

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1354 August 2019

隆起抑制型 CPG 工法の開発

佐々 真志・山崎 浩之・小西 武・足立 雅樹・新坂 孝志・竹之内寛至
諸橋 弘樹・斎藤 英徳・岡田 宙・高田 圭太・渡邊 慎吾・金子 誓
高橋 但

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 新たなCPG工法(U/D施工)の開発	4
2.1 室内模型実験の概要	4
2.2 実験結果	7
2.3 現場実証実験の概要	10
2.4 現場実験結果と考察	12
3. 隆起抑制メカニズムの検証	14
3.1 U/D施工のメカニズムの考察	14
3.2 地盤の隆起抑制メカニズム	14
4. 施工能率向上の検討	15
4.1 実験概要	15
4.2 実験結果及び考察	16
5. まとめ	18
6. あとがき	18
参考文献	18

Development of a New Compaction Grouting Method with Improved Upheaval Control and Efficacy of Liquefaction Countermeasures

Shinji SASSA*
Hiroyuki YAMAZAKI**
Takeshi KONISHI***
Masaki ADACHI***
Takashi SHINSAKA****
Kanji TAKENOUCI****
Hiroki MOROHASHI****
Hidenori SAITO*****
Hiroshi OKADA*****
Keita TAKADA*****
Shingo WATANABE*****
Chikai KANEKO*****
Tadashi TAKAHASHI*****

Synopsis

The Compaction grouting (CPG) method is one of the liquefaction countermeasures to increase the density of improved ground by injecting mortar statically into the ground. CPG is often adopted just below or near the existing structures, and accordingly ground upheaval often becomes a problem. In this study, a series of model and field experiments were conducted for the purpose of developing a new method which has more efficiency than the conventional construction's upheaval control. The proposed method has proven itself in reducing the ground upheaval quantity by more than 80 %. Furthermore, the results demonstrate that the ground density, K-value and effect of liquefaction countermeasures can be significantly increased by the new Up and Down method (U/D method). Moreover, by using the concept of an equivalent improvement rate, it is possible to predict the upheaval amount and density increase of the improved ground by the new U/D method, thereby facilitating a rational design based on the conventional CPG method. The construction efficiency and upheaval control mechanism of the new method was also examined. It was found that the workability can be improved by using an injection pipe with a tip end tapered shape. The upheaval control mechanism can be explained by the cyclic contraction of the ground due to the up and down of the new CPG method.

Key Words: compaction grouting, liquefaction countermeasure, U/D method

* Head, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department
** Formerly, Distinguished Researcher
*** MIRAI CONSTRUCTION CO., LTD.
**** SANSIN CORPORATION
***** TOKO GEOTECH CORPORATION
***** FUKKEN CO., LTD.
***** ATON Civil Engineering & Technology, Inc.
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5054 Fax : +81-46-844-4577 e-mail:sassa@p.mpat.go.jp

隆起抑制型 CPG 工法の開発

佐々 真志*
山崎 浩之**
小西 武***
足立 雅樹***
新坂 孝志****
竹之内 寛至****
諸橋 弘樹****
斎藤 英徳*****
岡田 宙*****
高田 圭太*****
渡邊 慎吾*****
金子 誓*****
高橋 但*****

要 旨

静的圧入締固め工法（CPG 工法）は、低流動性モルタルを地盤に静的に圧入して地盤の密度を増大させる液状化対策工法である。既設構造物の直下や近傍での適応が可能であることから、様々な港湾・空港域で活用されている。しかし施工にともなう地盤変位、特に隆起が問題であり、その抑制が課題であった。本研究では、新しい圧入方法であるアップダウン施工（U/D 施工）に関する各種の室内模型実験並びに現場実証実験の実施を通じて、隆起抑制効果、改良効果及び液状化対策効果が向上した新たな CPG 工法を開発した。本施工法によると、従来の圧入方式であるボトムアップ施工法に比べて、平均隆起量にして 8 割以上の低減、液状化強度にして 1.5 倍以上の効果が得られた。また実機種を用いた実大規模の現場実証実験の結果、開発した U/D 施工は当該現場で施工が可能であり、従来の CPG 工法と比較して当該地盤の隆起量を最大で 90 %以上低減した。さらに、提案する等価改良率の概念・定量化法を用いることで、U/D 施工による地盤の隆起量及び密度増加量を予測することができ、従来の CPG 工法と同様の設計が可能であることを示した。そして、U/D 施工の今後の実用化に向け、施工能率が良く、隆起抑制できる方法の検討及び隆起抑制メカニズムの検証を行った結果、以下の知見が得られた。(1) 貫入抵抗を低減できる先端テーパ形状の注入管を用いることで、隆起抑制効果を担保し、施工性を向上できる。(2) U/D 施工は少ない繰返し体積で隆起抑制効果と密度増大効果が速やかに発現する。(3) 隆起抑制メカニズムは、U/D 施工に伴う地盤の繰返し収縮で説明できる。

キーワード：静的圧入締固め工法，CPG 工法，液状化対策，隆起抑制，密度増大

* 地盤研究領域動土質研究グループ長
** 元特別研究主幹
*** みらい建設工業株式会社
**** 三信建設工業株式会社
***** 東興ジオテック株式会社
***** 復建調査設計株式会社
***** 株式会社アートンシビルテクノ
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所
電話：046-844-5054 Fax：046-844-4577 e-mail:sassa@p.mpat.go.jp

1. まえがき

CPG工法（静的圧入締固め工法）は注入管より低流動性のモルタルを地盤に静的に圧入して地盤の密度を増大させる液状化対策工法である。本工法は、既設構造物の直下や近傍での適応が可能であることから、東京国際空港をはじめ、様々な港湾・空港域で多くの施工実績を積み重ねている。しかし、CPG工法は、施工に伴う地盤隆起が問題となる場合があり、その抑制が課題である。また、地盤隆起の発生は、締固め効率の低下を招き液状化対策効果を低減させるおそれがあることから、当該課題を克服した新工法の開発が望まれている。

隆起の発生はこれまで、図-1.1に示すような、従来のボトムアップ方式とトップダウン方式の併用や標準打設速度の変更、並びに注入工程を工夫した分散施工やローテーション施工¹⁾により対応してきたが、これらはいずれも施工時間及び工期の長期化に直結することが課題であった。また、近年では、図-1.2に示すように、通常圧入時のポンプ動作を正転と逆転を交互に繰り返すリバース併用方式とすることにより隆起抑制を図っている。

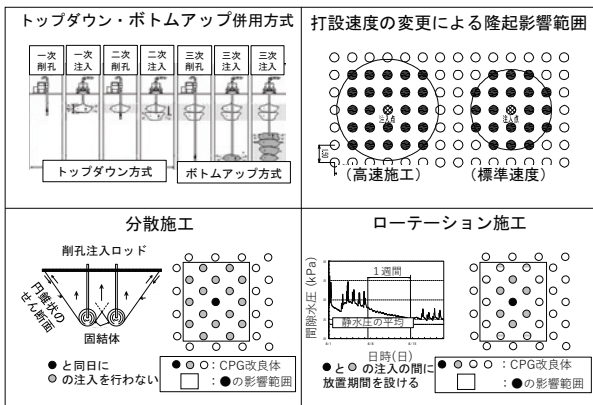


図-1.1 CPG工法の従来の隆起抑制対策

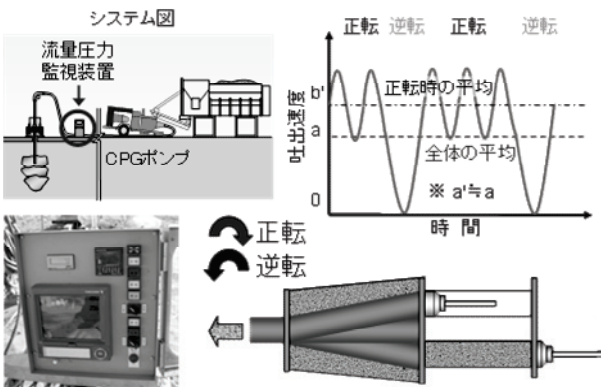


図-1.2 CPG工法の起抑制対策：リバース併用方式

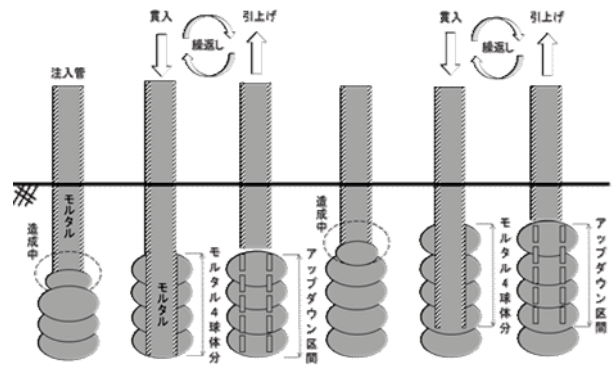


図-1.3 開発したU/D施工のイメージ

しかし、これらの従来の対策では、隆起抑制に限界があるため、抜本的な対策の要請が高まっている。

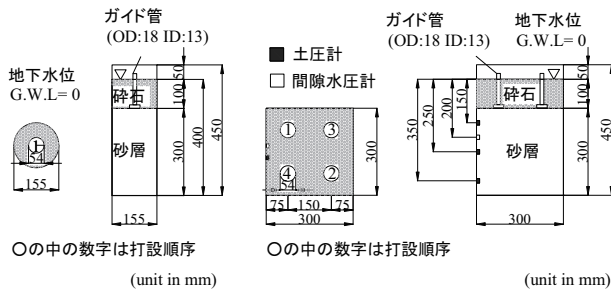
本研究は、従来のCPG工法に比べて、地盤の隆起を大幅に抑制しつつ、かつ、改良効果及び液状化対策効果を向上させた新たなCPG工法：アップダウン施工（以下、「U/D施工」という。）を開発したものである^{2)~6)}。U/D施工とは、圧入したモルタルの中で注入管の貫入・引き上げを繰り返す施工法である。そのイメージを図-1.3に示す。本資料では、まず、新たなCPG工法の開発内容について、円筒形土槽、角型土槽、及び、せん断土槽の3種の土槽を用いた室内模型実験について記し、その後、これらの室内実験結果を踏まえた現場実証実験について記述する。そして、開発した新工法の隆起抑制メカニズムを記述・考察する。また、開発工法の施工能率向上に関する検討についても記載する。

2. 新たな CPG 工法 (U/D 施工) の開発

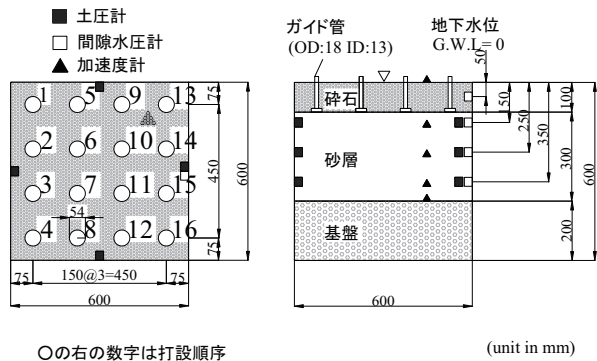
2.1 室内模型実験の概要

本節では、模型地盤、圧入装置、施工方法、測定項目及び実験ケースについて述べる。本実験では円筒形土槽 ($\phi 155 \text{ mm} \times H450 \text{ mm}$)、角型土槽 ($W300 \text{ mm} \times L300 \text{ mm} \times H450 \text{ mm}$)及びせん断土槽 ($W600 \text{ mm} \times L600 \text{ mm} \times H600 \text{ mm}$) の3種類の土槽を用意し、それぞれの土槽中に模型地盤を作製した。各模型地盤中に小型の圧入装置を使用して、実現場の1/10スケールでU/D施工による圧入実験を行った。図-2.1に3種の土槽概要図を示す。

模型実験においては、相似則が問題になる場合がある。力学的相似則は、液状化など対象とする現象によってそれぞれ異なり、CPG工法を地盤に適用した際の力学的相似則は未だ確立されていない。しかし、既往の知見において、CPG工法に関わる室内模型実験を現場との幾何学的相似性を満足した上で実施した場合、当該室内実験の



(a) 円筒形土槽 (b) 角型土槽



(c) せん断土槽
図-2.1 土槽概要図

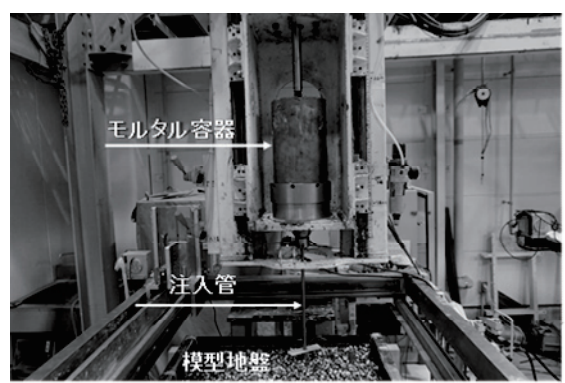
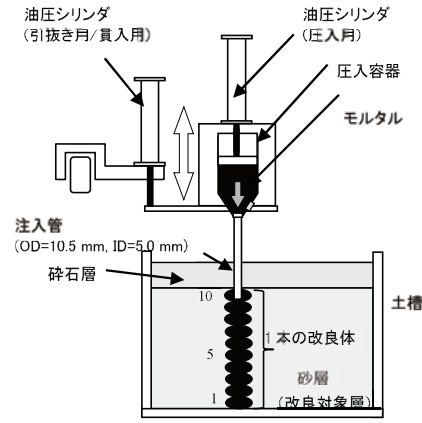


図-2.2 圧入装置模式図及び写真

結果は、現場においても同様に適用可能であることが確認されている^{7),8)}。本研究では、この知見を踏まえ、一連の室内実験を実施した。

(1) 模型地盤

円筒形土槽及び角型土槽の模型地盤は、下位に液状化層（砂層 300 mm）、上位に非液状化層（砕石層 100 mm）の 2 層、せん断土槽は下位に基盤層（砕石層 200 mm）、中・上位は上述と同一条件の液状化層と非液状化層を置いた 3 層で構成した。砂は東北硅砂 7 号（中央粒径 $D_{50}=0.19 \text{ mm}$ 、土粒子比重 $\rho_s=2.62$ ）を、砕石は粒径 10 mm のものを使用した。

模型地盤の作製法は、以下のとおりである。まず基盤層を設置し（せん断土槽のみ）、次に水中落下法にて初期相対密度を 40% に調整して、50 mm ごとに砂層を堆積させた。砂層の天端には、上位の砕石の落下防止のため、不織布を設置した。次に、ガイド管（PVC 製、外径:18 mm、内径:13 mm）を各圧入位置に設置し、最後に砕石を敷設した。地下水位（G.W.L.）は、砕石層の天端とした。

(2) 圧入装置

図-2.2 に、圧入装置の模式図及び写真を示す。本装置は注入管の貫入・引上げを行う機能と、モルタルを圧入する機能をそれぞれ有している。これらの機能では、油圧制御によって、注入管引上げ速度（ $P_u V \text{ cm/sec}$ ）、注入

管貫入速度（ $P_e V \text{ cm/sec}$ ）及び圧入速度を調整することができる。ここで、 $P_u V$ を $P_e V$ で除したものを繰返し速度比と定義した。下記に定義式を示す。

$$\text{繰返し速度比} = \frac{P_u V}{P_e V} \quad (1)$$

(3) 施工方法

まず、従来施工以上の隆起抑制効果を有する U/D 施工方法を確立するために、円筒形土槽中に改良体を 1 本圧入し、隆起抑制効果を検証した。次に、この実験結果を踏まえて角型土槽中に改良体を 4 本、せん断土槽中に改良体を 16 本圧入し、隆起抑制効果及び改良効果について検証を行った。また、せん断土槽では、圧入完了後に加振実験を行い、液状化対策効果について検証した。

図-2.3 に従来施工及び U/D 施工の注入管先端位置の時刻歴の模式図を示す。本研究の 1 本の改良体は、10 個のモルタル球体で構成される。この球体内を注入管が上下に繰返し移動する施工法が U/D 施工である。この際、モルタル圧入時は、上下移動は行わないものとした。

従来施工を示した図-2.3 (a) は、1 つのモルタル球体

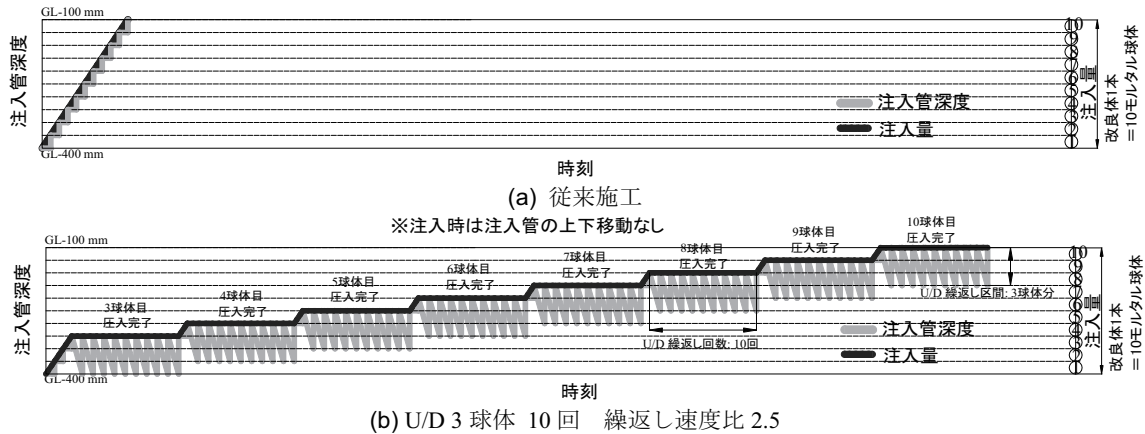


図-2.3 (a) 従来施工と (b) 今回開発した U/D 施工の注入管先端位置の時刻歴の模式図

圧入完了後に、注入管を1区間ずつ引き上げて注入するボトムアップ方式である。

図-2.3 (b) に U/D 3 球体 10 回の施工方法を示す。これは、注入管を上下に動かす1サイクルの U/D の区間長がモルタル 3 球体分であり、かつ1サイクルの注入管往復回数が 10 回であることを意味する施工方法である。

ここで、U/D 施工の注入管先端が上下移動した総移動距離を (ΣL)、注入管断面積を (A) とし、両者の積を“繰返し体積 cyclic volume” (CV) 式 (2a) とした。この CV を初期地盤体積 (V_0) で除したものを“繰返し体積率 cyclic volume rate” (CVR) 式 (2b) とした。また、 CVR と改良率 a_s 式 (2c) が地盤の締固め効果に対して同等の価値があるとし、両者を足したものを式 (2d)により等価改良率 a_{se} と定義した。以下にそれぞれの定義式を示す。

$$CV = \Sigma L \times A \quad (2a)$$

$$CVR = \frac{CV}{V_0} \quad (2b)$$

$$a_s = \frac{\Sigma Q}{V_0} \quad (2c)$$

$$a_{se} = a_s + CVR \quad (2d)$$

ここに、 ΣQ は総注入量である。

(4) 測定項目

(a) 隆起抑制効果

施工によって生じる隆起量は、円筒形土槽では地点隆起量を、角型土槽及びせん断土槽では平均鉛直変位量を測定し、実験ケース間で比較した。地点隆起量は、レーザー変位計のレーザーをガイド管に設置した反射板に施工中連続的に照射して、各注入深度において注入完了時に計測した(図-2.4)。平均鉛直変位量は、土槽平面の改良

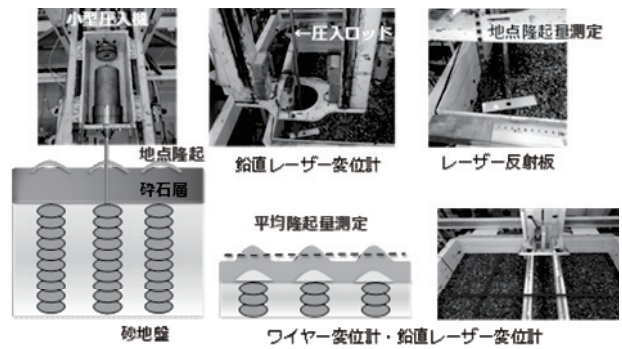


図-2.4 隆起測定方法

体の杭頭及び杭間を通る測線上をレーザー変位計にて計測し、その値を平均したものである。この測定は初期地盤及び圧入1本完了ごとに計測した。

(b) 改良効果

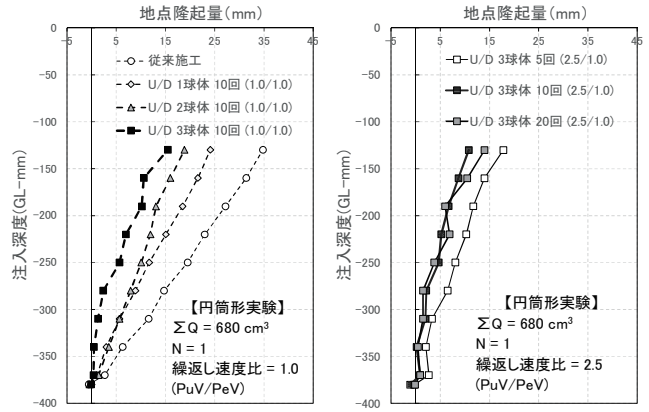
角型土槽及びせん断土槽実験では、模型地盤の壁面土圧及び間隙水圧を計測した。角型土槽の土圧計は、土槽の左壁面の3深度 (GL-150mm, GL-250mm, GL-350mm) に設置した。また間隙水圧計は、左壁面の1深度 (GL-200mm) に設置した(図-2.1 (b))。せん断土槽の壁面土圧計は、4方向(手前, 左, 奥, 右)3深度 (GL-150mm, GL-250mm, GL-350mm) の計12箇所に設置した。また間隙水圧計は、右壁面の4深度 (GL-50mm, GL-150mm, GL-250mm, GL-350mm) に設置した(図-2.1 (c))。

壁面土圧及び間隙水圧から、静止土圧係数 (K_0) を算出した。 K_0 値は、土圧の水平有効応力 (σ'_h) を初期地盤の鉛直有効応力 (σ'_{v0}) で除した値である。以下に式を示す。

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_{v0}} \quad (3)$$

表-2.1 実験内容一覧

	円筒形土槽	角型土槽	せん断土槽
使用珪砂	東北珪砂 7号 ($\rho_s=2.631 \text{ g/cm}^3$, $e_{\max}=1.120$, $e_{\min}=0.609$)		
初期相対密度 D_{r0} (%)	40		
施工方法	従来施工及びU/D施工		
改良範囲 (mm)	$\Phi 155 \text{ mm}$	300×300	600×600
改良長 (mm)	300	300	300
1本当り圧入量 (cm^3)	680	680	680
圧入本数 N (本)	1	4	16
総圧入量 ΣQ (cm^3)	680	2,720	10,880
改良率 (%)	12	10	10
U/D施工の区間長 (球体数)	1,2,3	3	3
U/D施工の往復回数 (回)	5,10,20	3,5,10	5,10
注入管引上げ速度 P_uV (cm/sec)	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5	2.5	2.5
注入管貫入速度 P_eV (cm/sec)	1.0,1.5,2.0,2.5	1.0	1.0
繰返し速度比 (P_uV/P_eV)	0.5,1.0,1.5,2.0,2.5	2.5	2.5



(a) 繰返し区間長の比較 (b) 繰返し回数の比較

図-2.5 注入深度と地点隆起量の関係

(c) 液状化対策効果

せん断土槽における液状化対策効果を検証するために、壁面土圧、間隙水圧及び平均鉛直変位量を測定した。

加振実験の波は、5Hzの正弦波を20波入力した。入力加速度は加振ごとに50Galずつ上げていくステップ加振を行った。また液状化強度は、液状化に至った波数より液状化換算加速度 α_{eq} として下記の式で算出した。

$$\alpha_{eq} = \frac{\text{液状化発生時の波数}}{\text{全波数}} \times 50 + (\text{入力加速度 } \alpha_{eq} - 50) \quad (4)$$

(d) 実験ケース

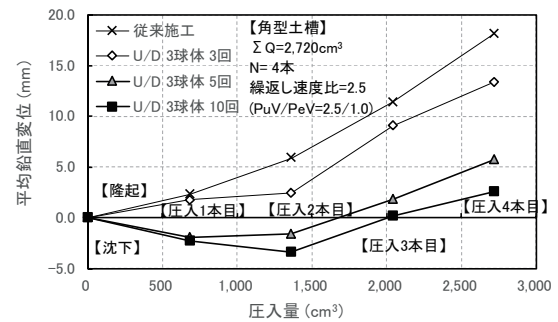
表-2.1に各種パラメータを変化させた実験内容一覧を示す。今回開発したU/D施工の隆起抑制効果、改良効果及び液状化対策効果の違いを検証するために、U/D施工の区間長、往復回数及び繰返し速度比に着目して実験を行った。1本当りの圧入量は 680 cm^3 とし、これに対応して、円筒形土槽実験では、改良率を12%、角型土槽及びせん断土槽実験では改良率を10%で行った。

円筒形土槽実験は、U/D施工の繰返し区間を1球体から3球体、繰返し回数を5回から20回、繰返し速度比を0.5から2.5まで各種パラメータを変化させ、その中で最も隆起抑制に効果がある施工法を検討した。

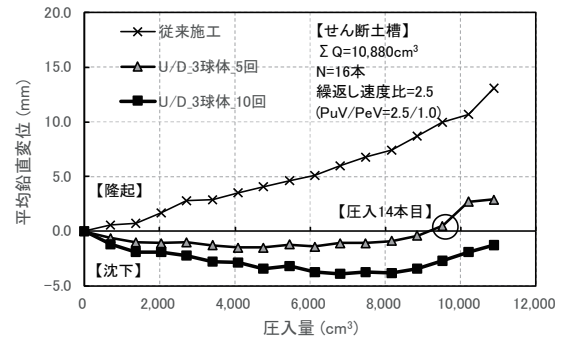
2.2 実験結果

(1) 地点隆起量

図-2.5に円筒形土槽実験における注入深度と地点隆起量の関係を示す。この地点隆起量とは、各注入深度において注入完了時に計測した地表面隆起量を表す。図-2.5(a)はU/D施工の繰返し回数を10回、繰返し速度比を1.0に固定した状態で、U/D施工の繰返し区間長を



(a) 角型土槽 (圧入4本)



(b) せん断土槽 (圧入16本)

図-2.6 圧入量と平均鉛直変位量の関係

変化させた図である。従来施工の地点隆起量は約35mmであった。またU/D施工により隆起対策をした場合は、繰返し区間長が大きなものほど、地点隆起量が小さくなった。図-2.5(b)はU/D施工の繰返し区間長を3球体、繰返し速度比を2.5に固定した状態で、繰返し回数を変化させた図である。全注入完了後の地点隆起量は、繰返し回数10回の施工法が最も小さかった。またU/D3球体10回の繰返し速度比1.0と2.5を比較すると、前者の地点隆起量は約15mm、後者は約11mmであり、繰返し速

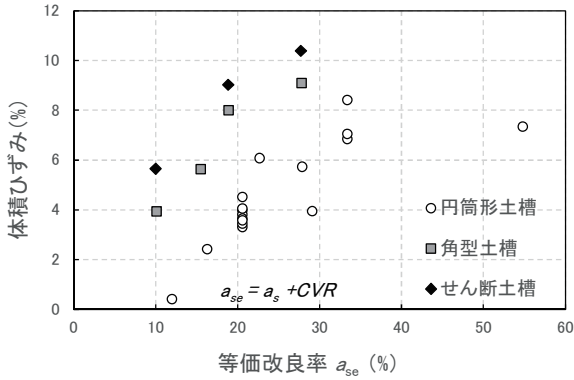


図-2.7 等価改良率と体積ひずみの関係

度比 2.5 の方が、隆起抑制効果が高いことが分かった。

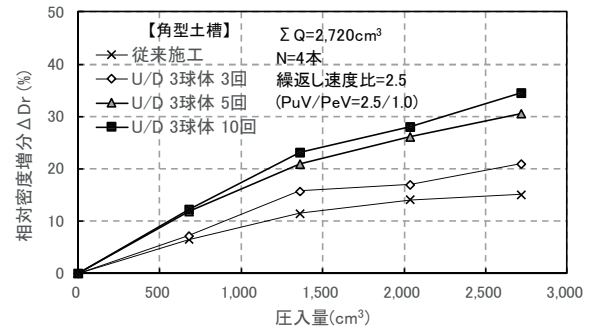
円筒形土槽の各種施工法を検討した結果、隆起抑制に最も効果があったケースは、繰返し区間にして 3 球体、繰返し回数にして 10 回、繰返し速度比にして 2.5 であった。ただし繰返し速度比 2.5 は、本実験における制御可能な限界値に対応している。以降の角型土槽実験及びせん断土槽実験は、上述の円筒形土槽実験の結果に基づき、繰返し区間を 3 球体、繰返し速度比を 2.5 として行った。

(2) 平均鉛直変位量

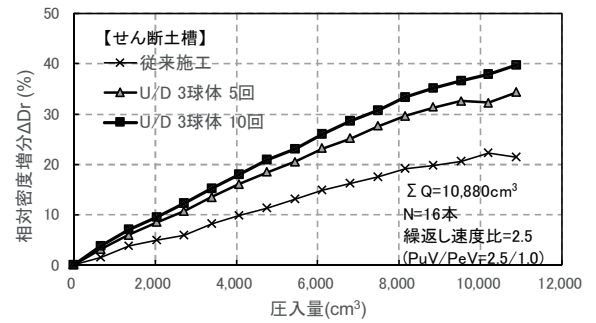
図-2.6 に、角型土槽及びせん断土槽の圧入量と平均鉛直変位量の関係をそれぞれ示す。

角型土槽について示した図-2.6(a) によれば、U/D 3 球体 5 回及び U/D 3 球体 10 回は、圧入 1 本目・2 本目では地盤沈下傾向を示した。これは、U/D 施工による注入管の上下運動が、地盤に注入した体積以上に周辺地盤を圧縮したためと考えられる。しかし、圧入 3 本目・4 本目では隆起に転じており、これは地盤の圧縮限界を超えたためと考えられる。また圧入 4 本完了後の従来施工の平均鉛直変位量は 18 mm、U/D 施工の平均鉛直変位量の最小値は、U/D 3 球体 10 回の 2.5 mm であった。この結果は、U/D 施工により、施工時に発生する隆起量を最大で 8 割以上低減したことを示すものである。

図-2.6(b) は、せん断土槽実験における圧入量と平均鉛直変位量の関係である。従来施工は、施工の進捗に伴い平均鉛直変位量が右肩上がりであるが、U/D 3 球体 5 回では圧入 13 本目まで地盤沈下し、圧入 14 本目から隆起に転じた。U/D 3 球体 10 回については、すべての圧入を終えても隆起が生じなかった。せん断土槽は角型土槽に比べ改良対象体積が大きいこと、また改良率は同じであるが、施工本数が 4 本から 16 本に増えたという違いがある。また土槽サイズの増加により境界の影響が少なく、これらの要因が地盤圧縮の相乗効果を発生させ、

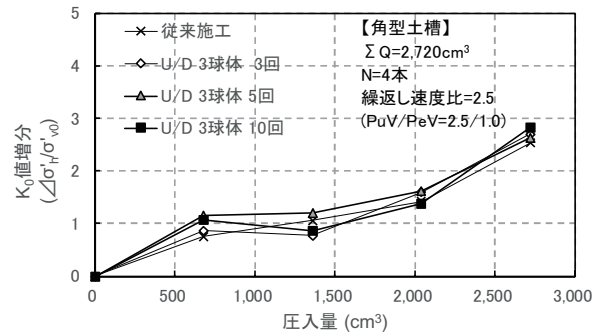


(a) 角型土槽 (圧入 4 本)

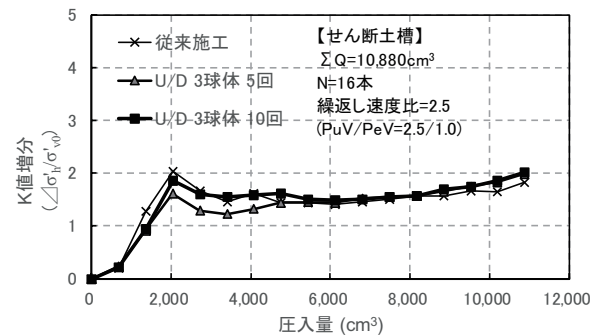


(b) せん断土槽 (圧入 16 本)

図-2.8 圧入量と相対密度増分の関係



(a) 角型土槽 (圧入 4 本)



(b) せん断土槽 (圧入 16 本)

図-2.9 圧入量と K₀ 値増分の関係

最終的に地盤隆起が発生しなかったと考えられる。

図-2.7 に円筒形土槽、角型土槽及びせん断土槽の等価改良率と体積ひずみの関係を示す。体積ひずみとは、注入ともなう地盤の圧縮量 ΔV を初期地盤体積 (V_0) で除した値である。改良率 (a_s) 一定の条件では、繰返し体積率 (CVR) が大きなものほど、体積ひずみが大きくなること分かる。

(3) 相対密度増分

図-2.8 に角型土槽及びせん断土槽の圧入量と相対密度増分の関係を示す。この増分は、初期相対密度を減じた相対密度増分を表している。

図-2.8 (a) は、角型土槽における相対密度増分の図である。従来施工の相対密度増分は約 15%であったが、これに対し最も効果があった U/D 施工は、U/D 3 球体 10 回の施工方法であり、相対密度増分は約 35%であった。U/D 3 球体 3 回、U/D 3 球体 5 回、U/D 3 球体 10 回の施工方法を比較すると、往復回数 (繰返し体積率: CVR) が大きいほど、相対密度増分が大きかった。

せん断土槽について示した図-2.8 (b) によれば、従来施工の相対密度増分は約 20%であった。一方、U/D 施工では、U/D 3 球体 5 回が約 35%、U/D 3 球体 10 回が約 40%増加した。

上述の結果は、U/D 施工の注入管の上下移動を加えることで、地盤に対する締め固め効果が向上し、モルタルを圧入する以上の密度増加が得られることを示している。

(4) K_0 値

図-2.9 に、圧入量と K_0 値増分の関係を示す。各値は、初期の K_0 値を減じた K_0 値増分であり、代表して左側壁面、GL-250 mm の結果を示す。

図-2.9 (a) は、角型土槽の実験結果である。従来施工及び U/D 施工とも、圧入量の増加とともに K_0 値が増加した。最終的な値を見ると、従来施工の K_0 値増分は 2.5、U/D 施工の K_0 値増分は 2.6~2.8 であり、U/D 施工の K_0 値は従来施工と同程度の増加量であった。

図-2.9 (b) は、せん断土槽実験の実験結果である。従来施工及び U/D 施工による K_0 値増分は同程度であった。

上記結果より、 K_0 値増加は改良体を構築することによる横方向の拘束力による増加の影響が大きく、U/D 施工の注入管の上下移動は影響していないと考えられる。

(5) 液状化強度

図-2.10 に、加振前相対密度と液状化換算加速度の関係を示す。本加速度は、従来施工の際の液状化換算加速度で除し正規化したものである。同図から、U/D 施工は、従来施工よりも 1.5 倍以上の液状化換算加速度を示し、特に U/D 3 球体 10 回では、1.8 倍程度の液状化強度の

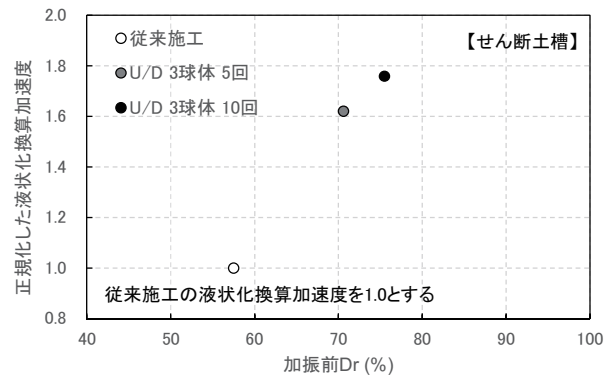


図-2.10 加振前相対密度と正規化した液状化換算加速度の関係

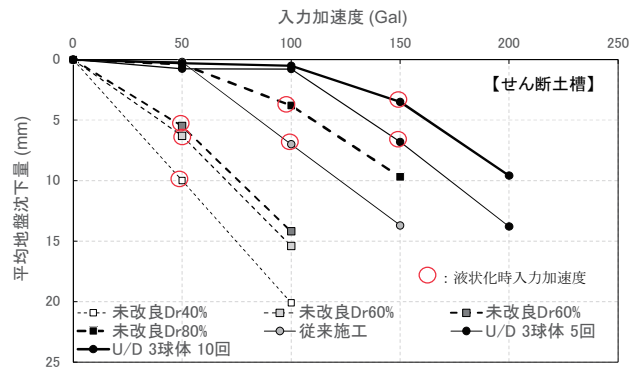


図-2.11 入力加速度と平均地盤沈下量の関係

増加が認められた。

(6) 平均地盤沈下量

図-2.11 に、入力加速度と平均地盤沈下量の関係を示す。赤丸が液状化時を表している。未改良の相対密度 60%程度までの地盤では、加振とともに液状化に至り沈下量が大きくなっている。従来施工は、未改良の相対密度 80%と同じ 100 Gal 程度から沈下量が大きくなっている。U/D 施工では 150 Gal 程度から沈下量が大きくなり、U/D 3 球体 10 回が液状化時の沈下量は最も小さい結果となった。このことは、U/D 施工が、液状化による沈下被害抑制の面でも効果を有することを示している。

(7) 各土槽実験結果の比較

図-2.12 に、最も隆起抑制効果があった U/D 施工である 3 球体 10 回について、円筒形土槽、角型土槽、及び、せん断土槽別に地点隆起量の比較を示している。各実験結果は、9 モルタル球体の注入が完了した時の値であり、比較対象となるボトムアップ施工 (BU 施工) の地点隆起量を併せて示している。角型土槽とせん断土槽の地点隆起量は、注入 1 本ごとに測定した地点隆起量を合計し、

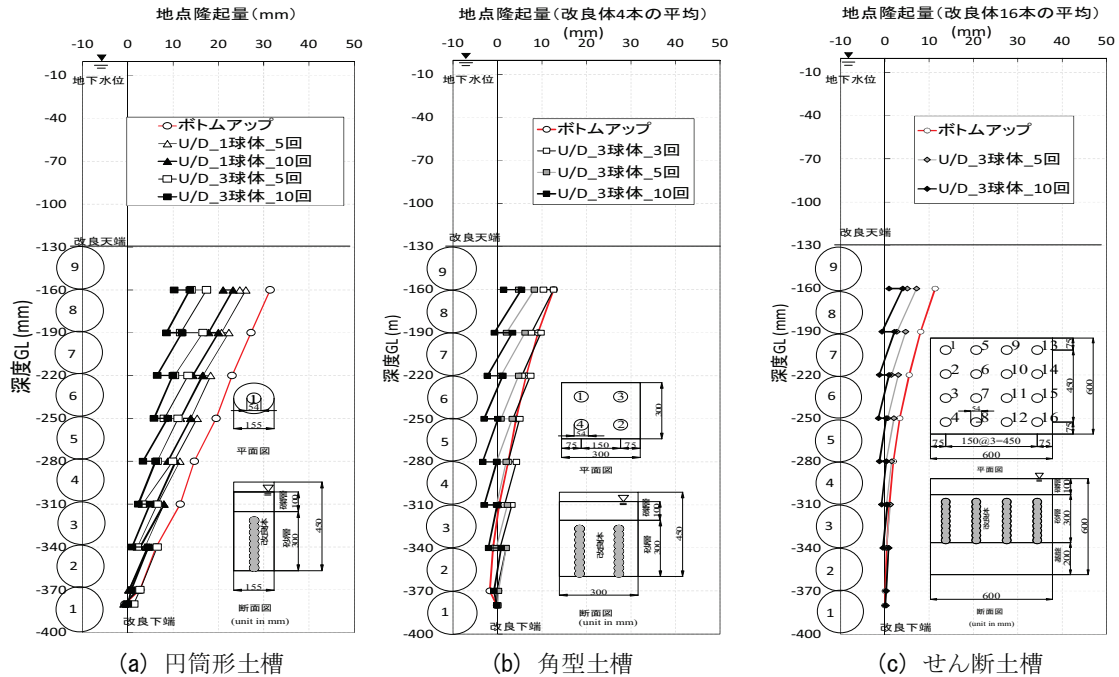


図-2.12 模型実験の各土槽における地点隆起量の深度分布

注入本数で除して得られた平均の値である。本図から、円筒形土槽では、従来のBU施工の隆起量30 mmがU/D施工により10 mmに抑制し、角型土槽では、従来のBU施工の隆起量12.6 mmがU/D施工により1.4 mmと80%以上の隆起量低減を実現している。さらに、せん断土槽では、従来のBU施工の隆起量11.3 mmがU/D施工により0.9 mmと実に90%以上の隆起量低減を達成するなど、土槽サイズの増加と共にすなわち実際の施工条件に近づくにつれて、格段に高い隆起抑制効果が得られていることがわかる。

2.3 現場実証実験の概要

前節では、各種の室内模型実験を通じて、従来のCPG工法のボトムアップ施工（BU施工）と比較して、大幅に隆起抑制効果及び液状化対策効果を向上させた新たなU/D施工を開発した内容について記した。一方、実大規模においては、U/D施工の可否及び室内模型実験と同様

の高い隆起抑制効果を有するかが不明であり、その検証が重要となる。本節では、上述の室内模型実験の結果を踏まえ、実大規模で対応できる実機及び資機材を開発し、現場実証試験を通じて新工法の有効性の検証を行った内容について述べる。

(1) U/D 施工法

図-2.13に現場実証試験で最も隆起抑制効果のあったU/D施工の模式図を示す。具体的には、U/D区間長を4球体、繰り返し回数を10回と設定し、以下の作業手順で現場実験を行った。

- ①先行してモルタル4球体分を注入した。
- ②注入を中断し、この4球体中に注入管を10往復させた。
- ③ステップアップし、1球体分を注入した。
- ④③で注入したモルタル1球体を含む次の4球体に注入管を10往復させた。
- ⑤以降、③及び④の手順を改良天端まで行った。

本作業手順では、U/D区間長が4球体であるため、U/D工程の1～3は、アップダウンのない条件に対応している。

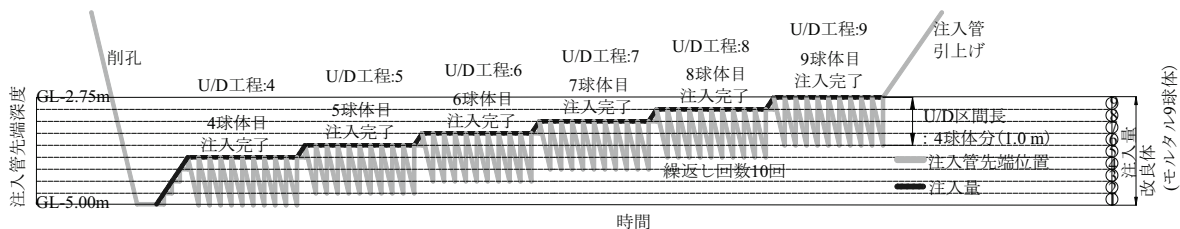


図-2.13 現場実証実験で最も隆起抑制効果のあったU/D施工の模式図

(U/D 4球体10回の施工法、引上げ速度：4 m/min、貫入速度：1 m/min、貫入時の注入管の回転なし)



図-2.14 現場土質柱状図



写真-2.1 実機写真

(2) 土質構成

当該地盤は、地下水位がGL-1.8 m、N値が1~9のシルト混り砂層で構成される(図-2.14)。改良範囲は、GL-2.75 m~5.00 mとし、この範囲に対して1ステップ当り0.25 mの注入長で、モルタルを9球体分注入した。

(3) 使用機械

実機を使用した現場実証実験のU/D施工では、特に実機重量、注入管の回転及び注入管の引上げ速度の3点の性能を考慮した。実機重量は、注入管の貫入時に反力を確保するため、一定以上の重量を確保した。注入管の回転は、注入管の(再)貫入時の抵抗を低減するため必要であった。注入管の引上げ速度は、上述の室内模型実験の結果から、より速いものが高いい隆起抑制効果を有することが分かっており、この知見から、実機による注入管の引上げ速度は、可能な範囲で速く設定した。

写真2.1に、開発した実機を示す。実機種は、CHP-T(Tタイプ)、CHP-TSR(TSRタイプ)及びGI-130C(GIタイプ)の3種類である。Tタイプは、CPG工法で使用される従来型の注入管リフト装置である。使用する注入管の大きさは、外径φ73 mm、内径φ50 mmである。TSRタイプは、U/D施工を可能にするためTタイプを改造して実機重量を重くし、注入管の回転機能を付与した注入管リフト装置である。注入管は、Tタイプと同じものが使用できるようにした。GIタイプは汎用の地盤改良機であるが、現場実証実験のために、実機重量が重く、注入管の貫入・引上げ能力の高い大型の施工機を選定した。またCPG施工に対応した、専用の注入管及びスイベル(注入管と注入ホースとの間にある回転する接合部)を開発した。注入管はGIタイプの標準ロッドと同様の外径φ165 mmとした。注入管の内径はCPG工法の仕様に合わせて、φ50 mmとした。

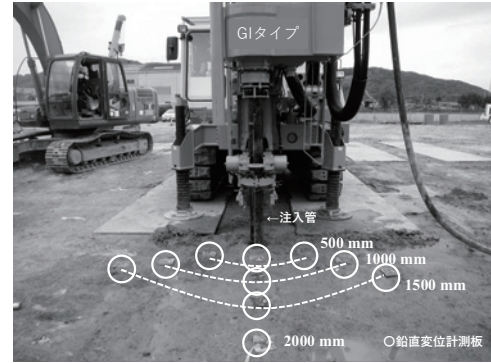


写真-2.2 鉛直変位計測板の設置状況

表-2.2 実機種及び各種パラメータを変化させた現場実証実験一覧

		Tタイプ	TSRタイプ	GIタイプ
		CHP-T	CHP-TSR	GI-130C
試験仕様	使用機械	CHP-T	CHP-TSR	GI-130C
	本体寸法 (L×W×H)	mm 1,370×750×2,000	2,215×1,300×1,190	8,830×2,490×3,050
	本体重量	kg 700	2,950	23,700
	注入管径	mm 外径φ73 内径φ50	外径φ73 内径φ50	外径φ165 内径φ50
	引抜き力	kN 159.7	210	132.5
	貫入力	kN -	144	132.5
	注入管最大引上ストローク長	mm 333	500	5,500
	注入管の最大引き上げ速度	m/min	2	4.5
	土撈り	m 2.75	2.75	2.75
	改良長	m 2.25	2.25	2.25
注入条件	換算改良後	m 0.7	0.7	0.7
	注入量	m ³ 0.963	0.963	1.017
	改良率 (※1)	% 15.4	15.4	15.4
	注入ステップ長	m 0.25	0.25	0.25
	改良体を構成するモルタル数	球体 9	9	9
	注入管引上げ速度	m/min	2	2および4
	注入管貫入速度	m/min	1	1
U/D施工仕様	貫入時の注入管の回転	有/無	有	有および無
	U/D区間長	球体	2	2および4
	繰返し回数	回	5および10	5および10
	施工法		BU施工	BU施工 U/D施工 ・2球体10回 (引上げ2 m/min、回転あり) ・4球体5回 (引上げ4 m/min、回転なし) ・4球体10回 (引上げ4 m/min、回転なし) ・空打ち4球体5回 (引上げ4 m/min、回転なし) ・空打ち4球体10回 (引上げ4 m/min、回転なし)
			U/D施工 ・2球体5回 (引上げ2 m/min、回転あり) ・2球体10回 (引上げ2 m/min、回転あり)	
			5および10	
			5および10	

※改良率は、改良体の平面配置間隔を1.7 mの正三角形配置として算出

(4) 計測状況

本現場実証試験では、1ケース当たり、Tタイプ及びTSRタイプで0.963 m³、GIタイプでは1.017 m³のモルタル9球体分をそれぞれ注入し、施工に伴う地点隆起量並びに注入量及び注入圧力を計測した。

写真2.2に鉛直変位計測板の設置状況を示す。地点隆起量は、鋼製の鉛直変位計測板(計測板)(L150 mm×W150 mm×t6 mm)を設置し、レベル及びスタッフを用

いて計測した。計測板は、注入管から 500 mm, 1,000 mm, 1,500 mm 離れた位置にそれぞれ 3 箇所ずつ、及び注入管から 2,000 mm 離れた位置に 1 箇所に、中心角度が 120° の扇形状に設置した。計測頻度は、各注入ステップの注入完了時及び各 U/D 工程の完了時とした。注入量と注入圧力の計測は、流量圧力監視装置を用い、施工中常時計測した。

(5) 現場実験ケース

表-2.2 に、実機種及び各種パラメータを変化させた現場実験一覧を示す。本現場実験では、まず、T タイプ及び GI タイプを使用して BU 施工を行い、当該地盤における基準となる地点隆起量を計測した。次に、TSR タイプ及び GI タイプを使用して U/D 施工を行った。この U/D 施工の仕様は、はじめに TSR タイプの機械仕様に GI タイプを合わせて、U/D 区間長を 2 球体 (0.5 m)、注入管の貫入速度を 1 m/min、引上げ速度を 2 m/min とした。また TSR タイプは実機重量が 2,950 kg であり、反力の不足から、U/D 施工時に注入管が貫入できない可能性があったため、注入管を回転させながら貫入した。GI タイプも、U/D 区間長が 2 球体の時は、TSR タイプとの条件をそろえるため、同じく注入管を回転させながら貫入した。

次に、GI タイプを使用した U/D 施工では、上述の室内模型実験に近い状態を再現するために、U/D 区間長をより長く 4 球体 (1.0 m)、引上げ速度をより速く 4 m/min 及び注入管を回転なしで貫入させた。さらに U/D 施工の隆起抑制メカニズムを考察するために、GI タイプを使用して空打ち施工を行った。この施工法は U/D 施工のモルタルの注入工程がなく、U/D 工程のみ行う施工法である。

2.4 現場実験結果と考察

(1) 現場実証実験の U/D 施工の可否

図-2.15 に最大注入圧力の深度分布を示す。TSR タイプ及び GI タイプ使用した全ての U/D 施工において、注入管の先端閉塞や急激な圧力上昇によるモルタルの圧送不可が発生せず、常に施工性が確保される結果となった。また U/D 施工の全ケースにおいて、注入管の貫入及び引抜きを、U/D 区間長全体にわたり所定の繰返し回数達成することができた。この結果、U/D 施工は実大規模の現場で施工が可能であることが実証された。

(2) 地点隆起量

図-2.16 (a), (b) に現場実証実験の地点隆起量の深度分布図を示す。本結果は、各モルタル球体の注入完了時の地表面隆起量である。また同地点隆起量は、半径 500 mm の位置で測定した 3 点の地点隆起量の平均を表す。

T タイプを使用した BU 施工の地点隆起量は約 30 mm

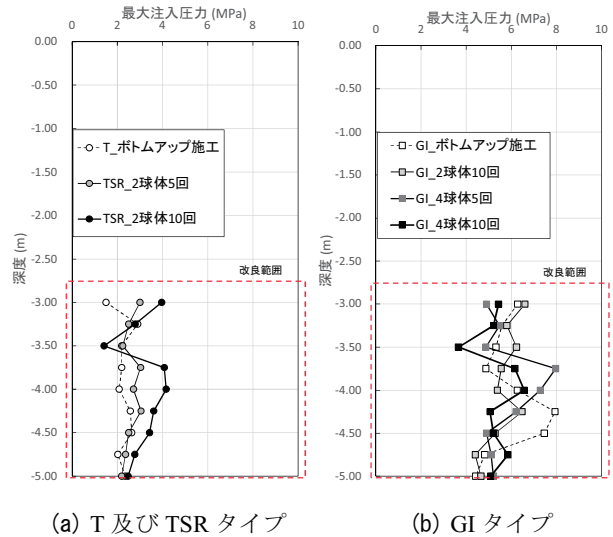


図-2.15 最大注入圧力の深度分布 (現場)

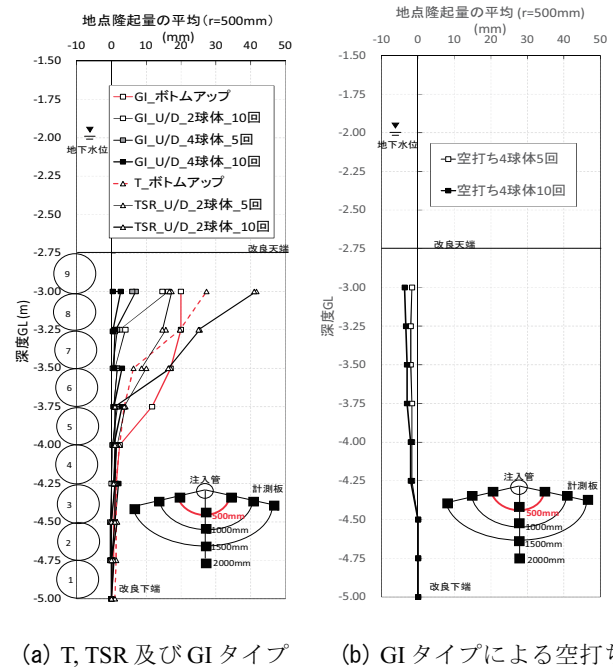


図-2.16 現場実証実験の地点隆起量の深度分布図

であった。TSR タイプの U/D 区間長が 2 球体、繰返し回数が 5 回の施工法 (2 球体 5 回) は、BU 施工と比べて地点隆起量が小さかった。TSR タイプの U/D 区間長が 2 球体、繰返し回数が 10 回の施工法 (2 球体 10 回) は、GL-3.75 m までは隆起は発生していなかったが、GL-3.75 m 地点で施工機の不具合が発生したため、注入管を上げた後、再削孔をした影響で地盤を乱し、これ以浅の深度の隆起量が大きくなった。GI では、BU 施工で最大 20 mm 程度の地点隆起量であったが、U/D 区間長を 2 球体から 4 球体に、かつ繰返し回数を 5 回から 10 回と設定することにより、従来の CPG 工法 (BU 施工) よりも大幅に隆起を

抑制し、地点隆起量は、室内模型実験と同様に 90 %以上の隆起低減を実現した。

図-2.16 (b) は、GI を使用した空打ち施工（モルタル注入なし）の結果である。本空打ち施工によって、沈下（地点隆起量が負）が生じたがその程度は小さかった。したがって、本結果は、砂層中の U/D 工程よりもモルタル中での U/D 工程が隆起低減に寄与していることを示している。

(3) 隆起断面

図-2.17 に現場実証実験における、注入管からの距離と地点隆起量の平均の関係を示す。本図のプロットは、注入管から 500 mm の 3 地点、1,000 mm の 3 地点及び 1,500 mm の 3 地点で計測した地点隆起量の平均並びに注入管から 2,000 mm の 1 地点の地点隆起量を示したものである。各距離の地点隆起量の平均は注入管から離れるほど直線的に減少した。U/D 施工では、注入管径が大きく、等価改良率が大きな GI タイプが、TSR タイプに比べ隆起が少ない結果となった。

(4) 隆起低減率

図-2.18 に GI タイプの施工における繰返し体積と隆起低減率の関係を示す。本図のプロットは、注入管から 500 mm の 3 地点の地点隆起量の平均を用いて算出した。注入管引上げ速度が 2 m/min、U/D 区間長が 2 球体、繰返し回数が 10 回の施工法（2 球体 10 回）では、BU 施工に対して隆起低減率が 25 %であった。また注入管引上げ速度が 4 m/min、U/D 区間長が 4 球体、繰返し回数が 10 回の施工法（4 球体 10 回）では 90 %以上の隆起低減効果があった。2 球体 10 回の施工法と 4 球体 5 回の施工法の繰返し体積は同程度であるが、両者を比較すると、引上げ速度が速く、U/D 区間長が長い 4 球体 5 回の施工法が高い隆起低減率であった。以上のように、U/D 区間長をより長く、引上げ速度をより速くした状態では高い隆起低減率となり、最適な条件下で U/D 施工をした場合、室内模型実験と同様に 90 %以上の地点隆起量の低減が得られた。

(5) 等価改良率を用いた隆起抑制の評価

図-2.19 に室内模型実験における、等価改良率と鉛直変位の関係を示す。図の鉛直変位は、地表面の改良体の杭頭及び杭間を通る測線上をレーザー変位計にて計測し、その値を平均したものである。本図より、各土槽において等価改良率の増加に伴い鉛直変位の平均値が低減し、隆起が抑制される傾向があることが分かった。

図-2.20 に、室内模型実験における等価改良率と相対密度増分の関係図を示す。本実験の模型地盤は、初期相対密度を約 40 %で作製した。本図の相対密度増分は、施

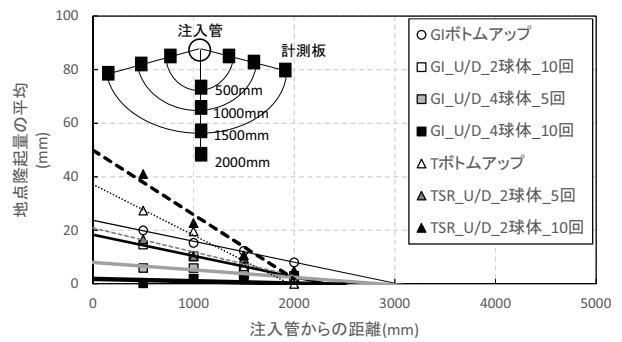


図-2.17 注入管からの距離と地点隆起量の関係（現場）

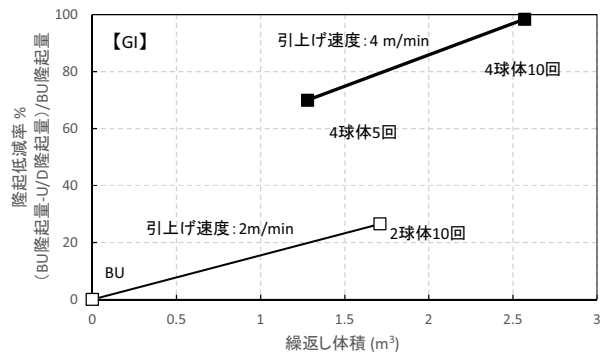


図-2.18 繰返し体積と隆起低減率の関係（現場）

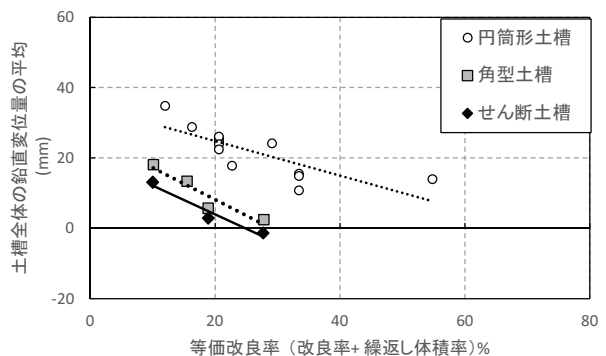


図-2.19 等価改良率と鉛直変位の関係（室内）

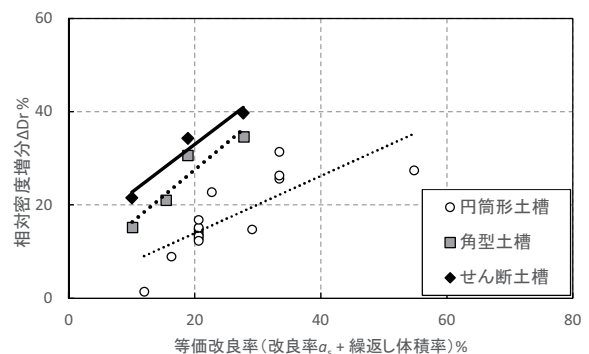


図-2.20 等価改良率と相対密度増分の関係（室内）

工後の地表面の鉛直変位の平均から地盤の平均的な相対密度を算出し、ここから初期相対密度を減じた値である。

本図より、各土槽において等価改良率の増加に伴い、相対密度が増加することが明らかになった。この結果は、U/D 施工の注入管の上下の往復運動を加えることで、地盤に対して締固め効果が上がり、単にモルタルを注入する以上に密度増加が得られることを示している。

図-2.21 に、上記の室内模型実験の分析結果との対比の下に、現場実証実験における等価改良率と地点隆起量の関係を示す。本図は、全ステップの注入が完了し、最後のU/D工程が完了したときのプロットを示したものである。Tタイプ及びTSRタイプでは、TSRタイプの施工の時のトラブルのため、明瞭な相関は見られなかったものの、GIタイプでは等価改良率の増加に伴い隆起が20mmから1mm以下と格段に抑制されることが分かった。上述の結果より、室内模型実験と同様に、実機を用いた現場実証実験においてもU/D施工による高い隆起抑制効果を明確に確認できた。また、室内模型実験の相対密度増加の結果から、現場の改良地盤においても、等価改良率に応じた密度増加が生じていると考えられる。

3. 隆起抑制メカニズムの検証

3.1 U/D 施工のメカニズムの考察

室内模型実験及び現場実証実験の結果から、U/D 施工によって隆起が抑制されるメカニズムとして、以下のように考察した。図-2.16 (b)に示すように、空打ち施工では、砂層中でのU/D工程による地盤沈下量は小さかった。また図-2.18 に示すように、引上げ速度の増大によって、さらなる隆起抑制を実現した。これらの事実は、モルタル内部でのU/D工程、特に、注入管の引上げが隆起抑制に寄与していることを示す。すなわち、注入したモルタルが、注入管引上げ時にはサクション効果で注入管の存在していた分の体積が収縮し、周りの土砂の沈込みを誘起し、注入管貫入時には体積が僅かに膨張するといった地盤の繰返し収縮がモルタルの脈動と共に生じていることが考えられる。実際、室内模型実験でも、上記の注入管引上げ時に地盤収縮し、貫入時に膨張していた。この地盤の収縮傾向が膨張傾向を常に上回るために、地盤隆起を低減させているといえる。したがって、モルタルの脈動に伴う上記の繰返し収縮の結果として地盤の締固め効率が上がり、隆起抑制効果が発揮されているものと考えられる。この結果、図-2.19 及び図-2.21 に示すように、U/D 施工によって、従来のBU 施工に比べて最大90%以上の隆起低減を実現した。

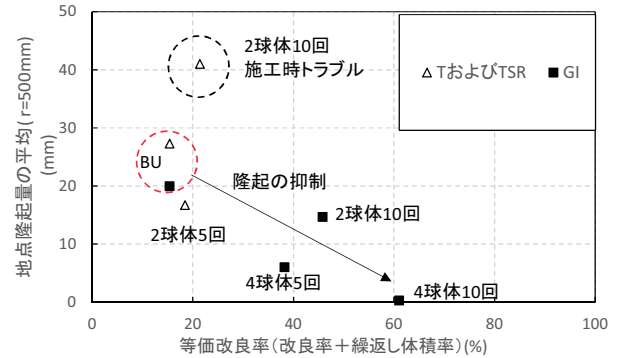


図-2.21 等価改良率と地点隆起量の関係（現場）

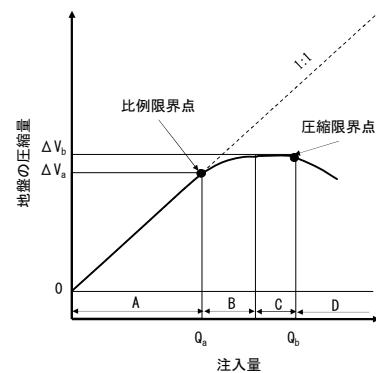


図-3.1 注入量と地盤圧縮量の関係モデル

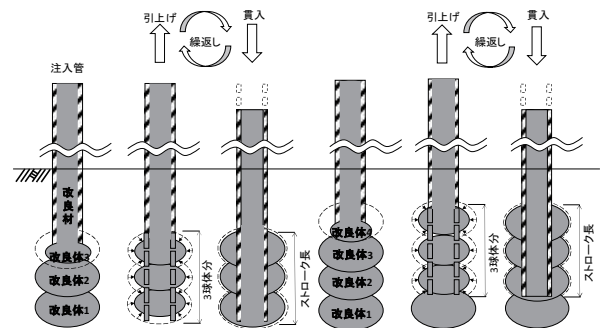


図-3.2 U/D 施工時の地盤内イメージ

3.2 地盤の隆起抑制メカニズム

図-3.1 に CPG 工法の注入量と地盤圧縮量の関係モデルを示す。図中の A の区間は、隆起が発生しない範囲であり、地盤に注入した材料の体積分だけ周辺地盤が圧縮できる状態である。B から C の区間は、注入により隆起が発生している状態である。この隆起を発生させない点を「比例限界点」、圧縮できる限界点を、「圧縮限界点」としている。

図-3.2 に U/D 施工時の地盤内のイメージを示す。モルタル内での注入管引き上げ時には、注入管の存在していた分の体積がモルタル内で収縮し、周りの地盤の落ち込

みを誘起する。一方、注入管の貫入時には、モルタルの体積が回復し、結果として地盤の僅かな膨張を引き起こす。このようなモルタル内でのU/D施工によって、地盤の繰返し収縮が発生していると考えられる。これは、図-3.1の地盤の「比例限界点」及び「圧縮限界点」が結果的に伸びて隆起抑制していることを表しているといえる。

図-3.3に、上記を実証したU/D施工による隆起抑制メカニズムを示す。本図は、実際に地盤を動態観測した結果であり、注入管の先端の深度並びに地点隆起量の経時変化をそれぞれ示している。使用した注入管の外径は、10.5 mm、U/D施工の条件は、ストローク長 90 mm（モルタル 3 球体分）及び繰返し回数 10 回である。

本結果が示すように、注入管の貫入時には、地盤がわずかに膨張し、注入管の引き上げ時には、周辺地盤の沈みこみが発生している。この際、地盤の収縮傾向が膨張傾向を常に上回るため、隆起量が繰返し回数とともに減少し、結果として締固め効率が向上し、高い隆起抑制効果が発揮されていることが実証された。

上述の実大規模の現場実証実験では、モルタル注入をせず、地盤内で注入管を上下運動のみさせる空打ち施工を実施した。この施工法による地盤変位は、ほとんど確認されなかったことから、上述のU/D施工に伴う地盤の繰返し収縮が主要な隆起抑制メカニズムであることが裏付けられた。

4. 施工能率向上の検討

新たなCPG工法として開発したU/D施工の今後の実用化に向け、施工能率の向上の検討が必要となる。そこで、以下では、有効性が実証された室内模型実験において、注入管の大きさと先端形状に着目し、施工能率よく隆起抑制できる方法を検討した内容及び結果について述べる。

4.1 実験概要

本実験では、上述の2.1節記載の注入装置及び模型地盤を用い、注入管及びU/D施工の繰返し回数等の実験パラメータを変化させてU/D施工を行い、地盤変位の動態観測を行った。

(1) 模型地盤

図-4.1に模型地盤のモデル図を、表-4.1に模型地盤の注入条件を示す。本実験では、円筒形の半透明の塩ビ土槽（φ155 mm×450 mm）に模型地盤を作製した。模型地盤は2層で構成し、下層は厚さ300 mmの砂層（改良対象層）、上層は厚さ100 mmの砕石層（非改良対象層）とし、水位は砕石層の天端とした。砂は東北砕砂 7号（ $\rho_s=2.631 \text{ g/cm}^3$,

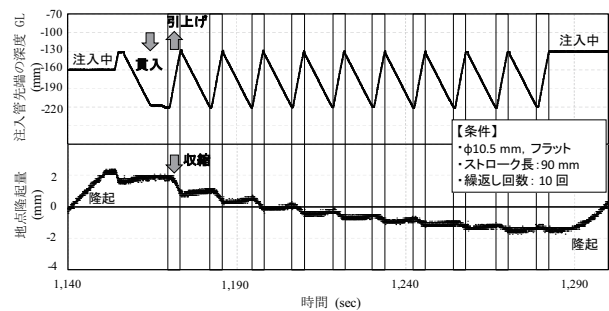


図-3.3 U/D施工による地盤の繰返し収縮

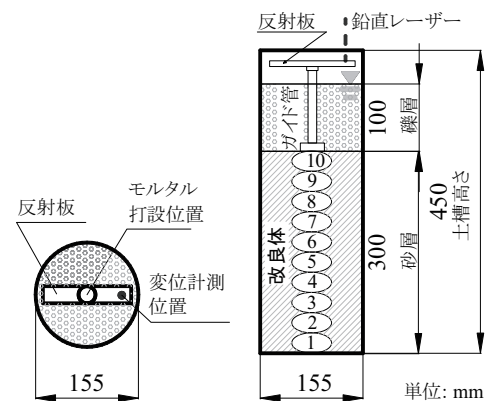


図-4.1 模型地盤のモデル図

表-4.1 模型地盤の注入条件

模型地盤の大きさ	φ155 mm×400 mm
改良長	300 mm
改良対象層を構成する砂	東北砕砂7号 $\rho_s=2.631 \text{ g/cm}^3$ $e_{max}=1.120$ $e_{min}=0.609$
非改良対象層を構成する礫	粒径:約10 mm
砂の初期相対密度 (D_{r0})	約40%
水位	GL±0 mm
モルタル球体の総数 (ステップ数)	10 個
1モルタル球体の長さ (ステップ長)	30 mm
1モルタル球体当たりの注入量 (ステップ当量)	68 cm ³
総注入量	680 cm ³
改良率 a_s	12%

$e_{max}=1.120$, $e_{min}=0.609$) を使用し、初期相対密度 40 %を目標とし、水中落下法により作製した。砕石層中には、注入管を貫入可能とするためのガイド管を設置した。

改良体は、680 cm³のモルタルを1モルタル球体当たり30 mm ずつ引き上げながら、10 球体に分けて注入した。

(2) 変位の計測方法

施工に伴う変位（隆起及び沈下）の計測には、注入装置の注入管近傍に設置した鉛直レーザー変位計を使用した。変位計のレーザーを、上述の図-4.1に示すガイド管の天端に設置した反射板に照射し、施工時に常時計測した。

(3) 注入管

表-4.2に本室内模型実験で使用した注入管の一覧表を示す。注入管は、先端形状がテーパ及びフラットで、それぞれ外径が15.0 mm, 19.0 mm, 24.0 mm, 並びに先端形状がフラットで外径10.5 mmの注入管の合計7種類を使用した。なお、注入管の内径は、6.0 mmで統一した。

(4) U/D 施工の実験条件

表-4.3に実験条件の一覧を示す。注入管の貫入及び引き上げの際のU/D施工のストローク長は、90 mm (モルタル球体3個分)とした。また、繰返し体積 (注入管の貫入・引き上げの総移動距離に、使用した注入管の外径の断面積を乗じた値、式(2a)) が約600 cm³, 1,200 cm³, 2,500 cm³及び4,000 cm³となるように、繰返し回数を決定した。

表-4.2 室内模型実験で使用した注入管の一覧

	注入管の大きさ (mm)			
	外径:10.5 内径:6.0	外径:15.0 内径:6.0	外径:19.0 内径:6.0	外径:24.0 内径:6.0
注入管の外径における断面積 (cm ²)	0.87	1.77	2.84	4.52
断面積比	1.00	2.04	3.27	5.22
先端フラット				
先端テーパ (30°)				

4.2 実験結果及び考察

(1) 注入管の違いによる隆起抑制効果

(a) 注入管の外径の違い

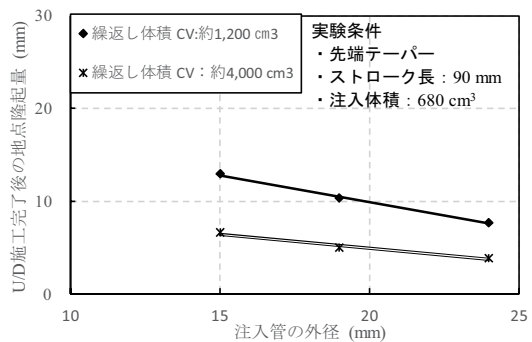
図-4.2に注入管の外径と U/D 施工完了後の地点隆起量の関係を示す。繰返し体積が約 1,200 cm³ 及び約 4,000 cm³ のものを抽出した。本図が示すとおり、注入管の先端形状がテーパ、フラットのいずれも、繰返し体積が同一であるとき、注入管の外径の大きいものほど地点隆起量が小さいことが分かった。また、任意の繰返し体積に対し、注入管が大きなものほど、貫入・引き上げの総移動距離を低減できるので、施工能率が向上すると言える。

図-4.3に、注入管別の隆起低減率を示す。隆起低減率とは、各注入管での BU 施工による施工完了後の地点隆起量と U/D 施工での施工完了後の地点隆起量との差に対して、各注入管での BU 施工の施工完了後の地点隆起量で除した値である。なお、隆起低減率が 100% の場合は、U/D 施工に伴う隆起量が最終的に 0 であることを示す。さらに、隆起低減率が 100% 以上の場合は、U/D 施工により最終的に沈下をしたことを示す。

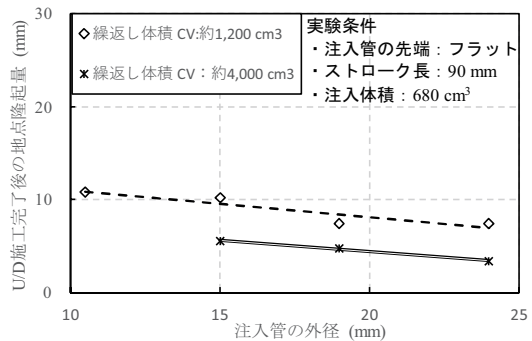
本図から、注入管の先端形状がテーパ、フラットいずれも、注入管の外径の大きさによらず、繰返し体積が 2,000 cm³ 程度の U/D 施工で、70~80% の隆起低減率を達成することが分かった。また、繰返し体積が 4,000 cm³ から 10,000 cm³ にかけた繰返し体積の U/D 施工では、繰返し体積の増加に合わせて、隆起低減率の上昇が緩やかになることが分かった。これらのことから、U/D 施工の高い隆起抑制効果は、繰返し体積の少ない段階で速やかに発現することが明らかとなった。

表-4.3 U/D 施工の実験条件の一覧

注入管 外径 mm	注入管の 先端形状		U/D施工の ストローク長 mm	繰返し回数 N																	繰返し体積				
	フラット	テーパ		mm																	cm ³				
			0	90	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	0	600	1,200	2,500	4,000	13,029			
10.5	○	○	○	○	○												○								
10.5	○	○	○	○	○												○								
10.5	○	○	○	○	○												○								
10.5	○	○	○	○	○												○								
15.0	○	○	○	○	○												○								
15.0	○	○	○	○	○												○								
15.0	○	○	○	○	○												○								
15.0	○	○	○	○	○												○								
19.0	○	○	○	○	○												○								
19.0	○	○	○	○	○												○								
19.0	○	○	○	○	○												○								
19.0	○	○	○	○	○												○								
24.0	○	○	○	○	○												○								
24.0	○	○	○	○	○												○								
24.0	○	○	○	○	○												○								
24.0	○	○	○	○	○												○								
24.0	○	○	○	○	○												○								

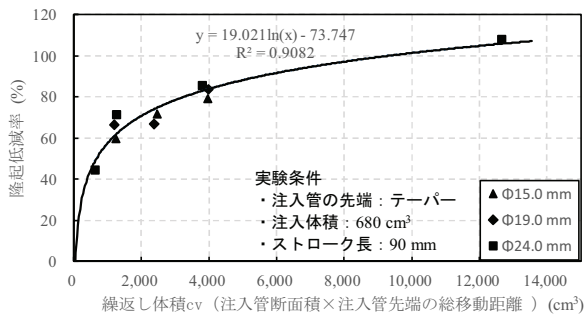


(a) テーパー形状

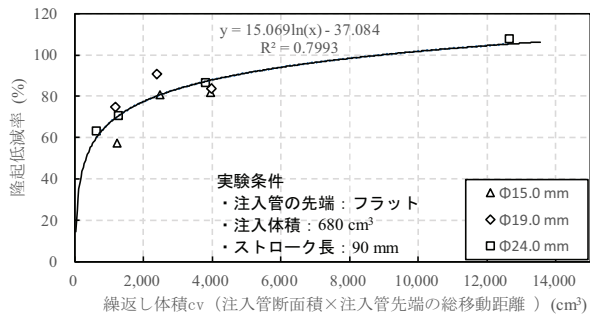


(b) フラット形状

図-4.2 注入管の外径と U/D 施工完了後の地点隆起量



(a) テーパー形状



(b) フラット形状

図-4.3 注入管別の隆起低減率

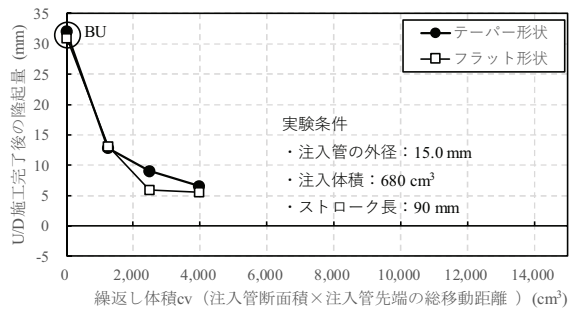
(b) 注入管の先端形状の違い

図-4.4に、注入管の先端形状が、テーパー及びフラットで、注入管の外径 15.0 mm, 19.0 mm 及び 24.0 mm の地点隆起量の比較結果をそれぞれ示す。

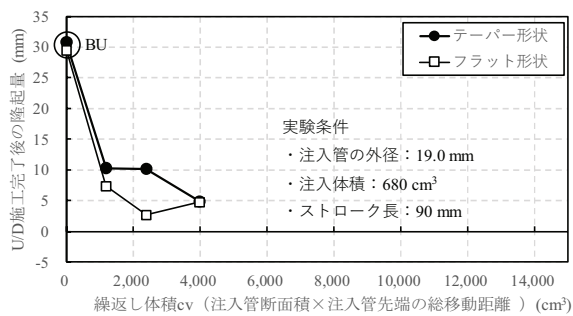
本図の地点隆起量は、施工完了後の値である。図-4.4 (b)の繰返し体積が約 2,500 cm³のテーパーとフラットにおいて、地点隆起量に 7.5 mm の差が生じた。しかし、その他の繰返し体積においては、地点別隆起量の差は概ね 3 mm 以内を示し、注入管テーパー及びフラットにおいて、ほぼ同等の隆起抑制効果をもたらすことが分かった。これらの実験結果から、地盤中で注入管の貫入及び引上げを繰返す U/D 施工は、注入管の貫入抵抗が低減できる先端テーパー形状を用いることで、先端フラット形状とほぼ同等の隆起抑制効果を担保しながらより施工性を向上させることができると考えられる。

(2) U/D 施工の相対密度の増加

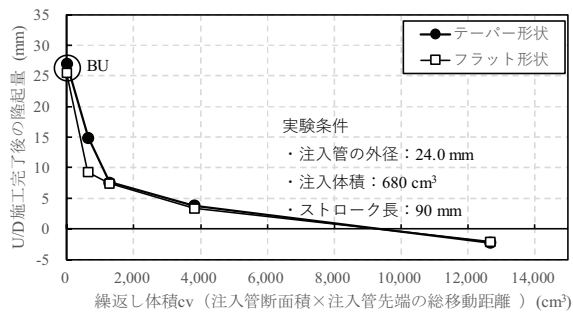
図-4.5に、繰返し体積と U/D 施工による相対密度増分の関係を示す。縦軸の値は、U/D 施工による地盤の平均的な相対密度 (D_{r1}) から初期相対密度 (D_{r0}) を差し引いた相対密度の増分である。本図が示すとおり、繰返し体積が 2,000 cm³ 以下の U/D 施工で、約 20% の相対密度の増加が得られ、それ以降の繰返し体積の U/D 施工では、繰返し体積の増加とともに、緩やかに相対密度が上昇し、最終的には相対密度増分が約 40% に達した。この結果から、U/D 施工による相対密度増加は、少ない繰返し体積



(a) φ 15.0 mm



(b) φ 19.0 mm



(c) φ 24.0 mm

図-4.4 注入管の外径の違いによる地点隆起量の比較

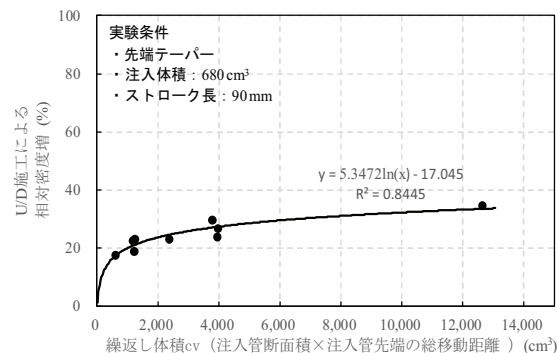


図-4.5 繰返し体積と U/D 施工による相対密度増分の関係

の施工の段階で速やかに発現することが分かった。また、U/D 施工による相対密度の増加関係が定量的に示されたとともに、締め固め効果が実証された。

5. まとめ

本研究では、3種の室内模型実験及び現場実証実験を通じて、従来のCPG工法に比べて、地盤の隆起を大幅に抑制しつつ、改良効果及び液状化対策効果を向上させた新たなCPG工法を研究開発した。

室内模型実験では、新たに開発したU/D施工により施工時に発生する地盤隆起量を8割以上低減できることを明らかにした。改良効果の面では、従来施工以上の密度増加があり、 K_0 値は従来施工と同等であった。そして、液状化対策効果は、従来施工と比較し、1.5倍以上の液状化強度が得られた。また、液状化による沈下被害の抑制の面でも効果を有することが分かった。

実機種及び各種パラメータを変化させた現場実証実験では、開発したU/D施工は実大規模での施工が可能であり、室内模型実験と同様又はそれ以上(地点隆起量にして90%以上の低減)の高い隆起抑制効果を有することが実証された。また、等価改良率の定量化法を用いることで、U/D施工による地盤の隆起量及び密度増加量を予測することができ、従来のCPG工法と同様の設計が可能であることを示した。

新たなCPG工法：U/D施工の施工能率の向上及び隆起抑制メカニズムについて得られた主要な知見は以下のとおりである。

- 1) U/D施工は、任意の繰返し体積を地盤に与える場合、注入管の外径を大きくすることで、注入管の総移動距離を削減でき、施工能率を向上できる。
- 2) U/D施工は、注入管の外径の大きさによらず、隆起抑制効果が速やかに発現することを明らかにした。
- 3) U/D施工で使用する注入管の先端のテーパ形状とフラット形状は同等の隆起抑制効果がある。
- 4) 注入管の貫入抵抗が低減できる先端テーパ形状を用いることで、同等の高い隆起抑制効果を担保しながら施工性を向上させることができると考えられる。
- 5) U/D施工の隆起抑制メカニズムは、U/D施工に伴う地盤の繰返し収縮で説明できる。その帰結として、締固め効率の向上と高い隆起抑制効果を同時に実現している。
- 6) U/D施工による改良後の地盤の平均的な相対密度の増大を定量的に示し、少ない繰返し体積の施工法で、密度増大効果が発現することを明らかにした。

6. あとがき

CPG工法は、既設構造物の直下や近傍で液状化対策が

適用可能な工法である。東日本大震災以降、地震の外力の想定が高くなり液状化のリスクがますます増大している。このような状況下において港湾・空港域の液状化対策としてのCPG工法は、高改良率が求められるようになってきている。しかし、高改良率の施工によって従来のCPG工法では、隆起量が許容値を超える問題が発生してくる可能性がある。

本研究で開発した新たなCPG工法であるU/D施工は、従来からの課題であった隆起抑制及び液状化対策効果増大(密度増加)の双方を、少ない繰返し体積で効率よく発現させることができる工法である。それゆえ、従来工法と同様の効果を対象とした場合には、コスト縮減が実現でき、また今後増大する液状化リスクの低減並びに安全性の向上に大きく資することができる。さらに、隆起の大幅な抑制によって、従来適用が困難であった許容変位量がシビアな施設にも適用範囲が拡大したといえる。

参考文献

- 1) 沿岸技術研究センター:液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアル-コンパクショングラウチング工法-, 2013.
- 2) 竹之内寛至, 佐々真志, 山崎浩之, 足立雅樹, 高田圭太, 岡見強, 金子誓善: 隆起抑制効果と液状化対策効果が向上した新たなCPG工法の開発, 土木学会論文集 B3, Vol.72, No.2, pp. 372-377, 2016.
- 3) Takenouchi, K., Yamazaki, H., Sassa, S., Shinsaka, T., Konishi, T., Adachi, M., Kanno, Y., Takada, K., Okami, T., Okada, H., Takahashi, T. and Zen, K.: Development of Compaction Grouting Method with Improved Upheaval Control, Proceedings of the Twenty-sixth International Ocean and Polar Engineering Conference, pp.908-915, 2016.
- 4) 竹之内寛至, 佐々真志, 山崎浩之, 足立雅樹, 高田圭太, 岡見強, 金子誓: 隆起抑制型 CPG 工法の開発と現場実証実験による検証, 土木学会論文集 B3, Vol. 73, No. 2, pp. 282-287, 2017.
- 5) 竹之内寛至, 佐々真志, 山崎浩之, 足立雅樹, 高田圭太, 岡田宙, 金子誓: 新たなCPG工法の隆起抑制メカニズムと施工能率向上の検討, 土木学会論文集 B3, Vol. 74, No.2, pp. 886-891, 2018.
- 6) Takenouchi, K., Sassa, S., Yamazaki, H., Konishi, T., Shinsaka, T., Kanno, Y., Okada, H. and Takahashi, T.: Development and Field Verification of a New Compaction Grouting Method with Improved Upheaval Control, ASCE Geotechnical Special Publication No. 296, pp.

283-293, 2018.

- 7) Zen K et al. : Countermeasure for Liquefiable Ground beneath the Existing Structure by CPG, *Proceedings of the Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference*, Vol.2, pp.839-844, 2015.
- 8) 原田他:空港滑走路において静的圧入締固め工法で液化対策した地盤の継続調査, 第9回地盤改良シンポジウム論文集, pp.26-29, 2010.

港湾空港技術研究所資料 No.1354

2019. 8

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2019) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています