

TBM トラブル事例の実態とその対策に関する考察

STUDY ON TROUBLED CASE AND COUNTERMEASURE IN TBM EXCAVATION

木谷 努*・真下 英人*・砂金 伸治*・城間 博通**・関 茂和**

Tsutomu KITANI, Hideto MASHIMO, Nobuharu ISAGO, Hiromichi SHIROMA and Shigekazu SEKI

Application of Tunnel Boring Machine (TBM) is considered as the rational and economical tunneling method of constructing road tunnel. The reason is that rapid excavation by TBM leads to reduction of construction cost, and the degree will be more effective when the ground conditions are comprehended beforehand and auxiliary methods are adopted adequately. In this study, the countermeasure for excavation trouble was analyzed by collecting the examples in bad ground condition. In addition, the design model for tunnel support was examined, and load acting on support was calculated and the safety of support was confirmed for same load values.

Keywords: tunnel, tunnel boring machine, design model, ground condition, auxiliary method

1. はじめに

現在、社会的要請が高い“トンネル建設費の縮減”を実現するためには、トンネルを急速施工することが重要である。このような背景から水路トンネル等の本坑、大断面道路トンネルの先進導坑、避難坑等様々な用途に対してTBMによる施工が注目されている。

一方、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を回避する手段として何らかの補助工法を用いるのが一般的である。もし、補助工法の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部の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。

これまで、TBMによる不良地山部の施工については、過去に多くの詳細な研究や報告がなされてきている(例えば、1),2)。しかし、これらの大半は、個別のトンネル毎を対象としたものであり、多くのトンネルを横断的に整理、分析しているものが少なかった。このため本研究では、TBMトンネルにおけるトラブルの実態とその対策について、ヒヤリング、アンケート調査、文献調査を行い整理分析した。また、トラブル事例の分析結果に基づき、TBM支保工設計について考慮すべき荷重形態を検討するとともに、支保工の設計モデルやその際の荷重値について考察を加えた。

* 正会員 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ トンネルチーム

**正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室

2. TBMトンネルのトラブル事例とその分析

(1) 分析の対象としたトンネル

分析の対象とした TBM トンネルの主な地質と掘削径、TBM のマシンタイプを表-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 20 トンネル（上り線と下り線があるものは 2 本と数えた）である。掘削径が 3.5m ～ 5.0m であるが、多くは 5.0m のものである。

マシンタイプとしては、改良オープンタイプとシールドタイプがそれぞれ 10 本と同数となっている。

表-1 対象トンネルの主な特徴

トンネル	主な地質	掘削径 (m)	マシンタイプ
A	砂岩、礫岩、泥岩、安山岩溶岩、凝灰質火山岩、火山角礫岩	5.0	フルシールド*
B	砂岩、礫岩、泥岩、安山岩溶岩、凝灰質火山岩、火山角礫岩	5.0	フルシールド*
C	砂岩、泥岩、礫岩、砂岩泥岩互層	5.0	フルシールド* 中折れ
D	砂岩、礫岩、泥岩、砂岩泥岩互層	5.0	フルシールド* 中折れ
E	砂岩泥岩互層、砂岩	5.0	フルシールド* 中折れ
F	砂岩泥岩互層、砂岩	5.0	フルシールド* 中折れ
G	砂岩、礫岩、泥岩	5.0	改良オープン
H	砂岩、礫岩、泥岩	5.0	改良オープン
I	泥岩砂岩礫岩互層、砂岩頁岩互層	5.0	フルシールド*
J	泥岩砂岩礫岩互層、砂岩頁岩互層	5.0	フルシールド*
K	チャート、粘板岩、輝緑凝灰岩、石灰岩、千枚岩、変輝緑岩、変斑れい岩	5.0	改良オープン
L	凝灰角礫岩、玄武岩、粘板岩、砂岩、礫岩、頁岩	5.0	改良オープン
M	凝灰角礫岩、玄武岩、粘板岩、砂岩、礫岩、頁岩	5.0	改良オープン
N	花崗岩、砂岩、泥岩、礫岩	5.0	改良オープン
O	花崗岩、砂岩、泥岩、礫岩	5.0	改良オープン
P	粗粒黒雲母花崗岩	5.0	改良オープン
Q	粗粒黒雲母花崗岩	5.0	改良オープン
R	片麻岩、流紋岩、花崗岩	4.5	フルシールド*
S	凝灰岩、流紋岩、玄武岩質火山砕屑、玄武岩	3.5	フルシールド* 中折れ
T	溶結凝灰岩、花崗斑岩	4.5	改良オープン

(2) トラブルの種類と地山現象

発生したトラブルを TBM 掘進不能（カッターヘッド回転不能や掘削作業不能等）、TBM 拘束、グリップ反力不足、排土不能に分類するとともに、その時の地山現象（多量の湧水発生、地山の押し出し、地山の崩落）に区分した。整理は、TBM のマシンタイプごとに行い、その結果をオープンタイプについては、図-1 に、シールドタイプについては図-2 に示す。

図-1 によると、オープンタイプの TBM では、トラブル現象のうち地山崩落による TBM 掘進不能が大部分を占めた。掘進不能の理由としては、崩落した土砂がカッターヘッドに堆積し大きなずりの取り組みができず、掘進不能やカッターヘッドの回転不能になること、および安全性確保ができなくなる等があった。その他の事例では、地山の押し出しによる TBM 拘束、湧水に起因した排土不能となるケースが見受けられた。

一方、図-2 のシールドタイプの TBM では、オープンタイプと同様に TBM 掘進不能が最も多いが、それとともに TBM 拘束の発生も多かった。TBM 掘進不能の原因としては、オープンタイプと同様、崩落に関するものが大半であった。また、TBM の拘束がオープンタイプと比べ多く、機長（シールド部）が長いというマシンの特性が良く表れていると言える。

次に、地山の崩落に起因したトラブルが発生した場合について、その時の状況を整理した。

図-3 は、崩落形態をⅠからⅣに分けそれぞれシールドタイプごとに示したものである。なお、崩落は、切羽や TBM の上ですべて発生しており、今回の調査ではマシンを抜けた支保工部で崩落が発生した事例はなかった。

図-3 によると、崩落のパターンとしては切羽およびその上方から崩落するパターンⅠが最も多かった。こ

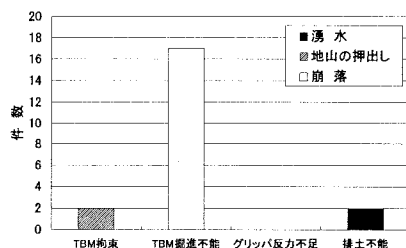


図-1 トラブルと地山の現象（オープン）

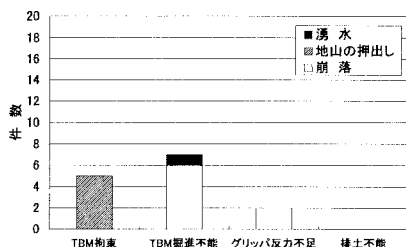


図-2 トラブルと地山の現象（シールド）

のことから切羽前方の地山状態を適切に把握することがTBM施工の高速化に重要であるあることが分かる。

図-4に地山の崩落高さ（TBMより上部の高さ）と崩落が発生した部分で採用された支保工を示す。これによると崩落が発生した部分では鋼アーチ支保工、簡易ライナー、ライナーが採用されており、崩落高さが高くなれば比較的剛性が高い簡易ライナーやライナーが用いられる傾向があることが分かる。また、地山の崩落高さとしては大部分が1～3mの範囲にあり、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ケースが多いことが分かる。

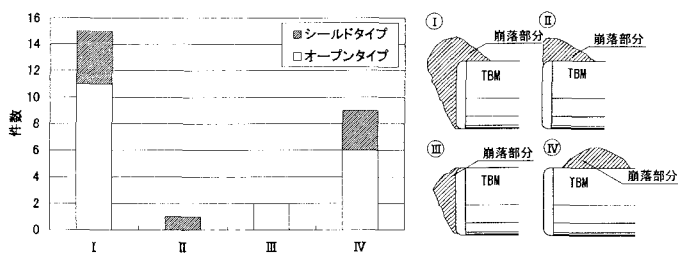


図-3 崩落の形態

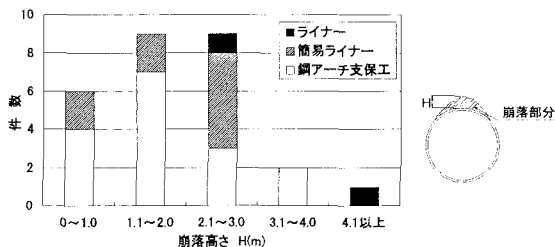


図-4 地山崩落実績

(3) トラブルと地質状況

トラブルが発生した時の地質状況を粘土化、土砂化、砂礫粘土、多亀裂、断層・破砕帯に分類し、トラブル現象とともに整理した。オープンタイプについては、図-5に、シールドタイプについては図-6に示す。

図-5によるとオープンタイプでは多亀裂、断層・破砕帯や土砂化でトラブルが多く発生していることが分かる。多亀裂や土砂化では地山が崩落しやすいためTBM掘進不能が発生している場合が多かった。一方、断層破砕帯では、その規模や性状および湧水状況が多様異なったため、TBM掘進不能、グリッパ反力不足、排土不能、TBM拘束の様にトラブルも多様発生していた。

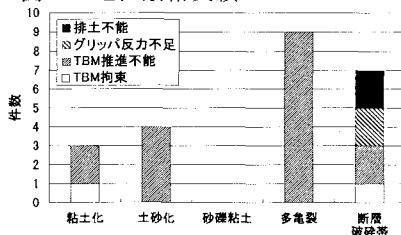


図-5 地質と発生トラブル（オープン）

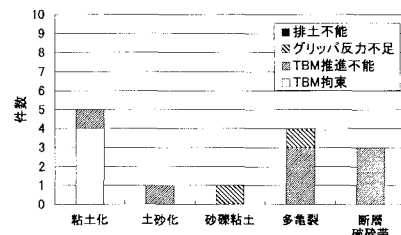


図-6 地質と発生トラブル（シールド）

図-6によるとシールドタイプでは、粘土化、多亀裂、断層破砕帯でトラブルが多く発生していることが分かる。粘土化でトラブルが多く発生しているのは、TBM本体の機長が長いことによる粘土化に基づく地山の押出しの影響を受けやすいためと考えられる。多亀裂、断層・破砕帯では、崩落に起因したTBM掘進不能が多かった。

図-7には地質と地山現象を示す。崩落は多亀裂や断層破砕帯で、押出しは粘土化、湧水は断層・破砕帯で多く発生していた。

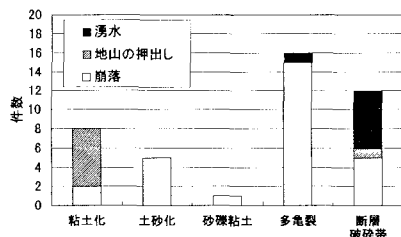


図-7 地質と地山現象

(4) 補助工法の採用実績

トラブルが発生する前もしくはトラブル発生後にどのような補助工法、対策工がなされたかを整理した。図-8は、不良地山対策として採用された補助工法を、トラブル発生前に予めなされる事前対策とトラブル発生後になされた事後対策に分類したものである。これによるとTBMの補助工法としては、事後対策の方が多く、切羽の目視観察が出来ないTBMの短所がよく表れている。なお、事前対策はオープンタイプのTBMでよく実施されている。この理由としては、オープンタイプではTBM本体に搭載した油圧削岩機等から効

率的な切羽前探査（削孔検層等）が行われ、かつ、その調査結果に基づき削岩機等からフォアパイリングや鏡ボルトなどの補助工法が実施されやすい構造であるからだと考えられる。

図-9にトラブル発生前に実施された補助工法の採用実績をTBM マシントップ毎に示す。

オープンタイプのTBMでは、TBMマシン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が多く実施されていた。フォアパイリングは10m以上が多く、注入材は地山状況や湧水状況に応じてセメント系やシリカレジンが採用されている。事前の拡幅掘削は、上下線トンネル施工における先行トンネル施工中に発生した1回目のトラブルの経験を踏まえ、後行トンネル施工時に調査ボーリングで前方不良地山部を確認し、事前に拡幅掘削を行っていた例であった。薬液注入については、調査ボーリングなどにより切羽前方地山に不良部が想定される場合に、天端や鏡の安定性対策として実施していた。

シールドタイプでは、事前対策を実施していたものは1トンネルであり、調査ボーリング結果から破砕帯の出現、高圧湧水が予想されたため、事前に水抜きボーリング、切羽安定対策としてフォアパイリングを実施している例であった。

トラブル発生後に実施された補助工法の採用実績を整理し、オープンタイプを図-10に、シールドタイプを図-11に示す。

図-10によるとオープンタイプでは、フォアパイリング、空洞充填、拡幅掘削、薬液注入、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。崩落した場合や崩落した土砂の改良が必要な場合に、空洞充填や薬液注入が実施され、さらに前方地山に不良地山が予想される場合にフォアパイリングや鏡ボルトが多く実施されていた。

図-11によるとシールドタイプでは、地山の押し出しによるTBM拘束に対応するための拡幅掘削が多く、機長が長いというマシンの特性がよく表れている。また、フォアパイリングの採用が少ないことも、フォアパイリングが効率的に施工できないというマシンの特性に起因していると考えられる。

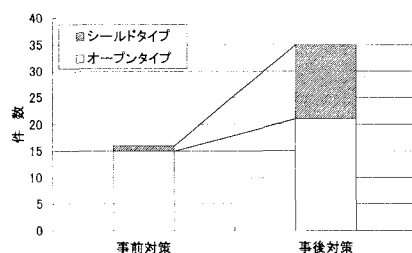


図-8 補助工法採用時期とマシンタイプ

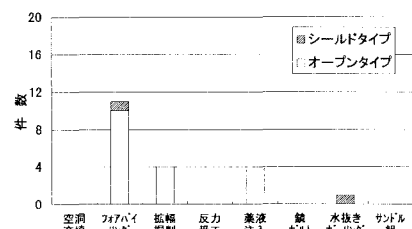


図-9 トラブル前の補助工法

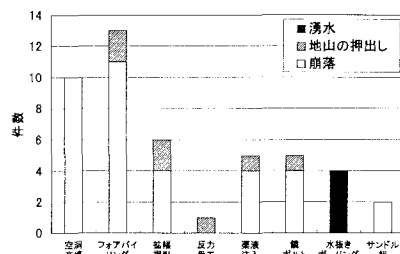


図-10 トラブル後の補助工法（オープン）

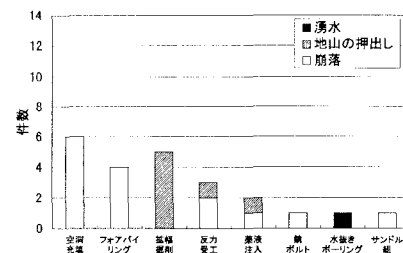


図-11 トラブル後の補助工法（シールド）

3. トラブル時に見られた地山現象を考慮したTBM支保工設計法の考察

(1) トラブル時の地山現象と設計モデル

現在、TBMトンネルの支保工は、過去の実績等により設定された支保パターンを採用しているのが一般的である。しかし、今後、TBMトンネルが道路トンネル等の避難坑や本坑として構築される機会が多くなればより合理的な支保構造として解析的手法を用いた支保工の設計を行わなければならない場合も出てくることが想定される。そこで、ここではトラブル時に見られた地山現象を考慮したTBM支保工設計モデルの検討を行った。

先に述べてきたように TBM 施工中のトラブル発生時に見られた地山現象としては、地山の押出しと崩落が多かった(図-1, 2 参照)。したがって、不良地山部に限らず一般的な地山についても TBM 支保工を解析的手法にて設計しようとした場合、考慮しなければならない主要な荷重形態としては、トンネル周辺地山からトンネル全体に荷重が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局所的な荷重として作用する場合であると考えられる。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の算定や、支保工の安全性に関する試算を実施した。

(2) 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図-12 に示すような 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が考えられる。そこで、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。

詳細については筆者らが報告した文献³⁾を参照することとし、ここでは結果の概要のみを述べることにする。この解析より算定された支保工に作用している荷重の平均的な値は、おおむね $P_v/\gamma D = 0.3$ 程度の小さい値であった。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にあり、最大で $P_v/\gamma D = 0.9$ 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、分析した断面数にばらつきはあるが、支保パターンが C 級以上の場合と D 級以下の場合で $P_v/\gamma D$ の大きさに差が生じていると考えられる。

さらに算定した側圧係数 λ 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 $0 \sim 0.5$ 程度であると考えてよい場合がほとんどであった。

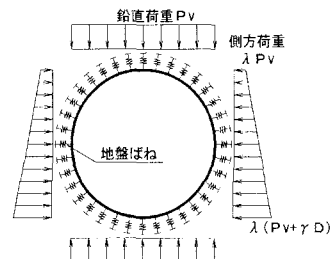


図-12 骨組み構造解析モデル

(3) 局所的に作用する荷重に対する設計法

a) 崩落実績と設計モデル

局所的に作用する荷重としては、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。図-4 で示した崩落実績よりここでは崩落高さを 3m と仮定して検討した。

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、TBM 支保工の主要な破壊モードとしては、局所的な荷重によって発生する支保工の押し抜きせん断破壊および支保工の曲げ破壊が考えられる。そこで本検討では、これら 2 つの破壊形態に関する設計モデルを考え、支保工の安全性に関する試算を実施した。

b) 崩落による支保工押し抜きせん断破壊についての検討

ここでは、支保工が押し抜きせん断破壊する場合を考える。図-13 は崩落高さ $H=1, 3\text{m}$ の場合の吹付けコンクリートの押し抜きせん断に対する安全率の変化を示したものである。安全率は、底辺径 ϕ の円錐岩塊が崩落・落下すると仮定し、円錐底面の円周長と吹付け厚さ (2cm とし、支保パターン CI に相当する) から求まる押し抜きせん断耐力 (吹付けコンクリートの許容せん断応力度 $\tau_{sl} = 0.8\text{N/mm}^2$ より算定) を、崩落円錐部の土塊重量で除すことにより算定した。図-13 によれば、 $H=1\text{m}$ の場合には、吹付け厚さ 2cm で十分安全率が確保でき、 $H=3\text{m}$ 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。

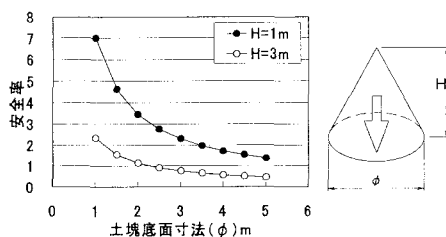


図-13 押し抜きせん断の安全率

このように崩落による支保工の押し抜きせん断破壊に対しては、小規模な崩落に対しては吹付けコンクリートのみの C I パターンで安全率を確保でき、またある程度規模が大きくても鋼アーチ支保工のピッチを細かくする等の対策を行えば安全率が確保することができるものと考えられる。

c) 崩落による支保工曲げ破壊についての検討

曲げ破壊に対しては、図-14 に示すように全体的に荷重が作用する場合と同様に骨組み構造解析の適用が考えられる。このモデルでは、ある規模の崩落がトンネル延長方向に十分長く続くと考えている。このモデルについて、崩落範囲を天端を含む 45° 範囲と仮定し、(2) で解析した断面の平均的な地盤反力係数 ($k_v=2\sim 20\text{GN/m}^3$)

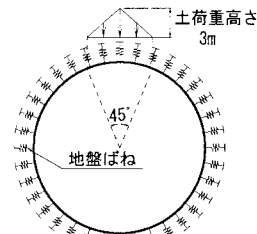


図-14 崩落に対する曲げモデル

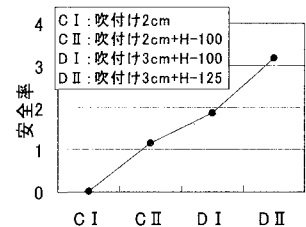


図-15 曲げ応力の安全率

を用いてそれぞれの支保パターンにおける曲げ応力度を算定する。図-15 に算定された曲げ応力度の許容応力度に対する安全率を示す。なお、安全率は短期的な荷重に対する許容応力度の割増しを考慮し、C I パターンでは吹付けコンクリートのみ、C II, D I, D II パターンでは鋼アーチ支保工も曲げ応力を負担するものとして算定した。

これによると、今回試算した崩落規模や地盤反力係数の範囲内においては、吹付けコンクリートのみである C I パターンでは、曲げ破壊に対する安全率を確保できないが、鋼アーチ支保工が設置される場合にはある程度安全率が確保できることとなる。このことから、崩落によって曲げ破壊が発生すると想定される場合には、支保工には吹き付けコンクリートのみでなく、曲げに対する十分な抵抗を有する鋼アーチ支保工やライナー類を設置することが重要と考えられる。

4. まとめ

本研究では、まず、TBM 施工時のトラブルの実態とその対策について調査し整理・分析した。そして、トラブルの種類と地山現象の関係、トラブルと地質状況の関係、および補助工法の実施時期や実施内容と地山状況の関係について明らかとした。今後、検討対象トンネルを増やすとともに、より詳細な分析が望まれる。

また、トラブル事例の分析結果に基づき、これまで十分確立されたものがない TBM 支保工設計モデルやその際に用いる荷重値、安全性について試算や考察を行った。これにより、トンネル全体に荷重が作用する場合には、計測結果から算定された最大の荷重値としては概ね掘削径に相当する土荷重であることが明らかとなった。また、崩落等によりトンネルに部分的に荷重が作用する場合、押し抜きせん断破壊に対しては、吹付けコンクリートのみで安全性が確保できる場合があるが、曲げ破壊に対しては鋼アーチ支保工等の曲げに抵抗力を十分有する支保工の採用が必要であることが分かった。TBM 支保工設計モデルについては、今回、限られた条件や仮定条件が多い中での検討であったため、今後はより多くの条件、施工実績を踏まえた検討を行うとともに、試験施工等を実施し、設計モデルの検証を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 吉田武男, 吉田安利, 岡崎隆雄, 森孝之: 前方探査に基づく脆弱地山 TBM 拘束対策の実績, トンネル工学研究論文・報告集, vol.12, pp.345-350, 2002.11
- 2) 小林隆幸, 佐藤淳, 水戸聰: 入山断層破碎帯粘土部の TBM 導坑挙動特性, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), III-238, pp.475-476, 2002.9
- 3) 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に作用する荷重の関連性に関する考察, 第 32 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.239-244, 2003.1