

試験施工報告：津波堆積物(ヘドロ)再資源化による人工地盤造成

東北大学大学院環境科学研究科 ○ 高橋 弘
(株)森環境技術研究所 森 雅人

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、日本における観測史上最大のマグニチュード9.0を記録した。この地震により場所によっては波高10m以上の大津波が発生し、沿岸部に未曾有の被害をもたらした。大震災により発生したガレキは、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(ヘドロ)が宮城県内で生じていると言われている¹⁾。現在、可燃物は焼却処分し、金属類などは分別してリサイクルに回すなどの処理が行われているが、津波堆積物については処理がほとんど行われていない。約2,500万トンと推定される津波堆積物を埋め立て処分することはほぼ不可能であり、有効活用せざるを得ない状況にある。仙台市では、被災した東部地域の復興ビジョンとして、海岸に防潮堤や海岸防災林などによる防災公園緑地を整備し、その内側に高盛土の幹線道路を建設する骨子を発表しているが²⁾、高盛土の幹線道路建設などに津波堆積物を利用するなど、津波堆積物の積極的な再利用が期待される。ただし、津波堆積物を再利用するにしても、国土交通省「高速道路のあり方検討委員会」による緊急提言³⁾に見られるように盛土の耐震性は必要不可欠であると考えられる。

ところで、申請者らは建設汚泥やヘドロなどの高含水比泥土のリサイクル率の向上を目指し、泥土に古紙破砕物と高分子系改良剤を混合して良質な土砂を生成する「繊維質固化処理土工法」を開発した⁴⁾。本工法は、既に780件、48万m³を超える実績を有しており、2004年に発生した中越地震の際にも、芋川河道閉塞により発生した大量の軟弱泥土を原位置で処理し、迅速な災害復旧に貢献した実績がある⁵⁾。

今回、三井物産環境基金「東日本大震災復興活動支援」を受け、塩釜市の中倉最終処分場および仙台市若林区の農地で津波堆積物の再資源化に関する試験施工を実施した。本報ではその内容について報告する。

2. 塩釜市中倉処分場における津波堆積物の処理

塩釜市の中倉処分場は、2011年7月末を持って

計画の容量に達するため閉鎖の予定であった。しかし、今回の大震災を受け、津波によるガレキの一次集積所として現在も稼働せざるを得ない状況になり、2011年9月現在でも可燃物や金属類、コンクリート、ガラスなどに分別する作業が行われている。大量の津波堆積物も同様に運び込まれており、今回、約400m³の津波堆積物を用いて再資源化のための試験施工を2011年8月22日～9月2日に実施した。

2.1 室内試験

室内試験の目的は、試験施工の際の古紙破砕物およびセメント系固化材の配合量を決定することである。配合量決定のための室内試験は一軸圧縮試験とし、ここでは改良土の強度および破壊ひずみについて改良目標を設定した。

強度については以下のように目標値を設定した。まず建設機械の走行に必要なトラフィカビリティを確保し、かつ第2種処理土を満足するため、コーン指数を $q_c=800\text{kN/m}^2$ 以上とした⁶⁾。さらに現場施工と室内試験の強度比を考慮して室内試験で満足すべき強度を算出した。この強度比とは室内試験と現場施工における条件の違いを調整するもので、施工機械と室内試験用混合機械の攪拌性能による混合程度の相違、養生温度の相違に起因する強度の差および改良区域での土質のバラツキや含水比の相違による現場強度の変動をも含めて経験的にカバーするものである。ここでは、強度比を0.65とし、コーン指数を $q_c=800\div 0.65=1231\text{kN/m}^2$ 以上とした。さらに、コーン指数 q_c と一軸圧縮強さ q_u との関係を示す次式⁷⁾を用いて、一軸圧縮試験における強度の目標値を 123kN/m^2 と決定した。

$$q_c = 10q_u \quad (1)$$

また破壊ひずみは従来の研究⁸⁾にならい、5%以上とした。

ところで、今回の津波堆積物が、これまで本工法で扱ってきた泥土と大きく異なるのは、様々な大量のガレキ(木くず、ガラス、ビニールなど)が混入していることである(図-1参照)。特にレジ袋のようなビニール類が顕著であった。そこで、初めに篩いを用いてガレキの除去を行った。ガレキ除去

後の津波堆積物の含水比，湿潤密度，塩分濃度およびpHを表-1に示す。



図-1 津波堆積物に含まれる種々のガレキ

表-1 津波堆積物の物理特性測定結果

含水比 [%]	湿潤密度 [g/cm ³]	塩分濃度 [%]	pH [-]
68.0	1.48	0.3	8.5

試験施工における古紙破砕物およびセメント系固化材の最適配合量を決定するため，古紙破砕物の添加量を 25kg/m³ および 45kg/m³ の 2 種類とし，それぞれの添加量に対してセメント系固化材の添加量を 50, 100 および 150kg/m³ として試料を作成し，一軸圧縮試験を実施した．試料の作成には直径 5cm×高さ 10cm のモールドを用いたが，紙面の関係上，試料作成手順は割愛する。

図-2 に一軸圧縮試験結果を示す．強度の目標値をクリアするセメント系固化材の最小添加量は，古紙の添加量が 25kg/m³ の場合は 81kg/m³，45kg/m³ の場合は 75kg/m³ であった．いずれの場合も破壊ひずみは 5%を超えることが確認された．経済性を考慮し，本施工では古紙破砕物の添加量を 25kg/m³，セメント系固化材の添加量を 81kg/m³ と決定した．

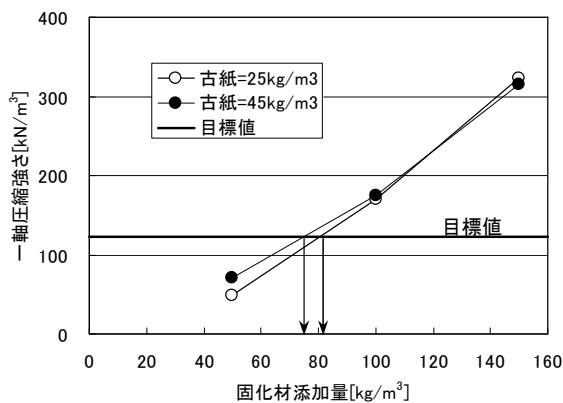


図-2 一軸圧縮試験結果（塩釜市中倉処分場）

2.2 試験施工概要

試験施工では，室内実験と同様に，初めに津波堆積物に含まれる種々のガレキを除去する作業から行った．本施工では，日立建機(株)の協力を得て自走式スクリーン VR408 をお借りし，ガレキの分級作業を行った．作業の外観および分級の様子を図-3 および図-4 に示す．ビニールの破片などに付着した津波堆積物が団子状になりやすいため，少量ずつ投入し，分級を行った．ガレキは図-3 の右のコンベアからダンプトラックのベッセルに直接投入した．スクリーンを通過したヘドロは，図-3 左のコンベアから排出し，地表面に堆積させた．

ところで，この現場の津波堆積物は，ガレキの量とヘドロの量がほぼ同程度であったため，約 400m³ の津波堆積物を分級した結果，ガレキが除去されたスクリーン下のヘドロの量は約 200m³ であった．

次に，この約 200m³ のヘドロを繊維質固化処理土工法により改良した．改良は 9 月 1 日および 2 日の 2 日間で実施した．



図-3 作業の外観（日立建機 VR408(左)，右のパワーショベルは ZAIS200)



図-4 スクリーン上の様子

まず水槽に所定量(12.3m³)の津波堆積物を投入した。次に投入した津波堆積物に対して、25kg/m³の添加量になるように古紙破砕物を添加し、攪拌・混合を行った(図-5)。古紙破砕物と津波堆積物がほぼ均一に攪拌・混合された後、室内実験で決定した添加量(81kg/m³)になるように、セメント系固化材を添加した(図-6)。一連の攪拌時間は、おおよそ40分程度であった。改良土は、処分場における廃棄物の覆土として全量再利用される予定であ



図-5 古紙破砕物を攪拌・混合



図-6 セメント系固化材の添加



図-7 ショベルによる改良土の転圧

るが、改良終了時には廃棄物の厚さが所定の厚さにまで達していないため、後日、覆土として再利用されることになった。そのため、改良土はパワーショベルにより水槽から取り出され、ショベル脇に仮置きすることにした。図-7は改良土をパワーショベルで転圧している様子を示す。

中倉処分場は最終処分場であるため、法的な受入れ時の有害物質の含有や溶出試験の義務付けは無いが、確認のため中倉処分場の津波堆積物を用いて土壌環境分析を実施した。土壌環境基準27項目のうち、フッ素のみがやや高い値(0.8mg/L以下という基準に対して1.0mg/L)を示した。そこで、改良後の土壌をサンプリングし、現在、フッ素のみ再度分析中である。

ところで、中倉処分場の津波堆積物は濃い黒色を呈していた。一般に泥土が黒色を呈する場合、硫化鉄を含む有機物による影響と考えられる。そこで、XGT分析(X線分析顕微鏡)を実施した結果、最も多く含まれる元素はSiであり、次いでFe、3番目がSであった。このことより、中倉処分場の津波堆積物は硫化鉄を多く含むことによる黒色であると推察される。

3. 仙台市若林区藤塚における津波堆積物の処理

仙台市若林区は太平洋に面し、約6kmの海岸線を有する。名取川を境に北が仙台市若林区、南が名取市である。平坦な土地が多く、周辺で高台と言え、海岸線から約2km内陸を海岸線とほぼ平行に走る仙台東部道路(高速道路)程度である。3月11日の大津波は仙台東部道路まで達したが、仙台東部道路が高盛土の高速道路であったため、ここで津波が止められ、被害の拡大を防ぐ防波堤の役目を果たすことになった。仙台東部道路の東側は水田や農地が広がっていたが、その多くが津波をかぶる被害を受け、農地の上に大量のガレキや津波堆積物が残される大災害となった(図-8)。



図-8 大量のガレキが堆積した水田(仙台東部道路仙台東IC付近)

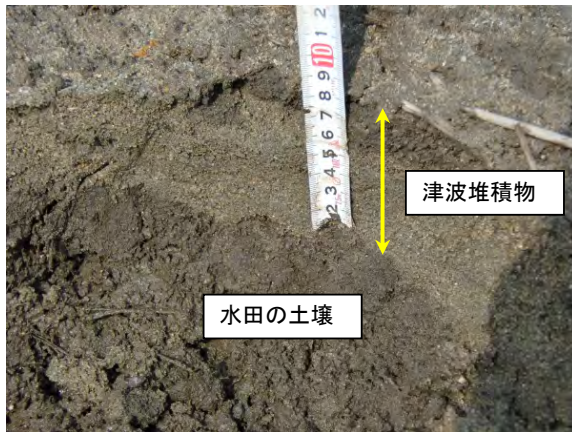


図-9 水田の土壌に堆積した津波堆積物（仙台市若林区）

この地域の津波堆積物の特徴は、図-9に見られるように津波によって巻き上げられたと考えられる海岸砂が農地表面を数 cm 程度覆い、その上に粘土層が数 mm 堆積しているという点である。著者らの調査では、砂質系堆積物の厚さは7~10cm程度であり、粘土質系の堆積物の厚さは5mm程度であった。

ところで、硫化物を含む海底の泥土が、津波によって巻き上げられ、大気さらされると空気中の酸素によって酸化され、様々な反応の末に最終的に硫酸を生成すると言われている⁹⁾。硫酸が生成されると土壌が酸性化し、また硫化鉄と硫酸が反応すると、硫化水素の発生も懸念されるため⁹⁾、迅速な津波堆積物の除去が農地の復元のためにも極めて重要であった。

さらに、上述したように仙台市の復興ビジョンでは、高盛土の幹線道路を建設する計画案も示されていることから、筆者らは、農地に堆積した津波堆積物を除去し、その津波堆積物を繊維質固化処理土工法で改良し、高盛土の幹線道路建設のための地盤材料として再利用することを提案する。

震災から約5ヶ月が経過すると、ガレキの撤去もある程度進んで来たことから、仙台市若林区藤塚の農地をお借りし、津波堆積物の剥ぎ取り→繊維質固化処理土工法で改良→改良土を用いて人工地盤を造成する一連の施工を確認する試験施工を仙台市若林区藤塚の農地において2011年9月5日～9日に実施した。

3.1 室内試験

室内試験の目的は2.1で上述した内容と同じであるので割愛する。また目標値としては、建設機械の走行に必要なトラфикаビリティを確保し、かつ第2種処理土を満足するため、コーン指数を $qc=800\text{kN/m}^2$ 以上としたが、津波堆積物の堆積状況を考慮し、強度比は0.8とした。従って、コーン指数は $qc=800\div 0.8=1000\text{ kN/m}^2$ 以上となり、さらに



図-10 津波堆積物サンプリングの様子

コーン指数 qc と一軸圧縮強さ qu との関係を示す(1)式を用いて、一軸圧縮試験における強度の目標値を 100kN/m^2 と決定した。

図-10に津波堆積物サンプリングの様子を示す。8月上旬のサンプリングの時点で、自動車などの大型のガレキはほぼ撤去されているものの、図-10に示されるように、木くず、ビニール、瓦の破片、トタンなど様々なガレキ類が撤去されずに残っている状態であった。

仙台市若林区藤塚における津波堆積物の含水比、湿潤密度、塩分濃度およびpHを表-2に示す。

表-2 津波堆積物の物理特性測定結果

含水比 [%]	湿潤密度 [g/cm ³]	塩分濃度 [%]	pH [-]
8.8	1.44	0	7.8

津波堆積物のサンプリングは梅雨明けの8月に行ったため、津波堆積物の表面は乾燥し、図-10に示されるようにひび割れた状態であった。そのため、サンプリング時の含水比は8.8%と非常に低い値であった。また懸念された塩分濃度であるが、堆積した当初は海水の塩分濃度に近い値を示したと考えられる。実際、地権者の話では、震災直後の晴れの日には地表面が塩分で白くなっていたとのことである。しかし、今回、懸念された塩分は検出されず、塩分濃度は0であった。これは、梅雨のシーズンを経て8月にサンプリングした結果、ほとんどの塩分が梅雨の降雨により洗い流された結果であると推察される。

次に試験施工における古紙破砕物およびセメント系固化材の最適配合量を決定するため、古紙破砕物の添加量を 25kg/m^3 および 50kg/m^3 の2種類とし、それぞれの添加量に対してセメント系固化材の添加量を50、100および 150kg/m^3 として試料

を作成し、一軸圧縮試験を実施した。含水比が8.8%と非常に低い値であるため、本室内試験では含水比が40%になるように加水調製して試料を作成した。試料の作成には直径5cm×高さ10cmのモールドを用いたが、紙面の関係上、試料作成手順は割愛する。

図-11に一軸圧縮試験結果を示す。強度の目標値をクリアするセメント系固化材の最小添加量は、古紙の添加量が25kg/m³の場合は64kg/m³、50kg/m³の場合は52kg/m³であった。いずれの場合も破壊ひずみは5%を超えることが確認された。経済性を考慮し、本施工では古紙破砕物の添加量を25kg/m³、セメント系固化材の添加量を64kg/m³と決定した。

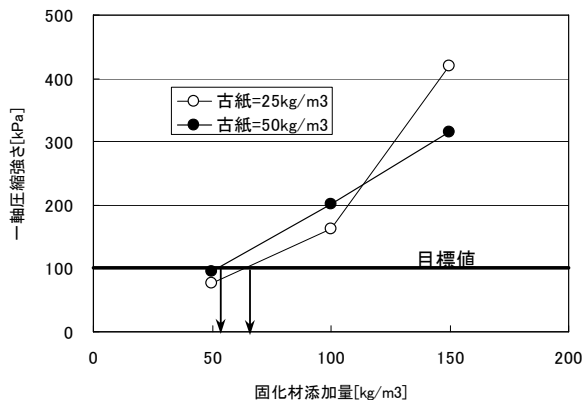


図-11 一軸圧縮試験結果（仙台市若林区藤塚）

3.2 試験施工概要

本試験施工では、若林区藤塚の農地に堆積した津波堆積物をブルドーザのブレードを制御した情報化施工で剥ぎ取り、剥ぎ取った津波堆積物を繊維質固化処理土工法で再資源化し、改良土を用いて小規模の模擬堤防を原位置で造成する一連の工程を確認することを目的とした。ここでは、キャタピラージャパン社の協力を得て、情報化施工のためのブルドーザおよびトロンメル(分級機)をお借りし、施工を行った。

施工場所は仙台市若林区藤塚の農地であり、施工前は図-12に示すように津波堆積物の上に雑草が覆い茂っている状態であった。そのため、初めに除草作業を実施し、その後、ブルドーザを用いて津波堆積物の剥ぎ取り作業を実施した。図-13に使用したブルドーザを示す。

本試験施工の面積は約3,000m²であり、約15cmの厚さで津波堆積物の剥ぎ取りを行った。従って、剥ぎ取った津波堆積物の量は約450m³である。剥ぎ取った津波堆積物の中には、木くず、瓦の破片など様々なガレキ(ゴミ)が含まれていたため、次に図-14に示すトロンメルを用いて分級作業を行った。図-14の左のベルトコンベアからガレキが除去



図-12 施工前の現場の様子（仙台市若林区藤塚）



図-13 津波堆積物の剥ぎ取りに用いたブルドーザ（キャタピラージャパン社 D3K）



図-14 ガレキの除去に用いたトロンメル

された津波堆積物が排出され、右のベルトコンベアからガレキ(ゴミ)が排出される。分級の結果、ガレキの混合割合は約2割であり、450m³の8割に相当する約360m³の津波堆積物を繊維質固化処理土工法により改良した。

上述したように、若林区の農地に堆積した津波堆積物の厚さは約10cm程度であり、また8月の好天により津波堆積物はかなり乾燥状態であった。そこで、効率良く古紙を攪拌・混合するために、

初めに加水調整を行った。バキュームカーで現場に水を搬入し、ピット(水槽)に所定の水量の水を入れた後、所定の量の津波堆積物を水槽に投入して水と混合した。含水比は室内試験と同じ40%になるように調整した。その後、室内試験で決定した配合量に元に、古紙破砕物の添加量が 25kg/m^3 になるように、またセメント固化材の添加量が 64kg/m^3 になるように添加し、攪拌・混合を行った。全体の攪拌時間は約30分であった。

改良が終了した土砂はパワーショベルによりピットから排出され、直ちにブルドーザーにより敷地の境界まで運ばれ、小規模の模擬堤防造成が行われた。小規模の模擬堤防は、底面の幅3m、天端の幅1.5m、高さ1mの台形状である。図-15に施工後の農地の様子を示す。津波堆積物が約10cmの厚さで堆積し、雑草が覆い茂っていた農地は海岸側にミニ堤防を有する農地に復元された。



図-15 施工後の現場の様子（仙台市若林区藤塚）

4. むすび

2カ所の試験施工を通して、津波堆積物に繊維質固化処理土工法を適用し、生成された改良土を用いて人工地盤を造成できることが確認できた。本試験施工の結果を広く情報発信し、迅速な復旧・復興に貢献したいと考えている。

なお今後、気仙沼市でも試験施工を実施する予定である。詳細については別途報告したいと考えている。

謝辞

仙台市若林区藤塚の施工は、三井物産環境基金 東日本大震災復興活動助成を受けて実施した試験施工であることを付記し、謝意を表す。

また分級機やブルドーザーなどの建設機械の使用に対して多大なるご協力を頂いた日立建機株式会社およびキャタピラージャパン株式会社に厚くお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 6月1日付け環境新聞, 2011
- 2) 仙台市: 仙台市震災復興ビジョン(案)骨子, http://www.city.sendai.jp/311jishin/_icsFiles/afieldfile/2011/05/23/vison_kossi.pdf.
- 3) 高速道路のあり方検討委員会: 東日本大震災を踏まえた緊急提言, http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/hw_arikata/teigen/t01.pdf.
- 4) 森 雅人・高橋 弘他: 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, J. of MMIJ, Vol.119, No.4-5, pp.155-160, 2003.
- 5) 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.
- 6) (独)土木研究所: 建設汚泥再利用マニュアル, p.58, 2008.
- 7) 同上, p.186.
- 8) 森 雅人・高橋 弘・熊倉 宏治: ペーパースラッジを用いた繊維質固化処理土の強度特性および乾湿繰り返し試験における耐久性に関する実験的研究, J. of MMIJ, Vol.122, No.6-7, pp.353-361, 2006.
- 9) 宮城県農産園芸環境課: 東日本大震災に伴う農作物の技術情報(第2報), <http://www.pref.miyagi.jp/noenkan/nousansyokuryou/gijyutu-2.pdf>.