

既設トンネルと鋭角に交わるトンネル交差部の施工

Construction of the tunnel which joints a existing tunnel in an acute angle

秋保 琢¹・古戸幸博²・福田和寛³・名内慎助⁴
Taku Akiho, Yukihiro Furuto, Kazuhiro Fukuda and Shinsuke Nauchi

¹正会員 工修 清水建設株式会社 北海道支店 土木部

(〒077-0225 北海道増毛郡増毛町南暑寒町9-105) E-mail: akiho@shimz.co.jp

²正会員 工修 清水建設株式会社 北陸支店 土木部

(〒949-1316新潟県西頸城郡能生町大字柱道字小出691-1) E-mail: furuto@shimz.co.jp

³正会員 工博 清水建設株式会社 土木事業本部 技術第二部

(〒105-8007東京都港区芝浦一丁目2-3) E-mail: k-fukuda@shimz.co.jp

⁴非会員 工修 北海道開発局 留萌開発建設部 留萌開発事務所

(〒077-0022留萌市堀川町二丁目83番地) E-mail: nauchi-s22aa@hkd.mlit.go.jp

Hikatadomari tunnel is a newly established tunnel for the national road replacement in mashike-chou hikata-domari district where the danger of large-scale rock falls is pointed out. This tunnel planned for the purpose of a radical solution of the disaster measures. The Sapporo side of the tunnel joins to the middle part of the existing Tengu tunnel at an acute angle. During the construction, the traffic in the existing tunnel must not be restricted because the tunnel is the main road of the district. This paper describes the design and construction on the intersection part of the tunnels under such difficult conditions.

Key Words : crossing tunnel, stability of excavation, FEM, ventilation, monitoring

1. はじめに

日方泊トンネルは、大規模岩盤崩落の危険性が指摘されている一般国道231号線の増毛町日方泊地区における国道付け替えの新設トンネルである。本路線は大半が日本海に面しており、特にこの地域は標高100~300mの山地の端に位置し、比高100m以上の急峻な海食崖を通過する急勾配・急カーブが多

い路線であり、このような区間で岩盤崩落の危険性が指摘されている。日方泊トンネルは防災対策の抜本的解決を目的として計画された道路トンネルで、留萌側は現国道と合流し、札幌側は既設の天狗トンネルの中間部に接合する。新設トンネル区間延長2,081m、完成後は既設天狗トンネルの一部を加えて全長2,900mの長大トンネルとなる。

トンネル掘削は、ほぼ中間地点の海岸部道路から

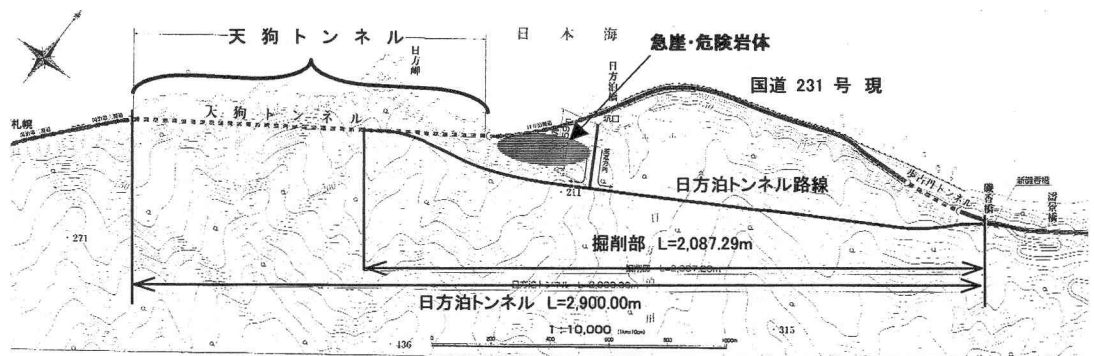


図-1 全体平面図

作業坑で本坑位置に至り、本坑交差部より留萌方、札幌方の2方向に本坑を掘削した。岩盤崩落の危険性に対する発破振動の影響を避けるため、掘削はすべて機械掘削とした。札幌側の既設天狗トンネル中間部における分岐合流部は既設トンネルと鋭角で交差する。一般国道231号線は同地区の基幹道路であり、天狗トンネルを全面通行止めとすることは出来ないため、天狗トンネルの交通を確保しながらこの交差部を施工する必要があった。

2. 地質概要

当該地域の地質は、新第三紀鮮新世の岩老溶岩火山角礫岩層で、トンネル区間に分布する岩種は安山岩と凝灰角礫岩であり、一部に軽石凝灰岩が見られる。トンネル交差部の岩盤状況は、既設天狗トンネルからのボーリング調査結果によれば、図-2に示すように、トンネル位置が安山岩溶岩と自破砕溶岩の境界付近にあり、既設トンネル上部にはゆるみと思われる多亀裂部が存在した。一軸強度は、安山

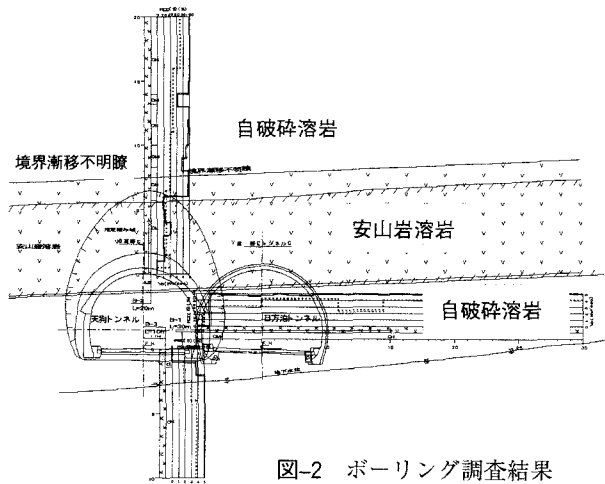


図-2 ボーリング調査結果

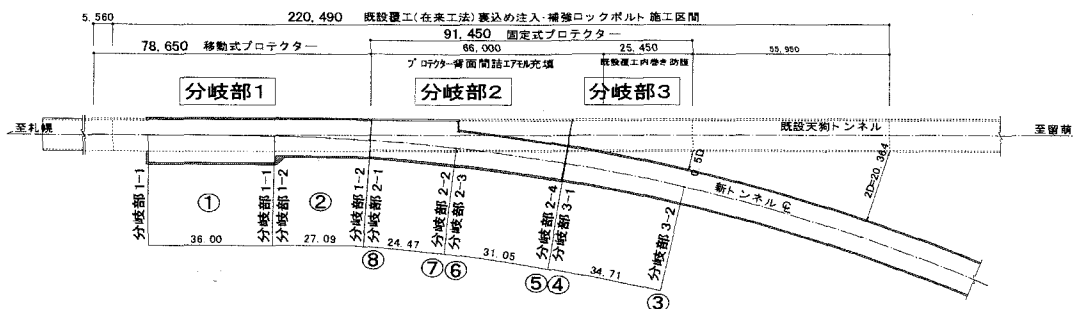


図-3 全体平面図

岩溶岩が 70MPa、自破砕溶岩が 25MPa 程度であり、安山岩溶岩は硬質であるが冷却節理が発達し、自破砕溶岩は塊状であるがやや軟質で、全体としては地山区分 CII ~ DI 程度と判断された。交差部の土被りは約 75m であった。

3. 交差部の施工

(1) 施工条件

一般国道 231 号線は札幌を起点として日本海側を経由して留萌市に至るオロロンラインとして親しまれる観光と物流の基幹ルートである。このため、既設天狗トンネルの昼間の全面通行止めは避けなければならない、交差部施工時の通行規制は基本的に片側交互通行として、片側通行規制期間を少しでも短縮する工夫が求められた。また、一般通行の安全を確保し、クリーンな環境を維持することが必須の条件となる。

既設天狗トンネルの交差部付近の健全性調査によれば、トンネル構造は在来工法によるもので、地山のゆるみと覆工背面の空隙がかなり存在することが明らかになった。交差部の掘削に先立って既設トンネルの補強工が必要と考えられた。

交差部は、図-3 に示すように、既設・新設トンネルが鋭角に交わりその先に非常駐車帯を併設する構造となっている。既設トンネルを拡幅する分岐部 1、既設・新設トンネルが合流して大断面トンネルとなる分岐部 2、既設・新設トンネルが近接する分岐部 3 と構造が 3 次元的に変化するため、交差部の支保構造と加背割、掘削順序を十分に検討し、掘削時の安定性を確認しておくことが重要である。

(2) 既設トンネルの補強と通行の防護

a) 既設トンネルの補強

交差部付近の既設トンネル周辺の地山条件、ならびに覆工コンクリートの健全性を把握するため、交差部近傍で表-1に示す事前調査を行い、既設トンネルの補強・補修について検討した。対象範囲は過去の類似事例も参考にし、既設トンネルが新設トンネル掘削に影響を与える可能性のある範囲として、トンネルの壁面離隔距離が $2D$ (D : トンネル掘削径) 以内となる位置から、拡幅断面(非常駐車帯)よりトンネル軸方向に $1D$ 離れた位置までとした。

調査の結果、覆工コンクリートは十分な強度を有しているが、浮き、剥離等の形跡はみられないものの、覆工ジョイントの止水板近傍に劣化部が確認されたため、特に状態の悪い箇所については覆工補修を行った。また、既設トンネル覆工背面に最大 1.5m 程度の空隙が確認されたため、対象区間全域においてエアモルタルによる裏込め注入を行った。さらに既設トンネル周囲の地山のゆるみを縫い付け、覆工と一体化を図るために、ロックボルト($l=6.0\text{m}$, @ $1.0\text{m} \times 1.0\text{m}$)を打設した。将来、拡幅掘削予定範囲については掘削時の障害にならないよう、掘削部分をFRPとした複合ボルトを採用した。

表-1 事前調査項目とその目的

調査項目	目的
コンクリート強度	健全性の確認
クラック発生状況	ブロック状に分断された箇所はないか 裏込め充填前の補修の要否判定
覆工表面調査	健全性の確認
背面空隙調査	空隙厚さの検測 ⇒裏込め充填量推定 既設覆工厚さの検測 空隙内裏込め注入方法 使用材料の選定(逸走対策)
地質調査ボーリング	掘削加背割り、安定性検討 ⇒FEM解析

b) 通行の防護

通行の防護は、一般車両の安全性、確実性を第一に考え、新旧トンネルの壁面離れが $0.5D$ 以下の範囲において、固定式の鋼製プロテクターを設置し、その外周をエアモルタルで充填した。ただし、作業空間の確保が困難な既設トンネル拡幅区間(分岐部1)については、移動式鋼製プロテクターを使用した。移動式プロテクターを用いた施工状況を図-4に示す。

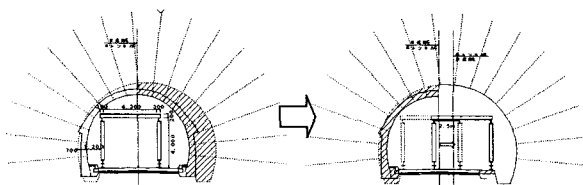


図-4 移動式プロテクターを用いた施工状況

(3) 交差部の支保構造と掘削時の安定性検討

交差部の支保構造は、このように3次元的に変化する断面に対しては標準支保パターンが適用できないことから、基本的には国土交通省の提唱した大断面支保パターンに準拠し、FEM解析によって掘削時の安定性を確認することとした。図-5、表-2に交差部の支保パターンを示す。

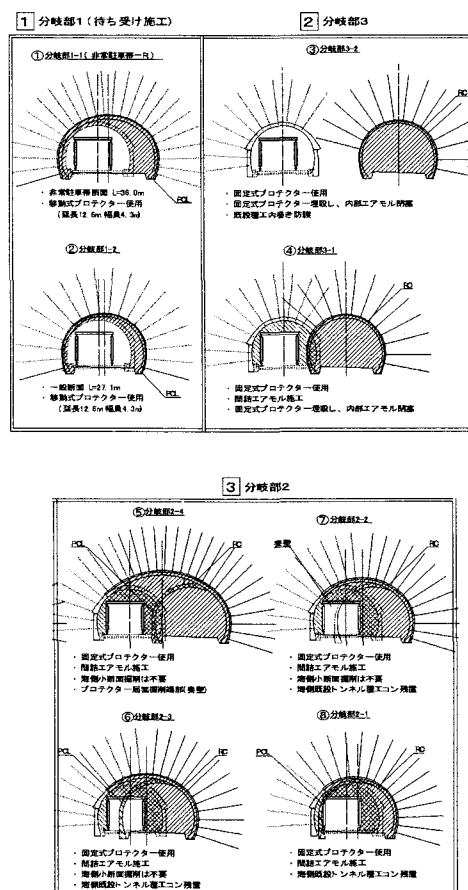
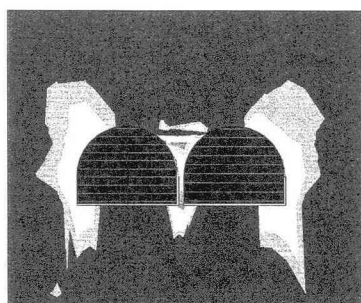


図-5 交差部各位置の支保パターン

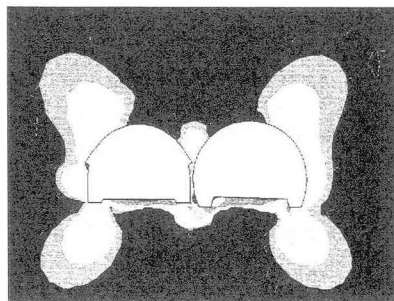
表-2 交差部の支保パターン

	分岐部 1	分岐部 2	分岐部 3
鋼製支保工	H-125@1.0 H-150@1.0(非常 駐車帯)	H-200@1.0 加背割毎に 分割	H-125@1.0
吹付けコンクリート	t=15cm	t=20cm	t=15cm
ロックボルト	L=6.0m@1.0	L=6.0m@1.0	L=6.0m@1.0
覆工コンクリート	t=40cm	t=40cm	t=30cm

交差部の施工に先立ち2次元・3次元のFEM解析によって支保工・補強工の安定性を検討すると共に、プロテクターの安全性、切羽の加背割の妥当性のチェックを行った。交差部は既設トンネルと新設トンネルが鋭角に交わる3次元構造となっているため、3次元FEMで掘削解析を行うことが望ましいが、計算容量等の制約でゆるみを考慮した支保構造の逐次掘削解析を3次元モデルで行うのは困難である。そこで、まず、2次元・3次元で素掘り状態の弾性解析を行い、応力分布状況を比較した。その結果、図-6に示すように、2次元解析結果が3次元解析よりも安全側の評価であることを確認した。



3次元弾性解析応力分布状況



2次元弾性解析応力分布状況

図-6 2次元・3次元解析結果比較

次に、電中研式非線形弾性2次元モデルを用いて、ゆるみを考慮した支保構造の逐次掘削解析を実施し、分岐部の支保工・補強工の検討を行った。図-7に一例として、掘削途中のトンネル周りの安全率分布を示す。最終的な掘削状態において、設定した支保パターンで、すべての位置においてゆるみはロックボルトで縫付けられており、鋼製支保工・吹付けコンクリートも健全性を保つことが確認できた。ただし、挙動の特徴としては、新規に掘削するトンネルで最初に掘削する加背の既設トンネルと反対側の壁面付近に打設するロックボルトにもっとも大きな応力変化が生じることが予測され、この部分の計測の増強と増しボルトの準備を計画した。

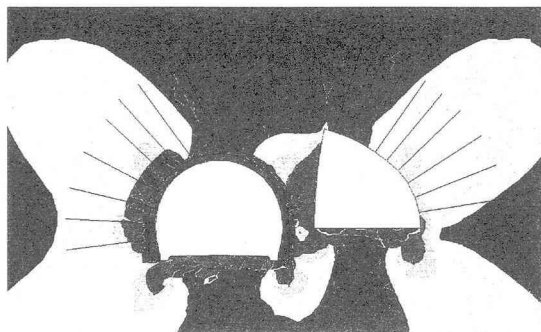


図-7 逐次掘削解析結果

(4) 交差部施工時の換気の検討

交差部の施工においては作業員の作業環境を考えるだけではなく、既設トンネルの利用者を含めた総合的な環境配慮が必要となる。

そこで、既設トンネルへの粉塵の拡散防止を含めた換気検討を行なった。既設トンネルと新設トンネルが接合し、貫通した場合も考慮し、坑道換気を含めた換気計算を行なったところ、1,481m³/min以上の換気設備が必要ことがわかった。

コントラファンのみでの換気を考えた場合、作業で発生する粉塵に関しては拡散希釈となるため、既設トンネルへ粉塵を拡散することになる。そこで、分岐部に2箇所の隔壁を設け、粉塵処理を効果的に行なうこととした。移動式プロテクターに設置する隔壁については設置・解体をスムーズに行なうことができるトンネルバルーンを使用した。本坑側に関しては車輛の出入りがあるため、開閉式の扉を設けた。

以上の条件で気流解析を行った結果、集塵機等の設備配置を図-8に示す配置モデルのようにすることで、移動式プロテクターの周りにエアカーテンを形

成することができ、作業場所である移動式プロテクター付近で発生した粉塵が既設トンネルに流入しないことがわかった。移動式プロテクター周辺の気流

解析結果を図-9に示す。新設トンネル側で発生した粉塵については、新設トンネル側に設置している2,000m³/min級集塵機により処理した。

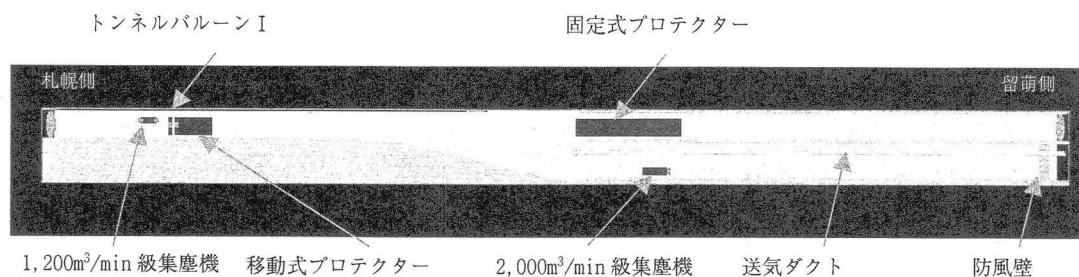
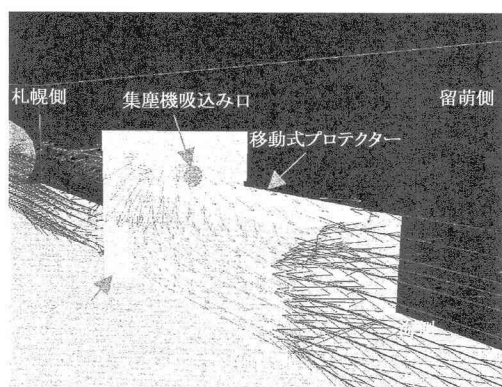
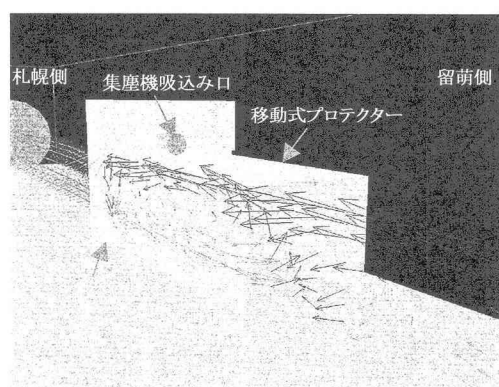


図-8 換気設備配置モデル



〈札幌側よりの風向の場合〉



〈留萌側よりの風向の場合〉

図-9 気流解析結果

4. 施工実績

(1) 施工順序と施工上の留意点

新設トンネルは、既設トンネルよりも掘削断面積が大きく、トンネル同士が鋭角に交差するため、近接・併設トンネル部、偏平断面トンネル部、拡幅断面トンネル部とトンネル構造が変化し、周辺地山には応力集中、緩みの発生が考えられ、切羽の安定が困難な状況も想定された。そこで、切羽の安定のため、加背を分割し、施工順序を施設トンネルから離れた部分から新設トンネルを掘ることとして、安全で効率的な施工を目指した。図-10に各断面での加

背割および施工手順を示す。

新設トンネルの上半を複数に分割して掘削する分岐部2については、既設トンネルから遠い側の断面を2間先行させ、隣接する加背がこれを追うように掘削を行った。この区間では鋼製支保工を組み立てても不安定な状態となるため、摩擦式ロックボルト（スウェレックスボルト）を使用して鋼製支保工を地山に固定した。

分岐部の施工を通じて、トンネルの変形は小さかったため、増しロックボルト等のさらなる補強は必要とされなかった。

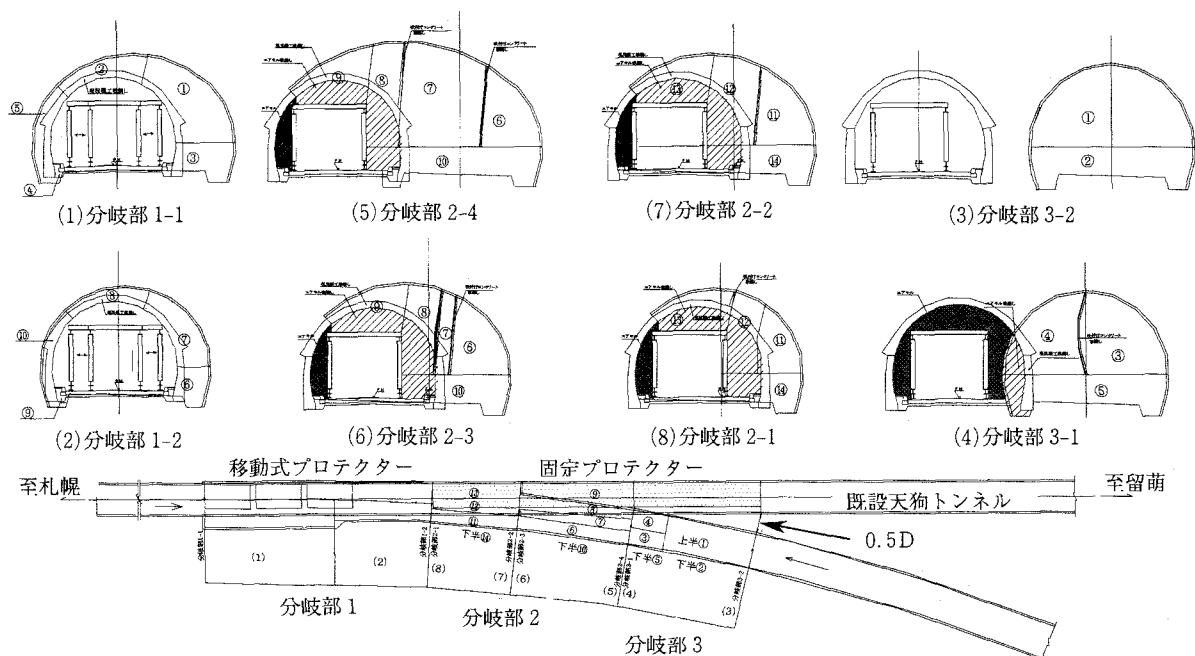


図-10 施工平面図

(2) 岩盤状況と計測結果

交差部では、断面変化に応じ7断面のB計測断面を設け、内空変位、地中変位、ロックボルト軸力、吹付コンクリート応力、支保工応力、既設覆工応力、プロテクター応力の変化を計測した。図-11に最も大断面となった、分岐部2-4断面の計測器配置を示す。

交差部の岩盤分類状況は、安山岩溶岩と自破碎溶岩の境界部を掘削しており、この境界が多少上下したが、トンネル天端には常に安山岩溶岩が出現し、この緩みが予想以上に小さかったことから、切羽は安定し、変位が非常に小さかった。

トンネル周囲の応力分布を見ると、掘削解析で示されたように、新設トンネルの既設側と反対側の側壁部で大きくなり、最初の掘削で打設したロックボルトに、その後の掘削に伴う応力変化のが重なり、大きな軸力が発生するものと予想された。ロックボルト軸力の計測結果を見ると、図-12に示すように、解析と同様な位置で大きな軸力が発生していることがわかる。ただし、計測値が解析値を大きく下回る結果となっており、地山の物性が解析で仮定した岩盤物性よりも変形にくいものであり、全体的に周辺地山が安定した状態のもと、掘削できたことがわかった。

凡例	項目	単位	数量
○	地中変位計	L=100mm変位	4
○	地中変位計	L=50mm変位	1
□	ロックボルト軸力計	L=50mm変位	7
■	鋼製支保工応力計	KM-100B	12
▲	吹付コンクリート応力計	吹付機-2E	5
●	プロテクター応力計	KM-100B	6
◎	通風計	BT-100B	1

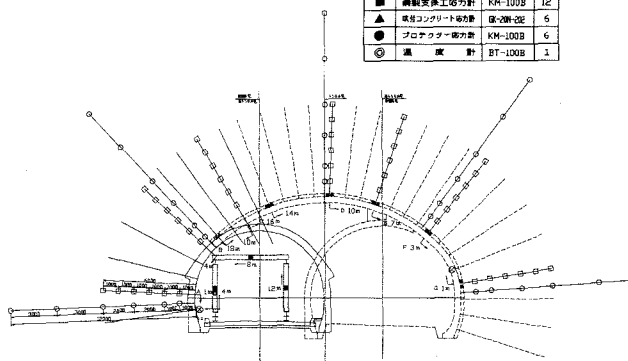


図-11 計測器配置図

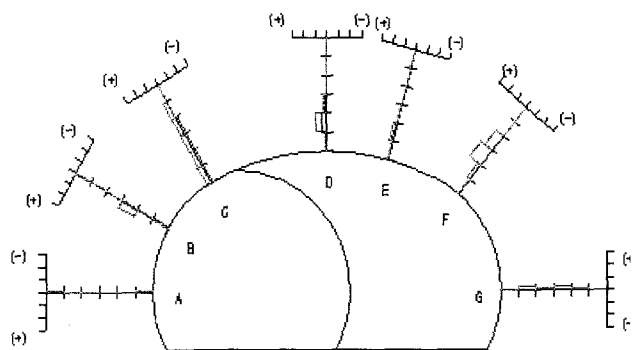


図-12 ロックボルト軸力計測結果