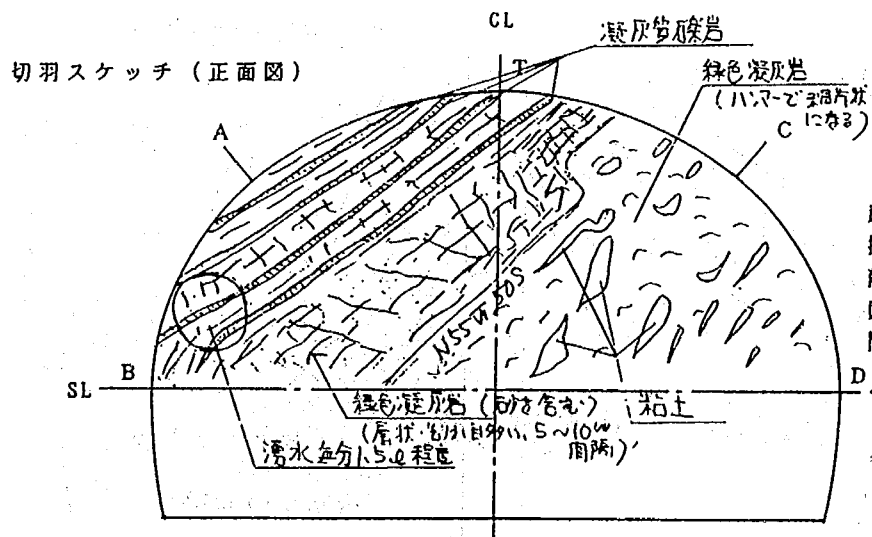
③切羽前方100m～110mの反射面がみられるゾーン

第2低速度帯の境界面からの反射面（写真－5.3、図－5.5）とみられるゾーンである。ただし、①の反射面強度に比べエネルギーが小さく、当初からこの部分を第2低速度帯境界部からの反射と認定することは難しく、施工結果等を検討した結果対応したものである。

地山状況としては、緑色凝灰岩・凝灰質礫岩の細互層がリズムカルに繰り返すゾーンから粘土パッチを多く含む軟質緑色凝灰岩への境界部分に相当する。



写真－5.3 切羽写真（STA691+29）



図－5.5 切羽スケッチ（STA691+29）

④切羽前方110mより奥の反射面少なくなるゾーン

第2低速度帯内部に相当し、やや締まった粘土をレンズ状もしくはパッチ状に含む岩質劣化部（写真-5.4、図-5.6）に相当すると判断される。細かくは、緑色凝灰岩と0.5~1.0m程度の粘土レンズの組合せとなるが、全体としては反射面に相当しそうな部分の少ない軟質なゾーンである。

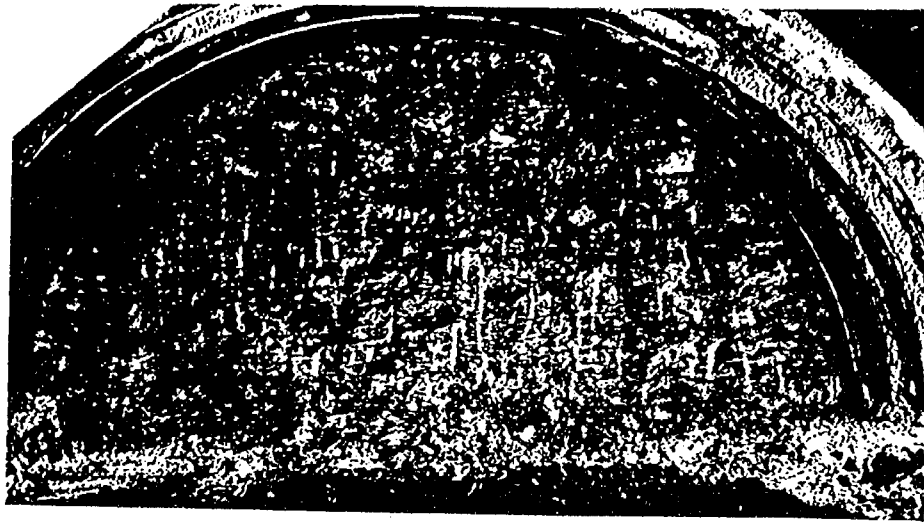


写真-5.4 切羽写真 (STA690+98)

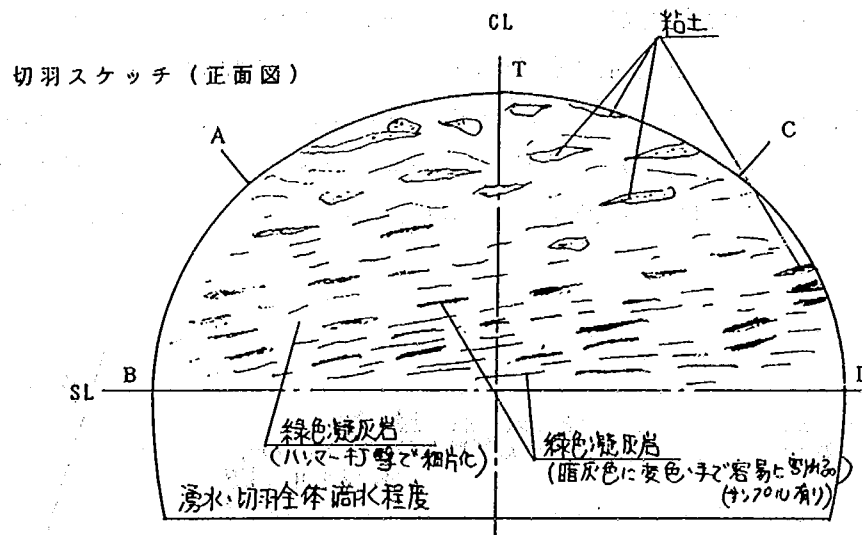


図-5.6 切羽スケッチ (STA690+98)

5.2 測定・処理方法についての検討

5.2.1 VSPモードと反射モードの選定

トンネルHSP法により反射面を検出する場合、反射面として考えられる地層境界面や弱層あるいは亀裂といったものは、トンネル軸に対して様々な走向・傾斜をもっている。したがって、トンネルHSP法のデータ処理では、反射面の走向および傾斜方向がトンネル軸に直交していなくても対応可能である手法を用いなければならない。

ここで、トンネル坑内においてトンネルHSP法を実施した際に計測される反射波が、反射面の走向および傾斜方向によってどのような性質をもつかを考える。なお、以下では2次元平面上に限定して議論し、反射面の方向はトンネル軸の直交方向からの傾斜角で規定されるものとする。このとき、図-5.7に示すように、反射面の傾斜角 α をトンネル軸の直交方向となす角として定義する。

実際に反射波の走時が、反射面のトンネル軸上（測線延長線上）での位置および傾斜角によってどのように変化するかを、いくつかのモデルについて計算した結果を図-5.8に示す。起振点位置を-50m、測線（受振点）展開を0～94mに固定し、反射面の【位置、傾斜角】の対を【144m, 30°】、【194m, 30°】、【144m, 70°】、【194m, 70°】の4通りに設定して、直接波および反射波の走時を計算している。弾性波速度は5.0km/sで一定とした。また、各ケースでの反射波の波線図を図-5.9に示す。

従来用いていた外向波、内向波という考え方は、ここでは

①外向波：振源距離が大きくなるほど走時が大きくなる波動成分

（直接波，【144m, 70°】および【194m, 70°】からの反射波）

②内向波：振源距離が大きくなるほど走時が小さくなる波動成分

（【144m, 30°】および【194m, 30°】からの反射波）

と表わすことができる。

トンネルHSP法のデータ処理では、外向波と内向波の両方を一度に処理することは難しいため、波動場分離の段階でこれらの波動成分を分離して、各波動成分を別々に処理している。そして、内向性の反射波を扱うものをVSPモード、外向性の反射波を扱うものを反射モードと呼んでいる。

図-5.9の波線図を見るとわかるように、VSPモードでは主に受振点展開よりも外側（切羽前方に対応する）に反射点が分布する反射波を扱うのに対して、反射モードでは主に受振点展開内（既掘削区間のトンネル周辺の側方部に対応する）に反射点が分布する反射波を扱っている。したがって、切羽前方を採

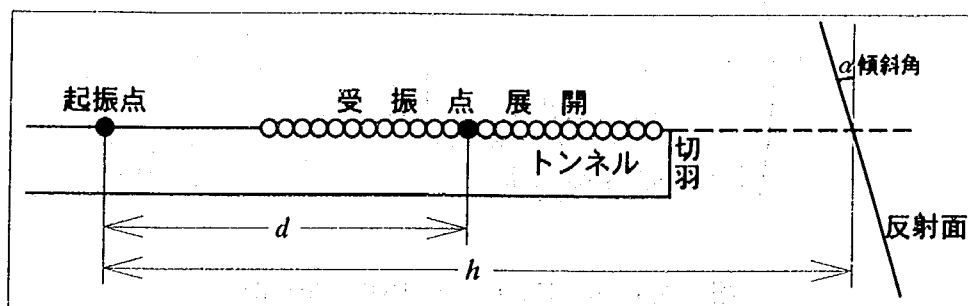


図-5.7 測定ジオメトリと傾斜反射面

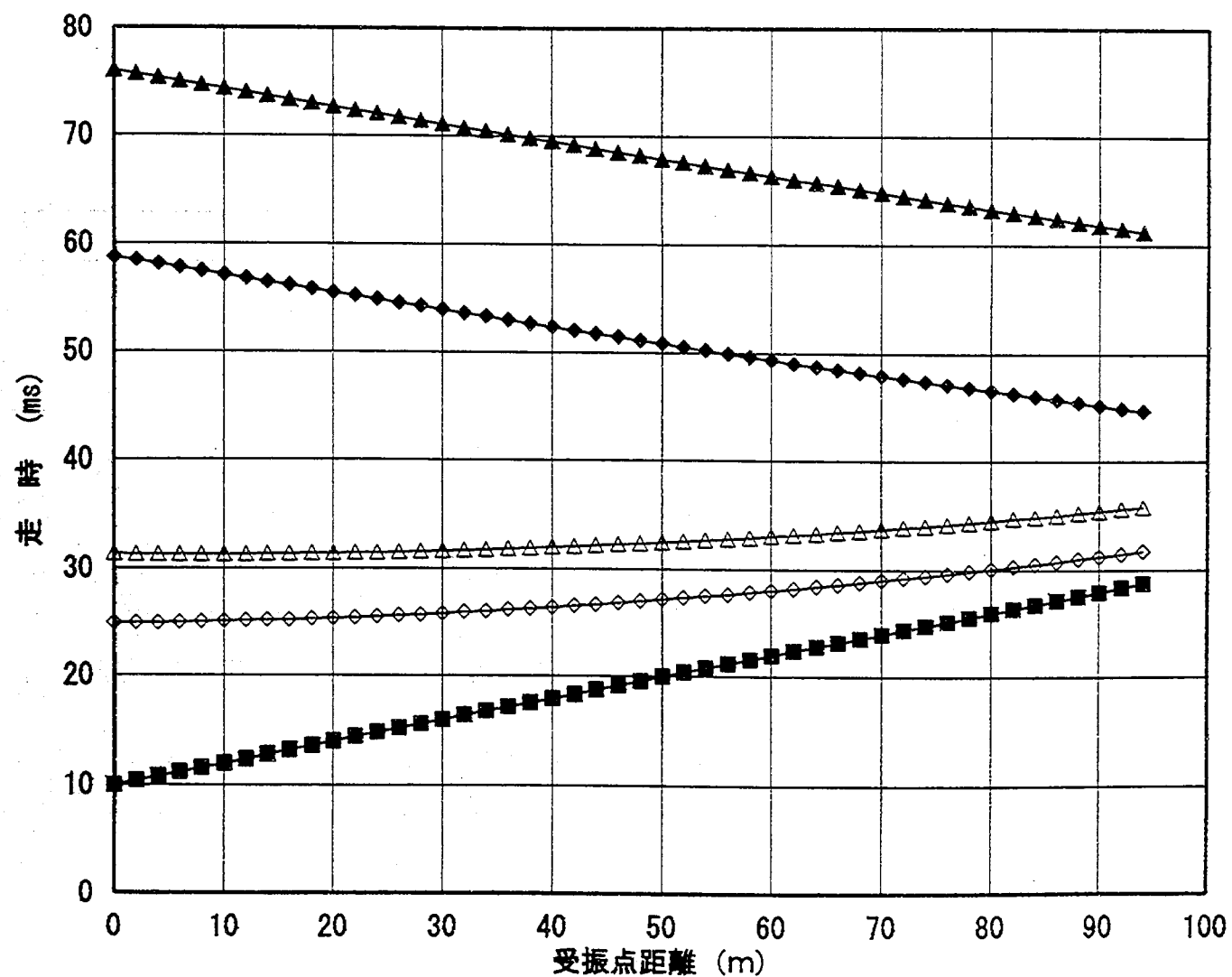
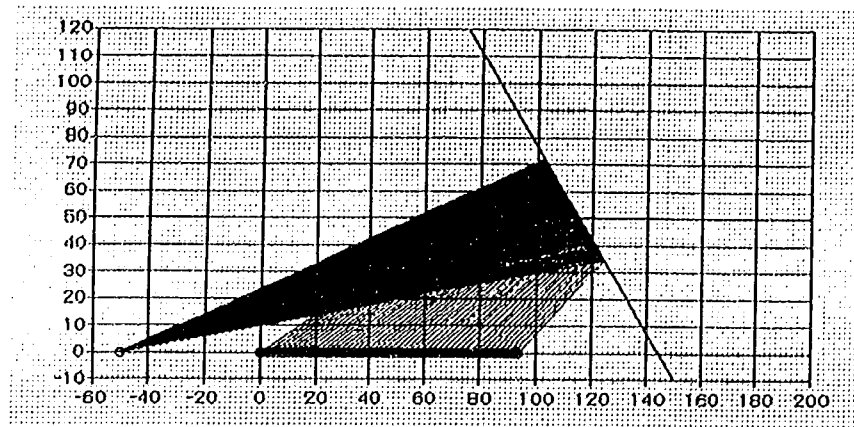
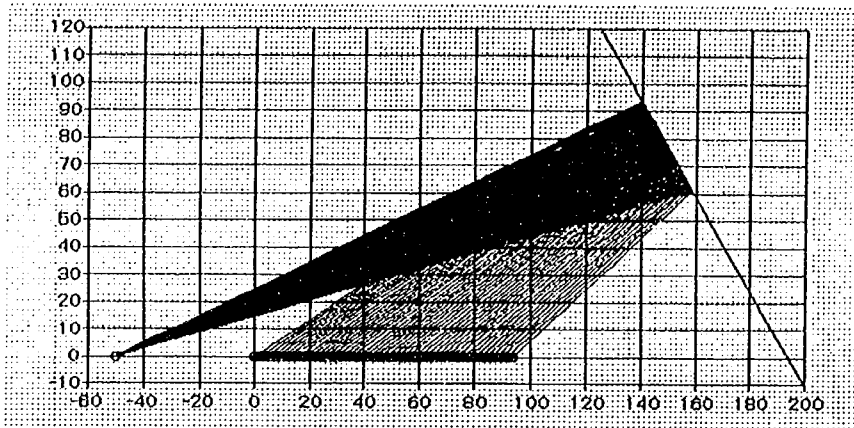


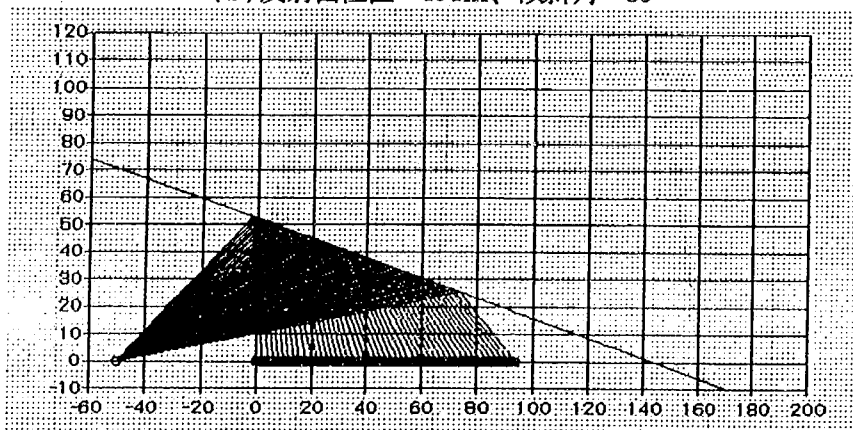
図- 5.8 反射面の位置と角度の違いによる走時の変化
(反射面の角度はトンネル軸直交方向からの角度を表わす)



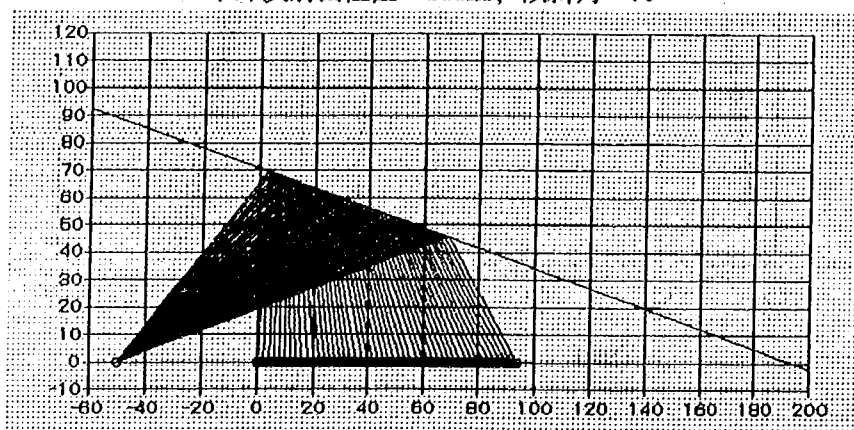
(a) 反射面位置=144m、傾斜角=30°



(b) 反射面位置=194m、傾斜角=30°



(c) 反射面位置=144m、傾斜角=70°



(d) 反射面位置=194m、傾斜角=70°

図- 5.9 斜交反射面に対する反射波の波線図

査対象とする場合にはVSPモードを、また既掘削区間のトンネル周辺の側方部を探索対象とする場合には反射モードを用いるように、計測・処理法を使い分ける必要がある。ただし、単に各モードを探索目的によって使い分けるというだけではなく、どちらのモードで扱うことのできる反射波が生じるかは、測定ジオメトリと反射面の傾斜角によって決まってくる。

それでは、起振点・受振点位置と反射面の位置・傾斜角がどのような関係のとき、VSPモードで扱う内向性の反射波となり、また反射モードで扱う外向性の反射波となるのであろうか。これを以下に考察する。

話を簡単にするために、起振点と受振点展開はトンネル軸に沿った同一線上にあるものとし、また弾性波速度 V は一定とする。このとき、反射波の全波線長 l （〔起振点～反射点の距離〕＋〔反射点～受振点の距離〕）は

$$l = Vt = \sqrt{d^2 + 4(h-d)h \cos^2 \alpha} \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

で表わされる。ここに、 t は反射波の走時、 d は起振点と受振点との距離、 h は起振点から測線延長線と反射面の交点までの距離である（図-5.7参照）。ここで、全波線長 l を d の関数として偏微分すると、

$$\frac{\partial l}{\partial d} = \frac{d - 2h \cos^2 \alpha}{\sqrt{d^2 + 4(h-d)h \cos^2 \alpha}} \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

となる。

前述したように、外向性の反射波は振源距離が大きくなるほど走時が大きくなる波動成分であり、また内向性の反射波は振源距離が大きくなるほど走時が小さくなる波動成分である。いま弾性波速度は一定と仮定しているので、反射波の走時が大きくなるということは、全波線長が長くなることと等しい。すなわち、式(5.2)で表わされる $\partial l / \partial d$ の値が正のとき外向性、負のとき内向性の反射波となり、 $\partial l / \partial d = 0$ のときがその境界となる。条件として $h > d$ を考えると、式(5.2)において分母は常に正であるから、 $\partial l / \partial d = 0$ となるのは

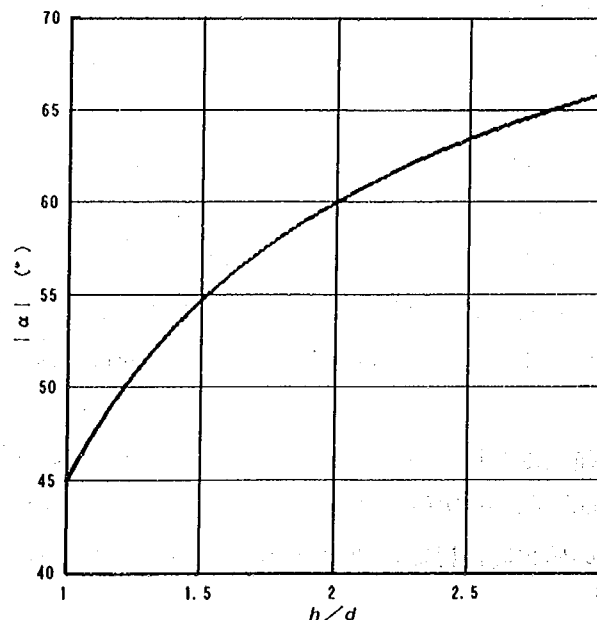


図-5.10 反射波の走時変化が0となる反射面の傾斜角

$$\cos^2 \alpha = d/(2h) \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

の条件を満たすときである。横軸に h/d をとって、式(5.3)より $\partial l/\partial d = 0$ となるときに傾斜角 α の絶対値を計算した結果を図-5.10に示す。図-5.10の曲線より左上の範囲は外向性の反射波、右下の範囲は内向性の反射波となる。例えば、 $d = 100m$ 、 $h = 150m$ のとき $h/d = 1.5$ であり、 α の絶対値が 54.7° より小さい場合内向性の反射波、それより大きい場合外向性の反射波となる。

5.2.2 振幅についての検討

1) 初動振幅の距離減衰

起振点と受振点の距離（振源距離）を R 、初動付近の両振幅（初動以降のある時間幅内での最大値と最小値の差とする）を $A(R)$ とし、この両振幅値の距離減衰を

$$A(R) = A_0 \cdot R^{-n} \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

によって表わす。ここに、 A_0 は定数（ $R = 1m$ における両振幅値）、 n は距離減衰指数である。

初動振幅の距離減衰の要因としては、以下の項目等が考えられる。

- ①幾何減衰（球面発散）
- ②非弾性減衰
- ③測線内に存在する速度境界面による透過損失
- ④測線内に存在する亀裂等による波動の散乱

距離減衰の要因としては上記の項目等が考えられ、また振源距離に対する振幅値の表現式も式(5.4)とは異なるものもある。しかし、ここでは上記の項目をすべてひとまとめにして、振幅値の距離減衰を式(5.4)によって表わすものとする。

式(5.4)の両辺の対数をとると

$$\log A(R) = \log A_0 - n \cdot \log R \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

と表わされる。式(5.5)より、ある1つの起振点から発生した波動を複数の受振点で計測し、その初動付近の両振幅値を読み取って $\log R$ と $\log A(R)$ の両対数グラフを描き、その傾きを最小二乗法を用いて求めることにより距離減衰指数 n を求めることができる。

屈折法解析およびVSPモードの処理データから得られた諸数値（地山弾性波速度、両振幅値、距離減衰指数、卓越周波数、内向波／外向波振幅比等）をまとめて表-5.1に示す。初動部分の諸数値は、初動以降10msの時間幅内のデータを用いて求めた。図-5.11に、初動部分について振源距離－両振幅および測線距離－両振幅の関係をプロットしたものを示す。図-5.11(a)は振源距離－両振幅の関係を両対数で示したものであり、図中の太い実線は各起振点毎に求めた回帰直線である。この直線の傾きから初動部分の距離減衰指数 n を求めることができる。

表-5.1を見ると、 n の値の範囲は2.1～2.5である。ただし、起振点と測線始点の距離が大きくなるほど $\log R$ の範囲が相対的に狭くなるため、 n の値の信頼性が低くなると考えられる。そこで、起振点位置－100mのデータを省くと、 n の値の範囲は2.1～2.3となる。このように、西会津トンネルでの n の値は2程度の値を示している。

一般には硬岩地山に比べて軟岩地山において波動の減衰が大きく、初動部分の距離減衰指数 n は軟岩地山の方が大きいことが予想される。しかし、今までの現地適用実験の結果では、花崗岩系の硬岩地山（犬狹トンネル、水越トンネル）での n 値が大きい傾向にある。この原因として、花崗岩系の硬岩地山では亀裂が発

図- 5.1 トンネルHSP成果・比較表

トンネル名 計測坑	地山弾性 波速度 (km/s)	ゲイジ種 受振方式 受振器 ^{*1)}	起振		受振		初動部分 ^{*3)}				後続波卓越部分 ^{*3)}			
			起振点位置 ^{*2)} (m)	薬量 (g)	測線位置 ^{*2)} (m)	振源距離 (m)	両振幅対数 値 (R=1m)	距離減衰 指数 n	両振幅値 (R=100m)	卓越周波数 (Hz)	速度 (km/s)	両振幅対数 値 (R=1m)	距離減衰 指数 n	卓越周波数 (Hz)
西会津工 本坑	1.8~2.2	サハガス, エマト 坑壁40Hz (G)	-100(R)	200	0~94(R)	100~194	6.63	2.52	38.44	70~180	0.8~1.0	4.26	1.40	50~110
			-80(R)	200	0~94(R)	80~174	5.67	2.08	31.84	70~150	0.8~1.0	5.46	2.13	50~120
			-60(R)	200	0~94(R)	60~154	5.51	2.11	19.23	75~150	0.8~1.0	3.49	1.22	50~110
			-40(R)	100	0~94(R)	40~134	4.81	2.07	4.75	70~160	0.8~1.0	4.71	1.92	50~130
			-20(R)	100	0~94(R)	20~114	5.48	2.27	8.56	70~240	0.8~1.0	5.16	2.18	40~140
			0(R)	33	14~94(R)	14~94	5.06	2.19	4.76	70~170	0.8~1.0	5.15	2.11	45~150

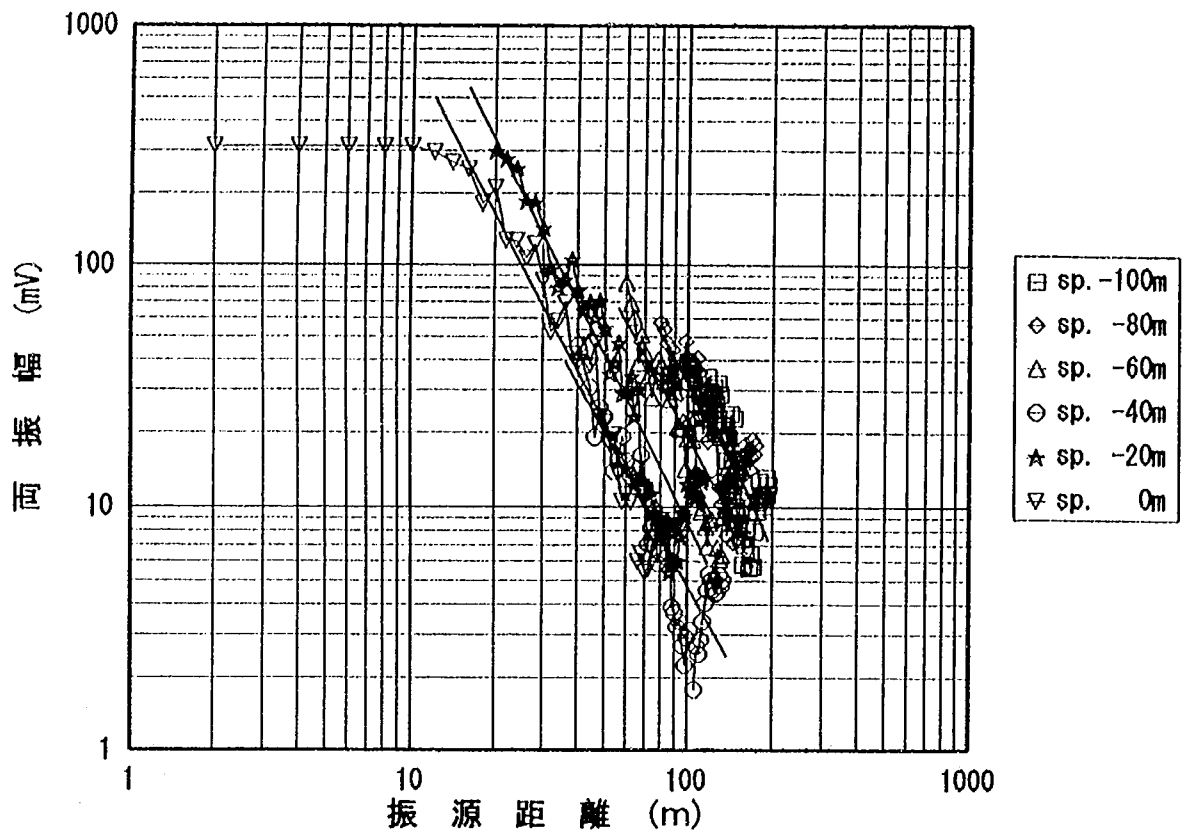
外向波成分 ^{*3)}		内向波成分 ^{*3)}			内向波/ 外向波 振幅比
両振幅対数 値 (R=1m)	距離減衰 指数 n	両振幅対数 値 (R=1m)	距離減衰 指数 n	卓越周波数 (Hz)	
6.08	2.30	6.26	2.68	80~150	0.1 ~0.4
5.53	2.04	3.20	1.33	70~150	0.05 ~0.4
5.42	2.09	1.98	0.84	75~140	0.04 ~0.4
4.58	1.99	2.70	1.34	80~140	0.09 ~0.7
5.50	2.32	0.92	0.24	75~140	0.01 ~0.7
5.04	2.21	1.65	0.57	75~140	0.02 ~1

*1) (G)は各測点において地震計を2個ずつグルーピングを行ったことを示す。

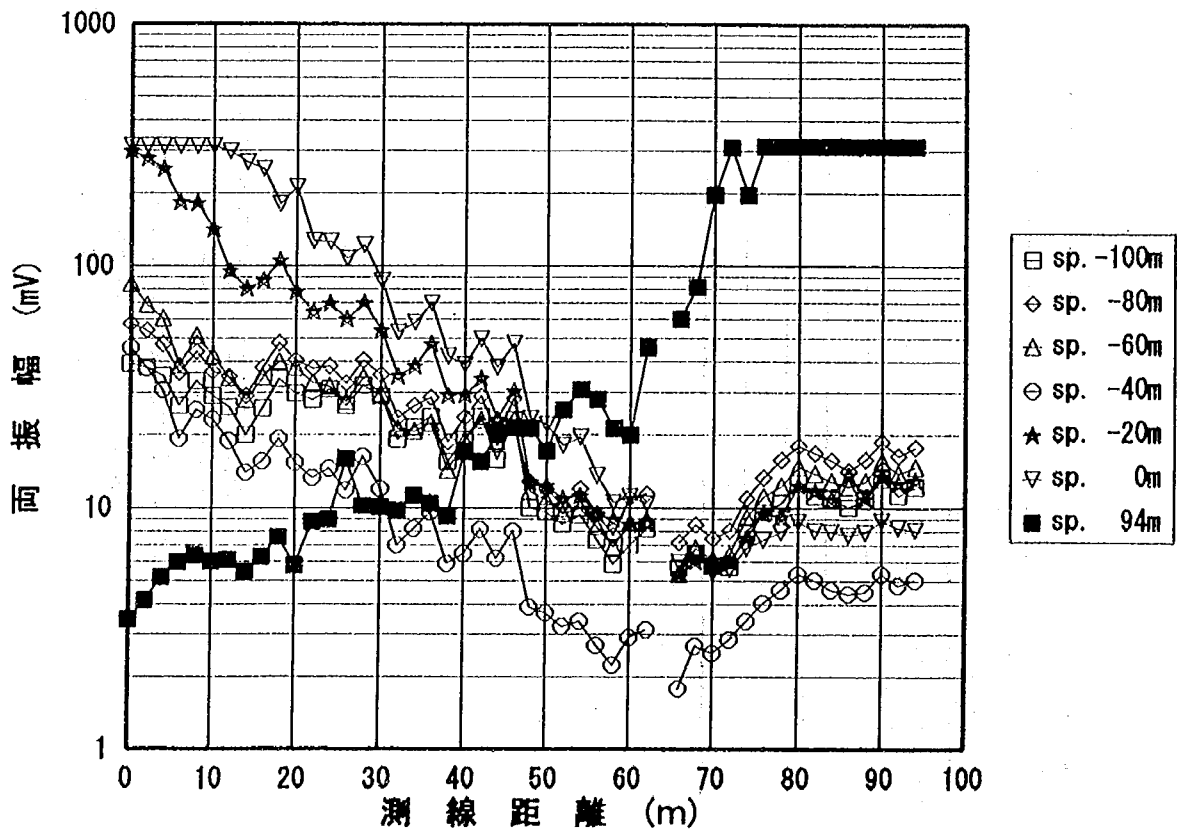
*2) (R)は右側側壁を表わす。

*3) 両振幅対数値(R=1m)は、振源距離-両振幅の両対数グラフの回帰直線から求めた振源距離1mにおける両振幅値の対数値である。
距離減衰指数nは $[\text{両振幅値}] = [\text{定数}] \cdot R^{-n}$ と表わされる(Rは振源距離)。

両振幅値(R=100m)は、振源距離-両振幅の両対数グラフの回帰直線から求めた振源距離100mにおける両振幅値である。



(a) 振源距離—両振幅の関係



(b) 測線距離—両振幅の関係

図— 5.11 初動部分の両振幅値と距離の関係

達しており、波動の散乱現象によって初動振幅の減衰が大きくなることが考えられる。一方、亀裂が少ない地山において振源距離200m程度以内では、軟岩地山であっても n 値は2程度の値を示すものと考えられる。

2) 外向性後続波の距離減衰

今までの各トンネルでの現地適用実験の測定記録では、P波初動の数倍の振幅をもつ外向性の後続波位相が観測されている。これらの後続波の振幅は、坑壁垂直成分の受振記録において大きい傾向にある。一方、トンネル軸成分の受振記録では小さい傾向にある。

後続波成分を強調するために、測定記録にローパス・フィルター（周波数300Hz以上をカット）、データ・ウィンドウ、静補正およびミュートの各処理を行った後、速度フィルターによって1.5km/s以下の外向波成分を抽出した結果を図-5.12に示す。

図-5.12の各トレース毎に最大値と最小値を求め、その差を両振幅値として、振源距離に対してプロットしたものを図-5.13に示す。図-5.13中の太い直線は各振源毎に求めた回帰直線であり、この直線の傾きから距離減衰指数を求めた。その結果、距離減衰指数の値は1.2~2.2の範囲である。

なお、この結果は最も振幅の大きい位相から求めた伝播速度、卓越周波数とともに表-5.1に示した。

3) 外向波成分および内向波成分データの振幅

VSPモードの処理データについて、外向波成分および内向波成分データの振幅を計算した結果を図-5.14(a)~(b)に示す。ここに、各振幅は以下のように求めた。

(a) 外向波成分の振幅

速度フィルター後（あるいはデコンボリューション後）の外向波成分データより、初動以降10msの時間幅内における最大値と最小値の差から両振幅値を計算。この方法によって計算された外向波成分データの両振幅値は、直接波部分の両振幅値と考えられる。

(b) 内向波の振幅

速度フィルター後（あるいはデコンボリューション後）の内向波成分データをtwo-way time shift後、最も切羽側の受振点での初動位置+5msよりデータの終わりまでの時間幅における最大値と最小値の差から両振幅値を計算。この方法によって計算された内向波成分データの両振幅値は、切羽前方からの反射波のみを対象としているが、特定の反射面の選択や反射面の位置による補正は考慮していない。

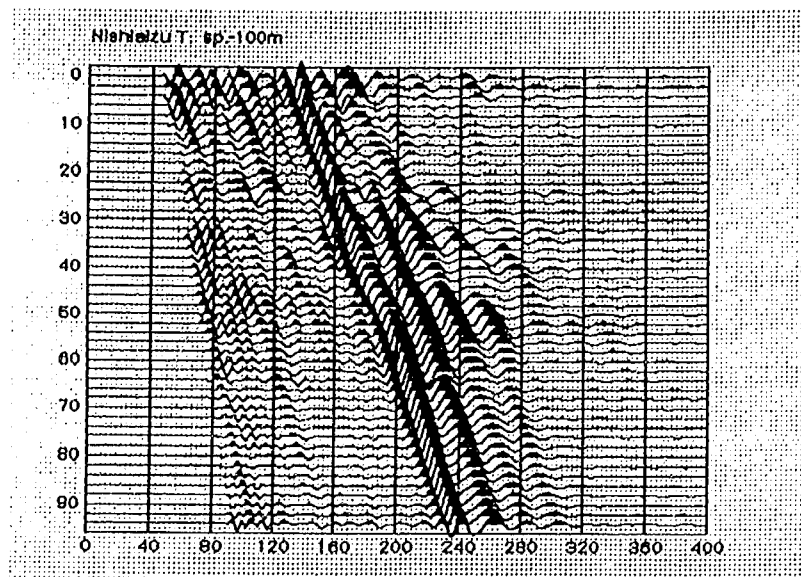
図-5.14(a)~(b)に示した外向波成分および内向波成分データの両振幅値から両振幅比を計算した結果を図-5.15に示す。

5.2.3 各波動成分の周波数帯域

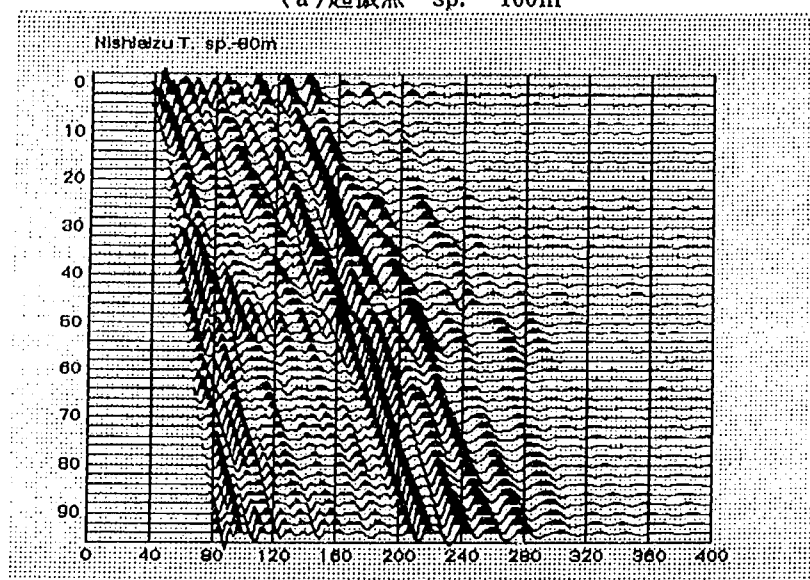
測定記録の初動部分（初動以降10msの時間範囲）および後続波強調処理後データ（図-5.12）に対して、スペクトル解析を行って各波動成分の周波数帯域を調べた。とくに初動部分の解析時間長が短いため、自己回帰過程に基づく方法を用いてパワー・スペクトルを計算した。この方法はアルゴリズム的には最大エントロピー法と同じである。

計算したパワー・スペクトルを図-5.16に示す。この図から各波動成分毎に卓越周波数を求めた。その結果は表-5.1に示したが、初動部分では70~240Hz、後続波卓越部分では40~150Hz程度が卓越している。

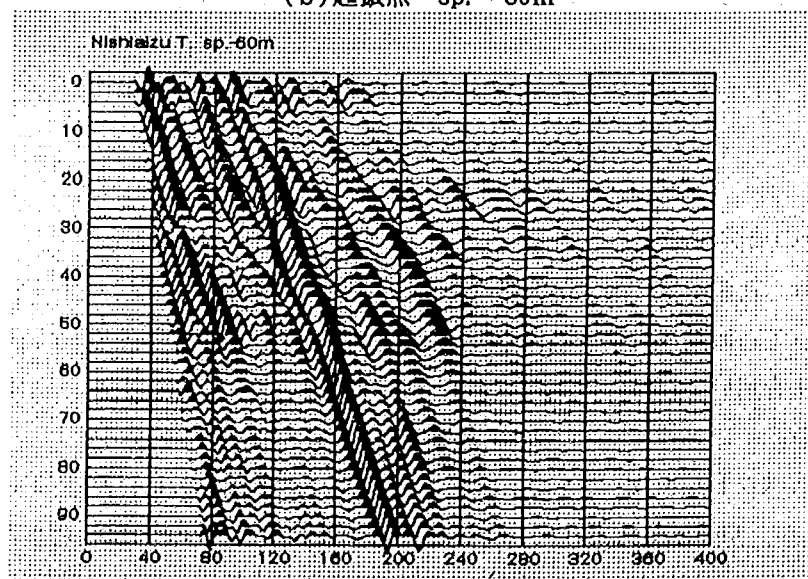
現在までの現地適用実験の解析結果から得られた弾性波速度と卓越周波数との関係を図-5.17に示す。これらの結果を比較すると、硬岩地山での初動部分の卓越周波数は最大700~900Hz程度であり、西会津トンネ



(a) 起振点 sp. -100m



(b) 起振点 sp. -80m



(c) 起振点 sp. -60m

図-5.12 後続波強調処理後データ

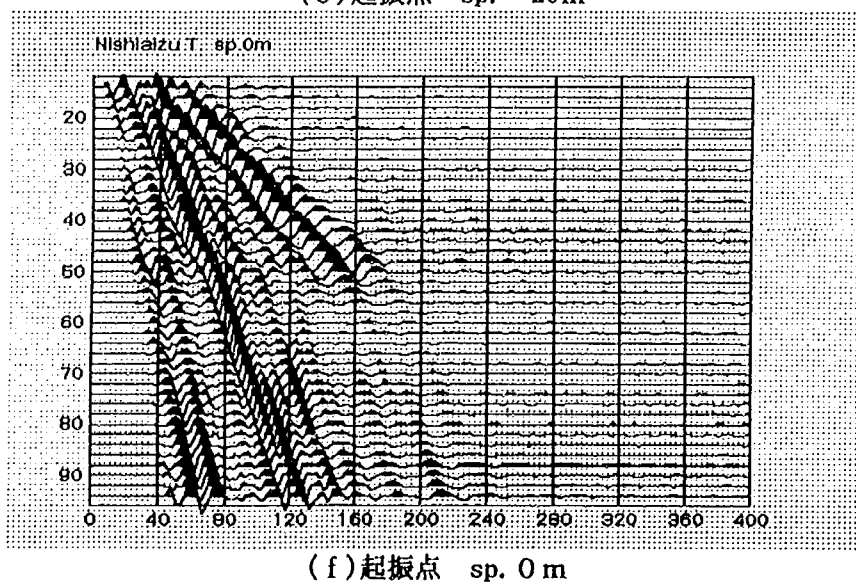
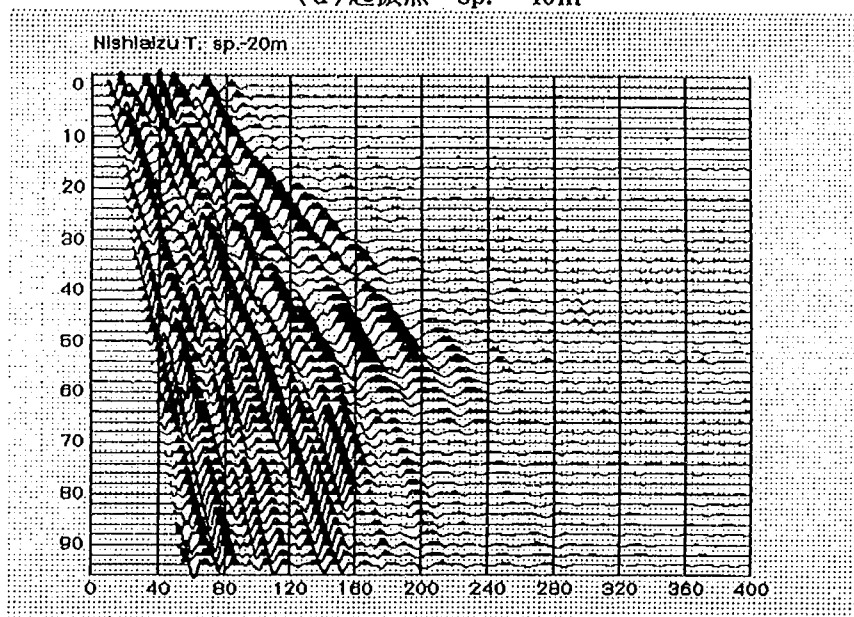
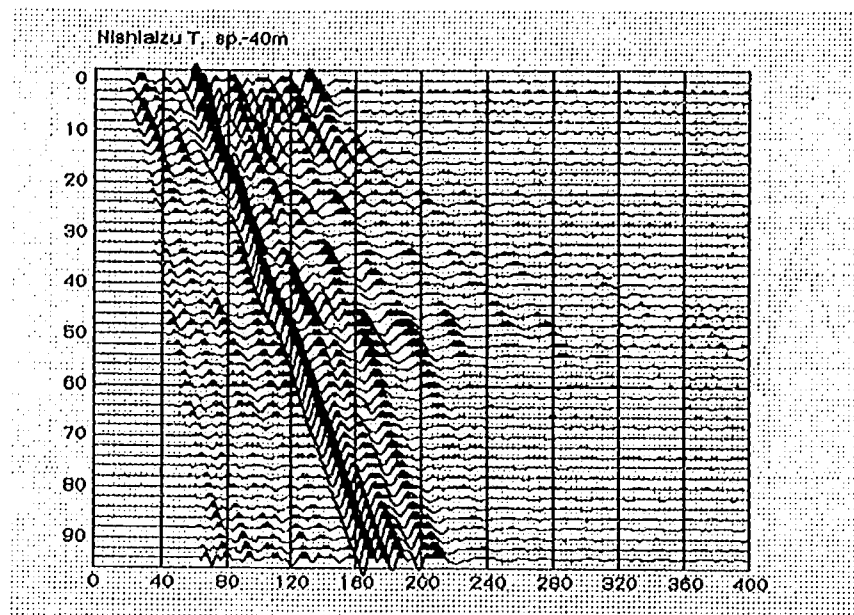
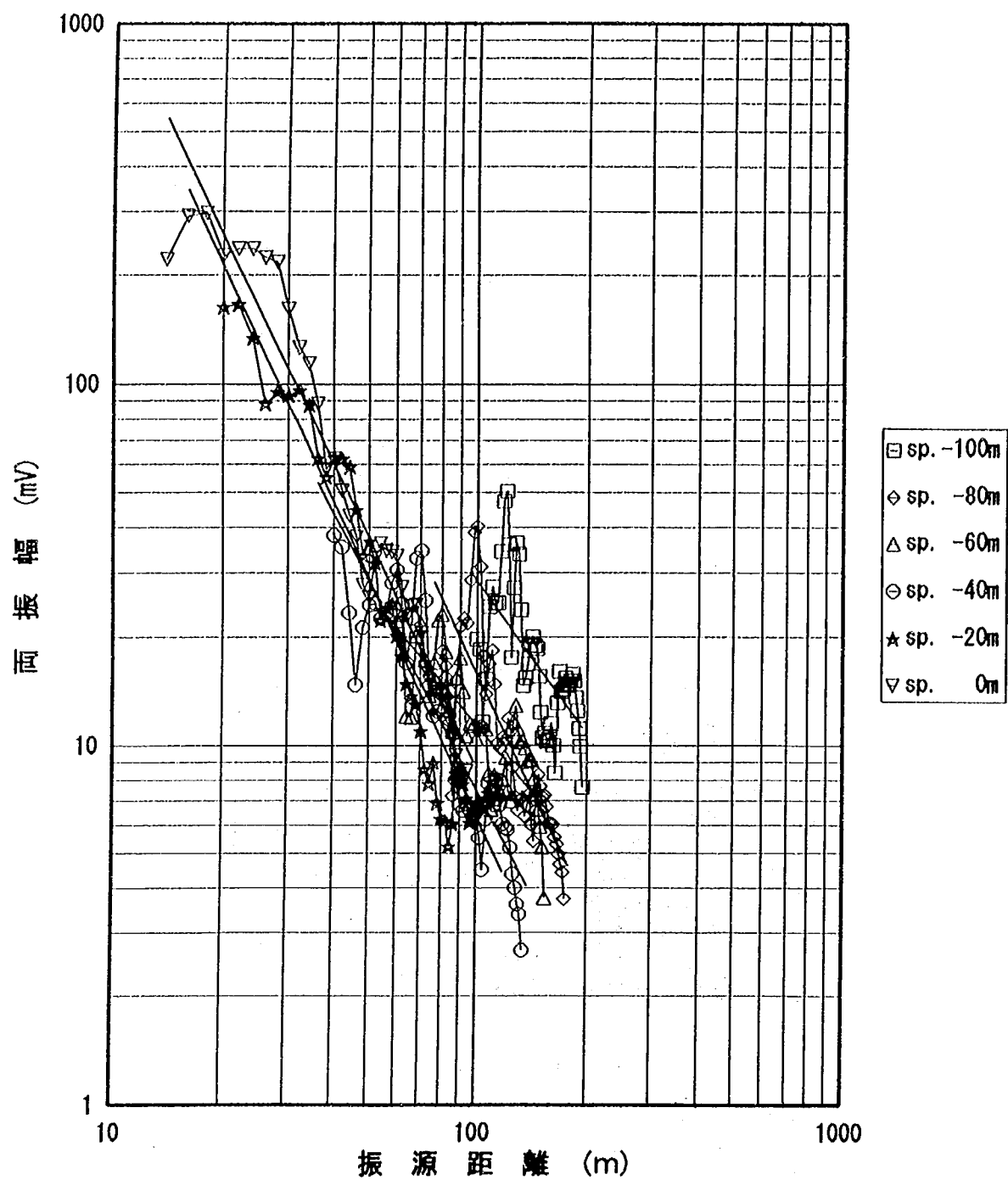
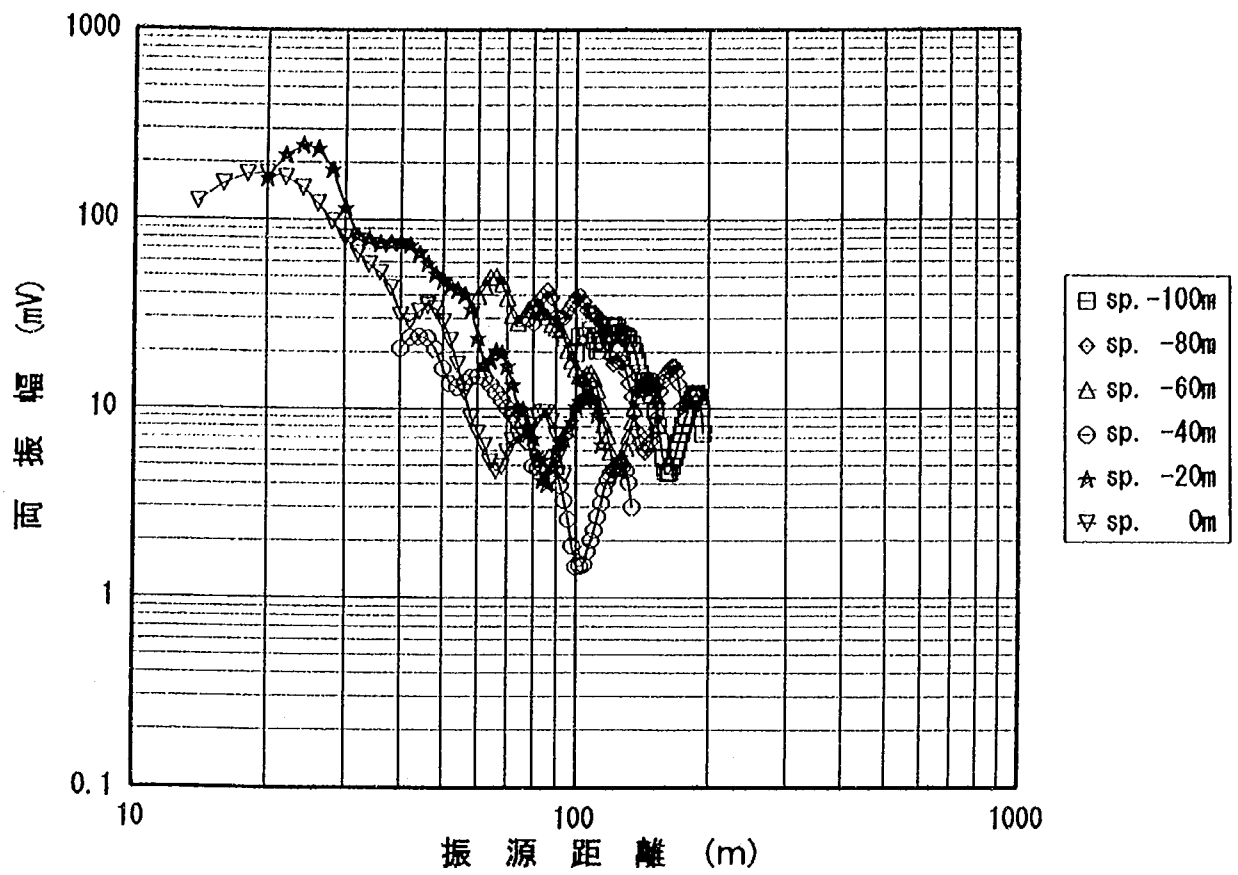


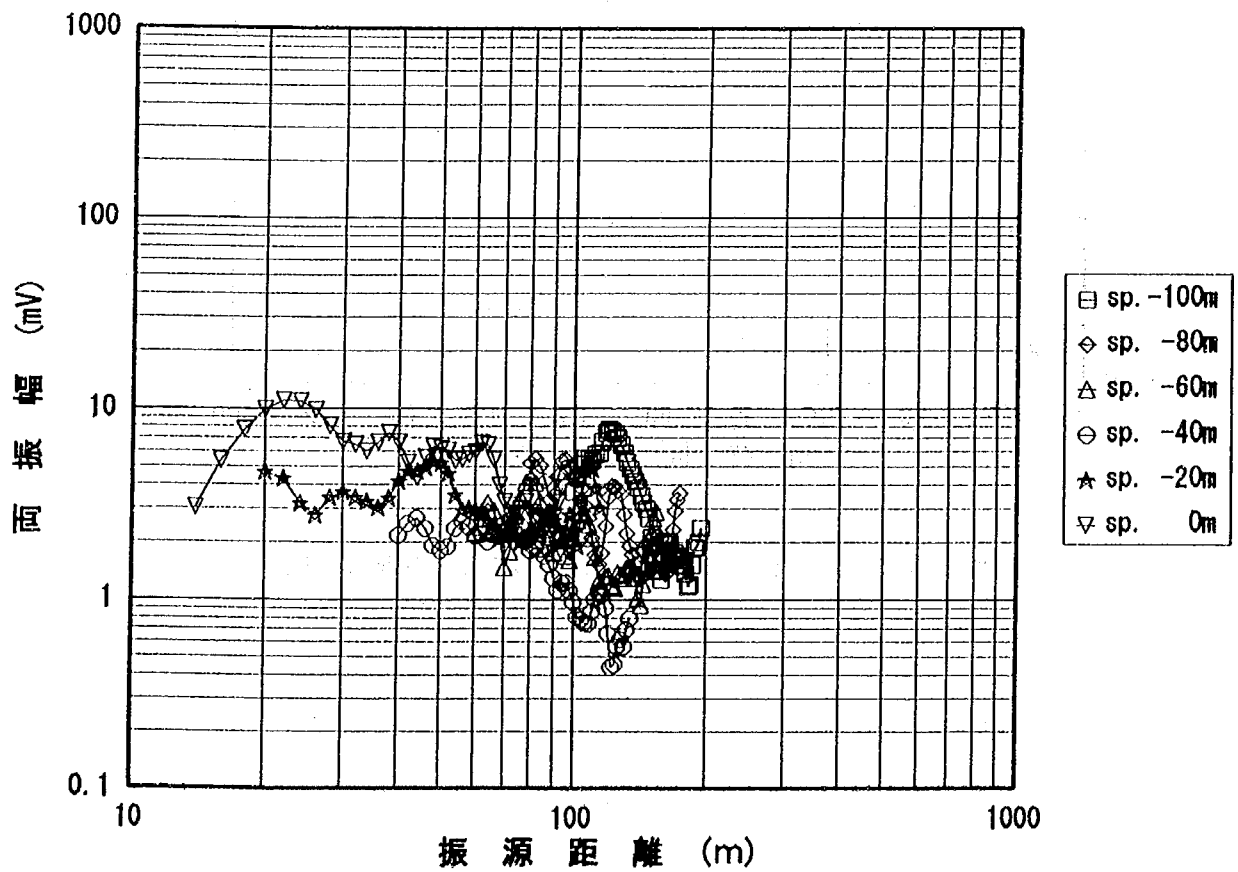
図- 5.12 後続波強調処理後データ



図一 5.13 後続波卓越部分の両振幅値と振源距離の関係



(a) 外向波成分データ



(b) 内向波成分データ

図-5.14 外向波成分および内向波成分データの面振幅値と振源距離の関係

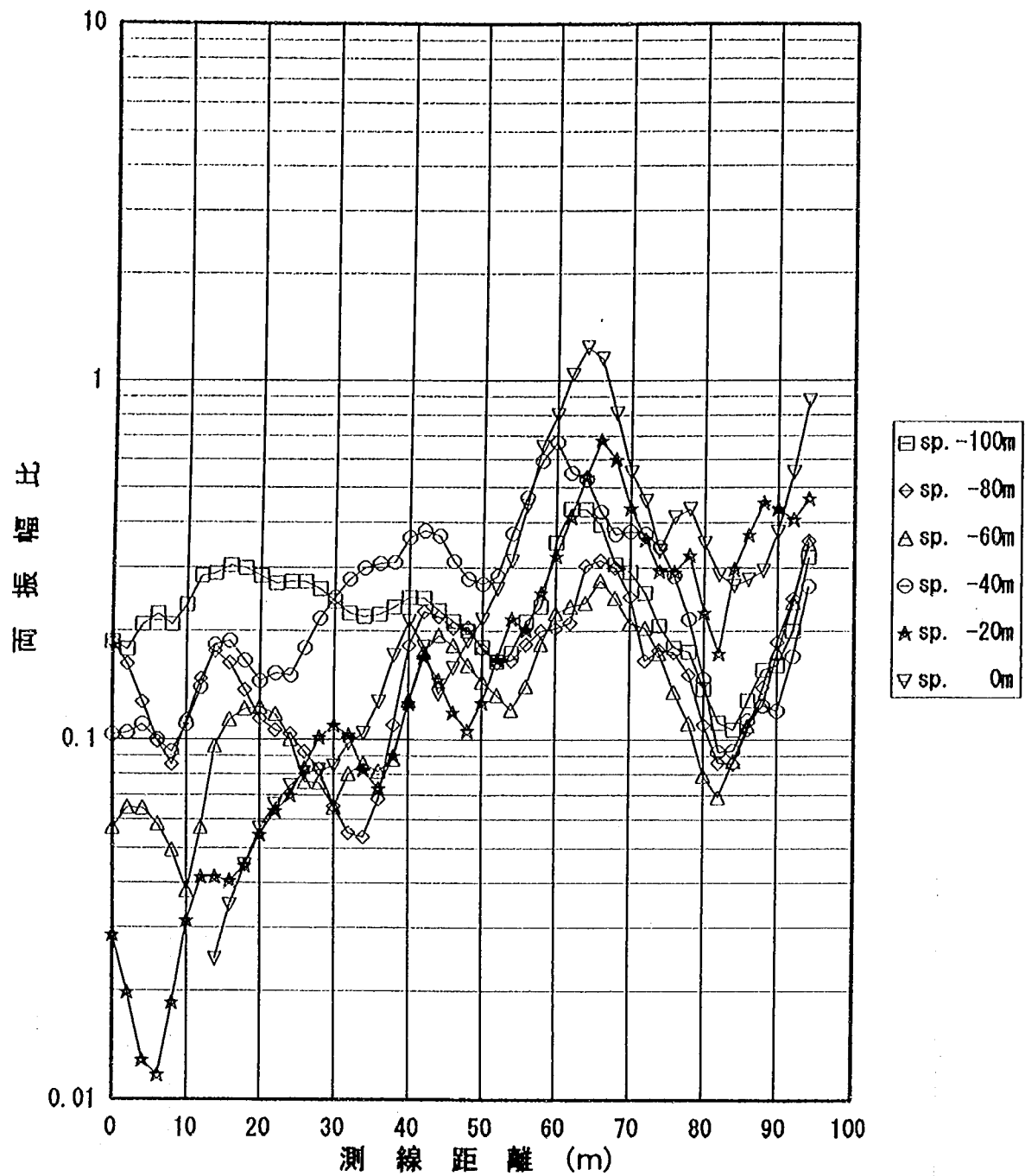
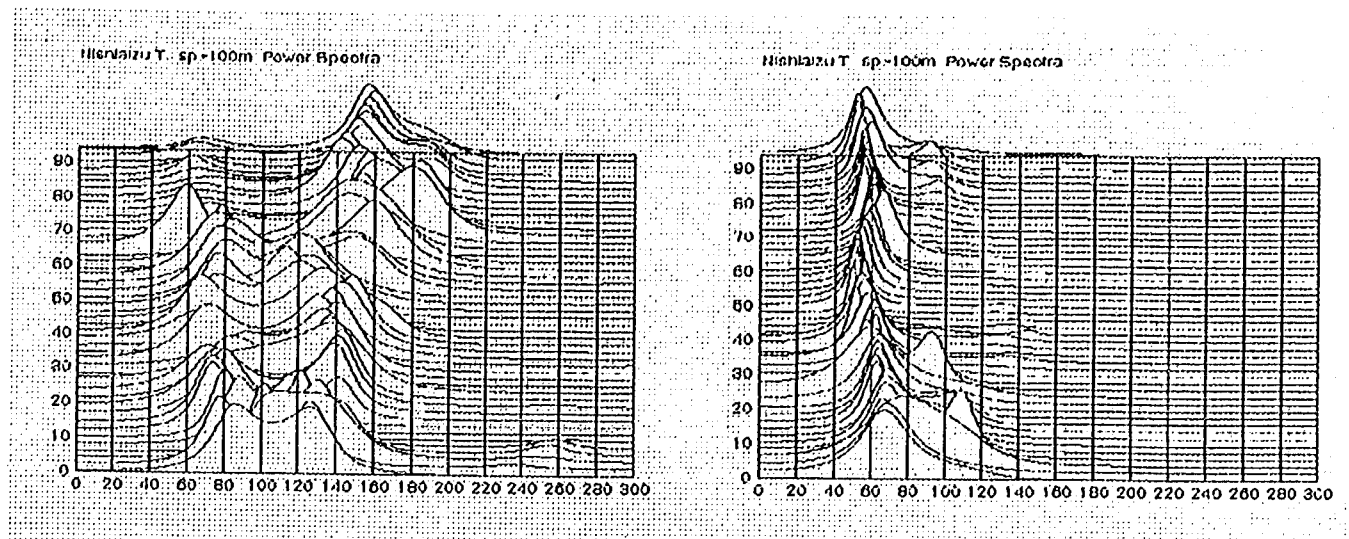
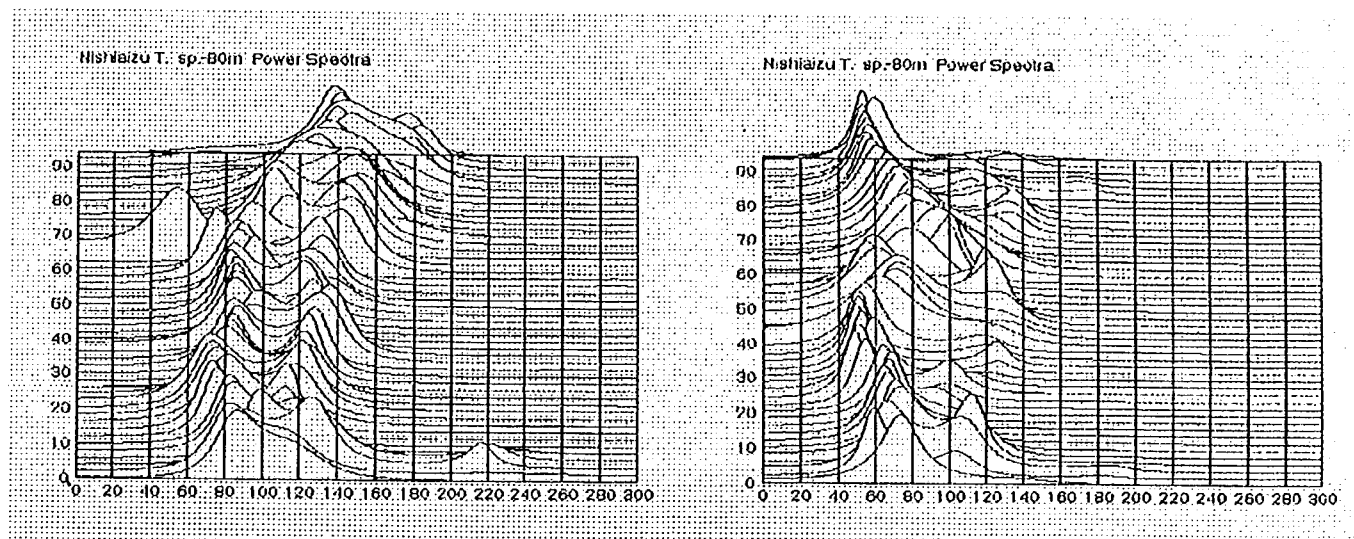


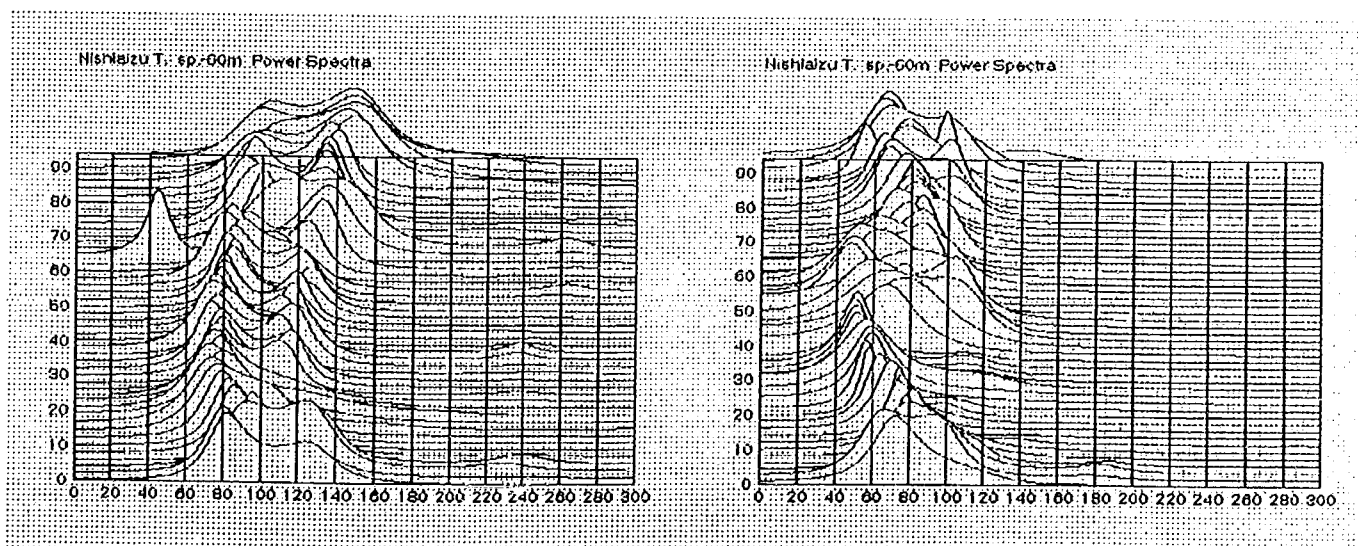
図- 5.15 外向波成分に対する内向波成分の両振幅比



(a) 起振点 sp.-100m



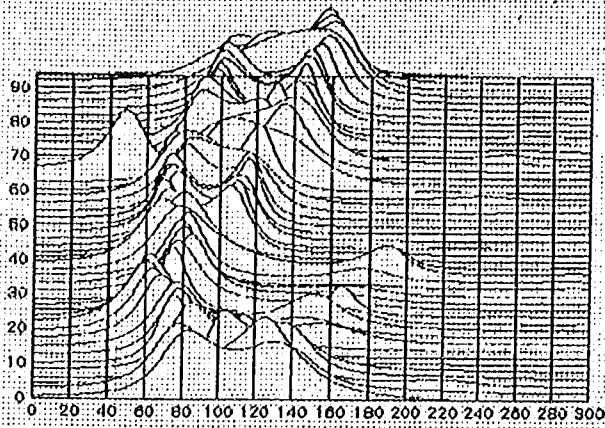
(b) 起振点 sp.-80m



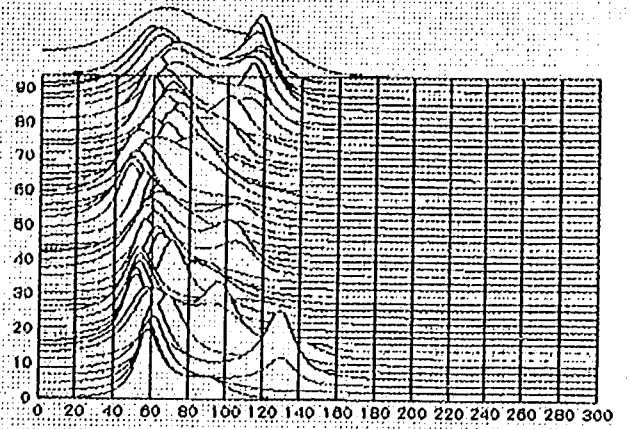
(c) 起振点 sp.-60m

図-5.16 初動部分および後続波卓越部分のパワー・スペクトル
各起振点毎の左側は初動部分、右側は後続波卓越部分のパワー・スペクトル
である。また、各図の横軸は周波数(Hz)、縦軸は測線距離(m)である。

Nishiazu T. sp.-40m Power Spectra

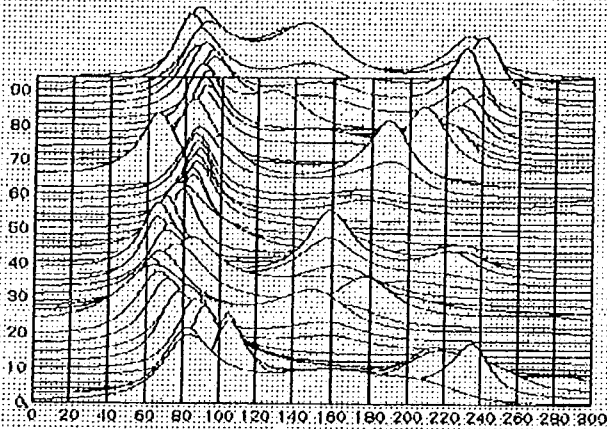


Nishiazu T. sp.-40m Power Spectra

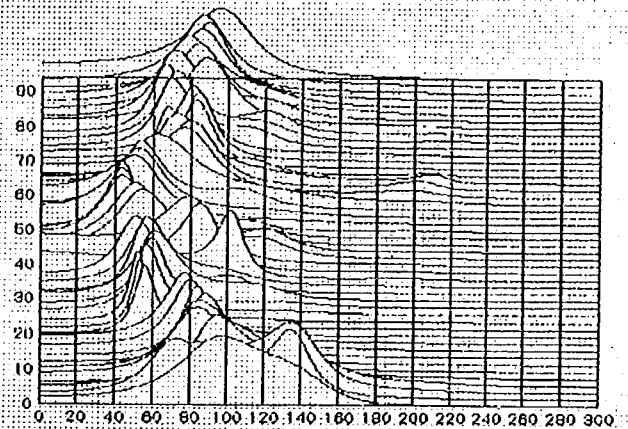


(d) 起振点 sp.-40m

Nishiazu T. sp.-20m Power Spectra

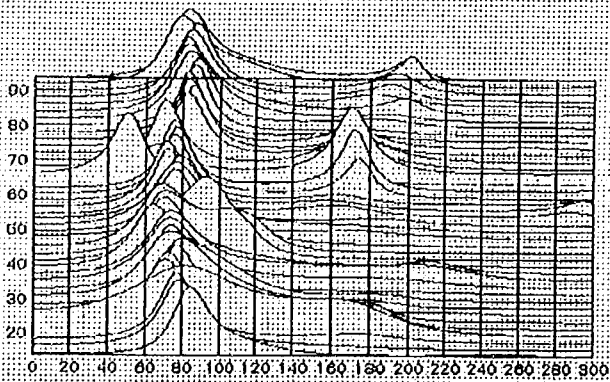


Nishiazu T. sp.-20m Power Spectra

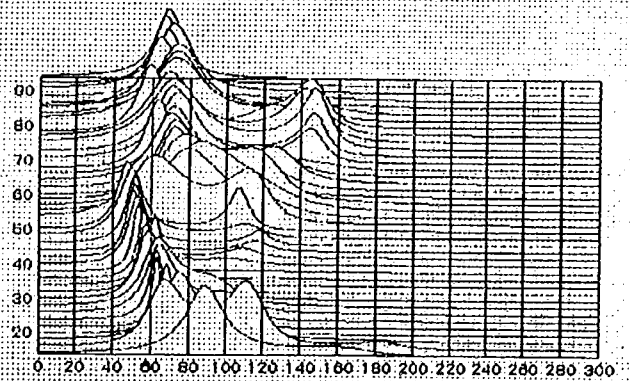


(e) 起振点 sp.-20m

Nishiazu T. sp.0m Power Spectra



Nishiazu T. sp.0m Power Spectra



(f) 起振点 sp. 0 m

図-5.16 初動部分および後続波卓越部分のパワー・スペクトル
各起振点毎の左側は初動部分、右側は後続波卓越部分のパワー・スペクトル
である。また、各図の横軸は周波数(Hz)、縦軸は測線距離(m)である。

ルに比べてかなり高い。一方、後続波卓越部分については、NATM工法により掘削されているトンネルに限れば、西会津トンネルと大きな差はない。ただし、TBM工法により掘削され、孔内用地震計を使用して受振している津久井導水路では、後続波卓越部分の卓越周波数は最大300～650Hz程度と高い値を示している。

5.2.4 速度境界面における平面P波の反射と透過

現在、トンネルHSP法のデータ処理および解析によって得られる結果は、反射強度分布を図示したHSP断面である。この断面では、反射強度の値を振幅の大きさと極性によって表示している。

一般に、反射波の振幅の大きさおよび極性は不連続面を境にした音響インピーダンス（弾性波速度と密度の積）の変化を反映している。このことを以下に考察する。

ここで、図-5.18に示すように、媒質1と2が接している平面状の速度境界面にP波が垂直に入射する場合を考える。入射P波は媒質1（密度 ρ_1 、P波速度 α_1 、S波速度 β_1 ）側から媒質2（密度 ρ_2 、P波速度 α_2 、S波速度 β_2 ）側に向かって入射するものとする。このとき、境界面から媒質1側に反射P波、媒質2側に透過P波が生じる。P波が境界面に垂直に入射する場合には、P波からS波への変換波は生じない。

反射P波と透過P波の振幅および極性は媒質1と2の密度およびP波速度（あるいはその積である音響インピーダンス）に依存する。入射P波の振幅を1とした場合、反射P波の振幅値は反射係数 r によって表わすことができ、

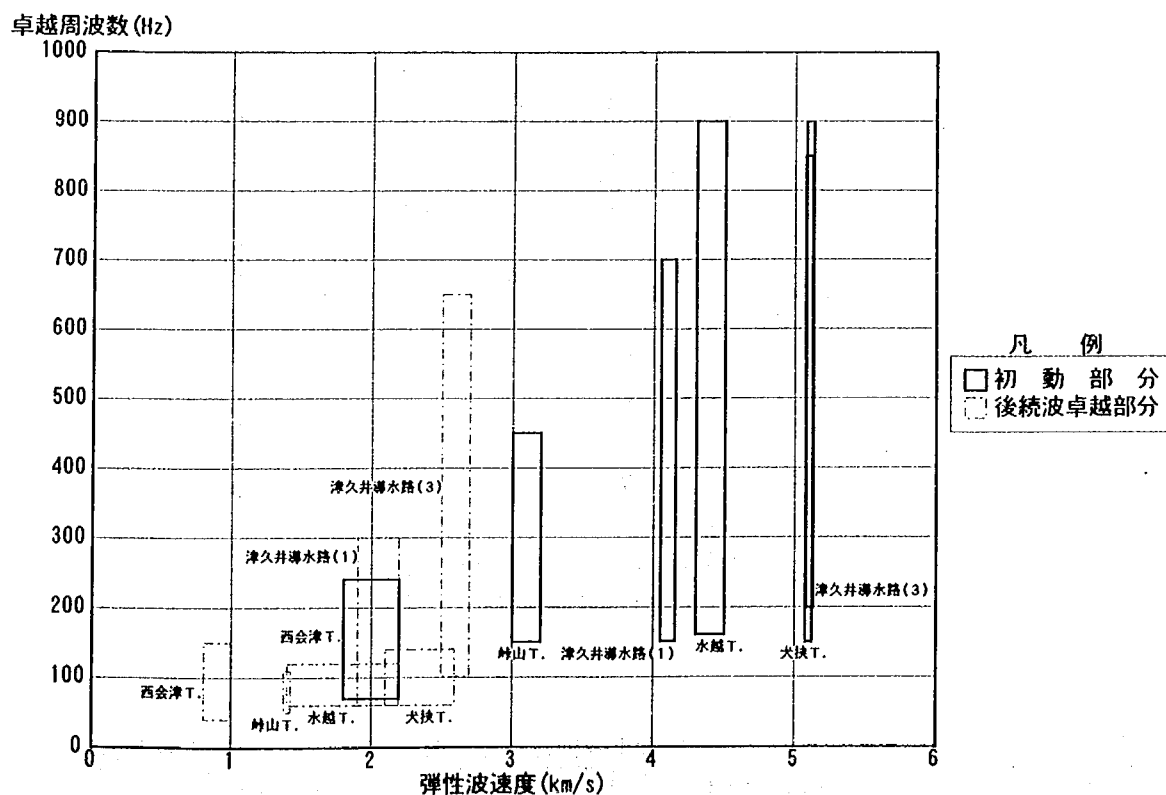


図-5.17 弾性波速度と卓越周波数の分布

$$r = \frac{\rho_2 \alpha_2 - \rho_1 \alpha_1}{\rho_2 \alpha_2 + \rho_1 \alpha_1} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

となる。ここに、

$$z_i = \rho_i \alpha_i \quad (i = 1, 2) \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

で音響インピーダンスを表わす。また、透過P波の振幅は透過係数 t によって表わすことができ、

$$t = 1 - r = \frac{2z_1}{z_2 + z_1} \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

となる。

式(5.8)より、透過係数 t は z_1 、 z_2 の値の大小に関係なく、常に負になることはないから透過P波の極性は入射P波と同じになる。一方、反射P波では z_1 、 z_2 の値の大小関係により振幅の大きさとともに極性も変化する。この様子を表-5.2に示す。

HSP断面の解釈にあたっては、岩盤の硬軟を評価することが重要となる。この岩盤の硬軟は、弾性波動の面から見た場合

硬質＝音響インピーダンス値大

軟質＝音響インピーダンス値小

と仮定することによって評価することが可能となる。

P波が軟質から硬質に変わる境界面に入射した場合、そこから生じる反射P波の極性は入射波と同じになる（反射係数が+）。一方、硬質から軟質に変わる境界面にP波が入射した場合、そこから生じる反射

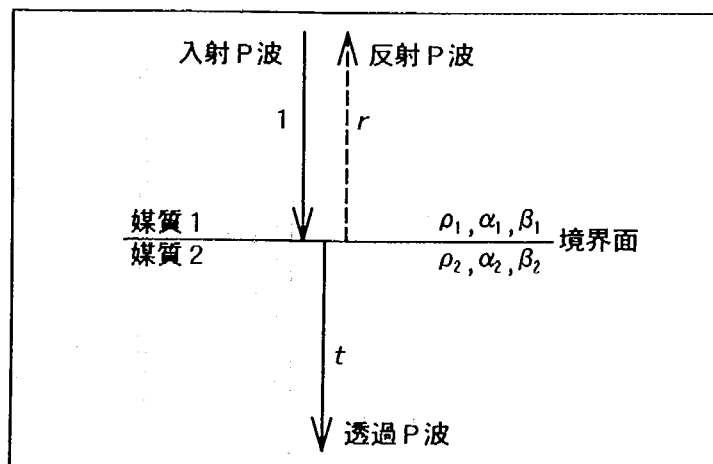


図-5.18 速度境界面における波動の反射と透過
(垂直入射の場合)

表-5.2 媒質の音響インピーダンスの大小関係による反射係数の変化（垂直入射の場合）

音響インピーダンス	反射係数値	振幅と極性
$z_1 < z_2$	$0 < r < 1, 0 < r$	反射波の振幅値は入射波より小さくなるが、極性は変わらない。
$z_1 > z_2$	$0 < r < 1, r < 0$	反射波の振幅値は入射波より小さくなるとともに、極性が逆転する。

P波の極性は入射波と逆になる（反射係数が－）。したがって、直接P波の極性を見て、それと同じ極性の反射P波であれば軟質→硬質の境界面からのものであり、逆の極性であれば硬質→軟質の境界面からのものであるとみなすことができる。

上記では、入射波と反射波の極性から境界面での変化が〔硬質→軟質〕か、あるいは〔軟質→硬質〕かを評価することができることを述べた。また、入射波に対する反射波の振幅の大きさは、境界面での音響インピーダンスの変化に関係していることを示した。ただし上記の議論では、入射P波は境界面に垂直に入射するものと仮定した。しかし、一般の場合には、入射波が境界面に垂直に入射するという仮定は成り立たない。そこで、入射P波が境界面に対して斜めに入射する場合を考え、そのとき生じる反射波の性質について考察する。

ここで、図-5.19に示すように、媒質1と2が接している平面状の速度境界面にP波がある入射角 θ で入射する場合を考える。入射P波は媒質1側から媒質2側に向かって入射するものとする。このとき、垂直入射の場合と同様に、境界面から媒質1側に反射P波、媒質2側に透過P波が生じる。さらに、垂直入射の場合とは異なり、斜め入射の場合には境界面から媒質1側に反射S波、媒質2側に透過S波が生じる。

入射P波に対する反射P波の振幅値を、入射角 θ の関数として反射係数 $r_{pp}(\theta)$ によって表わす。4つのモデル（① $\alpha_1:\alpha_2=2.0:2.4$ 、② $\alpha_1:\alpha_2=2.0:2.2$ 、③ $\alpha_1:\alpha_2=2.0:1.8$ 、④ $\alpha_1:\alpha_2=2.0:1.6$ とし、P波速度とS波速度の比を $\alpha_i/\beta_i=\sqrt{3}$ ($i=1,2$)、密度値はすべて 2.0 g/cm^3 とする）を設定して、入射角 θ が $0\sim90^\circ$ の範囲で変化したときの反射係数 $r_{pp}(\theta)$ の値を計算した結果を図-5.20(a)に示す。また、同図(b)には入射角 0° のときの反射係数に対する比 $r_{pp}(\theta)/r_{pp}(0)$ を計算した結果を示す。

ここで使用したモデルでは、両媒質の弾性波速度比（ α_2/α_1 および β_2/β_1 ）を $0.8\sim1.2$ の範囲とし、またP波速度とS波速度の比および密度値を一定としたが、これらのモデルに対する計算結果だけからは以下のことが結論付けられる。

①斜め入射の場合でも反射係数 $r_{pp}(\theta)$ の極性は垂直入射の場合と変わらない。

②入射角 θ が $0\sim20^\circ$ の範囲では反射係数 $r_{pp}(\theta)$ の値は垂直入射の場合の $0.8\sim1.0$ 倍程度である。

したがって、入射角 θ があまり大きくない $0\sim20^\circ$ 程度の範囲内では、反射係数 $r_{pp}(\theta)$ の値を垂直入射の場合の反射係数 $r_{pp}(0)$ の値で近似しても、あまり大きな誤差を与えない。

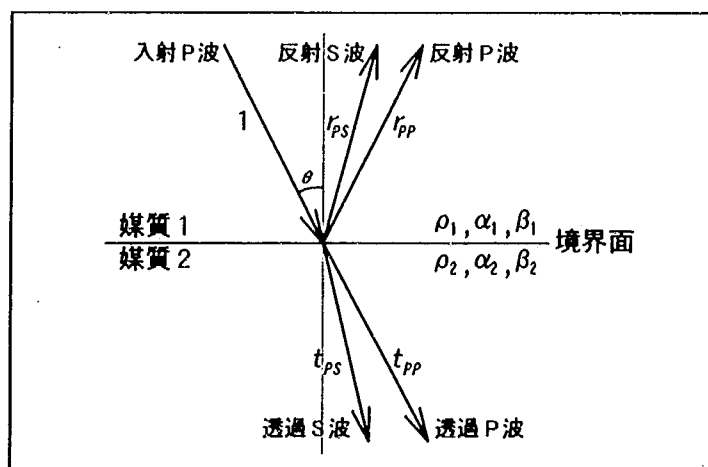
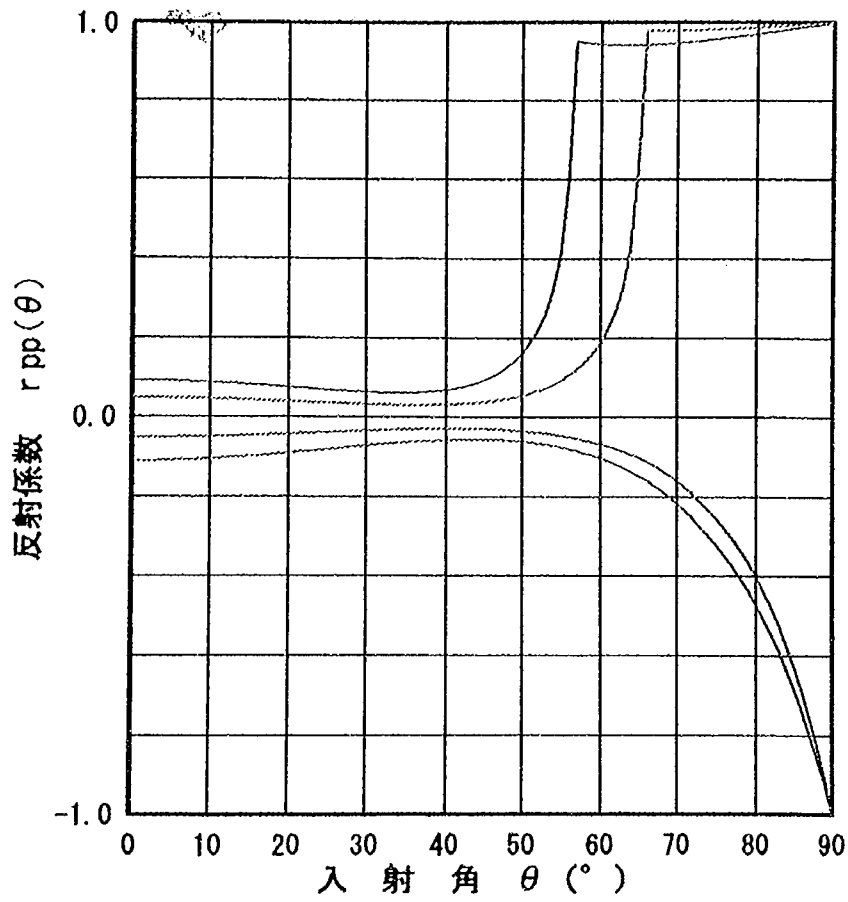
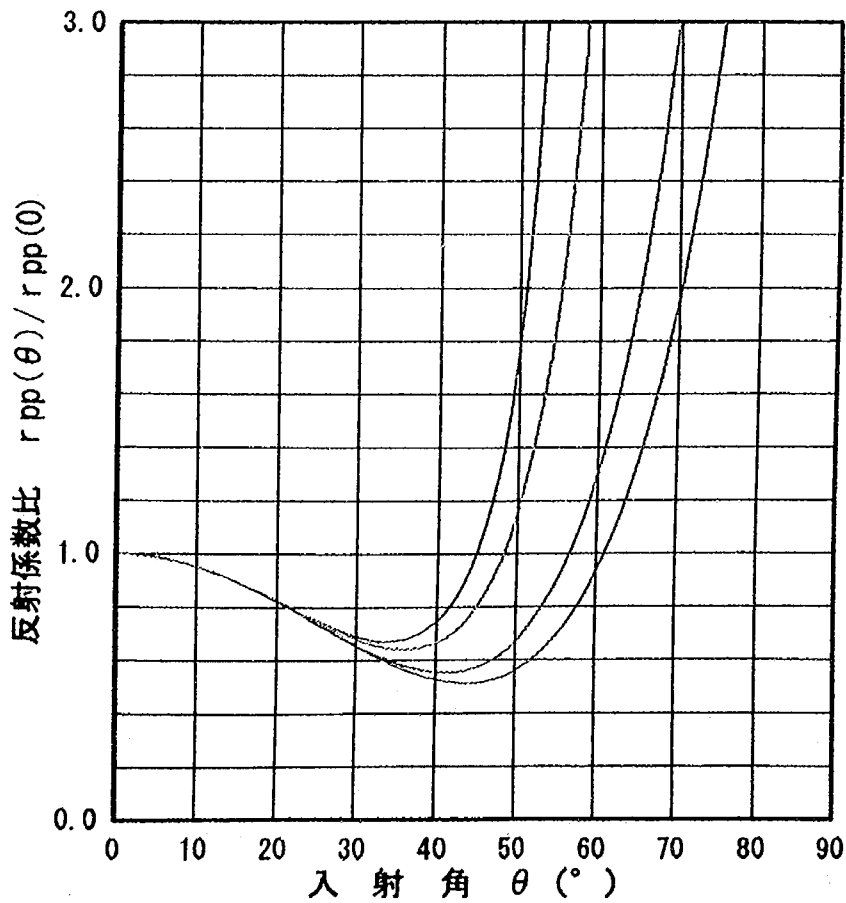


図-5.19 速度境界面における波動の反射と透過
(斜めにP波が入射した場合)



(a) 反射係数 (P-P 反射係数)



(b) 入射角 0° の反射係数に対する反射係数の比

図- 5.20 速度境界面に P 波が入射したときの反射 P 波の反射係数

5.2.5 反射面と反射波形の対比について

- ・反射面と地質状況の対比をする場合、1本ごとの反射面を対比させることの是非について。
- ・いくつかの反射面を合わせて”ゾーン”として扱い、対比させることはどう考えるか。
- ・利用する側としては、1本ごとの特定を望んでいるようだが、精度や解釈の点からそこまでは難しいと考えるが、理論的に1本ごとの反射面の持つ意味を特定できるのか。

振源から発生して岩盤内を伝播している波動は、単一のインパルスではなくある時間幅をもつ波形である。そのような波動が反射面に入射して生じた反射波の波形も、入射波の波形に応じて変化する。例えば、簡単に入射波を1波長の正弦波とした場合には、反射波も正弦波的な波形になる。

実際には、振源から発生して岩盤内を伝播している波形はもっと複雑であるので、一概にHSP断面において+あるいは-の振幅が大きい部分を1つ1つ反射面とみなすことには注意を要する。岩盤内をどのような波形で波動が伝播しているかは、波動場分離によって抽出された外向波成分の直接波部分からある程度推定できると考えられる。

6. ま と め

6.1 解析結果のまとめ

西会津トンネルでの現地適用実験では、トンネル切羽前方の地山状況を把握することを目的としたVSPモードによる探査とともに、緩い傾斜の地層境界の位置・形状を求める目的で反射モードによる探査も実施した。これらの解析結果と探査区間の切羽観察結果および施工実績との対比により、以下のことが判明した。

- ①強い反射イベントが見られた区間(切羽前方20~60m区間)は、中硬岩地山的な面付きで岩質的にはやや硬いが、1~3m程度の間隔で大きな亀裂が発達した区間である。
- ②切羽前方100~110m区間には低角度地層境界が出現し、この下位側のパッチ状の粘土レンズを含む軟質緑色凝灰岩(岩質劣化部)が、今回の探査目標であった第2低速度帯に対応するものと考えられる。VSPモード、反射モードともに位置的な誤差を多少含むものの、ほぼその位置にイベントを見出すことができる。しかし、この区間に見られるイベントの反射強度は強いものではない。
- ③切羽前方60~100mおよび110m以奥の区間には反射面があまり見られない。これらの区間は全体的に軟質で、亀裂等の不連続面が少ない塊状の地山であった。

上記の事項より、中硬岩的な地山内に発達した亀裂からは強い反射波が生じることがわかる。一方、軟質で不連続面が少ない地山や不連続面があっても漸移的な変化を呈する地山からは、強い反射面は生じにくいことがわかる。このことは、音響インピーダンスの変化が大きい境界面から大きな振幅を持つ反射波が発生するという理論と調和的である。

今回の現地適用実験は軟岩での適用事例であり、測線区間の弾性波速度値は1.8~2.2km/s、測定記録の初動付近の卓越周波数は70~200Hz程度である。この結果、岩盤内を伝播するP波の波長は10m以上あるものと考えられる。強い反射イベントが認められた区間の亀裂状況を鑑みると、伝播速度の波長の1/10以下のスケールの変化でも反射波が生じることが期待できる。

以上のように、地質観察結果による岩質の特徴と解析結果の反射面の状態との間に概ね良い相関が得られ、軟岩地山でトンネルHSP法が適用可能であることを確認することができた。

6.2 問題点と課題

- ①解析結果を施工へ反映させていくためには、反射強度値の(相対的ではない)絶対的な評価が必要である。そのための試みとして、今回は各波動成分の振幅変化について考察を加えた。波動の振幅変化は複雑であるが、今後適切な補正方法を確立し、絶対的な反射強度値の評価を行っていくことが重要である。
- ②単に反射強度の強さのみから地山状況をすべて把握することは困難である。すなわち、音響インピーダンスの変化に関しては判明しても、ある区間の平均的な地山の硬軟といったものは完全には把握できていない。振幅以外の波動場に含まれている情報(例えば、各波動成分の周波数帯域、波形変化)を利用することによって、これらを評価することが可能か検討する必要がある。

6.3 今後の取り組み

トンネルの安全施工のため、切羽前方の地質評価に対する要請は強い。トンネルHSP法は、準備に半日、計測に半日と切羽における現場作業時間が短く、通常の施工サイクルに組み込める利点がある。また、探査範囲が100～150mと広範であり有力な切羽前方探査法となる可能性を持っている。そのためには、今回実施したような詳細な地質観察を伴う現地適用例を増して、予測精度の向上と解析結果の解釈、評価の充実を図り、施工面への反映を確かなものにしていく努力が必要である。

謝 辞：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、日本道路公団仙台建設局会津工事事務所、住友建設・地崎工業共同企業体西会津トンネル作業所の関係各位より多大なるご協力を頂いた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 鈴木敬治ほか(1968)：福島県地質調査報告「野沢盆地の地質」，福島県
- 2) 金属鉱業事業団(1974)：昭和48年度広域調査報告書「東会津地域」，通産省資源エネルギー庁
- 3) 地すべり学会東北支部(1992)：東北地方の地すべり，地すべり地形，地すべり学会東北支部
- 4) 日本の地質「東北地方」編集委員会(1989)：日本の地質2「東北地方」，共立出版