不飽和化による新しい液状化対策工法の開発

（株）大林組　正会員　○望月　勝紀
同上　正会員　伊藤　浩二
同上　正会員　山田　祐樹
同上　正会員　山田　宏

1. はじめに

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震により，多くの構造物が液状化被害を受けた．また，今後発生が予想されている南海トラフ地震ではそれを上回る規模で液状化被害を生じるとされており，対策が急がれる．しかし，液状化対策は一般に工事費用が嵩むため，重要構造物を除いて対策が進んでいない．そのため，供用中構造物直下に適用できる廉価な対策工法が求められている．また，液状化対策工法の中でも比較的廉価である不飽和化工法は，不飽和状態を維持するためのポンプアップやモニタリングが必要であり，維持管理費用がかかってしまう．そこで，我々はマイクロスフェアと呼ばれる微小な中空粒状体を地盤に注入することで，地盤を不飽和化する新たな液状化対策工法を開発した．ここでは，新工法の効果および施工性検証結果を報告する．

2. 工法概要

(1)　概要

本工法は緩い飽和砂質地盤（液状化対象地盤）に，直径 10μm 程度のマイクロスフェア（以下，MS と称す）と呼ばれる中空粒状体を注入して地盤を不飽和化する新工法である（**図-1**）．MS は，熱可塑性樹脂の中に熱膨張性気体を封入し，加熱膨張させた微小中空粒状体で，非常に軽量（密度：0.03～0.07g/cm^3）である（**図-2**）．主に，プラスチック製品の軽量化材や塗料の光沢材として利用されている．また，MS は圧力を加えると圧縮し，圧力を解放すると元に戻る性質をもつ．なお，MS は地中でも分解されることはなく，環境面でも無害である．

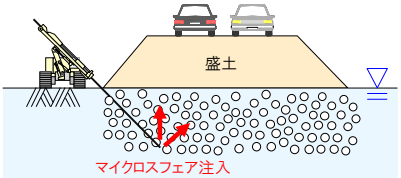

図-1 新工法適用イメージ

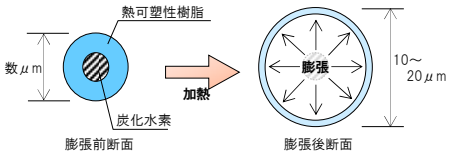

図-2 マイクロスフェア

(2)　特長

本工法では MS を地盤に注入することで不飽和地盤を形成する．地震時に発生する過剰間隙水圧を MS が圧縮変形することで吸収し，過剰間隙水圧の上昇を抑制できる（**図－3**）．既存の薬液注入工法の施工機と設備により施工が可能であり，既設構造物直下にも適用することができる．また，プラスチックの“殻”を有していることから，既存の不飽和化工法と比較して，気泡が消散しにくいと考えられるため，液状化抑制効果が持続し，維持管理におけるコストダウンが期待される．

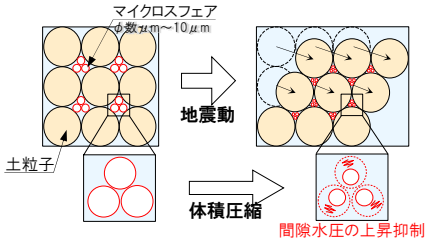

図-3 液状化抑制原理

3. 繰返し非排水三軸試験

(1)　試験方法

表-1 に示した条件で繰返し非排水三軸試験（JGS-0541-2009）を実施し，MS の有無で液状化強度を比較した．ケイ砂 6 号にて相対密度 50％の供試体を作成し，飽和化した．その後，MSを 5vol％および分散剤を混合した水を供試体下部より注入し，供試体を不飽和化した．その際，供試体の飽和状態を示す指標であるＢ値が 0.98 から 0.15 程度へ低下（すなわち，見かけの飽和度が低下）したことを確認している．

表-1 繰返し非排水三軸試験条件

土質材料	ケイ砂 6号
相対密度	50 %
供試体寸法	φ50mm×H100mm
初期有効拘束圧	100 kPa
背圧	100 kPa

キーワード　液状化対策，不飽和化，マイクロスフェア，非排水繰返し三軸試験，振動台実験

連絡先　〒108-8502　東京都港区港南2－15－2　品川インターシティB棟　TEL03-5769-1302

試験完了後，供試体から試料を採取して，強熱減量試験（JIS A1226:2009）を実施し，MS 充填率（地盤の間隙に対する MS の体積占有率）を計測した．なお，事前に MS は強熱（750℃前後）によって蒸発して消失することを確認している．

(2) 試験結果

MSを注入した供試体の液状化強度 R_{l20} は，無対策に比べて約 1.3 倍に増加した．道路橋示方書の FL 法[1)]によってレベル1地震動に対する液状化の有無を判定すると，無対策は液状化するが，MS を入れた場合は液状化しないと判定された（**図－4**）．また，**図-5** に示すとおり，MS によって過剰間隙水圧比の上昇が抑制されることも確認された．

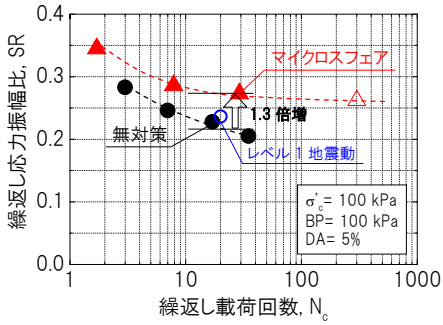

図-4 繰返し非排水三軸試験結果

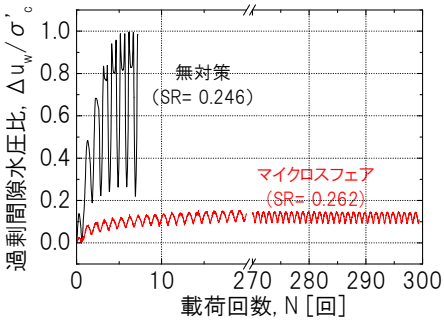

図-5 間隙水圧比の上昇傾向

4. 数値解析

(1) 解析条件

MS 混合水を注入した地盤の液状化特性を推定するため，二次元有効応力解析を実施した．盛土直下の改良を想定し，厚さ 10m の N 値 10 程度の緩い砂層の上に高さ 5.6m の盛土が構築されている状態をモデル化した（**表－2**，**図－6**）．また，地下水位を GL.-1.0m と設定し，MS 充填率を 50%と仮定した．入力地震波は，レベル 2 タイプⅠ地震動（プレート境界型，告示波，最大加速度 350gal）とした（**図－7**）．なお，MS が注入された地盤に関しては，間隙水の剛性を低下させることで再現した．

(2) 解析結果

無対策では盛土基礎地盤が液状化し，盛土天端が約 3m 沈下しているが，MS 改良地盤では液状化が抑制され，盛土天端沈下も1m以下に収まっている（**図－8，9**）．

表-2 解析諸条件

解析手法	・2次元有効応力解析
基礎地盤	・砂質土 ・N値= 10 ・地下水位= GL.-1.0m ・MS充填率= 50%
既設構造物（盛土）	・盛土高さ= 5.6m ・湿潤重量= 19kN/m³
入力地震動	・レベル2地震動(タイプⅠ)

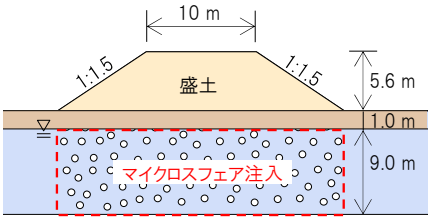

図-6 解析モデル（断面図）

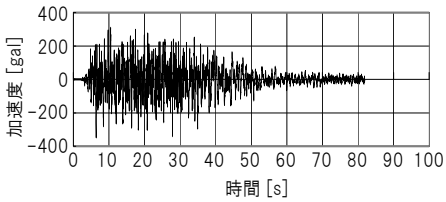

図-7 入力地震波

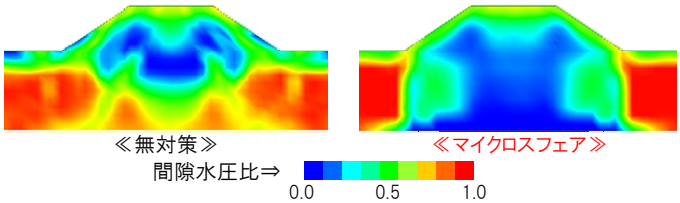

図-8 解析結果（間隙水圧の分布）

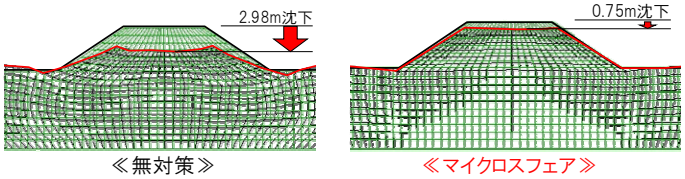

図-9 解析結果（加振 5 時間後の変位）

5. 注入性確認実験

(1)　試験方法

地盤に対する MS の注入性を確認するため，透明な塩化ビニル製の円筒容器内（ϕ100mm×H 1,000mm）にケイ砂 6 号を相対密度 50%となるように詰め，飽和させた．その後，容器下部より MS を 5vol%および分散剤を混合した水を注入した（**図-11**）．注入状況を見やすくするため，MS 混合水を食紅（青色 1 号）で着色した．注入完了後，供試体を凍結して 10 分割し，それぞれ強熱減量試験を実施して MS 充填率を計測した．

(2)　結果

実験後の円筒容器の様子を**写真-1** に示す．供試体全体に MS 混合水が充填出来ていることが確認できる．また，MS 充填率は供試体下部より 700mm 以下の部分で 20～30%，それより上の部分では 5～10%となった．

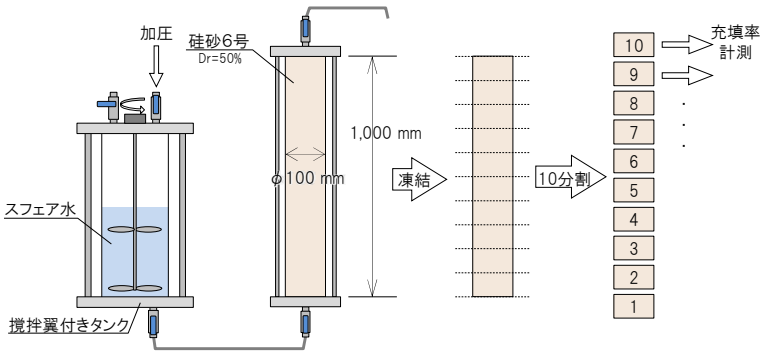

図-11 注入性確認実験

写真-1 注入実験後

6. 振動台実験

(1)　実験方法

写真-2 に示す幅 120 cm，奥行き 80 cm，高さ 110 cm のせん断土槽を用いて一次元方向の振動台実験を実施した．実験では模型縮尺を 1/10，図-7 の入力地震波で時間縮尺を 1/5.6 とした．地盤作成条件，実験ケースを**表-3，4** に示す．せん断土槽にケイ砂 6 号と水を投入し，ボイリングによって，それらを撹拌・循環させることで，層境のない均一な地盤を作成した．その後，土層下部より脱気水を注入して地盤を飽和させた．ケース 3，4 では，単管注入を模擬した注入管を用いて，室内試験と同じ MS 混合水を地盤に所定量注入した（**図-12**）．また，加速度計，間隙水圧計，外部変位計（レーザー変位計）を**図-13** のように配置した．さらに，MS 注入前後の飽和状態を把握するため，地盤中の電磁波速度計測（**写真-3**）およびP波速度計測（**図-14**）も併せて実施した．電磁波速度は飽和度が低下すると速くなり[2)]，一方のP波速度は飽和度が低下すると遅くなる[3)]性質を利用している．ただし，両者とも飽和度を直接測ることは出来ず，あくまでも飽和状態の相対変化しか捉えられない．

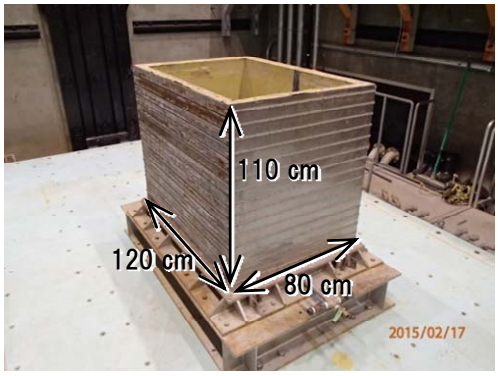

写真-2 せん断土槽

表-3 地盤作成条件

地盤材料	ケイ砂 6号
相対密度	50 %
初期飽和度	100 %（地下水位以下）
地下水位	GL=-0.1 m

表-4 実験ケース

	土槽条件	入力地震動
ケース1	無対策	L1（タイプⅠ）
ケース2	無対策	L2（タイプⅠ）
ケース3	スフェア	L1（タイプⅠ）
ケース4	スフェア	L2（タイプⅠ）

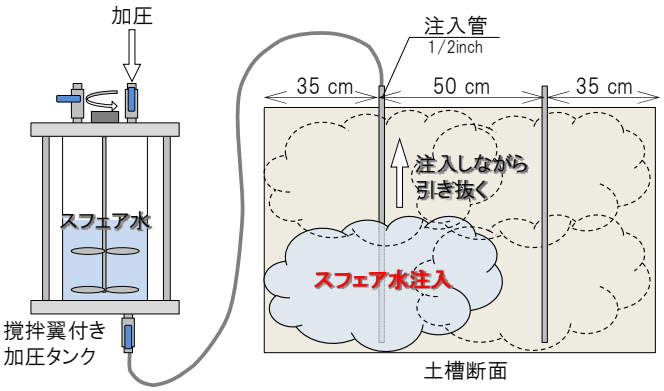

図-12 スフェア水注入イメージ

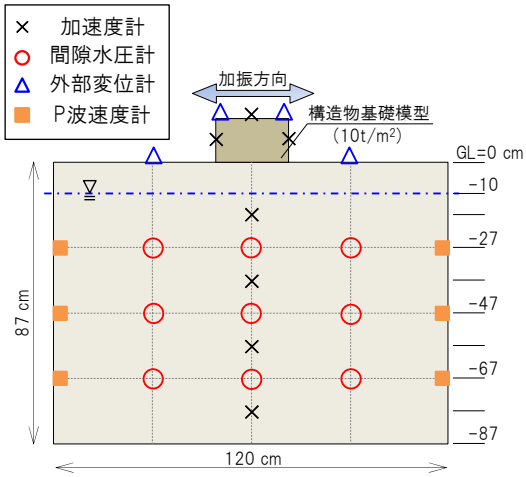

図-13 計測器配置(断面)

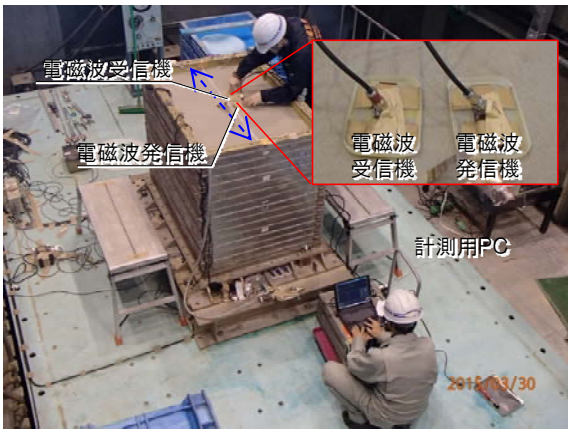

写真-3 電磁波速度計測状況

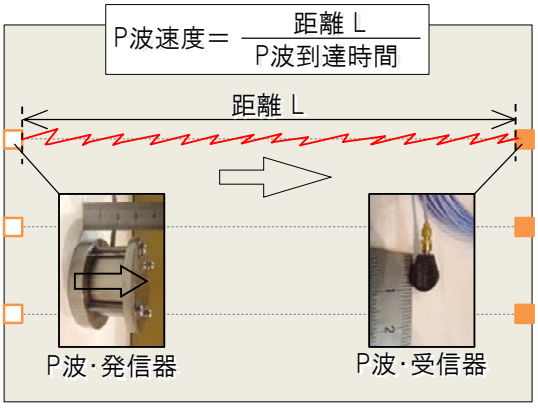

図-14 P 波速度計測

(2) MS 充填性

今回の実験では，注入管先端における土被りが一番大きなところでも 80cm 程度と小さかったため，注入の途中で MS 水が地表へリークしてしまったが，注入圧力をこまめに調整することで，所定量の MS 水を地盤に注入することができた．**写真-4** は，実験完了後に砂を掘り起こして断面を撮影した写真である．地表より-40cm 以深で全体的に青く着色されており，MS 水が浸透していることが分かる．また，試料を採取して強熱減量試験にて MS 充填率を計測したところ，全体で平均 20%程度充填されていることが分かった．

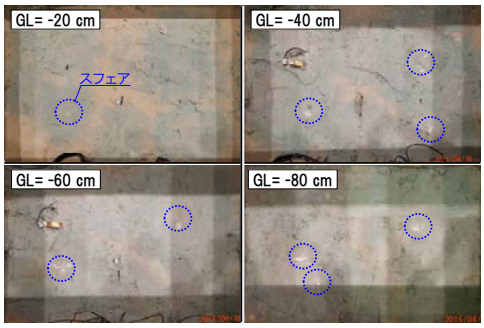

写真-4 MS 充填状態

(3) MS 注入前後の飽和状態

MS 注入前後の電磁波速度，P 波速度の計測結果を**表-5，6** に示す．電磁波速度は MS 注入前後で若干増加している．一方の P 波速度は，MS 注入前後で違いは見られない．予備実験として，水槽に水または MS 水を満たして計測した結果，水中で 1,446m/s，MS 水中で 1,057m/s となった．そのため，地盤の間隙中に存在する MS 水量が少なかったために，P波速度に影響しなかったと考えられる．

表-5 電磁波速度計測結果

	電磁波速度 (cm/ns)	
	飽和後	MS水注入後
ケース3	5.90	6.23
ケース4	5.62	5.90

表-6 P 波速度計測結果

	P波速度 (m/s)	
	飽和後	MS水注入後
ケース3	1,367	1,358
ケース4	1,303	1,295

(4) 実験結果

図-15，16，17 に時間～基礎沈下量，時間～間隙水圧比，時間～加速度の関係(いずれも代表値)を示す．MS を注入することで，L1，L2 地震動における沈下量がそれぞれ 1/4，1/2 程度に低減されていることが確認で

きる．一方，過剰間隙水圧比はMSを注入することにより，無対策よりも速く上昇し，最大値も大きくなっている．さらに，間隙水圧の消散に時間を要している．また，地盤中の応答加速度計測結果を見ると，MS を注入した地盤の方が，応答加速度が低下する傾向が見られる．これは，MS 水の粘性により，透水性が低下したことが原因と考えられる．現在，透水試験と数値解析で原因を確認中である．

7．まとめ

マイクロスフェアを用いた新たな液状化対策工法を開発し，その効果および適用性について，各種実験ならびに解析にて検討した．各種検討により得られた結果を以下に示す．

① MS を地盤に注入することで，液状化強度が増加し，レベル 1 地震動に対して液状化対策効果があることを室内試験，振動台実験により確認できた．

② 数値解析，振動台実験より，レベル 2 地震動に対して，液状化はするが変形を抑制できることが示された．

③ 施工方法として，薬液注入工法の汎用機で施工できる可能性があることが分かった[4)]．

④ 現場における MS 注入状態の把握（すなわち出来形確認）方法としては，電磁波速度計測を利用できると考えられる．

今後，追加実験や数値解析により振動台実験結果のさらなる検証を進めていきたい．

参考文献

1）日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，平成 24 年 3 月，2）山田茂治，鈴木敬一，岡二三生，木元小百合：土槽実験による砂質土の地下水位と電磁波速度の関係，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2007，平成 19 年，3）中澤博志，石原研而，塚本良道，鎌田敏幸：地盤の弾性波速度による液状化発生条件の検討，土木学会論文集 C Vol.62 No.2，pp346-359，平成 18 年 4 月，4）阿部智彦，松本伸，新村亮，金沢智彦：海水を利用した地盤注入工法の開発，第 67 回土木学会年次学術講演会，pp651-652，平成 24 年 9 月，5）望月勝紀，伊藤浩二，山田宏，古関潤一，清田隆：マイクロスフェアを用いた新しい液状化対策工法の開発，第 70 回土木学会年次学術講演会，平成 27 年 9 月

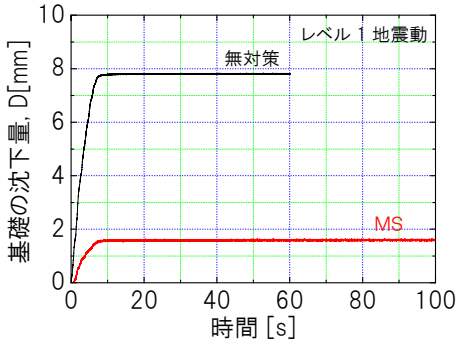

図-15a 時間～基礎沈下関係（L1 地震動）

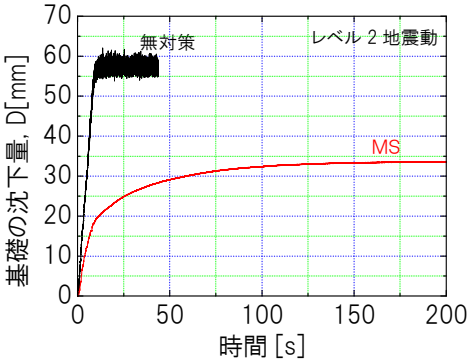

図-15b 時間～基礎沈下関係（L2 地震動）

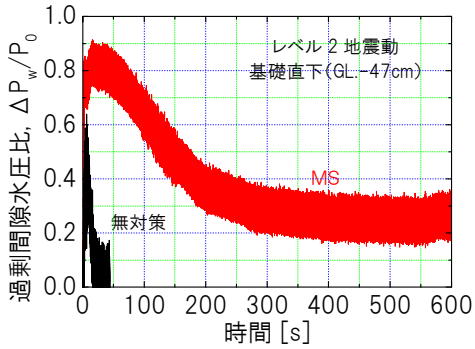

図-16 時間～過剰間隙水圧比関係

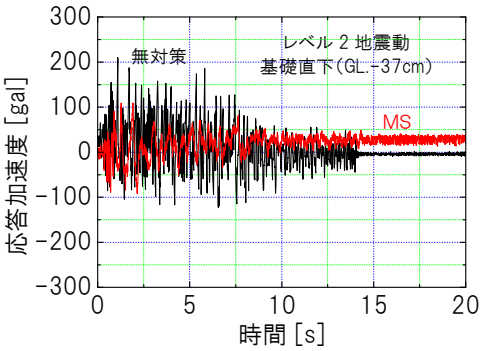

図-17 時間～応答加速度関係