

トンネル事前設計における地質調査 の問題点とその評価に関する研究

中川浩二¹・保岡哲治²・北村晴夫³・三木茂⁴・藤本睦⁵・木村恒雄⁶

¹正会員 工博 山口大学教授 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

²正会員 工修 山口大学大学院学生 理工学研究科 博士後期課程 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

³正会員 (株)東建ヅ行ツク 山口出張所 (〒753-0215 山口県大内矢田 234-1)

⁴正会員 理修 基礎地盤コンサルツク(株)岩盤工学センタ- (〒102-8220 東京都千代田区九段北 1-11-5)

⁵博士(学術) 復建調査設計(株)地質調査部 (〒732-0052 広島市東区光町 2-10-11)

⁶正会員 工修 山口県 道路建設課 (〒753-8501 山口市滝町 1-1)

この研究は、山岳トンネルの事前設計と実施における地山評価の不一致原因を明らかにすることを目的とした。原因を、1)地質調査の技術的限界、2)地質情報の不足、3)地質技術者の地山解釈に関する個人差、4)地質、設計および施工技術者の地山評価差の計4項目に集約した。4項目の評価を行うため、3本の既施工トンネルを例にとり、弾性波速度および地質調査の再評価、地質、設計および施工技術者の地山評価に関するアンケート調査と面接を実施した。その結果、トンネル毎に事前設計から施工段階までの地山評価の実態が明らかとなった。不一致は、事前調査の量や質に依存するのみならず、トンネル毎の地質条件、地質技術者の地質解釈、施工の安全性評価等に起因することがわかった。

Key Words : geological survey, preliminary design stage, geological evaluation, geological engineer, construction stage

1. はじめに

山岳トンネルの建設においては、事前設計(当初設計)と施工実績における地山評価が合わないことが少なくない。例えば、鈴木ら²⁾は、事前調査と施工段階間の地山評価に関する食い違いの実態を報告している。

また、事前調査段階での地山評価の不適切さから実施工において工事費の増大をもたらす事例がしばしば見られ、予算管理上の問題点となることもある。このことは、最近、特に求められる公共工事費の透明性を高める上でも障害となる。

本研究では、このような立場から、山岳トンネルの事前設計と実施における地山評価の不一致の原因と考えられる諸要因について、既に施工された3本のトンネルを例にとり、検討したものである。

2. トンネルにおける事前調査の問題点とその内容

(1) 事前調査の問題点

鈴木ら²⁾によりトンネル建設における事前調査の不適切さを生じる原因として、5つの問題点が指摘されてい

る。この中で、鈴木らは、地質調査技術の限界、不十分な地質調査、事実と解釈の区分、地質解釈の人による相違および残された問題点の成果物への明記を挙げている。

事前調査の不適切さが生じる原因としては、この他にも考えられる。その中で本研究において筆者らは鈴木らの指摘する問題点のうち、事実と解釈の区分、地質解釈の人による相違および残された問題点の成果物への明記の3点に関しては、担当技術者の判断に依存するところが大きいので、一括して地質技術者の地山解釈に関する個人差として考えた。また、川上の事前調査段階から川下の施工段階までの業務内容の異なる技術者間における地山評価の個人差についても、問題の一項目と思われる。

そこで本研究では、これら調査から実施工にかけて発生する問題点を次に示す地質調査の技術的限界、地質情報の不足、地質技術者の地山解釈に関する個人差、さらに地質、設計および施工技術者の地山評価差の計4点にまとめ、実証的に検討する。

(2) 事前調査の問題点の内容

a) 地質調査の技術的限界

地質調査の技術的限界には、探査技術の原理上の欠陥と複雑な地質構造への適応能力の限界等がある。弾性波

探査の技術的限界例³⁾では、高い弾性波速度値を示す地層の下位に同速度値の低い地層が分布する地層構成の場合、断層や岩脈が緩やかな傾斜をして分布する場合などに解析上の限界が発生するのは良く知られているところである。

b) 地質情報の不足

地質情報の不足例としては、予算上の制約などで調査項目や数量が不足する場合、土被りが大きく調査が及びにくい山体内部、表土や植生に覆われて地山の露頭が少なく地表地質踏査の精度が上がらない場合などである。このような場合、地山情報が不足して結果的に評価の誤りが発生しやすい。

c) 地質技術者の地山解釈に関する個人差

地質技術者は、得られた地質情報を帰納的に解釈して地山評価する。したがって、技術者により解釈が異なる可能性があり、評価結果も同じものになるとは限らない。また、経験差等による地山評価の確信度の差が異なった解釈を生じることもある。

d) 地質、設計および施工技術者の地山評価差

事前調査から施工までの一貫した過程の中、工学的に適切な地山評価は、同じ条件下で各技術者間によって行われることを前提としている。しかし、各技術者間には、地山判断に関する習熟度の違いや事前と施工中の地質情報量の違いなどで、判断が一致しないことがあり得る。このような場合には、事前に適切な地山評価を行っても施工段階で変更されることになり、結果的に事前調査結果が反映されないことになる。

上述した問題点が実務上どのような形で生じているかを明らかとするため、事例に基づき検証する。

3. 検討対象トンネルの概要と研究の手法

(1) 検討対象トンネルの概要

検討対象トンネルとして、最近竣工した3本の2車線道路トンネルを取り上げた。検討対象トンネルの概要を表-1に示す。

(2) 研究の手法

本研究では、前述の4項目の問題点を検討することを目的とし、以下に示す手法を採用した。

a) 地質調査の技術的限界

地山評価に関する調査技術のうち、数値的な根拠を与えているものは弾性波探査である。したがって、調査技術自体が有する技術的限界に関する検討は、弾性波探査結果を例として評価する。

土木学会「トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解

表-1 検討対象トンネルの概要

	トンネル延長 (m)	主要地質	当初設計の主要地山等級	最大土被り厚 (m)
Aトンネル	833	泥質片岩	C II	160
Bトンネル	463	安山岩、凝灰角礫岩	B	80
Cトンネル	422	流紋岩質凝灰岩	C I	70

表-2 「地山分類表」⁴⁾をもとに弾性波速度値より推定したC+D値と実際の切羽観察記録の関連(片岩と粘板岩の例)

弾性波速度 (km/s)	圧縮強度 C	風化変質 D	合計 C+D	該当地山等級
5.0以上	1~2	1~2	2~4	A
3.8~5.0	2~3	2	4~5	B
3.3~3.8	2~3	2~3	4~6	C I, C II
2.6~3.3	3	3~4	6~7	D I, D II
2.6未満	3~4	4	7~8	E

CとDの各評価段階は、図-1の「切羽観察記録の項目」を参照

説⁴⁾と日本道路公団「設計要領、第三集 第9編トンネル」⁵⁾においては、「地山分類表」が示されている。同表では、各地山等級における岩種別の弾性波速度とこの速度に対応するおよその岩盤状況が示されている。一方、施工に際して作られる切羽観察記録(後述する図-1のうち、切羽観察記録の項目)には、切羽の安定性、風化変質と強度、節理状況および水に関する項目が記されている。ここで、事前調査の弾性波速度と比較的対応しやすいと考えられる圧縮強度(切羽観察項目:C)と風化変質(同項目:D)を取り上げる。地山分類表に基づいて調査弾性波速度から推定されるC、D項目の評価段階(1~4)と実施工において記録された評価段階を比較した。たとえば、片岩地山において弾性波速度値が3.5km/sと与えられたとする。地山分類表によると、この弾性波速度値を有する片岩地山の一軸圧縮強度、風化変質は、それぞれハンマーで容易に割れる、風化作用を受けて岩石に変質をおこしている、とされている。これを切羽観察表に当てはめると、一軸圧縮強度は2~3、風化変質も2~3が対応する。弾性波速度が節理の発達により低下するのは周知の事実であるが、このことを考慮に入れても、およその対応は可能なものとして、これらの値を実観察された値と比較することとする。

記録表のCとD項目を採用した理由としては、比較的切羽観察者の客観性が期待できることと対象地山が数十N/mm²程度の一軸圧縮強度を示す亀裂の少ない中硬岩地山であることを重要視したことにもよる。

予測と実際の比較には、2項目の評価点の和を用いた。片岩と粘板岩を対象とした地山等級と切羽観察表の関連を表-2に示す。表中の数字は、切羽観察記録表の評価点

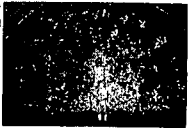
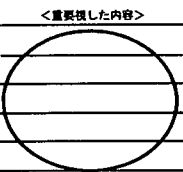
整理番号: Bトンネル No. 1		<トンネル条件>	土盛り: 37m	岩石名: 安山岩	特殊条件: 膨圧・偏圧・流動性・谷の下・土盛り小・広製構造物接近・その他()
<切羽写真>  撮影項目 →	<切羽観察記録の項目> 掘削地点の地山の状態と挙動				
	A 切羽の状態	1. 安定	② 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出
	B 暴露面の状態	1. 自立 (岩盤不)	② 時間が経つと崩れ崩落ちする (後者)	3. 自立困難掘削後早期に支保する (先着)	4. 掘削を先行して山を受けておく必要がある
	C 圧・縮強度	1. $\sigma \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃は続ねず	② $1000 > \sigma \geq 200$ ハンマー打撃で砕ける	3. $200 > \sigma \geq 50$ 軽い打撃で砕ける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma$ ハンマー刃先くい込む
	D 風化変質	1. なし・健全	② 岩目に沿って黄色い強度やや低下	3. 全体に黄色い強度相当に低下	4. 土砂状・粘土状・破砕・当初より未固結
	E 割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1\text{m}$ 割れ目なし	② $1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	3. $20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	4. $5\text{cm} > d$ 、破砕当初より未固結
	F 割れ目の状態	1. 密着	② 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさむ当初より未固結
	G 割れ目の形態	① ランダム方形	2. 柱状	3. 層状、片状、板状	4. 土砂状、細片状、当初より、未固結
	H 湧水	①. なし、湧水程度	2. 高水程度	3. 壁中湧水	4. 全面湧水
	I 水による劣化	①. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出
<重要視した内容> 		<重要度のパーセント表示> ① 割れ目の方向性 % ② 湧水 % ③ 劣化 % ④ 岩盤強度の項目 % (合計: 100%)		地山等級 B, C I, C II, D I, D II	
		縦断方向 1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$), 2. さし目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$), 3. さし目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$), 4. 流れ目 ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$), 5. 流れ目 ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$), ⑥. 覆直 ($\theta \geq 80^\circ$) [最大傾斜角をとる]		割れ目の方向性	
		横断方向 1. 水平 ($10^\circ > \theta > 0^\circ$), 2. 右から左へ ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$), 3. 右から左へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$), 4. 左から右へ ($60^\circ > \theta \geq 30^\circ$), 5. 左から右へ ($30^\circ > \theta \geq 10^\circ$, $80^\circ > \theta \geq 60^\circ$), 6. 垂直 ($\theta \geq 80^\circ$) (切羽面のみかけの傾斜角をとる)			

図-1 アンケート調査 (Bトンネル, 切羽No. 1の例)

図中, ○ で囲った部分がアンケート記入依頼箇所

である。

b) 地質情報の不足と地質技術者の地山評価に関する個人差

地質情報の不足と地質技術者の地山解釈に関する個人差の検討のために前述の3本のトンネルについて再地質調査を行った。

本研究の主たるテーマである地質技術者の地質解釈に関する個人差は、地質情報の不足の検討と同じく実際にトンネルを再調査することにより検討する。

再調査は、対象トンネル周辺を実際に歩く地表地質踏査から地山等級決定までの作業とした。なお、地山等級の範囲は、事前調査と施工時の地山等級の比較を行うため、坑口部パターンを含んだ設計段階の等級 (B, C I, C II, D I, D II, D III) とした。また、再調査は、1本のトンネルにつき2組の地質技術者 (1グループは複数の地質技術者より構成) の担当とした。再調査に当たって、技術的判断が大きく異なる項目は、共通データとして事前に提供した。

- ・ ルートマップと航空写真
- ・ 弾性波速度分布図 (走時曲線解析後の分布図)
- ・ ボーリングコアの写真と柱状図

再調査の成果品には、工学的判断根拠を添付した設計支保パターンとして提案してもらった。設計支保パターンに関する各技術者間の評価については、後に詳述する。

地山情報の不足については、事前の調査数量に関して、再調査を担当した地質技術者へのヒアリングによって実施した。評価項目は、地表地質踏査、弾性波探査、ボーリング調査および調査全体とし、適切度の評価は、不足、

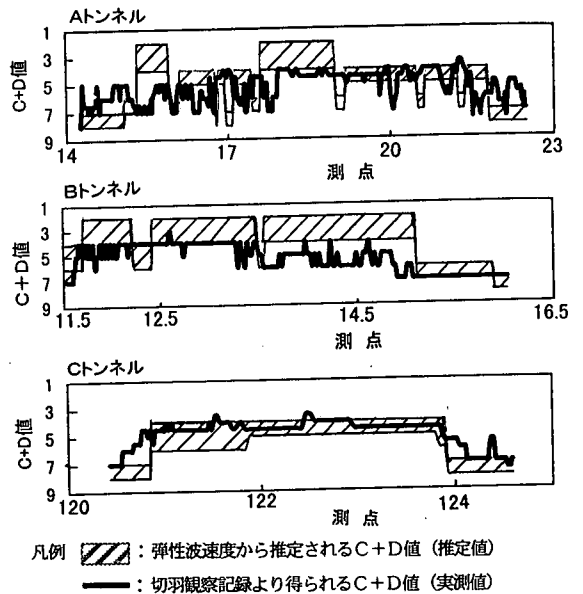


図-2 弾性波速度から推定される地山評価と切羽観察記録から得られる地山評価の関係 (斜線内に実測C+D値があれば弾性波速度推定が妥当であったといえる。)

やや不足および適切な三段階に分けた。

地表地質踏査の不足は、露頭の量や質の現地条件の程度を表し、弾性波探査とボーリング調査は、当初設計時

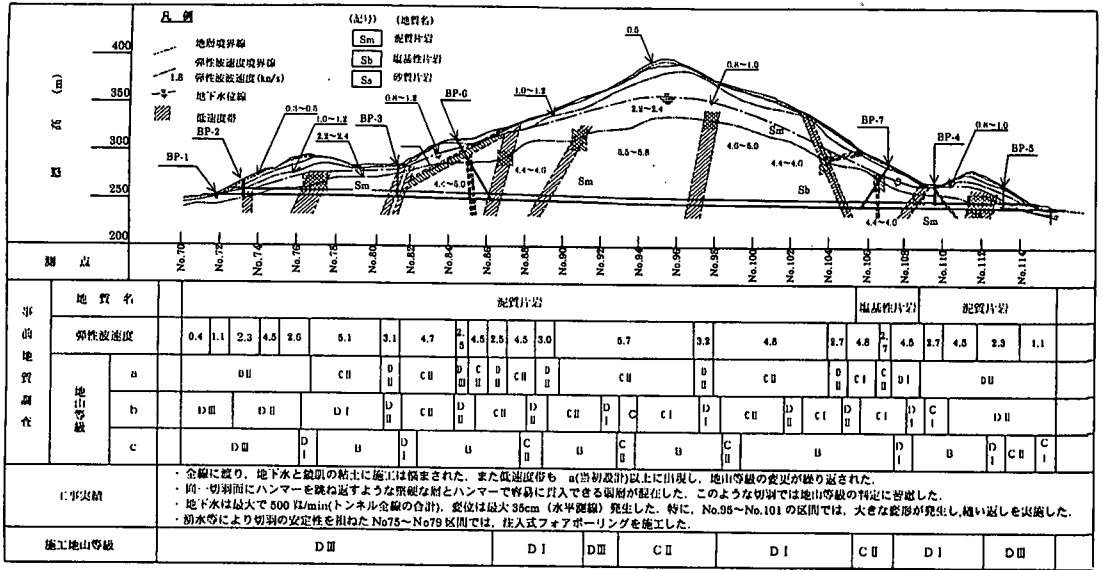


図-3 Aトンネルの再調査結果

に実施した調査数量から判断した。また、調査全体については、事前調査で行った全ての調査について十分な地質情報が得られたかどうかを総合的に評価した。

c) 地質、設計および施工技術者の地山評価差

地質、設計および施工技術者の地山評価の個人差は、鈴木らの方法⁹⁾を参考に上述の再調査トンネルの代表的切羽情報を用いたアンケート調査によって検討した。

再調査トンネルの複数切羽に関して、図-1に示す依頼票を用いたアンケート調査を実施した。対象切羽は、坑口部を除く各再調査トンネルの代表断面とし、3切羽ずつの合計9切羽とした。アンケートのサンプル数は、100人(地質技術者30人、設計技術者30人、施工技術者40人)とし、このうち、84人(地質技術者28人、設計技術者21人、施工技術者35人)から回答(回答率:84%)を得た。なお、アンケート対象者は、トンネル経験の浅い技術者、豊かな技術者が均等になるように抽出した。

切羽情報としては、切羽写真、切羽スケッチ、切羽観察記録の項目およびトンネル条件の記入されたものを提示した。ここで、トンネル条件は岩種と土被り厚の2項目である。ただし、アンケートでは、地山等級と等級決定時に重要視した項目(切羽写真、切羽スケッチ、切羽観察記録の項目およびトンネル条件)に関しても回答を求めた。

4. 実例を用いた再評価

(1) 弾性波速度の再評価

3トンネルについて、弾性波速度から地山分類表によ

って推定されるC+D値と実際の切羽観察により得られたC+D値を図-2に示す。

図中斜線を施した範囲が表-2に示すC+D値の該当範囲と考えられ、実際のC+D値がこの範囲内にあれば、弾性波速度の推定は、ほぼ妥当であったといえる。なお、図の横軸はトンネル測点を表し、縦軸はC、D項目の判定値の合計を示す。

図-2において、AとBトンネルでは、推定値に比べて実測値がかなり低く記録されている。Aトンネルでは、実測値は推定値の下限付近あるいはその少し下、また、Bトンネルでは、実測値は推定値下限付近より2点近く下回っている。このことは、トンネルによっては、弾性波速度がトンネル掘削時の地山の状況を正しく反映していないことを示している。これに比べて、Cトンネルでは、坑口部を除いて実測値はほぼ推定値の範囲内に収まっており、弾性波速度の推定が、ほぼ妥当であったことを示している。

(2) 再調査結果

調査結果を対象トンネルごとに図-3~図-5に示す。図中、当初設計は事前調査結果の1ケースと考え、当初設計(以下; a)、各グループ(b, c, d)および施工結果に分けて示した。

ここで当初設計は、当初の地質調査をもとに設計技術者が行ったものである。そこで各グループによる再設計に際しては、各グループ(各社)のトンネル設計技術者にも直接参加してもらい、当初設計に準じる形とした。

a) Aトンネル

地質技術者間で地山評価は異なる。aとbはC等級を主体とした。一方、cはトンネル延長の60%以上をB

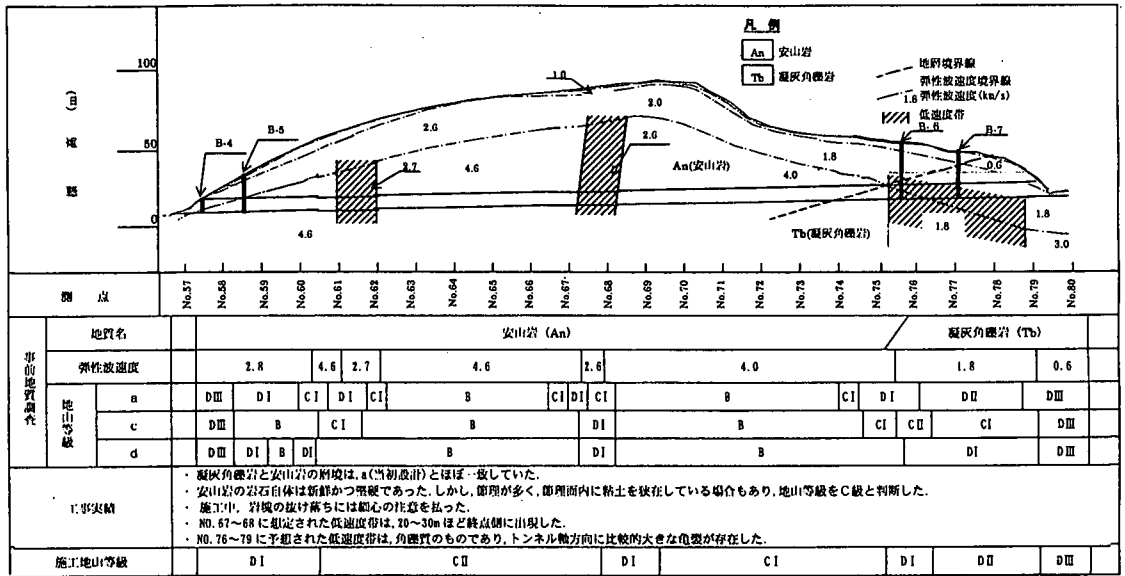


図-4 Bトンネルの再調査結果

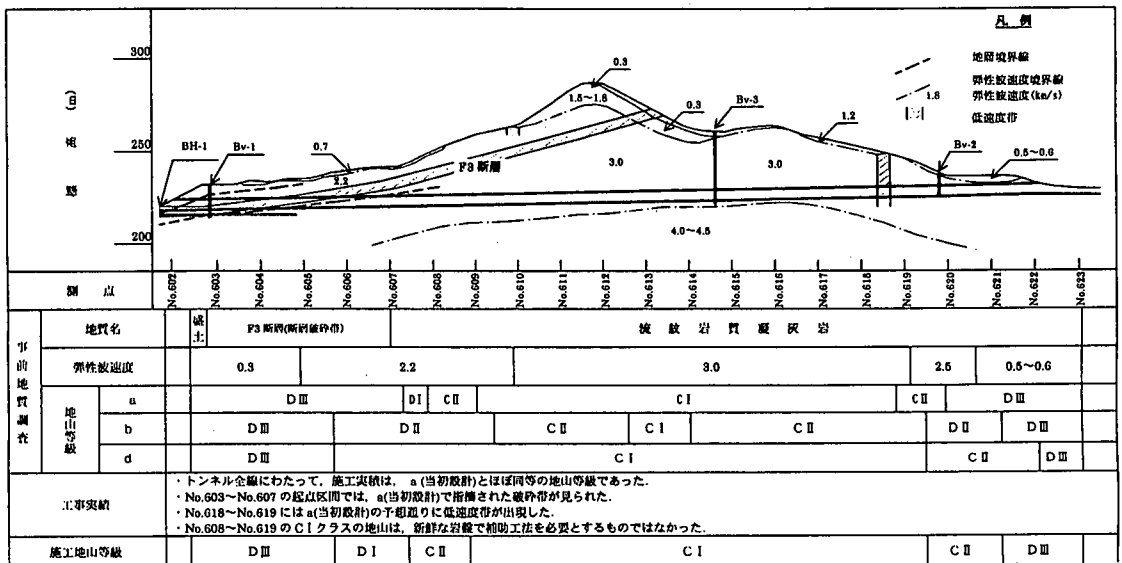


図-5 Cトンネルの再調査結果

等級と判定している。施工実績は、最も不良地山と予想したaより、一層不良側の地山等級であった。

aの地山等級は、片岩の弾性波速度に関する異方性、十数本の破砕帯の存在、地下水位がトンネル掘削基面よりも高い位置にあること等を考慮して地山分類表に示される弾性波速度と地山等級間の関係より結果的に2等級(A→C)不良側として設定している。

bは、断層破砕帯数が多く、特に、地層境界の全てが断層であり、また、地下水位がトンネル全線にわたってトンネルより高い位置にあることから、aとほぼ同等の地山評価と考えた。

cは、弾性波速度値は破砕部以外で4~5km/s、ボーリングコアの採取率はほぼ100%、また、コアの亀裂も閉じており、片理面の存在を考慮しても地山分類表に示される弾性波速度と地山等級間の関係に比べて結果的に1等級(A→B)不良側に下げれば十分であると判断し、Bを主体とした地山等級とした。なお、cの地表地質踏査では、破砕帯の存在は確認できず、積極的に不良側へ地山等級を設定する根拠はなかった。これに比べて、a、bは当地方における片岩地山の特性を考慮し、高い弾性波速度値にも関わらず、地山等級を不良側に下げている。

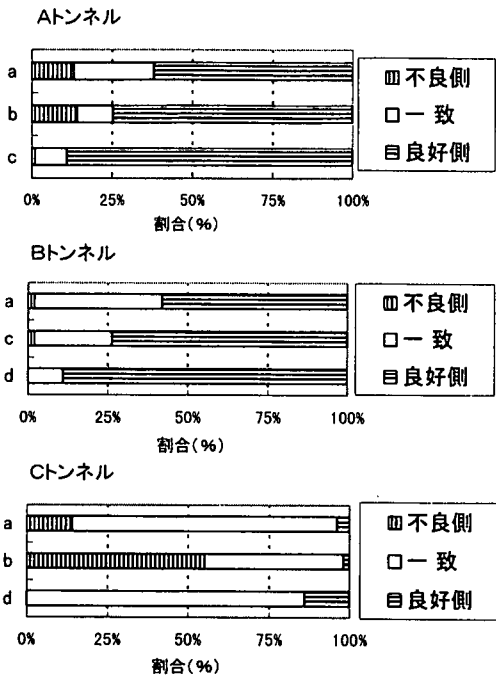


図-6 施工実績との比較

b) Bトンネル

3グループの地質技術者間の判断はほぼ一致し、約50%の区間をB、残り区間をCとD等級とした。一方、地質技術者がB等級と判定した地山は、1~2ランク不良側のC I、C II等級で施工された。

aは、トンネルの主体となる安山岩区間について、地表地質踏査、弾性波速度値(4.0~4.6km/s)を主体に、ボーリングコア(B-4, 5)の目視観察の結果等からB級地山と判定した。特に、Bトンネルはトンネル位置が海岸線に近く、露頭も豊富にあり、地表地質踏査は十分と判断した。

cおよびdもaと同様に、地表地質踏査とボーリング調査で地質を十分確認の上、3グループとも安山岩部は、弾性波速度を判断の主な根拠として地山等級をBとした。なお3グループの地質技術者は地質情報の質および量とも適切であり、事前調査段階の地山評価結果の信頼性は高いと考えた。

c) Cトンネル

対象トンネルの全延長の約60%を3グループともC地山(C IとC II)と判断した。この判断は、Bトンネルと同様に地質技術者間で一致した。さらに、施工実績は3グループで予想したものと、ほぼ良い一致をみた。

aは、弾性波速度を主に地山等級を設定している。凝灰岩のボーリング調査(B₇)よりC等級を確認している。

bおよびdともaの判断と同等である。しかし、F-3断層とCトンネルに平行してある断層等については施工中の地質調査が必要であると指摘している。

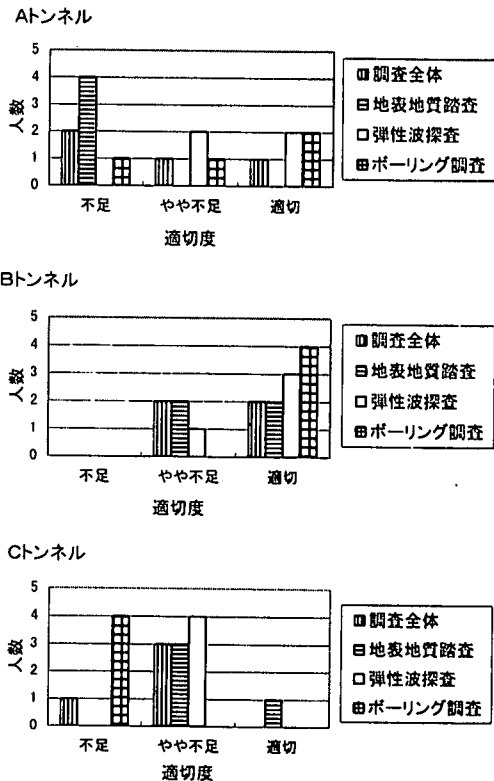


図-7 地山情報の不足に関するヒアリング結果

施工実績に対する事前調査の地山等級の一致度を整理したものが図-6である。この図によると、Aトンネルは一致度が低く、事前調査は施工実績に比べて良好側と判断している。これは、前述した弾性波速度の評価等に問題があったのではないかと考えられる。Bトンネルにおける一致度は低いが、Aトンネルより若干高い。Cトンネルは一致度が高く、dでは80%以上、bでも40%程度一致している。また、bは、50%の区間で事前調査の地山評価は施工実績に比べて不良側と判定した。

d) まとめ

以上より、地質技術者間で地山評価が一致し、その判断と施工実績が良い一致をみたCトンネル、地質技術者間で地山評価は一致し、それと施工実績とは食い違ったBトンネル、地質技術者間で地山評価が不一致で、さらに施工実績とも食い違ったAトンネルに分かれ、たまたま選択した3本のトンネルにおいてもさまざまな状況の生じることが示された。

(3) 地質情報の不足に関するヒアリング

ヒアリングは各グループの再調査担当各2名を対象とした。その結果を図-7に記す。図中、適切度は、不足、やや不足、適切な3段階で示した。

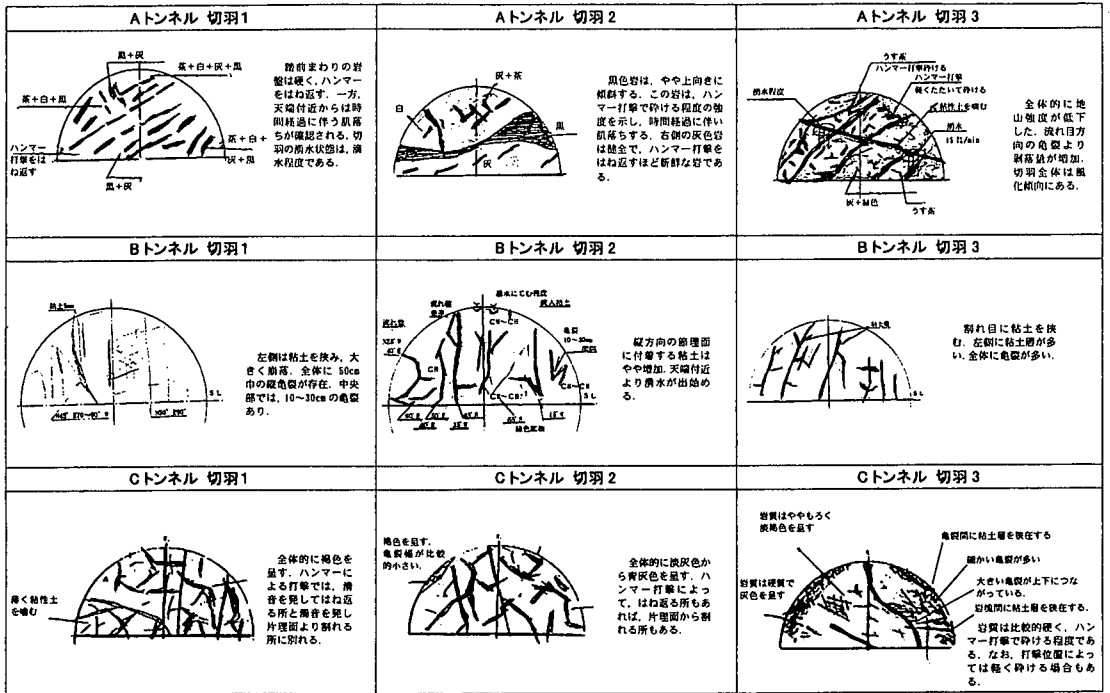


図-8 地質、設計および施工技術者の地山評価差に関するアンケートの切羽スケッチ一覧

a) Aトンネル

Aトンネルでは、評価項目3項目のうち、地表地質踏査から情報不足との評価が全員から得られた。特に、断層破碎帯や低速度帯の劣化および脆弱部が露頭には皆無との一致した意見であった。また、他の2項目である弾性波探査とボーリング調査には判断のばらつきが見られた。

片岩地山における弾性波探査の速度値は、トンネル掘削による応力解放時の岩盤の状態と対応していない(断層などで揉まれている場合に多い)場合があるなど、弾性波探査技術の限界が指摘された。また、地下水位が高い場合の速度値の信頼度や低速度帯に地下水が集中しやすいことがあるので、高密度電気探査などの併用が望ましいという意見もあった。

ボーリング調査は、数量についての意見が分かれた。不足していないとしたものは、ボーリングを増やしても地山判定の結果は変わらないと考えたからであろう。しかし、地山判定が大ききはずれたのは、やはり弾性波速度に大きく影響されたからであり、ボーリングを増やすことで判断材料が増加すれば、より判断が正確になると思われる。

b) Bトンネル

Bトンネルでは、3項目の調査とも地質情報の不足はないと判断し、全体的な調査量は適切であったと判定している。また、弾性波速度値が4.0~4.6km/sに相当する地山の軸圧縮強度が20~30N/mm²と低い数値を示していることから、強度試験の追加が望まれた。

c) Cトンネル

Cトンネルについては、地表地質踏査に関する情報は比較的十分であったのに対して、弾性波探査はやや不足、ボーリング調査は不足であった。その結果、調査全体に関して、不足側の判断がなされた。

地表地質踏査では、全員が起点側の断層(F-3断層)の存在を露頭で確認できなかった。また、弾性波速度値4.0~4.5km/sの地層を貫通したボーリングがないことなどが挙げられた。

d) まとめ

Aトンネルでは、地表地質踏査が露頭条件から十分実施できず、弾性波探査とボーリング調査の情報についても技術者間で不足度の評価が分かれた。その結果、調査全体としては、やや不足側の結果となった。

Bトンネルの各調査項目の数量と調査全体量については、ほぼ十分な地山情報が得られたと判断している。

Cトンネルでは、ボーリング調査を中心に弾性波探査、地表地質踏査とも不足、やや不足と判断し、全体としては、4人もやや不足と判断している。

これらの結果から、地山情報の不足度について地質技術者間で判定の分かれるAトンネル、ほぼ十分な情報があると判断できるBトンネル、やや不足であると意見が一致したCトンネルに分類できた。

(4) 地質、設計および施工技術者の地山評価差に関するアンケート調査

アンケート調査の対象とした3トンネル各3切羽、合

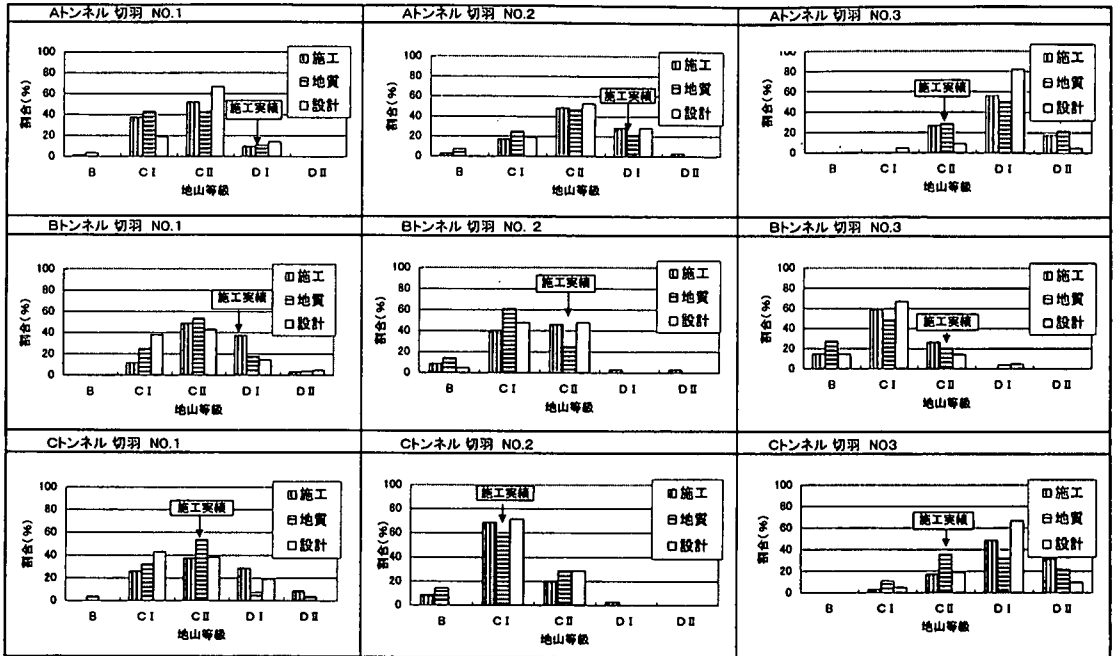


図-9 地質、設計および施工技術者を対象とした地山評価差に関するアンケートの結果一覧

計9切羽のスケッチを図-8に示す。また、地質技術者、設計技術者および施工技術者による地山評価に関するアンケート結果を図-9に示す。図-9には、施工実績としての地山等級もあわせて示している。

この図より、同一切羽に関して各技術者の判断する地山等級の棒グラフはバランスの良い山型の分布を示し、最頻等級を中心に良不良側に1ランク程度の幅を持つことがわかる。

分野別の技術者の評価傾向としては、施工、地質および設計技術者は概ね同等な分布を示し、分野の違いによる差はなく、切羽情報に基づく地山評価結果は同等といえ、取りたてて論じる程の差は見られない。

一方、地山評価時の重要度(図-10)については、各技術者とも、切羽スケッチと切羽観察記録による合計が60%を越える結果となった。

この結果より、回答者は切羽スケッチと切羽観察記録に重点をおいて地山評価しているといえ、以後、切羽スケッチ(前述の図-8)を用いて、施工時の地山評価について考察する。

a) Aトンネル

3つの切羽でアンケート結果と施工実績の判断はかなり異なっている。切羽1と切羽2では、片岩の硬質部と軟質部が同時に切羽面に現れた。この場合には、地質の互層構造を地山評価にどのように反映させるかが、アンケートと施工実績の差となって現れている。施工実績はアンケート結果より不良側の地山評価をしている。切羽3では、切羽スケッチに、湧水の発生、地山が軟質化し

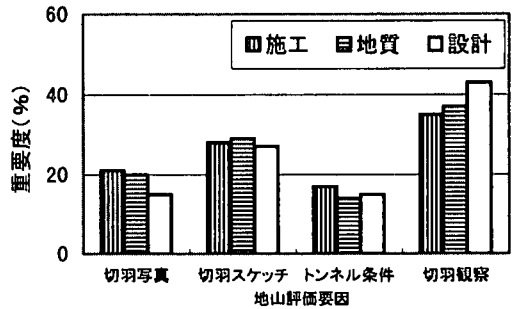


図-10 地山評価要因の重要度

ているコメントが述べられ、アンケートでは施工実績より不良側の評価が行われている。施工実績は補助工法の併用が望ましい不良地山であったことを考慮すると、実際の地山は、施工実績の地山等級より不良側であった可能性も推察できる。

b) Bトンネル

アンケート結果の判断は、3つの切羽とも施工実績より概ね良好側の地山評価を行っている。大半の回答者は、地山等級をB~C Iと判定し、切羽スケッチに記入されているコメントに関する評価差が、そのまま最終地山評価に反映されている。

切羽観察結果の特徴として、切羽1では粘土を挟んだ岩塊の崩落、切羽2では節理に付着する粘土、切羽3では、亀裂に挟在する粘土である。施工実績は、上述したコメントを積極的に考慮したケースと思われる。

c) Cトンネル

アンケート結果と施工実績は、ほぼ一致している。3つの切羽の共通項目として、全体に硬質で細かい亀裂が多く、湧水の影響も見られない。したがって、切羽1と切羽2についてアンケート結果では、CⅠもしくはCⅡ級地山と判断し、回答のピーク等級と施工実績は一致した。切羽3については、比較的土被り(土被り厚:15m)となること、切羽1と切羽2に比べて亀裂密度が増加することなどから、アンケート結果は地山を不良側に判定している。これに対し施工技術者は上述の地山情報を不良と判断しなかったためと考えられる。

d) まとめ

アンケート結果では、地質、設計および施工技術者間に地山評価に関する有意な差異はないことが明らかになった。また、アンケート結果は再調査結果と同様の傾向を示し、施工実績とは必ずしも一致しないものとなった。

5. 再調査トンネルごとにみた事前調査の適切度の再評価

調査対象3トンネルについて、事前調査の適切度を再評価する。

(1) Aトンネル

Aトンネルでは、地質技術者間で地山の評価差が現れるとともに、施工時の地山等級は一層不良側であった。原因としては、地表地質踏査による地山情報の不足、弾性波探査の技術的限界、地山解釈に関する個人差が挙げられる。特に、片岩地山における弾性波探査の速度値は、トンネル掘削による応力解放時の岩盤の状態と対応していない場合があるなど、弾性波速度と地山等級との関係が解明されておらず、そのことが地質技術者の判断に差異が生じた原因であり、また、施工時の地山等級と一致しなかった原因でもある。

このように、弾性波探査からの地山の推定に問題があり、さらに露頭が少なく地表地質踏査の精度が上がらない状況では、それを補う意味でも、ボーリング調査、場合によってはトレンチ調査等を追加する必要がある。したがって、事前調査は、一般的には適切な量であっても、このような特殊条件下ではやや不足していると評価される。追加調査をしても、なお事前調査の信頼度の問題がある場合は、施工時に切羽ボーリングなどの前方調査技術を積極的に活用するとともに、客観的事実に基づく一層柔軟な設計変更などが望まれる。

(2) Bトンネル

Bトンネルにおいて、地質技術者間で地山評価は一致

し、施工実績とは不一致であった。

地表地質踏査、弾性波探査、ボーリング調査等の事前調査量は適切であった。また、岩種は安山岩で、片岩のように片理面による異方性もなく、弾性波速度値から直接地山等級を設定しても良い状況にあった。地質技術者は、地山評価結果に十分な自信を持っていた。しかし、事前調査でB等級と地山評価したものは、施工実績でCⅠとCⅡ等級であった。

工事資料によれば、当初設計でB等級と判断した地山は、岩塊自体は硬質である反面、節理面に粘土を挟在したり、岩塊が流れ目の状態となっていたと示されている。これは、切羽観察記録の風化変質の項目にも示され、弾性波速度値に比べて、節理に沿った強度劣化が見られた。また、再調査と並行して行った施工技術者に対するヒアリングにおいて、切羽岩盤が流れ目であり、肌落ちの危険が常にあったことが強調され、鋼製支保工のあるCⅡの採用が多くなったものと思われる。

すなわち、Bトンネルでは、地質技術者が適切であると判断できる量の調査を行い、信頼度の高い地山評価であった。一方、施工技術者は、節理の挟在粘土と走向・傾斜を重要視し、積極的に施工の安全側の地山等級を設定した結果、地質技術者の地山評価と施工実績に差が発生したといえる。

(3) Cトンネル

事前調査段階で地質技術者の地山評価は一致し、その結果は施工実績とも一致した。

事前調査段階では、地表地質踏査は十分行えたが、F-3断層の位置把握を目的としたボーリング調査が不足またはやや不足であり、全体的に、事前調査量は不足していた。しかし、不足側の地山情報から判断した地山等級は地質技術者間で一致した。調査で懸念されたF-3断層は予想した位置に現れ、施工上のトラブルもなかった。なお、現地技術者の判断は、アンケート調査で回答した施工、地質技術者の判断とも一致した。

Cトンネルの事前調査の適切度については、ボーリング調査を中心に事前調査量はやや不足していた。しかし、弾性波速度を基本に設定した地山評価は地質技術者間で同様の判断であった。また、施工実績とも一致した。したがって、Cトンネルは、調査、設計および施工上、課題の少ないトンネルであるといえる。

6. まとめと今後の地山評価方法の提案

(1) まとめ

本研究では、最近施工された3本のトンネルを実例としてトンネル事前設計における地質調査の問題点を

検討し、次の知見を得た。

- a) 事前調査の問題点を、①地質調査技術の技術的境界、②地質情報の不足、③地質技術者の地山解釈に関する個人差および④地質、設計および施工技術者の地山評価差にわけて検討した。その結果、この項目別に事前調査の問題点が整理できた。これらの項目のうち、④地質、設計および施工技術者の地山評価差を除く、①地質調査技術の技術的境界、②地質情報の不足、③地質技術者の地山解釈に関する個人差によるものが、主な不一致の原因と考えられた。
- b) 再調査の結果、3本のトンネルは、事前調査段階で地山評価の分かれるトンネル、事前調査段階で地山評価は一致するが施工実績と異なるトンネルおよび事前調査段階で地山評価が一致し、施工実績とも一致するトンネルに分けられた。これらのケースは、結果的に一致不一致の発生するすべてのケースとなった。
- c) 地質調査技術の技術的境界として、弾性波速度値に着目した。その結果、弾性波速度値から得られる推定値(C+D値)と切羽観察に記入された実測値(C+D値)は必ずしも一致せず、地山状況によっては、異なる結果を与えることがわかった。特に、片岩は力学的異方性がある上に事前調査の弾性波速度値が応力解放時の地山等級に対応しないなどの条件を持っていることが裏付けられた。なお、弾性波速度値から得られる推定値と切羽観察に記入された実測値を比較することによって、弾性波探査結果の技術的境界を評価する方法は、施工実績に基づく弾性波探査結果を数量的に評価できる有効な手段と考えられる。
- d) 適正な地質調査の数量は絶対的なものではなく、対象地質や露頭状況によって異なる。したがって、事前調査と実施工の地山評価の不一致は、地山の性質と事前調査の質および量の関係で発生するといえる。
- e) 地質、設計および施工技術者間で、傾向的には地山評価の判断に有意な差は見られない。ただし、現地施工技術者が施工の安全性を最優先した場合には、地質と設計技術者間で妥当と判断した地山評価よりも不良側の地山と判断する場合がある。

(2) 今後の地山評価方法の提案

本研究の結果、地山評価のあるべき姿として次の項目を提案する。

- a) 片岩などある特定の地質では事前調査の精度が上がりにくく、事前調査で予測した地山評価が施工実績と一致しないことがある。このような特定の地質については、弾性波速度を主体とした現在の地山区分に問題があるので、ポーリングコアや地質構造等の地質特性を考慮した他の指標を積極的に取り入れ、実状にあった地山判定基準を確立する必要がある。

- b) 事前調査における地質情報と、施工時の地質情報には質および量的に大きな差がある。事前調査において、少ない地質情報で施工時の地山区分を正確に予測するには限界がある。そこで、事前調査でどの程度の精度を期待するのか、費用対効果も含めて明らかにする必要がある。事前調査の精度を上げることがコスト増大につながるのであれば、施工時、切羽前方探査技術等の積極的な活用も一つの解決策となる。
- c) 今後は、事前調査から施工段階まで分業化した現状の設計のあり方を改善・改良していくことも必要である。できれば、設計時、地質、設計および施工技術者が同席して事前調査結果について、問題点の洗い出し作業や地質の不明確点について協議し、上述の情報を相互確認し、必要な情報は追加地質調査を提案・実施して把握しておく必要もあろう。また、調査を担当した地質技術者が施工までにわたって一貫して地山評価すれば、地山評価の技術が蓄積し、精度も向上するので事前調査の問題点も一層明瞭になると考えられる。
- d) 切羽に直面する施工技術者が、少しでも精度の高い地山情報を得る方法として、施工結果の反映が有効と思われる。実際の切羽の情報を地質と設計技術者に返すことによって、地山評価の食い違いの原因が明確になると考えられる。既地質調査データを見直し、さらには、再設計によって、次の施工に生かされる。山岳工法(NATM)は、本来、ここまで施工結果の反映が可能な工法であったのではないか。このような施工結果の反映は、新設トンネルの事前調査にも生かされるものであろう。

謝辞：本研究を行うに当たり、ご協力頂いた関係機関には謝意を表わします。特に、施工技術者へのアンケート調査では、日本道路公団試験研究所とゼネコン数社の方に、設計技術者へのアンケート調査では、コンサルタンツ数社に回答をお願い致しました。ここに記して感謝の意を表わします。

参考文献

- 1) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二: NATM 施工実績に基づく事前調査の評価に関する一考察, 土木学会論文集, 第427号/VI-14, pp. 261-270, 1991.
- 2) 鈴木守, 富田宏夫: トンネルの地質調査の性格と問題点(2), トンネルと地下, 第24巻, 10号, pp. 49-58, 1993.
- 3) 土木学会: トンネル標準示方書(山岳編)・同解説, pp. 9-11, 1977.
- 4) 土木学会: トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説, pp. 40-42, 1996.

5) 日本道路公団：設計要領 第三集 第9編 トンネル, pp. 33-36, 1985.

6) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二：アンケートに基づ

くトンネル施工時の岩盤分類に関する研究, 土木学会論文集, 第435号/VI-15, pp. 51-60, 1991.

(1999. 7. 14 受付)

GEOLOGICAL CONDITIONS AT PRELIMINARY TUNNEL DESIGN STAGE AND CONSTRUCTION STAGE : AN EVALUATION AND ASSESSMENT

Koji NAKAGAWA, Tetsuharu YASUOKA, Haruo KITAMURA,
Sigeru MIKI, Mutsumi FUJIMOTO and Nobuo KIMURA

This study highlights the reasons of disagreement between the preliminary tunnel design and design at construction stage through the geological investigations at both stages. For this purpose, the geological details for three existing tunnels at both stages were investigated. Data from elastic wave velocity, geological survey details and interviews and answers to questionnaires from several design and construction engineers were considered for the evaluation and assessment. The reasons for disagreement were determined comparing the items differed at preliminary design stage and design at construction stage for each tunnel site and interpretation from geological engineers.