

河川横断シールドトンネル直上の護岸基部改良工 — 曲がり削孔による河床砂置換部の高強度地盤改良 —

西松建設(株) 正会員 ○山崎 宏
西松建設(株) 藤田 俊弥

西松建設(株) 正会員 村川 徳尚
西松建設(株) 正会員 吉田 吉孝
西松建設(株) 正会員 草野 孝三

1. 地盤改良の目的

シンガポール地下鉄 T228 工区は、**図-1** のようにシンガポール川の河口部における 1980 年代の埋立てで造成された土地に位置している。海底に堆積していた軟弱粘土層の上を埋立て、現在の地形が形成されている。河川の両岸にあたる場所は、護岸の安定を図るため、海底部の軟弱粘性土を浚渫し、海砂で置換したのち護岸を構築している。なお、この河川は河口堰で海と仕切られており、飲料水の水源にもなっている。

上記の海砂にて置換した護岸基礎構造（以降、サンドキー）は、**図-2** に示すように、平面的にその大部分が河川下に広がっており、泥土圧シールド工法により施工されるトンネル通過断面の天端付近に存在している。したがって、サンドキー直下のトンネル掘削時に、土砂の噴発や裏込め材が河川へ漏出するリスクがあったため、トンネル直上 3m、トンネル外側左右 3m の範囲において、サンドキーの地盤改良が求められた¹⁾。

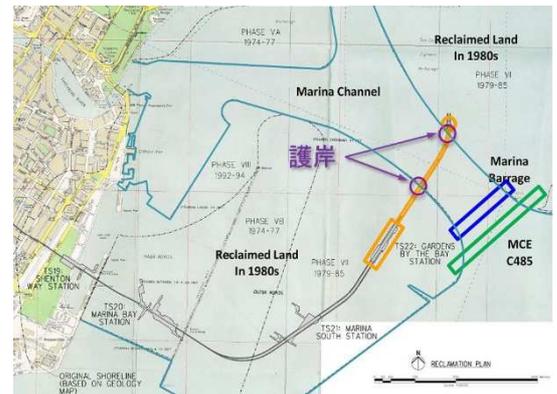


図-1 埋立て平面図

2. 課題と対策

(1) 技術的課題

地盤改良工を施工するにあたって、以下の厳しい施工条件を克服し技術的課題を解決する必要があった。

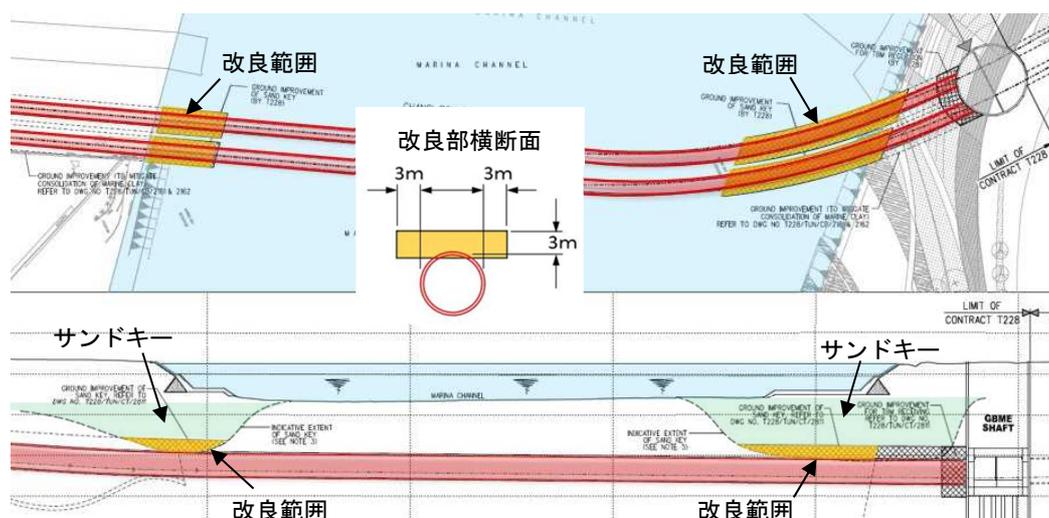


図-2 サンドキーと改良範囲

キーワード シールド, 河川横断, 砂地盤, 環境負荷低減, 曲がり削孔, 高強度薬液注入
連絡先 〒105-6310 東京都港区虎ノ門1-23-1 虎ノ門ヒルズ森タワー10階 西松建設(株) 国際事業本部 TEL03-3502-7693

- ① 改良対象であるサンドキーは、海砂による埋土であり、非常に粒径の揃った緩い砂質土である
均等係数：7程度，N値：5～20，透水係数： $4.1 \times 10^{-5} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ m/sec
- ② 改良範囲は河川直下であり，かつ護岸から約 60m 離れた地点までの長距離・広範囲に亘る
- ③ 河川の水は飲料水にも利用されるため，環境負荷の低減が必要不可欠である
- ④ 改良体に対して高い品質が要求されている

せん断強度 (Cu) : 300kPa 以上，透水係数(k) : 2×10^{-8} m/sec 以下

水不足に悩むシンガポールにとって，この河川は貴重な水源であり，特に項目③は企業先が最も憂慮していた課題であった。また，項目①，②のような厳しい施工条件のもと，項目④にあるように日本の薬液注入では例を見ない高強度かつ不透水性を確保するために，確実な施工が求められた。

(2) 工法の選定

地盤改良の工法を選定するにあたり，表-1 に示すように，a. 陸上部からの曲り削孔による薬液注入工，b. TBM からのグラウト注入工，c. 改良範囲直上の河川仮締切りからの薬液注入工の3工法について，工程，施工性，経済性，環境負荷の面から，比較検討を行った。

「b. TBM からのグラウト注入工」は，TBM から注入を行うため，注入材が固化するまでの養生期間中，掘削することができず，当現場のクリティカルパスである，トンネル掘削工の工程に大きな影響を与える。また，「c. 仮締切りによる薬液注入工」は，石張り護岸(写真-1)に仮締切りを行い，さらに埋立てが必要となるため，施工性，経済性が悪く，また水質汚濁など環境への負荷が大きいため，課題を解決するに至らない工法であった。

以上から，河川への環境に負荷を与えず陸上部から改良範囲への注入が可能となる「a. 曲り削孔による薬液注入工」を本地盤改良の工法として採用した。

(3) 注入材の選定

注入材は，分類の異なるアルカリ系溶液型注入材，非アルカリ系溶液型注入材，セメント系懸濁型注入材の3種類を候補とした。強度発現の側面では，セメント系懸濁型注入材が適しているが，材料の粒径が比較的大きいため浸透性が悪く，要求される透水係数を満足できない可能性があった。溶液型の材料は，浸透性に対して問題ないため，発現強度が期待できるアルカリ系溶液型注入材と非アルカリ系溶液型注入材を候補とした。

最も適した材料を選定するために，原地盤で試験施工を実施し改良体の品質確認を行った。結果を表-2 に示す。

① 非アルカリ系溶液型注入材

サンドキー中の貝殻と注入材の希硫酸が化学反応(発泡現象)を起こし，未改良部が生じたため，せん断強度および透水係数ともに要求値を満たさなかった。

② セメント系懸濁型注入材

注入材が十分に浸透している部分のせん断強度は要求値を大幅に上回ったが，注入材が土中に均一に浸透できなかったため，透水試験の削孔中に孔壁が崩壊し，透水試験を実施できなかった。

表-1 地盤改良工法比較

工 法	a. 曲り削孔による薬液注入	b. TBMからのグラウト注入工	c. 仮締切りによる薬液注入
工 程	○	× 養生による待ち	△
施工性	○	△ 注入範囲の制約	× 石張り護岸での締切りと埋立
経済性	△	○	×
環境負荷	○	○	×
総合評価	○	△	×



写真-1 河川護岸

表-2 注入材料の試験施工結果

材 料	要求品質	②セメント系懸濁型注入材		③アルカリ系溶液型注入材	
		①非アルカリ系溶液型注入材	1.5		2.0
削孔間隔 (m)	—	2.0	1.5	2.0	2.0
せん断強度 Cu (kPa)	300	275	898	435	435
透水係数 k (m/s)	2×10^{-8}	2.5×10^{-6}	×	2.5×10^{-7}	2.5×10^{-7}
改良状況	—	土中の貝殻と反応し発泡	均一に浸透せず 透水試験のための孔壁が崩壊		実施工では群効果で透水係数向上が期待できる
総合評価	—	△	×	○	○

③ アルカリ系溶液型注入材

ほぼ均一に地盤を改良できており、せん断強度について要求値を満足した。また透水係数も3種類の材料中、最も低い値が得られた。

以上の結果から、当該改良工の注入材としてアルカリ系溶液型注入材を採用することとした。

試験施工は3本のみでの改良体で実施したため、薬液が土中に拡散しやすい状況であった。したがって、透水係数が要求値より若干高い値になったと考えられた。しかし、実施工では改良範囲が広いので、群効果により薬液の部留まりが良くなり、透水係数が向上できると判断した。

(4) 曲がり削孔システム

曲がり削孔システムは、空港滑走路直下の耐震補強工事等、改良範囲直上からの削孔が不可能な施工条件を対象に、高精度の長距離曲線削孔を可能にした施工システムである²⁾。

適用範囲は、粘性土ではN値10以下、砂質土ではN値30以下であり、最大削孔長は200m、深度は30mである。また、最小曲率半径は60m、施工精度は削孔長に対して1/300以上である。削孔機の外観を写真-2に示す。

曲線削孔専用ツールは、図-3に示すように、ロストビット、先端ロッド、ジャイロケース、中空型通電管を仕込んだ特殊鋼ロッドから構成される。所定位置まで削孔したのち、ロストビット(写真-3)を分離することでツール全体がパイプ状になり、内部に注入外管を建て込むことができる。

ロストビットは、斜めに切り落としたテーパ形状に



写真-2 削孔機

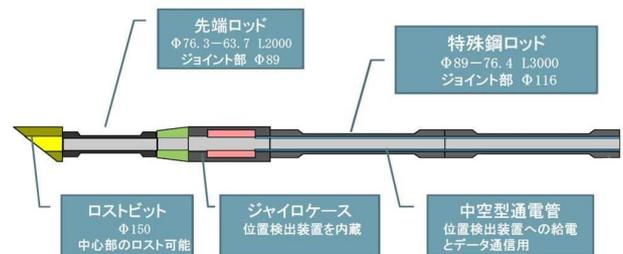


図-3 曲がり削孔ツール



写真-3 ロストビット

なっており、この面が土圧を受けることで横方向の分力を得る。すなわち、直線削孔するときは、ビットを回転させながら推進し、曲げ削孔するときは、ビットを曲げたい方向に向け回転させずに押し込むことで、地山からの抵抗を受けて、曲がって削孔できる。

削孔管理システムは、削孔計画線形に対する削孔位置の計測、表示、記録を行う。削孔位置は、ツールに設置したジャイロによるリアルタイム計測と削孔 3~9m 毎に行う挿入式傾斜計による高精度位置計測による補正を組み合わせ計測する。これらの情報は、**図-4**のような削孔機に装備されているモニターにより、リアルタイムに確認できるため、精度の高い削孔が可能となっている。

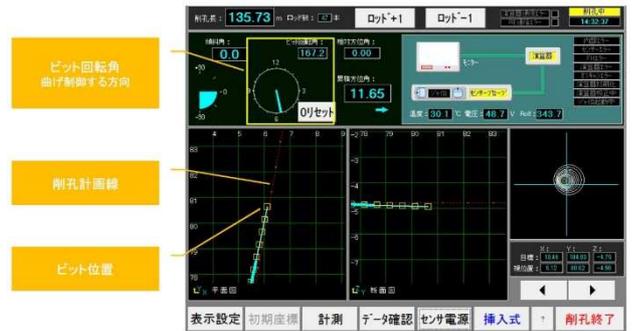


図-4 リアルタイムモニター

3. 施工計画および施工管理

(1) 削孔配置

曲り削孔の配置を**図-5**に示す。試験施工より、透水係数を向上させるためには、注入材を土中に確実に浸透させることが重要であること、また削孔精度を勘案して、削孔配置は間隔を試験施工の 2.0m より狭くし、平面的に 1.8m 間隔に 7 本、縦断的に上下 2 層 1.5m 間隔とした。削孔は地表面から 25 度の入射角とし、30m 先において半径 100m で上方に曲げることで、改良範囲ではトンネルと平行になる計画線形とした。1 本あたりの計画削孔延長は、約 95m である。改良範囲の終点部は、サンドキー下端が上昇する位置にあった。このため、削孔の停止位置は削孔計画線形が粘性土に貫入する位置とした。現場では、削孔延長が 95m に近づいた際、ビットの貫入抵抗や戻りの削孔水に含まれる土砂の状況を注意深く観察することに加え、ビットが粘性土に貫入する際、削孔水であるベントナイト泥水の送水圧が急激に上昇することに着目し、送水圧の変化にも注視してその位置を確認した。

(2) 施工管理

削孔は、計画の線形に対し 300mm 以内の誤差に収まるように、モニターで確認しながら微調整を行った。併せて、削孔 6m ごとに挿入式傾斜計を特殊鋼ロッド内に挿入して削孔位置を確認・修正した。

注入方法は、ゲルタイムを 30 分に、注入速度は毎分 15l に設定した。また、注入 1 巡目は注入率 40% の量管理とし、2 巡目は終圧が 0.5MPa となるように、圧管理で注入した。

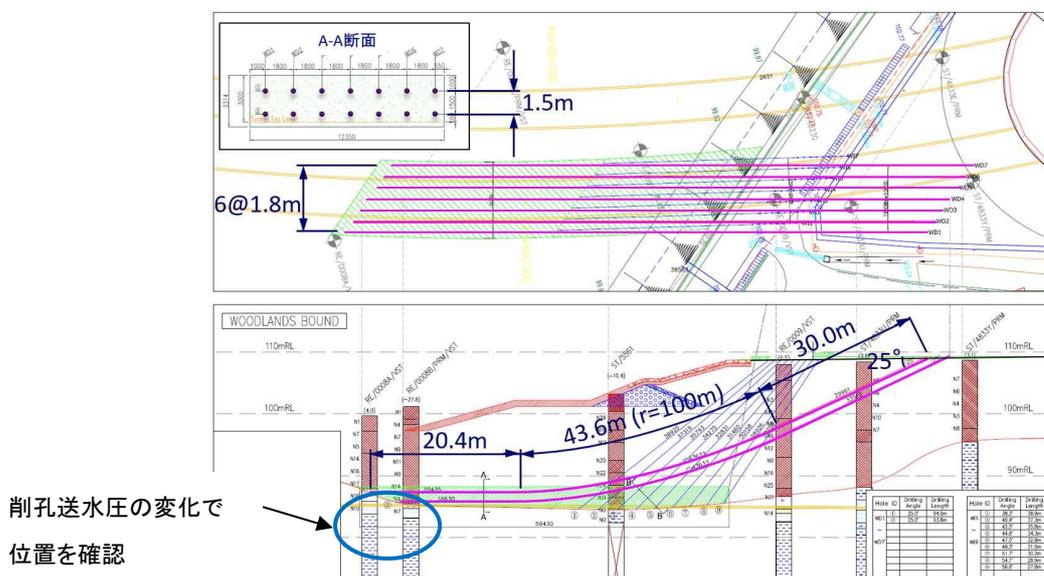


図-5 削孔配置図

a) 削孔精度確保の工夫

削孔精度を確保するには、削孔機の据付けやジャイロの初期値入力のため、測量の精度を高める必要がある。そこで測量用参照点を複数設け、測量の際は複数点から据付位置を確認することで、削孔機の据付精度の向上を図った。また、曲がり削孔ではジャイロを先端ロッドの直後に取り付けるため、打撃を使用した削孔が出来ない。現場の表層近くは比較的大きな石など障害物が多く、打撃無しの削孔では精度の確保が困難であった。そこで、曲がり削孔機とは別に、ロータリーパーカッションタイプの削孔機を配備し、削孔開始点から 20m 程度の直線部分においては、打撃併用で削孔を行い、削孔精度の確保を図った。

b) 流量管理の工夫

アルカリ系溶液型注入材はゲル化反応の特性上、配合比率によるゲルタイムや強度への影響が大きく、注入する際は正確な配合比率を確保する必要がある。そこで、通常 2 液型の薬液注入では、1 液のみ流量計を通し流量を管理するところを、当該工事においては両液とも流量計を通し、注入中は常に規定の比率で薬液が注入されていることを確認しながら注入を行った。

c) 注入順序の工夫

注入順序は、注入材の上方への拡散を抑えるため、上層から先行して注入した。薬液注入の注入順序に関して、注入による地盤の隆起を抑制するために下部から上部への施工が一般的であるが、当該工事では、注入効果を重視したため上部から下部への施工とした。また平面的な注入順序は、地下水を排除しながら注入材を浸透させる目的で、奥から手前方向に片押し注入とした。さらに、横方向への注入材拡散を抑制する目的で、**図-6**に示すように両端（第1列と第7列）を先行注入し、注入が V 字に進むように管理した。

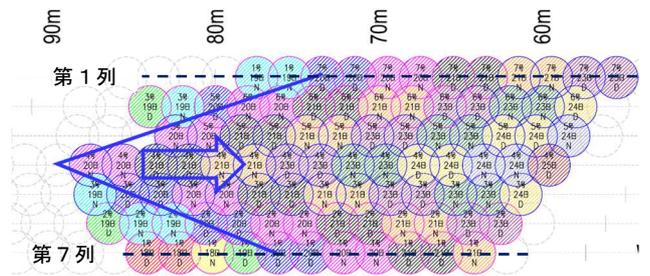


図-6 注入順序概念図

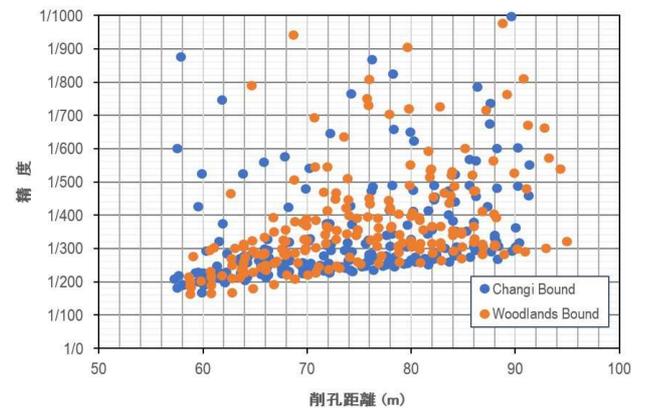


図-7 削孔精度実績

4. 施工結果

(1) 削孔精度

削孔距離と精度の関係を**図-7**に示す。注入範囲である 57m~95m の削孔距離に対する精度は 1/200~1/300 以上を確保していた。また削孔距離に関わらず、計画線形に対しほぼ 300mm 以内の誤差に収まっており、削孔機の据付け精度の高さと削孔管理システムの有効性が確認された。

(2) 注入実績

代表的な 2 断面における、注入 1 巡目を終えた時点での注入量と注入圧を**図-8**に示す。削孔の戻り水の状態から、サンドキーに粘性土が混在し始めた位置を水色破線で、また、送泥圧の変化から粘性土に完全に貫入したと判断された位置を青色破線で示した。これらより、実際のサンドキーと粘性土の境界は、設計よりも高い位置にあり、サンドキー底部は粘性土が混在していることが分かる。これに基

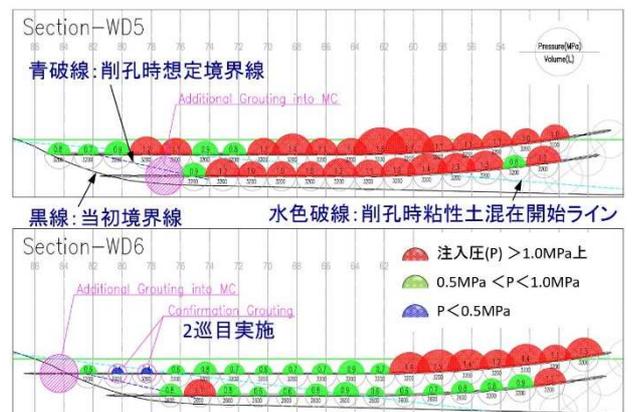


図-8 注入量-圧力マップ

づき、最初の注入孔が粘性土中に位置するようスリーブ管を配置した。また各注入ステップにおける注入の終圧を0.5MPa毎に3段階に色分けした。上層の初期に注入した2ヶ所では、注入材が拡散したと考えられ、終圧が管理値の0.5MPaより低い値を示している。しかし、それ以外の箇所では終圧は管理値を上回っており、注入順序を工夫することで注入材が確実に改良範囲に浸透し、かつ留まっている状況が確認できる。なお、管理値に達しなかった上記2ヶ所においては2巡目を注入し、終圧が0.5MPaを超えたことを確認している。

表-3 品質確認試験結果

項目	要求値	平均	最大	最小
せん断強度 Cu (kPa)	300	469	734	302
透水係数 (m/s)	2×10^{-8}	1.43×10^{-8}	1.69×10^{-8}	0.92×10^{-8}



写真-4 コアサンプル

(3) 品質確認試験結果

コアサンプルによって採取した改良体のせん断強度、および現場透水試験による透水係数の結果を**表-3**に示す。削孔精度と注入材の浸透状況が良好であったこと、さらに注入順序の工夫により注入材の拡散を制御したことより、両品質項目に対してすべて要求値を満足していることが確認された。

5. まとめ

河川下の広い範囲に亘る砂質土護岸基礎部(サンドキー)に対し、河川に環境負荷を与えずに高強度の地盤改良を行うため、陸上部から削孔・注入のできる曲がり削孔システムを採用した。原地盤に対して試験施工を行うことで、要求品質を満足できる最適な材料を選定した。また実施工では、削孔精度を向上させるための掘削機の据付け方法、強度および注入材の部留まりを向上させるための、注入量管理および注入手順について工夫を凝らした。

その結果、薬液注入工では例を見ない高いせん断強度と不透水性を達成することができ、切羽および護岸への影響を与えずトンネル掘削を完了した。

近年、既設構造物による制約や環境への配慮等、より厳しい施工条件が求められてきている。当現場で適用した曲がり削孔システムは、改良範囲直上の状況に影響を受けず、離れた場所から高精度の施工が可能であるため、今後そのニーズが高まっていくものと考えられる。

最後に、計画・施工を進めるにあたり、土木設計部を始め技術研究所、国際事業本部、ライト工業株式会社から貴重なご助言を頂戴した。ここに改めて謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉田吉孝他：シールド河川横断に伴う護岸防護工，西松建設 技報 40 号，P26，2017
- 2) ライト工業株式会社 Web サイト：工法カタログ「コンダクションナビ工法」