

# 東日本大震災で発生した廃木材と津波堆積物の 再資源化による地盤材料の開発

DEVELOPMENT OF GROUND MATERIAL BY RECYCLING WASTED WOOD AND  
TSUNAMI SLUDGE GENERATED IN THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE

高橋 弘<sup>1</sup>・栗原 弘樹<sup>2</sup>・里見 知昭<sup>3</sup>

Hiroshi TAKAHASHI, Hiroki KURIBARA and Tomoaki SATOMI

<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 東北大学大学院環境科学研究科環境科学専攻前期課程(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

<sup>3</sup> 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)

**Key Words:** fiber-cement-stabilized soil, tsunami sludge, wood chips, 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。この地震の影響により、場所によっては波高10m以上の津波が発生し、沿岸部に大きな被害をもたらした。この地震と津波被害により発生したがれきの量は、宮城県、岩手県、福島県の3県合計で約2500万トンと推定され、これと同程度の津波堆積物が生じているといわれている<sup>1)</sup>。現在、がれきに関しては、可燃物は焼却処分し、金属類は分別してリサイクルするなどの処理が進んでいるが、津波堆積物に関しては処理がほとんど行われていない。また、約2500万トンと推定される津波堆積物をすべて埋立処分することは不可能であり、津波堆積物の積極的な再利用が期待される。

一方、震災で発生した廃木材は終末処分場でチップ化され、再資源化するために製紙工場に搬送されている。そこでふるい分けを行い、規定値より細くなったチップに関しては、用途がないため再び終末処分場に戻されているのが現状である。津波堆積物を基礎とし、さらに多少でも廃木材チップを混合して地盤材料として再資源化できれば、被災地の復旧・復興に大いに貢献できると考えられる。

ところで、高含水比泥土の再資源化に対して既に多くの実績を挙げている工法に纖維質固化処理土工法がある<sup>2)</sup>。本工法は高含水比泥土に古紙破碎物およびセメント系固化材を混合することにより、破壊強度および破壊ひずみが大きく、乾湿繰り返し・凍結融解に対して高い耐久性を有し、

動的強度の高い改良土を生成する工法である。本工法により高含水比泥土の早期再資源化が可能となり、循環型社会の構築の一役を担っている<sup>3)</sup>。しかし、これまでの研究では津波堆積物と廃木材チップを使用した纖維質固化処理土の強度特性・変形特性については検討されていない。

そこで本研究では、津波堆積物と廃木材チップを再資源化するために、強度特性および変形特性について実験を行い、地盤材料としての利用可能性について検討することを目的とした。

## 2. 繊維質固化処理土工法

纖維質固化処理土工法とは高含水比泥土に古紙破碎物とセメント系固化材を混合し、泥土を良質な土砂に再資源化する工法であり、これまでに800件、50万m<sup>3</sup>を超える施工実績を有している。纖維質固化処理土工法の原理を以下に示す。

- 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。
- この状態の高含水比泥土に古紙破碎物を混入すると図-1(b)に示されるように土粒子の周りの自由水が纖維質物質に吸収され、見かけの含水比が低下する。
- さらにセメント系固化材を添加すると、図-1(c)に示されるように水和反応によりエトリンガイトと呼ばれる針状の結晶が生成され土粒子の移動を拘束し、含水比の低下とあいまって土の強度を増加させる。

この処理土は内部に纖維質物質を含むため、纖維質物

質が土粒子間に複雑に入り込んで絡み合い、土粒子間結合力が非常に強くなるため、高い破壊強度および高い破壊ひずみを有する。

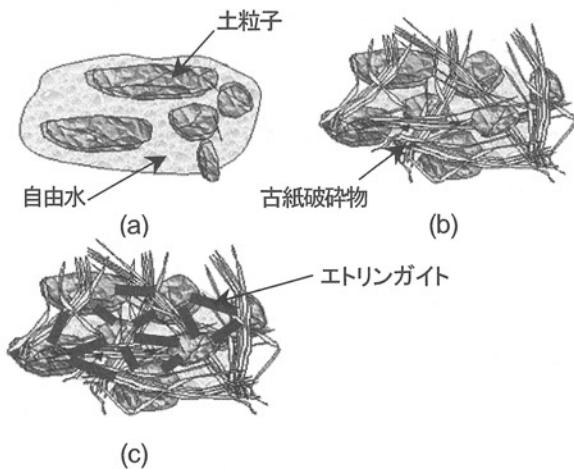


図-1 繊維質固化処理土工法の原理

### 3. 廃木材チップ混合効果に関する実験的検討

上述したように、震災で発生した廃木材は、終末処分場でチップ化され、再資源化するために製紙工場などに運ばれているが、細かいチップは製紙工場でも用途がなく、終末処分場に戻されているのが現状である。そこで、本研究では、この用途がない廃木材チップを加えた繊維質固化処理土を作成して一軸圧縮試験を行い、廃木材チップが強度特性および変形特性に与える影響について検討した。

#### (1) 廃木材チップ

本研究で使用した廃木材チップを写真-1に示す。この廃木材チップは気仙沼市の終末処分場で採取した。チップの密度は  $1.41\text{g}/\text{cm}^3$  であり、またチップを直方体とみなし、3辺をそれぞれ長さ、幅、厚さとして測定した結果、平均の長さ、幅、厚さは、それぞれ  $16.4\text{mm}$ 、 $2.69\text{mm}$ 、 $1.47\text{mm}$  であった。



写真-1 廃木材チップ

#### (2) 泥土試料

本研究では、実際の津波堆積物を用いた実験に先立ち、粘土とシルトを乾燥質量比 40:60 で混合した模擬泥土を使用してチップ入り繊維質固化処理土を作成し、チップ混合効果を確認した。実際の津波堆積物では、土砂の性状にバラツキが懸念されるが、模擬泥土では泥土の性状を常に一定状態に保ったまま一連の実験を行うことが可能である。そこで、初めに模擬泥土を使用し、チップ混合の影響について検討した。

#### (3) 試料作成手順

- ① まず初めに、粘土とシルトを乾燥質量比 40:60 で混合し、加水して含水比を調整する。
- ② 含水比を調整した模擬泥土に古紙破碎物、セメント系固化材の順に加えて搅拌する。
- ③ チップを加えて搅拌する。
- ④ 初期養生として上記の処理土を容器に入れて密封し、 $20\pm3$  度で 3 日間養生する。
- ⑤ 直径 5cm、高さ 10cm の標準的なモールドで供試体を作製する。
- ⑥ 供試体を密封し、 $20\pm3$  度で 7 日間養生する。

#### (4) 一軸圧縮試験

本研究では一軸圧縮試験により処理土の強度特性および変形特性を評価した。図-2 および写真-2 に一軸圧縮試

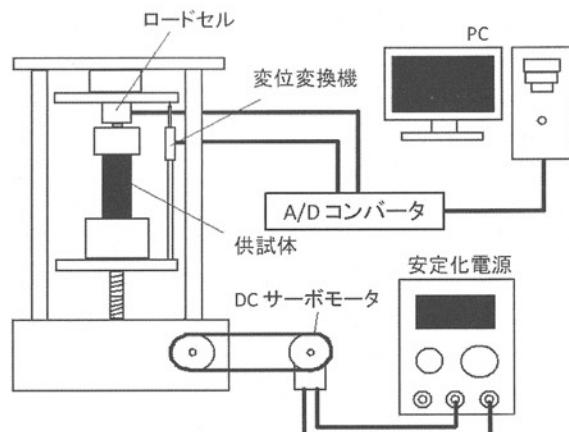


図-2 一軸圧縮試験装置概略図

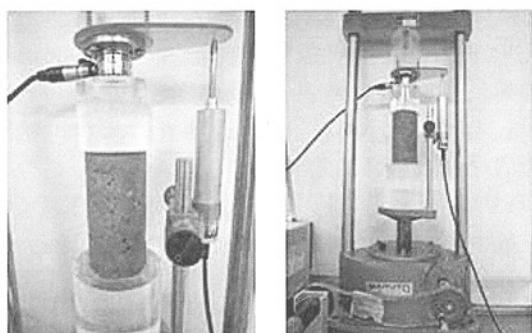


写真-2 一軸圧縮試験装置外観

験機の概略図および外観を示す。図-2に示すように、本装置では安定化電源より一定速度(1%/min)で載荷を行い、ロードセルにより圧縮荷重を、変位計により圧縮変位を計測した。出力された信号はA/Dコンバータを介してPCに記録した。一軸圧縮試験装置は、丸東製作所製「運研港湾型一軸圧縮試験機」(型番:S56A)であり、ロードセルには共和電業製「荷重変換器」(型番:LCF-A-5KN, 定格荷重:5kN), 変位計には共和電業製「小型変位変換器」(型番:DTH-A-30, 定格容量:30mm), A/Dコンバータには共和電業製「センサインターフェース PCD-300 series」(型番:PCD-300A)を使用した。

試験方法は、まずA/DコンバータとPCの電源を入れ、供試体を圧縮荷重がかからない程度にロードセルに密着させ、試験装置にセットする。その後、PCにてモニタリングとデータサンプリング用のアプリケーションを起動した後、変位計の取り付けを確認し、原点調整を行い、1%/minのひずみ速度で載荷する。ロードセルからの荷重データと変位計からの変位データはサンプリング周波数1HzでPCに記録される。

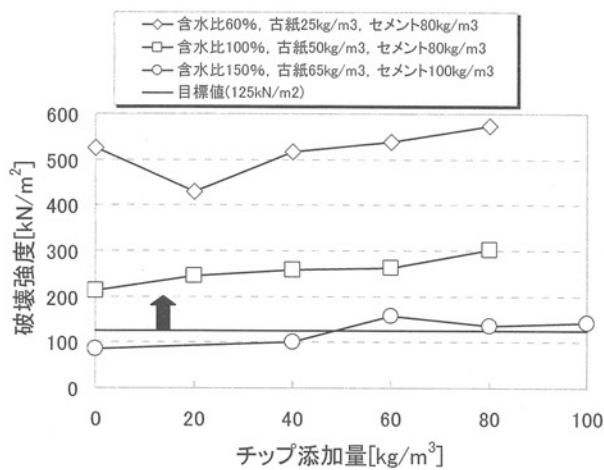


図-3 チップ添加量と破壊強度の関係(模擬泥土)

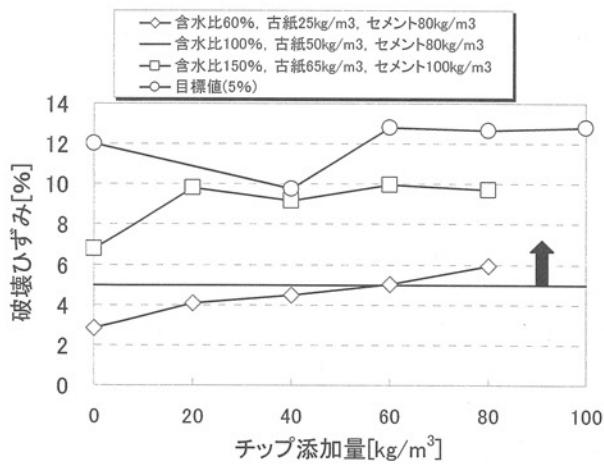


図-4 チップ添加量と破壊ひずみの関係(模擬泥土)

## (5) 試験結果および考察

1つの試験条件に対して3本の供試体を作成し、それぞれに対して一軸圧縮試験を行い、3本の結果の平均値を算出した。本実験では、破壊強度および破壊ひずみのそれぞれに対して目標値を設定し、目標値をクリアする添加量について検討した。破壊強度の目標値は、これまでに実施した3箇所の津波堆積物再資源化の現場試験施工<sup>3</sup>を参考にして125kN/m<sup>2</sup>以上とした。破壊ひずみの目標値は従来の研究<sup>4</sup>に倣り、5%以上とした。

最初にチップの添加量を変化させて試験を行った。図-3および図-4にチップの添加量と破壊強度の関係およびチップの添加量と破壊ひずみの関係を示す。多少のバラツキはあるものの、泥土の初期含水比にかかわらずチップの添加量を増加すると、破壊強度および破壊ひずみは増加する傾向が認められる。これはチップと土粒子が複雑に絡み合うことにより、高い破壊強度および高い破壊ひずみが発現したためと考えられる。また、初期含水比150%の場合、破壊強度が全体的に小さい値になっているが、本実験では時間の関係上、7日間の養生で試験を行ったため、セメントの水和反応が十分に進行しておらず、十分な強度が発

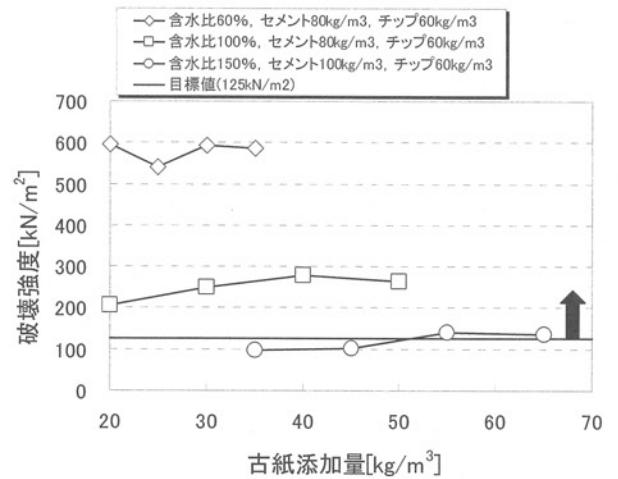


図-5 古紙添加量と破壊強度の関係(模擬泥土)

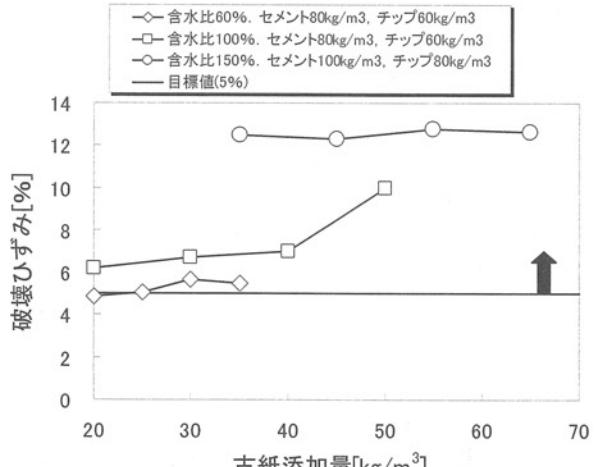


図-6 古紙添加量と破壊ひずみの関係(模擬泥土)

現できなかつたためであると考えられる。ただし、7日間養生でもチップの添加量が $50\text{kg/m}^3$ 以上では、目標強度を満足することが分かる。

次に古紙の添加量を変化させた場合の結果を図-5および図-6に示す。結果より、わずかではあるが、古紙の添加量を増加させていくと、破壊強度および破壊ひずみは増加する傾向が見られる。しかし、顕著な差異は見られない。これは、古紙と同じ繊維質物質であるチップが入っているため、古紙の添加量を増加させても破壊強度および破壊ひずみには顕著な変化が見られなかつたと考えられる。

ところで、各添加物の1kgあたりのコストを比較すると、チップは終末処分場から採取したものであるのでコストは0円/kgである。セメントと古紙のコストはそれぞれ10.1円/kg、80円/kgである。このことから古紙の添加量を減らし、代わりに廃木材チップを加えることで地盤材料としての目標値を満足することができれば、古紙の量を削減した分だけ、全体の施工コスト削減に繋がると期待される。

#### 4. 津波堆積物を使用した廃木材チップ入り繊維質固化処理土の強度特性に関する実験的検討

上述したように、震災によって発生した津波堆積物をすべて埋立処分するのは不可能であるため、津波堆積物の再利用が必要な状況である。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おり<sup>5)</sup>、津波堆積物の積極的な再利用が期待されている。しかし、津波堆積物を地盤材料として再利用する場合、津波堆積物を用いた地盤材料の強度特性および変形特性を検討することは必要不可欠である。

前章では、廃木材チップ混合の効果が確認されたので、次に実際の津波堆積物と廃木材チップを使用してチップ入り繊維質固化処理土を作成し、一軸圧縮試験により強度特性および変形特性について検討した。

##### (1) 津波堆積物

本研究で使用した津波堆積物は2011年12月10日に仙台市若林区藤塚で採取したものである。砂質系の津波堆積物を写真-3に、粘土系の津波堆積物を写真-4に示す。また、表-1に津波堆積物の物性値を示す。

採取した津波堆積物はがれきなどを含んでおり、採取した津波堆積物をそのまま使用して試験を行うのは困難であったので、前処理を行った。初めに津波堆積物の含水比を炉乾燥により0%にした後、2mmのふるいにかけ通過分を試料として用いることにした。

##### (2) 試験結果および考察

試験結果を図-7ないし図-10に示す。図-7および図-8はチップの添加量を変化させた時の結果を示しており、図



写真-3 砂質系の津波堆積物



写真-4 粘土系の津波堆積物

表-1 津波堆積物の物性値

	含水比 [%]	湿潤密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	土粒子密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	塩分濃度 [%]	pH [-]
砂質系	19.1	1.88	2.69	0	7.3
粘土系	37.6	1.66	2.54	0	6.6

-9および図-10は古紙の添加量を変化させた時の結果を示している。砂質系の津波堆積物に関しては、チップや古紙破碎物などの繊維質物質の添加量を増加させると破壊ひずみは増加するが、破壊強度は減少する傾向を示した。これは、前章で述べた模擬泥土に対する結果とは異なる傾向である。一方、粘土系の津波堆積物に関しては、チップや古紙破碎物などの繊維質物質の添加量が増大すると、破壊強度および破壊ひずみともに増加するという模擬泥土と同様の傾向を示した。

ところで、上述したようにチップを混合し、古紙の添加量を削減できれば、全体の施工コスト削減に繋がると期待される。古紙を全てチップで代替できればコスト削減は最大となるが、図-9および図-10から分かるように、古紙の添加量が0では目標値を満足しない。一方、古紙の添加量が $20\text{kg/m}^3$ 以上では、古紙添加の効果は顕著ではなく、特に砂質系の津波堆積物では、古紙の添加量を増加させると逆に強度が低下する傾向がある。それゆえ、津波堆積物とチップを混合して再資源化を図る場合、古紙の添加量は $20\text{kg/m}^3$ 程度に抑え、さらにチップを混合して地盤材料を生成することが望ましいと考えられる。

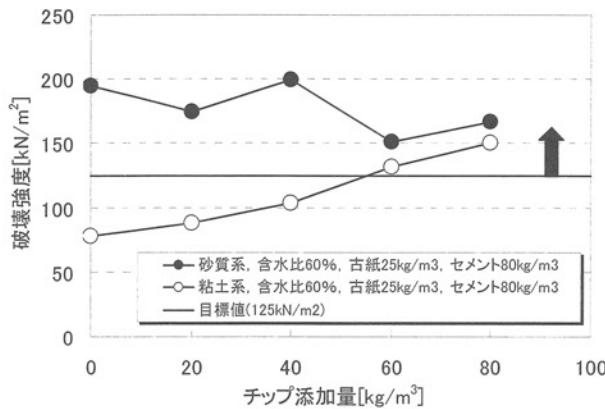


図-7 チップ添加量と破壊強度の関係（津波堆積物）

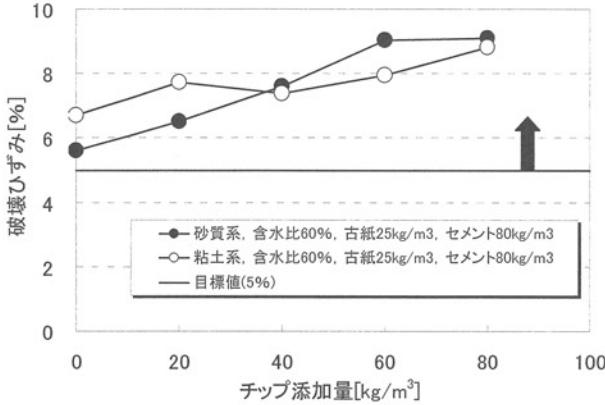


図-8 チップ添加量と破壊ひずみの関係（津波堆積物）

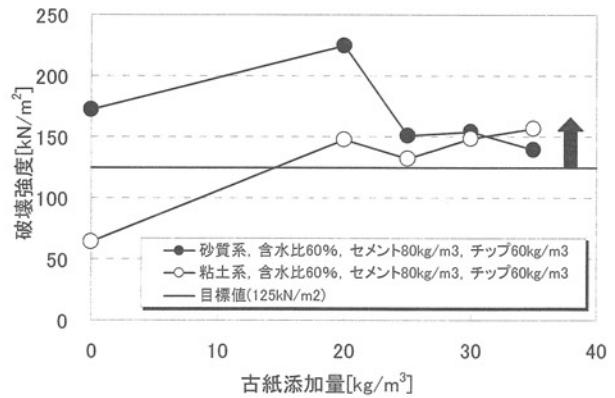


図-9 古紙添加量と破壊強度の関係（津波堆積物）

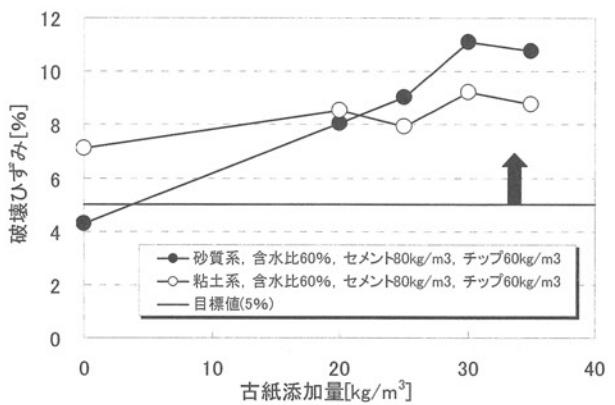


図-10 古紙添加量と破壊ひずみの関係（津波堆積物）

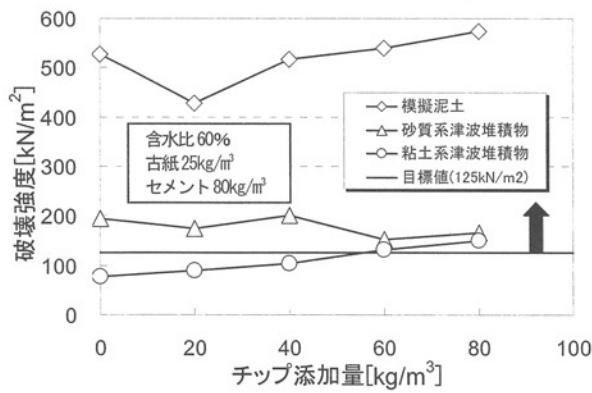


図-11 チップ添加量と破壊強度の関係

図-11 は条件が全て等しい 3 つの試料(模擬泥土, 砂質系の津波堆積物, 粘土系の津波堆積物)についてチップ添加量と破壊強度の関係をまとめた結果である。模擬泥土と粘土系の津波堆積物はチップの添加量を増加すると、破壊強度が増加する傾向を示したが、砂質系の津波堆積物は逆の傾向を示した。また、模擬泥土と津波堆積物で強度に大きな差があることが分かる。このように、同じ条件でも処理土の強度特性が大きく変わる理由について検討するため、過去の論文<sup>⑥)</sup>を参考に試料の粒度分布に注目した。

図-12 に模擬泥土と粘土系、砂質系の津波堆積物の粒度分布を示す。また、それぞれの土の粒度分布から得られ

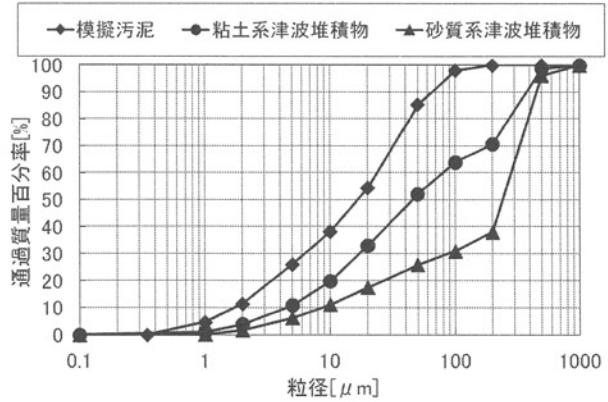


図-12 各試料の粒度分布

表-2 粒度分布から得られた各試料の物性値

	平均粒径 $D_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	均等係数 $U_c$ [-]	曲率係数 $U'_c$ [-]
模擬泥土	17.8	7.39	1.49
粘土系津波堆積物	47.2	17.7	0.79
砂質系津波堆積物	281.0	36.4	2.68

る平均粒径  $D_{50}$ 、均等係数  $U_c$ 、曲率係数  $U'_c$ についてまとめたものを表-2 に示す。平均粒径  $D_{50}$  に注目すると、模擬泥土と粘土系の津波堆積物は近い値を示しているが、砂質系の津波堆積物は模擬泥土の約 16 倍の平均粒径を有してい

ることが分かる。チップや古紙などの纖維質物質の添加量を増加した時、破壊強度が増加する場合と減少する場合があるのは、試料の粒度分布の違いによって、土粒子と纖維質物質とのなじみ具合に差があるためであると推察される。すなわち模擬泥土や粘土系の津波堆積物は細かい土粒子が多いため、纖維質物質と土粒子が複雑に絡み合い易く、両者の結合が強固になるため、纖維質物質の増加とともに破壊強度も増大すると考えられる。一方、砂質系の津波堆積物は粒径の大きな土粒子が多いため、纖維質物質の量がある程度以上に増大すると、土粒子とあまり絡み合わず隙間が多くなり、纖維質の添加量の増加によって破壊強度が減少したと考えられる。

ところで、図-7ないし図-10を見ると破壊ひずみに関してはすべての条件で目標値の5%をクリアしているが、破壊強度に関しては、目標値の $125\text{kN/m}^2$ をクリアするための最小チップ添加量が存在することが分かる。また、模擬泥土と粘土系津波堆積物の粒度組成が近いにもかかわらず、粘土系津波堆積物の破壊強度は、模擬泥土の破壊強度の1/5程度であり、全体的に破壊強度が小さいことが分かる。これは、津波堆積物に含まれる有機物の影響も1つの原因と考えられるが、詳細は不明である。今後、有機質系の固化材あるいは石灰系固化材などを使用し、破壊強度について検討したいと考えている。なお、上述したように、今回は時間の関係上、養生期間を7日間として試験を行ったが、一般的な28日の養生期間を設ければセメントの水和反応が進むため、強度は全体的に増加すると期待できるため、今後検討する予定である。

## 5. むすび

本研究では模擬泥土を使用した廃木材チップ入り纖維質固化処理土を作成して一軸圧縮試験を行い、強度特性および変形特性について検討した。試験結果より、チップの添加量が増加するにつれて破壊強度および破壊ひずみも増加することが分かった。また、仙台市若林区藤塚で採取した砂質系および粘土系の2種類の津波堆積物を使用した廃木材チップ入り纖維質固化処理土を作成して一軸圧縮試験を行い、強度特性および変形特性について検討

した。砂質系の津波堆積物では、チップや古紙破碎物などの纖維質物質の添加量の増加に伴い、破壊ひずみは増加するが、破壊強度は減少する傾向を示した。一方、粘土系の津波堆積物では纖維質物質の添加量の増加とともに、破壊強度および破壊ひずみともに増加する傾向を示した。そこで、試料の粒度分布を測定した結果、特に平均粒径に大きな差があることが確認された。このことから、粒度分布の違いにより土粒子と纖維質物質とのなじみ具合に差が生じ、纖維質物質の添加量を増加させた際の処理土の強度特性が変わると推察される。

今後は、処理土を地盤材料として利用する場合、乾湿繰り返しに対する高耐久性および高い動的強度が必要となるので、これらを評価する試験を行う予定である。

## 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) 森 雅人・高橋 弘他: 故紙破碎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纖維質固化処理土の強度特性, J. of MMJ, Vol.119, No.4-5, pp.155-160, 2003.
- 3) 高橋弘, 里見知昭, 森雅人: 津波堆積物の再資源化による人工地盤造成, 第6回土砂災害に関するシンポジウム論文集投稿中, 2012.
- 4) 森 雅人・高橋 弘・熊倉 宏治: ペーパースラッジを用いた纖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 MMJ, Vol.122, No.6-7, pp.353-361, 2006.
- 5) 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/vision\\_kossi.pdf](http://www.city.sendai.jp/311jishin/_icsFiles/afieldfile/2011/05/23/vision_kossi.pdf).
- 6) 高橋研太: 地盤材料の動的強度を目指した纖維質固化処理土工法に関する研究, 平成19年度東北大学大学院修士論文, pp55-58, 2007.

(2012.5.9受付)