

## 津波堆積物を用いて作成した放射能汚染土覆土材の耐侵食性に関する研究

高橋 弘\*, 熊谷 翔太\*\*, 里見 知昭\*\*

### Study on Durability for Erosion of Cover Soil Made of Tsunami Sludge for Radiation-Contaminated Soil

Hiroshi TAKAHASHI, Shota KUMAGAI and Tomoaki SATOMI

It is already confirmed that Fiber-cement-stabilized soil is the best for the ground material because this soil has several features. However, in order to use this soil as cover soil for radiological contaminated soils in Fukushima Prefecture, the investigation on durability for erosion is indispensable. Therefore, the durability for erosion of fiber-cement-stabilized soil using tsunami sludge was experimentally investigated in this study. The experiment was carried out by using the submerged water jet erosion test apparatus manufactured according to Hanson et al. The critical shear stress for erosion and erodibility coefficient were measured. It was confirmed that the durability for erosion of fiber-cement-stabilized soil is much larger than the one of normal soil.

**Key words:** Recycling, Fiber-Cement-Stabilized Soil, Water Jet Erosion Test, Cover Soil, Tsunami Sludge, Radiation-Contaminated Soil

#### 1. はじめに

2011年3月11日、東北地方で震度7の巨大地震が発生し、東北地方を中心とした多くの地域に未曾有の被害が生じた。その中でも津波による被害は甚大で、多くの家屋を破壊するとともに、大量の津波堆積物を発生させた。硫化物を含む海底の泥土は、大気にさらされると空気中の酸素によって酸化し、様々な反応の末に最終的に硫酸を生成する可能性があり、農地の復元は大きな課題である。また、塩害や悪臭被害など津波堆積物の問題点は多く指摘されており、その処理は急務となっている。

ところで、循環型社会の構築を目的として、様々な廃棄物の再資源化が取り組まれている。建設現場などで発生する高含水比泥土もその1つであるが、高含水比泥土は含水比が高いため直接利用が困難であり、再資源化率は非常に低いのが現状である。そこで、著者らは高含水比泥土の再資源化率向上のため、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、高含水比泥土を再資源化する技術（以下、繊維質固化処理土工法と記す）を開発した<sup>1)</sup>。本工法で生成される土砂（以下、繊維質固化処理土と記す）は破壊強度および破壊ひずみが大きく、乾湿の繰返しに対する耐久性が高いなどの特徴を有するため、これまでに800件、50万m<sup>3</sup>を超える実績を有し、盛土材や埋戻材として広く利用されている<sup>2)</sup>。また、繊維質固化処理土お

び従来の固化処理土を用いて繰返し三軸圧縮試験を行った結果、繊維質固化処理土は固化処理土よりも高い動的強度を有していることが確認され<sup>3)</sup>、耐震性地盤材料としての活用も期待されている。

ところで、福島県では除染作業の1つとして放射性物質が降り積もった土壌の地表面を剥ぎ取る除染作業が行われているが、掘削土壌の処分先は未だ決まっておらず、しばらくの間、仮置きせざるを得ない状況にある。環境省のガイドライン<sup>4)</sup>では、Fig.1に示すように放射能汚染土をコンテナに詰め、覆土を施して一定期間仮置きするとしている。覆土は空間線量を下げる効果的な方法であるが、遮水シートは紫外線で劣化しやすいため、単に汚染土壌を通常土で覆うだけでは耐久性の観点から不十分である。一方、津波堆積物を用いて高機能性（高耐久性、高耐侵食性、難透水性、高耐震性）を有する覆土材を生成することができれば、津波堆積物の再資源化が進むとともに汚染掘削土壌の安心・安全保管が可能となる。上述したように、繊維質固化処理土の優れた強度・変形特性および乾湿繰返しに対す

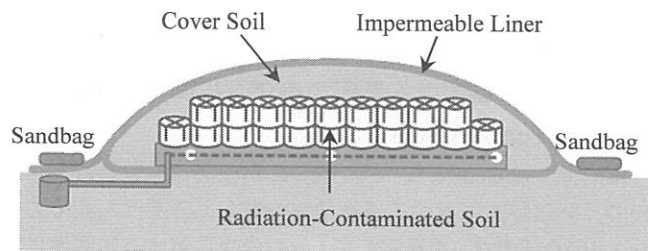


Fig.1 Concept of storage of radiation-contaminated soil shown by Ministry of the Environment<sup>4)</sup>

原稿受付 2013年7月9日

\* 正会員 東北大学大学院環境科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-20)

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

る高い耐久性は確認されており, 繊維質固化処理土工法により生成された土砂は覆土材として非常に有効であると考えられるが, 降雨に対する耐侵食性についてはほとんど検討されていない. そこで, 本研究では津波堆積物に繊維質固化処理土工法を適用して覆土材を作成し, さらに Hanson ら<sup>5)</sup>が考案した水中噴流試験装置を用いて作成した覆土材の耐侵食性について実験的に検討することを目的とする. 水中噴流試験装置による方法は土砂の耐侵食性を定量的に評価する方法として広く用いられているので, 本研究ではこの方法に従って耐侵食性を実験的に定量評価した.

## 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のようになる.

- ① 高含水比泥土は, Fig.2(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.
- 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, Fig.2(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 さらにセメント系固化材を添加し攪拌すると, Fig.2(c)に示すようにエトリングaitが生成され, その後, ケイ酸カルシウム水和物等が形成されて強度を増し, 土粒子が団粒化して機能性の高い土砂が生成される.

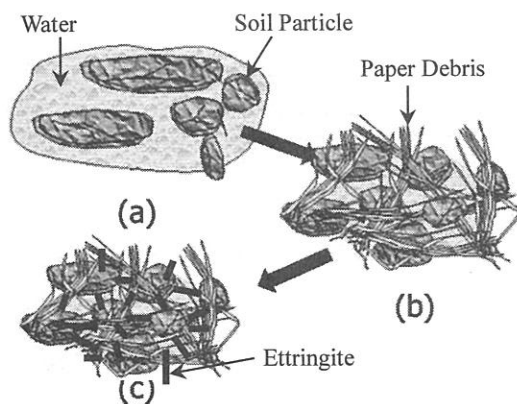


Fig.2 Principle of Fiber-cement-stabilized soil method

## 3. 土の侵食限界せん断応力の測定に関する実験

### 3.1 水中噴流試験装置の概要

本研究では Hanson ら<sup>5)</sup>が考案した水中噴流試験装置を用いて, 経過時間に対する侵食量を測定し, 限界せん断応力 ( $\tau_c$ ) と侵食係数 ( $k_d$ ) を算定して, 土の侵食に対する脆弱性について検討した. Fig.3 に実験装置の概要を示す. 浸水タンクは直径 30cm, 高さ 30cm の円筒容器であり, 水で満たさ

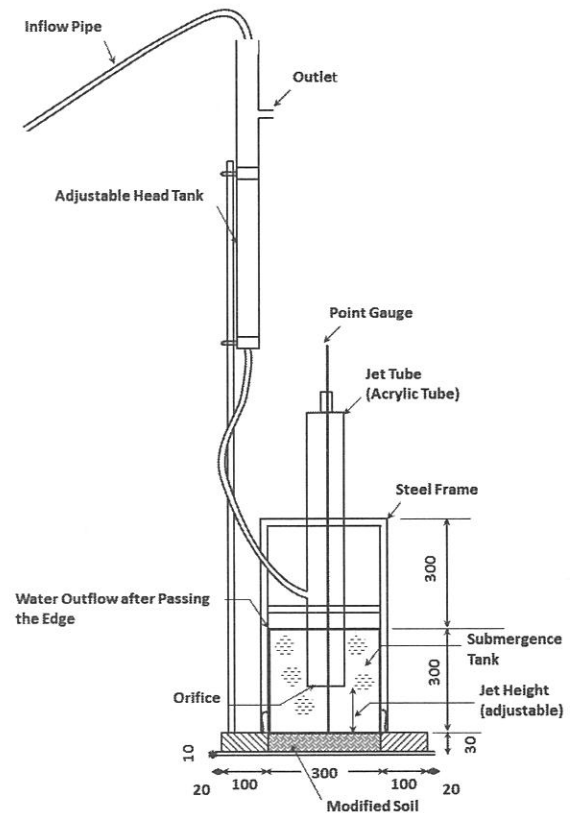


Fig.3 Schematic diagram of water jet erosion test apparatus

れている. この浸水タンクの中央にジェットチューブをセットした. ジェットチューブは直径 0.09m, 長さ 1.0m の直管であり, ジェットチューブの底面には直径 4.0 mm の孔 (ノズル) が開けられている. ジェットチューブはヘッドタンク (長さ 1.0m, 直径 0.065m) と連結されており, ヘッドタンクからヘッド一定の水がジェットチューブに供給され, ノズルを通して浸水タンクの水中に噴流が噴出されるようになっている. 供試体は浸水タンクの下部にセットされており, 供試体の表面に水中噴流が衝突することにより, 供試体が侵食される. この供試体の侵食量はポイントゲージを用いて測定した. ヘッドタンクは上下に移動可能であり, ヘッドタンクの位置を調整することにより, 水流によるせん断応力を制御できるようになっている. ヘッドタンクへの注水には水中ポンプを用いた.

### 3.2 限界せん断応力と侵食係数の決定法

水中噴流試験による限界せん断応力は, 「もぐり噴流の拡散原理」と「噴流衝突による噴流直下部に形成される侵食孔の無次元表示式」に基づいて行われる. 水中噴流の拡散原理の概要を Fig.4 に示す. ここで,  $d_0$  はノズルの直径,  $J_e$  は平衡時の深さ (m),  $J_1$  は初期地盤からノズルまでの高さ (本実験では 0.1m に設定),  $J_p$  は噴流ポテンシャルコアの長さ (0.025m) である. 侵食速度  $\varepsilon_r$  は Eq.(1) のように, 作用するせん断応力の限界せん断応力に対する超過度に比例すると考える.

$$\varepsilon_r = k_d(\tau_e - \tau_c) \quad (1)$$

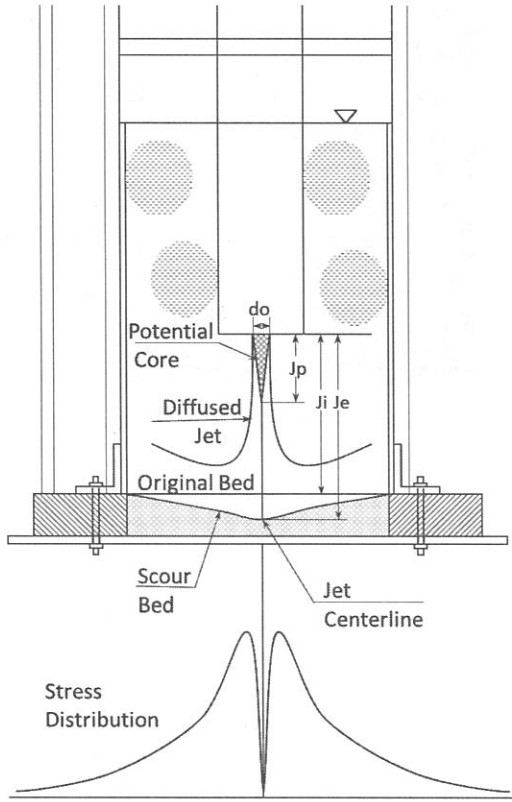


Fig.4 Schematic diagram of jet dispersion

ここに、 $k_d$  は侵食係数、 $\tau_c$  は地盤表面における噴流の有効せん断応力、 $\tau_c$  は地盤の侵食が生じる限界せん断応力である。侵食深さの時間変化率が減少してゼロになったとき、平衡時の侵食深さ  $J_e$  が得られ、Eq.(2)を用いて限界せん断応力  $\tau_c$  が算定される。また、Eq.(3)およびEq.(4)から、最大せん断応力とノズルでの水流の流速が求められる。

$$\tau_c = \tau_0 \left(\frac{J_p}{J_e}\right)^2 \tag{2}$$

$$\tau_0 = C_f \rho U_0^2 \tag{3}$$

$$U_0 = \sqrt{2gh} \tag{4}$$

これらの式で、 $\tau_0$  は水流による最大せん断応力、 $\rho$  は使用する流体の密度(1000~1025kg/m<sup>3</sup>)、 $U_0$  はノズルにおける流速、 $h$  は水頭差である。 $C_f$  は摩擦係数であるが、Hansonら<sup>5)</sup>は、この値を一定値(0.00416)で与えている。本研究ではHansonらが考案した装置を作成し、実験を行ったため、この値はHansonらにならい、 $C_f=0.00416$ とした。

通常、平衡状態の最終洗掘深を得るまでの長時間の通水は極めて困難である。そこで、本研究ではHansonら<sup>5)</sup>にならいBlaisdellら<sup>6)</sup>によって提案されている「水流によって発生する局所洗掘孔の時間変化の無次元表示」を用い、任意の計測時間の洗掘深から最終洗掘深  $J_e$  を推定する。Blaisdellら<sup>6)</sup>は、水流によって発生する洗掘深の時間変化を、双曲関数を用いてEq.(5)で表している。ここで、 $f_0$  はEq.(5)の  $f$  軸の切片で、これはEq.(5)の漸近線の  $f$  軸切片で

ある。 $f_0$ ,  $f$ ,  $x$  は Eqs.(6), (7)および(8)で表される。また、 $J$  は  $t$  時間後に計測されたノズルと侵食表面間の距離である。1つの試料に対して、 $t$  時間後に数回測定された  $J$  の値が、Eq.(5)を満足する  $A$  および  $f_0$  すなわち  $J_e$  の値を試行錯誤で決定する。

$$x = \sqrt{(f - f_0)^2 - A^2} \tag{5}$$

$$f = \log\left(\frac{J}{d_0}\right) - x \tag{6}$$

$$x = \log\left(\frac{U_0 t}{d_0}\right) \tag{7}$$

$$f_0 = \log\left(\frac{J_e}{d_0}\right) \tag{8}$$

侵食係数  $k_d$  は、実測された洗掘深、時間と既に決定した  $\tau_c$  を用い、実測された洗掘深の時間変化が Eq.(9)で表される関係式を満たすように決定される。ここに、 $J_i^*=J/J_e$ ,  $T^*=t/T_i$ ,  $T_i=J_e/(k_d \cdot \tau_c)$  である。

$$T^* = -J^* + 0.5 \ln\left(\frac{1+J^*}{1-J^*}\right)_{J_i^*} \tag{9}$$

本実験では、水頭は 1.83~2.43m の範囲で変化させて解析を行った。計測間隔は侵食の進行具合により変更しながら平均 7 回程度計測を行った。一例として Fig.5 に、粘土 100%、含水比 35%の試料を用いて計測した結果を示す。まず、7 回計測した 7 組の計測時間と侵食深に対し、Eq.(5)による計算値と実測値の誤差が最小になるように  $A$  および  $f_0$  を決定し、その値を用いて Eq.(5)から計算される  $f$  と  $x$  の関係を図示したものが Fig.5 である。図中において、Eq.(5)の漸近線の  $f$  軸切片が  $f_0$  になる。実測された値はほぼ Eq.(5)の計算結果と一致している。一方、侵食係数  $k_d$  は、実測された侵食深の時間変化が Eq.(9)に一致するように決定する。Fig.6 は、このように決定された  $k_d$  を用いて計算された侵食深の時間変化と Eq.(9)から計算される無次元侵食深と時間の関係を示したものである。すべてのケースに対して、この方法で  $\tau_c$  と  $k_d$  を決定した。

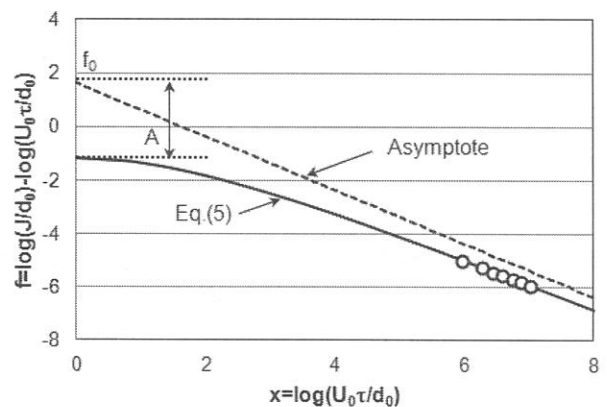


Fig.5 An example of measured data (Relationship between  $x$  and  $f$ )

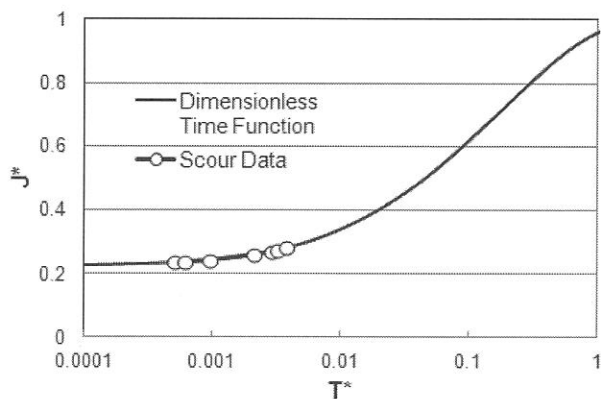


Fig.6 Relationship between dimensionless erosion depth  $J^*$  and dimensionless time  $T^*$

#### 4. 供試体の作成および実験条件

本実験で用いる固化処理土および繊維質固化処理土の供試体の作製手順は以下の通りである。標準モールド(直径 50 mm×高さ 100mm)の代わりに木枠を用いて供試体を作成した点以外の締固め条件は、従来の供試体作成手順<sup>1)</sup>と同じである。

- ① 土砂に加水して含水比を調整する。
- ② 含水比を調整した泥土に古紙破砕物を加え、攪拌・混合する。さらに所定の添加量になるように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、泥土にセメント系固化材のみを加え、攪拌・混合する。
- ③ 攪拌・混合を終えた処理土を容器に入れて密封し、初期養生として  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  で 3 日間静置する。
- ④ 固化処理土に対しては、初期養生後、処理土を解きほぐし、その後、Fig.7 に示す縦 50cm 横 50cm 深さ 7cm の木枠に固化処理土を入れ、締固めを行い、供試体を作成する。締固めの際、土を 4 層に分け、1.27kg の重りを高さ 30cm から落下させて締固めを行った。各層の締固め条件は 1 層目 5 回、2 層目 10 回、3 層目 10 回、4 層目 20 回とした。また、供試体は範囲が広いので、9 分割して 9 か所全て締固めを行った。繊維質固化処理土は団粒化して固化するので解きほぐしの必要はなく、木枠に入れて直ちに供試体を作成した。締固めの条件は固化処理土の場合と同じである。
- ⑤ 供試体から水分が蒸発しないよう密封材で被覆し、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$  で 7 日間養生する。

#### 5. 繊維質固化処理土に関する耐侵食性の評価実験

本実験では模擬泥土および津波堆積物を試料として用いた。津波堆積物は粒度によって砂質系、粘土質系、その二つを混合した混合質系として分類し、実験を行った。

##### 5. 1 模擬土を用いた実験

津波堆積物を用いた実験に先立ち、模擬土を用いて耐侵

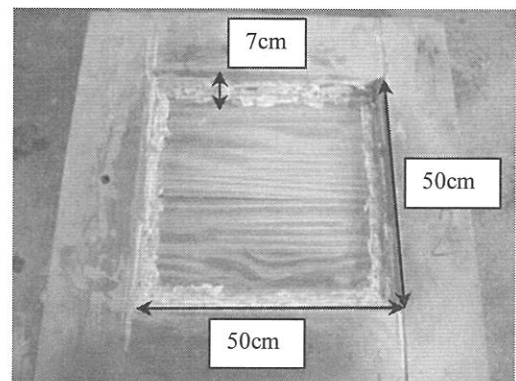


Fig.7 Wood frame to make specimen

食性評価実験を行った。模擬土は、市販の粘土とシルトを 40:60(乾燥質量比)で混合し、試料とした。模擬土を用いた理由は、市販のシルトおよび粘土を混合して作成した泥土であれば常に一定品質の泥土が得られるためであり、初めに品質一定の泥土を用いて同一条件で複数回実験を行い、データのバラツキを求め、装置の妥当性を評価するとともに、本実験における同一条件での実験回数を決定した。すなわち、覆土材の脆弱性を検討するに当たり、同一条件で複数回実験を行い、平均値を求めることが望ましい。しかし、本実験は、上述した測定方法の性質上、1 回の実験にかなりの長時間を要する。そこで、初めに未処理土、固化処理土(セメント  $60\text{kg}/\text{m}^3$ )および繊維質固化処理土(セメント  $60\text{kg}/\text{m}^3$ 、古紙破砕物  $50\text{kg}/\text{m}^3$ )に対して同一条件で 5 回の測定を行い、得られたデータのバラツキについて検討した。Table 1 に平均値、最大値と平均値との偏差(=(最大値-平均値)/平均値 $\times 100$ )および最小値と平均値との偏差(=(最小値-平均値)/平均値 $\times 100$ )を示す。また Fig.8 に模擬土の粒度分布を示す。

Table 1 Average and deviation of measured  $\tau_c$  and  $k_d$

$\tau_c$	Original Soil	Cement-Stabilized Soil	Fiber-Cement-Stabilized Soil
Average	6.50	40.3	51.6
(Max - Ave)/Ave*100 (%)	12.7	13.2	1.05
(Min - Ave)/Ave*100 (%)	-8.3	-25.7	-1.37

$k_d$	Original Soil	Cement-Stabilized Soil	Fiber-Cement-Stabilized Soil
Average	37.3	0.0041	0.0021
(Max - Ave)/Ave*100 (%)	60.5	9.0	8.1
(Min - Ave)/Ave*100 (%)	-69.6	-13.3	-6.8

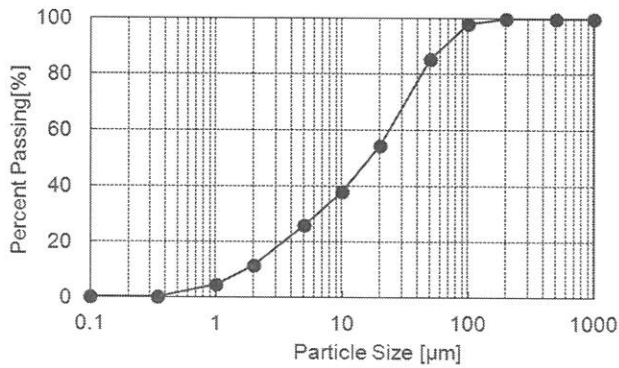


Fig.8 Particle size distribution of slit and clay mixture

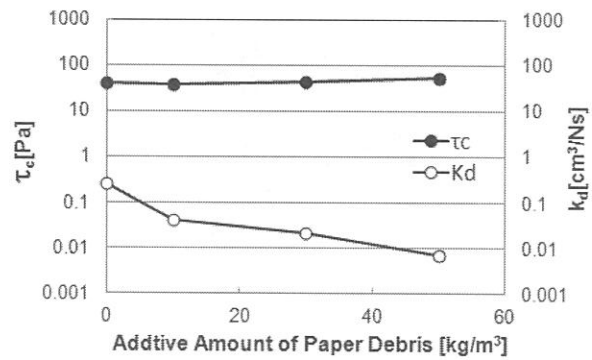


Fig.9 Effect of additive amount of paper debris on critical shear stress and erodibility (imitation mud)

限界せん断応力に関しては、未処理土と固化処理土の偏差は同程度の値を示しているが、繊維質固化処理土の偏差は、両者に比べてかなり小さくなっている。一方、侵食係数に関しては、固化処理土および繊維質固化処理土の偏差は未処理土に比べて非常に小さくなっている。これは、固化処理土および繊維質固化処理土はセメント系固化材の影響で硬くなり、試料の個体差が未処理土の場合よりも小さくなり、その結果、データのバラツキが小さくなったためと考察される。そこで、本実験では、未処理土の実験では同一条件で3回の実験を行って平均値を求めるが、固化処理土および繊維質固化処理土については、実験時間の関係上、1回の実験値で代表させることにした。

次に、固化材および古紙破砕物の添加量を変化させて実験を行った。本実験では Table 2 に示すようにセメント添加量と古紙添加量を変えて実験を実施した。一例として Fig.9 に一定量のセメント(40kg/m<sup>3</sup>)を加え、古紙破砕物の添加量を変えた場合の侵食に対する脆弱性の変化を示す。Fig.9 から、古紙破砕物の添加量が増大するのに伴い、限界せん断応力は上昇し、侵食係数は減少していることが分かる。これは古紙破砕物の添加量の増加に伴い、侵食に対する強度が増加することを示している。また、セメントを 20kg/m<sup>3</sup>、60kg/m<sup>3</sup> 加えた場合の実験でも同様の傾向が見られた。

Table 2 Mixing condition of cement and paperdebris for imitation mud

Specimen	Water Content (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Paper Debris (kg/m <sup>3</sup> )
Fiber-Cement-Stabilized Soil	100	20,40,60	10,30,50
Cement-Stabilized Soil	100	20,40,60	0
Original Soil	25	0	0

5. 2 津波堆積物を用いた実験

津波堆積物は被災地で採取したものを使用した。砂質系津波堆積物は宮城県仙台市若林区藤塚で採取したものを乾燥させた後、ふるいにかけて、最大粒径を 2mm 試料に調整した(Fig.10)。粘土質系津波堆積物は宮城県気仙沼市において、分級作業を経て最後に得られたフロックを用いた(Fig.11)。混合質系津波堆積物は、これらを質量比 1 : 1 で混合したものを使用した(Fig.12)。試料の粒度分布を Fig.13 に示す。本実験では Table 3 に示すようにセメント添加量と古紙添加量を変化させて実験を実施した。

ところで、フミン酸やフルボ酸などの有機物が多く含まれている高含水比泥土の場合、これらの有機物はセメントの水和反応を阻害する性質があるので、必要な強度が得られないことがある。そのため、予備実験により一般軟弱土用固化材の他に高有機質土用固化材を用いて津波堆積物を改良した結果、一般軟弱土用固化材でも十分な強度が得られることが確認できたため、本実験では安価な一般軟弱土用固化材を使用した。



Fig.10 Sandy tsunami sludge



Fig.11 Clayey tsunami sludge

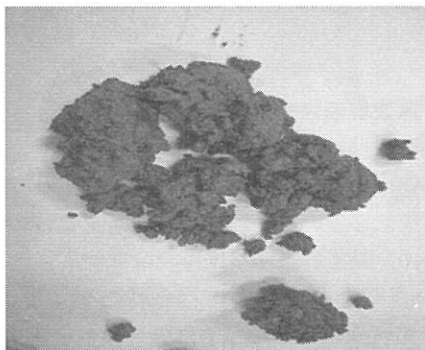


Fig.12 Mixed tsunami sludge

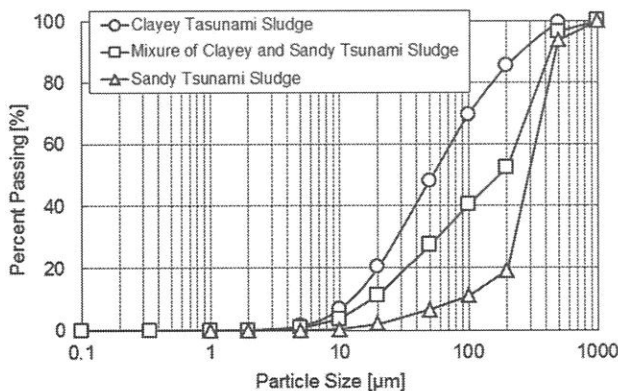


Fig.13 Particle size distribution of each tsunami sludge

Fig.14 に砂質系津波堆積物に一定量のセメント(40kg/m<sup>3</sup>)を加え, 古紙破砕物の添加量を変えた場合の侵食に対する脆弱性の変化を示す。Fig.14 から, Fig.9 と同様に古紙破砕物の添加量が増大するのに伴い, 侵食に対する強度が増加することが分かる。粘土質系, 混合質系の津波堆積物でも同様の傾向が見られ, 固化処理土や通常土と比較して, 繊維質固化処理土は侵食に対する強度が増大することが確認された。

Table 3 Mixing condition of cement and paperdebris for tsunami sludge

Specimen	Water Content (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Paper Debris (kg/m <sup>3</sup> )
Fiber-Cement-Stabilized Soil	Sandy	100	
	Clayey	150	20,40,60
	Mix	100	10,30,50
Cement-Stabilized Soil	Sandy	100	
	Clayey	150	20,40,60
	Mix	100	0
Original Soil	Sandy	25	
	Clayey	100	0
	Mix	50	0

Fig.15 に限界せん断応力  $\tau_c$  と侵食係数  $k_d$  の関係を示す。Fig.15 から繊維質固化処理土工法を適用することで粒度の違いによる耐侵食性の差が小さくなっていることが分かる。これにより, 繊維質固化処理土工法は様々な土砂に対して適用し得ることが確認された。

最後に繊維質固化処理土が未処理土および固化処理土に対してどれくらいの耐侵食性を有しているかについて考察する。ここでは, Eq.(1)で示される侵食速度を基に考察する。一例として砂質系津波堆積物の場合の侵食速度の比(=改良土の侵食速度  $\varepsilon_m$  / 未改良土の侵食速度  $\varepsilon_n$ )とセメント系固化材の添加量との関係を Fig.16 に示す。CS は固化処理土を示し, FCS は繊維質固化処理土を示す。また FCS の後の数字は古紙破砕物の添加量を示す。侵食速度の比は古紙破砕物およびセメント系固化材の添加量によって変化するが, 試料が最も硬くなる条件(古紙破砕物 50kg/m<sup>3</sup>, セメント 60kg/m<sup>3</sup>)では, 繊維質固化処理土は未改良土に対して約 10,000 倍の耐侵食性を有し, 固化処理土に対して約 24 倍といった極めて高い耐侵食性を有していることが分かる。

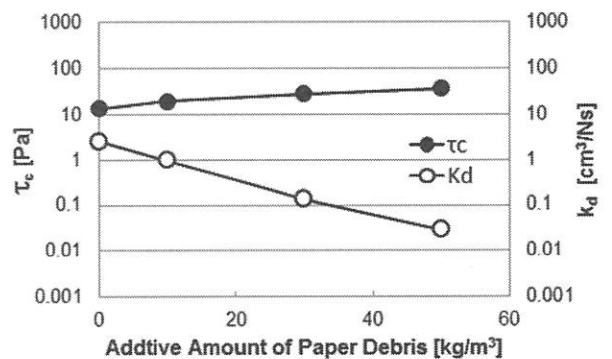


Fig.14 Effect of additive amount of paper debris on critical shear stress and erodibility (Tsunami sludge)

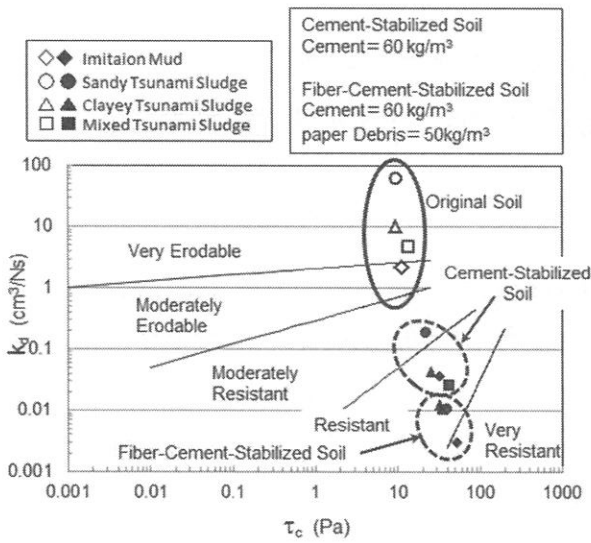


Fig.15 Relationship between critical shear stress and erodibility

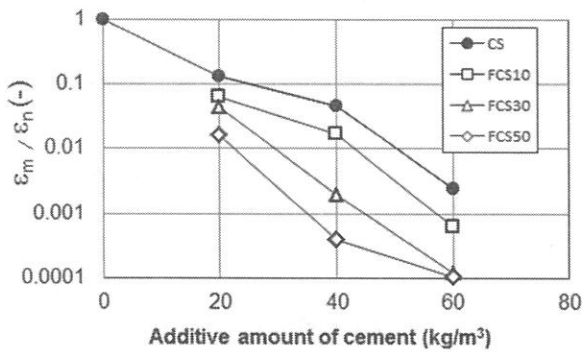


Fig.16 Relationship between ratio of rate of erosion and additive amount of cement

6. むすび

本研究では繊維質固化処理土の侵食に対する脆弱性について実験的に検討した。この際、従来の固化処理土と比較するとともに、セメント系固化材や古紙破砕物の添加量の違いによる繊維質固化処理土の脆弱性の影響について考察した。その結果、セメントおよび古紙破砕物の添加量の増加に伴い、限界せん断応力は大きくなり、侵食係数は減少する結果が得られ、古紙破砕物を添加した繊維質固化処理土は従来の固化処理土よりも耐侵食性に優れた地盤材料であることが確認できた。

謝辞 本研究は、平成 24 年度環境研究総合推進費補助金「津波堆積物を用いた放射線汚染掘削土壌被覆のための高機能性覆土材の開発」(K122104)によったことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) Mori, M., Takahashi, H., Ousaka, A., Horii, K., Kataoka, I., Ishii, T. and Kotani, K.: A Proposal of New Recycling System of High-Water Content Mud by using Paper Debris and Polymer and Strength Property of Recycled Soils, *J. of MMLJ*, **119-4,5**(2003), 155-160.
- 2) Mori, M., Yamazaki, J. and Takahashi, H.: New Development and Application of High Water Content Mud Recycling, *Japanese J. of Multiphase Flow*, **21-1**(2007), 22-28.
- 3) Takahashi, H., Takahashi, K. and Mori, M.: Experimental Study on Dynamic Strength of Fiber-Cement-Stabilized Soil, *Proc. of the 4th Symposium on Sediment-Related Disasters*, (2008), 1-5.
- 4) [http://josen.env.go.jp/area/processing/temporary\\_place.html](http://josen.env.go.jp/area/processing/temporary_place.html).
- 5) Hanson, G. J. and Simon, A.: Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA, *Hydrological Processes*, **1** (2001), 23-38.
- 6) Blaisdell, F.W., Clayton, L.A. and Hebaus, G.G.: Ultimate Dimension of Local Scour, *J. of Hydraulics Division, ASCE*, **107-HY3**(1981), 327-337.