

岐阜県のトンネル地質の予測と実際

サコ-アソシエイト(株)名古屋支店

正会員

田辺 謹也

岐阜県高山土木事務所道路建設課

小原 順治

1. はじめに

岐阜県の主なトンネル地質は、①いわゆる中生層（層状～塊状岩盤）、②花崗岩類（塊状岩盤、風化軟岩を含む）および③濃飛流紋岩類（塊状岩盤）に分けられる。この外、局所的には④新第三紀層（堆積性軟岩）および⑤新期火山性堆積層（岩盤および土砂）が付け加わる。安房トンネルは周知のように、①古生層の化石谷を埋積する未固結火山性堆積物からの大量湧水と切羽の自立性欠如および②新期火成作用に伴う地熱と火山性ガスが地質上の問題点となっている。¹⁾ しかし岐阜県のトンネル地質は、昭和62年度にNATMが標準工法となって以来、その大部分が主として節理性岩盤である①～③であると言っても過言ではない。これは④が都市近郊の丘陵性山地を構成しているため、現状では山岳トンネルの対象となっていないこと、また⑤が主として県境の高地に分布しているため未だ計画段階のものが多いためである。

トンネル設計は一般に事前設計段階において、①地質、地山区分予測に基づく標準支保パターンの適用、②トンネル構造の安定性評価のための管理基準値の予測がなされる。これらの予測に際しては、地表踏査、屈折法弾性波探査、ボーリング調査および岩石試験などの事前調査結果が用いられる。しかし屈折法弾性波探査自体、種々の仮定を伴うものであるため、施工時の地質状態は、事前予測と異なることが多々あり、施工時の計測などに基づいて地山評価をし直し、事前設計を適宜修正してゆく手法が取られている。事前設計の大幅な変更を避けるためには、事前の地質、地山区分予測の適中度を高めることが必要である。また施工時の安全性や経済性を高めるためには、客観性の高い地山評価基準が必要である。

本文は岐阜県内の主要地質である中生層、花崗岩類および濃飛流紋岩類に対して施工された3～4例の道路トンネルの地質、地山区分予測と施工実績を比較検討し、事前予測手法の提案を行う。

2. 岐阜県地質の概要

岐阜県内の地質分布を図2.1に示す。いわゆる中生層は県の南西部と北東部に、花崗岩類は南東部と北部に、濃飛流紋岩類は中央部に広く分布している。これらはおおむね硬岩に属し、山地を形成するため、山岳トンネルの対象となっている。本文ではA～Dの4トンネルを検討対象とした。

3. 地山状態の予測

トンネルの事前設計は一般に事前調査結果に基づいて地山区分を実施し、これに対応する標準支保パターンを利用してなされる例が多い。これはトンネルが線状構造物のため、事前設計段階で設計条件を確定できる程度に調査を実施するの

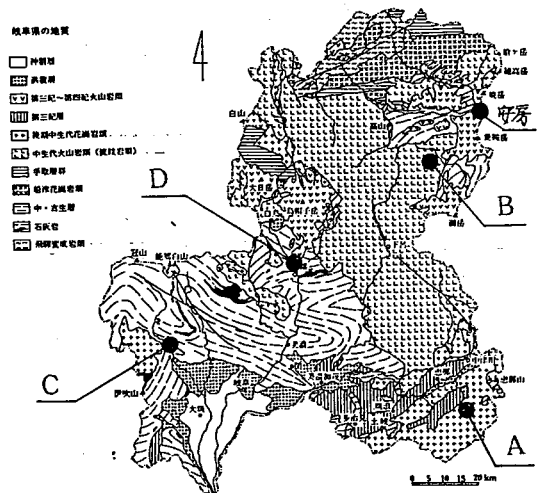


図2.1 岐阜県の地質とトンネル位置²⁾

Geotechnological Predictions and Practice of Tunnel in Gifu Prefecture, Kinya Tanabe : the Nagoya Branch of Suncoo Consultant Co., Ltd., Junji Kohara : the Takayama Branch of the Gifu Public Engineering Part.

は、技術的にも経済的にも困難であるためである。このため必然的に施工中の設計変更が注ざる。大幅な設計変更を避けるためには、事前調査の質を高め地山区分の適中率を高めることが必要である。

(1) 標準示方書の適用

トンネルの調査では地表踏査、屈折法弾性波探査およびボーリング調査が多用される。屈折法弾性波探査は、トンネル全線に対して唯一連続的、定量的情報が得られるため重要な調査法となっている。標準示方書³⁾ではこれによって得られる地山弾性波速度値とボーリングコア状態により、表3.1を用いて各速度値の地質状態を想定して地山区分する手法を提案している。また岩石試験値（超音波伝播速度、一軸圧縮強度）と弾性波速度値との比較から、岩盤良好度⁴⁾や地圧作用の推定に用いられる準岩盤強度⁵⁾の推定もなされている。しかしこの手法によって予測された地質状態と実際に切羽に出現する地山のそれが大幅に異なる例も多く見られる。

表3.1 NATMのための地山分類

地山区分	地 山 判 定 基 準												
	(1) 弾性波速度 ($V_p, \text{km/s}$)					(2) ボーリングコア		(3) 地質状態		(4) 崩落			
	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	強度比	コアの状態	RQD値	(地質調査の結果または崩落時の状態)	ハンマー打撃による割れ方	崩落深度 (m)	切羽の崩壊性	内安全係数 (m)
A	a					—	コア採取率は、割れ目0%以上で完全な柱状を呈し、ほぼ20cm以上の長さを持つ。断片はほとんど含まない状態のもの。	90以上	地質は非常に堅硬かつ新鮮なもので大規模な割れ目、割れ目ほとんどなく連続して安定している。水による劣化は少ない。	ハンマーが割れず、強く叩いてからうじて割れ、新鮮な面が割れる。	100 ~ 50以上	自立状態は非常に良く、長期にゆるむことはない。ゆるみ高さ1.5~2.0m	崩小
	b					—	コア採取率は、割れ目0%以上で完全な柱状一帯を示し、コアの長さが概ね10~20cmであるが、5~10割程度のものはみられる。	80 ~ 70	地質は新鮮で堅硬であるが割れ目は比較的少ない。地質はかなりの堅硬であっても崩壊作用のため多少変質した傾向が認められる。岩質は堅硬であるが層状構造を呈する片層状が認められ、その間に沿って割れ目が入る。水による劣化は少ない。	ハンマーで強く叩けば割れるが、ほとんどが角質である。割れ目が割れ、比較的粗く割れる。	70 ~ 50	崩壊は自立。崩壊面に崩壊した岩塊がみられるが、割れ目安定。崩壊時にゆるみが生じ、崩壊時に崩壊する可能性がある。ゆるみ高さ1.5~2.0m	崩小
	c					4以上	コア採取率は、40~70%で角質が多く、また砕け易いものが多い。5cm以下の断片が多数に散らばる状態のもの。崩壊元は認められない。	70 ~ 10	崩壊作用を受けて岩石に劣化を起しているもので、地質が多少軟くなる。地質は比較的堅硬であっても崩壊が細く入っていて、その間に沿って崩壊が起る。崩壊の層が層状構造を呈する片層状の岩質が認められる。崩壊の層が層状構造を呈する。崩壊の層が層状構造を呈する。崩壊の層が層状構造を呈する。崩壊の層が層状構造を呈する。	ハンマーで容易に割れる。角質部は比較的粗く割れる。比較的粗く割れる。比較的粗く割れる。比較的粗く割れる。	50程度以下	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	50以下
	d					4以上	コア採取率は低下し、割れ目40%以下となる場合が多く、コアは断片状となるが、中には角質部が認められる状態のもの。	10程度以下	著しい崩壊作用を受け、一面には既に土質化した部分が見られる。中に多少硬い部分が残っている状態に劣化している。割れ目が割れるものでも崩壊作用のいかなる層からでも容易に崩壊することがある。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	ハンマーで容易に割れる。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	—	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	50以下
	e					2以上	コア採取率は低下し、割れ目40%以下となる場合が多く、コアは断片状となるが、中には角質部が認められる状態のもの。	2-1	著しい崩壊作用を受け、一面には既に土質化した部分が見られる。中に多少硬い部分が残っている状態に劣化している。割れ目が割れるものでも崩壊作用のいかなる層からでも容易に崩壊することがある。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	ハンマーのわずかな打撃によって割れる。ハンマーの先が割れ割れる。	—	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	200以下
B	a					1以下	コア採取率は低下し、割れ目40%以下となる場合が多く、コアは断片状となるが、中には角質部が認められる状態のもの。	—	著しい崩壊作用を受け、一面には既に土質化した部分が見られる。中に多少硬い部分が残っている状態に劣化している。割れ目が割れるものでも崩壊作用のいかなる層からでも容易に崩壊することがある。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	ハンマーのわずかな打撃によって割れる。ハンマーの先が割れ割れる。	—	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	400以下
	b					—	コア採取率は低下し、割れ目40%以下となる場合が多く、コアは断片状となるが、中には角質部が認められる状態のもの。	—	著しい崩壊作用を受け、一面には既に土質化した部分が見られる。中に多少硬い部分が残っている状態に劣化している。割れ目が割れるものでも崩壊作用のいかなる層からでも容易に崩壊することがある。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	ハンマーのわずかな打撃によって割れる。ハンマーの先が割れ割れる。	—	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	400以下
	c					—	コア採取率は低下し、割れ目40%以下となる場合が多く、コアは断片状となるが、中には角質部が認められる状態のもの。	—	著しい崩壊作用を受け、一面には既に土質化した部分が見られる。中に多少硬い部分が残っている状態に劣化している。割れ目が割れるものでも崩壊作用のいかなる層からでも容易に崩壊することがある。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	ハンマーのわずかな打撃によって割れる。ハンマーの先が割れ割れる。	—	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	400以下
	d					—	コア採取率は低下し、割れ目40%以下となる場合が多く、コアは断片状となるが、中には角質部が認められる状態のもの。	—	著しい崩壊作用を受け、一面には既に土質化した部分が見られる。中に多少硬い部分が残っている状態に劣化している。割れ目が割れるものでも崩壊作用のいかなる層からでも容易に崩壊することがある。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	ハンマーのわずかな打撃によって割れる。ハンマーの先が割れ割れる。	—	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	400以下
	e					—	コア採取率は低下し、割れ目40%以下となる場合が多く、コアは断片状となるが、中には角質部が認められる状態のもの。	—	著しい崩壊作用を受け、一面には既に土質化した部分が見られる。中に多少硬い部分が残っている状態に劣化している。割れ目が割れるものでも崩壊作用のいかなる層からでも容易に崩壊することがある。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。崩壊作用の著しい層状構造を呈する。	ハンマーのわずかな打撃によって割れる。ハンマーの先が割れ割れる。	—	崩壊は自立する。崩壊面に崩壊した岩塊がみられる。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。崩壊時に崩壊する可能性がある。	400以下

(2) PS検層の適用

PS検層は従来軟弱地盤の液状化特性を評価するために多用されてきた物理検層法であり、これを用いてS波速度と地盤の強度特性の関係など多くの研究例がある。測定方法にはダウンホール法やサスペンション法などがあるが、従来の測定器には発振源や受振器に限界があり、1 km/sec以上のS波速度の測定精度に問題があった。当社が開発したサスペンションPS音波層器(図3.1)はこの点を克服したものであり、高い速度領域でのS波速度の測定が可能になってきた。⁶⁾ S波速度は割れ目の数の増加により鋭敏に速度低下するが割れ目が密着しておればP波速度はほとんど変化しないことがわかっている。⁷⁾ このことは本検層器が割れ目の存在に鋭敏なS波速度を用いて地山の強度特性をより精度良く推定できる可能性があ

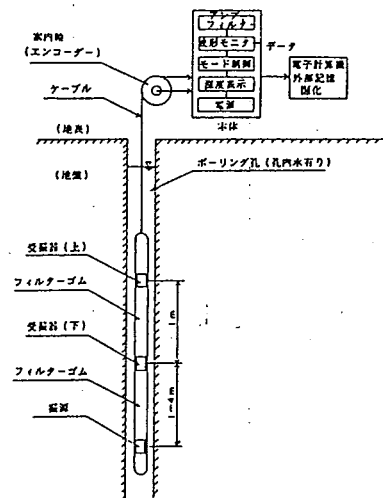
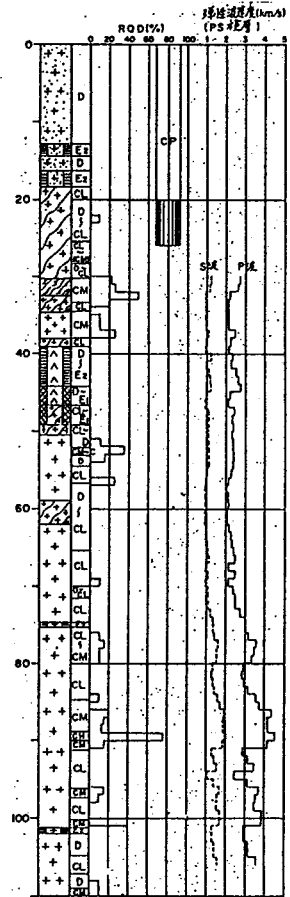
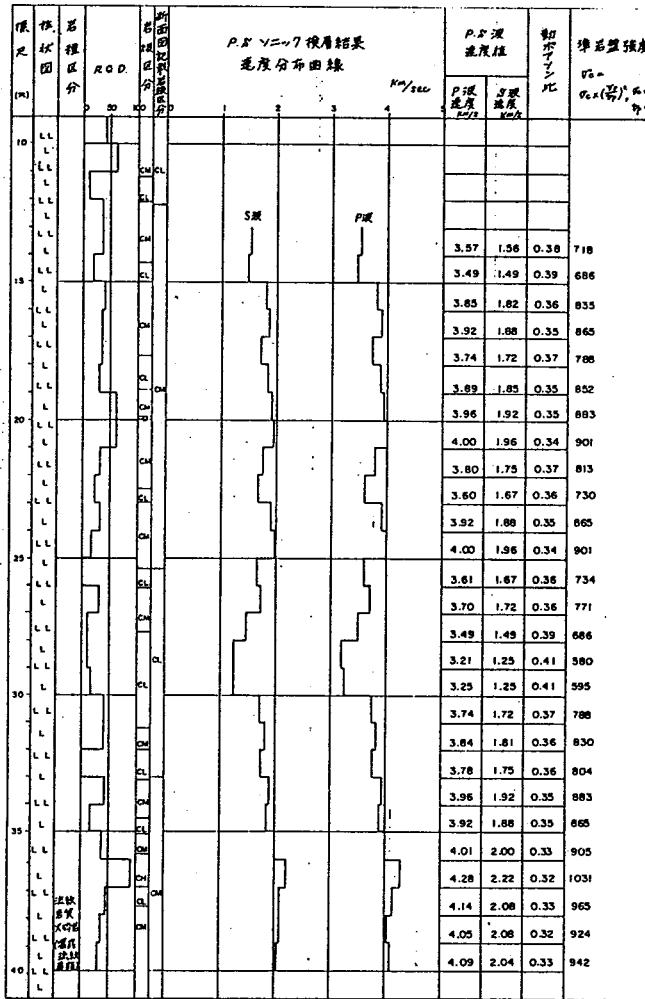


図3.1 PS音波検層器の模式図

ることを意味する。図3.2にはトンネルを対象とした調査ボーリング孔での測定例を示す。本図から1m毎の弾



<花崗岩類の例>

図3.2 P S音波検層の適用例

<濃飛流紋岩類の例>

性波速度の分解能は良好で、RQDや岩級区分との対応も良い。図3.3および図3.4には花崗岩類と濃飛流紋岩類について岩盤 (Vp, Vs) と岩石 (vp, vs) の弾性波伝播速度を例示した。花崗岩の vs/vp と Vs/Vp は類似した傾向を示すのに対し、濃飛流紋岩類では vs/vp に比較して Vs/Vp の傾斜がかなり大きくなっている。これは両者では主な風化機構が異なり、岩盤の劣化が前者では岩石そのものの強度低下が主であり、後者は割れ目の増加が主であることを意味していると考えられる。またS波速度は割れ目の含水状態に影響を受けないので、vs/vsは岩盤の強度特性の指標に、Vs/Vp は岩盤の透水性の指標になり得る可能性がある。

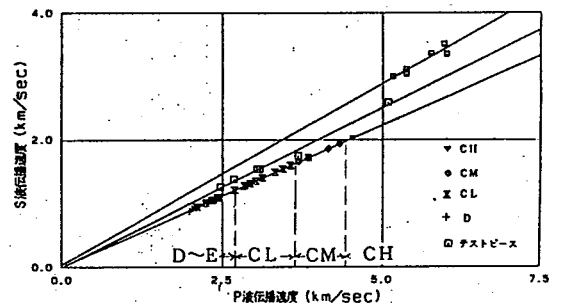


図3.3 テストピースの超音波伝播速度と岩盤の弾性波速度 (花こう岩)

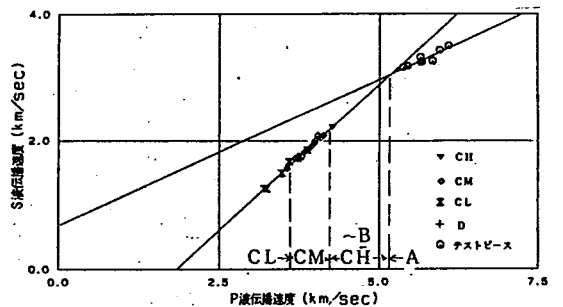


図3.4 テストピースの超音波伝播速度と岩盤の弾性波速度 (濃飛流紋岩類)

弾性波探査から得られる地山速度値の地質状態を予測することができる。このようにして得られた地山等級毎の弾性波速度値は表3.2に示すように、標準示方書に示されるものとはかなり異なる。

表3.2 標準示方書の地山分類と弾性波速度値

NATMのための地山分類		電中研式岩盤 分類の岩盤等級	PS検層、岩石試験等から求められた弾性波速度値の範囲			
地山等級	弾性波速度 (km/sec)*		花こう岩類		濃飛流紋岩類	
			P波 (km/sec)	S波 (km/sec)	P波 (km/sec)	S波 (km/sec)
A	$V_p \geq 4.8$	A B			$P > 4.8$	$S > 2.7$
B	$3.5 \leq V_p < 4.8$	CH	$P \geq 4.2$	$V_s \geq 1.85$	$4.4 < P \leq 4.8$	$2.3 < S \leq 2.7$
CI	$2.9 \leq V_p < 3.5$	CM~CL	$3.6 \leq P < 4.2$	$1.6 \leq S < 1.85$	$3.7 < P \leq 4.4$	$1.7 < S \leq 2.3$
CII					$3.0 < P \leq 3.7$	$1.1 < S \leq 1.7$
DI	$2.4 \leq V_p < 2.9$	CL D E ₁ ~E ₂	$2.6 \leq P < 3.6$	$1.15 \leq S < 1.6$	$P \leq 3.0$	$S \leq 1.1$
DII						

4. 管理基準の提案

施工時のトンネルの安全性は、構造物としての安全性と施工性を含めた安全性の双方を満足する必要がある。ここでは①限界ひずみに基づく管理基準値、および②Q値に基づく管理基準値を提案する。

(1) 限界ひずみに基づく管理基準

桜井らは一軸圧縮試験の応力-ひずみ曲線から限界ひずみを定義し、これを各種の岩石に適用した(図4.1)⁹⁾。そして限界ひずみが岩石と岩盤では大差ないことに着目して、トンネルのひずみおよび天端沈下に対する管理基準値を提案した(図4.2)¹⁰⁾。ここでは岐阜県内に分布する主要岩石の一軸圧縮強さ、静ヤング率および限界ひずみの関係を検討した。図4.3および図4.4にその結果を示すが、図中には桜井らによる注意レベルIおよび注意レベルIIIのラインも付記した。その結果、花崗岩類と濃飛流紋岩類の限界ヒズミはほぼ同程度の値を示すのに対して、砂岩や頁岩からなる古生層のそれは著しく小さい。これはおそらく岩石組織の相違が原因と考えられ、岩石試験結果を用いて管理基準値を設定するに当たっては岩石の種類も考慮しなければならない。

表4.1には岩石の種類も考慮した管理基準値を提案した。ここでは計測遅れ等も考慮し、全変位量に占める先行変位量の比率を約40%と仮定した。

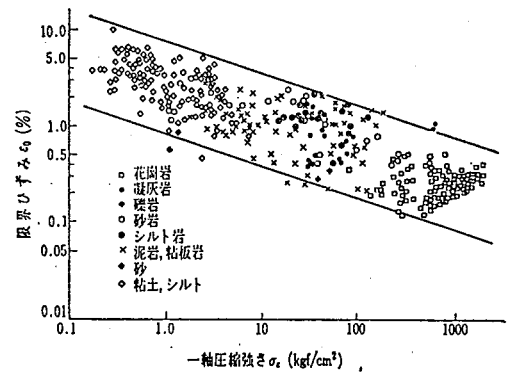
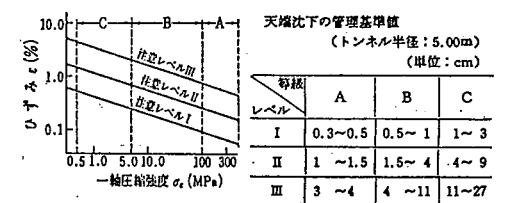


図4.1 限界ひずみと一軸圧縮強さとの関係



注1) ここに示す変位の基準値は、掘削によって生ずる全変位であり、計測遅れのある場合には注意を要する。
 注2) 本基準値は土被りが十分に大きい場合の値であり、浅いトンネルでは、ここに示すものより小さい値を用いる必要がある。
 注3) 岩塊が堅く割れ目の影響が顕著な地山では、この基準値の適用には注意を要する。

図4.2 ひずみおよび天端沈下に対する管理基準値

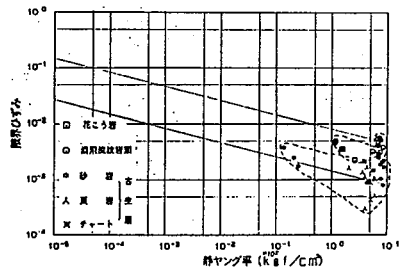


図4.3 静ヤング率と限界ひずみの関係

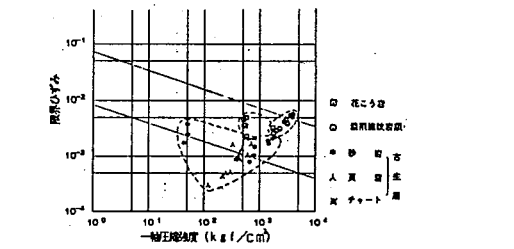


図4.4 一軸圧縮強度と限界ひずみの関係

(2) Q値に基づく管理基準値

施工段階では想定とは異なる岩盤状態が出現し、工事費が高むことが多々あり、設計変更の際、施工側と施工者側で地山の評価に関して意見が分かれることがある。施工の安全性や経済性を確保するためには、両者の共通認識となり得る尺度が必要である。一般に岩盤状態を記載する上での基本のパラメータは、①風化変質状態、②割れ目の頻度、③割れ目中の挟在物等の状態および場合によっては④割れ目の系統と考えることができる。トンネル工事ではこの外に事前の予測が極めて困難な湧水状態が地山状態を評価する上で重要な項目となる。そこでこれらの評価項目により、地山状態が指数として表示できるQ値¹⁾を用いて評価する手法を提案する。

Q値は実際の算定に際してかなり細かな評価ランクがあり、現場において運用する上で簡便さが劣る。そこで標準示方書に示される切羽観察記録表を表4.2のように改変し、岩盤状態を記載する上で主要な4項目と湧水状態に対して表4.3に示す評点を与えることによりQ値を算定する。あらかじめ図4.5に示すようなものを作成しておき、各エリアのQ値の幅を求めておけば、現場で使われる表4.2から簡便にQ値をある幅で求めることができる。

Aトンネルに於いて、施工途中段階でそれまでの切羽観察結果を表4.2の主要4項目を用いて、評価ランクと実際に採用された標準支保パターンとの分析を試みた。その結果は図4.5の通りで、支保パターン別のQ値の範囲は表4.4に示される。この手法によって施工時の設計変更が余り問題なく実施することができた。節理性の岩盤であれば、岩盤状態の記載項目にほとんど変更を加える必要がないので、表4.4で求められたQ値の範囲は若干の地質毎の特性を加味することで他岩種においてもそのまま地山等級に応じたQ値の対応値として用いることができると期待できる。

表4.1 花こう岩類、濃飛流紋岩類の管理基準値(案)

注意レベル	天端沈下量 (mm)	内空変位量 (mm)	記 事
	5未満	10未満	
注意レベルI	5~10	10~20	1D変位量が3mmを超える場合は、補助工法の追加を検討
注意レベルII	10~15	20~30	
注意レベルIII	15以上	30以上	マサ土でD Iパターンの場合に吹付面破壊例あり。

古生層(砂岩、頁岩、チャート)の管理基準値(案)

注意レベル	天端沈下量 (mm)	内空変位量 (mm)	記 事
	1.5未満	3未満	
注意レベルI	1.5~4	3~8	
注意レベルII	4~7	8~15	
注意レベルIII	7以上	15以上	

注1) 本表は半径5m程度の円形断面に近いトンネルに適用する。偏平大断面の場合、天端沈下量が卓越する場合がある。
 注2) 本表の管理基準値は、全変位量に占める先行変位量の比率を40%程度と仮定して求めたものであり、計測が早まる場合や遅れがある場合には適宜修正が必要である

表4.2 切羽観察記録表

切羽の状態	1. 欠 欠	2. 割れ目から岩片が脱落する。	3. 割れ目から岩片が浮き出る。	4. 割れ目の押し出しを生じる。	5. 割れ目に直立した岩片がある。	6. その他
① 岩盤の状態	1. 崩 落 (岩盤崩落)	2. 割れ目がつる(風化)	3. 割れ目がつる(濃飛流紋岩)	4. 崩落した岩片が割れ目から脱落する。	5. 割れ目に直立した岩片がある。	6. その他
② 正 規 換 算	1. 5.0 < RQD ≤ 100%	2. 100% > RQD ≥ 75%	3. 75% > RQD ≥ 50%	4. 50% > RQD ≥ 25%	5. 25% > RQD ≥ 10%	6. 10% > RQD ≥ 0%
③ 風 化 変 質	1. なし	2. 軽微	3. 中等	4. 強	5. 特強	6. その他
④ 割れ目の頻度	1. 割れ目 ≤ 1/m	2. 1.0 > 割れ目 ≥ 0.5/m	3. 0.50 > 割れ目 ≥ 0.15/m	4. 0.15 > 割れ目 ≥ 0.05/m	5. 0.05 > 割れ目 ≥ 0.01/m	6. 0.01 > 割れ目 ≥ 0.001/m
⑤ 割れ目の状態	1. 不連続、粗い挟在物あり	2. 連続で粗状	3. 連続で細状	4. 滑らか滑りやすい	5. 粘土付着あり	6. その他
⑥ 割れ目の形状	1. 放射状	2. 1方向の割れ目	3. 2方向の割れ目	4. 3方向の割れ目	5. 4方向以上の割れ目	6. その他
⑦ 湧 水	1. なし	2. 湧水程度、割れ目から湧水	3. 割れ目から湧水、割れ目から湧水	4. 割れ目から湧水、割れ目から湧水	5. 割れ目から湧水、割れ目から湧水	6. その他
⑧ 水による劣化	1. なし	2. 軽微	3. 中等	4. 強	5. 特強	6. その他

表4.3 主な観察項目ランクの評点

項目	1	2	3	4	5
D Ja	0.75~1.0	2.0~3.0	4.0	6.0~8.0	10~20
E RQD	100	100~90	90~60	60~10	10
F Jr	5~3	2	1.5	1.0~0.5	1.0
G Jn	0.5~2	3~4	6~9	12~15	20
H Jw	1.0	0.66	0.5	0.33	0.2~0.05

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (SRF=1.0と仮定する)$$

5. 適用例 実際と予測の評価

地山予測および管理基準値の適用例を図5.1~図5.4に示す。またその予測と実績を表5.1にまとめる。

(1) 地山状態の予測と実際

濃飛流紋岩類に対してはP S検層結果と地山弾性波速度値から予測した地山状態は低土盛り部では妥当なものと評価できる。しかし高土盛り部では施工基面付近の熱水変質の状態を事前に十分把握できていなかったため、大幅な変更を余儀なくされた。これは屈折法弾性波探査の限界と考えられる。古生層に対しては深

表4.4

支保パターン別のQ値の範囲

支保パターン	Q値
B	≥20
C I	1 ≤ Q ≤ 30
-C II	0.1 ≤ Q ≤ 5
D I	0.02 ≤ Q ≤ 1

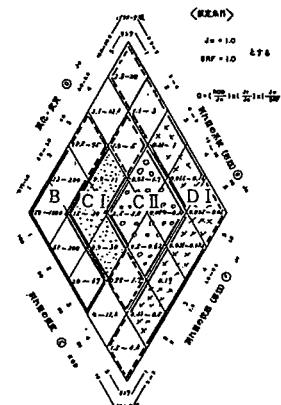
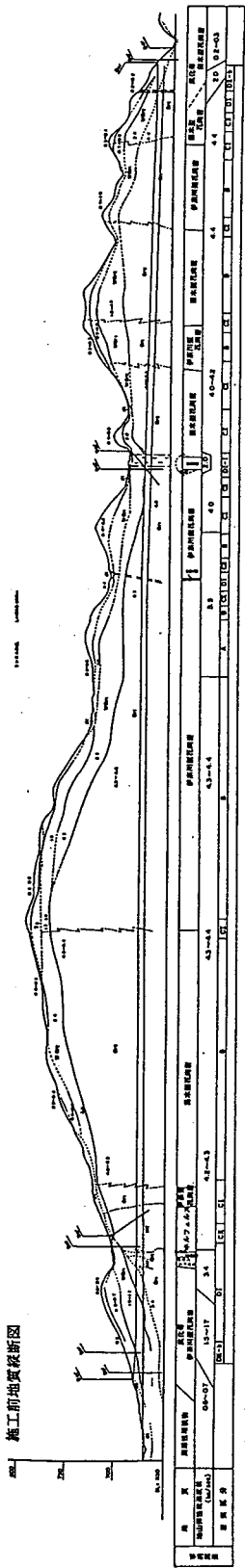


図4.5 岩質パターンとQ値の範囲

表 5.1 トンネルの予測と実績

トンネル名	A (花崗岩類)	B (濃飛流紋岩類)	C (チャート、石灰岩等・古生層)	D (砂岩、頁岩 古生層)																																																																		
地山状態																																																																						
	<table border="1"> <tr> <th>地山等級</th> <th>P波 (km/s)</th> <th>S波 (km/s)</th> </tr> <tr> <td>B</td> <td>$P \geq 4.2$</td> <td>$S \geq 1.85$</td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>$3.6 \leq P < 4.2$</td> <td>$1.6 \leq S < 1.85$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td>$2.6 \leq P < 3.6$</td> <td>$1.15 \leq S < 1.6$</td> </tr> <tr> <td>D I</td> <td>$P < 2.6$</td> <td>$S < 1.15$</td> </tr> </table>	地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)	B	$P \geq 4.2$	$S \geq 1.85$	C I	$3.6 \leq P < 4.2$	$1.6 \leq S < 1.85$	C II	$2.6 \leq P < 3.6$	$1.15 \leq S < 1.6$	D I	$P < 2.6$	$S < 1.15$	<table border="1"> <tr> <th>地山等級</th> <th>P波 (km/s)</th> <th>S波 (km/s)</th> </tr> <tr> <td>B</td> <td>$P > 4.4$</td> <td>$S > 2.3$</td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>$3.7 < P \leq 4.4$</td> <td>$2.3 < S \leq 2.7$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td>$3.0 < P \leq 3.7$</td> <td>$1.1 < S \leq 1.7$</td> </tr> <tr> <td>D I</td> <td>$P \leq 3.0$</td> <td>$S \leq 1.1$</td> </tr> </table>	地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)	B	$P > 4.4$	$S > 2.3$	C I	$3.7 < P \leq 4.4$	$2.3 < S \leq 2.7$	C II	$3.0 < P \leq 3.7$	$1.1 < S \leq 1.7$	D I	$P \leq 3.0$	$S \leq 1.1$	<table border="1"> <tr> <th>地山等級</th> <th>P波 (km/s)</th> <th>S波 (km/s)</th> </tr> <tr> <td>B</td> <td>$P > 4.4$</td> <td>$S > 2.3$</td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>$3.7 < P \leq 4.4$</td> <td>$2.3 < S \leq 2.7$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td>$3.0 < P \leq 3.7$</td> <td>$1.1 < S \leq 1.7$</td> </tr> <tr> <td>D I</td> <td>$P \leq 3.0$</td> <td>$S \leq 1.1$</td> </tr> </table>	地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)	B	$P > 4.4$	$S > 2.3$	C I	$3.7 < P \leq 4.4$	$2.3 < S \leq 2.7$	C II	$3.0 < P \leq 3.7$	$1.1 < S \leq 1.7$	D I	$P \leq 3.0$	$S \leq 1.1$	<table border="1"> <tr> <th>地山等級</th> <th>P波 (km/s)</th> <th>S波 (km/s)</th> </tr> <tr> <td>B</td> <td>$P > 4.4$</td> <td>$S > 2.3$</td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>$3.7 < P \leq 4.4$</td> <td>$2.3 < S \leq 2.7$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td>$3.0 < P \leq 3.7$</td> <td>$1.1 < S \leq 1.7$</td> </tr> <tr> <td>D I</td> <td>$P \leq 3.0$</td> <td>$S \leq 1.1$</td> </tr> </table>	地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)	B	$P > 4.4$	$S > 2.3$	C I	$3.7 < P \leq 4.4$	$2.3 < S \leq 2.7$	C II	$3.0 < P \leq 3.7$	$1.1 < S \leq 1.7$	D I	$P \leq 3.0$	$S \leq 1.1$						
	地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)																																																																			
	B	$P \geq 4.2$	$S \geq 1.85$																																																																			
C I	$3.6 \leq P < 4.2$	$1.6 \leq S < 1.85$																																																																				
C II	$2.6 \leq P < 3.6$	$1.15 \leq S < 1.6$																																																																				
D I	$P < 2.6$	$S < 1.15$																																																																				
地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)																																																																				
B	$P > 4.4$	$S > 2.3$																																																																				
C I	$3.7 < P \leq 4.4$	$2.3 < S \leq 2.7$																																																																				
C II	$3.0 < P \leq 3.7$	$1.1 < S \leq 1.7$																																																																				
D I	$P \leq 3.0$	$S \leq 1.1$																																																																				
地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)																																																																				
B	$P > 4.4$	$S > 2.3$																																																																				
C I	$3.7 < P \leq 4.4$	$2.3 < S \leq 2.7$																																																																				
C II	$3.0 < P \leq 3.7$	$1.1 < S \leq 1.7$																																																																				
D I	$P \leq 3.0$	$S \leq 1.1$																																																																				
地山等級	P波 (km/s)	S波 (km/s)																																																																				
B	$P > 4.4$	$S > 2.3$																																																																				
C I	$3.7 < P \leq 4.4$	$2.3 < S \leq 2.7$																																																																				
C II	$3.0 < P \leq 3.7$	$1.1 < S \leq 1.7$																																																																				
D I	$P \leq 3.0$	$S \leq 1.1$																																																																				
実態	<p>低土被り部： ボーリング調査によってほぼ問題点が把握されていたため、地山評価に関してはほぼ妥当な結果。</p> <p>高土被り部： 屈折法弾性波探査の限界 → 大幅な設計変更余儀なし。原因は熱水変質によって各所に緑泥石や絹雲母、カオリナイトなどの非膨潤性粘土を割れ目に挟む。</p>	<p>低土被り部： 地山状態の評価に関してはほぼ妥当な結果。</p> <p>高土被り部： 屈折法弾性波探査の限界 → 大幅な設計変更余儀なし。原因は一部に熱水鉱脈を伴う変質帯が主体で、硬質岩と粘土脈が頻りに繰返し、集中湧水も伴っていたこと。熱水変質帯の深度方向の状態変化が十分評価できなかった。</p>	<p>破碎帯位置についてはほぼ想定通り。深部の地山区分に大幅なずれ。原因は、弾性波速度値の速度異方向性を十分把握できなかったこと。</p>	<p>砂岩の厚層に挟まれる頁岩の破塊、鱗片化、粘土化、流れ目構造。 → 高土被り部で大幅な設計変更。原因は褶曲構造を事前に十分把握できなかったこと、および速度異方向性を十分把握できなかったこと。</p>																																																																		
	予測	<table border="1"> <caption>変位計測管理基準 (案)</caption> <thead> <tr> <th>注意レベル</th> <th>天端沈下量 (mm)</th> <th>内空変位量 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>5未満</td> <td>10未満</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>5~10</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>10~15</td> <td>20~30</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>15以上</td> <td>30以上</td> </tr> </tbody> </table>	注意レベル	天端沈下量 (mm)	内空変位量 (mm)		5未満	10未満	I	5~10	10~20	II	10~15	20~30	III	15以上	30以上	<table border="1"> <caption>変位計測管理基準 (案)</caption> <thead> <tr> <th>注意レベル</th> <th>天端沈下量 (mm)</th> <th>内空変位量 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>1.5未満</td> <td>3未満</td> </tr> <tr> <td>I</td> <td>1.5~4</td> <td>3~8</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>4~7</td> <td>8~15</td> </tr> <tr> <td>III</td> <td>7以上</td> <td>15以上</td> </tr> </tbody> </table>	注意レベル	天端沈下量 (mm)	内空変位量 (mm)		1.5未満	3未満	I	1.5~4	3~8	II	4~7	8~15	III	7以上	15以上																																					
注意レベル	天端沈下量 (mm)	内空変位量 (mm)																																																																				
	5未満	10未満																																																																				
I	5~10	10~20																																																																				
II	10~15	20~30																																																																				
III	15以上	30以上																																																																				
注意レベル	天端沈下量 (mm)	内空変位量 (mm)																																																																				
	1.5未満	3未満																																																																				
I	1.5~4	3~8																																																																				
II	4~7	8~15																																																																				
III	7以上	15以上																																																																				
実測値	<ul style="list-style-type: none"> 初期変位速度と上半掘削後の内空変位収束値の関係は吉川ほか (1983) の提案値とほぼ同様。 下半掘削後の内空変位収束値は吉川ほか (1983) の提案値よりかなり大きくなる。 マサ土において、D Iパターンで注意レベルIIIを超える変位量を観測し吹付面クラック発生 → 増吹付コンクリート施工。 注意レベルIを超えるB、C Iパターン区間の切羽周辺で5~10mm程度の岩塊崩落発生 → C IIパターンに変更 	<ul style="list-style-type: none"> 坑口付近を除く区間の注意レベルIを下回る最終変位量の区間は土被りに応じた変位量を示す。 注意レベルIを超える最終変位量を示すC IIパターン区間では、切羽からの土砂流出やフォアバイリングなどの補助工法の採用例多い。 1 D内空変位量と最終内空変位量の間から、1 D内空変位量が3mmを超える場合に補助工法や支保パターンの変更を検討する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 鋭角に斜交する破碎帯近傍の計測点で5mm以上の内空変位量を観測。 切羽からの土砂崩落、岩塊抜け落ち部近傍の計測点では、10mmを超える変位量を観測 (注意レベルII) 坑口付近および破碎帯で天端沈下量が注意レベルIIIを超えている。 	<ul style="list-style-type: none"> 内空変位量収束値は全般に小さいが偏平大断面のため、相対的に天端沈下量が大きくなった (5~10mm)。 とりたてたトラブルはない。 																																																																		
	予と実績	<table border="1"> <thead> <tr> <th>支保パターン</th> <th>予 測</th> <th>実 績</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B</td> <td></td> <td>$Q > 8$</td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>なし</td> <td>$0.9 < Q < 3$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td></td> <td>$0.09 < Q < 5$</td> </tr> <tr> <td>D I</td> <td></td> <td>$0.02 < Q < 1$</td> </tr> </tbody> </table>	支保パターン	予 測	実 績	B		$Q > 8$	C I	なし	$0.9 < Q < 3$	C II		$0.09 < Q < 5$	D I		$0.02 < Q < 1$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>支保パターン</th> <th>予 測</th> <th>実 績</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B</td> <td>$Q > 3$</td> <td>$Q > 10$</td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>$0.7 < Q < 20$</td> <td>$1 < Q < 30$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td>$0.5 < Q < 10$</td> <td>$0.008 < Q < 10$</td> </tr> <tr> <td>D I</td> <td>$0.1 < Q < 1$</td> <td>$0.025 < Q < 2.5$</td> </tr> </tbody> </table>	支保パターン	予 測	実 績	B	$Q > 3$	$Q > 10$	C I	$0.7 < Q < 20$	$1 < Q < 30$	C II	$0.5 < Q < 10$	$0.008 < Q < 10$	D I	$0.1 < Q < 1$	$0.025 < Q < 2.5$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>支保パターン</th> <th>予 測</th> <th>実 績</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B</td> <td>$Q > 30$</td> <td>$Q > 15$</td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>$0.9 < Q < 30$</td> <td>$2.5 < Q < 20$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td>$0.09 < Q < 4.5$</td> <td>$0.3 < Q < 4$</td> </tr> <tr> <td>D I i</td> <td>$0.01 < Q < 0.35$</td> <td>$0.01 < Q < 2.5$</td> </tr> <tr> <td>D II i</td> <td></td> <td>$0.013 < Q < 0.075$</td> </tr> </tbody> </table>	支保パターン	予 測	実 績	B	$Q > 30$	$Q > 15$	C I	$0.9 < Q < 30$	$2.5 < Q < 20$	C II	$0.09 < Q < 4.5$	$0.3 < Q < 4$	D I i	$0.01 < Q < 0.35$	$0.01 < Q < 2.5$	D II i		$0.013 < Q < 0.075$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>支保パターン</th> <th>予 測</th> <th>実 績</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B</td> <td>$Q > 30$</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C I</td> <td>$1 < Q < 40$</td> <td>$4.5 < Q < 20$</td> </tr> <tr> <td>C II</td> <td>$0.1 < Q < 4$</td> <td>$0.085 < Q < 20$</td> </tr> <tr> <td>D I</td> <td>$0.008 < Q < 0.4$</td> <td>$0.05 < Q < 1$</td> </tr> <tr> <td>D III a</td> <td></td> <td>$0.0065 < Q < 1$</td> </tr> </tbody> </table>	支保パターン	予 測	実 績	B	$Q > 30$		C I	$1 < Q < 40$	$4.5 < Q < 20$	C II	$0.1 < Q < 4$	$0.085 < Q < 20$	D I	$0.008 < Q < 0.4$	$0.05 < Q < 1$	D III a	
支保パターン	予 測	実 績																																																																				
B		$Q > 8$																																																																				
C I	なし	$0.9 < Q < 3$																																																																				
C II		$0.09 < Q < 5$																																																																				
D I		$0.02 < Q < 1$																																																																				
支保パターン	予 測	実 績																																																																				
B	$Q > 3$	$Q > 10$																																																																				
C I	$0.7 < Q < 20$	$1 < Q < 30$																																																																				
C II	$0.5 < Q < 10$	$0.008 < Q < 10$																																																																				
D I	$0.1 < Q < 1$	$0.025 < Q < 2.5$																																																																				
支保パターン	予 測	実 績																																																																				
B	$Q > 30$	$Q > 15$																																																																				
C I	$0.9 < Q < 30$	$2.5 < Q < 20$																																																																				
C II	$0.09 < Q < 4.5$	$0.3 < Q < 4$																																																																				
D I i	$0.01 < Q < 0.35$	$0.01 < Q < 2.5$																																																																				
D II i		$0.013 < Q < 0.075$																																																																				
支保パターン	予 測	実 績																																																																				
B	$Q > 30$																																																																					
C I	$1 < Q < 40$	$4.5 < Q < 20$																																																																				
C II	$0.1 < Q < 4$	$0.085 < Q < 20$																																																																				
D I	$0.008 < Q < 0.4$	$0.05 < Q < 1$																																																																				
D III a		$0.0065 < Q < 1$																																																																				
評 価	<ul style="list-style-type: none"> 円形断面に近いものであれば、マサ土に対して変位計測に基づく管理基準値 (案) はそのまま用いることができる。 B、C Iパターンで注意レベルI以上の変位が観測された場合は、C IIパターンの採用を検討する方がよい。 P S検層による弾性波速度値に基づく地山評価は妥当 (事後評価) 	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測管理基準 (案) は適用できない。むしろ、1 D内空変位量が3mmを超える場合に、補助工法や支保パターン変更を検討する必要がある。 C IIパターンがかなり小さいQ値にまで適用される。 P S検層による弾性波速度値に基づく地山評価は妥当。 	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測管理基準 (案) は適用できない。むしろ、鋭角に斜交する破碎帯の出現予測に変位計測結果を利用できる可能性がある。 Q値による予測値はほぼ妥当。 P S検層による地山状態予測を加えることにより、弾性波速度値に基づく地山評価を適正化できる可能性あり。 	<ul style="list-style-type: none"> 変位計測管理基準 (案) は適用できない。 偏平大断面トンネルの場合は、天端沈下が卓越する。 流れ目構造が著しい場合、Q値による予測値が適合しない場合がある。 P S検層による地山状態予測を加えることにより、弾性波速度値に基づく地山評価を適正化できる可能性あり。 																																																																		

施工前地質縦断面図



実績地質縦断面図

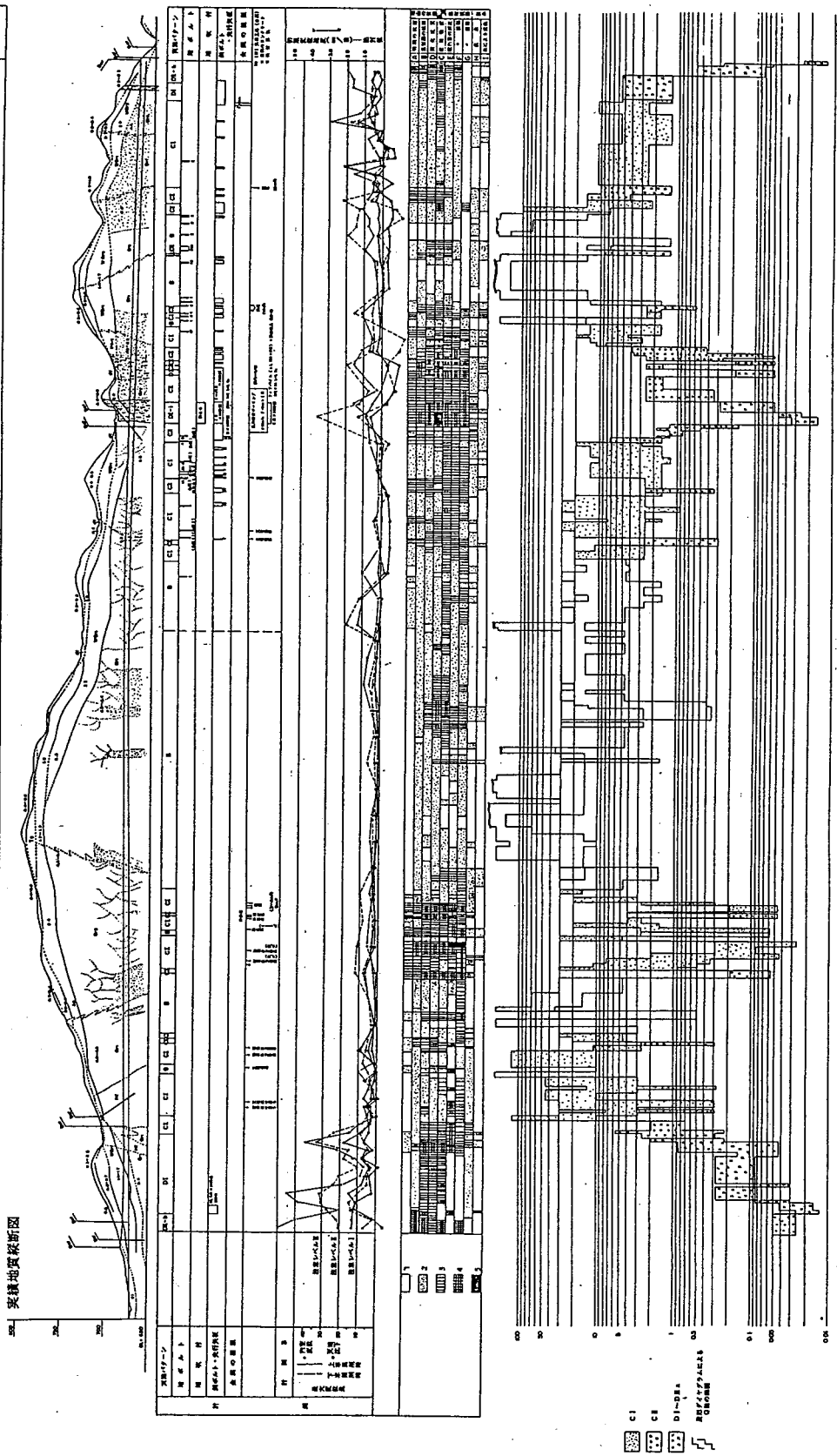


図5.1 A トンネル実績図

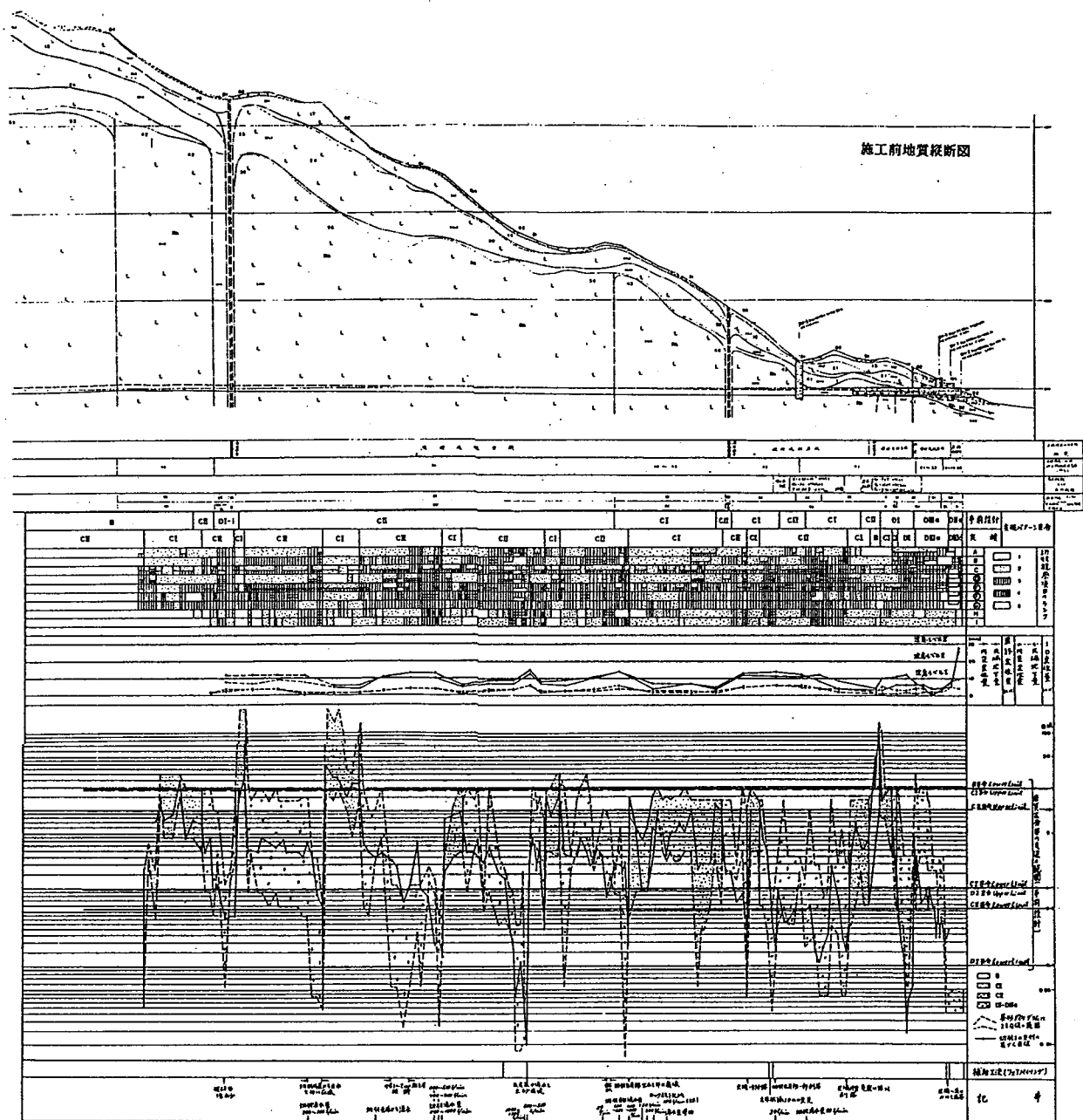


図5.2 Bトンネル実績図 0 100 200 300 400 500(m)

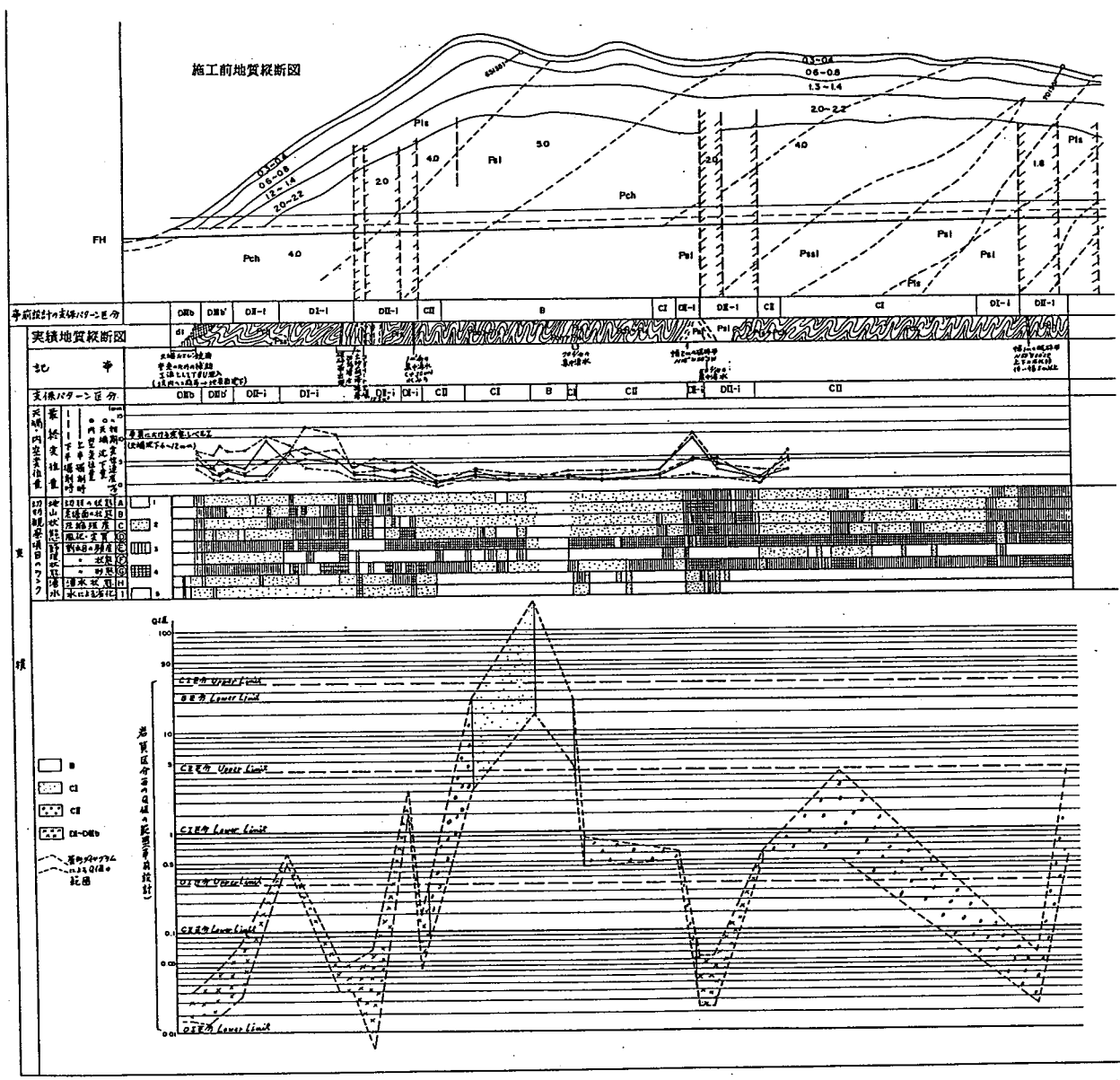
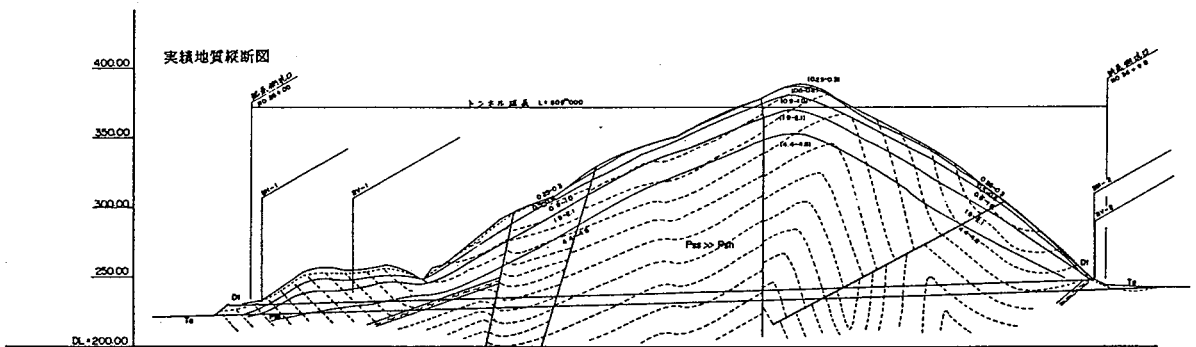
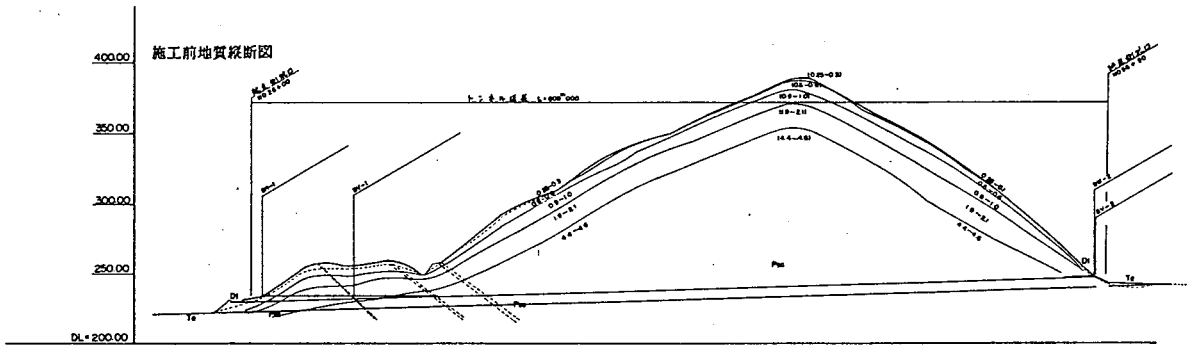


図5.3 Cトンネル実績図



事前設計支保区分	D1a	DI	CI	CI	CI	B	CI	CI	D1a
実績パターン	D1a	DI	CI	CI	CI		CI		D1a

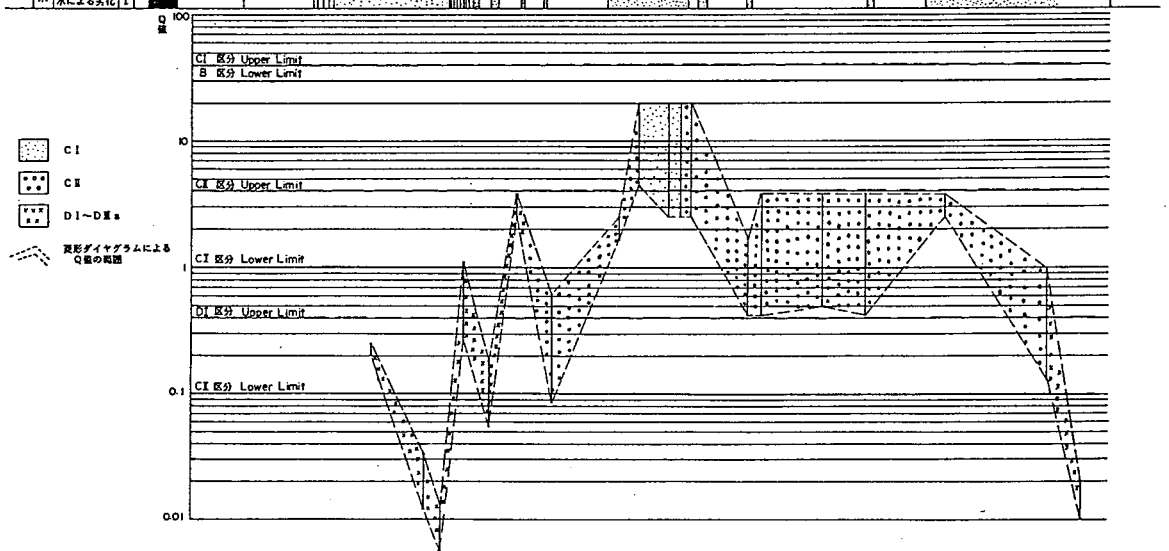
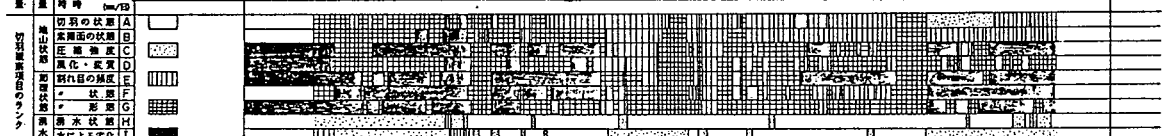
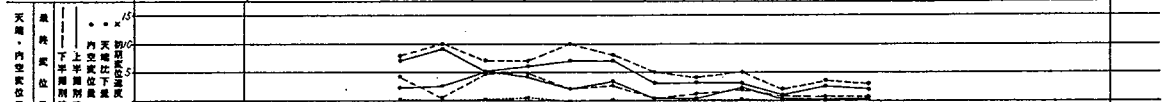


図5.4 Dトンネル実績図 0 20 40 60 80 100 m

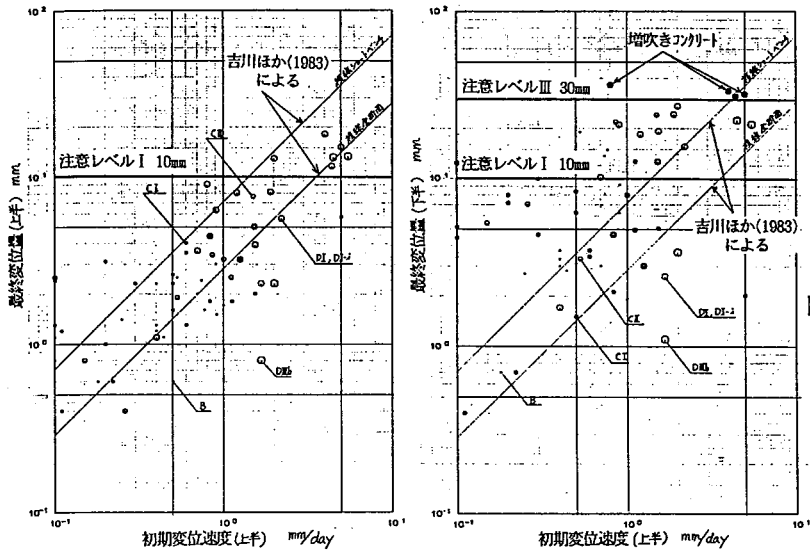


図5.5 Aトンネル(花崗岩類)の初期変位速度と最終変位量⁽¹⁾

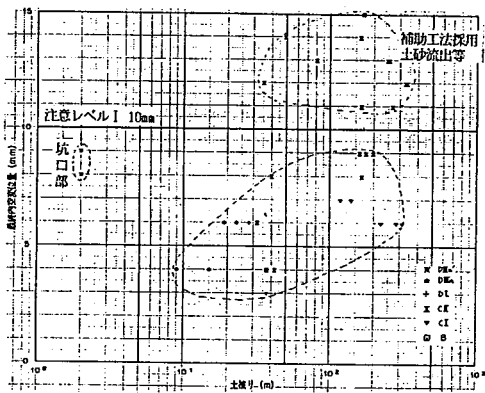


図5.6 土被りと最終内空変位量 (Bトンネル, 濃飛流紋岩類)

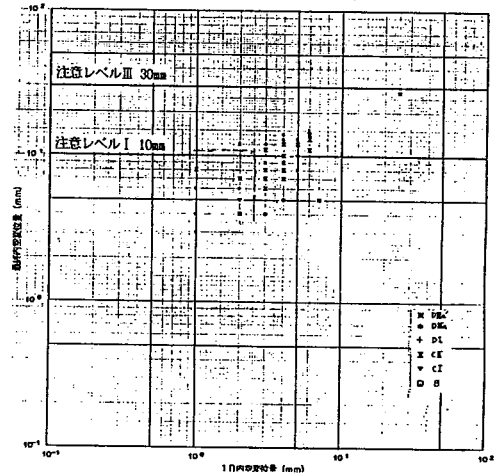


図5.7 1D(トンネル直径)内空変位量と最終内空変位量 (Bトンネル, 濃飛流紋岩類)

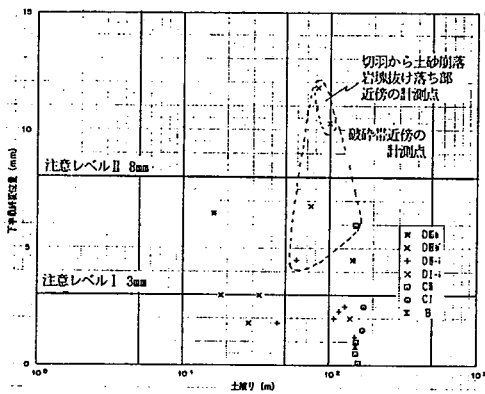


図5.8 土被りと下半最終変位量(Cトンネル, 古生層)

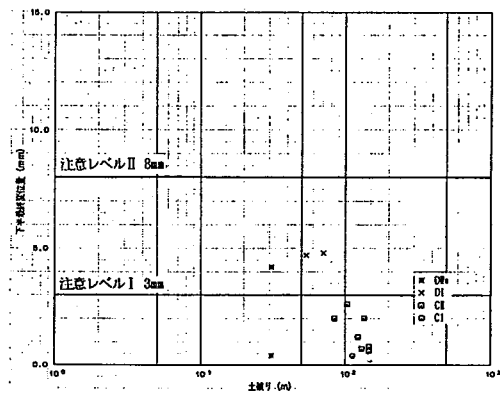


図5.9 土被りと下半最終変位量(Dトンネル, 古生層)

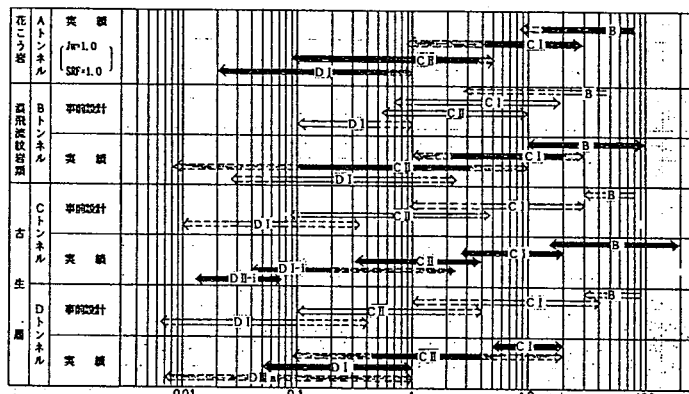
部の高土被り部で地山区分に大幅なずれがあった。これは古生層の褶曲構造を十分把握できなかったことと速度異方性を十分評価できなかったことが原因と考えられる。今後PS検層の適用により、弾性波速度値に基づいて地山評価に反映させる必要がある。

(2) 管理基準値の提案値と実測値

限界ひずみに基づく管理基準値は、適用した硬質地山の全てについて余り有効ではない。特に花崗岩類や濃飛流紋岩類では、注意レベルIの段階で切羽周辺での岩塊崩落、補助工法の追加、あるいは支保パターンの変更が行なわれている(図5.5～図5.7)、また古生層では、天端沈下量が注意レベルⅢを越えても、實際上、何ら障害を生じていない。内空変位計測結果を支保の選定に用いる場合には、本例を参考に実際的な管理基準を設定する必要がある。しかしマサ土に関しては提案した管理基準がそのまま適用できると考えられる。

(3) Q値の提案値と実測値

事前設計で想定したQ値の範囲と切羽観察に基づく実測のそれは図5.10のようにまとめられる。各トンネル共、



$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

(事前設計段階 Jw=SRF=1.0、実績Jw=1.0~0.2 SRF=1.0と仮定)

図5.10 事前予測と実績Q値の関係

坑口付近の低土被り部におけるD種パターンを除けば、若干の地質特性(特に湧水によるQ値の低下)はあるもののQ値の提案値の幅と実績のそれはほぼ類似したものとなった。したがって各地層の各支保パターンに対するQ値の提案値はほぼ妥当なものと評価できる。

6. まとめ

トンネル全体の地山評価に関する情報は、現在のところ屈折法弾性波探査に依存する所が大きい。今回この方法で得られた速度値を用いて地山評価するに当っては、新たに開発されたPS検層器を用いるのが有効であるとの結論を得た。しかし屈折法弾性波探査法は種々の仮定に立っており、得られる速度値を用いて地山状態を予測することには限界がある。このためトンネル施工時には予測した地山状態と異なるものが出現することが度々ある。Q値を用いて施工中の地山評価する手法は、その際、施主と施工者の共通尺度として用いることができ、速やかな設計変更が可能となるのではないかと考えている。表6.1に地山等級、弾性波速度値及びQ値の関係を示し、今後の同種地山での地山評価の参考としたい。

岩盤におけるPS検層の適用は緒についたばかりである。線状構造物であるトンネルの調査ではその有効性に限界があるが、大規模地下空洞などの岩盤評価では特に有効と考えられる。今後、岩盤の静的力学特性や透水性と弾性波速度値等の関係を求め、PS検層の岩盤評価への適用性を高めてゆく予定である。

本文を作成するに当り、実際の計測データを提供いただき、切羽で種々のご協力をいただいた共同企業体各位に深く謝意を表する次第である。

表6.1 地山等級、弾性波速度値及びQ値の関係

地山等級 および 地山支保 パターン	P S 検層、岩石試験等から求められた弾性波速度値の範囲				Q 値 の 範 囲		
	花こう岩類		濃飛流紋岩類		Q = $\frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$ (Jw=1, SRF=1とする)		
	P波 (km/sec)	S波 (km/sec)	P波 (km/sec)	S波 (km/sec)	花こう岩類	濃飛流紋岩類	古生層
A			P > 4.8	S > 2.7			
B	P ≥ 4.2	S ≥ 1.85	4.4 < P ≤ 4.8	2.3 < S ≤ 2.7	Q ≥ 15	Q ≥ 10	Q ≥ 15
C I	3.6 ≤ P < 4.2	1.6 ≤ S < 1.85	3.7 < P ≤ 4.4	1.7 < S ≤ 2.3	4 ≤ Q < 30	2 ≤ Q < 20	4 ≤ Q < 20
C II	2.6 ≤ P < 3.6	1.15 ≤ S < 1.6	3.0 < P ≤ 3.7	1.1 < S ≤ 1.7	0.05 ≤ Q < 4	0.1 ≤ Q < 3	0.3 ≤ Q < 4
D I			P ≤ 3.0	S ≤ 1.1	0.02 ≤ Q < 0.6	0.025 ≤ Q < 1	0.04 ≤ Q < 1
D II	P < 2.8	S < 1.15					Q < 0.07

(参 考 文 献)

- 1) 三谷 健：総括報告「安房トンネル」，シンポジウム「今後のトンネル技術と安房トンネル」，1989.
- 2) 梶田澄雄：岐阜の地質をめぐって，口曜の地学「11」，築地書館，1980.
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説，1986.
- 4) 土質工学会：岩の工学的性質と設計・施工への応用，pp. 334, 1974.
- 5) 日本国有鉄道：NATM設計・施工指針（案），日本鉄道施設協会，pp. 33~35, 1983. 3.
- 6) 林 久夫：P波とS波のフルウェーブ・デジタル検層システム，新しい地盤調査法Ⅱ，日本応用地質学会九州支部，p. 93~105, 1989.
- 7) 建設省中部地方建設局丸山ダム調査事務所・サンコーコンサルタント株式会社：昭和59年度丸山ダム原石山岩石試験調査報告書，1984.
- 8) 田中治雄：土木技術者のための地質学入門，山海堂，1964.
- 9) 桜井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文集，no. 317, 1982.
- 10) 桜井春輔：NATMにおける現場計測と管理基準値，土と基礎，Vol. 34, no. 2, pp. 5~10, 1986.
- 11) Barton, N., Lion, R. and Lundc, J. : Estimation of support requirement for underground excavation. Design method in Rock Mech., Univ. of Minnesota, 1975.
- 12) 吉川恵也ほか：NATM計測実績の統計分析，土木学会第15回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，p. 222, 1983. 2.