

「高速回転式カルシア工法」による津波堆積土の再生利用

(カルスピ[®]工法)

新日鐵住金株式会社 スラグ・セメント事業推進部 中川 雅夫

TEL : 03-6867-6143

e-Mail : nakagawa.s3a.masao@jp.nssmc.com

1. はじめに

鉄鋼の生産工程で副生する転炉系製鋼スラグ（以下、製鋼スラグ）は、碎石状で、締固めに適した粒度組成であるとともに、酸化カルシウム（CaO：カルシア）分を多く含むことから水と反応して固化する性質やリン酸や硫化物等の富栄養化物質を吸着する性質を有する。そこで、鉄鋼業界では、これを「カルシア系改質材」（以下、改質材）として製品化の上、港湾等から発生するヘドロ状の底質浚渫土と混合し、人工干潟や深掘れ窪地の造成材や埋立材に有効利用する技術開発に取り組んでおり（図1参照）、東京湾、大阪湾、伊勢・三河湾等の実海域での海域環境再生実証事業等に適用されてきている¹⁾。

一方、東日本大震災における津波被害によって、被災6県では約2,300万トンの災害廃棄物とともに、海底土砂とがれきが混然一体となった津波堆積物が約1,300万トン～2,800万トン発生し、震災復興の足かせとなっている。²⁾ この津波堆積土

には、海底底質に由来する粘土分を多く含むものがあり、また、木片や金属片等のがれき分が混在していることから、これを震災復興用の盛土材料等に活用するためには、がれき分を効率よく選別することと、細粒分の多い土を締固め特性に優れた再生土に改良することが課題となる。

ここでは、これらの課題の解決策として技術開発を行ってきた「高速回転式カルシア工法」について、以下に紹介する。

2. 高速回転式カルシア工法

図2に高速回転式カルシア工法による仙台市宮城野区での津波堆積土再生実験の概要を示す。ホッパーに手選別を完了した津波堆積土と、改質材を各々充填し、容積比で8:2～7:3の比率でベルトコンベア上に切り出して、これを「回転式破碎混合機」に装入する。混合機の出側には振動篩を設置することで、がれき（篩上）と再生土（篩下）を効率的に選別する。

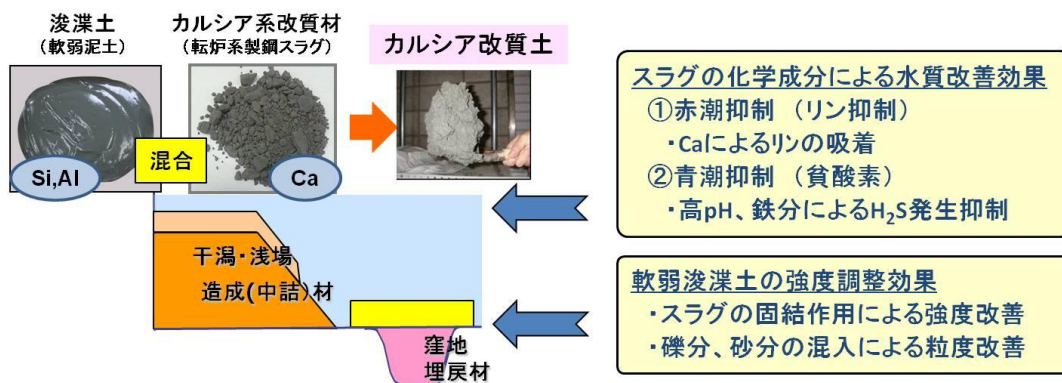


図1 カルシア改質土の定義、機能と海域への有効利用

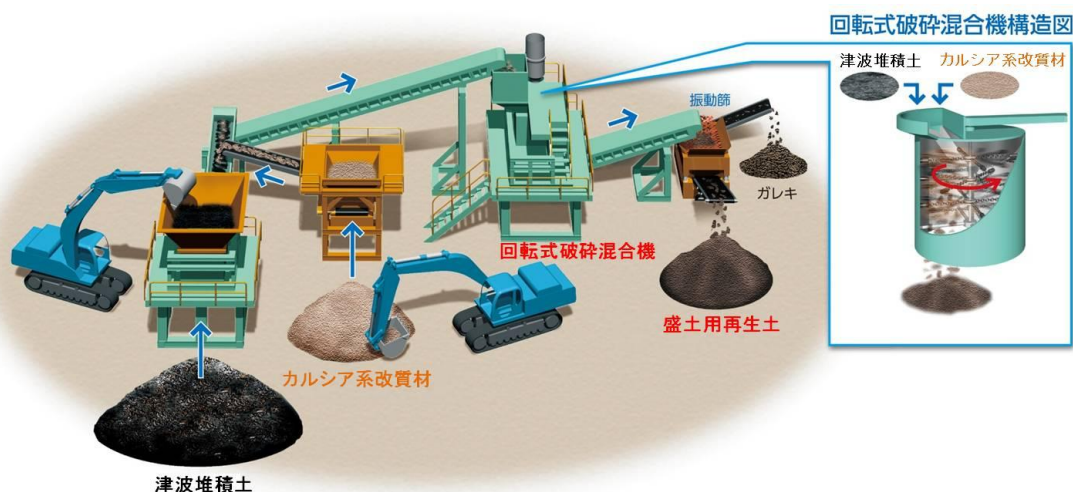


図2 高速回転式カルシア工法の概要



写真1 仙台市宮城野区の実験設備



写真2 岩手県釜石市の実験設備

回転式破砕混合機は、容器内部で鋼製チェーンが高速回転（600～800rpm）することで津波堆積土と改質材とが混合攪拌される。具体的には、以下のような機構によって改良が行われるものと推察される。

- ①鋼製チェーンの遠心力と打撃力で、高含水の津波堆積土と、低含水の改質材とが混合されることで、がれきから土が剥ぎ取られるとともに、脱水作用によりがれきと土が分離されやすくなる。
- ②改質材中の生石灰分が津波堆積土の細粒分を団粒化して、再生土の粘着力が向上する（改質材のCa分と土中のSi、Al分が化学反応する）。
- ③改質材の粗粒分が添加されることで、再生土の粒度が改善され締固め特性が向上する。

3. 津波堆積土の再生実験

3-1 使用材料

表1 津波堆積土の物性

	含水比 (%)	細粒分 含有率 (%)	湿潤 密度 (g/cm ³)	土粒子 密度	強熱 減量 (%)
原土A : 石巻津波堆積土	31~40	28	1.599	2.622	5.5
原土B : 釜石市処理土(篩下)	34	52	1.615	2.701	8.8

表2 カルシア系改質材の物性

	粒径 (mm)	表乾 密度 (g/cm ³)	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
カルシア系改質材A : CS-5	0~5	3.12	3.03	2.89
カルシア系改質材B : CS-30	0~30	3.21	3.13	2.45

表3 カルシア系改質材の成分組成(%)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	T-Fe	MgO	MnO	S
16.8	35.5	2.1	22.7	7.7	5.0	0.01

仙台市宮城野区と岩手県釜石市に上記の施工システムをそれぞれ写真1、写真2のように設置し、

がれき混じり津波堆積土の再生実験を行った³⁾⁴⁾。
表1に津波堆積土の物性を、表2、表3に改質材の物性と化学成分を示す。尚、原土Aは石巻市の一次集積場の津波堆積土、原土Bは釜石市の災害廃棄物処理試行事業の篩下土(木くず混じり土)の提供を受けた。

3-2 強度

(1) コーン試験

原土Aに改質材A(0-5mm)を20vol%混合して再生した材料のコーン指数変化を図3に示す。ここでは、原土と再生した材料をJIS A 1210のA法で締固めを行った直後に、JGS1431に準拠してコーン試験を実施した。図に示すように、原土では250kN/m²以下であったコーン指数が、改質材の添加によって、発生土の強度指標である第2種処理土(800kN/m²)以上まで向上し、再泥化しない材料に改良されることがわかった。

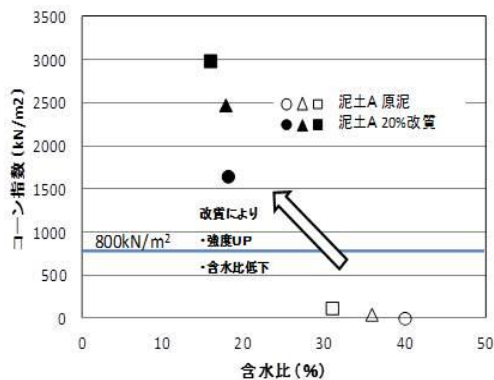


図3 再生前後のコーン指数

(2) 三軸圧縮試験、一軸圧縮試験

原土A、Bに改質材Aを20vol%混合した再生土の三軸圧縮試験(CD試験)の結果を表4、図4に示す。尚、図4は原土Bの改質土の結果である。いずれも、せん断抵抗角 ϕ_d は40度、粘着力 c は60kN/m²程度で十分な強度を持つ盛土材料に改良されている。また、図5に同材料の一軸圧縮強さの経時変化(温度20℃の気中養生)を示す。原土Bの再生土の結果より時間の経過とともに強度上昇していることがわかる。これは改質材中のCaと

表4 カルシア改質土の三軸試験結果

	粘着力 (kN/m ²)	せん断抵抗角(度)
原土Aの改質土	60	40
原土Bの改質土	55	41

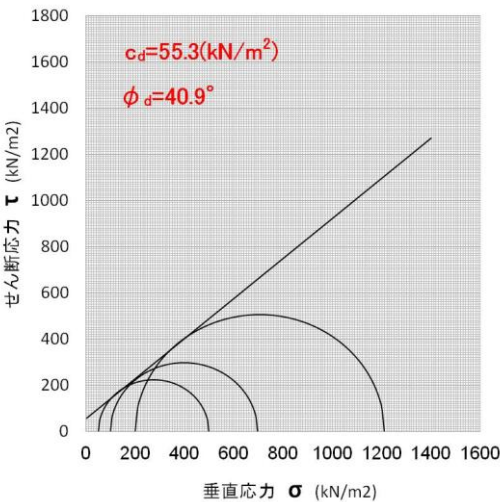


図4 原土Bの改質土の三軸CD試験結果

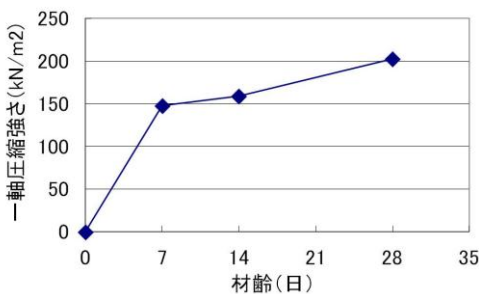


図5 カルシア改質土の一軸圧縮強さ

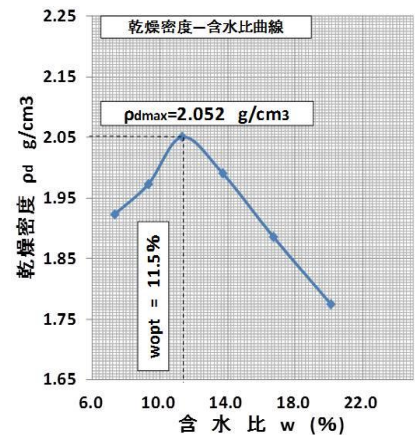


図6 カルシア改質土の締固め特性

土中のSi、Alが水和反応(セメント反応)すること

によると考えられる。

3-3 締固め特性

原土 A に改質材 A を 20vol%混合した再生土の締固め試験の結果を図 6 に示す。また、表 5 に原土 A, B に改質材 A を 20%混合した時の修正 CBR の値を示す。改質材を添加することで、細粒土含有率の高い土を締固めが容易な盛土材料に改良することが可能であることがわかる。

表 5 カルシア改質土の修正 CBR (%)

	修正 CBR (90%)	修正 CBR (95%)
原土 A の改質土	20	60
原土 B の改質土	18	27

3-4 再泥化抑制効果

原土 A, B に対して改質材 A を 30vol%混合した材料の再泥化抑制効果の試験結果を表 6 に示す。この試験は土木学会で定められている「浸水崩壊度試験」を参考にし、原土と再生土の比較を行った。

原土は浸漬後 4 時間程度で崩壊したのに対し、再生土は崩壊現象が見られなかった。これは、原土は浸漬により供試体中に水分が吸収され、原土中の細粒分が再泥化したものと推察される。一方、再生土は締固め効果と固化作用により再泥化が抑制されたものと推察される。

表 6 再泥化試験結果

	泥土 A		泥土 B	
	原泥	改質土	原泥	改質土
供試体作成状況				
24時間浸漬後	 崩壊		 崩壊	

3-5 膨張安定性

第 1 項に述べたように、本改質材は生石灰分 (f-CaO) を含むことにより、時間の経過とともに若干量の膨張が生じることがある。そこで、原土 A と改質材 A を 20vol%混合した再生土の水浸膨張

試験を行い、その結果を図 7 に示す。この試験は JIS A 5015 「道路用鉄鋼スラグ」 附属書 2 の「鉄鋼スラグの水浸膨張試験方法」に従った。本試験は鉄鋼スラグからなる供試体を 80℃10 日間水浸させることで、常温で数十年の膨張量を推定する目的で基準化されている。結果として、この再生土は使用時に締固め作業を行うことで拘束圧がかかり、また膨張比は 0.5%以下で収束しており、盛土材料として問題ないことが考えられる。

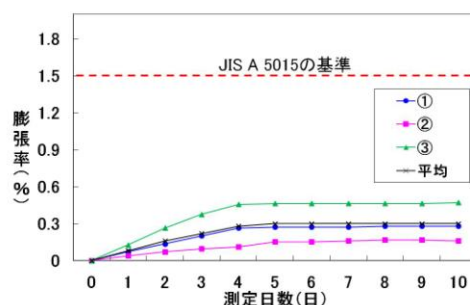


図 7 水浸膨張試験結果

3-6 環境安全性

(1) 土壌汚染対策法の溶出・含有量基準

改質材 A、原土 A、B および原土 A, B に各々改質材を 20vol%混合した再生土について、土壌汚染対策法に規定された溶出試験と含有量試験を行った。いずれも基準値を満たしており、改質材を混合することによる重金属溶出の増幅等は見られなかった。一例として表 7、表 8 には、改質材 A、原土 B および原土 B の再生土の溶出試験と含有量試験の結果を示す。

(2) pH 溶出安全性

改質材は、Ca を主成分とするため、その溶出水は一般に高 pH を示すが、締固めによる表面積の減少と、表面が固化することで透水係数が低減するため締固めた材料からの pH 溶出は低減することが推察される。そこで、締固めの有無による pH 溶出の違いを確認するために、締固めた供試体と緩詰め供試体について以下の実験を行った。pH 試験は JGS0211 土懸濁液の pH 試験法を参考に、溶媒を純水、固液比を 1:5 とし、試料投入後に懸

濁を生じないように攪拌することとした。供試体は気中養生とし、試験日に水浸して pH 計測し、計測後は次試験タイミングまで気中養生して pH 計測することを繰り返した。試験結果を図 8 に示すが、締固めにより、供試体からの高 pH 水の溶出は大幅に低減されることがわかった。

表 7 溶出試験結果

	改質材	原土	改質土	基準値
四塩化炭素	—	不検出	不検出	0.002mg/L
1,2-ジクロロエタン	—	不検出	不検出	0.004mg/L
1,1-ジクロロエチレン	—	不検出	不検出	0.02mg/L
シス-1,2-ジクロロエチレン	—	不検出	不検出	0.04mg/L
1,3-ジクロロプロペン	—	不検出	不検出	0.002mg/L
ジクロロメタン	—	不検出	不検出	0.02mg/L
テトラクロロエチレン	—	不検出	不検出	0.01mg/L
1,1,1-トリクロロエタン	—	不検出	不検出	1mg/L
1,1,2-トリクロロエタン	—	不検出	不検出	0.006mg/L
トリクロロエチレン	—	不検出	不検出	0.03mg/L
ベンゼン	—	不検出	不検出	0.01mg/L
カドミウム	不検出	不検出	不検出	0.01mg/L
六価クロム	不検出	不検出	不検出	0.05mg/L
シアン	—	不検出	不検出	不検出
水銀	不検出	不検出	不検出	0.005mg/L
アルキル水銀	—	不検出	不検出	不検出
セレン	不検出	不検出	不検出	0.01mg/L
鉛	不検出	不検出	不検出	0.01mg/L
砒素	不検出	0.003	0.003	0.01mg/L
ふっ素	不検出	0.72	0.19	0.8mg/L
ほう素	不検出	0.41	0.02	1mg/L
シマジン	—	不検出	不検出	0.003mg/L
チウラム	—	不検出	不検出	0.02mg/L
チオベンカルブ	—	不検出	不検出	0.006mg/L
PCB	—	不検出	不検出	不検出
有機りん化合物	—	不検出	不検出	不検出

表 8 含有量試験結果

	改質材	原土	改質土	基準値
カドミウム	不検出	不検出	不検出	150mg/kg
六価クロム	不検出	不検出	不検出	250mg/kg
遊離シアン	—	不検出	不検出	50mg/kg
水銀	不検出	不検出	不検出	15mg/kg
セレン	不検出	不検出	不検出	150mg/kg
鉛	不検出	38	15	150mg/kg
砒素	不検出	不検出	不検出	150mg/kg
ふっ素	110	100	100	4000mg/kg
ほう素	不検出	不検出	不検出	4000mg/kg

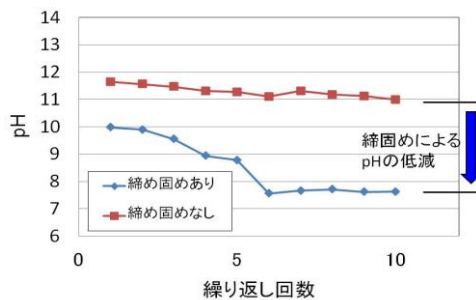


図 8 カルシア改質土の pH

3-7 がれき(木くず)の除去効果

原土 B に改質材 A を 20vol% 添加し、回転式破碎混合工法にて再生することで、原土中に含まれる木くず等のがれきの分別性能を確認した。試験には、20mm と 10mm の 2 種類の篩い目を用いて、がれき除去効果（原土全体重量に対する除去割合）と再生土の強熱減量の変化を調査した。試験結果を表 9、表 10 に示す。本工法によって、篩い目寸法に応じて、原土中のがれきを除去できることがわかる。これより、混合改質後の振動篩の篩い目を変えることで、再生盛土材の利用用途に応じたがれき除去の可能性が示唆された。

また、木片まじりの津波堆積土の選別処理を行う際に、高速回転によって改質材と木片がぶつかり合うことによって、木片に付着した泥土が改質材のサンドブラスト効果によりそぎ落とされる「木片からの泥土除去効果」があることがわかった（表 11）。特に、改質材を 20vol% 以上添加することで、この効果が顕著になることが確認できた。これによって、木片を焼却する場合の熱量の低減や焼却灰の減量化が図れることが期待できる。

表 9 がれき(木くず)除去効果

	篩目 20mm	篩目 10mm
篩で除去されたがれき(木くず)		
除去割合(%)	7	20

表 10 がれき除去による強熱減量

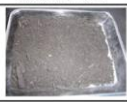
	原土	再生土	
		篩目 20mm 通過再生土	篩目 10mm 通過再生土
写真			
強熱減量(%)	8.8	6.0	3.8

表 11 木片からの泥土除去効果

		原泥(振動篩のみ)	高速回転式カルシア改質		
			10VOL%	20VOL%	30VOL%
(30kg) 泥土付着付き木片	20mm篩残留物状況				
	20mm篩残留分(kg)	26.13	21.96	21.06	19.92
	20mm篩通過率(%)	12.9	26.8	29.8	33.6
(10kg) 泥土付着付き木片 + (20kg) 泥土B	20mm篩残留物状況				
	20mm篩残留分(kg)	11.22	7.83	7.77	7.59
	20mm篩通過率(%)	62.6	73.9	74.1	74.7

⇒ 除去効果良

4. 復興用資材への適用事例

津波堆積土の再生土を岸壁背面エプロン嵩上げ復旧工事の路床材に適用すべく、以下の2ケースの再生土を準備し、室内試験と現場締固め試験を実施した⁵⁾。(比率はvol%)

Case-A 原土A 80%+改質材A20%

Case-B 原土A 60%+改質材A20%+改質材B20%
現場試験の状況を写真3に示す。路床厚は20cm毎に2層に分けて振動ローラを用いて締固めをおこなった。尚、最適含水比10.1%に対して自然含水比が20%程度であったため、散水による含水比調整は行わなかった。

試験結果を表12に示す。路床材に適用するには、現場CBRが15%程度以上は必要であることから、路床材に適用するには、Case-B程度の粒度改善が必要ながわかった。

これらの取り組みを踏まえて、平成24年1月に仙台塩釜港のエプロン部の嵩上げ復旧工事(国土交通省東北地方整備局塩釜港湾・空港事務所発注)の路床材(80m³)に試験適用され、再生土が適用可能であることが確認された(写真4参照)。

表 12 カルシア改質土の現場 CBR (%)

	Case-A	Case-B
現場CBR (%)	4.8	15.4



写真4 仙台塩釜港への試験適用状況



写真3 現場締固め試験と現場 CBR の測定

5. おわりに

鉄鋼スラグ製品であるカルシア系改質材と回転式破碎混合機を組み合わせることで津波堆積土を震災復興用の盛土工事材料として再生利用する「高速回転式カルシア工法」の技術開発状況について紹介した。今後、本工法が、広く、震災がれきの処理事業や復旧・復興用の工事材料に適用され、少しでも被災地の復興に寄与できれば幸いである。尚、本文で記述した技術開発成果は新日鉄住金エンジニアリング株式会社との共同研究成果であり。記して、謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 中川雅夫：「鉄鋼スラグの有効利用の状況」第205・206回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会）、pp27－56、2011
- 2) 「東日本大震災津波堆積物処理指針」、環境省、2011
- 3) 赤司有三他：「高速回転式カルシア改質工法による津波堆積土の改質」、第47回地盤工学研究発表会 308、2012
- 4) 飯室賢一朗他：「高速回転式カルシア改質工法による津波堆積土からの異物分別」、地盤工学会第47回地盤工学研究発表会 309、2012
- 5) 飯室賢一朗他：「高速回転式カルシア改質工法で改質された津波堆積土の路床材への適用」、土木学会第67回年次学術講演会VI-298、2012

尚、本稿は雑誌 HEDRO No.115 に掲載した内容を転載の許可を得て掲載するものです