全断面方式トンネル掘進機の地質に対する適用性

池田和彦*・西松裕一**

The Effect of Geotechnical Properties of Rock Formation on the Productivity of Tunnel Boring Machines

Kazuhiko IKEDA and Yuichi NISHIMATSU

Abstract

In 1964, a Komatsu-Robbins Tunnel Boring Machine (TBM) was used to drive a pressure tunnel of water power plant for the first time in Japan. Since this first experience for TBM up to 1979, tunnels driven with TBM amount to 34 tunnels and 28 km in their total length.

The experiences on based the driving of TBM have indicated that the performance of TBM is obviously dependent on the geotechnical properties of rock formation, because they can find many case histories in which many troubles were caused by difficulties of rock formation.

In this report, the authors discuss on the possibility of application of TBM for various rock formations and the effect of geotechnical properties on the performance of TBM, based on the experiences of operation of TBM in Japan.

The geotechnical factors affecting the performance of TBM would be as follows;

- 1) rock stresses around the tunnel,
- 2) discontinuities in rock formation,
- 3) strength and hardness of intact rock,
- 4) in situ strength of rock formation, and
- 5) rate of inflow of ground water.

Most of rock formations where tunnels had been driven with TBM are included in the areas (I) in Fig. 3. In Fig. 3, the abscissa in logarithm of the square of the index of discontinuity k^2 , and the ordinate is logarithm of the estimated in situ rock strength $k^2 \cdot \sigma$.

1. ま え が き

日本では経済成長に伴い、1964年～1979年の15ヶ年間に鉄道関係 1,700 km, 道路関係 400 km, 水路, 坑道など 400 km 計 2,500 km のトンネルが建設され、今後10ヶ年間には約 2,200 km のトンネル建設が予定されている。

1964年、第1号の全断面方式トンネルボーリングマシン (T.B.M.) が水路トンネルの掘削に導入されて以来、1979年迄の15年間に T.B.M. で掘削されたトンネルは、掘削件数 34 件、掘削延長約 28 km である。これらの掘削実績を集収し、検討を行った結果、掘進機にはまだ今後改良すべき点が残されており、特に日本は地形、地質が複雑であり、掘進機を駆使する場合には地質的要因に

よる制約を無視することはできない。このことは、地質的要因に起因するトラブルが多く見られることから理解される。

本論文は掘進機の適用範囲を求めるために、過去における掘削実績をもとに、掘進機の地質に対する適応性を検討したものである。

2. 掘削実績と地質

全断面方式トンネル掘進機は 21 種製造され、掘削径は 2.3～4.8 m である。掘削実績は表-1 に示すようで、34 箇所のトンネル工事で総延長約 28 km が掘削されている。地質別に見ると、火成岩: 5ヶ所 2.1 km, 変成岩: 3ヶ所 0.8 km, 古生界: 2ヶ所 2.0 km, 中生界: 3ヶ所 9.0 km, 第三系: 22ヶ所 14.3 km で、中生界、第三系が大半を占めている。中生界、第三系を構成する岩石は、泥岩、頁岩、粘板岩、砂岩、礫岩、凝灰岩、角

* 地質計測(株)

** 東京大学工学部

表-1 TBM 掘削実績一覧表

トンネル種別	名 称	企 業 者	施 工 者	機 種	径 (m)	施工長 (km)	施工期間	地 質
水路	東平発電所導水路トンネル	住友共電	大豊建設	小松 TM 230 G	2.3	0.3	1964.4~12	結晶片岩
"	名古屋市犬山導水路トンネル	名古屋市水道局	熊谷組	小松 TM 430 G	4.3	1.8	1968.2~10	古生層
"	長崎市導水路トンネル	長崎市水道局		小松 TM 230 G	2.3	0.3	1968.9~10	結晶片岩
"	香川用水阿讃導水路トンネル	水資源開発公団	熊谷組	小松 TM 430 G	4.3	5.0	1969.12~1972.8	中生層
"	酒匂川導水路トンネル (10工区)	神奈川県広域水道企業団	奥村組	小松 TM 480 G	4.8	0.8	1971.7~1972.3	第三紀層
"	" (9工区)	"	鹿島建設	川重 MK-17	4.8	1.0	1971.10~1972.3	"
"	呉市休山配水池トンネル	呉市水道局	熊谷組	小松 TM 350 G	3.5	0.5	1972.12~1973.4	花崗岩
"	新川ダム導水路トンネル	沖縄開発庁	"	小松 TM 340 G	3.4	3.5	1974.9~1976.11	中生層
"	下郷発電導水路トンネル (斜坑)	電源開発	間組	Wirth	3.3	0.5	1979.6~1979.12	"
鉄道	青函トンネル (北海道方試験坑)	鉄建公団青函建設局	同 左	ハーベイガ TBM 736	3.6	0.2	1966.6~1967.2	第三紀層
"	" (北海道方導坑)	"	"	"	"	0.5	1967.8~1968.12	"
"	" (")	"	"	石播 IHI-MHT 836	"	1.2	1969.3~1970.3	"
"	" (" 作業坑)	"	"	" 840	4.0	2.2	1970.5~1972.2	"
"	" (本州方試験坑)	"	"	" 845	4.5	0.1	1973.3~1973.4	"
"	" (北海道方試験坑)	"	"	" 945	4.5	0.1	1973.7~1973.9	"
"	北陸本線木の浦トンネル	国鉄岐阜工務局	前田建設	小松 TM 230 G	2.3	0.9	1967.1~1967.5	"
"	山陽新幹線西庄トンネル	国鉄大阪工務局	佐藤工業	三菱 RT-45	4.5	0.5	1969.2~1970.1	凝灰質流紋岩
"	奥羽本線大平山トンネル	国鉄盛岡工務局	"	小松 TM 450	4.5	0.7	1969.12~1970.3	第三紀層
"	東北新幹線第2有壁トンネル	"	"	三菱 RT-45 A	4.5	1.8	1972.12~1973.8	"
"	東北新幹線岡トンネル	国鉄仙台新幹線工務局	フジタ工業	川重 MK-17	5.0	1.0	1973.4~1973.11	"
"	篠井線第3白坂トンネル	国鉄岐阜工務局	佐藤工業	三菱 RT-45 A	4.5	2.9	1977.2~1978.10	"
"	東北新幹線薬師トンネル	国鉄仙台新幹線工務局	清水建設	ロックトンネラ	4.8	0.2	1977.6~7	"
"	東北新幹線鍋沢トンネル	"	"	"	"	0.2	1977.7~8	風化片麻岩
道路	国道45号浜田歩道トンネル	建設省	同 左	三菱 RT-32	3.3	0.1	1967.8~11	第三紀層
"	" 須賀第2歩道トンネル	"	"	"	"	0.1	1968.7~9	"
"	" 須賀第1歩道トンネル	"	"	"	3.4	0.1	1968.10~11	"
"	国道13号 信夫山歩道トンネル	"	"	"	"	0.1	1969.8~1970.2	流紋岩
"	国道6号 波立第2歩道トンネル	"	常盤開発	"	3.5	0.1	1971.12~1972.2	第三紀層
"	" 波立第1歩道トンネル	"	"	"	"	0.1	1972.1~2	"
"	中央道 恵那山トンネル	日本道路公団	熊谷組	小松 TM 455 G	4.4	0.9	1968.3~1969.6	花崗岩
坑道	拳原発電所接近横坑	関西電力	関電興業	小松 TM 320 G	2.3	0.2	1967.12~1968.3	古生層

"	松島炭鉱池島鉱業所	石炭技術研究所	同 左	小松 TM 320G	3.2	0.1	1976.6~10	第三紀層
"	住友石炭奔別鉱業所	住友石炭	同 左	住友 ST-340	3.4	0.1	1968.10~ 1969.3	"
試験坑	相生試験掘削	鉄建公団青函建設局	石川島播磨重工	石播 IHI-MHT 840	3.6	0.1	1969.2~ 1971.2	流紋岩

礫凝灰岩、輝緑凝灰岩およびこれらの互層である。中生界、第三系の掘削実績が多いのは、これらの地質が T. B. M. の掘削に最も適した地質であることを意味するものである。

掘削延長と圧縮強さとの関係は、岩石試料の平均圧縮強さ 50 kg f/cm² 以下: 3.9 km, 50~100 kg f/cm²: 1.6 km, 100~300 kg f/cm²: 6.0 km, 300~800 kg f/cm²: 5.5 km, 800~1,200 kg f/cm²: 5.5 km, 1,200 kg f/cm² 以上 5.7 km となっている。

3. 掘進機による掘削性と地質条件

掘進機による掘進の際の掘進速度、カッター消費量、支保工、稼働率、トラブルなどの掘削性は地質条件に大きく左右される。掘削性に影響を与える地質条件としては岩石の強さ、硬さ、岩盤の強度、岩盤の弾性波速度、岩盤の割れ目状態、地圧状態、湧水およびこれらの要因の組み合わせが考えられる。

3-1. 地質条件と掘進速度

掘進機の掘進速度に影響を与える要素として、岩石の圧縮強さおよびせん断強さ、岩盤の弾性波速度、割れ目指数¹⁾、割れ目指数から算定した岩盤強度¹⁾などを取りあげ、これらの指標と掘進速度との関係を求めた。

図-1 は岩石の圧縮強さと純掘進速度との関係を示したものであるが、相関係数は0.3前後で両者の間に明確な相関関係は認められないが、試験掘削のデータを除くと、掘進速度の限界線が上に凸になった曲線をなしていることから、圧縮強さが500 kg f/cm² 付近に極端に低い

掘進速度のものがなく、この付近が T. B. M. 施工に最適の岩石の圧縮強さと言える。試験掘削は掘進機の性能および掘進速度、岩石の強度、推力、カッターの消耗などの相互関係を求めるため、坑道を設定して掘削した試験掘りである。岩石の圧縮強さと純掘進速度との相関関係が不明確なのは、岩石の圧縮強さのほかに掘削性に影響を与える要因が多いこと、また機械の構造に改善の余地が大ききことを意味している。

岩盤に存在する割れ目は岩盤の強度に大きな影響を持ち、割れ目の頻度、結合度、幅は割れ目指数 $k^{1)}$ によって算定される。ただし、 k = 岩盤の弾性波速度/岩石試料の弾性波速度で、一般に $0 < k \leq 1.0$ であるが、地質が膨潤性岩石からなる場合などは $k > 1$ になることもある。 k が小さい程割れ目の数が多くなり、かつ結合力は小さくなる。 $k \equiv 1$ であると、岩盤に割れ目は殆んどなく塊状である。割れ目岩盤の強度は岩石試料の強度より低く、割れ目が多くなる程より強度は低下し、岩石試料の強度を σ とすると、割れ目岩盤の強度は割れ目指数を用いて $k^2 \cdot \sigma$ として算定される¹⁾。

T. B. M. 施工の場合はさらに割れ目状態が掘進速度に影響を与えるものであり、割れ目指数と割れ目岩盤の強度との組み合わせによる要素と純掘進速度との関係を求めたのが図-2 である。同図は横軸に $k \cdot (k^2 \sigma_0)$ 、縦軸に純掘進速度 H をとって、実績をプロットしている。ただし、 σ_0 は岩石試料の一軸圧縮強さ (kg f/cm²) で、 H は m/h で表わしている。図-2 より、

$$H = 5.07 - 1.33 \log k \cdot (k^2 \sigma_0)$$

図-1 純掘進速度と圧縮強さとの関係

図-2 岩盤強度と純掘進速度との関係

なる関係が得られ、相関係数は 0.767 でかなり高い相関性を示している。

3-2. トラブルと地質条件

T.B.M. による施工は岩盤が硬すぎても、軟かすぎても能率は低下する。

岩盤が硬い場合には岩盤強度の増加につれて、掘削速度の低下、機械故障の頻発、カッター消耗の増大をきたし、これらが相乗して機械工法を困難ならしめる。

一方、岩盤が軟い場合は、切羽および天盤が保持できる範囲において軟かい程能率は向上するが、この範囲を超えて軟かくなると支保工を必要とし、さらに軟かくなると、切羽やカッターヘッド後部で岩盤の崩壊が生じ、機械掘削が困難となる。湧水によるトラブルとしては、湧水による岩盤の地耐力低下によって、岩盤が軟弱化化するケースである。

4. 掘削機の地質条件からの適用範囲

掘削機はどのような地質条件や施工条件でも適用できるとは限らない。地質条件からみた適用範囲を算定する要因としては、1) トンネル地圧 2) 割れ目状態 3) 岩石の強さと硬さ 4) 岩盤の強度 5) 湧水状態が考えられる。

1) ~ 4) の地質条件を要素としてとりいれ、適用範囲を求めたのが 図-3 である。図-3 は、縦軸に割れ目指数から算定した岩盤の一軸圧縮強さ $k^2 \cdot \sigma_c$ 、横軸に割れ目の性状および地圧状態を表わす、割れ目指数の 2 乗 k^2 をとり、割れ目からの肌落ちまたは塑性地圧作用の可能性の限界線である a-a 線、a'-a' 線、岩盤の強度の限界を示す b-b 線、岩盤の強度に対する掘削可能の限界を示す c-c 線、d-d 線、大きなゆるみ地圧が作用するか否かを示す e-e 線ととりいれて作成した適用範囲である。

a-a, a'-a' 線 ($k^2=0.5, 0.25$) より左側の領域は割れ目が非常に多いか、破碎帯¹⁾で、肌落ちが激しいかあるいは塑性地圧が作用し、切羽の自立が困難となるので、T.B.M. の掘削が不可能か、仮に掘削ができても相当の難工事となる。地圧が小さい場合 (a-a, a'-a' 線に挟まれた領域) は、シールド工法、パイプラー工法などを適用し、支保工、吹付けを施工することによって掘削可能である (II 区間)。b-b 線は割れ目を考慮にいれた岩盤の圧縮強さの限界線で、これより上側の領域での岩盤の圧縮強さは存在しない。岩盤の圧縮強さは割れ目が多い程低下し、その関係は b-b 線に示すような関係にある¹⁾。c-c 線は岩盤の圧縮強さから判断した限界線で、この線より上側の領域では岩盤が硬すぎて掘削速度が低下し掘削が困難となる。図-1 に示すように、純掘削速度は岩石試料の圧縮強さが 500 kg/cm² を超えると、圧縮強さ

図-3 T.B.M. の地質に対する適用範囲

が大きくなる程掘削速度は低下する。T.B.M. が有効に移動するためには、純掘進速度は 1.5 m/h であることが必要で、c-c 線を限界とした。縦軸の $\sigma_c \cdot k^2$ の大きさが同じでも、 k^2 が小さい程掘削が容易であるので、c-c 線は左あがりになっている。d-d 線は岩盤が軟弱かあるいは割れ目が多くて、掘削が困難な限界を示す。この線より下側では塑性地圧が作用し、切羽が自立しないか、あるいは肌落ちが多いなどの理由により T.B.M. 施工が困難である。e-e 線は大きなゆるみ地圧が作用する限界を示し、これより下側では掘削能率が低下する。

a-a, c-c, e-e 線で囲まれた (I) ゾーンが、T.B.M. による施工の地質条件に対する最適の適用範囲であり、T.B.M. が有効に移動した実績はほぼこのゾーンの中にある。(II) ゾーンは場合によっては地山の崩壊を起し、あるいは地圧が作用し、支保工の建込みを必要とし能率が低下するが、T.B.M. による施工は可能である。(III) ゾーンは岩盤強度が大きくて、掘進速度が低下し、またカッターの消耗も激しく機械施工が困難である。(IV) ゾーンは地圧が大きく作用し、あるいは地山の崩壊が激しく、T.B.M. による施工が困難である。

5. あとがき

掘進機にはまだ今後改良すべき点があるが、トンネル掘削の省力化と能率化のために、欠点を克服し、将来ますます掘削機によるトンネル施工法がとりいれられるようになると予想される。日本では今後 10 年間に、水路、

鉄道，道路などで約 2,200 km のトンネルが予定されているが，そのうち約 50 % が全断面方式トンネル掘進機で施工可能であると推察される。

本論文は主として土木学会編「わが国におけるトンネル掘削機の実績と展望」²⁾を参考資料とし，かつ同書発刊後の掘削実績をとりいれてまとめたものである。

参 考 文 献

- 1) 池田和彦(1979): 割れ目岩盤の性状および強度，応用地質，20 巻，4 号，pp. 20～32.
- 2) 土木学会岩盤力学委員会(1976): わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望.

(昭和55年12月24日受理)