

(一財) 港湾空港総合技術センター  
令和元年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 平成31年2月25日付 18港企第20-4号

研究開発項目 : (⑤) 公共工事コスト縮減対策 に関するもの

吸水性改質材を効果的に利用する  
ハイブリッド浚渫土固化処理技術の開発

令和2年4月30日

横浜国立大学大学院

早野 公敏



## 目次

1. はじめに .....	1
2. 各種 PS 灰の吸水性能評価試験の開発 .....	1
3. PS 灰とセメントを併用したハイブリッド固化処理土の強度特性 .....	3
4. PS 灰とセメントを併用したハイブリッド固化処理土の配合設計 .....	5
5. 養生に伴うハイブリッド固化処理土の強度特性の変化 .....	7
6. まとめ .....	8



## 1. はじめに

航路浚渫によって発生する土量は膨大であり、大量の浚渫土砂を処分する必要がある。ところが土砂処分場の受け入れ容量は限界となることが見込まれており、浚渫土砂の有効利用方策の拡充が求められている。浚渫土砂は水分を多く含むため、そのままでは有効利用できない。有効利用を促進させるために固化処理がしばしば適用されてきている。固化処理土は高い強度を有するが、強度の発現が遅く工期が長くなること、水分量が多いと添加量が多くなること、pHが高くなることなどの欠点がある。

そこで上記の欠点を解消すべく、本研究では安価な吸水性改質材を効果的に利用するハイブリッド浚渫土固化処理技術を開発することを目的とした。この技術は、浚渫土砂の固化処理を実施する際に安価な吸水性改質材を適切な手順で適量を添加することにより、初期強度の発現を速め、かつより少ない固化材の添加量で所定の強度を確保するものである。その結果、浚渫土砂を盛土・堤体の建設材料として有効利用する際の造成工期を短縮でき、また添加量を抑制することにより造成工事費を縮減できる。これらの成果により公共工事コスト縮減に資するものと考えられる。

本研究で開発する技術は、浚渫土砂の固化処理を実施する際に安価な吸水性改質材を適切な手順で適量添加し、浚渫土砂の初期強度発現の改善や固化材の添加量抑制を図ることで工事コストを縮減し、浚渫土砂の有効利用の拡大を図るものである。浚渫土砂の初期強度の改善により、盛土・堤体を早期に施工することができ、また固化材添加量の抑制により pH の過大な上昇を抑えるものである。

具体的に実施した研究開発の項目の概要は以下のとおりである。

### ・吸水性改質材の仕様の選定と吸水性能の評価

液状の浚渫土砂に吸水性改質材を添加したときに、浚渫土砂の早期の盛立てが可能な吸水性改質材を選定する。また、その吸水性改質材の吸水性能を評価する。

### ・固化材と吸水性改質材の併用によるハイブリッド固化処理土の開発

液状泥土に吸水性改質材とセメント固化材の両方を加えたハイブリッド固化処理土の強度特性を調査し、具体的な配合設計手法を提案する。またハイブリッド固化処理土の強度特性に養生期間が及ぼす影響を調べ、実務におけるハイブリッド固化処理土の効果的な適用を検討する。

## 2. 各種 PS 灰の吸水性能評価試験の開発

本研究では各種の吸水性改質材の中から、製紙焼却灰(PS 灰)系を選定した。泥土の瞬時改質材として実績があること、また比較的安価でかつ pH も固化材ほど高くないことを理由として選定した。次に PS 灰の吸水性能を、乾燥した PS 灰が吸水する水の質量  $m_{w,ab}$  に対する、乾燥 PS 灰の質量  $m_{ps}$  の比率として評価した。この評価のために、新たに開発した試験方法を図 1 に示す。乾燥 PS 灰 1 :

蒸留水 4 の質量割合で混合して飽和させた PS 灰を所定の期間養生させた後、取り出してステンレス製の 53 $\mu\text{m}$  ふりい上にセットする。その飽和した PS 灰とふりいを振とう機の上に置いて、振とう機の振動により、PS 灰が吸水できない余剰水を PS 灰から分離させた。ふりい振とう機の振動時間と振幅は、それぞれ 5 分と 3mm とした。また、飽和させた PS 灰の密閉養生期間は、10 分から 72 時間とした。ふりいの振動中は、PS 灰に吸水されなかった水が押し出されてふりいから落下する一方で、PS 灰粒子は互いに接近してふりい上に残る。残った PS 灰を振動終了後に回収して含水比  $w_{ab}$  を測定した。

このふりいと振とう機を使用した試験を、3 種類の PS 灰 (A, B, C)、セラミック破砕物、青粘土に対して実施した。セラミック破砕物は、リサイクルのために回収した瀬戸物を砂の粒径になるように破砕したものである。また青粘土の場合は、1:4 の割合ではなく 1:2 の割合で乾燥青粘土と蒸留水を混合したものをを用いた。

試験により得られた各材料の  $w_{ab}$  を、その材料の養生期間に対してプロットしたものを図 2 に示す。同図から、PS 灰の種類によって  $w_{ab}$  の値、すなわち吸水特性が異なることが分かる。PS 灰 A と C は、養生期間の増加とともに  $w_{ab}$  が増加する一方で、PS 灰 B の  $w_{ab}$  は養生期間が増加してもあまり増加しない。これは PS 灰の化学成分の違いが影響していると考えられる。また、PS 灰 A, B, C の  $w_{ab}$  はいずれもセラミック破砕物、青粘土の  $w_{ab}$  よりかなり大きく、PS 灰の高い吸水性能が示されている。セラミック破砕物、青粘土の  $w_{ab}$  は小さく、かつ養生期間が経過しても変化しない。実際、セラミック破砕物、青粘土の粒子には、PS 灰粒子と異なり吸水性能はほとんどないものと考えられる。しかし、本評価試験ではセラミック破砕物、青粘土の  $w_{ab}$  がそれぞれ 22%、37%となっており、この理由として不飽和状態でサクシオンにより粒子間の間隙に水分が保持されたためと考えられる。このように粒子間の間隙にある程度の水分が保持されてしまうのは、PS 灰のときにも生じていると考えられるため、本研究は PS 灰の実質吸水率  $w_{ab}$  を、図 2 の PS 灰の  $w_{ab}$  からセラミック破砕物の  $w_{ab}$  を引いた値とした。PS 灰 A, B, C について得られた実質吸水率  $w_{ab}$  を表 1 に示す。同表に示すように、新たに開発した試験方法によって、各種 PS 灰の養生期間の経過にともなう吸水性能の違いを初めて評価することが可能になった。

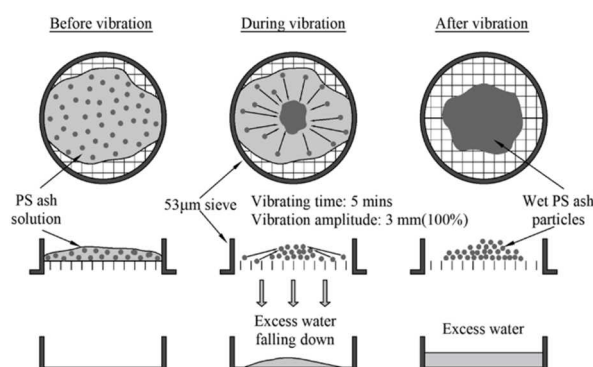


図 1. 吸水性評価試験の概要

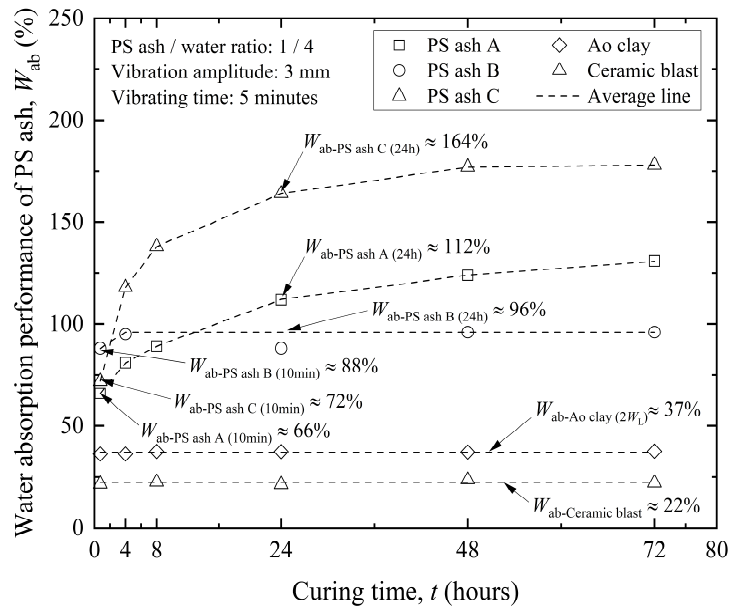


図 2. 各種 PS 灰の吸水性評価結果

表 1. 各種 PS 灰の実質吸水率 (%)

	10min	4h	8h	24h	48h	72h
PS ash A	44	59	67	90	102	109
PS ash B	66	74	74	74	74	74
PS ash C	50	96	116	142	155	155

### 3. PS 灰とセメントを併用したハイブリッド固化処理土の強度特性

表 1 に示した PS 灰 A, B, C それぞれに対し、普通ポルトランドセメントを併用したハイブリッド固化処理土を作製し、一軸圧縮試験を実施して強度特性を調べた。配合条件を表 2 に示す。青粘土の含水比を液性限界の 2 倍に調整したのち、同表に示す割合で普通ポルトランドセメントと PS 灰の両方を添加した。なお PS 灰と普通ポルトランドセメントを青粘土に混合する際には、次に示す 2 つの方法で混合した。

方法 1: PS 灰と普通ポルトランドセメントを同時に添加し混合。

方法 2: PS 灰を添加して 1 日後に普通ポルトランドセメントを添加し混合。

方法 1, 方法 2 とともに混合した直後にプラスチックモールドに投入して密閉養生させた。そして普通ポルトランドセメントを添加して 3 日後にモールドから脱型し、一軸圧縮試験を実施した。

得られた一軸圧縮強さを、青粘土の乾燥質量に対するセメントと PS 灰の合計質量の割合、すなわち添加材比( $m_c+m_{ps}$ )/ $m_s$  に対してプロットしたものを図 3 に示す。同図に示すように、添加材比が大きくなるにつれて一軸圧縮強さが大きく

なっている。また、詳細にみると、PS 灰 C や PS 灰 A を用いた場合に PS 灰 B に比べて、方法 2 で作成した供試体のほうが方法 1 で作製した供試体に比べて  $q_u$  が大きい。これは表 1 に示した各 PS 灰の実測  $w_{ab}$  の養生に伴う変化の違いが影響していると考えられる。

図 4 は、図 3 のハイブリッド供試体の一軸圧縮強さを、表 1 に示した PS 灰の実測  $w_{ab}$  に対してプロットしたものである。方法 1 で作製した場合には各 PS 灰の 10 分後の  $w_{ab}$  を、方法 2 で作製した場合には各 PS 灰の 24 時間後の  $w_{ab}$  を用いた。ばらつきがあるものの、同図をみると同じ水セメント比  $W/C$  の場合、 $w_{ab}$  の増加にともない一軸圧縮強さが増加している。すなわち、PS 灰の吸水性能を利用すると、同じ水セメント比でもより高い強度の固化処理土を作製できることが明らかになった。

表 2. ハイブリッド固化処理土供試体の配合条件

Case No.	1	2	3	4	5
Ao clay slurry	$W = 2W_L = 81.4\%$				
Stabilizers/Dry clay	1.25	1.0	0.75	0.5	
PS ash/Cement	0.1	0.1	0.1	0.5	3.0
$W/C$	0.72	0.9	1.2	2.44	6.51

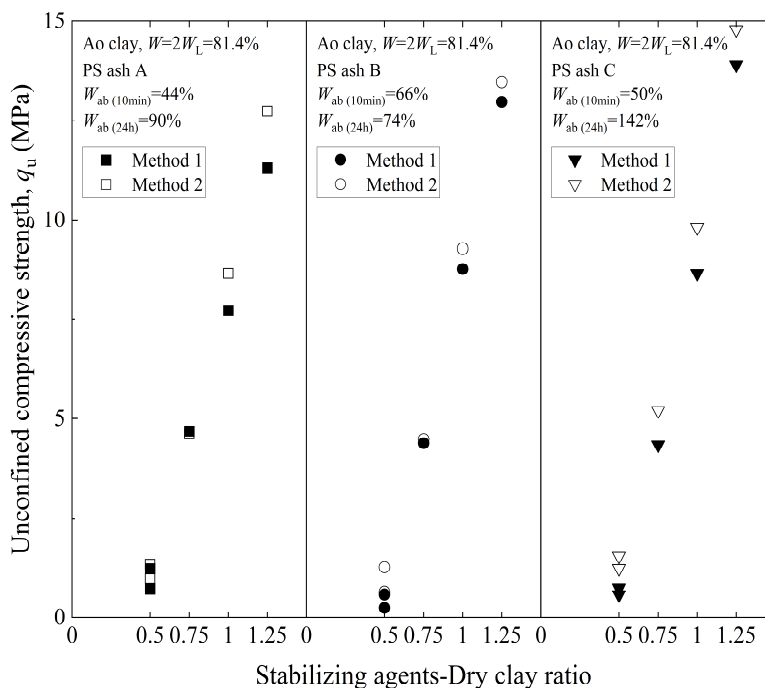


図 3. ハイブリッド固化処理土の一軸圧縮強さと添加材比



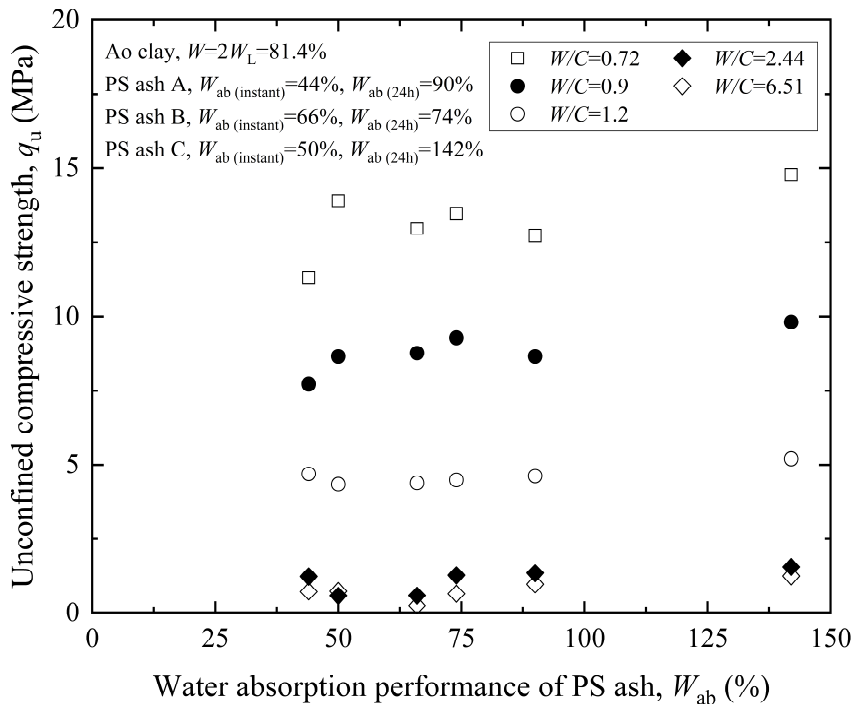


図 4. ハイブリッド固化処理土の一軸圧縮強さと PS 灰の吸水率

#### 4. PS 灰とセメントを併用したハイブリッド固化処理土の配合設計

PS 灰とセメントを併用したハイブリッド固化処理土の配合設計手法について検討を行った。前章では、同じ水セメント比  $W/C$  の場合でも実測吸水比  $w_{ab}$  の違いに伴い、一軸圧縮強さが変化することが明らかになった。そこで本研究では、自由水量  $W$  から PS 灰によって吸水される水分量  $W_{ab}$  を差し引いた  $W^*$  に対する水セメント比  $W^*/C$  を、ハイブリッド固化処理土の配合設計の重要な指標と仮定した。そして実際に水セメント比  $W^*/C$  が異なるハイブリッド供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施してこの仮説を検証した。

作製したハイブリッド固化処理土の配合条件を表 3 に示す。使用した PS 灰は、表 1 の PS 灰 A である。ここでも下記の 2 種類の方法によりハイブリッド固化処理土を作製した。

方法 1: PS 灰と普通ポルトランドセメントを同時に添加し混合。

方法 2: PS 灰を添加して 1 日後に普通ポルトランドセメントを添加し混合。

方法 1 と 2 では同じ配合でも PS 灰が吸水する水分量が異なると考えられるので、その違いを考慮して、水セメント比  $W^*/C$  を算出した。すなわち表に示した  $W^*/C$  ( $W_{ab-10min}$ ) は方法 1 に、 $W^*/C$  ( $W_{ab-24h}$ ) は方法 2 に対応する水セメント比  $W^*/C$  である。算出に際しては表 1 に示した実質  $w_{ab}$  を用いた。方法 1 の場合は 44%、方法 2 の場合は 90% である。方法 1、方法 2 とともに混合した直後にプラスチックモールドに投入して密閉養生させた。そして普通ポルトランドセメ

ントを添加して 3 日後にモールドから脱型し、一軸圧縮試験を実施した。なお比較のために、PS 灰を添加しない、普通ポルトランドセメントのみを添加したセメント固化処理土についても同様の配合で供試体を作り、養生 3 日後に一軸圧縮試験を実施した。

図 5(A)(B)に得られた一軸圧縮強さと水セメント比  $W^*/C$  の関係を示す。図 5(A)がセメント固化処理土の結果、図 5 (B)がハイブリッド固化処理土の結果である。なお、セメント固化処理土の場合は、PS 灰に吸水される水分量  $W_{ab}$  がないので、 $W^*/C$  は  $W/C$  と同じ値である。図 5(A)(B)をみると、セメント固化処理土、ハイブリッド固化処理土ともに  $W^*/C$  が減少すると、固化処理土の一軸圧縮強さが増加している。ただし、どちらも  $W^*/C$  が 0.5 未満の場合、水分量の不足により水和反応が不完全に生じるため一軸圧縮強さが低下している。また図 5(B)では、方法 1 と方法 2 においてハイブリッド固化処理土の一軸圧縮強さと水セメント比  $W^*/C$  の関係に違いがないことを示している。これらの結果は、PS 灰によって吸水される水分量  $W_{ab}$  を実測吸水率  $w_{ab}$  を用いて適切に算出して水セメント比  $W^*/C$  を用いると、セメント固化処理土と同様の配合設計ができることを示唆している。

図 5(C)(D)は、 $W^*/C$  が 0.5 より大きい結果に対して、次式により近似した結果である。

$$q_u = \frac{x}{(1 - e^{-y(W^*/C)})^z} \quad (1)$$

ここで  $x, y, z$  は近似により得られる定数である。同図に示されているように、水和反応に必要な水分量  $W^*/C$  が確保できる範囲において、セメント固化処理土、ハイブリッド固化処理土ともにある所定の養生日数の一軸圧縮強さが式(1)によりよく近似できることが分かる。

表 3.  $W^*/C$  を考慮したハイブリッド固化処理土許したいの配合条件

<b>Case No.</b>	1	2	3	4	5	6	7
Stabilizers/Dry clay		1.5		1.25		1.0	
PS ash / Cement	0.2	0.5	0.9	0.1	0.5	0.1	0.3
$W^*/C (W_{ab-10min})$	0.56	0.58	0.61	0.67	0.74	0.85	0.92
$W^*/C (W_{ab-24h})$	0.47	0.36	0.22	0.63	0.53	0.81	0.79
<b>Case No.</b>	8	9	10	11	12	13	14
Stabilizers/Dry clay		0.75			0.5		
PS ash / Cement	0.1	0.3	0.8	0.5	1	2	3
$W^*/C (W_{ab-10min})$	1.15	1.27	1.58	2.21	2.79	3.94	5.1
$W^*/C (W_{ab-24h})$	1.1	1.14	1.23	1.99	2.36	3.08	3.81

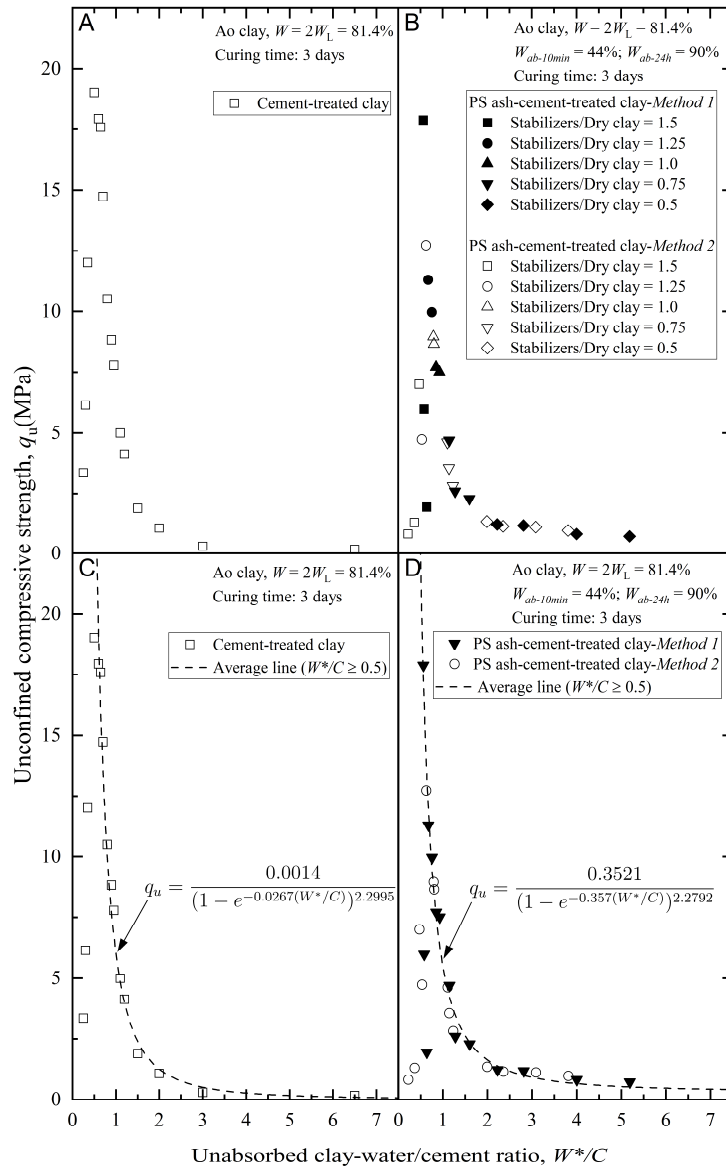


図 5. セメント固化処理土・ハイブリッド固化処理土の一軸圧縮強さと  $W^*/C$

### 5. 養生に伴うハイブリッド固化処理土の強度特性の変化

前章と同様に、密閉養生 7, 28 日後のセメント固化処理土、ハイブリッド固化処理土の一軸圧縮試験を実施し、それぞれについて式(1)による近似式を求めた。図 6 にその結果を示す。図 6(A)が養生 3 日後、図 6(B)が養生 7 日後、図 6(C)が養生 28 日後の結果を示している。いずれの養生日数でも  $W^*/C$  が大きいと、ハイブリッド固化処理土のほうがセメント固化処理土に比較して一軸圧縮強さが大きい。この傾向は、養生日数が長いほど著しい。これは養生中において PS 灰が自由水を吸水し続けるために、実質的な  $W^*/C$  が減少するためと考えられる。逆に  $W^*/C$  が小さいと、ハイブリッド固化処理土のほうがセメント固化処理土に比較して一軸圧縮強さが小さくなる。これは水和反応に必要な水分量が

十分にない状態に対して、さらに PS 灰が吸水してしまい、水和反応がより不完全になるためと推察される。

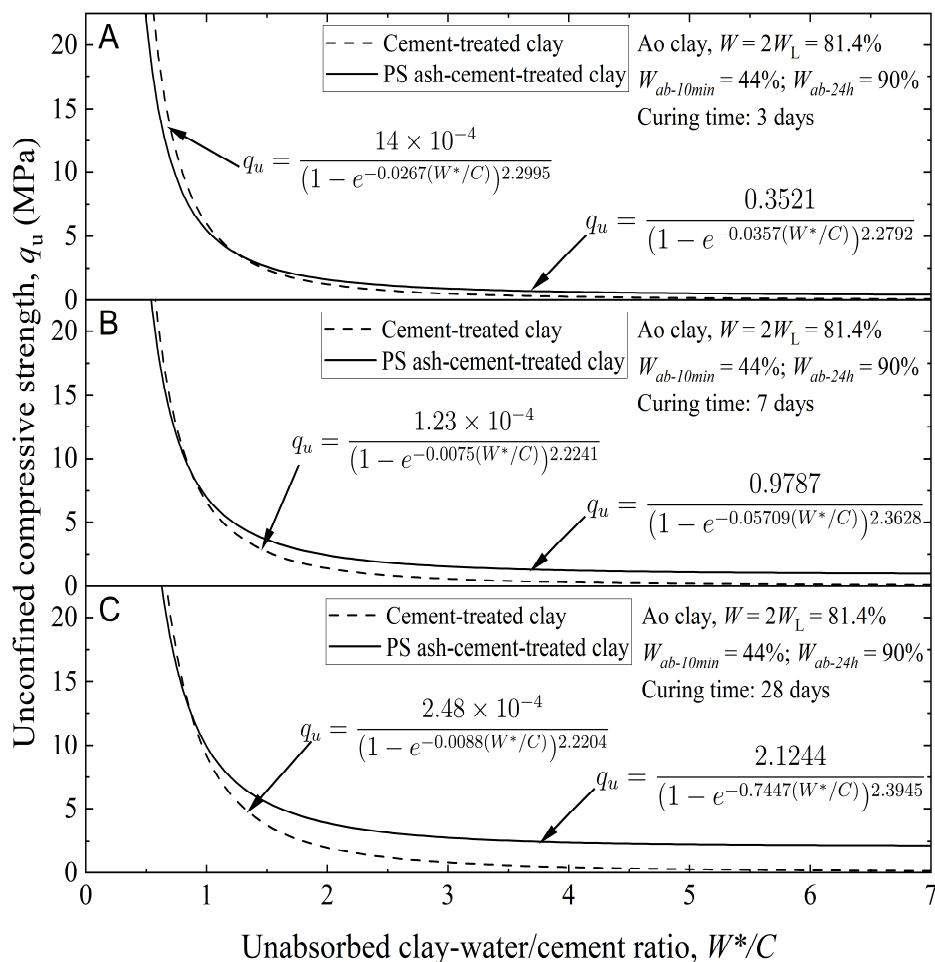


図 6. セメント固化処理土・ハイブリッド固化処理土の  $q_u$ - $W^*/C$  関係に養生日数が及ぼす影響

## 6. まとめ

本研究では、吸水性開発材を効果的に利用したハイブリッド固化処理土の開発を行った。

まず、吸水性改質材として泥土の瞬時改質材として実績があること、また比較的安価でかつ pH も固化材ほど高くないことを理由として、製紙焼却灰 (PS 灰) 系を選定した。そして PS 灰の吸水性能を評価できる試験方法を考案し、3 種類の PS 灰の吸水率を評価した。その結果、新たに開発した試験方法によって、養生期間の経過にともなう各種 PS 灰の吸水性能の違いを初めて評価することが可能になった。

次に PS 灰とセメントを併用したハイブリッド固化処理土の基本的な強度特性を一軸圧縮試験により調査したところ、PS 灰の吸水性能を利用すると、同じ水セメント比  $W/C$  でもより高い強度の固化処理土を作製できることが明らかになった。さらに同じ水セメント比  $W/C$  の場合でも PS 灰の実測吸水比  $w_{ab}$  の違いに伴い、一軸圧縮強さが変化することが明らかになった。そこで、自由水量  $W$  から PS 灰によって吸水される水分量  $W_{ab}$  を差し引いた  $W^*$  に対する水セメント比  $W^*/C$  を、ハイブリッド固化処理土の配合設計の重要な指標と仮定し、実際に種々の水セメント比  $W^*/C$  のハイブリッド供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施してこの仮説を検証した。その結果、PS 灰の実測吸水率  $w_{ab}$  を用いて PS 灰によって吸水される水分量  $W_{ab}$  を適切に算出して水セメント比  $W^*/C$  を用いると、セメント固化処理土と同様にハイブリッド固化処理土の配合設計ができることが明らかになった。

最後にハイブリッド固化処理土と通常のセメント固化処理土の強度特性の違いを調べたところ、いずれの養生日数でも  $W^*/C$  が大きいと、ハイブリッド固化処理土のほうがセメント固化処理土に比較して一軸圧縮強さが大きいことが分かった。この傾向は、養生日数が長いほど著しく、これは養生中において PS 灰が自由水を吸水し続けるために、実質的な  $W^*/C$  が減少するためと考えられる。逆に  $W^*/C$  が小さいと、ハイブリッド固化処理土のほうがセメント固化処理土に比較して一軸圧縮強さが小さくなり、これは水和反応に必要な水分量が十分でない状態に対して、さらに PS 灰が吸水してしまい、水和反応がより不完全になるためと推察された。したがって、ハイブリッド固化処理土の実務での適用としては、水セメント比が大きい条件において効果的であると考えられた。