

水平多軸式地中連続壁掘削機による岩盤掘削実績とその考察 Construction Records of Rock Excavation by EMX Method (Trench Cutting)

山本 達也*

Tatsuya Yamamoto

要 約

連続壁工における水平多軸式掘削機による岩盤の大深度掘削（EMX 工法）の施工実績は少なく、標準歩掛りが無いのが現状である。本論ではシールド発進立坑築造において、岩盤（泥岩層）に対する連続壁工の連壁掘削実績をまとめ、立坑掘削時に得られた岩盤性状（岩級区分）との関係について検討した。さらに、施工実績から標準歩掛り算出式で設定されている一軸圧縮強度（ 5 N/mm^2 以下）を上回る岩盤に対する標準歩掛りの算出に関する検討もあわせて行った。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 連壁工の概要
- § 3. 岩盤調査結果
- § 4. 地中連続壁施工実績
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

地下構造物の大深度化に伴い、大深度立坑の施工は今後増えていく状況にある。さまざまな土質条件の中で、立坑はより剛で水密性の高い構造が求められ、立坑躯体としての連続壁の需要は高い。同時に、大深度を対象にした場合、掘削対象がより硬質な地盤となることも予想される。しかしながら、そのような硬質な地盤を対象とした連続壁掘削における施工実績は少なく、とくに一軸圧縮強度が 5 N/mm^2 を上回るような地盤の掘削に関しては標準歩掛りもないという現状がある。

今回対象としたシールド工事の発進立坑築造工事では、鋼製地中連続壁工が採用されており、その特徴として、

- ① 岩盤（一軸圧縮強度 $> 5 \text{ N/mm}^2$ ）を対象とした水平多軸掘削機による大深度掘削
- ② 衝上体（付加体）により形成された不均質な泥岩層掘削が挙げられる。

本論では、上述のような岩盤の連壁掘削における、所要時間やビット損耗量などの施工実績と、立坑掘削時の岩盤調査で得られた岩盤性状との関係についてまとめるとともに、標準歩掛りの算出を試みた。

§ 2. 連壁工の概要

2-1 工事概要

本工事は、シールドトンネルの発進立坑築造工として内径約 10 m、深さ約 64 m の円形立坑を構築するものである。主な工事内容を以下に示す。また発進立坑断面の形状と地質の概要を図-1 に、連続壁エレメントの平面割付け概要を図-2 に示す。

工事内容

発進立坑築造工：内径 10.2 m、深さ 63.97 m

○先行掘削工

- ・全周回転工法流動化処理土置換え

○鋼製地中連続壁工

- ・水平多軸式掘削機（EMX-240）
- ・NS-BOX 式（嵌合継手式）
- ・施工深さ 68.5 m、壁厚 1.0 m、施工面積 $2,474.5 \text{ m}^2$

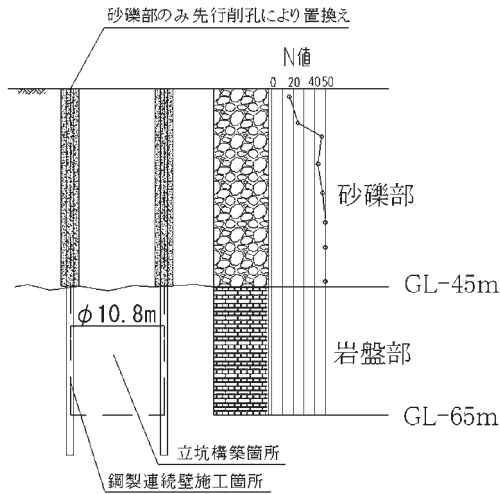
○立坑内部掘削工

- ・砂礫層 $4,150 \text{ m}^3$ 、岩盤部 $1,710 \text{ m}^3$

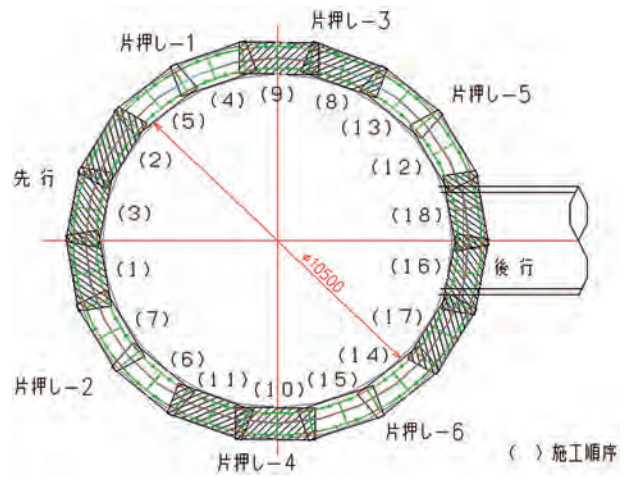
2-2 地質概要

発進立坑付近の地質は、GL-0 m ~ -45 m までは玉石混じりの砂礫層、GL-45 m 以深は泥岩となっている。砂礫層の玉石は硬質な砂岩が主体であり、 $\phi 100 \sim 1,000 \text{ mm}$ の大きさであった。連続壁施工を容易にする目的で、玉石が介在している砂礫層のみ連壁掘削範囲を全周回転工法にて流動化処理土に置き換えた。GL-45 m 以深は事前調査では泥岩が主体で、一軸圧縮強度は 25.7 N/mm^2 の CM 級岩盤と想定されていた。

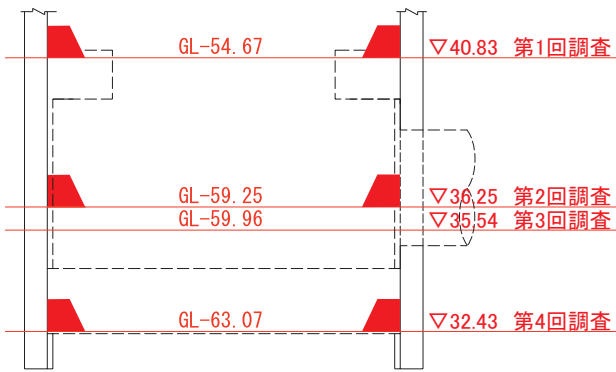
* 土木設計部設計課



図一 発進立坑断面概要図



図二 発進立坑平面概要図

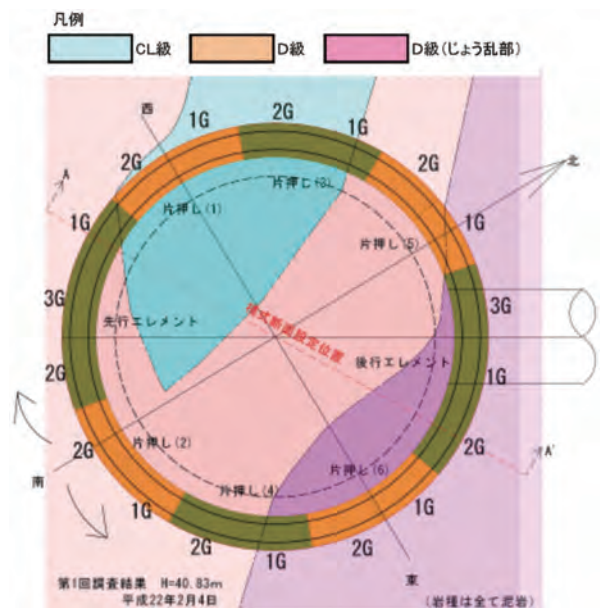


図三 岩盤調査箇所

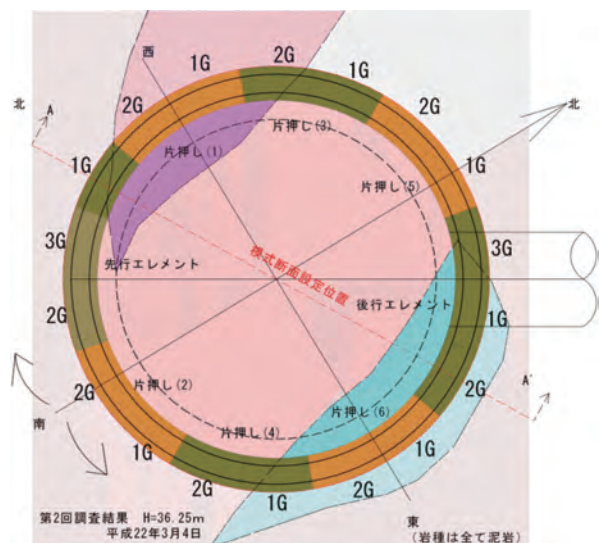
§3. 岩盤調査結果

シールドトンネル発進位置付近の岩盤の特徴を把握することを目的に、発進立坑内部掘削時に岩盤調査を実施した。岩盤調査深度は図一三に示すように、9段目かまち梁付近 GL-54.67 m から、床付付近 GL-63.07 m の間で計 4 回実施した。調査方法は、掘削過程で 1m 程度連壁側の断面を残し、その断面に対して岩盤の状態、風化状態、節理状態を観察・記録するとともに、岩盤物性を把握するためにロックシュミットハンマー試験を実施して推定岩盤強度を求めた。それらの結果に基づき、図一四～七に示すような岩級区分平面図を作成した。

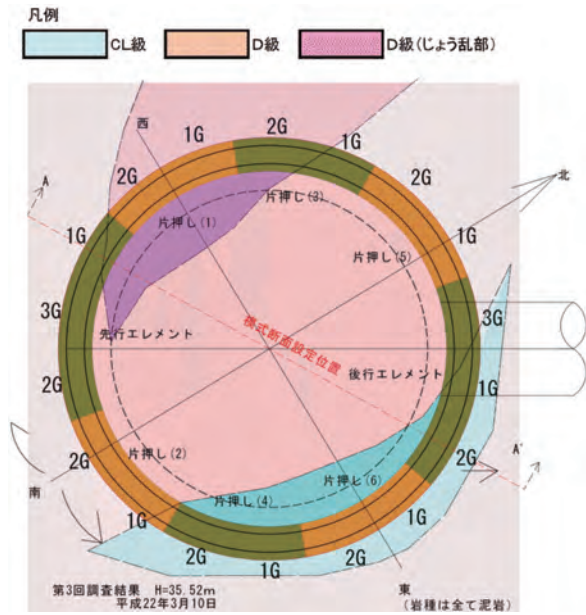
第 1 回調査結果では、図の南西から北西に掛けて比較的堅固な CL 級岩盤が分布している。一方、北東から南東にかけて強風化した非常に脆いじょう乱状態の D 級岩盤が分布している。また、南北方向にはハンマーの軽打で容易に割れる D 級岩盤が分布している。それに対して第 2～4 回調査結果では、南東から北東にかけて CL 級岩盤が分布しており、南西から北西にかけてじょう乱状態の D 級岩盤が分布している。なお、南北方向には第 1 回と同様に D 級岩盤が分布している。



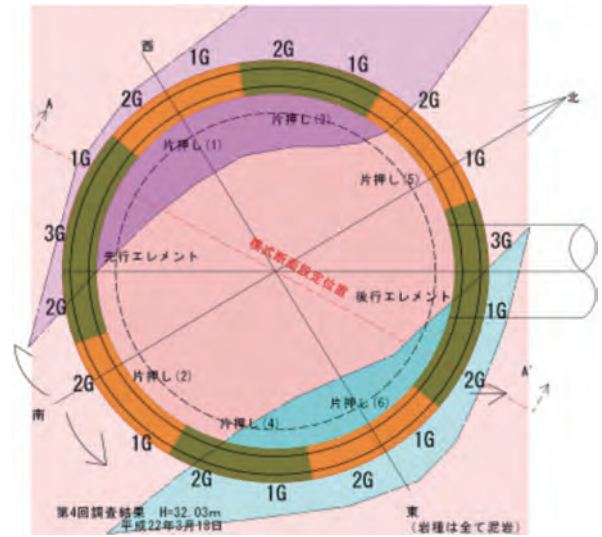
図四 第 1 回岩盤調査結果 (平面図)



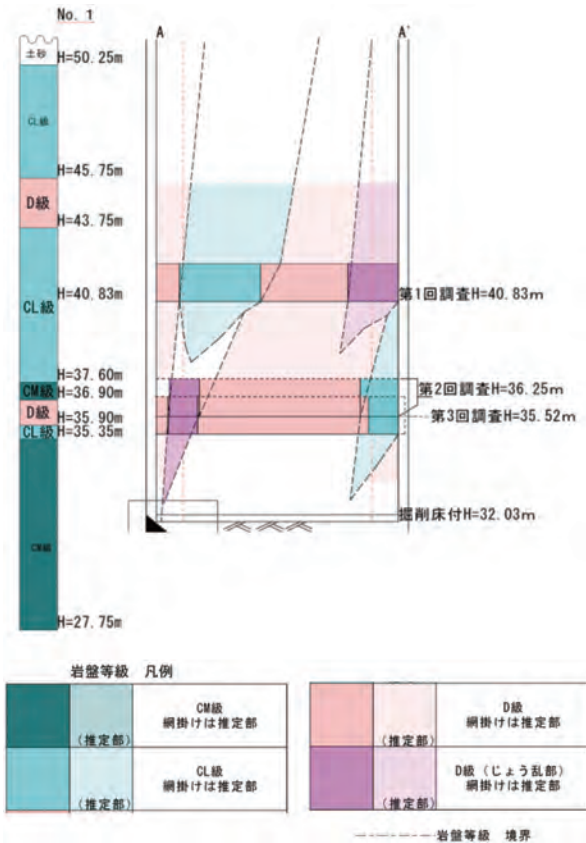
図五 第 2 回岩盤調査結果 (平面図)



図一六 第3回岩盤調査結果(平面図)



図一七 第4回岩盤調査結果(平面図)



図一八 岩盤調査断面図

岩盤調査結果から作成した縦断面図を図一八に示す(断面方向: 図一四~七中の赤色点線ライン). 図のように, 地質構造は約 60° の西傾斜となっているが, 同一性状の地質が縦断方向においても著しく変化するような不均質な岩盤を呈していることがわかった. また, 立坑近傍において実施された事前ボーリング結果に基づく地質想定では CM~CL 級岩盤が卓越するとされていたが, 実際にはより脆弱な D 級が卓越していた.

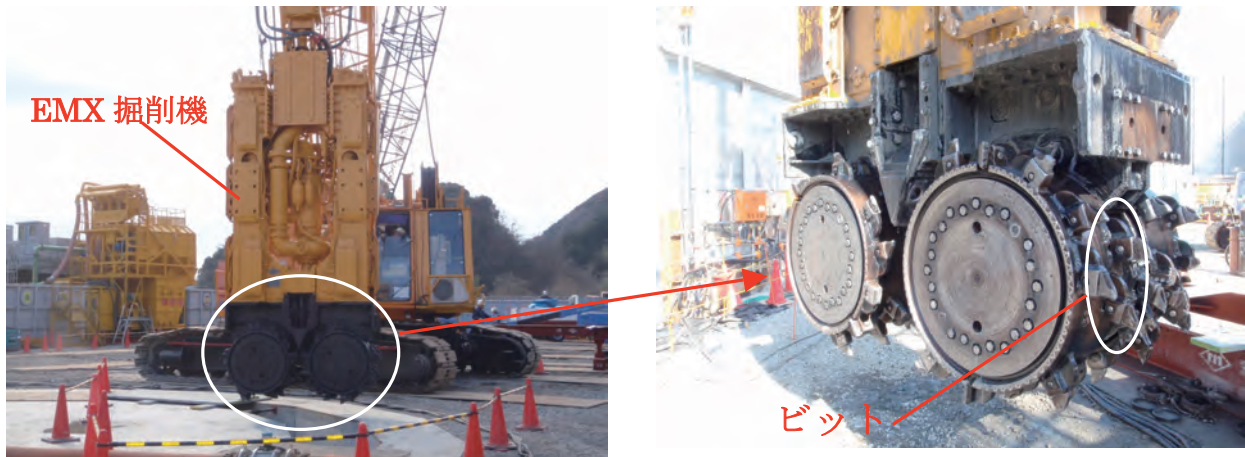
また, ロックシュミットハンマー試験による推定岩盤強度を岩級区分毎にまとめると, CL 級岩盤が 7.2 N/mm², D 級岩盤が 5.5 N/mm²であった.

§ 4. 地中連続壁施工実績

本工事では, 写真一1 に示す水平多軸式掘削機 (EMX-240) を使用して, 深度 68.5 m (内, 岩盤部掘削 23.5 m) の連壁掘削を行った. 本論では連壁掘削時の施工実績の中からとくに掘削所要時間とビット損耗量を対象に, 岩盤調査で得られた岩級区分との関係について検討した. また, 標準歩掛り算定方式に関して, 今回施工したような一軸圧縮強度が 5 N/mm² を上回る地盤を網羅するのが現状ではないため, 現場施工実績に基づき標準歩掛りの逆算を試みた.

4-1 連続壁掘削実績と岩級区分との関係

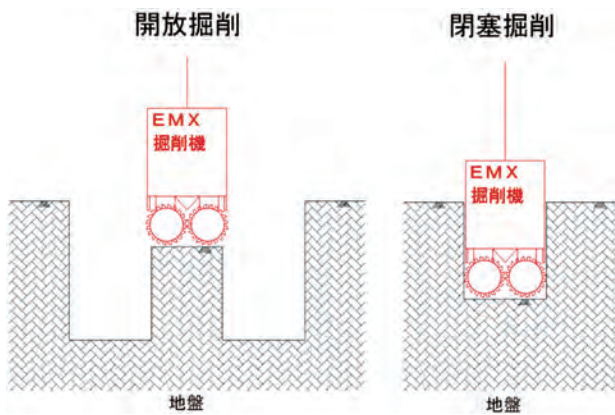
掘削時の岩盤調査結果から, 連続壁掘削区間に卓越する岩級を連続壁の要素毎に判別した. それをもとに, 岩級区分別に連続壁掘削実績を表一1 のようにまとめた. 表に示すように, 1 m³ 当たりの掘削時間に関しては CL 級岩盤が D 級岩盤の約 1.5 倍を要しており, 1 m³ 当たりのビット損耗量については CL 級岩盤が D 級岩盤の約 4 倍となった. また, 同一岩級内で図一九に示すような掘削時の地盤形状 (開放掘削, 閉塞掘削) 別に比較



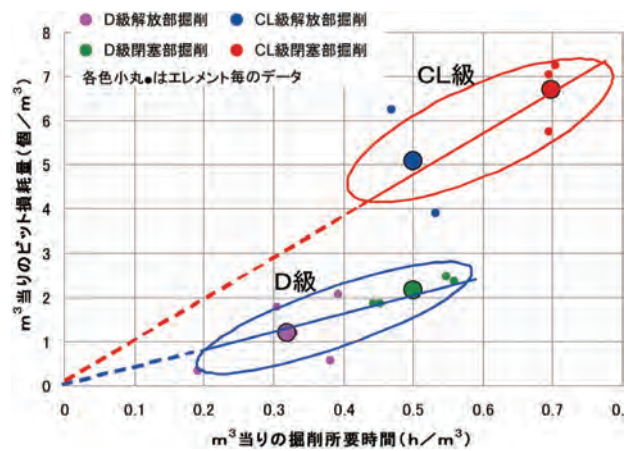
写真一 水平多軸式掘削機 (EMX-240)

表一 掘削時間とビット交換回数

岩級区分 掘削タイプ	D級			CL級		
	開放掘削	閉塞掘削	平均	開放掘削	閉塞掘削	平均
岩盤掘削数量(m ³)	237.06	190.40	427.46	79.02	142.80	221.82
岩盤掘削時間(h)	75.50	95.00	170.50	39.50	99.50	139.00
ビット損耗量(個/m ³)	245	412	657	402	957	1359
1m ³ 当りの岩盤掘削時間(h/m ³)	0.32	0.50	0.40	0.50	0.70	0.63
1m ³ 当りのビット損耗量(個/m ³)	1.03	2.16	1.54	5.09	6.70	6.13



図一 掘削時の地盤形状パターン



図一〇 岩盤掘削 1 m³ 当りの所要時間とビット損耗量の関係

すると、1 m³ 当りの掘削時間、ビット損耗量ともに閉塞掘削が開放掘削の概ね 1.5~2.0 倍程度となった。同一地盤形状内で岩級別に比較すると、1 m³ 当りの掘削時間に関しては開放・閉塞による差は小さく、ともに CL 級岩盤が D 級岩盤の 1.4~1.6 倍の時間を要した。

一方、1 m³ 当りのビット損耗量に関しては、開放掘削時では CL 級岩盤が D 級岩盤の 4.9 倍、閉塞掘削時では 3.1 倍となっており、開放掘削の方が岩盤性状 (岩級) の違いによる影響を大きく受ける傾向が認められた。

表一に示した結果について、1 m³ 当りの掘削時間とビット損耗量の関係を図一〇に示す。なお、図中には表中の値の元となった連続壁の各エレメントの値も示した。

図のように、各エレメントのデータは、岩級や掘削時の地盤形状別にある程度まとまった領域に分布しており、掘削時間とビット損耗量の関係がそれぞれの岩級において異なる傾向 (それぞれにおいて一定の比例関係) を示すことがわかった。

以上の関係を用いて、同種工事の計画・施工時において事前に想定された掘削区間の岩級区分から掘削時間やビット交換回数・数量を見積りことができると考えられる。ただし、今回得られた関係は泥岩に限られるものであるため、今後は異なる岩種についても同様のデータを蓄積する必要がある。

表一2 標準歩掛りに用いる土質係数 α

N<50	N \geq 50	玉石混じり土 軟岩* (土丹含む)
1.00	1.22	1.96

※軟岩： $qu \leq 5N/mm^2$

表一3 流動化処理土掘削実績と標準積算との比較

	標準積算 日数	施工実績 日数	比率
片押し-5	4.36日	3.30日	0.76
片押し-3	4.36日	4.20日	0.96
片押し-1	4.36日	4.80日	1.10
片押し-2	4.36日	3.70日	0.85
片押し-4	4.36日	3.60日	0.83
片押し-6	4.36日	4.70日	1.08
後行EL	6.54日	7.00日	1.07
平均	—	—	0.95

表一4 岩盤部施工実績と一軸圧縮強度

	岩級 区分	施工実績 日数	平均施工 実績日数	一軸圧縮 強度 (N/mm^2)
片押し-5	D級	6.70日	7.75日	5.5
片押し-3	D級	6.80日		
片押し-1	D級	12.20日		
片押し-2	D級	5.30日		
片押し-4	CL級	7.40日	8.90日	7.2
片押し-6	CL級	10.40日		
後行EL	CL級	12.00日		

表一5 施工実績から逆算した土質係数 α

岩級区分	標準積算 (軟岩)	D級	CL級
一軸圧縮強度 (N/mm^2)	5.0	5.5	7.2
土質係数 α	1.96	3.61	4.15

4-2 連続壁掘削実績と掘削標準歩掛り

連続壁1エレメントの施工日数(地山掘削時)の標準歩掛りは(1)式で示される¹⁾。

$$Td = 0.0269 \times \alpha \times \beta \times d \times h \times t \text{ (日/エレメント)} \quad (1)$$

ここに、Td：標準積算日数(日)

α ：土質係数

β ：補正係数 ($1,000 \leq t \leq 1,500$: $t = 0.9$)

d ：掘削長(掘削する平面的な長さ)(m)

h ：掘削深度(m)

t ：壁厚(m)

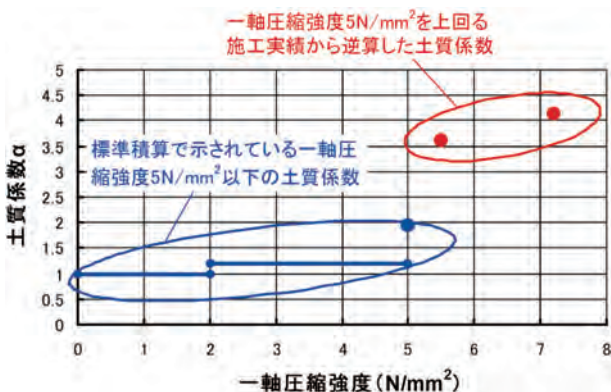
ここで、土質係数 α は、表一2に示すように地山のN値等によって定められる。

岩盤部の検討に先立ち、N<50である流動化処理土部(GL-45.0m以浅)の標準歩掛りと施工実績との比較を行った。(1)式にそれぞれの項に値を代入した結果、標準歩掛りは4.36日となった。表一3に各エレメント毎の流動化処理土の施工実績を示す。掘削機のトラブルや小崩落があったエレメントでは標準歩掛りよりも掘削時間を要するものの、トラブル等が無かったエレメントでは標準歩掛りに対して8割程度の日数で掘削ができた。トラブル等も含めて全体では概ね標準歩掛りと同様(施工実績日数/標準積算日数=0.95)であった。

岩盤部の施工実績を表一4に示す。岩盤部の標準歩掛りの適用は、表一2に示すように玉石混じり土または一軸圧縮強度が $5 N/mm^2$ 以下の軟岩を対象としている。本工事ではD級岩盤でも原位置試験で得られた一軸圧縮強度が $5.5 N/mm^2$ を示しており、標準歩掛りの算出に必要な土質定数 α について表一2では適当な値が示されていない。したがって、一軸圧縮強度が $5 N/mm^2$ を上回る領域の岩盤に対しては新たに土質係数 α を算出する必要があり、今回は施工実績からの逆算を試みた。

表一5に岩級区分別の一軸圧縮強度と逆算して得られた土質係数 α を示す。土質係数 α の逆算は、(1)式中のTdに表一4の施工実績を代入して求めた。表に示すように、D級岩盤の一軸圧縮強度は標準積算の強度範囲をわずかに上回る値($5.5 N/mm^2$)であるにもかかわらず、逆算して得られた土質係数 α は標準積算の約1.8倍となった。また、CL級岩盤は標準積算の土質係数 α に対して、約2.1倍の値となった。

表一2に示したN値から一軸圧縮強度(N値50のとき $qu = 2 N/mm^2$)を換算し²⁾、標準積算で設定された強度範囲における一軸圧縮強度と土質係数 α の関係を図一11に示す(青色でプロットした範囲)。同様に、表一5の施工実績から得られた一軸圧縮強度と土質係数 α (逆算値)の関係は赤色でプロットした範囲となる。図のように、一軸圧縮強度 $5 N/mm^2$ を上回る地盤に対する土質係数 α は、標準積算基準で示された強度範囲($5 N/mm^2$ 以下)のものに比べて強度増加に伴う上昇傾向がよ



図一11 一軸圧縮強度と土質係数 α の関係

り顕著となっている。

以上より、対象地盤の強度が一軸圧縮強度 5 N/mm^2 を上回る地盤条件について安易に既存の標準歩掛り算出方式により計画すると、実施工では計画の2倍程度の日数を要する可能性があるため、そのような条件下における土質係数 α の適用には十分留意する必要がある。

§5. おわりに

本報告は、施工実績の少ない水平多軸式掘削機による大深度岩盤掘削において、施工実績および地盤調査結果から得た岩級区分との関係について検討した。その結果、対象地質（泥岩）の岩級区分がD級、CL級のそれぞれにおいて、掘削時間とビット損耗量の関係に一定の比例関係があることを確認した。

また、既存の標準積算案では網羅されていない、対象地盤が一軸圧縮強度 5 N/mm^2 を上回る領域の掘削に対して、施工実績からの逆算という手法を用いて土質係数

α を求めた。その結果、上述した強度領域の地盤に対しては、強度増加に対する土質係数 α の増加割合が相対的に高まり、既存の標準歩掛りで設定されている土質係数 α を使用すると実施工と大きな差を生じる可能性を指摘した。

より実施工に即した施工計画を立てるためにも、継続的に同様の強度領域における施工実績データを収集し、掘削時間とビット損耗量の関係や、一軸圧縮強度と土質係数 α の関係を明らかにしていく必要がある。

謝辞. 本社土木設計部および技術研究所の皆様からのご指導ならびにご支援により、本工事の施工を円滑に進めることができ、さらに報告書をまとめるまでに至りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鋼製地中連続壁工法—I 積算基準案 鋼製地中連続壁協会
- 2) 地盤調査法—地盤工学会