

## トンネルに関する三、四の問題を裏から考察する

齋 藤 徹\*

### 1. はじめに

最近トンネル建設が日本全土にわたり活発となり、その延長もますます長大化してきたとはよくいわれるところである。これを国鉄の第三次長期計画と過去の建設歴史との対比によって見ると、表-1 のとおりである。この表によってわかるとおり、新しい線路はトンネル延長が急激に増加し、かつ長大化している。山陽新幹線（新大阪～岡山間）においては、その傾向が顕著にあらわれており、線路規格の向上と平地における地域開発と相まって、今後このような傾向はますます拍車をかけられることは明らかである。狭い平地に人家、工場、鉄道、道路が雑然と軒先を接し、重なり合い、隣り合って造られており、あまつさえ土地価格が暴とうし、騒音振動等の公害が社会問題化している昨今であって見れば、新しく建設される鉄道が次第に山の中に追い込まれ、より高価な投資を強いられるのは今後とも逃れることのできない日本の宿命ともいうべきであろう。申すまでもなくトンネルを作るということは多額の工費を必要とするし、一方技術の巧拙により所要経費に大きな差異を生ずる。戦後わが国のトンネルの設計施工技術は、鋼製支保工の普及と相まって急速な進歩をしてきた。請負会社では、こぞって新進の技術者を育て新しい機械、施工方法を導入し、見違えるばかり近代化した。一方計画者であり発注者である企業者側の技術は、一概にいってしまえばお叱りを受けるかも知れないが、全平均的には進歩は停滞し、あ

る面では低下もあるのではないかと思う。施工業者の技術を高く評価し、責任施工に対する信頼感が一般に企業者側にゆきわたり過ぎたきらいはないだろうか。

そこで問題なのは、施工業者が、この信頼に十分応えて、施工上の諸問題解決への努力を全社的にこなしているか、企業者側に相手だのみで、指導、研さんの意欲において若干の不足が感じられないであろうか、ということである。暴言かもしれないが、慢心と過信と怠慢が最近 10 年ほどの間トンネル技術をマンネリ化し、進歩発展を阻害しているような気がする。

別の表現をすれば、企業者側にはトンネルは業者にまかせておけば時間が経てばチャンとでき上っているという成り行きまかせの気運が全くないとはいえないし、請負者側においては受注量の増加に応じ切れないで、技術的にも意欲的にも低拙な労務者の就業比率が増えてきているし、これらを訓練し施工の能率化を図るけん引力、指導力が特に求められるにもかかわらず、現状はこれまた成り行きにまかされている場合が多い。さらに悪いことには、失業保険制度の悪用により、労務者の就労が不安定になっている。工事の高能率化も労務者の訓練も、とても期待できるとは思われない。

このような状態で、全国で数多くの高価なトンネルが計画され、施工されることに大いなる抵抗を覚えざるを得ない。

こんな世のすね者のような物のいい方に対しお叱りを受けることは覚悟の上、あえて全国の土木技術者、トンネル屋に今後の奮起を呼びかけたい。

表-1 トンネル建設の推移

年	次	建設線路延長 (A)	新設トンネル(合計画中)		トンネル割合 (B/A)	トンネル平均長 (B/C)	最長トンネル
			延長 (B)	本数 (C)			
大正 15 年～昭和 10 年	戦前でトンネル建設の最も盛んであった時代	4 990 km	270 km	570 本	5.3%	470 m	清水トンネル延長 9 700 m
昭和 40 年～昭和 46 年	国鉄第三次長期計画(山陽新幹線)	3 300 (162)	460 (57)	600 (33)	13.9 (35.2)	770 (1 720)	北陸トンネル 13 870 m 六甲トンネル 16 200 m

注) ( ) は山陽新幹線新大阪～岡山間

\* 正会員 国鉄本社山陽新幹線建設部工事課長

トンネル論議の口火として三、四の話題を提供してご批判を賜りたい。

## 2. トンネルの施工速度

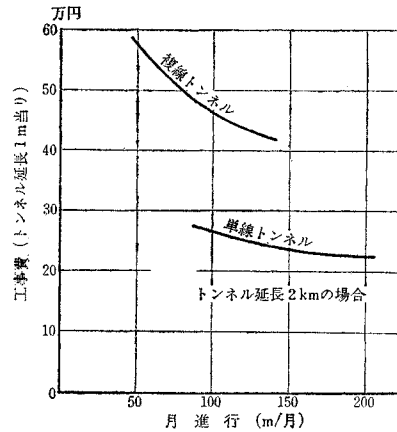
過去から現在にかけてのトンネル掘進速度の記録は表一2 のとおりで、戦後全断面掘さく工法が導入され、鋼

表一2 日本の山岳トンネルの掘進速度記録

トンネル名	年代(昭和)	企業者	掘さく断面(m <sup>2</sup> )	日進(m)	発破数(発破)	月進(m)
仙山	11年	国鉄直轄	導坑 11			209
真那板山	12年	国鉄直轄	導坑 12	11.0	5	231
大原	29年	国鉄	全断面 30	10.8	5	265
奥只見15号	31年	電源開発	全断面 29	14.0		275
逢神坂	32年	国鉄直轄	全断面 30	14.7	7	
曾根	32年	国鉄直轄	全断面 30	18.2	8	301
大町ルート	34年	関西電力	全断面 36	20.3		340
黒部ルート	35年	関西電力	全断面 22	25.1	10	540

製アーチ支保工の普及と相まって施工速度は急速に向上し、年々記録が更新され数年にして従来の3倍近くになった。しかし、昭和35~36年を最後に記録更新が止ってしまっただけでなく、逆に低下の傾向にさえる。最近では月進200m以上を掘進したという話も余り聞かなくなってしまったのは何故であろうか。前にも述べたように労務者不足にともなう技術力の低下が最大の原因となっていると思われるが、そのほか、記録に対する意欲の減退も大きな因をなしていると思う。かつての清水トンネルの懐旧座談会における某先輩の話が、思い出されるが、こんな話であった。「トンネルを掘る場合、トンネル技術者の心境は今も昔も変らぬはずだと思うが、必ず何か目標を立てる。長いトンネルを掘る場合は迅速施工が大きな目標となり、そのためにどの辺に重きをおくかということを考えなければならない。清水トンネルを施工していたころ(昭和2年ごろ)、アメリカのニューカスケードトンネル(延長12.5km)で月進351mという新記録を出したということが技術屋仲間で最大の話題となった。同じころ、清水トンネルでは月進110mしか出しておらず、このアメリカの記録を追いかけたいとの意欲に燃えたものだが、技術力と国力の差はいかんともしがたく、結局100mあまりの記録に止ってしまった。ヨーロッパでは1900年、1910年とか今世紀のはじめにシンプロン(延長19.8km)、レッチベルグ(延長14.5km)あたりで、300mに近い月進を出しており、1940年ごろにはアメリカのカルトンとかデロウェイとかいうところで月進569mを出している。欧米は地質が良くて比較にはならないという話を良く聞くが、迅速施工というのがトンネル技術の一つの命題であれば、常に記録への努力を払うべきである。日本の現状は目標がなく、ただ与えられた工期内に完成すれば、といった慢然とした気風が見られるのは残念なことだ……」。

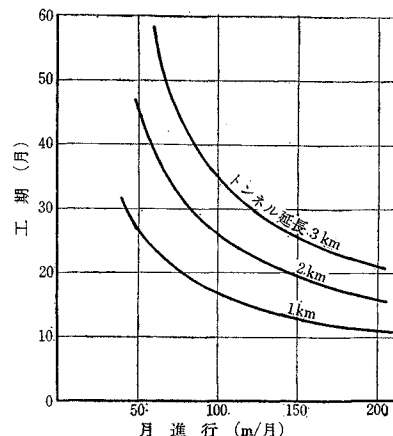
図一1 月進与工事費の関係



70才近いこの老トンネル屋のお言葉は、切々として心をうつものがあつた。

掘さく速度を上げるということは、技術者としての気概だけでなく、工費節減のためにも今後深く反省し努力すべきことである。図一1は現在われわれが行なっている積算方式により、進行速度と工事費の関係を試算したものである。この図によれば、単線トンネルの場合、月進100mを200mに向上させることにより約15%、複線トンネルの場合で月進70mを140mに向上させることにより約20%の工事費が軽減されることになり、さらに工期が大幅に短縮(図一2)することによる資本利子の節減も多額にのぼるはずである。別の観点からいえば、同額の工事費で完成させるためには工事費中の1/4ぐらゐ占める労務費を平均60~80%増額しても、なおかつ工期短縮による利益が大きく残る勘定になる。また労務賃金を全般について増額するのではなく、全労務者の内の特殊な職種、すなわち foreman, operator 等についてのみ考えれば、これらに2倍3倍の賃金を支払っても上記と同じ効果があると思われる。これがトンネル技

図一2 月進と工期との関係

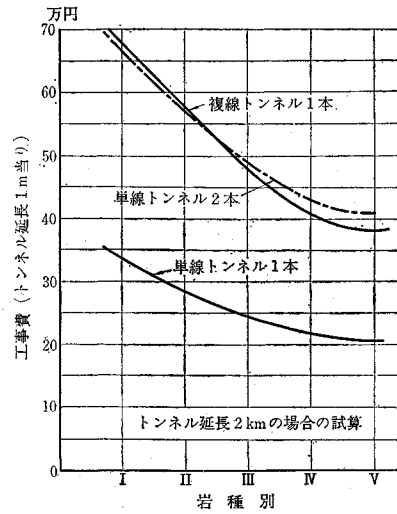


術者の技術向上と特殊技能労務者の養成が強く求められる所以である。

### 3. トンネルの断面と工事費

最近、国鉄の線路増設工事計画に当っては、列車速度の向上に対処するため、曲線、こう配の改良を同時に実施する機会が多く、ともなって複線トンネルが設計されることが多い。単線2本か複線1本かの議論は昔からくり返されてきたが、最近では将来の線路保守の便を考えて後者が常識のようにになっている。しかし軟質土の現場では、複線断面なるがために施工上非常に苦勞をしている。なかでも湧水等のため切羽が止ったときの有形無形の出費は単純なソロバン勘定に乗らない場合が多い。昔流の木製支柱式支保工を使っての新填式工法時代の比較では、山が良ければ単線×1.8倍ぐらいで複線トンネルができるが、山が悪くなるとその倍率は2.2~2.4倍になるといわれていた。最近H鋼支保工による工法が普及し、はたして昔と同じような傾向があるかどうかを知るため、表-3のような仮定を設けて試算してみた。結果は山の良い場合で1.85倍、悪い場合でも2.06倍というようにその開差が縮まっている(図-3)。これは試算方法の欠陥によるものもあるかもしれないが、それよりも施工の機械化、大型化により断面が大きいほど機械

図-3 岩種別と工事費の関係



の稼働が容易になるという有利さが表われたものと思われる。しかし反面、地質の変化、湧水による切羽のストップ、すなわち機械の遊休と多数の労務者の休業による損害は、逆にばく大であることにもなる。現在の契約が地質変動、湧水に対し明確にされていないだけに、表-3にあらわれたような単純な比較が単・複の比較であると断ずるのは早計に過ぎる。契約条項が本当に適正なるものになれば、実費としては昔の倍率に近づくのかもしれない

表-3 複線・単線トンネル工事費比較一覧表

項 目	単 位	複 線 ト ン ネ ル			単 線 ト ン ネ ル			
		軟 岩(岩I)	中硬岩(岩III)	硬 岩(岩V)	軟 岩(岩I)	中硬岩(岩III)	硬 岩(岩V)	
一 般 事 項	コンクリート巻厚	cm	75	60	45	60	45	30
	掘さく断面積	m <sup>2</sup>	69	65	62	34	30	29
	支保工種別率	%	H-200間隔0.6m	H-175 1.2m	H-150 1.2m	H-150 1.0m	H-125 1.2m	H-125 1.5m
	支保工建込率	%	100	100	70	100	100	50
	覆工断面積	m <sup>2</sup>	17.2	13.6	10.0	10.1	7.5	4.6
	掘さく方式		導坑先進半断面	導坑先進半断面	全断面	導坑先進半断面	導坑先進半断面	全断面
	掘さく平均月進	m/月	45	90	160	70	140	200
	覆工平均月進	m/月	45	90	160	70	140	300
ト ン ネ ル 延 長	km	2	2	2	2	2	2	
主 要 設 備	ジャンボ	台	導坑上半 1	1	全断 1	導坑 1	全断 1	
	さく岩機	台	シンカー 14	シンカー 19	ドリフター 20	シンカー 7	シンカー 9	ドリフター 12
		台	ピック 8	ピック 8	ピック 6	ピック 8	ピック 8	ピック 6
	ザリ績機	台	RS-85 1	1	コンウエイ 2.5	RS-85 1	1	コンウエイ 1.5
	ザリト	台	GS-5 4	4	100型 1	GS-5 1	1	100型 1
	機関車	台	4.5 m <sup>3</sup> 19	45. m <sup>3</sup> 22	6 m <sup>3</sup> 16	4.5 m <sup>3</sup> 11	4.5 m <sup>3</sup> 16	6 m <sup>3</sup> 13
		台	6t 7	6t 7	8t 5	6t 6	6t 6	8t 4
	スチールフォーム	m×台	ノンテレ6m 1	ノンテレ10m 1	ノンテレ10m 1	ノンテレ6m 1	ノンテレ10m 1	ノンテレ15m 1
	コンクリートポンプ	台	20 A 1	20 A 1	20 A 1	12 A 1	12 A 1	12 A 1
	アジテーターカー	台	3 m <sup>3</sup> 5	5	5	3	3	4
コンプレッサー	PS	400	500	700	250	300	400	
換気機械	台	ローカルファン 3	4	4	3	4	4	
電力設備	kW	7.5 PS 330	390	550	225	260	420	
工 事 費 (トンネル延長1km当り)	掘さく費	千円/m	388	287	226	192	134	124
	支保工費	千円/m	115	48	33	30	16	10
	覆工費	千円/m	172	143	119	109	94	70
	全工費	千円/m	675	478	378	331	244	204

ない。

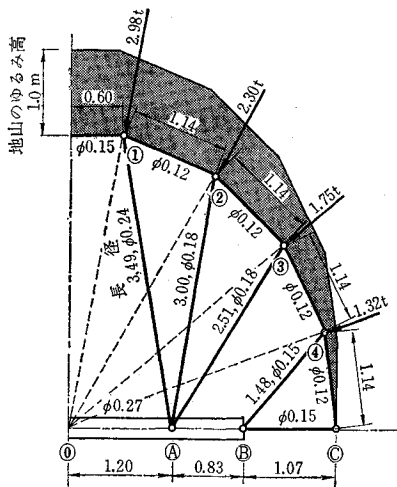
種々の不測の事態を考慮すれば、単線トンネルか複線トンネルかの論議は今一度俎上に乗せる必要があるのではないだろうか。少なくとも設計者たるものに、考える余裕だけは求めたい気持である。軟弱土地区における複線、三線トンネルで悪戦苦闘している現場を見るに見かねて、あえて問題を提起する次第である。

#### 4. 鋼製アーチ支保工の補強

最近のトンネル施工現場で坑口付近、かぶりの少ない区間、軟弱土中等における複線断面掘さくの実態は、いろいろの問題と警告を提起していると思う。従来の木製支柱式支保工のような木外しという危険な作業から完全に解放され、鋼製支保工は崩壊、死傷事故からは坑内を安全に保護している。しかし支保工の変状、沈下、あわや崩壊かといった程度の事故は意外に多いのではないだろうか。特に鋼製支保工と大断面掘さく、移動型わくによるコンクリートの機械打設がリンクされて施工される場合には、支保工だけで放置される不安定な状態が長時間続き、事態をますます悪化させている場合が多い。その対策として、増し支保工の建込み、根固めコンクリートの打設、仮巻コンクリートの施工等の手が使われているが、いずれも労多くして功少ない方法に過ぎない。

今ごろ昔の木製支柱式支保工のことをいえば時代錯誤

図-4 後光ばり支保工寸法と仮定荷重



- 荷重条件
- ・ Rock tunneling with steel supportsによる主動荷重
  - ・ 地山のゆるみ高 1 m
  - ・ 地山の単位重量 2.7t/m<sup>3</sup>
  - ・ 支保工ピッチ 1 m

凡例  
 図中太線は部材  
 太線中の数字は部材長さや径を示す

と笑われるかもしれないが、鋼製支保工との優劣を論ずるものでなく、木製支保工のもつ補強手段の容易さと有効さを再認識し、反面鋼製支保工の補強に対する弱点を反省し、今後の施工法の改善への足がかりとしたいと思うものである。

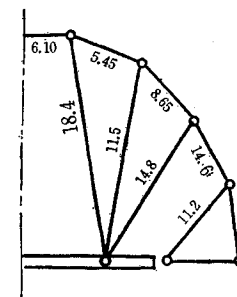
図-4のような単線トンネル後光ばり支保工の各格点上等しい高さ(1 mとする)の地山がゆるみ、各格点に柱状の地山重量が荷重として支保工にかかることを仮定し(Procton & Whiteの Rock tunneling with steel supportによる)はり各部材の応力を求め、表-4の生松丸太材の破壊応力から安全率を求めると、図-5のよ

表-4 生松丸太の破壊強度

荷重	荷重の方向	破壊強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
圧縮	せんいに平行	280-1.92λ
せん断	せんいに平行	30
	せんいに直角	45
支圧	せんいに平行	280
	せんいに直角	90
曲げ	せんいに平行	320

注) λは細長比

図-5 支保工各部材の安全率

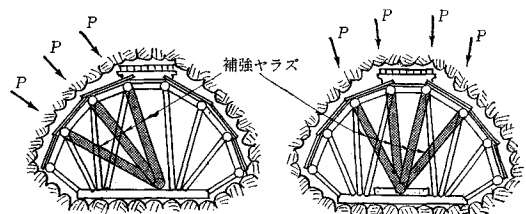


うな計算上の数値が得られる。これによれば、破壊強度に対応するゆるみ高さは①-②間の内ばりのけたに対する支圧応力が最弱点となり、5.45 mとなる。図-5により各部材ごとに安全率が非常に不均衡であることがわかるが、このことは、逆に図-6のような支保工

補強方法が荷重の状況に応じて適宜採用できることと、その補強により想像以上の大きな地山のゆるみに対して抵抗しうることを意味するといえよう。

一方鋼製アーチ支保工の強度に関しては、坂本貞雄氏の論文その他により、通常の単線トンネルの場合、H鋼-150×150、ピッチ 1 m に対しては、2400 kg/cm<sup>2</sup>の鋼材の降伏強度に対応する地山のゆるみ高さは 5~6 m とされているが、ひとたび変状を受け始めたとき、緊急に入れる増し支保工の補強効果は、100%は期待できないし、特に偏圧に対してはさらに期待は少なくなる。

図-6 後光ばり支保工の補強方法(例)



こう考えてくれば、土圧増大偏圧に対する支保工補強の容易さ、迅速さ、効果等に関する限り、鋼アーチは木製支柱式に劣るものと考えざるを得ない。さりとて、鋼アーチを木製支柱に変えるというわけではなく、鋼アーチ支保工の補強方法については慣行にとらわれず、新しい方法が工夫されるべきことを強調したいのである。

### 5. トンネル ボーリング マシン

トンネル掘さくの安全性をたかめ、労務者の不足を補なうため、また従来の火薬使用工法の作業の不連続性による時間的ロス省いて施工速度を向上させる手段として、トンネル ボーリング マシンの開発が世界各国で進められ実用化しつつあり、わが国においても遅ればせながら機械の国産化への努力が行なわれていることは、きたるべき機械化連続掘さく時代を告げるものと思う。

現在実用化されつつあるトンネル ボーリング マシンの掘さく機構と構造から見て、最大の欠陥は、軟弱層、断層の突破と硬岩（圧縮強度 800 kg/cm<sup>2</sup> 以上）の掘さく能力であるといわれている。一方、わが国の地質条件は、衆知のように諸外国と比べはるかに複雑で、全トンネルが均一の岩質で終始することはほとんど期待できない。また、岩の硬さの分布についての概念をつかむために、前記の国鉄第三次長期計画に含まれている新設予定トンネル 600 本・460 km について分類すれば、表—5 の値が得られる。すなわち、40%以上のものがトンネルボーリングマシンにとっていわゆる硬岩に属するものであり、さらに機械掘さくの対象とすべき 2 km 以上のトンネルについては、46% が硬岩、24% が硬岩と軟岩の混合したものと推定される。このことは、約 70% のトンネルが硬岩掘さく可能なマシンを必要とすることを意味する。

表—5 国鉄第三次長期計画中のトンネル調べ  
(昭和 40 年~46 年)

岩 分 類	トンネル全延長		2 km 以上の延長	
	延長 (km)	比率 (%)	延長 (km)	比率 (%)
硬 岩	187.5	41	86.6	46
中硬岩、軟岩	162.2	36	56.0	30
混 合	106.2	23	44.4	24
計	455.9	100	187.0	100

注) ① 硬岩とはコンクリート用骨材として使用可能のもの  
② 混合とは硬岩と中硬岩軟岩が混っているもの

過去 20 年あまりの間で、主としてアメリカにおいて開発され改良されてきたトンネル ボーリング マシンは、かなりの台数になっているが、このうち成功した例は大部分が岩質が比較的軟かく破砕が容易で、地下水面上にあり、きれつ、断層、風化などの欠陥が区間的に少なく、といった良好な条件下で掘さくされたものであ

り、これまでの実績だけから、硬岩掘さくについてトンネル ボーリング マシンが、さく岩爆破の方式に卓越しているということは本家であるアメリカにおいてすらいわれていない。

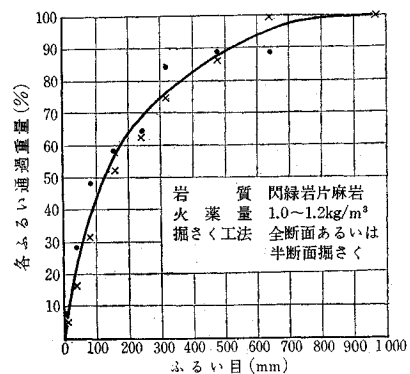
わが国のように硬岩と軟岩が入り交って現われる地勢で、しかも断層、湧水をとまなっている複雑な地質構造は、トンネル ボーリング マシンの実用化については最も困難な条件下にあるといつてさしつかえないだろう。しかし、将来の労働力不足、国民経済の急テンポの発展に対処するためには、トンネル ボーリング マシンは何が何でも開発されるべき機械であることは明らかで、それがために一段と飛躍した掘さく機構の改良が必須条件になると思う。

現在実用化しているマシンの掘さく機構について、つぎのような見方をしてみた。

#### (1) トンネルずりはできるだけ大塊のまま搬出すればよい

図—7 は圧縮強度 1 000 kg/cm<sup>2</sup> 程度の火成岩のトンネルで、1.0~1.2 kg/m<sup>3</sup> の火薬量で全断面爆破したときのずり粒径の分布状態である（国鉄直轄、第四中山トンネルで実測）。これによれば、粒径 10 cm 以上のものが重量で 50~60%、かりにトンネル ボーリング マシンでの破砕状態からその粒径を 7 cm 以上と以下に分けると 60~70% が 7 cm 以上のものとなる。

図—7 爆破工法による掘さくずりの粒度分布



爆薬使用による工法では、ずり積機のバケット容量に応じて適量の爆薬を使用することにより、大塊のままずり搬出を行ない、トンネル掘さくの目的を達しているのに対し、トンネル ボーリング マシンの掘さく機構による場合は、そのうちの 60~70% のずりを、さらに 7 cm 以下に破砕しなければトンネル掘さくの目的が達せられないことになる。トンネル ボーリング マシンの硬岩に対する掘さく機構は連続作業であり、地山を荒らさない、悪いガスを発生しない等の時間的、状況的ロスがないという利点が多々あるとしても、掘さくプロセスとして

は、前記のような細破砕という余分なエネルギーを費すことになる。

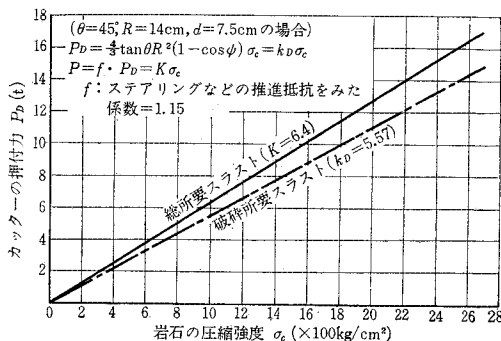
単純、率直に見て、現今われわれが使用できる諸物質の中で、最も安価で大きな破壊エネルギーを貯えているものは、ダイナマイトあるいは ANFO である（原子力を別にして）。この大きな破壊力を使って、可能な限り大きな塊のままトンネル外へ搬出することが最も理にかなった方法のように思う。かく断ずることは、必ずしも正鵠を得ていないであろうが、今のトンネルボーリングマシンの掘さく機構の基本的な問題点が、この辺にあるように思われる。

## (2) 硬岩の迅速掘さくの限界

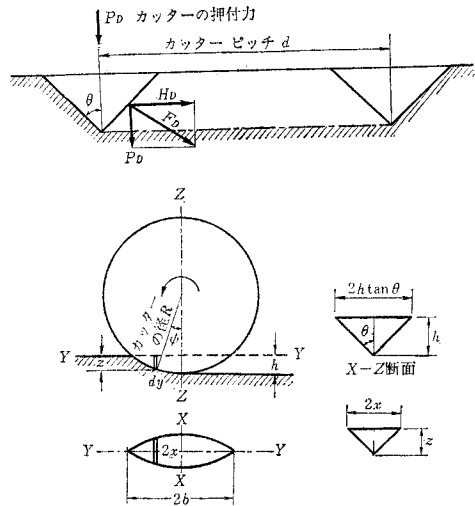
前述のとおり、今のトンネルボーリングマシンの掘さく機構による一つの泣き所は硬岩掘さくにあるが、では従来の爆破工法と比べ、施工速度、採算の面でどれくらいの硬さの岩が実用限界であるか、一歩進んでその限界が除去されるために今後どこをどう改良しなければならないかは、焦眉の課題であろう。

トンネルボーリングマシンの掘さく機構の一つであるディスクあるいはトリコンカッターの岩石破壊機構を、主としてくさびの貫入による岩石のせん断破壊として考えられた小松製作所の小島氏ほか2氏の報告(小松, 第12巻第4号)を引用させて戴くと、結論として、図一8のような押付力と岩石圧縮強度の関係を示されている。この仮定は、くさびの形状が図一9のような尖端がナイフエッジである場合であり、かつカッター相互のピッチに対し、1回の切込みはある深さを持っていることが条件のようである。しかし現実の作業は、カッターの尖端は常に摩耗が進行しており、くさびの貫入によるせん断のほかにカッター尖端には岩石の三軸圧縮強度を越える力が加えられなければ岩石は破壊されないはずである。カッターの摩耗限度、あるいはカッターの取換え時期は、トンネルボーリングマシンのランニングコスト

図一8 カッター押付力と岩石強度との関係



図一9 ディスクカッターの岩石破砕の概念図



トと施工速度とに最も大きな影響を与えるものであり、この問題がカッターの材質改善によって解決すべきものか、岩石の圧縮強度を別の破壊機構、あるいは手段により脆弱化することを併用すべきものが、浅学にして知るところでないが、カッターを押付けることによる岩石の破壊現象が、理論的、実験的にさらに糾明される必要があると思う。

以上まことに非理論的、観念的な感想を述べたがユーザーの立場からトンネルボーリングマシンが、もっともっと理学的、工学的に検討され、硬岩トンネルにおいても、高能率、経済的に安心して使用できるようになることを切望しているものである。

## 6. む す び

トンネルに関する諸問題は多い。それはトンネル技術そのものが経験技術であり、確たる理論的説明がなされていない面が多いからである。また各人は自己の経験と自ら思考したものを常に最上のものと思込みがちであることも、トンネルに定説なしの因をなしているのかも知れない。かくいう筆者自身が、その過ちを犯していることはときどき反省するが、なかなか治らないので困っている。

### 参 考 文 献

- 国鉄：ずい道会議記録
- 小島・千秋ほか：トンネル機械用ディスクカッターの岩石破砕理論
- 坂本貞雄：トンネル鋼アーチ支保工
- 国鉄：神岡線第中山ずい道工事誌

(1967. 9. 5・受付)