

# 液状化で被災した住宅地の対策工法として採用 された格子状地中壁工法の設計

津國 正一<sup>1</sup>・石井 一郎<sup>2</sup>・内田 明彦<sup>3</sup>・今井 政之<sup>4</sup>・  
山内 崇寛<sup>5</sup>・太田 光貴<sup>6</sup>

<sup>1</sup> 株式会社竹中土木 技術・生産本部 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1竹中技術研究所)  
E-mail:tsukuni-s@takenaka-doboku.co.jp

<sup>2</sup> 正会員 浦安市 副市長 (〒279-8501 千葉県浦安市猫実1-1-1)  
E-mail:ishii.ichirou@city.urayasu.lg.jp

<sup>3</sup> 株式会社竹中工務店 技術研究所 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1竹中技術研究所)  
E-mail:uchida.akihiko@takenaka.co.jp

<sup>4</sup> 株式会社竹中土木 技術・生産本部 (〒136-8570 東京都江東区新砂1-1-1)  
E-mail:imai-m@takenaka-doboku.co.jp

<sup>5</sup> 前田建設工業株式会社 土木事業本部 (〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2)  
E-mail:yamauchi.tak@jcity.maeda.co.jp

<sup>6</sup> 前田建設工業株式会社 土木事業本部 (〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-2)  
E-mail:oota.kou@jcity.maeda.co.jp

浦安市の埋立て地域では、東日本大震災(2011)の液状化により8700軒の個人住宅に被害が発生した。被害件数は日本全体の被害件数26914軒の約1/3と最も多かった。被害を受けた地区の中の4103軒を対象として、将来の地震に対して格子状地中壁工法を用いた対策を行う事業の調査設計を行ない、一部の地区では施工が始まっている。格子状地盤改良の設計では、格子間隔Lと液状化層厚Hの比L/Hが0.8以下となるように設計する事例も多い。しかし宅地面積の異なる多数の宅地を対象としてL/Hの考え方で設計することは困難である。そのため住宅沈下量を設計指標とし格子面積を用いた設計法を採用した。2次元モデルを用いた解析手法と住宅沈下量の予測精度の検証は、遠心模型振動実験結果との比較で実施した。

**Key Words :**liquefaction ,grid-form ground improvement,centrifuge model test, settlement

## 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震( $M_w=9.0$ )では、津波による人的被害の大きさとともに、液状化により個人住宅に大きな被害が発生した特徴がある。個人住宅に大きな被害が発生した地域は、震源から遠く離れた東京湾沿岸と利根川流域であった。液状化による被害を受けた個人住宅は日本全体で26,914軒。その約1/3にあたる8,700軒の被害が、面積17.3km<sup>2</sup>の浦安市(図-1)で発生した。図-2に示す浦安市のK-NET浦安で観測された地表面の最大加速度は0.157(m/s<sup>2</sup>)と比較的小さかったが、主要動の継続時間が200秒近く継続したため、液状化が発生したと考えられている。浦安市の中でも被害が発生した地区は、1965年から1973年頃にかけてポンプ浚渫による埋立てで

造成された地区に限定されており、特に埋立て年代が古い中町地区での被害が大きかった。

国土交通省では液状化による被害が大きかった住宅地を対象に、将来発生が予想される地震に対して図-3に示す道路と宅地を一体とした液状化対策を実施する事業に対して、補助金を交付することを2012年に決定した。

東日本大震災が発生した2011年には有識者を集めた浦安市の委員会で、液状化による被害状況と地盤特性の相互関係の検討が行われた。そして翌年の2012年からは、道路と宅地を一体とした液状化対策事業について、格子状地中壁工法と地下水位低下工法の2工法を中心に、同じく委員会での検討を始めることになった。浦安市の埋立て地区の地盤構成は、浚渫土砂で埋戻した埋土層(F)の下に緩い沖積砂層(A<sub>s</sub>)が堆積し、その下には軟弱な粘

性土層( $A_c$ )が厚く堆積している。地下水位低下工法の試験施工を行った結果、 $A_c$ 層での圧密沈下の影響による不同沈下が計測されたため、最終的に格子状地中壁工法<sup>1)</sup>が対策工法に選定された。図-4と写真-1は格子状地盤改良の概念を示している。深層混合処理工法で施工する改良杭をラップさせて格子壁を施工する。

2014年になると中町の16地区4103軒の宅地(写真-2)で、格子状地中壁工法を用いた液状化対策事業について、調査設計を行い事業計画案を作成することの合意が得られた。格子状地中壁工法を用いた事業計画案を作成するために、現地の地盤調査を開始し、翌年の2015年からは調査設計も始まった。作成した事業計画案は委員会での審議を経て住民に提示され、住民の合意が再度得られた段階で事業が実施されることになる。2015年3月の時点では16地区4103宅地に対する事業計画案の作成は完了している。2016年7月時点で住民の合意が得られ事業が始まっているのは、2地区121宅地である。

## 2. 格子状地中壁工法の設計方針

浦安市の液状化対策事業で採用された格子状地中壁工法の設計法について述べる。格子状地盤改良による液状化防止原理を図-5に示す。地震動によって無対策地盤では、大きなせん断応力が発生することによって液状化が発生する。一方、格子状地盤改良による対策が行われている地盤では、地震動によるせん断力が格子壁に集中するため、格子内地盤で発生するせん断応力が小さくなることで、液状化の発生を防止することができる。格子状地中壁工法の開発は1980年代後半から1990年代前半にかけて行われた。当初の設計法では、図-6に示すように格子間隔Lと液状化層厚Hの比L/Hと、格子内地盤で発生する過剰間隙水圧比の実験で得られた関係から、L/Hが0.8以下だと過剰間隙水圧比0.5以下に抑えることができ、液状化を防止することができるため、L/H=0.8以下で格子間隔を設定する設計法が採用されていた<sup>2), 3)</sup>。また格子状地中壁工法の設計法として、3次元形状の格子状地盤改良を2次元の擬似3次元でモデル化し、動的解析を行って格子間隔を設定する方法もある<sup>4)</sup>。この方法ではFEM解析を用いて、基盤に入力した地震動に対して液状化層で発生する応答せん断応力を求める。そして建築基礎構造設計指針の方法<sup>5)</sup>を用いて、N値と細粒分含有率から求まる液状化層の液状化強度を算出し、液状化層の液状化安全率FL値を算出する。この方法で設計した神戸のホテルでは、兵庫県南部地震時に液状化の発生を防止できたことが確認できている<sup>6)</sup>。また浦安市内の建築物基礎の液状化対策で採用されていた格子状地盤改良の格子間隔は、L/H=0.8を超えていたが、東日本大震災時

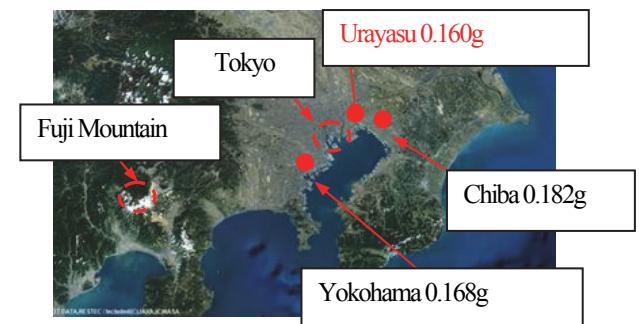


図-1 浦安市の位置図

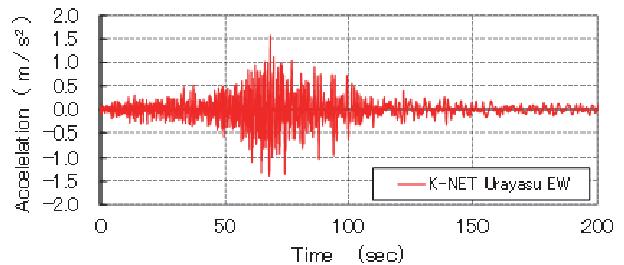


図-2 K-NET 浦安での観測波

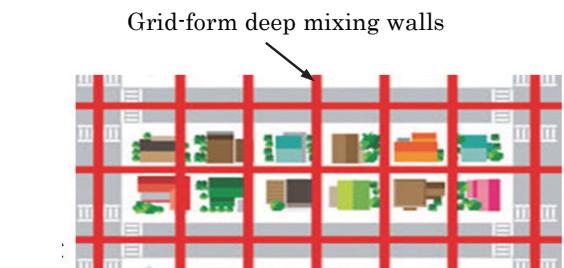


図-3 道路と宅地を一体とした液状化対策の計画平面図

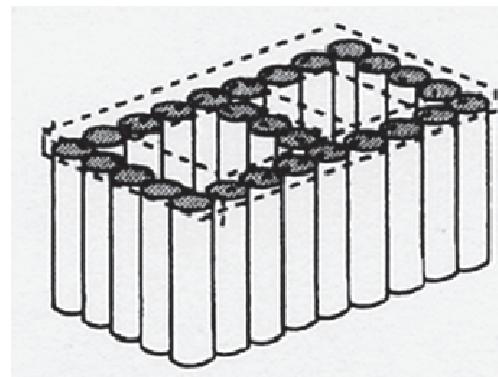


図-4 格子状地盤改良



写真-1 格子状地盤改良

に液状化の発生を防止できていたことが報告されている<sup>7)</sup>。そのため浦安市の液状化対策事業では、この方法を用いて設計を行うことにした。

次に浦安市の住宅地で格子状地中壁工法を採用した場合の課題について述べる。東日本大震災時に受けた住宅被害の大半は、液状化による地盤沈下によって住宅に大きな傾斜が発生したことである(写真-3)。そのため住民は発生した傾斜を修復するか、そのままにして住み続けているため、格子壁は既設住宅が存在する条件下での施工となる。既設住宅下に安価な工法で格子壁を施工できる技術がないため、格子間隔は広くなり液状化層全層でFL値が1.0以上になる格子間隔に設定することが難しい場合もある。そのため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ので、格子間隔と住宅沈下量の関係を求めるための遠心模型振動実験を行った。事業計画作成対象地区のモデル地盤条件に対して、平均的な宅地の大きさとなる格子間隔16m×13m=208m<sup>2</sup>であれば、東北地方太平洋沖地震時に浦安市で観測された地震と同等の大きさの地震に対して、住宅沈下量を50mmに抑えられることが確認できた<sup>8)</sup>。そのため1つの格子の中には1つの宅地しか入らない条件を、設計での基本方針として事業計画を作成することにした。

### 3. 格子状地中壁工法の設計条件

各地区の格子状地中壁工法の設計は、「市街地液状化対策推進ガイドンス」に定められた設計条件に準拠し、浦安市の特性を考慮して行った。

#### (1) 対策目標の設定

「市街地液状化対策推進ガイドンス」に示されている対策目標と住宅被害の可能性判定結果によると、過去の地震被害の調査結果<sup>9)</sup>から一定の非液状化層厚 $H_l$ を確保でき、かつ液状化によって地盤に発生する沈下量の指標 $D_{cy}$ <sup>10)</sup>が小さいと、住宅の顕著な被害の可能性が低いと判定している。そのため格子状地中壁工法による対策後の性能として、東北地方太平洋沖地震の浦安市における本震と同等規模の地震動に対して $H_l > 5.0\text{m}$ かつ、 $D_{cy} = 5\text{cm}$ 以下となることを最低条件に設定した。

表-1に設計で設定した性能規定値を示す。設計地震動の対策対象地震動は、東北地方太平洋沖地震の浦安市における本震と同等規模の地震動を想定している。レベル2地震動は、直下型地震を想定している。対策対象地震動に対しては、住宅に液状化による顕著な被害が発生しないとした。そして性能規定値は、液状化層全層で $FL > 1.0$ とし、この条件を満足できない場合は、 $D_{cy} = 5\text{cm}$ 以下で $H_l$ が5m以上を確保することとした。レベル2地震

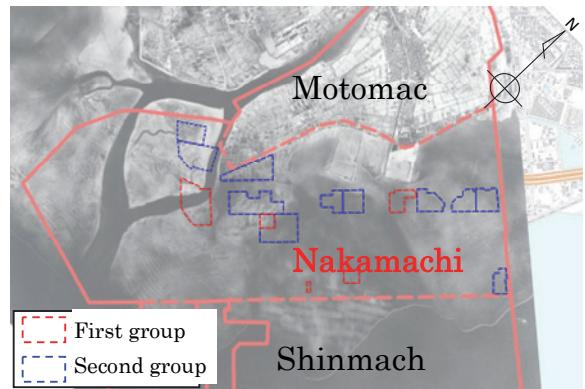


写真-2 浦安市の航空写真(1948年撮影、埋立て前)

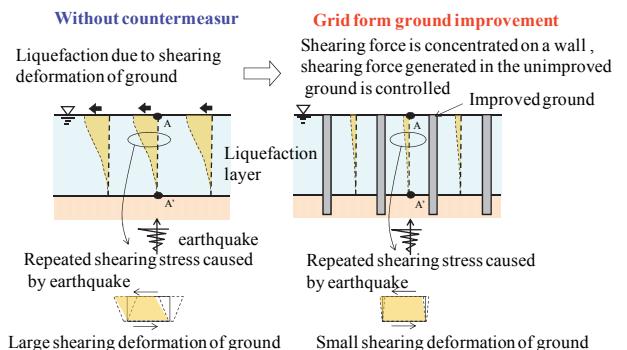


図-5 格子状地中壁工法の液状化防止原理

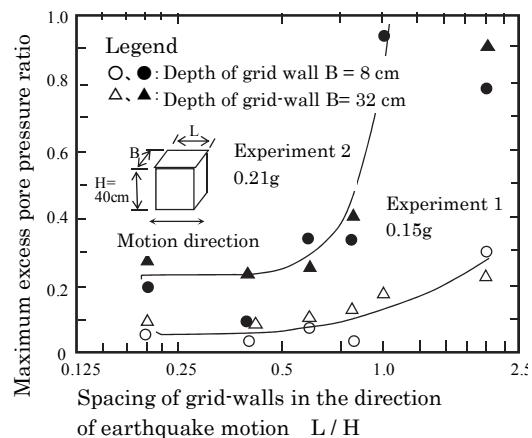


図-6 格子間隔と最大過剰間隙水圧比の関係



写真-3 浦安市で液状化により被災した住宅

動に対しては、レベル2地震動が発生した後に発生する対策対象地震動に対しても、液状化による住宅被害発生を防止する機能を保持できていることを性能規定値とした。そのため、液状化防止に関しては性能規定として定めず、格子壁の健全性保持を性能規定値とし、改良体に発生するせん断応力に対する評価で格子壁の健全性を判定している。

## (2) 設計で採用する地震波の設定

対策対象地震動として用いる地震波は、図-7に示す東北地方太平洋沖地震時に東京都の夢の島の基盤で観測された地震波とした。設計では工学的基盤( $V_s \geq 400$  m/s)に入力する夢の島観測波の振幅を調整することで、東日本大震災時の各地区での地表面加速度最大値の推定値と同等になるようにしている。図-8にレベル2地震動として用いる東京湾北部地震波を示す。この地震波は直下型地震を想定した浦安市の工学的基盤での模擬地震波である。設計では各地区の工学的基盤に、そのままの振幅で入力している。

## (3) 設計解析で用いる地盤定数の設定

2次元等価線形解析で実施する設計解析で必要な地盤定数は、単位体積重量・地盤のせん断波速度 $V_s$ と動的変形特性である。単位体積重量と動的変形特性については、先行して地質調査を実施した第1グループ5地区の各土層の平均値を用いた。液状化判定の対象とした $F_s$ 層・ $A_{sl}$ 層・ $A_d$ 層の解析で採用した動的変形特性を図-9に示す。各地区的地下水位は、ボーリング調査を実施した試験孔で観測された地下水位を参考に設定した。観測された地下水位の中には、GL-0.5mと浅い結果も一部あるが、平均すると観測側された地下水位はGL-1.5m程度であった。解析で用いた地下水位は季節変動を考慮して浅めに設定したため、16地区のうち10地区がGL-1.0mとなった。

盛土層の $B_s$ 層は厚さ1.5m程度あり、現地のスウェーデン試験結果と液状化試験から求めた液状化強度から、対策対象地震動に対して液状化しないと判定できたので、設計では非液状化層として取り扱っている。また $F_s$ 層についても土質試験結果から得られた塑性指数と細粒分含有率の関係から非液状化層と判定した。 $B_s$ 層と $F_s$ 層を非液状化層と判定すると、16地区の大部分のエリアで非液状化層を地表面から2m以上確保することができる。表-3に各地区的液状化判定の対象とした $F_s$ 層・ $A_{sl}$ 層・ $A_d$ 層の15波で片振幅せん断ひずみ3.75%で定義した液状化強度を示す。この強度は土質試験結果の平均値を採用している。同表には各地区的代表的な調査地点での1次元等価線形解析結果から求めた液状化の発生状況を示す。各地区的入力地震動の振幅は、各地区で推定された震災時の地表面最大加速度と整合するように設定している。 $F_s$

表-1 性能規定値の設定

設計地震動	要求性能	性能規定値
対策対象地震動	液状化による顕著な被害が生じない	①液状化層全層でFL1.0 場合によって ②Dey $\leq$ 5cmかつ 地表面からの非液状化層厚さH1 対策後 H1 $\geq$ 5m
		改良体発生せん断応力 $\leq$ 改良体のせん断強度
レベル2地震動	格子状改良体としての対策効果の保持	

表-2 設計で採用する地震波

設計地震動	地震波	マグニチュード、最大加速度
対策対象地震動	夢の島観測波(2011.3.11観測)	Mw9.0、最大加速度0.109g
レベル2地震動	東京湾北部地震模擬波	Mw7.3、最大加速度0.426g

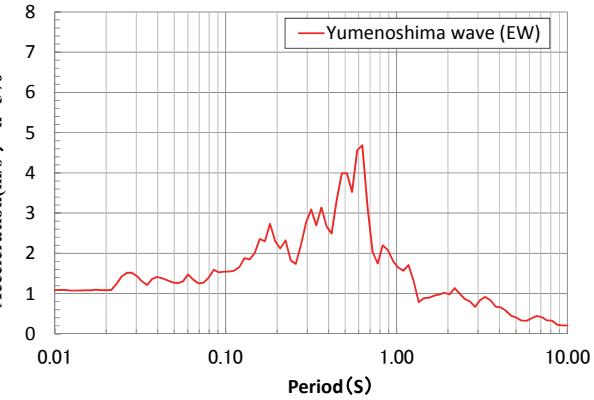
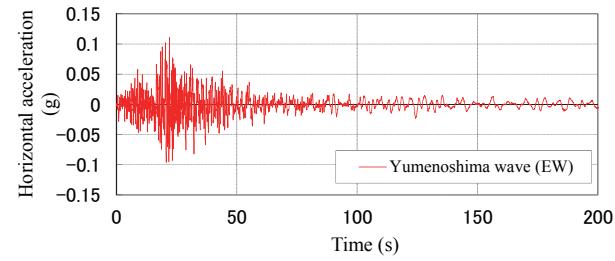


図-7 対策対象地震動の地震波と加速度応答スペクトル

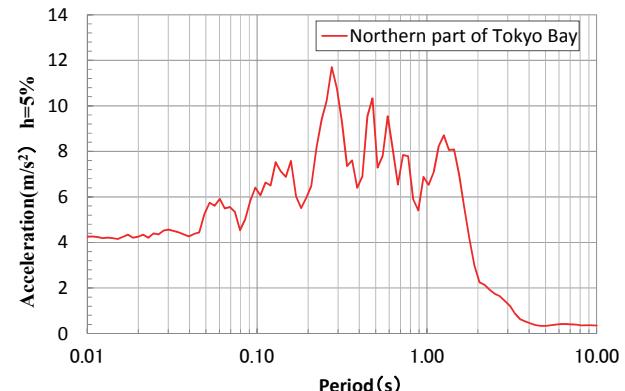
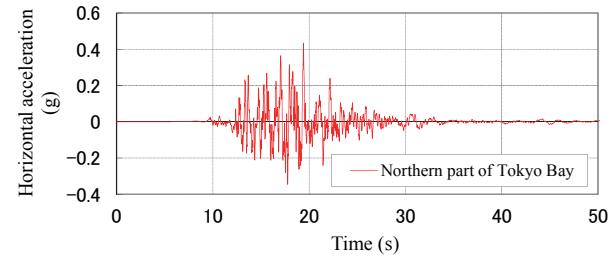


図-8 レベル2地震動の地震波と加速度応答スペクトル

層では全地区で液状化が発生し、 $A_{sl}$ 層で液状化するのは16地区のうち4地区であった。 $A_{s2}$ 層では14地区で液状化は発生せず、一部エリアで液状化が発生するのが2地区だけであった。

#### 4. モデル地盤を対象とした解析手法の検証

図-10に浦安市の委員会(2012)で対策工法検討時に用いられたモデル地盤構成<sup>10)</sup>を示す。モデル地盤は震災時に液状化による住宅の被害が大きかった地区的地盤構成を参考に設定されている。地表面から山砂で盛土した $B_s$ 層、浚渫土で埋戻した緩い埋土層のFs層、やや緩い沖積砂層の $A_{sl}$ 層・ $A_{s2}$ 層と続く。その下には軟弱な沖積粘性土層の $A_{cl}$ 層が厚く堆積している。基盤となる洪積砂層の $D_s$ 層は、地表面から45mの深度にある。各地区的地盤構成は、モデル地盤の構成にほぼ近い構成になっている。このモデル地盤条件を用いて遠心模型振動実験を行い、得られた格子面積と住宅沈下量に対する関係を用いて、各地区的格子状地盤改良の改良仕様を設定するために行う解析手法の検証を行った。

##### (1) 遠心実験で求めた格子間隔と住宅沈下量の関係<sup>8)</sup>

図-10に示すモデル地盤の地層構成を参考に設定した遠心模型振動実験での模型地盤条件を表4に示す。模型地盤の作成に用いた砂は、豊浦砂と震災時に浦安市で発生した噴砂を粒度調整した浦安砂である。豊浦砂と浦安砂の密度は、モデル地盤で設定されている液状強度にはほぼ相当する液状化強度が得られるように設定した。浦安砂の密度管理に用いているD値は、締固め試験の最大乾燥密度( $\rho_{dmax}=1.45t/m^3$ )に対する密度の比率として定義されている。豊浦砂は相対密度Drで管理した。図-11に豊浦砂と浦安砂の粒度分布を示す。浦安砂は細粒分含有率25%に粒度調整している。

図-12に1つの宅地を1つの格子で囲う条件と無対策を同時にモデル化した実験ケースの平面図と断面図を示す。実験は60G場で行った。格子間隔は格子壁の中心間距離で定義されている。隣接する住宅の間隔は、加振方向・加振直交方向ともに2.0m離れており、格子壁の中心が住宅から1.0m離れた位置にある。模型地盤は、浦安市で発生した噴砂の細粒分含有率を25%に粒度調整した浦安砂を用いた。格子状地盤改良の模型は幅0.9mのアクリル製(ヤング率 $E=1.47 \times 10^3$ MPa)である。機械式攪拌工法で施工された格子状地盤改良の標準的な設計基準強度 $F_c=1.5(N/mm^2)$ にほぼ相当する剛性を有している。図-2に示すK-NET浦安観測波(浦安波)を入力地震動として振動台に入力した。住宅模型寸法8m(加振方向)×11m(加振直交方向)、接地圧8.4(kN/m<sup>2</sup>)である。

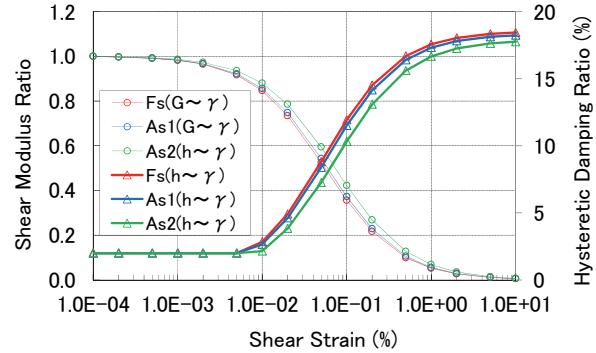


図-9 16地区の設計で用いた動的変形特性  $G \sim \gamma, h \sim \gamma$

表3 16地区の液状化強度と液状化発生状況

District	Liquefaction strength (RL15)			Occurrence of liquefaction		
	Fs	As1	As2	Fs	As1	As2
A	0.171	0.210	0.279	×	×	○
B	0.147	0.182	0.256	×	×	○
C	0.162	0.248	0.241	×	○	○
D	0.167	0.169	0.360	×	×	○
E	0.162	0.276	0.239	×	○	△
F	0.178	0.203	0.241	×	△	○
G	0.217	0.251	0.282	×	△	○
H	0.199	0.190	0.319	×	—	○
I	0.201	—	0.253	×	—	△
J	0.209	0.172	0.267	×	×	○
K	0.148	0.190	0.375	×	×	○
L	0.184	0.230	0.259	×	×	○
M	0.180	0.174	0.486	×	×	○
N	0.215	0.175	0.259	×	×	○
O	0.184	0.181	0.286	×	×	○
P	0.148	0.187	0.478	×	×	○

× : Liquefaction    △ : Partial liquefaction    ○ : Non-liquefaction

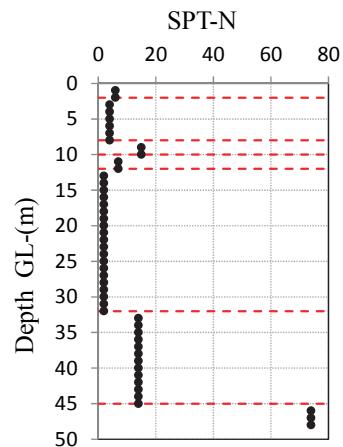


図-10 モデル地盤の地層構成<sup>10)</sup>

表4 検討委員会でのモデル地盤と模型地盤の関係

△	浦安モデル地盤 <sup>10)</sup>		遠心模型地盤				
	深度(m)	層区分	$\varepsilon = 2.5\%, 20$ 波の応力比	層区分	$\varepsilon = 2.5\%, 20$ 波の応力比	層区分	$\varepsilon = 2.5\%, 20$ 波の応力比
0~2m	Bs		0.25	豐浦砂 Dr=50%	0.17	浦安砂 D値=90%	0.18
2m~8m	Fs		0.20				
8m~10m	As1		0.36	豐浦砂 Dr=70%	0.22	浦安砂 D値=95%	0.28
10m~12m	As2		0.23				

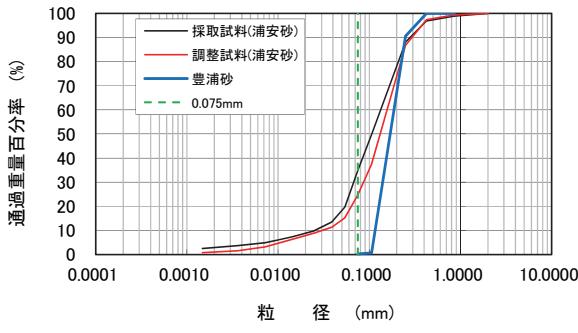


図11 浦安砂と豊浦砂の粒度分布

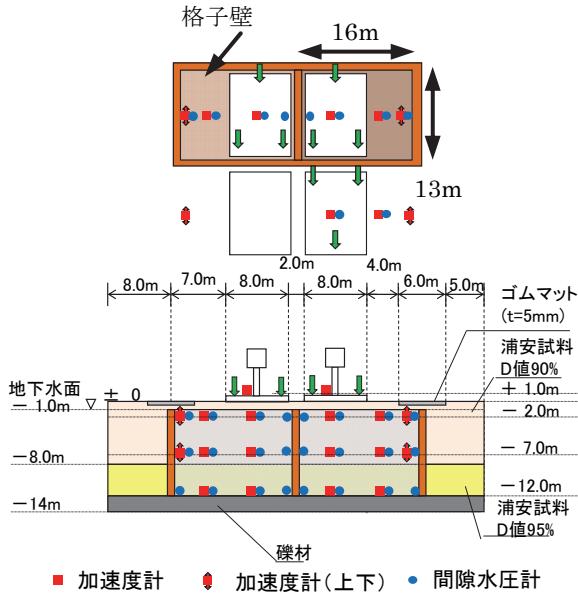


図12 Case-6の格子状地盤改良側の平面図と断面図  
(寸法は実大スケール換算寸法)

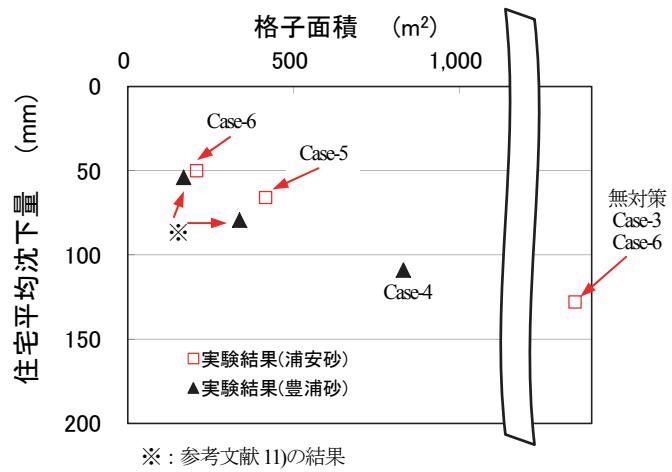


図13 遠心実験で得られた格子面積と住宅平均沈下量の関係

表-5 解析で用いたパラメータ

土質名	N値	細粒分含有率 (%)	密度 ( $t/m^3$ )	せん断波速度 (m/s)	初期せん断剛性 ( $kN/m^2$ )	ボアソン比
	Fc	$\rho$	$V_s$	$G_0$	$\nu$	
Bs (乾燥)	6	1	1.80	145	38,038	0.49
Bs (飽和)	6	1	1.80	145	38,038	0.49
Fs	4	6	22	1.80	127	29,029
As1	15	2	21.9	1.80	197	70,067
As2	7	2	31	1.70	153	39,813
Ac1	2	20	93.6	1.50	133	26,534
Ac2	14	15	93.6	1.50	220	72,600
Ds (工学的基盤)	74	-	10	2.00	388	0.49

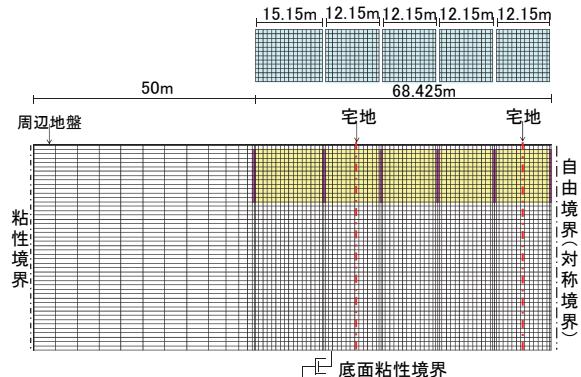


図14 疑似3次元モデル(1宅地1格子)

図-13に格子面積と住宅平均沈下量の関係を示す。格子面積は格子壁中心で囲まれる面積で定義しており、格子間隔16m×13mで208m<sup>2</sup>、格子間隔32m×13mで416m<sup>2</sup>、格子間隔32m×26mでは832m<sup>2</sup>となる。格子面積が小さくなると住宅平均沈下量が小さくなる傾向にあることを示しており、格子間隔16m×13mの住宅平均沈下量は50mm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。模型地盤の作成に浦安砂を用いた時の住宅平均沈下量と、豊浦砂を用いた時の住宅平均沈下量の間に大きな差はなかった。また格子面積400m<sup>2</sup>で格子の中心間隔20m×20mの正方形で実験した時の住宅平均沈下量は71mmであった。この格子面積は長方形の格子間隔

32m×13mの416m<sup>2</sup>に近い。そして格子間隔32m×13mの住宅平均沈下量66mmに近い結果であった。このことから、図-13に示す実験ケースに対して格子面積で結果を整理しても問題はなく、各地区の格子状地盤改良の設計で、格子面積を指標として用いることができる判断ができる。

## (2) モデル地盤の解析

図-10に示すモデル地盤の解析は等価線形解析で行った。表-5に解析で用いたパラメータを示す。格子状地盤改良による対策後の解析には、図-14に示す疑似3次元モデルを用いた。疑似3次元解析モデルでは、加振直交方

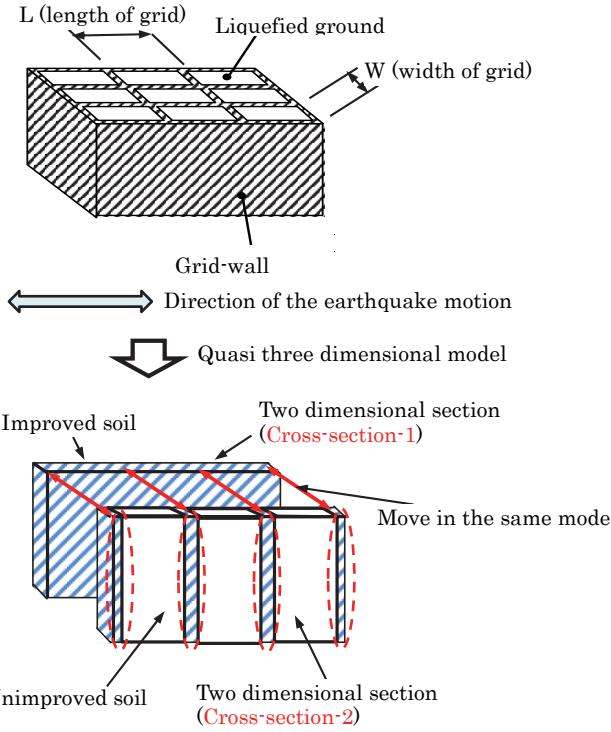


図-15 疑似3次元モデルでのモデル化方法

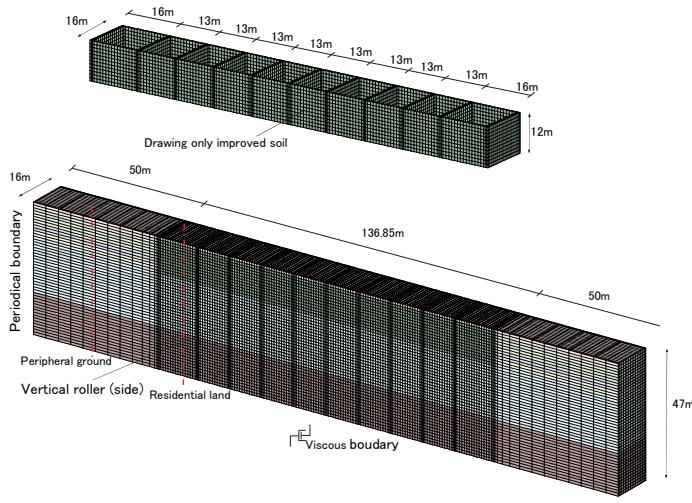


図-18 3次元解析モデル

向の改良体と地盤をモデル化した、加振平行方向の改良体をモデル化した2つの2次元断面を用いる。加振平行方向改良体と加振直交方向改良体が交差する節点を共有する境界条件によって、3次元形状の格子状地盤改良を2次元断面でモデル化している。解析では無対策以外に、図-15に示す解析モデルの面外方向改良体の間隔と、解析モデルの奥行方向の幅を変えることによって、1つの格子に1つの宅地が入る格子間隔16m×13m、1つの格子に2つの宅地が入る格子間隔32m×13m、1つの格子に4つの宅地が入る格子間隔32m×26mの解析を行った。ただし、住宅をモデル化しない条件で解析は行っている。

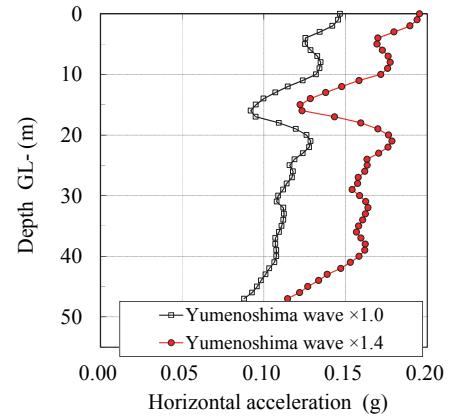


図-16 水平応答加速度の深度分布(無対策)

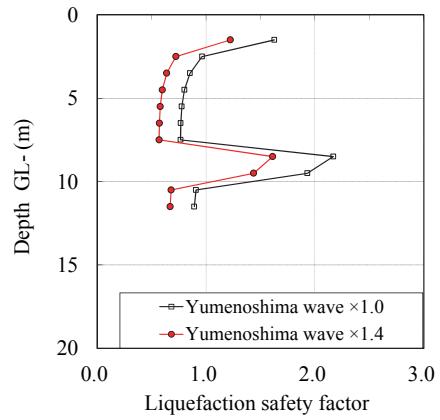


図-17 FL値の深度分布(無対策)

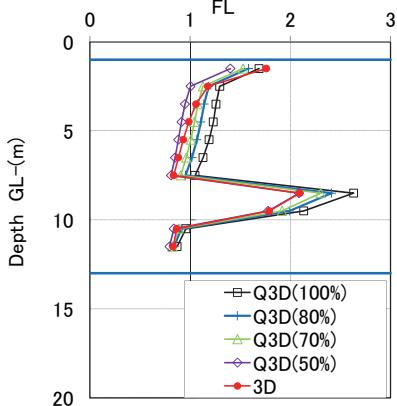


図-19 擬似3次元解析(Q3D)と3次元解析(3D)のFL値分布比較

図-16と図-17は無対策の宅地位置での水平応答加速度の最大値と、FL値の深度分布である。地表面加速度は夢の島観測波1.0倍入力に対して1.43(m/s<sup>2</sup>)、夢の島観測波1.4倍入力に対して1.91(m/s<sup>2</sup>)で、いずれの入力に対してもほぼ全層でFL<1.0であった。

疑似3次元解析モデルでは、改良体のせん断剛性を低く設定しないと、格子内地盤で発生するせん断応力を過少評価する傾向にあると言われている。そこで格子間隔16m×13mの疑似3次元モデルと同じ条件で、図-18に示す3次元モデルを用いた等価線形解析を行い、格子内地盤のFL値を求めた。入力には夢の島観測波の1.4倍振幅

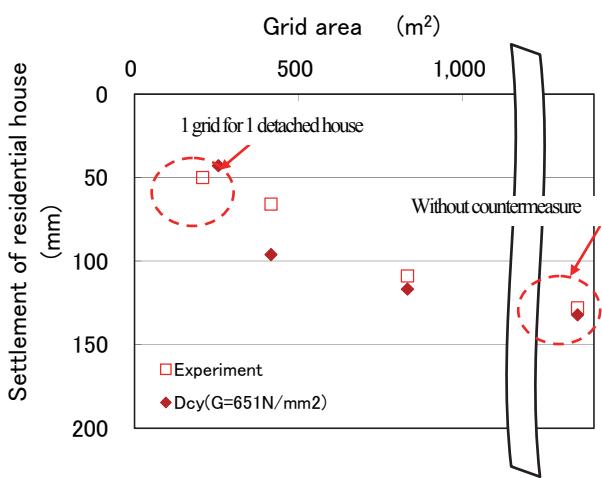


図-20 疑似3次元解析と遠心実験の沈下量の比較

を用いている。図-19では疑似3次元モデルのせん断剛性を変えた条件で求めた格子内地盤のFL値と、3次元解析結果との比較を行っている。改良体のせん断剛性を70%に低下させた時、疑似3次元解析結果と3次元解析結果の対応が良かった。図-20は改良体のせん断剛性を70%に低下させた条件で、疑似3次元モデルを用いて $D_{cy}$ を求めた結果と、図-13に示す遠心実験で求めた住宅沈下量を比較している。実験結果と解析結果の対応が取れていることが確認でたので、この事業での格子間隔と地盤条件での格子状地盤改良の設計では、改良体のせん断剛性を70%に低下させる条件で疑似3次元モデルを用いることにした。

## 5. C地区の設計

前章で述べた解析手法を用いて、16地区4103宅地を対象とした格子状地盤改良の設計を行った。本章ではその中のC地区について、地盤調査結果を用いて格子状地盤改良の改良仕様を、どのように設定したかについて述べる。

### (1) 現地調査

図-21にC地区の平面図を示す。C地区は7つの街区の98宅地で構成されている。現地調査の調査項目を大きく分類すると、宅地部と道路部に分れる。宅地部では住宅と住宅の隣棟間距離、塀・植栽など格子壁の施工に障害となる障害物を確認し、障害物の撤去復旧を含めた宅地部の改良杭の施工計画を作成する。道路部では埋設されている下水管等の障害物を竣工図面から調査し、埋設管等の施工時の移設の必要性等を考慮して、道路部の改良杭の施工計画を作成する。1つの宅地を1つの格子で対策する条件で作成された改良杭の配置平面図は作成されてい

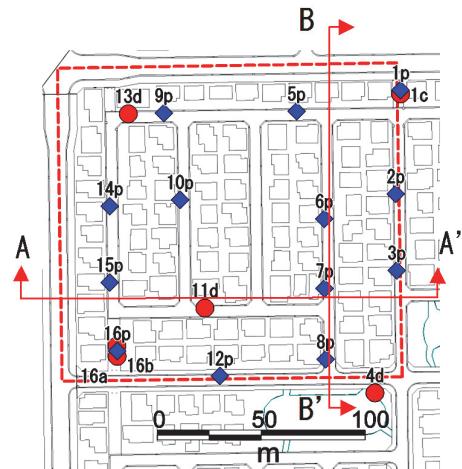


図-21 C地区の平面図

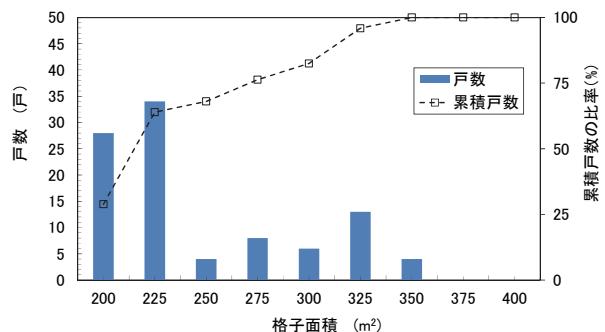


図-22 C地区の格子面積と累積戸数の関係

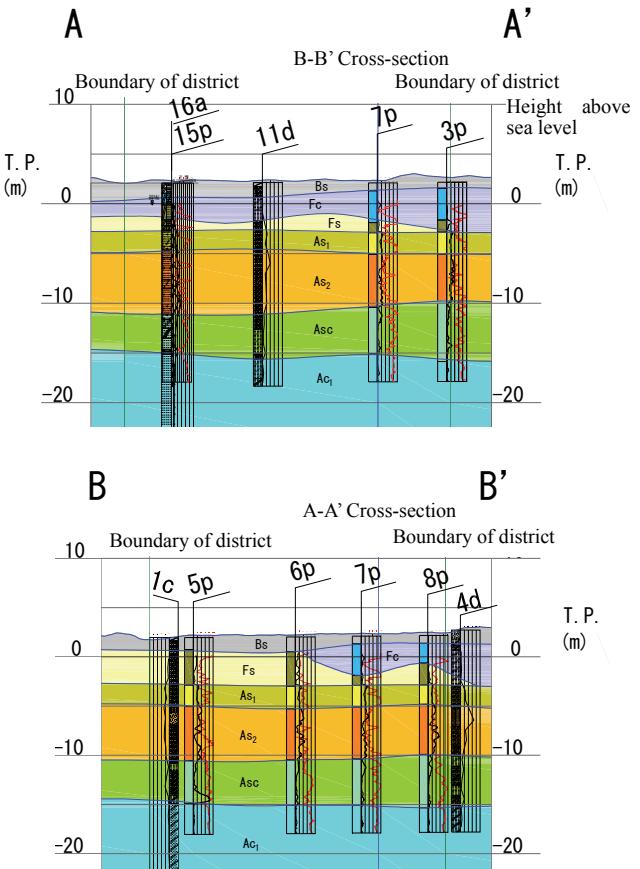
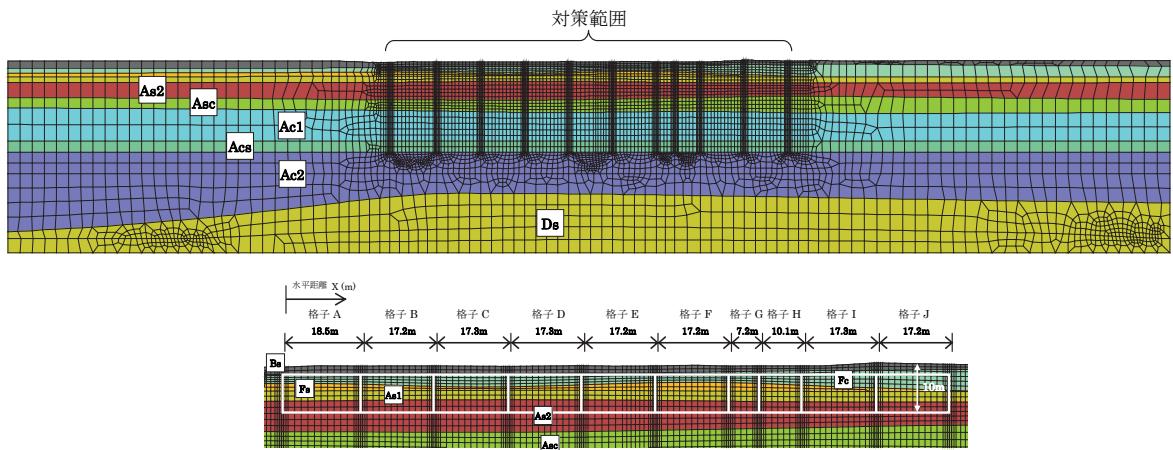


図-23 地質断面図



A-A'断面の解析モデル

図-24 解析で用いた疑似3次元モデル

表-6 C地区の解析パラメータ

地層	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$v$	$G_0$ (MN/m <sup>2</sup> )
Bs	19.0	9.0	1.937	120	0.489	27.9
Fc	15.5	5.5	1.581	120	0.489	22.8
Fs	19.0	9.0	1.937	170	0.488	56.0
As1	19.0	9.0	1.937	170	0.488	56.0
As2	19.0	9.0	1.937	170	0.488	56.0
Asc	18.0	8.0	1.835	130	0.496	31.0
Ac1	16.0	6.0	1.632	130	0.496	27.6
Ac2	16.5	6.5	1.683	150	0.495	37.9
Ac2(1)	16.0	6.0	1.632	150	0.491	36.7
Ac2(2)	16.0	6.0	1.632	200	0.491	65.3
Ds	18.5	8.5	1.886	310	0.480	181.3
改良体	20.0	10.0	2.041	-	0.260	781.0

る。得られた格子面積と累積戸数の関係を図-22に示す。

2断面に対して設計解析を実施した。

## (2) 地質調査

地質調査は50m～100mピッチで標準貫入試験かPDC試験を実施し、計測したN値と細粒分含有率から液状化層の液状化強度を算出している。図-21の赤丸が標準貫入試験の実施箇所、青丸がPDC試験<sup>12)</sup>の実施箇所を示している。標準貫入試験を実施したボーリング孔から採取した試料に対して実施した土質試験の項目は、物理試験、動的変形試験、繰返し三軸試験である。また、PS検査試験も1箇所で実施している。このようにして得られた地質調査の結果を分析し、地区の地質構成を推定している。そして3次元の地質構成をCADデータとして作成した。図-23に示すのは、図-21の平面図に示されているA-A'断面とB-B'断面での地質構成図である。この2断面に対して設計解析を実施した。C地区は、中町の沖合中央に位置し、地形区分から砂洲とトラフとの境界に位置する。盛土層(Bs層)の下に浚渫による埋土層(Fs, Fc)が深度5～6mまで、その下には沖積砂質土層(As1, As2, Ac2)が深度16～18mまで概ね水平に堆積している。埋土粘性土層(Fc)はB-B'断面図の右側(南東側)で確認され、同図左側(北西側)では埋立砂質土層(Fs)が厚く分布している。この

## (3) 設計解析

図-23に示す2断面に対して疑似3次元モデルで作成した解析モデルを図-24に示す。境界条件は底面が粘性境界、側面はエネルギー伝達境界とした。設計での解析では、100宅地に対して1断面程度の解析モデルを作成することを基本方針としている。表-6に解析で用いたパラメータの一覧を示す。改良体の初期せん断剛性 $G_0$ は日本建築センター指針<sup>13)</sup>に示されている式に基づいて次のように設定した。改良体の変動係数 $V_{quf}=0.45$ とすると現場強度の一軸圧縮強度 $q_{uf}$ は

$$q_{uf}=2.4F_c$$

砂層での改良体のヤング係数 $E_{50}$ 、 $E_0$ と $q_{uf}$ の間には

$$E_{50}=130q_{uf} \quad E_{50}/E_0=0.2$$

の関係があるので、改良体のポアソン比 $\nu=0.26$ から

$$G_0=258 \times 2.4F_c=619F_c$$

となり、 $F_c=1.8(\text{N/mm}^2)$ に対して $G_0=1114(\text{N/mm}^2)$ となる。

疑似3次元モデルを用いた解析では、改良体のせん断剛性を70%に低下させる必要があることが、3次元解析結果との比較で分かっているので、解析で用いる $G_0$ は

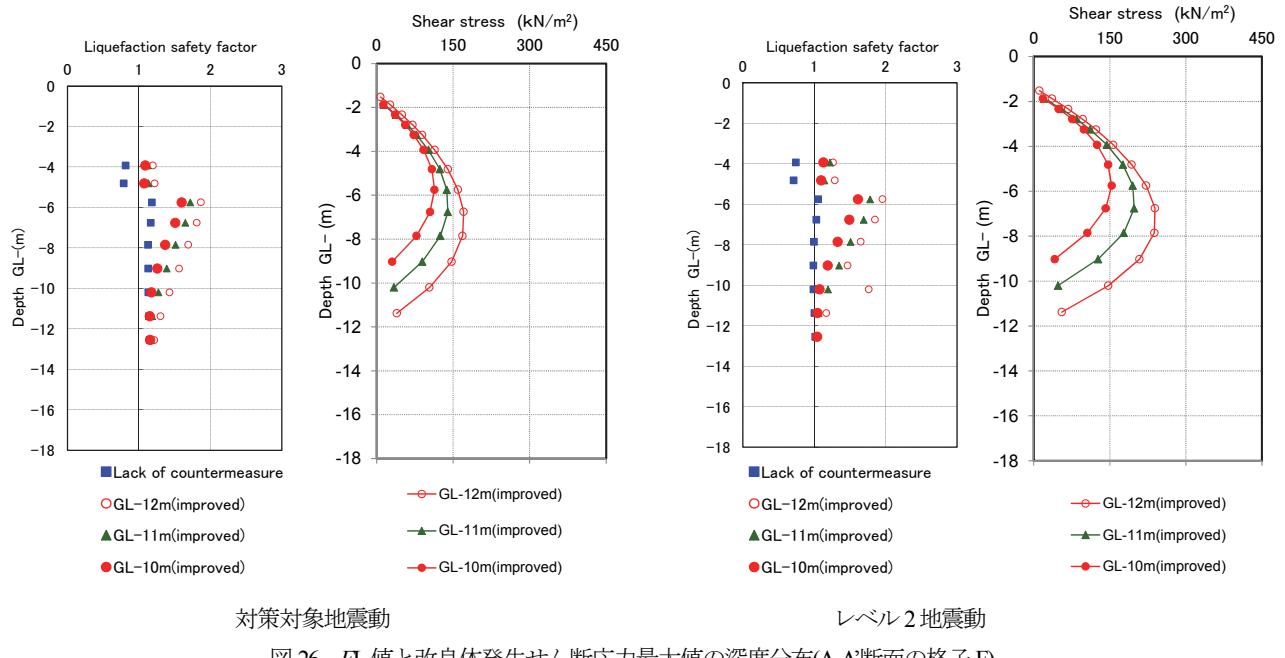


図-26 FL値と改良体発生せん断応力最大値の深度分布(A-A'断面の格子F)

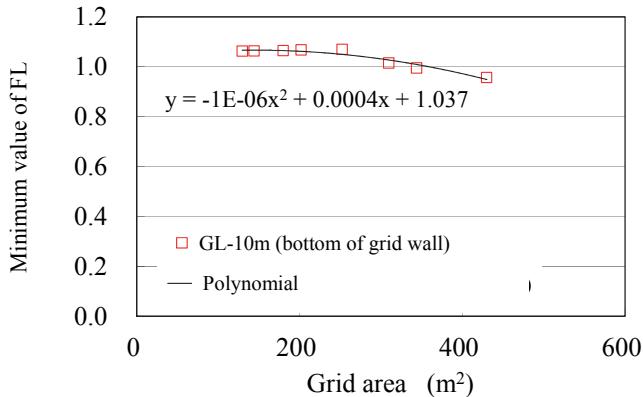


図-27 格子面積とFL値の最小値との関係(改良下端深度GL-10m)

781(N/mm<sup>2</sup>)とした。図-25に示す改良体の動的変形特性は文献から設定した。地盤の動的変形特性は図-9に示す関係を用いている。

等価線形解析で格子壁で囲まれた地盤中央部でのせん断応力の最大値  $\tau_{\max}$  を求め、その値から算出される等価な地震時せん断応力比と液状化強度を比較することで FL 値を算出した。地盤のせん断応力評価では地震のマグニチュード  $M$  を考慮し、等価なせん断応力  $\tau_{eff}$  に換算する際の補正係数は  $\gamma_n=0.1(M-1)=0.8$  とした。液状化層の液状化強度は標準貫入試験結果とPDC試験から求めた値を、  $F_o$  層・  $A_{sl}$  層・  $A_s$  層毎に平均した値をFL値の算出に用いた。

図-22に示すようにC地区の宅地面積は一定ではないので、格子面積も200m<sup>2</sup>～400m<sup>2</sup>の範囲に分布している。図-13に示す格子面積と住宅沈下量の関係は、C地区にある

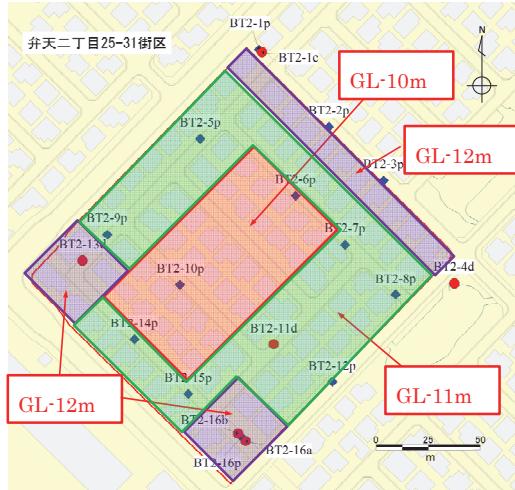


図-28 改良下端深度の平面分布

宅地の平面形状であれば適用することができると言えられる。そのため解析では解析モデルの奥行方向の幅を変えた解析を行うことによって、幅広い範囲に分布する格子面積に対して、液状化発生の危険度評価と改良体の健全性評価を行う。道路から宅地に引き込まれているガス管や水道管の埋設深度は地表面から1m程度である。改良体施工時に、これらの埋設管が障害になるのを防止する必要性と、宅地部での施工で用いる噴射搅拌工法では1.5m程度の土被りが必要なことから、改良体の天端は地表面から1.5mとした。改良体の下端深度は表-1に示す性能規定値を満足できる深度とする必要があるので、改良下端深度をGL-10m, GL-11m, GL-12mと変えた解析モデルを作成し解析を行っている。

A-A'断面の格子FでのFL値の深度分布と、改良体に発生するせん断応力の最大値の深度分布を示しているのが

図-26である。改良下端深度10mで対策対象地震動に対して、液状化層全層でFL値は1.0以上になっている。また改良体に発生するせん断応力も許容値以内に収まっている。改良体の許容せん断応力  $\tau_a$  は、設計基準強度の30%と設定する。対策対象地震動に対する安全率は2/3、レベル2地震動に対する安全率を3/3とすると、 $\tau_a$  は対策対象地震動に対して360(kPa)、レベル2地震動に対して540(kPa)となる。C地区の改良下端深度は、性能規定値で定める液状化層全層でFLが1.0以上になる条件で設定した。図-27は改良下端深度10mの解析結果に対して、各解析ケースの各格子で求めたFL値の最小値を求め、格子面積との関係をプロットしたものである。格子面積350m<sup>2</sup>以下であれば、最小FL値が1.0を超えることが確認できる。解析結果と地質構成を考慮して決めた改良下端深度の平面分布が図-28である。

## 6. まとめ

2011年の東北地方太平洋沖地震で液状化により浦安市で住宅地に大きな被害が出たのは、1965年から1973年にかけてポンプ浚渫により埋立てられた地域であった。また、住宅被害に大きな影響を及ぼしたのは、F<sub>s</sub>層とA<sub>s</sub>層の液状化と考えられる。特にF<sub>s</sub>層については、設計対象とした全ての地区的解析で、東北地方太平洋沖地震と同等の地震動に対して液状化が発生するという評価結果であった。それに対してA<sub>s</sub>層は、液状化が発生する地区と発生しない地区に分かれた。浦安市の被害が大きかった地域の4103軒を対象として格子状地盤改良工法を用いた液状化対策の設計を行った。設計で規定した性能は、①東北地方太平洋沖地震と同等の地震動に対して液状化による顕著な被害が生じないこと、②レベル2地震動が発生しても格子壁の健全性を保持し、その後に発生する東北地方太平洋沖地震と同等の地震動に対しても、液状化による顕著な被害が発生しないという2つの性能とした。

液状化による顕著な被害が生じない性能を設計では、液状化層全層でFL>1.0を満足するか、非液状化層厚H<sub>1</sub>≥5mかつD<sub>y</sub><5cmという性能規定値で定義した。この性能規定値が満足できているかどうかについては、擬似3次元モデルを用いた等価線形解析手法によって確認した。解析結果の検証については、遠心模型振動実験結果を3次元の等価線形解析でシミュレーションすることで行った。その結果、今回の事業対象とする地区で採用する格子間隔と地盤条件の下での擬似3次元モデルでの解析では、改良体のせん断剛性を70%に低減する必要があることを明らかにした。また、宅地面積の異なる多数の宅地を対象とした場合、疑似3次元モデルの奥行方向幅を変

えたパターンの解析を実施し、格子面積と最小FL値の関係を導く手法で格子状改良の設計が可能であることを示した。格子間隔ではなく格子面積を指標とすることの妥当性については、格子の平面形状を変えた遠心模型振動実験によって検証した。

## 参考文献

- 1) 国土交通省都市安全課編：市街地液状化対策推進ガイドブック、2014
- 2) 建設省土木研究所耐震技術センター動土質研究室ほか：液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)，土木研究所共同研究報告書，第186号，1999。
- 3) 古賀泰之，松尾修，榎田実，伊藤浩二，鈴木吉夫：深層混合処理工法による砂地盤の液状化対策に関する模型振動実験(その2)－格子状改良地盤の液状化抑制効果について－，土質工学研究発表会，pp.1019-1020，1998。
- 4) 内田明彦，小田島暢之，山下清：東北地方太平洋沖地震における格子状地盤改良を施した建物基礎の挙動，日本建築学会技術報告集，Vol.19，No.42，pp.481-484，2013。
- 5) 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.62，2001。
- 6) 鈴木吉夫，斎藤聰，鬼丸貞友，木村玄，内田明彦，奥村良介：深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策工，土と基礎，Vol.44，No.3，pp.46-48，1996。
- 7) Uchida, A., Yamashita, K., Odajima, N., 2012. Performance of Piled Raft Foundation with Grid-Form Ground Improvement During the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of Disaster Research Vol.7 No.6, pp.726-732.
- 8) 津國正一，内田明彦，本多剛，小西一生：格子状地盤改良による住宅沈下量抑制効果に着目した遠心模型振動実験，地盤工学ジャーナル，Vol.9，No.4，pp.761-771，2014。
- 9) Ishihara, K.: Stability of natural deposits during earthquake, Proc., 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp.321-376, 1985.
- 10) 浦安市ホームページ，液状化対策実現可能性技術検討委員会報告書：  
<http://www.city.urayasu.lg.jp/shisei/johokoukai/shingikai/toshiseibi/1002853/1005444.html>, 2016.08.12参照。
- 11) 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。
- 12) Sawada, S.: Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone, 17th International Conference on Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, 1064-1067, 2009.
- 13) 日本建築センター：改訂版建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—，2002。