

津波堆積物の再資源化による人工地盤造成

CREATION OF ARTIFICIAL GROUND BY RECYCLING TSUMANI SLUDGE

高橋 弘¹・里見 知昭²・森 雅人³

Hiroshi TAKAHASHI, Tomoaki SATOMI and Masato MORI

¹ 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

² 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

³ (株)森環境技術研究所 (〒996-0071 新庄市小田島町 7-36)

Key Words: tsunami sludge, recycling, artificial ground, rubble, screening, quake-resistant ground material

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、日本の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が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、その活用法について検討する必要がある。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²⁾が、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。

ところで、著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セメント系固化材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³⁾。本工法で生成される土砂、すなわち繊維質固化処理土は、固化処理土(セメント系固化材のみを用いる従来工法により生成される土砂)に比べて、破壊強度および破壊ひずみが大きく、高い耐久性を有するなど優れた特徴を有するため、既に800件、50万m³を超える実績を有しており、さらに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⁴⁾。

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、仙台市若林区の農地および気仙沼市の3カ所で津波堆積物の再資源化に関する試験施工を実施した。本論文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稼働せざるを得ない状況になり、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。

(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⁵⁾。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 $q_c=800 \div 0.65=1231$ 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⁶⁾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。

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

破壊ひずみは従来の研究⁷⁾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。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 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少添加量は、古紙の添加量が 25kg/m^3 の場合は 81kg/m^3 , 45kg/m^3 の場合は 75kg/m^3 であった。経済性を考慮し、本施工では古紙破砕物の添加量を 25kg/m^3 , セメント系固化材の添加量を 81kg/m^3 と決定した。なお、この条件では破壊ひずみは 5% を超えることが確認された。

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

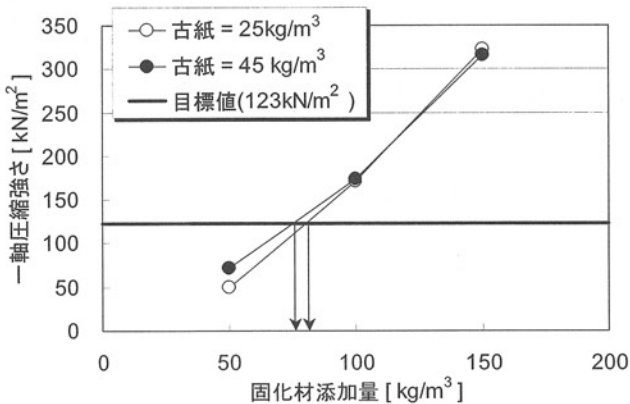


図-1 一軸圧縮試験結果 (塩釜市中倉処分場)

(2) 試験施工概要

試験施工では、初めに津波堆積物に含まれる種々のガレキを除去する分級作業から行った。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写真-1 および写真-2 に示す。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



写真-1 作業の外観 (日立建機 VR408(左), 右のパワーショベルは ZAXIS200)

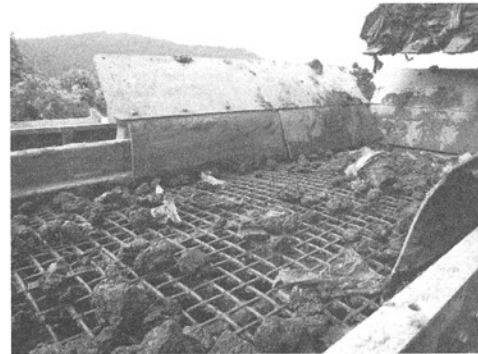


写真-2 スクリーン上の様子

程度であったため、約 400m^3 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 200m^3 であった。次に、この約 200m^3 のヘドロを繊維質固化処理土工法により改良した。

まず水槽に所定量(約 12.3m^3)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/m^3 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(写真-3)。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/m^3)になるように、セメント系固化材を添加した。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かったため、後日、覆土として再利用されることになった。そのため、改良土はショベル脇に仮置きすることにした。写真-4 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、フッ素のみ再度分析した結果、溶出量は 0.56mg/L に減少し、土壌環境基準を満足した。



写真-3 古紙破砕物の攪拌・混合



写真-4 ショベルによる改良土の転圧

これは、セメント系固化材による不溶化の効果によると考えている。

なお、施工終了後 85 日目にコーン貫入試験を行い、造成した地盤強度を計測した。5 カ所の計測値の平均は $1,96\text{kN/m}^2$ であった。この値を一軸圧縮強さに換算すると 196kN/m^2 となり、目標値である 123kN/m^2 以上を満足することが確かめられた。

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。この地域の津波堆積物の特徴は、写真-5 に示す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、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、大気に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⁸⁾。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⁸⁾、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。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

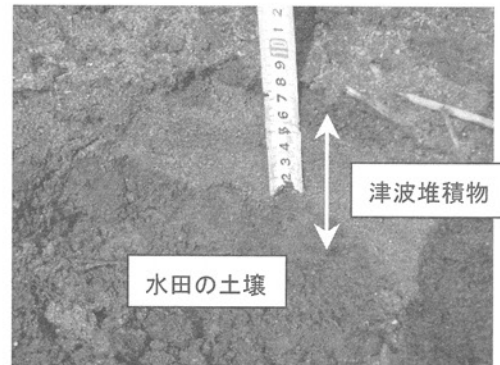


写真-5 水田の土壌に堆積した津波堆積物(仙台市若林区)

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。

(1) 室内試験

室内試験の目的は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、塩竈市の場合と同様にコーン指数を $q_c=800\text{kN/m}^2$ 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 $q_c=800 \div 0.8=1000\text{kN/m}^2$ 以上となり、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(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。

写真-6 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、写真-6 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。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。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。

図-2 に一軸圧縮試験結果を示す。表-2 に示すように津波堆積物の含水比が 8.8% と非常に低い値であった。そこで、室内試験では古紙破砕物が土砂と容易に混合するように最小限の加水を行うことにした。試行錯誤の結果、この場所の津波堆積物に対しては、含水比 40% が適当と判断し、含水比を 40% に調整して試料を作成した。強度の目標値をクリアするセメント系固化材の最少添加量は、古紙の添加量が 25kg/m^3 の場合は 64kg/m^3 、 50kg/m^3 の場合は 52kg/m^3 であった。経済性を考慮し本施工では古紙破砕物の添加量を 25kg/m^3 、セメント系固化材の添加量を 64kg/m^3 と決定した。なお、この条件では破壊ひずみは 5% を超えることが確認された。



写真-6 津波堆積物サンプリングの様子



写真-7 ガレキの除去に用いたトロンメル

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

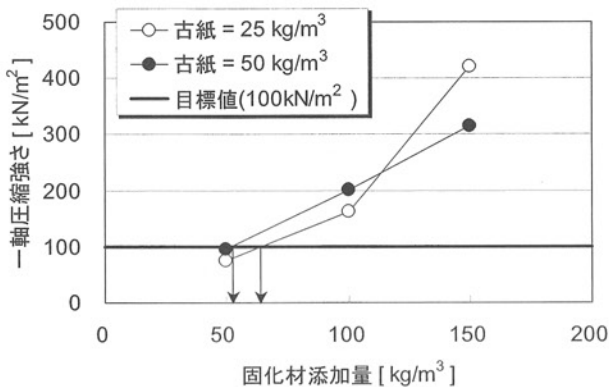


図-2 一軸圧縮試験結果 (仙台市若林区藤塚)

(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。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、次に写真-7 に示すトロンメルを用いて分級作業を行った。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、8 月の好天により津波堆積物はかなり乾燥した状態であった。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を基に、古紙破砕物の添加量が 25kg/m³ になるように、またセメント系固化材の添加量が 64kg/m³ 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 の台形形状である。写真-8 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。

本施工現場でも津波堆積物を用いて土壤環境分析を行った。その結果、砒素のみ土壤環境基準を上回る結果となった(0.01mg/L 以下に対し、溶出量は 0.012 mg/L)。そこで、施工後に改良土をサンプリングし、砒素のみ再度分析を行った結果、溶出量は 0.005 mg/L 未満となり、土壤環境基準を満足した。



写真-8 施工後の現場の様子 (仙台市若林区藤塚)

なお、施工終了後 80 日目にコーン貫入試験を行い、造成した地盤強度を計測した。5 カ所の計測値の平均は $2,90\text{kN/m}^2$ であった。この値を一軸圧縮強さに換算すると 290kN/m^2 となり、目標値である 100kN/m^2 以上を満足することが確かめられた。

4. 気仙沼市における津波堆積物の処理

津波堆積物の性状は地域によって大きく異なる。そこで、宮城県北部地域における津波堆積物を再資源化し、人工地盤を造成する一連の施工を確認するため、気仙沼市内の終末処分場に堆積している津波堆積物を改良し、改良土を終末処分場近くの公園に隣接し地盤沈下した箇所の嵩上げに再利用するための試験施工を 2011 年 10 月 30 日から 11 月 3 日の工期で実施した。

(1) 室内試験

目標値は、仙台市若林区藤塚の現場と同じ値に設定した。すなわち、一軸圧縮試験における強度の目標値を 100kN/m^2 とし、破壊ひずみについては 5% 以上とした。

この現場の津波堆積物の特徴は、写真-9 に示すように大量の木材チップが含まれていることである。この木材チップを取り除くことは極めて非効率であり、また著者の研究室にて予備実験として通常の軟弱泥土に木材チップを混合し、木材チップ入り繊維質固化処理土を作成して、その強度特性を測定した結果、木材チップを混合しない通常の繊維質固化処理土に比べて強度が増加する結果が得られたので、本施工現場では、写真-9 に示す木材チップ混合の津波堆積物をそのまま使用することにした。なお、津波堆積物単位質量当たりのチップの質量割合を求めた結果、45%であった。

気仙沼市終末処分場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-3 に示す。サンプリング時の津波堆積物の含水比は 21.5% であり、やや乾燥が進んでいた。古紙破砕物を混合しやすくするため、ここでは含水比が 30% になるように加水調整し、室内試験を実施した。

上述したように本施工現場の津波堆積物には多くの木材チップが含有されていたため、古紙破砕物の添加量は 25kg/m^3 とし、2 種類の固化材、すなわち一般軟弱用の固化材と高有機質土用の固化材の 2 種類を試すことにした。

図-3 に一軸圧縮試験結果を示す。固化材の添加量を 30kg/m^3 、 50kg/m^3 、 70kg/m^3 としたが、2 種類の固化材とも全ての添加量で目標強度を上回った。木材チップを含有するため、多少単価の高い高有機質土用の固化材も使用を試みたが、試験結果より一般軟



写真-9 気仙沼市終末処分場における津波堆積物

表-3 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 [-]
21.5	0.97	0.74	7.94

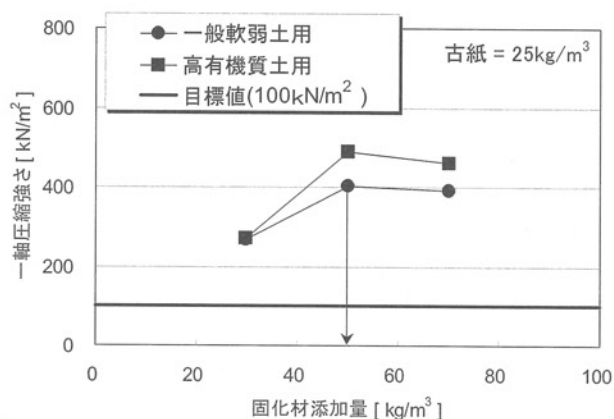


図-3 一軸圧縮試験結果（気仙沼市終末処分場）

弱土用の固固化材でも十分な強度が得られることが分かったため、固固化材としては、より単価の安い一般軟弱土用の固固化材を使用することにした。また津波堆積物に含まれる木材チップが土粒子と絡み合うためと推定されるが、 30kg/m^3 という少ない添加量でも強度の目標値をクリアすることが分かった。ただし、試験施工においては、木材チップの含有量が常に一定であるとは限らないこと、また地盤改良マニュアル⁹⁾にはセメント系固固化材の最少添加量として 50kg/m^3 と明記されていることを考慮し、セメント系固固化材の添加量は 50kg/m^3 とした。破壊ひずみはいずれの場合も 5% を超えることが確認されたため、本施工では古紙破砕物の添加量を 25kg/m^3 、セメント系固固化材の添加量を 50kg/m^3 とした。なお、固固化材の添加量が 70kg/m^3 で強度が低下した理由は不明であり、今後検討して行きたい。

(2) 試験施工概要

試験施工を実施した場所は、気仙沼市終末処分場

近くの公園に隣接する場所で、今回の地震により地盤沈下が生じた箇所である。この地盤沈下した箇所を嵩上げするため、混合のための水槽を嵩上げ箇所のおすぐ脇に設置した。試験施工では、初めに終末処分場に堆積してある木材チップ混合の津波堆積物を試験施工場所までダンプトラックで運搬し、その津波堆積物を所定の量だけ水槽に投入した。また室内試験と同様に含水比を40%に調整するため、所定の量だけ加水した。本試験施工での1回の処理量は約14.5m³である。その後、25kg/m³の添加量になるように古紙破砕物を水槽に投入し、津波堆積物と混合した。さらにセメント系固化材を加え、攪拌・混合を行った。今回の施工で再資源化した津波堆積物の量は約100m³であり、再資源化された土砂の全量を用いて嵩上げのための人工地盤を造成した。施工の様子を写真-10に示す。一連の攪拌・混合を終えた後、パワーショベルのバケットをミキシングバケットから通常のバケットに取り替え、このバケットにより改良土を水槽から取り出し、地表面に放土した。その後、バケットの底面およびショベルによる転圧を行い、地盤の嵩上げを行った。造成した人工地盤様子を写真-11に示す。今回使用した津波堆積物のチップ含有量は45%とかなり高めであったので、全体的に弾力のある地盤となった。今後は室内実験により最適なチップ混合量を把握し、より効果的な人工地盤造成に貢献して行きたいと考えている。

ところで、本現場においても津波堆積物の土壌環



写真-10 気仙沼市における再資源化施工の様子



写真-11 地盤沈下した箇所の嵩上げのために造成した人工地盤

境分析を実施した。土壌環境基準27項目のうち、砒素とフッ素のみ土壌環境基準を上回る結果となった(砒素は0.01mg/L以下に対して0.012mg/L、フッ素は0.8mg/L以下に対して、0.81mg/L)。そこで、施工後、改良土をサンプリングし、再度砒素とフッ素のみ分析を行った結果、砒素の溶出量は0.005mg/L以下、フッ素は0.19mg/Lに減少し、土壌環境基準を満足する結果となった。

なお、本施工ではコーン貫入試験を行うことが出来なかったため、造成した地盤強度の値は得られなかった。

5. むすび

塩釜市、仙台市および気仙沼市の3カ所における試験施工を通して、種々の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。

謝辞

本試験施工は、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/visio_n_kossi.pdf.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) (独)土木研究所: 建設汚泥再利用マニュアル, p.58, 2008.
- 6) 同上, p.186.
- 7) 森 雅人・高橋 弘・熊倉 宏治: ペーパー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.
- 8) 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>.
- 9) (社)セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル, p.48, 2007年.

(2012. 5. 9 受付)