# 平成 25 年度

環境研究総合推進費補助金 研究事業

総合研究報告書

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

(3K122104)

# 平成 26 年 3 月

東北大学大学院環境科学研究科 高橋 弘

補助事業名 環境研究総合推進費補助金研究事業(平成24年度~平成25年度)

所管 環境省

- 国庫補助金 44,324,000 円(複数年度の総計)
- 研究課題名 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
- 研究期間 平成 24 年 7 月 2 日~平成 25 年 3 月 31 日
- 研究代表者名 高橋 弘(東北大学)
- 研究分担者 里見 知昭(東北大学)

# 目 次

総合研究報告書概要	1
本文	
1. 研究背景と目的	7
2. 研究方法	8
2.1 降雨に対する耐侵食性試験	8
2.1.1 概要	8
2.1.2 水中噴流装置	
2.1.3 限界せん断応力と侵食係数の決定法	
2.1.4 人工降雨装置による耐侵食性試験	13
2.1.5 目然条件下による盛土試験	14
2.2 乾湿繰返しに対する耐久性試験	16
2.3 透水性試験 ····································	17
2.4 耐震性試験	····· ['/
3. 結果と考察	18
3.1 動的締固めによる改良十の機能性評価	
3.1.1 降雨に対する耐侵食性評価	
3.1.2 人工降雨装置による耐侵食性試験	
3.1.3 自然条件下による盛土試験	
3.1.4 乾湿繰返しに対する耐久性評価	
3.1.5 強度特性および透水性の評価	
3.1.6 耐震性評価	
3.1.7 まとめ	
3.2 静的締固めによる改良土の機能性評価	64
3.2.1 静的締固めによる繊維質固化処理土の特性	64
3.2.2 流動性および材料分離抵抗性の評価	
3.2.3 流動性および材料分離抵抗性の基準を満足する配合に関する考察	70
3.2.4 耐侵食性評価	75
3.2.5 乾湿繰返しに対する耐久性評価	76
3.2.6 強度特性および透水性の評価	78
3.2.7 耐震性評価	80
3.2.8 まとめ	83
4. 結論	
5. 参考文献	
6. 研究発表	
7. 知的財産権の取得状況	
8. 研究概要図	
	00
9. 央乂慨安	

# 環境研究総合推進費補助金 研究事業 総合研究報告書概要

研究課題名: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 研究番号 :3K122104

国庫補助金清算所要額:44,324,000 円円(複数年度の総計)

**研究期間:** 平成 24 年 7 月 2 日~平成 26 年 3 月 31 日

研究代表者名: 高橋 弘(東北大学)

**研究分担者**: 里見知昭(東北大学)

#### 研究目的

東日本大震災で発生した津波堆積物の量は膨大であり、被災6県で2,800万トンという推 計もある。これだけの量の津波堆積物を埋め立て処分するのは極めて困難であり、できる限 り再資源化することが望まれている。一方、現在、福島県内では除染作業が精力的に行われ ている。その1つに放射線物質が降り積もった土壌の表面を剥ぎ取る掘削作業がある。放射 線量の高い地表面の土壌を掘削した後では、放射線量が大きく減少するなど効果が得られて いるが、掘削土壌の処分先は未だ決まっておらず、ブルーシートなどで覆いながら、その場 に仮置きされているのが現状である。シートで覆われているものの、乾燥時には粉塵が舞い やすく、降雨時には雨水が浸透しやすい状態にある。特に雨水により放射性物質が地下に浸 透し、地下水層に達すると、汚染の範囲が大幅に拡大してしまうため、放射性物質の地下水 層への浸透は絶対に避けなければならない。さらに掘削土砂の空間線量は依然として高い状 態のままであるので、安全・安心な保管状況とは言い難い。汚染土壌を通常土で被覆した場 合、いわゆる覆土を施した場合は、覆土により空間線量が低減することが既に確認されてお り、覆土は効果的な手段であることは間違いない。しかし、単なる通常土あるいは通常土を セメント系固化材のみで固化した固化処理土は耐久性が低く、乾湿繰り返しによる影響を受 けて大きく劣化することが報告されている。乾湿により劣化し、覆土に亀裂が発生すると透 水性が増大し、放射性物質の地下への浸透が懸念されるため、これらの土壌は必ずしも万全 な覆土材とは言い難い。

そこで、乾湿繰り返しを受けても劣化しない高い耐久性、ゲリラ豪雨のような激しい降雨 にも抵抗し、侵食されない高い耐侵食性、降雨を地下に浸透させない難透水性、地震時でも 液状化しない高い耐震性を有する高機能性の覆土材を津波堆積物を用いて作成し、放射能汚 染掘削土砂の安全・安心保管に寄与することを本研究の目的とする。本研究では、道路盛土 などを造成する際に一般に採用される動的締固めによる方法の他に、実施工の容易さを考慮 し、埋戻しなどの施工の用いられることの多い打設型の静的締固めによる方法の両方で覆土 材を生成し、その機能性を評価する。

# 研究方法

#### (1) 降雨に対する耐侵食性実験

比較的短時間で耐侵食性を定量評価できる水中噴流試験装置を設計・作成する。津波堆積 物は、海岸砂のような砂質系のものとヘドロに近い粘土系のものがあることが研究代表者ら の調査により確かめられている。難透水性確保のためには、粘土系の津波堆積物の方が望ま しいことは容易に推定できるが、土質の違いにより耐侵食性がどのように変化するかを実験 により評価する。試料は古紙破砕物およびセメント系固化材の添加量を変化させて作成し、 耐侵食性に及ぼす添加量の影響についても検討する。

また、現有している人工降雨機を用いて、雨滴による耐侵食性についても検討する。この 実験では、ゲリラ豪雨のような1時間100mmを超えるような雨を人工的に再現し、この豪雨 に対しても侵食が生じない覆土材の開発を目指す。

#### (2) 乾湿繰り返しに対する耐久性試験

これまでの研究代表者らの研究により、繊維質固化処理土の高い耐久性は確認されている。 この性能は、津波堆積物を対象にしても同様であると考えられるが、実際に乾湿繰り返しに 対する高い耐久性を保持していることを実験を通して確認する。実験では、40度炉乾燥2 日間、20度水浸1日間を1サイクルとし、10サイクル繰り返しても劣化せず、初期強度の 90%を保持できる覆土材を生成するために必要な添加量の決定などを行う

# (3)透水性試験

砂質系および粘土系の津波堆積物に対して古紙破砕物およびセメント系固化材の添加量 を種々に変化させて繊維質固化処理土を作成し、透水性試験を実施して処理土の透水性を評 価し、ベントナイトと同程度の難透水性を確保できる最適添加量を把握する。本研究では、 目標透水係数を1×10<sup>-6</sup> cm/s とする。砂質系の津波堆積物の場合、古紙破砕物およびセメン ト系固化材を混合しても、この目標値をクリアできない可能性もある。この場合は、シルト・ 粘土を若干添加して粒度調整を行い、難透水性を確保できる添加量を実験的に把握する。

#### (4) 耐震性試験

津波堆積物には海岸の砂も多く含まれており液状化しやすい土である可能性が考えられ るため、改良土の耐震性の評価は必要不可欠である。そこで、一般的な手法である繰返し非 排水三軸圧縮試験により津波堆積物を使用した改良土の耐震性を評価した。 繰返し三軸圧縮試験装置は株式会社マルイ製、エアシリンダー制御式繰返し三軸圧縮試験 装置「型式:MIS-235-1-06」を使用した。セル内への加圧は、エアーレギュレーターによる 手動制御方式で恒圧制御を行う。負荷容量はセル圧が 0.6 MPa、背圧が 0.3 MPa である。繰 返し荷重の載荷は、ベロフラムシリンダー、空圧電磁弁を用いた電気・空圧サーボ方式で最 大負荷能力は約3 kN、シリンダーストロークは 100 mm である。載荷は PC にて制御を行い、 繰返し軸荷重は正弦波形による荷重制御で 0.05 Hz ~1.0 Hz の周波数で載荷できる。軸ひず み、軸荷重、間隙水圧、セル圧はそれぞれ軸変位計、ロードセル、間隙水圧計、セル圧計か らの信号値を制御ラック盤に内蔵されているアンプを介して、デジタルデータとして PC に 取り込むことができる。

#### 結果と考察

#### 動的締固めによる改良土の機能性評価

#### (1) 降雨に対する耐侵食性実験

水中噴流試験装置を用いた実験では、津波堆積物を繊維質固化処理土工法で改良した覆土 材は、未改良の津波堆積物に比べて限界せん断応力が大きく、かつ侵食係数が極めて小さい こと、すなわち耐侵食性が極めて増大することが確認された。侵食速度で比較すると1,000 倍以上の耐侵食性が得られた。また繊維質物質およびセメント系固化材の添加量の増大とと もに耐侵食性も増大することが確かめられた。一方、自然降雨による盛土からの土砂流出量 を調べた結果、土砂流出量は山砂(通常土)の約1/7程度に留まり、山砂(通常土)の土砂流出 量の1/10以下(山砂に対して10倍以上の耐侵食性)という目標値にはやや届かない結果とな った。

#### (2) 乾湿繰り返しに対する耐久性試験

40℃炉乾燥2日間、20℃水浸1日間を1サイクルとして乾湿繰り返し試験を10サイクル 継続した結果、セメント系固化材のみで改良した従来の固化処理土はサイクル数の増加とと もに劣化し、破壊強度が減少するが、繊維質固化処理土工法で改良した覆土材は、サイクル 数の増加に拘わらず劣化せず、高い耐久性を有することが確認された。

### (3)透水性試験

覆土材には雨水を内部に浸透させない難透水性が要求される。そこで、透水性試験を実施 し、覆土材の透水係数を測定した。目標値は透水係数1×10<sup>-6</sup> cm/s以下とした。津波堆積物 は砂質系が卓越するため、未改良の状態では非常に高い透水係数となったが、繊維質固化処 理土工法で改良すると、セメント系固化材の水和反応により生じたエトリンガイトなどが間 隙を埋めるようになってくるため、透水係数が低くなることが分かった。しかし、改良に当 たり津波堆積物に加水しなければならないが、適切な初期含水比に設定して改良しない限り、 透水係数の目標値をクリアすることは困難であった。

一方、本研究では改良の対象となる津波堆積物が最も締まる(密度が高くなる)含水比を基 に、改良に際しての最適初期含水を算定する理論式を導出した。この理論式に基づいて算出 される初期含水比で改良を施した場合、生成された覆土材は間隙が小さくなり、透水係数の 目標値をクリアできることが確認された。

### (4) 耐震性試験

汚染土壌の安心・安全保管を実現するためには地震時でも液状化しない高い耐震性が要求 される。そこで、繰り返し三軸圧縮試験を実施し、耐震性について検討した。本研究では、 覆土材に繰り返し圧縮荷重を負荷した際の過剰間隙水圧の上昇で耐震性を相対的に評価し た。過剰間隙水圧が大きく上昇する土砂は動的強度が低く、液状化しやすい、すなわち耐震 性が低く、逆に過剰間隙水圧があまり上昇しない土砂は動的強度が高く、液状化し難い、す なわち耐震性が高いことになる。津波堆積物を繊維質固化処理土工法で改良した覆土材は、 未改良の津波堆積物よりも約7倍程度耐震性が高く、目標値である2倍以上をクリアした。 しかし、固化処理土の1.5倍以上を目標値としたが、繊維質固化処理土は固化処理土よりも 低い耐震性となり、目標値を達成することはできなかった。

# 静的締固めによる改良土の機能性評価

#### (1)降雨に対する耐侵食性実験

静的締固めによる繊維質固化処理土を用いて水中噴流試験を実施し、限界せん断応力およ び侵食係数を評価した結果、静的締固めによる繊維質固化処理土は動的締固めによる繊維質 固化処理土よりもさらに高い耐侵食性を有していることが確かめられた。さらに静的締固め による繊維質固化処理土を用いて試験盛土を作成し、自然降雨による土砂流出量を計測した 結果、土砂流出量はほとんど見られず、動的締固めによる繊維質固化処理土では達成できな かった「山砂に対して 10 倍以上の耐侵食性」を静的締固めによる繊維質固化処理土では達 成できることが確認された。

# (2) 乾湿繰り返しに対する耐久性試験

静的締固めの改良土は動的締めの場合と異なり、突き固めを行うことをしないので、流動 性の改良土をモールドに流し込み、1週間の養生後、動的締固めの場合と同様に40℃炉乾燥 2日間、20℃水浸1日間を1サイクルとして乾湿繰り返し試験を10サイクル継続した。そ の結果、動的締固めの場合と同様に繊維質固化処理土工法で改良した覆土材は、サイクル数 の増加に拘わらず劣化せず、高い耐久性を有することが確認された。さらに目標値である「10 サイクル終了時点で初期強度の90%以上を保持」をクリアできることが分かった。

#### (3)透水性試験

乾湿繰り返し試験と同様に、流動性の改良土を容器に流し込み、1週間養生および4週間 養生後に透水性試験を実施して透水係数を計測した。2種類の津波堆積物を用いて試験を実 施したが、1週間養生では津波堆積物の種類によっては目標値である透水係数 1×10<sup>-6</sup> cm/s 以下をクリアすることができなかったが、4週間養生ではどちらの津波堆積物でも目標値を 達成できることが確認された。これは、動的締固めの場合と同様に、水和反応により生じた エトリンガイトなどの水和物が土砂の間隙を埋め、透水性を低下させたためであると推察される。

#### (4) 耐震性試験

静的締固めの場合も、動的締固めの場合と同様に、覆土材に繰り返し圧縮荷重を負荷した際の過剰間隙水圧の上昇で耐震性を相対的に評価した。動的締固めにより作成した覆土材は極めて高い耐震性を示し、未改良の津波堆積物の約30倍、固化処理土の約3倍の耐震性を示し、目標値である山砂に対して2倍以上、固化処理土に対して1.5倍以上の両方をクリアできることが確かめられた。

#### 環境政策への貢献

福島県では、除染作業で発生した掘削土や枝葉などがフレコンバッグに詰められ、仮置き されている。耐候性のフレコンバッグが使用されているものの、バッグ自体の耐久性はさほ ど高くないため、放射線を遮断するためには覆土を施す必要がある。津波堆積物や未利用の 排泥土を利用して機能性の高い覆土を生成するためには、これらの泥土に古紙破砕物および セメント系固化材を添加して改良する必要があるが、本研究では目標とする機能性を満足す る覆土材の生成法を示し得た。これにより、現場では最適配合量や最適初期含水比を求める ための室内試験を行うことなく、簡便に泥土改良作業、すなわち覆土材の生成作業を行うこ とができ、放射能汚染土の安心・安全保管を実現できることから、社会的貢献度は大きいと 考えている。

#### 研究成果の実現可能性

本研究では、覆土材の機能性について地盤工学的観点から考察するととともに、実施工も 念頭に試験盛土を作成し、自然環境下における機能性についても考察した。さらに実施工で の効率性を考慮し、動的締固めによる施工法と動的締固めを必要としない打設型の施工法を 提案するとともに、実際に試験施工を行い、その優位性を確認している。試験施工および室 内試験を通して、本研究で開発した覆土材は当初の目標値をクリアしていることを確認して おり、すぐにでも現場へ適用できる、すなわち実用化可能であると判断している。

#### 結論

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、機能性の高い覆土材を生成す ることを目的とした。実施工を考慮し、動的締固めによる繊維質固化処理土と静的締固めに よる繊維質固化処理土の両方を作成し、耐侵食性・耐久性・難透水性・耐震性の機能性につ いて検討した。その結果、津波堆積物に繊維質固化処理土工法を適用することで、機能性の 高い覆土材を生成できることが確認された。動的締固めによる繊維質固化処理土では、一部 で当初の目標値にやや届かない結果となったが、静的締固めによる繊維質固化処理土では全 ての目標値をクリアし、極めて高い機能性を有する覆土材となることが確認された。また動

5

的および動的締固めによる繊維質固化処理土の両方に対して、最適な生成を提示することが できた。本研究成果により汚染土壌の安心・安全保管が実現さることを期待したい。

# 1. 研究背景と目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、わが国の観測史上最大の 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 生した災害廃棄物および津波堆積物の量は、宮城県、岩手県、福島県の3県合計でそ れぞれ約1,600万トンおよび1,000万トンと推定されている<sup>1)</sup>。被災地の処理施設で 災害廃棄物および津波堆積物の処理が進められており、復興庁によると2014年3月 末までに全ての処理が完了する予定である。災害廃棄物に関して、可燃物は焼却処分 し、木材や金属類などは分別して再生利用されている。津波堆積物は被災した沿岸部 地域の幹線道路や宅地用の地盤材、防災林や堤防を整備するための盛土材としての利 用が進められている<sup>2)</sup>。

一方、福島県では除染作業の一つとして、放射性物質が降り積もった土壌の地表面 を剥ぎ取る作業が行われているが、掘削土砂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。仮置き場における安全確保の方法として、 盛土や土のうの被覆による汚染土の飛散や流出の防止、雨水などの流入を防止するた めのシートの使用などが挙げられている<sup>3)</sup>。しかし、通常土による覆土やシートでは 風雨や紫外線によって劣化するおそれがあり、安全・安心な保管とは言い難く、二重 三重の対策が必要である。また、仮置き場においては、放射能汚染土壌の覆土材とし て津波堆積物を利用することが検討されている。津波堆積物を覆土材として利用する ためには、高機能性(優れた強度特性、高い耐久性、降雨に対する高い耐侵食性、雨 水を地下に浸透させない難透水性、高耐震性など)を有する必要があるが、津波堆積 物そのものがこれらの高機能性を有しているとは言い難いため、津波堆積物を改良す る必要がある。

ところで、建設汚泥やヘドロなどの高含水比泥土のリサイクル工法として、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」がある<sup>4)</sup>。本工法により生成される改良土は、破壊強度・破壊ひずみが大きい、 乾湿繰返しに対して耐久性が高いなど優れた強度特性を有しており、これまでに盛土 材、埋戻材として 800 件、50 万 m<sup>3</sup>を超える実績がある。しかし、これまでは主とし て建設汚泥やヘドロなどの高含水比泥土を対象としており、津波堆積物を使用した繊 維質固化処理土の機能性は十分に検討されていない。

そこで、津波堆積物を繊維質固化処理土工法で再資源化して、汚染土の仮置き場に 用いる覆土材に活用できれば、処分に苦慮している津波堆積物を有効活用し、汚染土 の安全・安心な保管が可能になるなど震災の復旧・復興に貢献できると考えられる。 その汚染土の仮置き場における施工方法として、(1)改良土を重機で転圧することによ り目標の形に成形する動的締固めによる工法と、(2)あらかじめ用意した型枠に流動性 を持たせた改良土を流し込むことにより目標の形に成形する静的締固めによる工法 の二つの工法が考えられ、両方の施工方法に対する津波堆積物を用いた繊維質固化処 理土の機能性を検討する必要がある。

7

以上の背景より、本研究では津波堆積物を繊維質固化処理土工法により再資源化し、 動的締固めおよび静的締固めにより供試体をそれぞれ作製し、その機能性(高耐久性、 難透水性、高耐侵食性、高耐震性)を実験的に調べ、放射能汚染土壌の覆土材として の利用可能性を検討することを目的とする。

# 2. 研究方法

本研究では、津波堆積物を用いた繊維質固化処理土を動的締固めおよび静的締固め で作製した供試体で、(1)降雨に対する耐侵食性試験、(2)乾湿繰返しに対する耐久性 試験、(3)透水性試験、(4)耐震性試験を実施した。以下にその研究方法を示す。

#### 2.1 降雨に対する耐侵食性試験

# 2.1.1 概要

比較的短時間で耐侵食性を定量評価できる水中噴流試験装置を設計・作成する。こ れは、水を満たした容器の中に土砂試料をセットし、その試料に噴流を当て、噴流に よって削られた部分の深さと噴流を当ててからの時間との関係から試料の耐侵食性 を求めるものである。津波堆積物はこれまでの研究代表者らの調査により、海岸砂の ような砂質系のものとヘドロに近い粘土系のものがあることが確かめられている。難 透水性を確保するためには、粘土系の津波堆積物の方が望ましいことは容易に推定で きるが、土質の違いにより耐侵食性がどのように変化するのかを実験的に評価する。 試料は古紙破砕物およびセメント系固化材の添加量を種々変化させて作製し、耐侵食 性に及ぼす古紙破砕物およびセメント系固化材の添加量の影響も検討する。

また、現有している人工降雨装置を用いて、雨滴による耐侵食性についても検討す る。本実験では、ゲリラ豪雨のような1時間100mmを超えるような雨を人工的に再 現し、このような豪雨に対しても侵食が生じない覆土材の開発を目指す。さらに、自 然条件下での盛土試験を行い、津波堆積物を用いた繊維質固化処理土の降雨パターン と侵食土砂量の関係、降雨パターンと間隙水圧の変化傾向の関係について検討する。

#### 2.1.2 水中噴流装置

本研究では Hanson ら<sup>5)</sup>が考案した水中噴流装置を用いて、経過時間に対する侵食 量を測定し、侵食限界せん断応力(τ<sub>c</sub>)と侵食係数(k<sub>d</sub>)を算定して、土の侵食に対する 脆弱性について検討した。図-1 に実験装置の概要を示す。ジェットチューブ(長さ 1.0 m、直径 0.09 m)は潜水タンクの中央に設置し、ヘッドタンク(長さ 1.0 m、直径 0.065 m)からジェットチューブに注水する。ヘッドタンクは水流によるせん断応力を コントロールし、注入時の不安定さを抑制するために用いた。ジェットのノズルの直 径は 4.0 mm である。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 ンクへの注水には水中ポンプを用いた。



図-1 水中噴流装置の概略

# 2.1.3 限界せん断応力と侵食係数の決定法

ジェットテストによる限界せん断応力の推定は、「もぐり噴流の拡散原理」と「ジェット衝突によるジェット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。ジェットの拡散原理の概要を図-2に示す。



図-2 ジェットの拡散原理の概要

ここで、 $d_0$ はノズルの直径、 $J_e$ は平衡時の深さ[m]、 $J_i$ は初期地盤からノズルまでの高さ(= 0.1 m)、 $J_p$ はジェットポテンシャルコアの長さ(= 0.037 m)である。侵食量 $\varepsilon$ は式(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。

$$\varepsilon = k_{\rm d} \left( \tau_{\rm e} - \tau_{\rm c} \right) \tag{1}$$

ここに、kaは侵食係数、taは流体に作用するせん断力、taは限界せん断力である。式(1)より、侵食限界せん断応力が大きいほど、また侵食係数が小さいほど侵食量が小さくなり、耐侵食性が高いということになる。

侵食された土砂表面の深さの変化率が減少してゼロになったとき、平衡時の深さ Je が得られ、式(2)を用いて限界せん断応力が算定される。また、式(3)および式(4)から、 最大せん断応力とノズルでのジェット流速が求められる。

$$\tau_{\rm i} = \tau_0 \left(\frac{J_{\rm p}}{J_{\rm i}}\right)^2 \tag{2}$$

$$\tau_0 = C_{\rm f} \rho U_0^{\ 2} \tag{3}$$

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

ここに、 $\tau_0$ はジェットによる最大せん断力、 $C_f$ は摩擦係数 (= 0.00416)、 $\rho$ は使用する 流体の密度(= 1,000 kg/m<sup>3</sup>~1,025 kg/m<sup>3</sup>)、 $U_0$ はノズルの流速、hは水頭差である。

通常、特に現地では、平衡状態の最終洗掘深を得るまでの長時間の通水は不可能で ある。そこで、Blaisdell ら<sup>6</sup>によって提案されている「ジェットによって発生する局 所洗掘孔の時間発展の無次元表示」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 らは、ジェットによって発生する洗掘深の時間変化を、双曲 関数を用いて式(5)で表現している。

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

ここで、 $f_0$ は式(5)のf-軸の切片で、これは式(5)の漸近線のf-軸切片である。 $f_0$ 、f、xはそれぞれ式(6)、式(7)および式(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、式(5)を満足するAおよび $f_0$ すなわち $J_0$ の値を試行錯誤で決定する。

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

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

$$f_0 = log\left(\frac{J_{\rm e}}{d_0}\right) \tag{8}$$

侵食係数 kd は、実測された洗堀深、時間、既に決定した tc を用い、実測された洗堀深の時間変化が式(9)で表される関係式を満たすように決定される。

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

実験において水頭は 1.83 m~2.43 m 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 6 回程度計測を行った。一例として図-3 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、6 回計測した 6 組の計測時間と侵食深に対し、式(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<sub>0</sub>を決定し、その値を用いて式(5)から計算される f と x の関係を図示したも のが図-3 である。図中において、式(5)の漸近線の f-軸切片が f<sub>0</sub>になる。実測された値 はほぼ式(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式(9)に一致するように決定 する。図-4 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式(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。全てのケースに対し て、この方法で $\tau_c$ と  $k_d$ を決定した。



# 2.1.4 人工降雨装置による耐侵食性試験

図-5に試験装置の全景を示す。本試験装置は、降雨装置(0.6 m×0.6 m)、転倒ます 型雨量計(大起理化工業株式会社製、DIK-0201)、木製土槽(図-6を参照)、侵食土砂 を測定するための容器で構成される。なお、本試験では繊維質固化処理土と比較する ため、盛土の遮水性材料として使われている、まさ土とベントナイトの混合土(以下、 ベントナイト混合土)<sup>7)</sup>でも検証した。なお、本試験は動的締固めによる供試体のみ で行った。





図-6 に示すように、斜面角は一般的な盛土の斜面勾配の 1:1.5 を採用した<sup>8)</sup>。本研

究では、雨量強度と侵食土砂量との関係を検討するため、雨量強度を 70 mm/h、 95 mm/h、 120 mm/h の 3 ケースで土槽試験を実施した。降雨量の計測間隔は 1 分、土砂 侵食量の計測間隔は 30 分とした。本試験では仙台市若林区藤塚で採取した砂質系津 波堆積物を用いた。採取土には多くのがれきが混入していたため、炉乾燥で乾燥させ た堆積物を 2 mm のふるいを使い、ふるいを通過した土で供試体を作製した。

繊維質固化処理土の作製手順を述べる。まず試料に古紙破砕物を混合しやすくする ため含水比が40%となるように加水調整する。含水比調整した試料に古紙破砕物とセ メント系固化材を加え混合する。今回はこれまでの研究成果をもとに、古紙破砕物の 添加量を25 kg/m<sup>3</sup>、セメント系固化材の添加量を60 kg/m<sup>3</sup>とした。次に初期養生とし て、上述の処理土を容器に入れて密封し、20±3℃で3日間静置する。初期養生後、突 固めによって供試体を作製し、供試体から水分が蒸発しないように密封材で被覆し、 20±3℃で7日間養生する。

一方、ベントナイト混合土はまさ土とベントナイトを 6:1 の乾燥質量比で混合し、 含水比は締固め試験(JIS。 A 1210)の結果で得られた最適含水比 15.7%となるよう に加水調整した。供試体は突固めによって作製した。

# 2.1.5 自然条件下による盛土試験

自然条件下に対する耐侵食性と浸透挙動を評価するための盛土試験を大学の敷地 内で実施した。津波堆積物を用いた繊維質固化処理土と比較するため、ベントナイト 混合土でも検証した。まさ土とベントナイトは 6:1 の乾燥質量比で混合し、含水比を 15.7%(最適含水比)に調整して作製した。津波堆積物は宮城県名取市で採取した砂 質系の津波堆積物を使用して繊維質固化処理土を生成した。繊維質固化処理土の作製 条件はこれまでの研究成果より、初期含水比を 40%、古紙破砕物の添加量を 25 kg/m<sup>3</sup>、 セメント系固化材の添加量を 100 kg/m<sup>3</sup>と設定した。

図-7 に盛土試験の概要を示す。斜面角は一般的な盛土の斜面勾配の 1:1.5 を採用した。また、繊維質固化処理土とベントナイト混合土の覆土厚は環境省の方針<sup>3)</sup>に従っ



(a) 盛土の全景



図-7 自然条件下における盛土試験の概要

て 30 cm に設定した。基盤層 (図-7 (b)の Natural ground) は土砂再資源化工場で生成 した透水性の極めて低い繊維質固化処理土を用いた。

測定は2013年6月上旬から開始した。降雨量は転倒ます型雨量計(OW-34-BP、株 式会社大田計器製作所製)を使って10分間隔で測定した。侵食土砂量は降雨後、定 期的に側溝から流出土砂を採取し、110±5℃の高温乾燥器で炉乾燥させ、その乾燥質 量を測定した。盛土内の浸透挙動を具体的に把握するため、間隙水圧を測定できるテ ンシオメータを設置した。テンシオメータは図-8に示すように、セラミック製ポーラ スカップ、タンク・パイプ、圧力センサで構成され、内部は脱気水で満たされている。 テンシオメータは広く使われている機器であり<sup>9)</sup>、著者らも自然斜面に設置してリア ルタイム測定を実施している<sup>10),11)</sup>。なお、テンシオメータを断熱カップで覆ってい る理由は、テンシオメータの圧力センサを防水し、さらに直射日射による圧力センサ の日周期変動を抑えるためである。図-9 にテンシオメータによる測定箇所(①~⑦) を示す。本試験では、盛土内の浸透挙動を詳細に把握するため、繊維質固化処理土と ベントナイト混合土の斜面に各7本設置した。間隙水圧の測定間隔は降雨量と同じく 10分とした。なお、本試験は室内降雨試験と同様、動的締固めによる供試体のみで測 定を行った。



図-8 テンシオメータの概要(左:模式図、右:設置状況)



図-9 テンシオメータによる測定箇所

# 2.2 乾湿繰返しに対する耐久性試験

これまでの研究代表者らの研究により、繊維質固化処理土の高い耐久性は確認され ている。この性能は、津波堆積物を対象にしても同様であると考えられるが、これま でと同様に乾湿繰返しに対する高い耐久性を保持することを実験的に確認する。試験 方法は独立行政法人土木研究所と(財)先端建設技術センターおよび民間 22 社が共 同開発した「建設汚泥の高度処理・利用技術」建設汚泥改良土の耐久性に準拠した<sup>12)</sup>。 具体的には、直径 5cm、高さ 10cm の標準モールドを用いて供試体を作製し、40℃炉 乾燥 2 日間、20℃水浸 1 日間の合計 3 日間を 1 サイクルとし、10 サイクル繰返し行い、 各サイクルの乾燥後および水浸後に供試体の状況観察・写真撮影を行うとともに、所 定のサイクル(0, 2, 6, 10 サイクル)終了後に一軸圧縮試験を行い、サイクル数の増 加に伴う一軸圧縮強度の変化を調べる。状況観察では、表-1 に示す健全度ランクによ り供試体の健全度を数値化することにより評価する。本研究では 10 サイクル繰返し ても劣化せず、初期強度の 90%を保持できる覆土材を生成するために必要な添加量の 決定などを行う。

ランク	クラック状況	欠落状況		
А	外見上、ほとんど変化なし			
В	微細クラック発生 表面剥離が局部的に多			
С	明瞭なクラックが一部に発生	供試体の一部が僅かに欠落		
D	明瞭なクラックが全体に発生	供試体がより大きく欠落		
Е	供試体の一部または全体が崩落 (~20%)			
F	供試体が全体的に崩落、崩壊、供試体としての形は存在			
G	供試体全体が崩落し、片々は塊状			
Н	供試体全体が崩落し、片々は細粒化~泥状化			

表-1 供試体健全度ランク

# 2.3 透水性試験

汚染土壌に降雨が浸透し、放射性物質が地下水層まで到達すると、汚染の範囲が格 段に広がってしまうため、放射性物質の地下水層までの浸透は絶対に避けなければな らない。つまり、難透水性は覆土材に求められる重要な機能の1つである。遮水材と しは一般に透水性の低いベントナイトが使用されることが多いが、津波堆積物を利用 して難透水性の覆土材が生成できればベントナイトを購入する必要がなく、津波堆積 物の処分にも繋がる。そこで、砂質系および粘土系の津波堆積物に対して古紙破砕物 およびセメント系固化材の添加量を種々変化させて繊維質固化処理土を作製し、大起 理化工業株式会社の土壌透水性測定器(DIK-4012)を用いて透水性試験(変水位と雨 水試験)を行い、処理土の透水性を評価し、古紙破砕物およびセメント系固化材の最 適添加量を把握する。本研究では、改良土の難透水性に関する性能目標は環境省が示 した方針<sup>13)</sup>を参考に、目標透水係数を1×10<sup>-6</sup> cm/s とする。

# 2.4 耐震性試験

津波堆積物を地盤材料として再資源化する際の改良土に求められる性能の一つと して、高耐震性が挙げられる。わが国は世界でも有数の地震大国であり、直近の事例 を挙げると東北地方太平洋沖地震の影響により、日本各地で液状化による被害が発生 した。繊維質固化処理土に対する耐震性に関するこれまでの研究では、建設汚泥を模 擬した泥土を用いて作製した繊維質固化処理土は高耐震性を有することが確認され ているが<sup>14)</sup>、津波堆積物には海岸の砂も多く含まれており液状化しやすい土である可 能性が考えられるため、改良土の耐震性の評価は必要不可欠である。そこで、一般的 な手法である繰返し非排水三軸圧縮試験により津波堆積物を使用した改良土の耐震 性を評価した。 繰返し三軸圧縮試験装置は株式会社マルイ製、エアシリンダー制御式繰返し三軸圧 縮試験装置「型式:MIS-235-1-06」を使用した。セル内への加圧は、エアーレギュレ ーターによる手動制御方式で恒圧制御を行う。負荷容量はセル圧が 0.6 MPa、背圧が 0.3 MPa である。繰返し荷重の載荷は、ベロフラムシリンダー、空圧電磁弁を用いた 電気・空圧サーボ方式で最大負荷能力は約 3 kN、シリンダーストロークは 100 mm で ある。載荷は PC にて制御を行い、繰返し軸荷重は正弦波形による荷重制御で 0.05 Hz ~1.0 Hz の周波数で載荷できる。軸ひずみ、軸荷重、間隙水圧、セル圧はそれぞれ軸 変位計、ロードセル、間隙水圧計、セル圧計からの信号値を制御ラック盤に内蔵され ているアンプを介して、デジタルデータとして PC に取り込むことができる。

# 3. 結果と考察

### 3.1 動的締固めによる改良土の機能性評価

# 3.1.1 降雨に対する耐侵食性評価

# (1) 水中噴流試験装置の妥当性評価試験

耐侵食性試験に先立ち、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、本研究における同一条件 での実験回数を決定した。本来であれば、覆土材の脆弱性を検討するには、同一条件 で複数回実験を行うことが望ましい。しかし、本実験は先述した測定方法の性質上、 1回の実験に長時間を要する。そこで初めに未処理土、固化処理土(セメント添加量 60 kg/m<sup>3</sup>)および繊維質固化処理土(古紙破砕物添加量 50kg/m<sup>3</sup>、セメント系固化材添 加量 60 kg/m<sup>3</sup>)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。妥当性評価実験では試料として市販されている粘土とシルトを混合 した土を用いた。これは市販のシルトおよび粘土を混合して作製した泥土であれば常 に一定品質の泥土を用いて実験を行うことができるためである。

表-2 に限界せん断力 τ<sub>c</sub>および侵食係数 k<sub>d</sub>の平均値、最大値あるいは最小値と平均 値との偏差(=(最大値(最小値)-平均値)/平均値×100)を示す。

限界せん断力に関しては、未処理土と固化処理土の偏差は同程度であるが、繊維質固 化処理土の偏差は未処理土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 硬化し、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えられる。そこで、本試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につ いては、計測時間の都合上、1回の実験値を代表値として用いることにした。

限界せん断力 t <sub>c</sub>	原土 (未処理土)	固化処理土	繊維質固化処理土
平均值 [Pa]	6.50	40.3	51.6
最大値との偏差 [%]	12.7	13.2	1.05
最小値との偏差 [%]	-8.3	-25.7	-1.37
侵食係数 k <sub>d</sub>	原土 (未処理土)	固化処理土	繊維質固化処理土
平均值 [cm <sup>3</sup> /Ns]	37.3	0.0041	0.0021
最大値との偏差 [%]	60.5	9.0	8.1
最小値との偏差 [%]	-69.6	-13.3	-6.8

表-2 限界せん断力および侵食係数の平均値および偏差

(2) 模擬泥土を用いた繊維質固化処理土の耐侵食性評価

本実験ではシルトと粘土を質量比 6:4 で混合することによって、模擬泥土を作製 し、それを用いて生成した繊維質固化処理土の耐侵食性について検討した。模擬泥土 を作製し、実験試料として用いた理由は先述したとおり市販のシルトおよび粘土を混 合して作製した泥土であれば常に一定品質の泥土を用いて実験を行うことができる ためである。模擬泥土の粒径加積曲線を図-10に示し、締固め曲線を図-11に示す。締 固め試験は JIS A 1210 (A-a 法) で行った。



図-11 模擬泥土の締固め曲線

初期含水比、古紙破砕物の添加量、セメント系固化材の添加量などの条件を表-3 に 示す。未処理土は供試体が最も密になる含水比、つまり最大乾燥密度となる含水比よ りやや湿潤側の 25%で締固めを行った。そして、侵食係数 kd、限界せん断力 τ εを算出 した。

	初期含水比 [%]	古紙破砕物の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	セメント系固化材の 添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]
原土 (未処理土)	25	0	
固化処理土	100	0	20, 40, 60
繊維質固化処理土	100	10, 30, 50	20, 40, 60

表-3 試料の作製条件

図-12 に一定の古紙破砕物の添加量に対してセメント系固化材の添加量を変えた場合の試験結果を示す。図-12 は古紙破砕物を添加していない従来のセメント系固化材のみの固化処理土に対する結果である。一方、図-13 は古紙破砕物の添加量が 30 kg/m<sup>3</sup>の場合の結果である。セメント系固化材の添加量の増加に伴い、限界せん断力 τ<sub>c</sub> は緩やかに上昇しているのに対し、侵食係数 k<sub>d</sub> は減少していることがわかる。これはセメント系固化材の添加量が増加するほど、侵食に対する強度が上昇していることを示している。また、図-12 に示す従来の固化処理土の場合は、セメント系固化材の添加量が増加するにつれて侵食係数が急減しているものの、図-13 の繊維質固化処理土の場合はセメント添加量の増加に対して侵食係数の減少は緩やかである。また、図-12 および図-13 の侵食係数 k<sub>d</sub> の結果より、古紙破砕物を加えることで耐侵食性に優れ、セメント系固化材の使用量を抑えた地盤材料を作ることができると考えられる。

図-14 にセメント系固化材の添加量が 60 kg/m<sup>3</sup>の場合に対する古紙破砕物の添加量 を変えた試験結果を示す。図-14 より、古紙破砕物の添加量の増加に伴い、限界せん 断力 τ<sub>c</sub>は緩やかに上昇しているのに対し、侵食係数 k<sub>d</sub>は減少していることがわかる。 これは古紙破砕物の添加量が多いほど侵食に対する強度が上昇していることを示し ている。つまり、古紙破砕物を添加することによって侵食しにくい地盤材料を生成す ることができると考えられる。



図-12 従来の固化処理土に対するセメント系固化材の添加量の影響



図-13 繊維質固化処理土に対するセメント系固化材の添加量の影響



図-14 繊維質固化処理土に対する古紙破砕物の添加量の影響

図-15 は未処理土、固化処理土、繊維質固化処理土の限界せん断力  $\tau_c$  および侵食係数  $k_d$ の関係をまとめた結果である。図-15 に示されている「Very erodible」「Moderately erodible」「Moderately resistant」「Resistant」「Very resistant」は Hanson らが河川の侵食 に関する研究を行った際に用いられた限界せん断力  $\tau_c$  および侵食係数  $k_d$  による耐侵 食性の評価区分である。つまり、図-15 においてプロットがより右下にあれば耐侵食 性に優れているということになる。

図-15 から固化処理土および未処理土と比較して、繊維質固化処理土は耐侵食性に 優れた区分にあることがわかる。すなわち、本試験から繊維質固化処理土が侵食に対 して高い耐久性を有していることを明らかにすることができた。



図-15 限界せん断力 τ<sub>c</sub>と侵食係数 k<sub>d</sub>の関係

# (3) 津波堆積物を用いた繊維質固化処理土の耐侵食性評価

本試験では、宮城県仙台市藤塚で採取した砂質系津波堆積物、宮城県気仙沼市で採取した粘土質系津波堆積物、その二つを質量比 1:1 の割合で混合した混合津波堆積物を用いて繊維質固化処理土を作製し、繊維質固化処理土の耐侵食性を検討した。各 津波堆積物の写真を図-16 に、各津波堆積物の粒径加積曲線を図-17 に示す。

表-4 に初期含水比、古紙破砕物の添加量、セメント系固化材の添加量などの配合条件を示す。セメント系固化材および古紙破砕物を添加しない未処理の砂質系津波堆積物は含水比 100%では締固めを行うことができなかったため、本試験では模擬泥土の場合と同様に含水比 25%に調整した。気仙沼で採取した粘土系津波堆積物は分級作業を経て得られたものであり、凝集剤が含まれているため、採取した時点で含水比約 100%の状態であった。粘土質系津波堆積物および混合津波堆積物には凝集剤が含まれており、乾燥させると団粒化する可能性があったため、炉乾燥を行わなった。また、加水調整を行わない状態では古紙破砕物、セメント系固化材を添加して繊維質固化処理土を作製することが困難であったため、本実験では初期含水比を 150%に加水調整



(a) 砂質系





(c) 混合

図-16 本試験で使用した津波堆積物



図-17 本試験で使用した津波堆積物の粒径加積曲線

し、固化処理土、繊維質固化処理土を作製した。初期状態でセメント系固化材、古紙 破砕物を添加しない粘土質系津波堆積物と混合津波堆積物の未処理土は含水比 25% で調整することができないため、加水調整を行わず、それぞれ含水比 100%および 50% の状態で締固めを行い、供試体を作製した。そして、侵食係数 k<sub>d</sub>、限界せん断力 τ<sub>c</sub> を算出した。

		初期含水比	古紙破砕物の	セメント系固化材の	
		[%]	添加量 [kg/m³]	添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	
原土 (未処理土)	砂質系	25			
	粘土質系	100	0	0	
	混合	50			
固化処理土	砂質系	100		0	
	粘土質系	150	20, 40 ,60		
	混合	100			
繊維質 固化処理土	砂質系	100			
	粘土質系	150	20, 40, 60	10, 30, 50	
	混合	100			

表-4 試料の作製条件

ところで、フミン酸やフルボ酸など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系固化材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。

# (a) 砂質系津波堆積物を用いた場合

図-18 に古紙破砕物を添加していない従来の固化処理土を用いた結果を示し、図-19 に古紙破砕物の添加量を 10 kg/m<sup>3</sup>、30 kg/m<sup>3</sup>、50 kg/m<sup>3</sup>とした場合の結果を示す。セメント系固化材の添加量の増加に伴い限界せん断力 τ<sub>c</sub> は緩やかに上昇しているのに対し、侵食係数 k<sub>d</sub> は減少していることがわかる。これはセメント系固化材の添加量の増加により、侵食に対する強度が上昇していることを示している。つまり、模擬泥土と同様に砂質系津波堆積物の場合でも古紙破砕物を加えることで耐侵食性に優れ、セメント系固化材の使用量を抑えた地盤材料を作ることができると考えられる。



図-18 従来の固化処理土に対するセメント系固化材の添加量の影響





(c) 古紙破砕物の添加量が 50 kg/m<sup>3</sup>の場合 図-19 繊維質固化処理土に対するセメント系固化材の添加量の影響

図-20 にセメント系固化材の添加量を一定とし、古紙破砕物の添加量を変えた場合の試験結果を示す。試験結果より古紙破砕物の添加量の増加に伴い、限界せん断力 τ。は緩やかに上昇しているのに対し、侵食係数 kd は減少していることがわかる。これは古紙破砕物の添加量が多いほど侵食に対する強度が上昇していることを示している。つまり、古紙破砕物を添加することによって侵食しにくい地盤材料を生成することができると考えられる。



(c) セメント系固化材の添加量が 60 kg/m<sup>3</sup>の場合 図-20 繊維質固化処理土に対する古紙破砕物の添加量の影響

図-21 は未処理土、固化処理土、繊維質固化処理土の限界せん断力 τ<sub>c</sub>および侵食係 数 k<sub>d</sub>の関係をまとめた結果である。図-21 から固化処理土や未処理土と比較して、繊 維質固化処理土が耐侵食性に優れた区分にあることがわかる。すなわち、本試験から 砂質系津波堆積物を用いて作製した繊維質固化処理土が侵食に対して高い耐久性を 有していることを明らかにすることができた。



図-21 限界せん断力 τ<sub>c</sub>と侵食係数 k<sub>d</sub>の関係(砂質系津波堆積物)

# (b) 粘土質系津波堆積物を用いた場合

図-22 に古紙破砕物を添加していない従来の固化処理土を用いた結果を示し、図-23 に古紙破砕物の添加量を 10 kg/m<sup>3</sup>、30 kg/m<sup>3</sup>、50 kg/m<sup>3</sup>とした場合の結果を示す。試験結果より、限界せん断力  $\tau_c$ は緩やかに上昇しているのに対し、侵食係数  $k_d$ は減少していることがわかる。これはセメント系固化材の添加量の増加に伴い、侵食に対する強度が上昇していることを示している。



図-22 従来の固化処理土に対するセメント系固化材の添加量の影響



(c) 古紙破砕物の添加量が 50 kg/m<sup>3</sup>の場合 図-23 繊維質固化処理土に対するセメント系固化材の添加量の影響

図-24 にセメント系固化材の添加量を一定とし、古紙破砕物の添加量を変えた場合の試験結果を示す。未処理土、砂質系津波堆積物を用いた繊維質固化処理土を作製した場合、古紙破砕物の添加量が増加するほど、限界せん断力 τc は緩やかに増加し、 侵食係数 kd は減少した。しかし、粘土質系津波堆積を用いた本実験結果からは同様の傾向は確認することができなかった。これは粘土系津波堆積物に含まれる凝集剤が影響していると考えられる。本実験では団粒化している粘土質系津波堆積物に加水を行い、初期含水比 150%で固化処理土、繊維質固化処理土を作製したが、古紙破砕物を十分混合することが難しく、繊維が絡み合わなかったため、あまり耐侵食性が向上しなかったと考えられる。





(c) セメント系固化材の添加量が 60 kg/m<sup>3</sup>の場合 図-24 繊維質固化処理土に対する古紙破砕物の添加量の影響

図-25 は未処理土、固化処理土、繊維質固化処理土の限界せん断力 τ<sub>c</sub>および侵食係 数 k<sub>d</sub>の関係をまとめた結果である。全体の傾向としては、固化処理土や未処理土と比 較して、繊維質固化処理土が耐侵食性に優れた区分にあることがわかる。すなわち、 本試験から繊維質固化処理土が侵食に対して高い耐久性を有していることを明らか にすることができた。すなわち、粘土質系津波堆積物を用いた場合でも固化処理土や 通常土と比較して、繊維質固化処理土の侵食に対する高い強度を明らかにすることが できた。



図-25 限界せん断力 Tc と侵食係数 kd の関係(粘土質系津波堆積物)

しかし、セメント系固化材の添加量が20kg/m<sup>3</sup>の場合、固化処理土、繊維質固化処 理土は未処理土と比較してそれほど高い耐侵食性を有していないことがわかる。これ は初期含水比が高いため、セメント系固化材の添加量が少ない状態では適切な締固め が行われていないためであると推察される。また、粘土質系津波堆積物を用いた場合、 セメント系固化材のほうが古紙破砕物に比べて、侵食に対する強度に影響を与えてい ることが顕著に明らかとなっている。これは凝集剤の影響で古紙破砕物が試料に対し てなじみにくいのに対し、セメント系固化材は粒径が小さく凝集剤が含まれた試料に も均一に混合されるためであると考えられる。

### (c) 混合津波堆積物を用いた場合

図-26 は未処理土、固化処理土、繊維質固化処理土の限界せん断力 τ<sub>c</sub>および侵食係 数 k<sub>d</sub>の関係をまとめた結果である。図-26 より、固化処理土や未処理土と比較して、 繊維質固化処理土が耐侵食性に優れた区分にあることがわかる。また、砂質系津波堆 積物および粘土質系津波堆積物の結果と同様、繊維質固化処理土が侵食に対して高い 耐久性を有していることを明らかにすることができた。

しかし、セメント系固化材の添加量が 20 kg/m<sup>3</sup>の場合、固化処理土、繊維質固化処 理土は未処理土と比較してそれほど高い耐侵食性を有していないことがわかる。これ は初期含水比が高いため、セメント系固化材の添加量が少ない状態では適切な締固め が行われていないことが原因であると考えられる。また、先に示した粘土質系津波堆 積物を用いた場合の試験結果より、セメント系固化材のほうが古紙破砕物に比べて、 侵食係数 ka (侵食に対する強度)の変化への影響が大きいことが確認されている。こ れも粘土質系津波堆積物を用いて作製した繊維質固化処理土と同様、凝集剤の影響で 古紙破砕物が試料に対してなじみが悪くなるのに対し、セメント系固化材は粒径が小 さく凝集剤が含まれた試料にも均一に混合されるためであると考えられる。



図-26 限界せん断力 τ<sub>c</sub>と侵食係数 k<sub>d</sub>の関係(混合津波堆積物)

#### (d) 考察

図-27 に模擬泥土および津波堆積物の耐侵食性の関係をまとめた図を示す。未処理

土はセメント系固化材、古紙破砕物を全く添加しないもの、固化処理土はセメント系 固化材を 60 kg/m<sup>3</sup>添加し、古紙破砕物を添加しないもの、繊維質固化処理土はセメン ト系固化材を 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物を 50 kg/m<sup>3</sup>添加したものを示している。



図-27 限界せん断力 τ<sub>c</sub>と侵食係数 k<sub>d</sub>の関係のまとめ

図-27 より、未処理土の耐侵食性を比較すると模擬泥土が最も高く、次いで混合津 波堆積物、粘土質系津波堆積物であり、砂質系津波堆積物が最も低くなっている。一 般的に耐侵食性の評価方法には粘土含有率、粘着力、乾燥密度などがパラメータとし て用いられている<sup>15)</sup>。表-5 に各試料の均等係数  $U_c$  (=  $D_{60} / D_{10}$ ) および曲率係数  $U_c$ ' (=  $(D_{30})^2 / (D_{10} D_{60})$ )を示す。 $D_i$ は粒子全体の質量の i%が通過したときの粒径を示し ている。

	$D_{10}$ [µm]	$D_{30}$ [µm]	$D_{50}$ [µm]	$D_{60}$ [µm]	U <sub>c</sub> [-]	Uc' [-]
模擬泥土	3.1	10.2	17.8	22.7	7.32	1.478
砂質系津波堆積物	10.7	117.6	289.5	332.0	31.12	3.904
粘土質系津波堆積物	12.5	28.2	53.0	71.7	5.74	0.899
混合津波堆積物	4.5	15.3	26.1	32.4	7.2	1.606

表-5 各津波堆積物の均等係数および曲率係数

表-5 より、砂質系津波堆積物は粒度がよいため  $(U_c \ge 10$ および  $\sqrt{U_c} \ge U_c' > 1)$ 、乾燥 密度が高いと考えられるが、他の津波堆積物と比較して粘土含有率が低く、粘着力が ほとんどないため、より低い耐侵食性を示したと推察される。

図-27 に示す固化処理土の耐侵食性についても未処理土の耐侵食性と同様、模擬泥 土が最も高く、次いで粘土質系津波堆積物、混合津波堆積物であり、砂質系津波堆積 物が最も低くなっている。この理由も未処理土の場合と同様であると考えられる。一 方、繊維質固化処理土については、模擬泥土の耐侵食性が最も高く、それ以外の津波 堆積物はほとんど差のない同程度の耐侵食性を有していることがわかる。また、土質 改良を施すことによって耐侵食性の差が小さくなっていることも試験結果からわか る。つまり、繊維質固化処理土工法は様々な土質に対して適用可能であり、繊維質固 化処理土工法を適用することによって安定した耐侵食性を有する土砂に改良するこ とができることが本試験で明らかとなった。

以上の試験結果をもとに、繊維質固化処理土が未処理土および固化処理土と比較し てどれほどの耐侵食性を有しているかについて考察する。ここでは式(1)で示される侵 食速度 $\varepsilon$ をもとに考察する。侵食速度 $\varepsilon$ を求めるには侵食係数 $k_d$ 、流体に作用するせん 断力 $\tau_e$ 、限界せん断力 $\tau_c$ を求める必要がある。限界せん断力 $\tau_c$ および侵食係数 $k_d$ は試 験結果より求めることができるものの、 $\tau_e$ は侵食深によって変化する値である。そこ で、式(3)のジェットによる最大せん断力 $\tau_0$ の半分のせん断力が加わるときの侵食速 度について比較検討した。

図-28 に模擬泥土、砂質系津波堆積物、粘土質系津波堆積物、混合津波堆積物の侵 食速度の比(= 改良土侵食速度 ε<sub>m</sub> / 未改良土の侵食速度 ε<sub>n</sub>)とセメント系固化材の 添加量との関係を示す。ここで、図中の判例のSは未処理土、CSは固化処理土、FCS は繊維質固化処理土を表す。また、FCSの次に示した数字は古紙破砕物の添加量 [kg/m<sup>3</sup>]である。図-28 より、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ことがわかる。




図-28 セメント系固化材の添加量と侵食速度の比の関係

表-6 は各試料が最も硬化する条件(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加量 50 kg/m<sup>3</sup>)で作製した繊維質固化処理土が未処理土に対して何倍の耐侵食性を有しているかを示しており、表-7 は各試料が最も硬化する条件(セメント系固化材添加量 60kg/m3、古紙破砕物添加量 50kg/m3)で作製した繊維質固化処理土が固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>)に対して何倍の耐侵食性を有しているかを示している。ここで、 $\varepsilon_{FCS}$  は繊維質固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加量 50 kg/m<sup>3</sup>)の侵食速度、 $\varepsilon_{CS}$  は固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加量 50 kg/m<sup>3</sup>)の侵食速度、 $\varepsilon_{CS}$  は固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加量 50 kg/m<sup>3</sup>)の侵食速度、 $\varepsilon_{CS}$  は固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>)の侵食速度、 $\varepsilon_{CS}$  は固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加量 50 kg/m<sup>3</sup>)の侵食速度、 $\varepsilon_{CS}$  は固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加量 50 kg/m<sup>3</sup>)の侵食速度、 $\varepsilon_{CS}$  は固化処理土(セメント系固化材の添加量 60 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加量 50 kg/m<sup>3</sup>)の侵食速度を表す。最も繊維質固化処理土工法の効用が大きかったのは砂質系津波堆積物であり、侵食速度は未改良土と比較して約 10,000 倍、固化処理土と比較して約 24 倍小さい値(すなわち耐侵食性が高い)が得られた。これは、 $\tau_0$ の半分のせん断力が加えられたとき、繊維質固化処理土は未改良土の 10,000 分の 1、固化処理土 24 分の 1 程度の速度で侵食が進むこととなり、繊維質固化処理土が極めて高い耐侵食性を有していることになる。また、他の試料を用いて作製した繊維質固化処理土の侵食速度も未処理土および固化処理土と比較して非常に遅く、大きな耐侵食性を有していることがわかった。

以上より、動的締固めにより作製した繊維質固化処理土は放射能汚染土に対する覆 土材に求められる機能性の一つである高い耐侵食性を有していることが確認された。

表-6 各試料に対する *ɛ*s/*ɛ*<sub>FCS</sub>

	$\epsilon_s/\epsilon_{fcs}$ [-]
模擬泥土	989.0
砂質系津波堆積物	9578.1
粘土質系津波堆積物	1115.7
混合津波堆積物	517.8

表-7 各試料に対する ε<sub>CS</sub>/ε<sub>FCS</sub>

	$\epsilon_{cs}/\epsilon_{fcs}$ [-]
模擬泥土	17.9
砂質系津波堆積物	23.8
粘土質系津波堆積物	3.3
混合津波堆積物	3.2

## 3.1.2 人工降雨装置による耐侵食性試験

図-29 に雨量強度に対する侵食状況を示す。なお、降雨装置の性能上、雨滴の落下 場所が固定され同じ場所で侵食されている。図-29 から、ベントナイト混合土は時間 が経過するにつれ雨滴による侵食が深く大きくなっていることが分かる。また、雨量 強度が増すほど、法先において試料が液状化し、斜面が崩れる時間が早くなっている 様子が確認される。一方、繊維質固化処理土ではベントナイト混合土と比べて降雨に 対して侵食しにくいことが明らかとなった。



(c) 時間雨量 120 mm/h

図-29 降雨に対する侵食状況(左:繊維質固化処理土、右:ベントナイト混合土)

図-30 に経過時間に対する 30 分間降水量と累積侵食土砂量の関係を示し、図-31 に 雨量強度と総侵食土砂量の関係を示す。図-30 より、降雨装置の性能上、30 分間降水 量に多少ばらついているものの、降水量の平均値はそれぞれ 71.5 mm/h、93.6 mm/h、 118.3 mm/h と設定雨量強度とほぼ同じ値であった。図-30 および図-31 から、ベントナ イト混合土では雨量強度が増加するほど累積流出土量の変化が大きくなり、より多く の土が流出した。一方、図-31 に示すように、繊維質固化処理土はベントナイト混合 土よりも雨量強度の影響を受けていないことがわかる。なお、雨量強度が 95 mm/h の ときの繊維質固化処理土の流出量が雨量強度 70 mm/hの時よりもやや小さい値となっ ているが、これは誤差の範囲内であると考えられる。

したがって、繊維質固化処理土はベントナイト混合土に比べて非常に高い耐侵食性を有していると言える。これは、古紙破砕物とセメント系固化材の添加によって繊維

質物質が土粒子間に入り込んで複雑に絡み合い、土粒子間の結合力を非常に強くして いるためであると考えられる。また、今回の供試体の条件より、繊維質固化処理土の 飽和透水係数(1.1×10<sup>-4</sup> cm/sec)は通常土(3.6×10<sup>-3</sup> cm/sec)に比ベオーダーが1桁低 かったことから、雨水の浸透によって間隙水圧が上昇し土粒子間の結合力が弱まるこ とを防いでいることも高い耐侵食性を示す要因の一つであると考えられる。



図-30 設定時間雨量に対する 30 分間雨量および累積侵食土砂量の関係



## 3.1.3 自然条件下による盛土試験

図-32 に経過日数に対する総雨量と累積侵食土砂量の関係を示す。本試験では侵食 土砂の回収や各降雨データの集計を一連の降雨ごとに行った。一連の降雨とは降り始 め前・降り終わり後が 24 時間無降雨の一続きの雨のことである。193 日間の累計流出 土量は、通常土が 26,275 g、繊維質固化処理土が 3,246 gとなり、繊維質固化処理土は 通常土に対し質量比で約 1/8 しか流失せず、降雨に対する高い耐久性が示された。ま た図-32 より、1 日雨量と流出土量にあまり相関関係が無いことが分かる。これは流 出土量が1日雨量のような長い時間の雨量の累計よりも、より短い瞬間的な降雨強度 によって左右されているためと考えられる。



図-32 経過日数に対する総雨量および累積侵食土砂量の関係

図-33 に盛土法面の侵食状況を表す。また、試験開始後 178 日後の拡大写真を図-34 に示す。ベントナイト混合土は、試験開始直後に対して 92 日後および 178 日後の写 真を見ると表面に小さな凹凸が多数見られ、降雨によって侵食が進んでいることが確 認できる。一方、繊維質固化処理土は、試験開始直後に対して 92 日後および 178 日 後の写真ともに、湿り気による表面の質感の違いはあるものの、表面の変化はほとん ど見られなかった。図-33 および図-34 より、繊維質固化処理土の降雨耐久性の高さを 目視でも確認することができた。



図-33

(i) 試験開始



(ii) 92 日後 (a) ベントナイト混合土



(iii) 178 日後



(i) 試験開始

(ii) 92 日後 (b) 繊維質固化処理土

降雨に対する侵食状況



(iii) 178 日後





(a) ベントナイト混合土 (b) 繊維質固化処理土 図-34 降雨に対する侵食状況の拡大写真

図-35 に各種降雨パラメータと流出土量の関係を示す。各種降雨パラメータとは、 最大 10 分間雨量(一連の降雨の中で最大の 10 分間雨量)、総雨量(一連の降雨中に 降った合計の雨量)、降雨継続時間(一連の降雨が継続した時間)の3種類のパラメ ータであり、決定係数が最も高くなるような近似直線または近似曲線を示している。 図-35(a)~(c)の近似直線および近似曲線に対する決定係数 R<sup>2</sup>を比較すると、各降雨 に対する流出土量は最大10分間雨量と最も相関関係があることが分かる。このこと から降雨継続時間の長短や総雨量の大小による降雨履歴の違いよりも、瞬間的な雨の 強さが流出土量に大きく影響していることが分かる。流出土量と最も高い相関を示し た最大 10 分間雨量を、さらに累積によってまとめたものが図-35(d)である。図-35(d) で得られた近似式を用いれば、任意の地点の降水量を入力することで流出土量の予測 を行うことができる。今回は気象庁の福島県福島市の10分間降雨データ1年分(2012 年12月1日~2013年11月30日)を用いて流出土量予測を行ったところ、今回の示 す盛土に対して繊維質固化処理土は1面あたり4,872g、ベントナイト混合土は1面あ たり38,435g流出することが予測された。また、試験盛土の法面面積および覆土の乾 燥密度を考慮すると、繊維質固化処理土は0.10 cm、通常土は0.51 cmの侵食深さとな ることが予測された。仮に侵食深さが一定以上になったときに覆土を補うというメン テナンスを考えると、繊維質固化処理土は通常土に比べて5倍の期間メンテナンスを 必要としないことに等しい。したがって、繊維質固化処理土はベントナイト混合土に 比べて非常に高い耐侵食性を有していることが明らかとなった。





図-36 にベントナイト混合土と繊維質固化処理土の間隙水圧、10 分間雨量の測定結 果例を示す。なお、図-36 の判例の①ないし⑦は図-9 に対応している。テンシオメー タの不具合で測定できなかった結果(ベントナイト混合土の④と⑤、繊維質固化処理 土の③と⑤)は示していない。図-36 に示すように、間隙水圧は降雨によって増加し、 降雨後は減少する様子が見られ、ベントナイト混合土と繊維質固化処理土の間隙水圧 が増加するタイミングはほとんど同じであった。これはベントナイト混合土と繊維質 固化処理土の雨水浸透挙動が似ていることを意味しており、それぞれの透水係数の結 果(ベントナイト混合土:1.6×10<sup>-7</sup> cm/sec、繊維質固化処理土:2.0×10<sup>-7</sup> cm/sec)から も解釈することができる。7月23日以降は降雨が続いたために間隙水圧は0kPa付近 (飽和状態)であった。一般に降雨に伴う間隙水圧の増加、特に正圧が続くと斜面は 不安定になりやすいと言われており、著者らも過去の崩壊履歴と間隙水圧の測定結果 からこの現象を考察している<sup>10</sup>。



図-36 降雨に対する間隙水圧の経時変化

さらに試験を行った全期間に渡る間隙水圧のデータから雨水浸透挙動を評価する ために、間隙水圧を図-37 に示すように、まずセンサ毎に全期間に渡って最大値と最 小値を調べ、その最大値と最小値の間で一定の基準値以上を示した回数をカウントす る方法によって間隙水圧のデータを整理することにした。各テンシオメータの圧力セ ンサはそれぞれ校正しているもののデータがセンサ毎に上下に大きくばらついてお り、このデータを正規化するために採用した手法である。今回は基準値を 70%とした。 これは様々な基準値において値を比較した結果、70%のときがセンサ毎の傾向が表れ たためである。

この手法によって試験期間全てのデータを整理した結果を図-38 に示す。ベントナ イト混合土と繊維質固化処理土では水分特性が異なっているために双方をそのまま 比較することはできないため、各土同士で傾向を把握することにする。まず両方の1 番~4 番を見ると、ベントナイト混合土は1番と3番のカウント数が2番、4番のカ ウント数に比べて高いのに対し、繊維質固化処理土では2番、4番のカウント数が1 番と3番に比べて高くなる傾向を示している。このことからベントナイト混合土は表 面に雨水が留まりやすいのに対して、繊維質固化処理土は深い部分に水が浸透しやす いと推察される。



Time

図-37 間隙水圧の変動評価手法の概念図



このような傾向が得られたのは、繊維質固化処理土は締固めが不十分であり、透水 係数が所定の値よりも上昇している可能性があることが考えられる。実際に盛土を造 成するときのベントナイト混合土の乾燥密度は 1.77 g/cm<sup>3</sup>、繊維質固化処理土は 1.34 g/cm<sup>3</sup>(いずれも最大乾燥密度)に設定した。しかし、試験終了後コアサンプリング によって実際の乾燥密度を実測した結果、ベントナイト混合土が 1.67 g/cm<sup>3</sup>(締固め 度 95%)、繊維質固化処理土が 1.12 g/cm<sup>3</sup>(締固め度 84%)となっていることが分かっ た。実際現場で施工する際の品質基準として、盛土では締固め度 85%~95%を基準と する場合が多い<sup>16)</sup>。つまり、今回の繊維質固化処理土は締固めが不十分であったと解 釈される。その結果、ベントナイト混合土が雨水を表面付近で留める一方、繊維質固 化処理土は雨水を深部にまで浸透している、すなわち難透水性が低いことが推測され る。また、それぞれの土の 1 番~4 番と 5 番~7 番を比較すると、どちらの土におい ても 5 番~7 番の方が平均的に多くカウントしている。これは水が覆土内を重力によ って下方へ浸透し、法面上方に比べて法面下方の方に滞留しやすいことを示している と考えられる。

#### 3.1.4 乾湿繰返しに対する耐久性評価

## (a) 使用した津波堆積物の粒度および作製条件

本試験で使用した津波堆積物の粒径加積曲線を図-39に示す。堆積物Aは仙台市若 林区藤塚、堆積物Bは気仙沼市、堆積物Cは名取市広浦湾で採取したものである。



図-39 使用した津波堆積物の粒径加積曲線

表-8 に試料の作製条件を示す。試料は堆積物 A、B、C の 3 種類で、それぞれの試料においてセメント系固化材のみで改良した固化処理土、セメント系固化材と古紙破砕物を加えて改良した繊維質固化処理土の2種類を作製した。また、堆積物 C については後述するが、改良土の強度の減少がみられたため追試験として含水比を下げて改良した試料を用意した。

供試体 No.	津波 堆積物	初期含水比 [%]	古紙破砕物の 添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	セメント系固化材の 添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]
A1	Sludge A	40	0	60
A2	Sludge A	40	25	60
B1	Sludge D	150	0	100
B2	Sludge B	150	25	100
C1		60	0	80
C2	Sludge C	60	25	80
С3		40	25	100

表-8 試料の作製条件

## (b) 試驗結果

試験に先立ち、一軸圧縮試験で得られる破壊強度および破壊ひずみの目標値を現場 での試験施工を参考に、破壊強度は 125 kN/m<sup>2</sup>以上、破壊ひずみは 5%以上に設定し た<sup>17)</sup>。また、乾湿繰り返しに対する耐久性の目標値として、10 サイクル時の破壊強 度が 0 サイクル時の破壊強度の 90%以上とした。

図-40に供試体のサイクル数と健全度の関係を、図-41に供試体の0サイクル時およ び 10 サイクル時の写真を示す。B1 および C1 はセメント系固化材のみで改良した固 化処理土であるが、この2条件は2~4 サイクルあたりから健全度が悪くなりサイクル 数の増加に伴い供試体の劣化が認められた。これは乾燥収縮により土粒子間の結合が 破壊され、クラックが発生したためであると考えられる。過去の研究において固化処 理土は乾湿繰り返しの影響を受け劣化すると報告されているが<sup>18)</sup>、本試験においても 同様の結果が得られた。また、堆積物 A と堆積物 C の粒度分布は比較的似ているに も関わらず、A1 はサイクル数が増加しても供試体は劣化しなかった。この理由とし て平均粒径 D<sub>50</sub>の違いによることが考えられる。一般的に供試体の間隙率が大きいと、 乾燥時の収縮および水浸時の膨張過程において間隙が緩衝材の役割を果たし、乾湿繰 り返しに対して高い耐久性を示す。堆積物 A の平均粒径 D<sub>50</sub>(289.5 μm) は堆積物 C (198.4 µm) よりも大きいため、A1 は劣化しなかったと推察される。一方、繊維質 固化処理土は堆積物の種類に関わらずサイクル数が増加しても供試体の劣化は認め られなかった。これは古紙破砕物に含まれる細かな繊維が土粒子と結びつくことによ り、クラックの発生を抑制したためであると考えられる。この結果から、津波堆積物 を使用した繊維質固化処理土は乾湿繰り返しを受けても劣化せず、高い耐久性を示す ことが確認された。



図-40 サイクル回数に対する健全度の変化



0サイクル







0サイクル 10 サイクル (b) A2





10 サイクル

0サイクル 10サイクル (c) B1



0サイクル 10サイクル (d) B2





0 サイクル10 サイクル0 サイクル10 サイクル(e) C1(f) C2図-410 サイクル時および 10 サイクル時の供試体の様子

## 3.1.5 強度特性および透水性の評価

# (a) 作製条件

津波堆積物試料として、図-39 に示した堆積物 A、堆積物 A と堆積物 B を乾燥質量 比1:1 で混合した混合津波堆積物、堆積物 C の 3 種類を使用した。配合条件は、試 料ごとにセメント系固化材の添加量、古紙破砕物の添加量、初期含水比を変化させた ものを準備した。表-9 に試料の作製条件を示す。

津波堆積物	初期含水比 [%]	古紙破砕物の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	セメント系固化材の 添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]
Sludge A	30	0, 10, 20, 30	100
Sludge A	40	0, 10, 20, 30	100
Mixed	50	0, 10, 30, 50	100
sludge	100	0, 10, 30, 50	80
(A:B=1:1)	100	0, 10, 30, 50	100
	40	0, 20, 25, 30, 35	100
Sludge C	60	0, 20, 25, 30, 35	80
	60	0, 20, 25, 30, 35	100

表-9 試料の作製条件

## (b) 試験結果

覆土材としての用途を考慮すると 改良土には破壊強度および透水係数の目標値を ともに満足することが求められる。一軸圧縮試験における破壊強度の目標値は「3.1.4 乾湿繰返しに対する耐久性評価」と同様に 125 kN/m<sup>2</sup>以上とした。また、透水係数の 目標値は処理土を放射能汚染土壌の覆土材として用いることを想定し、環境省の方針 により 1.0×10<sup>-6</sup> cm/sec 以下とした。

図-42 から図-44 に堆積物 A を使用した試験結果を示す。順に古紙破砕物の添加量と破壊強度の関係、古紙破砕物の添加量と透水係数の関係、古紙破砕物の添加量と間 隙率の関係を示している。なお、間隙率 n (式(10)を参照)を求めるために必要な乾燥密度 pd と土粒子 (固相)密度 ps をそれぞれ式(11)と式(12)から算出した。

$$n = \frac{V_{\rm v}}{V} = 1 - \frac{\rho_{\rm d}}{\rho_{\rm s}} \tag{10}$$

$$\rho_{\rm d} = \frac{m_{\rm s}}{V} = \frac{\rho_{\rm t}}{1 + w/100} \tag{11}$$

$$\rho_{\rm s} = \frac{m_{\rm s}}{V_{\rm s}} = \frac{100\rho_{\rm d}\rho_{\rm w}}{100\rho_{\rm w} - w\rho_{\rm d}} \tag{12}$$

ここで、Vは土全体の体積 [cm<sup>3</sup>]、 $V_v$ は間隙の体積 [cm<sup>3</sup>]、 $V_s$ は土粒子の体積 [cm<sup>3</sup>]、  $m_s$ は土粒子質量 [g]、wは含水比 [%]、 $\rho_t$ は湿潤密度 [g/cm<sup>3</sup>]、 $\rho_w$ は水の密度 [g/cm<sup>3</sup>] である。含水比 w と湿潤密度 $\rho_t$ は試験後の供試体を使って求めた。そして、式(12)の 固相密度は固相を津波堆積物、古紙破砕物、セメント系固化材とし、供試体の飽和度 を 100 %と設定して求めた。

堆積物 A に関しては、図-42 よりすべての条件において破壊強度の目標値を満足し ているが、図-43 に示されるように透水係数の目標値を満足する条件は存在しなかっ た。一般的に粒径の大きな土粒子が多く含まれていると、供試体を密に締固めたとし ても土粒子間に大きな間隙が生じやすくなり、その結果、間隙が水の通り道となり透 水係数は増加する。堆積物 A の平均粒径 *D*<sub>50</sub> は 289.5 μm であり本試験で使用した 3 試料の中で最も大きく、細砂を多く含むため透水係数の目標値を満足しなかったと考 えられる。また、一般的に繊維質固化処理土は古紙破砕物の添加量を増やすと破壊強 度も増加するが、図-42 に示すように含水比 40%の場合、古紙破砕物の添加量を増や すほど破壊強度は減少する傾向を示した。これは、試料を作製する際に古紙破砕物の 添加量が少ない条件においては、発生するブリージング水の量が増加し、多くのブリ ージング水を捨てたことにより含水比が低下し、供試体がより締まったため破壊強度 が高い値を示したと考えられる。実際、図-44 に示されるように古紙破砕物の添加量 が少ないほど間隙率が小さく、供試体がより密に締まっていることが分かる。



図-45から図-47に堆積物 A と堆積物 B の混合津波堆積物を使用した試験結果を示 す。順に古紙破砕物の添加量と破壊強度の関係、古紙破砕物の添加量と透水係数の関 係、古紙破砕物の添加量と間隙率の関係を示している。図-45 および図-46 より、セメ ント系固化材や古紙破砕物の添加量を増やすと破壊強度は増加し、透水係数は減少す る傾向を示した。また、含水比を変化させた場合は、セメント系固化材や古紙破砕物 の添加量を変化させた場合に比べ、破壊強度および透水係数に大きな差が見られた。 図-47 に示されるように、含水比 50%の場合の間隙率は、含水比 100%の場合よりも小 さく、供試体がより締まっているため、破壊強度および透水係数が大きく改善された と考えられる。含水比 50%の条件においては破壊強度および透水係数の目標値をとも に満足する条件も存在した。



図-45 古紙破砕物の添加量と破壊強度の関係(堆積物 A と堆積物 B の混合)



図-46 古紙破砕物の添加量と透水係数の関係(堆積物 A と堆積物 B の混合)



図-47 古紙破砕物の添加量と間隙率の関係(堆積物 A と堆積物 B の混合)

図-48 から図-50 に堆積物 C を使用した試験結果を示す。順に古紙破砕物の添加量 と破壊強度の関係、古紙破砕物の添加量と透水係数の関係、古紙破砕物の添加量と間 隙率の関係を示している。堆積物 C の結果は混合津波堆積物と同様の結果が得られ、 含水比 40%では破壊強度および透水係数ともに目標値を大きく上回った。





図-50 古紙破砕物の添加量と間隙率の関係(堆積物 C)

ここで、透水係数の目標値を満足しなかった堆積物Aに関して、追試験として遮水 材として用いられているベントナイトを混合した供試体を作製し、透水試験を行った。 透水試験の結果を図-51に示す。含水比、セメント系固化材の添加量、古紙破砕物の 添加量を固定し、ベントナイトの添加量を0kg/m<sup>3</sup>、40kg/m<sup>3</sup>、70kg/m<sup>3</sup>、100kg/m<sup>3</sup> の範囲で変化させて試験を行った。その結果、ベントナイトの添加量を増加させると 透水係数は徐々に減少することが確認され、40kg/m<sup>3</sup>のベントナイトを添加した時点 での透水係数は 2.4×10<sup>-7</sup> cm/sec であり、目標値を満足していることが分かる。この ベントナイトの添加量を質量比で示すと、堆積物Aの質量に対して 37分の1の質量 のベントナイトを添加していることになり、津波堆積物に対して少量のベントナイト を添加すればよいことに等しい。このことから、改良土の生成のコスト面に負担をか けずに、砂質系の津波堆積物を使用して透水係数の目標値を満足する覆土材を生成す ることは可能であると考えられる。



以上を整理すると、初期含水比、試料ごとに古紙破砕物の添加量、セメント系固化 材の添加量を変化させて試験を行った結果、古紙破砕物およびセメント系固化材の添 加量を増やすと、破壊強度および透水係数は改善される傾向を示し、含水比を下げた 場合、つまり締固め特性を改善させた場合は、破壊強度および透水係数はより改善さ れることが明らかとなった。

## (c) 繊維質固化処理土の最適初期含水比に関する検討

繊維質固化処理土工法は建設汚泥をはじめとする高含水比泥土を対象として開発 された工法であり、対象とした土砂の含水比に応じてセメント系固化材および古紙破 砕物の添加量を決定していた。建設汚泥は含水比 100%を超えるものが大半であり、 水を吸収させるために混合する古紙破砕物の価格も近年高騰しているため、コスト削 減のために古紙破砕物やセメント系固化材の添加量は最小限に抑えたいというのが 現状である。津波堆積物は震災から数年が経過しており、総じて含水比が低い状態で あるため、加水して最も締まる含水比に調整した後に施工を行えば、強度特性および 透水性ともに目標値を満足し、加えるべき古紙破砕物やセメント系固化材の添加量を 最小限に抑えることが可能であると考えられる。

一方、先に示した強度特性および透水性の評価において、津波堆積物を改良した繊維質固化処理土の破壊強度および透水係数は含水比の低い条件において覆土材としての性能を満足する結果が得られた。一般に土を同じ締固めエネルギーで締固めると、図-52のように含水比が変わると土の乾燥密度(間隙状態)が変化し、土が最も締固まるときの含水比が存在することが知られている。そのときの含水比を最適含水比woptと呼ばれ、そのときの密度は最適乾燥密度ρdmaxと呼ばれる。そこで、図-52に示すような土が最も締固まるときの最適な含水比が津波堆積物を用いた繊維質固化処理土でも同様に存在すると考え、本研究では土の締固め特性をもとに繊維質固化処理土が最も締固まるときに必要な初期含水比を理論的に求める方法を提案した。

52



図-53 に繊維質固化処理土の混合直後および養生後の質量変化を表した模式図を示 す。混合直後は古紙破砕物およびセメント系固化材を混合した直後を表し、養生後は 十分に攪拌し一週間程度 20±3 ℃で養生した後の様子を表している。改良後、古紙破 砕物は吸水材として働くために水を吸収し、セメント系固化材は水と化学反応して水 和物を生成するため、改良後の見かけの含水比は低下する。つまり、津波堆積物を改 良するために最適な初期含水比は津波堆積物の最適含水比よりも大きな値であると 推測される。したがって、改良後の繊維質固化処理土の見かけの含水比 w<sub>ap</sub>を津波堆 積物の最適含水比 w<sub>opt</sub>と等しく設定することで、このときの改良土は最も締固まると 考えられる。

Paper debris	 Paper debris Water (water absorption)
Cement	 Cement
	 Water (hydration)
Water	Water
Soil Particle of tsunami sludge	Soil Particle of tsunami sludge

(a) 混合直後(b) 養生後図-53 繊維質固化処理土の質量変化

この繊維質固化処理土の改良過程をもとに、繊維質固化処理土の乾燥密度が最も大きくなる最適な初期含水比を理論的に求める方法を以下に述べる。本研究では、簡単のために加水後の津波堆積物は飽和状態であると仮定すると、加水後の津波堆積物の体積 *V*soil は式(13)のように表すことができる。

$$V_{\text{soil}} = V_{\text{s}} + V_{\text{w}} = \left(\frac{1}{\rho_{\text{s}}} + \frac{w_{\text{ini}}}{100\rho_{\text{w}}}\right) m_{\text{s}}$$
(13)

ここで、 $V_s$ は土粒子の体積  $[m^3]$ 、 $V_w$ は水の体積  $[m^3]$ 、 $m_s$ は土粒子の質量 [kg]、 $m_w$ は水の質量 [kg]、 $\rho_s$ は土粒子の密度  $[kg/m^3]$ 、 $\rho_{sw}$ は水の密度  $[kg/m^3]$ (=1,000 kg/m<sup>3</sup>)、  $w_{ini}$ は加水後の津波堆積物の含水比 (初期含水比) [%]である。

いま古紙破砕物の添加量を $A_p$  [kg/m<sup>3</sup>]、セメント系固化材の添加量を $A_c$  [kg/m<sup>3</sup>]とすると、それぞれの添加質量 $M_p$  [kg]および $M_c$  [kg]は次式で表される。

$$M_{\rm p} = V_{\rm soil} \cdot A_{\rm p} = \left(\frac{1}{\rho_{\rm s}} + \frac{w_{\rm ini}}{100\rho_{\rm w}}\right) m_{\rm s} \cdot A_{\rm p}$$
(14)

$$M_{\rm c} = V_{\rm soil} \cdot A_{\rm c} = \left(\frac{1}{\rho_{\rm s}} + \frac{w_{\rm ini}}{100\rho_{\rm w}}\right) m_{\rm s} \cdot A_{\rm c}$$
(15)

そして、古紙破砕物が吸水する質量は古紙破砕物の質量の 900%であり、セメント系 固化材が水と化学反応する質量割合は「海上工事における深層混合処理工法技術マニ ュアル<sup>19)</sup>」を参考に 25%であると仮定すると、養生後の見かけの含水比 w<sub>ap</sub> は次式の ように表すことができる。

$$w_{\rm ap} = \frac{m_{\rm w} - 9M_{\rm p} - 0.25M_{\rm c}}{m_{\rm s}} \times 100 = \left(1 - \frac{9A_{\rm p} + 0.25A_{\rm c}}{\rho_{\rm w}}\right) w_{\rm ini} - \frac{900A_{\rm p} + 25A_{\rm c}}{\rho_{\rm s}}$$
(16)

ここで、この見かけの含水比 wap が津波堆積物の最適含水比 wopt と等しくなるとき、 繊維質固化処理土が最も締固まると考えると、改良土を作製するための最適な初期含 水比 wini は次式のような関係が成り立つ。

$$w_{\rm ini} = \frac{w_{\rm opt} + (900A_{\rm p} + 25A_{\rm c})/\rho_{\rm s}}{1 - (9A_{\rm p} + 0.25A_{\rm c})/\rho_{\rm w}}$$
(17)

式(17)より、津波堆積物の土粒子の密度  $\rho_s$  および最適含水比  $w_{opt}$  を室内土質試験(土 粒子の密度試験、締固め試験)から求め、古紙破砕物およびセメント系固化材の添加 量を任意に設定することで、繊維質固化処理土の最適な初期含水比  $w_{ini}$  が得られる。 つまり、改良土を作製するときに必要な含水量を簡易に求めることができる。

提案方法(式(17))の有用性を検証するため、津波堆積物を用いて試料を作製した。 今回は図-39に示した堆積物 A および堆積物 C、そして新たに堆積物 D の 3 種類の津 波堆積物を用いた。堆積物 D は名取市広浦湾で採取したものであり、図-54 に本試験 で使用した津波堆積物の粒径加積曲線を示す。



図-54 使用した津波堆積物の粒径加積曲線

まず、未改良土の最適含水比を求めるために締固め試験を行った。試験方法は JGS0771「突固めによる土の締固め試験方法」に準拠した。図-55に締固め試験により 得られた締固め曲線を示す。図-55における乾燥密度が最大となる含水比が最適含水 比である。図-55より各津波堆積物における最適含水比は、堆積物Aは14.3%、堆積 物Cは18.4%、堆積物Dは15.0%であった。また、各津波堆積物の土粒子密度は、堆 積物Aは2.69g/cm<sup>3</sup>、堆積物Cは2.65g/cm<sup>3</sup>、堆積物Dは2.73g/cm<sup>3</sup>であった。



図-55 使用した津波堆積物の締固め曲線

この結果から、各試料を改良する際の泥土の最適初期含水比を式(17)により求めた。 すべての試料において、セメント系固化材の添加量は 100 kg/m<sup>3</sup>、古紙破砕物の添加 量は 25 kg/m<sup>3</sup>として計算を行った。最適な初期含水比 w<sub>ini</sub>は、堆積物 A は 31%、堆積 物 C は 37%、堆積物 D は 32%と推定された。

この推定値のときに改良土の乾燥密度が最も大きくなるかを確認するため、初期含水比を種々変えた津波堆積物を用意した。そして、古紙破砕物およびセメント系固化

材をそれぞれ 25 kg/m<sup>3</sup>、100 kg/m<sup>3</sup>添加して供試体(直径 50 mm、高さ 100 mm)を作 製し、20±3 ℃で 7 日間養生した。養生後、供試体の湿潤密度および含水比から乾燥 密度を求めた。また一軸圧縮試験を行い、改良土の破壊強度も算定した。

図-56 に初期含水比と破壊強度および乾燥密度の関係を示す。図-56 から分かるよう に、すべての試料で乾燥密度の最大値が現れており、乾燥密度が最も大きくなったと き、破壊強度も最大値を示した。また、このときの含水比は式(17)を用いて理論的に 推定した初期含水比とほぼ同じ値であり、改良土の締固め状態が最も良いことを意味 している。

今後、現場において津波堆積物を繊維質固化処理土工法に再資源化する際は、試料 の土粒子密度および最適含水比を室内試験により求め、式(17)から改良土を作製する 際の津波堆積物の最適初期含水比を求めることできる。したがって、従来のように改 良土の作製条件を種々変えて検討する必要がなく、最適な条件を効率良く決められる 可能性がある。





図-56 初期含水比と破壊強度および乾燥密度の関係

# 3.1.6 耐震性評価

# (a) 作製条件および試験条件

表-10 に作製条件を示す。試料は堆積物 A、堆積物 C および堆積物 D の 3 種類を使用し、各試料において未処理土、固化処理土および繊維質固化処理土を作製した。初期含水比は先述した最適初期含水比付近に設定して泥土を作製し、古紙破砕物およびセメント系固化材の添加量はそれぞれ 25 kg/m<sup>3</sup>、100 kg/m<sup>3</sup>に設定した。供試体の作製は既往の研究<sup>14)</sup>を参考にして、直径 5cm、高さ 10cm のモールドを用い 3 層に分け、各層ごとに 1.5 kg のランマーを高さ 20 cm の位置から 2 回落下させて突固めを行った。 固化処理土および繊維質固化処理土は供試体を作製してから 7 日間養生した後、試験を行った。

津波堆積物	初期含水比 [%]	古紙破砕物の 添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	セメント系固化材の 添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]
	15	0	0
Sludge A	30	0	100
	30	25	100
Sludge C	20	0	0
	40	0	100
	40	25	100
	15	0	0
Sludge D	30	0	100
	30	25	100

表-10 試料の作製条件

試験条件は、背圧は 200 kN/m<sup>2</sup>、圧密応力は 100 kN/m<sup>2</sup>、有効拘束圧は 100 kN/m<sup>2</sup>、 載荷周波数は 0.1 Hz、軸差応力の片振幅は 32 kN/m<sup>2</sup>と設定した。背圧とは供試体の飽 和度を高めるために供試体内部に加える圧力である。有効拘束圧とは実際に供試体に 作用する圧力であり、セル圧と背圧の差で表される。すなわち本条件では 300 kN/m<sup>2</sup> のセル圧がかかっていることになる。一般的に供試体が十分に飽和されていない場合、 液状化強度は増加すると言われているため、B 値が 0.95 以上となるように飽和を試み たが、改良土においては完全に飽和させることが困難な条件も存在したため、そのよ うな条件については B 値がある程度上昇した (0.7~0.8 程度) ことを確認して試験を 行った。載荷周波数および軸差応力の片振幅は未改良土が完全に液状化するような条 件をもとに設定した。

## (b) 試驗結果

図-57 に堆積物 A の過剰間隙水圧比  $\Delta u/\sigma_0$ 'と経過時間の関係を、図-58 に堆積物 C の結果、図-59 に堆積物 D の結果を示す。過剰間隙水圧比とは有効拘束圧  $\sigma_0$ 'に対する間隙水圧の上昇分  $\Delta u$  の割合である。過剰間隙水圧比が 1 に近づくことは、供試体中の土粒子同士のかみ合わせが徐々に破壊されていることを示し、過剰間隙水圧比が上昇すればするほど液状化状態に近づいており、その供試体は液状化しやすい、つまり動的強度が低いと評価できる。一方、過剰間隙水圧比がほとんど上昇しない供試体は液状化しにくい、つまり動的強度が高いと評価できる。



図-57 過剰間隙水圧比と経過時間の関係(堆積物 A)



図-58 過剰間隙水圧比と経過時間の関係(堆積物 C)



堆積物 A の結果をみると、図-57(a)に示されるように未処理土は時間とともに過剰 間隙水圧比が上昇し、800 秒前後でほぼ1に達し、完全に液状化したことが分かる。 一方、図-57(b)および図-57(c)から分かるように、固化処理土および繊維質固化処理土 は載荷回数が増加しても過剰間隙水圧比は上昇せず、未処理土と比べて高い動的強度 を有していることが分かった。これはセメント系固化材の混合により供試体の強度が 増加し、土粒子間結合が強固になったためであると考えられる。また、堆積物 C およ び堆積物 D の結果(図-58、図-59)も堆積物 A の結果と同様、未処理土は完全に液状 化したのに対し、固化処理土および繊維質固化処理土は過剰間隙水圧比が上昇せず、 相対的に高い動的強度を有していることが分かった。

ここで、図-57、図-58、図-59におけるそれぞれの過剰間隙水圧比の最大値を図-60、 図-61、図-62に示す。これらの結果から、過剰間隙水圧比の最大値が低いほど、その 供試体の動的強度は高いと評価できると考えられる。どの試料についても、未処理土 は完全に液状化したため過剰間隙水圧比の最大値は1に近い値となっている。固化処 理土はすべての試料で 0.095 前後であり未処理土の 10 分の1 程度であった。繊維質固 化処理土は、固化処理土よりも値が大きく、0.13~0.20程度であり、未処理土に対し て7分の1から5分の1程度であった。既往の研究<sup>14)</sup>では、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するという結果であったが、本試験では固化処理土の 方がやや動的強度が高いという結果となった。この理由については不明であるが、過 去の研究では今回とは異なる試料を使用していることや、異なる試験装置を使用して いることから、一概に比較はできないと考えられる。しかしながら、津波堆積物を使 用した繊維質固化処理土は未処理土に比べて、相対的に高い動的強度を有しているこ とが確認できたので、本試験の目的は達成されたと考えられる。今回は時間の都合上、 未処理土、固化処理土、繊維質固化処理土の動的強度を相対的に比較することで耐震 性を評価したが、より正確な耐震性を評価するためには、応力振幅比を変化させて試 料固有の液状化強度曲線を求めることが必要である。





3.1.7 まとめ

本節では、盛土造成などの施工現場において用いられている動的締固めによる施工 を想定して、津波堆積物を使用した改良土をランマーで突固めることにより供試体を 作製し、室内試験により改良土の機能性評価を行った。

水中噴流装置による耐侵食性試験では。どの試料を用いても古紙破砕物の添加量が 増加するほど耐侵食性が向上し、繊維質固化処理土が固化処理土、未処理土と比較し て高い耐侵食性を有していることがわかった。また、室内土槽試験および屋外試験で もベントナイト混合土よりも繊維質固化処理土のほうが降雨に対する耐侵食性は優 れていることが確認できた。

乾湿繰返し試験では、3種類の津波堆積物試料を用いて試験を行った。固化処理土 はサイクル数の増加に伴い供試体の外見上の劣化がみられる条件も存在したが、繊維 質固化処理土はサイクル数が増加しても供試体の劣化はみられず、乾湿繰り返しに対 して高い耐久性を示すことが確認された。

一軸圧縮試験および透水試験では、3種類の試料を使用して作製条件を変えて試験

を行った。古紙破砕物やセメント系固化材の添加量を増加させると破壊強度および透水係数ともに改善される傾向を示したが、含水比を減らして適切に加水調整するほうが強度特性および透水性を改善する結果が得られた。混合津波堆積物および堆積物 C については破壊強度と透水係数の目標値をともに満足する条件も存在した。目標値を満足しなかった堆積物 A に関しては、ベントナイトを少量加えて透水試験を行ったところ、透水係数の目標値を満足したことから、砂質系の津波堆積物でも覆土材として再資源化が可能であることが確認された。

また、津波堆積物の土粒子密度と最適含水比から、改良を行う際の泥土の最適初期 含水比を求める関係式を提案した。この提案式の有効性を検証した結果、理論的に推 定した初期含水比と破壊強度が最も大きくなるときの初期含水比とほぼ同じ値とな った。すなわち、この提案式を用いることで従来のように改良土の作製条件を種々変 えて検討する必要がなく、最適な条件を効率良く決められる可能性がある。

繰返し三軸圧縮試験では、3種類の試料ごとにそれぞれ未改良土、固化処理土、繊維質固化処理土を作製し、試験を行った。その結果、すべての試料に対して固化処理 土および繊維質固化処理土は未改良土が液状化するような条件においても液状化せず、相対的に高い動的強度を有していることが確認された。

以上の結果から、動的締固めにより作製した繊維質固化処理土は覆土材として利用 するために求められる機能性を有していることが明らかとなった。

#### 3.2 静的締固めによる改良土の機能性評価

#### 3.2.1 静的締固めによる繊維質固化処理土の特性

静的締固めによる繊維質固化処理土工法は泥状にした繊維質固化処理土を型枠に 流し込み、養生を行い、固化を行うものである。動的締固めの場合より、工程が少な いものの、諸構成要素間の量的関連が施工性に大きく影響を及ぼす。そのため、土の 種類、初期含水比、セメント系固化材、繊維質物質の配合が重要となる。

静的締固めによる繊維質固化処理土工法の基本概念は流動化処理土工法<sup>20)</sup>である。 流動化処理土工法は建設発生土と調整泥土の混合、あるいは建設発生土への加水混合 によって得られた泥状土に固化材を加え、型枠に流し込み(打設)、原位置で固化さ せる工法である。流動化処理土工法を用いる場合、使用する試料を一般的に土の種類、 発生時の状態によって、A)山砂のような砂質に富んだ土の場合、B)砂質土であるが細 粒分を 25~30%以上含み、粘性に富んだ土の場合、C)細粒分に富んだ粘性土の場合に 大別される。細粒分とは粒径 75μm 以下の粘土分やシルト分のことである。発生土中 に処理作業の障害となるような大きさの木片、金属片などの挟雑物を含む場合は施工 性に問題があるため、施工に先立ち、分別、除去する作業が必要となる。

流動化処理土の構成の組み合わせとしては、1)A+調整泥土+固化材、2)B + 加水 +固化材、3)C+A+加水+固化材、4)C+加水+固化材などが一般的には用いられる。 2)の場合は加水するだけで泥状化できる可能性があるが、できない場合は調整土を用いることもある。 しかし、静的締固めによる繊維質固化処理土や流動化処理土のように流動性の高い 土を覆土材として用いる場合、施工自体は簡易であるものの、流動性と材料分離抵抗 性について確認する必要がある。流動性とは泥が流れ動く容易さのことで流動性が低 い場合、固化したのち空隙が生じ、強度が低下する。材料分離とは土粒子と他の粒子 が分離することで材料分離抵抗性が低い場合、固化前に混合物中からの過剰な水の分 離(ブリージング)が生じ、強度の低下や施工後の覆土の体積減少につながる。流動 性、材料分離抵抗性は初期含水比、セメント系固化材、古紙破砕物、調整泥土などの 配合バランスによって変化するため、静的締固めによる繊維質固化処理土工法を用い る場合、流動性と材料分離抵抗性の基準を満たした配合条件を決定して用いなければ ならない。

そこで、初期含水比、古紙破砕物、セメント系固化材を添加することによって生じ る流動性と材料分離抵抗性の変化について検討した。

## 3.2.2 流動性および材料分離抵抗性の評価

(a) 試験方法

流動性試験(フロー試験)の方法は簡便である日本道路公団規約によるフロー試験 を用いた。日本道路公団規約によるフロー試験とは日本道路公団規約「エアモルタル およびエアミルクの試験方法(JHS A 313-1992)」のコンステンシー試験方法のシリン ダー法に準拠した。図-63のように内径 80 mm、高さ 80 mmの硬化プラスチック製の シリンダーを水準器等で平坦性を確かめた辺長 40 cm 以上の剛性をもつ盤上にシリン ダーを置き、シリンダー上端まで処理土空隙を残さないように満たし、上端面をなら す。シリンダーを静かに鉛直上方に引き上げ、処理土が広がった後、最大と認められ た径とこれと直角の径を測定し、測定値の差が 20 mm 以下であれば平均値をフロー値 として用いる。

材料分離抵抗性試験(ブリージング試験)は土木学会規約「プレパックドコンクリ ートの注入モルタルのブリージング率および膨張率試験方法(JSCE-1986)」に準拠し た。この試験方法は図-64に示すように混合直後の処理土を所定のポリエチレン袋(径 5 cm、長さ 50 cm 以上)に空気が混入しないように満たし、水を入れたメスシリンダ ー中に釣り下げて改良土の表面の水位と合わせることで改良土の初期体積を把握し、 3 時間放置した後に分離した水量を測定し、初期体積に対する割合でブリージング率 を求める。



図-63 フロー試験



図-64 ブリージング試験

今回は宮城県名取市広浦湾で採取した砂質系津波堆積物(図-54の Sludge D)を用いた繊維質固化処理土の流動性、材料分離抵抗性について検討した。今回使用した津 波堆積物の粒径は大きく、細粒分が少ない土である。これは先述した「A)山砂のよう な砂質に富んだ土の場合」に該当するため、流動性、材料分離抵抗性の基準を満たす ためには調整泥土が必要となる可能性があった。そこで、本実験では初期含水比、古 紙破砕物およびセメント系固化材の添加に加え、調整泥土としてベントナイトを添加 した場合の流動性、材料分離抵抗性への影響についても検討した。

## (b) 試驗結果

流動性、材料分離抵抗性を調べるため、初期含水比、古紙破砕物の添加量、セメン ト系固化材の添加量、ベントナイトの添加量のうち、3つの値を固定し、それ以外の 1つの要素を変化させて、フロー試験およびブリージング試験を行った。

表-11 に古紙破砕物の添加量以外の値を一定にした場合の試料の作製条件を示す。 図-65 にフロー試験の結果、図-66 にブリージング試験の結果を示す。古紙破砕物を加 えることでフロー値、ブリージング率が減少することがわかる。

初期含水比 [%]	50
古紙破砕物の添加量 [kg/m³]	0, 10, 20, 30
セメント系固化材の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	60
ベントナイトの添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	70

表-11 古紙破砕物の添加量の影響を考慮した試料の作製条件





図-66 古紙破砕物の添加量とブリージング率の関係

表-12 にセメント系固化材の添加量以外の値を一定にした場合の試料の作製条件を 示す。図-67 にフロー試験の結果、図-68 にブリージング試験の結果を示す。セメント 系固化材を加えることでフロー値、ブリージング率が減少することがわかる。

初期含水比 [%]	50
古紙破砕物の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	30
セメント系固化材の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	60, 80, 100
ベントナイトの添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	70

表-12 セメント系固化材の添加量の影響を考慮した試料の作製条件



図-67 セメント系固化材の添加量とフロー値の関係



図-68 セメント系固化材の添加量とブリージング率の関係

表-13 にベントナイトの添加量以外の値を一定にした場合の試料の作製条件を示す。 図-69 にフロー試験の結果、図-70 にブリージング試験の結果を示す。ベントナイトを 加えることでフロー値、ブリージング率が減少することがわかる。

初期含水比 [%]	50
古紙破砕物の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	30
セメント系固化材の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	60
ベントナイトの添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	30, 50, 70

表-13 ベントナイトの添加量の影響を考慮した試料の作製条件



図-69 ベントナイトの添加量とフロー値の関係



図-70 ベントナイトの添加量とブリージング率の関係

表-14 に初期含水比以外の値を一定にした場合の試料の作製条件を示す。図-71 にフ ロー試験の結果、図-72 にブリージング試験の結果を示す。初期含水比が高いほど、 フロー値、ブリージング率が増加することがわかる。

初期含水比 [%]	40, 50, 60
古紙破砕物の添加量 [kg/m³]	25
セメント系固化材の添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	100
ベントナイトの添加量 [kg/m <sup>3</sup> ]	70

表-14 初期含水比の影響を考慮した試料の作製条件



図-71 初期含水比とフロー値の関係


図-72 初期含水比とブリージング率の関係

今回の試験結果より、古紙破砕物を加えると、特にフロー値の減少が大きく、セメ ント系固化材を加えると、フロー値への影響は少ないものの、ブリージング率が大き く減少することがわかる。また、ベントナイトを加えると、フロー値への影響は少な いもののブリージング率は大きく減少し、初期含水比はフロー値、ブリージング率の 両方に影響を与えることがわかる。すなわち、本試験から静的締固めによる繊維質固 化処理土は流動化処理土と比較した場合、繊維質物質の添加量も流動性、材料分離抵 抗性に影響を及ぼすため、試料の作製条件の決定はより困難であることが確認できた。

セメント系固化材を添加するとブリージング率が大きく低下して、フロー値への影響は少ないと述べたが、固化反応が進むと粘性が増して流動性は低下するため、フロー値は時間が経過するにつれて低下する。さらに固化反応は温度に依存しており、フロー値の低下量は冬より夏のほうが大きいと考えられる。実際の施工の際にはそれらの要素についても考慮が必要となると予想される。

# 3.2.3 流動性および材料分離抵抗性の基準を満足する配合に関する考察

前項では初期含水比の変化、古紙破砕物の添加、セメント系固化材の添加、ベント ナイトの添加に伴う試料の流動性および材料分離抵抗性に及ぼす影響について考察 した。前項でも述べたとおり、静的締固めによる繊維質固化処理土は流動化処理土と 比較した場合、繊維質物質の添加量も流動性や材料分離抵抗性に影響を与えるため、 配合条件の決定はより困難である。現場の津波堆積物の種類は様々であり、施工の際 に流動性、材料分離抵抗性を確認することは手間がかかる作業である。そこで、簡易 的に静的締固めによる繊維質固化処理土工法を用いる方法について検討した。

まず、施工可能な条件、つまり静的締固めによる繊維質固化処理土によって覆土を 造成する際の流動性、材料分離抵抗性の基準値について考察する。流動化処理土工法 は多くの場合、埋め戻しや空洞の充填に用いられるため、機械による転圧や補助が不 可能であり、流動性および材料分離抵抗性の基準値としてフロー値は160 mm 以上、 ブリージング率は1%未満が用いられることが多い。本研究でターゲットとしている 放射能汚染掘削土壌の覆土材として静的締固め工法によって繊維質固化処理土を作 製する場合、バイブレータなど機械による補助も可能なため、フロー値100mm以上、 ブリージング率1%未満を流動性、材料分離抵抗性の基準値として設定した。実際に 作製したフロー値100mm程度の供試体では、空洞などが発生するものの、振動を加 えるなどの補助を加えることで問題がないことを確認している。

図-73 に今回使用した試料の粒径加積曲線を示し、表-15 に使用した試料の均等係数 U。と曲率係数 U。を示す。



図-73 使用した津波堆積物の粒径加積曲線

	$D_{10}$ [µm]	<i>D</i> <sub>30</sub> [µm]	D <sub>50</sub> [µm]	D <sub>60</sub> [μm]	U <sub>c</sub> [-]	<i>U</i> <sub>c</sub> ' [-]
模擬泥土	3.1	10.2	17.8	22.7	7.32	1.478
藤塚	10.7	117.6	289.5	332.0	31.12	3.904
広浦湾(混合)	16.4	72.7	198.4	261.9	15.95	1.234
広浦湾(砂質系)	164.2	304.0	375.6	409.8	2.50	1.373
硅砂	41.6	63.5	81.7	92.2	2.21	1.051
笠岡粘土と硅砂の	5.2	26.1	(0.2	77.0	14.96	1 ( ( 9
混合	5.2	20.1	00.3	//.9	14.80	1.008

表-15 使用した津波堆積物の均等係数および曲率係数

図-74 に静的締固めによって作製した繊維質固化処理土(古紙破砕物の添加量 25 kg/m<sup>3</sup>、セメント系固化材の添加量 100 kg/m<sup>3</sup>)の流動性および材料分離抵抗性と細粒 分含有率の関係を示す。実験条件である古紙破砕物の添加量、セメント系固化材の添 加量は既往の研究から覆土材に必要な強度や透水性、耐侵食性などの性能を満たす程 度の値を経験的に決定した。赤で示したプロットが流動性および材料分離抵抗性の基 準を満たしている条件である。細粒分含有率が低い(30%未満)場合、いずれの初期 含水比に調整しても流動性、材料分離抵抗性の基準を満足させることができなかった。 「3.2.1 静的締固めによる繊維質固化処理土の特性」でも述べたが、一般的には細粒 分含有率 25%~30%程度の試料を用いた場合でも流動性、材料分離抵抗性を満たす泥 土を作製することも可能なケースが存在するが、本研究で用いた試料は有機物など 様々なものを含んだ津波堆積物であり、基準を満たさなかった。また、図-74 に示す ように、細粒分含有率が比較的高くても初期含水比が低い条件で流動性および材料分 離抵抗性の条件を満たすような場合があり、細粒分含有率だけでは初期含水比を決定 することができないことが推察された。



図-74 細粒分含有率と初期含水比の関係

図-75 に細粒分含有率の低い(30%未満)試料にベントナイトを 70 kg/m<sup>3</sup> 添加し、 静的締固めによって作製した繊維質固化処理土(古紙破砕物の添加量 25 kg/m<sup>3</sup>、セメ ント系固化材の添加量 100 kg/m<sup>3</sup>)の流動性および材料分離抵抗性と細粒分含有率の 関係を示す。赤で示したプロットが流動性および材料分離抵抗性の基準を満たしてい る条件である。ベントナイトを加えた場合、細粒分含有率が 30%未満の試料でも流動 性および材料分離抵抗性の基準を満たすことができた。このことから、細粒分含有率 が低い津波堆積物を用いて静的締固めによる繊維質固化処理土を作製する場合、細粒 分含有率が低い津波堆積物に細粒分含有率の高い試料や調整泥土を混合して用いる ことが必要であるということが分かった。



図-75 ベントナイトを混合した場合の細粒分含有率と初期含水比の関係

細粒分含有率だけでは簡易的に静的締固めによる繊維質固化処理土工法を用いる 方法が設定できないと推察されたため、土の状態に関係がある含水比の変化に伴う土 の塑性・液性に着目した。図-76 に静的締固めによって作製した繊維質固化処理土(古 紙破砕物の添加量 25 kg/m<sup>3</sup>、セメント系固化材の添加量 100 kg/m<sup>3</sup>)の流動性、材料 分離抵抗性と塑性指数の関係を示す。赤で表されているプロットが流動性、材料分離 抵抗性の基準を満たしている条件である。塑性指数 *I*p とは土の塑性の範囲を表すもの で液性限界 *w*L と塑性限界 *w*p の差である。液性限界試験は JIS A 1205 に規定されてい る方法で行い、塑性限界試験は JIS A 1206 に規定されている方法で行った。



図-76 から塑性指数が大きくなるほど、初期含水比も大きくなることがわかる。また、塑性指数が大きいほど、流動性および材料分離抵抗性を満たす初期含水比の条件

が増加する傾向にある。したがって、実際の施工の際は試料の細粒分含有率、液性限 界、塑性限界を調査することで初期含水比、古紙破砕物添加量、セメント系固化材添 加量などについてある程度の検討がつく可能性が図-76から示唆された。

式(18)は図-76の結果から推定される試料に古紙破砕物を25 kg/m<sup>3</sup>、セメント系固化 材を100 kg/m<sup>3</sup>添加した場合に必要な初期含水比 w を求めるための推定式である。な お、式(18)は流動性および材料分離抵抗性の基準を満たす初期含水比の平均値を通る ような近似曲線(図-76 の結果より対数関数として仮定)を最小二乗法によって推定 した。

$$w = 11.2\log(I_p + 1) + 55.6$$
 (18)

以上より、静的締固めによる繊維質固化処理土を用いた施工を考える場合、図-77 のフローチャートの手順に従うことができれば、より簡便に流動性、材料分離抵抗性 の基準を満たした静的締固めによる繊維質固化処理土を作製できると考えられる。

しかしながら、本研究では調整泥土であるベントナイトを添加した場合における流 動性、材料分離抵抗性の基準を満たす初期含水比、古紙破砕物の添加量、セメント系 固化材の添加量の配合バランスについては明らかにすることができなかった。実際の 施工では細粒分含有率が低い津波堆積物を用いて覆土材を造成することも考えられ るため、簡易的に静的締固めによる繊維質固化処理土工法を用いるためには今後、ベ ントナイトなどの調整泥土を用いた場合の流動性および材料分離抵抗性を満たす初 期含水比の推定方法を検討することが必要になる。

また、今後降雨が多い地域などで用いられる場合、覆土にさらに高い耐侵食性が求 められるため、古紙破砕物の添加量およびセメント系固化材の添加量が増加する可能 性がある。その場合、この手順は使うことができないため、初期含水比、古紙破砕物 の添加量、セメント系固化材の添加量の配合バランスについては試行錯誤によって決 定するしかなく、今後も検討の余地が残っている。



図-77 静的締固めによる繊維質固化処理土の作製条件設定のフローチャート

### 3.2.4 耐侵食性評価

図-78 は古紙破砕物添加量の増加による限界せん断力 τ<sub>c</sub> と侵食係数 k<sub>d</sub> の変化を表し たものである。実験結果より古紙破砕物の添加量が増加にともない、限界せん断力は 緩やかに上昇しているのに対し、 侵食係数は減少していることがわかる。これは古 紙破砕物の添加量が多いほど侵食に対する強度が上昇していることを示している。つ まり、静的締固めによる繊維質固化処理土の場合でも動的締固めによる繊維質固化処 理土と同様に古紙破砕物を添加することによって侵食しにくい地盤材料を生成する ことができると考えられる。



図-78 静的締固めによる繊維質固化処理土における限界せん断応力と侵食係数に及 ぼす古紙破砕物添加量の影響



図-79 静的締固めによる繊維質固化処理土の侵食試験結果と動的締固めによる繊維 質固化処理土の侵食試験結果

図-79 に静的締固めによる繊維質固化処理土の侵食試験結果と動的締固めによる繊 維質固化処理土の侵食試験結果との比較を示す。静的締固めによる繊維質固化処理土 は、動的締固めによる繊維質固化処理土よりもさらに耐侵食性が高いことが分かる。

## 3.2.5 乾湿繰返しに対する耐久性評価

試験は前述した乾湿繰り返し試験と同様の方法で行った。図-80 に供試体の0サイクル時および10サイクル時の写真を示す。また、図-81 および図-82 にサイクル数に伴う破壊強度、破壊ひずみの変化を表したグラフを示す。堆積物Dにみられるくぼみは供試体を作製した際、プラスチックモールド内に気泡が残り、気泡以外の部分が固化して発生したものである。0サイクル時と10サイクル時の写真から確認されるように、どちらの試料においてもサイクル数の増加に伴う供試体の劣化は見られなかった。破壊強度に関しては、どちらの試料においても目標値である125kN/m<sup>2</sup>以上を満足していた。また、堆積物Cおよび堆積物Dの10サイクル時の破壊強度は0サイクル時の破壊強度に対してそれぞれ105%、89%であり、耐久性の目標値である90%以上をおおむね満足する結果となった。破壊ひずみに関しては、サイクル数の増加に伴い増加し、最終的に5%前後となったため問題ないと考えられる。以上のことから静的締固めにより作製した供試体は、動的締固めにより作製した供試体と同様に、乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが分かった。



(a) 津波堆積物 C



0 サイクル 10 サイクル (b) 津波堆積物 D

図-80 乾湿繰り返し試験における 0 サイクル時と 10 サイクル終了後の供試体の様子



図-81 サイクル数の増加に伴う破壊強度の変化



図-82 サイクル数の増加に伴う破壊ひずみの変化

### 3.2.6 強度特性および透水性の評価

本試験では、供試体の養生期間を7日間および28日間とし、それぞれの供試体に 関して試験を行った。図-83 および図-84 にそれぞれの養生期間で試験を行った際の破 壊強度および透水係数を表したグラフを示す。破壊強度に関しては、どちらの試料も 7日養生の時点で破壊強度の目標値を満足しており、28日養生後は、セメント系固化 材の水和反応が進行したことにより破壊強度が大きく増加したと考えられる。透水係 数に関しては、7日養生の時点において、堆積物Dは目標値を満足していたが堆積物 Cは満足していなかった。28日養生後においては、堆積物Cは透水係数が7日養生の 時点の半分程度に減少し、また堆積物 D は微減したことにより、両者とも目標値を満 足する結果となった。ここで、表-16 に試験時のそれぞれの試料の乾燥密度を示す。 表から堆積物 D に関しては乾燥密度に差がほとんどないが、堆積物 C は 28 日養生の 供試体の乾燥密度は7日養生の乾燥密度よりも大きいことが分かる。これは、試料を 作製する際の誤差が原因ということがひとつ考えられるが、セメント系固化材の水和 反応により生成したエトリンガイトが間隙を埋めたことにより、28日養生の乾燥密度 が7日養生のときよりも大きくなったとも考えられる。いずれにしろ、透水係数は同 じ試料であれば、間隙の割合と密接な関係があることから、乾燥密度が高い 28 日養 生の供試体の方が、透水係数が小さいのは当然の結果であると推察される。セメント 系固化材の水和反応が進行するにつれて、間隙が減少していくとすると、改良土の透 水係数はさらに減少することが考えられる。



図-83 養生期間と破壊強度との関係



図-84 養生期間と透水係数との関係

	養生期間	乾燥密度	
	[日]	$[g/cm^3]$	
津波堆積物	7	1.115	
С	28	1.222	
津波堆積物	7	1.261	
D	28	1.271	

表-16 養生期間と試料の乾燥密度

#### 3.2.7 耐震性評価

図-85 および図-86 に堆積物 C、堆積物 D に関する過剰間隙水圧比と経過時間の関係 を示す。どちらの供試体においても、過剰間隙水圧比の上昇はみられなかった。ここ で図-87 および図-88 に動的締固めによる繊維質固化処理土の結果も含めた過剰間隙 水圧比の最大値の比較を示す。すべての供試体において試験条件を統一しているため、 過剰間隙水圧比の最大値が小さい供試体が他の供試体に比べ相対的に動的強度が高 いと考えられる。堆積物 C および堆積物 D の結果をみると、ともに静的締固めによ り作製した繊維質固化処理土は、動的締固めにより作製した供試体よりも高い動的強 度を有していた。繊維質固化処理土同士を比較しても、静的締固めによる供試体の方 が、動的強度が高いという結果となった。しかし、この結果から静的締固めによる供 試体の方が耐震性において優れているとは言い切れない。今回使用した動的締固めに よる供試体は、突固め回数が少なく、さらに回数を増やして供試体が密になるように 突固めを行えば、動的強度を高めることが可能であると考えられるためである。一方、 静的締固めによる供試体は、型に流し込むことにより供試体を作製するため、密度を 上げることは不可能であり、動的強度を高める余地はないと考えられる。



図-85 過剰間隙水圧の時間変化(津波堆積物 C)



図-86 過剰間隙水圧の時間変化(津波堆積物 D)



図-87 過剰間隙水圧比の最大値の比較(津波堆積物 C)



図-88 過剰間隙水圧比の最大値の比較(津波堆積物 D)

#### 3.2.8 まとめ

本研究では、改良土を放射能汚染土壌の覆土として利用する場合を想定し、静的締 固めにより作製した供試体の機能性評価を行った。試料は堆積物 C および堆積物 D の2種類を用いた。乾湿繰り返し試験では、どちらの供試体においても外見上の劣化 および破壊強度の著しい減少はみられず、動的締固めによる繊維質固化処理土と同様 に高耐久性を示した。一軸圧縮試験および透水試験では、7日養生と28日養生の供試 体を用意し試験を行った。7日養生で試験をおこなったところ、破壊強度の目標値は 満足するが、透水係数の目標値を満足しない条件が存在した。次に28日養生で試験 を行ったところ、すべての試料において、破壊強度および透水係数の目標値を満足す る結果となった。これは、セメントの水和反応が進行したことで強度が発現されると ともに供試体の間隙が減少したためであると考えられる。繰返し三軸圧縮試験では、 第2章と同様の試験条件で行い、動的締固めによる3種類の供試体と静的締固めによ る供試体について、過剰間隙水圧比の最大値を比較した。その結果、静的締固めによ る供試体は動的締固めによる供試体と比較して相対的に高い動的強度を有している ことが確認された。

以上の結果から、静的締固めにより作製した繊維質固化処理土は、地盤材や覆土材 として利用するために求められる機能性を有していることが確認された。

なお、静的締固めによる繊維質固化処理土を用いて福島県福島市内において試験盛 土を作成し、自然降雨環境下における耐侵食性および耐久性の確認を行った。図-89 は覆土を施すフレコンバッグであり、内部に汚染土を模擬した山砂を充填した。図-90 はフレコンバッグの周囲を型枠で覆い、その中央にフレコンバッグをセットし、型枠 の中に流動性の繊維質固化処理土を流し込んでいる様子である。図-91 は 1 週間の養 生後、脱型している様子であり、図-92 は完成した静的締固めによる繊維質固化処理 土の盛土である。図-93 および図-94 は脱型後 2.5 ヶ月後および 3.5 ヶ月後の写真であ るが、流出土はほとんど見られず、極めて高い耐侵食性および耐久性が確認された。



図-89 模擬汚染土を入れたフレコンバッ グ



図-90 打設の様子:フレコンバッグの周囲 を型枠で覆い、内部に流動性の繊維質固 化処理土を流し込む



図-91 一週間の養生後、脱型している様子



図-92 完成した静的締固めによる繊維質 固化処理土の盛土



図-93 脱型後 2.5 ヶ月後の盛土の様子



図-94 脱型後 3.5 ヶ月後の盛土の様子

# 4. 結論

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、機能性の高い覆土材を 生成することを目的とした。実施工を考慮し、動的締固めによる繊維質固化処理土と 静的締固めによる繊維質固化処理土の両方を作成し、耐侵食性・耐久性・難透水性・ 耐震性の機能性について検討した。その結果、津波堆積物に繊維質固化処理土工法を 適用することで、機能性の高い覆土材を生成できることが確認された。動的締固めに よる繊維質固化処理土では、一部で当初の目標値にやや届かない結果となったが、静 的締固めによる繊維質固化処理土では全ての目標値をクリアし、極めて高い機能性を 有する覆土材となることが確認された。また動的および動的締固めによる繊維質固化 処理土の両方に対して、最適な生成を提示することができた。本研究成果により汚染 土壌の安心・安全保管が実現さることを期待したい。

## 5. 参考文献

- 1) 復興庁:復興の現状と取組、2013.11.29. http://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-1/20131129\_gennjoutotoriku mi.pdf (参照 2014.1.30)
- 仙台市:仙台市震災復興ビジョン~仙台市震災復興計画素案~、2011.5. http://www.city.sendai.jp/shinsai/shinsaihukkokentou/pdf/vision/vision881.pdf (参照 2014.1.30).
- 環境省:除去土壌の保管に係るガイドライン、第4編、pp.1-43、2012. http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/josen-gl-full\_ver2.pdf (参照 2014.1.30).
- 4) 森雅人、高橋弘、逢坂照春、堀井清之、片岡勲、石井知征、小谷謙二:古紙破砕 物と高分子改良剤を用い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, Vol.119, No.4-5, pp.155-160, 2003.
- 5) Hanson, G. J. and Simon, A.: Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA, *Hydrological Processes*, pp.23-38, 2001.
- 6) Blaisdell, F. W., Clayton, L. A. and Hebaus, G. G.: Ultimate Dimension of Local Scour, *J. of Hydraulics Division*, ASCE, 107-HY3, pp.327-337, 1981.
- 7) 須川智久、土居洋一、三上博、戸村豪治、今泉繁良、飯塚正樹:まさ土を母材と するベントナイト混合土の現場施工実験、地盤工学会第38回地盤工学研究発表会 講演集(CD-ROM)、pp.2403-2404、2003.
- 8) 日本道路協会:道路土工、 盛土工指針、p.106、2010.
- 北村良介、川井田実、阿部廣史、城本一義、寺地卓也:砂質土地盤でのサクションの現地計測システムの開発、土木学会論文集、Vol.652、No.III-51、pp.287-292、2000.
- 10) 酒匂一成、深川良一、岩崎賢一、里見知昭、安川郁夫:降雨時の斜面災害防止の ための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング、地盤工学ジャーナル、 Vol.1、No.3、pp.57-69、2006.
- 11) 里見知昭、酒匂一成、安川郁夫、深川良一:主成分分析を用いた降雨に対する重要文化財後背斜面のリアルタイム崩壊危険度評価、土木学会論文集 C、Vol.65、No.2、pp.564-578、2009.
- 12) (財) 先端建設技術センター:建設汚泥の高度利用・利用技術の開発(盛土グル ープ) 共同研究最終報告書、旧建設省土木研究所 v.2.建設汚泥改良土の耐久性、 pp.77-82、1997.
- 13) 環境省: 8,000Bq/kg を超え 100,000Bq/kg 以下の焼却灰等の処分方法に関する方針 について、2011.

http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14161 (参照 2013.7.3)

14) 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、Vol.1、pp.1-5、2008.

- 15) 鳥谷部寿人、山下彰司、馬場仁志:粘性土河床の耐侵食性に関する実験的研究、 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所開発土木研究所報告論文、pp.81-87、1997.
- 16) 社団法人地盤工学会:土質試験 基本と手引き、pp.76,2001.
- 17) 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、Vol.1、pp.7-12、2012.
- 18) 嘉門雅史、勝見武、今西秀公:セメント系安定処理土の乾湿繰り返し耐久性、セメント協会第45回セメント技術大会講演集、pp.844-849、1991.
- 19) 沿岸開発技術研究センター:海上工事における深層混合処理工法技術マニュアル、 pp.129-130、1999.
- 20) 久野悟郎:土の流動化処理工法 建設発生土・泥土の再生利用技術、技報堂出版、 pp.21-81、1997.

## 6. 研究発表

- ・ 津波堆積物を用いた繊維質固化処理土の透水性に関する一考察、土木学会第67回 年次学術講演会講演集、CS10-005、pp.9-10、2012年9月5日.
- ・繊維質固化処理土工法による津波堆積物の再資源化と人工地盤造成、第23回廃棄 物資源循環学会研究発表会講演論文集、pp.181-182、2012年10月22日.
- Study on Durability for Erosion by Rainfall of Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge : A Consideration from the results of Jet Erosion Test, Proc. of the 3nd Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, Paper No. S3-1, pp.1-11, 2013 年 3 月 14 日.
- Study on Durability for Drying and Wetting of Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge, Proc. of the 3nd Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, Paper No. S3-2, pp.1-7, 2013 年 3 月 14 日.
- Study on Permeability of Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge, Proc. of the 3nd Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, Paper No. S3-3, pp.1-9, 2013 年 3 月 14 日.
- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の透水性評価、資源・素材学会春季大会 講演集、pp.173-174、2013.
- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の耐侵食性評価-水中噴流装置による耐 侵食性試験-、資源・素材学会春季大会講演集、pp.175-176、2013.
- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の耐侵食性評価 降雨による耐侵食性試験 、資源・素材学会春季大会講演集、pp.177-178、2013.
- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の乾湿繰り返しに対する耐久性評価、資源・素材学会春季大会講演集、pp.179-180、2013.
- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の耐侵食性に関する研究、テラメカニックス、第33号、pp.13-18、2013.

- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の耐侵食性と強度特性との関係、テラメ カニックス、第 33 号、pp.19-23、2013.
- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の透水性と強度特性との関係、テラメカ ニックス、第33号、pp.25-30、2013.
- Development of Ground Materials and Cover Soils by Recycling Waste Woods and Tsunami Sludge, Journal of Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol.13, Special Issue, pp.s108-s113, 2013.
- ・ 津波堆積物を用いた繊維質固化処理土の侵食と浸透に関する屋外実験、日本実験 力学会講演論文集 2013 年度年次講演会、No.13、pp.216-221、2013.
- Study on Durability for Erosion by Rainfall of Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge : A Consideration from the Results of Jet Erosion Test,Proc. of the 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013(CD-ROM).
- Study on Durability for Drying and Wetting of Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge,Proc. of the 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013(CD-ROM).
- Experimental Consideration on Relationship between Failure Strength Property and Permeability of Fiber-Cement-Stabilized Soil Made of Tsunami Sludge,Proc. of the 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013(CD-ROM).
- Study on Durability for Erosion by Rainfall of Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge,Proc. of the 8th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2013(CD-ROM).
- Experimental Study on Durability of Cover Soil for Radiation- Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge against Erosion by Rainfall, J of JSCE, Vol.1, No.1, Division C, pp.530-539, 2013.
- ・ 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、実験 力学、Vol.13、No.4、pp.339-345、2013.
- ・ 津波堆積物を用いた繊維質固化処理土の降雨に対する耐侵食性および浸透挙動に 関する屋外試験、実験力学、Vol.13、No.4、pp.346-352、2013.
- Study on Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil by Placing Type Fiber-Cement-Stabilized Soil,Proc. of the 4th Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, Paper No. S3-1, pp.1-19, 2014.
- Experimental Evaluation of Optimum Making Conditions for Fiber-Cement-Stabilized Soil Made of Tsunami Sludge,Proc. of the 4th Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, Paper No. S3-3, pp.1-8, 2014.
- Study on Durability for Erosion by Rainfall of Cover Soil for Radiation-Contaminated Soil Made of Tsunami Sludge: A Consideration for Placing Type Fiber-Cement-Stabilized

Soils,Proc. of the 4th Vietnam/Japan Joint Seminar on Geohazards and Environmental Issues, Paper No. S3-5, pp.1-9, 2014.

- ・ 津波堆積物を用いた繊維質固化処理土の最適作製条件に関する一考察、平成26年 度資源・素材学会春季大会。
- http://www.mmij.or.jp/convention/doc\_file.inc.cpx?est=770288f507e0754ee4240f495562
   ee07、2014.
- 打設型繊維質固化処理土による放射能汚染土の被覆に関する研究、平成26年度資源・素材学会春季大会。
- http://www.mmij.or.jp/convention/doc\_file.inc.cpx?est=3dce63613c8f6659188c47931fc8 81f7、2014.
- ・ 津波堆積物を用いた放射能汚染土覆土材の強度特性と透水性との関係、土木学会 第68回年次学術講演会講演集、CS5-001、CD-ROM、2013年9月4日.
- 7. 知的財産権の取得状況

とくに無し

8. 研究概要図



## PURPOSES

On March 11 in 2011, a very big earthquake occurred in Tohoku district in Japan. This is called "The Great East Japan Earthquake". This was the largest earthquake on record in Japan and magnitude of it was 9.0. Huge tsunami was generated by this earthquake and the coastal area of Tohoku district had catastrophic damage. Many houses were destroyed by tsunami and a large amount of rubble was generated. At the same time, a large amount of tsunami sludge deposited on land. The main reason which has delayed the restoration and reconstruction in the disaster areas is a large amount of rubble. If the high quality ground materials can be produced from waste woods and tsunami sludge, it can be considered that the restoration and reconstruction in the disaster areas will progress greatly.

By the way, we have already developed a new recycling method for high water content mud such as construction sludge by using paper debris(fragments of old newspaper) and cement in order to increase the recycling rate of construction sludge. This method is called "Fiber-cement-stabilized soil method". The modified soil produced by this method has 3 main features, that is, 1)high failure strength and failure strain, 2)high durability for drying and wetting and 3)high dynamic strength. Therefore, if the tsunami sludge can be modified by Fiber-cement-stabilized soil method, high quality ground materials will be produced and the restoration and reconstruction in the disaster areas will progress greatly.

Furthermore, excavation of the ground surface has been conducted in Fukushima Prefecture in order to reduce the spatial radiation dose. Excavation is a useful method to reduce the spatial radiation dose, but the excavated soils have to be kept safely and securely for several years. If the modified soils can be used as the cover soils for radiological contaminated excavated soils, safe and secure keeping of radiological contaminated excavated soils will be possible.

Therefore, the purposes of this study are to develop the cover soils from tsunami sludge by applying Fiber-cement-stabilized soil method, and to investigate experimentally the strength characteristics and durability for drying and wetting of modified soils.

## PROCEDURES

#### (1) Erosion Test

Durability for erosion was estimated by both a submerged jet erosion test and outdoor test under natural rainfall. In the submerged jet erosion test, the eroded depth and elapsed time were measured and then both critical shear stress and the erodibility coefficient were obtained. In the outdoor test, the durability for erosion was estimated by measuring the volume of soils discharged from the embankment.

## (2) Cyclic Test for Drying and Wetting

Table 1 shows the procedures of cyclic test for dying and wetting based on final report of cooperative research developed by Public Works Research Institute. One cycle consists of drying for two days at 40 degrees and wetting for one day at 20 degrees. Observation and taking photographs of specimens are carried out after drying and wetting of each cycle, and unconfined compression test is conducted after prescribed cycle to investigate the change of failure strength and failure strain with increasing the cycle number.

	5	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,
Specimens	1 cycle	Confirmation item
φ5×10 [cm]	Drying for two days at 40 degrees	•Unconfined compression test after prescribed cycle $(0^{th}, 2^{nd}, 6^{th})$ and $10^{th}$ )
	one day at 20 degrees	•Condition check and photography of specimens after drying and wetting of each cycle

 Table 1
 Procedures of cyclic test for drying and wetting

### (3) Permeability Test

Permeability tests were carried out by using a falling head permeability test apparatus. In each test, 3 specimens were used, and the hydraulic conductivity was measured.

### (4) Cyclic Tri-axial Compression Test

Dynamic strength of modified soils made of tsunami sludge were experimentally investigated by cyclic triaxial test. Each test was carried out based on Japanese Geotechnical Society Code (Method for cyclic undrained tri-axial test on soils, JGS-0541).

Test conditions set for cyclic tri-axial test are as follows. The back pressure is  $200 \text{ kN/m}^2$ , the effective confining pressure is  $100 \text{ kN/m}^2$ , load frequency is 0.1 Hz, and half amplitude of axial differential stress is  $32 \text{ kN/m}^2$ . Here, the back pressure is the internal pressure of specimen and applied in order to saturate specimen. The effective confining pressure is the external pressure of specimen. In this test, original (unimproved) tsunami sludge and placing type fiber-cement-stabilized soils were used to compare the dynamic strength. The specimens of original (unimproved) tsunami sludge were made by using dynamic compaction method.

#### **RESULTS AND DISCUSSIONS**

## 1. Experiments by Dynamic Compaction

#### (1) Erosion Test

The durability for erosion of fiber-cement-stabilized soils made of tsunami sludge was experimentally investigated by using the water jest test apparatus. Specimens were made by changing the additive amount of paper debris and cement, and the effect of paper debris and cement on durability for erosion was estimated through the experiments. In result, it was found that the critical shear stress increased with increasing the additive amount of paper debris and cement. Furthermore, it was confirmed that tsunami sludge can be modified to the high durability cover soil for erosion by using paper debris and cement.

## (2) Cyclic Test for Drying and Wetting

The durability for drying and wetting of modified soils made of tsunami sludge were investigated because the durability for drying and wetting is an important factor when the modified soils are used as cover soils for radiological-contaminated soils in Fukushima Prefecture. As a result, Cement-stabilized soils deteriorated largely with increasing the cycle number. On the other hand, Fiber-cement-stabilized soils did not deteriorate even if the cycle number increased. So, it was confirmed that they have high durability for drying and wetting.

### (3) Permeability Test

It was confirmed through the permeability test that fiber-cement-stabilized soils satisfied the target value for hydraulic conductivity if the fiber-cement-stabilized soils were made by adjusting the initial water content of the sludge.

## (4) Cyclic Tri-axial Compression Test

It was confirmed through the permeability test that fiber-cement-stabilized soils satisfied the target value for hydraulic conductivity if the fiber-cement-stabilized soils were made by adjusting the initial water content of the sludge.

#### 2. Experiments by Static Compaction

### (1) Erosion Test

Specimens were made by changing the additive amount of paper debris and cement, and the effect of paper debris and cement on durability for erosion was estimated through the experiments. In result, it was made clear that if the paper debris is added with the sludge, the durability of the modified soils for erosion increases largely. That is, it can be said that the durability for erosion can be increased extremely by applying placing type fiber-cement-stabilized soil method for the tsunami sludge.

Moreover, proper initial water content of the sludge was experimentally investigated in order to conduct the placing construction. As a result, it was confirmed that more than 30 % of fine-grain is necessary in the sludge to conduct the placing construction. The necessary

initial water content of the sludge is easily obtained if the fine-grain mass rate included in the sludge is measured.

# (2) Cyclic Test for Drying and Wetting

In this study, the performance of placing type fiber-cement-stabilized soil was experimentally investigated. Two kinds of tsunami sludge were used, and specimens were made by using static compaction method. As a result, both placing type fiber-cement-stabilized soils satisfied the target value of durability for drying and wetting. That is, placing type fiber-cement-stabilized soils had high durability for drying and wetting.

## (3) Permeability Test

In this study, the performance of placing type fiber-cement-stabilized soil was experimentally investigated. Two kinds of tsunami sludge were used, and specimens were made by using static compaction method. As a result, both placing type fiber-cement-stabilized soils satisfied the target value of hydraulic conductivity. That is, lacing type fiber-cement-stabilized soils had enough low permeability.

# (4) Cyclic Tri-axial Compression Test

In this study, the performance of placing type fiber-cement-stabilized soil was experimentally investigated. Two kinds of tsunami sludge were used, and specimens were made by using static compaction method. It was confirmed that both placing type fiber-cement-stabilized soils showed high dynamic strength compared to the original (unimproved) tsunami sludge.

# CONCLUSIONS

In this study, the procedures to produce the cover soils for radiation-contaminated soils from tsunami sludge were developed for both dynamic and static compaction construction. The cover soils produced in this study had the features such as high durability for erosion, high durability for drying and wetting, low permeability and high dynamic strength. Especially, placing type fiber-cement-stabilized soils had high qualities, and satisfied all target values. That is, it was confirmed that placing type fiber-cement-stabilized soils are the best as cover soils or radiation-contaminated soils.