

硬岩自由断面掘削機によるトンネル施工時の 地山挙動と支保構造に関する検討

STUDY ON TUNNEL STABILITY AND SUPPORT SYSTEM EXCAVATED BY NEW MOBILE HARD ROCK TUNNELLER

岩野 政浩*・白川 賢志**・真下 秀明**・田村 壽夫**・宮本 義広***

Masahiro IWANO, Takashi SHIRAKAWA, Hideaki MASHIMO, Hisao TAMURA and Yoshihiro MIYAMOTO

Newly developed mobile tunneller (MM130R), incorporating both the power of hard rock excavation of the TBM and the mobility of the roadheader, has been firstly applied to the hard rock excavation of Takatoriyama tunnel project in Rokko mountain area. In this project, the study on the tunnel stability considering the spherical face effect has been carried out by numerical analysis using FEM and field measurement of loosen zone ahead of tunnel face using seismic prospecting. Then the rational support system has been proposed and its effectiveness has been validated by comprehensive observational method at in-situ. These results will be useful for the next tunnel projects in the near future.

Keywords : mechanical excavation , hard rock , field measurement , support system , numerical analysis

1. はじめに

硬岩地山におけるトンネル工事においては発破工法が主であったが、近年、地山を痛めたくないというNATM本来の概念、余掘り量の低減およびトンネル周辺環境に及ぼす影響や既設構造物への近接施工などの配慮から無発破工法の必要性が増加している。このようなニーズに対しては、自由断面掘削機による機械掘削工法が望ましく、今回硬岩用に開発されたローラーディスク型カッターを有する自由断面掘削機(MM130R:写真-1参照)を用いて、わが国初めてのトンネル掘削が阪神高速2号線高取山トンネル(北行)工事にて実施された。

高取山トンネルは、神戸市須磨区に位置する施工延長1,051mのトンネルで、起点側坑口より約510mは硬岩の山岳部、以奥の約541mは土被りが薄く地表に住宅等が密集する都市部で構成されている。山岳部の地質は六甲花崗岩が基岩であり、一軸圧縮強度が約200Mpa程度と想定され、すでに坑口付近には高強度の基岩が露頭している。また坑口付近は、民家が密集しており、隣接家屋は坑口より約40mの距離である。このような背景から、周辺環境に配慮して騒音や振動が少なく且つ効率的なトンネル掘削を目指し、本工事では硬岩用自由断面掘削機「モバイルMM-130R」(以下MM-130R)を山岳部ベンチカット工法の上半盤掘削に導入した。

本施工においては、MM130Rの切羽面が球形となり、地山を極力痛めない掘削が可能等の特質を活かすことで、切

* 正会員 Ph.D. 大成建設(株)土木設計第1部
** 正会員 大成・飛鳥建設共同企業体 高取山工区(北行)トンネル工事作業所
*** 阪神高速道路公団 神戸第1建設部

切羽の安定性が従来より向上し、また緩みの発生を最小限に抑えた掘削により標準パターンの支保を低減できるものと考えられた。本文では、まず実際の地山特性と施工手順を考慮した逐次掘削弾塑性有限要素解析を行い、球面切羽の安定性を検討した。次に原位置での切羽前方地山の弾性波速度による計測結果と解析結果の比較を基に、MM130Rによる機械掘削時の地山の緩み領域について考察を加えた。これらの成果を踏まえ、MM130Rによる掘削に対する効率的施工を行うための標準パターンの支保を低減した1次支保工を提案し、施工中の坑内切羽観察による地山評価と計測に基づく地山変形挙動とを照らし併せてその有効性を原位置で検証した。その結果、MM130Rの掘削においては、切羽の安定性が高く、従来のトンネルより地山の緩みも少なく1次支保工の低減が可能であることが確認された。本検討で得られた実施工に基づく知見は、今後の山岳トンネルの合理的設計・施工に非常に有用であると考えられる。

2. 球面切羽効果の解析的検討

MM130Rによる掘削においては、切羽形状が球面形となるため従来の平面形切羽より安定性が高く、地山の緩みを抑えた掘削が可能であることが予期された。そのため、MM130Rによる施工を反映した逐次弾塑性有限要素解析を実施し、球面切羽効果の確認を試みた。この場合、切羽面が球面形になる場合と、比較の為に平面形になる場合の解析を実施した。

2.1 解析条件

図-1に軸対象の解析モデルを示す。回転軸をZ軸とし、解析領域はZ軸方向に最終切羽面から3D(D:最大掘削径、1D=8.0m)、Y軸方向にトンネル天端から3Dを設定した。地山は表-1に示すような高取山トンネルにおける標準的地山特性を想定し、土被り厚は50mの均一地盤とした。

支保工としては吹付コンクリートのみを考慮して厚さ20cmのシェル要素としてモデル化し、トンネル切羽先端面から吹付コンクリート施工位置までは両解析で同じになるように設定した。

2.2 吹付コンクリートの強度発現モデル

吹付コンクリートは、打設後1日で $f_c(t)=100\text{kgf/cm}^2$ となる早強コンクリート仕様とし、各時間での強度及びヤング率はコンクリート標準示方書に従い式(1),(2)で算定した。

$$f_c(t)=t/(a+b \cdot t) f_c(91) \quad (1)$$

$$E_e(t)=\psi(t) \times 1.5 \times 10^4 \sqrt{f_c(t)} \quad (2)$$

ここで $f_c(t)$ は材令t日コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)、 $a=4.5$ 、

$b=0.95$ 、 $E_e(t)$ は材令t日における有効ヤング係数(kgf/cm²)、 $\psi(t)$ は材令3日までは0.73、材令5日以降は1.0とした。

2.3 解析手順

逐次解析は、2方/日の施工を考慮して図-2に示したように1方2m掘削と切羽先端面の後方4~6mまでの2mの吹付を同一ステージで行う事とし、1ステージの所要時間は12時間とした。吹付を付加したステージでの吹付のヤング率は材令4時間の値を使用し、次のステージでは材令16時間と順に変化させる事により、物性の時間変化を考慮した。

2.4 解析結果

図-3、図-5に切羽面を球面形で掘削した場合の結果を、図-4、図-6に平面形で掘削した場合の結果を示す。ここで、

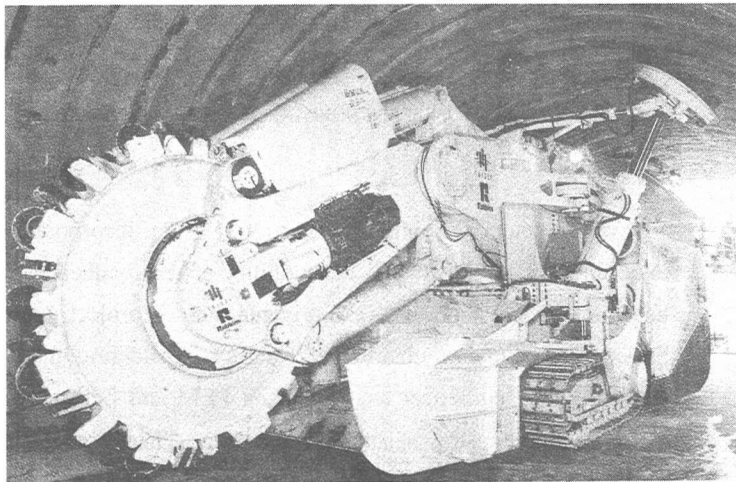


写真-1 硬岩自由断面掘削機(MM130R)

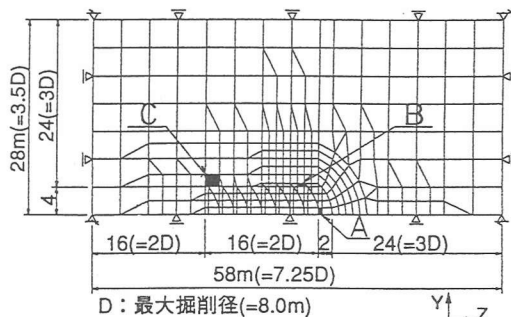


図-1 解析モデル図(Z軸=回転軸)

表-1 解析用地山物性値

変形係数 (tf/m ²)	粘着力 (tf/m ²)	内部摩擦角 (°)	ポアソン比	単位重量 (tf/m ³)
25,000	30.0	33.0	0.35	2.3

地山の破壊安全率算定にはDruker-Pragerの破壊基準を用いる。

切羽面の押し変位量は、球面形の場合が最大で18mmに対して平面形で22mm、天端沈下は、球面形が16mmに対して平面形で18mmの変位を生じている。また、一つの目安として安全率 $F_s=1.4$ 以下の領域を地山の不安定領域として考えた場合、切羽面では球面形で約90cmに対して平面形で約220cm、天端では球面形で約60cmに対して平面形で約80cmとなる。この結果より、球面形掘削の方が切羽面の安定性が良く、天端沈下を抑制する効果があると言える。これは、切羽面の球面形状による地山の π - τ 効果によるものと考えられる。

図-7に天端沈下量を平面(素掘)の天端最大沈下量($U_0=22\text{mm}$)で正規化した特性曲線を示す。ここで、凡例の「平面」、「球面」は切羽の掘削形状を、「吹付」、「素掘」は吹付コンクリートの支保工を行う場合と行わない場合を指す。切羽形状の相違に着目すると、素掘りの場合の最終変形量は、球面も平面もほとんど同じであるが、吹付を行う場合では最終沈下量は両者で10%程度違いが出てくる。これは、切羽が到達するまでの先行変位が平面の場合は30%であるのに対して、球面では25%となることからわかるように切羽形状による先行変位抑制効果と、その結果として早期に吹付コンクリートの支保効果が発揮できる事によるものと考えられる。

図-1に示したトンネル近傍の着目点における、掘削に伴う応力状態の変化を応力経路図として図-8に示す。A、B点の経路が素掘状態の、C点の経路が吹付後の地山の応力状態を表している。この図から素掘状態の切羽近傍での応力変化は、吹付け背面の応力変化より大きいものの、最終的にも安全率1.4を有しており切羽は安定であり、またトンネル周辺には塑性領域が発生しない様子も理解できる。

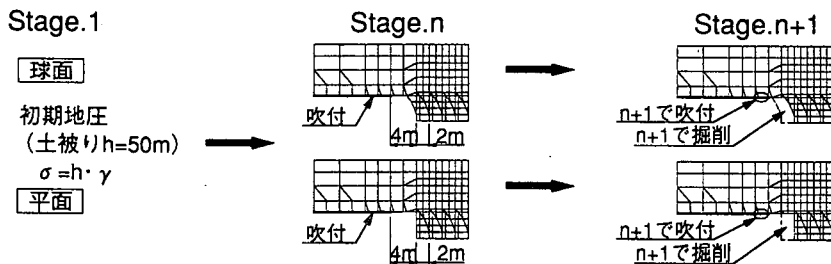


図-2 解析手順図

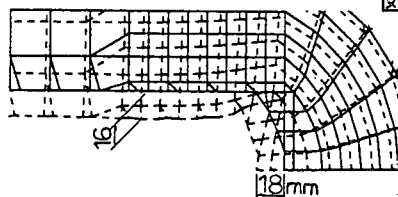


図-3 球面形掘削時の切羽近傍変位図

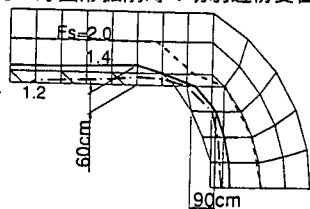


図-5 球面形掘削時の切羽近傍安全率分布

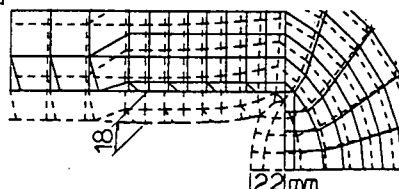


図-4 平面形掘削時の切羽近傍変位図

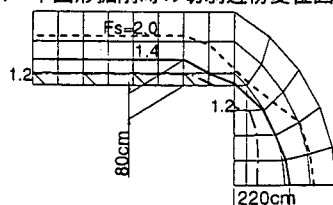


図-6 平面形掘削時の切羽近傍安全率分布

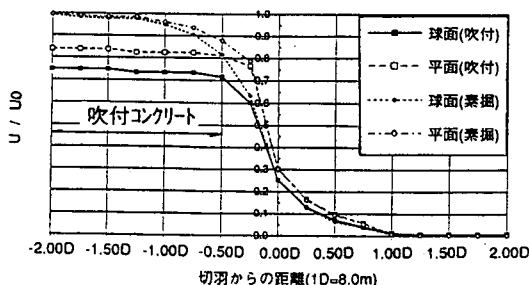


図-7 地山特性曲線

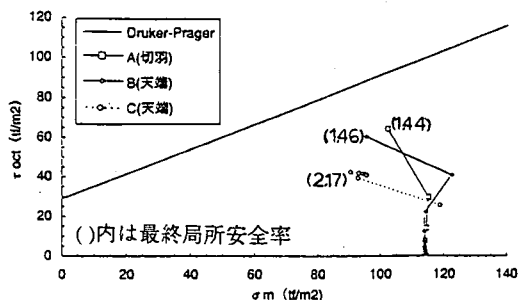


図-8 応力経路図

3. 球面切羽前方地山のゆるみ計測

MM130Rによる球面形状の切羽においては、平面形状の切羽に比べて、地山の緩みが抑制されるという解析結果を原位置にて確認するため、高取山トンネル施工時に切羽前方地山の地山特性変化域(以後ゆるみ領域)を弾性波速度という一つの指標を用いて計測することを試みた。

3.1 切羽前方速度検層

切羽前方地山のゆるみ領域を把握する事を目的として、弾性波(P波)の速度分布を求めるために速度検層を実施した。図-9に速度検層測定概念図を示す。調査は切羽前方に水平に掘削した3孔(各深度12m)を使用して1回目の測定を行い、切羽を3m前進させた後に2回目の測定を前出の3孔(各深度9m)で行った。測定に用いた孔中受振器には、上下1成分、水平2成分の直交する3成分の地震計が内蔵されている。弾性波の起振方法は、孔口付近をセツハマにより切羽面に対して垂直方向に強打する方法を用い、測定間隔は50cmとして行った。

3.2 計測結果

図-10に第1孔の計測結果例を示し、また走時曲線の速度変化点までをゆるみ領域として評価した計測結果一覧表を表-2に示す。この結果より、地山の弾性波速度は3,000~3,800m/sの範囲で分布し、ほぼ均質な岩盤であったと考えられる。また明瞭な速度変化点までの距離は切羽から約1.5mであり、この領域では母岩速度の1/5程度の450~810m/sとややばらついた結果となっているものの、この範囲がゆるみ領域であると考えられる。

3.3 計測結果の考察

切羽前方における弾性波探査結果より求められた速度低下域は深度約1.5mであり、これは同様な地山の通常のNATM工法における平面切羽の場合の約半分であると考えられる。また、解析結果と合わせて考えれば、この原因は切羽の球面形状効果により、切羽前方地山内の応力分布が $\sigma_{\theta} = \sigma_r$ になり、また球面切羽においては平面切羽近傍に発生する引張り領域を事前に掘削しているため、地山内の潜在亀裂の開口に伴う地山特性変化域(ゆるみ領域)が小さくなったためと考えられる。

4. 一次支保構造の検討

4.1 支保検討の目的

MM130Rを使用した場合の施工上の特色(1. 高い切羽安定性 2. 地山の緩み領域の抑制)を考慮すると、原設計において設定されている標準支保パターン(DI, CII) 区間において、一次支保工の軽減の可能性が解析及び計測結果より示唆された。そのため、本検討においては、標準支保パターンに含まれる鋼製支保工を取り除き、それに代わる耐力を有する効率的支保構造を原位置試験によって決定し確認することを試みた。

4.2 支保検討区間の設定

掘削に伴うトンネルの変形と切羽位置との関係は地山特性曲線で表現され、地山が弾性的に変形する場合(支保が有効に作用した場合)には切羽がトンネル断面の約2倍離れたとトンネルの変形は一般的に収束するものとされている。地山特性曲線については、地山の塑性化のしやすさや時間依存特性及び支保の施工時期等によって異なることは既往の計測例からも指摘されているが、今回一つの支保パターンに対する検討区間は、図-7に示す地山特性曲線を参考にトンネル径(本トンネル掘削径11.2m)の約2倍の20mを一つの目安として設定し、基本的にトンネルの

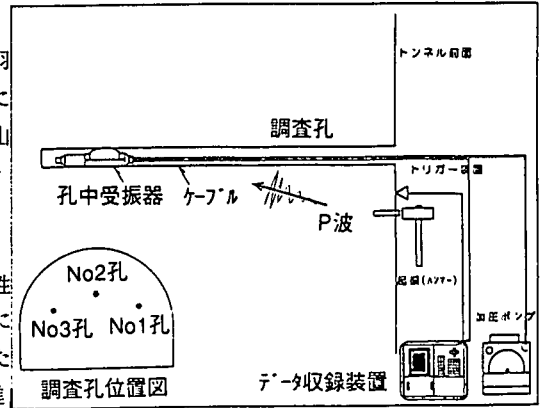


図-9 速度検層測定概念図

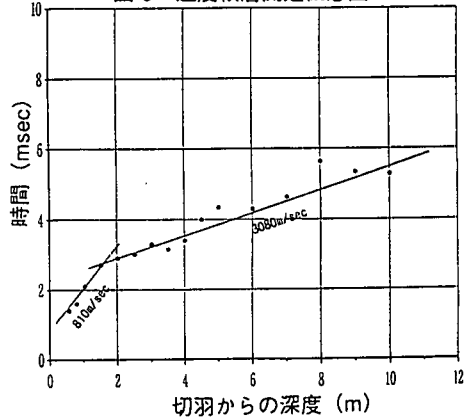


図-10 走時曲線(No.1孔1回目)

表-2 計測結果一覧表

		1回目	2回目
No1孔	ゆるみ領域速度(m/s)	810	810
	地山速度(m/s)	3,080	3,530
	ゆるみ領域深度(m)	1.5	1.5
No2孔	ゆるみ領域速度(m/s)	780	800
	地山速度(m/s)	3,550	3,530
	ゆるみ領域深度(m)	2.0	1.5
No3孔	ゆるみ領域速度(m/s)	450	600
	地山速度(m/s)	3,800	3,800
	ゆるみ領域深度(m)	1.5	1.5

変形量（内空変位、天端沈下）の絶対値及び収束の速度に着目して、一次支保の有効性を議論するものとした。図-11に示すように北行線坑口より33m進んだNO.141+1.8よりMM130Rによる掘削は開始され、NO.144+15.2までの73.4mを支保検討区間とした。支保検討は次に示す3パターンの一次支保構造を設定し、坑内切羽観察と各種計測を実施し、地山状態の評価とトンネルの変形、支保の応力状態等の相関を中心として支保軽減の妥当性について考察を加えた。

- (a) パターン 1 (CII-M1)
支保検討区間 : No.141+1.8～No.143+1.0
区間長 : 39.2m
一次支保構造 : 早強吹付けコンクリート20cm、ロックボルト(l=3m、D25、周方向1.5m、軸方向1.2m)
- (b) パターン 2 (CII-M2)
支保検討区間 : No.143+1.0～No.144+0.2
区間長 : 19.2m
一次支保構造 : 早強吹付けコンクリート15cm、ロックボルト(l=3m、D25、周方向1.5m、軸方向1.2m)
- (c) パターン 3 (CII-M3)
支保検討区間 : No.144+0.2～No.144+15.2
区間長 : 15m
一次支保構造 : 早強吹付けコンクリート15cm、ロックボルト(l=3m、D25、周方向2.7m、軸方向1.5m)

4.3 支保検討区間における計測内容

本支保検討における計測項目は、1) 施工の安全性の確保、2) 地山の安定性の確保、3) 設定支保パターンの妥当性の検討といった内容を考慮し、NATM工法において施工されるトンネルで一般に実施されている計測工A（坑内切羽観察、内空変位計測、天端沈下計測）を基本的に評価の第1に考え、検討区間内では計測断面の数を一般部より増やして詳細な計測を実施した。

さらに各検討区間内の一つの計測断面を設定して、簡易計測工B（ロックボルト軸力測定、地中変位測定、吹き付けコンクリート応力測定）を実施し、地山内変位、支保工（ロックボルト、吹き付けコンクリート）に作用している応力を測定した。

4.4 坑内地山観察結果と地山総合評価

本節では、北行坑口から約106m間（No.139+9.0～No.144+15.4）の地山状況の実績について報告する。これらの報告は毎日実施された坑内地山地質観察結果（日報）のデータをもとにしている。まずは、上述区間の坑内観察調査表に記載された地山情報だけから本検討区間の地山状況を報告し、次に観察表に示される地山情報をいかに視覚的にあるいは客観的に支保検討に利用しやすい地山情報とするかの方法論について示すものとする。

(a) 坑内切羽観察図からの地山情報

切羽で見る地質・地山状況がどのように推移したかを把握するために、まず坑内観察調査表の切羽観察図を分析した。これによると、不連続面の分布はランダムで規則性がなく、No.140+6.8当りから奥方向の切羽には不連続面1枚が連続的にあらわれているのが確認された。すなわち、その不連続面は、偶然にも走向がほぼトンネル軸方向で西側に急傾斜する形態で切羽の中央やや右（西）側に分布していることが理解され、連続性も良くまた断層破碎帯のように20～30cm幅の粘土化帯を伴っている

測点	No.145+10.4	No.145+00.0	No.144+15.4	No.144+10.0	No.144+00.0	No.144-00.2	No.143+9.0	No.143+0.0	掘削面1 No.142+10.0	掘削面2 No.143+0.0	掘削面3 No.144+00.2	掘削面4 No.141+1.8	掘削面5 No.141+0.0	掘削面6 No.141+1.0	掘削面7 No.141+1.8	掘削面8 No.141+1.8	掘削面9 No.141+1.8	掘削面10 No.141+1.8	掘削面11 No.141+1.8	掘削面12 No.141+1.8	掘削面13 No.141+1.8	掘削面14 No.141+1.8	掘削面15 No.141+1.8	掘削面16 No.141+1.8	掘削面17 No.141+1.8	掘削面18 No.141+1.8	掘削面19 No.141+1.8	掘削面20 No.141+1.8	掘削面21 No.141+1.8	掘削面22 No.141+1.8	掘削面23 No.141+1.8	掘削面24 No.141+1.8	掘削面25 No.141+1.8	掘削面26 No.141+1.8	掘削面27 No.141+1.8	掘削面28 No.141+1.8	掘削面29 No.141+1.8	掘削面30 No.141+1.8	掘削面31 No.141+1.8	掘削面32 No.141+1.8	掘削面33 No.141+1.8	掘削面34 No.141+1.8	掘削面35 No.141+1.8	掘削面36 No.141+1.8	掘削面37 No.141+1.8	掘削面38 No.141+1.8	掘削面39 No.141+1.8	掘削面40 No.141+1.8	掘削面41 No.141+1.8	掘削面42 No.141+1.8	掘削面43 No.141+1.8	掘削面44 No.141+1.8	掘削面45 No.141+1.8	掘削面46 No.141+1.8	掘削面47 No.141+1.8	掘削面48 No.141+1.8	掘削面49 No.141+1.8	掘削面50 No.141+1.8	掘削面51 No.141+1.8	掘削面52 No.141+1.8	掘削面53 No.141+1.8	掘削面54 No.141+1.8	掘削面55 No.141+1.8	掘削面56 No.141+1.8	掘削面57 No.141+1.8	掘削面58 No.141+1.8	掘削面59 No.141+1.8	掘削面60 No.141+1.8	掘削面61 No.141+1.8	掘削面62 No.141+1.8	掘削面63 No.141+1.8	掘削面64 No.141+1.8	掘削面65 No.141+1.8	掘削面66 No.141+1.8	掘削面67 No.141+1.8	掘削面68 No.141+1.8	掘削面69 No.141+1.8	掘削面70 No.141+1.8	掘削面71 No.141+1.8	掘削面72 No.141+1.8	掘削面73 No.141+1.8	掘削面74 No.141+1.8	掘削面75 No.141+1.8	掘削面76 No.141+1.8	掘削面77 No.141+1.8	掘削面78 No.141+1.8	掘削面79 No.141+1.8	掘削面80 No.141+1.8	掘削面81 No.141+1.8	掘削面82 No.141+1.8	掘削面83 No.141+1.8	掘削面84 No.141+1.8	掘削面85 No.141+1.8	掘削面86 No.141+1.8	掘削面87 No.141+1.8	掘削面88 No.141+1.8	掘削面89 No.141+1.8	掘削面90 No.141+1.8	掘削面91 No.141+1.8	掘削面92 No.141+1.8	掘削面93 No.141+1.8	掘削面94 No.141+1.8	掘削面95 No.141+1.8	掘削面96 No.141+1.8	掘削面97 No.141+1.8	掘削面98 No.141+1.8	掘削面99 No.141+1.8	掘削面100 No.141+1.8	掘削面101 No.141+1.8	掘削面102 No.141+1.8	掘削面103 No.141+1.8	掘削面104 No.141+1.8	掘削面105 No.141+1.8	掘削面106 No.141+1.8	掘削面107 No.141+1.8	掘削面108 No.141+1.8	掘削面109 No.141+1.8	掘削面110 No.141+1.8	掘削面111 No.141+1.8	掘削面112 No.141+1.8	掘削面113 No.141+1.8	掘削面114 No.141+1.8	掘削面115 No.141+1.8	掘削面116 No.141+1.8	掘削面117 No.141+1.8	掘削面118 No.141+1.8	掘削面119 No.141+1.8	掘削面120 No.141+1.8	掘削面121 No.141+1.8	掘削面122 No.141+1.8	掘削面123 No.141+1.8	掘削面124 No.141+1.8	掘削面125 No.141+1.8	掘削面126 No.141+1.8	掘削面127 No.141+1.8	掘削面128 No.141+1.8	掘削面129 No.141+1.8	掘削面130 No.141+1.8	掘削面131 No.141+1.8	掘削面132 No.141+1.8	掘削面133 No.141+1.8	掘削面134 No.141+1.8	掘削面135 No.141+1.8	掘削面136 No.141+1.8	掘削面137 No.141+1.8	掘削面138 No.141+1.8	掘削面139 No.141+1.8	掘削面140 No.141+1.8	掘削面141 No.141+1.8	掘削面142 No.141+1.8	掘削面143 No.141+1.8	掘削面144 No.141+1.8	掘削面145 No.141+1.8	掘削面146 No.141+1.8	掘削面147 No.141+1.8	掘削面148 No.141+1.8	掘削面149 No.141+1.8	掘削面150 No.141+1.8	掘削面151 No.141+1.8	掘削面152 No.141+1.8	掘削面153 No.141+1.8	掘削面154 No.141+1.8	掘削面155 No.141+1.8	掘削面156 No.141+1.8	掘削面157 No.141+1.8	掘削面158 No.141+1.8	掘削面159 No.141+1.8	掘削面160 No.141+1.8	掘削面161 No.141+1.8	掘削面162 No.141+1.8	掘削面163 No.141+1.8	掘削面164 No.141+1.8	掘削面165 No.141+1.8	掘削面166 No.141+1.8	掘削面167 No.141+1.8	掘削面168 No.141+1.8	掘削面169 No.141+1.8	掘削面170 No.141+1.8	掘削面171 No.141+1.8	掘削面172 No.141+1.8	掘削面173 No.141+1.8	掘削面174 No.141+1.8	掘削面175 No.141+1.8	掘削面176 No.141+1.8	掘削面177 No.141+1.8	掘削面178 No.141+1.8	掘削面179 No.141+1.8	掘削面180 No.141+1.8	掘削面181 No.141+1.8	掘削面182 No.141+1.8	掘削面183 No.141+1.8	掘削面184 No.141+1.8	掘削面185 No.141+1.8	掘削面186 No.141+1.8	掘削面187 No.141+1.8	掘削面188 No.141+1.8	掘削面189 No.141+1.8	掘削面190 No.141+1.8	掘削面191 No.141+1.8	掘削面192 No.141+1.8	掘削面193 No.141+1.8	掘削面194 No.141+1.8	掘削面195 No.141+1.8	掘削面196 No.141+1.8	掘削面197 No.141+1.8	掘削面198 No.141+1.8	掘削面199 No.141+1.8	掘削面200 No.141+1.8	掘削面201 No.141+1.8	掘削面202 No.141+1.8	掘削面203 No.141+1.8	掘削面204 No.141+1.8	掘削面205 No.141+1.8	掘削面206 No.141+1.8	掘削面207 No.141+1.8	掘削面208 No.141+1.8	掘削面209 No.141+1.8	掘削面210 No.141+1.8	掘削面211 No.141+1.8	掘削面212 No.141+1.8	掘削面213 No.141+1.8	掘削面214 No.141+1.8	掘削面215 No.141+1.8	掘削面216 No.141+1.8	掘削面217 No.141+1.8	掘削面218 No.141+1.8	掘削面219 No.141+1.8	掘削面220 No.141+1.8	掘削面221 No.141+1.8	掘削面222 No.141+1.8	掘削面223 No.141+1.8	掘削面224 No.141+1.8	掘削面225 No.141+1.8	掘削面226 No.141+1.8	掘削面227 No.141+1.8	掘削面228 No.141+1.8	掘削面229 No.141+1.8	掘削面230 No.141+1.8	掘削面231 No.141+1.8	掘削面232 No.141+1.8	掘削面233 No.141+1.8	掘削面234 No.141+1.8	掘削面235 No.141+1.8	掘削面236 No.141+1.8	掘削面237 No.141+1.8	掘削面238 No.141+1.8	掘削面239 No.141+1.8	掘削面240 No.141+1.8	掘削面241 No.141+1.8	掘削面242 No.141+1.8	掘削面243 No.141+1.8	掘削面244 No.141+1.8	掘削面245 No.141+1.8	掘削面246 No.141+1.8	掘削面247 No.141+1.8	掘削面248 No.141+1.8	掘削面249 No.141+1.8	掘削面250 No.141+1.8	掘削面251 No.141+1.8	掘削面252 No.141+1.8	掘削面253 No.141+1.8	掘削面254 No.141+1.8	掘削面255 No.141+1.8	掘削面256 No.141+1.8	掘削面257 No.141+1.8	掘削面258 No.141+1.8	掘削面259 No.141+1.8	掘削面260 No.141+1.8	掘削面261 No.141+1.8	掘削面262 No.141+1.8	掘削面263 No.141+1.8	掘削面264 No.141+1.8	掘削面265 No.141+1.8	掘削面266 No.141+1.8	掘削面267 No.141+1.8	掘削面268 No.141+1.8	掘削面269 No.141+1.8	掘削面270 No.141+1.8	掘削面271 No.141+1.8	掘削面272 No.141+1.8	掘削面273 No.141+1.8	掘削面274 No.141+1.8	掘削面275 No.141+1.8	掘削面276 No.141+1.8	掘削面277 No.141+1.8	掘削面278 No.141+1.8	掘削面279 No.141+1.8	掘削面280 No.141+1.8	掘削面281 No.141+1.8	掘削面282 No.141+1.8	掘削面283 No.141+1.8	掘削面284 No.141+1.8	掘削面285 No.141+1.8	掘削面286 No.141+1.8	掘削面287 No.141+1.8	掘削面288 No.141+1.8	掘削面289 No.141+1.8	掘削面290 No.141+1.8	掘削面291 No.141+1.8	掘削面292 No.141+1.8	掘削面293 No.141+1.8	掘削面294 No.141+1.8	掘削面295 No.141+1.8	掘削面296 No.141+1.8	掘削面297 No.141+1.8	掘削面298 No.141+1.8	掘削面299 No.141+1.8	掘削面300 No.141+1.8	掘削面301 No.141+1.8	掘削面302 No.141+1.8	掘削面303 No.141+1.8	掘削面304 No.141+1.8	掘削面305 No.141+1.8	掘削面306 No.141+1.8	掘削面307 No.141+1.8	掘削面308 No.141+1.8	掘削面309 No.141+1.8	掘削面310 No.141+1.8	掘削面311 No.141+1.8	掘削面312 No.141+1.8	掘削面313 No.141+1.8	掘削面314 No.141+1.8	掘削面315 No.141+1.8	掘削面316 No.141+1.8	掘削面317 No.141+1.8	掘削面318 No.141+1.8	掘削面319 No.141+1.8	掘削面320 No.141+1.8	掘削面321 No.141+1.8	掘削面322 No.141+1.8	掘削面323 No.141+1.8	掘削面324 No.141+1.8	掘削面325 No.141+1.8	掘削面326 No.141+1.8	掘削面327 No.141+1.8	掘削面328 No.141+1.8	掘削面329 No.141+1.8	掘削面330 No.141+1.8	掘削面331 No.141+1.8	掘削面332 No.141+1.8	掘削面333 No.141+1.8	掘削面334 No.141+1.8	掘削面335 No.141+1.8	掘削面336 No.141+1.8	掘削面337 No.141+1.8	掘削面338 No.141+1.8	掘削面339 No.141+1.8	掘削面340 No.141+1.8	掘削面341 No.141+1.8	掘削面342 No.141+1.8	掘削面343 No.141+1.8	掘削面344 No.141+1.8	掘削面345 No.141+1.8	掘削面346 No.141+1.8	掘削面347 No.141+1.8	掘削面348 No.141+1.8	掘削面349 No.141+1.8	掘削面350 No.141+1.8	掘削面351 No.141+1.8	掘削面352 No.141+1.8	掘削面353 No.141+1.8	掘削面354 No.141+1.8	掘削面355 No.141+1.8	掘削面356 No.141+1.8	掘削面357 No.141+1.8	掘削面358 No.141+1.8	掘削面359 No.141+1.8	掘削面360 No.141+1.8	掘削面361 No.141+1.8	掘削面362 No.141+1.8	掘削面363 No.141+1.8	掘削面364 No.141+1.8	掘削面365 No.141+1.8	掘削面366 No.141+1.8	掘削面367 No.141+1.8	掘削面368 No.141+1.8	掘削面369 No.141+1.8	掘削面370 No.141+1.8	掘削面371 No.141+1.8	掘削面372 No.141+1.8	掘削面373 No.141+1.8	掘削面374 No.141+1.8	掘削面375 No.141+1.8	掘削面376 No.141+1.8	掘削面377 No.141+1.8	掘削面378 No.141+1.8	掘削面379 No.141+1.8	掘削面380 No.141+1.8	掘削面381 No.141+1.8	掘削面382 No.141+1.8	掘削面383 No.141+1.8	掘削面384 No.141+1.8	掘削面385 No.141+1.8	掘削面386 No.141+1.8	掘削面387 No.141+1.8	掘削面388 No.141+1.8	掘削面389 No.141+1.8	掘削面390 No.141+1.8	掘削面391 No.141+1.8	掘削面392 No.141+1.8	掘削面393 No.141+1.8	掘削面394 No.141+1.8	掘削面395 No.141+1.8	掘削面396 No.141+1.8	掘削面397 No.141+1.8	掘削面398 No.141+1.8	掘削面399 No.141+1.8	掘削面400 No.141+1.8	掘削面401 No.141+1.8	掘削面402 No.141+1.8	掘削面403 No.141+1.8	掘削面404 No.141+1.8	掘削面405 No.141+1.8	掘削面406 No.141+1.8	掘削面407 No.141+1.8	掘削面408 No.141+1.8	掘削面409 No.141+1.8	掘削面410 No.141+1.8	掘削面411 No.141+1.8	掘削面412 No.141+1.8	掘削面413 No.141+1.8	掘削面414 No.141+1.8	掘削面415 No.141+1.8	掘削面416 No.141+1.8	掘削面417 No.141+1.8	掘削面418 No.141+1.8	掘削面419 No.141+1.8	掘削面420 No.141+1.8	掘削面421 No.141+1.8	掘削面422 No.141+1.8	掘削面423 No.141+1.8	掘削面424 No.141+1.8	掘削面425 No.141+1.8	掘削面426 No.141+1.8	掘削面427 No.141+1.8	掘削面428 No.141+1.8	掘削面429 No.141+1.8	掘削面430 No.141+1.8	掘削面431 No.141+1.8	掘削面432 No.141+1.8	掘削面433 No.141+1.8	掘削面434 No.141+1.8	掘削面435 No.141+1.8	掘削面436 No.141+1.8	掘削面437 No.141+1.8	掘削面438 No.141+1.8	掘削面439 No.141+1.8	掘削面440 No.141+1.8	掘削面441 No.141+1.8	掘削面442 No.141+1.8	掘削面443 No.141+1.8	掘削面444 No.141+1.8	掘削面445 No.141+1.8	掘削面446 No.141+1.8	掘削面447 No.141+1.8	掘削面448 No.141+1.8	掘削面449 No.141+1.8	掘削面450 No.141+1.8	掘削面451 No.141+1.8	掘削面452 No.141+1.8	掘削面453 No.141+1.8	掘削面454 No.141+1.8	掘削面455 No.141+1.8	掘削面456 No.141+1.8	掘削面457 No.141+1.8	掘削面458 No.141+1.8	掘削面459 No.141+1.8	掘削面460 No.141+1.8	掘削面461 No.141+1.8	掘削面462 No.141+1.8	掘削面463 No.141+1.8	掘削面464 No.141+1.8	掘削面465 No.141+1.8	掘削面466 No.141+1.8	掘削面467 No.141+1.8	掘削面468 No.141+1.8	掘削面469 No.141+1.8	掘削面470 No.141+1.8	掘削面471 No.141+1.8	掘削面472 No.141+1.8	掘削面473 No.141+1.8	掘削面474 No.141+1.8	掘削面475 No.141+1.8	掘削面476 No.141+1.8	掘削面477 No.141+1.8	掘削面478 No.141+1.8	掘削面479 No.141+1.8	掘削面480 No.141+1.8	掘削面481 No.141+1.8	掘削面482 No.141+1.8	掘削面483 No.141+1.8	掘削面484 No.141+1.8	掘削面485 No.141+1.8	掘削面486 No.141+1.8	掘削面487 No.141+1.8	掘削面488 No.141+1.8	掘削面489 No.141+1.8	掘削面490 No.141+1.8	掘削面491 No.141+1.8	掘削面492 No.141+1.8	掘削面493 No.141+1.8	掘削面4
----	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------	------------	------------	---------------------	--------------------	---------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	------

図-11 支保検討区間と計測断面

た。しかし、連続性の良い不連続面は上述以外は観測されず、ランダムに割れ目が分布しているだけで、トンネルの天端や肩部の地山内に不安定なキープロックは形成されなかったものと思われる。図-12に切羽観察図の一例を示す。

(b) 地山総合評価

切羽観察図だけからも地質構造的な地質要因（不連続面分布、岩質変化分布、湧水位置、変状部など）をとらえる上で有用な地山情報を提供してくれる。しかし、これらはあくまでも定性的な評価になってしまい、計測結果（天端沈下・水平空変位など）との相関性や地山状況の工学的な状態（硬さ、不連続面密度、湧水状態、切羽地山の安定性など）の変化を分析する点では切羽観察図の情報だけでは十分ではない。

そこで、坑内観察調査表に示す地山チェックリストから切羽地山で見る地質状態や地山挙動現象などを大きく6要因に分類し、さらに各地山要因ごとに細分化して、計10項目の切羽で見る地山状態の評価項目を基本的に5段階方式（良好地山～不良地山）でチェックする。これらの地山要因の状態によって区分されている評価ランクを点数化することにより、さらに、それら要因別に抽出される地山評価点を足し合わせて評価点の平均点を算出することにより、対象としている切羽の地山状態の程度を示す評価点（地山総合評価点：参考文献3）として、定性的な現象を定量的に評価できるようになる。また、計測結果の推移と対応させることで地山状態との相関性を把握しやすくなる。

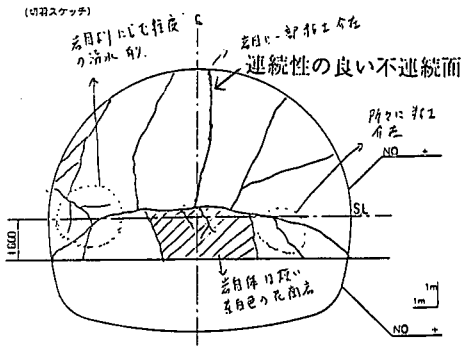


図-12 坑内切羽観察の例 (No.141+18.4, CII-M1)

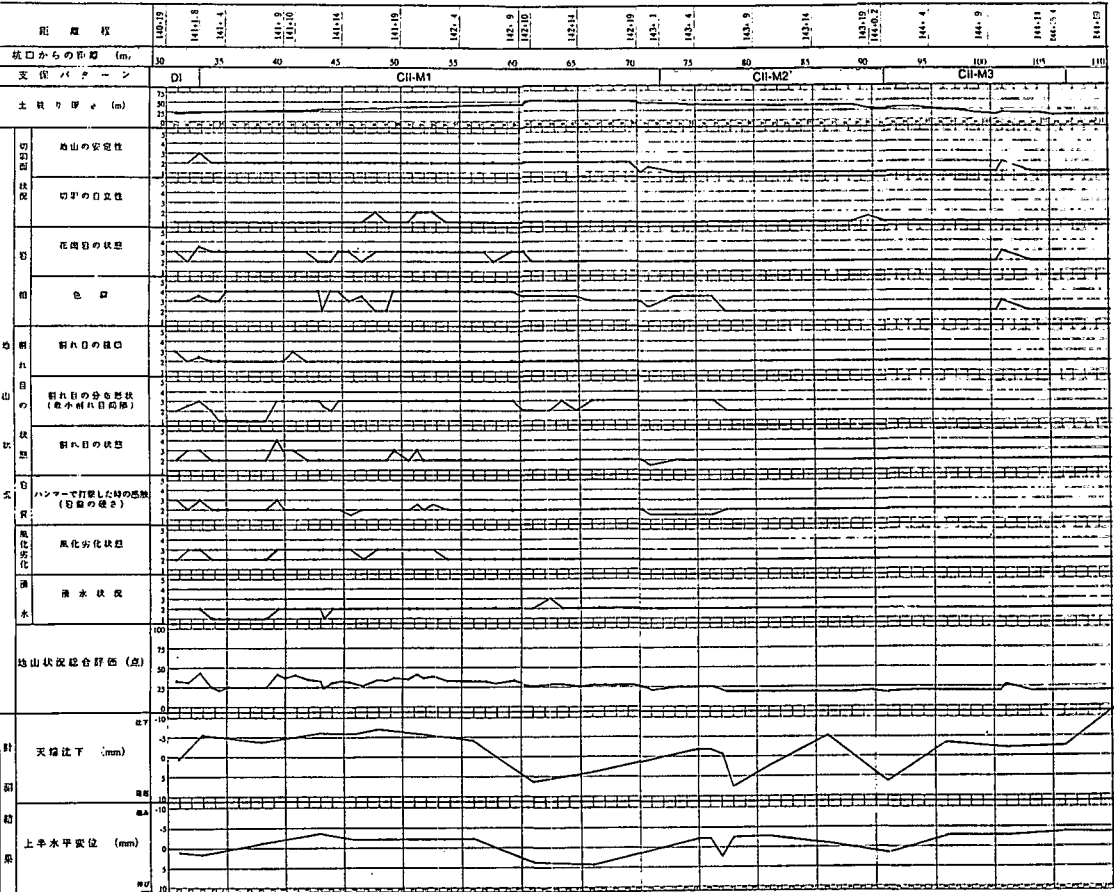


図-13 支保検討区間における地山総合評価と計測結果

そのような要領で図-13に示すように約106m間の坑内観察調査表の地山チェックリストの内容より地山評価点として100点満点方式で表し、地山の変化はこの地山総合評価点を見ることによりトンネル軸方向への相対的な地山状況の変化を追うことが可能となる。なお、点数が高いほど地山は工学的に不良化していることを示すものの、評価点の絶対値自身にはさほど意味もなく、単に相対値である点に留意しなければならない。また、図中には計測断面に対応した計測結果（計測工A・計測工B）として、測線設置後1日後の変位（初期変位量）と最大変位量を示してある。記号は、天端沈下の沈下方向への変位はマイナスで、水平（斜め）変位の内空縮小側への変位にはマイナスで示すように表示してある。

(1) No.140+19～No.142+14区間（35m間；坑口距離30～65m）

地山総合評価点分布から判断すると、坑口距離33m付近でやや地山の状態が不良化したが、坑口距離35mでは若干良好化する。坑口距離39m付近から60m付近まで一様な地山状態が続き、坑口距離60m～65mではまた若干良好化する。天端沈下の分布を見ると、地山総合評価点が30点前後を示す区間で沈下が大きくなっている。地山要因で見ると、花崗岩の状態（岩相）や割れ目の頻度分布と相関していることがわかり、天端付近にやや緩み域が広がりやすい状態にあったのではないかと推測される。すなわち、DⅠよりも小規模になったCⅡ-M1パターンでは、支保により荷がかかった状態にあることを示している。水平変位についても地山総合評価点分布とよく対応する。

(2) No.142+9～No.144+4区間（35m間；坑口距離60～95m）

地山総合評価点は、一様な分布を示し、坑口距離77m以降では良好な地山となる。地山としては、最も安定した区間であり、良好な状態が長く続いている区間である。それに比較して天端沈下や水平変位は奇妙な分布を示すが、地山の状態以外の理由でこのような挙動を示しているものと思われる。

(3) No.143+19～No.145+7.9区間（29m間；坑口距離90～119m）

この区間の地山総合評価点は、前の区間と同様に安定し、良好な地山が続く。しかしながら、変形は生じており、またCⅡ-M2パターン区間からCⅡ-M3パターン区間に変化する所で差が生じていることから、支保変化の影響がトンネルの変形挙動として顕著に表れたものと推測される。

4.5 支保検討区間における一次支保工の評価

(a) パターン1（CⅡ-M1）

図-14(a)にパターン1区間の計測断面-1（No.141+15.6）における簡易B計測結果の分布状況を示す。パターン1区間における天端沈下の最大値6.91mmは計測断面No.141+16.9で発生し、また上半内空変位の最大値3.57mmは計測断面No.141+12.0で発生しているものの、各々注意レベルⅠ（定常体制）の管理基準値（天端沈下：7mm、内空変位：14mm）以下である。また、一次支保の発生断面力も、図中に示すように吹付コンクリートにおいては、場所により不均一であるが右アーチ部で最大21.4kgf/cm²である。また、ロックボルトに発生している軸力は、側壁より地山内1mの位置で最大となるが高々1.0tfである。これらの結果より総合的に判断して、パターン1区間においては変状はみられず、トンネルの変形は注意レベルⅠ（定常体制）の管理基準値以下であり、一次支保に発生している応力も小さく、CⅡ-M1の一次支保は十分な耐力を有しているものと考えられる。

(b) パターン2（CⅡ-M2）

図-14(b)にパターン2区間の計測断面-2（No.143+7.0）における簡易B計測結果の分布状況を示す。パターン2区間における天端沈下の最大値5.20mmは計測断面No.143+15.2で発生し、また上半内空変位の最大値2.67mmはNo.143+9.1で発生しているものの、各々注意レベルⅠ（定常体制）の管理基準値以下である。また、一次支保の発生断面力も、パターン1と同様に非常に小さい。これらの結果より総合的に判断して、パターン2区間においては変状はみられず、CⅡ-M2の一次支保は十分な耐力を有しているものと考えられる。

(c) パターン3（CⅡ-M3）

図-14(c)にパターン3区間の計測断面-3（No.144+5.0）における簡易B計測結果の分布状況を示す。パターン3区間における天端沈下の最大値3.52mm及び上半内空変位の最大値2.85mmは計測断面No.144+5.1で発生しているが、各々注意レベルⅠ（定常体制）の管理基準値（天端沈下：7mm、内空変位：14mm）以下である。

また、一次支保の発生断面力も、吹付コンクリートにおいては、場所により不均一であるが左アーチ部で最大68.3kgf/cm²、天端部分、右アーチ部では30kgf/cm²以下の小さな値となっている。また、ロックボルトに発生している軸力は、全て3tf以下と非常に小さい。また、吹付コンクリートの設計基準強度180kgf/cm²に対し発生応力

68.3kgf/cm² も安全率2を考えた90kgf/cm² 以下に収まっている。パターン2に比べて、左アーチ部の吹付コンクリート応力で4.5倍、ロックボルト軸力で1.9倍の応力の増加がみられるものの、支保構造は十分な耐力を保有しているものと判断される。この応力の増加より、裏返せば地山に対し支保が有効に作用し、吹付コンクリートとロックボルトが地山荷重を各々分担して支保しているとも理解できる。

4.6 支保検討のまとめ

以上3つの支保パターンにおける計測結果より判断し、支保の軽減化(パターン1-2-3)に伴って一次支保に発生する応力に若干の増加はみられるが、これは主に断面内に出現する局所的不良箇所の影響によるものであった。パターン3区間においてもトンネルに変状はみられず、地山総合評価結果と併せて考えれば、本支保検討で実施した一次支保構造は本地山に対し適切であったと判断された。

5. まとめ

自由断面掘削機(MM130R)を使用した場合の施工上の特色を考慮した新しい支保構造の妥当性は、本支保検討を通して十分検証されたものと考えられ、断層破碎帯等の地山の急変部分および突発湧水等に遭遇しない限りにおいては、支保検討で実施されたパターン3の一次支保構造で山岳部のトンネルの施工は実施できるものと考えられる。これは、MM130Rの使用による球面切羽の形状効果による地山のアーチ効果を最大限に利用し、ゆるみ領域の発生等の地山の損傷を極度に抑えた掘削によるものと考えられる。また、ロックボルトと吹付コンクリートのみの支保構造にするためには、吹付けを出来るだけ早期に行う事と強度・剛性が早く発現する配合とする事が、地山の負担軽減には必要であり、施工時の安全性からも重要であると言える。本検討を通して得られた知見が、新しい効率的・経済的トンネル支保構造の発展の一助となれば幸である。

今後に残りの山岳部の施工を安全に進めるとともに、

本支保検討を通して得られた貴重な経験を最大限に利用し、また計測等によりゆるみの推移を再確認し、各種の計測に基づく地山状況に応じたトンネル支保構造について総合的検討を加え、山岳トンネルの合理的設計・施工法の確立に向けてさらなる努力をする所存である。

6. 謝辞

本検討を実施するに当たり、多くの貴重なご助言を頂いた京都大学工学部谷本親伯助教授および御協力と御理解を頂いた関係各位に深湛なる謝意を表します。

7. 参考文献

- 1) 横山正治・寺本 哲・岩野政浩：硬岩自由断面掘削機によるトンネル施工時の球面切羽効果に関する検討、第31回地盤工学研究発表会、pp.2253~2254、1996.7.
- 2) 岩野政浩・真下秀明・田村壽夫・宮本義広・藤井康男：硬岩自由断面掘削機によるトンネル施工時の切羽安定性に関する考察、第51回土木学会年次学術講演会概要集、第3部(B)、pp.108~109、1996.9
- 3) 本間直樹・亀村勝美：目視観察データに基づく岩盤評価手法、第18回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.426~430、1986.1.

