

# 建設・産業副産物の 地盤材料としての有効活用をめぐる技術



菊池 喜昭

東京理科大学 理工学部 土木工学科 教授

## 1. はじめに

著者は5年前にCDIT No.47<sup>1)</sup>で、「建設副産物等の有効活用をめぐる技術開発の動向と展望」を執筆した。本稿では、改めて、副産物を地盤材料として有効活用するときを考えるポイントを紹介してみたい。副産物の有効活用に関する背景や狙いについて、一部前稿と重複するところがあるが、読者の便のため、重複を恐れずに書いていきたい。

25年ほど前に建設副産物や産業副産物を有効活用しようという機運が起きた理由は、簡単に言うと、①天然資源の枯渇の危険性と地球規模での自然保護、②廃棄物処分場のひっ迫、③臨海部で大量に産出する副産物等の積極的利用の促進、④港湾施設の老朽化対策に必要となる新たな性質を持つ地盤材料の開発の必要性が主たるものであったと思う。その後、阪神淡路大震災、東日本大震災などを契機に、⑤災害廃棄物の有効利用が視野に入ってきていると思われる。

①については、港湾工事はおおむね大規模工事で、大量の地盤材料を使用してきたということ、良質の石や砂が枯渇していることからくるものである。②は廃棄物の最終処分場の残余が少ないことから、廃棄物の最終処分量を削減する必要が出ており、そのために分別収集が進んでいるが、分別した材料を有効に利用することでさらに最終処分を減らそうというものである。③は、海外から資源を調達するわが国では、沿岸域に様々な工場が立地しており、そこから産出する産業副産物をできるだけ有効活用しようというもので、従来、製鉄工場から出てくる鉄鋼スラグと石炭火力発電所から出てくる石炭灰が主たる対象であった。④は①から③までのやや受け身的内容とは少し異なり、積極的に材料の性質を改善することで新たな地盤材料を生み出していこうというものである。これは、従来の地盤材料だけでは老朽化した岸壁の改良や更新を行うのに十分ではないとの判断から行われているものである。この視点はさら

に、浚渫粘土のように、従来まず埋立地に放り込んで、埋め立てて完了後地盤改良すればよいという対応を改め、埋め立てると同時に良好地盤として機能するような、浚渫土の積極的利用の道を開くというふうに変化した。⑤は特に東日本大震災の後に注目されてきている。東日本大震災では、災害廃棄物の大規模な分別が行われ、できる限り多くの廃棄物を再利用しようとしてきている。その一つの表れが、公益社団法人地盤工学会が独立行政法人国立環境研究所から委託した、「災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン」<sup>2)</sup>の策定である。このガイドラインの趣旨は、災害廃棄物の処理の結果得られた復興資材を地盤材料としての特性と環境安全性に配慮しながら積極的に有効利用しようとするものであり、安定型の廃棄物についてはかなりの部分が地盤材料としても使えるとしたものである。その際、最後に残ったのが、篩い下残渣で、これについては、一般には地盤材料としても取り扱いが難しいものという範疇に置かれた。

## 2. 人工地盤材料に求められる性質

港湾等工事で用いられる、建設副産物等を加工して作られる人工地盤材料にはどのような性質が求められているのだろうか。

人工地盤材料が持つべき基本的な性質は、大量に産出すること、材料品質のばらつきが少ないことがあげられる。すでに述べたように、港湾工事では一度に大量の地盤材料を必要とするので、大量調達ができないものでは使い勝手が悪いということになる。また、材料の品質のばらつきが天然材料と同程度以下でないと安心して使えないということになる。そのうえで、従来の地盤材料の代替として用いるのであれば、使用する箇所に応じて、表1に示すような天然材料に対して要求している性質に等しいか、それを上回る性質を持っていることが要求される。

ところで、人工地盤材料については、図1のような方法で改

表1 用途と地盤材料に求められる性質

利用用途	求められる性質
地盤改良材（ドレーン材）	透水性が良いこと 目詰まりが生じないように粒度が良いこと
地盤改良材 （サンドコンパクションパイル材）	粘性土地盤の場合：締まりやすく、十分な強度が期待でき、 ケーシングからの排出が容易なもの
本体内中詰材	固まらないこと 重いこと 膨張しないこと
裏込材	せん断抵抗が大きいこと、また単位体積重量が小さいこと
裏埋材	（裏込材と同様）
盛土材	締め固めやすいこと 施工が容易で、せん断強度が大きく、圧縮性が小さいこと
覆土材	（盛土材と同様）
埋立材	軽いこと 圧縮しにくいこと

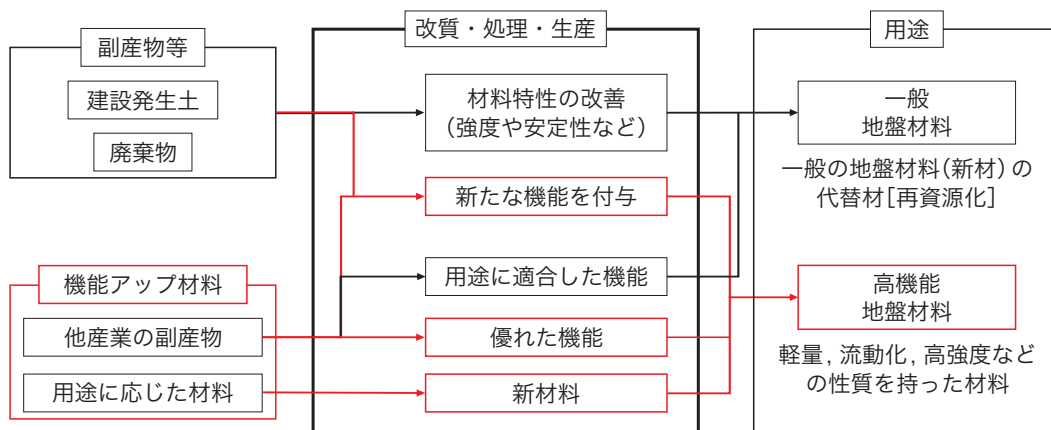


図1 人工地盤材料の創造

質をし、よりよいものに変えていこうとする考え方が以前からある。図1中に赤で書かれたところがポイントであるが、従来の地盤材料では見られないような高機能を持つ地盤材料を人工的に作る事が可能であるし、また、そういったものを作り出す努力が必要であると思われる。図中にあるような、機能アップとか、新たな機能とか、高性能とは具体的には何かということであるが、例えば、より軽い材料、せん断強度の大きな材料、より韌性に富む材料、透水性の高い材料など、様々なものが考えられ、要求は時とところによって変わるので、具体的にこれというのは言いにくい。

### 3. これまでに行われてきた技術的検討

#### 3.1 2種類以上の材料を混合

何かと何かを混ぜることで、悪い品質を抑え、良い品質に改善するという事はよく行われている。例えば、土にセメントを混ぜるなどはその典型例である。ほかには、気泡を混ぜるとか、発泡ビーズを混ぜる、ゴムチップを混ぜるなどされてきている。地盤材料の場合、混ぜるときに注意しなくてはいけないことは、そもそも混ぜるのは手間のかかることであるので、で

きるだけ簡単に混ぜないと材料価格があがってしまうことにある。混ぜるときに手間がかかることの例としては、SGM軽量土があげられよう。SGM軽量土は多くの方がご存知の通り、粘性土を主体として浚渫土に水を加えて液体状にしたものに、気泡あるいは、発泡ビーズとセメントを混合するものである。特に気泡の場合には、混合、圧送、水中投入時に、消泡や分離ということが問題になり、非常に丁寧な混合攪拌作業が必要となっている。これに対して、管中混合処理土は、SGM軽量土と同じように、浚渫粘土にセメントを混合するものであるが、粘性土の含水比をうまくコントロールすることで圧送パイプの中で圧送中に半ば自動的に混合するものである。

また、あまり一般化されていないが、浚渫粘土にゴムチップを混ぜた材料も提案されている<sup>3)</sup>。このときのゴムの大きさは、SGM軽量土の発泡ビーズの寸法を参考にして決めたもので、径が2mm程度のものを利用している。この数字は前例があったことによるものであるが、こうすることで混ざりやすく、分離しにくくすることができた。

水中投入時の分離も混合材料を利用するときの課題である。事前混合処理土は、もともと砂とセメントを混合する工法であ

るが、ベルトコンベアーの上でこれらを混合し、投入する直前に、のりを吹き付けてセメントと砂の分離を抑えている。

### 3.2 軽量化

軽くすることの一番の効果は、埋め立てた時などに基礎地盤に作用する上載荷重を低下させ、圧密沈下を抑制することにある。擁壁などに作用する土圧も低減できそうであるが、通常は単純に軽量化しただけでは土圧低減の効果は小さい。それは、地震時の土圧低減には上載荷重の低下があまり寄与しないことによる。

軽くするにはそもそも軽い材料を用いればよいので、その典型的な例は気泡あるいは発泡スチロールを用いることである。発泡スチロールの密度は、 $30\text{kg/m}^3$ 程度である。粘性土の場合、水を加えることは軽くすることの第1歩である。SGM軽量土では液性限界の1.5~2.0倍の含水比になるように水を加えており、これだけで材料は軽くなる。ただし、もちろん、水を加えただけでは水と土が分離するので、セメントを添加してその状態のまま固めるということが良く行われている。その結果、セメント処理土の多くは、密度が小さくてせん断強度が大きな材料となっている。セメント処理粘性土の弱点は、ある圧力レベル以上の圧力が作用するとセメントで固めた部分が壊れだし、大きく体積収縮することである。また、気泡などを多く含ませた場合には、等方的に圧力がかかっただけで気泡がつぶれてしまい、体積収縮するとともにせん断強度も失うということもある。

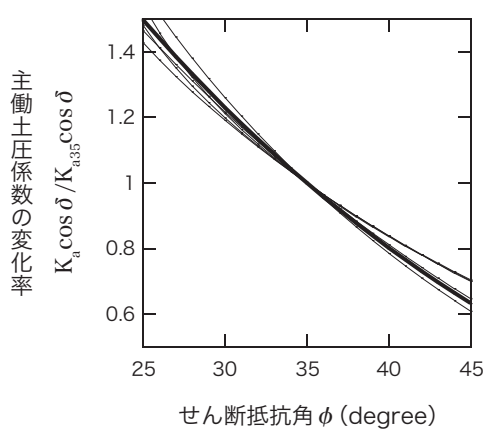
このほか、軽くするには様々な軽量材が用いられており、シラスなど火山灰由来の材料も軽量化材として利用されている。

なお、カウンターウェイトやケーソンなどの中詰め材とする

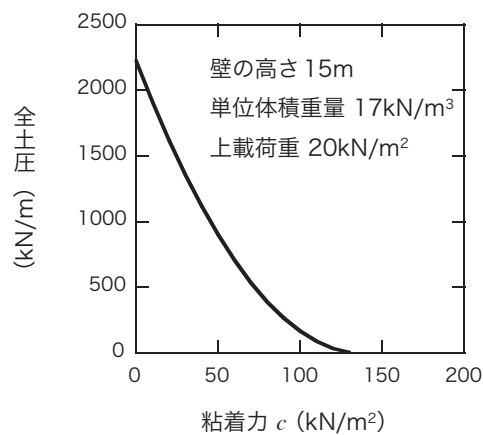
ときは重くすることも有利になるが、この場合には、土粒子密度の大きなものを用いることが良く使われている。実際には単に土粒子密度が大きいというだけでは単位体積重量を増すことにはつながらないので、単位体積重量を大きくするというところに注意が必要である。

### 3.3 高せん断強度化

せん断強度を高めることは構造物に作用する主動土圧の低下に寄与する。土のせん断強さはモールクーロンの破壊基準にみられるように、 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ で表される。ここに $\tau$ :せん断強度、 $c$ :粘着力、 $\sigma$ :考えている面に作用する直応力、 $\phi$ :せん断抵抗角である。構造物に作用する土圧を低下させるには、図2に示すように、せん断抵抗角を大きくするよりも、粘着力を大きくする方が効果的である。図2によれば、せん断抵抗角を5度変えると主動土圧係数は2割程度変化するが、そこまでであるのに対し、粘着力が大きくなれば擁壁に作用する全主動土圧を0にすることができる。図3に示すような断面で、固化改良体がそれだけで十分な安定性を保てていれば、ケーソンが前面に動いたときに、ケーソンの背後の土が崩れて、ケーソンがもとに戻れないということは起きなくなる。ではどの程度の粘着力があればよいかというと、よほど大きな構造物でない限り $c$ が $150\text{kN/m}^2$ もあれば十分であろう。 $c=150\text{kN/m}^2$ はおおざっぱに言ってコンクリートの圧縮強さの100分の1以下である。固化処理土の場合、 $\phi=0$ を仮定して、 $c=150\text{kN/m}^2$ を確保しようとするならば、必要な一軸圧縮強さ $q_u$ は $300\text{kN/m}^2$ となる。これに固化処理土でよく使われてきた安全率3を考慮すると設計段階での一軸圧縮強さを $900\text{kN/m}^2$ 見ておけば、自立する裏込めを作ることができ、



(a) せん断抵抗角の変化に伴う主動土圧係数の変化



(b) 粘着力の変化に伴う擁壁の全土圧の変化

図2 土のせん断強さをあげることによる擁壁に作用する主動土圧の変化への影響

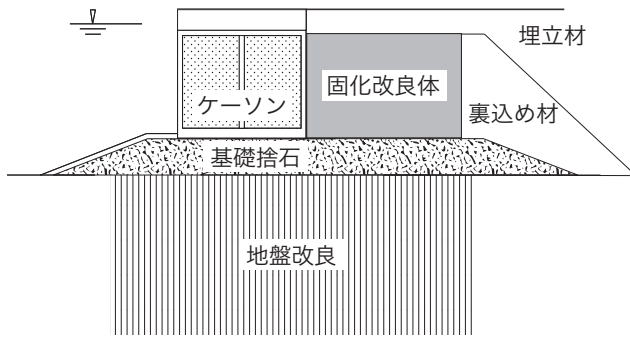


図3 土圧低減を考えた固化改良体

ケーソンの安定性が格段と高まることになる。

ところで、地盤材料に粘着力を付与するには、セメントを添加するばかりでなく、自硬性のある材料、例えば高炉スラグや製鋼スラグなどの鉄鋼スラグを混ぜるなどの方法もある。

### 3.4 粒子破碎の問題

人工的に作った地盤材料の現段階での最も弱点と思われるのは、粒子の圧縮強さが不足していることである。つまり、マウンドの大きな鉛直応力が作用する箇所のように使える

人工材料は今のところない。大きなブロックを作って利用するというアイデアならば、まだ可能性があるかもしれないが、捨石のようにかみ合わせを期待するとなると、粒子の局所に大きな圧縮力が作用し、割れてしまうのではないかということが問題である。よほどの工夫をしない限り、天然の石材のような大きな圧縮強さを持つ粒子を作るのはかなり難しい。

### 3.5 環境安全性

副産物をいざ使おうとすると、勢い、環境問題をおろそかにしがちであるが、平成27年に改訂された「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン（改訂）」<sup>4)</sup>において、環境に対する課題の評価方法が明確化された。図4は参考文献1)に掲載された図の採録である。検査基準が明確化されたので、対処方針が立てやすくなってきている。

### 3.6 災害廃棄物の活用

1. で紹介した⑤に関連する技術開発の中で著者の研究室で行ってきた研究を紹介する。災害廃棄物を分別して最後に残った低品質地盤材料が、篩い下残渣であるが、これが木屑を比較的多く含む材料であり、木屑の腐朽が懸念されるため、なかなか扱いづらい材料であった。それを有効に活用できないかという研究である。この研究のヒントは、ゴムチップを混合した地盤材料にあった。木屑は単体では、大きなせん断ひずみが生じ

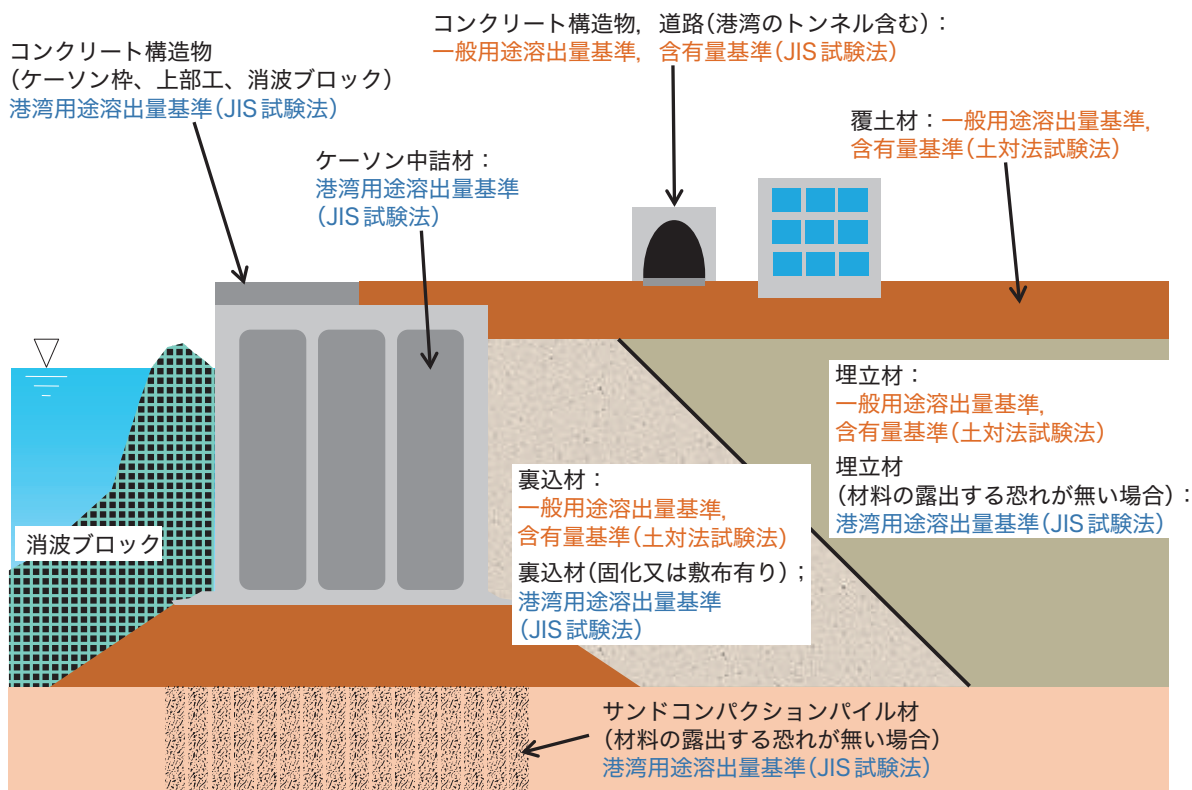


図4 リサイクル材料の適用箇所の違いによる検査基準の違い(国立環境研究所 肴倉宏史氏提供)

れば、最終的には大きなせん断抵抗を発揮することが考えられるが、せん断剛性が著しく低いため、そのままでは使いづらい。ゴムチップを固化処理粘土と混ぜるとせん断剛性が低いという問題が解消し、さらに、韌性が増すというメリットが出ること<sup>3)</sup>が明らかとなっているので、木屑と固化する材料を混合することで面白い性質を引き出すことができるのではないかと考え、製鋼スラグと木屑を混ぜる実験をしてきた<sup>5)</sup>。その結果の一例が図5である。ここでの条件であれば、繊維状の木屑を5~20%程度混合すると、圧縮強さが製鋼スラグ単味の場合より大きくなる上、破壊ひずみが大きくなるという特徴を示した。木屑は腐食するのではないかと懸念があるが、これまでに実験してきた範囲では、pHが高いことと、嫌気状態を作れることが幸いして、腐朽の問題はあまり大きくならないかもしれないという感触を得ている。

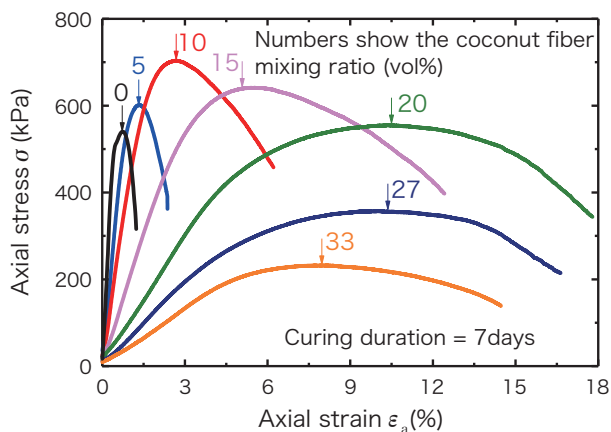


図5 木屑(ココヤシ繊維)と製鋼スラグを混合した時の一軸圧縮試験における応力ひずみ関係(養生7日)

## 4. まとめ

我が国のリサイクル材料活用技術は、これまで、再利用できずに困っているものを加工して使えるものにするというスタンスのものが多かったと思う。これが、アメリカでは、今は捨ててしまっているけど、うまく使うとメリットが大きいからリサイクルするという発想が多いということがかつてアメリカの研究者に聞いたことがある。つまり、日本ではマイナスをできるだけ少なくという思想であるが、アメリカの状況は、マイナスのものは捨ててプラスのものをさらに大きなプラスへという感じであろうか。アメリカでやっているような研究は日本では別にリサイクルの研究とは言わないと思う。結局、日本の方がより厳しい条件で必要に迫られて技術開発していることになる。結局はこういった厳しい環境にさらされることで技術は進歩するのであり、技術者としてはありがたい環境が与えられているようである。

近年では、カーボンニュートルの観点や海底火山噴火に伴う軽石処分などが副産物の有効利用の課題と関連して来ているなど、今後とも新たな技術の開発が期待されている。

### 【参考文献】

- 1) 菊池喜昭：建設副産物等の有効活用をめぐる技術開発の動向と展望，一般財団法人 沿岸技術研究センター機関紙，No.47，pp. 19-21，2017.
- 2) 公益社団法人地盤工学会：災害廃棄物から再生された復興資材の有効活用ガイドライン，公益社団法人地盤工学会，96 p.，2014.
- 3) 例えば、菊池 喜昭，永留 健，御手洗 義夫：ゴムチップ混合固化処理土の破壊メカニズムとせん断時の透水性の変化，地盤工学ジャーナル，1巻2号，pp.19-32，2006.
- 4) [https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_fr5\\_000054.html](https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr5_000054.html)
- 5) Tomotaka Yoshikawa, Yoshiaki Kikuchi, Shohei Noda, Yuka Kakahara, Akihiro Oshino : ICE Virtual Library, Environmental Geotechnics, pp. 1-9, 2021. DOI:10.1680/jenge.19.00233