

ロックボルトの作用効果と設計

トンネル・地下空洞小委員会
ロックボルト設計検討WG

1. はじめに

ロックボルトと吹付けコンクリートに代表されるNATMの支保は、最近、地山条件に応じてより明確な使い分けが求められている。また、第二東名神などに代表されるように、大断面化に向けた支保設計法の再構築が求められつつある。特にロックボルトにあっては、最近、地山条件や環境条件によっては従来の数量より減少させる傾向にあるようである。しかしながら、現在のところ、ロックボルトの作用効果を数値解析などによって定量的に示し得る実用的な設計法は見られず、従来どおり、地山分類基準に基づいた経験的設計法に依存しているのが現状である。

このような状況に鑑み、『ロックボルト設計検討WG』では、まず、ロックボルトの作用効果の考え方と設計法の現状を把握するために、以下の作業を行った。

- ①トンネルおよび地下空洞のロックボルト設計の現状整理
- ②概念的・定性的にいわれてきたロックボルト作用効果に着目した研究事例調査（文献調査）
- ③作用効果の意識に関するアンケート調査（小委員会委員を対象）

更に、これらの結果をもとに、ロックボルト作用効果の分類方法について再整理し、その分類方法に基づいた設計の考え方について考察を行っているところである。

本報告では、これらのWG作業の現時点における成果についてとりまとめる。

2. ロックボルト設計の現状

2.1 トンネルの場合¹⁾

一般に山岳工法によるトンネルの支保は、トンネル掘削に伴い発生する応力再配分、地山の挙動に対して周辺地山と一体となって作用し、地山が保有する支保機能を積極的に活用し、トンネルおよび周辺地山の安定を図れるものでなければならないとされている。トンネルは、一般に線状構造物であるため、全延長にわたって地山状況を詳細に調査することが困難であり、特に地山状況が複雑に変化する我が国においてはトンネル掘削前に地山状況を正確に把握することが極めて難しい状況にある。したがって、事前に実施された、限られた地山調査結果に基づき、地山分類毎に当初設計を行い、掘削時の観察・計測結果をもとに積極的に設計の変更をしているのが現状である。

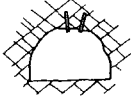
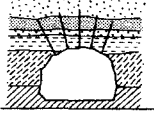
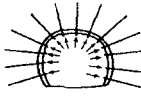
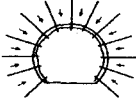
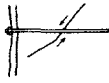
現在、ロックボルトの作用効果は、概念的に表-1のように考えられている。すなわち、亀裂の発達した中・硬岩地山にトンネルを掘削する場合は、亀裂に沿った岩塊の剥落や移動による不安定性が問題となるため、ロックボルトによって岩盤を一体化することによって縫付け効果・地山改良効果が期待されている。一方、軟岩地山にトンネルを掘削する場合は、トンネルの周辺地山の応力が岩石の強度を超えて地山が塑性化したり、地山が大きく変形したりすることがあるので、ロックボルトによって塑性域の拡大の防止、地山の変形抑制をすることによって、内圧効果・アーチ形成効果・地山改良効果等が期待されている。

現在、トンネルの支保設計は、以下の方法が考えられている。

- a. 標準パターンの適用：多くの施工実績、経験等に基づいて地山分類毎に標準的な支保パターンを設定する
- b. 類似条件での設計の適用：地山条件や断面形状等の設計条件が類似した既往の設計例を参考に、新たに支保パターンを設定する
- c. 解析的手法の適用：特殊な地山条件、掘削断面形状など通常の支保パターンの設定が困難な場合に、有限要素法・理論解析等の解析的手法により支保パターンを設定する

bおよびcは、aの方法が適用できない特殊な地山条件や断面形状の場合に検討される方法であるが、bは既往の施工実績と事前調査結果をあわせて十分に分析して適切な支保パターンの設定が必要であり、cは定量的な設計が可能であるが、地山物性値・応力解放率の適切な評価、支保部材・不連続地山のモデル化など、諸条件の適切な評価を行う必要があるなどの課題がある。

表-1 ロックボルト作用効果の概念

ロックボルトの作用効果	概念図
<p>① 縫付け効果（吊下げ効果） 発破などで緩んだ岩塊を緩んでいない地山に固定し、落下を防止しようとするもので、最も単純な効果である。割れ目の発達した地山において、吹付けコンクリートと併用すると効果がある。</p>	
<p>② はり形成効果 トンネル周辺の層を成している地山は、層面で分離して重ねばりとして挙動するが、ロックボルトによって層間を締め付けると、層面でのせん断応力の伝達が可能となり、合成ばりとして挙動させる効果が生じる。</p>	
<p>③ 内圧効果 ロックボルトの引張力に相当する力が内圧としてトンネル壁面に作用する。これにより、トンネル近傍の地山を三軸応力状態に保つことが可能となる。これは、圧縮試験時における拘束圧の増大と同じような意味を持ち、地山の強度あるいは耐荷能力の低下を防ぐ作用をする。</p>	
<p>④ アーチ形成効果 ロックボルトによる内圧効果のため、耐荷能力の高まったトンネル周辺の地山は、一様に変形することによって地山アーチを形成する。</p>	
<p>⑤ 地山改良効果 地山内にロックボルトが挿入されていると、地山自身の有するせん断抵抗力が増大し、地山が降伏した場合でも残留強度が増す。このような現象は、ロックボルトにより地山の強度特性が改善されたということになる。</p>	

ロックボルトの配置・打設長さは、特殊な条件のトンネルを除き、上記 a で示した地山分類毎に設定した標準パターンに基づいた配置とすることが多く、内空断面が標準化されている道路トンネルや鉄道トンネルで一般的に適用されている方法である。具体的には、鉄道トンネルでは地山条件が良好なほど短く、少ない本数でアーチ部主体の配置とし、膨張性地山のような塑性化地山では配置を密にかつ側壁部に長めのロックボルトを用いている。また、土砂地山のような切羽の安定性が問題となるような地山では、ロックボルトよりも吹付けに主体をおいた支保となっている。

2. 2 地下空洞の場合

地下発電所等の地下空洞の支保は、トンネル（断面積約 100m²、第二東名トンネルで 200 m²）に比し掘削断面

積が 330-1500m² (高さ 22-50m、幅 18-60m) と大きなものが多く、通常、岩盤の緩み領域や変形量が大きいためから長尺で導入力の大い P S アンカーによる補強工が主体となっている。なお、この設計は F E M 等による掘削時の空洞全体の安定性評価及び側壁緩み領域での岩盤すべり安定性の検討等の手法によって行われている。

上記のように、一部の例 [石油地下備蓄基地 (断面積 330~570 m²、延長 230~550m)] を除き、掘削断面積が大い地下空洞におけるロックボルトは、空洞アーチの一次支保、比較的緩みの小さい箇所、P S アンカー間の部分的な肌落ちに対する支保として使用される例が多く、ロックボルトと吹付けコンクリートを主体とするトンネルの支保とは異なる。

地下空洞掘削に関しては前述したように支保工として P S アンカーが主体であることや、各地点毎に地質特性が異なること等からロックボルトに関する設計基準 (岩盤分類に対する標準支保工パターン等) は、ほとんど発表されておらず、統一的な基準は無い。

但し、文献 (電力土木技術協会、1986) ²⁾ で紹介されている既設発電所アーチ部のロックボルト工による補強設計は概念的に、「縫付け (吊下げ) 効果」または「はり形成 (縫合わせ) 効果」で実施されている。

すなわち、部分的なロックボルティング (先端定着型ロックボルト等) により岩盤を補強する「縫付け (吊下げ) 効果」を期待する設計は、①付着強度と岩盤重量との関係 (安全率)、②ロックボルトの破断の検討 (安全率)、③吹付けコンクリートによる支持力の検討 (安全率) で実施される。全面接着型ロックボルトのシステムティックボルティングにより岩盤アーチを形成させるという「はり形成 (縫合わせ) 効果」を期待する考え方ではロックボルトの支持力を計算して設計するが、ロックボルトの配置間隔については確定的なものではなく現場状況にあわせて実施している。

3. 文献調査

まず、ロックボルトの作用効果を把握するため、ロックボルトについて設計、実験、解析、計測が行われた約 80 編の文献調査を実施した。調査対象は 1985 年~1996 年の 12 年間の公表文献である。これらの文献から、地山状態を硬岩地山 (不連続体) と軟岩・土砂地山 (連続体) に大別して、期待されるロックボルトの作用効果について、その傾向を分析した。ただし、特に作用効果を特定していない文献については、その研究内容から分類した。

図-1 に硬岩地山と軟岩・土砂地山のそれぞれについての研究事例数を、期待されるロックボルトの作用効果別および研究手法別に集計した結果を示す。ロックボルトの作用効果については、硬岩地山では①縫付け効果と⑤地山改良効果を対象とした事例が多く、軟岩・土砂地山では⑤地山改良効果を対象とした事例が圧倒的に多いが、地山状態にかかわらず②はり形成効果や④アーチ形成効果についての事例数は少ない。また、研究手法別にみると、硬岩地山では設計事例が多いが、軟岩・土砂地山では設計事例はほとんどなく計測事例が最も多くなっている。したがって、期待されるロックボルトの作用効果は地山状態によって異なっており、硬岩地山ではその作用効果が (工学的に) 評価されて設計に取り入れられているのに対して、軟岩・土砂地山では設計事例が少なく、その作用効果が十分に解明されていないと考えられる。

各地山状態におけるロックボルトの作用効果について、調査文献の概要をまとめると次のとおりである。

(a) 硬岩地山におけるロックボルトの作用効果

①縫付け (吊下げ) 効果はその効果が明白であるため、実験を行って効果を確認している事例はない。計測による研究では使用目的が明確であり、ロックボルトの軸力発生を計測することによってその効果を確認している。また、解析および設計事例では、地下空洞の天端部の安定性検討と側壁部の P S アンカー間の岩盤抜け落ち防止がある。

②はり形成効果は地下発電所の支保設計法で述べられているだけで、具体的な効果を確認することは困難と思

われる。この効果は、地山改良効果の結果としての地山挙動を指しているものと考えられる。

③内圧効果は地下発電所のPSアンカーと同様の考え方で、ロックボルトに緊張力を与えたときに期待する効果である。ロックボルトに生じた引張力が内圧としてトンネル壁面に作用するとした場合、ロックボルトには引張力と同時に地山に対応するせん断力が生じている。したがって、これらの応力が結果的にトンネル壁面付近の応力を三軸状態にしていると考えられる。

④アーチ形成効果について取上げられた調査研究事例はなかった。この効果は吊下げ効果と地山補強効果の結果、地山と支保が一体となって挙動した場合の状態を示していると考えられることができる。

⑤地山改良効果については、実験、計測と解析で検討されており、すべり面や亀裂面でのせん断強度の増加を期待するものとして作用効果のうちで最も評価しやすいと思われる。

(b) 軟岩・土砂地山におけるロックボルトの作用効果

①縫付け(吊下げ)効果は、プレボルトによる既設トンネルの補強計測、近接トンネルのピラー部の補強実験、円形立坑の補強計測、落とし土実験や遠心力载荷実験などで取上げられている。

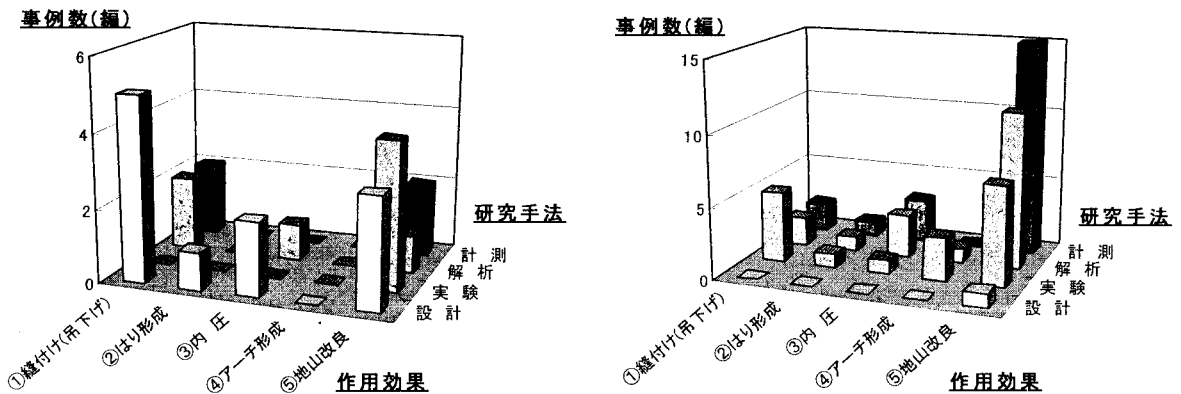
②はり形成効果は解析解と有限要素法による検討とジオグリッドといった特殊な支保の効果確認で検討されているだけである。

③内圧効果は円形立坑の補強工計測と解析による検討があるが、ロックボルトに初期導入力を与えていないため、ロックボルトに生じた引張力と地山とに生じたせん断力とが作用した状態と考えられる。

④アーチ形成効果では、メッシュボルティングによる岩盤補強解析と円形立坑の補強効果計測がある。円形によるリング効果とシステムボルトによる地山改良効果によって地山と支保が一体となる効果を期待している。また、落とし土実験では天端をアーチ状に形成したものが検討されている。

⑤地山改良効果はほとんどの事例で評価されている。この効果は軟岩・土砂地山を対象とした研究目的が「作用効果の確認」といった曖昧な場合にも分類されている。これに対して、その他の効果はより明確に確認できないため、作用効果として期待されにくいと考えられる。

以上のように、ロックボルトの作用効果が検討・評価されるのは、その程度をロックボルトの軸力やせん断力等で定量的に捉えることができる①縫付け(吊下げ)効果と⑤地山改良効果であり、その次に③内圧効果が挙げられる。その他の②はり形成効果や④アーチ形成効果は定性的には考えられるが、ロックボルトの役割が曖昧であり、



(a) 硬岩地山 (b) 軟岩・土砂地山

図-1 研究事例に基づく作用効果と研究手法の分布

設計や解析等への取り込みは困難であることがわかる。また、収集文献から作用効果の分類が困難なもの、作用効果や研究手法で事例数が少ないものについては、研究の蓄積が少なくまだ解明されていないことが推察される。

4. ロックボルトの作用効果

前節の文献調査の分析結果から、多くの事例で実際に期待されているロックボルトの作用効果は、内圧効果、地山改良効果、吊下げ効果などであることが明らかとなった。そして、はり形成効果、アーチ形成効果などは、技術者の実感としては理解されているものの、その効果を第一義に謳ったものはそれほど多くないことも明らかとなった。これは、こうした効果の具体的な評価が困難であることによると思われる。

設計実務上の問題として、トンネル標準示方書に示されたロックボルトの作用効果に基づいた具体的な設計(評価)手法が明確にされていないため、標準パターンによる方法の他、ロックボルトの設計(本数、配置、長さの決定)は難しいのが現状である。そこでここでは、ロックボルトの設計を念頭に置き、その作用効果を再整理した。

まず、ロックボルト単体の力学的機能として剛性(軸、曲げ、せん断)と強度(軸、曲げ、せん断)に着目した。そして対象とする地山として不連続体(不連続性が地山の挙動を支配するもの)と連続体を考え、これらの安定性確保のために、ロックボルトの機能の何が期待できるかを考えた。

その結果を表-2に示す。ここに、ロックボルト単体の力学的機能以外に付着力も考慮しなければならないが、設計上問題にならないとして省いている。

表-2 ロックボルト作用効果の分類の概念

ロックボルト 単体の力学的機能	地山種別	
	不連続体	連続体
	硬岩 岩塊	軟岩 土砂
軸(剛性・強度)	吊下げ効果	内圧効果
曲げ・せん断 (剛性・強度)	縫付け効果	地山改良効果

この再分類結果に対し、ロックボルトの設計のための具体的な効果の考え方と簡単なモデルを設定し、設計結果の評価までを示したのが表-3である。

勿論、実際の作用効果はここに示した効果が複合して表れるものであり、単純に分離できるものではない。しかしながら、計測結果の評価における事象説明での解析とは異なり、最小限の地山条件のみが与えられた当初(事前)設計では、対象とする地山の特性とロックボルトの期待効果を絞り込んだ上で、ロックボルトの本数などを決定する必要がある。

従って、条件の設定などにおいてはかなり割り切った判断をせざるを得ない。本表は、そうした設計への足掛かりとしてまとめたものであり、実際の運用に当たっては更なる議論が必要である。

表一3 設計を念頭に置いた効果の分類

ロックボルト単体の力学的機能	機能・効果	モデル	対象地山	結果の評価
軸剛性 kn	吊下げ効果 (引留め効果) → 縫付けに含まれる?	kn, σ_a 	・不連続性・硬岩 ・ある程度大きな不安定岩塊 ・キープロック	・軸力 (強度) ・岩塊自重
	内圧効果-1 = 掘削解放力の低減 R Bに積極的に軸力を与え掘削解放力の低減を図るとともに、反力として地山に発生する増分応力が地山の拘束圧 (σ_m) の増大となつて、結果として地山の剛性、せん断強度を増加させる。		P (kn) 積極的にプレストレスとして与えられる軸力 (BP支圧力) 	・硬岩、軟岩、土砂 ・いづれも可 ・不連続性岩盤も可 ・パターンボルト
軸剛性 kn 曲げ剛性 せん断剛性 ks	内圧効果-2 = 結果としての地山の強度・剛性の増加 地山の変位とともに生じたR B軸力の反力として地山に発生する増分応力が、地山の拘束圧の増大となつて、結果として地山の剛性、せん断強度を増加させる。	kn 地山の变形に応じて生じる軸力 (BP支圧力) 	・硬岩、軟岩、土砂 ・いづれも可 ・不連続性岩盤も可	・地山の拘束圧の増大 = 地山のせん断強度の増加 ・変位の減少 = 剛性の増加
	縫付け効果	kn, ks σ_a, τ_a 	・不連続性・硬岩 ・不連続面 ・キープロック	・すべり抵抗力 ・滑動力
曲げ強度 せん断強度 τ_a	地山改良効果-1 = 地山の剛性の増加 R Bの持つ剛性が地山の剛性に付加され、あたかも地山の剛性が増加したかのように変位が減少。	kn, ks 	・硬岩、軟岩、土砂 ・いづれも可 ・不連続性岩盤も可	・地山変位の減少 (硬岩では相対的な剛性の差が小さいため効果は小)
	地山改良効果-2 = 地山の強度の増加 R Bの持つ強度が地山の不連続面の強度が付加され、あたかも地山の強度が増加したかのようによに破壊耐力が増す。	力 強度増加 剛性増加 変位 地山改良効果-2 	τ_a 	・不連続面 ・すべり面

注) R B: ロックボルト, B P: ペアリングプレート

5. ロックボルトの設計

5. 1 現状における解析の適用性

トンネルや地下空洞の設計に利用される解析手法にはさまざまなものがあるが、表-4は代表的な解析手法に対してロックボルトの作用効果やモデル化の内容を示したものである。

円孔理論解析は、地山の变形特性や強度特性の定式化の方法によりいくつかの方法が提案されているが、ロックボルトの効果は、内圧として掘削壁面に等分布荷重として与えるのが一般的である。この方法では、プレストレスがある場合のロックボルトやロックアンカーでは直接内圧効果を表現しているが、ロックボルトの降伏力や強度に相当する力を内圧としてかける場合は、内圧効果-2、地山改良効果-1の効果を内圧効果-1に置き換えて表現していることになる。

極限平衡解析は、地山は剛体として釣合い式を解くので地山改良効果は期待されない。ロックボルトの効果はすべり岩塊に作用する力に置き換えられ、縫付け効果や吊下げ効果を期待したものとなる。

数値解析の場合、ロックボルトのモデル化は理論解の場合と同様に内圧を節点力として壁面に付加する方法、ボルトの施工範囲の地山剛性をあげる方法、ロックボルトを要素として直接モデルに取り込む方法があるが、最近では各種のロックボルト要素が開発・利用されるようになってからは直接モデル化する場合が多い。非線形FEMでは、幅広くロックボルトの作用効果が表現でき、内圧効果-2、地山改良効果-1~2が複合して表れていると考えられる。DEMをはじめとする不連続体解析法は、要素ブロック間をロックボルト要素がつかないでおり、吊下げ、縫付け効果が主体となる。ただし、トンネルの設計で不連続体解析法が用いられることは、現状では少ない。

また、これらの解析手法を組み合わせた設計が行われる場合もある。地下発電所における側壁のロックアンカーの設計においては、まずFEM解析により岩盤内の応力状態やゆるみ領域の範囲を推定し、次にこの領域内の岩盤に対してすべり解析を実施して、必要な導入力を算定する設計を行っている。

表-4 ロックボルトの作用効果と解析モデルの適用性

分類	解析手法	ロックボルトの作用効果						モデル化の内容		
		吊下げ効果	縫付け効果	内圧効果-1	内圧効果-2	地山改良効果-1	地山改良効果-2	線部材 注①	力に置換え 注②	地山剛性を増加
理論解析法	円孔理論解	-	-	◎	△	△	-	-	◎	△
	極限平衡解析 (キープロック解析、すべり解析)	◎	◎	-	-	-	-	-	◎	-
数値解析法	弾性FEM	-	-	○	◎	◎	-	◎	○	△
	非線形FEM (非線形弾性、弾塑性、粘弾塑性)	△	△	○	◎	◎	◎	◎	○	△
	不連続体解析法 (DEM、RBSM、DDA、その他)	○	○	○	-	-	-	○	△	-

作用効果を、◎：評価できる（適用例多い）、○：評価できる（適用例少ない）、△多少評価できる、-：適用不可

注① 線部材の材料特性として、線形、非線形（弾塑性、破断考慮）、地山とのすべりを考慮する等の手法がある。

注② 内圧、節点力として作用させる手法がある。

表-5 簡便的な解析手順の例

効果	解析手順	必要な情報	備考
吊下げ効果	1: 不安定岩塊の設定 →W 2: RBの選定 3: n (本数)の決定 → $n=W/P_r$ 4: l (長さ)の決定 →定着長= P_r/τ	・不連続面情報 ・単体重量→重量W ・引張り耐力→ P_r ・地山、充填材強度→ τ	
縫付け効果	1: 不安定岩塊の設定 →W 2: 抵抗力の算定 → $F=f(W, C, \phi)$ 3: RBの選定 4: n (本数)の決定 → $n=(W-F)/(P_r, \tau r)$ 5: l (長さ)の決定 →定着長= P_r/τ	・不連続面情報: 形状 ・単体重量→重量W ・地山強度C, ϕ ・引張り耐力→ P_r ・せん断耐力→ τr ・地山、充填材強度→ τ	・岩塊が設定できる場合の方法 ・一体化を目的とする場合、不連続面の間隔・方向などを考慮して決定する ・この場合の効果の評価は地山改良効果-1の手法による
内圧効果-1	1: 掘削解放力と変位の推定 2: 必要内圧の設定 →P 3: RBの選定 4: n (本数)の決定 → $n=P/P_r$ 5: l (長さ)の決定 →定着長= P_r/τ 6: 効果の確認	・初期応力、掘削工法 ・地山強度、剛性 ・掘削変位 ・必要内空、地山安定 ・耐力→ P_r ・充填材強度→ τ	・複雑な形状や工法の場合、FEM等による解析が必要 ・必要に応じて1と同じ手法を行う
内圧効果-2	1: 地山応力、変位の推定 → σ, u 2: RBの選定、配置 3: 地山応力、変位、N (軸力)の算定 4: 効果の評価 → σ, u, SF の変化	・初期応力、掘削工法 ・地山強度、剛性 ・軸剛性 k_n 、耐力 P_r ・過去の類似事例 ・他の支保配置	・変形と応力を同時に評価できる解析手法が必要 ・期待する効果が得られない場合、2から繰り返す
地山改良効果-1	1: 地山変位の推定 →u 2: RBの選定、配置 3: RB施工後の地山変位の算定 4: 効果の評価 →uの変化	・初期応力、掘削工法 ・地山強度、剛性 ・軸剛性 k_n 、耐力 P_r ・過去の類似事例 ・他の支保配置	・地山改良効果-1と同様の手法を用いているが、評価は地山変位とRB軸力
地山改良効果-2	1: 不連続面の特定 2: 不連続面に作用する応力の算定 →必要耐力の設定 3: RBの選定 4: n (本数)の決定 5: l (長さ)の決定 6: 効果の評価	・不連続面幾何情報 ・不連続面強度 ・耐力 $P_r, \tau r$	・応力を評価できる解析手法が必要 ・必要に応じて2と同じ手法を行う

6. おわりに

トンネルにおけるロックボルトの作用効果に着目して、設計の現状把握と実験・解析・計測実績の分析を行い、設計を念頭に置いた作用効果の分類方法を提案した。更に、この分類に基づいた設計の考え方を整理し、設計方法の提案を試みた。これらの提案が、今後のトンネルにおけるロックボルト設計のあり方を見直す契機の一つになれば幸いである。

なお、本文の検討・執筆は、石井秀夫(電源開発)、石村利明(建設省土木研究所)、越智 修(鉄道建設公団)、亀村勝美(大成建設)、小島芳之(主査: 鉄道総研)、新田宏基(奥村組)、西村 毅(間組)、長谷川達也(ダイヤコンサルタント)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
- 2) (社)電力土木技術協会: 電力施設地下構造物の設計と施工, 1986