周辺道路も含めた既設宅地及び既設インフラの液状化対策として 薄壁改良が可能な自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法による 効果的な改良形状および簡易設計手法の開発

# 平成 25 年 3 月 前田建設工業株式会社

目	次
---	---

1	章 総説	.1-1
	1.1 はじめに	. 1-1
	1.2 研究開発の目的と基本方針	. 1-2
	1.2.1 目的	. 1-2
	1.2.2 基本方針	. 1-2
	1.3 全体研究概要	. 1-4
	1.3.1 研究開発項目と研究全体フロー	. 1-4
	1.3.2 研究フローの概要	. 1-4
	1.3.3 研究実施工程表	. 1-6
	1.4 マルチジェット工法概要 1.1)	. 1-7
	1.4.1 工法概要	. 1-7
	1.4.2 東日本大震災における対策効果の実例と概要 1.2),1.3)	. 1-9
	1.4.3 本研究で開発した超小型マシンの概要	. 1-13
	1.5 委員会設立について	. 1-16
	1.6 研究メンバー	. 1-17
	1.7 引用文献	. 1-17
2	章 既設宅地の液状化委対策に対する各機関の目標性能の整理	.2-1
	2.1 はじめに	. 2-1
	2.2 公益社団法人地盤工学会における各委員会	. 2-2
	2.2.1 「浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究	
	:H24.9:浅層盤状改良による宅地の液状化対策委員会」	. 2-2
	2.2.2 「造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書-液状化から戸建て住宅を守るための手引	書-
	:H25.9:造成宅地の耐震対策に関する研究委員会」	. 2-2
	2.3 国土交通省都市局「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針(案):平成25年3月8日」.	. 2-3
	2.4 国土交通省 国土技術政策総合研究所	. 2-4
	2.5 浦安市実現可能性技術検討委員会	. 2-5
_		
3	草 模型実験による管理的な改良形状の検討(研究開発項目 ,フェース1)	.3-1
	3.1 16 場における振動台美験 	. 3-1
	3.1.1 振動台美敏の慨安	. 3-1
	3.1.2 振動台美駅の結果と考察	. 3-5
	3.2 退心戦何装直を用いた楔型実験	. 3-11
	3.2.1 退心載何美颖の慨安	. 3-12
	3.2.2 退心載何美騻の結果と考祭	. 3-16
4	単 3 次元有知心力解析による言理的な改良形状の快討(研究開発項目 , ノェース 2)	.4-1
	4.1 日町	. 4-1
	4.2 液(化化)) 束効果の許(凹力)な	. 4-2
	4.2.1 計Ⅲ泪悰	. 4-2
	4.2.2 取終ルト里の計画力/云	. 4-2
	4.2.3 住宅の頃科の計画力/広	. 4-3
	4.3 速心戦何夫缺の円現による時間でナルの女当性の快討	. 4-5
	4.3.1 はしめに	. 4-5
	4.3.2	. 4-0
	9.5.5 mF1/1ノース	. 4-0 1 0
	4.3.4 断切和末	. 4-0
	+,+ /m メログビノルCUC3/ハル市知心/J附作によるロ垤的な以及が小の快討	. 4-1/
	+.+ はしのに	. 4-1/
	¬.¬.4 円1际IC形 ····································	. +-1/ /_10

		4.	.4.4 解析結果	4-22
	4	.5	まとめ	4-45
	•	.0	5.1 遠心載荷宝験の再現による解析モデルの妥当性の検討	4-45
		1		1_15
	Λ	ч. 6	」の12 備文作をビアルとしたの次に有効応力解析による日本的な以及が状の技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1-16
	-	.0		4-40
F	幸		※二的米動な老虎したり次二方効応力叙近エゴルの検討(東京開発頂白 ファーブッ)	<b>5</b> 4
D	早	່ງ	) 八兀的 学動を ち思しに 2 八兀 有 幻心 刀 醉 怔 て デル の 快 剖 ( 伽 九 開 光 頃 日 ) ノ エ ー 人 3 )	5-1
	5.	.1		5-1
	5.	.2	( 低米のセナル化于法( 二里安系セナル) による2次 元 解 们 セナルと3次 元 解 们 セナルの 結果 り に	5-1
		5.	.2.1 解价余件	5-1
		5.	.2.2 解析ケース	5-3
		5.	.2.3 解析結果	5-4
	5	.3	改良体剛性の適正評価に関する検討	5-9
		5.	.3.1 目的	5-9
		5.	.3.2 検討手法	5-9
		5.	.3.3 検討ケース	5-11
		5.	.3.4 検討結果	5-12
	5	.4	改良体剛性の適正評価による2次元解析モデルと3次元解析モデルの解析結果の対比	5-14
		5.	.4.1 目的	5-14
		5.	.4.2 解析ケース	5-14
		5	4.3 解析结果	5-14
	5	5	まとめ	5-17
	5	6	2日文献	5-17
	0	.0		5 17
6	夽	音	宿見記計図主の笠守( <b>江</b> 空間発行日 ファーブル)	6 1
0	早	. µ∎ ⊿	町勿設計囚役の束定(新九開光項日 , ノエニス 4 )	0-1 C 1
	0	. 1	日 り	0-1
	6	. 2	間気設計凶衣束正の評価指標	6-1
	6.	.3		6-3
		6.	.3.1 解析セテルと検討ケース	6-3
		6.	.3.2 人刀地震動	6-4
		6.	.3.3 地盤物性	6-5
		6.	.3.4 改良体物性值	6-6
		6.	.3.5 住宅モデル	6-6
	6	.4	解析結果	6-6
		6.	.4.1 格子内地盤過剰間隙水圧比コンター図	6-6
		6.	.4.2 改良体(平行壁)のせん断ひずみコンター図	6-20
	6	.5	簡易設計図表(浦安地盤モデル)	6-34
	6	.6	まとめ	6-36
	6	.7	引用文献	6-37
	6	. 8	参考1: 浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会と同解析手法・同条件での簡易設計図表	6-39
	-	6		6-39
		6	8.2 日標性能	6-39
		6	83 解析方法	6-42
		6	8.4 予借檢討结甲(SuperFillSH/2D))	6-17
		6	8.5. 木梌討结甲(SuperFillSH/2D)+FilD(2D))	6-50
		0. 6	.0.5	6 54
		υ.	.0.0 间勿取司凶农	0-54
-	÷			7 4
1	卓 ~	k	用女夫証夫釈(切九開完頃日 ,ノエー人 3)	7-1
	1	.1		/-1 
	1	.2	日际のよい唯認力法,実験結果の評価基準・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	/-1
	7	.3	実験慨要	/-1
		7.	.3.1 位直図	7-1
		7.	.3.2 実証実験ヤード地盤条件	7-2

7.4 改良効果の確認方法	
7.5 実施工程	
7.6 実験結果	
7.6.1 施工性の確認	
7.6.2 周辺への影響確認	
7.6.3 品質確認	
7.6.4 改良効果の確認	
7.7 まとめ	
7.8 引用文献	
7.9 参考:施工機械,プラント寸法,施工に必要な作業面積,機械の搬入方法	
7.9.1 施工機械	
7.9.2 プラント寸法	
7.9.3 車上式プラント	
7.9.4 施工に必要な作業面積	
7.9.5 搬入方法	
8章 経済性評価	8-1
8.1 コスト試算条件	8-1
8.1.1 液状化対策仕様	8-1
8.1.2 積算条件	8-2
8.1.3 施工条件	8-2
8.1.4 官民負担の考え方	8-2
8.2 コスト試算結果	8-3
8.2.1 中地震動(200gal,M9.0)に対する液状化対策費用	8-3
8.2.2 大地震動(350gal,M7.3)に対する液状化対策費用	8-3
9章 研究成果と今後の課題	9-1
9.1 研究内容と成果	
9.1.1 基本方針	
9.1.2 研究開発項目と研究全体フロー	
9.1.3 各研究開発項目の内容と成果	
9.2 成果の実用化の見通し	
9.3 今後の課題	
謝辞	9-9

# 別添資料

別添資料1 外部発表論	这 第	9回地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2012	別添-	1
別添資料2 外部発表論	这 第4	48 回地盤工学研究発表会5	別添-	7

#### 1章 総説

1.1 はじめに

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震(M9.0)により発生した地盤の液状化により ,約 27000 棟の戸建て 住宅および下水道等のライフライン設備・周辺道路,その他社会基盤施設・産業施設等が大きな被害を受け た.我が国において液状化現象が初めてクローズアップされたのは,1964 年の新潟地震である.それ以降今 までの約 50 年間にわたり,多くの関係機関において液状化のメカニズムや液状化対策工法の研究が行われて きた.現在では,重要な施設を中心に液状化の検討を行い,液状化判定結果に応じて,設定された目標性能 を満足させる液状化対策工の実施が進められている.今回の地震において,液状化対策を実施した箇所の液 状化対策効果は十分発揮されたとの報告が数多くあり,これらの取り組みは一定の成果を上げることができ たといえよう.

現在,液状化対策工法の多くは,新設構造物を対象とした大型の機械を伴う工法が中心である.これらの 工法は,現在まで継続的な開発・改善に伴う品質向上,コスト縮減が図られてきたため,適用事例は多く, 今後も新設構造物に対して,液状化対策が効率的に実施されていくことが予想される.しかし,特に狭隘地 での既設構造物を対象とした液状化対策工法の本格的な開発の取り組みは,ここ数年始まったばかりである ため,実現化された工法は比較的少なく,コストも非常に高くなるケースが多い.そのため,既設構造物を 対象とした液状化対策の必要性は非常に高いにも関わらず,実現できない社会基盤施設,産業施設等が多い のが現状である(一部,大型タンクや岸壁,空港等といった非常に重要性の高い施設を中心に整備している段 階).

一方,今回,浦安市等多くの地域の戸建て住宅に大規模な液状化被害が発生したのは,液状化が発生する 恐れある地域に無対策で戸建て住宅を建てたことが直接的な原因であることは言うまでもない.ただし,そ の背景としては,戸建て住宅の液状化に関する被災メカニズムの研究が進んでいないこと,液状化に対する 基準や指針も整備されていないこと,また個人資産に対してコストがかかる液状化対策を実施することは新 設も含めて非常に少ないといったことがあげられる.今回の地震で大規模な被害を受けた地域は,今後,予 想されている巨大地震においても同様に液状化する可能性が非常に高いと言わざるを得ないが,特に戸建て 住宅に対しての恒久的な液状化対策は遅れている.その主な理由は,震災後2年経過しても解決していない 上記3つの背景にあると考えられる.

国土交通省では 平成 23 年度第 3 次補正予算により,災害に強い街づくりを目指すために「市街地液状化 対策事業」が創設された.現在,被災した各都市において,実施地区の選定,対象地区の地盤状況の把握, 具体的な液状化対策の実現可能性などの検討が進められている.これにより,今後道路や下水道などの公共 施設と民間の宅地とを一体化した液状化対策事業が具体的に多くの地域で進められることが期待されている. この事業推進において,最も大きな技術的トリガーは,経済的かつ効果的な液状化対策工法であろう.

このような背景を踏まえて,本研究では,狭隘地における既設戸建て住宅,社会基盤施設,産業施設等に 対して,目標性能を設定し,経済的で効果的な液状化対策工法およびその設計法,更にその工法を迅速に普 及させるために対象エリアの簡易土質条件等があれば平易に概略設計が可能となる設計図表を提案すること を目的に実施した.なお,本研究は,国土交通省平成23年度補正予算建設技術研究開発助成により採択され た「既設の公共インフラ及び宅地における経済的・効果的な液状化対策に関する技術研究開発」を受けて行 われた.また,本研究において実施した試験施工による施工性の確認は,千葉県浦安市公募の「浦安市が管 理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」として実施したものである.本研究の成果が震災復興に 役立ち一般市民ならびに社会全体に対して安心・安全な社会の形成に寄与できることを願っている. 1.2 研究開発の目的と基本方針

1.2.1 目的

本研究は,狭隘地における既設戸建て住宅,社会基盤施設,産業施設等に対して目標性能を設定し,経済 的かつ効果的な液状化対策工法およびその設計法,更にその工法を迅速に普及させるために対象エリアの簡 易土質条件があれば平易に概略設計が可能となる設計図表を提案することを目的とする.

#### 1.2.2 基本方針

#### (1) 地盤改良方法

狭隘地での施工が可能な小型の機械で薄壁形状のセメント改良が可能な「自由形状・大口径高圧噴射撹拌 工法(マルチジェット工法<sup>1.1)</sup>)」を採用した.この工法はすでに,既設構造物を対象にした液状化対策工法に おいて経済的な格子状改良として多くの実績がある.本研究ではこの工法を更に狭隘地用に改善すること, および工法の特徴である薄壁形状やその他の自由形状の改良を合理的に組み合わせることで大幅なコストダ ウンを図ることが可能であると考えた.なお,この工法を用いて格子状改良を実施した茨城県の埋め立て地 における火力発電所において東日本大震災で液状化対策効果の高さを検証している<sup>1.2)1.3)</sup>.本工法の概要は 「1.5 マルチジェット工法概要」にて記述する.

#### (2) モデル事例

具体的な研究を進めていくにあたって,液状化対策工のモデル事例を設定した.今回の地震に伴い特に液状化の被害が大きかった千葉県浦安市の住宅地に道路や下水道などの公共施設と民間の宅地とを一体化した「市街地液状化対策事業」として,マルチジェット工法による薄壁形状やその他の自由形状を合理的に組み合わせた格子状改良等を実施することをモデルとして研究を行った.なお,本研究のモデル事例では宅地を対象としているが,ここで得られた研究成果を応用することで既設戸建て住宅だけではなく,社会基盤施設,産業施設等全般に用いることが可能と考える.

なお,モデル事例においては1軒当たりの個人負担額として200万円程度以下になることを目標に研究を 行った.

# 道路と宅地の一体的な液状化対策

地盤の液状化による被害の軽減を図り、安全・安心な街づくりを推進するため に、道路などの公共施設と隣接宅地の一体的な液状化対策を行う「市街地液状化対 策事業」が、東日本大震災復興交付金の対象事業の一つとして新たに設けられまし た。

市では、この事業の実現可能性の調査を行います。

【問】市街地開発課

# 市街地液状化対策事業とは

道路などの公共施設の対策は公費の負担で、宅地の対策は原則として所有者の負担により街区全体の液状化対策を行うもので、10世帯以上かつ3000平方メートル以上の街区で世帯の3分の2以上の同意が得られることが事業の採択条件になっています。



# 実現可能性調査を行います

市では、液状化対策の効果や課題、事業に伴うリスク、宅地所有者の費用負担などの詳細な検討と、検証に必要な地盤調査などを行います。

昨年度、地盤工学会、土木学会、日本建築学会に委託して設置した浦安市液状化 対策技術検討調査委員会からの報告で、この一体的な対策工法として、個人の費用 負担や技術開発の状況などの観点から、課題はあるものの、「地下水位低下工法」が 一つの工法として挙げられました。

市では、液状化対策工法として「地下水位低下工法」、「格子状改良工法」、「個別 の対策工法(建て替え時を含む)」を対象として、市民アンケートなどを行いながら 検討を進め、秋ごろをめどに、基本的な方向性を取りまとめたいと考えています。

# 図1.1 液状化対策事業(広報うらやす抜粋)

# 1.3 全体研究概要

1.3.1 研究開発項目と研究全体フロー 以下に研究開発項目と研究全体フロー(図 1.2)を示す.

## 【研究開発項目】



図1.2 全体フロー図

1.3.2 研究フローの概要

(1) 合理的な改良形状の提案

フェーズ1:模型実験による合理的な改良形状の提案

マルチジェット工法を用いた薄壁形状および自由形状を用いた改良を想定した何ケースかの模型実験を実施して,合理的な改良形状の提案を行う.なお,模型実験はまず予備実験として振動台実験を行い,合理的な改良形状の成立可能性検討を行う.次に本実験として遠心載荷実験を行い,合理的な改良形状の絞込み・提案を行う.

# フェーズ2:3次元有効応力解析による合理的な改良形状の検討

模型実験によって得られた合理的な改良形状に対し解析的な検討を行う.解析的な検討を行うには,3次元的挙動を再現する必要があり,本研究では一般的な2次元有効応力解析コードとして普及している「FLIP」の3次元拡張版「FLIP3D」を用いる.しかし,このコードはまだ使用実績は少ないことからその再現性および境界条件等のモデル設定の妥当性も含めて検証する必要がある.そこで本研究においては,まずフェーズ1で実施した遠心載荷実験モデルを3次元有効応力解析によって再現することで解析モデルの妥当性を検証する.次に妥当性を検証できたモデルの考え方を用いて,具体的な事例として浦安運動公園の地盤モデルの解析を行い,合理的な改良形状の妥当性を検討する.ここで,浦安市運動公園の地盤モデルで解析を行った理由は,今回提案する合理的な改良形状を造成する実証実験工事を運動公園で実施することによるものである.

#### (2) 合理的な改良形状の簡易設計手法の提案

#### <u>フェーズ3:3次元的挙動を再現できる2次元有効応力解析モデルの検討</u>

上記,妥当性を検証した3次元有効応力解析を実施して,各サイト,各構造物毎の対策形状を実施設計す ることは可能であるが設計コストや設計時間がかなり必要とされる.そこで,対策工設計の迅速化のために は,3次元的挙動を再現できる2次元解析モデルの確立が必要と考える.また,本研究における目標の一つ である「平易に概略設計可能な設計図表策定」のためには土質条件等をパラメータとした数多くの有効応力 解析によるパラメタリックスタディが不可欠となるが,これを3次元有効応力解析で行うことも現実的でな いと思われたことから,簡易設計図表策定の観点からも上記の2次元解析モデルの確立が必要とされる.な お,具体的には同じ地盤で同じ改良形状を再現した2次元解析モデルと3次元解析モデルを対比させ,2次 元有効応力解析における改良体の剛性を3次元有効応力解析と同様に表現しうるモデルを確立させる.

#### フェーズ4:簡易設計図表の策定

合理的な改良形状による液状化対策を迅速に普及させるために,対象エリアの簡易土質条件等があれば平 易に概略設計が可能となる簡易設計図表を策定する.簡易設計図表の策定にはフェーズ3で検討した3次元 的挙動を再現できる2次元有効応力解析モデルを用いる.本フェーズにおいては,簡易設計図表の策定用モ デルとして「浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会」における地盤モデルを用いた.

#### (3) 合理的な改良形状の試験施工による施工性確認

#### フェーズ5:浦安実証実験

宅地を想定したヤードにて合理的な改良形状の試験施工を行い,施工性(狭隘地での施工)や周辺への影響 (騒音,振動,造成に伴う沈下),品質(出来形,強度),改良効果(人工地震による検討)の確認を行い,適 用性を検証する.

# 1.3.3 研究実施工程表

表 1.1 に研究実施工程表を示す.

								201	2年						2013年			
	Ê					3月	角	5月	育	叾	8月	肾	윍	윍	윍	1	<u> </u>	3月
	予備         3次元有効         改良形状の効果確認と模           応力解析         型実験のケース絞込み																	
1.;	合理的な	改良形状の提案																
	予備実験∶振動台実験																	
	Fn. i	的な改良形状の提案	本実験∶遠心載荷実験	[			[											[ ] ]
	3次 PH.2 によ 形利	3次元有効応力解析 による合理的な改良 形状の検討	再現解析の妥当性検討															
							[											
2.1	合理的な	改良形状の簡易設計	·手法の提案															
	PH.3	3次元解析挙動の再現 2次元解析モデルの検討	可能な 討														-	
	PH.4	簡易設計図表 の策定	3次元的挙動を再現できる 2次元解析モデルによる簡 易設計図表検討															
3.1	合理的な	改良形状の試験施工	による施工性確認															
			施工性確認、周辺へ															
	РП.Э	<b>湘女</b> 美訨美駛	の影響確認、 品質確認、 改良効果確認															
成	成果とりまとめ																	
産	官学テー	マ推進委員会					第1	回5/7		第2	<mark>回</mark> 8/9		第3	<b>_</b> []11/	9	第	<mark>-</mark> 4回2/	20

表1.1 研究実施工程表

#### 1.4 マルチジェット工法概要<sup>1.1)</sup>

#### 1.4.1 工法概要

高圧噴射撹拌工法は、小型のボーリングマシンを用いて セメントミルクやエアーを超高圧で地中に噴射して原地盤 と混合撹拌することでソイルセメント改良体を造成する深 層混合処理工法の一種である.セメントミルクの噴射量や 噴射圧力等によって、改良径の異なる各種の工法が実用化 されており、主として土留め壁の欠損防護・先行地中梁・ 底盤改良、シールド工事の発進・到達防護等の仮設利用と して広く用いられている.一方、近い将来、首都圏直下型、 東海・東南海・南海地震をはじめとする巨大地震の発生が 予測されており、既設施設を対象とした液状化対策の必要 性が高まっている.この場合、狭隘な箇所での施工や施設 を供用しながらの施工を求められることが多く、小型の機 械で施工可能な高圧噴射撹拌工法で計画・実施する事例が 増加している.

マルチジェット工法(写真 1.1)は、このような背景を踏ま えて、従来の高圧噴射撹拌工法に比してコストダウン、工 期短縮、既設構造物への影響低減、本設構造物としての高 い品質確保等を目的として開発された自由形状・大口径改 良が可能な高圧噴射撹拌工法である図1.3に示すように、 従来の高圧噴射攪拌工法は、円柱状の改良が主流であるた



写真1.1 マルチジェット工法(気中噴射)



め設定された改良範囲に対して,はみ出し部やラップ部など不要な部分が発生していた.また,最大改良径 が小さいため,削孔本数が多くなり段取り替えが頻繁に発生するといった課題があった.マルチジェット工 法では,自由形状と大口径改良の2つの特徴を生かし,図 1.3 に示すように必要改良範囲に対して無駄なく 合理的に改良することで,従来工法に対して 30%程度の改良体積削減を可能とし,コスト縮減と工期短縮を 可能とした.また,造成時に発生する排泥量も同様に 30%程度の削減が可能のため,コストダウン効果に併 せて環境負荷軽減も図ることができる.

#### (1) 自由形状

本工法では,専用ロッドを揺動式にし,複数方向の同時噴射方式を用いることで,従来工法で主流であった円形改良のみだけでなく,壁状や扇形・格子状など自由形状の造成を可能とした.(図 1.4)



図 1.4 自由形状改良

# (2) 大口径改良

従来工法の最大改良直径は 5.0m 程度であったが,本工法はツインノズルを用いたジェット噴流等の工夫 により, 8.0m(半径 R=4.0m 砂質土,関東ローム,粘土質砂礫で確認済み 図1.5,写真1.2)までの大口径 改良を可能とした.



図 1.5 大口径改良径

写真1.2 大口径改良(掘り起し)

(3) リアルタイム施工管理

マルチジェット工法では,従来の仮設目的以外にも,本設構造物として適用できる高い改良体の品質を確保するために,リアルタイムで施工管理が行える専用の管理装置を開発した.専用の管理装置(写真 1.3)を用いることで,削孔・造成の引上速度や揺動角度・回転速度の自動制御,硬化材の流量・圧力・空気量の流量をリアルタイムで計測,管理し,削孔位置も同時にリアルタイムで計測できる専用傾斜計測器を開発し,孔曲り計測しながら精度の高い施工を行うことを可能とした.また,造成直後の品質管理を行なうことを可能とするため,造成直後の改良体を直接目視確認が行えるビデオコーン,及び造成直後の改良体を直接サンプリングを行えるサンプリングコーンを開発することで,造成直後の改良径確認と未固結改良体採取による28日強度の若材齢予測(0~7日)を可能とした.





削孔・造成の引上速度制御 エアー量計測 硬化材流量・圧力計測 揺動角度・回転速度制御 噴射方向計測



写真1.3 管理装置

1.4.2 東日本大震災における対策効果の実例と概要<sup>1.2),1.3)</sup>

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では,広範囲な地域で埋立地を中心に液状化現象が発生し,住宅,道路,港湾施設,ライフライン,産業施設等に多大な被害をもたらした.

茨城県の湾岸地帯の約20m埋立層に立地する某産業施設では,震度6弱の地震動により,大規模な液状化 現象が発生した.埋土層は細粒分含有率20%程度以下,N値=5~20の緩い砂地盤を主体としており,今回の 地震で液状化対策を実施していない埋土層が液状化し,タイヤが埋まるほどの噴砂が発生(写真1.4)し,構内 道路は部分的に沈下・蛇行し,通行が困難となった(写真1.5).当施設の機械基礎部は,液状化対策としてマ ルチジェット工法による格子状改良が採用されている(図1.6).無対策個所で大規模に液状化現象が発生する 中,格子状改良箇所は液状化現象が発生せずに,その高い対策効果が実証された.さらに地震後に実施した 各種調査に基づく効果検証結果および再現解析結果によればマルチジェット工法による格子状改良の液状化 対策効果を再現できることがわかった.



写真1.4 液状化による被害状況

写真1.5 構内道路の被災状況



<u>断面図A - A</u>

<u>平面図B-B</u>

図1.6 マルチジェット工法による格子状改良事例(茨城県)

#### (1) 従来工法との比較

図 1.7 は各種工法を当現場に適用した場合の改良配置を比較したものである.機械攪拌工法を採用した場合には接円改良による全面改良が必要となる.一方,高強度改良が可能な高圧噴射攪拌工法を採用した場合, 同等以上の平均剛性および液状化対策効果を有する格子状改良により,改良率を大幅に低減できる.さらに, マルチジェット工法と同等の改良強度を有する従来の円形の高圧噴射攪拌工法による格子状改良と比較した 場合でも,必要な設計改良範囲に対して3割の改良体積削減と6割の削孔本数削減ができる.このように, 当現場におけるマルチジェット工法の採用により経済的に有利な格子状改良を行うことが可能である.マル チジェット工法については,掘起しによる改良体出来形確認,およびコアボーリング試料を用いた一軸圧縮 強度 qu による管理を行った.写真 1.6 は改良体造成後に行った出来形確認状況である.打設地点から最大 3.3m の良好な改良体が形成されていることが確認された(設計値: 3.0m).また,ボーリングで得られたコア を用いた一軸圧縮試験により,設計値を満足する強度が発現していることが確認された.



\*改良体積および削孔本数は高圧噴射攪拌工法の従来工法を基準とした

#### 図1.7 各種工法比較



写真1.6 マルチジェット工法 出来形確認状況(掘り起し)

- (2) マルチジェット工法部の調査結果
- 1) 格子状改良の連続的な健全性確認

格子状改良の連続的な健全性を確認するため,図1.8 に示すように,チェックボーリングを1箇所(調査位置)実施し,同一孔で原位置 PS 検層(サスペンション方式)を行った.コアボーリングのコア採取率はほぼ100%であり,全層にわたって良好な改良体を目視確認できた.また,図1.9 に弾性波速度 Vs の深度分布図を示す.原位置 PS 検層(未改良)の弾性波速度 Vs を併用して評価すると,改良体の弾性波速度 Vs が全層で0.6 km/sec 以上を確保しており,原地盤の弾性波速度(平均値0.2 km/sec)を大きく上回っている結果から,連続的に健全であると評価できる.

さらに,改良体が面的に健全であったことを確認するため多点式インティグリティ(IT)試験(図 1.10)を行った.多点式 IT 試験とは,杭やコラムの頭部に弾性波を発生させ,反射波を測定・解析することで躯体の健全性を評価する通常の IT 試験(食いの破損箇所や杭下端で反射波がもどってくる特性を利用した評価手法)を応用した試験方法である.通常の IT 試験では1つの受信センサーによる評価であるのに対し,2個の受信センサーを用いて位相差で計測・解析をおこなうことで,改良体の面的な健全性の評価が可能となる.

多点式 IT 試験による改良体の計測結果を図 1.11(a,b のみの結果を掲載)に示す.上・下端の濃い部分は, 入力波と反射波を意味しており,下端位置は実施工での改良下端とほぼ同一深度である.改良体上・下端以 外の中央部では,強い反射波がないことから改良体が面的に連続性を確保していることが確認できた.





図1.10 多点式 IT 試験イメージ図

図1.11 多点式 IT 試験結果(調査位置 B)

展開側面図b

2.90m 5.85m 2.90m

1 8-12-5 A-12

b

改良下編

2) 格子内未改良地盤の液状化有無の確認

格子改良範囲外の未改良地盤は液状化により最大 70cm 程度沈下が発生した.したがって,格子内未改良 地盤が液状化した場合,図1.12に示すように浅層改良部と格子内未改良部で空洞が発生することが想定され る.そこで,浅層改良と格子内地盤の境界をボアホールカメラで空洞の有無を確認した.図1.13に結果を示 すが,表層改良と格子内地盤の境界部に空洞がないことから,格子内未改良地盤の液状化は発生していない ことが確認できた.



図1.13 ボアホールカメラによる空洞調査結果

1.4.3 本研究で開発した超小型マシンの概要

(1) 開発の目的と目標

既設戸建て住宅などの狭隘地に対して,施工幅 1.0m 程度と空頭 2.0m 程度のスペースがあれば、施工ができることを目的に,狭隘地向け超小型マシンを開発した.

また,既設戸建て住宅を対象とした場合, 住民が生活しながら建物への有意な変形を発生させない, 騒音・振動が特定建設作業の規制基準以下, 建物への汚れを発生させないことを目標とした.

(2) 開発のコンセプト

開発のコンセプトは、従来のマルチジェット工法標準機の性能を保持したままで超小型化することである.

(3) 開発した超小型マシンの特徴

狭隘地向けに開発した超小型マシンの特徴を以下に示す. 従来のマルチジェット工法標準機と同等の改良性能(自由形状改良+最大直径 8.0m)を保持. 幅 60cm×長さ 75cm×高さ 163cm、総重量 400kg まで超小型化した. 施工機は自走以外にも人力移動が可能、さらに分解して搬入も可能. 施工時に相番のクレーンが不要で施工可能.

(4) 機械寸法

狭隘地向け超小型マシンの機械寸法図を図 1.14 に,関連状況写真を写真 1.7 に示す.











側面図



専用モニター(造成用ジェット)

専用モニター(削孔用ジェット)

写真 1.7 狭隘地向け超小型マシン

(5) 機械仕様

狭隘地向け超小型マシンの機械仕様を表 1.2 に示す.

項目	内容
ロッド径	73mm
ロッド長	1.5m , 1.0m
モニター径	89mm
最大噴射量	400 <b>l</b> /min
圧縮空気量	8 ~ 12Nm³/min
リーダー + スピンドル重量	400kg * 分解して人力移動が可能
油圧ユニット重量	1000kg *施工機械と分離して道路側にセット

表 1.2 狭隘地向け超小型マシンの機械仕様

(6) 従来機との対比

狭隘地向け超小型マシンと従来のマルチジェット工法標準機の対比表を表 1.3 に示す.

	標準タイプ	低空頭タイプ	超小型タイプ
姿図			
寸法	W170 × D235 × H240cm	W130 × D200 × H200cm	W60 × D75 × H163cm
重量	3.5t	2.0t	<b>0.4t</b> 分解し人力搬入組立可能
空頭制限 の適用性	×	2.3m程度	2.0m程度

表 1.3	狭隘地向け超小型マシンと従来機との対比
101.0	

(7) 施工状況

狭隘地向け超小型マシンの施工イメージ図を図 1.15 に,実証実験での施工状況写真を写真 1.8 に示す.



図 1.15 狭隘地向け超小型マシンの施工イメージ





写真1.8 実証実験での施工状況写真

# 1.5 委員会設立について

技術研究開発提案を着実に推進し,目標達成に向けて確実な進捗管理を図るために下表の産学官の分野から構成される委員会を設置し,次の項目を実施した.

・実証実験により、開発成果が有効に機能することの確認

・当該研究開発成果の具体的な事業化計画を作成

# 表1.4 委員会名簿

会務	役職	氏 (敬称I	名 略)	勤 務 先
委員長	教授	塚本	良道	東京理科大学理工学部土木工学科
委員	主任研究員	安部	哲生	株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部土工研究室
委員	副市長	石井	一郎	浦安市
委員	チーム リーダー	小濱	英司	独立行政法人港湾空港技術研究所 地震防災研究領域耐震構造研究 チーム
委員	室長	神田	政幸	公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部基礎・土構造 研究室
委員	上席研究員	佐々木	哲也	独立行政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ
委員	副部長	澤田(	俊一	応用地質株式会社エンジニヤリング本部地盤解析部
委員	上席研究員	平田	和太	一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域
委員	主任研究員	平出	務	独立行政法人建築研究所 構造研究グループ

委員名簿(敬称略、五十音順)

1.6 研究メンバー

本研究のメンバーを下表に示す.

	氏名	所属	執筆担当
代表研究者	清水英樹	前田建設工業株式会社 土木設計·技術部	全体統括 第3章
共同研究者	手塚広明	前田建設工業株式会社 土木設計·技術部	第1章、第2章 第8章
共同研究者	山内崇寛	前田建設工業株式会社 土木設計·技術部	第5章、第6章 第7章、第8章
共同研究者	平田昌史	前田建設工業株式会社 技術研究所	第3章
共同研究者	神田隆真	前田建設工業株式会社 土木設計·技術部	第5章、第6章
共同研究者	岡田直仁	前田建設工業株式会社 土木設計·技術部	第4章
共同研究者	吉本勝哉	前田建設工業株式会社 土木設計·技術部	第6章
共同研究者	太田光貴	前田建設工業株式会社 土木設計·技術部	第4章

表1.5 研究メンバー

1.7 引用文献

1.1)建設技術審査証明報告書 マルチジェット工法((社)日本建設機械化協会,平成21年6月)

1.2) 手塚広明:技術開発最前線,土木技術, vol.67, No.9, 2012.

1.3) 山内崇寛・手塚広明・清水英樹:東日本大震災における SIMAR 工法・マルチジェット工法の液状化対 策効果の検証,前田技術研究所報,vol.53,2012.

2章 既設宅地の液状化委対策に対する各機関の目標性能の整理

2.1 はじめに

本研究の目的は,「1.2 研究開発の目的と基本方針」で記載したように,狭隘地における既設戸建て住宅, 社会基盤施設,産業施設等に対して,目標性能を設定し,経済的かつ効果的な液状化対策工法およびその設 計法,更にその工法を迅速に普及させるために対象エリアの簡易土質条件等があれば平易に概略設計が可能 となる簡易設計図表を提案することである.なお,本研究では,浦安市における住宅地と道路や下水道など の公共施設とを一体化した「市街地液状化対策事業」をモデル事例として,マルチジェット工法による薄壁 形状やその他の自由形状を合理的に組み合わせることで経済的かつ効果的な改良形状の検討を実施している.

ここで,本研究の目的である経済的かつ効果的な液状化対策工法およびその設計法の提案をするためには 住宅の液状化に対する目標性能を明確にする必要がある.現在,戸建て住宅に関する液状化に対する目標性 能は一義的に定められていないのが現状であるが,東日本大震災における多数の戸建て住宅への被害を受け て,多くの機関で既往の調査・研究を踏まえた目標性能の提言がなされている.

本章では,現時点で各機関から提言されている目標性能を整理し,研究動向を探る一助とした.

2.2 公益社団法人地盤工学会における各委員会

2.2.1 「浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究:H24.9:浅層盤状改良による宅地 の液状化対策委員会」

本委員会では 法・基準類の調査, 既往研究の調査, 東日本大震災および近年の地震での液状化により被災した戸建て住宅の沈下による傾斜角の調査を行っている.その結果以下のまとめおよびクライテリア を設定している.

日本建築学会の基準では,小規模建築物基礎設計指針において,住宅の品質確保等促進法の技術的基準値 におけるレベル3相当の傾斜角 6/1000 が,住民が傾斜を強く意識するしきい値であるとの伊奈らの調査結果 から,傾斜角の限界値を 6~8/1000 と規定している.

一方,実際の居住者への調査では,不同沈下量が60~100mmに達した時点で傾斜を意識しはじめ,6/1000 で傾斜を意識し始め,8/1000 で強く意識,10/1000 ではめまいや頭痛といった健康障害が生じるため水平復 旧を余儀なくされている.この結果を裏付けるように,水平修正工事を実施した建物の調査結果は,不同沈 下量で80mm 程度,平均傾斜角で6~10/1000 であった.

罹災証明上の被災度判定および地震保険による損壊基準においては,いずれも 10/1000 程度を超えると半壊,半損として認定している.また,16.7/1000 程度を超えると大規模半壊,全損と判断され,部分的な補修では対応が困難となる.

これらの結果から本研究開発における戸建て住宅のクライテリアは,以下のように規定した.

- ・ 中地震動に対しては,有害な沈下変形を許容しない基礎構造とし,最大傾斜角では 10/1000,不同沈 下では 80~100mm を超えないものとすることが妥当である.
- ・ 大地震動に対しては,ある程度損傷は許容し,修復を容易にする基礎構造とし,最大傾斜角は16.7/1000 とすることが妥当である.

ただし,最大傾斜角を許容値として設計することは,現状の設計方法からして極めて困難であるとして, 現場調査と住宅の最大傾斜角とめり込み沈下量の関係を示した(表 2.1).

地震レベル	最大傾斜角	全体	潮来市 神栖市	千葉市 習志野市	採用値
中地震動	10/1000	12.5	14.0	7.5	10.0
大地震動	16.7/1000	21.0	23.0	12.5	15.0

表2.1 平均めり込み沈下量のクライテリア(cm)

2.2.2 「造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書-液状化から戸建て住宅を守るための手引書-: H25.9:造成宅地の耐震対策に関する研究委員会」

2.2.1 と同様に本手引書では東日本大震災で液状化により被災した戸建て住宅のめり込み沈下と傾斜角との関係を調査して,下表のようなクライテリアを提示している.

表2.2 戸建て住宅の平均めり込み沈下量に関するクライテリア

地震レベル	住宅に必要と考えらえる性能	該当する平均めり込み沈下量
レベル1地震動または中地震	「全層にわたって液状化させな	10cm 程度 . ただし , 住宅が密集し
	い」,もしくは一部の深さが液状化	ている地区ではこれより少し小さ
	しても有害な沈下や傾斜(例えば	い値を,散在している地区では少
	半壊程度に至らない 10/1000)を生	し大きい値をとると良い.
	じないようにする.	
レベル2地震動または大地震	液状化が発生してもある程度の損	15cm 程度 . ただし , 住宅が密集し
	傷は許容し、大規模半壊程度に至	ている地区ではこれより少し小さ
	らない(傾斜角では 16.7/1000)よう	い値を,散在している地区では少
	にする.	し大きい値をとると良い.

2.3 国土交通省都市局「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針(案):平成25年3月8日」

この指針(案)は,ボーリング調査結果と被害状況の関係を分析し,液状化被害の可能性を判定する手法等 について検討したものであり,戸建住宅等の宅地被害の可能性をボーリング調査に基づき3段階で判定する ものである.また,この指針(案)は,宅地の液状化に関する調査や対策を義務付けるものではないが,少な くとも今後開発・造成される新たな宅地については,この基準を参考にして,より安全な宅地供給が行われ ることを期待するとともに,既存の宅地についても,民間の自主的な取り組みにおいて広く活用されること を期待して作成されたものである.



図2.1 技術指針概要

# 2.4 国土交通省 国土技術政策総合研究所

国土技術政策総合研究所は,国土交通省都市局とともに,液状化の被害を受けた住宅地の復興に向けて, 被災地自治体に対する技術支援として,街路と宅地を一体的に行う液状化対策の実用的な工法の研究を進め ている.そこで,適用可能性のある有力な2つの工法(地下水位低下工法と格子状地中壁工法)について,そ の効果・影響を簡易に計算できる技術支援ツール(簡易計算シート)を作成し公開している.この各々の工法 の簡易計算シート作成に伴い,下表の目標性能を設定している.

入力地震動			
格子状改良	地下水低下		
液状化対策のメルクマーク (東日本大震災の夢の島観測波) 200gal、M9.0	タイプ1(中地震による中程度の揺れ) 200gal、M7.5		
直下型地震 (中央防災会議東京湾北部想定波) 350gal、M7.3	タイプ2(巨大地震による中程度の揺れ) 200gal、M9.0		
	タイプ3(直下型地震による大きな揺れ) 350gal、M7.5		

# 表2.3 入力地震動(国土技術政策総合研究所)

# 表2.4 目標性能(国土技術政策総合研究所)

目標性能					
格子状改良		地下水低下			
指標	規定値	計算方法	指標	指標	
FL值	規定なし	建築学会基礎構造設計 指針でFL値を算定す る。ただし、等価な繰り 返しせん断応力比は、 Super FLUSHより算定 し、液状化強度比は、N 値、Fc等から同指針より 算定する。	非液状化層厚H1	H1 3.0m	建築学会基礎構造設計 指針でFL値を算定する。
Dcy (液状化後の沈下量)	規定なし	上記と同様に建築学会 基礎構造設計指針で Dcyを算定する。ただし、 繰返しせん断ひずみを 算定する際の、等価な 繰返しせん断応力比 は、Super FLUSHにより 算定する。	Dcy (液状化後の沈下量)	Dcy 10cm	上記と同様に建築学会 基礎構造設計指針で Dcyを算定する。
(参考) 格子状改良体のせん断応 力	発生応力 せん断強度	Super FLUSHにより改良 体に発生するせん断応 力の照査を実施する。			

#### 2.5 浦安市実現可能性技術検討委員会

浦安市において,平成23年7月より「浦安市液状化対策技術検討委員会」を設け,「技術開発の状況,住 宅所有者の費用負担などの観点から,道路と宅地の一体的な対策工法として,実現可能性がある工法として いくつかが挙げられるものの,実施に当たってはさらに詳細な検討が必要である.また,今後,その他の工 法も含めて実現可能性を調査し,その結果を踏まえ,事業に伴うリスクや費用負担について地域住民と意見 交換を行いながら事業の実施について慎重に判断する必要がある.」との当面の結論を得ている.

そこで,平成24年6月から「浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会」を設けて前記委員会の検討結果 を踏まえ,地下水位低下工法および格子状改良工法,個別の対策工法(建て替え時を含む)について,液状化 防止軽減効果と事業リスクの評価を行い,道路などの公共施設と宅地の一体的な市街地液状化対策事業の実 現可能性を検討した.下表に格子状改良と地下水低下の場合の目標性能を記載する.計算方法は異なるが, 基本的に同じ目標性能である.

地震動:レベル1相当地震動(東日本大震災の夢の島観測波)200gal, M9.0

	目標性能				
	格子状改良		地下水低下		備考
	指標、管理値	計算方法	指標、管理値	計算方法	
道路を含む公共用地	レベル1相当地震動に対 して、地盤が液状化しない こと	建築学会基礎構造設計指針でFL 値を算定する。ただし、等価な繰り 返しせん断応力比は、2次元Super FLUSHより算定し、液状化強度比 は、N値、Fc等から同指針より算定 する。	レベル1相当地震動に対 して、地盤が液状化しない こと	建築学会基礎構造設計指針でFL 値を算定する。ただし、等価な繰り 返しせん断応力比は、1次元SHAK Eより算定し、液状化強度比は、N 値、Fc等から同指針より算定する。	-
宅地	レベル1相当地震動に対 して、建物自重等による 荷重が立地地盤の短期 許容応力度を超えないこ と	短期許容支持力度は告示式により 算定する。ただし、土の単位体積重 量は、上記算定されたFL値に応じ た過剰間隙水圧 U=FL <sup>-7</sup> により 低減する。	レベル1相当地震動に対 して、建物自重等による 荷重が立地地盤の短期 許容応力度を超えないこ と	短期許容支持力度は告示式により 算定する。ただし、別途算定した地 下水上昇量を考慮して低減する。	FL 1.0を満足 すれば支持力 は全く問題とな らない
格子状改良体	レベル1相当地震動に対 して、格子改良体のせん 断応力度が短期許容せん 断応力度(安全率1.5)を 超えないこと	2次元Super FLUSHにより改良体に 発生するせん断応力の照査を実施 する。			

# 表2.5 目標性能(浦安市実現可能性技術検討委員会)

3章 模型実験による合理的な改良形状の検討(研究開発項目 ,フェーズ1)

## 3.1 1G場における振動台実験

自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法「マルチジェット工法」では,従来の格子形状だけではなく,扇形や 壁状の改良体を組み合わせることで特殊な改良形状が造成可能であることが大きな特徴である.ここでは, 1G場における振動台実験を実施し,図3.1に示したような改良体形状の違いによる液状化抑制効果について 検討を行った.



図3.1 改良形状ケース

3.1.1 振動台実験の概要

(1) 模型地盤の作製方法と計測器位置

振動台実験では,写真 3.1 に示すせん断土槽(幅 1.2m,高さ 1.0m,奥行き 0.8m)を使用した.図 3.2 に,模型地盤の概略図を示す.非液状化層は,豊浦標準砂を投入した土槽に微振動を与え,高さ 400mm,相対密度 90%になるまで締め固めることで作製し,液状化層は,一定量の豊浦標準砂を投入した後,高圧噴射のパイプを用いて水を地盤内に送り込み撹拌することで,高さ 450mm,相対密度 50%になるように作製した.表 3.1 に,振動台実験で使用した豊浦標準砂の諸元を示す.なお,模型地盤は実物の 1/50 スケールを想定しており,地下水位は地表面である.

模型地盤内部には,地盤中央(改良体内部)と地盤右側(C.L.+R370mm,改良体外部)の2測線に,間隙水圧計 を4深度(GL.-150mm,-250mm,-350mm,-450mm)の計8箇所に設置し,加速度計を2深度(GL.-250mm, -450mm)の計4箇所に設置している.地盤内加速度計の設置方法については,高橋ら<sup>3.1)</sup>の手法を参考に,ア クリル板とテグスを用いて地盤内に加速度計を吊り下げることで,所定の方向・深度になるように調節して いる.また,改良体を考慮したケースでは,改良体模型にも加速度計を取り付けている.図3.2 に,計測器 の設置位置を示す.



写真3.1 振動台実験に使用したせん断土層



図3.2 模型地盤と計測器位置の概略図

表3.1 豊浦標準砂の諸元

土粒子密度	S	2.659	g/cm <sup>3</sup>
最小乾燥密度	dmin	1.334	g/cm <sup>3</sup>
最大乾燥密度	dmax	1.618	g/cm <sup>3</sup>

(2) 改良体形状と実験ケース

改良体形状は,通常の「単純格子」と格子内側にも壁を構築する「バットレス格子」の2つの格子形状に, 改良体上端に扇状改良による「蓋付き格子」を考慮した3種類の形状を基本とした.これらの形状に対して, 非液状化層まで改良を実施し根入れする「着底型」と,液状化層の途中まで改良する「浮き型」を考慮し, 計8種類の改良体模型を用いて実験を行った.実験ケースは,無対策地盤を含めて合計9ケースである.表 3.2 に,振動台実験のケースと改良体形状の一覧を示す.改良体模型の寸法は,宅地の敷地面積を50坪程度 (13m×13m)と想定し,実物の1/50スケールより260mm×260mmの格子形状,改良体の壁の厚さは8mm(実 スケールで0.4m),蓋の厚さは20mm(実スケールで1.0m)として作製した.また,「浮き型」の改良深度については,液状化層厚の2/3(液状化層450mmに対して改良深度300mm)と設定している.写真3.2 に,実験に 使用した改良体模型の一例を示す.なお,扇形改良による蓋の形状は,図3.1 に示したような形となるが, ここでは改良面積を考慮した正方形でデフォルメしている.また,改良体模型はアクリルで作製しており, 浮き上がり防止のため鉛板で重量調整している.

# 表3.2 振動台実験ケースおよび改良体形状の一覧

ケースNo.	改良体形状		
Case-01	無対策	-	
Case-02	パットレス格子 着底型		
Case-03	蓋付きパットレス格子 着底型	260 mm 1002 100	
Case-04	単純格子 着底型		
Case-05	蓋付き格子 着底型	260 mm	
Case-06	パッHJス格子 浮き型	260 mm	
Case-07	蓋付きパットレス格子 浮き型	260 mm	
Case-08	単純格子 浮き型		
Case-09	蓋付き格子 浮き型		



写真3.2 振動台実験で用いた代表的な改良体模型(着底型)

(3) 入力地震波

振動台実験では,入力地震波を周期 2Hz,加速度 80gal の正弦波とし,加振時間を振動台の始動・停止を 含め 10 秒(有効加振時間 7 秒程度,およそ 14 波)とした.図 3.3 は,振動台に設置した加速度計の加速度応答 結果を比較した図である.この結果を見ると,すべての実験ケース(Case-01 ~ Case-09)において加速度応答は ほぼ一致しており,今回実施した振動台実験における入力地震波の再現性が確認できる.



## 3.1.2 振動台実験の結果と考察

#### (1) 過剰間隙水圧比の比較

地盤内に設置した間隙水圧計の計測結果より過剰間隙水圧比を求め,各計測位置における比較を行った. 図 3.4 は無対策ケース(Case-01)と着底型改良ケース(Case-02~Case-05)の比較結果,図 3.5 は無対策ケース (Case-01)と浮き型改良ケース(Case-06~Case09)の比較結果である.図 3.4(a)に示す地盤中央(改良体内部)の過 剰間隙水圧比を見ると,過剰間隙水圧比が急激に増加する経過時間 1.0~2.0 秒間の勾配が,未改良ケース (Case-01,図中黒線)よりも着底型改良ケース(Case-02~Case-05)の方が若干緩やかになっており,液状化抑制 効果が確認できる.また,地表面に近いGL.-150mmおよびGL.-250mm位置では、改良体に蓋を付けたCase-03 と Case-05 の値が,経過時間 2.0 秒以降に大きく低減しており,蓋付き形状による液状化抑制効果も確認で きる.なお,単純格子とバットレス格子の間に,改良効果の差は確認できていない.

一方,図 3.5 に示した過剰間隙水圧比を見ると,すべてのケースの地盤中央ではほぼ同じ結果を示しており,浮き型改良ケースでは,着底型改良ケースで見られたような液状化抑制効果は確認できない.






### (2) 地盤内加速度応答の比較

図 3.6 は,無対策ケース(Case-01)と着底型改良ケース(Case-02 ~ Case-05)の地盤内加速度応答の比較結果, 図 3.7 は無対策ケース(Case-01)と浮き型改良ケース(Case-06 ~ Case-09)の地盤内加速度応答の比較結果である. 図 3.6(a)に示す GL.-250mm 位置の加速度応答を見ると,無対策ケース(Case-01,図中黒線)では,経過時間 2.0 秒程度で地盤が液状化し,加速度が急激に減衰するのに対し,着底型改良ケース(Case-02 ~ Case-05)ではほと んど減衰しておらず,改良体内部で地盤の液状化を抑制していることが伺える.一方,図 3.7(a)に示す浮き 型改良ケース(Case-06 ~ Case09)の地盤内加速度応答を見ると,改良体内部でも無対策ケース(Case-01)と同じ ように経過時間 2.0 秒程度で減衰しており,過剰感劇水圧比の結果と同様に液状化抑制効果は確認できない.

図 3.8 は,改良体に取り付けた加速度計の加速度応答結果である.この結果を見ると,浮き型改良ケース (Case-06 ~ Case-09)では図 3.7 に示す地盤内加速度応答と同じように,経過時間 2.0 秒程度で加速度が急激に 減衰しており、改良体周辺の地盤が完全に液状化し、入力地震波が改良体に伝達されていないことがわかる.





### (3) 実験結果のまとめと考察

1G場における振動台実験では、地盤内に設置した間隙水圧計および加速度計の計測結果より、非液状化層 まで改良を実施し根入れする「着底型」の改良形状で、液状化抑制効果が確認された.また、格子状改良体 の上端に扇状改良体による「蓋」を取り付けることで、地表面付近の液状化抑制に効果的であることも確認 された.なお、今回実施した振動台実験では、「浮き型」の改良形状の液状化抑制効果は確認できてない.こ れは、改良体自体が液状化した地盤と伴に挙動したため、改良体内部の地盤のせん断変形を抑制できなかっ たことが原因と考えられる.

今回実施した振動台実験は 1G 場の模型実験であるが,遠心載荷実験では,「浮き型」の液状化抑制効果が 現れるとの報告<sup>3.2),3.3)</sup> もあり,改良体の格子間隔や地盤内の土圧の影響を考慮した遠心載荷実験による検討 も必要であると考えられる.ちなみに,実験では図 3.2 に示したように地表面に変位計を 2 箇所設置し沈下 量を計測しているが,模型地盤が相対密度 50%と非常に緩く,かつ地下水位を地表面としていることから, 地表面付近の揺動が大きく加振中の沈下量を計測できていない.また,実験前後に測定した地表沈下量はど のケースも 10mm 前後であり,改良体内部と外部の差もほとんど生じていなかったことから,今回実施した 振動台実験では,改良形状の違いによる地表沈下量の比較・検討はできていない.

# 3.2 遠心載荷装置を用いた模型実験

1G場における振動台実験では,改良形状による液状化抑制効果の定性的な違いを確認することができた.しかしながら,改良体の格子間隔や地盤内の土圧が液状化抑制効果に影響を及ぼすと考えられるため,液状化抑制効果の定量的な評価はできていない.また,既設宅地を対象とした場合,家屋の沈下や傾斜(不等沈下)の抑制効果が重要となるが,改良形状の違いによる地表沈下量についても検討はできていない.そこで,写真3.3,図3.9に示すビーム型の遠心載荷装置を用いた模型実験を実施し,改良形状の違いによる液状化抑制効果や沈下抑制効果について比較・検討を行った.なお,今回実施した遠心載荷実験の遠心加速度は80Gである.



写真3.3 ビーム型遠心載荷装置



有効半径		(m)	2.2
容器最大寸法		(m)	<sup>L</sup> 0.6 × <sup>B</sup> 0.3 × <sup>H</sup> 0.4
最大回転数		(r.p.m)	320
最大加速度		(G)	250
搭載可能最大重量		(kgf)	300
有効搭載量		(G-tonf)	75
メインモーター		(kW)	AC 37
スリップリング極数	計測用		80
	電源用		7
ロータリージョイント		(ch)	5

図 3.9 ビーム型遠心載荷装置詳細

### 3.2.1 遠心載荷実験の概要

## (1) 模型地盤作製と計測器位置

遠心載荷実験では,写真 3.4 に示す剛性容器(幅 600mm,高さ 400m,奥行き 150mm)を使用した.図 3.10 に,遠心載荷実験で使用した模型地盤の概略図を示す.非液状化層は珪砂を用い,高さ 50mm,相対密度が 約 95%になるまで突き固めることで作製し,液状化層は中心の高さが 200mm,相対密度が約 40%になるよう に乾燥させた豊浦標準砂を容器内にゆっくりと投入した.その後,飽和化促進のための炭酸ガスを透気した 後に,容器の下から粘性スケーリングを調整したセルロース系の粘性流体を通水させて液状化層を作製した. なお,間隙水にセルロース系の粘性流体を用いるのは,80Gの遠心力場で浸透流の相似則を一致させ,地盤 を液状化させるには水の 80 倍の粘性が必要になることによる.また,家屋の沈下や傾斜を評価するため,表 層に 20mmの不飽和層(地下水位 G.L.-20mm)設け,その上に住宅模型を設置した.住宅模型はべた基礎を 想定し 80G 場での接地圧が 15kPa となるように、模型底面に鋼板を貼り付けることで重量を調整している. なお,住宅模型の偏心荷重は考慮していない.

模型地盤内部には,間隙水圧計を地盤中央(改良体内部)と地盤左側(C.L.+L150mm,改良体外部)の2 測線に4深度(G.L.-20mm,-70mm,-120mm,-170mm)の計8箇所,加速度計を2深度(G.L.-70mm,-200mm) の計3箇所に設置した.また,振動台実験と同様に,改良体を考慮したケースでは,改良体模型にも加速度 計を取り付けている.地表面沈下計は,住宅基礎左右2箇所,改良体外部1箇所の計3箇所に設置した.図 3.10に,計測器の設置位置を示す.なお,剛性容器前面はアクリル板を使用しており,加振中の挙動を高速 度カメラにて撮影している.



写真3.4 剛性容器と模型地盤



# (2) 改良体形状と実験ケース

改良体形状は,1G場における振動台実験の結果を考慮し,「着底型」を3ケース(単純格子,バットレス格子,蓋付き格子),「一部着底型」を1ケース(蓋付き格子)とした.「一部着底型」とは,隣接する道路等公共施設部分を基盤層まで改良する「着底型」とし,宅地部分を液状化層の途中まで改良する「浮き型」と想定したケースであり,改良体模型の前面・背面の2面を基盤層までの「着底型」としている.先に実施した1G場の振動台実験結果では,改良体自体が液状化した地盤と伴に挙動したため,一部着底とすることにより改良体の挙動を抑制し,液状化抑制効果を期待したケースである.表 3.3 に,遠心載荷実験のケースと改良体形状の一覧を示す.

# 表3.3 遠心載荷実験ケースと改良体形状の一覧

ケースNo.	5	<b>女良体形状</b>
Case-01	無対策	-
Case-02	単純格子 着底型	K 145 mm →
Case-03	バットレス格子 着底型	K <sup>145 mm</sup> → K <sup>145</sup>
Case-04	蓋付き格子 着底型	↓ 145 mm ↓ 145 mm ↓ 145 mm ↓ 145 mm ↓ 145 mm
Case-05	蓋付き格子 一部着底型	



単純格子 (着底型)

バットレス格子 (着底型)

蓋付き格子 (着底型) 蓋付き格子 (一部着底型)

写真3.5 遠心載荷実験で用いた改良体模型

# (3) 入力地震波

遠心載荷実験の入力地震波は,各実験ケースの再現性を重視し,実際の地震波(不規則波)ではなく,内陸 直下型地震相当の規則波(正弦波,1Hz,160gal,15波)を採用した.なお,80G場でこの入力地震波を再現す る場合,相似則より80Hz,12800gal(約13G)となる.図3.11は,振動台に設置した加速度計の加速度応答結 果を比較した図である.この結果を見ると,すべての実験ケース(Case-01 ~ Case-05)において加速度応答はほ ぼ一致しており,今回実施した遠心載荷実験における入力地震波の再現性が確認できる.



## 3.2.2 遠心載荷実験の結果と考察

### (1) 過剰間隙水圧比

図 3.12 は,加振から 0.8 秒後までの過剰間隙水圧比を比較した図である.表層付近(GL.-20mm)を除いた地 盤左側(改良体外部)の結果を見ると,表層付近(GL.-20mm)を除いた加振後(経過時間約 0.2 秒)の過剰間隙水圧 比は,すべてのケースでほぼ等しいため,どのケースでも地盤は同じように液状化していると推測される. また,地盤中央(改良体内部)の結果を見ると,表層付近(GL.-20mm)を除いた加振後(経過時間約 0.2 秒)の過剰 間隙水圧比は,単純格子(Case-02)とバットレス格子(Case-03)のケースでは,無対策ケース(Case-01)とほぼ等 しくなっており,格子形状が実スケールで 12m×12m と非常に大きいために,改良体中央位置では無対策ケ ースと同じように地盤が液状化したと考えられる.これに対し蓋付き格子ケース(Case-04, Case-05)では, GL.-70mm および GL.-120mm の位置で過剰間隙水圧比が低くなっており,蓋を考慮することで地盤中央位 置においても液状化抑制効果が確認できる.なお,表層付近(GL.-20mm)では,過剰間隙水圧が不飽和層の影 響を受けて加振中に消散したため,各ケースでバラつきが生じたものと思われる.

図 3.13 は、図 3.12 に示した過剰間隙水圧比グラフの横軸を加振から 5.0 秒後まで引き延ばすことで、過剰 間隙水圧の消散傾向を比較した図である.この結果を見ると、改良体を考慮したケース(Case-02 ~ Case-05) では、無対策ケース(Case-01)に比べ過剰間隙水圧の消散が早く、今回計測していない改良体近傍の地盤では、 液状化が抑制されていることが推測される.なお、一部着底型ケース(Case-05)では、改良していない地盤深 部(GL.-120mm、G.L.-170mm)の過剰間隙水圧の消散が、未改良ケース(Case-01)とほぼ等しいことが確認でき る.また、蓋付き格子ケース(Case-04、Case-05)の場合、改良体による蓋が非排水層となるため、地盤中央(改 良体内部)では、過剰間隙水圧の消散が地表面に近いほど遅くなる傾向が見られる.



3-17



## (2) 地盤内加速度応答

図 3.14 は,地盤内に設置した加速度応答の実験結果を比較した図である.図 3.14(a)に示す地盤左側(改良 体外部)の加速度応答は,どの実験ケースも加振開始から徐々に減衰しており,地盤が液状化することで剛性 が低下している様子が伺える.一方,図 3.14(b)に示す地盤中央(改良体内部)の加速度応答を見ると,未改良 ケース(Case-01,図中黒線)では加振開始から加速度が徐々に減衰し,地盤が液状化する様子が伺えるが,改 良体を設置したケース(Case-02~Case05)では,加振開始からの減衰はほとんど見られず,改良体が地盤の液 状化を抑制している様子が伺える.



(3) 住宅基礎の沈下量

図 3.15 は,加振から 0.5 秒後までの住宅基礎の沈下量を比較した図である.加振終了直後(約 0.3 秒後)の沈下量は,未改良ケース(Case-01)で約 6.4mm であるのに対し,単純格子ケース(Case-02)およびバットレス格子 改良ケース(Case-03)では約 3.7mm となっており,地盤改良による沈下の抑制効果を確認できる.さらに,蓋付き改良ケース(Case-04, Case-05)では,加振終了直後(0.3 秒後)の沈下量は約 0.5 ~ 0.7mm であり,単純格子 やバットレス格子に比べて,非常に高い沈下抑制効果が見られる.

図 3.16 は、図 3.15 に示した沈下量のグラフの横軸を、加振から 6.0 秒後まで引き延ばすことで、過剰間隙 水圧の消散過程における沈下を比較した図である.この結果を見ると、どのケースも加振開始から約 6.0 秒 程度で 沈下はほぼ収束している 消散過程(0.3 秒~6.0 秒間)の沈下量は、未改良ケース(Case-01)で約 3.4mm,通常格子改良ケース(Case-02)で約 2.0mm,バットレス格子改良ケース(Case-03)で約 1.5mm となっており、1G 場の振動台実験では確認できなかったバットレス形状の沈下抑制効果が確認できる.また、蓋付き改良ケース(Case-04, Case-05)では、過剰間隙水圧の消散過程(0.3 秒~6.0 秒間)における沈下量が共に約 0.2mm となっており、蓋付き格子による非常に高い沈下抑制効果が確認できる.

写真 3.6 は,高速度カメラで撮影した加振前と加振後(経過時間約 6.0 秒)の住宅模型の様子を比較したものである.この写真からも,図 3.16 に示した地盤改良ケースの沈下抑制効果を読み取ることができ,特に蓋付き改良ケース(Case-04, Case-05)では,住宅模型がほとんど沈下していない様子もわかる.表 3.4 に,各実験ケースで計測された住宅基礎沈下量の一覧を示す.











(a) Case-01: 無対策ケース



実スケール (469mm)

(b) Case-02: 単純格子改良ケース(着底)



(c) Case-03: バットレス格子改良ケース(着底)



(d) Case-04: 蓋付き格子改良ケース(着底)



(e) Case-05: 蓋付き格子改良ケース(一部着底) 写真3.6 加振前と加振後における住宅模型の沈下比 実スケール (43mm)

	住宅基礎沈下量 (mm)								
	0.3秒	後(加振直	<b>〔後</b> 〕	6.0秒後(水圧消散後)					
	左側	右側	平均	左側	右側	平均			
Case-01	6.04	6.81	6.42	9.42	10.14	9.78			
Case-02	3.40	4.10	3.75	5.65	6.08	5.86			
Case-03	3.48	4.00	3.74	4.80	5.62	5.21			
Case-04	0.48	0.67	0.58	0.62	0.80	0.71			
Case-05	0.49	0.17	0.33	0.78	0.29	0.53			

表3.4 各実験ケースにおける住宅基礎沈下量の一覧

(4) 実験結果のまとめと考察

遠心載荷実験では,地盤内に設置した間隙水圧計,加速度計,沈下計の計測結果より,地盤改良を考慮したすべてのケース(Case-02~Case-05)で,液状化や沈下に対する抑制効果が確認された.その中でも特に,蓋付き格子ケース(Case-04, Case-05)は表層付近の液状化抑制に高い効果を発揮すると伴に,住宅基礎の沈下に対しても非常に高い抑制効果があることが確認された.また,一部着底型の蓋付き格子ケース(Case-05)は,着底型の蓋付き格子ケース(Case-04)とほぼ同程度の沈下量となっており,住宅基礎の高い沈下量抑制効果を保ちつつ,宅地部分の大幅なコストダウンが可能であることを示唆している.

引用文献

- 3.1) 高橋英紀,山脇秀仁,北詰昌樹,石橋伸司:深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深 度を縮減した新しい格子配置の提案,港湾空港技術研究所報,第45巻第2号,pp.135-167,2006.
- 3.2) 津國正一, 菅野友紀, 森川嘉之, 高橋英樹, 川崎廣貴, 鈴木亘, 徳永幸彦: 浮型格子状改良地盤の液状化 防止効果に関する研究, 第45回地盤工学研究発表会, pp.1531-1532, 2010.
- 3.3) 高橋英樹, 森川嘉之, 福武毅芳, 津國正一, 居場博之, 丸山憲治 : 浮き型形式の格子状固化処理工法に よる岸壁背後地盤の液状化対策に関する遠心模型実験, 第46回地盤工学研究発表会, pp.1581-1582, 2011

4章 3次元有効応力解析による合理的な改良形状の検討(研究開発項目,フェーズ2)

4.1 目的

本章では,図4.1 に示すような様々な改良形状に対して,解析的に改良効果の検証を行うため,3次元有 効応力解析プログラム「FLIP3D<sup>4.1</sup>」を用いて検討する.ただし,FLIP3Dをはじめとした3次元有効応力解 析は実務レベルでの適用実績が少ないことから,まず,3章で実施した遠心載荷実験に対する再現解析を行 い,境界条件等のモデル設定の妥当性を検証する.その上で,具体的な事例として浦安市運動公園の地盤モ デルに対する解析を行い,合理的な改良形状の検討を行うこととする.



図 4.1 改良形状ケース

4.2 液状化対策効果の評価方法

4.2.1 評価指標

地盤の液状化に伴う戸建て住宅の被災程度は,主にその沈下量と住宅の傾斜により評価される.そこで, 本検討においては,液状化対策効果の評価指標として,下記に示す方法により沈下量および住宅の傾斜を評 価する.

4.2.2 最終沈下量の評価方法

FLIP3D は非排水条件を仮定した解析を行うため,液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う沈下や不飽和層の 揺すり込み沈下など,ダイレイタンシーに起因する体積変化を直接計算することができない.そこで,本検 討では以下の手順により最終的な地盤の変形形状を評価する.

STEP FLIP3Dの解析結果として抽出される各要素の最大せん断ひずみから, Ishihara and Yoshimine<sup>4.2)</sup> に よる手法を用いて過剰間隙水圧消散後の体積ひずみを算出.(図 4.2)



図 4.2 最大せん断ひずみと液状化後の消散に伴う体積ひずみの関係

STEP 3 次元 FEM にて強制的に各要素に体積収縮を与え, FLIP3D による加振終了後の変形に足し合わせる.(図 4.3)



図 4.3 3 次元 FEM による体積収縮イメージ

なお,過剰間隙水圧消散に伴う沈下は,住宅のみならず周辺地盤も含めて全体的に生じるため,建物の沈下を定量的に評価する際には,建物部と周辺地盤の相対沈下量として,図4.4 に示す「めり込み沈下量」を用いる.



図 4.4 めり込み沈下量の評価

# 4.2.3 住宅の傾斜の評価方法

東北地方太平洋沖地震の際の被害状況調査の結果,図4.5 に示すようにめり込み沈下量と傾斜の関係が示されている<sup>4.3)</sup>.各地域で住宅密集度などが異なるため,データはかなりバラついているが,めり込み沈下量が大きくなると傾斜量も大きくなる傾向がある.また,住宅が密集して隣接住宅との間隔が狭い千葉市・習志野市の傾斜が大きいことを示している.

本研究では,めり込み沈下量から傾斜を推定に,図4.5の千葉市の相関式(1)を用いることとした.



図 4.5 戸建て住宅のめり込み沈下量と住宅の傾斜の関係<sup>4.3)</sup> (東北地方太平洋沖地震における調査結果)

図 4.6 は,戸建て住宅が単独で存在する場合(a)と2 棟隣接して存在する場合(b)の,傾斜の発生の状況を静的 FEM で自重解析を行い表現したものであり,隣接家屋の存在により傾斜は増大することが解析的にも確認できる.また,この挙動は支持地盤の液状化を伴うような地震時においても同様となることが報告されている<sup>4.4</sup>.



(a) 単独家屋の場合



(b) 2棟隣接する場合

図 4.6 隣接家屋の存在が傾斜に与える影響

本章で実施する3次元有効応力解析は,解析モデルの大きさの制約上,単独の建物をモデル化した解析と なるため,隣接家屋との相互の影響による傾斜の増大といった現象を評価することができない.

一方,図4.6(b)のモデルに格子状改良を模擬した壁体(剛な梁要素)を加えたものが図4.7である.改良壁の存在により,隣接する住宅同士の影響が遮断されることがわかる.



図 4.7 格子状改良による隣接家屋同士の影響遮断効果

以上を踏まえ,本検討においては単独住宅に対する解析を行い,その結果から以下の通り傾斜の評価を行う こととした.

- 無対策ケース
  4.2.2の方法で解析的に評価しためり込み沈下量から,図4.5の関係(千葉市相 関式(1))を用いて概略的に傾斜を評価する.(隣接家屋の存在による傾斜の増 大を考慮し,被災事例を基に幅を持たせて評価)
- 対策実施ケース 解析により得られる建物の傾斜をそのまま評価する. (隣接家屋の影響は遮断されるため,単独家屋相当として傾斜を評価)

4.3 遠心載荷実験の再現による解析モデルの妥当性の検討

4.3.1 はじめに

本章では,3次元有効応力解析プログラム「FLIP3D<sup>4.1)</sup>」を用い,合理的な改良形状について解析的に検討 する.ただし,FLIP3D をはじめとした3次元有効力解析は実務レベルでの適用実績が少ないことから,ま ず,3章で実施した遠心載荷実験に対する再現解析を行い,境界条件等のモデル設定の妥当性を検証する.

FLIP (Finite element analysis program for Liquefaction Process)は,1988年に運輸省港湾技術研究所において 開発された,地盤 - 流体 構造物の連成系を対象とした,有効応力法に基づく2次元動的有効応力解析プロ グラムである.開発以来,港湾施設の解析を中心に使用されてきており<sup>4.5),4.6)</sup>,各種の有効応力モデルを用い た「液状化に関する一斉計算」<sup>4.7)</sup>において,FLIP は液状化がかなり進行してひずみが10<sup>-2</sup>オーダーのレベル になるまで安定してシミュレーションできることが確認されている.

FLIP3Dは2次元FLIPを3次元に拡張したものであり、土のせん断応力~せん断ひずみの非線形関係を3次元に拡張された多重せん断ばねモデル<sup>4.1,4.8</sup>(図4.8)で表現し、過剰間隙水圧モデルとしては井合のモデル<sup>4.9</sup>(図4.9)が採用されている.なお、多重せん断ばねモデルは、土の履歴減衰の大きさが調節可能なように、各ばねに適用する Masing 則を修正している<sup>4.10,4.11,4.12</sup>.また、変位~ひずみ関係には微小ひずみ理論を用い、さらに、土の間隙水には非排水条件を課している.







図 4.9 過剰間隙水圧モデルの概念図 4.7)

4.3.2 解析条件

(1) 解析モデル

図 4.10 に,解析に用いたメッシュ図を示す.ここでは,奥行き方向の対称性を考慮して 1/2 モデルとして いる.遠心載荷実験は 80G 場における実験であることから,実験で使用した土槽モデルを 80 倍に拡大した 解析モデルを用いる.

境界条件は,遠心載荷実験が剛性土槽を用いていることから,底面と側面を剛基盤として入力地震動を与え,前面と背面をローラー固定とする.



図 4.10 解析モデル(単純格子の場合)

## (2) 入力地震動

入力地震動は,遠心載荷実験の振動台に設置した加速度計で計測された各ケースごとの波形を実スケール に換算して使用する.図4.11 は遠心載荷実験の計測された応答加速度であるが,遠心載荷実験が80G場(1/80 スケール)で,実スケールの入力地震動(1Hz,160gal,15波(内陸直下型地震相当))を相似則より80Hz, 12800gal(約13G)と設定)でおこなっているため,計測された加速度を1/80倍して使用する.



図 4.11 遠心載荷実験計測された加速度

- (3) 材料パラメータ
- 1) 地盤材料

解析に用いた液状化層(豊浦標準砂)の材料パラメータは,無対策ケース(Case-01)に対して逆解析を実施することで同定した.表4.1 に,逆解析により同定した液状化層の材料パラメータを示す.

				不飽和層	液状化層	基盤層
湿潤密度	:	$\rho_{t}$	t/m <sup>3</sup>	1.91	1.91	1.91
基準せん断弾性係数	:	$G_{\rm ma}$	MPa	52.29	52.29	126.22
ポアソン比	1	v		0.33	0.33	0.33
粘着力		С	kPa	0.0	0.0	0.0
内部摩擦角	:	$\varphi$	deg.	38.30	38.30	41.20
細粒分含有率	:	$F_{c}$	%	10.0	10.0	10.0
履歴減衰の上限値	1	$h_{\rm max}$		0.24	0.24	0.24
変相角	:	$\varphi_{\rm p}$	deg.	12	28.0	
液状化特性全体の規定パラメータ	2	W1		-	6.057	
液状化特性前半の規定パラメータ	1	<i>P</i> 1		T.	0.500	20
液状化特性後半の規定パラメータ	1	P 2		-	1.025	-
液状化発生の下限値規定パラメータ	':	C1		-	1.600	-
液状化終局状態の規定パラメータ	:	<i>S</i> 1		-	0.005	-

表 4.1 遠心振動台実験の再現解析に用いる地盤物性値

2) 改良体

格子改良体の物性値については,遠心載荷実験では改良体をアクリルで作製していることから,改良体の 材料パラメータについては表 4.2 に示すアクリルの剛性を用いる.

表 4.2 遠心振動台実験の再現解析に用いる改良体物性値

		改良体
湿潤密度	: $\rho_{\rm t}$ t/m <sup>3</sup>	1.84
変形係数	: E MPa	3000.0
ポアソン比	: v	0.38

3) 住宅

住宅部分のモデル化については,ベた基礎寸法9.6m×9.6m,高さ5.0mとし,接地圧が15kPaとなるよう に単位体積重量を設定した剛な線形要素とする. 4.3.3 解析ケース

解析ケースは,遠心載荷実験を再現する目的から,表4.3に示す5ケースについて検討を行う.



表 4.3 遠心振動台実験の再現解析ケース

# 4.3.4 解析結果

CASE-01 から CASE-05 までの解析結果として,過剰間隙水圧比分布+変形図(加振終了時),過剰間隙水 圧消散に伴う体積収縮ひずみ分布+変形図(水圧消散後),遠心載荷実験における各計測点位置における過剰 間隙水圧時刻歴,応答加速度時刻歴を,次頁以降の図4.12~図4.16 にそれぞれ示す.これらのコンター図で は,沈下傾向を比較するため変形量を10倍し表示している.なお,実験結果のデータについては,いずれも 相似則により実スケールに補正している.



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 变形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



(c) 地盤中央(改良体内部)における過剰間隙水圧比時刻歴の比較



図 4.12 遠心載荷実験の再現解析結果 (CASE-01:無対策)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)







図 4.13 遠心載荷実験の再現解析結果 (CASE-02:単純格子)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 变形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



(c) 地盤中央(改良体内部)における過剰間隙水圧比時刻歴の比較



図 4.14 遠心載荷実験の再現解析結果 (CASE-03:バットレス格子 着底型)

## CASE-04:蓋付き格子(着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



(c) 地盤中央(改良体内部)における過剰間隙水圧比時刻歴の比較



図 4.15 遠心載荷実験の再現解析結果 (CASE-04:蓋付き格子 着底型)

## CASE-05:蓋付き格子(一部着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 变形図(加振終了時)

(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)







図 4.16 遠心載荷実験の再現解析結果 (CASE-05:蓋付き格子 一部着底型)

### (1) 過剰間隙水圧比の比較

各ケースにおける過剰間隙水圧比の分布を見ると,無対策ケース(CASE-01)と比べ,改良体を考慮した ケース(CASE-02~CASE-05)では格子内部の液状化が抑制されている.特に蓋付き改良ケース(CASE-04, CASE-05)では,表層付近の過剰間隙水圧が大幅に抑制されており,解析結果からも蓋付き格子の高い対策 効果が確認できる.

過剰間隙水圧比の時刻歴について実験結果と解析結果を比較すると,地盤表層(GL-1.6m,遠心載荷実験ではGL-20mm)では実験結果が不飽和層の影響を受けているため,解析結果とあまり一致していないが, その他の深度の解析結果については,実験結果で見られる過剰間隙水圧の増加傾向等を概ね再現できていると考えられる.

図 4.17 は,加振直後(経過時間約 20 秒)における過剰間隙水圧比を比較したグラフである.図 4.17 に示 す地盤中央(改良体内部)の G.L.-5.6m(遠心載荷実験では G.L.-70mm)位置における蓋付き改良ケース (CASE-04,CASE-05)の解析結果を見ると,実験結果による液状化抑制効果を過大評価する傾向にあるが, その他の位置については実験結果を概ね再現できていると考えられる.



(a) 地盤外側(格子改良外部)

(b) 地盤中央(格子改良内部)



### (2) 地盤内応答加速度の比較

図 4.12~図 4.16 に示す,各ケースにおける加速度応答時刻歴について実験結果と解析結果を比較すると, 地盤外側(改良体外部)では加振開始から徐々に減衰し地盤が液状化する実験結果の傾向を再現できている ことがわかる.また,地盤中央(改良体内部)の改良体を考慮したケース(CASE-02~CASE-05)の解析結 果では加振開始からの減衰は見られず,改良体が地盤の液状化を抑制する実験結果の傾向をほぼ再現できて おり,FLIP3D による解析が妥当な結果を与えることが確認できる.

# (3) 住宅基礎沈下量の比較

図 4.12~図 4.16 に示す,各ケースにおける過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみ分布を見ると,未改良ケース(Case-01)では体積ひずみが大きく発生し,住宅基礎が地盤にめり込む様に沈下している.これに対して 改良体を考慮したケース(Case-02~Case-05)では,格子内部の液状化が抑制され,住宅基礎の沈下量も低減している.特に,蓋付き改良ケース(Case-04, Case-05)では,住宅基礎よりも改良体周辺の地盤の方が 大きく沈下しており,これは遠心載荷実験の傾向とも一致している(写真 3.6 参照).

表 4.4 に住宅基礎沈下量の実験結果と解析結果の一覧を示すが、この結果を見ると、FLIP3D による加振直 後の補正前沈下量の解析結果は、遠心載荷実験で計測された沈下量よりもかなり小さい値となっている.こ れは、FLIP-3D による解析が地盤要素に関して非排水条件を仮定しているため、加振中に不飽和層へ間隙水 が浸透することで地下水位が上昇し(写真 3.6(a)参照)、大きな沈下量が発生する遠心載荷実験の傾向を再現 できないためだと考えられる.そこで、遠心載荷実験における加振直後の地下水位の上昇量から、不飽和層 に浸透した間隙水量を算定し、この値を用いて解析結果の補正を行った.高速度カメラで撮影した画像によ ると、加振直後の地下水位の上昇量は未改良ケース(CASE-01)で約 10mm、通常格子改良ケースおよびバ ットレス格子改良ケース(CASE-02、CASE-03)で約 5mm、蓋付き格子改良ケース(CASE-04、CASE-05) では加振直後の地下水位の上昇はほとんど生じていない.不飽和層に浸透した間隙水量と等価な沈下量が発 生したと仮定すると不飽和層の相対密度が 40%(間隙比 0.854)であることから、補正値は CASE-01 で 4.7mm (実スケールで 376mm)、CASE-02 および CASE-03 で 2.35mm(実スケールで 188mm)となる.図 4.18 は、 過剰間隙水圧消散後の住宅基礎沈下量について、補正後の解析結果と実験結果を比較したグラフである、補 正後の解析結果は実験結果とほぼ一致していることから、加振初期の沈下量を上記のように扱うことで、沈 下量に関しても遠心載荷実験結果を十分に再現可能であると評価できる.

	住宅基礎沈下量 (mm)						
	実験結果	(平均值)	解析結果 (基礎中央)				
	加垢古公	水口消费浴	加振直後			水工造费公	
	加加区包发	小工作取饭	補正前	補正後		小工作取饭	
Case-01	514	782	113	489	[376]	757	
Case-02	300	469	42	230	[188]	472	
Case-03	299	417	25	213	[188]	394	
Case-04	46	57	4	4	[-]	98	
Case-05	26	43	5	5	[-]	111	
					*	[]内は補正値	

表 4.4 住宅基礎沈下量の実験結果と解析結果の一覧



## (4) 住宅の傾斜の比較

図 4.19 は過剰間隙水圧消散後の住宅の傾斜の比較であるが,傾斜についてはいずれのケースにおいても解析結果は実験結果より小さい傾斜となっている.これは,遠心載荷実験では相似則により変位スケールを 80 倍して実スケール評価するため,模型地盤の不均質性や住宅モデルの非対称性により生じる少しの不等沈下が大きな傾斜量として評価されるのに対し,解析では均質な地盤要素と偏心のない形状の住宅モデルを用いていることから,両者に大きな差異が表れたものと考えられる.この結果によれば,FLIP3D による均質な地盤モデルに対する解析では,住宅の傾斜量に関する定量的な評価は難しいものと思われる.



図 4.19 住宅の傾斜の比較(解析結果補正後)

4.4 浦安市をモデルとした3次元有効応力解析による合理的な改良形状の検討

4.4.1 はじめに

ここでは、遠心載荷実験の再現解析により妥当性を検証した解析モデル設定の考え方を適用し、具体的な 事例として浦安市運動公園の地盤モデルに対する解析を行い、合理的な改良形状の検討を行う、今回提案す る合理的な改良形状を造成するマルチジェット工法の実証実験工事を浦安市運動公園で実施しており、その 実験的アプローチとリンクさせるために同地点の地盤モデルを採用するものである、浦安市運動公園の位置 図を図 4.20 に示す.



出典:電子国土 Web システム技術情報 図 4.20 浦安市運動公園位置図

4.4.2 目標性能

2 章において述べた通り,戸建て住宅の液状化対策に関する設計用地震動や目標性能については,現在, 各機関にて検討されている状況にあり,一義的に定められていない.そこで,本検討においては2章に示し た浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会の設定を参考に,表 4.5 に示す2つのレベルの地震動を検討 対象とする.また,それぞれの地震動に対する目標性能として,表 4.5 および図 4.21 に示すように,中地震 動に対する住宅の傾斜について制限値を設定する.

表 4.5	本検討におい	て設定する	5目標性能
-------	--------	-------	-------

区分	検討用地震動	目標性能	制限值
中規模地震(200gal(M9.0)) (震度 5 強相当)	東北地方太平洋沖地震 (夢の島観測波)	宅地の機能に重大な 支障が生じない	宅地基礎の傾斜 < 6/1000 (一部損壊の目安 )
大規模地震(350gal(M7.3)) (震度6強相当)	東京湾北部地震 (千葉県想定波)	人命および宅地の存続に 重大な影響を与えない	(本検討では設定せず 被害程度の確認を実施)

浦安市では,内閣府の「災害に係る住家の被害認定基準運用指針」にもとづき,住宅の傾斜による被害程度の判定基準を上記の通りとしている.一部損壊については明確に数値を規定するものではないが,ここでは住宅の傾斜による健康被害が現れる目安として 6/1000 と設定した.



図 4.21 傾斜による被害程度の判定基準(浦安市 HPより)

4.4.3 解析条件

(1) 解析モデル

図 4.22 に,解析に用いたメッシュ図を示す.ここでは,奥行き方向の対称性を考慮して 1/2 モデルとし, 住宅部分を含む不規則領域(幅 60m)の両側と,無限遠方地盤を模擬した自由地盤モデルとをダッシュポッ ドを介して接続する.その他の境界条件は,手前・奥(Y方向)の面をローラー固定とし,地震動は底面粘 性境界から入力する.初期応力解析では,地盤~格子間は2重節点により鉛直スライドさせ,局所的な応力 の発生を防止する.

住宅のモデル化は,浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会における設定を参考に,図4.23 に示すように標準的な住宅を1質点モデルに置き換えて評価する.



## 図 4.22 解析モデル(単純格子の場合)



図 4.23 住宅モデル

(2) 地盤モデル

地盤モデルは、「運動公園陸上競技場建設に伴う地質調査業務委託報告書H23年3月(浦安市)」を基に GL-25m以浅をモデル化する(図4.24).

このうち液状化の可能性がある土層は,砂質埋立て土層(Bs 層:GL-1.7m~9.5m)および沖積砂層(As1 層:GL-9.5m~11.8m)であり,これらの層については,解析において液状化を考慮する.



図 4.24 地盤モデルの設定

- (3) 材料パラメータ
- 1) 地盤材料

地盤材料のパラメータは、「運動公園陸上競技場建設に伴う地質調査業務委託報告書H23年3月(浦安市)」を基に、FLIPの簡易設定法<sup>4,11)</sup>を用いて表4.6の通り設定する.

							土層			
				В	B <sub>s</sub> 1	Bc	B <sub>s</sub> 2	A <sub>s</sub> 1	A <sub>c</sub> 1	A <sub>c</sub> 2
湿潤密度	:	ρ	t/m <sup>3</sup>	1.90	1.89	1.90	1.89	1.93	1.78	1.58
規準せん断弾性係数	:	$G_{\mathrm{ma}}$	Mpa	177.53	56.45	8.30	69.32	77.15	20.09	24.58
ポアソン比	:	v		0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
粘着力	:	С	kPa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
内部摩擦角	:	φ	deg.	42.90	38.50	30.00	39.10	39.40	30.00	30.00
_ 細粒分含有率	:	Fc	%	5.4	5.4	5.4	5.4	21.9	93.6	93.60
履歴減衰の上限値	:	$h_{\rm max}$		0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
変相角	:	$\varphi_{\rm p}$	deg.	-	28.0	-	28.0	28.0	-	-
液状化特性全体の規定パラメータ	:	W1		-	0.005	-	0.005	0.005	-	-
液状化特性前半の規定パラメータ	:	P 1		-	1.95	-	2.77	13.65	-	-
液状化特性後半の規定パラメータ	:	P 2		-	0.5	-	0.5	0.5	-	-
液状化発生の下限値規定パラメータ	:	<i>C</i> 1		-	1.103	-	1.06	0.903	-	-
液状化終局状態の規定パラメータ	:	<i>S</i> 1		-	1.6	-	1.6	1.3	-	-

表 4.6 浦安市運動公園モデルの解析に用いる地盤物性値

2) 改良体

改良体は設計一軸圧縮強度 qu = 3.0MPa とし,高圧噴射撹拌工法による地盤改良体の一般的な物性値として表 4.7 の通り設定する.

表4.7 浦安市運動公園モデルの解析に用いる改良体物性値

				改良体
湿潤密度	:	ρ	t/m <sup>3</sup>	1.84
变形係数	:	Ε	Mpa	2100.0
ポアソン比	:	v		0.26

3) 住宅

住宅は浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会における設定を参考に,図4.16に示すように標準的な 住宅を1質点モデルに置き換え,表4.8に示す物性値を設定する.

		改良体
断面2次モーメント	$: I m^3$	9.17E-01
変形係数	: E Mpa	2.50E+06
断面積	: $A m^2$	11.0
質量	: <i>m</i> t	23.9
固有周期	: f Hz	6.00

表 4.8 浦安市運動公園モデルの解析に用いる住宅物性値

(4) 入力地震動

入力地震動は,以下に示す中地震動および大地震動を用いて引き上げ解析を行い解析用地震動とした.

1) 中地震動 (200gal(M9.0)) (東北地方太平洋沖地震観測波)

住宅の供用期間中に1~2回程度発生する確率を持つ一般的な地震として、東京都夢の島地震観測所で計測 された東北地方太平洋沖地震時の加速度を工学基盤に引き戻した加速度波形(図4.25)を用いる.余震の影響については,ここでは考慮しない.



図 4.25 中地震動 (200gal(M9.0)) (東北地方太平洋沖地震観測波)
2) 大地震動 (350gal(M7.3)) (東京湾北部地震 浦安新庁舎メッシュにおける想定波)

発生確率は低いが,直下型または海溝型巨大地震に起因するさらに高いレベルの地震として,東京湾北部 地震(内陸直下型地震,350gal,M7.3)の浦安新庁舎に該当するメッシュにおける工学基盤の2E波(図4.26) を採用する.



図 4.26 大地震動 (350gal(M7.3)) (東京湾北部地震想定波)

(5) 解析ケース

解析ケースは,表4.9に示す5ケースについて検討を行う.

表 4.9 検討ケース

CASE-01 無対策	CASE-02 単純格子 (着底型)	CASE-03 蓋付き格子 (着底型)	CASE-04 単純格子 (一部着底型)	CASE-05 蓋付き格子 (一部着底型)
			0 13 13 13 13 13 13 13 13 13 13	3m 13m 3m 13m 13m 13m 13m 13m 13

4.4.4 解析結果

- (1) 建物の沈下および傾斜
- 1) 解析結果

建物の沈下量および傾斜に関する CASE-01 から CASE-05 までの解析結果として,過剰間隙水圧比分布+ 変形図(加振終了時),過剰間隙水圧消散に伴う体積収縮ひずみ分布+変形図(水圧消散後),地盤内の過剰 間隙水圧時刻歴,住宅の鉛直変位時刻歴,最終沈下量および傾斜の値を,次頁以降の図 4.27~図 4.31(中地 震動),図 4.32~図 4.36(大地震動)にそれぞれ示す.なお,これらのコンター図では,沈下傾向を比較す るため変形量を 10 倍し表示している.



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.27 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-01:無対策)





(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.28 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-02:単純格子 着底型)

中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-03:蓋付き格子(着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)





中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-04: 単純格子(一部着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.30 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-04:単純格子 一部着底型)

中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-05:蓋付き格子(一部着底型)





(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時) (b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



(c) 住宅の鉛直変位時刻歴

経過時間(sec.)

図 4.31 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-05:蓋付き格子 一部着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.32 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-01:無対策) 大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-02: 単純格子(着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.33 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-02:単純格子 着底型)

大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-03:蓋付き格子(着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.34 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動 (350gal(M7.3)) - CASE-03:蓋付き格子 着底型)

大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-04: 単純格子(一部着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.35 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-04:単純格子 一部着底型)

大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-05:蓋付き格子(一部着底型)



(a) 過剰間隙水圧比分布 + 変形図(加振終了時)



(b) 体積収縮ひずみ分布 + 変形図(過剰間隙水圧消散後)



図 4.36 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-05:蓋付き格子 一部着底型)

2) 考察

図 4.27~図 4.31 に示す中地震動に対する各ケースの過剰間隙水圧比分布を見ると 無対策ケース(CASE-01) では完全に液状化しているのに対し,一部着底型の単純格子ケース(CASE-04)を除くケース(CASE-02, CASE-03, CASE-05)では改良体内部の過剰間隙水圧上昇が抑制され,格子改良の液状化対策効果が確認できる.一部着底型の単純格子ケース(CASE-04)でも格子内部の間隙水圧上昇速度は抑制されており,一定の効果は得られていることがわかる 図 4.32~図 4.36 に示す大地震動に対しては 単純格子ケース(CASE-02, CASE-04)では格子外部と同程度まで間隙水圧が上昇してしまう一方,蓋付き格子ケース(CASE-03, CASE-05)では表層付近において間隙水圧の上昇が抑制されている.

図 4.37 は各ケースの加振終了時刻における過剰間隙水圧比の比較であるが,この図からも特に蓋付き格子 ケースの高い液状化抑制効果が確認できる.





図 4.38 は各ケースの最終沈下量の比較であるが,中地震動においては,無対策ケース(CASE-01)において 10cm を超える沈下が生じるのに対し,格子改良を考慮したケース(CASE-02~CASE-05)ではいずれもその半分以下となっている.特に蓋付き格子ケース(CASE-03,CASE-05)ではいずれも高い沈下抑制効果を 発揮し,5cm 以下の沈下にとどまる結果となった.大地震動においては,いずれのケースも中地震動の倍程度の沈下量が生じるが,やはり蓋付き格子ケース(CASE-03,CASE-05)の沈下抑制効果が高く,いずれも 10cm 以下の沈下量となっている.ただし,格子の一部を浮かせたケース(CASE-04,CASE-05)では,蓋付 き格子であっても壁を浮かせた箇所において比較的大きなせん断ひずみが生じており,着底型に対して沈下 量が大きくなっている.



(a) 中地震動 (200gal(M9.0))





表 4.10 は各ケースにおける住宅の傾斜を比較したものである.ここで,住宅の傾斜については,前述の通 り,無対策ケース(CASE-01)についてはめり込み沈下量から図 4.5 を用いて傾斜を想定し,その他の格子 改良ケース(CASE-02~CASE-05)については FLIP3D による解析結果からそのまま傾斜を算定している. その結果,無対策ケースでは中地震動で最大 15/1000,大地震動で最大 30/1000 と想定されるのに対し,格子 改良ケースでは中地震動,大地震動いずれにおいても 1/1000 以下と,非常に小さな傾斜となった.これは前 述の通り,FLIP3D による解析では均質な地盤要素と偏芯のない形状の住宅モデルを用いていることから, これらの不均質性や非対称性に伴う傾斜を評価できないことによる.そのため,住宅の傾斜に関しては比較 的危険側の検討となっている.本検討においては中地震動に対する格子改良ケース(CASE-02~CASE-05) の沈下量が 60mm 以下であり,格子により隣家の影響が遮断されることを加味して図 4.5 の相関の下限値ラ インを用いて傾斜を算定したとしても,おおむね傾斜は 6/1000 以下となり目標性能を満足する結果となる.

	Case-01	Case-02	Case-03	Case-04	Case-05	
	無対策	単純格子	蓋付き格子	単純格子	蓋付き格子	
		(着底型)	(着底型)	(一部着底型)	(一部着底型)	
中地震動	最大 15.0/1000	0.7/1000	0.8/1000	0.9/1000	1.0/1000	
大地震動	最大 30.0/1000	0.7/1000	0.8/1000	0.7/1000	0.8/1000	

表 4.10 住宅の最終傾斜の比較

(2) 改良体の内的安定に関する考察

#### 1) 解析結果

表 4.11 に改良体の内的安定に関する許容値を示す.改良体の内的安定に関する CASE-01 から CASE-05 ま での解析結果として,改良体の最大せん断応力度および最大圧縮・引張応力度の分布図を,次頁以降の図 4.39 ~ 図 4.42 (中地震動),図 4.43 ~ 図 4.46 (大地震動)にそれぞれ示す.

	せん断に関して	引張に関して
中地震動	短期許容せん断応力度	短期許容引張応力度
( 200gal(M9.0) )	<sub>a</sub> =750 ( kN/m <sup>2</sup> )以下	<sub>ta</sub> =225 ( kN/m <sup>2</sup> )以下
大地震動	破壊ひずみ	引張強度
(350gal(M7.3))	f=0.5%以下	<sub>tu</sub> =450 ( kN/m <sup>2</sup> )以下
備考	短期許容せん断応力度 a:深層混合処理工法設 エマニュアル <sup>4.13)</sup> を参考に, a=1/2 ca( ca=quo quck=3,000kN/m <sup>2</sup> , Fs=2.0)とした. 短期許容引張応力度 ta:深層混合処理工法設計 マニュアル <sup>4.13)</sup> を参考に, ta=0.15 ca( ca=quo quck=3,000kN/m <sup>2</sup> , Fs=2.0)とした. 破壊ひずみ f:右図に示す北詰の報告 <sup>4.14)</sup> とマ ェット工法実績より設定した. 引張強度 tu,深層混合処理工法設計・施工マニ <sup>4.13)</sup> を参考に, tu=0.15quck(quck=3,000kN/m <sup>2</sup> )とし	計・施 (室内配合供試体) * マルチジェット工法実績 (現場コア試料) *・施工 30 ルチジ シント施工 コアル た. 図 セメント改良地盤の 一軸圧縮強さと破壊ひずみ <sup>4.14</sup>

表4.11 改良体の内的安定に関する許容値



(a) せん断応力度 xz (kN/m²)

短期許容せん断応力度



短期許容せん断応力度

(b) せん断応力度 xy (kN/m²)

短期許容引張応力度



短期許容圧縮応力度

(c) 引張応力度 z (kN/m<sup>2</sup>) 短期許容引張応力度 for a = 225 for a = 225 for a = -1500 定a = -1500 短期許容圧縮応力度

(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.39 浦安市運動公園モデルにおける現解析結果 (中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-02:単純格子 着底型)



(a) せん断応力度 xz (kN/m²)

短期許容せん断応力度



短期許容せん断応力度



短期許容引張応力度



短期許容圧縮応力度



(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.40 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-03:蓋付き格子 着底型)



短期許容せん断応力度

(a) せん断応力度 xz (kN/m²)

短期許容せん断応力度



短期許容せん断応力度



短期許容引張応力度



短期許容圧縮応力度



(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.41 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (中地震動(200gal(M9.0)) - CASE-04:単純格子 一部着底型)





(a) せん断応力度 xz (kN/m²)

短期許容せん断応力度



短期許容せん断応力度



短期許容引張応力度



短期許容圧縮応力度



(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.42 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (中地震動 (200gal(M9.0)) - CASE-05:蓋付き格子 一部着底型)



(a) せん断応力度 xz (kN/m<sup>2</sup>)









圧縮強度

(c) 引張応力度 z (kN/m<sup>2</sup>) 引張強度 function fun

(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.43 浦安市運動公園モデルにおける現解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-02:単純格子 着底型)



(a) せん断応力度 xz (kN/m<sup>2</sup>)











圧縮強度

(c) 引張応力度 z (kN/m<sup>2</sup>) 引張強度 otu=450



(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.44 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-03:蓋付き格子 着底型)















(c) 引張応力度 z (kN/m<sup>2</sup>) 引張強度 のtu=450 マtu=450 マtu=3000

圧縮強度

(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.45 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-04:単純格子 一部着底型)



(a) せん断応力度 xz (kN/m<sup>2</sup>)











(d) 引張応力度 y (kN/m<sup>2</sup>)

図 4.46 浦安市運動公園モデルにおける解析結果 (大地震動(350gal(M7.3)) - CASE-05:蓋付き格子 一部着底型)

# 2) 考察

改良体の内的安定に関して,各地震レベルに対する結果を表 4.12 に,考察を以下に示す.

	せん断応力	引張応力
	単純格子 , 蓋付き格子ともに許容値(短	単純格子の場合 , 一部許容値(短期許容
山地電動	期許容応力度)以下である.改良体上部の	引張強度)を超える箇所が局所的に発生
中地辰勤 (2001/040-0))	隅角部に応力が集中する傾向があるが,	する.蓋付き格子の場合,単純格子と同
(200gai(M9.0))	蓋付き格子は単純格子に対して応力を分	様に,許容値を超える箇所が局所的に発
	散している.	生するが単純格子よりも範囲は少ない.
	単純格子 , 蓋付き格子ともに許容値(せ	単純格子の場合 , 許容値(引張強度)を
十世會動	ん断強度)以下である . 中地震動と同様に	超える箇所が局所的に発生する.蓋付き
入地展到 (350gal(M7.3))	改良体上部の隅角部に応力が集中する傾	格子の場合,単純格子と同様に,一部許
	向があるが,蓋付き格子は単純格子に対	容値を超える箇所が局所的に発生するが
	して応力を分散している.	単純格子よりも範囲は少ない

	表4.12	各地震レベルに	対する改良	体の内的安定編	課と考	察
--	-------	---------	-------	---------	-----	---

・改良体の引張応力に関して

局所的・部分的に基準値を超える箇所が発生する.しかし,応力の許容値超過は改良体表面で発生してお り,部材の全断面に至っていない.つまり,構造的に機能を阻害する「貫通クラック」は発生しないと考えら れ,問題ないと考えられる(図 4.47).



4.5 まとめ

- 4.5.1 遠心載荷実験の再現による解析モデルの妥当性の検討
- ・ 遠心載荷実験の再現は,過剰間隙水圧の消散を考慮した最終沈下量で再現できることを確認した.
- ・ 住宅の傾斜を比較した場合,解析結果がすべてのケースで小さい値となった.これは 1/80 スケールの遠 心載荷実験の測定誤差に起因すると推定される.
- 4.5.2 浦安市をモデルとした3次元有効応力解析による合理的な改良形状の検討
- (1) 建物の沈下および傾斜
- ・ 中地震動では,単純格子(着底型,一部着底型)と蓋付き格子(着底型,一部着底型)で液状化対策効 果を期待できる.また,蓋付き格子(着底型,一部着底型)は 13m×13m の格子ピッチをさらに拡大 できる可能性を示した.
- 大地震動では,蓋付き格子(着底型,一部着底型)で上層付近の過剰間隙水圧上昇を抑制し,液状化対策効果を期待できる.
- (2) 改良体の内的安定
- せん断応力については、中地震動・大地震動ともに許容値を満足する結果である。
- 引張応力については、局所的・部分的に許容値を超える箇所が発生する.しかし、応力の許容値超過は 改良体表面で発生しており、部材の全断面に至っていない.つまり、構造的に機能を阻害する「貫通クラ ック」は発生しないと考えられ、問題ないと考えられる
  (引張応力について、このような部分的な領域を一切許容しない設計は合理性に欠けると考えられる.
  例えば、部材断面方向の部分的な引張破壊は許容するが貫通クラックは発生させないなど、適切な判断 基準を設定した上で、引張応力の健全性も評価することが望ましい.)
- ・ 改良形状について,蓋付き格子は単純格子よりも応力が分散する効果が確認された.

4.6 引用文献

- 4.1) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
- 4.2) Ishihrara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of settlementsin sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992
- 4.3) 浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究:(社)地盤工学会, pp192-211, 2012
- 4.4) 安田進, 深谷成司: 隣接した直接基礎構造物の液状化による不同沈下について, 第 28 回土木学会地震工 学研究発表会, No.199, 2006.
- 4.5) Iai,S. and Kameoka,T.: Finite element analysis of earthquake induced damage to anchored sheet pile quay walls, Soils and Foundations, Vol.33, No.1, pp.71-91, 1993.
- 4.6) 井合進, 一井康二, 森田年一: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その7)ケーソン式岸壁の有 効応力解析, 港湾技研資料, No.813, pp.253-279, 1995b.
- 4.7) 井合進他: 液状化に関する一斉解析, 地盤の液状化対策に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.77-190, 1992.
- 4.8) Iai S., Ozutsumi O.: Yield and cyclic behavior of a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. ,29, pp.417-442.
- 4.9) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.
- 4.10) Ishihara,K., Yoshida,N. and Tsujino,S.: Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, Proc. of 5th International Conf. on Num. Methods in Geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp. 373-380, 1985.
- 4.11) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T.: Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model, Rep. of the Port and Harbour Res. Inst. Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990.
- 4.12) Ozutsumi,O. and Iai,S.: Adjustment Method of the Hysteresis Damping for Multiple Shear Spring Model, Proc. of 4th International Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Eng. and Soil Dynamics, 2001.
- 4.13) 陸上工事における深層混合処理工法 設計・施工マニュアル改訂版 (財)土木研究センター, pp73-74, 平成 16 年 3 月
- 4.14) 北詰昌樹: 深層混合処理工法における改良地盤の安定性に関する研究, 港湾技研資料 No.774, p7, 1994

5章 3次元的挙動を考慮した2次元有効応力解析モデルの検討(研究開発項目 ,フェーズ3)

5.1 目的

既設宅地に格子状改良を適用する場合には 10m 以上の大きな格子スパンが必要となるため,地震時には加 振方向と直交する壁のたわみ変形が卓越する.従来,格子状改良の液状化対策効果の評価は,二重要素モデ ル<sup>5.1)</sup>を用いた2次元有効応力解析による疑似3次元的な検討が行われてきたが,それらは比較的小スパンの 格子形状を対象としており,加振直交壁のたわみ変形は考慮できないことから,既設宅地における大スパン の格子改良に対しては危険側の解析結果を与える可能性がある.そのため10mを超えるような大スパンの格 子改良の液状化対策効果を評価するにあたっては,3次元有効応力解析を用いる必要がある.

しかし,3次元有効応力解析による解析は非常に時間とコストがかかるため,概略検討段階において液状 化対策の仕様を迅速に設定するには,2次元有効応力解析による解析が必要とされる.本章では4章で検討 した3次元解析モデル(遠心振動台実験の再現性検証済み)について,2次元解析モデルとの比較検討を行い, 実際の3次元的挙動を再現可能な2次元解析モデルのモデル化手法を検討した.

5.2 従来のモデル化手法(二重要素モデル)による2次元解析モデルと3次元解析モデルの結果対比

5.2.1 解析条件

解析コードは FLIP3D(3 次元有効応力解析)と FLIP2D(2 次元有効応力解析)を使用する.

(1) 解析モデル

図 5.1 に 3 次元解析モデルを,図 5.2 に 2 次元解析モデルを示す.3 次元解析モデルは遠心載荷実験の再現 解析に用いたモデルであり,実データとの対比により妥当性を検証済みである.なお,2 次元解析モデルでの格子状改良の擬似 3 次元的なモデル化,一般的に用いられるモデル化手法である二重要素モデル<sup>5.1)</sup>を用いた.



図5.1 3次元解析モデル(遠心載荷実験再現モデル,単純格子の場合)



図5.2 2次元解析モデル(遠心載荷実験再現モデル,単純格子の場合)



図5.3 2次元解析モデルにおける格子状改良地盤のモデル化(二重要素)

(2) 入力地震動

遠心載荷実験は 80G 場における実験であることから,入力地震動は,3章 3.3 の遠心載荷実験において用 いた各ケース毎の波形を 1/80 に換算して使用する(概ね 150Gal,1Hz の正弦波).図 5.4 に遠心載荷実験時の 入力地震動を示す.(実際はこれを 1/80 に換算して入力する.)



## (3) 地盤物性値

表 5.1 に解析に用いる地盤物性値を示す.

				不飽和層	液状化層	基盤層
湿潤密度	:	$\rho_{\rm t}$	t/m <sup>3</sup>	1.91	1.91	1.91
基準せん断弾性係数	:	$G_{\rm ma}$	MPa	52.29	52.29	126.22
ポアソン比	:	v		0.33	0.33	0.33
粘着力		С	kPa	0.0	0.0	0.0
内部摩擦角	:	$\varphi$	deg.	38.30	38.30	41.20
細粒分含有率	:	$F_{c}$	%	10.0	10.0	10.0
履歴減衰の上限値	:	$h_{\rm max}$		0.24	0.24	0.24
変相角	:	$\varphi_{\rm p}$	deg.		28.0	-
液状化特性全体の規定パラメータ		W1		-	6.057	-
液状化特性前半の規定パラメータ	1	<i>P</i> 1		-	0.500	<u>22</u> 3
液状化特性後半の規定パラメータ	:	P 2			1.025	
液状化発生の下限値規定パラメータ	:	C1		-	1.600	-
液状化終局状態の規定パラメータ		<i>S</i> 1		-	0.005	-

#### 表5.1 解析に用いる地盤物性値

# (4) 改良体物性值

表 5.2 に解析に用いる改良体を模擬したアクリル板の物性値を示す.

表5.2 解析に用いる改良体を模擬したアクリル板の物性値

		改良体	
湿潤密度	$\therefore \rho_t t/m^3$	1.84	
変形係数	: E MPa	3000.0	
ポアソン比	: v	0.38	

(5) 住宅モデル

住宅の平面寸法は 10m×10m,高さ 5m とし,接地圧=15kPa となるよう単位体積重量を与える要素を設定 した.

5.2.2 解析ケース

表 5.3 に示すように単純格子(□13m×13m)と蓋付き格子(□13m×13m)の2ケースについて3次元有効応 力解析と2次元有効応力解析を行い,比較検討した.

### 表5.3 解析ケース一覧

	3次元有効応力解析	2次元有効応力解析
単純格子	0	0
蓋付き格子	0	0

### 5.2.3 解析結果

表 5.4 に単純格子の解析結果を,表 5.5 に蓋付き格子の解析結果を示す.過剰間隙水圧比のコンター図, 格子内地盤の上層付近におけるせん断ひずみと過剰間隙水圧比の時刻歴,及び改良体の上層付近におけるせん断ひずみの時刻歴により3次元解析モデルと2次元解析モデルの結果を比較した.

表 5.4 の結果から,単純格子の場合は3次元解析モデルより2次元解析モデルの解析結果が過剰間隙水圧 比,せん断ひずみともに過小値となり危険側な解析となるのが分かる.

一方,表 5.5 の結果から,蓋付き格子の場合は上蓋部の剛性の効果により過剰間隙水圧比,せん断ひずみともに単純格子より小さな値となり2次元解析モデルと3次元解析モデルの結果は概ね整合することが分かった.



表5.4 解析結果比較(単純格子)



表5.5 解析結果比較(蓋付き格子)

3 次元解析モデルと 2 次元解析モデルの解析結果の格子内地盤最大せん断ひずみについて,単純格子の比較を図 5.5 に,蓋付き格子の比較を図 5.6 に示す.図 5.7 は最大せん断ひずみの抽出位置である.







図5.6 格子内地盤の最大せん断ひずみの比較(蓋付き格子)



図5.7 最大せん断ひずみの抽出位置

単純格子の場合は,表5.4,表5.5,図5.5,図5.6の結果より,スパン10m以上の大きな格子状改良では, 上層付近の改良体変形が大きく発生し,二重要素モデルを用いた2次元解析モデルの結果ではこの3次元的 挙動を適切に再現できていないものと考えられる.一方蓋付き格子の場合は,蓋部の剛性により改良体上部 の変形が拘束されることから格子内地盤の最大せん断ひずみ,過剰間隙水圧の発生が抑制されている. 図5.8 に単純格子の場合の3次元解析モデル解析結果の改良体変形図を,図5.9 に蓋付き格子の場合の3 次元解析モデル解析結果の改良体変形図を示す.単純格子では改良体上部の側方壁中央付近が大きく変形し ているのに対し,蓋付き格子の場合は,上蓋部の剛性により改良体変形が抑制されているのが確認できる.



図5.8 改良体変形図(単純格子)



以上の比較検討結果から,二重要素を用いた一般的な2次元解析モデルでは3次元的挙動を適切に再現で きない場合があり,3次元的挙動を再現できる2次元解析モデルの確立が必要となることが判明した. 次頁以降で3次元的挙動を考慮した2次元解析モデルのモデル化手法について検討する. 5.3 改良体剛性の適正評価に関する検討

5.3.1 目的

前節の解析結果により,単純格子を2次元解析モデルで評価するためには,3次元的挙動を再現できる2 次元解析モデルの確立が必要となることが分かった.

単純格子の場合は3次元解析モデルでは格子状改良体上部の変形が過大に発生しているが,2次元解析モデルではこの変形があまり発生していないことから,本節では2次元解析モデルの改良体剛性を補正(低減) することにより3次元的挙動を再現することを目的とする.

また蓋付き格子についても,格子間隔を大きくした場合に改良体剛性を補正する必要があるか確認する.

5.3.2 検討手法

格子間隔,液状化層厚を変えた各ケースに対し,格子内地盤中央部の最大せん断ひずみを比較したときに 3次元解析モデルの解析結果と2次元解析モデルの解析結果が整合するように2次元解析モデルの改良体剛 性を低減する.図 5.10 に解析の概要を示す.



図5.10 解析の概要

### (1) 検討モデル

図 5.10,図 5.11 に 3 次元解析モデルと 2 次元解析モデルの概要を示す.いずれも格子改良体と格子内地盤 をモデル化し底面を固定する.FLIP3D,FLIP2Dの解析と同様,3次元解析モデルは 1/2 格子とし 2 次元解析 モデルは二重要素モデルを用いて擬似的に3次元を再現する.



(a) 3次元解析モデル概要図(単純格子)



図5.11 解析モデル概要図(単純格子)
### (2) 地盤物性値

表 5.6 に解析に用いる地盤物性値を示す.FLIP3D, FLIP2Dと同一である.

十扇	密度	基準せん断弾性係数	ポアソン比
上眉	(t/m3)	Gma ( kPa )	
不飽和層	1.91	52290	0.33
液状化層	1.91	52290	0.33
基盤層	1.91	126220	0.33

#### 表5.6 検討に用いる地盤物性値

## (3) 改良体物性值

表 5.7 に解析に用いる改良体(アクリル)物性値を示す.FLIP3D, FLIP2Dと同一である.この変形係数を基準(100%)とし各検討ケースにおいて低減させる.

表5.7	検討に用し	\る改良体物性値
10.1		

材料	密度	基準せん断弾性係数	ポアソン比
	(t/m3)	Gma ( kPa )	
改良体	1.84	3000000	0.38

### (4) 荷重

要素全体に水平方向一様に 0.1 の水平震度を与える.

# 5.3.3 検討ケース

表 5.8 に解析ケースの一覧を示す.

### 表5.8 検討ケース一覧

+2 7	+4 7	液状化層厚 7m	液状化層厚 12m	液状化層厚 17m (遠心載荷モデル)
	格士 間隔	2 次元解析モデル 及び 3 次元解析モデル	2 次元解析モデル 及び 3 次元解析モデル	2 次元解析モデル 及び 3 次元解析モデル
	13.0m × 13.0m	0	0	0
単純 格子	18.5m × 18.5m	0	0	0
	26.0m × 26.0m	0	0	0
	13.0m × 13.0m			0
蓋付き 格子	18.5m × 18.5m			0
	26.0m × 26.0m			0

層厚 17m の比率で決定すれば安全側となるため省略した

### 5.3.4 検討結果

(1) 単純格子

図 5.12~5.14 に単純格子の各ケースの2次元解析モデルと3次元解析モデルの解析結果で,格子内地盤中 央部における最大せん断ひずみ分布の比較結果を示す.改良体剛性比率は液状化層厚ごとに設定し,液状化 層厚が同じ場合は格子間隔によらず同じ比率とした.なお,改良体剛性比率とは,3次元解析モデルの改良 体剛性を100%とした場合の2次元解析モデルの改良体剛性比率である.



図5.12 格子内地盤中央部における最大せん断ひずみ分布の比較(液状化層厚7m,単純格子)



図5.13 格子内地盤中央部における最大せん断ひずみ分布の比較(液状化層厚12m,単純格子)



図5.14 格子内地盤中央部における最大せん断ひずみ分布の比較(液状化層厚17m,単純格子)

## (2) 蓋付き格子

図 5.15 に蓋付き格子の格子内地盤中央部における最大せん断ひずみ分布の比較結果を示す.蓋付き格子は, 改良体上層の変形が蓋部で拘束され,改良体剛性を低減しなくても3次元解析モデルの解析結果に概ね整合 していることが確認できた.層厚7mと12mのケースは層厚17mの比率で決定すれば安全側となるため検討 を省略した.



図5.15 格子内地盤中央部における最大せん断ひずみ分布の比較(液状化層厚17m,蓋付き格子)

5.4 改良体剛性の適正評価による2次元解析モデルと3次元解析モデルの解析結果の対比

5.4.1 目的

5.1 の 2 次元解析モデルに対して 5.3.4 の改良体剛性比率を用いた再検討を行い, 2 次元有効応力解析により 3 次元的挙動を再現可能かどうかの検証を行う.

## 5.4.2 解析ケース

表 5.9 に示すように単純格子(□13m×13m)について 3 次元解析モデルと 2 次元解析モデルの解析結果を比 較検討した.3 次元解析モデルについては 5.2 の解析結果をそのまま用い,2 次元解析モデルは遠心載荷モデ ルと改良長(14.4m)が近い図 5.14 の改良体剛性比率(改良長 17m)を採用した.

	3次元解析モデル	2次元解析モデル
単純格子 □13m×13m	0	0

#### 表5.9 検討ケース一覧

5.2 で解析済

5.4.3 解析結果

表 5.10 に単純格子の解析結果を示す.過剰間隙水圧比のコンター図,格子内地盤の上層付近におけるせん 断ひずみと過剰間隙水圧比の時刻歴,及び改良体の上層付近におけるせん断ひずみの時刻歴により3次元解 析モデルと2次元解析モデルの解析結果を比較した.

表 5.10 の結果を表 5.4 の結果と比較すると,単純格子の場合は改良体剛性を低減することにより 2 次元解 析モデルの解析結果が,過剰間隙水圧比,せん断ひずみともに概ね 3 次元解析モデルの解析結果に整合する ことが分かった.



表5.10 解析結果比較(単純格子) 2次元解析モデル改良体剛性低減

図 5.16 には 3 次元解析モデルと 2 次元解析モデルの解析結果で,格子内地盤の最大せん断ひずみの比較を示す.格子内地盤中央部における最大せん断ひずみの深度分布についても改良体剛性を低減した 2 次元解析 モデルの解析結果と 3 次元解析モデルの解析結果は概ね整合していることが分かった.

表 5.10 及び図 5.16 の結果から,単純格子の場合は2次元解析モデルにおける改良体の剛性を適宜設定することにより3次元的挙動を再現可能であることが確認できた.



図5.16 格子内地盤の最大せん断ひずみの比較(単純格子)

### 5.5 まとめ

3次元解析モデルと二重要素を用いた一般的な2次元解析モデルの比較検討を単純格子と蓋付き格子について行った。単純格子の場合は3次元解析モデルに比べ2次元解析モデルの解析結果が危険側の値となった. 蓋付き格子の場合は上蓋部の剛性の影響により過剰間隙水圧比,せん断ひずみなどの値は単純格子より小さな値となり,2次元解析モデルと3次元解析モデルの結果は概ね整合することが分かった.

3 次元解析モデルの解析結果より,単純格子では改良体上部側方壁の中央付近が大きく変形しているのに 対し,蓋付き格子の場合は,上蓋部の剛性により改良体変形が抑制されているのが確認できた.

以上の比較検討結果から,2次元解析モデルでは3次元的挙動を適切に再現できない場合があり,3次元 的挙動を再現できる2次元解析モデルの確立が必要となることが判明した.

簡便な解析で格子内地盤の最大せん断ひずみに対し3次元解析モデルと2次元解析モデルのフィッティン グを行い単純格子の改良体剛性比率を決定した後,その比率を用いて2次元有効応力解析モデルを行い,概 ね3次元解析モデルの結果に整合することが確認できた.

また蓋付き格子の場合は改良体剛性を低減しなくても概ね3次元解析モデルの結果と整合することも確認できた.

参考として表 5.11 に 2 次元解析モデルにおける単純格子の剛性比率を示す.

格子 種別	格子 間隔	液状化層厚 7m	液状化層厚 12m	液状化層厚 17m
	13.0m × 13.0m	上部 10%	上部 10%	上部 5%
単純 格子	18.5m × 18.5m	下部 50%		
	26.0m × 26.0m		下部 70%	下部 100%

表5.11 2次元解析モデルにおける単純格子改良体剛性比率

本章で検討した3次元的挙動を再現可能な2次元解析モデルのモデル化手法の手順を以下に示す.

STEP : 事前に簡便な解析で格子内地盤の最大せん断ひずみに対し3次元解析モデルと2次元解析モデルの解析結果をフィッティングし,単純格子の改良体剛性比率を決定する.

STEP : で設定した剛性比率を用いて2次元有効応力解析を行う.

#### 5.6 引用文献

5.1) 港湾空港技術研究所報告 Vlo.51:(独)港湾空港技術研究所,pp28-39,2012.9

6章 簡易設計図表の策定(研究開発項目 ,フェーズ4)

6.1 目的

5 章までに検討してきた経済的かつ効果的な改良形状による液状化対策を速やかに普及させるために,目 標性能に応じて,対象エリアの簡易土質条件等があれば平易に概略設計が可能となる簡易設計図表を策定する.

本章では千葉県浦安市をモデル地盤とし,5章で検討した3次元的挙動を再現できる2次元解析モデルに よる解析結果を用いて簡易設計図表を策定する.本章で策定した簡易設計図表の適用範囲を表 6.1 に示す.



表6.1 簡易設計図表の適用範囲

6.2 簡易設計図表策定の評価指標

2章で述べた各機関<sup>6.1)6.2)6.3)</sup>の動向を踏まえ,簡易設計図表策定における評価指標を以下の3つに定めた.

地表沈下量

多くの機関で目標性能の指標として取り上げられ,構造物への影響も非常に大きいと考えられることから 地表沈下量 Dcy を評価指標の一つとする.

沈下量 Dcy の算定は, Ishihara and Yoshimine<sup>6.4)</sup>による手法を用いて,各要素の最大せん断ひずみから過剰 間隙水圧消散後の体積ひずみを別途算出(Dr60%と設定)し,加振終了時の変形に足し合わせることで評価 することとした.(図 6.1)



図6.1 最大せん断ひずみと液状化後の消散に伴う体積ひずみの関係6.4)

#### 過剰間隙水圧比

木造家屋などの軽量小規模構造物を対象とした場合,液状化による地盤被害が発生する条件は既往事例の 調査により図 6.2 のように示されている<sup>6.5)</sup>.例えば中規模地震動(200gal,M9.0)の場合は概ね表層の非液状化 層厚が 3m あれば液状化による地盤被害が発生しないことが読み取れる.よって本研究では簡易設計図表の 評価指標の一つとして,中規模地震動(200gal,M9.0)における表層 3m の範囲の過剰間隙水圧比の平均値と最 大値をとることとした.



図6.2 液状化により被害が発生する条件6.5)

## 改良体のせん断ひずみ

改良体の健全性を確認するため,改良体平行壁の最大せん断ひずみを評価指標とした.北詰<sup>6.0</sup>によるセメント改良地盤の一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係を図 6.3 に示す.同図中にマルチジェット工法の室内配合供試体と現場コア試料の関係も示す.既往の報告にマルチジェット工法の実績も踏まえて,破壊ひずみを0.5%と設定した.許容せん断ひずみは,中地震動に対しては破壊ひずみに安全率 1.5 を考慮した 0.33%とし, 大地震動では破壊ひずみである 0.5%とした.



図6.3 セメント改良地盤の一軸圧縮強さと破壊ひずみ<sup>6.6)</sup>

6.3 解析条件

6.3.1 解析モデルと検討ケース

図 6.4 に 2 次元解析モデル図を示す.格子内地盤と平行壁は 5 章の 2 次元解析モデルと同様に二重要素<sup>6.7)</sup> によりモデル化した.

改良体の深度は液状化層厚と同一とし,改良体の格子間隔と地盤の液状化層厚をパラメータとしてパラメ タリックスタディを実施する.表 6.2 に検討ケースの一覧を示す.単純格子の場合は3次元的挙動を再現す るため,5章の検討結果に従い改良体剛性を低減した.



図6.4 2次元解析モデル図

液状化	바이라 동차		格子形状	供老	
層厚H	地辰勤	種別 間隔 L(m)		涌ち	
		畄尓	13.0×16.0		
	山地雪動	——元 格子	18.5×21.5	改良体剛性低減あり	
Zm	⊤地展勤 乃7Ň	L UL	26.0×32.0		
1 111	大地震動	苦付き	13.0×16.0		
		査11で +2−フ	18.5×21.5	改良体剛性低減なし	
		1 L L	26.0×32.0		
	中地震動	単純 格子	13.0×16.0		
			18.5×21.5	改良体剛性低減あり	
10m			26.0×32.0		
1211	人の大地震動	蓋付き	13.0×16.0		
	入地辰勤		18.5×21.5	改良体剛性低減なし	
		1, IL I	26.0×32.0		
		畄尓	13.0×16.0		
17m	ᆎᆘᇛᆂ	半紀枚之	18.5×21.5	改良体剛性低減あり	
	中地震動	恰丁	26.0×32.0		
	及び 大地雲動	助 蓋付き 按っ	13.0×16.0		
	八地辰勤		18.5×21.5	改良体剛性低減なし	
		1	1117	26.0×32.0	

表6.2 解析ケース一覧

# 6.3.2 入力地震動

入力地震動(中地震動,大地震動)を図 6.5 に示す.中地震動(200gal, M9.0)は東北地方太平洋沖地震の夢 の島観測波であり「浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会」で用いられているものと同様である. 大地震動(350gal, M7.3)は千葉県が公表している東京湾北部地震(浦安新庁舎該当メッシュ)を用いるこ ととした.内閣府中央防災会議でも同様の地震動を公表しているが,最大加速度がより安全側となる千葉県 モデルを適用する.



(a) 中地震動(200gal, M9.0)



(b) 大地震動(350gal, M7.3)

図6.5 入力地震動

#### 6.3.3 地盤物性

地盤モデルについては、「浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会」(以下「同委員会」と称す)で報告 されている地盤モデルを基本に検討を行うものとした.ただし、浦安市では地域によって地盤構成のバラつ きが報告されているため、液状化層厚 H をパラメータとして汎用化するにあたり、液状化対象層 (Bs, Fs, As1,As2 層)の中でもっとも液状化が発生しやすい Fs 層をすべての液状化対象層として安全側に評価した. なお、地盤物性は同委員会で報告されているものと同一とした.

表6.3に同委員会の地盤モデルを示す.表6.4に本研究における解析用地盤モデルを示す.その他必要な物性についてはFLIPの簡易設計法<sup>6.8</sup>により設定した

土質名	N值	層厚 (m)	細粒分 含有率 (%)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/s)	初期せん断剛性 (kPa)	ボアソン比
			Fc	ρ	Vs	Go	ν
Bs(乾燥)	6	1	18	1.80	145	38,038	0.49
Bs(飽和)	6	1	18	1.80	145	38,038	0.49
Fs	4	6	22	1.80	127	29,029	0.49
Asl	15	2	21. 9	1.80	197	70, 067	0.49
As2	7	2	31	1.70	153	39, 813	0.49
Ac1	2	20	93.6	1.50	133	26, 534	0.49
Ac2	14	15	93.6	1.50	220	72, 600	0.49
Ds (工学的基盤)	74	-	10	2.00	388	301,088	0.49

表6.3 「浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会」地盤モデル6.3)

表6.4 解析用地盤モデル

土質名	N値	層厚 (m)	細粒分 含有率 (%)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/s)	初期せん断剛性 (kPa)	ボアソン比
			Fc	ρ	Vs	Go	ν
Fs	4	H	22	1.80	197	29,029	0.49
Ac1	2	20	93.6	1.50	133	26, 534	0.49
Ac2	14	15	93.6	1.50	220	72,600	0.49
Ds (工学的基盤)	74	-	10	2.00	388	301,088	0.49

液状化対象層(Bs, Fs, As1, As2)をすべて安全側に Fs 層として評価

・液状化層厚 H はパラメータとして各ケースの検討を行う.

# 6.3.4 改良体物性值

表 6.5 に本検討に用いる改良体物性値を示す.この値を 100%とし,単純格子の場合は 5 章の検討結果に従 い改良体の物性値を低減する.

項目	解析用物性值				
改良体の設計基準強度 q <sub>uck</sub>	4.5 MPa				
改良体の初期せん断剛性 $\mathrm{G}_{0}$	2790 MPa (620quck)				

# 表6.5 解析用改良体物性值

## 6.3.5 住宅モデル

本解析では考慮しない.

### 6.4 解析結果

- 6.4.1 格子内地盤過剰間隙水圧比コンター図
- (1) 中地震動 (200gal M9.0)

図 6.6~図 6.11 に入力地震動が中地震動の場合の各ケースの格子内地盤過剰間隙水圧比コンター図を示す.





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m図6.6 過剰間隙水圧比コンター図(単純格子,液状化層厚7m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m図6.7 過剰間隙水圧比コンター図(単純格子,液状化層厚12m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m図6.8 過剰間隙水圧比コンター図(単純格子,液状化層厚17m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m図6.9 過剰間隙水圧比コンター図(蓋付き格子,液状化層厚7m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



図6.10 過剰間隙水圧比コンター図(蓋付き格子,液状化層厚12m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.11 過剰間隙水圧比コンター図(蓋付き格子,液状化層厚17m)

(2) 大地震動(350gal M7.3)

図 6.12~図 6.17 に入力地震動が大地震動の場合の各ケースの格子内地盤過剰間隙水圧比コンター図を示す.





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m図6.12 過剰間隙水圧比コンター図(単純格子,液状化層厚7m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



図6.13 過剰間隙水圧比コンター図(単純格子,液状化層厚12m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m図6.14 過剰間隙水圧比コンター図(単純格子,液状化層厚17m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.15 過剰間隙水圧比コンター図(蓋付き格子,液状化層厚7m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



図6.16 過剰間隙水圧比コンター図(蓋付き格子,液状化層厚12m)





(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.17 過剰間隙水圧比コンター図(蓋付き格子,液状化層厚17m)

6.4.2 改良体(平行壁)のせん断ひずみコンター図

(1) 中地震動(200gal M9.0)

図 6.18~図 6.23 に入力地震動が中地震動の場合の各ケースの改良体平行壁のせん断ひずみコンター図を示す.





(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m











(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



- (c) 改良ピッチ26m×32m
- 図6.19 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚12m)







(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.20 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚17m)





(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m











(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.22 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(蓋付き格子,液状化層厚12m)







(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m

図6.23 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(蓋付き格子,液状化層厚17m)

(2) 大地震動(350gal M7.3)

図 6.24~図 6.29 に入力地震動が大地震動の場合の各ケースの改良体平行壁のせん断ひずみコンター図を示す.





(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.24 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚7m)




(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.25 せん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚12m)





(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.26 せん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚17m)





(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.27 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚7m)





(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.28 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚12m)





(a) 改良ピッチ13m×16m



(b) 改良ピッチ18.5m×21.5m



(c) 改良ピッチ26m×32m 図6.29 改良体平行壁のせん断ひずみコンター図(単純格子,液状化層厚17m)

# 6.5 簡易設計図表(浦安地盤モデル)

解析結果を基に中地震動と大地震動それぞれについて,格子間隔L/液状化層厚Hを縦軸にとり,横軸に沈下量,地表面3m以浅の過剰間隙水圧比の平均値,最大値,及び改良体平行壁のせん断ひずみをとり各ケースの解析結果をプロットし簡易設計図表を策定した.

図 6.30 に中地震動に対する簡易設計図表を,図 6.31 に大地震動に対する簡易設計図表を示す.これらの 簡易設計図表を用いることにより,液状化層厚と目標性能を設定すれば単純格子,蓋付き格子の格子間隔を 決定できる.



図6.30 中地震動に対する簡易設計図表(浦安地盤モデル)



図6.31 大地震動に対する簡易設計図表(浦安地盤モデル)

6.6 まとめ

本章では3次元的挙動を再現できる2次元解析モデルを用いて,千葉県浦安市(臨海部埋立地域)をモデル 地盤とした簡易設計図表を策定した.液状化層厚と目標性能を設定すれば,簡易設計図表から格子間隔を決 定できることを確認した.

目標性能を表 6.6 に示すように設定した場合,格子間隔は表 6.7 に示すように決定される.

地震規模	目標性能
中地震動 (200gal,M9.0)	・地表沈下量 Dcy 5.0cm(被害:軽微) <sup>1</sup> ・地表面非液状化層 H1 3.0m (H1の過剰間隙水圧平均 0.5 <sup>2</sup> )
大地震動 (350gal,M7.3)	・地表沈下量 Dcy 10.0cm(被害:小) <sup>1</sup>

表6.6 目標性能

1:建築基礎構造設計指針<sup>6.9</sup>より設定

2:埋立地の液状化対策ハンドブック<sup>6.10</sup>のドレーン工法の設計を参考に設定

表6.7 簡易設計図表(浦安地盤モデル)から決定した改良仕様

地震規模	改良仕様			
中地震動	・単純格子 : 13.2m×13.2m以下			
(200gal,M9.0)	・蓋付き格子: 36m×36m以下			
大地震動	・単純格子 : 12m×12m以下			
(350gal,M7.3)	・蓋付き格子: 18m×18m以下			

本研究で策定した簡易設計図表は浦安市をモデル地盤としたものであり,現段階での適用範囲は浦安市に 限定される.今後は各地をモデル地盤として簡易設計図表を策定し,地盤の固有周期,N値等のパラメータ で整理することにより,全国どのようなエリアに対しても適用可能な簡易設計図表を策定していくことを今 後の展望としている.(図 6.32)

また簡易設計図表は既設戸建て住宅だけではなく 社会基盤施設や産業施設等に対しても適用可能である.





- 6.7 引用文献
- 6.1) 液状化被災市街地における地下水位低下工法の検討・調査について(ガイダンス(案)): 国土技術政策総合 研究所, p12, 2013.1
- 6.2) 浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究:(社)地盤工学会, pp192-193, 2012.9
- 6.3) 格子状改良工法 WG (WG2) 検討報告: 浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会, pp1-76, 2012.11
- 6.4) Ishihrara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of settlementsin sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188, 1992
- 6.5) 石原研而: Stability of Natural Deposits during Earthquakes, 11th International Concrete on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.321-376, 1985
- 6.6) 北詰昌樹 : 深層混合処理工法における改良地盤の安定性に関する研究,港湾技研資料 No.774, p7, 1994
- 6.7) 港湾空港技術研究所報告 Vlo.51: (独)港湾空港技術研究所, pp28-39, 2012.9
- 6.8) 液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務【事例編】:(財)沿岸技術研究センター, pp2-4-1~14, 2011.8
- 6.9) 建築基礎構造設計指針:(社)日本建築学会, pp66-71, 2001
- 6.10) 埋立地の液状化対策ハンドブック: pp170-194, 1997

参考資料

6.8 参考1: 浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会と同解析手法・同条件での簡易設計図表

6.8.1 はじめに

浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会(以下「浦安委員会」と称す)において,格子状改良による 評価が行われている.浦安委員会で想定している工法は機械攪拌工法であり,有効壁厚85cm(設計基準強度 1.5MPa)での検討結果が報告されている.

本検討は,浦安委員会で同解析手法・同条件で,本研究の改良仕様(最小壁厚 50cm,設計基準強度 4.5MPa) での改良性能の比較と簡易設計図表を検討するものである.

6.8.2 目標性能

(1) レベル1地震動(200gal M9.0)での目標性能

浦安委員会と同条件となる以下の目標性能で検討を行う.ただし, 建物荷重に対する地盤の短期許容支 持力照査については,全層 FL値 1.0 であれば,表 6.8,表 6.9 に示すように,支持力照査結果ではコントロ ールされないため,本検討のおいては省略する.

【目標性能(レベル1)】 全層 FL 値 1.0 改良体最大せん断応力度の短期許容安全率 Fs 1.5 建物荷重による接地圧 地盤の短期許容支持力度



<参考:浦安実現可能性検討第3回委員会」報告書のCASE1-2の結果抜粋>

c) Case1-2(道路+1住戸毎改良①)

表6.8 検討結果(CASE1-2)

	格子内地盤	改良体せん断応力度	地盤支持力
	FL値	短期許容安全率	安全率
判定	FL=1.157 1.0	Fs=2.2 1.5	Fs=7.2 1.0
	- OK -	- OK -	- OK -

表6.9 地盤の支持力照査結果(CASE1-2)

土層名	着目GL	粘着力c (kN/m2)	i₀α cNo	ί <sub>γ</sub> βγ <sub>1</sub> ΒΝγ	i <sub>q</sub> γ <sub>z</sub> DfNq	qa (kN/m2)	$\sigma' z_3$	判定 (qa>σ'z <sub>3</sub> )
Bs	0	0	0	405.450	0.00	270.3	15.00	ок
Bs	-1	0	0	177,946	352,28	353,5	29,86	OK
Fs	-2	0	0	125,739	339,32	310,0	35,62	ок
Fs	-3	0	0	124.633	395,10	346.5	41.96	ок
Fs	-4	0	0	123.662	453,99	385.1	48.70	ок
Fs	-5	0	0	122.802	515,33	425.4	55.71	ок
Fs	-6	0	0	122.036	578.03	466.7	62.93	ОК
Fs	-7	0	0	121.349	640.75	508.1	70.30	ок
As1	-8	0	0	489.072	1768.00	1504.7	77.78	ок
As1	-9	0	0	486.681	1950.18	1624.6	85.35	ок
As2	-10	0	0	169.202	1149.22	878.9	93.00	ок
As2	-11	0	0	168,533	1218,76	924,9	99,69	OK

図6.33格子状改良配置(CASE1-2)

(2) レベル2 地震動(350gal M7.3)での目標性能

浦安委員会では,レベル2(350gal M7.3)での目標性能は設定されていないため,本検討で以下の通り目 標性能を設定した.

【目標性能(レベル2)】

地表沈下量 Dcy 5cm (液状化の程度:軽微) 改良体のせん断ひずみ 改良体の破壊ひずみ(0.5%)(図 6.34)



<参考:セメント改良地盤の一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係>

1) 北詰昌樹: 深層混合処理工法による改良地盤の安定性に関する研究,港湾技研資料 No.774, p7, 1994

図6.34 セメント改良地盤の一軸圧縮強さと破壊ひずみ<sup>1)</sup>

6.8.3 解析方法

(1) 解析コード

解析コードは,表 6.10 に示すように,FL 値算定や改良体のせん断応力度・ひずみに対しては浦安委員会 と同様に Super FLUSH を用いる.地表沈下量については FLIP2D を用いて評価するものとした.

表6.10 解析コード

照査項目	解析方法
FL値、改良体のせん断応力度・ひずみ	SuperFLUSH(等価線形解析)
沈下量	FLIP(有効応力解析) *石原・吉嶺による最大せん断ひずみと体積収縮の関係から、過 剰間隙水圧消散にともなう沈下量を別途考慮する。 *遠心載荷実験より沈下量の精度を確認済

(2) 解析想定モデル

解析想定モデルについては,浦安委員会で報告されている1街区20軒(1軒 13×13m)の対策案で CASE1-2(道路シングルライン1戸1対策)を基本に検討を行うものとした.

簡易設計図表は,格子ピッチと液状化層厚をパラメータとして策定するため,1軒の寸法をLとして数ケースの検討を行う.



c) Case1-2 (道路+1 住戸毎改良①)

図6.35 格子状改良配置(「浦安市委員会報告書(資料3-3)」より)

# (3) 地盤モデル

地盤モデルについては,浦安委員会で報告されている地盤モデル(表 6.11)を基本に検討を行うものとした.ただし,浦安市では地域によって地盤構成のバラつきが報告されているため,液状化層厚 H をパラメータとして汎用化するにあたり,液状化対象層(Bs,Fs,As1,As2層)の中でもっとも液状化が発生しやすい Fs 層をすべての液状化対象層として安全側に評価した(表 6.12).なお,地盤物性は浦安委員会で報告されているものと同一とした.

土質名	N值	層厚 (m)	細粒分 含有率 (%)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/s)	初期せん断剛性 (kPa)	ボアソン比
			Fc	ρ	Vs	Go	ν
Bs(乾燥)	6	1	18	1.80	145	38,038	0.49
Bs (飽和)	6	1	18	1.80	145	38,038	0.49
Fs	4	6	22	1.80	127	29,029	0.49
Asl	15	2	21. 9	1.80	197	70,067	0.49
As2	7	2	31	1.70	153	39, 813	0.49
Ac1	2	20	93.6	1.50	133	26, 534	0.49
Ac2	14	15	93.6	1.50	220	72, 600	0.49
Ds (工学的基盤)	74	-	10	2.00	388	301, 088	0.49

表6.11「浦安委員会」地盤モデル



表6.12 本検討地盤モデル

土質名	N值	層厚 (m)	細粒分 含有率 (%)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 (m/s)	初期せん断剛性 (kPa)	ボアソン比
			Fc	ρ	Vs	Go	ν
Fs	4	H	22	1.80	197	29,029	0.49
Ac1	2	20	93.6	1.50	133	26, 534	0.49
Ac2	14	15	93.6	1.50	220	72, 600	0.49
Ds (工学的基盤)	74	-	10	2.00	388	301, 088	0.49

(4) 改良体モデル

改良体モデルについては,浦安委員会で報告されている改良体モデルを基本に,本工法の改良形状,改良 強度を反映して検討を行うものとした.

改良体のモデル化については,図6.36に示す二重要素モデルによりモデル化した.







図6.36 格子状改良地盤のモデル化(二重要素モデル)

## (5) 解析モデル

解析モデルを図 6.37 に示す.解析モデルは基本的に浦安委員会と同様であり,改良ピッチと液状化層厚を パラメータとして,パラメタリックスタディを実施する.



図6.37 解析モデルメッシュ図

(6) 入力地震動

入力地震動(レベル1,レベル2)を図 6.38 に示す.レベル1は東北地方太平洋沖地震の夢の島観測波であり 浦安委員会を同様である.

レベル 2 は千葉県が公表している東京湾北部地震(浦安新庁舎該当メッシュ)を用いることとした.内閣府 中央防災会議でも同様の地震動を公表しているが 最大加速度がより安全側となる千葉県モデルを適用する.



図6.38 入力地震動(レベル1,レベル2)

# (7) 検討ケース

検討ケースは,簡易設計図表策定のための予備検討として,表 6.14 に示す3ケースを実施する.簡易設計 図表策定のための本検討は表 6.15 に示すケースを,それぞれ SuperFLUSH(2D)とFLIP(2D)で解析を実施する.

項目	目的	内容	
1) 改良壁厚、改良強度と対策効 果	改良壁厚と改良強度の違いが 及ぼす対策効果の影響確認	L1地震動、単純格子モデル 壁厚85cm、強度1.5MPaと 壁厚50cm、強度4.5MPaの対策 効果比較	
2) 格子形状と対策効果	面積同等で改良形状が正方形と 長方形の場合の対策効果の影 響確認	L1地震動、単純格子モデル □18.5m×18.5m(A=342㎡) □13.0m×26.0m(A=338㎡)の 対策効果比較	
3) 単純格子と蓋付格子の対策 効果	FL値に対する蓋付格子の効果を 確認(沈下量については効果が あることを3~4章で確認済)	L1地震動 □13.0m×13.0m単純格子 □13.0m×13.0m蓋付格子の対 策効果比較	

表6.14 予備検討ケース

### 表6.15 本検討ケース一覧

入力地震動	格子モデル			液	状化層厚	Н
	単純格子		格子間隔 L	7m	12m	17m
L1		~	10m×10m	0	0	0
			13m×13m	0	0	0
L2	■ 単純格子		18.5m×18.5m	0	0	0
LZ	蓋付格子		26m×26m	0	0	0

\*レベル1の蓋付格子については,予備検討「6.8.5 単純格子と蓋付格子の対策効果」の検討で,対策効果が確認できた場合に実施するものとする.

6.8.4 予備検討結果(SuperFLUSH(2D))

- (1) 改良壁厚,改良強度と対策効果について
- 1) 目的

改良壁厚と改良強度が液状化対策効果に及ぼす影響を確認するため,表 6.16の改良仕様で検討を実施した.

地震動	改良形状	改良壁厚	改良強度
L1	□13m×13m単純格子	50cm	4.5MPa
L1	□13m×13m単純格子	85cm	1.5MPa

表6.16 改良仕様

2) 検討結果

図 6.39 に示すように,改良壁厚 50cm・改良強度 4.5MPa とした場合,改良壁厚 85cm・改良強度 1.5MPa の場合よりも,格子内地盤の FL 値,改良体の短期許容せん断応力安全率 Fs ともに同等以上の対策効果があることが確認できた.



図6.39 検討結果(格子内地盤FL値,改良体の短期許容せん断応力安全率)

- (2) 格子形状と対策効果について
- 1) 目的

格子形状(正方形・長方形)が対策効果に及ぼす影響を確認するため,表 6.17 に示すように,格子面積がほぼ同等となる格子ピッチで比較検討を実施した.

地震動	改良形状	改良壁厚	改良強度
L1	□18.5m×18.5m単純格子 (面積342㎡)	50cm	4.5MPa
L1	□13m×26m単純格子 (面積338㎡)	50cm	4.5MPa

表6.17 改良仕様

2) 検討結果

図 6.40 に示すように,正方形形状は改良上部で FL 値,短期許容せん断応力安全率 Fs ともに対策効果が高 い結果となるが,最小値は,両者とも改良下端で決まっており,対策効果としてはほぼ同等である. 簡易設計図表は正方形形状で整理しているが,長方形形状でも等価面積で正方形換算すれば適用可能.



図6.40(格子内地盤 FL 値,改良体の短期許容せん断応力安全率)

- (3) 単純格子と蓋付格子の対策効果について
- 1) 目的

蓋付格子の蓋効果が FL 値に対する対策効果を確認するため,表 6.18 に示す改良仕様で比較検討を実施した.

地震動	改良形状	改良壁厚	改良強度
L1	□13m×13m単純格子	50cm	4.5MPa
L1	□13m×13m蓋付格子	50cm	4.5MPa

表6.18 改良仕様

2) 検討結果

図 6.41 に示すように,蓋付格子は改良上部で FL 値,短期許容せん断応力安全率 Fs ともに対策効果が高い 結果となるが,最小値は,両者とも改良下端で決まっており,対策効果としてはほぼ同等である. レベル1蓋付格子の簡易設計図表は作成を省略する.(レベル1単純格子の結果と同等であり代用できる)



図6.41 検討結果

6.8.5 本検討結果(SuperFLUSH(2D) + FLIP(2D))

(1) レベル1 地震動 単純格子

1) 格子内地盤の FL 値

液状化層厚 12m での格子内地盤の FL 値を図 6.42 に示す.液状化層厚 7m と 17m の結果を踏襲して簡易設計 図表として整理する.



2) 改良体短期許容せん断応力安全率 Fs

液状化層厚 12m での改良体短期許容せん断応力安全率 Fsの検討結果を図 6.43 に示す 液状化層厚 7m と 17m の結果を踏襲して簡易設計図表として整理する.



- (2) レベル2地震動 単純格子・蓋付格子
- 1) 地表沈下量 Dcy

液状化層厚 12m での地表沈下量 Dcy の検討結果を図 6.44 に示す.沈下量の算定液状化層厚 7m と 17m の 結果を踏襲して簡易設計図表として整理する.

液状化層厚12mの事例 間隙水圧消散を考慮した沈下量(cm) 0.0 -2.5 -5.0 -7.5 ◆ 単純格子 ➡ 蓋付格子 -10.0 各格子ピッチの 最大Dcyを整理 レベル2 液状化層厚12m (quck=4.5MPa、壁厚50cm) 格子ピッチ~宅地内地盤最大沈下量Dcy(cm) 30  $y = 10.645e^{0.0754x}$ 25  $R^2 = 0.9759$ .... 20  $y = 9.3796e^{0.0755x}$ ー。 ポペピーで 15  $R^2 = 0.995$ 10 5 ◆単純格子 ▲蓋付格子 0 0 5 15 20 10 宅地内地盤最大沈下量Dcy(cm)



2) 改良体せん断ひずみ γ

液状化層厚 12m での改良体最大せん断ひずみ の検討結果を図 6.45 に示す.沈下量の算定液状化層厚 7m と 17m の結果を踏襲して簡易設計図表として整理する.



6.8.6 簡易設計図表

以上の結果を整理して,以下に簡易設計図表を示す.

(1) レベル1地震動(200gal M9.0)での単純格子に対する簡易設計図表



図6.46 簡易設計図表(レベル1(200gal M9.0) 単純格子(quck=4.5MPa,壁厚50cm))



図6.47 簡易設計図表(レベル2(350gal M7.3) 単純格子(quck=4.5MPa,壁厚50cm))



図6.48 簡易設計図表(レベル2(350gal M7.3) 蓋付格子(quck=4.5MPa,壁厚50cm))

# 7章 浦安実証実験(研究開発項目 ,フェーズ5)

7.1 目的

自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法(マルチジェット工法)における既設宅地の液状化対策として,効果 的な薄壁改良形状で,これまでの研究成果で効果の高い単純格子および蓋付き格子に対して実証実験を行な う.実証実験では,既設宅地を想定した狭隘地でも適用可能とするために開発した超小型マシンを用いて(一 部標準機を併用),単純格子と蓋付き格子の改良体を造成し,施工性・品質・周辺への影響・改良効果につい て確認することで既設宅地を対象とした効果的な液状化対策の確立を目的とする.

なお本実証実験は,平成24年度浦安市実証実験事業に採択され,浦安市より実証実験ヤードの提供を受け 実施している.

7.2 目標および確認方法,実験結果の評価基準

浦安実証実験において,目標および確認方法,実験結果の評価基準について表7.1 に示す.

実験目的	目標	確認方法
施工性確認	狭隘でも施工可能	・既設戸建を模擬し狭隘条件で施工が可能 ・施工歩掛りを確認
周辺戸建への影響確認	既設戸建へ影響を 与えない	・造成中、既設建物のレベル計測 ・造成中、施工位置での振動・騒音計測
品質確認	所定の出来形・強 度を確保	・造成後の改良体掘起しによる目視確認 ・造成28日後の試料採取で改良体強度確認 ・造成28日後の原位置PS検層による改良体連続性の確認
改良効果の確認	想定直下型地震動 に対し、格子内地 盤が液状化しない	間隙水圧計・加速度計・応力計等を設置して以下の計測を行なう。 ・実証実験における動的載荷試験 ・モニタリング(地震発生時にデータ抽出・検証)

表7.1 目標および確認方法,実験結果の評価基準

#### 7.3 実験概要

7.3.1 位置図

浦安実証実験の位置図を図 7.1 に示す.

既往の地質調査報告書<sup>7.1)</sup>によると,当該地点は浦安市域の中でも埋立て土が厚く(10m 程度)堆積するエリアであり,地下水位も GL-1.5m 程度と比較的高い.東北地方太平洋沖地震の際にも大規模な液状化が確認されている.



出典:電子国土 Web システム技術情報 図7.1 浦安実証実験位置図

7.3.2 実証実験ヤード地盤条件

(1) 既往資料<sup>7.1)</sup>による柱状図(液状化前)

既往の資料の当該地点の地盤条件を図 7.2 に示す No.3 柱状図は,当該地点より約 30mの距離に位置する. 地盤は,地下水位が GL-1.4m であり,GL-2.8~-4.2m にシルト層が介在するが,GL-9.5m まで N 値 5 程度の細砂主体の埋土,GL-11.8m まで N 値 15 程度の細砂主体の沖積層,GL-11.8m 以深は沖積シルト層で構成 される.実証実験ヤードは東日本大震災において実際に液状化現象が発生した.(以降,図中に記載している 柱状図は本調査結果 No.3 の情報である)



図7.2 実証実験ヤード地盤条件(既往資料)

# (2) 実証実験前に実施した柱状図(液状化後)

実証実験開始前に実施した柱状図を図 7.3 に示す.

既往の地盤調査報告書では地下水位が GL-1.4m と報告されているが,今回の調査結果で無水堀による水位 では GL-3.08m となっていたため,ボーリング孔を利用して地下水位を継続的に確認したところ,当該地点 の地下水位は GL-1.4m であることを確認した.地盤は液状化後に GL-5m から GL-13m の範囲で若干 N 値が 増加している傾向が確認された.



既往資料(液状化前)

今回調查(液状化後)

図7.3 実証実験ヤード地盤条件(既往資料と今回調査の対比)

(3) 全体平面図,断面図

図 7.4 に浦安市実証実験の全体平面図および断面図を示す.







7.4 改良効果の確認方法

改良効果を確認するため,人工地震による動的載荷試験を実施して,地盤の応答値(加速度・間隙水圧) および改良体のひずみの計測を行った.人工地震は動圧密工法<sup>7.2)</sup>(写真7.1)を用いて起振した. 動圧密工法とは,クレーンで吊り上げた重錘を地盤へ落下させることで地盤を直接締め固める工法であり, 地盤の液状化対策などに用いられている.



写真7.1 動的載荷新状況(動圧密工法<sup>7.2)</sup>)

7.5 実施工程

浦安実証実験での実施工程表を次ページの表 7.2 に示す.



# 7.6 実験結果

7.6.1 施工性の確認

(1) 宅地向け施工方法

宅地向け施工方法を図 7.5 に示す.

既設宅地の施工において,課題となるのは排泥処理方法である.通常は,トレンチ掘削で仮設の排泥溜め を設置して、サンドポンプで吸い上げて処理を行うが、既設宅地を対象とした場合、トレンチ掘削を行うこ とができない.そこで,地中にケーシングを埋設し,ケーシング頭部に直接バキューム車の吸引ホースを連 結できる排泥処理装置を製作した.図7.6に排泥処理装置概要図を示す.



1. 排泥処理装置用掘削·試掘



·排泥処理装置用掘削(深度1m) ・埋設物確認の試掘を兼ねる





・設置後、孔壁周りをセメントミルク で充填



・スライドベースによる自走 ・単管による人力移動 ・H鋼レールによる人力移動 ・分解による人力搬入、組立 (現場条件で選択)



施工最小幅:1m程度 ・バキューム車による直接吸引で 周辺を汚さず施工可能

図7.5 宅地向け施工方法



図7.6 宅地向け排泥処理装置

写真 7.2 に排泥処理状況を示す.施工中は,排泥をスムーズに処理できることを確認した.





写真7.2 排泥処理状況
## (2) 施工サイクル

施工サイクルを確認するため, 試掘・排泥システム設置時間, マシン移設設置, 削孔時間, 造成 時間, 撤去・片付けについて浦安実証実験中に施工サイクルの確認を行った.

その結果を用いてもっとも改良体造成量の多い改良体である CASE1 蓋付き格子の標準改良体(No.2,4,6,8)で施工サイクルの試算を行った.図7.7 に施工サイクルの確認を行った改良体の位置図を示す.

上記 ~ の標準的な施工サイクルを表 7.3 に示す.その結果,既設宅地内の施工において,1 孔の施工 を1日で完了させることができることを確認した.



図7.7 施工サイクル確認を行った改良体の位置図

内容	サイクル	削孔長12m 造成長10m として試算
試 掘 排泥システム設置	準備工として別施工 (30分/箇所)	0分
マシン移動・設置	30分/箇所	30分
削孔	12分/m ロット接続時間含む	144分
造 成 (蓋付き2方向)	17分/m ロッド切断時間含む	170分
撤去・片付	60分	60分

表7.3 標準施工サイクル(2方向壁状改良+蓋部180度)

計 404分 (6.7時間) 7.6.2 周辺への影響確認

(1) 振動・騒音

造成中の周辺への影響確認として,振動・騒音に対する計測を実施した.図 7.8 に計測位置図を示す.振動・騒音の計測位置は,模擬基礎の中央で実施し,施工地点(削孔位置)より最短距離で 6.5m となる.

振動・騒音の計測結果を図 7.9 に示す.振動は 60~70dB 程度(暗振動 35dB 程度),騒音は 70~80dB 程度 (暗騒音 60dB 程度)であった.振動は造成中の超高圧ジェットの噴射に起因するものであり,騒音は造成位置 に設置した排泥処理装置より発生するバキューム車の吸気音であった.いずれも造成中(約3時間弱)での 振動・騒音であり,造成前後ではほとんど振動・騒音は発生しなかった.造成中の振動・騒音については特 定建設基準値を満足している.なお,騒音の原因であるバキューム車による吸気音については,排泥処理装 置の改善で対応可能である.





図7.8 振動・騒音計測位置図



図7.9 振動・騒音計測結果

(2) 沈下

施工による沈下の影響を確認するため,造成開始前~造成後5日の期間でレベル計測を実施した.計測地 点は模擬基礎の4隅である.

計測結果は CASE1,2 ともに数 mm 程度と非常に小さいものであり,既設建物への影響はほとんど発生しないものと考えられる.

7.6.3 品質確認

(1) 出来形

造成した改良体の一部を掘起し,出来形確認を行った.図7.10に結果を示す.

CASE1(蓋付き格子)の蓋部については,改良半径4mの計画に対し4.2mを確保していた.なお,噴射距離 を明確にするため,改良体を外側へ30度追加して造成を行っている.CASE2(単純格子)では,実測され た最小壁厚は65cmであり計画値の50cmを満足している結果となった.なお,根元部で改良幅を確保するた め,削孔時のジェット削孔の方向に角度をつけること周辺地盤を事前に拡径できる対策を行っている(図 7.11).



図7.10 掘起しによる出来形確認結果



図7.11 ジェット削孔 7-11

## (2) 根元部・ラップ部の強度確認

改良体の強度を確認するため,掘り起こした改良体の一部でブロックサンプリングを行い,一軸圧縮強度 試験と圧裂引張試験を実施した.サンプリング位置を写真 7.3 に,ブロックサンプリング供試体作製状況を 写真 7.4 に,一軸圧縮試験および圧裂引張試験結果を表 7.4 に示す.

一軸圧縮強度については,設計強度 3.0MPa に対して2倍程度の強度が確認された.圧裂引張強度に対しては,設計強度 0.33MPa(0.15×quck,quck:設計基準強度)に対して,同様に2倍程度の強度が確認できた.

ラップ部と根元部で有意な強度の違いは確認できなかった.ラップ部が弱部とならず一体となった改良体 の造成が可能であることを確認した.



ラップ部



根元部

根元部

写真7.3 サンプリング位置



写真7.4 ブロックサンプリング供試体作製状況

試験	一軸圧縮試験(MPa)	圧裂引張試験(MPa)	
	间天	JIS A 1218	JGS 2551
設	計 値	3.0MPa	0.33MPa
=		6.33	0.52
์ พื่		5.97	0.81
ノ部		7.21	0.76
	平均	6.50	0.70
		7.78	0.71
根 元		6.76	0.92
		6.39	0.65
	平均	6.98	0.76

## 表7.4 一軸圧縮試験および圧裂引張試験結果

7.6.4 改良効果の確認

(1) 実験目的

無対策地盤と改良地盤(蓋付き格子・単純格子)の対策効果を確認することを目的として,動圧密工法を 用いた人工地震による動的載荷試験を実施して,地盤の応答値(加速度・間隙水圧)と改良体ひずみの計測 を行った.

## (2) 実験内容

原地盤(無対策), CASE1(蓋付き格子), CASE2(単純格子)の3ケースに対して,人工地震による動的 載荷実験を実施した.図7.12に改良効果確認の試験概要図を示し,表7.5に人工地震の仕様を示す.



## 図7.12 改良効果確認の試験概要図

表7.5 人上地震の仕	□様
-------------	----

項目	仕様	仕様	仕様
重錘重量	10t		
落下高さと載荷回数	落下高 15m×10 回	落下高 15m×10 回	落下高 20m×11 回
載荷サイクル	インターバル 180 秒間隔	インターバル 60 秒間隔	インターバル 75 秒間隔
セット数	1セット		

# (3) 実験結果

次頁以降,原地盤(無対策), CASE1(蓋付き格子), CASE2(単純格子)において,人工地震仕様 ~ での格子内地盤の応答加速度,間隙水圧,改良体ひずみの計測結果を図7.13~図7.27に示す.





図7.13 無対策(原地盤)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.14 無対策(原地盤)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.15 無対策(原地盤)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.16 CASE1(蓋付き格子)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.17 CASE1 (蓋付き格子)人工地震仕様 計測結果(改良体ひずみ)



7-20



図7.19 CASE1 (蓋付き格子)人工地震仕様 計測結果(改良体ひずみ)





図7.20 CASE1(蓋付き格子)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.21 CASE1(蓋付き格子)人工地震仕様 計測結果(改良体ひずみ)





図7.22 CASE2(単純格子)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.23 CASE2(単純格子)人工地震仕様 計測結果(改良体ひずみ)





図7.24 CASE2(単純格子)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.25 CASE2(単純格子)人工地震仕様 計測結果(改良体ひずみ)



図7.26 CASE2(単純格子)人工地震仕様 計測結果(加速度・間隙水圧)



図7.27 CASE2(単純格子)人工地震仕様 計測結果(改良体ひずみ)

1) 応答加速度と間隙水圧

人工地震仕様 で計測された原地盤(無対策)の応答加速度を図 7.28 に示す.1載荷当たり平均 150gal 程 度であり,過剰間隙水圧比では,1載荷当たり 0.20~0.23 程度の上昇を計測したが,載荷後のインターバル で消散し地盤の液状化までは至らなかった.



図7.28 応答加速度と過剰間隙水圧比の計測結果 (人工地震仕様 ,原地盤(無対策)GL-7m)

人工地震仕様 ~ において,原地盤(無対策),CASE1(蓋付き格子),CASE2(単純格子)の3ケース に対して,GL-7m地点の1載荷当たりの応答加速度と間隙水圧比で整理した結果を図7.29に示す.

1 載荷当たりの地盤の応答加速度と過剰間隙水圧比の関係に高い相関性が確認された.応答加速度は,人工地震仕様で比較した場合,原地盤(無対策)がもっとも小さく,CASE1(蓋付き格子)とCASE2(単純格子)が230gal程度と同程度であり,原地盤(無対策)に対して1.5倍程度大きい結果となった.これは,格子内地盤の全体剛性が増大することで,地盤のせん断変形による応答加速度の減衰が小さくなっているものと考えられる.過剰間隙水圧比は,人工地震仕様で比較した場合,原地盤(無対策)の過剰間隙水圧比の上昇量がもっとも大きく1載荷で0.20~0.23程度上昇しているのに対して,CASE1(蓋付き格子)では0.05~0.09程度,CASE2(単純格子)では0.10~0.14程度に抑制していることを確認した.



図7.29 過剰間隙水圧比と応答加速度の関係(GL-7m,1載荷当たり)

2) 改良体ひずみ

人工地震仕様 における深度 GL-3.5m, 7.0m の改良体ひずみの計測結果で, CASE1(蓋付き格子)を図 7.30に, CASE2(単純格子)を図 7.31に示す.

両ケースとも GL-3.5m の深度で GL-7.0m に対し相対的に大きなひずみを計測した.これは,地表面から載荷したため,地表面付近の改良体の変形がもっとも大きく発生したためと考えられる.

GL-3.5mにおいて, CASE1(蓋付き格子)ではひずみは累積していないが, CASE2(単純格子)ではひず みが累積傾向にある.これは, CASE1(蓋付き格子)の蓋部が改良体上部の剛性を大幅に向上させた効果で あることが推測される.

GL-7.0mにおいて, CASE1(蓋付き格子)では載荷直後のひずみの変化が少ないのに対し, CASE2(単純格子)では載荷直後に瞬間的に大きなひずみが発生している.これは, CASE1(蓋付き格子)の改良体剛性が高く,効果的に格子内地盤のせん断変形を抑制していると考えられる.

なお,両ケースとも,計測した最大ひずみは 0.02~0.03%程度である.今回の実験結果は周辺地盤が液状化していないこと,1載荷当たりの応答加速度自体は想定地震動レベルにあるが連続載荷でないことから, 一概に実際の地震動レベルでの改良体の健全性評価とならないが,北詰<sup>3)</sup>の報告やマルチジェット工法の実績を参考にセメント改良地盤の破壊ひずみ 0.5%とした場合の 1/25~1/17 程度と非常に小さい値である.



図7.30 改良体ひずみ計測結果 (CASE1 蓋付き格子,仕様)



図7.31 改良体ひずみ計測結果 (CASE2 単純格子,仕様)



図7.32 セメント改良地盤の破壊ひずみ7.3)

7.7 まとめ

浦安実証実験において,施工性・周辺への影響・品質の確認の検証結果より,既設宅地への適用性は十分 可能であると考えられる.平成25年度でも品質にかかわるデータ蓄積を目的に実証実験を計画しており,更 なる信頼性の確保を目指す所存である.

改良効果の確認においては,相対的な比較となるが,原地盤(無対策)に対して,過剰間隙水圧比の上昇 を蓋付き格子では 1/3 程度,単純格子では 1/2 程度まで抑制できることを確認した.動的載荷試験後の沈下 量は 2~3mmの計測誤差範囲であった.実際の地震動に対する効果検証を目的とした長期モニタリングにつ いては,現在継続中である.以降 2~3年程度の期間を目処に計測を継続する予定である.

7.8 引用文献

7.1) 浦安プロジェクト地盤調査報告書:東京基礎調査株式会社, pp14-42, 2010.9

7.2) 実用 軟弱地盤対策技術総覧,(株)産業技術サービスセンター,pp733-744,1993.11

7.3) 北詰昌樹:深層混合処理工法による改良地盤の安定性に関する研究,港湾技研資料 No.774,p7,1994

参考資料

- 7.9 参考:施工機械,プラント寸法,施工に必要な作業面積,機械の搬入方法 高圧噴射攪拌工法(マルチジェット工法)における施工機械およびプラント等についての仕様を示す.
- 7.9.1 施工機械
- (1) 道路部(低空頭タイプ)
- ・基本的にはクレーンを使用するが,クレーンを使用しなくても可
- ・総重量 2.0t





- (2) 宅地部(超小型タイプ)
- ・人力による移動・施工が可能
- ・総重量 0.4t





7.9.2 プラント寸法

(1) 定置式プラント

下図に示すように,標準的なプラントのスペースとして,10m×15m 程度の用地が必要となる. 用地がない場合は,各設備を道路の片側1車線に1列(3m×50m 程度)に並べることも可能である. なお,プラントと施工箇所の距離は,150m 程度以内とする.



図7.35 標準プラント配置図

## 7.9.3 車上式プラント

用地がない場合,各設備をトラックの上に積んだ車上式プラントとすることも可能である. (車上プラントとした場合においては,工事費は上がる.) なお,プラントと施工箇所の距離は,150m程度以内とする.



発電機300KVA + 超高圧ポンプSG200

発電機300KVA + 超高圧ポンプSG200



ミキシングプラント

水槽30m3 + 発電機125KVA





発電機150kva + コンプレッサー100ph



図7.36 車上式プラント配置

7.9.4 施工に必要な作業面積

(1) 道路部施工の場合

造成地点:標準施工機+4.9t 吊クレーン( 3.0m×10m)

周辺設備:高圧コンプレッサー+発電機(3.0m×10m)

造成地点から 50m程度以内

プラントヤード : サイロ,超高圧ポンプなど(10m×15m程度) 造成地点から150m程度以内





造成地点から 150m 程度以内



図7.39 既設戸建て住宅向け超小型マシン

7.9.5 搬入方法

- (1) プラントヤード
  ・4t~15t トラック(8台程度)により搬入
  ・25t ラフターによる荷下ろしを行う.
- (2) 造成地点(道路部)
  - ・施工マシン,高圧コンプレッサー,発電機を4tユニックで搬入・荷卸しを行う
- (3) 造成地点(宅地部)
  - ・施工マシン,高圧コンプレッサー,発電機,油圧ユニットを4tユニックで搬入・荷卸しを行う
  - ・施工マシン(超小型マシン)は,荷卸し後,人力移動で造成地点へ移動

## 8章 経済性評価

3~7章で述べた研究成果を基に,本成果を適用した液状化対策工事費の試算を行った.

- 8.1 コスト試算条件
- 8.1.1 液状化対策仕様

本章の経済性評価を行うための液状化対策仕様を以下に示す.

- ・ 液状化対策仕様は浦安市を想定し,6章の簡易設計図表を用いて液状化対策仕様を設定する.
- ・ 想定地震動と目標性能に対する液状化対策仕様を表 8.1 に,改良形状ケースを図 8.1 に示す.
- ・ 液状化層厚 12m, 地下水 GL-1.0m, 改良長 12m (GL-1.0~13m)とする.
- ・ 設計一軸強度 quck=4.5MPa の高強度タイプ (MJG-H 号)を採用する.
- ・ 有効壁厚は最小壁厚 50cm とする.
- ・ 1 宅地のサイズは 13m正方形とする.

想定地震動	目標性能	液状化対策仕様	
		単純格子 13m×16m (1住戸1格子)	
(200gal (M9.0))	地表付近の非液状化層厚 H1 3m	蓋付き格子 26m×32m (4住戸1格子)	
大地震動 (350gal (M7.3))	地表沈下量 Dcy 10cm(被害:小)	蓋付き格子 13m×16m	

表81 想定地震動と日標性能に対する海状化対策仕様

図8.1 改良形状ケース

## 8.1.2 積算条件

本章の経済性評価を行うための積算条件を以下に示す.

- ・ 起算数量は1街区(20軒)とする.
- ・ 工事用水は有償とし,400円/m<sup>®</sup>をコスト試算に計上する.
- ・ 排泥処理費は場外処分とし,7,700円/m<sup>®</sup>をコスト試算に計上する.
- ・ 工事用電力については発電機より受電するものとしコスト試算に計上する.
- 施工に伴う付帯工事(外構撤去復旧,緑地移植復旧,足場設置撤去等)は標準の想定範囲でコスト試算 に計上する.
- ・ 施工に伴う事前配合試験,事後品質確認試験はコスト試算に計上しない.
- ・ 公害対策費(観測井戸設置,水質管理,排水処理,飛散養生設備,騒音対策)はコスト試算に計上しない。
- ・ 労災保険,工事保険の加入手続き,および保険料はコスト試算に計上しない.
- ・ 労務資材単価については,現行(H25年2月)の単価とする.

#### 8.1.3 施工条件

本章の経済性評価を行うための積算条件を以下に示す.

- ・ 施工は昼間施工(8:00~17:00)とし,実働時間を6.7時間とする.
- ・ 休日は4週6休とする.
- ・ セット数は1セット(1セット当たり,プラント1基,低空頭マシン1機,超小型マシン1機)とする.
- ・ プラントは施工地点から 100m 以内で定置式プラント(20m×15m 程度)が設置できるものとする.
- ・ 現場への資機材搬入については大型トラックが搬入可能(平日昼間作業)とする.
- ・ 施工は連続施工が可能であり,施工待機が生じないものとする.

#### 8.1.4 官民負担の考え方

本章の経済性評価を行うための官民負担の考え方を以下に示す.

- ・ 削孔造成地点が道路の場合は官負担,宅地であれば民負担とする.
- 材料費,労務費,機械損料費,消耗材料費,排泥処分費,動力用水費,特許使用料については,改良体 積で官民費用を按分するものとする.
- ・ プラント設置撤去費,運搬費などの固定費はすべて官負担とする.
- ・ 間接工事費,共通仮設費については,全費用を改良体積で按分するものとする.

# 8.2 コスト試算結果

8.2.1 中地震動(200gal, M9.0)に対する液状化対策費用

	単純格子(着底型)	蓋付き格子(着底型)
概要図	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
目標性能	地表沈下量 Dcy 5cm(被害:軽微) 地表付近の非液状化層厚 H1 3m	地表沈下量 Dcy 5cm(被害:軽微) 地表付近の非液状化層厚 H1 3m
格 子 ピ ッ チ	13m×16m(1 住戸 1 格子)	26m×32m(4 住戸 1 格子)
液状化深度	GL-1m~12m(地下水位 GL-1.0m)	GL-1m~12m(地下水位 GL-1.0m)
改良深度	GL-1m~13m(改良長 12m)	GL-1m~13m(改良長 12m)
全体工事費	1.8億円	1.4 億円
(内、宅地工事費)	(0.7億円)	(0.3億円)
(内、所有者負額)	(340万円)	(130万円)

8.2.2 大地震動(350gal,M7.3)に対する液状化対策費用

	単純格子(着底型)	蓋付き格子(着底型)
概要図	(適用不可)	□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
目標性能		地表沈下量 Dcy 10cm (被害:小)
格 子 ピ ッ チ		13m×16m(1 住戸 1 格子)
液状化深度		GL-1m~12m(地下水位 GL-1.0m)
改良深度		GL-1m~13m(改良長 12m)
全体工事費		2.1 億円
(内、宅地工事費)		(0.8 億円)
(内、所有者負額)		(420万円)
# 9章 研究成果と今後の課題

- 9.1 研究内容と成果
- 9.1.1 基本方針
- (1) 地盤改良工法

狭隘地での施工が可能な小型の機械で薄壁形状のセメント改良が可能な自由形状・大口径高圧噴射撹拌工法(マルチジェット工法)を採用した.本研究においてはこの工法を更に狭隘地用に改善すること,および薄壁形状やその他の自由形状を合理的に組み合わせることで大幅なコストダウンを図ることが可能であると考えた.

(2) モデル事例

具体的な研究を進めていくにあたって,液状化対策工のモデル事例を設定した.そこで,千葉県浦安市の 住宅地と道路や下水道などの公共施設とを一体化した「市街地液状化対策事業」をマルチジェット工法によ る薄壁形状やその他の自由形状を合理的に組み合わせた格子状改良等を実施することをモデルとして研究を 行った.なお,本研究のモデル事例では宅地を対象としているが,ここで得られた研究成果を応用すること で既設戸建て住宅だけではなく,社会基盤施設,産業施設等全般に用いることが可能となる.

# 9.1.2 研究開発項目と研究全体フロー

研究開発項目を以下に,研究全体フローを図 9.1 に示す.



# 9.1.3 各研究開発項目の内容と成果 各研究開発項目の内容と成果を以下に示す.

(1) 合理的な改良形状の提案

フェーズ1:模型実験による合理的な改良形状の提案

【内容】

数ケースの改良形状(図 9.2)を選定し,予備実験で振動台実験による改良形状の可能性検討,次に本実験として遠心載荷実験を行い,合理的な改良形状の提案を行う.



図9.2 改良形状ケース

【成果】

- ・ 改良形状による効果は,単純格子(着底型) < バットレス格子(着底型) < 蓋付き格子(着底型)の順で高く, 特に蓋付き格子については,上層付近の過剰間隙水圧抑制効果と地表沈下抑制効果が特に優れていた.
- ・ 蓋付き格子(着底型)に対して,宅地部を浮き型(道路部は着底)とした場合でも,地表沈下量抑制効果に関しては同等の効果を有していることが確認できた.

## フェーズ2:3次元有効応力解析による合理的な改良形状の検討

【内容】

模型実験による合理的な改良形状に対し解析的に検討を行う.解析的に検討を行うには,3次元的挙動を 再現する必要があり,本研究では一般的な2次元有効応力解析として普及しているコード「FLIP」の3次元 有効応力解析が可能な「FLIP3D」を用いる.しかし,このコードはまだまだ使用実績は少ないことからその 再現性および境界条件等のモデル設定の妥当性も含めて検証する必要がある.そこで本研究においては,ま ずフェーズ1で実施した遠心載荷実験モデルを再現した3次元有効応力解析を実施して3次元解析モデルの 妥当性を検証する.次に妥当性を検証されたモデルの考え方を用いて,具体的な事例として浦安運動公園の 地盤モデルの解析を行い,合理的な改良形状の検討を行う.ここで,浦安市運動公園の地盤モデルで解析を 行った理由は,今回提案する合理的な改良形状を造成するマルチジェット工法の実証実験工事を運動公園で 実施したことによるものである.

【成果】

・ 3次元有効応力解析(FLIP3D)で模型実験(遠心載荷実験)の5ケース(無対策,単純格子(着底型),バットレス格子(着底型),蓋付き格子(着底型),蓋付き格子(一部着底型))を再現したモデルでは,地表面沈下量に対して高い精度で再現できることを確認した(図9.3).



図9.3 3次元有効応力解析と遠心載荷実験結果の対比

 ・ 蓋付き格子は地表面付近の過剰間隙水圧発生を効果的に軽減できることを確認した.これは模型実験結果とも整合する結果である(図 9.4).



図9.4 過剰間隙水圧比の対比(単純格子・蓋付き格子)

・格子状改良全般(単純格子,バットレス格子,蓋付き格子)において建物傾斜に対する抑制効果を確認した. これは,改良体で境界を区切る縁切り効果で隣接する建屋の影響を軽減したと考えられる(図 9.5).



図9.5 格子状改良の縁切り効果による建物傾斜抑制効果

(2) 合理的な改良形状の簡易設計手法の提案

フェーズ3:3次元的挙動を再現できる2次元有効応力解析モデルの検討

【内容】

平易に概略設計が可能な設計図表策定のためには土質条件等をパラメータとした数多くの有効応力解析に よるパラメタリックスタディが必要となるが,これを3次元有効応力解析で行うことは1ケースの解析時間 に数日を要することを考慮すると難しい.そこで,3次元的挙動を再現できる2次元有効応力解析モデルの 確立が必要となる. 【成果】

- 単純格子の場合,3次元有効応力解析によると改良体上部の変形(たわみ)がかなり大きく発生する.従来の2次元有効力解析モデル(二重要素モデル)では,この改良体上部の変形を表現できないため,危険側の結果となることが判明(図 9.6).
- ・ 単純格子の場合,3次元的挙動を再現できる2次元有効応力モデルとするには,表層付近の改良体剛性 を低減することで再現可能であった.本研究では,改良体剛性の低減量は,解析コードTDAP (2D,3D) を用いて定量的に評価した.
- ・ 蓋付き格子の場合,3次元有効応力解析によると改良体上部の変形が蓋部で拘束するため,改良体上部の変形(たわみ)はかなり抑制できる.したがって,従来の2次元有効力解析モデル(二重要素モデル)によるモデル化方法でもほぼ同程度の解析結果となった(図 9.6).



図9.6 大スパン格子状改良の変形状況

フェーズ4: 簡易設計図表の策定

【内容】

合理的な改良形状による液状化対策を迅速に普及させるために,対象エリアの土質条件等で平易に概略設計が可能となる簡易設計図表を策定する.本研究では千葉県浦安市をモデルとし,簡易設計図表の策定のためのパラメタリックスタディはフェーズ3で検討した3次元的挙動を再現できる2次元有効応力解析モデルを用いる.

【成果】

・フェーズ3 で確立した3次元的挙動を再現できる2次元有効応力解析モデルを用いて,千葉県浦安市を地盤モデルとするパラメタリックスタディを行った.その結果,目標性能に応じて,液状化層厚を既知とすれば格子スパン(単純格子,蓋付き格子)が算定できるような簡易設計図表を策定した(図 9.7).



・目標性能を中地震動(200gal(M9.0))で地表沈下量 Dcy 5cm,かつ地表付近の非液状化層厚 H1 3m,大地 震動(350gal(M7.3))で地表沈下量 Dcy 10cm とすると、本研究で策定した簡易設計図表によれば、浦安市 では中地震動では、単純格子ならばピッチ 13m×16m(1住戸1格子)、蓋付き格子ならばピッチ 26m×32m(4 住戸1格子)、大地震動では、蓋付き格子ピッチ 13m×16m(1住戸1格子)で目標性能を満足することがで きることを確認した.

# (3) 合理的な改良形状の試験施工による施工性確認

# <u>フェーズ5:浦安実証実験</u>

# 【内容】

既設戸建て住宅に適用できる超小型マシン(図 9.9)を開発し,宅地を想定したヤードにて,合理的な改良形状の改良体を造成し,施工性(狭隘地での施工)や周辺への影響(騒音,振動,造成に伴う沈下),品質(出来形, 強度),および改良効果(人工地震による検証)の確認を実施する.



図9.8 既設戸建て住宅向け超小型マシン

【成果】

- 狭隘地向け超小型マシンの施工性は,標準的な造成1孔を1日のサイクルで施工完了でき,効率的な施工が可能であることを確認した.また,専用の排泥処理装置を適用することで周辺を排泥で汚さずに施工できた.
- ・ 周辺への影響(騒音,振動,造成に伴う沈下)では,騒音は70~80dB,振動は60~70dBの範囲であり, 特定建設作業の基準値(騒音85dB,振動75dB)以下であることを確認した.造成に伴う沈下では,最終沈 下量が数mm程度の非常に小さいものであり,既設建物への影響はほとんど発生しないと考えられる.
- 品質確認(出来形)は,改良体の一部を掘起して実施した.設計値をすべて満足する結果であった.品質確認(強度)は掘起した改良体の一部をブロックサンプリングし一軸圧縮試験と圧裂引張試験を実施した.設計値に対して2倍程度の強度であることが確認できた.なお強度確認は根元部とラップ部で実施しているが,有意な強度差は確認されなかった.
- ・ 改良効果確認(人工地震による検証)では,相対比較となるが,ある応答加速度に対する過剰間隙水圧の発生は,原地盤(無対策)に対して単純格子では1/2程度,蓋付き格子では1/3程度の抑制効果であった(図 9.9,図 9.10).







図9.10 人工地震による改良効果確認結果

9.2 成果の実用化の見通し

本研究は,千葉県浦安市において,道路や下水道などの公共施設と民間の宅地とを一体化した「市街地液 状化対策事業」を想定し,経済的かつ効果的な改良形状の開発とその簡易設計図表の研究を行なった.その 結果,蓋付き格子状改良を提案・検証することができた.成果の実用化の見通しについて以下にまとめる.

従来の格子状改良では,改良率が 50%程度であるのに対し,本成果を活用すれば改良率を 7~10%程度 の改良率まで削減でき,従来工法に対して大幅にコストを削減できる.所有者1軒当たりの概略負担額 は中地震動では 100~200万円程度,大地震動では 400~500万円程度と試算される.経済性に優れた本 成果の活用で,市街地液状化対策事業の大きな課題でもある所有者合意形成を促進し,事業の実現化が 図れる.

合理的な改良形状(蓋付き格子)の簡易設計図表を活用することで,市街地液状化対策事業の改良仕様を 平易に算定できる.これらの設計手法により「市街地液状化対策事業」の普及までの迅速化が期待できる.

開発した狭隘地向け超小型マシンを用いて,既設戸建て住宅を想定した実証実験による検証結果から, 本成果の実用化については十分可能である.

なお,本成果を用いれば,浦安市以外の市街地液状化対策事業は当然のことながら,その他狭隘地における社会基盤施設,産業施設等に対しての液状化対策にも十分活用ができる.

## 9.3 今後の課題

改良体の引張応力に関して

本研究は現段階において,従来の格子状改良と同様に改良体はせん断応力の照査のみで,引張応力の 照査は実施していない.そこで,3次元解析により格子状改良体の引張応力を算定すると解析上,局部 的,部分的に許容値(引張強度等)を超える箇所が発生することは避けられない.引張応力に関する, このような部分的な領域を一切許容しない設計は合理性に欠けると考えられるため,適切な判断基準 (例えば,部材断面方向に部分的な引張破壊は許容するが,貫通クラックは発生させない等)を設定し て上で,引張応力の健全性も評価することが望ましい.

超小型マシンの施工データ蓄積による品質の信頼性向上

新たに開発した超小型マシンは,基本的に従来機と同等の性能を満足する施工仕様を確保できるよう に設計しているため問題はないと考えられるが,今後も超小型マシンの試験施工を実施していき総合的 な品質の信頼性向上を図ることが望ましい. 謝辞:

本研究は,平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により甚大な液状化被害を被った東北・ 関東の湾岸域を中心とした広域な被災地の現状を鑑み、当社保有技術である自由形状・大口径改良を特徴と する高圧噴射攪拌工法「マルチジェト工法」の応用展開に発想を得て着手したものである.幸いにも,この 着想が国土交通省・平成 23 年度建設技術研究開発助成にご採択いただいたことから ,研究を加速度的に進め る一助となった.また,助成を受ける条件として設置が義務付けられた「産官学テーマ推進員会」において は、塚本良道委員長(東京理科大学 理工学部 十木工学科・教授)はじめとする九名の著名なる地盤工学有 識者各位にご多忙の中を全4回の委員会にご参集いただき,数々の貴重なるご助言ならびに叱咤激励をいた だいたことが,本研究成果に繋がったものと確信し,心よりの感謝を申し上げる次第である.加えて,工法 の成立性を確認するための研究の初期段階における重要な模型実験に関しては,東京電機大学 理工学部 地 盤工学研究室・石川敬祐助手,肥後成一氏らの趣旨をご理解いただいた献身的で緻密な実験,ならびに東洋 建設㈱ 総合技術研究所 鳴尾研究所・鶴ヶ崎和博博士,澤田豊博士(現・神戸大学大学院・助教)の非常に 高度な実験技術に裏打ちされた貴重なるデータ収集により、短期間のうちに最大の成果を得られたことが、 その後の研究の推進力となったことにも心からの謝意を表したい、一方で忘れてならないのは、連日連夜、 昼夜を徹して前例のない難解な3次元有効応力解析に傾注していただいたフジミコンサルタント㈱・小泉亮 氏のご協力なくしては、最終成果には辿り着けなかったことであろう、そして、研究の最終段階における理 論と実現象の同位性を立証するために不可欠であった原位置実証実験を平成24年度浦安市実証実験事業に ご採択いただき,浦安市運動公園内にご提供いただいた敷地にて実施することが出来たことも,我々にとっ ては非常に幸運なことであった.

最後に,浦安市運動公園敷地で実施した公開実験にご参集いただき,長時間の施工実演・説明等にお付き 合いいただき,質疑応答や貴重なる意見を交換していただいた関係各位ならびに浦安市市民の方々に感謝申 し上げるとともに,本研究成果を実用化という形で結実させることこそが,各位のご厚意に報いる唯一の方 法との思いを新たにする次第である.

> 平成25年3月 前田建設工業㈱ 共同研究者一同

# 別添資料1

# 外部発表論文

第9回地盤工学会関東支部発表会 GeoKanto2012

# 宅地向け液状化対策を目的とした格子状改良体の 最適形状に関する基礎的検討 ~振動台実験結果に基づく考察~

液状化対策 格子状改良 振動台実験

前田建設工業	(株)	国際会員	○ 清水	英樹
前田建設工業	(株)	国際会員	平田	昌史
東京電機大学		学生会員	肥後	成一
東京電機大学		正 会 員	石川	敬祐

# 1. はじめに

東京都が発表した東日本大震災の液状化被害状況を考慮した首都直下地震による被害想定の見直し<sup>1)</sup>では、東京湾北部地震によって液状化被害を受ける建物棟数はこれまでの2.5倍にまで拡大しており、宅地向けの液状化対策は急務であるといえる.現在、既設宅地向けの液状化対策工法としては、深層混合処理工法による格子状地盤改良<sup>2)</sup>や地下水位低下工法等の検討が行われているが、ここでは自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法である「マルチジェット工法」<sup>3)</sup>を

用いた格子状地盤改良を取り上げる.従来の高圧噴射撹拌 工法は、回転する地中挿入ロッドからセメントミルクを噴 射し円柱状の改良体を造成するのが一般的であるが、本工 法では地中挿入ロッドを揺動させることで、扇形、壁状お よび格子状等の改良体を造成することが可能である.また、 円柱状の改良体を並べた格子形状に比べ、削孔数やセメン トミルク注入量が少なく、汚泥の発生量も抑えられるため 経済的である.

本研究では,既設宅地向けの液状化対策として自由形状 対応型の高圧噴射攪拌工法による格子状改良を想定し,改 良体形状による液状化抑制効果の違いを検討するため,1G 場における振動台実験を実施した.

## 2. 振動台実験の概要

# (1) 模型地盤と計測器位置

実験では,幅1.2m,高さ1.0m,奥行き0.8mのせん断主 槽(写真-1)の中に豊浦標準砂を投入することで模型地盤 を作製した.図-1に,模型地盤の概略図を示す.非液状化 層は,豊浦標準砂を投入した土槽に微振動を与え,高さ 400mm,相対密度90%になるまで締め固めることで作製し, 液状化層は,一定量の豊浦標準砂を投入した後,高圧噴射 のパイプを用いて水を地盤内に送り込み撹拌することで, 高さ450mm,相対密度50%になるように作製している.な お,模型地盤は実物の1/50スケールを想定しており,地下 水位は地表面である.表-1に,実験に使用した豊浦標準砂 の諸元を示す.

地盤内部には、図-1 に示すように地盤中央(C.L.,改良 体内部)と地盤右側(C.L.+370mm,改良体外部)の2測線 に、間隙水圧計を4深度(GL.-150mm,-250mm,-350mm, -450mm)の計8箇所,加速度計を2深度(GL.-250mm, -450mm)の計4箇所に設置した.改良体を考慮したケース では、改良体模型にも加速度計を取り付けている.なお、 地盤内加速度計の設置方法については、高橋ら<sup>4)</sup>の手法を 参考に、アクリル板とテグスを用いて地盤内に加速度計を 吊り下げ、所定の方向・深度になるように地盤を作製して いる.

Examination of the Liquefaction Countermeasure by Grid-shaped Improved Ground Model using Shaking Table Tests



写真-1 実験に使用したせん断土槽



SHIMIZU, Hideki HIRATA, Masafumi Maeda Corp. HIGO, Seiichi ISHIKAWA, Keisuke Tokyo Denki Univ.

#### (2) 改良体形状と実験ケース

改良体形状は、通常の「格子状改良」と格子内側にも壁を 構築する「バットレス格子状改良」の2つの格子形状に,改 良体上端に扇状の改良による「蓋」を考慮した4種類の形状 を基本とした、これらの形状に対して、非液状化層まで改良 を実施し根入れする「着底型」と、液状化層の途中まで改良 する「浮き型」を考慮し、計8種類の改良体模型を用いて実 験を行った.実験ケースは未改良地盤を含めて合計9ケース である.表-2に、実験ケースと改良体形状の一覧を示す.改 良体模型の寸法は、敷地面積 50 坪程度(13m×13m)の宅地 を想定し,260mm×260mmの格子形状とした.また,壁の厚 さを 8mm (実スケールで 0.4m) , 蓋の厚さを 20mm (実スケ ールで 1.0m)とし、「浮き型」の改良深度を液状化層厚の 2/3 (液状化層 450mm に対して改良深度 300mm) とした. 写 真-2 に、実験に使用した代表的な改良体模型を示す. なお、 改良体模型はアクリルで作製しており, 浮き上がり防止のた め鉛板で模型重量を調整している.

#### (3)入力地震波

振動台実験では、入力地震波を周期 2Hz,加速度 80gal の 正弦波とし、加振時間を振動台の始動・停止を含め 10 秒(有 効加振時間 7 秒程度、およそ 14 波)とした.図-2 は、振動 台に設置した加速度計の加速度応答結果である.この図より、 Case-01~Case-09 すべての実験ケースにおいて加速度応答は ほぼ一致しており、今回実施した振動台実験における入力地 震波の再現性が確認できる.

# 3. 実験結果の比較と考察

# (1) 過剰間隙水圧比の比較

地盤内に設置した間隙水圧計の計測結果より過剰間隙水圧 比を求め、各計測位置における比較を行った。図-3は未改良 ケース(Case-01)と着底型改良ケース(Case-02~Case05)の 比較結果,図-4は未改良ケース(Case-01)と浮き型改良ケー ス (Case-06~Case09) の比較結果である. 図-3(a)に示す地盤 中央(改良体内部)の過剰間隙水圧比を見ると、過剰間隙水 圧比が急激に増加する経過時間 1.0~2.0 秒の勾配が、未改良 ケース (Case-01, 図中黒線) よりも着底型改良ケース (Case-02 ~Case05)の方が若干緩やかになっていることが確認できる. また,地表面に近い G.L.-150mm および G.L.-250mm では, 改 良体に蓋を付けた Case-03 と Case-05 の値が経過時間 2 秒以 降に大きく低減しており、蓋付き形状による効果も確認でき る.一方,図-4(a)に示す地盤中央(改良体内部)の過剰間隙 水圧比は、未改良ケースと浮き型改良ケース(Case-06~ Case09)とほぼ同じ結果となっており、着底型改良ケースの ような効果は確認できない.

このような改良体による効果を相対的に比較するため,次 のような整理を試みた.図-5は、過剰間隙水圧比が0.8に到 達する時間をT<sub>0.8</sub>として、各ケースを比較したグラフである. 若干ばらつきはあるが、着底型改良ケース(Case-02~Case05) の地盤中央(改良体内部)の値が他のケースに比べ大きく、 過剰間隙水圧の上昇が緩やかであることがわかる.図-6は、 経過時間5.5~6秒(12波目)における過剰間隙水圧比を、最

表-1 豊浦標準砂の諸元

土粒子密度	$\rho_{\rm S}$	2.659	g/cm <sup>3</sup>
最小乾燥密度	$\rho_{\rm dmin}$	1.334	g/cm <sup>3</sup>
最大乾燥密度	$\rho_{\rm dmax}$	1.618	g/cm <sup>3</sup>

表-2 実験ケースおよび改良体形状の一覧

ケースNo.	改良体形状				
Case-01	未改良	_			
Case-02	バットレス格子 着底型				
Case-03	蓋付きバットレス格子 着底型	200 mm ue control to the control to			
Case-04	通常格子 着底型				
Case-05	蓋付き通常格子 着底型				
Case-06	バットレス格子 浮き型				
Case-07	蓋付きバットレス格子 浮き型	₹ <sup>260 mm</sup> um 000 to mm to mm			
Case-08	通常格子 浮き型				
Case-09	蓋付き通常格子 浮き型				



写真-2 代表的な改良体模型(着底型)





大過剰間隙水圧比で無次元化することで、過剰間隙水圧比 の低減率を定義し各ケースを比較したグラフである.地表 面位置に近いG.L.-150mm およびG.L.-250mm を見ると、蓋 付き着底型改良ケース(Case-03 および Case-05)の地盤中 央(改良体内部)の値が他のケースに比べ小さく、過剰間 隙水圧の発生を抑制していることがわかる.

#### (2) 加速度応答の比較

図-7 は、未改良ケース(Case-01)と着底型改良ケース (Case-02~Case05)の地盤内加速度応答の比較結果,図-8 は未改良ケース(Case-01)と浮き型改良ケース(Case-06 ~Case09)の地盤内加速度応答の比較結果である.図-7(a) に示す G.L.-250mm 位置の加速度応答を見ると、未改良ケ ース(Case-01, 図中黒線)では、地盤が液状化することで 加速度が徐々に減衰するのに対し、着底型改良ケース (Case-02~Case05) ではほとんど減衰しておらず,改良体 内部の地盤に対して液状化を抑制していることが伺える. 一方,図-8(a)に示す地盤内加速度応答では,浮き型改良ケ ース (Case-06~Case09) は未改良ケース (Case-01) と同じ ように減衰しており、着底型改良ケースのような液状化抑 制効果は確認できない. 図-9 は, 経過時間 5.5~6 秒(12 波目)における加速度振幅を,加速度振幅の最大値で無次 元化することで、加速度の低減率を定義し各ケースを比較 したグラフである.このグラフを見ても、着底型改良ケー ス(Case-02~Case05)では、他のケースと比較して地盤内 加速度の減衰がほとんど生じていないことが確認できる.





図-10 は、改良体模型に取り付けた加速度計の加速度応 答結果である.浮き型改良ケース(Case-06~Case09)では、 経過時間 2 秒程度で改良体周辺の地盤が完全に液状化し、 入力地震波が改良体に伝達されていないことがわかる.

ちなみに、図-1に示すように地表面には変位計を2箇所 設置し沈下量を計測している.しかしながら、模型地盤が 相対密度50%と非常に緩く、かつ地下水位を地表面として いることから地表面付近の揺動が大きく、沈下量をうまく 計測できていない.なお、実験前後に測定した地表面高さ から求めた地表面沈下量は、どのケースも10mm 前後であ り、改良体内部と外部の差もほとんど生じていない.

### 4. おわりに

本研究では,既設宅地向けの格子状地盤改良を対象とし た振動台実験を実施し,改良体形状による液状化抑制効果 の違いについて相対的な比較を行った.地盤内に設置した 間隙水圧計および加速度計の測定結果より,非液状化層ま で改良を実施し根入れする「着底型」の改良形状が,液状



化の抑制に効果があることがわかった.また,格子状改良体の上端に扇状改良による「蓋」を取り付けることで,地表面 付近の液状化抑制に効果があることもわかった.なお,今回実施した振動台実験では,バットレス格子形状の改良効果は 確認できていないが,1G場における1/50スケールの模型実験であるため,実際の格子状改良の間隔や地盤内の土圧を考 慮した場合には,バットレス格子形状の効果が現れることも考えられる.今後は,今回の振動台実験結果を踏まえた遠心 力場における模型実験や実規模の現場実証実験,数値解析の実施を予定しており,液状化対策効果の高い合理的な改良形 状,施工性および簡易設計手法について,さらに検討を行う予定である.

**謝辞**:本研究は,国土交通省の平成23年度補正予算建設技術研究開発助成制度による「震災対応型技術開発公募(液状 化対策)」の一環として実施したものである.なお末筆ながら,実験を行うにあたりご協力頂いた東京電機大学の鈴木英 樹氏,種子田聖志氏に深く感謝いたします.

## 参考文献

- 1) 東京都防災会議: 首都直下地震等による東京の被害想定報告書, 2012.4.
- 2) 例えば,香川裕司,小西一生,大西常康:戸建住宅地を対象とした耐液状化格子状地盤改良工法の施工事例,第 47 回地盤工学研究発表会,pp.1499-1500,2012.
- 3) 安井利彰, 手塚広明, 竹岡正二, 後藤和彦, 清水公了, 川西 敦士:マルチジェット工法の施工実績報告, 前田技術研 究所報, Vol.49, 2008.
- 4) 高橋英紀、山脇秀仁、北詰昌樹、石橋伸司:深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した 新しい格子配置の提案、港湾空港技術研究所報、第45巻第2号、pp.135-167、2006.

# 別添資料2

# 外部発表論文

# 第48回地盤工学研究発表会

# 既設宅地を対象とした格子状改良による液状化対策工法 の開発(その1)模型実験による合理的な改良形状の検討

液状化対策 格子状改良 模型実験

前田建設工業㈱	国際会員	○清水	英樹
前田建設工業㈱	国際会員	平田	昌史
東洋建設(株)	国際会員	鶴ヶ﨑	奇和博
東洋建設(株)	正 会 員	澤田	豊
東京理科大学	国際会員	塚本	良道

東日本大震災により1都8県80市区町村にも及ぶ極めて広い範囲で液状化現象が発生し、特に、東京湾沿岸部の市街 地や利根川下流域の埋立地等では住宅、道路、護岸等の様々な構造物に甚大な被害をもたらす結果となった。このよう な著しい液状化被害を受けた地域において、再度災害の発生を抑制するための市街地液状化対策推進事業<sup>1)</sup>が創設され たことを受け、関係自治体では事業計画の策定と検討委員会の設立が行われ、道路等の公共施設と隣接宅地の一体的な 液状化対策の推進に向けた議論が活発化している.現在、実現可能性のある工法として、地下水位低下工法や格子状地 盤改良等が挙がっている<sup>2)</sup>が、いずれも宅地向け改良に適用した場合の定量的効果の検証や周辺地盤への影響対策、コ スト低減策などの課題も多く残されている.そこで、既存宅地の液状化対策工法として、自由形状・大口径高圧噴射攪 拌工法である「マルチジェット工法」<sup>3)</sup>の適用を図ることを目的に、①模型実験および数値解析による合理的改良形状 の検討、②宅地向け小型施工機械の開発および実規模実験による施工性と改良効果の検証、③簡易設計手法の確立、と

いった一連の研究開発を実施した.本報では, このうちの①模型実験による合理的改良形状の 検討結果について述べる.なお,本研究開発は 国土交通省の平成23年度補正予算建設技術研 究開発助成制度による「震災対応型技術開発公 募(液状化対策)」の一環として実施した.

#### 1. マルチジェット工法の特徴

自由形状・大口径高圧噴射攪拌工法「マルチ ジェット工法」では地中挿入ロッドを揺動させ ることで、扇形、壁状および格子状等の改良体 を造成することが可能であるため(図1参照), 円柱状の改良体を並べた従来の格子状地盤改良 と比較して,より合理的な改良が可能なため経 済的である.さらに、扇形や壁状の改良体を組 み合わせることで、例えば図2に示すような格 子改良内部にも内壁状の改良体を造成した「バ ットレス格子」や、格子改良上端部を扇形の改 良体で蓋をする「蓋付き格子」といった特殊な 改良形状も造成することが可能であり、狭隘な 施工条件下での効果的な改良が求められる宅地

の液状化対策において順応性の高い様々な提案が期待される.

# 4. 模型実験の目的

既設宅地向けの液状化対策工法として「マルチジェット工法」による格子状地盤改良を想定し、16場における振動台実験および遠心模型実験を実施することで、液状化抑制に対する最適な改良体形状についての検討を行った. なお、ここで報告する遠心模型実験結果に対する再現解析を3次元動的有効応力解析(FLIP-3D)により実施し、液状化抑制効果の予測精度の検証および設計手法確立に向けた検討結果については、別報<sup>4)</sup>にて報告する.

## 3. 1G場における振動台実験

振動台実験では、せん断土槽(幅1.2m,高さ1.0m,奥行き 0.8m)を用い、豊浦標準砂を投入し、高さ450mm(実物の 1/50 スケール),相対密度50%になるように模型地盤を作製 した.また、地下水位は地表面と同一とした.16場における

Development of a rational liquefaction countermeasure constituting of lattice-shaped improved ground by jet grouting method for housing site : Part1 The shaking table tests and centrifugal tests for verifying the shape of optimal improving





図1 マルチジェット工法による改良体造成イメージ



(a)単純格子 (b)バットレス格子 (c)蓋付き格子 図 2 マルチジェット工法による改良パターン

SHIMIZU, Hideki HIRATA, Masafumi Maeda Corporation TSURUGASAKI, Kazuhiro SAWADA, Yutaka Toyo Construction Corporation LTD.

TSUKAMOTO, Yoshimichi Tokyo University of Science

振動台実験(全9ケース)の詳細については、既報<sup>5)</sup>に譲 るが、得られた知見は以下の通りであった.

①地盤内に設置した間隙水圧計および加速度計の計測結果 より、非液状化層まで改良を実施し根入れする「着底型」 の改良形状で, 液状化抑制効果が確認された.

②格子状改良体の上端に扇状改良体による「蓋」を取り付 けることで、地表面付近の液状化抑制に効果的であること が確認された.

#### 3. 遠心載荷装置を用いた模型実験

さらなる検証を進めるため、改良体の格子間隔や地盤内 の有効土被り圧の影響を実スケール相当で発現できる遠心 力場(80G)での模型実験を実施した.図3に、遠心模型実 験で使用した模型地盤の概略図を示す.実験では、剛性容 器(幅 600mm, 高さ 400mm, 奥行き 150mm)内に, 乾燥させ た豊浦標準砂を高さが 200mm (=実スケール換算層厚 16m), 相対密度が約40%になるようにゆっくりと投入し、その後容 器の下からセルロース系の粘性流体を通水・飽和させるこ とで液状化層を作製した.また,家屋の沈下や傾斜を評価 するため, 表層に 20mm の不飽和層(地下水位 G.L.-20mm) 設け, その上に 80G 場での接地圧が 15kPa となるよう住宅 模型を設置した.

入力地震波は、各実験ケースの再現性を重視し、実際の 地震波(不規則波)ではなく、内陸直下型地震相当の規則 波(正弦波, 1Hz, 150gal, 15 波)を採用した. なお, 80G 場でこの入力地震波を再現する場合、相似則より 80Hz, 12800gal (約13G) となる.

実験ケースは、振動台実験の結果を受けて、「着底型」 を3ケース(単純格子,バットレス格子,蓋付き格子),

「一部着底型」を1ケース(蓋付き格子)とした.「一部 着底型」とは、隣接する道路等公共施設部分を基盤層まで 改良する「着底型」とし,宅地部分を液状化層の途中まで 改良する「浮き型」とすることを想定したケースであり, 改良体模型の前面・背面の 2 面を基盤層までの「着底型」 としている.表1に、遠心模型実験のケースと改良体形状 の一覧を示す.

写真1は、高速度カメラで撮影した加振前と加振後(経 過時間約 6.0 秒)の住宅模型の様子を比較したものである。 この写真から、未改良地盤(Case-01)と一部着底型蓋付き 改良ケース(Case-05)では、住宅模型の沈下量に歴然たる 差が確認された.

#### 5. 遠心模型実験結果のまとめと考察

遠心模型実験では、地盤内に設置した間隙水圧計、加速 度計, 沈下計の計測結果より, 地盤改良を考慮したすべて のケース (Case-02~Case-05) で、液状化や沈下に対する 抑制効果が確認された. その中でも特に, 蓋付き形状ケー ス (Case-04, Case-05) は表層付近の液状化抑制に高い効 果を発揮すると伴に、住宅基礎の沈下に対しても非常に高 い抑制効果があることが確認された.また、一部着底型の 蓋付き形状ケース(Case-05)は、着底型の蓋付き形状ケー ス(Case-04)とほぼ同程度の沈下量となっており、住宅基 礎の高い沈下量抑制効果を保ちつつ、宅地部分の大幅なコ ストダウンが可能であることが示唆された.

#### 参考文献

1) 国土交通省:液状化対策推進事業について(国土交通省) 2) 浦安市:市街地液状化対策実現可能性検討調査結果の概要(浦安市市街地開発課,報道発表資料),2013.01.13

3) (社) 日本建設機械化協会:「マルチジェット工法」建設技術審査証明書, 2009.06

4) 岡田直仁,吉本勝哉,小泉 亮,塚本良道:既設宅地を対象とした格子状改良による液状化対策工法の開発(その

2) 3次元動的有効応力解析による合理的な改良形状の検討(投稿中),第48回地盤工学研究発表会(富山),2013.07 5)清水英樹,平田昌史,肥後成一,石川敬祐:宅地向け液状化対策を目的とした格子状改良体の最適形状に関する基礎 的検討~振動台実験結果に基づく考察~,第9回地盤工学会関東支部発表会 Geo-Kanto2012, 2012.





表1 遠心模型実験ケースと改良体形状の一覧 Case-04 Case-05 Case-01 Case-02 Case-03 蓋付き格子 蓋付き格子 無対策 単純格子 ベットレス格子 (一部着底) (着 底) 145 mm .145 mm 145 mm 145.mm |<del>< 145 mm</del> |<del>< <sup>145</sup> mm</del> 145 mm . 145 mm



(a) Case-01: 未改良ケース



(b) Case-05: 蓋付き格子改良ケース(一部着底) 写真1 加振前後における住宅模型の沈下比較

都市局市街地整備課,報道発表資料),2011.11.29

# 既設宅地を対象とした格子状改良による

液状化対策工法の開発(その2)

# 3次元動的有効応力解析による合理的な改良形状の検討

高圧噴射攪拌工法, 3次元動的有効応力解析, 格子状改良

#### 1. はじめに

前報その1では、振動台実験・遠心模型実験により、格子状地盤改良による液状化抑制効果を確認するとともに、 効果的な改良形状の検討を行った.

本報では,遠心模型実験に対して3次元動的有効応力解 析 (FLIP3D<sup>1)</sup>)による再現解析を実施し,実験結果との比 較から解析モデルの妥当性を確認する.

#### 2. 解析条件と材料パラメータ

### 2. 1 解析モデル

図1に、解析に用いたメッシュ図を示す.ここでは、奥 行き方向の対称性を考慮して1/2モデルとしている.境界 条件は、遠心模型実験が剛性土槽を用いていることから、 底面と側面を剛基盤として入力地震波を与え、前面と背面 をローラー固定とした.入力地震動は、遠心振動台におい て計測された加速度応答波形(図2)を使用している.な お、遠心模型実験は80G場における実験であることから、 実験で使用した地盤を80倍に拡大したモデルを用いる.



表1 解析に用いた各層の材料パラメータ

				不飽和層	液状化層	基盤層
湿潤密度	:	$\rho_1$	t/m <sup>3</sup>	1.91	1.91	1.91
基準せん断弾性係数	:	$G_{\rm ma}$	MPa	52.29	52.29	126.22
ポアソン比	्	v		0.33	0.33	0.33
粘着力	:	С	kPa	0.0	0.0	0.0
内部摩擦角	:	φ	deg.	38.30	38.30	41.20
細粒分含有率		Fc	%	10.0	10.0	10.0
履歴減衰の上限値	1	h max	a - 1	0.24	0.24	0.24
変相角	:	$\varphi_{\rm p}$	deg.	-	28.0	-
液状化特性全体の規定パラメータ	:	W1		-	6.057	-
液状化特性前半の規定パラメータ	:	P1		-	0.500	1.00
液状化特性後半の規定パラメータ	:	P2		-	1.025	-
液状化発生の下限値規定パラメータ	:	C1			1.600	12
液状化終局状態の規定パラメータ	:	\$1			0.005	-

前田建設工業株式会社	正会員	○岡田直仁
前田建設工業株式会社	非会員	吉本勝哉
フジミコンサルタント株式会社	非会員	小泉 亮
東京理科大学	国際会員	「塚本良道」

#### 2.2 材料パラメータ

解析に用いた材料パラメータは、未改良ケースに対する 逆解析により同定した.**表1**に、各層の材料パラメータを 示す.なお、改良体の材料パラメータについては、遠心模 型実験で格子状改良を模擬したアクリル材の剛性を用い ている.住宅部分は10×10mのべた基礎、高さ5mとし、 接地圧が15kPaとなるように単位体積重量を設定した.

#### 2. 3 解析ケース

解析ケースは、遠心模型実験を再現する目的から、表2 に示す5ケースについて検討を行う.

衣2 胜例クース					
CASE-01 無対策	CASE-02 単純格子 (着底型)	CASE-03 バットレス格子 (着底型)	CASE-04 蓋付き格子 (着底型)	CASE-05 蓋付き格子 (一部着底)	
_	11.2 m +	× <sup>uu</sup> <sub>2</sub> <sup>uu</sup>	tiller werting	HILE HILE HILE HILE HILE HILE HILE HILE	

#### 3. 解析結果と実験結果の比較

#### 3. 1 過剰間隙水圧比

図3に,格子改良内地盤の中央部における過剰間隙水圧 比の時刻歴の実験結果(実スケールに補正)と解析結果の 比較を,図4に,加振直後における過剰間隙水圧比の比較 を示す.FLIP3Dによる解析が非排水条件であるため地盤 表層(GL-1.6m)での水圧上昇傾向に差異が表れるものの, その他の深度においては,実験結果で見られる過剰間隙水 圧の増加傾向を概ね再現できている.また,実験結果と同 様,蓋付き格子改良が表層部において高い液状化抑制効果 を発揮することが確認できる.

#### 3. 2 住宅基礎沈下量

FLIP3D では過剰間隙水圧消散に伴う沈下を直接計算す ることができないため、住宅基礎の沈下量は、Ishihara and Yoshimine<sup>2)</sup> による手法を用いて、各要素の最大せん 断ひずみから過剰間隙水圧消散後の体積ひずみを別途算 出し、FLIP3D による加振終了後の変形に足し合わせるこ とで評価する.

図5は、加振直後の過剰間隙水圧比と、消散後の体積ひ ずみの分布図である.過剰間隙水圧比の分布を見ると、格 子改良により内部地盤の液状化が抑制され、特に蓋付き格 子改良ケースでは、表層付近の過剰間隙水圧が大幅に抑制 されており、解析結果からも蓋付き格子の高い対策効果が 確認できる.また、過剰間隙水圧消散に伴う体積ひずみ分 布を見ると、未改良ケースでは体積ひずみが大きく発生し、 住宅基礎が地盤にめり込むように沈下している.これに対 し、格子改良を実施したケース、特に蓋付き格子改良ケー スでは、格子改良周辺地盤が大きく沈下しているのに対し て住宅基礎の沈下は抑制されており、遠心模型実験の傾向 ともよく一致した結果が得られている.

表3は住宅基礎沈下量の比較であるが,解析結果の沈下



量は実験結果に比べかなり小さい値となった.これは,遠 心模型実験において,加振中に不飽和層へ間隙水圧が浸透 することで生じる大きな沈下を,非排水条件を仮定した FLIP3D では考慮できないためと考えられる.そこで,遠 心模型実験における加振直後の地下水位の上昇量から不 飽和層に浸透した間隙水量を算定し,この値を用いて解析 結果の補正を行った.図6は,補正後の住宅基礎沈下量を 比較したグラフであるが,解析結果は実験結果とほぼ一致 しており,今回用いた沈下量評価手法が十分に適用可能で あることがわかる.

### 4. まとめ

前報にて報告した遠心模型実験結果に対して、3次元動 的有効応力解析(FLIP3D)による再現解析を行い、過剰間 隙水圧の上昇傾向や住宅基礎沈下量の比較から、解析モデ ルの妥当性を確認することができた.また、格子状改良を



(a) 加振直後の過剰間隙水圧比 (b) 水圧消散後の体積ひずみ 図5格子改良内部における過剰間隙水圧比の比較

表3住宅基礎沈下量の比較

	実験結果(平均値)		角尾枝	斤結果	(基礎中	(央)
	Aug bert - An Ala	加振直後			L. COLUMN AND	
	加报直後	水上消散後	補正前	補	正後	水上消散後
Case-01	514	782	113	489	[376]	757
Case-02	300	469	42	230	[188]	472
Case-03	299	417	25	213	[188]	394
Case-04	46	57	4	4	[-]	98
Case-05	26	43	5	5	[-]	111



実施した地盤の沈下量を定量的に評価するため,最大せん 断ひずみから過剰間隙水圧消散に伴う沈下を評価する手 法について,定量的な評価が可能であることを確認した. 格子状改良の形状については,遠心模型実験同様,蓋付 き格子の対策効果が高く,一部浮き型の改良とした場合に も,蓋付きであれば表層地盤に対する液状化対策効果を十 分に発揮することを解析的に確認した.

#### 参考文献

 Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4, pp. 27-56, 1990.
 Ishihara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of settlements

in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 32, No.1, pp. 173-188, 1992. 既設宅地を対象とした格子状改良による液状化対策工法

の開発(その3)3次元的挙動を考慮した2次元

動的有効応力解析モデルの検討

高圧噴射攪拌工法,格子状改良,2次元動的有効応力解析

1.はじめに

前報その2では、遠心載荷実験を再現した3次元動的有 効応力解析(FLIP3D)で高い再現性を有することを報告し た.本報では,概略検討段階で改良仕様を迅速に設定する ことを目的として,3次元的な挙動を再現できる2次元動 的有効応力解析(FLIP2D)モデルの検討と,そのモデルを 用いて浦安市を事例とした改良効果の検討結果について 報告する.

2.三次元的挙動を考慮した二次元モデルの検討 2.1 解析モデルおよび解析ケース

2次元モデルを図1に示す.前報その2で報告した3次 元モデル(遠心載荷再現モデル)と同様の地盤・改良体物 性および入力地震波とした.格子状改良のモデル化は,擬 似的に3次元化するため2重要素モデル<sup>1)</sup>を用いた.

解析ケースは,前報その2で報告した検討ケースのうち, 単純格子(CASE-02)および蓋付き格子(CASE-04)で解析 を実施した.



2.2 検討結果

単純格子の過剰間隙水圧比コンター図、格子内地盤中央 部(GL-3.0m, GL-10.0m)の時刻歴のせん断ひずみと過剰 間隙水圧比の解析結果を図2に、蓋付き格子を図3に示す.

図2に示す単純格子では,GL-3.0mの表層付近のせん断 ひずみは,3次元モデルでは,初期の段階から大きな値が 発生しているのに対し,2次元モデルでは緩やかに増加し, 最大値では 1/2 倍程度と危険側の解析結果となった.過剰 間隙水圧比も同様の結果である.これは,スパンの大きな 格子状改良では,上層付近の変形が大きく発生し,2重要 素モデルを用いた2次元モデルでは3次元的挙動を適切 に再現できないものと考えられる.GL-10m でのせん断ひ

会員 山内	崇寛
会員 岡田	直仁
際会員 塚本	良道
	去員 田内 会員 岡田 際会員 塚本

ずみと過剰間隙水圧比の進行度と最大値は,過剰間隙水圧 比が2次元モデルでやや小さめな値となるが,概ね再現で きている

図3に示す蓋付き格子では,2次元モデルのせん断ひず みと過剰間隙水圧比の解析結果は,全体的にやや小さめの 値となるが,上層付近も含め,全体的に概ね再現できてい る結果となった.これは,表層付近の改良体の変形が蓋部 で拘束されたためと考えられる.

単純格子と蓋付き格子を対比した場合,図2と図3の過 剰間隙水圧比コンター図により ,特に蓋付き格子の蓋を設 けた上層付近の液状化抑制効果が非常に高いことが確認 できた.



0.8

0.6

0.4

0.2

0.0

0.8

0.6

0.4

0.0

10.0

u/ v'

2Dモデル

3Dモデル

- 2 Dモデル

30.0

GL - 10 0 m

20.0

Г

— 3Dモデル

30.0

2Dモデル

20.0



1.0%

0.0%

-1.0%

-2.0%

-3.0%

3.0%

1.0%

0.0%

-1.0%

0.0

xy 2.0%

10.0

Detached Houses : Part 3 Study on Simplified Design Method by 2D dynamic effective stress analysis considering 3D Effects MAEDA Corporation: Takamasa KANDA, Takahiro YAMAUCHI, Naohito OKADA Tokyo University of Science: Yoshimichi TSUKAMOTO

3.3次元的挙動を考慮した改良効果の検討例

浦安市を事例として2次元解析により格子状改良効果 の検討を実施した.

2章の検討結果より単純格子の場合は3次元的な挙動 を充分に考慮できず危険側の結果を与える可能性がある ため,改良効果が高く3次元的な挙動を再現できる改良形 状である蓋付き格子による検討を実施した.

3.1 目標性能の設定

既設宅地の液状化対策に対する目標性能については、国 や関係自治体で設立された検討委員会でも議論が進めら れているが、未だ統一された明確な基準は打ち出されてい ない、本事例での目標性能は現在までの動向を参考にして 表1の通りに設定した。

地震動レベル				
巨大地震による中程度の揺れ(200gal,M9.0)				
目標性能 2)3)4)				
5.0cm				
.Om				
.5				

3.2 解析ケース

解析ケースは,浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会の第3回検討報告書(以下,「委員会資料」と称す) <sup>4)</sup>を参考に,図4に示す2ケースに対して蓋付き格子で検討を実施した.





3.3 解析モデル

解析は3次元的挙動の再現性の検証を行った2次元モ デル(FLIP2D)を使用した.4住戸毎改良ケースの解析モ デルを図5に示す.解析断面は,委員会資料と同様である が5街区(1街区20軒)以上を一体の対策を行うとして, 1街区の長手方向の断面とした.



図5 解析モデル(4住戸毎改良)

地盤モデルは委員会資料と同様である.その他必要な物 性については FLIP の簡易設計法<sup>5)</sup>により設定した.改良 体の配合は設計一軸強度4.5N/mm<sup>2</sup>である高強度タイプと し,改良体物性は委員会資料と評価方法に準じて設定した.

入力地震動は,東北地方太平洋沖地震で東京都夢の島観 測所の計測波を工学基盤まで引き戻した.

3 . 5 整理方法

沈下量 Dcy の算定は、前報その 2 と同様に、Ishihara and Yoshimine<sup>6)</sup>による手法を用いて,各要素の最大せん断ひ ずみから過剰間隙水圧消散後の体積ひずみを別途算出 (Dr60%と設定)し,加振終了時の変形に足し合わせるこ とで評価した.液状化判定は、過剰間隙水圧比で評価し, 液状化対象範囲の過剰間隙水圧比で最大値 1.0 以下を非 液状化と判定した.改良体のせん断応力は,改良体の平行 壁について行い、短期許容せん断応力度については、委員 会資料の評価方法に準じて設定し,安全率を算出した. 3.5 解析結果

4 住戸毎改良ケースの過剰間隙水圧比コンター図を図 6 に、改良体(平行壁)せん断応力コンター図を図 7 に示す.

過剰間隙水圧比では,最大値0.8程度,平均値0.3程度 であり,地表面付近の非液状化層厚H1 3mを十分満足す る結果であった.沈下量Dcyについては,原地盤(無対策) では,沈下量が7.6cm発生する結果に対して,1住戸毎改 良では0.21cm,4住戸毎改良では1.42cmと沈下抑制効果 の非常に高い結果となった.

改良体の短期許容せん断応力安全率では,4住戸毎改良 でもほぼ安全率1.5を満足する結果となった.

なお単純格子(1 住戸毎改良)の場合 2 次元解析では図 8 に示すように過剰間隙水圧比も低く,目標性能を満足する 結果となるが,3次元解析では NG となることを確認して いる。このことは3次元的挙動を考慮した場合,単純格子 では目標性能を満足できない可能性があることを示唆し ている。

以上の検討結果から,3次元的挙動を考慮した蓋付き格 子は,1 住戸毎改良はもちろん4 住戸毎改良に対しても十 分適用可能であり単純格子に比べコスト削減効果も高い と考えられる.



図6 過剰間隙水圧比コンター図(4住戸毎改良)蓋付格子



因7 (2000年10月10月11 ンター図(4 住戸毎改良) 蓋付格子 図8 過剰間隙水圧比コン ター図(1住戸毎改良)単純 格子

現在これらの検討結果を基に,各種地盤に対し3次元的 挙動を考慮した改良仕様を,迅速かつ合理的に概略検討段 階で設定することを目的とした簡易設計図表を作成中で ある.

#### 引用文献

1)港湾空港技術研究所報告 VIo.51:(独)港湾空港技術研究 所,pp28-39,2012.9

2)液状化被災市街地における地下水位低下工法の検討・調査について(ガイダンス(案)):国土技術政策総合研究所,p12,2013.1

3)浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の 研究:(社)地盤工学会,pp192-193,2012.9

4)格子状改良工法 WG (WG2)検討報告:浦安市 液状化対策実現可 能性技術検討委員会,pp1-76,2012.11

5)液状化解析プログラム FLIP による動的解析の実務【事例 編】:(財)沿岸技術研究センター,pp2-4-1~14,2011.8

6) Ishihrara, K. and Yoshimine, M. :Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.173-188,1992

## 高圧噴射攪拌工法,超小型マシン,浦安市実証実験

#### 1.はじめに

前報その1~3より,効果的な改良形状が蓋付き格子で あることを確認した.本報では,狭隘地でも施工可能とな る超小型マシンを開発し,実証実験を浦安市総合運動公園 敷地内のヤードで実施した内容について報告する.本報で は施工性を中心に報告し,その5で改良効果の確認の報告 を行う.なお本実証実験は,平成24年度浦安市実証実験 事業に採択され,浦安市より実証実験ヤードの提供を受け 実施している.

2.既設宅地向け超小型マシンの概要

狭隘地の既設宅地にも適用できる超小型マシン(図1) を開発した.超小型マシンの特徴を以下に示す.

- マルチジェット工法標準機と同等の改良性能を保持 (自由形状+大口径改良(最大直径8.0m))
- ・ 幅 60cm,長さ 75cm,高さ 163cm,総重量 0.4t
- ・ 施工幅 1.0m 以内のスペースで施工が可能
- ・ 施工機を分解して人力で移動することが可能
- ・ 相番のクレーンなしで施工が可能

図 1

表 1

の検証結果について報告する.

工可能

目標

狭隘地でも施

既設宅地へ影

響を与えない

所定の出来

形・強度確保

対想定地震動

に対し格子内

地盤が液状化

しない

3.実験概要

目的

施工性

周辺への

改良効果

影響確認

品質

の確認

の確認

の確認

3.1 実験目的

 宅地専用の排泥処理装置により,周辺を排泥で汚さ ず施工が可能

1.0m以下

**R** 2

改良体

確認方法

・狭隘条件を再現し確認

・施工前後のレベル計測

・掘起しによる出来形確認

・人工地震による効果確認

・長期モニタリング

(地震発生時に検証)

・ブロックサンプリングによ

る確認(ラップ部・根元部)

・振動騒音計測

・施工サイクルの確認

民家

専用マシン

ブロック塀

既設宅地向け超小型マシン

目的,目標および確認方法一覧

表1に目的,目標および確認方法を示す.本報では



#### 3 . 2 実験概要

図 2 に実証実験ヤードの柱状図 を示す 地盤は 地下水位がGL-1.4m であり,GL-2.8~-4.2mにシルト層 が介在するが,GL-9.5mまでN値5 程度の細砂主体の埋土,GL-11.8m までN値15程度の細砂主体の沖積 層,GL-11.8m以深は沖積シルト層 で構成される.なお,実証実験ヤー ドは東日本大震災において実際に 液状化現象が発生した.

図 3 に実証実験配置図を示す. CASE1(蓋付き格子),CASE2(単純 格子)の2ケースとし,単独の改良 体を非液状化層に着底させて造成 する.既設宅地の影響を確認するた め,地表面にはべた基礎を模擬した RCスラブ(10m×10m,厚さ20cm) を設置した.





Development of a Rational Liquefaction Countermeasure Applied Lattice-Shaped Cement Treatment Method for Established Detached Houses : Part 5 Verification for the Countermeasure Effects by Demonstration Experiment in Urayasu MAEDA Corporation: Hiroaki TEZUKA, Takahiro YAMAUCHI, Akito TSUJI Tokyo University of Science: Yoshimichi TSUKAMOTO

別添-15



写真1 狭隘地での施工状況(離隔1m) 表2 標準的な施工サイクル(削孔長 12m,造成長 10m) 

内容	サイクル	時間			
マシン 移動・設置	30 分/箇所	30 分			
削孔工	12 分/m (ロッド接続時間含む)	144 分			
造成工	17 分/m (ロッド切断時間含む)	170 分			
撤去 片付け	60 分	60 分			
		스탁 404 /)			

(6.7時間)

# 4.2 周辺への影響確認

施工中に模擬基礎の中央部(施工地点より約5m地点) において,振動・騒音の計測をおこなった.図4に振動・ 騒音結果を示す.



### 図4 振動·騒音計測結果

振動は 60~70dB 程度(暗 振動 35dB 程度), 騒音は 70~80dB 程度(暗騒音 60dB 程度)であった 振動は造成 中の超高圧ジェットの噴射 に起因するものであり,騒 音は造成位置に設置した排 泥処理装置より発生するバ キューム車の吸気音であっ た.いずれも造成中(約3 時間弱)での振動・騒音で あり,造成前後ではほとん ど振動・騒音は発生しなか



写真2 騒音原因

った.造成中の振動・騒音については特定建設基準値を満 足している .なお ,騒音の原因であるバキューム車による 吸気音については、排泥処理装置の改善で対応可能である.

施工による沈下の影響についてはレベル計測を行った. 最終的に 3mm 程度以下の沈下傾向を示したが,沈下量自体 は小さく既設宅地への影響は小さいと考えられる.

4.3 品質確認

(1)出来形確認

造成した改良体の一部を掘起し,出来形確認を行った. 図5に結果を示す.

CASE1(蓋付き格子)の蓋部については,改良半径4mの 計画に対し4.2mを確保していた.なお,噴射距離を明確に するため,改良体を外側へ30度追加して造成を行ってい る.CASE2(単純格子)では,最小壁厚は65cmであり計画 値の 50cm を満足している結果となった.なお,根元部で改 良幅を確保するため,削孔時のジェット削孔の方向に角度 をつけること周辺地盤を事前に拡径できる対策を行って いる.



CASE1(蓋付き格子) 図5 掘起しによる出来形確認結果

CASE2(単純格子)

(2)根元部・ラップ部の強度確認

改良体の強度を,掘起した改良体の一部をブロックサン プリングし,一軸圧縮強度試験と圧裂引張試験を実施した. サンプリング位置を写真3に,試験結果を表3に示す. 一軸圧縮強度および引張強度について設計値をすべて満 足する結果となった.





ラップ部 根元部 写真3 ブロックサンプリング位置 表3 一軸圧縮試験および圧裂引張試験結果

試	験	一軸圧縮試験(MPa) JIS A 1218	圧裂引張試験(MPa) JGS 2551
設	計値	3.0MPa	0.33MPa
		6.33	0.52
ラッション		5.97	0.81
部 プ		7.21	0.76
~ 平均		6.50	0.70
		7.78	0.71
根		6.76	0.92
九部		6.39	0.65
ць.	平均	6.98	0.76

5.まとめ

本報では,浦安市実証実験において,施工性・周辺への 影響・品質の確認の結果について報告した.本実証実験結 果から既設宅地への適用は十分可能であると考えられる.

平成 25 年度でも品質にかかわるデータ蓄積を目的に実 証実験を計画しており、更なる信頼性の確保を目指す所存 である.

高圧噴射攪拌工法,実証実験,動圧密工法

#### 1.はじめに

前報その4では、浦安市実証実験において既設宅地の狭 隘地でも適用できる超小型マシンで,施工性の確認, 周辺への影響確認,品質の確認(出来形・強度)につい て報告した.本報では、人工地震による動的載荷試験によ り蓋付き格子・単純格子の改良効果を確認した内容につい て報告する.

2.実験概要

2.1 実験目的

無対策地盤と改良地盤(蓋付き格子・単純格子)の対策 効果を確認することを目的として,人工地震による動的載 荷試験を実施して,地盤の応答値(加速度・間隙水圧)と 改良体ひずみの計測を行った.人工地震は動圧密工法<sup>1)</sup> を用いて起振した.動圧密工法とは,クレーンで吊り上げ た重錘を地盤へ落下させることで地盤を直接締め固める 工法であり,地盤の液状化対策などに用いられている.

2.2 実験内容

原地盤(無対策), CASE1(蓋付き格子), CASE2(単純 格子)の3ケースに対して,人工地震による動的載荷実験 を実施した.図1に試験概要図を示す.



前田建設工業株式会社	正会員	山内崇寛
前田建設工業株式会社	正会員	手塚広明
前田建設工業株式会社	非会員	太田光貴
東京理科大学教授	国際会員	塚本良道

表1に人工地震の仕様を示し,写真1に動的載荷試験状 況を示す.

表 1 人工地震の仕様			
項目	仕様	仕様	
重錘重量	10t		
落下高さと	落下高 15m	落下高 20m	
載荷回数	×10回	× 11 回	
載荷 サイクル	インターバル 90 秒間隔		
セット数	2セット	1セット	



写真1 動的載荷試験状況

3.実験結果

3.1 地盤の応答加速度および間隙水圧計測結果

人工地震仕様 において,原地盤(無対策)の GL-7m 深度の応答加速度と過剰間隙水圧比の計測結果を図 2 に 示す.

人工地震仕様 で計測された原地盤(無対策)の応答加 速度は,1載荷当たり平均150gal程度であった.過剰間 隙水圧比では,1載荷当たり0.20~0.23程度の上昇を計 測したが,載荷後のインターバルで消散し地盤の液状化ま では至らなかった.



Development of a Rational Liquefaction Countermeasure Applied Lattice-Shaped Cement Treatment Method for Established Detached Houses : Part 5 Verification for the Countermeasure Effects by Demonstration Experiment in Urayasu MAEDA Corporation: Takahiro YAMAUCHI, Hiroaki TEZUKA, Koki OTA Tokyo University of Science: Yoshimichi TSUKAMOTO 人工地震仕様 および において,原地盤(無対策), CASE1(蓋付き格子),CASE2(単純格子)の3ケースに対 して,GL-7m地点の1載荷当たりの応答加速度と間隙水圧 比で整理した結果を図3に示す.

1 載荷当たりの地盤の応答加速度と過剰間隙水圧比の 関係に高い相関性が確認された.

応答加速度は,人工地震仕様 で比較した場合,原地盤 (無対策)がもっとも小さく,CASE1(蓋付き格子)とCASE2 (単純格子)が230gal程度と同程度であり,原地盤(無 対策)に対して1.5倍程度大きい結果となった.これは, 格子内地盤の全体剛性が増大することで,地盤のせん断変 形による応答加速度の減衰が小さくなっているものと考 えられる.

過剰間隙水圧比は,人工地震仕様 で比較した場合,原 地盤(無対策)の過剰間隙水圧比の上昇量がもっとも大き く1載荷で0.20~0.23 程度上昇しているのに対して, CASE1(蓋付き格子)では0.05~0.09 程度,CASE2(単純 格子)では0.10~0.14 程度に抑制していることを確認し た.



(GL-7m,1載荷当たり)

3.2 改良体ひずみの計測結果

人工地震仕様 における深度 GL-3.5m,7.0mの改良体ひずみの計測結果を図4に示す.

地表面からの載荷のため,GL-3.5m では地表面付近でひ ずみが累積する傾向があるが GL-7.0m では累積する傾向 が確認されなかった.なお,載荷した直後の値がもっとも 大きく,GL-3.5m,GL-7.0m ともに最大0.02%程度の改良体 ひずみを計測した.

今回の実験結果は周辺地盤が液状化していないこと,1 載荷当たりの応答加速度自体は想定地震動レベルにある が連続載荷でないことから,一概に実際の地震動レベルで の改良体の健全性評価とならないが,北詰<sup>2)</sup>の報告を参考 にセメント改良地盤の破壊ひずみ 0.2~0.5%とした場合 の1/20~1/10 程度と非常に小さい値である.



4.まとめ

本報では,浦安市実証実験で人工地震による蓋付き格子 と単純格子の改良効果の確認について報告した.相対的な 比較となるが,原地盤(無対策)に対して,過剰間隙水圧 比の上昇を蓋付き格子では 1/3 程度,単純格子では 1/2 程度まで抑制できることを確認した.動的載荷試験後の沈 下量は2~3mmの計測誤差範囲であった.

実際の地震動に対する効果検証を目的とした長期モニ タリングについては,現在継続中である.以降2~3年程 度の期間を目処に計測を継続する予定である.

5.総論

既設宅地を対象とした格子状改良による液状化対策工法で,対策コストの大幅な軽減を目的として研究開発を行ってきた.本研究成果は以下の通りである.

- 単純格子・バットレス格子・蓋付き格子の改良形状の中で蓋付き格子がもっとも改良効果が高い。
- ・ 道路を「着底型」,既設宅地を「浮き型」とする改 良形状でも十分対策効果がある
- 単純格子は、上層付近の地盤のせん断ひずみや過剰 間隙水圧比の進行度や最大値において3次元的な実 際の挙動に対し2次元モデルが危険側に評価する可 能性がある
- ・ 蓋付き格子は蓋部が改良体上部の変形を拘束するため、3次元的な実際の挙動と2次元モデルは概ね整合する。
- 浦安市を事例として,3次元的挙動を考慮した蓋付 き格子で対策効果の確認を行った結果,200gal,M9.0 の地震レベルにおいて,1住戸毎格子(16m×13m), 4住戸毎格子(29m×26m)ともに目標性能を概ね満 足する.
- 浦安市実証実験で既設宅地に対して,施工性・周辺への影響,品質,改良効果の面で本工法が十分適用可能である。

今後は本研究成果に基づき,概略検討段階において各種 地盤に対し,液状化対策の改良仕様を迅速かつ合理的に設 定することを目的とした簡易設計図表の作成に取り組み たい.

謝辞:本研究は,平成23年度補正予算建設技術研究助成 制度(国土交通省)の支援を受け行われた.また,実証実 験では平成24年度浦安市実証実験事業(浦安市)より実 験ヤード提供の協力を受け行われた.ここに記し深謝いた します.

#### 参考文献

1) 実用 軟弱地盤対策技術総覧,(株)産業技術サービスセンタ ー,pp733-744,1993.11

2) 北詰昌樹:深層混合処理工法による改良地盤の安定性に関する研究,港湾技研資料 No.774,p7,1994