

軟弱地盤を改良する 3 軸式深層混合処理工法の開発と適用事例 —レムニ 2/3 工法—

上村一義¹・川崎廣貴¹・佐藤 秀幸²・深田 久³・高橋辰夫⁴

¹正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 基盤技術部（〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3 シーパンス S 館）

²あおみ建設株式会社 地盤改良事業部 技術管理部（〒108-8430 東京都港区海岸 3-18-21 ブライトイースト芝浦）

³正会員 株式会社不動テトラ 建設本部 地盤技術部（〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2）

⁴株式会社不動テトラ 技術開発統轄部 知的財産課（〒103-0016 東京都中央区日本橋小網町7-2）

近年の建設費縮減の流れを受けて、清水建設、あおみ建設、不動テトラの 3 社は、より効率の良い 3 軸式深層混合処理工であるレムニ 2/3（ツースリー）工法を開発した。開発工法は、2 つのレムニスケート運動と新開発の攪拌補助装置の融合により、セメントスラリーの両側 2 軸からの注入方式で 3 軸改良体を効率的に造成することを可能にした。しかも、従来の施工機械設備をそのまま利用することで、従来工法と同レベルの改良品質を確保しながら、工期とコストを大幅に短縮・縮減することができるようになった。ここでは、本開発技術の概要と施工事例に関し報告する。

キーワード：地盤改良，深層混合処理，レムニスケート，改良体，3 軸・2 軸注入，攪拌補助装置

1. はじめに

わが国は世界でも有数の軟弱地盤国であり、国土開発のために軟弱地盤に対するさまざまな対策工法が立案されてきた。

その中でも、わが国で開発された深層混合処理工法は、開発以来 30 年余りが経過した現在も、各種構造物の基礎、あるいは基礎地盤の安定等の地盤改良技術として適用されている。その間、各種の技術改良が実施されてきたが、依然として開発当初の単軸式や 2 軸式技術が主流となっている。清水建設、あおみ建設、不動テトラの 3 社は、近年の建設費縮減の流れを受けて、より効率の良い 3 軸式深層混合処理工法であるレムニ 2/3（ツースリー）工法を開発した。

レムニ 2/3 工法は、2 つのレムニスケート運動と新開発の攪拌補助装置の融合により、セメントスラリーの攪拌軸両側 2 軸からの注入方式で 3 軸改良体を効率的に造成することを可能にした。

しかも大幅な設備投資をせず、従来の 2 軸式の施工機械設備をそのまま利用することで、大容量施工が可能となった。これらの技術により、従来工法と同レベルの改良品質を確保しながら、工期とコストを大幅に短縮・縮減することができるようになり、各地の地盤改良工事に適用・展開している。

2. 工法の概要

新しく開発した 3 軸式深層混合処理工法（レムニ 2/3 工法）は、従来、単軸もしくは 2 軸であった攪拌混合翼を 3 軸として施工効率を上げるばかりではなく、セメントスラリーの注入を両側の 2 軸のみとして、従来型の施工設備をほぼそのまま使える工法となっている。

(1) 施工機械と施工方法

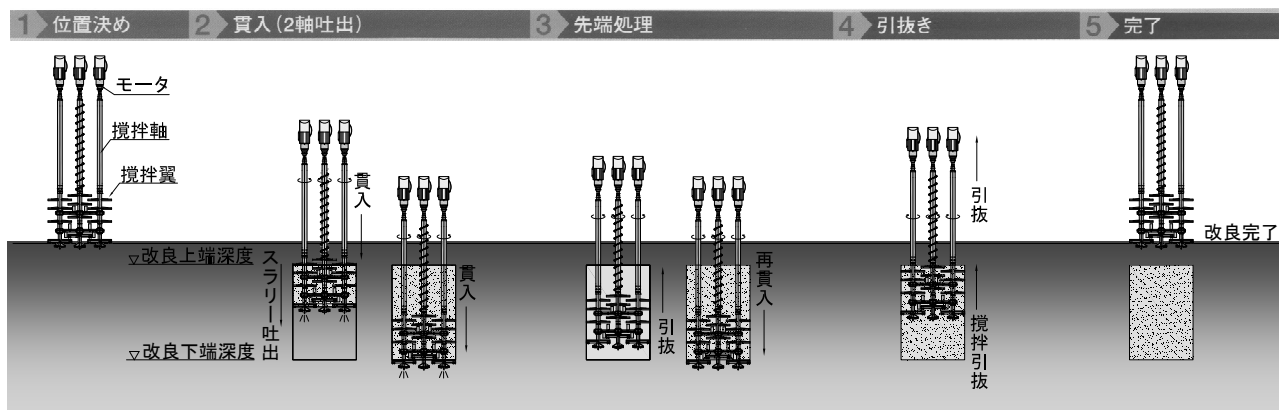
主要な施工機械の組合せは、2 軸式の標準的な仕様からの変更がほとんどなく、新工法採用における簡便性と経済性に優れている。レムニ 2/3 工法の施工方法を図-1 に示す。また、写真-1 に施工機械の全景、写真-2 に攪拌能力を高める攪拌混合翼と攪拌補助装置を示す。

(2) 改良体の形状

改良体の形状は、図-2 に示すように改良径 ϕ 1,000mm×3 軸、 ϕ 1,200mm×3 軸、及び ϕ 1,300mm×3 軸の 3 種類であり、ラップ長は 200mm としている。

(3) 適用範囲

本工法の適用地盤は、従来の 2 軸型と変わりがなく、改良径別の適用地盤は図-3 に示すとおりである。また、打設長は、現時点では 30m 以下にしている。



1 処理機本体セット 2 貫入吐出混合状況 2 中軸スパイラル排土状況 4 引抜き混合状況 5 打設完了 出来形（杭頭確認）

図-1 開発工法の施工方法



写真-1 施工機械の全景

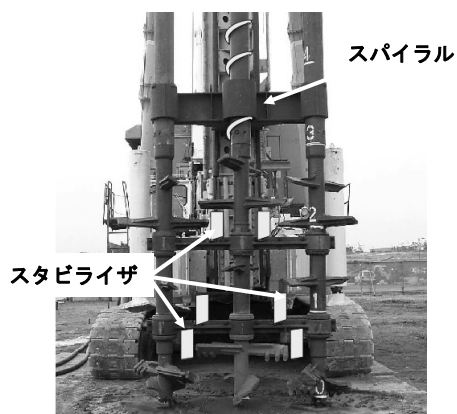


写真-2 攪拌翼部と補助装置

3. 新発想の攪拌技術

(1) メカニズム

レムニ 2/3 工法は、3 軸 1 列に駆動装置を搭載した深層混合処理機を使用して、攪拌混合翼の直径を $\phi 1000 \sim 1300 \text{mm}$ にした攪拌回転軸を 3 軸同時に地盤中に貫入させ、セメントスラリーの吐出は両端の 2 軸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て、この回転によって、セメントスラリーは 3 軸間を図-4 に示すように 2 つのレムニスケート型（連珠図形、 ∞ ）に流れる。これによって、軟弱土とセメントスラリーが効率良く攪拌混合され、注入を行っていない中軸にもスラリーが流れ込み、均一な強度の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 年に発表したレムニスケート曲線の考え方に由来している。

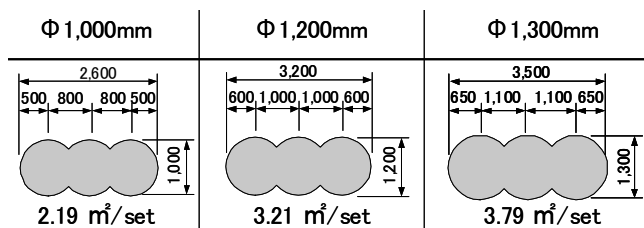


図-2 改良体の形状

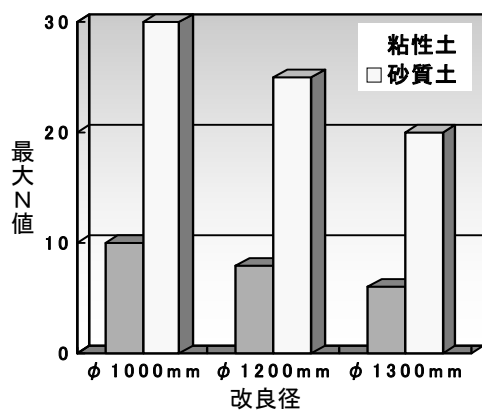
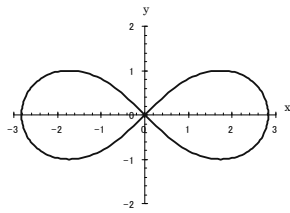
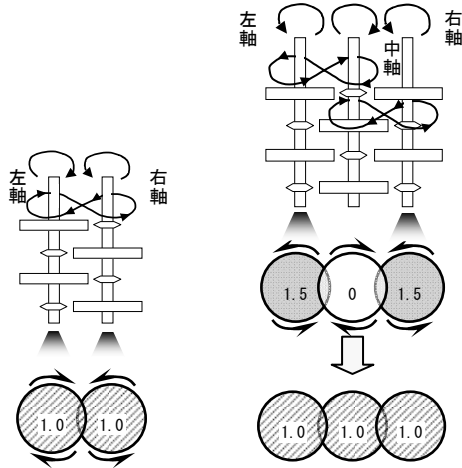


図-3 改良径別の適用地盤



(a) ベルヌイのレムニスケート曲線



注) 円内の数字は、注入セメントスラリーの混合割合を表わす。

(b) 従来2軸式工法
(2軸注入+2軸混合)

(c) 開発工法
(2軸注入+3軸混合)

図-4 開発工法の混合概念

(2) 攪拌補助装置

レムニ 2/3 工法に使用する施工装備は、セメントスラリーを各攪拌回転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-5 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を設けている。これらの補助装置は、写真-3、4 に示す様に可視化実験と現場実証実験により効果が確認されている。詳細は参考文献^{1) 2)}を参考にされたい。

2つの補助装置の効果は、貫入時には、図-6(a)に示すように、中軸のスパイラルが中軸周辺の土を押し上げて、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-6(b)に示すように、攪拌軸が逆回転することにより、スパイラルは土を押し戻し改良土の上下方向の混合を行い、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。

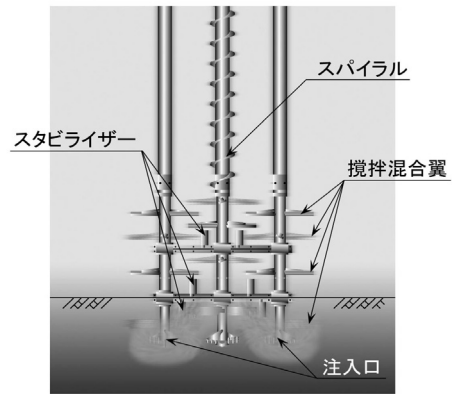


図-5 攪拌能力を高める補助装置

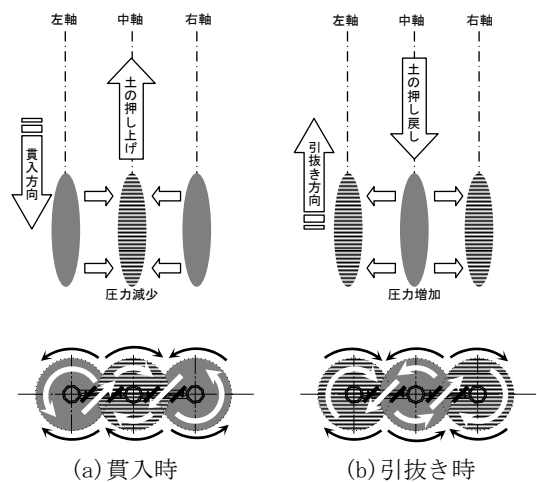


図-6 補助装置の効果

4. 開発の経緯

(1) 模型実験

レムニ 2/3 工法の攪拌混合の内部挙動を調査するため、攪拌混合状態をリアルタイムに可視化でき、かつ繰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た。本可視化模型実験により、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た。

実験装置は、1/5 模型を使用し、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 ケースを実施した。装置全景を写真-3、可視化実験の混合状況を写真-4 に示す。

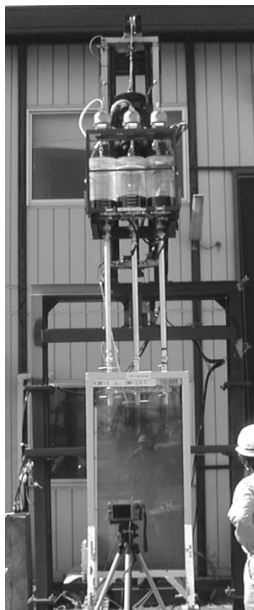


写真-3 装置全景

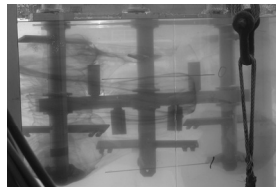
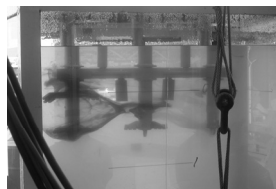


写真-4 可視化実験の混合状況

コアサンプリングを行い、コア観察と一軸圧縮試験を実施した。図-7 に針貫入試験とコア採取の位置を示す。この結果、以下のことが明らかになった。



写真-5 針貫入試験の試験状況

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判明した。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。

(2) 現場実証実験

レムニ 2/3 工法の攪拌補助装置の混合能力を現場にて確認する目的で、実機を用いた現場実証実験を行い、施工性や貫入能力、改良体の品質について検証を行った。実験は、表-1 に示すように 4 シリーズを設定した。なお、補助装置 (A) は、スタビライザ+スパイラルロッド、補助装置 (B) は、スタビライザのみの使用とし、試験改良体の仕様は改良径 $\phi 1300\text{mm}$ 、打設長 7.0m である。

表-1 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	羽根切り回数	混入率 (%)	ケース数
シリーズ I	補助装置 (A)	2 軸注入 3 軸混合	350, 450	10, 15, 20	6 ケース
シリーズ II	補助装置 (B)	3 軸注入 3 軸混合	350, 450	10, 15, 20	6 ケース
シリーズ III	なし	3 軸注入 3 軸混合	350, 450	10, 15, 20	6 ケース
シリーズ IV	なし	2 軸注入 2 軸混合	450	10, 15	2 ケース

改良体施工後に品質確認として GL-1.0m, -1.5m, -2.0m, -2.5m の 4 深度で写真-5 に示す改良体の針貫入試験、及び深度 2.5m~7.0m 間を対象にオール

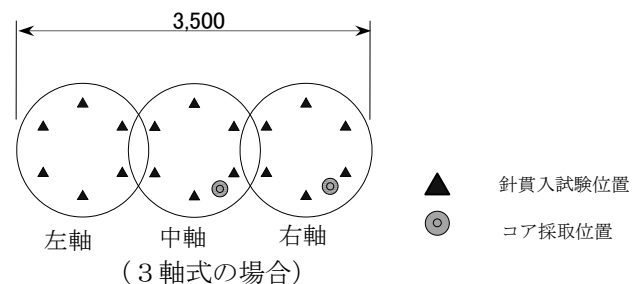


図-7 針貫入試験とコア採取位置

図-8 に示す針貫入試験結果グラフは、各軸 24 個の針貫入試験データを、中軸の強度を 100 とした場合の左右軸の強度との比率をプロットした。この結果より、中軸にスラリーが集まりやすい補助装置のない 3 軸式以外は、従来 2 軸式の左右軸の強度比と同程度になっており、レムニ 2/3 工法は、3 軸間の均一性に関し、問題ないことが判明した。

図-9 に示すコアの一軸圧縮強度のグラフは、スラリー混入率毎に 12 個、総数 36 個の改良体コアの一軸圧縮強度のデータをプロットしたものである。この結果より、レムニ 2/3 工法は、従来型の 2 軸式と他の 3 軸式と同程度のコア強度結果となっており、実用上問題ないことが分かった。

以上から、開発工法の 2 軸注入 3 軸混合方式は、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、品質的にも安定した改良体が得られた。その結果、2 軸式と同等の施工方法で、2 軸式に比べ 1.5 倍の改良体が効率的にできることが明らかとなった。

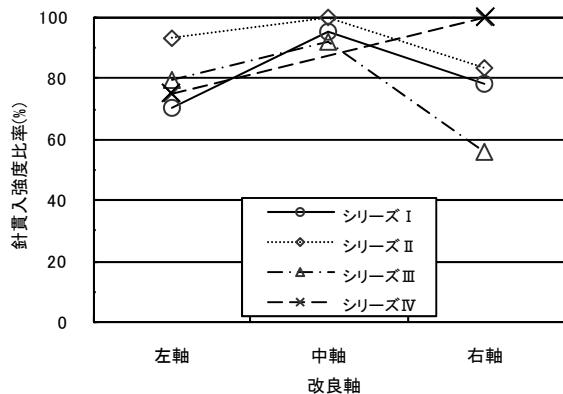


図-8 針貫入強度と改良軸の関係

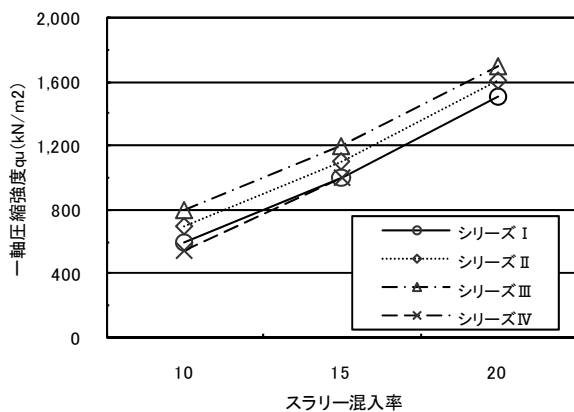


図-9 一軸圧縮強度と混入率の関係

5. 施工事例

レムニ2/3工法は、2004年度から実施工に採用され、2007年度までに9件、約25万m³の施工実績がある。ここでは、施工事例の一例を示す。

(1) 一般廃棄物最終処分場建設工事

香取広域市町村圏事務組合発注の千葉県佐原市に建設される一般廃棄物最終処分場（埋立処分地施設）建設工事において、廃棄物貯留槽を直接支持するため、地盤の支持力増加と液状化防止を目的に、軟弱地盤の固結改良工法として本工法が採用された。施工状況を写真-6、改良体の出来形状を写真-7に示す。



写真-6 施工状況



写真-7 改良体の出来形状

改良体造成後には、品質管理として改良体のコア採取を行い、いずれも設計基準強度を十分満足する改良体強度が得られたことを確認した。また、すべての攪拌軸からの改良体採取コア状況から、セメントスラリーを吐出していない中軸先端部においても攪拌混合が十分に行われていることが確認できた。改良体のコア状況を写真-8に示す。



写真-8 改良体のコア状況

(2) オイルターミナル基地建設工事

オイルターミナル基地の建設工事において、直径23m、容量8,000KLの地上タンク2基を直接支持するため、基礎地盤の支持力増加と液状化防止を目的に地盤改良工事が実施された。本工事は三期工事となり、前回工事に採用された従来2軸工法に比べ、より工期・コストが短縮・縮減できるレムニ2/3工法が採用された。施工状況と出来形状を写真-9に示す。



写真-9 施工状況及び出来形状

(3) 市街地道路整備工事

MM21みなとみらい地区は、21世紀にふさわしい未来型都市を目指して開発が進められている。本工事は、新高島駅側の60・61街区を周回する街路2号線の道路部地盤改良工である。周辺部にはクラブハウスなどが建設中であり、道路の暫定開放期日が指定されたことにより、施工は昼夜2交代制で計画されていた。暫定開放期日厳守のため、当初計画の地盤改良工よりも大幅な工期短縮(32日から19日に40%短縮)が可能であり、コストも削減できるレムニ2/3工法が採用され、無事、工事を完了することができた。写真-10に施工状況を示す。



写真-10 施工状況

(4) 大規模工場建設工事

埋立て地盤に建設される大規模工場建設工事に伴い、地盤の耐震補強対策を目的として本工法が採用された。改良対象敷地は、400m×360mの大きさで施工箇所を図-10に示す様に10mメッシュの格子状に改良体を配置して、深度方向には約15mの地盤改良の施工を行った。写真-11に施工状況を示す。



写真-11 施工状況

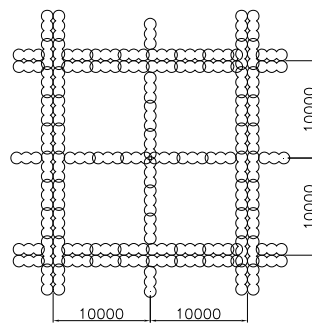


図-10 改良体配置計画

6. 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、開発概要と施工事例を記述した。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。本事例が、軟弱地盤分野の開発事例として何らかの参考になれば、幸甚である。なお、本工法のNETIS登録番号は、Q S-50016-Aであり、平成18年度土木学会技術開発賞を受賞した。

参考文献

- 1) 野田 洋, 磯谷修二, 川崎廣貴, 上村一義, 守安卓弥, 原俊郎: 3軸式深層混合処理工法(CDM-レムニ2/3)の開発, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.31-32, 2005.9
- 2) 原 俊郎, 川崎廣貴, 上村一義, 守安卓弥, 野田 洋, 磯谷修二: 3軸式深層混合処理工法(CDM-レムニ2/3)の可視化模型実験, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.33-34, 2005.9
- 3) 守安卓弥, 川崎廣貴, 上村一義, 原 俊郎, 野田 洋, 磯谷修二: 3軸式深層混合処理工法(CDM-レムニ2/3)の現場実証実験, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.35-36, 2005.9
- 4) 上村一義, 守安卓弥, 川崎廣貴, 原 俊郎, 野田 洋: 大径3軸型による深層混合処理工法(CDM-レムニ2/3)の合理化施工, 土木施工, Vol.46, No.12, pp.21-28, 2005.12
- 5) 上村一義, 原 俊郎, 高橋辰夫: 大径3軸式機械攪拌工法の開発と適用事例, 基礎工, Vol.37, pp.47-50, 2009.5
- 6) Kamimura, K., Kawasaki, H., Hara, T., Takahashi, T. and Fukada, H.: Development of Triple-Axial Cement Deep Mixing Method(Lemni 2/3 Method), Deep Mixing 2009 Okinawa Symposium.