静的締固め工法の杭芯材としてのクリンカアッシュの適用性（その 3）
～有効応力解析による SCP 改良後地盤の液状化抑制効果の確認～

大成建設株式会社　正会員○吉田　龍平，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
基礎地盤コンサルタンツ株式会社　正会員　萩原　協仁，正会員　大久保　幸倫

１．はじめに

SCP 工法の一種である静的締固め工法（SAVE）の杭芯材料としてのクリンカアッシュ（CA）の適用性確認を目的として，SAVE の試験施工を実施した．試験施工においては，杭間地盤について十分な密度増大効果と液状化強度の増加が得られることを確認した．また，杭芯 CA については，間隙比 e が液状化強度比 RL と良い相関を示すことに着目し，原位置で測定した間隙比 e から液状化強度比 RL を間接的に推定する方法を提案した．本稿においては，杭間地盤と杭芯 CA をモデル化した有効応力解析を実施し，レベル 2 地震動に対する液状化抑制効果を確認した結果を報告する．

２．解析ケース

解析ケースを**表 1** に示す．SCP 改良地盤を対象としたケースとしては，改良率 9.6%（φ700mm の CA 杭で正方形ピッチ 2.0m に相当）と 19.6%（同じく 1.4m に相当）の 2 ケースを設定し，両改良仕様に対して，杭間地盤のみのケースと，杭間地盤と杭芯 CA の両方を複合地盤としてモデル化したケースを実施した．解析プログラムは FLIP を用いた．

表 1　解析ケースとモデル化方法

ケース	改良有無	改良杭ピッチ（平面改良率）	杭間地盤	杭芯 CA
1	無対策	—	—	—
2-1	SCP 改良	正方形@2.0m (as=9.6%)	○	—
2-2			○	○
3-1		正方形@1.4m (as=19.6%)	○	—
3-2			○	○

○：モデル化する，—：モデル化しない

３．解析モデルおよび対象地震動

解析モデルを**図 1** に示す．地盤構成は，表層から Bs 層，As 層，Dc 層であり，地下水位以深の Bs 層と As 層，杭芯 CA について液状化（過剰間隙水圧の上昇）を考慮した．SCP 改良地盤における改良杭と杭間地盤の複合地盤のモデル化方法については様々な方法が提案されているが，本検討においては改良杭と杭間地盤は巨視的に同一の挙動をするものとみなし，杭芯 CA をモデル化したケース（2-2，3-2）では，杭芯 CA と杭間地盤を一次元土柱として貼り合わせた簡易なモデルを採用した．この時，改良率 as に応じて杭芯 CA 要素と杭間地盤要素の厚みを調整し，モデル地盤に占める杭芯 CA 要素の比率を実際の改良率と一致させた．

基盤地震動は，**図 2** に示すレベル 2 地震動相当の波形を用いた．

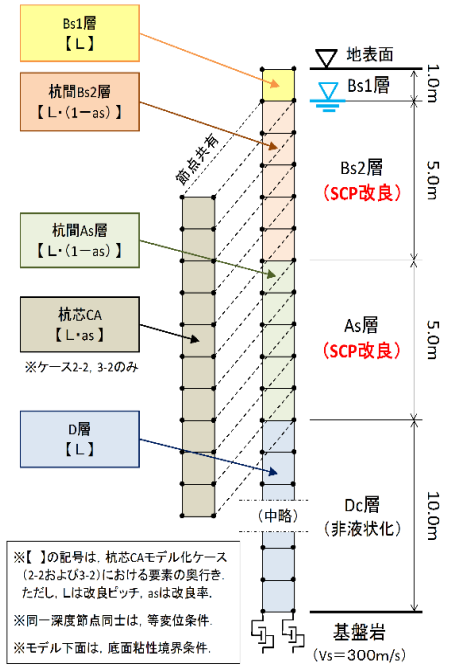

図 1　解析モデル概念図

４．解析物性値

解析物性値を**表 2** に示す．Bs 層と As 層は，層中央の原地盤 N 値をそれぞれ 4，10 として設定した．SCP 改良地盤ケースにおいては，改良後の杭間地盤 N 値を建築基礎のための地盤改良指針案に示される「方法 D」により求め，せん断弾性係数については改良後 N 値に応じた値を設定した．ケース 2-2，3-2 における杭芯 CA の物性は，試験施工において実施した間隙比 e＝1.0 の密度調整試料に対する物理・力学試験結果をもとに設定した．

液状化パラメーターは，液状化考慮対象である Bs 層，As 層，杭芯 CA のそれぞれに対し要素シミュレーションを実施して設定した．ここで，Bs 層と As 層の目標 RL20 は N 値に基づいた道路橋示方書の推定式を，RL4 および RL100 については貫井ら [1)]を参考に設定した．一方，杭芯 CA の目標値については，試験施工より得られた密度調整試料（e＝1.0）の液状化試験結果を用いた．要素シミュレーションの結果（液状化強度曲線）を**図 3** に示す．

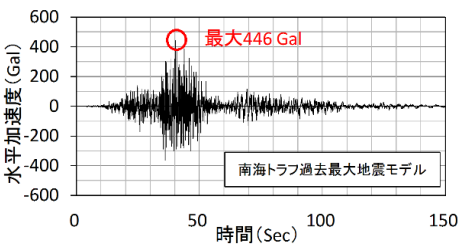

図 2　基盤地震動

キーワード　静的締固め工法（SAVE），クリンカアッシュ，有効応力解析
連　絡　先　〒470-2532　愛知県知多郡武豊町字竜宮 1-1　大成建設㈱名古屋支店土木作業所　ＴＥＬ0569-73-8600

５．解析結果

解析により得られた最大応答値深度分布を**図 4** に示す．

まず，過剰間隙水圧比は，いずれのケースでも Bs2 層と As 層で 1.0 近くまで上昇する結果となった．ここで，無対策地盤のケース 1 において As 層上部の水圧比が低いのは，As 層下部の液状化により減衰が生じたためである．一方，@1.4m 改良のケース 3-1 においても同様の傾向がみられるが，これは減衰効果に加えて As 層の剛性と液状化強度自体が十分高いためであると考えられる．

次に，せん断ひずみについてみると，無対策地盤のケース 1 に比べて，その他の SCP 改良地盤ケースではせん断ひずみが抑制されている，特に，@1.4m 改良ケースのせん断ひずみの低減効果は顕著であり，Bs2 層と As 層のいずれも一般的に液状化の指標として用いられる 3.75%（γSA）をいずれも下回っている．

改良地盤同士の比較では，ケース 3-1・3-2（@1.4m）の方がケース 2-1・2-2（@2.0m）よりも最大で 1.5%程度ひずみが小さく，改良ピッチによる改良効果の違いも確認できる．さらに**図 5** に示した As 層中央深度要素の過剰間隙水圧比の時刻歴変化からも，ケース 3-1・3-2 の方が過剰間隙水圧比の上昇が緩やかとなり，地盤の粘り強さが増していると言える．

最後に，杭間地盤のみのモデル化ケースと，杭芯 CA と杭間の複合地盤によるモデル化ケースの結果を比較すると，@2.0m（ケース 2-1・2-2）では複合地盤モデルの方がひずみは若干小さく抑えられている．これに対し，@1.4m（ケース 3-1・3-2）では杭間 As 層の方が杭芯 CA に比べて剛性と液状化強度が大きいため，@2.0m の傾向とは反対に，複合地盤モデルの方がややひずみが小さい．ただし，ひずみの差は 1%以内であり，今回の解析条件においては，杭芯 CA を複合地盤としてモデル化することにより地盤全体の挙動へ及ぼす影響は小さく，杭間地盤のみで改良後地盤を評価するモデル化方法でも十分妥当な結果が得られていると言える．

６．まとめ

SCP 改良後地盤の有効応力解析を実施し，改良率に応じてせん断ひずみの抑制効果が大きくなることを確認した．また，今回の解析条件では，杭芯と杭間地盤を複合地盤としてモデル化することによる影響は小さく，杭間地盤のみでモデル化することでも妥当な評価結果が得られていると考えられる．今後は，杭芯に CA を用いた SAVE の施工データを蓄積していく予定である．

表 2　解析物性値一覧

対象地盤要素	改良仕様	飽和質量密度 ρsat (t/m3)	細粒分含有率 Fc (%)	土層中央深度 Z (m)	土層中央深度における設定値 N値	間隙率 n	有効拘束圧 σ'm (kN/m2)	せん断弾性係数 Gm (kN/m2)	体積弾性係数 Km (kN/m2)	せん断強度 τf (kN/m2)	強度定数 粘着力 C (kN/m2)	内部摩擦角 φ (deg)	最大履歴減衰 hmax	補正N値 Na	液状化強度比 RL20 εDA=5%	液状化パラメータ（間隙水圧上昇を考慮する要素のみ） φp (deg)	s1	w1	p1	p2	c1
Bs層	原地盤	1.85	24	3.0	4	0.51	23.2	29,800	77,700	14.8	0	39.7	0.24	8.0	0.192	28	0.005	3.50	0.60	1.00	1.80
	@2.0m				8	0.49		47,400	123,600	15.3		41.2		11.3	0.228		0.005	4.70	0.62	1.00	2.00
	@1.4m				11	0.47		58,600	152,800	15.6		42.4		15.6	0.267		0.005	6.20	0.60	1.00	2.25
As層	原地盤	1.94	20	8.5	10	0.49	55.3	57,600	150,200	36.0	0	40.6	0.24	13.9	0.252	28	0.005	6.60	0.55	1.00	2.20
	@2.0m				17	0.46		82,100	214,100	37.0		42.0		18.9	0.296		0.005	7.80	0.60	1.00	2.51
	@1.4m				27	0.44		111,700	291,300	38.0		43.5		30.0	0.793		0.005	23.00	43.00	1.00	3.53
Dc層	原地盤	1.91	81	16.0	11	0.46	100.4	94,500	246,400	137.5	137.5	0	0.20								
杭芯CA	-	1.60	13	6.0	9	0.49	31.7	144,000	375,500	21.6	0	43.0	0.24	13.7	0.597	28	0.005	14.00	10.00	1.00	3.00

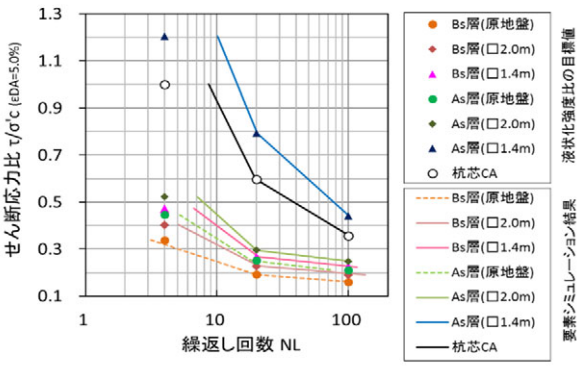

図 3　液状化強度曲線

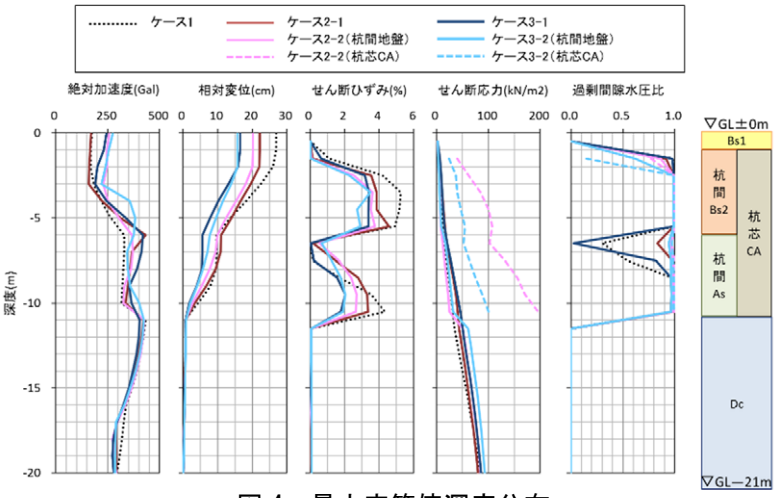

図 4　最大応答値深度分布

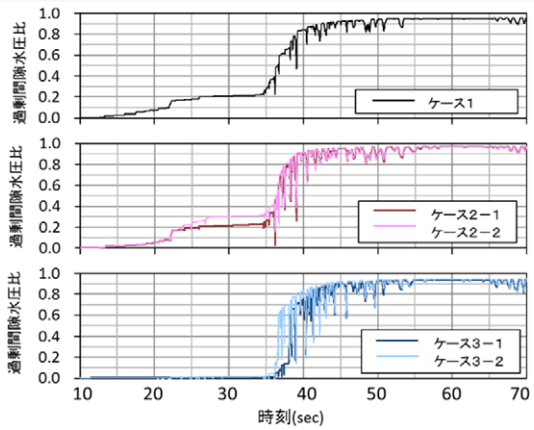

図 5　過剰間隙水圧比の時刻歴
（※As 層中央深度における 10～70 秒の結果）

参考文献

1)　貫井ら：液状化強度曲線の近似式の検討，第 40 回地盤工学研究発表会，2005.