

6. 大径3軸型深層混合処理工法

ツースリー

— (CDM-レムニ2/3) の開発と施工 —

清水建設(株) 土木技術本部技術第一部

○守安卓弥

国土総合建設(株) 技術本部

原 俊郎

(株) 不動テトラ ジオ・エンジニアリング事業本部

野田 洋

1. はじめに

深層混合処理工法(CDM工法)は、軟弱地盤にセメントスラリーを注入して、攪拌混合翼の回転により軟弱地盤を攪拌・混合しながら、セメントスラリーと地盤を化学的に結合させて強固な地盤を形成する地盤改良工法である。その特長は、あらゆる地盤に適用でき、盛土などの载荷に伴う改良地盤の変形がほとんどないことである。しかも、比較的短期間で強固な改良地盤が造成でき、低騒音・低振動工法であるため、近年でもその施工実績は豊富で、需要も確実に伸びている。

一方、近年の建設費縮減のトレンドを受けて、さらなる生産性の向上、すなわち、ハイスピード化と低コスト化が求められているのも事実である。このような背景を踏まえ、新たに開発した3軸型深層混合処理工法「CDM-レムニ2/3工法」は、従来型の1軸もしくは2軸型における各軸注入方式の混合形式から、単に攪拌混合翼の軸数増で3軸型にしたばかりではなく、2軸注入方式で、3軸混合を可能にした斬新な工法となっている。

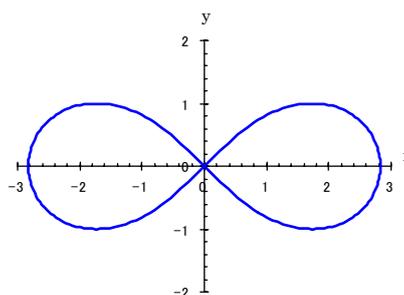
2. 原理と開発経緯

レムニ2/3工法は、清水建設(株)、不動建設(株)、国土総合建設(株)の3社共同で開発・実用化したものであり、従来の2軸型に比べ、全体として、工期を最大40%、工費を最大20%削減することを目標に開発したものである。

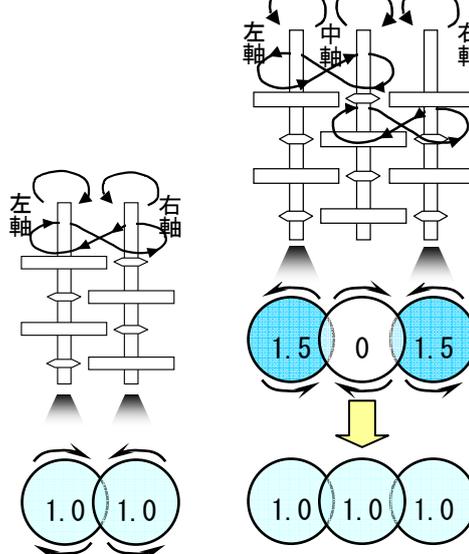
本工法は、3軸1列に駆動装置を搭載した深層処理機を使用しており、攪拌混合翼の直径を $\phi 1,000 \sim 1,300\text{mm}$ にした回転軸を、3軸同時に地盤中に貫入させながら、セメントスラリーの吐出を両端の左右軸の2軸のみから行うものである。両端の左右軸は、同一方向に回転させ、中軸は左右軸と逆方向に回転させる。この回転によって、セメントスラリーは3軸間を図-1に示すようにダブル ∞ (連珠図形、レムニスケート運動)型に流れる。これによ

て、軟弱土とセメントスラリーとが良く攪拌混合され、均一で強度の高い地盤改良体が造成できる。なお、工法名になっているレムニとは、スイスの学者、ベルヌイが1694年に発表した運動方程式のひとつであるレムニスケート曲線の考え方に由来している。

開発にあたっては、初めに基礎的検証として可視化模型実験を行い、各種補助装置の効果確認を実施し、次に、効果の高い補助装置を用いて実機による現場実証実験を行っている。



(a) ベルヌイのレムニスケート曲線



(b) 従来2軸式工法 (2軸注入+2軸混合) (c) CDM-レムニ2/3工法 (2軸注入+3軸混合)

図-1 CDM-レムニ2/3工法の混合概

3. 工法の特徴と施工仕様

(1) 施工機械

主要な施工機械の組合せは、3軸施工に伴って、従来の2軸型から攪拌装置とプラント設備が若干アップする程度であり、標準的な2軸型の施工仕様から変更がほとんどない。施工管理装置は、従来型がそのまま利用できるようになっており、新工法採用における簡便性と経済性に優れている。

(2) 攪拌補助装置

本工法に使用する施工装備は、セメントスラリーを各軸間に満遍なく行き渡らせ、より攪拌効率を高める目的で、図-2に示す間隔保持板に取り付けた上下3段のスタビライザと、中軸にはスパイラルという2つの補助装置を設けている。これらの補助装置は、後述する可視化実験と現場実証実験を踏まえたものであり、新たな機械装置の追加や能力増加が不要で、装備の軽微な追加のみで取り付けられるというメリットがある。

2つの補助装置の効果は、貫入時には、図-3(a)に示すように、中軸のスパイラルが中軸周辺の未改良土を押し上げて、中軸の圧力を減少させ、改良土が中軸に集まりやすくする。一方、スタビライザは、左右軸から中軸への改良土の流れをスムーズに誘導すると同時に保持効果も発揮し、攪拌混合効果を高める。引抜き時には、図-3(b)に示すように、攪拌軸が逆回転することにより、スパイラルは地表に堆積した盛り土の押し戻しを行い、スタビライザは、土の流れと攪拌混合をさらに助長し、より攪拌効率を高める。この効果により、各軸間が均等に混合されることになる。

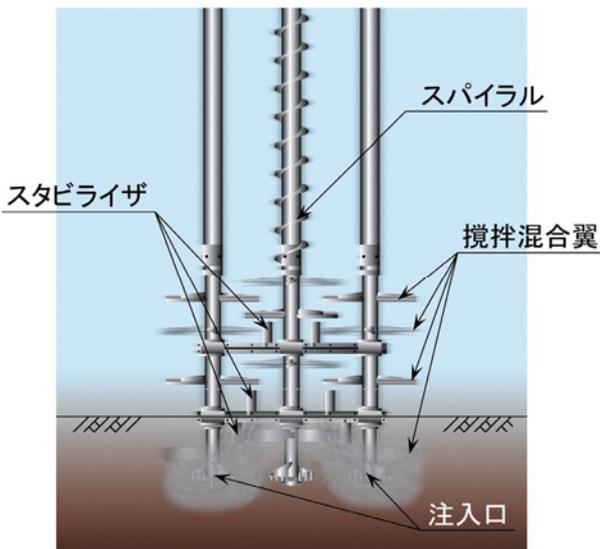


図-2 攪拌能力を高める補助装置

(3) 改良体の形状

改良体の形状は、図-4に示すように改良径φ1,000mm×3軸、φ1,200mm×3軸、及びφ1,300mm×3軸の3種類であり、各軸間のラップ長はいずれも200mmとしている。

(4) 適用範囲

本工法は、適用範囲において従来の2軸型と変わりがなく、改良径別の適用地盤は図-5に示すとおりである。打設長は、機械の大型化が伴わないように、現時点では30m以下に制限している。

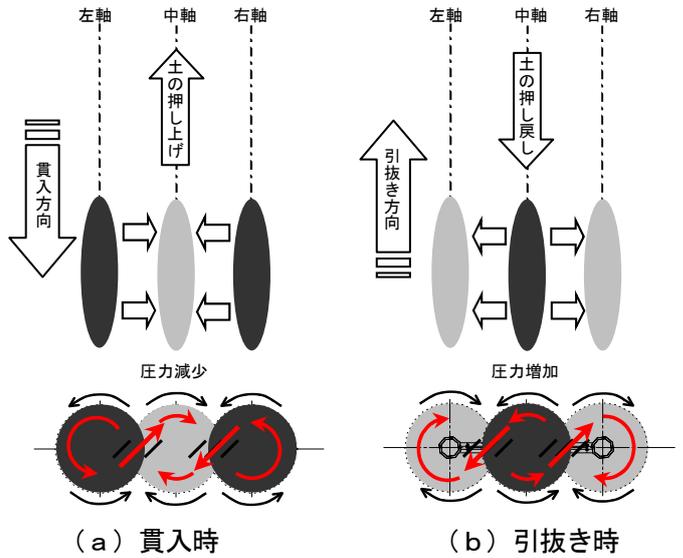


図-3 補助装置の効果

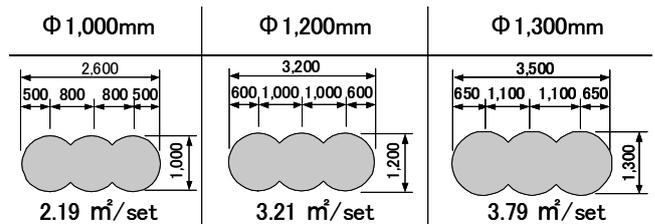


図-4 改良体の形状

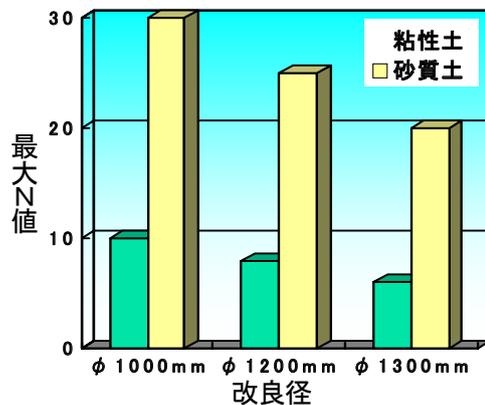


図-5 改良径別の適用地盤

4. 可視化模型実験

(1) 模型実験内容

攪拌混合の内部挙動を調査するために、攪拌混合状態をリアルタイムに可視化でき、かつ繰り返し使用が可能な可視化土層とこれに使用する疑似スラリーを開発し、基本条件把握用に可視化模型実験を行った。本模型実験により、各ケースの攪拌混合メカニズムを確認するとともに、攪拌混合性能がより高くなる補助装置の組合せ選定を行っている。実験装置は、**図-6**に示すように1/5模型を使用し、その試験状況を**写真-1**に示す。

実験仕様は、次に示すとおりである。

- ・実験装置：実機の1/5モデルの模型装置
- ・昇降装置：実速の1/5速度ギヤモータ
- ・駆動装置：実速同等の0~30rpmモータ
- ・攪拌翼：3軸φ1,300mmの1/5モデル
- ・注入装置：可変定量ポンプ
- ・透明水槽：L1,000×B500×H2,000mm
- ・土層：可視化可能なキトサン模擬土層
- ・スラリー：消散性、または残置性色素溶液

なお、実験ケースは、スラリー注入軸数と各種補助装置を組み合わせた11ケースで実施した。

(2) 模型実験結果

模型実験の結果、次のことが明らかになった。

- ① 3軸混合の原理は、中軸を中心とするダブル∞（連珠図形）型流動となっている。
- ② 3軸注入では、左右軸に比較して中軸にスラリーが集中する傾向が見られる。
- ③ 補助装置なしで単に2軸注入したケースは、中軸にスラリーが回り難い。
- ④ スタビライザと中軸スパイラルの2種類を組合せた補助装置は、もっとも攪拌混合性能に優れている。
- ⑤ **写真-2**には、3軸のうちの左右軸から疑似スラリーの色種を変えて2軸注入した場合のスラリー混合状態を示す。同写真から、2種類の補助装置により、中軸までスラリーが満遍なく行き渡っており、攪拌混合が良好に実施されていることが確認できる。

以上の実験結果から、補助装置としてスタビライザと中軸スパイラルの2種類の組合せが最適であるとの結論に至った。スタビライザには、注入スラリーを移動制御する導流効果と保持効果があり、中軸

スパイラルには、中軸混合部の圧力を貫入時に減少し、引抜き時に増加させて、改良土の上下方向混合を促進する効果があることが分かった。

5. 現場実証実験

(1) 現場実験内容

レムニ2/3工法の攪拌補助装置の混合能力を現場において調査する目的で、実機を用いた現場実証実験を行った。実験ケースは、レムニ2/3工法の仕様の2軸注入3軸混合方式と、比較用の3軸注入3軸混合方式、及び従来型の2軸注入2軸混合方式の各種ケースを設定し、施工性や貫入能力、改良体の品質について検証を行った。

実験シリーズは、**表-1**に示すように4シリーズを設定した。シリーズI~IIIでは、羽根切り回数を350、450回/m、スラリー混入率を10、15、20%として、これらの組合せで6ケースを設定した。シリーズIVでは、羽根切り回数450回/m、スラリー混入率10、15%の2ケースを設定した。

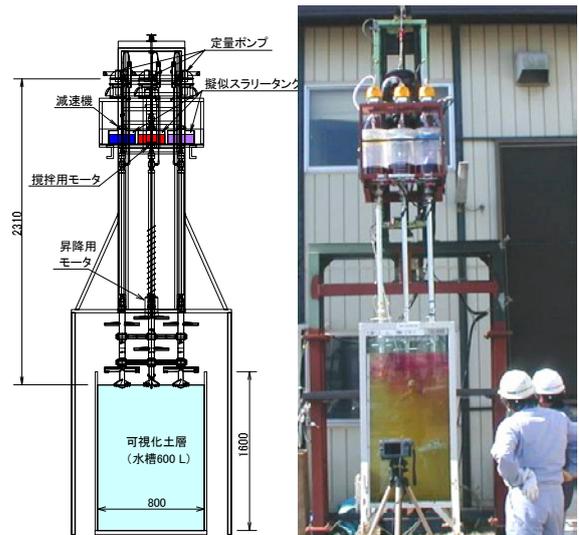


図-6 模型実験装置



写真-1 試験状況



写真-2 可視化実験の混合状況

なお、補助装置 (A) は、スタビライザ+スラロッド、補助装置 (B) は、スタビライザのみの使用としている。羽根切り回数とは、攪拌翼が改良対象土中の任意の 1m 区間を通過した回転数の総数、混入率とは、改良土 1m³ 当たりのセメントスラリー量を表している。

試験改良体の形状仕様は、次のとおりである。

- ・φ 1,300mm × 3 軸 (A=3.79m²)、及び φ 1,300 mm × 2 軸 (A=2.56m²)
- ・打設長：7.0m、改良長：6.0m
- ・試験改良体数：20 セット

試験改良体の対象地盤は、上部が腐植土 (A_p) と粘性土 (A_c)、下部が砂層となっており、上部軟弱層 (A_p、A_c) は、層厚にバラツキがあるため、事前に現地の均一な粘性土に置換した。

(2) 現場実験結果

改良体施工後に品質確認として改良体の針貫入試験、及びコア観察と一軸圧縮試験を実施した結果、以下のことが明らかとなった。

(a) 針貫入試験

改良体の強度確認を行うために実施した針貫入試験の結果を図-7に示す。同図から、次の傾向が見られる。

①シリーズⅢの針貫入強度は、左右軸に対して中軸がもっとも大きくなる傾向を示す。しかし、シリーズⅠとⅡでは、その傾向が小さい。

②針貫入強度のバラツキは、シリーズⅠ<シリーズⅡ<シリーズⅢとなっており、補助装置有無の差が明らかとなった。

③シリーズⅠは、変動係数が 20%程度であり、各改良軸の関係を比べると、もっとも安定している。

これらの結果から、シリーズⅠの 2 種類の補助装置付き 2 軸注入 3 軸混合方式は、シリーズⅢの 3 軸注入 3 軸混合方式に比べ、中軸にもセメントスラリーが十分満遍なく行き渡り、各改良軸間で均一な改良体が造成されて、品質的に安定した改良体が得られることが明らかとなった。

(b) 改良体コア状況と一軸圧縮強度

針貫入試験後の深度から、オールコアサンプリングを行い、改良体のコア採取率とコアの一軸圧縮強度を調査した。調査結果は、次のとおりである。

①コア採取率は、どのシリーズも 85~100%の範囲であり、良好である。

②図-8に示すように、コアの一軸圧縮強度は、スラリー混入率が大きいほど強度が高く、バラツキ(変動係数)も小さくなる。

③一軸圧縮強度の平均は、どのシリーズも同程度の値を示している。従来型の 2 軸注入 2 軸混合方式とすべての 3 軸混合方式は同様なコア強度結果となっている。また、2 軸注入 3 軸混合方式は、各軸注入方式と同等の改良強度が得られており、十分実用に供し得るものと考えられる。

④図-9に示すように、2 軸注入 3 軸混合方式では、中軸が左右軸より強度が高い傾向を示すが、スラリー混入率が大きくなるとその差は小さくなる。

(3) 現場実験のまとめ

①2 軸注入 3 軸混合方式の深層混合処理工法は、従来型の 2 軸注入 2 軸混合方式と同等の品質が確保で

表-1 現場実験シリーズの種類

| シリーズ名 | 補助装置の種類 | 注入混合方式 | ケース数 |
|--------|----------|-------------|-------|
| ①シリーズⅠ | 補助装置 (A) | 2 軸注入 3 軸混合 | 6 ケース |
| ②シリーズⅡ | 補助装置 (B) | 3 軸注入 3 軸混合 | 6 ケース |
| ③シリーズⅢ | なし | 3 軸注入 3 軸混合 | 6 ケース |
| ④シリーズⅣ | なし | 2 軸注入 2 軸混合 | 2 ケース |

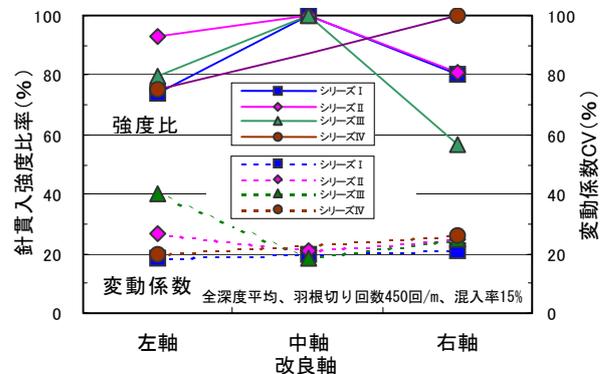


図-7 針貫入強度と改良軸の関係

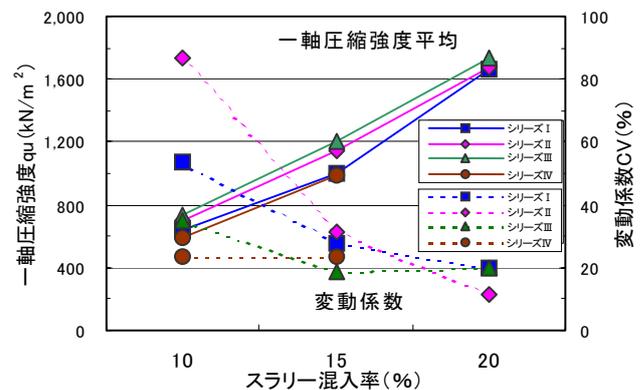


図-8 一軸圧縮強度と混入率の関係

きる。

②補助装置のない3軸式(シリーズⅢ)は、中軸の強度が高い値を示す傾向にある。

③2種類の補助装置付き2軸注入3軸混合方式(シリーズⅠ)は、3軸注入3軸混合方式よりも強度のバラツキが小さいことが明らかになった。

6. 施工事例

表-2に、CDM-レムニ2/3工法の施工事例と改良仕様を示す。5件の施工事例には、地方公共団体の官庁工事と民間工事が含まれている。事例1は、千葉県浦安市の研修施設建屋工事において、建屋基礎の液状化防止を目的として採用されたもので、改良体配置は格子状改良である。事例2は、千葉県佐原市における一般廃棄物最終処分場の建設工事である。事例3は、愛知県豊田市の土地区画整理事業における宅盤改良である。事例4は、東京都中央区晴海の護岸建設工事におけるケーソンの基礎地盤改良である。事例5は、新潟県上越市における新設地上タンクの基礎地盤改良である。セメントスラリーの注入混合方式は、事例1~3及び事例5は2軸注入3軸混合であり、事例4はスラリー混入率が45.5%と大きいため、3軸注入3軸混合方式で施工している。事例2の一般廃棄物最終処分場建設工事における施工状況と改良体出来形を写真-3、4に示す。

7. 現場の改良体強度

図-10は、表-2に示す5件の施工事例における改良体コア強度(一軸圧縮強度試験値)と変動係数を、スラリー混入率との関係で整理したものである。変動係数は概ね30%以下で深層混合処理工法として良好な値を示している。ただし、事例4ではスラリー混入率(45.5%)が大きいにも係らず、変動係数がやや高い値を示している。これは、改良対象と

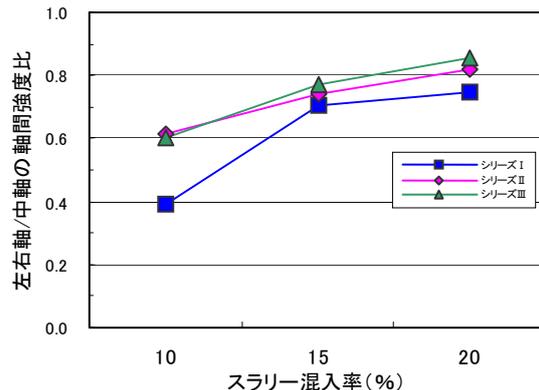


図-9 軸間強度比と混入率の関係



写真-3 レムニ2/3工法の施工状況



写真-4 改良体の出来形状

表-2 施工事例と改良仕様

| 施工No. | 改良径 | 打設長 (m) | 改良土量 (m ³) | 固化材添加量 (kg/m ³) | 改良率 (%) | スラリー混入率 (%) | 設計基準強度 (kN/m ²) |
|-------|------------|----------|------------------------|-----------------------------|---------|-------------|-----------------------------|
| 事例1 | φ1200mm×3軸 | 14.0 | 5,265 | 115 | 36 | 15.3, 17.9 | 700 |
| 事例2 | φ1000mm×3軸 | 4.0~11.0 | 41,520 | 90 | 84.2 | 11.9 | 240 |
| 事例3 | φ1300mm×3軸 | 11.5 | 3,335 | 115 | 83.3 | 15 | 500 |
| 事例4 | φ1300mm×3軸 | 3.0 | 10,172 | 350 | 83.3 | 45.5 | 900 |
| 事例5 | φ1300mm×3軸 | 6.9 | 10,066 | 310 | 83.3 | 40 | 3,200※ |

※実施工での設計基準強度

なる原地盤が、木片等の異物を混入する底泥土（ヘドロ）で、地盤自体が不均一な状態であり、これにより改良強度にもバラツキが生じたものである。

図-11 は、各事例の設計基準強度 (q_{uck}) に対する室内配合試験強度 (q_{ul}) 及び現場 90%信頼限界強度 ($q_{u90} = q_{uf}(1 - 1.3 \cdot Cv)$) をスラリー混入率の関係で整理したものである。現場 90%信頼限界強度 (q_{u90}) の設計基準強度 (q_{uck}) に対する比率は、施工条件によりバラツキが見られるが 1.3~3.8 の範囲となっている。さらに、混入率が増加すると q_{u90}/q_{uck} が小さくなる傾向を示し、良好な攪拌混合ができていると判断できる。室内配合試験強度 (q_{ul}) の設計基準強度 (q_{uck}) に対する比率は概ね 3.0 程度となっているのに対し、いずれの結果も現場 90%信頼限界強度 (q_{u90}) の設計基準強度 (q_{uck}) に対する比率が 1.0 を超えている。このことより、従来一般に使用されている強度安全係数 (3.0~4.0) を見直すことも考えられる。この辺の可能性を含めて、改良強度をより合理的に設定できるように、今後とも現場の実績データを蓄積して行きたい。

8. レムニ2/3工法の適用効果

レムニ2/3工法の適用効果の目安を把握するため、ここでは、従来の2軸型工法 (CDM工法 $\phi 1,000$) を比較対象にして、改良体の混合造成費と施工能力に関してレムニ2/3工法 $\phi 1,300$ 改良径とを比較する。この際の比較条件としては、打設長・改良長・地盤条件を同一のものに設定し、混合造成費では材料費と運搬・組立・解体費を含まずに算定している。図-12 には、平成 18 年度版の体系における改良体の改良長と混合造成費・施工能力の関係で両工法の比較結果を示す。同図から明らかのように、レムニ2/3工法は、従来2軸型工法 $\phi 1,000$ に比較して、適用効果が極めて優位であることが確認できる。

9. おわりに

本報告は、大径3軸型の深層混合処理機を使って軟弱地盤を改良する新工法「レムニ2/3工法」について、開発概要、施工事例及び現場の改良体品質を記述した。本工法は、まだ誕生したばかりのものであるが、幸いにも施工案件にも恵まれ、施工実績が増加する状況である。今後は、施工実績を積み重ねるとともに、幅広くより信頼できる現場適用データの蓄積に努めたいと考えている。

また、本工法をより長尺化、より大径化という観点でブラッシュアップをさらに図り、発展させて行きたいと考える。

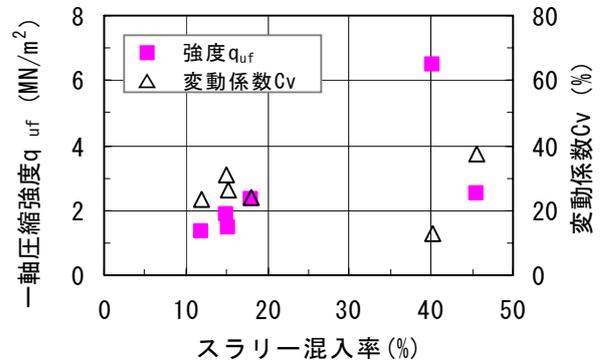


図-10 一軸圧縮強度と混入率の関係

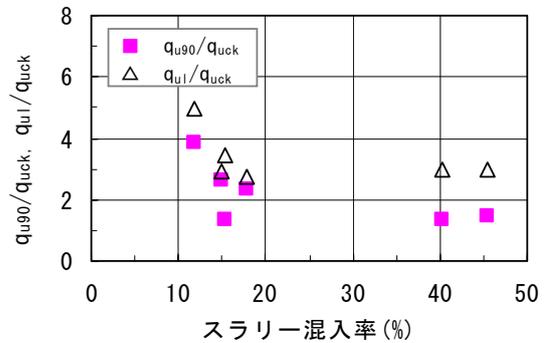


図-11 強度比率と混入率の関係

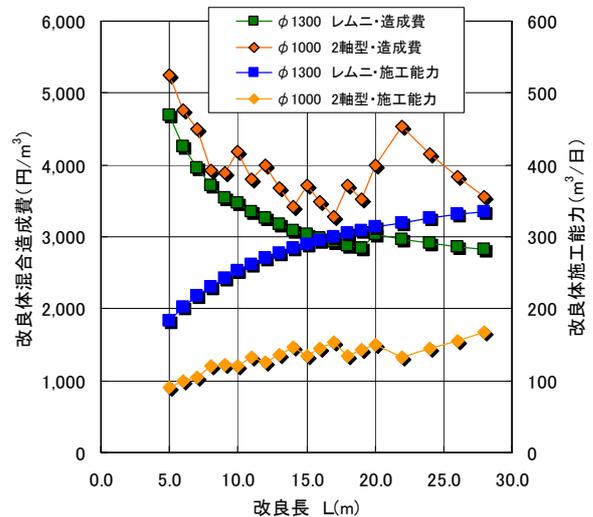


図-12 混合造成費と施工能力の比較

《関連文献》

- 1) 川崎他：CDM-レムニ2/3工法-大径3軸型による深層混合処理工法の合理化施工一，土木施工，Vol. 46，No. 12，2005. 12
- 2) 原他：大径3軸型による深層混合処理工法の合理化施工-1 模型実験・実証実験，第41回地盤工学研究発表会，2006. 77-スリー
- 3) 守安他：大径3軸型深層混合処理工法 (CDM-レムニ2/3) の改良体強度，第41回地盤工学研究発表会，2006. 7