繊維質固化処理土の動的強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC STRENGTH OF FIBER-CEMENT-STABILIZED SOIL

高橋　弘[1]・高橋 研太[1]・森　雅人[2]

Hiroshi TAKAHASHI, Kenta TAKAHASHI and Masato MORI

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

E-mail: htaka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

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

E-mail: metr@vega.ne.jp

***Key Words**: dynamic strength, fiber-cement-stabilized soil, liquefaction, pore water pressure*

1．はじめに

日本では古来より大きな地震が多発し, 深刻な地震被害を受けてきている．近年では 1995 年の兵庫県南部地震を筆頭に, 2003 年の十勝沖地震, 2004 年の新潟県中越地震, 2007 年の新潟中越沖地震など，深刻な地震災害が相次いで発生している. 地震による地盤の被害は大きく 2 つに分類される．1 つは地盤の液状化による被害である．液状化とは，地震によって地盤が振動することで，土中の間隙水圧が上昇し，土粒子構造が破壊され，地盤が液体状になる現象である．もう 1 つは，地盤の振動による土の強度低下に起因した斜面の滑り・破壊による被害である.

ところで，2003 年 9 月に発生した十勝沖地震では，下水道管渠やマンホールの浮上がり, 管渠埋戻し部の路面沈下など下水道施設に多大な被害が報告されているが, 十勝沖地震による下水道施設の被害状況に関する現地調査では, 改良土を埋戻し材として使用した箇所では被害が少ないなど，改良土の有効性が指摘されている[1)].

従来の液状化対策としては, 密度を増大させ土粒子骨格を強固にする密度増大工法, 薬剤により地盤を固化させる固結工法，液状化しにくい粒度の材料を用いる置換工法, 液状化の原因となる水分含有量を減らす地下水位低下工法，間隙水圧を抑制・消散させる間隙水圧消散工法などが挙げられるが[2)]，上述した埋め戻し土に改良土を使用した事例は固結工法の 1 つであると考えられる.

ところで，著者らは既に，高含水泥土のリサイクル率向上を目指して，新しい再資源化処理工法である「繊維質固化処理土工法」を開発した[3)]．この工法は，高含水泥土に古紙破砕物および高分子系改良剤などを混合することにより，脱水工程を施すことなく，良質な土砂に再資源化する工法である．これまでの研究により，本工法で生成される土砂，すなわち繊維質固化処理土は，従来の固化処理土に比べて破壊強度および破壊ひずみが大きく，乾湿繰返し・凍結融解に対して高耐久性を有することが確認されており[4)]，地震に対しても高い強度(動的強度)を有していると推察されている．ただし，従来の研究では静的強度のみについて検討されており, 動的強度については明らかになっていない.

一方，ライフラインを開削工法で埋設する工事では，掘削土砂を自走式土質改良機により改質し, 現場で埋め戻し材として再利用する事例が増えてきているが，この際，掘削土砂に古紙などの繊維質物質を混合すると, 単なる掘削土砂の再資源化ではなく，より耐震性の高い埋め戻し材として再利用できる可能性がある．しかし，掘削土砂に繊維質固化処理土工法を適用し, 処理土の動的強度について検討した例は見られない.

そこで本研究は，繊維質固化処理土の動的強度に関して実験的に検討を行うとともに，掘削土砂に対しても繊維質固化処理土工法を適用し, 処理土の動的強度について実験的に検討し, 耐震性地盤材料としての可能性について考察することを目的とする.

2．繊維質固化処理土工法

繊維質固化処理土工法の原理を簡単に記述すると以下のようになる.

①高含水比泥土は，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くことができるため，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．例えば含水比が 100%の場合，添加する古紙破砕物の量は 50kg/m^{3}である．

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(無機系凝集剤)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(図-1(d))．

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場合，ある程度の強度を必要とするため，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．

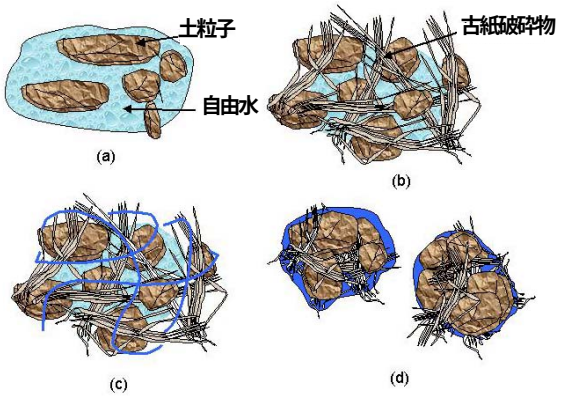

図-1 繊維質固化処理土工法の原理

3．繰返し非排水三軸圧縮試験

土の動的強度を評価する方法として一般的に用いられている試験に繰返し非排水三軸圧縮試験がある．この試験は非排水状態にある円柱形の供試体の側面方向から一定の拘束圧をかけ，軸方向に繰返し荷重を加えることで，供試体中の間隙水圧の上昇具合を測定し，土の動的強度を評価するものである．地震時における土砂の挙動を正確に再現しているとは言い難いが，広く使用されている信頼性の高い試験方法である．

評価方法としては地盤工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法」[5]が一般的に用いられているが，本研究においては，試験に割く労力・時間を大幅に削減することができることから，定ひずみ制御繰返し三軸試験[6]によって動的強度を評価した．

(1)実験装置

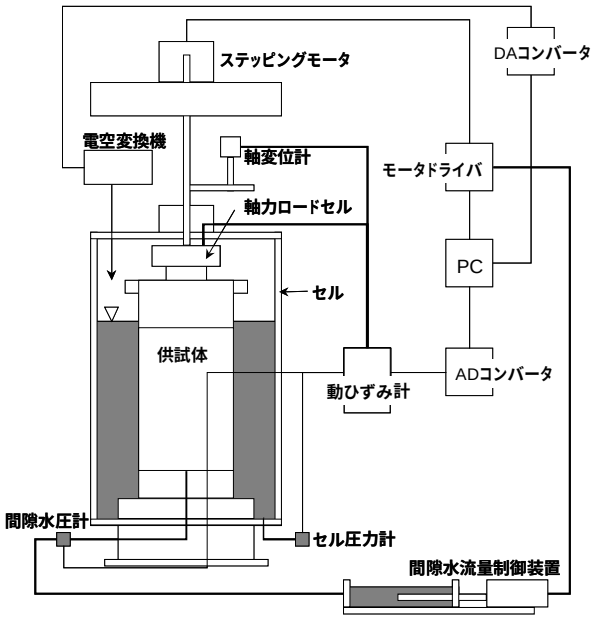

図-2 実験装置および計測システムの概略

図-3 セル内に供試体を設置した状態

図-2 に繰返し三軸圧縮試験機と計測システムの概略図を示す．この図に示されるように，本システムは三軸試験機，間隙水流量制御装置，パーソナルコンピュータ(PC)などから構成されている．図-3 に供試体を設置した状態を示すが，供試体寸径は直径 5cm×高さ 10cm である．

セル内へ加圧される空気圧は，PC から出力した信号を DA コンバータを介して電空変換機に入力することによって加圧される．軸ひずみの載荷はステッピングモータの回転を直動運動に変換して行った．またステッピングモータの制御はモータドライバを用いて行った．背圧載荷および圧密制御を行う間隙水流量制御装置への信号は，モータドライバを介して入力される．軸ひずみ・軸応力・間隙水圧・セル圧はそれぞれ軸変位計・軸力ロードセル・間隙水圧計・セル圧力計からの信号を動ひずみ計および AD コンバータを介してデジタルデータとして PC に取り込んだ．な

お，サンプリング周波数は約 20Hz である．

(2)実験試料および供試体作成条件

繰返し三軸圧縮試験に使用する試料は，後述する各々の土砂を電気炉で含水比ゼロまで乾燥させ，その後，加水して所定の含水比に調整し，模擬汚泥および模擬掘削土砂試料を作成した．供試体の作成には，直径 5㎝×高さ 10㎝の標準的なモールドを用い，3 層に分けて締固めを行った．

表-1 供試体作成のための配合条件

試料番号	土砂	含水比 [%]	改良剤 [kg/m^3]	助剤 [kg/m^3]	固化材 [kg/m^3]	古紙 [kg/m^3]	養生期間
N1	模擬汚泥	105	―	―	80 (ｾﾒﾝﾄ)	―	28 日
N2			1.2	8.6		50	
N3	山砂	10	―	―	―	―	―
N4			―	―	3wt%※ (生石灰)	―	28 日
N5		60	―	―		35	
N6			―	―	40 (ｾﾒﾝﾄ)		

※ wt%：質量パーセント

本実験では，表-1 に示すように 6 種類の条件を設定した．供試体 N1，N2 は建設汚泥の再資源化を想定したものである．つまり N1，N2 は，建設現場から発生した汚泥を改質し，埋め戻し土や被覆土として使用することを想定している．汚泥としては，実際の汚泥ではなく，模擬汚泥を用いた．模擬汚泥は粘土とシルトを乾燥質量比 4:6 で混合し，加水して作成した．なお，含水比は 105%とした．N1 は従来のセメント系固化材のみを添加した固化処理土に相当する．N2 は繊維質固化処理土である．

N1 の供試体は，含水比 105%に調整した模擬汚泥に表-1 に示した量のセメント系固化材を混合し，20℃±1℃で 3 日間初期養生した後に 1㎝角程度に解きほぐしを行い，さらに 20℃±1℃で 1 週間養生した後にモールドを用いて供試体を作成した．その後，供試体を 20℃±1℃で 28 日間養生した後に繰返し三軸圧縮試験を実施した．N2 の供試体は，N1 と同様に含水比 105%に調整した模擬汚泥に表-1 に示した量の古紙破砕物，高分子系改良剤およびセメント系固化材を混合して 20℃±1℃で 3 日間養生した．繊維質固化処理土は小さく団粒化するのが特徴であるため，固化処理土のような解きほぐしの工程が不要である．そこで，3 日間の初期養生後に直ちにモールドを用いて供試体を作成し，その後，20℃±1℃で 28 日間養生した．

一方，供試体 N3～N6 は，掘削現場で発生した掘削土砂を現場で再資源化し，埋め戻し土として使用することを想定したものである．掘削土砂を模擬するため市販の山砂を使用した．N3 は自然含水比状態の山砂であり，掘削土をそのまま埋め戻し土として使用することを想定している．N3 に関しては養生等を行わず，そのまま供試体を作成して繰返し三軸圧縮試験を行った．N4 は自然含水比状態の山砂に生石灰を乾燥質量比で 3%添加した．これは掘削土に生石灰を添加して改質するホットソイル工法[7]を想定したものである．N5 および N6 は，掘削土砂に繊維質固化処理土工法を適用したものに相当する．ただし，N5 と N6 では固化材の種類と添加量が異なっている．

N5 は自然含水比状態の山砂に加水して含水比を 60%まで上げてから古紙を添加し，生石灰を添加したものである．古紙を混合するためにはある程度の高い含水比が必要である．一方，含水比を高くし過ぎると，処理コストの増大につながるため，処理コストの面からは低い方がよい．本研究ではこれまでの研究を考慮し，含水比を 60%とした．

ところで，通常の繊維質固化処理土工法では，高分子系改良剤と助剤(無機系凝集剤)を添加する．これらの薬剤を添加することにより，処理土が即時運搬可能な状態になるが，即時運搬が必要ない場合は，これらの薬剤の添加は逆に処理土の強度を低下させるという報告[8]もある．よって，仮置き場や養生期間が確保されているような現場では，薬剤を添加しない方がコスト的に望ましい．そこで N6 に対しては薬剤の添加は行わず，古紙破砕物および固化材を混合した後に 3 日間初期養生を行い，その後，モールドを用いて供試体を作成した．

4．実験結果および考察

供試体 N1～N6 を用いて繰返し三軸圧縮試験を行った結果を図-4 ないし図-9 に示す．それぞれの図において波線が過剰間隙水圧の時間変化を表している．なお，初期有効応力の値(100%近傍)も併せて示した．過剰間隙水圧の値は，間隙水圧計により計測した．また初期有効応力は，セル圧力計により計測されるセル圧から載荷を加える前の状態の間隙水圧の値を引くことで算出した．過剰間隙水圧の波形は，供試体へ加えられる軸荷重の波形に対応している．

過剰間隙水圧が初期有効応力に近づくことは，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，過剰間隙水圧の値が上昇すればするほど，液状化状態に近づいており，その供試体の土は液状化しやすい，すなわち動的強度が低いと評価できる．逆にほとんど過剰間隙水圧が上昇しない供試体の土は液状化し難い，すなわち動的強度が高いと評価できる．

図-4 ないし図-9 の状態では比較評価を行うのが難しいため，図-4 ないし図-9 におけるそれぞれの過剰間隙水圧の波形の最大値がそれぞれの初期有効応力値に対してどれだけ上昇したかを百分率で求め，その結果を図-10 に示した．図-10 においては，値が高ければ低い動的強度を有すると評価され，逆に値が低ければ高い動的強度を有すると評価される．

まず建設汚泥の再資源化を考慮した供試体 N1，N2 について比較・検討する．図-10 からいずれも高い動的強度を

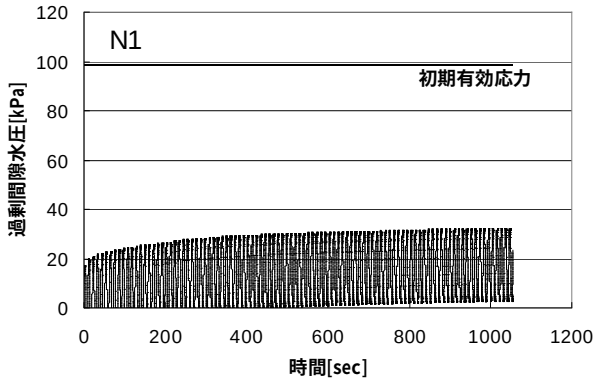

図-4 過剰間隙水圧の時間変化(試料N1)

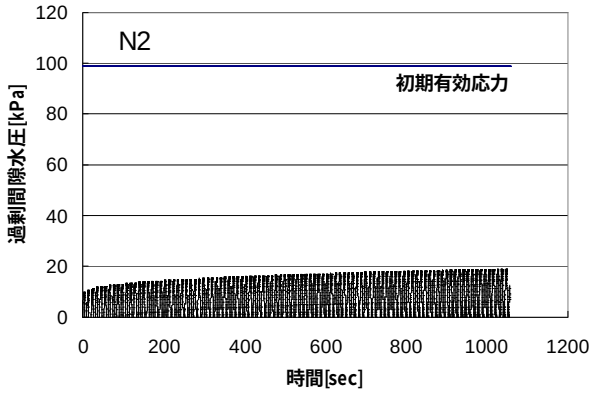

図-5 過剰間隙水圧の時間変化(試料N2)

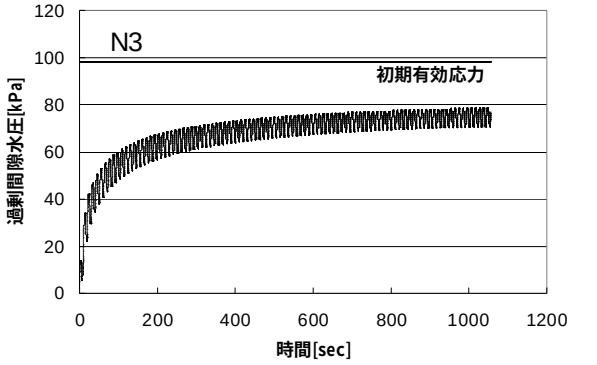

図-6 過剰間隙水圧の時間変化(試料N3)

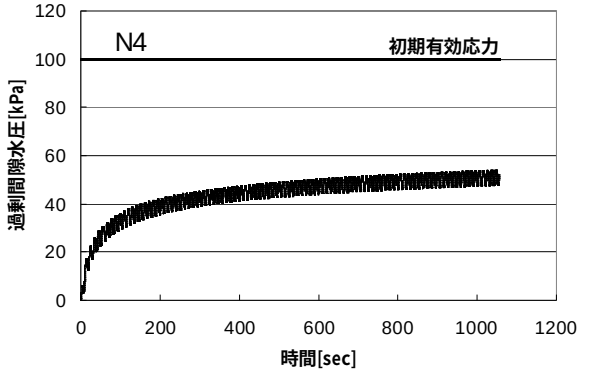

図-7 過剰間隙水圧の時間変化(試料N4)

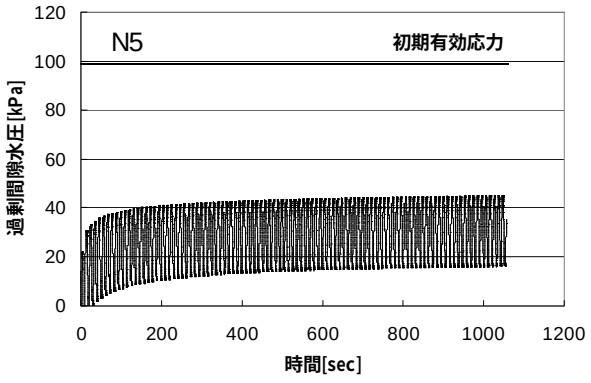

図-8 過剰間隙水圧の時間変化(試料N5)

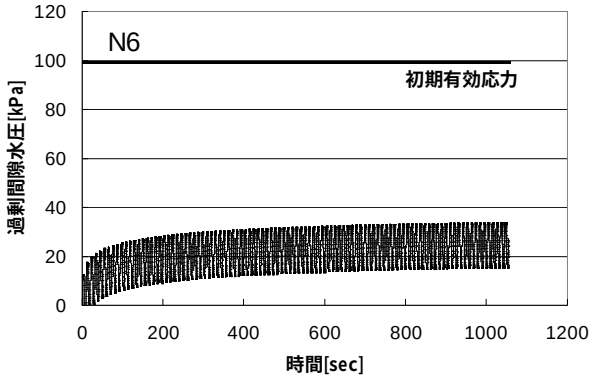

図-9 過剰間隙水圧の時間変化(試料N6)

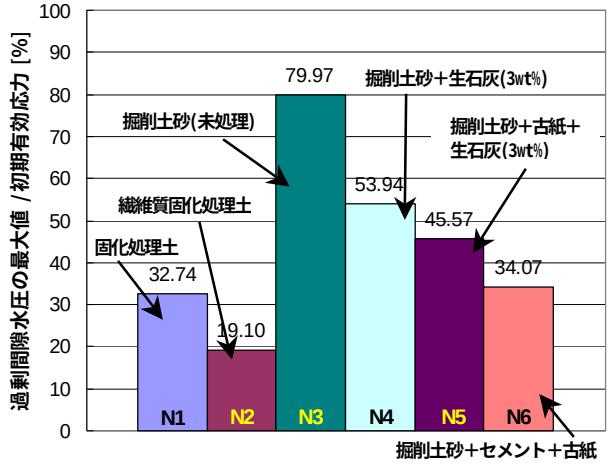

図-10 各試料の「過剰間隙水圧/初期有効応力」の値の比較

有していると判断でき，これはセメント系固化材の効果が大きいためと考えられる．しかしながら，繊維質固化処理土のN2の方が固化処理土のN1よりも値が低く，より高い動的強度を有していることが分かる．過去の研究で，高分子系改良剤と助剤は処理土の強度には影響を及ぼさないことが確認されている[8]．従って，これは，繊維質を加えたことにより，繊維質物質と土粒子が複雑に絡み合う構造をとることで，土粒子間構造がより堅固になったためと考えられる．

次に，供試体N3～N6について比較・検討する．図-10から現場の掘削土に何の処理も施さず，そのまま使用する

ことを想定したN3はかなり動的強度が低いことが分かる．しかし掘削土砂に生石灰を加えたもの，すなわちホットソイル工法で処理した土砂による供試体N4はN3に比べ大きく動的強度が向上している．つまり3%程度の生石灰添加でも，動的強度が大きく改善されていることが分かる．さらに繊維質物質を混合させやすくするために掘削土砂に加水してから生石灰および繊維質物質を混合したN5はN4に比べてさらに動的強度が向上していることが分かる．繊維質物質が土粒子と絡み合い，土粒子間構造を堅固にしたためであると考えられる．さらに固化材としてセメント系固化材を添加したN6はさらに動的強度が向上している．生石灰はセメントと比較すると高価なものであり，実際の現場においてはN6の条件が動的強度の観点からもコストの観点からも望ましいと言える．つまり現場での掘削土砂を再利用する場合は，掘削土砂に加水して繊維質物質とセメント系固化材を混合する処理が，動的強度の向上という観点からは最も適しているということが本実験により明らかになった．

ところで，図-7と図-8を比較した場合，供試体N4とN5は過剰間隙水圧の波形の振幅が大きく異なっていることが分かる．この理由として考えられるのが「ダイレイタンシー」である．液状化のメカニズムは，地震等の揺れにより土粒子同士のかみ合わせが破壊されることで土全体が縮まろうとし間隙水圧が上昇することで発生する．そのため緩い土ほど土粒子同士のかみ合わせが壊れやすいため液状化しやすい．一方，密な土砂や改良土は地震の揺れで土粒子同士のかみ合わせが外れにくくなっており，外れたとしても土粒子は近くの粒子に乗り上げるような挙動を示し，土全体では膨らむような挙動を示す．このように密な土砂にせん断力が加わって土砂が膨張する現象をダイレイタンシーというが，ダイレイタンシーが生じると間隙水圧は減少する．しかしながら，密な土砂や改良土であっても繰返しせん断を加えると強固な構造が徐々に壊れて全体として過剰間隙水圧は上昇する．しかし，もともと持っているダイレイタンシーの特性があるため過剰間隙水圧が大きな振幅をもって振動するような挙動が現れると考えられる．つまり初期有効応力に対する過剰間隙水圧の最大値が同程度であっても，過剰間隙水圧の振幅が大きいもののほうが高い動的強度を有すると考えられる．実際，図-10において高い動的強度をもつと評価された供試体N1，N2，N5，N6に対応する図-4，図-5，図-8，図-9を見ると過剰間隙水圧の振幅は大きくなっている．

5．むすび

著者らが開発した高含水比泥土の新しい再資源化工法である繊維質固化処理土工法により生成される土砂，すなわち繊維質固化処理土は，破壊ひずみおよび破壊強度が大きく，乾湿繰り返し・凍結融解に対する耐久性が高いことから，高い耐震性を有していると推察されていたが，動的強度については明らかにされていなかった．そこで，本研究では，繊維質固化処理土の動的強度について実験的に検討した．その結果，繊維質固化処理土は，従来の固化処理土よりもさらに高い動的強度を有していることが確認された．

また掘削現場から排出される掘削土砂は，既にホットソイル工法などにより現場で改質され，埋め戻しに使用されているが，改質の際に繊維質物質を添加・混合すると，動的強度が大きく増大することが確かめられた．すなわち，繊維質混合の有効性が確認されたが，繊維質混合によりコストも増加するため，今後は十分な動的強度を確保するための最小古紙添加量などについて検討する必要がある．

なお，本研究を遂行するに当たり，東北大学風間基樹教授より有益なるご助言を頂いた．付して謝意を表する．

参考文献

1)藤生和也，行方馨，田村敬一，佐々木哲也，石原雅則：平成15年十勝沖地震による下水道施設の被害状況に関する現地調査，月刊下水道 Vol.26 No.14 pp.39-44.
2) 土質工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで，pp.124-174.
3) 森雅人・高橋弘・逢坂昭治・堀井清之・片岡勲・石井知証・小谷謙二：故紙破砕物と高分子系改良剤を用いた新しい高含水比泥土リサイクル工法の提案と繊維質固化処理土の強度特性，Journal of MMIJ，Vol.119，No.4-5，pp.155-160，2003.
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，Journal of MMIJ，Vol.121 No.2-3，pp.37-43，2005.
5)地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp.421-450，2000.
6)風間基樹，柳澤栄司，増田昌昭：定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性，土と基礎，Vol.46，No.4，pp.21-24，1998.
7)ホットソイル工法ホームページ：http://www.hotsoil.com/.
8)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，Journal of MMIJ，Vol.122，No.6-7，pp.353-361，2006.

（2008．5．16受付）