

# 硬岩自由断面掘削機における地山変形挙動と支保構造

神戸管理部 保全第一課 宮本 義広  
神戸第一建設部 山手工事事務所 大隣 真一

## 要 約

硬岩自由断面掘削機(MM130R)は、TBMの硬岩掘削能力と自由断面掘削機の機動性を合わせ持つ、新しいタイプのトンネル掘削機である。同機は、一軸圧縮強度50~250MPaの岩盤を断面積50~80m<sup>2</sup>の自由な断面形状で掘削することができ、掘削操作は、すべてPLCシステム(Programmable Logic Control System)による自動制御となっている。当該地域は、坑口付近に民家が密集しており、発破の使用が厳しく制限されていたため、MM130Rを世界で初めて高取山トンネルに導入し、成果を挙げた。

本報告は、機械の概要と掘削実績およびMM130Rの使用による地山変形挙動と新しい支保パターンの有効性について述べる。

キーワード：硬岩自由断面掘削機、機械掘削、球面切羽、支保構造、早強吹付コンクリート

## まえがき

高取山王区(北行)トンネルは、施工延長1,051mの山岳トンネルで、起点側坑口より約510mは六甲花崗岩を基岩とする硬岩の山岳部、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。

坑口部ではすでに50MPa程度の六甲花崗岩が露頭しており、事前調査の結果からも約500m区間は、一軸圧縮強度が20~200MPa程度と想定された。しかし当該区間は神戸市須磨区の市街地に位置し、坑口付近には民家が密集しているため、発破の使用は非常に困難であり、当初から機械掘削で計画されていた。このため、周辺環境に配慮して騒音や振動が少なく、かつ硬岩掘削能力に優れた自由断面掘削機(以下MM130Rと称す。)を世界で初めて導入した。

本稿では、MM130Rの施工実績およびその地山変形挙動と支保構造の検討結果について報告する。

## 1. MM130Rの概要

### 1-1 背景

トンネルの機械掘削は、TBM(Tunnel Boring Machine)とブーム式自由断面掘削機に大別される。TBMは、近年、軟岩から超硬岩まで幅広い地質に対応できるようになっているが、掘削断面が円形および比較的小断面に限定される。また、機械設備費が高く、延長が短いトンネルへの適用には採算上の問題もある。一方、ブーム式自由断面掘削機は、断面形状の自由度と機動性は高いが、硬岩に対する掘削能力がTBMに比べ十分とはいえない上、岩の性状によっては限界がある。したがって、これまで硬岩トンネルを無発破工法で掘削する場合、一般的に割岩工法が用いられているが、施工効率は著しく低い上、不経済なトンネル掘削を強いられていた。よって、硬岩トンネルを自由な断面形状で経済的かつ効率的に機械掘削する技術が求められ、その結果、新しく研究開発された硬岩用自由断面掘削機(MM130R)を採用し

た。

## 1-2 機械概要

MM130Rは、TBMの硬岩掘削能力とブーム式自由断面掘削機の機動性を合わせ持つ機械である(写真-1)。本機は、4本の肩部グリッパーと前後クローラの間にある2カ所の地盤サポートで反力を取り、カッターを切羽に押し付けて岩盤を圧砕する機構になっている(図-1)。このカッター

表-1 MM130R主要仕様

項目	仕様
機械寸法	H=6.0m, W=7.3m, L=29m
カッターホイール直径	φ4.1m
カッターホイール回転数	15rpm
フェイスカッタ	17" ディスクカッタ 8個
ゲージカッタ	左右各4個
グリッパ・サポート位置	アーチ肩部・底部
推進ストローク	150mm
推進力	1.47MN (150T)
カッタモータ	300kw×2 (3000/3300V)
油圧システム	300kw×2 (3000/3300V)
全装備出力	1378kw
総重量	368 t

ホイールは、スイングブームとピッチブームにより縦横に動かすことが可能であり、その外周に17インチのディスクカッターを8個装備している。機械の主な仕様を表-1に示す。

## 1-3 掘削機構

### (1) 掘削原理

MM130Rは、TBMと同様にディスクカッターによる岩盤圧砕方式である。TBMは、面盤上の各カッターが同心円上の軌跡を取りながらカッター間の岩盤にクラックを発生させる機構である。これに対し、MM130Rは17インチディスクカッターを8個取り付けカッターホイールを切羽に直角方向に貫入させ、毎分15回転させながら横移動さ



写真-1 MM130R

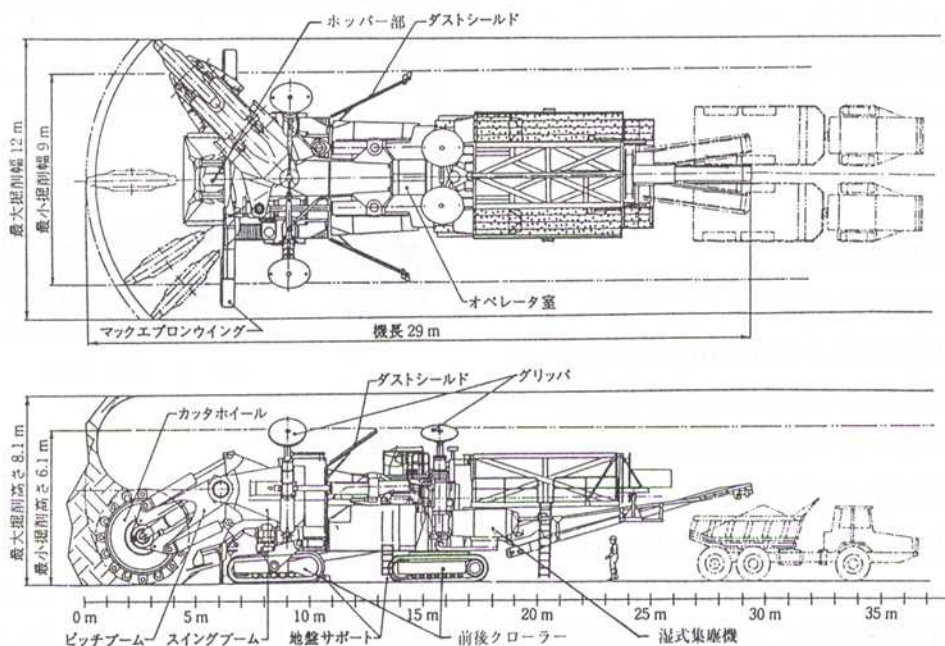


図-1 MM130R概念図

せることで8個のディスクカッターが順次軌跡を変えて、TBMと同様のチッピングを生じさせて掘削する。カッター貫入量とカーブ幅（ディスクカッターの軌跡間隔）は岩盤の強度や節理間隔に合わせて調整する。

## （2）掘削方式

MM130Rの掘削は、グリッパーと地盤サポートにより本体を固定し掘削反力をとりながら、スラストシリンダーによって推力をメインブームからスイングブーム、ピッチブーム、回転するカッターホイールを介してカッターに推力を与え、岩盤にあった貫入量（プランジ：通常10～25mm程度）分だけ切羽の岩盤に押し込んで行われる。カッターホイールは、スイングブーム（水平移動）とピッチブーム（上下移動）の組み合わせにより掘削断面形状に合わせて図-2のように移動する。スラストシリンダーの1ストローク長は150mmで、プランジを繰り返し1ストロークの掘削が終わるとグリッパーと地盤サポートを外し本体を前進させ、次の掘削サイクルに入る（図-3）。カッターホイールの移動、カッター貫入量の調整、掘削にかかわるすべての操作はPLCシステムにより自動制御される。掘削ずりは、カッターホイールに取り付けられたずり掻き込み装置（パドル）とカッターホイールの動きに連動するマックエプロンのウイングにより中央のホップ部に集められ、ベルトコンベアにより直接ダンプトラックに積み込まれる。掘削時に発生する粉じんは、ダストシールドを用いて切羽部分に封じ込め、湿式集塵機により処理している。

## 1-4 MM130Rの特徴

以下に、MM130Rの特徴をまとめて示す。

- 1) 一軸圧縮強度50MPa～250MPaの中硬岩・硬岩を自由な断面形状で効率的に掘削できる。
- 2) 50～80m<sup>2</sup>のトンネルを全断面掘削できる。
- 3) 掘削はPLCを用いた自動制御により行われ、掘削精度は0～100mm以内に保たれ、余堀りが少ない。
- 4) 円滑な掘削面が得られ、掘削時のトンネル周辺のゆるみ・損傷を最小限とすることができる。

- 5) 掘削に伴う粉じん対策として、ダストシールドと湿式集塵機を装備、施工環境に配慮している。
- 6) 掘削とずり積みが平行して行われ、省力化と安全性の向上が図られている。
- 7) クローラ走行により坑内移動が容易である。
- 8) 直径4.1mのカッターホイールによって形成される切羽は常に三次元的な球面合成切羽形状を保ち、不良地山を含め切羽の安定化が図られる。

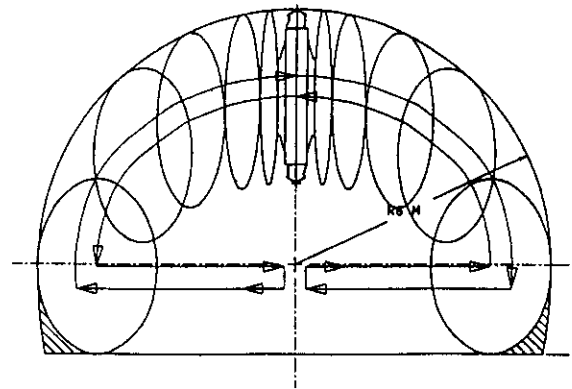


図-2 カッターホイールの移動

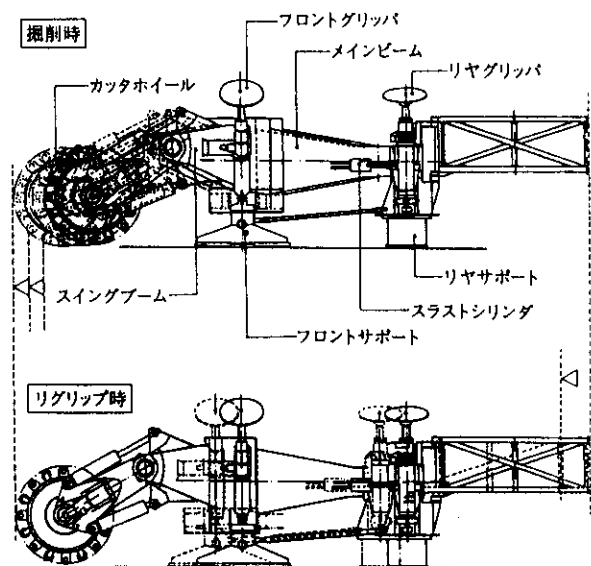


図-3 推進機構

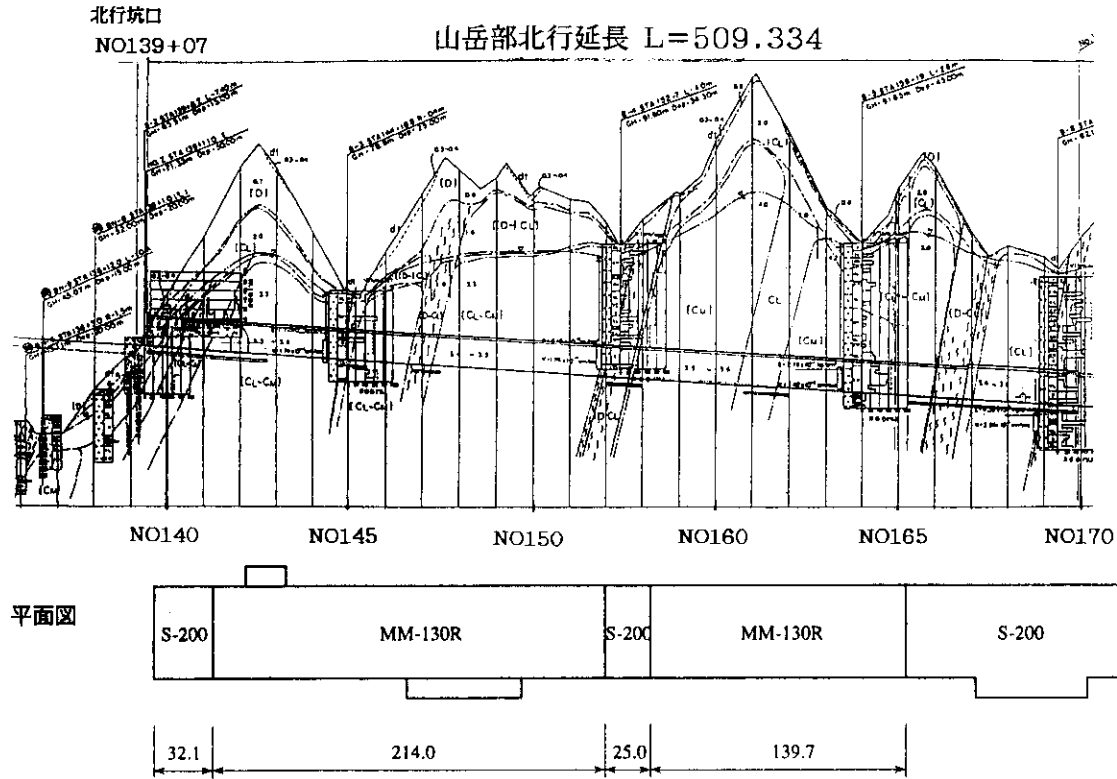
## 2. 施工実績

### 2-1 実施工程

MM130Rの現場への搬入、組立は平成7年6月26日から開始し、10月初旬に完了した。その後、初期掘進を開始し、調整を繰り返したのち、平成

8年3月より本掘削に移行した。しかしながら途中坑口より約250mの沢部の直下部のみは、切羽が自立せず、ロードヘッダ(S-200)による掘削を余儀なくされた。また坑口に防音扉が設置でき、かつ坑内にずりの仮置場が出来る坑口より約150

mまでは、昼1方だけの施工とし、それ以降は昼夜2方の施工とした。解体作業は平成8年9月初旬より開始し、11月初旬に全ての部材を現場から搬出し完了した。図-4に地質縦断面図と岩盤試験結果およびMM130Rの施工区間を示す。



実施断面区分図

地山等級区分	D		C			D	C		D	C	B	C	D	C	D		
断面区分	DIIa	DI	CI-M1	CI-M2	CI-M3	DIIa-M1	DI-M1	CI-M3	CI-M1	DII-M3	CI-M1	B-M1	CI-M3	DI	CI-L	DI-L	
延長 (m)	20.1	12.0	39.2	19.2	13.0	25.0	28.5	41.85	45.25	25.0	9.0	7.2	116.0	7.5	36.634	24.3	36.9
簡易弾性波速度 (km/sec)	[Graph showing data points for simple elastic wave velocity]																
シュミットロックハンマー反発度	[Graph showing data points for Schmidt hammer rebound]																
一軸圧縮強度 (MPa)	[Graph showing data points for uniaxial compressive strength]																
施工機械	S-200		MM-130R					S-200	MM-130R		S-200						

図-4 実施断面区分図

## 2-2 掘削概要

トンネル掘削は、上半先進ベンチカット工法の NATM で施工した。掘削機械は、上半では MM130R、下半掘削には、S200 のロードヘッダーおよび大型のブレイカを使用した。また、ずり運搬は坑内小運搬のため小回りの効く 4 t ダンプトラックを使用した。

上半掘削断面は、SL-1.6m より上部の H=7.4 m であるが、カッターホイールの構造上、上半隅踏まえ部に図-5 に示すような約 0.5m<sup>3</sup> の未掘削部分が生ずる。この未掘削部分は、下半施工時に同時に掘削する。

## 2-3 掘削実績

### (1) 掘削サイクル

掘削対象岩盤の一軸圧縮強度が 100MPa 程度の花崗岩における標準的な掘削サイクルタイムを図-6 に示す<sup>1)</sup>。

完全自動運転を行なった場合約 30 分で 150mm (1 ストローク) を掘進でき、昼 1 方で 1.5~2 m、昼夜 2 方で 3~4 m の掘進長を得た。また表-2 に支保パターン毎の掘削サイクルタイムを示す。

表-2 掘削サイクルタイム

項目	単位	B	CI	CIH	DI	概要
掘削断面積(余堀含まず)	m <sup>2</sup>	66.8	68.0	69.1	70.2	
掘削断面積(余堀含む)	m <sup>2</sup>	69.7	70.8	71.9	73.0	
1 サイクル進行	m	2.0	1.8	1.5	1.0	
掘進機能力(地山)	m <sup>3</sup> /h	13.5	17.2	19.6	22.8	MM 130R
カッター消費量	kg/m <sup>3</sup>	0.0042	0.0030	0.0039	0.0016	
1 サイクル当り吹付掘積	m <sup>3</sup>	44.1	39.4	32.6	21.6	
吹付設計厚さ	m	0.05	0.10	0.15	0.20	
1 サイクル当りロックボルト本数	本	7	7	7	14	
マシンセット、退避	分	65	65	65	65	
掘削	分	540	445	330	192	
吹付	分	95	98	100	95	
支保工	分	-	-	-	-	
ロックボルト	分	53	48	42	110	
金網	分	-	-	-	-	
カッター交換	分	18	11	10	4	
保守点検・その他・損失	分	159	135	83	125	
計	分	930	802	632	591	

上記のサイクルタイム表は、3月からの本掘削における実績をまとめたものである。

また各パターン毎の1サイクル進行長に割り戻した値である。

① マシンセット、退避：マシンのセットに45分、退避に20分要した。

② 掘削時間：掘削断面積×1サイクル進行×60÷掘進機能力により算出した。

③ カッター交換：8個全数の交換時の平均所要時間が4時間であるため、カッター交換を次式により算出した。

掘削断面積×1サイクル進行×カッター消費量×30分

④ 月平均進行：月に2回機械整備を実施している。

540×1サイクル進行×2方×(23日-2日)÷サイクル時間

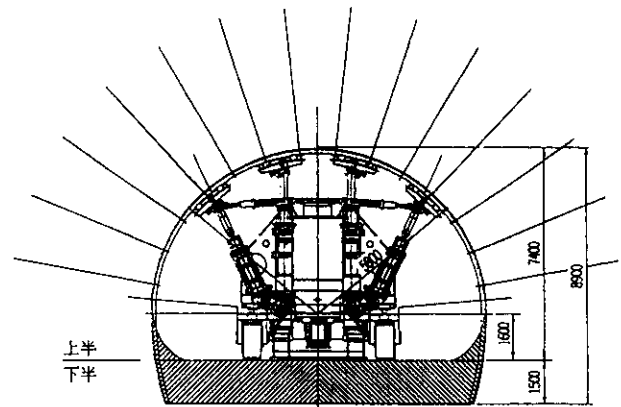
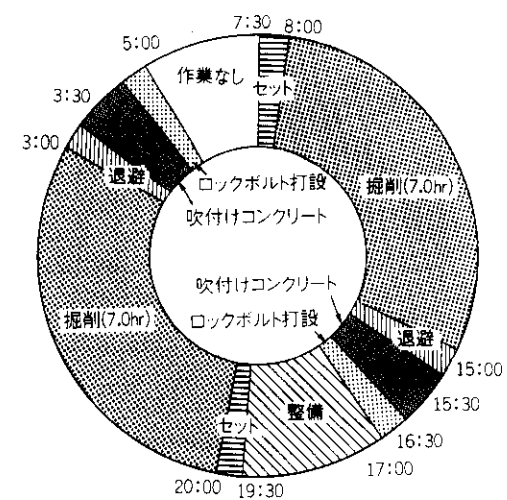


図-5 加背割図



標準掘削サイクル

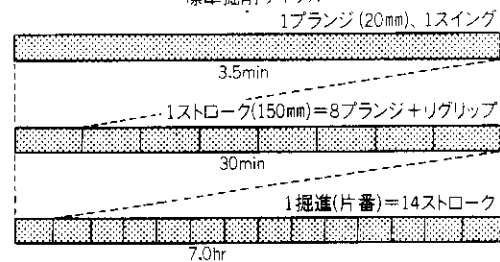


図-6 標準的なサイクルタイム

### (2) 掘削能力

初期掘進時は、調整等が不十分であり、機械の有する本来の性能を発揮していないと考えられるため、本掘削区間(1996年3月~8月)での掘削能力にて評価した。表-3 に支保パターン毎の掘削能力を示す。図-7 に掘削能力と岩盤強度との関係を示す。100MPa以上では、他の100 t級の自由断面掘削機と比較して、約2倍の掘削能力を示し、150MPa以上では、約3倍以上の能力を示した。

### (3) 掘削断面精度 (実測値)

MM130Rで掘削した断面の設定断面からの余堀量を図-8に示す。掘削断面精度は、現場における管理目標0～+100mm内にほぼ収まり、良好な管理状態が確認された。

表-3 掘削能力

パターン	一軸圧縮強度 (平均) (kgf/cm <sup>2</sup> )	純掘削時間当りの		実掘削時間当りの	
		掘進量 (m/h)	掘削量 (m <sup>3</sup> /h)	掘進量 (m/h)	掘削量 (m <sup>3</sup> /h)
D I	246	0.475	33.3	0.326	22.8
C II	617	0.398	27.5	0.284	19.6
C I	1008	0.360	24.6	0.253	17.2
B	1568	0.362	24.2	0.232	15.5

(注) 純掘削時間：MM130Rの純粋な掘削時間 (グリッパの張替え, ロスタイムは含まない)  
実掘削時間：MM130R掘削開始 (セット完了) から掘削完了 (退避開始) までの時間

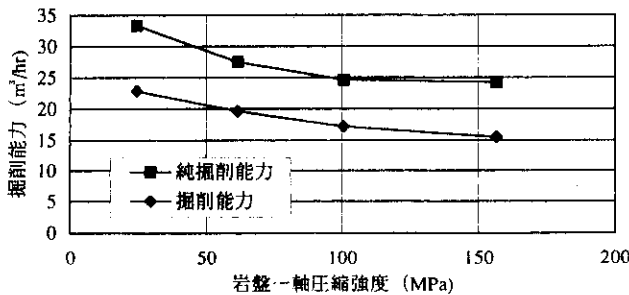


図-7 一軸圧縮強度と掘削能力の関係

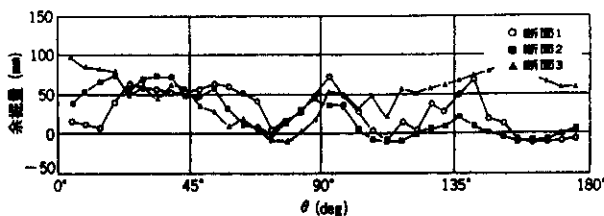


図-8 設定断面からの余堀量

## 3. MM130Rにおける一次支保の低減

### 3-1 支保パターンの試行

MM130Rは、TBMと同様の岩盤切削メカニズムをもち、しかも円形以外の任意の断面形状の掘

削を可能とするものである。TBMを使用したトンネル掘削においては、一般の発破工法と比べ、トンネル周辺地山をいためず、掘削に伴う地山のゆるみを最小に押さえる工法であると考えられている。また、掘削壁面は平滑で、部分的な応力集中による肌落ち現象等が発生しにくい。

一般的に対象地山の地質に応じて設定されている支保パターンは、発破工法、機械掘削工法を含め従来のNATMによるトンネル施工実績にもとづき規定されている。上記のような使用機械の特質を考慮すれば、支保をある程度軽減しても、地山に過大な変形等の変状を発生させることなく施工することが可能であると考えた。このため事前に、球面切羽の形状効果を考慮したFEM解析を実施し、トンネルの安定性を検証した。またMM130Rの掘削に伴う切羽延長方向のゆるみ領域を計測するため、坑内弾性波探査を実施し、それが平面状の切羽と比較して約半分の1.5m程度になることを確認した<sup>2)</sup>。

以上のことより、MM130Rによる掘削時の安全性の確保とコスト低減を目指した施工効率を考慮し、現設計において設定されている支保パターン (CII) 区間において、鋼製支保工を省き、それと等価な支保構造を解析により求め、試行した。

### 3-2 試験施工の概要

試験施工は、以下に示す3つの支保パターンにて実施した。(地山等級および断面区分はCII区間)

#### 1) パターン1

検討区間：NO. 141+01.8～NO. 143+01.0

区間長：39.2m

支保構造：早強コンクリート20cm, ロックボルト (L=3.0m, D25, 周方向1.5m, 軸方向1.2m)

#### 2) パターン2

検討区間：NO. 143+01.0～NO. 144+00.2

区間長：19.2m

支保構造：早強コンクリート15cm, ロックボルト (L=3.0m, D25, 周方向1.5m, 軸方向1.2m)



### 3) パターン 3

検討区間：NO. 144+00.2～NO. 144+15.2

区 間 長：15.0m

支保構造：早強コンクリート15cm，ロックボルト (L=3.0m, D25, 周方向2.7m, 軸方向1.5m)

試験施工区間における計測項目は，計測工A(坑内切羽観察，内空変位計測，天端沈下計測)を基本とし，計測断面を5mピッチに設け詳細な計測を実施した。また各パターン毎に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，吹付けコンクリート応力測定)を実施した(図-9)<sup>3)</sup>。

各パターンにおける計測結果より，支保の軽減化にともなって一次支保に発生する応力の増加が見られたが，パターン3区間においてもトンネル変形は注意レベルI(定常体制)の管理基準値以下であった。したがってパターン3をCIIパターンの最終支保構造として採用した(図-10)。

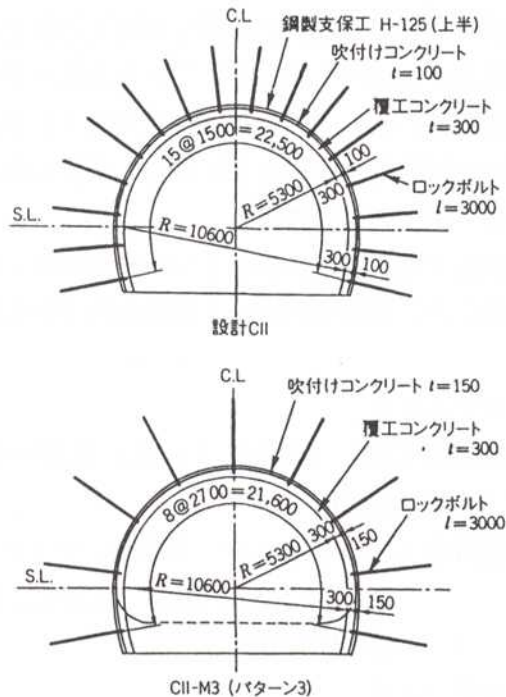


図-10 採用支保パターン

### 3-3 球面切羽の効果

MM130Rによる掘削は，カッターホイールの構造と動きから切羽が3次元的な球面合成形状とな

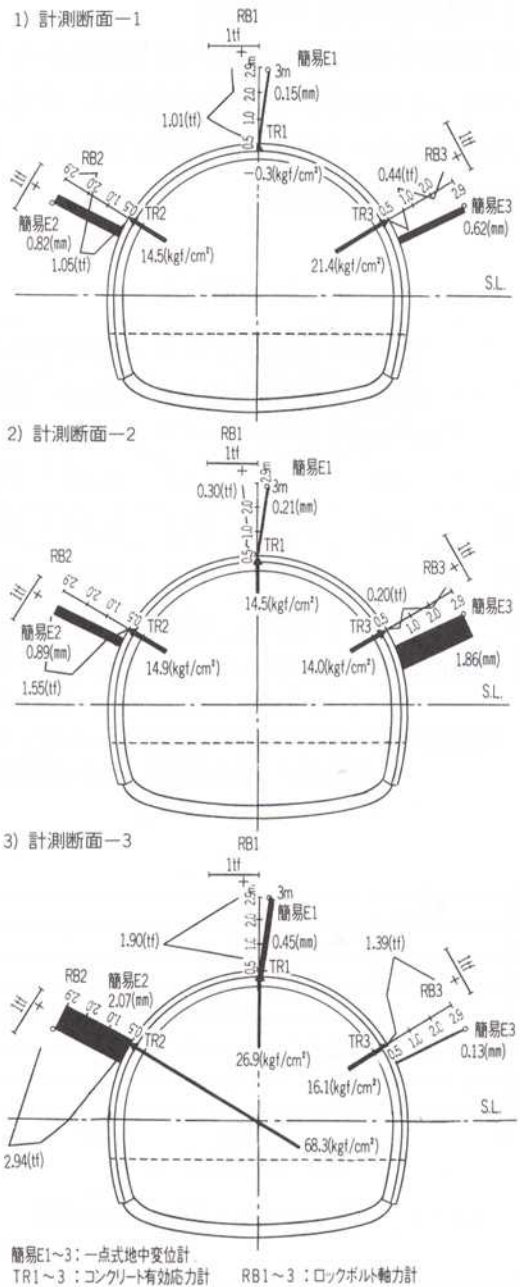


図-9 簡易計測工Bの最大分布図



写真-2 球面切羽

り、従来の平面状の切羽に生じる切羽近傍の引張応力状態の不安定部分を事前に掘削することになる。また掘削システムは地山に衝撃を与えずに全断面同時にスライス状に15~25mm圧砕掘削する。このため、極めて円滑な掘削周壁が得られ、肌落ち等の現象が少なく、施工時の切羽の安定性が大幅に改善された(写真-2)。

### 3-4 早強度吹付コンクリート

鋼製支保工に代わる切羽の早期安定が必要となり、吹付コンクリートの強度を早期に発現させ地山の負担軽減を図った。

一般的に吹付けコンクリートの設計基準強度(材令28日)は、18MPaであり、1日強度で5MPaを目標にしている。本トンネルでは、無水石膏とアルナイトを主成分としたセメント早強剤を使用し、1日強度で15MPaの吹付けコンクリートを施工した(図-11)。

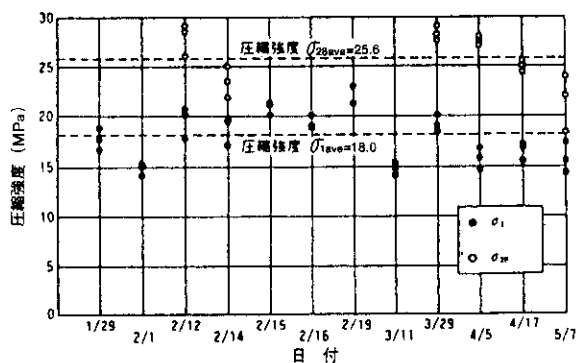


図-11 早強度吹付コンクリート強度試験結果

### 3-5 まとめ

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パターンは、本地山に対し有効に作用したものと考えられる。これは、MM130Rの使用による球面切羽の形状による地山のアーチ効果を最大限に利用し、ゆるみ領域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。

### あとがき

従来、トンネル等の硬岩掘削は発破工法を中心

に施工されてきた。しかしながら、発破工法は振動・騒音を生じるため、環境問題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。また、今後の技術者不足に対応して、危険・苦渋作業の根絶、省力化、自動化を目的とした高度の機械化が要求されている。このような中でMM130Rは、当現場において世界で最初に導入した機械であり、無発破工法のニーズに十分対応できる。

また、支保の低減化を目指したMM130Rによる新しい支保パターンの施工によって得られたデータは、今後の効率的・経済的なトンネル掘削の一つの指標を示すものである。

最後に高取山トンネル山岳部の施工に対し、トンネル地盤技術委員会(委員長 神戸大学櫻井春輔教授)をはじめ、御協力と御理解を頂いた関係各位に、感謝の意を表する次第である。

### 参考文献

- 1) 社団法人 日本建設機械化協会 建設機械化研究所；硬岩トンネル自由断面掘削機(MM130R)性能確認試験報告書(1996, 12)
- 2) 岩野・真下・田村・宮本・藤井；硬岩自由断面掘削機(MM130R)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(1996)
- 3) 岩野・白川・真下・田村・宮本・藤井・中村；硬岩自由断面掘削機(MM130R)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，第6回トンネル工学研究発表会(1996)