

浮き基礎工法の液状化対策としての可能性

余川 弘至*, 久世 直哉**, 野々山 栄人***, 中村 拓造****,
中村 充孝****, 八嶋 厚*****

Possibility of floating foundation for reducing damage by ground liquefaction

Hiroshi YOKAWA, Naoya KUZE*, Hideto NONOYAMA**,
Takuzo NAKAMURA***, Mitsutaka NAKAMURA*** and Atsushi YASHIMA****

(Received February 27, 2018)

In order to confirm the effect of liquefaction countermeasure of the floating foundation method, the authors conducted a field survey after the disaster of the 2011 Tohoku Pacific Offshore Earthquake using a model shaking table test and simple numerical analysis. As a result, it is confirmed that the settlement and tilting of houses by liquefaction can be suppressed by the application of the floating foundation method.

Keyword: Floating foundation, Liquefaction, Detached house

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震では液状化現象によって、戸建て住宅の沈下や傾斜などの被害が多く報告された¹⁾。地盤の液状化による戸建て住宅被害を軽減させるため、これまで地盤液状化対策工法が検討されてきた。しかし、土木分野で実績の多い液状化対策をそのまま宅地に適用すると、個人負担が非常に大きいなどの問題が生じると考えられる。

そこで著者らは、一般住宅向けの軟弱地盤の沈下抑制を主な目的として比較的低コストで施工可能な浮き基礎工法²⁾に着目した。この工法は、地盤置換工法の1つで、1996年に開発され現在まで様々な箇所で施工実績を積み上げている。しかし、この工法を液状化対策として用いられた事例は少なく、液状化対策としての傾斜・沈下の抑制効果については十分な検証が出来ていないと考えられる。そこで本研究では、戸建て住宅の基礎に浮き基礎工法を適用することによる液状化対策効果を確認するために、東北地方太平洋沖地震により被災した地域の現地調査、模型振動台実験および簡易数値解析を行った。

都市建設工学科 (Dept. of Civil Engineering)

*一般財団法人ベターリビング (Center for Better Living)

**防衛大学校 建設環境工学科 (National Defense Academy
Dept. of Civil and Environmental Engineering)

***中村物産有限公司 (Nakamura Bussan)

****岐阜大学 社会基盤工学科工学科 (Gifu University Dept.
of Civil Engineering)

2. 浮き基礎工法

2.1 工法概要

浮き基礎工法は、軟弱地面に建つ建物の基礎下の土を取り除いて、その代わりに軽量のジオフォームを敷き詰め、地盤と建物荷重のバランスを調整し、建物を不同沈下や振動から守る工法である。ジオフォームに使う材料は、発泡ポリスチレン(EPS)を用いている。住宅重量などに応じてサイズを選定して配置する。液状化層が地表から深い層にある場合などでは、他の液状化対策工法に比べて工事費用が縮減でき、工期が短縮されるなどのメリットがある工法である。

2.2 東北地方太平洋沖地震による被災状況

著者らは、東北地方太平洋沖地震より、浮き基礎工法が施工されていた住宅の被災状況調査を行い、現在も継続して実施している。その調査事例のうち、周囲に比較的大きな被害があったにもかかわらず、被害を免れた住宅を以下に示す。



写真1 K邸



写真2 I邸

写真1は、福島県須賀川地区のK邸である。K邸の周辺地盤状況は、地下水位はGL-1.0mと高く、表層は、

N値1の凝灰質砂が堆積している。公開されている液状化マップ等では、液状化の発生する可能性があるとしてされている地区である。この周辺の住宅では住宅が傾斜や沈下し、半壊している住宅も散見されたが、K邸では、室内の置物等が転倒するのみで、躯体に大きな被害が確認されなかった。

写真2は、千葉県浦安地区のI邸である。周辺地盤状況は、地下水位 GL-1.2m、表層のN値が1の砂質シルトが堆積している。この周辺の住宅では、住宅が沈下・傾斜している様子が確認できた。しかし、I邸では、基礎、構造材および配管等の被害を免れている。これらの事例から、浮き基礎工法には液状化による住宅の傾斜および沈下の抑制効果がある可能性がうかがわれる。浮き基礎工法は、戸建て住宅だけでなく、商業施設や共同住宅などに多く適用されている。著者らは、浮き基礎工法が適用されている千葉県(36件)、茨城県(6件)、福島県(9件)、宮城県(216件)の商業施設に対しても、戸建て住宅と同様に震災後の調査を実施した。その結果、液状化の発生の有無にかかわらず、軽微な修繕にとどまり、建物の継続使用が可能なものであったことがわかった。

3. 模型振動台実験

3.1 実験概要

東北地方太平洋沖地震と同程度の規模(最大加速度および継続時間)の地震を想定した1/50スケールの重力場模型振動台実験を行った。模型住宅基礎下に浮き基礎を模擬した発泡スチロールを設置したケースと設置しなかったケースの2ケースの実験を行い、住宅模型の沈下・傾斜抑制効果について確認した。

3.2 実験装置

水平一方向にのみ加振することができる電気油圧サーボ方式の加振装置と剛土槽(内寸: 幅1,000mm×奥行き200mm×高さ800mm)を組み合わせて実験を行った。加振時に地盤や住宅の動的挙動を把握できるように、剛土槽の前面にアクリル板を用いた。図1に振動台および土槽を示す。

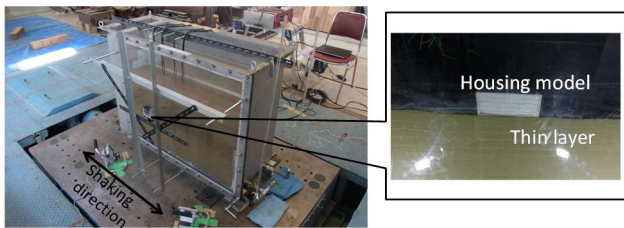


図1 実験装置

3.3 実験条件

(1) 模型住宅

模型住宅は、一般的な木造 2 階建て住宅を模擬して、幅 150mm×奥行き 150mm×高さ 50mm のアクリル製の容器を用いた。容器内にアルミのプレートを敷き、実大規模換算時に接地圧が 10kPa 程度となるように重量を調整した。また一般的に住宅の接地圧は均等でないと考えられることから、住宅荷重を偏心させた条件で実験を実施した。図 2 に、対策の有無が異なる住宅模型の概要図を示す。

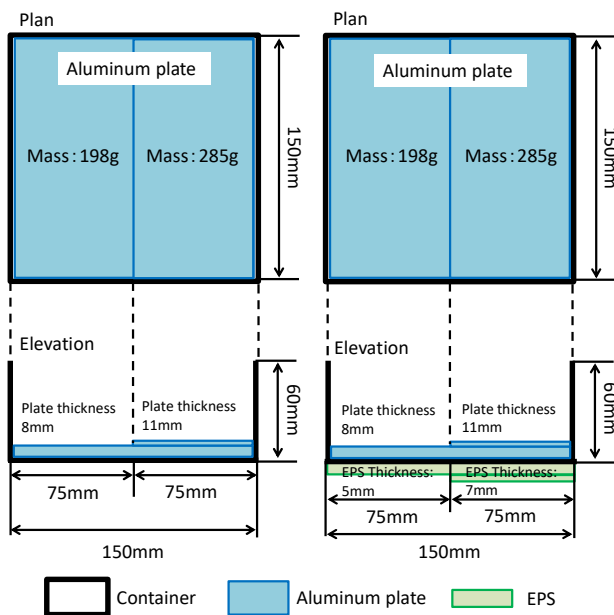


図2 住宅模型の概要図(左：無対策，右：対策有)

(2) 模型地盤

模型地盤は、珪砂 6 号を水中落下させ、相対密度が概ね 40% となるように水中落下法を用いて作製した。加振装置に入力する地震動は、最大加速度 350gal で周波数 2Hz の正弦波である。図 3 に入力地震動の時刻歴および

FFT の結果を示す。

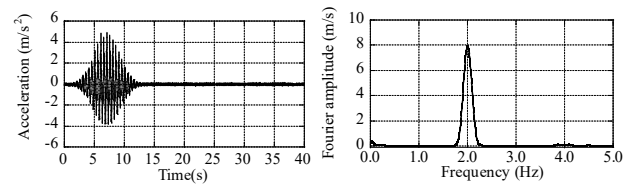


図3 入力加速度の時刻歴と FFT

(3) 検討ケース

模型住宅基礎下に浮き基礎を模擬した発泡スチロールを設置したケースと設置しなかったケースの 2 ケースの実験を行い、住宅模型の沈下・傾斜抑制効果について検討した。加振時の実験条件を表 1 にまとめる

表 1 検討ケースの実験条件

Case	Relative density (%)	Initial ground height (mm)	Counter-measure
1	39.1	454	Without
2	43.9	440	With

(4) 計測器の配置

加振中並びに加振後の地盤の応答加速度，過剰間隙水圧，模型住宅の沈下量および傾斜量を把握するために、ひずみゲージ式加速度計，ひずみゲージ式水圧計，レーザー変位計を設置した。計測器の配置を図 4 に示す。

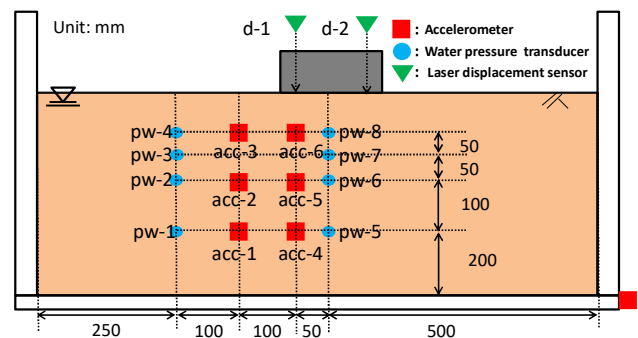


図4 計測器の設置状況

3.4 実験結果

図 5 および図 6 に実験結果を示す。図 5 の過剰間隙

水圧のグラフより、Case1、Case2 の両ケースとも過剰間隙水圧が、初期地盤条件から算出した有効上載圧を超えているため、液状化が発生していると判断できる。図6に示す住宅の沈下量の時刻歴より、最終の住宅傾斜量を比較すると Case1 の対策なしでは 15/1,000、Case2 の対策ありでは 3/1,000 となり、対策の適用により住宅の傾斜を抑制していることがわかる。また、住宅沈下量の左右で得られた値を平均して比較しても、Case1 の対策なしでは 24.8mm、Case2 の対策ありでは 19.6mm となり、対策により住宅の傾斜を抑制していることがわかる。写真3は、加振終了後の実験画像であり、図6の結果が示す通り、Case2 の対策ありは、Case1 の対策なしに比べ、住宅の傾斜量および沈下量が抑えられていることが目視でも確認できる。これらの実験結果から、地盤が液状化する場合であっても、浮き基礎を導入することによって、住宅の沈下や傾斜を抑制できることがわかった。

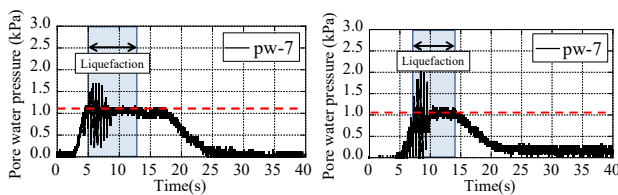


図5 過剰間隙水圧の時刻歴 (左: Case1 右: Case2)

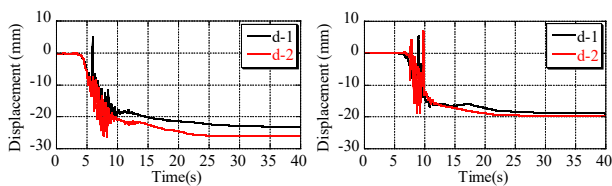


図6 住宅沈下量の時刻歴 (左: Case1 右: Case2)



写真3 振動終了後の住宅模型の状況 (左: Case1 右: Case2)

4. 簡易数値解析

液状化による地盤および構造物等の残留変形を予測することを目的として、著者らが開発を進めている

「SPH 法による 2 次元静的液状化プログラム³⁾」を用いて、模型振動台実験の再現解析を行った。

この解析プログラムには、以下の特徴がある。

- ①解析に用いるパラメータは、スウェーデン式サウンディング試験やコーン貫入試験など戸建て住宅で一般的に実施されている地盤調査結果から求めることができる。
- ②既往の液状化判定手法⁴⁾が利用できる。
- ③安田の提案した構成式⁵⁾を導入することで、静的な解析で液状化後の残留変形を再現できる。
- ④有限要素法では解析することが難しい大変形や局所変形を再現できる。

以上の通り、これまで戸建て住宅で一般的に行われてきた調査や判定法を用いるだけで、液状化後の地盤の変形を比較的簡単に再現できるという特徴がある。さらに、これまでの一連の研究^{3) 6) 7)}により、ある程度の精度をもって、実際に生じた残留変形を再現できることがわかっており、しかし、これまでは無対策の住宅で、基礎形式がベタ基礎を想定したもののみ検証が進められてきており、その他の条件での検証はなされていない。本研究で取り扱うような設置圧が偏った住宅や、浮き基礎を用いた場合の再現が可能であれば、今後の設計に利用することも可能であると考えられる。

4.1 SPH 法の概要

SPH 法^{8) 9)}は、連続体を多数の粒子(計算点)で離散化する解析手法であり、物理量の空間勾配を平滑化関数の空間勾配を用いて求める。宇宙物理学の分野で大きな密度差や密度変化が生じる場の圧縮性流体解析に適用されており、現在では非圧縮性流体解析や固体解析など様々な問題に適用され¹⁰⁾、近年では、地盤工学の分野への適用も行われている¹¹⁾。本研究では、SPH 法の理論に基づいて離散化された運動方程式と質量保存則を相互に段階的に計算をしている。また、液状化に伴う地盤変形の最終状態を表現するために、安田らの提案した構成式が導入されている。解法の詳細については文献¹²⁾を、構成式の詳細については文献⁵⁾を参照されたい。

4.2 解析条件

模型振動台実験と同様に無対策(Case1)および対策有(Case2)の2ケースの数値解析を行った。解析は模型スケールで行い、地盤のみ安田の提案した構成式を用い、それ以外を弾性構成式でモデル化した。粒子数は、地盤、住宅、底面および側面の壁を合わせて1,636個である。粒子間距離は0.020mとし、境界条件は、底面の壁を水平方向(x)固定かつ鉛直方向(y)固定とし、側面の壁を水平方向(x)固定とした。解析条件として、重力加速度が 9.8m/s^2 になるまで徐々に増加させる自重法を用い、変形が概ね収束するまで計算を実施した。図7に、再現解析に用いた解析モデルを示し、表2に材料パラメータを示す。浮き基礎および住宅重量の偏心のモデル化については、住宅モデルに与える密度を変えることで再現した。なお、地盤パラメータの設定方法については、既往の研究をもとに決定した³⁾。

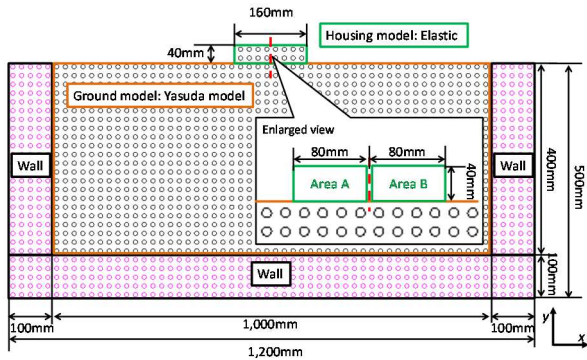


図7 粒子配置と境界条件

表2 材料パラメータ

parameter		Ground	House		Wall
		Yasuda Model	Elastic Case1	Elastic Case2	Elastic
Initial Young's Modulus (kN/m^2)	E_0	2,800	550,317		2,800
Poisson's ratio	ν	0.333	0.333		0.333
Fine content (%)	F_c	0.0	-	-	-
Unit weight (kN/m^3)	γ	18.2	Area A: 4.312 Area B: 6.174	Area A: 1.568 Area B: 1.960	-
Factor of safety for liquefaction	F_L	0.55	-		-

4.3 解析結果

図8に住宅部を拡大した最終変形図(コンターはせん断ひずみ)を示す。さらに図8中には、実験および解析の住宅と地盤の相対沈下量を示す。表3には、実験および解析で得られた対策導入による沈下量および傾斜量の低減率を示す。図8から、Case1の場合には、住宅近傍の地表面地盤で大きなせん断ひずみが生じていることがわかる。一方Case2では、せん断ひずみが無対策の半分程度であり、地盤の変形を大幅に抑制していることがわかる。浮き基礎の適用により住宅の沈下および傾斜を抑制する効果が数値解析でも表現された。Case1とCase2の解析条件の違いは、住宅に与える密度のみである。つまり軟弱地盤対策としての地盤置換工法の不同沈下抑制効果と同様に、地盤の液化化時にも地盤から受ける抵抗力と住宅荷重のバランスを調整することで、住宅の沈下や傾斜を抑制するという効果が得られたことを意味している。しかし、いずれのケースも解析の相対沈下量は、実験に比べて大きく見積もられることがわかった。実験では、写真3に示す通り住宅が地盤中に沈下するほど、住宅と間隙水との密度差による浮力が大きく住宅に作用するが、本数値解析では全応力解析であるため、その影響を考慮することができない。そのため、解析では、住宅の沈下量を過大に評価したと考えられる。特にCase1ではCase2に比べて住宅の沈下が大きくなったため、その影響が結果に反映されたものと推察される。

この問題を解決するためには、今後、土～水連成の2相系の数値解析手法を取り入れるなどの対応が必要と考えられる。

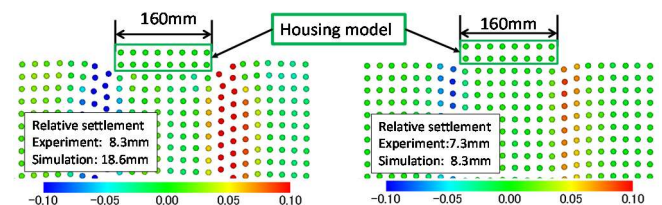


図8 最終変形図(左:Case1, 右:Case2)

次に、表3に対策導入による相対沈下量および傾斜量の低減率を示す。表3から実験と解析で対策導入による

沈下量および傾斜量の低減率を比較すると、解析では実験に比べて対策導入による沈下の抑制効果を過大に評価したが、傾斜の抑制効果については、概ね妥当な評価ができたものと考ええる。

表 3 対策導入による相対沈下量および傾斜量の低減率

	Decreasing rate of Relative settlement (%)	Decreasing rate of Tilting angle (%)
Experiment	12.6	8.3
Simulation	56.7	6.4

本模型実験では、より厳しい条件を想定して、模型実験の地下水位を地表面ぎりぎりに設定したが、実際に地表面に地下水位があることは少なく、一般的な条件であれば住宅の被害状況を簡易数値解析により予測可能であると考ええる。

5. まとめ

本研究では、戸建て住宅の基礎に浮き基礎工法を適用した場合の、液状化対策効果を確認するために、東北地方太平洋沖地震後の現地調査、模型振動台実験および簡易数値解析を行った。その結果、被災地の現地調査、模型振動台実験および簡易数値解析いずれも浮き基礎工法を適用することにより、地盤が液状化した場合であっても住宅の沈下および傾斜を抑制することができることが明らかとなった。また数値解析の結果から、軟弱地盤対策としての地盤置換工法の住宅の不同沈下を抑制する効果と同様に、液状化時にも地盤から受ける抵抗力と住宅荷重のバランスを調整することで、住宅の沈下や傾斜を抑制できることがわかった。

6. 今後の展望と課題

浮き基礎工法の適用により、液状化時に住宅の沈下や傾斜を抑制できる効果を明らかにすることは、可能となったものの、その効果は定性的なものである。平成 13 年国土交通省告示第 1113 号での地震時に液状化する恐れのある地盤に対して「建築物の自重による沈下その他の地盤の変形等を考慮して建築物又は建築物の部分に有害な損傷、変形及び沈下が生じないことを確かめなけれ

ばならない。」を満足させるためには、浮き基礎工法の定量的な効果を示す必要がある。今後、実大規模振動実験および遠心力場模型実験による追加検証や、簡易数値解析の予測精度向上、さらには適切な設計法の提案が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（若手研究(B) 16K18192）の支援により実施された。また、伴知寛氏(元中部大学)、神谷壮一朗氏(同)、津田裕也氏(同)、武藤大和氏(同)、吉川達也氏(同)、山牟田侑也氏(同)および和田智恵氏(同)には、実験準備および実施にあたり多大なる協力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Tokimatsu, K., and Katsumata, K.: Liquefaction -induced damage to buildings in Urayasu City During The 2011 Tohoku Pacific Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp665-674, 2012. 3.
- 2) 中村拓造: 異なる機能を持つ発泡樹脂浮き材を用いたいくつかの浮き基礎構造の特徴, 土と基礎, Vol. 50(4), pp. 7-9, 2002. 4.
- 3) 余川弘至, 野々山栄人, 八嶋厚, 吉原孝保: 液状化による戸建て住宅沈下を定量的に予測するための簡易解析, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第733号, pp423-432, 2017. 3.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 宅地の液状化被害可能性判定シート, URL: <http://www.nilim.go.jp/lab/jbg/takuti/takuti.html>. (参照2016. 5. 10)
- 5) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義: 液状化に伴う地盤の大変形の簡易予測方法, 土と基礎, Vol. 47, No. 6, pp. 29-32, 1999. 6.
- 6) Yokawa, H., Kondo, A., Sugii, T., Nonoyama, H., Yashima, A. and Yoshihara, T.: Settlement Prediction of Detached House After Liquefaction Using Smoothed Particle Hydrodynamics Method, WCCM XII & APCOM VI, Geo-disaster Modeling and Analysis, Seoul, Korea, No.151025, 2016. 7.

- 7) 余川弘至, 野々山栄人, 八嶋厚, 村田芳信, 吉原孝保: 簡易地盤調査を利用した戸建て住宅の液状化被害の再現解析, 第60回地盤工学シンポジウムNo. 6-3, pp.173-178, 2016.12.
- 8) Lucy, L. B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astronomical Journal*, Vol.82, pp. 1023-1024, 1977.12.
- 9) Gingold, R. A. and Monaghan J. J.: Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, Vol. 118, pp.375-389, 1977.11.
- 10) Liu, G. R. and Liu, M. B.: *Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method*, World Scientific, 449p, 2003.12.
- 11) Bui, H. H., Fukagawa, R. Sako, K. and Ohno, S.: Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.32, pp.1537-1570, 2008.2.
- 12) Nonoyama, H., Moriguchi, S., Sawada, K. and Yashima, A.: Slope stability analysis using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 2, pp.458-470, 2015.2.