

# セメントを使用しない懸濁系瞬結・中結型注入材の開発

懸濁型注入材 高炉スラグ 脱炭素

早稲田大学 非会員 ○中村陸央 国際会員 赤木寛一 国際会員 王海龍  
ケミカルグラウト(株) 正会員 渡邊陽介 非会員 横張光

## 1. 研究背景

地盤改良工法の多くに使用されるセメントは、材料製造時に多量の二酸化炭素の排出を伴う。脱炭素社会への転換が要求される社会的需要を考慮し、排出量が抑制される手法への転換が必要となると考えられる。

本研究では、懸濁系注入材を使用した薬液注入工法を主な研究対象としている。薬液注入工法とは、地盤中の隙間に固化する性質を有する薬液を注入することで、透水係数低下や強度増加を図る工法である。懸濁系注入材とは、本工法に用いられる薬液のうち、粒子を含むものを指す。高炉スラグの潜在水硬性を有する点、製造時の二酸化炭素排出が抑制される点と、産業廃棄物の活用が求められる点に着目し、懸濁型注入材のセメントの代替材料として、高炉スラグの利用を検討している。

## 2. 研究目的

本研究の目的は、高炉スラグ系懸濁系薬液注入工法の施工性向上を目指した瞬結・中結型の注入材の開発である。既存の研究において、微細な高炉スラグと反応剤（珪酸化合物）を主な材料とする緩結型注入材が実現可能であることが確認されている<sup>1)</sup>。そこで、新たに促進剤（カルシウム化合物）を添加することによる瞬結・中結型注入材の開発検証を行った。具体的には、ホモゲル状態における促進剤添加量とゲルタイムの関係、および一定の促進剤添加量における高炉スラグと反応剤添加量による一軸圧縮強度の変化を実験によって確認した。また、開発した懸濁型注入材が脱炭素化の目的を達成するか否かを確認するために、二酸化炭素排出に関するライフサイクルアセスメントも実施した。

## 3. 実験検討方法

- 促進剤添加量とゲルタイムとの関係を確認した。測定を実施した材料配合を表 1 に示す。サンプル a からサンプル i までに示した材料配合の全てに対し、設定した濃度(0.2%, 0.5%, 0.7%, 0.9%, 1.1%, 1.4%, 1.8%, 2.3%)の促進剤を有するホモゲルを作成し、ゲルタイムを測定した。実験の際は、反応剤及び水を混合させた液を A 液と定め、高炉スラグ、促進剤及び水を混合させた液を B 液と定めた。全てのゲルタイム測定において、A 液及び B 液の混合を開始する時刻より、ゲルタイム測定を開始した。混合はマグネチックスターラーの攪拌(回転数 1500rpm)にて行った。ゲルタイムは、数分以内の時間を有する瞬結型注入材に関してはスターラーの回転が確認されなくなり攪拌が困難となるまでの時間と定め、数十分以上の時間を有する中結型注入材に対しては音叉型粘度計による計測を行い、粘度が 50mPa・s に達するまでの時間と定めた。
- 一定の促進剤添加量(0.5%)における高炉スラグと反応剤添加量によるホモゲルの強度を確認するために、一軸圧縮試験(JIS A 1216)を実施した。検討した配合を、表 1 に示す。ホモゲルは気温 20℃、湿度 95%の恒温室内で養生させ、材齢 7 日、材齢 28 日において強度試験を行った。
- 各材料の二酸化炭素排出量に関する比較検討を実施した。内容としては 50m 四方、高さ 2m の地盤を改良範囲と設定し、既存のセメント系懸濁型注入材と開発した高炉スラグ系懸濁型注入材を使用した薬液注入工法及び、普通セメントを使用した高圧噴射攪拌工法で施工した場合の材料製造、施工、運搬の各工程における二酸化炭素の排出量を比較、評価した。

表 1 測定を実施した配合

ケース	配合	
	スラグ	反応剤
-	%	%
サンプル a	4	12.5
サンプル b		15.0
サンプル c		17.5
サンプル d	5	12.5
サンプル e		15.0
サンプル f		17.5
サンプル g	6	12.5
サンプル h		15.0
サンプル i		17.5

## 4. 結果及び考察

- 促進剤添加量とゲルタイムとの関係を確認した結果を図 1 に示す。図より、促進剤添加量の増加に伴い、ゲルタイムが大幅に短縮されることが確認された。また、高炉スラグや反応剤の添加量がゲルタイムに与える影響は、促進剤によるものと比較すると遥かに小さいことが確認された。結果として、数分から数十分にわたるゲルタイムを有する領域、数秒から数十秒にわたるゲルタイムを有する領域が確認された。
- 一定の促進剤添加量における高炉スラグと反応剤添加量によるホモゲルの一軸圧縮強度の変化を調査した結果を、図 2 に示す。図より、高炉スラグ添加量の増加が一軸圧縮強度の向上に関連すること、反応剤添加量の増加は一軸圧縮強度の向上に関連しないことが確認された。また、反応剤添加量の増加により、強度発現に要する時間が増加されることも確認された。
- 各材料の二酸化炭素排出量に関する比較検討を実施した結果を、図 3 に示す。図より、開発した懸濁型注入材を用いた薬液注入工法にて二酸化炭素排出量の抑制が可能であることが確認された。理由として、高炉スラグが産業廃棄物であり製造時の二酸化炭素排出が少ないこと、また薬液注入工法が高圧噴射攪拌工法と比べて使用機械の燃料使用量が少なく、更に排泥を発生させないことなどが考えられる。

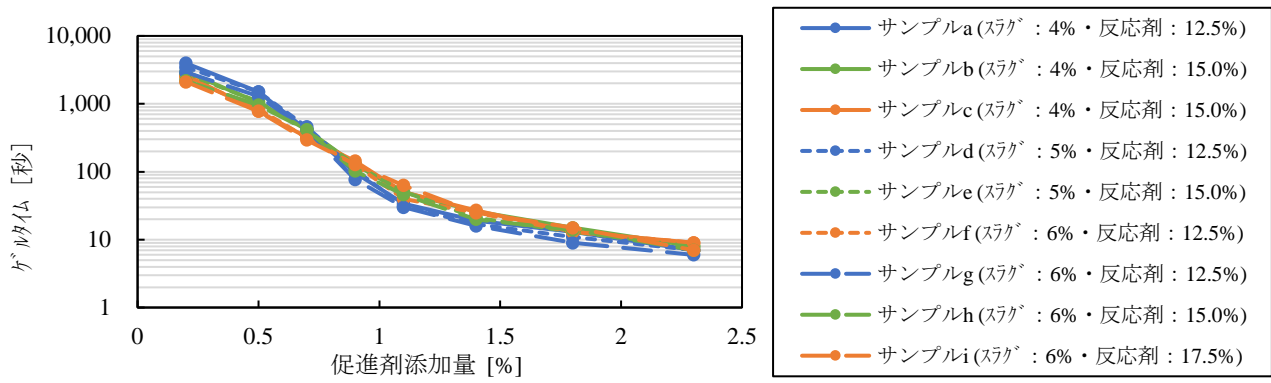


図1 促進剤添加量とゲルタイムとの関係

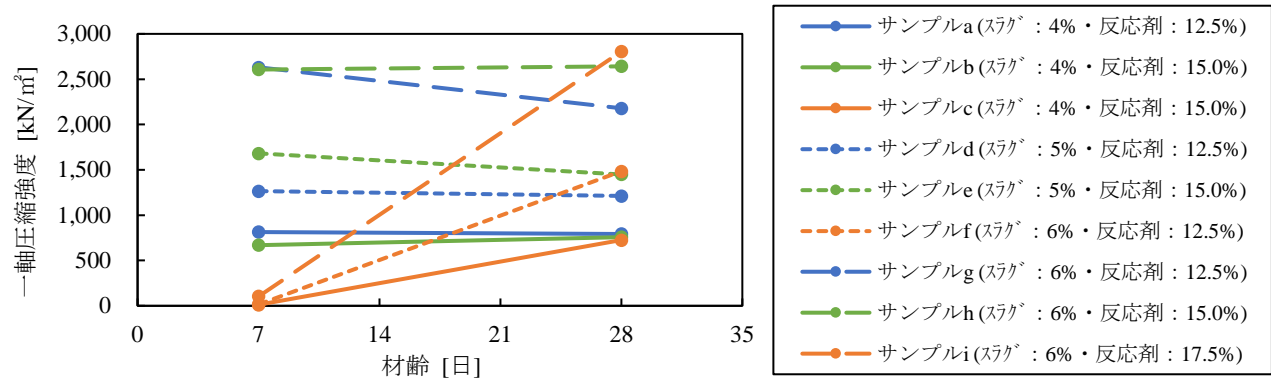


図2 ホモゲルの一軸圧縮強度の推移

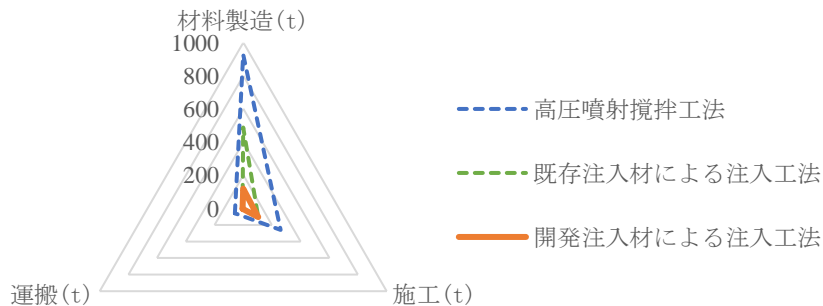


図3 CO<sub>2</sub>排出量の比較

### 5. まとめ

高炉スラグを使用した瞬結・中結型の懸濁型注入材の開発を目的とした各種性能を評価する実験を行った。その結果、促進剤を活用することで実現が可能であることが、ゲルタイム測定及び一軸圧縮試験から導き出された。また、高炉スラグによる懸濁型薬液注入工法が二酸化炭素排出抑制に有効であることを定量的に示すことが出来た。

### 6. 参考文献

- 1) 渡邊ら,セメントを使用しない懸濁型注入材の特性評価,第57回地盤工学研究発表会,2022
- 2) 鉄鋼スラグ協会,鉄鋼スラグを使用しCO<sub>2</sub>削減に寄与する高炉セメント,2020