

# トレンチャー式攪拌工法の調査・設計・施工・品質管理の留意点

寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○橋本 聖  
西本 聡  
林 宏親

改良深度3～10m（中層地盤）を対象としたトレンチャー式攪拌工法<sup>1)</sup>（パワーブレンダー工法と同意、以降、TMM）は、約5年前から北海道内で施工が開始され、急速に普及している。この理由として、深層混合処理工法（以降、DMM）と比べて経済的かつ施工性が良いからである。

TMMはDMMの設計法<sup>2)</sup>に準拠しているが、室内配合試験時の試料土の調整方法や地盤の攪拌方法が異なるため、TMMの特徴を理解した上で設計、工事を行うことが重要である。

本報は過去3カ年の現場調査で得られた知見から、現場技術者がTMMの調査・設計・施工・品質管理において、留意すべき点や対応方法について述べる。

キーワード：トレンチャー式攪拌工法，設計，施工，品質管理

## 1. TMMの調査・設計・施工フロー

TMMの概略的な検討フロー<sup>1)</sup>を図-1に示す。

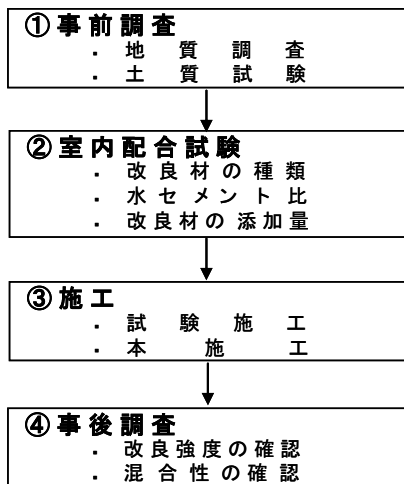


図-1 TMMの概略的な検討フロー

以下、図-1に記載している①～④について、実務上、留意すべき事項や対応方法を整理した。

## 2. 事前調査に関する留意事項

### (1) 地質縦断面図の精度

セメント配合量の施工エリア（区割り）を設定する際

には、施工区間の土層分布を把握した上で、地質縦断面図を作成する必要がある。施工区間の土層が概ね成層であれば、少ない調査（ボーリング）で地質縦断面図を作成することが可能である。一方、土層がわん曲している場合は、ボーリングの調査結果だけでは、土層構成を正確に判断できないため、不適正な配合量で施工を行ってしまう恐れがある。

ボーリング箇所以外では、バックホウによる試掘、ピートサンプラーを用いた簡単な調査などを実施することによって、地質縦断面図（土層構成）の精度を高めることが重要である。特に泥炭は湖沼等に枯れた植物が堆積して形成されるため、同じ土層構成でも施工箇所の違いによって、自然含水比や強熱減量が大きく異なることがある。このような現場では同じ土層構成でも配合量が異なる恐れがあるため、改良対象層の地盤特性を十分把握してから、改良エリア（区割り）を設定する必要がある。

### (2) 調査不足による失敗例

当該現場は盛土法尻をTMMで改良する工事であった。施工の区割りは土層構成ごとに決定されていた（図-2）。ところが、改良地盤の一部に、設計基準強度を下回る現場強度（A区間）が確認された。

施工箇所の土層（A区間）は、シルト質砂としてエリア（区割り）設定されていたが、実際には泥炭層であった。しかし、シルト質砂を対象とした高炉B種セメントで地盤改良を行ったために、現場強度が不足したと考えられる。

このような状況を回避するためにも、2.(1)の対策方

法を徹底して、改良エリア（区割り）を設定することが重要である。

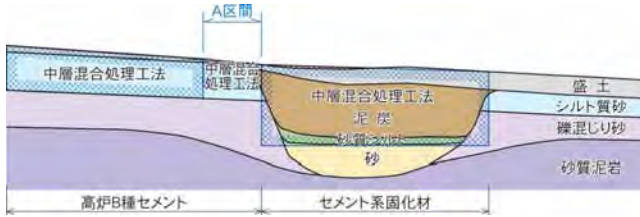


図-2 地質縦断面図と区割り

### 3. 改良材の種類および配合量の決定方法

改良対象層が互層の場合、各層の容積比に応じて試料土を混合する。ここでいう容積比とは、改良対象層全体の重量に対する、各層の重量の割合である。図-3に容積比の考え方を示す。この容積比で混合した試料土をベースとして、改良材の種類および配合量を、室内配合試験、試験施工の順で決定する（図-4）。

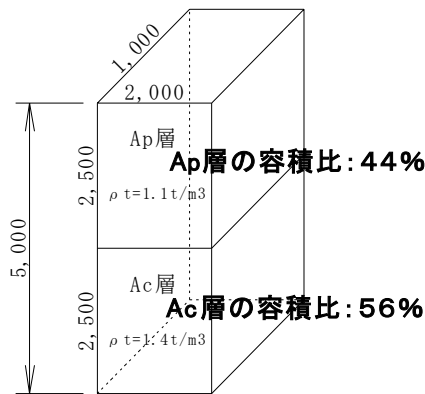


図-3 容積比の考え方

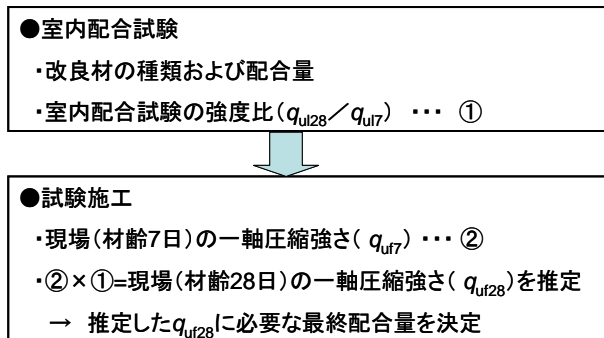


図-4 改良材の種類および配合量の決定フロー

室内配合試験は、改良材2～3種類、配合量3ケース程度で行われ、最も経済的かつ、六価クロム溶出量の基準値を満たす改良材の種類、配合量、室内配合試験の強度比を決定する。室内配合試験の強度比とは、室内配合試験で得られる材齢7日の一軸圧縮強さ ( $q_{uf7}$ ) と材齢28日の一軸圧縮強さ ( $q_{uf28}$ ) の比 ( $q_{uf28}/q_{uf7}$ ) で表される。

試験施工は、室内配合試験で得られた配合量を基準として、3ケース程度の固化材混合量で試験施工を行う。試験施工によって現場（材齢7日）の一軸圧縮強さ ( $q_{uf7}$ ) を求め、これに室内配合試験の強度比を乗じて、現場（材齢28日）の一軸圧縮強さ ( $q_{uf28}$ ) を推定し、必要な最終配合量を決定する。

### 4. 室内配合試験に関する留意事項

図-5は、ある現場の室内配合試験結果である。室内配合試験は3種類のセメント（固化材を含む）と3ケースの配合量 ( $W=70, 300, 500 \text{ kg/m}^3$ ) で行われ、室内目標強度 ( $q_{uck}=440 \text{ kN/m}^2$ ) に対して、セメント系固化材（一般軟弱土用）により配合量  $W=75 \text{ kg/m}^3$  を得た。

ここで図-5では、配合量  $W=70, 300 \text{ kg/m}^3$  間の一軸圧縮強さの伸びを直線と見なしているが、この間の一軸圧縮強さは必ずしも直線上にあるとは限らず、図-5に示すような破線内にばらついている可能性がある。場合によっては、室内目標強度に対して、配合量を少なく評価する懸念がある。

想定される過大、過小評価を防ぐために、配合量  $W=70 \sim 300 \text{ kg/m}^3$  の間隔を狭くした室内配合試験を行うことによって、より精度良く室内配合量間の強度増加の傾向を把握すべきである。

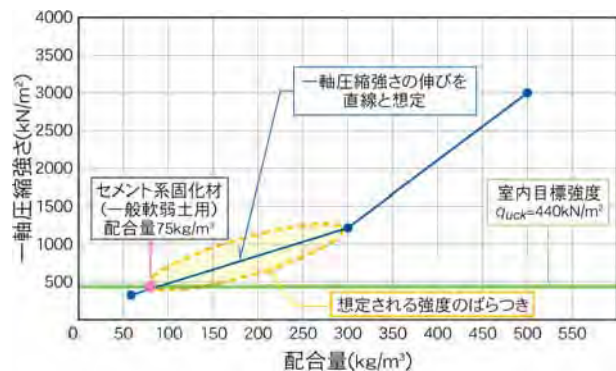


図-5 ある現場の室内配合試験結果

### 5. 施工に関する留意事項

#### (1) 試験施工における留意事項

泥炭性軟弱地盤の改良工事は、試験施工から得られた配合量によって実施される。しかし、現場強度 ( $q_{uf28}$ ) が設計基準強度 ( $q_{uck}=140 \text{ kN/m}^2$ ) を下回る現場があった（図-6）。この現場は図-5の室内配合試験で得られた配合量を基に試験施工を行ったものである。現場強度が設計基準強度を下回った要因を下記に示す。

- 1) 想定より泥炭層が厚く堆積
- 2) 試験施工と室内配合試験の諸条件の違い
- 3) セメントスラリーのサンプリング方法

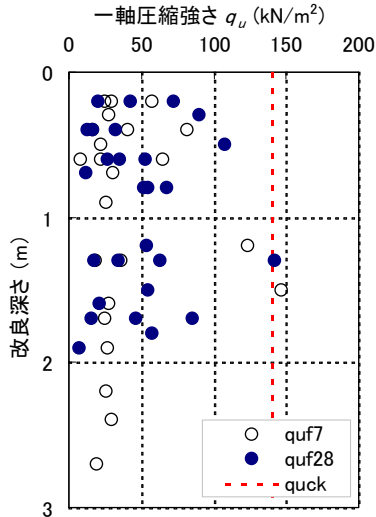


図-6 ある現場の深度方向の一軸圧縮強さ

1) に関して、事前調査で把握している泥炭層厚よりも実際の泥炭層厚が厚かったことが考えられる。既存の土層縦断図より層構成が大きく変化することが想定される箇所については、施工前に試掘等による再調査を行い、その結果を施工にフィードバックして強度不足にならないよう施工管理を行う必要がある。

2) に関して、試験施工の推定  $q_{uf28}$  を算出するには、現場の一軸圧縮強さ ( $q_{uf7}$ ) に、室内配合試験の強度比を乗じて推定する。しかし、泥炭性軟弱地盤における試験施工の強度比は、泥炭に含まれる繊維質の状態や地盤改良後の養生温度などによって、室内配合試験の強度比よりも小さくなる可能性があることを十分想定すべきである。

3) に関して、モールド法による一軸圧縮強さは、実際の改良地盤の一軸圧縮強さよりも大きくなることもあるため、場合によっては強度を過大評価することがある。詳細は6. で述べる。

いずれにせよ、土層構成や施工条件は千差万別である。調査も限りがあることを理解した上で、施工を行うべきである。

## (2) 試験施工の必要性

泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル<sup>2)</sup>によると、自然含水比  $W_n > 200\%$  の泥炭性軟弱地盤を、DMM によって地盤改良を行う場合は、試験施工を実施して最終的な改良材配合量を決定する、と記載されている。しかし、施工規模が小さくても、必ず試験施工を行う必要があるのか、との問い合わせがある。

施工規模が小さい現場で試験施工を行っても、得られた配合量で施工を行うエリアが小さいため、試験施工の効果が薄い。このような現場条件では、室内配合量を現場配合量として使用することもやむを得ない。ただし、室内配合試験で得られた配合量を現場配合量とみなす場

合には、室内配合試験時の容積比、施工箇所の土層構成を再チェックした上で、施工を実施すべきである。

## (3) 現場強度と室内強度の関係

TMM の室内目標強度 ( $q_{ul}$ ) は、設計基準強度 ( $q_{uck}$ ) に 2.5~3.3 倍の範囲を (現場/室内) 強さ比として決定されている。ここで、(現場/室内) 強さ比とは、現場で得られる材齢 28 日の一軸圧縮強さ ( $q_{uf28}$ ) と、室内配合試験で得られる材齢 28 日の一軸圧縮強さ ( $q_{ul28}$ ) の比 ( $q_{uf28}/q_{ul28}$ ) である。

しかし、TMM における (現場/室内) 強さ比は、経験的な数値であることから、TMM に即した現場強度と室内強度の比を設定できる可能性がある。

そこで、北海道内 7 箇所 8 現場 (表-1) の改良地盤に対して、トリプルチューブサンプリングおよび一軸圧縮試験を実施し、現場強度と室内強度の関係を整理した。各現場の改良断面、地盤条件、サンプリング数等は既往の文献<sup>3), 4), 5)</sup> に詳しく記載されている。

表-1 調査現場の概要

調査箇所	地盤性状	改良箇所	施工時期
千歳A	火山灰質土地盤	補強土壁基礎	6月
千歳B	火山灰質土地盤	補強土壁基礎	6月
幌加内	粘性土地盤	トンネル坑口	2月
名寄	粘性土地盤	橋台背面	10月
幌延	泥炭性軟弱地盤	盛土基礎	10月
日高	泥炭性軟弱地盤	Boxカルバート基礎	5月
稚内	泥炭性軟弱地盤	盛土法尻	7月
豊頃	泥炭性軟弱地盤	盛土法尻	12月

図-7 a), b), c) は、現場強度の代表値と室内強度の平均値の関係を表している。代表値は、泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル<sup>2)</sup>に記載されている式 (代表値=平均値-1/2×標準偏差) で算出した。以下、各地盤の (現場/室内) 強さ比を示す。

火山灰質土地盤の (現場/室内) 強さ比は、 $q_{uf28}/q_{ul28} = 1 \sim 2$  の範囲内にある (図-7 a) )。粘性土地盤の (現場/室内) 強さ比は  $q_{uf28}/q_{ul28} = 1/2$  程度 (図-7 b) )、泥炭性軟弱地盤の (現場/室内) 強さ比は、 $q_{uf28}/q_{ul28} = 1/2 \sim 2$  の範囲内にある (図-7 c) )。

能登ら<sup>6)</sup> は DMM (スラリー系) による (現場/室内) 強さ比を  $q_{uf28}/q_{ul28} = 1/5 \sim 1/2$  と報告しているが、TMM の (現場/室内) 強さ比は  $q_{uf28}/q_{ul28} = 1/2 \sim 2$  であり、DMM より大きいことがわかった。

これらの知見から、北海道内の現場条件に即した TMM の新たな室内強度と現場強度の関係式として、(1) を提案する

$$q_{ul} = 2.0 \cdot q_{uck} \quad (1)$$

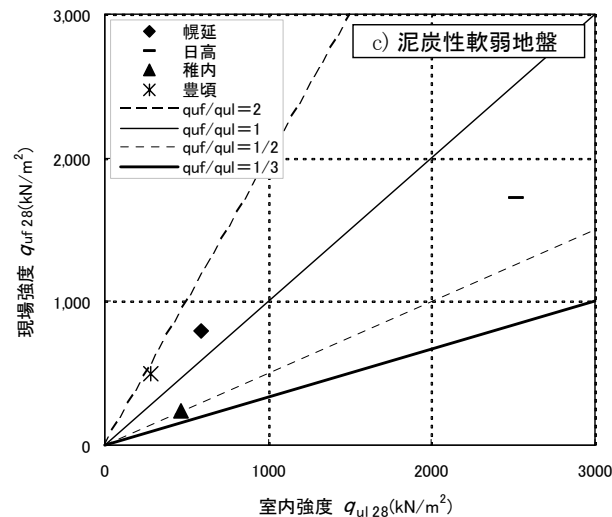
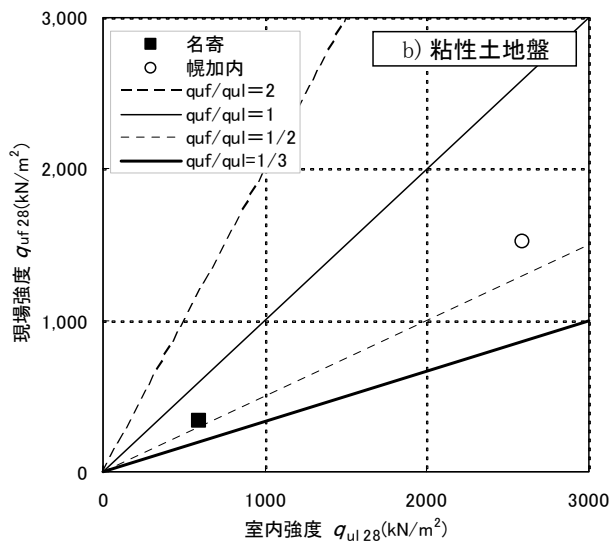
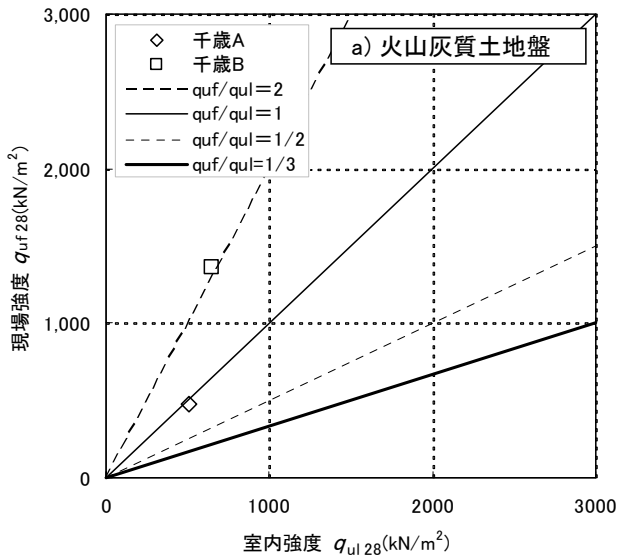


図-7 各地盤の室内強度と現場強度の関係

(4) 冬期施工の留意点

北海道北部の現場Aにおいて、TMMで施工された表層付近の改良地盤において強度不足が確認された。現場は泥炭混じり粘土および粘土で構成されており、盛土の基

礎地盤改良を目的とした工事である。12月下旬に施工が行われた(図-8、写真-2)。

施工時の外気温を図-9に示す。施工時は常に氷点下の状態にあったことがわかる。地盤改良時にセメントスラリーを圧送するポンプが凍結して、セメントスラリーの噴射が中断するなど、施工条件が極めて悪い状況であった。

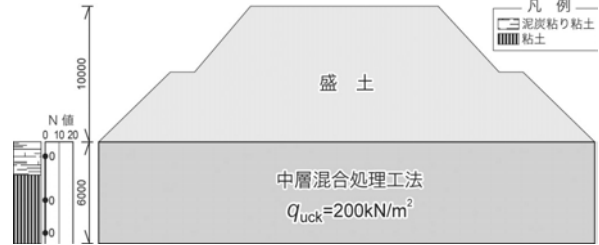


図-8 現場Aで施工された改良断面



写真-2 厳冬の施工状況

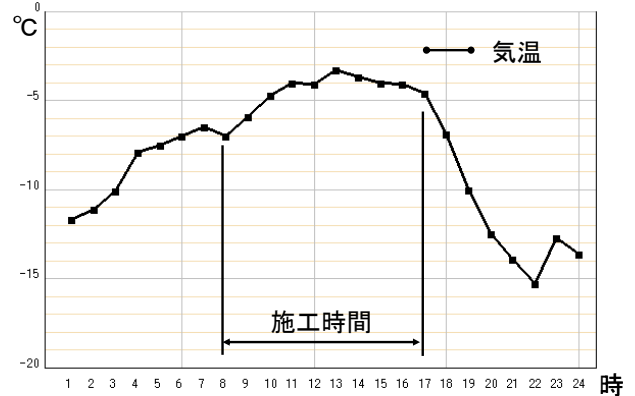


図-9 施工時の外気温(2005年12月20日:現場A)

各材齢における深度方向の一軸圧縮強さを図-10 a), b)に示す。現場Aの改良深度0~1mにおいて、現場の一軸圧縮強さ(q<sub>uf</sub>, q<sub>ul28</sub>)が表記されていないのは、改良地盤が固結せず、供試体が作成できないことが原因である(図-10 a)。改良深度2m以浅のq<sub>ul28</sub>は設計基準強度をすべて下回り、改良深度2m以深でも設計基準強度に達していない箇所が確認できる。

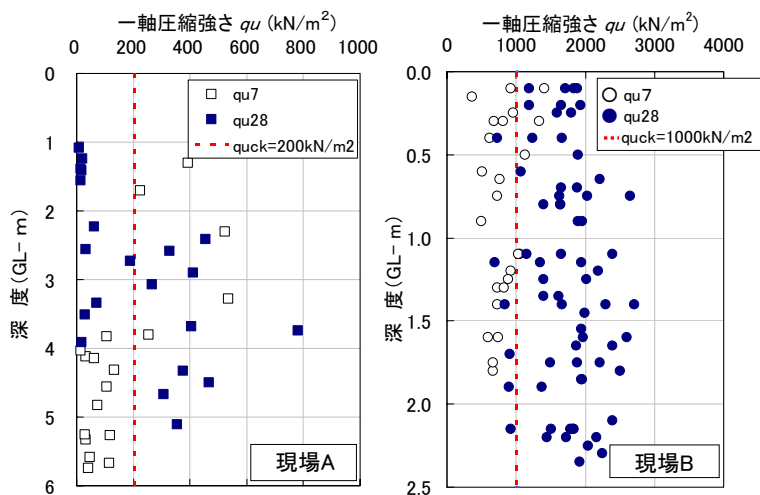


図-10 改良深度の強度分布

現場の一軸圧縮強度 ( $q_{u28}$ ) が設計基準強度不足になった要因として、次のことが推測される。

- ① 現場Aの12月の気温は、日中でも $0^{\circ}\text{C}$ を下回ったために、改良地盤の養生温度が低下した。
  - ② 工事終了後、施工箇所に覆土を行わなかったため、改良地盤に対して低温の影響（改良後1週間の最低気温は $-23.8^{\circ}\text{C}$ ）が継続した。
- ①、②より、改良地盤の強度増加が阻害されたと考えられる。

城戸ら<sup>7)</sup>は、セメント配合量の多少ならびに養生期間の長短に関わらず、養生温度が低いほど一軸圧縮強度が小さくなり、養生温度が $0^{\circ}\text{C}$ 未満となった場合には、強度発現がほとんどない。と報告している。

図-10 b)は、現場Aと同じく、日中でも氷点下で施工を行った北海道北部の現場B（施工時期2月）の事例である。

地盤改良を行った後、改良地盤上に覆土を施したために、改良地盤の養生温度が確保されて、 $q_{u28}$ は概ね設計基準強度を満足したと推測される。

厳冬期の北海道においてTMMで施工を行う場合には、施工時および施工後の養生温度を確保する工夫が必要である。なお、詳細な調査結果は既往論文<sup>7)</sup>を参照されたい。

## 6. 事後調査に関する留意事項

TMMの品質管理方法は、i)トリプルチューブサンプリングによる試料採取後、成形して一軸圧縮試験で評価する方法（以降、コアサンプリング法 写真-3）、ii)スラリー地盤にモールド付試料採取器を立込み、試料採取後、室内養生し一軸圧縮試験で評価する方法（以降、モールド法 写真-4）、iii)原位置攪拌された地表面のセメントスラリーを採取してモールド詰めし、室内養生後に一軸圧縮試験で評価する方法（以降、地表面スラリー法）、の3パターンによって行われている。それぞれの具体的な品質管理方法については、既往文献<sup>1),8)</sup>に詳



写真-3 コアサンプリング法



写真-4 モールド法

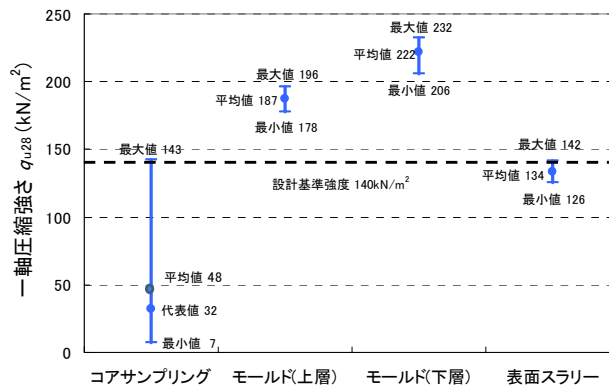


図-11 3パターンの品質管理方法による比較

述している。TMMの品質管理方法は3パターンが混在しているが、同一地盤で互いの管理方法を比較した実績がない。そこで、これらの品質管理方法を同一地盤で比較したところ、平均的な一軸圧縮強さに大きな違いが見られた（図-11）。

各品質管理方法を比較した結果を下記に述べる。

- 1) 地表面スラリー法ならびにモールド法は、コアサンプリング法と得られる一軸圧縮強さと大きく異なる場合がある。これは、現場と室内の養生条件の違いによる強度増加の違い、あるいはモールドによるセメントスラリーの採取と改良地盤を直接採取するトリプルサンプリングでは、改良地盤の密度が異なることが要因と考えられる。

2) モールド法および地表面スラリー法の単独による品質評価は、場合によっては設計基準強度不足を見抜けない恐れがある。モールド法とコアサンプリング法（泥炭性地盤対策工マニュアル<sup>2)</sup>や陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版<sup>9)</sup>に記載されている統計的手法による品質管理)を併用した品質管理が望ましいと考える。

TMMで施工された改良地盤はDMM相当の強度のばらつきを有することを考慮すれば、地表面スラリー法が改良地盤全体を評価していると言い難く、この方法による品質管理方法は望ましくない。

## 7. 最近の取り組み

平成19年度、稚内市郊外の一般国道40号更喜苫内（さらきとまない）防雪事業において、軟弱層厚が10m以上有する泥炭性軟弱地盤の拡幅盛土の安定対策としてTMMが採用された。しかし、TMMにおいて支持地盤まで改良しない形式（フローティング式地盤改良）の施工実績はほとんどなく、さらに下記が課題点と考えられた。

- ① 改良幅と改良強度の設定方法が不明確である。
- ② 盛土に伴うフローティング式改良地盤の改良効果が明らかではない。

これらの課題を明らかにするために、改良幅と改良強度が異なるTMMの試験施工（図-12）を5タイプ実施し、各タイプの改良効果ならびに工事費の比較（図-13）を行った。なお、地盤条件や設計条件、各タイプの緒元については既往の文献を参照されたい<sup>10)</sup>。

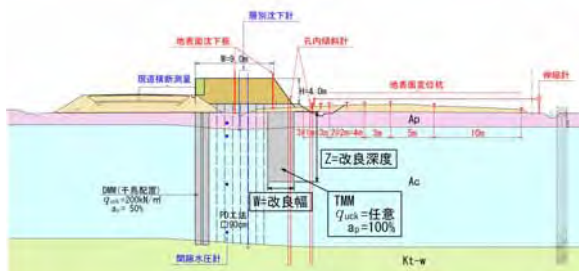


図-12 施工断面と動態観測計器の設置箇所

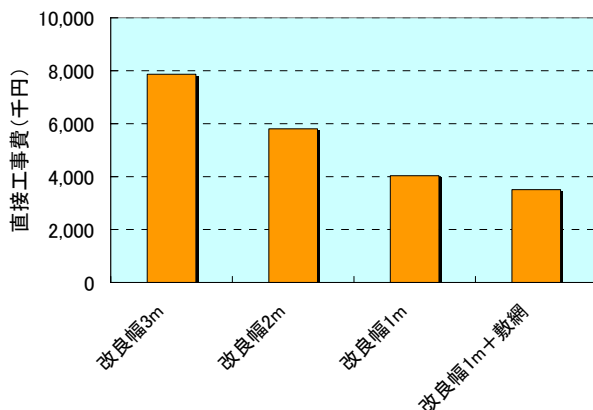


図-13 試験施工タイプの工事費比較

試験施工の結果、改良幅に関わらず拡幅盛土を構築することができた。また、フローティング式地盤改良は、盛土構築に伴う円弧すべりによる曲げ破壊を生じないことが確認された<sup>10)</sup>。

## 8. まとめ

3カ年の調査結果から調査、設計、施工（厳冬期施工）、品質管理の留意点を示した。本報告が実務の参考になれば幸いである。

今年度、更喜苫内の試験施工結果を踏まえて、同じ路線において改良幅1mのフローティング式地盤改良が採用され、試験施工によって工費の縮減に寄与できた。

ただし、改良幅を狭くしすぎると、改良体の許容せん断応力を越える領域が、改良地盤全体に広がることによる改良体の機能喪失が懸念される。今後、弾塑性FEM解析により改良地盤の応力状態を把握したい。また、品質管理方法や、冬期施工における改良地盤の品質確保に向けた研究を継続して進めていく予定である。研究成果は、別途、機会を設けて報告したい。

謝辞：3カ年の調査において、ご協力をいただいた北海道開発局各開発建設部の各位に感謝申し上げます。

### 【参考文献】

- 1) パワーブレンダー工法協会：パワーブレンダー工法スラリー噴射方式技術資料、2006.4
- 2) (独)北海道開発土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、2002.3
- 3) 橋本聖、西本聡、林宏親：トレンチャー式攪拌工法の改良強度に関する評価、寒地土木研究所月報 pp.32-38、2006.10
- 4) 橋本聖、西本聡、林宏親：トレンチャー式攪拌工法で施工された改良地盤に関する評価、(社)地盤工学会北海道支部技術報告集第47号 pp.85-90、2007.2
- 5) 橋本聖、西本聡、林宏親：トレンチャー式攪拌工法で施工された地盤の強度特性とその管理方法について、(社)地盤工学会北海道支部技術報告集第48号 pp.219-224、2008.2
- 6) 能登繁幸：泥炭性軟弱地盤における土構造物の設計に関する研究、開発土木研究所報告第89号 pp.64-65、1988.8
- 7) 城戸優一郎、西本聡、林宏親、橋本聖：セメント改良した泥炭における養生温度が改良強度へ与える影響、(社)地盤工学会北海道支部技術報告集第48号 pp.35-40、2008.2
- 8) 橋本聖、西本聡、林宏親：トレンチャー式攪拌工法による改良強度のばらつきについて、第7回地盤改良シンポジウム pp.81-84、2006.11
- 9) (財)土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版、2004.3
- 10) 山崎正文、江川倫法、橋本聖：拡幅盛土における泥炭性軟弱地盤対策工の改良効果とコスト縮減について、平成19年度北海道開発局技術研究発表会、2008.2