

新豊浜トンネル分岐部の設計と施工

Design and construction of the junctions of Shin-Toyohama Tunnel

生出信二*・佐々木博一*・盛 春雄**・仲井幹雄***

Shinji OIDE, Hirokazu SASAKI, Haruo MORI and Mikio NAKAI

Shin-Toyohama Tunnel will become a long single tunnel by connecting existing Toyohama Tunnel with its adjacent Setakamui Tunnel by a bypass tunnel. At each junction of the new and old tunnels, two-lane tunnels merge at a small angle, resulting in a large cross section with a low oblateness. Traffic on the existing tunnels will not be restricted during the construction work. To conduct the tunneling work under such difficult conditions each junction area was divided into four blocks based on the sectional shape, and the processes of tunnel face division and excavation were design for each block to minimize rock-mass loosening.

Key Words: tunnel junction, large cross section, flat tunnel

1. はじめに

一般国道229号は北海道の日本海沿岸を通る路線である。豊浜トンネルは、積丹半島の東側、余市町と古平町を結ぶ位置にある。平成8年2月古平側坑口付近で発生した岩盤崩落事故により被災し、現在応急復旧が完了した状態にある。新豊浜トンネルは、本復旧として崩落箇所とその周辺の急崖斜面を迂回するよう計画された全長2,228m(内新規掘削延長1,242m)の道路トンネルである(図-1)。本工事は、豊浜トンネルとそれに続くセタカムイトンネルとをバイパストンネルで結び一本のトンネルにするものである。工事の最大の特徴は、既設トンネルから新設トンネルへと繋がる分岐個所の施工にあり、この部分では2本の2車線道路トンネルが薄い交差角度(15°)で接続するため、トンネルが超偏平大断面となる(掘削断面積174m²、掘削幅23m、偏平率41%)。しかも、当路線は地域住民の生活道路であり、迂回路も存在しないため、分岐部の施工中においても一般車両の2車線通行を確保しなければならない。

本稿は、このような厳しい条件で安全かつ迅速に2つの分岐部の施工を行うための掘削工法および既設トンネルの補強について報告するものである。



図-1 位置図

「キーワード」 坑内交差、大断面、偏平トンネル

- * 北海道開発局 小樽開発建設部 小樽道路事務所 第二工事課
- ** 前田・草別特定建設工事共同企業体
- *** 正会員 前田建設工業㈱ 土木本部 土木設計部

は15～30cm程度で、亀裂面は比較的新鮮な状態にある。火砕角礫岩と安山岩溶岩の境界には厚さ10m程度で安山岩溶岩が自破砕状を呈しており、亀裂間隔も5～15cm程度となっている。豊浜側分岐部における地質は、ユニットI（上部）が広く分布している。先進ボーリング調査においても、部分的に短棒状のコアを主体としたやや軟質な箇所が存在するものの、概ね当初設計時の岩質と変わらないことが確認された。なお、いずれのボーリング調査においても湧水は確認されていない。

現セタカムイトンネルの施工実績では、不規則な割れ目の発達が認められたが切羽の剥落などなく補助工法も採用されていない。また、セタカムイトンネルは、NATMで施工されており（分岐部に相当する箇所は、CⅠ→CⅡパターン）、既設トンネル内からボーリング調査を行った結果、覆工背面に空隙はなく、緩み領域についても在来工法の豊浜トンネルに比べ小さいと推定された。

4. 分岐部の設計と施工計画

4-1 設計条件

分岐部の設計にあたっては、以下の基本条件に従うこととした。

①一般車両の通行確保

分岐部の施工中も一般車両の通行を確保するため、既設トンネルに2車線および歩道を防護するプロテクターを設置する。

②機械掘削方式の採用

分岐部の施工は、周辺地山および現道への影響を最小限にするため、機械掘削による施工を行う。

③既設トンネル覆工背面からの施工

既設トンネル内に防護プロテクターが設置されるので、分岐部の施工は既設トンネルの覆工背面からとする。

4-2 支保構造

本トンネルのような超偏平大断面の支保パターンは定められていない。よって、FEM解析を用いて支保構造の設計を行なった。

掘削解析を行ない、その結果発生する緩み領域が崩落、あるいは滑動しないように支保部材で縫い付けることとした。ただし、施工過程に基づきロックボルトと吹き付けコンクリートを考慮している。この際、no-tension 則とMohr-Coulomb基準に従うFEM弾塑性解析を行なうために、緩み領域（補強対象領域）は最大主ひずみ（限界ひずみ¹⁾との比較）、最大せん断ひずみ（限界せん断ひずみ²⁾との比較）および安全率（破壊包絡線に対するモール応力円接近度あるいは塑性領域）の3つの指標で判定した。そして、安全側に考え、この3つの指標で判定された各々の緩み領域を包絡する領域を補強対象領域とした。なお、「縫い付け効果」は「地山改良効果」と等価と考えられる。すなわち、緩み領域が崩落したり滑動したりしないように緩んでいない健全な地山にロックボルトで縫い付けることは、見方を変えれば緩み領域の強度をロックボルトにより増大させて、地山の物性を改良していることになると考えられる。

表-1 地質層序

地質時代	地質名	記号	地質
新 第 三 世 紀	ユニットIV	IV	含角礫成層火砕岩
		a n	安山岩溶岩
	中 新 世	上部	ⅢU 含角礫成層火砕岩
		ⅢL③	含角礫成層火砕岩
		ⅢL②	含角礫火砕岩～火砕角礫岩
		a n	安山岩溶岩
		下部	ⅢL① 含角礫火砕岩～成層火砕岩
		ⅢL①	不淘汰火砕角礫岩
	ユニットII	a n	含角礫成層火砕岩
			安山岩溶岩
			火山礫凝灰岩
		Ⅱ	含角礫成層火砕岩 粗粒火砕岩、不淘汰 火砕角礫岩を伴う
新 第 三 世 紀	ユニットI	f d	ファイダー ダイク
		ⅠU a n	含角礫成層火砕岩
新 第 三 世 紀	ユニットI	ⅠL a n	粗粒火砕岩
			安山岩溶岩

① NATMの採用

分岐部支保設計の基本としてNATMが在来(木矢板)工法かに分類されるが適切な補助工法を用いることによりNATMと考える設計を行う。ただし、大断面部分の既設トンネル側不用空間は、最終的には充填を行い小断面化を図る。そのため、大断面は完成断面に対する仮設とみなす。

最終的には既設トンネル部を埋め戻すものとするが、仮設時は大断面での施工であるため、基本的な支保パターンは建設省が提唱する大断面支保に準拠するものとする。

二次元弾塑性解析の結果、安全率 (1.2)、限界ひずみ (0.06%) および限界せん断ひずみ (0.12%) の3つの指標から推定すると、緩み領域の深さは 3~5m であった。よって、必要ロックボルト長は [平面図] [掘削加背割り]

6.0m と決定した (図-4)。

4-3 施工順序

分岐部におけるトンネル断面は、新旧トンネルが複合する区間であると同時に掘削断面積が $109 \sim 174 \text{m}^2$ 、掘削幅が $16 \sim 23 \text{m}$ 、偏平率が $57 \sim 41\%$ と極めて大きくかつ偏平な形状となる。そのため、周辺地山の保有耐力や力学的な安定性が失われやすい状態となることが事前解析より予想された。既設トンネル背面の掘削をできるだけ先行した方が、防護プロテクター上部の拡幅掘削を行う際、十分な作業空間を確保できるという点で有利であるが、その反面、大きく掘削しすぎると力学的な安定性を損なう恐れがある。そこで、分岐部全体を断面形状から4つのブロックに分け、各ブロック単位ごとに掘削・一次支保を完成させ、計測により地山の安定が確認された後、次のブロックの施工に移る掘削方式を採用することとした。また、機械掘削の最小施工範囲を基本とした加背割りで大断面を分割し、各ブロックごとに緩みを最小限に抑える加背割りと掘削順序を定めた(図-5)。

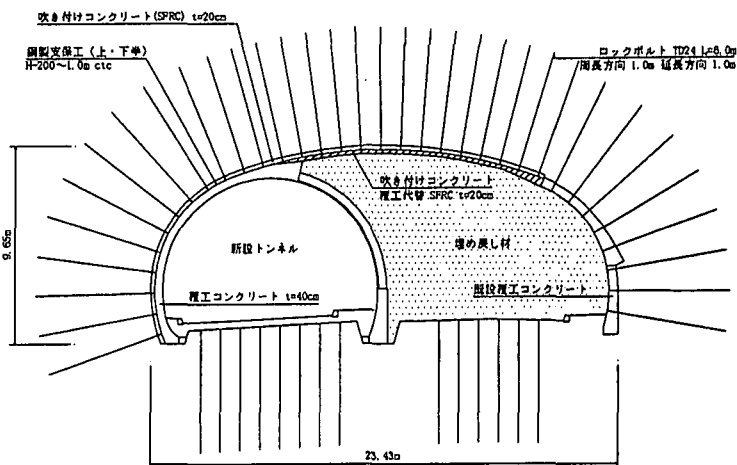


図-4 分岐部大断面支保パターン

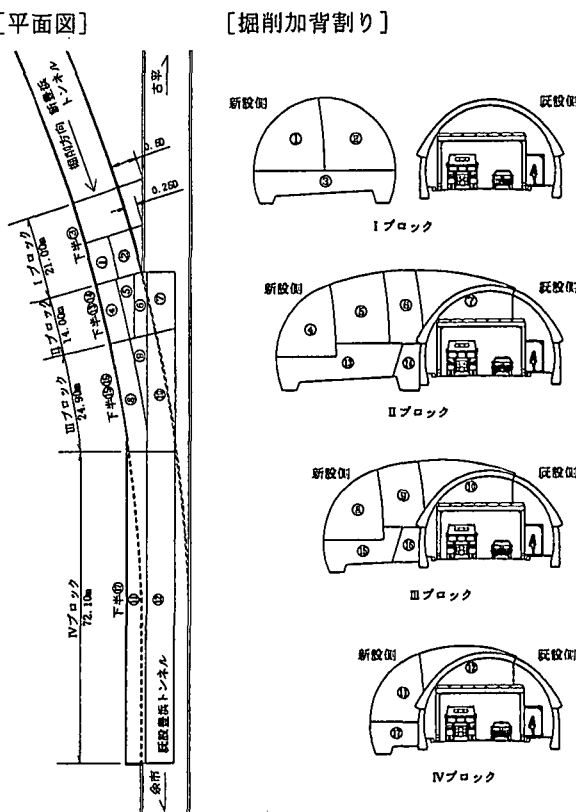


図-5 豊浜側分岐部の施工ブロックと加背割り

5. 既設トンネルの補強

一般車両の通行を確保し、トンネル接合時における周辺地山の保有耐力および力学的安定性を失わないようにするため、事前に既設トンネルの補強を行なった(図-6)。特にピラー部(新設トンネルと既設トンネルの間に残る地山部分)は、トンネル掘削により応力が集中すると考えられる。よって、ピラー部の将来的な安定が分岐部全体の安定に大きく影響を及ぼすため、十分に補強を行なった。施工は比較的交通量の少ない夜間(22:00~5:00)に片側交互通行規制を行ない実施した。

5-1 裏込め注入

既設豊浜トンネル(昭和 59 年 11 月竣工)は在来工法で施工されたため、覆工と地山の間に空隙があると予想された。そこで、補強ロックボルトの施工に先立ち、既設覆工と地山との間の空隙を充填する目的で、エアーモルタルの注入を行った。

5-2 補強ロックボルト

補強ロックボルトは、既設覆工背面地山における緩みの進展抑制および既設覆工解体時における残存覆工の安定確保を目的に実施した。施工範囲は、新設トンネルとの

離隔距離 2 D (D : トンネル内空幅) の地点から分岐部終了区間までとした。覆工残存箇所にはネジリ鋼棒 (TD24、耐力 18tf) を使用し、覆工解体箇所には容易に切断が可能な F R P (ガラス繊維補強プラスチック) ボルト (φ 24mm、耐力 20tf 以上) を使用した。特に既設トンネルの拡幅箇所天端部は、地山の補強を目的として、長尺 (7.0m) のものを用いた。

5-3 間詰コンクリート

プロテクター設置後、ピラー部を安定させかつ強化を図る目的で、プロテクター側面と既設覆工との間をコンクリートで充填することとした。ただし、既設トンネル監査歩廊部下は砕石であり、この部分も含めて補強を行う必要がある。そこで、プロテクター設置前に監査歩廊を取り壊し砕石部分を撤去した後、コンクリートの充填を行なった。

5-4 間詰エア一モルタル

プロテクターと既設覆工の間をエアームタルで充填することにより一体化を図り、覆工解体時の安定および安全を確保することとした。

5-5 ピラー部補強ロックボルト

間詰コンクリート打設後、新トンネルとの離隔距離 0.5D 以下のピラー部分をさらに補強し、間詰コンクリートとの一体化を図る目的でロックボルトを施工した。プレートは、大型 (300×300×19) のものを使用し支圧面積の増大を図った。

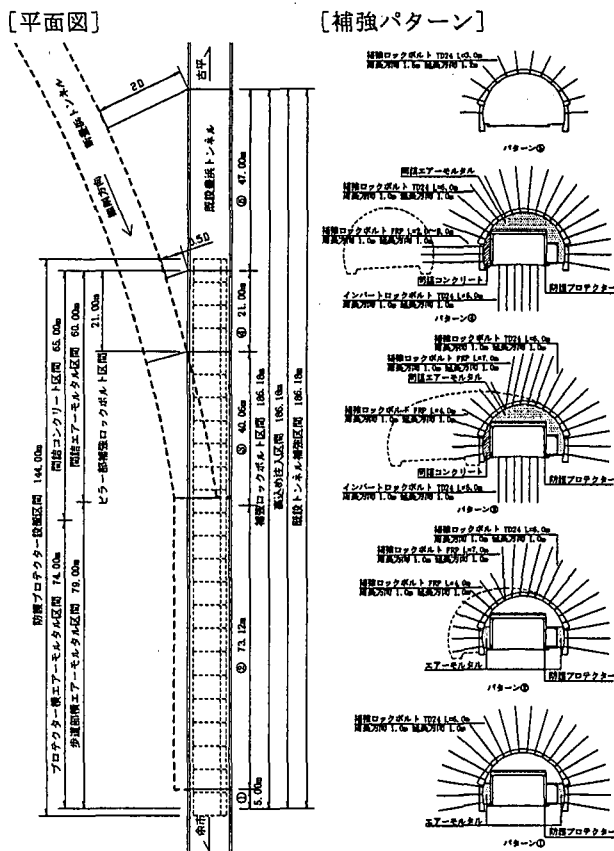


図-6 既設トンネル補強パターン

6. 防護プロテクター

プロテクターの設置には、車両通行止めを含む交通規制がどうしても必要となる。当路線は積丹半島地域における交通の生命線であるため、車両通行止めの時間および期間をできるだけ短くするばかりではなく、車両通行止めの時間帯であっても、救急車等の緊急車両が速やかに通行できるようにしなければならない。

6-1 基本方針

プロテクター設置に関して、以下のような方針を立てた。

- ①接触事故等を防止するため、プロテクターの構造は、可能な限り内空高さおよび幅とも広くする。
- ②プロテクターはトンネルの外（組み立てヤード）で組み立て、搬入・設置を行う。
- ③搬入途中においても緊急車両が通行できる方法をとる。

6-2 プロテクターの構造

坑外で組み立てを行い、搬入を行うため1基あたりの長さを6.0mとした（図-7）。

6-3 坑外組み立て

夜間通行止めの時間に搬入・設置を行うため、昼間組み立てを行うこととした。1日あたりの組み立て基数は、

組み立てヤードのスペースより1日2基とした。また、現地での組み立て時間を短縮するため、部材はあらかじめ工場でユニット化し、組み立てヤードへ運搬することとした。

6-4 搬入・設置

36t トレーラーの荷台上、油圧ジャッキおよび油圧シリリンダーを組み込んだ装置を載せ、プロテクターを1基ずつ中央部付近で持ち上げて搬入を行った（図-8）。

緊急車両対策として、搬入途中でもプロテクターをその場に置いてトレーラーが即座

に退避できるよう、プロテクターの固定は、左右4台のチェーンブロックのみで行った。したがって、プロテクターは「やじろべえ」のように左右のバランスを保ちながら運搬されることになるが、多少揺れても構わないよう、プロテクター脚部に車輪を取り付けた。緊急車両通過の連絡が入った場合、約5分で退避することが可能であった。

6-5 運搬時の接触防止

プロテクターは設置後の交通事故防止の目的で可能な限りの内空を確保した寸法となっている。このままでは、運搬時にプロテクター上部がトンネル覆工および照明に接触する恐れがある。トンネル歩道側には、歩道柵があり寄ることはできない。そこで、柱材の一部（20cm）をコマ材として敷き桁に取り付けることとした。敷き桁は、プロテクター搬入時にあらかじめトンネル内に配置しておき、設置直前でとりこむ方法を用いた。その結果、プロテクターは所定の高さ以下で搬入が可能となり、人が早足で歩く程度の速さで運搬することが可能であった。

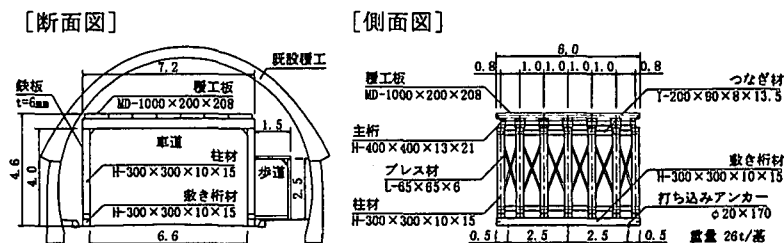


図-7 防護プロテクター

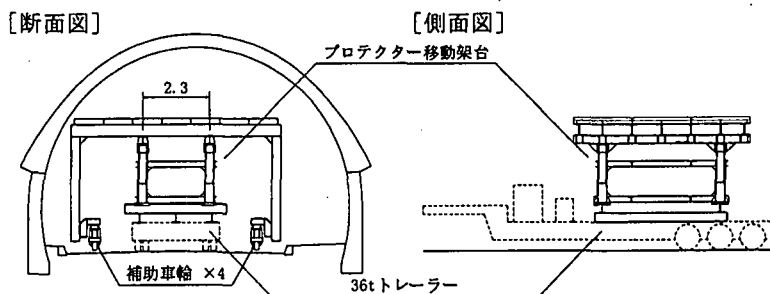


図-8 プロテクター移動架台

7. 分岐部の計測計画

分岐部においては、新設トンネルが接近・接合することにより掘削相当外力が再配分され新たな応力場を形成する。この再配分の状況をリアルタイムに捉え、経時変化傾向や予測解析結果との比較から周辺地山の力学的挙動を把握し、施工管理上の安全性確保に役立てるとともに、既設トンネル補強工まで含めた当初設計の支保効果の確認および対策工の必要性に関する評価を行なうこととした。

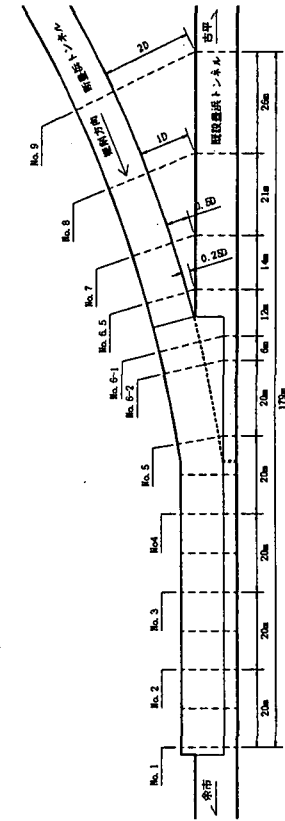
7-1 計測計画

計測項目は、天端沈下・内空変位の観測に加え、周辺地山の力学的挙動、支保部材の効果および既設トンネルへの影響をリアルタイムで捉えるため、計器観測を実施した。特に分岐部ではトンネル断面が偏平かつ大断面になることから、天端沈下とその沈下に伴う緩み領域の拡大が発生すると予想された。そこで、このような周辺地山の力学的挙動を把握するために計測機器の種類・仕様を選定し配置を行なった(図-9)。分岐部大断面トンネルの安定はロックボルトにより確保するというのが設計思想であり、ロックボルトの軸力および地中変位が重要な計測管理項目になる。これらの計測結果に基づいてロックボルトの長さや本数が妥当であるかを判断することとした。データ収録は、完全自動収録方式を採用し、24時間体制で分岐部全体の挙動を把握できるようにした。得られたデータの経時変化傾向を捉え、管理基準値および予測解析結果との比較を行なうことで施工管理上の安全性を評価した。

7-2 管理基準と管理体制

表-2に示す管理体制を設定し、図-10に示すフローに従い管理を行なうこととした。ロックボルト軸力および吹き付けコンクリート応力に関しては、部材の耐力を基準値とし、安全率をFs=3として管理レベルを3段階に分けて設定した。天端沈下・内空変位および地中変位(緩み領域)に関しては、FEM解析による予測値を基準値とした(表-3)。

[平面図]



[計器配置図]

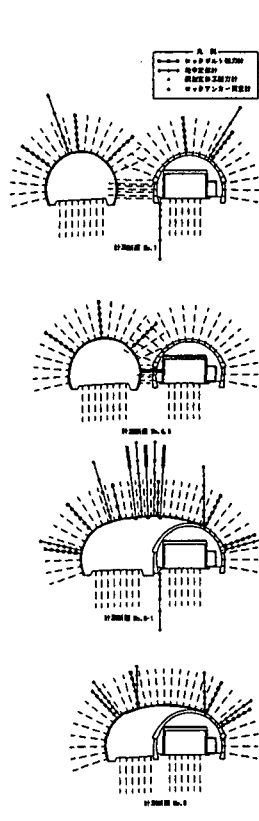


図-9 分岐部計測断面

表-2 管理体制

管理体制	通常体制	注意体制	警注意体制	厳重注意体制
管	ロックボルト軸力 基準値×1/3 以下	基準値×1/3 ～基準値×2/3	基準値×2/3 ～基準値×1.0	基準値を越える
理	吹き付けコンクリート応力 基準値×1/3 以下	基準値×1/3 ～基準値×2/3	基準値×2/3 ～基準値×1.0	基準値を越える
基	天端沈下・内空変位 基準値×0.5 以下	基準値×0.5 ～基準値×0.7	基準値×0.7 ～基準値×1.0	基準値を越える
準	地中変位(ゆるみ領域) 基準値×0.5 以下	基準値×0.5 ～基準値×0.7	基準値×0.7 ～基準値×1.0	基準値を越える
計測管理体制	通常計測		近傍位置における測点の増加 地山評価	24時間計測管理 地山評価
計測頻度*	通常通り	通常×1.5倍	通常×2.0	通常×2.5
施工管理体制	通常施工	対策工の検討	増ボルト 増ロックアンカー 増支保工 仮支柱	切羽の停止 設計変更

1)天端沈下・内空変位の補足的な役割。地山評価、ロックボルト長の決定に反映させる。
2)計測頻度は目安であり、状況に応じて検討する必要がある。

表-3 基準値

項目	基準	備考
ロックボルト軸力	ロックボルト破断耐力	ネジ部 18.4tf (TD24)
吹き付けコンクリート応力	設計基準強度	f _{ck} = 180 kgf/cm ²
天端沈下・内空変位	FEM 解析結果	各断面ごとに設定
地中変位(ゆるみ領域)	FEM 解析結果	各断面ごとに設定

8. おわりに

分岐部の設計にあたり最も注意した点は、如何に周辺地山を緩ませず、保有耐力を維持したNATMとして成り立たせるかであった。本トンネルのような角度の小さい合流形状と超偏平断面の事例は、他にあまり類のないトンネル形状であり、不明確な要素も多い。その上、間違っても一般車両の通行に支障をきたすようなことがあってはならない。このような極めて厳しい条件の下、事前に入念な検討を行ない、状況に合わせて計画を見直して慎重に施工を進めていった結果、平成12年1月、地山の安定性を損なうことなく無事に両分岐部の掘削を終えることができた。特に、分岐部においては天端沈下が最大で5.0mm程度であり、標準部の計測結果とほぼ同程度の値となっていることを考えると、超偏平大断面のトンネル形状から推測しても極めて少ない変位量である(表-4)。また、ロックボルト軸力は、側壁部よりも天端部で大きな軸力を示しており、天端部においてはロックボルトが効果的な支保部材であったと考えられる。ロックボルト軸力および地中変位の計測結果から推定される緩み領域は4.0m未満であり、当初FEM解析により予測した値(3.0~5.0m程度)より若干小さいものの、ロックボルト長は妥当なものであったと考える。

その結果、本トンネルのような超偏平大断面のトンネルであっても、分割施工および事前補強を行なうことにより、NATM理論を適用して掘削できることが確認されたと考える。

現在工事は、平成13年春の全面開通に向けて鋭意施工中である。得に分岐部の覆工コンクリートや既設トンネルの埋め戻しなど、慎重に施工を進めなければならない。

本工事は既設トンネルを供用しながら拡幅するという、施工例の少ない工事である。今後、小断面トンネルの拡幅や坑口部において地山崩壊の危険性があるトンネルのリニューアルといった工事が増大するものと予想される。本工事の経験がそのような工事の参考になれば幸いである。

最後に、本工事にあたって御指導いただいた今田徹・東京都立大学教授をはじめ関係各位の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 桜井・足立：都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版会
- 2) 桜井・川嶋・大谷・松村：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集，No. 493/Ⅲ-27, pp. 185-188,

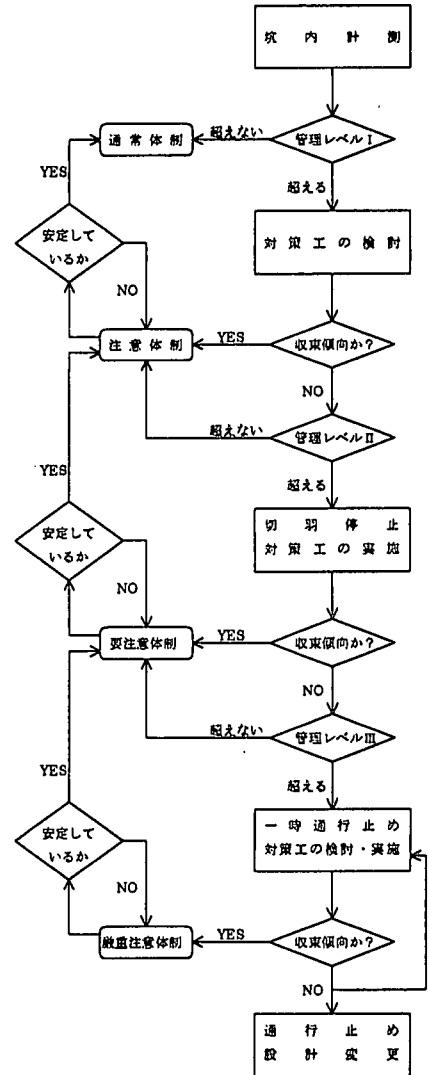


図-10 計測管理フロー

表-4 天端沈下計測結果と予測値の比較

	セタカムイ側	豊浜側
地山弾性係数	14,000kgf/cm ²	15,000kgf/cm ²
計測結果最大天端沈下量	約5.0mm	約4.0mm
事前解析予測天端沈下量※	19.92mm	26.21mm

※計測位置における相対変位