

窯業副産物である微粒珪砂キラのPS灰による改良効果と骨格構造概念に基づく解釈

名古屋大学 国際会員 中野正樹, 山田英司, 浅岡 顕

1 はじめに

窯業副産物キラを地盤材料として有効利用するために、PS灰（製紙工業の副産物、ペーパースラッジ灰）との破砕・混合による団粒化、その後の締固めと養生によってPS灰改良土を作製し、その物性、力学特性を調べた。PS灰はキラの乾燥重量に対して18%、27%、36%を混合した（それぞれPS18、PS27、PS36とする）。窯業副産物として排出されるキラの物性、力学特性と3種類の改良土との比較を行った結果、PS27において最も改良効果が現れることが分かった^{1),2)}。本論文では、まずキラの物性および力学特性を示し、PS27の場合について、室内力学試験による力学特性における改良効果を示した後に、土の骨格構造（構造・過圧密・異方性）の働きを記述できる弾塑性モデル（SYS Cam-clay model）³⁾の応答によって力学挙動を再現し、PS灰によるシルト質砂キラの改良原理を骨格構造概念に基づいて考察する。

2 窯業副産物キラの物性および力学特性

キラは珪砂精製時に排出される窯業副産物であり、その主な成分はSiO₂とAl₂O₃で、それぞれ70%、17%を占める。珪砂精製時の汚泥水を沈殿させ、高圧フィルタープレスにかけて脱水ケーキ状態で排出されたキラ（脱水ケーキキラ）は、常時含水比 $w=33\%$ を有する。キラの物理的性質を表-1に、粒径分布を図-1に典型的な砂と粘土とともに示す。キラは地盤材料の工学的分類の基準によるとシルト（ML）に分類され、液性限界 w_L は粘土に比べ小さく、塑性指数 I_p は17.3と低くなっている。土粒子密度 ρ_s については、通常的地盤材料とほとんど同じ値を示し、粒度は砂と粘土の中間値を示す。脱水ケーキキラを乾燥させ、繰返し乾燥法により締固め試験を行ったところ、最大乾燥密度 $\rho_{d\max}=1.56\text{g/cm}^3$ 、最適含水比 $w_{opt}=21.4\%$ となった（図-2）。最適含水比での一軸圧縮強度 $q_u=110\text{kPa}$ 、脱水ケーキキラ（含水比 $w=33\%$ ）の一軸圧縮強度 $q_u=24.8\text{kPa}$ となった（図-3）。キラを乾燥させて締固めることにより強度は上昇するものの、排出直後の強度は低く、何らかの改良が必要となる。拘束圧を変えた三軸圧縮試験結果は後ほど示す。

表-1 キラ，粘土，珪砂の各種物性

	キラ	粘土	珪砂
初期含水比 (%)	33.0	—	—
液性限界 w_L (%)	44.6	94.0	—
塑性限界 w_p (%)	27.3	34.6	—
塑性指数 I_p	17.3	59.4	—
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.62	2.65	2.65

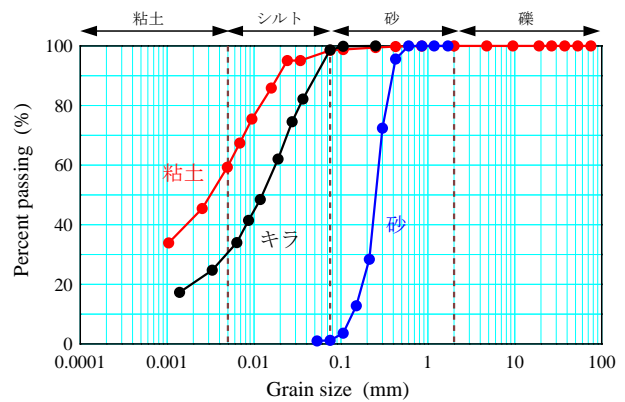


図-1 キラ，粘土，砂の粒径加積曲線

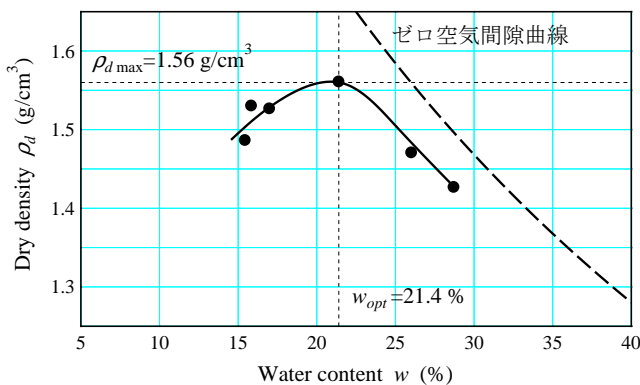


図-2 未改良キラの締固め曲線

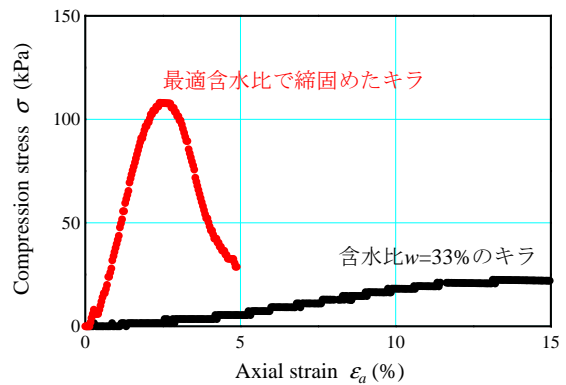


図-3 未改良キラの一軸圧縮強度

3 破碎・PS 灰混合・締固めによるキラの改良

(1) 改良方法

キラの固化材として用いた PS 灰は，成分調整を施されたものを富士製紙共同組合から得た．PS 灰の主な成分は， SiO_2 が 40%， Al_2O_3 が 25%， CaO が 27% で，土質改良効果の高い石灰成分や粘土鉱物を多く含有し，キラに及ぼす改良効果は確認している⁴⁾．また灰粒子は多孔質材料で保水性に優れた特徴をもつ．

チェーン回転式破碎混合機⁵⁾（以降，破碎混合機とよぶ）を用いて脱水ケーキキラを破碎すると同時に PS 灰を均質に混合し，キラと PS 灰の団粒集合体を作製した（ $75\mu\text{m}$ 以上の粒径が 95% を占める）．団粒化したキラに対して突固めによる締固めを行い，その後養生することによって供試体を作製した．養生日数として 0 日，7 日，14 日，21 日としている．以下は PS27 の結果について示す．

(2) 改良土の締固め特性と一軸圧縮強さ

図-4 に PS27 の締固め曲線を示す．図中のプロットは，混合時に含水比調整せずに締固めた状態を示す．未改良キラに比べ，最大乾燥密度は減少している（ $\rho_{d\text{max}}=1.56\text{g}/\text{cm}^3 \rightarrow 1.45\text{g}/\text{cm}^3$ ）が，プロットの状態はほぼ最適含水比，最大乾燥密度になっている．すなわち，PS27 の場合は，破碎混合機を用いてキラと PS 灰を破碎・混合し，締固めれば含水比調整することなく最適含水比，最大乾燥密度の状態が得られることになる．

図-5 に PS27 の養生日数に対する一軸圧縮強度を示す．混合時に含水比調整せずに締固めた供試体（図-4 のプロット）を用いて一軸圧縮試験を実施した．PS 灰混合によって一軸圧縮強度は上昇し，養生 0 日でも $q_u=286\text{kPa}$ となり，脱水ケーキキラの約 11 倍となる．養生 14 日まで強度は上昇して養生 0 日の 2 倍の強度増加を示す．養生 21 日になると一軸圧縮強度は 495kPa まで上昇し，脱水ケーキキラの約 20 倍となる．ここで PS27 について，さらにセメントをキラ乾燥重量に対して 7.5% 添加し（PSC27），PS27 と比較した（図-5）．セメントを添加することにより養生日数による強度上昇が著しく向上し，養生 14 日の一軸圧縮強度は 991kPa で脱水ケーキキラの約 40 倍になっている．

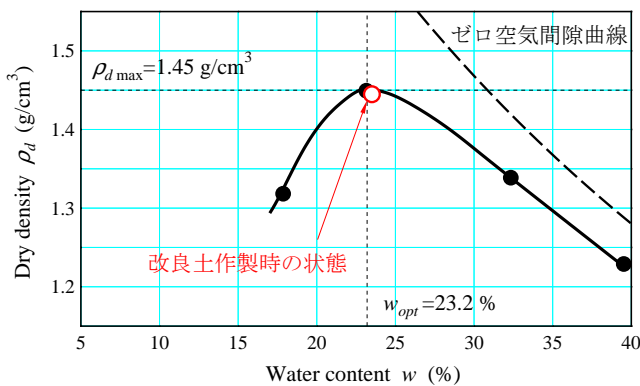


図-4 キラ改良土（PS27）の締固め曲線

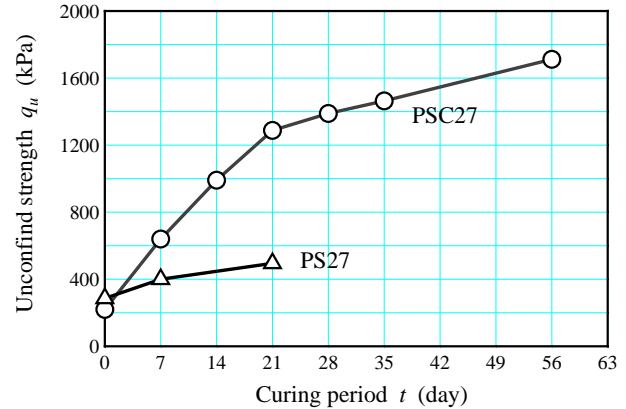


図-5 キラ改良土の一軸圧縮強さ

(3) 圧縮特性における改良効果

図-6 は未改良キラ（スラリー状キラおよび最適含水比で締固めたキラ）とキラ改良土（PS27）の標準圧密試験における鉛直応力 σ_v ~ 比体積関係 $v (=1+e, e: \text{間隙比})$ を示す（図中のプロット）．図中には， $\sigma_v=39.2\text{kPa}$ から $\sigma_v=2511\text{kPa}$ までの鉛直応力増分に対する比体積 v の変化量を示している．PS 灰の破碎・混合によって，高圧縮性のキラは低圧縮性の材料に改良されることが分かる．

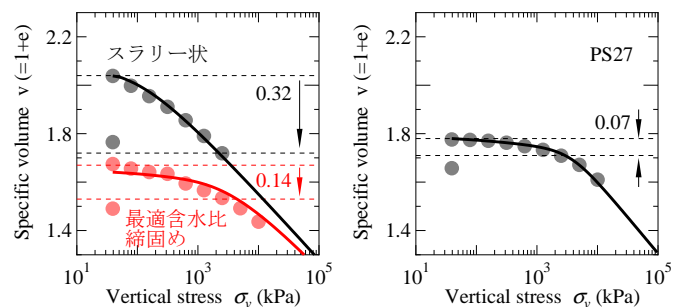


図-6 未改良キラ，キラ改良土（PS27）の一次元圧縮挙動と SYS Cam-clay model による再現

(4) 非排水せん断特性における改良効果

図-7は未改良キラ（スラリー状キラおよび最適含水比で締固めたキラ）の側圧一定非排水三軸試験結果を示す（図中のプロット）。スラリー状キラでは全くせん断強度を発揮することができない。最適含水比に調整して突き固めによって締固めると、せん断の進行に伴い、初期は平均有効応力 p' が減少するが、やがて p' が増加しながらせん断応力 q が増加する非排水せん断挙動を示し、せん断強度も大きくなる。

図-8はキラ改良土（PS27）の側圧一定非排水三軸試験結果を示す（図中のプロット）。キラ改良土も最適含水比で締固めたキラと同様のせん断挙動を示すが、スラリー状キラおよび最適含水比で締固めたキラよりもさらに大きなせん断強度を発揮している。

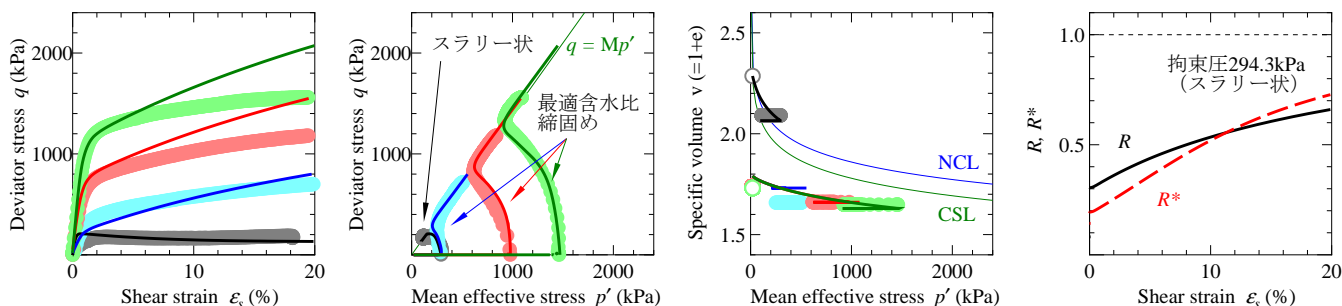


図-7 未改良キラの非排水三軸圧縮試験結果と SYS Cam-clay model による再現

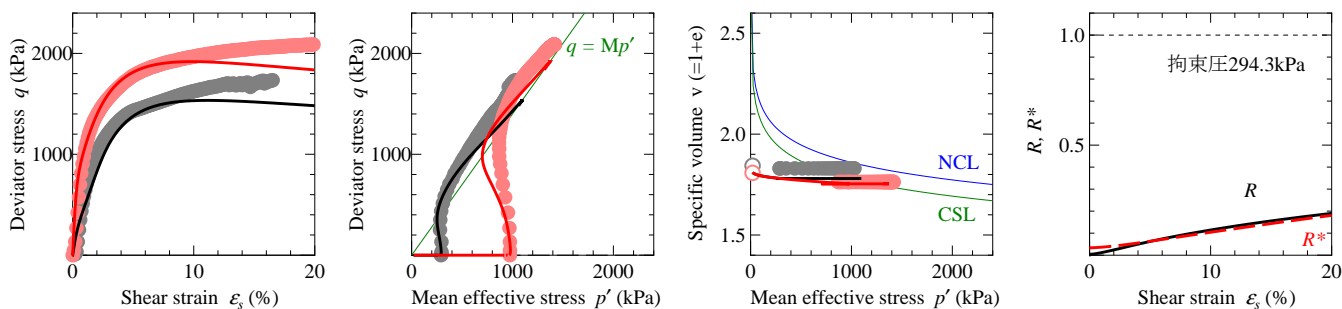


図-8 キラ改良土（PS27）の非排水三軸圧縮試験結果と SYS Cam-clay model による再現

4 SYS Cam-clay model による力学挙動の再現

図-6～図-8中の細線は、SYS Cam-clay model を用いた軸対称条件下における構成式応答の計算結果を示す。非排水三軸圧縮試験では、初期状態から等方圧密過程を計算し、その後にせん断過程を計算した。また、最適含水比で締固めたキラは、スラリー状キラの初期状態からの排水繰り返しせん断によって突き固めによる締固め過程を表現した。

表-2、表-3は、それぞれ計算に用いた材料定数、初期値を示す。改良効果を骨格構造概念に基づいて整理するため、未改良キラとキラ改良土の弾塑性パラメータは同一とし、破碎、PS灰混合、締固めとその後の養生による改良はキラの骨格構造に及ぼす働きかけと見なした。すなわち、破碎・石灰混合・締固めを発展則パラメータの変化で表現し、養生の効果を初期値の変化で表現した。これらの図の試験結果と計算結果を比較すると、計算結果は十分に試験結果を再現していることが分かる。

図-7、図-8の $R, R^* \sim \epsilon_s$ 関係は、せん断に伴う過圧密 (R) と構造の程度 (R^*) の変化を示す。1に近いほど過圧密解消、構造劣化/破壊が進展している。塑性変形が同じなら、砂では一般に構造の劣化/破壊が過圧密の解消より早く進展し、粘土では逆に、過圧密の解消のほうが構造の劣化/破壊より早く進展する³⁾が、キラおよびキラ改良土では過圧密解消、構造劣化/破壊ともほぼ同じ速さで進展している。また、キラ改良土はキラに比べて構造劣化/破壊の進展は遅くなっている。初期値に関して見ると、表-3より、キラ改良土はキラに比べて構造高位

化，過圧密化していることが分かる．破碎および PS 灰の混合，その後の突き固めによる締固めによって過圧密化し，養生によって構造が高位化し，さらに過圧密になる⁶⁾と考えられる．そのために，せん断強度が上昇し，圧縮性は低下する．PS27 の場合に最も改良効果が現れたが，その理由は，PS27 の自然含水比が最適含水比付近になるので他の場合に比べて突き固め回数が多くなり，さらに過圧密になると同時に初期比体積も小さくなったためと考えられる．

表-2 計算に用いた材料定数

<弾塑性パラメータ>			
圧縮指数 λ	0.125	NCL の切片 N	2.15
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.009	(at $p' = 98.1\text{kPa}$)	
限界状態定数 M	1.4	ポアソン比 ν	0.3
<発展則パラメータ>		キラ	PS27
正規圧密土化指数 m	0.1	0.018	
構造劣化指数 a	0.8	0.07	
構造劣化指数 b	0.8	0.11	
構造劣化指数 c	1.5	0.85	
構造劣化指数 c_s	0.85	0.85	
回転硬化指数 b_r	0.01	0.01	
回転硬化限界定数 m_b	1.0	1.0	

表-3 計算に用いた初期値

<初期値・圧密試験>			キラ	PS27
比体積 v_0			2.04	1.78
有効応力 p'_0 (kPa)			39.2	39.2
過圧密比 $1/R_0$			21.0	1955
構造の程度 $1/R_0^*$			3.0	30.0
<初期値・三軸試験>			キラ	PS27
比体積 v_0			2.29	1.81
有効応力 p'_0 (kPa)			19.6	19.6
過圧密比 $1/R_0$			12.2	3186
構造の程度 $1/R_0^*$			7.0	30.0

5 おわりに

含水比 $w=33\%$ で排出されるキラに対し，PS 灰混合率（キラ乾燥重量に対して）27% で破碎混合，その後締固めた PS 灰改良土（PS27）は，締固め曲線での最適含水比 w_{opt} を示し，一軸圧縮強度も 286kPa で脱水ケーキキラの 11 倍以上，養生 21 日になると 495kPa で約 20 倍となり，高品質な地盤材料に転化する．標準圧密試験からも PS27 は他の PS 灰混合率の改良土に比べ，圧縮性は低い．PS27 にセメントを転化することにより（7.5%），養生 14 日の一軸圧縮強度が 991kPa で脱水ケーキキラの約 40 倍になり，圧縮性は PS27 よりも低減する⁷⁾．また，キラ，PS 灰の大きな特徴の一つに高保水性が挙げられる．今回は示さなかったが，PS 灰改良土は，強度を有する保水性材料として，例えば保水性舗装材など，付加価値のある地盤材料として有効利用が可能となると考えている^{1),7)}．

未改良キラと弾塑性パラメータを同じにして，PS 灰改良土の試験結果をシミュレートしたところ，計算結果は試験結果を十分に再現できた．PS 灰の固化作用と締固め効果は，骨格構造の働きを変化させることで良好に力学挙動を表現できた．すなわち，PS 灰改良土はキラに比べ構造が高位化し，過圧密が増加し，また構造劣化しにくく，過圧密解消しにくい材料に転化した．

なお本研究は，科学研究費基盤研究 (C)（課題番号 18560483）の助成を得ている．

参考文献

- 1) 中野他 (2008): 窯業副産物である微粒珪砂キラの PS 灰による改良効果に関する実験的研究，第 43 回地盤工学研究発表会概要集．
- 2) 山田他 (2008): PS 灰を用いた微粒珪砂キラ改良土の骨格構造概念に基づく改良原理の解釈，第 43 回地盤工学研究発表会概要集．
- 3) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S & F, **42**(5), pp.47-57.
- 4) 中野他 (2006): 破碎・石灰混合・締固めによるシルト改良土の構造の高位化，第 41 回地盤工学研究発表会概要集，pp.759-760.
- 5) 二宮他 (2002): 回転式破碎混合工法を用いた事前混合処理工法の実施例，土木学会，第 1 回土木建設技術シンポジウム，pp.225-232.
- 6) 田代他 (2004): 土の骨格構造の働きに着目した「擬似過圧密効果」の一考察，土木学会応用力学論文集，Vol.7, pp.589-596.
- 7) 中野他 (2008): PS 灰，セメント，骨材を混合した微粒珪砂キラ改良土の力学特性の把握，土木学会平成 20 年度年次学術講演会．