

石材加工石粉のセメント系固化補助材としての強度発現メカニズム

香川大学 正会員 ○山中稔 香川大学 正会員 長谷川修一
(有)高橋石材 正会員 高橋省司 (株)四国総合研究所 正会員 岩原廣彦

1. はじめに

石材加工の際に発生する大量の石粉の処理が社会問題となる一方、ため池に堆積する高有機質・高含水泥土（以下底泥という）の有効利用が喫緊の課題となっている。底泥は、固化改良し工事用仮設道路や護岸盛土材料に利用できるが、その場合必要強度として7日養生で一軸圧縮強度 100kN/m^2 以上が必要とされる。著者らが石粉の基本物性を調査した結果、石粉は高アルカリ環境下でシリカ（以下二酸化ケイ素という）を溶出することが分かり、セメントと混合することでポズラン反応が促進すると考えられた^{1),2)}。本研究では、石粉を底泥に混合し、セメント系固化材（以下固化材という）による室内配合固化試験を行ったところ、石粉配合量の増加に伴い一軸圧縮強さの増加が認められるとともに、強度増加は養生日数が長くなるほど増加することが判明した。本稿ではこの強度発現メカニズムについて述べるものである。

2. 室内混合固化実験

本研究では、乾燥石粉に底泥Aを使用し（Case I）、湿潤石粉に底泥Bを用いた（Case II）室内混合固化実験を行った。表-1に、試料として用いた石粉及び底泥の基本土質物性を示す。室内実験に使用する固化材の種類は、強熱減量値から判断し、底泥Aは8.5%と小さいために一般軟弱土用とし、底泥Bは11.6%と若干大きいために高有機質土用とした。

表-1 石粉及び底泥の基本土質物性

項 目	Case I		Case II	
	乾燥石粉	底泥A	湿潤石粉	底泥B
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.67	2.62	2.62	2.47
含水比 w (%)	<1.0	120	30	160
湿潤密度 ρ_i (g/cm^3)	1.45	1.63	1.77	1.27
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.45	0.74	1.36	0.49
強熱減量 Li (%)	1.0	8.5	1.4	11.6
平均粒径 D_{50} (mm)	0.02	0.008	0.007	0.02
土の分類	SF	Cs	Cs	SF

表-2に、供試体の石粉と底泥の配合条件を示す。石粉と底泥は体積率を変化させて混合し、各配合条件名は底泥の割合を示す（例えば、HS90という混合物名は90%が底泥であり、石粉は10%である）。今回実験に使用した固化材は、底泥の基本土質物性を基に、過去の底泥改良工事における使用実績量から、Case Iには一般軟弱土用固化材を 100kg/m^3 、Case IIには高有機質土用固化材を 125kg/m^3 添加した。HS100は底泥と固化材を10分間攪拌し、HS80は底泥と石粉を10分間攪拌した後に、固化材を加えさらに10分間攪拌した。供試体（ $\phi 5\text{ cm}$, $h 10\text{ cm}$ 、供試体は1配合あたり3本）は締め固めを行わない方法で作成し、養生条件は3日、7日、28日、91日の4材令、室温気中養生とした。

表-2 配合条件

混合条件	割合(%)	
	底泥	石粉
HS100	100	0
HS90	90	10
HS80	80	20
HS70	70	30
HS60	60	40

3. 実験結果

図-1に、Case Iの試料を用いて配合した供試体の養生日数と一軸圧縮強度の関係を示す。一軸圧縮強度は養生日数が増えるにしたがって増加した。3日養生で

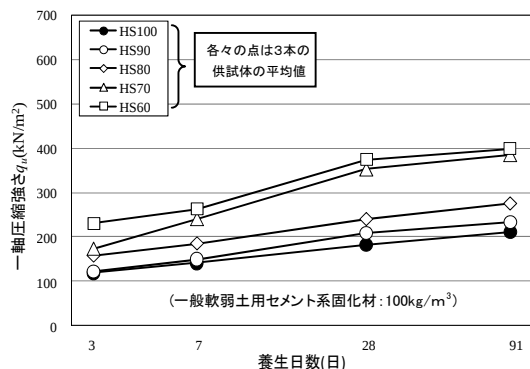


図-1 一軸圧縮強度と養生日数の関係(Case I)

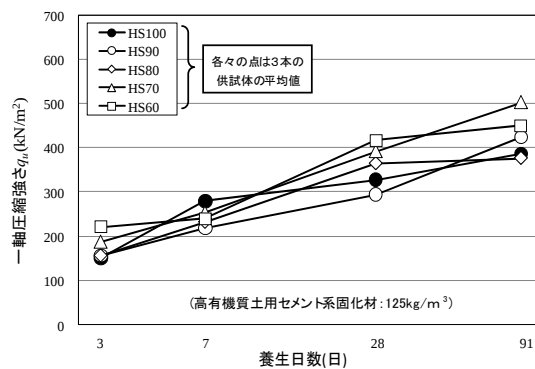


図-2 一軸圧縮強度と養生日数の関係(Case II)

は石粉配合量が多くなるほど一軸圧縮強度の増加が見られる。その他の養生日数でも同じ傾向が見られる。さらに、石粉を加えることによる一軸圧縮強度の絶対量としての増加は、3日養生よりも91日養生が増加している。これは、石粉の中の二酸化ケイ素と固化材中のセメントがポズラン反応を起こしたためと推定できる。

石粉配合量を増すことによる一軸圧縮強度の増加は、28 日養生、91 日養生では HS70、HS60 に特に大幅な強度の増加がみられた。しかし、HS90、HS80 には HS70、HS60 ほどの強度の上昇はみられなかった。よって、石粉を混入することによってポズラン反応を起こすためには、石粉を 30%以上配合する必要があるといえる。

図-2 に、Case II の試料を用いて配合した供試体の一軸圧縮強度と養生日数との関係を示す。一軸圧縮強度は養生日数が増えるにしたがって増加している。3 日養生では石粉配合量が多くなるほど強度の増加が見られるが、7 日養生日数において石粉配合量による明確な一軸圧縮強度の違いは見られない。また、材令 91 日において、石粉配合量増加による一軸圧縮強度の増加は、図-1 に示す乾燥石粉の場合ほどの強度の伸びは見られない。

4. 固化土の組織構造観察

石粉を加えることによる一軸圧縮強度の絶対量としての増加は、養生日数が長期になるほど増加していることが明らかとなった。これは、石粉中の二酸化ケイ素と固化材中のセメントがポズラン反応を起こしたためと推論したが、これを確認するために電界放出型走査電子顕微鏡（以下 FE-SEM という）観察、およびエネルギー分散 X 線分光法（以下 EDS という）による定量分析を実施した。

図-3、4 に、Case I の試料を用いて配合した供試体の 7 日養生日と、28 日養生日の FE-SEM での観察状況を示す。観察試料は、所定の養生日数での一軸圧縮試験終了後の試料片とした。まず、HS100 では、7 日養生日数及び 28 日養生日数では針状の水和生成物がほとんど認められない。一方、HS60 では 28 日養生日数では針状の水和生成物が多く見られるとともに、土粒子間が密になっていることが分かる。この FE-SEM での観察および EDS による元素の定量分析（マッピング）結果から、石粉に含まれている二酸化ケイ素が針状の水和生成物（エトリンガイト）の生成を促したものと考えられる。

室内混合固化実験から、乾燥石粉の配合を増加することによる一軸圧縮強度の増加が確認できた。また、強度の増加理由は、石粉中の二酸化ケイ素と固化材中のセメントがポズラン反応を促進し、エトリンガイトが生成し、これが土粒子の動きを拘束することに起因することが分かった。一方、湿潤石粉の配合を増加することによる一軸圧縮強度の増加は、乾燥石粉の場合ほどの強度の伸びは見られない。これは石粉に含まれる凝集剤と含水量の違いに起因するものと考えられる。

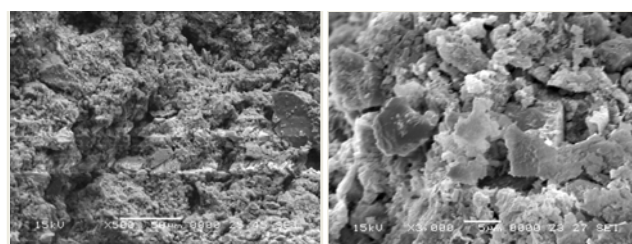
5. まとめ

本研究において、石粉配合量を増加することにより、石粉と底泥混合物（固化材含む）の一軸圧縮強度の増加が確認できた。この理由として以下のことが判明した。

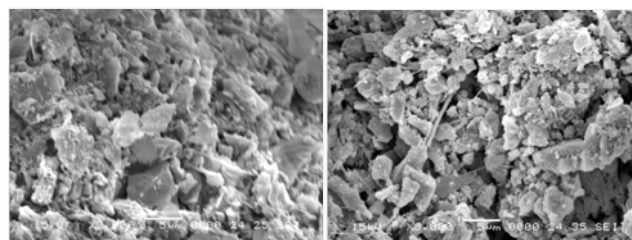
- 1) 石粉中から溶出した二酸化ケイ素が、固化材中のセメントのポズラン反応を促進することによって、針状の水和反応物（エトリンガイト）を生成する。
- 2) 生成されたエトリンガイトが土粒子の動きを拘束することによって、石粉と底泥混合物（固化材含む）の一軸圧縮強度の増加に繋がった。

参考文献

- 1) 須崎純平，山中 稔，長谷川修一，岩原廣彦，高橋省司：石材加工石粉のため池底泥セメント系固化補助材としての適用性，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，pp.909-910，2009.
- 2) 須崎純平，山中 稔，長谷川修一，岩原廣彦，高橋省司：セメント系固化材に石材加工石粉を混入したため池底泥の固化実験，土木学会四国支部平成 21 年度技術研究発表会講演概要集，pp.17-22，2009.5.



7日養生 28日養生
図-3 HS100によるFE-SEM画像(Case I)



7日養生 28日養生
図-4 HS60によるFE-SEM画像(Case I)