

新たなCPG工法の実験的検証 ー密実化・液状化抵抗・等価改良率ー

復建調査設計（株） 正会員 ○岩城 徹也
 （国研）港湾空港技術研究所 正会員 佐々 真志
 三信建設工業（株） 木田 匠紀
 （株）アートンシビルテクノ 正会員 金子 誓

1. はじめに

静的圧入締固め工法（CPG工法）¹⁾は、主に港湾・空港等の臨海部における液状化対策に適用され、地盤内にモルタルを圧入し、周辺地盤の密度を増大させる工法である。著者らは、模型実験²⁾や現場実証実験³⁾を通じて、従来のCPG工法よりも格段に高い隆起抑制効果と液状化対策効果を得る新たなCPG工法（以下、U/D（アップダウン）施工）を開発した。これまでU/D施工では、改良対象域に対する圧入したモルタルの割合（改良率： a_s ）及び改良対象域に対する注入管先端部の断面積に注入管先端部の総移動距離を乗じた割合（繰返し体積率：CVR）²⁾が、地盤の締固めに対して等価な改良効果があるものとし、それぞれ1:1の割合で合計した等価改良率（ a_{se} ）²⁾を使用してきた。しかし、既往の研究によって、少ない繰返し体積率のU/D施工でも、改良効果は速やかに発現すると共に、ある繰返し体積率を境界として改良効果に頭打ちがあることが示され⁴⁾、U/D施工時の等価改良率を検証する必要がある。本研究では、U/D施工の等価改良率、とくに繰返し体積率に関する補正係数 α の検証を目的として、一連のせん断土槽実験及び加振実験を行った。本研究の概要及び隆起抑制・改良体拵径・ K_0 値は文献⁵⁾を参照されたい。

2. 実験概要

図-1に模型地盤（幅598mm、奥行き598mm、高さ490mm）の平断面図を、表-1に実験ケース一覧を示す。土槽底面より150mmの碎石基盤、270mmの砂層、50mmの碎石層を設置した。砂層は初期相対密度40%に設定し、東北7号珪砂を下位から水中落下法で模型地盤を作製した。模型地盤作製後、モルタル圧入を行った上で図-1に示すせん断方向に加振実験を実施した。注入管の直径、U/D施工の進退動の長さ、繰返し回数、モルタルの打設本数（改良率）の異なる13ケースについてせん断土槽を用いてボトムアップ施工（以下、BU施工）及びU/D施工を実施し、施工後にステップ加振実験を行い、液状化抵抗を検証した。

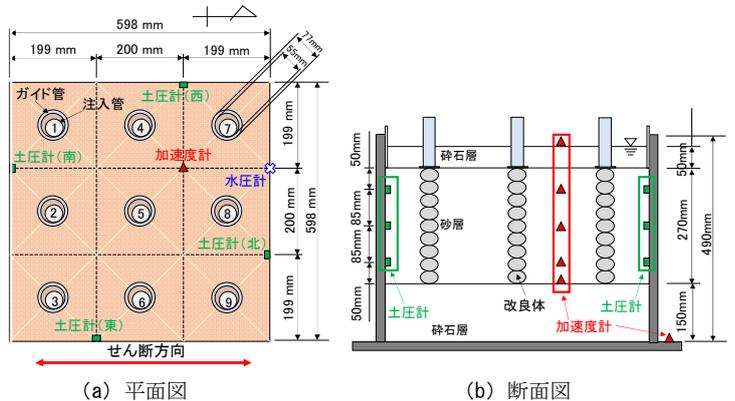


図-1 模型地盤の平断面図（改良体9本打設）

表-1 実験ケース一覧

実験年度	CASE名 (注入管外径・アップダウン長・繰返し回数・打設本数)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
		模型地盤体積 cm ³	初期地盤乾燥質量 m_{d0} g	初期相対密度 D_{r0} %	改良体1本当りの体積 cm ³	改良体の打設本数 本	改良体体積 (④×⑤) cm ³	改良率 (⑥/①)×100 %	繰返し体積率 (⑥/①)×100 %	繰返し体積率 (⑥/①)×100 %
R1	1 φ190 cm・0 cm・0回・9本 ▲	96,553	132,085	41.5	612	9	5,508	5.7	612	0.6
	2 φ190 cm・9 cm・6回・9本 ●	96,553	132,085	37.8	612	9	5,508	5.7	19,980	20.7
	3 φ190 cm・9 cm・10回・9本 ●	96,553	132,085	40.0	612	9	5,508	5.7	32,841	34.0
R2	4 φ105 cm・0 cm・0回・16本 ▲	96,553	131,795	38.2	612	16	9,792	10.1	333	0.3
	5 φ105 cm・0 cm・0回・9本 ▲	96,553	131,795	36.1	612	9	5,508	5.7	187	0.2
	6 φ105 cm・9 cm・2回・9本 ○	96,553	131,795	38.3	612	9	5,508	5.7	2,174	2.3
	7 φ105 cm・9 cm・5回・9本 ○	96,553	131,795	41.2	612	9	5,508	5.7	5,120	5.3
	8 φ105 cm・9 cm・10回・9本 ○	96,553	131,795	43.2	612	9	5,508	5.7	10,029	10.4
	9 φ190 cm・0 cm・0回・16本 ▲	96,553	131,795	38.2	612	16	9,792	10.1	1,089	1.1
	10 φ190 cm・0 cm・0回・9本 ▲	96,553	131,795	41.1	612	9	5,508	5.7	612	0.6
	11 φ190 cm・9 cm・3回・9本 ●	96,553	131,795	37.4	612	9	5,508	5.7	10,335	10.7
	12 φ190 cm・9 cm・5回・9本 ●	96,553	131,795	42.2	612	9	5,508	5.7	16,765	17.4
	13 φ190 cm・9 cm・10回・9本 ●	96,553	131,795	43.3	612	9	5,508	5.7	32,841	34.0

本実験では、毎回5 Hz・20波の入力加速度50 Galから開始して加振を行った。加振後に液状化評価を行い、液状化が発生した場合は、そのケースの実験を終了した。液状化が発生しなかった場合は、入力加速度を50 Gal増加させて再び加振を行った。本実験の液状化評価は過剰間隙水圧比が1.0に達した際とし、液状化発生時の換算加速度を(式-1)により求め、これを液状化抵抗として評価し、各ケースの結果を比較した。

$$\text{液状化発生時の換算加速度 } \alpha'_{eq} = \frac{\text{液状化発生時の波数}}{\text{全波数 (20波)}} \times 50 + (\text{入力加速度 } \alpha_{eq} - 50) \dots \text{(式-1)}$$

キーワード：静的圧入締固め、せん断土槽、改良効果

連絡先：〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-8-15 復建調査設計(株) 東京支社 TEL 03-5835-2631 FAX 03-5835-2632

3. 実験結果

図-2 に繰返し体積率と施工後の相対密度の関係を示す。本実験における BU 施工終了後の相対密度は、約 45% から約 50% となった。一方、U/D 施工では、注入管の径の大きさに依らず、少ない繰返し体積率で速やかに施工終了後の相対密度は増大していることがわかる。

図-3 に改良率 5.7% (打設本数 9 本) の条件下における施工完了後の相対密度と正規化した液状化発生時の換算加速度を示す。正規化した液状化発生時の換算加速度 (液状化抵抗) とは、CASE 5 の BU 施工のもの (図-3 の赤丸) を 1.0 とし、各ケースの値を比で表したものである。施工完了後の相対密度の増加と共に液状化抵抗が、増加したといえる。

図-4 に改良率 5.7% (打設本数 9 本) の条件下における、繰返し体積率と正規化した液状化発生時の換算加速度の関係を示す。繰返し体積率の増加と共に相対密度が上昇し、正規化した液状化発生時の換算加速度も増加する傾向にあることが分かった。

図-5 に繰返し体積率に関する改良効果の寄与度合を示す補正係数 α の導出手順を示す。①大きさが異なる 2 種類の注入管の打設本数 9 本及び 16 本における BU 施工時の改良率と液状化抵抗の関係をそれぞれ求めた。

②図-4 より U/D 施工時に発現した液状化抵抗：正規化液状化換算加速度を、注入管の大きさ別に、前記関係に内挿することによって U/D 施工時の”等価”な改良率を算出した。例として、図-5 の正規化液状化換算加速度が 3.74 の場合、等価改良率は 20.6% となる。③“等価”な改良率からモルタル圧入による改良率 5.7% を引いた値を繰返し体積率で除し、補正係数 α を得た。

図-6 に繰返し体積率と補正係数 α の関係を示す。繰返し体積率が増加するにつれて補正係数 α は減少することが分かり、等価改良率は、(式-2) のように、本補正係数 α を介して規定できることが分かった。

$$a_{sc} = a_s + \alpha \text{CVR} \quad \dots \text{(式-2)}$$

4. まとめ

本研究では、U/D 施工の等価改良率、特に繰返し体積率に関する補正係数 α の検証を目的として、一連のせん断土槽実験及び加振実験を行った。得られた知見は、次の通りである。

- 繰返し体積率が大きくなるほど相対密度が増大し、正規化した液状化換算加速度すなわち液状化抵抗は顕著に増加した。

- 等価改良率は、モルタル圧入による改良率と注入管進退動による繰返し体積率の等価な合計ではなく、補正係数 α を介した等価改良率で規定できることを明らかにした。また、本補正係数 α は、繰返し体積率の増加に伴い次第に減少することが明らかとなった。図-6 によれば、当模型実験で U/D 施工の繰返し体積率が 20% の場合は、補正係数 α が約 0.5 となり、モルタル圧入による改良率にして 10% 相当の等価な改良効果を、隆起抑制に伴う密度・液状化強度増大効果として見込みうる。

<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) 竹之内他：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 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, I_372-I_377, 2016.
- 3) 竹之内他：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 (海洋開発), Vol. 73, No. 2, I_282-I_287, 2017.
- 4) 竹之内他：新たな CPG 工法の隆起抑制メカニズムの検証と改良体径時の改良効果, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, I_929-I_934, 2020.
- 5) 足立他：新たな CPG 工法の実験的検証—隆起抑制・改良体径・ K_0 値—, 土木学会第 76 回年次学術講演会, 2021 (投稿中)。

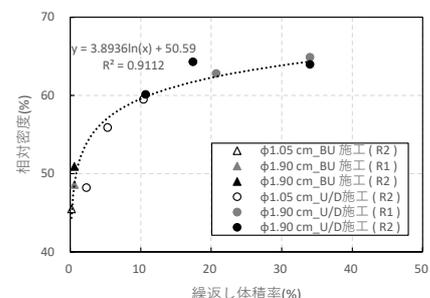


図-2 繰返し体積率と施工後の相対密度の関係

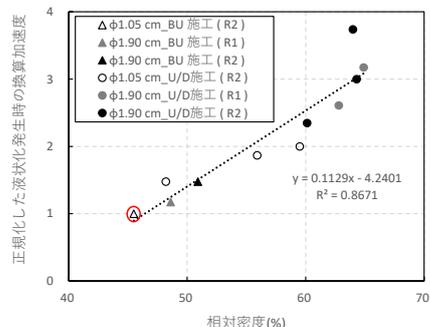


図-3 相対密度と正規化した液状化発生時の換算加速度の関係

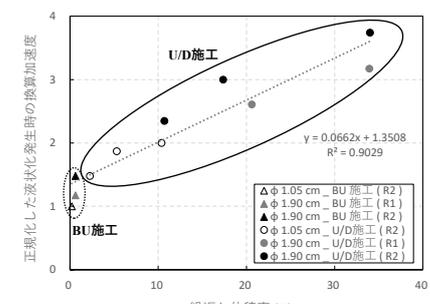


図-4 繰返し体積率と正規化した液状化発生時の換算加速度の関係

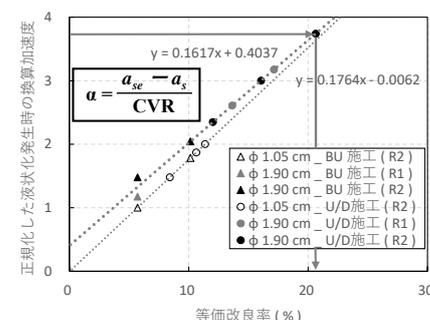


図-5 補正係数 α の導出手順

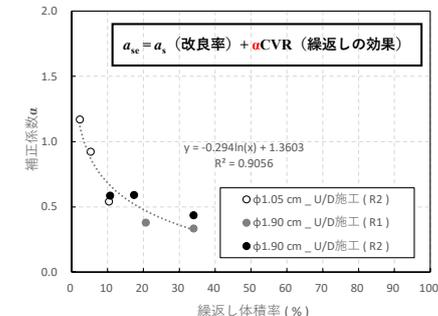


図-6 繰返し体積率と補正係数 α の関係