

# 水平方向の噴射攪拌工法を用いた耐震補強工事

田中 佳利<sup>1</sup>・田中 孝典<sup>2</sup>・伊勢 壽一<sup>3</sup>・本田 幸一郎<sup>1</sup>・影山 雄<sup>2</sup>・加藤 貴代<sup>2</sup>・  
佐藤 弘<sup>4</sup>・長崎 康司<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 清水建設株式会社 土木東京支店 千葉土木営業所（〒260-0015 千葉県千葉市中央区富士見二丁目11-1 日土地千葉ビル8F）

<sup>2</sup>正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 技術計画部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーパンスS館11F）

<sup>3</sup>正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 基盤技術部（〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーパンスS館11F）

<sup>4</sup>ライト工業株式会社 関東支店 施工技術部（〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-35）

<sup>5</sup>ライト工業株式会社 生産事業本部 都市技術環境部（〒102-0073 東京都千代田区九段北4-2-35）

プラント工場内で稼働中の杭基礎構造物に対して、杭頭部周辺の地盤を改良し、耐震性能の向上を行った。対象地盤は細粒分含有率が40%程度の軟弱埋土地盤であり、土被りが非常に浅い部分に位置していた。そのため、薬液注入工法などの一般的な手法を用いた場合、改良体の品質不良や周辺地盤の変状が生じる可能性があった。本件では、対象構造物の近傍に施工した立坑内から、プレジェットを併用した水平方向の噴射攪拌工法を考案したが、その効果を十分に検証する必要がある。そこで現地状況を再現した試験施工を行い、様々な工夫を実施工に展開した。稼働中の構造物に対する耐震対策は、今後社会的ニーズが増加すると予想される。耐震技術向上の一助となるべく、水平方向の噴射攪拌工法に関する報告を行う。

**キーワード：**水平方向改良、排泥、プレジェット、ステップダウン方式、サイクルタイム

## 1. はじめに

千葉縣市原市の臨海工業地域の工場内に所在する構造物に対して、耐震性能の向上を目的とし、基礎杭の頭部周辺地盤の変形係数を飛躍的に向上させる必要があった。対象構造物には稼働中の施設が多数設置されており、周辺地盤には配管基礎などの構造物が複数近接している。また、施設が休止する極めて短期間で施工を行う必要があった。

本工事では、構造物の近傍に施工した立坑内から水平方向に噴射攪拌工法を行った。しかしながら、水平方向の噴射攪拌工法の施工実績は少なく、採用するには複数の問題を解消する必要があった。

本稿では、水平方向の噴射攪拌工法の課題とその問題点を示し、創意工夫を凝らして行った試験施工および実施工の結果について報告・考察を行う。

## 2. 概要

### (1) 工事概要

杭頭部の周辺地盤（深さ：1.7m、幅：12.0m、奥行き：28.0m）を改良し、現地盤の変形係数を

70MN/m<sup>2</sup> に向上させる（図-1 参照）。

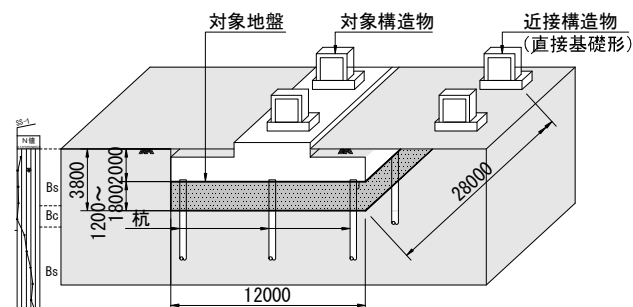


図-1 対象地盤概略図

### (2) 地質概要

対象地盤はN値が0の埋土地盤であり、細粒分が40%以上含まれる軟弱地盤である（表-1 参照）。また、地下水位位置もGL付近と高い。

表-1 対象地盤の構成

| 時代  | 区分  | 記号 | 土質名称     | 出現深度<br>平均GL-(m) | 層厚<br>(m) |                               |
|-----|-----|----|----------|------------------|-----------|-------------------------------|
| 現代  | 埋土  | Bs | シルト混じり細砂 | 0.00 ~ 3.89      | 3.89      | 含水が多く、細粒分含有率が40%程度を有する不均質な土層。 |
|     |     | Bc | 砂混じり粘土   | 3.89 ~ 5.30      | 1.41      | 均質な粘性土であり、粘性に富む。              |
| 沖積層 | 砂質土 | As | 細砂       | 5.30 ~           |           | 粒子均一な細砂であるが、少量の粘土がブロック状に点在する。 |

### 3. 技術的課題および問題点

本工事では、薬液注入工法やアンダーピニング工法による地盤置換案などが当初検討された。しかしながら、薬液注入工法では要求される変形係数の発現が困難であり、アンダーピニング工法では大幅に工期が必要となるため、採用は難しい。そこで、構造物近傍に立坑を施工し、立坑内から水平方向の噴射攪拌工法を行うことで所定の要求品質を確保し、短期間で竣工を図った。

水平方向の噴射攪拌工法における技術的課題および問題点を以下に示す。

#### (1) 周辺地盤の変状防止に向けての問題点

水平方向の改良は、鉛直方向に比べ排泥効率が低下する。排泥効率が改善しない場合、スラリーと排泥の循環が阻害され、地山内の圧力が上昇することになる。この現象が顕著な場合、地山内の圧力が対象箇所に作用する土圧を上回り、最終的に周辺地盤が変状する(図-2 参照)。

特に本工事の対象地盤は細粒分が多く、造成により排泥の比重および粘性が増大し、流動性が著しく低下する危険性が高い。また、対象地盤は土被りが浅いため、作用する土圧は小さい。

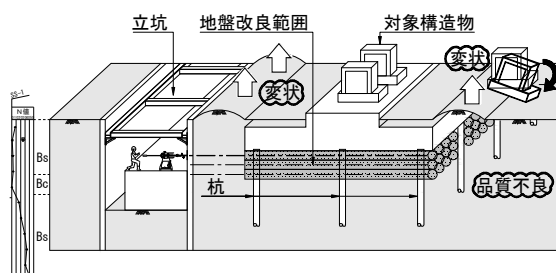


図-2 周辺地盤の変状概略図

#### (2) 改良体の品質確保に向けての問題点

一般的に細粒分含有率が20%を超える地盤に噴射攪拌工法を適用した場合、スラリー噴射による地盤の切削・攪拌効率が悪く、造成能力が低下す

る。その結果、改良体の強度、変形係数、および改良径が要求品質を満足しない危険性がある。

### (3) 施工精度の確保に向けての問題点

本工事では、立坑から水平方向にロッドを挿入して水や固化剤を高圧で噴射し、現地盤の削孔および攪拌を行う。そのため、ロッド重量による先端部のたわみ、および噴射時の振動により、改良体の出来形精度の低下が懸念された。

## 4. 解決策

#### (1) 排泥ルートの確保

##### a) プレジェット工法の併用

水噴射による先行切削(プレジェット)を噴射攪拌に先駆けて行い、排泥の排出ルートを施工機械側から順次造成する(表-2 参照)。

一般的にプレジェットを行った場合、孔壁崩壊が生じる報告例もあるが、本工事のように細粒分含有率が40%を超える地盤では、土粒子の粘着力により地山の自立性がある程度期待できる。

プレジェットの併用による効果として、排泥効率の向上による周辺地盤の変状防止、および改良体品質の向上が期待できる。

##### b) ステップダウン方式の適用

通常プレジェットを併用する場合は、ロッドを所定の位置まで挿入し、引抜きながら地盤を切削する(ステップアップ方式)。しかしながら、ステップアップ方式では、プレジェット時にロッドの引抜きを行うため、ロッドの挿入距離および施工時間が通常の数倍必要となる。

そのため、今回はステップダウン方式でプレジェットを行い、ステップアップ方式で改良体の造成を行うことで、短時間で合理的に改良を行う。(表-2 参照)。

表-2 造成メカニズム

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <p>プレジェット<br/>(ステップダウン方式)</p> |  |
| <p>噴射攪拌<br/>(ステップアップ方式)</p>   |  |

## (2) 特殊ロッドの採用

### a) 改良体の偏芯防止

改良体の偏芯を防止するため、1.0m程度の先導管を装着した特殊二重管ロッドを制作した(図-3参照)。特殊ロッドを設置することで、プレジェット時にはロッドが地盤に挿入される状態になる。その結果、ロッドの自重によるたわみ、造成時の振動による偏芯の防止を図る。

### b) 内部メカニズム

特殊ロッドは二重管構造であり、噴射部と先端部に区分される。両者の結合部には、削孔水と下段噴射ラインとの切替え用圧力弁を取り付けた。

削孔時には、ある一定の圧力以下で送水することで、ロッド先端より送水が可能となり(図-3参照)、一定の圧力以上で送水することで圧力弁が閉塞し、横方向の噴射が可能となる。

特殊ロッドを使用することで、短時間で合理的に改良を行う。

## 5. 試験施工

### (1) 目的

水平方向の噴射攪拌工法は施工実績が極めて少ない。そのため、今回考案した手法の実用性を確認するため、試験施工を実施した。以下に試験施工で確認すべき項目を示す。

- ・対象構造物および周辺地盤への影響程度の確認
- ・品質(改良径、強度、変形係数)(表-3参照)
- ・施工性(排泥量、排泥状況、サイクルタイム)
- ・造成仕様の良否(表-4参照)

表-3 改良体要求品質

| 項目     | 目標値                  |
|--------|----------------------|
| 改良径    | φ700mm               |
| 一軸圧縮強度 | 1.0MN/m <sup>2</sup> |
| 変形係数   | 70MN/m <sup>2</sup>  |

表-4 造成の仕様

| ﾌﾟﾚｼﾞｬｯﾄｽﾍﾞｯｸ |         |        | 噴射攪拌ｽﾍﾞｯｸ            |      |         |        | 挿入速度<br>削孔速度<br>引抜速度<br>(分/ｍ) |
|---------------|---------|--------|----------------------|------|---------|--------|-------------------------------|
| 先端噴射          | 超高圧ﾉｽﾞﾙ |        | ﾐﾙｼﾞｬｯﾄﾉｽﾞﾙ<br>(先端部) |      | 超高圧ﾉｽﾞﾙ |        |                               |
| 30L/分         | 80L/分   | 20 Mpa | 30L/分                | 5Mpa | 50 L/分  | 10 Mpa |                               |
|               |         |        |                      |      |         |        | 4                             |

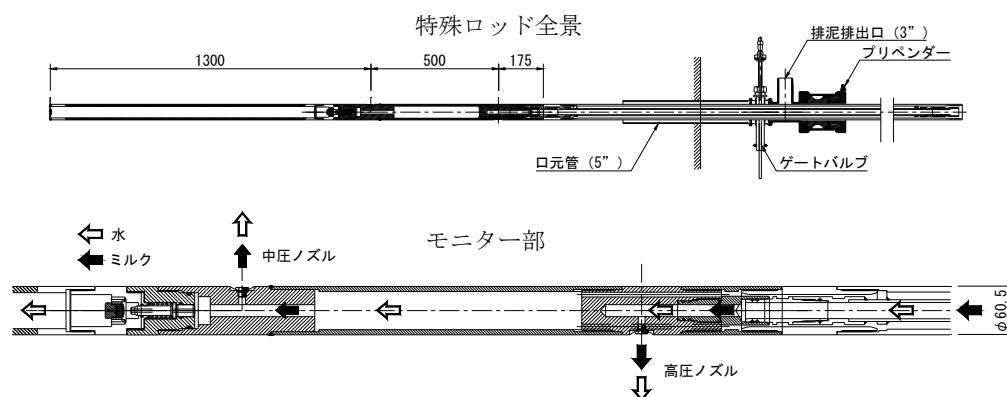


図-3 特殊ロッド詳細図

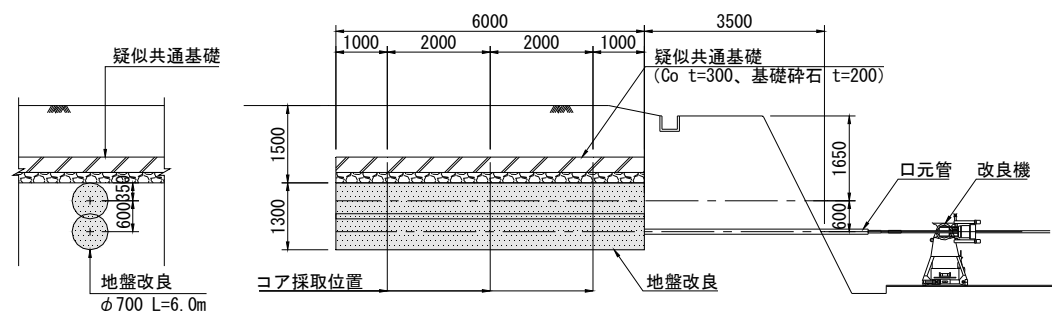


図-4 試験施工概要

## (2) 概要

実施工と同様な地盤条件である場所で、奥行き6.0m、幅12.5mの模擬基礎を構築し実施工環境を再現した(図-4 参照)。この条件下で上下2段の造成を特殊ロッドを使用した場合としない場合で上→下の順で計4本の改良を行う。

## (3) 確認方法

模擬基礎および周辺地盤の変状、排泥効率(排泥量、排泥状況)について、目視確認および計測を行った。要求品質に関しては、試験施工終了後に改良部を掘り起こし、出来形を確認した。更に3箇所の位置で鉛直方向にコアを採取し、一軸圧縮強度および変形係数を確認した(図-7 参照)

## (4) 試験施工結果

全てのケースで周辺地盤への影響を抑制し、所定の要求品質(強度、変形係数、改良径)の確保が可能であった(図-6, 7 表-5 参照)。

一方で、特殊ロッドの採用時と不採用時では施工精度が大きく異なった。特殊ロッドを用いない場合には、偏心量が275mm(水平方向：50mm、鉛直方向：271mm)と非常に大きくなった。



図-6 改良体出来形(特殊ロッドあり)

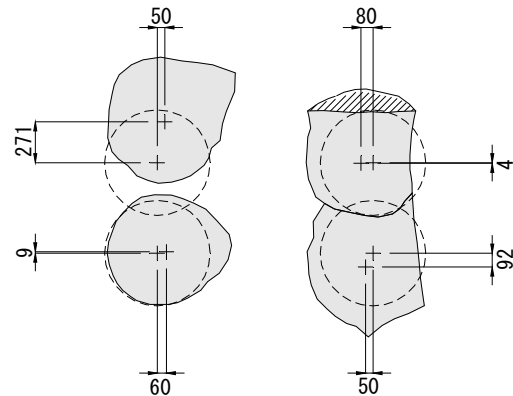


図-7 改良体出来形



図-5 試験施工状況

## (5) 実施工に向けての課題

試験施工の結果から、実施工に向けて解決すべき課題が新たに確認された。課題を以下に示す。

### a) 排泥効率の向上

送液量に対する口元部からの回収量は65～80%程度であり、模擬基礎と改良機設置間の地表面からの排泥の流出も確認された。この流出量と口元部からの回収量を合計しても送液量の100%未満であった。そのため、排泥効率の向上を図る。

### b) サイクルタイムの短縮

実施工では短期間での施工が求められる。その施工時間を試験施工の規模に換算した場合、マシンセットから造成完了までを3時間で行う必要があったが、結果として平均4時間程度を要した。そのため、更なるサイクルタイムの短縮を図る。

表-5 試験施工結果 一覧表

| 仕様          | 施工箇所 | 改良径<br>(mm) | 偏心量(mm) |      | 一軸圧縮強度<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | 変形係数<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | 発生最大変位量(mm) |      | 口元排泥回収率<br>(%) | 施工時間<br>(分) |
|-------------|------|-------------|---------|------|--------------------------------|------------------------------|-------------|------|----------------|-------------|
|             |      |             | 水平方向    | 鉛直方向 |                                |                              | 模擬基礎        | 周辺地盤 |                |             |
| 特殊ロッド<br>なし | 上    | 800         | 50      | 271  | 1.356                          | 321                          | -1          | -1   | 75.0           | 112.0       |
|             | 下    | 700         | 60      | 9    | 2.036                          | 208                          | -1          | -2   | 81.0           | 101.0       |
| 特殊ロッド<br>あり | 上    | 700         | -80     | -4   | 2.936                          | 519                          | -1          | -4   | 65.0           | 153.0       |
|             | 下    | 750         | -50     | -92  | 3.286                          | 407                          | 0           | -2   | 69.0           | 116.0       |

## 6. 実施工

### (1) 工事概要

試験施工の結果を考慮し、実施工の改良体の配置、実施工数量、および概略工程を決定した(図-8, 表-6, 7 参照)。地盤改良に関しては、15日の短期間で計125本(改良延長1,500m)の改良体を立坑から順次施工する。

表-6 実施工工程

| 作業項目     | 延 日 数 |    |    |    |    |    |
|----------|-------|----|----|----|----|----|
|          | 5     | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 準備工      | ■     |    |    |    |    |    |
| 立坑築造工    |       | ■  |    |    |    |    |
| 地盤改良工 仮設 |       |    | ■  | ■  | ■  | ■  |
| 施工       |       |    | ■  | ■  | ■  | ■  |
| 解体・復旧工   |       |    |    |    |    | ■  |

表-7 実施工数量

| 項目     | 計画値                  |
|--------|----------------------|
| 施工数量   |                      |
| 施工本数   | 125 本                |
| 削孔延長   | 1,937.5m (15.5m)     |
| 改良延長   | 1,500.0m (12.0m)     |
| 要求品質   |                      |
| 改良径    | φ 700mm              |
| 一軸圧縮強度 | 1.0MN/m <sup>2</sup> |
| 変形係数   | 70MN/m <sup>2</sup>  |

### (2) 試験施工結果を踏まえた改善点

#### a) 排泥孔の設置

試験施工時には、口元部からの排泥以外に、施工機械と模擬基礎間の地表面に排泥が確認されていた。そこで、排泥効率の向上を目的として、立坑と対象構造物の間に鉛直方向の排泥孔を複数設置し、施工中に排泥孔を増設できるように小型自走式削孔機械を配置した。この排泥

孔を設置することで、口元部以外の排泥回収ルートを確認する(図-9 参照)。

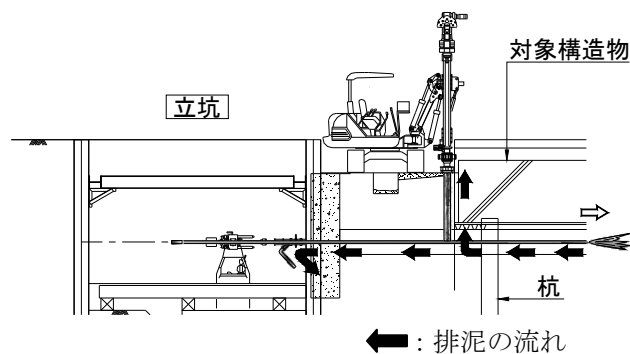


図-9 排泥回収ルート

#### b) サイクルタイムの短縮

試験施工において、各施工ステップに移る切替え時間が想定以上に必要であることが分かった。そのため、ステップダウンの切替えスイッチや、ロッドチャックの自動化など、簡易的な機械改造を施した。その結果、造成1回当たり、210分の短縮が可能となった(図-10 参照)。

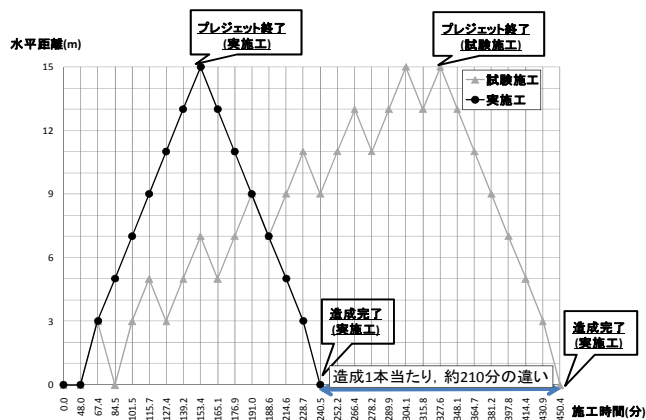


図-10 施工サイクル比較

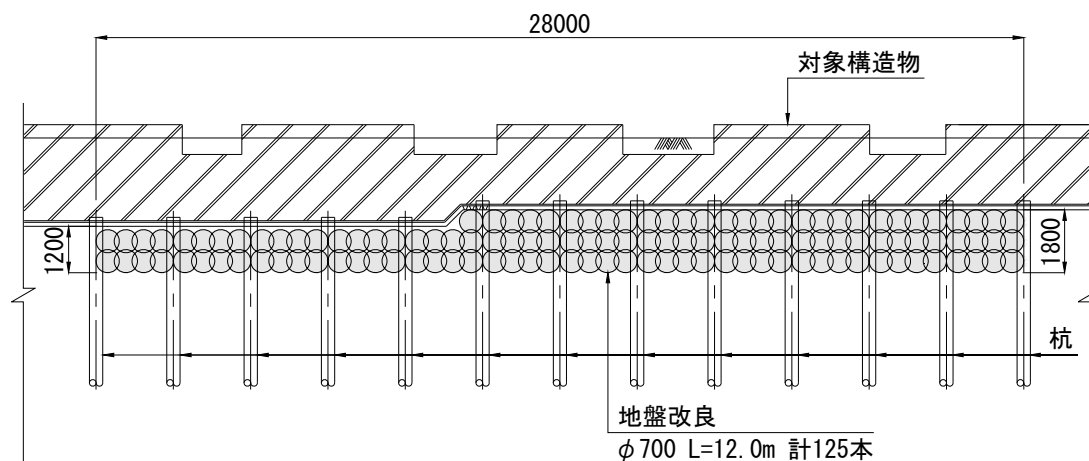


図-8 地盤改良配置図(正面図)

### (3) 施工状況

実施工では工期を考慮し、計 4 台の機械を用いて、昼夜 2 交代制で施工を行った(図-11 参照)



図-11 実施工状況

### (4) 計測管理方法

施工時には、レベルを用いて影響範囲内の既設構造物および基礎周辺地盤の計測を定期的に順次行った。

### (5) 成果

#### a) 排泥効率

プレジェットおよび噴射を行った結果、排泥率(送液量に対する口元部と排泥孔からの回収量の百分率)はほぼ 100%であった(図-12 参照)。



図-12 排泥状況

#### b) 周辺地盤への影響

改良範囲(構造物基礎上)での発生変位量は 0mm であり、変状は生じなかった。一方、周辺構造物で、最大 3mm の隆起が確認されたが、基礎の損傷

は確認されなかった(図-13、表-8 参照)。

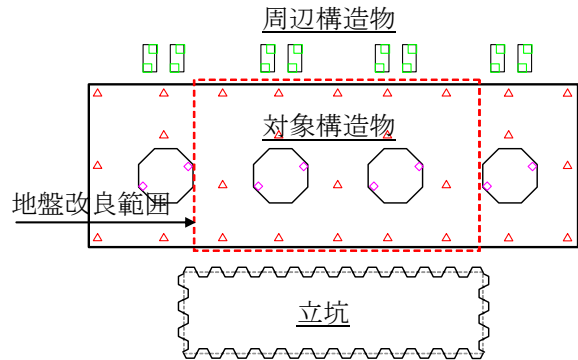


図-13 計測位置

| 測定箇所  | 区分 | 許容値  | 管理値 | 計測値     |
|-------|----|------|-----|---------|
| 対象基礎  | ◇  | 2mm  | 1mm | 0mm     |
| 近接基礎  | □  | 5mm  | 3mm | -1~+2mm |
| 周辺土間等 | △  | 10mm | 8mm | -2~+3mm |

表-8 計測結果

### c) 改良体の品質

ラップ部のコアを採取し、供試体の一軸圧縮強度および変形係数を確認した(図-14 参照)。その結果、改良体は要求品質を十分満足していることが確認された(表-9 参照)。

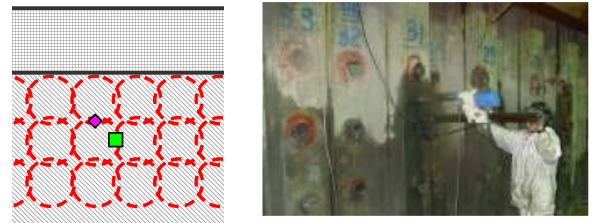


図-14 改良体出来形

表-9 改良体品質

| 採取箇所   | 区分 | 一軸圧縮強度<br>(MN/m <sup>2</sup> ) | 変形係数<br>(MN/m <sup>2</sup> ) |
|--------|----|--------------------------------|------------------------------|
| 鉛直ラップ部 | ◇  | 4.668                          | 1,511                        |
| 水平ラップ部 | □  | 4.678                          | 1,528                        |

## 7. おわりに

当工法は稼働中かつ短期間で対策が求められる既存施設に対して、非常に有効な工法の 1 つであると思われる。しかしながら、採取した供試体の一軸圧縮強度および変形係数は所定値を大きく上回った。今後は配合や施工時間などの改良仕様を合理的に改善し、施工実績数を増加させていく所存である。