

大阪大学工学部 学生員 ○中根 達人 大阪大学大学院 正会員 谷本 親伯
西松建設 正会員 阿部 俊 大阪大学大学院 学生員 津坂 仁和
大阪大学大学院 学生員 山仲 俊一朗

1. はじめに TBM によるトンネル施工では、地山の条件によってカッタビットの摩耗量が当初の積算量より大きくなることがある。カッタビットの摩耗量は、直接掘削コストに影響するだけでなく、交換回数の増加に伴う工程の遅延などを招くおそれもあるため、岩種、岩級、節理の状況、鉱物含有量などにより事前に予測する必要がある。そこで、本研究では摩耗量が積算基準量よりも著しく大きかった南紀地区のトンネル（A トンネル）を対象とし、現場で採取したボーリングコアを用いて岩石の一軸圧縮強度と亀裂係数を求め、摩耗量との関係を示すことにより、摩耗が著しかった原因について考察を行った。また、他のトンネル（B トンネルとC トンネル）との比較も行った。

2. 対象トンネルと摩耗量について A, B, C トンネルのトンネル縦断距離(T. D.)とTBM 単位掘削長当りの摩耗量の関係を図1～3に示す。TBM 単位掘削長当りの摩耗量（以下、摩耗量とする）とは、トンネルの縦断方向に対してTBM が1m 掘進したときのカッタビット1個当りの摩耗量を表すものである。地質によって、それぞれのトンネルをA-1～A-4, B-1, B-2, C-1, C-2の全8区間に分割した。図1と図2において、摩耗量が突出している部分がある。この原因の一つとして、センターカッタの欠けが挙げられる。欠けとは、カッタビットの一部が破損してしまうことである。カッタビットの欠けが発生すると、掘削効率が低下するだけでなく、ディスクカッタの損傷やカッタヘッド自体の損傷を招く恐れがある。したがって、欠けたカッタビットは早急に交換する必要がある。今回、摩耗量を算出するにあたり、カッタビットが欠け、破損、偏摩耗のために摩耗量が交換基準量に達せずに交換された場合、それぞれの取付位置ごとの交換基準量である20mmおよび10mmを摩耗量とした。また、各区間の平均摩耗量を比較した結果を表1に示す。同表より、A-2 区間の平均摩耗量がA トンネルの他の区間の2～5 倍、B-1 区間の4 倍、B-2 区間の7 倍、C-1 区間の6 倍、C-2 区間の23 倍となっている。このように、A-2 区間の摩耗量が他の地質でのそれに比べて非常に大きくなっていることがわかる。

3. 岩石の強度及び亀裂係数について A トンネルにおいて摩耗量と岩石の強度の関係を考察するために、トンネル坑内でボーリングを実施し、得られたコア11本を用いて一軸圧縮強度 q_0 及び圧裂引張強度 σ_t を求めた。また、摩耗量と亀裂係数 C_f の関係を考察するために、岩盤内の弾性波速度 V_p と、その岩盤から採取した岩石試料の弾性波速度 V_{pl} から亀裂係数 C_f を求めた。なお、亀裂係数 C_f は以下の式(1)にて表される¹⁾。

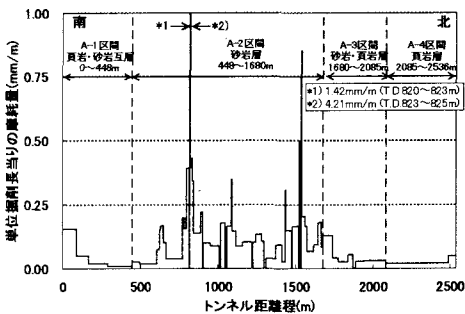


図1 単位掘削長当りの摩耗量 (A トンネル)

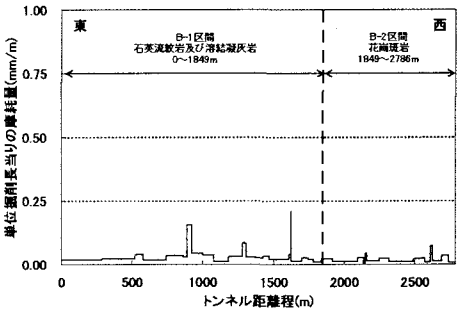


図2 単位掘削長当りの摩耗量 (B トンネル)

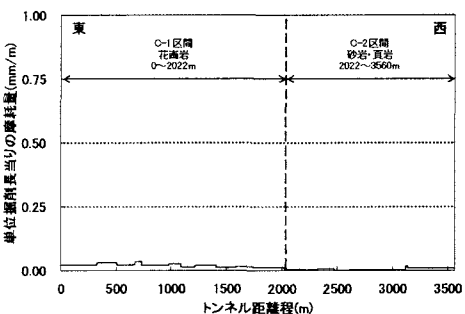


図3 単位掘削長当りの摩耗量 (C トンネル)

表1 平均摩耗量の比較

区間	平均摩耗量 (mm/m)
A-1	0.039
A-2	0.114
A-3	0.046
A-4	0.022
B-1	0.027
B-2	0.017
C-1	0.019
C-2	0.005

$$C_r = 1 - (V_{p2}/V_{p1})^2 \quad (1)$$

ここで、 V_{p1} : コアのP波速度(km/s), V_{p2} : 地山の弾性波速度(km/s) である。

それぞれの結果を表2に示す。A-2区間の砂岩の供試体の平均一軸圧縮強度は200MPa前後であった。一般的な堆積岩の平均一軸圧縮強度が72.3MPaである²⁾ことを考慮すると、A-2区間の砂岩はその約3倍にあたる。このことより、A-2区間の砂岩の一軸圧縮強度は非常に高いことがわかる。またTBMは、カッタヘッドを回転させながら

表2 強度試験及び弾性波速度測定試験結果(Aトンネル)

No.	T. D. (m)	岩種	q_u (MPa)	σ_c (MPa)	脆性度	コアP波 (km/s)	地山P波 (km/s)	亀裂係数	岩盤の 良好度分類
1-1	400	砂岩	224.8	18.9	11.9	5.52	4.7	0.28	B
2-1	500	砂岩	84.1	7.5	11.3	4.94	4.0	0.35	B
2-2	600	砂岩	266.5	26.8	9.9	5.30	4.5	0.28	B
2-3	700	砂岩	226.5	14.9	15.2	5.36	4.5	0.28	B
2-4	820	砂岩	193.2	29.0	6.7	5.24	4.5	0.26	B
2-5	860	砂岩	106.1	—	—	5.23	4.5	0.26	B
2-6	1100	砂岩	148.4	21.8	6.8	5.09	5.0	0.03	B
2-7	1300	砂岩	178.0	16.8	10.6	5.24	5.0	0.09	A
2-8	1600	砂岩	214.4	17.8	12.1	5.21	5.0	0.08	A
3-1	1700	砂岩	137.7	17.1	8.1	5.36	5.0	0.13	A
3-2	1800	砂岩	115.7	—	—	5.22	3.0	0.67	D
平均			172.3	19.0	10.3	5.2	4.5	0.25	

カッタビットを岩盤に押し付けて、岩盤を圧砕しながら掘削する。その際、カッタビットを岩盤に押し付けることにより岩盤内部に引張応力を発生させ、亀裂を生じさせながら掘削する。そのため、引張強度が高い岩石の場合にはより大きな押し付け力が必要となる。つまり、引張強度が高い岩石を掘削する場合にはカッタビットの摩耗が激しくなると予想される。したがって、TBM施工には脆性度(q_u/σ_c)も掘削効率に関わる一つの要因と考えられる。一般的な火成岩と堆積岩を比較した場合には、平均脆性度は火成岩で15.6、堆積岩で10.9であり²⁾、前者の方が約1.5倍大きくなっている。つまり、同じ圧縮強度の火成岩と堆積岩を比較した場合、堆積岩の方が脆性度は低いため、引張強度が大きくなり、TBMの掘削効率は低下すると予想される。ここで、A-2区間の砂岩のように、一軸圧縮強度が約200MPaと一般的な堆積岩と比較して約3倍の一軸圧縮強度を有する岩石をTBMで掘削する場合には、同じ強度の火成岩を掘削するよりも掘削効率は低下すると考えられる。また、亀裂係数に基づいて岩盤の良好度分類を行なった結果、T.D.1800m以外、岩盤の良好度分類は全てB以上であり、Aトンネルの岩盤は、新鮮で割れ目が少なかったと考えられる。

4. 摩耗量と岩石の一軸圧縮強度及び亀裂係数の関係について

岩石の一軸圧縮強度と摩耗量の関係を図4に示す。同図より、一軸圧縮強度が増加するほど摩耗量が増加していることがわかる。また、同図中の破線は、支保パターン別の積算のTBM単位掘削長当りのカッタビット摩耗量を示したものである。一軸圧縮強度が約100MPaまでの摩耗量は、Aトンネルの主な支保パターンであるCIパターンによって積算された摩耗量をほぼ下回っているが、一軸圧縮強度が100MPaを超えると、それを大きく上回る傾向にある。次に、亀裂係数と摩耗量の関係を図5に示す。同図より、亀裂係数が小さいほど、即ち、岩盤が新鮮で割れ目が少ないほど、摩耗量が増加していることがわかる。今回、摩耗量が大きかったA-2区間の岩盤の良好度分類は全てB以上であり、岩盤が新鮮で割れ目が少なかったため摩耗が激しくなったと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) Aトンネルの砂岩区間において、カッタビットの摩耗が著しかった原因の一つは、岩石一軸圧縮強度が一般的な堆積岩の約3倍と、非常に高強度であったことに起因する。
- 2) Aトンネルの砂岩地山は割れ目が少なく新鮮であったため摩耗量が多くなったと予想される。

[参考文献]

- 1) 工藤慎一：ダム基礎岩盤の調査，土木技術資料，Vol.2 No.3 1960
- 2) 日本材料学会編「岩の力学—基礎から応用まで」丸善株式会社，p.64，1993

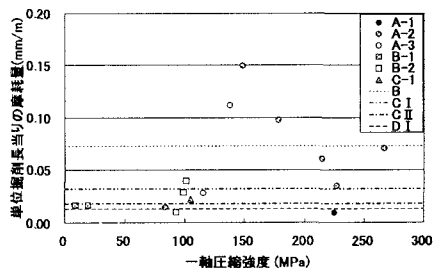


図4 岩石の一軸圧縮強度と摩耗量の関係

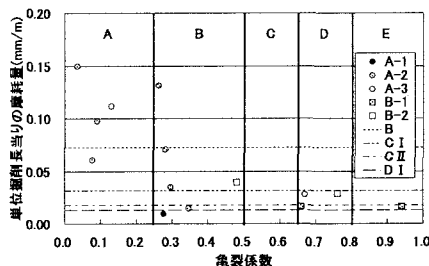


図5 亀裂係数と摩耗量の関係