

低水固化材比スラリーの流動性および施工性に及ぼす混和剤の影響

太平洋セメント(株) 正会員      ○小須田 和貴

太平洋セメント(株) 正会員      野崎 隆人

太平洋セメント(株) 正会員      肥後 康秀

1.はじめに

セメント系固化材スラリーの混合方式による機械式攪拌工法の施工では、圧送時のスラリーの流動性に加え、吐出後の改良土の攪拌のしやすさが重要なファクターとなる。一方で、近年、地盤改良において、低い水固化材比(低 W/C)による高強度化を目的として、固化材スラリーに混和剤を添加するケースが増加している。森らは、固化材スラリーによる改良土の流動性について、ポリカルボン酸(PC)系、ナフタレンスルホン酸(NS)系混和剤と土壌との相性の観点から整理している<sup>1)</sup>。一方でPC系とNS系の混和剤では、ポルトランドセメントの水和へ及ぼす影響が異なり、PC系の混和剤は接水から数時間のごく若材齢の水和を促進することが知られている<sup>2)</sup>。しかし、混和剤による水和の進行の違いが固化材スラリーの流動性や施工性に及ぼす影響については、十分な検討がなされていない。

そこで、本検討では、固化材およびセメントのスラリーにおいてPC系、NS系混和剤を添加した場合の流動性の経時変化と改良土の攪拌のしやすさの違いについて検討し、混和剤の吸着特性や固化材スラリーの水和メカニズムの観点からその原因を明らかにした。

2.試験概要

(1)使用材料

本実験における使用材料の一覧を表1に示す。固化材については、固化しにくい土壌において高強度が要求される現場を想定して、市販の高有機質土用固化材を使用した。また固化材の比較対象として、普通ポルトランドセメントを使用した。混和剤は市販されている、PC系、NS系のものを使用した。土壌に関しては、2種類の粘性土を使用した。

(2)配合条件

本検討ではW/Cを50%に設定した。スラリーの練混ぜは手練りで90秒間行った。混和剤の添加量は材料分離を生じず、かつメーカーの推奨添加量の範囲の中で多めの添加量となるように、一律C×1.5%とした。各土壌に対する固化材の添加量は400kg/m<sup>3</sup>とした。

(3)試験項目

試験項目を表2に示す。水和熱の測定は、初期の経時変化を検出可能な微小熱量計(東京理工社製)を使用した。スラリーの流動性の評価として、塑性粘度を「JIS Z 8803:2011」に準拠して測定したベーンせん断試験はハンドベーンを用いて改良土に対して行った。

表1 使用した材料

| 種類   | 概要                                         |
|------|--------------------------------------------|
| 固化材  | 高有機質土用固化材                                  |
| セメント | 普通ポルトランドセメント                               |
| 混和剤1 | ポリカルボン酸(PC)系                               |
| 混和剤2 | ナフタレンスルホン酸(NS)系                            |
| 土壌1  | 粘性土(湿潤密度:1.58g/cm <sup>3</sup> 、含水比:68.5%) |
| 土壌2  | 粘性土(湿潤密度:1.77g/cm <sup>3</sup> 、含水比:39.0%) |

未吸着の混和剤量の評価にあたり、材齢60分のスラリーに対し遠心分離機を行い、上澄み水部分の全有機炭素量(TOC)を測定した。粉末X線回折、SEM観察は、材齢60分の固化材スラリーを多量のアセトンで水和停止させ、40℃環境で1日乾燥させたものを試料とした。

3.試験結果及び考察

(1)固化材スラリーの初期水和進行

ポルトランドセメントにおいては、注水直後の発熱はエーライトやカルシウムアルミネートの水和に由来することが知られており、この時期の水和はスラリーの流動性に与える影響が大きい。固化材スラリーの水和発熱速度を図1に示す。注水直後に活発な水和反応による発熱が見られ、混和剤の種類により若干の速度の違いが見られるが、注水60分後には発熱速度に顕著な差は見られなかった。このことから、PC系、NS系混和剤の添加によらず、注水直後の活発な水和は60分以内に収束したと考えられる。

また、本稿中では割愛するが、注水60分後の固化材スラリーの粉末X線回折を測定したところ、エトリンガイト等の主要な水和生成物のピーク強度について、混和剤の有無や種類による顕著な違いは検出できなかった。

(2)固化材およびセメントスラリーの流動性

水和反応が活発な段階の練混ぜ直後と、水和が一時的に収束した60分後の段階において、スラリーの塑性粘度を測定した結果を図2に示す。測定時期や混和剤の種類によらず、普通ポルトランドセメントのスラリーと比べて固化材スラリーの塑性粘度は高い値を示し、流動性が低かった。また、本検討の条件では、練混ぜ直後ではNS系よりもPC系混和剤を添加したスラリーの粘度が高いが、材齢

表2 試験項目

| 項目       | 対象           | 材齢    |
|----------|--------------|-------|
| 水和熱測定    | 固化材スラリー      | 60分まで |
| 粉末X線回折   | 固化材スラリー      | 60分   |
| 塑性粘度測定   | 固化材・セメントスラリー | 0、60分 |
| ベーンせん断試験 | 改良土          | 0、60分 |
| 全有機炭素量測定 | 固化材・セメントスラリー | 60分   |
| SEM観察    | 固化材スラリー      | 60分   |

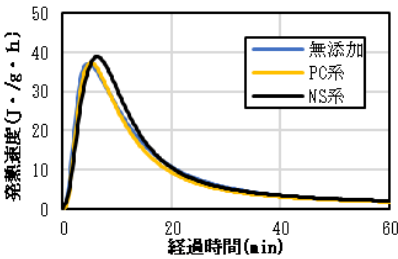


図1 固化材スラリーの水和発熱速度

60 分においては NS 系混和剤を添加したスラリーの粘度の方が高い値となり、流動性が低下しやすいことがわかった。

(3)改良土の攪拌しやすさ

スラリーで処理した改良土の攪拌のしやすさの評価にあたり、フロー試験では改良土が流動せず性能差の評価ができなかったため、本検討ではベーンせん断強さを指標として評価した。練混ぜ直後および材齢 60 分のスラリーを用いて 2 種の粘性土を改良した際の、ベーンせん断強さの結果を図 3 に示す。土壌によってせん断強さに差はあるが、使用材料により物性が異なり、使用材料の影響を反映した評価が可能であると考えられる。練混ぜ直後においては、前述のスラリーの粘度が低いほど、ベーンせん断強さは低い値を示し、攪拌がしやすいことがわかった。一方、材齢 60 分においては PC 系と比較して NS 系のスラリーのほうが高い粘度を有するにも関わらず、NS 系のスラリーによる改良土のほうがせん断強さは低くなり、この傾向がセメントよりも固化材では顕著になった。

また土壌 1 では、練混ぜ直後と比較して、材齢 60 分のスラリーで改良した場合、ベーンせん断強さは低い値を示した。この原因として、土壌 1 のようにせん断強さの小さい粘性土に対しては、水和物の生成が強度向上に及ぼす度合いが大きいと考えられる。練混ぜ直後のスラリーで改良した場合は土粒子の間で水和物が生成するが、材齢 60 分の場合はある程度初期の水和物が既に生成した状態で混合することとなる。この結果、材齢 60 分スラリーで改良した場合の方が水和物による土粒子の拘束の効果が小さくなり、その結果ベーンせん断強さの低下につながった可能性が考えられた。

以下、材齢 60 分におけるスラリーの粘度とベーンせん断強さの逆転について原因を明らかにするために、残存する混和剤量と、水和組織の観点から分析を行った。

(4)未吸着の混和剤の残存量

一般的に混和剤はセメント粒子に吸着することで効果を発揮する。一方で混和剤は、土粒子にも吸着し流動性を向上することが知られている<sup>3)</sup>。未吸着の混和剤が土壌へ吸着して流動性に影響を及ぼした可能性を確認するために、TOC を用いてスラリー液相中に残存する混和剤の残存量を測定した。添加した混和剤の全量が吸着せず液相中に存在した場合を 100%とし、材齢 60 分における混和剤の残存率を計算した。結果を表 3 に示す。スラリーの液相にはいずれもわずかな混和剤しか残っておらず、添加した混和剤はほぼ全てセメント粒子あるいは水和物に吸着したと考えられ、土粒子に吸着して流動性に影響した可能性は低いと判断した。

(5)固化材スラリーの水和組織

走査型電子顕微鏡を用いて、材齢 60 分の固化材スラリーの水和組織を観察した結果を、写真 1 に示す。粉末 X 線回折では PC 系 NS 系混和剤による水和生成物の違いは検出されなかったが、水和組織は明らかな違いが認められた。特徴的な水和組織として、PC 系混和剤を添加したスラリーのみ、数  $\mu\text{m}$  に成長した針状・柱状のエトリンガイトの生成が広く確認された。このような数  $\mu\text{m}$  に及ぶ針状のエトリンガイトが、攪拌時に土粒子と接触することで、ベーンせん断強さが増加した可能性が考えられた。

4.まとめ

固化材およびセメントのスラリーの塑性粘度は時間の経過に伴って増加し、PC 系と比較して NS 系でその度合いが大きく、流動性がより低下することがわかった。練混ぜ直後のスラリーで改良した場合、塑性粘度が低いほど改良土のベーンせん断強さは低い値を示

した。一方、材齢 60 分のスラリーで改良した場合は、塑性粘度の高い NS 系の方がベーンせん断強さは低くなり、流動性と攪拌のしやすさの傾向に逆転が認められた。この原因として、生成される水和組織の違いが影響しているものと考えられた。

<参考文献>

1) 森喜彦 他、地盤工学研究発表会、Vol.52、pp.517-518、2017

2) 姜珍圭 他、セメント・コンクリート論文集、No.53、pp.71-77、1999

3) 森喜彦 他、地盤工学研究発表会、Vol.51、pp.443-444、2016

4) 坂井悦郎、熱量測定とセメント・コンクリートの性能、熱測定 Vol.39、pp.15-21、2012

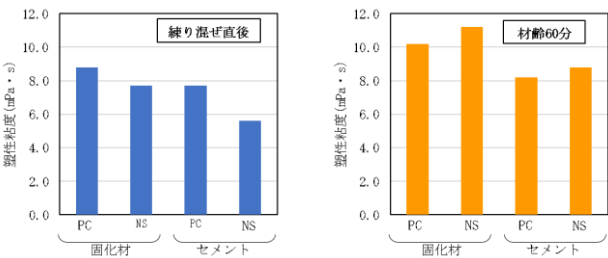


図 2 固化材・セメントスラリーの塑性粘度

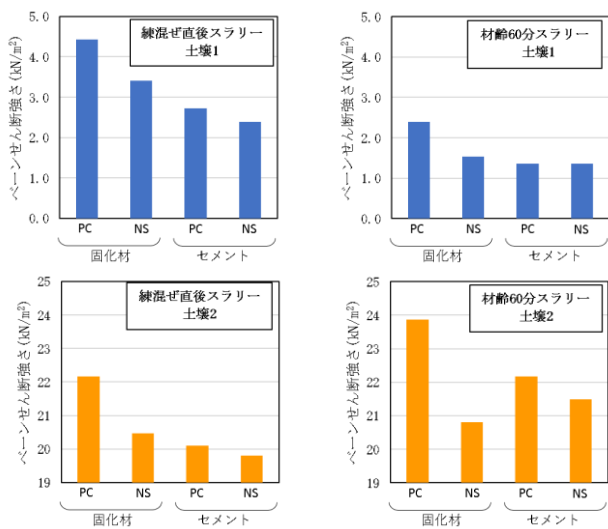


図 3 改良土のベーンせん断強さ

表 3 材齢 60 分の混和剤残存率

| 材料   | 混和剤種類 | 残存率(%) |
|------|-------|--------|
| 固化材  | PC    | 0.59   |
|      | NS    | 0.63   |
| セメント | PC    | 0.50   |
|      | NS    | 0.49   |

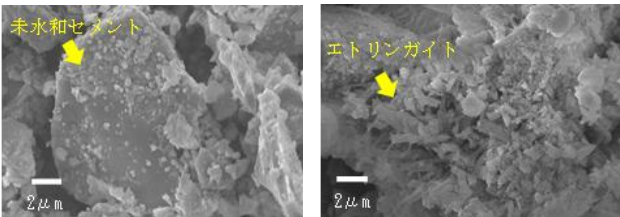


写真 1 材齢 60 分混和剤添加固化材スラリー  
(左：NS 系、右：PC 系)