

既設戸建て住宅に対する杭とワイヤーによる 簡易な液状化対策工法の提案

石川 敬祐¹・深谷 敏文²・安田 進³・松橋 求⁴

¹正会員 東京電機大学 准教授 理工学部建築・都市環境学系（〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂）
E-mail: ishikawa@g.dendai.ac.jp

²正会員 ハイアス・アンド・カンパニー株式会社 事業開発本部

³名誉会員 東京電機大学 名誉教授 総合研究所

⁴学生会員 東京電機大学大学院 理工学研究科建築・都市環境学専攻

2011 年東日本大震災では地盤の液状化により約 27,000 棟の戸建て住宅の沈下や傾斜被害が発生した。今後、同様の液状化被害を未然に防ぐために、既設戸建て住宅に対する新たな液状化対策の開発が急務である。本報では、既設戸建て住宅に対して液状化対策を行う上での“狭い施工空間”“対策費用”といった制約を満足する新しい液状化対策工を提案する。この対策工は、地盤が液状化した際の支持力低下分を小口径の杭材の軸力とそれに連結したワイヤーの張力で補うものである。ここでは、1/25 スケールの重力場の振動台実験により、杭やワイヤーの配置による対策効果を考察した。その結果、建物周囲に配置した杭端部の水平方向の変位を拘束することで建物模型のめり込み沈下を抑制できることがわかった。加えて液状化地盤中の杭材の変形は杭の中央部で最大となるが、杭材の変形に伴う曲げ降伏は生じなかった。

Key Words: existing detached house, liquefaction countermeasure, shaking table, penetration settlement

1. はじめに

2011 年東日本大震災では、地盤の液状化による深刻な被害が東北地方から関東地方の広い範囲で発生した。この被害の特徴として、私的財産である戸建て住宅の沈下や傾斜があげられる。本震災での戸建て住宅の沈下や傾斜の被害総数は、東日本地域で約 27,000 棟におよび、その内の半数が東京湾岸エリアの都市域の住宅地に集中した¹⁾。このような膨大な数の住宅が被害を受けたのは我が国ではもちろんのこと、世界的にも初めての事象となった。一方、公共構造物や中・高層ビルのように地盤の液状化に対する調査方法や設計が確立され、必要な対策が施されている構造物においては被害は確認されていない。

このような甚大な被害が生じた要因には、私的財産である戸建て住宅などの小規模建物においては、地盤の液状化による被害がその所有者や設計者に十分に認識されていなかったことが考えられる。また、戸建て住宅に対する液状化による被害の予測方法や対策技術の開発も十分になされていないといった課題もある。

これまでに開発されてきた液状化対策工法は、①液状化を防止する工法と②構造的な対策工法（液状化が発生

しても被害を受けないようにする工法）に大別される²⁾。新設の構造物では、①や②の種々な工法で対策を施しやすいが、個々の既設戸建て住宅のような小規模建物に対しては施工上の多くの制約がある。

既設の戸建て住宅に対する液状化対策の制約条件として、以下の点が挙げられている³⁾。

- 1) 個々の宅地ではスペースが狭いため、狭隘な場所では施工ができる小型の施工機械が必要となる。
- 2) 家屋が隣接していると隣家に悪影響を与えないように注意する必要がある。
- 3) 個々の財産なので公共構造物に比べて多大な費用をかけにくく、安価な対策しか実施し難い。
- 4) 新設の場合と既設の場合で対策に必要な費用が大幅に異なる。

このように、既設の戸建て住宅に対する液状化対策では、施工方法やその費用に強い制約がかかるため、戸建て住宅に特化した新しい液状化対策の開発が望まれている。既設の戸建て住宅に対する被害抑制対策として、安田らは薄鋼矢板を用いて既設戸建て住宅の周囲を囲むことで不同沈下が抑制されることを実験的に明らかにしている⁴⁾。三輪らは丸太で既設戸建て住宅の周囲を囲むことで住宅の不同沈下を抑制される有効性を模型実験や数

値解析で明らかにしている⁹⁾。また、眞野らは構造物外周の表層付近を礫置換することで液状化による小規模構造物の傾斜を大幅に低減できることを実験的に明らかにしている⁹⁾。このように、既設戸建て住宅の周囲に対する被害抑制対策は東日本大震災以後に各種提案されている。しかし、建物周囲を全面的に改良するためには、狭隘な場所での施工や隣家への影響、またライフラインなどによって不連続部が生じることへの影響など課題も残されている。

以上のことを背景として、本研究では既設の戸建て住宅に対する新しい液状化対策工法として、杭材とワイヤーを併用した簡易な液状化対策工法を提案し、重力場での振動台実験により本工法の沈下抑制メカニズムを考察するとともに、本工法のめり込み沈下抑制効果を評価することを目的とした。

2. 既設小規模建物に対する簡易な液状化対策の概念

地盤の液状化に伴う直接基礎構造の建物の被害として、建物が地盤中にめり込むように不等沈下する被害が発生する⁷⁾。図-1は、直接基礎の小規模建物のめり込み沈下の概念を示したものである。建物の支持地盤が液状化すると地盤のせん断剛性が低下し、建物荷重に対する支持力が低下または消失する。そして建物荷重が液状化層に伝達することで液状化層にせん断変形が発生する。この際に、建物が地盤中にめり込む沈下や傾斜が発生する。

次に、本報で提案する既設小規模建物に対する簡易な液状化対策の概念を図-2で説明する。本対策工法は2つの部材で構成されている。1つ目は、建物周囲に複数本配置した鉛直杭材である。2つ目は、建物下に敷設したワイヤー材である。ワイヤー材を杭頭部で連結することで液状化時の支持力低下分を補う新たな液状化対策である。本工法は、先述の通り、建物の支持地盤が液状化すると建物荷重に対する支持力が低下または消失するため、この際の支持力低下分を杭とワイヤーで補う工法となる。常時の支持力は地盤が受け持つが、液状化時の支持力は液状化の程度に応じて地盤と本対策工が受け持つことになる。地盤が完全に液状化し泥水状態になると地盤の支持力は期待できず、建物荷重はワイヤーに伝達する。そして、ワイヤーに働く張力を通じて杭材に荷重が分配される。したがって、液状化地盤に作用する建物荷重は小さくなり、液状化層のせん断変形は小さくなる。そして、地盤のせん断変形を小さくすることができると、建物のめり込み沈下量を抑制することが可能となる。加えて、建物下面にワイヤーを通すことで建物基礎のたわみ変形を抑制する複合効果も兼ね備えている。

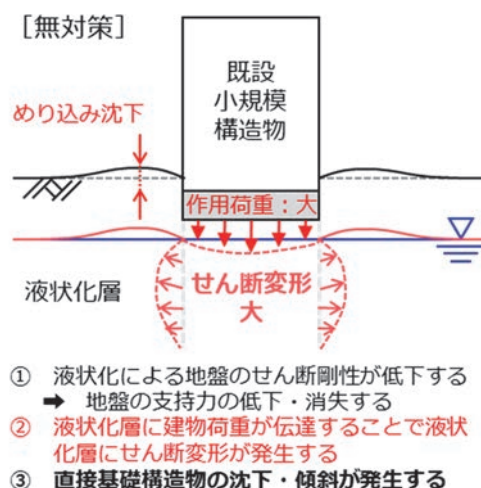


図-1 直接基礎の小規模建物のめり込み沈下の概念

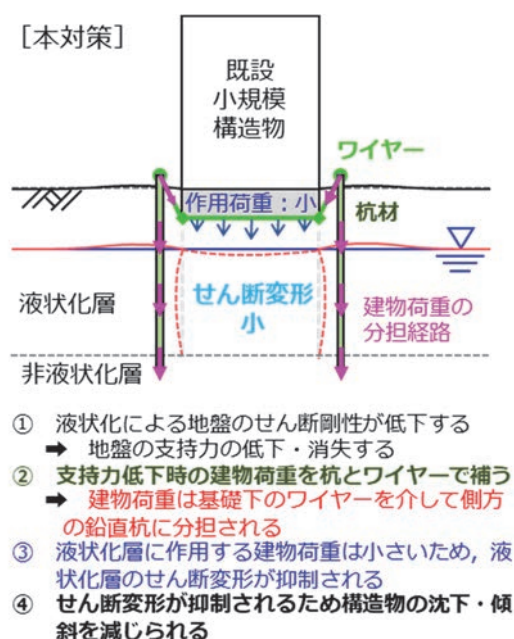


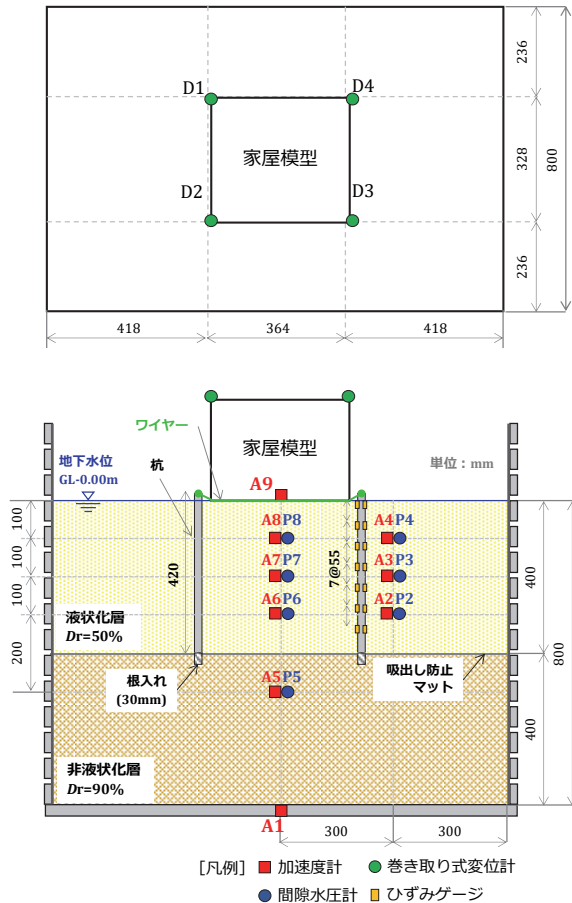
図-2 簡易な液状化対策工法の概念

3. 振動台実験の方法

本対策工法の効果を検証するために重力場での模型振動台実験を行った。図-3は、模型や計測器の配置図である。本実験には、せん断土槽（幅 1,200mm×高さ 1,000mm×奥行 800mm）を用いた。模型の縮尺は、1/25とした。模型地盤には、豊浦砂（ $\rho_s=2.659\text{Mg/m}^3$, $e_{\text{max}}=0.993$, $e_{\text{min}}=0.613$ ）を用いた。模型地盤は、液状化層と非液状化層の二層地盤とした。液状化層は、実地盤で層厚 10m 相当の緩い砂地盤を想定し、層厚 400mm の相対密度 $D_r=50\%$ とした。その下層には、非液状化層として層厚 400mm の相対密度 $D_r=90\%$ とした。液状化層と非液状化層の層境界には吸出し防止マット（厚さ 10mm）を敷設している。これは、繰返し模型振動台実験を行う際に液

表-1 実験ケースの一覧

	杭			杭端部の拘束条件		ワイヤー	
	材質	杭径(mm)	本数	杭頭部	杭先端	本数	配置方向
Case1	-	-	-	-	-	-	-
Case2	アクリル	8	4	フリー	着底	2	直交
Case3							
Case4							
Case5	アルミ	4	8	水平拘束	根入れ	4	平行
Case6							
Case7							
			12			6	



上：平面図 下：側面図 (単位：mm)

図-3 模型地盤と計測器配置

状化層の再作製を効率よく行うためである。液状化層の密度管理は、地表面から高水圧噴射ノズルを液状化層中に貫入することで砂地盤を攪拌し、緩い状態の液状化層を層厚管理で再作製している⁸⁾。非液状化層は、水中にて所定の密度相当の豊浦砂を投入し、微振動を与えながら層厚管理で模型地盤を作製した。地下水位は、全ての実験ケースで地表面としている。家屋模型は、一般的な2階建て木造住宅を想定して接地荷重を 0.48kN/m^2 (実物 12kN/m^2) とし、土槽中央の地表部に設置した。なお、家屋模型は根入れしていない。対策工に用いる杭材は、一般に流通している炭素鋼管 (外径 60.5mm 、厚さ 4mm) を想定し、Iai が提案する曲げ剛性の相似則⁹⁾からアクリ

ル製パイプ (外径 8mm 、厚さ 2mm 、長さ 420mm) とアルミ製パイプ (外径 4mm 、厚さ 0.5mm 、長さ 420mm) の外径の異なる2種類を用いた。ワイヤーには伸縮性の少ないポリエチレンロープ (太さ 1.5mm) を使用し、杭頭部にネジを用いて剛結した。

計測器は、図-3に示すように加速度計 (A1-A9)、間隙水圧計 (P2-P8) をそれぞれ同一深度にペアで配置した。液状化層中には、深度 -100mm 毎に家屋模型直下と家屋模型の側方地盤中に配置している。非液状化層中には、家屋模型直下の深度 -500mm に配置している。家屋模型の変位計測には、模型の四隅に設置した巻取り式変位計 (D1-D4) を用いた。また、加振前と後の地表面の変化から液状化に伴う地盤の沈下量を求めている。この際に家屋模型の中心線から土槽の長手方向に 25mm ピッチで10点ずつ計測を行った。Case4-Case7の杭材の1本には、杭材の深度方向の曲げひずみを測定するために地表から 55mm 間隔で7対のひずみゲージを付している。

加振条件は、正弦波 (2Hz , 20s) とし、振動台の台加速度を 1.40m/s^2 とした。加振方向は、一方向加振で土槽の長手方向に入力している。なお、加振終了後より、過剰間隙水圧が完全に消散しきることを確認して計測を終了した。

実験条件は、表-1に示すように杭頭部や杭先端の拘束状態、杭径、杭本数を変化させた全7ケースとした。Case1は、無対策の条件である。Case2-Case4は、アクリル製パイプの杭材4本とワイヤーの対策モデルであり、杭端部の拘束条件やワイヤーの配置方法を変化させた条件となる。Case5-Case7は、アルミ製パイプの杭材の本数を変化させた条件となる。Case2-Case3の杭端部の拘束条件として、杭頭部はフリーな状態とし、杭先端部は非液状化層上面の吸出し防止マットに杭先端が着底した状態である。Case4-Case7の杭端部の拘束条件として、杭頭部は家屋模型に設置したヒートン (杭径より一回り大きいリング状の金具) で家屋模型と杭頭の水平方向の変位を拘束した。ただし、この金具で家屋模型の鉛直方向の変位を拘束するものではない。また、杭先端部に円錐状に加工した丸棒を 30mm 接続し、この部分を非液状化層内に根入れした状態である。ワイヤーの配置方向は、

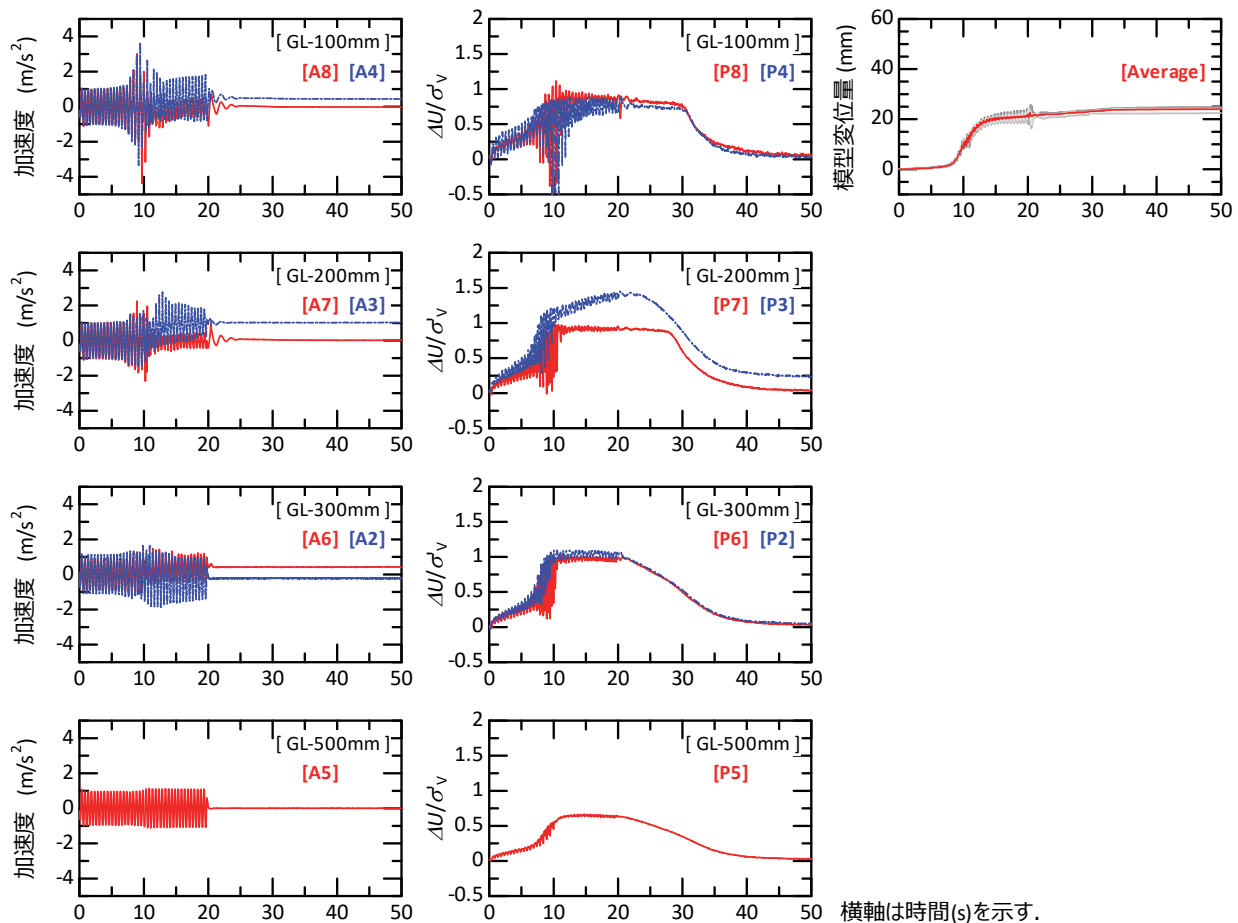


図-4 Case1（無対策）の実験結果

振動台の加振方向に対する方向を示している。

4. 振動台実験による対策効果の検証

(1) 無対策時の家屋模型の沈下挙動

図-4 に Case1 の無対策条件での各計測器の時刻歴を示す。同図は、各計測器の深度ごとに整理している。加速度や過剰間隙水圧比のデータは、赤線が家屋模型直下を示し、青線が家屋模型の側方地盤部を示している。なお、過剰間隙水圧比は、計測器設置位置での有効上載圧で除した値である。右上の模型変位量は、家屋模型の4隅に設置した各変位計の時刻歴を灰色で示し、それらの平均値を赤線で示している。

液状化層内の過剰間隙水圧比の時刻歴より、加振開始とともに間隙水圧が上昇しており 8s 付近から急増し、10s 付近で各深度の有効上載圧に達していることがわかる。また、時刻 20s で加振が終了した後、下層からの過剰間隙水圧の消散に伴い地表付近では加振終了後 10s 程度は過剰間隙水圧比が頭打ちの状態となっている。P3 では時刻 10s 付近から上昇しているが、加速度記録が正側へドリフトしているためセンサー位置が変化したため

と考えられる。一方、非液状化層の過剰間隙水圧比は 0.6 程度で頭打ちとなり液状化には至っていない。

家屋模型の沈下挙動は、3 段階に区分することができる。1 段階目は、加振直後～模型直下地盤の P8 の過剰間隙水圧比が 0.7 程度となるまでの加振後 8s 間であり、この間に家屋模型は軽微なゆすり込み沈下が生じている。続いて、2 段階目は P8 の過剰間隙水圧比が 0.7 に達した 8s から過剰間隙水圧比の低下が始まる 30s までであり、この間に家屋模型の主要な沈下となるめり込み沈下が生じ、液状化層の下層の過剰間隙水圧の消散に伴う体積圧縮が生じていることがわかる。3 段階目は、液状化層上部の過剰間隙水圧の消散が確認される 30s 以降であり、過剰間隙水圧の消散に伴う体積圧縮挙動が生じている。家屋模型の最終沈下量の平均値は 24mm であり、家屋模型の周辺地盤の過剰間隙水圧の消散後の地表面の平均沈下量は 5mm であり、平均めり込み沈下量は 19mm であった。

(2) 杭とワイヤーの配置や杭端部の拘束条件の違いによる対策効果

図-5 に Case2-Case4 の杭とワイヤーによる対策モデルにおいて、杭端部の拘束条件やワイヤーの配置方法を変

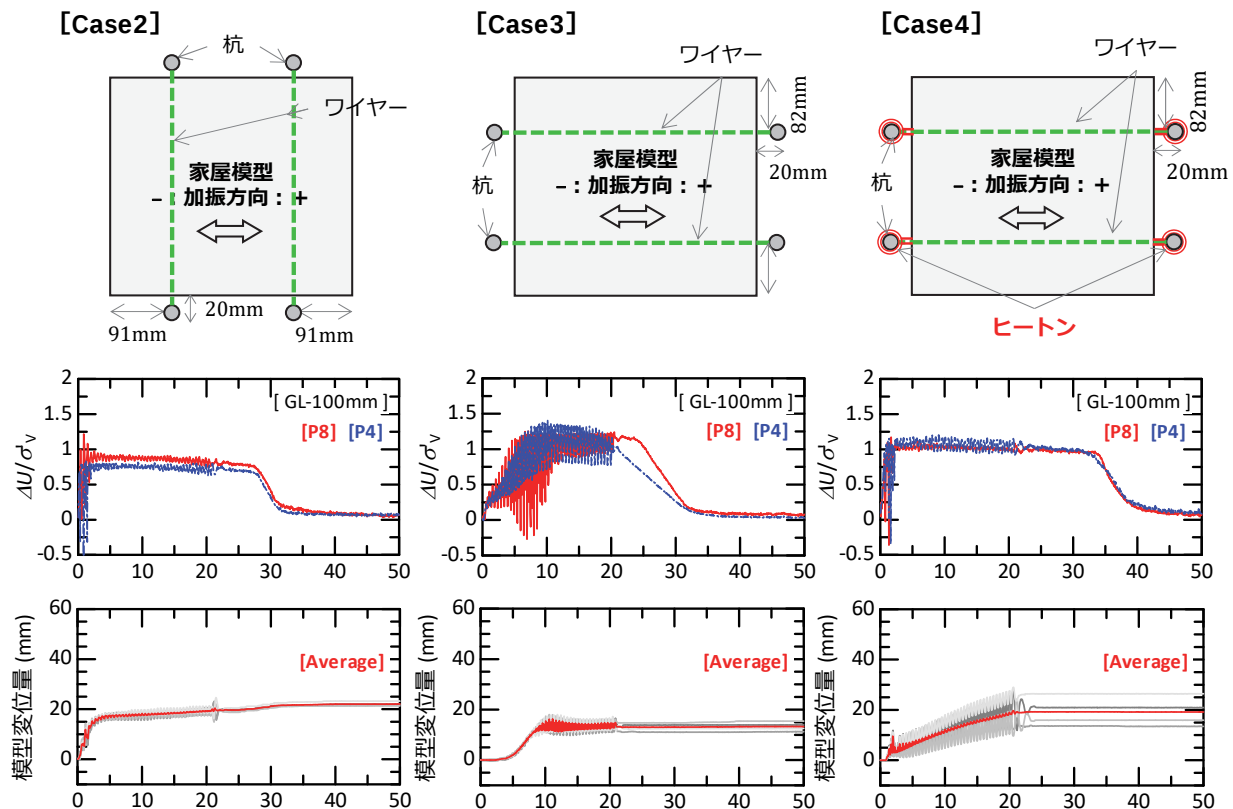


図-5 Case2-Case4の実験結果例

化させた条件での実験結果を示す。ここでは、液状化層の最上部（GL-100mm）の過剰間隙水圧比と家屋模型の変位のみを示す。

Case2（左図）は、杭とワイヤーを加振方向に対して直交に配置した条件である。これより、液状化層の過剰間隙水圧の上昇や家屋模型の沈下の傾向は無対策と類似した挙動を示しており、過剰間隙水圧比の消散過程である 29s 以降にも家屋模型が沈下していることがわかる。対策効果が少なかった原因として、加振中の液状化層のせん断変形により杭材の杭頭が加振方向に移動していたことが実験動画より確認できた。これにより家屋模型の直下に敷設したワイヤーが弛んでしまったことにより、本工法の支持効果を十分に発揮できなかったと考えられる。家屋模型の最終沈下量の平均値は 22mm であり、家屋模型の周辺地盤の過剰間隙水圧の消散後の地表面の平均沈下量は 6mm であり、平均めり込み沈下量は 16mm であり、対策工効果はあまり見られなかった。

Case3（中図）は、杭とワイヤーを加振方向に対して平行に配置した条件である。これより、加振開始 4s 後に過剰間隙水圧が有効上載圧に達し、この付近から家屋模型の沈下が発生する。しかし、家屋模型の沈下は 10s 付近で頭打ちとなり、その後の 20s までの加振中や過剰間隙水圧の消散に伴う体積圧縮時にも Case1 や Case2 で見られたような家屋模型の沈下挙動は見られなかった。また実験動画より、加振開始から 7s の時点で杭頭が家

屋模型に接触していることが確認された。この際の杭とワイヤーの挙動は、液状化に伴う支持力低下により家屋模型が沈下し、その影響によりワイヤーには家屋模型側に引き込む方向の張力が発生し、その張力によって杭頭部が家屋模型に接触したと考えられる。家屋模型の最終沈下量の平均値は 13mm であり、家屋模型の周辺地盤の過剰間隙水圧の消散後の地表面の平均沈下量は 5mm であり、平均めり込み沈下量は 8mm であり、無対策に対してめり込み沈下量を 40%程度に抑制できる効果が確認された。

Case4（右図）は、杭とワイヤーを加振方向に対して平行に配置し、杭頭部の水平方向の変位を拘束し、非液状化層に杭先端を根入れした条件である。これより、加振直後から液状化層の過剰間隙水圧の上昇が確認され、1s 付近で有効上載圧に達していることがわかる。また、液状化状態での加振中（1s-20s 間）の家屋模型の変位振幅の単調増加は Case2 や Case3 には見られない挙動である。これは、液状化層が液状化したことで加振に伴う地盤のせん断変形が大きくなり、液状化地盤中に配置された杭が地盤のせん断変形を受けて家屋模型の水平移動を生じたと考えている。ただし、過剰間隙水圧が完全に消散した後の家屋模型の最終沈下量の平均値は 11mm であり、家屋模型周辺の地表面平均沈下量は 12mm であり、平均めり込み沈下量は -1mm と若干抜け上がる状態であり、対策効果が十分に確認された。

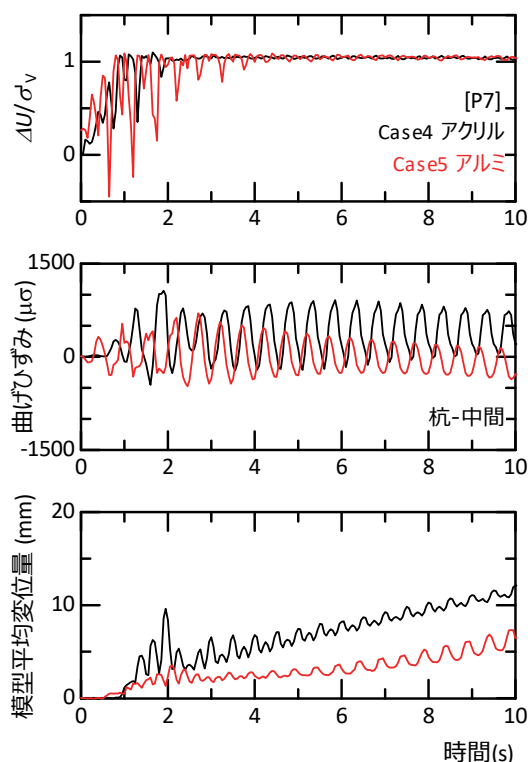


図-6 液状化地盤中の杭材の挙動（杭径の違い）

以上のことより、杭頭部の水平方向の変位を拘束し、かつ杭先端部を根入れして変位拘束することで液状化時の直接基礎構造物のめり込み沈下を抑制できることがわかった。

(3) 液状化地盤中の杭材の時刻歴応答

Case4 において、既設小規模建物の液状化時のめり込み沈下量を抑制する効果は確認できた。一方、液状化地盤のせん断変形を受けることで家屋模型の水平変位が確認されたことから液状化地盤中の杭材の挙動を把握するために杭径や杭本数を変えた実験を行った。使用した各杭材のパイプは、材質や外・内径から曲げ剛性を合わせている。Case4 の杭材は外径 8mm（アクリル製）であり、Case5-Case7 の杭材は外径 4mm（アルミ製）である。図-6 は、杭径の異なる Case4 と Case5 の液状化層の中間深度における過剰間隙水圧比と杭材の曲げひずみ、家屋模型の平均変位量の時刻歴である。図-7 は、Case5-Case7 の杭本数の違いによる同関係である。これより、液状化地盤中の杭材に発生する曲げひずみの特徴は、液状化に至る状態と完全に液状化した状態と異なることがわかる。液状化に至る状態では、加振に伴い液状化層の過剰間隙水圧が上昇することで、有効応力が低下する。過剰間隙水圧比が 0.6 程度に達すると地盤のせん断剛性が低下し、杭材の曲げひずみが発生する。また、液状化層のサイクリックモビリティにより過剰間隙水圧が一時的に減少し有効応力が回復したタイミングで杭材の曲げひずみのピ

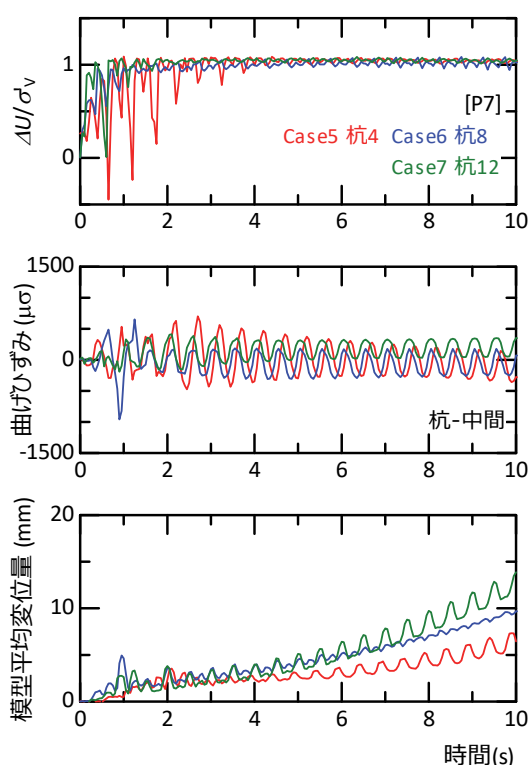


図-7 液状化地盤中の杭材の挙動（本数の違い）

ーク値が現れる。この挙動は液状化層のせん断剛性が回復したことで杭材の変形が拘束されたことが影響していると考えられる。一方、液状化層の過剰間隙水圧比が頭打ちとなり、完全に液状化した状態では杭材には大きな曲げひずみは発生せずに一定振幅の曲げひずみが発生していることがわかる。

液状化地盤中の杭材に曲げひずみが急増する点と家屋模型の変位が発生する時点は、ほぼ同じタイミングである。このことから、液状化層のせん断剛性が低下したことでワイヤーを通じて杭材に建物荷重が作用したことや液状化層のせん断変形で杭材が撓み、撓んだ杭材が地盤のせん断変形を受けやすくなり、それに伴い各杭材の杭頭部の位置が変化する。そして杭頭部が水平変位することに連動して家屋模型も水平変位を生じていると考えられる。これらの挙動は、杭径が太いほど、また杭本数が多いほど顕著なようである。

(4) 液状化地盤中の深度方向の杭材の挙動

図-8 は、Case4-Case7 の杭径・杭本数の違いによる液状化地盤中の杭材の曲げひずみの深度分布である。各深度分布の内、小さいプロットは加振中の曲げひずみ応答であり、大きいプロットは加振後の過剰間隙水圧の消散過程中的曲げひずみ応答である。なお、Case5 の下端位置の曲げひずみ計測は計測不良である。これより、杭材の曲げひずみの深度応答は杭径が太いほど各深度で曲げひずみの最大値は大きくなっていることがわかる。一方、

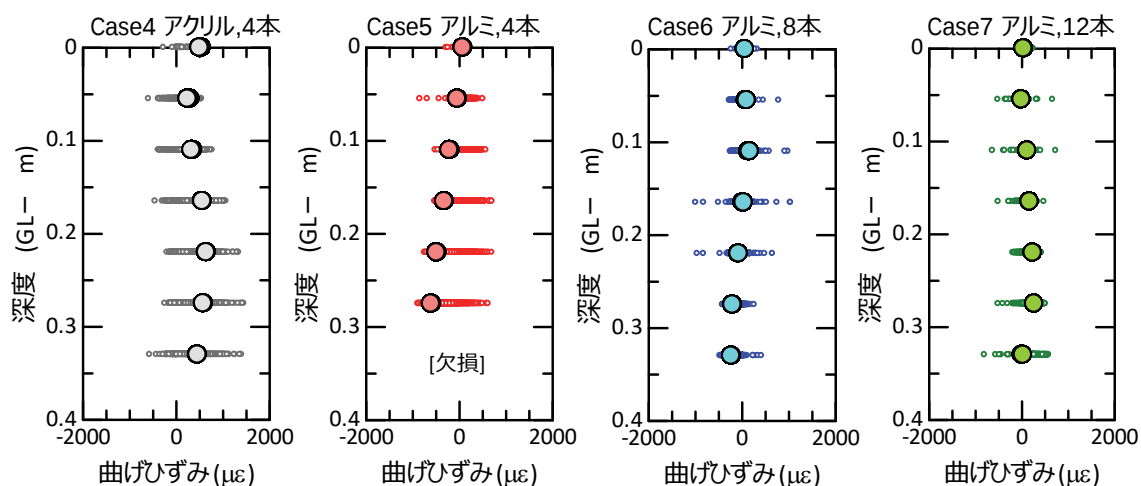


図-8 曲げひずみの深度分布

杭径が同じ場合に杭本数が多い方が曲げひずみの最大値は小さくなっているようである。これは、杭本数を増やしたことで杭 1 本あたりの家屋模型の荷重負担割合が小さくなることで杭材の曲げひずみが減少したと考えられる。また、過剰間隙水圧の消散過程中には曲げひずみの変化は非常に小さいことがわかる。深度方向の曲げひずみ分布の特徴は、液状化層の中間深度付近で最も大きな曲げひずみが発生することがわかった。以上のことから、杭 1 本あたりの建物荷重の負担割合を適切に定めることで液状化地盤中の杭材の曲げ変形を制御することが可能と考えられる。

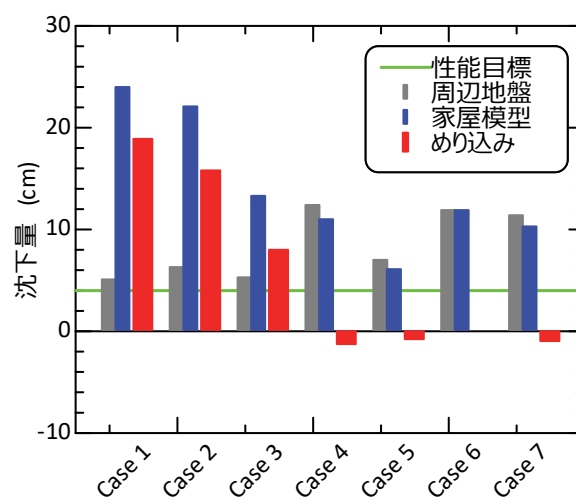


図-9 めり込み沈下量と性能目標の関係

5. 杭とワイヤーによる簡易な液状化対策工の評価

谷ら¹⁰⁾は、液状化に対する戸建て住宅の性能評価として、関連する法令・基準類や過去の被災事例、修復工事の状況等を詳細に調査している。過去の被災事例^(例えば 11)からは、傾斜角が 10/1,000 (0.6°程度) となるとめまいや頭痛を生じ水平復元工事を行わざるを得ないことが指摘されており、傾斜の限界値は 8/1,000~10/1,000 程度と述べられている。また、内閣府による罹災証明のための被害認定では 10/1,000 の傾きは半壊と判定される¹²⁾。東日本大震災後の水平修復工事を実施した建物の被災状況より、不同沈下量は 80mm 程度であったことや傾斜は 6/1,000~10/1,000 であったことが述べられている。これらの結果を踏まえて、中地震動に対する戸建て住宅の液状化対策のクライテリアとして、有害な沈下変形を許容しない基礎構造とし、傾斜は 10/1,000 を超えないものと提案されている。

本工法の液状化対策工法としての性能評価は、上記の

クライテリアを踏襲し、傾斜で 10/1,000 を満たすことに定めた。ただし、等分布荷重の家屋模型一棟では傾斜は確認されないため、家屋模型の平均沈下量と周辺地盤の沈下量の差であるめり込み沈下量で対策効果の検討を行う指標と定めた。東日本大震災における戸建て住宅の平均めり込み沈下量と傾斜角の関係¹³⁾より、傾斜が 10/1,000 時の平均めり込み沈下量は、70mm~150mm となり住宅の密集程度の違いによって異なるようである。これらを踏まえて、本研究では傾斜が 10/1,000 となる住宅の平均めり込み沈下量を 100mm (模型スケールで 4mm) と定義し、この値を満足するか否かを液状化対策効果の性能目標に定めた。

図-9 は、各 Case の地盤沈下量と家屋模型のめり込み沈下量の関係である。ここで、家屋模型のめり込み沈下量とは、家屋模型の平均沈下量から周辺地盤の平均沈下量の差を示しており、正 (+) の値は地表面より深に家屋模型が沈下した値を示し、負 (-) の値は対策効果によ

り地表面より家屋模型の沈下量が少ない状態を示している。なお、液状化中の加振によって家屋模型の水平移動が確認された Case4-Case7 の家屋模型の平均沈下量については、加振前後の家屋模型の位置関係より水平変位量を求め、巻取り式変位計の変位量を鉛直成分と水平成分に分離して算定した。これより、Case2やCase3の杭材の杭頭や杭先端の変位拘束を与えない状態では、無対策に対して対策工の効果は認められるが本対策工の性能目標には達していない結果となっている。一方、Case4-Case7の家屋模型からの杭頭の水平方向の変位を拘束し、杭先端を非液状化層に根入れした状態では、周辺地盤の沈下量と家屋模型の沈下量はほぼ同程度となり、有意な家屋模型のめり込み沈下量は生じていないことがわかり、本対策工の性能目標を満足することが確認された。

6. まとめ

本研究では既設の戸建て住宅に対する新しい液状化対策工法として、杭材とワイヤーを併用した簡易な液状化対策工法を提案し、重力場での振動台実験結果より本工法のメカニズムを検討し、沈下抑制効果について評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 家屋模型の液状化に伴う沈下挙動は、加振直後～模型直下地盤の過剰間隙水圧比が 0.7 程度となるまでの間の軽微なゆすり込み沈下と、その後の液状化過程でのめり込み沈下および過剰間隙水圧の消散に伴う体積圧縮が生じることがわかった。
- 2) 杭とワイヤーによる簡易な液状化対策は、杭端部の拘束条件によって本工法の対策効果に大きな違いが生じることがわかった。
- 3) 液状化地盤中の杭材の曲げ変形の挙動として、液状化層の過剰間隙水圧比が 0.6 程度を超えると曲げひずみが発生する。これは、液状化地盤のせん断剛性が低下することで建物荷重がワイヤーを通じて杭材に作用したことや液状化地盤のせん断変形を杭材が受けたためと考えられる。
- 4) 液状化地盤中の杭材の曲げ変形の深度分布は、液状化層の中間深度付近で最も大きな曲げひずみが発生する。杭径が大きいほど各深度の曲げひずみは大きくなり、杭本数が多くなるほど各深度の曲げひずみは小さくなる。
- 5) 本工法の対策効果を十分に発揮するためには、杭頭の水平方向の移動を拘束し、杭先端を非液状化層に根入れすることで液状化時の直接基礎構造物のめり込み沈下を抑制できることがわかった。

今後は、本実験結果を踏まえて二棟間による本工法の対策効果の検証や FEM 解析によるめり込み沈下量の評価方法を検討していく予定である。

謝辞：振動台実験は、東京電機大学大学院の奥倉大樹氏、東京電機大学の福田開氏、山口佳晃氏にご協力いただいた。末筆ながら深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Yasuda S., Harada K., Ishikawa K. and Kanemaru Y.: Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.52, No.5, pp.793-810, 2012.
- 2) 安田進：既設構造物のための液状化対策の考え方、*基礎工*, Vol. 34, No. 4, pp.5-7, 2006.
- 3) 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：液状化から戸建て住宅を守るための手引き，pp.26-31, 2013.
- 4) Yasuda S. and Ishikawa K.: Appropriate measures to prevent the liquefaction-induced inclination of existing houses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.115, pp.652-662, 2018.
- 5) 三輪滋，吉田雅穂，村田拓海，沼田淳紀：丸太打設による既設戸建て住宅の液状化対策の小型振動実験および数値解析による検討，*土木学会論文集 A1（構造・地震工学）*，Vol.72, No.4, pp.I_117-I_128, 2016.
- 6) 眞野英之，社本康広，石川明，吉成勝美：構造物外周直下の礫置換による小規模構造物の液状化被害低減対策，*日本地震工学会論文集*，第 16 巻，第 1 号（特集号），pp.59-69, 2016.
- 7) 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：液状化から戸建て住宅を守るための手引き，pp.17-19, 2013.
- 8) 安田進，丹羽俊輔：細粒分を含む模型地盤のジェットによる再利用方法，*土木学会第 59 回年次学術講演会*，No.3-219, pp.437-438, 2004.
- 9) Iai S.: Similitude for shaking table tests on soil-structure model in 1G gravitational field, *Report of the port and harbor reserch institute*, Vol.27, No.3, pp.1988.
- 10) 谷和夫，松下克也，橋本隆雄，山本彰，竹内秀克，野田利弘，規矩大義，大林淳，清田隆：浅層盤状改良工法による戸建て住宅の液状化被害軽減効果の検証と経済性評価：地盤工学ジャーナル，Vol. 9, No. 4, pp.533-553, 2014.
- 11) 安田進，橋本隆雄：鳥取県西部地震における住宅の液状化による沈下について，*土木学会第 57 回年次学術講演会*，pp.1029-1030, 2002.
- 12) 内閣府(防災担当)：災害に係る住家の被害認定基準運用指針，pp.4-1-4-7, 2021.
- 13) 橋本隆雄，安田進，山口亮：東北地方太平洋沖地震による液状化被災地区における住宅の傾斜とめり込み沈下量の関係，第 47 回地盤工学研究発表会，No.748, pp.1487-1488, 2012.

SIMPLIFIED LIQUEFACTION COUNTERMEASURE FOR EXISTING DETACHED HOUSE

Keisuke ISHIKAWA, Toshihumi FUKAYA, Susumu YASUDA
and Motomu MATSUHASHI

During the Great East Japan Earthquake of 2011, approximately 27,000 detached houses were damaged by settlement and tilting due to liquefaction of the ground. To reduce similar liquefaction disasters in the future, it is urgent to develop and deployment of new liquefaction countermeasure for detached houses. In this study, we propose a new liquefaction countermeasure to suppress the settlement and tilting of detached houses that can satisfy the conditions of “narrow construction space” and “construction cost.” The concept of this liquefaction countermeasure is to compensate for the reduced bearing capacity of a spread foundation when the bearing layer liquefies using the axial force of the pile and tension of the wire. In this thesis, the mechanism of the countermeasure effect of this method is discussed using 1/25 scale 1g shaking table tests under the experimental conditions of pile arrangement and wire arrangement between piles. From a series of shaking table experiments, it was observed that the piles were placed in pairs near the corners of the building model, and the horizontal displacement of the pile heads and pile tips was constrained, which significantly reduced the amount of settlement.