

シンガポール地下鉄工事における RAS-JET 工法の設計・施工 Ground Improvement by the RAS-JET method for Singapore MRT

上田 幸生* 古園 豊繁**
Yukio Ueda Toyoshige Furusono
佐藤 靖彦*** 今村 眞一郎***
Yasuhiko Sato Shinichiro Imamura

要 約

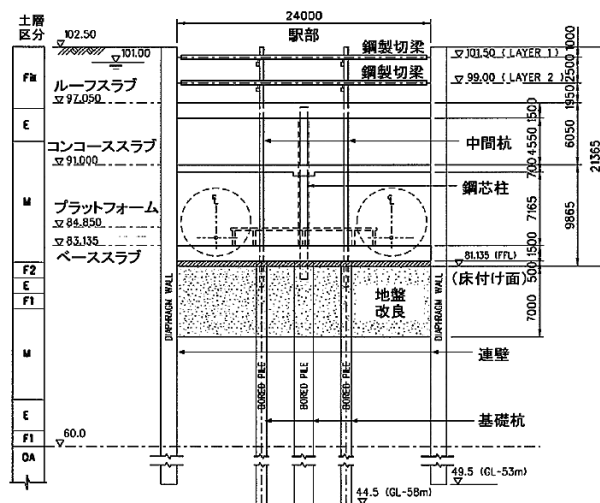
シンガポール地下鉄 C828 工区の新駅（ニコルハイウェイ駅）の建設工事においては、駅部の土留め掘削の深さが約 20 m と深く、軟弱なマリンクレイが最大 40 m の深さまで存在し、土質条件が厳しいものであった。そのため土留め壁は厚さ 1.5 m の本体兼用連壁とし、底板下に厚さ 7 m の地盤改良を施すこととした。この地盤改良に機械攪拌併用高圧噴射工法の RAS-JET 工法を採用した。本文では、この地盤改良工についての設計、試験施工、施工管理、品質管理および土留め工の計測結果について述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 対象地盤
- § 3. 工法概要
- § 4. 設計
- § 5. 試験施工
- § 6. 施工管理
- § 7. 品質管理
- § 8. 計測結果との比較・考察
- § 9. おわりに

§ 1. はじめに

ニコルハイウェイ駅が建設される地盤は 1970 年代の埋め立てにより造成されたもので、約 5 m の埋土層の下に軟弱な海成粘土層が 30~40 m 程度の深さまで存在している。本工事は、このような軟弱地盤中に開削工法により駅舎本体を建設するものである。駅部標準断面図を図一1に示す。掘削深さは約 20 m であり、土留め工には厚さ 1.5 m の本体兼用連壁を採用した。掘削方法は逆巻き工法とし、2 段の切梁とルーフおよびコンコース階の本体スラブを仮設支保工として利用する。また、掘削中の過大な変形を抑制するため、最終掘削底面下には地盤改良を施工した。軟弱地盤中の大深度掘削となるため、



図一1 駅部標準断面図

先行地中梁としての地盤改良は安全な掘削を行う上で非常に重要である。地盤改良工法は、機械攪拌併用の高圧噴射工法である RAS-JET 工法を採用した。本論文は、RAS-JET 工法による土留め工底板改良の設計、施工・品質管理および土留め工の計測結果についてまとめたものである。

§ 2. 対象地盤

表一1に当該地盤の土性値を示す。地盤改良部分の土質は、その大部分が海成粘土層 (M) である。海成粘土は、非排水せん断強度 (C_u) が 15~50 kPa と非常に軟

* シンガポール地下鉄 C828 出張所
** 海外事業部海外土木部
*** 技術研究所技術研究部土木技術研究課

表一 地盤の土性値

土層	N 値	単位重量 (kN/m ³)	含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	変形係数 (kPa)	粘着力 C _a (kPa)	内部摩擦角 (°)
埋土 (Fill)	5-10	19	—	—	—	10,000	—	30
海成粘土層 (M)	0-1	16	50-75	70-90	25-35	4,500-15,000	15-50	—
沖積砂質土層 (F1)	1-20	20	20-30	—	—	30,000	—	30
沖積粘性土層 (F2)	3-15	19	20-50	40-70	20-30	10,000-27,000	35-90	—
腐食土層 (E)	0-5	15	35-70	60-90	30-40	7,500-18,000	25-60	—
洪積層 (OA) 砂質土	30-100	20	—	—	—	60,000-200,000	0-25	30-32
洪積層 (OA) 粘性土							150-500	—

弱であり、深度によって強度が異なる。また対象深度には腐食土層 (E)、沖積砂質土層 (F1)、沖積粘土層 (F2) が互層で不規則に介在する。

§ 3. 工法概要

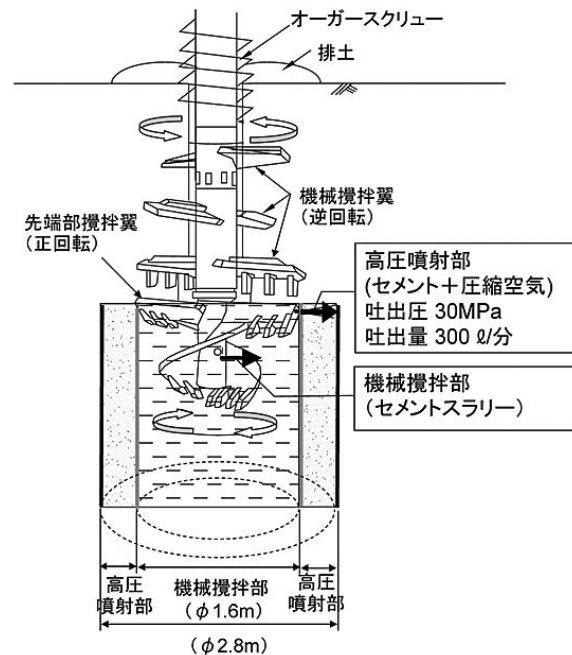
RAS-JET 工法は、セメント固化材と原位置土を機械的に攪拌混合する機械攪拌に加え、攪拌翼先端よりグラウト・エアを高圧噴射攪拌させ改良体を造成する工法である。図一2に RAS-JET 工法の改良システム概略図を示す。

§ 4. 設計

一般的に土留め工計算において、地盤改良体は強固な地盤としてモデル化され、受働土圧の増加および底版のヒービング防止効果を期待する。改良体自体の照査は、受働反力が改良体の強度以下であることを確認する。本工事においては、これらの一般的な設計アプローチに加え、改良体のひずみの評価および先行地中梁としての水平方向の評価も考慮して、改良体の照査を行い改良仕様を決定した。

4-1 改良体の破壊ひずみの考慮

従来、地盤改良のひずみについてはあまり検討が行われていなかったが、図一3に示すように改良体は拘束圧の低い条件下では破壊ひずみに達すると急激に強度が低下する脆性的な破壊モードになる。このことを踏まえ、土留め解析においては、地盤改良のひずみレベルをチェックし、脆性的な破壊が生じないことを確認した。事前のコアサンプリングによる圧縮試験結果より、改良体の破壊ひずみは平均で 1.5% という結果を得た。したがって、土留め解析 (弾塑性解析) における改良体の破壊ひずみが 1.0% 以下になるように地盤改良厚さを決定した。図一4は改良厚 5m、6m および 7m における改良体に発生するひずみ分布を表したものである。改良厚さが 5m および 6m の場合は改良体全域にわたり 1% 以上のひずみが生じているため、脆性破壊を生ずる可能性



図一2 RAS-JET 工法システム概略図

がある。改良厚さを 7m とすれば 1% を超えるひずみの範囲は限定され全体的な破壊には至らないものと考えられる。これらの結果より、7m の改良厚を採用することとした。

4-2 先行地中梁としての水平方向の評価

地盤改良を先行地中梁として期待する場合、水平方向での改良体の連続性と変形特性の確認が重要となる。しかし、通常行うチェックボーリングでは、部分的かつ鉛直方向でしか品質確認はできない。そこで、改良地盤全体の水平方向の特性を評価するために、図一5に示すようなクロスホール弾性波探査を行い、柱状改良体の集合体としての水平方向の原位置弾性波速度 V_{sf} を測定した。これは 1 本のボーリング孔からせん断波を発信し、離れたボーリング孔で波を受信して伝播速度を求めるものである。また、地盤改良体から採取したコアの鉛直方向の弾性波速度 V_{sc} を室内超音波試験で測定し、両者を比

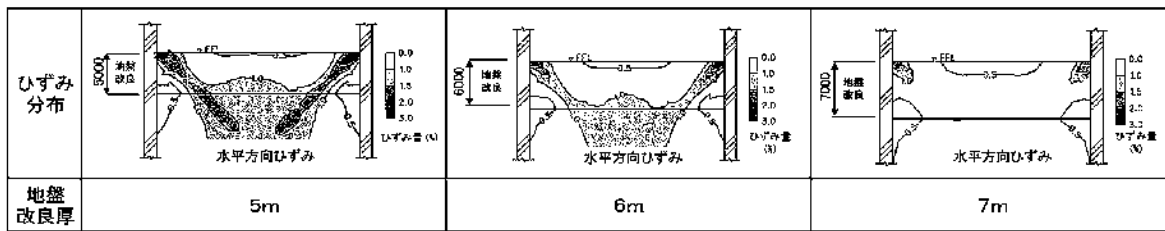


図-4 ひずみ分布図

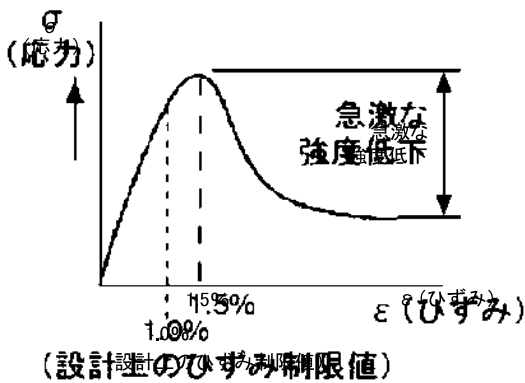


図-3 応力-ひずみ曲線

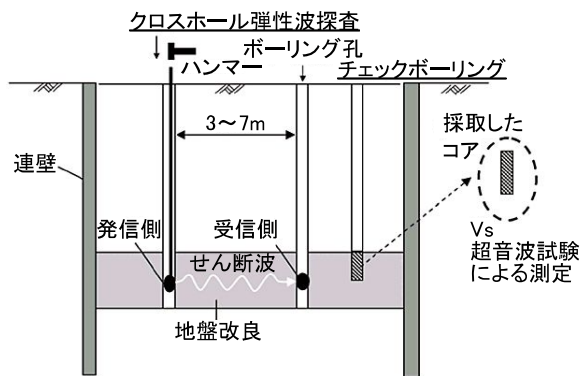


図-5 クロスホール試験概要

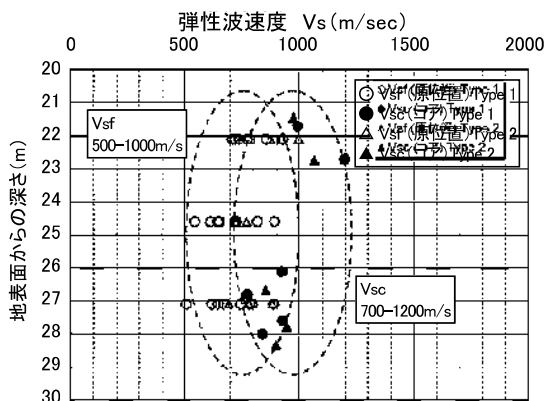


図-6 クロスホール試験結果

表-2 クロスホール試験結果

	TYPE-1	TYPE-2
造成径	2800 mm	2600 mm
セメント量 (kg/m ³)	400	300
原位置弾性波速度	507-927	692-996
Vsf (m/s)	平均値 744	817
コア弾性波速度	772-1197	652-1064
Vsc (m/s)	平均値 942	898
速度比 (Vsf)/(Vsc)	0.79	0.91
変形係数比 (Ef)/(Ec) = (Vsf) ² / (Vsc) ²	0.62	0.83

較することにより、水平方向地盤変形係数の換算係数を求め改良体の水平方向の評価を行った。検討結果を図-6および表-2に示す。コアのVscが約700~1200 m/sに対して、原位置水平方向のVsfは約500~1000 m/sとコアのVsより0.8~0.9程度の大きさであった。変形係数の比に換算すると、0.62~0.83の比となり、コア試験の結果に上記の係数を乗じたものを地盤改良体の水平方向の変形係数として評価した。

§5. 試験施工

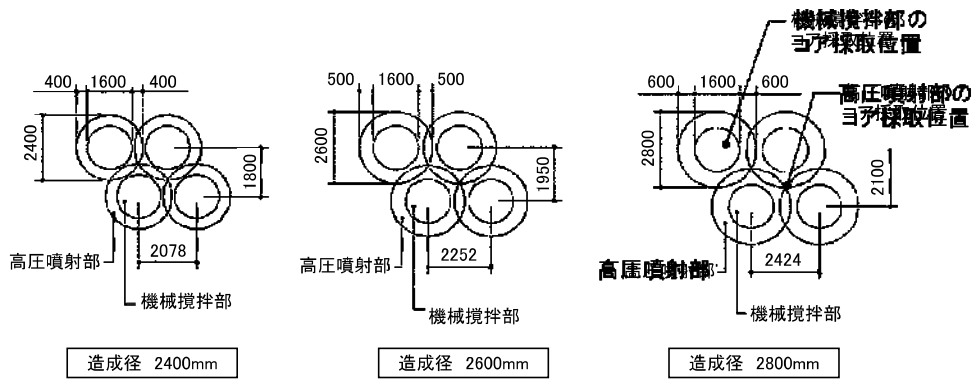
5-1 試験施工の目的

機械攪拌部分のセメント添加量は、室内配合試験により決定されるが、海成粘土は非常に粘性が高いため、セメントスラリーとの練混ぜが容易でなく、通常の内配

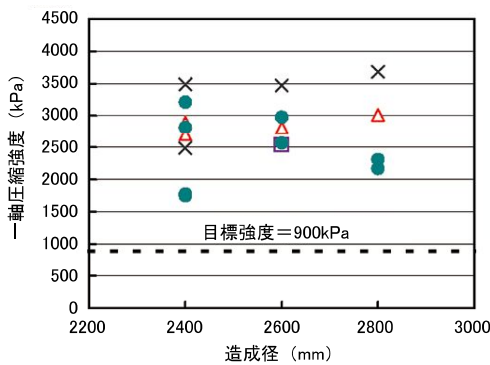
合試験においてセメント配合量を決定することが困難であった。そこで、本工法の造成径、セメント添加量、現場改良強度および施工方法を検討確認するために、事前に試験施工を行った。試験施工は、造成径2800 mm、2600 mm、2400 mmの3つを仮定し、改良体間隔を変化させることにより改良体同士のラップ状況を確認することとした。図-7に改良体各径の配置図を示す。

5-2 施工手順

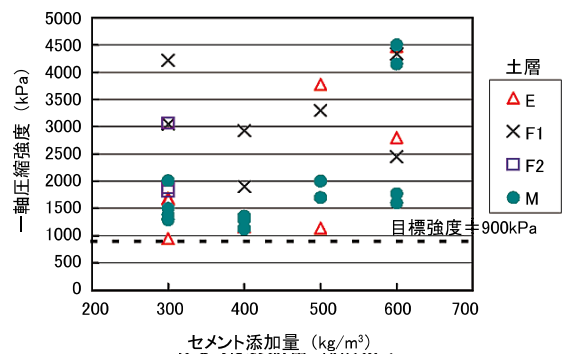
日本での施工では通常、セメントスラリーを吐出しながらの削孔→機械攪拌改良→高圧噴射部改良の順で施工を行うが、シンガポールの海成粘土に対してはスラリー削孔時に硬化が早く、排泥が閉塞して施工が困難となった。そこで、はじめに水削孔によりマリンクレイを解泥した後、スラリーを添加混合する改良手順に変更した。



図一七 試験施工改良体配置図



図一八 一軸圧縮強度と改良体径の関係 (高圧噴射部)



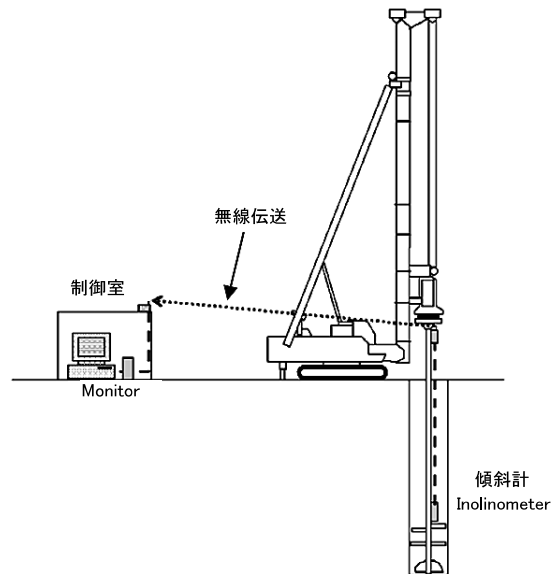
図一九 一軸圧縮強度とセメント量の関係 (機械攪拌部)

5-3 試験結果

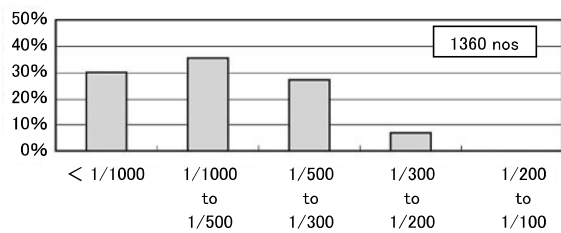
図一八に高圧噴射ラップ部，図一九に機械攪拌部の一軸圧縮強度の結果を示す。高圧噴射部では，造成径 2400 mm，2600 mm，2800 mm とともに目標強度 900 kPa を満足しているため，造成径は 2800 mm に決定した。機械攪拌部のセメント量については，添加量とともに一軸圧縮強度が増加する傾向は認められたが，全般にばらつきが大きいこと，腐食土層 (E) の強度発現が小さいことから，E 層ではセメント量を 600 kg/m³，その他の地層では 400 kg/m³ と決定した。

§ 6. 施工管理

実施工においては，地盤改良の施工精度向上を図るために，自動施工管理システムおよび鉛直精度管理システムなどを採用した。図一十に鉛直精度管理システムの概要を示す。本システムは，リーダー傾斜計に加え，施工機械ロッドの先端に傾斜計を取付け，ロッド上端部から計測データを制御室に無線伝送し，リアルタイムで改良杭の鉛直度を把握するものである。図一十一に鉛直精度の計測結果を示す。全ての改良杭で管理基準値 1/200 を満足し，90% 以上の改良杭が 1/300 以下であった。RAS-JET 工法の特徴としてロッド剛性が大きいため，大深度施工においても高い鉛直精度で施工できることが確認された。



図一十 鉛直精度管理システム



図一十一 鉛直精度測定結果

§ 7. 品質管理

7-1 品質管理方法

品質確認は、チェックボーリングによるコア採取率 (TCR)、材齢 28 日の一軸圧縮強度 (q_u) および変形係数 (E_{50}) によって改良体の品質を確認した。品質管理の頻度および管理目標値を表-3 に示す。1箇所のコアボーリングからは3~4個の試験体を採取した。先行地中梁の場合には、改良体の連続性の確認が重要であるため、ジェット改良のオーバーラップ部に重点を置き、試験頻度も通常よりも多くして品質管理を行った。

7-2 結果

高压噴射部と機械攪拌部における試験結果を表-4 に示す。

(1) コア採取率

コア採取率 TCR は高压噴射部で平均 97%、機械攪拌部で 99% と高い値を示し、管理値 85% を満足した。特に高压噴射部では、オーバーラップ部で TCR 97% という結果を得ており、完全ラップおよび設計造成径の確保がともに満足できたことを示している。

(2) 一軸圧縮強度および変形係数

一軸圧縮強度と変形係数ともにすべて目標管理値を満足し、高压噴射部で平均 3.5 MPa、機械攪拌部で 3.9 MPa と非常に高強度の改良体を造成できたことが確認された。

図-12 に深さ方向の一軸圧縮強度分布を示す。すべて目標強度以上であったが、高压噴射部・機械攪拌部ともに 0.9~4.5 MPa の広範囲の分布を示し、ばらつきが大きい。また、機械攪拌部の方がより高い強度を示し、攪拌混合は均一にできていたとみられる。なお、ばらつきが大きいのは、対象土層が海成粘土層 (M)、腐植土層 (E)、砂質土層 (F1)、粘性土層 (F2) と様々な土質が混在していることが原因の1つとして考えられる。変形係数についても、平均値で 500~600 MPa と非常に高い値を示しており、水平方向の変形係数に換算しても目標値を満足する結果が得られている。

図-13 に一軸圧縮強度 (q_u) と変形係数 (E_{50}) の関係を示す。両者は概ね比例関係が認められ、 E_{50} は q_u のおよそ 100~250 倍であった。

§ 8. 計測結果との比較・考察

8-1 計測結果

掘削工事は 2006 年 9 月下旬に始まり、2007 年 6 月に完了した。掘削中は傾斜計により連壁の変位を計測した。図-14 に掘削完了時点の連壁の計測結果を示す。最大変形量は 10~15 mm 程度であり、設計計算値と比較すると非常に小さい結果であった。

表-3 サンプルング頻度および管理目標値

	高压噴射部	機械攪拌部
チェックボーリング頻度	1回/350 m ³ (オーバーラップ部)	1回/280 m (1回/560 m ³)
管理目標値	TCR ≥ 85%, q_u ≥ 0.9 MPa, E_{50} ≥ 90 MPa	

表-4 品質管理の試験結果

		TCR (%)	q_u (MPa)	E_{50} (MPa)
高压噴射部	平均値 (試験数)	97 (50)	3.54 (150)	552 (150)
機械攪拌部	平均値 (試験数)	99 (21)	3.95 (84)	608 (84)

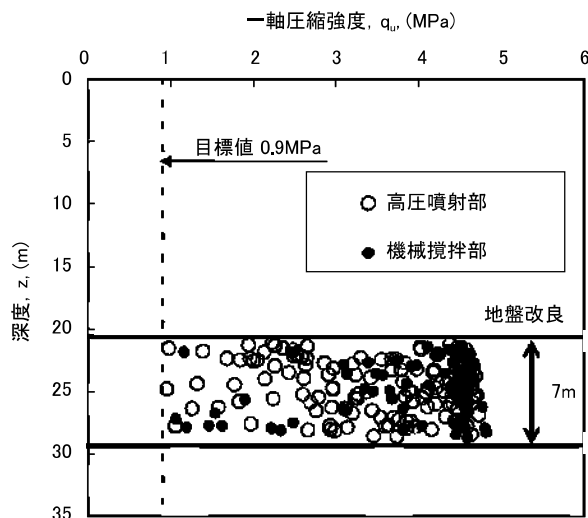


図-12 一軸圧縮強度の深度分布

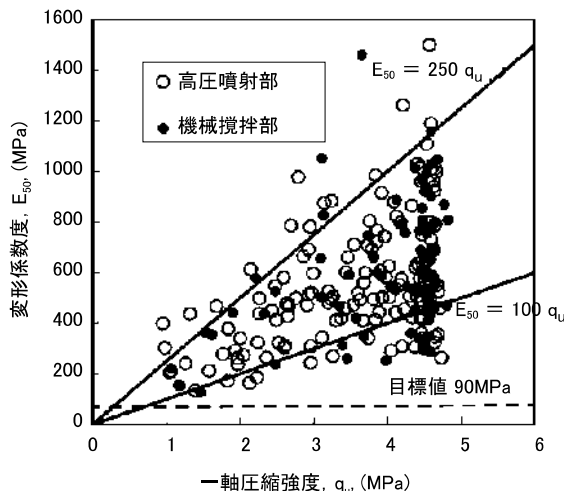
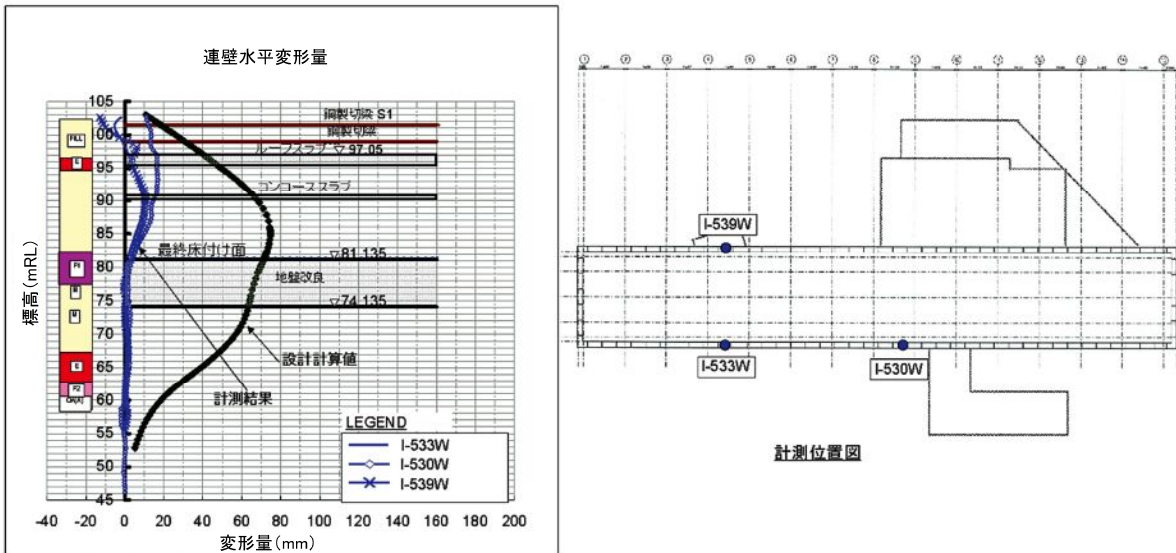


図-13 一軸圧縮強度と変形係数の関係



図一14 傾斜計による連壁の計測結果



改良体



改良体

写真一1 未改良部分で観察された改良体

8-2 計測結果に対する考察

チェックボーリングの結果より実際の地盤改良部分の強度は、設計値の約4倍と非常に大きいため、改良部分の変形が抑えられていたことが計測結果からもわかる。また、未改良部分（改良体以浅）の掘削中にセメント混じりの強固なコラムが観察された（写真一1参照）。このコラムの径は、機械攪拌の径とほぼ同じであり、地盤改良施工時に排泥とともにスラリーが機械攪拌翼を伝わって上がってきたものと考えられる。したがって、改良体上部の海成粘土は部分的に改良されていたことになり、これも変形抑制の要因の1つであると思われる。

§9. おわりに

シンガポール軟弱粘性土地盤での先行地中梁地盤改良工事にRAS-JET工法を適用した。地盤改良工事にあつ

ては、設計・施工および品質管理の各段階において、詳細な検討と施工精度向上、綿密な品質管理に配慮した。その結果、確実な地盤改良体を造成することができた。また、連壁の変形量も設計値より小さく抑えることができ、安全にかつ工期内に掘削工事を完了することができた。今後は、目標強度に対する適切なセメント量の設定を行い、また未改良部分で観測された改良体をどのように評価して設計に取り入れていくかが課題である。

最後に、本工事において数多くの御指導、御協力を頂いた関係各位に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

1) YUEDA, et al : Design, Construction and Quality Control of the Ground Improvement method adopted for Singapore Marine Clay, 4 the CECAR Taipei, 2007.