招待論文

流動化処理土の力学特性と今後の課題

MECHANICAL PROPERTY OF LIQUEFIED STABILIZED SOIL AND FUTURE ISSUES

木幡 行宏¹

Yukihiro KOHATA

¹ 正会員 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

E-mail: kohata@news3.ce.muroran-it.ac.jp

Key Words : *liquefied stabilized soil, recycling, strength and deformation property, fiber reinforced material, aseismatic performance, ductility*

流動化処理土は、各種構造物の裏込めや地中構造物の埋戻しの際に適切な締固めができない場合に対して建設発生土を有効に利用するために開発されたものであり、締固めが不要で適度な流動性を持たせた泥状の土に固化材を適量に混合して固化効果を期待することが基本概念である。近年、社会的に再資源化が大きな時流となり、都市部で流動化処理土が広く利用されるようになってきた。本論文では、流動化処理土の実績と動向を概観し、埋戻し材として用いられる低強度の流動化処理土とシールドトンネルのインバート材に用いられる流動化処理土の力学特性を概説するとともに、靱性を改善して耐震性を向上させるために繊維質材料を流動化処理土に混合した繊維材混合流動化処理土の力学特性を述べる。また、今後の流動化処理土における課題について述べる。

1. まえがき

近年、経済成長の発展に伴い、産業廃棄物の発生量が增大するとともに質的にも複雑化してきていることから、環境問題が深刻化し、各種廃棄物・産業副産物の排出量を減らすために建設リサイクル法の制定と廃棄物処理法の改正が行われるなど、社会的にもこれらの再資源化、リサイクルが大きな時流となっている。このような状況の中で、地盤工学の分野においては多様な産業副産物に対する様々な有効利用手法が模索されており、主として地盤の補強材としてポリエステル繊維（例えば 1）やプラスチック片（例えば 2,3）を混合したセメント安定処理土の強度・変形特性に関する研究などが行われており、新たな知見が得られている。また、掘削残土の有効利用としては、残土処分地の確保や埋戻し用山砂の入手など、制約条件が厳しい都市の建設現場で発生した土砂にセメント等の固化材を混合して再び埋戻し材として利用する等の流動化処理工法が広く取り入れられるようになってきている⁴⁾。しかし、流動化処理土には、セメント系安定処理土と同様に強度が増加するのに伴って脆性的な挙動を示し耐震性能の低下が生じる恐れがあること、固化材による強度の増加は再掘削が必要な箇所への適用を困難にする恐れがあること等の指摘がなされている。したがって、埋戻し材としての流動化処理土について、脆性的な力学挙動を改善し靱性の向上をはかることは重要な課題である。

本論文では、まず、土質材料にセメントを混合して土質改良を行うという観点から従来のセメント系改良土と流動化処理土の違いを示し、流動化処理土の施工実績と動向について概観する。次に、埋戻し材として用いられる低強度流動化処理土とシールドトンネルのインバート部に用いられる高強度流動化処理土の力学特性について概説した後、流動化処理土の耐震性向上を目的に、流動化処理土に繊維質材料として粉碎した古紙を混合する方法で作製した繊維材混合流動化処理土の力学特性について論じる。最後に、今後の流動化処理土における課題について述べる。

2. 流動化処理土の実績と動向

わが国では昭和 30 年代から、軟弱な地盤の改良を主目的に、石灰安定処理や瀝青安定処理あるいはソイルセメントと呼ばれるセメント安定処理などにより、高含水比の軟弱な土を団粒化し良質な地盤材料に改良して締固めを行うことにより道路や鉄道の路床、路盤などに対する浅層地盤改良が行われてきた。また、昭和 40 年代後半からは、港湾施設や高速道路の建設工事に伴い、軟弱な粘性土地盤にセメントを機械的に強制攪拌混合するセメント系安定処理工法が開発され、昭和 50 年代に深層混合処理工法が実用化された⁵⁾。昭和 60 年代には、セメント系改良土を用いる工法として深層

混合処理工法が体系的にほぼ完成されたものとなり、研究対象となる事例が数多く報告されている。平成元年以降、セメント系改良土を用いる工法として事前混合処理工法が開発された⁶⁾。この工法は、土砂等にあらかじめ少量のセメント系安定材を混合し、所定の場所に運搬して打設し、そのままの状態安定した埋立地盤を造成する工法である。主として人工島建設に多く用いられている（例えば、東京湾横断道路における川崎人工島や木更津人工島の建設）。事前混合処理工法は、スラリー系とドライ系に分類され、土質材料として砂質土を用いる場合が多いが、スラリー系では、砂質土のほか、泥岩スラリー、石炭灰、火山灰なども用いられる。

一方、流動化処理土は、土質材料にセメントを添加・混合して改良地盤を造成するという点では、セメント系改良土のひとつに分類されるが、その開発コンセプトは大きく異なる。すなわち、従来のセメント系改良土による浅層混合処理工法、深層混合処理工法、事前混合処理工法は、軟弱地盤や液状化防止対策としての地盤改良工法あるいは構造物の基礎、盛土の安定、土留め擁壁への適用、掘削時の安定性の確保などへの適用、さらには人工島の埋立、ケーソン等の護岸背後の裏埋工、海中盛土工などの工法として用いられてきたのに対し、流動化処理工法は、主として地下鉄や埋設管などの地中構造物の建設の埋戻しで締固めを伴う山砂・水締めという従来の埋戻し工法に替わるもので、締固め不要な「土のコンクリート工」として開発されたものである。また、原地盤にセメントを強制攪拌混合するのではなく、事前に土質材料とセメントを混合しスラリー状にして埋戻すという点では、スラリー系の事前混合処理工法と同様であるが、事前混合処理工法では、主として良質の砂質土を用い、流動性が小さいのに対し、流動化処理工法では、掘削発生土という必ずしも良質ではない土質材料を用いること、すなわち、より軟弱で高含水比な泥状土の密度を調整して適度な流動性を持たせ、長距離圧送や隙間への充填性を考慮している点が異なる⁷⁾。

流動化処理工法は、平成5年～8年の4年間、建設省総合技術開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」の一環として、当時の建設省土木研究所と日本建設業経営協会中央技術研究所によって実施された流動化処理土の利用技術に関する共同研究により、流動化処理工法の効用とその実用性の第一段階の確認を実施している⁸⁾。プロジェクト終了後、平成9年に、この共同研究に参画した企業を中心に「流動化処理工法研究機構」が設立され、一般に広く使用されるようになってきた。図-1に平成6年～平成16年までの流動化処理土の施工実績を示す⁹⁾。この11年

図-1 流動化処理土の施工実績⁹⁾

間で、総施工量は約 310 万 m³ に達し、平成 10 年以降の年間施工量は平均で 40 万 m³ 程度で推移している。

流動化処理土の適用用途は、地下鉄開削部や共同溝あるいは地中埋設管や建築基礎の狭隘箇所等の埋戻し、建築基礎地盤や路面下の空洞充填や廃坑の充填、橋台などの構造物の裏込め、さらには地下鉄複線シールドトンネルのインバート部への充填など、適用範囲は広がる傾向にあるが、平成6年～平成16年の総施工量の約 50%は、地下鉄工事に伴う需要によるものである⁹⁾。

流動化処理土の利用が拡大してきた理由のひとつに、国の循環型社会政策が挙げられる。すなわち、これまで豊かな社会を支えるために大量生産・大量消費・大量廃棄システムを継続してきたが、狭い国土のわが国は、廃棄物の最終処分場のひっ迫などの環境制約、将来的な鉱物資源の枯渇に対する懸念などの資源制約といった問題に直面し、廃棄物・リサイクル問題が社会的に大きくクローズアップされた。平成12年には、基本的枠組み法として循環型社会形成推進基本法が施行され、一連の廃棄物・リサイクル法体系が順次整備された。特に、建設分野では、建設リサイクル法（建設工事に係る資材の再資源化に関する法律）が制定され、また、廃棄物処理法の改正によって、建設発生土の再利用の促進が図られたため、掘削発生土の有効利用に適した流動化処理工法が広く用いられるようになったと考えられる。

図-1を見ると、平成14～16年の施工実績はわずかに減少傾向にあるが、今後の動向として、掘削工事の

埋戻しが発生する箇所では、流動化処理土の利用がさらに増加する傾向にあると思われる。これは、国土交通省において平成 14 年に通達された「建設リサイクル計画 2002」で国の直轄工事では建設発生土を積極的に利用することが謳われており、平成 15 年には「建設発生土等の有効利用に関する行動計画」が示され、この中で具体的な目標指標として利用土砂の建設発生土利用率（＝（土砂利用量のうち土質改良を含む建設発生土利用量）/土砂利用量）を、平成 17 年度には 80%（平成 12 年度実績、62%）、平成 22 年度には 95%という数値目標を掲げていることから推察される。なお、流動化処理工法は、平成 15 年にグリーン購入法特定調達品目に建設汚泥再生処理工法として認定された。

一方、流動化処理工法に関する取扱い方法などのマニュアル類の整備も進んでいる。平成 9 年に建設省土木研究所で「流動化処理土利用技術マニュアル」が刊行され、流動化処理土の用途別要求品質が示された。その後、各地方自治体における建設発生土のリサイクルガイドラインや利用技術指針などが順次整備されている。また、平成 17 年には(財)鉄道総合技術研究所から「鉄道構造物に用いる流動化処理土の設計マニュアル」が刊行された。

近年、セメント系固化材による改良土では、対象土質や配合条件により、土壤環境基準（0.05 mg/l）を超える六価クロムの溶出が認められる場合が報告され、平成 12 年 3 月には旧建設省、旧運輸省、農林水産省などから「セメントおよびセメント系固化材の地盤改良への使用及び改良土の再利用に関する当面の措置について」の通達が出され、その後、平成 13 年 4 月には国土交通省より「セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験要領（案）の一部変更」が通達された。これにより、セメント系固化材を使用する場合には、事前に溶出試験を実施し、六価クロムの溶出量を確認することが行われるようになった。前述のように、大きな視点で見ると、流動化処理土はセメント系改良土のひとつに分類されることから、流動化処理土を利用する場合についてもセメント系固化材による改良土と同様、環境へ与える影響が問題となってきた。また、適用箇所によっては、永久構造物となることから、長期安定性の問題も指摘されている。

これらの問題は、最近、特に注目されはじめた事項で

あり、この分野における今後の研究成果が待たれるところである。したがって、本論文では、筆者が行ってきた研究を中心に、かなりの部分で明らかになってきた流動化処理土の力学特性について論じるものである。

3. 流動化処理土の力学特性

本来、流動化処理土は、各種構造物の裏込めや埋設物の埋戻しで十分な締固めが行えないような場合に、建設発生土を使用可能なようにするために開発されたものである。現地で利用できない土には、細粒分を多く含み、高含水比の場合が多く、固化材を添加して作製される流動化処理土の密度が小さくなることが懸念される。このような流動化処理土は、水と固化材によるセメンテーションによって構造骨格が保たれていると考えられ、乾燥すると極めて脆い地盤材料になってしまうので、地下水で浅く乾燥するような箇所での使用には適さない。基本的には、東京湾横断道路で使用されたセメント改良工法のうちのスラリー系の事前混合処理工法^{10),11)}に似たような性質を持つと考えられる。

本章では、横浜市のみなどみらい線建設における開削トンネルの埋戻しを目的として作製された低強度流動化処理土およびシールドトンネルのインバート材としての利用を目的として作製された高強度流動化処理土の力学特性について述べる。

(1) 低強度流動化処理土の三軸せん断特性

低強度流動化処理土は、開削トンネル等の埋戻し材として用いるものである。埋戻し材は、再掘削が行われる可能性があることから、一軸圧縮強さを 490 kPa 以下に設定される場合が多い。以下に、低強度流動化処理土の三軸せん断特性について述べる^{12)–15)}。

試験に用いた現場発生土は、シルト質粘性土であり、多数の貝殻等を含んでいるため、泥水を作製する際に 2 mm ふるいで調整した。流動化処理土の作製は、所定の条件（フロー値 200 mm 以上、ブリージング率 1% 以下、一軸圧縮強さ $q_{28} = 196 \sim 490$ kPa）による配合試験結果に基づいて¹²⁾、設計泥水密度を 1.2 g/cm^3 とし、固化材はセメント系固化材一般軟弱土用を用いた。さらに、山砂を添加して流動化処理土の密度を増大させた配合の試料についても検討を加えた。表-1 には、設計

表-1 設計配合の例

配合	泥水密度 (g/cm^3)	処理土密度 (g/cm^3)	粘性土 (kg)	含水比 (%)	水 (kg)	砂 (kg)	含水比 (%)	セメント系 固化材 (kg)	泥水混合比
配合 1	1.20	1.24	541	71.4	636	0	—	59	—
配合 2		1.30	493	65.9	616	132	9.96		8.40
配合 3		1.40	446	65.9	557	338	9.96		2.97

（流動化処理土 1 m^3 当たりの配合設計：内割り）

図-2 三軸試験機の概略図

図-3 軸差応力～軸ひずみ関係

図-4 有効拘束圧～軸ひずみ関係

配合の一例を示す。試験は、図-2に示すように円柱供試体（高さ10 cm，直径5 cm）を用いた三軸試験装置によって49, 98, 196 kPaの拘束圧で，圧密非排水三軸圧縮試験をひずみ速度0.01%/minにて実施した。軸変位測定には，上部キャップの変位を測定する非接触変位計，および供試体上下端面での緩み層（ベディングエラー）の影響を含まない正確な軸ひずみを供試体側面において測定する局所変形測定装置（Local Deformation Transducer）¹⁶⁾をそれぞれ用いた。図-3に，配合1～3

図-5 E_{tan} のひずみレベル依存性

図-6 E_{tan} のせん断応力レベル依存性

の拘束圧 $\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$ での軸差応力～軸ひずみ関係を，図-4にはせん断中の有効拘束圧と軸ひずみの関係をそれぞれ示す。砂の添加量が多いほど，すなわち処理土密度が大きいほど，最大軸差応力 q_{max} が大きい。図-4を見ると，せん断初期からピーク強度に至るまでの過剰間隙水圧の発生が極めて大きく，処理土密度やせん断開始時の有効拘束圧の値にかかわらずピーク強度時（ q_{max} 時）の有効拘束圧はほとんどゼロになっている（後述の図-8参照）。しかし，ピーク強度以降は，有効拘束圧が増加傾向にあり，残留強度がある程度大きくなるため，一軸試験での有効応力状態とは異なってくる。これは，セメント改良土と類似の傾向である¹⁷⁾。図-5には，配合1～3における $\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$ の軸差応力～軸ひずみ曲線の接線勾配から得られた接線変形係数 E_{tan} のひずみレベル依存性を示す。配合1, 2では軸差応力～軸ひずみ曲線の接線勾配である E_{tan} が，軸ひずみ0.05%程度までほぼ一定値を示していることから，軸差応力～軸ひずみ関係は線形的であり，その変形特性は線形性が大きいと言える。一方，配合3では軸ひずみ0.01%程度から E_{tan} が減少傾向を示していることから，軸差応力～軸ひずみ関係は非線形であり，その変形特性は配合1, 2の変形特性に比べて非線形性が増加している傾向にある。図-6は， E_{tan} のせん断応力レベル依存性の比較である。配合1, 2では，ピーク強度

図-7 初期変形係数の拘束圧依存性

図-8 $q_{\max}$ と $q_{\max}$ 時の有効拘束圧の関係

の40%程度まで $E_{\tan}$ の減少率が小さいのに対して、配合3の $E_{\tan}$ の減少率はピーク強度の20%程度以降で大きくなっている。すなわち、配合3のせん断応力レベル依存性は配合1, 2のそれに比べて大きい。図-7は、等方圧密過程で拘束圧49, 98, 147, 196 kPaにおける軸ひずみ 4×10^{-5} レベルでの微小な繰返し载荷を行って得られた初期変形係数 E_0 の拘束圧依存性を示している。 $\sigma'_c = 49 \sim 196$ kPa の範囲での E_0 について見ると、全体的な傾向としては、配合種類によらず E_0 の拘束圧依存性は見られないようである。これはセメント改良土と類似の傾向であり¹⁷⁾、セメントを添加した地盤材料はセメンテーションにより、微小ひずみレベルでの変形特性が弾性的になることを示している。図-8は、 $q_{\max}$ と $q_{\max}$ 時の有効拘束圧の関係である。非排水三軸圧縮試験で得られた $q_{\max}$ の値の範囲は、配合設計で設定した一軸圧縮強さの範囲(196~490 kPa)にほぼ等しい値を示している。これは、ピーク強度状態において有効拘束圧の値がほぼゼロに近い一軸試験と同様な有効応力状態にあるということに対応している。しかし、前述したようにピーク強度以降は、一軸試験での有効応力状態とは異なってくる。

(2) 高強度流動化処理土の繰返し変形特性

高強度流動化処理土は、主としてシールドトンネル

のインバート材に使用されるものである。インバート材としての高強度流動化処理土の研究は、泥水シールドからの発生土を利用したインバート材の開発に関して、強度特性や流動性、耐久性などの検討が報告されているが¹⁸⁾、掘削発生土を利用した高強度流動化処理土の繰返し载荷耐久性などの変形特性については未解明な部分が多い。ここでは、目標とする一軸圧縮強さを1.96, 5.88 MPaとした高強度配合による流動化処理土に対して種々の条件で繰返し载荷を実施した結果について述べる^{19)~20)}。

試験に用いた試料は、シルト質粘性土であり、多数の貝殻等を含んでいるため、泥水を作製する際に2 mm 以下の調整した。流動化処理土の作製は、所定の条件(フロー値200 mm以上、ブリージング率1%以下、処理土密度1.5 g/cm³以上、一軸圧縮強さ $q_{28} = 1.96$ (以下、タイプ20)、5.88 (以下、タイプ60) MPa)による配合試験結果に基づいて固化材はセメント系固化材一般軟弱土用を用いた。実験は、直径30 cm、高さ60 cmの円柱供試体に対する水浸および湿潤状態での一軸繰返し载荷試験(図-9(a), (b))と直径50 cm、深さ30 cmの模型土層による水浸状態での繰返し载荷試験(図-9(c))を実施した。水浸状態での一軸繰返し载荷試験では、供試体の側方が拘束されない状態での载荷試験であるが、実際のインバート部分はセグメントなどにより側方に拘束された状態にあると考えられる。模型土層による水浸状態での繰返し载荷試験は、原位置の応力状態に近いと考えられる模型土槽に高強度流動化処理土を直接、打設することにより側方が拘束されていると考えられる状態での変形特性を把握・検討するために実施した。

実施した一連の試験の载荷条件は、载荷周波数20 Hzの正弦波で、繰返し载荷回数150万回まで繰返し载荷応力の両振幅を98 kPaとして、一定の载荷振幅による繰返し载荷試験(载荷振幅一定)と、所定の繰返し载荷回数に達した後に载荷両振幅を段階的に増加させる繰返し载荷試験(载荷振幅増加)の2種類の試験を実施した。载荷振幅を増加させる荷重ステップは、1~10万回を98 kPa、10万回~50万回を196 kPa、50万回~75万回を294 kPa、75万回~100万回を392 kPa、100万回~150万回を490 kPaの载荷振幅となるように設定した。一般に、有道床軌道の場合、まくら木下面での圧力は98 kPaであるが、道床の剛性が大きくなるほど、まくら木下面での圧力は増大することが知られている。本軌道構造は、まくら木の下に厚さ30 cmのコンクリート路盤が施工される計画であるため、コンクリート路盤下の圧力は、強化路盤の設計に用いる路盤圧力程度と考えてよい。したがって、輪重8.3 t、道床厚25 cm、PC3号まくら木を想定した場合、路盤圧力

(a) 水浸一軸繰返し载荷試験

(b) 湿潤一軸繰返し载荷試験

(c) 模型土槽繰返し载荷試験

図-9 各試験装置の概略図

が 98 kPa を超えるのは、列車速度が 150 km/h であることから、試験で設定した繰返し载荷応力幅は安全側であると考えられる。供試体の試験開始時の材令を 28 日として、水浸状態での試験では水浸開始材令を 24 日に設定した。

図-10 には、タイプ 20 の繰返し試験結果を、図-11 にはタイプ 60 の繰返し試験結果をそれぞれ示す。水浸状態での試験結果を見ると、载荷振幅一定として列車荷重相当の繰返し载荷によって生じる 150 万回での沈下量は、タイプ 60 で 0.11 mm、タイプ 20 で 0.17 mm であり、極めて少ない沈下量である。一方、载荷振幅を増加させる試験では、100 万回以降に载荷振幅を、490 kPa

図-10 タイプ 20 の繰返し試験結果の比較

図-11 タイプ 60 の繰返し試験結果の比較

としたところで沈下量が急激に増大し、最終的に崩壊に至っている。すなわち、図-10 に示すタイプ 20 では、载荷振幅を 490 kPa とすると同時に崩壊に至る結果であり、また、载荷振幅を 392 kPa とした場合にも崩壊の兆候が見られたが、タイプ 60 では、载荷振幅を 490 kPa とすると沈下が進行するものの崩壊には至らなかった。したがって、タイプ 20 の一軸圧縮強さ 1.96 MPa の供試体に対して、392~490 kPa の限界応力を示すと考え、本実験で用いた高強度流動化処理土の変形に対する限界応力は、一軸圧縮強さの 20~25% 程度であると言える。各载荷条件での载荷振幅 98 kPa で 50 万回までに発生する沈下量を比較すると、湿潤状態での沈下量が最も小さく、水浸状態での沈下量は一軸、模型土槽ともに同程度となっている。また、150 万回での沈下量を比べると、湿潤状態での繰返し载荷では、载荷振幅を 490 kPa に設定したにもかかわらず、载荷振幅を 98 kPa で一定とした水浸状態の繰返し载荷試験による沈下量と大きく変わらない。ただし、载荷振幅を 490 kPa では

沈下量の収束傾向が見られないことに注意する必要がある。このことから、高強度流動化処理土の変形特性は、湿潤状態にあれば極めて良好であることがわかる。水浸一軸繰返し載荷試験結果と模型土槽における繰返し載荷試験結果を比較すると、タイプ 20 では、沈下量～載荷回数関係が載荷振幅 294 kPa まではほぼ一致している。タイプ 60 では、模型土槽の繰返し載荷試験において 1～40 万回を 98 kPa で載荷振幅としたため直接的には比較できないが、40 万回～50 万回での沈下量の発生傾向をみると、ほぼ同じであることから、タイプ 20 と同様に、載荷振幅 294 kPa までの沈下量～載荷回数関係はほぼ一致するものと考えられる。

4. 繊維材混合流動化処理土の力学特性

流動化処理土は、セメント安定処理土と同様に固化材添加量を増やして強度を増加させると、脆性的な挙動を示し耐震性能の低下が生じる恐れがある。また、強度の増加は再掘削が必要な箇所への適用を困難にさせる等の指摘がなされている。したがって、種々の土構造物に適用可能で、地震に対して粘り強く耐え得るような地盤材料とするためには、流動化処理土の靱性を向上させることが望まれている。

本章では、靱性の向上をはかる目的で流動化処理土に繊維質材料として粉碎した古紙を泥水に混合することによって²¹⁾、補強効果が期待できる繊維材混合流動化処理土の力学特性について述べる^{22)–24)}。

(1) 配合試験

試験に用いた試料は、均質性を考慮して、物理的性質が明らかになっている市販の粘性土 NSF-CLAY である。表-2 にその物理的性質を示す。また、固化材には一般軟弱土用セメント系固化材を用いた。添加する繊維質材料には細かく粉碎した綿状新聞紙、2 × 10 mm の短冊状に裁断した新聞紙および普通紙を用いた。配合ケースの一覧を表-3 に示す。なお、短冊状新聞紙を添加したケースでは、15 kg/m³ 以上添加すると繊維質材料が団粒状になり均質に混合できなかった。

一軸圧縮試験には直径 50 mm、高さ 100 mm の円柱供試体を用い、養生日数 7, 14, 21, 28 日で試験を行った。なお、軸ひずみの測定には、供試体端面の乱れやゆるみ層のために生じるベディングエラーのない正確なひずみを求めるために局所変形測定装置 (Local Deformation Transducer, LDT) を用いた。綿状新聞紙はシュレッダーにて裁断した後、加水してフードプロセッサにより粉碎したものを炉乾燥することによって作製した。また、本研究では供試体の再現性を高めるために配合時においてパラメータが少なく比較的作製容易な泥水式

表-2 NSF-CLAY の物理的性質

土粒子密度	ρ_s (g/cm ³)	2.762
液性限界	w_L (%)	60.15
塑性限界	w_p (%)	35.69
塑性指数	I_p	24.46

表-3 配合ケース一覧

紙種 添加量	新聞紙		普通紙
	綿 状	短冊状	短冊状
0 (kg/m ³)		○	
5 (kg/m ³)	○	○	○
10 (kg/m ³)	○	○	○
15 (kg/m ³)	○	×	—
20 (kg/m ³)	○	×	○

図-12 配合試験結果

図-13 繊維質材料添加量とフロー値の関係

流動化処理土とした。配合は、28 日養生後の目標一軸圧縮強さ q_u を 180 kPa、流動性の指標であるフロー値を 250 mm として配合試験により決定した。配合試験は、初めに固化材添加量を泥水 1 m³ 当たり 100 kg に設定して行った。その結果、目標強度を満たすことができなかったため、固化材添加量を外割で 200 kg とし泥水密度を変化させ、目標値を満たす泥水密度である $\rho_f = 1.250$ g/cm³ に決定した。配合試験による泥水密度 ρ_f 、フロー値、一軸圧縮強さ q_u の関係を図-12 に示す。図-13 は、繊維質材料添加量とフロー値の関係を

図-14 軸差応力-軸ひずみ関係

示している。綿状新聞紙を添加したケース (○) では、添加量の増加に伴ってフロー値が線形的に減少する傾向を示している。これに対して短冊状新聞紙を添加したケース (◇) および短冊状普通紙を添加したケース (△) では添加量の増加にもかかわらず、フロー値の減少は、概ね見られないようである。この結果より、繊維材混合流動化処理土の流動性には添加する繊維質材料の形状が大きく影響することが考えられ、特に本研究で行った条件では綿状新聞紙の影響が最も大きい。

(2) 一軸圧縮試験による力学特性

図-14 は、繊維材無添加、添加量 10 kg/m³ および 20 kg/m³ の繊維質材料を変化させたケースの軸差応力と軸ひずみの関係を比較したものである。一軸圧縮強度 q_u に注目すると、無添加のケースと比較して、繊維質材料を添加したケースでは添加した繊維質材料の種類によらず、約 10% 大きな強度が得られた。ピーク後は、無添加のケースでは急激に強度が減少し、軸ひずみ 10% 以降では 50 kPa 未満となっているのに対して、短冊状の繊維質材料を添加したケースではピーク直後から強度の減少が見られるものの、その減少量は無添加のケースに比べて小さく、軸ひずみ 10% 以降でも 100 kPa に近い強度を維持している。さらに綿状の繊維質材料を添加したケースでは、ピーク後も軸ひずみ 5% 付近まで強度を維持し、その後緩やかな減少傾向に転じている。また、軸ひずみ 10% に至っても 130~160 kPa の強度を維持している。すなわち、繊維質材料の形状によらず脆性的性質の改善効果は見られるが、特に綿状新聞紙を添加したケースで最も大きい。

写真-1 (a)~(c) は、それぞれ繊維材無添加、綿状新聞紙 (20 kg/m³)、短冊状普通紙 (20 kg/m³) の試験終了時の破壊状況の写真である。写真-1 (a) の無添加のケースでは、鉛直方向に亀裂が生じて破壊に至ったが、

写真-1 供試体の破壊状況

図-15 E_{tan}/E_0 と q/q_u の関係

図-16 E_0 および E_{50} と q_u の関係

写真-1 (b) の綿状新聞紙を添加したケースでは表面に細かいシワ状の亀裂が生じて破壊に至っている。また、写真-1 (c) の短冊状普通紙を添加したケースでは、添加量が等しいにもかかわらず綿状新聞紙のケースとは異なり、細かい亀裂が見られず、斜め方向に明瞭な破壊面が生じている。この明瞭な破壊面は、短冊状新聞紙を添加したケースにも見られることから、破壊性状は添加する繊維質材料の形状によるところが大きいと思われる。また、細かい亀裂が生じた綿状新聞紙を添加したケースの脆性的性質の改善効果が最も大きいことから、この細かい亀裂がせん断面の形成を妨げている状況を示していると考えられる。

図-15 に、接線変形係数 E_{tan} を初期変形係数 E_0 で正規化した E_{tan}/E_0 と、応力レベル q/q_u の関係を示す。 E_{tan}/E_0 はいずれのケースにおいても載荷とともに減少

し、非線形的な関係となっている。繊維質材料の違いによる比較においては明瞭な差は見られない。図-16は、 E_0 および E_{50} と q_u の関係である。繊維質材料の種類によらず E_0 は $1000 \sim 3000 q_u$ (kPa), E_{50} は $500 \sim 1000 q_u$ (kPa) の値を得た。既往の研究では²⁵⁾, LDTを用いて測定したセメント改良土の場合、 E_0 はおよそ $3000 q_u$ (kPa), $E_{50} = 100 \sim 1000 q_u$ (kPa) の関係が報告されており、本研究で用いた繊維材混合流動化処理土も類似の関係となった。

5. 今後の課題と展望

本論文では、流動化処理土の施工実績と動向、流動化処理土と耐震性向上を目的として靱性能を改善した繊維材混合流動化処理土の力学特性について論じた。力学特性に関しては、以下に示す知見を得た。

- (1) シルト質粘性土による低強度流動化処理土に対して圧密非排水三軸圧縮試験を実施し、その力学特性を検討した結果、載荷初期からピークに至るまで過剰間隙水圧が増加して、ピーク時の過剰間隙水圧は拘束圧にほぼ等しくなり、有効拘束圧がほとんどゼロを示すことから、非排水状態での q_{max} は一軸圧縮強さと同程度になると考えられること、ピーク後には過剰間隙水圧が減少し有効拘束圧が増加傾向にあるため、残留強度がある程度大きくなり、一軸試験での応力状態とは異なること等がわかった。
- (2) シルト質粘性土による高強度流動化処理土に対して実施した種々の繰返し載荷試験の結果から、水浸状態での列車荷重相当の繰返し載荷によって生じる150万回での沈下量は極めて少ない沈下量であること、水浸状態での列車荷重相当の繰返し載荷によって沈下が進行しない限界応力は一軸圧縮強さの20～25%程度であること、高強度流動化処理土は、湿潤状態が確保されれば変形性能に対して極めて良好な状態にあること等がわかった。
- (3) 市販の NSF-Clay による低強度流動化処理土に繊維質材を混合した繊維材混合流動化処理土に対して実施した配合試験、一軸圧縮試験の結果から、繊維材混合流動化処理土の流動性は、添加する繊維質材料の形状の影響を大きく受けること、一軸圧縮試験において、繊維質材料の添加量や種類によらず一軸圧縮強さ q_u は無添加のケースに比べて約10%増大するが、ピーク後の脆性的性質の改善効果は綿状新聞紙を添加したケースが最も大きいこと、 E_0 および E_{50} と q_u の関係に及ぼす繊維質材料添加の影響は小さいこと等がわかった。

上記に述べた結果から、流動化処理土の力学特性は、

基本的にはセメント改良土と同様な物性であることから、従来のセメント改良土に対して行われてきた膨大な研究成果を活かして参考にすることができると考えられる。また、流動化処理土に繊維材を混合するとピーク後の応力が急減することなく、非常に粘り強い材料になることが示されたことから、セメント改良土においても繊維材を混合すれば、セメント系改良地盤の耐震性を向上させることが可能であることが示唆された。今後、さらなる応用が期待できるものと考えられる。

一方、東京湾横断道路に用いたセメント改良工法には、4種類の工法が用いられたが、それぞれの工法による地盤の一樣性は、事前混合処理工法（スラリー）、深層混合処理工法（従来）、深層混合処理工法（低強度）、事前混合処理工法（ドライ）の順に高いことが報告されている^{10)–11)}。流動化処理土は、東京湾横断道路に用いた事前混合処理工法（スラリー）による改良土に似て、地盤の一樣性が高いことが予想されるが、一般には、混合過程や盛り立て中に均一に施工されないなどの理由から改良土地盤は非一樣になる恐れがあると言われている。しかし、流動化処理土が実用化されてから10年程度しか経っていないため、実際に施工された流動化処理土地盤に対する詳細な原位置試験の実施報告はあまり見られない。したがって、今後は原位置試験などから非一樣性の程度を詳細に検討する必要がある。

最近では、建設リサイクル法の制定などを受け、石炭灰や鉄鋼スラグなどの再利用として、流動化処理土を用いる場合が見られるようになってきている。しかし、前述のように、流動化処理土は密度を小さくしすぎると多量の水を含む貧配合のモルタルになってしまい、乾燥した場合には非常に脆くなる。したがって、作製方法や適用箇所を誤ると、予想外の沈下や崩壊といった事態を招く恐れもあることから、事前の配合試験を十分に行うことが重要であろう。一方で、狭隘な箇所では、埋戻し材に山砂を使っても十分な締固めができないことから、そのような箇所への流動化処理土の利用は極めて有効であると考えられる。流動化処理土が広く用いられるようになってから、まだ、日が浅いことから、今後は地震時の災害時など供用中の挙動について詳細な調査が必要であると思われる。

謝辞：本研究の遂行にあたっては、独立行政法人日本学術振興会、財団法人鉄道総合技術研究所、みらい建設工業株式会社、株式会社アースプライムから研究助成を受けた。また、財団法人鉄道総合技術研究所、村田修氏、神田政幸氏、みらい建設工業株式会社、市原道三氏には、多大な研究支援とご助言を頂いた。さらに、実験およびデータ整理には、藤川拓氏（現 岩手県

庁), 對馬広紀氏 (現 岩田建設(株)) に負うところが大きい。末筆ながら, ここに関係各位に深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 工藤宗治, 落合英俊, 大嶺聖: 安定処理した火山灰質粘性土の強度・変形特性における短繊維補強効果, 第 34 回地盤工学研究発表会講演集, pp.857-858, 1999.
- 2) 築地健太郎, 安福規之, 落合英俊, 大嶺聖, 宮崎良彦: プラスチック廃材を利用したセメント安定処理土の粘り強さの改善, 第 33 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2263-2264, 1998.
- 3) 山本雅之, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖: プラスチック廃材の地盤補強材としての有効利用—砂質土に対する強度改善効果—, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1047-1048, 2000.
- 4) 久野悟郎編著: 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, 1997.
- 5) 末松直幹, 杉山勝英: 深層混合処理工法, 基礎工, Vol.11, No.2, pp.8-17, 1983.
- 6) 芳沢秀明, 片野英雄, 黒山英伸: 事前混合処理工法の開発, 土木学会第 43 回年次学術講演会講演概要集, VI, Vol.43, pp.8-9, 1988.
- 7) 地盤工学会: セメント改良土の物性と試験方法に関する委員会報告書第 2 章 2.1, 2.2, セメント及びセメント系固化材を用いた固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム発表論文集, pp.2-22, 2005.
- 8) 久野悟郎, 三木博史, 持丸章治, 岩淵常太郎, 竹田喜平衛, 加々見節男, 大山正: 発生土の利用率を高めた流動化処理土の充填性に関する大型実物大実験の報告, 第 29 回土質工学研究発表会講演集, pp.2207-2210, 1994.
- 9) 流動化処理工法研究機構ホームページ: 施工実績について, <http://www.lss-kiko.jp/bb/jisseki.htm>.
- 10) Tatsuoka, F., Uchida, K., Imai, K., Ouchi, T. and Kohata, Y.: Properties of cement-treated soils in Trans-Tokyo Bay Highway project, *Ground Improvement*, Vol.1, pp.37-57, Thomas Telford, 1997.
- 11) 龍岡文夫: 土質試験の課題と試験結果の評価—東京湾横断道路計画における土質工学の諸問題と室内土質試験—, 昭和 61 年度最近の土質・基礎に関する講習会講演資料, 土質工学会, pp.55-103, 1976.
- 12) 中村敦, 青木一二三, 村田修, 木幡行宏, 矢崎澄雄: 掘削発生土を利用した流動化処理土の配合試験, 第 33 回地盤工学研究発表会講演集, pp.2289-2290, 1998.
- 13) 奥原祐治, 中村敦, 井上好一, 木幡行宏, 村田修, 矢崎澄雄: 流動化処理土の非排水三軸せん断特性, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, 3-B, pp.626-627, 1998.
- 14) 市原道三, 木幡行宏, 村田修: 調整泥水式流動化処理土の諸特性に及ぼす細粒分含有率の影響, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 3-B, pp.384-385, 1999.
- 15) 村田修, 木幡行宏, 神田政幸, 棚村史郎, 市原道三: 流動化処理土の非排水繰返し三軸特性, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, 3-B, pp.556-557, 2000.
- 16) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y-S and Sato, T.: A simple gauge for local small strain measurements in the laboratory, *Soil and Foundations*, Vol.31, No.1, pp.169-180, 1991.
- 17) 木幡行宏, 前川晴義, 矢島寿一, 村本勝巳, 馬場崎亮一: セメント系安定処理土の強度・変形特性について, セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.1-19, 1996.
- 18) 助川禎: 泥水シールド発生土によるトンネルインバート材の開発, 土木学会論文集, No.504/IV-25, pp.107-116, 1994.
- 19) 木村勝, 野島邦夫, 木幡行宏, 村田修, 梅原俊夫: 高強度流動化処理土の非排水三軸せん断特性, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 3-B, pp.386-387, 1999.
- 20) 木幡行宏, 村田修, 梅原俊夫: 高強度流動化処理土の繰返し載荷による変形特性, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 3-B, pp.382-383, 1999.
- 21) 久野悟郎, 関口昌男: 繊維質材料を混合した流動化処理土の変形および支持力特性, 第 55 回土木学会年次学術講演会講演集, pp.554-555, 2000.
- 22) 木幡行宏, 藤川拓, 市原道三, 神田政幸, 村田修: 繊維混合流動化処理土の強度特性について, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.635-636, 2001.
- 23) 藤川拓, 木幡行宏, 市原道三, 神田政幸, 村田修: 一軸圧縮試験による繊維混合流動化処理土の強度・変形特性, 第 37 回地盤工学研究発表会講演集, pp.651-652, 2002.
- 24) 木幡行宏, 對馬広紀, 藤川拓: 長期養生した繊維材混合流動化処理土の強度・変形特性, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 43 号, pp.217-224, 2003.
- 25) 木幡行宏, 蔣関魯, 龍岡文夫, 緒方紀夫: セメント改良砂質土の変形・強度特性に及ぼす養生日数の影響, セメント系安定処理土に関するシンポジウム発表論文集, pp.137-142, 1996.

(2006. 7. 6 受付)

A Liquefied Stabilized Soil (LSS) was developed for an effective utilization of soil produced at a construction site in which a back filling soil for under ground structure cannot be compacted adequately. It is basic conception that an effect of cementation is expected by slurry soil, which have moderate flowability and no compaction, mixed with appropriate amount of cement. Recently, a recycling becomes the big stream of the times at the social level, LSS is using extensively in an urban area. In this paper, an experience of construction and trend of LSS is reviewed. The mechanical properties are discussed about LSS with low strength used as a back filling soil and LSS with high strength used in invert part of shield tunnel. The mechanical properties are discussed about LSS mixed with fiber reinforced material to increase the aseismic performance. Finally, issues in the future of LSS are described.