

花崗岩山岳地帯における トンネルコスト削減方策について

杉本 利英¹・堤 雄生²・水巻 徹也³・南谷 達也⁴

¹利賀ダム工事事務所 副所長 (〒939-1363 富山県砺波市太郎丸1-5-10)

²利賀ダム工事事務所 工務課 (〒939-1363 富山県砺波市太郎丸1-5-10)

³利賀ダム工事事務所 工務課 (〒939-1363 富山県砺波市太郎丸1-5-10)

⁴利賀ダム工事事務所 工事課 (〒939-1363 富山県砺波市太郎丸1-5-10)

利賀ダム建設事業において、ダム建設に必要な工事用道路は急峻な地形から全長9.3kmの内、トンネル区間が66%を占めるため、トンネル建設のコスト削減がダム事業全体のコスト削減と早期完成に結びつく。事前調査の結果、花崗岩類を主体とした地山区分がB又はC I等級の良好な地山と予想された利賀トンネル(1工区~2工区、延長約5.0km)において、コスト削減方策の検討を行った。その結果、トンネル1掘進長の延伸長を従来の2倍にする長孔発破や覆工コンクリートの高強度化による施工厚の縮小、さらには機械の大型化等の新しい設計・施工法により約11%のコスト削減を図る計画とした。

今回、花崗岩山岳地帯においてトンネルコストを削減するために計画した内容、および現在施工中の利賀トンネル3工区(延長約1.1km)においてコスト削減方策について実施した結果について報告するものである。

キーワード 花崗岩山岳地帯、トンネルコスト削減、長孔発破、新設計・施工法

1. はじめに

利賀ダムは、一級河川庄川の右支川である利賀川において洪水調節、流水の正常な機能の維持、工業用水供給の目的で建設を進めている多目的ダムである。利賀ダム建設事業においては、工事用道路の建設費が約3割を占め、このうち、トンネル区間が66%を占めていることから、トンネルのコスト削減がダム事業全体のコスト削減と早期完成に繋がる。

トンネル計画部の地質は、花崗閃緑岩が主体で比較的良好的な地山と予想されることから、1掘進長の延伸や高

強度コンクリート利用による覆工厚の縮小、大型施工機械の採用などにより、施工コストの削減および施工時間の短縮を図る検討を行った。検討にあたっては、他機関へのアンケート結果・既存の施工実績および新設計・施工法を参考に実施した。

本報は、花崗岩山岳地帯におけるトンネル施工において「合理的な設計によるコスト削減方策」および「合理的な施工によるコスト削減方策」の両面について検討した結果とその検討内容に基づき、現在施工中の利賀トンネル3工区においてコスト削減方策を実施した結果について報告するものである。

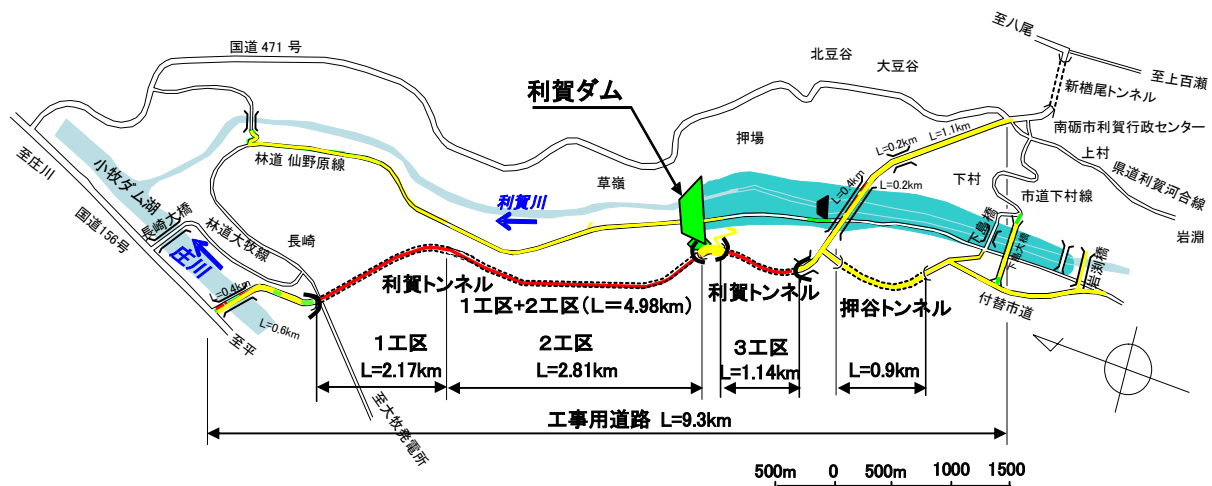


図-1 利賀ダム工事用道路およびトンネル配置図

2. 工事用道路トンネルの概要

利賀ダム工事用道路は、富山県南砺市利賀村栃原地先を起点とし、利賀村利賀地先までの延長9.3kmの道路でダム建設時には資材運搬工事用道路として建設し、完成後は一般国道471号利賀バイパスとして機能するものである(図-1)。

今回、コスト削減方策の検討を利賀トンネル(1~2工区延長約5.0km, 3工区延長約1.1km, 総延長約6.1km)を対象に行った。利賀トンネルの設計条件を表-1、標準断面を図-2に示す。

3. 地形・地質概要

(1) 計画トンネル周辺の地形・地質

トンネル計画地は、花崗岩山岳地帯に位置する。調査地周辺の山腹斜面は、V字谷をなし北流する河川に浸食され40~60°と急峻である。山腹斜面を流下する支沢には比高10~30m程度の滝が多く形成されており、年間を通じて流水が認められる。

地質は、調査地全域に中生代ジュラ紀に侵入した花崗閃緑岩(一部カタクレーサイト質)が分布し、新第三紀中新世に花崗閃緑岩に貫入したと推定されるヒン岩などの貫入岩が所々に認められ接触変成作用を被っている。この他、山麓の緩斜面や支沢には崖錐性堆積物が分布し、河川沿いには小規模な平坦~緩斜面が所々に形成され、段丘堆積物が分布している。

(2) 計画トンネルの地質調査結果

計画対象の利賀トンネル(1~2工区)は、延長4.98km, 最大土被り厚372mの山岳トンネルである(図-3)。

弾性波探査及び地表踏査の結果、閃緑岩には目立った脆弱部は認められず、割れ目間隔は30~50cm, 花崗閃緑

表-1 トンネルの設計条件

利賀トンネル	
道路規格	第3種第4級
設計速度	40km/h
計画交通量	2,100台/日
大型混入率	20%
トンネル延長	4.98km(1~2工区) 1.14km(3工区)

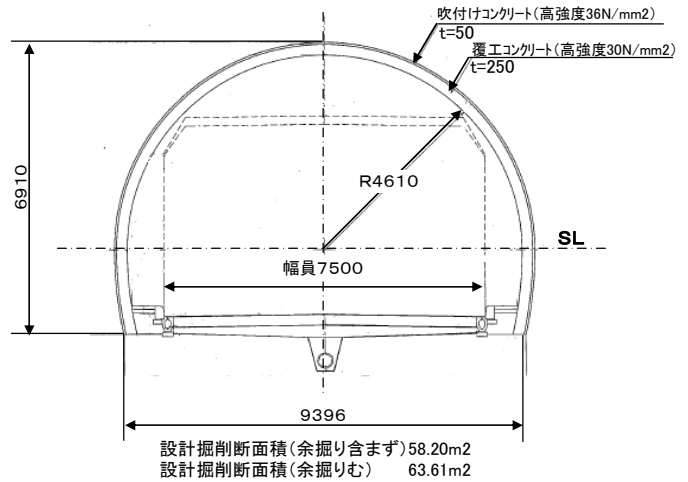


図-2 利賀トンネル(1~2工区)標準断面図
(支保パターン: B)

岩の割れ目間隔は10~50cmで断層破碎帯や岩脈類との境界部分が脆弱・変質しており、部分的に不良地山となっている。弾性波探査の基盤速度は4.2~5.3km/sであり、2箇所の低速度帯(2.5~3.0km/s)を確認した。地山等級は、割れ目間隔や割れ目挟在物(変質粘土)、断層破碎帯や貫入岩体周辺の破碎・変質状況を考慮し、図-4に示すよう地山等級Bが27.5%, C Iが30.7%, C IIが29.8%の良好な地山と想定された。

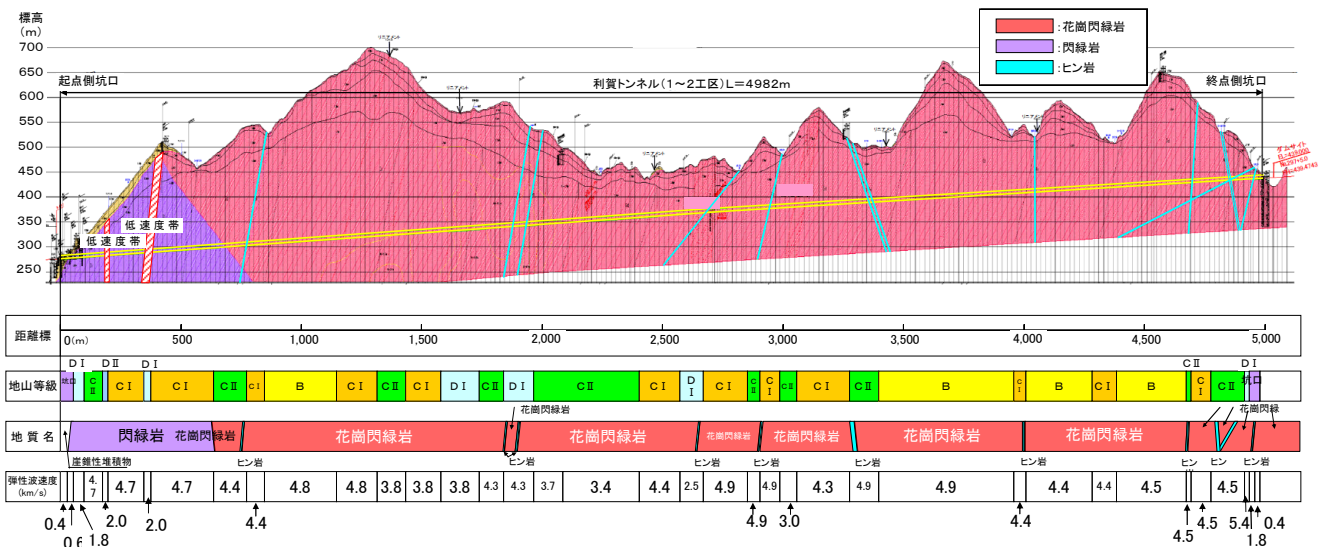


図-3 利賀トンネル(1~2工区)の地質縦断面図と地山分類

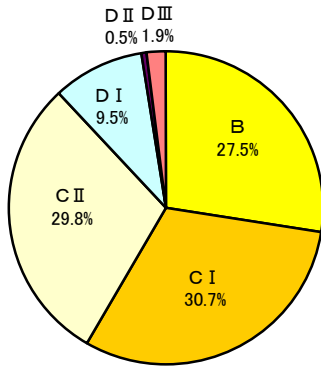


図4 利賀トンネル (1~2工区) 地山等級区分延長比

4. 合理的な設計によるコスト縮減方策の検討

現在用いられているトンネルの支保構造の組み合わせは、道路トンネル技術基準 (表-2) で定められており、その仕様に基づき施工が実施されている。

しかし、地山状態が良くない地山等級C IIやD Iはマルチパターンで2種類の標準支保構造が示されているが、地山状態が良い地山等級BやC Iの場合は1種類しか規定されておらず、同表は組み合わせの目安と記載されている。今回計画している利賀トンネルは延長が約6.1kmと長く、硬岩地山の比率が大きいことから、支保構造の組み合わせを見直すこととし、コスト縮減方策の検討を以下の項目で行った。

- ① 1掘進長の延伸による効率化
- ② 吹付けコンクリート、ロックボルト、覆工コンクリート等支保構造の仕様変更による安全対策

(1) 1掘進長の延伸、支保間隔

a) アンケート結果

1掘進長の延伸による長孔発破事例は、旧日本道路公団をはじめとして実績があるため、長孔発破のアンケートを道路、鉄道、発電導水路 (海外工事含む) を対象に実施した。アンケートの結果、35箇所、現場数で46トンネルで地山等級別の回答があった。結果は地山等級の高いB, C Iに長孔発破の実績が多く見られ、B等級の標準1掘進長2mに対し、最大3.9m, C I等級では標準1掘進長1.5mに対し、最大3.2mの実績が得られた (図-5)。

b) 利賀トンネルの支保構造仕様

① B, C Iパターン

現在の標準支保構造によるロックボルトは、最大長さ4mの打設が必要であり、B, C Iパターンについてはドリルジャンボのロッドを継ぎ足さず穿孔できる長さで、1掘進長を極力長くすることを検討し、1掘進長をBパターンの場合2.0mから4.0mとして標準の2倍に設定した (表-3)。支保工間隔はシステムボルトの効果が期待できないので標準と同様な長さとし、吹付コンクリート厚は、基準強度を確保するために設計基準強度18N/mm²から

表-2 標準的な支保構造の組み合わせの目安¹⁾

地山等級	支保パターン	標準1掘進長 (m)	ロックボルト			鋼アーチ支保工			吹付け厚		覆工厚		変形余裕量 (cm)	掘削工法
			長さ (m)	施工間隔		施工範囲	上半部種類	下半部種類	建込間隔 (m)	アーチ・側壁 (cm)	インバート (cm)			
				周方向 (m)	延長方向 (m)									
B	B	2.0	3.0	1.5	2.0	上半120°	-	-	-	5	30	0	0	補助ベンチ付全断面工法または上半断面工法
C I	C I	1.5	3.0	1.5	1.5	上半	-	-	-	10	30	(40)	0	
C II	C II-a	1.2	3.0	1.5	1.2	上・下半	H-125	-	1.2	10	30	(40)	0	
	C II-b													
D I	D I-a	1.0	3.0	1.2	1.0	上・下半	H-125	H-125	1.0	15	30	45	0	
	D I-b													
D II	D II	1.0以下	4.0	1.2	1.0以下	上・下半	H-150	H-150	1.0以下	20	30	50	10	

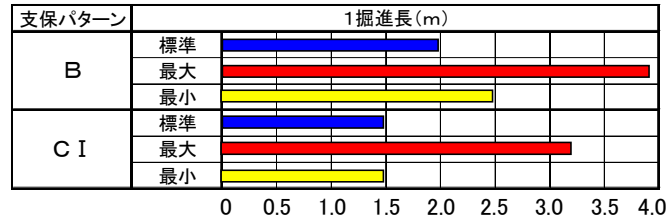


図-5 長孔発破事例のアンケート調査結果

表-3 1掘進長の延伸、縦断方向支保工間隔の延伸

支保パターン	標準掘進長	提案掘進長	縦断方向支保工間隔
B	2.0m	4.0m	ボルト本数・間隔、同じ
C I	1.5m	3.0m	ボルト本数・間隔、同じ
C II	1.2m	1.5m	ボルト支保工間隔延伸
D I	1.0m	1.2m	ボルト支保工間隔延伸

表-4 吹付けコンクリートによる吹付け厚の削減

支保パターン	標準吹付厚	提案吹付厚	設計基準強度
B	5cm	5cm	36N/mm ² (高強度)
C I	10cm	5cm	36N/mm ² (高強度)
C II	10cm	10cm	36N/mm ² (高強度)
D I	15cm	15cm	36N/mm ² (高強度)

表-5 覆工コンクリートの高強度化による覆工厚の削減

支保パターン	標準覆工厚	提案覆工厚	設計基準強度
B	30cm	25cm	30N/mm ² (高強度)
C I	30cm	25cm	30N/mm ² (高強度)
C II	30cm	30cm	18N/mm ²
D I	30cm	30cm	18N/mm ²

36N/mm²に上げることにより、C Iパターンは標準10cmから5cmに削減することとし、Bパターンは標準5cmのままとした (表-4)。

これは、支保耐荷力の確保について理論解析 (ラプセビッツー岡の方法) を実施した結果、提案した支保構造の耐荷力が標準と同等の結果であるためである (図-6)。

② C II, D Iパターン

C II, D Iパターンについては、類似の施工例から縦断方向支保工間隔を1.2~1.25倍に延伸することとし、高強度コンクリートを採用することにより、吹付けコン

クリートおよび覆工コンクリートの厚さは標準値として、支保間隔を延伸することとした（表-3）。

(2) 安全対策

a) 吹付けコンクリートの高強度化

1 掘削長の延伸や支保間隔を延伸した場合、施工時の安全性確保が重要となることから、吹付けコンクリートを高強度（強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ から $36\text{N}/\text{mm}^2$ ）として初期強度を高めることで、掘削条件および切羽進行に応じて生じる地山の挙動に対して安定性を確保した（表-4）。

なお、全支保パターンにおいて吹付けコンクリートを高強度化（ $36\text{N}/\text{mm}^2$ ）したのは、段取り替えなどの施工上の有利性から決定した。

b) ロックボルトの早期強度発現

1 掘削長の延伸に伴う施工の安全性確保のためにロックボルトの早期強度発現させる定着材として、早強セメントモルタル、速硬性モルタル、摩擦式ロックボルトについて比較採用について検討を行った。

摩擦式ロックボルトは、早期強度発現が最も期待できるが高価であり、速硬性モルタルは、初期の強度発現性に優れ摩擦ロックボルトより安価であるが、先充填方式での可使時間の改良が必要となることから、トンネルの定着材は、早強セメントモルタルを採用した。

c) 覆工コンクリートの高強度化

覆工コンクリートのコスト縮減は、トンネルの安全性を確保しつつ、覆工の余力保持機能に着目して検討した。当該検討ではコンクリート強度を増加させ、覆工厚を薄くした場合でも現行覆工が同等の耐荷力（限界荷重）を有することが重要であり、覆工を梁モデルで近似したフレーム解析を用いて耐荷力を算定することとした。

B, C Iパターンでは、通常の覆工より高強度化した薄肉化覆工（覆工厚 25cm 、設計基準強度 $30\text{N}/\text{mm}^2$ ）の限界荷重と現行覆工（覆工厚 30cm 、設計基準強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ ）の限界荷重を比較した結果、通常の覆工の限界荷重と同等な耐荷力を有する評価となり、問題がないと判断し、覆工厚 25cm の薄肉化により施工することとした。

しかし、C II以下の覆工厚は施工性の問題と覆工の品質確保の面から困難と判断した（表-5）。

5. 合理的な施工によるコスト縮減方策の検討

(1) 施工方法の検討

利賀ダム工事用道路のトンネル施工の面からコスト縮減を図るために、「掘削方法」「ざり積込み・運搬・吹付け機械の大型化」「穿孔機械の性能向上」の適用性の観点から検討を行った。

a) 長孔発破の方法と余堀り対策

長孔発破は、中硬岩・硬岩の比較的良好な地山に対して標準長の1掘進長を超えて発破作業を行うことで掘削サイクル総数を減らすことが可能であり、経済面で大き

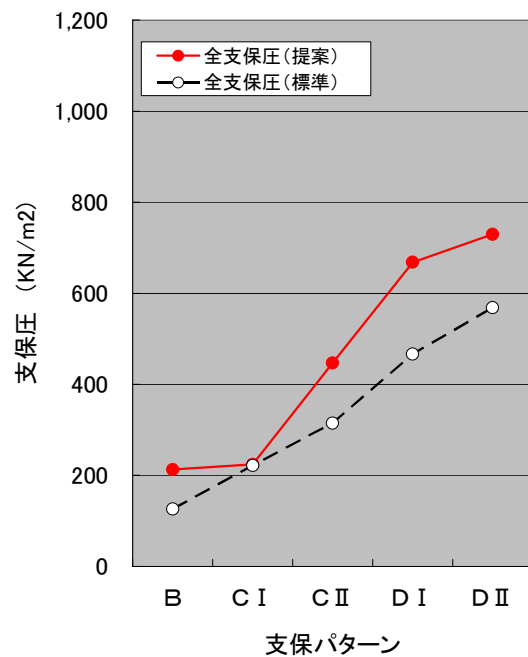


図-6 推定全支保圧

な効果が期待できることから、利賀トンネルにおいては地山等級B, C Iについて長孔発破の対象とした。

しかし、旧日本道路公団においても、試験施工で3～4mの長孔発破を実施しているが、余堀りが多くなることや1サイクルの作業時間が長くなるため作業員の過労等による作業効率の低下のため試験施工程度にとどまっている。以下に長孔発破を実施するうえで検討した具体的対応策について述べる。

①心抜き方法の変更

利賀トンネルにおいてアングルカットで長孔発破を行う場合、掘削長は3m程度が限界である。B支保パターンの長孔発破では掘進長4mを前提としているため平行心抜きを行う必要がある。平行心抜きのうち、シリンダーカットは大口径削孔の専用機が必要のため、通常のドリルジャンボで穿孔可能な大口径バーンカットを適用した。

②余堀り対策

長孔発破により、1サイクルの掘進長が延伸できるが、余堀り量の増大や周辺地山を傷める安全上の課題がある。

その対処として、最外周の孔間隔を小さくし破砕力の小さな爆薬を通常より長く装薬することで余堀りを少なくできるスムーズプラスティングを採用する。

また、その切羽マーキングを正確なレーザーで行うことと斉時性のよいIC雷管を使用することで掘削精度の向上を図った。

b) 掘削に伴う機械の大型化等

長孔発破の掘削に伴う作業時間延伸の短縮方法として、以下による機械の大型化により対処することとした（図-7）。

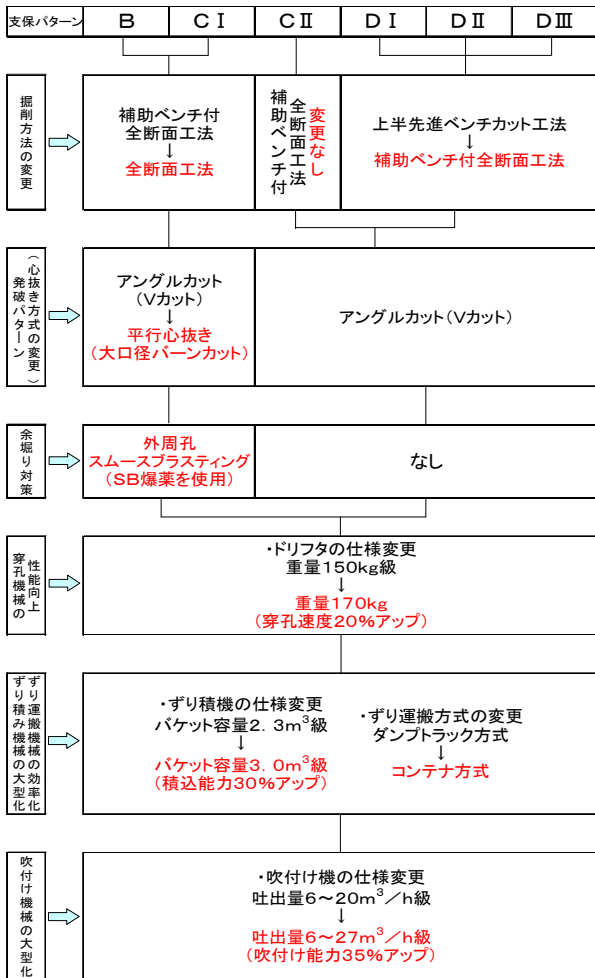


図-7 施工方法の変更

①穿孔機械の大型化

3ブームジャンボで油圧削岩機（ドリフタ）150kg級から高性能油圧削岩機170kg級に大型化することにより、20%程度の穿孔時間の短縮を図った。

②ずり積み機械の大型化

1掘進長の延伸から、ずり処理能力を上げるため、ずり積み機山積み2.3m³級（トンネル工事用搬出対策型、サイドダンプ式）から山積み3.0m³級に大型化し、作業能力を64.4m³/hから84.0m³/hに向上させた。

③ずり運搬機械の効率化

「ダンプトラック方式」，「コンテナ方式」，「連続ベルコン式」の3方式についてトンネル延長および大型ずり積み機械による作業能力に応じた経済比較を行った結果、トンネル延長が2.5km以上の場合には、コンテナ方式が有利となるため、利賀トンネル（1～2工区）ではコンテナ方式を採用した。

④吹付け機械の大型化

吹付け機の標準機械は最大吐出量20m³であるが、機械の使用実績等から最大吐出量27m³に上げることにより長孔発破による掘削速度に追従する計画とした。

6. コスト縮減率

コスト縮減率については、「合理的な設計」および「合理的な施工」による検討結果に基づき、各支保パターン（B，C I，C II，D I等）のサイクルタイムを算出しコストを試算した。

利賀トンネル（1～2工区）延長4,982mにおける従来方式とコスト縮減方式におけるサイクルタイムを算出した結果、「掘削」「ずり出し」「吹付け」「ロックボルト」「鋼製支保工」では従来方式が平均月進86.5m/月となるが、コスト縮減方式では120.7m/月となった。これにより、施工月数は57.6ヶ月に対してコスト縮減方式では41.3ヶ月となり約1.4倍の速度アップが可能と結果が得られた。

また、各支保工パターンによるコスト比較を行った結果、表-8に示すようにトンネル全体で11%程度の縮減率が見込まれる。これにより、利賀トンネル（1～2工区）では約11億円の縮減額となる予定である。

表-8 コスト縮減率の算出

支保パターン	月進(m/月)		コスト縮減率(%)	地山等級延長比
	標準	提案		
B	127.1	178.1	8	27.5
C I	101.0	147.3	14	30.7
C II	78.6	98.6	7	29.8
D I	75.5(上半) 130.1(下半)	47.4 (全断面換算) 77.0	17	9.5
D II	73.0(上半) 122.4(下半)	46.1 (全断面換算) 67.0	14	0.5
D III	65.9(上半) 121.8(下半)	42.8 (全断面換算) 60.4	12	2.0
1～2工区 全体あたり	86.4	120.7	11	100

※平均月進及び施工月進は、従来の従事時間（540分×2方）で試算したものである。

7. 利賀トンネル3工区コスト縮減策の実施結果

(1) 利賀トンネル3工区施工概要

利賀トンネル3工区は、トンネル延長1,140m、最大土被り厚150mのトンネルで事前の地質調査の結果では、基盤速度は4.3～5.4km/secであることから4箇所の低速度区間を除いて地山区分はC IまたはC II等級と判定された。しかし、C II等級と判定していた区間では、掘削開始から「肌落ち」「抜け落ち」「湧水」が確認されたため、D I支保パターンで掘削が進められた。施工で確認したD I支保パターンの区間は、熱水変質による地山不良区間であった。現在、良好地山が出現しC II支保パターンとして支保工間隔を延伸して780mまで施工中である（図-8）。

以下にC II，D I支保パターンのコスト縮減策の実施結果について述べる。

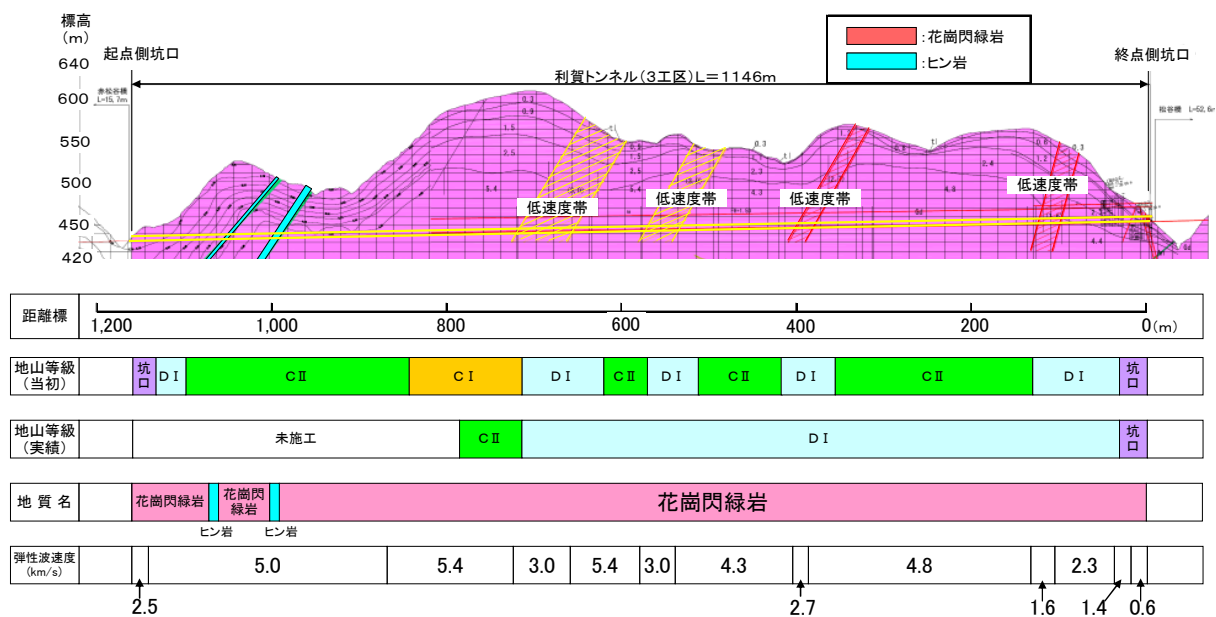


図-8 利賀トンネル（3工区）の地質縦断面図と地山分類

(2) C II, D I 支保パターン実施結果

a) D I 支保パターンの施工

掘削完了した坑口部から720mまでの区間は、亀裂が大きく粘性土を挟む層状であり、肌落ちも頻繁に発生したため、D I 支保パターンとした。長期支保構造の安全性並びに作業員の安全性確保のため鏡吹付けを実施し、コスト削減方策によるD I パターンの支保工間隔1.2mについては、問題なく施工することができた。

b) C II 支保パターンの施工

坑口部から720m以降については、熱水変質作用の影響は少なく、亀裂も減少し湧水も殆ど無い塊状と変化した。これにより、C II 支保パターン1.5mの施工においても肌落ち等の心配も少なく、施工後の変位量も20mm以下で変位収束時間も2時間以内であるため、問題なく施工が可能であった。

(3) 利賀トンネル3工区におけるコスト削減結果

トンネル技術基準にそった支保パターンと比較するとD I で17%、C II で7%のコスト削減ができており利賀トンネル3工区では約2億円のコスト削減が図られる見込みである。また、D I 支保パターンについて標準1掘進長で既に施工済みの押谷トンネルと1掘進長延伸を行った利賀トンネル3工区的设计平均施工量を比較すると、押谷トンネルが3.35m/日に対し利賀トンネル3工区は5.6m/日で約1.7倍の施工速度である。このことは、掘削日数短縮となり、坑内の作業環境の改善につながり安全性にも寄与していたと思われる。

今後施工を計画している利賀トンネル（1～2工区）の設計・施工に反映するため、利賀トンネル3工区において施工歩掛調査および掘削速度調査を実施し、今回検討したコスト削減策の検証を行う予定である。

8. まとめ

今回の花崗岩山岳地帯のトンネルコスト削減方策について、利賀トンネル（1～2工区）でトンネルコスト削減策の検討を合理的な設計・施工の両面から行い、実際に施工中の利賀トンネル3工区においてコスト削減策の検証を行った。利賀トンネル3工区では、亀裂が著しく発達し、部分的に生じた湧水に加えてシームの狭在に起因した小崩落があるなどの地山の状態からC II, D I 支保パターンの検証となったが、その結果C II では支保間隔を1.2mから1.5mに、D I では1.0mから1.2mに延伸ができ地山区分を適切に行えば十分安全に施工が可能であることが検証できた。

今後、施工を予定している延長約5kmの利賀トンネル（1～2工区）では、今回検討したコスト削減策により約11億円（削減率11%）のコスト削減が図れる予定である。しかし、今回提案したコスト削減策はB, C I 等級地山において長孔発破により1掘進長を標準の2倍にする計画であり、確実に施工するためには、事前調査の段階で的確に地山状態を把握することが重要である。

今後は、既往のトンネル事前調査に加えて、施工済の押谷トンネルや利賀トンネル3工区における近接トンネルの情報も併用し地山区分を判定する必要がある。また、施工段階においては地山観察、坑内弾性波探査調査等を行い、必要に応じ既往調査資料を再解析するなどし、施工直前の地山状態を高精度で確認しながら地山区分を行うことにより、安全で確実なコスト削減および工期短縮を図ることができると考える。

参考文献

- (社) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説