

# 地盤改良技術「DCM-L 工法」の高度化

大西 常康・栞田 旬 祐

軟弱な地盤にセメントスラリーを添加・混合する陸上深層混合処理工法（DCM-L 工法：Deep Cement Mixing Method Land）は、土木・建築分野で数多くの施工実績を持っている。阪神・淡路大震災でも被害が少なかった「神戸メリケンパークオリエンタルホテル」を始めとし、竹中グループではプロジェクト 200 件以上、延べ 500 万  $m^3$  を超える改良実績がある。一方、陸上深層混合処理工法においても、施工品質、施工効率の向上、コスト縮減および環境問題への対応が求められている。株式会社竹中土木では、陸上深層混合処理工法を基本としたさまざまな新工法の開発を行っており、本報文ではこれらの工法の概要および適用事例について報告する。

キーワード：地盤改良、深層混合処理工法、多軸施工、方向制御、土壌浄化、VOC

## 1. はじめに

軟弱な地盤にセメントスラリーを添加・混合し地盤を強化する陸上深層混合処理工法は、建築・土木の種々の用途に使用され、多くの施工実績をあげている。

しかし、近年の建設分野でのさまざまな変革に伴い、より一層の改良地盤の品質向上とともに施工効率の向上やコスト縮減が要求されている。これらの要求に対処するために、筆者ら（株式会社竹中土木、以下、当社）は従来の 2 軸処理機を発展させ、施工効率向上のための 4 軸処理機（DCM-L Twins 工法）、施工品質向上のため攪拌翼の方向制御を可能とした工法（パペット工法）、揮発性有機化合物汚染土を原位置で分解・浄化する工法（DCM-e 工法）等を開発し実工事へ適用している。

本報文は、開発した各工法の特徴を述べるとともに、それらの工法およびシステムを用いた工事の概要および結果を報告するものである。

## 2. 4 軸処理機（DCM-L Twins 工法）<sup>1)</sup>

### （1）4 軸処理機の概要

4 軸処理機は、2 軸用モータ（90 kW×2 台）と並列 4 軸装置を組合わせて 4 本の駆動軸・攪拌翼を回転させる。

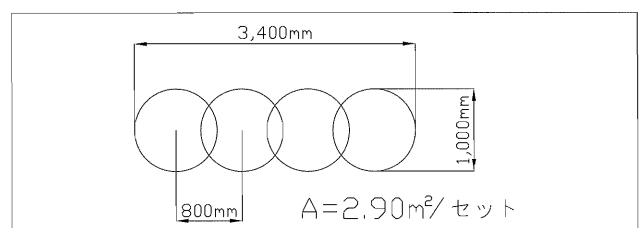
この並列 4 軸装置は、入力側 2 軸を出力側 4 軸に変換する同期ギア装置である。4 本の駆動軸の軸間距離は 800 mm、改良径は  $\phi 1,000$  mm、改良面積は 2.9

$m^2$  である。4 軸処理機を運転する動力源は、発電機 600 kVA が 1 台である。

セメントスラリーの製造は、全自動プラント（24  $m^3/h$  級）2 台でスラリーポンプ 4 台に対応し、4 軸す



写真一1 4 軸処理機



図一1 4 軸処理機の改良断面

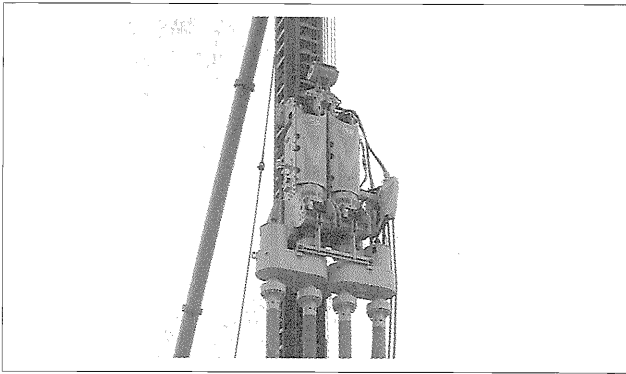
べてからセメントスラリーを吐出する。

施工管理システムは、2軸処理機の管理装置を2セット使用することで、従来の2軸処理機による施工品質の実績を受継いだ。4軸処理機の全景を写真—1に、改良断面形状を図—1に示す。

(2) 実工事への適用

(a) 施工概要

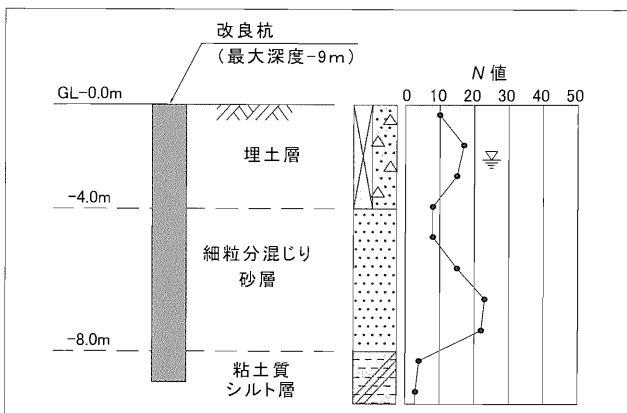
大阪市福島区に分譲マンション新築工事における基礎工事のうち、杭併用の耐液状化格子状深層混合処理工に4軸処理機を適用した。4軸処理装置は、全装備重量135tクラスの3点式杭打ち機に装備した。



写真—2 4軸処理機 (上部)

表—1 処理機能力

| 項目                          | 形式/能力                      |     |      |
|-----------------------------|----------------------------|-----|------|
| モータ                         | 90 kW×4/8 P×2台 (400/440 V) |     |      |
| 回転数<br>(min <sup>-1</sup> ) | 50 Hz                      | 4 P | 32.2 |
|                             |                            | 8 P | 16.1 |
|                             | 60 Hz                      | 4 P | 38.7 |
|                             |                            | 8 P | 19.3 |
| 掘削トルク<br>(1軸分に換算)<br>(kN・m) | 50 Hz                      | 4 P | 13.3 |
|                             |                            | 8 P | 26.7 |
|                             | 60 Hz                      | 4 P | 11.1 |
|                             |                            | 8 P | 22.2 |
| 改良径 (mm)                    | φ 1,000                    |     |      |



図—2 土質柱状図

施工本数は203セット、打設長は9.0mである。固化材は高炉セメントB種を使用し、添加量は250 kg/m<sup>3</sup>、設計基準強度は1,500 kN/m<sup>2</sup>である。

対象地盤はGL-4.0mまでが埋土、GL-8.0mまでがN値=8~23の細粒分混じり砂層、それ以深が粘土質シルト層である。処理機上部を写真—2に、処理機の能力を表—1に、地盤の代表的な土質柱状図および改良深さを図—2に示す。

(b) 改良体の品質

採取したコアの1軸圧縮試験結果を表—2に示す。試験結果は、細粒分混じり砂層の中央部における値で、統計量を除く表中の数値は3供試体の平均値である。

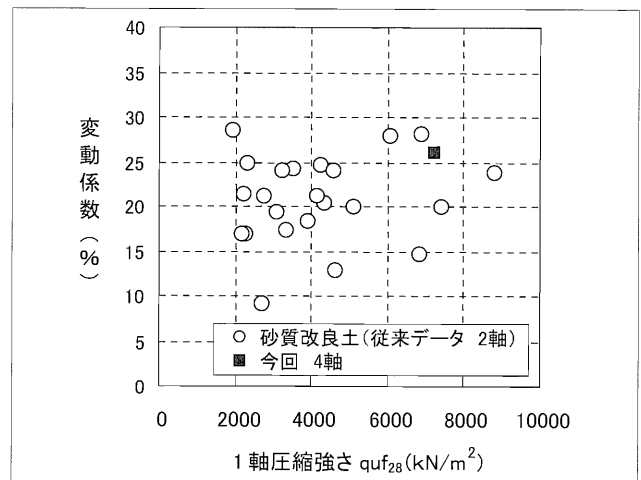
平均1軸圧縮強さ  $q_{uf28}$  は、7,195 kN/m<sup>2</sup>で、合格判定値を上まわった。また、強度の変動係数は26%となり、図—3に示すように、砂質土の改良としては従来の2軸処理機の変動係数の範囲となった<sup>2)</sup>。

(c) 施工効率

4軸処理機の適用の結果、1回の施工で従来の2セット分の施工が可能となり、工期を約40%短縮することができた。施工にかかった日数は、8時間の昼間施工で21日間であった。1日当たりの平均施工数は9.7セット/日となり、国土交通省の標準積算歩掛(スラ

表—2 品質試験結果

| コア採取位置   | 湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 含水比 $w$ (%) | 1軸圧縮強さ $q_{uf28}$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
|----------|------------------------------------|-------------|--|
| ①        | 1.994                              | 19.0        | 9897                                   |
| ②        | 1.914                              | 20.8        | 5090                                   |
| ③        | 1.991                              | 21.7        | 5090                                   |
| ④        | 2.078                              | 16.4        | 8283                                   |
| ⑤        | 1.920                              | 21.3        | 6960                                   |
| ⑥        | 2.014                              | 21.2        | 7850                                   |
| 平均値      | 1.985                              | 20.1        | 7195                                   |
| 標準偏差     | 0.061                              | 2.0         | 1888                                   |
| 変動係数 (%) | 3.1                                | 10.1        | 26.2                                   |



図—3  $q_{uf28}$  の変動係数

リー攪拌工)の9.0セット/日を上まわることができた。

また、4軸処理機の運転において、モータの異常な温度上昇や発電機の遮断等の障害も見られなかった。

(d) ラップ交差部の品質

ラップ交差部は、24時間以内に施工することを原則としている。しかし、杭の配置によっては後行杭の打設までに3日以上かかるケースがある。このような場合、先行杭の強度発現が大きくなり、一体性の保持が難しくなり、せん断耐力の低下や遮水機能の低下の原因となる可能性があった。

これを防止するために従来は、後行杭をセメントスラリーの吐出なしで施工(空打ち)し、先行杭とのラップ交差部をあらかじめ乱しておくなどの処置を行っている。しかし、今回の工事では、施工効率の向上により、片側からの連続施工で、休日1日を挟む以外はすべて24時間以内でラップ交差部の施工を行うことができた。

外周部改良土壁の掘出し状況を写真-3に示す。掘出した側面を観察した結果、ラップ交差部または1セット内に漏水は認められなかった。4軸処理機による施工は、ラップ交差部自体も半分になることから、止水に対しても有利である。

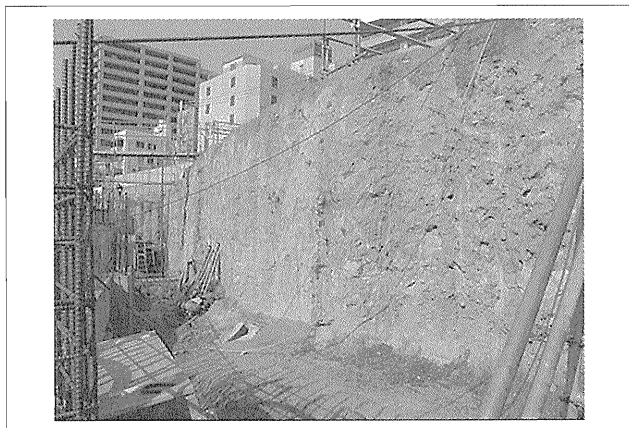


写真-3 改良土壁

3. 方向制御システム (パペット工法)<sup>3)</sup>

(1) システムの概要

方向制御システムは、2軸モータ下端に取付けられ方向制御のための引き力を発生させる油圧ジャッキ、ジャッキの引き力を連結軸受に伝達するワイヤ、地中における攪拌翼の現在位置をリアルタイムに検出する3次元ジャイロセンサおよび管理室内に設置する施工管理システムから構成される。

方向制御は、モニタにリアルタイムで表示される攪拌翼の軌跡にもとづき油圧ジャッキを適宜操作するこ

とで行う。油圧ジャッキの引き力を連結軸受に伝達するワイヤは、引張り荷重による伸びが生じないことからPC鋼より(撚り)線を採用した。また、腐食対策として外周をポリエチレン被覆とした。方向制御システムの構成を図-4に、油圧ジャッキとワイヤの仕様を表-3に示す。

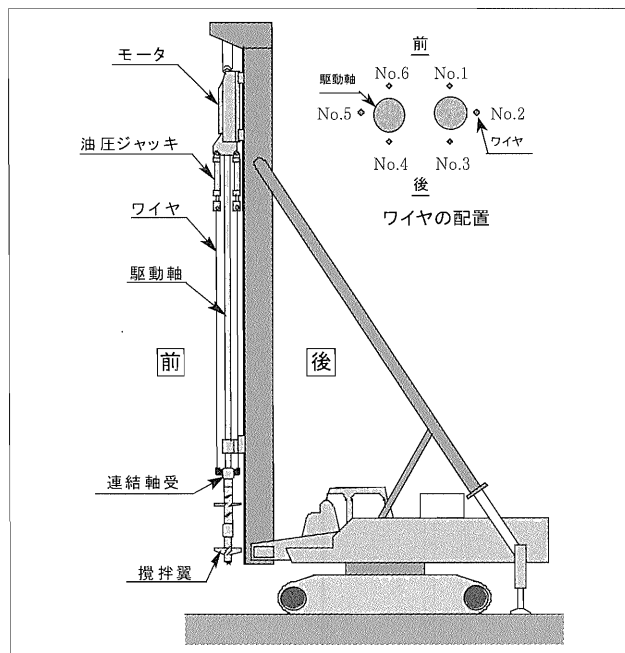


図-4 方向制御システム

表-3 油圧ジャッキとワイヤの仕様

|        |      |           |                         |
|--------|------|-----------|-------------------------|
| 油圧ジャッキ | 前後方向 | 本数<br>引き力 | 前後各2本、計4本<br>Max 200 kN |
|        | 左右方向 | 本数<br>引き力 | 左右各1本、計2本<br>Max 340 kN |
| ワイヤ    | 前後左右 | 外径        | 35.6 mm                 |

(2) 実工事への適用

(a) 施工概要

対象工事は、株式会社竹中工務店新社屋建設工事(東京都江東区)の基礎工事である。建屋基礎には「TOFT併用パイルド・ラフト基礎」という複合基礎工法が採用されており、方向制御システムは、同工法を構成する「TOFT工法(耐液状化格子状深層混合処理工法)」に適用した。施工条件を表-4に示す。

対象地盤は、表層が瓦礫混じりの埋設土、GL-9m付付近までは含水比の高いシルト質細砂、それ以深は粘

表-4 施工条件

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| 改良長     | L=11.2 m                |
| 設計基準強度  | 1,800 kN/m <sup>2</sup> |
| セメントの種類 | 高炉セメントB種                |
| セメント添加量 | 175 kg/m <sup>3</sup>   |
| 水セメント比  | 80%                     |

着性に乏しい粘土質シルトと砂質シルトの互層である。

方向制御を行った施工総本数は73セットである。

また、精度確認のため着色杭を1セット施工した。

#### (b) 鉛直精度

施工完了後、鉛直精度確認のため着色杭と一般杭のラップ交差部を大口径ボーリング（外径220mm）した。ボーリング完了後、孔曲がり測定器によるボーリング孔計測とボアホールカメラによる孔壁撮影を行った。軌跡管理システムの計算結果と孔壁の画像展開図から推定した先端軌跡および施工時の油圧ジャッキの操作状況を図-5に示す。

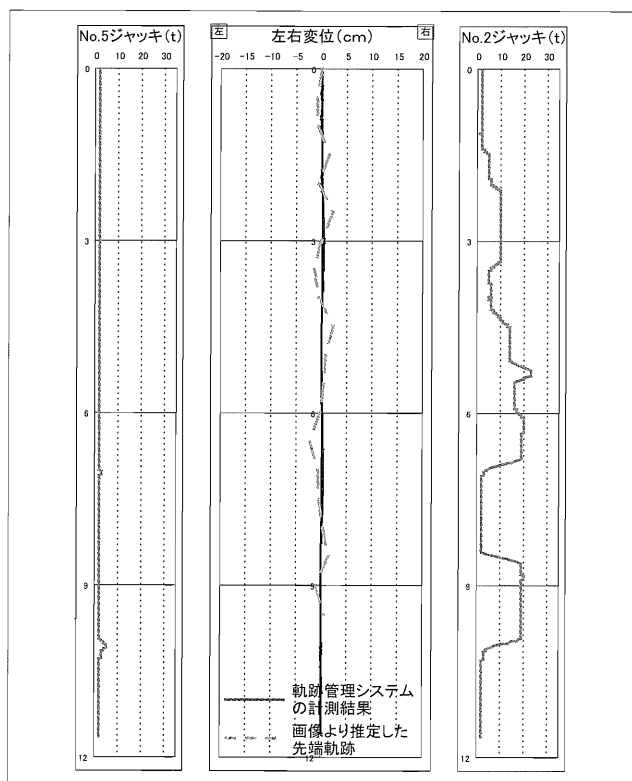


図-5 先端軌跡の比較

図-5より、軌跡が左方向へ変位するのを抑えるため、右ジャッキ（No.2）を操作した結果、先端軌跡がほぼ鉛直に制御されたことが分かる。また、油圧ジャッキの最大引力は230kNであった。軌跡管理システムの計算結果と計測した鉛直変位を比較すると、ほぼ±3cm以内で一致しており、施工深度にかかわらずに方向制御が可能であることが分かる。

#### (c) 施工効率

方向制御を実施した73セットの施工期間は、7日間であった（1セットは载荷試験用）。1日当たりの施工数は、空掘りは含まないで平均で10.3セット/日、最大で13セット/日であった。施工時間は、平均で約29分/セットで、方向制御を行っても標準施工の28分/セット（貫入12分、先端処理4分、引抜き12分）

と同等であった。

また、貫入時のジャッキの操作は、処理機の運転・操作に影響していないことをオペレータより確認できた。

#### (d) 施工品質

ボーリング採取したコアの1軸圧縮試験結果は、平均で3,000kN/m<sup>2</sup>で、設計基準強度の1,800kN/m<sup>2</sup>を上回った。

このことから、方向制御用の装置類（ワイヤ、連結軸受、信号線保護管）は、改良杭の施工品質に悪影響を及ぼさないと判断した。

## 4. 土壌浄化（DCM-e工法）<sup>4)</sup>

### (1) 浄化工法の概要

本工法は、土壌のVOC（揮発性有機化合物）汚染部まで処理機を貫入させ、攪拌翼先端から浄化材を吐出し、汚染土壌と浄化材を均一に混合することで土壌浄化を行う工法である。また、攪拌・混合による地盤強度の低下には、浄化材とともに混合する固化材で強度を回復させる。図-6に施工方法の概要を示す。

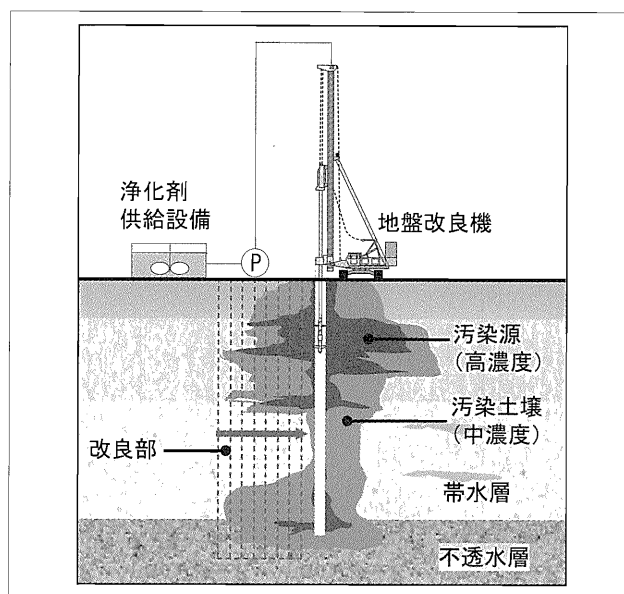


図-6 土壌浄化工法（DCM-e工法）

汚染部の浄化は、中濃度VOC汚染（環境基準の百倍程度以下）の場合、「還元+固化」処理で行う。高濃度VOC汚染（環境基準の数万倍程度）の場合は、事前処理として過酸化水素による酸化処理を行い、汚染濃度を中濃度まで低下させた後に、「還元+固化」処理を行い環境基準レベルまで低下させる。

高濃度VOC汚染の場合、従来の金属系還元剤を用いると6カ月程度の浄化期間を必要とされていたが、事前処理することで1~3カ月の浄化期間で可能となる。また、地盤強度の回復に使用するセメントは、還元作

用を阻害しにくい低アルカリセメントを使用していたが、金属還元剤に高活性鉄粉を使用することで高炉セメント等の汎用セメントを使用できる。

(2) 実工事への適用

(a) 施工概要

VOCの浸透による汚染された対象地盤は、シルト質粘性土を主体とした地盤であった。浄化対策前の溶出量は、TCE(トリクロロエチレン)が平均7.6 mg/L、最大26.2 mg/L、PCE(テトラクロロエチレン)が平均52.6 mg/L、最大174.4 mg/Lで、汚染深度はGL-12 m、浄化土量は約130 m<sup>3</sup>である。

酸化処理では、触媒に鉄塩(FeSO<sub>4</sub>・7H<sub>2</sub>O)とリン酸を用い、酸化剤には35%過酸化水素を用いた。還元処理として、還元剤には高活性鉄粉を用い、固化材はマグネシア系の低アルカリセメントを用いた。

施工は、酸化処理後に半日~1日程度の反応期間をおいた後に「還元+固化」処理を実施した。その後、チェックボーリングを行い、7日および90日後の溶出濃度と90日後の地盤の1軸圧縮強さを確認した。施工状況を写真-4に示す。

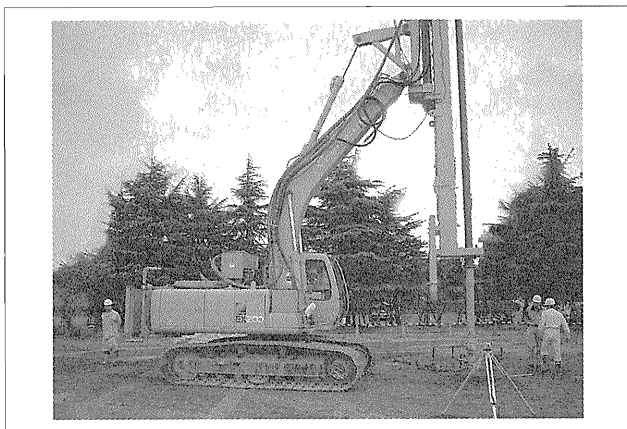


写真-4 土壤浄化状況

(b) 浄化結果

TCE溶出濃度の経時変化を図-7に、PCE溶出濃度の経時変化を図-8に示す。

図-7より、TCEは還元処理直後には環境基準値以下の0.01 mg/Lとなり、90日後には定量限界値である0.0001 mg/Lまで浄化することができた。また、PCEは対策前は環境基準値の約5,000倍の高濃度であったが、酸化処理直後には中濃度程度まで下げることができ、7日後には環境基準値以下の0.005 mg/Lとなった。

また、90日後には平均値で0.0005 mg/Lまで浄化することができ、最大値も0.002 mg/Lと環境基準値以下とすることができた。

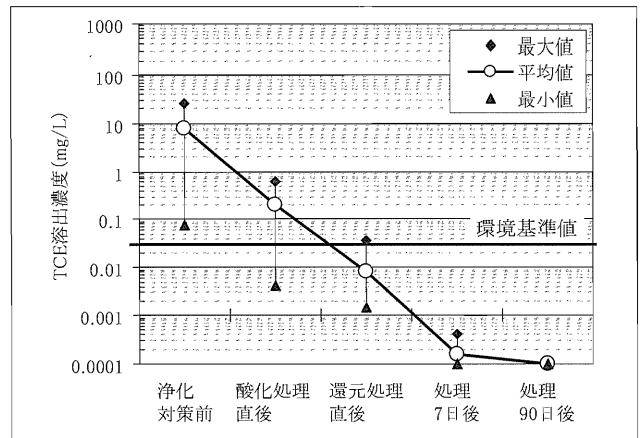


図-7 TCE溶出濃度の経時変化

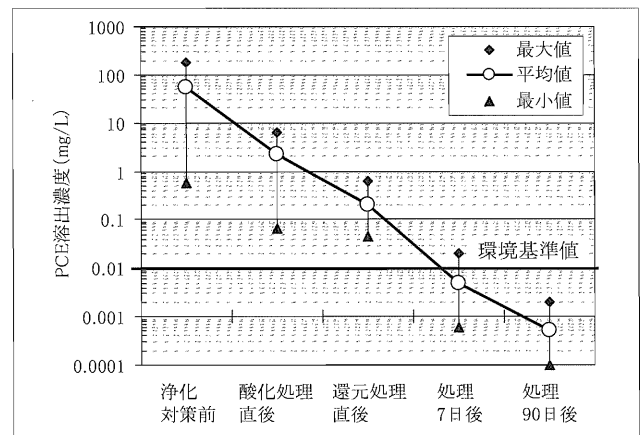


図-8 PCE溶出濃度の経時変化

地盤強度の経時変化を図-9に示す。図-9より、対策前の原地盤の1軸圧縮強さは、平均60.0 kN/m<sup>2</sup>であったが、浄化時の攪拌混合により、約1/10の5.0 kN/m<sup>2</sup>程度まで低下した。しかし、処理90日後には、浄化材スラリーと同時に混合した固化材により平均56.0 kN/m<sup>2</sup>となり、ほぼ原地盤まで回復させることができた。

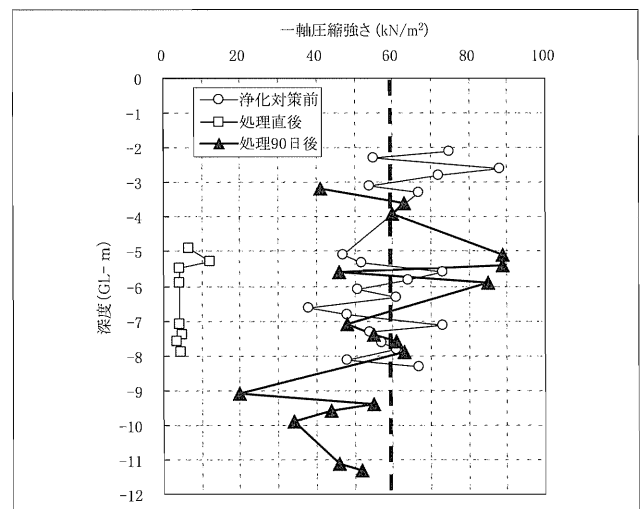


図-9 地盤強度の経時変化

## 《参考文献》

- 1) 栢田ほか：深層混合処理工法における4軸処理機の開発と施工，土木学会全国大会，VI-054，2006
- 2) (財)日本建築総合試験所，建築技術性能証明評価概要報告書 DCM-L 工法，p.55，2004
- 3) 大西ほか：深層混合処理機の施工精度制御装置の実用化，第10回建設用ロボットシンポジウム論文集，pp.363-368，2004
- 4) 近ほか：中・高濃度 VOC 汚染の原位置浄化技術：DCM-e 工法，基礎工，vol.33，No.7，pp.50-52，2005

J C M A

## 5. おわりに

竹中土木で取組んできた新しい技術の概要と適用結果を報告した。結論としては、4軸処理機は、従来と同等の品質が確保できるとともに、軸数が増えた分、施工効率を著しく向上することができた。また、ラップ交差部の一体性確保とラップ箇所数の低減が可能となり、品質的にも有利である。

方向制御システムについては、攪拌翼の先端変位を少なくとも5cm以内で制御することができた。これにより、鉛直精度の向上、ラップ幅低減による産業廃棄物の排出量抑制およびコスト低減が期待できる。

土壌浄化への適用では、TCE、PCE共に従来よりも短時間で環境基準値以下に低下させることができた。また、地盤強度低下に対しても、90日後に原地盤強度にまで回復することが実証できた。

最後に、本工法およびシステムの開発にご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

## 【筆者紹介】

大西 常康 (おおにし つねやす)  
株式会社竹中土木  
工事本部  
機材グループ  
課長



栢田 旬祐 (ますだ しゅんすけ)  
株式会社竹中土木  
西日本機材事業センター  
施工グループ



## 大口径岩盤削孔工法の積算

—平成18年度版—

## ■内 容

- (1) 適用範囲
- (2) 工法の概要
- (3) 岩盤用アースオーガ掘削工法の標準積算
- (4) ロータリー掘削工法の標準積算
- (5) パーカッション掘削工法の標準積算
- (6) ケーシング回転掘削工法の標準積算
- (7) 建設機械等損料表

■A4判 約250頁 (カラー写真入り)

## ■定 価

非会員：5,880円 (本体5,600円)  
会 員：5,000円 (本体4,762円)  
送 料：会員・非会員とも  
沖縄県以外 450円  
沖縄県 340円 (県内に限る)

※学校及び官公庁関係者は会員扱い

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289 <http://www.jcmanet.or.jp>