

# シンガポール MRT トンネル岩盤掘削に置ける RQD 値とシールド機掘進速度について

伊賀 貢滋<sup>1</sup> ・ 早川 淳一<sup>2</sup> ・ 関 茂樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup>佐藤工業 (株) (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-19)

E-mail : iga@satokogyo.co.jp

<sup>2</sup>佐藤工業 (株) (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-19)

E-mail : J.Hayakawa@satokogyo.co.jp

<sup>3</sup>佐藤工業 (株) (149Rochor Road #04-14/15 Fu Lu Shou Complex Singapore 188425)

E-mail : shigeki.seki@satokogyo.com.sg

本工程 Contract T212 は、シンガポール陸上交通省 (LTA) が発注する、新 MRT 路線「トムソン・ライン」22 駅の中の Upper Thomson Station(T8)の駅部築造工事及び隣の駅 Caldecott Station(T9)迄の単線並列鉄道トンネルの築造工事である。

シールド掘削延長は北行、南行合わせて約 3.8Km 余り。今回のレポートは Upper Thomson Station(T8)より南方へ 550m の位置に築造された Upper Thomson Launching Shaft(シールド発進立坑)から Caldecott Station(T9)区間の約 1.35KM で得られたシールド掘進速度と実際に掘削した岩盤の RQD 値との関係を調べ、これらのデータから岩盤掘削時に置ける進捗管理を考察するものである。

**Key Words :** Bukit Timah Granite, Full face of rocks, RQD(Rock Quality Designation), Slurry TBM

## 1. はじめに

T212 シールドトンネル工事は、Upper Thomson Launching Shaft(以下 ULS)より 3 基の泥水式シールド機で 4 本のシールドトンネルを築造する工事である。

交通量の激しい Upper Thomson Rd 上で駅端部にシールド発進立坑を設けるのではなく、駅構築部より南方約 550m の比較的余地のある位置にシールド発進基地を設け、工事による交通渋滞の緩和を図っている。またこれにより駅構築工事とシールド工事が独立して工事を進める事が出来、全体工期の短縮になっている(図-1)。

## 2. シールド掘削手順

各シールドは、下記に示すような順で掘進した。

- ① TBM1 ULS→Upper Thomson Station (T8)
- ② TBM2 ULS→Caldecott Station (T9)
- ③ TBM3 ULS→Caldecott Station (T9)
- ④ TBM1' ULS→Upper Thomson Station (T8)

シールド機は発進立坑 (W25m×L40×H30m) から順次発進し、TBM 1 P は TBM1 の掘削終了後に TBM スキップレートを再利用して地上で再度組立を行い、再発進を行った。

掘進中にシールドの組立・解体・段取替等の作業も混在するが、基本的に三基のシールド機が同時に掘進を行った。また、図-1 の中にも記載されているがこの路線には 5 カ所 (CP17~CP22) の連絡横坑も計画されていて、シールド掘進作業と並行して横坑の掘削も在来工法で行った。

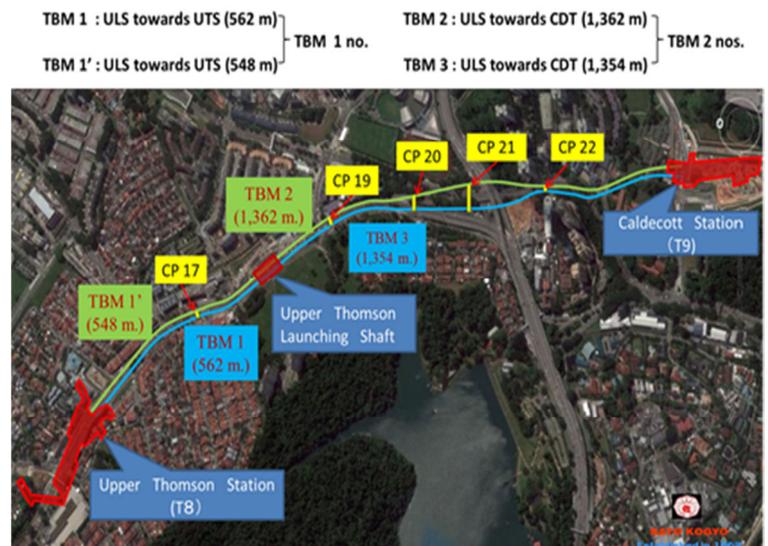


図-1 トンネル工事全体平面図

### 3. 地質及び地層

#### (1) 地質概要

本トンネル掘削断面の地質は、大別して **Bukit TIMAH GRANITE** 及 **KALLANG FORMATION** の二つのエリアに代表される。

**Bukit TIMAH GRANITE** は、シンガポール本島の中央部から北部の一部に広く分布しており、シンガポールの中でも最古の地層のひとつである。この地層は今から 200~250 億年前の三疊記中期頃に形成され、幾つかの混成岩と岩脈を伴った、様々な花崗岩や花崗閃緑岩から構成される火成岩である (図-3)。

**KALLANG FORMATION** は、数億年前から花崗岩の表面が湧水等により浸食され低地や谷に堆積した土層で、緩い砂層及び柔らかい粘土層やピート層から構成されている (図-2)。

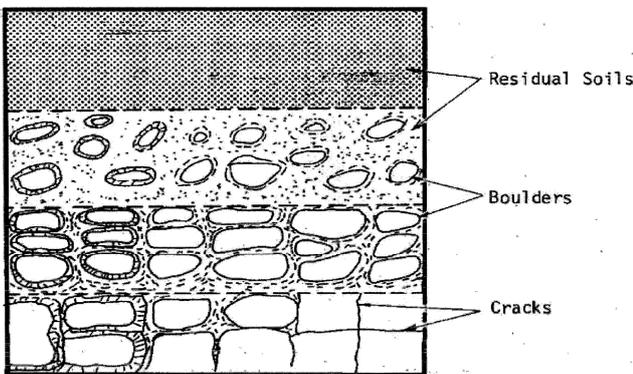


図-2 Weathering Processes of Granitic Rocks (After Ruxton and Berry,1957)

#### (2) 地層構成

本トンネル掘削付近の地層構成は場所によって夫々層厚が変わってくるが、概ね以下の通りである。

1. **Fill** (埋戻土等)
2. **Kallang Formation**
  - 1) **Estuarine Clay(E)** (とても柔らかい粘土層)
  - 2) **Fluvial Sand(F1)** (緩んだ砂層)
  - 3) **Fluvial Clay (F2)** (柔らかい粘土・シルト層)
3. **Bukit Timah Granite(G)**
  - 1) **Residual Soil(G VI)** (比較的締ったシルト・粘土混砂質土)
  - 2) **Completely Weathered Granite(G V)** (完全に風化した良く締った粘土シルト混じり砂層)
  - 3) **Highly Weathered Granite(G IV)** (非常に風化した岩, 土層と混在している)
  - 4) **Moderately Weathered to Fresh Granit**
    - a) **Moderately Weathered (G III)** (適度に風化した岩)

- b) **Slightly Weathered Granite(G II)** (僅かに風化した岩)
- c) **Fresh Granite(G I)** (風化していない新鮮な岩)

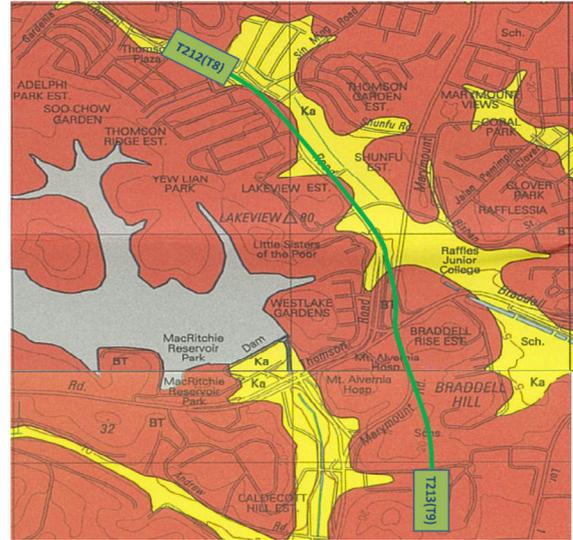


図-3 Geological Map Thomson Line

- (BT) Bukit Timah Granite   
 (Ka) Alluvial Member

### 4. トンネル掘削断面について

本シールドトンネル掘削延長は北行・南行線合せて約 3.8Km に及ぶが、その土質内訳は下記の通りである。

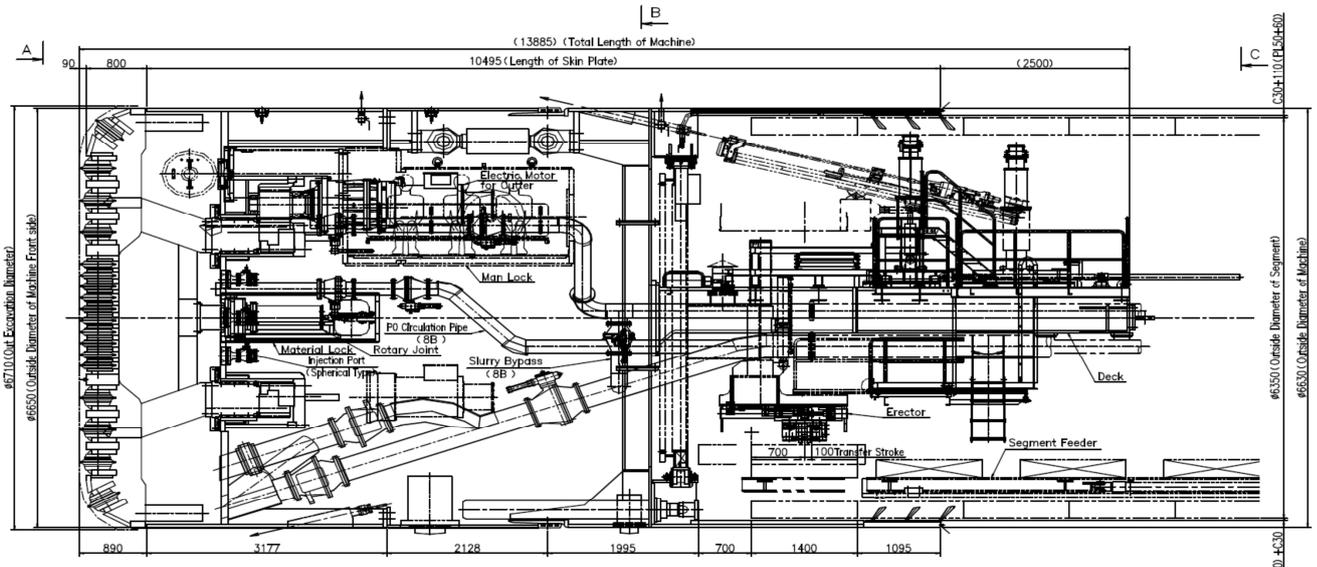
表-1 土層 / 掘削延長

土層 / 掘削延長	北行線 (m)	南行線 (m)	延長 (m)
<b>Mix Face (Kallang+G VI+G V+G IV+G III)</b>	700	500	1,200
<b>Full Face Rock (G IV to G I)</b>	1,350	1300	2,650
<b>Total</b>	<b>2,050</b>	<b>1,800</b>	<b>3,850</b>

シールド掘削断面が 100% 岩盤な状態 (**Full Face Rock**) の延長は約 2,650m, その他は土と岩盤が混在している状態 (**Mix Face**) の延長が約 1,200m であり, 最小・最大土被りは南北線ともに, 最小 10.5m~11.0m, 最大 46.5m~47.5m であった。また, GIBR (Geotechnical Interpretative Baseline Report) よる Bukit Timah Granite の UCS (Uniaxial Compressive Strength) 最大値は 330Mpa であった。

## 5. シールド機及びセグメント概要

### (1) シールド機概要



本工事で使用した3基の泥水式シールド機の仕様は基本的に同じだが、掘削部の地質に応じてDRC (Disc Roller Cutter) のアレンジメントの変更を行った。シールド機の主な仕様は以下の通りである。

- 1) カッターヘッド 外径  $\phi = 6,710 \text{ mm}$
- 2) シールド機 機長  $L = 11,385 \text{ mm}$
- 3) 総推力  $48,000 \text{ KN}$
- 4) シールドシヤッキ本数  $N = 32 \text{ set}$
- 5) 電動カッターモータ  $6 \text{ set}$
- 6) カッター回転スピード 最大  $4.7 \text{ rpm}$
- 7) カッタートルク 最大  $7,170 \text{ KN-M}$

カッターヘッド DRC の配置、数量に関してはセンターDRCが10個、インナー及びゲージカッターが37個、何れも19インチサイズを採用した(図-5)。

また、このシールド機で特筆すべきは前胴上部に配置してあるマロックである。ここから限定圧気を行う事により定期的(7日~10日/回)にチャンバー内に作業員が入りDRCを交換し掘削を行う。もあり、発注者の要求事項の中には最大400Mpaの硬岩にも耐えるシールド機及び、その他設備を備える必要があるとの記載もあった。

### (2) セグメント概要

- 1) セグメント外径  $\phi 6,350 \text{ mm}$
- 2) セグメント内径  $\phi 5,800 \text{ mm}$
- 3) セグメント延長  $L = 1,400 \text{ mm}$  (1R)

セグメント分割数は6分割、Kセグメントは軸挿入型のRCセグメントで、ジョイントボルトは軸方向・円周方向共にストレートボ

ルト、セグメントはR及びLの二種類のみである。

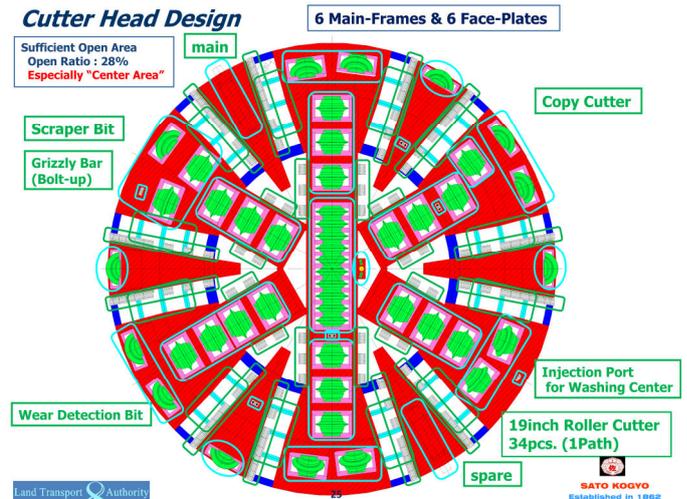


図-5 カッターヘッド詳細図

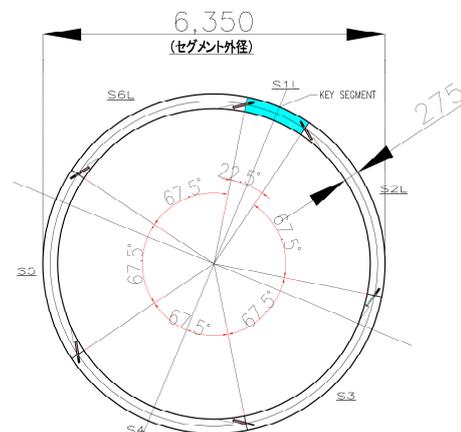


図-6 セグメント図

## 6. 土質縦断面図

本稿の主題である Full Face Rack 部分の詳細を下記に図-7~9 の縦断面図に示す。位置は北行線 TBM3 の発進立坑から隣駅の Caldecott Station (T9) の区間。発進立坑より約 100m 区間の初期掘進中は土砂山の部分もあり対象範囲とはしていない。本掘進開始以降、リング毎の掘進時間とその掘削路線に近傍した調査ボーリング結果から得られた RQD 及び一軸圧縮強度 (UCS) を調べ考察した。

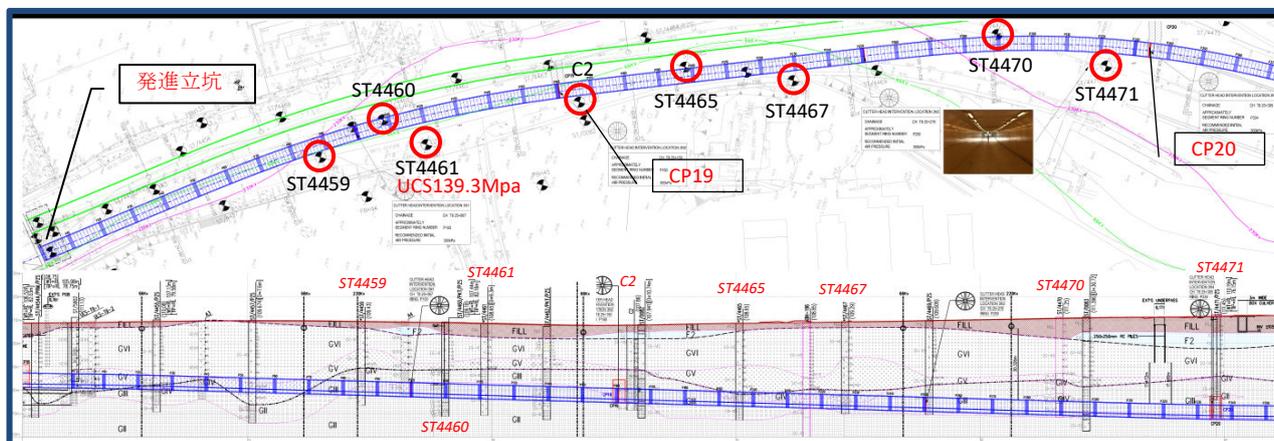


図-7 TBM3 土質縦断面図 0-370R

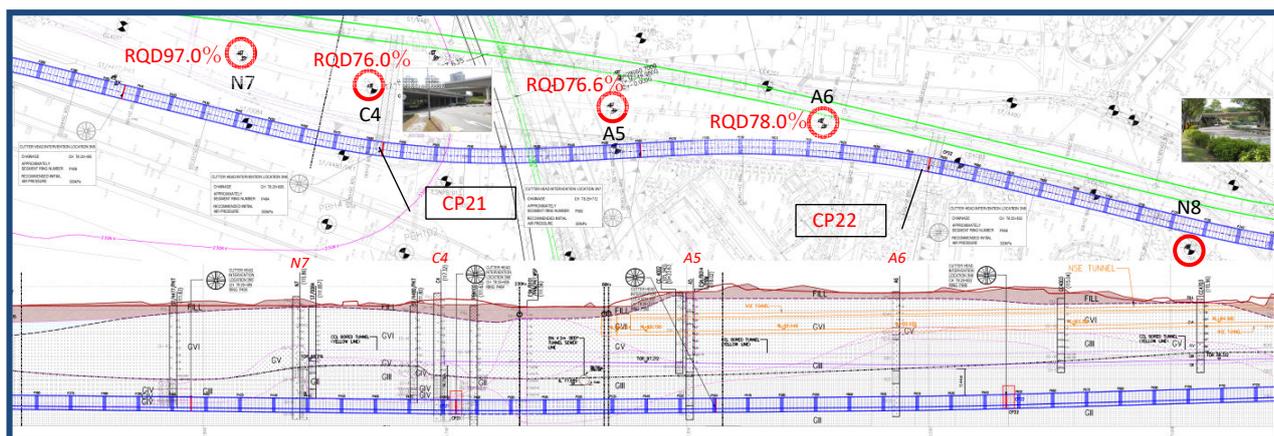


図-8 TBM3 土質縦断面図 370-750R

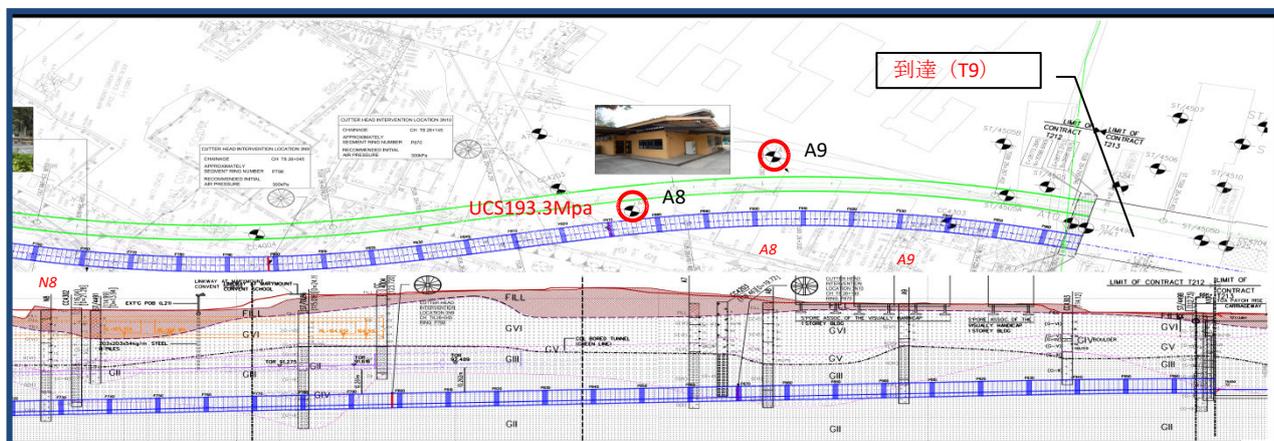


図-9 TBM3 土質縦断面図 750-970R

## 7. 掘削時間と RQD (%) 及び UCS (Mpa)

表-2 が各ボーリング地点の平均掘削時間 (Net Time) と RQD 及び UCS の一覧表である。

表-2 掘削時間-RQD 及び UCS

Bore Hole No,	Excavation time(min)	RQD(%) Ave	Compressive Strength(Mpa)
ST4459	148.5	72.6	85.5
ST4460	171.4	37.6	121.2
ST4461	169.4	68.0	139.3
C2(CP19)	117.2	16.8	14.7
ST4465	143.8	5.0	31.5
ST4467	113.5	5.0	40.0
ST4470	142.0	34.7	70.5
ST4471	141.4	18.5	84.8
S5	114.2	15.1	84.9
N7	201.8	97.0	75.0
C4(CP21)	193.3	76.0	188.7
A5	161.0	76.6	159.0
A6	159.8	78.0	152.4
N8	156.7	33.9	154.0
A8	127.0	32.7	193.3
A9	120.8	11.3	89.0

調査ボーリング結果の中で、RQD 値が最大だった N7 及び風化が一番進行していた ST4465 のコアサンプルを写真-1, 2 に示す。

写真-1 は追加で行った N7 ボーリングのコアサンプル写真である。シールド掘削断面の 75% を占めるコアサンプルであり、RQD 値は何れも 100% であった。また岩判定に付いては G II ~ G III であったが、予想に反して UCS 値は 75Mpa と低く、表-2 から分る様に RQD 値と UCS 値の間には明確な相関関係が見いだせなかった。

写真-2 は ST4465 のコアサンプルで岩判定は G IV が殆どで、一部 G III も見られる。非常に風化が進行していて RQD 値は粗 0 である。岩強度は PLT Is (50) より UCS は 31.5Mpa であった。

次に表-2 の掘削時間と RQD 値の関係をグラフにして相関関係を考察した。

図-10 は縦軸に RQD 値、横軸に掘削時間を現したグラフであるが、明らかに比例関係である事が推測される。

Project	Additional SI for Contract T212 - Construction of Upper Thomson Station and Tunnels for Thomson Line	Core No	Depth		TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)
			Top (m)	Bottom (m)			
Project No	S27-09	16	45.10	46.10	100	100	100
Borehole No	N7	17	46.10	47.10	100	100	100
Date	29/01/2015 - 06/02/2015	18	47.10	48.10	100	100	100
Box No	4 of 5	19	48.10	49.10	100	100	100
		20	49.10	50.10	100	100	100

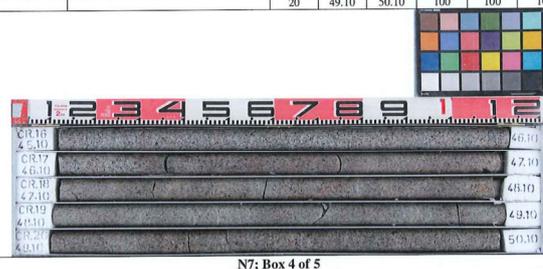


写真-1 N7 コアサンプル

CLIENT	LTA	DATE	CR	DEPTH[M]	TCRZ	SCRZ	RQDZ
PROJECT	SI FOR C211A WD 23	22.05.12	5	34.50-36.50	100	75	0
LOCATION	UPP THOMSON ROAD	23.05.12	6	35.50-36.50	100	30	0
BH NO.	ST/4465		7	36.50-37.50	100	15	0
BOX NO.	2		8	37.50-38.50	100	15	0
			9	38.50-39.50	100	20	0



写真-2 ST4465 コアサンプル

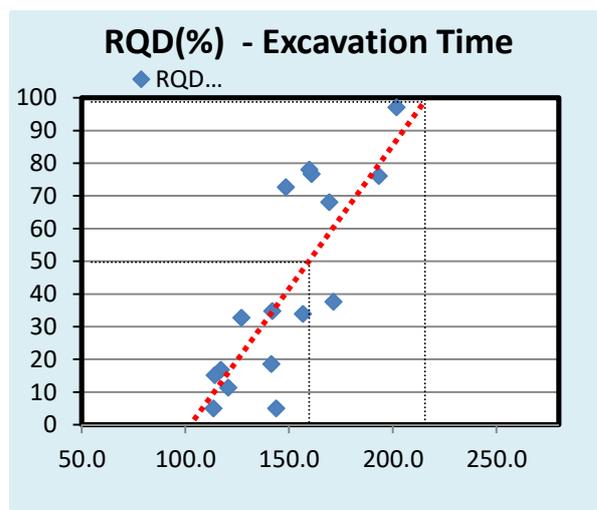


図-10 掘削時間-RQD 値

また図-11 では UCS と掘削時間の関係をグラフに現したものだが、確かに岩強度と掘削時間にも多少の相関関係は見られるものの RQD 値ほどの明確な比例関係には無いと推測される。

最後に図-12 は RQD 値と UCS (岩強度) を現したグラフであるが、高 RQD = 高 UCS の関係に無い事がグラフから読み取れる。

## 8. 考察まとめ

シールド工事に置いて工事工程を考えるに当たって掘進速度は重要な要素となる。

岩盤掘削シールド工事に置いては、その岩強度を基に、カッター回転数、貫入量等を考慮して掘進速度を推測し工程を考えた。これも一つの指標となり工程を考える上で間違えでは無いと考えられるが

今回の様に非常に変化に富む地層の場合、RQD値を基に掘進速度を推測し全体工程を考えた方がより正確であったと言える。

シールド機の仕様により、そのポテンシャルに違いが出るのは当然の事と思われるが、今回の施工結果から得られた図-9（掘削時間-RQD値）の関係性は他の機種にも当てはまると考えられる。

今後、類似工事に置いて今回の考察が工程を考える上で役立てば幸いである。

## 9. 今後の課題

今回の考察は純粋に掘削時間と RQD 値等を見比べた物で、他の要因に関しては考慮していない。実際にはカッターヘッド形状、DRCの耐力、摩耗、掘進、泥水のパラメータ、後続設備等、工程を考える上で重要な要素が多々ある。

機会があれば今回の工事で得られた情報をまとめて報告したい。

**謝辞：** 今回のシールド工事を完了させるに当たり 125 回の圧気作業を実施し、カッター交換の作業を行った。これらは全てタイ人を始めとする東南アジアの作業員たちによってなされた仕事であり、この労に感謝するばかりである。また、今後彼らが得たこの経験がアジアの諸国の発展に寄与する事を願いたい。

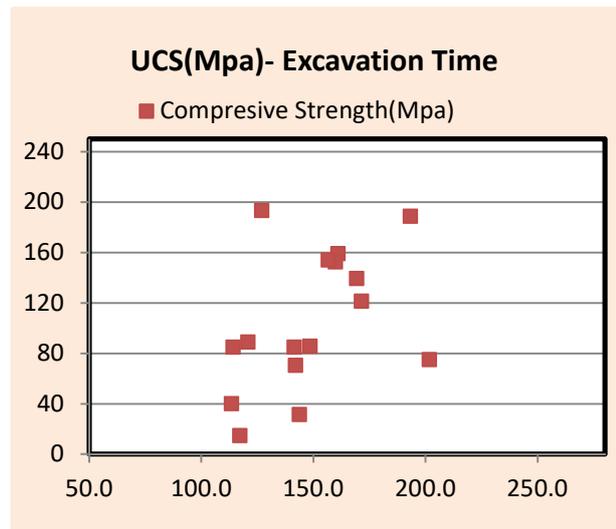


図-11 掘削時間-RQD 値

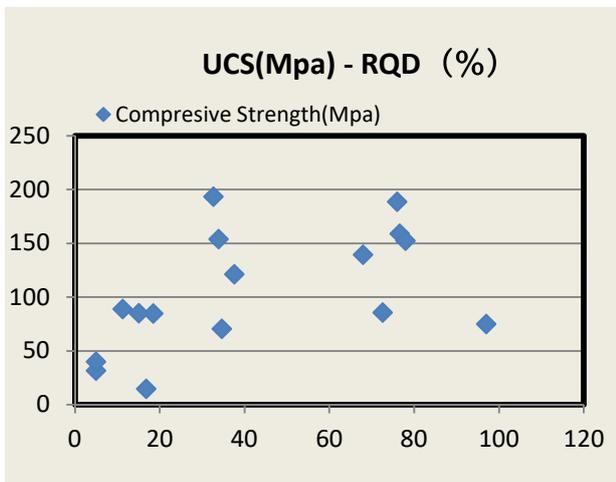


図-12 UCS 値-RQD 値

## CONSIDERATION FOR ROCK QUALITY DESIGNATION AND TBM EXCAVATION TIME UNDER THE Bukit Timah Granite AT THE SINGAPORE MRT TUNNEL

Koji IGA , Junichi HAYAKAWA and Shigeki SEKI

CONTRACT T212 will construct Upper Thomson Station (T8) and twin bored tunnel where Upper Thomson Station to Caldecott Station (T9) which is the next station of Upper Thomson Station. And this Upper Thomson Station is one in 22 stations of THOMSON LINE which is proposed new MRT line by Land Transport Authority (LTA) in Singapore.

Excavation Length of twin bored Tunnel is more than 3.8Km include mix face and full face rock condition. This report is consider progress rate of rock excavation that base on RQD value and actual excavation time which had been got during excavation where full face rock of Bukite Timah Granite approximately 1.35Km long.