

重粘土を用いた固化材分割添加によるソイルセメントの考察

株式会社インボックス ○小林瑞穂 秋山祥克 松村和樹 酒巻克之
株式会社北海道土砂資源化研究所 宮木康二
北海道大学 山田孝 厚井高志

1 はじめに

2018年9月に発生した北海道胆振東部地震では、災害復旧事業において材料に現地発生土砂と砕石を用いたソイルセメントが多く採用された。強度向上や施工性確保の観点から、現地発生土砂の単独活用はされなかったが、単独活用ができるならば、より広い分野で活用可能な建設資材となる。そこで、北海道の気候・土質・地域特性および社会条件等に適応し、耐久性を重視した新しいソイルセメントの開発を目標に検討を開始した。

本報告は、北海道の特殊土の中から重粘土を選定し、その土砂の特性に合わせて固化材の分割添加方式を用いて行った検討の第2報である。前回報告（以下、「試験1」と称す）¹⁾では屋外暴露試験にて、凍結融解の影響により供試体表層部の劣化が見られたが、強度は微増し、供試体内部では水和反応が確認された。第2報（以下、「試験2」と称す）である本報告では、試験1から一部条件を変更し実施した試験結果から凍結融解に対する耐性について確認検討する。

2 試験概要

2.1 対象土砂

試料土として、試験1と同様に2018年9月の北海道胆振東部地震で被災した北海道厚真地区ウクル沢より採取した重粘土を用いた。試料土の諸特性を表1に示す。

表1 対象土砂の諸特性

項目	値	項目	値
土粒子密度 (Mg/m ³)	2.660	液性限界 (%)	66.5
自然含水比 (%)	44.3	塑性限界 (%)	25.5
細粒含有率 (%)	81.7	強熱減量 (%)	5.8
		pH	5.2

2.2 試験方法

対象土砂である重粘土は、粘性が非常に高く自然状態では固化材の混合が困難である。一般にこのような土砂は礫質材料を混合して対処するが、本試験では現地発生土砂の単独利用を一つの目標としていることから、固化材の分割添加方式を採用し供試体を作製した。なお、本試験における分割添加の作業フローは図1の通りである。

作製した供試体および試験1の配合条件を表2に示す。この配合条件は、予備試験として行ったソイルセメント転圧タイプ（目標強度 $\sigma_{28} = 1 \sim 2 \text{ N/mm}^2$ ）の室内配合試験結果より決定した。

供試体は表2の条件に従い、暴露試験用供試体および標準養生供試体の2種類作製し、 $20 \pm 2.0^\circ\text{C}$ にて水中養生を行った。28日経過後、暴露試験用供試体は暴露を開始し、標準養生供試体は水中養生を継続した。なお、供試体寸法

は $\phi 150 \times H300 \text{ mm}$ とし、固化材は高炉セメントB種を用いた。

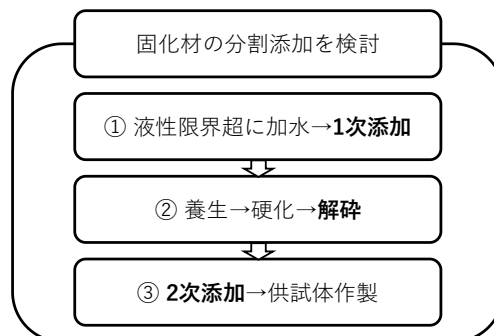


図1 分割添加の作業フロー

表2 固化材分割添加方式の配合条件

試験	固化材添加量			仮置き養生期間 (日)
	Total (kg/m ³)	一次添加 (kg/m ³)	二次添加 (kg/m ³)	
試験1	400	350	50	3
試験2	400	200	200	35

2.3 暴露試験

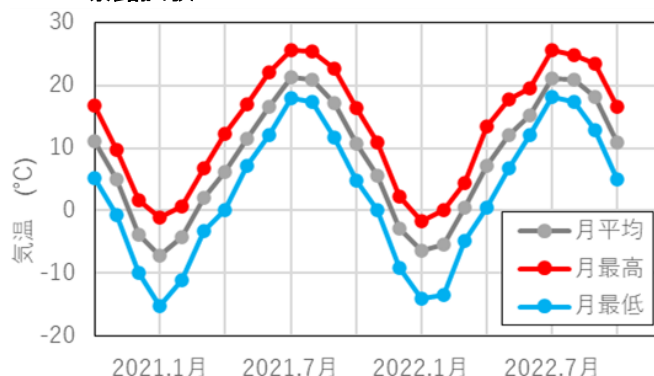


図2 試験期間の気温推移

暴露試験用供試体は、暴露開始前に型枠を脱型し、被覆していない状態とした。その供試体を平年の積雪深を考慮し地上から0.90m程度の高さに設置し、北海道千歳市内（標高44m）にて2021年10月下旬より暴露を開始した。この時、屋根や囲い等は設けなかったが、積雪により暴露供試体が埋もれ保温状態となることを避けるため、適宜除雪を行った。なお、暴露試験中の外気温度は、試験箇所から南東約15kmにある千歳空港アメダスデータを参照した（図2）。試験結果は暴露開始より6ヶ月後および1年後にて、物理試験および化学試験により評価した（表3）。併せて、標準養生供試体についても同様に試験を実施した。

3 試験結果と考察

暴露試験は本報告までに約1.5年経過し、最大5年間継続予定である。暴露試験用供試体は現在までの試験期間中、多少のひび割れは見られたが、外観に大きな変化は認められなかった（2023年4月現在）。

物理・化学試験結果を表3に示す。なお、比較対象として試験1の結果を一部併記した。

表3 試験結果

項目	試験 1					試験 2				
	標準養生 ^{*1}			暴露		標準養生 ^{*1}			暴露	
	1ヶ月	6ヶ月	1年	6ヶ月	1年	1ヶ月	6ヶ月	1年	6ヶ月	1年
供試体重量(g)	8,770	8,737	8,723	6,219	6,355	8,708	8,767	8,763	6,803	7,450
湿潤密度(Mg/m ³)	1.654	1.648	1.646	*2	*2	1.643	1.654	1.653	1.283	1.405
圧縮強さ補正なし	0.39	3.60	4.58	0.83	0.84	1.85	6.56	8.50	3.15	3.41
(N/mm ²)補正あり	-	-	-	1.2	1.4	-	-	-	-	-
供試体含水比(%)	51.3	52.8	51.8	24.9	35.8	51.5	49.1	51.7	14.6	29.4
供試体表層部	11.9	11.6	11.1	8.70	8.40	12.2	10.9	11.9	9.58	9.20
pH中心部	11.8	11.6	10.9	11.8	11.0	12.2	11.2	12.0	11.6	12.1
Cr ⁶⁺ 溶出量(mg/ℓ)	0.02	-	-	-	-	>0.02	-	-	-	-

※圧縮強さの“補正あり”については、暴露供試体の劣化した表層部をそぎ落とした健全部の概略断面積から求めた値

*1 室内20℃水中 *2 容積測定不能

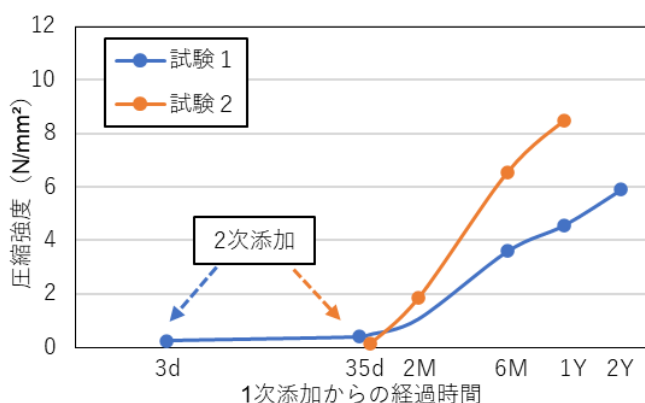


図3 強度発現の差異（標準養生供試体）

材齢1ヵ月から1年の発現強度の伸び率は標準養生供試体が約4.6倍、暴露試験用供試体では約1.8倍であった。標準養生と暴露試験用の供試体における強度伸び率の差は、凍結融解の影響によるものと考えられる。図2より、試験1と試験2の試験期間中の外気温はほぼ同様の気温変化であったことが分かる。従って、試験1にて0℃を跨いだ回数は計98回であったことから¹⁾、試験2においても同等の回数、凍結融解が発生したと考えられる。氷点下ではほとんど圧縮強度が増加しないという知見²⁾があることから、標準養生供試体と比較して暴露試験用供試体の強度が低く発現したと推察される。

pHについては標準養生供試体の表層部および中心部のいずれも、ほぼ変化しなかった。一方、暴露試験用供試体では、表層部にて中性化の進行がみられたが、試験1と比較すると、進行は緩やかである。これは、試験1よりも表層部の劣化が軽減されていることから推察すると、仮置き養生期間の長短の影響により発現強度に差が発生したためではないかと考える。

また、試験2の標準養生供試体の圧縮強度は、試験1に対して暴露開始1年後にて約1.9倍となった（図3）。試

験1と試験2の異なる点は、一次と二次の固化材の添加量比および仮置き養生期間である。分割添加の固化材添加量比については、結果より一次添加量≤二次添加量とする方が効果的である可能性が示唆される。一方、仮置き養生期間については一定期間仮置きすることで、固化材の一次添加により重粘土の土粒子表面にカルシウムイオン（Ca²⁺）が充分吸着され、二次添加にて固化材からCa²⁺が供給されることにより正常な水和反応およびボゾラン反応によって強度が増進したと考えられる。一般に重粘土のような粘性土は、その土粒子表面に固化材中のCa²⁺を多量吸着する性状があり、固化材の本来の水和反応は著しく阻害される³⁾。しかし、試験2は仮置き養生期間が試験1よりも長く、Ca²⁺が吸着される期間を十分にとることができたことにより重粘土が改質され、固化材の二次添加にて新たにCa²⁺が供給されることで正常な水和反応を進行させることが可能となったと考える。

4 まとめ

これまでに実施した検討内容について、以下にまとめる。

- 1) 固化材の分割添加方式にて土砂単独での活用が困難な重粘土の単独活用がより現実的となった。
- 2) 暴露試験用供試体の強度は凍結融解の影響および、外気温がほぼ氷点下である期間があったことにより低く発現したと考えられる。
- 3) 暴露試験用供試体の表層部劣化は、固化材分割添加の配合条件を変化させることで中性化が抑制され、軽減可能となった。
- 4) 固化材の添加量比は一次添加量≤二次添加量とする方が効果的であると示唆される。
- 5) 仮置き養生期間は固化材の一次添加時にCa²⁺を充分吸着する時間を与えると強度増進に効果的であると考えられる。

以上より、固化材の分割添加には以下のメリットがあると考えられる。

- 一次添加により土粒子を団粒化させ、土砂を改質させることで二次添加にて施工性の改善や固化材の混合度、締固め度の向上が可能となる。
- 一次添加により固化材中や高有機質土に含まれるカルシウムイオンを吸着させ、二次添加にて正常な水和反応をさせることが可能である。

重粘土供試体による分割添加の配合条件を変化させると発現強度の伸び方が異なるという結果となった。今後はさまざまな土砂について、固化材の分割添加を用いて凍結融解の耐性および強度増進等の改良土の特性について検討を進めていきたいと考える。

参考文献

- 1) 橋木貞則ら：北海道重粘土を用いたソイルセメントの諸特性、令和4年度砂防学会研究発表会概要集
- 2) 佐藤厚子ら：セメントおよび石灰改良土の発現強度に及ぼす養生温度の影響、地盤工学ジャーナル Vol. 3, No. 4, p331-342
- 3) (一社)セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル第5版、2.2, (5), p55