

石炭灰埋立地盤に対する静的締固め工法の適用性（その1） ～試験施工結果に基づく液状化評価と締固め改良率について～

大成建設株式会社 正会員○天野 喜勝, 正会員 広重 敬嗣, 正会員 城山 翔平
中部電力株式会社 市橋 豊隆, 喜多 千砂子
不動テトラ株式会社 正会員 鶴野 雅明, 正会員 尾形 太

1. はじめに

石炭火力発電所等において排出される石炭灰の有効利用の拡大が求められる中、石炭灰埋立地盤の液状化対策として、クリンカアッシュ（CA）を杭芯材に用いた静的締固め工法（SAVE）の試験施工を実施し、締固め改良率に応じて杭間地盤の密度増大効果が得られることを確認した。本論文では、試験施工前後の杭間地盤の液状化強度試験結果を用い、中規模・大規模地震動に対する液状化の検討を行ったので、以下に報告する。

2. 試験施工の概要

試験施工における改良杭配置および土層断面を図1に示す。試験施工は、正方形配置ピッチ（以下、□で表記）で□1.2m（改良率26.7%）、□1.4m（同19.6%）、□1.6m（同15.0%）で実施し、石炭灰埋立地盤にφ700mmのCA杭を静的圧入した。

3. 試験施工結果の概要

地盤調査は、SAVE改良前および改良後3か月経過時において、図1中に示す位置で実施した。

改良前後の石炭灰埋立地盤において得られた物理試験結果を表1に、平均N値を表2に、三軸CD試験および液状化試験の結果を表3および図2に示す。

表1より、改良後は改良前よりも密度が増加し、杭間地盤の締固め効果が得られている。表3からは、改良後地盤における内部摩擦角 $(\phi_d)_{eq}$ および液状化強度比 R_{L15} が改良前に比べて増加し、SAVEによる締固め改良効果を確認できる。ここで、 $(\phi_d)_{eq}$ は三軸CD試験により得られた粘着力 C_d をゼロとして換算して求めた等価な内部摩擦角である。また、 R_{L15} は「建築基礎構造設計指針（以下、建築基礎指針）」に用いられる液状化強度比であり、せん断ひずみ片振幅 $\gamma_{SA}=5\%$ に対する繰返し15回の繰返し応力振幅比である。

4. 液状化に対する検討方法

検討ケースの一覧を表2に示す。検討方法は、簡易法・詳細法(1)・詳細法(2)の3手法とした。簡易法・詳細法(1)における液状化判定は、建築基礎指針に従う。液状化安全率 F_L は、本論文においては $F_L=R/L$ と表し、 L を地震時せん断応力比、 R を液状化抵抗比と呼ぶこととする。

キーワード 石炭灰, 液状化, 静的締固め工法

連絡先 〒163-0606 新宿区西新宿1-25-1 大成建設(株)土木設計部 TEL 03-5381-5418

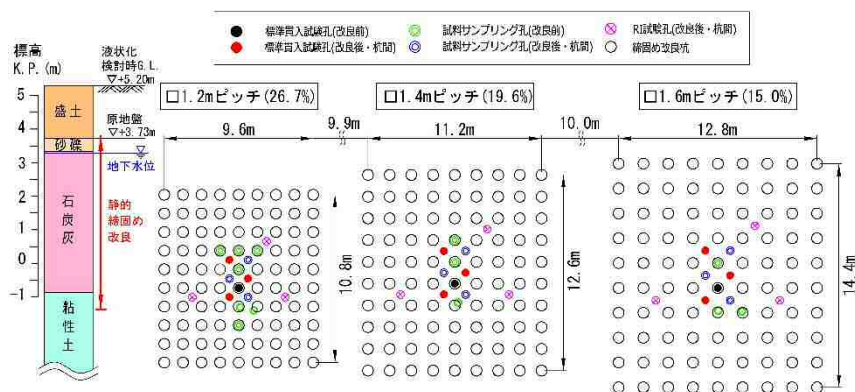


図1 試験施工平面図および土層断面図

表1 石炭灰埋立地盤の物理試験結果

	改良ピッチ (改良率)	細粒分 含有率 Fc (%)	粘土分 含有率 Pc (%)	平均粒徑 D50 (mm)	塑性 指数 Ip	土粒子 密度 ρ_s (g/cm ³)	乾燥 密度 ρ_d (g/cm ³)	飽和 密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	間隙比 e	相対 密度 D_r (%)	締固め度 D_c (%)
改良前	—	64.6	10.5	0.072		2.20	0.85	1.46	1.54	67.7	81.2
改良後 (杭間)	□1.6m(15.0%)	67.6	17.7	0.036	N.P.	2.24	0.94	1.51	1.38	95.1	89.8
	□1.4m(19.6%)	85.9	21.0	0.019		2.22	0.99	1.55	1.26	112.0	94.9
	□1.2m(26.7%)	77.9	21.3	0.028		2.23	1.02	1.56	1.20	120.4	97.5
	—	—	—	—		—	—	—	—	—	—

表2 石炭灰埋立地盤の平均N値

標高 K.P.(m)	改良前 平均N値	改良後平均N値(杭間)		
		□1.6m (15.0%)	□1.4m (19.6%)	□1.2m (26.7%)
2.44	4.3	4.3	6.7	11.7
1.44	5.7	11.0	12.3	16.7
0.44	4.3	7.0	5.7	9.0
0.56	1.3	3.3	2.3	5.3

表3 石炭灰埋立地盤の力学試験結果

	改良ピッチ (改良率)	$(\phi_d)_{eq}$ deg	R_{L15} ($\gamma_{SA}=5\%$)
改良前	—	38.2	0.390
改良後 (杭間)	□1.6m(15.0%)	38.8	0.497
	□1.4m(19.6%)	38.4	0.553
	□1.2m(26.7%)	42.9	0.739

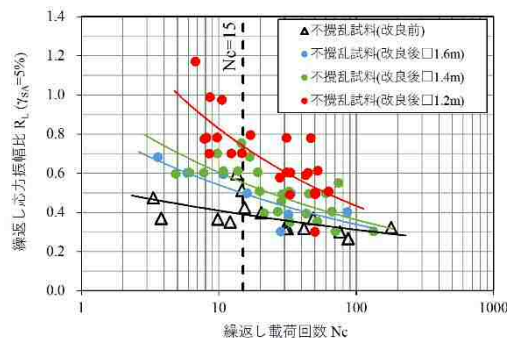


図2 液状化強度曲線 $N_c \sim R_L$ ($\gamma_{SA}=5\%$)

簡易法では、地表面加速度 $\alpha_{\max}$ を用いて L を算定するとともに、改良後の R は締固め改良設計法 (D 法) による改良後 N 値から建築基礎指針の液状化強度比推定式により算定した。詳細法(1)では、等価線形解析 SHAKE により得られた各深度の最大せん断応力 $\tau_{\max}$ より L

を算定し、 R は液状化試験により得られた R_{L15} を直接用いて算定した。詳細法(2)では、図 2 の液状化強度曲線为目标にパラメータ設定した一次元有効応力解析 FLIP より、液状化の程度を直接評価した。詳細法(1)・詳細法(2)の SHAKE・FLIP 解析においては、愛知県公開の南海トラフ過去地震最大の基盤地震動 (図 3) を、 $V_s \geq 400\text{m/s}$ の工学基盤面に入射して用いた。また、詳細法(1)・詳細法(2)の改良後地盤のケースにおいて、萩原ら⁹⁾が明らかにしている締固め改良後地盤の静止土圧係数 K_0 の増大効果を考慮し、一般的に用いられる $K_0=0.5$ の他、 $K_0=1.0$ のケースも検討した。また、簡易法・詳細法ともに、改良後地盤で $K_0=0.5$ としたケースにおいては、 R を設定する際に「建築基礎のための地盤改良設計指針案」に示される締固め改良による液状化強度比の割増し 1.1 倍を考慮した。

5. 液状化の検討結果

簡易法および詳細法(1)の検討結果を表 3 に示す。表 3 より、簡易法の検討においては、中規模地震を想定した $\alpha_{\max}=200\text{Gal}$ のケースでは改良前・改良後ともに液状化程度が軽微と判断される $P_L \leq 5$ となった。一方、大規模地震を想定した $\alpha_{\max}=350\text{Gal}$ のケースでは、改良前には液状化程度が甚大とされる $15 < P_L$ であるのに対し、改良後は $P_L \leq 5$ に軽減されている。次に、南海トラフ地震を対象とした詳細法(1)についてみると、改良前には $15 < P_L$ であるのに対し、改良後では $K_0=0.5$ のケースにおいては $\square 1.2\text{m}$ によって $P_L \leq 5$ を満足し、 $K_0=1.0$ を考慮した場合においては改良後の全てのケースで $P_L \leq 5$ を満たす結果となった。

最後に、詳細法(2)の有効応力解析による、最大値応答分布と石炭灰層中央深度における過剰間隙水圧比の時刻歴を図 4、図 5 に示す。本結果より、改良前・改良後ともに、過剰間隙水圧比は最大 1.0 近くまで上昇しているが、改良後では改良前に比べてせん断ひずみ γ が小さく抑えられている。特に、改良後のうち $K_0=1.0$ とした場合にはその違いが顕著であり、改良前は最大で $\gamma=7\%$ 程度発生するのに対し、 $\square 1.6\text{m}$ および $\square 1.4\text{m}$ では最大 3% 程度、 $\square 1.2\text{m}$ では最大 2% 程度に抑制されている。本解析結果より、改良後地盤においては、過剰間隙水圧の上昇を生じながらも、地盤の剛性がある程度保持されているものと考えられる。

6. まとめ

石炭灰埋立地盤における静的締固め工法 (SAVE) の試験施工結果を用い、液状化の検討を実施した。その結果、高改良率の地盤においては、未改良地盤に比べて液状化被害を相当軽減できる可能性があることを確認した。今後は、これらの液状化検討結果を参考として、最適な締固め改良仕様の設計を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 萩原ら：石炭灰埋立地盤に対する静的締固め工法の適用性 (その 3)，第 52 回地盤工学研究発表会, 2017. (投稿中)

表 2 液状化検討ケース一覧

検討方法	対象地震動 (M: マグニチュード)	地震時 せん断応力比 L	液状化 抵抗比 R	検討ケース							
				改良前		改良後杭間地盤					
						K_0	$\square 1.6\text{m}$ (15.0%)	$\square 1.4\text{m}$ (19.6%)	$\square 1.2\text{m}$ (26.7%)		
簡易法	$\alpha_{\max}=200\text{Gal}$ (M=7.5) $\alpha_{\max}=350\text{Gal}$ (M=9.0)	建築基礎指針 (地表面加速度 $\alpha_{\max}$)	建築基礎指針	0.5	A1-0	0.5	A1-1	A1-2	A1-3		
				0.5	A2-0	0.5	A2-1	A2-2	A2-3		
詳細法(1)	南海トラフ 過去地震最大 (M=8.4)	SHAKE解析 (各深度の $\tau_{\max}$)	建築基礎指針 (R_{L15} 試験値)	0.5	B-0	0.5	B-1a	B-2a	B-3a		
詳細法(2)				有効応力解析 (FLIP) により 液状化程度を直接評価	0.5	C-0	0.5	C-1a	C-2a	C-3a	
							1.0	C-1b	C-2b	C-3b	

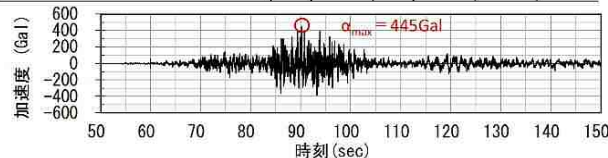


図 3 南海トラフ過去地震最大モデルの基盤地震動

表 3 簡易法・詳細法(1) 検討結果一覧

検討方法	改良前地盤			改良後杭間地盤					
	K_0	ケース	P_L	K_0	ケース	P_L	ケース	P_L	ケース
簡易法	0.5	A1-0	1.5	0.5	A1-1	0.0	A1-2	0.0	A1-3
	0.5	A2-0	15.1	0.5	A2-1	4.8	A2-2	3.4	A2-3
詳細法(1)	0.5	B-0	19.0	0.5	B-1a	11.6	B-2a	9.4	B-3a
				1.0	B-1b	4.5	B-2b	2.0	B-3b

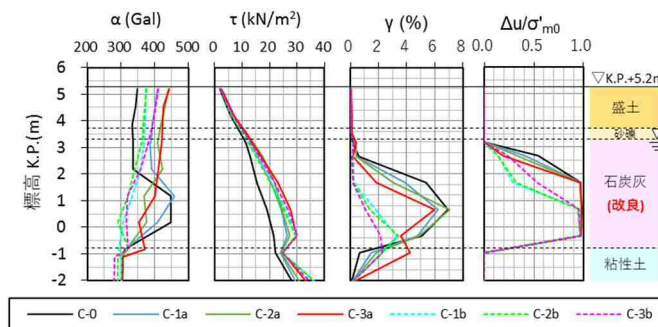


図 4 詳細法(2) 有効応力解析 FLIP 最大応答値深度分布

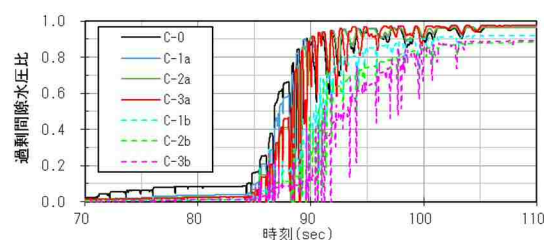


図 5 詳細法(2) 有効応力解析 FLIP
石炭灰層の過剰間隙水圧比時刻歴