

# 格子状改良・排水工法を併用した液状化対策に関する研究開発 Research and Development of a liquefaction countermeasure combinedly using latticed walls and drains

佐藤 靖彦*	土屋 光弘**
Yasuhiko Sato	Mitsuhiro Tsuchiya
今村 眞一郎***	小宮 隆之**
Shinichiro Imamura	Takayuki Komiya
平野 孝行****	齋藤 禎二郎****
Takayuki Hirano	Teijiro Saito

## 要 約

2011年に発生した東日本大震災を契機に、戸建て住宅や公共施設、民間工場設備等の既設建物の耐震対策、液状化対策が検討されている。当社では、既設構造物や施設に適用可能な液状化対策として、格子状改良と排水工法を併用した液状化対策の検討を、遠心模型実験および数値解析により進めてきた。本報では、格子状改良・排水工法を併用した液状化対策の効果について、遠心模型実験により確認するとともに、遠心模型実験の再現解析を行った。再現解析は、①2次元および3次元動的有効応力解析により行い、併用の効果を検証した。また、②実地盤を想定した数値解析も行っている。2次元解析では格子状改良や排水工法の3次元効果を模擬する簡易な解析モデルを提案し、簡易モデルの有用性を示した。

## 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 背景
- § 3. 工法概要
- § 4. 動的遠心模型実験による検証
- § 5. 数値解析手法と遠心模型実験の再現解析
- § 6. 実地盤を想定した対策効果の試解析
- § 7. まとめ

## § 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震により関東地方でも広い範囲で液状化現象が生じ、東京湾岸や河川周辺地域を中心に戸建て住宅や公共施設などに被害が発生した。今後発生が危惧される南海トラフ地震や首都直下地震に対して、液状化被害の抑止、軽減を図るために、既設構造物やインフラ施設に関する液状化対策を検討する必要がある。

液状化対策には今までにも様々な工法が開発されてい

るが、東日本大震災を契機に既設構造物やインフラ施設に適用可能な液状化対策の研究開発が活発となっている。筆者らは既設建物に対して格子状改良と排水工法を併用した液状化対策の適用性について、遠心模型実験および数値解析により検討を行った。格子状改良は既設構造物の外周を囲うように改良し、排水工法はドレーン材を建物外周あるいは建物内部から打設する方法を想定した。

本報では、格子状改良・排水工法を併用した液状化対策の概要について最初に説明し、次に対策効果を確認するため実施した遠心模型実験結果を示す。また、対策効果を検討するために実施した2次元および3次元動的有効応力解析の手法と検証結果について報告する。

## § 2. 背景

日本は過去、新潟地震、兵庫県南部地震など大地震が繰り返し発生しており、そのたびに液状化被害が発生していた。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）においても、継続時間の非常に長い地震動が影響して、関東地方を中心に東京湾岸や河川周辺等において広く液状化現象が発生し、住宅や道路、上下水道施設などの公共施設、民間施設で建物の沈下、傾斜や埋設管の浮き上がりなどの液状化による被害が多発した。また2016年4月の熊本地震においても液状化被害の報

\* 技術研究所

\*\* 土木設計部設計一課

\*\*\* 技術研究所土木技術グループ

\*\*\*\* 土木設計部

告がされている。

南海トラフ等を震源とする連動型地震や首都直下地震等の発生の可能性が言われており、大地震の発生リスクへの対応として「国土強靱化基本法」が平成25年に施行され、国土強靱化アクションプランとしてインフラ等の防災対策の施策が進められている<sup>1)</sup>。また、民間においてもBCPの観点で、施設の防災・耐震対策が検討、講じられるケースが増加している。ただし、防災対策のために構造物や施設を改新築するには多額の費用を要することや、産業活動等を継続しながら対策を行うことが必要な条件が多い点も踏まえ、本研究では既設の構造物や建物・施設に対する液状化対策工法として、併用工法の検討を行ったものである。

§3. 工法概要

既設構造物や施設に適用できる対策工法として、図-1に示すように構造物の外周地盤を囲う格子状改良（または格子壁）と排水工法に着目し、両工法を併用した液状化対策方法について、その適用性と効果を遠心模型実験ならびに数値解析により検証を行うこととした。

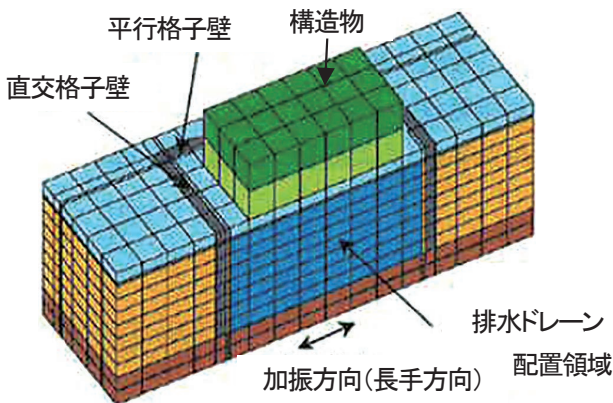


図-1 格子状改良と排水工法の併用工法のイメージ

格子状改良は、液状化のある砂質地盤の地震時せん断変形を抑制する効果がある。TOFT工法のように格子壁の間隔が一定範囲内であれば、せん断変形の拘束により過剰間隙水圧の発生を抑制することが期待される<sup>2)</sup>。しかし、格子壁の間隔が比較的小さいため既存構造物に対しては建物内部からの施工が必要になるなど、適用が難しい場面が想定される。

一方、排水工法はドレーンを地中に埋設して、地震時の液状化に伴う過剰間隙水圧の抑制と過剰間隙水圧の消散を促進することにより、液状化被害を低減する工法であり、既設構造物の周囲からの施工が可能である。過去に当社では、リサイクル材を利用した人工ドレーン材工法「ポリベイン工法」を研究開発している<sup>3)</sup>。

格子状改良と排水工法の併用工法は、格子壁による地盤のせん断変形の抑制効果と排水材による過剰間隙水圧の抑制・消散による効果、両者の相乗効果に期待するも

のである。

§4. 動的遠心模型実験による検証

格子状改良と排水工法の併用工法の対策効果の確認を目的に、まず動的遠心模型実験を実施し、効果の検証を行った<sup>4)5)</sup>。

4-1 実験概要

図-2に遠心模型実験の概要図を示す。実験は、実規模深さ10mの液状化地盤上に戸建て住宅相当の建物を想定し、格子壁と排水ドレーンをモデル化し、遠心力場50G、1/50縮尺の条件で実験した。模型地盤は豊浦砂を使用し、液状化層を相対密度Dr=60%、非液状化層をDr=90%の条件とし飽和砂地盤を作製した。建物は実規模スケールで平面12m×12m×高さ5.5m、荷重は15kPa、格子壁は壁厚1.5m、深度10mの規模とした。ドレーン材は実物換算で外径300mm、透水係数0.03m/s、ドレーン材の配置間隔は、1.4mと2.8mピッチの2条件とした。実験ケースを表-1に示す。入力地震動は最大

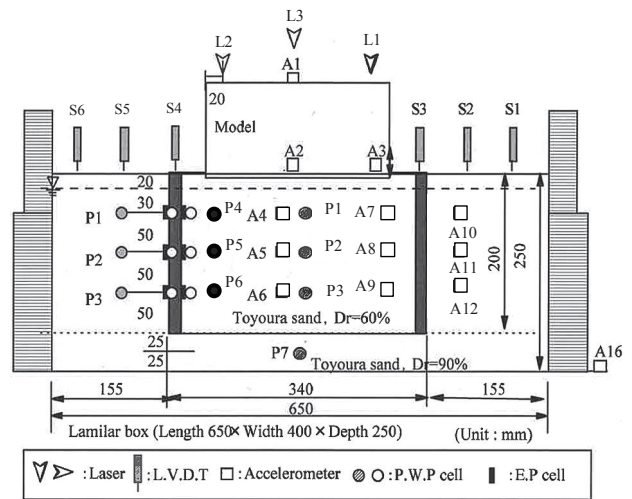
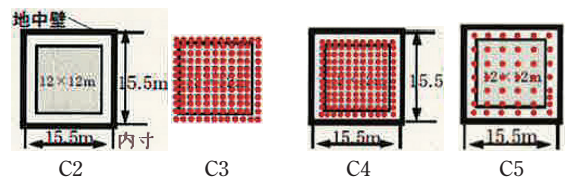


図-2 遠心模型実験の概要図 (C2)

表-1 実験ケースと実験条件

Case	対策内容
C1	無対策
C2	格子壁 内寸：15.5m×15.5m L/H=1.55 (L：格子幅, H：格子壁深さ)
C3	排水対策 排水材：建物直下および周辺 1.4mピッチ
C4	格子壁+排水対策1 格子壁 内寸：15.5m×15.5m L/H=1.55 排水材：建物直下および周辺 1.4mピッチ
C5	格子壁+排水対策2 格子壁 内寸：15.5m×15.5m L/H=1.55 排水材：建物直下および周辺 2.8mピッチ



加速度 311 gal の臨海波 (ST3 : RINKAI92h) とした (図-3)。

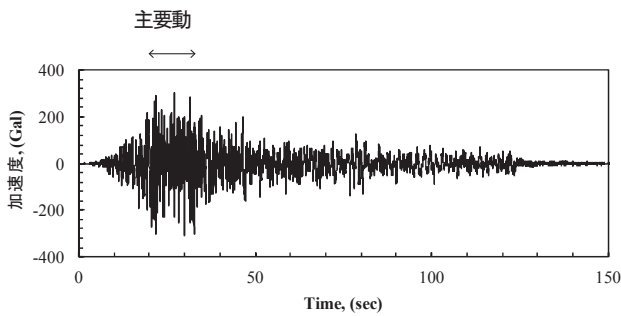


図-3 入力地震動 (臨海波)

4-2 実験結果

図-4 に建物直下 P1 における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。主要動の 20~30 秒付近で、過剰間隙水圧比は無対策 C1 で約 1.0、格子壁単独 C2 で約 0.8 まで上昇し、主要動後も高い過剰間隙水圧比で推移しているのに対して、排水対策 C3、併用法 C4 (ピッチ 1.4 m) は主要動後は消散する挙動が確認された。

図-5 に建物の平均沈下量 ( $L_1, L_2, L_3$  の平均) の時刻歴を示す。加振が終了する 130 秒までの沈下挙動に着目すると、無対策 C1 は沈下が最も大きくかつ継続して増大し、格子壁単独 C2 では沈下が小さいものの増大傾向にある。これに対して、排水工法単独 C3、併用法 C4、C5 は主要動の初期に排水に伴う沈下が生ずるものの、過剰間隙水圧比の低下に伴い、沈下の増加が収まる傾向が認められる。

図-6 は、建物の平均沈下量を加振終了時点 (130 秒) と過剰間隙水圧の消散完了時点 (1000 秒後) に分けて図

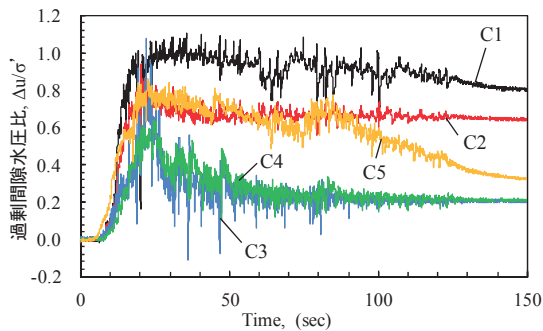


図-4 過剰間隙水圧比の時刻歴 (P1)

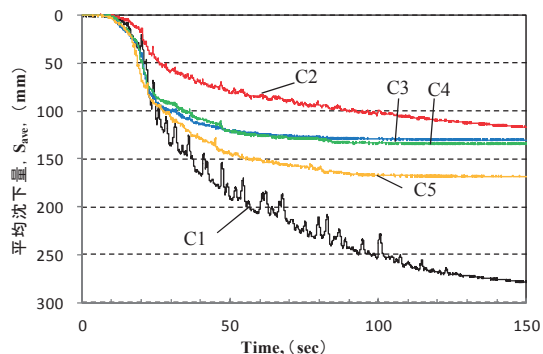


図-5 建物の平均沈下量の時刻歴

示したものである。格子壁単独 C2 は無対策 C1 に比べて、沈下量が約 50% であり、格子壁により地盤変形が抑制された効果と考えられる。一方、加振終了後 130~1,000 秒間の沈下量に着目すると、無対策 C1 および格子壁単独 C2 では 30~40 mm の沈下が生じているのに対して、排水対策を適用した C3~C5 では加振終了後の沈下量が大幅に減少した。

図-7 は建物の傾斜角  $S_{dif}/L$  を比較したものである。格子壁単独 C2 と排水工法単独 C3 の傾斜角は無対策 C1 よりも若干大きいですが、併用法 C4 の傾斜角は C1 の約 1/10 という結果となった。

以上、遠心模型実験結果より、格子状改良と排水工法を併用した対策工法は、格子壁により地盤せん断変形の抑制効果が認められるとともに、単独工法よりも建物の傾斜を抑制する効果があることを確認した。また併用法 C4 のドレーン間隔を 2 倍とした場合 C5 でも傾斜角の抑制効果が確認された。

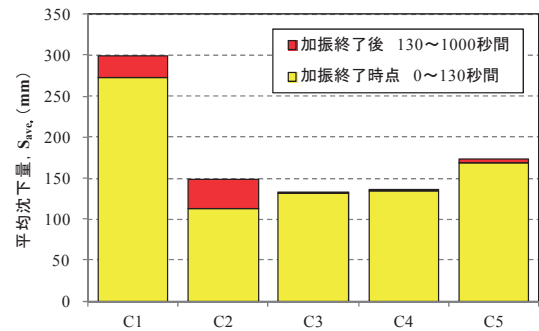


図-6 建物の平均沈下量の比較

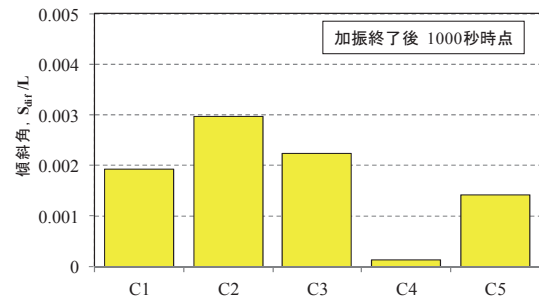


図-7 建物の傾斜角の比較

§ 5. 数値解析手法と遠心模型実験の再現解析

5-1 解析手法

格子状改良・排水工法の併用法の対策効果を、数値解析により再現、検討することとした。数値解析には、群馬大学が基幹部分を開発した透水・排水挙動を考慮できる地盤の動的有効応力解析ツール UWLC (フォーラムエイト社製) を用い、2次元解析と3次元解析の両者を実施した。2次元解析では格子状改良の3次元効果を模擬する簡易な解析モデルを検討し、3次元解析との比較を行った。また排水工法のモデル化においては、ドレーン材を1本ごとにモデル化するにはモデル作成が非常に煩

雑であり、解析時間も膨大となることから、ドレーンと地盤を複合地盤として評価する等価透水係数の考え方を導入することとした。

5-2 模型実験の再現解析<sup>6)7)8)</sup>

4章で報告した実験ケース(C1~C5)を再現する解析を、2次元ならびに3次元解析UWLCを用いて行った。

(1) 2次元解析の解析条件

図-8に2次元解析モデルを示す。遠心模型実験の地盤および構造物を実物換算して、平面ひずみ要素、梁要素、節点集中質量要素によりモデル化した。

地盤の構成モデルは、液状化層(Dr=60%)・非液状化層(Dr=90%)はPZ-sandモデル(有効応力モデル)、地下水以浅の不飽和層はHDモデル(全応力モデル)とした。また、PZ-sandモデルの材料パラメータはUWLC要素シミュレーションにより繰り返し非排水三軸試験結果を表現できるように設定した。

排水材はPZ-sandモデルとし、その透水係数は模型の透水係数0.03 m/sを用いて設定した。格子状改良のうち直交格子壁は梁要素および平面ひずみ要素でモデル化し、弾性モデルとした。平行格子壁については弾性水平梁要素でモデル化し、3次元効果を簡易的に表現した。建物・基礎は弾性梁要素でモデル化し、模型の重心位置に節点集中質量を設定した。

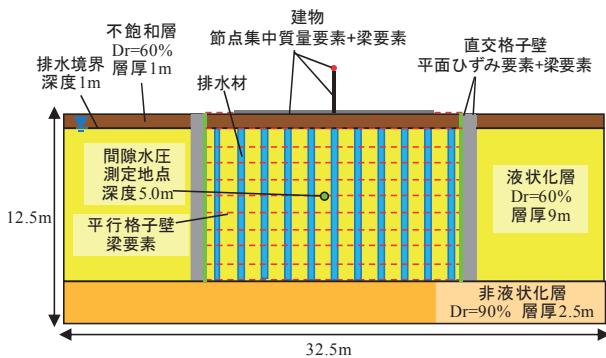


図-8 2次元解析モデル

(2) 2次元解析結果

図-9に2次元解析による過剰間隙水圧の時刻歴を示す。入力加速度が最大値を示す20秒以降に着目すると、無対策C1と格子壁単独C2の過剰間隙水圧は高い状態で推移しているのに対し、排水対策を適用したC3~C5は過剰間隙水圧が抑制されているとともに消散する結果となり、遠心模型実験の挙動が再現されている。

図-10および図-11に加振後150秒での建物沈下量と建物傾斜角の比較を示す。沈下量については格子壁単独のC2を除き、実験よりも解析の方が大きいものの、沈下量の傾向はおおむね再現できた。一方、傾斜角については、無対策C1では実験と解析で同程度であるが、対策を行ったC2、C3、C5では解析の方が小さい傾斜角となった。併用工法のC4の建物傾斜角が最も小さくなり、併用工法による建物傾斜角の抑制効果が再現できた。

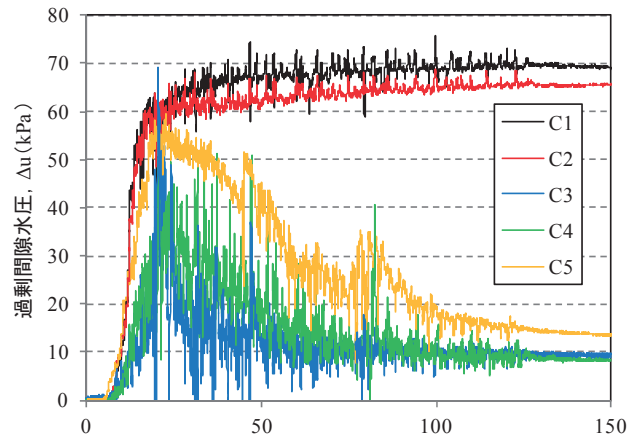


図-9 過剰間隙水圧の時刻歴(2次元解析)

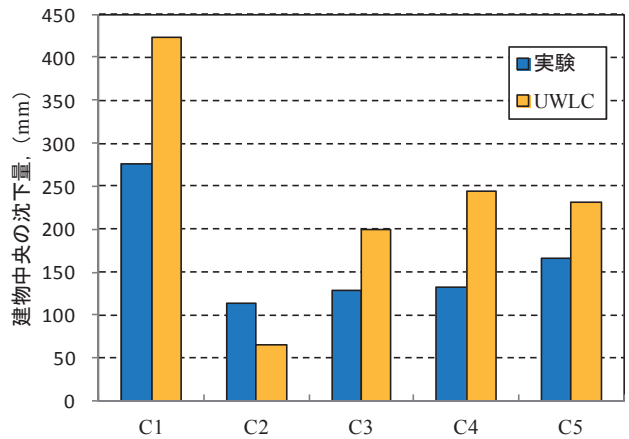


図-10 150秒での建物沈下量の比較(2次元解析)

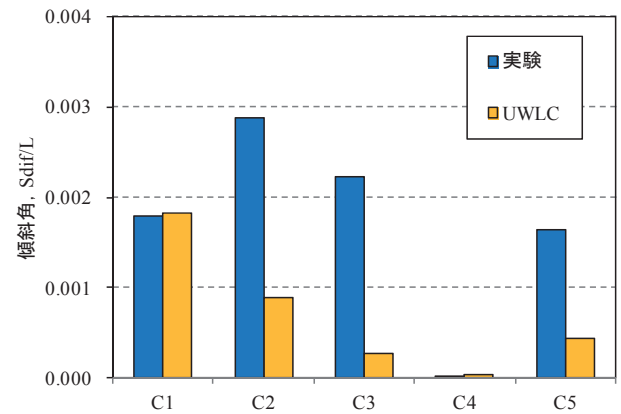


図-11 150秒での建物傾斜角の比較(2次元解析)

(3) 3次元解析の解析条件

3次元解析の地盤、格子壁、建物の構成則およびパラメータは2次元解析と同様とした。一方、排水ドレーンの効果は、3次元解析における要素数節約のため、排水ドレーンを直接表現するのではなく、排水ドレーンの効果を等価な地盤鉛直透水係数kveにより表現した。等価な地盤鉛直透水係数kveはTerzaghiの1次元圧密理論により次のように算定した<sup>6)</sup>。

$$k_{ve} = \left( 1 + \frac{8l^2}{C_d \mu d_e^2} \frac{k_h}{k_v} \right) k_v \quad (1)$$

$$\mu = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln \left( \frac{n}{s} \right) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) + \frac{2\pi l^2 k_h}{3q_w} \quad (2)$$

ここで、 $l$ はドレーン長、 $C_d$ は最適な調整係数、 $d_e$ はドレーンの等価円直径、 $k_v$ 、 $k_h$ はそれぞれ地盤の鉛直および水平方向の透水係数、 $n = d_e/d_w$ 、 $d_w$ はドレーン径、 $q_w$ はドレーンの鉛直方向通水能力である。

本研究では、 $d_w = 0.3$  m、 $k_h = k_v$ とし、 $C_d$ は試算結果に基づき $C_d = 0.42$ を用いた。ドレーン間隔 $d = 1.4$  mの場合には等価透水係数 $k_{ve} = 40 k_v$ 、ドレーン間隔 $d = 2.8$  mの場合には $k_{ve} = 10 k_v$ が求められた。3次元解析ではこれらの値を排水工法を用いた範囲内の地盤の鉛直透水係数として設定した。

(4) 3次元解析結果

図一12に各ケースの最大過剰間隙水圧比分布を示す。格子壁単独C2の過剰間隙水圧比は格子壁内も無対策C1と同程度となった。格子壁の間隔が大きいので、過剰間隙水圧の発生を抑制するほどの地盤せん断変形の拘束効果までは至っていないと考えられる。

図一13に長手方向中央断面における各ケースの150秒後の変形図を示す。図中の赤で示した箇所は格子壁の位置である。格子壁を施すと地盤の側方変形が抑制された結果、建物の沈下が減少している。排水工法C3は建物直下の対策範囲の過剰間隙水圧の抑制、低減効果があるものの、格子壁がないことから対策範囲外部の地盤が沈下するとともに、建物側への地盤変形の挙動が認められる。

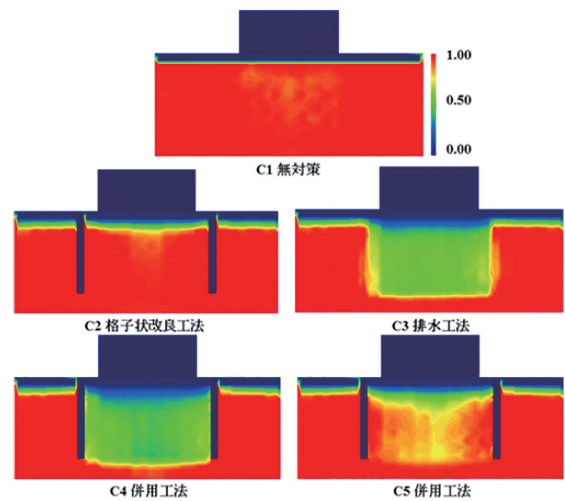
(5) 2次元解析と3次元解析の比較

ここでは、2次元解析と3次元解析との解析結果について比較・考察する。過剰間隙水圧については2次元解析および3次元解析ともに、無対策、格子状改良ならびに排水工法の挙動を概ね再現できていた。

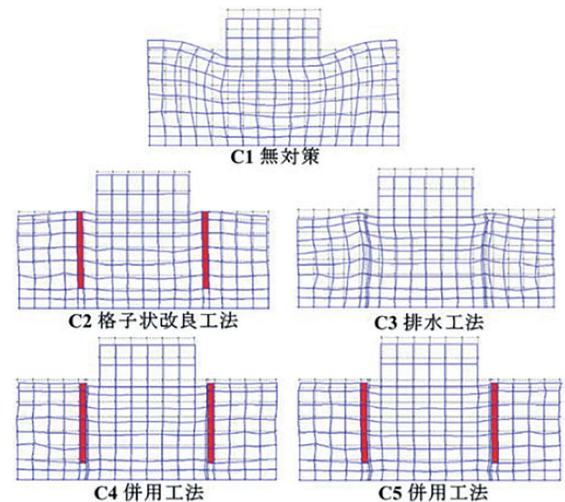
図一14および図一15に遠心模型実験、2次元解析ならびに3次元解析による加振終了後（150秒後）の建物沈下量と建物傾斜角を示す。図一14によると実験および解析ともに無対策C1で沈下量が最も大きく、格子状改良・排水工法の併用法C4、C5、排水工法C3、格子壁C2の順で沈下量は小さくなり、全般的な沈下傾向は2次元および3次元解析ともにおおむね再現できたと考える。なお、無対策C1の沈下量が3次元解析よりも2次元解析の方が大きい点は、建物の形状効果の差によるものであり、また排水工法を適用したC3～C5が格子壁単独C2よりも沈下量が大きい点は、排水工法による過剰間隙水圧の消散に伴う沈下の影響と考えられる。

図一15の建物傾斜角については、2次元解析と3次元解析の傾斜角の傾向はよく似ており、格子壁と排水工法の単独工法C2、C3よりも建物の傾斜を抑制する効果が認められた。

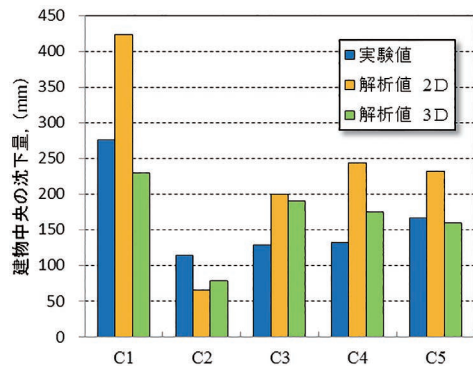
以上のように過剰間隙水圧、変形挙動、建物沈下量お



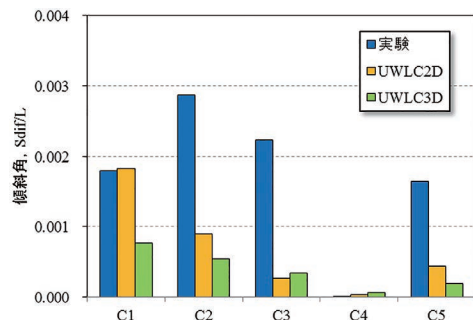
図一12 最大過剰間隙水圧比分布（3次元解析）



図一13 中央断面の変形図（3次元解析，150秒後）



図一14 建物沈下量の比較（150秒後）



図一15 建物傾斜角の比較（150秒後）

よび建物傾斜角について、2次元解析および3次元解析とも各ケースの挙動・傾向をおおむね再現できた。このことから、2次元解析と3次元解析がほぼ一致または同等な結果となったことから、2次元解析での3次元効果の模擬方法はおおむね妥当なものであると考えられる。

(6) 格子壁間隔による影響について

遠心载荷実験の再現解析（ケースC4）に対し、格子壁の間隔の影響を確認するためケーススタディを3次元解析にて実施した<sup>7)</sup>。

表一2に格子壁間隔の条件を変えた解析ケースを、図一16に要素分割図を示す。格子状改良・排水工法による併用法のCase4-1を基本ケース（平行格子壁間隔  $W_x=15.5\text{ m}$ 、直交格子壁間隔  $W_y=15.5\text{ m}$ 、実験ケースC4）とし、格子壁間隔を1.5倍、2倍とする組み合わせで検討した。なお、側面境界の影響を解消するために、長手方向の解析領域は液状化層厚の3倍以上を採用し、格子壁から側面境界までの距離を30mとした。

図一17に格子壁間隔のケーススタディ結果を示す。図より格子壁間隔が大きくなるにつれて建物沈下量は増加傾向にあることを確認できる。格子壁間隔が1.5倍になると沈下量は1.1~1.2倍に、格子壁間隔が2倍になると沈下量が1.3倍に増加した。なお、Case4-3よりもCase4-2の沈下量が大きく、加振方向の格子壁間隔を大きくした場合に沈下量が増加する傾向が認められた。

§6. 実地盤を想定した対策効果の試解析

次に実際の地盤・建物を想定した実地盤モデルをケーススタディとした試解析を行い、格子状改良・排水工法を併用した液状化対策効果について、2次元解析と3次元解析の比較・検討を行った<sup>9)10)</sup>。

(1) 解析条件

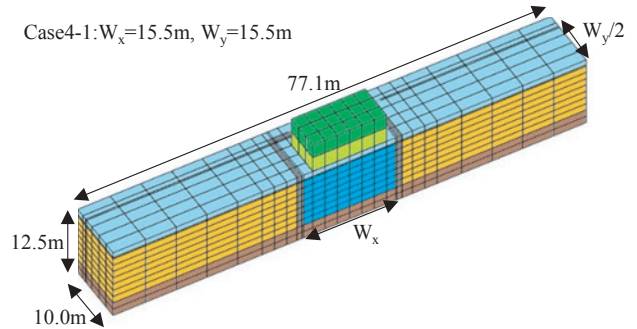
図一18、表一3に解析モデルと土層構成（ここでは地盤条件1と称する）を示す。地盤モデルとして埋立地の水平成層地盤を想定した。各土層の物性値および液状化パラメータは既往の地質調査結果を参考にして設定した。

解析に用いた構成則は、液状化層、排水材はPZ-sandモデル（有効応力モデル）、非液状化層、地下水位以浅の土層をROモデル（全応力モデル）とした。対象構造物は、3階建ての鉄骨造、直接基礎で平面寸法21.5m×50mの規模を想定した。建物荷重は節点集中質量要素として梁要素の交点に設けた。

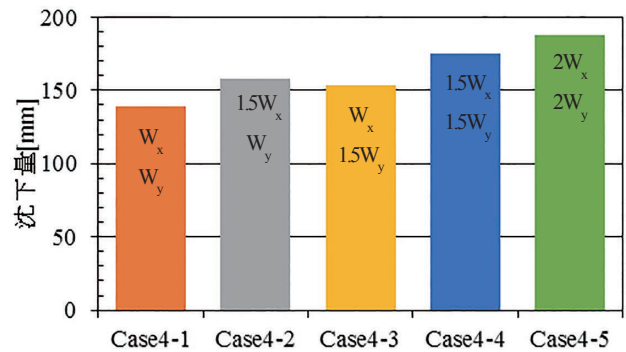
入力地震動は、首都直下地震を想定し、図一19に地震動（最大加速度311gal）を解析モデル底面に入力した。図一19は、 $V_s=700\text{ m/sec}$ の基盤面から一次元応答解析を行い設定したものである。

表一2 格子壁間隔の解析ケース（ケーススタディ）

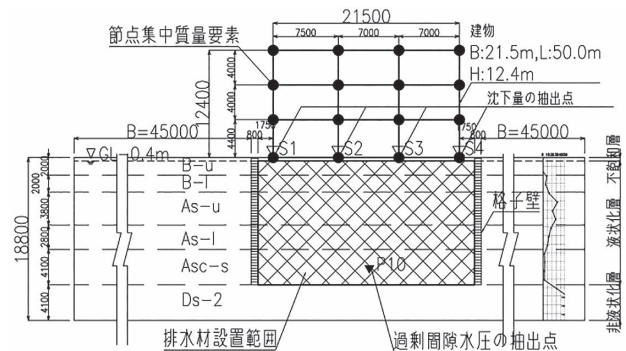
Case	平行格子壁間隔比	直交格子壁間隔比
Case4-1	$W_x$	$W_y$
Case4-2	$1.5 W_x$	$W_y$
Case4-3	$W_x$	$1.5 W_y$
Case4-4	$1.5 W_x$	$1.5 W_y$
Case4-5	$2 W_x$	$2 W_y$



図一16 格子壁間隔の検討モデル



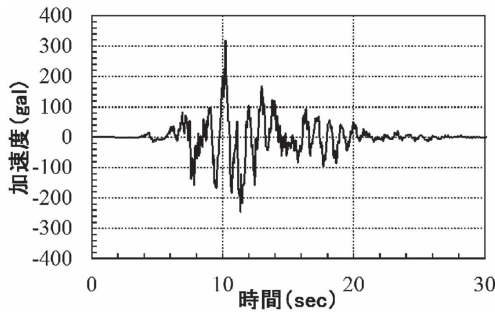
図一17 格子壁間隔の検討結果（建物沈下量）



図一18 解析モデル

表一3 土層構成（地盤条件1）

土層	下端深度 (GL-m)	層厚 (m)	平均 N 値	透水係数 (m/sec)
埋土 B-u	-2.0	2.0	0	$8.50 \times 10^{-7}$
埋土 B-l	-4.0	2.0	7	$1.75 \times 10^{-5}$
細砂 As-u	-7.8	3.8	25	$2.64 \times 10^{-5}$
シルト混じり細砂 As-l	-10.6	2.8	14	$9.55 \times 10^{-5}$
シルト質細砂 Asc-s	-14.7	4.1	3	$1.08 \times 10^{-6}$
シルト混じり細砂 Ds-2	-18.8	4.1	$\geq 50$	$2.69 \times 10^{-5}$



図一19 入力地震動

(2) 解析ケースと解析モデル

実地盤モデルでの2次元解析ケースを表一4に示す。無対策C1、格子状改良単独C2、排水工法単独C3、C4および両工法を併用した場合C5、C6の6ケースについて解析を実施した。

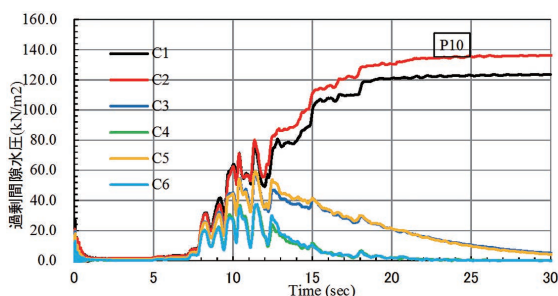
格子壁は深層混合処理工法を想定し、設計基準強度 $quck = 1,000 \text{ kN/m}^2$ とした。奥行方向の平行格子壁は左右の直交格子壁を水平梁要素で連結することにより表現した。排水材は人工ドレーン材を想定し、許容過剰間隙水圧比0.5以下を満足するように、排水材ピッチを1.0m(水平震度 $kh = 0.17$ に対して)と0.6m( $kh = 0.26$ に対して)と設定した。排水材の排水効果は、排水材を含む地盤要素を等価な地盤鉛直透水係数 $kve$ により評価した。

(3) 2次元解析結果

図一20に建物中央直下のP10位置(シルト質砂層, Asc-s)における過剰間隙水圧の時刻歴を示す。無対策C1および格子壁単独C2の場合、過剰間隙水圧が漸増して

表一4 実地盤モデルでの解析ケース

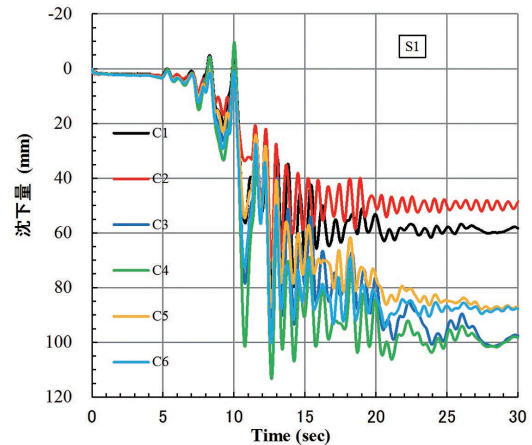
解析ケース		対策内容
C1	無対策	対策なし
C2	格子壁単独	格子壁：内寸 25 m × 53.4 m，厚さ 800 mm
C3	排水対策1	排水材：建物直下および周辺 1.0 m ピッチ
C4	排水対策2	排水材：建物直下および周辺 0.6 m ピッチ
C5	格子壁 + 排水対策1	格子壁：内寸 25 m × 53.4 m，厚さ 800 mm 排水材：建物直下および周辺 1.0 m ピッチ
C6	格子壁 + 排水対策2	格子壁：内寸 25 m × 53.4 m，厚さ 800 mm 排水材：建物直下および周辺 0.6 m ピッチ
C8	格子壁 + 排水対策3	格子壁：内寸 25 m × 53.4 m，厚さ 800 mm 排水材：建物外周のみ 0.6 m ピッチ



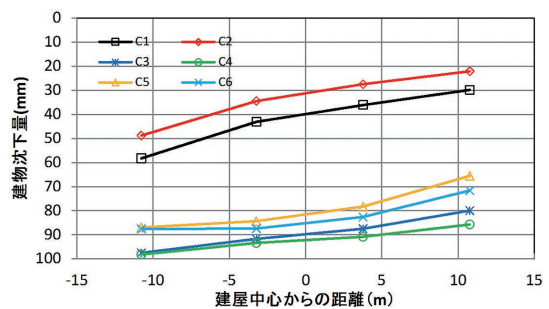
図一20 過剰間隙水圧の時刻歴 (2次元解析)

120  $\text{kN/m}^2$  に達し、加振 20 秒後も水圧が残留している。これに対し、排水対策単独 C3、C4 および併用工法 C5、C6 の場合、加振途中から過剰間隙水圧が消散し、排水材間隔の狭い 0.6 m 間隔 (C4、C6) は水圧の消散が他のケースに比べ早いことが確認された。

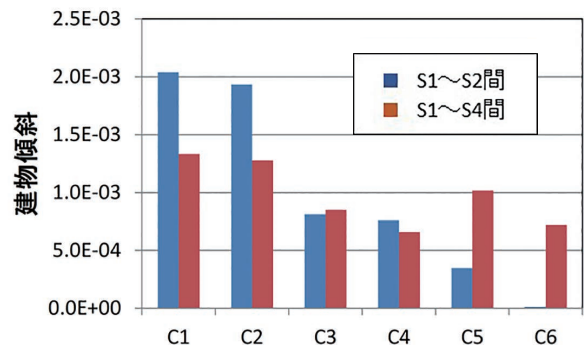
図一21に建物左端 S1 の沈下量時刻歴を示す。入力加速度が最大となる 10 秒から 20 秒にかけて沈下量が大きく増大している。加振中においては無対策 C1、格子壁単独 C2 よりも排水材を配置したケース C3~C6 の方が排水に伴い沈下が大きくなった。図一22に建物の沈下分布を示す。格子壁単独 C2 が最も沈下量が小さく、無対策 C1、格子壁・排水工法併用 C5、C6、排水対策単独 C3、C4 の順で沈下量が大きくなる傾向を示した。なお、無対策 C1 と格子壁単独 C2 の場合、左端部の沈下量がやや大きくなる沈下傾向を示した。建物の左側荷重がやや大きいことが沈下量分布に影響したと考えられる。



図一21 建物沈下量の時刻歴 (2次元解析)



図一22 建物沈下量分布 (2次元解析)



図一23 建物傾斜角の比較 (2次元解析)

図-23 に加振 30 秒後の建物傾斜角の比較を示す。無対策 C1 と格子壁単独 C2 の傾斜角が大きいものに対して、排水対策を施している C3～C6 の傾斜角が小さくなる傾向が認められる。

図-24 に建物沈下量を加振中の 30 秒までと加振終了以降の沈下量を合わせて示す。無対策 C1 および格子壁単独 C2 は加振終了以降の沈下が 50～60 mm 程度生じており、加振終了後に残留していた過剰間隙水圧の消散に伴い、沈下が増大していることが表現できている。その結果、当該地盤条件（地盤条件 1）では各対策ケースで最終沈下量の差は少なくなった。

(4) 2次元解析と3次元解析の比較

次に、表-4 と同じ条件で3次元動的有効応力解析も行い、実地盤モデルのシミュレーション結果を2次元解析と比較、確認した。

図-25 に2次元および3次元解析における加振 30 秒までの最大過剰間隙水圧比の分布図を比較して示す。2次元・3次元解析結果ともに、埋土層と Asc-s 層で過剰間隙水圧比が上昇する傾向は類似している。格子壁近傍ではモデル化の相違により、過剰間隙水圧比の分布状況が多少異なるものの、全体的には2次元解析と3次元解析で同様な分布傾向である。

図-26、図-27 に建物左端 S1 における2次元解析と3次元解析での 30 秒時の沈下量と建物傾斜角の比較を示す。C1～C8 の各ケースで、C2 の沈下量が最も小さく、C4 の沈下量が最も大きくなる傾向は、2次元解析と3次元解析で同一の傾向となっている。

(5) 地盤条件の違いに対する検討<sup>10)</sup>

異なる地盤条件における格子状改良・排水工法の併用工法の効果について確認するために、表-3 に示した土層構成（地盤条件 1）に対して、表-5 に示すように As-u 層と Asc-s 層を入れ替えて、液状化しやすい層が浅い位置にある土層構成（地盤条件 2）について試解析を行った。解析ケースを表-6 に、2次元解析による建物沈下

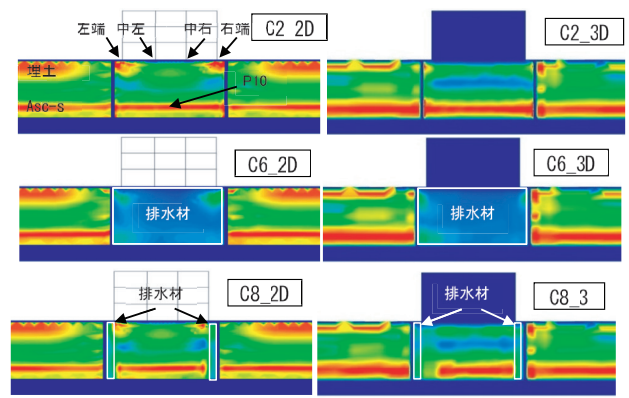


図-25 最大過剰間隙水圧比分布（2D、3D解析）

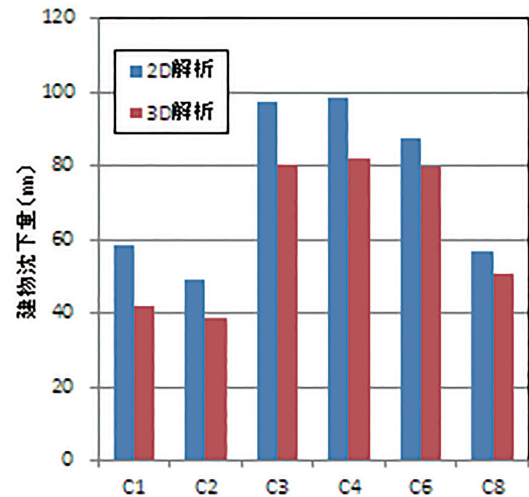


図-26 建物沈下量の比較（建物左端）

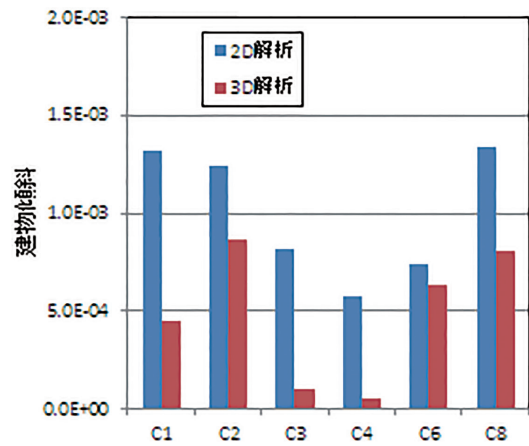


図-27 建物傾斜の比較（S1-S4）

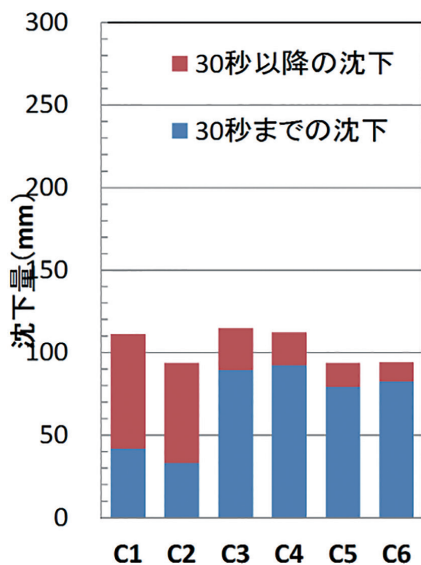


図-24 建物沈下量の比較（2次元解析）

表-5 土層構成（地盤条件 2）

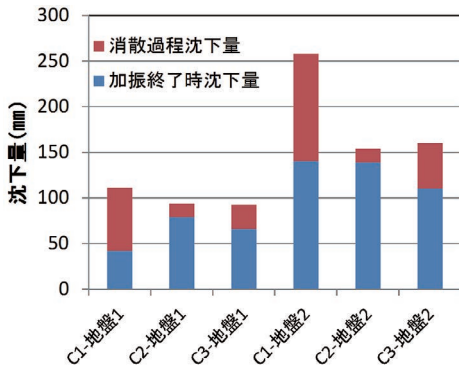
土層	下端深度 (GL-m)	層厚 (m)	平均 N 値	透水係数 (m/sec)
埋土 B-u	-2.0	2.0	0	$8.50 \times 10^{-7}$
埋土 B-l	-4.0	2.0	7	$1.75 \times 10^{-5}$
シルト質細砂 Asc-s	-7.8	3.8	3	$1.08 \times 10^{-6}$
シルト混じり細砂 As-l	-10.6	2.8	14	$9.55 \times 10^{-5}$
細砂 As-u	-14.7	4.1	25	$2.64 \times 10^{-5}$
シルト混じり細砂 Ds-2	-18.8	4.1	$\geq 50$	$2.69 \times 10^{-5}$

※太枠内は地盤条件 1 と入れ替えた条件

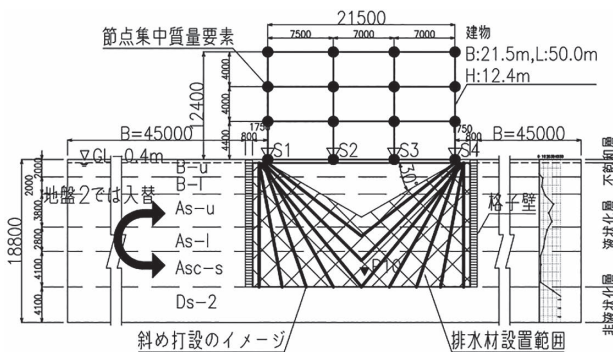


表一六 解析ケース (地盤条件 2)

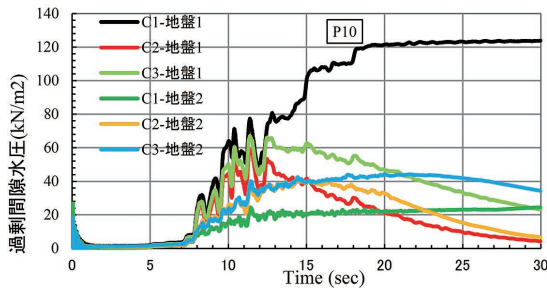
解析ケース	対策内容
C1 無対策	対策なし
C2 格子壁 + 排水対策 1	格子壁：内寸 25 m × 53.4 m, 厚さ 800 mm 排水材：建物直下全域 1.0 m ピッチ
C3 格子壁 + 排水対策 2	格子壁：内寸 25 m × 53.4 m, 厚さ 800 mm 排水材：斜めドレーン 1.0 m ピッチ 建物直下に非打設部あり



図一28 建物沈下量の比較 (平均沈下量)



図一29 排水材配置を考慮した解析モデル (C3)



図一30 過剰間隙水圧の時刻歴

量を図一28に示す。建物沈下量は柱位置4箇所(図一17中のS1~S4)の沈下量の平均値を示した。また加振終了時(30秒)とそれ以降の過剰間隙水圧の消散終了時の沈下量を区別して示している。地盤条件1と地盤条件2の沈下量を比較すると、無対策C1および格子壁・排水工法の併用工法C2ともに地盤2の方が沈下量が大きく、液状化しやすい土層が地表面に近い地盤条件の方が沈下量が大きくなる傾向が認められた。また、地盤条件2の無対策C1の場合は、消散過程における沈下量が大きく、併用対策C2との差が大きくなった。このように、

地盤条件によって格子状改良・排水工法の併用工法の効果に差があることが解析的に確認された。なお、地盤条件2の方が沈下量が大きくなった理由としては、液状化しやすい層が建物荷重面に近いこと、ならびに地震応答による地盤せん断応力が大きくなったことが影響した可能性が高いものと考えている。

(6) 排水材の配置条件に関する検討<sup>10)</sup>

既設構造物においては、排水材の設置を構造物内部から施工することは難しく施工の制約条件から、構造物の外周から排水材を打設が必要となることが多いと想定される。このような制約条件を想定して、図一29に示すように排水材を構造物外周から構造物直下に斜め方向に配置するケースについて検討した。排水材は斜め打設の角度30°以上で配置することとした。斜めドレーンの排水効果は、打設角度を考慮して、以下のように鉛直および水平方向透水係数で簡便に評価した。

$$k_h = k_h' \sin^2 \theta + k_{ve}' \cos^2 \theta \quad (3)$$

$$k_v = k_h' \cos^2 \theta + k_{ve}' \sin^2 \theta \quad (4)$$

ここに、 $\theta$ ：各排水材打設角度

$k_h'$ ：排水材軸直角方向の透水係数 (= 地盤の透水係数)

$k_{ve}'$ ：排水材軸方向の等価鉛直透水係数

$k_h$ ：排水材斜め打設地盤の水平方向透水係数

$k_v$ ：排水材斜め打設地盤の鉛直方向透水係数

図一30に2次元解析による建物下方(図一29中のP10)地点における過剰間隙水圧の時刻歴を示す。斜めドレーン打設(C3-地盤1)の場合、鉛直打設(C2-地盤1)に比べて過剰間隙水圧が多少大きくなるものの、過剰間隙水圧の消散は表現されている。

建物沈下量に関しては、図一28に示すように排水材の建物直下全域配置のケースC2と斜めドレーン配置C3とで、最終沈下量は同程度であった。別途行った3次元解析においても同様の結果であることを確認している。このように、建物直下に部分的に排水材非打設部があった場合についても、格子状改良・排水工法の併用工法に関する変形抑制効果が認められた。

§7. まとめ

本研究では、既設構造物に適用可能な液状化対策として、格子状改良と排水工法を併用した液状化対策について、遠心模型実験ならびに2次元および3次元動的有効応力解析によりその対策効果を検討した。その結果、以下に記載する成果と知見が得られた。

- ① 臨海波を想定した動的遠心載荷模型実験の結果から、格子状改良と排水工法を併用した対策は、格子状改良単独よりも過剰間隙水圧の抑制効果があった。ま

た、各単独工法よりも併用工法の方が建物の傾斜を抑制する効果が確認された。

- ② 動的有効応力解析 UWLC を用いて遠心模型実験の再現解析を行った結果、2次元解析において格子壁の3次元効果を模擬できること、また適切なパラメータ設定により、3次元解析と同様に実験挙動を再現できた。
- ③ 排水材の透水効果については、等価な地盤透水係数を用いて考慮する方法により、過剰間隙水圧の消散効果を簡便に再現することができた。
- ④ 2次元解析ならびに3次元解析結果から、格子状改良は地盤変形抑制による沈下抑制効果が確認された。ただし、格子壁間隔が大きくなるとその拘束効果が小さくなる。
- ⑤ 実地盤モデルを対象とした解析においても、2次元解析と3次元解析は概ね同様な結果が得られた。
- ⑥ 格子状改良、排水工法、および両者の併用工法の対策効果は、地盤条件や地震動の条件により優劣の差の結果が異なってくる。動的有効応力解析を用いた検討により、対象案件に応じて最適な対策の検討と選定が可能であることを確認した。
- ⑦ 排水材の打設角度を考慮して、水平および鉛直方向の等価透水係数を用いる方法により、既設構造物の外周から斜めドレーンにて排水対策を計画する場合の解析的検討が可能であることを確認した。
- ⑧ 3次元解析は構造物と対策工法の形状と仕様を忠実に再現できる長所がある一方で、解析モデル作成と計算にかなりの時間を要する。これに対して、2次元解析は3次元効果を模擬的に考慮して計算するため、沈下量等の算定結果に多少の差異が含まれる可能性があるものの、モデル化が簡便であり計算時間も短いという設計実務上の長所がある。そのため、簡便な解析手法である2次元解析にて対策工の選定と対策工の仕様を決定し、3次元解析により性能照査を行うことが設計実務の面で有用と考えられる。

以上の通り、遠心模型実験および数値解析による検討結果から、格子状改良と排水工法の併用工法による液状化対策として、変形・沈下抑制ならびに建物の傾斜抑制に関する効果を確認した。また格子状改良を2次元解析において3次元効果を簡易に模擬する方法を、排水工法については排水材と地盤とを複合して透水性を簡便に評価する方法を提案して適用した結果、その有用性を確認した。

今後は、これらの工法と解析手法を提案、活用して、既設構造物の耐震対策、防災対策に貢献していきたい。

**謝辞.** 本研究は、群馬大学大学院理工学府との共同研究により実施したものである。蔡飛准教授には解析手法の面でいろいろと指導をいただきました。元群馬大学大学

院生の芦澤拓八君と現群馬大大学院生の狩野圭喬君には3次元解析の実施・検討を担当して尽力してもらいました。本研究にあたりご指導、ご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 例えば、内閣官房国土強靱化推進本部：国土強靱化アクションプラン 2017、平成 29 年 6 月<内閣官房 HP>。
- 2) 建設省土木研究所：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) 佐藤靖彦・萩原敏行・平野孝行・小宮隆之：リサイクル人工ドレーン材を用いた液状化対策（ポリベイン工法）の対策効果、西松建設技報 VOL. 28, pp. 13-18, 2005。
- 4) 今村眞一郎・佐藤靖彦・岩谷隆文・佐藤透ら：格子状改良工法と他工法との併用による液状化対策効果について、土木学会第 68 回年次学術講演会、第 III 部門、pp. 85-86, 2013。
- 5) 佐藤透・今村眞一郎・佐藤靖彦・岩谷隆文ら：格子状改良・排水工法による液状化対策効果について（その 1）- 遠心模型実験による効果の確認 -、土木学会第 69 回年次学術講演会、第 III 部門、pp. 29-30, 2014。
- 6) 土屋光弘・小宮ら：格子状改良・排水工法による液状化対策効果についての解析的検討（その 1）～（その 3）、土木学会第 70 回年次学術講演会、第 III 部門、pp. 653-658, 2015。
- 7) 土屋光弘・平野孝行・蔡飛ら：格子状改良・排水工法による液状化対策効果についての解析的検討（その 4）- 3 次元有効応力解析を用いた格子壁間隔による効果の検討 -、土木学会第 71 回年次学術講演会、第 III 部門、pp. 589-590, 2016。
- 8) 蔡飛・芦澤拓八・佐藤靖彦ら：3 次元動的有効応力解析を用いた格子状改良工法・排水工法による液状化対策効果評価、土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, pp. I\_48-I\_49, 2017。
- 9) 小宮隆之・平野孝行・蔡飛ら：格子状改良・排水工法の液状化対策効果に関する試算（その 1）～（その 3）、土木学会第 71 回年次学術講演会、第 III 部門、pp. 591-596, 2016。
- 10) 小宮隆之・平野孝行・蔡飛ら：格子状改良・排水工法の液状化対策効果に関する試算（その 4）、（その 5）、土木学会第 72 回年次学術講演会、第 III 部門、pp. 447-450, 2017。