

低炭素型地盤改良材の開発

「バイプロジオ」「クリーンクリートジオ」「インフィルハードジオ」

諸 富 鉄之助・三 浦 俊 彦・照 井 太 一

(株)大林組は、2050年のカーボンニュートラルの目標達成に向け、地盤改良分野で使用できる低炭素型の材料3種類（土質改良材、地盤改良材、薬液注入工法用材料）を開発している。これらは副産物を利用することで、現在の汎用材料であるセメント、石灰、水ガラスと比べてCO₂排出原単位を小さくしている。本報文では、強度や流動性等の品質および重金属安全性の調査を目的として実施した室内試験の結果と、これまでの適用実績およびCO₂削減効果を紹介する。

キーワード：地盤改良、低炭素、副産物、セメント、薬液注入工法

1. はじめに

2050年のカーボンニュートラルの目標達成に向け、(株)大林組では重機・車両から排出する二酸化炭素量削減や、施工の改善、建設資材の低・脱炭素化等、様々な角度からの取り組みを実施している。地盤改良分野では、現在の汎用材料であるセメント、石灰、水ガラス等の材料が、工業プロセスで大量の二酸化炭素を排出する。これら材料の性能・品質を維持しながら、いかに二酸化炭素排出量の小さい材料で代替していくかが今後の重要な課題である。当社はその代替材料として副産物を利用する方法を検討している。

一方で副産物は、業種や地域によって品質が一定ではない特徴がある。また、重金属等の有害物質を含む場合もあり、固化に有用な成分が含有されているから

といって、安易に地盤改良に利用することはできない。当社は副産物の成分変動や重金属含有の調査、そして改良土の環境安全性を丁寧に評価している。本報文では、副産物を有効利用した低炭素型の開発品として、「バイプロジオ」（以下、低炭素型土質改良材）、クリーンクリートジオ（CCG、以下、低炭素型地盤改良材）、インフィルハードジオ（以下、低炭素型薬液注入材）の3製品について紹介する（表—1）。

2. 低炭素型土質改良材

(1) 材料の概要

発生土の改質や浅層改良といった粉体の改良材を使用する土質改良工事では、セメントや石灰が一般的に使用されている。これらの従来材料はCO₂排出量原

表—1 各低炭素型地盤改良材の位置づけ

材料	セメント・石灰の代替			水ガラス系薬液の代替
	低炭素型土質改良材（L）	低炭素型土質改良材（C）	低炭素型地盤改良材	低炭素型薬液注入材
用途・目的	土のハンドリング性の改善	浅層改良	深層改良 ソイルセメント柱列壁工法	薬液注入工法
使用形態	粉体	粉体	セメントミルク状	コロイダルシリカを含む 2液タイプ
改良コンセプト	土の含水状態を改善する	土を固化させる	土を固化させる	土を固化させる
構成材料	スラグ等の様々な副産物	スラグ等の様々な副産物	スラグ、セメント等	天然由来副産物
強度	同等以上	同等以上	一般的な土質では 同等以上	同等以上
CO ₂ 排出原単位	55%削減 (セメント系固化材比)	50%削減 (セメント系固化材比)	60%削減 (セメント系固化材比)	60%削減 (従来の薬液比)
重金属安全性	従来より六価クロムを低減	従来より六価クロムを低減	従来より六価クロムを低減	従来と同程度の安全性

単位が大きく、最も汎用的な高炉セメントB種のCO₂排出量原単位は0.48 kg-CO₂/kgである。また関東ロームのような土質の場合は、改良土からの六価クロム溶出量が基準値を超過する可能性がある。

低炭素型土質改良材は土質改良工事で使用できる低炭素型土質改良材である。土質改良には、固化によって強度を増加する目的と、含水性状を改善する目的の2ケースがある。低炭素型土質改良材は改良の目的に応じて表—1に示す2タイプの材料を展開しており、固化目的には低炭素型土質改良材C、含水改善目的には低炭素型土質改良材Lが高い効果を発揮する。どちらのタイプも原料として、高炉スラグ微粉末(以下、スラグ)等の様々な副産物を使用している。数多くある副産物の中から、強度発現や重金属安全性の点で高い効果を発揮するものを厳選している。副産物を使用しているため、材料のCO₂排出原単位は小さく、低炭素型土質改良材Cが0.27 kg-CO₂/kg、低炭素型土質改良材Lが0.24 kg-CO₂/kgである。

(2) 室内試験

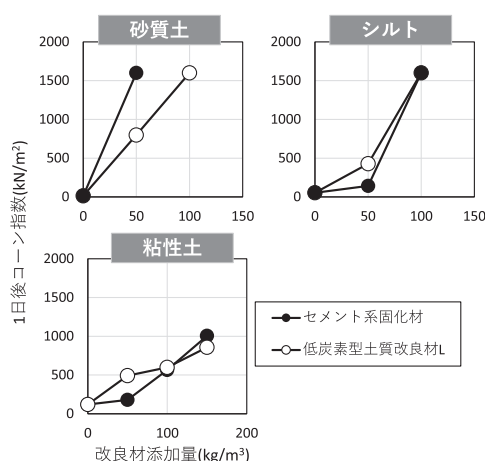
低炭素型土質改良材の強度特性について、浅層改良を想定した低炭素型土質改良材Cの配合試験結果を図—1に、盛土利用に向けた高含水比土砂の改質を想定した低炭素型土質改良材Lの配合試験結果を図—2に示す。いずれも比較対象であるセメント系固化材と比べて、同程度の強度が発現している。通常は副産物を多く含むと改良に必要な有効成分が少なくなるため、セメントと比べると強度が低下する傾向にある。一方で低炭素型土質改良材は、様々な土質に対して、上記の強度発現が可能になるよう、適切な原料選定・調合で材料設計されている。例えば、スラグの潜在水硬性やその他結晶鉱物の生成を十分に発揮できるように、Ca系助材の仕様や産地、配合量を限定する等し

ている。そのため、一般的には改良が困難と言われている関東ローム等の火山灰質粘性土であっても改良が可能である。

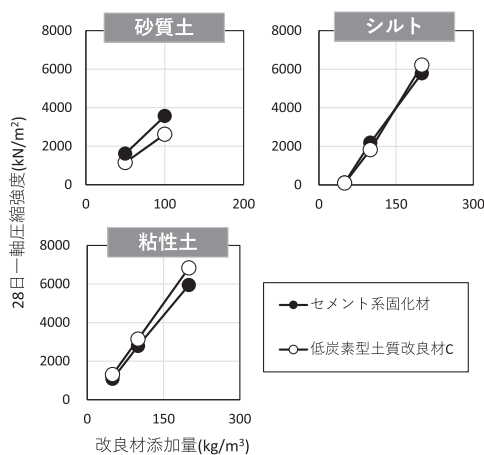
次に低炭素型土質改良材の六価クロム溶出特性について、各土質における改良土からの六価クロム溶出試験の結果を図—3に示す。すべての土質において、土壌溶出量基準値0.05 mg/Lを大きく下回っている。さらにセメント系固化材と比べても溶出量が小さく、高い環境安全性を有していることが分かる。この理由としては、単に六価クロムへの還元作用を持つスラグを多く含有する点のみならず、副産物であるCa系助材に六価クロム溶出量の小さい材料を選定している点もある。

(3) 適用事例

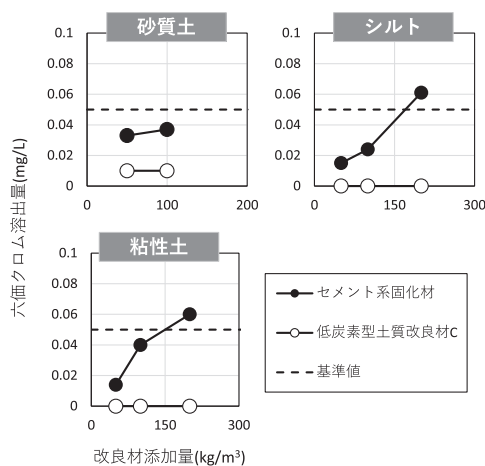
これまでに低炭素型土質改良材L、C合わせて4件の施工実績がある。適用条件の概要とCO₂削減効果を表—2に示す。合計で15t以上のCO₂を削減している。また使用状況を写真—1に示す。バックホウ



図—2 土質ごとの低炭素型土質改良材Lの発現強度



図—1 土質ごとの低炭素型土質改良材Cの発現強度



図—3 土質ごとの改良土からの六価クロム溶出量

表—2 低炭素型土質改良材適用条件の概要とCO₂削減効果

材料	用途	場所	使用量 (t)	CO ₂ 削減率 (%)	CO ₂ 削減量 (t-CO ₂)
低炭素型土質改良材 C	盛土利用に向けた発生土の強度増加	岐阜県	10	50	2.7
	埋め土利用に向けた発生土の強度増加	岐阜県	4	50	1.1
	重機用の仮設道路の改良	三重県	10	50	2.7
低炭素型土質改良材 L	高含水比土の運搬性状改善	和歌山県	36	72	8.7



写真—1 低炭素型土質改良材 C の使用状況

等の汎用的な機械で施工でき、従来の材料と同じ要領で混合できるため、従来と同程度の施工性があることを確認している。

3. 低炭素型地盤改良材

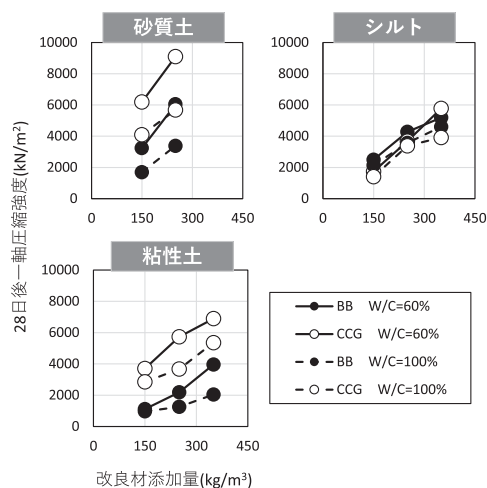
(1) 材料の概要

機械攪拌工法や高圧噴射攪拌工法等の地盤改良工事では、一般に地中へ圧送するためにスラリー状にした改良材を用いて改良する。改良材には高炉セメント B 種やセメント系固化材が使用される。2 節でも述べたように、これらは CO₂ 排出量原単位が大きい材料である。

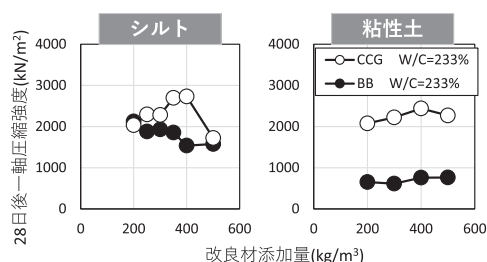
当社はセメントの一部を副産物であるスラグに置き換えた低炭素型のコンクリートを開発し、42 万 m³ 以上の施工実績を有している¹⁾。今回、低炭素型のコンクリートを地盤改良に応用した低炭素型地盤改良材を開発した。低炭素型地盤改良材はスラリー状で利用できるため、深層改良やソイルセメント柱列壁工法等に適用できる。高炉セメント B 種と比べてスラグの割合が多く、CO₂ 排出量原単位は 0.22 kg-CO₂/kg である。

(2) 室内試験

低炭素型地盤改良材の強度特性について、機械攪拌工法を想定した強度試験の結果を図—4 に、SMW 工法を想定した強度試験の結果を図—5 に示す（グラフの凡例の BB は高炉セメント B 種、CCG は低炭素



図—4 機械攪拌工法における土質ごとの低炭素型地盤改良材の発現強度

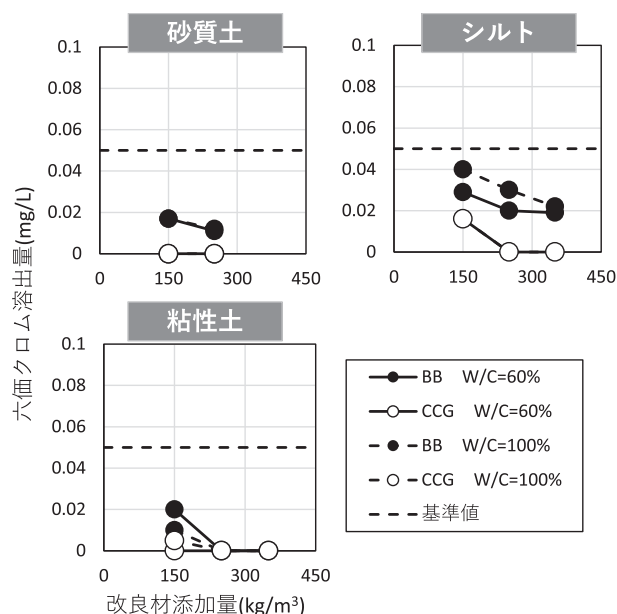


図—5 SMW 工法における土質ごとの低炭素型地盤改良材の発現強度

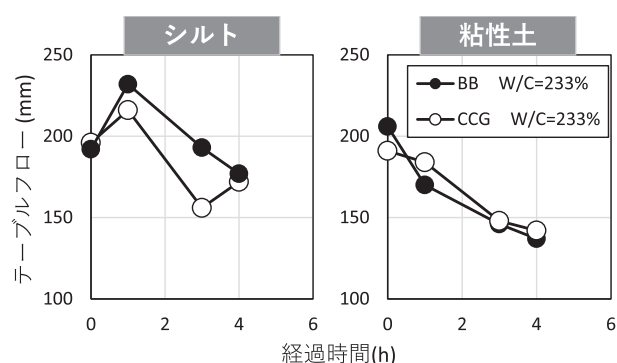
型地盤改良材を表す、以下同様)。一般的にはスラグを多く含有すると強度が低下する傾向が知られているが、土質や施工条件によっては、むしろスラグを多く含む方が、強度が大きくなる。具体的には、土質としては pH 緩衝力の小さい土、施工条件としてはソイルセメント中の土の割合が少なくなる条件（添加量が多い場合や SMW、高圧噴射攪拌工法など）等がある。そのような性能を利用して、低炭素型地盤改良材は、従来材料と同等以上の強度を発現する。

さらにスラグを多く含有するため、六価クロム溶出量も小さい。図—6 に機械攪拌工法を想定して作製した改良土からの六価クロム溶出量を示す。従来材料である高炉セメント B 種でも土壤溶出量基準を満足するが、低炭素型地盤改良材の方が、より六価クロム溶出量が小さいため、溶出リスクが低いことがわかる。

ソイルセメント柱列壁工法では、芯材をソイルセメント中に建て込む場合があるため、ソイルセメントの



図一六 土質ごとの改良土からの六価クロム溶出量



図一七 土質ごとのソイルセメントの流動性

流動性が施工性に大きく影響する。例として、SMW工法を想定した配合で作製したソイルセメントのテーブルフロー試験の結果を図一七に示す。低炭素型地盤改良材を用いて作製したソイルセメントは、高炉セメントB種と同程度の流動性を有することがわかる。このように従来材と同様の施工性であるため、低炭素型地盤改良材を用いる場合でも特殊な機械は必要なく、従来の機械で施工が可能である。

(3) 適用事例

低炭素型地盤改良材はこれまでに3件の施工実績がある。適用条件の概要とCO₂削減効果を表一三に示す。また流動化処理土用途および機械攪拌工法での施工状況を写真一2、3に示す。合計で12t以上のCO₂を削減できており、さらに今後55,000 m³以上の地盤改良にも適用計画がある。適用件数を増やしていくことで、ますますCO₂削減量を増加していきたい。

表一三 低炭素型地盤改良材適用条件の概要とCO₂削減効果

用途	場所	使用量	CO ₂ 削減率(%)	CO ₂ 削減量(t-CO ₂)
流動化処理土	東京都	222 m ³	62	3.2
	千葉県	28 m ³	62	0.4
機械攪拌工法	大阪府	278 t	13	8.7

※流動化処理土用途の使用量には打設数量を記載



写真一 二 流動化処理土用途での施工状況



写真一 三 機械攪拌工法用途での施工状況

4. 低炭素型薬液注入材

(1) 材料の概要

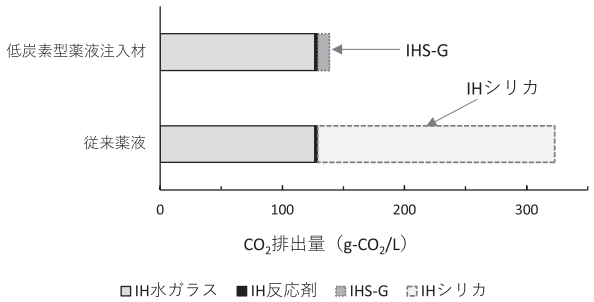
低炭素型薬液注入材は液状化防止等を目的とした薬液注入工法に使用する長期安定性を有する特殊シリカ系注入材である。従来薬液と同様に、主剤である水ガラス、反応剤、コロイダルシリカおよび水で構成される。従来はコロイダルシリカとしてIHシリカ(工場製)を使用していたが、低炭素型薬液注入材では天然由来の「IHシリカGタイプ」(以下、HIS-G)を使用する。地熱発電では、熱水が冷却されるとシリカが析出し、

表一4 低炭素型薬液注入材と従来薬液の配合例

		低炭素型 薬液注入材	従来薬液
A 液	IH 水ガラス	100 L	100 L
	水	100 L	100 L
B 液	IH 反応剤	12 L	12 L
	水	172.2 L	172.2 L
C 液	IHS-G (天然由来 コロイダルシリカ)	15.8 L	—
	IH シリカ (工場製 コロイダルシリカ)	—	15.8 L

表一5 各材料の CO₂ 排出係数

材料	排出係数 (g-CO ₂ /kg)	備考
IH 水ガラス	384	・参考文献 2), 3)
IH 反応剤	46.5	・参考文献 4)
IH シリカ	4,090	・参考文献 5)
IHS-G	200	・参考文献 6)



図一8 各材料の CO₂ 排出量の比較

それがパイプ内部や発電設備に付着することが発電効率の低下につながっている。これを回収することで発電効率が改善し、この回収したシリカを薬液に使用している。低炭素型薬液注入材の配合および従来薬液との比較は表一4に示す通りである。

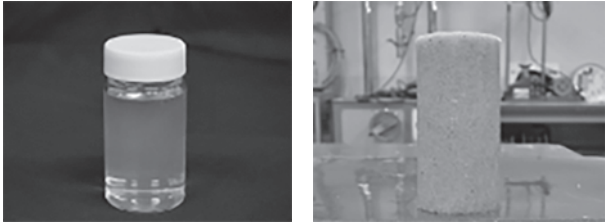
表一5は各材料の CO₂ 排出係数である。これらを表一4に示す各材料の配合に乗じて CO₂ 排出量を合計すると、従来薬液では 323 g/L-CO₂ となるのに対し、低炭素型薬液注入材では 139 g/L-CO₂ となる。これより、製造過程における CO₂ 排出量を従来から約 60% 削減することができる (図一8)。

(2) 室内試験

表一6は低炭素型薬液注入材の材料特性を評価するために実施した改良土 (写真一4) の試験結果である。一軸圧縮強さは 200 ~ 300 kN/m² 程度で、材齢 300 日まで増加している。透水係数は粘性土と同等

表一6 改良土の試験結果一覧

	材料特性	試験結果	備考
1	一軸圧縮強さ (サンドゲル)	200 kN/m ² 以上 (28 日) 280 kN/m ² 以上 (300 日)	JIS A 1216
2	透水係数	$1.0 \times 10^{-9} \sim 10^{-10}$ m/sec	JGS 0311
3	pH 値	6 ~ 7	
4	液状化強度比	RL _{20.5%} = 1.84	JGS 0541
5	変形特性	初期剛性率 $G_0 = 201.2$ MN/m ² 最大減衰率 $h_{max} = 16.3\%$	JGS 0542
6	重金属等溶出量	全ての計量対象物が基準値を満足	環境省告示 第 46 号
7	生物毒性	ラットにおける急性経口投与により LC ₅₀ (カットオフ値 5,000 mg/kg) をクリア	OECD TG 423
		ヒメダカにおける 96 時間曝露により LD ₅₀ (設定濃度 100 mg/L) をクリア	OECD TG 203



写真一4 IHS-G (左), 低炭素型薬液注入材を用いた改良土 (右)

表一7 低炭素型薬液注入材適用実績と CO₂ 削減効果

用途	場所	使用量 (m ³)	CO ₂ 削減率 (%)	CO ₂ 削減量 (t-CO ₂)
薬液注入工法	三重県	5,083	57	935
	富山県	79	57	15
	富山県	49	57	9

で、十分な止水性を有している。pH は中性域で安定しており、周辺の地下水への影響はない。液状化強度比および変形特性は従来の薬注改良体と同等であり、設計指針類で規定されている地震動レベルに対する液状化抵抗特性および剛性を有している。また、重金属等溶出量および生物毒性も各ガイドラインの基準を満足しており、安全性および周辺環境への影響も問題ないことから、従来薬液と同様の品質および安全性を有する薬液注入材である。

(3) 適用事例

低炭素型薬液注入材は、構造物やタンクなどの基礎の耐震補強や液状化防止、港湾や河川構造物の吸出し防止など、長期安定性が必要となる薬液注入工事で使用でき、これまでに表一7に示す3件の施工実績がある。

5. おわりに

(株)大林組では、地盤改良分野において、特殊な施工機械を必要としない汎用性の高い低炭素型材料を開発し、施工実績を重ねていく。それとともに、副産物を積極的に工事に使用することで、低炭素型社会ならびに循環型経済の実現に向けて役割を果たしていく。



《参考文献》

- 1) 野島省吾他, 大林組の低炭素型コンクリート材料の開発と普及・展開, 土木施工, 104-107, 2023
- 2) M.Fawer, et.al, Int.J.LCA 1999, 4 (4), 207-212
- 3) 環境省 HP, <https://ghg-santeikohyo.env.go.jp/calc>
- 4) '90・'95・'00・'05 年度版 3EID 対応 味の素グループ版「食品関連材料 CO₂ 排出係数データベース」
- 5) A.L.Rose, et.al, J.Nanopart Res.2010, 12, 2011-2028.
- 6) Geo40HP, <https://geo40.com/corporate-responsibility/our-beliefs-policy/>

【筆者紹介】

諸富 鉄之助 (もろとみ てつのすけ)
(株)大林組
技術研究所 自然環境技術研究部
主任



三浦 俊彦 (みうら としひこ)
(株)大林組
技術研究所 自然環境技術研究部
上級主席技師



照井 太一 (てるい たいち)
(株)大林組
土木本部生産技術本部 技術第二部
副部長

