

福島県沖地震における静的締固め砂杭工法による改良効果の定量的評価

株式会社不動テトラ 正会員 ○高山 英作 日高 亮 尾形 太  
清水建設株式会社 正会員 若林 雅樹

1. はじめに

静的締固め砂杭工法（以下、SAVE-CP）は液状化対策工法としてこれまで多くの実績を有している。SAVE-CP の改良効果は改良後の調査による液状化判定結果で確認される。併せて地震発生の際、改良地盤上の構造物が地震後も問題なく運用できている等の調査報告などでも証明されている<sup>1)</sup>。しかし、実際に地震を経験した SAVE-CP 改良地盤において、設計時に求められた要求性能と地震により発生した水平・鉛直変位を比較し、改良効果を定量的に評価した事例は少ない。

写真-1 に 2021 年福島県沖地震により噴砂が生じた石油資源開発株式会社（以下、JAPEX）相馬 LNG 基地（以下、相馬 LNG 基地）の状況を示す。相馬 LNG 基地は 2022 年福島県沖地震も経験しており、基地内の SAVE-CP 改良地盤において地震による鉛直変位量（以下、地震後の実測沈下量）を測定した。本稿では、その測定結果から SAVE-CP 改良地盤に求められた要求性能「液状化時沈下量 $\leq 20\text{cm}$ 」と、地震沈下量を比較した結果を報告する。

2. SAVE-CP 改良概要

相馬 LNG 基地は相馬港 4 号ふ頭に立地する大型の LNG 基地である。敷地は 2000 年頃に埋立て完了した旧埋立地と 2016 年に埋立て完了した新埋立地に大別され、新埋立地に位置する相馬 LNG 基地 No.2LNG タンクと福島ガス発電株式会社（以下、FGP）福島天然ガス発電所（以下、福島天然ガス発電所）の大部分はサンドコンパクションパイルにより液状化対策がなされている（図-1 参照）。地盤は砂主体の埋立地盤で、平均 N 値 7 程度の液状化層が存在する。今回、報告対象とする箇所は新埋立地の北西側に位置する No.2LNG タンクと将来スペースとする。

No.2LNG タンクは 2017 年に表-1 に示す改良仕様、要求性能に基づいた SAVE-CP 工事を施工している。

3. 地震概要

図-2、表-2 に 2021,2022 年に発生した福島県沖地震において、防災科学技術研究所の K-NET 相馬で得られた地震波データ<sup>2)</sup>を示す。K-NET 相馬は相馬 LNG 基地から約 4km の南西側に位置している。最大加速度の EW 成分は 2022 年が  $728\text{cm/s}^2$  であり、2021 年の EW 成分  $555\text{cm/s}^2$  の 1.3 倍程度大きい。これより、2022 年地震は 2021 年地震より地震加速度が大きく、液状化がより発生しやすい状況であった。また設計時のレベル 2 水平震度  $kh=0.48$  であったことからレベル 2 地震（以下 L2 地震）であった。

キーワード 液状化，サンドコンパクションパイル，地盤変位

連絡先 〒980-0803 宮城県仙台市青葉区国分町 1-6-9 株式会社不動テトラ 東北支店 TEL022-262-3411



写真-1 被害事例（2021 年地震時）



図-1 相馬 LNG 基地および福島天然ガス発電所

表-1 SAVE-CP 改良概要

| 改良対象 | Fs(埋立土) N値2~33                                       |                                                | 改良体配置 |
|------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------|
| 改良仕様 | 改良ピッチ $2.5\text{m}\times 2.5\text{m}$ 改良率 $as=6.1\%$ |                                                |       |
| 改良仕様 | SD部 $\phi 400\text{mm}$ 改良長（平均） $=2.0\text{m}$       | CP部 $\phi 700\text{mm}$ 改良長（平均） $=9.0\text{m}$ |       |
| 設計指針 | 製造設備等耐震設計指針（JGA 指-101-14）                            |                                                |       |
| 要求性能 | 液状化時沈下量 $\leq 20\text{cm}$                           |                                                |       |

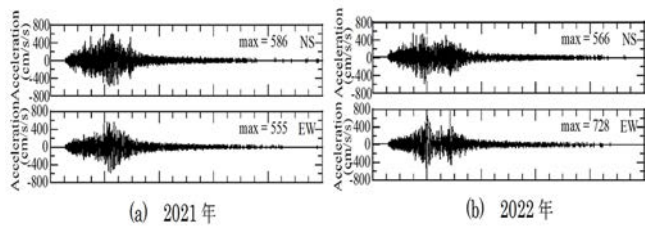


図-2 K-NET 相馬で観測された加速度波形

表-2 K-NET 相馬観測記録諸元

| 地震発生日           | 最大加速度<br>( $\text{cm/s}^2$ ) |     | 水平震度<br>kh |      | マグニチュード<br>M | 最大震度 |
|-----------------|------------------------------|-----|------------|------|--------------|------|
|                 | NS                           | EW  | NS         | EW   |              |      |
| 2021/2/13 23:07 | 586                          | 555 | 0.60       | 0.57 | 7.3          | 6強   |
| 2022/3/16 23:36 | 566                          | 728 | 0.58       | 0.74 | 7.4          | 6強   |

4. 沈下量について

4.1 SAVE-CP 改良による予測沈下量

図-3 に SAVE-CP 地盤改良効果確認ボーリング位置と地震後の実測沈下量測定位置を、表-3 に SAVE-CP 改良後の L2 地震時の予測沈下量を示す。この改良後の予測沈下量は「製造設備等耐震設計指針<sup>3)</sup>」に基づき測定位置 F11~F16 (図中●印) の液状化判定で求めた液状化抵抗率  $F_L$  値と液状化に伴い生じる体積ひずみ  $\varepsilon_v$  の関係から算出した値である。

F11~F16 の全地点において SAVE-CP 改良後の予測沈下量  $\leq 20\text{cm}$ 、平均  $13.8\text{cm}$  となり、要求性能を満足した。また、図-4 に SAVE-CP 改良効果比較図を示す。F11~F16 の実測平均 N 値は改良前で 7.0、改良後で 15.4 と向上し、SAVE-CP の改良効果が確認された。

4.2 2021,2022 年地震による実測沈下量

表-4 に図-3 に示す各測定位置で得られた地震後の実測沈下量を示す。No.2LNG タンク沈下量測定位置 1~4 (図中◆印) はタンク基礎版下の空隙<sup>4)</sup>を、配管基礎沈下量測定位置 5~7 (図中■印) は直接基礎の天端、改良範囲外の将来スペース沈下量測定位置 a~i (図中×印) は原地盤で測定した。なお、改良範囲内の測定位置 1~7 は各構造物基礎の設計地盤高に対する 2021,2022 年地震での実測沈下量を、改良範囲外の測定位置 a~i は 2022 年地震後の地盤面の実測沈下量を測定している。

2022 年地震後の改良範囲内の平均累計沈下量は約  $7.9\text{cm}$  であった。また、改良範囲外の平均沈下量が  $26.9\text{cm}$  であったことから、地盤改良によって沈下を約 30%に抑制できており、SAVE-CP による改良効果が確認できた。また、改良範囲内の平均沈下量は 2021 年地震で  $3.6\text{cm}$ 、2022 年地震で  $4.3\text{cm}$  と 2022 年地震の方が  $0.7\text{cm}$  大きい。これは 2022 年地震が 2021 年地震と比較して、地震加速度が大きい地震であったことが要因だと考えられる。

4.3 予測沈下量と地震沈下量の比較

設計時の L2 水平震度  $kh=0.48$  で予測された改良後の予測沈下量  $13.8\text{cm}$  と比べ、実地震による実測沈下量は各地震において  $3.6\text{cm}$  (26%)、 $4.3\text{cm}$  (31%) と小さかった。なお 2 回の累計沈下量  $7.9\text{cm}$  は予測沈下量の 57%であった。また、2021 年地震の NS 成分での  $kh=0.60$ 、2022 年地震の EW 成分での  $kh=0.74$  は、設計水平震度  $kh=0.48$  より大きい。これより設計で想定した地震動より大きい地震動に対しても十分な改良効果を発揮したと考えられる。

5. まとめ

- 大地震を 2 回経験した SAVE-CP 改良地盤の予測沈下量と実測沈下量を比較した結果、以下の事項が確認された。
- ・改良率 6.1%の SAVE-CP による改良地盤は、未改良地盤と比べ 2 回の L2 地震の累計沈下量を約 30%に抑制した。
  - ・上記改良地盤の L2 地震時予測沈下量に対し、各地震の実測沈下量は 26%、31%、累計でも 57%と小さかった。

○謝辞：本稿の発表を許諾してくださいました JAPEX、FGP の関係者に謝意を表します。

参考文献 1)原田健二：沿岸地区の液状化対策 SAVE コンポーザー -東北地方太平洋沖地震における改良効果-、土木施工、pp54-57、2011. 2)石川ら：2022 年福島県沖地震における相馬 LNG 基地構内に敷設したグラベルサポートの液状化被害低減効果、清水建設研究報告、pp55-62、2022. 3)日本ガス協会：製造設備等耐震設計指針 JGA 指-101-12、pp259-261、2012. 4)橋本ら：2021 福島県沖地震における LNG タンク基礎版下の地盤沈下について、令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会、IV-46、2022.

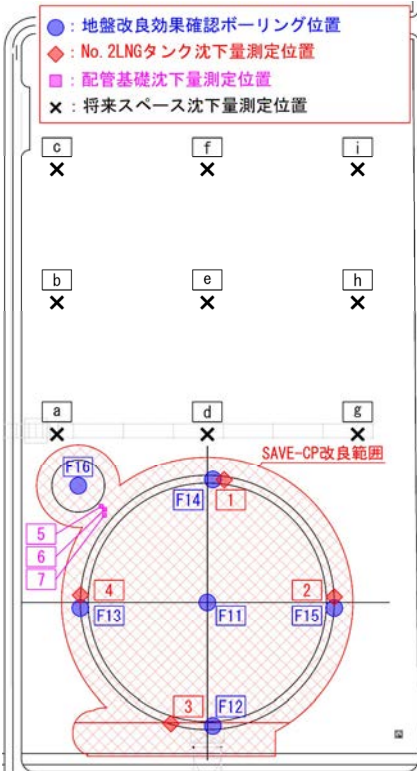


図-3 地盤改良効果、実測沈下量測定位置

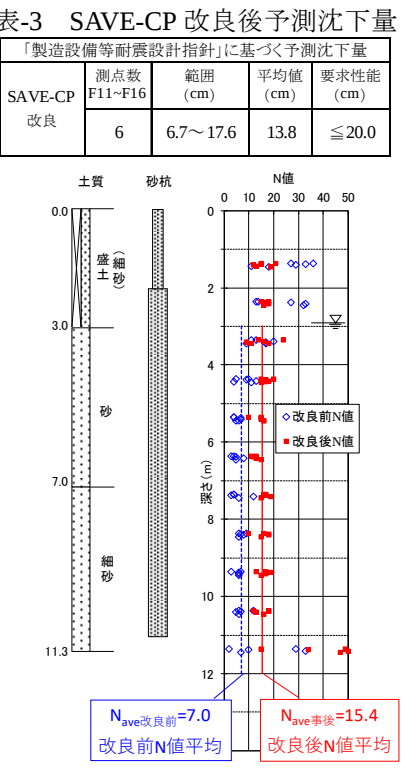


図-4 SAVE-CP 改良効果比較図

表-4 地震後の実測沈下量まとめ

| SAVE-CP改良範囲内       |    |    |                          |                          |                   | SAVE-CP改良範囲外 |    |    |                          |      |
|--------------------|----|----|--------------------------|--------------------------|-------------------|--------------|----|----|--------------------------|------|
| 測定位置               | 測点 | 凡例 | 2021年地震<br>実測沈下量<br>(cm) | 2022年地震<br>実測沈下量<br>(cm) | 累計<br>沈下量<br>(cm) | 測定位置         | 測点 | 凡例 | 2022年地震<br>実測沈下量<br>(cm) |      |
| No.2<br>LNG<br>タンク | 1  | ◆  | 2.0                      | 2.5                      | 4.5               | 将来<br>スペース   | a  | ×  | 21.4                     |      |
|                    | 2  |    | 6.5                      | 4.0                      | 10.5              |              | b  |    | 17.0                     |      |
|                    | 3  |    | 6.5                      | 4.8                      | 11.3              |              | c  |    | 32.5                     |      |
|                    | 4  |    | 5.5                      | 5.0                      | 10.5              |              | d  |    | 15.2                     |      |
| 配管<br>基礎           | 5  | ■  | 1.0                      | 5.1                      | 6.1               |              | e  |    | 32.7                     |      |
|                    | 6  |    | 2.4                      | 4.4                      | 6.8               |              | f  |    | 31.0                     |      |
|                    | 7  |    | 1.5                      | 4.1                      | 5.6               |              | g  |    | 34.9                     |      |
| 平均                 |    |    | 3.6                      | 4.3                      | 7.9               |              | h  |    |                          | 36.2 |
|                    |    |    |                          |                          |                   |              | i  |    |                          | 21.0 |
|                    |    |    |                          |                          |                   | 平均           |    |    | 26.9                     |      |

将来スペースは2022年地震後の  
実測沈下量のみ測定している→

将来スペースは2022年地震後の  
実測沈下量のみ測定している→