

がれき混じり泥土の再生処理技術の開発

Development of the Recycling Process Technology for Tsunami Deposit Soils

平嶋 裕* 平石 耕一
Yutaka HIRASHIMA Kohichi HIRAISHI

抄 録

東日本大震災では、津波により多くの災害廃棄物ならびに津波堆積物が発生した。新日鉄住金(株)は、新日鉄住金エンジニアリング(株)と共同で、従来より開発を進めてきたカルシア改質技術を応用し、がれきが多量に混じる津波堆積物の再生処理技術を開発した。本技術は、釜石市で本採用され、約20万トンの津波堆積物の処理費用の縮減および、復興事業への改質土の有効利用による土工材料費の縮減、天然資材不足に貢献している。

Abstract

By the East Japan great earthquake, many disaster waste and tsunami sediment were caused by a tsunami. We applied the Calcia improvement technology that pushed forward development conventionally, and we developed a reproduction processing technology of the tsunami sediment which debris mixed abundantly in cooperation with Nippon Steel & Sumikin Engineering Co., Ltd. This technique is employed full-time in Kamaishi-shi (approximately 200 000 t) and contributes the reduction of disposal expense for tsunami sediment, the reduction of earthwork material cost by the utilization of reforming soil in reconstruction, the lack of nature material.

1. 緒 言

東日本大震災における津波被害によって約2000万トンの災害廃棄物が発生するとともに、津波堆積物も約1000万トン発生した。この津波堆積物には、海底底質に由来する粘土分を多く含む土砂が存在し、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等の地盤材料として活用するためには、①がれき分の効率的な分別と、②細粒分が多い土を締め固め特性に優れた再生土に改良することが課題であった。

一方、鉄鋼の生産工程で副生する製鋼スラグを原料とするカルシア改質材(石灰系粒度調整材)は、碎石状で締め固めに適した粒度組成であるとともに、酸化カルシウム分(CaO:カルシア)を多く含むことから水と反応して固化する性質等を有する。その性質を利用し、港湾等から発生するヘドロ状の底質浚渫土と混合し、人工干潟や深掘り窪地埋戻しの造成材や埋立柱への適用が広がってきている。

本稿では、浚渫土と似た特性と考えられる津波堆積物に対して、新日鉄住金エンジニアリング(株)が保有する回転式破碎混合機と新日鉄住金(株)のカルシア改質技術を用い

て、復興用土工材料に分別、改質する検討を実施した結果について報告する。

2. 本 論

2.1 高速回転式カルシア改質工法の概要

2.1.1 工法の概要

図1に本工法の概要図を示す。本工法は、回転式破碎混

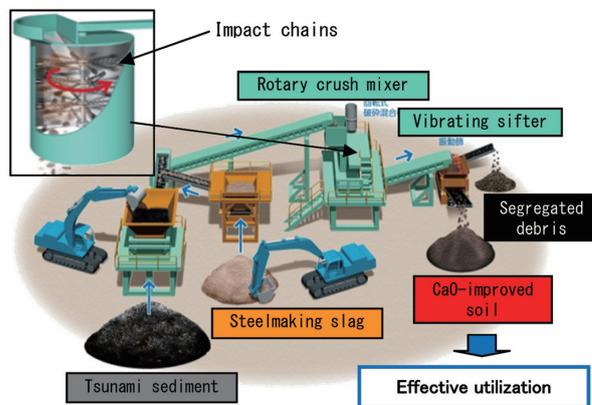


図1 高速回転式カルシア改質工法の概要図
High-speed rotary CaO-improvement method

* スラグ・セメント事業推進部 スラグ営業推進室 主幹 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



図2 がれき混じり泥土の分別，改質結果の一例
Example of segregation/improvement

合機によりがれき混じり泥土（以下原土と略す）とカルシア改質材（以下改質材と略す）を混合し，振動篩にてがれき（以下分別がれきと略す）とカルシア改質土（以下改質土と略す）に分別する工法（カスピン®工法）である。回転式破碎混合機は，円筒内で高速回転する複数本のインパクトチェーンの打撃力により，原土を破碎，細粒化するとともに，改質材を均一に混合することができる。

図2に本工法にて分別，改質した一例を示す。がれきに付着した泥土は引き剥がされ，改質土に残存するがれきも木くず程度である。

2.1.2 高速回転式カルシア改質工法の分別・改質メカニズム

本工法は，以下に示すメカニズムにより精度良くかつ効率的に分別，改質できると考えられる。

(1) 混入がれきの効率的な分別

回転式破碎混合機による混合に，改質材の吸水効果（図3）とサンドブラスト効果（図4）が加わり，がれきと泥土の分離と泥塊の破碎を促進することができる。

(2) 泥土を迅速に良質な土工材料へ改質

泥土に低含水比の改質材を混合することで含水比を大幅に低減でき，加えて，改質材の粗粒分が混合されることで粒度分布を改善することができる。また，改質材は石灰分（CaO）を含有しているため，土粒子表面へのカルシウムイオンの吸着による団粒化と，可溶性カルシウム分のポズラン反応等による固化効果等（図5）により，再泥化を防止し強度も増加する。

2.2 分別・改質性能確認試験概要

2.2.1 試験に用いた原土

表1に試験に用いた原土の物性を示す。試験には，農地で鋤取りされた原土 A，仮置場に集積された原土 B，トロ

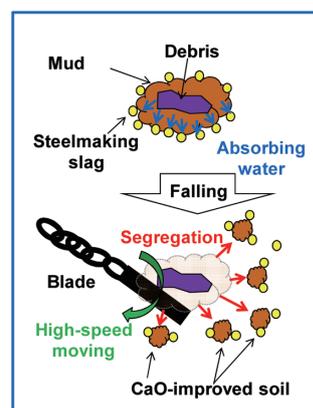


図3 吸水効果のイメージ図
Image of absorbing water effect

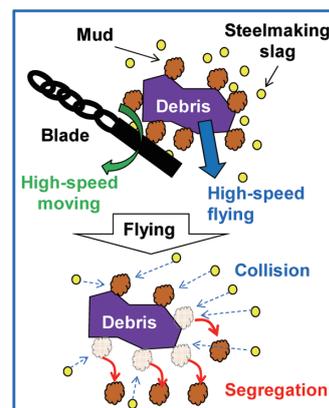


図4 サンドブラスト効果のイメージ図
Image of sandblast effect

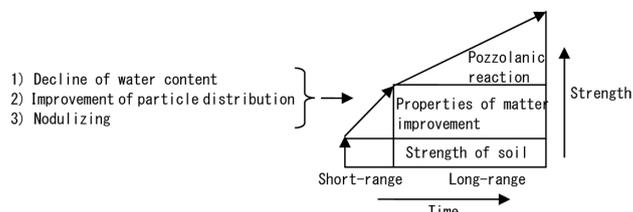


図5 石灰の強度発現模式図（セメント系固化材による地盤改良マニュアル：（社）セメント協会より引用）
Strength development of lime

表1 試験に用いた原土
Original soils (A,B,C) used for an examinations

Item	Unit	A	B	C
Wet density	g/cm ³	1.708	1.817	1.615
Water content	%	40	31	34
Density of soil particles	g/cm ³	2.654	2.662	2.701
Fine fraction content (less than 75 μm)	%	54	28	52
Sand fraction content (75 μm-2mm)	%	46	69	45
Gravel fraction content (more than 2 mm)	%	0	3	3
Liquid limit	%	56.5	45.0	47.3
Plastic limit	%	26.5	25.4	22.8
Collection place of original soil		Farm	Temporary place	Segregated soil *

* Segregated soil : Under size 40 mm by a trammel (sieving machine)

ンメル篩にて一次処理された原土 C の 3 種類を用いている。原土 A には農土が混入しているため、細粒分含有率が 54% と高く、含水比も 40% あり、ダンゴ状の泥塊状態（表 4 参照）である。原土 B、C には木片やコンクリートがら等のがれきが多く混入（表 5 参照）している。図 6 に粒度分布を示す。粒度分布は、原土 A、B、C ともに再生資材としての粒度組成の適用範囲から外れており、粗粒分が少なく締固め性能に劣る土質性状である。

2.2.2 カルシア改質材

表 2 に改質材の物性、図 7 に粒度分布を示す。改質材は環境安全品質を満足した石灰系の固化材に相当する粒状体の材料である。CCS-5 は分別時の篩目（標準 20mm）を通すために粒径を約 5mm 以下に粒度調整したものである。

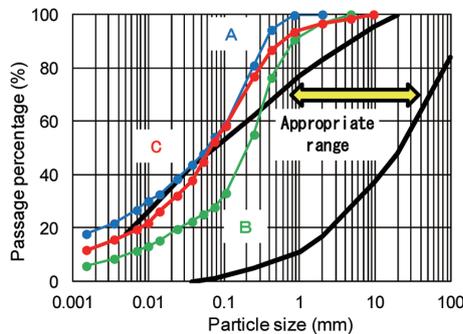


図 6 原土の粒径加積曲線
Particle size distribution curve of original soil

表 2 カルシア改質材の種類と特性
Kind and characteristic of steelmaking slag

Product	Segregation/improvement	CCS-5		
	Improvement	CCS-20	CCS-30	CCS-40
Chemical ingredient properties	CaO content	More than 30% (mass%)		
	CaO/SiO ₂	More than 1.5 (mass ratio)		
Environmental safe quality *	8 heavy metal elution /content amount	Standard value or less of soil contamination countermeasures act		

* Apply JIS A 5015 “Steelmaking slag for road” 2013

CCS-20 ~ 40 の粒径は道路用鉄鋼スラグ CS-20 ~ 40 と同等である。

2.2.3 確認手順と試験方法

表 3 に試験ケースを示す。分別性能の確認については、改質材混合有無の 2 ケース、篩目（10mm, 20mm）の 2 ケースを実施して、目視と計量により改質土と分別がれきの出来形を比較した。改質性能の確認については、コーン試験、CBR 試験、三軸圧縮試験と、試験盛土を築造して施工性と安定性の確認を実施した。なお、改質材の混合率は容積率（原土容積 100%）である。

2.3 試験結果

2.3.1 分別性能確認試験

(1) 原土 A（農地堆積土）

表 4 に原土 A（農地堆積土）の分別状況を示す。改質材を 30% 混合して分別した結果、がれきは精度良く分別され、改質土も含水比が下がり粒度調整もされ、良質な土砂に再生されている。原土のみで分別した結果は、多くの泥塊が篩上に残存し、篩下の土も泥土状の泥塊のままである。参考までに実施した一般的な土質改良工法であるセメント混合では、原土のみよりは改善されるものの、泥塊が篩上に残存し、篩下のセメント改良土も含水比が高く握るとだんご状になる。

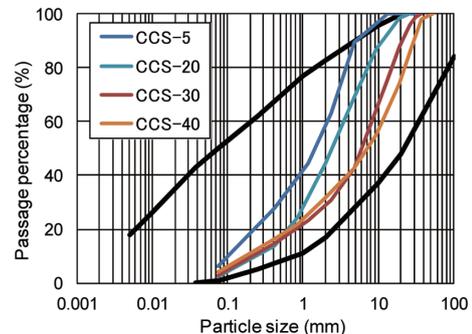


図 7 カルシア改質材の粒径加積曲線の一例
Example of particle size distribution curve of steelmaking slag

表 3 性能確認試験ケース
Case of performance verification test

Original soil No.		A	B	C
Segregation performance		1) Improved soil 2) Original soil	—	1) under size 10 mm 2) under size 20 mm
Improvement performance	Cone (mixing ratio : 0%-30%)	1) CCS-5 mix 2) CCS-30 mix	1) Water content 31% 2) Water content 36% 3) Water content 40%	—
	CBR (mixing ratio : 0%-30%)	1) CCS-5 mix 2) CCS-30 mix	—	—
	Triaxial compression	CCS-30 30% mix	CCS-5 20% mix	—
Test banking		—		1) Improved soil 2) Original soil

(2) 原土 C (分別土)

表5に原土C(分別土)の分別状況を示す。カルシア改質土に残存するがれきは、20mm篩では木片が残るが、10mm篩にすることで繊維状の木くずまで減少できることを確認した。減少した分のがれきは、篩上のがれき質量の差となっており、20mm篩では7%であったがれきが、10mm篩では20%まで増えている。また、篩上のがれきは、カルシア改質材を20%混合することで、原土Aと同様に、がれきに付着した泥土が引き剥がされている。

表4 原土 A の分別状況
Segregation result (original soil A)

A (farm)		
Water content : 40%		
Fine fraction content : 54%		
Sand fraction content : 46%		
Gravel fraction content : 0%		
		
Case	Under size (<20mm)	Upper size (20mm<)
	CaO-improved soil	Segregated debris
CCS-5 30% mix		
	Segregated soil (lumps of mud)	Segregated debris (+ lumps of mud)
Only original soil		
Reference	Cement-mixed improved soil	Segregated debris (+ lumps of mud)
Blast furnace slag cement 5% mix		

2.3.2 改質性能確認試験

(1) コーン試験

図8, 図9にコーン試験結果を示す。図8より含水比と細粒分含有率がともに高い原土Aについても、改質材の混合率30%(本工法の標準配合:20%~30%)にてコーン指数が800kN/m²以上(第2種建設発生土)に改質されていることがわかる。また、図9よりコーン指数は、コーン指数の影響因子の一つとして考えられる含水比と高い相関関係があることが確認できる。

(2) CBR 試験

図10に自然含水比によるCBR試験結果を示す。改質材の混合率20%以上にて、CBRが3%以上(路床最低値)

表5 原土 C (分別土) の分別状況
Segregation result (original soil C)

C (segregated soil)		
Water content : 34%		
Fine fraction content : 52%		
Sand fraction content : 45%		
Gravel fraction content : 3%		
		
Sieve mesh	Under 20mm Improved soil	Upper 20mm Segregated deribs
20mm		
CCS-5 20% mix		
Mass % *	93% + 40% = 133%	7%
Sieve mesh	Under 10mm Improved soil	Upper 10mm Segregated deribs
10mm		
CCS-5 20% mix		
Mass % *	80% + 40% = 120%	20%
	140% = (Original soil) 100% + (steelmaking slag) 40%	

* Mass % : Mass of original soil = 100%

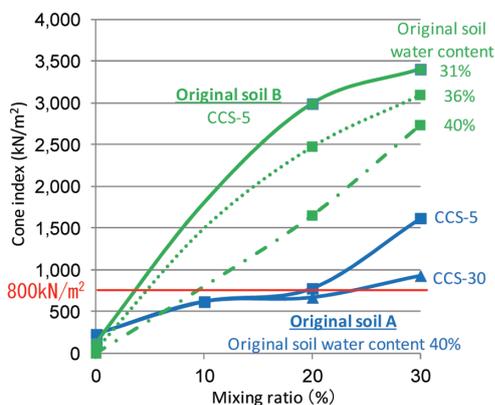


図8 コーン指数と改質材混合率の関係
Relationship between cone index and mixing ratio

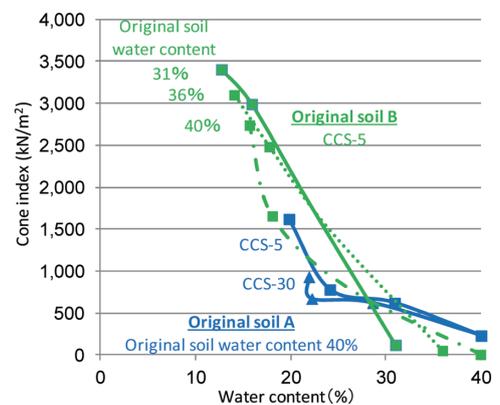


図9 コーン指数と含水比の関係
Relationship between cone index and water content

に改質されていることがわかる。

(3) 三軸圧縮試験

表6に三軸圧縮試験結果を示す。改質材の混合率20%～30%にて、せん断抵抗角 ϕ が良質砂と同等の35°に改質されていることがわかる。

2.3.3 試験盛土による施工性と安定性の確認

原土Cを用いた改質材有無の2ケースの試験盛土を、幅5m×奥行き5m×高さ1mで築造した。図11に試験盛土の築造状況を示す。施工性については、2ケースともに特殊な建設機械を用いることなくバックホーにて築造でき、築造時のコーン指数も2000kN/m²程度あり良好に締め固まることが確認できた。

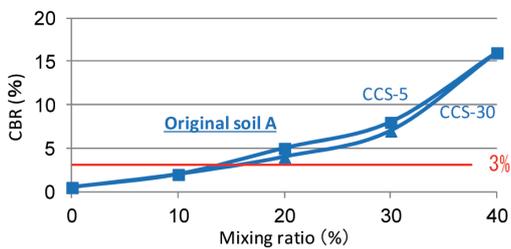


図10 CBRと改質材混合率の関係
Relationship between CBR and mixing ratio

表6 三軸CD試験結果(圧密排水)
Result of triaxial compression

	Unit	Original soil A	Original soil B
Angle of internal function ϕ_d	°	34.8	39.6
Cohesion cd	kN/m ²	25.0	62.2
Mixing ratio	%	30	20
Degree of compaction	%	95	



図11 試験盛土の築造状況²⁾
Result of test banking²⁾

安定性については、40cm×20cm×深さ2cmの水溜めの溝を掘り、1回/日の乾湿繰返しと降雨による強度変化をコーン試験にて確認した。図12に試験結果を示す。原土のみケースは、乾湿による粉化と降雨による再泥化により強度低下しているが、改質土ケースは強度低下せず安定していることが確認できた。

2.4 適用事例

2.4.1 高速回転式カルシア改質工法の適用

高速回転式カルシア改質工法は、表7に示す2箇所の実証試験を経て、2013年3月に釜石市災害廃棄物処理事業に本採用された。写真1に釜石市災害廃棄物処理事業(釜石市発注)の本工法全景を示す。本事業では、実質約9か月間の作業で約20万トンの津波堆積物の分別、改質を実施した。

2.4.2 カルシア改質土の適用

高速回転式カルシア改質工法にて再生処理された改質土

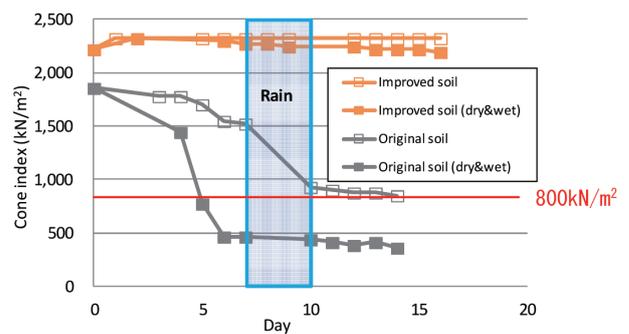


図12 乾湿繰返しと降雨によるコーン指数変化²⁾
Changes of cone index by dry & wet



写真1 高速回転式カルシア改質工法全景
(釜石市災害廃棄物処理事業)
Full view high-speed rotary CaO-improvement method
(Iwate Prefecture Kamaishi City)

表7 高速回転式カルシア改質工法の適用事例
Application examples of high-speed rotary CaO-improvement method

	Client	Place	Quantity *	Work period
Demonstration test	Voluntary	Miyagi Prefecture Sendai City	200 ton	2011.9 - 2011.11
		Iwate Prefecture Kamaishi City	100 ton	2011.11
Employment	Kamaishi City	Iwate Prefecture Kamaishi City	200 thousand ton	2013.3 - 2014.1

* Quantity : Original soil

表8 カルシア改質土の適用先（予定含む）
Application of CaO-improved soil (within plan)

	Work period	Place	Client	Use	Quantity
Demonstration test	2011.9	Miyagi Prefecture	Voluntary	Test banking	50 m ³ ×2
	2011.11	Sendai City		Test road bed	3 m ³ ×2
Application test	2011.11	Iwate Prefecture Kamaishi City	Kamaishi City	Bank	40 m ³
	2012.1	Sendai Shiogama Port	Nation *	Road bed behind a quaywall	80 m ³
Plan	Under consideration	Iwate Prefecture Kamaishi City	Kamaishi City	Banking etc.	200 thousand ton

* Ministry of Land, Infrastructure and Transport

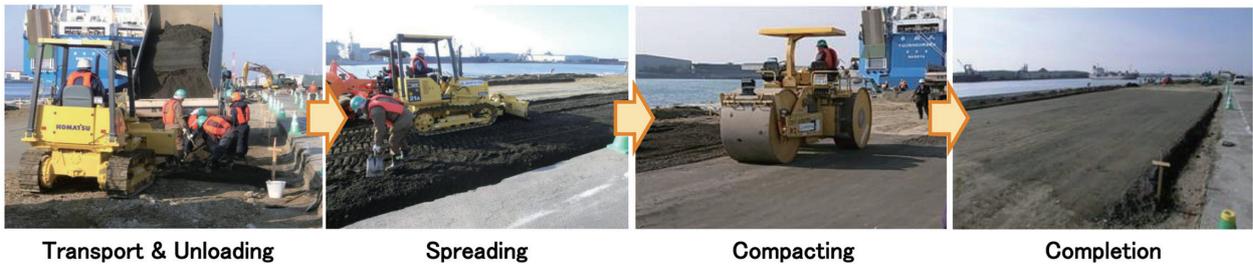


写真2 仙台塩釜港岸壁嵩上げ工事の施工状況
(東北地方整備局 塩釜港湾空港事務所発注)
Example of construction (Sendai Shiogama Port)

は、表8に示す2箇所の実証試験（試験盛土、試験路床）を経て、2箇所の実構造物（堤防拡幅、岸壁路床）に試験適用された。

写真2に仙台塩釜港岸壁嵩上げ工事（東北地方整備局塩釜港湾空港事務所発注）の施工状況を示す。本工事にて、改質土が特殊な建設重機を用いることなく、一般重機にて施工できることを確認した。

また、釜石市災害廃棄物処理事業にて再生処理された改質土は、（仮称）鶴住居地区スポーツレクリエーション拠点整備工事の嵩上げ材と、釜石市東部地区の（仮称）グリーンベルト整備工事の盛土材に使用される予定である。

3. 結 言

回転式破碎混合機とカルシア改質材を用いて、津波堆積物を復興用土工材料に分別、改質する検討を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 本工法は、細粒分含有率と含水比が高い津波堆積物でも精度良い分別と改質ができる。
- (2) 改質土は、粒度改善と含水比低下により良好な締固め性能を有し、コーン指数 800kN/m² 以上（第2種建設発生土）、CBR 3%以上、せん断抵抗角 35°以上の強度を有している。
- (3) 改質土は、降雨による再泥化が生じにくい安定した材料であり、防潮堤や道路等の盛土材料、地盤の嵩上げ材料等の復興用土工材料に有効利用できる。

本工法は、建設技術審査証明（建技審証 第1305号）を2013年8月に取得しており、釜石市災害廃棄物処理事業

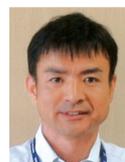
に本採用され、約20万トンの津波堆積物の分別、改質を実施した。再生処理された改質土は、復興事業に有効利用される予定である。また、カルシア改質材は、津波堆積物のみでなく浚渫土（海域）、建設残土や農地泥土（陸域）の改質にも有効であり、今後の適用の広がりを期待している。

参考文献

- 1) 国土交通省：迅速な復旧・復興に資する再生資材の宅地造成盛土への活用に向けた基本的考え方。2012.3
- 2) 赤司有三他：カルスピン工法によるがれき混じり津波堆積物の利用技術。（公社）地盤工学会，第10回環境地盤工学シンポジウム，2013.9



平嶋 裕 Yutaka HIRASHIMA
スラグ・セメント事業推進部
スラグ営業推進室 主幹
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



平石耕一 Kohichi HIRAIISHI
新日鉄住金エンジニアリング(株)
環境修復推進部 シニアマネジャー