

施工機械と土質工学

9. 山岳トンネル

きた 村

あきら 章

昔、トンネルを掘るのはノミとハンマーによる人力によっていたのが、明治中期にダイナマイト、削岩機、コンプレッサーが使用されるに至り飛躍的に進歩し、大正から昭和初期に至るトンネル技術発展の足がかりを作った。戦後になってアメリカ方式の大型機械、鋼製支保工が導入され、その後のトンネルの長大化と、増大するトンネル建設需要に対する基礎ができた。最近になって新しいトンネル理論に基づく NATM 工法が採用されるに至り、新しい歴史が展開されようとしている。

以下、トンネルに使用される機械の変遷、地質あるいは掘削工法と機械との関係などについて述べてみたい。

9.1 地質と掘削工法

トンネルで使用される機械は、掘削工法によって大きく違ってくるが、またこの掘削工法が地質により異なる。そのため、ここでは現在、我が国で行われている岩盤の分類および掘削工法について記してみる。

9.1.1 岩盤の分類

トンネル工事では、地質の良し、悪しによって掘削工法あるいは工事費、工期が大きく変わることから、以前より岩盤の分類がなされており、次の三つの系統に分けることができるとしている(土木学会岩盤力学委員会第二分科会)。

第1の系統は、岩石の硬さ・強度、岩盤の風化度、き裂の間隔・状態、すなわち肉眼等による観察を重視する系統で、水資源開発公団、電力関係で行われているもの、

第2の系統は、岩石の種類、地山の弾性波速度を重視する系統で、国鉄、鉄建公団で行われているもの、

第3の系統は、両系統の中間に位置するもので、建設省、農林水産省、道路公団で行われているもの、である。

9.1.2 岩盤の分類と掘削工法

岩盤の分類とトンネルの設計あるいは掘削工法との関係については、企業者がそれぞれ作成しているが、ここでは池田の提案を紹介するので掘削工法、機械選定に参考にされたい。池田の岩盤分類は、岩質と弾性波速度の組合せを主体とする第2系統に属するもので、7種類に分類のうえ設計と掘削方法(在来工法)の関係を表-9.1のように示している。

表-9.1 岩盤分類と設計、施工(断面積 60~80 m²)

岩盤分類	掘削工法	支保工	巻厚 [cm]	その他
1	1)全断面掘削工法 2)きのこ型全断面工法 3)中央または側壁導坑先進全断面工法 4)半断面掘削工法	1)必要なし 2)ルーフボルト 3)H-150 1.3~1.5m	40~50	大部分導坑先進必要ない
2		1)ルーフボルト 2)H-150 1.1~1.3m		ときにボーリングマシン適す
3	1)きのこ型全断面工法 2)中央または側壁導坑先進全断面工法 3)上部半断面工法 4)導坑先進上部半断面工法	1)H-150 0.8~1.0m 2)H-175 1.2~1.5m	50~60	多くの場合ボーリングマシン適す
4	1)側壁導坑先進全断面工法 2)底設導坑先進半断面工法	1)H-175 1.0~1.3 2)H-200 1.2~1.5m	60~70	1)ときに縫地工法を必要とする 2)A, B地質を除いてボーリングマシン適す
5		H-200 0.8~1.2m	70~80 ときにインパート必要	A, B, F地質を除いてボーリングマシン適す
6	1)底設導坑先進逆巻工法 2)側壁導坑先進逆巻工法	H-200 0.8~1.2m	70~80 (インパート)	1)ときに水抜き、注入、導坑式、縫地などの特殊工法を必要とする 2)E, F地質ではシールド工法が必要な場合がある
7				

注：岩盤分類は土木学会「トンネル標準設計方書(山岳編)」を参照

なお、NATM における岩盤分類と施工法との関係については、「吉村ほか：鉄道トンネル最近の展望(2)、トンネルと地下、1972年6月」等を参考にされたい。

9.2 掘削機械

我が国のトンネル施工の歴史を鉄道トンネルから振り返ってみると、明治3年の石屋川トンネル(延長61m)に始まり、明治13年の柳ヶ瀬トンネル(延長1352m)で既にダイナマイト、削岩機、空気圧縮機による機械掘削が産声をあげている。

そして大正時代に入り、新オーストリア式の底設導坑先進工法を採用したり(その以前は日本式と称する頂設導坑先進工法であった)、あるいは本格的に削岩機やずり積機を使用することにより、トンネルの長大化あるいは掘進速度のアップが進められてきた。

戦後は昭和27年に始まった佐久間ダム建設に伴う飯田線付替え工事で、18ブームのジャンボ、コンウェイ 100 型ずり積機による全断面掘削、20~30 m³/h のコンクリートポ

*日本鉄道建設公団海峡線第一課 課長

講 座

ンプなど大型機械がアメリカから導入され、今日のトンネル工事の原形を作り上げ、トンネルの長大化と30年代後半から急増したトンネル建設の需要にこたえてきた。トンネルボーリングマシンによる機械掘削は、42年に木の浦トンネル(延長1570m)において始まったが、有壁トンネルで65 m/dの掘進記録があるものの、成功を収めるにいたっていないが、これに代わって昨今では自由断面掘削機が活躍している。

また、新しいトンネル理論に基づく NATM 工法が最近広く採用される方向にあり、数多くの施工実績に基づき今後は集大成されるものと考えている。

以下、地質と関係の深い掘削機械について述べてみる。

9.2.1 削岩機

爆破工法による山岳トンネルの掘削は、削岩、爆破、換気、ずり処理および支保工の建込みの各作業の繰返しで成り立っているが、このうち地質に大きく関係するものは削岩である。

削岩機はその用途、自重から次のように分類される。

シンカー：作業員が手で持ち、主として下向きの孔をせん孔するために製作されたもの。

レッグハンマー：シンカーをサポートシリンダー(レッグ)に装架し、水平または上下20度前後をせん孔するもので、主として軟岩～中硬岩に使用される。

ドリフター：硬岩のせん孔用で、せん孔速度の向上を図るため機体の自重を増大したもの。

ストーパー：上向きのせん孔を行うもの。

ピックハンマー：軟岩の破碎、掘削に用いるもので、昔のつるはしに代わるものである。

削岩機は、削孔方式(打撃式、回転式、併用式)、供給動力(圧縮空気、油圧、電気、内燃機関)により分類されるが、現在山岳トンネルで広く採用されているのは、打撃

式のピックハンマー、打撃・回転併用式の空圧のレッグハンマー、ドリフターである。しかし近年、削岩機の大型化、高性能化の要求にこたえて、油圧式ドリフターが使用されるようになってきた。この削岩機の長所は、①小型で大きな出力が得られる、②作動、制御が容易、③排気音がないので騒音が小さい、④空気圧縮機、送気管がいらない、⑤油や霧の飛散がなく作業環境がよい、であり今後広く使用されることになる。

削岩にあたっては、岩質(岩石の硬さ、き裂の状態)、掘削断面積、爆破結果(ずりの大きさ、堆積状態)に適したせん孔長、せん孔数が決められるが、その際、削岩機の種類が関係するのはもちろんであり、これらを総合的に判断のうえ決定する必要がある。

9.2.2 トンネルボーリングマシンと自由断面掘削機

従来の発破工法による掘削は、削岩、爆発、ずり処理が不連続作業となるが、省力化と工費の低減を図る目的で、最近、連続掘削が可能な機械掘削工法が使われている。

機械掘削工法には、トンネルボーリングマシン(TBM)による全断面掘削方式と、アーム掘削機による自由断面掘削方式の二つがある。

機械掘削工法には

(ア)爆破工法に比し地山を緩めることが少なく、トンネルに及ぼす土圧が小さい、あるいは作業時の安全性が高い。

(イ)余掘りが少なく、余分なコンクリートを打つ必要がない。

(ウ)爆破振動による近接構造物への影響あるいは騒音、振動に伴う苦情が少ない。

等の長所を有している。

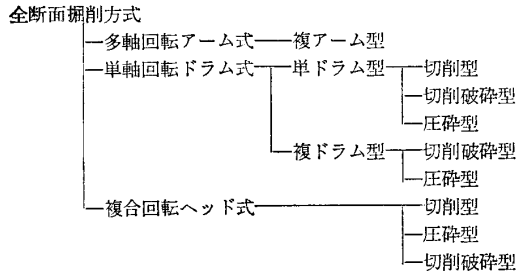
(1) トンネルボーリングマシン(TBM)

TBM は、1852年アメリカのフーザックトンネルで使わ

表-9.2 空気、油圧削岩機の標準的な仕様

機 種		空 気 削 岩 機				油 圧 削 岩 機
項 目		シンカー	レッグハンマー	ストーパー	ドリフター	ドリフター
自重(本体)	kg	15~25	25	(フィードシリンダー含む) 35~40	35~150	97~370
シリンダ内径	mm	55~75	60~75	65~70	80~120	
ストローク	mm	45~70	50~70	50~70	70~100	
打撃数	bpm	2500~2000	2500~2000	2000	1800~1300	3000~1800
回転数	rpm	300~200	250~200	250~200	200	550~0
打撃力	kgf·m					15~38
回転トルク	kgf·m					23~600
空気消費量	m ³ /min	2~3	2.5~3.5	2.5~3.0	3~16	
空気圧力	kgf/cm ²	5	5	5	5	
油	所要量	打撃	l/min			70~110
						0~120
	作動圧	打撃	kgf/cm ²			140~170
						120~170
機長(本体)	mm	500~600	600~700	(フィードシリンダー含む) 1200~1500	600~1000	1000~1300

表—9.3 TBM の分類

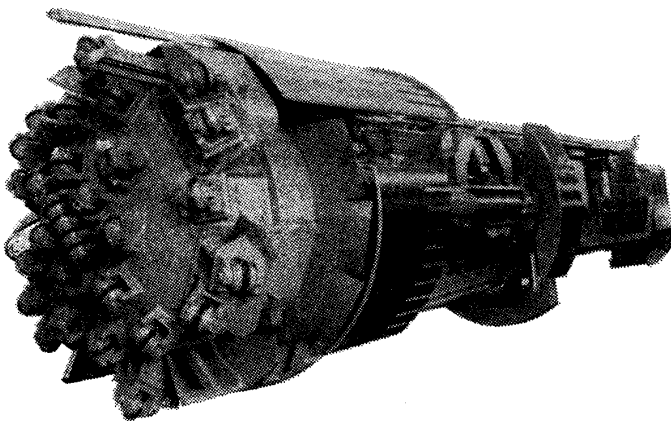


れたのが最初であり、1881～1883年にイギリスのパーモンの考案したものが現在の TBM の原形といわれている。TBM はその構造あるいは岩石の切削方式によって表—9.3 のように分類される。

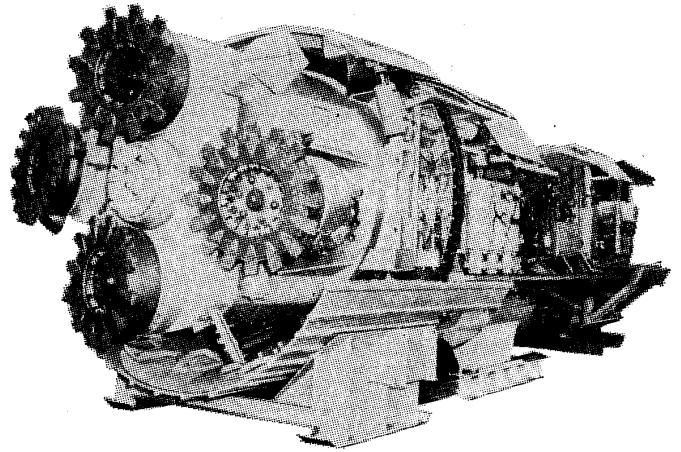
TBM の中で一番重要な部分は、何といたっても切削部分であるが、その機能から圧砕型と切削破砕型の2種が現在の代表といえる。

圧砕型は大きな推力をカッターに与え、カッターのくさび作用によって岩石を破砕する型式のもので、ディスクカッターの小松ロビンス型、ギヤカッターの三菱ヒューズ型、ボタンローラーカッターの川重ジャーバ型等があり、切削破砕形は回転トルクによってカッター接線方向あるいは直角方向に切削破砕する型式のもので、石川島播磨ハーベガー型、三和グリーンサイド型がこれに入る。これら両機種の特徴は表—9.4 のとおりである。

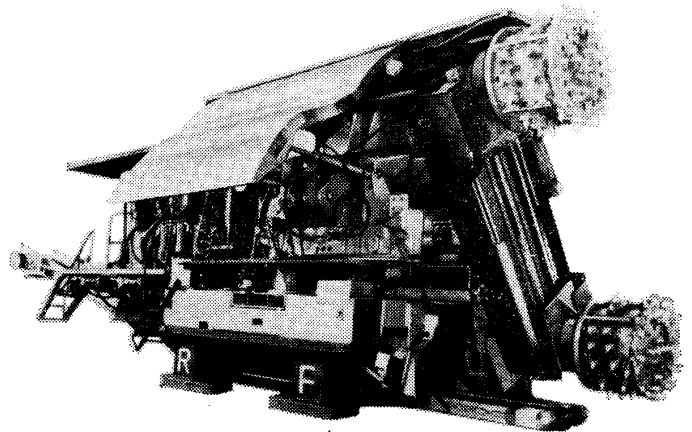
TBM は回転ドラムの機構上、掘削断面が円形となるため、水路トンネル等に使用するのが有利である。また地質条件としては、岩石の一軸圧縮強度で $300 \sim 1\,000 \text{ kgf/cm}^2$ の中硬岩が適当と考える。TBM の最大の特長は連続掘削とその高速性にあるので、地質の変化が激しいところには



写真—9.1 小松製作所のロビンス型トンネル掘進機で、単軸回転ドラム式のうちの圧砕型である。サイドグリッパーにより坑壁反力を取り、700 tfの推力で珠算型ローラーカッターにより地山を圧壊する形式のものである。型式の440は掘削径4.4 mを表し、推進装置ストローク、総自重および電動機出力は、1.1 m, 168 t, カッターヘッド125 kW×4、油圧ポンプ59 kWの仕様である。



写真—9.2 石川島播磨重工製で、別称ウォールマイヤー型とも呼ばれている。特徴は工作機械のフライス盤のようにカッターヘッドおよびドラムの回転により取り付けられたチップによって岩盤を切削破砕するもので、ルーフ、シユールを突っ張ることにより掘削反力をとる。TBM 840の場合、8は型番、40は掘削径4.0 mを示す。推進装置ストローク、総自重および電動機出力は、1.0 m, 100 tおよび390 kWである。



写真—9.3 三和機械製のグリーンサイドロックトンネルで、中心軸に取り付けられて回転するアームにカッタードラム2個をセットし、各ドラムはアームに沿って個々に伸縮できる。したがって円以外の形すなわち馬蹄型等の掘削が可能であることが大きい特徴といえる。円掘削の場合の径は3.0～5.0 m(可変式)であり、推進ストローク、総自重、および電動機出力は0.75 m, 50 tおよびカッタードラム90 kW×2そのほか90 kW×1である。

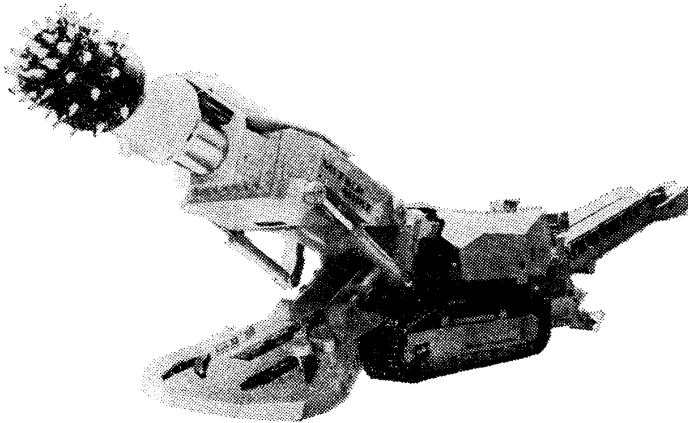
不向きである。そのため、使用に当たっては事前に地質を十分把握しておく必要がある。また掘削中にあるのは、TBM はその自重が大きいことから、上下ならびに左右方向の蛇行に注意する必要がある。

(2) 自由断面掘削機

自由断面掘削機は、1950年代に採炭用の沿層坑道掘進機として開発されたものであるが、最近トンネル工事での使用が著しい。

表—9.4 TBM の機種とその特徴

	掘削機構	圧砕型	切削破砕型
機械要素	掘削に必要な応力	$>\sigma_c$	$>\sigma_t$ または σ_c
	掘削に必要な反力	大	小
	ドラム、刃物の必要負荷能力	大	小
	電動機容量	大	小
	ドラム周りの機構と構造	単純	複雑
地質要素	圧縮強度が高く、ぜい性度の小さい岩石に対する掘削能力	大	大
	石英質が多くじん性の高い岩石に対する掘削能力	大	小
	軟弱層に対する掘削能力	弱	弱
その他の	使用実績	多	少



写真—9.4 三井三池製作所製のロードヘッダーで、ビット植込みのドラムがブームに取り付けられ、ブーム軸と同じ軸回転をして地山を切削するものである。ブームは0.5mの伸縮量もち、俯仰および旋回により盤上4.3m、盤下0.36m、幅4.6mの断面掘削が可能であり、ずり積はギャザリングアーム式および後部一次コンベヤーにより行われる。自重およびヘッド部駆動動力は30t、125kWである。

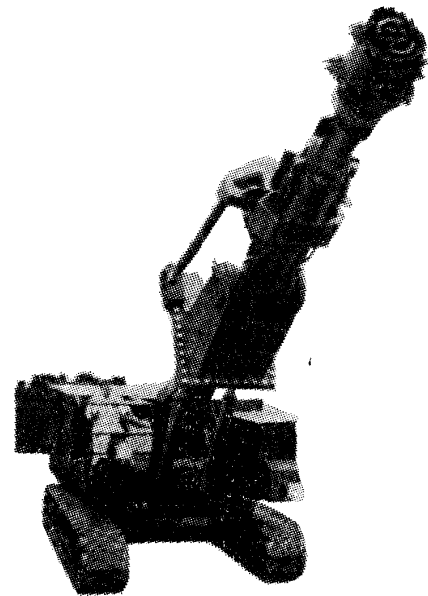
この掘削機は、切削ヘッド部、ずり積込み運搬部、走行装置部、油圧装置部の四つの部分から構成されているが、その構造から表—9.5のように分類される。

自由断面掘削機はTBMと違い、小型、軽量であるため、取扱いが簡単で、地質の変化に応じて爆破工法との切換えが容易である。そのほかTBMでは全断面を一斉に掘削することになるので、切羽に不良地質が部分的に出現した場合、その対応は困難であるが、この機械であれば部分掘削となっているので、容易に対処することが可能である等の長所を有している。

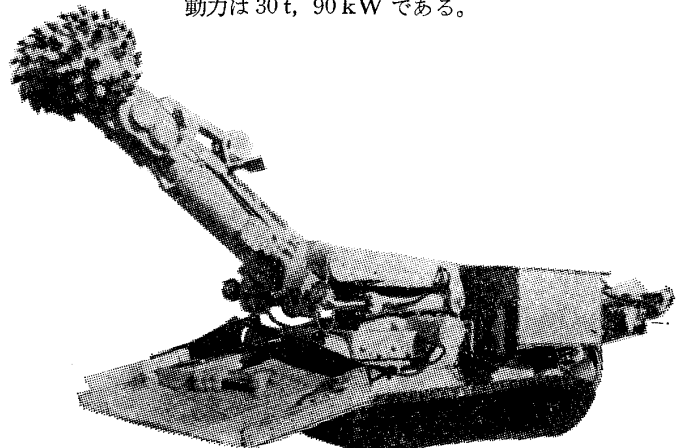
この機械はアーム式であるため、走行機能あるいはアーム長さとのバランス等の関係で、掘削断面積でおおむね40m²ぐらいまでのものが開発されている。また地質条件としては、岩石の一軸圧縮強度で50~300kg/cm²の軟岩に適していると考えてよい。

9.2.3 特殊工法

ゆう(湧)水が多い、地盤の強度がない、あるいは土かぶ



写真—9.5 日本鉱機株式製のブームエクスキャベータで、機構は三井三池のロードヘッダーと同じである。掘削断面は盤上5.3m、盤下0.4m、幅7.5mで、ブーム伸縮量0.5m、自重およびヘッド部駆動動力は30t、90kWである。



写真—9.6 三菱重工業株式のアルピネ AM 50で、特徴はカッターヘッドがブームと直角に取り付けられて回転する機構で、この方法によればカッターヘッドが地山に支えられる形となり振動が少ない。掘削断面は盤上3.75m、盤下0.1m、幅4.8mで、ブームは固定式で伸縮しない。自重およびヘッド部駆動動力は26t、120kWである。

表—9.5 自由断面掘削機の分類

自由断面掘削方式	
アーム移動式	<ul style="list-style-type: none"> 旋回アーム型 自由アーム型 多連ジブ型 リッパードップ型

りが少ないうえに地表に建造物がある等、地質の条件によって特殊工法が採用される。

(1) 水抜き工法

切羽でのゆう水量が多く、ゆう水圧が大きい場合、水抜き坑の掘削や水抜きボーリングを施工し、自然排水により

表—9.6 水抜き工法と機械

工 法	削 孔 機	排 水 設 備
水抜きボーリング工法	削岩機 ボーリング機械 (ロータリー式, パーカ ッション式, ロータリー パーカッション式)	自然排水
ウェルポイント工法	上記のほか	ウェルポイント, 真空ボ ンプ
ディープウェル工法	アースオーガー機	水中ポンプ

表—9.7 注入用機械の種類

削 孔 機	グラウトポンプ	グラウトミキサー
削岩機 ボーリング機械 (ロータリー式, パー カッション式, ロータリー パーカッション 式)	ピストン式(高圧注入) プランジャ式(中圧注入) スクリュー式(低圧注入) ダイヤフラム式(") カニフ式(")	機械型(低速, 高速) 噴流式 圧気式

切羽での掘削を可能にする工法がとられるほか、地質がシルト、砂、砂礫層等で土かぶり小さい場合、ウェルポイント、ディープウェルによる強制排水工法が採用される(表—9.6)。

(2) 注入工法

大量のゆう水がある場合や軟弱地盤のところでは地山に注入材を注入して、止水あるいは地盤強化が行われる。注入材の種類により懸濁液型(粘性が大きく、き裂の大きい場合に使用)と溶液型(粘性が小さく、浸透性が必要なときに使用)に、また工法の種類により、単管注入工法、二重管注入工法、高圧噴射注入工法に分類できる(表—9.7)。

(3) メッセル工法, パイプルーフ工法

土かぶりが小さく、地表面に道路か建物等が存在するとき、あるいは掘削による地山の緩み、地表面の沈下を防止するため、軟弱地盤のところではメッセル工法かパイプルーフ工法が採用される。

メッセル工法は掘削しながら鋼矢板をジャッキにより送り込むもので、同種のものに、ランツェベルノルド工法、ブレードシールド工法がある。

また、パイプルーフ工法は掘削に先立って、掘削断面外

に鋼管をトンネル軸方面に挿入して屋根を形成するもので共に有効な工法である。

9.3 NATM

9.3.1 NATMの特徴

戦後、山岳トンネルにおいては大型施工機械と鋼製支保工の導入により、トンネル工事の急速化、低廉化が進められてきたことは先に述べたところであるが、考え方としては、トンネルに及ぼす土圧は鋼製支保工と剛性のある覆工により、リジッドに支えるものとしてきた。

しかし、最近、ラプセビッツ等による新しい理論に基づくNATMが導入され、着実に普及しつつある。この工法の特徴は、①トンネルは地山でもたせることを掘削の基本にしており、②そのため、地山の強度維持および覆工へ作用する土圧の軽減と分布の均等化を図るため、薄肉の吹付けコンクリートとロックボルトを施工する。③かつ、現場計測を行うことによって周辺地山の挙動を確認し、併せて本覆工施工の最適時期を決定するとともに、計測結果を未掘削区間の設計・施工に反映させるところにある。

9.3.2 施 工

NATM工法での掘削は、通常ショートベンチカット工法が採られる。一般に2段～3段ベンチが普通であるが、硬岩のところでは全断面工法が採用される。また、施工する吹付けコンクリート厚、ロックボルトの本数も地質によって当然変わるが、一例として表—9.8に掘削断面積が約80 m²の鉄道複線トンネルの場合を参考に示した。

施工の順序は、①掘削、ずり出し、②支保工建込み金網取付け、③吹付けコンクリート、④ロックボルトで行われるが、図—9.1で2段ベンチ工法での使用機械の配置例を示した。

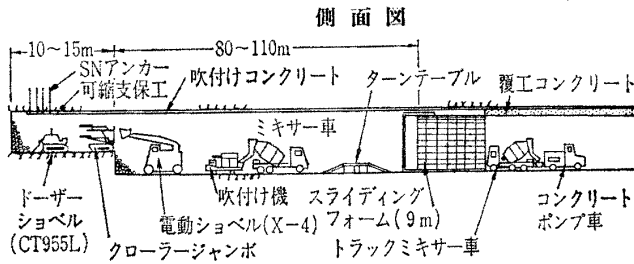
なお、NATMの特徴を十分に発揮するには、施工にあたって次のような点に留意する必要がある。

①掘削面での応力集中を避けるために、機械掘削あるいはスームスプラスチング工法を用いて、掘削面を平滑に仕上げる。

表—9.8 NATMの掘削方法と設計例

パター ン	掘 削 方 法	掘進長 (m)	ロックボルト		吹付けコ ンクリ ート厚 (cm)	支保工	ラ ス	断 面 形	2次覆工 厚 (cm)	インパート施工 時期	余裕量 (cm)
			長 さ (m)	断面本数 (本)							
I _s	ショートベンチ(上半 リングカットまたは 3段)*	0.7~0.9	4~5	23~30	20~25	可 縮	有	複線断面(下盤 にRをつける) またはおむすび	30	同時または20日以 内(ベンチ長5m 以内)	上半20 下半15 下盤10
I _l	ショートベンチ (上半リングカット)	0.9~1.0	3.5~4.5	21~27	15~20	150H	"	複線断面	"	30日以内	上半10 下半5
II _s	ショートベンチ	1.0~1.2	3~3.5	18~25	"	"	"	複線断面(下盤 にRをつける)	"	後施工	上半15 下半10
II _l	"	1.0~1.5	"	15~20	10~15	125H	有 (部分的)	複線断面	"	後施工 (必要に応じ)	上半5 下半3
III _l	ショートベンチまたは 全断面	1.5	2~3	13~18	"	"	有 (アーチ部)	"	"	な し	5
IV	全断面	"	— (2)	0(必要 に応じ)	5~10	な し	"	"	"	"	0

講 座



図—9.1 NATMの使用機械例

②掘削後、速やかに支保を施し、地山の強度を有効に利用する。

③できるだけ全断面を早急に完成させ、安定したトンネル形状で応力の再配分を行う。
等である。

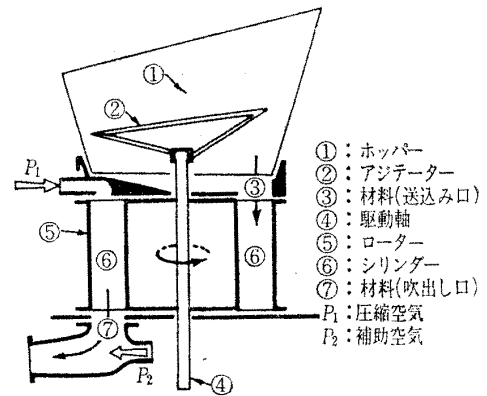
地山が悪く、切羽が安定しない場合は、切羽に吹付けコンクリートを施工したり、あるいはロックボルトを打つと非常に有効である。このような点から分かるように、NATMは地質が良い場合から悪い場合まで、幅広い適用範囲を有しているといえよう。

9.3.3 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートは、その施工法により乾式と湿式に分類される。

乾式工法は、砂+砂利+セメント+急結剤をドライミックスして吹付機でエア搬送し、ノズル部で別ホースからの圧力水を添加しながら掘削面に吹き付けるもので、その長所としては搬送距離が長いこと、吹付け圧力が比較的小さいのでノズルマンに与えるショックが小さいこと、材料がドライミックスのため機械のメンテナンスが容易、機械の構造が簡単なのでランニングコストが安いことなどである。その反面、粉じんの発生が大きく、機械の運転には経験が必要であり、わけてもノズル部での水バルブ操作と、ノズルの壁面との距離、角度等の吹付け方法により、コンクリートの品質やばね返りが大きく左右される欠点がある。

一方、湿式工法は、砂+砂利+セメント+水をあらかじめ練り混ぜて、ウェットの状態のものを吹付機で搬送、搬送中で急結剤を混入して掘削面に吹き付けるもので、その長所は、①水、セメント比を一定に管理できるので品質のばらつきが少ない、②粉じんの発生が小さい、③吐出量が大きく施工能率がよい、と乾式の欠点を克服している点である。しかしその反面、搬送距



図—9.10 乾式ローター型吹付け機の原理

離が短く機動性が悪いことから、昨今のトンネルではほとんど使用されていない。

吹付機は表—9.9のように分類できる。

表—9.9 吹付機の分類

吹付機	乾式工法	チャンパー型
		ローター型
	湿式工法	スクリー・チャンパー併用型
		ポンプ型

なお、チャンパー型としてはトルクレット、ローター型にはアリバ、メナディエ、技術資源開発社のものが、また

表—9.10 計測離隔・頻度の標準

	計測項目	計測離隔	配 置	頻 度 (回)			計測器具および方法
				0~15日	16~30日	31~日	
計測 A	坑内観察調査	全延長	各切羽	1回/日	同左	同左	
	内空変位測定	10~50m毎	水平2測線または6測線	2~1回/日	1回/2日	1回/週	コンバージェンスメーター
	天端の沈下測定	同 上	1 点	2~1回/日	同上	同上	レベルによる水準・測量
	ロックボルトの引抜き試験	50~100m毎	1断面5本 	—	—	—	センターホールジャッキ等
計測 B	地山試料試験	200~500m毎	—	—	—	—	
	地中の変位測定	同 上	3~5箇所/断面 深度は5種以上	2~1回/日	1回/2日	1回/週	エクステンソメーター
	ロックボルトの軸力測定	同 上	3~5箇所/断面 1本当たり5点以上	同上	同上	同上	メカニカルアンカー
	覆工の応力測定	同 上	接線方向、半径方向、各3~5箇所/断面	同上	同上	同上	土圧計 応力計
	地表地中の沈下測定						水準測量 エクステンソメーター
	坑内弾性波速度測定	500m毎	測線長100~200m	1回	1回	1回	

スクリー、チャンパー併用型としてはコンパルナス、スピロクリート、テクマン、ポンプ型にはチャレンジックがある。

トンネル内ではほとんど乾式工法の吹付機が使用されているのは、搬送距離が長い、トンネルのような狭い場所では機動性を発揮できること、またドライミックス材料に水を添加する位置を、ノズル先端の手前数メートルにすることによって粉じんの発生を小さくできる（これを半湿式工法と呼んでいる）ことによる。

吹付機の例として乾式ローター型の原理を図9.2に示す。

コンクリートに鋼繊維（スチールファイバー）を一様に分散させたものを鋼繊維補強コンクリートと称するが、従来のコンクリートに比べせん断強度や曲げ引張り強度が比較的高いため、土圧の大きいトンネル等に有効である。

このコンクリートでは鋼繊維塊を手際よくほぐし、コンクリート材料中に均一に分散させること、練り混ぜ中に分離が生じないようにする必要がある。最近では、鋼繊維分散投入に際し、ディスペンサーと呼ぶ機械が建設ファスナー、住友金属工業、ダーフィン社等で開発され、使われている。

9.3.4 計 測

計測は NATM 工法において、工事を安全に進める、合理的設計を行う、二次覆工の打設時期を決めるうえで重要な役目を持っている。

日本トンネル技術協会では「NATM の計測指針に関する調査研究」において、①トンネル周辺地山の安定の確保と設計、施工への反映のために行う日常の計測を計測A、また②将来の工事計画の策定と未掘削区間の設計、施工のための代表箇所Aに追加して行う計測を計測Bとし、その作業標準案を表9.10、図9.3のように示しているのが参考になろう。

日常の計測（計測A）では、坑内観察、内空変位、天端の沈下、ロックボルトの引抜き等の各調査を行うこととしているが、そのうち特に内空変位調査が重要である。

内空変位測定によって

(1) 切羽掘削後、早期に最終変位量を予測し、安全性を検討して、一次覆工の追加の要・不要を判断する。

(2) 下半掘削等による一次覆工の安全性を判断する。

(3) 二次覆工打設時期を判断する。

等が可能だからである。

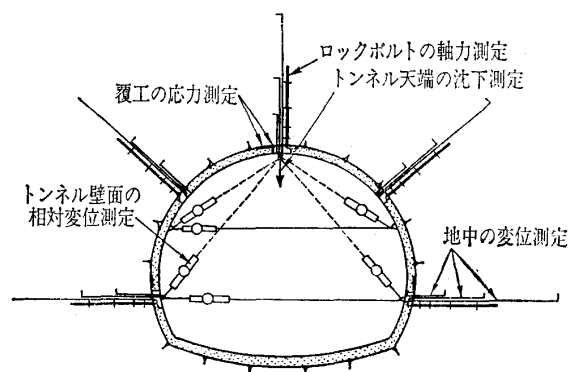


図9.3 計器配置例

通常、天端の沈下、インバートの盤膨れ、側壁のはらみ出しなどの時間的変化を測定するため、トンネル内空の2点間距離を「コンバージェンスメーター」を用いて測定している。

代表的箇所で行う計測（計測B）では、かぶりが浅いトンネルで、掘削に伴う地表面への影響等を調べるための地表・地中の沈下測定等を含んでいるが、重要なのは、将来の設計、施工の判断資料を得るために行われる。地中変位測定、ロックボルトの軸力測定である。

地中変位測定は、トンネル周辺地山の緩み領域を知り、ロックボルト長の決定の判断資料とするものである。通常これには、エクステンソメーターが用いられるが、これはボーリング孔内に深さの異なる1～8点の測点を固定し、トンネル壁面と測点間に生ずる相対変位量を測定するものである。

ロックボルトの軸力測定は、ロックボルトの本数、パターンを決定するための判断資料とするものである。これにはメカニカルアンカー等が用いられるが、これはボルトのひずみをダイヤルゲージで測定するものである。

参 考 文 献

- 1) 土木学会、岩盤力学委員会、第二分科会：トンネル岩盤分類の考え方、土木学会誌、1979. 11.
- 2) 池田ほか：わかりやすい土木地質学入門、土木工学社
- 3) 日本トンネル技術協会：トンネル工事用機械ハンドブック 上・下巻
- 4) 小竹ほか：トンネル工事用機械、山海堂
- 5) 天野ほか：山岳トンネル、技報堂
- 6) 土木学会：わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望
- 7) 日本トンネル技術協会：NATMの計測指針に関する調査研究報告書