

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(4)

トンネルHSP計測・解析マニュアル(案)
—施工中のトンネル切羽前方地山の調査と評価・活用—

1997年1月

建設省土木研究所
環境部地質研究室

日本物理探鑛 株式会社
株式会社 熊谷組
株式会社 大林組
株式会社 鴻池組
西松建設 株式会社

大日本コンサルタント 株式会社
住友建設 株式会社
鹿島建設 株式会社
佐藤工業 株式会社
復建調査設計 株式会社
サンコーコンサルタント 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 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(4)

トンネルHSP計測・解析マニュアル(案) —施工中のトンネル切羽前方地山の調査と評価・活用—

建設省土木研究所 環境部 地質研究室

日本物理探鉱 株式会社 企画本部開発二部

大日本コンサルタント 株式会社 地質防災課

株式会社 熊谷組 土木本部土木技術部 地質グループ

住友建設 株式会社 土木本部 土木部

株式会社 大林組 土木技術本部技術第二部

鹿島建設 株式会社 土木技術本部技術部

株式会社 鴻池組 技術研究所伝法研究室

佐藤工業 株式会社 技術本部 土木技術部

西松建設 株式会社 技術研究所 環境研究課

復建調査設計 株式会社 横浜事務所 地質調査課

サンコーコンサルタント 株式会社 計測技術部

前室長	中村康夫*
主任研究員	稲崎富士
研究員	倉橋稔幸
部長	渡辺文雄
主任技師	河村茂樹
課長	千田敬二
副部長	三谷哲
副部長	飯酒孟久夫
部長	盛谷智之
次長	桑原秀樹
課長	金田勉
課長	大野清
課長	山本俊夫
次長	山本松生
課長	戸松征夫
課長	原口強
課長	林久夫

*現 日本道路公団静岡建設局 調査役

要 旨

建設省土木研究所は、1993年度より民間企業11社とともに「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」に関する共同研究を進めてきた。

本研究は、土木研究所が提唱した新しい切羽前方調査法であるトンネルHSP法の実用化を加速度進し、技術の確立をはかるために、現地計測技術・解析技術を検討しその基準化をはかること、施工中のトンネルで試験適用し、掘削実績と比較して予測の精度・弱層の検出能を検証することを主な目的とした。

本報告書は、トンネルHSP法の今後の活用と良好な予測・解析結果を得ることができるよう、同法の計測・解析技術の詳細をマニュアル(案)として詳述したものである。

キーワード：トンネルHSP、切羽前方、弾性波、亀裂評価、施工中調査、施工への反映

序 文

建設省では、公共事業に関わる技術開発を効率的に進めることができるよう、官民が共同して研究開発に取り組む共同研究制度を整備し民間企業との共同研究を積極的に実施してきている。土木研究所地質研究室においても、その一環として93年度より3年計画で、「弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する研究」という課題についての共同研究を開始した。

本研究は、弾性波を用いて切羽前方領域をイメージングし、トンネル掘削に影響する断層破碎帯や亀裂集中部などの地質急変部を事前に検出する手法を確立することで、施工の安全性を確保し、さらに経済性向上に資することを目的としたものである。

共同研究は、建設省土木研究所環境部長を研究代表者とし、土木研究所地質研究室と民間企業11社（日本物理探鉱（株）、大日本コンサルタント（株）、（株）熊谷組、住友建設（株）、（株）大林組、鹿島建設（株）、（株）鴻池組、佐藤工業（株）、西松建設（株）、復建調査設計（株）、サンコーコンサルタント（株））で組織された。

本研究では、土木研究所地質研究室が提唱した新しい切羽前方探査技術である「トンネルHSP」の実用化に向けて、主として以下の課題について検討した。

- （1）現位置計測手法および計測システム
- （2）データ処理・解析手法および解析システム
- （3）探査結果の地質工学的評価および施工反映
- （4）探査手法の基準化

本報告書は、直接的には上記（4）の探査手法の基準化に対するものであるが、基準化にあたっては上述の（1）～（3）の項目についての研究成果が網羅されているので、共同研究全体の総括的な報告としての性格を合わせ持っている。したがって本報告書を、単なる実務的な手順を記述したマニュアルとしてでなくトンネルHSP法探査技術の集大成として、その考え方、特に施工中調査と施工管理の根幹的課題に言及した基本的な技術報告として参照していただければ幸いである。

なお本共同研究に関わる適用実験および試験適用を、雁坂トンネル、犬狹トンネル、安房トンネル、朝来トンネル、水越トンネル、太郎山トンネル、森トンネル、西会津トンネル、国見トンネル、峠山トンネル、五里ヶ峰トンネル、市之瀬トンネル、津久井導水路トンネル、道志導水路トンネル、妙見トンネルの現場をお借りして実施させていただいた。建設省・道路公団をはじめとする関係工事事務所および建設企業体の関係各位には実験にあたって便宜をはかっていただいた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

建設省土木研究所
地質研究室長
中村 康夫

共同研究者一覧

研究者氏名	所 属	役 職 名
竹林 征三 [*] 中村 康夫 ^{**} 稲崎 富士 倉橋 稔幸	建設省土木研究所	環境部 地質研究室 室長 " " 主任研究員 " " 研究員
渡辺 文雄 河村 茂樹 吉田 武志	日本物理探鑛 (株)	企画本部開発二部 部長 " 主任技師 " "
新谷 鏡三 千田 敬二 田中 丈博	大日本コンサルタント (株)	常勤監査役 地質防災課 課長 " 技師
三谷 哲 飯酒 孟久夫 野坂 徹	(株) 熊谷組	土木本部土木技術部 地質グループ 副部長 " " 副部長 " " 係長
盛谷 智之 桑原 秀樹 佐々木 健二	住友建設 (株)	土木本部土木部 部長 " 次長 " 課長
金田 勉 桑原 徹 宇山 尚仁	(株) 大林組	土木技術本部技術第二部 課長 技術研究所土木第一研究室 主任研究員 土木技術本部技術第二部 主任技師
土橋 勇次 大野 清 日比谷 啓介 広野 進	鹿島建設 (株)	土木技術本部工務部 部長 " 技術部 課長 技術研究所 室長 " 主幹研究員
中澤 重一 山本 俊夫 小倉 哲也 高馬 崇	(株) 鴻池組	技術研究所 副所長 " 伝法研究室 課長 " " 研究員 " " 研究員
山本 松生 西野 治彦 中村 創 鈴木 仁志 稗田 肇	佐藤工業 (株)	技術本部土木技術部 次長 " " 主任 " " " 横浜支店宮ヶ瀬作業所 主任 " " 主任
戸松 征夫 稲葉 力 石山 宏二 明石 健 平野 享	西松建設 (株)	技術研究所 環境研究課 課長 " 土木技術課 課長 " " 主任 " 地質研究課 主任 " 土木技術課 技師
福田 直三 原口 強 河野 吉次郎 田中 善朗 仁科 利晴	復建調査設計 (株)	技術研究所 所長 横浜事務所 地質調査課 課長 交通技術部道路技術一課 課長 " " 二課 課長 地質調査部地質調査課 チーフエンジニア
土屋 彰義 林 久夫 石井 英二 橋本 励	サンコーコンサルタント (株)	調査技術部地質部 部長代理 計測技術部物探部 課長 " " 課長 " " 技師

* 現 建設省土木研究所 地質官

** 現 日本道路公団 静岡建設局 調査役

ま え が き

岩盤崩落・突発湧水などトンネル掘削時に問題となるトラブルの大部分は、無支保状態である切羽付近で発生している。切羽前方部の地山状況、特に施工上問題となる断層・破碎帯等の弱層の分布を事前に把握できれば切羽部での工事の安全性を確保できるとともに、切羽対策を的確に実施することにより経済的施工が可能となる。従来のトンネル地山評価は、調査段階に実施される地表踏査・弾性波探査によっていたが、地質構造の複雑な我が国においては事前調査段階で地山条件を詳細に把握することは極めて困難であり、施工段階でも実施可能な効果的な切羽前方調査・評価手法の開発が望まれてきた。トンネルHSPは、施工中のトンネル坑内で実施する新しい調査手法であり、弾性波を用いて切羽前方地山の内部構造を画像化し、亀裂等の掘削への影響度を評価する手法である。建設省土木研究所では、平成5年度より民間11社とトンネルHSP共同研究会を組織し、同手法の実用化に向けた研究を進めてきた。

施工中のトンネルで切羽前方領域の地山状況を調査することのニーズは大きく、これまでも多くの「切羽前方調査法」が提案されてきたが、実用化されているものは極めて少ない。調査法の開発主体が施工会社である場合がほとんどであるため、他会社が利用せず普及の妨げとなったこと、また調査技術開発に必要とされる物理探査・地質工学に関わる専門的技術者が施工会社にはほとんどいないため、計測・解析技術、評価技術に問題がある場合が多いことがその原因として考えられた。しかし、前方調査結果を施工へ効果的に結びつけるには施工会社の参画が必要不可欠である。そこで、本共同研究を組織するにあたっては施工会社、設計会社、地質調査会社の3者に働きかけ、各々の専門的技術分野での貢献を期待するとともに、関連する技術課題の検討・当該技術の普及を促進できるよう横断的な共同研究体制を構成した。

具体的には共同研究会内に、地質調査会社を主体としてHSP法の探査・解析技術の開発・基準化を担当する「探査技術部会」、設計会社を中心に3者が加わって地山の亀裂評価に関わる課題について検討する

「切羽地質WG」、施工会社を主な構成メンバーとして施工中調査とその結果の活用法を検討する「施工管理・反映WG」、現地トンネルへHSPを適用し、掘削実績と比較することで同法の予測精度・適用性を検討する「現地適用グループ」を組織した。また共同研究会の日常的な運営・調整にあたる「幹事会」を組織するとともに、全体的な研究計画の承認と研究成果を確認するための「全体会」を開催した。約2年半の共同研究期間中に、5回の全体会と、12回の幹事会を開いている。また各部会・WGは適宜開催した。期間中のトンネルHSP法の現地適用は、15トンネル29切羽に達した。共同研究に関連して発表された報告・論文は23編に達した。この中には国際会議で発表されたものも3編含まれている。

トンネルHSP法における特徴的事項は、前述したように、単なる施工中調査法にとどまらず調査結果の解釈・地山評価・施工過程への反映までを統合した複合技術たることを目標としていることである。すなわちトンネルHSP法は、調査会社や施工会社が単独で実施・解析する従来の調査技術と異なり、調査・設計・施工会社および発注者が連携して解析・評価・活用にあたることを前提としている。

施工中調査は、その結果に基づいて事前調査・当初設計を見直し、より地山条件に適合した施工法を提案する根拠となることから、事前調査段階以上に高度な地山評価能力と設計変更・実施施工に対する中立的・

客観的立場が必要とされる。従来、トンネル施工にあたっては事前調査・設計・施工をそれぞれ独立して遂行する「分離発注」の形態が、業務の独立性・中立性を確保するものとして採用されてきた。しかし分離発注方式には、業務引継の際に必要な情報が十分に伝達されない等の問題点が指摘されている。特に地山情報は、トンネルの経済施工・安全施工に関わる基本情報であることからの確に伝達されなければならない。

業務の中立性・客観性を確保する今一つの形態として、施工関連会社・技術者が連携してそれにあたる「協議会方式」を挙げることができる。この方式では、施工中調査に関わる調査会社、設計会社、施工会社および発注者側技術者が、調査計画・解析処理法・結果評価およびその活用としての施工への反映過程において情報を共有し、それぞれの専門分野に関わる過程を分担・協同する。これにより、高品質の結果を提供でき、また客観的な立場で地山を評価し、必要な施工対策を提案することが可能になる。

トンネルHSPは、切羽前方地山評価のための新しい施工中調査技術であるとともに、施工中調査とその活用過程に関連した革新的な考え方でもある。本計測・解析マニュアル（案）には、同法の現場計測・データ解析に関わる実務的な手順を記述するだけでなく、結果の評価・活用法についても言及している。またHSP法の適用性に対する参考として、これまでの適用事例を紹介する。施工への反映過程・体制については、その実現に行政的な手続きを必要とすることから、巻末に「施工管理体制（案）の提言」として参考資料の形で掲載した。

本報告書が、トンネルHSP技術の普及の契機となり、同法の適用によってトンネル施工の効率化、安全性向上に貢献できることを期待するものである。

建設省土木研究所

地質研究室

稲崎 富士

目 次

序 文

執筆者名簿

まえがき

1. 総 論	1
1.1 本指針の目的	1
1.2 用語の定義	2
1.3 施工中調査の性格	4
1.4 トンネルHSPの概要	5
1.5 適用の条件	6
1.6 トンネルHSPの適用計画	7
2. 測 定	9
2.1 測定計画	9
2.1.1 計画時の条件及び制限	9
2.1.2 測定計画の流れ	9
2.1.3 地質構造の把握	9
2.1.4 探査目的及び深度	9
2.1.5 測線設定	9
2.1.6 展開位置（切羽からの距離）	10
2.1.7 展開の条件（類似地質）	10
2.1.8 受振方法	10
2.1.9 起振方法	13
2.1.10 測定器（記録器）	13
2.2 測定準備	14
2.2.1 測定のための現場作業	14
2.2.2 現場作業の流れ	14
2.2.3 測線設定（配置）	15
2.2.4 受振孔の削孔と受振器の設置方法	15
2.2.5 起振孔の削孔と装薬方法	15
2.2.6 作業性	15
2.2.7 資材について	15
2.3 測 定	16
2.3.1 測定器材のセット	16
2.3.2 測定系のチェック	16

2.3.3	サンプリング間隔および記録長	16
2.3.4	測定	16
2.3.5	測定データの品質管理	16
2.4	補助的な測定	17
2.4.1	反射モード測定	17
2.4.2	既施工区間を対象とした測定	17
2.4.3	双設トンネルでの測定	17
3.	解析	18
3.1	データ処理の進め方	18
3.1.1	基本的なデータ処理の流れ	18
3.1.2	基本的なデータ処理方法	18
3.1.3	測点データの整理	19
3.1.4	測点データの編集	19
3.1.5	処理手順の決定方法	20
3.1.6	処理パラメータの選択および決定方法	20
3.2	データ処理の内容	20
3.2.1	データ入力	20
3.2.2	編集作業	20
3.2.3	屈折法による解析	20
3.2.4	ゲイン回復・振幅調整	20
3.2.5	周波数フィルタ	20
3.2.6	ミュート	20
3.2.7	静補正	21
3.2.8	波動場分離処理	21
3.2.9	デコンボリューション	21
3.2.10	マイグレーション	21
3.2.11	断面重合	21
3.3	データ処理装置	22
3.3.1	機器の基本構成（ハードウェア）	22
3.3.2	出力装置	22
3.3.3	ソフトウェア	22
3.4	処理データの品質管理と保存	22
3.4.1	処理データの品質管理	22
3.4.2	データの保存	22
3.4.3	事例	22

3.5	解析の成果物	22
3.5.1	具体的成果物	22
3.5.2	成果物の表示方法	24
3.6	解析結果の妥当性のチェック	24
3.6.1	チェック項目	24
3.6.2	チェック方法	24
3.7	補助的な測定データの処理	26
3.7.1	反射モード測定データの処理	26
3.7.2	既施工区間を対象とした処理	26
3.7.3	双設トンネルでの測定データの処理	26
4.	解釈・評価	27
4.1	基本的な考え方	27
4.2	既施工区間の解釈・評価	29
4.3	切羽前方区間の解釈・評価	42
4.4	解釈・評価のとりまとめ	43
5.	トンネルHSPの利用法	44
5.1	トンネルHSP探査の直接的目的	44
5.2	具体的な活用法	46
6.	適用事例	48
6.1	調査・研究例	48
6.2	実際への適用例	62
	参考文献	64
	施工管理体制(案)の提言	65

1 総 論

1.1 本指針の目的

本指針は、施工中のトンネル切羽前方地山の探査法であるトンネルHSPの測定・解析に関する標準的な仕様を定め、適切なトンネル施工に資することを目的とする。

(解 説)

トンネル掘削では、しばしば断層破碎帯等の地質劣化帯や突発湧水により切羽崩壊等の事故が発生しているが、我国のような複雑な地質条件下にあっては、事前調査で地下の地山情報を経済的かつ精度良く把握する事には限界がある。信頼性の高い調査としては、施工中の水平ボーリングが挙げられるが、掘削作業を一時的に止めることとなり、費用も高価なことより、必要に応じて実施されるにとどまっている。

トンネル工事において、切羽前方の地山状況を掘削前に簡便に、精度良く把握することは、地山に適合する施工方法や支保工を選定準備することが可能となり、工事の安全性や経済性を飛躍的に向上させることが可能である。特に、湧水を伴う破碎帯や、切羽が自立しない地質不良部等の存在を、直前であれ掘削前に予測・検出することは、現在のトンネル調査・施工技術の中で最も重要な課題の一つである。トンネルHSPは、施工中のトンネル切羽前方地山を精度良く探査する調査手法であり、これまで多くの現場実験を通して、施工に対する適用性が実証されている。

本指針では、このような状況を踏まえ、施工中のトンネルにおいてトンネルHSP（以下解説ではHSPという）を適用して切羽前方の地山状況を予測する場合の標準的な仕様を定めて、本手法の品質を保証するものである。

1.2 用語の定義

本指針で使用される基本的な用語について定義し、統一を計る。

(解 説)

- (1) 【トンネルHSP】 施工中のトンネル既施工区間の坑壁沿いに多数の受振器を設置し、坑内の複数の地点で起振を行う弾性波探査法。解析には弾性波探査の屈折法、反射法、VSPの処理技術を併用し、地山内の不連続面から戻る反射波を選び出し不連続面の位置、規模等を求め、事前調査、施工中の地質状況・計測状況等の結果と併せて評価するものである。
- (2) 【VSP】 Vertical Seismic Profilingの略称。ボーリング孔を利用した速度検層と反射法を融合させた高分解能な弾性波探査。
- (3) 【坑内弾性波探査】 トンネル既施工区間で実施する弾性波探査屈折法。坑壁近傍の弾性波速度と掘削に伴う緩み厚が求められ、NATM工法の計測Bにも含まれる。
- (4) 【事前調査】 トンネル施工の前に実施された地質調査および設計業務等のことである。
- (5) 【施工中調査】 施工中に発生または予測される問題点を解決するために行う調査のことである。
- (6) 【音響インピーダンス】 地山弾性波速度(V)と地山密度(ρ)の積をいう。入射P波の振幅を1とした場合、地質境界から反射してくるP波の振幅は、
反射係数 $r = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1)$
で表すことができる。よって、硬質岩盤内の軟質断層破碎帯からの反射波は明瞭に識別できる。
- (7) 【反射波】 弾性波は物性の異なる地点で反射、屈折をする。物性の変化点で波動の入射方向へ戻る成分を反射波という。
- (8) 【卓越周波数】 振動現象を観測すると多数の周波数成分が認められる。このうち振幅の大きい振動の周波数を卓越周波数という。
- (9) 【S/N比】 信号(Signal)とノイズ(Noise)の比率。S/N比が大きいほど良好なデータ

になる。

- (10) 【振幅】 振動する量の変動幅。
- (11) 【マイグレーション】 得られた反射波記録から地盤の走向、傾斜を考慮し、真の地盤構造を求めるためのデータ処理法。
- (12) 【切羽前方】 トンネルの未掘削区間のことである。
- (13) 【既施工区間】 トンネル掘削が終了した区間のことである。
- (14) 【地山総合評価】 トンネルHSPの探査結果を事前調査・施工実績等と対比し、施工に反映させる目的で、切羽前方区間の地山状況を評価することである。
- (15) 【支保構造】 支保工と覆工等をいい、掘削されたトンネル空間の安定性を保つための構造物。
- (16) 【支保工】 鋼製法支保工、ロックボルト、吹付コンクリート、金網等、掘削時の地山を安定させる支保部材をいう。
- (17) 【施工管理体制】 トンネルHSPでは、切羽前方探査に加え事前調査結果の有効活用をはかることが重要である。このためには、発注者と施工業者のみによる施工管理ではなく、1つの事業に関連する業者が一堂に会して議論することが望まれる。本指針（案）では、発注者、調査業者、設計コンサルタント、施工業者により構成される協議会組織等の設立を提案している。
- (18) 【観察調査】 トンネル施工に際し、地山が安定性を維持し続けられるようにその挙動を捉えることを目的として実施するものである。切羽の観察、既施工区間の観察等よりなり、計測Aのひとつである。
- (19) 【観察・計測】 トンネル構造物の安定性と安全性を確認するとともに、設計・施工の妥当性を評価するために行う。観察・計測には計測Aと計測Bの2種類がある。

1.3 施工中調査の性格

施工中の調査は、切羽前方地山の予測される問題についての確に地山情報を収集し、施工に迅速に反映されなければならない。

(解 説)

施工中調査は、切羽前方の地山状況を的確に予測し、施工にリアルタイムで反映させることが望ましい。

切羽前方探査は施工中の調査であるために探査技術の条件として、以下の点を満足させる必要がある。

- ①適応しているかどうか？少なくとも5～6時間は切羽を止める必要がある
- ②可探領域（深度）が掘削工程に充分対応できる
- ③方法論、あるいは解析に当たっての理論的な裏付けがある
- ④解析過程およびその結果が客観的であり工学的解釈が可能である
- ⑤調査費が安い

HSPは、これらの条件を満たす調査手法の1つとして位置づけられる。

1.4 トンネルHSPの概要

トンネルHSPは、施工中のトンネルにおいて、未掘削区間である切羽前方部や既掘削区間の地山状況を弾性波を用いて探査し、かつ事前調査および掘削中の地質状況及び変位計測データ等を総合評価し、切羽前方の地山状況を精度良く把握するものである。なお、トンネルHSPは、探査技術のみならず、それに基づく評価・活用技術の確立についても含むことが特徴である。

(解 説)

HSPは、施工中のトンネル内で発破をかけて人工的に振動を発生させ、坑内に配置したセンサー（地震計）で反射波をとらえる多点起振、多点受信を原則とし、切羽から150～200m先の地山状況を調査する手法である(図-1.1)。

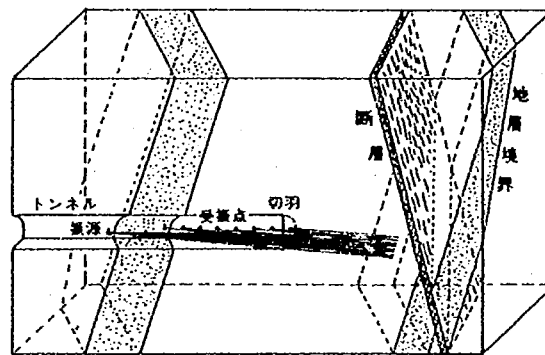


図-1.1 トンネルHSPの概念図

本法は、原理的には資源探査（石油探査等）で採用されているVSP法（反射法地震探査）技術を、従来の屈折法（弾性波探査）と結合、発展させたものである。

VSP法は地表に配置した起振源で発生させた弾性波を、ボーリング孔内に多数配置した受信器で観測し、地盤内の不連続面から反射した波動のみを抽出し、不連続面に対応した波形を作成する方法である。これに対して、例えば坑内で実施するHSPでは、既施工区間のあらゆる地点、すなわち坑口から切羽までの区間、さらに待避坑、避難坑および換気坑等の本坑から離れた地点においても起振、受信ができる。探査対象と分解能で比較すると、資源探査では水平多層構造を対象とし、探査深度数百～数千mで、地震波の周波数が数十～数百Hzの領域であるのに対し、HSPでは山岳トンネルの複雑な地質構造を対象とし、可探深度150～200m、周波数が数百～数千Hzの領域を対象としており、HSPは、伝播速度が同じだと仮定すると、波長は約1/10で、分解能は10倍程度高い特徴がある。

また、HSPは、VSP法に比較し、次のような特徴があげられる。

- ①既施工区間の緩み層の範囲と速度および真の地山速度を把握できる
- ②多起振点の記録を重合することにより、信頼度の高い断面を作成できる。
- ③探査対象領域を切羽前方あるいは側方等の任意の方向に設定できる

1.5 適用の条件

本指針は、山岳トンネル工法の施工中調査において、トンネル切羽前方の地山状況を予測するために実施するトンネルHSPの測定・解析および評価・解釈技術に適用する。

（解 説）

トンネル施工前の事前調査は、地形条件・トンネル延長・土かぶり厚さ・地質構造の複雑さおよび露頭条件の良否等によって地下の水文関連を含む地山状況の予測精度に限界があり、事前設計段階で実際の地山状況を反映できない大きな要因となっており、山岳トンネルの事前設計が、施工実績としばしば乖離する現象が発生している。このため、トンネル延長の長いトンネルや地質構造が複雑な条件下にあっては、施工中調査によって事前調査段階の情報量を補うことが必要であり、妥当な設計変更に伴う施工の確立が望まれる。

施工中調査であるHSPは、上記の要求に応える有力な調査手法の一つであり、確度の高い切羽前方地山状況を予測するには、事前調査・設計および既施工区間の成果を最大限に利用・検討し、探査結果と連携させることが必須の条件である。この結果より、当初地山区分の適否を掘削前に予測・評価し、設計変更や対策工の要否を提案することが可能である。

1.6 トンネルHSPの適用計画

トンネルHSPの適用にあたり、トンネル施工における探査目的を明確にし、適用時期、適用条件等について整理し、測定計画に反映させねばならない。

(解 説)

HSPは他の多くの調査法と同様に、探査結果だけで切羽前方の地山情報を提供できる万能な調査技術ではなく、適用に当たっては、トンネル施工における探査目的を明確にすると共に、事前調査、当初設計および既施工区間の計測・施工実績の資料を充分検討し、測定位置や探査対象を設定しなければならない。HSPは、弾性波による波動を扱う探査手法であるため、適用に関する一般的な特性を把握し、測定計画に反映させることが重要である。

HSP探査結果により基本的に得られる情報は、既施工区間の地山弾性波速度と切羽前方地山の波動インピーダンス（地山質量と弾性波速度の積）を反映する反射波である。未掘削区間のトンネル施工に対する工学的特性を評価するには、反射波の定量化を行うことで可能になると思われるが、山岳トンネルでは地質構造が複雑な地点が多いため、反射波に含まれる地質情報もかなり多いといえる。従って、反射波の客観的評価の精度を高めるため、基本的な反射波の特性を理解した上で、事前調査や既施工区間で獲得した地山情報を、予め測定計画に反映させる必要がある。

HSPにおいて、反射波の定量化の際に、問題点としてあげられる波動の一般的な特性は、次の通りである。

①可探深度の精度および特徴的な現象

- ・可探深度は切羽前方150～200m
- ・起振点、受振点と反射面の距離が短いほど卓越周波数が高く、S/N比も高いが、切羽前方の数mの区間は、観測誤差、測線配置と解析近似法のギャップのため測定精度が悪い
- ・周波数が高い方が波形が短いため時間断面での反射面検出の精度が高く、解析精度は高い
- ・観測誤差は0.5msec前後であり、硬岩地山の弾性波速度 $V_p=5\text{km/sec}$ と仮定した場合で2.5mの誤差が生じ、最適条件下でも数mの誤差を考慮しなければならない
- ・硬岩地山では、軟岩地山に比較して波群の収束が良い
- ・卓越周波数は、硬岩地山で数百～数千Hz、軟岩地山で数百Hzである
- ・S/N比は、火薬を振源とした時に振源距離による変化はほとんどない

②最適な波動の種類

- ・P波は、汎用的で扱いやすく、発生源も火薬等の使用により簡便である
- ・S波は、分解性は高いが、物性の違いによる屈折率が高く解析が困難でかつ発生源が困難である
- ・起振方法や解析上の容易性を考えると、P波が適性である

③波形認識

- ・切羽前方50～200m区間の反射波は、目視によって特徴を把握することは困難である
- ・反射波形のパターン認識は、地山情報のデータを総合的に組み入れて判断する必要がある
- ・測定区間の振幅強度の規格化を可能な限り行い、地山状況と対比し、振幅強度の定量化に結び付けられる可能性がある
- ・減衰による反射波の振幅強度を補正する必要がある

④速度境界の構造（位置・方向・規模・性状）と探査限界

- ・事前に走向・傾斜等の地質構造を予測し、測定計画に反映させることにより、精度を向上させることができる
- ・地山特性が漸移的に変化する場合は、強い反射波が得られにくく、検出評価が難しい
- ・断層破碎帯の検出幅は波長 λ の約 $1/12 \sim 1/30$ であり、弾性波速度 $V_p=5\text{km/sec}$ で周波数が800Hzで20～50 cmの破碎帯の検出が可能である

⑤湧水帯の確認

- ・地下水が賦存される地質状況により変化する
- ・地質不良部の性状と帯水状況により変化するが、硬岩地山より軟岩地山で抽出の可能性が高い

2. 測 定

2.1 測定計画

2.1.1 計画時の条件および制限

事前に既存地質調査結果、当初設計および既施工区間の施工実績等を吟味して、探査目的、探査対象およびその想定深度を把握し、測定計画を立案する。

2.1.2 測定計画の流れ

下記の流れにより、測定計画を立案する。

- ①既存地質調査結果、当初設計および既施工区間の施工実績・切羽観察・計測結果の整理
- ②概略の地質構造および地山特性の把握
- ③探査目的、探査対象構造およびその想定深度の把握
- ④測定計画立案

2.1.3 地質構造の把握

既存地質調査結果および既施工区間の施工実績等から、事前に概略の地質構造（地層の走向・傾斜、断層破碎帯、地下水、岩相変化等）を把握する。

2.1.4 探査目的および深度

測定計画立案にあたって、探査目的および探査対象深度をあらかじめ的確に設定する。

2.1.5 測線設定

測線は、トンネル軸に沿ってなるべく直線状、かつできるだけ起伏が少なくなるように設定する。また、測線位置（左・右側壁、底盤等）は、地質構造や坑内設備の位置および作業性を考慮して決定する。

〔解説〕

地質構造による測線位置選択の例を図2.1に示す。

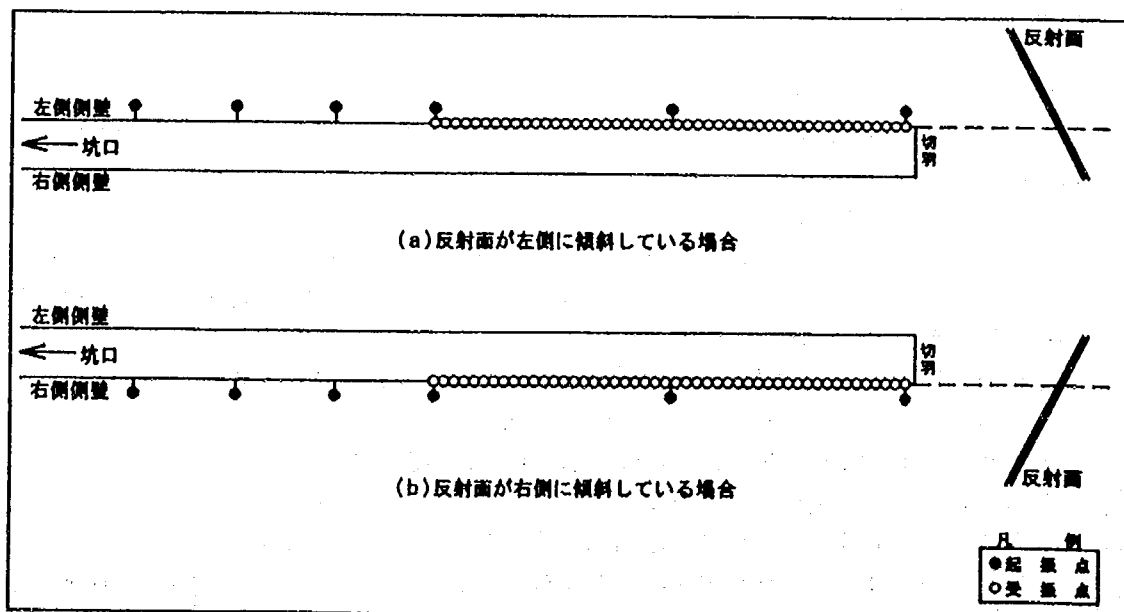


図2.1 地質構造による測線位置の選択（平面図）

2.1.6 展開位置（切羽からの距離）

受振器展開の終点（切羽側）は、原則として切羽直前の位置とする。

〔解説〕

通常受振器展開の終点は、切羽の安定状態を考慮し、切羽直前で保安上問題のない位置に設定する。

ただし、補助的な測定として既施工区間を対象とした測定（2.4.1項参照）を行う場合には、受振器展開の終点から切羽側にインライン・オフセットをとった起振点を設けることが望ましく、オフセット距離の分だけ受振器展開の終点位置を坑口側に移動する。

典型的な展開方法と起振点・受振点配置の例を図2.2に示す。

2.1.7 展開の条件（類似地質）

測線設定区間の地質状況は、均質であることが望ましい。

2.1.8 受振方法

1) 受振点位置

受振点位置は、通常踏前部あるいは0.5～1.5m高さの坑壁（側壁）部に設定する。

2) 受振点数および間隔

受振点数は24～48程度を標準とし、展開長と受振点間隔を考慮して決定する。

受振器は一定間隔に設置することを原則とし、受振点間隔は地山弾性波速度と卓越周波数から空間的エリアジングを生じさせないように設定する。

3) 固定方法

坑壁設置型受振器では、スパイク状のカップラーを坑壁に削孔した小孔に押し込んで固定するとともに、石膏等を用いて密着性の改善を行うことが望ましい。また、孔内設置型受振器では、適切な圧着方式によりゾンデ本体を孔壁に圧着させて固定する。

4) 受振装置

受振器は速度型地震計あるいは（小型・高感度）加速度計を標準として用いる。受振器の固有周波数は、信号波および妨害波の種類および周波数帯域に応じて適当に選択する。

坑壁設置型受振器では坑壁垂直1成分を受振するものとし、1受振点当りの受振器数は2個以上として、複数個の受振器を1箇所にとめて配置するバンチングアレーを採用する。また、孔内設置型受振器では、2成分あるいは3成分受振を行うことが望ましい。

〔解説〕

受振孔の削孔と受振器設置方法の例を図2.3に示す。

受振点をトンネル軸に沿って直線状に配置する場合、決定すべき測定パラメータは受振点数、間隔および受振器展開長である。これらの間には、

$$(\text{受振点数} - 1) \times (\text{受振点間隔}) = (\text{展開長})$$

の関係がある。すなわち、すべてが独立な量ではなく、このうちの2つの値を決めれば、もう1つの値が自動的に決定される。これらのパラメータのうち、どれを最初に決定するかは、各探査法においてそれぞれのパラメータがもつ重要度によって異なってくる。

例えば、浅層反射法探査では、一般に下記の順番でパラメータを決定する（稲崎，1993¹⁾）。

①探査対象深度と最大オフセット距離から展開長を決定する

②受振点数を決定する（24を標準とし、高分解能探査では48を補用する）

③受振点間隔を展開長と受振点数から決定する

トンネルHSP法においては、データ処理において波動場分離処理（2次元フィルタ）を行うことから、時間および空間軸上でのエリアジングを避けることが重要である。したがって、空間的エリアジングを生じさせないように受振点間隔を設定する。次に、使用する測定装置のチャンネル数により

$$(\text{受振点数}) \times (1 \text{ 受振点成分数}) = (\text{測定装置のチャンネル数})$$

として、受振点数を決定するのが普通である。このように、受振点数と間隔を決定すると、自動的に受振器

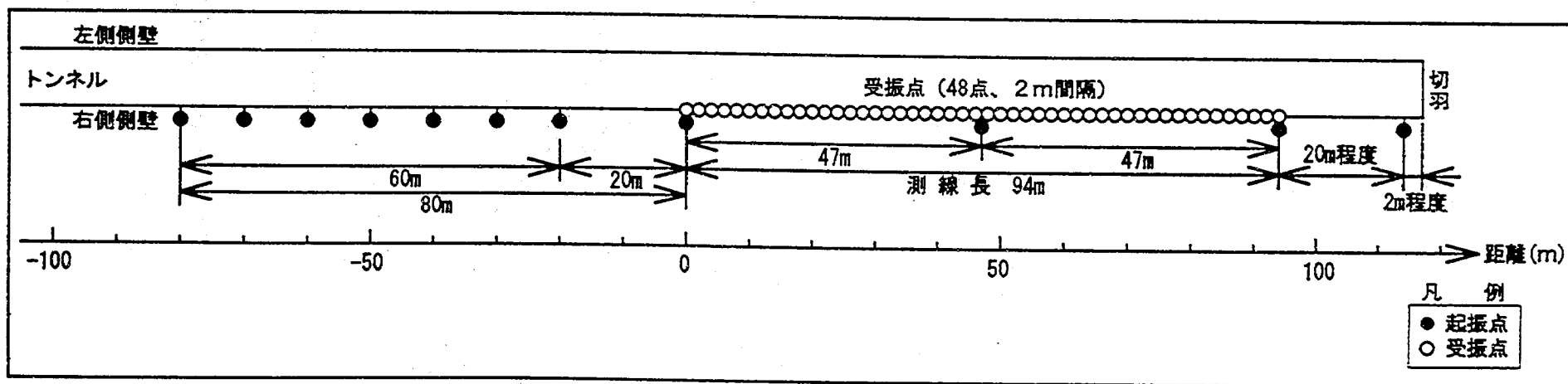
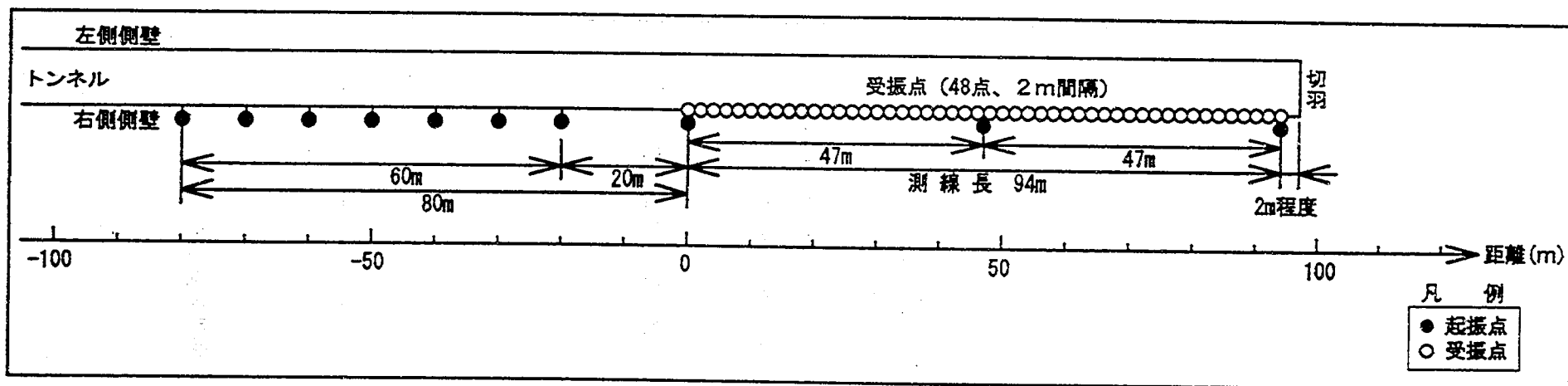
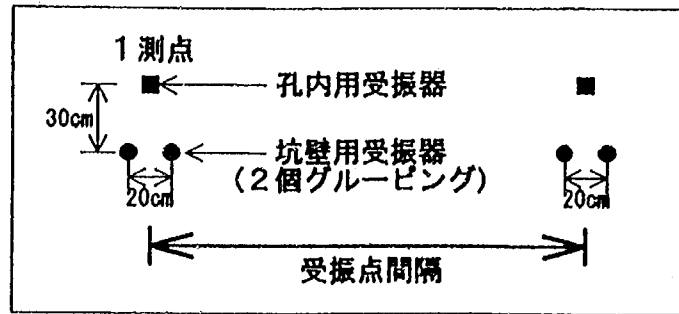
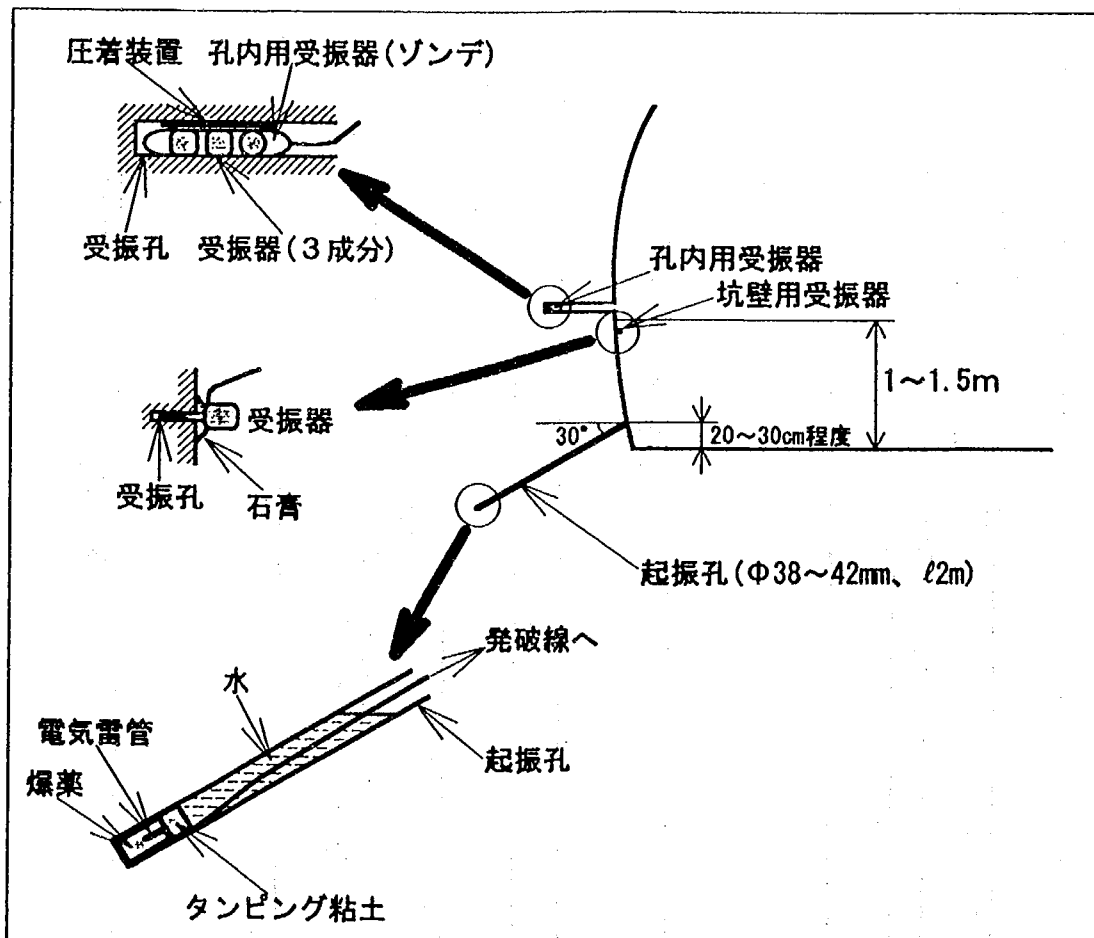


図 2.2 典型的な展開方法と起振点・受振点配置の例
(測線を右側側壁とした場合)



(a) 側壁平面図



(b) トンネル断面図

図2.3 起振孔・受振孔の削孔と受振器設置方法

器展開長が決定される。

2.1.9 起振方法

1) 起振点位置

起振点位置は、通常踏前部より20～30cm程度の高さとし、受振器展開内およびその延長線上で屈折法解析およびHSP解析に必要な位置に設定する。

2) 起振点数および間隔

起振点数およびその間隔は、屈折法解析およびHSP解析の目的を考慮して設定する。

3) 起振源

起振装置はP波起振源として、爆薬と瞬発電気雷管を標準とし、現場の状況や探査目的・深度を考慮して適切な薬量を選択する。

4) トリガー

精度の良いトリガー方式を用い、振動発生時刻に生ずるトリガー信号によって記録器を正確に作動させるようにする。

【解説】

起振孔の削孔と親ダイの装填方法の例を図2.3に示す。

屈折法解析および多点起振記録処理によるHSP解析断面のS/N比改善を目的として、受振器展開内およびその延長線上に複数の起振点を設定する。普通以下のように起振点を設ける（図2.2参照）。

①屈折法解析用起振点

受振器展開の両端および中央部に設ける。必要であれば、受振器展開内にさらに補助起振点を設ける。

②HSP解析用起振点

受振器展開の始点（坑口側）より坑口側にインライン・オフセットをとって数点の遠隔起振点を設ける。

遠隔起振点の受振器展開始点（坑口側）からのオフセット距離は最大100m程度とする。これは境界波やS波等の後続波が切羽前方からの反射波に重なるのを避けるためである。また、反射面上での反射点分布域を広げるとともに、複数起振点によるHSP解析断面を重合してS/N比を向上させる目的もある。

2.1.10 測定器（記録器）

1) 測定装置

データは、全受振成分数（受振点数×1受振点成分数）を同時測定するチャンネル数を有し、かつ増幅機能、デジタル化機能、フィルタ機能、スタッキング機能、デジタル収録機能およびモニター機能を有する、デジタル探査装置に収録する。

2) 測定装置の基本事項

デジタル探査装置は、広いダイナミックレンジを有し、IFP方式の増幅機能を内蔵していることが望ましい。

3) 記録方式

データはデジタル記録とし、磁気テープ、フロッピーディスク、光磁気ディスク等コンピュータへの入力容易な媒体に記録する。

データは、SEG-YあるいはSEG-2フォーマットに編集できるようSEGフォーマットに準拠した様式で記録することが望ましい。

【解説】

測定系の模式図を図2.4に示す。

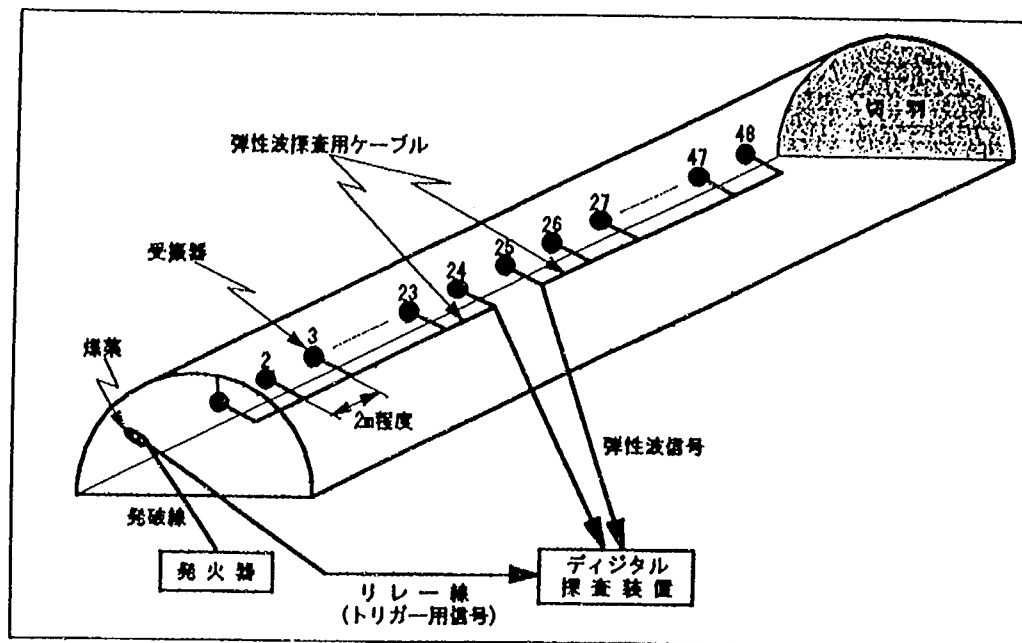


図 2.4 トンネルHSP法の測定系模式図

2.2 測定準備

2.2.1 測定のための現場作業

現場での測定作業に先立ち、測定準備として下記の作業を行う。

- ①測線位置の決定
- ②測量および起振点・受振点位置のマーキング
- ③受振孔の削孔
- ④起振孔の削孔

2.2.2 現場作業の流れ

下記に示す流れに従って現場作業を行う。

- 1) 測定機器類の坑内への搬入
- 2) 受振器設置
- 3) ケーブル類展開
- 4) 測定機器準備および結線
- 5) 起振準備 (爆薬振源)
 - a) 爆薬・瞬発電気雷管準備
 - b) 親ダイの火工
 - c) 発破線およびトリガー線の展開
- 6) テスト測定
- 7) 測定
 - a) 各起振点での起振準備 (爆薬振源の場合：親ダイ装填、発破準備)
 - b) 起振と記録収録
 - c) 測定記録のQC
(a)～c)を起振点数分繰り返す)
- 8) 撤収、後片づけ
- 9) 測定機器類の坑内からの搬出

2.2.3 測線設定（配置）

現場の状況を考慮し、測定計画に基づいて測線を設定する。

【解説】

測線は通常踏前部あるいは0.5～1.5m高さの坑壁（側壁）部に設定する。

2.2.4 受振孔の削孔と受振器の設置方法

受振孔は測線の受振器展開位置に一定の間隔に削孔する。坑壁設置型および孔内設置型受振器での受振孔の削孔と受振器の設置方法は以下のとおりとする。

①坑壁設置型受振器

吹付コンクリートにφ9mm、λ10cm程度の小孔を削孔し、その小孔にスパイク状のカップラーを押し込んで固定する。また、石膏等を用いて密着性の改善を行うことが望ましい。

②孔内設置型受振器

吹付コンクリートにφ40mm、λ1.5～2m程度の孔を削孔し、その孔内に孔内用ゾンデを挿入後圧着装置によりゾンデ本体を孔壁に圧着させて固定する。

【解説】

受振点間隔は通常2m程度で、受振点数は24～48点程度である（図2.3参照）。

2.2.5 起振孔の削孔と装薬方法

踏前部より20～30cm程度の高さに、φ30～40mm、λ2m程度の起振孔を30°程度下向きに削孔し、その孔内に親ダイ（少量の爆薬30～100g程度と瞬発電気雷管）を装填する（図2.3参照）。また、発破の効きをよくするために、タンピング粘土を用いるとともに起振孔内に水を注入することが望ましい。

2.2.6 作業性

測定作業を円滑に進めるために、事前に受振孔および起振孔を削孔しておくことが望ましい。

2.2.7 資材について

測定準備および測定作業に使用する主な資材等は、下記に示すとおりである。

①準備作業

測量用具、削孔用機器（受振孔および起振孔）

②受振および測定器系

受振器（および設置・圧着用器材）、受振用ケーブル（中継線）、探査装置（および電源系）

③起振系

発破線、リレー線、電気発火器・通信器（リレー・ボックス）、火薬箱、防爆シート
カケヤ、トリガー・スイッチ

④消耗品類

石膏等、爆薬および瞬発電気雷管、タンピング用粘土

⑤その他

工具類、トランシーバ

2.3 測定

2.3.1 測定器材のセット

受振点に受振器を設置し、測定器系と結線する。

2.3.2 測定系のチェック

すべての結線が終了したら本測定に先立ちテスト測定を実施し、トリガー、受振器、探査装置等全システムが正常に作動することをチェックする。

テスト測定により必要性が認められ、かつ可能であれば、測線位置、起振点・受振点位置、展開方法および起振方法等を変更する。

〔解説〕

具体的なチェック項目を下記に示す。

①ノイズ・レベル

ノイズ・モニターによりノイズ・レベルを調べ、ノイズ・レベルの大きい場合には改善のための措置を施す。

②トリガー・テスト

トリガーに時間的なずれがなく、正常に作動することを確認する。

③測定記録のS/N比

テスト測定記録からS/N比を調べ、安全性・経済性を考慮して薬量（爆薬起振源）を決定する。

④受振器の設置状況

各受振点の記録の質を調べ、不良地点については受振器の再設置を行う。

⑤測定パラメータの決定

サンプリング間隔、記録長、フィルタ・パラメータ等の測定パラメータの最適な値を決定する。

2.3.3 サンプリング間隔および記録長

テスト測定記録から直接波部分の卓越周波数および概略の弾性波速度を求め、探査対象物までの距離を考慮してサンプリング間隔および記録長を決定する。

2.3.4 測定

起振点毎に起振、移動を行い、測定を進めていく。

測定作業時には、作業状況や起振点位置等を正確に記載した測定野帳を作成する。

2.3.5 測定データの品質管理

測定データは常にモニターし、十分な経験を有する測定責任者が測定データの品質管理を行う。不良データが得られた場合は再測定を行う。

〔解説〕

品質管理時の主なチェック項目を下記に示す。

①トリガーずれがなく、トリガーが正常に作動していること

②デッド・トレースの有無

③測定データのS/N比

④突発的ノイズの有無

⑤初動の明瞭さと極性

2.4 補助的な測定

2.4.1 反射モード測定

探査対象とする構造がトンネル軸と平行に近い場合には、反射モードによる測定を行う。

〔解説〕

反射モード測定における起振点・受振点配置の例を図2.5(a)に示す。

2.4.2 既施工区間を対象とした測定

受振器展開区間を含めた既施工区間を対象とした解析を行うために、切羽側の起振点による記録を収録する。

〔解説〕

トンネルHSP法の測定データから受振器展開区間を含めた既施工区間からの反射波を抽出し、それを探査実施時点での既施工区間の実績データと比較することで予測区間の反射波の性格付けを容易にするとともに、解析断面の地質工学的解釈・評価を的確化する。

起振点位置は、受振器展開の終点（切羽側）から20m程度切羽側にインライン・オフセットをとった位置とすることが望ましい（図2.2参照）。

2.4.3 双設トンネルでの測定

パイロット坑や避難坑等がある双設トンネルの場合には、測線から直角オフセットをとった2次元的な起振点・受振点配置とすることが望ましい。

〔解説〕

本坑と併行してパイロット坑や避難坑等が掘削されている場合には、反射面上での反射点分布域を広げるとともに解析精度の向上を目的として、2次元的な起振点・受振点配置とする。

反射モード測定における起振点・受振点配置の例を図2.5(b)に示す。

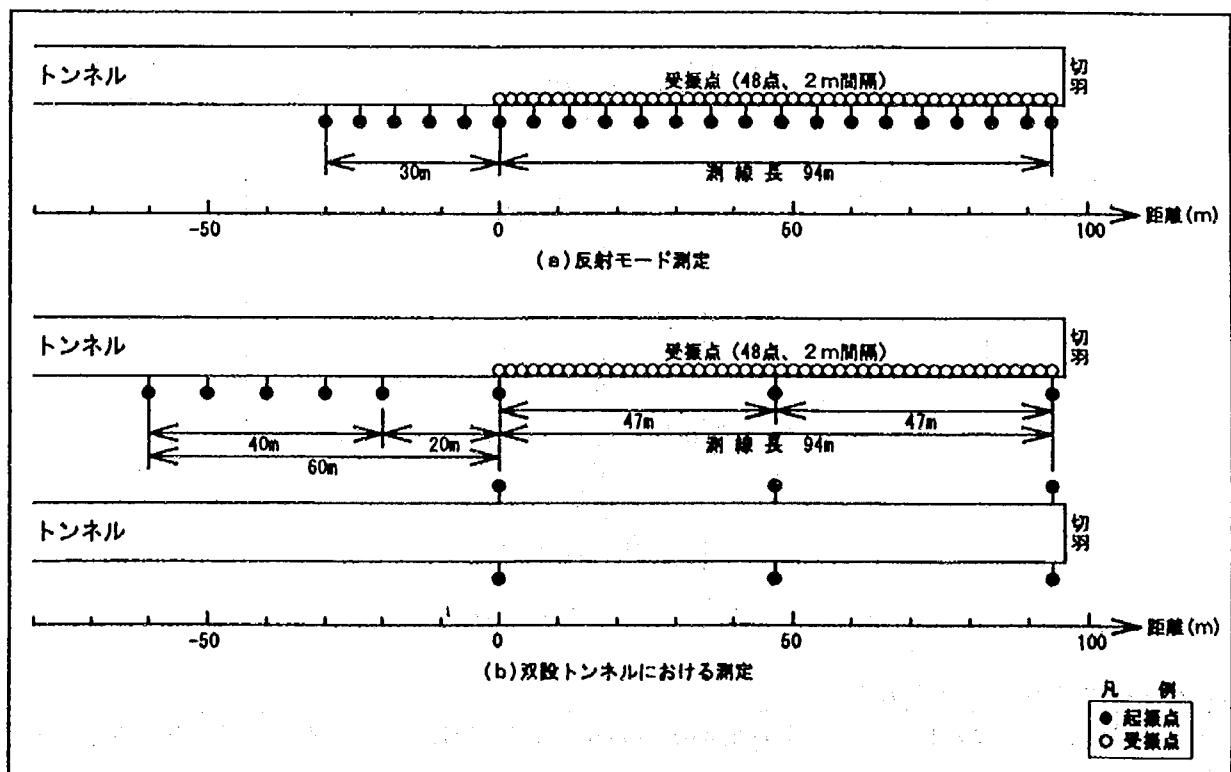


図2.5 補助的な測定における起振点・受振点配置の例

3. 解 析

3.1 データ処理の進め方

3.1.1 基本的なデータ処理の流れ

下記に示す流れに基づいて、データ処理および解析作業を行う。

- ①測点データの整理および編集を行う。
- ②目視あるいは反射波のシミュレーション結果と比較する等の方法によって、原測定データや初歩的な処理を施したデータを評価し、データ処理の手順について概略計画を立てる。
- ③データ処理を実施する。
- ④処理データの品質管理を行い、必要があれば処理計画あるいは処理パラメータの変更を行う。
- ⑤解析結果をチェックし、必要があれば再解析を行う。
- ⑥解析成果物を作成する。

〔解説〕

基本的なデータ処理および解析作業の流れを、概略的に図 3.1 に示す。

反射波の走時や振幅のシミュレーション（モデリング）は、既存の資料や解析によって得られた解析断面等を利用して地質構造モデルを作成して実施する。

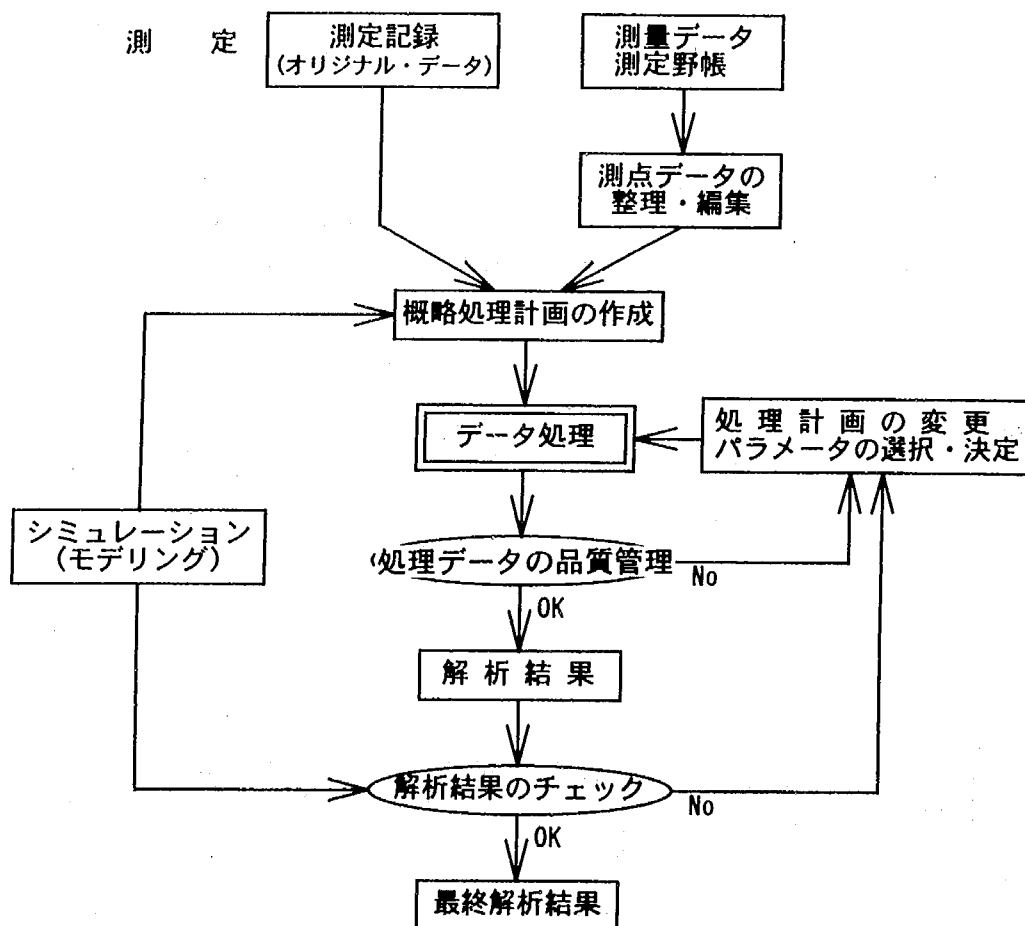


図 3.1 基本的なデータ処理および解析作業の流れ

3.1.2 基本的なデータ処理方法

データ処理は、トンネル軸に斜交した反射面からのイベントに対処できるイメージング法を基本とする方法で行う。

〔解説〕

トンネルHSP法のデータ処理（以下HSP処理と称する）の目的は、現地測定作業によって収録された原測定データ（オリジナル・データ）より、切羽前方からの反射波を分離・抽出し、適切なイメージング手法により反射強度分布を表わす解析断面（反射断面）を作成することである。

HSP処理の流れは、基本的に鉛直ボーリング孔を利用したVSPと同じである。ただし、トンネルHSP法では、起振点および受振点配置がトンネル軸に沿っていてゼロオフセットとみなせる場合でも、反射面がトンネル軸に直交している、あるいは直交に近いという仮定が成り立たない。このため、two-way time shift後コリドール・スタックを行う方法やVSP-CRP変換による方法は適切ではなく、マイグレーションにより反射面位置や反射強度を2次元あるいは3次元的にとらえることが必要となる。

トンネルHSP法は反射信号を画像化する技術であるから、稲崎(1993)¹⁾が述べているように、データ処理の基本はイメージング処理と考えられる。そして、これらのイメージング処理には、普通各々が行われる順序についての原理的な決まりがある。一方、その他の多くの探査法に共通的な補助処理は、基本的にはどの段階で行われてもよい。

以上のことから、一般的なデータ処理の手順は図3.2のように考えることができる。

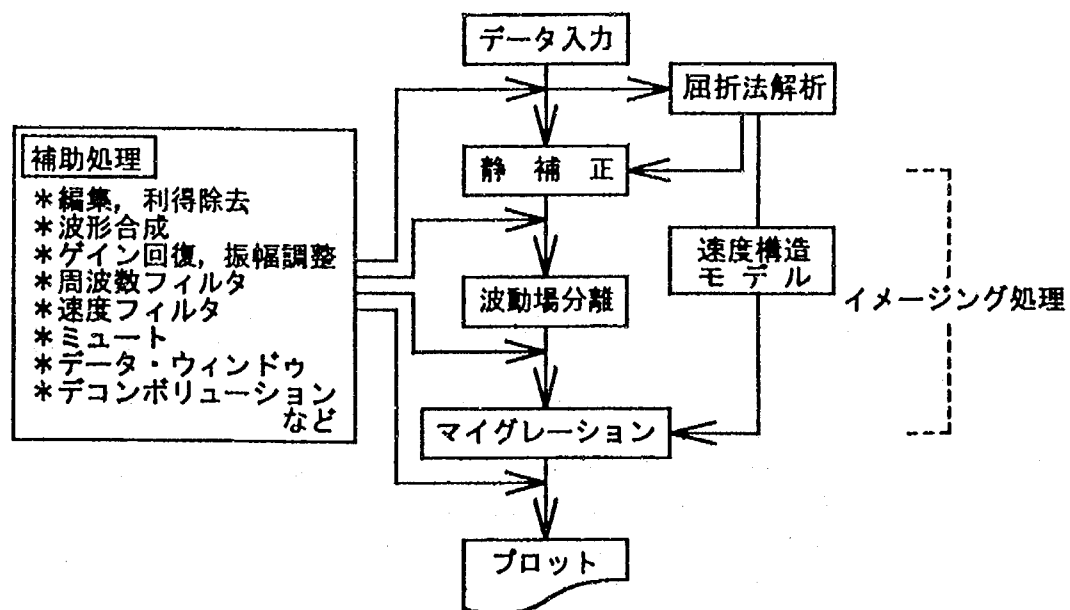


図3.2 一般的なデータ処理の手順

3.1.3 測点データの整理

測量データ、測定野帳、既存の資料、補助的な測定データ等を整理し、必要なものについては解析作業を行う。

3.1.4 測点データの編集

測量データおよび測定野帳に基づき、測線位置や起振点・受振点毎の座標を整理し、測線位置図を作成する。

また、使用するデータ処理システムに固有なフォーマットで測定配置（測定ジオメトリ）の定義を行い、各トレースにトレース番号、起振点・受振点座標、オフセット距離等を割り当て、後のデータ処理に備える。

3.1.5 処理手順の決定方法

データ処理の手順は、当初立てた概略計画に基づいて実施するものとする。ただし、データ処理の進捗に伴って、初期の処理計画に変更の必要性が生じた時は、これを変更する。そのために、主だった途中データは処理終了時まで保管しておくことが望ましい。

3.1.6 処理パラメータの選択および決定方法

各データ処理法に付随するパラメータや、場合によっては部分的な処理手順について、それぞれの効果を理論的には予測しきれない場合には、テストを行ってこれらを決定する。

【解説】

各処理において決定すべきパラメータは、データの性質に応じて決定されるべきものである。したがって、データを十分に観察して、その上で処理の効果が予測しきれない内容について実際にいくつかのケースを試してみて、その結果を比較する形式のテストを行って処理パラメータを決定する。

3.2 データ処理の内容

3.2.1 データ入力

入力装置を介して、データをコンピュータに入力する。

3.2.2 編集作業

測定器材の不調やノイズ等による不良トレースが混入している場合は、これを取り除き、作業ミスによる極性反転がある場合は、これを修正する。

3.2.3 屈折法による解析

受振器展開範囲の地山弾性波速度および坑壁付近のゆるみ層の速度・層厚を把握するために屈折法による解析を行う。

【解説】

トンネルHSP法では既掘削区間での多点起振が可能であり、屈折法による解析が行える。すなわち、トンネルHSP法は、坑内弾性波探査を包括した探査法である。

屈折法解析の結果から、受振器展開範囲の地山弾性波速度とゆるみ層の速度・層厚を求めることができ、ゆるみ層の影響を静補正により取り除くことができる。

3.2.4 ゲイン回復・振幅調整

球面発散、非弾性減衰あるいは散乱現象等による振幅減衰を補正する。

3.2.5 周波数フィルタ

信号波とノイズがそれぞれの周波数帯域を異にしている場合は、周波数フィルタによってノイズを除去する。

3.2.6 ミュート

各トレースの初動時刻以前等、ノイズのみが存在している箇所はミュートする。

【解説】

オリジナル・データには直接波や反射波の他に境界波、S波、自然あるいは人工的なランダム・ノイズ等の様々な波動成分が含まれている。周波数フィルタやミュート等の処理は、ノイズ成分の抑制およびシグナルである直接波や反射波成分の強調を目的として行う。

3.2.7 静補正

坑壁付近の速度変化やゆるみ層の層厚変化等によって、各トレース間にイメージング法では取り扱いえない走時ずれが生じている場合には静補正する。

【解説】

NATM工法によるトンネル掘削においても、坑壁のゆるみ領域は数m程度である。また、このゆるみ領域は一般に受振点毎に異なるため、原初動走時曲線は凹凸したものになる。今までの坑壁設置型受振器を用いた測定結果では、ゆるみ層の厚さの違いによって直接波、反射波とも $1/2 \sim 1$ 周期程度ずれることがある。したがって、波形の並びの連続性が悪くなり、波動場分離処理に悪影響を与えることが考えられる。このことより、多点起振記録を用いて、屈折法解析結果からゆるみ層の影響を評価し、静補正量を精度よく求めることが重要となる。

静補正量としては、屈折法解析から得られたゆるみ層による各受振点での深度走時分を用いる。この補正によって、直接波や反射波の波形の並びの連続性を改善し、波動場分離処理が適切に行えるようにする。

3.2.8 波動場分離処理

外向波成分と内向波成分が含まれているデータから、速度フィルタやメディアン・フィルタ等の2次元フィルタを用いて、これらの波動成分を分離・抽出する。

3.2.9 デコンボリューション

起振装置、受振器、測定器系および地層のフィルタ作用によるウェーブレットの歪みを補正するとともに分解能の向上を目的としてデコンボリューションを行う。

【解説】

分解能の向上およびノイズ成分の抑制等を目的としてデコンボリューションを行う。

3.2.10 マイグレーション

一連の処理が終了したら、屈折法解析の結果、既存の資料および補助的な測定の結果を総合的に検討して、探査領域の速度構造を推定する。その速度構造モデルを利用して、波動場分離後の反射波成分から、トンネル軸に斜交した反射面からの反射イベントに対処できるマイグレーション手法により解析断面を得る。

【解説】

トンネルHSP法は基本的には鉛直ボーリング孔を利用したゼロオフセットVSPを水平方向に適用したものと考えられる。したがって、VSPと同様に、測線に直交する反射面は問題ないが、反射面がトンネル軸に対して斜交している場合にはその位置が正しく求められない。すなわち、VSPで一般に用いられているtwo-way time shift→コリドール・スタックあるいはVSP-CRP変換といった手法は適切ではない。

そこで、斜交した反射面の位置および傾斜角を検出することを目的としてマイグレーション処理を行う。マイグレーション処理を簡単に説明すると、波動場分離によって抽出された反射波成分から、2次元あるいは3次元空間における反射強度分布を再構成するための手法と考えることができる。

VSPにおけるマイグレーション手法としては、比較的少ないトレース数でも安定した手法とされるキルヒホフ積分による方法や一般化ラドン変換(Generalized Radon Transform、略してGRT)による方法がよく用いられている。

3.2.11 断面重合

マイグレーションによって得られた各起振点毎の解析断面を必要に応じて重合し、重合断面を得る。

3.3 データ処理装置

3.3.1 機器の基本構成（ハードウェア）

十分な能力を有する、コンピュータ、記憶装置、入出力装置を使用する。

3.3.2 出力装置

成果物を作成するために、十分な大きさの、十分にきれいな図面の描ける出力装置を使用する。

3.3.3 ソフトウェア

データを処理するために、十分な機能を有するソフトウェアを使用する。

3.4 処理データの品質管理と保存

3.4.1 処理データの品質管理

各処理段階のデータは、十分な経験を有する担当技術者が品質管理を行うものとする。

3.4.2 データの保存

主だった処理結果は、2.1.10項に規定した記録媒体および記録様式をもって保存するものとする。

3.4.3 事例

データ処理の流れおよび各処理段階のデータ（オリジナル・データ、前処理後データ、外向波および内向波成分データ）の例を図3.3に示す。

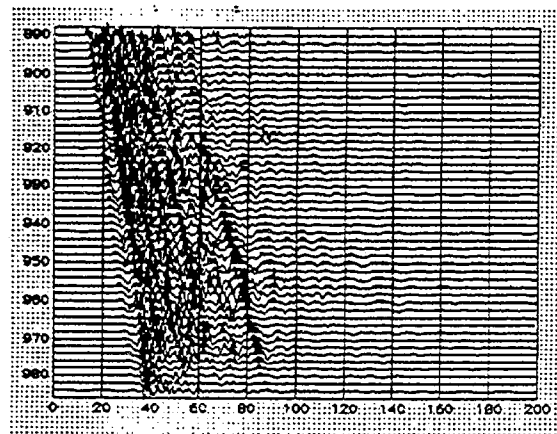
3.5 解析の成果物

3.5.1 具体的成果物

データ処理および解析の成果を、解析断面図、反射断面図等の形式で表示し、成果物とする。また、データ処理の過程で得られた各種波形データおよび断面図等は、必要に応じて整理し成果物に加える。

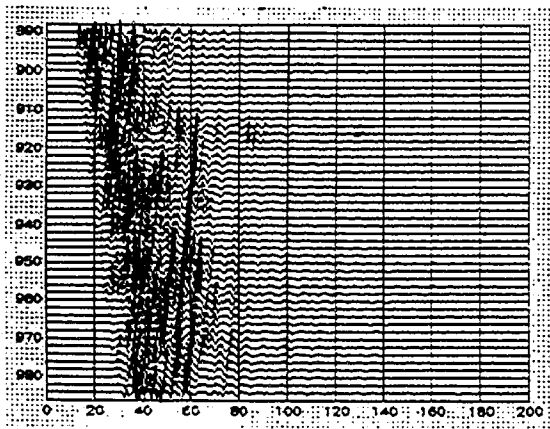
具体的な成果物を下記に示す。

- 1) 探査位置および測線配置図
- 2) 観測波形および処理波形データ
- 3) 屈折法解析結果
走時曲線、速度層断面図
- 4) HSP解析結果
フローチャート、解析断面図
- 5) 補助的な測定の結果
①反射モード解析結果
フローチャート、反射断面図
②後方解析結果
解析断面図
地質展開図、縦断面図、平面図等の坑壁観察結果

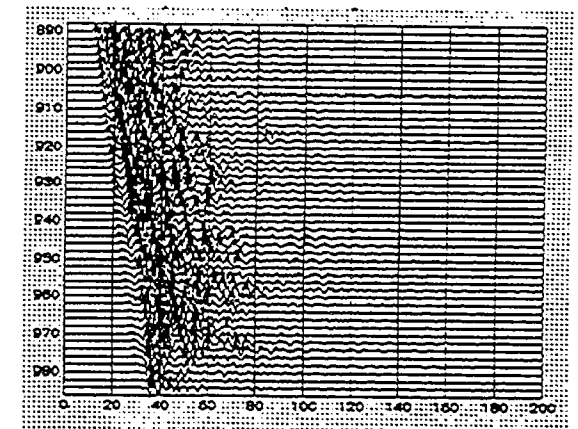
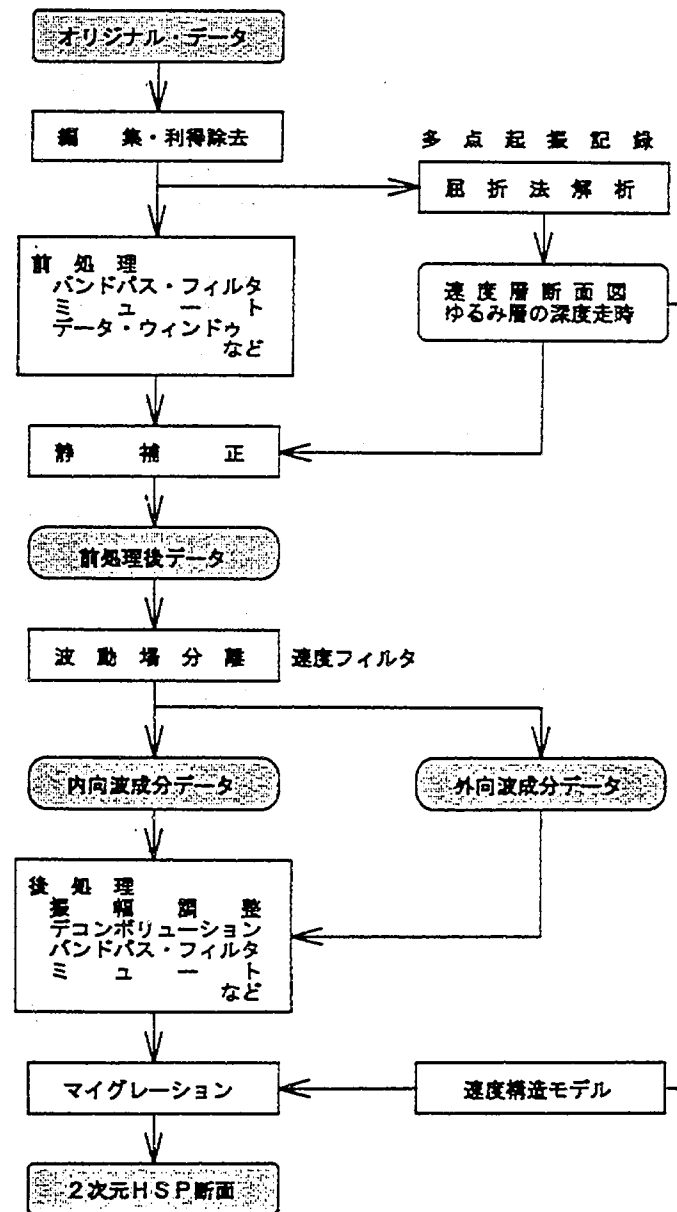


オリジナル・データ

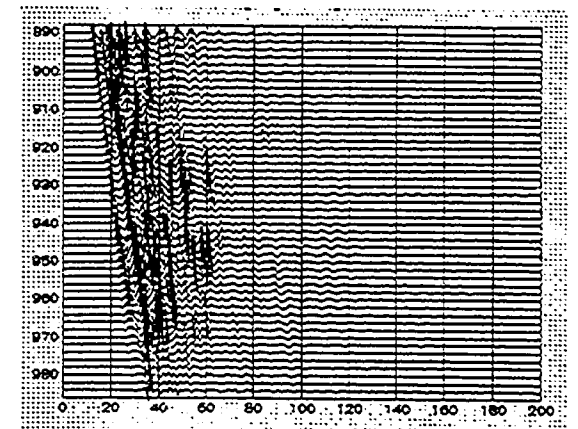
(縦軸：坑口距離(m)、
横軸：時 間(ms))



内向波成分データ



前処理後データ



外向波成分データ

図 3.3 HSP処理の概略的な流れ
(トンネル軸に斜交した反射面に対する処理)

3.5.2 成果物の表示方法

マイグレーション処理前の波形データ（トレース）は、ウイグル表示とバリブルエリア表示の複合法、あるいはその変形法によって、適当な間隔およびスケールで表示する。

また、マイグレーション処理後の解析断面図は、トンネル軸に沿った距離を横軸に、トンネル軸に直交した方向での（測線や坑壁からの）距離を縦軸にとり、反射イベントの振幅・極性が識別できるような表示方法を用いて、適当なスケールで表示する。具体的な表示方法としては、カラー、円表示（白黒および半径による識別）、コンター等を用いるものとする。

〔解説〕

解析断面図のカラー、円表示および コンター+カラー による表示例を図3.4に示す。

3.6 解析結果の妥当性のチェック

3.6.1 チェック項目

解析結果について、下記の項目をチェックし、必要があれば再解析を行う。

- 1) 速度構造モデルの妥当性
- 2) 解析断面上の反射イベントの妥当性
- 3) 既存の調査結果との整合性

3.6.2 チェック方法

解析結果のチェックは、下記の方法により行う。

1) 速度構造モデルの妥当性のチェック

既存の調査結果、屈折法解析結果および補助的な測定の結果から、解析領域における弾性波速度分布を総合的にチェックし、データ処理の過程で用いた速度構造モデルの妥当性について検討する。

2) 解析断面上の反射イベントの妥当性のチェック

解析断面上の各反射イベントについて、極性、連続性、周期性等の性質や共通起振点記録上での対応する重合軌跡に沿ってのコヒーレンスおよび補助的な測定の結果との整合性等を検討し、真の一次反射波であるかどうかの評価を行う。

3) 既存の調査結果との整合性のチェック

反射波であると判断された反射イベントのうち、反射強度が大きく連続性のよいものについて、既存の調査結果から推定されている地質構造等との整合性を検討する。

〔解説〕

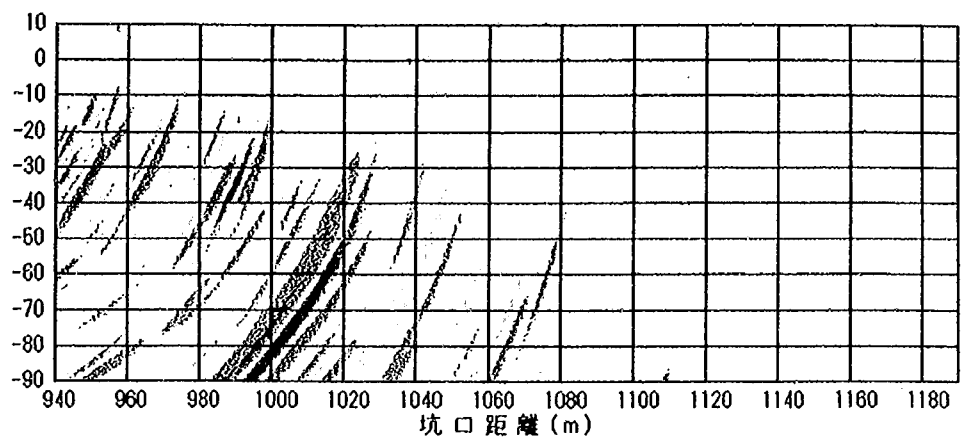
解析結果および既存の調査結果としては、下記のものがある。

1) 解析結果

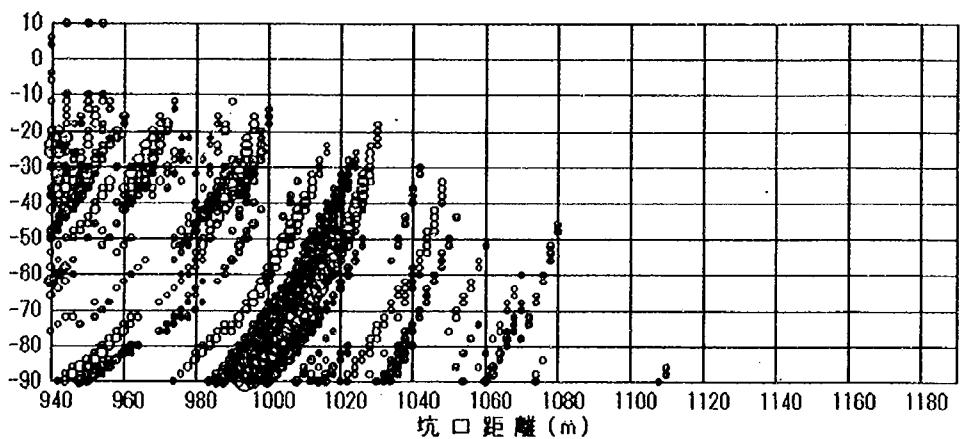
- ①速度構造モデル
- ②解析断面
- ③補助的な測定の結果
・ 反射断面（反射モード測定）
・ トンネル後方解析結果

2) 既存の調査結果

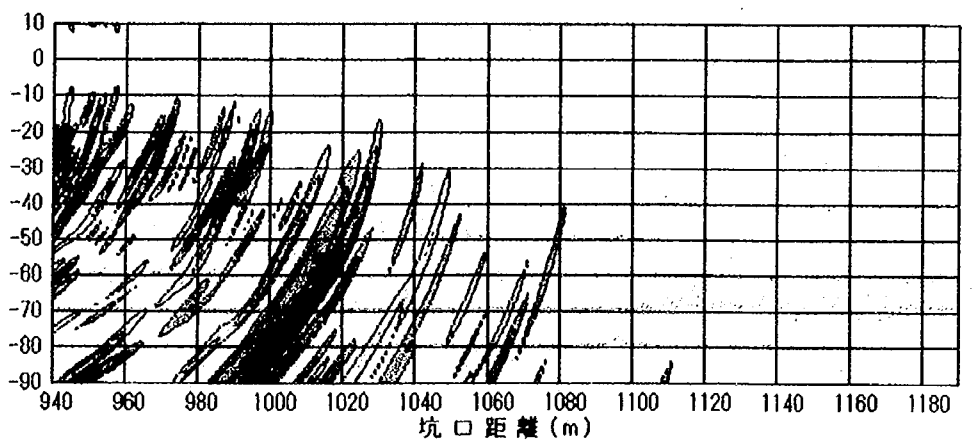
- ①施工前調査結果
・ 地表地質踏査
・ 屈折法弾性波探査
・ 地表ボーリング 等
- ②施工中調査結果
・ 既施工区間の施工実績、切羽観察、計測結果
・ 先進ボーリング



(a) カラー表示



(b) 円表示



(c) コンター+カラー表示

図 3.4 解析断面図の表示例
横軸は坑口距離(m)、縦軸は測線直交
方向での測線からの距離(m)である。

・坑内弾性波探査 等

解析結果の妥当性のチェックには、上記のデータ等を総合的に検討することが必要である。

3.7 補助的な測定データの処理

3.7.1 反射モード測定データの処理

反射モードによる測定データは、CDP重合法あるいはマイグレーション法を用いて処理を行う。

3.7.2 既施工区間を対象とした処理

トンネルHSP法の測定データを用いた測線区間および既施工区間のデータ処理は、トンネル切羽前方を対象としたデータ処理と同様に行う。

3.7.3 双設トンネルでの測定データの処理

双設トンネルにおいて、測線から直角オフセットをとった2次元的な起振点・受振点配置から収録した測定データは、下記の手順で処理を行う。

- ①初動走時分布から2次元的な速度構造を推定する。
- ②解析対象区間の2次元速度構造モデルを作成する。
- ③2次元速度構造モデルを用いて、波動場分離処理によって抽出された反射波成分よりマイグレーション法により解析断面を得る。

参 考 文 献

- 1) 稲崎富士(1993)：浅層反射法マニュアル、土木研究所資料、第3170号、pp. 21-65.

4 解釈・評価

4.1 基本的な考え方

トンネルHSPの解釈・評価は、探査結果による反射波の特性を踏まえ、事前調査、事前設計及び施工中の観察・計測・施工データ等を総合的に検討して行わなければならない。

（解 説）

HSPは、施工中調査における、探査・解析技術の確立のみならず、反射波（イベント）の工学的解釈・評価とそれに基づく施工への反映体制の体系化まで行う複合技術であることを特徴としている。HSPの解釈には、現在行われている観察・調査や施工管理体制では、施工に反映させるための地山情報量がうまく収集できているとは言えず、探査結果が最大限に生かしきれない状況にある。HSP探査は切羽前方地質の情報を提供するものの、これら切羽観察・計測結果・施工実績に加え、事前の地質調査結果を充分踏襲することによりその成果を最大限に生かすことができるものである。

HSPの解釈・評価の流れは図-4.1に示すように、事前調査による全体的な地山状況を視野に入れながら、探査結果と既施工区間の十分な対比による解釈・評価を基準として、切羽前方予測区間の反射波の客観性に結びつけ、切羽前方予測区間の解釈・評価を行うものである。

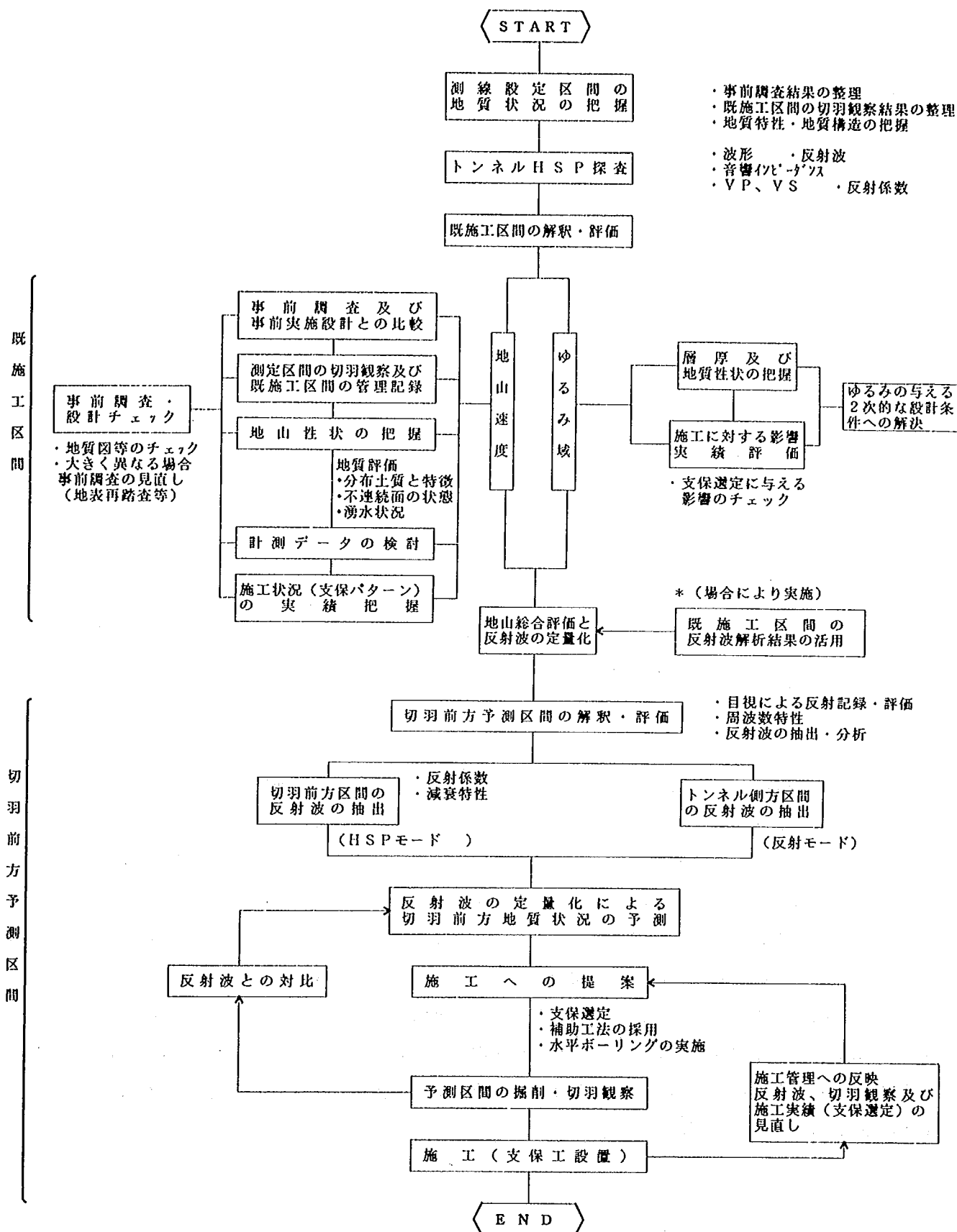


図-4.1 トンネルHSPにおける解釈・評価の流れ

4.2 既施工区間の解釈・評価

既施工区間は、探査結果と事前調査、事前設計および坑内観察調査、施工管理記録等を十分に照合させた総合的な解釈・評価を行う。

（解 説）

H S P 結果から得られる既施工区間の地山速度や反射イベントの正しい対比・評価は、切羽前方区間の地山状況を予測するのに多くの情報を提供する極めて重要な位置を占める。既施工区間の解釈・評価に関しては、次の点に充分配慮して行う必要がある。

（1）H S P と既施工区間の評価の考え方

H S P の既施工区間の結果としては、はぎ取り法の適用による初動補正と地山速度が把握される。また、場合によっては切羽後方既施工区間に H S P を適用し、反射イベントを検出することによって、地山状況の定量化に結び付けることが可能である。これら反射波の性状は、施工中の管理の一環として行われている観察・調査の切羽観察、計測および施工状況、既施工区間の支保工観察結果と有機的に結び付けて、評価されることにより、精度が高くなるため、これらの情報を入手しながら、切羽前方の反射イベントの解析に結び付けるものとする。また、はぎ取り法の適用により、トンネル掘削の影響による緩み領域の把握を行い、緩み領域が施工に与える二次的な評価も合わせて行うものとする。

（2）事前調査および事前実施設計との比較

現在の事前実施設計は、調査段階に実施される地質調査と弾性波探査速度によって設計条件を決定しているが、地質構造が複雑な我国において事前調査段階で地山条件を詳細に予測することは土かぶりの厚い長大トンネル等にあってはきわめて困難であり、実際の施工と異なるケースが多く発生する原因となっている。このことは、この様な条件下にあるトンネル施工は、施工中調査を有効に活用して、合理的な設計変更を行い、施工に反映されるべき性格の工事であることを意味する。H S P によって得られる地山速度は、事前実施設計と、施工中の設計変更に関わる問題点に関連づけることが可能となる特徴をもつ。

既施工区間の解釈・評価では、事前調査段階による地質分布・構造・工学的特性・地質急変部の存在・湧水帯・湧水量および弾性波速度や比抵抗値等を整理し、既施工区間の観察調査との対比を行う。これにより、当初の想定と大きく異なる場合は、事前調査の見直しや地表再踏査を行って原因を解明し、未掘削領域の地山の予測に結び付ける必要がある。

(3) HSPと観察・計測

従来のトンネル施工管理は、日常管理のための計測Aと地山条件に応じて計測Bが行われている。このうち、HSPは、計測技法からみれば計測Bの原位置試験に区分される坑内弾性波探査と基本的には同一である。複合技術として位置づけられるHSPを適用する上での問題点は、多くの場合、坑内地質や掘削実績データが絶対的に不足していることにあり、反射イベントを評価し、施工管理へ反映させるためには、切羽観察等の他の調査・計測データの利用を含めた施工までの流れが未整備なことにある。

HSPと観察・計測では、一般的に行われる観察・計測を基本とし、特に反射イベントとの対比が重要となる計測A坑内観察調査に区分される切羽観察および変位計測を含む既施工区間について次の点に留意し実施されたい。

1) 切羽観察

(I) 基本的考え方

切羽観察は、HSPによる反射イベントが地質及び断裂系の性状にどの様に現れているか詳細に対比するため、地質展開図、地質断面図等を作成し、連続したトンネルの地質状況を把握する。なお、観察にあたりトンネル技術に理解のある地質技術者を配置して、詳細な地質状況の把握を行うことを原則とする。

切羽観察表については、HSPの地山区分と掘削実績との比較検証を行い、適正な支保工パターンの選定に反映させることを目的としている。

(II) 切羽観察の要点

- ・表-4.1に切羽観察のための地山区分を示す。
- ・硬岩及び軟岩地山の区分は、切羽中の硬質岩片の占有率(80%)、一軸圧縮強度($q_u=200\text{kgf/cm}^2$)、無亀裂供試体の弾性波速度(2.8km/sec)を目安とした。
- ・硬岩の本質的な地山の挙動は、岩石個々の強度と地山を構成する割れ目状態、地下水状況によって左右される。また、割れ目間の軟弱層の占有量により、切羽の地山挙動は大きく異なるため、軟弱層の切羽に占める割合は20%以下とし、20%以上の場合硬岩中の風化・変質帯及び破碎帯地山に区分する。
- ・軟岩地山については岩石強度に支配された挙動を示すものの、礫岩・凝灰角礫岩等については不均質岩盤を構成しやすい地山の特性を有するため、基本的には硬岩の風化・変質帯等と同様の区分になる。
- ・岩種は特に特定はしない。ただし一般的な傾向を示すと考えられるものについて示した。
- ・HSPとの関連では、割れ目等に特に方向性のない地山(塊状岩)と方向性を有する地山(層状岩)では、反射波の特性が異なると考えられ区分して評価する。

(Ⅲ) 切羽観察について

(a) 切羽観察記録表(表4-2)・切羽観察図(図4-2)

①観察表の地山区分

- ・HSPによる反射イベントの評価や施工へ反映させる上で、大まかに特性の異なる地山区分を行う。
- ・地山区分に対応した観察を行う。
- ・硬岩地山は岩石自体の強度と断裂系の構成による基本的な挙動を示す。また断層破碎帯等の不連続面や切羽への出現形態によって地山挙動が大きく左右される。このため従来から言われる硬岩地山の定義が岩石自体の物理特性をさすか、断裂系を含めた物理特性とするかが問題となる。本観察図では、粘土等の介在によって挙動が異なる切羽地質を対象とする性格上、岩石自体の構成比率に着目した。
- ・岩石強度は一軸圧縮強度 200kgf/cm^2 、弾性波速度 2.8km/sec を区分の目安とした。
- ・構成比率の区分案としては80%を目安としたが、今後の観察実態により修正が加えられるものである。
- ・断層破碎帯等の断裂系が切羽の20%以上を占める場合は、異方性を含めた不均質な地山への対処となる。

②岩種区分について

- ・岩石自体の物理特性と弾性波速度値に着目しているため、岩種としては大まかな区分の目安を示した。
- ・例えば弱変質した硬岩の一軸圧縮強度が 200kgf/cm^2 以上で、断裂系が認められなければ硬岩地山の分類となり、一軸圧縮強度が 1000kgf/cm^2 であっても弱層部が20%以上占めれば硬岩中の風化・変質帯の区分に入る。

③切羽評価の因子

- ・切羽評価の因子としては、定性的な地山挙動を把握できる切羽の状態(2項目)、割れ目(4項目)、湧水(2項目)とした。
- ・岩石強度及び風化・変質帯等の因子については、事前に評価されることとなり硬岩地山の評価項目にはいれていない。
- ・破碎帯地山では岩石自体の風化・変質が地山の挙動に影響を与えるため評価因子として加えた。

④切羽観察図・切羽観察整理図(図-4.3)

- ・切羽観察図は、切羽(坑壁)展開図、切羽スケッチ図、スプリングライン(SL)スライス平面図、トンネル中心線におけるトンネル縦断図を作成する。これにより、HSPの反射波や屈折処理による波動現象と地質状況との対応づけをおこなう。
- ・切羽観察図を図-4.3に整理することにより、立体的な構造把握を行う。

IV) 切羽観察の要件 (H S P 対象区間)

(a) 切羽観察及びスケッチについて

①観察者 ---- 地質技術者、地質の素養のあるトンネル技術者

<参 考> ・経験年数5年以上の地質技術者でトンネル施工及び管理の素養のある技術者が理想的。

②観察時期 ---- 10分前後 (一般的な時間内に行う)

③観察頻度 ---- 1切羽毎を原則としたいが、施工条件によって変化させる。

④観察場所 ---- 切羽から離れた安全な場所で行い、必要に応じて切羽で観察。

⑤記載事項 ---- 岩石強度：ハンマーの打撃音、一軸圧縮強度試験

<項 目> ・不連続面の抽出に重点を置く。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とどめる。

- ・割れ目の幅、充填物、粘土化の程度、性状、湧水状況、湧水量。
- ・切羽面の凹凸による陰影などの装飾は不要。
- ・地質構造及び断裂系の走行・傾斜の明記等。
- ・サンプリングを頻繁に行う
- ・その他、地質状況に応じ現場技術者が判断する。

(b) 切羽の写真撮影

①撮影時期 ---- ずり出し直後 (実体視が可能な2枚組の写真が好ましい)

天端やインバートの写真撮影も行う

②撮影頻度 ---- 原則として1切羽毎、施工条件による

(c) その他の技術との融合

- ・画像処理技術の導入
- ・ステレオ写真、展開写真撮影による補完

2) 既施工区間の観察 (表-4.3)

・切羽観察結果を施工条件にフィードバックするため行う。項目としては日本道路協会(1993.11)の観察例に準ずるものとする。

(4) 施工(地山区分・支保パターン)への反映(表-4.4、表-4.5、表-4.6)

- ・切羽観察結果は施工へ反映されなければならないが、現状では表4-4の日本道路協会(1993.11)の地山分類表がある(定性的評価)。

- ・定量的評価として、評点法、海外の評点法および多変量解析による方法等があるが、トンネル延長の長いトンネルにあっては、施工実績と充分照らし合わせ、得られた情報を未施工区間に有効に活用し、種々の地山状況に応じた評価を行っていくことが基本となる。

- ・表-4.4を参考として、切羽観察項目の単純平均法による地山総合評価点(案)を表-4.5に示す。

- ・定量化手法については単純平均法による必要はないが、支保パターンとの定量的な把握は今後の現地適用によって実績を積む必要がある。単純平均法による一例として支保パターンと総合評価点の関連を表-4.6に示す。

(5) 既施工区間の反射波解析結果の活用

地山の総合評価と反射波の客観的評価に際し、場合により、既施工区間の後方地山を対象としたHSPを実施し、反射イベントの定量化を行い切羽前方区間の地山性状の予測に役立てる。HSPでは、既施工区間の地山状況が詳細に判明するため、反射イベントから施工実績までの流れが明確化できる可能性があり、切羽前方地山の反射イベントの地質予測を向上させることができる。反射イベントが切羽前方地山と後方地山で振幅の規格化が行えて、絶対評価が可能となるならば、HSPによる地質状況の定量化として最も妥当な方法となる。

(6) 地山総合評価

切羽前方地山状況を予測するため、既施工区間の探査結果と事前調査、切羽観察、既施工区間の観察および施工状況の結果を工学的に総合評価し、切羽前方未掘削領域の反射イベントの客観化に結び付けるものとする。

表-4.1 切羽観察の地山区分とトンネルHSPとの関連

< 施工中調査 >

切羽観察 地山区分	硬 岩 地 山		硬岩中の風化・変質及び破砕帯、軟岩地山		
	塊 状 岩	層 状 岩	硬岩中の風化変質帯 及び破砕帯地山	新第三系堆積岩類	新第三系凝灰岩類
地山構成 からの 定義 (目安)	・切羽中の約80%以上を代表する岩石(岩片)の一軸圧縮強度が200kgf/cm²以上を示す地山(岩石の占有率は目視観察等による)。 ・岩石の弾性波速度値は新鮮部で一般に2.8km/sec以上。 ・岩掘削による区分ではリップ掘削の可否が一つの目安となる。 ・工学的性状は、割れ目等の不連続面により大きく作用される。 ・割れ目等の不連続面が切羽中の約20%を超える場合は、硬岩中の風化・変質帯及び破砕帯地山に区分される。		・切羽中の約20%以上を代表する岩石(岩片)の一軸圧縮強度が200kgf/cm²以下を示す地山。硬岩が風化、変質等により軟質化したものや、硬質岩塊を塊状に取り込んだ不均質地山も本区分にはいる。 ・岩石の弾性波速度は軟岩地山では一般に2.8km/sec以下。 ・硬質岩塊と弱層部よりなる不均質地山では弾性波速度が2.8km/sec以上であっても本区分に相当する地山が多い。 ・工学的特性は不均質地山の場合は割れ目の不連続面に、軟岩地山では岩石の物性に左右されやすい。		
岩 種 (目安)	・深成岩(花崗岩、閃緑岩、斑れい岩等) ・脈岩(花崗斑岩、石英斑岩、輝緑岩等) ・火山岩(石英粗面岩、安山岩、玄武岩等)	・古生層及び中生層(粘板岩、頁岩、砂岩、礫岩、輝緑凝灰岩等) ・変成岩(千枚岩、結晶片岩等)	・硬岩地山を含む風化変質した岩種 ・硬岩地山を含む破砕帯 ・層状岩を含む弱層の発達する岩種 ・硬岩地山を含む異方性のある岩種 <異方性の特に強い特殊な地山は別途検討する>	・泥岩、砂岩、礫岩及びこれらの互層	・凝灰岩、凝灰角礫岩等
切羽評価の 因 子	・切羽の状態、2項目 〔定性的な状況評価〕 (切羽面、素掘面) ・割れ目、4項目 (形態、間隔、状態、充填物) ・湧水、2項目 (湧水量、水による劣化)	・同左	・切羽の状態、2項目 〔定性的な状況評価〕 (切羽面、素掘面) ・岩石の風化・変質、1項目 ・割れ目、4項目 (形態、間隔、状態、充填物) ・湧水、2項目 (湧水量、水による劣化)	・基本的な評価要素は同じ。ただし軟岩で割れ目が少ない場合は、岩石自体の物性に左右された評価となる。	・同左
HSP法との 関連事項	・断層破砕帯等の明瞭な地質不連続面は検出しやすい。 ・湧水等も断裂系に左右されることが多く、検出しやすい。	・層状の構造が結果に反映されやすい。 ・走行性の不連続面は比較的検出しやすい。 ・走行と斜交する断裂系は規模が小さい場合、検出が可能な。	・硬岩地山中の風化・変質帯及び破砕帯の検出には最適である。 ・硬質岩塊を多量に含む地山では、検出が困難か。	・今後の実験による検証が必要。	・同左
	・トンネルHSPとの対比では、切羽観察による立体的な地質状況の詳細な把握が必要。	・同左	・同左	・同左	・同左

表-4.2 切羽観察記録表

観測位置	上 半				下 半				割坑口から	土質	地山分類	備考
	平成 年 月 日 時		平成 年 月 日 時		平成 年 月 日 時		平成 年 月 日 時					
	左	右	左	右	左	右	左	右				
便 岩 地 山 の 場 合 ① 切羽の状態 1. 安定 2. 鉄面から岩塊が抜け落ちる(少) 3. 鉄面から岩塊が抜け落ちる(多) 4. 鉄面の押出しを生じる 5. 鉄面は白く見える(はげ) 6. 鉄面は白く見える(はげ) 7. 鉄面は白く見える(はげ) 8. 鉄面は白く見える(はげ) 9. 鉄面は白く見える(はげ) 10. 鉄面は白く見える(はげ) ② 鉄面の状態 1. 自立(特注不要) 2. 自立する(特注あり) 3. 自立する(特注あり) 4. 自立する(特注あり) 5. 自立する(特注あり) 6. 自立する(特注あり) 7. 自立する(特注あり) 8. 自立する(特注あり) 9. 自立する(特注あり) 10. 自立する(特注あり) ③ 割れ目の状態 1. なし 2. ランダム、方眼(フクロ) 3. 柱状 4. 腐状、片状、板状 5. 小片状、細片状 6. 腐状、片状、板状 7. 小片状、細片状 8. 腐状、片状、板状 9. 小片状、細片状 10. 腐状、片状、板状 ④ 割れ目の間隔 1. 1m以下 2. 1m~50cm 3. 50cm~20cm 4. 20cm~5cm 5. 5cm以下 6. 1m以下 7. 1m~50cm 8. 50cm~20cm 9. 20cm~5cm 10. 5cm以下 ⑤ 割れ目の状態 1. 密着 2. 根ね密着 3. 部分的に開口 4. 全般に開口 5. 開口が著しい 6. 密着 7. 根ね密着 8. 部分的に開口 9. 全般に開口 10. 開口が著しい ⑥ 割れ目の充填物 1. なし 2. 部分的に薄く粘土を挟む 3. 全般に薄く粘土を挟む 4. 部分的に厚く粘土を挟む 5. 全般に厚く粘土を挟む 6. なし 7. 部分的に薄く粘土を挟む 8. 全般に薄く粘土を挟む 9. 部分的に厚く粘土を挟む 10. 全般に厚く粘土を挟む ⑦ 湧水 1. なし 2. 部分的な湧水 3. 湧水程度 4. 部分湧水 5. 全面湧水 6. なし 7. 部分的な湧水 8. 湧水程度 9. 部分湧水 10. 全面湧水 ⑧ 水による劣化 1. なし 2. 部分的な劣化 3. 劣化を生じる 4. 軟弱化 5. 崩壊・流出 6. なし 7. 部分的な劣化 8. 劣化を生じる 9. 軟弱化 10. 崩壊・流出 便 岩 中 の 風 化 ・ 変 質 等 及 び 破 砕 等 の 場 合 ① 切羽の状態 1. 安定 2. 鉄面から岩塊が抜け落ちる(少) 3. 鉄面から岩塊が抜け落ちる(多) 4. 鉄面の押出しを生じる 5. 鉄面は白く見える(はげ) 6. 鉄面は白く見える(はげ) 7. 鉄面は白く見える(はげ) 8. 鉄面は白く見える(はげ) 9. 鉄面は白く見える(はげ) 10. 鉄面は白く見える(はげ) ② 鉄面の状態 1. 自立(特注不要) 2. 自立する(特注あり) 3. 自立する(特注あり) 4. 自立する(特注あり) 5. 自立する(特注あり) 6. 自立する(特注あり) 7. 自立する(特注あり) 8. 自立する(特注あり) 9. 自立する(特注あり) 10. 自立する(特注あり) ③ 割れ目の状態 1. なし 2. ランダム、方眼(フクロ) 3. 柱状 4. 腐状、片状、板状 5. 小片状、細片状 6. 腐状、片状、板状 7. 小片状、細片状 8. 腐状、片状、板状 9. 小片状、細片状 10. 腐状、片状、板状 ④ 割れ目の間隔 1. 1m以下 2. 1m~50cm 3. 50cm~20cm 4. 20cm~5cm 5. 5cm以下 6. 1m以下 7. 1m~50cm 8. 50cm~20cm 9. 20cm~5cm 10. 5cm以下 ⑤ 割れ目の状態 1. 密着 2. 根ね密着 3. 部分的に開口 4. 全般に開口 5. 開口が著しい 6. 密着 7. 根ね密着 8. 部分的に開口 9. 全般に開口 10. 開口が著しい ⑥ 割れ目の充填物 1. なし 2. 部分的に薄く粘土を挟む 3. 全般に薄く粘土を挟む 4. 部分的に厚く粘土を挟む 5. 全般に厚く粘土を挟む 6. なし 7. 部分的に薄く粘土を挟む 8. 全般に薄く粘土を挟む 9. 部分的に厚く粘土を挟む 10. 全般に厚く粘土を挟む ⑦ 湧水 1. なし 2. 部分的な湧水 3. 湧水程度 4. 部分湧水 5. 全面湧水 6. なし 7. 部分的な湧水 8. 湧水程度 9. 部分湧水 10. 全面湧水 ⑧ 水による劣化 1. なし 2. 部分的な劣化 3. 劣化を生じる 4. 軟弱化 5. 崩壊・流出 6. なし 7. 部分的な劣化 8. 劣化を生じる 9. 軟弱化 10. 崩壊・流出												
特記事項(膨圧・偏圧・流動性・土質小(a)・重要構造物近接・谷の直下等)												

記 事

<切羽状況>

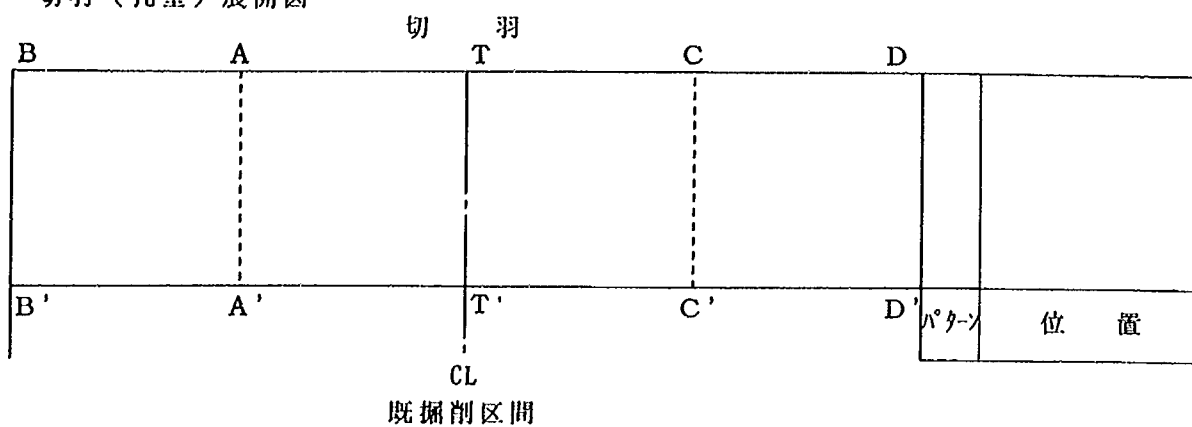
<構造、割れ目、粘土の幅、卓越性等>

<その他の記載事項>

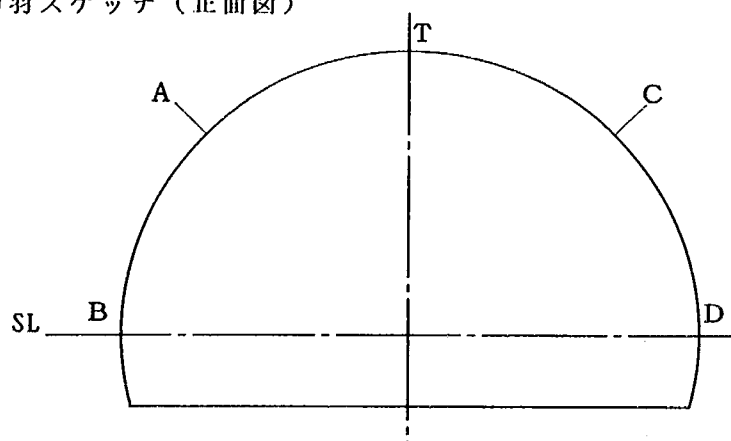
<計測結果、内空変位、天端沈下等>

切羽観察図 (S =) 観察位置 STA. No

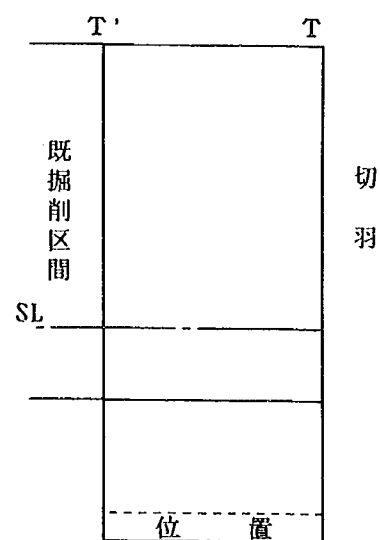
切羽 (孔壁) 展開図



切羽スケッチ (正面図)



縦断面図



SLスライス平面図

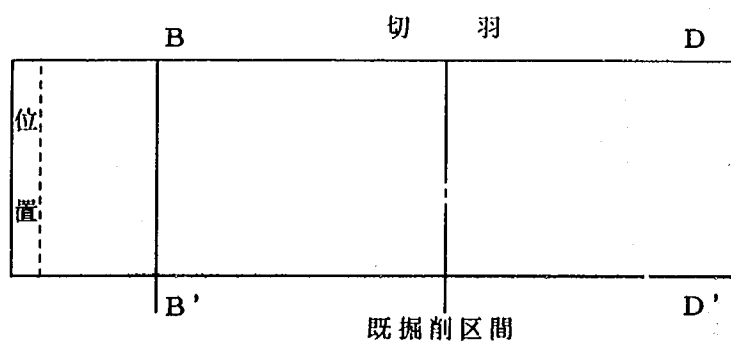


図-4.2 切羽観察図

※計測開始時期は、上半掘削後からの第一回目の計測時間

SL 水平地質断面図

地質縱斷圖

切羽スケッチ図※

· 特殊事項

※切羽観察図を貼付

圖 4-3 切羽觀察整理圖

表-4.3 既施工区間の観察例

変状・特殊施工

該当項目を○で囲み、該当地点または区間を右側に記入する。

変状	支保工変状	①なし	2 変形	3 座屈			
	吹付けクラック	①なし	2 クラックあり 掘削に影響なし	3 顕著な クラック	4 せん断ク ラック発生 押出し発生	5 コンクリート片 はく落	6 脱落
	ボルト異状	①なし	2 頭部変状	3 頭部脱落	4 破断		
	インバート部変状	①なし	2 破損				
	二次覆工の変状	①なし	2 クラック発生	3 顕著な クラック	4 せん断ク ラック発生	5 破損	
特殊	増吹付けの有無	①なし	2 あり()cm				
	増ボルトの有無	①なし	2 あり()本				
	インバート早期閉合	①なし	2 あり				
	繰返し	①変形余裕内	2 繰返しあり	3 袖導坑			変形余裕()cm
	縫地	①なし	2 先行矢板	3 斜ボルト	4 パイプ ルーフ		○当初から予定
施工	鏡止有無	1 なし	②吹付けのみ	3 鏡止	4 鏡ボルト	5 吹付け+ 鏡ボルト	○当初から予定
	ストラット	①なし	2 変形	3 座屈			○当初から予定
	リングカットの有無	1 なし	②あり				○当初から予定
	断面形	1 馬てい型	2 卵型	③くり型	4 円型		○当初から予定
	葉注の有無	①なし	2 ロッドタイプ	3 ソレタン シュ			○当初から予定
補助工 地山挙動	水抜き工	①なし	2 水抜き ボーリング	3 ウェルポ イント、デ ィー プウェル	4 水抜き工	5 迂回坑	○当初から予定
	S L 部変状	①なし	2 流動化	3 盤ぶくれ			
	泥土化	①なし	2 少しあり	3 あり			
記事							
リングカット ファポーリング15本							

〔日本道路協会(1993.11)：「道路トンネル観察・計測指針」，27p.〕

表-4.4 地山分類表に基づく切羽の状態と地山等級との対応

トンネル名		(道路名、上下線等も記入)									
判定年月日		年 月 日			測 点	STA No.					
当該地点 での 地質等	岩 石 名				土かぶり	m					
	地 質 年 代	1. 完新世 2. 更新世 3. 新第三紀 4. 古第三紀 5. 中生代 6. 古生代									
	当初設計における 地山等級	A、B、CⅠ、CⅡ、DⅠ、DⅡ、E、その他									
トンネル掘削断面		直 径				断 面 積					
項 目	種 別	内 容				A	B	C	D	E	備考
切羽の自立性の岩石強度の地山状態の観 察	切羽の自立性	・自立状態は非常に良く、長期に緩むことはない。				○					
		・鏡面は自立、素掘面に局部的に肌落ちが見られるがおおむね安定。					○				
		・局部的に緩んだ箇所には部分的に支保を要する地山。									
		・鏡面は自立する。						○			
		・素掘面は発破後直ちにクラウン部に吹付けが必要となる地山。									
		・鏡面は自立する。							○		
		・素掘面は天端付近で肌落ちし先受け支保工が必要となる地山。									
		・鏡面、素掘面とも肌落ちが著しい場合と側方からの若干の押出しがある場合がある。								○	
		・先受け支保工および早期の山留めが必要な地山。									○
		・鏡面は肌落ちが著しい。									
	岩石強度	・素掘面は側方からの押出しがある。									
		・鏡面は押し出し、顕著なものは崩壊する。									○
		・素掘り面は周圧的な押出しを生ずる。									
		・ハンマーが跳ね返る。強く叩いてかろうじて割れ、新鮮な面で割れる。				○					
		・ハンマーで強く叩けば割れるが、ほとんどがきれつあるいは節理などに沿って比較的大きく割れる。					○				
地山状態	・ハンマーで容易に割れる。きれつあるいは節理等に沿って比較的小片に割れ、むしろきれつ以外の面では割ることが困難である。						○				
	・ハンマーで容易に崩れる。岩は脆く、指先で容易に割れる。								○		
	・ハンマーのわずかな打撃によって崩れる。ハンマーの先が突き刺さる。									○	
	風化変質	・岩質は非常に堅硬かつ新鮮なもので大塊状を呈する。				○					
		・岩質はかなり堅硬であっても風化作用のため多少変質した傾向が認められる。					○				
		・風化作用を受けて岩石に変質をおこしているもので、岩質が多少軟らかくなる。						○			
		・著しい風化作用を受け、一部にはすでに土壌化した部分がみられ、中には多少硬い部分が残っている程度に軟質で脆いもの。								○	
	割れ目	・割れ目がほとんどなく連続して安定している。				○					
		・岩質は新鮮で堅硬であるが割れ目は比較的少ない。					○				
		・岩質は堅硬であるが層状をなす岩で層理あるいは片理が認められ、その面に沿って割れやすいもの。						○			
・岩質は比較的堅硬であってもきれつが細く入っていて、その間隔には薄い粘土が挟在するもの。											
断面状態	・層理の顕著な岩で非常に薄く割れやすいもの。										
	・割れ目がきわめて多いものできれつ以外のいかなる部分からでも容易に削ることができるもの。							○			
	・幅の狭い小断層を挟むもの。						○				
	・粘土化のあまり進んでいない破碎帯で、粘性土と細片状の岩片の混合した状態になって、幾分硬い所も含まれているもの。								○		
湧水劣化	・著しい偏圧、周圧を伴うような、かなり幅を有する粘土化が著しい断層、破碎帯や大きな崖地帯等。									○	
	湧水					○	○				
	・水による劣化はない。							○			
	・水による劣化は少ない。										
直近でボーリングを行った場合	・水により鏡が軟弱化する場合はDⅡ								○		
	・水による劣化が著しく軟弱化を生ずる。									○	
	RQD (%)	A : 80以上 B : 90~60 C : 70~20 D : 20程度以下				A	B	C	D		
	一軸圧縮強度					kgf/cm ²					
直近の計測結果	N 値										
	測 点					STA No.					
	水平内空変位					mm					
既施工区内の支保の観察	天 端 沈 下					mm					
	支 保 変 状	1. 変状なし 2. 変状あり									
総合評価	(2つの場合に記入)										
	(記入)										
						A	B	C	D	E	
								I	II	I	II

注) 「切羽の観察」は該当する○を塗りつぶす。

(日本道路協会(1993.11):「道路トンネル観察・計測指針」, 99p.)

表4-5 切羽観察表による地山総合評価点(案)

硬 岩 地 山

(単純平均)

	項 目	評価番号 (v)	換 算 点 (E _i)	評 価 点
A	切羽の状態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	A~Hまでの E _i 値の、 単純平均を 評価点とする
B	素掘面の状態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
C	割れ目の形態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
D	割れ目の間隔		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
E	割れ目の状態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
F	割れ目充填物		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
G	湧水		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
H	水による劣化		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	

硬岩中の風化・変質帯及び破砕帯(軟岩地山にも摘要する) (単純平均)

	項 目	評価番号 (v)	換 算 点 (E _i)	評 価 点
A	切羽の状態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	A~Iまでの E _i 値の、 単純平均を 評価点とする
B	素掘面の状態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
C	割れ目の形態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{5}$	
D	岩石の 風化変質		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{5}$	
E	割れ目の間隔		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{5}$	
F	割れ目の状態		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{5}$	
G	割れ目充填物		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{5}$	
H	湧水		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	
I	水による劣化		$E_i = (v-1) \times \frac{100}{4}$	

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
支保パターン									
A									0 ~ 18
B									8 ~ 36
C I									26 ~ 49
C II									39 ~ 71
D I									61 ~ 89
D II以下									79 ~ 100

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
支保パターン									
A									
B									0 ~ 16
C I									6 ~ 38
C II									28 ~ 61
D I									51 ~ 83
D II以下									73 ~ 100

表-4.6 総合評価点の算出例

硬岩地山

地山区分	項目別評価								総合評価点 (上限値)	評価点範囲 (上・下限値それぞれ±5を加味)
	A	B	C	D	E	F	G	H		
A	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0～18
B	1	2	2	2	2	1	1	1	13	8～36
CⅠ	1	2	3	3	3	2	2	2	31	26～49
CⅡ	2	2	3	4	3	3	3	2	44	39～71
DⅠ	3	3	4	4	4	4	4	3	66	61～89
DⅡ以下	4	4	5	5	5	4	4	4	84	79～100

硬岩中の風化・変質帯及び破碎帯、(軟岩地山にも適用する)

地山区分	項目別評価									総合評価点 (上限値)	評価点範囲 (上・下限値それぞれ±5を加味)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0～16
CⅠ	1	1	2	2	2	2	2	1	1	11	6～38
CⅡ	2	2	3	3	3	3	3	2	2	33	28～61
DⅠ	3	3	4	4	4	4	4	3	3	56	51～83
DⅡ以下	4	4	5	5	5	5	5	4	4	78	73～100

4.3 切羽前方区間の解釈・評価

切羽前方区間は、既施工区間の地山総合評価を基本とし、反射波の客観的解釈から地質状況と切羽現象を評価し施工に適切に反映させる。

(解 説)

HSPによって得られる未掘削領域の情報は、切羽前方地山とトンネル側方区間（トンネル軸と平行）の反射イベントである。反射イベントの評価は、既施工区間で行った地山総合評価が基本となり、地質出現状況の予測を可能な限り定量的に評価するものとする。

反射波の定量化による地質状況の予測を行った後、支保工選定、補助工法の採用および水平ボーリング等の実施について、既施工区間で蓄積された施工実績を踏まえ判断し、施工への提案を行う。

予測区間の切羽観察、計測および施工結果は、即時に既施工区間データとしてフィードバックし、できるだけ反射イベントの定量化に結び付け、施工に反映させていくものとする。

4.4 解釈・評価のとりまとめ

解釈・評価のとりまとめは、既施工区間および切羽前方予測区間の反射イベントと地質状況等が対比でき、かつ施工に反映できる表現とする。

（解 説）

解釈・評価のとりまとめは、HSPの探査目的に合わせ、施工に反映できる表現とする。探査結果の表示は、既施工区間については地質状況・湧水状況・計測および施工実績を表示し、測線設定区間の位置づけを明確にする。予測区間については、反射イベントの評価から支保選定、補助工法の採用および水平ボーリング等の施工への提案を行うとともに、施工実績や切羽観察結果より、反射イベントとの対比・見直しを行う。

解釈・評価のとりまとめの表示は、主に以下の内容を含め、総合解析を行うものとする。

（１）探査結果

測線配置と反射イベントのトンネル出現位置の表示

（２）切羽観察結果

地質展開図、水平地質断面図、地質縦断面図等

（３）計測結果

内空変位、天端沈下の最終値、B計測結果等

（４）既施工区間の観察結果

吹付けコンクリートクラック、ロックボルトのプレートの変状、支保工の変状、湧水量等

（５）施工状況

実施支保パターン、補強支保、火薬使用量

表示方法は、二次元表示を原則とするが、今後は施工中の岩盤挙動や解析結果を三次元的に表示するシステムを指向し、三次元的に可視化して掘削工事に反映させることが望ましい。

5 トンネルHSPの利用法

5.1 トンネルHSP探査の直接的目的

トンネルHSPの直接的目的は、以下の通りである。

- ① 断層破碎帯等の地質急変部が存在するか否かの確認
- ② 事前調査で確認された断層破碎帯等のトンネル坑内での位置確認
- ③ 断層破碎帯等の規模（坑内での分布距離）
- ④ トンネルとの交差角度・方向
- ⑤ 断層破碎帯等の特性
- ⑥ 既施工区間の地山弾性波速度、緩み層の把握

（解 説）

- ① HSPは反射波を利用した探査であり、反射波の強弱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。従って、切羽状況が急激に悪化する断層破碎帯等は明瞭に把握される。
- ② 測定記録上では、硬岩地山の方が軟岩や土砂地山に比べて波動の卓越周波数が高く波長が短いため、時間断面での反射面検出の精度は良いと考えられる。しかし、距離断面では弾性波速度が速いほど速度変化による誤差が大きくなり、また波長が長くなる。
- ③ 断層破碎帯等の規模の確定については、層厚および波動の波長以外にも音響インピーダンス比やその他の条件が影響するものと思われるが、硬岩地山での探査実績では数10cm程度のシームまで検出されている。
- ④ トンネル工事において、同程度の断層破碎帯であっても、トンネルとの幾何学的な位置関係により施工に対する影響は大きく異なる。概念的には、トンネルに対する幾何学的パターンは図-5.1の通りに整理できる。

HSPでは不連続面の走向傾斜を一意的に決めるのは困難であるが、事前地質調査結果から走向または傾斜が判明しているならば、それを加味して最適な結果が求められる。また、換気坑や退避坑を利用して測線に対するオフセットを取ることで、方向検出への改善が期待される。

- ⑤ 波動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波の極性は入射波と同じになる。一方、硬質から軟質に変わる境界面に波動が入射した場合、そこから生じる反射波の極性は入射波と逆になる。よって、直接波と反射波の極性を比較することにより、岩質パターンの変化（硬→軟、軟→硬）を把握することが可能となる。

但し、地質状況が序々に悪化する場合は、一般的に強い反射波が出にくいため識別することが困難である。また、HSPは直接的に貯留層の有無を把握することは難しいものの、探査結果と地質状況の総合的な検討により間接的に推定することは可能であろう。

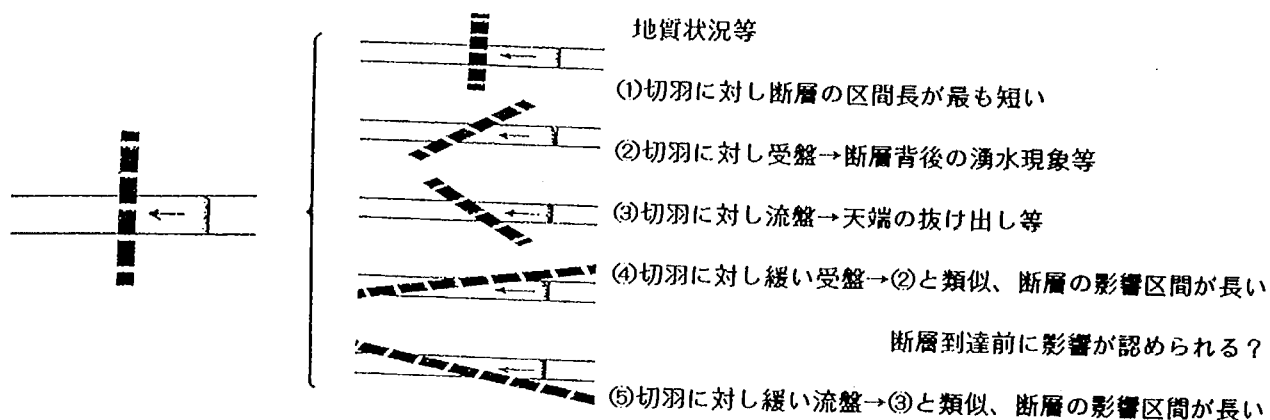
- ⑥ HSPの探査時には、既施工区間に測線を配置し、この範囲での弾性波速度、緩み層厚を得ることがで

きる。これは、NATMの計測Bに含まれる調査項目と同じである。

①平面的にはトンネルと直交するが、傾斜方向と傾斜角が変化するパターン

平面図

断面図



②平面的にトンネルと斜交するパターン

断層通過後の影響が長引く？

(断面的には①と同じだけの組み合わせがある)

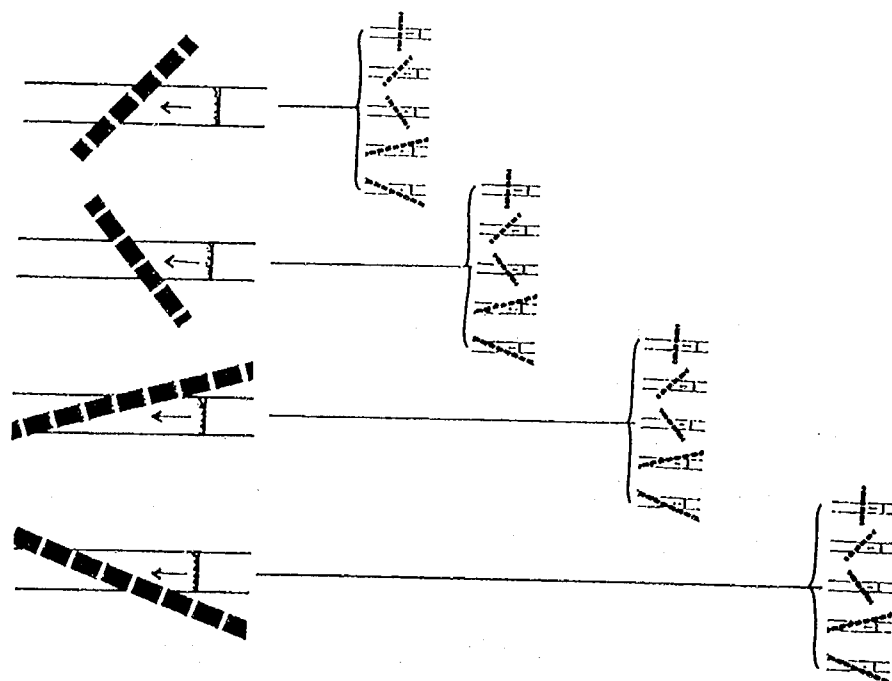


図-5.1 トンネルと断層破碎帯の幾何学的パターン

5.2 具体的な活用法

トンネルHSPを利用するには、次のような利用法がある。

①先進ボーリングの代用として

- ・地質急変部があるかどうか判断したい場合
- ・推定断層破碎帯の出現位置の確認をする時
- ・掘削中の不良地質の終了位置を把握したい時
- ・急速施工トンネル、TBMトンネルで早期に前方地質を判断したい場合
- ・工程的、経済的に制約がある場合

②先進ボーリング実施前の調査として

- ・先進ボーリングが必要かどうか判断根拠を得たい場合
- ・何時何処から開始するか判断する時
- ・穿孔長、穿孔方向などの判断をする時

③先進ボーリングとの併用として

- ・先進ボーリングのみでは得られない、断層等の方向性、連続性等を把握し、先進ボーリング調査結果の効率的活用を図る場合

④簡易なさぐりボーリング等との併用として

- ・のみ下がり、給圧、トルク、スライム、湧水情報の有効利用を図りたい場合

(解 説)

既存調査法として比較的地位の高い坑内先進ボーリング（コア抜）は、期待される地質情報に対してかなりの情報が提供されるものの、その限界についての認識を十分に理解した上での適用が必要である。先進ボーリングを実施する際の留意点としては、次に述べる点が代表例として挙げられる。

① 坑内先進ボーリングを実施する際には、事前調査結果から推定される不良地質の手前から穿孔を開始するが、実際その不良地質が存在するか否か自体が問題であり、もし存在しなかった場合は高価な調査費が無駄に帰す危険性を孕んでいる。

② トンネル工事において、同程度の断層規模であっても、トンネルとの幾何学的な位置関係によって施工に与える影響は大きく異なる。先進ボーリングのみでは、断層の方向性が不明であるため、坑内での最初の出現位置や分布距離に対し確実な情報が得られる保証がない。トンネルに対する断層の幾何学的パターンの概念図を図-5.1に示す。

一方、HSPは切羽前方情報の全てを提供する万能な調査技術というわけではなく、先進ボーリングでなければ得られない地下水情報などもある。HSPと先進ボーリングの比較について表-5.1に一覧する。HS

Pは、水平ボーリングと比較し、計測作業の迅速性、経済性において特に優位であり、かつ計測Bに当たる情報も得られる点に特徴がある。

表-5.1 トンネルHSPと坑内水平ボーリング（コア抜）の比較表

情 報 \ 調 査 法		トンネル HSP	水 平 ボーリング	備 考（HSPについて）
①	断層等の有無の確認	◎	◎	
②	トンネルフォर्मーションでの位置確認	○	○	
③	坑内での分布距離	○	○	
④	トンネルとの交差角度・方向	○	×	
⑤	角礫状・粘土状・膨潤性等	△	◎	硬質→軟質、軟質→硬質の区別程度
⑥	地下水情報	×	◎	
⑦	地山の弾性波速度・緩み層厚	◎	×	測線区間に限定される
⑧	作業の迅速性	◎	×	準備工事に半日・計測に半日程度
⑨	経済性	◎	×	

6. 適用事例

6.1 調査・研究例

犬狹トンネル現地適用実験

犬狹トンネル現地適用実験グループ

建設省土木研究所

株式会社熊谷組

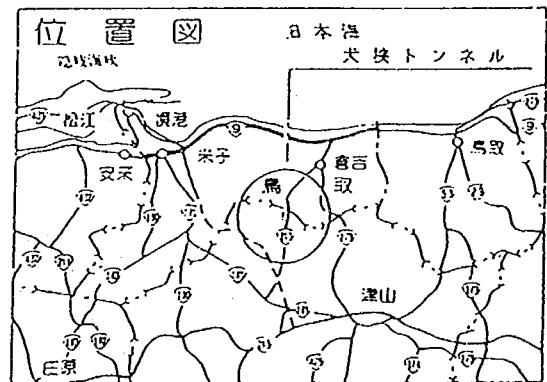
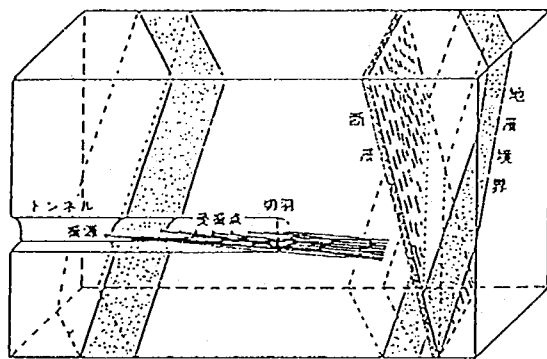
日本物理探査株式会社

復建調査設計株式会社

犬狹トンネル現地適用実験グループは、平成5年度に2回のトンネルHSP法の現地検証実験を実施した。ここでは、そのうち第1回目の探査結果と施工実績の概要について報告する。

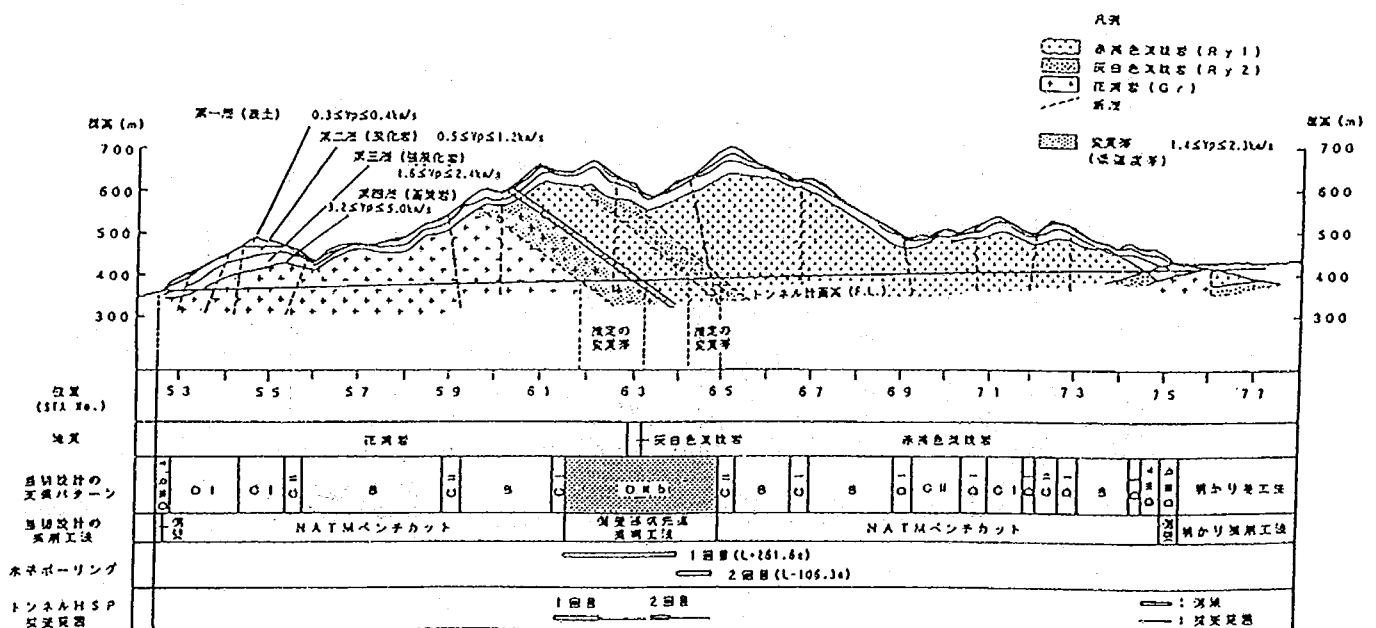
(要 旨)

犬狹トンネルは、一般国道313号の鳥取・岡山の県境部に計画された、総延長2,000mの道路トンネルである。本トンネルでは、事前調査の段階で規模の大きい断層破砕帯及び熱水変質帯が推定されていたため、この区間に対して、当初設計パターンは側壁導坑先進掘削工法(DⅢb)が計画されていた。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。



トンネルHSP法の概念

犬狹トンネルの位置



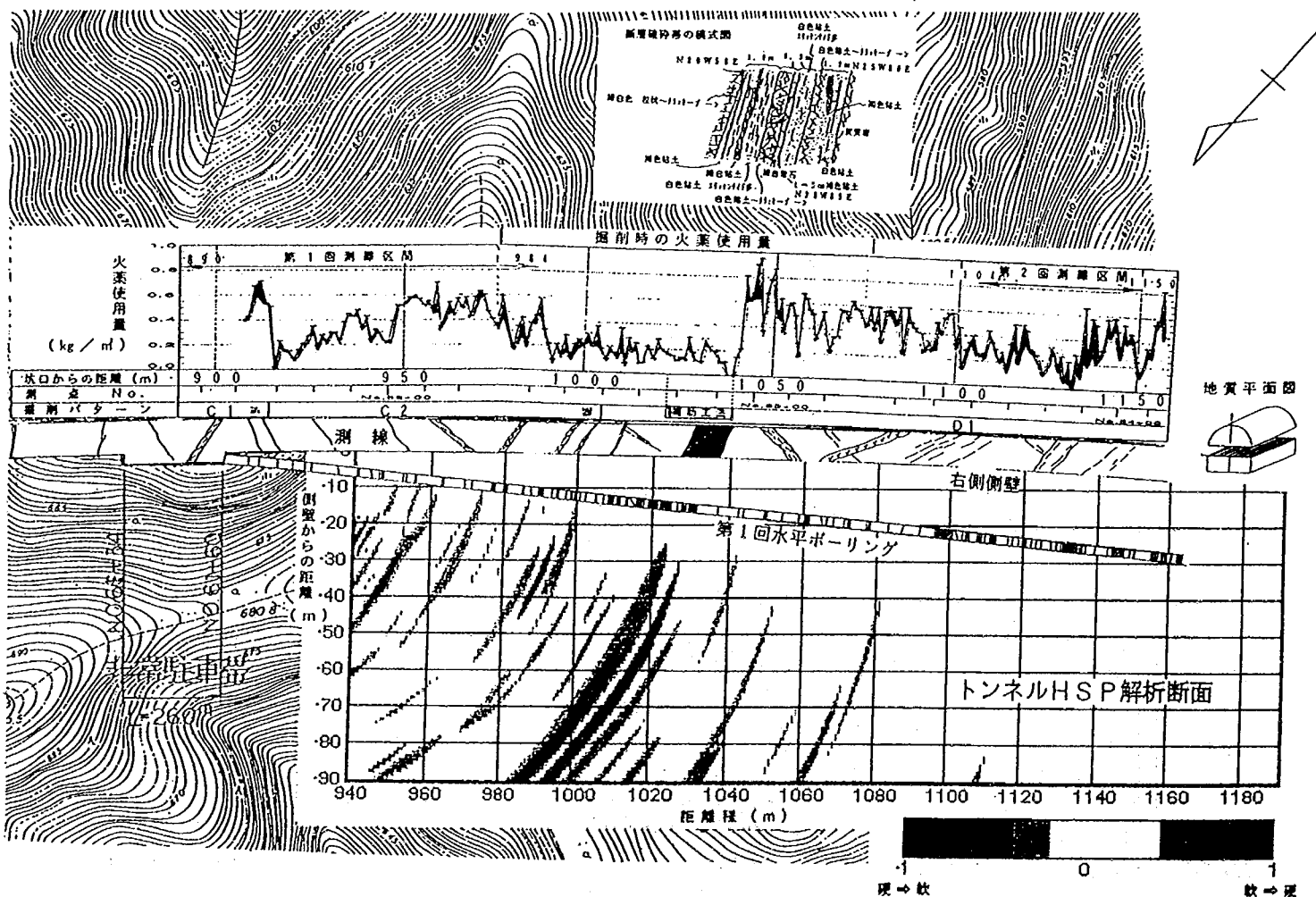
事前調査段階での地質縦断面図

(概 要)

探査実験位置は、坑内で実施した2本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、2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、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い総合的な考察を加えた。

(施工実績との対比)

下図は掘削時の切羽観察から得られた坑内地質平面図、断層破碎帯の模式断面図および水平ボーリング結果と掘削時の火薬使用量を併記している。掘削に伴う切羽状況は、青と赤色の反射波が認められる50m 手前から次第に悪化し始め、掘削時の火薬使用量も減少し始めた。非常駐車帯から実施した水平ボーリング結果から、TD. 1030m付近には粘土層の断層破碎帯の存在が推定されていたため、この段階で支保パターンをC II からD Iに変更した。その後、弱破碎ゾーンが10m 程続いてから、TD. 1040m付近で模式断面図に示す約3.0m 幅の断層破碎帯が出現した。破碎帯区間の施工に当たっては、火薬を使用せずにバックホーによる機械掘削を実施し、補助工法としてリングカット、鏡面吹き付け、注入式フォアパイリングを併用した。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、鏡面の右側半分が最大1支保工分抜け落ちた。幸い、フォアパイリング効果が発揮されたため、天端が抜け落ちることはなかった。破碎帯の通過後には比較的堅硬な岩盤が出現し、火薬使用量も急激に増加した。



トンネルHSP解析断面
地質状況・火薬使用量の関係

トンネルHSP法 安房トンネル現地適用実験

安房トンネル現地適用実験グループ
建設省土木研究所
鹿島建設株式会社
サンコーコンサルタント株式会社
復建調査設計株式会社

(要旨)

本実験は、弾性波によるトンネル切羽前方調査法の実用化にあたり、将来的に最も重要となる湧水を伴う断層破碎帯の予測を行うことを目的に、HSP法を実トンネル切羽へ適用し検証を試みたものである。実験を行った中部縦貫自動車道安房トンネルは、北アルプスの南部、乗鞍火山帯の中央付近に位置し、火山活動に伴う高熱帯と有毒火山性ガスの噴出、熱水帯、火山噴出物の堆積した低速度帯及び湧水を伴う断層破碎帯等の劣悪地質が予想されたため、本坑施工に先立って調査坑が並行して掘削されており、ここで遭遇した断層破碎帯に着目して実験を行った。通常トンネル本坑におけるHSPの計測は、切羽に対して受振点と発震点は同一直線上に配置されることとなるが、安房トンネルでは本坑に調査坑が並行して掘削されているため、受振点と発震点を両坑に設置することにより、より広い範囲の反射面の検出が可能と考えられる。

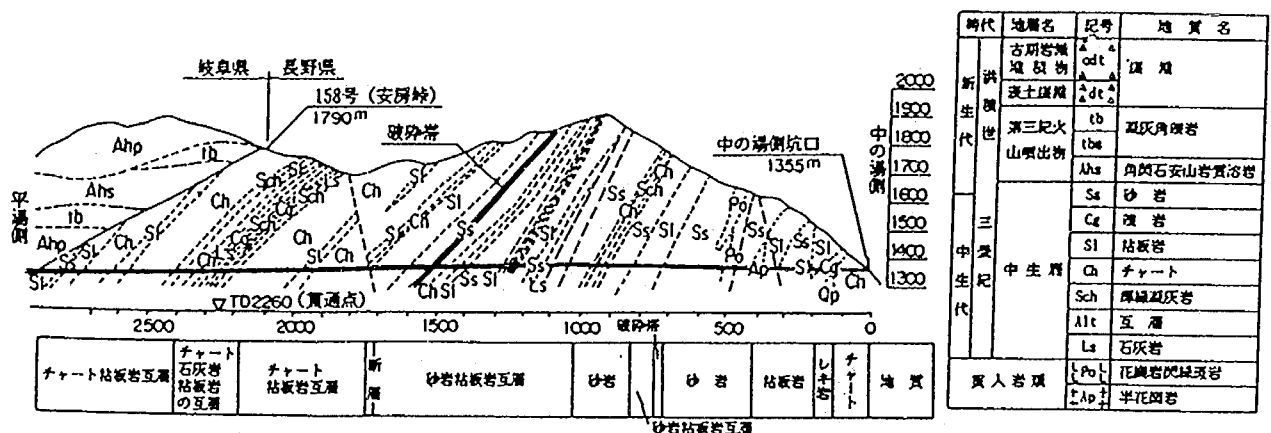


図-1 安房トンネル（中の湯工区）地質縦断

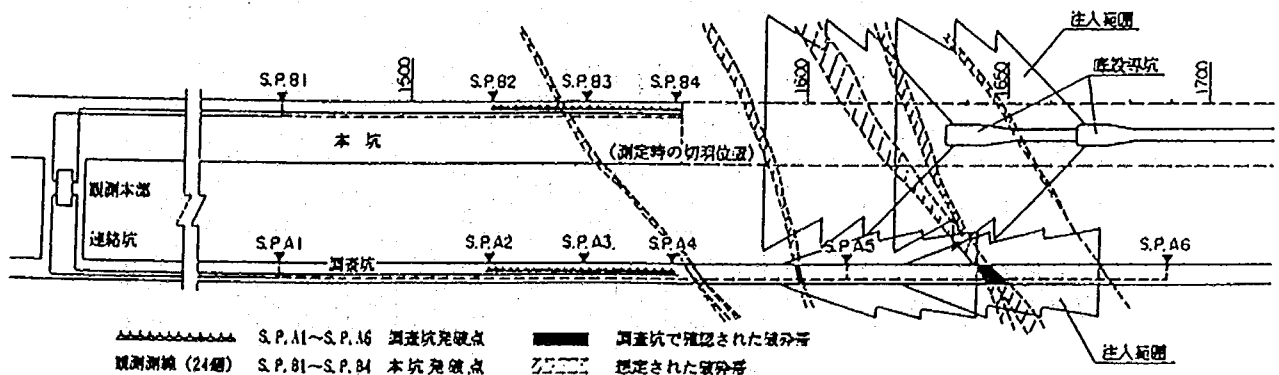


図-2 HSP測線配置

(H S P 解析結果)

今回の実験では、とくに顕著な反射面（大規模な断層破砕帯）の存在を検証することはできなかったが、比較的反射波の相対強度の大きいイベントについて実際の地質構造との比較を以下に示す。

- ①…本坑TD1595付近；調査坑から連続する断層破砕帯で、F-2断層の延長と判断される。調査坑TD1575で注入残存湧水が粘土層にまわり切羽が崩落した断層破砕帯に相当し、本坑においては事前注入域の先端部で地質が悪くフォアパイル工を施工した。
- ③…調査坑TD1620付近；調査坑で遭遇した最大規模の破砕帯で、F-3断層に一致する。破砕帯での全断面掘削は不可能となり上下半の2分割で掘削した。ロックボルトの打設も不可能となり鋼支保工H-150を建込み一部鉄矢木による縫地を行いながら施工した。
- ⑤…本坑TD1620左、側方；切羽での破砕帯の確認はされなかったが、本坑において事前に注入を実施した区間で、湧水もほとんど無く、注入区間外に比べて注入区間内の変位は小さく抑えられており、地山改良の効果が現れていたものと考えられる。F-3断層の延長の可能性も考えられる。
- ⑥…調査坑TD1560付近；チャートのレンス状ブロックの分布と一致しているが、破砕はされていない。F-1断層とF-2断層のほぼ中間地点に位置する。

実際の施工状況においても、本坑掘削時は調査坑に比べて大きなトラブルもなく施工されている。HSPの解析結果から得られたイベントについては地質との対応は見られるものの、施工に影響を及ぼす程の反射面ではなく、事前の対策による水抜き効果（底設導坑）や注入効果が地山改良に寄与していたと推測される。

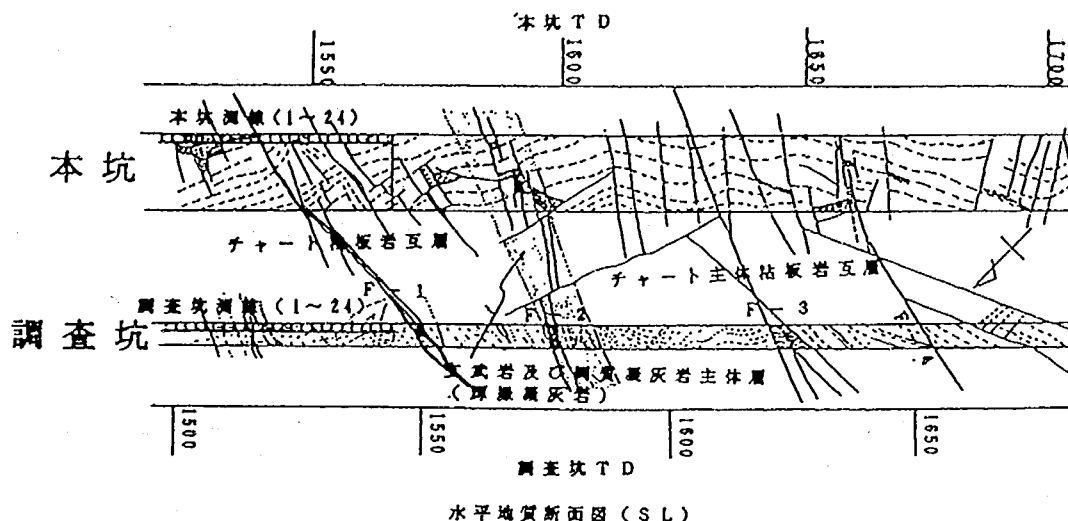


図-3 試験区間の地質構造

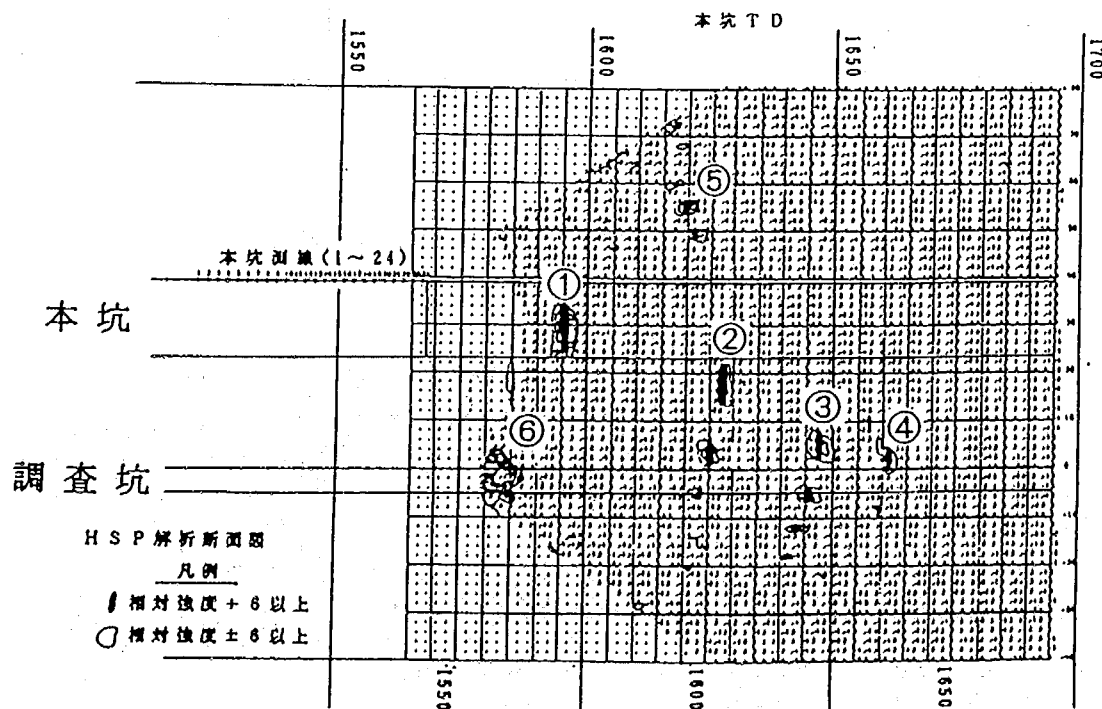


図-4 HSP解析断面

トンネルHSP法 朝来トンネル現地適用実験

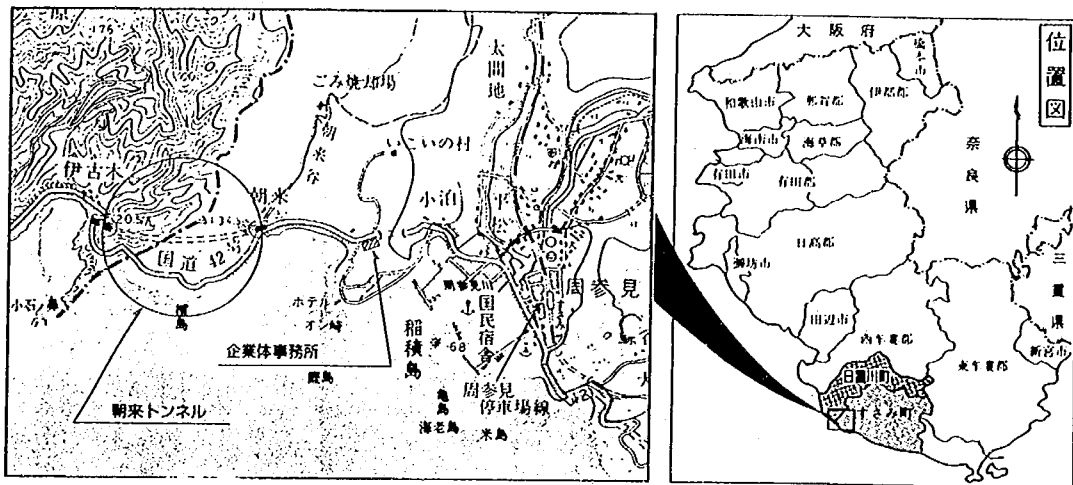
朝来トンネル現地適用実験グループ

建設省土木研究所
西松建設株式会社
サンコーコンサルタント株式会社
大日本コンサルタント株式会社

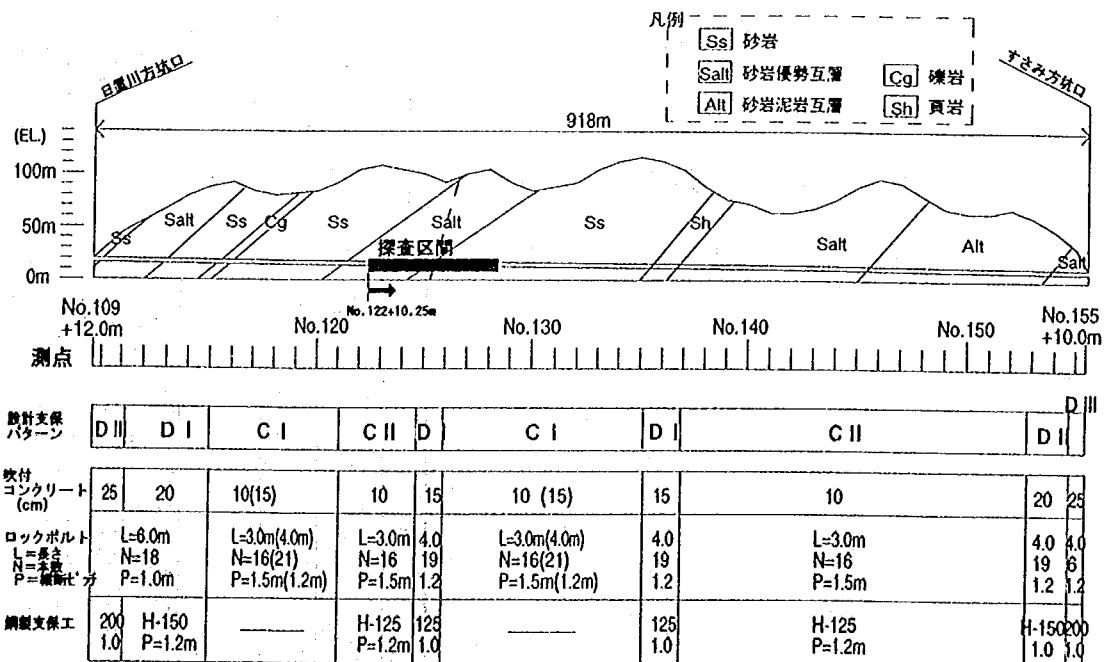
朝来トンネル現地適用実験グループは、平成6年5月19～21日にかけて、和歌山県日置川町の国道42号線朝来トンネルにてトンネルHSP法の現地適用実験を実施した。その探査結果と施工実績の概要について報告する。

(要旨)

朝来トンネルは、和歌山県南部の日置川～すさみ間に計画された延長918mの国道トンネルである。本トンネルは、「四万十帯」として構造区分される位置にあり、塊状砂岩や砂岩・頁岩互層などから構成されると推定されていた。そこで、本探査は、切羽前方約60mの位置に予想されていた断層を含め、掘削に影響を及ぼしそうな弱層（境界）の有無とその位置の判断資料を得るために実施し、探査結果と施工実績の比較からその適用性について検討したものである。



朝来トンネルの位置



事前調査段階での地質縦断図

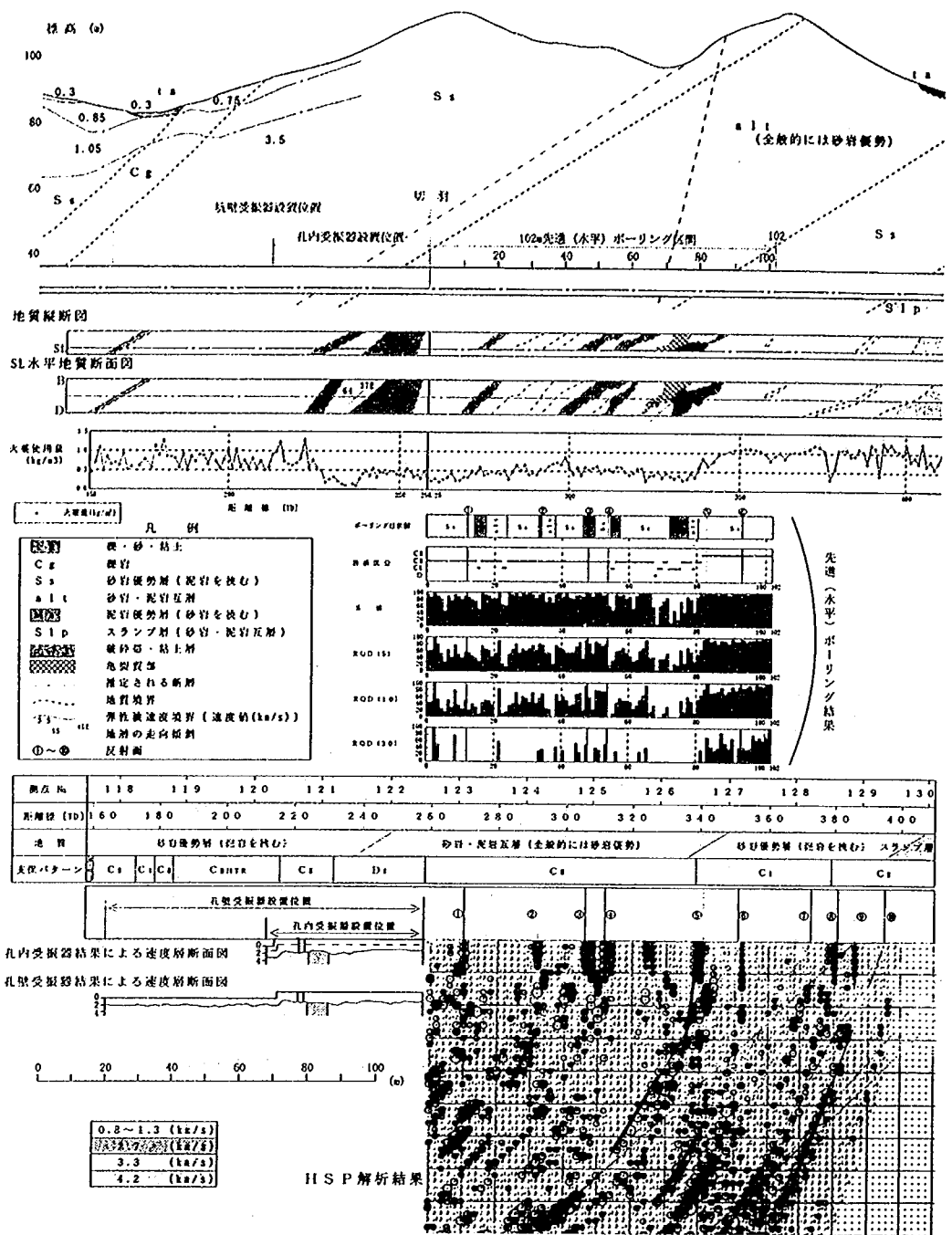
(探査概要)

探査対象範囲は、地質縦断面図内に示すように、断層を含む約100m区間に設定し、掘削に先立ち100mの先進ボーリングを切羽より実施した。測定は、坑内の右側壁に孔内2成分受振器を切羽手前から2m間隔で24点設置し、計12の発振点から地震波データを各々感知・記録する方法とした。解析では、ディフракション・スタック法により最終結果(断面)を得た。予測された反射面に対し、先進ボーリングおよび切羽観察記録に基づく地質状況、火薬使用量、および掘削実績を併せた総合的な考察を行い、施工管理への提言を行った。

(施工実績との対比)

トンネルHSPから検出された10の反射面と先進(水平)ボーリングおよび施工実績に基づく反射面付近の地質状況を比較した結果、8つの反射面が距離2m以内で予測できていた。反射面に対応する地質性状は、砂岩優勢の割れ目発達部もしくは泥岩挟在部であり、トンネルHSPによる切羽前方探査は、四万十層群のトンネルにおいて良好な結果を得ることができた。

トンネルHSP総合解析結果図



HSP 反射面	HSP探査解析結果			地質観察結果		地質状況に対する HSP反射面の 評価
	STA. [切羽 距離(m)]	岩質変化 方向と反射面走 向のなす角度	トンネル軸方 向と反射面走 向のなす角度	先進(水平)ボーリングおよび施工実績 による反射面付近の地質状況	評価	
①	122+22 [11.8]	傾→傾	(90°)	掘削実績でも砂岩から泥岩へと移行する境界部に相当した。	○	2m
②	124+4 [13.3]	傾→傾	(90°)	掘削実績でも砂岩互層へと移行する境界部に相当した。	○	2m
③	124+18 [14.7]	傾→傾	63°	掘削実績でも砂岩から泥岩へと移行する境界部に相当した。	○	2m
④	125+4 [15.3]	傾→傾	(90°)	掘削実績でも砂岩から泥岩へと移行する境界部に相当した。	○	0m
⑤	126+13 [18.2]	傾→傾	80° (90°)	掘削実績でも泥岩優勢の脆弱層部から砂岩へと移行する境界部に相当した。火薬使用量も増加の傾向にあり反射面と地質状況とは対比される。	○	2~3m
⑥	127+3 [19.2]	傾→傾	60°	柱状・棒状コアで採取され良好な岩質区分(C11)を示した。この付近はRQD(D30)で0という結果を得た箇所(TD.91~92m)であるが、掘削実績では特に周囲との変化が認められなかった箇所であり、反射面と地質状況とは対比されない。	△	2~3m
⑦	128+5 [114.8]	傾→傾	61°	掘削実績では砂岩に相当し、地質状況に変化は認められない。しかし、火薬使用量がこの付近のみ減少しているのが局所的な弱層部であった可能性がある。	×	-
⑧	128+13 [122.8]	傾→傾	62° (90°)	掘削実績では砂岩から砂泥互層へと移行する境界部に相当した。	○	2~3m
⑨	128+18 [127.8]	傾→傾	44° (90°)	掘削実績では砂泥互層から砂岩へと移行する境界部に相当した。	○	0~1m
⑩	129+7 [136.8]	傾→傾	63° or 71°	掘削実績では砂岩からスランプ層へと移行する境界部に相当した。	△	6m

○:比較的良好な対応, △:対応が不明瞭, ×:対応が見られない。

トンネルHSP法

水越トンネル現地適用実験

水越トンネル現地適用実験グループ

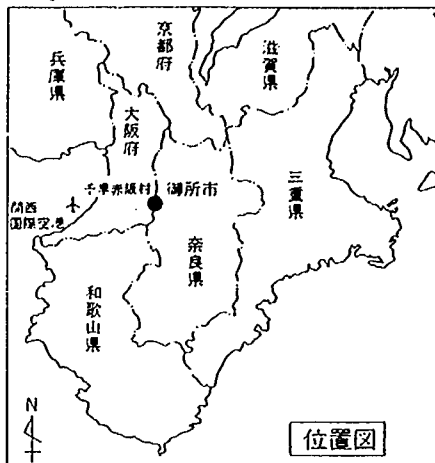
建設省土木研究所

株式会社鴻池組

日本物理探査株式会社

大日本コンサルタント株式会社

水越トンネル現地適用実験グループは、平成5年度にトンネルHSP法の現地検証実験を実施した。以下に、その探査結果と施工実績および地質との相関性の概要について報告する。



位置図

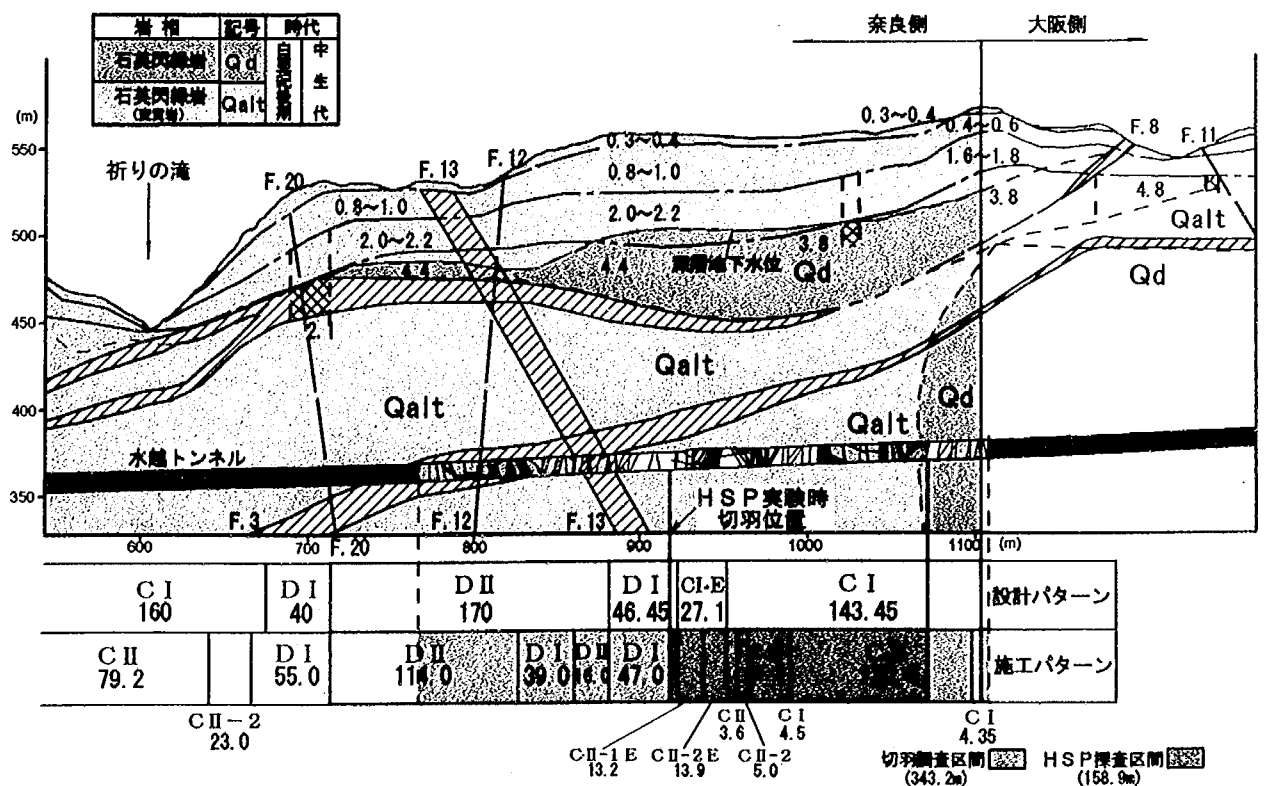
(要旨)

水越トンネルは、一般国道309号線の奈良県と大阪府の境界部に計画された、延長2,370mの道路トンネルである。本実験は、事前地質調査から切羽前方150mに推定されていた石英閃緑岩の堅岩部と変質部との境界およびトンネル軸と平行な断層の検出、実験結果と詳細な地質観察記録、施工実績との対比を目的に実施したものである。

(概要)

切羽地質観察記録や岩級占有率、地山評価などの資料に基づいて地質状態を復元し、反射面と地質および施工実績との対比を行い考察した。

検出された反射面は、地質観察記録、施工実績と対比することで、各反射波の意味する施工への影響度を特徴づけられた。地質観察記録は、現地に地質技術者が常駐し岩盤の



地質縦断面図

太郎山トンネルHSP試験報告書

太郎山トンネル現地適用グループ

建設省土木研究所

(株)大林組

復建調査設計(株)

サンコーコンサルタント(株)

1 調査の概要

- (1)調査日時 平成6年7月10日～11日
- (2)調査場所 日本道路公団、上信越自動車道、太郎山トンネル(全長4,303m)西工区
- (3)調査目的
 - 1)新第三紀層の軟岩地山に於いて、断層・褶曲・熱水変質作用により形成された地質劣化部分の位置、幅、性状を推定(図-1)。
 - 2)劣化部における坑壁部分のP波速度の調査。
 - 3)地質状況、施工実績などとの対比による予測精度の検証。
- (4)調査方法 ゲイジによる発振、単成分(96カ所)および2成分(22カ所)地震計による受振。(観測配置は図-2参照)

2 HSP試験結果

- (1)劣化部における坑壁部分のP波速度は、記録の屈折法解析により3.6km/secである。
- (2)HSP法に関しては、反射記録からまず2次元断面上でマイグレーション処理を行い、反射波の振幅の大きさを円の大きさに表し、振幅の極性に従ってプラスは○、マイナスは●で表示した(図-3)。
- (3)反射面は切羽手前に5カ所、切羽前方に6カ所の、合計11カ所で検出できた。

3 設計、施工実績、トンネル坑内地質との検討結果

- (1)坑内地質状況および施工実績を図-4に示す。
- (2)掘削後の坑内地質状況を見ると、今回得られた反射面はいずれも劣化帯の中にあり、HSP法による劣化帯内部の地質解析を行ったことになる。
- (3)地質および施工関連の調査項目と反射面の関係は、それぞれの特徴を反映して必ずしも一致しないが、その中でも多くの調査項目で変化を伴う反射面も認められる。

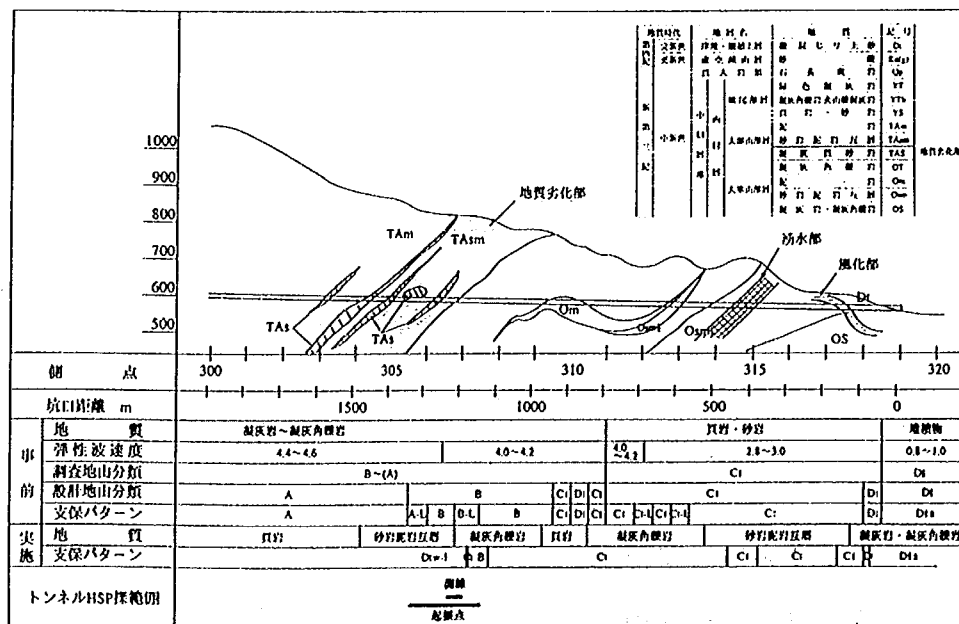


図-1 地質概要

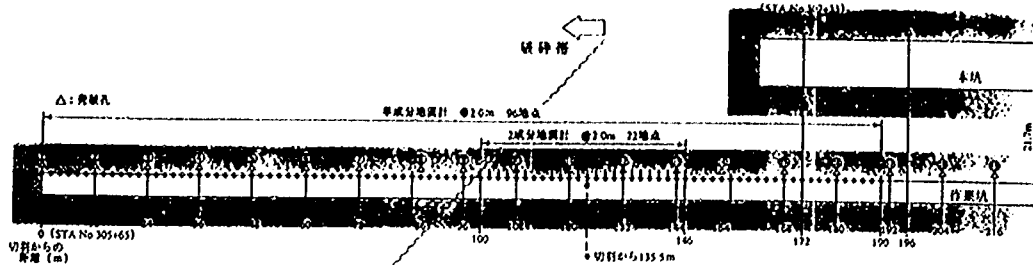


図-2 観測配置

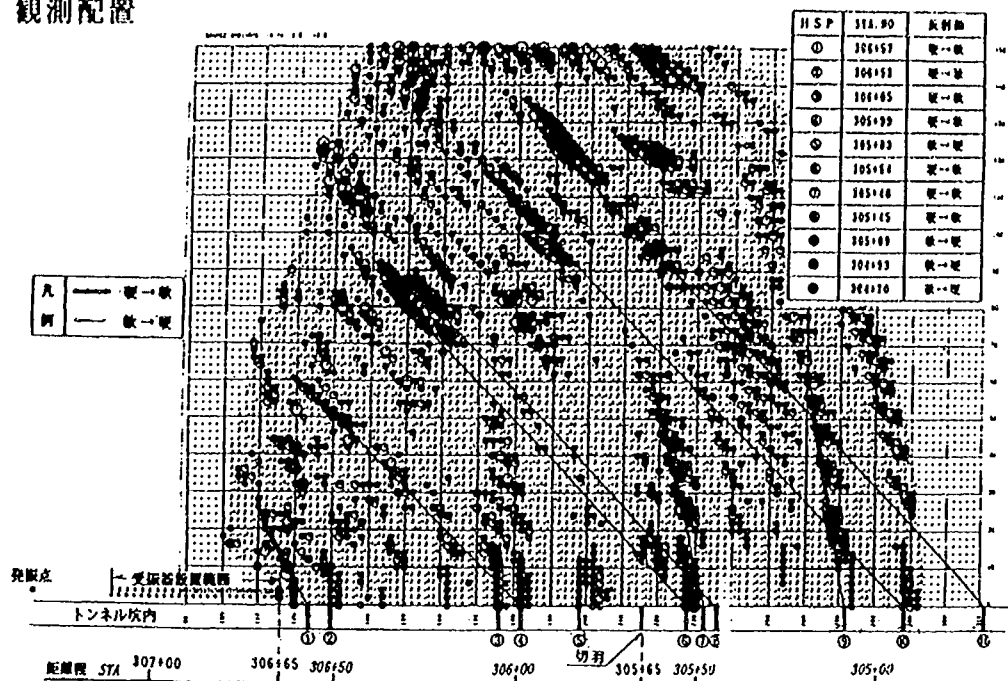


図-3 HSP法の解析結果

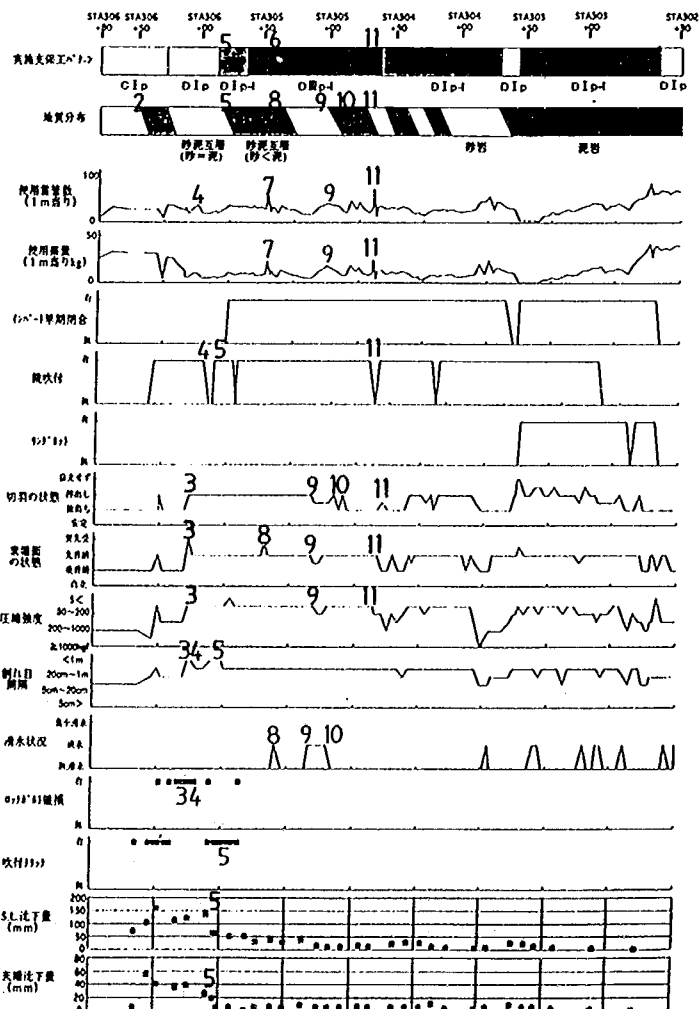


図-4 施工実績と

坑内トンネル地質状況

図中の数字は、図-3の反射面の番号に対応。

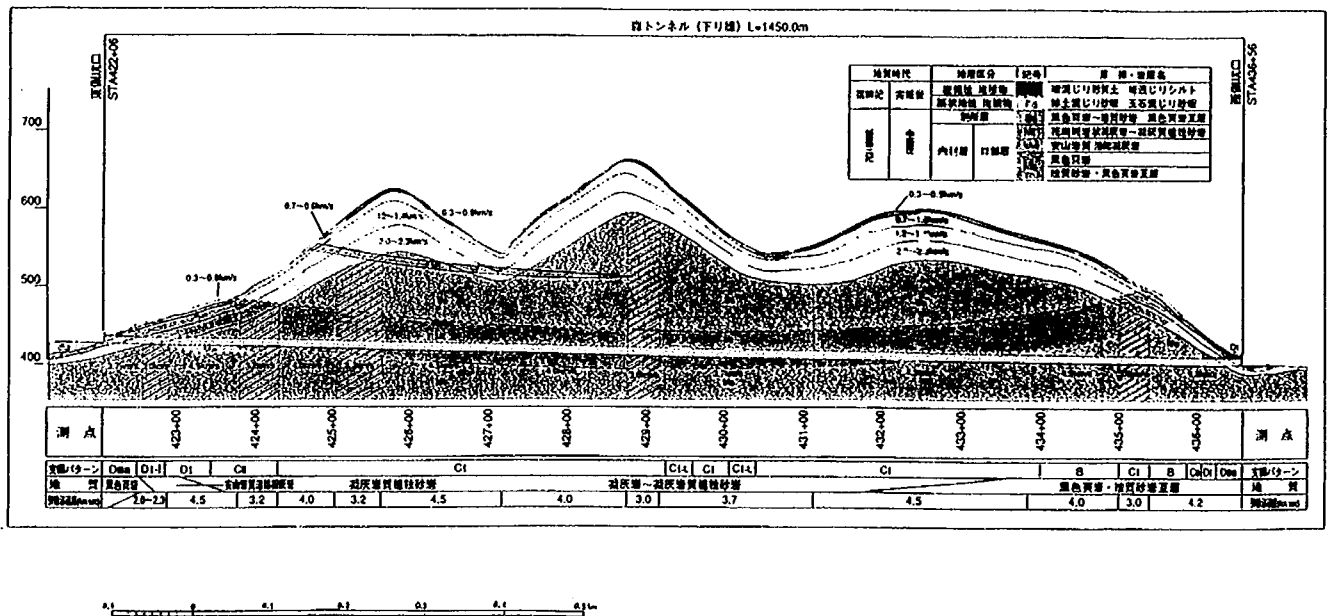
トンネルHSP法 森トンネル現地適用実験

森トンネル現地適用実験グループ
建設省土木研究所
佐藤工業株式会社
大日本コンサルタント株式会社
サンココンサルタント株式会社

森トンネル現地適用グループは、平成6年11月26日にトンネルHSP法の現地適用実験を実施した。ここでは、その際の探査結果と施工実績の概要について報告する。

(要 旨)

森トンネルは、上信越自動車道のうち長野県更埴市に計画された延長1450mの道路トンネルである。事前調査によると、トンネル地質の大半は新第3紀の内村層に属する花崗斑岩状凝灰岩～凝灰岩質粗粒砂岩(Mt)であり、始点側坑口付近の約250mが黒色頁岩・珪質砂岩互層であると想定された。本検証実験は、事前調査により想定されていた低速度帯(STA425+60～STA425 付近)の位置、幅および地質変化の度合い等の確認と、施工中調査としての同法の適用性についての検討を目的として実施したものである。



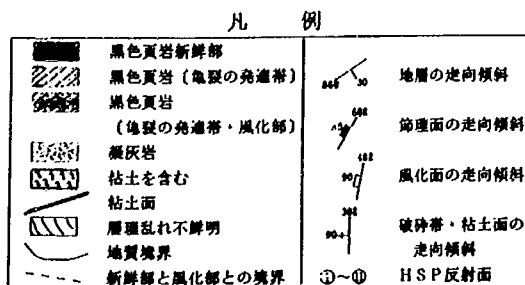
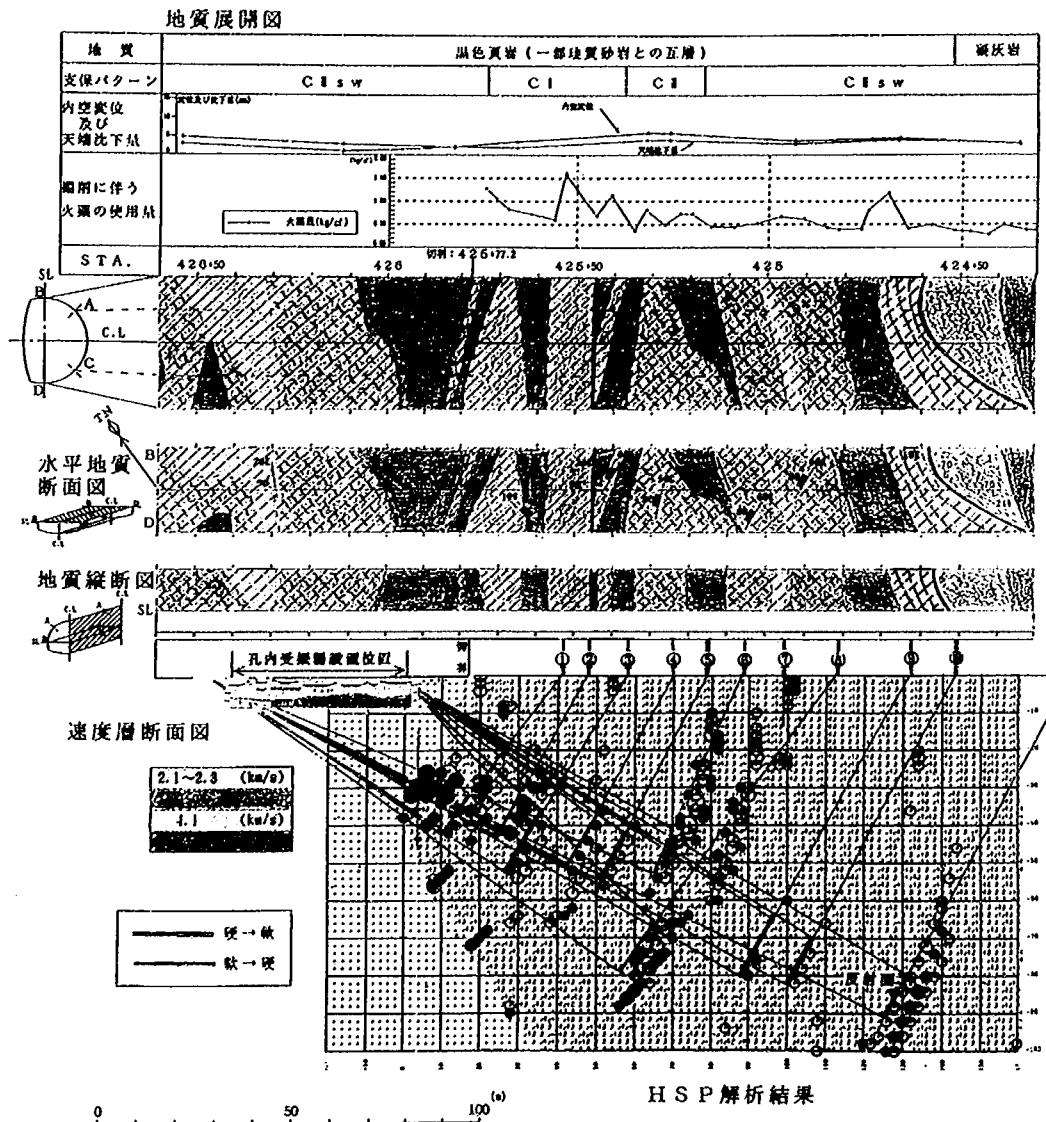
事前調査段階での地質縦断面図

(概 要)

本実験では2成分孔内横受振器を用いて、トンネル軸方向とトンネル直行方向の2成分の測定を行った。また、孔壁にも受振器を設置し、ゆるみ域の(孔壁)の地震波を測定し、各受振点ごとに走時の補正を行った。解析では波形処理を行った後に、ディフラクションスタック(マッピング)法による処理を行った。実際の地山状況については切羽観察記録より作成した地質展開図と施工実績があり、それらとHSP法による予測結果とを比較して適用性の検討を行った。

(施工実績との対比)

下図にHSP法による予測結果と地質展開図、掘削に伴う火薬使用量、内空変位と天端沈下量および施工実績(支保パターン)の対比を示す。施工実績による支保パターンでは、反射面がCⅠ、CⅡおよびCⅡ_{sw}(スウェレックスボルト)区間に見られ、特にCⅡおよびCⅡ_{sw}区間とよく対応している。反射現象と施工パターンが細かく対応しないのは、施工段階の支保工の変更が、ある一定区間の地質状況の変化により行わざるを得ないため、ゾーンの判断では探索結果が施工に比較的良好に対応していると言える。また、多亀裂帯の分布は、火薬使用量にも対応しており、多亀裂帯の風化部の火薬使用量は、 $0.5 \sim 0.7 \text{ kg/m}^3$ と小さくなっている。計測工の結果では、内空変位および天端沈下量とも6mm以下を示し、極めて小さい地山変位であり、屈折法の解析から求められたゆるみ域(4~6m)は、発破直後のゆるみに起因し、トンネル掘削後は、このゆるみ域が助長されていないことを示している。この結果は、切羽観察結果による節理分布から推定すると、発破後に硬質なブロック状の岩石によりアーチ効果が発生したことによるものと判断できる。ただし、施工に際しては、坑壁周辺部は、割れ目のために肌落ちしやすい状況となり、当初設計で予定されたCⅠパターンがCⅡパターンを主体とした施工実績となったものと考えられる。



反射面の位置

HSP 反射面	STA.	切羽からの距離	層質の変化	トンネル軸と なす角度
①	425 + 52.00	24.2 (m)	軟→硬	53°
②	425 + 46.00	31.2 (m)	軟→硬	61°
③	425 + 36.00	41.2 (m)	軟→硬	58°
④	425 + 25.00	52.2 (m)	軟→硬	61°
⑤	425 + 18.00	61.2 (m)	硬→軟	63°
⑥	425 + 6.00	71.2 (m)	軟→硬	65°
⑦	424 + 95.00	82.2 (m)	硬→軟	90°
⑧	424 + 82.00	95.2 (m)	軟→硬	54°
⑨	424 + 62.00	114.2 (m)	軟→硬	62°
⑩	424 + 51.00	126.2 (m)	硬→軟	63°
⑪	424 + 21.00	156.2 (m)	硬→軟	61°

トンネルHSP解析断面

トンネルHSP法 西会津トンネル現地適用実験

西会津トンネル現地適用実験グループ

建設省土木研究所

住友建設株式会社

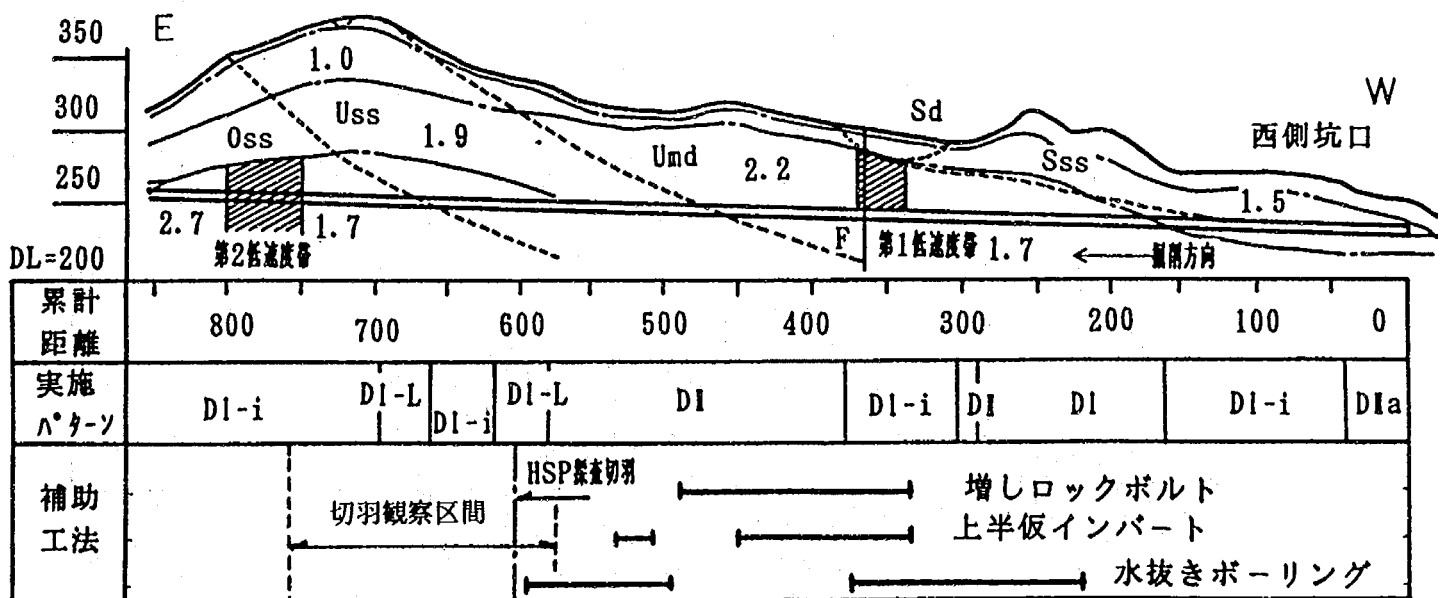
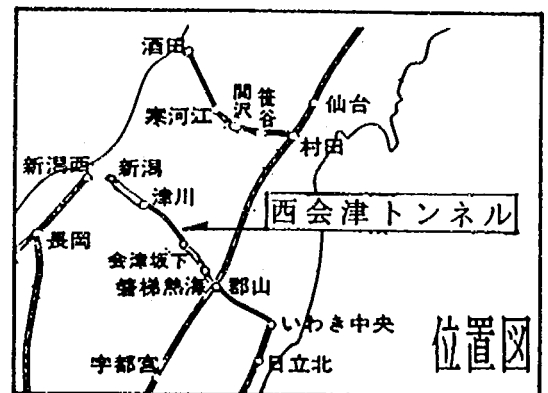
日本物理探査株式会社

復建調査設計株式会社

(要 旨)

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、平成6年12月11日～12日に実施した。

時 代	地層名	記号	岩 層
第四紀	崖錐堆積物	dt	土砂 礫
	湿地堆積物	sd	礫混じりシルト、凝灰岩
	段丘堆積物	td	砂 礫
新第三紀	塩 坪 層	Sss	砂岩、凝灰岩
	漆 窪 層	Umd	泥 岩
		Uss	砂 岩
		Oss	凝灰質砂岩
	荻 野 層	Ogt	含浮石緑色凝灰岩



西会津トンネル地質縦断面図

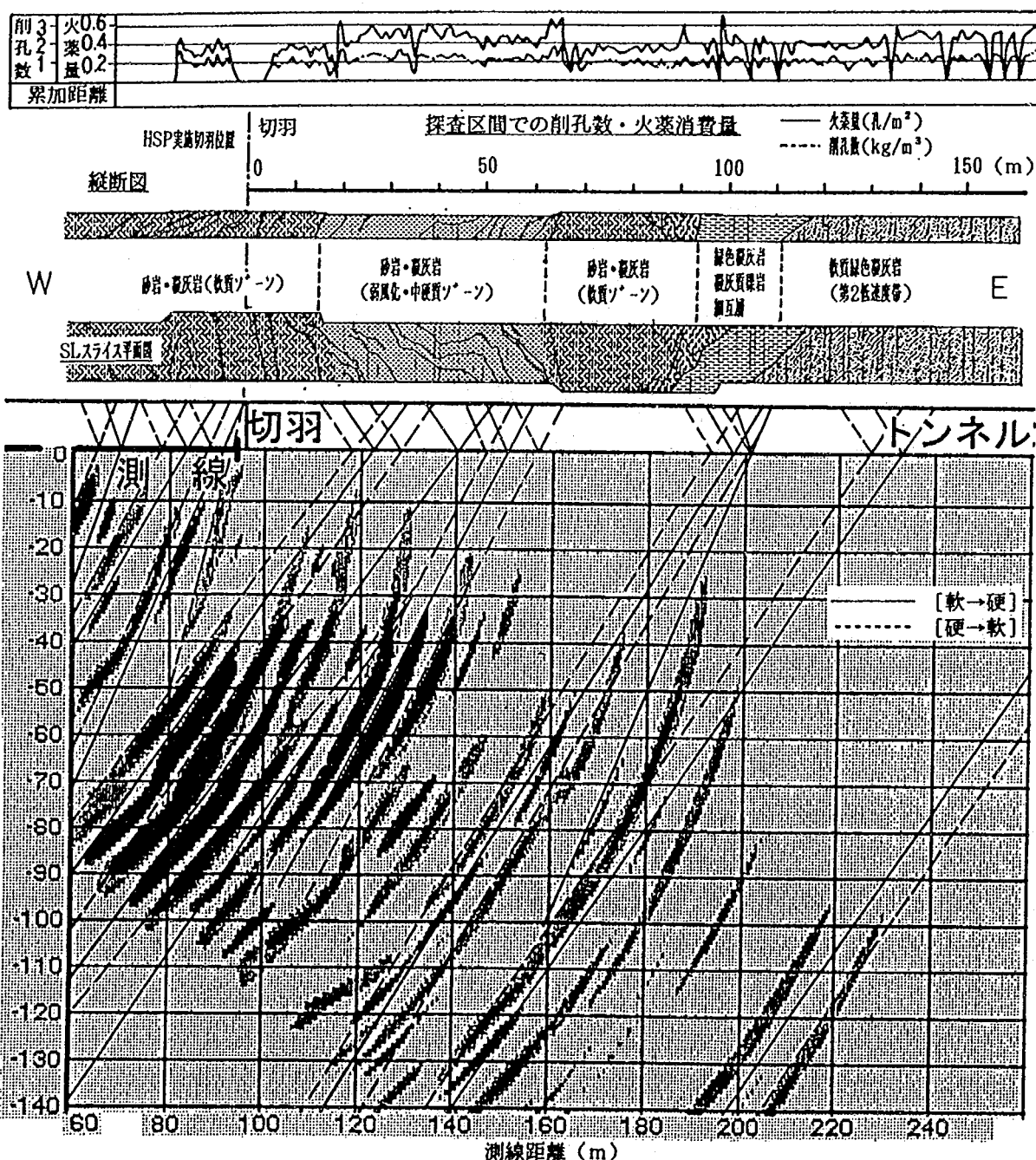
(概 要)

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よう150m手前とした。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。さらに、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及び施工実績との対比について総合的な考察を加えた。

(施工実績との対比)

VSPモードの解析結果による反射面強弱の状態から4つのゾーンが認められた。これらは切羽観察結果による地質状況と概ね良い相関を示し、火薬消費量など施工実績とも相関する傾向を示している。各ゾーンの特徴は以下の通りである。

- ①切羽前方20～60m：砂岩、凝灰岩の中硬岩地山。1～3m間隔の大きな亀裂が発達し、その反映と見られる強い反射面が卓越する。切羽では楔状の岩盤崩落が有り、安全上やや問題があった。
- ②切羽前方60～100m：砂岩、凝灰岩で全体的に軟質で亀裂の少ない塊状地山。反射面はほとんど見られない。
- ③切羽前方100～110m：緑色凝灰岩と凝灰質礫岩の細互層部。下位の粘土レンズを多く含む軟質緑色凝灰岩(第2低速度帯)との境界部で、反射面は見られるが強くない。
- ④切羽前方110m以奥：上記の含粘土レンズ軟質緑色凝灰岩の岩質劣化部で第2低速度帯内部に相当し、反射面は弱くなるが、内空変位がやや大きくなる。



施工実績とVSPモードによる解析結果

6.2 実際への適用例

①トンネル名：国見トンネル

路線名：国道265号道路改良工事

発注者：宮崎県日向土木事務所

地質：秩父古生層

場所：宮崎県

経緯：事前地質調査結果に基づいて弾性波速度の低速度帯部分の先進ボーリングが2箇所で設計されており、このうちの最初の低速度帯部分(STA. 158+4.1～STA. 160+14.1)で設計通りに延長50mの先進ボーリングを行った結果では、予定通りには不良地質が出現せず、これを越えて掘削中に、STA. 162+15.7地点で高圧湧水とともに切羽が流動崩壊する事態を招いた。

探査目的：2回目の不良地質位置を事前に把握し、掘削中に不慮の事故を招かないこと、ならびに、先進ボーリングを最も効果的に行えることを目的に、HSPによって前方探査を行い、その結果に基づいて先進ボーリング位置を決定して所要の成果を得た。

②トンネル名：峠山トンネル

路線名：秋田自動車道

発注者：日本道路公団仙台建設局

地質：新第三紀中新世シルト質凝灰岩

場所：岩手県

経緯：本トンネルの掘削工法は、当初補助ベンチ付全断面工法で計画されていたが、掘削当初の施工実績から鏡面やベンチ自体の自立性が極めて悪いことが判明した。掘削工法選定に当たっては、ある区間の地質状況観察からの判断に頼って来ていたが、補助ベンチ付全断面工法を実施するほどの地山に恵まれず、以後の区間ではショートベンチカット工法が採用されていた。

探査目的：地山が良好化する際には、補助ベンチ付全断面工法を採用する意向であったため、今後の施工法を判断する上で、HSPを実施すると共に、解析結果と広域地質、実績地質の検討を踏まえて、以降の坑内地質の予測を行った。併せて、非常駐車帯の位置を反射波の存在しない地質良好区間に決定した。

③トンネル名：五里ヶ峰トンネル（戸倉工区）

路線名：北陸新幹線

発注者：日本鉄道建設公団北陸新幹線建設局

地質：新第三紀中新世黒色頁岩・凝灰岩

場所：長野県

経緯：本トンネルは、事前地質調査結果から、工区全線に渡り良質な地山($V_p=4.0 \sim 5.0$ km/s)が

予想されていたが、度々予期せぬ大量集中湧水に見舞われ、その度に掘削に難渋していた。このため、平成3年度より毎週水抜き水平ボーリングを実施しながら掘削を行っていた。しかし、湧水は収束傾向を示し始めたため、水抜きボーリングからの出水が無くなればボーリングは終了せざるを得ない状況であった。

探査目的 : 切羽前方の最大土被地点付近には、不良地質帯が予想されていた。当現場は急速施工を実施しており、出水は進行に大きな障害となる。このため、前方地質を早期に把握し、滞水の可能性を有する不良地質が確認された場合は、水抜きボーリングの実施を要請するため、HSPの探査を実施した。

④トンネル名：津久井導水路

路 線 名：宮ヶ瀬ダム導水路トンネル

発 注 者：建設省関東地方建設局

地 質：新第三紀中新世凝灰岩類

場 所：神奈川県

経 緯：事前の地質調査では、地表の露頭数が少ないにも拘らず、弾性波探査が一部を除いて実施されていない。設計ではD区間（10数ヶ所）の性状把握を目的とした水平ボーリングが計画されているが、事前の地質情報が乏しいためD区間の位置が必ずしも明確になっていない。

探査目的 : 本トンネルではTBM掘削工法を採用しており、不良地質に遭遇した場合、施工に著しい障害が発生することが懸念される。D区間の有無・位置・水平ボーリング位置を決定する判断資料として適用した。

参考文献

- 1) 稲崎富士(1993) : 浅層反射法マニュアル, 土木研究所資料, 第3170号, pp. 21-65.
- 2) 日本道路協会(1989.6) : 道路トンネル技術基準(構造編)・同解説
- 3) 日本道路協会(1993.11) : 道路トンネル観察・計測指針

施工管理体制（案）の提言

トンネルは線状の構造物であり地下深部に設けられる場合が少なくないため、設計や施工計画の立案に必要な地山状況を、トンネル全線にわたり詳細に把握することは必ずしも容易でないのが現実である。特に、①トンネル延長が長い、②土被りが深い、③地質の露頭程度が少ない、④地質構造が複雑、⑤地形が急峻、等の悪条件が重なる場合には、事前調査から得られる予測精度にはかなりの技術的限界がある。

予測精度を上げるために事前調査の数量や項目をいたずらに増やすことは、期待する成果に対して投資費用が急激に増加すると考えられ、主観的ではあるものの技術的・経済的に正当と判断されるある妥協点で投資金額が決められていると思われる。このためトンネル工事では、当初設計が多くの課題を残したまま実施されているため、実際の施工時のトンネル挙動が事前の予測とは異なるのが一般的である。注 1)2)

このように、計画地の立地条件、現在の地質調査の技術レベル、経済的な制約等の理由から、事前地質調査は不確定要因を残したままで終了しておりそのまま設計・施工段階に受け継がれているのが実情である。

地山評価の技術的限界や経済的制約等に加え、調査・設計・施工の流れの中に存在する見過ごせない問題点として、当初の地質情報が設計・施工段階に充分伝達されているのかという疑問、時には誤解さえ与えているのではないかという不安がある。このような不備が設計・施工の担当者に与えている影響は、潜在的に大きいものと考えられる。地山情報伝達の障害となっている主要因は、現行の発注体系を背景として副次的に生じている問題であると考えられる。現状の発注形態は、関連法令、行政指導、業界陳情等の背景を受けたものであり、調査・設計・施工の分離発注やコンサルタントの独立性・中立性・守秘義務等が課せられている。このため、各分野の担当者が単発的な業務を分担するに留まっており、地山評価がルート選定から施工管理に至るまで一連の作業として位置づけられていない。

トンネル施工時において、事前調査結果と切羽観察・計測結果・施工実績は、既施工区間および未施工区間に迅速かつ適切に反映させる必要があるが、今後施工する区間においては支保構造の増強・軽減・掘削方法の再検討等に充分活かされているとはいえない。これは切羽前方地質について、従来検討に耐える程の情報が必ずしも得られていなかったこと、および調査業務→設計業務→施工間の忠実な意思疎通が不充分であるため施工段階では事前の価値ある情報を十分に活かし切れていないことに起因している。

トンネルHSPは切羽前方地質の情報を提供するものの、これら切羽観察・計測結果・施工実績に加え、事前の地質調査結果を充分踏襲することによりその成果を最大限に活かすことができる。

価値ある地山情報が忠実に伝達されるためには、

- ① ルート選定から竣工に至るまで、一連の作業として地質調査を位置づけるという幅広い認識が必要不可欠である。
- ② 地質調査、当初設計からの技術的課題の円滑なる継承と透明化を図るため、地質調査業者、設計コンサルタントが施工時にも参加できる機会を設ける必要がある。
- ③ 但し、コンサルタントが業務上知り得た秘密事項の遵守、コンサルタントの中立・独立性を害するような利害関係を持たないことが前提である。

上記の主旨を踏まえた管理体制としては、発注者、調査業者、設計コンサルタント、施工業者により構成される協議会組織等の設立が1つの解決策として挙げられる。

トンネルH S Pを施工中調査と位置づけた場合、この組織は事業全体の流れの中で、付図－1に示すように工事発注後の時期に設置される必要がある。この場合トンネルH S Pおよび観察・計測結果等の施工中調査と地山評価の流れは、付図－2に示す新しい施工管理体制（案）のもとで確立される可能性がある。

新施工管理体制（案）下におけるメリットとして、

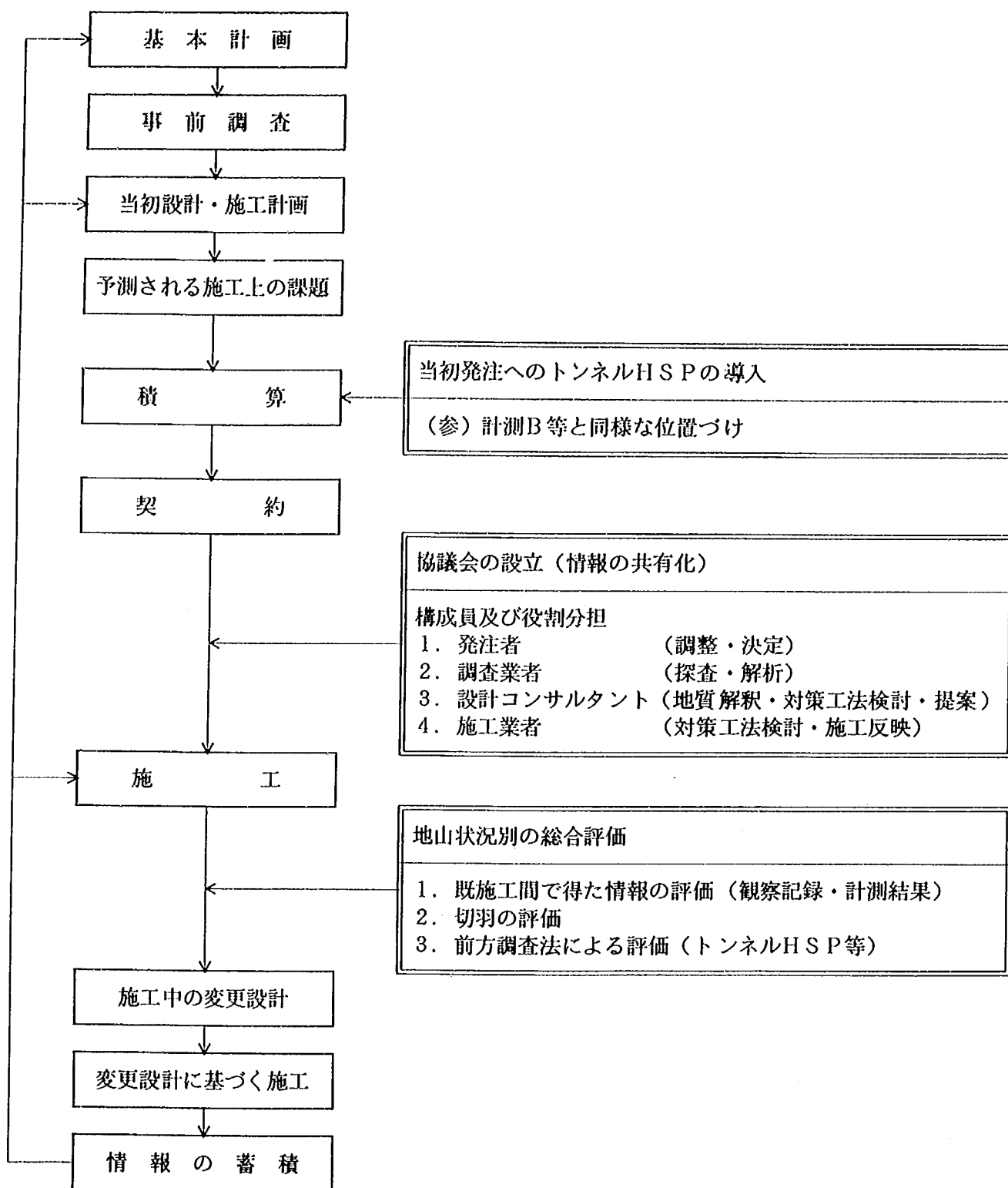
- ① 事前調査、事前設計に関わる情報の共有化が図れる。
- ② 調査、設計時の評価・判断基準が施工時に反映される。
- ③ 変更設計検討の範囲が限定され、時間短縮が可能となる。
- ④ 透明性のある適性な変更が行われ、施工業者のリスクが軽減される。
- ⑤ 事前調査から竣工までの情報が蓄積され、類似トンネルにおける設計、施工の合理化に資することができる。

等が挙げられる。

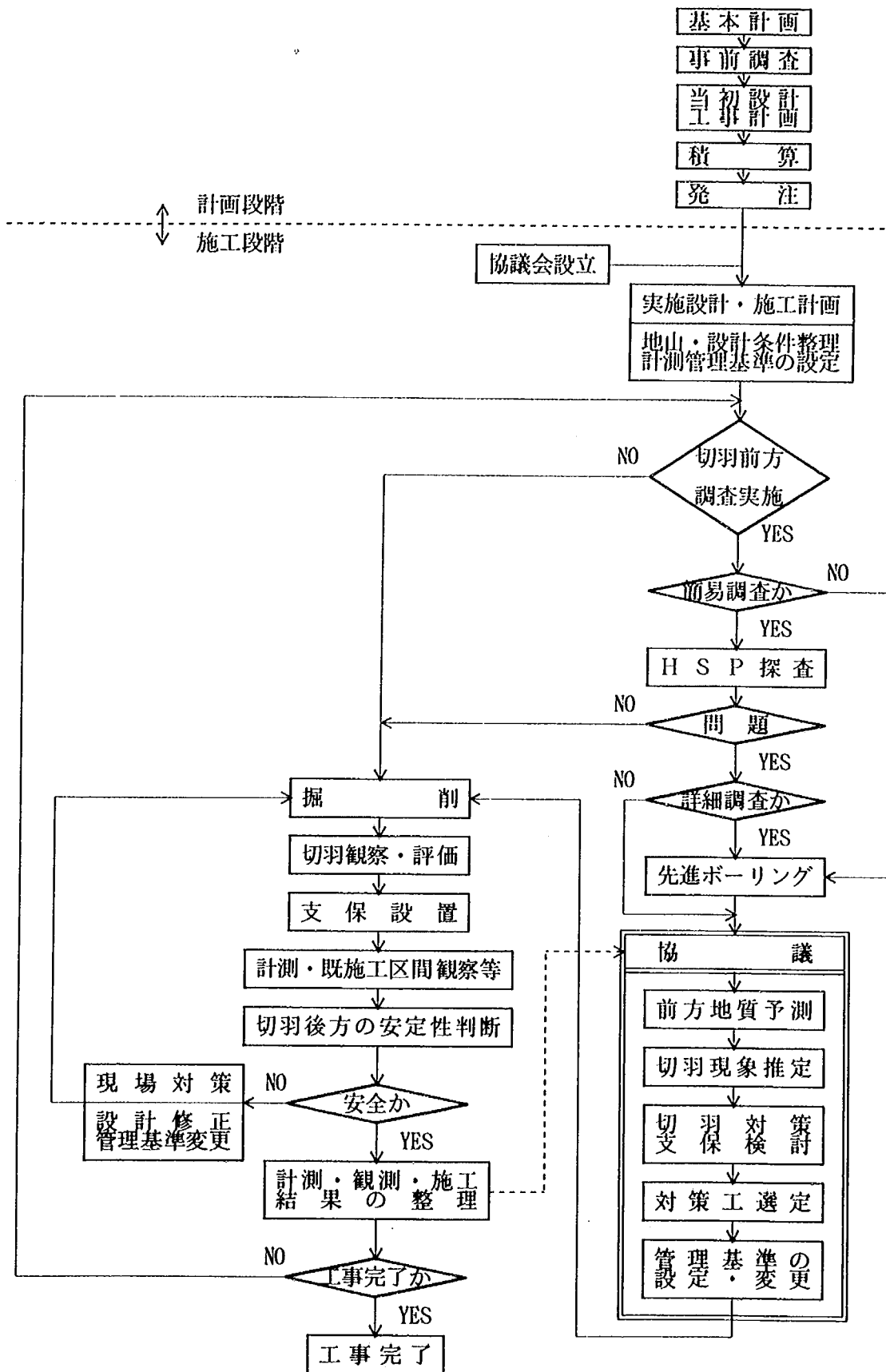
しかし、本（案）は荒削りの素案段階であり、実現に当たっては数多くの課題が山積みされている。今後は、建設業界の将来展望、関連法令、行政指導との絡み、各業界の動向等を考慮し、具体的に煮詰めていく必要がある。

注 1)土質工学会(1986)：NATM工法の調査・設計から施工まで

2)土木学会(1987)：トンネルにおける調査・設計の評価と利用



付図－1 協議会の位置づけ



付図-2 新施工管理体制（案）