

吹付けコンクリートの作用効果と設計

トンネル・地下空洞小委員会
吹付けコンクリートWG

1. はじめに

吹付けコンクリートは、NATMにおける重要な支保メンバーであり、最近ではトンネルの大断面化等多様化するニーズやコスト縮減等を背景に、様々な技術的取り組みが行われている。

このような状況に鑑み、「吹付けコンクリートWG」では、吹付けコンクリートに関する各種文献調査を行うとともに、調査結果も踏まえて、吹付けコンクリートの作用効果、設計ならびに最近の技術動向、課題について考察を実施した。

本報告は、これらWG作業の現時点における成果について取りまとめたものである。

2. 吹付けコンクリートに関する文献調査

2.1 収集文献の概要

本WGでは、吹付けコンクリートの支保設計や作用効果に関する検討を行う目的で、これまでの研究事例や施工事例を中心に文献調査を実施した。調査は近年の研究動向を把握することを目的に、1985年以降の文献を対象とした。調査にあたっては、調査目的に合致あるいは参考となる内容の文献についてリストアップし、文献調査表と文献リストの作成を行った。文献調査表は、著者名、対象、地質、手法、概要・図面等の全12項目について調査し整理を行った。

調査の結果、収集された論文は116件に達した。文献・雑誌名ごとの調査文献内訳を表-1に示す。また、吹付けコンクリートの種類ごとに分類した調査文献の内訳を表-2に示す。

吹付けコンクリートの種類別では、通常吹付けコンクリートに関する論文や報文が大半を占めているものの、近年になって高強度吹付けコンクリートや繊維補強吹付けコンクリートなど新しい取り組みも行われていることも大きな特徴となっている。特に海外においては高強度吹付けコンクリートは多くの国で取り組まれており、我が国でもようやく本格的な研究が始まったといえる。

2.2 収集文献の分析

収集した吹付けコンクリートに関する文献全116件を表-2に示すように、「通常吹付けコンクリート」、「高強度吹付けコンクリート」、「繊維補強吹付けコンクリート」、「その他の研究」の4種類に分類し、さらに各々を「実験」、「計測」、「解析」による研究事例に細分化し、それぞれの傾向および特徴について考察を加えた。また、吹付けコンクリートは支保部材として力学的にどのような役割を多く期待されているのかを探る目的で、『トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説』(土木学会)に示される「吹付けコンクリートの作用効果」による分類(表-3)にて各文献を整理し、その傾向をとらえることを試みた。

その結果、収集文献は、粉塵・跳ね返り対策等の作業環境の改善や、吹付けコンクリートの強度発現特性等、施工性や作業性に主眼を置いた研究が多い傾向がみられた。

表-1 調査文献ごとの内訳（文献総数 116 件）

種 別	文 献・雑 誌 名	文献数
設計基準	トンネル関係：国内外	8
	地下空洞関係：国内外	2
研究事例	土木学会トンネル工学研究発表会	2 2
	土木学会岩盤力学シンポジウム	2 2
	土木学会論文集	2 0
施工事例	トンネルと地下（1985～1988）	8
	トンネルと地下（1989～1992）	1 5
	トンネルと地下（1993～1997）	8
そ の 他	日本道路会議	6
	鉄道総研報告他	5

注) 年号表示の無い文献については 1985～を対象とする。

表-2 吹付けコンクリート種類ごとの調査文献内訳

種 類	設計基準・指針		論 文・報 文				
	トンネル	空 洞	室内試験	実物大試験	現地試験・計測	解 析	その他
通常吹付けコンクリート	8	2	1 0	3	2 9	4 0	9
高強度吹付けコンクリート			4	3	1 2	2	1
繊維補強吹付けコンクリート			5	3	4	2	6
その他の研究			0	0	1 0	0	1
小 計	8	2	1 9	9	5 5	4 4	1 7

注) 調査文献 116 件中、複数の項目に重複する文献があるため総数は一致しない。

2. 2. 1 作用効果による分類

収集文献を、土木学会標準示方書に示される吹付けコンクリートの作用効果による分類にて整理した結果を表-4に示す。なお、文献中に特定の作用効果を研究対象とする旨、記述のないものについては、本WGにおいて、その研究内容から分類した。

同表に示すように、全体的な傾向としては、②の「内圧効果、リング閉合効果」を期待しているものが最も多いのが特徴である。ただし、ほとんどの文献はこれら作用効果に対する定量的な評価は行っておらず、その数値的考察はみられなかった。また、繊維補強吹付けコンクリートについては、①の「岩盤との付着力、せん断抵抗による支保効果」に分類される文献数が最も多く見られた。これは、今回調査した文献は、既設レンガ覆工の剥離防止、引張抵抗力の導入、シングルシェルとしての採用等、特殊条件下での報告が多かったためではないかと考えられる。

表-3 吹付けコンクリートの作用効果（土木学会『トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説』より）

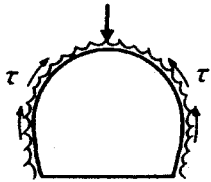
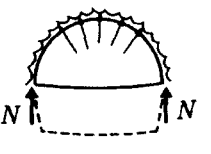
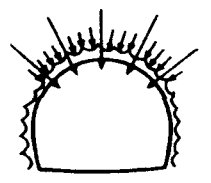
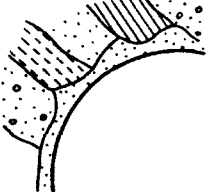
吹付けコンクリートの作用効果	概念図
<p>① 岩盤との付着力，せん断抵抗による支保効果 吹付けコンクリートと岩盤との付着力により，吹付けコンクリートに作用する外力を地山に分散させ，またトンネル周辺の割れ目や亀裂にせん断抵抗を与え，キープロックを保持して抜け落ちを防止し，グラウンドアーチをトンネル壁面近くに形成させる．割れ目の多い硬岩等に作用効果大きい．</p>	
<p>② 内圧効果，リング閉合効果 比較的厚い吹付けコンクリートが連続した 1 個の部材として地山を支持することにより，地山の変形を拘束して地山に支保力（内圧）を与え，地山を三軸応力状態に近い状態に保持して，地山の応力解放を抑制する．また，早期にインバートを敷設して断面を仮閉合することにより，支保効果がさらに発揮される．これらの効果は，軟岩や土砂地山等で大きい．</p>	
<p>③ 外力の配分効果 鋼製支保工，あるいはロックボルトに土圧を伝達する部材として挙動する．</p>	
<p>④ 弱層の補強効果 地山の凹みを埋め，弱層をまたいで接着することにより，応力集中を防ぎ弱層を補強する効果．</p>	
<p>⑤ 被覆効果 掘削後，早期に壁面を被覆するため，周辺地山の風化防止，止水，微粒子の流出防止等の効果がある．</p>	

表-4 吹付けコンクリートの作用効果による収集文献の分類

吹付けコンクリートの作用効果	文 献 数			
	通 常	高強度	繊維補強	計
①岩盤との付着力，せん断抵抗による支保効果	1/23	0/3	5/7	6/33
②内圧効果，リング閉合効果	15/23	3/3	3/7	21/33
③外力の配分効果	8/23	0/3	1/7	9/33
④弱層の補強効果	0/23	0/3	0/7	0/33
⑤被覆効果	0/23	0/3	1/7	1/33

注) 調査文献 116 件中，分類可能な文献のみを対象とした．また重複分類のため総数は一致しない．

2. 2. 2 各種吹付けコンクリートの特徴

通常吹付けコンクリート、高強度吹付けコンクリート、繊維補強吹付けコンクリート種別ごとに分類した文献の特徴を取りまとめて以下に述べる。

(1) 通常吹付けコンクリート

(a) 実験による研究事例

限定された室内模型実験下において、吹付けコンクリートの効果を挙動や強度特性等より検討している文献が多く見られ、地山条件、施工性等を考慮した実験を体系的に行うまでには至っていない。また、研究事例は、表-4に示す①および②の効果を期待しての実験と考えられるが、具体的記述は見られない。④および⑤について研究事例は無かったが、定性的効果は期待できるものと考えられる。

(b) 計測による研究事例

計測は、施工中に観察・計測に基づいて得られた実際のトンネル周辺地山の挙動や支保部材の効果を、定量的に正しく把握することが重要となる。収集した計測事例の傾向としては、トンネルの変形挙動の比較的大きい土砂地山、膨張性地山、未固結地山、脆弱地山などにおいて吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工の応力を計測し、各支保機能の効果、荷重分担を解明し、適切な設計・施工に反映することを目的としたものが多い。また、切羽評価手法を検討したもの、切羽評価の数値化と各地山分類の相関性を検討したものがそれぞれ1件あった。膨張性地山・未固結地山の吹付けコンクリートの厚さは、通常最大20cm程度であり、軟岩・土砂地山と同様に②の「内圧効果、リング閉合効果」を期待していると考えられる。

(c) 解析による研究事例

解析による研究事例を大きく理論解析と数値解析の2つに分類すると、収集した40文献のうち、理論解析によるもの11件に対し、数値解析によるものが26件と2倍以上の事例数となっている。さらに、数値解析事例の内訳は、FEM解析を適用したものが20件とそのほとんどを占めている。

理論解析としては、NATM導入当初に謳われていたFenner-Pacher型曲線の支保工反力を最小とする変位量の設定に代わって、設計断面が確保できる変位量を設定し、設計内空、覆工厚および地山変位量の和で表される掘削範囲を最小にする方法や、掘削に伴う形状弾性ひずみエネルギーが地山に蓄えられる最大形状弾性ひずみエネルギーを超過しないように支保工数量を設定する方法等が提案されている。

また、理論解析は、空洞の断面形状や荷重条件等が限られたものとなるため、偏圧や膨張性地圧の作用、特殊断面空洞等の特殊な条件下で理論解析によることが困難である場合の検討手法として、FEM、BEM、DEM、RBSM等の数値解析が用いられている。

(2) 高強度吹付けコンクリート

(a) 実験による研究事例

高強度吹付けコンクリートに関する研究として収集した15件のうち、実験（室内試験および現地施工試験）によるものは10件であった。実験による研究は、コンクリート自体の強度増加、すなわち材料および配合に着目した実験的アプローチが主流であり、個別のトンネルの地山条件等による技術的課題に直接対応したものよりも、より一般的な将来への技術開発を念頭においた試験施工等によるものが多い。また、高強度吹付けコンクリートのための材料（混和材および混和剤）としては、シリカフューム、石灰岩微粉末、高炉スラグ微粉末、急結剤および高性能減水剤等が用いられ、特にシリカフュームに着目した研究が多い。

(b) 計測・解析による研究事例

現場計測あるいは解析を主体とした研究事例は3件であった。実験による研究とは異なり、計測・解析によ

る研究事例は、いずれも実際のトンネルを対象とし、その技術的課題（力学的な必要性）に対して高強度吹付けコンクリートを採用して解決を図ったものである。すなわち、それぞれのトンネルにおいて、掘削後の変状対策として早期の支保効果強化のため、高強度吹付けコンクリートを採用し、初期強度の増加を図っている。

以上の研究事例から、高強度吹付けコンクリートが必要とされる力学的側面は、次の2点であるといえる。

- ・トンネルの大断面化に対し、設計吹付け厚さの増大を抑えるため。
- ・高土盛りあるいは膨張性地山等に起因する変状対策として、支保効果を増強するため。

今回の文献調査の範囲では、このような観点からの実験による研究事例が多く、実際の現場における計測、解析によるものは少数であった。すなわち、わが国では現在までのところ、高強度吹付けコンクリートをいかに実現するかという、材料および施工法に関する研究が多く、工法としてはようやく確立されてきた段階であるといえる。これら一連の研究に基づいて、例えば『高品質吹付けコンクリート設計・施工指針（案）（微粒分を混入し粘性を活用した吹付けコンクリート）』（日本鉄道建設公団，1997.5）がまとめられていることなどから、今後は、個別の現場における必要性（設計、施工および経済面からの要求）に応じて、高強度吹付けコンクリートの適用事例は増加していくものと考えられ、さらにそれらの成果に基づいて、技術として改良、向上がなされていくものと思われる。

(3) 繊維補強吹付けコンクリート

(a) 実験による研究事例

実験による研究事例は7件あり、これらはその研究目的により以下のように分類できる。

- ・現場で採用する上での試験施工的な実験（5件）
- ・材料特性の研究としての実験（1件）
- ・設計法検討のための実験（1件）

以上に示すように、7件中5件の文献が、現場での採用を目的としたものである。これら現場での繊維補強吹付けコンクリートの採用目的は、既設覆工の補強、通常の吹付けに代替するもの、高強度化と組み合わせシングルシェルとするものと様々であるが、実験内容はいずれも、繊維混入率等の配合実験、吹付け施工性の確認が主となっている。

(b) 計測・解析による研究事例

計測に関する文献は1件のみであった。また、その文献での計測とはトンネル工事において一般的に行われるA計測であり、その計測からとらえた変位に対応する手段としてSFRCを採用したという内容であり、純粋にSFRCに関する計測ではない。例えば、SFRCの配合、材料等を変化させ、その挙動についての計測結果等は、興味あるところであるが、残念ながら今回の文献調査においては、そのような文献は見られなかった。

収集した文献のうち、解析に関するものは2件であった。このうち1件は現場計測の結果を逆解析し、その結果の対応策としてSFRCを採用したという内容のものでSFRC自体の解析ではなく、実質SFRCに関する解析を行っている文献は1件のみであった。


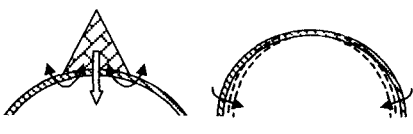
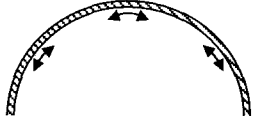
繊維補強吹付けコンクリートは、通常の吹付けコンクリートに比べて、大きな曲げ耐力が期待できるため、変状の大きなトンネル等において、対策工の一環として実施工で採用されてきている。ただし、これらはいずれも各現場において、必要に迫られ採用されているため、個々の状況に対する適用性等の実験、研究は比較的多く行われているものの、標準化を目指した研究には至っていない。今回の事例調査においても、現場における試験施工的な位置づけの実験、研究事例は多かったものの、基礎的研究、解析等は少なかった。今後の課題としては、標準的な設計、施工法を確立し、現場での確認項目を減らすことが期待される。

3. 吹付けコンクリートの作用効果

文献調査の分析結果から、表-3に示した「吹付けコンクリートの作用効果」について、定量的に検証した研究事例は極めて少ないことが分かった。これは、表-3に示す分類が定性的には理解し易いものの、例えば①の「岩盤との付着力、せん断抵抗による支保効果」が、その結果として②の「内圧効果、リング閉合効果」をもたらすといったように、種々の効果が複合的に絡むことから、それぞれの効果を明確に分類することが困難であることを示していると思われる。

そこで本WGでは、吹付けコンクリートの力学的機能に着目し、作用効果について再分類を試みた。吹付けコンクリートは、表-5に示すように「せん断力」、「曲げ」、「軸力」といった吹付けコンクリート単体の力学的機能による効果を期待する場合と、掘削後早期に掘削面を被覆することによる周辺地山の風化・劣化防止や湧水による微粒子の流出防止などのように吹付けコンクリートの力学的機能以外の効果を期待する場合に大別される。上記を踏まえ「吹付けコンクリートの作用効果」を、吹付けコンクリート単体の力学的機能および対象とする地質についてまとめると、表-6のようになる。

表-5 吹付けコンクリート単体の力学的機能による効果

吹付けコンクリート単体の力学的機能による効果	概念図
<p>○ せん断力による抵抗 せん断力による抵抗は、岩塊の剥落や地山の変形などに対し吹付けコンクリートのせん断力によって抵抗する場合をいい、吹付けコンクリート厚が非常に薄い場合は付着力よりもせん断力で吹付けコンクリートの破壊が決まる場合が多い。</p>	
<p>○ 曲げによる抵抗 曲げによる抵抗は、岩塊の剥落や地山の変形などに対し曲げによって抵抗する場合をいう。</p>	
<p>○ 軸力による抵抗 軸力による抵抗は、地山の変形などに対し比較的吹付け厚が厚かつ地山との付着力が十分に得られない場合に、主に吹付けコンクリートの軸力で抵抗する場合をいう。</p>	

注) 吹付けコンクリートと地山の付着力の大小により、吹付けコンクリートの破壊モードが変わることがある(付着力:大→せん断破壊,小→曲げ破壊,等)ので、付着力についても検討する必要がある。

4. 吹付けコンクリートの設計

吹付けコンクリートの設計法について「設計の適応対象」、「設計の照査方法」をキーワードとして分類すれば、概ね以下ようになる。

(1) 設計の適応対象をキーワードとして分類した場合

- (a) 標準設計: 標準断面、普通地山を対象とした地山分類等による標準支保パターンの設定。
- (b) 個別設計: 特殊断面(分岐、双設、大規模空洞)や特殊地山(膨張性、未固結地山)を対象とした個別の支保設計

表-6 吹付けコンクリートの作用効果

	吹付けコンクリートの作用効果	吹付けコンクリート単体の力学的機能	対象とする地質	概念図
力学的機能による効果	(i) 剥落防止効果 吹付けコンクリートのせん断抵抗力や岩盤との付着力によって岩塊の剥落を防止する効果をいう。付着が損なわれるとロックボルト等を支点とした吹付けコンクリートの曲げおよびせん断抵抗によって、荷重を支えることになる。	せん断力 曲げ	亀裂： 小 地山強度： 大	
	(ii) 荷重分散効果 地山の挙動が節理などの不連続面に沿って地山が変形する場合などにおいて、吹付けコンクリートに発生する圧縮応力を吹付けコンクリートと地山とのせん断力を介して、再び地山内に分散させることにより地山を安定させる効果をいう。	せん断力 軸力	亀裂： 中 地山強度： 中	
	(iii) 内圧効果 比較的厚い吹付けコンクリート部材がロックボルトや鋼製支保工と一体となって、曲げ抵抗力や軸力によって、地山の変形を拘束して内圧を与え三軸状態に近い状態に保つことにより、地山の安定を確保する効果をいう。	せん断力 曲げ 軸力	亀裂： 大 地山強度： 小	
力学的機能以外の効果	(iv) 被覆効果 掘削後早期に掘削面を被覆することにより、周辺地山の風化・劣化の防止や湧水などによる微粒子の流出を防止し、地山の安定に寄与する効果をいう。	せん断力 曲げ 軸力	全地質	

注) 「(iv) 被覆効果」の概念図は土木学会『トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説』より引用

(2) 設計の照査方法をキーワードとして分類した場合

- (a) 局所的設計照査：ゆるみ、不連続面等により岩盤が連続性を失い重力場になった場合の検討(円弧すべり、キープロック解析等)
- (b) 全体的設計照査：岩盤は連続性を保ち、掘削による応力再配分の影響による空洞の安定性検討(FEM解析等)

通常地山で標準的な断面形状のトンネルでは、上記(1)(a)の地山分類による標準支保パターンが適用されるのが普通である。これは、標準的な断面形状のトンネルについて、多くのトンネルの実績を基に、数値解析による検討結果も考慮に入れて、支保工を標準化したものである。この場合、あくまでも標準的な地山を対象としているので、特殊工法(複雑な掘削工法や大規模な補助工法を採用している場合等)、特殊地山(未固結や膨張性地山)、特殊条件(近接施工、大断面等)の場合には適用できない。

従って、特殊地山や特殊条件のトンネル(上記(1)(b)の場合)では、標準支保パターンをもとに吹付け厚の増加、早強性等を加味して、上記(2)の各種解析的照査が実施される場合が多い。一般に、FEM等の数値解析により、周辺地山の変位や支保に作用する応力などを予測し、この予測に基づき支保を決定する方法が採ら

れているが、今後、さらに解析精度を向上させる上で、

- ・吹付けの効果を考慮した支保部材のモデル化の検討
- ・地山と吹付け部材の相互作用の的確なモデル化の検討
- ・吹付けコンクリートの変形特性や強度特性の時間依存性の適切な評価、モデル化の検討

等の課題が残っていると考えられる。また、解析をする上での調査情報不足に起因する周辺岩盤自体のモデル化、外力の評価の問題等、解析手法だけでなく、調査法についても検討すべき課題を有している。

5. 吹付けコンクリートに関する最近の技術動向

ノルウェー、スイス、オーストリア等の欧州では、地山区分や構造物の用途に応じて、吹付けコンクリートの強度レベル（初期強度、長期強度）や、耐久性（透水性、耐凍害性、耐食性等）が細分化されたガイドラインが整備されている。

これに対して我が国では、施工数量が約 200 万 m^3 /年と諸外国に比較して圧倒的に多いにも関わらず、吹付けコンクリートの要求品質としては、設計基準強度（ $18N/mm^2$ [$180kgf/cm^2$]）が主流がほとんどであったことから、特にガイドラインは整備されていない。また、吹付けコンクリートの品質向上に関する研究開発も、諸外国に比べ立ち遅れているのが実情ではなかろうか。

近年の第二東名・名神高速道路の建設計画に見られるトンネルの大断面化・扁平化および地下発電所等の地下空洞など、多様化するニーズや建設費削減などを背景として、支保部材の形式が次第に変化している。その支保部材に用いられる吹付けコンクリートについては、品質の向上（高強度化、高品質化）を図ろうとする動向が高まっており、数年前からトンネル支保のマルチ化の一つとして高強度吹付けコンクリートを用いた種々の取り組みがなされている。

このような高強度、高品質な吹付けコンクリートは、掘削直後の地山のゆるみ防止や長期的な荷重の増加、変形に対する耐力の維持等の支保効果を期待し、鋼製支保工の軽減あるいはその省略、ロックボルトの減少など施工の合理化を図るものである。さらに、一般の打ち込みコンクリートと同等の品質、耐久性を有した吹付けコンクリートを用いることにより、これまでの二次覆工を省略し、吹付けコンクリートのみによる永久覆工の可能性を指向するものである。

高強度・高品質コンクリートについては、

- ・設計基準強度を大きくすることで吹付けコンクリートの厚さを薄くし、同時にトンネル掘削量を削減することによるトンネル建設コストの削減
- ・粘性が増加することによる跳ね返り率の低減によるコストの削減
- ・粉塵低減等による作業環境の改善

等により、大きなコストダウン効果、環境改善効果が期待されており、今後、大断面トンネルや最終覆工の他にも、一般断面トンネルの吹付け厚の低減による効率化施工等も考えられているが、現段階では試験施工の段階であり、実施工に幅広く適用していくにあたっては解決すべき課題も多い。

以下に、設計、施工面に分けて、現状の課題を列挙する。

【設計面】

- ・高強度、高品質コンクリートは、長期強度は無論のこと初期強度、付着強度の向上も期待できることから、これらを考慮した設計手法の確立が必要。
- ・軸剛性だけでなく岩塊が落下するような場合の吹付け厚さ低減の考え方の検討が必要。

【施工面】

- ・材料特性から生じるポンプ圧送の低下（大量吹付け時）等の課題に対応したコンクリートの品質に適合した施工システムの検討が必要。
- ・標準的な設計・施工法を確立し、現場での確認項目を減らすことが期待される。
- ・はね返り、粉塵低減への定量的効果の確認が必要。
- ・圧縮強度の変動係数低減の検討が必要。
- ・本格的実用化に向けては、試験段階とは相違した切羽での湧水、地山等の条件、骨材等材料の複雑な変化に遭遇することが想定され、これらに向けての現場での適切な対応が必要。

今後、これらの課題および問題点の検討を進めるとともに、日々進歩している混和材料の適用の検討等により、最適かつ経済的な吹付けコンクリートを目指し、研究を進めていく必要がある。

6. おわりに

本WGでは、トンネルにおける吹付けコンクリートの作用効果を、吹付けコンクリートの力学的機能に着目し、再分類を試みた。

吹付けコンクリートの現状の設計は、地山分類等による標準支保パターンを適用するケースがほとんどであると思われるが、より合理的な設計を行うために、吹付けコンクリートの力学的機能、地山状況に着目した研究が行われることを期待するものである。

さらに、諸外国の動向を見ても、高強度、高品質な吹付けコンクリートへの大きな流れには逆らうべくもなく、我が国においても早急にガイドラインの策定に向けた検討が必要と考えている。

文献調査に始まった本WGの活動が、今後の研究に対して何らかのヒントとなれば幸いである。

なお、本文の検討・執筆は、石黒 幸文（中部電力）、浦上 博行（中部電力）、木戸 研太郎（水資源開発公団）、浄内 明（四国電力）、富田 修司（JR 東日本）、南部 茂義（東京電力）、藤田 一宏（日本建設機械化協会）、細見 浩（中部電力）、八木 弘（日本道路公団）が担当した。

参考文献

- 1) (社)土木学会：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説，1996.7