

V-7 経済性に優れた長大トンネルの掘削方法に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 11～平 15

担当チーム：基礎道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：真下英人、砂金伸治、遠藤拓雄

【要旨】

トンネルボーリングマシン (TBM) を用いたトンネル掘削は施工速度が速く、支保工の低減も図れるため長大トンネルの建設費を縮減する有力な方策となる。しかし、地質変化の激しい日本で TBM を大断面トンネルへ適用するには地山状態を考慮した支保構造の設計法を確立することが必要である。

本研究では、施工時に TBM トンネルの周辺地山の安定性を評価する方法として機械データの適用性について検討を行ない、機械データは地山安定に必要な支保パターンや周辺の地質状況と高い相関性が見られ、地山評価を行う上では有用な指標となることを明らかにした。また、TBM 工法を用いたトンネルでの補助工法選定手法に関してトラブル発生時における機械データの状況について検討を行い、補助工法の採用が必要となる不良地山部では機械データに何らかの変化が生じる可能性が高いことを明らかにした。さらに、TBM トンネルの支保構造の設計法に関して、土圧が全体的に作用する場合と、局所的に作用する場合について設計モデルを提案するとともに設計に用いる荷重値を算定した。

キーワード：トンネルボーリングマシン (TBM)、機械データ、荷重、支保パターン

1. はじめに

長大トンネルの建設費の縮減を図るためには、トンネルの断面をなるべく分割せずに急速施工を行い、かつ地山の緩みを抑制して支保の軽減を図ることが最も効果的であると考えられる。このため、トンネルボーリングマシン (以下 TBM と略) を活用した機械掘削工法の採用は、建設費縮減のための一つの有効な方法と考えられている。しかし、我が国では地質が脆弱であるために、道路トンネルの TBM の実績は避難坑等の小断面に限られていること、また、その場合の支保設計はほとんどが個別のトンネル毎に試行錯誤的に実施されていることなどから、設計手法が確立しているとは言い難い。今後、TBM の適用範囲を広げ、標準的な工法として普及させるためには TBM を用いたトンネルの掘削時における地山評価手法や、地山状態に応じた支保構造の設計手法を確立する必要がある。

本研究^{1)~3)}では、施工時にトンネル周辺地山の安定性を評価する方法や補助工法の選定手法を提案するため、TBM を道路トンネルの先進導坑や避難坑の施工に用いた時の、掘削時に実際に得られた機械データを分析することにより、機械データと地山状態、支保パターンおよび補助工法との関係の分析を行っ

た。また、TBM トンネルの支保構造を設計するためのモデルについて検討するとともに TBM トンネルの支保工応力などの現場計測や天端での崩落が発生したトンネル事例を分析することにより、TBM 支保工の設計に用いる荷重を算定した。

図-1 に本研究の検討フローを示す。

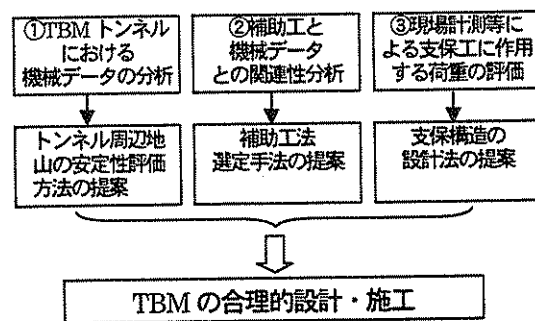


図-1 本研究の検討フロー

2. 機械データを用いた TBM トンネル周辺地山の安定性の評価

地山状況が多岐に渡る日本の山岳トンネルでは、切羽での地山状態などを評価して、あらかじめ設定された支保パターンを施工時の地山状況において変更する、いわゆる情報化施工が重要である。しかし、TBM では、掘削中の地山状況を直接目視確認するこ

とが難しいため、TBMの各種機械データを分析し施工中の地山評価に活用する方法が有効であると考えられる。ここでは、今後のTBM施工のため、機械データと各種地山および地山安定に必要な支保パターンとの関連性について検討する。

分析の対象としたTBMトンネルの主な地質と掘削径を表-1に示す。これらは、道路トンネルの避難坑や先進導坑としてTBMを用いたものであり、掘削径が3.5m~5.0mの計15本(上り線と下り線があるものは2本と数えた)である。

表-1 機械データ分析対象トンネル

トンネル	主な地質	掘削径 (m)
A	凝灰岩、流紋岩、玄武岩	3.5
B	安山岩、角礫岩	5.0
C	安山岩、凝灰岩、砂岩、凝灰角礫岩	5.0
D	砂岩、礫岩、泥岩、砂岩泥岩互層	5.0
E	砂岩、砂岩泥岩互層	5.0
F	砂岩、砂岩泥岩互層	5.0
G	チャート、凝灰岩、粘板岩、変斑れい岩、輝緑岩	5.0
H	チャート、凝灰岩、粘板岩、変斑れい岩、輝緑岩	5.0
I	砂岩泥岩互層、花崗岩、ホルンフェルス	5.0
J	花崗岩	5.0
K	花崗岩	5.0
L	安山岩、凝灰岩、流紋岩	4.5
M	安山岩、凝灰岩、凝灰岩、砂岩シルト岩互層	4.5
N	アブライト、花崗斑岩、凝灰岩	4.5
O	花崗斑岩、流紋岩	4.5

表-2 分析対象機械データ

種類	名称	内容
1次機械データ	カット回転速度	カットヘッドが1分間に回転する回数
	スラスト推力	スラストジャッキ圧にジャッキ内空面積と使用したジャッキの本数の積
	カットトルク	カットヘッドに作用する抵抗
2次機械データ	掘進エネルギー	(スラスト推力/掘削断面積)
	回転エネルギー	(= (カットトルク × カット回転速度) / (純掘進速度 × 掘削断面積))
	掘削体積比エネルギー	掘削体積あたりの総エネルギー (スラスト系と回転系) (掘進エネルギー + 2π × 回転エネルギー)

分析対象とした機械データは、表-2に示すものである。ここで、1次機械データは、TBM掘進中に直接機械より得ることができるデータである。また、2次機械データは、1次機械データを処理して得られるものであり、本分析では、スラスト推力における掘削径の影響を除去した掘進エネルギー、カットトルクにおける掘削径の影響を除去した回転エネルギー、そして両エネルギーを加味した掘削体積比エネルギーを対象とする。

なお、分析に用いた支保パターンについては、各々のトンネルでの実施支保パターンを表-3に示した共通支保パターンに変換して整理した。また、トンネル周辺の地質については、表-4に示すように硬質岩、中硬質岩、軟質岩に分類した岩質で評価した。

表-3 本研究で設定した共通支保パターン

パターン	支保の内容
B	無支保
C I	吹付け(2cm)
C II	吹付け(2cm)、鋼アーチ支保工 H-100 の使用
D I	吹付け(3cm)、鋼アーチ支保工 H-100 の使用
D II	吹付け(3cm)、鋼アーチ支保工 H-125 の使用
L I	簡易ライナー
L	ライナー

表-4 岩質の分類

硬質岩	中硬質岩	軟質岩
斑れい岩		
花崗岩	安山岩	蛇紋岩
花崗閃緑岩	玄武岩	凝灰岩
石英斑岩	石英安山岩	凝灰角礫岩
ホルンフェルス	流紋岩	千枚岩
角閃石岩	ひん岩	黒色片岩
砂岩、礫岩	砂岩、礫岩	緑色片岩
(中生層)	(第三紀層)	泥岩、頁岩
石灰岩	粘板岩	(第三紀層)
チャート	頁岩(中生層)	砂岩泥岩互層
片麻岩	角礫岩	
アブライト		
輝緑岩		

2. 1 平均的な機械データと支保パターンの関係

各トンネルの支保パターンごとの機械データを平均しプロットしたものを図-2に示す。なお、この平均は支保パターン内におけるばらつきを持つデータを単純に平均したものであり、周辺岩質やその他条件を考慮していないことに注意を要する。

純掘進速度と支保パターンの関については、純掘進速度は地山条件が良好で支保規模が小さい場合と地山条件が悪く支保規模が大きい場合に低下する傾向があるとともに、地山が悪い場合の一部では純掘進速度が増加する場合もあった。これは地山条件が良好なほど掘進しにくくなることによる速度低下と、地山状況が不良な場合の掘進に慎重を期することによる速度低下、また逆に岩自体の掘進は容易であることからの速度増加が複合しているためと考えられる。すなわち、支保パターンがBもしくはL程度に該当する地山以外であれば、平均的に見れば純掘進速度と支保パターンの間に関連性は見られる。しかし、純掘進速度は施工上のサイクル等の制約条件も受けやすく、支保パターンとの関連性を現場にて議論することに対しては困難であると考えられる。

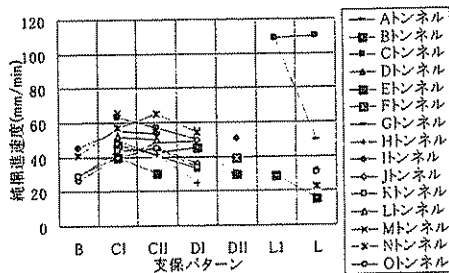
カット回転速度と支保パターンとの関係については、カット回転速度は地山条件が悪く支保規模が大きくなるほど低下する傾向が全体の平均値をとれば読みとれる。しかし、カット回転速度そのものの値の低下の度合いが小さいことから、実際の施工中のリアルタイムの値から支保との関連を導き出す場合

の指標として用いる場合は検討が必要であると考えられる。また、異なったトンネル間でのばらつきも大きいことから、カット回転速度だけから定量的な判断を行うことは困難であると考えられる。

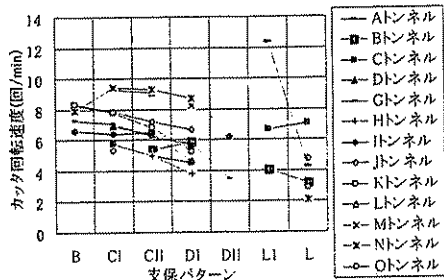
スラスト推力と支保パターンとの関係については、スラスト推力は、地山条件が良好で支保規模が小さいほどスラスト推力が大きくなっている傾向が見られる。このことは、地山条件が良好となれば、岩盤が強固となり、TBM 推進に大きな力が必要となることが原因と考えられる。しかし、地山条件が悪く、支保パターンがL1, Lとなるにつれて、スラスト推力のばらつきが大きくなっている。このことは、地山条件がかなり悪いと支保規模が多岐にわたるだけでなくTBM 掘進に必要な力にもばらつきが多くなりマシン制御が難しくなることを示唆している。

カットトルクと支保パターンとの関係については、カットトルクは地山条件が良好で支保規模が小さいほど大きくなっている傾向が見られる。しかし、地山条件が悪く、支保パターンがL1, Lとなるにつれて、カットトルクのばらつきが大きくなっていることはスラスト推力と同様である。

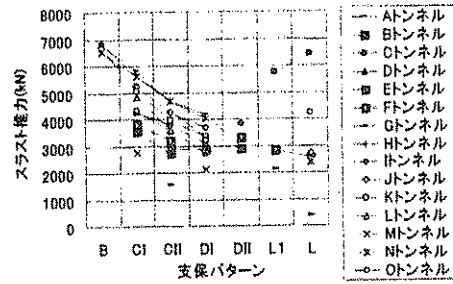
掘進エネルギーと支保パターンとの関係は、全体的な傾向がスラスト推力と同様であることが分かる。これは、本研究の対象のTBM 径がどれも大差なく、スラスト推力から掘削径の影響を除去して掘進エネルギーに換算しても大きな大小関係の変化が生じないことが原因であると考えられる。



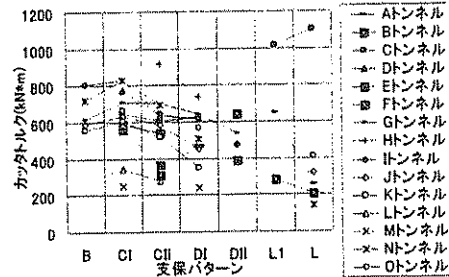
(a) 純掘進速度



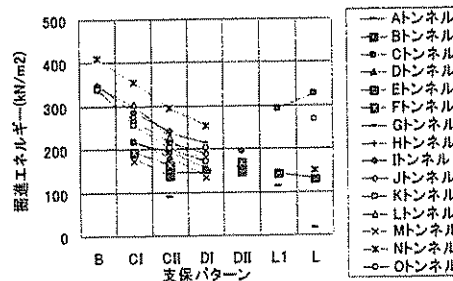
(b) カット回転速度



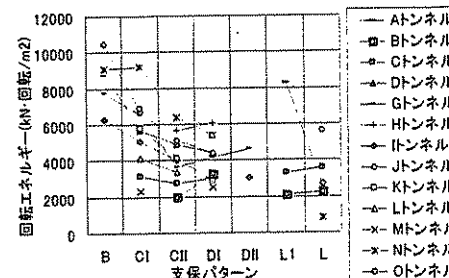
(c) スラスト推力



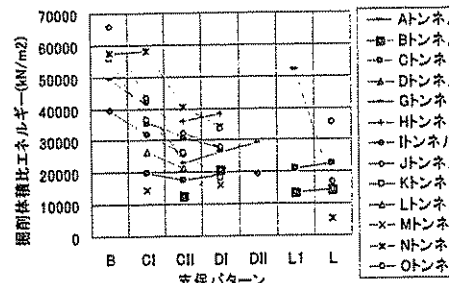
(d) カットトルク



(e) 掘進エネルギー



(f) 回転エネルギー



(g) 掘削体積比エネルギー

図2 平均的な機械データと支保パターン

回転エネルギーと支保パターンとの関係については、回転エネルギーは、地山条件が良好で支保規模が小

さいほど大きくなっている傾向が見られる。また、支保パターンとの相関関係がカットトルクに比べ向上していることが分かる。このことから、カットトルクを回転エネルギーに変換することは、支保パターン選定の指標とするためには有効であると言える。

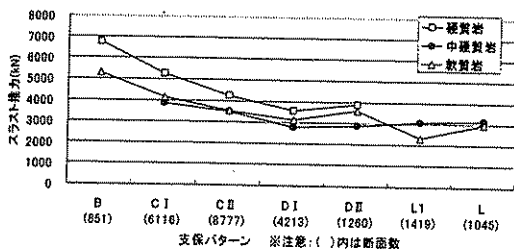
掘削体積比エネルギーと支保パターンとの関係については、回転エネルギーとほぼ同傾向にあることが分かる。これは、掘削体積比エネルギーのうち回転エネルギーの占める割合が大きいことが原因と考えられる。

以上より、施工上の制約を受けやすい1次の機械データと支保パターンとの関連性については支保パターン間に関連性は見られるものもある。しかし、トンネル間、または支保パターン毎でのばらつきが大きい場合もあることから、それら個々のデータから支保パターンを決定するためには検討の余地があると言える。これに対しては、同規模のトンネル径の速度一定区間で推力やトルクを比較することが有効な手段とも考えられるが、このことは実際には非常に困難である。したがって、他の指標と組み合わせること等適切な処置が必要になる場合もあると考えられる。

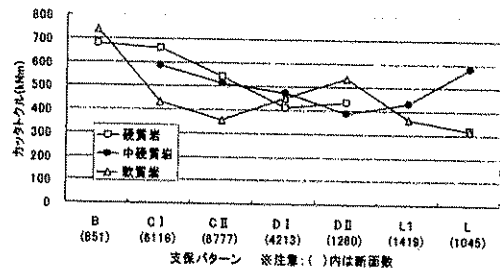
2. 2 全平均機械データと支保パターンの関係

各トンネル間において機械データはある支保パターンや岩質との相関関係があるものの、データにばらつきも有する。ここでは、各トンネルの機械データを横断的に検討し、支保パターンや岩質に対する機械データの傾向をより明確にするため、全てのトンネルの機械データについて平均したものを示す。したがって、ここでの分析はデータのばらつきを無視した分析であることに注意を要する。

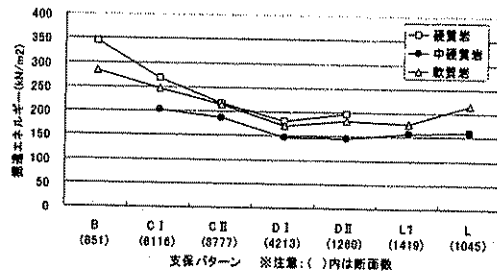
図-3 に示すのは、スラスト推力、カットトルク、掘進エネルギー、回転エネルギー、掘削体積比エネルギーを全トンネルについて平均し、支保パターンおよび岩質ごとにプロットしたものである。



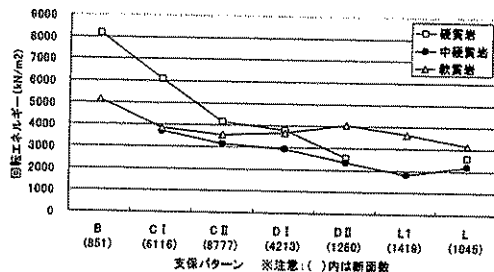
(a) スラスト推力



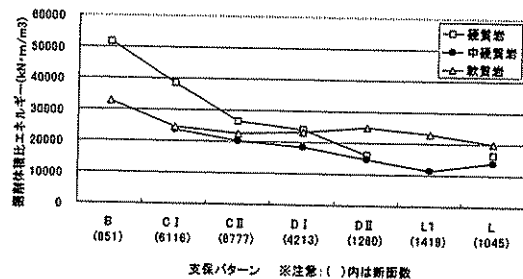
(b) カットトルク



(c) 掘進エネルギー



(d) 回転エネルギー



(e) 掘削体積比エネルギー

図-3 全平均機械データと岩質、支保パターンの関係

スラスト推力については、支保規模がB, C IからL I, L と大きくなるにつれて、小さくなっていることが分かる。また、この傾向は支保パターンがBからC IIで特に顕著である。逆に、支保パターンがD IからLでは、推力がほとんど一定に近づいていることが分かる。このことの原因としては、ある程度規模が大きな支保が採用されている地質状態が悪い地山においては、推力におけるカットヘッド推進反力以外の要因(摩擦抵抗や台車牽引力等)の占める

割合が相対的に大きくなっている可能性も考えられ、今後機械データの吟味が必要である。

カットトルクについては、特に中硬質岩、軟質岩について支保パターンとの相関があまり見られない。トンネルごとのばらつき大きいことが一因であることが考えられる。このように、特に中硬質岩、軟質岩において、複数のトンネルに対して同一のカットトルク指標を用いて支保パターンを選定することは、地山評価を誤る可能性が高いものと言える。

推力を断面積で除したものである掘進エネルギーについては、スラスト推力とほぼ同様の傾向となっている。これは、今回の検討対象トンネルの掘削径が3.5から5m程度とほぼ同程度であったことが原因であると考えられる。今後、大断面TBMの機械データが蓄積されれば、新たな考察を行う必要があると考えられる。

回転エネルギーについては、支保規模との相関が特に硬質岩、中硬質岩についてよく見られ、特に支保パターンBからCIIが顕著である。回転エネルギーは、カットトルクおよび速度、掘削断面積から求められるものである。カットトルクが支保規模との相関が見られなかったのに対して、回転エネルギーには相関がある程度見られたことから、カットトルクについては、速度と総合して判断する必要性が窺える結果と言える。

掘削体積比エネルギーについては、回転エネルギーと同様となっている。これは掘削体積比エネルギーに占める回転エネルギーの割合が大きく、推進エネルギーの要因が相対的に小さくなっていることによる。

また、全機械データを総じて見れば、支保規模と機械データの相関について、硬質岩が他の岩質より際立っている。このように、機械データの分析においては掘削岩質も重要なファクターであり、機械データのダイレクト値だけでなく、掘削中の岩質を掘削ざり等から評価するシステムを確立することも重要であると言える。

3. TBM工法を用いたトンネルでの

補助工法の選定手法

TBMトンネルにおいては、断層、破碎帯、高地下水、膨張性などの不良地山において、掘進停止等のトラブルの徴候が見られる場合が多い。そのような時、掘進停止等のトラブル回避の手段として何らかの補助工法を用いるが一般的である。もし、補助工

法採用が遅れたり不十分であったりしてトラブルを回避できず掘進不可能となれば、TBMの最大の長所である高速施工が実現できず、工費増大につながることも考えられる。したがって、TBMトンネルにおいては、トラブルの原因となり得るような不良地山の適切な把握や補助工法の適切な採用は、施工上極めて重要である。

ここでは、TBMトンネルにおける補助工法採用実績およびトラブルについて、ヒヤリング、アンケート調査、文献調査を行い整理した。また、前章で整理した各トンネルの機械データと補助工法採用箇所との相関について整理し、補助工法採用箇所の機械データがどのように変化していたかを分析した。

3.1 補助工法採用、トラブルの実績

TBMマシンタイプ別の対策時期を図-4に示す。

オープンタイプTBMでは、TBMが停止する前に対策を行う事前対策がトラブル発生後に行う事後対策に比べて多く実施されていた。その理由は、TBM本体に搭載した油圧削岩機により効果的な切羽前方探査(削孔検層等)を行うことができ、その調査結果に基づき、切羽前方にTBM掘進が困難であるような不良地山の存在が予想される場合には、削岩機で施工できるフォアパイリング、鏡ボルトなどの対策を実施しているからと判断される。

シールドタイプTBMでは、オープンタイプTBMと異なり、切羽前方地山を確認するための切羽前方探査(削孔検層等)を効率的に実施することができず、また、フォアパイリング、長尺鏡ボルトなどを効率的に実施することができないため、オープンタイプTBMと異なり、事前対策はあまり行われていなかった。

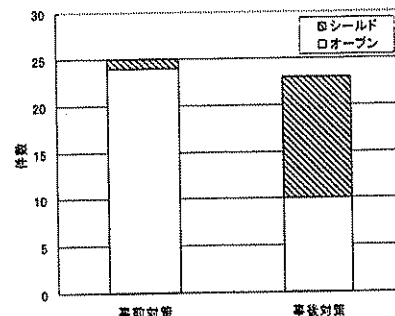


図-4 TBMマシンタイプ別の対策時期

発生したトラブルについて、TBMマシンタイプ別のトラブル現象(掘進不能、TBM拘束、グリッパ反

力、排土不能)を図-5に示す。

オープンタイプでは、トラブル現象のうち、掘進不能(カッタヘッド回転不能含む)が大半であった。その理由は崩落した土砂がカッタヘッドに堆積し、大きなずりの取り込みができず、カッタヘッドが回転不能になったり、推進不能になるからである。

シールドタイプでは、掘進不能とともにシールドタイプ特有のTBM拘束の発生頻度が多いことが特徴となっている。

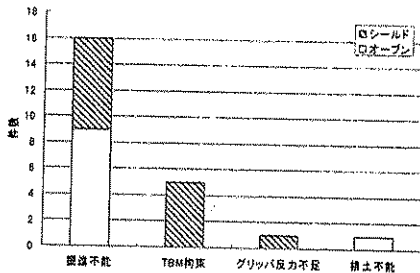


図-5 TBMマシンタイプ別のトラブル現象

事前対策で実施されていたトラブル対策を図-6に示す。

オープンタイプでは、TBM本体に搭載された油圧削岩機で施工できるフォアパイリング、鏡ボルトが実施されている。フォアパイリングはTBM本体のローフ長が5m程度あるので、一般的にはL=10m以上であり、注入材については、地山状況・湧水状況を考慮してセメント系やシリカレジンなどを使用していた。なお、拡幅掘削が4件あるが、これは1回目が発生したトラブル状況を踏まえ、その後は調査ボーリングで前方地山の不良部の存在を確認し、TBM掘進が不可能であると判断して、事前に拡幅掘削を行っているものであった。

シールドタイプで事前対策を行っているものは調査ボーリング結果から、破碎帯の出現が予想され、かつ高圧湧水も予想されたので、事前に水抜き対策(水抜きボーリング、水抜き坑)、切羽の安定対策として、フォアパイリングを実施したものであった。

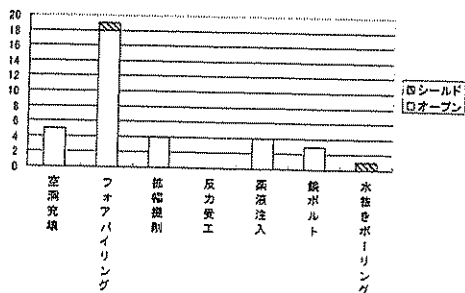


図-6 事前対策で実施しているトラブル対策

事後対策で実施されていたトラブル対策を図-7に示す。オープンタイプTBMでは、拡幅掘削、フォアパイリング、薬液注入、空洞充填、水抜きボーリング、鏡ボルトなどが、空洞状況、地山状況、湧水状況などを考慮して採用されていた。空洞充填対策は、崩落の進行性をできるだけ防止し、地山の緩みを抑えるものであった。崩落した場合には、前方地山の状況により、再発進にあたって、空洞充填のみだけでなく、崩落土の改良、フォアパイリングなどを実施していた。多量湧水箇所においては、湧水圧の低下および湧水量の減少を目的に適切な水抜きボーリングを実施していた。

シールドタイプTBMでは、TBM機体が長いことに起因する拡幅掘削の対策が多く、後は、オープンタイプTBMと同様に、空洞状況、グリッパ反力不足、湧水状況などにより、空洞充填、反力受工、水抜きボーリングなどの対策が採用されていた。

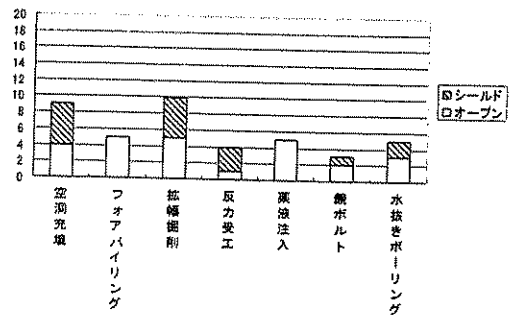
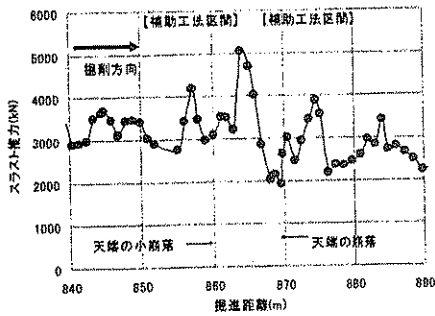


図-7 事後対策で実施しているトラブル対策

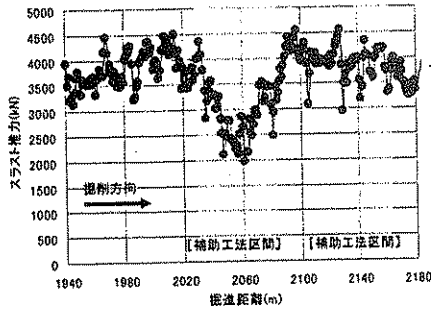
3.2 補助工法採用実績と機械データの関係

図-8にスラスト推力と補助工法採用箇所との関係を、図-9にカッタトルクと補助工法採用箇所との関係を示す。これによると、不良地山部において崩落等が発生し、補助工法を採用した箇所においては、その箇所の前後の区間よりもスラスト推力、カッタトルクの機械データが低下するケースが多いことが分かる。また、このことは、機械データの分析が不良地山部の早期発見・早期対策に役立つ可能性を示唆している。

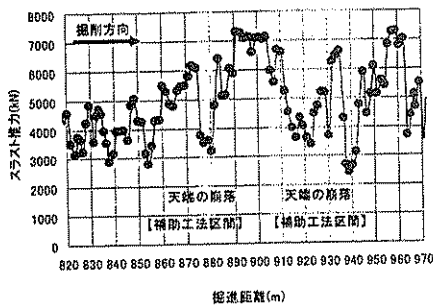
ただし、Bトンネルの小規模な崩落が発生した箇所ではスラスト推力の低下が見られないことやKトンネルの補助工法が採用していない掘進距離820m付近でカッタトルクが低下している等、機械データ低下そのものが全て補助工法を採用すべき地山であることを表しているとは言えない場合もあり、前方探査結果と総合して判断するなどが必要である。



(a) Bトンネル

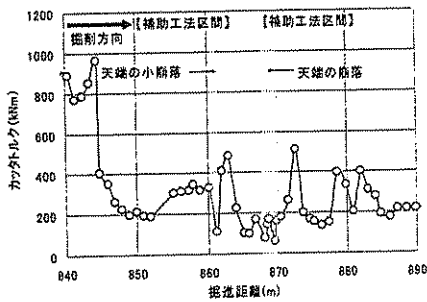


(b) Iトンネル

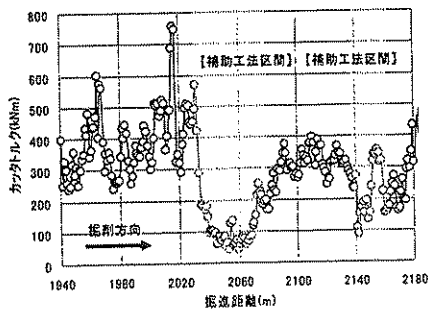


(c) Kトンネル

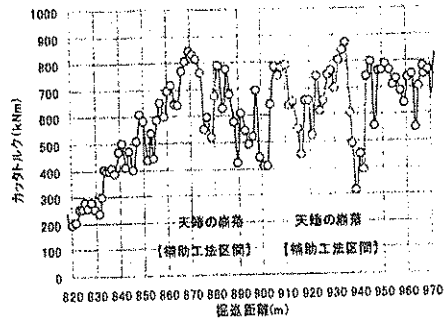
図-8 スラスト推力と補助工法採用実績の関係



(a) Bトンネル



(b) Iトンネル



(c) Kトンネル

図-9 カッタトルクと補助工法採用実績の関係

4. TBM 工法を用いたトンネルの

支保構造設計法

TBM 支保工構造に作用する荷重形態としては、トンネル周辺地山からトンネル全体に作用する場合と天端など地山の一部分がトンネルに対し抜け落ちる場合が考えられる。ここでは、2つの荷重形態に適した支保工の設計モデルについて検討を行うとともに、TBM トンネルの支保工応力などの現場計測や天端での崩落が発生したトンネル事例を分析することにより、TBM 支保工の設計に用いる荷重を算定した。

4.1 トンネル全体に作用する荷重に対する設計法

トンネル周辺地山から全体的な土圧として作用する場合についてはTBM 支保工の設計モデルに骨組み構造解析を適用することを考え、現場で得られた支保工計測結果から支保工に作用している荷重を算定した。なお、検討対象とするのは、表-5に示す支保工計測実施断面のうち、通常鋼アーチ支保工が設置されないB、C Iを除くものである。支保パターンのお緒元は表-3と同じとする。

表-5 支保工計測実施断面

トンネル・No.	支保パターン	岩種	トンネル・No.	支保パターン	岩種
Aトンネル(1)	C II	凝灰岩	Gトンネル(7)	D II	チャート
Aトンネル(2)	C II	流紋岩	Gトンネル(8)	D I	千枚岩
Aトンネル(3)	C II	流紋岩	Hトンネル(1)	D I	粘板岩
Aトンネル(4)	L	流紋岩	Hトンネル(2)	D I	チャート
Aトンネル(5)	L	流紋岩	Hトンネル(3)	C II	斑状いり岩
Bトンネル(1)	L I	安山岩	Hトンネル(4)	C II	粘板岩
Bトンネル(2)	L I	安山岩	Hトンネル(5)	D I	千枚岩
Cトンネル(1)	L I	安山岩	Hトンネル(6)	D I	千枚岩
Cトンネル(2)	L I	安山岩	Hトンネル(7)	D I	チャート
Eトンネル(1)	D II	砂岩泥岩互層	Hトンネル(8)	D I	千枚岩
Fトンネル(1)	C II	砂岩泥岩互層	Hトンネル(9)	D I	千枚岩
Fトンネル(2)	D II	砂岩	Nトンネル(1)	D I	凝灰岩
Fトンネル(3)	C II	砂岩	Nトンネル(2)	C II	凝灰岩
Gトンネル(1)	D I	粘板岩	Nトンネル(3)	C I	凝灰岩
Gトンネル(2)	D II	粘板岩	Nトンネル(4)	B	凝灰岩
Gトンネル(3)	D II	凝灰岩	Nトンネル(5)	L	花崗斑岩
Gトンネル(4)	D I	凝灰岩	Nトンネル(6)	D I	花崗斑岩
Gトンネル(5)	C II	凝灰岩	Oトンネル(1)	L I	流紋岩
Gトンネル(6)	C II	千枚岩	Oトンネル(2)	L I	流紋岩

荷重の算定は、支保工を対象とした骨組み構造解析を行い、計測された支保工の応力と誤差が最小となるような荷重を算定することで行う。すなわち、式(1)のように計測ひずみ値から求まる応力 σ_i^* と骨組み構造解析により算定される断面力より求まる応力 σ_i とから成る誤差関数 ε を最小となる荷重を算定する。

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i^* - \sigma_i)^2} \rightarrow \min \quad \dots \text{式(1)}$$

本研究の骨組み構造解析では、シールドトンネルにおいて用いられるモデル(剛性一様地盤全周ばねモデル)を参考に設定した図-10に示す解析モデルを用いた。なお地盤反力係数の算定は、トンネル標準示方書(開削工法編)の式を参考として算定した。

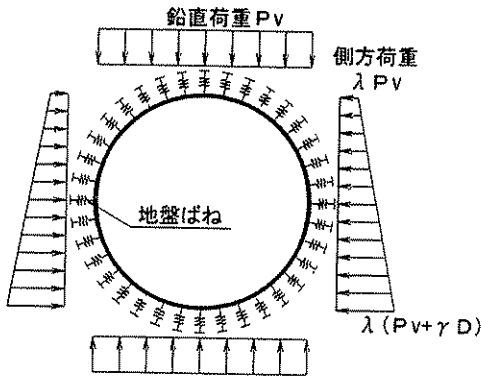


図-10 骨組み構造解析モデル

図-11に計測値と解析値の誤差が最小となるようにして得られた $Pv/\gamma D$ の平均値と、最大値と最小値を支保パターンごとに表した結果を示す。これより荷重の平均的な値は、おおむね $Pv/\gamma D = 0.3$ 程度の小さい値であることが分かる。また、荷重の値は地山が不良になるにつれて相対的に大きくなる傾向が読みとることができ、最大で $Pv/\gamma D = 0.9$ 程度、すなわち概ね掘削径に相当する土荷重が作用すると考えられる。また、分析した断面数にはばつきはあるが、支保パターンがC級以上の場合とD級以下の場合で $Pv/\gamma D$ の大きさに差が生じていると考えられる。

なお、山岳部工法によるトンネルの緩み荷重の値としては、一般にTerzaghiの緩み荷重表⁶⁾が用いられる。この荷重表に道路トンネルで採用されている地山分類をあてはめると $Pv/\gamma D$ の値は概ね、CI級以上では0.5以下、CII級では0.5~0.75、D級以下では0.7~2.2となる。したがって、ここで求めたTBMに作用する荷重の大きさは、従来の山岳工法で

掘削されたトンネルに作用すると考えられている荷重より小さいものであり、TBMの緩み抑制効果が窺える。

図-12に同様にして算定した側圧係数 λ の平均値と、その間の最大値と最小値を表した結果を示す。これより側圧係数は支保パターン毎に大きな差は見受けられず、側圧係数は概ね0~0.5程度であると考えてよい場合がほとんどであった。

図-13に岩質を硬質・中硬質岩の場合と軟質岩の場合に分類し、支保パターンをC級以上とD級以下とに分類した場合の支保工に作用する荷重 $Pv/\gamma D$ の結果を示す。なお、図-13中の円の大きさが $Pv/\gamma D$ が算定されたサンプル数の頻度を表している。

これよりC級以上の地山では岩質によらず $Pv/\gamma D$ が0.2以下の分布に集中して大きな差が見られなかったのに対し、D級以下の地山ではC級以上の地山より $Pv/\gamma D$ は大きい値で得られていることがあり、さらに、硬質・中硬質岩の場合と軟質岩の場合を比較すると軟質岩の方が総じて $Pv/\gamma D$ が大きいと考えられる。以上よりC級以上の概して良好な地山において荷重値を検討する場合は岩質等の地山の性状によらず荷重の最大値が決まり、D級以下の概して不良な地山の場合は岩質による影響を受けることが多いと考えられる。

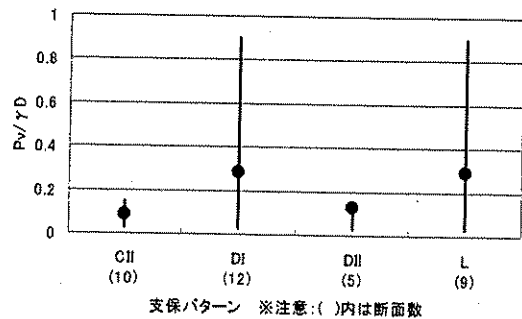


図-11 鉛直荷重と支保パターンの関係

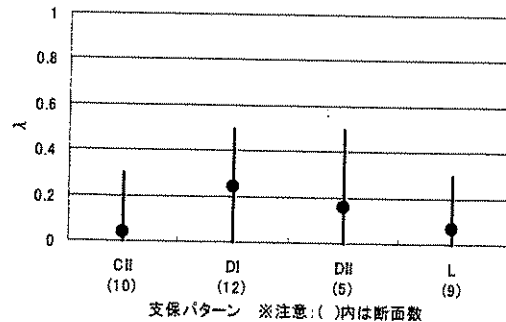


図-12 側圧係数と支保パターンの関係

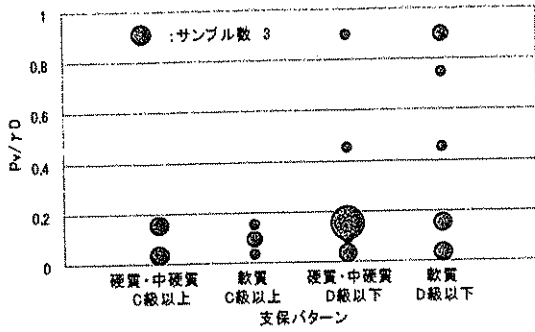


図-13 鉛直荷重と支保パターンの関係

4. 2 局所的に作用する荷重に対する設計法

局所的に作用する荷重として、天端など地山の一部がトンネルに対し抜け落ちる場合を考え、3章で調査した補助工法採用実績の中から地山に崩落が生じた時の崩落高さを整理したものを図-14に示す。これによると地山の崩落高さとしては1~3mの範囲にあり、最大でトンネル径の半分程度に相当する高さの崩落が発生する場合があることが分かる。また、崩落高さと支保パターンには明確な相関関係が認められないことが分かる。

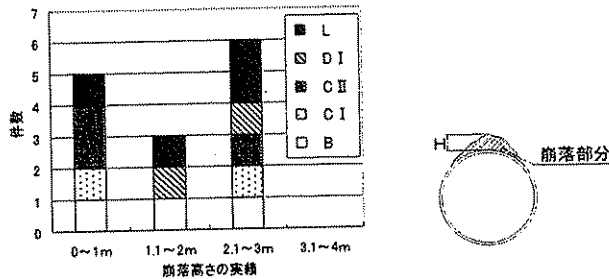


図-14 地山崩落実績

天端からの岩塊の崩落のようにトンネルに局所的に作用する荷重に対して、支保工として厚さの薄い吹付けコンクリートを採用する場合は、その破壊メカニズムとして曲げ（曲げ圧縮応力および曲げ引張応力）による破壊とせん断による破壊の2通りが考えられる。図-15は高さH=1, 3mで、底辺を径φの円錐岩塊が落下する場合の、吹付けコンクリート厚さ2cmに対する押し抜きせん断安全率の変化を示したものであるが、H=1mの場合には、吹付け厚さ2cmで十分安全率が確保でき、H=3mの場合でも底面径2.5m程度まで安全率1.0を確保できることが分かる。

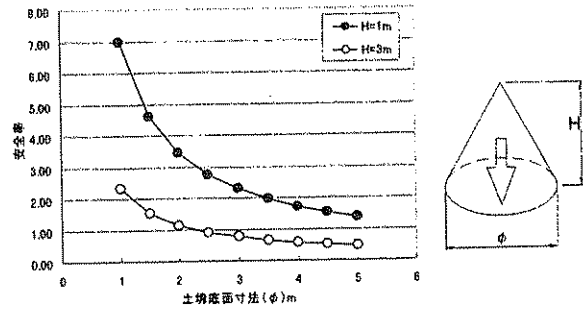


図-15 地山崩落に対する押し抜き安全率

しかし、図-14で示した通り、崩落は、吹付けコンクリート厚さ2cmのCIパターンや3cmのDIIパターンでも発生していることを考えると、地山の崩落を完全に抑制するという観点からは、吹付け厚さ2cmで十分な安全率が確保できるせん断による破壊に着目した設計では不十分であり、曲げ（曲げ圧縮応力および曲げ引張応力）による破壊に着目した設計モデルの適用を考える必要があると言える。

5. まとめ

本研究では、今後のTBMトンネルの施工時における地山評価方法、補助工法選定手法確立のため、施工時に得られた機械データと採用支保工および補助工法との関係について分析した。また、TBMトンネルの支保工の設計モデルについて検討を加えるとともに、TBMトンネルの支保工応力などの現場計測や天端での崩落が発生したトンネル事例を分析することにより、TBM支保工の設計に用いる荷重を算定した。検討結果は、以下の通りである。

機械データを用いたトンネル周辺地山の安定性評価方法に関しては、

①各トンネル個別に見れば、機械データと支保パターンが単純な相関関係にあるとは必ずしも言えないが、機械データやトンネルによっては、機械データと支保パターンがかなり良好な相関関係にあり、機械データによって採用すべき支保規模を設定できる可能性が高い。

②岩質で区別して全トンネルを平均的に見た場合、硬質岩の全支保パターンと中硬質岩・軟質岩の支保パターンBからCIIについては、機械データを支保パターンの選定に用いることが、ある程度可能となる可能性が高い。また、機械データの中では、スラスト推力または、各種エネルギー（掘進、回転、掘削体積比）が支保パターンの選定指標として適している場合が多い。

補助工法の選定手法に関しては、

①対策時期としては、事前事後ともほぼ同数であったが、シールドタイプについては事後対策となる傾向があった。また、トラブルの内容としては、オープンタイプでは掘進不能が大半であり、シールドタイプでは掘進不能とともにシールド型特有の TBM 拘束の発生も多い。

②トラブル対策としては、事前対策としてはオープンタイプでのフォアパイリングが多く、事後対策としてはオープンタイプでのフォアパイリング、薬液注入、オープンタイプ、シールドタイプでの拡幅掘削、空洞充填の他に反力受け工、水抜きボーリングなどが見られる。

③補助工法を採用する必要があるような不良地山部においては、機械データに何らかの変化が生じる可能性が高い。

支保構造の設計法に関しては、

①全体的に土圧が作用する荷重形態に対しては、TBM 支保工設計モデルに骨組み構造解析を適用した場合、天端での鉛直方向の荷重値は、土荷重に換算すると概ね $P_v/\gamma D = 0.3$ 程度の小さい値であり、最大でも掘削径程度であった。ただし、C 級以上の地山においては岩質等の地山の性状が荷重値に及ぼす影響は小さく、D 級以下の場合には岩質による影響を受けることが多い。また、側圧係数は概ね $0 \sim 0.5$ 程度となった。

②地山の一部が崩落し、局所的に土圧が作用する荷重形態に対しては、最大でトンネル径の半分程度に相当する高さの土荷重を考える必要があり、設計に際しては、せん断による破壊に着目するだけでは不十分であり、曲げによる破壊にも着目した設計モデルの適用を考える必要がある。

参考文献

- 1) 真下英人, 砂金伸治, 木谷努, 城間博通, 関茂和: TBM トンネル掘削時の地山特性と機械データおよび作用荷重の関連性に関する共同研究報告書, 土木研究所共同研究報告書, 第 301 号, 2004. 3
- 2) 砂金伸治, 真下英人, 赤木渉, 城間博通: TBM トンネル掘削時の機械データと支保工に作用する荷重の関連性に関する考察, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 239, 2003. 1
- 3) 砂金伸治, 真下英人, 赤木渉, 城間博通: TBM 掘削時に得られた機械データと支保工に作用する荷重に関する考察, 土木技術資料, 45-7, p. 60, 2003. 7

- 4) 木谷努, 真下英人, 砂金伸治, 城間博通, 関茂和: TBM トンネル掘削時の機械データと地山特性の関連性に関する考察, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p. 115, 2004. 1
- 5) Isago, N., H. Mashimo, W. Akagi, and H. Shiroma: Consideration on machine data and load in TBM excavation for tunnel support selection, North American tunneling 2004 (投稿中)
- 6) 吉中龍之進, 桜井春輔, 菊地宏吉: 岩盤分類とその適用, 土木工学社, p. 10, 1989. 7