

## 土木分野の資源有効利用技術

## Technologies for Effective Use of Resources in Civil Engineering

川 端 淳 一      笹 倉   剛      坂 井 吾 郎

## I. はじめに

社会インフラの構築を担う建設業は、その生産活動過程において大量の資源を必要とする。したがって、サステナブルな社会インフラを目指すうえで、資源の有効利用は不可避な課題であるといえる。本文では、土木分野における資源有効利用技術について、土質・地盤技術分野とコンクリート材料技術分野に分けて、それぞれの取り組み状況を概説する。

地盤分野における資源有効利用の歴史は古く、灌漑用の築堤盛土やフィルダムは、建設サイトに賦存する種々の地盤材料の採取・混合・締固めにより止水性や力学的安定性を確保するもので、まさに資源有効利用の先駆けといえる。また、特に近年においては、工事に伴う建設発生土に関して、廃棄物処分場容量の逼迫、処理コスト、運搬による周辺環境への影響抑制等の観点から、活用途に適する性状に改質した上で有効利用することが求められている。有効利用する対象としては、シールドトンネルや連続地中壁等の施工に伴う高含水状態の泥土や泥水、自然堆積状態から掘削等により乱されて軟質化した土、自然由来重金属含有土ならびに分級・分別が必要な混合廃棄物等が挙げられる。しかし、こうした材料の再生利用は、法規制および自主規制等により実際には中々進まないのが実状であった。

東日本大震災の発生以後、がれきや津波堆積物等の震災廃棄物の処理にあたり、環境省よりこれらなるべく再生利用する方向性がいち早く打ち出され、様々な地盤材料としての再生利用の試みがなされるとともに、いくつかの公的なガイドライン等が整備された。この際、再生を行うにあたっての大きな課題として、焼却灰等、本来産業廃棄物処分されるべき材料の再利用ならびに土壤環境基準に適合しない自然由来の重金属を含む堆積物の管理方法が挙げられた。これらの課題は、前述の建設発生土における課題と共通するものであり、緊急性の高い災害廃棄物処理を契機として、土質・地盤材料の再利用を図る試みが現在各所で進められるようになってきている。本文では、建設発生土の有効利用に向けた取り組み、自然由来重金属含有土、焼却灰について現況と再生利用技術の事例を示す。

一方、コンクリート技術分野における資源有効利用としては、産業副産物によるセメントの代替が挙げられる。ここでいう産業副産物とは、製鉄所で産する高炉スラグ微粉末や、石炭火力発電所で産する石炭灰を分級するなどして品質規格（JIS A 6201）に適合するよう調整されたコンクリート用フライアッシュ（以下、フライアッシュと称する）といったものであるが、セメント代替には単にこれらの有効利用というだけでなく、サステナブルな社会インフラ構築において重要となる環境負荷低減という側面もある。セメント製造の際には、セメントクリンカー焼成時における燃料の燃焼と、石灰石の脱炭酸によって大量のCO<sub>2</sub>が排出される。したがって、セメントの代替として産業副産物を使用する技術は、資源の有効利用であ

ると同時に、CO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与することができるのである。セメントの代替となり得る産業副産物のうち、高炉スラグ微粉末については本論に続く「建築分野の資源利用技術」にて述べることとし、ここではフライアッシュおよび石炭灰のコンクリートやセメント系材料への有効利用技術について示す。

## II. 地盤材料に関する技術

## 1. 現地発生土の改質による再資源化

現地発生土の再資源化のための処理方法は、脱水、乾燥、良質材との混合等の物理的処理と、固化材や改質材の攪拌混合による化学的処理に大別される。

(1) サンドコンパクションパイル（SCP）による物理的改質<sup>1)</sup>

開削による半地下構造の道路トンネルの施工に際し、床付け面付近に分布し、掘削土量の約40%を占めるコーン指数が12kN/m<sup>2</sup>の軟弱な沖積粘性土の扱いが課題となった。要求項目は掘削重機のトラフビカビリティ確保と掘削土の河川堤防の盛土材としての再利用で、これらを両立できる解決策として、化学的処理に頼らないSCPの事前打設による含水比低下と、掘削時のSCP砂材との混合による改質の適用性を検討した。このため、改良率をパラメータとしたSCP試験施工を実施し、Fig.1に示す粘性土の液性指数と掘削混合材のコーン指数を指標とした管理図を作成して、最適なSCP打設仕様を決定した。Photo 1は施工状況で、固化材等の使用を回避しつつ作業性の確保と盛土材料としての再利用の両立を果たした。

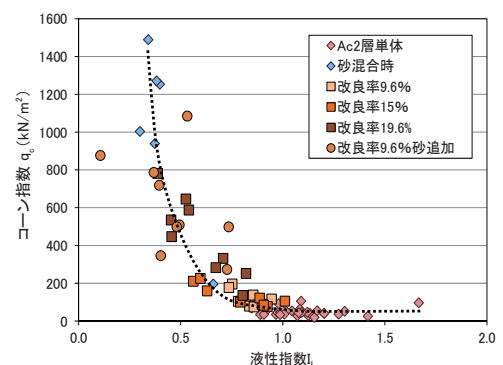


Fig.1 液性指数とコーン指数の関係  
(Relation of Liquidity Index and Cone Index)



Photo 1 施工状況  
(Excavation after SCP Ground Improvement)

(2) 掘削土を再利用した泥土モルタルの配合管理<sup>2)</sup>

総延長が約600mの大規模止水壁の構築に際し、環境影響やコストの低減のため、全旋回掘削で先行削孔した孔壁に、その掘削土に固化材や水等を現地プラントで混合して製造した泥土モルタルを打設する掘削土再利用連壁工法の適用を検討した。管理項目として密度、流動性、強度に加え止水性が求められ、逐次変化する掘削土の土質性状に応じた迅速な配合決定方法が課題となった。このため、施工に先立ち入念な土質調査と配合検討を行い、掘削土の細粒分含有率を指標とした配合決定チャート (Fig. 2) を作成した。この管理手法を適用することにより、搬出土を大幅に抑制しつつ、要求品質を満足する止水壁を構築することができた (Photo 2)。

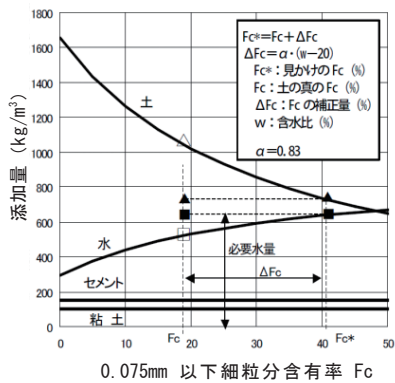


Fig. 2 配合決定チャート

(Fixing Chart of Soil Mortar Mix Proportion)



Photo 2 改良体外観

(Outlook of Soil Mortar Column)

2. 自然由来重金属含有土等の再資源化

Fig. 3 に自然由来重金属含有土の発生量の予測を示す。リニア中央新幹線や首都圏の道路整備等を背景にして、今後も多くの自然由来重金属土が発生する。こうした土は従来セメント工場等で処理業者により処分されてきたが、コストが非常に高いことから今後は盛土等に再生利用するための枠組みが社会的に検討されている。

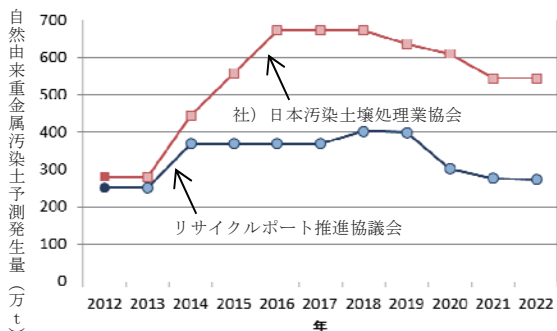


Fig. 3 2つの機関による自然由来重金属含有土の発生量予測 (Predicted Volume of Construction Waste Soil containing Natural Heavy Metal)

(1) 重金属拡散防止材料 KAT ビーズ

当社では重金属含有土を盛土に利用する場合、拡散防止材料としてその最下層に敷設するための材料 KAT ビーズ<sup>3)</sup>を開発した (Photo 3)。この材料は、実際に重金属含有土による高速道路盛土の下部の重金属吸着材として適用された (Fig. 4) ほか、重金属含有土を仮置きする場合の拡散防止材料として利用されている。



Photo 3 KAT ビーズ

(KAT Beads)

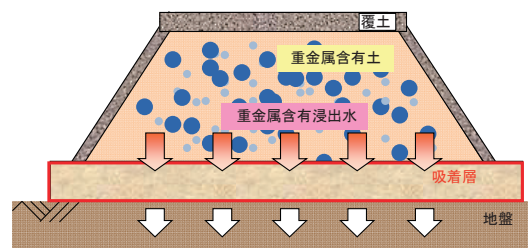


Fig. 4 吸着層盛土の概念図

(Filling with Soil of Natural Heavy Metal with Adsorption Under-layer)

(2) 重金属含有土の鉄粉洗浄法

重金属泥水中に、重金属吸着能をもつ鉄粉を混合して、重金属含有土を無害化する浄化方法 (鉄粉洗浄法) を開発した (本年報で報告)。これにより、従来処理業者で処分していた土を無害な土として現地の埋戻しに使うことができるようになり、実際の土壌洗浄プロジェクトに適用し全量を無害化、埋戻した。また、泥水シールドにおいても現場適用を行い、所定の効果を得た (Fig. 5)。

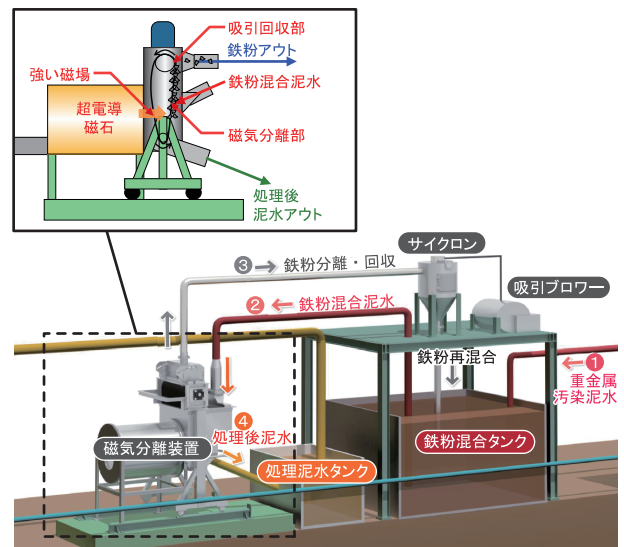


Fig. 5 鉄粉洗浄による重金属汚染土の無害化技術 (Soil Cleaning System with using Iron Powder Sorption Effect)

### 3. 中性改質材による軟弱土の再資源化

シールド工事や地盤改良等の施工に伴い生じる泥状土のコーン指数が 200kN/m<sup>2</sup> を下回る場合、建設発生土区分によれば扱いの難しい「泥土」と区分され、その有効利用には安定処理が必要となる。泥土処理物の有効利用に際しては、安定処理材（セメントや石灰等）に起因するアルカリ成分や、土に自然由来で含有される有害重金属の溶出の抑制等環境面への配慮が求められ、中性改質材と重金属の不溶化材の適用が必要になる。このような要求に対応できる改質材として開発したものに、半水石膏を主とし複数の無機鉱物を混合した「タイガージブハード TYPE-K」、中性度や脱水効果をより高めかつ脱硫された無機鉱物主体の材料「泥 DRY」、「泥 CURE」がある。前者は水との接触による二水石膏の針状結晶形成過程で脱水効果を得るものであり、泥土圧シールドの掘削土の改質に適用され海面埋め立て材として利用された。「泥 DRY」は、高分子吸収材と粘土材料を組み合わせたものであり、急速脱水効果が非常に高く高含水・高粘性土中の草木等の篩分け選別が可能となるものである。また「泥 CURE」は、これを発展させ、建設汚泥の再利用の可能性を広げる無機鉱物のみを組み合わせた低コスト材料であり、下記のように軟弱地盤の改良、建設汚泥の再資源化に用いられている。



Photo 4 泥 DRY による除染土壌の篩分け選別状況 (Sorting Plants from the Removed Soil)

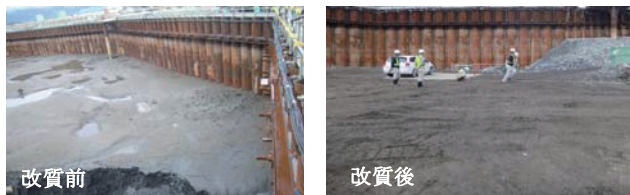


Photo 5 泥 CURE による底質の地盤改良 (The Soil Improvement in Riverbed Sediments)



Photo 6 泥 DRY(左), 泥 CURE(右) (Outlook of Dei-DRY(left), Dei-CURE(right))

### 4. 焼却灰の造粒固化による再生利用

東日本大震災により発生した約 300 万 t の災害廃棄物の洗浄・焼却等による処理が石巻市にて行われ、2014 年 9 月に完了した。この事業では、最終処分量低減を目的として、現場でキルンによる廃棄物の焼却処理が行われたが、大量に発生する焼却主灰にセメントを添加混合した造粒固化材 (Photo 7) が製造され、海面埋め立てに再生利用された<sup>4)</sup>。この際、焼却灰から環境基準を超過する重金属(砒素、鉛等)等の溶出が認められたため、造粒固化物に鉄系材料やマ

グネシウム系材料を添加混合し、重金属成分が水に溶出しにくいようにする不溶化処理を行った。不溶化処理された造粒固化物の再生利用にあたっては、不溶化効果の長期安定性が大きな課題となったが、これについて Fig. 6 に示すように繰り返し溶出試験等による評価手法を確立し適用すると同時に、埋め立て材料はその後長期の曝露試験にも供されている<sup>5)</sup>。



Photo 7 造粒固化物 (Soil Like Material) produced from Cemented Fly Ash

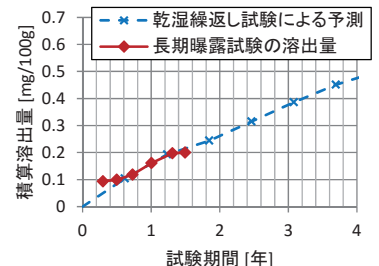


Fig. 6 フッ素不溶化効果の長期安定性試験 (Experimental Result evaluating Long Term Stability of Insolubilization)

### III. コンクリート材料に関する技術

土木分野におけるフライアッシュの適用事例をいくつか挙げると、コンクリートダム工事に用いられる中庸熱フライアッシュセメント、山岳トンネルにおける吹付けコンクリート、構造物背面の空隙充填を目的とした可塑性グラウトなどがある。いずれでも、温度応力の低減や水密性の向上、粉じんやリバウンドの低減、高強度化等、フライアッシュの優れた性質が活用されている。

また、フライアッシュには、含有する未燃炭素によって空気連行剤が吸着され、コンクリート中の空気量の確保が難しいという欠点があるが、近年では加熱処理することによりこれを解決した高品質フライアッシュ (CfFA) も開発されている<sup>6)</sup>。

一方、特に調整していない石炭灰 (原粉) をコンクリートやセメント系材料に適用した技術もある。ここでは、当社が開発した 2 つの新技术について紹介する。

#### 1. 環境負荷低減型コンクリート CO<sub>2</sub>-SUICOM

CO<sub>2</sub>-SUICOM は、コンクリート中の全粉体のうち、20~60% を石炭灰で置換した環境負荷低減型のコンクリートである。全粉体のうち 49% を石炭灰で置換した場合には、1m<sup>3</sup> あたりの石炭灰使用量は 212kg となる<sup>7)</sup>。石炭灰 (原粉) の CO<sub>2</sub> 排出量は、定義上 0 kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> であるため、一般的なコンクリートに比較し、使用材料のレベルで 260kg-CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> 程度の CO<sub>2</sub> 排出量が削減される。このコンクリートを用いてプレキャスト基礎ブロック b2.0×w0.4×h0.5m を 11,000 個製造した場合、Fig. 7 に示すように、廃棄物リサイクル量は 1,341ton となり、一般的なコンクリートを用いた場合 (267ton) の約 5 倍となる計算となる。

また、CO<sub>2</sub>-SUICOM は、長寿命化コンクリート<sup>8)</sup> で培った炭酸化養生の技術を応用したコンクリートであり、セメントの大部分を石炭灰、高炉スラグおよび特殊混和材 γ-C<sub>2</sub>S で置換して材料由来の CO<sub>2</sub> 排出量を削減するとともに、コンクリートを高濃度 CO<sub>2</sub> 環境下で養生し、強制的に炭酸化させることで、コンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出量をゼロ以下にすることができる。

2. 水中流動充填材 Hilo

Hilo は、東北地方太平洋沖地震に伴う津波によって被災した福島第一原子力発電所の汚染水対策のために開発されたセメント系充填材である<sup>9)</sup>。適用対象の1つであるスクリーンポンプ室は、タービン建屋と接続する最も海側に位置する施設であり、ここから汚染水が漏れ出すリスクを回避するため、セメント系充填材で閉塞する対策が講じられた。

スクリーンポンプ室の閉塞工事においては、①水中流動距離が最大約 30m であること、②必要十分な充填性を確保できること、ならびに③材料調達の確実性と資源の有効活用の両立を図ること、といった要求を踏まえ、必要となる水中流動性や充填性を確保しつつ、混和材にフライアッシュではなく近接する広野火力発電所から産出される石炭灰（非 JIS 灰）を用いた。充填材の性状は、使用する石炭灰の違い（主に原炭の産出地に由来）によって多少の相違があるものの、いずれも良好な流動性と水中不分離性を有することが確認された（Fig. 8）。また、実施工では水中流動充填材に石炭灰を積極的に活用したが、15,424m<sup>3</sup> 全ての施工において良好なレベリング性が得られ、無事に充填を完了することができた。

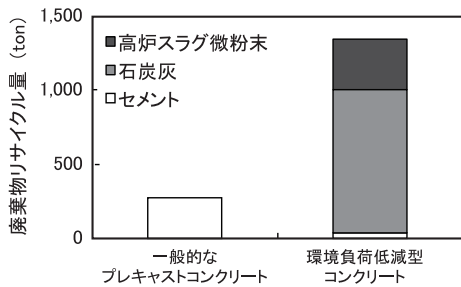


Fig. 7 廃棄物リサイクル量の比較  
(Comparison of the Waste Recycling Amount)

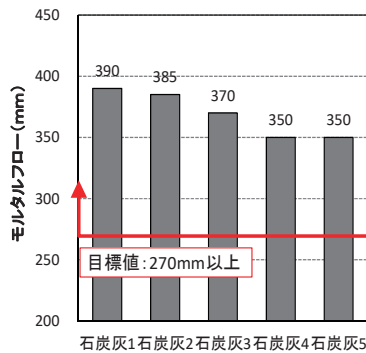


Fig. 8 水中流動充填材の性能試験結果  
(Testing Result of Anti-washout Special Material)

IV. おわりに

土木分野での資源有効利用の取り組み例を紹介したが、冒頭で述べたように、サステナブルな社会インフラを目指していくにあたり、大量の資源を扱う建設業においては、その有効利用を今後さらに加速させていく必要がある。

土質・基礎分野では、有効利用上の選択肢となり得る処理や対応の方法が多岐に亘る。しかし、選ぶべき方法は対象材料の賦存状態や性状によって異なる。制約条件を明らかにし、これらの中から各々の現場条件に適した方法の選定が肝要である。また、社会的には、

土や地下水に関する環境規制を満足しながら、自然由来重金属含有土を地盤材料として再生利用することがますます求められるようになってきており、そのための社会的な法規制の緩和も検討されている。この動きを促進させるためには、重金属溶出や力学的性質について長期安定性を確保するための技術と、それを客観的に評価するための技術等が今後必要となる。

一方、有効利用が望まれている石炭灰については、統計上は発生量の 98% が有効利用されている。その内訳はセメント分野が最も多く、有効利用量の 68% を占める。しかしながら、そのほとんどはセメント原料（粘土代替）としての利用であり、セメント混合材やコンクリート混和材（＝フライアッシュ）は、いずれも僅か 0.7% 程度に過ぎない。すなわち、現状において石炭灰は CO<sub>2</sub> の削減の観点からは必ずしも有効に利用されているとは言い難く、今後さらにセメント代替としてコンクリート材料分野での利用を促進していく必要があるものと考えられる。

さらに、今後、火力発電所の増大とともに石炭灰発生量の増大が見込まれるほか、製紙灰、都市ごみ焼却灰等の再利用も模索されている。処分場の逼迫が続く中、灰の再利用ニーズは大きい。どの灰を利用する場合にも、造粒固化技術、重金属の不溶化効果や力学的性質の長期安定性を実現する技術がキー技術となっており、前述の災害廃棄物処理での知見が活用できるものと考えられる。

参考文献

- 岡本道孝他；開削工事における掘削土再利用を目的としたサンドコンパクションパイルの適用事例，土木建設技術発表会，2014.
- 笹倉剛他；泥土モルタル柱列壁工法におけるモルタル配合管理，第 38 回地盤工学研究発表会，2003，pp. 809-810.
- 田中真弓，川端淳一，佐藤一成，竹市篤史；重金属吸着材を用いた吸着マットの原位置吸着性能把握試験，第 68 回土木学会年次講演会要旨集，2013，III-297.
- 小川，佐々木，佐山，川端，久田，皆川；「災害廃棄物焼却主灰の造粒固化物の埋立資材への活用-重金属不溶化とその長期安定性について-」，第 20 回地下水・土壌汚染研究会シンポジウム，2014. 6.
- 佐藤，河合，川端，久田，皆川；重金属等を含む焼却主灰造粒固化物の長期溶出挙動評価，第 71 回土木学会年次講演会 III.
- 李相培，佐藤嘉昭，山田高慶，大谷俊浩；改質石炭灰（CfFA）を用いたコンクリートの特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 1，2008，pp. 213-218.
- 木村彩永佳，関健吾，取違剛，横関康祐；炭酸化養生を行った環境負荷低減型コンクリートの環境影響評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36，No. 1，2014，pp. 2254-2259.
- 坂田昇，横関康祐，渡邊賢三，小林聖；高耐久炭酸化コンクリートの開発および施工実績，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 11 巻，2011. 10，pp. 93-100.
- 日比康生，柳井修司，西郡一雅，相馬裕；福島第一原子力発電所汚染水対策工事 海水配管トレンチとスクリーンポンプ室の閉塞，コンクリート工学，Vol. 54，No. 6，2016，pp. 628-634.