

山岳トンネル建設における臨床トンネル工学的アプローチ

On Site Approach to Tunnel Engineering



中川浩二 Koji NAKAGAWA (NPO 法人臨床トンネル工学研究所)

山岳トンネル工学は経験工学としてその経験的事実に多くを立脚している。わが国の山岳トンネル標準工法が NATM となり、力学、数学に基礎を置いたトンネル工学も見られるようになり、学問的な位置づけもなされてきたような一面もある。しかし土木工学が「ものをつくる」ということを一つの大きな目標としている以上、ものを作る実務そのものが土木工学の一つの主体であるべきである。特にトンネル工学においては実務を専門とする学者、研究者も少ないように思われる。臨床トンネル工学はトンネル建設の実務を学問、研究の対象として捉えようとするところに一つの特徴を持つものである。ここでは臨床トンネル工学に関するアプローチに関して所見を述べる。

キーワード：経験工学，山岳トンネル，調査・設計・施工，臨床 (IGC: C07, H05)

1. 臨床トンネル工学とは

土木工学は『経験工学』であるとししばしば言われる。なかでもトンネル工学は、経験工学の代表的なものとされることがある。とすれば経験工学とは何かということになるが辞書によれば、「経験的事実に重きを置いた工学」ということなのである。

トンネル工学が経験工学として、その経験的事実に多くを立脚していることは間違いない。特に山岳トンネルの調査、設計、施工において、未知の状況にある地山を対象にして仕事を進めるには数学あるいは力学の助けを借りるとしても、到底あらかじめ細部にわたるまで予測することは困難であり、そこに経験的事実、あるいは多くの場合ノウハウと呼ばれるいわゆる経験が役に立つことはいうまでもない。

医学の世界には、「基礎医学」と「臨床医学」があると聞く。大学の医学部の先生は、基礎系と臨床系とに分類されるらしい。医学という神のおつくりになった人体を対象とする学問においては、ある種の論理を基に原理的な問題を究明しようとする基礎医学に対して、病人を実際に診察、治療する医学としての臨床医学が定義されていると考えられる。そういえば、「臨床心理学」という学問分野がある。その道の権威である前文化庁長官河合隼雄氏によると、これは必ずしも病人を対象とするものではなく、「個人や集団の適応上の問題を、心理学的知識や技術を背景に示唆・助言などを通して解決を図ることを目的とした心理学の一分野」ということになる。とすれば、この神様のおつくりになった大自然の中、それも地下深いところに建設するトンネル工学においては、数学的あるいは力学的論理の帰結としての学問と並んで、トンネル建設における諸問題を力学的知識や経験的事実から得られた知識を背景に解決を図ろうとする学問、すなわち『臨床トンネル工学』が

存在してもよいであろう。

臨床トンネル工学とは、トンネル工学の名医を育てるための学問であるかもしれない。臨床の達人すなわち名医を育てる立場に立ったとき、しばしば直面する問題は過度の経験重視である。こうなると、経験の少ない技術者は、経験の多い技術者に勝つことはできないということになる。当然のこと、経験は大いに重視されるべきものである。しかし、その経験の中に論理性と一般性をもって、トンネル工学の問題点の解決を図ろうとするのが、臨床トンネル工学の目指すべきものであろう。

2. 臨床的立場から見たトンネル工学

ここで述べる臨床トンネル工学とは、経験を重視するとともに力学など基礎トンネル工学に裏づけされた論理性を重んじ、実際のトンネル現場に対して有用な解決法を提供することを目的とする。概念的議論は他に譲るとして山岳トンネル工学に於ける次のような現実問題の捉え方が必要であろう。

2.1 技術の限界を知り、現実を認識しよう

トンネル工学の主体は神のおつくりになった地山との対応である。過去のトンネルの事前設計支保パターンと実際に施工された支保パターンを比較すると、その差が大きいことが報告されている。すこしデータは古くなるが中国地方の花崗岩、粘板岩、片岩中に建設された高速道路トンネルの設計と施工の支保パターンの比較を図-1に示す¹⁾。図によると、設計においてはBあるいはCIと判断されるほどに探査において弾性波が高速を示し、堅硬であると判断された地山が、実際の掘削に際しては鋼支保工を必要とする程度の地山である部分が多かったということを示している。

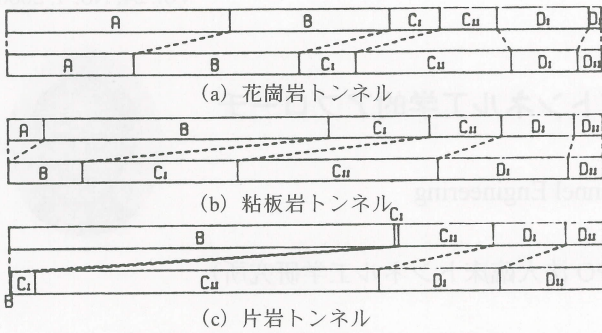


図-1 事前設計と施工支保パターンの距離区分
(上段：事前設計，下段：施工)

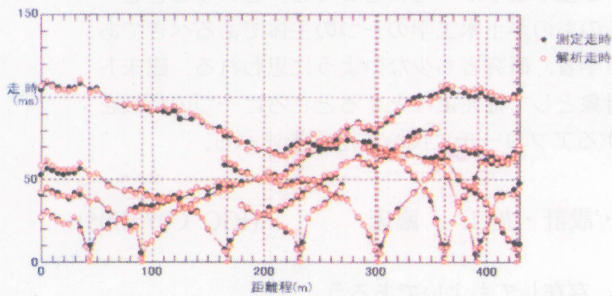


図-2 走時曲線図

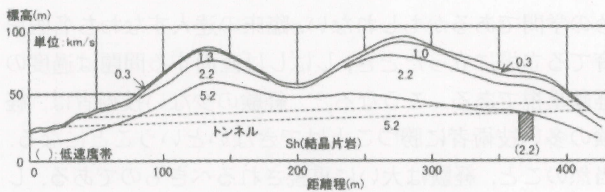
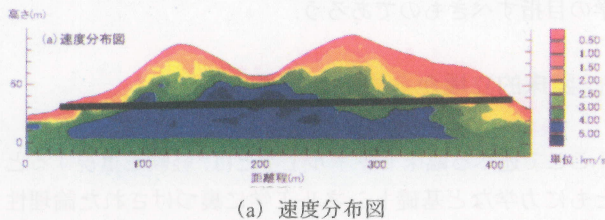
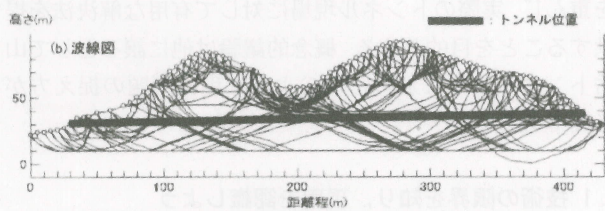


図-3 従来法における速度構造断面図



(a) 速度分布図

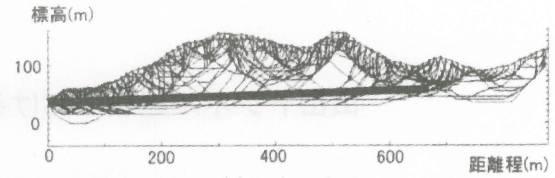


(b) 波線図

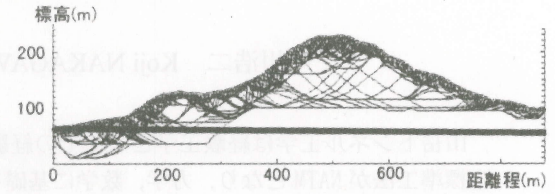
図-4 トモグラフィ法による解析結果

事前地質調査において、特に地山深部で大きな位置を占めているのが弾性波探査である。ここで用いられている方法は、いわゆる弾性波探査におけるはざとり法といわれる方法であり、多くの仮定に基づいて解析される。さらに、弾性波速度は地山の力学的特性と相関が高いとされており、地山深部の状況はこの弾性波速度を判断基準として判定されることが多い。

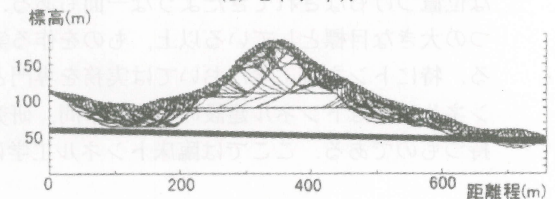
ここで、弾性波探査法に関して最近よく用いられるトモ



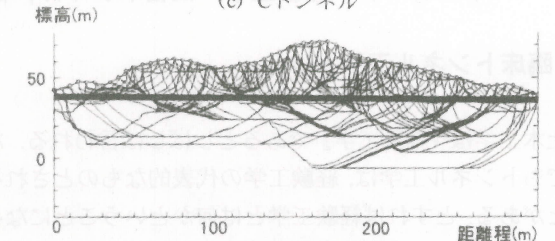
(a) Aトンネル



(b) Bトンネル



(c) Cトンネル



(d) Dトンネル

図-5 花崗岩におけるトモグラフィ法解析結果

グラフィ的方法について述べる²⁾。従来のはざとり法は、地山の構造を深部になるほど弾性波速度値の高い層状構造と仮定して解析するのに対し、トモグラフィ的方法是、そのような仮定なしに直接走時の計測値からコンピュータを用いて求めるものである。したがって、トモグラフィ的方法においては、地山中の弾性波の通過経路(波線)が明快になり、解析の適切さの一つの指標となる。

走時曲線図を図-2に、従来法(はざとり法)による速度分布図を図-3に、トモグラフィ的方法による速度分布図、波線図を図-4に示す。ここで、中国地方の花崗岩トンネルについて4本のトンネルについて解析した例を図-5に示す。AおよびDトンネルでは波線がトンネル計画線あたりを通過しているが、BおよびCトンネルでは波線は通過していない。後者の場合には、地山は深部へ行くほど弾性波速度が速くなるという仮定の成り立たない場合には、誤った推定結果を与える可能性があることになる。

NATMの導入以来、トンネルに関する力学が大きく発展した。なかでも支保剛性とトンネルの変位に関する議論、特にFenner-Pacher曲線は代表的なものであり支保の設計において一つの基礎となっている。しかし、大変位を生じるトンネルにおいてはまだしも、比較的良好な地山においても実質的に剛な支保を用いれば、変位が低減するののかという問題がある。

比較的良好な地山におけるトンネル支保の変位に与え

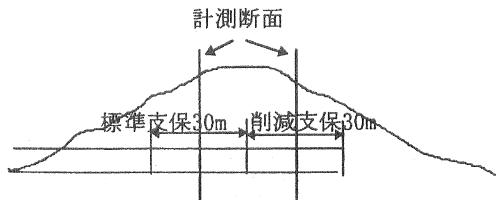


図-6 現場実験の方法と概念図

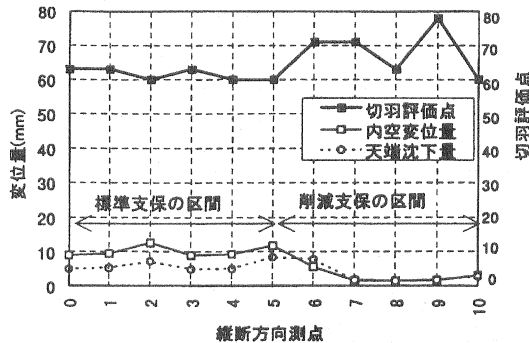


図-7 縦断方向の切羽評価点と変位量

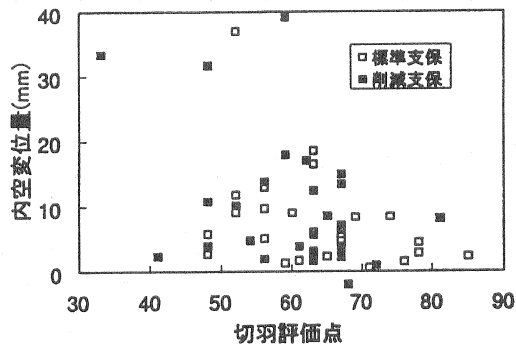


図-8 支保工の削減前後の内空変位量の分布

る影響を調べるために行われた実験の概要を図-6 に示す³⁾。図に示すように、ほぼ同一と思える地山の連続する状況において連続して 30m の区間を 2 箇所取り、一方でその地山に対応すると思われる標準の支保を、それに続く次の区間では標準から 1 ランク程度削減した支保を採用し、両者の変位を比較している。一般には、ほぼ同一と予想される地山においても地山状況の変化が考えられるため、縦断方向に切羽評価点と変位量を示したものが図-7 である。図に示すとおり地山は変化しており、またそれに伴って変位にも変化が見られるため、支保の効果を変位から論じるためには地山の状況を含めて評価することが必要であることが示される。実験はおよそ 30 箇所で行われ、基本的には鋼製支保を有する CII 地山において標準支保からロックボルト、鋼製支保を削減し、あるいは 1 進行長を延長するなどして比較を行っている。図-8 に支保の削減と切羽評価点の違いによる内空変位量の変化を示す。得られた結果は混沌としており、その支保削減の効果は明快ではない。そこで、切羽評価点と削減項目ごとの変位量を示したものが表-1 である。これによると、それぞれの削減項目ごとの変位量は、若干削減に伴い増加するかのようにも見かけうるが明快ではない。特に、切羽評価点との関係で個々の状況を示したものが図-9、10 である。これによると、評

表-1 切羽評価点と変位量の平均値

削減項目		平均切羽評価点	平均内空変位量	平均天端沈下量
全体	標準支保	61.4	8.6mm	6.0mm
	削減支保	59.9	10.1mm	7.4mm
R B 削減	標準支保	61.1	10.3mm	8.1mm
	削減支保	60.4	9.6mm	8.7mm
一掘進長延長	標準掘進長	66.8	8.9mm	7.4mm
	掘進長延長	65	10.6mm	8.9mm
H 鋼削減	標準支保	58.3	5.9mm	1.8mm
	削減支保	55.6	10.5mm	4.4mm
H 鋼削減 ^{注-1)}	標準支保	59.6	4.7mm	2.1mm
	削減支保	60.2	6.0mm	3.4mm

注-1) No. 9 のデータを除いた平均値

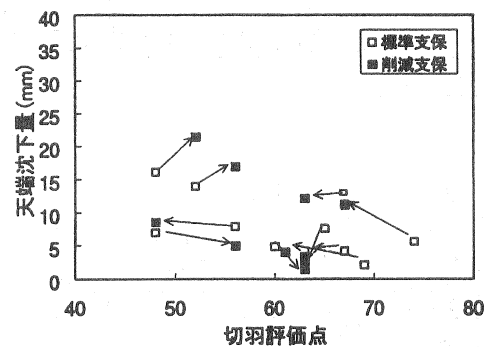


図-9 RB削減時の天端沈下量の変化

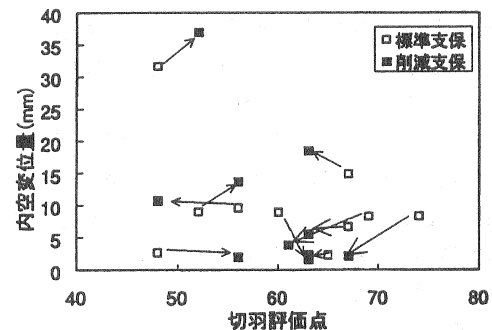


図-10 RB削減時の内空変位量の変化

価点が小さくなり（地山が劣悪になり）支保が削減されるという状況（両者とも変位が増加する方向）であるにもかかわらず、変位が低減するという例もいくつかみられ、この程度の支保低減では、変位に与える影響は明確ではないことが示される。すなわち、比較的良好な地山においては 1 ランク程度の支保剛性の低減が変位に及ぼす影響は明快ではなく、例えば鋼製支保は作業中の安全確保の目的が大きいことが推測される。

2.2 トンネル工学には人依存性がある

トンネルの事前設計に於ける人依存性を検討するため、既に掘削されたトンネルにおいてトンネルの事前再調査を行った⁴⁾。

再調査においては、掘削に関する資料は一切提示するこ

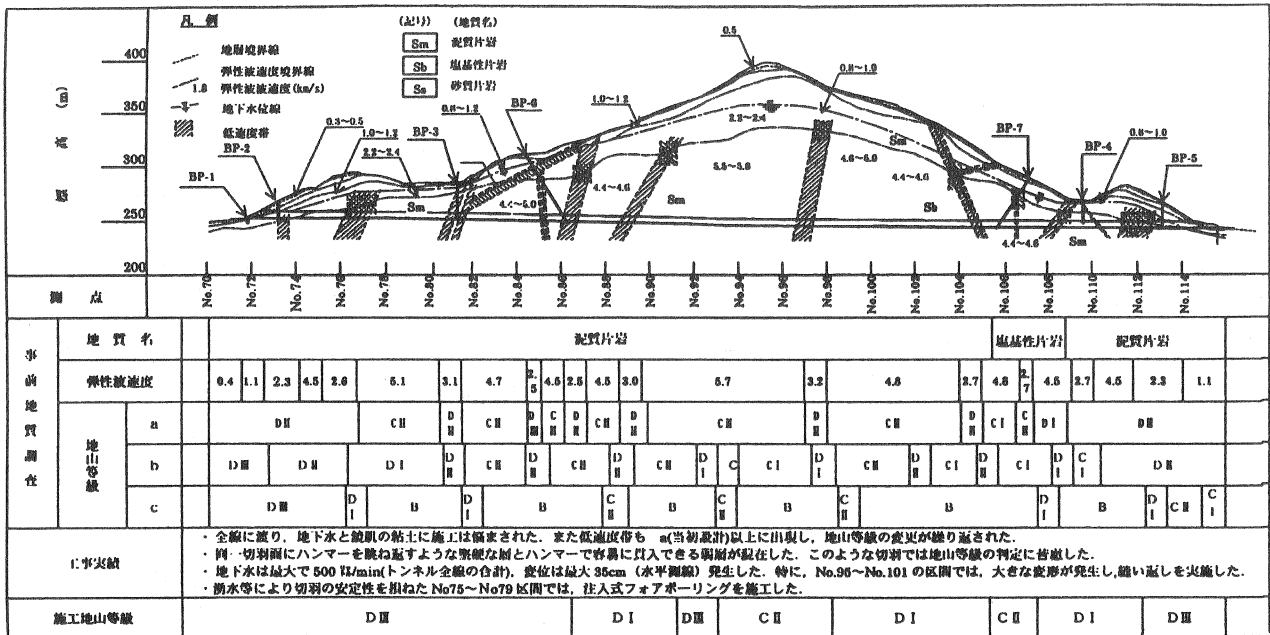


図-11 Aトンネルの再調査結果

表-2 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	CII	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	CI	70

となく、地質資料、弾性波探査結果を2組の地質技術者に提示し、踏査を行ってもらい設計技術者との協議の上、地山等級を決定してもらった。調査対象としたトンネルの地質縦断面図と探査された弾性波速度、3組の地質、設計技術者により設定された地山等級、そして実際に施工された施工地山等級を図-11に示す。ここで示した3組の事前地山等級は、実際の事前設計(成果品)であったもの1組と再調査2組の計3組を意味する。

事前地山等級は、設計者それぞれによって大きく異なっており、またそれぞれ実際の施工地山等級とも大きく異なる結果となっている。このことは、ここで対象とした地山が事前調査の対象としては容易でない特性を持っていたということが言えよう。

同様な方法で、図に示すものとは別に2本のトンネルについても同様な再調査を行った。計3本のトンネルの概要を表-2に示す。その結果、ここでは詳細は割愛するが3本のトンネルそれぞれについて、

- ① (Aトンネル) 3者の事前設計は大きく異なり、また実施工の結果とも異なる。
 - ② (Bトンネル) 3者の事前設計は概ね一致しているが実施工とはかなり異なる。
 - ③ (Cトンネル) 3者の事前設計は概ね一致しており、また実施工とも概ね一致している。
- という結果が得られた。

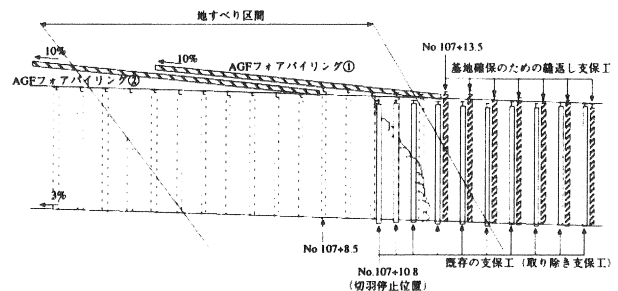


図-12 AGF施工計画断面

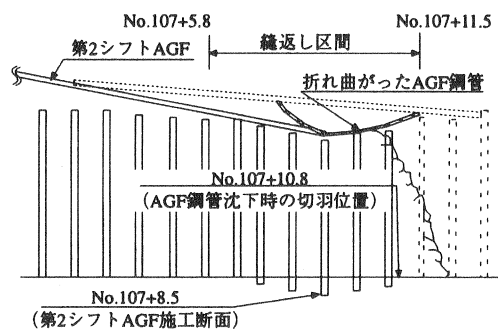


図-13 AGF鋼管沈下状況

何年か前までは、トンネル技術者には「神様」と呼ばれた方々がおいでになったと聞く。NATMになって理論あるいは計測が発達し、トンネル技術が一般的になったと言われてはいるが、臨床的な判断が個人に依存するのは当然であると思われる。

ここでは、トラブルに見舞われながらも完成したトンネルを例に取り、技術的判断が技術者の属性に依存するかどうかについて検討した調査例を述べる⁵⁾。

対象トンネルは、地すべり地帯に建設された延長 300m 弱の道路トンネルである。地すべり帯に遭遇し、脚部沈下、崩落、AGF の折れ曲がりなどを生じた。AGF 施工計画断

表-3 アンケートの回答者一覧

個人属性	発注者	施工者	設計者
回答者数	34	35	32

表-4 アンケートの質問項目と施工内容

項目	施工内容
[1]	垂直縫地ボルト工の施工
[2]	増しフォアボーリング (60cm→30cm) の採用
[3]	増しボルト工の採用
[4]	天端抜け落ち部の吹付けによる充填
[5]	鏡押し出しに対する鏡吹きと鏡止めボルトの採用
[6]	支保工間隔の変更 (1.0m→0.7m)
[7]	天端小崩落に対するウレタン注入式フォアボーリングおよびウレタン注入式鏡止めボルトの採用
[8]	掘削の一時中断と追加ボーリング調査
[9]	地すべり地帯への AGF 工法の計画
[10]	AGF 基地確保の際のウレタン注入式フォアボーリングの施工
[11]	AGF 鋼管の沈下と鏡押し出しに対する AGF 鏡止めボルトの施工
[12]	内空断面が侵された状態での粘土帯の突破計画
[13]	沈下した天端への第2シフトの AGF の施工
[14]	地すべり帯縫返しの際のレールの打ち込みとウレタン注入式フォアボーリングの採用
[15]	工事全体の評価

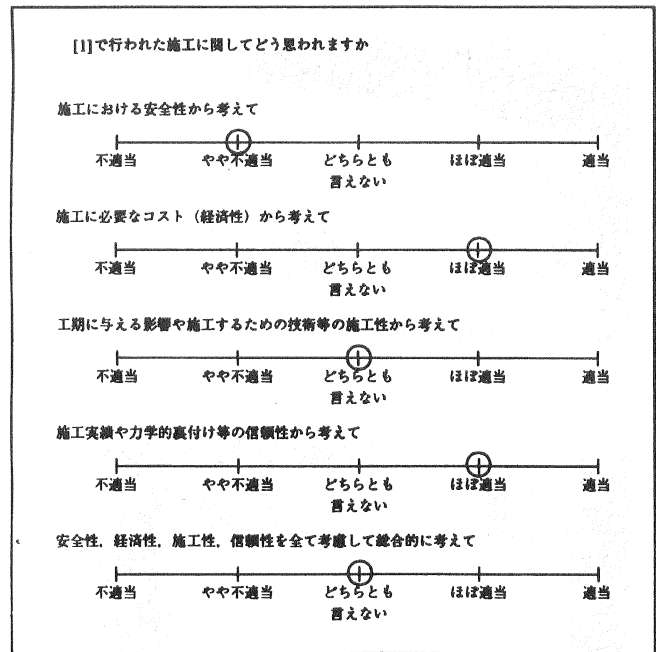


図-14 アンケートの回答例

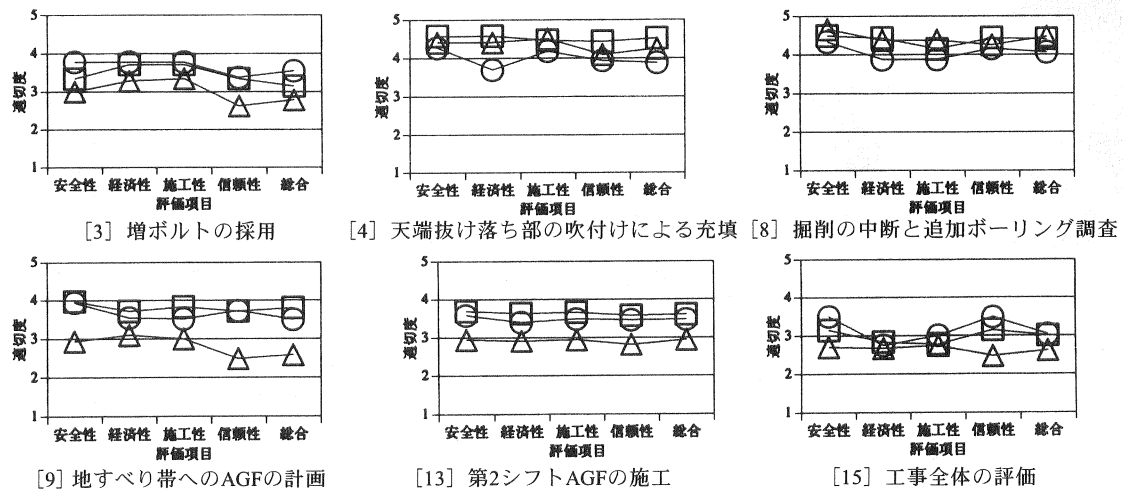


図-15 回答結果の平均値

面図を図-12に、鋼管折れ曲がりと脚部沈下の状況を図-13に示す。これらの現場において、採用された技術的判断の妥当性に関して表-3に示す約100名の技術者にご回答をいただいた。ここで、施工者とは現場におけるJV等などの、設計者とはゼネコン本社における技術者を意味する。

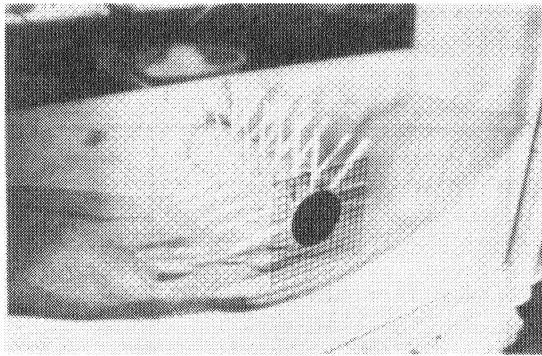
アンケートの質問項目は表-4の15項目である。アンケートは、図-14に示す評価をお願いした。結果のうち、属性ごとの差が比較的明かに現れたものを主に図-15に示す。これによると、ゼネコン本社の技術者である設計者の評価が比較的厳しく、発注者と現場技術者の判断が似通っている傾向がみられる。また、評価項目ごとの適切度の評価に関してもいくつかの傾向がみられる。さらに、このアンケ

ートに際して、記入してもらったコメントは実に大きなばらつきを有するものであった。

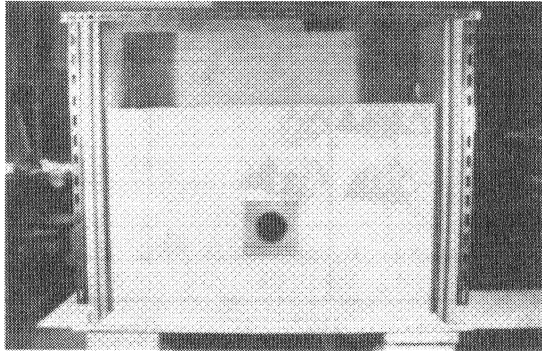
2.3 本質を見抜こう

言うまでもないことながら、臨床トンネル工学の理想は、本質を見抜いた上での現場判断の重要性を認識することであろう。本質を見抜くことは必ずしも容易ではないが、その努力は必要であろう。

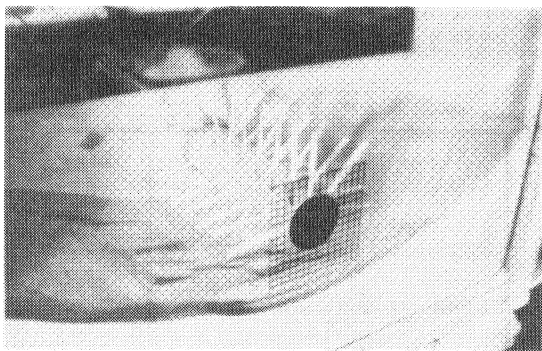
トンネルの支保効果に関して、地山のアーチアクションの形成と関連付けて非常に明快な実験が足立ら⁶⁾により行われている。本来、乾いた砂の中にトンネルを掘ることは困難である。しかし、砂相互の移動を拘束するような工夫を行うことができれば、乾いた砂といえどもアーチアク



(a)



(b)



(c)

図-16 実験手順, (a)真鍮パイプの挿入, (b)ライニングの巻き込み, (c) 実験準備完了

ションを生じ、トンネル掘削が可能になる。この状況を吹付けコンクリートとロックボルトに見立てた紙片を用いることにより、砂の中に空間を確保することが可能であることを実験で示している。実験の状況を図-16, 17に示す。

このことは、実際のトンネル掘削における補助工（フォアボーリング、フォアパイリング、ロックボルト、薬液注入など）の効果を考える上で大きな参考になるであろう。

3. 実例に学ぼう

(1) 実例からおよその方向を知ろう

困難なトンネルに遭遇した場合、しばしば理論的な考察あるいは数値解析的な検討が加えられる。理論的な考察あるいは数値解析的な検討は、トンネル掘削における検討を

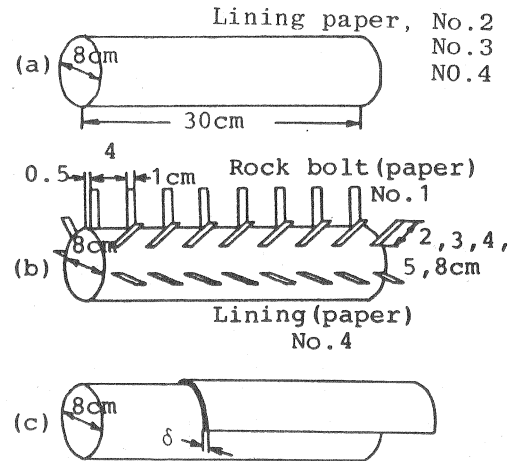


図-17 紙ライニング

表-5 切羽評価項目とそれぞれの評価ランク

観察項目 (7項目)	評価ランク (カテゴリー)				
	1	2	3	4	5
切羽の状態	安定	鏡面から岩塊が抜け落ちる	鏡面の押し出しを生じる	鏡面は自立せず崩れあるいは流出	その他
素掘面の状態	自立 (岩塊不要)	時間が経つと緩み肌落ちする (後普請)	自立困難掘削後早期に支保する (先普請)	掘削に先行して山を受けておく必要がある	同上
圧縮強度	$\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	$1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	$200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	$50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先くい込む	同上
風化変質	なし・健全	岩目に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結	同上
割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1\text{m}$	$1\text{m} > d \geq 20\text{cm}$	$20\text{cm} > d \geq 5\text{cm}$	$5\text{cm} > d$ 破砕当初より未固結	同上
割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘土を挟む、当初より未固結	同上
割れ目の形態	ランダム・方形	柱状	層状、片状、板状	土砂状、細片状、当初より未固結	同上
湧水	なし、滲水程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水	同上
水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊・流出	同上

行う上で非常に重要なことは言うまでもない。しかし、それらはあくまで「ある仮説に基づいた理論的あるいは数値解析的検討である」ということを認識しなければならない。多くの場合、理論とはある考え方ということであり、また数値シミュレーションとは現場の現象を数値モデルを作成してシミュレートしたということなのである。「ある仮説」というものが地山挙動を完璧に表現するものでなければ理論は中途半端であろうし、また地山挙動を含めたトンネルの挙動がそう簡単に数値モデルでシミュレートできるとは思えない。また、探査すら思うままにならない地山が力学定数まで含めて簡単に評価されるとは思えない。理論あるいは数値解析は臨床技術者にとっては現象を考えていく上での筋道を示唆するものであり、およその見当を与えてくれるものである。また経験の異なる技術者間の情報、意見の交換を可能にするための共通の物差しとしての役割も大きいと考えられる。

その中で臨床技術者にとって学ぶべきことの一つに、多くの経験の整理、統合からおよその方向を見出すというこ

表-6 現在の切羽観察システム

観察項目		評価区分				
A.圧縮強度		100以上	100~50	50~25	25~10	10~3
A.圧縮強度 (N/mm ²)	一軸圧縮強度	4以上	4~2	2~1	1~0.4	0.4以下
	ハンマーの打撃による強度の目安	岩片を地面に置きハンマーで打撃しても割れない	岩片を地面に置きハンマーで打撃すれば割れる	岩片を手で持ってハンマーでたたき割れる	両手で岩片を叩き割れる	力を込めれば、小岩片を指先で割ることができる
	評価区分	1	2	3	4	5
	風化の目安	新鮮な岩	割れ目沿いの風化変質	割れ目沿いの風化変質	岩面まで風化変質	土砂状風化、未固結土砂
B.風化変質		変質は見られない				
C.割れ目の間隔		d≦1m	1m> d≦50cm	50cm> d≦20cm	20cm> d≦5cm	5cm> d
D.割れ目の状態	割れ目の開口度	割れ目は密着している	割れ目の一部が開口している (幅<1mm)	割れ目の多くが開口している (幅<1mm)	割れ目が開口している (幅1~5mm)	割れ目が開口し5mm以上の幅がある
	割れ目の挟持物	なし	なし	なし	薄い粘土を挟む (5mm以下)	厚い粘土を挟む (5mm以上)
	割れ目の粗度鏡面	粗い	割れ目が平滑	一節に鏡面	よく磨かれた鏡面	
	評価区分	1	2	3	4	5
E.走向傾斜		走向がトンネル軸と直角	1.差し目傾斜 45~90°	2.差し目傾斜 20~45°	3.差し目傾斜 0~20°	4.差し目傾斜 20~45°
F.湧水量		なし、湧水 1L/分以下	湧水 1~20L/分	湧水 20~100L/分	湧水 100L/分以上	
G.劣化		水による劣化	なし	腐蝕を生ず	腐蝕が著しい	腐蝕が著しい
評価区分		1	2	3	4	

とがある。その例として、旧日本道路公団における切羽評価システムがある⁷⁾。

NATM が一般的になって以来、1日1回の切羽観察が義務付けられ膨大な数の切羽観察結果が残されてきた。もともとはこれらの記録は支保判定あるいは切羽評価のために作られたものではなく、記録を残すという目的のためであった。しかし、NATMの普及とともに一般的な評価法、換言すれば全日本的に標準化した評価法の必要性から「およその支保判定ができないか」という要請のもとに作られたのが、このシステムであると解釈している。

システムの構築に関しては、表-5に示す切羽観察データが用いられた。これらのデータの中から、クラスター分析により独立性の強い項目を抽出し、また本来あるべきと考えられる判断を基に「圧縮強度」、「風化変質」、「割れ目の間隔」、「割れ目の状態」を主な観察項目とし、水に関する項目、走向傾斜を補助項目としたのが表-6に示す現在の切羽観察システムである。ここでは、岩種に関してはトンネル掘削という土木技術的判断から評価することとし、強度区分に関しては「硬質岩」、「中硬質岩」、「軟質岩」、また性状に関しては「塊状」、「層状」とのみ簡単に表現し、それにしたがって岩石をグループ化している。また評価項目に関しては各項目のもつ重みの評価が重要であり、過去の実績から表-7のように、その値を与えている⁸⁾。

このような手法により、全国一律な支保の評価が可能となり、現在において身近に行われている評価に関して、一見客観的な考え方が可能となる。ここで一見というのは、あくまで切羽を見て各項目を評価するのは、その切羽を判断する技術者であることによるからである。また評価点と支保ランクとは、一意的に決定されるものではなく、ここに取り入れられていない種々の要因を考慮した上で決定されるべきものであることは言うまでもない。

(2) 旧来の考え方に拘束されないよう

表-7 各評価点の重み付け

評価区分		1	2	3	4	5	6
岩石グループ1	圧縮強度	40	32	24	16	8	0
	風化変質	18	12	6	0	-	-
	割れ目の間隔	16	12	8	4	0	-
	割れ目の状態	26	19	13	6	0	-
岩石グループ2	圧縮強度	31	25	19	13	6	0
	風化変質	22	15	7	0	-	-
	割れ目の間隔	20	15	10	5	0	-
	割れ目の状態	27	20	13	7	0	-
岩石グループ3	圧縮強度	32	26	19	13	6	0
	風化変質	26	17	9	0	-	-
	割れ目の間隔	14	10	7	3	0	-
	割れ目の状態	28	21	14	7	0	-
岩石グループ4	圧縮強度	37	30	22	15	7	0
	風化変質	15	10	5	0	-	-
	割れ目の間隔	21	15	10	5	0	-
	割れ目の状態	27	20	14	7	0	-

臨床工学が経験重視となりがちであることはある程度はやむを得ない。しかし経験を重視し、過去のデータを整理するとともに、しかるべき洞察力を持って体系化し、その上で新しいものを求め、あるいはより発展を目指すのが臨床トンネル工学のあるべき姿である。

ここでこの立場に立った一つの開発事例を示す⁹⁾。

最近、各所でしばしば見られる特殊トンネルの一つとしてめがねトンネルがある。めがねトンネルとは、2本のトンネルをお互いに接した状態で建設するもので、基本的には両トンネルの間にはセンターピラーと呼ばれる柱部分が存在する。高速道路などの併設トンネルにおいては、両者のトンネルの相互影響が大きくないようにということで中心間距離として3D(D:トンネル掘削幅)の離隔を取るのが通常である。しかし、トンネル坑口が交差点近くあるいは市街化地域にあり、3Dの離隔を取るだけの用地買収が困難である場合や、建設直前になって切土対象地山に遺跡が発見されたなど、両トンネルを接近して掘削せざるを得ない場合に建設されることが多い。

過去の例によれば、極端に近接したトンネルの建設には、まず最初に中央に導坑を掘削し、そこに鉄筋コンクリート構造物としてのセンターピラーを建設、その後導坑の両側に2本のトンネルを掘削する、いわゆるめがねトンネルを建設することになる。しかし、ここで建設される2本のトンネルをそれぞれ1本ずつの独立なトンネルとして扱うことができれば、この導坑の掘削とセンターピラーの構築は不要になる。このことは工期、工費の大幅な縮減をもたらすことは明白である。このような超近接の状態にある2本のトンネルを掘削可能にするためには、建設中あるいは供用後に考えられるリスクに対する対応が必要である。これらの条件をクリアーして最近建設された例を示す。このトンネルにおいては、全長280mにわたってセンターピラーを有するめがねトンネルが当初計画された。しかし工期、工

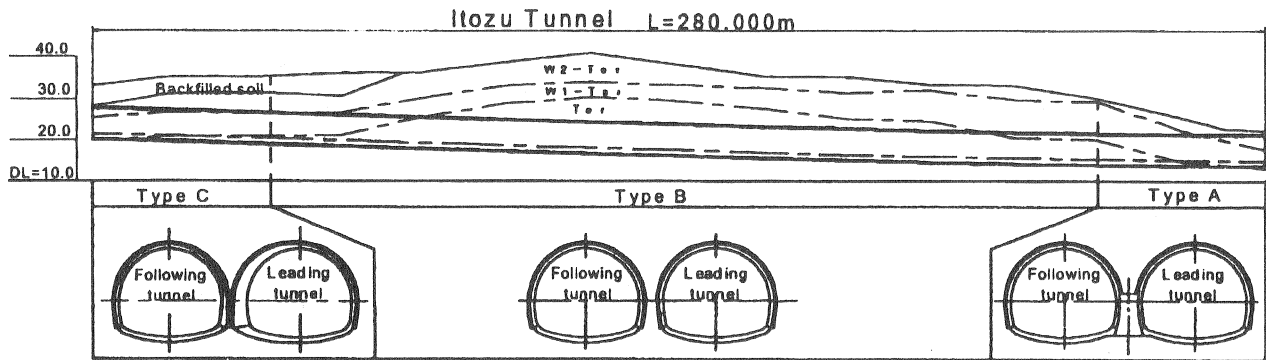


図-18 地質縦断面図及びトンネルタイプ適用区間

費の問題もあり、種々の検討がなされる中、最初の 40m はセンターピラーのある通常のめがねトンネルとして施工された。しかし中間部の 200m 区間は若干地山が良くなること、工期、工費が切迫していることも有り、検討の結果独立した超近接状態にある 2 本のトンネルとして施工された。さらに、地山条件の低下が予想される最後の 40m 区間は後進坑施工時の先進坑への荷重増加に対するリスク吸収の目的もあり、先進坑の内側の支保を特に大きくした併設トンネルとして施工された。

縦断面を図-18 に、各トンネルタイプの断面図を図-19 に示す。前述のように、このトンネルにおいて、採用された無導坑併設 B タイプは、後進坑の施工時に生じる可能性のある先進坑への過度の負荷に対応するため先進坑の後進坑側の支保剛性を大きくしたものである。

この方式の採用は、技術者のめがねトンネルに対する認識の変化をもたらすきっかけになったようである。その結果、最近ではめがねトンネルの建設においてセンターピラーのない超近接トンネルが採用される傾向にある。

ここで重要なのは、このような技術の開発は実際の必要性に迫られる中で、臨床的なアイデアと施工可能性に関する経験から来る信頼性に後押しされて実現されたものであることである。当然のことながら、このトンネルの設計に際しては、詳細な数値解析が行われた。しかし、トンネルプロジェクトに関しては「できるはずである」との臨床的判断が先行して、それを数値解析で裏づけしたというのが実情である。

4. 現実をしっかりと見て考えよう、そして発信しよう

ともすれば、トンネル工学は経験工学の典型的なものとして位置づけられ、発展途上にあるものと扱われることがある。トンネル工学が発展途上にあるのは当然のことであり、これは技術者が日夜努力している成果である。このことは技術の進展が多くの場合その原点を現場、すなわち臨床的位置から発信しているということになる。

トンネル工学における数学、力学はいうまでもなく先に述べたように論理的な思考を進め、あるいは技術者間の意見の交換などにおいて重要である。しかし、神様のおつく

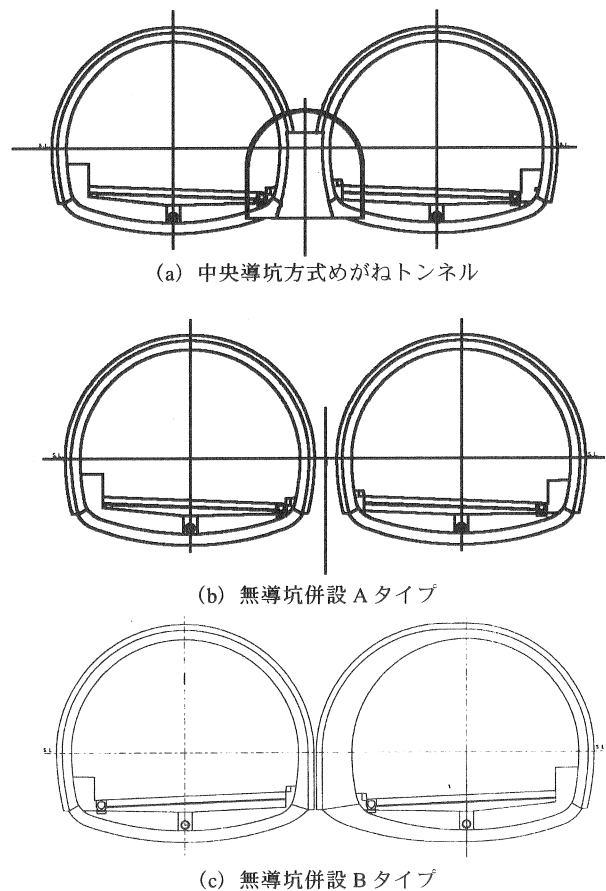


図-19 採用された3タイプの断面図

りになったこの大地をそれも地下深いところを対象として建設されるトンネルにおいて、臨床的立場からの知見を常にしかるべき見識を持って受け止め、その中からより良きものを創出することがさらに大切である。このようなアイデアは、必ずしも書斎や研究室においてのみ見出されるものではなく、切羽であっても坑外であっても、あるいはスナックのカウンターであってもよいわけである。ただ、このようにして得られた知見を整理、体系化するという努力は臨床トンネル「工学」と称する以上は常に心がけたいものである。

5. 何よりも良好な環境で



(a) 「従来」的なトンネル



(b) 「革靴で歩け、新聞の読める」トンネル

写真-1 「従来」的なトンネルと工夫が見られる「最近」トンネル

たとえば健康を損ねたとき、良好な環境の下での養生が必要なことは言うまでもない。また十分に健康な状況においても規則正しい、快適な環境が私たちの生活の基本であろう。トンネル建設においても臨床トンネル工学というからにはトンネル建設の環境に関して論じることは必要であろう。

何年か前（ずいぶん昔のように思うが）「建設中のトンネルの中を歩いてズボンに泥はねを残さずに歩くのがベテランの証である」といわれたのを覚えている。また現場で計測をやっている作業中の切羽近くで気分が悪くなったこともあった。

当時を思い出すと最近のトンネル現場はずいぶんと環境がよくなった。「革靴で歩いて新聞の読める現場」を目標にということをよく願っている。当然地山からの湧水の有無で建設中のトンネルの路面状況は大きく左右される。また常に重ダンプの走行により泥濘化する路面をしかるべき状態に保つには当然時間と金がかかる。しかし「革靴で歩いて」とまでも言わないまでも良好な路面状態の実現は作業性、快適性、安全性からも望ましいことは言うまでもない。

また、「新聞の読める現場」もしばしばお目にかかるようになってきた。もともと道路トンネル技術基準には切羽作業等では70ルクス、その他の場所でも最低10ルクスが必要とは書かれている。しかしその値はすこぶる低い。おそらくこの値は必要最低限を示したものであって快適（といわないまでも）な作業にはほど遠いものである。最近では照明のやり方にもいろいろな工夫が見られ、風管の両側への照明配置や簡単などころでは照明の笠を外し、すこし低くする、などの工夫が見られる。写真-1は「従来」的なトンネルと「革靴で歩け、新聞の読める」トンネルの代表的なものを示したものである。さらにある現場では近くの小学生の見学会があり、車椅子の子供が切羽まで入り大喜びしたということである（写真-2）。ぜひすべてのトンネル現場でこの方向を目標にしてほしいものである。ただ



写真-2 見学会での記念撮影

このための大きな障害は発注者からの積算であろう。一般に積算においては「革靴で入れて新聞が読める」状況は求められていないと聞く。粉塵に関しては明快な基準が出されているが照明問題をはじめもう一步進んだ環境問題に関する配慮もほしいものである。

さらに言及すればトンネル工事はなぜいまでも24時間体制なのか、ということがある。24時間作業により職員は深夜を含めた緊張状態に、また作業員は不規則な生活を要求される。もちろんトンネル掘削を昼間だけとすれば設備費は単純計算では2倍必要になる。しかし作業する人を苛酷な状況において経費の縮減を求めるのはいまの時代に逆行しているのではなからうか。製造業の工場ではロボットが24時間作業についている（これを監視する人達も24時間勤務ではあるようである）が、人間が主たる業務を行う場所において24時間作業を前提とすることは無からう。

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設計の評価に関する一考察, 土木学会論文集, No.427/VI-14, pp.261-270, 1991.
- 2) 三木茂, 吉田幸信, 井上浩一, 中川浩二: トモグラフ

- ィ的弾性波探査手法によるトンネル地山調査の評価, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.111-124, 2002.
- 3) 中田雅博, 三谷浩二, 中川浩二: 比較的良好な地山での支保工の役割に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.85-95, 1999.
- 4) 中川浩二, 保岡哲治, 北村晴夫, 三木茂, 藤本睦, 木村恒雄: 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, 土木学会論文集, No.658/VI-48, pp.33-43, 2000.
- 5) 中川浩二, 御手洗良夫, 寺戸秀和, 木村恒雄: 山岳トンネルの補助工法の選定における技術者の評価と意志決定に関するアンケート調査, 土木学会論文集, No.602/VI-40, pp.53-65, 1998.
- 6) 足立紀尚, 田村武, 八嶋厚: 薄肉柔支保構造(吹付けコンクリート, ロックボルト)の支保機構に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.358/III-3, pp.47-52, 1985.
- 7) 中田雅博, 三谷浩二, 八木弘, 西琢郎, 西村和夫, 中川浩二: 観察記録の分析に基づく新しいトンネル切羽評価システムの提案, 土木学会論文集, No.623/VI-43, pp.131-141, 1999.
- 8) 赤木渉, 佐野理, 進士正人, 西琢郎, 中川浩二: 山岳トンネル施工支援のための切羽評価法の適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.121-134, 2001.
- 9) 上村正人, 梨本裕, 梶山孝司, 青木宏一, 進士正人, 中川浩二: センターピラーを構築しないめがねトンネル工法の実用化と検証, 土木学会論文集, No.756/VI-62, pp.75-87, 2004.

(2006年11月29日 受付)