

立体網状スパイラル構造排水材を用いた戸建て既設住宅の  
スマート液状化対策工法の研究・開発

Development of smart countermeasure against liquefaction disaster of  
detached house by using manufactured drain pipe

2019年3月

岐阜大学大学院工学研究科博士後期課程  
生産開発システム工学専攻

吉原孝保



## はじめに

『水が全ての根源である。何ものも水の力を逃れられない。』

南アフリカ生まれのイギリスの生物学者、ライアル・ワトソン(1939～2008)の「水の惑星」は、次のような文章で始まっている。

「水はじつに不思議である。この世でいちばん豊富に存在する液体。あまねく地上に自然なかたちで存在する、唯一の無機質の液体、それが水だ。水はわれわれ自身、いやわれわれの人生そのものに染みわたっている。それほど満ち溢れていながら、水はまたひどく珍しい物質である。科学的に言えば、水は変わり種だ。液体の方が固体より比重が大きい、つまり密度が高いというのも変わっていて独特だが、固体、液体、気体の三つの状態をもち合わせる化合物となると、水のほかにはまったくない。また強力な溶剤でもあるので、長い時間をかけて地上のあらゆるものを溶かしてしまう。何ものも、水の力を逃れられない。このユニークな物質は、無色にして無味無臭。『乾いた』砂にさえ15パーセントの水分が含まれているし、地表の71パーセントまでが水に覆われている。まさに、水は地球を丸ごと潤していると言えるのだ……。」(ライアル・ワトソン, 1988)

また、日本では豊臣秀吉の知恵袋であり別名を黒田如水と呼ばれた黒田官兵衛が「水五訓」という教を残している(例えば、安藤, 1975)。

- 「一、自ら活動して他を動かしむるは水なり
- 二、障害にあい激しくその勢力を百倍し得るは水なり
- 三、常に己の進路を求めて止まざるは水なり
- 四、自ら潔うして他の汚れを洗い清濁併せ容るるは水なり
- 五、洋々として大洋を充たし発しては蒸気となり雲となり雨となり雪と変じ霰(あられ)と化し凝(ぎょう)しては玲瓏(れいろう)たる鏡となりたえるも其(その)性を失はざるは水なり」

地球の約4分の3をも覆っている強大な水に戦いを挑んでも勝てるわけがない。それよりも水の機嫌をそこなわないように、いかに水と付き合うか。

また、地震大国である我が日本において、一世一代の高価で大切な買い物である家屋という資産を液状化被害から守るために、どのようにすれば軽減できるか。

家屋を支える「宅地地盤と水」。互いに仲良く良縁を結び、水を理解することによって、家屋の持ち主に少しでも安心安全を提供することが本研究のテーマである。

## 参考文献

[序.1] ライアル・ワトソン(1988): 水の惑星—地球と水の精霊たちへの讃歌。

[序.2] 安藤英男(1975): 史伝黒田如水, 日貿出版社。



# 目次

はじめに

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景と位置付け.....	1
1.2 液状化発生メカニズム.....	2
1.2.1 液状化被害例.....	3
1.3 建築における法令としての地盤の取り扱い.....	5
1.4 液状化対策工法.....	6
1.4.1 既往の液状化対策工法(道路と宅地との一体的な液状化対策工法).....	6
1.4.2 道路・宅地の一体的な液状化対策工法の比較検討.....	8
1.4.3 道路・宅地の一体的な液状化対策工法のまとめ.....	13
1.5 地震後の家屋復旧費用.....	14
1.5.1 地震時の建物被害と修復費用の関係.....	14
1.5.2 既設宅地補強技術に関する費用対効果の考え方.....	19
1.6 本論文の構成.....	20
参考文献.....	22
第2章 既往の研究.....	24
2.1 従来の建築分野における地盤設計法の課題.....	24
2.1.1 許容応力度設計法.....	25
2.1.2 国土交通省国土技術政策総合研究所による液状化判定法.....	26
2.1.3 数値解析を用いた設計法の提案と課題.....	27
2.2 まとめ.....	28
参考文献.....	28
第3章 立体網状スパイラル構造体の液状化対策効果の検証.....	30
3.1 模型振動台実験.....	30
3.2 実験条件および検討ケース.....	31
3.3 実験結果.....	32
3.4 まとめ.....	34
参考文献.....	34
第4章 2次元静的液状化プログラムの高度化と検証.....	35
4.1 模型振動台実験の概要.....	35
4.2 SPH法による2次元静的液状化プログラムの概要.....	36
4.2.1 定式化および離散化.....	36
4.2.2 構成式.....	37

4.3	2次元有効応力解析(LIQCA) .....	38
4.3.1	定式化 .....	38
4.3.2	構成式 .....	38
4.3.3	空間および時間の離散化 .....	39
4.4	模型振動台実験の FEM および SPH による再現解析 .....	39
4.4.1	振動台実験, LIQCA, SPH の結果比較 .....	41
4.4.2	模型振動台実験の再現解析のまとめ .....	42
4.5	浦安市の液状化被害の再現解析および架空地盤モデルによる解析 .....	43
4.5.1	対象地点概要 .....	43
4.5.2	浦安市の液状化被害再現解析の解析条件 .....	45
4.5.3	浦安市の液状化被害再現解析の解析結果 .....	46
4.5.4	架空地盤モデルの検討条件 .....	48
4.5.5	架空地盤モデルの解析条件 .....	49
4.5.6	架空地盤モデル解析の結果 .....	50
4.5.7	浦安市の液状化被害の再現解析および架空地盤モデルによる解析のまとめ .....	50
4.6	簡易地盤調査を利用した液状化被害再現解析 .....	52
4.6.1	解析対象地概要 .....	52
4.6.2	地盤調査 .....	53
4.6.3	茨城県神栖市の液状化被害再現解析の解析条件 .....	56
4.6.4	茨城県神栖市の液状化被害再現解析の結果 .....	58
4.6.5	茨城県神栖市の液状化被害再現解析のまとめ .....	59
4.7	まとめ .....	59
	参考文献 .....	60
第5章 現場への適用に向けて .....		63
5.1	開発目標 .....	63
5.2	人工ドレーン(立体網状スパイラル構造体) .....	66
5.3	試作機による貫入確認実験 .....	70
5.4	貫入装置の改良と試験貫入 .....	73
5.4.1	貫入方法 .....	73
5.4.2	試験貫入実験 .....	74
5.4.3	試験貫入の結果 .....	77
5.5	人工ドレーン材の排水効果の確認 .....	78
5.6	現場試験施工 .....	82
5.6.1	試験施工概要と問題点 .....	87
5.6.2	問題点の改良 .....	89
5.7	作業手順書と対策工設計要領 .....	90
5.7.1	作業手順書 .....	90
5.7.2	設計要領 .....	91

5.8 まとめ.....	92
参考文献 .....	93
第6章 結論.....	94
付録1 耐圧強度試験 試験成績書 .....	A-1
付録2 溶出試験 試験報告書 .....	A-4
付録3 小型回転圧入装置 作業手順書 .....	A-5
付録4 地盤総合評価システム Ver.1 使用マニュアル .....	A-24





# 第 1 章 序論

## 1.1 本研究の背景と位置付け

日本は世界でも有数な地震大国である。太古の昔から地震が頻繁に発生している。これまで大規模な地震が発生するたびに地盤の液状化現象の発生が確認されている。

1995 年兵庫県南部地震，2004 年新潟県中越地震，2007 年新潟県中越沖地震，2011 年東北地方太平洋沖地震，2016 年熊本地震，そして 2018 年北海道胆振東部地震などでは，広範囲にわたって戸建て住宅など，小規模建築物に傾斜や沈下など甚大な被害が生じた。その主な原因の一つは，液状化対策が施されていなかったことにある。

公共施設(道路など)と宅地の一体的対策については，様々な対策工法が開発されてはいるが，戸建住宅への適用は，建築基準法においては，液状化に対する明確な設計法が示されておらず，基礎の構造に杭基礎を採用することや，設計上は各種指針を参考に，液状化判定や液状化時の沈下量や傾斜量を把握し完全に液状化を防止することが，設計者判断とされているのが現状である。

建築前の更地であれば，液状化の発生を完全に抑止できる液状化対策を大規模に実施できる。また，単位面積当りの対策費用も安く抑えることができる。しかし，すでに建物が建築されている場合には，隣地との境界線など狭隘地での施工が求められ，既存の対策工法の戸建て住宅への転用は個人負担が非常に大きくなり，施工性の問題，近隣への騒音問題，振動問題など事実上不可能に近く，既設の戸建て住宅を対象とした液状化対策工法はほとんど適用例がなく，いまだ確立されていないのが現状である。

そこで本研究では，建築基準法における構造計算の義務付けがない木造 2 階建て，延べ面積が 500m<sup>2</sup>以下の戸建て住宅(以下，4号建物と呼ぶ)を液状化被害から守るべく，その地盤を対象とし，隣接住宅により隣地間が狭小な場合でも施工可能な低振動・低騒音，そして低コストで施工できる液状化対策工法を開発し，経済的・効率的な減災工法の確立と性能設計概念に基づく設計法を構築することを目指す。

## 1.2 液状化発生のメカニズム

地盤は一般的に粘土や砂，水，空気構成されているが，液状化現象が起こりやすい地盤としては，海岸や川のそばなどの比較的ゆるい地盤がゆりく，地下水位が高い砂質地盤といわれている．砂や砂礫(砂より粒子が大きく粒径 2mm 以上)からなる砂質地盤は，砂同士の摩擦で安定を保っており，常時は砂粒子同士の摩擦力によって地盤上の建物などを支持している．乾燥した砂質地盤では砂の粒子間の隙間に空気があるため，地震などによって振動が加えられると表面が沈下し詰まった状態になるが，地表面に近い高さまで地下水があるような場所では，砂の粒子間の隙間に水があるため，連続した振動が加わることによって粒子間の摩擦力が低下するとともに，隙間にあった水の圧力(間隙水圧)が高まる．この間隙水圧がその部分より上にある地表面までの砂，または土の重量による圧力(土被り圧)に等しくなると，砂の粒子間の摩擦がなくなり，砂粒子が水に浮いた状態である液状化現象となる(図 1.1)．

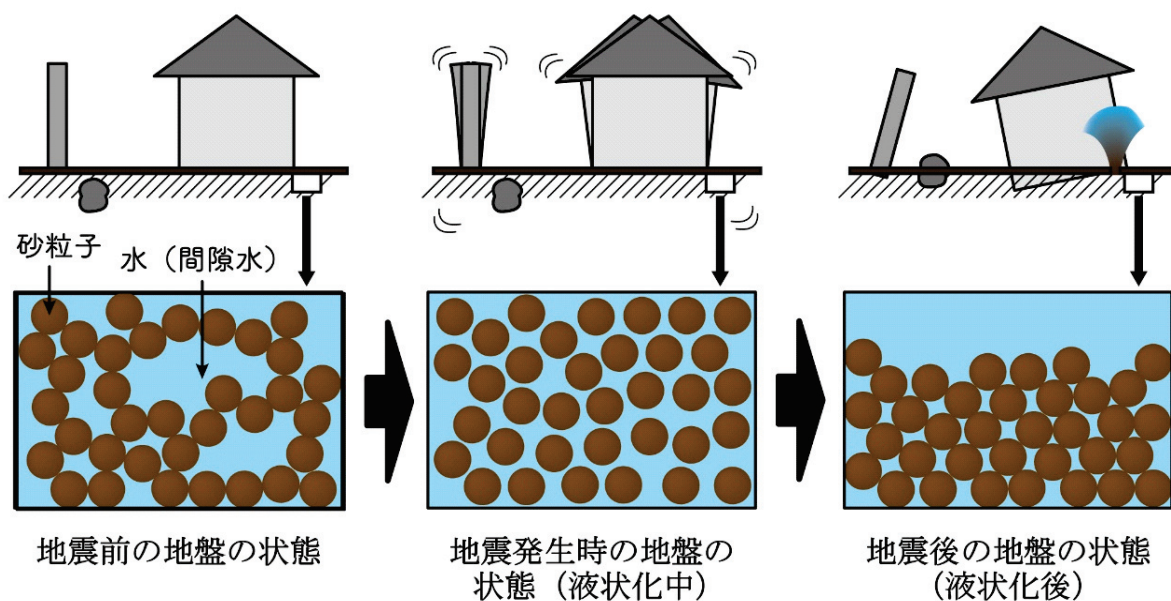


図 1.1 液状化の発生メカニズム (「浜松市南区避難行動計画」に記載の図をもとに作成)

### 1.2.1 液状化被害例

大規模地震の発生によって引き起こされた地盤の液状化現象による沈下及び傾斜被害の様子を以下にまとめて示す。写真 1.1 は東日本大震災における千葉県浦安市の代表的被害事例、写真 1.2 は千葉県我孫子市と埼玉県久喜市の被災前後を比較したもの、写真 1.3 は 2016 年熊本地震の代表的被害事例、写真 1.4 は 2018 年北海道胆振東部地震の代表的被害事例である。



写真 1.1 東日本大震災における千葉県浦安市の代表的被害事例（浦安市, 2012）



千葉県我孫子市布佐

埼玉県久喜市南栗橋

- 被災前(正常な状態)
- 被災後(沈下・傾斜した状態)

写真 1.2 東日本大震災における被災前と被災後



写真 1.3 2016 年熊本地震の代表的被害事例（熊本市，2016）



写真 1.4 2018 年北海道胆振東部地震の代表的被害事例（国土交通省等，2018）

### 1.3 建築における法令としての地盤の取り扱い

建築における地盤の取り扱いについて、建築基準法施行令 38 条において「建築物の基礎は、建築物に作用する荷重及び外力を安全に地盤に伝え、かつ、地盤の沈下又は変形に対して構造耐力上安全なものとしなければならない。」と定められている。さらに、宅地地盤(液状化)の取り扱いについては、建築基準法施行令第 93 条において、地盤調査を行わない場合における地盤の許容応力度が規定されており、地震時に液状化のおそれのないものとし、「地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力は、国土交通大臣が定める方法によって、地盤調査を行い、その結果に基づいて定めなければならない。ただし、次の表に掲げる地盤の許容応力度については、地盤の種類に応じて、それぞれ次の表の数値によることができる。」と定められている。各地盤の許容応力度について、表 1.1 に示す。

表 1.1 各地盤の許容応力度

地盤	長期に生ずる力に対する許容応力度 (単位 kN/m <sup>2</sup> )	短期に生ずる力に対する許容応力度 (単位 kN/m <sup>2</sup> )
岩盤	1,000	長期に生ずる力に対する許容応力度の それぞれの数値の 2 倍とする
団結した砂	500	
土丹盤	300	
密実な礫層	300	
密実な砂質地盤	200	
砂質地盤 (地震時に液状化の 恐れのないものに 限る)	50	
硬い粘土質地盤	100	
粘土質地盤	20	
硬いローム層	100	
ローム層	50	

加えて、建築基準法施行令第 93 条の規定に基づいて地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を求めるための地盤調査の方法を国土交通省告示 1113 号において定めている。告示 1113 号は全 8 項で構成されており、第 1 項で地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を求めるための地盤調査の方法、第 2 項から第 5 項では地盤調査の結果に基づき地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を定める方法、第 7 項では建築基準法施行令第 94 条の規定に基づいて、地盤アンカーの引抜き方向の許容応力度の算定方法、第 8 項ではくい体又は地盤アンカー体に用いる材料の許容応力度の算定方法を求めることとして定められている。

以上のとおり、小規模建築物(4 号建物)においては建築基準法による構造計算の義務付けがないため、次のようなことが考えられる。

- ・液状化が想定される場合は、基礎構造を杭基礎とすることが一般的である。
- ・小規模建築物においては、簡易的な地盤調査のみが実施されるという制約から、そもそも対策を必要とするかどうか不明である。

- ・液状化の発生が懸念される場合に、液状化層全層に対策を施す場合を除いて、どのように地盤対策を施すか、またどのように設計するか明確な基準が無い。

したがって建築基準法施行令 38 条, 同 93 条, 国土交通省告示 1113 号について、いずれも基礎や地盤についての原則的な事項が示されているのみで、具体的な設計法等は示されておらず、設計者の判断に委ねられているのが現状である。つまりは、設計者による判断に偏りが生じる可能性も十分に考えられるため、液状化地盤において住宅の沈下や傾斜などの変形を防止する工法と設計方法の開発が望まれている。

## 1.4 液状化対策工法

### 1.4.1 既往の液状化対策工法(道路と宅地との一体的な液状化対策工法)

これまでに多数の液状化対策工法が開発・施工されており、構造物の重要度、経済性、施工性などを勘案し、最適と思われる工法が適用されてきた。液状化対策を大別すると以下の通りであり、分類を図 1.2 に示す。

#### ①液状化そのものを防止する対策

土の密度の増大・土の性状の改良や飽和度を低下させるなどの工法が挙げられる。

#### ②液状化の発生を抑制する対策

地盤の有効応力の増大や、鋼材などを用いて、地盤のせん断変形を抑制させる工法。または柱状ドレーンなどを用いて発生する過剰間隙水圧を抑制・消散させる工法などが挙げられる。

#### ③液状化発生は許すが、構造物や施設の被害を軽減する対策

構造物を堅固な地盤に支持させる、基礎を強化する、液状化の発生に伴って生じる水平方向の土圧や浮力の増加に耐え得るように構造物や支持を強化する。液状化後に発生する変位置を抑制する対策などが挙げられる。特に既設構造物の対策では、施工性の観点から構造物近傍の対策が主流となっている。これは、構造物直下の液状化は許す、周辺からの土砂や過剰間隙水圧の伝達を防止・抑制するものである。

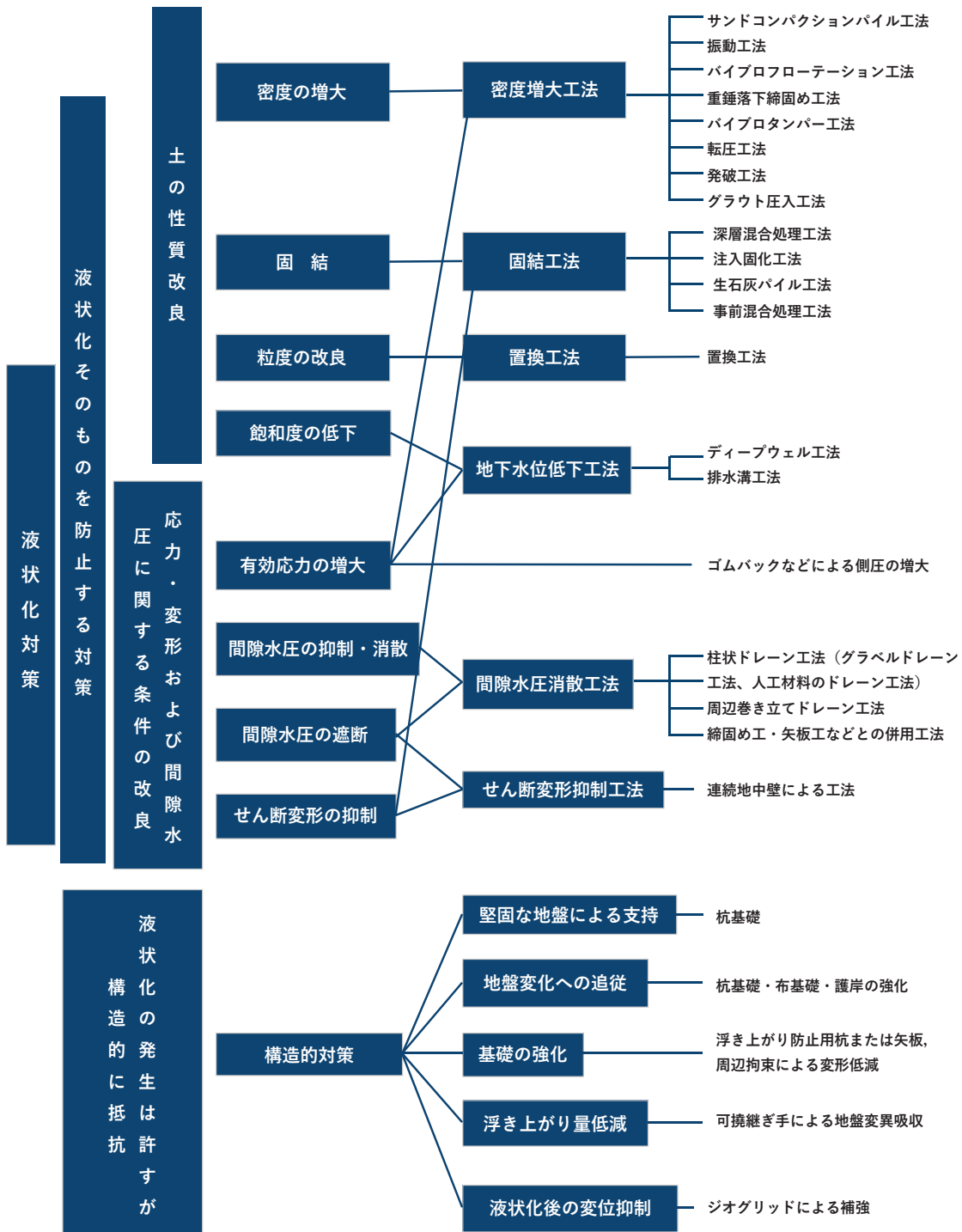


図 1.2 既住の液状化対策工法の分類(国土交通省, 2018)

### 1.4.2 道路・宅地の一体的な液状化対策工法の比較検討

戸建住宅において、道路と隣接宅地(既存戸建住宅)を一体的に液状化対策する場合の工法が検討されてきた。検討の対象となった代表的な工法を以下の1~5案に示す。

- 1案:杭状改良工法
- 2案:静的圧入締固め工法
- 3案:格子状改良工法(深層混合処理工法)
- 4案: 同 (高圧噴射攪拌工法)
- 5案:地下水位低下工法

#### 1案:杭状改良法

##### [概要]

セメント系固化材を用いて建築物直下の地盤を杭状に改良し、建築物を直接支えることにより液状化による沈下を防止する。道路部については、セメント系固化材を道路直下の表層地盤を盤状に固化することにより、液状化防止・軽減を図る工法である。本工法の特徴・課題、費用負担を以下に示し、**図 1.3**には杭状改良工法の施工イメージ図を示す。

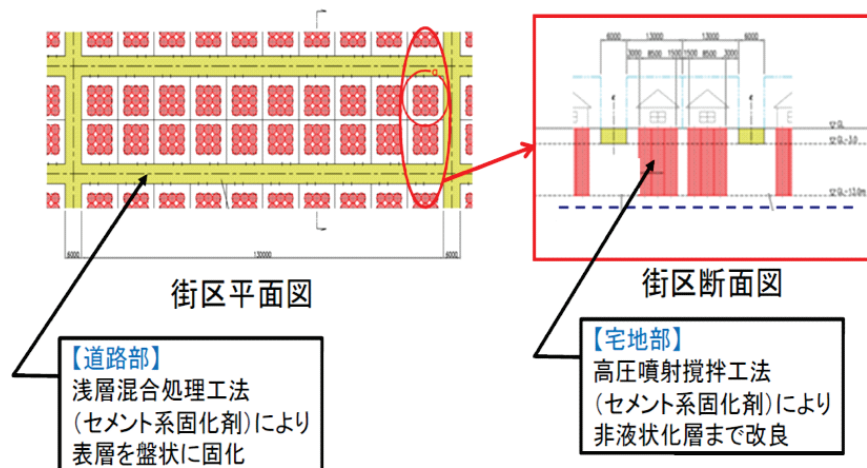


図 1.3 杭状改良工法の概要(港湾技術研究所, 2018)

##### [特徴・課題]

- ・非液状化層まで地盤改良を行う必要があるため、コストが割高。
- ・小型機械により住宅屋内での施工が可能である、複数個所で床の開口と補修工事が必要。

##### [費用負担]

- ・宅地内の対象費用は個人負担となり、高額(約 20~30 百万/戸程度)



## 2案:静的圧入締固め工法

### [概要]

建築物直下の地盤にモルタルを注入して地盤を締固め、液状化を防止・軽減する工法。道路部については、セメント系固化材を道路直下の表層地盤を盤状に固化することにより、液状化防止・軽減を図る工法である。本工法の特徴・課題、費用負担を以下に示し、**図 1.4** および**図 1.5**には静的圧入締固め工法の施工イメージ図および工法概念図を示す。

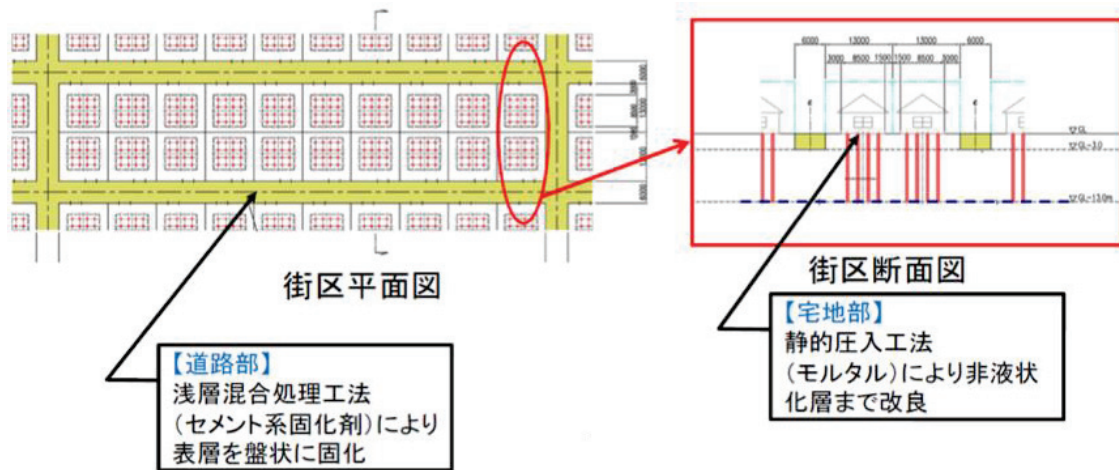


図 1.4 静的圧入締固め工法の概要(港湾技術研究所, 2018)

### [特徴・課題]

- ・細粒分の多い地盤に締固め効果について検討が必要。
- ・液状化層を効率的に締め固めることができれば、コスト低減が可能。
- ・小型機械により住宅屋内での施工が可能であるが、複数個所で床の開口を補修工事が必要。

### [費用負担]

- ・宅地内の対象費用は個別となり、高額(約 10~15 百万円/戸建て)。

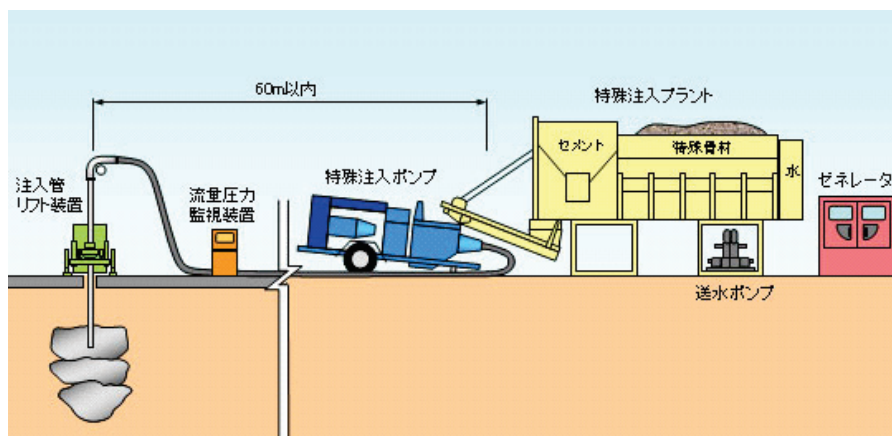


図 1.5 静的圧入工法の工法概念図(国土交通省, 2018)

### 3案:格子状改良工法(深層混合処理工法)

#### [概要]

地盤にセメント系固化材を混合させて、道路と宅地の境界及び宅地相互の境界の地中に、格子状に強固な連続壁を造成することによって、地盤のせん断変形を抑えて液状化の防止・軽減を図る工法である。本工法の特徴・課題、費用負担を以下に示し、**図 1.6** および**図 1.7** には格子状改良工法(深層混合処理工法)の施工イメージ図および工法概念図を示す。

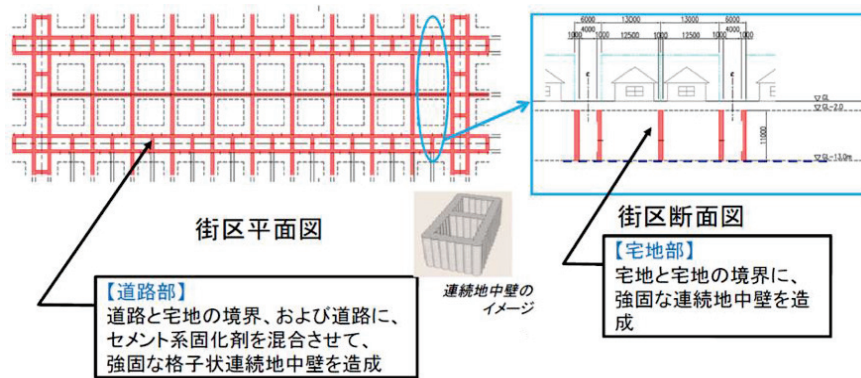


図 1.6 格子状改良工法(深層混合処理工法)の概要(港湾技術研究所, 2018)

#### [特徴・課題]

- ・戸建て住宅の液状化防止工法として適用例がない。
- ・対策効果を発揮するための格子間隔の精査が必要。
- ・大型攪拌機を用いて地中壁を造成するため、宅地相互の境界で施工するには、小型機械の開発が必要。
- ・道路や宅地境界線での施工が必要のため、外構(堀, 植栽)やライフラインの撤去・再設置工事を伴う。

#### [費用負担]

- ・宅地内の対策費用は個人負担となる(7~10 百万円/戸程度)。

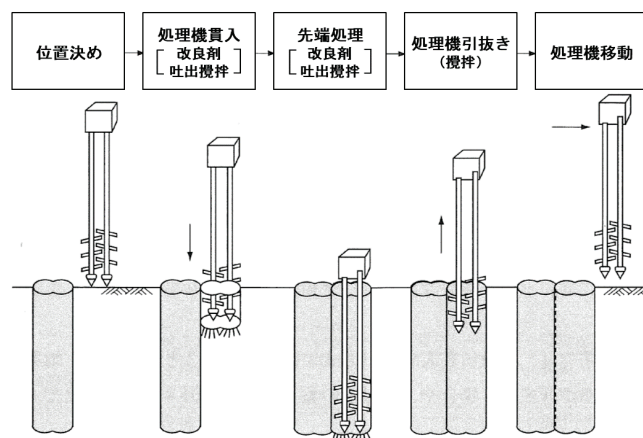


図 1.7 格子状改良工法(深層混合処理工法)の工法概念図(港湾技術研究所, 2018)

#### 4案:格子状改良工法(高圧噴射攪拌工法)

##### [概要]

小型機械を用いて、地中に挿入した特殊なパイプからセメント系固化材を、場所を限定して高圧で噴射し、液状化地盤と混合攪拌することで高強度の扇状の壁を造成し、これらの地中壁を格子状に構築することによって液状化防止・軽減を図る工法である。本工法の特徴・課題、費用負担を以下に示し、**図 1.8** および **図 1.9** には格子状改良工法(高圧噴射攪拌工法)の施工イメージ図および工法概念図を示す。

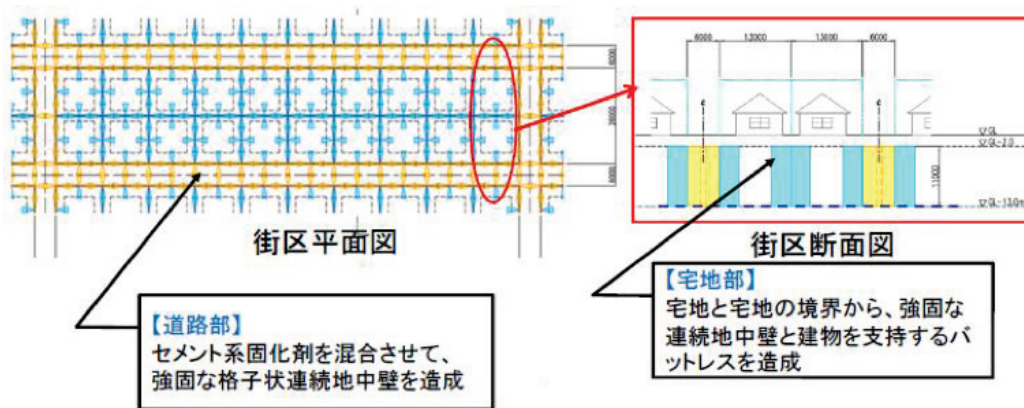


図 1.8 格子状改良工法(高圧噴射攪拌工法)の概要(港湾技術研究所, 2018)

##### [特徴・課題]

- ・壁を格子状に組み合わせた工事例がない。液状化抑制のための改良体強度の評価や壁厚の検討、格子間隔の精査など、技術開発の途中段階。
- ・小型の機械を用いるが、宅地相互の境界スペースが狭い場合、施工が困難な場合がある。
- ・道路や宅地境界線での施工が必要なため、外構やライフラインの工事を伴う場合がある。

##### [費用負担]

- ・宅地内の対策費用は個人負担となる(約 4~8 百万円/戸程度)。

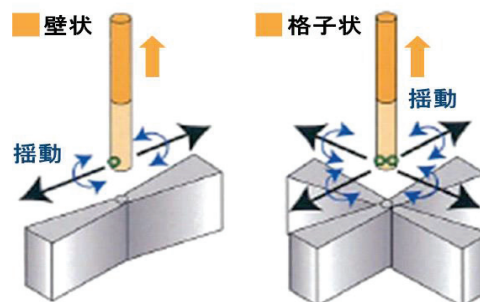


図 1.9 格子状改良工法(高圧噴射攪拌工法)の工法概念図(港湾技術研究所, 2018)

## 5 案:地下水位低下工法

### [概要]

道路直下と宅地地盤内に排水管を敷設して、地下水を下げることにより、地盤の液状化強度を増加させて被害を軽減する工法である。地下水位を一定に保つため、ポンプ施設と止水壁が必要な場合がある。本工法の特徴・課題、費用負担を以下に示し、**図 1.10**には地下水位低下工法の施工イメージ図を示す。

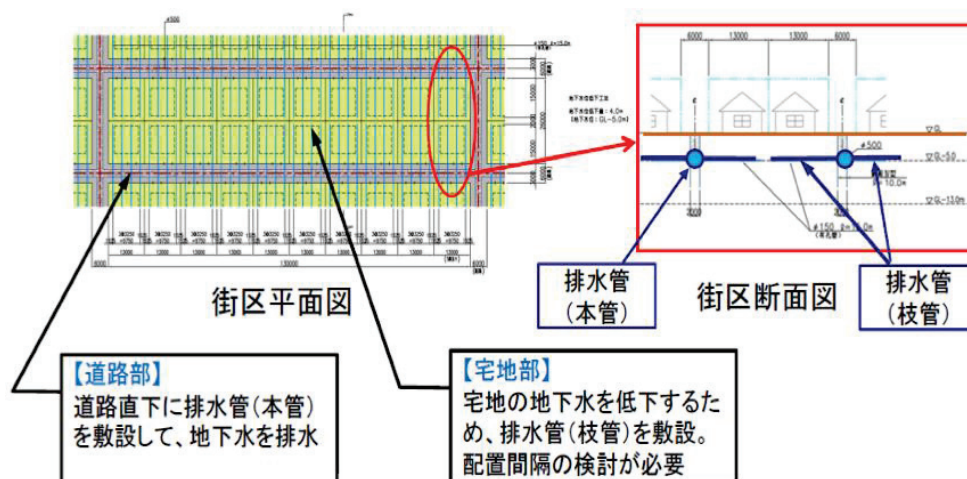


図 1.10 地下水位低下工法の概要図(港湾技術研究所, 2018)

### [特徴・課題]

- ・地下水位低下量と液状化効果について検討が必要。
- ・地盤沈下が発生する可能性が高く、建築物の不同沈下や段差の発生、ライフライン切断対策等の検討が必要。
- ・地盤標高が低い地域では、地下水位低下深度によってはポンプ施設が不可欠となり、維持管理経費が必要となる。
- ・海水浸透対策のため、止水壁の設置が必要となるケースもある。

### [費用負担]

- ・初期費用は比較的安価と考えられるが、地盤沈下対策によるコスト増やポンプ施設の維持管理費などの長期的な費用が生じる。

### 1.4.3 道路・宅地の一体的な液状化対策工法のまとめ

道路・宅地の一体的な液状化対策 1 案から 5 案の方法・評価・費用の概要を表 1.2 に示す。道路・宅地の一体的な液状化対策工法として、技術開発の状況、住宅所有者の費用負担などの観点から、「地下水位低下工法」の優位性がわかる。しかしながら、「地下水位低下工法」も、液状化防止効果や地下水位の低下による地盤沈下の問題、ポンプ施設や止水壁の設置など技術的な課題や維持管理コスト・施設更新コストの検討など、さらなる詳細検討が必要である。また、従来の液状化抑止対策工法を既設住宅に応用すると、膨大な費用がかかってしまう。実現可能性調査を実施し、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。

表 1.2 既設住宅地の液状化対策工法と評価

案	方法	評価	個人負担額への概算 (万円)
1 案 杭状改良工法	建物内部からボーリング機械等で建物直下の地盤を改良する	建物直下の施工時に床を開口、補修工事が必要	2,000~3,000
2 案 静的圧入締固め工法	同上	同上。細粒分の多い地盤の効果について要検討	1,500~2,000
3 案 格子状改良工法 (深層混合処理工法)	数戸の宅地を囲むように重機を用いて地盤を改良する	講師間隔については要検討、宅地内では施工機械の小型化が必要	700~1,000 (道路自治体負担で 200~500)
4 案 格子状改良工法 (高圧噴射攪拌工法)	個々の宅地を囲むようにボーリング機械等で地盤を改良する	住宅地では開発途上で、施工機械の小型化開発が必要	400~800
5 案 地下水位低下工法	止水壁を設けて内部の地下水をポンプにより排水し水位を低下する	対策効果、地盤沈下について要検討、住民との合意形成が困難	初期費用は安価であるが、ランニングコストが発生

## 1.5 地震後の家屋修復費用

戸建住宅の液状化による沈下傾斜の修復工法としている注入工法（硬質ウレタン注入，グラウト注入），アンダーピニング工法，耐圧版工法，プッシュアップ工法などがある．各工法によって不同沈下量の大きさなどの施工条件が異なるため，工法の選定にあたっては，各工法の詳細とその特徴を理解した上で選定しなければならない．液状化による沈下傾斜修復工法の概要と費用を表 1.3 に示す．

表 1.3 既設住宅地の液状化修復工法と評価

工法名		1:硬質ウレタン注入工法	2:グラウト注入工法	3:アンダーピニング工法	4:耐圧版工法	5:プッシュアップ工法
				ジャッキアップ	ジャッキアップ	あげ舞い工法
施行条件	基礎形式	べた基礎	べた基礎	べた基礎 布基礎	べた基礎 布基礎	べた基礎 布基礎
	傾き	5cm 程度	5cm 程度	条件なし	条件なし	10cm 程度
	隣地間隔	条件なし	条件なし	100cm 程度	100cm 程度	条件なし
工事費 (建坪 15～20 坪総 2 階建ての場合)		350～600 万円程度	300～600 万円程度	600～1,000 万円程度	500～700 万円程度	200～300 万円程度
工期		1～3 週間	1～2 週間	1～3 ヶ月	2～5 週間	2～3 週間
床又は壁の補修		床面の撤去復旧必要無し	床面の撤去復旧必要無し	1 階床面の解体復旧の必要あり	床面の撤去復旧必要無し	床面の撤去復旧必要無し
居ながら		施工可能	施工可能	施工可能	施工可能	施工可能

### 1.5.1 地震時の建物被害と修復費用の関係

1)住宅品質確保促進方法瑕疵の判断基準があり，瑕疵の存在する可能性として，床の傾斜に関するものを表 1.4 と，基礎のひび割れに関するものを表 1.5 に示す．

表 1.4 床の傾斜に対する瑕疵の存在する可能性

レベル	木造住宅，鉄骨造住宅，鉄筋コンクリート住宅， 又は鉄骨鉄筋コンクリート住宅 (注；建設住宅性能評価書が交付された住宅を対象)	構造耐力上必要な部分に瑕疵が存在する可能性
1	3/1,000 未満の勾配の傾斜	低い
2	3/1000 以上 6/1,000 未満の勾配の傾斜	一定程度存在する
3	6/1,000 以上の勾配の傾斜	高い

表 1.5 基礎のひび割れに対する瑕疵の存在する可能性

レベル	木造住宅、鉄骨造住宅、鉄筋コンクリート住宅、 又は鉄骨鉄筋コンクリート住宅 (注；建設住宅性能評価書が交付された住宅を対象)	構造耐力上必要な 部分に瑕疵が存在 する可能性
1	レベル2 およびレベル3に該当しないひび割れ	低い
2	仕上材と構造材にまたがった幅 0.3mm以上 0.5mm未満 のひび割れ（レベル3に該当するものを除く）	一定程度在する
3	①仕上材と乾式の下地材にまたがったひび割れ ②仕上材と構造材にまたがる幅 0.5mm以上のひび割れ ③錆汁を伴うひび割れ	高い

2)災害に係る住家の被害認定基準運用指針(平成21年6月内閣府)においても、①外観による認定、②傾斜による判定(1階部分の四隅の柱を計測した単純平均)、③部位による判定がある。概要を以下に示す。

(1)外観による認定

- ・一見して住宅全体が倒壊している場合は全壊とする。
- ・また、応急危険度判定では以下の通り判定される。

ア. 建築物全体又は一部の崩壊・落階

イ. 建築物全体

又は一部の著しい傾斜と判断された住家について、全壊の被害認定を行う場合もある。

(2)傾斜による判定(1階部分の四隅の柱を計測した単純平均)

傾斜は、下げ振りの垂直長さ( $h$ )に対して、水平寸法( $d$ )の占める割合を計算して測定し、表 1.6 の通り判定する。

表 1.6 傾斜による判定(損保ジャパン興和損保, 2018)

傾斜( $d/h$ )	判定
$(d/h) \geq 1/20$	住家の損害割合を 50%以上とし全壊とする
$1/60 \leq (d/h) < 1/20$	傾斜による損害割合を 15%以上とし、部位による判定を行う
$(d/h) < 1/60$	傾斜による判定を行わず、部位による判定を行う

(3)部位による判定

傾斜による判定で、傾斜が 1/60 以上 1/20 未満と測定された場合は、以下のとおりである。

①傾斜 = 15% + 「屋根」の損害割合、②全ての部位別損傷割合の合計、いずれか大きい数値により判定する。また、「基礎」の損傷率が 75%以上となる場合には、損害割合を 50%以上とし全壊とする。部位の名称と構成比を表 1.7 に、損害の割合と判定を表 1.8 にそれぞれに示す。

表 1.7 部位の名称と構成比

部位の名称	構成比
屋根	10%
壁(外壁)	80%
基礎	10%

表 1.8 損害の割合と判定

損害割合	判定
50%以上	全壊
40%以上 50%未満	大規模半壊
20%以上 40%未満	半壊
20%未満	半壊に至らない

### 3)地震保険 地震・噴火これらを原因とする津波による被害

地震・噴火を原因とする津波による損害に対する支払額の間係を、表 1.9 に示す。

#### (1)保証内容

火災保険に付帯して契約、火災保険の保険金額の 30～50%を補償

#### (2)保険金の支払い

保険会社独特の認定方法(罹災証明と必ずしも一致しない)

表 1.9 保険会社独特の認定方法

区分	規 準	支 払 額 契約金×以下割合
全 損	地震等により損害を受け、主要構造部(土台、柱、壁、屋根等)の損害額が、時価の 50%以上である損害、または焼失もしくは流失した部分の床面積の 70%以上である損害	100% 時価の 100%が限度
半 壊	地震等により損害を受け、主要構造部の損害額が、時価の 20%以上 50%未満である損害、または焼失もしくは流失した部分の床面積が、その建物の延床面積の 20%以上 70%未満である損害	50% 時価の 100%が限度
一部損	地震等により損害を受け、主要構造部の損害額が、時価の 3%以上 20%未満である損害、または建物が床上浸水もしくは地盤面より 4cm をこえる浸水を受け損害が生じた場合で、全壊・半壊に至らないとき	5% 時価の 100%が限度

保険料は都道府県によって異なり、保険金 1,000 万円あたり耐火建築物で 8,400～20,200 円/年、非耐火建築物で 16,500～32,400 円/年程度。

#### (3)割引制度

損保ジャパン日本興和の住宅金融支援機構特約火災保険、特約地震保険(損保ジャパン興和損保、2018)において、建物の免震・耐久性能に応じた保険料の割引制度がある。

##### ・建築年割引

地震保険の保険開始日が平成 13 年 10 月 1 日以降の契約、並びに昭和 56 年 6 月以降に新築された建物に適用され、割引率は 10%である。

##### ・耐震等級割引

地震保険の保険開始日が平成 13 年 10 月 1 日以降の契約であり、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」に基づく耐震等級、または国土交通省の定める「耐震診断による耐震等級(構造躯体の倒壊等防止)の評価指針」に基づく耐震等級によって表 1.10 の通り割引率が適用される。

表 1.10 耐震等級と適用される割引率

耐震等級	3 等級	2 等級	1 等級
割引率	50%	30%	10%



・免震建築物割引

地震保険の保険開始日が平成 19 年 10 月 1 日以降の契約であり、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」に基づく免震建築物に適用され、割引率は 50%である。

・耐震診断割引

地震保険の保険開始日が平成 19 年 10 月 1 日以降の契約であり、地方公共団体等による耐震診断または、耐震改修の結果、改正建築基準法(昭和 56 年 6 月 1 日施行)における耐震基準を満たす建築物に適用され、割引率は 10%である。

(4)一般財団法人ベターリビングによる保証制度

ベターリビング(以下、BL と呼ぶ)は住生活水準の向上に寄与することを目的として、1973 年に当時の建設省(現国土交通省)より認可を受け設立され、翌 1974 年に優良住宅部品の評定機関として指定を受け、BL 部品の認定に関する業務を行っている一般財団法人である。地盤の液状化対策に関する審査と保証を行っており、それぞれの内容を表 1.11、表 1.12 に示す。

表 1.11 BL による審査について(ベターリビング, 2018)

審査内容	第三者の公的機関である BL が、液状化に関する技術的知見を基に液状化対策工法の審査基準を定め、中立的な立場で審査基準への適合性を確認します。審査は、地盤調査の内容、液状化判定の方法、液状化対策設計の内容、施工記録の内容、地盤改良体の品質について行います。また、審査対象工法は、対策効果について BL が事前に確認した工法とします。審査対象工法の第一号は、積水ハウス株式会社の格子状地盤改良工法である「SHEAD 工法」(証明番号: BL 審査証明-025)です。
対象建築物	新築、延べ床面積は 1,000m <sup>2</sup> 以下、用途及び構造種別の制限なし
審査料	1 申請につき ¥108,000(消費税込み)

表 1.12 BL による保証について(ベターリビング, 2018)

保障内容	建物の傾斜修正を保証します。
保証の条件	震度 5 弱から震度 5 強の地震により、地盤が液状化し、建物が 5/1,000 以上の傾斜増分が生じた場合
保証の対象	対策を講じた建物の傾斜修正(建物に取り付く配管設備、敷地内の工作物等の修正工事は、すべて対象外となります。) ※液状化による建物被害・地震保険との違い地震の揺れによる建物被害と、地盤の液状化による建物被害には違いがあります。地盤の液状化により建物が傾斜が生じると建物の躯体に損傷がなくても、継続使用ができない場合があります。また、地震保険は、傾斜の程度に応じて支払い金額が異なるため、被害の程度が小さいと傾斜修正工事費を賄えない場合がありますが、本保証では、傾斜修正を保証しているため安心です。
保証利用料の例	千葉県: ¥53,000/年 東京都・茨城県・神奈川県: ¥35,000 程度/年 上記以外: ¥4,000~¥15,000 程度/年

### (5)政府の再保険

地震等による被災者の生活の安定に寄与することを目的として、民間保険会社が負う地震保険を政府が再保険し、再保険料の受入れ、管理・運用のほか、民間のみでは対応できない巨大地震発生の際には、再保険金の支払いを行うために地震保険特別会計において区分経理する。表 1.13 に復旧支援と費用、および選択を示す。

表 1.13 小規模家屋被害の復旧支援と費用、選択(日本建築学会, 2018, 野崎洋之, 2016)

被害の程度 傾斜	再建方法	被害者 生活再建 支援制度 (公助)	義援金 (共助)	地震保険 (自助)	支援 合計額 (万円)	復旧費用 (万円)	一般的な選択
全壊 50/1,000 以上	建替え	300	107	500 全損	907	2,100	建替えと同時に地盤復旧を実施する。
	補修	200			807	1,500	
	地盤復旧	200			-	200	
大規模半壊 17/1,000 以上	建替え	300	53	250 半損	603	2,100	修復を実施するが、基礎の補強のみで地盤復旧まで実施することは少ない。
	補修	150			453	1,000	
	地盤復旧	150			-	150	
半壊 10/1,000 以上	建替え	300	17	50 一部損	367	2,100	地盤復旧が高額となることから、再液状化を覚悟して、建物の傾斜修復と補強のみ。
	補修	対象外			67	500	
	地盤復旧	-			-	-	
一部損壊 6/1,000 以上	建替え	対象外	-	50 一部損	50	2,100	地盤復旧が高額となることから、再液状化を覚悟して、建物の傾斜修復と補強のみ。
	補修					200	
	地盤復旧					-	

### 4)住宅に係る被災者支援(東日本大震災)

東北地方太平洋沖地震による被災した住宅に係る被災者支援として、被災者生活再建支援制度、義援金について以下に示す。また、浦安市における被災者住宅再建支援事業の内容を図 1.11 に示す。いずれも平成 25 年 1 月調べである。

#### (1)被災者生活再建支援制度(公助)

本支援金の支給額は「基礎支援金」にて全壊 100 万円、半壊で解体に 100 万円、長期避難者 100 万円、大規模半壊 50 万円。「加算支援金」にて建設購入 200 万円、補修 100 万円、賃貸(公共住宅以外)50 万円が支給される。

## (2)義援金(共助)

平成 23 年 11 月 25 日時点で総額 3,389 億円の 9 割が都道府県に送金済み。内訳として、宮城県に対する 1~5 回の合計で次の通りである。死亡行方不明 115 万円/人，住宅全壊(焼)107 万円/戸，住宅半壊(焼)35 万円/戸，大規模半壊(焼)17 万円/戸，原発避難地帯 35 万円/世帯。

### 浦安市被災者住宅再建支援事業

(平成25年1月調べ)

り災程度	再建方法	国		県	市
		基礎支援	加算支援		
全壊 	建て替え	100	200	補助対象外	100
	別の場所に建て替え・購入	100	200		-
	住宅賃貸	100	50		-
	補修	100	100		100
	地盤復旧	100	100		100
大規模半壊 	建て替え	50(100 <sup>*</sup> )	200	補助対象外	100
	別の場所に建て替え・購入	50	200		-
	住宅賃貸	50	50		-
	補修	50	100		100
	地盤復旧	50	100		100
	解体	50(100 <sup>*</sup> )	-		-
半壊 	建て替え	100 <sup>*</sup>	200	-	100
	補修	補助対象外		25	25
	解体	100 <sup>*</sup>	-	-	-
	地盤復旧	補助対象外		100	100
一部損壊 	建て替え	補助対象外		-	100
	解体	補助対象外		100	-
	地盤復旧	補助対象外		100	100

単位(万円)

図 1.11 浦安市被災者住宅再建支援事業(浦安市, 2018)

### 1.5.2 既設宅地補強技術に関する費用対効果の考え方

地震時に家屋が被害を被ると、瑕疵担保地震保険，各公助(被災者生活再建支援制度)，共助(義援金)等，各種補償制度があっても，建替え補修には相当の自己負担を要することになる。既設宅地補強技術に関する費用対効果の考え方は以下の通りである(須田，2017；須田ら，2017)。

#### 1)宅地補強技術に求められる要求性能

通常の地震動に対して，1/100 以下(一部損壊)の建物傾斜(不同沈下)に抑制できる性能が求められる。

#### 2)住民が要求性能に対して納得できる費用負担

仮に修復に要する費用が 200 万円とした場合，一部損壊保険金である 50 万円が支払われても，150 万円の自己負担がかかる。そのため，保険の範囲内で被害が修復できる技術が求められる。

#### 3)住民の満足度向上

再液状化に対して安心が得られる。また，想定以上の地震動に対して不同沈下の抑制効果が期待できる。

## 1.6 本論文の構成

本研究では、木造二階建て、いわゆる4号建物を地震時の液状化被害から守るべく、その宅地地盤を対象とした、低振動・低騒音、そして低コストで施工できる工法を開発する。また、性能設計概念に基づく設計法を構築する。

本論文は、第1～6章と巻末の付録から構成される。各章の内容を以下に示す。

### 第1章 序論

本研究の背景と位置付けについて述べた。液状化発生メカニズムを概観した後、これまでの地震時液状化によって被災した建物の被害例を示した。また、既往の液状化対策工法についてまとめるとともに、地震後における家屋修復費用の関係についても言及した。最後に、本論文の構成について説明する。

### 第2章 既往の研究

従来の建築物を対象とした液状化対策について、特に課題を中心にとりまとめる。また、建築分野における従来の地盤設計法の課題について、許容応力度設計法、液状化判定法を紹介するとともに、本研究で提案する2次元簡易静的液状化全応力変形解析手法について述べる。

### 第3章 立体網状スパイラル構造体の液状化対策効果の検証

立体網状スパイラル構造体(以下、人工ドレーン材)の液状化対策効果を明らかにするために、模型振動台実験を実施し、人工ドレーン材による液状化対策効果を検証する。

### 第4章 2次元簡易静的液状化全応力変形解析手法の高度化と検証

液状化時の住宅地盤の沈下量および傾斜量を予測するため、第3章の模型実験で得られた計測データに基づいて2次元簡易静的液状化全応力変形解析手法の適用性を検討する。ここでは、2次元有効応力解析法(LIQCA2D)、2次元静的液状化解析法(SPH法)の概要と比較検討結果を述べる。さらに、簡易液状化変形解析手法として位置づけられるSPH法の適用性について、東日本大震災において液状化被害を受けた浦安市の事例を対象に再現解析を試みる。

### 第5章 現場への適用に向けて

狭隘なスペースで建物周辺ならびに基礎下に高性能排水材を回転圧入することが可能な低振動・低騒音型小型回転貫入装置の開発過程についてとりまとめる。

高性能排水材の排水促進効果について現場試験を実施する。H型鋼に強制的に振動を与え、地盤内に打設・引抜を繰り返すことによって間隙水圧を発生させる。このときの地盤内間隙水圧の発生・消散過程を計測することによって、高性能排水材の排水促進効果を議論する。

愛知県あま市の既存宅地において現場試験施工を実施する。試験施工に基づいて、提案工法の適用性を議論するとともに、残された課題について整理する。

最後に、提案するスマート液状化対策工法の作業手順と設計要領をまとめる。

## 第6章 結論

結論であり、本研究のまとめと今後の課題および展望を述べる。

## 付録

本研究で人工ドレーン材として用いる立体網状スパイラル構造体の耐圧強度試験結果及び溶出試験結果を付録 1, 2 に掲載する。また、第 5 章で概要を述べたスマート液状化対策工法の作業手順と設計要領について、作業手順の詳細を付録 3(岩田, 2018)に、設計要領の詳細を付録 4 に掲載する。

図 1.12 に本研究のフローを示す。

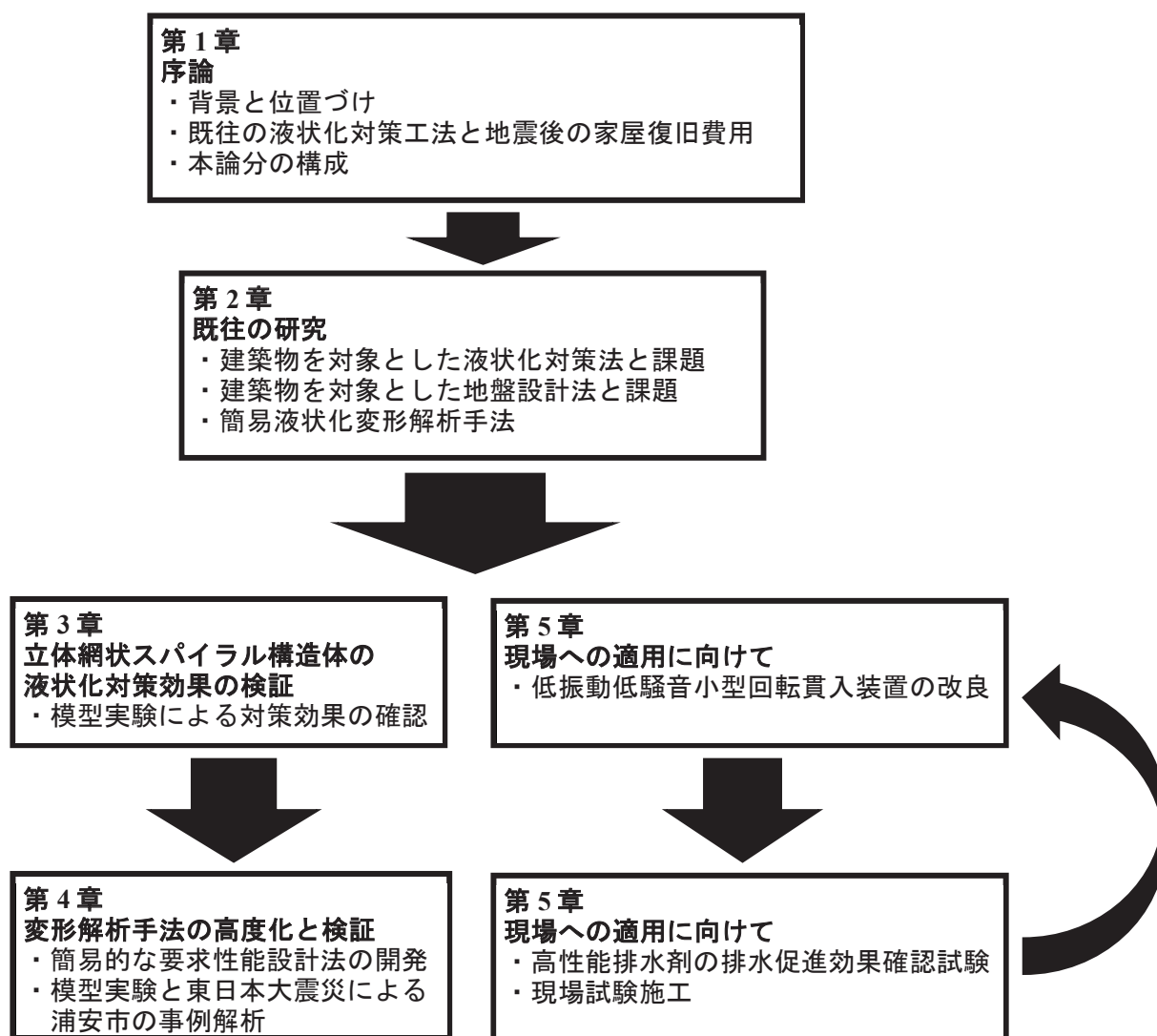


図 1.12 本研究のフロー

## 参考文献

- [1.1] 岩田知之, 既設宅地のスマート液状化対策工法の現場実証実験, 岐阜大学工学部社会基盤工学科卒業論文, 2018.
- [1.2] 浦安市: 浦安市液状化対策技術検討調査委員会 道路・宅地の一体的な液状化対策工法の比較検討, URL:[https://www.city.urayasu.lg.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_page\\_/001/002/934/06\\_hosoku-2.pdf](https://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/934/06_hosoku-2.pdf), (2018年7月1日アクセス).
- [1.3] 浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会資料・議事概要, URL:[http://www.city.urayasu.lg.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_page\\_/001/005/444/1-2higai\\_to\\_taio2.pdf](http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/005/444/1-2higai_to_taio2.pdf), (2019年2月7日アクセス).
- [1.4] 熊本市液状化対策技術検討委員会, URL:[https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c\\_id=5&id=16165&sub\\_id=3&flid=112342](https://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=16165&sub_id=3&flid=112342), (2019年2月8日アクセス).
- [1.5] 港湾空港技術研究所: 動土質研究グループ: 静的締固め圧入に関する実験, URL:<https://www.pari.go.jp/unit/doudo/theme>, (2018年8月3日アクセス).
- [1.6] 国土交通省: 市街地液状化対策推進ガイダンス 平成28年2月, URL:<http://www.mlit.go.jp/common/001123045.pdf>, (2018年8月日アクセス).
- [1.7] 国土交通省国土技術政策総合研究所・国立研究開発法人土木研究所・国立研究開発法人建築研究所, URL:<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2018/iburi02.pdf#search=%27%E5%B9%B3%E6%88%9030%E5%B9%B4%E5%8C%97%E6%B5%B7%E9%81%93%E8%83%86%E6%8C%AF%E5%9C%B0%E9%9C%87%E3%81%A7%E7%99%BA%E7%94%9F%E3%81%97%E3%81%9F%E6%B6%B2%E7%8A%B6%E5%8C%96%E8%A2%AB%E5%AE%B3%E7%AD%89%E3%81%AB%E9%96%A2%E3%81%99%E3%82%8B%E5%B0%82%E9%96%80%E5%AE%B6%E6%B4%BE%E9%81%A3%E7%B5%90%E6%9E%9C%27>, (2019年2月7日アクセス).
- [1.8] 地盤工学会液状化対策工法編集委員会(2004):液状化対策工法, 214p.
- [1.9] 一般財団法人消防防災科学センター:災害データベース URL: [http://www.saigaichousa-db-isad.jp/drddb\\_photo/photoSearch.do](http://www.saigaichousa-db-isad.jp/drddb_photo/photoSearch.do), (2018年5月19日アクセス).
- [1.10] 須田楓可, 排水材を用いた既設住宅液状化対策工法の開発とその経済効果, 岐阜大学大学院工学研究科修士論文, 2017.
- [1.11] 須田楓可・八嶋厚・村田芳信・苅谷敬三・吉原孝保・渡邊将成・余川弘至, 排水材を用いた既設住宅液状化対策工法の開発とその経済効果, 平成28年度土木学会中部支部講演概要集, No.III-015, 261-262, 2017.
- [1.12] 損保ジャパン興和損保:住宅金融支援機構特約火災保険 特約地震保険 割引制度, URL:<https://www.sjnk.co.jp/kinsurance/fireinsurance/jyukou/earthquake/cost/>, (2018年8月3日アクセス).
- [1.13] 内閣府:災害に係る住家の被害認定基準運用指針 平成21年6月, URL:<https://www.city.narashino.lg.jp/joho/keikaku/shingikai/toshikankyo/kyodogatahukkokaigi/3401201201130841245-75.files/s03.pdf>, (2018年8月3日アクセス).
- [1.14] 日本建築学会(2008):小規模建築物基礎設計指針, 日本建築学会.

- [1.15] 日本建築学会基礎構造運営委員会小規模建築物基礎設計小委員会(2011)：小規模建築物基礎設計小委員会資料。
- [1.16] 日本建築学会住まい・まちづくり支援建築会議情報事業部会:復旧・復興支援 WS: 液状化被害の基礎知識：液状化被害を受けた場合の修復方法・費用, URL, <http://newssv.ajj.or.jp/shien-/s2/ekijouka/repair/index.html>, (2018年8月3日アクセス).
- [1.17] 野崎洋之(2016):日本における家計地震保険の適正な普及に向けた改善, 岐阜大学博士課程学位論文, 94p.
- [1.18] 浜松市(2012): 南区版避難行動計画 詳細版, URL:  
<http://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/kiki/disaster/bousai/hinankoudoukeikaku/documents/minamikusyo-usai.pdf>
- [1.19] 国土交通省(2017): 第1回 熊本市液状化対策技術検討委員会 宅地液状化防止事業の実態と課題, URL: [http://www.hiyoshi-skk.com/ekijyouka-kyougikai/5\\_16165\\_112343\\_up\\_RYVSARJC.pdf](http://www.hiyoshi-skk.com/ekijyouka-kyougikai/5_16165_112343_up_RYVSARJC.pdf), (2018年7月1日アクセス).
- [1.20] 一般財団法人ベターリビング:地盤の液状化対策審査・保証, URL:<http://www.cbl.or.jp/tbtl/-ekijouka/file/pamph.pdf>, (2018年6月3日アクセス).
- [1.21] 村田芳信:宅地被害にみる 地盤調査の問題と課題 & 宅地の地盤調査 と地盤補強事例紹介, WOOD AC ゼミナール.





## 第 2 章 既往の研究

### 2.1 従来の建築分野における地盤設計法の課題

先に述べた通り，液状化対策工法は，被害を完全に防止する工法と被害を抑制・低減する工法の 2 つに分けることができる．前者は，基礎の構造に杭基礎を採用することや，完全に地盤の液状化を防止する工法であり，対策費が高額になる傾向があるが，建築基準法(以下，法と呼ぶ)や各種指針類(一般社団法人日本建築学会編，2001)を参考に設計されるため，ある程度の安全性が確保できる．一方，後者については，対策の効果を住宅の沈下量や傾斜量などにより定量的に示す必要がある．しかし，住宅の沈下や傾斜を予測するためには，高度な数値解析手法を用いる必要があり，加えてその解析を実施するためには，複数の室内土質実験を行う必要がある．また，高度な解析を取り扱うことのできる技術者が限られるなど，戸建て住宅において採用する場合にはこれらの問題点を解決する必要がある．沈下量や傾斜量という定量的な情報を住宅所有者に提供することで，液状化対策の重要性を把握でき，液状化対策を広く普及させることができると考えられる．

地盤に関わる法令として，法第 19 条，建築基準法施行令第 38 条，第 93 条がある．しかし，いずれも基礎や地盤についての原則的な事項が示されるのみで，具体的な設計方法等は示されていない．また，国土交通省告示(以下，告示と呼ぶ)第 1113 号では，地盤の調査方法や地盤の許容応力度を定める方法が示されているが，地震時に液状化する恐れのある地盤に対しては，「建築物の自重による沈下その他の地盤の変形等を考慮して建築物又は建築物の部分に有害な損傷，変形及び沈下が生じないことを確かめなければならない。」とあり，設計者に判断が委ねられているのが現状である．このままでは，設計者により判断に偏りが生じる可能性があることから，液状化地盤においても住宅の沈下や傾斜などの変形を定量的に評価できる手法の開発が望まれている．

図 2.1 に，現在実施されている設計法およびそれぞれの設計における予測精度の概要図を示す．建築基準法およびその他関連法令で要求されている最低限の許容応力度法では，液状化の判定や変形に関する情報を提供することは難しい．この許容応力度設計法に加えて，液状化判定を加えることを要求している住宅の品質確保の促進等に関する法律(以下，品確法)では，建築基礎構造設計指針等に示される液状化判定法などの実施を要求している．現在では，国土交通省国土技術総合研究所より，宅地の液状化被害可能性判定計算シート(以下，液状化シート)が無料公開されており，地盤調査結果があればだれでも簡単に液状化による被害程度を定性的に確認することができる．しかし，これらの結果だけでは，住宅の沈下や傾斜などの変形を定量的に知ることができない．そこでより詳細な情報を住民に提供するために，高精度解析レベルである変形解析を取り入れた検討を行った．地盤が液状化した場合の構造物およびその周辺地盤の変形予測手法は，これまでに数多く提案されており，精度よく予測が可能となっている．例えば，高度な構成式の導入された有効応力解析を用いた再現解析では，変形を数 cm 単位で予測できるほどの精度を有している．しかし，高度な構成式を用いる場合には，数々のパラメータが必要となるため，ボーリングや数多くの土質実験が必要となるだけでなく，地震動の設定やメッシュの作成など費用や時間がかかり，戸建て住宅の設計での利用は難しいと考えられる．そのため，既往の地盤調査結果および建物情報などわずかな情報で液状化時の構造物およびその周辺地盤の変形予測手法を提案する．

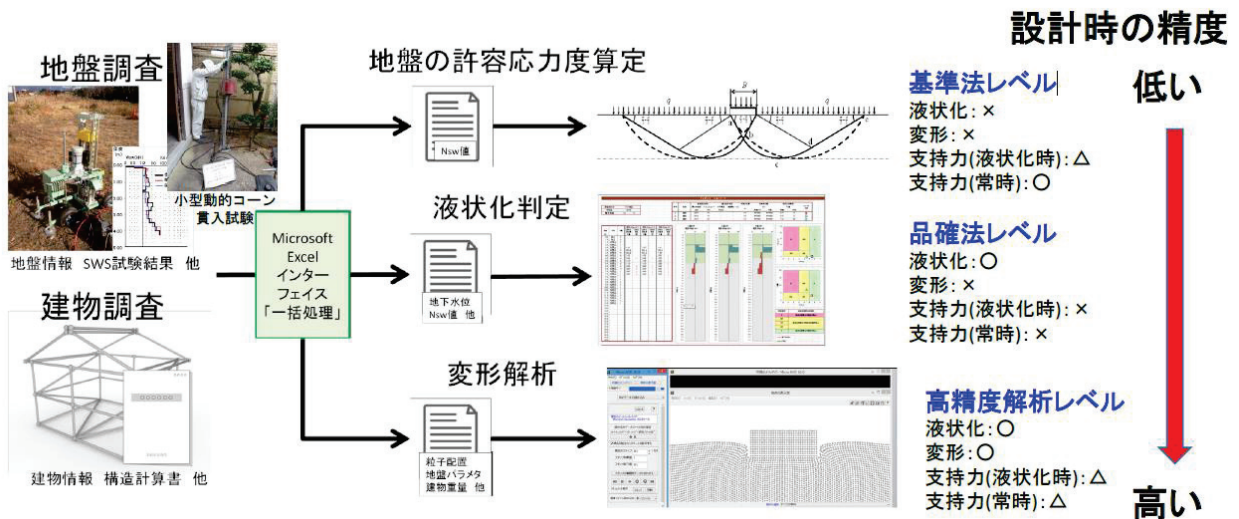


図 2.1 各設計手法の特徴と被害予測精度の関係

以下に、地盤の許容応力度算定方法、戸建て住宅における地盤調査方法および数値解析による検討の現状をまとめる。

### 2.1.1 許容応力度設計法

告示第 1113 号には、液化化を含む軟弱地盤を除いた長期・短期に生ずる力に対する地盤の許容応力度を定める方法が 3 つ示されている。また建築基礎構造設計指針(一般社団法人日本建築学会編, 2001)では、Terzaghi の支持力理論等に基づいた許容支持力式を定めている。式(2.1)~(2.3)に告示に示される許容応力度算定式を示す。

$$q_a = 2/3(i_c \alpha C N_c + i_\gamma \beta \gamma_1 B N_\gamma + i_q \gamma_2 D_f N_q) \quad (2.1)$$

$$q_a = 2q_t + 1/3 N' \gamma_2 D_f \quad (2.2)$$

$$q_a = 60 + 1.2 [N_{sw}] \quad (2.3)$$

ここで、 $q_a$ は地盤の許容応力度(支持力度)、 $i_c$ 、 $i_\gamma$ 、 $i_q$ は基礎に作用する荷重の鉛直方向に対する傾斜角に応じて計算した数値、 $\alpha$ 、 $\beta$ は基礎荷重面の形状による係数、 $C$ は基礎荷重面下にある地盤の粘着力、 $B$ は基礎荷重面の短辺又は短径、 $N_c$ 、 $N_\gamma$ 、 $N_q$ は地盤内部の摩擦角による支持力係数、 $\gamma_1$ は基礎荷重面下にある地盤の単位体積重量又は水中単位体積重量、 $\gamma_2$ は基礎荷重面より上方にある地盤の平均単位体積重量又は水中単位体積重量、 $D_f$ は基礎に近接した最低地盤面から基礎荷重面までの深さ、 $q_t$ は平板載荷試験による降伏荷重度、 $N'$ は基礎荷重面下の地盤の種類に応じて決まる係数および $[N_{sw}]$ は基礎の底部から下方 2m 以内の距離にある地盤のスウェーデン式サウンディング試験(以下、SWS 試験と呼ぶ)における 1m あたりの半回転数である。

式(2.1)～(2.3)は、住宅基礎下の地盤が一様であることを想定していることから、地盤中に非液状化層と液状化層が介在する2層以上の互層となる場合や住宅周辺のみで地盤改良などの対策を実施した場合については、許容応力度を算定することが難しい。既往の研究(岡野ら, 2013, 高田ら, 2014)で、式(2.1)中の単位体積重量に水中単位体積重量を用いるとともに、その値を液状化によって生じた過剰間隙水圧の値に応じて低減させることで、液状化地盤の許容応力度を算定することを試みている。また、非液状化層と液状化層の層厚比によって、その低減率を変化させているが、定量的な評価には至っていない。

余川ら(2013)は、この許容応力度設計法の応用し、円弧滑り法による検討を行った。円弧滑り法によって、極限支持力は再現できたが(図 2.2 参照)、模型振動台実験を再現したケースでは、地盤液状化中の住宅直下地盤ですべり面が確認できず、円弧滑り法による検討は難しいことや、液状化の被害を安全率で評価する事が難しいことを指摘している。

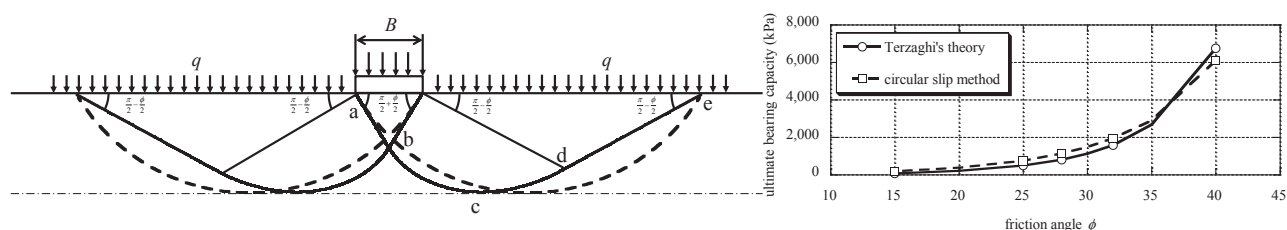


図 2.2 左：円弧滑りによる極限支持力の算定，右：円弧滑りによる極限支持力と理論値の比較

### 2.1.2 国土交通省国土技術政策総合研究所による液状化判定法

戸建て住宅向けの地盤調査として、一般的に SWS 試験が行われている。SWS 試験は、他の地盤調査方法に比べ安価で実施でき、試験によって得られる  $W_{sw}$  (載荷荷重(N))や  $[N_{sw}]$  から  $N$  値を推定することも可能である。SWS 試験には、標準貫入試験と異なり地下水位や地質を調査することができないなどの欠点があったものの、最近では、SWS 試験でできた掘削孔を利用した地下水位調査(金ら, 2009)やサンプリング(岡野ら, 2013, 高田ら, 2014)などが実施可能となっている。推定した  $N$  値や地下水位、土質情報を用いれば、液状化安全率  $F_L$  値(一般社団法人日本建築学会編, 2001)、液状化指数  $P_L$  値(一般社団法人日本建築学会編, 2001)による液状化判定や、地表面変位  $D_{cy}$  (一般社団法人日本建築学会編, 2001)により地盤の沈下量を推定することができると考えられる。国土技術政策総合研究所では、液状化シートを公開し、 $D_{cy}$ 、 $P_L$  値および非液状化層厚  $HI$  の組み合わせで液状化による被害度を判定し、住民に周知することに努めている。許容応力度設計法とは異なり、液状化を考慮した設計手法と考えられるが、液状化シートでは定性的な被害度を示すことにとどまり、住宅の「沈下量および傾斜量」などの被害度を定量的に住民に示すことができないという問題点がある。図 2.3 に、東日本大震災で液状化被害を受けた浦安市を対象に実施した液状化判定の結果の一例を示す。

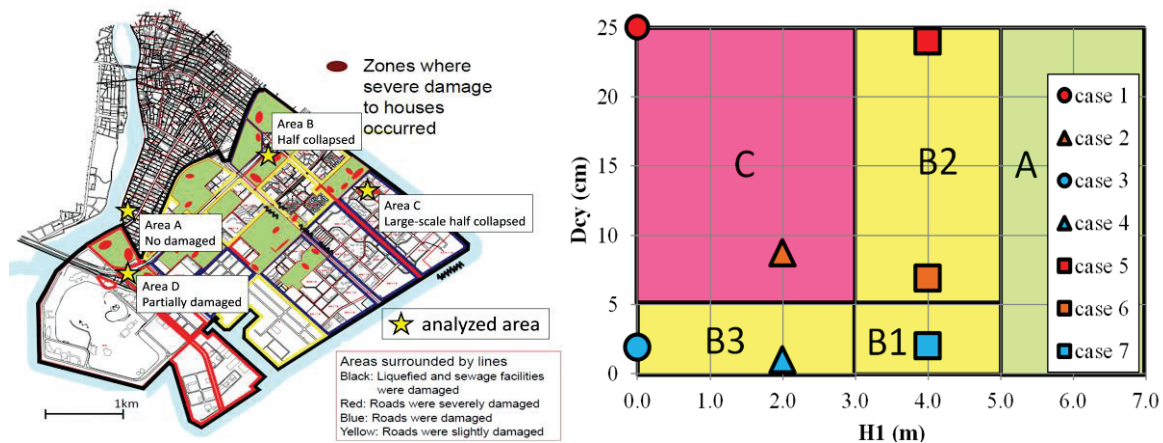


図 2.3 浦安市を対象に実施した液状化判定の結果  
(国土交通省国土技術政策総合研究所, 2012)

### 2.1.3 数値解析を用いた設計法の提案と課題

地盤が液状化した場合の構造物およびその周辺地盤の変形予測手法(古山田ら, 2003, 一般社団法人日本建築学会編, 2008)は, 数多く提案されており, 精度よく予測が可能となっている. 例えば, 高度な構成式の導入された有効応力解析を用いた再現解析(谷ら, 2014)では, 変形を数 cm 単位で予測できるほどの精度を有している. しかし, 高度な構成式を用いる場合には, 数々のパラメータが必要となるため, ボーリング調査や数多くの土質実験が必要となるだけでなく, 地震動の設定やメッシュの作成など費用や時間がかかり, 戸建て住宅の設計での利用は難しいと考えられる.

以上のことから, 液状化時の戸建て住宅の沈下量や傾斜量を予測するための解析プログラムは, 比較的安価に実施でき, 実務者であれば誰でも簡単に利用できることが求められる. そこで本研究では, Smoothed Particle Hydrodynamics 法(以下, SPH 法)による 2 次元静的液状化解析プログラム(余川ら, 2016)を用い, 無対策時の液状化による住宅の被害程度(沈下量や傾斜量)を予測することを目的とする. 検討の対象は, 建築基準法で構造計算の建築主事による確認の義務付けがない木造 2 階建てで, 延べ面積が 500m<sup>2</sup>以下の戸建て住宅(4 号建物)およびその住宅が立地している液状化地盤である.

液状化時の戸建て住宅の沈下量, 傾斜量を本解析プログラムで検討するために必要な手順は, 以下のとおりである.

- (1) 「液状化シート」に用いる地盤パラメータの設定
- (2) 地下水位の設定
- (3) 入力地震動の設定
- (4) 液状化安全率  $F_L$  値の算定
- (5) 初期ヤング率  $E_0$  の算定
- (6) 住宅重量および基礎幅の設定
- (7) 粒子配置の設定
- (8) 自重法による静的液状化解析の実施
- (9) 戸建て住宅の沈下量, 傾斜量の把握

なお、(1)に必要なパラメータは、標準貫入試験で得られた  $N$  値もしくは SWS 試験で得られた  $[N_{sw}]$  値を換算した  $N$  値、細粒分含有率  $F_c$  (%)、密度  $\rho$  ( $t/m^3$ ) である。(3)で必要となるパラメータは、液状化判定に用いる設計用最大加速度  $\alpha_{max}$  (gal) および地震マグニチュード  $M(M)$  である。例えば、(5)の初期ヤング率  $E_0$  は、(1)で入力した  $N$  値および換算  $N$  値から推定することで決定する。(6)は、構造計算書や建築物荷重指針により決定できる。

## 2.2 まとめ

本章では、建築分野における液状化設計についてまとめるとともに、その課題点について述べた。それらの課題を解決するための方法として2次元簡易静的液状化全応力変形解析手法を提案するとともにその特徴について示した。提案した簡易液状化変形解析手法の代表的な特徴は以下のとおりである。

- ・ SPH 法を利用している点
- ・ 比較的少ないパラメータで住宅沈下量や傾斜量を予測することができる点
- ・ 実務者であれば誰でも簡単に利用できる点

## 参考文献

- [2.1] 一般社団法人日本建築学会編(2001):建築基礎構造設計指針, 第2版, 丸善出版社.
- [2.2] 一般社団法人日本建築学会編(2008):建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 日本建築学会.
- [2.3] 岡野泰三, 平出務, 松下克也, 金哲鎬, 小川正宏(2013):小規模建築物の簡易液状化判定法の検証, その1.土質判別方法の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.789-790.
- [2.4] 金哲鎬, 松下克也, 岡野泰三, 安達俊夫, 藤井衛(2009): スウェーデン式サウンディング試験孔を利用した有孔パイプによる地下水位の測定法(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.635-636.
- [2.5] 国土交通省国土技術政策総合研究所(2012):宅地の液状化被害可能性判定シート, URL: <http://www.nilim.go.jp/lab/jbg/takuti/takuti.html>.(2016年5月10日アクセス).
- [2.6] 古山田耕司, 宮本裕司, 時松孝次(2003):液状化地盤での杭応力の実用的な解析法, 第2回日本地震工学研究発表会, pp.348-349.
- [2.7] 高田徹, 長坂光泰, 徳山義孝, 須々田幸治(2014): SWS 孔を用いた開口型土質採取器の開発と原位置試験, 日本建築学会大会学術講演概要集, 構造 I, pp.247-248.
- [2.8] 谷和夫, 松下克也, 橋本隆雄, 山本彰, 竹内秀克, 野田利弘, 規矩大義, 大林淳, 清田隆(2014): 浅層盤状改良工法による戸建て住宅の液状化被害軽減効果の検証と経済性評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.533-553.
- [2.9] 余川弘至, 二木幹夫, 佐久間博文, 菅谷憲一, 久世直哉(2013):地盤液状化時の許容応力度計算方法に関する提案その2 計算例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.599-600.

[2.10] 余川弘至, 杉井俊夫, 野々山栄人, 近藤敦之, 伴知寛, 八嶋厚(2016):直接基礎構造物の液状化時のゆすりこみ沈下解析に関する新しい試み, 平成 27 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, III-10, pp.193-194.

### 第3章 立体網状スパイラル構造体の液状化対策効果の検証

これまでに延べてきたとおり、海岸や干潟の埋立地などで、地盤の液状化が発生し、戸建て住宅などの小規模構造物に傾斜や沈下などの被害が生じた(Tokimatsu, 2011)。傾斜や沈下の生じた戸建て住宅の多くは、べた基礎などの直接基礎で、液状化対策がなされていなかった。液状化対策が施されてこなかった理由として、土木分野で一般的に用いられる液状化対策工法を戸建て住宅に適用する場合には、高額となりすぎることや、施主が液状化による被害の程度を十分に把握していなかったことが挙げられる。これらの問題を解決すべく、戸建て住宅にも適用できる立体網状スパイラル構造体(以下、人工ドレーン材)を用いた液状化対策工法の開発を進めている(余川ら, 2016)。開発を進めている工法は、施主に現状の液状化による被害程度を把握してもらうための調査と判定を実施するだけでなく、施主の要求する性能と費用を勘案した性能規定型設計手法を取り入れた対策を目指している。そこで、本章では、人工ドレーン材による液状化対策効果を明らかにするために、模型振動台実験を実施し、人工ドレーン材による液状化対策効果を確認した。

#### 3.1 模型振動台実験

液状化時の住宅沈下および地盤の変形を確認するために、水平一方向に加振可能な電気油圧サーボ方式の加振装置と前面をアクリル板とした剛土槽(内寸：幅 1,000mm×奥行き 200mm×高さ 800mm)を組み合わせた振動台実験装置を使用し、1/40 スケールの平面ひずみ条件で模型振動台実験を行った(図 3.1 参照)。実験では、液状化時の住宅沈下や地盤変形を確認することができるよう土槽に小型のカメラを設置した。模型地盤は、相対密度 30%を目標に、三河珪砂 6 号を地盤高さ 400mm となるように水中落下法で作製した。住宅模型は、塩ビ製の箱とアルミ板(重量物)によりモデル化した。アルミ板は、接地圧が一般の木造住宅と等価になるように重量を調整した。本研究の対象は、人工ドレーン材を地盤中に連続的に打設することで、地震時に発生する過剰間隙水圧の上昇を抑制、もしくは消散の促進により、住宅の沈下を抑制する工法である。実際に地盤中に打設する際には、ポリプロピレン製の人工ドレーン材(透水係数 3.35cm/s)に PE メッシュフィルタを巻き付けて使用している。模型実験では、この排水効果のみを再現するために、剛性の非常に小さいポリエステル長繊維不織布により再現した。ポリエステル長繊維不織布は、東洋紡社製の東洋紡スパンボンド(品番：4131N)を利用した。模型振動台実験の振動台に入力した地震動は、中地震を想定した周波数 5Hz, 最大加速度 200gal, 入力時間 16 秒の正弦波である。

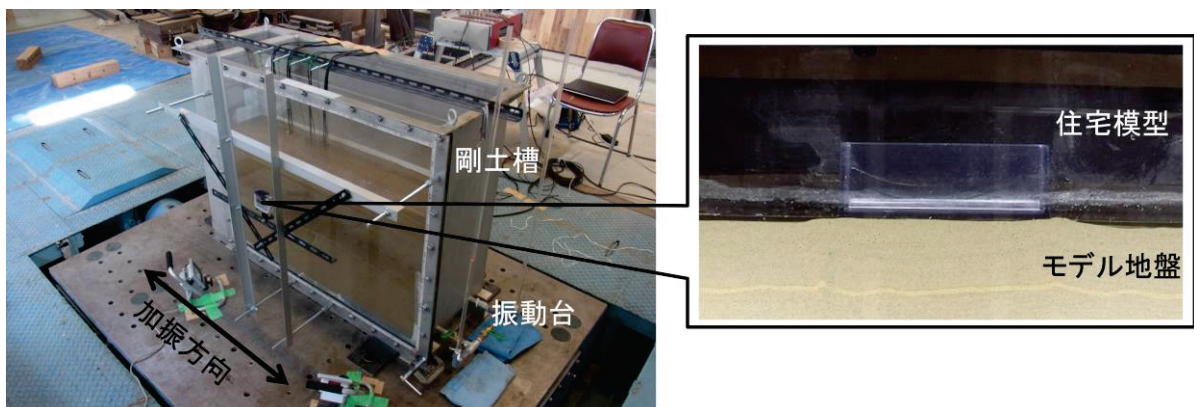


図 3.1 振動台実験の状況

### 3.2 実験条件および検討ケース

実験は無対策およびドレーンの配置箇所を変えた3ケースの計4ケースを実施した。実験の状況を図3.1に、模型振動台実験中に振動台の上で計測された加速度の時刻歴を図3.2に、ドレーンおよび計測器の設置位置の概要図を図3.3に示す。

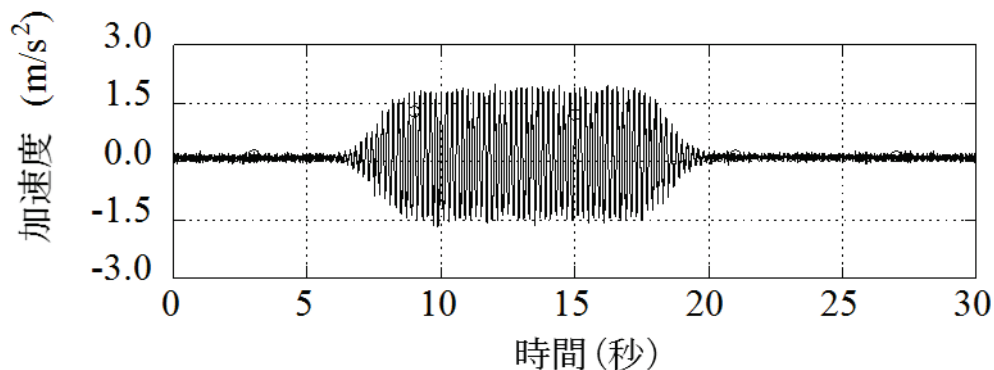


図 3.2 加速度の時刻歴

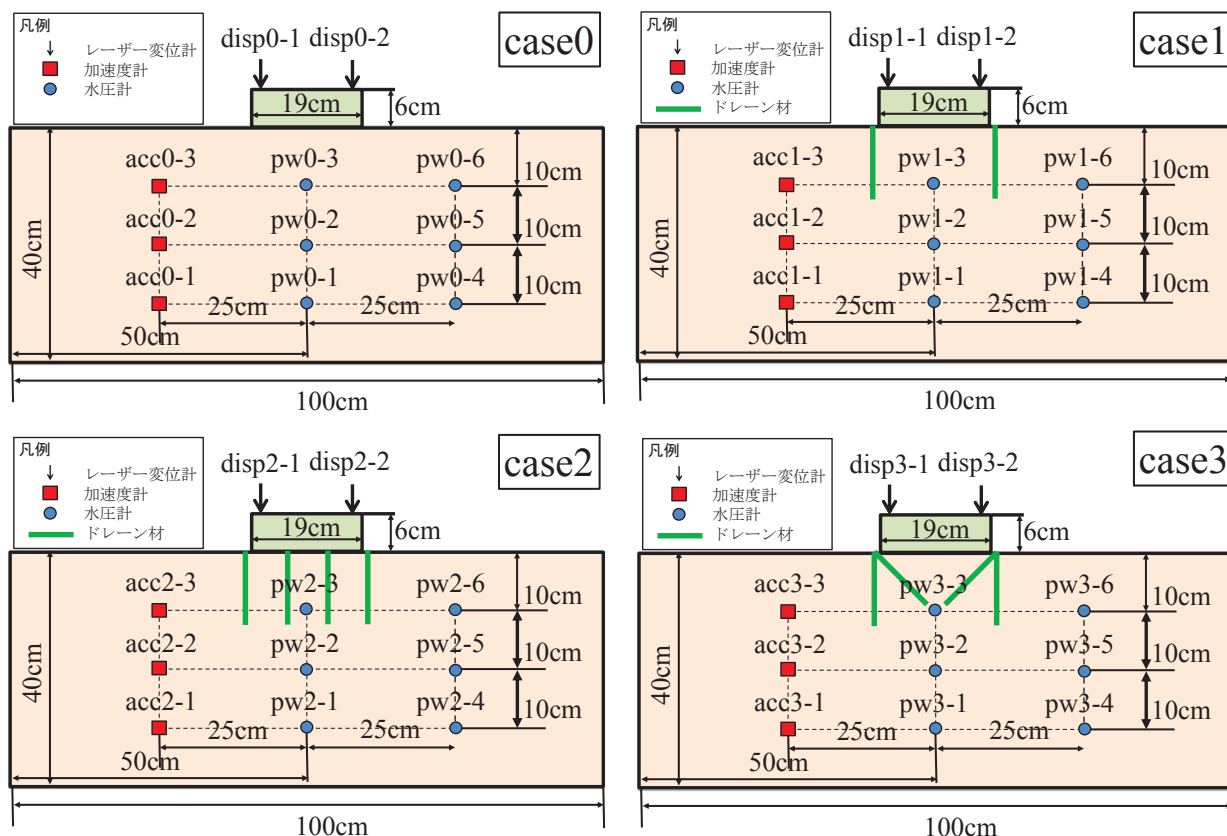


図 3.3 ドレーンおよび計測器の設置位置の概要図



### 3.3 実験結果

各実験で得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を図 3.4 に、住宅沈下量の時刻歴を図 3.5 に示す。なお、図 3.4 中の赤の破線は、有効上載圧を示す。また図 3.4 および図 3.5 中の凡例は、図 3.3 の凡例と対応している。

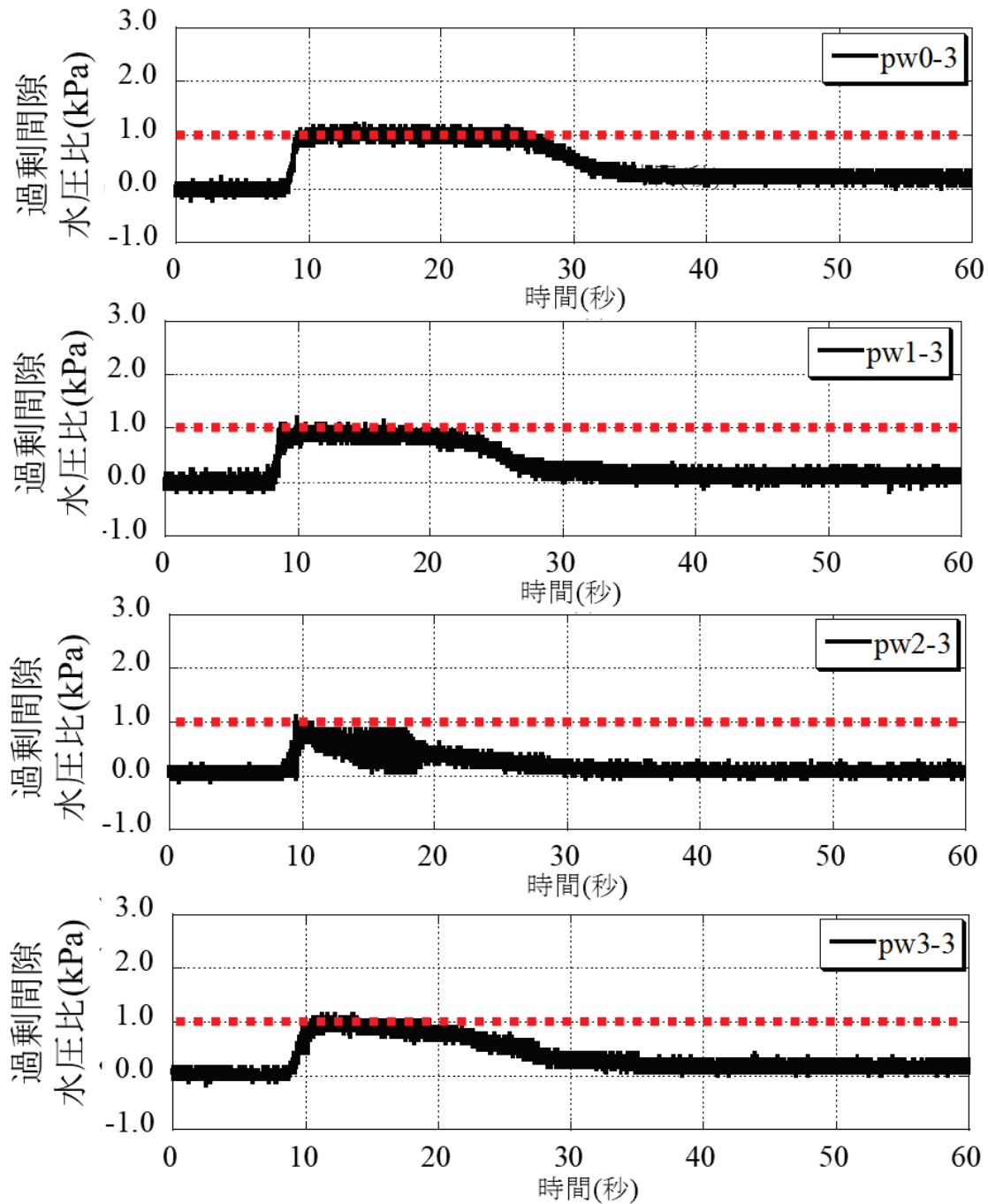


図 3.4 過剰間隙水圧比の時刻歴(上から case0~case3)

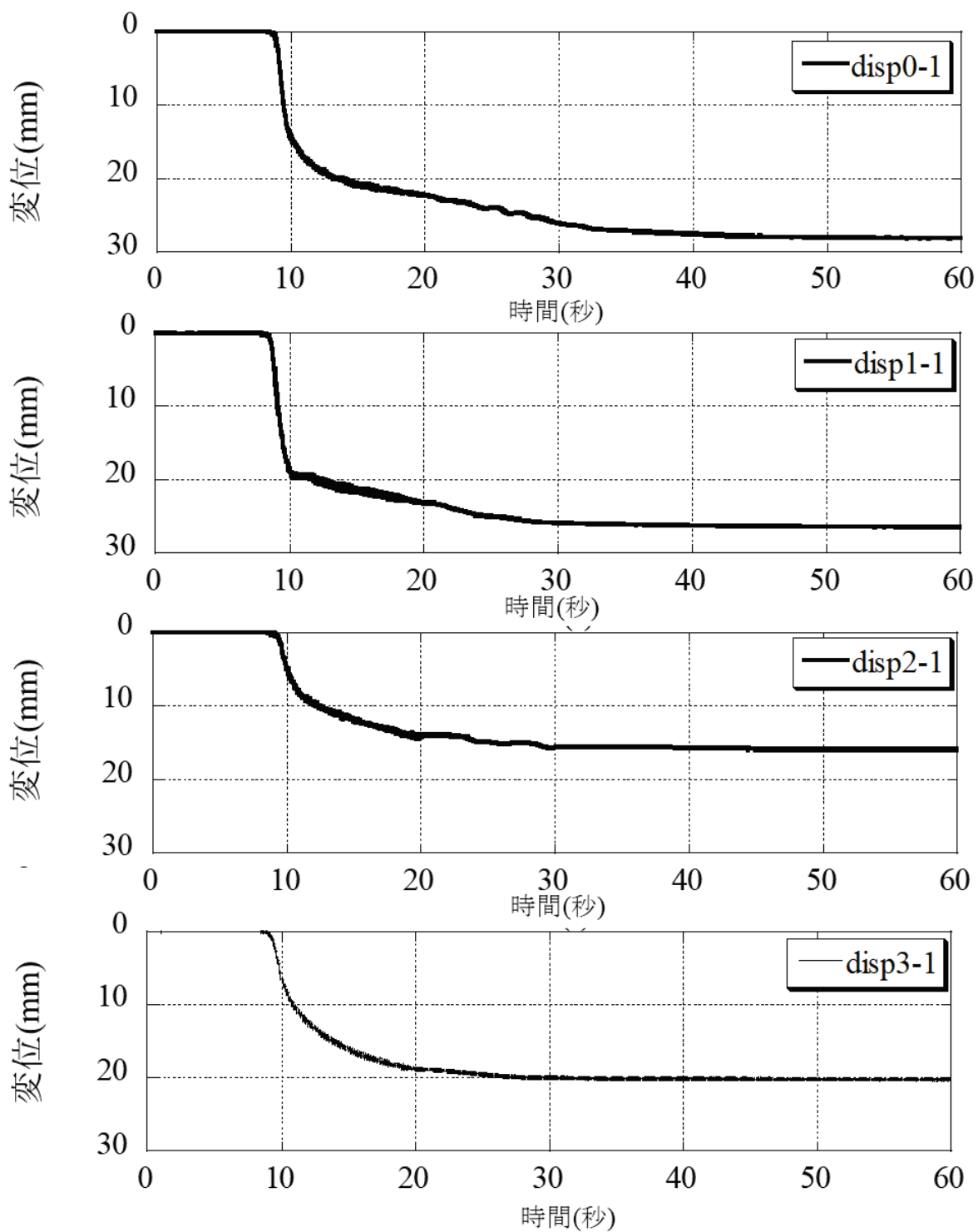


図 3.5 住宅沈下量の時刻歴(上から case0~case3)

図 3.4 で、各ケースの過剰間隙水圧比の時刻歴を比較すると、どのケースも加振開始と同時に過剰間隙水圧比が上昇しており、液状化の発生を防止するほどの対策の効果は見られなかった。一方、

過剰間隙水圧の消散過程においては、対策によりその効果の違いがみられた。無対策の case0 は、加振終了後も過剰間隙水圧比が 1.0 をしばらく保持しているが、対策を施した case1～case3 については、加振終了後もしくは加振中に過剰間隙水圧が消散し始めている。過剰間隙水圧の消散終了時刻については、住宅下にドレーンを鉛直方向に設置した case2 が最も早く、速やかに過剰間隙水圧を消散させていることが確認できる。

次に、**図 3.5** の住宅沈下量を比較すると、どのケースも加振開始直後に大きく沈下し、その後は、過剰間隙水圧が消散されるまで緩やかに沈下している。加振開始直後の住宅沈下量を比較すると、住宅直下にドレーンを設置していない case0 および case1 は、住宅直下にドレーンを設置した case2 および case3 に比べて沈下量が大きくなった。この結果から、住宅の沈下量を抑制するためには、住宅直下に対策を施すことが重要であることがわかった。住宅周囲のみに対策を施した case1 については、大きく沈下量を抑えることはできなかったものの、無対策に比べれば、ある程度の住宅沈下の抑制効果が得られることもわかった。

### 3.4 まとめ

本節では、人工ドレーン材の液状化対策効果を明らかにするために、模型振動台実験を実施し、人工ドレーン材による液状化対策効果を確認した。その結果、ドレーン材だけでは、完全に液状化の発生を抑制することは困難なケースがあることがわかった。しかし、対策を施すことで、無対策の状態に比べて、住宅の沈下量を抑制することができた。また、住宅の沈下量を抑制するためには、住宅直下にドレーン材を設置することが重要であることもわかった。

本実験では、ドレーン材の排水効果を確認する実験にもかかわらず、間隙流体に水を使用したため、透水に関する相似則を満足していない。そのため間隙水が非常に移動しやすく、得られたドレーンの対策効果は、定性的なものに留まらざるを得ない。今後、透水に関する相似則を満足させるために、間隙流体にメトロゾ水溶液などの粘性流体を用い、より信頼性のある実験を実施する必要がある。

### 参考文献

- [3.1] 余川弘至, 野々山栄人, 八嶋厚, 吉原孝保, 津田裕也(2016):粒子法を用いた液状化時の戸建て住宅の被害予測解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), No.20253, pp.505-506.
- [3.2] K.Tokimatsu(2012):Liquefaction -induced damage to buildings in Urayasu City During The 2011 Tohoku Pacific Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp665-674.



## 第4章 2次元静的液状化プログラムの高度化と検証

### 4.1 模型振動台実験の概要

液状化時の住宅沈下および地盤の変形を確認するために、水平一方向に加振可能な電気油圧サーボ方式の加振装置と前面をアクリル板とした剛土槽(内寸：幅 1,000mm×奥行き 200mm×高さ 800mm)を組み合わせた振動台実験装置を使用し、1/50 スケールの模型振動台実験を行った。実験では、液状化時の住宅沈下や地盤変形を確認することができるよう土槽に小型のカメラを設置した。模型地盤は、相対密度 50%を目標に、三河珪砂 6 号を地盤高さ 450mm となるように水中落下法で作製した。住宅模型は、アクリル製の箱とアルミ板(重量物)によりモデル化した。アルミ板は、接地圧が一般の木造住宅と等価になるように重量を調整した。模型振動台実験の振動台に入力した地震動は、周波数 2.0Hz, 最大加速度 200gal, 入力時間 16 秒の正弦波である。実験の状況を**写真 4.1**に、模型振動台実験のテーブル上で計測された加速度の時刻歴を**図 4.1**にそれぞれ示す。なお、実験で得られた結果と、2次元数値解析(既往の解析手法および提案手法)の結果を直接比較するために、平面ひずみ状態で実施した。

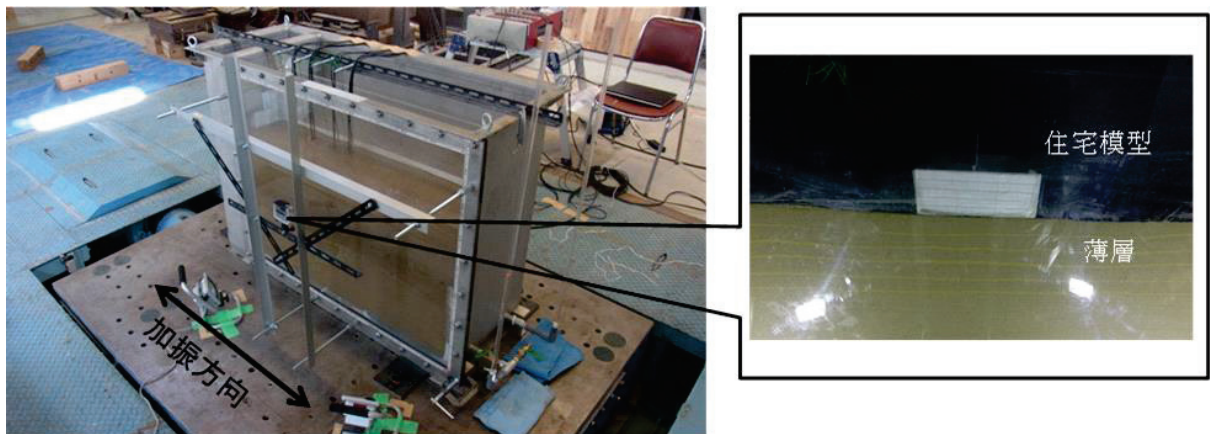


写真 4.1 実験の様子

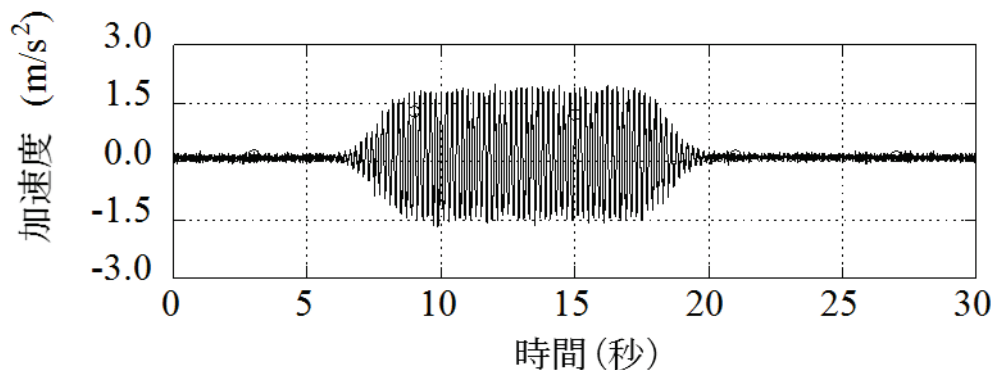


図 4.1 入力地震動

## 4.2 SPH 法による 2 次元静的液状化プログラムの概要

先に述べた通り，液状化時の戸建て住宅の沈下量や傾斜量を予測するための解析プログラムは，比較的安価に実施でき，実務者であれば誰でも簡単に利用できることが求められる．そのため，本研究では以下の点に留意した解析プログラムを開発し検討を行った．

- (1)SWS 試験など簡易調査結果を基に利用できること
- (2)室内試験の実施を求められないこと
- (3)実務者であれば誰でも利用できること
- (4)既存の液状化判定結果を利用できること
- (5)液状化した土の応力-ひずみ関係を再現できること
- (6)地盤の大変形と局所的変形を表現できること

(1)～(5)の条件を満足するプログラムとして，安田ら(1996)により，ALID(Analysis for Liquefaction-induced Deformation)が提案されている．安田らは，地震中の複雑な液状化挙動ではなく，地震後の流動特性に着目して，液状化に伴うせん断剛性の低下に関する種々の室内試験を行ってきた．その室内試験結果から求められた構成式(以下，ALID モデル)を導入した有限要素解析による自重解析を用いることで，液状化後に生じる残留変形量を実用的に使える精度で求められることができることを報告している．つまり，一般的な動的解析プログラムとは異なり，時々刻々と変化する動的な応答を求めることはできないが，ALID モデルを用いれば，液状化後に生じる残留変形を予測することができる．一方，(6)の条件は，大変形問題を解くための解析手法の 1 つである SPH 法を用いることで対応できる．SPH 法を用いた単純せん断試験のシミュレーション(Nonoyama et al, 2015)では，せん断ひずみが 100%を超えるような大変形に対しても精度よく解析できることが明らかとなっている．

### 4.2.1 定式化および離散化

SPH 法(Lucy et al., 1977, Gingold et al., 1977)は，連続体を多数の粒子(計算点)で離散化する解析手法であり，物理量の空間勾配を平滑化関数の空間勾配を用いて求める．宇宙物理学の分野で大きな密度差や密度変化が生じる場の圧縮性流体解析に適用されており，現在では非圧縮性流体解析や固体解析など様々な問題に適用され(Lui et al., 2003)，近年では，地盤工学の分野への適用も行われている(Bui et al., 2008)．本研究では，SPH 法の理論に基づいて離散化された運動方程式と質量保存則を相互に段階的に計算をしている．地盤の変形を表現するために，4.2.2 で示す構成式を新たに導入している．なお，本論文では間隙水の影響は考慮していないため，一相系の解析となっている．解法の詳細については Nonoyama et al. (2015)を参照されたい．

### 4.2.2 構成式

構成式には、ALIDモデル(安田ら,1996)を用いた。図4.2(a)は、実験から想定される地震前と流動時のせん断応力-せん断ひずみ関係の解法模式図であり、それをバイリニアで近似したものが図4.2(b)である。液状化した土のせん断応力-せん断ひずみ関係は、図4.2中流動の経路で示され、非排水状態で一定振幅の繰返しせん断応力を加えて液状化させたのち、単調載荷を行う特殊な室内試験法により求められる。安田らによれば、液状化前のせん断剛性  $G_0$  と液状化した状態から行った単調載荷時のせん断剛性  $G_1$  の比は、液状化安全率  $F_L$  および細粒分含有率  $F_c$  のみで決定できるとしている。また、ある一定のせん断ひずみ  $\gamma_L$  より大きなせん断ひずみが生じた場合は、せん断剛性  $G_2$  が液状化前の初期せん断剛性  $G_0$  程度まで回復することも明らかにしている。せん断剛性決定の詳細については、安田ら(1996)を参照されたい。

図4.2において、実際のせん断応力-せん断ひずみ関係は、有効応力の変化に伴い変化し、これに伴って状態点は地震前の状態 A から流動後の状態 C に移動する。しかし安田らは、簡易的な解析方法として、A→B→Cの経路で検討する応力解放法と 0→B→Cの経路で検討する自重法の2つを提案している。さらに2つの解法による再現解析の結果と実際の被害結果を比較し大きな差異が無いことを報告している。本研究では、より簡便に解析することのできる経路 0→B→Cを用いる自重法により検討を行った。なお、ALIDモデルで必要となるパラメータは、初期ヤング率  $E_0$ 、細粒分含有率  $F_c$ 、ポアソン比  $\nu$ 、単位体積重量  $\gamma$  および液状化安全率  $F_L$  のみである。

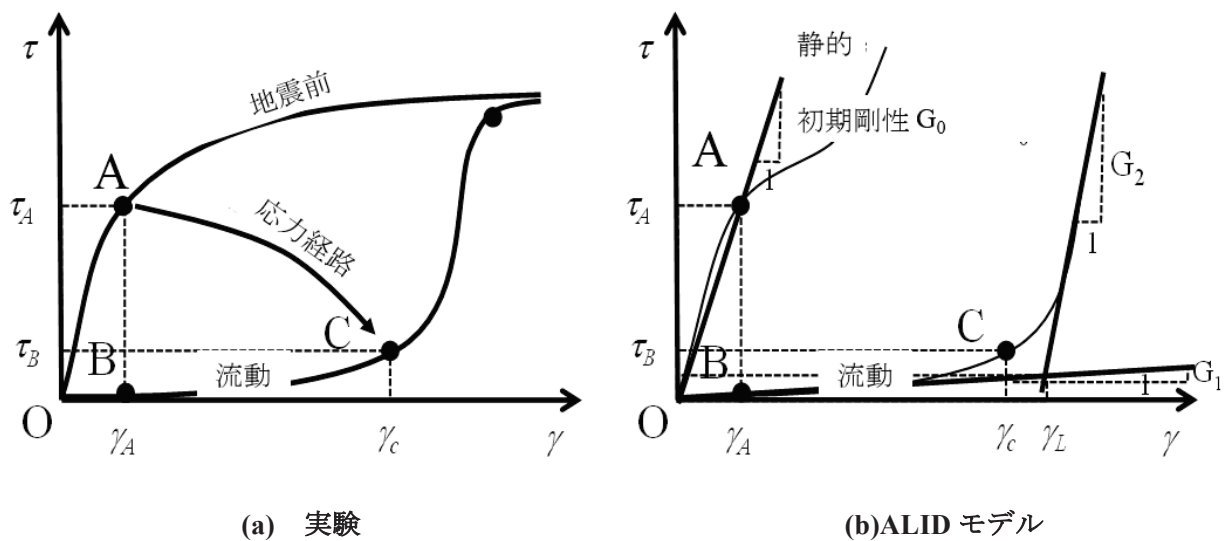


図4.2 せん断応力～せん断ひずみ関係のイメージ図

## 4.3 2次元有効応力解析(LIQCA)

土の相と水の相に関する力のつり合いを考慮して定式化された2次元有効応力解析プログラムLIQCA2D14(Oka et al., 1994)により、前述した模型振動台実験の再現を試みた。LIQCAの定式化、構成式および空間の離散化の概要については4.3.1節、4.3.2節および4.3.3節に示す。

### 4.3.1 定式化

固体力学に基づく土の骨格と間隙水圧の連成問題の支配方程式は、固相と液相の二相から成る飽和多孔質体を扱ったBiotの飽和多孔質体理論(Biot, 1941; Biot, 1955; Biot, 1956; Biot, 1962)により導くことができる。Biotの式には、未知数の取り方や近似の方法によって、様々な定式化(Zienkiewicz and Shiomi, 1984; Lewis and Schrefler, 1998; Zienkiewicz et al., 1999)がある。完全な定式化としては、固相の変位 $u$ 、液相の変位 $U$ および間隙水圧 $p$ を未知数とした $u-U-p$ 定式化、あるいは液相の固相に対する相対変位 $w$ を用いた $u-w-p$ 定式化がある。また、液相の圧縮性を仮定して間隙水圧 $p$ を消去した $u-U$ 定式化あるいは $u-w$ 定式化がある。LIQCAではOkaら(1994)により誘導された固相の変位 $u$ と間隙水圧 $p$ を未知数とした $u-p$ 定式化( $u-p$  formulation)を用いる。 $u-p$ 定式化では、液相の固相に対する相対加速度は固相の加速度に比較して小さいと仮定して液相の変位を陽に扱わないことから、従来から地盤工学で用いられてきた圧密問題の定式化ともなじみがよい。また、要素の重心で間隙水圧(Christian and Boehmer, 1968)を定義すれば、解くべき自由度の数を減らすことができ、計算コストの面で有利となる。

### 4.3.2 構成式

LIQCAには種々の構成式が搭載されている。ここでは、本研究で主に使用した砂の繰返し弾塑性モデルについて概要を述べる。構成式の詳細およびその他の構成式については、文献に譲る。

砂の動的挙動を表現する構成式には様々な種類のものが提案されているが、液状化に伴う地盤の地震中の変形を再現するには、繰返し载荷中に発生するある程度のひずみレベルまでを再現できるモデルが必要である。LIQCAではOkaら(1999)の繰返し弾塑性モデルを用いている。この構成式には以下の特徴がある。

- 1) 応力パラメータとして相対応力比を用いており、主応力の回転などの多次元応力状態を考慮できる
- 2) 硬化則として非線形移動硬化則を用いており、繰返し载荷時において応力反転時に硬化パラメータを初期化する必要がないため、地震時のようなランダムな载荷条件に対して適用性が高い
- 3) 境界曲面として過圧密境界面を導入し、これにより返相応力比を決定することで、過圧密に伴うダイレイタンス量の減少などを再現できる。
- 4) 一般化した流動則を用いることにより、種々の砂が有するストレス～ダイレイタンスー関係を再現することができる
- 5) 塑性ひずみ量に依存したせん断弾性係数を用いることにより、せん断ひずみ10%程度まで砂の挙動を再現できる。



### 4.3.3 空間および時間の離散化

空間離散化には一般に有限要素法(FEM)が用いられるが、LIQCA では有限要素法と有限差分法(FDM)を用いて、支配方程式の空間離散化を行っている。つりあい式の空間的な離散化には有限要素法、連続式の間隙水圧の項の空間的な離散化には直交格子に対する有限差分法(赤井・田村, 1978)を拡張した有限体積法(例えば, 河村, 1995)を用いている。ここでは、間隙水圧は要素内で一定値として重心で算定し、応力とひずみもまた要素の重心で算定している。これにより、計算自由度の低減と非排水条件での locking の回避が可能となる(例えば, 久田・野口, 1995)。なお、このためアワーグラスモードが発生する可能性があるが、構造物の全体的な変形に与える影響は大きくない。一方、時間離散化には陰解法である Newmark の  $\beta$  法を用いている。

## 4.4 模型振動台実験の FEM および SPH による再現解析

図 4.3 に再現解析に用いた有限要素メッシュを示す。節点数および要素数は、それぞれ 1,125 および 1,040 である。解析領域は、模型振動台実験と同じ大きさとした。変位の境界条件として、底面は、水平方向(x)、鉛直方向(y)とし、側方の境界は、水平方向(x)固定とした。水理境界条件として、地下水面の位置を排水境界とし、その他の境界面はすべて非排水境界とした。模型振動実験では、地下水位を GL.-20mm に設定したが、毛管上昇の影響で地表面までほぼ飽和状態であったと想定される。そのためここでは、地表面を地下水面と仮定して、解析を実施した。入力地震動は、有限要素メッシュの底面から入力することとし、模型実験で計測された図 4.1 の加速度波形を用いた。

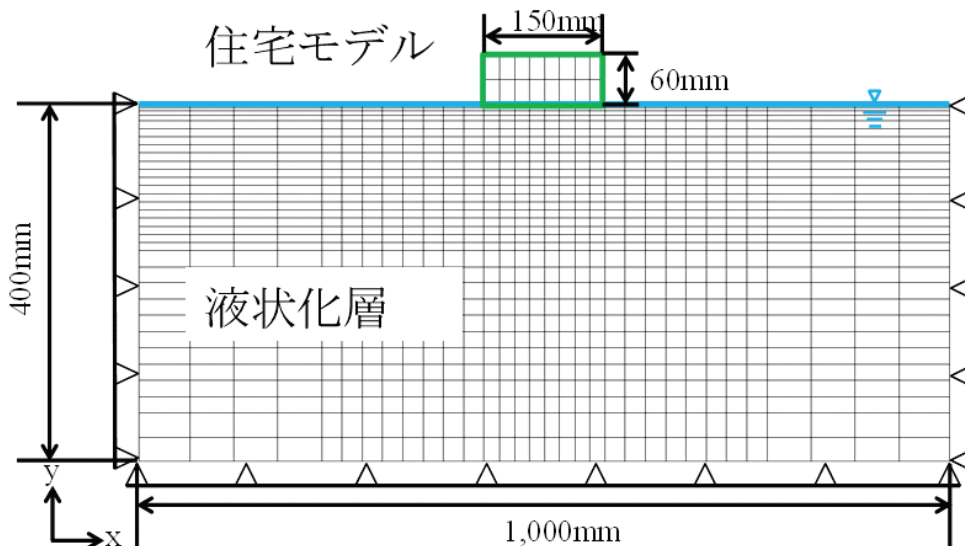


図 4.3 有限要素メッシュおよび境界条件

計算時間増分は 0.0005 秒、時間積分に用いた Newmark- $\beta$ 法の係数は $\beta=0.3025$ 、 $\gamma=0.6$ とした。Rayleigh 減衰として、初期剛性比例型を用いた。繰返し弾塑性構成式のパラメータを表 4.1 に示し、図 4.4 に要素シミュレーションおよび繰返し三軸試験の液状化強度曲線を示す。

表 4.1 材料パラメータ

初期間隙比	$e_0$	0.802
圧縮指数	$\lambda$	0.05
膨潤指数	$K$	0.006
疑似過圧密比	$OCR^*$	1.7
初期せん断剛性比	$G_0/\sigma'_m$	687.5
破壊応力比	$M^*_f$	1.222
変相応力比	$M^*_m$	0.682
硬化関数パラメータ	$B^*_0$	1,300
	$B^*_l$	70
規準ひずみ	$\gamma^{P^*}_r$	0.01
	$\gamma^{E^*}_r$	0.03
ダイレイタンスパラメータ	$D^*_0$	5
	$n$	3.7

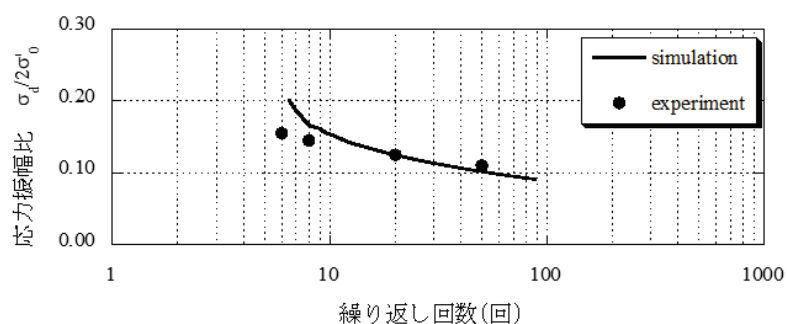


図 4.4 液状化強度曲線

次に、模型振動台実験を SPH 法による 2 次元静的液状化プログラムを用いて再現解析を実施した。はじめに模型振動台実験の条件を考慮して「液状化シート」による液状化判定を行い、それらによって得られた液状化安全率  $F_L$  等を入力パラメータとし、自重法による静的液状化解析を実施した。図 4.5 に模型振動台実験の再現解析に用いた解析モデルを示し、表 4.2 に材料パラメータを示す。なお、表 4.2 中の  $E_0$  は、道路橋示方書に示される標準貫入試験における  $N$  値から推定される弾性定数を示し、ここでは、表 4.2 中の  $G_0$  から式(4.1)および式(4.2)を用いて  $N$  値を逆算し、初期ヤング率  $E_0$  を式(4.3)により求めた。

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (4.1)$$

$$V_s = 80 \cdot N^{1/3} \quad (4.2)$$

$$E_0 = 2,800 \cdot N \quad (4.3)$$

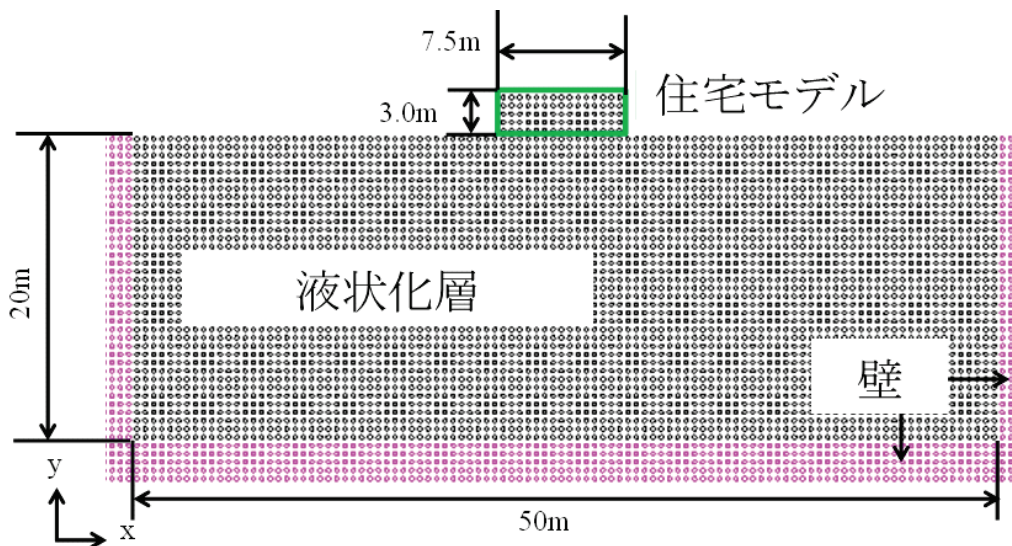


図 4.5 解析条件(粒子配置)

解析は実物スケールで行い、地盤を ALID モデルで、住宅および壁を弾性モデル(剛体)でモデル化した。粒子数は、地盤、住宅、底面および側面の壁を合わせて 26,760 個である。粒子間距離は 0.25m とし、境界条件は、底面の壁を水平方向(x)、鉛直方向(y)固定、側面の壁を水平方向(x)固定とした。解析条件として、重力加速度が  $9.8\text{m/s}^2$  になるまで徐々に増加させる自重法を用い、変形が概ね収束するまで計算を実施した。

表 4.2 入力パラメータ

パラメータ		地盤 ALID	住宅 弾性体	壁 弾性体
初期ヤング係数 ( $\text{kN/m}^2$ )	$E_0$	11,200	800,000	800,000
ポアソン比	$\nu$	0.333	0.333	0.333
細粒分含有率	$F_c$	0.0	-	-
密度 ( $\text{t/m}^3$ )	$\rho$	1.86	0.51	-
液状化安全率	$F_L$	0.55	-	-

#### 4.4.1 振動台実験、LIQCA、SPH の結果比較

図 4.6 に、模型振動台実験、LIQCA2D14 を用いた有効応力解析および SPH 法による 2 次元静的液状化解析の地震動終了後の変形状況を示す。各検討における住宅の沈下量は、実物スケールで表現すると、模型実験で 1.00m、有効応力解析で 1.35m、SPH 法で 1.37m となり、有効応力解析および SPH 法ともにやや沈下量を大きく見積もる結果となった。SPH 法の沈下量が模型実験や有効応力解析に比べて過大に評価された原因として、既往の研究(金ら, 2013)でも指摘されているとおり、液状化安全率  $F_L$  が実際よりも危険側に(小さく)評価されたことが要因の 1 つとして考えられる。一方、住宅周辺の地盤変形に着目すると、SPH 法では住宅近傍地盤のみが大きく変形し、住宅がめり込み沈下している様子が分かる。両解析とも地表面で盛り上がりの変形がみられるが、これは住宅の沈下に伴い、住宅直下地盤が圧力の小さい方向に移動しようとするためであり、側方さらには地表面に向かって移動したためである。空間離散化の方法の違いにより、SPH 法では住宅近傍で大

きく地表面が盛り上がり，有効応力解析では，住宅近傍から側方の境界に向けて緩やかに地表面が盛り上がる結果となった．SPH法では，沈下量を実際よりもやや大きく算定する可能性があるが，液状化後の構造物の沈下によって生じる地表面の変形挙動(めり込み沈下)を表現できることが確認できた．

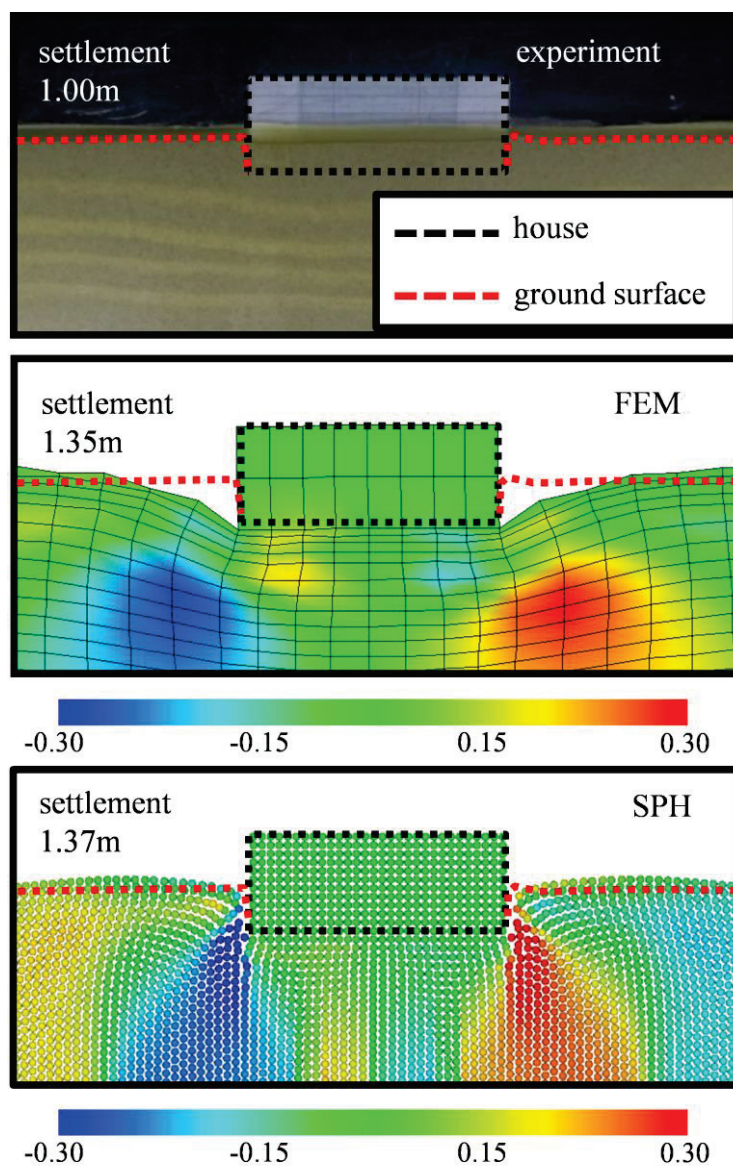


図 4.6 シミュレーションと実験結果の比較 (コンター：せん断ひずみの分布)

#### 4.4.2 模型振動台実験の再現解析のまとめ

液状化による建物の沈下および傾斜を予測するため，SPH法による①重力場模型振動台実験の再現解析および②既往の高精度 FEM 解析手法の解析結果との比較を実施した．本節で得られた結果は以下のとおりである．

- ・重力場模型振動台実験の再現解析および既往の高精度 FEM 解析手法の解析結果との比較から，SPH法を用いた場合は，それらの結果に比べて沈下量をやや過大評価する可能性がある．
- ・実験で生じた住宅周辺の地盤の大変形現象(めり込み沈下)に対して，高精度 FEM 解析手法では再現が難しかったが，SPH法では再現することができた．

## 4.5 浦安市の液状化被害の再現解析および架空地盤モデルによる解析

ここでは、東日本大震災で液状化被害を受けた住宅を対象に再現解析を試みた。再現解析は、住宅被災状況および液状化の発生の有無が調査されており、かつ周辺でボーリング調査が行われている地点を対象とした。解析対象とした地点の被害度と解析から得られた結果を比較することで、解析の適用性を確認した。

### 4.5.1 対象地点概要

再現解析の対象地点は、浦安市内で住宅の被災状況が調査され、かつ周辺でボーリング調査が実施されている4地点とした。図4.7に対象地点の位置および液状化による被災状況(内閣府災害に係る住家の被害認定)を、表4.3に各地点の $N$ 値および $F_L$ 値の深度分布を図4.8に各地点における液状化判定の結果の一例( $D_{cy} \sim H_I$ )、表4.4に各対象地点の被災概要をそれぞれ示す。図4.8中のA, B1, B2, B3およびCは、液状化シートによる判定で、それぞれ「C(顕著な被害の可能性が高い)」、「B3(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B2(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B1(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「A(顕著な被害の可能性が低い)」を示している。A地点の場合は、「B2」となり顕著な被害の可能性が比較的低いという結果となったことを示している。表4.3中の赤色で着色したセルは、 $F_L$ 値が1.0より小さくなり液状化の発生が懸念される層を、青色で着色したセルは $F_L$ 値が1.0より大きくなった層を示している。また、表中に地下水位を赤線で示した。なお、液状化判定には、近傍のボーリングデータを利用し、地震動の条件として最大加速度には200gal、マグニチュードは9.0を用いた。

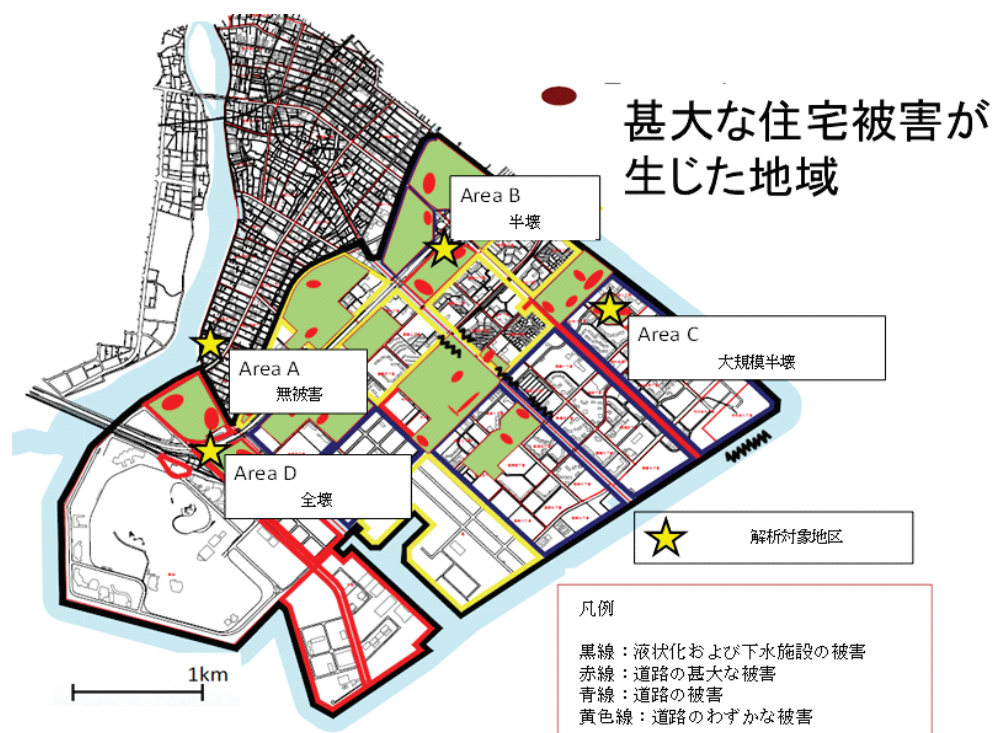


図 4.7 浦安市の被災状況

表 4.3 N値および  $F_L$  の深度分布

深度 (m)	Area A		Area B		Area C		Area D	
	N	$F_L$	N	$F_L$	N	$F_L$	N	$F_L$
0.5	5	-	5	-	5	-	5	-
1.0	5	-	5	-	5	-	5	-
1.5	22	-	2	-	1	-	5	-
2.0	1	-	1	-	1	0.41	7	-
2.5	1	-	1	-	1	0.37	7	1.1
3.0	1	-	1	-	9	0.78	11	2<
3.5	1	-	1	-	12	0.93	11	1.93
4.0	10	0.96	1	-	1	0.6	4	0.83
4.5	10	0.88	1	-	1	0.58	4	0.79
5.0	11	0.93	5	0.75	1	-	8	0.93
5.5	11	0.87	5	0.73	1	-	8	0.89
6.0	18	1.79	5	0.5	3	0.34	4	0.69
6.5	18	1.55	5	0.49	3	0.34	4	0.67
7.0	4	0.59	3	0.53	6	0.52	1	0.55
7.5	4	0.58	3	0.53	6	0.51	1	0.54
8.0	6	0.56	10	0.58	2	0.37	1	-
8.5	6	0.56	13	0.69	2	0.37	1	-
9.0	23	2<	15	1.17	5	0.59	2	-
9.5	23	2<	15	1.11	5	0.59	2	-
10.0	20	2<	25	2<	6	-	1	-
10.5	20	1.95	25	2<	6	-	1	-
11.0	22	1.48	6	0.6	6	0.6	2	-
11.5	2	1.39	6	0.6	6	0.6	2	-
12.0	11	0.85	8	-	4	-	2	-
12.5	11	0.84	8	-	4	-	2	-
13.0	2	-	8	-	9	-	1	-
13.5	2	-	8	-	9	-		
14.0	8	0.79	4	-	21	-		
14.5	8	0.79	4	-	21	-		
15.0	1	-	2	-	12	-		
15.5	1	-	2	-	12	-		
16.0	1	-	2	-	8	-		
16.5	1	-	2	-	8	-		
17.0	1	-	2	-	1	-		
17.5	1	-	2	-	1	-		
18.0	1	-	1	-	1	-		
18.5	1	-	1	-	1	-		

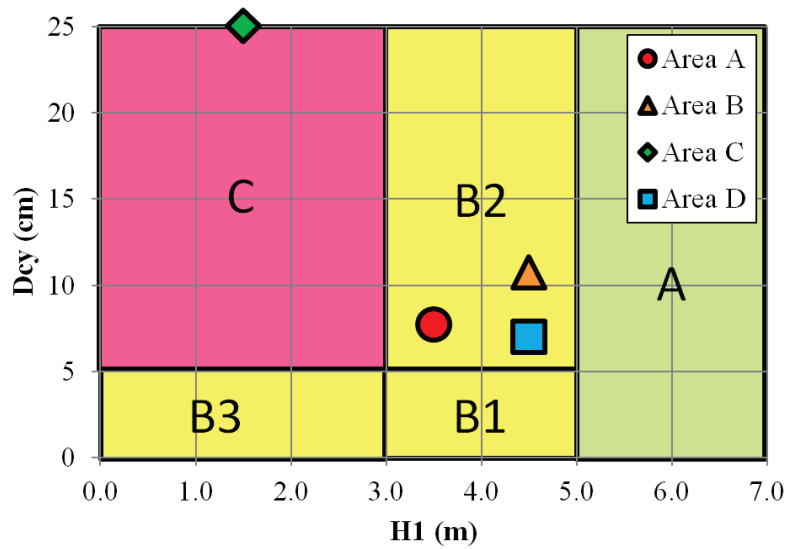


図 4.8 液状化判定の結果

表 4.4 被害の概要

地区	調査結果	
	地盤条件	住宅被害程度
A (富士見)	液状化なし	被害なし
B (入船)	液状化	半壊
C (日の出)	液状化	大規模半壊
D (舞浜)	液状化	被害なし

#### 4.5.2 浦安市の液状化被害再現解析の解析条件

解析では、住宅および壁を弾性モデルで、地盤を ALID モデルでモデル化した。解析に用いる地盤の入力パラメータは、ボーリング調査結果および液状化シートを利用して第 4.4 節と同様の方法で設定し、住宅および壁については、表 4.2 の値を用いた。住宅は、幅 7.5m、高さ 6.5m、接地圧 15kN/m<sup>2</sup> の木造 2 階建てを想定した。図 4.9 に解析モデルの一例を示す。なお、以下の解析では、図 4.7 のそれぞれの Area を解析ケースとして用いる。つまり、解析 case1 は Area A を対象としており、以下、Area B を case2 としている。解析図中の z は解析対象深度を示しており、case1～case3 は 18.5m、case4 では 13.0m である。粒子間距離は 0.50m とし、粒子数は、地盤、構造物、底面および側面の壁粒子を合わせて 4,863 個である。変位の境界条件として、底面および側面の壁粒子は、水平方向(x)、鉛直方向(y)固定とした。解析は、重力加速度が 9.8m/s<sup>2</sup> になるまで徐々に増加させる自重法を用い、変形が収束するまで計算を実施した。

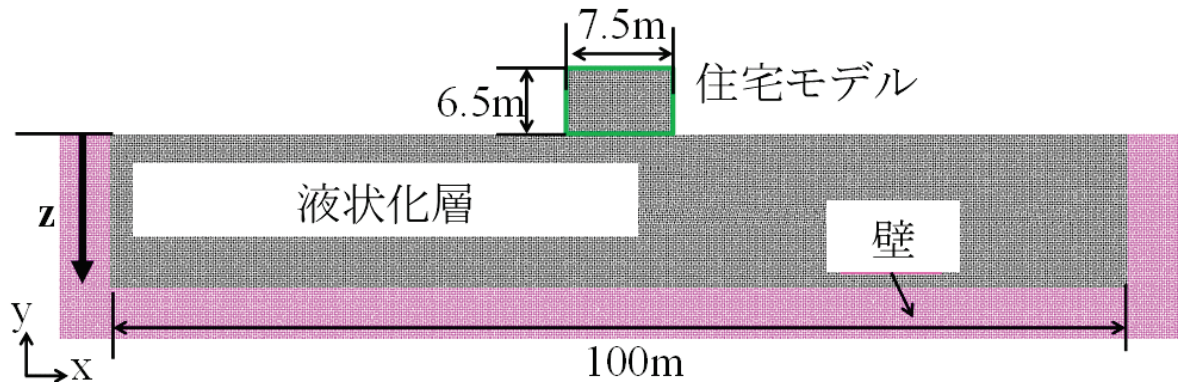


図 4.9 解析条件の例 (粒子配置)

#### 4.5.3 浦安市の液状化被害再現解析の解析結果

表 4.5 に住宅の沈下量，傾斜量および被害度を示し，図 4.10 に，各地点の深度 10m までの最終変形図(コンターはせん断ひずみ)を示す．解析では，偏心していない建物をモデル化しているため傾斜は表現できない．そのため，表 4.5 中の傾斜量は，金ら(2012)の東日本大震災における調査により算定されたべた基礎の住宅の沈下量と傾斜量との関係を用いて，数値解析で得られた沈下量を傾斜量に換算し，その傾斜量から被災度を推定した．表 4.5 中に示される SPH 法によって求められた住宅の被災度と実際に調査された被災度の結果を比較すると，概ね被災状況を再現できることが分かる．次に，図 4.10 の変形図と液状化判定結果を比較すると，液状化判定で  $F_L$  値が 1.0 を下回った深度でせん断ひずみが大きくなり，住宅の沈下量が大きくなっていることが分かる．

表 4.5 実被害とシミュレーションの比較

Area	シミュレーション結果			調査結果
	沈下 (mm)	傾斜量	被害度	被害度
A	30	3.0/1,000	無被害	無被害
B	120	11.5/1,000	半壊	半壊
C	340	32.0/1,000	大規模半壊	大規模半壊
D	1	1.0/1,000	無被害	無被害



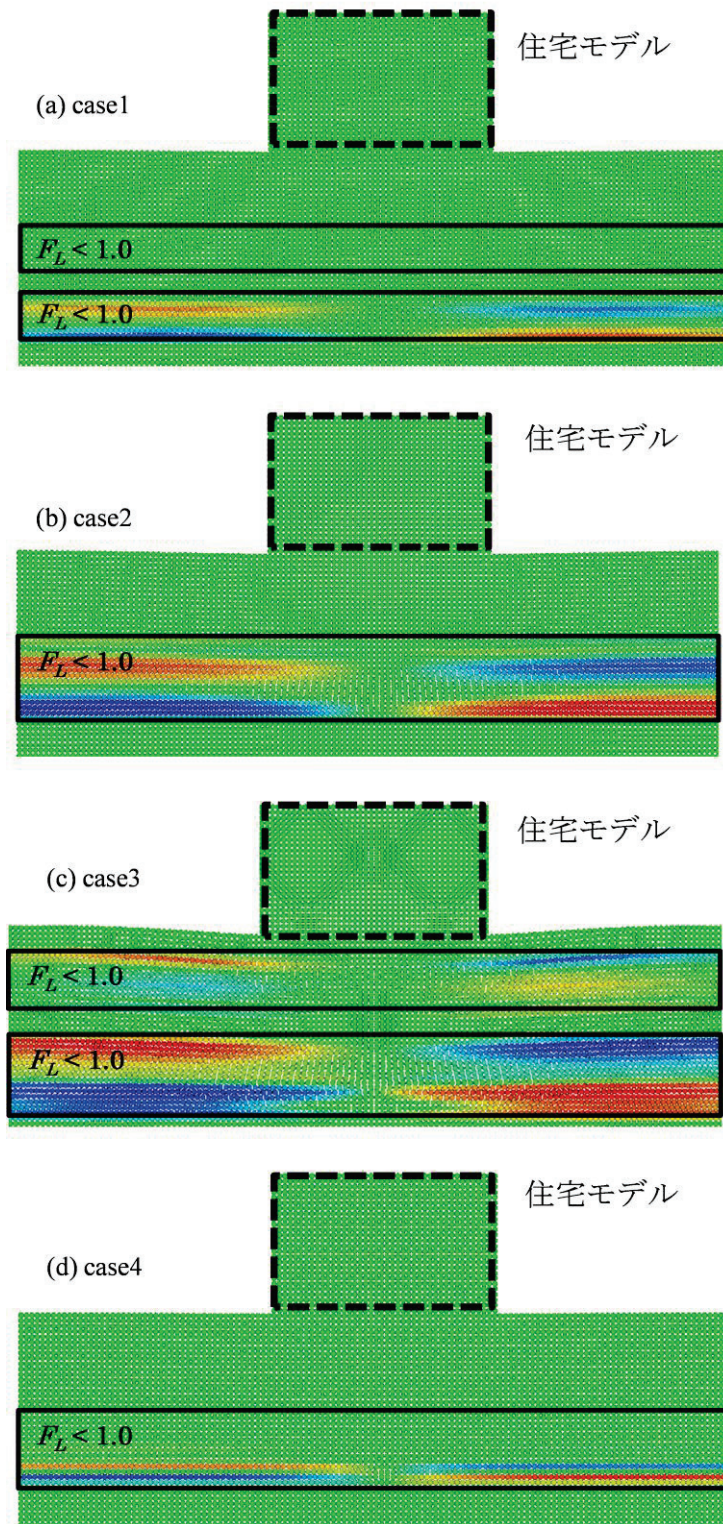


図 4.10 変形とせん断ひずみの分布

本解析では、住宅1棟のみを対象に2次元SPH法により検討を行ったが、実際の被害には奥行方向にも沈下することが考えられる、さらに住宅が2棟隣接している場合には、住宅がお辞儀するように沈下することが指摘されている。予測の精度を高めるためには、これらの点について、今後の検討を進める必要がある。

#### 4.5.4 架空地盤モデルの検討条件

液状化シートによる判定で、「C(顕著な被害の可能性が高い)」、「B3(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B2(顕著な被害の可能性が比較的低い)」、「B1(顕著な被害の可能性が比較的低い)」となる架空のモデル地盤を作成し、木造2階建て住宅(接地圧 15kN/m<sup>2</sup>)の液状化時の沈下量を検討した。モデル地盤は、細粒分を含まない砂地盤を前提に7ケース、住宅は1棟のみとし検討を行った。

図4.11に各ケースの地盤条件と液状化シートの判定結果の関係について示し、表4.6に各ケースの $N$ 値の深度分布および地下水位を示す。表4.6中の橙色で着色したセルは、地盤が飽和していることを示す。図4.11中の $H1$ (m)は非液状化層厚を示し、本研究では、地表面から連続して、地下水より浅い層、 $F_L$ 値が1.0より大きい層、もしくは $N$ 値が2より大きい粘性土層を非液状化層と定義した。 $Dcy$ (cm)は、地表面沈下量(変位置)を示す。

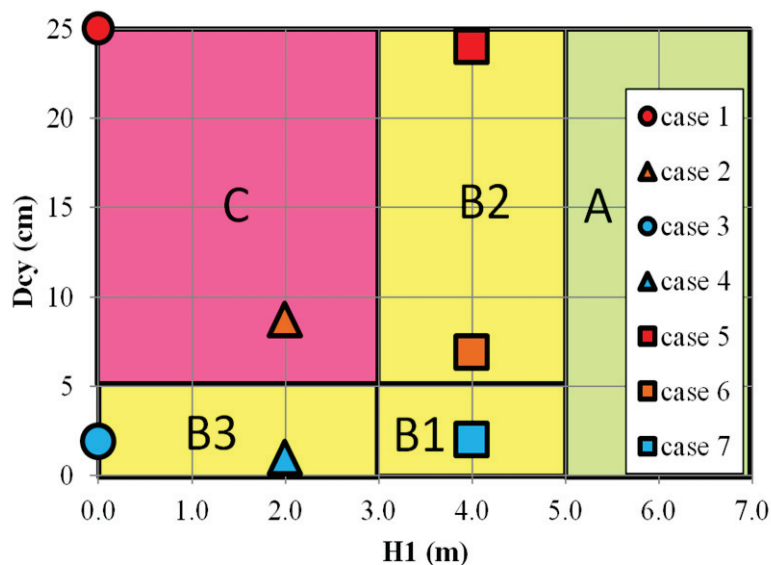


図 4.11 地盤条件と液状化判定結果

表 4.6 N 値と地下水位および  $F_L$  値の分布

深度 (m)	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7
	N-値						
0.5	4	12	4	12	4	12	12
1.0	4	12	4	12	4	12	12
1.5	4	12	50	12	4	12	12
2.0	4	12	50	12	4	12	12
2.5	4	12	50	12	4	12	12
3.0	4	12	50	12	4	12	12
3.5	4	12	50	50	4	12	12
4.0	4	12	50	50	4	12	12
4.5	4	12	50	50	4	12	12
5.0	4	12	50	50	4	12	12
5.5	4	12	50	50	4	12	50
6.0	4	12	50	50	4	12	50
6.5	4	12	50	50	4	12	50
7.0	4	12	50	50	4	12	50
7.5	50	50	50	50	50	50	50
8.0	50	50	50	50	50	50	50
8.5	50	50	50	50	50	50	50
9.0	50	50	50	50	50	50	50
9.5	50	50	50	50	50	50	50
10.0	50	50	50	50	50	50	50

#### 4.5.5 架空地盤モデルの解析条件

図 4.12 に解析に用いた解析モデルを示す。粒子間距離は 0.25m とし、地盤は ALID モデル、構造物、底面および側面の壁は弾性モデルでモデル化した。変位の境界条件として、底面および側面の壁は、水平方向(x)、鉛直方向(y)固定とした。重力加速度が  $9.8\text{m/s}^2$  になるまで徐々に増加させる自重法を用い、変形が収束するまで計算を実施した。ALID モデルの入力パラメータは、層厚 0.5m ごとに、表 4.6 および液状化シートの結果に基づき入力した。なお、住宅および壁については、表 4.2 の値を用いた。

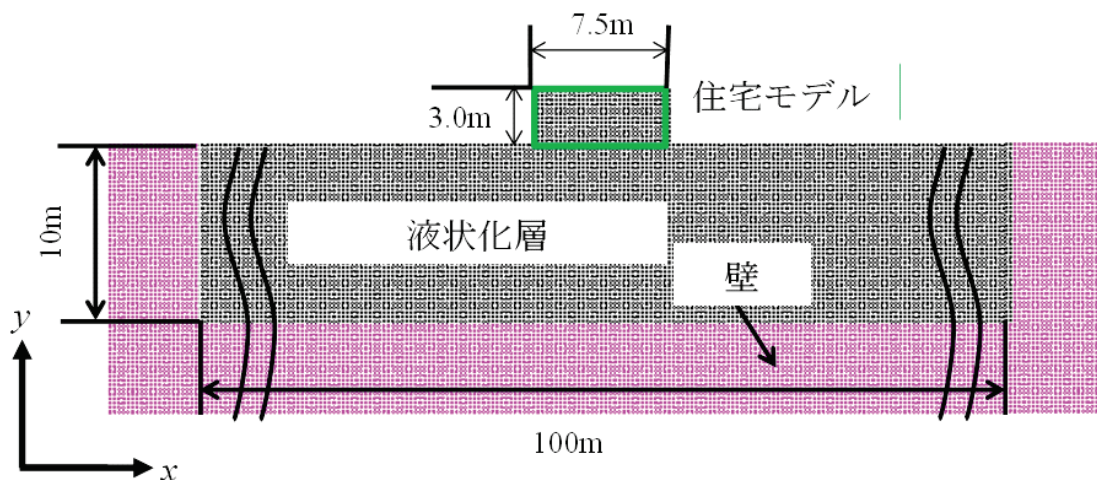


図 4.12 解析条件の一例 (粒子配置)

#### 4.5.6 架空地盤モデル解析の結果

表 4.7 に SPH 法より得られた沈下量および傾斜量を示す。図 4.13 には、各ケースの最終変形図とせん断ひずみのコンターを示す。なお、傾斜量は前章と同様に金らのべた基礎の住宅の沈下量と傾斜量との関係を用いて換算したものである。解析結果を以下にまとめる。

(1)  $D_{cy}$  の大きさが異なり、非液状化層厚が等しい case5, case6, case7 の住宅沈下量を比較すると、 $D_{cy}$  が大きなケースほど住宅沈下量が大きくなる傾向がわかる。

(2) 非液状化層厚が異なり、 $D_{cy}$  がほぼ同等な case3, case4, case7 の住宅沈下量を比較すると、非液状化層厚が小さいケースほど住宅沈下量が大きくなる傾向がわかる。

(3) 地表面が液状化層となる case1 および case3 では、住宅基礎周辺地盤にせん断ひずみが蓄積する。したがって、地表面の  $N$  値を大きくすることで、住宅の沈下量を大幅に小さくすることができる。

(4) case1 と case2 や case5 と case6 のように、液状化シートで「同じ被害レベル」と評価された場合であっても、沈下量が大きく異なる可能性がある。これは、液状化シートで左上ほど被害が大きくなる可能性が高く、右下に行くほど被害が小さくなる可能性が高いという定性的な結果を反映したものと推察される。

一方で、顕著な被害の可能性が高い「C」と顕著な被害の可能性が比較的低い「B(B1, B2, B3)」を比較すると、相対的に「C」は「B」に比べて、沈下量が大きくなることが分かった。

#### 4.5.7 浦安市の液状化被害の再現解析および架空地盤モデルによる解析のまとめ

本節では、浦安市における東日本大震災時の再現解析および液状化シートを利用した架空モデル地盤における予測解析を行った。その結果を以下にまとめる。

- ・浦安市における東日本大震災時の再現解析を行った結果、実際の被災度を SPH 法でも概ね再現できた。
- ・液状化シートを利用した架空モデル地盤における予測解析により、同じ被害度レベルであっても、住宅の沈下量に差が出ることを示すことができた。
- ・また、地表面の液状化層の影響や、 $D_{cy}$  が与える住宅沈下量への影響を明らかにすることができた。

表 4.7 平均沈下量および傾斜量

	液状化被害レベル	平均沈下 (cm)	傾斜角
case1	C	79.7	80/1,000
case2	C	7.2	7/1,000
case3	B3	1.4	1/1,000
case4	B3	0.2	0/1,000
case5	B2	4.4	4/1,000
case6	B2	1.6	2/1,000
case7	B1	0.1	0/1,000

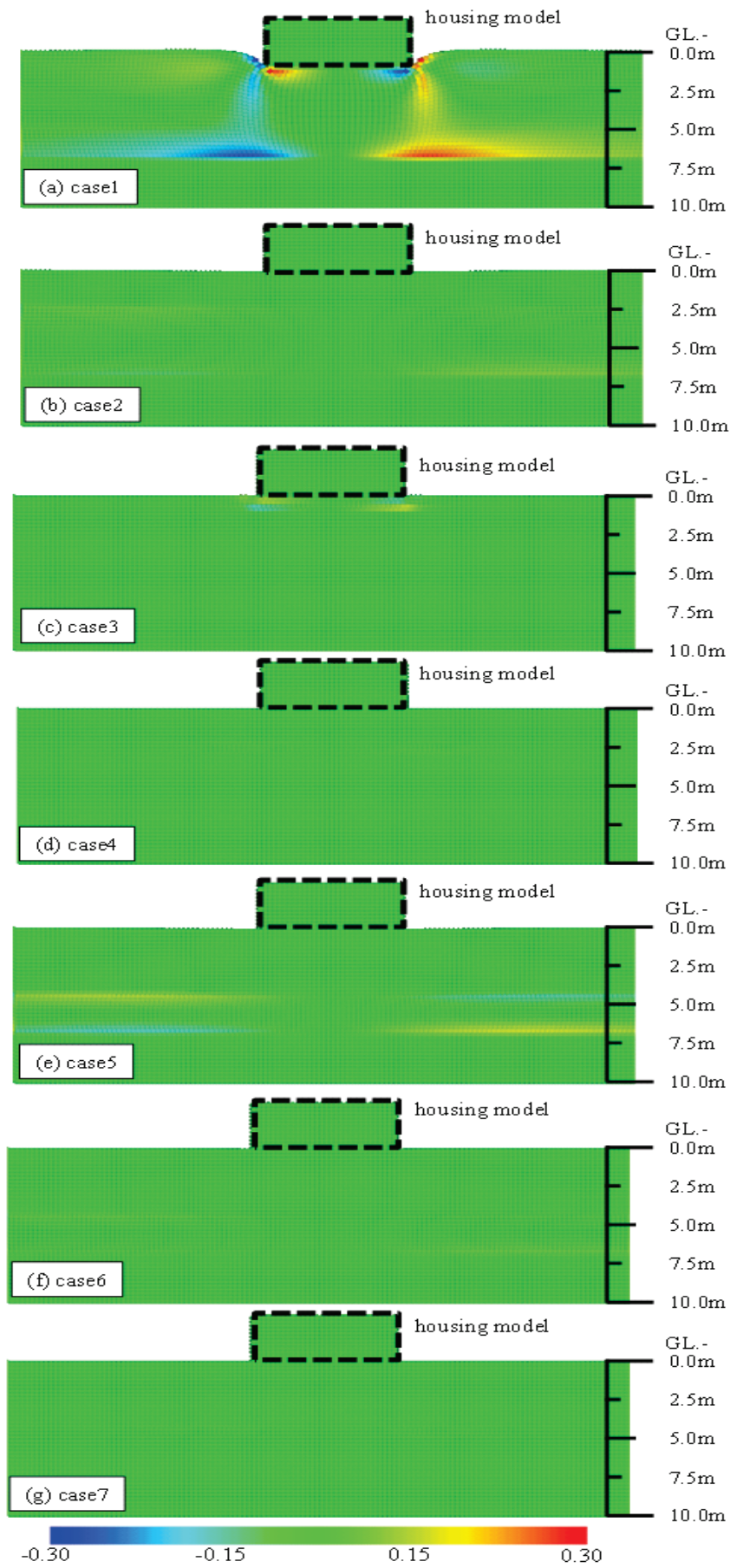


図 4.13 変形およびせん断ひずみの分布

## 4.6 簡易地盤調査を利用した液状化被害再現解析

東日本大震災では、埋立地などで地盤の液状化が発生し、戸建住宅などに傾斜や沈下などの被害が生じた(Tokimatsu, 2012)。その主な原因は、液状化対策が施されていなかったことである。様々な液状化対策が開発検討されているが、液状化対策を普及させるために重要なことは、液状化による被害の程度を住民に周知することである。国土技術政策総合研究所では、2015年に「宅地の液状化被害可能性判定計算シート(以下、液状化シート)」を公開し、活用を促している。液状化シートでは、得られる  $D_{cy}$ ,  $H_I$  から定性的な危険度を示すことができるが、住宅の「沈下量および傾斜量」などの被害度を定量的に示すことで、液状化対策のさらなる普及につながると考えられる。

そこで本研究では、東日本大震災で実際に被災した住宅地を対象に簡易地盤調査およびその結果をもとに簡易数値解析を実施し、被災状況との比較を行った。その結果について報告する。

### 4.6.1 解析対象地概要

東日本大震災では多くの戸建て住宅が地盤の液状化による沈下や傾斜の被害を受けた。既往の研究(Tokimatsu, 2012)によると、戸建て住宅が隣接している場合、それぞれの住宅自重により住宅間の地盤に応力集中が生じ、直近の隣接住宅方向に傾斜する傾向があることが明らかとなっている。不同沈下の要因として、それらを考慮することは重要と考えられるが、本研究では、簡易地盤調査と簡易数値解析の組み合わせによりどの程度被災状況を再現できるかを念頭に置いたことから、隣接する住宅が無く、応力集中の影響を比較的受けにくいと考えられる住宅を選定し、再現解析を行った。以下に、研究対象とした戸建て住宅の概要と被災状況を示す。

解析対象は、東日本大震災時に液状化による被害を受けた茨城県神栖市内の木造1階建ての戸建て住宅である。被災当時、建築直後(施主への引き渡し前)であったため、住宅の不同沈下の要因となりうる家具や本棚などが室内に設置されていなかった。そのため積載荷重による偏心を受けていない住宅であることが特徴である。解析対象とした戸建て住宅の建坪は56坪であり、基礎形式にはべた基礎を適用している。

解析対象とした戸建て住宅の立地条件は、北側に空き地、西側に耕作地、南側および東側に庭となっており、隣接している住宅が無い状況である。図4.14に解析対象とした住宅の立地条件の概要を示す。



図 4.14 立地条件(斜線が解析対象住宅)

被災時の調査では、解析対象住宅の西側で大量の水と砂が噴き出る噴砂現象が確認されており、地盤の液状化により住宅が沈下した。また、住宅の沈下修正工事に伴って実施された傾斜量測定では、住宅の西側が東側に比べて 300mm 以上沈下していたことが確認されている。

#### 4.6.2 地盤調査

液状化に伴う住宅沈下を数値解析で再現するために必要となる地盤パラメータを得るために、種々の地盤調査を行った。戸建て住宅でも利用できることを考慮して、標準貫入試験より安価に実施できる小型動的サウンディング試験(以下、PENNY)、試験残孔を利用した地下水位調査およびサンプリングを実施した。

##### [地盤調査方法]

本研究で実施した地盤調査の概要を以下に示す。

##### (1)PENNY(村田ら, 2016)

PENNY は、表層から 15m 程度の深さまで調査可能とされており、比較的少ないスペースでも適応できる特徴がある。質量 294N のハンマーを落下高さ 20cm から自由落下させて、先端コーン(先端角 60°, 断面積 10cm<sup>2</sup>)を 10cm 貫入するのに必要な打撃回数を連続的に記録する。既往の研究から、ボーリング調査時に実施される標準貫入試験で得られた  $N$  値と PENNY によって得られた  $Nd$  値には非常に良い相関があることが報告されている。なお本試験は、**図 4.14** 中の調査地点 1 および 2 で実施した。**写真 4.2** に調査時の状況を示す。



写真 4.2 PENNY による地盤調査状況

##### (2)サンプリング(高田ら, 2014)

開口型のサンプラーとロッドを複数個接続させ、地中に挿入することで、1 度に複数深度のサンプリングが可能なサンプラーである。サンプラーには、土かきとり羽根がついており、サンプラーを回転させることで、孔壁の土をかきとるようにして角孔に土試料を保持させる仕組みである。なお本試験では、**図 4.14** 中の調査地点 1 でサンプリングを実施し、表層から 1m ピッチで土試料を採取した。**写真 4.3** にサンプラーとサンプリング状況を示す。

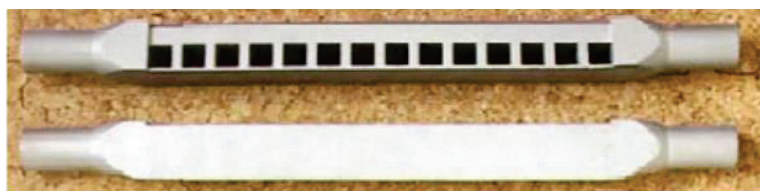


写真 4.3 サンプラー(上)およびサンプリング状況(下)

### (3)地下水位調査(金ら, 2013)

地下水位調査に用いる装置は、角パイプと検知装置から構成されている。角パイプ内に検知装置であるエアチューブおよび気圧計が内蔵されており、この装置を地下水位付近まで挿入すると、地下水がエアチューブ内に浸入する。地下水の浸入によるエアチューブ内の気圧変化を気圧計で検知し、地下水位と判定をする仕組みである。なお、本試験では図 4.14 中の調査地点 1 で地下水位調査を実施した。写真 4.4 に地下水位検出装置と調査状況を示す。



写真 4.4 地下水位検出装置(左)および調査状況(右)



[調査結果]

PENNYによる地盤調査によって得られた  $N_d$  値の深度分布，サンプリングした土試料の細粒分含有率  $F_c$  および地下水位を図 4.15 に示す．調査地点 1 と調査地点 2 の  $N_d$  値の結果を比較すると，地表面から GL.-1m 程度まで明らかに調査地点 2 の  $N_d$  値が小さく，それ以深は，ある程度のばらつきはあるものの GL.-7m 前後まで同等の値を示していることが分かる．

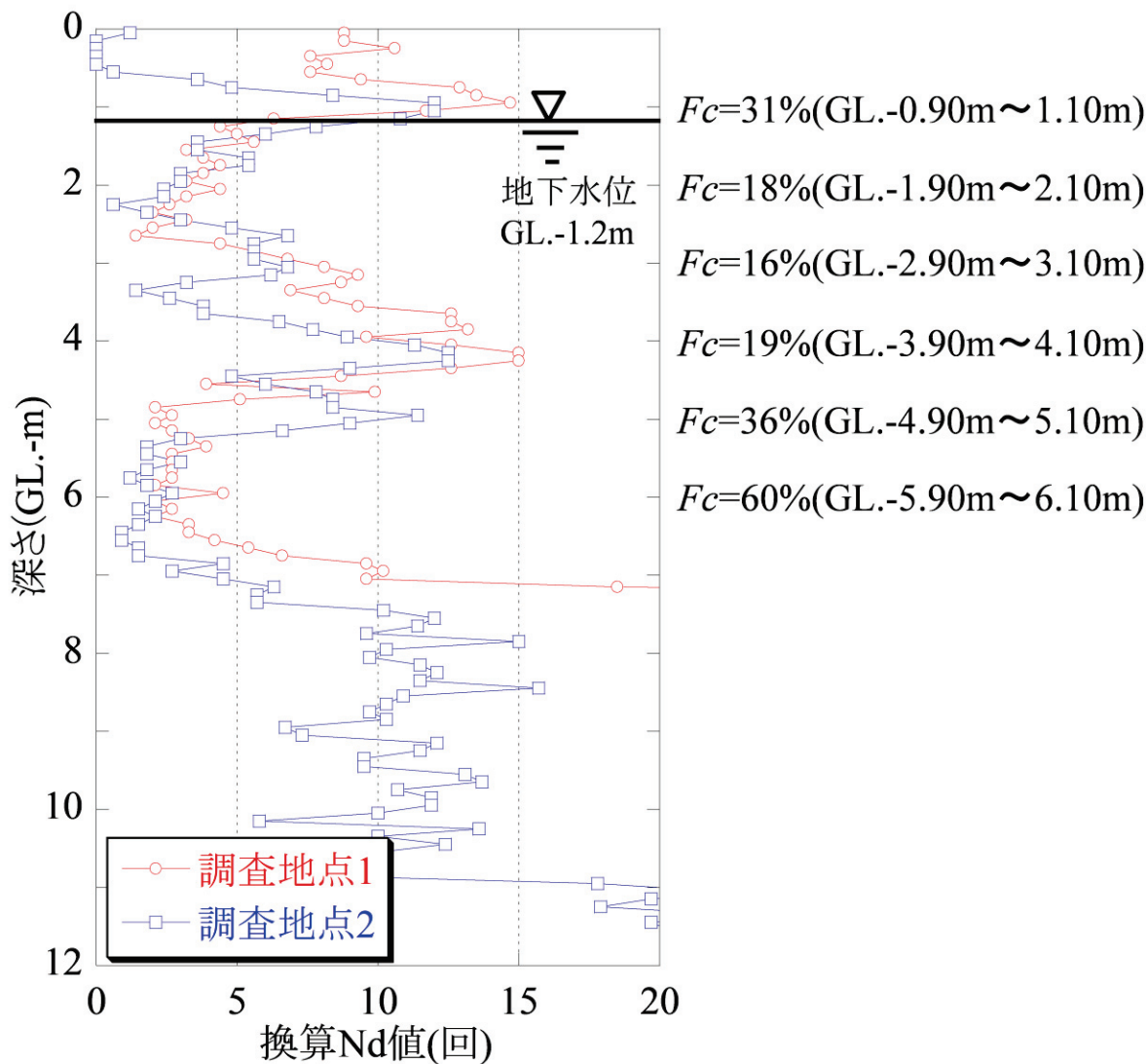


図 4.15  $N_d$  値の深度分布および細粒分含有率

### 4.6.3 茨城県神栖市の液状化被害再現解析の解析条件

#### (1)粒子配置

図 4.14 中の A-A'断面を、2次元の粒子配置でモデル化した(図 4.16)。粒子数は、地盤、住宅、底面の壁および側面の壁を合わせて 13,989 個である。粒子間距離は、事前に行った予備解析で、液状化時のめり込み沈下を再現できる 0.25m を採用した。境界条件は、底面の壁を水平方向(x)、鉛直方向(y)固定、側面の壁を水平方向(x)固定とした。なお、3章の地盤調査時に、解析対象の住宅の西側に、建築地盤面よりも 45cm 低い畑があったことを確認した。住宅の沈下挙動に与える影響が大きいと考えて、畑の存在を考慮した。地盤には ALID モデル、住宅、壁には弾性モデルを用いた。本研究では、計算時間の関係上、自由地盤を大きくとらなかったが、壁境界の影響を考慮して、自由地盤は解析対象の 10 倍程度取ることが望ましいと考えられる。

#### (2)地下水位

地下水位は、3章の地下水位調査によって得られた結果では、GL.-1.2m であった。しかし、地盤調査直後に地下水位を計測したため、観測された地下水位は実際の水位よりもやや深い可能性がある。そのため既往の研究結果(金ら, 2013)より、地下水位は、GL.-0.8m 程度と推定した。さらに、液状化判定をする際は、地表面から深度 0.5m ピッチで検討する。神栖市では、震災時の 4 日前に 30mm 程度の降雨も観測されていることから、液状化判定に用いる地下水位は、GL.-0.5m を仮定した。

#### (3)液状化安全率

地盤調査結果の各種データを 0.5m ごとに整理し、液状化シートを利用して各深度の  $F_L$  値を算定した。なお入力地震動は、東日本大震災を想定してマグニチュード 9.0、設計最大加速度 340gal を用いた。

#### (4)地盤パラメータと地盤構成

前節で実施した地盤調査結果をもとに、深度 0.5m ごとに整理し、地盤パラメータを決定した。地盤構成は水平成層地盤を想定した。初期ヤング率  $E_0$  は、道路橋示方書に示される推定式を用い、 $E_0=2,800Nd(\text{kN/m}^2)$  で決定した。細粒分含有率  $F_c$  は、地盤調査結果を利用し、ポアソン比  $\nu=0.333$  とした。単位体積重量  $\gamma(\text{kN/m}^3)$  は、 $Nd$  から推定した間隙比より算定した(小松田, 1994)。液状化安全率  $F_L$  は、液状化判定の結果を用いた。表 4.8 に地盤パラメータを示す。なお地盤調査の結果、GL.-0.0m~-0.5m までの  $Nd$  値は、調査地点 1 で 0、調査地点 2 で 8 と大きく異なっていたことを勘案して、図 4.16 中で調査地点 1 より左側と右側で異なる材料パラメータを与えた(それぞれ表 4.8 中で「0.5 左側」「0.5 右側」と表記した)。また、 $Nd$  値が 0 の場合、初期ヤング率が  $0.0(\text{kN/m}^2)$  となり計算を行うことができないため、別途実施したスウェーデン式サウンディング試験結果の平均換算  $N$  値 0.25 を採用して、初期ヤング率を  $700\text{kN/m}^2$  と仮定した。

#### (5)住宅パラメータ

住宅パラメータである重量は、小規模建築物基礎設計指針の固定荷重を参考に、解析対象である住宅の荷重を計算した。その結果、接地圧に換算すると  $12\text{kN/m}^2$  となった。

表 4.8 地盤パラメータ

深度 GL.-(m)	$N_d$	$E_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	$F_c$ (%)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$F_L$ 値
0.5 左側	0 (0.25)	700	31	10.5	-
0.5 右側	8	16,800	31	17.5	-
1.0	2	5,600	31	16.6	0.43
1.5	6	16,800	18	17.3	0.69
2.0	3	8,400	18	16.8	0.35
2.5	3	8,400	16	16.8	0.32
3.0	6	16,800	16	17.3	0.42
3.5	4	11,200	19	17	0.33
4.0	8	22,400	19	17.5	0.51
4.5	8	22,400	36	17.5	-
5.0	8	22,400	36	17.5	-
5.5	5	14,000	60	17.2	-
6.0	2	5,600	60	16.6	-
6.5	2	5,600	-	16.6	0.28
7.0	2	5,600	-	16.6	0.28
7.5	10	28,000	-	17.6	0.29
8.0	10	28,000	-	17.6	0.28
8.5	10	28,000	-	17.6	0.28
9.0	10	28,000	-	17.6	0.28
9.5	10	28,000	-	17.6	0.28
10.0	10	28,000	-	17.6	0.27
10.5	10	28,000	-	17.6	0.27
11.0	10	28,000	-	17.6	0.27
11.5	20	56,000	-	18.2	0.5
12.0	20	56,000	-	18.2	0.93

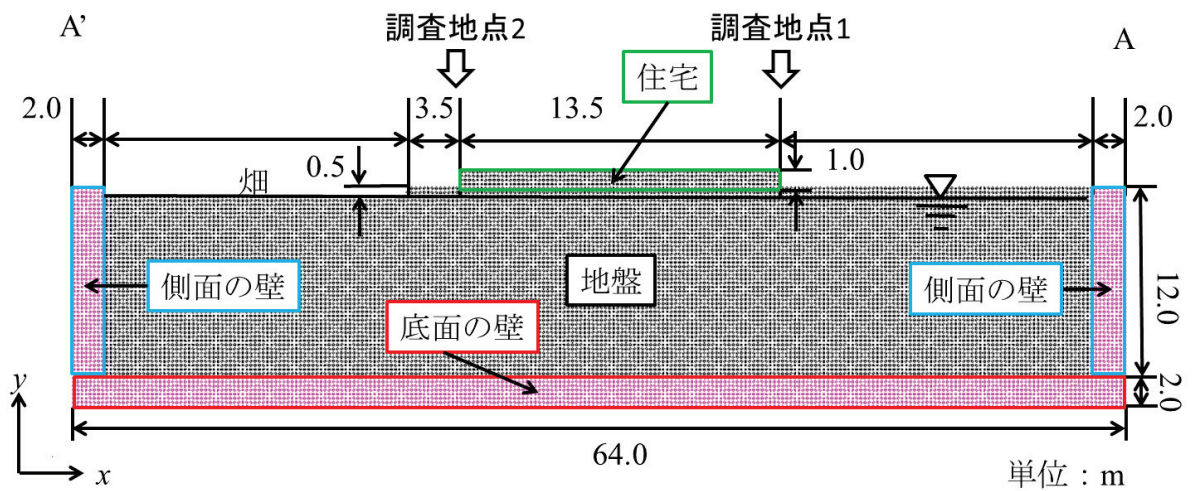


図 4.16 粒子配置

#### (6)その他の計算条件

無重力状態から、重力加速度が  $9.8\text{m/s}^2$  になるまで荷重を徐々に増加させる自重法を用い、変形が概ね収束するまで計算を実施した。

#### 4.6.4 茨城県神栖市の液状化被害再現解析の結果

図 4.17 に解析終了後の変形図を示す。図 4.17 中のコンターはせん断ひずみの分布を示す。図 4.17 に示す通り、住宅の左側(西側)の沈下量は  $0.45\text{m}$ 、右側(東側)の沈下量は  $0.30\text{m}$  となり、その差は  $0.15\text{m}$  となった。実際の被災状況は、左側(西側)と右側(東側)の沈下量の差は、 $0.30\text{m}$  であったことから、本研究で行った数値解析では、実際の沈下量を再現することはできなかった。これには、以下に挙げた要因が考えられる。

- ①地震および液状化の影響により、被災前後で地盤の状態が変化している可能性があること。
- ②震災時の地下水位を適切に表現していない可能性があること。
- ③実際は、3次元(奥行)方向に地盤が変形し、住宅も傾斜した。しかし本研究手法は2次元解析であったため、奥行方向の変形は考慮できず、奥行方向に生じるべき地盤変形および住宅傾斜を再現できなかったこと。
- ④実被害で確認された噴砂現象を再現できていないこと。

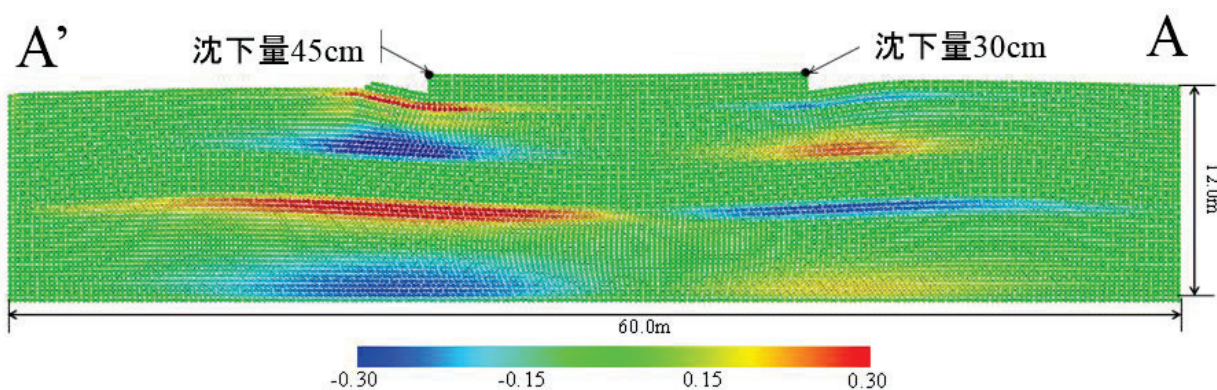


図 4.17 解析終了後の変形図

一方、地盤調査を東西方向に2点計測し、さらに周辺の地形条件を考慮したことにより、住宅の西側が東側に比べて大きく沈下する傾向は再現することができた。一般的に、新築住宅建設時に5点程度のスウェーデン式サウンディング試験(以下、SWS試験)が実施されるが、これは住宅の不同沈下予測に非常に重要であることを示唆している。また地盤調査時には、周辺の地形条件などを記載しておくことが重要であることが分かった。

次に、住宅の左側(西側)が右側(東側)に比べて大きく沈下した要因について考察する。本研究では、地表面から  $0.5\text{m}$  の非液状化層を除き、水平成層地盤を仮定して数値解析を実施した。図 4.17 の住宅周辺を見ると、 $N_d$  値の小さい左側(西側)で液状化層におけるせん断ひずみ量が大きくなっている。その大きな要因は以下の2つと考えられる。

- ①住宅左側(西側)には畑があり、非液状化層が無いこと。
- ②住宅左側(西側)の地盤の  $N_d$  値が小さいこと。

住宅が地盤中にめり込むと、せん断剛性の小さい液状化層は圧力の小さい側方、さらには地表面に向かって変形する。非液状化層のない住宅左側(西側)の畑では、非液状化層が無いと地表面変形を自重により抑制することができない。さらに非液状化層は、自身の持つせん断剛性が低下しないため、その直下にある液状化層の側方への変形を抑制する効果があると考えられる。そのため、 $N_d$  値の大きな地盤では、液状化層の変形抑制効果が大きく、 $N_d$  値の小さな地盤では、変形抑制効果が小さいため、住宅の左側(西側)が右側(東側)に比べて大きく沈下したと考えられる。

以上のことから、既往の研究(金ら, 2012)で報告されているとおり、非液状化層の層厚は、住宅被害の大小に大きな影響を与える要因であることがあらためてわかった。さらに、非液状化層の地盤剛性も重要であると考えられ、たとえ地下水面よりも上の地盤であったとしても、SWS 試験の荷重が 1kN 以下で自沈するような層の場合には大きな変形が予想され、十分に注意する必要があると考えられる。

#### 4.6.5 茨城県神栖市の液状化被害再現解析のまとめ

本節では、戸建て住宅を対象に、簡易地盤調査および簡易数値解析を用いて、液状化による被害の程度を把握することを試みた。東日本大震災で実際に被災した住宅地で簡易地盤調査を行い、その結果をもとに実施した数値解析と被災状況を比較した。その結果、以下の結論が得られた。

- ・簡易地盤調査の結果を使った簡易数値解析による再現解析では、住宅の不同沈下の沈下傾向を再現することはできたが、実際の沈下量を再現することはできなかった。
- ・住宅の不同沈下を予測するためには、SWS 試験などの地盤調査を多点計測するとともに、その周辺地形条件などを十分に観察・評価する必要があることを示した。
- ・液状化による住宅被害の大小は、非液状化層が大きく影響を与えているものと考えられ、その厚さだけでなく、剛性についても十分に配慮する必要があることを示した。

### 4.7 まとめ

変形解析手法の高度化と検証のために、模型振動台実験の再現解析、浦安市の実被害の再現解析および簡易地盤調査を利用した液状化被害再現解析を実施した。研究項目ごとにまとめを以下に示す。

#### [模型振動実験の再現]

- ・重力場模型振動台実験の再現解析および既往の高精度 FEM 解析手法の解析結果との比較から、SPH 法を用いた場合は、それらの結果に比べて沈下量をやや過大評価する可能性がある。
- ・実験で生じた住宅周辺の地盤の大変形現象(めり込み沈下)に対して、高精度 FEM 解析手法では再現が難しかったが、SPH 法では再現することができた。

#### [浦安市の実被害の再現解析]

- ・浦安市における東日本大震災時の再現解析を行った結果、実際の被災度を SPH 法でも概ね再現できた。

- ・液状化シートを利用した架空モデル地盤における予測解析により、同じ被害度レベルであっても、住宅の沈下量に差が出ることを示すことができた。
- ・地表面の液状化層の影響や、 $D_{cy}$  が与える住宅沈下量への影響を明らかにすることができた。

### [簡易地盤調査を利用した液状化被害再現解析]

- ・簡易地盤調査の結果を使った簡易数値解析による再現解析では、住宅の不同沈下の沈下傾向を再現することはできたが、実際の沈下量を再現することはできなかった。
- ・住宅の不同沈下を予測するためには、SWS 試験などの地盤調査を多点計測するとともに、その周辺地形条件などを十分に観察・評価する必要があることを示した。
- ・液状化による住宅被害の大小は、非液状化層が大きく影響を与えているものと考えられ、その厚さだけでなく、剛性についても十分に配慮する必要があることを示した。

## 参考文献

- [4.1]赤井浩一，田村武(1978): 弾塑性構成式による多次元圧密の数値解析, 土木学会論文報告集, 第 269 号, pp.98-104.
- [4.2]磯部有作, 福田毅, 里優, 余川弘至, 新井洋(2012): 液状化に伴う戸建て住宅の沈下現象についての数値解析的アプローチ(その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.489-490.
- [4.3]岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進(1980): 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28, No.4, pp.23-29.
- [4.4]大島昭彦(2012): 浦安一斉試験における各種動的 サウンディング試験の比較, 浦安地盤調査一斉試験報告会論文集, pp.65-70.
- [4.5]河村哲也(1995): 非圧縮流体解析, 第 2 章, 数値流体力学編集委員会編, 東京大学出版会.
- [4.6]金哲鎬(2013): 宅地地盤の液状化判定のための地下水水位測定法と土質判別に関する研究, 東海大学大学院大学博士論文, 85p.
- [4.7]金哲鎬, 藤井衛, 品川恭一, 伊集院博, 高田徹, 松下克也, 小川正宏(2012): 東北地方太平洋沖地震の液状化地域における戸建て住宅の基礎の被害, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.195-205.
- [4.8]小松田精吉(1994): クレーガーの方法による透水係数値の補正, 第 29 回土質工学学会研究発表会, pp.1891-1892.
- [4.9]高田徹・長坂充泰・徳山義孝・須々田幸治 (2014): SWS 孔を用いた開口型土質採取器の開発と原位 置試験, 第 49 回地盤工学研究発表会論文集, No.124, pp.247-248.
- [4.10]一般社団法人日本建築学会(2015): 東日本大震災合同調査報告 建築編 5 建築基礎構造 津波の特性と被害, 第 1 版, 丸善出版社.
- [4.11]久田俊明, 野口裕久(1995): 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, pp.161-175.
- [4.12]村田芳信・佐藤将・岩田麻衣子・沢田和秀・八嶋 厚 (2012): 浦安市における各種動的サウンディング試験の比較(その 7: PENNY), 浦安地盤調査一斉試験報告会論文集, pp.21-23.
- [4.13]安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義(1996): 液状化に伴う地盤の大変形の簡易予測方法, 土と基礎, Vol.47, No.6, pp.29-32.

- [4.14]余川弘至, 浅野憲雄, 杉井俊夫, 山田公夫, 張岩(2015): 液状化時の地盤支持力に関する実験的研究, 第 50 回地盤工学研究発表会, No.970, pp.1939-1940.
- [4.15]Biot, M.A.(1941): General theory of three-dimensional consolidation, *Journal of Applied Physics*, Vol.12, No.4, pp.155-164.
- [4.16] Biot, M.A.(1955): Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid, *Journal of Applied Physics*, Vol.26, No.2, pp.182-185.
- [4.17]Biot, M.A.(1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.28, No.2, pp.168-191.
- [4.18]Biot, M.A.(1962): Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media, *Journal of Applied Physics*, Vol.33, No.4, pp.1482-1498.
- [4.19]Bui, H. H., Fukagawa, R. Sako, K. and Ohno, S. (2008): Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.32, pp.1537-1570.
- [4.20] Christian, J.T. and Boehmer, J.W.(1968): Plane strain consolidation by finite elements, *Journal of Soil Mechanics*, ASCE, Vol.96, No.SM4, pp.1435-1457.
- [4.21]Gingold, R. A. and Monaghan J. J. (1977): Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Royal Astronomical Society, Monthly Notices*, Vol.181, pp.375-389.
- [4.22]Liu, G. R. and Liu, M. B. (2003): *Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method*, World Scientific, 449p.
- [4.23]Lucy, L. B.(1977): A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astronomical Journal*, Vol.82, pp.1023-1024.
- [4.24]Lewis, R.W. and Schrefler, B.A.(1998): *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*, Second edition, John Wiley & Sons Ltd.
- [4.25]Nonoyama, H., Moriguchi, S., Sawada, K. and Yashima, A.(2015): Slope stability analysis using smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.2, pp.458-470.
- [4.26]Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R. (1994) : FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Scientific Research*, No.52, pp.209-245.
- [4.27] Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.(1999): A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 5, pp. 661-680.
- [4.28] Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., and Uzuoka, R.(1994): FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Scientific Research*, Vol.52, pp.209-245.
- [4.29] Tokimatsu, K. (2012):Liquefaction-induced damage to buildings in Urayasu City during The 2011 Tohoku Pacific Earthquake, *Proceedings of the InternationalSymposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp665-674.
- [4.30] Zienkiewicz, O.C. Chang, C.T. and Bettess, P.(1980): Drained, undrained consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils, *Geotechnique*, Vol. 30, No. 4, pp. 385-395.

[4.31]Zienkiewicz, O.C. and Shiomi, T.(1984): Dynamic behavior of saturated porous media; the generalized Biot formulation and its numerical solution, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8, No. 1, pp. 71-96.

[4.32]Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A. and Shiomi, T.(1999): Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering, John Wiley & Sons Ltd.



## 第5章 現場への適用に向けて

### 5.1 開発目標

本研究は、狭隘なスペースで建物周辺ならびに基礎下に立体網状スパイラル構造からなる高性能排水材(以下、人工ドレーン)を回転圧入することが可能な低振動低騒音型小型回転貫入装置の開発と、既存宅地における液状化対策の効果判定が可能な数値解析手法の開発により、調査・設計から施工までを経済的に実現できるスマート液状化工法を確立し、その普及と社会実装による地域防災力ならびに生産性の向上を図ることにある(渡邊ら, 2017, 八嶋ら, 2018, 村田ら, 2018)。以下に、開発目標を述べる。

1) 狭隘な場所において施工が可能となる低振動低騒音型小型回転貫入装置を試作開発することによって、以下の①～④の数値目標を満足するシステムを構築する。

- ①振動レベルを 75dB 以下に抑える。
- ②騒音レベルを 85dB 以下に抑える。
- ③貫入速度を 1.0m/分以上を達成する。
- ④鉛直および斜め打ちの貫入精度を $\pm 3^\circ$ とする。

以上により、住宅が密集する現場においても振動騒音の特定建設作業における環境基準内で高速施工が可能となる。また、例えば 11m×16m(176m<sup>2</sup>, 53.3 坪)の宅地の場合、施工期間は準備工を含めて5日以内、施工費用は150万円以内を達成する。

2) 液状化地盤上の小規模建築物(木造2階建てで延べ床面積が500m<sup>2</sup>以下の建築物、いわゆる4号建物)について、複雑な数値解析を実施することなく、対策前および対策後の沈下および傾斜を予測できる簡易法(地盤総合評価システム、付録4参照)を開発する。

- ①従来の液状化判定シート(国土交通省国土技術政策総合研究所, 2012)では、定性的評価のみ可能であった建物被害について、沈下量と傾斜量のある程度の精度で予測することができるものとする。
- ②高精度予測を達成するために用いられていた FEM 解析等では、詳細な地盤調査を必要としたが、本システムでは小型動的コーン貫入試験を用いた液状化判定調査で十分なものとする。これにより、4号建物について、傾斜量を 6/1,000 以下に抑えるための液状化対策が、簡易設計法によって瞬時に決定される。

3) 騒音・振動に係る基準値

騒音および振動に係る基準値について、工場・事業場に係る基準値(表 5.1)、特定建設作業に係る規制基準値(表 5.2)、深夜における音響機器の使用規制(表 5.3)についてそれぞれ以下に示す。

表 5.1 工場・事業場に係る(規制)基準値 [敷地境界における基準値](単位：dB)

時間の区分 地域の区分	騒音			振動	
	昼間	朝・夕	夜間	昼間	夜間
	8時～ 19時	6時～8時 19時～22時	22時～ 翌日の6時	7時～20時	20時～ 翌日の7時
第一種低層住居専用地域 第二種低層住居専用地域 第一種中高層住居専用地域 第二種中高層住居専用地域	45	40	40	60	55
第一種住居専用地域 第二種住居専用地域 準住居地域	50	45	40	65	55
近隣商業地域・商業地域 ・準商業地域	65	60	50	65	60
工業地域	70	65	60	70	65
工業専用地域	75	75	70	75	70
その他の地域	60	55	50	65	60

[備考]

- 1) 騒音関係では、近隣商業地域・商業地域・準工業地域・工業地域・工業専用地域・その他の地域内、振動関係では、工業地域・工業専用地域内の学校、保育所、病院・診療所(患者の入院施設を有するもの)、図書館及び特別養護老人ホームの敷地の周囲 50m の範囲内の基準は上の表の値から 5dB を減じた値とする。
- 2) 第一種低層住居専用地域、第二種低層住居専用地域、第一種中高層住居専用地域、第二種中高層住居専用地域、第一種住居地域、第二種住居地域又は準住居地域に接する工業地域又は工業専用地域の境界線から工業地域又は工業専用地域内へ 50m の範囲内の基準は上の表の値から 5dB を減じた値とする。
- 3) 騒音発生施設又は振動発生施設を設置する工場等、相当程度の騒音又は振動を発生する施設を設置する工場等、騒音の規制を受ける作業を行う事業場、飲食店営業等の騒音の規制を受ける事業場に適用される基準値を示す。(ただし飲食店営業等については夜間のみ適用される。)

表 5.2 特定建設作業に係る規制基準値 [敷地境界における基準値]

規制の種別	地域の区分	騒音	振動
基準値	[1][2][3]	85dB	75dB
作業時間	[1]	午後 7 時～翌日の午前 7 時の時間内でないこと	
	[2]	午後 10 時～翌日の午前 6 時の時間内でないこと	
一日あたりの作業時間	[1]	10 時間を越えないこと	
	[2]	14 時間を越えないこと	
作業期間	[1][2][3]	連続 6 日間を超えないこと	
作業日	[1][2][3]	日曜日その他の休日でないこと	

**[備考]**

地域：

ア) 第一種低層住居専用地域，第二種低層住居専用地域，第一種中高層住居専用地域，第二種中高層住居専用地域，第一種住居地域，第二種住居地域，準住居地域，近隣商業地域，商業地域，準工業地域，都市計画区域で用途地域の定めのない地域及び都市計画区域以外の地域

イ) 工業地域及び工業専用地域のうち，学校，保育所，病院・診療所(患者の入院施設を有するもの)，図書館及び特別養護老人ホームの敷地の周囲 80m の区域

地域：工業地域([1]地域のイの区域を除く。)

地域：工業専用地域([1]地域のイの区域を除く。)

表 5.3 深夜における音響機器の使用規制

規制対象業種	使用禁止時間	使用禁止区域	対象機器
飲食店 喫茶店 カラオケボックス	23 時 ～ 翌日の 6 時	第一種低層住居専用地域 第二種低層住居専用地域 第一種中高層住居専用地域 第一種住居専用地域 第二種住居専用地域 準住居地域 第二種中高層住居専用地域	カラオケ装置 音響再生装置 楽器器 拡声装置 有線ラジオ放送受信装置

**[備考]**

音が外部に濡れない場合は使用可能とする。

## 5.2 人工ドレーン(立体網状スパイラル構造体)

### 1) 人工ドレーン開発の背景

土木の現場では排水材として、砕石に代わりうる、同等以上の性能を持ち、経済的、効果的かつ品質保証された工業製品が出来ないかとの要望が古くからあった。このような要望に応じて、数多くの人工排水材が開発されてきたが、集水能力があっても、目詰まりや潰れて透水能力が落ちる、透水能力があっても、集水能力が無いなど、改良の声が多くあった。そこで、表 5.4 のような機能を持ったポリプロピレンを材料とした製品の開発を目指した。

表 5.4 製品に求められる機能と性能

機能・性能	概要
集水機能	侵入する地下水を効率的に集める
排水機能	集めた地下水を速やかに排水する
耐圧(形状保持)性能	土圧によって不要な変形を起こさない
耐目詰まり性能	地下水排除機能の耐久性

### 2) 人工ドレーンの特徴

人工ドレーンには図 5.1 のとおりマット型とパイプ型の 2 種類があり、本研究ではパイプ型を使用した。人工ドレーンは、ポリプロピレンを素材とし、塩ビのような接着剤ではなく金属の溶接のように溶かしながら、線状相互熱溶着して一体成形した立体網状体の透水材である。この構造体は、表面は線状網状、全面開孔によって集水する機能を高め、内部はらせん状にすることで通水性と耐圧強度を高めている。工場で管理製造されたドレーン製品であり、以下の特徴がある。

- ①軽量で剛性があり、形状が安定していて、品質のばらつきが無い
- ②前面開孔型の線状網状の構造によって集水機能が高められている
- ③透水に有利な筒状空洞部(スパイラルパイプ状)を有しており、立体網状でありながら、通水断面が大きい
- ④ランダムな筒状空洞部を有する立体網状体によって、耐圧強度が高められており、施工後の体積変化による構造物や圧密への影響が小さい

また、エコマークを取得しており、環境に配慮した製品である。

さらに、NETIS への登録、ベターリビングによる技術評定も行われている。

# もやいドレーン

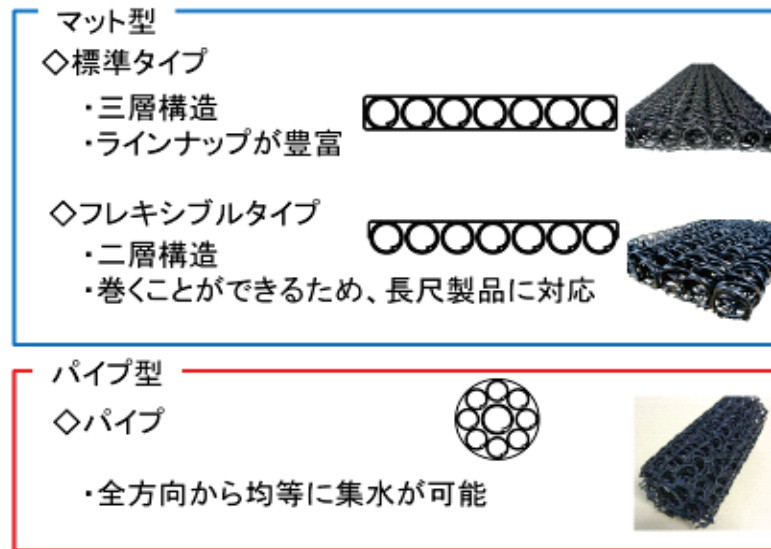
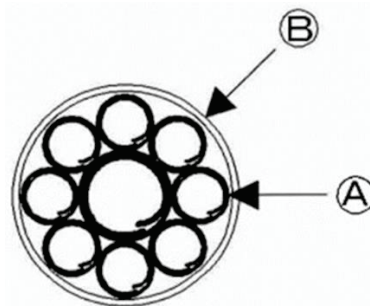


図 5.1 人工ドレーンの種類と特徴

今回使用した人工ドレーンは、パイプ型の中でも全透水型(P-73)のものを芯材とし、P-73 にメッシュフィルター(Y-3000)を包んだもの(品番 P-73N)である。P-73N の構造図を図 5.2 に示す。また、P-73N の外形寸法については、表 5.5 に示す。なお、メッシュフィルターを包む実寸は 80mm 近くとなる。



- ① 芯材 人工ドレーンパイプ P-73
- ② メッシュフィルター Y-3000

図 5.2 人工ドレーンの構成

表 5.5 人工ドレーンの寸法

品番(呼称)	外形(mm)	長さ(mm)
P-73N	73	2,000

### 3) 人工ドレーンの品質・性能

人工ドレーンの品質と性能の証明として、第三者機関による品質・性能試験を行っている。表 5.6 に各試験と実施機関を示す。

表 5.6 品質・性能試験と実施機関

品質・性能試験	実行機関
耐圧試験	日本品質保証試験
溶出・耐薬品性試験	化学研究評価機構
クリープ試験	岐阜大学
透水試験	大阪府立産業技術総合研究所

以下に，耐圧強度試験結果，溶出試験結果ならびに透水試験結果について述べる。

### 3-1) 耐圧強度試験

2017年3月29日に人工ドレーンパイプ(P-73)について，一般社団法人日本品質保証機構による耐圧試験を行った。試験条件および試験方法を図 5.3 に，試験結果を表 5.7 に示す。また，試験成績書は付録 1 に添付する。

試験機：島津オートグラフ AG-250kND(JIS B 7721:2009 1 等級)

試験方法：中日本高速道路 株式会社 JHS711-1997 「裏面排水材耐圧強度試験方法」

2.パイプ系材料に準ずる。

最大載荷荷重は，外径に対する圧縮率 20%までとし，試験に使用した圧縮治具及び載荷板の取付状態及び寸法は図 5.3 のとおり。

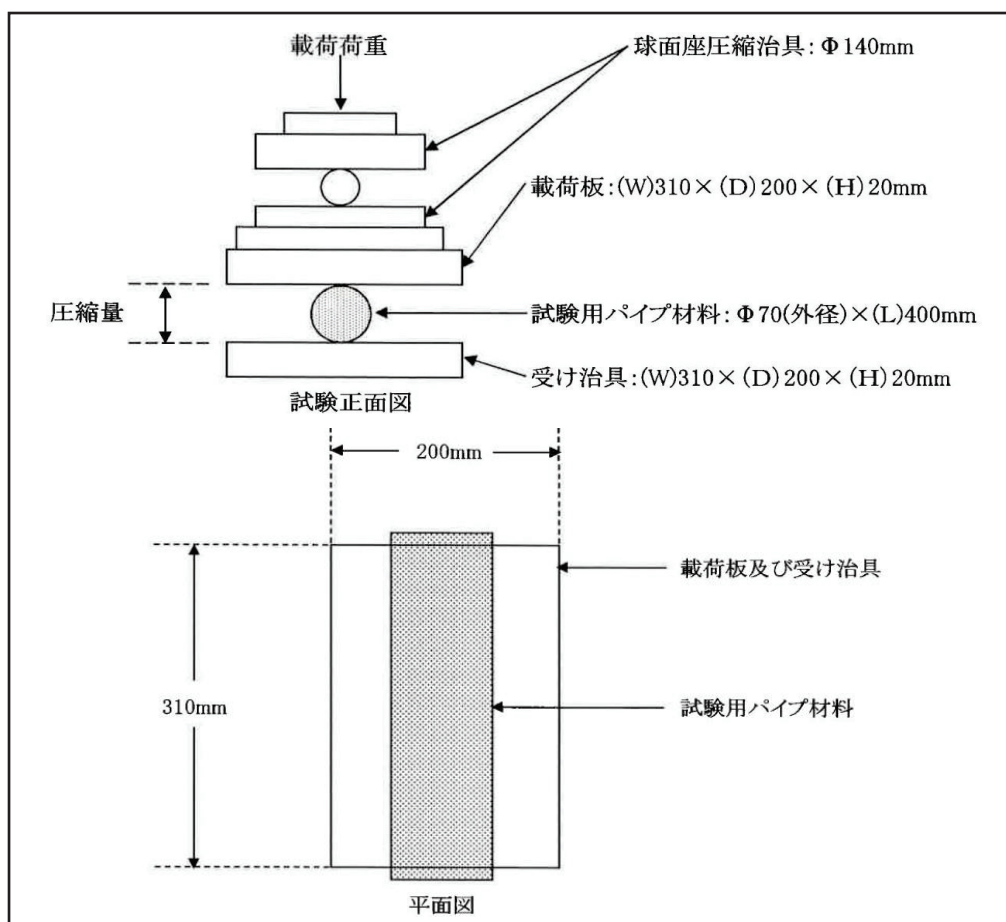


図 5.3 耐圧強度試験 試験方法 概略図

表 5.7 耐圧強度試験結果

圧縮率 (%)	圧縮量 (mm)	載荷荷重 (kN)				耐圧強度 (kN/m)
		試料				
		A	B	C	平均	
2	1.4	0.2	0.3	0.2	0.2	1
4	2.8	0.5	0.6	0.4	0.5	2
6	4.2	0.9	1.0	0.7	0.9	3
8	5.6	1.3	1.4	1.1	1.3	4
10	7.0	1.6	1.7	1.4	1.6	5
12	8.4	1.9	1.9	1.7	1.8	6
14	9.8	2.0	2.1	1.9	2.0	6
16	11.2	2.1	2.2	2.1	2.1	7
18	12.6	2.2	2.3	2.3	2.3	7
20	14.0	2.3	2.4	2.6	2.4	8

※試料 A,B,C はともに人工ドレーンパイプ(P-73)外径 Φ70 x 長さ 400mm

注 1:最小載荷荷重の読みは, 100N とし圧縮率は試験機のストローク量(mm)とした.

注 2:耐圧強度の計算結果は, 整数にまるめた.

### 3-2)溶出試験

2009年6月30日に人工ドレーンパイプについて, 財団法人化学技術戦略推進機構高分子試験・評価センターによる溶出試験を行った. 試験条件と試験結果(表 5.8)は以下に示すとおりである. また, 試験成績書は付録2に添付する.

試料: 人工ドレーン

試験方法: 平成15年3月6日環境省告示第18号

(土壤汚染対策法施行規則に基づく土壤溶出量調査に係る測定方法)

測定方法: ポリ塩化ビフェニル: 昭和46年環境庁告示59号 付表3

ベンゼン: JIS K 0125 5.2

表 5.8 溶出試験結果

試験項目	試験結果
ポリ塩素化ビフェニル	0.0005mg/L 以下
ベンゼン	0.001mg/L 以下

### 3-3)透水試験

人工ドレーン材の透水能力は, 透水性試験により管水路の式(マンニングの公式)の適用が可能であると確認され(松本ら, 1995), 実験値より粗度係数を求めている. 人工ドレーンの透水量はその値を用いて算出した理論排水量としている.

動水勾配が 1/100 のときの透水係数  $k$  は,  $k = 6 \times 10^2 \text{ cm/sec}$  である.

### 5.3 試作機による貫入確認実験

低振動低騒音小型回転貫入装置の開発に先立ち、高性能排水材(以下人工ドレーンという)の設置に適用可能な鋼管(SGP80A 黒ガス管)を電動モーターにより回転貫入する実験を行った。実験場所は、岐阜県瑞浪市横谷にある株式会社西濃建機駐車場で、直近の畑で実施した小型動的コーン貫入試験結果を図 5.4 に示す。表層の盛土直下には  $N_d$  値 0~8 と深さとともに増加する砂質シルトからなる粘性土が深さ 7.5m 付近まで分布し、途中深さ 4.0~4.7m 間に  $N_d$  値 10 程度に突出するように砂層が挟在する地盤である。

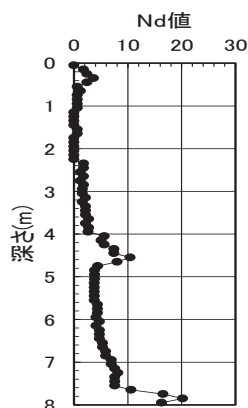


図 5.4 実験値の小型動的コーン貫入試験結果 (瑞穂市横谷)

貫入装置は、写真 5.1 に示すように、長さ 4m の H 型鋼(200×200)をリーダーにして、鋼管頂上の圧入用モーター0.75kw によりウォームギアを回転、このギアにより昇降稼働するガイドに回転用モーター3.5kw を搭載し回転軸にケーシングねじ加工したヘッドを取付け、これに鋼管(SGP80A 黒ガス管、以下ケーシングという)をねじ混んで回転する構造とした。鋼管の先端には、金属で試作ビット(写真 5.2)を付け、リーダーを重機に取り付けて鉛直ならびに傾斜貫入を実験した。



写真 5.1 試作機の全体

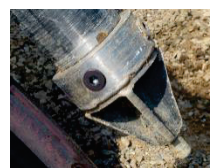


写真 5.2 試作ビット

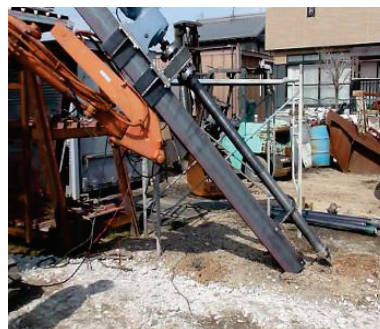


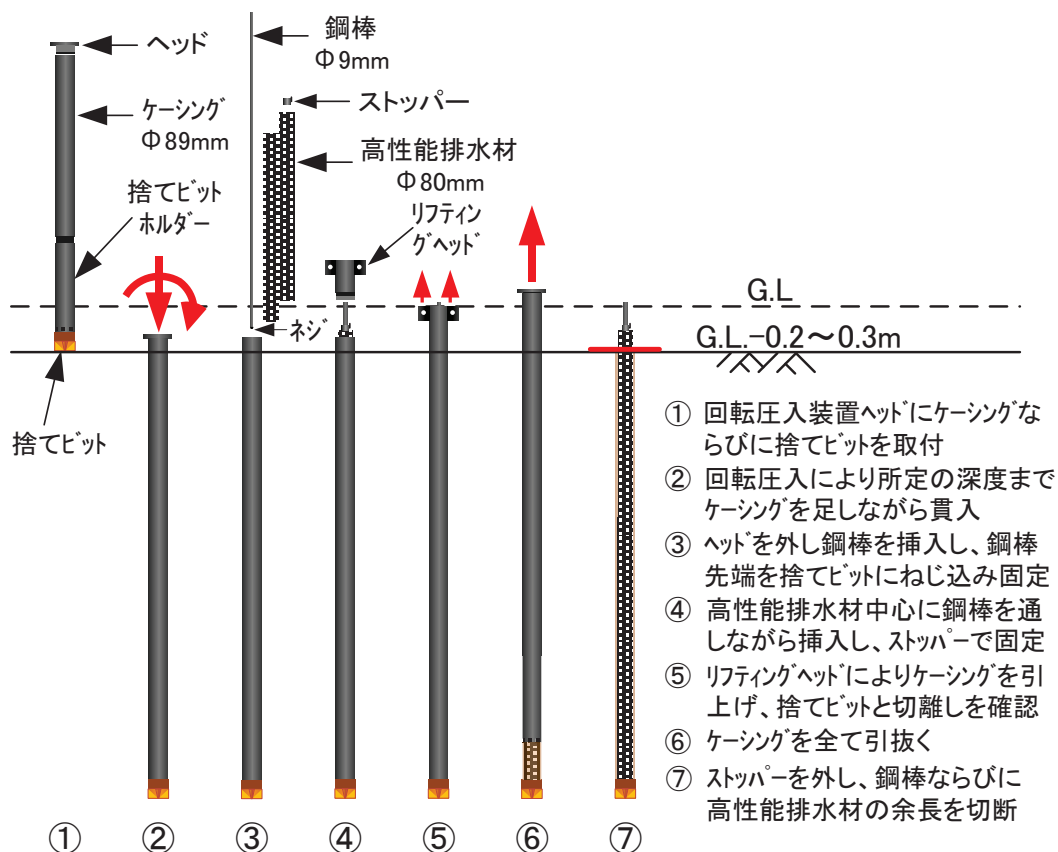
写真 5.3 傾斜貫入の様子



実験により確認された事項を以下に列挙する。

- ① 圧入用の電動モーターは、パワー不足であり、昇降に 35cm/min を要するため、モーターの出力を大きくして、減速比を3段階程度に調整できる必要がある。
- ② 回転用の電動モーターは、当該地の表層のよく締まった砂利層を回転圧入するには適しているが、圧入力を高め、表層をあらかじめハツルなどの準備を行うことで、小型軽量化することが可能である。
- ③ 先端ビットの切離しは、逆回転では確実性に欠け、非常に難しい。したがって、先端ビットは差込み式として、鋼管内に挿入した鉄筋棒で切離し、それを補助しかつ確認できる工夫が必要である。
- ④ ③の鉄筋棒をドレーンの補強材として、ドレーンの中心の空洞を通してガイドパイプ内に設置することが望ましい。また、これによりドレーンの挿入は、所定深さまで鋼管を回転貫入した後に行うことで、設置の確実性が増し、作業的にも効率的である。
- ⑤ ③、④の機能を備えた先端ビットの開発が必要であり、そのコスト低減が課題である。

この実験結果より、まずドレーンの設置手順を、**図 5.5** のように提案した。



**図 5.5** 高性能排水材の設置手順

ついで、低振動低騒音小型回転貫入装置の主な構造ならびに機能を、**図 5.6** のように提案した。主な内容と特徴を以下に述べる。

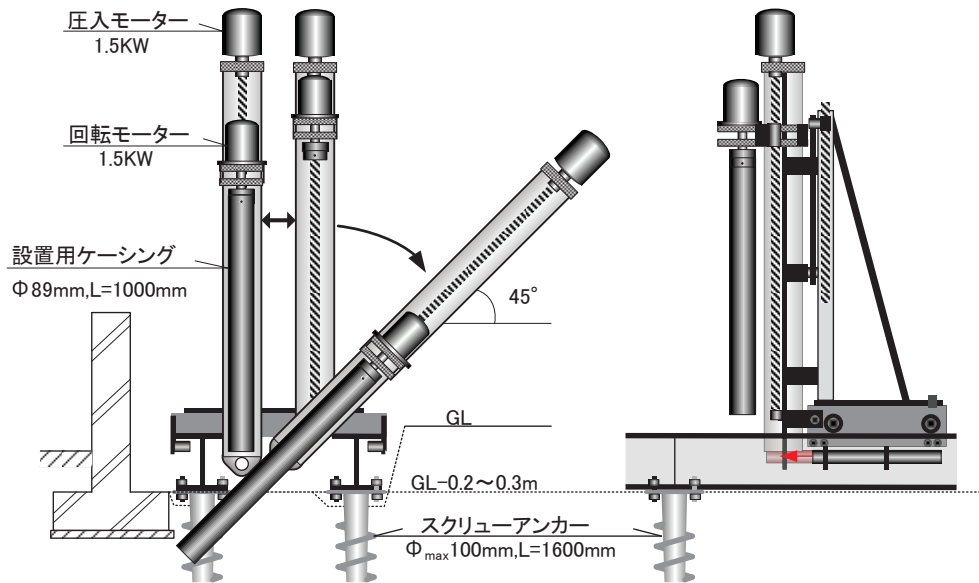


図 5.6 低振動低騒音小型回転貫入装置の主要構造と機能（正面図と側面図）

- ① あらかじめ建物の外壁(基礎)に平行に施工箇所を掘削し，地下埋設物の確認ならびに基礎位置(深さ)を確認する．これは，軒下での機械の稼働スペースを確保するとともに，架台の据付けスペースを確保すること，さらに傾斜貫入(地面との傾斜角最小45度)が可能な高さに機械の据付け高さを下げることを目的とする．
- ② スクリューアンカーを設置し，これを反力に 200×200H 型鋼 2 列を架台として水平に設置する．H 型鋼の間隔は 400mm とし，貫入装置の首ふりにより 2 列の鉛直ドレーン(300mm 間隔)の施工を可能とする(図 5.7 参照)．
- ③ 架台上に貫入装置を据付ける．貫入装置は，架台を反力として回転圧入が可能となり，架台上をスムーズに移動することができる．また，架台上での機械の組立・分解，ならびに前後回転を補助するためのホイストクレーン(電動 10 kN)を別途製作する．

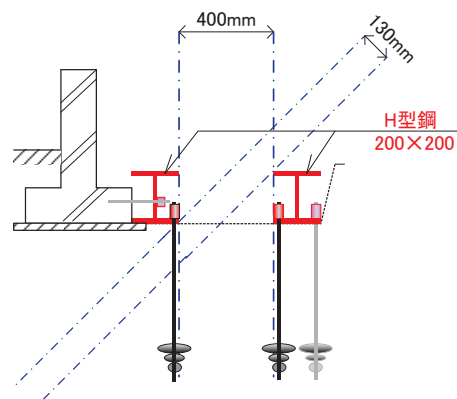


図 5.7 H 型鋼の据付け位置とドレーン打設位置の関係

## 5.4 貫入装置の改良と試験貫入

貫入確認実験の結果を受け、試験施工に向けて低振動低騒音小型回転貫入装置を改良し開発した。装置の全体図を図 5.8 に示すとともに、装置の仕様を表 5.9 に示す。

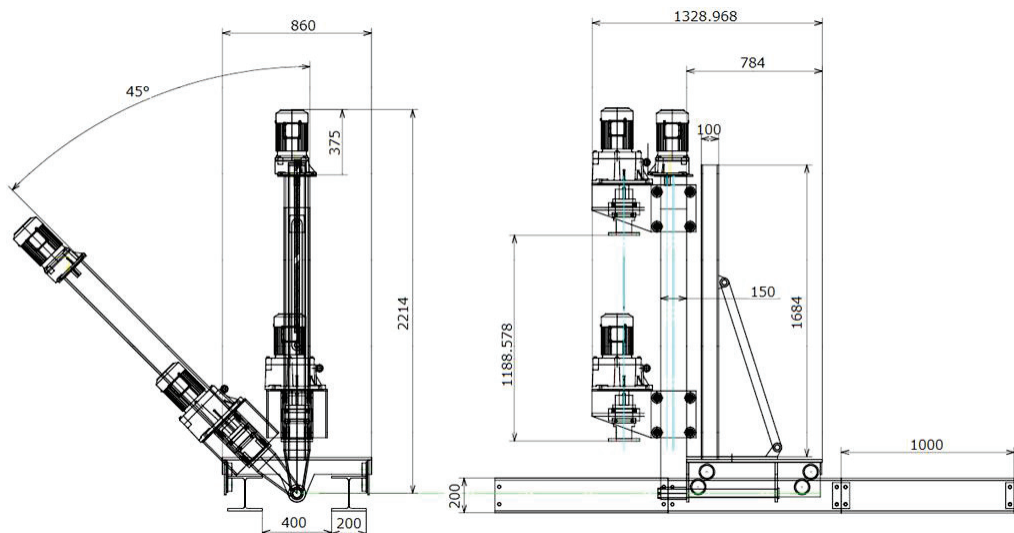


図 5.8 開発した低振動低騒音小型回転貫入装置

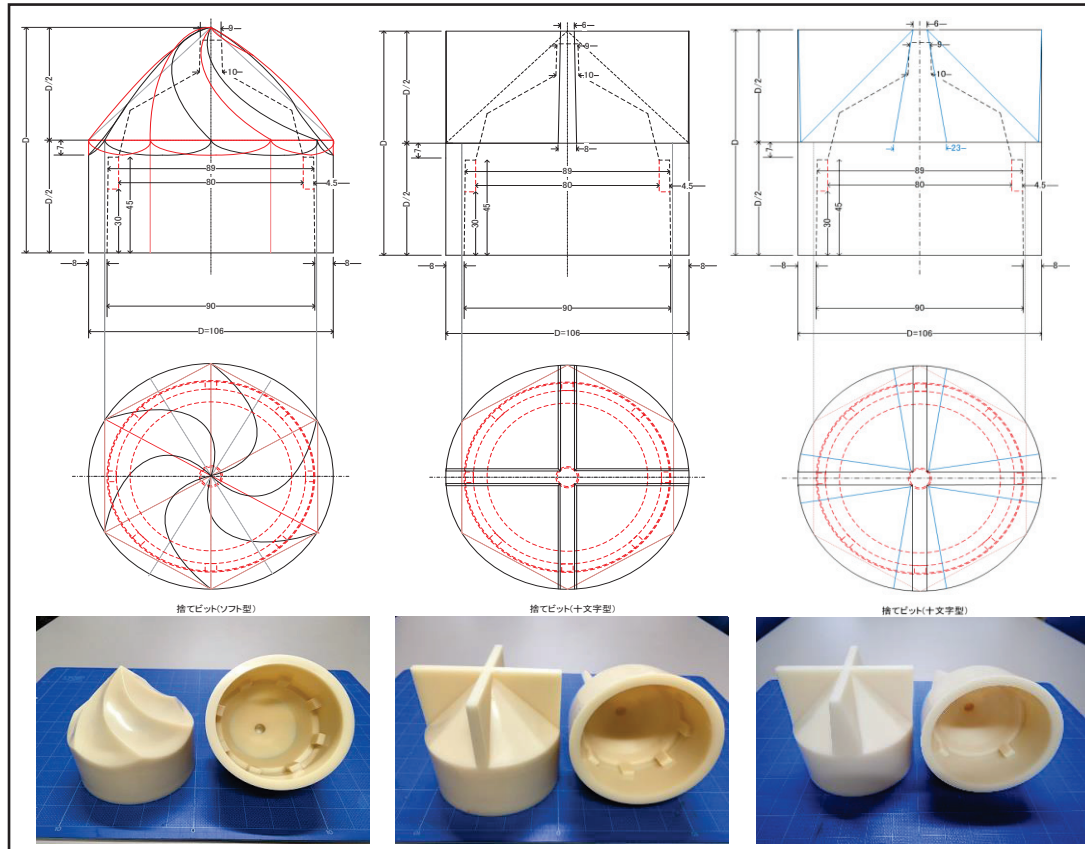
表 5.9 開発した低振動低騒音小型回転貫入装置の仕様

装置	使用器具および仕様
ケーシング	80Aガス管，外径89.1mm，全長1,000mm
圧入用モーター	三相1.5KWモーター，1/10減速機付(148rpm/43.6Nm)
回転用モーター	三相1.5KWモーター，1/80減速機付(19.2rpm/320Nm)
リーダー	H型鋼200×200，45度まで傾斜可能
ケーシングチャック	摩擦締付け型
移動レール（架台）	H型鋼200×200，全長1,000mm
スクリュウアンカー	太陽光発電設備用GSA，径65mm×長さ1000～1600mm
制御装置	スイッチング(on/off)制御

### 5.4.1 貫入方法

先の図 5.5 に示したように、ドレーンの地中への設置方法は、7つの工程からなる。①回転貫入装置のヘッドに、ケーシングならびに捨てビットを取付ける。②回転圧入により、所定の深さまで鋼管を足しながら貫入する。③ヘッドを外して鋼棒(Φ9 mm)を挿入し、鋼棒先端(ねじ加工)を捨てビットにねじ込み固定する。④ドレーン中心の中空スペースに鋼棒を通しながら挿入し、ドレーン地表端をストッパーで鋼棒に固定する。⑤引抜用のヘッドをケーシング地表端に取付け、少しケーシングを引上げて捨てビットとの切離しを確認する。⑥切離しを確認できたら、ケーシングをすべて引抜く。⑦ストッパーを外し、鋼棒ならびにドレーンの余長を切断する。

捨てビットは、**図 5.9** に示すように、量産性とコスト面から材質をプラスチック(ABS 樹脂)とし、圧入貫入に適した「スクリュウ型」と回転貫入に適した「十字型」を試作した。さらに、これらを試験貫入した結果、十字型の刃の根元を厚くして耐久性を増した「改良十字型」が最も回転圧入に適することを確認した。



**図 5.9** 開発した捨てビット (左：スクリュウ型、中央；十字型、右；改良十字型)

#### 5.4.2 試験貫入実験

試作した軽量小型の回転貫入実験装置による試験打設を、愛知県あま市の宅地で行った。試験地は、蟹江川の氾濫原に発達した自然堤防の一面に当たり、海拔 0m 地帯の軟弱な沖積低地で、地震時には液状化の発生が懸念されている土地である。

**図 5.10** には、愛知県あま市の住宅において実施したボーリング調査結果から液状化判定を実施した結果を示す。液状化判定は、建築基礎構造設計指針に準拠し、モーメントマグニチュード  $M=7.5$ 、地表最大加速度  $a_{max}=220$  gal とした。また、ボーリング調査において、乱れの少ない試料採取方法(GS サンプラー)により採取した試料を用いて行った土の繰り返し非排水三軸圧縮試験ならびに動の変形特性試験結果は、**表 5.10** に示すとおりである。さらに、**図 5.11** には小型動的コーン貫入試験結果から、ボーリング調査による細粒分含有率  $F_c$  を用いて液状化評価した場合と、 $N_1 < 5$  以下を  $F_c=50\%$  として液状化評価(提案簡便法)した場合を示す。

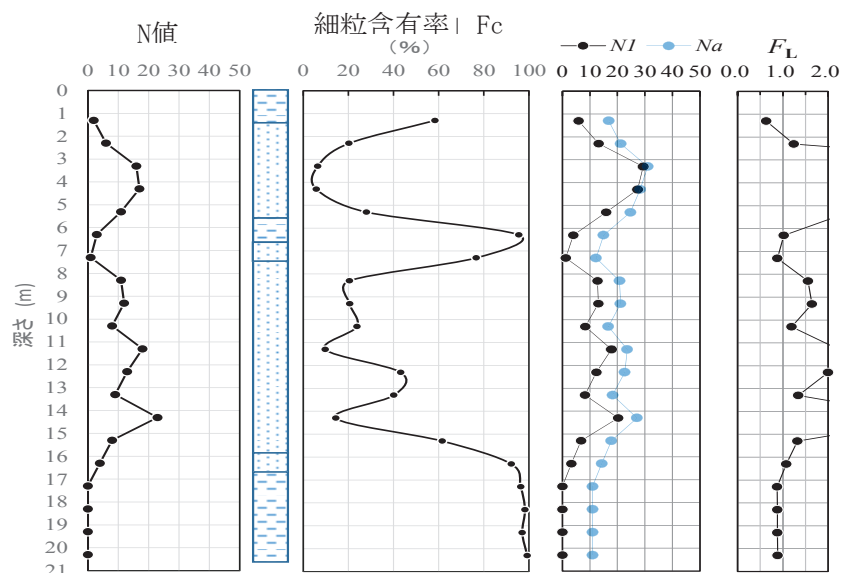


図 5.10 ボーリング調査結果と液状化判定

表 5.10 室内土質試験結果(繰り返し比排水三軸圧縮試験, 土の動的変形特性試験)

試料の深さ (m)	N 値	湿潤密度 $P_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	自然含水比 $W_n$ (%)	細粒分含有率 $FC$ (%)	液状化強度比 $RL_{20}$	初期せん断剛性率 $G_0$ (MN/m <sup>2</sup> )
2.00~2.95	6	1.93	22.2	28.7	0.360	24.6
4.00~5.00	17	1.98	22.1	10.2	0.221	25.4
8.00~9.00	11	1.96	21.4	10.4	0.251	28.7

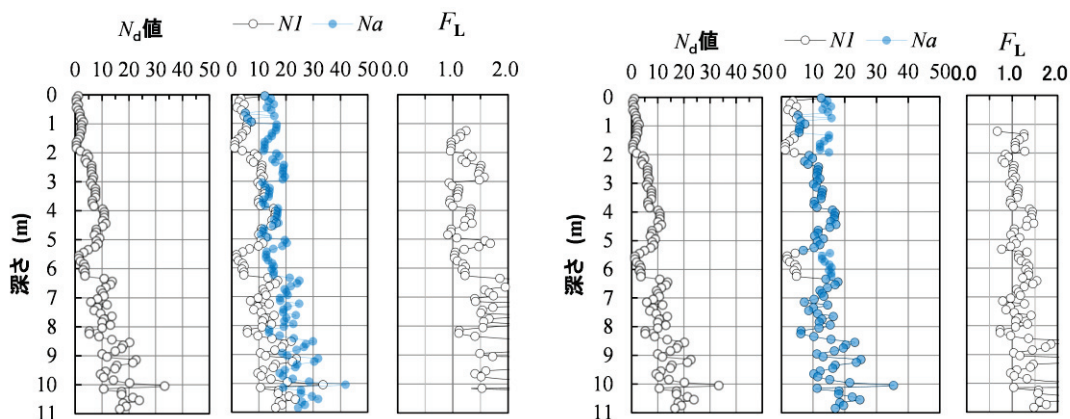


図 5.11 小型動的コーン貫入試験結果と液状化判定(左 ; 細粒分含有率, 右 ;  $N1 < 5 \Rightarrow Fc = 50\%$ )

試験地の宅地において実施した小型動的コーン貫入試験ならびにボーリング調査による標準貫入試験結果を図 5.12 に示す. 小型動的コーン貫入試験は, 標準貫入試験の  $N$  値と等価な  $N_d$  値を求める試験で, 建物周りの 4 か所(No.1~No.4)と今回の試験地(No.5)の 5 か所で行った. ボーリング調査は, 試験地(No.5)の近傍で行った.

液状化対象層は、ボーリング調査による  $N$  値から深さ 3m 付近までの  $N$  値 10 以下の砂層と判断され、試験(No.5)では  $N_d$  値 10 以下の深さ 4m 付近までの貫入施工が目安となる。

試験打設では、①目標深度の 4.0m 付近までスムーズ(貫入速度 1.0 m/min)に回転圧入が可能であるか、②貫入の鉛直精度( $\pm 3^\circ$ )が保てるか、③貫入後、捨てビットへの鋼棒のねじ込みならびに捨てビットのケーシングとの切離しが可能か、④ドレーンの敷設後、ケーシングの引抜き時にドレーンが共上がりしないか、⑤市街地で施工可能な騒音振動レベル(敷地境界での騒音 85dB 以下、同振動 75dB 以下)内での施工が可能であるかの 5 点について確認した。

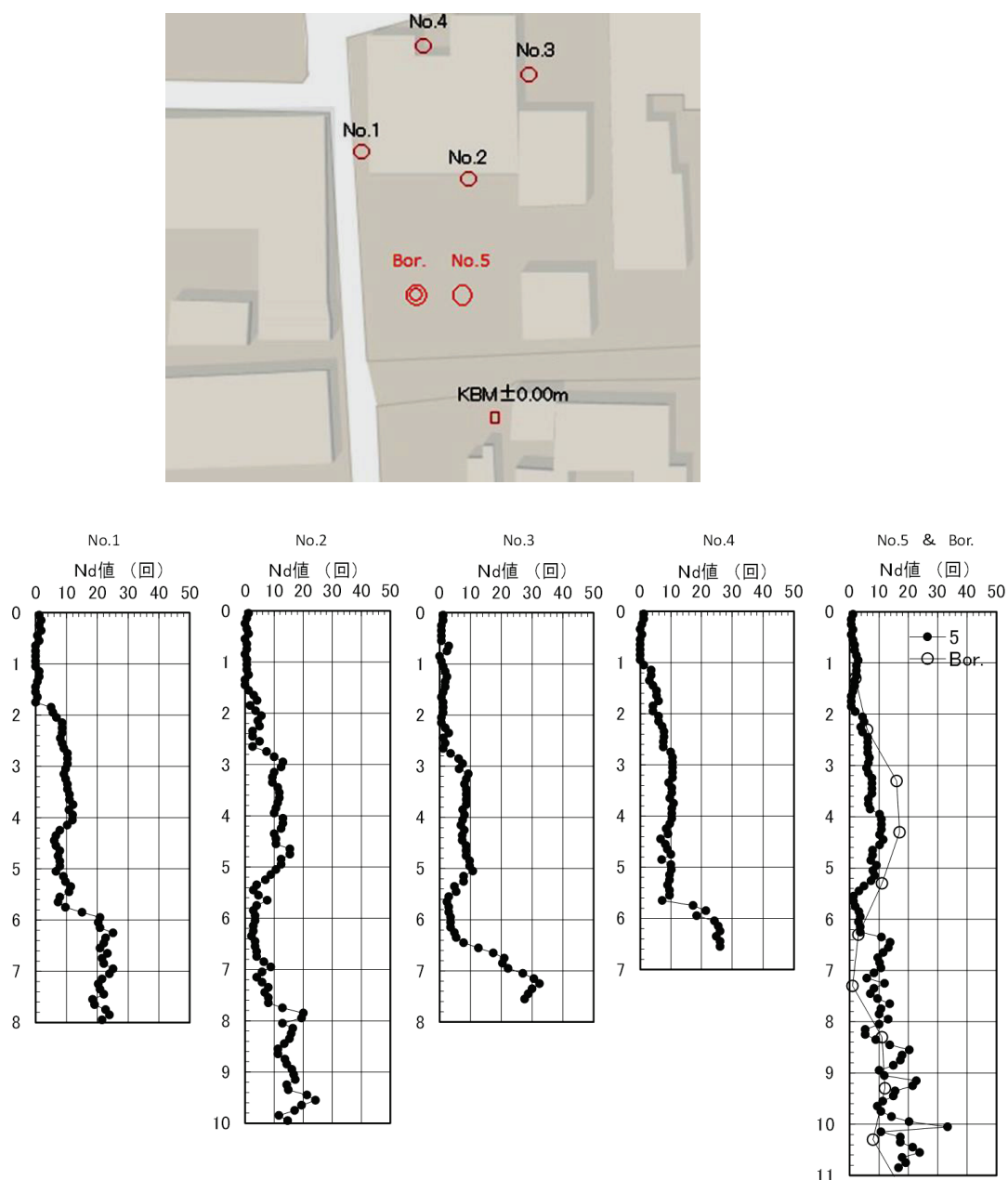


図 5.12 試験施工地の地盤調査結果 (小型動的コーン貫入試験と標準貫入試験)

### 5.4.3 試験貫入の結果

試験貫入実験の結果，以下のことが明らかとなった。

- ① 目標深度 4m まで，0.67m/min の速度で回転圧入による貫入ができた．これは，試作機の電気モーター(0.75kw)のパワー不足と反力不足による機械の持ち上がりが原因で，貫入速度が目標の 1.0m/min に及ばないばかりか，隣接するドレーンの設置では深度 2m 付近から貫入が少しずつ困難になった．
- ② 架台と機械のとの接続のクリアランス(反力の不足も原因)により，1.7°ほどの傾斜が生じたが，反力を確実にすることと架台と機械をバイス等でしっかり固定することで解消できる．
- ③ 捨てビットへの鋼棒のねじ込みならびに捨てビットのケーシングとの切離しは良好であった．
- ④ ケーシングの引抜き時にドレーンの共上がりは確認されなかった．
- ⑤ リオン社製の振動騒音測定装置を用いて，施工機械ならびに発電機（両者とも図 5.12 のボーリング No.5 近傍）から 1.0m，2.5m，5m の地点で計測した振動騒音レベルを図 5.13 に示す．発生する騒音振動は振動規制法ならびに騒音規制法に示される基準値(騒音 85dB 以下，同振動 75dB 以下)を大きく下回ることが確認できた．

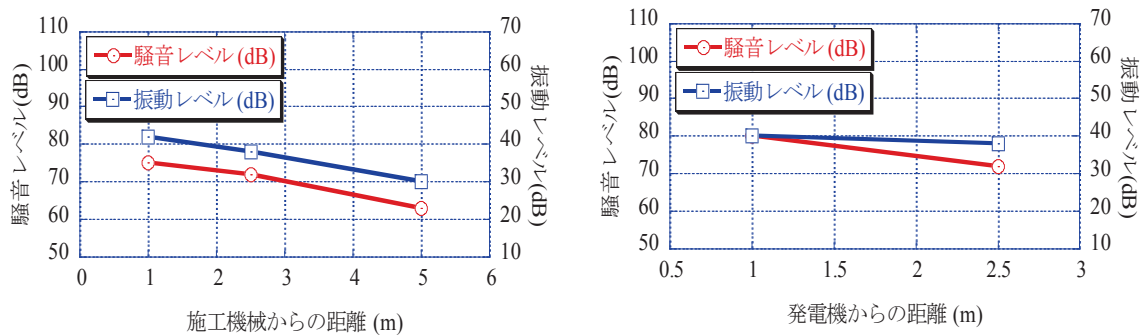


図 5.13 施工機械と発電機の騒音振動レベル(渡辺ら，2017)

## 5.5 人工ドレーン材の排水効果の確認

開発した低振動低騒音型回転貫入装置(プロト機)を用いて、人工ドレーン材の排水効果を確認するための現場実証試験を実施した(八嶋ら, 2018). 現場実証試験は、愛知県あま市の宅地において、**図 5.14**に示すように、改良域と未改良域にそれぞれ深さ 2m と 4m に地中間隙水圧計を設置し、その中間点で H 型鋼を加振打設した際に発生する過剰間隙水圧(静水圧からの変化分)の変化を捉えて、改良域と未改良域の違い、すなわち排水促進効果を確認するものである。

まず、間隙水圧計をボーリング孔の孔底から 50cm ほど押し込み所定の深さに設置する(**写真 5.4** 間隙水圧計と押し込み用ロッド). 間隙水圧計は、バケツ内のきれいな水中で、ハウジング内部に空気が残らないように組立、ゴムメンブレンでポーラスメタルが空気に触れないようにして設置する(**写真 5.5**). 間隙水圧計を設置した後、スクリュウアンカーを打設してこれに新しく用意した H 型鋼 200×200 を架台として水平に据える(**写真 5.6**). これに、プロト機を据えて鉛直ドレーンを打設する(**写真 5.7**).

鉛直ドレーンは、30cm 隔で 2 列、それぞれ 60 cm 間隔で千鳥配置(60 cm 間隔 2 列千鳥配置)するので、合計 6 本を打設した。ドレーン配置は、当初 60cm 間隔の間にさらにもう 1 本の打設(30 cm 間隔 2 列正方形配置)の可能性を考えたが、ドレーンの打設により周辺地盤が締固まるため、その間の打設が困難であることが確認された。すなわち、この現場では、この配置が施工可能な最小間隔の配置であることを確認した。

また、実証試験における鉛直ドレーン施工において、捨てビットの耐久性ならびに機能を確認するため、スクリュウ型および十字型を使用して比較検討した。**写真 5.8**に示すように、スクリュウ型を長時間回転圧入すると、摩耗により先端が破壊することを確認した。また、十字型ビットにおいて、内側のケーシングの爪とのかみ合わせが 4 か所の場合には、締まった砂層の貫入において樹脂側が破壊することを確認した。さらに、十字のウイングが折れて破壊することで、貫入速度が急速に低下する状況が生じた。したがって、先の**図 5.9**で示したように、十字型捨てビットのウイングの根元部分を厚くする改良を行った他、内側のケーシングとのかみ合わせは 8 か所とした。



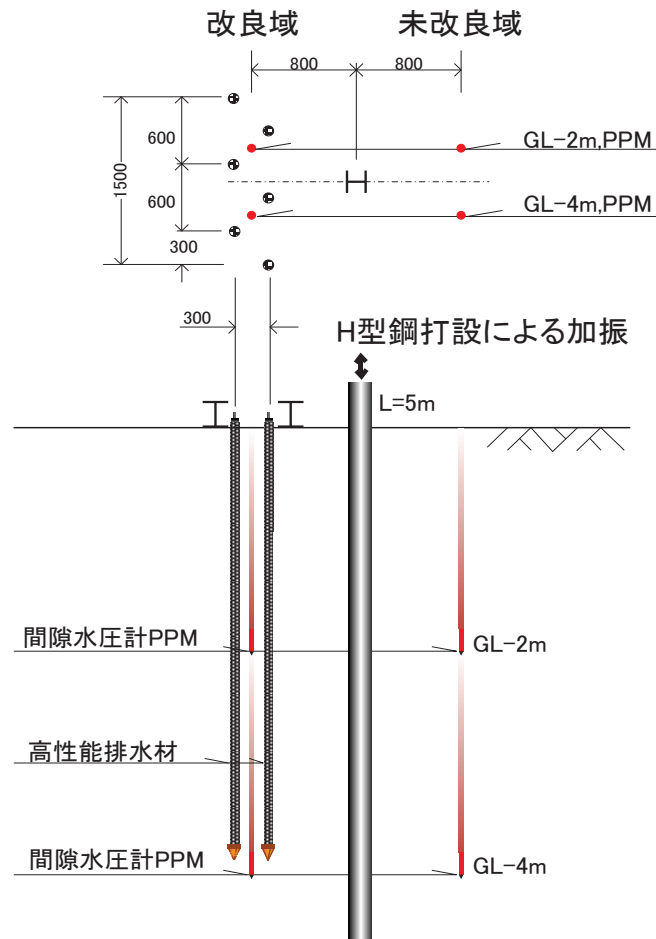


図 5.14 実証試験における間隙水圧計配置(上；平面図、下；断面図)

次いで、現場実証試験は、敷地外の道路より 10t ラフタークレーンによって起振機を吊り下げ、H 型鋼に振動を与え打設・引抜することで、地震発生時の地盤内の様子を擬似的に再現し間隙水圧を測定した。なお、H 型鋼を打設する地点はそれぞれの間隙水圧計測地点から 800mm 離れた地点にて行った。写真 5.9 に 10t ラフタークレーンによる H 型鋼打設状況を、写真 5.10 にパイプロによる起振状況および写真 5.11 に計測状況(H 鋼架台部分改良)を示す。

実験結果について述べる。図 5.15 に各地点の間隙水圧の時刻歴を、図 5.16 には図 5.15 中の破線で囲んだ部分を拡大した間隙水圧の時刻歴を示す。間隙水圧の挙動については、図 5.15 からわかるように、H 型鋼打設時は正の間隙水圧が、引抜時は負の間隙水圧が発生している。

図 5.16 より、間隙水圧の発生ピーク時間は、地下 2m 地点では改良域は未改良域よりも 33 秒早く、4m 地点では改良域は未改良域とほぼ同時であった。この結果より、地表面付近の液状化に大きく影響を与える範囲ではドレーン材によって排水が促進されていることがわかる。間隙水圧の最大値は、地下 2m 地点で改良域では 2.1kPa、未改良域では 3.0kPa であり、地下 4m 地点で改良域では 0.9kPa、未改良域では 1.0kPa であった。この結果より、地表面付近の液状化層では間隙水圧の発生を 3 割減少させていることがわかる。間隙水圧の消散時間は、間隙水圧のピーク時間から間隙水圧が 0.2kPa 未満となるまでの時間を消散時間とすると、地下 2m 地点の改良域では 3 分 48 秒、未改良域では 8 分 27 秒という結果となった。これより、間隙水圧の消散時間が 4 分以上も短くなることがわかる。



写真 5.4 地中間隙水圧計



写真 5.5 同左設置作業



写真 5.6 架台設置 200H型鋼



写真 5.7 鉛直ドレーン施工



写真 5.8 ビット損傷(左 ; スクリュウ型, 右 ; 十字型)



写真 5.9 10t ラフタークレーンによる  
H型鋼打設状況



写真 5.10 パイプロによる起振状況  
(H型鋼部分改良)



写真 5.11 計測状況(H型鋼部分改良)

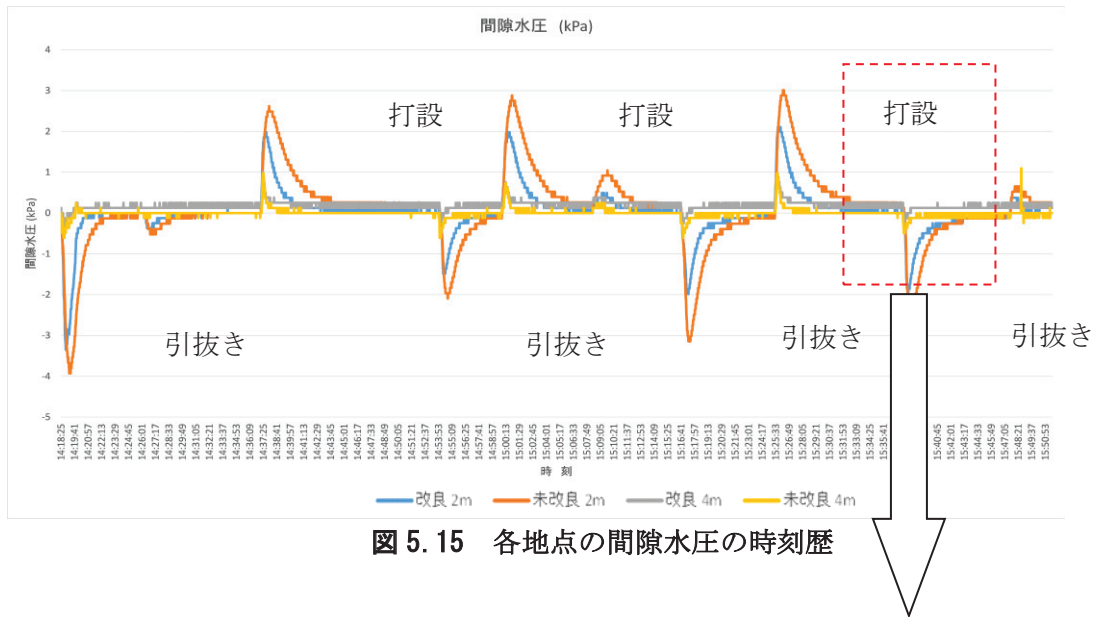


図 5.15 各地点の間隙水圧の時刻歴

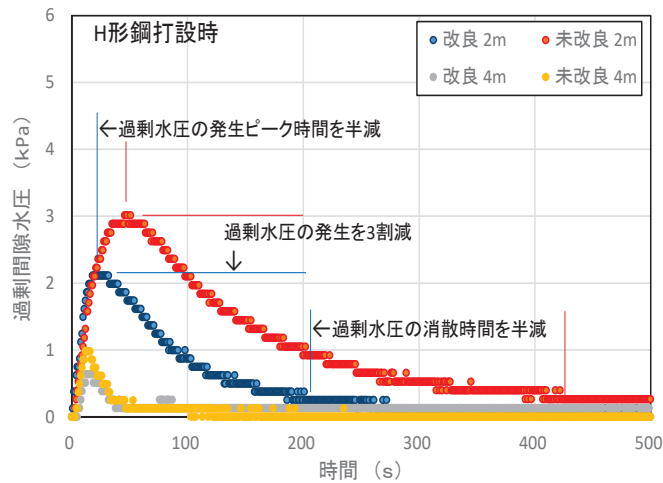


図 5.16 代表地点の間隙水圧の時刻

人工ドレーン材を用いた改良域は未改良域と比べ、過剰間隙水圧を抑制し、素早く消散させることが可能であり、間隙水圧の蓄積の継続による宅地の沈下を抑制させる効果があると考えられる。

また、地下 4m 地点における間隙水圧の挙動が地下 2m 地点と比較して小さいのは、H 型鋼打設に伴い間隙水圧は若干上昇するが、無視できる程度のものであったためである。なお、本研究では、H 型鋼打設・引抜による全応力の変化に伴い発生した初期状態からの水圧変動を過剰間隙水圧として取り扱ったが、地震時に発生する過剰間隙水圧でも同様の効果が期待できるものと推察される。

## 5.6 現場試験施工

現場実証試験の結果を受けて、愛知県あま市の既存宅地における現場試験施工を実施した(村田ら, 2018)。**図 5.17** に住宅の平面図を示すように、対象住宅(赤色)はその後に新しく建設された別棟と繋がり、また離れや納戸が周辺に付帯する。昭和 56 年以前の建物であることから、あま市の助成により木造住宅耐震診断を受け、建物の耐震補強を実施した。これに併せて、地盤調査ならびに基礎構造調査を実施し、地盤ならびに基礎補強の必要性を調査した。先の実証試験場所との地盤状況を敷地西側において南北に実施した 2 次元表面波探査により比較すると、**図 5.18** の S 波速度断面図に示すように、液状化対象層は北側にわずかに浅くなるのがわかる。建物周辺の地盤調査では、**図 5.19** に示すように、 $N_d$  値 < 10 の赤色部分が有害な不同沈下を生じる改良対象範囲と判断した。

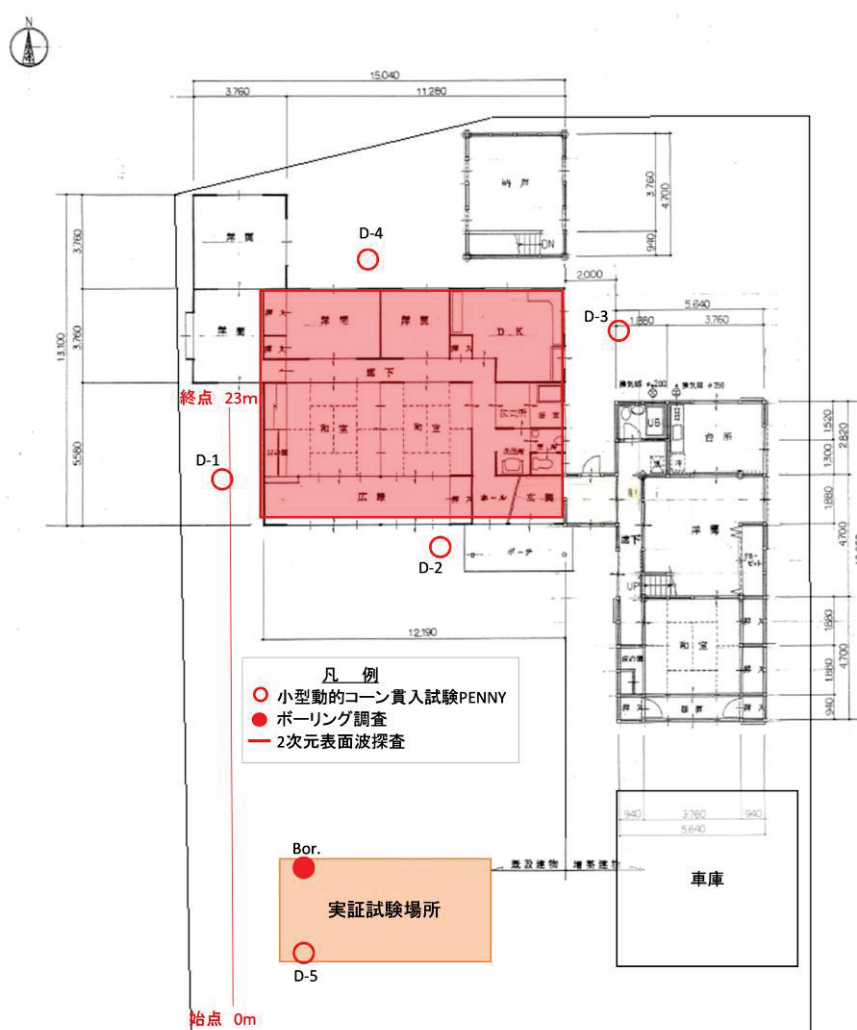


図 5.17 実証試験ならびに現場試験施工の敷地平面図

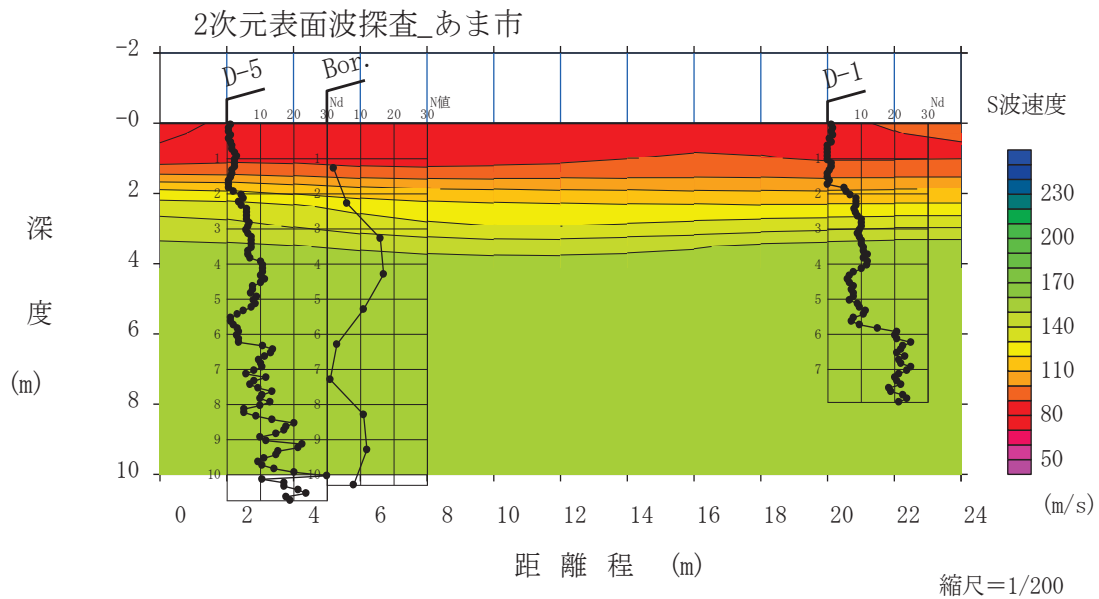


図 5.18 実証試験ならびに現場試験施工の地盤の S 波速度分布

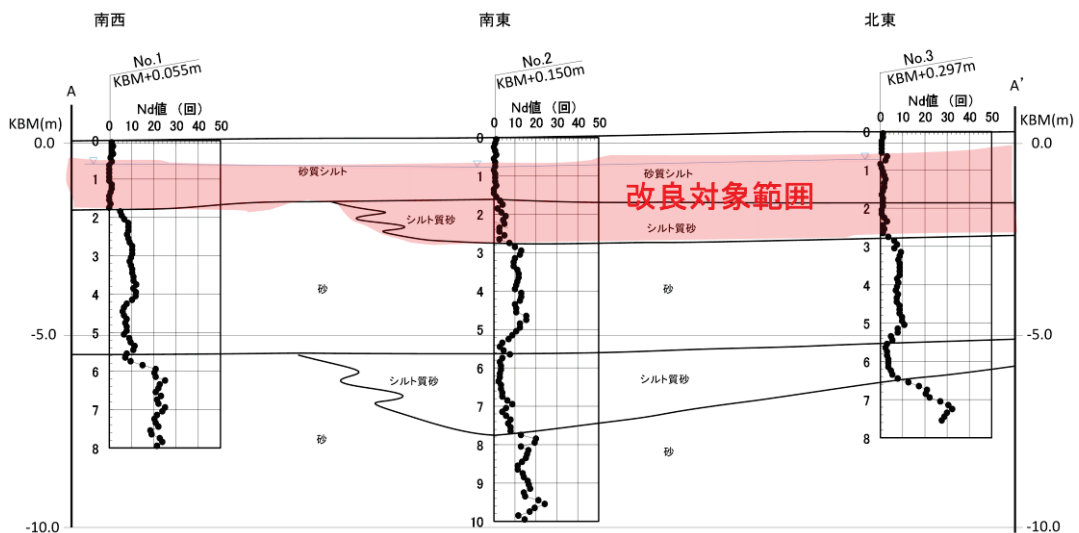


図 5.19 建物の西-南-東地質断面図と改良対象範囲

対象建物周辺は、新屋との渡り廊下や離れが付帯し、また納戸や玄関さらに縁石など簡単には動かすことのできない構築物があり、建物周辺での対策工は限定的なものとなる。このため、施工可能な範囲に最小打設間隔で、建物の東西ならびに南北に等価な対策を実施することとした。図 5.20 に、最小打設間隔における標準施工図を示す。また、図 5.20 には、改良範囲とドレーンの計画打設本数と実施数量を示す。

図 5.21 中の、「直 D」は鉛直打設を、「斜 D」は斜め 45 度打設を示す。これらのドレーンは建物壁面と並行に 30cm 間隔で 2 列を配置し、鉛直ドレーンは 60cm 間隔を千鳥で施工し、斜めドレーンは建物側の垂直ドレーンの間 6cm 間隔に配置する。

図 5.22 には、ドレーンの敷設までの作業手順を実際の施工状況とともに示す。まず、ドレーンの設置に先立ち、回転圧入装置の反力となる架台設置のために、ドレーン設置場所を 0.2~0.3m ほど掘削した。この際に、基礎の深さや地下埋設物の確認を行って、安全にドレーンが施工できることを確認した。新しく改良した回転貫入装置は、スクリュウアンカーにねじ止めされた H 型鋼 200×200 をレールにして前後に移動が可能で、首振りによる 2 列鉛直貫入施工、ベースのピンを回転軸にした最大 45°の傾斜貫入施工が可能である。回転ならびに圧入は、それぞれ電気モーター 1.5 kw を減速機により制御(回転 1/120, 圧入 1/10)し、N 値 10 程度の砂層に貫入できるものとしている。このプロト機は、パワーアップに伴い重量化しており、組立や方向変換にはクレーンによる補助が必要である。このため、軒下での作業が可能ないように架台上で使用可能な簡易クレーンを製作した。

この簡易クレーンは、プロト機によるケーシング回転貫入作業とクレーンによるケーシング引抜きならびにドレーン設置作業を分業して実施することで作業効率を改善することも可能である。

当初、ドレーン 1 本当たり(平均長さ 3 m)の設置時間を 15~20 分と想定し、移設を含めて日当たり 20 本の打設を目標とした。計画では、鉛直ドレーン 90 本、斜めドレーン 34 本の合計 124 本の施工期間を 6 日間とした。

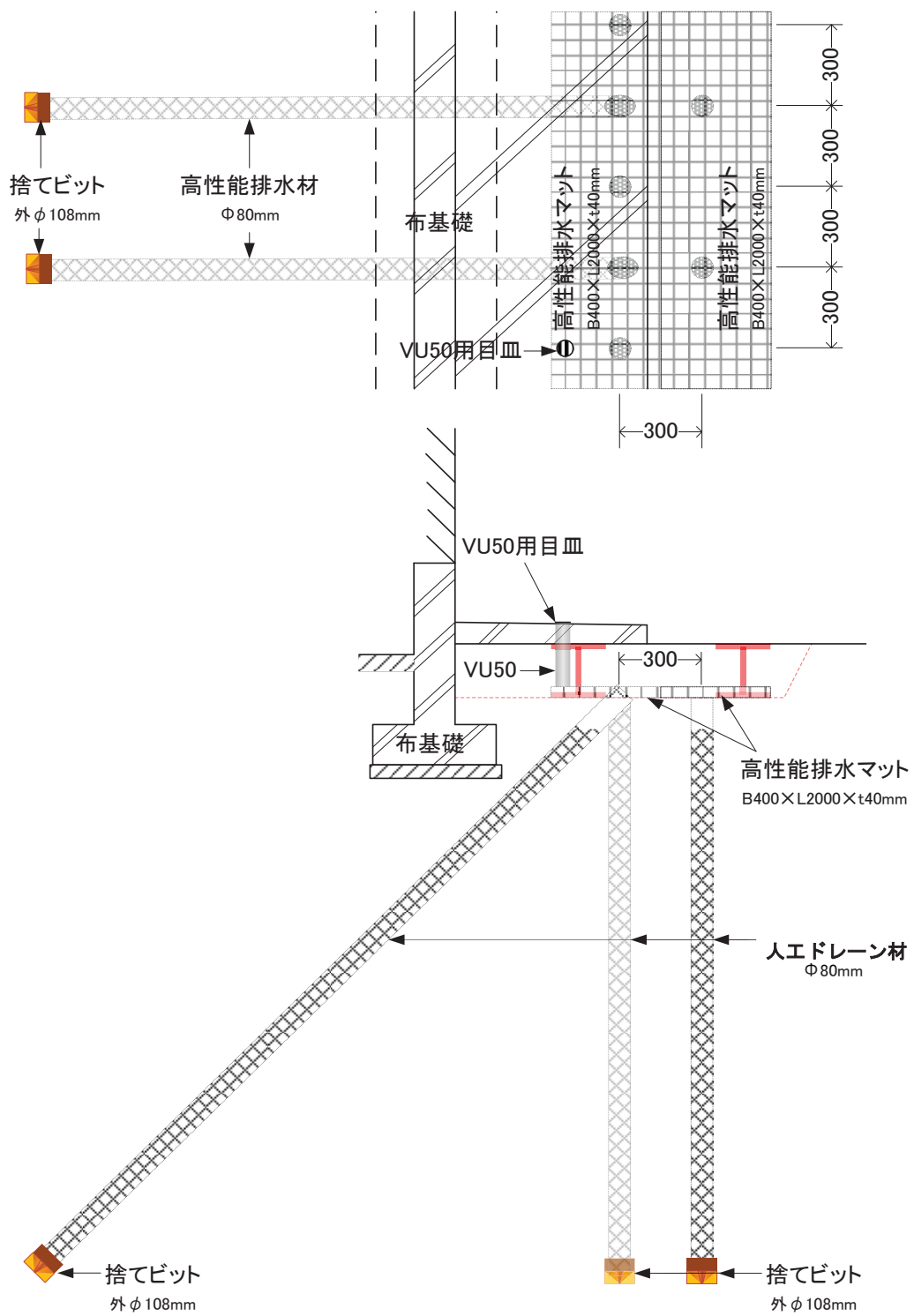


図 5.20 あま市住宅液状化対策工標準施工図

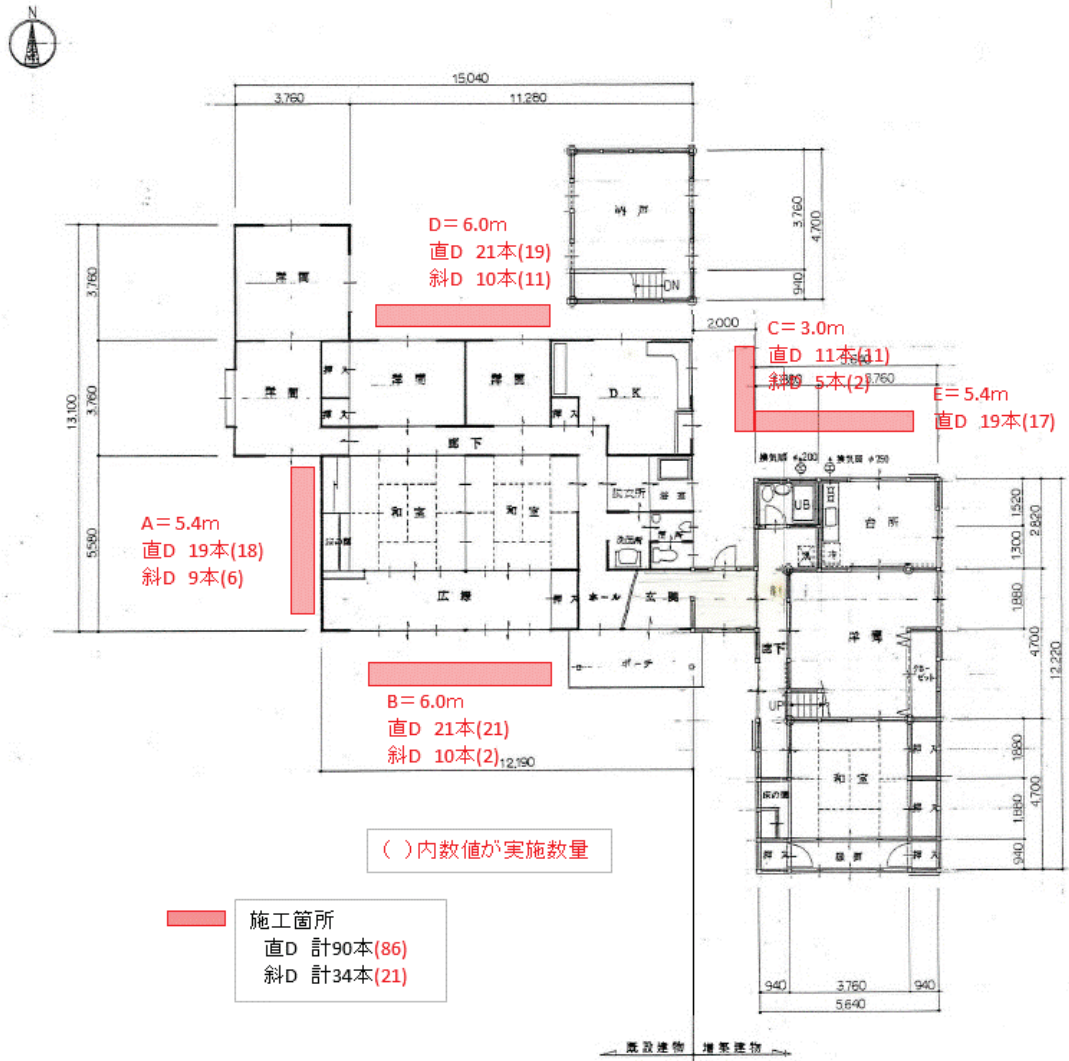


図 5.21 あま市住宅改良範囲とドレーンの計画打設本数と実施数量



図 5.21 ドレーン敷設の作業手順と施工状況



### 5.6.1 試験施工概要と問題点

試験施工は、表 5.11 に示すように、途中台風の影響もある中、実施工日数は 9 日間で延べ 53.5 時間を要し、日当たりドレーン施工本数は 12 本と目標の 20 本を大きく下回った。また、基礎直下に杭基礎が施工されていて斜めドレーンの貫入が不可能な箇所が見つかるなど、実際の施工本数は鉛直ドレーン 86 本、斜めドレーン 21 本の合計 107 本と減少した。

ドレーンの設置に時間を要した主な原因は、ドレーン貫入用の鋼管の強度不足により、継ぎ手ネジのかじりやヘッドとの取付け部の膨らみが生じたことにある。このため、鋼管の途中交換や損傷を回避するために貫入速度を慎重にコントロールするなど、回転圧入装置の性能を十分に生かした施工が困難であった。また、建物外周を連続的に施工することが不可能であったことから、狭い場所で回転圧入装置の分解組立作業を繰り返すことになり、機械の移設に手間を要した。さらに、打設区間の両端が限られている場合には、回転圧入装置を反転してそれぞれの端部を施工する必要があり、その都度吊上げ用の専用装置を再設置して行ったことも、施工期間の延伸の原因である。これらの問題を解決するためには、以下の改良を行う必要があると考えられる。

- ・ケーシングパイプの肉厚を厚くする
- ・構造設計の最適化による機械の軽量化もしくは油圧モーター駆動へ切替える
- ・貫入・引抜きの効率化のためにチェーンドライブを採用する
- ・反力架台を軽量化する

表 5.11 施工実績概要

施工日	施工エリア 直 D・斜 D 別本数	施工長	施工時間	備考
平成 29 年度 8 月 1 日	掘削・基礎調査		終日	準備工
8 月 2 日	A エリア：直 D 6 本 A エリア：斜 D 1 本	14.5m	4.0 時間	機械設置
8 月 3 日	A エリア：直 D 7 本 A エリア：斜 D 3 本	20.0m	6.5 時間	機械反転
8 月 4 日	A エリア：直 D 5 本 A エリア：斜 D 2 本 B エリア：直 D 3 本	20.0m	6.5 時間	機械移設
8 月 5 日	B エリア：直 D 13 本 B エリア：斜 D 2 本	37.0m	6.5 時間	機械移設
8 月 6 日				休工
8 月 7 日				休工
8 月 8 日	B エリア：直 D 5 本 C エリア：直 D 7 本	27.0m	7.0 時間	機械移設
8 月 9 日	C エリア：直 D 12 本 C エリア：斜 D 5 本			
8 月 10 日	C エリア：斜 D 6 本 D エリア：直 D 5 本	37.0m	6.5 時間	機械移設
8 月 11 日	D エリア：直 D 6 本 D エリア：斜 D 2 本 E エリア：直 D 6 本	38.0m	6.0 時間	機械移設
8 月 12 日	E エリア：直 D 11 本	30.0m	4.0 時間	機械撤去

ドレーンの設置終了後、架台ならびにスクリューアンカーを撤去して、厚さ 5 cm ほどの敷砂により均し、高性能排水マット(厚さ 4 cm)を敷設した。次いで、その上に覆土を埋戻し、必要に応じてコンクリート(厚さ 10 cm)を打設して原型復旧した。また、高性能排水マット内の空気を地表に逃がすための排気口(直径 50 mm)を適宜設けた。施工完了後の様子を写真 5.13 に示す。



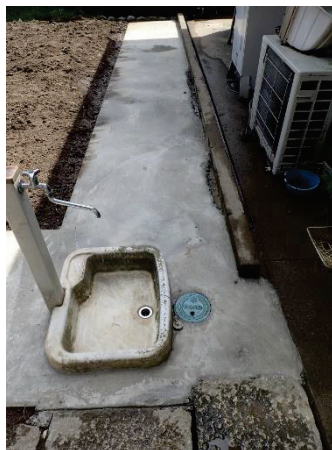
西側



南側



北側



東側(南北)



東側(東西)

写真 5.13 施工完了後の様子

### 5.6.2 問題点の改良

現場試験施工において明らかとなった課題を解決するため、作業性・機械操作の能率を上げるべく、小型・軽量タイプのプロト機を設計・製作した。主な改良ポイントは、以下のとおりである。

- ・専用ケーシングの製作(φ80SKD20鋼管の採用)
- ・回転用モーターシステムの小型化改良(油圧モーターの採用)
- ・圧入用モーターシステムの改良(油圧モーターによるチェーンドライブ方式の採用)
- ・本体構造の最適化及び軽量化改良
- ・台車システムの軽量化改良
- ・架台の小型軽量化改良
- ・スクリーアンカーの小径化改良
- ・その他附属機器 油圧ポンプ他

上記の改良計画に基づいて製作した改良プロト機を**写真 5.14**に示す。



**写真 5.14** 製作された改良プロト機

この改良機を、あま市の現場実証試験箇所において、**写真 5.15**に示すように、試運転を実施し、首ふり鉛直貫入、45度傾斜貫入において共に良好な運転が可能であることを確認した(八嶋ら、2018)。これにより、狭小な場所であっても建物に損傷を与えないで、その宅地の必要に応じた最低限の液状化対策を実現できる経済的な施工が可能となった。



操作状況

首ふり鉛直貫入

45度傾斜貫入

**写真 5.15** 改良プロト機の試運転状況

## 5.7 作業手順書と対策工設計要領

### 5.7.1 作業手順書

ここまでの研究成果に基づいてスマート液状化対策工法の作業手順書を作成した。手順書の目次を図 5.23 に示す。作業手順書を付録 3 に添付する。

作業手順書 目次
1.1 はじめに
1.2 既存の施工との違い
2.1 施工概要
2.2 ドレーンの設置
2.3 施工機械
2.4 施工イメージ
3.1 施工手順
3.2 施工機械の設置
①宅地周辺の埋設物の調査
②整地と架台設置
③小型回転圧入装置の搬入・組み立て
3.3 ドレーンの打設
①ケーシングとビットの取り付け
②回転圧入
③捨てビットの切り離し
④ドレーンの貫入
⑤ケーシングの引き抜き
⑥ドレーンの後処理
3.4 ドレーン設置後の処理
①排水マットの敷設
②空気抜き穴の設置とコンクリート被覆
4.1 施工実績と完了後の様子

図 5.23 スマート液状化対策工法作業手順書の目次

## 5.7.2 設計要領

開発された工法が実用化されるためには、地盤調査から最適な対策の提案までを効率的に行う必要がある。本研究開発においては、数値解析に入力するデータ(粒子の配列や材料パラメータ)作成に多くの時間を要することは効率的でない。そこで、地盤調査結果および構造計算書から得られる建物の重量や大きさを入力することで、自動的に数値解析の入力データを作成し、解析を実行することのできるインターフェースを作成した。なお、既往の設計と同様に「地盤の許容応力度算定」から「液状化判定」を同時に算定できるシステムとした。

インターフェースは実用化を鑑み Microsoft Excel を利用して作成することとした。Excel に入力された地盤調査結果および建物情報から、数値解析の入力データを作成するとともに、入力ミス削減のための可視化を行う。その後、自動的に解析が実施されるシステムを開発した。図 5.24 にシステムのイメージを示す。詳細は付録 4 に添付する。

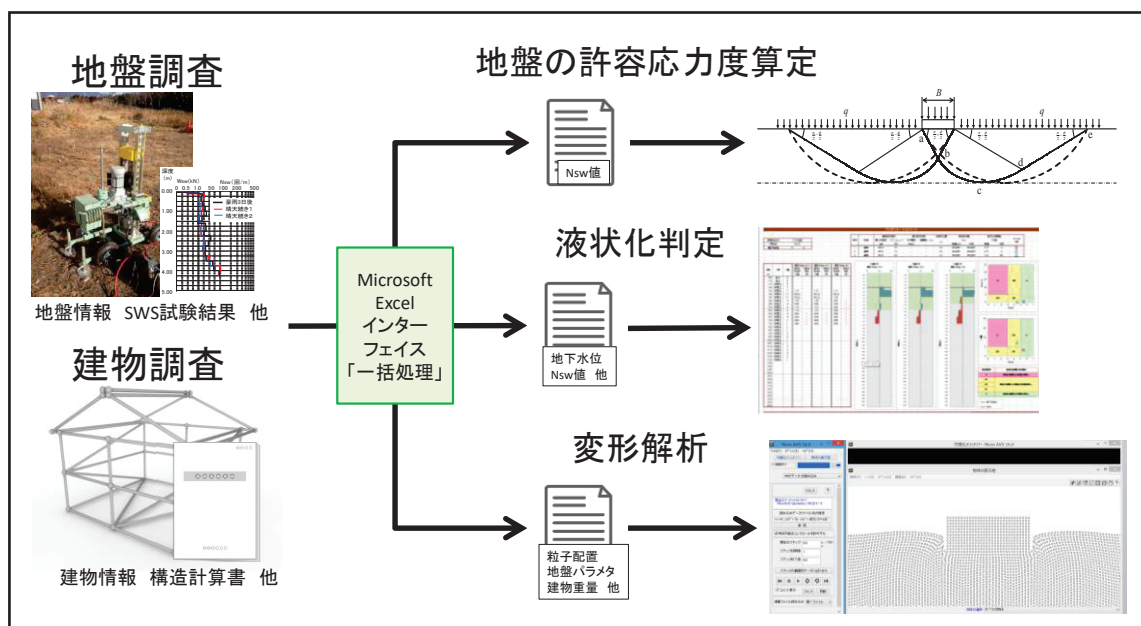


図 5.24 インターフェースによる効率的な設計システム

## 5.8 まとめ

本章では、現場への適用に向けた取り組みとして狭小なスペースで建物周辺ならびに基礎下に高性能排水材を回転圧入することが可能な低振動・低騒音型小型貫入装置を開発した。

はじめに、試作機を製作し回転圧入による貫入確認を行った。これにより、ドレーンの設置手順と貫入装置の主な構造ならびに機能を提案した。

この提案に基づいて、貫入装置を改良して開発した。また、回転圧入に適した先端ビットを試作し、人工ドレーン材を最も効率的に回転圧入できる形状について実験検討を行った。さらに、開発した装置ならびに先端ビットを用いて人工ドレーン材の過剰間隙水圧消散効果を検証するための現場実証実験を実施し、その効果を確認した。

続いて、開発した施工機械を用いて現場試験施工を実施し、その施工性能を実施工において確認した。この現場試験施工において確認された新たな課題についても、施工装置の改良を実施して、開発課題を解決した。

最後に、現場適用に向けた作業手順書の作成および対策工設計要領を作成し、社会実装を図った。

以下に、本章で得られた結論を各項目に分けて示す。

### [試作機による貫入確認実験]

- ・ 目標深度 4m まで、0.67m/min の速度で回転圧入による貫入ができた。
- ・ 試作機の電気モーター(0.75kw)のパワー不足および反力不足による機械の持ち上がりにより、目標貫入速度 1.0m/min を達成することができなかった。
- ・ 架台と機械のとの接続のクリアランスにより、貫入角度に最大 1.7° の傾斜が生じた。これを防ぐためには、反力を確実にすることおよび架台と機械を完全に固定する必要がある。
- ・ 捨てビットへの鋼棒のねじ込みならびに捨てビットのケーシングとの切離しは良好であった。
- ・ ケーシングの引抜き時にドレーンの共上がりは確認されなかった。
- ・ 施工に伴い発生する騒音振動は振動規制法ならびに騒音規制法に示される基準値(騒音 85dB 以下、同振動 75dB 以下)を大きく下回ることが確認できた。

### [人工ドレーン材の排水効果の確認]

- ・ 人工ドレーン材を用いた改良域は未改良域と比べ、過剰間隙水圧を抑制し、素早く消散させることが確認できた。
- ・ 間隙水圧の蓄積の継続による宅地の沈下を抑制させる効果があると考えられる。
- ・ 本研究では、全応力の変化に伴い発生した初期状態からの水圧変動を過剰間隙水圧として取り扱ったが、地震時に発生する過剰間隙水圧でも同様の効果が期待できるものと推察される。

### [現場試験施工]

- ・ 小型施工機械による人工ドレーンの鉛直および、45度傾斜貫入が可能であった。
- ・ 改良機において、液状化対策を実現できる経済的な施工が可能であることが確認できた。

- ・実施工日数は9日間で延べ53.5時間を要し、日当たりドレーン施工本数は12本と目標の20本を大きく下回った。
- ・基礎直下に杭基礎が施工されていて斜めドレーンの貫入が不可能な個所が見つかるなど、実際の施工本数は鉛直ドレーン86本、斜めドレーン21本の合計107本と減少した。
- ・ドレーン貫入用の鋼管の強度不足により、鋼管の交換や損傷を回避するため貫入速度を低下させたため打設効率が著しく低下した。
- ・建物外周を連続的に施工することが不可能であったことから、狭い場所で回転圧入装置の分解組立作業を繰り返すことになり、機械の移設に手間を要した。
- ・更なる改良に向けた課題点の整理ができた。

## 参考文献

- [5.1] 国土交通省国土技術政策総合研究所(2012):宅地の液状化被害可能性判定シート, URL: <http://www.nilim.go.jp/lab/jbg/takuti/takuti.html>.(2016年5月10日アクセス).
- [5.2]松本哲, 赤井智幸, 金坂聖干(1995): 立体網状体構造を有する排水マットの面内方向透水性, 第38回地盤工学研究発表会概要集, No.7, pp.13-14.
- [5.3]村田芳信, 八嶋厚, 苅谷敬三, 岩田和之, 吉原孝保, 余川弘至(2018): 既設宅地の液状化対策における高性能排水材を用いた間隙水圧消散工法の実験施工, 第53回地盤工学研究発表会概要集, No.0950, pp.1897-1898.
- [5.4]八嶋厚, 苅谷敬三, 村田芳信, 余川弘至, 吉原孝保, 渡辺将成, 伊藤孝芳(2018): 高性能排水材を用いた既設宅地の液状化対策工法の開発, 第73回土木学会年次学術講演会概要集, No.VI-962, p1923-1924.
- [5.5]八嶋厚, 村田芳信, 苅谷敬三, 余川弘至, 吉原孝保(2018): 既設宅地の液状化対策における高性能排水材を用いた間隙水圧消散工法の実証試験, 第53回地盤工学研究発表会概要集, No.0949, pp.1895-1896.
- [5.6]八嶋厚, 村田芳信, 吉原孝保(2018):既設宅地のスマート液状化対策工法の開発, 建設機械施工, 826号.
- [5.7]渡邊将成, 須田楓可, 村田芳信, 八嶋厚, 吉原孝保, 余川弘至, 津田裕也(2017), 吉川達也: 地盤中に排水材を打設するための低振動低騒音型加型回転圧入装置の開発, 第52回地盤工学研究発表会概要集, No.847, pp.1691-1692.





## 第 6 章 結論

これまで大規模な地震が発生するたびに、地盤の液状化による戸建て住宅など小規模建築物に傾斜や沈下などの甚大な被害が広範囲にわたって発生した。公共施設(道路など)と宅地の一体的な対策については、様々な対策工法が開発されているが、戸建て住宅への適用は明確な設計法・工法が示されていないのが現状である。そこで本研究では、人工ドレーン材を使用して、建築基準法における構造計算の義務付けがない木造 2 階建て、延べ面積が 500m<sup>2</sup> 以下の建築物(4 号建物)を液状化被害から守るべく、その家屋地盤を対象とし、隣接住宅による隣地間が狭小な場合でも施工可能な低振動、低騒音でなおかつ低コストで施工できる工法を開発し、経済的、効率的な減災工法の確立と性能設計概念に基づく設計法を提示した。

本論文の各章で述べた内容を以下にまとめる。

### 第 1 章 研究の背景

本研究の背景と位置付けについて述べた。液状化発生メカニズムを概観した後、これまでの地震時液状化によって被災した建物の被害例を示した。また、既往の液状化対策工法についてまとめるとともに、地震後における家屋修復費用の関係についても言及した。

### 第 2 章 既往の研究

従来の建築分野における地盤設計法の課題についてとりまとめた。許容応力度設計法、液状化判定法を提示し、簡易液状化変形解析法を提示し、その特徴について示した。

その特徴は以下の通りである。

- ・ SPH 法を利用している点。
- ・ 比較的少ないパラメーターで住宅沈下量、傾斜量を予測できる点。
- ・ 実務者であれば、誰でも簡単に利用できる点。

### 第 3 章 立体網状スパイラル構造体の液状化対策効果の検証

人工ドレーン材の液状化対策効果を明らかにするために、模型振動台実験を実施して、液状化対策効果を検証した。その結果、無対策の状態に比べて、住宅の沈下量を抑制することを確認した。また、住宅の沈下を抑えるためには、住宅直下もしくは極周辺にドレーン材を設置することが重要であることも判明した。

### 第 4 章 変形解析手法の高度化と検証

液状化時の地盤の沈下量・傾斜量を予測するために、模型実験で得られた計測データを対象に、2 次元有効応力解析法(LIQCA2D)と 2 次元静的液状化解析法(SPH 法)を用いた解析を実施した。比較検討した結果、住宅周辺の地盤変形に着目すると、SPH 法では住宅近傍地盤のみが大きく変形し、住宅がめり込み沈下している様子を表現できることがわかった。

空間離散化の方法の違いにより、SPH 法では住宅近傍で地表面が大きく盛り上がり、LIQCA2D 法では住宅近傍から側方の境界に向けて緩やかに地表面が盛り上がる結果となった。SPH 法では、沈下量を実際より大きく算定する可能性があるが、液状化後の構造物の沈下によって生じる地表面の変形挙動(めり込み沈下)を表現できることが確認できた。

また、浦和市の液状化被害の再現解析を試みた結果、以下の結論が得られた。

・簡易地盤調査の結果を使った簡易数値解析による再現解析では、住宅の不同沈下の沈下傾向を再現することはできたが、実際の沈下量を再現することはできなかった。

・住宅の不同沈下を予測するためには、SWS 試験などの地盤調査を多点計測するとともに、その周辺地形条件などを十分に観察・評価する必要があることを示した。

・液状化による住宅被害の大小は、非液状化層が大きく影響を与えているものと考えられ、その厚さだけでなく、剛性についても十分に配慮する必要があることを示した。

## 第5章 現場への適用に向けて

小規模建物(4号建物)を対象とした液状化対策工法として、住宅家屋の隣地境界という狭隘な場所において、振動問題・騒音問題等制約のある中でも、施工が可能な低振動・低騒音型小型貫入装置を開発した。試作機から1号機・2号機へと貫入装置の改良を重ねることによって、振動軽減については振動レベル75dB以下、騒音軽減については騒音レベル85dB以下までそれぞれ軽減でき、工法として適応できることが確認された。

地表面付近の液状化に大きく影響を与える範囲では、人工ドレーン材によって排水が促進されていることが確認された。

試験施工に基づいて、機械を改良した。改良ポイントは以下の通りである。

- ・専用ケーシングの製作(φ80SKD20鋼管の採用)
- ・回転用モーターシステムの小型化改良(油圧モーターの採用)
- ・圧入用モーターシステムの改良(油圧モーターによるチェーンドライブ方式の採用)
- ・本体構造の最適化及び軽量化改良
- ・台車システムの軽量化改良
- ・架台の小型軽量化改良
- ・スクリューアンカーの小径化改良
- ・その他付属機器 油圧ポンプ他

改良機において現場実証試験をした結果、液状化対策を実現できる経済的な施工が可能であることが確認できた。

数ある液状化対策工法の中で、地盤中の間隙水の排水促進を目指す工法としては「グラベルドレーン」工法が多用されている。しかしながら、本論文でも繰り返し述べたように、従来の「グラベルドレーン」工法を既設の4号建物が立地する地盤に適用することは難しい。そこで本研究では、品質確保された工場製品である立体網状スパイラル構造体を液状化対策の人工ドレーン材として用いる試みに挑戦した。この試みは、プロト機の完成という一定の成果に到達した。ここで、今一度、立体網状スパイラル構造を有する人工ドレーン材の特徴を列記しておきたい。

- ① 軽量で剛性があり、形状が安定していて、品質のばらつきが無い
- ② 前面開孔型の線状網状の構造によって集水機能が高められている
- ③ 透水に有利な筒状空洞部を有しており、立体網状でありながら、通水断面が大きい
- ④ ランダムな筒状空洞部を有する立体網状体によって、耐圧強度が高められており、施工後の体積変化による構造物や圧密への影響が小さい

- ⑤ エコマークを取得しており，環境に配慮している
- ⑥ NETIS 登録，ベターリビングによる技術評定もうけている

## 課題と展望

本研究では，立体網状スパイラル構造排水材を用いた戸建て既設住宅のスマート液状化対策工法の現場に適用できるための「対策費(修復費)」，「地盤調査」，「設計」，「施工」，を網羅的にまとめるとともに，液状化対策工法の普及に向けた検討を行った．以下に本研究の課題と今後の展望を示す．

### [施工能力と対策費用について]

一般的な住宅を対象に概算金額により対策費を検証したものであり，個々の住宅すべてに適用は難しく，地盤状況や住宅構造等を加味したさらなる検討が必要となる．

狭小な土地においても施工可能な施工機械を開発し，振動レベル 75dB 以下，騒音レベル 85dB を満足させることができたが，施工能力に課題が残った．対策費用を大幅に低減するためには，施工日数をできる限り削減することが望まれ，本論文で示したいくつかの課題を今後解決していかねばならない．

### [間隙水圧消散工法の維持管理について]

人工ドレーン材を用いた間隙水圧消散工法は，地震時に発生する過剰間隙水圧をドレーン材に排水することで抑制するものである．このため，ドレーン材ならびにドレーン材を覆うフィルターに目詰まりを生じないこと，またドレーン材に排水された水が速やかに地表に解放されるように排水マットや通気口の疎通を図っておくことが重要となる．しかし，地中に敷設されたドレーン材の機能を点検することはほとんどなく，その効果を確認することも難しい．

そこで，今回敷設したドレーン材が長期間その性能を維持できるかどうか点検確認することが重要である．また，地震発生後の余震や本震に対して再びその排水効果が発揮できるかどうかについても大変重要な課題であり，その検証確認の必要がある．

さらに，ドレーン材ならびにフィルターが目詰りや汚れを取り除くことが可能かどうかについても，検討が必要である．今回敷設したドレーン材には中央に直径 20mm ほどの空洞があり，この空洞を介して設置のための鋼棒がドレーン材先端から地表までを貫いている．これを利用してフラッシングなどのメンテナンスも可能と考えられる．今後，試験施工現場の地権者の理解と協力を得ながら，長期的な施工現場のモニタリングについても，調査研究を継続したい．

### [模型振動台実験について]

間隙流体にメトローズ水溶液を用いるなど相似則をできる限り満足できるように配慮してきたが，重力場の小型模型実験では，得られる成果は定性的なものにとどまる．今後遠心力場模型振動台実験等を用いて定量的な評価ができるように取り組まなければならない．

### **[数値解析について]**

設計に数値解析を取り入れることができ、簡易的に液状化の被害を予測することができたものの、SPH法を用いた場合には解析に多くの時間を要し、3次元解析等への発展に関しては、まだ実務での利用について検討の余地が大いに残る。今後最新の知見等を取り入れ、解析精度の向上や計算速度の向上を目指さなければならない。

# 付録1 耐圧強度試験 試験成績書



総数 3 枚 1 頁

受付日 2017年3月28日

No. NJ-280939-20

## 試験成績書

株式会社 吉原化工 殿

試験品内容：[種 別] もやいドレーンパイプ  
P-73 [Φ 70(外径)]・・・3個

試験項目：耐圧強度試験

試験日：2017年3月29日

試験結果：次頁以降のとおり

(注) :1 上記試験品は、試験申込者により試験実施場所へ持ち込まれたものである。  
:2 試験品内容等については、試験申込者提出の試験申込書に基づき表記したものである。

試験の結果は、上記のとおりであることを報告します。

2017年4月3日

愛知県北名古屋市中村沖浦39番地  
一般財団法人 日本品質保証機構

中部試験センター

所 長 田 中 好



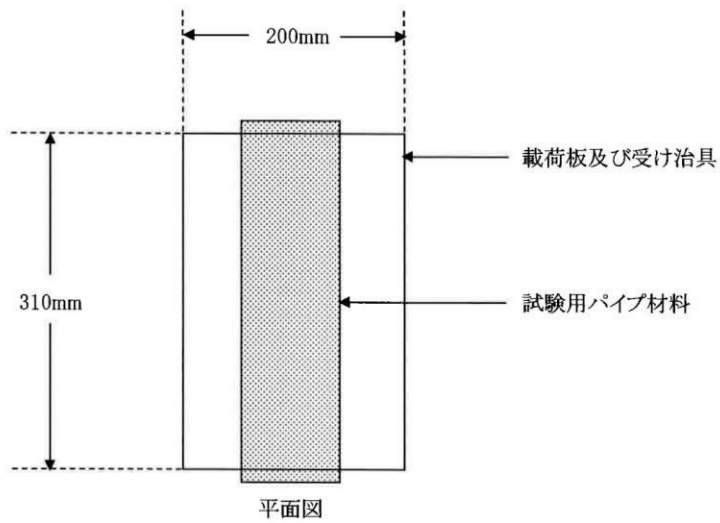
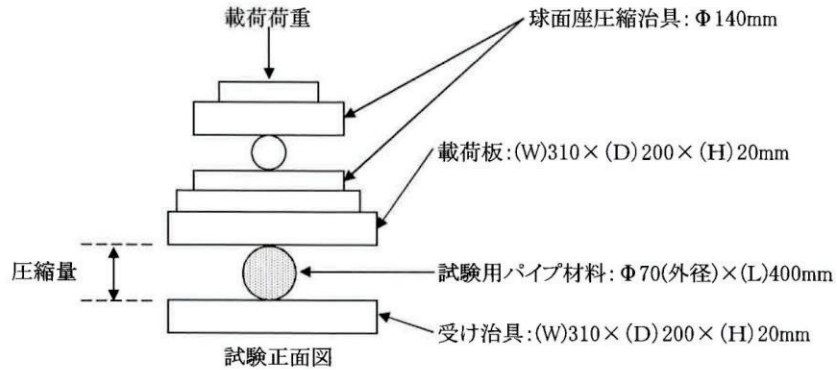
この試験成績書の転載、一部分の複製をするときは当機構の承認を受けて下さい。  
尚、成績書には改ざん防止策として穴あけ措置を施しています。

一般財団法人 日本品質保証機構

## 試験条件

試験機：島津オートグラフAG-250kND (JIS B 7721:2009 1等級)

試験方法：中日本高速道路 株式会社 JHS 711-1997「裏面排水材耐圧強度試験方法」  
2.パイプ系材料に準ずる。  
最大載荷荷重は、外径に対する圧縮率20%までとし試験に使用した圧縮治具及び  
載荷板の取付状態及び寸法は下記図のとおり。



試験結果

試料の大きさ : もやいドレーンパイプ P-73  
試料のNo. A・B・C Φ70 (外径)×400 (長さ)mm

圧縮率 (%)	圧縮量 (mm)	載荷荷重 (kN)				耐圧強度 (kN/m)
		試 料				
		A	B	C	平均	
2	1.4	0.2	0.3	0.2	0.2	1
4	2.8	0.5	0.6	0.4	0.5	2
6	4.2	0.9	1.0	0.7	0.9	3
8	5.6	1.3	1.4	1.1	1.3	4
10	7.0	1.6	1.7	1.4	1.6	5
12	8.4	1.9	1.9	1.7	1.8	6
14	9.8	2.0	2.1	1.9	2.0	6
16	11.2	2.1	2.2	2.1	2.1	7
18	12.6	2.2	2.3	2.3	2.3	7
20	14.0	2.3	2.4	2.6	2.4	8

注1:最小載荷荷重の読みは、100Nとし圧縮量は試験機のスローク量(mm)とした。

注2:耐圧強度の計算結果は、整数に丸めた。

以 上





## 付録2 溶出試験 試験報告書

【溶出試験結果②】



No. T090-02472-001  
(頁/全頁数: 2/2)

### 試験報告書

平成21年 7月 2日

株式会社 吉原化工 殿



財団法人 化学技術戦略推進機構  
高分子試験・評価センター  
TEL 03-3862-4841 FAX 03-3866-8340

試 料: もやいドレーン

試験方法: 平成15年3月6日環境省告示第18号  
(土壤汚染対策法施行規則に基づく土壤溶出量調査に係る測定方法)

計量方法

ポリ塩素化ビフェニル: 昭和46年環境庁告示第59号 付表3  
ベンゼン: JIS K 0125 5.2

試験年月日: 平成21年 6月30日

貴社から提出された試験体の試験結果は、下記のとおりです。

#### 試験項目

#### 試験結果

ポリ塩素化ビフェニル	0.0005mg/L以下
ベンゼン	0.001mg/L以下

— 以下余白 —

本試験報告書を他に掲載するときは、当センターの承認を受けて下さい。

責任者	担当者	担当者



## 付録 3

### 小型回転圧入装置 作業手順書





## 1.1 はじめに

本施工は、狭隘な土地に小型回転圧入装置を用いて人工ドレーン(高性能配水材)の貫入を行う。これにより、地震発生に伴う宅地への液状化被害を抑える事を目的として実施する。1.2にて既存の施工との比較を示した後、本施工の概要と施工手順及び注意点を示す。

## 1.2 既存の施工との違い

スマート液状化対策工法は、人工ドレーンを用いた液状化対策工法である。本工法は、狭隘な敷地での施工を考え開発された。従来のドレーン工法の多くは、埋め立て地など広い敷地での施工を対象に行われてきた。しかし、東日本大震災において宅地への液状化被害が多く発生した。これに伴い、宅地における液状化対策の必要性が生じ、本工法は開発された。以下の表 A.3.1 では、狭隘な敷地にて施工を行うことを目的に開発したスマート液状化対策工法と東亜建設工業のスパイラルドレーン工法の比較を示す。

表 A.3.1 スマート液状化対策工法とスパイラルドレーン工法の比較

工法	スマート液状化対策工法	スパイラルドレーン工法
施工機械	小型回転圧入装置 	自走式スパイラルドレーン小型打設機 (東亜建設工業, 2018) 
サイズ	幅 800mm 奥行 1,329mm 高さ 2,214mm	幅 2,200mm 奥行 3,872.4mm 高さ 5,650mm
重量	装置は分解可能で、約 4kN	約 720kN
騒音・振動	騒音 6dB (機械から 5m) 振動 3dB (機械から 5m)	騒音 85 dB (機械から 5m) 振動 75 dB (機械から 5m)
ケーシング	ねじ継ぎ式	テレスコ式
施工深度	5m	10m
斜打ち	45度	30度
打設速度	1.0m/min	3.0m/min

## 2.1 施工概要

本施工では宅地周辺にドレーンの貫入を行う。ドレーンの貫入については、本施工のために開発された小型回転圧入装置を用いる。また、宅地周辺に配置するドレーンの設置間隔は、装置の最小施工間隔にて行う。これを標準施工とし以下に詳細を示す。

## 2.2 ドレーンの配置

本施工におけるドレーンの配置を、**図 A. 3. 1** の施工標準平面図に示す。図からわかるように鉛直ドレーンを 30cm 間隔で 2 列に 60cm 間隔で千鳥に配置する。また、装置を 45 度又は 60 度傾け斜めドレーンを 60cm 間隔で 1 列配置する。**図 A. 3. 2** には施工標準断面図を示す。

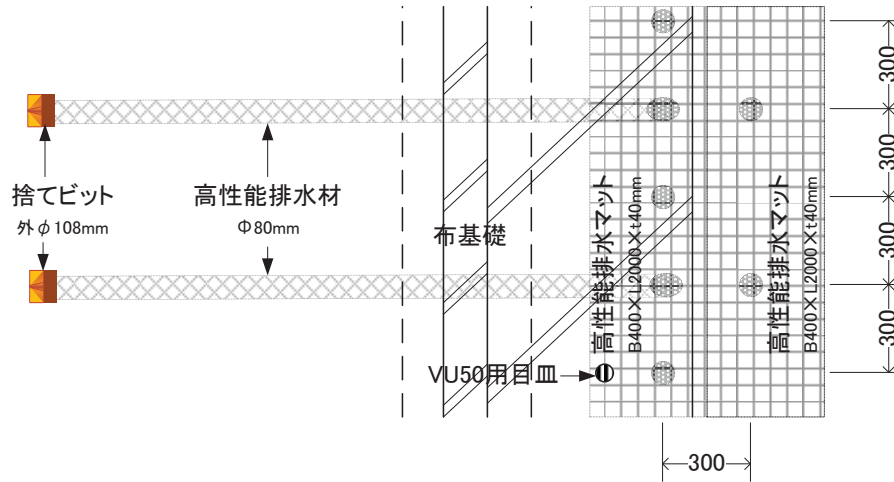


図 A. 3. 1 施工標準平面図

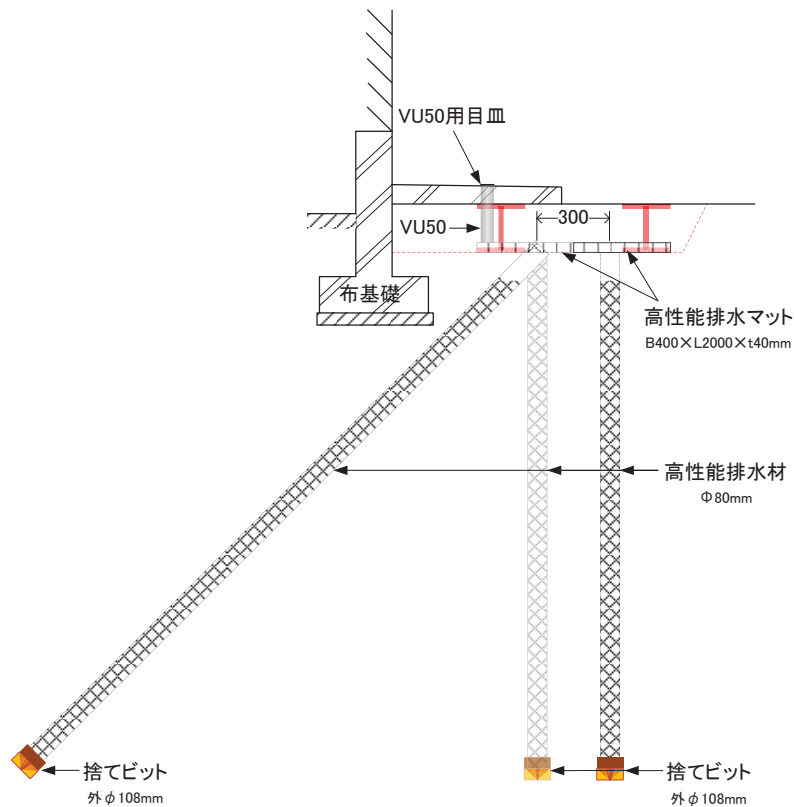


図 A. 3. 2 施工標準断面図

## 2.3 施工機械

本施工を行うために開発した小型回転圧入装置の図面を施工機械図として図 A.3.3 に示す。本機械は、高さ 2214mm、横幅 80mm、奥行き 1,329mm からなっている。45度の斜め打ちを行う際には装置の横幅が 2m となる。施工にあたっては、狭隘なスペースにて斜打ちを行うことで軒下の施工が可能となるように設計されている。また、N値 10 程度の地盤に対してドレーンの貫入が可能となる施工能力を有している。

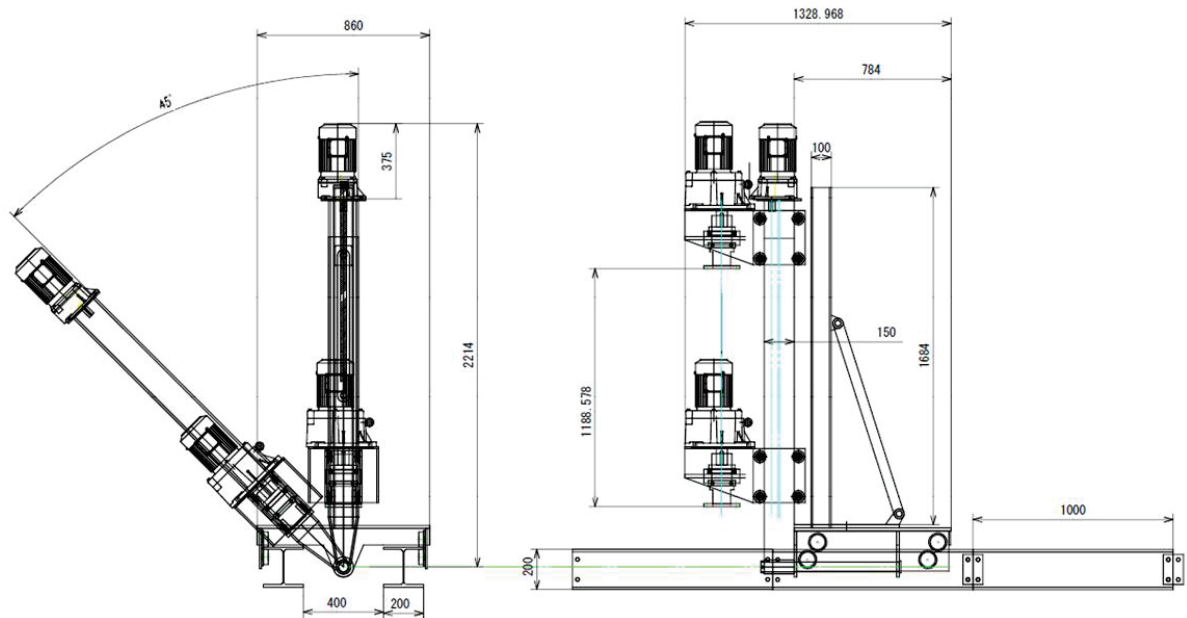


図 A.3.3 施工機械図

## 2.4 施工イメージ

開発した装置による施工模式図を図 A.3.4 に、施工に用いた小型回転圧入装置を写真 A.3.1 に各装置名と器具の仕様について表 A.3.2 に示す。

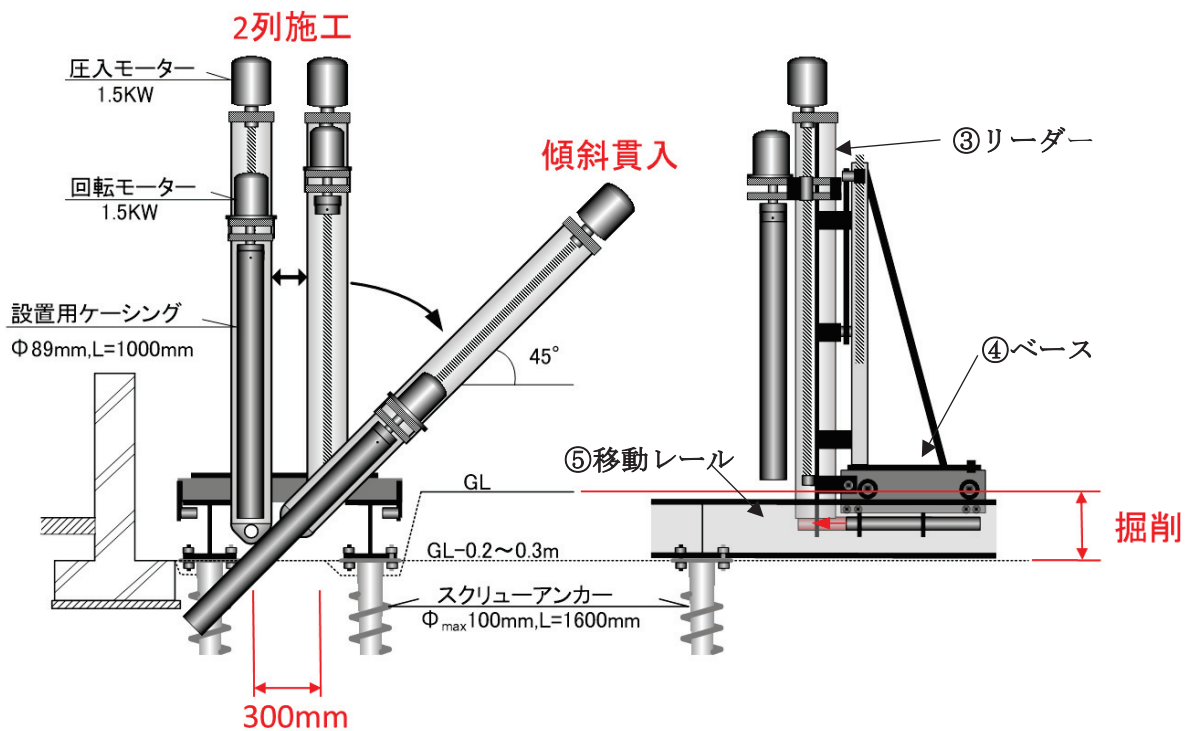


図 A.3.4 施工模式図

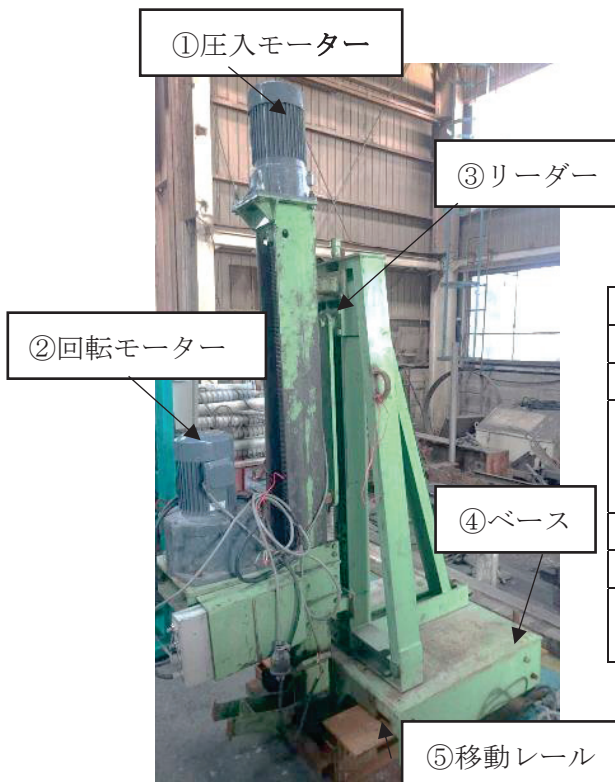


写真 A.3.1 小型回転圧入装置

表 A.3.2 装置名と器具の仕様

装置	使用器具および仕様
① 圧入モーター	三相 1.5K w モーター減速機 1/10
② 回転モーター	三相 1.5K w モーター減速機 1/120
③ リーダー	H 形 鋼 150×150mm 水平移動 300mm(ヒンジ式) 回転 45度(ヒンジ式)
④ ベース	鋼板 800×784×16mm
⑤ 移動レール	H型鋼 200×200mm 仮設材
⑥ スクリュアンカー	グランドスクリュアンカー 径 65mm, L=1,000or1,600mm

### 3.1 施工手順

スマート液状化対策工法の施工手順を図 A.3.5 に示す。この手順に添って実施工の様子を交え施工方法、注意点について説明する。

#### 1. 施工機械の設置

- ① 宅地周辺の埋設物の調査
- ② 整地と架台設置
- ③ 小型回転圧入装置の搬入・組み立て



宅地周辺の埋設物の調査



整地と架台設置



装置の搬入・組み立て

#### 2. ドレーンの打設

- ① ケーシングとビットの取り付け
- ② 回転圧入
- ③ 捨てビットの切り離し
- ④ ドレーンの貫入
- ⑤ ケーシングの引き抜き
- ⑥⑦ ドレーンの後処理



鉛直ドレーン打設



斜めドレーン打設(45度)

#### 3. ドレーン設置後の処理

- ① 排水マットの敷設
- ② 空気抜き穴の設置とコンクリート被覆



排水マットの敷設



空気抜き穴の設置とコンクリート被覆

図 A.3.5 スマート液状化工法の施工手順



## 3.2 施工機械の設置

### ① 宅地周辺の埋設物の調査

ドレーンを貫入する際に地下埋設物があると、ビットが埋設物とぶつかり装置の破損や、埋設物を破壊する恐れがある。そこで、事前に施工箇所の状況確認を行う。埋設物の確認については建物の基礎部分や水道管、ガス管などの地下埋設物の位置確認を行う。これにより、ドレーンを打ち込む際に宅地からどれだけ装置を離せば良いか、液状化防止効果を上げるための斜め打ちが可能かを予め検討することが出来る。写真 A.3.2 に基礎の確認、写真 A.3.3 に埋設管の確認状況を示す。



写真 A.3.2 基礎の確認



写真 A.3.3 埋設管の確認

## ② 整地と架台設置

はじめに、装置を水平に設置するために施工箇所の整地を行う。次に、小型回転圧入装置の移動を容易にさせるための架台を設置する。整地では、ドレーンの斜打ちを行う際に宅地の基礎部分と装置が接触しない深さまで地面を掘り、整地を行うよう注意する。架台設置では、地面にスクリュウアンカーを打設し、施工機械の反力を得る。また、その上に H 型鋼を設置し、装置の移動を容易にさせる。図 A. 3. 6 に埋設物を考慮した整地のイメージ図を、図 A. 3. 7 に架台設置時のイメージ図を示す。また、写真 A. 3. 4 に埋設物を考慮した整地状況を、写真 A. 3. 5 に架台設置状況を示す。

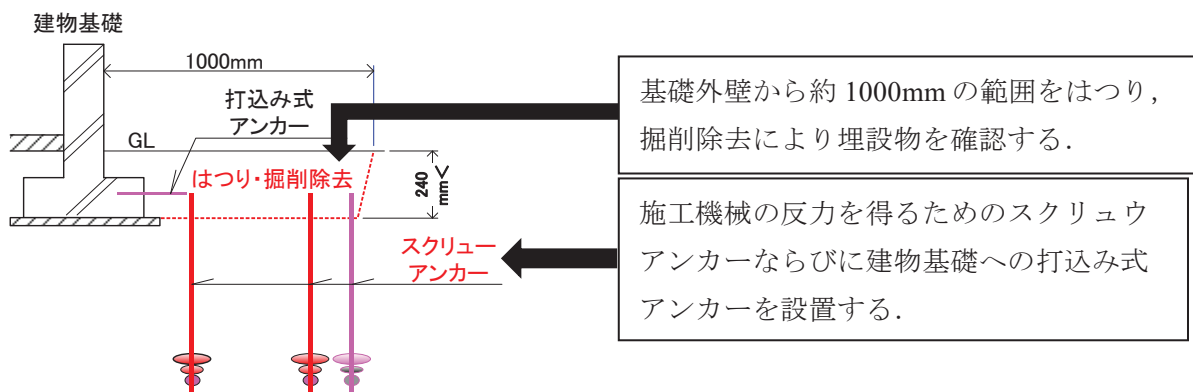


図 A. 3. 6 埋設物を考慮した整地のイメージ図

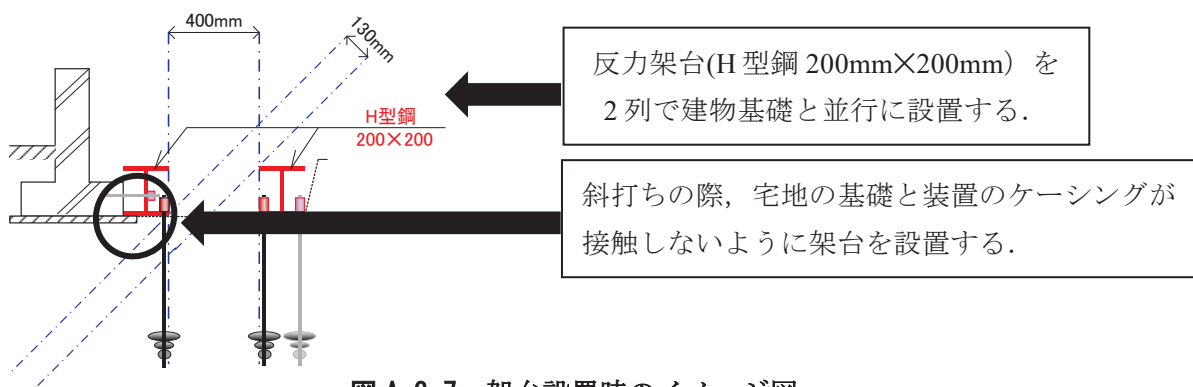


図 A. 3. 7 架台設置時のイメージ図

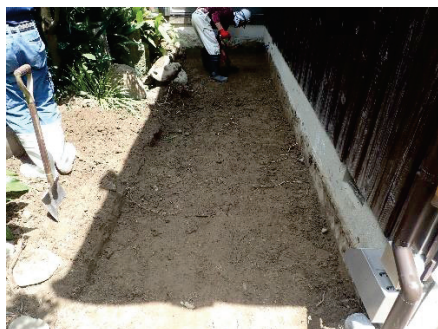


写真 A. 3. 4 整地状況

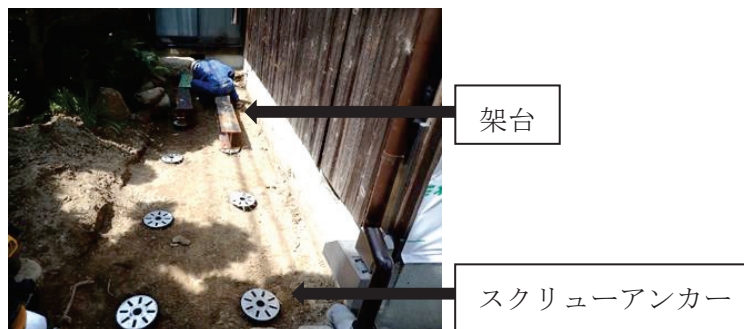


写真 A. 3. 5 架台設置状況

### ③ 小型回転圧入装置の搬入・組み立て

施工機械は、小型回転圧入装置、H型鋼、スクリュウアンカーに分かれており、小型回転圧入装置は圧入モーター、回転モーター、ベース、に分解できる。運搬の際には、分解した機材を人力で運び、狭隘な敷地に搬入する。小型回転圧入装置の組立は、装置の移動を容易にする架台にて行う。**写真 A. 3. 6** に小型回転圧入装置の搬入状況を**写真 A. 3. 7** に小型回転圧入装置の組立状況を示す。



写真 A. 3. 6 小型回転圧入装置の搬入状況



写真 A. 3. 7 小型回転圧入装置の組立状況

### 3.3 ドレーンの打設

小型回転圧入装置を用いてのドレーン打設手順と施工における注意点について以下で述べる。

図 A.3.8 にドレーン材の打設フローを示す。

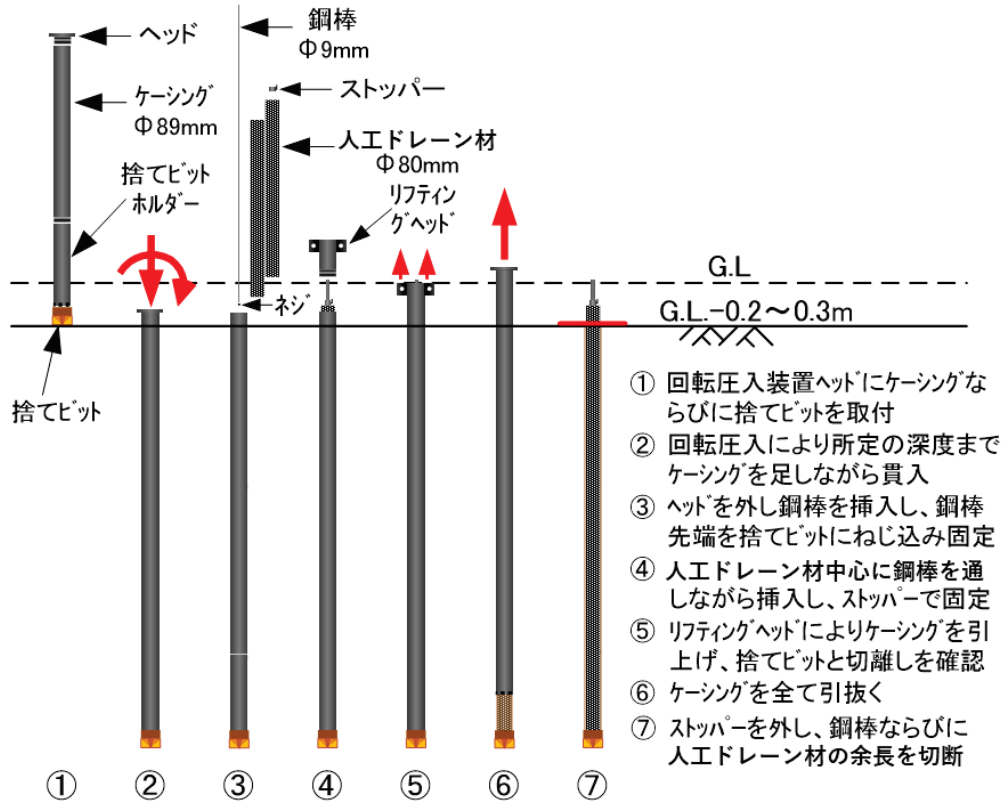


図 A.3.8 ドレーンの打設フロー

### ① ケーシングとビットの取り付け

施工箇所に装置を設置し、ドレーンを貫入するための筒の役割を果たすケーシングを装置に取り付ける。次に、穴を掘るための捨てビットをケーシングに取り付ける。捨てビットは施工箇所ごとにケーシングの先端に新たに取り付ける。斜め打ちを実施する場合は装置を所定の角度まで傾け行う。写真 A. 3. 8 に取り付けの様子を、写真 A. 3. 9 に斜打ちの様子を、写真 A. 3. 10 にケーシングの先端に取り付ける捨てビットを示す。



写真 A. 3. 8 取り付けの様子



写真 A. 3. 9 斜打ちの様子



写真 A. 3. 10 捨てビット

## ② 回転圧入

①で取り付けたケーシングとビットを回転圧入して目標の深さまで穴を掘る。この際に、ケーシングの長さが足りなくなるので、ケーシングを装置に再度接続し回転圧入を行う。ケーシングには、ネジ加工がされており、ケーシングどうしをつなぎ合わせることができる。施工の際には、ケーシングを何本接続して貫入したか注意しておく必要がある。写真 A. 3. 11 にケーシングの再接続の様子を、写真 A. 3. 12 にケーシングを示す。

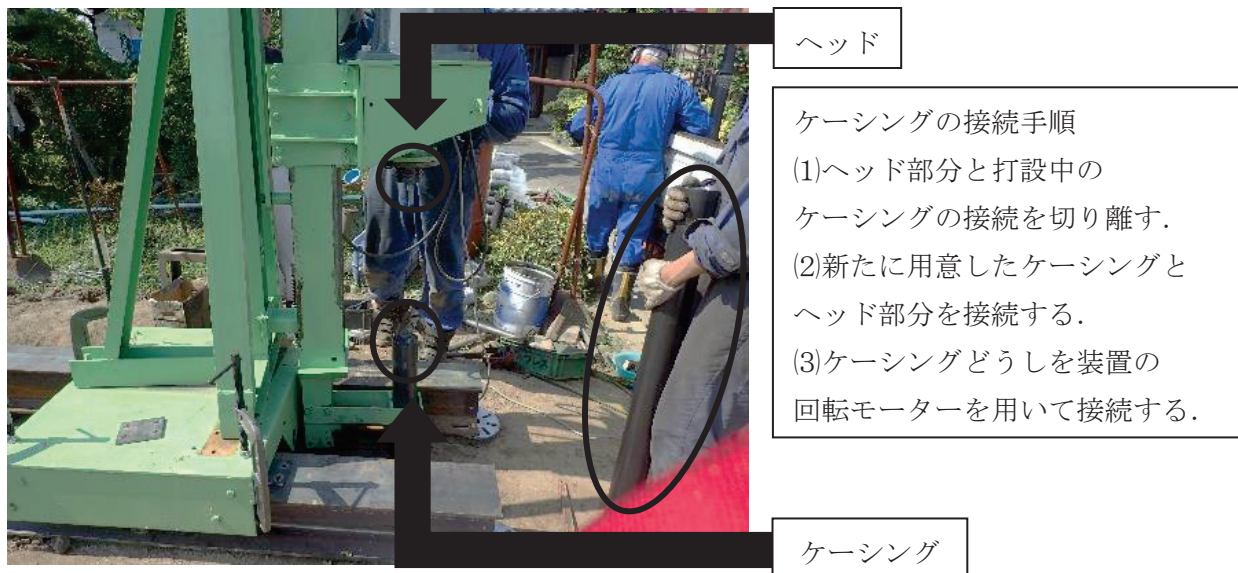


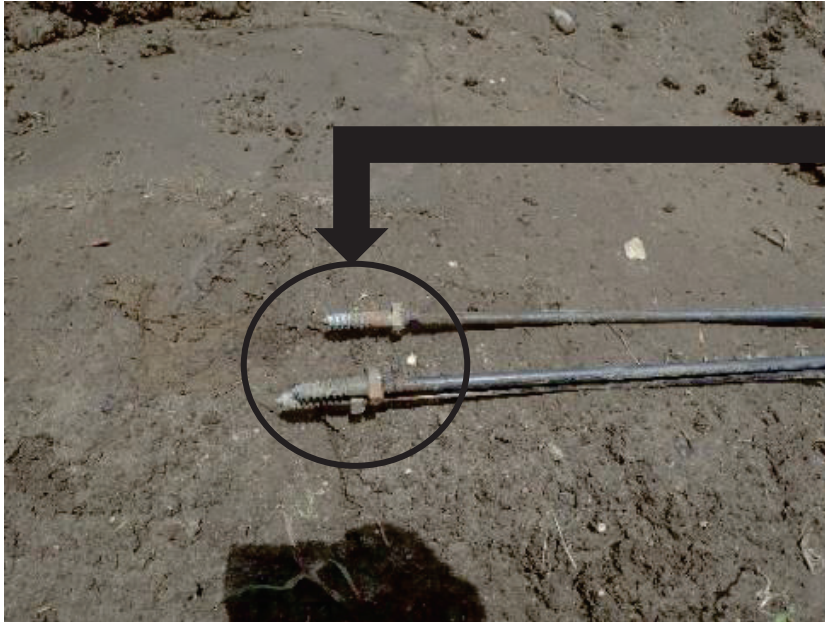
写真 A. 3. 11 ケーシングの再接続の様子



写真 A. 3. 12 ケーシング

### ③ 捨てビットの切り離し

目標の深さまで穴を掘った後、次の施工箇所に装置を移動させるために地中からケーシングを引き抜く必要がある。そこで、ケーシングに鋼棒を挿入し捨てビットを切り離す。この際に、鋼棒の先端部を捨てビットにねじ込み固定する。鋼棒の長さは、ドレーンを打設する深さにより変わってくるので、どの鋼棒を使用するか注意する必要がある。なお、鋼棒は現場にて溶接し作成するので、長さの調整を自由に行うことが出来る。写真 A. 3. 13 に鋼棒を、写真 A. 3. 14 に固定の様子を示す。



ネジ加工された  
鋼棒の先端

写真 A. 3. 13 鋼棒



ペンチにて鋼棒を  
回転させ捨てビットに  
固定させている。

写真 A. 3. 14 鋼棒を捨てビットに固定する様子

#### ④ ドレーンの貫入

ドレーンは中心に鋼棒を通すように貫入する。ドレーンどうしを接続する際はビニールテープにて繋ぎ合わせる。これを実施する事で、貫入したドレーン材に隙間が生じることを防ぐことが出来る。結果として、接続部において間隙水をスムーズに上部へ逃がすことが可能となる。写真 A. 3. 15 に施工で用いるドレーン材の断面を、写真 A. 3. 16 にドレーン材のつなぎ合わせを示す。



写真 A. 3. 15 人工ドレーン材の断面

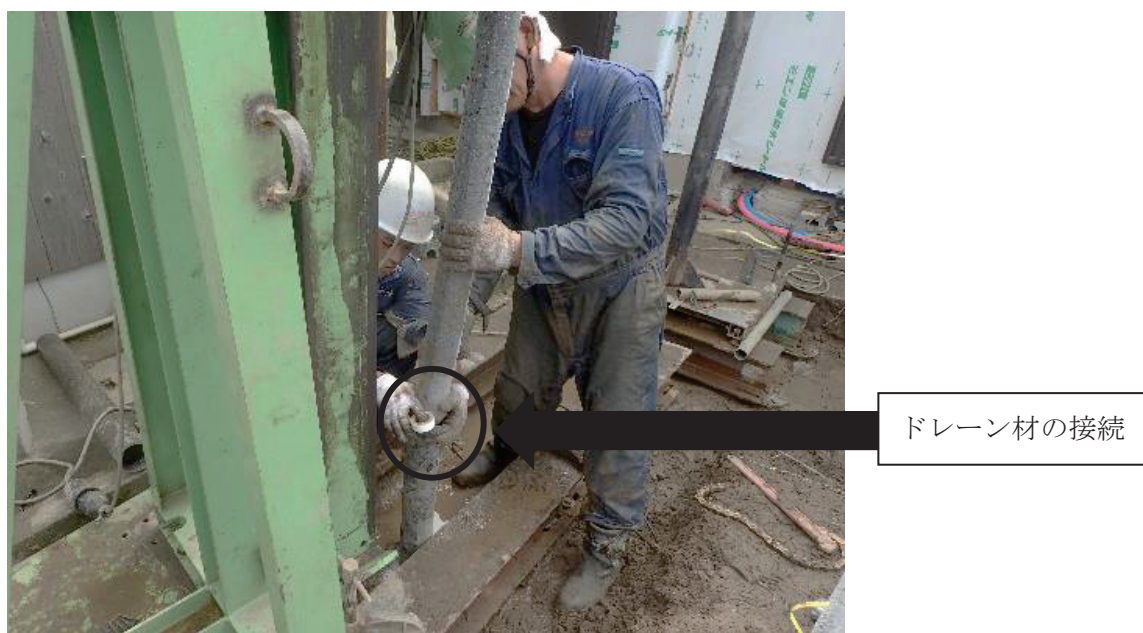


写真 A. 3. 16 ドレーン材のつなぎ合わせ



### ⑤ ケーシングの引き抜き

ケーシングを引き抜く際には、④で貫入したドレーンの共上りを防ぐために丸鋼にストッパーを装着し固定する。また、③にて丸鋼により捨てビットはケーシングから切り離されているので、ドレーンはストッパーと捨てビットに挟まっている。これにより、ドレーンはケーシングを引き抜く際に共上がりしない。ケーシングの引き抜きを行う際にはリフティングヘッドを装着し小型回転圧入装置にてドレーン貫入時とは逆方向に装置を動かし引き抜く。写真 A. 3. 17 にストッパー取り付けの様子を、写真 A. 3. 18 に引き抜きの様子を示す。

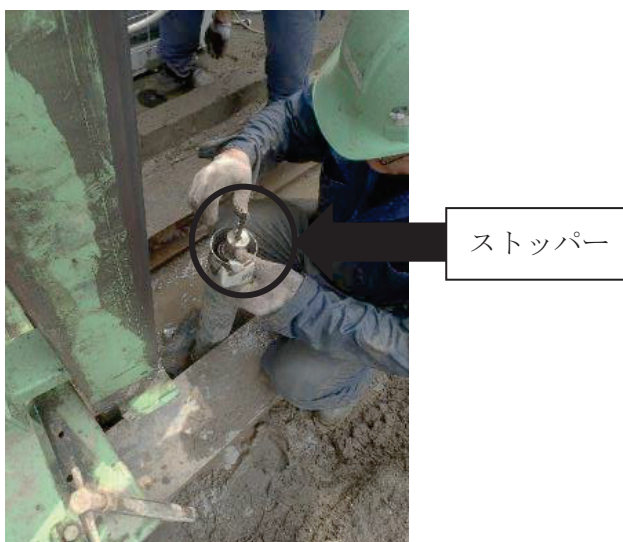


写真 A. 3. 17 ストッパー取り付け



写真 A. 3. 18 ケーシングの引き抜きの様子

### ⑥, ⑦ ドレーンの後処理

ケーシングを全て引き抜いた後、鋼棒からストッパーを外す。その後、鋼棒ならびにドレーンの余長を切断する。

### 3.4 ドレーン設置後の処理

#### ① 排水マットの敷設

ドレーンは地震により生じる過剰間隙水を排水する通り道となる。これにより、地盤内の過剰間隙水圧を抑え地盤の液状化を防ぐことを目的に本工法は行われる。この際、ドレーンからの排水を阻害しないために、地表部に砂とドレーンマットからなる水平排水層を設ける。また、ドレーンの頭部処理を行い、地表部のドレーン材が動かないよう固定し、排水を促す。この排水層を排水マットと称す。写真 A. 3. 19 に頭部処理を行ったドレーンを、写真 A. 3. 20 に地表部に砂を敷いた状況を、写真 A. 3. 21 にドレーンマット施工時の状況を示す。

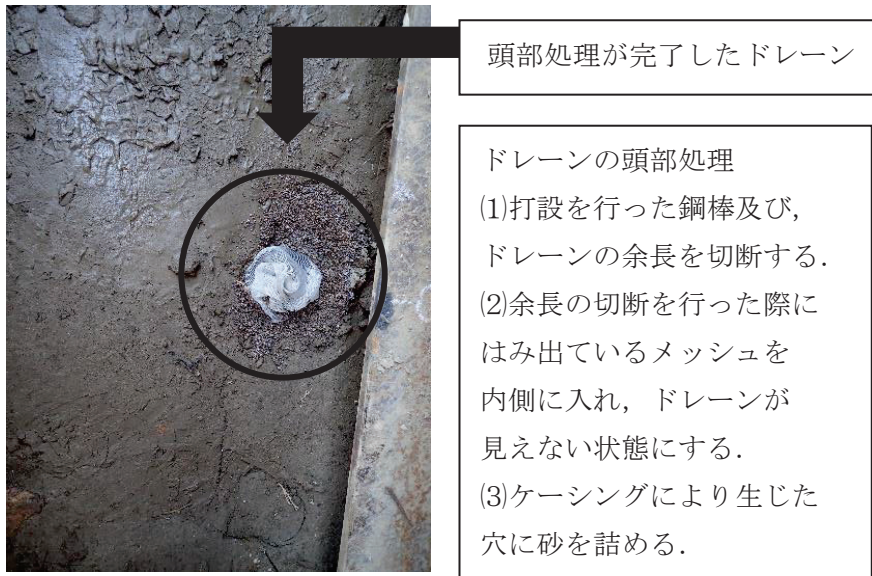


写真 A. 3. 19 頭部処理後のドレーン



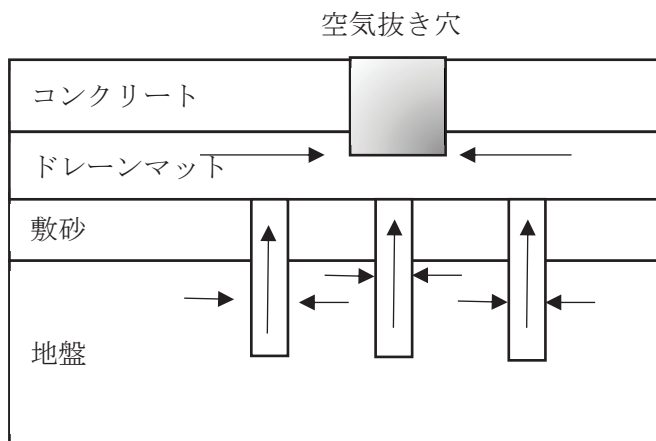
写真 A. 3. 20 地表部に砂を敷いた状況



写真 A. 3. 21 ドレーンマット施工時の状況

## ② 空気抜き穴の設置とコンクリート被覆

空気抜き穴は、排水マットから空気をスムーズに排出するために施工個所にそれぞれ設ける。空気抜き穴(DEEP 工法, 2018)の機構については、以下のように説明する。ドレーン材の上部を密閉状態と仮定した場合、地震発生時に地表面と地下水面間では、地下水面の上昇に伴い間隙水圧が上昇する。この結果、ドレーンに通じる地盤内の間隙水の流れが阻害されてドレーン本来の目的が達成できにくくなる。つまり、地盤内が非排水状態に近くなることから、地盤の間隙水圧が上昇し、無対策と同様な状態となる。このような現象の発生を防止するために、**図 A. 3. 9**に示すように空気抜き穴を設置する。**写真 A. 3. 22**に水抜き穴の設置状況を、**写真 A. 3. 23**にコンクリート被覆後の状況を示す。



**図 A. 3. 9** 空気抜き穴の機構



**写真 A. 3. 22** 空気抜き穴の設置状況



**写真 A. 3. 23** コンクリート被覆後の状況

#### 4.1 施工実績と完了後の様子

試験施工では、作業員3名にてドレーン材を鉛直打ちで86本、斜め打ちで21本の合計107本を施工した。設置ドレーン長は合計248.45m、平均ドレーン長は2.32mである。機械の設置、移動、回転を含む作業時間は53.5時間(9日間)、日当りの施工本数は12本であった。施工はA B D C Eの順に施工を行った。図A.3.10に試験施工を実施した宅地の平面図と施工完了後の様子、写真撮影箇所を示す。

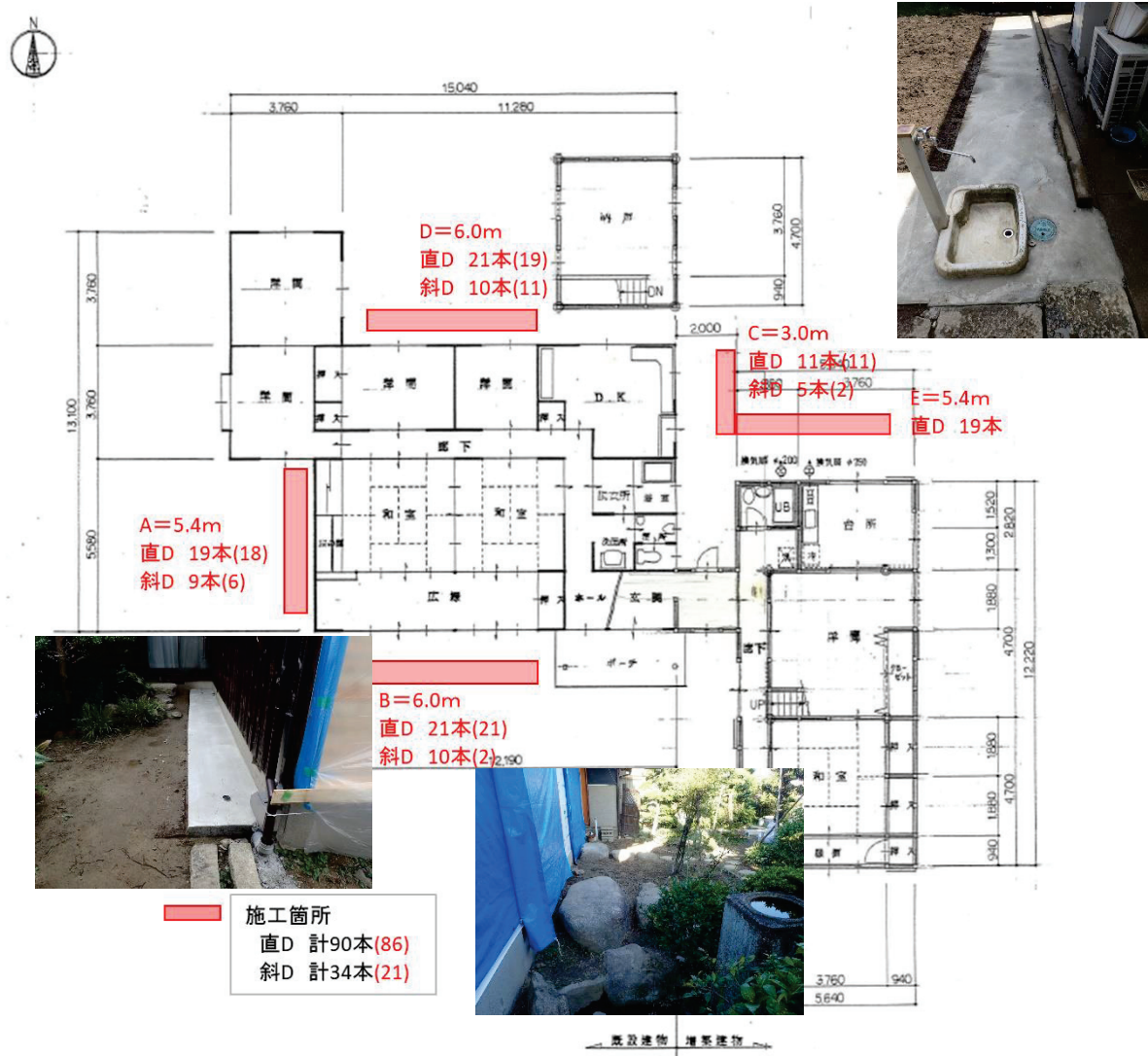


図 A. 3. 10 施工箇所の概要

## 参考文献

[A-1]東亜建設工業：スパイラルドレーン工法　－間隙水圧消散工法－，URL:<https://www.toa-const.co.jp/techno/civileng/ground/f02/>, (2018/02/08 アクセス)

[A-2]DEEP 工法　技術資料, URL:<http://www.depp-koho.jp/shiryo/shiryo201205.pdf>, pp65, (2018/02/08 アクセス)



## 付録 4

### 地盤総合評価システム Ver.1 使用マニュアル

# 1 はじめに

地盤総合評価システムは、住宅の宅地地盤の調査で一般的に実施されるスウェーデン式サウンディング試験、標準貫入試験の結果から、住宅の支持力、液状化判定および論文3章に示した簡易液状化解析に利用するパラメータも出力することができるマイクロソフトエクセルベースの解析ソフトウェアである。

なお本システムは、今後の指針等の変更に伴うプログラムのモディファイが可能である。

## 2 使用方法

ここでは、地盤総合評価システムの使用方法およびその手順を示す。以下に手順を示す。

### 2.1 ソフトウェアの立ち上げ

#### (1) ソフトの起動

「地盤の総合評価システム.xlsm(以下、ソフトウェア)」が保存されているディレクトリに移動し、ソフトウェアをダブルクリックし、立ち上げる。図 A. 4. 1 および図 A. 4. 2 にソフトウェア起動の状況および起動後の状況を示す。

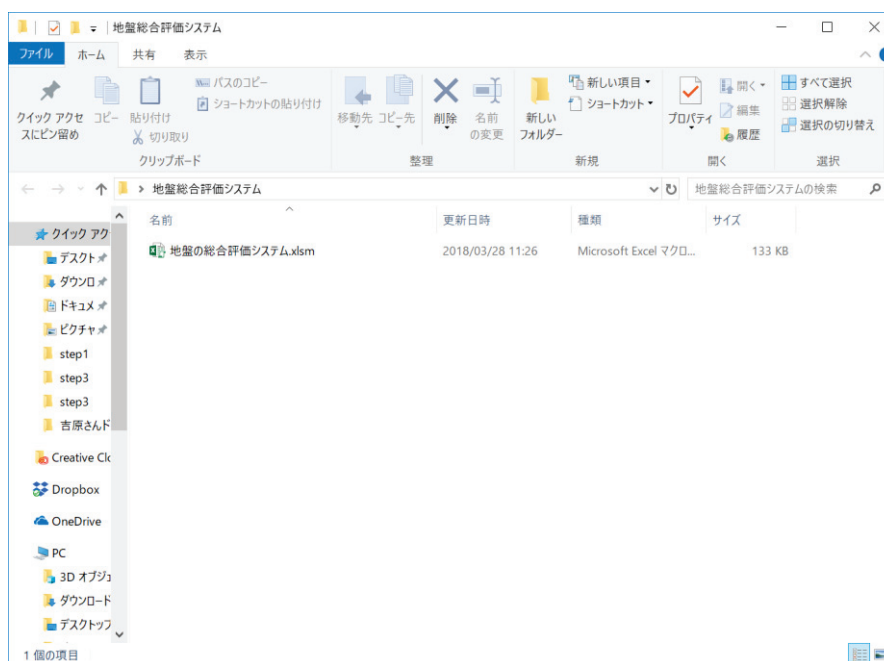


図 A. 4. 1 地盤の総合評価システム



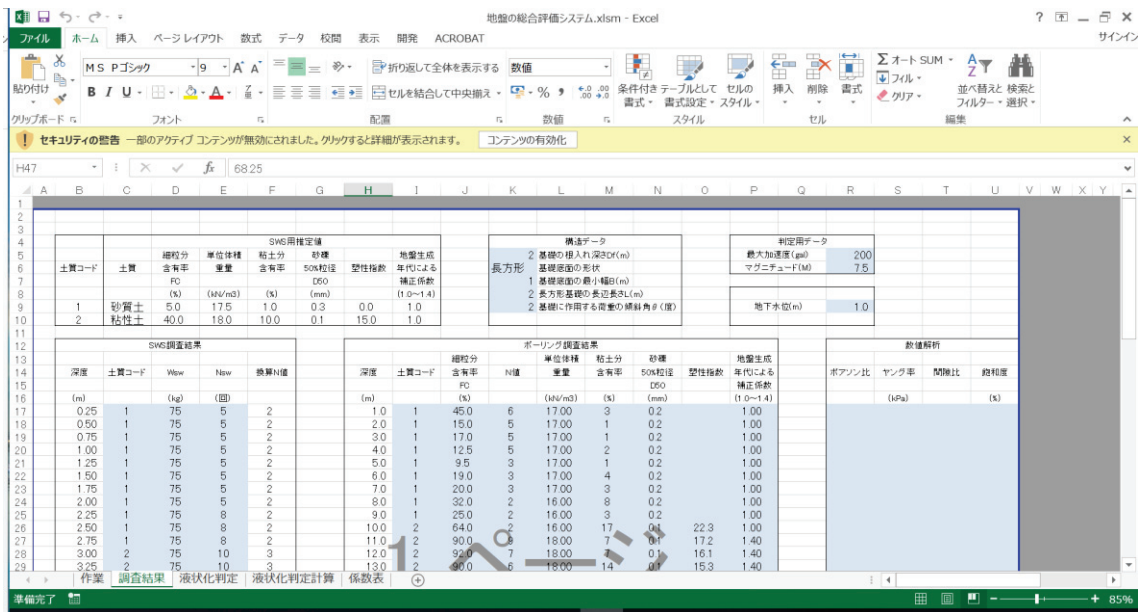
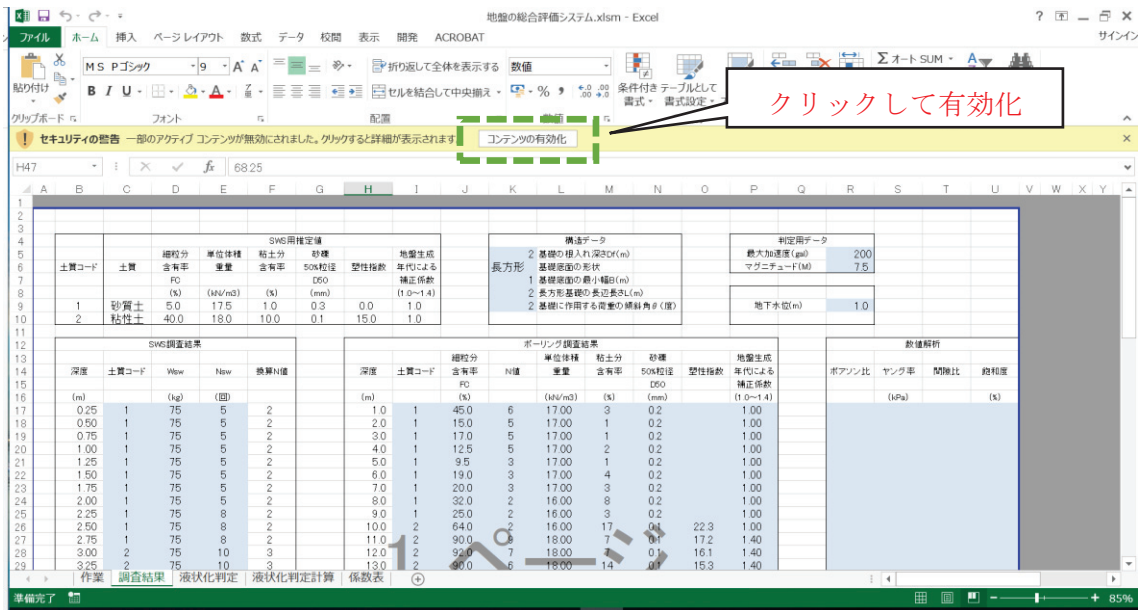


図 A. 4. 2 ソフトウェア立ち上げ後の画面

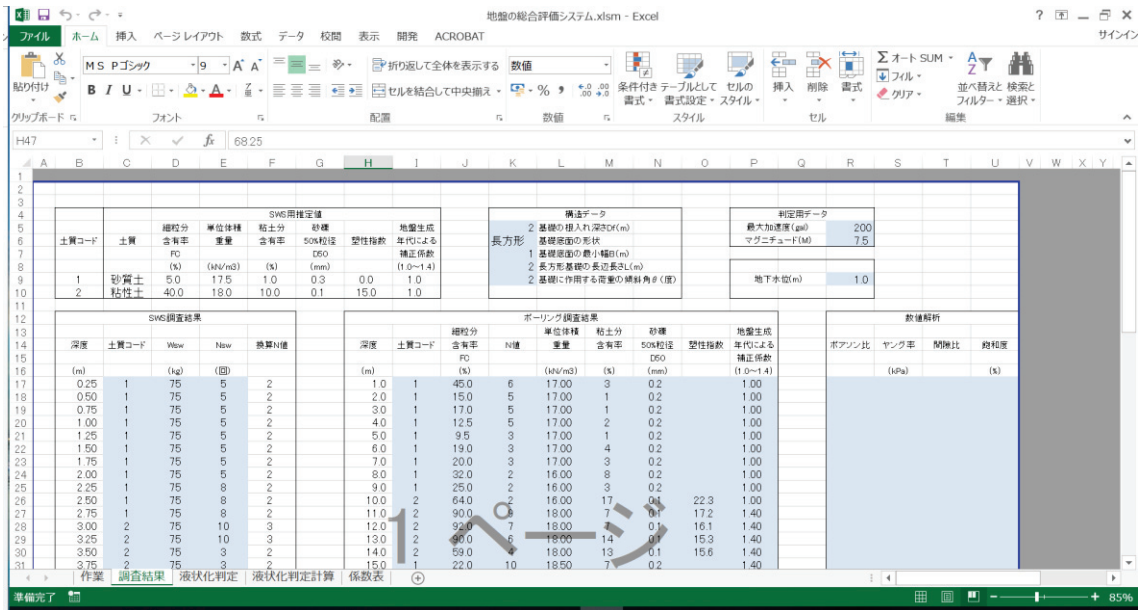
(2) コンテンツの有効化

ソフトウェアにはマクロが使用されているため、立ち上げるとセキュリティの警告が表示される。「コンテンツの有効化」をクリックし、ソフトウェアを有効にする。これでソフトウェアが使用可能な状況となった。図 A. 4. 3 にコンテンツの有効化前後の状況を示す。



(a) コンテンツ有効化前の状況

図 A. 4. 3 コンテンツの有効化前後の状況



(b) コンテンツ有効化後の状況  
 図 A. 4. 3 コンテンツの有効化前後の状況

## 2.2 SWS 試験を利用した許容応力度および液状化判定法

ここでは、SWS 試験を利用した許容応力度および液状化判定を行う方法について述べる。ここでは一般的な SWS 試験を実施したことを想定しており、土質は一般的な砂質土および粘性土の 2 種類のみを地盤パラメータとして利用できる仕組みとなっている。本論文のように SWS 試験に加え、地下水位調査や地盤サンプリングを実施した場合には、2.3 の「標準貫入試験を利用した許容応力度および液状化判定法」を利用することが望ましい。

### (1)土質コードの入力

簡易的に液状化判定を実施するために SWS 用の推定値を設定する。入力項目は、細粒分含有率(%), 単位体積重量( $kN/m^3$ ), 粘土分含有率(%), 砂礫 50%粒径(mm), 塑性指数および地盤生成年代による補正係数(1.0~1.4)である。それぞれの示すパラメータの意味や設定方法については、文献 1)などが参考となる。土質コード入力後のファイルを図 A. 4. 4 に示す。

土質コード	土質	SWS用推定値					
		細粒分含有率	単位体積重量	粘土分含有率	砂礫 50%粒径	塑性指数	地盤生成年代による補正係数
		FC (%)	( $kN/m^3$ )	(%)	D50 (mm)		(1.0~1.4)
1	砂質土	5.0	17.5	1.0	0.3	0.0	1.0
2	粘性土	40.0	18.0	10.0	0.1	15.0	1.0

図 A. 4. 4 土質コード入力後の状況

## (2)SWS 試験結果の入力

現地調査で得られた SWS 試験の結果を深度 0m から深度 10m まで 0.25m ピッチで入力する。入力項目は、土質コード、Wsw、Nsw である。換算 N 値は、土質コード(砂質土・粘性土の判別)を利用して稲田式により自動計算される。SWS 試験結果入力後の状況を **図 A. 4. 5** に示す。

SWS調査結果				
深度	土質コード	Wsw	Nsw	換算N値
(m)		(kg)	(回)	
0.25	1	75	5	2
0.50	1	75	5	2
0.75	1	75	5	2
1.00	1	75	5	2

**図 A. 4. 5** SWS 試験結果入力後の状況(深度 1.0m まで)

## (3)構造データの入力

地盤の許容応力度を算定するためのデータとして構造データを利用する。入力項目は、基礎の根入れ深さ(m)、基礎底面の形状(連続・正方形・長方形・円形)、基礎底面の最小幅(m)、長方形基礎の長辺長さ(m)および基礎に作用する荷重の傾斜角(度)である。それぞれ対象とする住宅形状に合わせて入力する。**図 A. 4. 6** に入力後の状況を示す。

構造データ	
長方形	2 基礎の根入れ深さDf(m)
	基礎底面の形状
	1 基礎底面の最小幅B(m)
	2 長方形基礎の長辺長さL(m)
	2 基礎に作用する荷重の傾斜角 $\theta$ (度)

**図 A. 4. 6** 構造データの入力

## (4)液状化判定用の外力および地下水位の入力

ここでは、液状化判定に利用する外力(地震動の最大加速度(gal)およびマグニチュード(M))および地下水位(m)を入力する。外力については、建築基礎構造設計指針等(日本建築学会, 2013)等を参考に決定することが多い。なお、中地震ではマグニチュード 7.0, 最大加速度 250gal などが多く用いられており、大地震ではマグニチュード 7.5, 最大加速度 350gal などが用いられているようである。また、2011 年東北地方太平洋沖地震時の浦安市での液状化の被害については、マグニチュード 9.0, 最大加速度 250gal を利用された例もある(新井, 2011)。**図 A. 4. 7** に判定データおよび地下水位を入力した状況を示す。

判定用データ	
最大加速度 (gal)	200
マグニチュード(M)	7.5
地下水位(m)	1.0

図 A. 4. 7 判定用データおよび地下水位を入力した状況

#### (5)地盤の許容応力度の算定

(1)～(4)を入力後、地盤の長期および短期許容応力度を算定する。「計算」ボタンをクリックすることで、(1)～(4)の情報をもとに自動計算が行われる。計算前後の状況を図 A. 4. 8 に示す。なお、短期の許容応力度は算定可能であるが、液状化のある場合には使用できないことに注意する必要がある。

■結果	
	地盤の長期許容応力度 (kN/m <sup>2</sup> )
	地盤の短期許容応力度 (kN/m <sup>2</sup> )

計算      液状化判定

(a)計算前

■結果	
34.13	地盤の長期許容応力度 (kN/m <sup>2</sup> )
68.25	地盤の短期許容応力度 (kN/m <sup>2</sup> )

計算      液状化判定

(b)計算後

図 A. 4. 8 地盤の許容応力度計算

#### (6)液状化判定

(1)～(4)のデータを利用し、地盤の液状化判定を実施する。「液状化判定」をクリックすると、液状化判定用のページが表示される。なお、一般的な液状化判定結果である  $F_L$  値のみではなく、国総研シートと同様に、 $D_{cy}$  および  $P_L$  値による被害可能性評価も可能となっている。なお計算方法は、建築基礎構造設計指針等(日本建築学会, 2013)に準拠している。図 A. 4. 9 に液状化判定後の結果を示す。

最大加速度(gal)		200	H1		Dcy		PL値		
マグニチュード(M)		7.5			数値	評価	数値	評価	
地下水位(m)		1.0	-0.5		53.17	C	34.27	C	
深度	土質	細粒分 含有率 FC	N値	単位体積 重量 (kN/m <sup>3</sup> )	粘土分 含有率 (%)	砂礫 50%粒径 D50 (mm)	塑性指数	地盤生成 年代による 補正係数 (1.0~1.4)	FL値
(m)		(%)							
0.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	
1.0	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	
1.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.51
2.0	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.44
2.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.41
3.0	粘性土	40.0	3	18.00	10	0.1	15.0	1.00	0.82
3.5	粘性土	40.0	2	18.00	10	0.1	15.0	1.00	0.76
4.0	粘性土	40.0	2	18.00	10	0.1	15.0	1.00	0.74
4.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.32
5.0	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.31
5.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.30
6.0	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.29
6.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.29
7.0	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.28
7.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.28
8.0	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.27
8.5	砂質土	5.0	2	17.50	1	0.3	0.0	1.00	0.27
9.0	粘性土	40.0	3	18.00	10	0.1	15.0	1.00	0.67

図 A. 4. 9 液状化判定結果

## 2.3 標準貫入試験を利用した許容応力度および液状化判定法

### (1)ボーリング調査結果の入力

現地調査で得られたボーリング調査試験の結果を深度 0m から深度 20m まで 1.0m ピッチで入力する。入力項目は、土質コード、細粒分含有率(%), 単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>), 粘土分含有率(%), 砂礫 50%粒径(mm), 塑性指数および地盤生成年代による補正係数(1.0~1.4)である。それぞれの示すパラメータの意味や設定方法については、文献等(国土交通省総合政策研究所, 2017)を参考されたい。土質コード入力後のファイルを図 A. 4. 10 に示す。

ボーリング調査結果								
深度 (m)	土質コード	細粒分	N値	単位体積	粘土分	砂礫	塑性指数	地盤生成
		含有率 FC (%)		重量 (kN/m <sup>3</sup> )				含有率 (%)
1.0	1	45.0	6	17.00	3	0.2		1.00
2.0	1	15.0	5	17.00	1	0.2		1.00
3.0	1	17.0	5	17.00	1	0.2		1.00
4.0	1	12.5	5	17.00	2	0.2		1.00
5.0	1	9.5	3	17.00	1	0.2		1.00
6.0	1	19.0	3	17.00	4	0.2		1.00
7.0	1	20.0	3	17.00	3	0.2		1.00
8.0	1	32.0	2	16.00	8	0.2		1.00
9.0	1	25.0	2	16.00	3	0.2		1.00
10.0	2	64.0	2	16.00	17	0.1	22.3	1.00
11.0	2	90.0	9	18.00	7	0.1	17.2	1.40
12.0	2	92.0	7	18.00	7	0.1	16.1	1.40
13.0	2	90.0	6	18.00	14	0.1	15.3	1.40
14.0	2	59.0	4	18.00	13	0.1	15.6	1.40
15.0	1	22.0	10	18.50	7	0.2		1.40
16.0	1	19.0	11	18.50	5	0.2		1.40
17.0	1	17.5	21	19.50	5	0.2		1.40
18.0	1	20.0	23	19.50	6	0.2		1.40
19.0	1	19.5	40	19.50	6	0.2		1.40
20.0	1	19.5	41	19.50	6	0.2		1.40

図 A. 4. 10 SWS 試験結果入力後の状況(深度 1.0m まで)

### (2)構造データの入力

2.1 節と同様に、地盤の許容応力度を算定するためのデータとして構造データを利用する。入力項目は、基礎の根入れ深さ(m)、基礎底面の形状(連続・正方形・長方形・円形)、基礎底面の最小幅(m)、長方形基礎の長辺長さ(m)および基礎に作用する荷重の傾斜角(度)である。それぞれ対象とする住宅形状に合わせて入力する。図 A. 4. 11 に入力後の状況を示す

構造データ	
長方形	2 基礎の根入れ深さDf(m)
	基礎底面の形状
	1 基礎底面の最小幅B(m)
	2 長方形基礎の長辺長さL(m)
	2 基礎に作用する荷重の傾斜角θ(度)

図 A. 4. 11 構造データの入力

### (3)液状化判定用の外力および地下水位の入力

2.1 節と同様に、液状化判定に利用する外力(地震動の最大加速度(gal)およびマグニチュード(M))および地下水位(m)を入力する。外力については、建築基礎構造設計指針等(日本建築学会, 2013)等を参考に決定することが多い。なお、中地震ではマグニチュード 7.0, 最大加速度 250gal などが多く用いられており、大地震ではマグニチュード 7.5, 最大加速度 350gal などが用いられているようである。また、2011 年東北地方太平洋沖地震時の浦安市での液状化の被害については、マグニチュード 9.0, 最大加速度 250gal を利用された例もある。図 A. 4. 12 に判定データおよび地下水位を入力した状況を示す。

判定用データ	
最大加速度 (gal)	200
マグニチュード(M)	7.5
地下水位(m)	1.0

図 A. 4. 12 判定用データおよび地下水位を入力した状況

#### (4)地盤の許容応力度の算定

(1)～(4)を入力後，地盤の長期および短期許容応力度を算定する。「計算」ボタンをクリックすることで，(1)～(4)の情報をもとに自動計算が行われる。計算前後の状況を図 A. 4. 13 に示す。なお，短期の許容応力度は算定可能であるが，液状化の可能性がある場合には使用できないことに注意する必要がある。

■結果	
地盤の長期許容応力度 (kN/m <sup>2</sup> )	87.96
地盤の短期許容応力度 (kN/m <sup>2</sup> )	175.93

(a)計算前

(b)計算後

図 A. 4. 13 地盤の許容応力度計算

#### (5)液状化判定

(1)～(3)のデータを利用し，地盤の液状化判定を実施する。「液状化判定」をクリックすると，液状化判定用のページが表示される。なお，一般的な液状化判定結果である  $F_L$  値のみではなく，国総研シートと同様に， $D_{cy}$  および  $P_L$  値による被害可能性評価も可能となっている。なお計算方法は，建築基礎構造設計指針等(日本建築学会，2013)に準拠している。図 A. 4. 14 に液状化判定後の結果を示す。

最大加速度(gal)		200		H1	Dcy		PL値		
マグニチュード(M)		7.5			数値	評価	数値	評価	
地下水位(m)		1.0		2.0	15.66	C	16.58	C	
深度	土質	細粒分 含有率 FC (%)	N値	単位体積 重量 (kN/m <sup>3</sup> )	粘土分 含有率 (%)	砂礫 50%粒径 D50 (mm)	塑性指数	地盤生成 年代による 補正係数 (1.0~1.4)	FL値
0.5	砂質土	45.0	6	17.00	3	0.2		1.00	
1.0	砂質土	45.0	6	17.00	3	0.2		1.00	
1.5	砂質土	15.0	5	17.00	1	0.2		1.00	1.24
2.0	砂質土	15.0	5	17.00	1	0.2		1.00	1.04
2.5	砂質土	17.0	5	17.00	1	0.2		1.00	0.94
3.0	砂質土	17.0	5	17.00	1	0.2		1.00	0.86
3.5	砂質土	12.5	5	17.00	2	0.2		1.00	0.77
4.0	砂質土	12.5	5	17.00	2	0.2		1.00	0.74
4.5	砂質土	9.5	3	17.00	1	0.2		1.00	0.58
5.0	砂質土	9.5	3	17.00	1	0.2		1.00	0.57
5.5	砂質土	19.0	3	17.00	4	0.2		1.00	0.62
6.0	砂質土	19.0	3	17.00	4	0.2		1.00	0.62
6.5	砂質土	20.0	3	17.00	3	0.2		1.00	0.61
7.0	砂質土	20.0	3	17.00	3	0.2		1.00	0.61
7.5	砂質土	32.0	2	16.00	8	0.2		1.00	0.57
8.0	砂質土	32.0	2	16.00	8	0.2		1.00	0.57
8.5	砂質土	25.0	2	16.00	3	0.2		1.00	0.54

図 A. 4. 14 液状化判定結果

## 2.4 簡易液状化解析のパラメータ出力

2.3 節の判定結果に用いた入力情報から、簡易液状化解析のパラメータを出力する。ここではボーリングデータを利用して出力した結果のみを示すが、SWS 試験の結果を参考に出力することも可能である。なお、研究の進捗によって液状化解析プログラムの読み込みパラメータや順番が変更されるため、ここでは出力項目を、ポアソン比、ヤング率(kPa)、間隙比、飽和度の4つに限定して表記してある。図 A. 4. 15 に、出力された数値解析用のパラメータを示す。パラメータは 1m ピッチでの出力である。なお、簡易液状化解析への入力は、この表示部分をコピーしてペーストする形で利用することができる。



数値解析			
ポアソン比	ヤング率	間隙比	飽和度
	(kPa)		(%)
0.333	16800	1.25	100
0.333	14000	1.25	100
0.333	14000	1.25	100
0.333	14000	1.25	100
0.333	8400	1.25	100
0.333	8400	1.25	100
0.333	8400	1.25	100
0.333	5600	1.61	100
0.333	5600	1.61	100
0.333	5600	1.61	100
0.333	25200	0.97	100
0.333	19600	0.97	100
0.333	16800	0.97	100
0.333	11200	0.97	100
0.333	28000	0.86	100
0.333	30800	0.86	100
0.333	58800	0.67	100
0.333	64400	0.67	100
0.333	112000	0.67	100

図 A. 4. 15 出力された数値解析用パラメータ

### 3. その他

本ソフトウェアで計算された液状化判定結果は、1 枚のシートで整理されており、そのまま印刷し紙面に出力することも可能である。

## 参考文献

- [A-1] 新井洋(2011)：継続時間の長い地震動に対する液状化の評価と対策, シンポジウム内陸直下型地震と海溝型地震のどちらに備えればよいか? 「増大する地震動レベルに対する設計」, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会, pp.37-50.
- [A-2] 国土交通省 国土技術政策総合研究所(2017): 宅地防災, 宅地の液状化被害と可能性の評価, 宅地の液状化被害可能性判定計算シート(国総研シート), (2018.09.20 アクセス).
- [A-3] 日本建築学会(2013)：建築基礎構造設計指針第2版, 丸善出版社, 485 P.

# 謝 辞

本論文は、岐阜大学工学部八嶋厚教授のもと筆者が株式会社吉原化工を経営するかたわら、岐阜大学大学院後期課程に籍を置き、立体網状スパイラル構造のドレン材(商標登録もやい)を活用して地震時における既設戸建て住宅の液状化対策工法に関する研究の一連の成果をまとめたものであります。

また、八嶋厚教授・沢田和秀教授・神谷浩二教授には本論文の審査をしていただきました。

齢65才からまさに古稀に達せんとする4年間、老体で浅学非才なる小生に、頭にも汗をかけ!!と多くの方々から前から手を指しのべていただいたり、後から背を押していただいたり、多大なる熱心なご指導と叱咤激励を頂戴いたしました。良きご縁に目巡りあい、小生のか細いタテ糸に皆様方の心強いヨコ糸を紡いでいただき、学位論文という四柄の織り物に至ることが出来たことに、心より感謝し、厚くお礼申し上げます。

岐阜大学工学部教授八嶋厚先生には、サミュエル・ウルマンの「青春」という文中の「年を重ねただけで人は老いない、理想を失う時に初めて老がくる」「歳月は皮膚のしわを増やすが、情熱を失う時に精神はしぼむ」という熱きお言葉と共に、小生の年齢にもかかわらず岐阜大学大学院後期課程への入学のチャンス頂き、本研究のテーマを進める上での目的、必ずや「世のため人のためになる」という強い意志の元、本論文に係わるほとんど全てについて、方向性から内容の細部に至るまで、多大なる懇切丁寧なご指導を賜りました。特に基礎学力に乏しく、物覚えもままならない小生に対して愛想もつかさず、我慢強くご丁寧に、地盤工学に関する巾広い知識での基本から講義をしていただきました。又、読書の大切さ、ナイトサイエンスの場においては人間学から、考え方のヒントなど雑学も含めて多

くのお教えを賜ることができ、本論文をまとめるに至りました。ここに、厚くお礼申し上げます。本当にありがとうございました。

中部大学工学部都市建設工学科助教授余川弘至先生には、模型振動台実験における室内実験そのデータ収集、整理からそれらに供なう数値解析・再現解析など多岐にわたり細部に至るまで懇切丁寧なご指導を賜りました。厚くお礼申し上げるとともに、心から感謝しております。ありがとうございました。

NPO法人地盤防災ネットワーク代表であり、岐阜大学客員教授でもある村田芳信先生、同じく荊谷敬三先生におかれましては、地盤探査・地質調査のデータ解析から突現場での機械の開発、戸建て住宅その実証実験・施工方法など現場での経験を踏えた貴重なご意見、資料等を提供いただきました。ここに厚くお礼申し上げます。あわせて、実証実験での邸宅を提供いただきました。佐藤容郎様には心より感謝申し上げます。

西濃建機株式会社、岩田悟社長、太洋基礎工業株式会社顧問の伊藤孝芳様、ならびに同社の大野康年様におかれましては、試作機に始まり、改良機からプロト機へと施工機械開発に携わっていただき、多大なるご苦勞をおかけしました。心より感謝申し上げます。

(財)ベターリビング二木幹夫氏、(社)中部地域づくり協会理事長福田晴耕氏同協会研究員神谷政人氏、(株)

WASC基礎地盤研究所代表取締役高森洋氏におかれましては、本研究工法について専門的見地からのご指導・アドバイスを賜りました。厚くお礼申し上げます。

八嶋・沢田研究室におきましては、岐阜大学工学部附属インフラマネジメントセンター長であり、工学部の教授でもある沢田和秀先生とは同郷ということもあり、時には優しく、時には厳しく叱咤激励、忌憚なくアドバイスをいただきました。又、秘書である熊田素子氏、事務補佐員の藤田清子氏には事務的な面から多大なるサポートをいただきました。

同期でもあり、同じ社会人ドクターで先に卒業され、現在東海大学助教の要職に榮転された藤原覚太氏との楽しい思い出の数々、反面、同じドクターを目指しながら、志半ばで鬼籍に入られた中央復建コンサルタンツ(株)國眼定氏には心よりお悔み申し上げるとともに、ご冥福をお祈り申し上げます。

本研究を実施するにあたり、多くの方にご指導を賜りました。  
名古屋工業大学名誉教授 中井照夫先生  
中部大学教授 山田公夫先生、同教授 杉井俊夫先生  
名古屋大学教授 野田利弘先生  
富山大学教授 原隆史先生  
名古屋工業大学教授 張鋒先生  
防衛大学助教 野々山栄人先生、中部大学 浅野憲雄先生  
他、岐阜大学の学生の皆様、中部大学の学生の皆様

まさに、

# 縁尋機妙・多逢聖因

ご縁にご縁が……よき出逢いに感謝

最後に、

小生のがまを受け入れ、学業に対してこぞって応援  
バックアップしてくれた我が愛する吉原化工の社員の  
面々、甥っ子の加藤良将氏、そして最愛なる妻・幸枝  
本当にありがとう

# 人生の午後70才の春に

合掌