

強度の空間的ばらつきを考慮した浸透固化処理地盤 の地震時における信頼性解析

笠間, 清伸
九州大学

古川, 全太郎
九州大学

秋本, 哲平
五洋建設

Binh, Nguyen
五洋建設

他

<https://hdl.handle.net/2324/7217550>

出版情報 : 2022-11-18. 地盤工学会
バージョン :
権利関係 :



強度の空間的ばらつきを考慮した浸透固化処理地盤の地震時における信頼性解析

地盤改良 信頼性設計 液状化

九州大学 正会員 ○笠間清伸 古川全太郎
五洋建設 正会員 秋本哲平 Nguyen Binh 片山遥平
中央復建コンサルタンツ 正会員 西田啓介

1. 目的

地盤改良工法の一つである浸透固化処理工法は、主として砂質地盤の液状化対策を目的として用いられる。浸透固化処理を施した地盤は、土質の不均質性や薬液浸透の不均一性により、一軸圧縮強さや液状化強度等の地盤定数に空間的なばらつきが生じることが報告されている¹⁾。本文では、浸透固化処理工法で背後地盤を液状化対策した岸壁を対象に、FLIP²⁾を用いて地盤定数の空間的ばらつきを考慮して地震応答解析を行った。その結果を用いて浸透固化処理部における強度の空間的ばらつきが地震時の岸壁の残留変位に与える影響を分析した。また、解析結果と改良後の地盤の一軸圧縮強さの調査結果を用いて、岸壁の残留水平変位を推定する事後評価手法を提案した。

2. 解析概要

図1に解析対象とした背後地盤を浸透固化処理された岸壁の断面図を示す。表1に土質材料パラメータを、表2に液状化パラメータを示す。岸壁背後の浸透固化処理地盤を縦16要素、横27要素、合計432個の要素とした。空間的ばらつきを表現するために、平均一軸圧縮強さ q_u を84 kPa、変動係数0.1 - 0.5とした対数正規分布で一軸圧縮強さにばらつきを与えた。ただし、設計基準強度70 kPa以上の要素は表1下の式(A)群に従い粘着力、基準初期せん断弾性係数および基準体積弾性係数を決定し、設計基準強度を満たさない要素は未改良土相当の地盤として扱った。既往の事例³⁾を参考に、水平方向、鉛直方向の自己相関距離をそれぞれ2.0 m、0.2 mとした。なお、表1の*印がついている値は、 $q_u = 84$ kPaとしたときの値、つまり G_{ma} 、 K_{ma} 、 c それぞれの平均値を示している。また、地盤のばらつきを表す指標として、浸透固化処理部における設計基準強度以上の空間割合を適合率と定義した。例えば、未改良地盤の適合率は0、ばらつきを考慮しない改良地盤の適合率は1.0となる。図2にL2地震動を想定した最大加速度740 Galの入力地震動と、代表的な解析結果として岸壁天端部の水平変位の経時変化を示す。図2より、加速度が最大値を示した辺りで急激に水平変位が増加する挙動を示した。完全改良時の残留水平変位は1.2 m程度であった。各適合率において、空間的に強度のばらつきが異なる100ケースを再現し、モンテカルロシミュレーション(以降、MCSとする)を実施した。本解析では、試行回数80回以降は全ての適合率において岸壁の水平変位と沈下量の平均値および標準偏差がほぼ一定値に収束していたことから、MCS100回で十分な統計値が得られていると判断した。

3. 岸壁の残留水平変位の解析結果

図3は各適合率における岸壁天端の残留水平変位の頻度分布である。 χ^2 検定より有意水準5%で対数正規分布に適合し

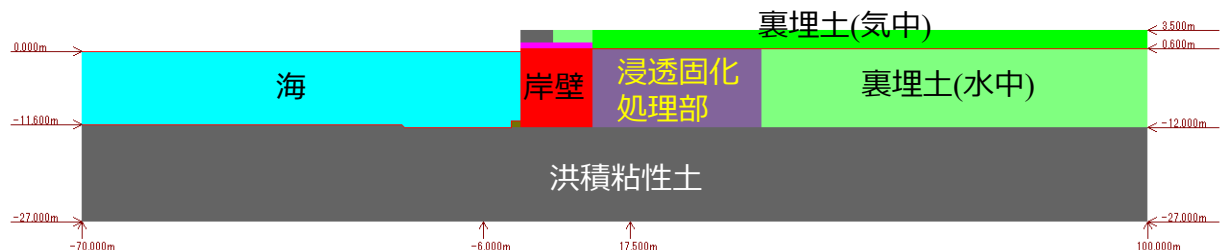


図1 解析断面図

表1 入力定数

	単位体積重量	水中重量	基準初期せん断弾性係数	基準体積弾性係数	粘着力	せん断抵抗角	最大減衰定数	間隙率
	γ	γ'	G_{ma}	K_{ma}	c	ϕ_f	h_{max}	n
↓地盤	kN/m ³	kN/m ³	MN/m ²	MN/m ²	kN/m ²	°		
洪積粘性土	17	7	49.6	129.3	146	0	0.2	0.55
裏埋土(気中)	18	-	67.2	175.2	0	39	0.24	0.45
裏埋土(水中)	20	10	49.1	128.0	0	38	0.24	0.45
浸透固化処理部	20	10	54.0*	140.8*	20.48*	38	0.24	0.45

表2 液状化パラメータ

FLIPパラメータ	S_1	W_1	P_1	P_2	C_1
未改良土	0.005	4.661	0.500	1.035	1.567

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{q_u}{2 \times \tan(45^\circ + \frac{\phi_f}{2})} = q_u / 4.1 \quad [\text{kN/m}^2] \\ G_{ma} &= 49.1 \times \left(\frac{q_u}{70} \times 0.0833 + 1 \right) \quad [\text{MN/m}^2] \\ K_{ma} &= 128 \times \left(\frac{q_u}{70} \times 0.0833 + 1 \right) \quad [\text{MN/m}^2] \end{aligned} \right\}$$

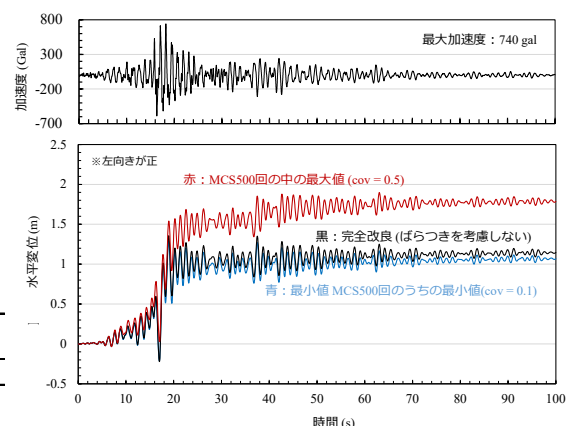


図2 入力地震動と水平変位の時刻歴

Seismic Reliability Analysis on Permeation Grouting Ground with Spatial Variation of Strength

Kiyonobu Kasama, Zentaro Furukawa, Kyushu University
Teppei Akimoto, Nguyen Binh, Youhei Katayama, PENTA-OCEAN CONSTRUCTION CO.,LTD.
Keisuke Nishida, Chuo Fukken Consultants Co., Ltd.

た．有意水準 5 %で正規分布に適合するのは，適合率 0.96 と 0.79 のみであった．適合率 0.96 での残留水平変位の平均値と標準偏差はそれぞれ 1.094 m と 0.014 m であり，適合率 0.56 での平均値と標準偏差はそれぞれ 1.441 m と 0.113 m となり，平均水平変位が約 0.35 m も大きく，標準偏差は約 8 倍となった．

図 4 は，岸壁天端の残留水平変位と適合率の関係である．残留水平変位は，100 回の MCS の平均値，平均値±標準偏差，最大・最小値を示す．今回の解析では許容変位を 1.5m で設定した．適合率が 0.72 を上回るとすべての地盤で許容変位 1.5m を下回った．また，適合率 0.61 と 0.68 では，最大水平変位は許容変位 1.5 m¹⁾を上回るものの，平均値+標準偏差の値は，許容変位を下回った．

図 5 は，残留水平変位が許容水平変位 1.5 m 以下となる確率である．目標確率を 0.9 に設定すると，必要となる適合率は 0.64 となった．

4. 岸壁の残留水平変位の事後評価手法

施工後の浸透固化処理地盤の強度を調査することにより，L2 地震動が起こった時の残留水平変位が 1.5 m 以上となる確率を求めた．まず，ボーリング調査で得られたサンプルに対する一軸圧縮試験や現場でのピエゾドライブコーン (PDC) 試験⁴⁾等により q_u を求める．1 点の調査点から得られる情報は， q_u が設計基準強度以上であるか否かであり，その確率分布は適合率 p を母数とする二項分布⁵⁾に従う． q_u が得られている場合の「残留水平変位が 1.5 m 以上となる条件付き確率 P 」は，この二項分布から得られた「確率」に図 5 の「残留水平変位が 1.5 m 以下となる確率」を掛け合わせた確率である．

図 6 は，適合率と「残留水平変位が 1.5 m 以上となる条件付き確率 P 」の関係をサンプリング点数ごとに示したものである．例えば，ボーリングコアの一軸圧縮試験をすることを想定し，改良部 10 点 (図 6 灰線) の q_u のうちの 9 点が設計基準強度以上であった場合，適合率は 0.9 となり，このときの P は 0.6 % である．すなわち，信頼度 99 % (=100 - P) で L2 地震時の残留水平変位 1.5 m 以下であることを保証する場合，10 点調査したうちの 9 点が設計基準強度以上でなければならないことを意味する．同様に，PDC 試験を想定し，30 点 (図 6 青線) 調査した q_u のうち 24 点が設計基準強度以上，すなわち適合率 0.8 以上であれば P が 1 % 以下となり，信頼度 99 % で残留水平変位 1.5 m 以下であることを保証すると評価できる．

図 6 を用いると，信頼度から要求される適合率を求めることもできる．例えば，信頼度 99 % ($P = 1 %$) 以上を満足する適合率は，10 点サンプリングで 0.87，すなわち 9 点以上が設計基準強度以上，30 点サンプリングでは 0.8，すなわち 24 点以上が設計基準強度以上であればよい．

5. まとめ

本論文で得られた結論は，次の通りである．(1) 各適合率における岸壁の残留水平変位は，有意水準 5 %で対数正規分布に従う．(2) 許容水平変位を 1.5 m としたとき，適合率 0.72 以上の浸透固化処理による改良を実施する必要がある．(3) 残留水平変位が 1.5 m を下回る確率を 0.9 以上にした場合，必要となる適合率は 0.64 となった．(4) 改良後の一軸圧縮強さ q_u の調査結果を用いた残留水平変位の事後評価法を提案した．

謝辞：本研究は五洋建設共同研究「性能規定に基づいた改良地盤の事後照査手法に関する研究」のもとに行われたものである．【参考文献】1) 一般財団法人 沿岸技術研究センター：浸透固化処理工法技術マニュアル (改訂版)，2020．

2) Iai, S. , Morita, T. , Kameoka, T. , Matsunaga, Y. and Abiko, K. : Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro Oki earthquake, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 1, pp. 115 - 132, 1995. 3) 笠間清伸ら，性能規定に基づく浸透固化処理地盤の支持力評価，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol. 78, No.1, pp.45 - 59, 2022. 4) 菅野高弘ら，液状化対策として薬液を注入した地盤の原位置調査による強度評価法，港湾空港技術研究所資料，No.1366, 2020. (ISSN1346-7840) 5) 薩摩順吉，確率・統計，岩波書店，pp. 68 - 74, 1989.

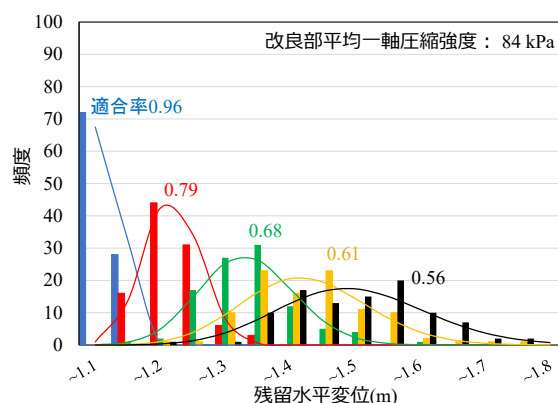


図 3 水平変位のヒストグラム

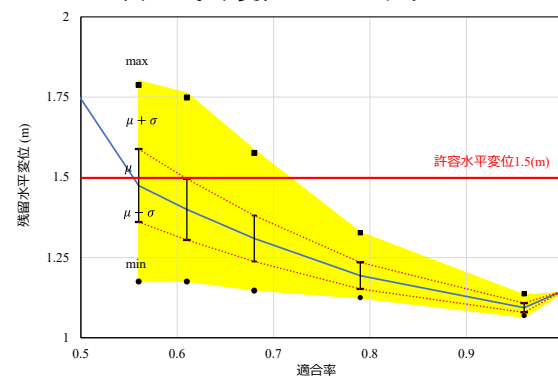


図 4 水平変位と適合率

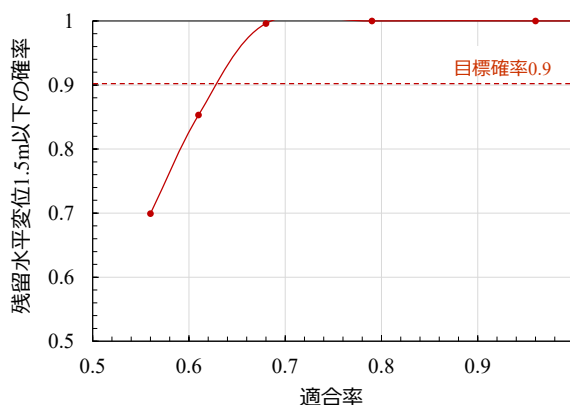


図 5 残留水平変位が 1.5 m 以下の確率と適合率の関係

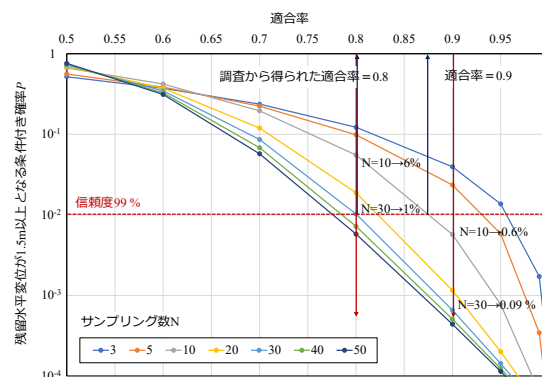


図 6 残留水平変位が 1.5 m 以上である条件付き確率