

格子状地盤改良の住宅沈下量抑制効果に着目した遠心模型振動実験

Centrifuge Model Vibration Testing Focused on Settlement of the Residence
Improved with Grid-form Deep Mixing Walls

津 國 正 一 (つくに しょういち)

㈱竹中土木 技術・生産本部 部長

内 田 明 彦 (うちだ あきひこ)

㈱竹中工務店 技術研究所 主任研究員

小 西 一 生 (こにし かずお)

㈱竹中土木 技術・生産本部 課長

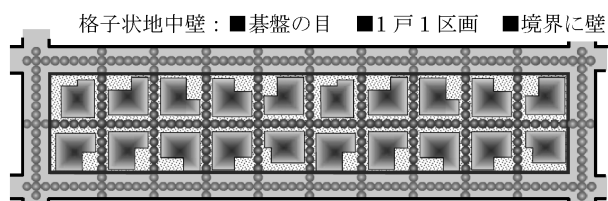
1. はじめに

浦安市では約9 000棟の戸建て住宅が、東北地方太平洋沖地震（マグニチュード $M=9.0$ ）時の液状化によって沈下・傾斜する被害が発生した。復興事業として道路と宅地を一体とした液状化対策（図—1 参照）が計画¹⁾され、格子状地盤改良工法と地下水位低下工法について、浦安市の「液状化対策実現可能性検討委員会（委員長：東畑郁生東京大学教授）」²⁾で検討された。

浦安市で液状化の被害が発生した地域の地層構成は、埋立てられた砂層の下部に軟弱な沖積粘性土層が厚く堆積している。そのため地下水位低下工法を採用すると、有効応力の増加により沖積粘性土層で圧密沈下が発生するので、格子状地盤改良工法が採用されることになった。

しかし、検討委員会の検討で用いられたモデルケースの宅地（13 m×13 m）と幅 6 m の道路に対して格子状地盤改良工法を適用した場合、既設住宅を残したままでの施工となるため、1つの格子の中に1宅地が入る条件でも格子間隔は16 m×13 m となり、格子状地盤改良工法の施工実績の中でも大きな格子間隔となる。

また、戸建て住宅に対して格子状地盤改良工法を適用した事例は殆どない。格子状地盤改良工法の設計では、格子内地盤が液状化しないように格子間隔を設定する。しかし、既設住宅がある条件では、格子間隔を小さくするのにも限界がある。格子内地盤が液状化しない条件として F_L 値・過剰間隙水圧比を設計指標としてきたが、設計で想定する地震動の大きさによっては、住宅沈下量を指標とした性能設計の考え方も必要になる。そのため、格子間隔と住宅沈下量の関係に関する設計での知見を得るために、遠心模型振動実験を実施した。

図—1 格子状地盤改良を用いた道路と宅地の一体対策¹⁾2. 格子間隔と F_L 値の関係

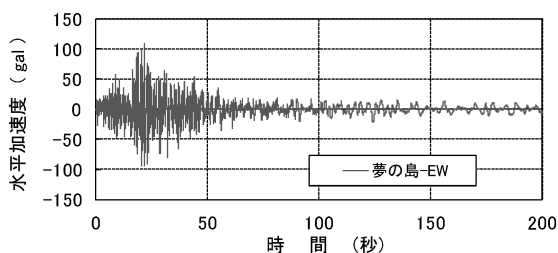
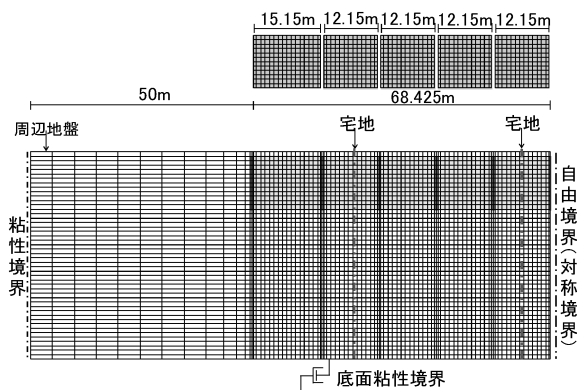
格子状地盤改良工法の設計では、擬似3次元モデルを用いた等価線形解析によって、格子内地盤での $F_L \geq 1$ になる条件で格子間隔を設定している。

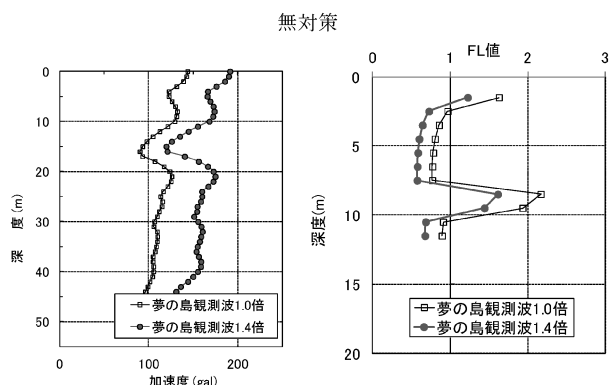
検討委員会では、東北地方太平洋沖地震での夢の島観測波（図—2 参照）を工学的基盤での入力地震動とし、格子間隔を変えたモデル（格子間隔16 m×13 m（図—3 参照）、32 m×26 m、無対策）の検討を行った。格子間隔32 m×26 m では、1格子に道路と4宅地が入る。ただし、住宅をモデル化しない条件で解析は行っている。

検討委員会での検討条件とは別に、夢の島観測波の最大振幅を1.4倍にした入力地震動の検討も行った。

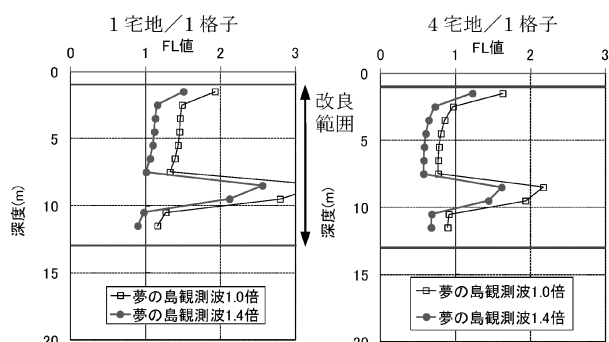
図—4 は無対策の宅地位置での水平応答加速度の最大値と、 F_L 値の深度分布である。

地表面最大加速度は、夢の島観測波1.0倍入力に対して143 gal、夢の島観測波1.4倍入力に対して191 gal で、

図—2 夢の島観測波（工学的基盤に引上げた地震波）²⁾図—3 擬似3次元解析モデル
(1宅地1格子、格子間隔16 m×13 m)²⁾



図—4 水平応答加速度と F_L 値の深度分布
(無対策)²⁾に追記



図—5 F_L 値の深度分布
(左：格子間隔16m×13m，右：格子間隔32m×26m)²⁾に追記

いずれの入力に対してもほぼ全深度で $F_L < 1$ であった。

図—5に格子間隔16m×13mと格子間隔32m×26mのモデルに対する F_L 値の深度分布を示す。格子間隔16m×13mでは、夢の島観測波1.0倍入力に対して $F_L \geq 1$ を満足でき、夢の島観測波1.4倍入力でも $F_L < 1$ となる深度は部分的であった。格子間隔32m×26mの F_L 値分布の傾向は、無対策と大きな差はなかった。

3. 格子間隔と住宅沈下量の関係

3.1 遠心模型振動実験の条件と実験ケース

表—1に60G場で実施した遠心模型振動実験（口絵写真—1（https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id=1555%3A2009-01-07-08-26-28&catid=101%3A2008-09-18-06-24-51&Itemid=72）の実験ケースと、計測器配置の平面図と断面図を示す。実大寸法で幅48m×奥行き31.8m×高さ13.8mのせん断土槽を用いた（以降、全て実大寸法で表示）。住宅模型寸法8m（加振方向）×11m（加振直交方向）、接地圧8.4（kN/m²）である。

模型地盤は、浦安市で発生した噴砂の細粒分含有率が25%に粒度調整した砂（浦安砂）を用いた。ただし格子間隔32m×26mのCase-4だけは豊浦砂を用いた。

模型地盤の作成は、表—2に示す検討委員会のモデル地盤の条件に合わせて作成している。模型地盤の作成時、浦安砂は締固め試験の最大乾燥密度（ $\rho_{dmax} = 1.451 \text{ t/m}^3$ ）に対する D 値で管理した。 D 値90%は概ね N 値5, D

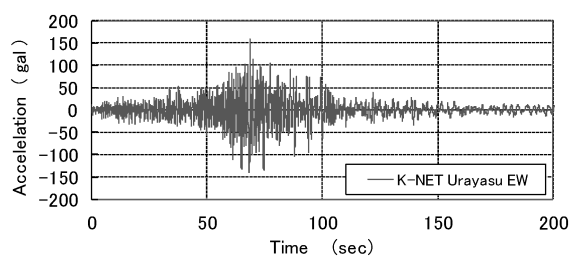
表—1 遠心模型振動実験の実験ケースと計測器配置

ケース名	模型地盤の計測器配置	
	平面図	断面図
Case-3 (無対策)		
Case-4 (4戸/ 1区画)		
Case-5 (2戸/ 1区画)		
Case-6 (1戸/ 1区画、 無対策)		

■ 加速度計 ↓ 加速度計(上下) ● 間隙水圧計 ■ 土圧計

表—2 検討委員会でのモデル地盤²⁾と模型地盤の関係

深度 (m)	浦安モデル地盤 ²⁾		遠心模型地盤			
	層区分	ϵ a=2.5%, 20波の 応力比	層区分	ϵ a=2.5%, 20波の 波の	層区分	ϵ a=2.5%, 20波の 波の
0~2m	Bs	0.25	豊浦砂	0.17	浦安砂	0.18
2m~8m	Fs	0.20	Dr=50%		D値=90%	
8m~10m	As1	0.36	豊浦砂	0.22	浦安砂D値	0.28
10m~12m	As2	0.23	Dr=70%		=95%	

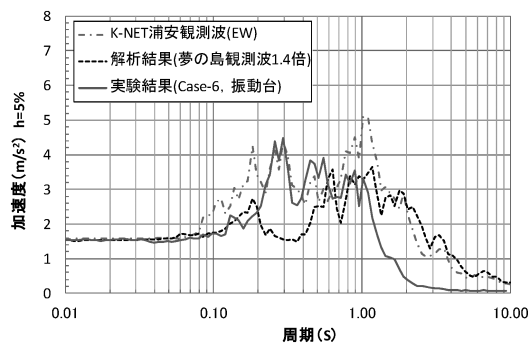


図—6 K-NET 浦安観測波（液状化していない地点の地表面）

値95%は概ね N 値10に相当する。豊浦砂の管理は相対密度である。間隙流体には粘性のあるシリコンオイルを用いて相似則を満足させている。地下水位はGL-1mとした。格子状地盤改良の模型はアクリル製で、改良体の設計基準強度 $F_c = 1.5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ 相当の剛性を有している。

計測は水平応答加速度、過剰間隙水圧、住宅・周辺地盤地表面の沈下に対して行った。

図—6に遠心模型振動実験の入力に用いた K-NET 浦安観測波 EW 成分を示す。東北地方太平洋沖地震時



図—7 加速度応答スペクトルの比較

に液状化しなかった地表面の観測点での最大加速度は157 galであった。

図—7ではK-NET浦安観測波の加速度応答スペクトルと、解析結果・実験結果の加速度応答スペクトルを比較している。解析結果は格子間隔16 m×13 mのモデルで夢の島観測波1.4倍入力に対して、格子状地盤改良下端（GL-12 m）での水平応答加速度から求めた値である。実験結果はCase-6の振動台で計測した水平応答加速度から求めた値である。解析結果と実験結果の加速度応答スペクトルは、周期0.5秒～1.0秒の間で良く対応している。夢の島観測波1.4倍入力の解析での地表面加速度187 galから、実験は $M=9.0$ 、液状化していない地点の地表面加速度約200 gal相当の地震に対する実験であったと言える。

3.2 水平応答加速度

図—8に格子間隔を変えた各ケースと、無対策（Case-6）の庭部分（Line①）の水平応答加速度時刻歴（GL-2 m地点）を示す。無対策と格子間隔32 m×26 mの応答は全体的に小さく、下部地盤の液状化によって60秒以降に応答が殆ど表れていない。それに対して格子間隔が狭くなると、下部地盤の液状化によると見られる応答の低下は見られなくなり、格子間隔16 m×13 mでは、はっきりとした応答が見られている。

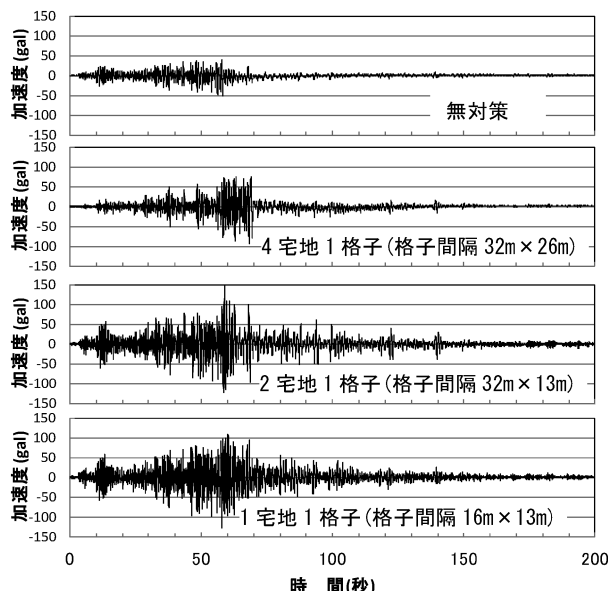
3.3 過剰間隙水圧

図—9に格子間隔を変えた各ケースと、無対策の過剰間隙水圧比の最大値コンター図を示す。無対策ではGL-7 m～GL-12 mの深度の深い部分で過剰間隙水圧比が1.0まで上昇しており、Line①のGL-2 m地点で60秒以降に殆ど水平加速度の応答が表れていなかったことと対応している。また、格子間隔32 m×26 mでもGL-4 m～GL-8 m付近で過剰間隙水圧比が1.0まで上昇しており、水平加速度の応答が殆ど表れていなかったことと対応する。

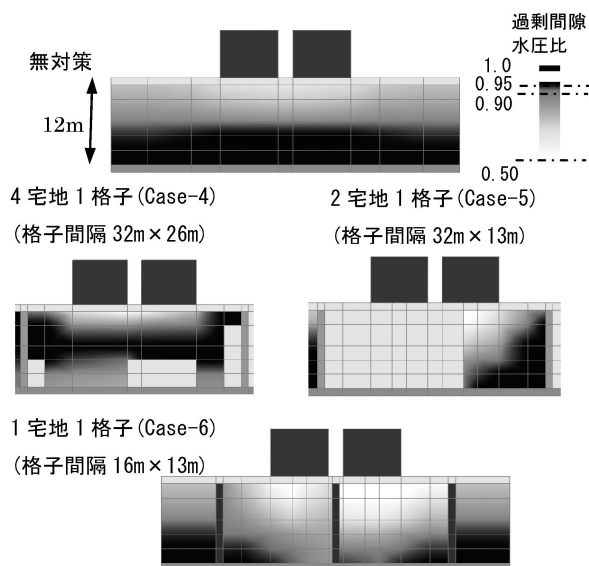
格子間隔32 m×13 mでは改良壁付近と住宅下の深度の深い部分で過剰間隙水圧が上昇しているが、格子間隔16 m×13 mに狭くなると、過剰間隙水圧比が1.0まで上昇しているのは、格子壁付近の深度の深い部分だけになり、住宅直下の深度の浅い部分では、過剰間隙水圧比は0.5以下に抑制されている。

3.4 住宅沈下量

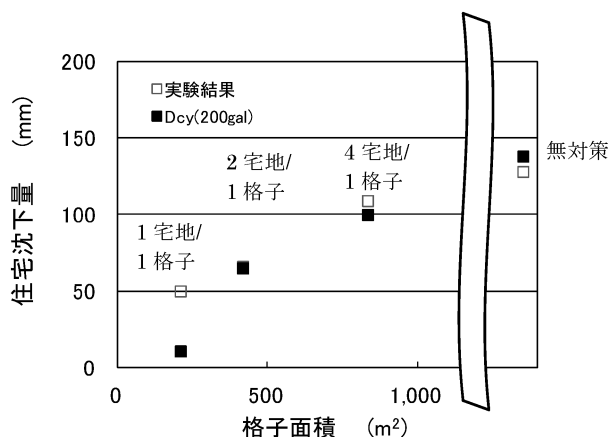
図—10に格子間隔を変えた各ケースと無対策の、格子



図—8 庭部分での水平応答加速度時刻歴（Line①，GL-2 m）



図—9 過剰間隙水圧比の最大値コンター図



図—10 格子面積と住宅沈下量の関係

で囲まれた面積と住宅沈下量の関係を示す。まず実験結果について比較する。無対策の平均沈下量は128 mmであった。それに対して格子状地盤改良による対策を実施

すると、格子面積が狭くなるにつれて住宅沈下量は減少する傾向が得られ、格子間隔16 m×13 mの住宅沈下量は50 mmと、無対策の約40％にまで抑制する効果があることが確認できた。また、格子内地盤の深度の深い位置で部分的な液状化が発生していても、住宅直下部の深度の浅い部分での過剰間隙水圧上昇が抑制されていれば、住宅沈下量を抑制する効果が大きくなることも分かった。

図中の D_{cy} の定義は建築基礎構造設計指針に示されている³⁾。 $F_L < 1$ となる深度での繰返しせん断ひずみ γ_{cy} から求めた変位を累積して、地表での最大変位を求めた値が D_{cy} で、沈下量を求める場合は、 γ_{cy} を体積ひずみ ε_v にそのまま読み換える。 D_{cy} と液状化の程度との関係は、 $D_{cy} \leq 5$ cmで軽微、 5 cm $< D_{cy} \leq 10$ cmで小、 10 cm $< D_{cy} \leq 20$ cmで中となっている。

図中の D_{cy} は、夢の島観測波1.4倍入力に対する等価線形解析で得られた、格子内地盤のせん断応力の応答値と F_L 値から算出した値である。実験結果と D_{cy} の対応は非常に良く、擬似3次元モデルを用いた等価線形解析による格子状地盤改良の設計法を用いて、住宅の沈下量を照査できることが確認できた。ただし、格子間隔16 m×13 mの D_{cy} は実験結果に比べて小さかった。格子間隔16 m×13 mでは、部分的な液状化しか発生しておらず（図9参照）、その点は等価線形解析結果（図4参照）と対応している。しかし、 D_{cy} の定義より $F_L \geq 1$ では沈下量を計算しないので、液状化している深度が部分的な場合、少しの条件変化で液状化するかもしれないかの判定が変わるため、実験結果と D_{cy} の差が大きくなったと考える。

国土交通省から「液状化被災市街地における格子状地中壁工法の検討・調査について（ガイダンス（案）」⁴⁾と共に、「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針⁵⁾」が出されている。技術指針では図11に示す非液状化層厚さ H_1 と D_{cy} の関係から、表3のように判定図の数値表を定めている。遠心実験での非液状化層厚さ H_1 を、住宅直下部の過剰間隙水圧比時刻歴の最大値 $0.5 \cdot 0.6 \cdot 0.7$ に対してそれぞれ仮定し、図11に遠心実験で得られた住宅の沈下量 $=D_{cy}$ としてプロットする。例えば、過剰間隙水圧比の最大値0.7に対して仮定した H_1 に対して、無対策と格子間隔32 m×26 mの判定はB2で、被害の出る可能性は、A判定の格子間隔32 m×13 m・16 m×13 mよりも高くなる。この傾向は H_1 を定義する過剰間隙水圧比の最大値を0.5にした時も同様であった。

住宅の被害を被害額で比較した場合、住宅の傾斜よりも沈下の影響の方が大きいので、実験では住宅の沈下量に着目している。

4. ま と め

擬似3次元モデルを用いた等価線形解析による格子状地盤改良工法の設計法で、住宅の沈下量を照査できる

水圧比 0.5 ●：格子状改良 ○：無対策
水圧比 0.6 ▲：格子状改良 △：無対策
水圧比 0.7 ■：格子状改良 □：無対策

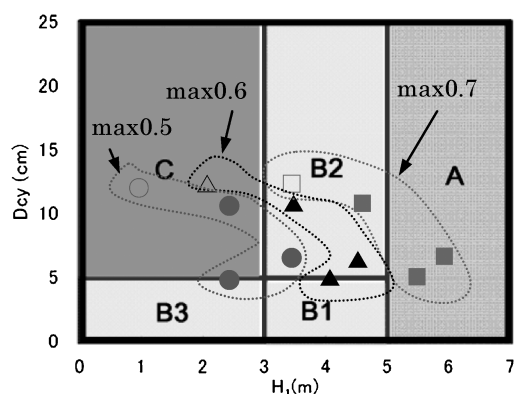


図11 $H_1 \sim D_{cy}$ 判定図⁵⁾

表3 判定図の数値表⁵⁾

判定結果	H_1 の範囲	D_{cy} の範囲	液状化被害の可能性
C	3m以下	5cm以上	顕著な被害の可能性が高い
B3		5cm未満	
B2	3mを超え、5m以下	5cm以上	顕著な被害の可能性が比較的低い
B1		5cm未満	
A	5mを超える	—	顕著な被害の可能性が低い

ことが、遠心模型振動実験での検討で確認できた。

謝辞

本研究の実験結果の一部は、国土交通省国土技術政策総合研究所の検討業務として実施したものである。関係各位と、噴砂を提供いただいた浦安市殿に感謝いたします。また、浦安波を防災科学技術研究所 HP よりダウンロードして使用しましたことに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 浦安市ホームページ，浦安市 宅地の液状化対策に関する説明資料，<http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/33824/shiryo.pdf>（参照2014.3.11）
- 2) 浦安市ホームページ，液状化対策実現可能性検討委員会 <http://www.city.urayasu.chiba.jp/dd.aspx?menuid=12095>（参照2014.3.11）
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2001改訂），日本建築学会，pp. 66, 2001.
- 4) 国土交通省ホームページ，液状化被災市街地における格子状地中壁工法の検討・調査について（ガイダンス（案）），<http://www.mlit.go.jp/common/000995101.pdf>（参照2014.3.11）
- 5) 国土交通省ホームページ，宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針，<http://www.mlit.go.jp/common/000993582.pdf>（参照2014.3.11）

（原稿受理 2014.3.17）