

狭隘地用の流動材圧入静的締固め工法の開発（その1）

Development of Static Compaction Method with Press-in Fluidized Material for Narrow Areas (Part 1)

岡田 和成*1 大山 将*2 加藤 満*3 小山 孝*1 後藤 宇*4
Kazunari Okada Sho Oyama Mitsuru Kato Takashi Koyama Hisashi Goto
内川 裕也*4 竹中 夏子*5 佐藤 潤*6 金高 鉄次*7 勝見 武*8
Yuya Uchikawa Natsuko Takenaka Jun Sato Tetsuji Kanetaka Takeshi Katsumi

要旨

本開発は、流動材を地中に圧入する静的締固め工法による地盤改良と同時に CO₂ を地中に貯留する技術の開発である。施工機械は 30t 未満のコンパクトな地盤改良機の使用を想定しており、狭隘地への適用性を確保する。流動材は、セメントを使用せず、事業所等の排ガスに含まれる CO₂ と副産物由来のカルシウム源から合成した軽質炭酸カルシウムを混合した環境配慮型地盤圧入材である。

本報告では、流動材圧入静的締固め工法に用いる流動材を対象に、流動性、力学特性、環境安全性、CO₂ 排出量と CO₂ 貯留量を報告する。また、本開発工法の施工方法について紹介する。

キーワード：地盤改良 環境配慮型地盤圧入材 CCU 材料 軽質炭酸カルシウム CO₂ 地下貯留

1. はじめに

著者らは環境配慮型地盤圧入材を用いて「地盤改良をしながら CO₂ を地盤中に貯留する技術」の開発に取り組んでいる。著者らが提案する環境配慮型地盤圧入材は、副産物もしくは未利用資源を母材として、これに CCU (Carbon dioxide Capture and Utilization) 材料として排ガス由来 CO₂ を副産物由来カルシウム源に固定化した軽質炭酸カルシウム CaCO₃ を混合した材料である。固化材は高炉スラグ微粉末と珪酸ソーダからなり、セメント系固化材は使用しない。CO₂ を炭酸カルシウムの形で鉱物化してから地盤改良の一環として地中に貯留するため、地下深くの貯留層に圧入する CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) と比較して容易かつ安価に貯留できることが期待されるほか、地震等の外力により圧入した CO₂ が貯留層外部に漏洩する

等の懸念が無い。

本報告では、種々の地盤改良工法のうち流動材を地中に圧入する静的締固め工法（以下、流動材圧入静的締固め工法）に用いる流動材を対象に、流動性、力学特性、環境安全性、CO₂ 排出量と CO₂ 貯留量を報告する。また、環境配慮型地盤圧入材を用いた地盤改良の施工方法について紹介する。

2. 地盤改良をしながら CO₂ を地盤中に貯留する技術の概要

一般的な地盤圧入材に使用されるセメント系固化材は、現状では製造工程において CO₂ を大量に排出するため、セメント代替材料による環境配慮型地盤圧入材の利用が望まれている。

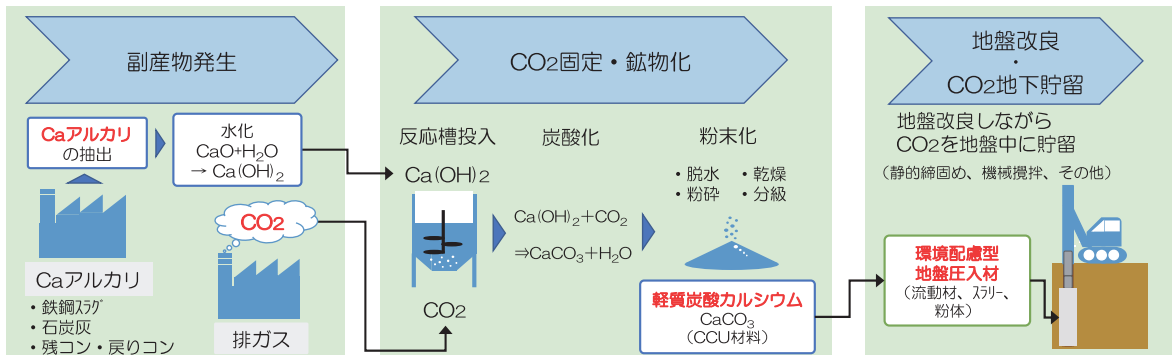


図1 地盤改良をしながら CO₂ を地盤中に貯留する技術の模式図

*1 技術本部 技術企画部 *2 技術研究所 大阪テクノセンター *3 技術研究所 技術戦略部 *4 技術本部 土木技術部
*5 環境エンジニアリング本部 環境技術部 *6 日特建設(株) *7 東曹産業(株) *8 京都大学大学院 地球環境学

図1に、地盤改良をしながらCO₂を地盤中に貯留する技術の模式図を示す。排ガス由来CO₂と副産物由来カルシウム源から合成する軽質炭酸カルシウムCaCO₃は、分子量は100g/molであり、そのうちCO₂の分子量は44g/molであることから、純度100%のとき0.44t-CO₂/tのCO₂が固定されており、たとえばこれを環境配慮型地盤圧入材に100kg/m³混合して地盤改良工法の本モルタル等に用いると、44kg-CO₂/m³のCO₂をCaCO₃の形で地盤中に貯留することが可能となる。

3. 環境配慮型地盤圧入材の概要

3.1 環境配慮型地盤圧入材の組成

図2に、環境配慮型地盤圧入材の組成を示す。固化材として、高炉スラグ微粉末（石膏添加品）とアルカリ刺激剤（珪酸ソーダ）の混合物を用いる。骨材には、未利用資源として砕石スクリーニングス・砕石粉、副産物としてコンクリートスラッジ破碎骨材¹⁾、高炉スラグ細骨材などを用いることができる。不活性フィラーとして、軽質炭酸カルシウムを骨材や固化材の一部に置き換えて混合する。

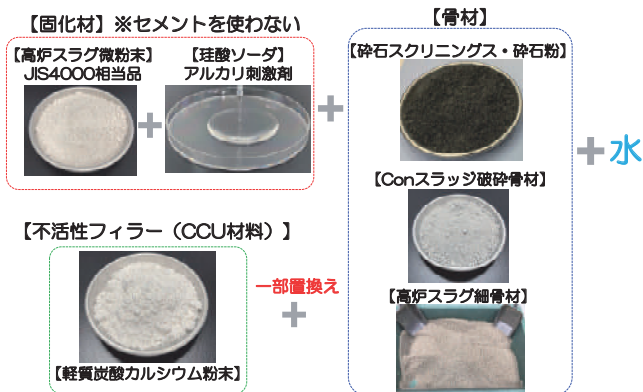
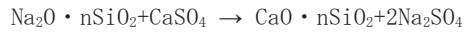


図2 環境配慮型地盤圧入材の組成

3.2 反応メカニズム

固化材に用いる高炉スラグ微粉末は、石膏添加品、石膏添加無しの2種類が市販されているが、高炉スラグ微粉末、水、珪酸ソーダを混合する事前試験を行った結果、石膏添加品はゲル化物が生成されブリーディング率が低減したことから、石膏添加品を用いることを標準とした。石膏と珪酸ソーダとの反応²⁾は以下のとおりである。



ここで、ゲル化物の生成量は石膏量とNa₂O濃度に影響され、ゲル化物強度はSiO₂の量に影響される。SiO₂量を増やしてゲル化物強度を大きくすれば材料分離抵抗性が向上するが、地盤改良施工時のポンパビリティの低下が懸念される。

一方で硬化反応は、高炉スラグ微粉末に含まれる金属イオンがアルカリ液(Na₂O)で溶け出しポリマー化が進行することによるが³⁾、SiO₂量が適量であってもNa₂O量が不足すると金属イオンの溶解が進まず、15~20℃程度の常温で硬化しない。

著者らが事前検討として行った実験⁴⁾より、固化材にアルカリ刺激剤として用いる珪酸ソーダは、SiO₂/Na₂Oモル比2.0~2.3、Na₂O=12.4~14.5%程度においてブリーディングを抑えつつ可使用時間を確保し、常温で強度発現できることが確認されたことから、上記範囲の珪酸ソーダを用いることを標準とした。

3.3 流動性

3.3.1 テーブルフロー値

流動材圧入静的締固め工法の施工において、流動材の混練りは0.1~0.3m³/バッチ程度のミキサーで現場練りにて行うことが一般的であるため、短時間で流動性を得られる配合の設定が重要である。そこで本実験では、流動材の各材料の配合量を変化させて、3分程度の混練り時間で流動性が確保できる範囲を調べた。表1に使用材料を、表2に配合表を示す。骨材に、高炉スラグ細骨材(S1)を用いた

表1 使用材料

| 材料名 | 記号 | 密度 g/cm ³ | 摘要 | CO ₂ 排出原単位 kg-CO ₂ /t |
|-----------|-----|-------------------------------|---|--|
| 骨材 | S1 | ρ _{S1} =2.6~2.9 | JIS A 5011-1、高炉スラグ細骨材(5mm以下) | 26.5 |
| | S2 | ρ _{S2} =2.4~2.7 | コンクリートスラッジ破碎骨材(5mm以下) | 1.2 |
| 高炉スラグ微粉末 | P | ρ _P =2.8~3.0 | JIS A 6206、SO ₃ =2~4%、比表面積3500~5000cm ² /g | 26.5 |
| 軽質炭酸カルシウム | F | ρ _F =2.5~2.8 | CaCO ₃ 純度90%以上、比表面積2500cm ² /g以上 | -366 |
| 珪酸ソーダ | WG | ρ _{WG} =1.49~1.53 | SiO ₂ /Na ₂ Oモル比=2.0、Na ₂ O=14.1~14.5% | 300 |
| 水 | W | ρ _W =1.0 | 上水道水 | 0.235 |
| 混和剤 | BT1 | ρ _{BT1} =1.045~1.065 | 高流動性充填材用特殊増粘剤「ビスコトップ200LS-2」 | — |
| | BT2 | ρ _{BT2} =1.02 | 界面活性剤型液体増粘剤「ビスコトップ500K」 | — |
| 高炉セメントB種 | BB | ρ _{BB} =3.02~3.05 | JIS R 5211-2009 | 465 |

表2 配合表

| ケース数 | 1m ³ 当り配合 (kg) | | | | | | 液体粉体比 (wt%) | CCU材料置換率 (wt%) | 骨材 ^h -スト比 (vol%) |
|------|---------------------------|----------|--------|--------|-----------|---------|-------------|----------------|-----------------------------|
| | S1 | S2 | P | F | WG | W | | | |
| 11 | 1545~1711 | 0 | 38~416 | 95~357 | 11.2~13.1 | 255~298 | 65~80 | 0~18 | 121~155 |
| 15 | 0 | 927~1196 | 22~293 | 96~241 | 7.2~9.3 | 441~558 | 151~244 | 0~18 | 53~82 |

11 配合、コンクリートスラッジ破碎骨材 (S2) を用いた 15 配合の計 26 配合について試験を行った。骨材毎に配合量を変化させて混練りした。混練りには、モルタルミキサー (マルイ社製) を用いた。攪拌回転数は、自転 140 rpm、公転 62 rpm とした。練り鉢内に骨材、高炉スラグ微粉末、軽質炭酸カルシウムを投入して攪拌・混合した後、水を投入して 30 秒攪拌した。さらに珪酸ソーダを添加して 2 分攪拌した。

混練り後にテーブルフロー試験 (以下、TF 試験) を行い、その後供試体を採取して、養生 28 日後に一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験結果については 3.4 節を参照されたい。TF 試験は JIS R 5201 に準拠したが、フローコーンに代わり JHS A 313 コンシステンシー試験方法のシリンダー (寸法: φ80 mm×高さ 80 mm) を使用した。混練物を充填し、シリンダーを静かに鉛直上方に引き上げた直後 (0 打) および 15 回の落下運動を与えた後 (15 打) に混練物の広がり測定してテーブルフロー値 (以下、TF 値) とした。

写真 1 に、TF 試験状況の一例を示す。いずれの配合も混練り時間 3 分で均質に混練りができた。S1 骨材配合は 0 打が TF 値 80~100 mm、15 打が TF 値 120~220 mm であり、S2 骨材配合は 0 打が TF 値 80~150 mm、15 打が TF 値 140~230 mm であった。どちらも固化材の初期反応⁴⁾によりチキントロピー性が付与されている。

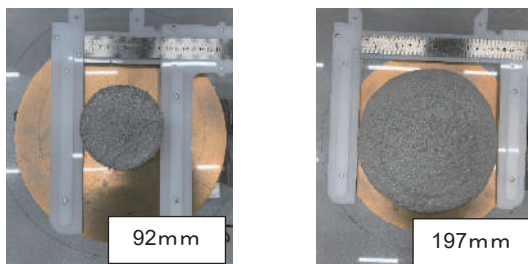


写真 1 TF 試験状況 (左: 0 打, 右: 15 打)

図 3 に液体粉体比と TF 値の関係を示す。液体粉体比 (wt%) は $(WG+W) / (P+F)$ による値である。S1 骨材配合は、液体粉体比が増減すると、TF 値が鋭敏に変化する。流動性が得られる液体粉体比の範囲は、S1 骨材配合は 60 wt% 程度以上、S2 骨材配合は 150 wt% 程度以上であった。

図 4 に CCU 材料置換率と TF 値の関係を示す。CCU 材料置換率 (wt%) は $F / (S+P+F)$ による値である。置換率 0~18 wt% の範囲においては流動性が確保できる結果が得られた

が、本検討の範囲において CCU 材料置換率と TF 値に相関は認められなかった。

図 5 に骨材ペースト比と TF 値の関係を示す。骨材ペースト比 (vol%) は $(S/\rho_s) / (P/\rho_p + F/\rho_f + WG/\rho_{wg} + W)$ による値である。骨材ペースト比が大きくなる、つまり骨材の体積比率が大きくなると、TF 値は小さくなった。S1 骨材配合は 160 vol% 程度以下、S2 骨材配合は 85 vol% 程度以下で流動性が得られることが確認できた。

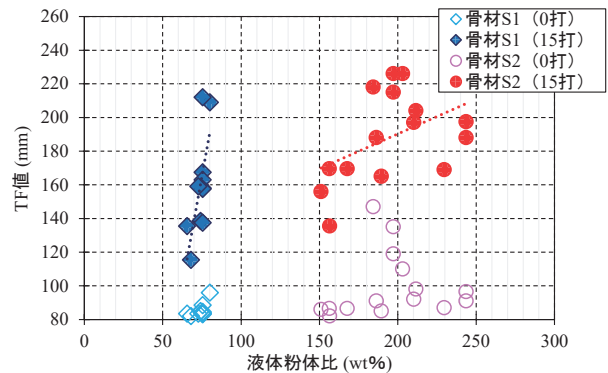


図 3 液体粉体比と TF 値の関係

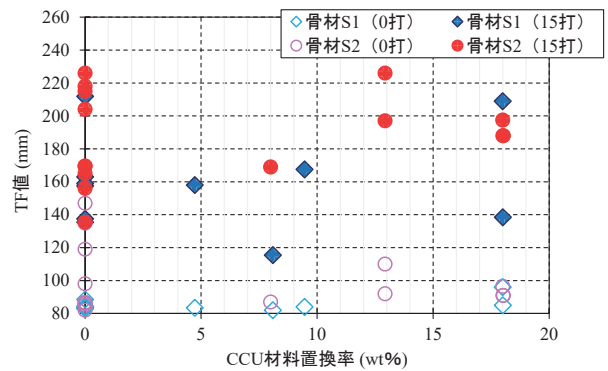


図 4 CCU 材料置換率と TF 値の関係

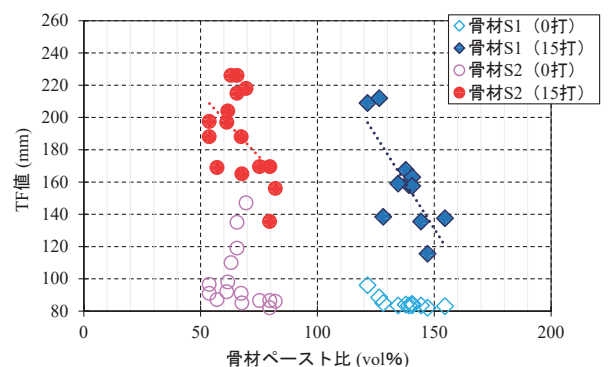


図 5 骨材ペースト比と TF 値の関係

表3 配合と諸物性

| No. | 環境配慮型地盤圧入材の配合 | | | | | | | | 物性 | | | | | | 加圧ブリーディング試験 | 室内ベンセン断試験 | 環境安全性評価 | |
|-----|----------------------------|------|-----|-----|-----|------|-----|----------|---------------------------------------|-----|-----------|------|-----------------------------|------|-------------|-----------|---------|------|
| | 1m ³ 当り添加量 (kg) | | | | | | | | TF値 (mm) | | 膨張収縮率 (%) | | 一軸圧縮強さ (MN/m ²) | | | | | |
| | S1 | S2 | P | BB | F | WG | W | BT1 (kg) | BT2 (kg) | 0打 | 15打 | σ7 | σ28 | σ7 | | | | σ28 |
| 1 | 1616 | | 404 | | 0 | 12.6 | 281 | 0 | 0 | 84 | 159 | -1.4 | -2.0 | 7.38 | 18.97 | — | — | 3.5節 |
| 2 | 1545 | 0 | 39 | | 348 | 12 | 298 | | | 96 | 209 | -0.9 | -1.0 | 1.12 | 3.72 | | | |
| 3 | | 1085 | 271 | | | 8.4 | 526 | | | 82 | 136 | 0.7 | 2.2 | 4.86 | 7.30 | | | |
| 4 | | 1085 | 271 | | | 8.4 | 526 | W×0.1% | | 135 | 226 | -0.1 | 0 | 1.99 | 3.27 | ○ | — | — |
| 5 | | 1085 | 271 | | | 8.4 | 526 | W×0.25% | | 111 | 211 | 0 | 0 | 2.98 | 4.80 | | | |
| 6 | | 1085 | 271 | 0 | 0 | 8.4 | 526 | W×0.1% | 103 | 209 | -0.2 | 0 | 3.04 | 4.94 | | | | |
| 7 | | 1085 | 271 | | | 8.4 | 526 | W×0.25% | 98 | 196 | 0 | 0 | 3.88 | 5.36 | ○ | ○ | — | — |
| 8 | | 800 | 580 | | | 13 | 546 | W×0.25% | 172 | 255 | 0 | 0 | 5.06 | 8.02 | | | | |
| 9 | | 800 | 290 | | 290 | 13 | 537 | W×0.25% | 120 | 225 | 0 | 0 | 3.38 | 4.89 | | | | |
| 10 | | 800 | 193 | | 387 | 13 | 534 | W×0.25% | 122 | 229 | 0 | 0 | 1.54 | 2.55 | ○ | ○ | — | — |
| 11 | | 800 | 116 | | 464 | 13 | 532 | W×0.25% | 109 | 220 | 0 | 0 | 0.74 | 1.09 | | | | |
| 12 | 1616 | 0 | 0 | 160 | 0 | 0 | 374 | 0 | ※BB添加量は、一般的な流動材圧入静的締固め工法のセメント系固化材の添加量 | | | | | | | | | |

3.3.2 ポンプバビリティ

流動材圧入静的締固め工法の施工時において、①圧送距離が長い②吐出量を増やす③地盤に圧入して締め固めるなどの場合、流動材の吐出圧力が上昇することで凝集や加圧脱水が促進され、その結果、配管が閉塞して圧送不可となることが懸念される。そこで本項では、ポンプバビリティ向上を目的として実施した、加圧脱水量軽減に関する基礎的検討の結果について報告する。

数種類の混和剤を用いて予備試験を行った結果、界面活性剤を主成分とする2種の混和剤(表1)が少量添加で加圧脱水量軽減に効果が高いと判明したため、本検討に用いることとした。表3に配合と諸物性(TF値、膨張収縮率、一軸圧縮強さ)および試験項目を示す。混和剤は水に対して外割りで添加した。混練りは3.3.1項と同様にモルタルミキサー(マルイ社製)を用いて、攪拌回転数は自転140rpm、公転62rpmとした。練り鉢内に骨材、高炉スラグ微粉末、軽質炭酸カルシウムを投入して攪拌混合した後、水を投入して30秒攪拌した。さらに珪酸ソーダを添加して30秒攪拌したのち、混和剤を添加して90秒攪拌した。混練り後にTF試験、加圧ブリーディング試験、室内ベンセン断試験を行った。さらに供試体を採取して、恒温恒湿室(20℃)で養生後(σ7およびσ28)に膨張収縮率測定および一軸圧縮試験を行い、破壊後供試体で環境安全性評価を行った。環境安全性については3.5節を参照されたい。加圧ブリーディング試験は、土木学会コンクリート標準示方書JSCE-F502に準じた。モールド上下方向から3.5MPaで10分間加圧して適宜ブリーディング水を採取し、10分経過後に5.0MPaに上昇させて、さらにブリーディング水を採取した。測定した水量から60秒脱水率と最終脱水率を算出した。室内ベンセン断試験は、地盤工学会基準JGS1411-2012に準じ、測定最大トルク値より、ベンセン断強さを算出した。ポンプバビリティの持続性の傾向を把握するため、練り上がり

直後および1, 2, 3時間ごとに再攪拌を行った状態の試料でベンセン断強さを測定した。

加圧ブリーディング試験の結果を図6および図7に示す。脱水量は、混和剤を添加しないNo.3と比較すると、混和剤添加配合No.4~7は、混和剤の種類および添加量によらずおおむね半分以下となり、混和剤の添加が加圧時の材料分離抵抗性の向上に有効であることが確認できた。また、混和剤BT1を添加したNo.4, 5とBT2を添加したNo.6, 7を比較すると、BT2の方が少量でも加圧脱水量の低下に大きく寄与していることがわかる。

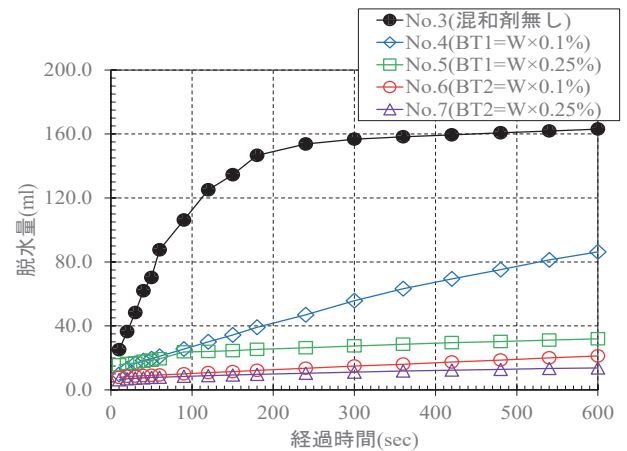


図6 加圧ブリーディング試験結果

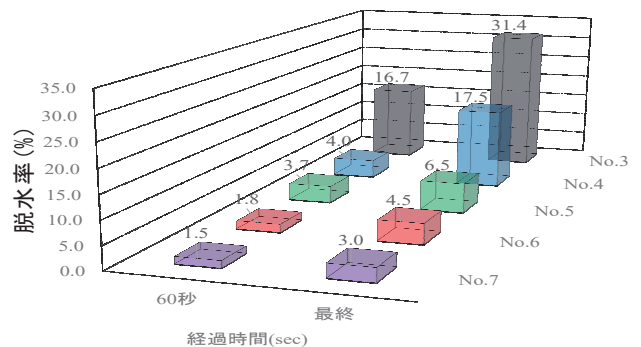


図7 60秒および最終脱水率

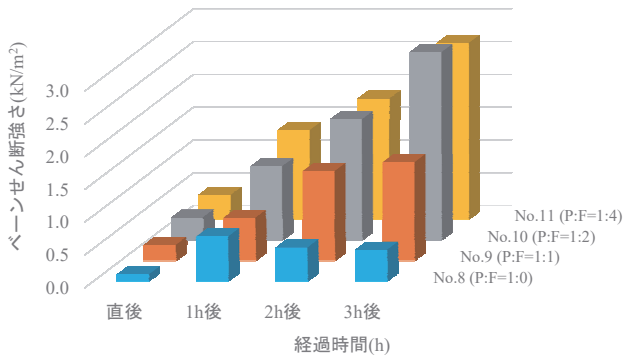


図8 ベーンせん断強さの経時変化

室内ベーンせん断試験の結果を図8に示す。高炉スラグ微粉末 (P) と軽質炭酸カルシウム (F) の比率において F の添加無し (No. 8) は3時間後もベーンせん断強さの変化が少なく流動性が維持されており、3時間程度はポンパビリティが確保できる可能性がある。一方で、F の比率が大きくなるにつれて経過時間に対するベーンせん断強さが大きくなる傾向にあることから、流動性が低下してポンパビリティが維持されない可能性が示唆された。なお、ポンパビリティとベーンせん断強さとの関係については、実機でポンプ圧送試験を行って検証する必要があるため、今後の課題とする。

3.4 力学特性

地盤改良は改良目的に応じて目標とする設計強度が異なる

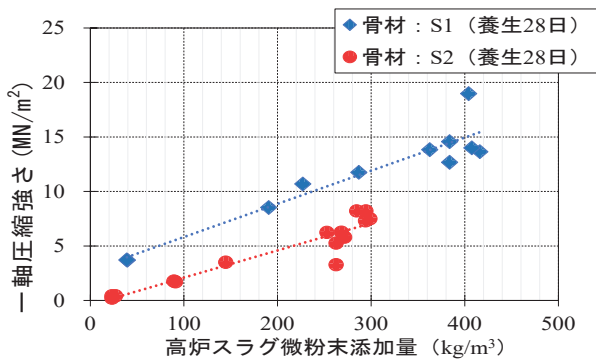


図9 P添加量と一軸圧縮強さの関係

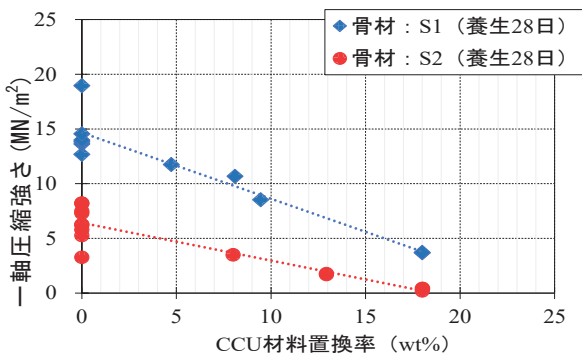


図11 CCU材料置換率と一軸圧縮強さの関係

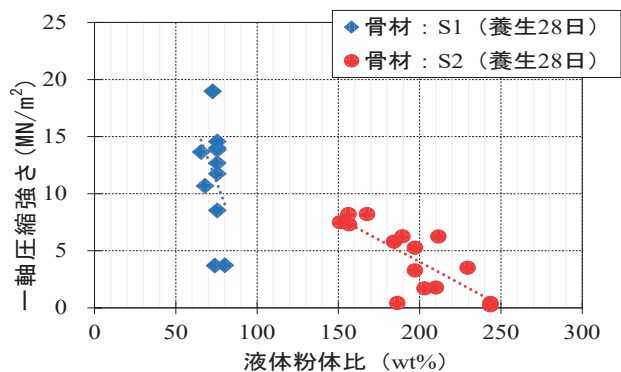


図10 液体粉体比と一軸圧縮強さの関係

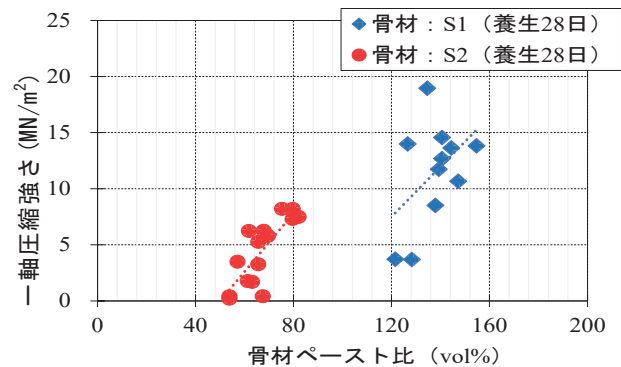


図12 骨材ペースト比と一軸圧縮強さの関係

るため、設計強度を満足する配合を設定する必要がある。本節で示す力学特性は、表2に示す配合の一軸圧縮試験結果である。供試体の作製方法は、3.3.1項を参照されたい。

図9に高炉スラグ微粉末 (P) 添加量と一軸圧縮強さの関係を示す。両者には正の相関が認められる。S1 骨材配合のほうが相対的に高い一軸圧縮強さが得られている。P 添加量 22~416 kg/m³ において一軸圧縮強さ 0.2~19 MN/m² 程度の範囲に調整できる可能性がある。

図10に液体粉体比と一軸圧縮強さの関係を示す。液体粉体比 (wt%) は3.3.1項と同様に (WG+W) / (P+F) による値である。液体粉体比が大きくなると一軸圧縮強さは低下する。S1 骨材配合は、液体粉体比が増減すると、一軸圧縮強さが鋭敏に変化する。S1 骨材配合は液体粉体比 80 wt%以下において一軸圧縮強さ 3.69 MN/m² 以上となり、S2 骨材配合は液体粉体比 244 wt%以下において一軸圧縮強さ 0.2 MN/m² 以上となった。

図11にCCU材料置換率と一軸圧縮強さの関係を示す。CCU材料置換率 (wt%) は3.3.1項と同様に F / (S+P+F) による値である。CCU材料置換率が大きくなると一軸圧縮強さは低下する。本実験の範囲においては、S2 骨材配合ではCCU材料置換率が 18 wt%程度以上になると一軸圧縮強さが得られない結果である。

図12に骨材ペースト比と一軸圧縮強さの関係を示す。骨材ペースト比 (vol%) は3.3.1項と同様に (S/ρ_s) / (P/ρ_p) による値である。

$\rho_p+F/\rho_F+WG/\rho_{WG}+W$) による値である。骨材ペースト比が大きくなる、つまり骨材の体積比率が大きくなると一軸圧縮強さも増加する結果であった。

骨材毎に整理すると以下のとおりである。S1 は高炉スラグ微粉末 (P) 添加量 38~416 kg/m³、液体粉体比 65~80 wt%、CCU 材料添加率 0~18 wt%、骨材ペースト比 121~155 vol% の範囲において一軸圧縮強さ 3.69~19 MN/m² が得られた。S2 は高炉スラグ微粉末 (P) 添加量 22~293 kg/m³、液体粉体比 151~244 wt%、CCU 材料添加率 0~18 wt%、骨材ペースト比 53~82 vol% の範囲において一軸圧縮強さ 0.2~8.2 MN/m² が得られた。

3.5 環境安全性

地盤改良工法の環境配慮型地盤圧入材として本材料を用いる場合は、改良後地盤の環境安全性が担保されることを確認する必要がある。そこで本節では、表 3 の配合 No1、2 の環境安全性の調査結果を報告する。

環境安全性評価のための試験方法は、土壤環境基準や土壤汚染対策法、「コンクリート用骨材又は道路等のスラグ類に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会」の報告書⁵⁾などを参考に、H15 環告 18 号溶出量試験、H15 環告 19 号含有量試験、JIS K 0058-1 の 5 溶出量試験とした。環境安全性評価に用いた供試体の作製方法は 3.3.2 項に記載のとおりである。恒温恒湿室 (20℃) で養生後に膨張収縮率測定および一軸圧縮試験を行い、破壊後供試体で H15 環告 18 号溶出量試験、H15 環告 19 号含有量試験を行った。JIS K 0058-1 の 5 溶出量試験の供試体も別途混練り時に作製し、養生 42 日後に試験を行った。

図 13 に一軸圧縮強さの経時変化を示す。No. 1、2 ともに養生 91 日にかけて強度増加している。No. 1 (軽質炭酸カルシウム添加無し) の高炉スラグ微粉末添加量は No. 2 (軽質炭酸カルシウム添加有り) の約 10 倍であるが、強度発現は約 5 倍に留まっている。

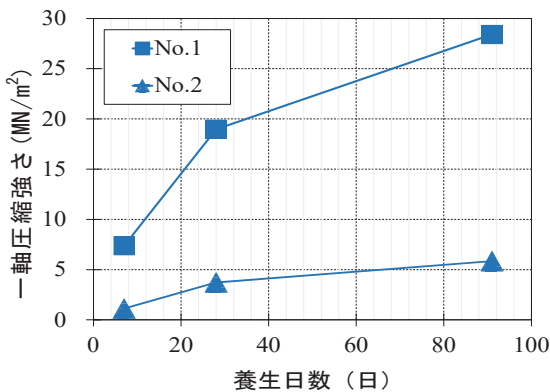


図 13 一軸圧縮強さの経時変化

表 4 に環境安全性確認試験結果を示す。いずれの試験においても、土壤溶出量基準や土壤含有量基準と比較して低い値を示しており、本検討の範囲においては環境に対する安全性が確認できた。今後は、高炉スラグ細骨材以外の骨材を用いた配合についても安全性の確認を行っていく予定である。

表 4 環境安全性確認試験結果

| 試験方法 | 項目 | 配合 | 養生日数 | 試験結果 | 基準 | 判定 |
|--|-------|-------|---------|-------------|----------|----|
| H15環告18号 溶出量試験 (単位: mg/L) | カドミウム | 1, 2 | 7 | 0.0003未満 | 0.003以下 | ○ |
| | 鉛 | 1, 2 | 7 | 0.005未満 | 0.01以下 | ○ |
| | 六価クロム | 1, 2 | 7 | 0.02未満 | 0.05以下 | ○ |
| | 砒素 | 1, 2 | 7 | 0.002未満 | 0.01以下 | ○ |
| | 水銀 | 1, 2 | 7 | 0.0005未満 | 0.0005以下 | ○ |
| | セレン | 1, 2 | 7, 28 | 0.004~0.007 | 0.01以下 | ○ |
| | ふっ素 | 1, 2 | 7, 28 | 0.31~0.43 | 0.8以下 | ○ |
| ほう素 | 1, 2 | 7, 28 | 0.1~0.2 | 1以下 | ○ | |
| H15環告19号 含有量試験 (単位: mg/kg) | カドミウム | 1, 2 | 7 | 4.5未満 | 45以下 | ○ |
| | 鉛 | 1, 2 | 7 | 5未満 | 150以下 | ○ |
| | 六価クロム | 1, 2 | 7 | 5未満 | 250以下 | ○ |
| | 砒素 | 1, 2 | 7 | 5未満 | 150以下 | ○ |
| | 水銀 | 1, 2 | 7 | 0.02未満 | 15以下 | ○ |
| | セレン | 1, 2 | 7 | 5未満 | 150以下 | ○ |
| | ふっ素 | 1, 2 | 7 | 240~330 | 4000以下 | ○ |
| ほう素 | 1, 2 | 7 | 52~66 | 4000以下 | ○ | |
| JIS K 0058-1 有姿攪拌溶 出試験 (単位: mg/L) | セレン | 1, 2 | 42 | 0.002~0.006 | 0.01以下 | ○ |
| | ふっ素 | 1, 2 | 42 | 0.25~0.29 | 0.8以下 | ○ |
| | ほう素 | 1, 2 | 42 | 0.1未満~0.1 | 1以下 | ○ |

4. 環境配慮型地盤圧入材の CO₂ 排出量と CaCO₃ としての CO₂ 貯留量

本章では、表 3 の環境配慮型地盤圧入材の CO₂ 排出量と CaCO₃ としての CO₂ 貯留量の試算結果を報告する。

表 1 に示す CO₂ 排出原単位は各材料の製造に係る値であり、参考文献^{6) 7) 8)}に記載のないものはメーカーにヒアリングして得た値を用いた。本検討に用いた軽質炭酸カルシウムは純度 94.5%であり 416 kg-CO₂/t の CO₂ が固定されている。製造時の CO₂ 排出量 50 kg-CO₂/t を差し引くと、正味の CO₂ 排出原単位は -416+50=-366 kg-CO₂/t となる。なお、混和剤については添加量が少ないため、CO₂ 排出量収支の検討に考慮しないこととした。

図 14 に、地盤圧入材の CO₂ 排出量を示す。ここで CO₂ 排出量は、表 3 の配合量に表 1 の各材料の CO₂ 排出原単位を乗じて合計した値である。参考例として、セメント系固化材の場合の CO₂ 排出量を記載した。軽質炭酸カルシウムを

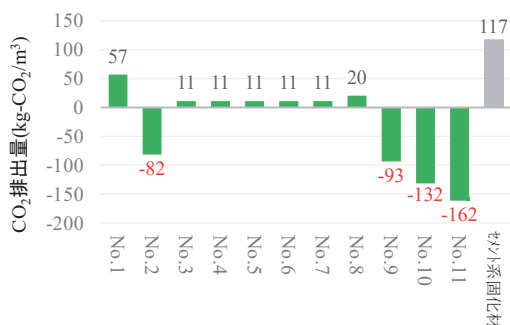


図 14 地盤圧入材の CO₂ 排出量

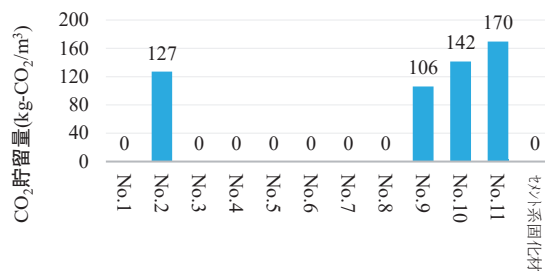


図 15 地盤改良施工による CaCO₃ としての CO₂ 貯留量

添加すると CO₂ 排出量がマイナスになる。軽質炭酸カルシウムを添加しない No. 1 においても 57 kg-CO₂/m³ であり、セメント系固材と比べて CO₂ 排出量は 1/2 程度である。

図 15 に、地盤改良工の施工による CaCO₃ としての CO₂ 貯留量を示す。ここで CO₂ 貯留量は、表 3 の軽質炭酸カルシウムの配合量に表 1 の CO₂ 排出原単位を乗じた絶対値である。本検討の配合を適用した場合の CO₂ 貯留量は、地盤改良工の施工時に環境配慮型地盤圧入材を 1 m³ 使用につき 106~170 kg-CO₂/m³ となる。なお、正味の CO₂ 貯留量は、材料運搬や施工機械運転に伴う CO₂ 排出量などを考慮して全体収支で評価する必要があるが、本検討では考慮していない。

CCU 材料を混合した環境配慮型地盤圧入材を用いることにより、地盤改良の一環として CO₂ を効率よく地中に貯留できる可能性があることがわかった。今後は、材料運搬や施工機械運転に伴う CO₂ 排出量も含めた全体収支の検討を進める予定である。

5. 環境配慮型地盤圧入材を用いた地盤改良の施工方法

環境配慮型地盤圧入材は、本検討の流動材のほかスラリーや粉体を使用することも考えられるが、本章では種々の地盤改良工法のうち流動材を用いる流動材圧入静的締固め工法の施工方法を紹介する。

従来の流動材圧入静的締固め工法は、圧入のみで締め固めるため、ポンプへの負荷が大きくなることが避けられず、

また、施工中の地盤内の圧力分布はロッド先端から放射状であるため、対象地盤の土質や応力状態などによっては造成可能な改良径が限界圧入圧力⁹⁾の制限を受ける場合があることが課題であった。

そこで著者らは、強制拡幅治具を用いて土塊を強制的に水平方向に移動させ、円筒形の空洞を造成する工程と流動材を圧入充填する工程とを併用することによって、ポンプへの負荷を軽減し、かつ所定の改良径を確保する新しい流動材圧入静的締固め工法の開発に取り組んでいる。

5.1 新しい流動材圧入静的締固め工法の施工フロー

図 16 に新しい流動材圧入静的締固め工法の施工フローを示す。強制拡幅治具を装着したボーリングロッドを用いて、強制拡幅治具を格納した状態で左回転しながら削孔する。改良範囲下端に到達後に右回転させて強制拡幅治具を展開する。強制拡幅治具で土塊を強制的に水平方向に移動させて円筒形の空洞を造成する。流動材をポンプ圧送して強制拡幅治具先端部から吐出させて円筒形の空洞に圧入充填する。さらに流動材を圧入し続けて周辺地盤を押し広げようように締め固め、所定の杭径に相当する量に達したのちステップアップする。拡幅、圧入充填、ステップアップを繰り返し、改良範囲上端に到達後に左回転させて強制拡幅治具を格納してボーリングロッドを引き上げ、次の施工箇所へ移動する。本工法による杭径は、改良径 φ400~700 mm 程度を想定している。ここで改良径は、流動材圧入量を等価な円柱に仮定した場合の直径である。

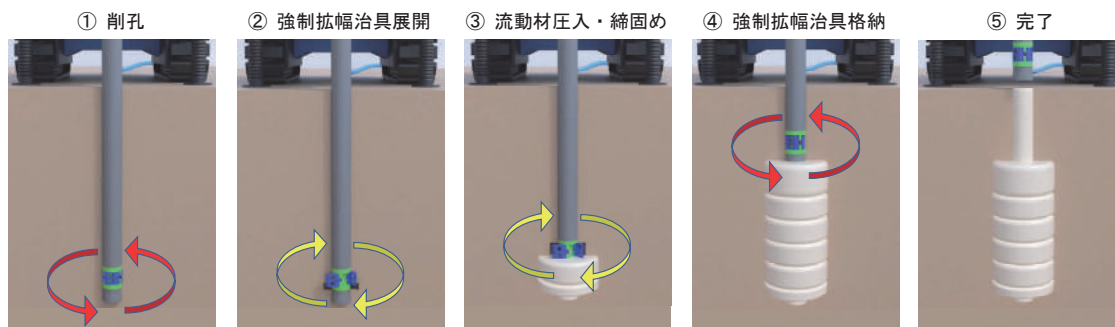


図 16 新しい流動材圧入静的締固め工法の施工フロー



写真2 試験状況（砂質土）



写真3 出来形確認状況（粘性土）

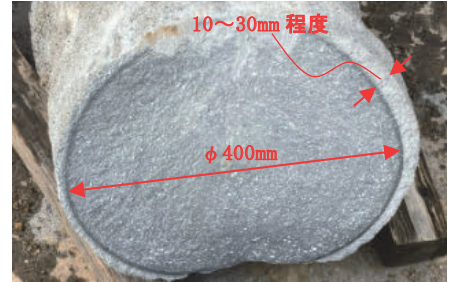


写真4 固結体断面（砂質土）

5.2 強制拡幅治具の動作確認試験

模擬地盤で強制拡幅治具（試作品）による空洞の造成を確認する試験を行った。今回の試験においては、流動材に替えてセメントスラリーを使用した。試作した強制拡幅治具は、格納状態で $\phi 216\text{mm}$ 、展開状態で $\phi 400\text{mm}$ である。施工機械は総重量約25tの地盤改良機(GI-130C、 $L \times W = 8.8\text{m} \times 2.6\text{m}$)を使用した。模擬地盤は、N値5程度の砂質土およびN値4程度の粘性土とした。図16の施工フローと同じ手順にて送水しながら模擬地盤をGL-1.2mまで削孔し、強制拡幅治具を展開させたのちセメントスラリーをボーリングロッド先端から吐出した。セメントスラリーの配合は、 $W/C = 42.3\%$ （普通ポルトランドセメント）であり、アンカーグラウト材用混和剤¹⁰⁾を添加してPロートフロー値10~15秒に調整した。セメントスラリーを圧力0.2MPa程度以下で圧入圧力を加えることなく吐出しながらステップアップした。セメントスラリーの吐出量は、強制拡幅治具で形成した空洞に相当する量とした。砂質土は、強制拡幅治具を展開した状態で地表面まで引き上げて、展開状況を目視確認した。粘性土は、GL-0.2mまでステップアップした段階でスラリーの吐出を停止し、強制拡幅治具を格納したのちロッドを引き上げた。写真2に砂質土の試験状況を示す。強制拡幅治具が展開していることが確認できた。セメントスラリーの固結を待って砂質土と粘性土それぞれ開削を行い、出来形を確認した。写真3に粘性土の出来形確認状況を示す。強制拡幅治具を展開させた区間は $\phi 400\text{mm}$ が確保されていることが確認できた。写真4に砂質土の固結体断面を示す。砂質土においても $\phi 400\text{mm}$ が確保されていた。 $\phi 400\text{mm}$ の外側に砂とセメントスラリーとの混合物が10~30mm程度存在していたことから、セメントスラリーの一部が砂に浸透したものと推測される。

6. まとめ

著者らが提案する環境配慮型地盤圧入材のうち流動材圧入静的締固め工法に用いる流動材を対象に、流動性が得られる配合の範囲を示し、また力学特性と環境安全性確認試験結果を報告した。排ガス由来CO₂を副産物由来カルシウ

ム源に固定化した軽質炭酸カルシウムCaCO₃を混合した材料を用いることにより、地盤改良の一環としてCO₂を効率よく地中に貯留できる可能性があることがわかった。

環境配慮型地盤圧入材を用いた地盤改良の施工方法例として、新しい流動材圧入静的締固め工法を紹介した。今回試作した強制拡幅治具を使用することによって、少なくとも改良径400mm以上を確保できる可能性があることがわかった。強制拡幅治具の動作確認試験にセメントスラリーを用いたが、今後は、環境配慮型地盤圧入材を用いた実証試験を行って改良径や締固め効果の検証を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 佐々木猛ら：コンクリートスラッジ由来の粒状脱リン材(PAdeCS)による流通系システムによるリン回収，化学工学論文集40巻5号，pp.443-448，2014.
- 2) 丸安隆和ら：セメント・スラグ・水ガラスを用いたグラウトによる地盤注入工法，生産研究24巻・1号，pp.10-20，1972.1
- 3) 池田攻：ジオポリマーバインダーによる鉱物質粉体の常温固化と材料化，資源と素材，Vol.114，No.7，pp.497-500，1998.
- 4) 岡田和成ら：CCU材料を用いた環境配慮型地盤改良材の開発～その1：珪酸ソーダの物性が硬化特性に与える影響～，第58回地盤工学研究発表会，2023.7
- 5) コンクリート用骨材又は道路等のスラグ類に化学物質評価方法を導入する指針に関する検討会総合報告書，平成24年3月，<https://www.slg.jp/pdf/sougouhoukokusyoh24.pdf>
- 6) 河合研至：コンクリートの環境負荷評価①コンクリートに関する環境負荷，コンクリート工学，Vo.50，No.6，2012.6
- 7) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリ125，2005.11
- 8) 東京都水道局：くらしと水道CO₂計算ツール，<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/kurashi/co2.html>（参照2023.5.8）
- 9) 新坂孝志ら：静的圧入による砂地盤の締固め効果に関する基礎的研究，土木学会論文集No.764/III-67，pp.183-192，2004.6
- 10) 三興コロイド化学(株)：アンカーグラウト材用混和剤GELWHITEカタログ，<http://www.sankocc.com/pdf/GELWHITE.pdf>（参照2023.5.8）