

# マリーナ地区高速道路（485 工区）建設工事における深層混合処理工法の適用

五洋建設（株） 国際会員 ○車田 佳範  
五洋建設（株） 長津 辰男  
五洋建設（株） 内田 桂司

## 1. はじめに

本工事はシンガポールのマリーナ地区高速道路の地下トンネルを建設するものである。485 工区は当事業の中でも最も難易度の高い工事であり、トンネル全長 700m のうち 420m がシンガポール川河口の海底地盤下に建設された。施工方法は二重の鋼管矢板止水壁で河川を仮締切りし、開削工法でボックスカルバートンネルを構築した。この時、仮締切り内掘削時の鋼管矢板の安定性確保とヒービング防止のため地盤の軟弱な海成粘土を深層混合処理工法で改良した。本論文では工事概要と地盤改良の効果について報告する。

## 2. 工事概要

### (1) マリーナ地区高速自動車道路（MCE : Marina Coastal Expressway）

マリーナ地区高速自動車道路は 2013 年 12 月に開通したシンガポールで 10 番目となる新しい高速道路である。本高速道路は、既存のイーストコーストパークウェイ（ECP）とアヤ・ラジャー・エクスプレスウェイ（AYE）をマリーナ沿岸側で結ぶことでマリーナ地区へのアクセス向上や ECP、AYE の渋滞緩和を目的としており、シンガポール陸上交通庁（LTA : Land Transport Authority of Singapore）により事業化された。シンガポールでは初となる海底を通る高速道路であり、延長 5.3 km、片側 5 車線の大部分が二重ボックスカルバート構造（外幅 53.3m×高さ 10.89m）の大断面地下トンネルである。図-1 に本高速道路の位置図を示す。



図-1 MCE 位置図<sup>1)</sup>



図-2 485 工区位置図<sup>1)</sup>

### (2) 485 工区（Contract485）の特徴

図-2 に 485 工区の位置図を示す。485 工区は本事業のうちほぼ中央の工区にあたり、トンネル全長 700m のうち 420m がシンガポール川河口の海底トンネルとなる。

当工区では施工箇所の近くに”Marina Barrage”と呼ばれる河口堰が隣接していた。この河口堰は豪雨の際に水門を開き雨水を放流する役割を有していたため、工事期間中はこの河口堰の機能に影響を与えないよう常時、幅 150m 以上の河口幅を確保することが要求された。そこで施工は左岸（ステージ 1 : 2009 年 5 月～2011 年 4 月）と右岸（ステージ 2 : 2010 年 11 月～2012 年 12 月）の 2 ステージに分割して行った。図-3 に分割施工の状況を示す。

Soil Improvement in Marina Coastal Expressway Project (C485) with Cement Deep Mixing (CDM) Method:

Yoshinori KURUMADA, Tatsuo NAGATSU and Keiji UEDA (Penta-Ocean Construction Co., Ltd.)

トンネル施工を開削工法で行うため、河川を二重の鋼管矢板止水壁で一旦仮締切りし、締切り内を掘削してボックスカルバートを構築した。仮締切り内を開削する際の鋼管矢板の安定性を確保するため、底盤の軟弱な海成粘土を深層混合処理工法で改良した。

また、本工事は海底に打設した直径 1.4m の鋼管矢板をトンネル工事完了後は引き抜くという世界でも前例のない難易度の高い工事であった。そこで施工にあたっては、世界で最大級（起振力 4,000kN）のバイブロハンマーや 20,000kN 級の油圧ジャッキなど多くの新しい建設技術を導入した。図-4 にバイブロハンマーおよび油圧ジャッキによる鋼管の引抜き状況を示す。



図-3 仮締切りと分割施工の状況



(a) バイブロハンマー



(b) 油圧ジャッキシステム

図-4 鋼管杭の引抜き状況<sup>1)</sup>

### (3) 施工方法

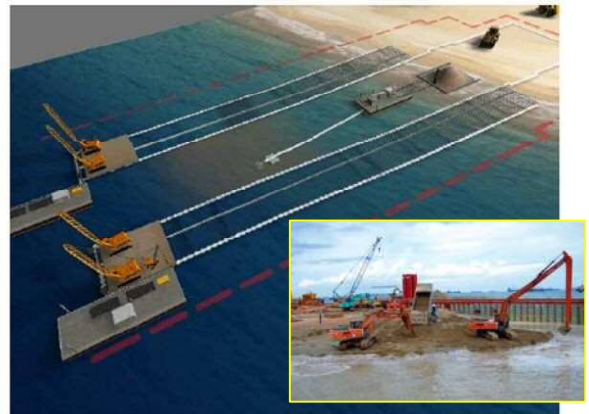
本工事の施工フローを図-5 に示す。

- ① 海底トンネルを開削工法で施工するため、トンネル線形に沿って二重の鋼管矢板止水壁による仮締切り堤を設置する。
- ② 仮締切り内に浚渫土砂を投入した後、海水をポンプで抜き水位を下げ陸化する。
- ③ 掘削時の鋼管矢板の安定性を向上するため、深層混合処理工法による底盤の地盤改良を行う。
- ④ トンネル基礎用の場所打ち杭を打設する。
- ⑤ 仮締切り内に切梁支保工を設置しながらトンネル下面（海底-20m）まで土砂掘削を行う。
- ⑥ 切梁支保工を取り外しながら下部よりトンネル基礎版、壁、天井を構築する。
- ⑦ トンネルのボックスカルバート完成後、海底地盤高さまで土砂を埋め戻す。
- ⑧ 仮締切りを撤去する。

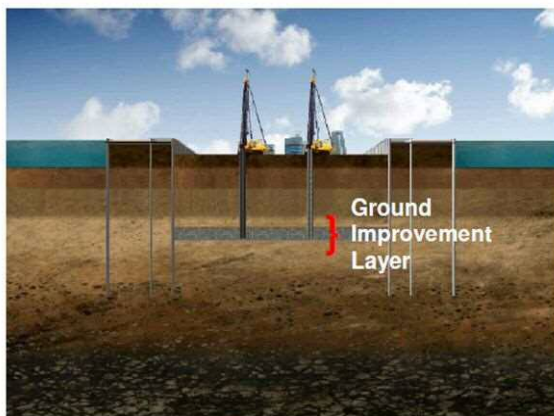
この手順をステージ1、ステージ2と2回繰り返して海底トンネルが完成する。



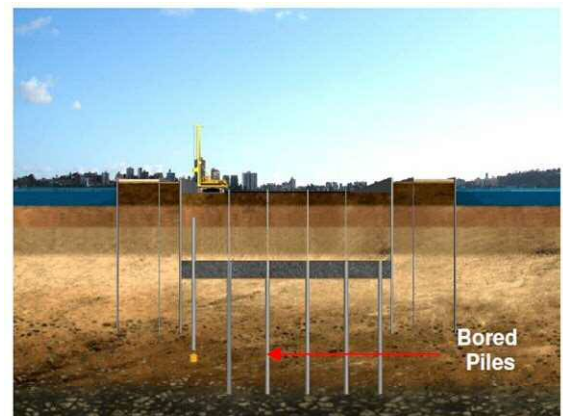
①二重の鋼管矢板による仮締切りの設置



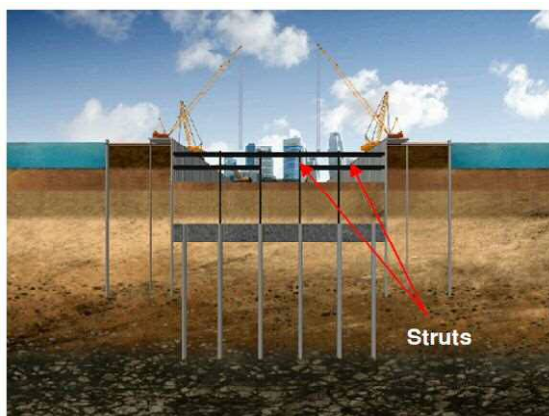
②仮締切り内に浚渫土を投入し一旦陸化



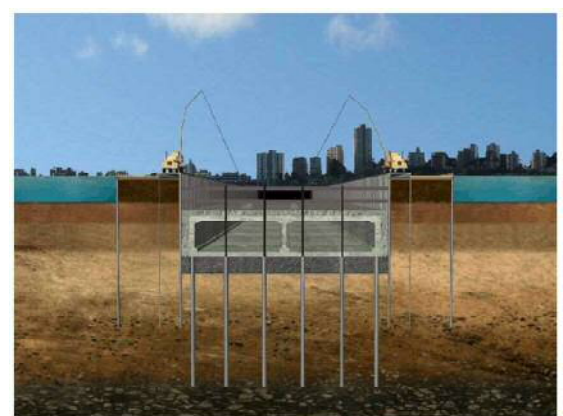
③深層混合処理工法による地盤改良



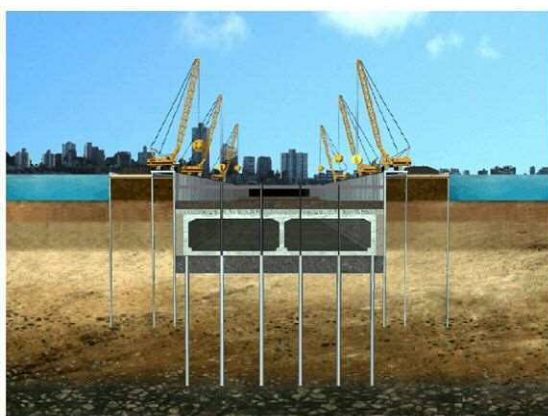
④トンネル基礎杭の打設



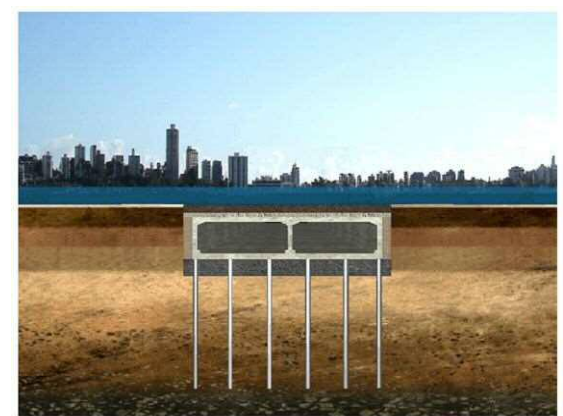
⑤切梁支保工を設置しながら底盤まで掘削



⑥ボックスカルバートンネルの構築



⑦海底地盤高さまで土砂を埋め戻し



⑧仮締切りを撤去し海底トンネル完成

図-5 485 工区の施工フロー<sup>1)</sup>

### 3. 本工事における深層混合処理工の適用

#### (1) 目的

本工事における地盤改良断面図を図-6 に示す。改良地盤には、仮締切り内掘削時において鋼管矢板の変位を抑制する地中梁としての働きに加え、掘削底面のヒービングを抑制することが求められた。他の工法との比較検討の結果、経済的で急速施工が可能な機械攪拌式の深層混合処理工法（CDM: Cement Deep Mixing）が採用された。

改良対象土は厚く堆積した軟弱な海成粘土層中に固結粘性土層が挟在する地盤であった。改良深度はマリーナ湾の海底約-20m である。図-7 に土層分布を示す。また表-1 に CDM 工法の改良仕様を示す。

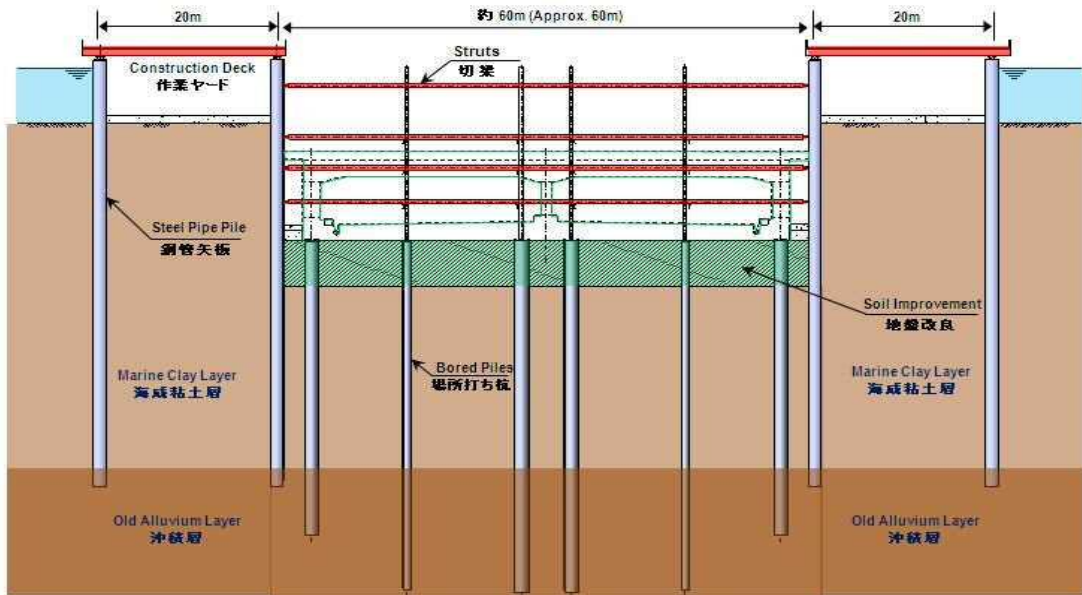


図-6 地盤改良断面図

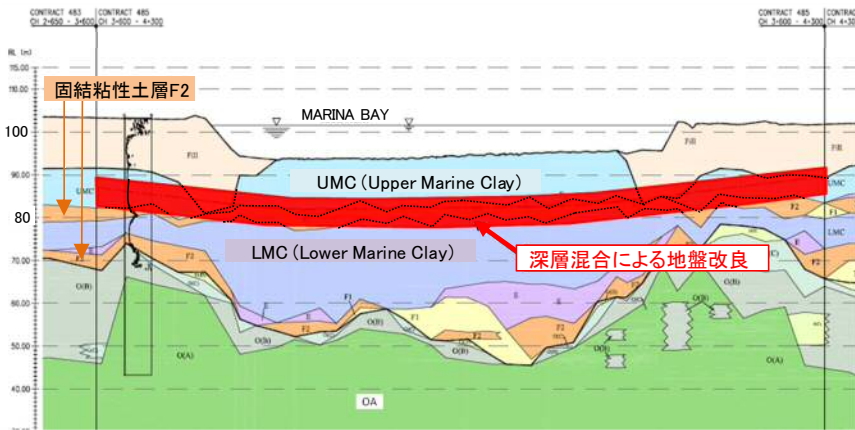


図-7 改良対象土の土層構成

表-1 改良仕様

項目	数量
設計改良面積	40,826 m <sup>2</sup>
改良本数	15,690 本
改良長	5.0～9.4 m
合計改良土量	262,573 m <sup>3</sup>
構造形式	接円式
パイル断面積	2.99 m <sup>2</sup>
改良率	100%
設計基準強度 $q_{\text{quick}}$	800 kPa/m <sup>2</sup>
安定材種類	高炉B
安定材使用数量	200 kg/m <sup>3</sup>
水セメント比 W/C	100%

#### (2) 施工方法

二重の鋼管矢板止水壁を構築し、仮締切りの内部を一時的に海から採取した砂で埋め戻すことで、陸上地盤改良機での施工を可能とした。図-8 に深層混合処理工法の施工断面を示す。また改良体を鋼管矢板に密着させるため、止水壁際には高圧噴射攪拌工法（Jet Grout Pile）を併用した。

本工事では2軸式（φ1,300mm×2）のCDM陸上施工機械を使用した。図-9 に施工状況を示す。従来のφ=1,000mmタイプに比べ改良面積が大きく、工期およびコストを低減できた。CDM工法の杭配置は、先行地中梁となる形で断面方向に改良体を連続させるため、改良杭を相互にオーバーラップさせることが必要であった。図-10 に改良杭の配置を示す。ラップ幅は断面方向に20cm、縦断方向は10cmであり高い施工精度が要求されたが、CDM工法を

陸上施工できたことにより潮位の変動等の影響を受けやすい海上施工に比べ効率的かつ高精度な施工が可能となり、隣接する改良杭を確実にラップすることができた。

地盤改良終了後、仮締切り内の掘削時は表-2 に示すモニタリングを実施した。掘削時の変位、切梁反力等に管理基準値を設定し、その何れかが管理基準値の 70%に達した場合を警告値、100%に達した場合を作業停止値として施工管理を行った。

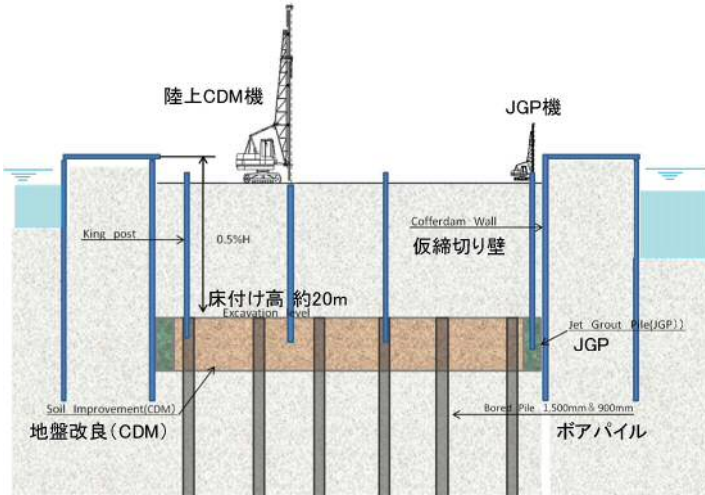


図-8 深層混合固化処理工法断面図



図-9 CDM 施工状況(陸上2軸機)

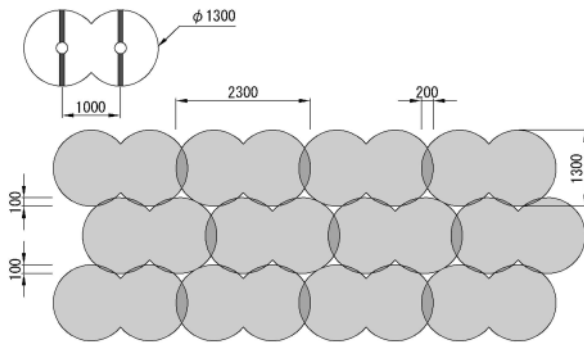


図-10 CDM 改良杭の配置

表-2 開削時のモニタリング項目

モニタリング対象	計測項目
鋼管矢板	傾斜計(変位)、ひずみ計(応力)
CDM改良地盤	土圧計(地梁軸力)
ヒービング	層別沈下計(変位)
掘削下部の地盤	間隙水圧計(過剰間隙水圧) 層別沈下計(変位)

### (3) 地盤改良の効果

本工事では改良強度が一軸圧縮強さ  $qu$  と弾性係数  $E$  の両方で規定されており、設計基準強度は  $qu_{ck}=800kPa$ 、 $E=140MPa$  であった。施工後の調査によると、CDMの現場安定処理土の一軸圧縮強さ  $qu_f$  の平均値は  $qu_f=2,955kPa$  であり、標準偏差 ( $\sigma$ )  $\times qu_f=1,839kPa$  であった。図-11 に CDM 改良土の一軸圧縮強さの頻度分布を示す。改良対象土層は軟弱粘土の UMC 層、LMC 層と、それらの中にある固結粘性土層からなっていた。全体の改良層厚が 5.0~9.4m と薄いことから、全層において同一の固化材添加量で安全側に改良した結果、2つの強度分布が重なるような分布形状を示した。

図-12 に改良土の一軸圧縮強さと弾性係数の関係を示す。両者には比例関係があるとされており、設計では  $E=175 \cdot qu$  として変形解析を行った。事後調査の結果では  $E=(90\sim260) \cdot qu$  の範囲に分布しており、ばらつきは大きいものの、設計の要求事項を満足することが確認できた。

仮締切り内の開削は切梁の設置段数に合わせ 5 層で行った。掘削層ごとの底盤のヒービング量を図-13 に示す。解析では床付け時には 110mm~120mm の隆起が予想されたが、実際は 10mm 程度の変位に収まった。

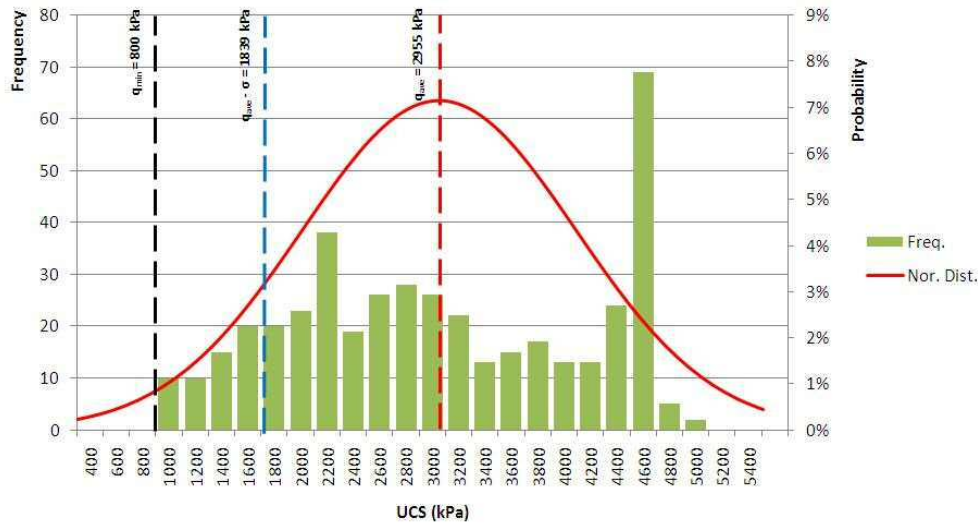


図-11 固化処理土の一軸圧縮強さの頻度分布

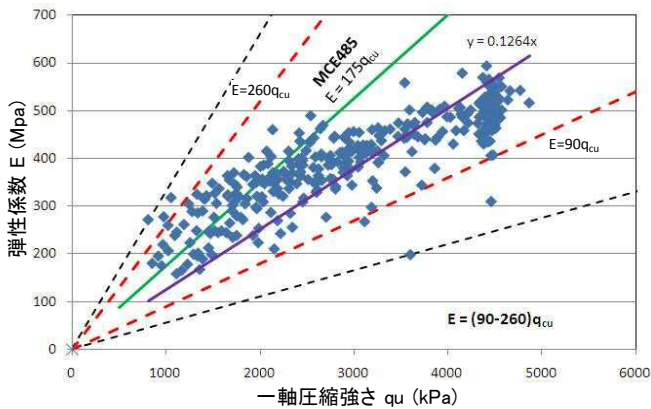


図-12 一軸圧縮強さと弾性係数の相関

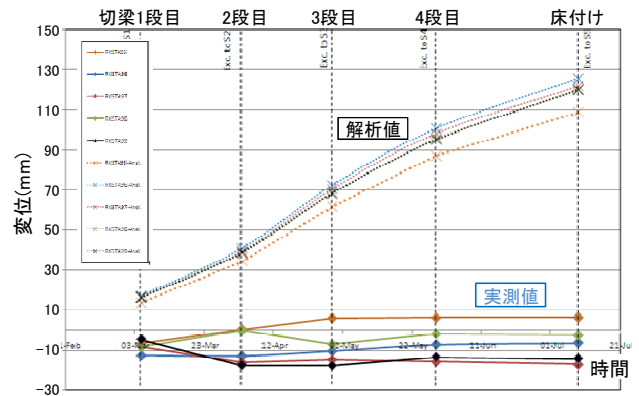


図-13 床付け面のヒービング量

#### 4. おわりに

本工事は当社が設計・施工方式で行ったものである。

地盤改良の施工にあたり、仮締切り内を埋め戻し陸化することによって陸上機械で安定した地盤での作業が可能となり、改良作業を精度よくかつ効率的に実施することができた。改良対象土層は主に軟弱粘土の UMC 層と LMC 層およびそれらの中間にある固結粘性土層であったが、安全側の固化材添加量で全層を改良した結果、設計基準強度を満足するとともに止水壁、開削底面の変位は計画値内に収まり、無事工事を完了することができた。

最後に、本工事の発注者である LTA から2年連続で、"Safety Excellence Construction Awards"を頂いた。これらは工事に様々な形で尽力頂いた全ての関係者の協力のおかげであり、この場を借りてお礼申し上げる次第である。

#### 【参考文献】

- 1) シンガポール陸上交通省ホームページより：

<http://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/roads-and-motoring/projects/marina-coastal-expressway-mce.html>