

リサイクル特集

故紙を混ぜて建設汚泥をリサイクル — 繊維質固化処理土の強度特性と施工事例 —

高橋 弘・森 雅人

建設汚泥等の高含水比泥土の新しい再資源化工法として、故紙破砕物と高分子系改良剤を用いた繊維質固化処理土工法を開発した。本工法により生成される土砂は、破壊ひずみおよび残留強度が大きく、かつ劣化しない高耐久性を示す。また本工法は既に70を超える施工実績を有しており、平成15年12月には、国土交通省のテーマ設定技術募集システム「浚渫土砂のリサイクル技術」に選定されるなどの成果を挙げている。本報文では、繊維質固化処理土工法の概要、繊維質固化処理土の強度特性および施工事例について簡単に紹介する。

キーワード：建設汚泥、リサイクル、故紙破砕物、高分子系改良剤、強度特性、高耐久性

1. はじめに

建設汚泥は、建設工事に伴って発生する掘削汚泥や微細な泥状土などであり、そのままでは盛土などに直接流用できない。したがって、年間1,000万トン近くの建設汚泥が排出されているにもかかわらず、建設汚泥のリサイクル率は低く、ごく一部再利用されるものを除き、大部分は産業廃棄物である「汚泥」として中間処理施設で脱水処理を施すか、あるいは直接最終処分場に持込まれている。

しかしながら、処分場の不足・遠隔化は深刻な問題であり、輸送コストの負担から建設汚泥の不法投棄が後を絶たず、地球環境への汚泥負荷の影響が大きな問題となっており、建設汚泥の有効利用が望まれているのが現状である。

これまでの建設汚泥の処理法としては、天日乾燥、脱水処理、セメント系固化材による固化処理などが挙げられる。しかし、天日乾燥では仮置き場所と処理に長時間を要し、また脱水処理では大きな脱水施設が必要であるとともに、濁水処理の問題などが依然として残る。

固化処理工法はセメント系固化材を建設汚泥に混合させ、固化する工法であるが、本工法により生成される土砂（以下、固化処理土と記す）は、コンクリートのように硬くてもろい性質がある。例えば、泥水とセメント系固化材を混合し流動化させ、まだ固まらないコンクリートのようにポンプなどで流し込んで埋戻しなどの施工を行う「流動化処理土工法¹⁾」では、生成

される土砂（固化処理土）は、一軸圧縮試験における破壊ひずみが通常土より小さく、品質改良が十分とは言えず、盛土材としての用途に適さない場合が多々ある。例えば村田²⁾は、「流動化処理土工法の弱点は、処理土に粘り強さが無く、外力が加わると小さなひずみで破壊に至ることである」と述べている。

さらに固化処理土は乾湿繰返しによる劣化が激しいと言われている^{3),4)}。そのため、固化処理土を盛土材などとして使用する場合には、外部に露出しないように固化処理土を山土などで被覆する必要があると指摘されている⁴⁾。つまり、固化処理土は品質改良が十分であるとは言い難い。

そこで著者らは、十分な品質特性を有する盛土材料として汚泥の再資源化をはかるために、建設汚泥に繊維質物質である故紙破砕物と高分子系改良剤を添加し、高含水比泥土を再資源化する技術を開発した⁵⁾。本工法では、汚泥に故紙を投入し、故紙に自由水の大部分を吸水させるため、高含水比泥土に対しても大量のセメント系固化材を添加する必要がなく、かつ高分子系改良剤の添加量も少なく済むため処理費の大幅な低減につながるとともに、処理土の内部に繊維質を含むため、破壊ひずみの大きい粘り強い土砂（以下、繊維質固化処理土と記す）の生成が可能になる。

本報文では、新しい処理工法（以下、繊維質固化処理土工法と記す）の概要と繊維質固化処理土の強度特性およびいくつかの施工例について報告する。

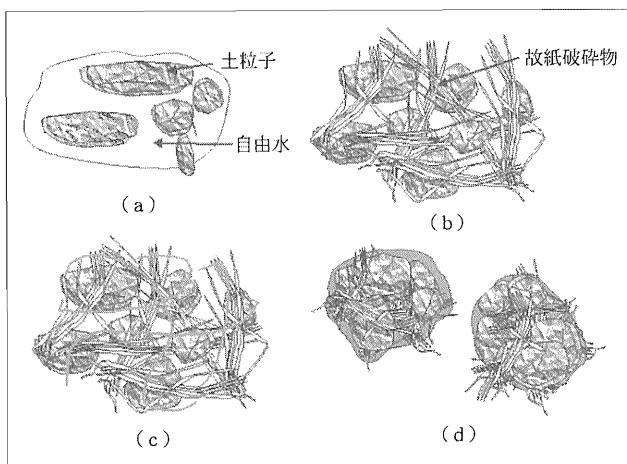
2. 繊維質固化処理土工法の原理

繊維質固化処理土工法の原理を簡単に記述すると以下ようになる。

- ① 高含水比泥土は、図一1 (a) に示されるように土粒子が自由水の中で自由に動き回れる状態であるため、若干の降伏応力を持っているが、流体としての挙動を示す。このため高含水比泥土の運搬はパイプラインかバキュームカー等によらなければならない。
- ② この状態の高含水比泥土に吸水性の高い新聞の故紙のような繊維質物質を混入すると、図一1 (b) に示すように土粒子の周りの自由水が繊維質物質に吸水され、見かけの含水比が低下する。繊維質物質の添加量は含水比に応じて変化させる。
- ③ さらに高分子系改良剤を添加し攪拌すると、図一1 (c) に示すように水溶性の高分子が溶解し、土粒子の表面に吸着する。土粒子間の架橋・吸着効果により団粒化構造の中に自由水を封じ込め、流動性を失わせ団粒状態となる。
- ④ 最後に助剤を混合し、攪拌機により泥土を攪拌してせん断を与えると、土粒子が団粒化して保水性の高い土砂が生成する。

処理土を植生土壌として再利用する場合、セメント系固化材を混入する必要はないが、盛土材として利用するため、ある程度の強度を必要とする場合は、目的とする強度に応じて、さらに必要量のセメント系固化材を添加する。

以上の工程により、高含水比泥土が繊維質固化処理土として再資源化される。



図一1 繊維質固化処理土工法の原理

3. 繊維質固化処理土の安全性

本工法で使用する高分子系改良剤および助剤は地中の微生物により完全に分解されてしまうので、地球環境に負荷を与えないことが既に確認されており⁶⁾、また故紙に使用されているインキに関しては、近年、植物油を用いた環境に優しい「エコインキ」が開発され、既に使用されており⁷⁾、このインキも毒性が無い。

故紙はほとんどがセルロースから構成されており、生物学的に難分解性物質である。セルロースを分解する生物は一般的にキノコや放線菌であるが、これらの生物は地下深く（1m以深）には生息していない⁸⁾。また処理土の透水性はかなり低いため、周囲から浸入水とともに微生物が流入する可能性も低い。したがって、本研究で提案する繊維質固化処理土は、定性的ではあるが、地球環境に対して安全な土砂と言える。

4. 繊維質固化処理土の強度特性

(1) 圧縮強度

始めに試験に使用する供試体を作製した。供試体の作製には、模擬泥水を使用した。作泥方法は、粘土とシルトを40：60（乾燥質量比）で混合し、それに加水調整して含水比105%および150%の汚泥を作製した。供試体の作製は、「建設汚泥改良土の利用に関する基礎的研究⁹⁾」に準じた方法を用いた。その概要は以下に示す通りである。

- ① 粘土とシルトを40：60（乾燥質量比）で混合し、加水調整して含水比を調整する。
- ② 繊維質固化処理土の作製には、含水比を調整した汚泥に故紙破砕物、高分子系改良剤および助剤を加え、攪拌・混合する。さらに所定のセメント系固化材を加え、混合する。固化処理土の作製には、泥水にセメント系固化材のみを加え、攪拌・混合する。
- ③ 初期養生として、上述の処理土を容器に入れて密封し、 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ で3日間静置する。
- ④ 固化処理土に対しては、初期養生後、処理土をときほぐし、その後、供試体を作製する。供試体の作製には、直径5cm、高さ10cmのモールド（供試体作製容器）を使用した。1軸圧縮試験に使用する供試体の寸法は直径5cm、高さ10cmとし、また圧裂引張り試験に使用する供試体の寸法は直径5cm、厚さ2.5cmとした。
- ⑤ 供試体から水分が蒸発しないようにモールドを

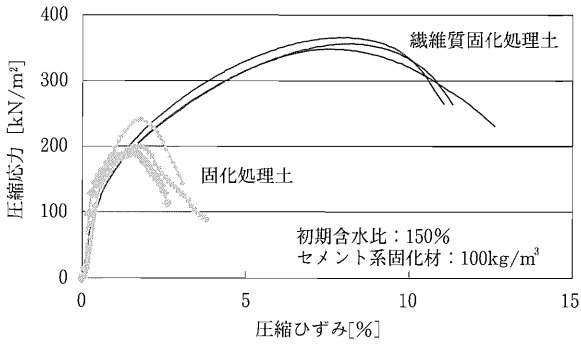
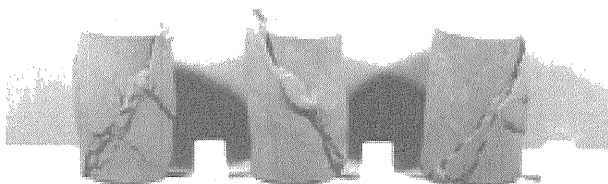


図-2 1軸圧縮試験結果の一例

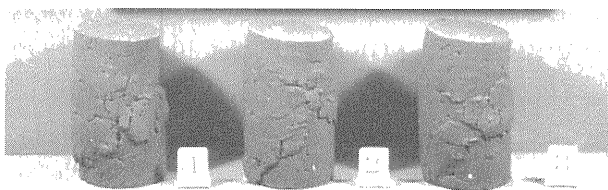
密封材で被覆し、20±3℃で28日間養生する。

作製された供試体を材料試験機にセットし、1軸圧縮試験を実施した。図-2に1軸圧縮試験の結果の一例を示す。図-2の縦軸および横軸は、それぞれ圧縮応力および圧縮ひずみを示している。固化処理土の場合、荷重を増加させていくと圧縮ひずみも大きくなるが、1~2%の圧縮ひずみで圧縮応力は最大値を示し、破壊に至っていることが分かる。これに対して、繊維質固化処理土の場合、破壊ひずみは7~8%と大きく、また破壊後も圧縮応力が急激に減少することなく、残留強度も大きいことが分かる。つまり、繊維質固化処理土は、セメント系固化材を用いた従来の固化処理土に比べて破壊に至るまでのひずみ量が大きく、残留強度が大きく粘り強い性質を示すことが大きな特徴である⁵⁾。

図-3に試験後の供試体の破壊の様子を示す。固化処理土は明確な破壊面が現れており、岩石やコンクリートの破壊形態とよく似た形状を示している。これに対して繊維質固化処理土の場合、明確な破壊面が現れず、全体的に膨らんだいわゆる樽型変形を示している。これは、内部に繊維質物質を含むため、土粒子



固化処理土の破壊の様子



繊維質固化処理土の破壊の様子

図-3 圧縮試験後の供試体の様子

と繊維質が複雑に絡み合い、破壊を生じ難くしているのと同時に繊維質を通して応力が分散されるためであると考えられる。

(2) 引張り強度

図-4に圧裂引張り試験の結果の一例を示す。圧裂引張り試験は、図-5にその概略を示すように、供試体の直径方向に圧縮荷重をかけ、その荷重により供試体が左右に引張られる時の強度を求めるものである。図-4の縦軸は圧縮荷重を、横軸は圧縮方向のひずみ量を示す。この図に示されるように、引張り強度も圧縮強度と同じ傾向を示している。すなわち、固化処理土は小さなひずみで破壊に至るが、繊維質固化処理土は破壊に至るまでのひずみ量が大きいことが分かる。すなわち、繊維質固化処理土は従来の固化処理土に比べて、外部からの荷重に対して大きな変形に耐え得ることを示している。

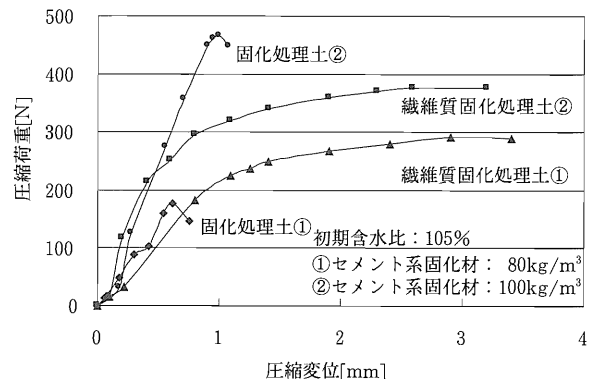


図-4 圧裂引張り試験結果の一例

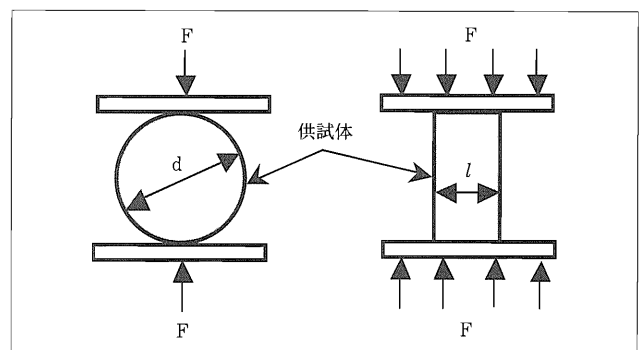
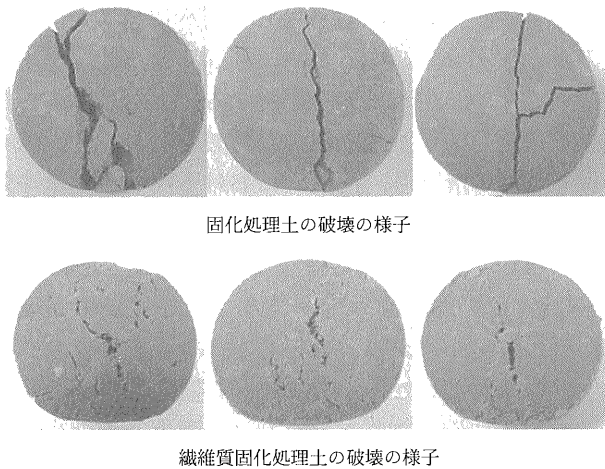


図-5 圧裂引張り試験の概要

図-6に試験後の供試体の破壊の様子を示す。圧裂引張り試験の場合も圧縮試験の場合と同様に固化処理土は明確な破壊面が観察され、また供試体もほぼ円形を保っていることから、小さな変形で破壊に至ってしまったことが分かる。これに対して繊維質固化処理土は明確な破壊面が見られず、また全体的に押しつぶさ



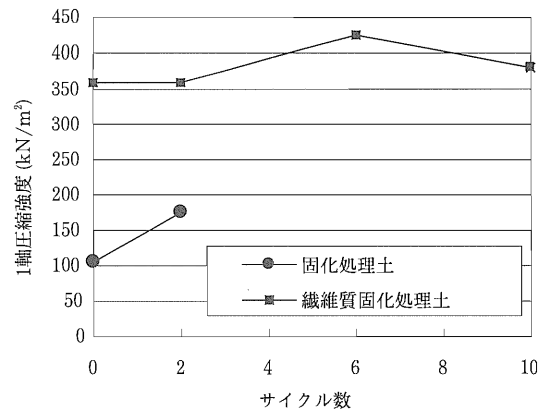
図一六 引張り試験後の供試体の様子

れている。これはこのような大きな変形が生じるまで破壊に至っていないことを示すものであり、繊維質固化処理土が従来の固化処理土に比べて、いかに粘り強い性質を示すかが分かる。

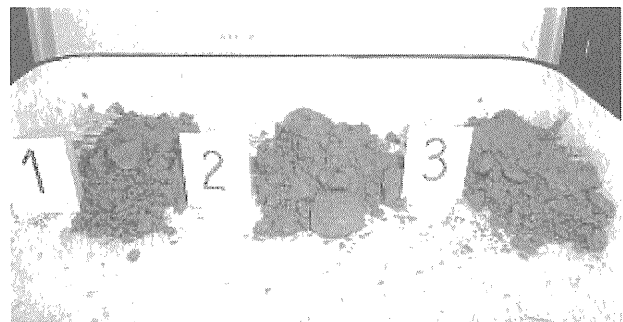
(3) 乾湿繰返し試験による耐久性評価

セメント系固化材による従来の固化処理土は乾湿繰返しにより劣化することが報告されている^{3),4)}。すなわち、固化処理土は乾燥過程において収縮クラックが生じ、乾湿のサイクル数が増加するにつれて塊状の崩壊が発生し、1軸圧縮強度も減少する。そのため、固化処理土を実際に使用する場合は、乾湿の影響をなるべく受けないように、外部に暴露しないように山土などで被覆すべきであると報告されている。繊維質固化処理土に対しても乾湿繰返しによる耐久性を評価するために、「建設汚泥の高度処理・利用技術の開発」に準拠して乾湿繰返し試験を実施した。なお、この際、比較のため固化処理土も同時に作製し、乾湿繰返し試験を実施した。試験では、40℃ 炉乾燥 2 日間、20℃ 水浸 1 日間の合計 3 日間を 1 サイクルとして 10 サイクル繰返し、所定のサイクル毎に 1 軸圧縮試験を行い、1 軸圧縮強度の変化を調べた。

図一七にサイクル数と 1 軸圧縮強度の関係を示す。固化処理土は 2 サイクルまでは 1 軸圧縮試験を実施することができたため、1 軸圧縮強度の値がプロットされているが、供試体の劣化が激しく、3 サイクル以上では全ての供試体が崩壊したため、1 軸圧縮試験を実施することができなかった。これに対して繊維質固化処理土は 10 サイクル終了後も供試体にクラックの発生や劣化はほとんど見られず、1 軸圧縮強度も初期の強度を維持しており、強度の減少も見られない。すなわち、繊維質固化処理土は乾湿繰返しに強く、ほとん



図一七 乾湿繰返し試験におけるサイクル数と 1 軸圧縮強度との関係



2 サイクル終了後の固化処理土



10 サイクル終了後の繊維質固化処理土

図一八 乾湿繰返し試験終了後の供試体の様子
(初期含水比はともに 105%, セメント系固化材添加量は 100 kg/m³)

ど劣化しないことが確認された。このことは、固化処理土のように使用箇所を限定する必要がないことを意味する。なお、図一八に乾湿繰返し試験終了後の供試体の写真を示す。

5. 施工事例

(1) 流域下水道 尾花沢大石田幹線推進工事のポンプ場盛土利用 (山形県発注, 図一9)¹⁰⁾

最上川を横断する推進工事と中継ポンプ場工事から発生した自硬性泥土と非自硬性泥土全量を再利用した事例で、

- ① 繊維質固化処理土は粘り強く、高耐久性であることから、田圃との境にコンクリート擁壁を作ら

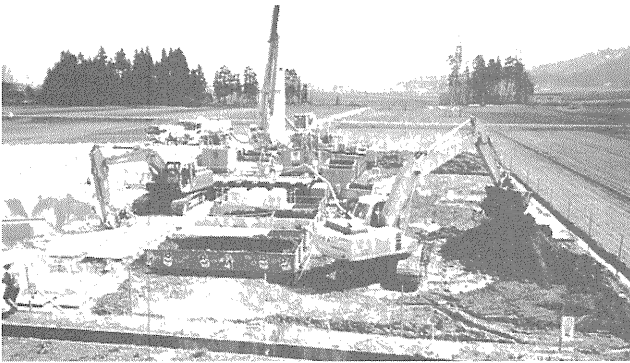


図-9 繊維質固化処理土工法における施工の様子
(左に見えるのがミキサを装着したバックホウ。右のバックホウは、出来上がった処理土を脇に仮置きしている)

ない、

- ② 無代で盛土材として再利用、
- ③ 自硬性処理土の特性で草が生えない、
- ④ 自硬性泥土の脱水・運搬・管理型最終処分場への処理費用との差額および非自硬性泥土の処理費用との差額が生じたため、4,000万円以上のコスト削減を図ることができた、

などの特長がある。

(2) 高含水比土による盛土施工に関する技術：浜尾遊水地関連の築堤工事（国土交通省東北地方整備局福島河川国道事務所発注，図-10）

国土交通省東北地方整備局では、民間会社等が保有する優れた新技術や特許技術等を東北地方整備局発注工事に活用し、コスト削減やリサイクル等を推進するため、平成14年度に4つの技術を募集した。その内の1つである「高含水比土による盛土施工に関する技術」に、繊維質固化処理土工法（応募時の名前は、ボンテラン工法）が採用され、福島県須賀川市の浜尾遊水地の工事現場で施工が行われた。

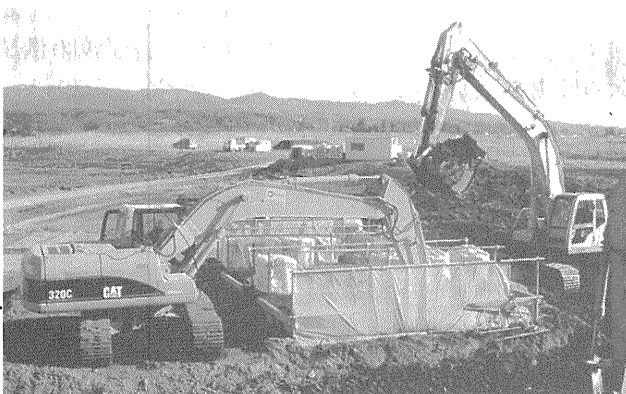


図-10 浜尾遊水地における施工の様子

(写真右のバックホウで高含水比の原泥を掘削しピットに入れ、左のバックホウのアタッチメントを攪拌用のミキサに替え、故紙と原泥を混合・攪拌する)

本工事は、阿武隈川流域の浜尾遊水地および下流地区の洪水被害を軽減するため、期間、経済性、実現性を勘案しつつ、遊水地内を掘削するとともに、この掘削土を利用して遊水地関連の堤防を整備し、貯水量を確保するものであり、河川等における高含水比土を効率的かつ経済的に築堤施工する技術が求められた。

平成14年度の工事では、ボンテラン工法により3,000m³が処理され、ボンテラン土を用いて築堤工事が行われたが、がり侵食を全く受けず、クラックの発生も見られないことから、繊維質固化処理土の高耐久性が改めて検証されたとともに、現場適用性にも優れていることが確認された。

(3) 仙台東部共同溝工事（国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所発注，図-11）

当工事は、仙台市宮城野区小田原地内から青葉区本町間の一般国道45号道路下にシールド工法により、共同溝1.37kmを構築するものである。当シールドは宮城野区小田原地内に発進立坑、発進設備を設置し、国道45号道路下を掘進するが、発進立坑の構築において地中連続壁を造成する際、セメントミルクを使用することから自硬性汚泥が発生する。そこで、建設現場におけるゼロエミッションを目指し、汚泥処理に繊維質固化処理土工法が採用された。当現場では、夜間の立坑掘進工事から排出される汚泥をピットに貯え、昼間に繊維質固化処理土工法を行うが、当現場は仙台市中心部に近い工事現場であるため、限られた敷地内に生成された土砂を仮置きするだけのスペースの余裕はない。そこで、処理が終了する時点でダンプトラックが待機しており、処理後、直ちにダンプに荷積みし、



図-11 仙台東部共同溝工事現場の全景

(本現場は、先の2つの施工現場と異なり、市街地中心部近くに位置し、限られた作業面積しか取れないため、重機が効率良く整然と配置されている。右上奥が繊維質固化処理土工法の実施場所。混合・攪拌およびダンプへの積込みを1台のバックホウで行うため、ミキシングバケットが装着されている)

4号線バイパス拡幅工事現場に運搬する方式が採用されており、その結果、完全なゼロエミッションを実現した。

当現場は、限られた敷地内に効率的に重機が配置され、また常に振動・騒音を計測し、低振動・低騒音施工に細心の注意を払いながら周辺環境にも考慮し、かつ廃棄物を出さないゼロエミッションを実現しており、これからの環境調和型建設現場の見本とも言うべき現場になっている。

6. むすび

建設汚泥リサイクル率の向上を目指して新たに開発された繊維質固化処理土工法（ボンテラン工法）は、生成される土砂が土質学的に優れた性質を有することから、既に80以上の実績がある。また平成15年12月には、国土交通省のテーマ設定技術募集システム「浚渫土砂のリサイクル技術」に選定されており、今後、国の直轄工事に活用されることになっている。

ところで、上述した優れた性質を生み出している最大の要因は、繊維質固化処理土を生成する過程で混合する故紙破砕物にある。再資源化処理の過程で高含水比泥土に繊維質物質である故紙破砕物を十分に攪拌・混合するため、生成される繊維質固化処理土では土粒子と繊維質が互いに絡み合った複雑な構造体を形成する。この土粒子と繊維質が絡み合った構造体自体で十分に山土などの一般土以上の強度を発現するが、さらにこの繊維質を通して応力が分散されるため、地震時のような大きな動的荷重がかかっても、地盤材料全体に応力が分散され、集中応力を受けることがない。このことが高い破壊ひずみを生み出し、粘り強い土を生成する。粘り強い土であるということは地震時の大きな繰返し荷重に十分耐え得ることを意味しており、以上の結果より、繊維質固化処理土は地震に強く、地震対策用地盤材料として十分使用可能であり、かつ効果的な地盤材料であると判断できる。今後、動的荷重による繊維質固化処理土の変形特性や液状化に対する検

討などを予定しているが、これらの結果については別途報告したい。

最後に、本工法が全国的に広く普及することを期待して本報の結びとする。

JCM A

《参考文献》

- 1) 久野悟郎：土の流動化処理工法，pp.1-19，1997，技報堂出版
- 2) 村田 修：流動化処理土工法，土木学会誌，Vol.87，4月号，pp.25-28，2002
- 3) 小川伸吉，鮑本一己，藤崎勝利，椿 雅俊：建設汚泥改良土の利用に関する基礎的研究（その9）—乾湿繰り返しによる性状変化—，第31回地盤工学研究発表会講演要旨集，pp.303-304，1996
- 4) 松原榮一，他7名：ため池堆積土を用いた軽量地盤材料の特性，軽量地盤材料の開発と適用に関するシンポジウム論文集，pp.183-186，2000
- 5) 森 雅人，高橋 弘，逢坂昭治，堀井清之，片岡 勲，石井知征，小谷謙二：故紙破砕物と高分子系改良剤を用いた新しい高含水比泥土リサイクル工法の提案と繊維質固化処理土の強度特性，資源・素材学会誌，Vol.119，No.4-5，pp.155-160，2003
- 6) 藤井國博，山口浩一，久保井 徹，矢崎仁也：合成凝集剤の土壌環境に与える影響（Ⅱ）土壌中でのポリアクリルアミド誘導体の分解，国立公害研究所報告，第14号，pp.21-31（1980）
- 7) 読売新聞2002年10月11日付朝刊（海外で植林/環境配慮への取り組み/古紙リサイクル拡大/植物油使用エコインキ）
- 8) 金野隆光，前田乾一，大久保隆弘：土つくりの原理，p.17，1976，（社）農山漁村文化協会
- 9) 小川伸吉，鮑本一己，関 眞一，吉成寿男：建設汚泥改良土の利用に関する基礎的研究，第30回土質学会研究発表会講演要旨集，pp.2221-2222，1995
- 10) 石井知征，高橋 弘：ゼロエミッションとコスト縮減—建設汚泥を再資源化するボンテラン工法，月刊下水道，Vol.26，No.8，pp.19-23，2003

【筆者紹介】

高橋 弘（たかはし ひろし）
東北大学大学院
環境科学研究科
環境科学専攻
教授



森 雅人（もり まさと）
有限会社森環境技術研究所
所長

