

参 考 资 料 5

目 次

1 通則	4-参 5-1
1.1 特殊地山のトンネル一般	4-参 5-1
2 塑性・膨張性地山のトンネル	4-参 5-2
2.1 塑性・膨張性地山のトンネル一般	4-参 5-2
2.2 調査	4-参 5-3
2.3 設計	4-参 5-4
2.4 掘削工	4-参 5-6
2.5 支保工	4-参 5-7
2.6 覆工	4-参 5-8
2.7 観察・計測工	4-参 5-9
3 蛇紋岩地山におけるトンネル設計・施工事例	4-参 5-10

1 通則

1-1 特殊地山のトンネル一般

次に示すような特殊地山のトンネルの設計・施工にあたっては、それぞれの地山の性状に適応した安全で、経済的な対策を検討しなければならない。

- (1) 塑性・膨張性地山のトンネル
- (2) 未固結地山のトンネル
- (3) 山はねが生じる地山のトンネル
- (4) 高い地熱、温泉、有毒ガスがあるトンネル
- (5) 高圧、多量の湧水がある地山のトンネル

【解 説】

次に示すような特殊な地山条件のトンネルでは、問題となる現象が発生し、工事に多大な影響を及ぼす可能性がある。そのため、事前の地質調査により特殊地山の分布と性状、設計および施工条件の詳細を十分把握する必要がある。設計・施工にあたっては第3章等に示す技術基準をそのまま適用しにくいいため、それぞれの地山性状に対応できるように、安全性、経済性等にも十分配慮し、適切な対策を検討する必要がある。

参考資料5では、特殊地山のうち、塑性・膨張性地山について、その概要を示す。

(1) 塑性・膨張性地山のトンネルについて

塑性・膨張性地山では、掘削断面内空への著しい地山の押し出しと強大な土圧の作用により、施工中の支保工や供用後の覆工に変状生ずる場合がある。

(2) 未固結地山のトンネルについて

未固結地山には、洪積層や一部沖積層を形成する未固結ないし固結度の低い砂質土や礫質土ならびに火山灰、火山礫、軽石等からなる火山噴出物等が未固結地山と呼ばれる。また、岩石の風化帯、断層破碎帯等も含まれる場合がある。未固結地山は、一般に切羽の安定性が悪く、地下水下にある場合には、掘削に伴う湧水によって地山の流出、切羽の崩壊、あるいはトンネル底盤のぜい弱化等が生ずることがあり、とくに被圧水が存在する場合には、これらの現象は顕著となる。また、湧水による地下水の枯渇、地山の流出や崩壊による地表面沈下を招き、周辺の環境に影響を及ぼすことがある。

(3) 山はねが生じる地山のトンネルについて

山はねが生ずる地山では、板状の岩片が突然、内空に飛び出すなど作業に危険が伴うばかりでなく、作業能率が大きく阻害されることがある。

(4) 高い地熱、温泉、有毒ガスがあるトンネルについて

高い地熱や温泉、有毒ガス等が湧出する地山では、作業における安全性の確保はもとより、労働衛生面からの作業環境の維持と作業員の適正な健康管理が重要になってくる。また、メタンガス等の可燃性ガス、一酸化炭素、硫化水素、亜硫酸ガス、酸化窒素（NO_x）等の有毒ガス、あるいは酸素欠乏空気、炭酸ガス等の湧出する地山では、これらによる爆発災害や作業員の健康障害の発生するおそれがある。

(5) 高圧、多量の湧水がある地山のトンネルについて

高圧、多量の湧水がある地山では、湧水により作業が難航して能率が低下するばかりでなく、地山がぜい弱化し、増大した土圧あるいは偏圧によって支保工に変状が生ずる。また、とくに突発的な高圧、多量の湧水に遭遇した場合には、切羽の崩壊等を引き起こすことがある。

2 塑性・膨張性地山のトンネル

2-1 塑性・膨張性地山のトンネル一般

塑性・膨張性地山のトンネルの設計、施工にあたっては、事前の調査、試験ならびに施工中の調査、観察・計測等を行って塑性・膨張性地質の分布状態および性状等を十分に把握し、適切な対策を講じなければならない。

【解 説】

塑性・膨張性地山のトンネルでは、地山の挙動と土圧の作用において特異な状況を示す。すなわち、トンネルが掘削されると、周辺の地山とともに坑壁が徐々に内空に押し出されてくる現象が見られ、はなはだしい場合には工事に支障をきたすほど著しく掘削断面が縮小することがある。その変位は天端、側壁ばかりではなく、底盤や鏡面にも生ずることが大きな特徴である。

このような地山の変位を支保工や覆工で抑えようとする、支保工や覆工には大きな土圧が作用することになる。こうした土圧は、掘削直後ではごく小さい場合でも、切羽の進行とともに増加し、その強大な土圧によって支保工が破壊したり、また数年にわたりクリープひずみが蓄積した結果、覆工やインバートが変状し、トンネルの改築を余儀なくされることもある。

このような塑性・膨張性地山のトンネルでは、地山が通常のトンネルとは異なった挙動を示すので、事前にその分布状態や性状等を可能な限り調査するとともに、想定される現象に類似した施工例等も参考として、適切な設計、施工、観察・計測計画を行う必要がある。

しかし、このような地山の挙動や土圧の性状を施工前に的確に把握することは困難であるため、施工中において、地山状況の観察、さらに内空変位や地中変位とともに、支保工および覆工の応力や作用する荷重等の計測、岩石試験等を行い、これらの結果にもとづいて総合的に判断し、必要があれば設計、施工法の変更を迅速かつ適切に行うことが肝要である。

塑性・膨張性地山の判定は、トンネルの形状、掘削工法、支保構造、補助工法、トンネル完成後の後荷の検討等にとって非常に重要であるため、適切に評価しなければならない。

【解 説】

塑性・膨張性地山には、岩石強度をはるかに越える応力による塑性流動化を原因として内空断面が縮小する（スキージング地山、押し出し性地山とも呼ばれる）、吸水に伴う体積膨張を原因として内空断面が縮小する地山（スウェリング地山）の2種類があり、単に岩石の種類や性質のみでなく、土被り圧による応力や褶曲構造等による地質構造的な応力との関連も大きく、同一基準によって膨張の大小を判定できないことが多い。一般には、上記のいずれの膨張性についても新第三紀以降の泥岩や凝灰岩、断層部の粘土、破碎帯、温泉余土、蛇紋岩等でみられることが多い。蛇紋岩、粘土化した結晶片岩、温泉余土、断層粘土等では分布が不規則で変質状態等も様でないため過去の事例を参考に調査、評価する必要がある。

地山の膨張性を示す指標としては、地山強度比、変形係数、一軸圧縮強度、自然含水比、浸水崩壊度、膨張性鉱物の含有等が挙げられている。（トンネル標準示方書山岳工法 P, 37 表2.13参照）

また、地山の塑性を示す指標としては、滑石（タルク）、水滑石（ブルーサイト）の含有が挙げられる。

本坑の施工に先立って調査坑を掘削し、各種の調査、試験および計測を行い、その結果を本坑の設計、施工に反映させる場合もあるが、調査坑の位置の選定にあたっては、その目的とする成果が得られるよう、土被り等の地形条件、地質の性状とその分布状況等について、慎重に調査、検討する必要がある。

塑性・膨張性地山でのトンネル設計は、設計条件と必要な設計項目を十分に考慮した上で、適切な手法により検討しなければならない。

【解 説】

地山が極端に不良な状況では、地山自身の支保機能がほとんど期待出来ないで、十分な支保機能の発揮が要求される。場合によっては、覆工の支保機能まで期待しなければ必要とされる支保機能を満足出来ない状態になることも想定される。そのうえ、長期の安定性を考慮すると、供用後、地山、支保工、覆工ともに経時的な材料劣化が想定される。したがって、設計の段階では供用期間中の材料劣化等も織り込んだ支保機能の設定を行う必要があるがそれは難しいため、場合によっては長期間が経過したのちに覆工に変状が発生する原因となる。なお地山の支保機能の劣化は他の材料と比較して予測しにくい、一般に地山が不良になるにつれその程度も大きいものと考えられる。

また、支保工の支保機能については、建設時のみ、その支保機能が発揮される考え方がある一方、大断面トンネル等のトンネルに対する要求性能の向上や、社会的なコスト削減の影響により、長期間にわたって支保工の機能が維持されるとの考え方もある。したがって、この考え方にたてば、地山及び支保工と覆工の機能を組み合わせて全体として長期耐久性を検討し、材料が劣化しても必要とされる支保機能が全体として満足される設計を行うことが望ましい。

- ①地山の支保機能の評価
- ②支保部材の性質を考慮したうえでの支保部材の設計
- ③長期耐久性を配慮したうえでの覆工の設計

(1) 標準設計の適用について

特殊地山に該当する地山においては、標準設計は適用不可である場合が多く、以下に示す類似条件での設計の適用、解析的手法の適用を基本に設計を行うこととなる。

(2) 類似条件での設計の適用について

類似条件での設計は、過去に施工したトンネルと設計条件が類似する場合に適用される。一般には、トンネルの使用目的や諸元もほぼ等しいトンネルに適用される事例が多いが、その使用目的や諸元が異なっても、類似条件や地質条件が類似する場合には、それらの事例を参考として設計がなされる。

(3) 解析的手法の適用について

解析的手法は、設計条件に特殊な要件（たとえば、既設構造物への近接施工、低土被り地形、変形や土圧の大きな特殊地山、大きな内空断面や特殊な断面形状、都市部山岳工法によるトンネルなどで周辺地山の挙動予測が課題となる場合等）が含まれ、標準設計や類似条件での設計のみでは設計検討が不十分な場合に適用される。支保工の設計では、おもに周辺地山の挙動予測や支保部材の応力照査を目的として、有限要素法等を用いて地山と支保部材をモデル化して検討を実施している。覆工、インバートの設計では、想定される外力に対する部材の構造的な応力度照査を目的として、骨組構造解析を用いて部材をはりで地山をバネでモデル化し想定荷重を作用されて検討を実施している。これらの解析的手法は、数値計算技術の向上によって一般化されつつある。しかしながら、解析条件（モデルの設定、境界条件、地山の物性値入力等）によって計算結果が大きく異なるので、解析条件と結果の評価に十分な注意が必要となると同時に、地山の不確実性や不連続性を勘案すれば解析的手法が万能ではないことを念頭に置くべきである。また、解析的手法の適用においては、類似条件におけるトンネル設計、施工事例が参考となる。

支保構造の設計にあたり解析的手法を適用する場合には、地山の不均質性、節理等の不連続面、異方性や寸法効果等の影響により、原位置試験および室内試験によって得られた物性値は地山全体を代表する値でない場合が多く、そのまま入力物性値として利用すると、解析結果と施工時の実測との間に不一致を生ずることが多い。このため特に下記の物性値について留意が必要である。

①定量的な要因

- ・内部摩擦力【単位：°】
- ・粘着力【単位：kPa】
- ・変形係数【単位：MPa】
- ・土被り高さ【単位：m】
- ・地山強度比【単位：-】

②定性的な要因

- ・滑石（タルク）、水滑石（ブルーサイト）の含有有無、含有量
- ・時間依存性による応力の増加
- ・蛇紋岩種の不均質性（塊状、葉片状、粘土状）
- ・著しく小さい蛇紋岩の地山強度
- ・節理角度の低角化
- ・断層破砕帯の有無、規模
- ・微閃緑岩の貫入の有無、規模

③その他

- ・試験で得られる物性値を割れ目の状態に応じて低減する。
- ・実測にもとづく逆解析で得られる値を参考にする。
- ・過去の類似地山で使用された物性値を用いる。
- ・各機関により定められた標準的な物性値を用いる。

掘削にあたっては、地山を緩めないよう、早期に断面の閉合を図ることを基本とし、地山条件に合わせた適切な掘削工法を選定しなければならない。

【解 説】

塑性・膨張性地山では、一般に切羽の安定性が悪く、地山の緩みは時間の経過とともに著しく増大し、大きな土圧が作用することになるので、施工にあたっては、切羽の周辺および前方の地山を極力緩めないよう留意し、掘削した断面をできるだけ早期に支保工で全周を閉合することが重要である。また、断面を分割して掘削すると、地山の応力の再配分が複雑になって各断面が相互に干渉し合い、先行する坑道が後続の切羽の接近に伴って偏圧を受けたり、いったん落ち着いた土圧が再び増加し始めることも多いので、切羽の安定性等を考慮しながら、断面の分割数が最小限となるような掘削工法の採用を検討しなければならない。その結果、掘削断面積が大きくなり、切羽の安定性に問題があると判断される場合には、先受け工、鏡吹付けコンクリート、鏡ボルト等の補助工法によって安定性の改善を図ることは可能である。これらの対応によって極力断面の分割数を少なくし、施工断面を大きくできれば、より合理的で能率的な施工が可能となる場合もあるので、十分な検討が必要である。

塑性・膨張性地山に用いる掘削工法は、基本的に早期に断面の閉合が可能なものとする必要があるが、掘削地山外周から内側への押出しだけでなく、切羽鏡面からの押出し変形にも留意しなければならないため、適切な加背割も重要となる。したがって、標準的にはショートベンチカット工法やミニベンチカット工法、補助ベンチ付き全断面工法等のベンチ長を短くした掘削工法を採用することが多い。これらの掘削工法は、分割断面の相互干渉が少なく、比較的早期に断面の閉合が可能である。また、上半盤やインバート部に吹付けコンクリートや、場合によっては鋼製ストラットを併用するインバート吹付けにより掘削断面を閉合することは、変形を抑えるのに有効である。なお、切羽の安定性が問題となる場合には鏡面への吹付けコンクリートの施工だけでなく、鏡ボルトを施工することが多い。このほかに、上半断面内に円形導坑を先進させ、その後ベンチカットを行う工法がある。この方法は、地山の潜在応力の一部を解放し、支保に作用する応力を軽減させる効果がある。

支保工は、地山の性状、土圧および変位の状況、掘削断面、掘削工法等を考慮し、適切に選定しなければならない。

【解 説】

塑性・膨張性地山においては、その現象によって縫返しがないように当初から対策を講じる必要がある。具体的には当初から大きな剛性の支保工により、地山変位を小さく抑える方法が一般的である。支保工はどのような種類、形状でも、閉合されていない状態では十分な耐力や地山拘束力は望めないため、断面を分割して掘削する場合においても、施工の各段階で、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工を組み合わせた支保工により、掘削の全周をできるだけすみやかに閉合しておくことが望ましい。

なお、最近では、地山変位をある程度許容し、最初の支保工（一次支保工）の健全性が損なわれることを見越して、その内側に新たに何層にも支保工（多重支保工）を設けることで支保全体の健全性を確保するという考え方にもとづいて施工している事例もある。

塑性・膨張性地山においては、覆工は円形に近い断面とし、必ずインバートを設けて全周を閉合する必要がある。インバートは、コンクリートにより直接閉合するケースが多いが、地山の変位量や変位速度が大きくなり、早期に断面を閉合する必要がある場合は、施工性と早期強度の発現に優れる吹付けコンクリートによって一次閉合することが望ましい。また、場合によっては繊維補強吹付けコンクリートの採用やストラットの併用を検討しなければならない。この場合、一次閉合の施工を掘削サイクルに組み込み、切羽間近で一問ごとに施工することが望ましい。

(1) 吹付けコンクリートについて

吹付けコンクリートは、掘削後ただちに施工することにより、地山の緩み、風化を防止するため塑性・膨張性地山においては、とくにその効果は著しい。吹付けコンクリートの厚さは、標準支保パターンに比べ厚い吹付け厚が採用されている。また耐荷性やじん性向上を目的に、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が用いられることもある。

(2) 鋼製支保工について

鋼製支保工には、H形鋼が一般に用いられているが、著しく強大な土圧に対抗できる剛な支保工として高規格H形鋼や鋼管が用いられることもある。鋼管支保工は、建込み後、鋼管内にモルタルを注入したり、さらにらせん鉄筋を入れると耐力の著しい増強を図ることが可能である。

(3) ロックボルトについて

ロックボルトは、塑性・膨張性地山に対しても効果的であり、吹付けコンクリートと併用することによって、一層その効果をあげている場合が多い。ロックボルトをこのような地山に有効に作用させるためには、できるだけ早期に打設し、地山を拘束することが重要であり、とくに早期に支保耐力が必要とされる場合には、摩擦式ロックボルトが採用されることもある。また、穿孔時、粘性土および高含水比の泥岩地山ではロッドにくり粉が付着したり、あるいは浸水崩壊しやすい地山では、孔壁が崩壊し穿孔に難渋することが多い。このような場合は気泡剤を利用した穿孔や、また孔壁が自立せずロックボルトを挿入できない場合は自穿孔ロックボルトを用いる。また、スレーキングを生じる地山対策として気泡剤やシリカレジンの使用が効果的な場合もある。

ロックボルトの種類の選定を含め、施工方法を工夫する必要がある。

(4) 変形余裕量について

膨張性地山等の押し出し性の著しい地山では、大きな変位が生じた場合には巻き厚不足となることがあり、場合によっては、所定の断面になるよう、再度地山を掘削する縫い返しを余儀なくされるので、設計時に地山特性に応じた変形余裕量を適切に見込む必要がある。

トンネル断面は、なるべく円形に近い形状で全周閉合とし、覆工の施工時期は、計測結果等から地山の変位状況等を把握し、適切に定めなければならない。

【解 説】

塑性・膨張性地山に対するトンネルの断面形状は、力学的には円形が最も望ましいと考えられるが、円形断面は施工性が悪く、とくに鉄道および道路トンネルでは、不必要な掘削断面が多くなるので、土圧の程度によっては、栗形や馬てい形断面等も採用されている。また、実際の施工では、変位の状況に応じた断面の変形余裕を適切に設定しておく必要がある。また、覆工の施工時期は、変位が収束した段階で施工することを基本とするが、変位が収束せず、支保工のみでは土圧に対抗することが不利と判断した場合は、覆工にも荷重を負担させることがある。具体的には、耐荷力の大きい鉄筋コンクリート、またはじん性に優れた繊維補強コンクリート等により覆工を早期に施工することもある。この場合、変位速度等を含めた判断基準の設定等、十分な検討が必要である。

塑性・膨張性地山でのトンネル施工における観察・計測項目の選定については、予測される地山挙動、支保工の機能、地山条件ならびに個々の計測の役割を十分に考慮しなければならない。

【解 説】

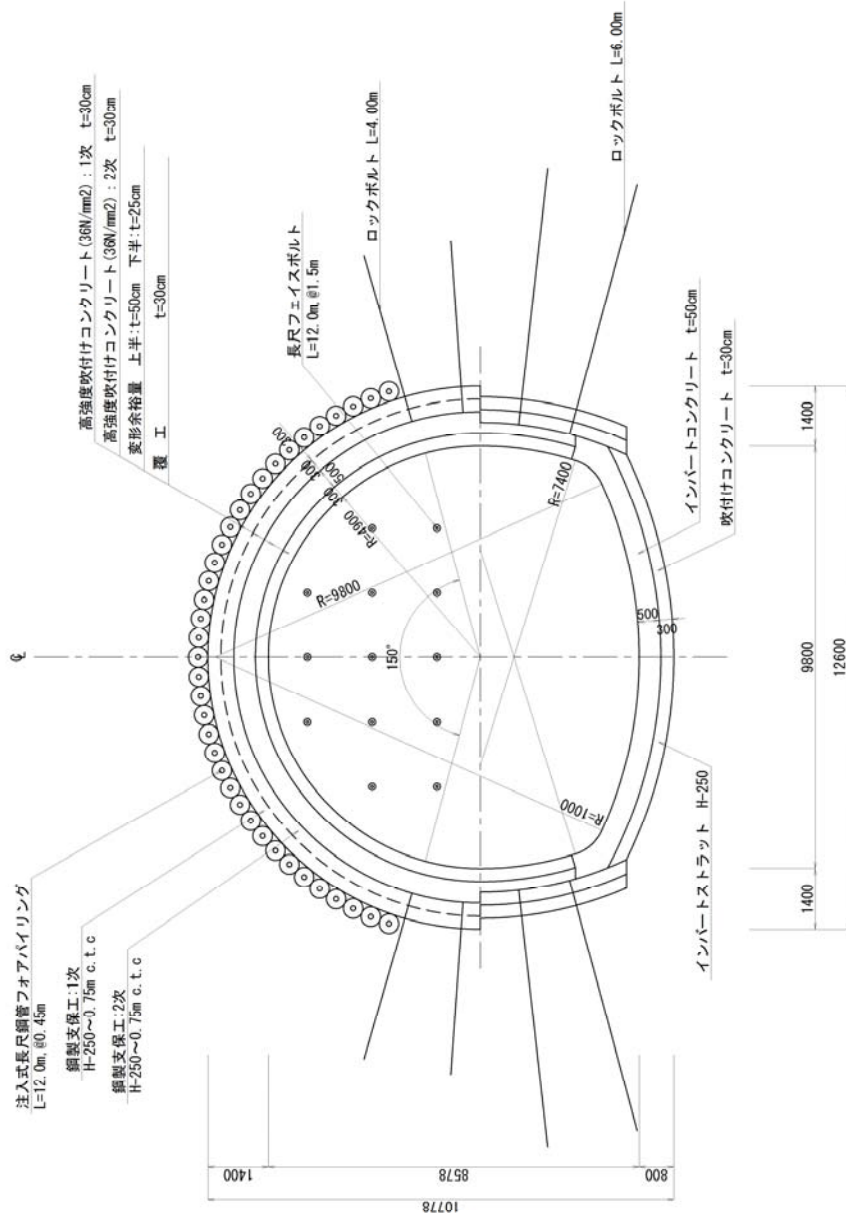
各種地山条件に応じて選定される主な観察・計測項目については、「トンネル標準示方書 山岳工法・同解説」解説表7.5、解説表7.6等に記載されているとおりである。特に、膨張性地山においては、切羽観察結果の要点や地形、地質の特記事項、断面の閉合時期等の施工状況、支保部材応力等の計測結果、計測項目以外の留意事項や場合により切羽評価点等も併せて記入して相互の関連を対比しやすいよう整理するなど、全体の状況を把握しやすくすることにより、総合的な評価が容易に行えるようにすることが大切である。また、3Dスキャナーによる変位計測、ボルト張力の見える化等、新技術・新工法も積極的に活用することも重要である。

3 蛇紋岩地山におけるトンネル設計・施工事例

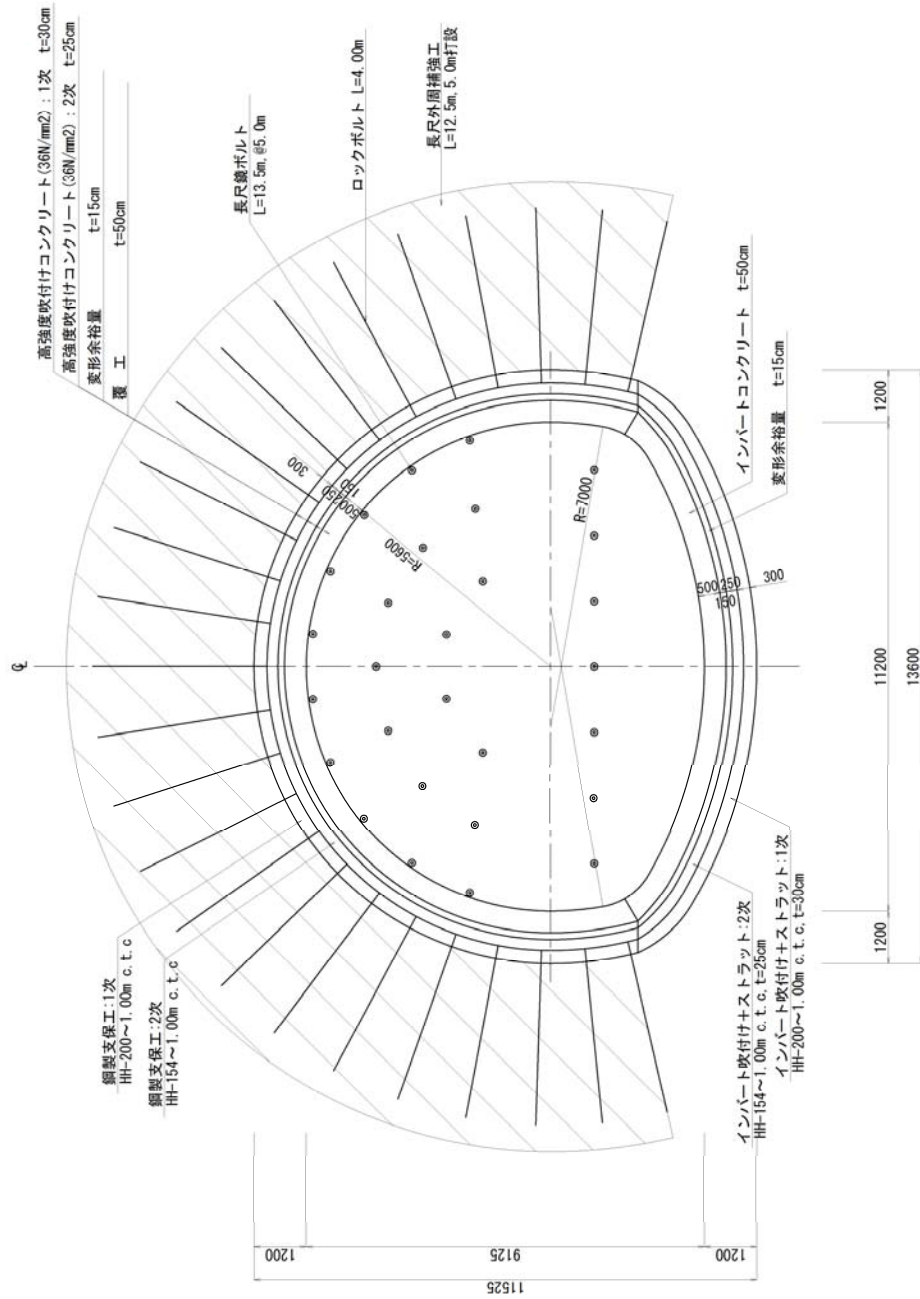
表4. 参5.1 蛇紋岩地山のトンネル設計・施工事例

トンネル名 (路線名)	諸元		地山物性値				トンネル構造				
	延長(m)	断面形状 (内空幅) (m)	変形係数 (MPa)	粘着力 (kN/m ²)	内部 摩擦角 (°)	ブルー サイトの 含有	掘削工法	吹付コン クリート (cm) (σ _{ck})	ロックボルト 長さ×本数	鋼製支保工 呼称×間隔	覆工 (cm)
地芳トンネル (国道440号)	2,990	馬蹄形 (9.80)	150以下	50	20~30	不明	ショート ベンチ カット 工法	30+30 (36N/mm ²)	4m×4本 (上半) 6m×4本 (下半)	H250×0.75m H250×0.75m	30
穂別トンネル (北海道横断 自動車道)	4,323	馬蹄形 (11.20)	150	200	30	不明	マイクロ ベンチ カット 工法	30+25 (36N/mm ²)	4m×25本	HH200×1.00m HH154×1.00m	50
占冠トンネル 西避難坑 (北海道横断 自動車道)	3,098	円形 (4.20)	160	350	28	不明	不明	25 (36N/mm ²)	2m×11本	NH200	20
タンネナイ トンネル (北海道横断 自動車道)	816	馬蹄形	18	130	15	不明	不明	20 (不明)	不明	不明	30
音威子府 トンネル (国道40号)	2,699	馬蹄形 (11.40)	不明	400	20	不明	マイクロ ベンチ カット 工法	20 (18N/mm ²)	4m×10本	H200×1.00m (上半) H150×1.00m (下半・インバ ート)	30
音中 トンネル (国道40号)	4,686	円形 (11.50)	150	60	10	有	マイクロ ベンチ カット 工法	40+40+35	4m×14本	H200×1.00m H200×1.00m H200×1.00m	50

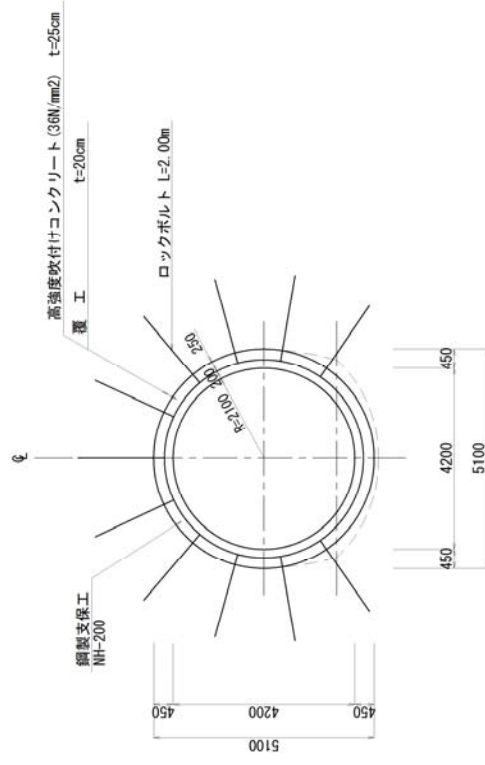
地芳トンネル



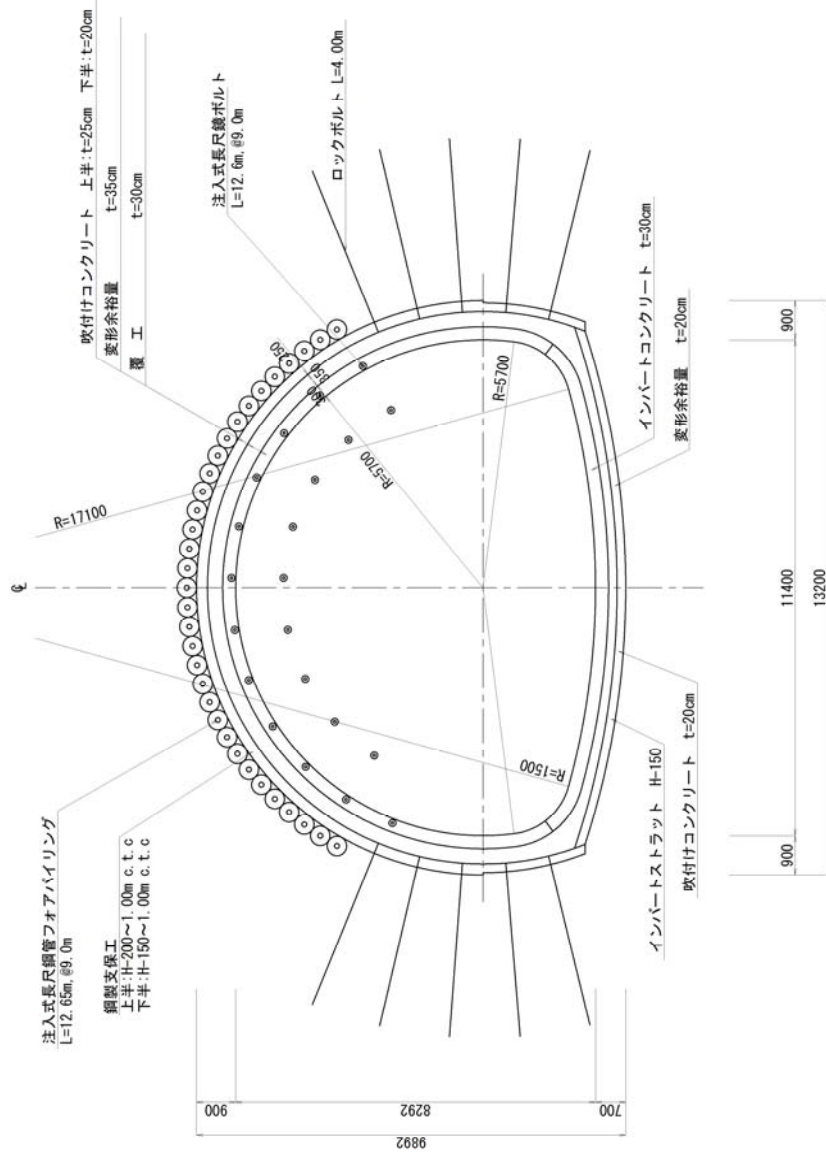
穂別トンネル



占冠トンネル（西避難坑）



音威子府トンネル



音中トンネル

