

軟弱泥土を高機能性地盤材料に再資源化

ボンテラン工法の原理と特徴

高橋 弘

筆者らは、高含水比泥土を十分な品質特性を有する地盤材料に再資源化することを目的として、泥土に繊維質物質である古紙破砕物とセメント系固化材を添加し、良質な地盤材料に再資源化する新しい技術(ボンテラン工法—以下「本工法」という)を開発した。本工法で生成される土砂は、1) 破壊強度および破壊ひずみが大きく、2) 乾湿繰り返しに対する耐久性が高く、3) 動的強度が高く液状化し難いなどの特徴を有するため、既に数多くの施工実績を有する。本報では、「本工法」の原理と特徴および東日本大震災関連を中心にした施工事例を報告する。

キーワード：ボンテラン土、繊維質物質、高含水比泥土、再資源化、耐震性地盤材料

1. はじめに

建設汚泥、浚渫土(ヘドロ)、浄水発生土などは一般に含水比が高く、直接利用が困難であるため、リサイクル率が低く、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ち込まれている。また土砂災害現場で発生する大量の軟弱泥土も基本的には「厄介者」として除去・処分されることが多い。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、地球環境への汚濁負荷の影響が大きな問題となっており、高含水比泥土の有効利用が望まれている。高含水比泥土に対する従来の処理法としては、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が、いずれも品質改良が十分であるとは言えないのが現状である¹⁾。

そこで筆者らは、高含水比泥土を十分な品質特性を有する地盤材料に再資源化することを目的として、泥土に繊維質物質である古紙破砕物とセメント系固化材を添加し、良質な地盤材料に再資源化する新しい技術である「本工法」を開発した²⁾。「本工法」を用いると、高含水比泥土や軟弱泥土を機能性の高い地盤材料に再資源化できるため、「本工法」にとって高含水比泥土や軟弱泥土はもはや「厄介者」ではなく、「良質な地盤材料を生み出す原材料」である。

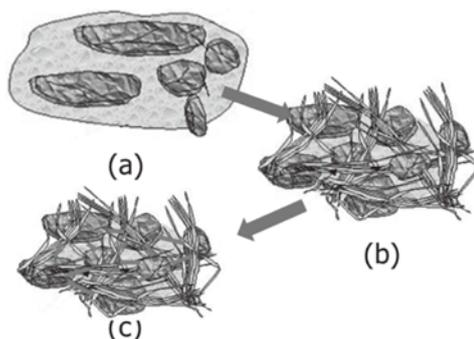
「本工法」の最大の特徴は、泥土に繊維質物質である古紙を添加することであり、この繊維質が地盤材料

としての様々な優れた特性を生み出している。本報では「本工法」の原理と特徴について紹介する。

2. 「本工法」の原理

「本工法」の原理を簡単に記述すると以下のようになる。

- ①高含水比泥土は、図—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古紙のような繊維質物質を混入すると、図—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。
- ③さらにセメント系固化材を添加し攪拌すると図—1



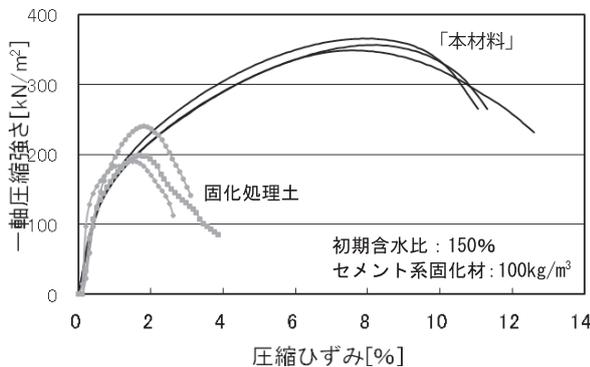
図—1 「本工法」の原理

(c) のようにエトリンガイトが生成し、機能性の高い土砂（ボンテラン土—以下「本材料」という）が生成される。

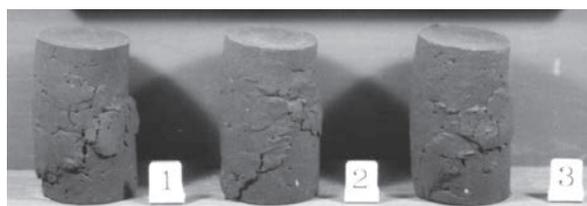
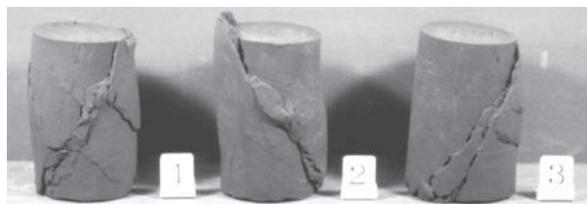
3. 「本材料」の優れた特徴

(1) 高い破壊強度および破壊ひずみ

「本材料」を盛土材・埋め戻し材として使用するためには、「本材料」の強度特性を把握しておく必要がある。そこで、「本材料」を用いて直径 50 mm、高さ 100 mm の供試体を作成し、一軸圧縮試験を実施した²⁾。図一 2 に一軸圧縮試験の結果の一例を示す。従来の固化処理土の場合、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、「本材料」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、「本材料」は、セメント系固化材のみを用いた従来の固化処理土に比べて破壊強度のみならず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



図一 2 一軸圧縮試験結果の一例



写真一 1 圧縮試験後の供試体の様子

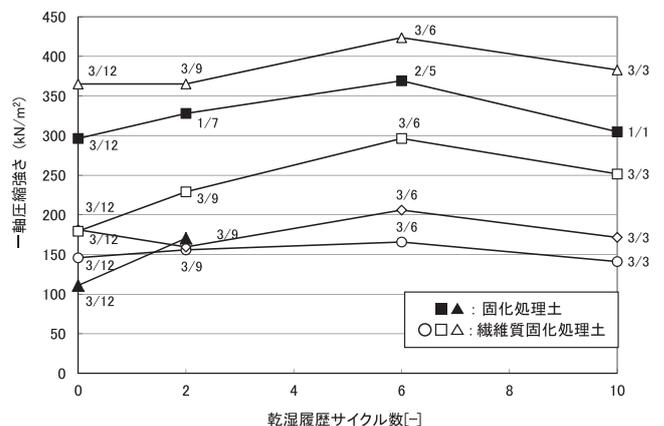
示すことが大きな特徴である。

写真一 1 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「本材料」の場合、明確な破壊面は現れておらず、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。

(2) 乾湿繰り返しに対する高い耐久性

従来の固化処理土は乾湿繰り返しにより劣化することが報告されている。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されている^{3), 4)}。そこで「本材料」に対しても乾湿繰り返しによる耐久性を評価するために乾湿繰り返し試験を実施した⁵⁾。

図一 3 にサイクル数と一軸圧縮強さの関係を示す。▲印で示す固化処理土は、2 サイクルまでは供試体が存在し、一軸圧縮試験を実施することができたため、一軸圧縮強さ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、一軸圧縮試験を継続することができなかった。これに対して「本材料」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、一軸圧縮強さも初期の強度を維持しており、強度の減少も見られない。このことは、「本材料」は乾湿繰り返しに対する耐久性が高く、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、写真一 2 に乾湿繰り返し試験終了後の供試体の写真を示す。



図一 3 乾湿繰り返し試験におけるサイクル数と一軸圧縮強さとの関係



2 サイクル終了後の固化処理土



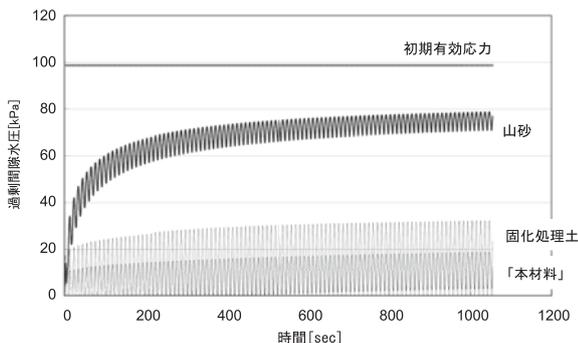
10 サイクル終了後の「本材料」

写真一 2 乾湿繰り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）

(3) 高い動的強度（耐震性地盤材料）

2003年9月に発生した十勝沖地震では、下水道管渠やマンホールの浮上がり、管渠埋戻し部の路面沈下など下水道施設に多大な被害が報告されているが、十勝沖地震による下水道施設の被害状況に関する現地調査では、改良土を埋戻し材として使用した箇所では被害が少ないなど、改良土の有効性が指摘されている⁶⁾。「本材料」は、土砂内部に繊維質を含むため、動的強度にも優れていると考えられる。「本材料」が高い動的強度を有していれば、耐震性地盤材料としての適用が可能であり、適用範囲が大きく向上する。そこで、繰り返し三軸圧縮試験を行い、「本材料」の動的強度について検討した。

図一4は、山砂、固化処理土、「本材料」を用いて繰り返し三軸圧縮試験を行った時の結果を示している



図一4 繰り返し三軸圧縮試験の結果の一例

7)。横軸は試験を開始してからの経過時間であり、縦軸は過剰間隙水圧を示している。過剰間隙水圧の上昇が大きいものほど液状化しやすく、動的強度が小さいことになる。固化処理土は山砂に比べて大きな動的強度を有しているが、「本材料」は過剰間隙水圧の増加がさらに小さく、固化処理土よりもさらに大きな動的強度を有していることが分かる。すなわち、「本材料」は静的強度および動的強度ともに大きく、変形特性にも優れていることから耐震性地盤材料として最適であると言える。事実、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では多くの地盤が甚大な被害を受けたにもかかわらず、「本材料」で施工された箇所はほとんど被害が見られず、極めて高い耐震性が証明された。詳細については後述する。

4. 「本材料」を用いた施工事例

(1) 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）

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、コスト縮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、「本工法」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。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、「本工法」により3,000 m³が処理され、「本材料」を用いて堤防の一部を構築する築堤工事が行わ



写真一3 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ーに変え、古紙と原泥を混合・攪拌する）

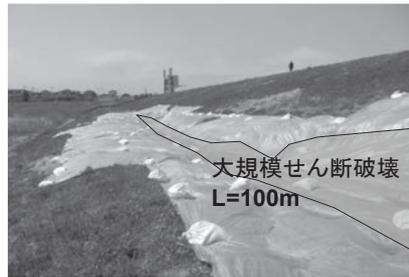


写真-4 現地発生土による築堤箇所は多くのせん断破壊が生じた

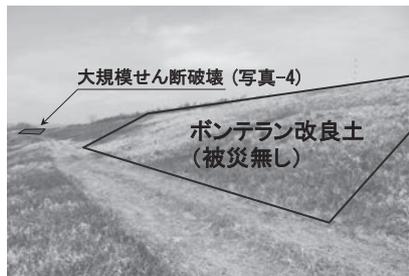


写真-5 「本材料」による築堤箇所は被害が生じておらず、高い耐震性が証明された



れた（写真-3）。堤防の大部分は現地発生土を用いて構築されたが、この堤防部分は2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により大きく破壊されたのに対し（写真-4）、「本材料」で構築した堤防部分は全く被害が見られず（写真-5）、「本材料」は高い耐震性を有する地盤材料であることが巨大地震を通して明らかになった。現在、被災地では復旧・復興工事が精力的に行われているが、堤防や高盛土道路などの重要土構造物の構築にあたっては、「本材料」の使用を推奨したいと考えている。

(2) 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）

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ものであるが、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「本工法」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「本工法」により処理を行うが、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かった。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、4号線バイパス拡幅工事現場に運搬する方式が採用さ



写真-6 仙台東部共同溝工事現場の全景（本現場は、写真-3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「本工法」の実施場所。混合・攪拌およびダンプへの積み込みを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）

れ、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、これからの環境対応型建設施工の見本とも言うべき現場を実現した（写真-6）。

なお、平成19年度には、この共同溝を延長する工事が新たに発注されたが、その特記仕様書の中で発生土処理に対して「本工法」が「発注者指定技術」として明記された。実際の工事では発生土の含水比が想定よりも低かったため、「本工法」の適用にまでは至らなかったが、「発注者指定技術」としての明記は、「本工法」の特徴が評価された結果であると考えている。

(3) 芋川河道閉塞緊急対策工事（国土交通省北陸地方整備局濁沢砂防事務所発注）

平成16年10月23日17時56分、新潟県中越地方で震度6強の地震が発生した。新潟県小千谷市・旧山古志村・川口町・長岡市・堀之内町などでは、大きな揺れや地すべり・斜面崩壊により、住宅や道路・鉄道・河川施設などで大きな災害が発生するとともに、土砂崩れ等により芋川河道閉塞が生じ、大量の軟弱土が発生した。迅速な災害復旧のためには、現場までのアクセス道路をできるだけ早急に整備することが必要不可欠であることから、「本工法」が旧山古志村の災害復旧工事に採用され、土砂崩れ等で発生した現地の軟弱土砂を改良し、改良土を資材運搬路・仮設ヤード・国道291号迂回路に再利用した⁸⁾。このように「本工法」は災害復旧現場でも活用できることが証明された（写真一7）。



写真一7 土砂災害により発生した大量の軟弱土に古紙破砕物を混合している様子。処理土は強度発現が早いので、迅速な復旧工事に大きく寄与した。

(4) 津波堆積物の再資源化による人工地盤造成

東日本大震災で発生したガレキは、宮城県、岩手県および福島県の3県合計で約2,500万トンと推定され、これとほぼ同程度の津波堆積物が生じていると言われている。これらの津波堆積物を全て埋め立て処分することは不可能であり、できるだけ再資源化し、有効活用することが望まれている。上述したように、「本工法」は災害現場で発生した軟弱泥土を原位置で再資源化し、早期の復旧に貢献した実績があることから、「本工法」は津波堆積物にも適用可能であると考え、「本工法」を津波堆積物に応用し、耐震性の高い地盤材料に再資源化する試験施工を実施している。これまでに宮城県塩竈市、仙台市、気仙沼市、名取市および岩手県大船渡市で試験施工を実施した。塩竈市では、最終処分場に搬入された津波堆積物を「本工法」で再資源化し、廃棄物の覆土材に再利用した。仙台市では、農地に堆積した津波堆積物をブルドーザで掘削し、改良

した「本材料」を用いてミニ防潮堤を構築した。気仙沼市では、終末処分場のチップ混じりの津波堆積物を「本工法」で再資源化し、地盤沈下地区の嵩上げに再利用した。名取市では広浦湾底部に堆積した津波堆積物を浚渫し、「本工法」で再資源化した。改良した「本材料」は現在、施工場所に仮置きされている。大船渡市では、水田に堆積した津波堆積物をパワーショベルで掘削し、2次選別所に搬入した後、「本工法」で再資源化した。改良した「本材料」は浄化槽撤去後の埋め戻し材として再利用された。2012年、宮城県は砂押川を遡上した津波が残した河川底部の津波堆積物を浚渫・再資源化し、改良土を堤防補強盛土材に再利用する工事を発注したが、その特記仕様書に「本工法」の使用が明記された。津波堆積物の再資源化に「本工法」が本格採用された初めての事例であり、「本工法」の今後の展開が期待される。写真一8は浚渫土の陸揚げ状況であり、写真一9は「本工法」による再資源化の様子である。



写真一8 浚渫土の陸揚げ



写真一9 「本工法」による再資源化

5. おわりに

ボンテラン工法の最大の特徴は、高含水比泥土に繊維質物質である古紙破砕物を添加・混合することであ

る。本工法は日本素材物性学会論文賞や資源・素材学会論文賞を受賞するなど学術的に評価されてきており、また国土交通省発注の工事をはじめ、全体の現場施工実績も340件、47万 m^3 を越え、国土技術開発賞、産官学連携功労者表彰・国土交通大臣賞、日刊工業新聞社モノづくり大賞、日立環境財団環境賞を受賞するなど社会的にも高い評価を受けている。ボンテラン工法の適用範囲が拡大することを期待するとともに、ボンテラン工法が全国的に広く普及することを祈念して本報のむすびとする。

JCMMA

《参考文献》

- 1) 高橋 弘：掘進工事にもなう掘削排土対策の現状と今後の課題，月刊推進工事，Vol.20, No.4, pp.3-8, 2006.
- 2) 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：古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，Journal of MMIJ (資源・素材学会誌)，Vol.119, No.4-5, pp.155-160, 2003.
- 3) 松原 榮一，矢田 義輝，朝日 彰弘，後藤 年芳，清水 和也，垣本 泰臣，須田 清隆，小野 正樹：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発表論文集，pp.183-186, 2000.

- 4) 小川 伸吉，杉山 雅彦，横山 勝彦，山本 博之：建設汚泥改良土の利用に関する基礎的研究（その9）一乾湿繰り返しによる性状変化一，第31回地盤工学研究発表会講演要旨集，pp.303-304, 1996.
- 5) 森 雅人，高橋 弘，熊倉 宏治：繊維質固化処理土の乾湿繰り返し試験による耐久性に関する実験的研究，Journal of MMIJ (資源・素材学会誌)，Vol.121, No.2-3, pp.37-43, 2005.
- 6) 藤生 和也，行方 馨，田村 敬一，佐々木 哲也，石原 雅則：平成15年十勝沖地震による下水道施設の被害状況に関する現地調査，月刊下水道 Vol.26 No.14 pp.39-44, 2003.
- 7) 高橋 弘，高橋 研太，森 雅人：繊維質固化処理土の動的強度に関する実験的研究，第4回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.1-5, 2008.
- 8) 高橋 弘，森 雅人，柴田 聡，佐々木 和則：繊維質固化処理土工法を用いた芋川河道閉塞緊急対策工事について，第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.19-24, 2006.

【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
教授



「建設機械施工ハンドブック」改訂4版

建設機械及び施工の基礎知識，最新の技術動向，排出ガス規制・地球温暖化とその対応，情報化施工などを，最新情報も織り込み収録。

建設機械を用いた施工現場における監理・主任技術者，監督，世話役，オペレータなどの現場技術者，建設機械メーカー，輸入商社，リース・レンタル業，サービス業などの建設機械技術者や，大学・高等専門学校・高等学校において建設機械と施工法を勉強する学生などに必携です。

建設機械施工技術の修得，また1・2級建設機械施工技士などの国家資格取得のためにも大変有効です。

[構成]

1. 概要
2. 土木工学一般
3. 建設機械一般
4. 安全対策・環境保全
5. 関係法令

6. トラクタ系機械
7. ショベル系機械
8. 運搬機械
9. 基礎工事機械
10. モータグレーダ
11. 締固め機械
12. 舗装機械

●A4判／約800ページ

●定 価

非 会 員：6,300円 (本体6,000円)

会 員：5,350円 (本体5,095円)

特別会員：4,800円 (本体4,570円)

【ただし，特別価格は学校教材販売（学校等教育機関で20冊以上を一括購入申込みされる場合）】

※送料は会員・非会員とも沖縄県以外700円，沖縄県1,050円

※官公庁(学校関係を含む)は会員と同等の取扱いとします。

●発行 平成23年4月

一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>