

ジオテキスタイルを併用した難透水性地盤の 液状化時地表面沈下量抑制効果の実験的検証

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECT OF LOW-PERMEABILITY SURFACE SOIL IMPROVEMENT COMBINED WITH SOIL REINFORCEMENT ON POST-LIQUEFACTION SUBSIDENCE

地盤工学分野 寺尾卓真

Lab. of Geotechnical engineering Takuma TERAO

本研究では難透水性材料を用いた表層改良の液状化対策効果を検証することを目的として、改良地盤の層厚・透水係数（ベントナイト混合割合）及び地下水位を変化させて遠心加振模型実験を行った。計測した間隙水圧と地表面沈下量から地盤改良による沈下量抑制効果について比較検討を行った。表層1m程度に透水性を低下させる改良を施すことで、下方の飽和層が液状化したとしても、過剰間隙水圧の消散時に飽和層から不飽和層内への間隙水の侵入を抑制することで地表面の沈下を抑制できる結果が得られた。

This paper shows the idea concerning the suppression effect of the settling amount during liquefaction based on the centrifugal excitation model experiment. Excess pore water pressure and settlement amount in case where modified layer thickness, permeability coefficient and groundwater level were changed were compared and the improvement effect was compared. As a result, it was found that if the water permeability is lowered, the settling amount becomes small. As a conclusion of this study, it was found that sinking is reduced by suppressing invasion of pore water from the saturated layer into the unsaturated layer at the time of dissipation of excess pore water pressure

1. まえがき

2011年東北地方太平洋沖地震に伴う甚大な液状化被害を受けて、宅地及び民間の大・中小規模建築物周辺の一體的な液状化対策の需要が高まっている¹⁾。一方、現存の液状化対策として有効とされる地盤改良工法については、膨大なコストを要するため建築物周辺全土にわたる液状化対策の実施は極めて困難であるとされてきた。

地盤の液状化による地表面構造物被害の有無の推定に、地盤の不飽和層（非液状化層）とその下部にある飽和層（液状化層）の層厚割合が用いられる²⁾ことが多い。これは地盤内で液状化が発生してもその影響が地表面に現れなければよいという考え方であり、大規模集合住宅の外構や小規模建築物の基礎の設計に適用されている³⁾。

本研究では、深度1m程度までの表層にジオテキスタイルを併用した表層改良地盤の液状化による地表変位抑制効果を検証することを目的として、不飽和層厚、改良層厚および改良層の透水性を変化させた条件で遠心模型実験を行い、液状化による地表面沈下量について比較検討を行った。なお、本研究で想定する地盤改良は、締固めや固化剤の添加により表層地盤の透水性を低下させるものであり、ジオテキスタイルを併用することで液状化時の地盤の変形を抑制する効果を期待している。

2. 実験概要

本研究では、内寸が幅300mm、奥行110mm、深さ320mmの土槽内に、岐阜県土岐産の珪砂7号（ $\rho_s=2.69\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=1.10$, $e_{\min}=0.68$ ）を用い、相対密度 $D_r=30\%$ （乾燥密度 $\rho_d=1.36\text{g/cm}^3$ ）で上部に不飽和層（層厚 H_1 ）、下部に飽和層（層厚 H_2 ）を有する模型地盤を作製した。模型地盤全体の層厚は300mmであり、不飽和層厚 H_1 と飽和層厚 H_2 の比を変化させて実験を行った。遠心力場において動的实验を実施する場合は、時間の相似則を動的現象に合わせる工夫が必要であるため、事前に行った粘性試験の結果から、飽和層の間隙流体には濃度0.6%のCMC（カルボキシメチルセルロース）溶液を用いた。飽和層は、飽和度 $S_r=100\%$ に必要な量の脱気したCMC溶液を土槽内に投入した後、珪砂7号を水中落打法で投入した。さらに、土槽側面から適宜打撃を加えることで密度を調整した。不飽和層は、含水比 $w=10\%$ に調整した珪砂7号を突固めて所定の層厚 H_1 になるように作製した。改良層には、珪砂7号にベントナイトを質量比で所定の割合混合し、含水比 $w=10\%$ に調整した試料を用いた。

本研究で対象としたベントナイト系遮水シートの概要を図-1に示す。幅300mm、奥行115mm、厚さ0.05mmのジオテキスタイル（不織布）の基材に、厚さ3mmのベントナイト混合土が挟まれている構造となっている。遮水シート内の地盤材料には珪砂7号にベントナイト

を質量比で 10% 混合し、含水比 $w=10\%$ に調整した試料を用いた。

実験条件は表-1 に掲げた 20 ケースであり、全層厚 10m の実地盤を想定し、いずれも 33.3G の遠心場において実施した。表-1 に示す各条件の指標はすべて実寸換算値で記してある。Case1.1~Case1.4 は無改良地盤で不飽和層厚 H_1 (地下水位) のみが異なる条件であり、Case1 シリーズでは液状化による地表面沈下に対する地下水位の影響について検討した。Case2 シリーズでは改良程度の違いによる影響について検討した。Case2.1~Case2.9 では地盤改良に用いるベントナイトの混合割合 $B=10\%$ とし、改良率 (不飽和層厚 H_1 に対する改良層厚 h の割合, h/H_1) を変化させた条件であり、 $h/H_1=1.0$ の条件は不飽和層を全層改良したことを意味する。Case3 シリーズでは改良層の透水係数の違いによる影響を検討した。Case3.1, Case3.2 では $h=0.17\text{m}$ の表層改良に対してベントナイト混合割合 $B=5\%$, 2% と変化させ、Case3.3 ではベントナイトの混合割合 $B=2\%$ で全層改良 ($h=1.0\text{m}$) したケースである。Case4 シリーズでは改良と補強を併用することでより大きな沈下抑制効果が期待される遮水シートを用いており、敷設位置 (遮水シートの液状化層境界からの距離 l) や遮水シート内のベントナイト混合割合 B を変化させて比較検討した。また不織布のみの効果を検討するために、遮水シート内に珪砂 7 号のみを用いた改良も併せて行った。

図-2 はセンサーレイアウトと模型地盤の模式図であり、Case2 シリーズの模型地盤の例を示している。加速度計は土層底面 (ACC1), 飽和層中央 (ACC2), 飽和層上部 (ACC3) に設置した。間隙水圧計は飽和層内に加速度計と同じ位置に 3 つ設置し、さらに不飽和層内における間隙水圧の変動を把握するために、飽和層上端から上 2cm の位置に 1 つ設置した。全ての実験ケースで飽和層を確実に液状化させる目的で、遠心力場において実寸換算で周波数 2.0Hz, 加速度片振幅 250gal の正弦波で 66.6 秒間土層全体を振動させる強い加振を行った。図-3 に入力波形として、土槽底面に固定した加速度計 (ACC1) で計測された加速度時刻歴を示す。地表面の沈下は、模型土槽に固定した非接触変位計で測定し、変位計と反射板の距離の変化量を地表面沈下量 S と定義した。ここで、反射板はステンレス鋼板と板ゴムを張り合わせたものであり、寸法は幅 63.3mm, 奥行 63.3mm, 厚さ 11mm, 質量は 0.07kg である。したがって、反射板の接地圧は 33.3G の遠心加速度下では 5.7kN/m^2 であり、これは 1 階建て小規模建築物や電気室等の外構施設の基礎の設置圧に相当する。すなわち、本研究で計測した地表面地下量は、接地圧 5.7kN/m^2 の直接基礎構造物の沈下に対応するといえる。

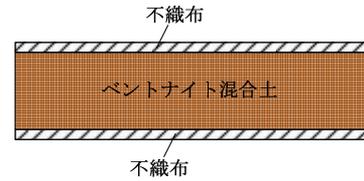
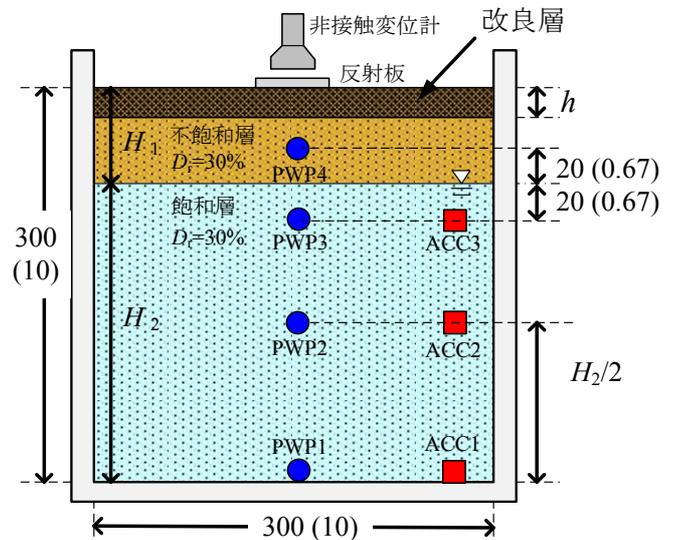


図-1 遮水シート概要

表-1 実験条件

Case ID	不飽和層厚 H_1 (m)		飽和層厚 H_2 (m)		改良層厚 h (m)	ベントナイト割合 B (%)	透水係数 k (cm/s)	遮水シートの液状化層境界からの距離 l (m)
	条件	加振前	条件	加振前				
1.1	1.00	0.62	9.00	9.28	0	0	1.03×10^{-1}	-
1.2	1.50	1.39	9.00	8.57				
1.3	2.00	2.00	8.00	7.95				
1.4	3.00	2.79	7.00	7.18				
2.1	0.80	0.99	9.20	8.97	0.50	10	1.89×10^{-3}	-
2.2	0.80	1.09	9.20	8.87				
2.3	0.80	1.19	9.20	8.76				
2.4	1.00	0.77	9.00	9.18				
2.5	1.00	0.84	9.00	9.03				
2.6	1.00	1.03	9.00	8.90				
2.7	1.00	0.37	9.00	9.55				
2.8	2.00	1.50	8.00	8.41				
2.9	3.00	3.02	7.00	6.94				
3.1		0.77		9.19	1.00	5	1.42×10^{-2}	-
3.2	1.00	0.95	9.00	9.01				
3.3		1.17		8.79				
4.1		1.12		8.81	1.00	10	1.03×10^{-1}	0.5
4.2	1.00	1.09	9.00	8.85				
4.3		1.12		8.83				
4.4		1.14		8.80				



- : 間隙水圧計(PWP) 単位: mm
- : 加速度計(ACC) ()内は実寸換算: m

図-2 模型地盤の模式図

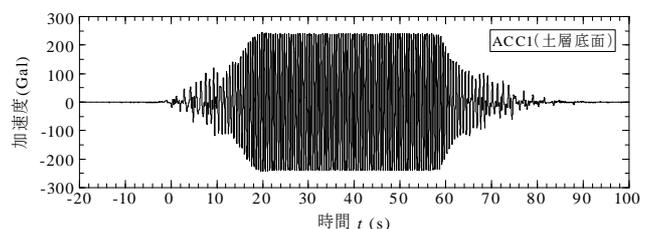


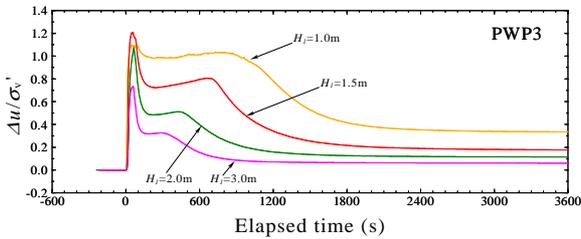
図-3 入力波の加速度時刻歴 (実寸換算)

3. 実験結果

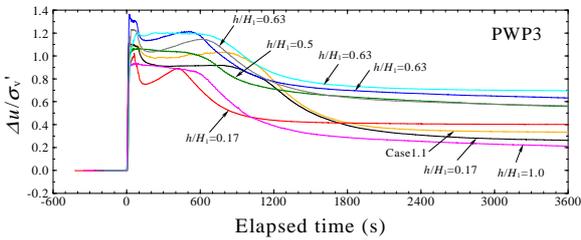
各ケースの実験で得られた飽和層上部 (PWP3) の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\Delta\sigma'_v$ の時刻歴を Case シリーズごとについて図-4 (a) ~ (d) に示す。過剰間隙水圧比 $\Delta u/\Delta\sigma'_v$ の最大値は、Case1.4 の $H_1=3.0\text{m}$ の無改良地盤を除く全てのケースにおいて 1.0 程度を示していることから、不飽和層厚の違いや改良の有無または程度によらず、飽和層において液状化が生じているといえる。Case1.4 においても液状化層下部 (PWP1) と液状化層中央 (PWP2) の $\Delta u/\Delta\sigma'_v$ の最大値が 1.0 程度であることを確認しており、飽和層は完全液状化に近い状態に至ったと考えられる。また、ケースごとに過剰間隙水圧の挙動に顕著な違いが見られる。無改良地盤では H_1 が小さいほど高い水圧比が維持される。本研究で用いた模型地盤の全層厚は実寸換算で 10m であるため、不飽和層厚が厚いケースでは飽和層がその分薄くなる。

したがって、飽和層が液状化したとしても、不飽和層厚が厚いケースでは地盤全体としての液状化の程度が小さくなり、すぐに水圧が消散したと考えられる。また、改良地盤では改良率が高いケースでより高い水圧比が維持されていることがわかる。これは、地下水面の近傍に難透水性地盤が存在することで、不飽和層内への間隙水の侵入が抑制され、飽和層上部の過剰間隙水圧の消散が妨げられたことによると考えられる。

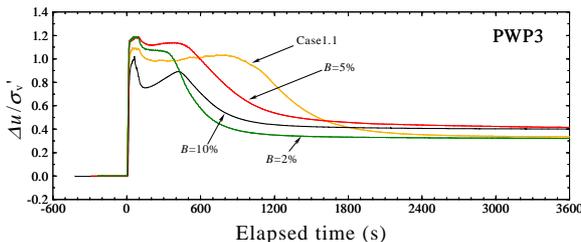
図-5 (a) ~ (d) は地表面沈下量 S の時刻歴を全ての実験ケースについて、Case シリーズごとに示したものである。地表面は加振中に大きく沈下し、液状化発生後、過剰間隙水圧の消散に伴い沈下が収束していく様子が見て取れる。無改良地盤では不飽和層厚が厚いほど、沈下量が小さくなる。また、改良地盤では改良率が高いほど、改良層のベントナイト混合割合が大きいほど、沈下量が小さくなる傾向が見られた。



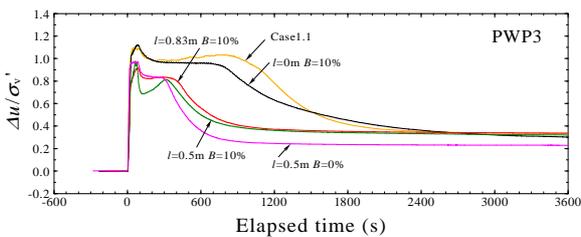
(a) Case1 シリーズ



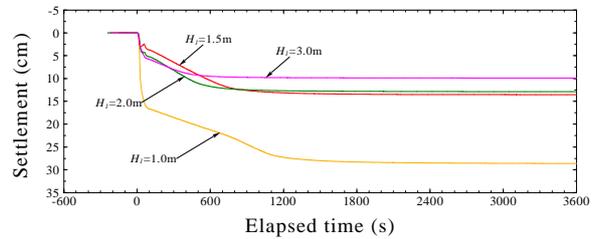
(b) Case2 シリーズ



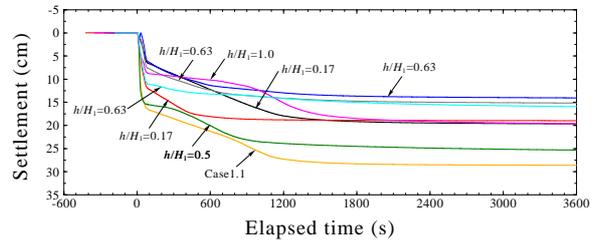
(c) Case3 シリーズ



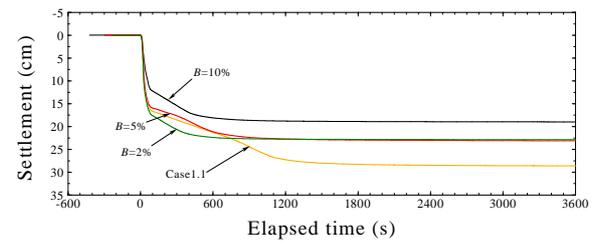
(d) Case4 シリーズ



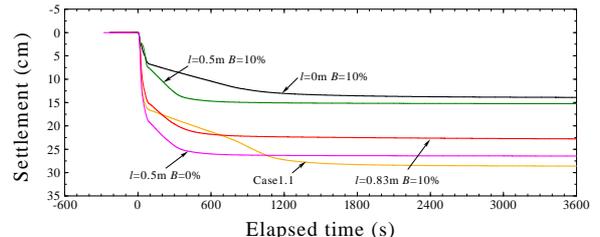
(a) Case1 シリーズ



(b) Case2 シリーズ



(c) Case3 シリーズ



(d) Case4 シリーズ

図-4 飽和層上部の過剰間隙水圧比(PWP3)の時刻歴

図-5 地表面沈下量の時刻歴

4. 沈下量抑制効果についての評価

地表面沈下量と不飽和層厚の関係を一明らかにするため、以下の指標を定義する。

加振後沈下量 S_a : 加振終了後から沈下停止時の沈下量
 総沈下量 S_t : 加振開始から沈下停止時の沈下量

ここで、表-1に示した Case2.1, Case2.2, Case2.3における加振前の H_1 は実験条件として設定した H_1 より過大になっていることがわかる。これは模型地盤作製中及び遠心载荷中に地下水面が難透水性の改良層に達したことで、水圧計の計測値をもとに算出した H_2 が過小となったことが原因と考えられる。そこで Case2.1, Case2.2, Case2.3 の H_1 については、以下のように補正を行った。以後、補正を行った3ケースについては、加振前 H_1 の代わりに H_1^* を用いて比較を行う。

$$H_1^* = \text{加振前}H_1 - (\text{条件}H_1 - \text{改良層厚}h) \quad (1)$$

図-6(a), (b)は、各実験ケースにおける加振前 H_1 と加振後沈下量 S_a 及び総沈下量 S_t との関係を示している。両図より S_a , S_t はともに $H_1=1.0\text{m}$ の無改良地盤で最も大きく、無改良地盤では H_1 が大きいほど地表面沈下量が小さいことがわかる。ここで地表面沈下量を液状化による地表面被害とすると、この結果は参考文献²⁾で知られている結果に整合するものであり、また地下水位低下工法による液状化被害対策の有効性を示すものと考えられる。表層改良を施したケースでは、同じ地下水位の無改良地盤と比較して沈下量が小さいことがわかり、改良層厚が厚いほど、さらに透水性が低いほど、沈下量が低減されることがわかる。遮水シートを用いたケースでは、 S_a には違いが見られず、 S_t は液状化層境界からの距離 l が小さいほど沈下量が小さいことがわかる。また、ベントナイト混合割合 $B=0\%$ とした場合で最も大きい沈下量となった。このことから不織布による補強効果よりベントナイトによる低透水性地盤改良効果の方が沈下量に与える影響は大きいことが言える。

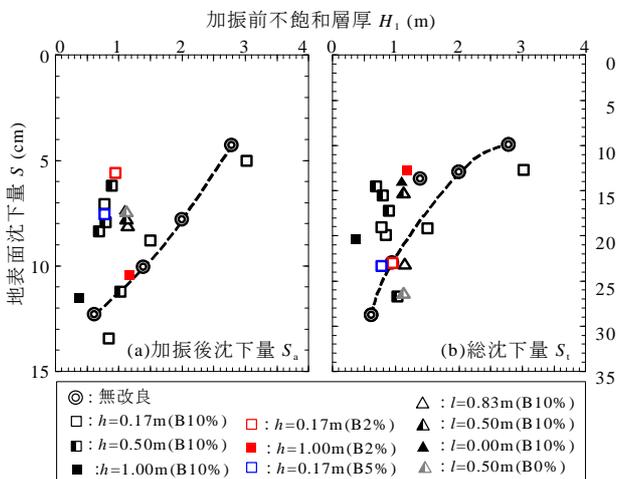


図-6 加振前 H_1 と地表面沈下量の関係

次に、飽和層上部(PWP3)の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\Delta\sigma'_v$ において、加振終了後から1時間後 ($t=3600\text{s}$) の消散率を算出し、加振前の不飽和層厚 H_1 との関係を図-7、加振後沈下量 S_a 及び総沈下量 S_t との関係を図-8(a), (b)に示す。凡例は図-6と共通である。図-7より無改良地盤では不飽和層厚が大きいほど、消散率が大きいことがわかる。表層改良を施したケースでは、改良層厚が厚いほど、さらに改良層の透水性が低いほど、消散率が小さいことがわかる。しかしCase2.7のように、一部のケースでは改良による間隙水圧の消散を妨げる効果が見られなかった。遮水シートを用いたケースでは、ベントナイト混合割合 $B=0\%$ とした場合が最も消散率が高く、液状化層境界からの距離 l が小さいほど消散率は小さくなる傾向が見られた。以上より改良の程度が大きいほど間隙水圧が消散しにくいことが言える。図-8(a), (b)より①無改良地盤とCase2.7のような間隙水圧の消散を妨げる効果を発揮しなかった改良地盤では、一般的に知られているように間隙水圧の消散が速い(消散率が高い)ほど地表面沈下量が小さいのに対して、②消散を妨げる効果がみられた改良地盤では消散率が低いほど地表面沈下量が小さくなることわかる。これらのことからより透水性の低い改良層地盤が地下水面の直上に存在することで不飽和層内への間隙水の侵入が抑制され、沈下抑制に繋がったと考えられる。

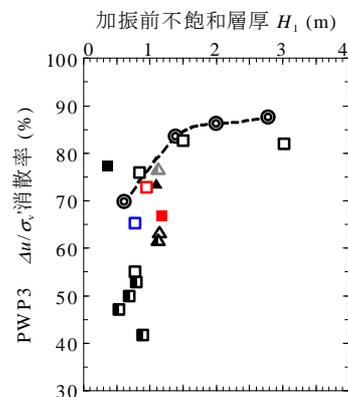


図-7 加振前 H_1 と PWP3 $\Delta u/\sigma'_v$ 消散率の関係

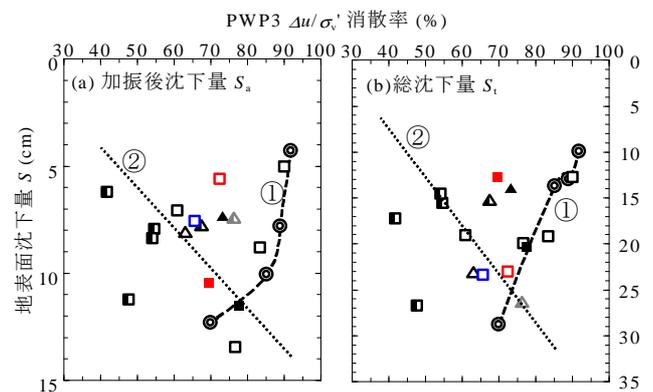


図-8 PWP3 $\Delta u/\sigma'_v$ 消散率と地表面沈下量の関係

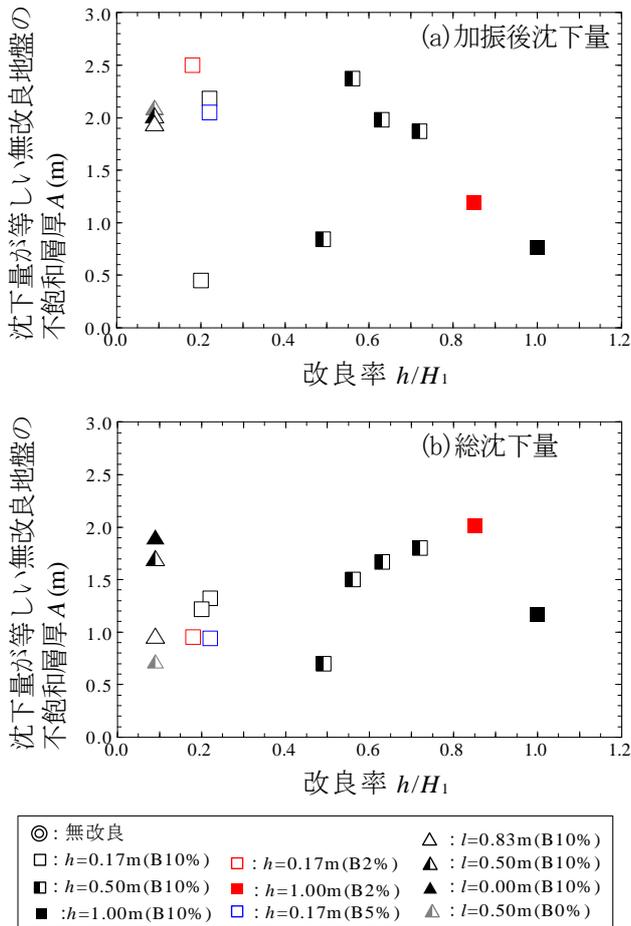


図-9 地表面沈下に対する表層改良の効果

図-6 で示したように無改良地盤の地表面沈下量と不飽和層厚の関係を図中の破線で仮定し、改良地盤と同じ S_a または S_t を与える無改良地盤の不飽和層厚を破線上から読み取った値を A として、改良率との関係を図-9(a), (b)に描いた。表層改良と遮水シートの地表面沈下に対する抑制効果を改良地盤の不飽和層厚 H_1 に対応付けると、本研究の実験結果では不飽和層 $H_1=1.0m$ に対して $h=0.17m$, $B=10\%$ の改良を施せば、加振後の沈下量は $H_1=2.0m$ 程度に相当する効果を発揮し、総沈下量は $H_1=1.3m$ 程度に相当する効果を発揮した。 $H_1=1.0m$ に対して遮水シートを液状層境界に敷設した場合、加振後の沈下量、総沈下量ともに $H_1=2.0m$ 程度に相当する効果を発揮した。

次に図-9から得られた不飽和層厚 A をそれぞれの加振前の不飽和層厚 H_1 で除した値 A/H_1 と改良率 h/H_1 の関係を図-10(a), (b)に示す。凡例は図-9と共通である。 A/H_1 より加振前の不飽和層厚に改良を施すことで、何倍相当の不飽和層厚に値するかを判断することができる。すなわち A/H_1 が1.0を超えている場合のみ改良効果があることを意味している。

加振後沈下量で比較すると改良効果が大きい場合には、加振前の不飽和層厚の2.5倍程度の不飽和層厚と同等の沈下抑制効果が期待できる。総沈下量を見ると、

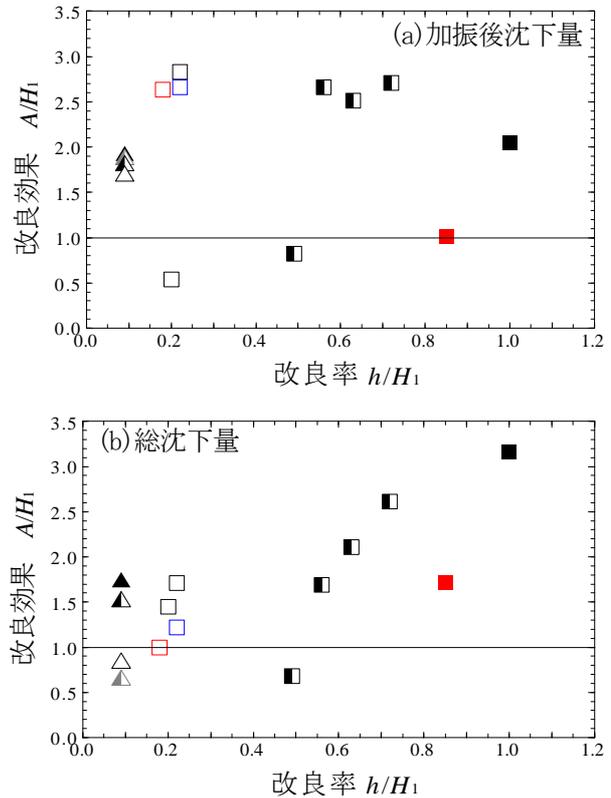


図-10 地表面沈下に対する表層改良の効果

改良率が高いほど改良の効果が大きいことがわかる。遮水シートに関しては設置位置が液状化層境界に近ければ近いほど、改良の効果が大きくなっている。また、透水性の違いに着目すると、ベントナイト割合を大きくすればするほど、改良の効果が大きくなっていることがわかる。このことから、地下水水位低下工法と同様に難透水性地盤改良工法の液状化対策としての有効性を確認することができた。

改良層厚 h 、ベントナイト混合割合 B 、遮水シートの位置 l を各々変化させた実験条件に対して、不飽和層の透水性に与える影響をまとめて比較評価するために、液状化層境界から改良層上端までの層厚に対する平均的な透水係数を算出し、地表面沈下量との関係を図-11に示した。これより不飽和層内の平均的な透水係数が小さいほど、沈下量が小さくなることがわかる。さらに透水係数が同じ条件であっても、遮水シートを用いた場合の方が沈下量は小さくなることがわかる。これは遮水シートの不織布の補強効果または、不織布自体の低透水性の影響によって沈下量がより低減されたと考えられる。

次に不飽和層内の平均的な透水係数と沈下量には線型的な関係があることから、図-11中の実線で示したような近似線で仮定し、無改良地盤と同じ S_t を与える改良地盤の透水係数を線上から読み取り、加振前の不飽和層厚 H_1 との関係を図-12に描いた。これより $H_1=0.62m$ の表層の透水係数を 10^{-2} 低下させた改良地

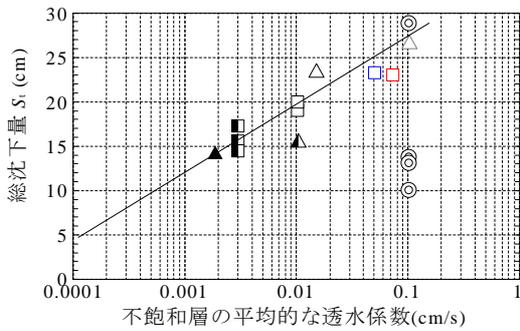


図-11 H_1 の平均的な透水係数と地表面沈下量の関係

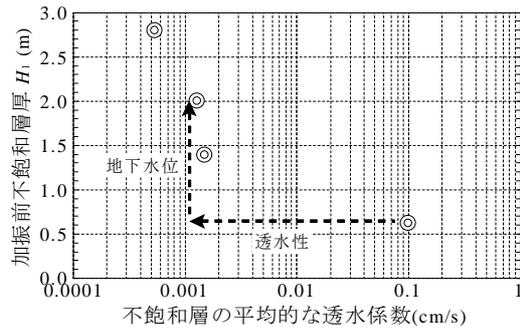


図-12 H_1 の平均的な透水係数と加振前 H_1 の関係

盤の沈下量と、 $H_1=2.0\text{m}$ 相当の無改良地盤の沈下量が等価とみなせる。すなわち不飽和層内の平均的な透水係数を 10^{-2} 低下させることで、地下水位を約 1.4m 低下させるのと同等の沈下量低減効果が見込まれる。

図-13 は不飽和層厚 $H_1=1.0\text{m}$ の無改良地盤 (Case1.1) で得られた S_a と S_t に対する各実験ケースにおける沈下量低減割合 r_s を示したものである。 r_s は本研究において最も沈下量が大きかった Case1.1 (不飽和層厚 $H_1=1.0\text{m}$ の無改良地盤) の沈下量に対する、改良層厚や透水性が異なる実験ケースの沈下量の割合として、以下の式を用いて求めた。

$$r_s = (S_0 - S) / S_0 \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

ここで、 S は各実験ケースの S_a または S_t であり、 S_0 は Case1.1 の S_a または S_t である。

これより表層改良地盤では、改良率 h/H_1 が 0.5 より小さい場合では加振後沈下量 S_a の低減割合が高く、改良率 h/H_1 が 0.5 より大きい場合では S_a 、 S_t 両方に対して沈下量低減割合が高いことがいえる。また総沈下量の低減割合を比較すると改良率が高いほど、透水性が低いほど地表面沈下量は低減されることが図-13 に示した沈下量低減割合 r_s から確認できる。本研究で検討したケースの中で改良率が最も小さい条件である遮水シートを用いた地盤においても、十分な沈下量低減効果が確認され、最も効果の大きかった液状化層境界に敷設した場合は、改良率 0.8 程度の表層改良と同等の効果が得られ、沈下量低減割合が 50% 程度であった。

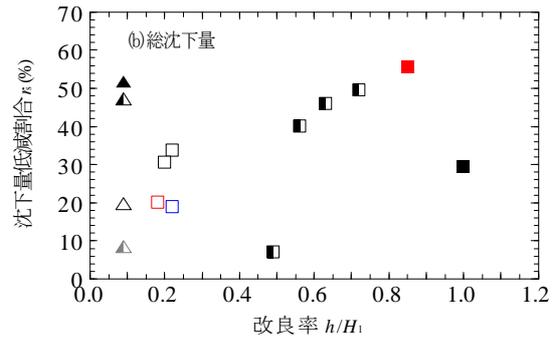
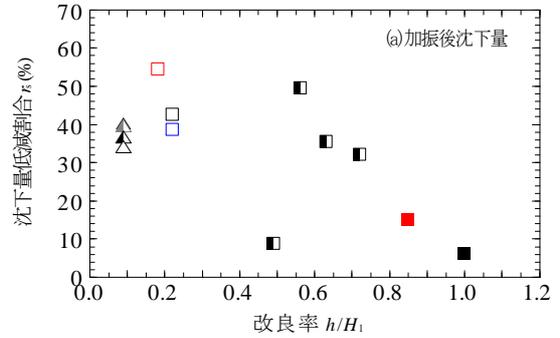


図-13 改良率と沈下量低減割合の関係

5. 結論

本研究では、遠心加振模型実験によりジオテキスタイルを併用した表層改良地盤の液状化による地表面沈下抑制効果について検討を行った。その結果、透水性の低いベントナイト混合土を用いて不飽和層の表層一部に改良を施すことによって、液状化による地表面沈下量を抑制できることがわかった。そして改良の程度が大きいくほど、改良層の透水性が低いほど沈下量が小さくなり、遮水シート用いた条件では液状化層境界に敷設した場合に最も大きな改良効果が見られた。

沈下量が低減された要因として不飽和層の難透水性により、液状化後の水圧の消散が妨げられ、噴砂・噴水が抑制されるためであると考えられる。さらに、飽和層境界付近に改良を施せば、不飽和層内への水の侵入が抑制されるため、大きな低減効果が発揮されたと考えられる。

具体的には $H_1=0.62\text{m}$ の無改良地盤の表層の透水係数を 10^{-2} 低下させる改良を施すことで、 $H_1=2.0\text{m}$ 相当の無改良地盤と同等の沈下量抑制効果が得られる。沈下量低減割合は最大で 50% を超える結果となった。

参考文献

- 公益社団法人地盤工学会:地震時における地盤災害の課題と対策 2011年東日本大震災の教訓と提言, 2011.
- Ishihara, K.: Stability of natural deposits during earthquakes, Proceedings of the 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, America, Vol.1, pp. 321-376, 1985.
- 一般社団法人日本建築学会:小規模建築物基礎設計指針, pp. 88-90, 2008.