PS灰系改良土の強度特性に及ぼす 養生効果とその要因に関する基礎的検討

川合 彩加¹・早野 公敏²・山内 裕元³

¹学生会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: kawai-sayaka-tc@ynu.jp

²正会員 横浜国立大学大学院教授 都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: hayano-kimitoshi-hg@ac.jp

³正会員 domi環境株式会社代表取締役 (〒299-0268 千葉県袖ヶ浦市南袖29番地)
E-mail: yamauchi@domi-es.jp

本研究では養生がペーパースラッジ (PS) 灰系改良土の強度特性に及ぼす影響を調べるとともに、養生にともなう物性変化の要因を検討した。その結果、PS灰系改良材の吸水性能は経時変化しないにも関わらず、養生にともない液性指数が低下しPS灰系改良土が硬化すること、またコーン指数はゆるやかに増加し液性指数と一義的な関係があることが明らかになった。一方、PS灰系改良材の成分組成は普通ポルトランドセメントのものに定性的に類似し、養生にともないPS灰系改良土にエトリンガイトが生成することが確認された。このエトリンガイト生成などによるPS灰系改良土中の拘束水量の経時変化を、40℃加熱の含水比試験結果により評価した結果、液性指数の変化とよい相関が認められ、さらに拘束水量に基づいて評価したコーン指数は実測値に比較的一致した。

Key Words : paper sludge ash, soil improvement, curing effect, ettringite, constrained water

1. はじめに

製紙工場で発生する汚泥を焼却して得られる残渣がペーパースラッジ(PS)灰である。従来、製紙工場の廃棄物としてPS灰の多くは埋立て処分されていた。しかし、現在では環境負荷を低減させるために処分量を抑制して再資源化量を増加させる努力が行われている。そのなかでPS灰の再資源化用途の一つとして土木利用材料の割合が増加している(図-1)¹⁾。これは、軟弱地盤改良や建設排泥処理に際し、PS灰の吸水性に着目して開発されたPS灰系土質改良材(以下、PS灰系改良材)の利用事例が増えているためである(例えば2)5)。PS灰粒子は多孔質性を有するため、泥土の余剰な水分を瞬時に吸水して土質の改良を行うことが可能である。

一方、近年、PS灰系改良材を泥土に添加すると吸水により泥土の改質が生じることに加えて、養生とともにPS灰系改良土の物性が変化していくことが指摘されている⁶⁾。しかし、現行の配合設計では泥土の改良原理として、PS灰系改良材の瞬時の吸水効果のみに着目する

図-1 PS灰の再資源化用途の変化(文献1)から作成)

ことが多く(例えば2)4)5)、仮に養生を実施しても吸水以外の改良メカニズムは期待されていない³⁾。これは泥土改質の目的や施工条件によっては必ずしも合理的な状況とは言えない。そこで本研究では物理試験やコーン指数試験を実施してPS灰系改良土の強度特性に養生が及ぼす影

響を調べるとともに、養生にともなう物性変化の要因を検討した。さらにPS灰系改良土中の拘束水の経時変化から、強度特性を簡易に評価する方法について基礎的な検討を行った。

なお、地盤工学用語辞典⁷⁾によれば、「脱水、乾燥、粒度調整および安定処理を行い、その性状を改良した発生土を総称して処理土」と呼んでいる。さらに「土の性状を固化材や高分子材で化学的に改良することを安定処理といい、主として安定処理された土を改良土」と呼んでいる。これらの定義に従えば、改良原理として吸水のみに着目する場合にはPS灰系処理土と呼んだほうが適切であるが、先に挙げた文献^{3,4,5)}では改良土と呼び、文献^{4,6)}では改質土としていて、やや混乱が見られる。本研究では、瞬時の吸水効果に加えて養生効果にも着目するため、PS灰系改良土と呼ぶことにする。

2. 用いた粘土とPS灰系改良材

(1) 青粘土とPS灰系改良材の粒度分布

本研究には泥土を模擬するものとして市販の青粘土を用いた。液性限界 w_L は40.7%、塑性限界 w_p は23.7%、塑性指数 I_p は17.0で、CL(粘土(低液性限界))に区分される。PS灰系改良材としては、フッ素などの不溶化処理のためにPS灰に薬剤を混合して水和処理したものをを用いた。なお、PS灰系改良材はNP(非塑性)である。

図-2に青粘土とPS灰系改良材の粒径加積曲線を示す。図中のJGSとは地盤工学会基準による土の粒度試験方法⁸⁾から得られた粒径加積曲線を表し、レーザ回折とはレーザ回折式粒度分布測定装置を用いて測定した粒径加積曲線を表している。なお、青粘土のレーザ回折では試料を分散させるために溶媒にヘキサメタリン酸ナトリウム0.2%水溶液を用いたが、PS灰系改良材のレーザ回折では溶媒に水溶液ではなくエタノールを用いた。これはPS灰系改良材と水を混合させるとPS灰系改良材は瞬時に吸水するとともに若干膨張して粒径に変化が見られたためである。そのため、PS灰系改良材については地盤工学会基準による土の粒度試験⁸⁾を実施していない。

同図を見るとレーザ回折により得られた青粘土の粒径は、地盤工学会基準のものより少し大きめである。この違いは主に測定原理の違いに因るものと考えられる。一方、レーザ回折により得られた青粘土とPS灰系改良材の粒径加積曲線は比較的似ている。また、本研究で使用したPS灰系改良材の粒径加積曲線は、既往のPS灰の粒度範囲²⁾に収まっており、粒径の小さいPS灰を原料として使用していることが確認できる。最近のPS灰が過去のものと比較して細粒分をより多く含むようになってきていることが報告されており⁹⁾、本研究で使用したPS灰系改良材の粒度は、上記の傾向と整合するものである。

図-2 青粘土とPS灰系改良材の粒径加積曲線

(2) PS灰系改良材の吸水性能の経時変化

PS灰系改良材は一般に高い吸水性能を示すことが知られている。これは原料であるPS灰が多孔質で水を保持するためである。一方で先に述べたように近年ではPS灰の細粒化の傾向があり、本研究のPS灰系改良材も粒径の小さいPS灰を使用していることが明らかになった。PS灰が細粒化すれば、粒子に存在する細孔の大きさも小さくなり、吸水性能に変化が生じる可能性がある。そこで本研究で用いたPS灰系改良材の吸水性能を調べるために、加藤らの方法⁹⁾に基づき吸水試験を行った。

吸水試験の様子を写真-1に、その概要を図-3に示す。試験では乾燥質量 m_{ps} (=100, 150, 200g)のPS灰系改良材を用意し、それぞれメスシリンダー内で体積 V_w (=300cm³)の水と攪拌混合した後、メスシリンダーを静置した。静置後、沈降堆積物に含まれる気泡をバイブレーターで加振して抜くとともに、堆積物を十分に締め固まった状態にした。この状態で所定の時間が経過後、水面までの高さ H_1 (cm)と堆積物表面までの高さ H_2 (cm)を測定し、灰1g当たりの吸水質量として次式で定義される吸水比 w_{ab} を求めた。

$$w_{ab} = \left[\frac{\{V_w - A(H_1 - H_2)\}}{m_{ps}} \right] \times \rho_w \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで ρ_w は水の密度(g/cm³)、 A はメスシリンダーの断面積(cm²)である。吸水試験では、PS灰系改良材に加えて青粘土も対象とした。青粘土の吸水比 w_{ab} の算定の際には、式(1)における m_{ps} を青粘土の乾燥質量 m_s に置き換えた。

メスシリンダーの静置後30分、24時間、7日後に測定した吸水比 w_{ab} の結果を図-4に示す。PS灰系改良材と青粘土それぞれについて3種類の供試体(100, 150, 200g)から得られた吸水比 w_{ab} およびその平均値($w_{ab} \text{ave}$)の経時変化を示した。ここで青粘土粒子にはあまり吸水性がないと考えられるが、同図では静置後30分の青粘土の吸水比

$(w_{ab})_{ave}$ は74.3%である。これは式(1)において、堆積粒子の間隙水も吸水量として扱っているためである。したがって本研究では吸水比 w_{ab} は対象材料粒子の絶対的吸水量を表すものではなく、異なる材料間で吸水性の程度を比較できる相対的な指標と捉える。

先に述べたようにPS灰系改良材の粒度は青粘土のものに比較的近くかつPS灰系改良材はNP(非塑性)である。これらの事実にも関わらず、図-4でPS灰系改良材の吸水比に着目すると、供試体の乾燥質量の違いによりばらつきがあるが、 $(w_{ab})_{ave}$ は132.3%であり、青粘土に比べて約60%も高い。実際に写真-1により、例えば乾燥質量200gで用意した供試体を比べると、青粘土よりPS灰系改良材の上澄み液が少なく、水を多く抱え込んでいることがわかる。また得られた吸水比 $(w_{ab})_{ave}$ は、既往のPS灰系改良材の吸水比の範囲⁹⁾の中央くらいにある。すなわち細粒分の多いPS灰を用いてもPS灰系改良材の吸水性に著しい変化は生じていない。さらに同図をみると静置後30分以降に吸水比はほとんど変化しない。これはPS灰系改良材を泥土に添加し養生を行っても吸水性能に経時変化が生じないことを示唆しており、PS灰系改良土の物

性が経時変化しても、吸水性が影響を及ぼしていないと考えることができる。

3. 養生にともなうPS灰系改良土の物性変化

前章で述べたように、本研究に用いたPS灰系改良材の特徴として、細粒分が多いものの従来と同様の吸水性能が認められる一方で、吸水性能に経時変化が認められないことが明らかになった。このような条件において、養生にともないPS灰系改良土の物性変化が生じるかを調べた。調査にあたっては、建設発生土の利用技術マニュアル¹⁰⁾や建設汚泥再生利用マニュアル¹¹⁾を参考に、PS灰系改良土を対象とした液性限界・塑性限界試験、含水比試験およびコーン指数試験を実施した。

(1) コンシステンシー特性の変化

まず養生にともなうPS灰系改良土のコンシステンシー特性変化を調べるために、液性限界・塑性限界試験¹²⁾および含水比試験¹³⁾を実施した。具体的には表-1に示すように含水比を液性限界 w_L の40.7%に調整した青粘土に、PS灰系改良材を乾燥質量比 A で5, 10, 15, 20, 25%添加した。その後、それぞれの供試体を室温約20℃で3時間, 3, 7, 28日間密閉養生し、液性限界・塑性限界試験および含水比試験を行った。ただし25%添加については28日養生の試験を実施していない。

PS灰系改良材を添加した直後のPS灰系改良土の様子を写真-2に、添加率・養生期間にともなう液塑性限界 w_L ,

写真-1 吸水試験の様子

図-3 吸水試験の概要⁹⁾

図-4 PS灰系改良材の吸水比の経時変化

表-1 液性限界・塑性限界試験、含水比試験の配合・養生条件

青粘土の調整含水比, $w(\%)$	PS 灰系改良材の添加率, $A(\%)$	改良土の養生期間, t
40.7%	5, 10, 15, 20, 25	3時間, 3, 7, 28日(ただし 25%を除く)

w_p の変化を図-5に、塑性指数 I_p の変化を図-6に示す。図-5から液性限界 w_L 、塑性限界 w_p は添加率 A ともに増加することがわかる。一方、図-6を見るとばらつきが見られるものの、添加率 A の増加に対して塑性指数 I_p はあまり変化していない。この理由として青粘土がもともと低塑性の粘土であることに加えて、粒度がPS灰系改良材のものによく似ておりPS灰系改良材を添加しても粒度変化が少ないことなどが考えられる。ここで養生期間 t の影響に着目すると、液性限界 w_L 、塑性限界 w_p は養生期間 t とともに増加する一方で、塑性指数 I_p については明確な傾向は認められなかった。

上記の液性限界・塑性限界試験結果と含水比 w の測定結果から各供試体の液性指数 $I_L[(w-w_p)/I_p]$ を算出した。添加率・養生にともなう液性指数 I_L の変化を図-7に示す。添加率 A の増加とともに液性指数 I_L が減少しており、土の流動性が次第になくなっていく状況は、写真-2の様子と調和的である。ここでPS灰系改良材を添加するとPS灰系改良土においてPS灰系改良材粒子の占める部分が増加し、吸水効果が生じなくても単純に固相増加効果により液性指数 I_L が減少する。固相は土粒子やPS灰系改良材粒子の占める部分を意味する。そこで固相増加効果のみにより変化する液性指数 I_L^* を算出して同図に点線で示した。なお塑性限界 w_p 、塑性指数 I_p は変化しないものとして算出した。すなわちPS灰系改良材の代わりに乾燥した青粘土が添加された状態とみなせる。同図をみると、

すべてのPS灰系改良土において固相増加効果のみを考慮した I_L^* より液性指数 I_L が小さくなっており、固相増加以外の改良効果の存在が認められる。各供試体の液性指数 I_L について、同じ添加率 A で固相増加効果のみを考慮した液性指数 I_L^* との差 ΔI_L を求めた。なお、ここで ΔI_L は絶対値として扱う。図-8は固相増加効果を基準とした液性指数からの変化量 ΔI_L について養生にともなう変化を示したものである。添加率が25%の結果にばらつきがあるものの、全体的に添加率 A が大きくなると養生期間の増加とともに液性指数変化量 ΔI_L がゆるやかに増加する傾向にある。液性指数 I_L が小さいほど、土の状態は硬いとみなせるため、PS灰系改良材の添加直後に改質された後も、PS灰系改良土が養生の経過とともに次第に硬化していくことが明らかになった。

(2) 強度特性の変化

コーン指数試験¹⁴⁾を実施して養生にともなうPS灰系改良土の強度特性を調べた。具体的には表-2に示すように、含水比を w_L に調整した青粘土に乾燥質量比 A でPS灰系改良材を5, 10, 20%, 含水比を $2w_L$ に調整した青粘土にPS灰系改良材を40, 50, 60%それぞれ添加し、室温約20℃で3時間, 3, 7, 28日間密閉養生した後、コーン指数試験を行った。また含水比を $1.5w_L$ に調整した青粘土に乾燥質量比 A でPS灰系改良材を25, 50%それぞれ添加し、3時間, 3, 7日間密閉養生した供試体についてもコーン指数試験を行った。

写真-2 PS灰系改良材を添加直後のPS灰系改良土の状況

図-5 添加率・養生にともなう液塑性限界の変化

図-6 添加率・養生にともなう塑性指数の変化

図-7 添加率・養生にともなう液性指数の変化

図-8 固相増加効果を基準とした液性指数からの変化量 \$\Delta I_L\$ の養生にともなう変化

表-2 コーン指数試験の配合・養生条件

青粘土の調整含水比, \$w_L\$ (%)	PS 灰系改良材の添加率, \$A\$ (%)	改良土の養生期間, \$t\$
40.7	5, 10, 20	3時間, 3, 7, 28日
61.1	25, 50	3時間, 3, 7日
81.4	40, 50, 60	3時間, 3, 7, 28日

図-9に得られたコーン指数を示す。添加率が60%の結果にばらつきがあるものの、全体的には養生にともなうコーン指数のゆるやかな増加が認められ、3時間養生供試体のコーン指数 $q_{c,3時間}$ に対して、3, 7, 28日間養生した供試体のコーン指数 $q_{c,3日}$, $q_{c,7日}$, $q_{c,28日}$ は大きい。図-10は $q_{c,3時間}$ に対して $q_{c,3日}$, $q_{c,7日}$, $q_{c,28日}$ を比較したものである。図中の点線1:2, 1:3, 1:4はそれぞれ $q_{c,3時間}$ に対して2, 3, 4倍のコーン指数を示したものである。添加率が5%のデータを除けば、3時間養生に対して3日間養生で約2倍、7日間養生で3~4倍、28日養生で約4倍にコーン指数が増加している。なお、ここで密閉養生下における増加割合であることに留意する必要がある。

図-9に示したデータのうち、含水比を w_L に調整した青粘土に乾燥質量比 A でPS灰系改良材を5, 10, 20%添加した供試体のコーン指数 q_c について、先に得られた液性指数 I_L (図-7参照)との相関性を調べた。その結果を図-11に示す。同図には青粘土のコーン指数 q_c および既往の火山灰質細粒土のコーン指数 q_c と液性指数 I_L のデータ¹⁵⁾、さらに建設発生土の土質区分基準に用いられている $q_c=200, 400, 800 \text{ kN/m}^2$ の値もあわせて示した。火山灰質細粒土と同様に、PS灰系改良土の液性指数 I_L とコーン指数 q_c に良い相関が認められる。すなわち、添加率 A や養生期間 t にともないPS灰系改良土の強度や硬さは変化するものの、両者には一義的な関係があると考えられる。なお、図中の点線は、PS灰系改良土の液性指数 I_L とコーン指数 q_c の相

 (a) 青粘土の調整含水比: w_L

 (b) 青粘土の調整含水比: $1.5w_L$ と $2w_L$

図-9 養生にともなう PS 灰系改良土のコーン指数の変化

関を次式で近似したものである。

$$q_c = 1284e^{-3.67I_L} \quad (2)$$

式(2)によると液性指数 I_L が約0.5を境にして、この値より小さくなると、コーン指数 q_c が急激に増加することが分かる。

図-10 $q_{c,3時間}$ と $q_{c,3日}$, $q_{c,7日}$, $q_{c,28日}$ の比較

図-11 養生にともなうPS灰系改良土のコーン指数の変化

4. PS灰系改良土の物性変化メカニズムの検討

(1) PS灰系改良材の成分組成

前章でPS灰系改良土は養生期間の経過にともない密閉養生下でも硬化するとともにゆるやかに強度増加することが明らかになった。しかし第2章で述べたようにPS灰系改良材の吸水性能に経時変化が認められないので、PS灰系改良材の吸水効果だけでは養生にともなう物性変化を説明できず、他の要因が影響していると考えられる。

望月・中野⁹⁾は、最近のPS灰の酸化カルシウム(CaO)の含有率が過去のものに比較して増加している傾向を報告している。そこで本研究で用いたPS灰系改良材の成分組成を、エネルギー分散型X線分光法(EDS)により調べた。比較のために普通ポルトランドセメント(OPC)およ

び青粘土についても実施した。

各材料の成分組成を表-3に示す。既往の報告²⁾では二酸化ケイ素(SiO₂)の含有率が一番高いが、本研究のPS灰系改良材ではCaOの含有率が一番高く40.6%である。これは普通ポルトランドセメントの含有率に比較して少ないが、過去に報告された事例¹⁶⁾²⁰⁾に比べて高い。さらに他の成分に着目すると、CaOについてSiO₂が多く、次に酸化アルミニウム(Al₂O₃)、三酸化硫黄(SO₃)、酸化鉄(FeO)の順番で多い。このようにCaO、SiO₂、Al₂O₃、SO₃、FeOの順番で含有率が高い形になる成分組成は普通ポルトランドセメントのものに定性的に類似している。

(2) 水和物の生成

本研究で用いたPS灰系改良材のCaO含有率は、既往の報告に比較して高く、また普通ポルトランドセメントの

表-3 PS 灰系改良材, OPC, 青粘土の成分組成
(%質量比)

(a) PS 灰系改良材

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	FeO	MgO	P ₂ O ₅	その他
40.6	20.7	17.2	6.2	4.6	2.7	1.4	6.6

(b) 普通ポルトランドセメント(OPC)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	FeO	MgO	その他
66.2	19.0	5.9	4.0	2.9	1.2	0.8

(c) 青粘土

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
57.1	20.1	11.1	4.1	4.1	1.9	1.7

成分組成に定性的に類似していることが明らかになった。これにより、PS 灰系改良土の養生にともなう物性変化には、セメント固化材のように水和物の生成が寄与しているという仮説が立てられる。

ここでセメント固化材による水和物として珪酸カルシウム水和物(C-S-H)、水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)、エトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)、モノサルフェート(3CaO・Al₂O₃・CaSO₄・12H₂O)などが挙げられるが、これら水和物の結合水量は温度により異なることが報告されている²⁾。たとえばエトリンガイトに関しては以下のような報告がある。

坂内・中川²²⁾は、エトリンガイトの昇温による非晶質化をX線回折によって調べたところ、回折線強度が60℃あたりから低下し105℃で消滅することを報告している。また、野澤²³⁾はセメントクリンカー構成化合物のC₃Aを水和させてエトリンガイトを合成したところ、80℃で12時間加熱するとエトリンガイトがメタエトリンガイトに変化して結合水量が大幅に減少すると述べている。さらに原島・伊藤²⁴⁾は、高炉スラグ中のエトリンガイトの分解率は60～70℃付近から大きく増加し、90℃では約80%分解することを明らかにしている。そこでこれらの既往の結果を踏まえて本研究では、PS 灰系改良土における水和物の生成有無を調べるために、異なる温度で加熱したPS 灰系改良土の粉末X線回折(XRD)を実施した。

図-12は、PS 灰系改良土および青粘土のX線回折結果を示したものである。用いたPS 灰系改良土は、表-4に示すように含水比を w_L に調整した青粘土にPS 灰系改良材を乾燥質量比Aで20, 100%添加し、室温約20℃で7日間密閉養生した後、40℃または110℃で加熱し乾燥させたものである。同図に示すように、青粘土にはエトリンガイト特有の回折線のピークが検出されない一方で、40℃に加熱して乾燥したPS 灰系改良土供試体にはピークが検出された。このことから青粘土にPS 灰系改良材を添加

表-4 X線回折に用いた供試体の配合・加熱条件

青粘土の調整 含水比, w_L (%)	PS 灰系改良材 の添加率, A(%)	改良土の 養生期間, t	加熱温度, T (℃)
40.7	20, 100	7 日	40, 110

(a) 40℃炉乾燥した PS 灰系改良土(添加率 100%, 7 日養生)

(b) 40℃炉乾燥した PS 灰系改良土(添加率 20%, 7 日養生)

(c) 110℃炉乾燥した PS 灰系改良土(添加率 100%, 7 日養生)

(d) 110℃炉乾燥した PS 灰系改良土(添加率 20%, 7 日養生)

(e) 青粘土

図-12 40℃, 110℃炉乾燥した PS 灰系改良土と青粘土の X 線解析結果

し、所定の養生期間を経ることによって水和物としてエトリンガイトが生成されることが明らかになった。さらに同図を見ると、110℃に加熱して乾燥したPS 灰系改良土供試体にはエトリンガイトのピークが検出されなかった。すなわち、110℃環境ではエトリンガイトの多くが非晶質化していると考えられる。

図-13は、走査電子顕微鏡(SEM)で取得したPS 灰系改良土の画像を示したものである。用いた PS 灰系改良土は、含水比を w_L に調整した青粘土にPS 灰系改良材を乾燥質

量比Aで50%添加し、室温約20℃で7日間密閉養生した後、40℃で加熱し乾燥させたものである。同図には多数の針状結晶が認められ、エトリングタイトの生成が確認できる。なお、110℃で加熱し乾燥させたPS灰系改良土のSEM画像も取得したが、40℃のものと比較して大きな違いは認められなかった。これは吉良ら²⁹が指摘しているように、エトリングタイトを加熱脱水しても結晶の外形はそのまま保たれるためと思われる。

5. 拘束水の経時変化が強度特性に及ぼす影響

(1) 拘束水の経時変化

前章でPS灰系改良材の成分組成が定性的に普通ポルトランドセメントのものに類似していること、養生にともないエトリングタイトが生成することが明らかになった。このエトリングタイトの生成により改良土の水の一部は結

図-13 PS灰系改良土(添加率 50%, 7日養生, 40℃炉乾燥)のSEM画像

合水として拘束されると考えられる。図-14は、養生にともなうPS灰系改良土中の拘束水の変化を表したものである。なお、土の粒子表面の帯電による固定水（あるいは吸着水）と区別するため、本論文ではPS灰系改良材の吸水分と水和物生成により結合される水分をあわせて拘束水と呼ぶこととする。同図では、PS灰系改良材によってもたらされるPS灰系改良土中の拘束水量を m_{psw} と表している。PS灰系改良材添加直後に吸水による拘束水が生じた後、養生に伴って水和物生成による拘束水が増加する。この拘束水の経時変化がPS灰系改良土の物性変化の要因として推察される。

そこでPS灰系改良土中の拘束水量 m_{psw} の経時変化を調べるために、エトリングタイトがあまり非晶質化しない40℃加熱による含水比試験を実施した。試験は地盤工学会の含水比試験¹³)の方法に準じて実施し、40℃の恒温乾燥炉に試料を入れて質量が一定となるまで27時間以上炉乾燥した。ここで、地盤工学会¹³)では、含水比を「(110±5)℃の炉乾燥によって失われる土中水の質量の、土の炉乾燥質量に対する比。質量百分率で表す。」と定義している。しかし、本論文では佐野ら²⁰)の定義と同様に、PS灰系改良土に対しては40℃の加熱温度で炉乾燥して算出した土中水の質量の、土の炉乾燥質量に対する比の質量百分率も広義の意味で含水比と称することにする。ただし、通常の110℃加熱により得られる含水比 w と区別するため、40℃加熱により得られた含水比を w_{40} と表記する。40℃加熱による含水比試験の条件を表-5に示した。含水比を w_c に調整した青粘土にPS灰系改良材を乾燥質量比Aで5, 10, 15, 20, 25, 50, 100%添加し、室温約20℃で3時間、3, 7, 28日間密閉養生した供試体について40℃加熱による含水比試験を行った。なお比較のために110℃加熱による含水比試験も合わせて実施した。

図-14 PS灰系改良土における拘束水の経時変化のイメージ

40℃, 110℃加熱により得られた含水比 w_{40} , w をそれぞれ添加率 A に対して図-15に示す。加熱温度によらず添加率 A の増加とともに含水比は減少するが、添加率 A が同じであれば110℃加熱供試体の含水比 w は養生期間 t によらずほぼ同じである。一方、40℃加熱供試体の含水比 w_{40} は養生期間 t とともに減少している。このことから、40℃加熱の含水比試験結果は養生にともなう水和物生成による拘束水量 m_{psw} の増加を評価できていると考えられる。佐野ら²⁹⁾は、石膏安定処理土において半水石膏や無水石膏が有する吸水効果を適切に評価するためには、110℃加熱の含水比試験よりも、二水石膏が半水石膏に形態変化を生じない温度の加熱試験の必要性を述べている。本研究においても、PS灰系改良土が有する拘束水効果を適切に評価するには、110℃より低温の加熱による含水比試験が必要と考えられる。

ここで図-14に示したPS灰系改良土中の拘束水量 m_{psw} が40℃加熱供試体では蒸発せずに残っているとすると、含水比 w_{40} は、次式のように表すことができる。

$$w_{40} = \frac{(m_w - m_{psw})}{(m_s + m_{ps} + m_{psw})} \times 100 \quad (3)$$

ただし、式(3)における拘束水量 m_{psw} は、常温ではなく40℃環境下におけるものである。

一方、図-15には図-7と同様に固相増加効果のみを考慮した含水比 w^* も合わせて示したが、含水比 w^* は次式で算出される。

$$w^* = \frac{m_w}{(m_s + m_{ps})} \times 100 \quad (4)$$

図-15では110℃加熱供試体の含水比 w はこの含水比 w^* に近いことから、110℃環境では拘束水が自由水に変化し蒸発していると考えられる。すなわち、PS灰系改良材の吸水分の蒸発に加えて、水和物生成により結合される水分が非晶質化していると推測され、この結果は図-12に示したXRDの結果と整合する。なお、厳密には添加率 A が高くなると含水比 w が w^* よりわずかに大きくなる傾向があるが、これはPS灰系改良材が粉体ではあるものの水和処理されているために水分をわずかに含んでいるためと考えられる。

図-15に示した40℃加熱の含水比 w_{40} と含水比 w^* の違いから、PS灰系改良土の土粒子質量 m_s に対する拘束水量 m_{psw} の比率（以下、拘束水率と呼ぶ） w_c を次式にて算出した。

$$\begin{aligned} w_c &= \frac{m_{psw}}{m_s} \times 100 \\ &= \frac{m_w - (m_w - m_{psw})}{m_s + m_{ps}} \times \frac{m_s + m_{ps}}{m_s} \times 100 \\ &\approx (w^* - w_{40}) \times \left(1 + \frac{A}{100}\right) (\%) \end{aligned} \quad (5)$$

なお、導出の際に式(3)において $m_{psw} \ll (m_s + m_{ps})$ と

表-5 40℃および110℃加熱による含水比試験の配合条件

青粘土の調整 含水比, w_L (%)	PS 灰系改良材 の添加率, A (%)	改良土の 養生期間, t	加熱温度, T (℃)
40.7	5, 10, 15, 20, 25, 50, 100	3時間, 3, 7, 28日	40, 110

図-15 40℃, 110℃加熱による含水比の違い

している。これは厳密には異なるものの、 w^* と w_{40} の違いが拘束水量 m_{psw} によるものとみなすことと同じである。各供試体について得られた拘束水率 w_c の経時変化を図-16に示す。添加率 A とともに拘束水率 w_c は大きくなるが、添加率 A が大きくなると養生期間の増加とともに拘束水率 w_c がゆるやかに増加することが分かる。また増加傾向は、図-9に示した養生にともなうコーン指数の変化と類似している。

(2) 拘束水の変化が強度に及ぼす影響

式(5)により算出される拘束水率 w_c には、養生期間の増加とともにゆるやかに増加する傾向があることから、PS灰系改良土の物性変化との相関を調べた。図-16に示した結果のうち表-1の配合・養生条件と同じ供試体の w_c と、図-8に示した各供試体の固相増加効果からの液性指数変化量 ΔL_i との相関を求めた。その結果を図-17に示す。ばらつきはあるものの、拘束水率 w_c と液性指数の変化量 ΔL_i には相関が認められ、拘束水率 w_c の増加とともに ΔL_i が増加している。したがって拘束水の経時変化がPS灰系改良土の液性指数の変化、すなわち硬さの変化に影響を及ぼしていることが分かる。

図-11に示したようにPS灰系改良土の液性指数 I_L とコーン指数 q_c に一義的な関係が見られることから、拘束水の経時変化がPS灰系改良土の強度特性にも寄与していると考えられる。そこで拘束水率 w_c から、種々の配合・養生条件のPS灰系改良土のコーン指数 q_c の予測を行い、実測値との比較を試みた。具体的には、表-2、図-9に示した配合・養生条件のPS灰系改良土のコーン指数を対象に比較を行った。まず表-2と同じ配合・養生条件の供試体を用いた40℃加熱による含水比試験を実施しその結果から、式(5)を用いて拘束水率 w_c を算出した。次に、算出した拘束水率 w_c と液性指数の変化量 ΔI_L の相関を示す次式(図-17参照)により、各配合・養生条件で期待される液性指数の変化量 ΔI_L を求めた。

$$\Delta I_L = 0.159 w_c \quad (6)$$

ここで、 $\Delta I_L = I_L - I_L^*$ であり、 I_L^* は固相増加効果のみを考慮した液性指数で配合条件から得られる。最後に、 ΔI_L と I_L^* からそれぞれの液性指数 I_L を算出し、式(2)を用いてコーン指数 q_c の予測値を求めた。

図-18に各配合・養生条件におけるコーン指数 q_c の予

図-16 土粒子質量に対する拘束水量の経時変化

図-17 液性指数の変化量 ΔI_L と拘束水率 w_c の関係

測値と実測値を比較したものを示す。ばらつきがあるものの両者の値は比較的一致しており、拘束水の経時変化がPS灰系改良土の強度変化に定量的に寄与していることが分かる。すなわち、拘束水の経時変化を、エトリンガイトがあまり非晶質化しない加熱温度の含水比試験などにより調べることで、養生にともなうPS灰系改良土の強度特性の変化を評価することが可能であると考えられる。なお同図でコーン指数が大きい場合に、実測値と予測値に違いが認められるが、これは図-11に示したようにコーン指数が大きくなると式(2)による近似値が実測値を少し下回っているためと考えられ、式(2)の適用範囲には留意が必要である。

6. 結論

近年、PS灰系改良材を泥土に添加すると吸水により泥土の改質が生じることに加えて、養生とともにPS灰系改良土の物性が変化していくことが指摘されている。そこで本研究ではPS灰系改良土の強度特性に養生が及ぼす影響を調べるとともに、養生にともなう物性変化の要因を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本研究に用いたPS灰系改良材は、近年のPS灰の細粒化の傾向に整合する形で細粒分が多いものの、従来と同様の吸水性能が認められた。ただし、吸水性能そのものに経時変化が認められなかった。
- (2) 吸水性能が経時変化しないに関わらず、PS灰系改良土は密閉養生下でも養生期間の経過にともない液性指数が低下し硬化することが明らかになった。またコーン指数は養生とともにゆるやかに増加し、液性指数との一義的な関係が認められた。
- (3) PS灰改良材の成分組成に着目すると、エネルギー分散型X線分光法(EDS)により普通ポルトランドセメントのものに定性的に類似していることが明らかになった。

図-18 拘束水率 w_c から得られる予測値と実測値の比較

またPS灰系改良土のXRDの結果から、110℃環境では非晶質化するエトリンサイトが養生にともないPS灰系改良土に生成していることが認められた。

(4) このエトリンサイト生成による拘束水の増加が物性変化の要因と考えられ、拘束水の経時変化を、40℃加熱の含水比試験結果により算出したところ、PS灰系改良土の液性指数の変化とよい相関が認められた。さらに算出した拘束水に基づいて、PS灰系改良土のコーン指数を予測したところ、実測値に比較的一致した。すなわち拘束水の経時変化を、エトリンサイトが非晶質化しない加熱温度の含水比試験などにより調べることで、養生にともなうPS灰系改良土の強度特性の変化を評価することが可能であると考えられる。

謝辞：本研究の遂行に際し、株式会社日建設シビルの片桐雅明氏に貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本製紙連合会：環境行動計画（廃棄物対策）フォローアップ調査結果，2011～2016.
- 2) 望月美登志，今井五郎，齊藤悦郎，吉野広司：製紙スラッジ焼却灰を基材にした泥土改良工法の開発と適用事例，基礎工，Vol. 34, No. 2, pp. 64-69, 2006.
- 3) 松丸沙織，林泰弘，江渕昇，竹井亮太，松尾雄治：PS 灰を主体とした土質改良材による泥土の改良，土木学会第 69 回年次学術講演会，III-112, pp. 223-224, 2014.
- 4) 加島史浩，竹山佳奈，浜谷信介，和栗成樹，山内裕元，鶴飼亮行，岩本裕之：PS 灰系改質材の水域利用における性状の把握および施工方法の提案，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 73, No. 2, pp. I_947-I_952, 2017.
- 5) 相良昌男：PS 灰を用いた無機吸水系土質改良材の適用事例，基礎工，Vol. 45, No. 9, pp. 80-82, 2017.
- 6) 望月美登志，中野浩之：PS 灰の利活用の現状と課題，基礎工，Vol. 45, No. 9, pp. 31-35, 2017.
- 7) 地盤工学会：地盤工学用語辞典，pp. 94，丸善，2006.
- 8) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 115-123，丸善，2009.
- 9) 加藤雄介，今井五郎，大向直樹，望月美登志，斎藤悦郎，吉野広司：PS 灰添加による泥土の改良に関する研究，第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp. 677-678, 2005.
- 10) 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル（第 4 版），pp. 29-32，丸善，2013.
- 11) 土木研究所：建設汚泥再生利用マニュアル，pp. 58-60，大成出版社，2008.
- 12) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 138-141，丸善，2009.
- 13) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 104-105，丸善，2009.
- 14) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 386-392，丸善，2009.
- 15) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領第 1 集土工編，pp. 2-31～2-32, 2006.
- 16) 下野健一・桑原啓至：製紙スラッジ焼却灰の建築用ボードへの利用に関する研究，高分子加工，Vol. 31, No. 3, pp. 5-14, 1982.
- 17) 富永充治：製紙スラッジの処理・再資源化一製鋼用副資材への産業廃棄物の利用，クリーンジャパン，Vol. 90, pp. 16-24, 1991.
- 18) 下野健一，山本登久男：製紙スラッジ焼却灰の有効利用 II セメント工業材料への利用，静岡県製紙工業試験報告，pp. 109-112, 1980.
- 19) 浅田素之，堤博恭，鈴木正浩，福江正治：PS 灰と採石粘土の混合地盤材料のトンネル充填材への活用事例，基礎工，Vol. 32, No. 7, pp. 44-47, 2004.
- 20) 中野正樹，山田英司，浅岡顕，李琪，上野慎也，伊藤勇志：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，pp. 635-636, 2008.
- 21) セメント協会，セメント硬化体研究委員会報告書，pp. 273-290, 2001.
- 22) 坂内秀雄，中川晃次：エトリンサイトの加熱変化，石膏と石灰，No. 97, pp. 11-17, 1968.
- 23) 野澤里渚子，斎藤豪，佐藤賢之介，佐伯竜彦：乾燥条件および温度履歴がエトリンサイト結晶中の水分状態に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol. 70, No. 1, pp. 2-8, 2017.
- 24) 原島亜弥，伊藤公久：高炉スラグとアルカリ性水溶液との反応によるエトリンサイトの生成条件，鉄と鋼，Vol. 101, No. 11, pp. 566-573, 2015.
- 25) 吉良欣一，間木野義雄，村田義彦：エトリンサイトの脱水と再水和，石膏と石灰，No. 170, pp. 7-13, 1981.
- 26) 佐野博昭，山田幹雄，小竹望，稲積真哉，桑嶋啓治：廃石膏ボード由来再生石膏を添加・混合した安定処理土の含水比推定式の提案，地盤工学ジャーナル，Vol. 10, No. 4, pp. 603-610, 2015.

(2018. 2. 13 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON CURING EFFECT AND ITS MECHANISM ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF PS ASH-BASED IMPROVED SOIL

Sayaka KAWAI, Kimitoshi HAYANO and Hiromoto YAMAUCHI

In this study, the effect of curing on the strength characteristics of PS ash-based improved soil was examined together with the mechanism inducing the effect. As a result, it was found that the liquid index of improved soil decreases with curing time so that the soil become hardened, despite the fact the water absorption performance of the PS ash-based improving material does not change over time. It was also found that the cone index gradually increases with time and it has a unique relationship with the liquid index. On the other hand, it was observed that the component composition of PS ash-based improving material was qualitatively similar to that of ordinary Portland cement. Then the formation of ettringite in the improved soil along with curing was confirmed by XRD analysis. Increase of constrained water due to the ettringite formation is considered to be a factor of the change in properties of the improved soil. The time-dependent change of constrained water was calculated based on water contents obtained under 40 degree-heating temperatures. It was found that the change of constrained water has a good correlation with the change in the liquidity index. Furthermore, the cone index of the improved soil can be predicted based on the constrained water.