



未利用高含水比泥土の軽量盛土材としての再資源化に関する研究

(16360453)

平成16年度～平成17年度科学研究費補助金（基盤研究(B)）研究成果報告書

平成18年3月

研究代表者 高橋 弘
(東北大学大学院環境科学研究科・教授)

未利用高含水比泥土の軽量盛土材としての再資源化に関する研究

(16360453)

平成16年度～平成17年度科学研究費補助金（基盤研究(B)）研究成果報告書

平成18年3月

研究代表者 高橋 弘
(東北大学大学院環境科学研究科・教授)

目 次

はしがき	1
研究組織	1
交付決定額	
研究発表	2
研究成果	
繊維質固化処理土の強度特性に関する研究	4
乾湿繰り返し試験における繊維質固化処理土の耐久性	21
凍結融解試験における繊維質固化処理土の耐久性	37
ペーパースラッジを用いた繊維質固化処理土の強度特性および 乾湿繰り返し試験における耐久性に関する実験的研究	42
資料(学会誌掲載論文・国際会議 Proceedings など)	

はしがき

建設汚泥は、建設工事に伴って発生する掘削汚泥や微細な泥状土であり、一般に含水比が高いため、そのままでは盛土などに直接流用できない。従って、年間800万トン程度の建設汚泥が排出されているにもかかわらず、建設汚泥のリサイクル率は低く、ごく一部再利用されるものを除き、大部分は産業廃棄物である「汚泥」として中間処理施設で脱水処理を施すか、あるいは直接最終処分場に持ち込まれている。しかしながら、処分場の不足・遠隔化は深刻な問題であり、輸送コストの負担から建設汚泥の不法投棄が後を絶たず、地球環境への汚濁負荷の影響が大きな問題となっており、建設汚泥の有効利用が望まれているのが現状である。

これまでの建設汚泥・ヘドロ等の高含水比泥土の処理法としては、天日乾燥、脱水処理、セメント系固化材による固化処理などがある。しかし、天日乾燥では仮置きの場合と処理に長時間を要し、また脱水処理では大きな脱水施設が必要であるとともに、濁水処理の問題などが依然として残る。固化処理工法はセメント系固化材を建設汚泥に混合させ、固化する工法であるが、本工法により生成される土砂(固化処理土)は、コンクリートのように硬くてもろい性質がある。例えば、泥水とセメント系固化材を混合し流動化させ、まだ固まらないコンクリートのようにポンプなどで流し込んで埋戻しなどの施工を行う「流動化処理土工法」では、生成される土砂(固化処理土)は、一軸圧縮試験における破壊ひずみが通常土より小さく、品質改良が十分とは言えず、盛土材としての用途に適さない場合が多々ある。

さらに固化処理土は乾湿繰り返しによる劣化が激しいと言われている。そのため、固化処理土を盛土材などとして使用する場合には、外部に露出しないように固化処理土を山土などで被覆する必要があると指摘されている。つまり、固化処理土は品質改良が十分であるとは言い難い。

そこで本研究では、十分な品質特性を有する盛土材料として高含水比泥土の再資源化をはかるために、建設汚泥に繊維質物質である古紙破砕物と高分子系改良剤を添加し、高含水比泥土を再資源化する技術について検討した。すなわち、新しい再資源化工法により高含水比泥土が団粒化した土砂に生成できることを確認した後、生成土(繊維質固化処理土)の強度特性、乾湿繰り返しにおける耐久性、凍結融解における耐久性、軽量盛土としての経済性などについて検討した。本報告書は、これら一連の研究成果を取りまとめたものである。

研究組織

研究代表者：高橋 弘(東北大学大学院環境科学研究科・教授)

研究分担者：井上 千弘(東北大学大学院環境科学研究科・助教授)

研究分担者：須藤 祐子(東北大学大学院環境科学研究科・助手)

研究分担者：建山 和由(立命館大学理工学部・教授)

交付決定額(配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	3,500	0	3,500
平成 17 年度	2,200	0	2,200
総計	5,700	0	5,700

研究発表

(学会誌・国際会議 Proceedings 等)

- 1) 高橋 弘, 森 雅人：故紙を混ぜて建設汚泥をリサイクルー繊維質固化処理土の強度特性と施工事例ー, 建設の機械化, No. 651, pp. 28-33, 2004
- 2) 高橋 弘, 土肥 将也, 須藤 祐子, 橋本 久儀：土質改良機の粘性土小割性能に関する研究, 第 2 回オーガナイズド・テラメカニックス・ワークショップ in 仙台講演論文集, Vol. 1, pp. 13-20, 2004
- 3) M.Mori, H.Takahashi and K.Kumakura : Durability and Utilization System of Fiber-Cement-Stabilized Mud Produced from Construction Sludge, Proc. of the 2nd International Workshop on Earth Science and Technology, Vol.1, pp.209-214, 2004
- 4) 森 雅人, 高橋 弘, 熊倉 宏治：繊維質固化処理土の乾湿繰り返し試験による耐久性に関する実験的研究, 資源・素材学会誌, Vol. 121, No. 2-3, pp. 37-43, 2004
- 5) H.Takahashi, M.Mori and K.Kumakura : A New Recycling System of High Water Content Mud : Production of High Quality Soil from Construction Sludge, Proc. of the 5th International Conference on Micromechanics of Granular Media, Vol.2, pp.1067-1071, 2005
- 6) H.Takahashi, M.Mori and K.Kumakura : Study on Durability of Fiber-Cement-Stabilized Mud Produced from Construction Sludge in Freezing and Thawing Tests, Proc. of the 5th International Conference on Materials Engineering for Resources, CD-ROM, 2005
- 7) 高橋 弘, 森 雅人：建設汚泥の新しい再資源化処理工法ー繊維質固化処理土工法と生成土の強度特性ー, 平成 17 年度機械施工と建設機械シンポジウム論文集, pp. 17-24, 2005
- 8) H.Takahashi, M.Do, M.Mori and Y.Suto : Study on Recycling of Wasted Soils and Paper Sludge : Application of Paper Sludge to Soil Improvement, Proc. of the 3rd International Workshop on Earth Science and Technology, pp.177-185, 2005
- 9) H.Takahashi, H.Akuzawa and M.Mori : Study on Development of Neutral Fiber

Solidification Material by use of Wasted Gypsum Boards and its Application to Soil Improvement, Proc. of 3rd International Workshop on Earth Science and Technology, pp.161-170, 2005

- 10) 森 雅人, 高橋 弘, 熊倉 宏治: ペーパースラッジを用いた繊維質固化処理土の強度特性および乾湿繰り返し試験における耐久性に関する実験的研究, 資源・素材学会誌掲載決定, 2006

(口頭発表)

- 1) 森 雅人, 高橋 弘, 熊倉 宏治: 繊維質固化処理土の耐久性に関する実験的研究, 日本素材物性学会平成 16 年度年会講演会要旨集, pp.104-107, 2004
- 2) 熊倉 宏治, 高橋 弘, 森 雅人: 軽量繊維質固化処理土を橋台の裏込材に適用した試設計例, 日本素材物性学会平成 16 年度年会講演会要旨集, pp.108-111, 2004
- 3) 熊倉 宏治, 森 雅人, 高橋 弘: 繊維質固化処理土の軽量盛土材としての活用, (社) 日本建設機械化協会東北支部 平成 17 年度新技術情報交換会論文集, pp. 51-56, 2005
- 4) 高橋 弘, 三浦 洋輔, 森 雅人, 熊倉 宏治: 繊維質固化処理土の耐久性に関する実験的研究—凍結融解試験における耐久性および強度特性—, 平成 17 年度日本混相流学会年会講演論文集, 2005

繊維質固化処理土の強度特性に関する研究

1. はじめに

近年、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・有効利用が注目されている。ヘドロや建設汚泥なども同様に再資源化が望まれているが、これらは一般に含水比が高いため、直接利用が困難であり、何らかの再資源化処理が必要になっている。例えば、ヘドロは、一般に脱水処理されて埋め立て処分されることが多いが、長期間放置すると微生物の嫌気性分解により強烈な悪臭を発生するとともに、泥濁化する。物性改良のためにセメント系固化材を添加・混合して固化処理することが多い¹⁾。一方、建設汚泥は、建設工事に伴って発生する掘削汚泥や微細な泥状土などであり、そのままでは盛土などに直接流用できない。従って、年間1,000万トン以上の建設汚泥が排出されているにもかかわらず、建設汚泥のリサイクル率は低く、ごく一部再利用されるものを除き、大部分は産業廃棄物である「汚泥」として中間処理施設で脱水処理を施すか、あるいは直接最終処分場に持ち込まれている。しかしながら、処分場の不足・遠隔化は深刻な問題であり、輸送コストの負担から建設汚泥の不法投棄が後を絶たず、地球環境への汚泥負荷の影響が大きな問題となっており、建設汚泥の有効利用が望まれているのが現状である。

建設汚泥は高含水比状態を呈し、本来地盤を形づくっていた土が建設工事の過程で泥状となった場合が多く、有害物質などを含有する例は極めて希であり、セメント系固化材などにより固化処理することによって盛土材料としてリサイクルが可能であり¹⁾、既に流動化処理土工法²⁾³⁾などが提案されている。流動化処理土工法は泥水とセメント系固化材を混合し流動化させ、まだ固まらないコンクリートのようにポンプなどで流し込んで、埋め戻しなどの施工を行う方法であるが、この工法により生成される土砂(以下、固化処理土と記す)は、一軸圧縮試験における破壊ひずみが通常土より小さく、品質改良が十分とは言えず盛土材としての用途に適さない場合が多々ある。例えば村田³⁾は、「流動化処理土工法の弱点は、処理土に粘り強さが無く、外力が加わると小さなひずみで破壊に至ることである」と述べている。つまり、流動化処理土工法は処理が比較的容易であるが、生成される固化処理土はコンクリートや岩石のような強度特性を示すため、周辺地盤や既存盛土と固化処理土による新設の盛土の間に剛性の相違が生じ、互いのなじみが悪く、地震時のように盛土や基礎地盤が大きな変形を受ける時には、剛性の高い部分に局所的な変形集中によるクラックや過大な土圧の発生が懸念される⁴⁾。

一方、吸水性の高分子系改良剤(ポリマー)を用いて汚泥を再資源化する工法も提案されているが⁵⁾、この工法が適用できる含水比の範囲は100%程度までであり、それを超える含水比の泥水に対しては、上述した流動化処理土工法のように泥水にセメント系固化材を添加し、水和反応により含水比を100%程度までに低下させる必要があ

る。しかし、高含水比泥土の場合、含水比を低下させるためには大量のセメント系固化材を添加する必要があるが、その結果、上述したような固化処理土と同じ特性を示すことになり、強度上の問題点が発生してしまうことになる。

そこで著者らは、十分な品質特性を有する盛土材料として汚泥の再資源化をはかるために、ヘドロや汚泥に繊維質物質である古紙破砕物と高分子系改良剤を添加し、高含水比泥土を再資源化する技術の開発を行った。本工法では、汚泥に古紙を投入し、古紙に自由水の大部分を吸水させるため、高含水比泥土に対しても大量のセメント系固化材を添加する必要がなく、かつ高分子系改良剤の添加量も少なく済むため処理費の大幅な低減につながるとともに、処理土の内部に繊維質を含むため、破壊ひずみの大きい粘り強い土砂(以下、繊維質固化処理土と記す)の生成が可能になる。本研究で使用する高分子系改良剤および助剤の詳細は後述するが、これは地中の微生物により完全に分解されてしまうので、地球環境に負荷を与えないことが既に確認されており⁶⁾、また古紙に使用されているインキも、近年では、植物油を用いた環境に優しい「エコインキ」が開発され、既に使用されており⁷⁾、このインキも毒性が無い。古紙はほとんどがセルロースから構成されており、生物学的に難分解性物質である。セルロースを分解する生物は一般的にキノコや放線菌であるが、これらの生物は地下深く(1m以深)には生息していない⁸⁾。また処理土の透水性はかなり低いいため、周囲から侵入水とともに微生物が流入する可能性も低い。従って、本研究で提案する繊維質固化処理土は、定性的ではあるが、地球環境に対して安全な土砂と言える。

本論文では、新しい処理工法(以下、繊維質固化処理土工法と記す)の概要と繊維質固化処理土の強度特性について報告する。

2. 繊維質固化処理土工法の原理

本研究で提案する新しい繊維質固化処理土工法の原理は以下に示すようである。

- ①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。このため高含水比泥土の運搬はパイプラインかバキュームカー等によらなければならない。
- 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、図-1(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さらに高分子系改良剤を添加し、攪拌すると、図-1(c)に示すように水溶性高分子が溶解し、土粒子の表面に吸着する。土粒子間の架橋・吸着効果により団粒化構造の中に自由水を封じ込め、流動性を失わせ団粒状態となる。
- ④最後に助剤を混合し、攪拌機により泥土を攪拌してせん断を与えると、土粒子が団粒化して保水性の高い土砂が生成される。

処理土を植生土壌として再利用する場合、セメント系固化材を混入する必要はない

が、盛土材として利用するため、ある程度の強度を必要とする場合は、目的とする強度に応じて、さらに必要量のセメント系固化材を添加する。

以上の工程により、高含水比泥土が繊維質固化処理土として再資源化される。

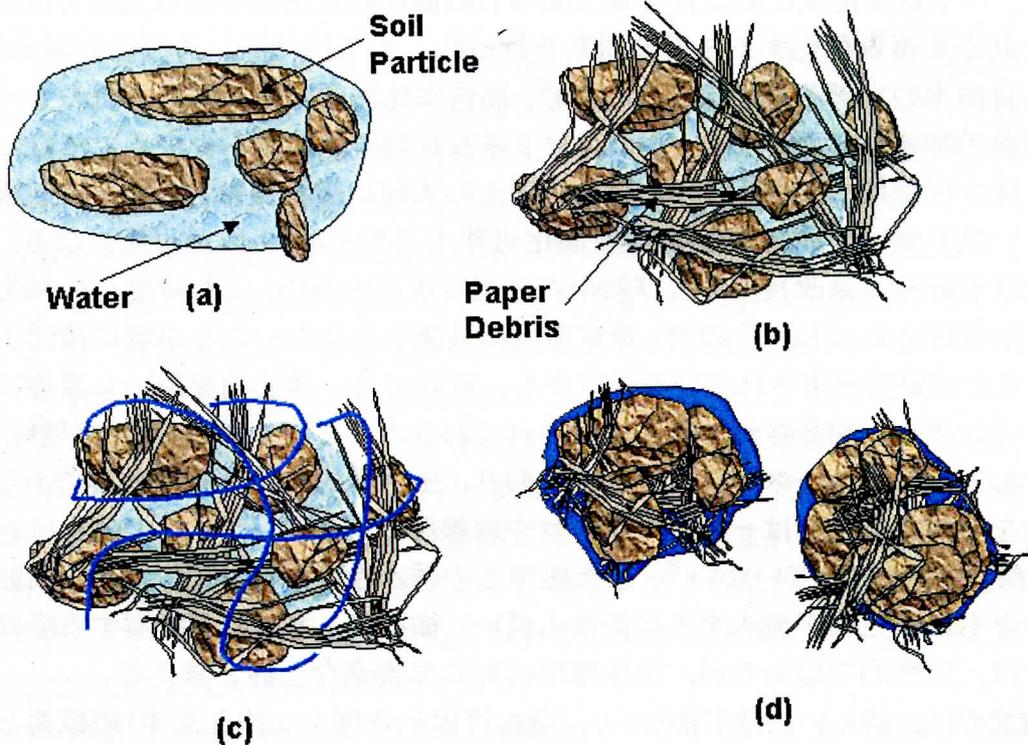


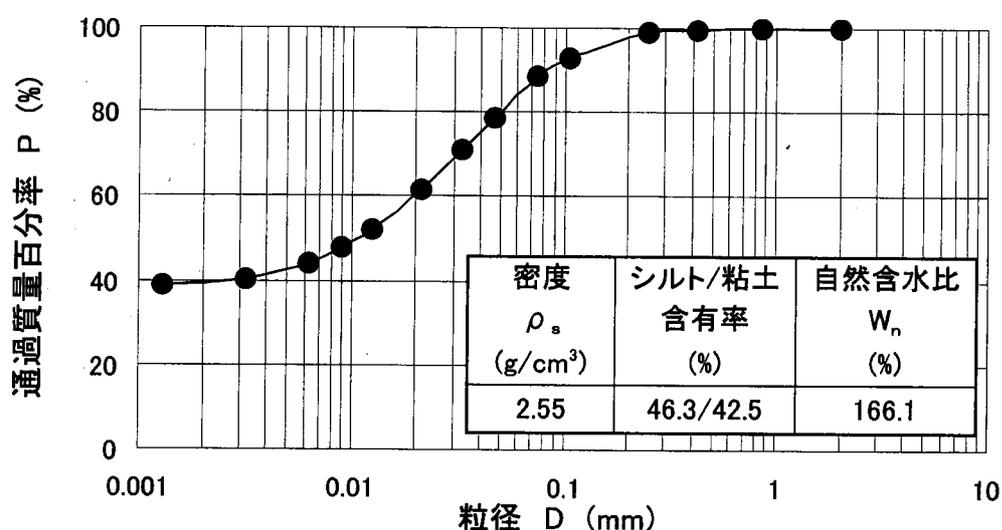
図-1 繊維質固化処理土の原理

3. 繊維質固化処理土工法に関する実験的考察

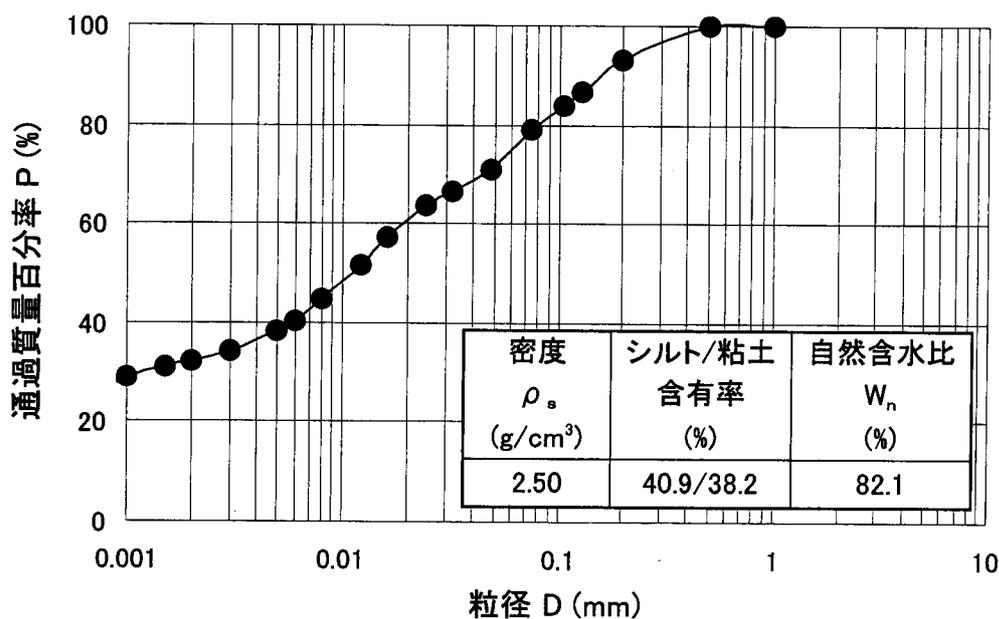
3.1 実験試料

繊維質固化処理土の強度特性に関する検討に先立ち、繊維質固化処理土工法に関する検討を行った。上述したように、本研究で提案する処理工法では、泥水に古紙、高分子系改良剤、助剤およびセメント系固化材を添加して攪拌混合し、繊維質固化処理土を生成するものである。従って、繊維質固化処理土工法を確立するためには、処理すべき対象である泥水の量および含水比に応じて、どの程度の添加剤を混合すべきかについて検討する必要がある。そこで、実際の建設現場から泥水式推進工法余剰泥水を、また河川から浚渫土をサンプリングし、添加剤の添加量を種々に変えて、繊維質固化処理土の生成を行った。これらの泥水の粒径加積曲線、土粒子の密度、シルト/粘土含有率、自然含水比は図-2 に示す通りである。粒径加積曲線は泥水の水分を蒸発させ、土粒子のみを採取し、JIS A1204「土の粒度試験方法」に従って測定した。すなわち0.075mm までを「ふるい分析」により分類し、0.075mm ふるいを通過した土粒子に対

して「沈降分析」を行い、粒度分布の測定を行った。シルト/粘土含有率は、泥水の大まかな性状を表すことができるパラメータであるが、この値は測定された粒径加積曲線から算出した。すなわち、JIS A1204 では、土粒子径の範囲が 0.005mm~0.075mm の土粒子をシルトに分類し、また 0.005mm 以下の土粒子を粘土と分類しているため、測定された粒径加積曲線を用いて土粒子全体の重量に対してシルトの重量および粘土の重量の割合を求め、シルト/粘土含有率を算出した。



(a) 泥水式推進工法余剰泥水



(b) 河川浚渫土

図-2 泥水の粒径加積曲線

3.2 実験方法

サンプリングした泥水に水を加え、含水比を調整した。初めに、容量5リットルの卓上モルタルミキサーに含水比を調整した泥水を入れ、次に古紙を加えて60秒間攪拌した。その後、高分子系改良剤を加えて2分間攪拌し、最後に助剤を加えて30秒間攪拌した。同一の含水比の泥水に対して、古紙添加量、高分子系改良剤の添加量および助剤の添加量を種々に変化させて上述の実験を繰り返し、改良土生成の可否を評価した。評価方法としては、目視によって団粒化したものを改良可とし、団粒化しなかったものを改良不可とした。

なお、本研究では、高分子系改良剤としてアニオン性の高分子系ポリアクリルアミド((株)テルナイト製:商品名 ボンテラン-P)を用いた。また、助剤としてカチオン性の無機系凝集剤((株)テルナイト製:商品名 ボンテラン-L)を用いた。この助剤は疎水化剤としての役割があるため、この助剤を添加することにより団粒化がさらに促進され、高分子系改良剤だけでは団粒化が困難な泥水に対しても安定した改良土を生成することが可能である。

3.3 添加量に関する実験結果

実験結果の一例として、含水比が166.1%(サンプリングした推進余剰泥水の初期含水比)の時の結果を表-1に示す。評価として団粒化したものを○、団粒化しなかったものを×で示した。含水比および泥水を変えて8通りの実験を行った結果、最適添加量として、表-2に示す結果が得られた。この結果より、高分子系改良剤および助剤の最適添加量は、 1.0kg/m^3 および 7.0kg/m^3 であると判断した。

ところで、古紙破砕物を添加する目的は、泥水中の自由水を吸水し、見かけの含水比を低下させて、水溶性の高分子系改良剤を土粒子に直接作用させることであるが、泥水中に自由水がどの程度存在するかを直接測定することは極めて困難である。そこで、簡単のため「自由水=含水比-液性限界」と仮定し、含水比-液性限界と古紙添加量の関係を図-3に示した。この図を見ると、実験点に多少バラツキがあるものの、両者にほぼ直線関係が認められる。従って、処理対象となる泥水の含水比(=水の重量/土砂の乾燥重量)を計測し、さらに土砂の液性限界を室内実験により計測すれば、図-3に示す関係より、最適古紙添加量を決定することができる。しかし、現場適用性を考えた場合、含水比は現場で簡単に計測することができるものの、土砂の液性限界を現場において計測することは極めて困難である。現場で最適古紙添加量を決定するためには、現場で簡単に計測できるパラメータを用いることが望ましい。そこで、本研究では、現場で簡単に計測できる含水率(=水の重量/泥水の重量)を取り上げ、便宜上「含水比-液性限界」と含水率とは比較的近い値であると仮定し、図-3より最適古紙添加量として表-3に示すような値を得た。なお、含水比 w と含水率 e との間には、次式で示す関係がある。

$$e[\%] = \frac{w[\%]}{100 + w[\%]} \quad (1)$$

ただし、含水率(あるいは含水比)のみによって古紙添加量を決定する場合、土質条件が加味されていないため、正確に自由水量を把握することはできず、室内実験を行い

表-1 各種添加量における団粒化の有無(○：団粒化したもの、
×：団粒化しなかつもの、含水比：166.1%)

古紙添加量 [kg/m ³]	高分子系改良剤 添加量 [kg/m ³]	助剤添加量 [kg/m ³]	評価
30.0	0.8	5.0	×
		7.0	×
		9.0	×
	1.0	5.0	×
		7.0	×
		9.0	×
	1.2	5.0	×
		7.0	×
		9.0	×
50.0	0.8	5.0	×
		7.0	×
		9.0	×
	1.0	5.0	×
		7.0	○
		9.0	○
	1.2	5.0	×
		7.0	×
		9.0	○
70.0	0.8	5.0	×
		7.0	×
		9.0	×
	1.0	5.0	×
		7.0	○
		9.0	○
	1.2	5.0	×
		7.0	○
		9.0	○

液性限界を考慮して求めた古紙添加量と誤差を生じる可能性がある。従って、表-3に示す値は、現場において古紙添加量を簡単に推定するための目安であり、厳密には、土砂の液性限界を考慮して、図-3に示す関係より最適古紙添加量を決定すべきである。それゆえ、現場において簡単に土砂の液性限界を求める方法や自由水量を計測する方法の開発が必要であるが、これについては今後の課題としたい。

表-2 最適添加量

泥水	含水比 [%]	古紙添加量 [kg/m ³]	高分子系改良剤 [kg/m ³]	助剤 [kg/m ³]
推進余剰 泥水	1661.	50.0	1.0	7.0
	192.5	90.0	1.0	7.0
浚渫土	82.1	20.0	1.0	7.0
	94.3	40.0	1.0	7.0
	130.0	80.0	1.0	7.0
	106.5	40.0	1.0	7.0
	128.7	60.0	1.0	7.0
	155.1	90.0	1.0	7.0

さて、セメント系固化材の添加量についてであるが、従来の工法では、主として含水比を低減させるために大量のセメント系固化材を添加しており、その結果、生成される固化処理土はコンクリートのような固くて脆い性質のものとなっていた。本工法では、必要な強度を得るために必要なだけのセメント系固化材を添加すればよい。セメント系固化材は、添加量が多いほど繊維質固化処理土の強度は大きくなる。従って、使用する場所の目的強度に応じて添加量を決定すればよい。セメント系添加量と処理土の強度との関係については、次章で述べる。

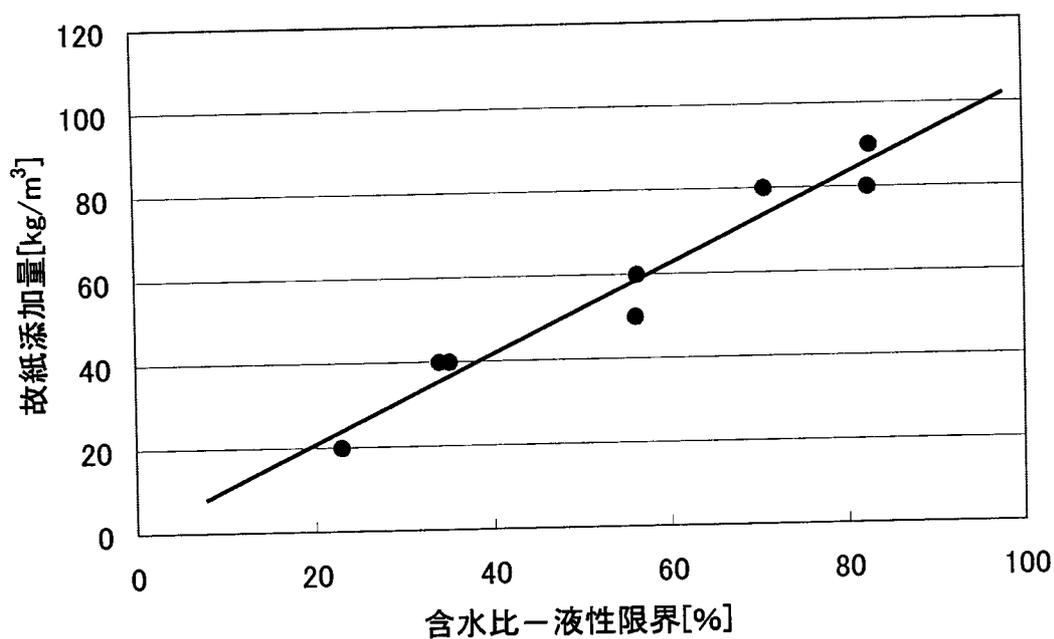


図-3 含水比-液性限界と古紙添加量の関係

表-3 泥水の含水比と古紙添加量との関係

泥水の含水比 [%]	泥水の含水率 [%]	古紙添加量 [kg/m ³]
100	50.0	50
200	66.7	70
300	75.0	80
400	80.0	85
500	83.3	90

4. 繊維質固化処理土の強度特性に関する実験的考察

4.1 実験試料および実験方法

繊維質固化処理土の強度特性について検討するため、本研究で提案した工法により繊維質固化処理土を生成するとともに、比較のため同じ泥水を使用して、セメント系固化材のみを用いて固化処理土を生成し、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を実施した。なお、繊維質固化処理土を生成するために用いた泥水試料は、前述した泥水式推進工法余剰泥水である。

表-4 供試体作成のための配合割合

固化処理土	泥水 セメント系固化材 : 100, 200, 300kg/m ³
繊維質固化処理土	泥水 古紙破砕物 : 50kg/m ³ 高分子系改良剤 : 1kg/m ³ 助剤 : 7.2kg/m ³ セメント系固化材 : 100, 200, 300kg/m ³

固化処理土および繊維質固化処理土は、表-4の配合で供試体を作成し、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を実施した。供試体はJGS 0821-2000(地盤工学会基準)「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」に従って作製した。すなわち、表-4に示す配合で泥水と添加剤を攪拌・混合し、直径5cm、高さ10cmの標準的なモールド(供試体作製容器)に入れ、供試体から水分が蒸発しないようにモールドを密封材で被覆し、20℃±3℃で7日間および28日間養生した。一軸圧縮試験は、JIS A1216「土の一軸圧縮試験方法」に従って計測を行った。また三軸圧縮試験は、JGS 0521-2000「土の非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験方法」に従って計測を行った。2つの試験ともに上

述した寸法の供試体を使用した。

4.2 一軸圧縮強度

建設汚泥の処理土を土質材料として利用する場合の品質区分は、原則としてコーン指数を指標としており、 800 kN/m^2 以上を確保することが望ましいとされている⁹⁾。また、建設汚泥固化処理土のコーン指数 q_c と一軸圧縮強度 q_u の関係は $q_c=5\sim 15q_u$ であることから¹⁰⁾¹¹⁾、一軸圧縮強度で安全側にみて 160 kN/m^2 以上の強度が求められていることになる。しかし、ライフラインの埋設等で再掘削が必要となる場合では、強度が大きくなりすぎて掘削が困難にならないように注意する必要がある。油圧ショベルで容易に再掘削可能な強度としては、一軸圧縮強度で $500\sim 1000 \text{ kN/m}^2$ であるため、固化処理土の一軸圧縮強度もこの範囲内に抑える必要がある。

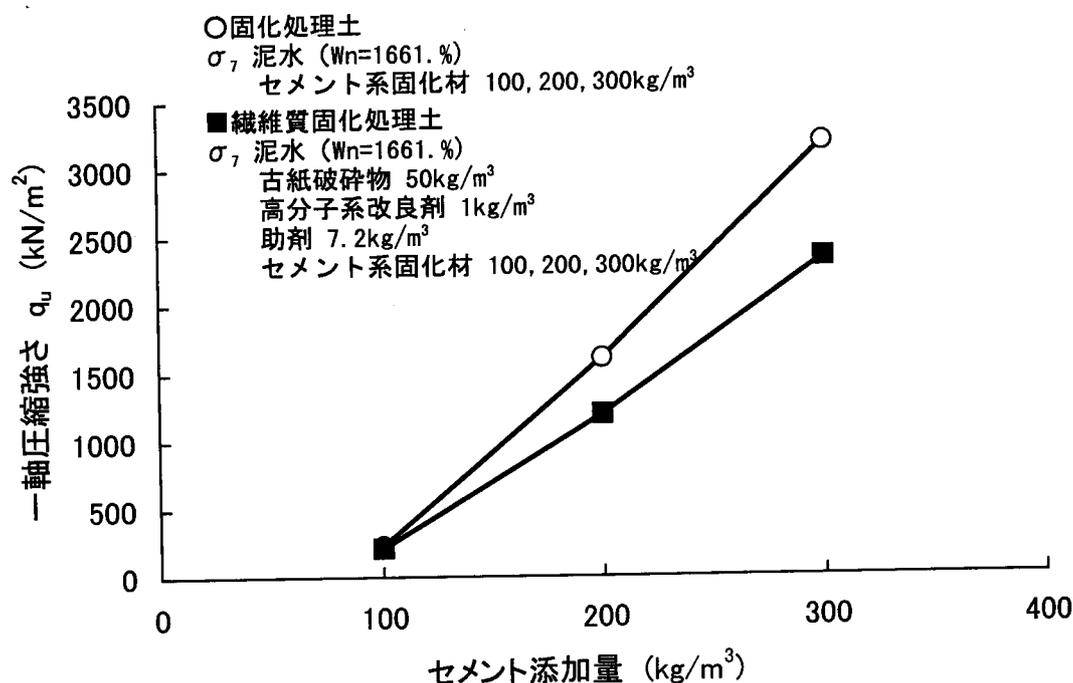


図-4 一軸圧縮強度とセメント系固化材の添加量との関係

セメント系固化材の添加量を 100 kg/m^3 , 200 kg/m^3 , 300 kg/m^3 として固化処理土と繊維質固化処理土を作成し、これらの処理土の強度特性を調べるために一軸圧縮試験を実施した。なお、養生期間は7日間とした。これらの試験から得られた一軸圧縮強度とセメント系固化材の添加量との関係を図-4に示す。図中の σ_7 は、養生期間が7日間であることを示す。固化処理土および繊維質固化処理土ともにセメント系固化材添加量の増加とともに一軸圧縮強度が増加している。しかし、セメント系固化材添加量が $200\sim 300 \text{ kg/m}^3$ の場合は、固化処理土と繊維質固化処理土はともに再掘削を

考えた場合、固くなりすぎている。再掘削がないとしても固くなりすぎると周辺地盤との連続性が失われ、また、混練等の施工性も低下する。従って、セメント系固化材の添加量は最大でも $100\text{kg}/\text{m}^3$ 程度にすべきであると考えられる。

図-5はセメント系固化材添加量を $100\text{kg}/\text{m}^3$ とした場合の応力-ひずみ曲線を示している。注目すべきは、固化処理土は破壊ひずみが1%未満であるのに対して繊維質固化処理土は8~9%と大きいことである。また、繊維質固化処理土は、ピーク応力後も大きな残留強度を持ち続けている。これは、本工法で生成される処理土は内部に繊維質を含むため、圧縮応力が分散し、局所的な変形集中が生じ難いためであると考えられる。繊維質固化処理土は固化処理土に比べて一軸圧縮強さがピーク応力で1割程度低くなっていることが分かる。しかし、前述したように固化処理土を使用する場合、「ときほぐし」の工程が必要であり、ときほぐし後の強度は、2~5割程度低下することが分かっている。このことを考慮すれば1割程度の強度低下は問題ないと考えられる。

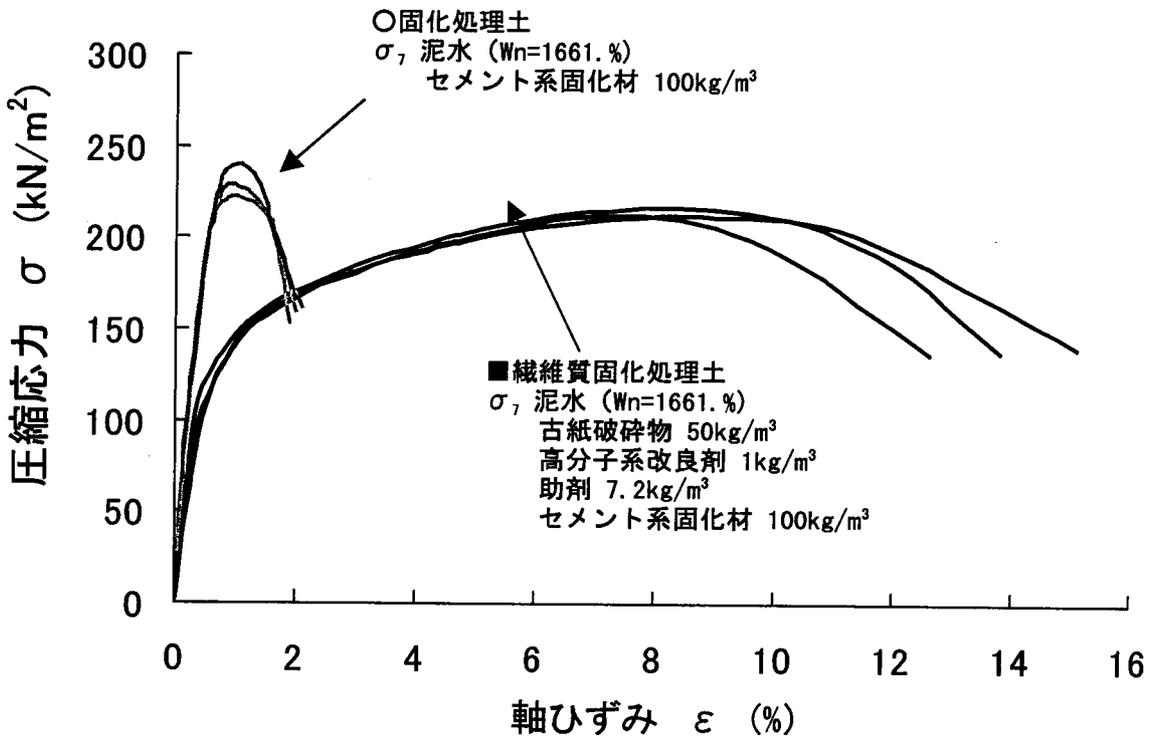


図-5 固化処理土および繊維質固化処理土の応力-ひずみ曲線

図-6は一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係を示しているが、固化処理土に比べ繊維質固化処理土の破壊ひずみが大きいことが分かる。繊維質固化処理土は、セメント系固化材の添加量が多くなるにつれ破壊ひずみの低下が見られるが、一軸圧縮強度が $2300\text{kN}/\text{m}^2$ もの固さにしても破壊ひずみが2%もあり、繊維質の影響が現れており十分な破壊ひずみを有していることが分かる。

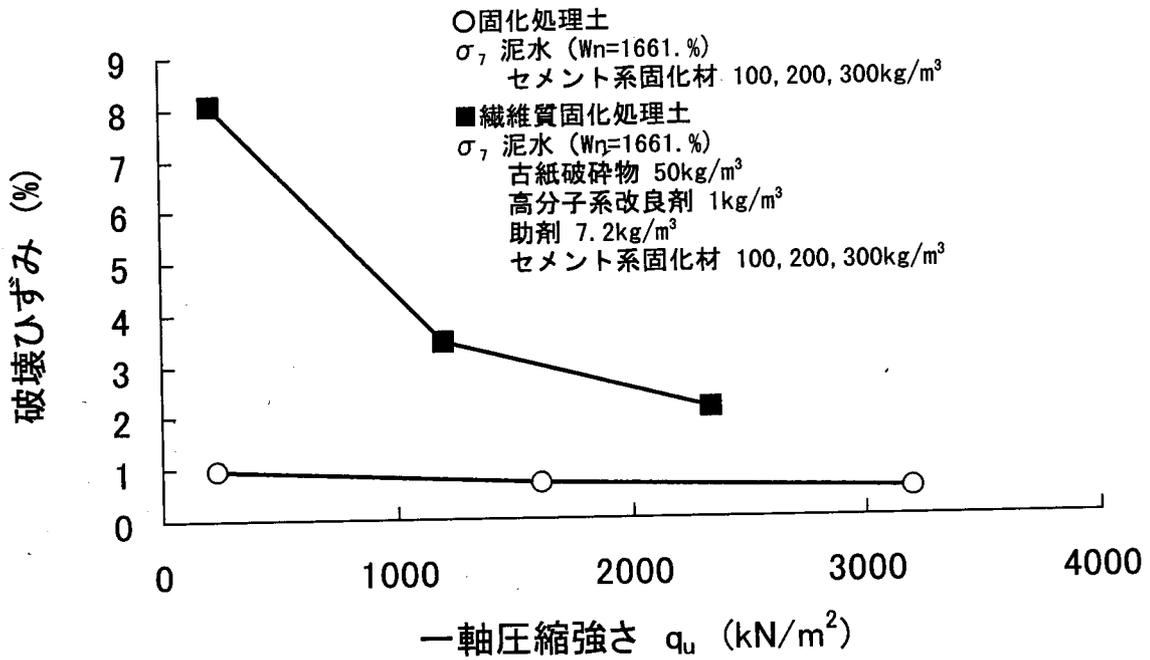


図-6 固化処理土および繊維質固化処理土の破壊ひずみと一軸圧縮強さとの関係

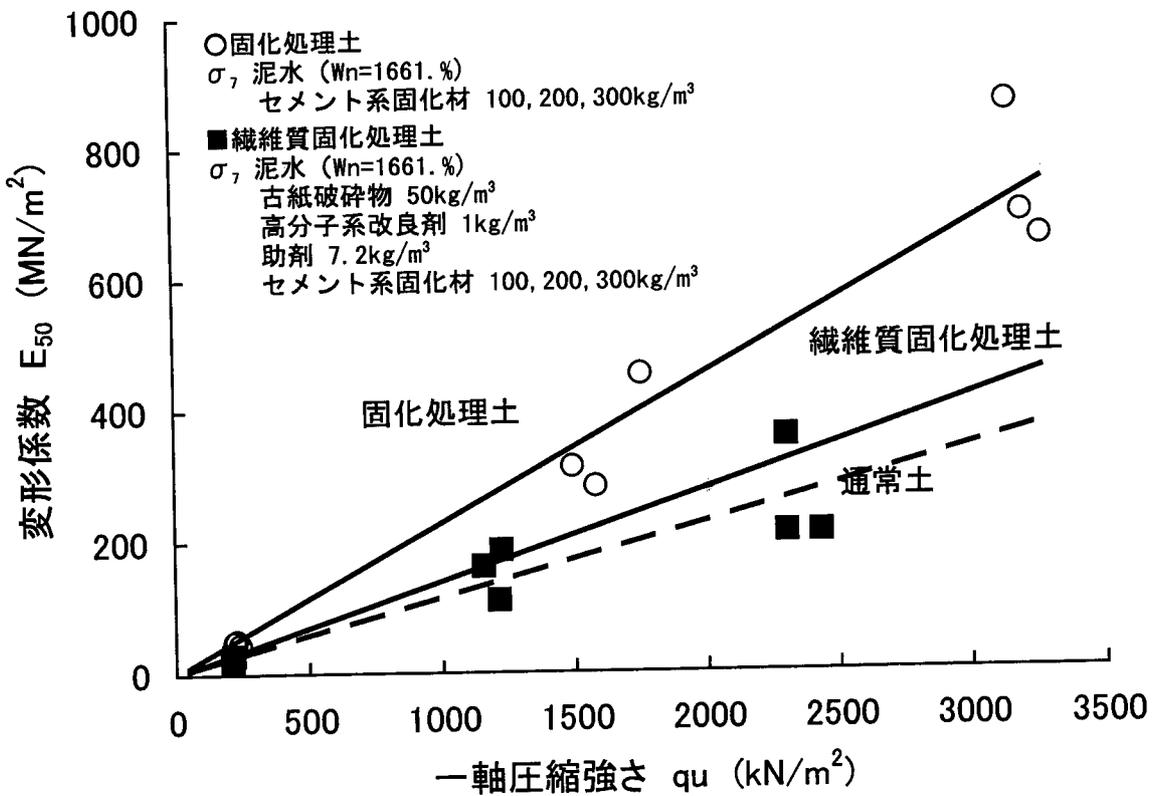


図-7 固化処理土, 繊維質固化処理土および通常土の変形係数

次に固化処理土、繊維質固化処理土および通常土の変形係数 $E_{50}^{12)}$ を比較して図-7に示す。変形係数 E_{50} は、応力-ひずみ曲線においてピーク応力 q_u の半分の点 $q_u/2$ と原点を結ぶ直線の傾きで定義され、この値が大きいほど固くもろい材質であることを示す。繊維質固化処理土と通常土の変形係数は同程度の値となっているが、固化処理土の変形係数は繊維質固化処理土の変形係数の約2倍の値を示している。このことは、固化処理土は固くもろいコンクリートの特性を有することを示している。土構造は橋台や擁壁などより受ける荷重に対して相応な強さが粘り強く続くことが求められており、すぐ破壊してしまう固いもろさは盛土材としての用途に適さないと考えられる。繊維質固化処理土は破壊ひずみが大きく粘り強く、また変形係数の値も通常土と同程度の値を有するため、盛土として利用しても周囲の土壌となじみ易く、盛土材として優れていると言える。

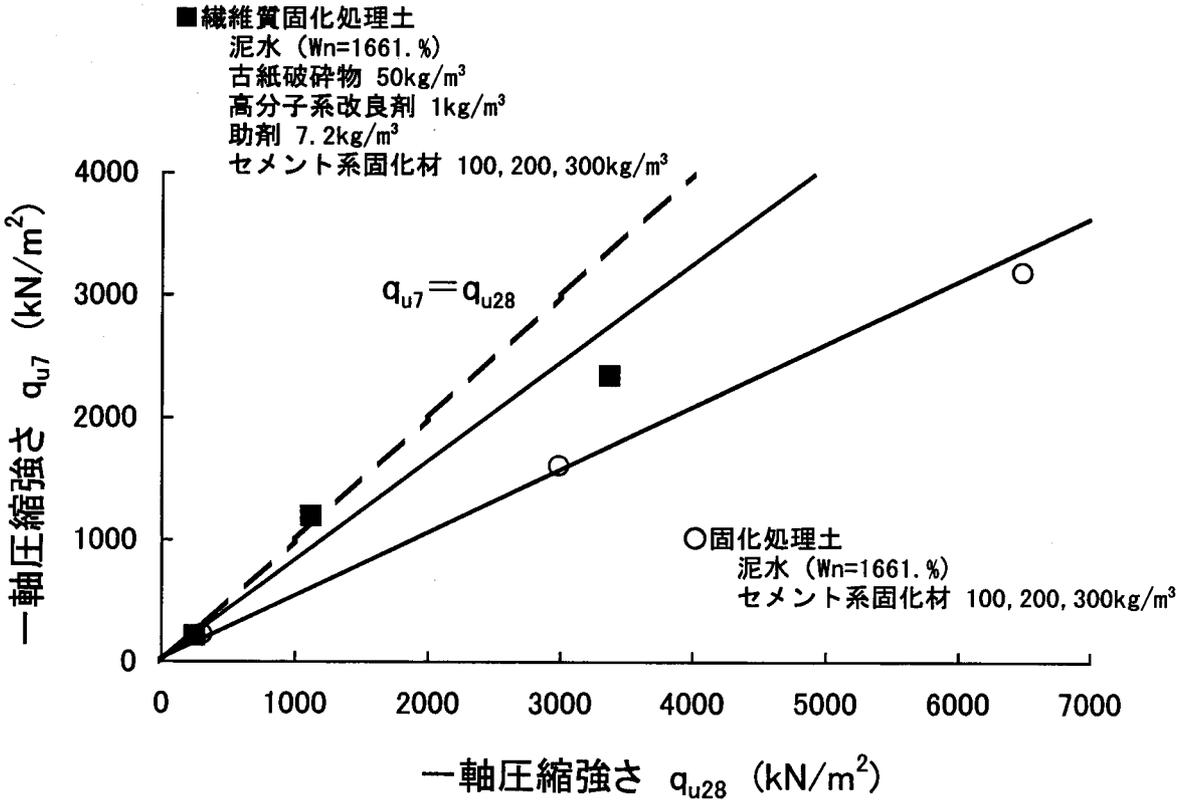


図-8 一軸圧縮強さに及ぼす養生期間の影響

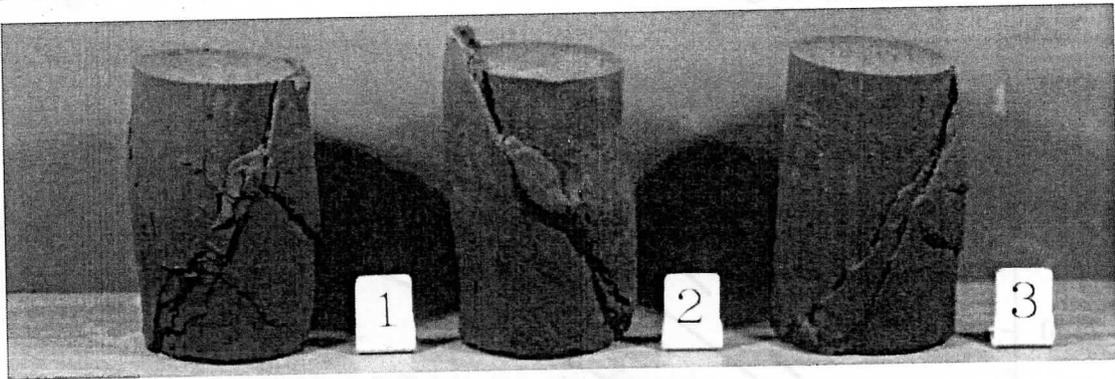
養生期間の影響による強度の変化を見るため、養生日数が7日間の場合の一軸圧縮強度 q_{u7} と28日間の場合の一軸圧縮強度 q_{u28} を比較し、その結果を図-8に示した。図中の破線は $q_{u7} = q_{u28}$ を示しており、実験値がこの破線に近いほど、強度発現が早いことを示す。図より固化処理土に比べ繊維質固化処理土の方が $q_{u7} = q_{u28}$ の直線に近いことが分かる。このことは、最終的な強度としての q_{u28} の強度に対して、 q_{u7} の時点でもより大きい強度が出ており、繊維質固化処理土の強度発現が早いことを示している。この理由としては、1) 繊維質が土粒子の移動を拘束する、2) セメント系固化材

が水和反応するよりも先に団粒構造が出来上がるなどが考えられるが、詳細は明らかではなく、今後より詳細に検討して行きたいと考えている。なお、本実験では、繊維質固化処理土の時間経過に伴う強度増加に関する実験式として、次式を得た。

$$q_{u28} = 1.36 \cdot q_{u7} \quad (2)$$

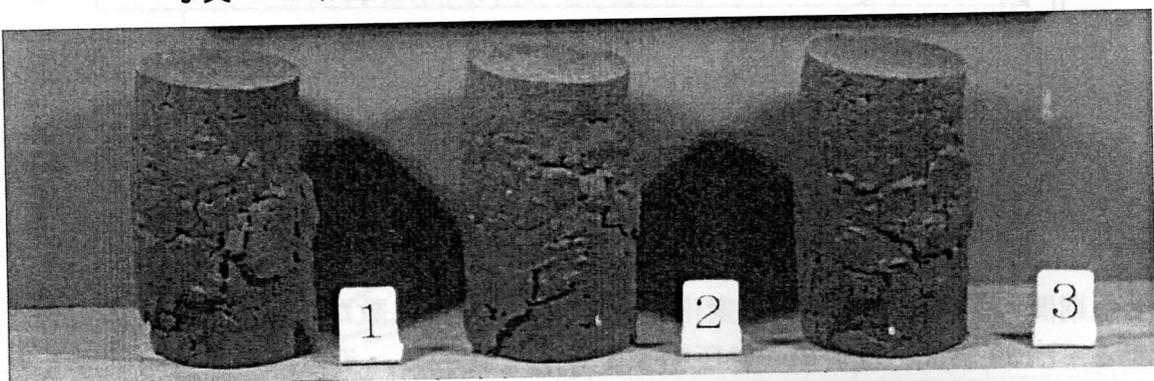
4.3 三軸圧縮強さ

固化処理土および繊維質固化処理土の拘束圧下での強度パラメータを調べるために三軸圧縮試験を実施した。セメント系固化材添加量を 100kg/m^3 とし、7日間養生した供試体を用いて試験を行い、Mohr の応力円から求めた強度パラメータを表-5に示す。固化処理土と繊維質固化処理土での粘着力と内部摩擦角においては大きな差は見られない。また、両処理土とも内部摩擦角が小さく、共に粘着力を主とした強度成分であることが分かる。



養生期間 7 日，セメント系固化材 100kg/m^3
拘束圧 No. 1: 50kN/m^2 ，No. 2: 100kN/m^2 ，No. 3: 200kN/m^2

写真 1 三軸圧縮試験後の供試体の破壊形態 (固化処理土)



養生期間 7 日，セメント系固化材 100kg/m^3
拘束圧 No. 1: 50kN/m^2 ，No. 2: 100kN/m^2 ，No. 3: 200kN/m^2

写真 2 三軸圧縮試験後の供試体の破壊形態 (繊維質固化処理土)

表-5 三軸圧縮試験により得られた処理土の物理定数

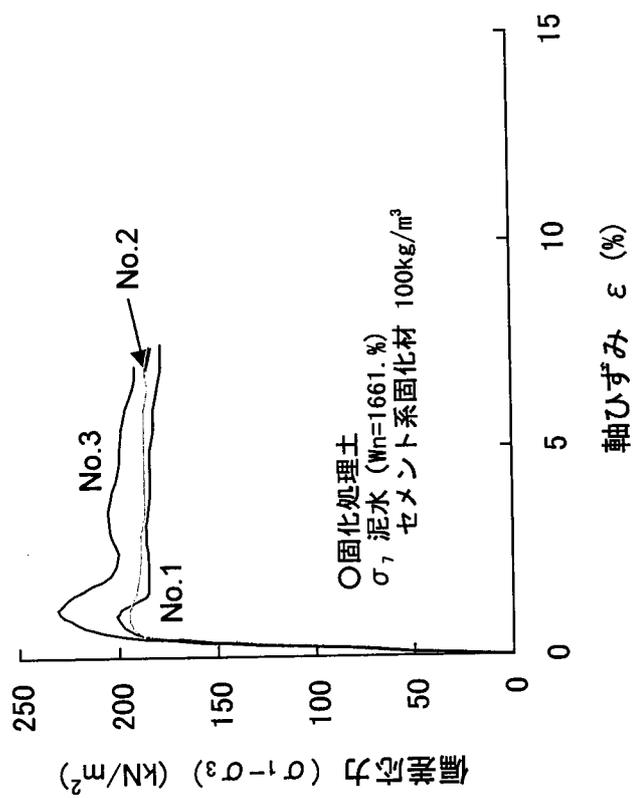
物理定数	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg.)
固化処理土	82.3	5.67
繊維質固化処理土	102.6	2.60

次に、その時の応力-ひずみ曲線を図-9 および図-10 に示す。図-9 は固化処理土に対する結果を、また図-10 は繊維質固化処理土に対する結果を示しているが、両者には、大きな違いが見られる。固化処理土は、線形的に偏差応力が増加し、明瞭なピーク応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_{max} が破壊ひずみとして現れており、その後、急激に偏差応力が低下し、残留状態に至る。これに対して、繊維質固化処理土は、偏差応力がせん断初期から非線形的に増加していき、明瞭なピーク応力が現れず、またこの状態での軸ひずみも通常土程度ある。このような変形性の違いはせん断後の供試体の破壊形状からも判断できる。つまり固化処理土は、Photo 1 のように明瞭なせん断面が現れ局所的な変形集中を示しているが、繊維質固化処理土は Photo 2 のように樽型変形を起こし、局所的な変形集中を起こしてはいない。繊維質固化処理土は、繊維質とセメント系固化材を混合してあることから、セメント系固化材による強度と繊維質を挟んだ形での強度があると考えられる。繊維質物質とセメント系固化材が絡み合っていることにより、応力の集中が繊維を通して分散されていることが分かる。

4.4 繊維質固化処理土工法および処理土の特徴

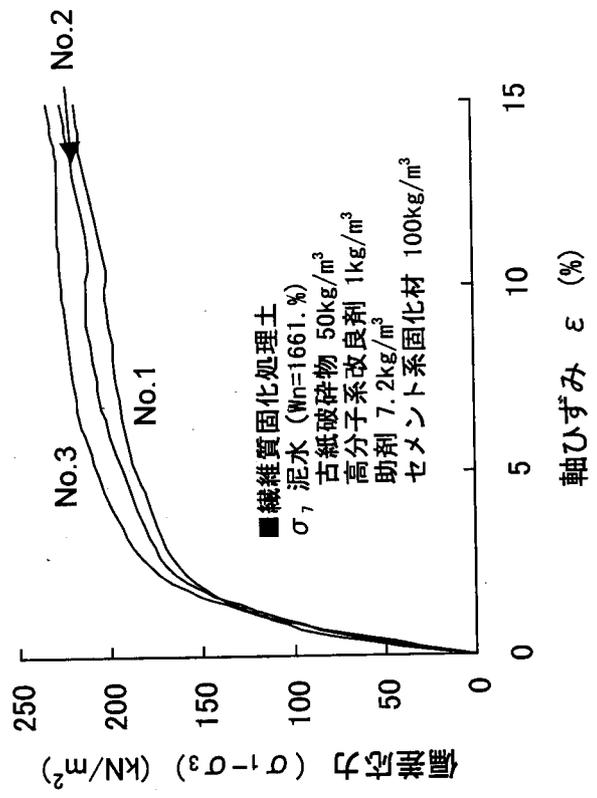
本研究で提案した繊維質固化処理土工法の特徴および本工法により生成される繊維質固化処理土の特性をまとめると、以下ようになる。

- ①本工法は脱水が不要であり、高分子系改良剤の効果により、泥水を団粒化させるので即時運搬が可能である。また運搬までの養生時間が不要となるため仮置き場を必要としない。従って、掘削(汚泥の採取)から処理、運搬の一連の作業工程を効率的に遂行することができる。なお、繊維質固化処理土は普通のダンプトラックで輸送が可能である。
- ②含水比に応じて投入する古紙の量を調整すればよいため、含水比の影響を受けず、現場で泥水の含水比を調整する必要がないばかりでなく、500%という高い含水比の泥水にも容易に対応できる。
- ③処理に必要な機器は、泥水を貯めるピット(水槽)と古紙、高分子系改良材およびセメント系固化材などの添加物と泥水を攪拌混合する攪拌機だけである。攪拌機はパワーショベルのアタッチメントとしてパワーショベルに設置されるので、処理のための特殊な機械装置を必要としない。すなわち、現場において低コストで再資源化が可能である。



拘束圧 σ_3 (kN/m ²)	圧縮強さ ($\sigma_1 - \sigma_3$) _{max} (kN/m ²)	偏差応力最大時の軸ひずみ ϵ_f (%)
No.1 50	200.4	1.0
No.2 100	195.1	1.0
No.3 200	228.8	1.0

図-9 三軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線 (固化処理土)



拘束圧 σ_3 (kN/m ²)	圧縮強さ ($\sigma_1 - \sigma_3$) _{max} (kN/m ²)	偏差応力最大時の軸ひずみ ϵ_f (%)
No.1 50	218.4	15.0
No.2 100	225.7	15.0
No.3 200	233.1	15.0

図-10 三軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線 (繊維質固化処理土)

- ④Photo 3 に示すように繊維質固化処理土は大きな塊とならず、小さく団粒化して固化するので、ときほぐしの工程が不要となる。

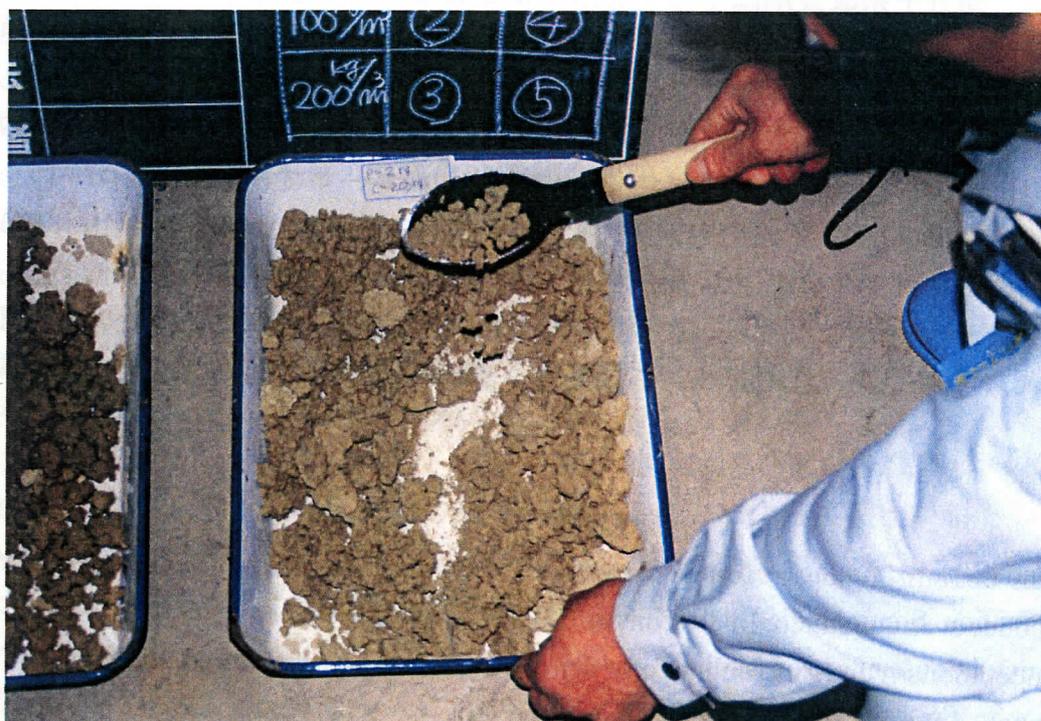


写真 3 団粒化した繊維質固化処理土の様子

- ⑤繊維質固化処理土の破壊ひずみは、固化処理土の破壊ひずみよりも大きく、残留強度が高く粘り強い性質を有し、盛土材として適している。
- ⑥団粒化した土粒子塊は、雨により再泥化することはないので施工性が良い。
- ⑦張り付きの原因となる水分をポリマーで被覆し、団粒化するため、ハンドリング性の向上につながる。

5. むすび

本研究では、古紙と高分子系改良剤を用いた新しい繊維質固化処理土工法を提案し、その概要を述べるとともに、繊維質固化処理土の強度特性について実験的に考察した。その結果、本工法で再資源化される繊維質固化処理土は、変形係数が通常土の変形係数に近く、かつ破壊ひずみが大きく残留強度が大きい特徴を有していることが分かった。従って、繊維質固化処理土を盛土や埋め戻し土として利用しても原地盤と極端な不連続性を示すことなく、周囲地盤とのなじみが良いため、盛土材として適していることが確認された。また本工法は古紙を用いて泥水の見掛けの含水比を低減させ、高価な高分子系改良剤の添加量を削減させることができるためコスト的にも優れてお

り、建設汚泥等のリサイクル率の大幅な向上に寄与できると考えられる。

今後は、古紙の劣化が強度特性に及ぼす影響、すなわち繊維質固化処理土の耐久性について検討する必要がある。高分子系改良剤は地中の微生物で完全に分解されると述べたが、高分子系改良剤は土粒子を団粒化させるだけの役割しか果たしておらず、繊維質固化処理土の強度発現には関与していない。従って、高分子系改良剤が地中の微生物により分解されてしまっても、処理土の強度特性には影響しない。しかし、古紙の劣化が処理土の強度特性に及ぼす影響については、現時点では定量的に明らかになっていない。上述したように古紙の成分はセルロースであり、セルロースを分解する生物は一般的にキノコや放線菌であるが、これらの生物は地下深く(1m以深)には生息していない。また処理土の透水性はかなり低いため、周囲から侵入水とともに微生物が流入する可能性も低い。従って、定性的には古紙の分解にはかなりの年月を要すると考えられるが、これについては今後、詳細に検討して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) Japan Cement Association : *Sementokei Kokazai ni yoru Jibankairyō Manual* (Gihoudou Shuppan Co.Ltd, Tokyo, 1999), pp.150-152.
- 2) Advanced Construction Technology Center : *Kensetsuodei Recycle Shishin*(Taisei Shuppan Co.Ltd, Tokyo, 1999), pp.164-165.
- 3) M. Murata : Civil Engineering, JSCE, 87(2002), pp.25-28.
- 4) S. Fukushima, A. Kitajima, K. Ishiguro, Y. Ikeda, K. Sakamaki and S. Tani : Proc. of JSCE, No.666/III-53(2000), pp.99-116.
- 5) S. Miura, J. Kawanishi and S. Kanemitsu : Proc. of the 10th Symposium on Environment and Sanitary Research(1988), pp.295-298.
- 6) K. Fujii, K. Yamaguchi, T. Kuboi and J. Yazaki : Report of National Institute for Environmental Studies, No.14(1980), pp.21-31.
- 7) Yomiuri Shinbun of October 11, 2002(Shokubutsuyu Shiyō Eco Ink).
- 8) R. Konno, K. Maeda and T. Okubo : *Tsuchitsukuri no Genri*(Rural Culture Association, Tokyo, 1976), p.17.
- 9) The Japanese Geotechnical Society : *Doshitsushiken no Houhou to Kaisetsu*(2000), pp.268-272
- 10) *ibid.* 2), pp.158-159.
- 11) S. Ogawa, S. Kirikoshi, K. Hisano and H. Yamamoto : Proc. of the 30th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering(1995), pp.2227-2228.
- 12) *ibid.* 1), pp.139-140.

乾湿繰り返し試験における繊維質固化処理土の耐久性

1. はじめに

建設汚泥は、年間 1,000 万トン近く排出されているにもかかわらず、リサイクル率は低く、ごく一部再利用されるものを除き、大部分は産業廃棄物である「汚泥」として中間処理施設で脱水処理を施すか、あるいは直接最終処分場に持ち込まれている。しかしながら、処分場の不足・遠隔化は深刻な問題であり、輸送コストの負担から建設汚泥の不法投棄が後を絶たず、地球環境への汚濁負荷の影響が大きな問題となっており、建設汚泥の有効利用が望まれているのが現状である。

ところで、建設汚泥の処理法としては、乾燥処理、脱水処理、固化処理などの方法が提案されている¹⁾。しかし、乾燥処理では大きな仮置き場が必要であり、処理に時間がかかる問題がある。また脱水処理では、圧縮プレスが必要であり、現場で簡単に処理するのは難しい。さらに脱水ケーキを如何に処分するかという問題が残る。固化処理は、セメント系固化材などにより固化処理することによって盛土材料としてリサイクルする方法であり、既に流動化処理土工法²⁾³⁾などが提案されている。この工法は泥水とセメント系固化材を混合し流動化させ、まだ固まらないコンクリートのようポンプなどで流し込んで、埋め戻しなどの施工を行う方法であるが、この工法により生成される土砂(以下、固化処理土と記す)は、一軸圧縮試験における破壊ひずみが通常土より小さく、品質改良が十分とは言えず盛土材としての用途に適さない場合が多々ある。つまり、生成される固化処理土はコンクリートや岩石のような強度特性を示すため、周辺地盤や既存盛土と固化処理土による新設の盛土の間に剛性の相違が生じ、互いのなじみが悪く、地震時のように盛土や基礎地盤が大きな変形を受ける時には、剛性の高い部分に局所的な変形集中によるクラックや過大な土圧の発生が懸念される³⁾⁴⁾。

そこで著者らは、十分な品質特性を有する盛土材料として汚泥の再資源化をはかるために、ヘドロや汚泥に繊維質物質である古紙破砕物と高分子系改良剤を添加し、高含水比泥土を再資源化する技術の開発を行った⁵⁾。この工法で生成される土砂(以下、繊維質固化処理土と記す)を用いて一軸圧縮試験⁵⁾および圧裂引張試験⁶⁾を実施した結果、繊維質固化処理土は、従来の固化処理土と比較して、破壊ひずみおよび残留強度が大きく粘り強い性質を有することが確認された。

ところで、繊維質固化処理土あるいは固化処理土を盛土材として利用する場合、これらの土砂は気象変動の影響、すなわち乾湿繰り返しの影響を受けることになる。固化処理土の強度特性については既に多くの研究例が見受けられるが、固化処理土の乾湿繰り返しによる耐久性に関する研究は一般に不足していると言われており⁷⁾、また既に行われたいくつかの研究報告では、固化処理土は乾燥工程における乾燥収縮によりクラックが発生し、乾湿繰り返しにより劣化して強度が低下するので、固化処理土を盛土材として利用する場合、外気に暴露しないように山土などで被覆して使用すべ

きであると指摘されている⁸⁾⁻¹¹⁾。繊維質固化処理土の強度特性については前報でその優位性を検証したが、乾湿繰り返しによる耐久性については明らかにされていない。

そこで、本研究では乾湿繰り返し試験を行い、繊維質固化処理土の耐久性を定量的に評価することを目的とした。なお、本研究では繊維質固化処理土の他に比較のため固化処理土も作成して乾湿繰り返し試験を実施した。ここではこれらの処理土を用いた乾湿繰り返し試験の結果について報告する。

2. 繊維質固化処理土および固化処理土の作成

2.1 実験試料

供試体の作成には、模擬泥水を使用した。模擬泥水を使用した理由は以下の通りである。すなわち、実際の建設汚泥やヘドロは、固化材による固化の阻害物質である有機物(フミン酸等)を含むことがあり、この有機物の影響により試験結果にバラツキが生じる可能性がある。そこで、この有機物によるデータのバラツキを抑えるため模擬泥水を用いた。本実験では無機の土粒子を使用し、一定の比率で粘土とシルトを混合して作泥したものを使用した。作泥方法は、粘土とシルトを 40:60(乾燥質量比)で混合し、それに加水調整して含水比 105%および 150%の汚泥を作成した。土粒子の密度は $2.623[\text{g}/\text{cm}^3]$ である。

2.2 供試体作成手順

繊維質固化処理土の供試体作成は、建設汚泥の高度処理・利用技術の開発(盛土グループ)共同研究最終報告書「建設汚泥改良土の耐久性¹²⁾」に準じた方法を用いた。図-1に供試体作成のフローを示す。

- ①まず初めに、上述したように粘土とシルトを 40:60(乾燥質量比)で混合し、加水調整して含水比を調整する。
- ②含水比を調整した汚泥に古紙破砕物、高分子系改良剤および助剤を加え、攪拌・混合する。古紙破砕物の最適添加量は、前報⁵⁾で示したように含水比に応じて決定され、一般的に表-1のような値をとる。本研究では、含水比 105%の場合は、 $50[\text{kg}/\text{m}^3]$ とし、また含水比 150%の場合は $65[\text{kg}/\text{m}^3]$ とした。また前報で高分子系改良剤および助剤の最適添加量は、それぞれ $1.0[\text{kg}/\text{m}^3]$ および $7.0[\text{kg}/\text{m}^3]$ であると報告したが、実際の現場での処理では攪拌ムラが避けられないので、2割ほど高めに設定する方がよい。そこで、今回は現場適用性を考え、高分子系改良剤および助剤の添加量を、それぞれ $1.2[\text{kg}/\text{m}^3]$ および $8.6[\text{kg}/\text{m}^3]$ とした。
- ③次にセメント系固化材を加え、混合する。固化材の添加量は、含水比に応じて表-2に示す配合条件として4通りに変化させた。
- ④初期養生として、上述の処理土を容器に入れて密封し、 $20\pm 3^\circ\text{C}$ で3日間静置する。
- ⑤初期養生後、供試体を作成する。供試体は JCAS L-01:2003(セメント協会標準試験方法)「セメント系固化材による安定処理土の試験方法」に従って作製した。なお、供試体作成には、直径 5cm、高さ 10cm の標準的なモールド(供試体作製容器)を使

用した。

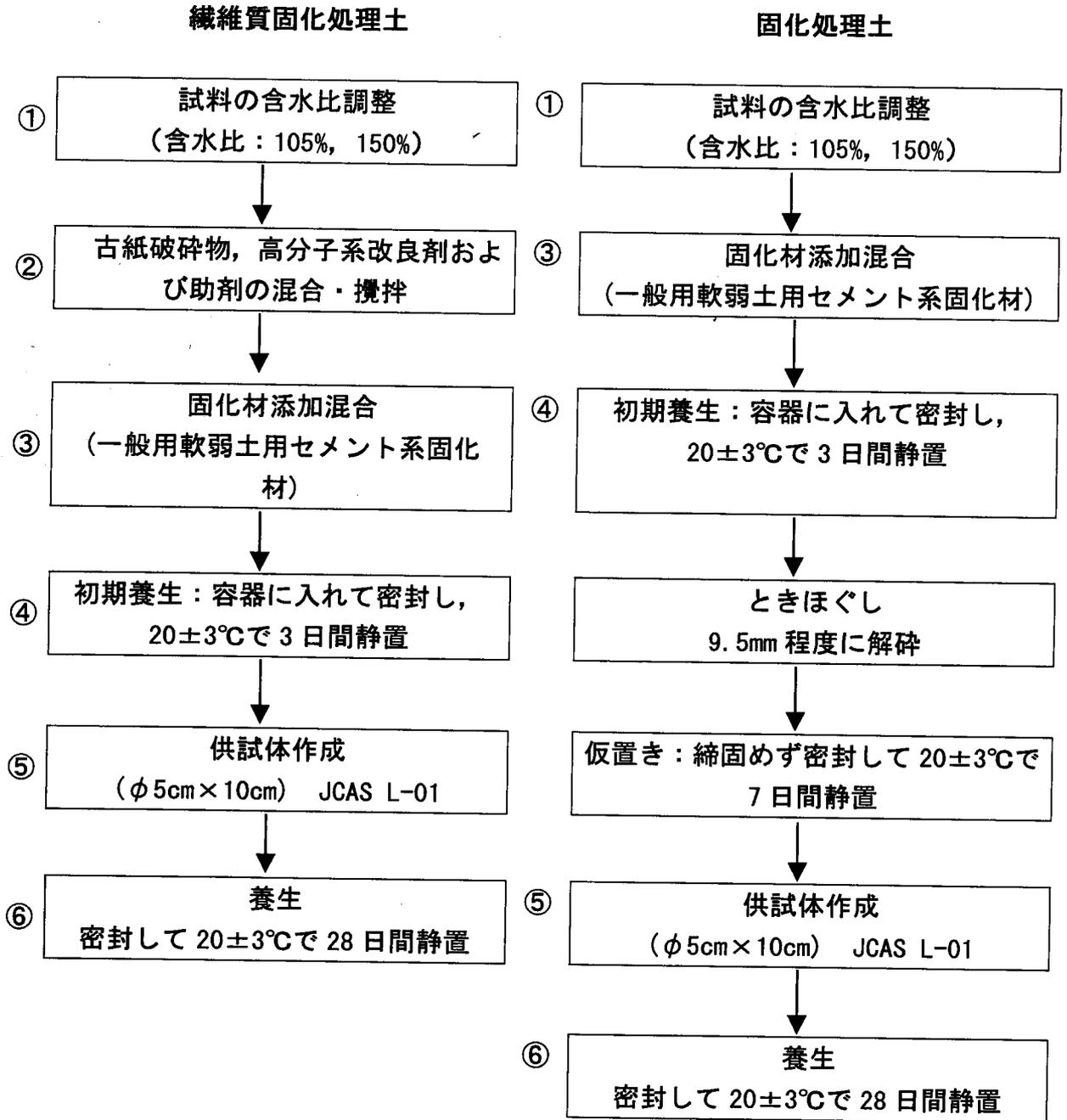


図-1 供試体作成のフロー

⑥供試体から水分が蒸発しないようにモールドを密封材で被覆し、 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ で28日間養生する。

固化処理土の供試体作成も繊維質固化処理土の場合とほぼ同様であるが、固化処理土では古紙破砕物や高分子系改良剤などを混合・攪拌することはないので、上記②の工程を飛ばし、表-2に示す配合条件として2通りに変化させた。①の工程の後、直

表-1 泥水の含水比と古紙添加量との関係

泥水の含水比 [%]	泥水の含水率 [%]	古紙添加量 [kg/m ³]
100	50.0	50
200	66.7	70
300	75.0	80
400	80.0	85
500	83.3	90

表-2 配合条件

	含水比 W ₀ (%)	古紙破砕物 添加量 (kg/m ³)	高分子系改良剤 添加量 (kg/m ³)	助剤 添加量 (kg/m ³)	セメント系固化材 添加量 (kg/m ³)	目標強度 qu (kN/m ²)
繊維質固化 処理土 1	105	50	1.2	8.6	40	200
繊維質固化 処理土 2	105	50	1.2	8.6	90	—
繊維質固化 処理土 3	150	65	1.2	8.6	70	200
繊維質固化 処理土 4	150	65	1.2	8.6	100	—
固化処理土 1	105	—	—	—	90	200
固化処理土 2	150	—	—	—	100	200

ちに③の工程にてセメント系固化材を混合する。なお、実施工において固化処理土を盛土材として使用する場合、「ときほぐし(解砕)」を行わないと大きな塊の状態に固化してしまい、盛土材として使用できないので、一般にパワーショベルなどで処理土を砕く作業、いわゆる「ときほぐし」が行われる。「ときほぐし」を行うためにはある程度の強度が必要であるため、④の工程で初期養生を行った後、直ナイフで9.5mm角程度に解砕し、さらに7日間静置した後、供試体を作成した。なお、繊維質固化処理土は小さく団粒固化し、大きな塊にならないので、「ときほぐし」の工程は不要である。

繊維質固化処理土と固化処理土の配合を6通り変化させた理由は以下の通りである。まず、下記の理由により供試体の目標強度を一軸圧縮強度 $qu=200\text{kN/m}^2$ (σ_{28}) に設定した。

- ① 建設機械の走行に必要なトラフィックビリティを満足する強度であること¹³⁾
- ② 有害物質を原位置に封じ込めて、流出防止を目的とするときの必要強度であること¹³⁾
- ③ 路床、路体盛土、構造物の裏込等に再利用するために必要な強度であること²⁾

目標強度を達成させる配合は、予備試験により繊維質固化処理土および固化処理土のそれぞれに対して、以下の通りであることが確認された。

- ① 配合条件 繊維質固化処理土 1
- ② 配合条件 繊維質固化処理土 3
- ③ 配合条件 固化処理土 1
- ④ 配合条件 固化処理土 2

また、繊維質固化処理土と固化処理土の含水比と、セメント系固化材添加量を同一条件として乾湿繰り返し試験を実施し、両者の結果を比較したいと考え、以下の2条件を追加し計6通りとした。

- ⑤ 配合条件 繊維質固化処理土 2
- ⑥ 配合条件 繊維質固化処理土 4

したがって、上記⑤⑥の配合条件では、目標強度を設定した配合とはなっていないため、表-2の目標強度の欄は空欄になっている。

3. 試験方法

表-3 乾湿繰り返し試験方法

試験項目	試験方法		
	供試体	乾湿1サイクル	確認項目
乾湿繰り返し試験	φ5×10 (cm)	40℃炉乾燥2日 20℃水浸1日 の合計3日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 所定サイクル終了後、軸圧縮試験 (JIS A 1216) ・ 各サイクルの乾燥後、水浸後に供試体の状況観察、写真撮影

試験方法は、表-3に示すように建設省土木研究所(現 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・利用技術の開発」建設汚泥改良土の耐久性¹²⁾に準拠した。すなわち、40℃炉乾燥2日、20℃水浸1日の合計3日間を1サイクルとし、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た。状況観察としては、表-4に示す健全度ランクにより供試体の健全度を評価した。後述するように実験を行うに当たり繊維質固化処理土および固化処理土ともに12本の供試体を作成し、所定サイクル終了時の一軸圧縮試験には3本の供試体と使用したため、評価方法としては、

2 サイクルまでは 9 本の供試体を，3～6 サイクルまでは 6 本の供試体を，また 7～10 サイクルまでは 3 本の供試体をそれぞれ観察して，A～H を 8 段階として数値化して平均ランクを求めた。

4. 試験結果および考察

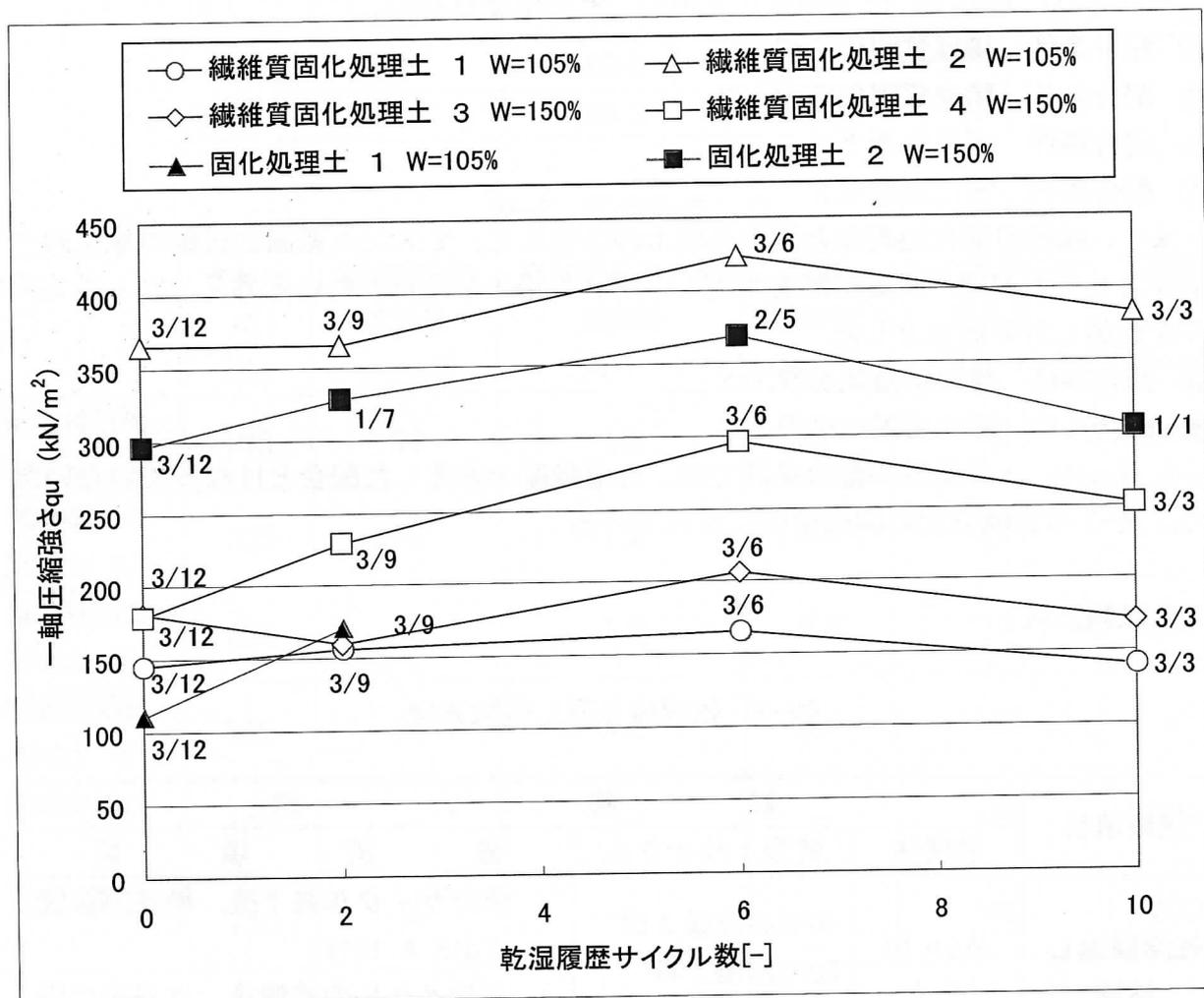


図-2 乾湿サイクル数と一軸圧縮強さの関係

図-2 にサイクル数と一軸圧縮強度との関係を示す。図中の▲および■印は固化処理土の結果を，また○，△，◇，□印は繊維質固化処理土の結果を示している。乾湿繰り返し実験を行うに当たり，初めに，固化処理土および繊維質固化処理土ともに 12 本の供試体を作成した。図中の値は，(一軸圧縮試験に供した供試体の数) / (一軸圧縮試験を行うに当たり現存していた供試体の数) を示している。すなわち，3/12 とは，0 サイクル時に 12 本の供試体が存在し，そのうち 3 本を使用して一軸圧縮試験を行い，それらの平均値を図中にプロットしたことを意味する。つまり，繊維質固化処理土の場合，一軸圧縮試験には常に 3 本の供試体を使用され，分母の値も常に 3 ずつ減少している。これは 10 サイクルを通して常に供試体が崩壊せずに形状を保ち，一軸圧縮

試験に供し得たことを示す。固化処理土の値は、以下のような試験状況であったことを示している。すなわち、初期含水比 150%の固化処理土の場合(■印)、2 サイクル終了した時点で7本しか供試体が現存せず、残り2回の試験で3本ずつ使用することを考え、1本のみ一軸圧縮試験に使用した。残りの6本でさらに乾湿繰り返し試験を続けたが、6 サイクル終了時までには1本が崩壊し、5本のみ現存したため、最後の試験(10 サイクル終了時)に3本使用することを考え、2本のみ一軸圧縮試験に使用した。10 サイクル終了時には、1本のみ残っていたので、この1本を用いて一軸圧縮試験を実施した。初期含水比 105%の場合(▲印)、2 サイクル終了までに11本の供試体が崩壊し、2 サイクル終了した時点で形を留めていた供試体は1本であり、その1本を用いて一軸圧縮試験を実施したため、この時点で供試体が無くなり、以後、乾湿繰り返し試験を継続することは不可能であった。前述したように、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、本実験でも従来の結果と同様の結果が得られた。2 サイクル終了時の強度が0 サイクル終了時の強度よりも増加しているが、この原因としては、セメント系固化材による水和反応の進展も一因と考えられるが、12本中11本の供試体が崩壊し、1本の供試体だけが残ったことを考えると、作成した供試体自体に強度のバラツキが若干あり、強度の最も強い1本のみが最後まで残ったためとも推察される。しかし、いずれにせよ、固化処理土は乾湿繰り返しの影響を大きく受け、劣化することが再確認された。

一方、繊維質固化処理土は、乾湿繰り返しサイクル数が増加してもほとんど劣化せず、また一軸圧縮強度の低下も見られず、10 サイクル終了時においても0 サイクル時の強度とほぼ同程度の強度を有していることが分かる。また10 サイクル時の値は、3本の供試体を用いて測定しており、繊維質固化処理土は劣化せず、乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが実験的に確認された。

図-3 に健全度ランクとサイクル数との関係を示す。この図に示されるように、固化処理土はサイクル数の増加とともに健全度が悪くなるが、繊維質固化処理土の健全度はサイクル数に関わらず常にAランクであり、乾湿を繰り返しても劣化することなく、外見上もほとんど変化が無いことが確認された。

図-4 に固化処理土および繊維質固化処理土の供試体の写真を示す。先に述べたように含水比 105%の固化処理土は2 サイクルまでに作成した12本の供試体のうち11本が図に示すように激しく崩壊した。これに対して、繊維質固化処理土は10 サイクル終了時も試験開始の状態をそのまま維持しており、ほとんど劣化していない。固化処理土1と2の健全度ランクに差が生じた原因については初期強度が考えられる。一般的に、同じ原泥で含水比が高く、湿潤密度が低い方が乾燥状態での脱水量が大きくなり、乾燥収縮クラックが入りやすい。しかし、セメント系固化材を添加した改良土は、土粒子の移動を拘束し、セメンティング効果が発揮され、強度が発現して乾燥収縮に抵抗する。表-5 に固化処理土の性状を示すが、固化処理土1の初期強度は固化処理土2の初期強度よりも小さいため、含水比が小さいにもかかわらず大きく劣化したと考えられる。

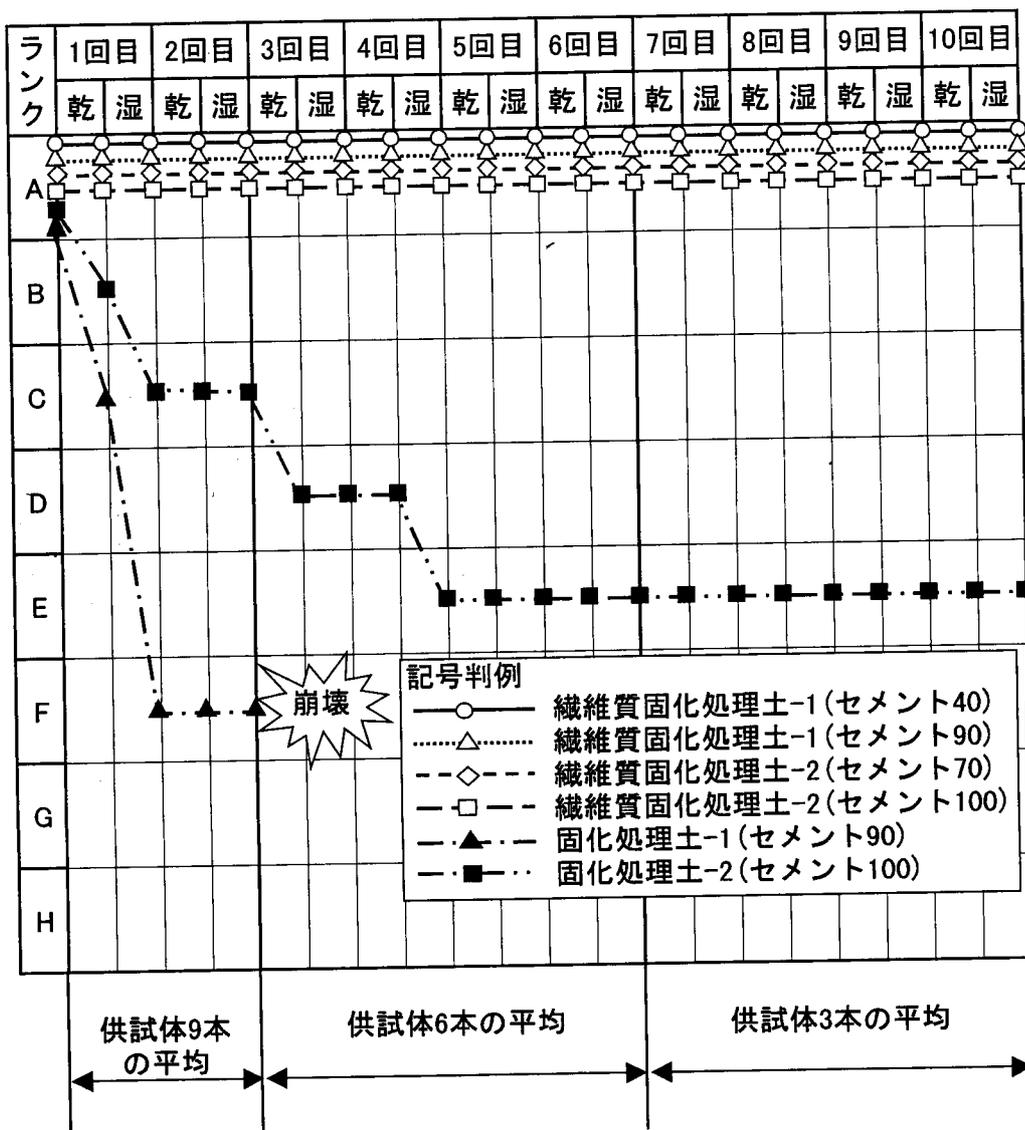


図-3 健全度ランクとサイクル数との関係

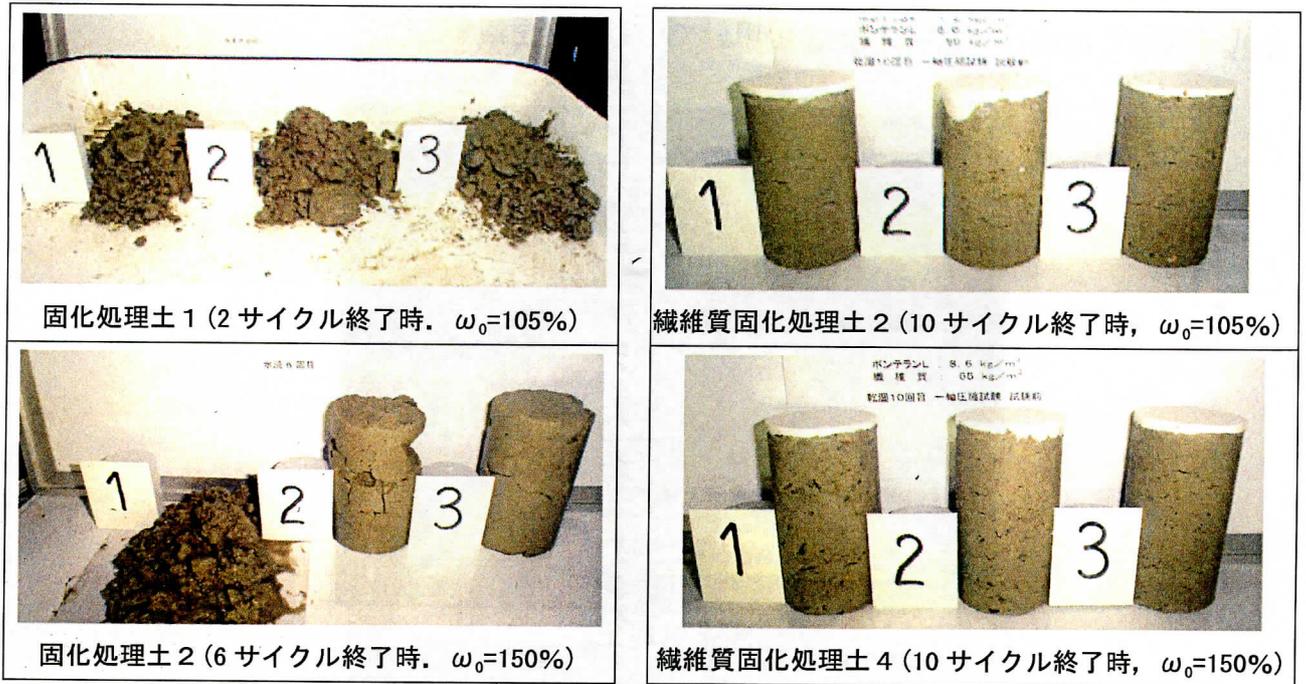
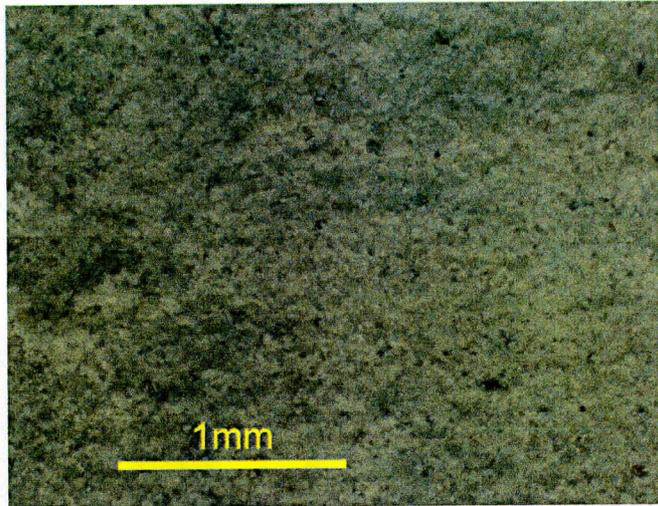


図-4 供試体の外観

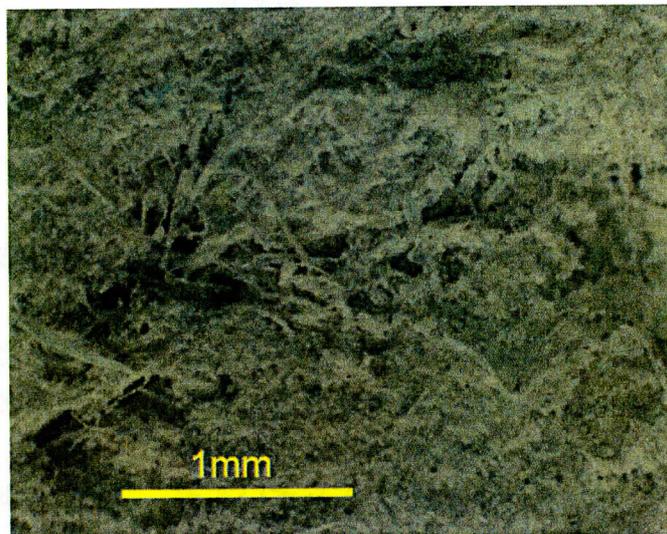
ところで、固化処理土が乾湿繰り返しの影響を受け劣化するのには、乾燥工程において間隙中の水分が脱水し、乾燥収縮により土粒子間の結合が切れ、クラックが発生するためと言われている⁸⁾⁹⁾。また自然状態のままではかなりの固結力を有する岩石であっても、地下水位の変動、地山掘削による応力解放と吸水膨張、風化などにより岩石の固結力が低下することが報告されている¹⁴⁾。特に軟岩では、これらの環境変化に基づく乾燥・湿潤の繰り返しによって急激に固結力を失い、組織が破壊される現象が報告されており、この現象は一般にスレーキングと呼ばれている。このスレーキングのメカニズムについて種々の説明が試みられているが、一般に乾燥した岩石組織の間隙中に浸透した水分が間隙内の空気を圧縮し、岩塊に引張り力を生じること、あるいは再吸水による浸透圧の作用などが考えられている¹⁴⁾。

以上のことを考えると、固化処理土が乾湿繰り返しの影響を受け劣化するのには、従来から言われているように乾燥工程において間隙中の水分が脱水し、乾燥収縮により土粒子間の結合が切れ、クラックが発生するためであり、繊維質固化処理土が乾湿繰り返しの影響をほとんど受けず高い耐久性を示すのは、土粒子間の結合が固化処理土よりも強いためであると推察される。つまり、繊維質固化処理土は、固化処理土と同様に乾燥工程において間隙中の水分が脱水するものの、繊維質固化処理土は生成の過程で高含水比泥土に古紙を混合し、十分に攪拌するため土粒子と繊維質が複雑に絡み合うため、この構造体が土粒子間の結合を強め、クラックの発生を抑制していると考えられる。そこで、初めに乾燥工程終了後の固化処理土および繊維質固化処理土の表面を光学顕微鏡で観察するとともに、2つの供試体の内部から小さな土砂の塊を取り

出して薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて内部構造を観察した。



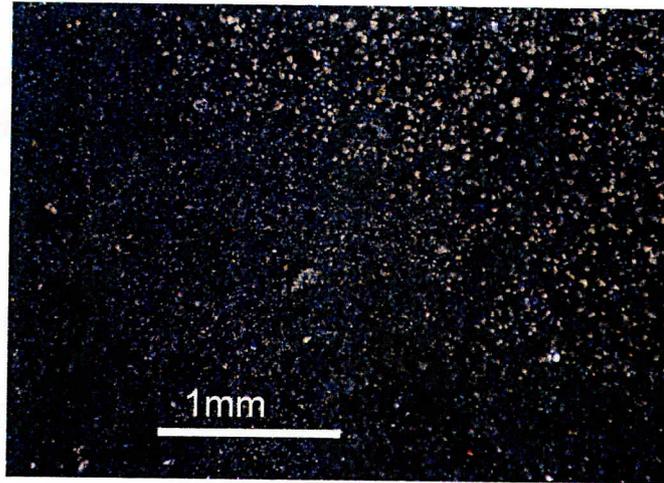
固化処理土



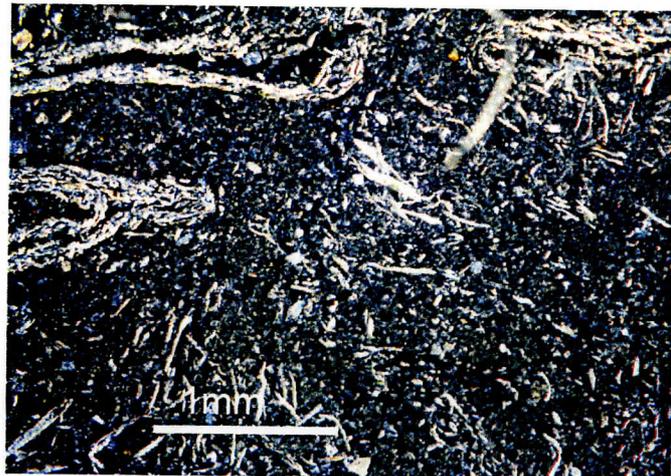
繊維質固化処理土

図-5 供試体の光学顕微鏡写真

図-5 および図-6 に光学顕微鏡および偏光顕微鏡による画像を示す。図-6 において黒い部分は土砂であり、また白い部分は繊維質である。固化処理土は土粒子のみが観察されるが、繊維質固化処理土は繊維質が土砂の間に複雑に入り込んだ構造になっている。セメント系固化材の水和反応による土粒子の凝集、接着（セメンティング効果）と上述したように、この繊維質が土粒子間の結合を強め、クラックの発生を抑制していると推察され、その結果、繊維質固化処理土は乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すと考えられる。



固化処理土



繊維質固化処理土

図-6 供試体の偏光顕微鏡写真

光学顕微鏡および偏光顕微鏡による観察結果から、繊維質固化処理土が乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示す原因は、繊維質が存在することにより土粒子間の結合力が増加するためであることが定性的に考察された。そこで、次にこの土粒子間の結合力に関して、破壊ひずみの観点から定量評価を試みた。破壊ひずみとは、一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線において圧縮応力の最大値に対するひずみを言う。一軸圧縮試験において供試体を圧縮していくと、土粒子間の結合が切れ、やがて破壊に至るので、土粒子間の結合力は破壊ひずみの大小で評価できると考えられる。そこで、種々の配合条件で固化処理土および繊維質固化処理土を作成し、一軸圧縮試験を実施して破壊ひずみを計測した。供試体の作成方法は先に述べた方法と同じである。

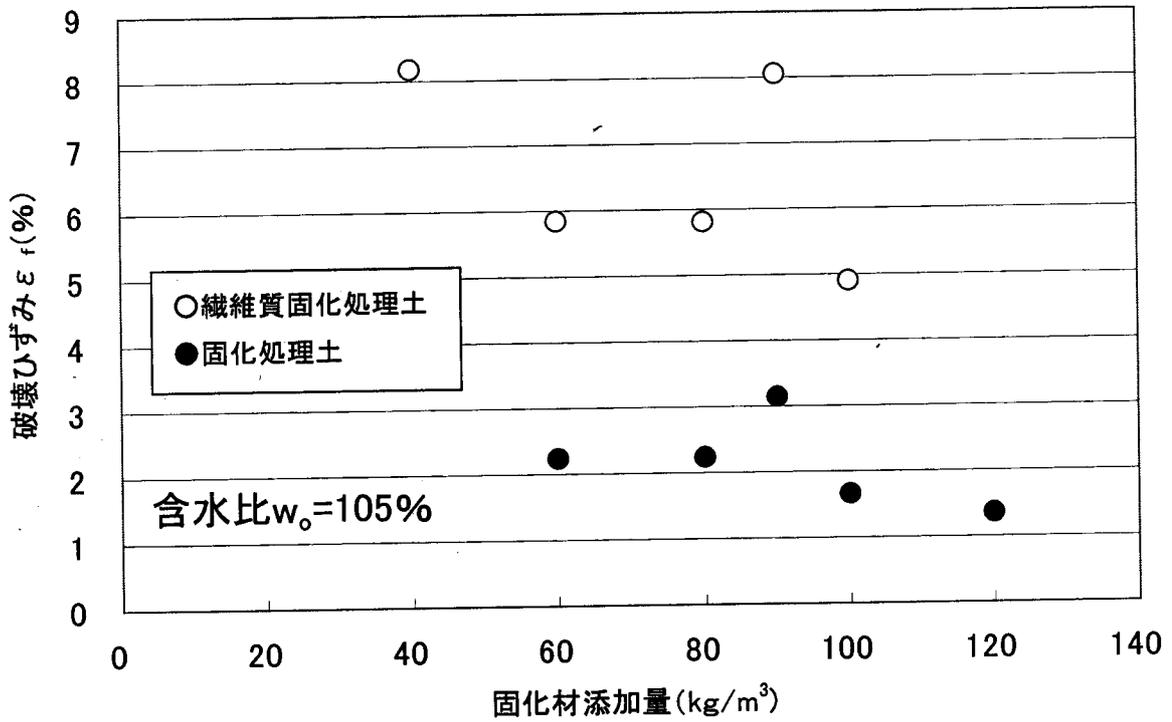


図-7 固化材添加量と破壊ひずみとの関係(含水比: 105%)

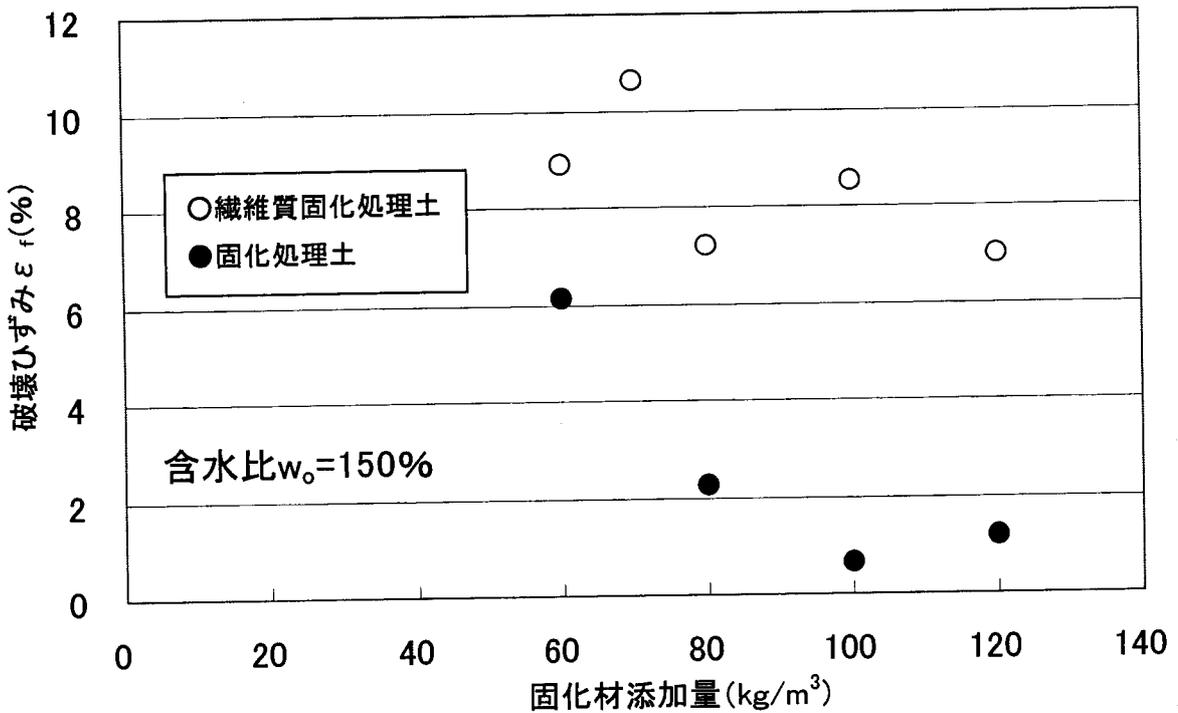


図-8 固化材添加量と破壊ひずみとの関係(含水比: 150%)

図-7 および図-8 は、破壊ひずみと固化材添加量との関係を示したものである。図-7 は含水比 105%の時の結果を、また図-8 は含水比 150%の時の結果を示している。また図-9 に一軸圧縮強さと破壊ひずみとの関係を示した。含水比に拘わらず、繊維質固化処理土の破壊ひずみは固化処理土の破壊ひずみの 3~4 倍の値を示していることが分かる。また同じ一軸圧縮強さの固化処理土に比べても、繊維質固化処理土の破壊ひずみは極めて大きな値を示している。すなわち、繊維質固化処理土における土粒子の結合力は、固化処理土における土粒子の結合力よりも大きくなっていることが定量的にも確認された。また前報⁵⁾でも述べたが、図-10 および図-11 に示した三軸圧縮試験後の供試体の破壊形状からも分かるように、固化処理土は明確なせん断面が現れ、局部的な応力集中を起し、小さなひずみで破壊しているが、繊維質固化処理土は樽型変形を起し、応力の集中が繊維を通して分散されている。このことは、繊維質固化処理土は、繊維質物質が土粒子間に複雑に入り込み、その結果、土粒子間結合力が非常に高くなっており、き裂の発生を抑制し、破壊に至るまでに大きな変形に耐え得ることを示している。

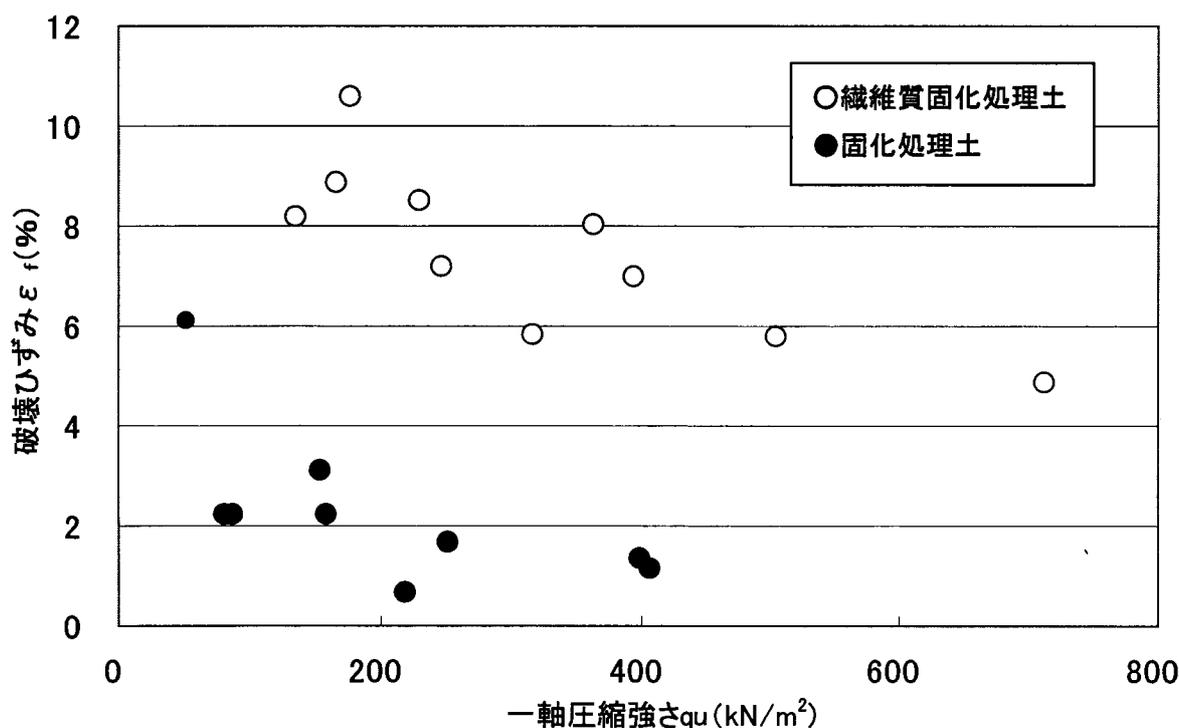
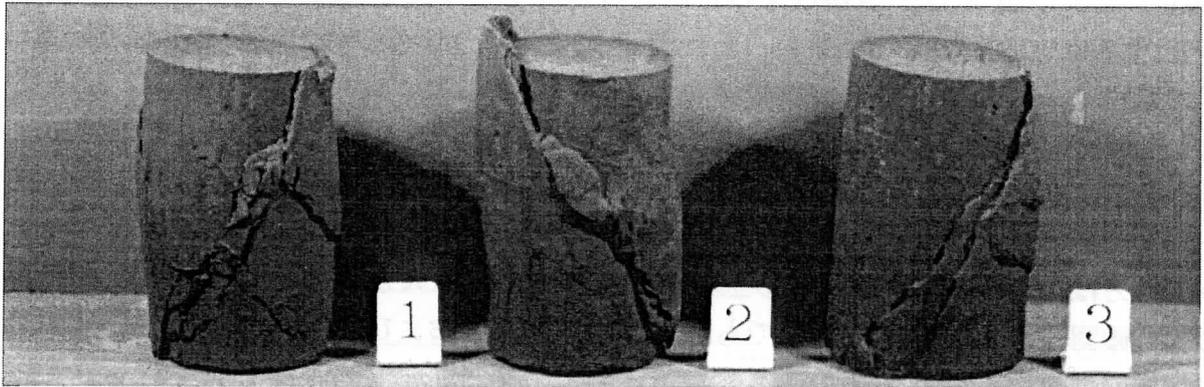


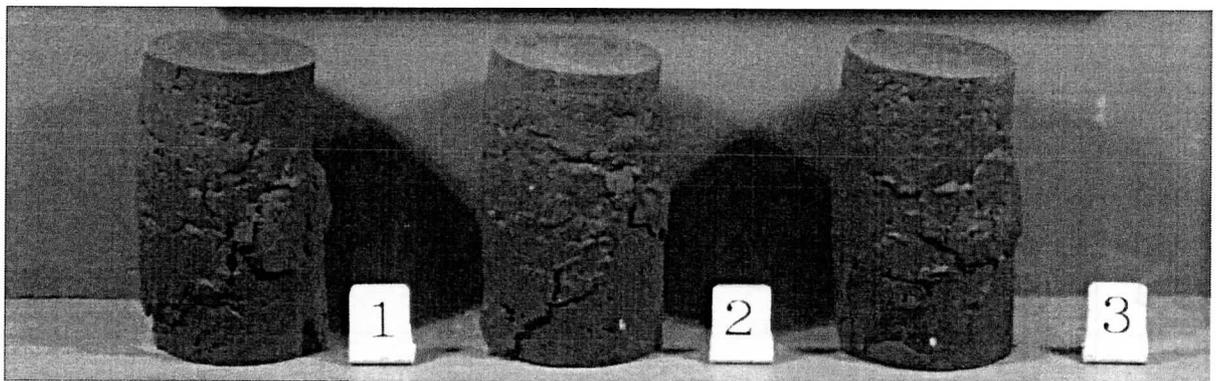
図-9 一軸圧縮強さと破壊ひずみとの関係

ところで、繊維質固化処理土はどれくらいの期間、このような高い耐久性を示すかについてはまだ明らかではない。上述したように、繊維質固化処理土の耐久性は、高含水比泥土に混合する繊維質の存在によると考えられる。換言すると、繊維質が劣化しない限り繊維質固化処理土は乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すと予想される。すなわち、繊維質固化処理土の耐久性は、古紙の耐久性に依存すると考えられる。



養生期間 7 日，セメント系固化材 $100\text{kg}/\text{m}^3$
拘束圧 No. 1: $50\text{kN}/\text{m}^2$ ，No. 2: $100\text{kN}/\text{m}^2$ ，No. 3: $200\text{kN}/\text{m}^2$

図-10 三軸圧縮試験後の供試体の破壊形態(固化処理土)



養生期間 7 日，セメント系固化材 $100\text{kg}/\text{m}^3$
拘束圧 No. 1: $50\text{kN}/\text{m}^2$ ，No. 2: $100\text{kN}/\text{m}^2$ ，No. 3: $200\text{kN}/\text{m}^2$

図-11 三軸圧縮試験後の供試体の破壊形態(繊維質固化処理土)

定性的には、①セメント系固化材の影響により土砂は高アルカリ性を示し、古紙の成分であるセルロースを分解する微生物(糸状菌)が生息できない¹⁵⁾、②土砂に含まれる粘土鉱物の大きさは、 $0.02\mu\text{m}\sim 1.00\mu\text{m}$ 以下であり¹⁶⁾、繊維質固化処理土のセメント固化材の水和によるセメンティング効果とあいまって間隙の大きさはそれ以下であると考えられるが、糸状菌胞子のうの大きさは $2\sim 10\mu\text{m}$ ¹⁵⁾であるので、雨水とともに菌が侵入する可能性は極めて低いなどの理由から、繊維質固化処理土内部の古紙はほとんど劣化しないと推察されるが、この古紙の耐久性については今後、定量的に検討し、さらに繊維質固化処理土が高い耐久性を維持する期間を定量的に把握したいと考えている。

以上のように、繊維質固化処理土は乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが実験的に確かめられた。従って、解明すべき点は残されてはいるものの、繊維質固化

処理土は地下水位の変動・気象条件による乾湿繰り返しを受ける場所においても使用可能であると考えられる。

5. むすび

繊維質固化処理土および固化処理土を用いて乾湿繰り返し実験を行った結果、固化処理土はサイクルの進展に伴ない劣化し、一軸圧縮強度が低下するが、繊維質固化処理土は乾湿繰り返しによりほとんど劣化せず、極めて高い耐久性を示すことが確認された。従って、繊維質固化処理土は地下水位の変動・気象条件による乾湿繰り返しを受ける場所においても使用可能であることが確かめられた。繊維質固化処理土が乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示す原因としては、土砂内部に存在する繊維質物質と土粒子が絡み合って土粒子間結合力を高め、乾燥収縮によるき裂の発生を抑制しているためであることが破壊ひずみの観点から確認された。

今後は、寒冷地での使用も考慮に入れ、凍結融解による耐久性および凍上について実験的に検証するとともに、古紙そのものの劣化特性を評価したいと考えている。また今回は、実際の泥水に含まれる有機物によるデータのバラツキを抑えるため模擬泥水を用いたが、上述したように繊維質固化処理土の乾湿繰り返しに対する高い耐久性は、土砂内部に存在する繊維質物質と土粒子が絡み合って土粒子間の結合力を高めることが主な原因であり、固化の程度にはほとんど関係しないので、実際の泥水から生成される繊維質固化処理土も本実験結果と同様に乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すと考えられる。ただしこれについては今後、実験的に検討したいと考えている。

参考文献

- 1) T. Shirai : *Base Sekkei Shiryo* (Kensetu Kogyo Chousakai, 2002), 59-61.
- 2) Advanced Construction Technology Center : *Kensetsuodei Recycle Shishin* (Taisei Shuppan Co. Ltd, Tokyo, 1999), 41-43 and 164-165.
- 3) M. Murata : *Civil Engineering, JSCE*, 87(2002), 25-28.
- 4) S. Fukushima, A. Kitajima, K. Ishiguro, Y. Ikeda, K. Sakamaki and S. Tani : *Proc. of JSCE, No. 666/III-53* (2000), 99-116.
- 5) M. Mori, H. Takahashi, A. Ousaka, K. Horii, I. Kataoka, T. Ishii and K. Kotani : *Shigen-to-Sozai*, 119(2003), 155-160.
- 6) H. Takahashi et al. : *Proc. of MMIJ Tohoku Branch Autumn Meeting* (2003), 31-32.
- 7) M. Kamon, T. Katsumi, H. Imanishi : *Proc. of the 45th Meeting on Cement Technology*, (1991), 844-849.
- 8) S. Ogawa, M. Sugiyama, K. Yokoyama and H. Yamamoto : *Proc. of the 31st Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (1996), 303-304.

- 9) G. Kuno: *Tsuchi no Ryudouka shorikouhou*(Gihoudo Press Co. Ltd., 1997), 57-60.
- 10) N. Mori et al. : Proc. of the 28th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering(1993), 2639-2640.
- 11) E. Matsubara et al. : Proc. of the Symposium on Development and Application of Light Soil Materials, (2000), 183-186.
- 12) Public Works Research Institute: *Final Report of Cooperative Research (Kensetsuodeikairyoudo no Taikyusei)*, (1997), 77-82.
- 13) Japan Cement Association: *Jibankairyoudo Manual (2nd. Edition)*(Gihoudo Press Co. Ltd., 1999), 154-157.
- 14) The Japanese Geotechnical Society: *Iwa no Chousa to Shiken*, (Soukousha Insatsu Co. Ltd., 1989), 414-418.
- 15) T. Hattori and K. Miyashita: *Tsuchi no Biseibutsugaku*(Youkendo Co. Ltd., 2000), 4-14 and 154-157.
- 16) S. Ookusa: *Nendo no Fushigi*(Shin Nihon Insatsu Co. Ltd, 1994), 38-39.

凍結融解試験における繊維質固化処理土の耐久性

1. はじめに

著者らは既に、高含水比泥土に古紙破砕物と高分子系改良剤を添加し、泥土を良質な土砂に再資源化する工法(以下、繊維質固化処理土工法と記す)を開発した¹⁾。本工法は、古紙に自由水の大部分を吸水させ、見掛けの含水比を低下させるため、セメント系固化材の添加量を抑えられることから処理費の低減につながるるとともに、施工性に優れ、また即時運搬可能な土砂を生成できることから養生期間や仮置き場が不要になるなど多くの利点を有している¹⁾。その結果、繊維質固化処理土工法は既に多くの施工実績を有し、さらにこれまでの研究で様々な優れた地盤工学的特性が確認されている²⁾。例えば生成土を用いて一軸圧縮試験を行った結果、生成土は従来の固化処理土に比べて圧縮強度および破壊ひずみともに大きく、かつ乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示すことが確かめられている²⁾。これは、従来の固化処理土は、乾燥過程における収縮により土砂内部にき裂が生じるが、繊維質固化処理土では、繊維質と土砂が複雑に絡み合い、土粒子間結合を増加させるため、乾燥過程においても土粒子間結合力が低下しないためである。

ところで生成土を寒冷地において盛土として利用するためには、凍結融解に対する耐久性についても把握しておく必要がある。つまり、寒冷な地域では冬季間、土中の水分が凍結する。水は凍結によって体積が膨張するため、凍結融解を繰り返すことにより土粒子間結合力が低下し、土砂の強度が下がる可能性がある。しかしながら、凍結融解による繊維質固化処理土の耐久性については明らかになっていない。そこで本研究では繊維質固化処理土の凍結融解による耐久性について実験的に検討することを目的とする。

2. 凍結融解試験

2.1 凍結融解試験の方法

凍結融解試験を行うに当り、供試体である繊維質固化処理土を作成した。また比較のため固化処理土も作成し、乾湿繰り返し実験を行った。供試体の作成には、模擬泥水を使用した。作泥方法は、粘土とシルトを40:60(乾燥質量比)で混合し、それに加水調整して含水比105%および150%の汚泥を作成した。土粒子の密度は $2444[\text{kg}/\text{m}^3]$ である。なお、供試体の作成は、「建設汚泥改良土の利用に関する基礎的研究³⁾」に準じた方法を用いた。

本実験では処理土を -21°C で12時間凍結した後、 $+21^{\circ}\text{C}$ で12時間融解を1サイクルとすることで1日の凍結融解のモデルとし、0, 1, 3, 5, 7, 15サイクルごとに一軸圧縮試験を行った。また、比較のために従来工法で作成した固化処理土でも同様の試験を行った。

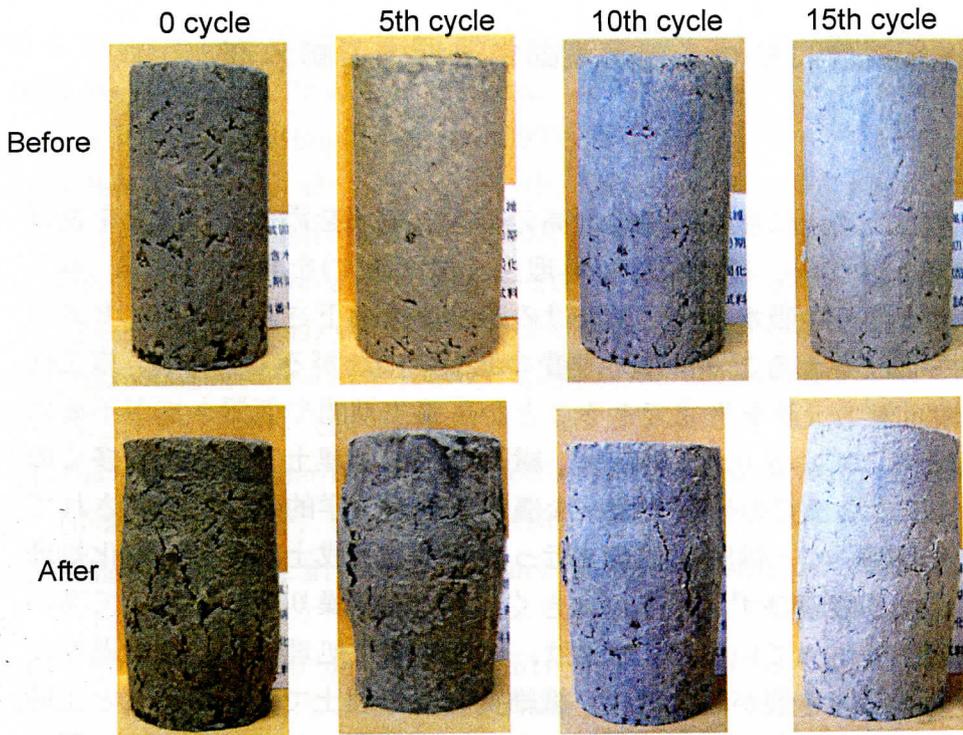


Fig. 1: Fiber-Cement-Stabilized Mud (water content 105%)

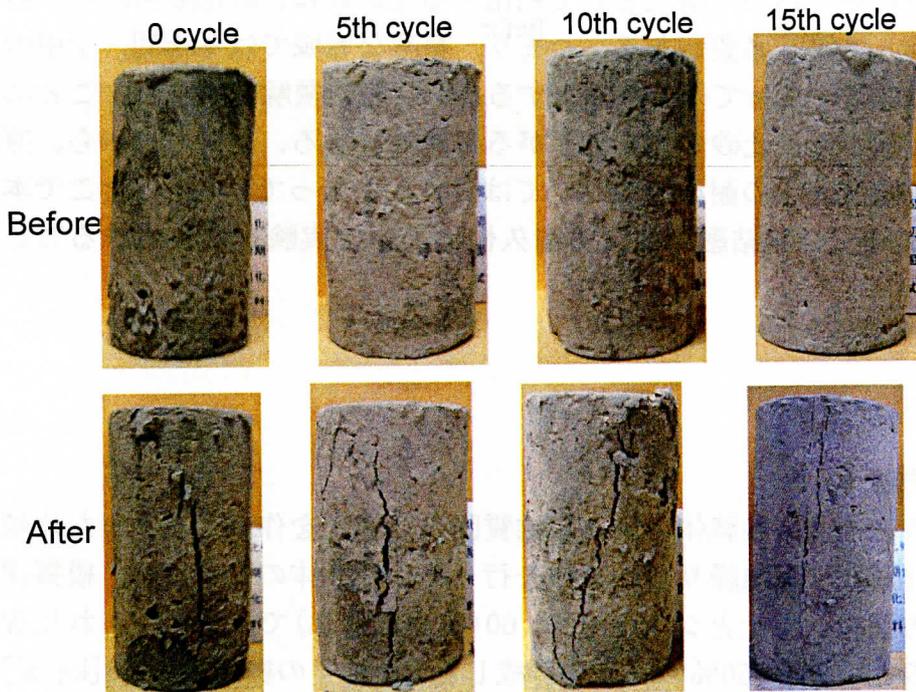


Fig. 2: Cement-Stabilized Mud (water content 105%)

2.2 凍結融解試験の結果

各サイクルの試験前後の写真を **Fig. 1** および **Fig. 2** に示す。 **Fig. 1** は繊維質固化処理土、 **Fig. 2** は固化処理土の様子である。これらの図より、繊維質固化処理土は中央が樽型に膨らみ、潰れているのに対して、固化処理土はほとんど変形せず、明確なき

裂面で破壊が生じているのが分かる。この破壊形態は含水比を変えても、また凍結融解を繰り返しても変化はなかった。この結果から、供試体の破壊形態を決定するのは古紙の存在であることが分かる。また、処理土の外形上は、劣化の影響は目に見えるほどではないことも分かる。

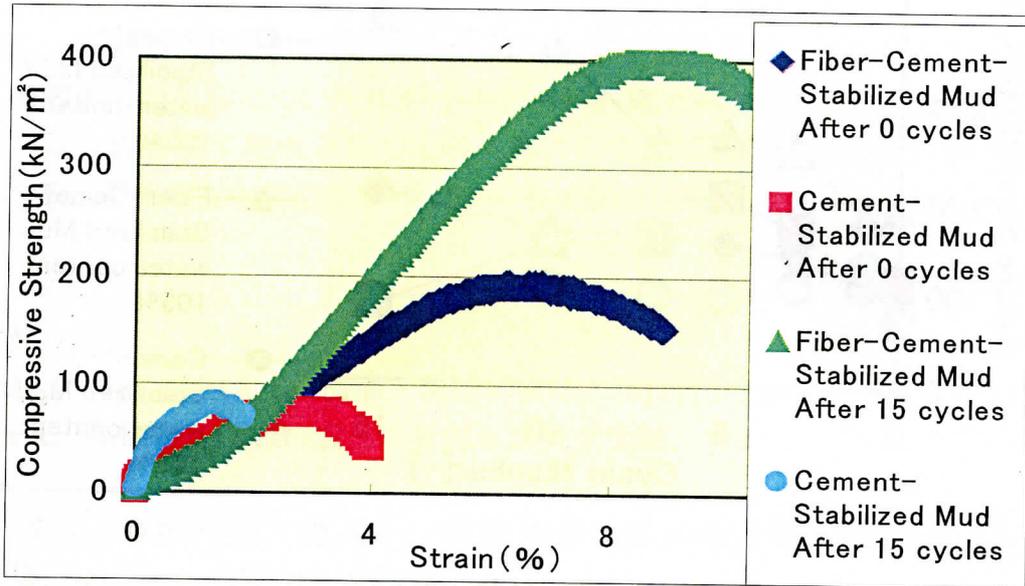


Fig. 3: Comparison of the results at 0 cycle with the ones at 15th cycle

0, 15 サイクル終了後の一軸圧縮強度と軸ひずみの関係を、Fig. 3 に示す。また、凍結融解のサイクル数による破壊強度と破壊ひずみの変化を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。繊維質固化処理土は凍結融解による劣化はほとんど見られず、強度はサイクル数の増加とともに増大している。これは、今回の実験では養生期間を7日間としたため、凍結融解試験中もセメント系固化剤の水和反応が進行したためであると考えられる。固化処理土も同じ7日間の養生期間としたので、同様にセメント系固化剤の水和反応が進行していると判断でき、劣化がなければ繊維質固化処理土と同様にサイクル数の増加とともに強度も増大するはずであるが、固化処理土の強度は3~5 サイクル以降は徐々に減少し、15 サイクル終了時には、初期強度と同等あるいはそれ以下にまで減少している。これは、明らかに固化処理土が凍結融解の影響を受けて劣化したためである。つまり、凍結によって固化処理土の内部に存在する水の体積が増大し、その結果、土粒子間結合力が低下したと考えられる。この土粒子間結合力は、破壊ひずみと密接な関係があると考えられるが、Fig. 5 の結果は上述の考察と同様の傾向を示している。

以上のことより、繊維質固化処理土の土粒子間結合力は凍結融解を繰り返しても低下することなく、その結果、繊維質固化処理土は凍結融解に対して高い耐久性を示すことが確かめられた。

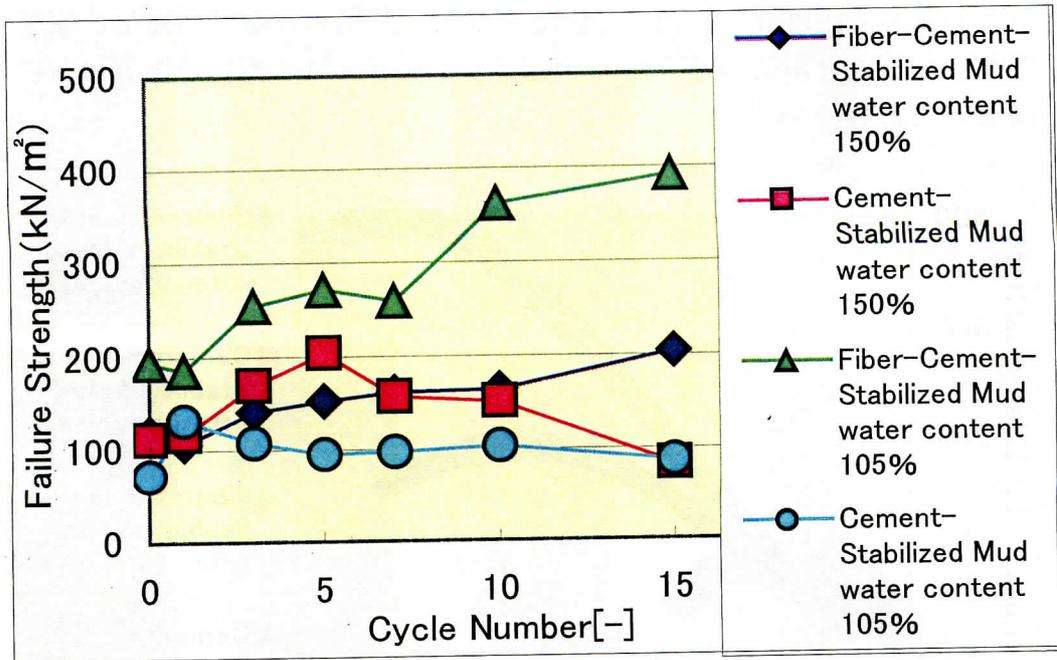


Fig. 4: Change of failure strength

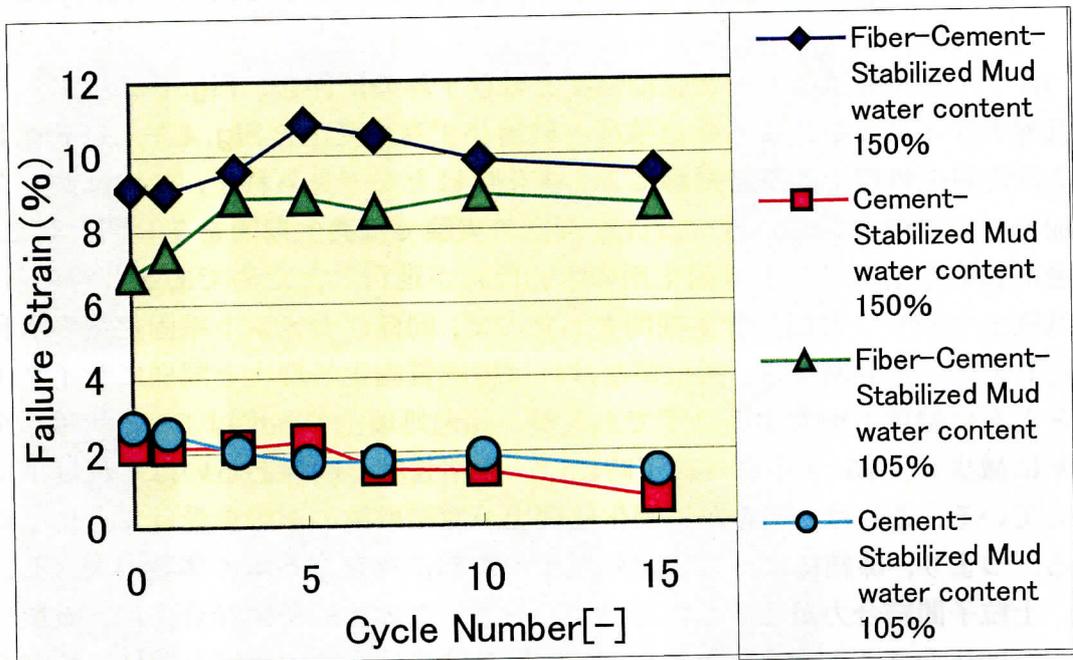


Fig. 5: Change of failure strain

3. むすび

繊維質固化処理土および固化処理土を用いて凍結融解試験を行った結果、固化処理土は凍結融解により劣化するのに対し、繊維質固化処理土はほとんど劣化せず、凍結融解に対して高い耐久性を示すことが確かめられた。

ただし、今回の実験は、試験期間としては15日間に留まっているため、今後はさらに長期間での耐久性について検討することが必要であるとともに、繊維質固化処理土が高い耐久性を示す理由として土砂内部に含まれる繊維質の影響が挙げられるので、この繊維質そのものの耐久性についても実験的に検証する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 森 雅人, 高橋 弘他 5 名: 資源・素材学会誌, Vol. 119, No. 4-5, pp. 155-160, 2003
- 2) 森 雅人, 高橋 弘, 熊倉 宏治: 資源・素材学会誌, Vol. 121, No. 2-3, pp. 37-43, 2005
- 3) 小川 伸吉, 飽本 一己, 関 眞一, 吉成 寿男: 第 30 回土質工学会研究発表会講演要旨集, pp. 2221-2222, 1995.

ペーパースラッジを用いた繊維質固化処理土の強度特性および乾湿繰り返し試験における耐久性に関する実験的研究

1. はじめに

建設汚泥は、年間 1,000 万トン近く排出されているにもかかわらず、リサイクル率は低く、ごく一部再利用されるものを除き、大部分は産業廃棄物である「汚泥」として中間処理施設で脱水処理を施すか、あるいは直接最終処分場に持ち込まれている。しかしながら、処分場の不足・遠隔化は深刻な問題であり、輸送コストの負担から建設汚泥の不法投棄が後を絶たず、地球環境への汚濁負荷の影響が大きな問題となっており、建設汚泥の有効利用が望まれているのが現状である。

そこで著者らは、十分な品質特性を有する盛土材料として汚泥の再資源化をはかるために、ヘドロや汚泥に繊維質物質である古紙破砕物と高分子系改良剤を添加し、高含水比泥土を再資源化する技術の開発を行った¹⁾。この工法で生成される土砂(以下、繊維質固化処理土と記す)を用いて一軸圧縮試験および圧裂引張試験を実施した結果、繊維質固化処理土は、従来の固化処理土と比較して、破壊ひずみおよび残留強度が大きく粘り強い性質を有することが確認された。

また、繊維質固化処理土あるいは固化処理土を盛土材として利用する場合、これらの土砂は気象変動の影響、すなわち乾湿繰り返し試験の影響を受けることになる。そこで、繊維質固化処理土および固化処理土を用いて乾湿繰り返し試験を行った結果、固化処理土はサイクルの進展にともなって劣化し、一軸圧縮強さが低下するが、繊維質固化処理土は乾湿繰り返し試験を受けてもほとんど劣化せず、極めて高い耐久性を示すことが確認された²⁾。

ところで、本工法の大きな特徴は、高含水比泥土に古紙破砕物を添加し、脱水工程を施すことなく泥土を団粒固化することである。古紙の添加量は含水比の関数として与えられるが、例えば 500%といったかなりの高含水比泥土になると、泥土 1m³あたり 90kg という大量の古紙を添加する必要がある。古紙は市場価格の変動の影響を大きく受けるため、少しでも古紙の添加量を削減できれば、施工コストの安定化およびコスト縮減に繋がると考えられる。

そこで、本研究では古紙のリサイクル製造工程から発生するペーパースラッジ(以下、PS と記す)に注目する。すなわち、本研究では古紙破砕物の代わりに PS を泥土に添加し、PS 入り固化処理土(以下、PS 固化処理土と記す)および PS と古紙破砕物の両方を泥土に添加した PS 入り繊維質固化処理土(以下、PS 繊維質固化処理土と記す)を作成し、それらの強度特性・耐久性を既に報告した繊維質固化処理土および固化処理土の強度特性・耐久性²⁾と比較し、強度特性・耐久性について定量的に評価することを目的とする。さらに強度特性・耐久性に対する高分子系改良剤・助剤の影響についての検証も併せて行う。これらの薬剤は、処理土の即時運搬を可能にする団粒化構造を作り出すためのものであり、即時運搬の必要性のある現場では必要不可欠な

薬剤であるが、これらの薬剤が処理土の強度特性・耐久性に及ぼす影響は明らかになっていない。仮にこれらの薬剤が処理土の強度特性・耐久性には影響を及ぼさないという場合、仮置き場・養生期間が十分にあり、即時運搬を必要としない現場では、薬剤を添加する必要がなくなり、その結果、施工コストの削減に繋がる可能性がある。そこで、本研究では、薬剤の有無による強度特性・耐久性の違いについても実験的に検討する。

2. ペーパースラッジ

紙は多量に生産、消費、廃棄される消費材であり、依然として一般廃棄物処理の約25%を占める最大の素材の一つである。このため、古紙のリサイクルは、資源有効利用、ごみ減量化、森林資源保全の観点からますます重要となってきた。現在、製紙業界では資源有効利用促進法に基づき「平成17年度までに古紙利用率を60%にする」という目標に取り組んでいる³⁾。

一方、古紙リサイクルは再生紙の原料となるパルプ繊維を回収する際に、無機物である填料、紙にならない短いパルプ繊維、脱墨されたインキ成分等を廃棄物として排出することから、古紙利用率の上昇に伴ってペーパースラッジ (PS) も増加する傾向にある。製造工程から発生するペーパースラッジは、工場単位で年間数万トン以上に達し、現状では焼却または埋め立て処分されているが⁴⁾、用地確保難、処理費用の増大および環境問題から、再資源化を目的とした早急な対策が望まれている。そこで、本研究では、前述したようにPSを古紙の代替品として利用し、建設汚泥やヘドロの有効利用を図るリサイクルシステムを確立することを目的としている。本実験に用いたPSは宮城県内の再生紙工場から採取し、土壌の汚染に係る環境基準 (人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持することが望ましい基準) によりその安全性を確認した後、実験に供した。また実験に用いたPSの成分質量比を図-1に示す。図-1(a)に示すように、初期状態のPSは質量の65%が水分であり、35%が固形スラッジである。この固形スラッジは、有機物(セルロース)と無機物(填料など)から構成されていると考えられるため、乾燥して水分を蒸発させたPSを熱重量/示差熱分析装置(TG-DTA)により解析した結果が図-1(b)である。この図に示されるように固形スラッジ全体の45%が有機物であり、55%が無機物であった。またX線トポグラフィ(XRT)により成分を分析した結果、無機物としては、タルク、カオリン、炭酸カルシウムなどの成分が含まれていることが確かめられた。ただし、XRTでは、それぞれの成分が含まれていることの確認ができるだけであり、質量比の算定にまでは至らなかった。

ところで、再生紙工場から排出されるペーパースラッジ (PS) は、初期状態では図-1(a)に示すようになんかの水分を含んでいるため、このままでは古紙破砕物の代用品にはならない。そこで、本研究では、採取したPSを天日乾燥し、その後、鉄バチでほぐして古紙破砕物の代用品になり得るPSを作成した。以上の工程により作成したPSを図-2に示す。以後、特に断らないかぎり、PSとは再生紙工場から採取したペ

一パースラッジを以上の工程で処理し、生成された短繊維質を含む粉末状のペーパー
スラッジを指すことにする。

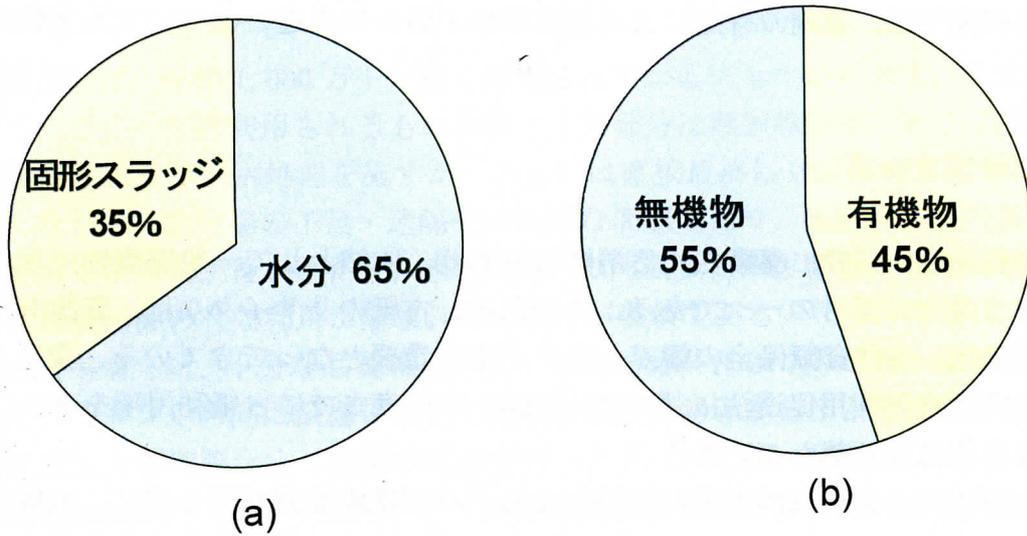


Fig-1 Component mass ratio of paper sludge : (a)Component mass ratio of initial paper sludge, (b)Component mass ratio of solid sludge after drying process

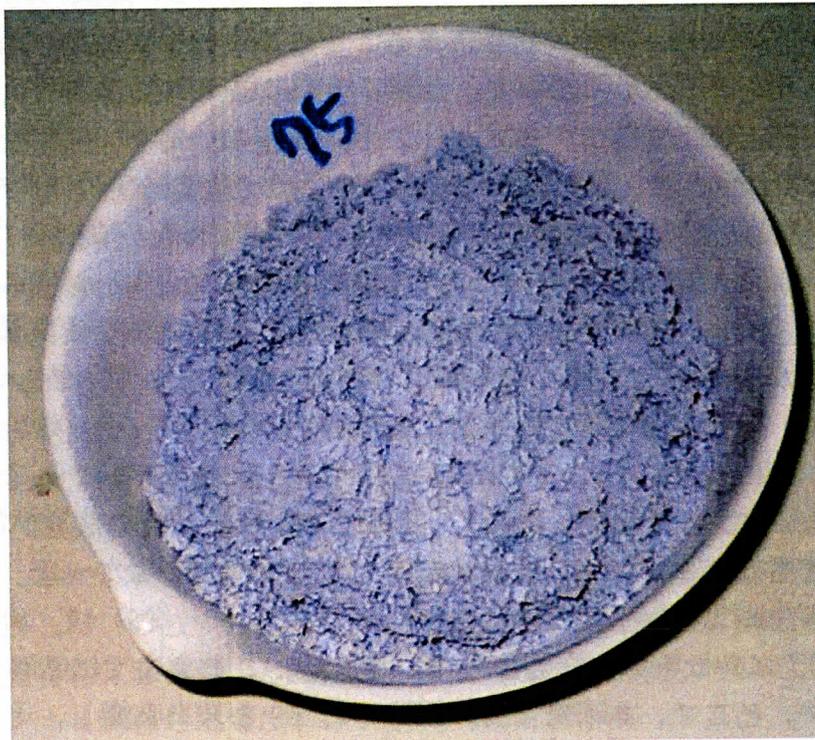


Fig-2 Paper sludge used in this study

3. 各処理土の作成

3. 1 実験試料

供試体の作成には模擬泥水を使用した。模擬泥水を使用した理由は以下の通りである。すなわち、実際の建設汚泥やヘドロは、固化材による固化の阻害物質である有機物(フミン酸等)を含むことがあり、この有機物の影響により試験結果にバラツキが生じる可能性がある。そこで、この有機物によるデータのバラツキを抑えるため模擬泥水を用いた。本実験では無機の土粒子を使用し、一定の比率で粘土とシルトを混合して作泥したものを使用した。作泥方法は、粘土とシルトを 40:60(乾燥質量比)で混合し、それに加水調整して含水比 105%および 150%の汚泥を作成した。土粒子の密度は $2.623[\text{g}/\text{cm}^3]$ である。

繊維質物質は新聞古紙を 1.0cm 角程度にちぎった物を用いた。高分子系改良剤としてはアニオン系高分子系ポリアクリルアミド(株テルナイト製:商品名 ボンテラン-P)を用いた。助剤としては無機系凝集剤(株テルナイト製:商品名 ボンテラン-L)を用いた。

3. 2 供試体作成手順

供試体作成手順を述べる前に、各処理土の定義を整理しておく。

- 1) 固化処理土: 汚泥にセメント系固化材のみを添加・混合した処理土
- 2) 繊維質固化処理土: 汚泥に古紙破砕物および高分子系改良剤・助剤を加え、さらにセメント系固化材を添加・混合した処理土
- 3) PS 固化処理土: 汚泥に PS および高分子系改良剤・助剤を加え、さらにセメント系固化材を添加・混合した処理土
- 4) PS 繊維質固化処理土: 汚泥に PS および古紙破砕物ならびに高分子系改良剤・助剤を加え、さらにセメント系固化材を添加・混合した処理土
- 5) 繊維質固化処理土(薬剤無): 汚泥に古紙破砕物を加え、さらにセメント系固化材を添加・混合した処理土
- 6) PS 固化処理土(薬剤無): 汚泥に PS を加え、さらにセメント系固化材を添加・混合した処理土
- 7) PS 繊維質固化処理土(薬剤無): 汚泥に PS および古紙破砕物を加え、さらにセメント系固化材を添加・混合した処理土

上述した供試体作成は、「建設汚泥の高度処理・利用技術の開発(盛土グループ)共同研究最終報告書 建設汚泥改良土の耐久性⁵⁾」に準じた方法を用いた。図-3 に供試体作成のフローを示す。ここでは、PS 固化処理土と PS 繊維質固化処理土(薬剤無)の作成手順の詳細を記す。

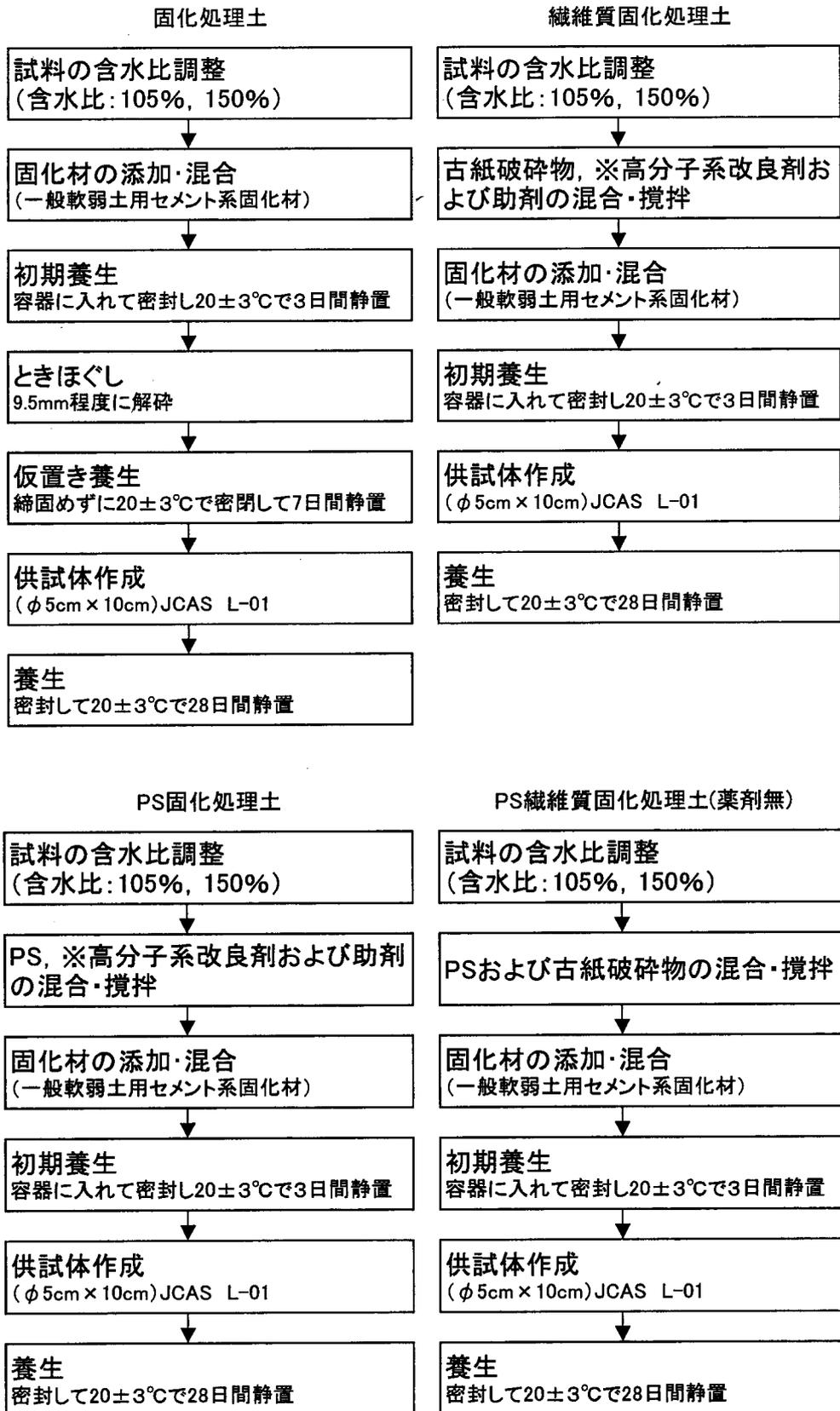


Fig-3 The flowchart of making specimens for each modified mud

Table-1 Mixing conditions of each modified mud

	含水比 W ₀ (%)	古紙破砕物 添加量 (kg/m ³)	PS 添加量 (kg/m ³)	高分子系改良剤 添加量 (kg/m ³)	助剤 添加量 (kg/m ³)	セメント系固化材 添加量 (kg/m ³)
固化処理土 1	105	—	—	—	—	90
固化処理土 2	150	—	—	—	—	100
繊維質固化処理土 1	105	50	—	1.2	8.6	90
繊維質固化処理土 2	150	65	—	1.2	8.6	100
繊維質固化処理土(薬剤無) 1	105	50	—	—	—	90
繊維質固化処理土(薬剤無) 2	150	65	—	—	—	100
PS固化処理土 1	105	—	50	1.2	8.6	90
PS固化処理土 2	105	—	70	1.2	8.6	90
PS固化処理土 3	105	—	90	1.2	8.6	90
PS固化処理土 4	150	—	65	1.2	8.6	100
PS固化処理土 5	150	—	85	1.2	8.6	100
PS固化処理土 6	150	—	105	1.2	8.6	100
PS固化処理土(薬剤無) 1	105	—	50	—	—	90
PS固化処理土(薬剤無) 2	105	—	70	—	—	90
PS固化処理土(薬剤無) 3	105	—	90	—	—	90
PS固化処理土(薬剤無) 4	150	—	65	—	—	100
PS固化処理土(薬剤無) 5	150	—	85	—	—	100
PS固化処理土(薬剤無) 6	150	—	105	—	—	100
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 1	105	10	70	—	—	90
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 2	105	20	70	—	—	90
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 3	105	30	70	—	—	90
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 4	105	40	70	—	—	90
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 5	105	50	70	—	—	90
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 6	150	10	85	—	—	100
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 7	150	20	85	—	—	100
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 8	150	30	85	—	—	100
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 9	150	40	85	—	—	100
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 10	150	50	85	—	—	100
PS繊維質固化処理土(薬剤無) 11	150	65	85	—	—	100

「PS 固化処理土の作成手順」

- ① まず初めに、上述したように粘土とシルトを 40 : 60 (乾燥質量比) で混合し、加水調整して含水比を調整する。
- ② 含水比を調整した汚泥に、Table-1 に示した添加量の PS, 高分子系改良剤および助剤を加え、攪拌・混合する。前報で高分子系改良剤および助剤の最適添加量は、それぞれ 1.0[kg/m³]および 7.0[kg/m³]であると報告したが、実際の現場での処理では攪拌ムラが避けられないので、2割ほど高めに設定する方がよい。そこで、今回は現場適用性を考え、高分子系改良剤および助剤の添加量を、それぞれ 1.2[kg/m³]および 8.6[kg/m³]とした。
- ③ 次にセメント系固化材を加え、混合する。固化材は、含水比毎の添加量を固定して添加する。
- ④ 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。
- ⑤ 初期養生後、供試体を作成する。供試体は JCAS L-01:2003 (セメント協会標準試験方法)「セメント系固化材による安定処理土の試験方法⁶⁾」に従って作製した。なお、供試体作成には、直径 5cm, 高さ 10cm の標準的なモールド(供試体作製容器)を使用した。

⑥ 供試体から水分が蒸発しないようにモールドを密封材で被覆し、 $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ で28日間養生する。

PS 固化処理土(薬剤無)の作成手順は、上記②の工程において薬剤を添加せず、Table-1に示す配合条件として6通りに変化させた。

「PS 繊維質固化処理土(薬剤無)の作成手順」

- ① 粘土とシルトを40:60(乾燥質量比)で混合し、加水調整して含水比を調整する。
- ② 含水比を調整した汚泥に、PS および古紙破砕物を加え、攪拌・混合する。
- ③ 次にセメント系固化材を加え、混合する。なお、PS、古紙破砕物、セメント系固化材の添加量は、含水比に応じて Table-1 に示す配合条件とし11通りに変化させた。

固化処理土、繊維質固化処理土の供試体作成手順は前報で報告しているので詳細は省略するが、上述した工程の②においてPSを添加しない点が異なるだけで、後は全て同じ手順である。

4. 乾湿繰り返し試験

4. 1 試験方法

初めに乾湿繰り返しに対する耐久性について検討した。試験方法は、Table-2に示すように、旧建設省土木研究所(現 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・利用技術の開発」建設汚泥改良土の耐久性⁷⁾に準拠した。すなわち、 40°C 炉乾燥2日、 20°C 水浸1日の合計3日間を1サイクルとし、各サイクルの乾燥後、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さの変化を調べた。状況観察としては、Table-3に示す健全度ランクにより供試体の健全度を評価した。

Table-2 Experimental procedures for drying and wetting test

試験項目	試験方法		
	供試体	乾湿1サイクル	確認項目
乾湿繰り返し試験	$\phi 5 \times 10$ (cm)	40°C 炉乾燥2日 20°C 水浸1日 の合計3日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 所定サイクル終了後、軸圧縮試験 (JIS A 1216) ・ 各サイクルの乾燥後、水浸後に供試体の状況観察、写真撮影

Table-3 Rank of sound degree for specimens

	クラック状況	欠落状況
A	外見上、ほとんど変化なし	
B	微細クラック、局部クラック発生	表面剥離が局部的に発生
C	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
E	供試体の一部または全体が崩落（～20%程度）	
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	供試体全体が崩壊し、片々は塊状	
H	供試体全体が崩壊し、片々は細粒化～泥状化	

ここで、細粒化とは粒径 2mm 程度の粒状に細分化された状況を指す。

「固化処理土」および「繊維質固化処理土」の乾湿繰り返しに対する耐久性については既に報告済みであるので²⁾、本実験では、「PS 固化処理土」、「PS 固化処理土(薬剤無)」および「繊維質固化処理土(薬剤無)」の 3 種類の供試体を作成し、乾湿繰り返し実験を行った。この 3 種類の供試体を作成したのは以下の理由による。

- ① 乾湿繰り返しに対する耐久性という観点から、PS は古紙破砕物の代用品になり得るのかどうか(前報で報告した「繊維質固化処理土」の結果と本実験の「PS 固化処理土」の結果を比較することにより検証可能)。
- ② 薬剤は、処理土の強度特性および乾湿繰り返しに対する耐久性に寄与しているのかどうか(「PS 固化処理土」と「PS 固化処理土(薬剤無)」の比較および「繊維質固化処理土」と「繊維質固化処理土(薬剤無)」の結果を比較することにより検証可能)。

実験を行うに当たり、各供試体ともに 12 本の供試体を作成した。所定サイクル(0, 2, 6, 10 サイクル)終了時の一軸圧縮試験には 3 本の供試体を使用したため、健全度の評価方法としては、2 サイクルまでは 9 本の供試体を、3～6 サイクルまでは 6 本の供試体を、また 7～10 サイクルまでは 3 本の供試体をそれぞれ観察して、A～H を 8 段階として数値化して平均ランクを求めた。

4. 2 試験結果

図-4 および図-5 にサイクル数と一軸圧縮強さとの関係を示す。図-4 は初期含水比 105%の時の結果を、また図-5 は初期含水比 150%の時の結果を示している。図中の▲および●印は前報で示した固化処理土および繊維質固化処理土の結果を、また○、△、□印は PS 固化処理土、PS 固化処理土(薬剤無)、繊維質固化処理土(薬剤無)の結

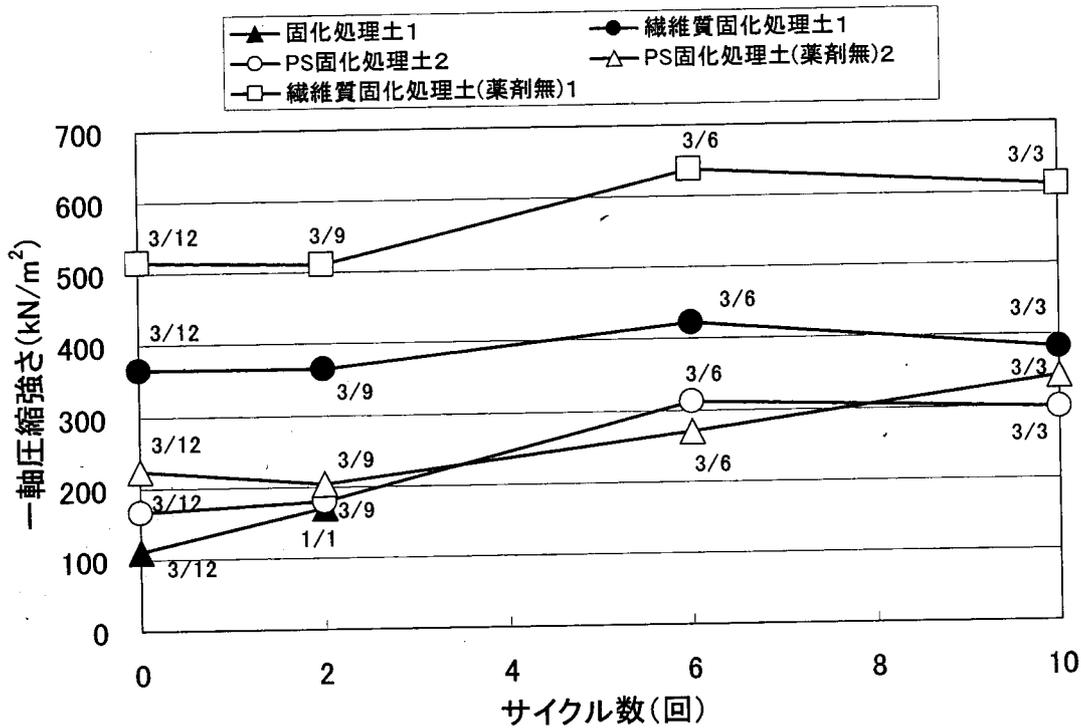


Fig-4 Relationship between cycle number of drying and wetting and unconfined compressive strength(water content = 105%)

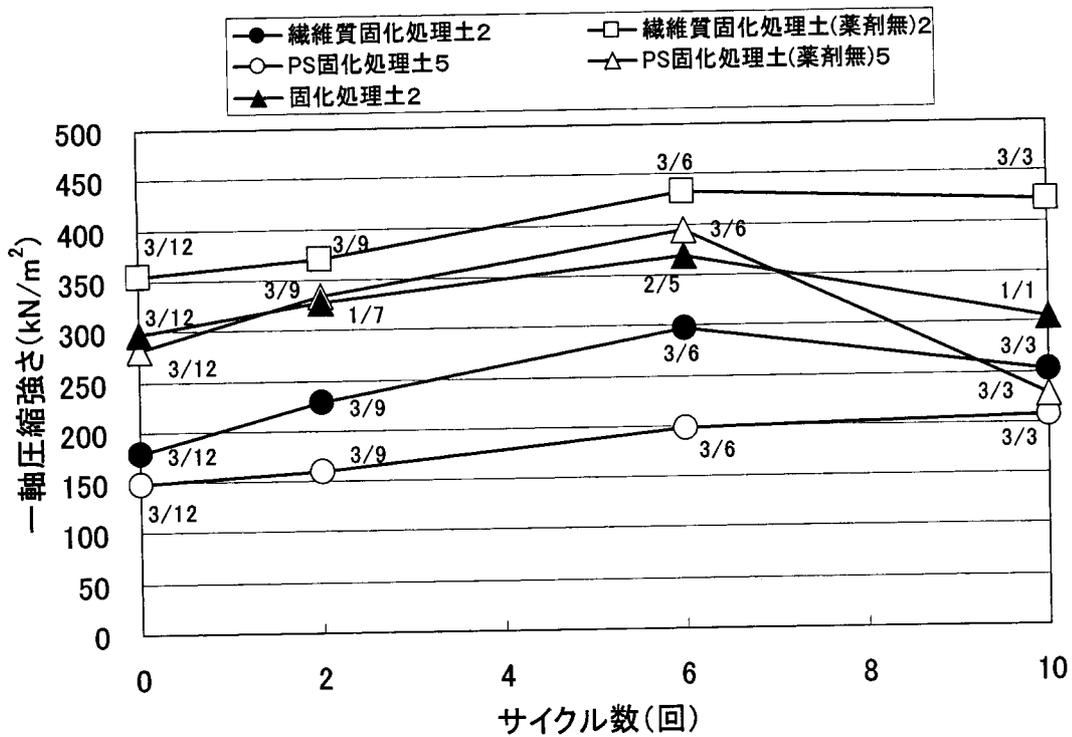


Fig-5 Relationship between cycle number of drying and wetting and unconfined compressive strength(water content = 150%)

果を示している。上述したように乾湿繰り返し実験を行うに当たり、初めに、全ての供試体ともに12本の供試体を作成した。図中の値は、(一軸圧縮試験に供した供試体の数) / (一軸圧縮試験を行うに当たり現存していた供試体の数)を示している。すなわち、3/12とは、0サイクル時に12本の供試体が存在し、そのうち3本を使用して一軸圧縮試験を行い、それらの平均値を図中にプロットしたことを意味する。つまり、繊維質固化処理土の場合、一軸圧縮試験には常に3本の供試体を使用され、分母の値も常に3ずつ減少している。これは10サイクルを通して供試体が崩壊せずに形状を保ち、常に3本の供試体を一軸圧縮試験に供し得たことを示す。

●印の結果と○印の結果を比較してみると、全サイクル数を通して繊維質固化処理土の強度がPS固化処理土よりも高くなっているが、PS固化処理土も一軸圧縮試験を行うに当たり常に3本の供試体を供し得ており、また強度の値もサイクル数の増加とともに減少することなく、10サイクル終了後も初期強度以上の値を示しており、ほとんど劣化していないことが分かる。従って、乾湿繰り返しに対する耐久性という観点からは、PSは古紙破砕物の代用品になり得ると判断できる。なお、10サイクル終了後のPS固化処理土の強度が初期強度より増加しているのは、処理土が乾湿繰り返しの影響を受けず、かつセメントの水和反応による強度発現のためと考えられる。

次に「○印と△印」および「●印と□印」を比較してみると、全体的に薬剤を使用しない処理土(△および□)の方が薬剤を使用した処理土(○および●)よりも強度が高くなっていることが分かる。これは、本実験で用いた助剤(ボンテラン-L)のpHが約3であり強酸性を示すことから、助剤を添加すると、助剤がセメントの水和反応を妨げるためと考えられる。従って、処理土の強度という点では、薬剤を添加しないほうが望ましい。また薬剤を添加しない処理土でも乾湿繰り返しに対する耐久性は高く、薬剤は乾湿繰り返しに対する耐久性に関してほとんど寄与していないことが確認された。

図-6 および図-7 に健全度ランクとサイクル数との関係を示す。この図に示されるように、固化処理土はサイクル数の増加とともに健全度が悪くなるが、その他の処理土の健全度はサイクル数に関わらず常にAランクであり、乾湿を繰り返しても劣化することなく、外見上もほとんど変化が無いことが分かる。すなわち、繊維質固化処理土およびPS固化処理土が乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示す原因は、処理土内に繊維質物質が存在するためであり、薬剤は耐久性に寄与しないばかりでなく、むしろ強度を若干低下させる要因になっている。

以上の結果を考慮すると、仮置き場・養生期間が十分にあるような現場では、薬剤を添加せず、PSあるいは古紙破砕物等の繊維質物質のみで泥土を処理した方が強度的およびコスト的に優れていると言える。

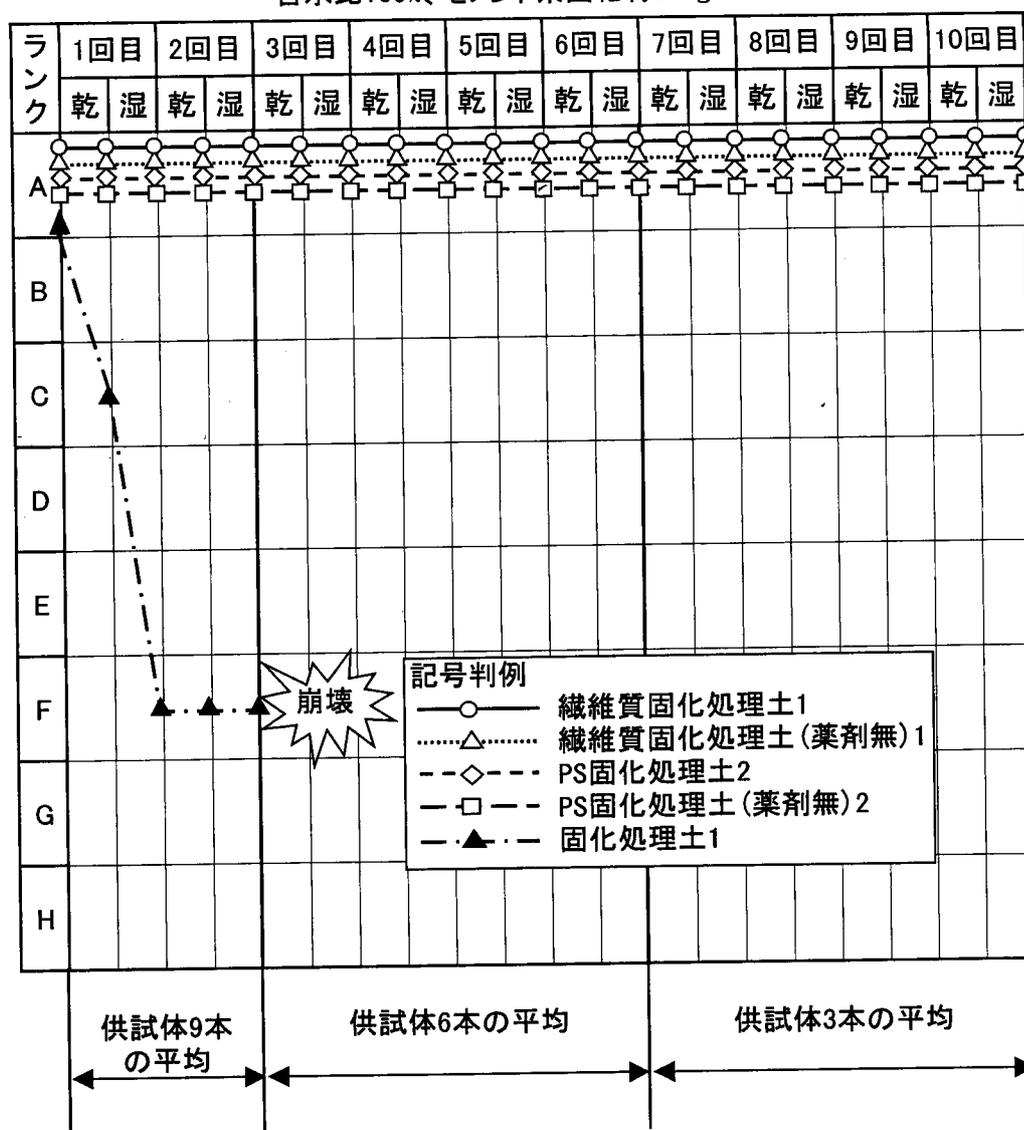
含水比105%、セメント系固化材90kg/m³

Fig-6 The change of sound degree for specimens in the repeating process of drying and wetting (water content = 105%)

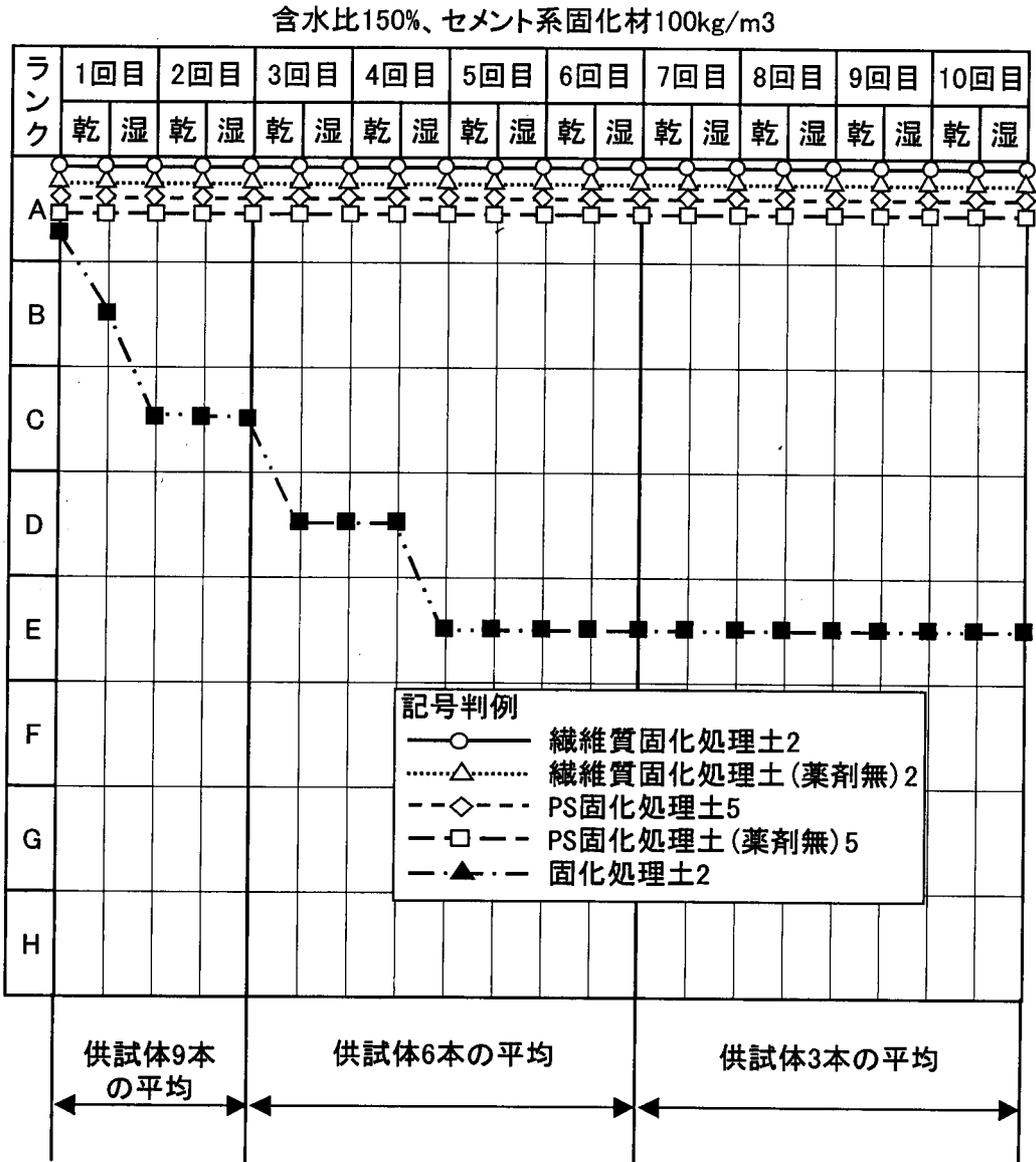


Fig-7 The change of sound degree for specimens in the repeating process of drying and wetting (water content = 150%)

5. PS 固化処理土の強度特性

前章の結果より、乾湿繰り返しに対する耐久性という観点からは、PS は古紙破砕物の代用品になり得ることが確認された。そこで、次に処理土の強度特性の観点から、最適 PS 添加量について考察を行う。ここでは初めに処理土が満足すべき目標値(基準値)を設定し、最適 PS 添加量について定量的評価を行う。以下、各目標値と設定理由について記述する。

1) 目標強度 q_u

目標強度を設定する条件として以下の点が挙げられる⁸⁾。

- ①建設機械の走行に必要なトラフィカビリティーを満足する強度であること。
 - ②有害物質を原位置に封じ込めて、流出防止を目的とするときの必要強度であること。
 - ③路床、路体盛土、構造物の裏込等に再利用するために必要な強度であること。
- 上記目標を達成させるために必要な強度は、以下の一軸圧縮強さを満足する必要がある。

- ① $q_u=50\sim 100\text{kN/m}^2$
- ② $q_u=200\text{kN/m}^2$ 以上
- ③ $q_u=100\sim 300\text{kN/m}^2$

建設汚泥の処理土を土質材料として利用する場合の品質区分は、原則としてコーン指数 q_c を指標としており、 $q_c=800\text{ kN/m}^2$ 以上を確保することが望ましいとされている。また、建設汚泥固化処理土のコーン指数 q_c と一軸圧縮強さ q_u の関係は $q_c=5\sim 15q_u$ であることから⁹⁾、一軸圧縮強さで安全側にみて $q_u=160\text{kN/m}^2$ 以上の強度が求められていることになる。しかし、ライフラインの埋設等で再掘削が必要となる場合では強度が大きくなりすぎて再掘削が困難にならないようにするために注意する必要がある。油圧ショベルで容易に再掘削可能な強度としては、一軸圧縮強さで $500\sim 1000\text{kN/m}^2$ であため、処理土の一軸圧縮強さもこの範囲内に抑える必要がある。そこで、本研究で提案する PS 固化処理土の目標強度は総合的に判断して $q_u=200\text{kN/m}^2\sim 300\text{kN/m}^2$ 程度とする。

2) 目標変形係数 E_{50}

変形係数 E_{50} は一軸圧縮強度試験における応力-ひずみ曲線においてピーク応力 q_u の半分の点 $q_u/2$ と原点を結ぶ直線の傾きで定義され、この値が大きいかほど固くもろい材質である事を示す。処理土を盛土や埋戻し土として再利用する場合、原地盤と極端な不連続性を示すことなく周囲地盤となじみを良くする必要がある。固化処理土はコンクリートや岩石のような強度特性を示すため、周辺地盤や既存盛土と固化処理土による新設の盛土の間に剛性の相違が生じ、互いのなじみが悪く、地震時のように盛土や基礎地盤が大きな変形を受ける時には、剛性の高い部分に局部的な変形集中によるクラックの発生が懸念される。そのため本工法で再資源化される PS 固化処理土の

変形係数を通常土の変形係数に近づける必要がある。

図-8 に固化処理土、繊維質固化処理土および通常土を固化処理した場合の変形係数を示す。図中の w は、改質前の泥土の初期含水比を示す。通常土とは、マサ土、ローム、山砂を指し、図中に示されている通常土の変形係数は、文献¹⁰⁾より引用した値である。繊維質固化処理土と通常土の変形係数は同程度の値となっているが、固化処理土の変形係数は繊維質固化処理土の変形係数の3~5倍の値を示している。このことは、固化処理土は固く脆いコンクリート的な特性を有することを示している。本研究で提案するPS固化処理土の変形係数は、目標強度を $q_u=200\sim 300\text{kN/m}^2$ とすれば目標値 $E_{50}=20\text{MN/m}^2$ 以下となる。

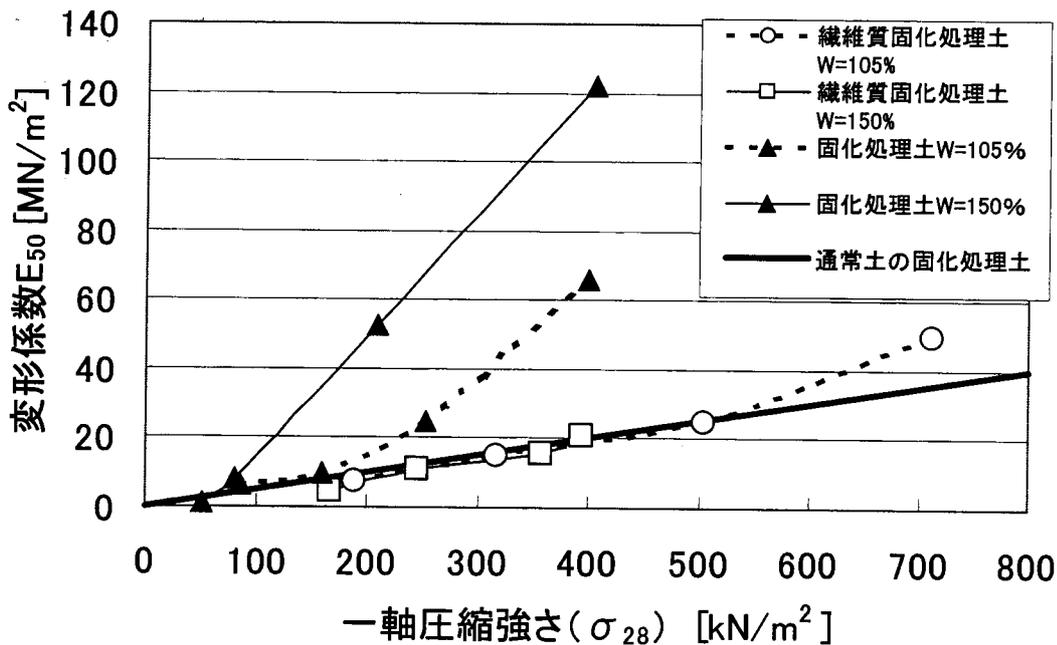


Fig-8 Relationship between unconfined compressive strength and coefficient of deformation

3) 目標破壊ひずみ ϵ_f

前報でも述べたが、三軸圧縮試験後の固化処理土には明瞭なせん断面が現れ、局所的な応力集中を起こしているのに対し、繊維質固化処理土は樽型変形を生じ、応力の集中が繊維を通して分散されている。このことは、繊維質固化処理土は、繊維質物質が土粒子間に複雑に入り込み、その結果、土粒子間結合力が非常に高くなっており、き裂の発生を抑制し、破壊に至るまでに大きな変形に耐え得ることを示している。同様に繊維質固化処理土が乾湿繰り返しに対して高い耐久性を示す理由として、繊維質が土粒子間の結合を強め、クラックの発生を抑制していると推定され、この土粒子間結合力を前報で破壊ひずみの値から定量的に評価した。図-9に一軸圧縮強さと破壊ひずみとの関係を示すが、繊維質固化処理土と固化処理土の土粒子間結合力を破壊ひずみで評価する場合の境界ラインは約5%であることが分かる。そこで、ここでは目標

破壊ひずみ ε_f を 5% とする.

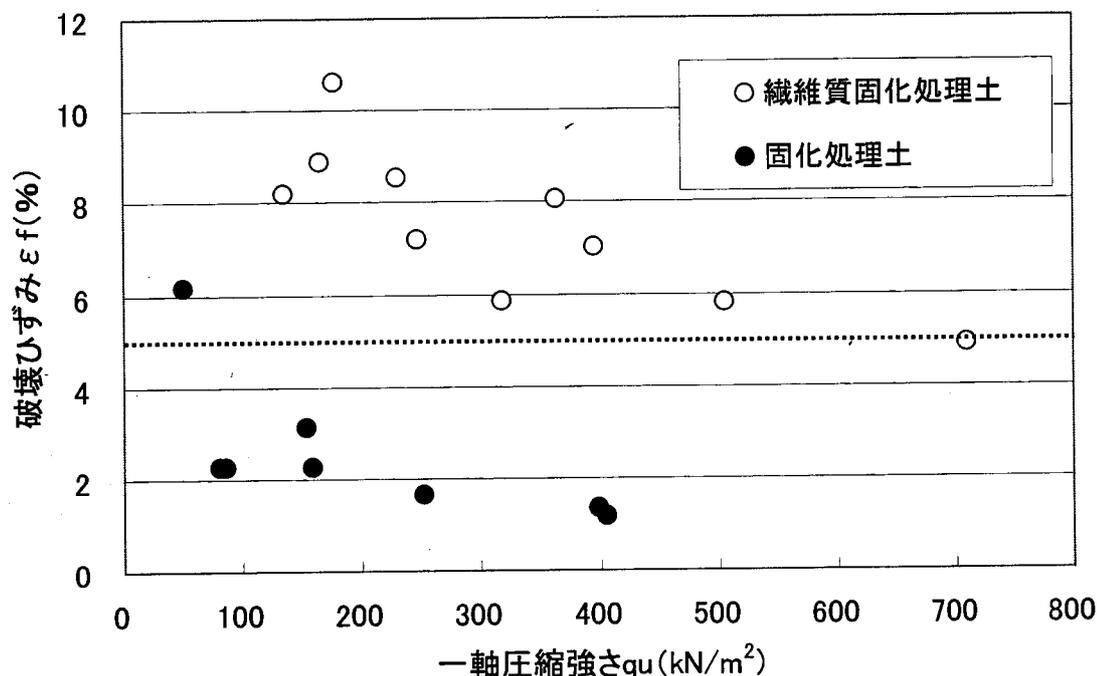


Fig-9 Relationship between unconfined compressive strength and failure strain

ところで、前章で強度的には薬剤無の方が優れていることが確認されたので、ここでは薬剤を添加せずに処理土を作成した。すなわち、初期含水比 105% の泥土に対しては PS 添加量を 50kg/m^3 , 70kg/m^3 および 90kg/m^3 に変化させて、また初期含水比 150% の泥土に対しては 65kg/m^3 , 85kg/m^3 および 105kg/m^3 に変化させて PS 固化処理土(薬剤無)を作成し、一軸圧縮試験を行った。図-10 および図-11 に PS 添加量と一軸圧縮強さ、破壊ひずみおよび変形係数との関係を示す。図-10 および図-11 は初期含水比がそれぞれ 105% および 150% の時の結果である。参考のため固化処理土、繊維質固化処理土および繊維質固化処理土(薬剤無)の値も併せ示した。この図より、一軸圧縮強さはいずれの PS 添加量に対しても目標強度の範囲内の値となったが、破壊ひずみおよび変形係数に対しては、いずれの PS 添加量に対しても目標値まで達していない。すなわち、PS 固化処理土(薬剤無)は、乾湿繰り返しに対する耐久性は高いものの、強度特性については十分であるとは言えない。そこで、破壊ひずみおよび変形係数に対する不足分を古紙破砕物で補うことを考え、PS 繊維質固化処理土(薬剤無)を作成し、一軸圧縮試験を行った。実験結果については次章で述べる。

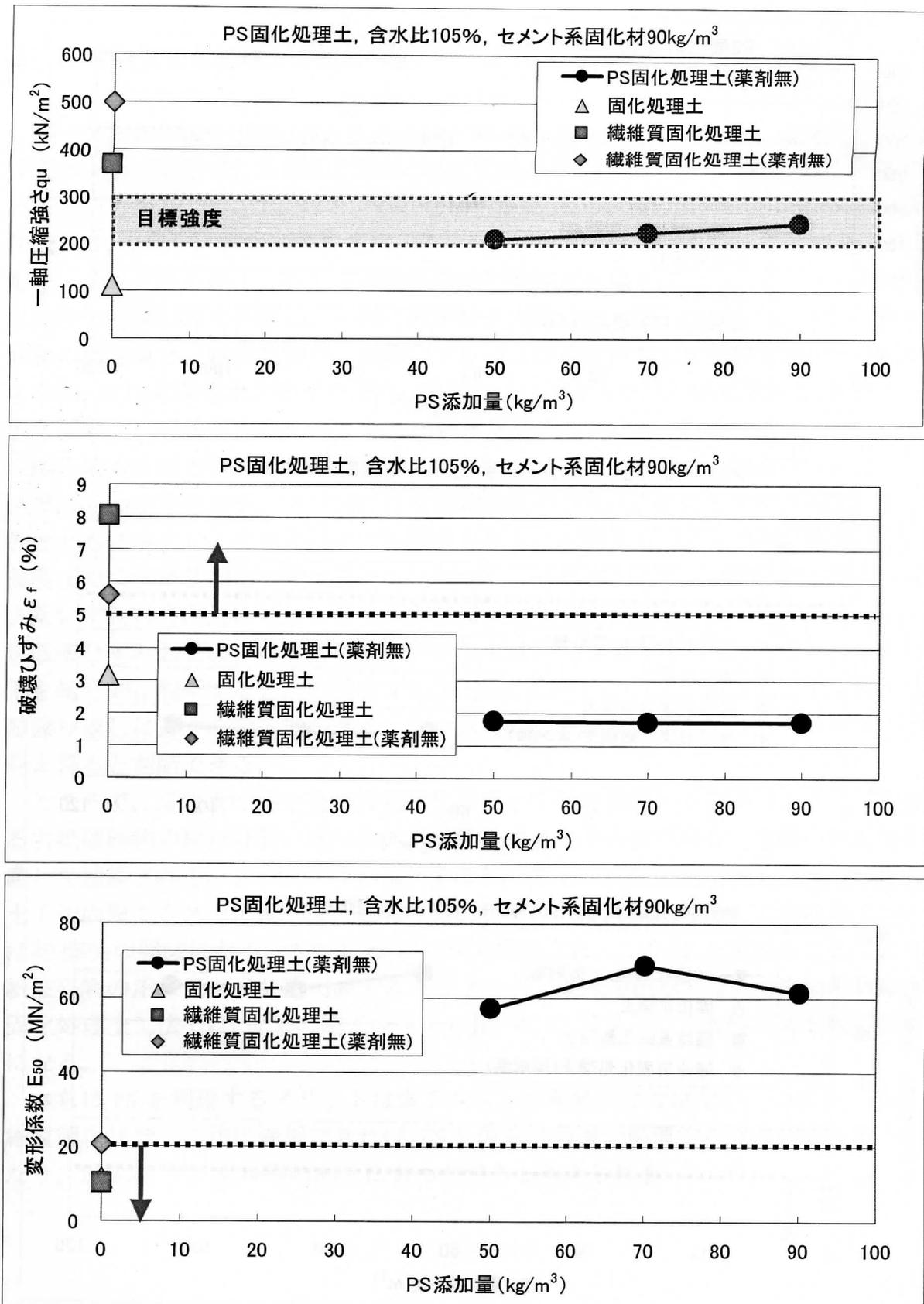


Fig-10 Relationship among PS addition rate, unconfined compressive strength, failure strain and coefficient of deformation (water content = 105%)

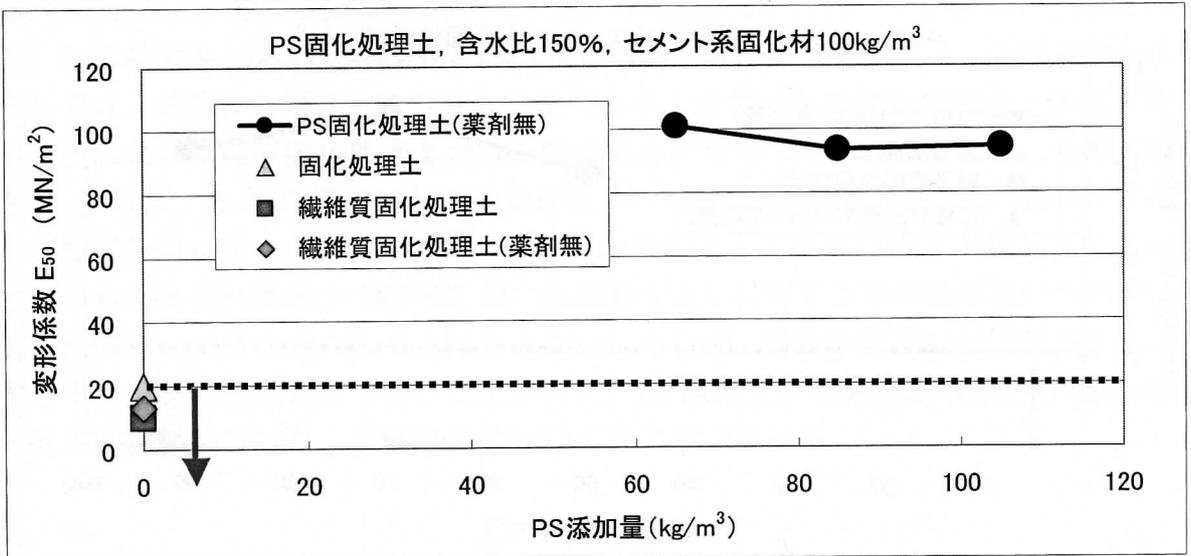
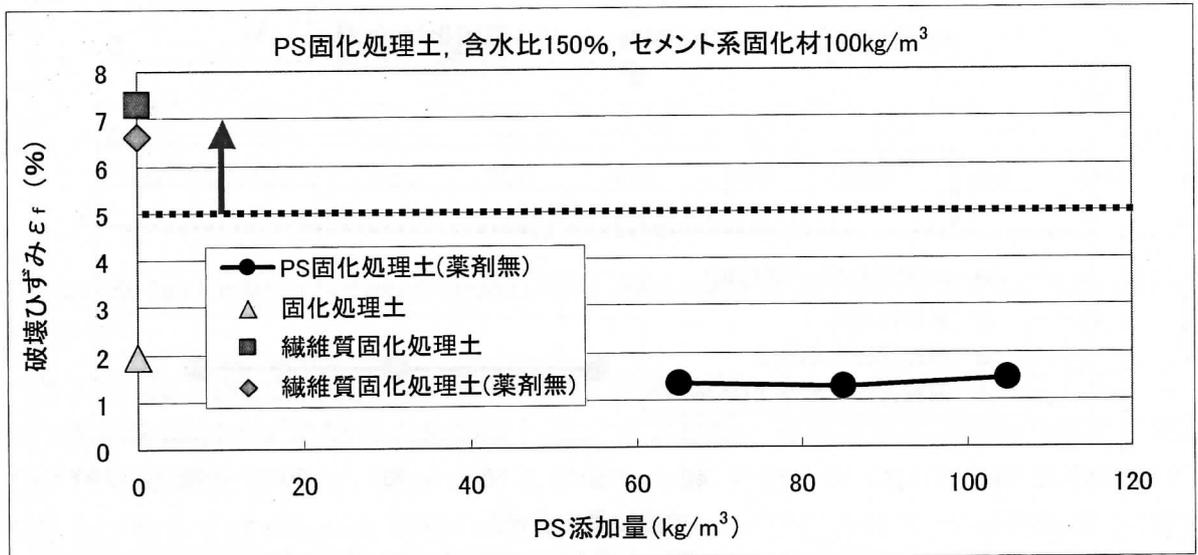
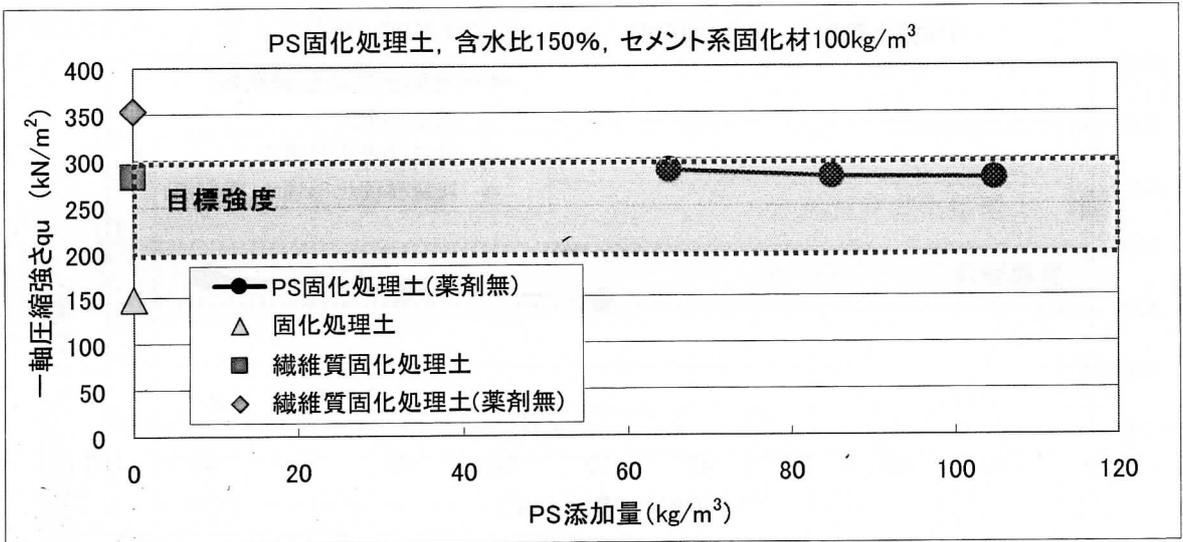


Fig-11 Relationship among PS addition rate, unconfined compressive strength, failure strain and coefficient of deformation (water content = 150%)

6. PS 繊維質固化処理土の強度特性

図-10 および図-11 に示されるように、PS 添加量を変化させても、破壊ひずみおよび変形係数が改善される傾向が見られない。つまり、PS 添加量を増やしても効果がないことが分かる。そこで、ここでは、初期含水比 105% の泥土に対しては PS 添加量を $70\text{kg}/\text{m}^3$ に固定し、また初期含水比 150% の泥土に対しては PS 添加量を $85\text{kg}/\text{m}^3$ に固定し、それぞれの泥土に対して古紙破砕物の添加量を種々に変化させて PS 繊維質固化処理土(薬剤無)を作成し、一軸圧縮試験を実施した。図-12 および図-13 に古紙破砕物の添加量と一軸圧縮強さ、破壊ひずみおよび変形係数との関係を示す。図-12 および図-13 は初期含水比がそれぞれ 105% および 150% の時の結果である。参考のため固化処理土、繊維質固化処理土および繊維質固化処理土(薬剤無)の値も併せ示した。一軸圧縮強さは古紙添加量の増加とともに徐々に増加している。破壊ひずみは、データのばらつきはあるが、全体的には古紙添加量が $30\text{kg}/\text{m}^3$ 程度までは古紙添加量の増加とともに増大し、その後はほぼ一定値を示す傾向がある。変形係数は逆に $30\text{kg}/\text{m}^3$ 程度までは古紙添加量の増加とともに減少し、その後はほぼ一定値を示す傾向がある。またいずれの含水比に対しても古紙添加量が約 $30\text{kg}/\text{m}^3$ 程度になると、目標強度、目標破壊ひずみおよび目標変形係数のいずれも満足するようになる。つまり、以上の結果を総合的に判断すると、古紙を $30\text{kg}/\text{m}^3$ 程度添加すれば、PS 繊維質固化処理土は乾湿繰り返しに対する耐久性が高く、かつ強度的にも優れ、盛土材としての使用に十分耐え得ると判断できる。

ところで、高含水比泥土を繊維質固化処理土工法で処理する際のコストは、混合する古紙破砕物の材料経費、薬剤の材料経費、セメントの材料経費、重機の損料他を考慮して積算される。含水比を 100% とすると、従来の薬剤を使用する繊維質固化処理土工法の施工コストに比べて、薬剤を使用しない繊維質固化処理土工法の施工コストは約 65% の縮減になる。さらに PS が無料で提供され、この PS を用いることにより古紙破砕物の添加量を半分に削減できたとすると、薬剤を使用しない PS 利用の繊維質固化処理土工法では、従来の施工コストに比べて約 75% という大幅コスト縮減が可能になる。

さらに PS を利用するメリットは施工コストの縮減だけではない。つまり、PS を繊維質固化処理土工法に適用できれば、PS を最終処分場で処理する際の処理費が不要になり、PS のリサイクル率の向上にもつながると考えられる。

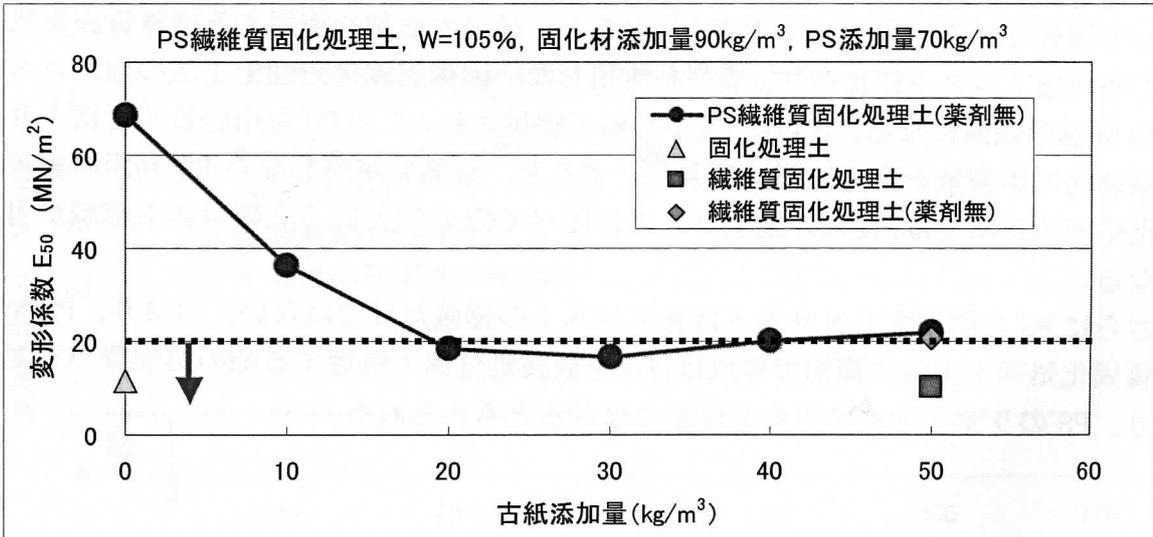
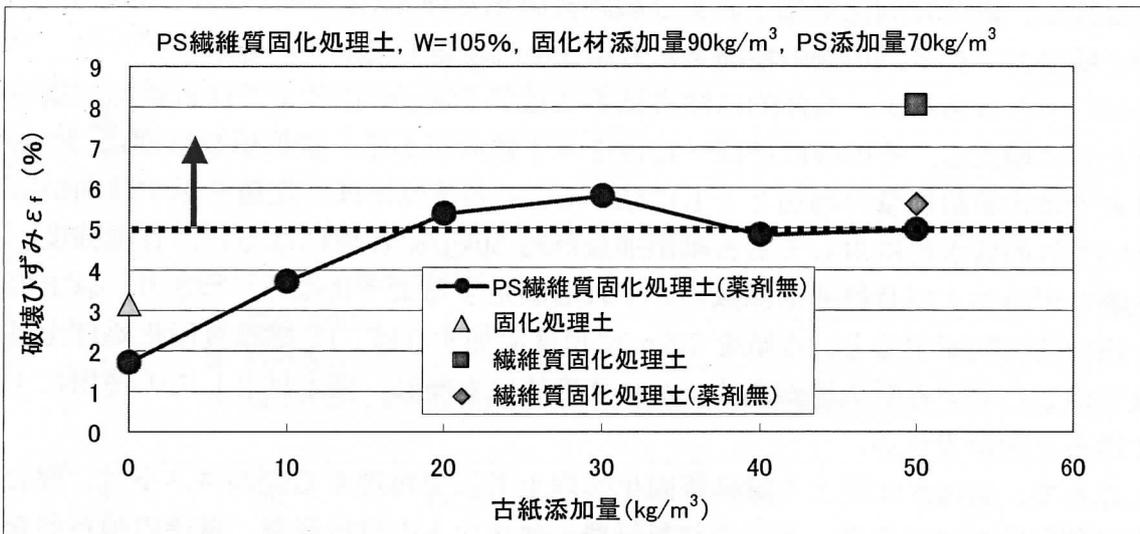
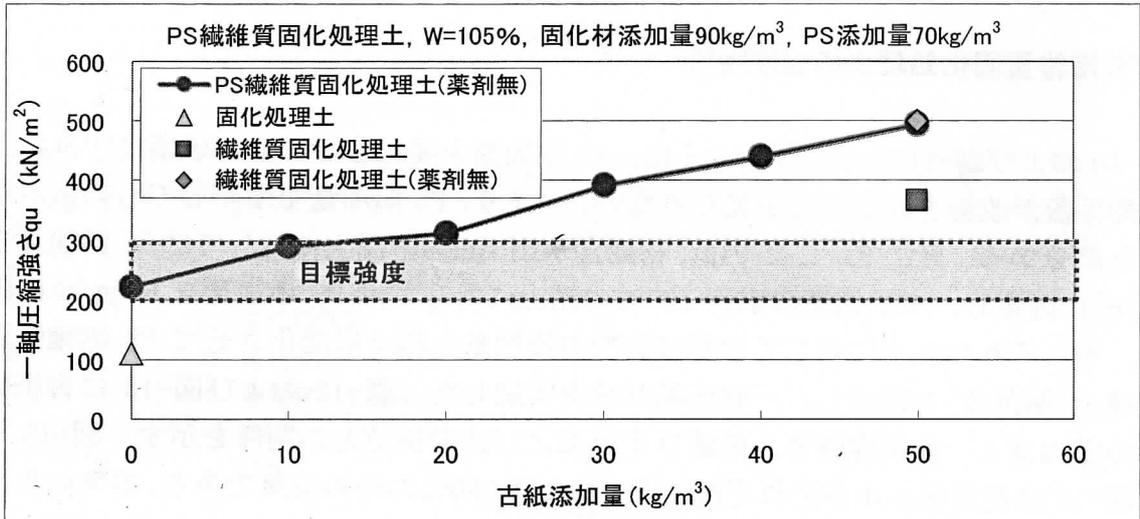


Fig-12 Relationship among addition rate of paper debris, unconfined compressive strength, failure strain and coefficient of deformation (water content = 105%)

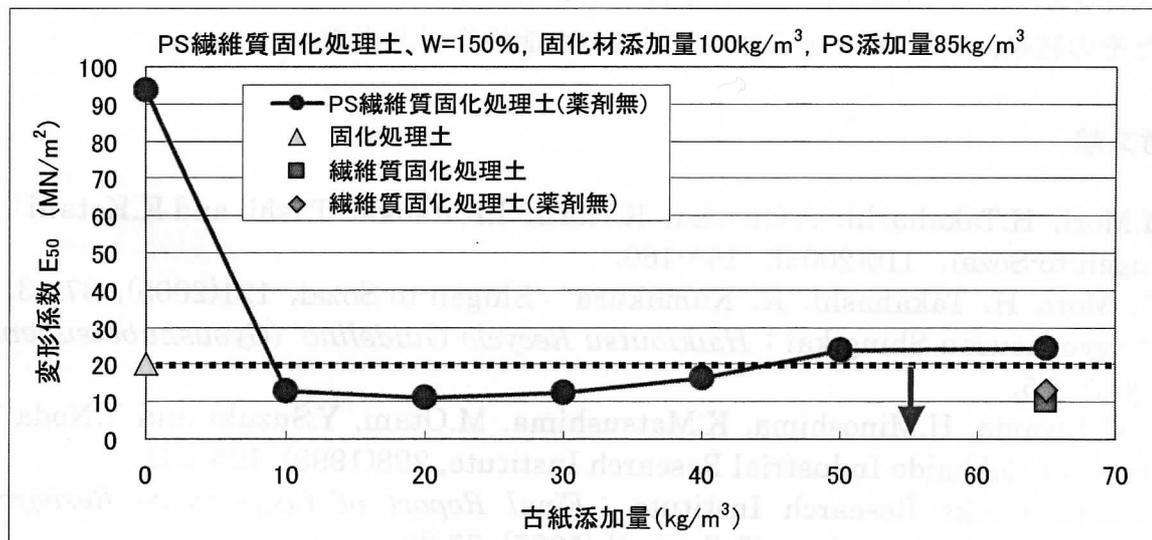
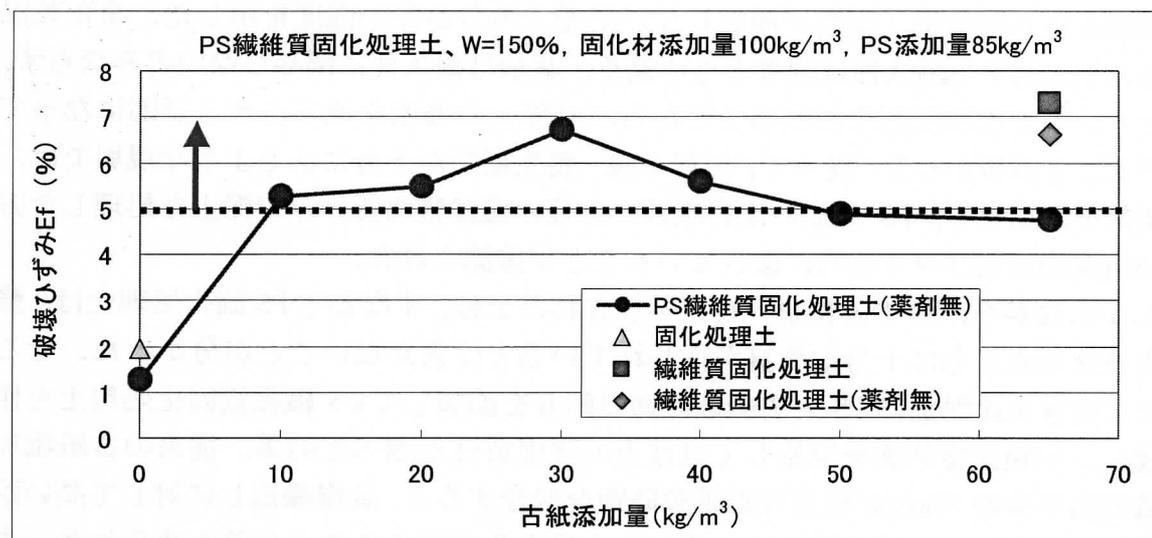
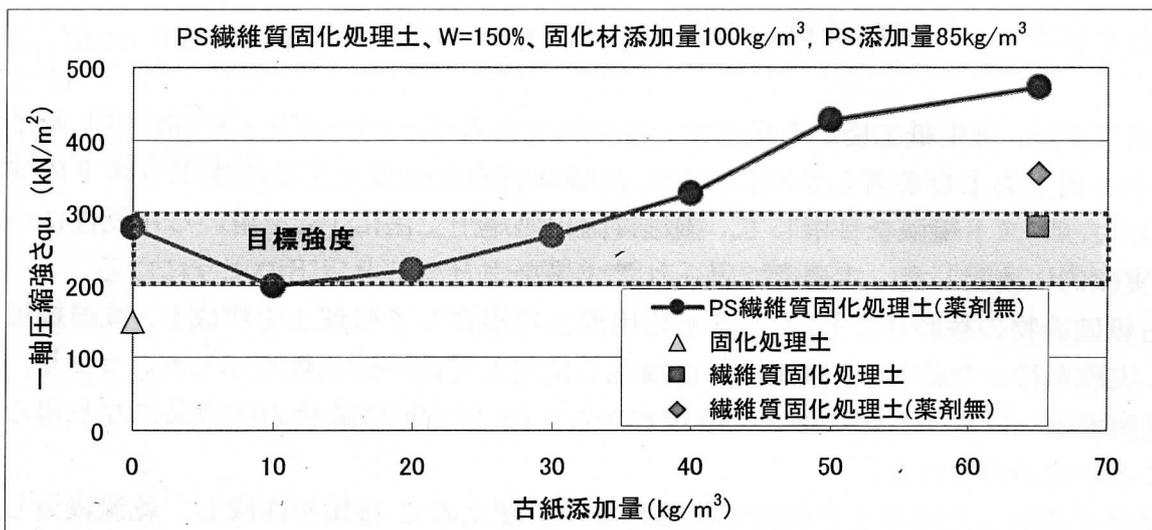


Fig-13 Relationship among addition rate of paper debris, unconfined compressive strength, failure strain and coefficient of deformation (water content = 150%)

7. むすび

本研究では、再生紙工場から発生する廃棄物であるペーパースラッジ(PS)のリサイクル率の向上および著者らが既に開発した繊維質固化処理土工法の施工コストの安定化およびコスト削減を目指して、繊維質固化処理土工法に PS を用いる可能性について実験的に検討した。本研究で得られた成果をまとめると以下のようになる。

- 1) 古紙破砕物の代わりに PS を高含水比出泥土に混合して処理土を作成し、乾湿繰返し実験を行った結果、処理土は乾湿繰返しに対して高い耐久性を示した。つまり、乾湿繰返しに対する耐久性という観点から、PS は古紙破砕物の代用品になり得ることが確かめられた。
- 2) 薬剤を添加した処理土と薬剤を添加しない処理土の 2 種類を作成し、乾湿繰返し実験を行った結果、薬剤を添加しない処理土の方が高い強度を示した。また乾湿繰返しに対する耐久性は両者ともに高く、薬剤は耐久性に関与しないのみならず、セメントの水和反応を妨げることから、処理土の強度を低下させる要因になっていることが分かった。従って、仮置き場・養生期間が十分にあるような現場では、薬剤を添加せず、PS あるいは古紙破砕物等の繊維質物質のみで泥土を処理した方が強度的およびコスト的に優れていることが確認された。
- 3) しかしながら、PS のみにより再生処理された土砂、すなわち PS 固化処理土は、強度特性の点からは十分な改質が行われているとは言えないことが分かった。そこで、高含水比泥土に PS と古紙破砕物の両方を添加して PS 繊維質固化処理土を作成し、一軸圧縮試験を実施して処理土の強度特性を調べた結果、従来の古紙添加量の約半分の $30\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の古紙破砕物を混合すると、乾湿繰返しに対して高い耐久性を示し、かつ強度特性にも優れた土砂を生成できることが確かめられた。またその結果、約 75% の施工コスト削減の可能性を示し得た。

参考文献

- 1) M.Mori, H.Takahashi, A.Ousaka, K.Horii, I.Kataoka, T.Ishii and K.Kotani : Shigen-to-Sozai, 119(2003), 155-160.
- 2) M. Mori, H. Takahashi, K. Kumakura : Shigen-to-Sozai, 121(2005), 37-43.
- 3) Sangyo Kouzou Shingikai : *Haikibutsu Recycle Guideline (Gyoushubetsuhen)*, (2003), 4-5.
- 4) T.Uchiyama, H.Minoshima, K.Matsushima, M.Otani, Y.Suzuki and Y.Noda : Report of Hokkaido Industrial Research Institute, 298(1999), 125-132.
- 5) Public Works Research Institute : *Final Report of Cooperative Research (Kensetsuodeikairyoudo no Taikyusei)*, (1997), 77-82.
- 6) Japan Cement Association: *Jibankairyō Manual(2nd. Edition)* (Gihoudo Press Co.Ltd., 1999), 154-157.
- 7) Advanced Construction Technology Center : *Kensetsuodei Recycle Shishin* (Taisei Shuppan Co.Ltd, Tokyo, 1999), 41-43.

- 8)G. Kuno : *Tsuchi no Ryudouka shorikouhou*(Gihoudo Press Co. Ltd. , 1997),
73-74.
- 9) *ibid* 6), 139-140.
- 10) *ibid* 7), 158-159.

資 料

(学会誌掲載論文・国際会議 Proceedings など)

本報告書収録の学術雑誌等発表論文は本ファイルに登録しておりません。なお、このうち東北大学在籍の研究者の論文で、かつ、出版社等から著作権の許諾が得られた論文は、個別に **TOUR** に登録しております。