

事業の名称

低平地における液状化対策工法の効果の検証

〔事業責任者〕

(自治体側)

ひたちなか市・都市整備部・都市計画課長 堀川 滋

(大学側)

茨城大学・工学部・准教授 村上 哲

事業テーマ：自治体との連携

連携先

茨城大学、ひたちなか市

プロジェクト参加者

村上 哲（茨城大学・准教授 担当：全体統括）

堀川 滋（ひたちなか市・都市計画課長

担当：ひたちなか市の情報提供）

渡部拓哉（ひたちなか市・公務係

担当：ひたちなか市の情報提供）

プロジェクトの実施概要

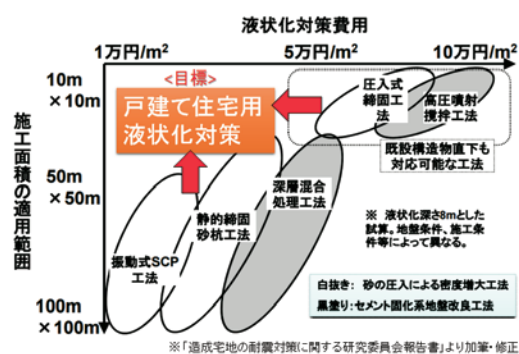
①プロジェクトの目的

日本で観測史上最大となる M9.0 の平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震が発生し、日本各地に甚大な被害をもたらした。この地震によって関東地方を中心に 8 都県 80 市町村で液状化による住宅被害が確認された¹⁾。

茨城県ひたちなか市では、液状化による被害が多数報告されたが、液状化層が薄い田中後地区で比較的安価な柱状改良・杭工法を用いた全住宅で構造物傾斜の被害が確認されなかった²⁾。さらに、振動台模型実験や現地調査からも液状化層が薄い地盤において杭基礎の液状化時沈下抑制効果が実証されている³⁾。しかし、海門町地区のような液状化層が厚い地盤では杭基礎の液状化時沈下抑制効果は発揮されなかった。また、図－1 に示すように戸建て住宅を対象とした安価な液状化対策工法も未だに開発されていない。以上から、地盤条件に適した安価な液状化時沈下抑制工法を提案することで、液状化対策工法の着手促進を期待

できる。

本研究では、1g 場振動台模型実験装置を用いて、杭基礎やジオグリッド、CSP（Crushed Stone Pile）工法など比較的安価な液状化時沈下抑制工法の効果を調査する。そして、地盤条件に合った戸建て住宅の液状化対策の提案を行う。ここで、CSP 工法とはグラベルコンパクションパイル工法の一つで、無排土で地盤中に碎石杭を打設する工法である。締固めによる液状化強度の増加や排水効果による過剰間隙水圧の早期消散など 2 点の効果で液状化抑制が期待できる。



図－1 液状化対策費用と施工面積の関係⁴⁾

②連携の方法及び具体的な活動計画

連携の方法は、各連携先の役割を分担し定期的に打ち合わせを実施する。

- ・茨城大学：1g 場振動台模型実験装置を用いて模型実験を行い、杭基礎による液状化時のめり込み沈下抑制効果を調査する。さらに、ひたちなか市ハザードマップの情報提供を行う。
- ・ひたちなか市：ひたちなか市での住宅被害のヒ

アリング調査や液状化対策のガイドライン作成等を行う。また、ひたちなか市の地盤情報や住宅基礎情報等を提供する。

- ・川崎地質：周辺地盤の情報を整理する。液状化強度 F_L 値、液状化指数 P_L 値を算出し液状化ハザードマップを作成する。また、周辺地盤の情報提供を行う。
- ・旭化成建材：対象地域の住宅基礎の整理を行う。また、液状化時沈下抑制対策について情報提供を行う。

③期待される成果

杭基礎・ジオグリッド・CSP 工法による液状化時沈下抑制工法を提案できる。また、この研究が今後起こりうる、巨大地震による液状化時の構造物傾斜被害の対策になると考える。

プロジェクトの実施成果

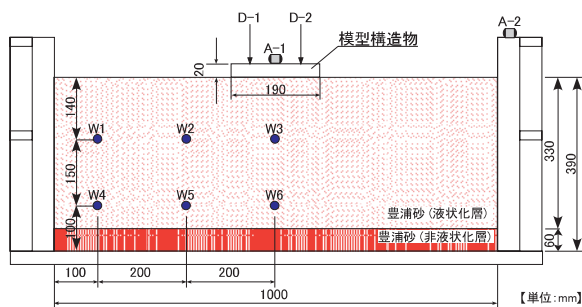
①活動実績

以下に、活動実績について示す。

1. 振動台模型実験の概要

1.1 1g 場振動台模型実験装置の概要

図－2 に実験概要を示す。本研究では、1g 場振動台模型実験装置を用いて、杭基礎、ジオグリッドおよび CSP 工法を使用した場合における液状化時の模型構造物・模型地盤の挙動を調査した。模型土槽の寸法は幅 1000mm × 高さ 480mm × 奥行き 200mm である。また、構造物沈下量、過剰間隙水圧比、応答加速度は、変位計 (D1, D2)、間隙水圧計 (W1 ～ W6)、加速度計 (A1, A2)、



図－2 1g 場振動台模型実験装置

A2) を図－2 に示す位置に設置して計測した。地表面沈下量は、模型土槽上面から定規で計測した。一様な液状化層作製のため、模型地盤材料として豊浦標準砂 (土粒子密度 $\rho_s=2.650\text{g/cm}^3$) を用いた。地盤高さは模型土槽底部より 390mm である。

1.2 模型実験材料の概要

実験に用いた土試料は、模型地盤に豊浦標準砂、CSP 工法の模型杭材に 7 号碎石を用いた。室内透水試験により、碎石の透水係数は $k=3.78\text{cm/s}$ で、豊浦砂 ($k=5.4 \times 10^{-3}\text{cm/s}$) より約 700 倍である。

模型作製時には支配方程式を用いて、基本的な実地盤と模型の相似比を考え、実物と模型の長さの比を $\lambda (=l_p/l_m)$ とした。液状化判定を行う際、地表面から 20m 以内にある飽和土層を対象としているので液状化判定深度 l_p は 20m、模型土槽の高さ l_m は 390mm であるから $\lambda=51$ となる。RC 造 2 階建てを模擬した模型構造物 (幅 190mm, 高さ 25mm, 奥行き 170mm, 質量 1.9kg) および木造 2 階建てを模擬した模型構造物 (幅 190mm, 高さ 25mm, 奥行き 170mm, 質量 0.7kg) を用いた。グリッド模型の寸法は幅 400mm, 奥行き 170mm, 厚さ 2mm, 内径 2.5mm とした。模型杭は杭径 9.8mm, 長さ 78mm, 120mm, 220mm, 370mm の 3 種類を計 25 本使用した。

表－1 に実験条件を示す。液状化層の相対密度は 50% (CASE1 ～ 4 は 30%)、非液状化層の相対密度は 70% とした。地下水位は、対象地域である海門町の地下水位 -1.5m を基に相似比 (1/51) を用いて -30mm (CASE1 ～ 4 は -0mm) とした。さらに、ジオグリッドの曲げ剛性と構造物沈下量の関係を調査するために、ピアノ線をジオグリッドに装着し曲げ剛性を変化させ結果の比較を行った。

1.3 実験手順

- (1) 模型土槽内に模型地盤を作製した。地盤は相対密度 $D_r=30, 50, 70\%$ で作製し、地下水位

表－１ 実験条件

(a) 杭基礎			
実験条件	構造物質量	杭基礎	液状化層厚
無対策	0.7kg (木造 2F 建)	無	390mm
CASE14:12		120mm	140mm
CASE19:12		120mm	190mm
CASE19:22		220mm	190mm
CASE24:12		120mm	240mm
CASE24:22		220mm	240mm
CASE29:12		120mm	290mm
CASE29:22		220mm	290mm
CASE34:12		120mm	340mm
CASE34:22		220mm	340mm
CASE34:37		370mm	340mm

実験ケースの名称は、CASE 液状化層厚：杭長と表記。

(b) ジオグリッド			
	構造物質量	ジオグリッド幅	曲げ剛性 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)
CASE1	1.9kg (RC 造 2F 建)	無対策	—
CASE2		400mm	2.30×10^{-4}
CASE3			5.93×10^{-2}
CASE4			6.45×10^{-2}
CASE4-1		300mm	
CASE4-2		250mm	

(c) CSP 工法					
CASE	構造 物質量	本数	改良 面積比	碎石 マット	杭材
0-0	0.7kg	0	-	なし	-
8-0		8	2.5	なし	碎石
8-1		8	2.5	あり	碎石
12-0		12	3.7	なし	碎石
12-1		12	3.7	あり	碎石
20-0		20	6.2	なし	碎石
20-1		20	6.2	あり	碎石
SCP		20	6.2	なし	砂
GLL		0	-	なし	-
SCP : Sand compaction pile, GLL : Groundwater level lowering					

- ・実験ケースの名称は、CASE 杭本数-碎石マットの有無（有：1，無0）と表記。
- ・改良面積比は（碎石杭で改良した地盤面積 / 構造物の底面積）である。

によって模型地盤を飽和層と不飽和層で構成した。

(2) 液状化時の地盤挙動把握のため、色砂を地盤底部から 200, 240, 280, 320, 360mm に敷設し、模型土槽底部より水を注水し、地下水位を上昇させた。

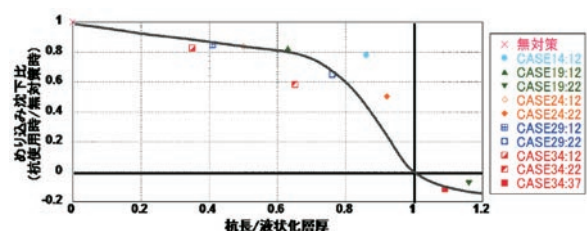
(3) 液状化対策工法

- ・杭基礎：模型杭を貫入する場合は、模型地盤作製後に等間隔で杭を 25 本貫入した。
- ・ジオグリッド：模型地盤底部 370mm 地点でジオグリッドおよび模型構造物を敷設し、そして構造物を 10mm 根入れした。
- ・CSP 工法：杭を打設する前に模型地盤の表面まで地下水位を上昇させる。次に、ケーシングを用いて碎石杭を杭深 200mm まで打設した。碎石マットを敷設する場合は模型構造物を中心に、300mm × 200mm の範囲に高さ 10mm の碎石マットを敷設した。
- (4) 入力加速度 200gal，振動数 5Hz の正弦波を模型地盤に 6 秒間与えた。そして、構造物・地盤沈下量，過剰間隙水圧，応答加速度を計測した。

2. 実験結果・考察

2.1 杭基礎の液状化時沈下抑制効果^{3), 5)}

図－３にめり込み沈下比と液状化層厚に対する杭長の比の関係を示す。めり込み沈下比の定義は杭使用時のめり込み沈下量を無対策時のめり込み沈下量で除したものである。図－３より、めり込み沈下比と杭長 / 液状化層厚には、一義的な関係があることが分かる。また、液状化層厚に対する杭長の値が大きくなると、めり込み沈下比が減少している。しかし、液状化層厚に対して半分の

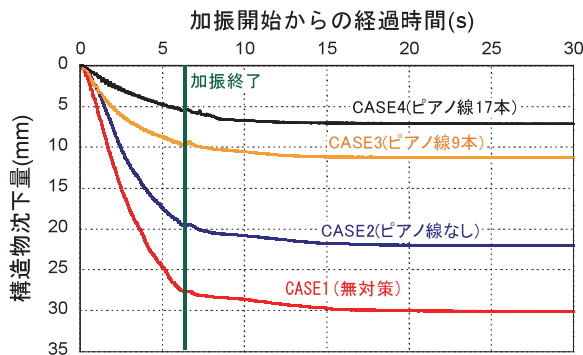


図－３ めり込み沈下比と杭長 / 液状化層厚の関係

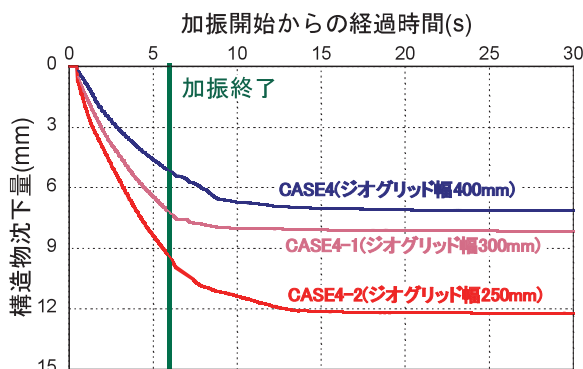
杭長（杭長 / 液状化層厚 = 0.5）の場合、めり込み沈下比は 0.85 程度、0.8 の杭長の場合、めり込み沈下比は 0.6 ということが分かる。したがって、杭基礎は液状化層の 80% まで貫入すると沈下低減が 60% となり、表層付近に薄い液状化層がある場合に有効であることが分かった。

2.2 ジオグリッドの液状化時沈下抑制効果⁶⁾

図－4、図－5 に加振開始からの構造物沈下の時刻歴を示す。ジオグリッドの剛性を高くすることによって沈下量も抑制されていることが確認できる。さらに、ジオグリッドは幅を広くすることによって構造物沈下を抑制していることがわかる。

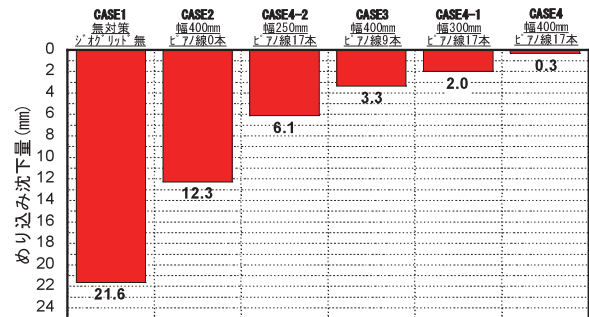


図－4 構造物沈下の時刻歴（CASE1～4）

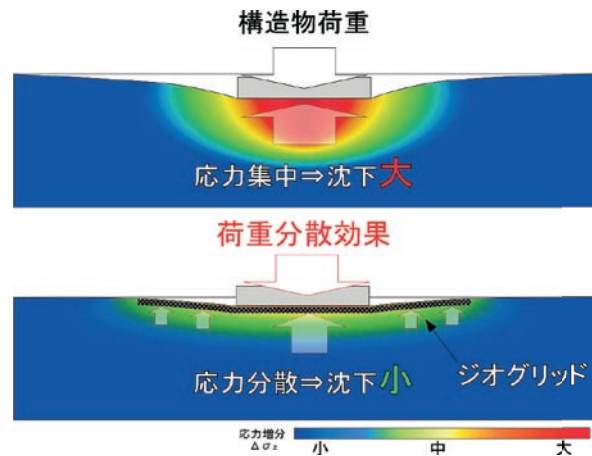


図－5 構造物沈下の時刻歴（CASE4, 4-1, 4-2）

図－6 にめり込み沈下量の比較を示す。ここで、本研究ではめり込み沈下量を構造物沈下量から構造物から 1cm 以内の地盤沈下量を差し引いた値とした。実験結果より、ジオグリッドを敷設する



図－6 めり込み沈下量の比較

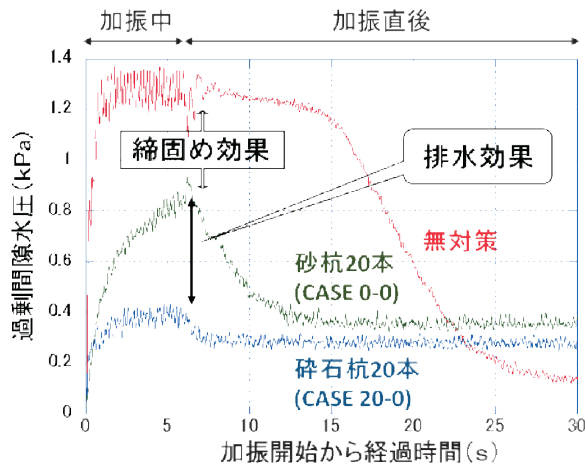


図－7 ジオグリッドによる荷重分散効果

ことによってめり込み沈下を抑制していることがわかる。さらに、CASE8 においてめり込み沈下量を殆ど抑制していることが分かった。要因として、図－7 に示すように加振中に構造物荷重がジオグリッドによって分散され地盤内で生じる応力が小さくなり、沈下が抑制されたことが考えられる。

2.3 CSP 工法の液状化時沈下抑制効果⁷⁾

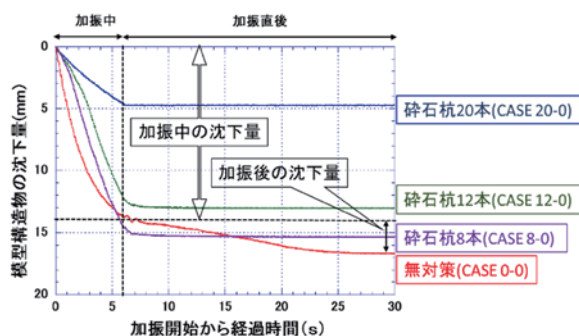
図－8 に W3 における過剰間隙水圧を示す。発生する過剰間隙水圧は、碎石杭の方が小さく地震時過剰間隙水圧の早期消散効果が高いことが確認できる。砂杭では締固めによる非液状化効果は期待できるが透水性はほぼ打設前と同様のため無対策地盤と同様に排水効果が期待できないと考えられる。さらに、碎石杭では非改良層にも同じ効果が確認された。これは、上の改良層の過剰間隙水圧早期消散により、下の非改良層の過剰間隙水



図－8 W3における過剰間隙水圧

圧が消散しやすくなったためと考える。したがって、砕石杭を打設すると打設深度の液状化層を改良するだけでなく、その下層の液状化抑制効果が期待できる。

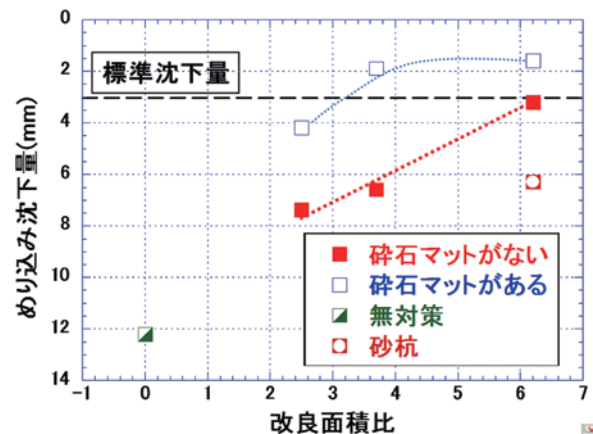
図－9に杭本数の違いによる模型構造物の沈下量を示す。砕石杭8本は構造物の直下改良，12本は構造物の直下と周辺改良，20本は地盤全面改良と想定し実験を行った。砕石杭を打設すると最終沈下量を小さくなり，本数が増えるほど沈下量が小さくなる。したがって，改良面積は広いほど沈下量が低くなることが分かる。また，無対策では加振後の沈下が見られたが，砕石杭の全ケースで殆ど見えなかった。地震後沈下は過剰間隙水圧の消散による沈下であり，過剰間隙水圧がほとんど生じない砕石杭では地震後沈下もほとんど生じないことが分かる。以上から，地震中の過剰間隙水圧を抑制するだけでなく，地震後沈下の抑制



図－9 構造物の沈下量

にも効果があることが分かる。

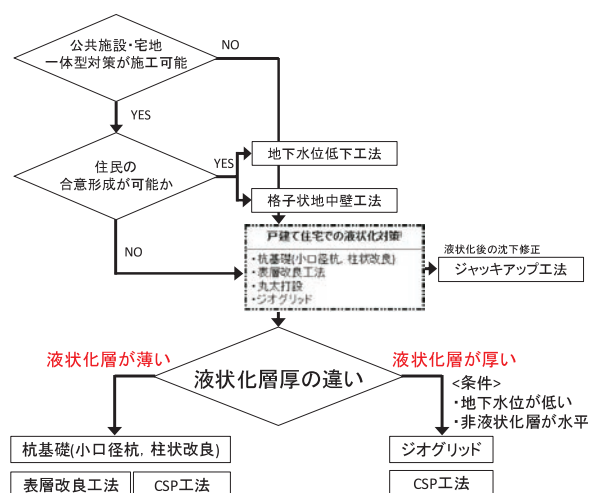
図－10は，改良面積比とめり込み沈下量の関係を示している。砕石マットの敷設により，めり込み沈下抑制効果を確認できる。しかし，改良面積比が約4より大きくなるほど，この効果が小さくなる。また，本実験条件で，砕石杭マットが有る場合，改良面積比が約2以上にするとめり込み沈下量が最大許容沈下量以内，改良面積比が約3.2以上にするとめり込み沈下量が標準沈下量以内である。一方，砕石マットが無い場合，改良面積比を3.2にするとめり込み沈下量が最大許与沈下量より大きい。従って，安全面と経済面から，本実験条件では改良面積比を3.2で砕石マットを敷設することが良いと判断できる。



図－10 改良面積比によるめり込み沈下量

3. 戸建て住宅の液状化時沈下抑制工法の提案

東日本大震災を受けて，国土交通省による市街地液状化対策事業により地下水低下工法など公共施設・宅地一体型対策に取り組む地区が報告されているが，住民合意が得られない地区では個別に液状化対策を行う必要がある。しかし，図－1に示すように従来の液状化対策は安価な工法が少ない。そこで，図－11に示す比較的安価なジオグリッドおよび杭基礎を含めた液状化対策選択フローを提案する。本フロー図の有意義な点は，地盤条件から液状化対策工法を選択できることである。従来までの液状化対策工は地盤条件（液状化層厚の違い）についての言及が少なかった。さら



図－ 11 液状化対策選択フロー

に、液状化層が厚い地盤は対策費用が高価であり戸建て住宅用の工法が確立されていなかったが、本研究よりジオグリッド・CSP工法の有効性を示したので本フロー図に加えた。

4. アウトリーチ活動

本研究の成果を地域社会へ還元するためのアウトリーチ活動は以下のとおりである。

- ・ひたちなか市で作成している液状化ハザードマップ（解説版）において、戸建て住宅の液状化被害防止および低減技術について、本研究の成果を紹介するとともに、地域住民が対策の必要性や効果の理解を促進する地域社会還元を行った。
- ・平成 25 年度から本プロジェクトで取り組んでいる活動について、NHK の TV 番組「いは 6」（2015 年 2 月 24 日放映）に地域自治体と大学が共同で取り組んでいる活動のひとつとして紹介された。番組の反響は大きく、より一層の研究成果が社会還元される期待の大きさを再認識した。

②プロジェクトの達成状況

- ・杭基礎は液状化層の 80% まで貫入すると沈下低減が 60% となり、表層付近に薄い液状化層がある場合に有効であることが分かった。

- ・ジオグリッドの剛性を高くし、さらに幅を広げることで構造物のめり込み沈下量を本実験条件で 1mm 以内に抑制することを確認した。
- ・CSP 工法の改良面積が広いほど液状化抑制効果が上がることを確認された。また、安全面と経済面から、本実験条件では改良面積比を 3.2 で碎石マットを敷設することが良いと分かった。

また、得られた結果は地域住民に配布する防災マップの個別対策方法の紹介に掲載され、地域貢献に大きく寄与することができた。さらに、地盤調査会社および住宅基礎メーカーとの協力を得ることができ、産官学連携と地域貢献へのより強固な体制を作ることができた。

③今後の計画と課題

- ・数値解析を実施し、解析的に杭基礎・ジオグリッド・CSP 工法の効果を調査する。
- ・地域住民に対するアウトリーチ活動を行い、地域貢献に寄与する。
- ・液状化対策工法の構造物傾斜抑制効果についても調査を行う。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、室山拓生（川崎地質・課長代理）、塚田義明（旭化成建材・マネージャー）の協力を頂いた。付記して謝辞を表します。

参 考 文 献

- 1) 国土交通省：宅地の液状化対策について、http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_fr1_000010.html, (2015 年 12 月 21 日現在)
- 2) ひたちなか市役所：液状化対策検討住民説明会, 2013.
- 3) 野口武彦・村上 哲・小峯秀雄：杭基礎を用いた戸建住宅の液状化時沈下抑制効果の実験的検証, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.1591-1592, 2014.
- 4) 地盤工学会関東支部：造成宅地の耐震対策に

関する研究委員会，造成宅地の耐震効果に関する研究委員会報告書－液状化から戸建て住宅を守るための手引き－，2013.

- 5) 吉丸将司・村上 哲・野口武彦：1g 場振動台模型実験装置を用いた杭基礎による液状化時めり込み沈下抑制効果の検討，第 50 回地盤工学研究発表会，pp.1943-1944, 2015. 7
- 6) 野口武彦・村上 哲・小林 薫：ジオグリッ

ドによる戸建住宅の液状化時めり込み沈下抑制効果の検討，第 51 回地盤工学研究発表会（投稿中）

- 7) NGUYEN DINH DAT・村上・小林・安原・野口：1g 場振動台模型実験装置を用いた CSP 工法の地震時液状化抑制効果，第 51 回地盤工学研究発表会（投稿中）