

学位論文

既設住宅を対象とした液状化危険度調査  
及び薬液注入工法による対策の高度化

**Upgrading of liquefaction hazard investigation for existing houses and  
countermeasure with chemical grouting method**

岐阜大学大学院

工学研究科

工学専攻

2023年3月

樋口 翔太郎

# 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 本研究の背景 .....	1
1.1.1 過去の地震による液状化被害.....	2
1.2 液状化現象とは .....	16
1.3 既存の液状化危険度判定.....	17
1.3.1 ハザードマップ.....	17
1.3.2 住宅を対象とした簡易液状化判定.....	22
1.4 既往の液状化対策工法について.....	23
1.4.1 住宅に適応可能な液状化対策工法.....	25
1.4.2 各工法の経済性評価.....	30
1.5 地震後の家屋復旧費用.....	36
1.5.1 液状化被害認定について.....	36
1.5.2 保障費用 .....	41
1.6 本研究の目的 .....	43
1.7 本論文の構成 .....	45
参考文献 .....	47
第2章 面的な地盤調査法を用いた液状化判定.....	50
2.1 2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査.....	50
2.2 対象地域 .....	52
2.3 調査結果 .....	55
2.4 液状化危険度判定.....	57
2.5 まとめ .....	61
参考文献 .....	62
第3章 新たな薬液注入工法による経済性を考慮した住宅の沈下抑制効果の確認.....	63
3.1 遠心場模型振動台実験.....	64
3.2 実験条件 .....	69
3.3 実験結果と考察.....	72
3.4 まとめ .....	81
参考文献 .....	82

第4章 模型実験の再現解析及びめり込み沈下量抑制効果の確認.....	83
4.1 3次元解析の必要性.....	83
4.2 液状化解析プログラム LIQCA の概要.....	83
4.3 支配方程式.....	83
4.3.1 混合体の密度.....	84
4.3.2 混合体の応力.....	84
4.3.3 変位とひずみの関係.....	85
4.3.4 構成式.....	85
4.3.5 質量保存則.....	85
4.3.6 運動量保存則.....	86
4.3.7 連続式.....	87
4.3.8 地盤の構成式.....	89
4.3.9 改良砂を対象とした構成式.....	93
4.3.9.1 改良砂モデルの検証解析.....	96
4.3.9.2 検証結果.....	98
4.4 遠心場模型振動台実験の再現解析.....	101
4.4.1 検証結果と考察.....	106
4.5 住宅規模と液状化層を変更した解析.....	115
4.5.1 検討結果と考察.....	116
4.6 まとめ.....	117
参考文献.....	118
第5章 結論.....	120
課題と展望.....	122

謝辞

## 第1章 序論

### 1.1 本研究の背景

日本は、世界中で発生するマグニチュード 6.0 以上の地震発生件数の中で、約 20%を占める<sup>1-1)</sup>地震大国である。その地震による地盤液状化によって住宅が沈下や傾斜する被害も生じている。住宅の傾斜が 6/1,000 以上になると、構造耐力上主要な部分に瑕疵が存在する可能性が高くなる<sup>1-2)</sup>ことが、住宅の安全性を確保する指標の一つである住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）<sup>1-2)</sup>によってわかっている。これは、施工誤差の実態調査等で、柱の倒れの平均値が 3/1,000 程度発生していたことと、不同沈下による木造建物への損傷（無筋基礎の 0.5 ミリ程度等の損傷）が見られる変形角が 3/1,000～5/1,000 と考えられることの 2 点からなっている。他にも、傾斜が大きくなると住宅に住んでいる住人に対して健康被害が発生することも報告されている<sup>1-3)</sup>。

上記より、地盤液状化による住宅被害は構造物及び人々の生活に甚大な影響を与えることがわかる。その液状化被害を減らすためには、液状化対策を普及させることが求められ、普及には以下の 2 つの問いに答えることが重要であると考えられる。

1. 対象とする住宅の地盤が、地震発生時に液状化が発生するのか
2. 地震による地盤液状化発生時に、住宅に沈下、傾斜などの被害がどの程度発生するのか

### 1.1.1 過去の地震による液状化被害

初めに、「1. 対象とする住宅の地盤が、地震発生時に液状化が発生するのか」と「2. 地震による地盤液状化発生時に、住宅に沈下、傾斜などの被害がどの程度発生するのか」に答えるためには、液状化によってどのような被害が発生し、住宅にどんな影響があったのかを知り、液状化現象の脅威を正しく認識する必要がある。そのために、過去の地震によって発生した液状化被害を知っておく必要がある。そこで、本節では気象庁によって名称を定められた地震について、その被害をいくつかピックアップし、その中でも特に液状化被害に焦点を絞ってまとめていく。

気象庁では、顕著な災害を起こした自然現象について名称を定めることとしている<sup>1-4)</sup>。名称を定めることにより、防災関係機関等による災害発生後の応急・復旧活動の円滑化を図るとともに、当該災害における経験や貴重な教訓を後世に伝承することを期待するものである。

また、各地域で独自に定められた災害やそれをもたらした自然現象の名称についても、後世への伝承の観点から利用し普及を図ることとしている。

台風、火山などの災害によって名称を定める基準は異なっており、地震における名称を定める基準については、以下(1)～(3)の基準を満たした場合とする。

#### (1) 地震の規模が大きい場合

陸域： M7.0 以上（深さ 100 km 以浅）かつ最大震度 5 強以上

海域： M7.5 以上（深さ 100 km 以浅）であり、かつ最大震度 5 強以上または津波の高さ 2 m 以上

#### (2) 顕著な被害が発生した場合（全壊家屋 100 棟程度以上の家屋被害、相当の人的被害など）

#### (3) 群発地震で被害が大きかった場合等

### [1964年新潟地震]

この地震は、新潟県新潟市などで最大震度5を記録した地震である。新潟県下を中心に北は秋田、西は島根まで広域にわたり、特に新潟市内とその周辺は甚大な被害を受けた。人的被害は、死者26人、負傷者447人、建物の被害は、全壊：1,960棟、半壊：6,640棟にのぼった。被害を特徴づけるものとして、地盤の液状化による大規模な変状が広い範囲に生じたことが挙げられる。そして、この地震を機に、液状化現象への本格的な研究が始まった<sup>1-5)</sup>。また、日本で地震保険ができる直接的な要因となった震災としても知られ、この2年後、1966年に地震保険制度<sup>1-6)</sup>が誕生した。

表-1.1 新潟地震の詳細

発生日	1964年6月16日	
発生時刻	13時01分	
震央	緯度	北緯 38°22'
	経度	東経 139°13'
深さ	34km	
規模	M7.5	

写真-1.1 に液状化によるアパートの転倒の様子を、写真-1.2 に液状化による陸上競技場内の被害の様子を示す。



写真-1.1 液状化によるアパートの転倒<sup>1-5)</sup>



写真-1.2 陸上競技場内の液状化被害<sup>1-5)</sup>

### [1983年日本海中部地震]

この地震は、秋田県秋田市、青森県深浦町などで最大震度5を記録した地震である。震源地が陸地に近かったため、地震発生から津波到達までの時間が短く、津波による被害が多かった。人的被害は死者：104人、負傷者：324人、建物の被害は、全壊：1,584棟、半壊：3,515棟にのぼった。秋田港の岸壁が全面的に崩壊したほか、液状化によるガソリントankの浮上、噴砂などが確認された。また、沼地を埋立てることで建物を建設した地域で噴砂などが確認された<sup>1-7)</sup>。

表-1.2 日本海中部地震の詳細

発生日	1983年5月26日	
発生時刻	11時59分	
震央	緯度	北緯 40°22'
	経度	東経 139°04'
深さ	14km	
規模	M7.7	

写真-1.3 に秋田港の様子を、写真-1.4 にガソリントankの浮上の様子を、写真-1.5 に噴砂の様子をそれぞれ示す。



写真-1.3 秋田港エプロンの様子<sup>1-7)</sup> 写真-1.4 ガソリントankの浮上<sup>1-7)</sup>



写真-1.5 男鹿工業高校での噴砂の様子<sup>1-7)</sup>

**[1993年釧路沖地震]**

この地震は、北海道釧路市で最大震度6を記録した地震である。震源が107kmと深かったことが特徴であり、地震動が激しかった割には家屋倒壊などの被害が少なかった。人的被害は、死者：2人、負傷者：966人、縦門の被害が全壊：53棟、半壊：254棟にのぼった。液状化の被害に関しては、マンホールが最大1.5m浮き上がる被害が確認された他に、液状化による敷地の沈下などが確認された<sup>1-8)</sup>。また、釧路港では大規模な液状化被害を確認し、噴砂や護岸の沈下などを確認した<sup>1-8)</sup>。

**表-1.3 釧路沖地震の詳細**

<b>発生日</b>		1993年1月15日
<b>発生時刻</b>		20時06分
<b>震央</b>	<b>緯度</b>	北緯 42°51'
	<b>経度</b>	東経 144°23'
<b>深さ</b>		107km
<b>規模</b>		M7.8

**写真-1.6** にマンホールの浮き上がりの様子を、**写真-1.7** に液状化による敷地の沈下の様子を、**写真-1.8** に釧路港での噴砂の様子を、**写真-1.9** に釧路港での沈下の様子を示す。



**写真-1.6** マンホールの浮き上がり<sup>1-8)</sup> **写真-1.7** 液状化による敷地の沈下<sup>1-8)</sup>



**写真-1.8** 道路・歩道での噴砂<sup>1-8)</sup> **写真-1.9** 釧路港での沈下・亀裂<sup>1-8)</sup>



### [1993年北海道南西沖地震]

この地震は、北海道奥尻島で最大震度 6 を記録した地震である。震源の深さが 34km と比較的浅かったことにより大規模な津波が発生したことが大きな特徴である。また、地震発生から津波到着までが 10 分以内であったことも被害が拡大した要因である。人的被害は死者：172 人、負傷者：143 人、建物の被害は全壊：601 棟、半壊：408 棟にのぼった。液状化の被害は沖積層分布地域及び海岸埋立て地域などを中心に確認され、サイロの転倒や住宅が土台からずれるなどの被害が確認された<sup>1-9)</sup>。

**写真-1.10** にサイロが転倒した様子を、**写真-1.11** に液状化により基礎が沈下した住宅の様子を示す。

表-1.4 北海道南西沖地震の詳細

発生日	1993年7月12日	
発生時刻	22時17分	
震央	緯度	北緯 42°47'
	経度	東経 139°11'
深さ	34km	
規模	M7.8	



写真-1.10 サイロの転倒<sup>1-9)</sup>



写真-1.11 液状化による住宅基礎の沈下<sup>1-9)</sup>

### [1995年兵庫県南部地震]

この地震は、兵庫県神戸市などで最大震度 7 を記録した地震である。東北地方南部から九州地方にかけて広い範囲で有感となった。震源である野島断層付近では、地震により断層が大きく隆起して地表にも露出していることが確認されている。また、日本で戦後発生した地震の中で、2023年2月時点で関連死も含めて死傷者数が歴代2位であった。人的被害は死者：6,434人、負傷者：43,792人、建物の被害は全壊：104,906棟、半壊：144,274棟にのぼった。液状化の被害としては、神戸市、芦屋市、西宮氏の埋立地の多くで確認された。そのなかでも、六甲アイランドでは、護岸が液状化によってはらみだす被害なども確認された<sup>1-10)</sup>。

**写真-1.12** に規模な噴水・噴砂の様子を、**写真-1.13** に地下鉄の支柱破壊による道路の変形と液状化による噴砂の様子<sup>1-11)</sup>を、**写真-1.14** に六甲アイランドの護岸の変形の様子を示す。

表-1.5 兵庫県南部地震の詳細

発生日	1995年1月17日	
発生時刻	5時46分	
震央	緯度	北緯 34°36'
	経度	東経 135°02'
深さ	16km	
規模	M7.2	



写真-1.12 噴水・噴砂の様子<sup>1-11)</sup>



写真-1.13 大開通における道路の変形<sup>1-11)</sup> 写真-1.14 六甲アイランドの護岸の変形<sup>1-11)</sup>

**[2000年鳥取県西部地震]**

この地震は、鳥取県境港市などで最大震度 6 強を記録した地震である。震源地となった鳥取県だけでなく、中国地方の 5 県と四国の 4 県、さらに兵庫県及び大阪府でも震度 4 が観測されており、広域的な被害であったことがわかっている。兵庫県南部地震を超えるマグニチュードではあったが、地盤が比較的堅固であったことや人口密集地域ではなかったことが幸いして、大災害には至らなかった。人的被害は死者：0 人、負傷者：182 人、建物の被害として、全壊：433 棟、半壊：3,084 棟にのぼった。液状化の被害としては、ほとんどが埋立地で発生しており、住宅の傾斜、護岸のはらみだし、大規模な噴砂などが確認された<sup>1-12)</sup>。

**表-1.6 鳥取県西部地震の詳細**

<b>発生日</b>		2000年10月6日
<b>発生時刻</b>		13時30分
<b>震央</b>	<b>緯度</b>	北緯 35°17'
	<b>経度</b>	東経 133°21'
<b>深さ</b>		11km
<b>規模</b>		M7.3

**写真-1.15** に中央の住宅が液状化により傾斜した様子を、**写真-1.16** に岸壁のはらみだしの様子を、**写真-1.17** に大規模な噴砂の様子を示す。



**写真-1.15 住宅の傾斜** <sup>1-12)</sup>



**写真-1.16 前面にはらんだ岸壁** <sup>1-12)</sup>



**写真-1.17 大規模な噴砂の様子 (左：遠景 右：近景)** <sup>1-12)</sup>

**[2004年新潟県中越地震]**

この地震は、新潟県川口町で最大震度 7 を記録した地震である。気象庁の計測器で初めて震度 7 が計測された、最大震度 6 弱の余震が 4 回計測されたなどの特徴がある。人的被害は、死者：68 人、負傷者：4,805 人、建物の被害は、全壊：3,175 棟、半壊：13,810 棟にのぼった。液状化による被害としては、主に震源地から約 30km の範囲に液状化が多数発生していた。地形・液状化したとみられる地層を地盤特性から分類すると、信濃川周辺と埋立地で液状化が発生していることがわかった<sup>1-13)</sup>。

**表-1.7 新潟県中越地震の詳細**

発生日		2004年10月23日
発生時刻		17時56分
震央	緯度	北緯 37°17'
	経度	東経 138°52'
深さ		13km
規模		M6.8

**写真-1.18** に噴砂の様子を、**写真-1.19** に住宅の傾斜被害の様子を、**写真-1.20** にマンホールの浮き上がりの様子を、**写真-1.21** にのり面の崩壊の様子を示す。



**写真-1.18 駐車場での噴砂** <sup>1-13)</sup>



**写真-1.19 住宅の傾斜被害** <sup>1-13)</sup>



**写真-1.20 マンホールの浮き上がり** <sup>1-13)</sup>



**写真-1.21 国道8号ののり面崩壊** <sup>1-13)</sup>

**[2007年能登半島地震]**

この地震は、石川県輪島市で最大震度 6 強を記録した地震である。震源に最も近い旧門前町は、石川県で最も高齢化率が高い地域であったため、被害の絶対数は少ないが、被害の及ぼす影響が大きい地震であった。人的被害は死者:1人、負傷者:338人、建物の被害として、全壊:686棟、半壊:1,740棟にのぼった。液状化による被害は、港湾地区の埋立地と河川流域の沖積地盤において発生した。また、1993年能登半島沖地震で液状化した箇所再度液状化した場所も確認された<sup>1-14)</sup>。

**表-1.8 能登半島地震の詳細**

発生日		2007年3月25日
発生時刻		9時41分
震央	緯度	北緯 37°13'
	経度	東経 136°41'
深さ		11km
規模		M6.9

**写真-1.22** に輪島港で発生した液状化によるエプロンの沈下の様子を、**写真-1.23** に建物周辺地盤の沈下の様子を、**写真-1.24** に鵜飼漁港における 1993年能登半島沖地震の被害の様子と 2007年能登半島地震の被害の比較の様子を示す。



**写真-1.22 輪島港におけるエプロンの沈下** <sup>1-15)</sup>

**写真-1.23 建物周辺地盤の沈下** <sup>1-15)</sup>



**写真-1.24 鵜飼漁港における噴砂** <sup>1-14)</sup>

(左: 1993年能登半島沖地震 右: 2007年能登半島地震)

### [2011年東北地方太平洋沖地震]

この地震は、宮城県栗原市で最大震度7を記録した地震である。東北地方を中心に北海道から九州地方まで広い範囲で地震を観測した。この地震の特徴は、地震によって発生した9.3m以上の高さの津波による被害であるといえる。他にも、千葉県浦安市を中心に地盤液状化による被害が確認された。人的被害は死者：16,278人、負傷者：6,179人、行方不明者：2,994人、建物の被害として、全壊：129,198棟、半壊：254,238棟にのぼった。

液状化による被害としては、千葉県浦安市で住宅の傾斜、マンホールの浮き上がり、噴砂などの被害が確認された。この原因としては、広範囲の地盤が埋立地であるため、地盤が緩く、また海に近い地下水位が高いなどの条件が重なったことが挙げられる。

この地震で発生した住宅沈下量と地盤沈下量の差(以下、めり込み沈下量と呼ぶ)と傾斜量を調査した結果の図(図-1.1参照)によると、「住宅が密集している地区」と「住宅があまり密集していない地区」の違いによる相関の差はあるが、地盤に対する住宅のめり込み沈下量が大きくなるほど、傾斜量も大きくなることが報告されており、住宅のめり込み沈下量と傾斜量に相関があることが確認されている<sup>1-16)</sup>。

写真-1.25に盛土の液状化によって擁壁が傾斜し、その影響により住宅が傾斜した様子を、写真-1.26に液状化による住宅の傾斜の様子を、写真-1.27にマンホールの浮き上がりの様子を、写真-1.28に噴砂の様子を示す。

表-1.9 東北地方太平洋沖地震の詳細

発生日		2011年3月11日
発生時刻		14時46分
震央	緯度	北緯 38°6'
	経度	東経 142°52'
深さ		24km
規模		M9.0



写真-1.25 盛土の液状化による住宅被害<sup>1-17)</sup>

写真-1.26 液状化による住宅の傾斜<sup>1-18)</sup>

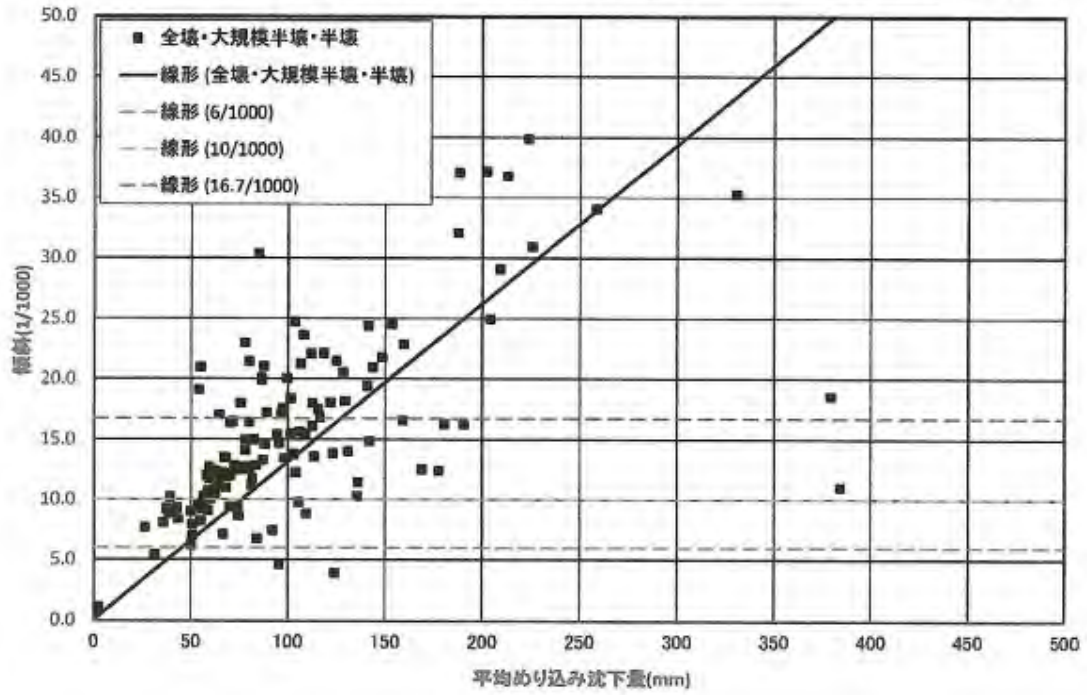


写真-1.27 液状化によるマンホールの浮上<sup>1-19)</sup>



写真-1.28 液状化による噴砂<sup>1-19)</sup>

$$\text{傾斜角 } \theta (1/1,000) = 0.13 \times \text{平均めり込み沈下量 } S_{av} \text{ (mm)}$$



$$\text{傾斜角 } \theta (1/1,000) = 0.07 \times \text{平均めり込み沈下量 } S_{av} \text{ (mm)}$$

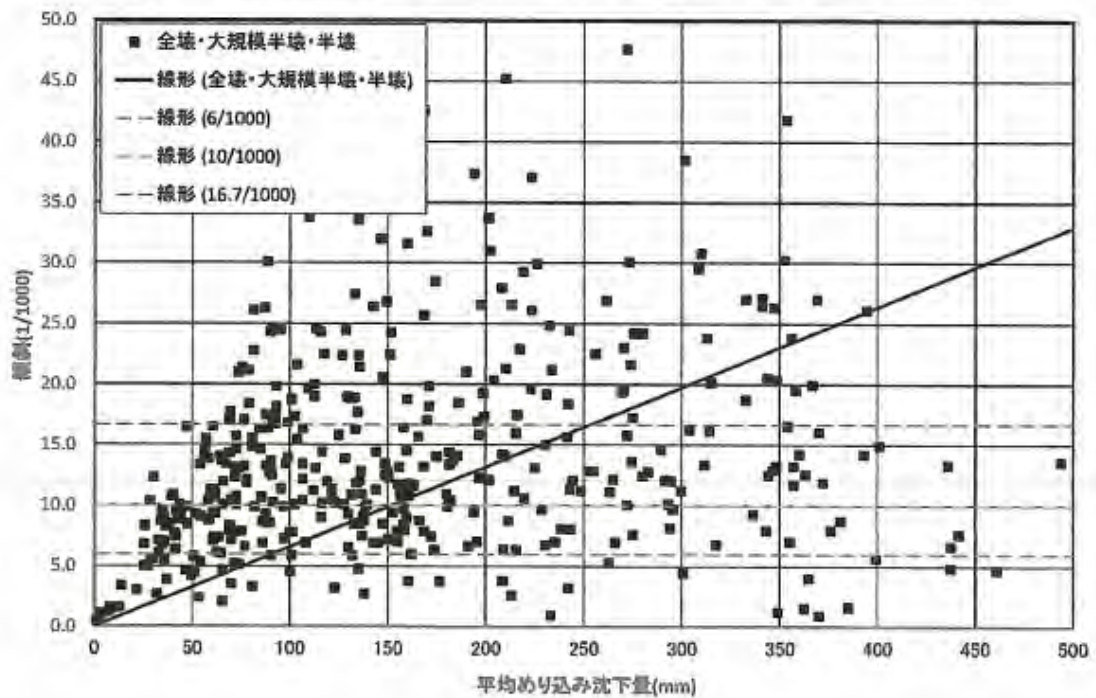


図-1.1 戸建て住宅のめりこみ沈下量と傾斜角の関係図<sup>1-16)</sup>

(上図：住宅が密集している地区 下図：住宅があまり密集していない地区)



**[2016年熊本地震]**

この地震は、熊本県益城町で最大震度7を記録した地震である。人的被害は死者：252人、負傷者：2,720人、建物の被害として、全壊：8,665棟、半壊：34,392棟にのぼった。最大の特徴として、同一地域において、わずか約28時間以内に震度7の地震が2回発生していることが挙げられる。この2回の地震により、河川沿いの三角州や後背湿地、自然堤防、旧河川などで液状化被害が多く確認された<sup>1-20)</sup>。

**写真-1.29** に黒色の火山灰質砂による噴砂の様子を、**写真-1.30** にマンホールの浮き上がりの様子を、**写真-1.31** に液状化による住宅の傾斜の様子を示す。

**表-1.10 熊本地震の詳細**

<b>発生日</b>		2016年4月16日	
<b>発生時刻</b>		1時25分	
<b>震央</b>	<b>緯度</b>	北緯	32°45'
	<b>経度</b>	東経	130°46'
<b>深さ</b>		12km	
<b>規模</b>		M7.3	



**写真-1.29** テニスコートで発生した噴砂<sup>1-20)</sup> **写真-1.30** 浮き上がったマンホール<sup>1-20)</sup>



**写真-1.31** 傾斜した住宅<sup>1-21)</sup>

**[2018年北海道胆振東部地震]**

この地震は、北海道厚真町で最大震度7を記録した地震である。この地震によって、斜面の崩壊や、宅地での液状化現象の発生が確認された。さらに、北海道電力苫東厚真火力発電所が被災したことにより、北海道全域で295万戸の電力が止まる「ブラックアウト」が発生した。人的被害は死者：42人、負傷者：762人、建物の被害として、全壊：462棟、半壊：1,570棟にのぼった。液状化の被害としては、沢埋め盛土や切盛り境界を対象とした液状化による住宅の沈下、傾斜被害などが数多く確認された。これらの被害から住宅直下だけでなく、周辺の地盤条件が住宅に大きな影響を及ぼすことがわかった<sup>1-22)</sup>。

**写真-1.32** に液状化によって沈下、傾斜した住宅の様子を、**写真-1.33** に周辺地盤の沈下によるマンホールの突出の様子を、**写真-1.34** に噴砂の状況を示す。

**表-1.11 北海道胆振東部地震の詳細**

発生日		2018年9月6日	
発生時刻		3時07分	
震央	緯度	北緯	42°41'
	経度	東経	142°00'
深さ		37km	
規模		M6.7	



**写真-1.32 傾斜した住宅<sup>1-22)</sup>**



**写真-1.33 地盤沈下により突出したマンホール<sup>1-22)</sup> 写真-1.34 噴砂の状況<sup>1-22)</sup>**

## 1.2 液状化現象とは

地盤は一般的に粘土、砂や岩、水、空気で作られている。そのなかでも、砂や砂礫（礫は、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、通常は土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（図-1.2 中の左図）。

液状化現象が起こりやすい地盤は、海岸や川のそば、埋立地などの比較的地盤がゆるく、地下水位が高い砂質地盤といわれている。その地盤が地震などの繰返しせん断荷重を受けると、砂の粒子が隙隙内に入り込もうとする負のダイレイタンスが発生し体積が減少しようとする。しかし、隙隙には水が存在し、地震動のような短時間で発生する繰返しせん断荷重下では、十分な排水を期待することができず（非排水状態）、過剰隙隙水圧が高まる。この過剰隙隙水圧がその部分より上にある地表面までの砂による有効応力以上になると、砂の粒子間の結合が切れ、砂粒子が水に浮いた液状化現象となる（図-1.2 中の中央図）。この時に、地盤の有効応力が 0 になってしまうため、上部構造物（住宅や橋梁など）が沈下する被害や、地中のマンホールが浮き上がるなどの被害が発生する。地震動が収まった後、上昇した過剰隙隙水圧は、圧力が低い場所に排出されることで（例えば、地表面や透水性が高いために過剰隙隙水圧が低い地盤）、地盤の体積が減少し、地表面が沈下する（図-1.2 中の右図）。

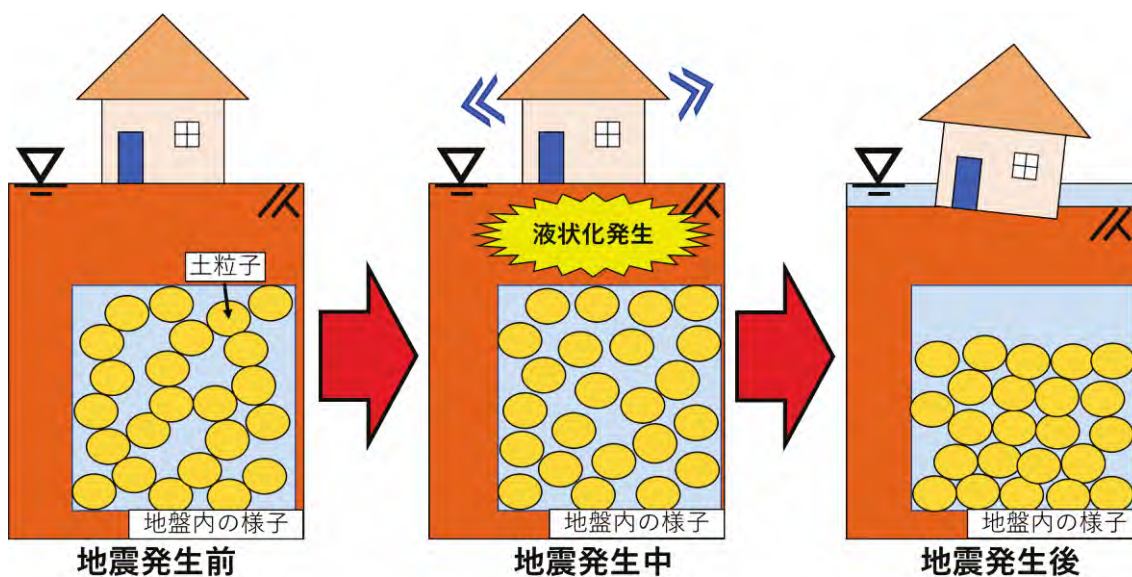


図-1.2 液状化が起きた際の砂地盤の動き

### 1.3 既存の液状化危険度判定

本節では、「1. 対象とする住宅の施工地で、地震の発生時に地盤液状化が発生するのか」の問いに答えるための既存の方法について述べる。現在、液状化危険度を知る方法は、「ハザードマップ」を利用するもの、「SWS 試験を用いた簡易液状化判定」などが存在する。

#### 1.3.1 ハザードマップ

液状化発生危険度を知る簡便な方法の一つに、市町村単位で作成しているハザードマップの利用がある。ハザードマップとは、既存のボーリング柱状図を用いた液状化危険度判定（後に記す  $P_L$  値や  $D_{cy}$  値）の結果や微地形区分などにより液状化発生危険度などを判断し、まとめたものである。メリットとして、各自治体が公表している場合が多く、利用者が住んでいる場所が液状化するかどうかを簡単に知ることができる。しかし、デメリットとして、作製の際に区切った範囲内はすべて同一の地盤条件と考え液状化判定を行うため、対象地の地盤が局所的に変化する場合などは、その変化を考慮できないこと、ハザードマップが公表されていない地域では、液状化の危険度を把握することできないことが挙げられる。

一例として岐阜市中心部の液状化ハザードマップ<sup>1-23)</sup>を図-1.3に示す。この図は、国土交通省が公表しているハザードマップの作成の手引き<sup>1-16)</sup>を参考に作成され、液状化発生危険度によってそれぞれ色分けがなされおり、利用者が地盤工学の基礎知識がなくても液状化の危険度を知ることができるようになっている。

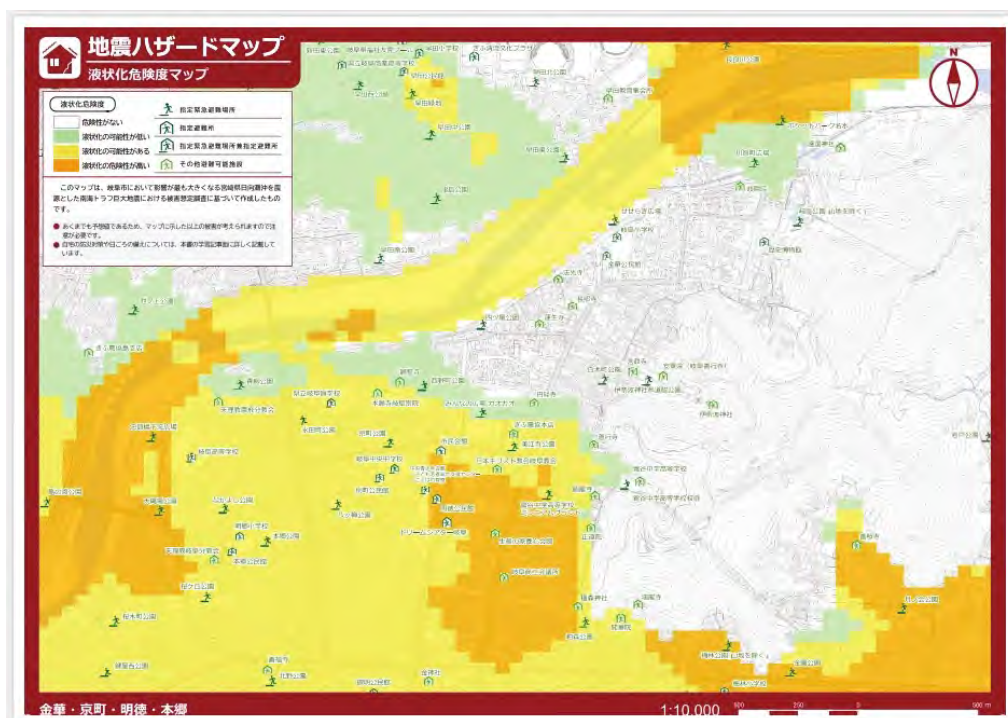


図-1.3 岐阜市中心部の液状化ハザードマップ<sup>1-23)</sup>

ハザードマップの作成手順を以下の図-1.4に示す。図-1.4における、「液状化発生傾向図」の中の微地形とは、臨海部、大河川沿いの沿岸部、海岸砂丘の裾、砂丘間の低地などの自然地形の他に、埋立地、低地（湿地）上の盛土造成地、砂利（砂鉄）等採取後の埋戻し地、丘陵地や台地の谷埋め盛土造成地などの人工改変地などがある。微地形の液状化発生傾向を表-1.1に示すような5段階評価で評価している。

宅地の液状化危険度マップの作成における液状化危険度の判定としては、収集した地盤情報から各層の液状化に対する安全率（ $F_L$ ）を算出し、これを基に算出される非液状化層厚（ $H_L$ ）、地表変位量（ $D_{cy}$  値）、液状化指標値（ $P_L$  値）を図-1.5に示す判定図でA、B1、B2、B3、Cの5区分3段階に区分けし、液状化被害の可能性を表-1.2で判定するものである<sup>1-16</sup>。なお、各パラメータの算出方法は、以下に記載する。

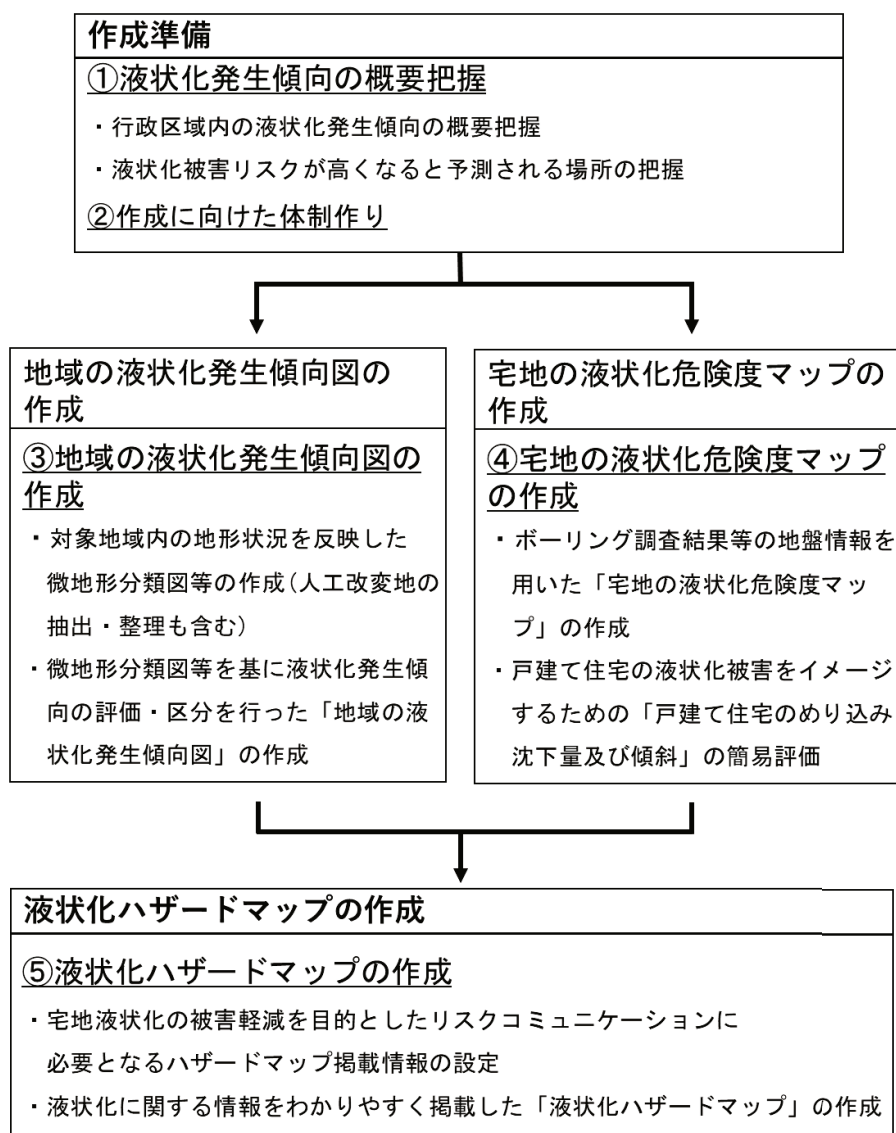








図-1.4 液状化ハザードマップの作成手順<sup>1-16</sup>を基に作成

表-1.1 手引きで標準としている微地形の「液状化発生傾向の評価区分」<sup>1-16)</sup>

液状化発生傾向 の評価区分		微地形(自然地形)及び人工改変地	
 強       弱		微地形(自然地形)	旧河道、砂丘縁辺部、 砂丘間低地・砂州間低地
		人工改変地	埋立地 <sup>※1</sup> 、砂利(砂鉄)採取後の埋戻し地、 低地(湿地)上の盛土造成地 <sup>※2</sup>
		微地形(自然地形)	三角州・海岸低地、自然堤防、 砂州上・砂丘上の凹地
		人工改変地	干拓地 <sup>※3</sup> 、浅い谷や凹地の盛土地、 谷埋め盛土造成地
		微地形(自然地形)	砂州・砂礫州、氾濫低地、後背低地
		微地形(自然地形)	砂丘(砂丘縁辺部、砂丘間低地を除く)、 扇状地 <sup>※4</sup> 、谷底低地
		微地形(自然地形)	山地・丘陵、山麓堆積地形、台地 <sup>※5</sup>

- ※1 微地形分類(自然地形)における「旧水部(埋立地)」を含む
- ※2 谷底低地を除く、後背低地や氾濫低地、三角州・海岸低地、砂丘間低地・砂州間低地の低地面や干拓地上に盛土下造成地
- ※3 微地形分類(自然地形)における「旧水部(干拓地)」を含む
- ※4 盛土造成されていない「扇状地上の旧河川」を含む
- ※5 盛土造成されていない「台地上の浅い谷・凹地」を含む

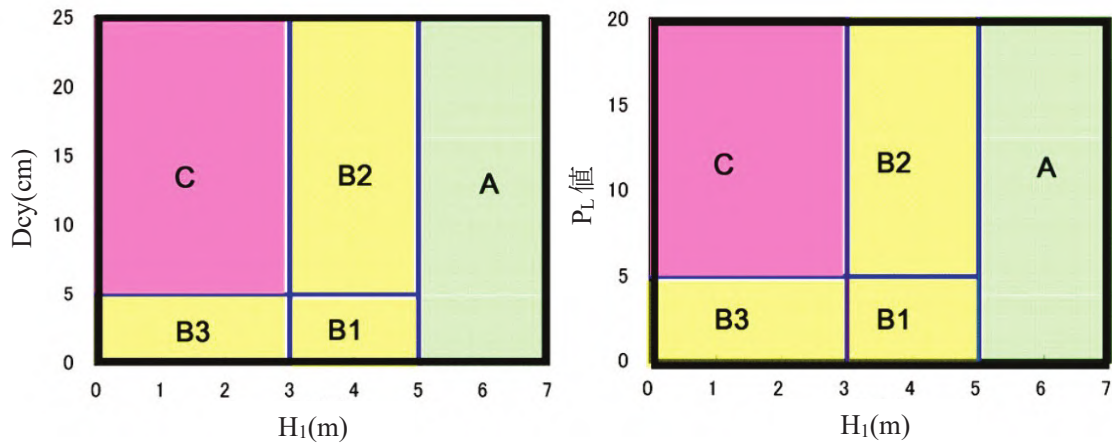


図-1.5 H<sub>1</sub> 値、D<sub>cy</sub> 値、P<sub>L</sub> 値による判定図<sup>1-16)</sup>

表-1.2 判定図の数値表<sup>1-16)</sup>

判定結果	H <sub>1</sub> の範囲	D <sub>cy</sub> の範囲	P <sub>L</sub> 値の範囲	液状化被害の可能性
C	3m以下	5cm 以上	5 以上	顕著な被害の可能性が高い
B3		5cm 未満	5 未満	
B2	3mを超え、5m以下	5cm 以上	5 以上	顕著な被害の可能性が比較的低い
B1		5cm 未満	5 未満	
A	5mを超える	—	—	顕著な被害の可能性が低い

[F<sub>L</sub> 値及び P<sub>L</sub> 値算出方法<sup>1-24)</sup>]

$$F_L = \frac{R}{L} \quad \dots (1.1)$$

$$P_L = \int_0^{20} (1.0 - F_L)(10.0 - 0.5Z)\Delta Z dx \quad \dots (1.2)$$

ここで、R：液状化強度比、L：繰返しせん断強度比、Z：地表面からの深さ（m）、ΔZ：対象とする地盤の層厚（m）である。また、F<sub>L</sub> 値は 1.0 以上で液状化しない、F<sub>L</sub> 値が 1.0 以下で液状化する危険性がある。

[非液状化層厚（H<sub>1</sub>）の算出方法]

非液状化層厚（H<sub>1</sub>）は、以下 4 つの条件の中で 1 つでも該当する地層の層厚である。

1. 地下水位より浅い層
2. 液状化抵抗率 F<sub>L</sub> が 1.0 以上の層
3. N 値が 2 より大きい粘性土層
4. 細粒分含有率 35%を超える層

[Dcy 値の算出方法]

$$Dcy = \sum \frac{\gamma_{cvi} H_i}{100} \quad \dots (1.3)$$

ここで、 $\gamma_{cvi}$  : i 層の繰返しせん断ひずみ、 $H_i$  : i 層の層厚、i 層 : 計算対象としている地層である。

なお、繰返しせん断ひずみは以下の図-1.6 より決定し、 $\tau_d$ は水平方向に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅 (kN/m<sup>2</sup>)、 $\sigma_z'$ は検討する深さにおける鉛直方向の有効応力 (kN/m<sup>2</sup>)、Na は補正 N 値を示す。

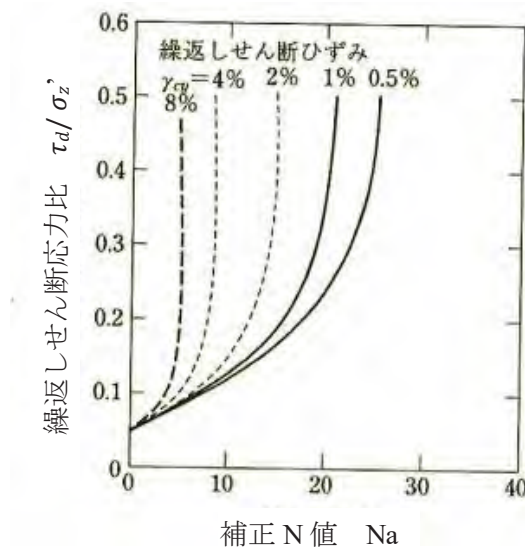


図-1.6 補正 N 値 Na と繰返しせん断ひずみの関係<sup>1-24)</sup>



### 1.3.2 住宅を対象とした簡易液状化判定

住宅を対象とした液状化危険度判定は、主に2つに分けることができる。1つ目は、ボーリング調査によって、地層ごとのN値と土質試料を採取し、前節で紹介した $P_L$ 値、 $D_{cy}$ 値の計算を行う方法である。この方法は、高精度な液状化判定が可能ではあるが、費用が高い特徴がある。2つ目が、スクリーウエイトサウンディング試験（以下、SWS試験と呼ぶ）の試験結果を基に、簡易的に液状化危険度を把握する方法である。手軽で費用も安価であるが、地震動などによる詳細な検討は行えない特徴がある。以下にSWS試験による調査手順を示す。

#### [調査手順]

1. 国土交通省告示第1113号第2項<sup>1-25)</sup>より、深さ5mまでSWS試験を実施し、その地層までの土質試料を採取する。
2. 採取した土質試料から、前節で述べた非液状化層( $H_1$ )とそれ以外の層(液状化層 $H_2$ と呼ぶ)を判別し、層厚を決定する。
3. 図-1.7を参照し、求めた $H_1$ と $H_2$ を図中に当てはめ、液状化危険度を判定する。

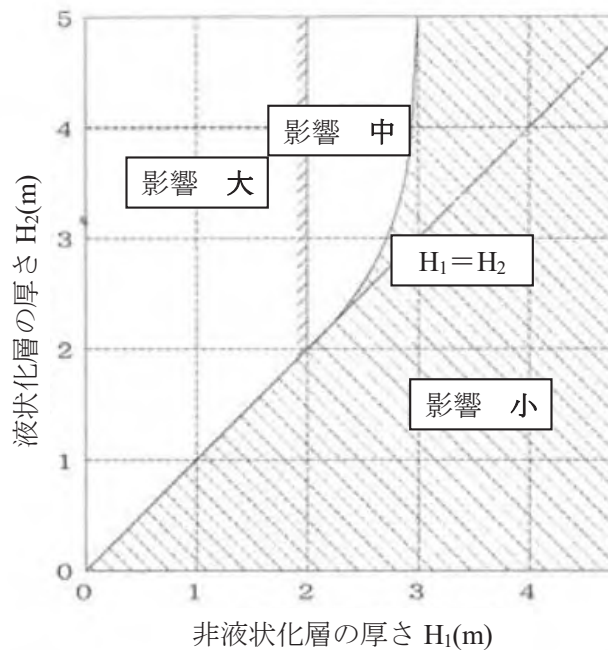


図-1.7 液状化層 $H_1$ と非液状化層 $H_2$ の関係図<sup>1-26)</sup>

また、共通の課題として、既設住宅の場合には住宅直下の液状化危険度を把握することができない点が挙げられる。

## 1.4 既往の液状化対策工法について

液状化危険度が高い地盤では、予防対策として液状化対策を施工することが望まれる。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-1.8<sup>1-27)</sup>に示す。

### 1)液状化そのものを防止する方法

液状化の発生要因に過剰間隙水圧の上昇、それに伴う有効応力の減少がある。そのためには、密度を上げて地盤を締固めることで過剰間隙水圧の発生を抑制する（密度の増大）、添加剤によって土粒子間の結びつけることで過剰間隙水圧を抑制する（固化）、過剰間隙水圧が発生しづらい地盤材料に置き換える（粒度の改良）などの**土の性質改良**と、地盤に透水性が高い物質を埋め込むことで過剰間隙水圧の上昇を抑制、過剰間隙水圧の消散を促進させる（間隙水圧の抑制・消散）、対象地盤を地中壁で囲うことにより周辺地盤で上昇した過剰間隙水圧の流入を防ぐ（間隙水圧の遮断）、対象地盤を地中壁で囲うことにより地震などのせん断変形を抑制する（せん断変形）などの**応力・変形及び間隙水圧に関する条件の改良**に大別できる。

具体的な工法としては、土の密度を増大させ地盤を締固めることで過剰間隙水圧の発生を抑制する工法（密度増大工法）、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（間隙水圧消散工法）、土の材料を改良することで液状化しない地盤材料に置換する工法（置換工法）や、地下水位を低下させることで飽和度を低下させる工法（地下水位低下工法）が挙げられる。

### 2)液状化の発生は許すが、構造物や施設の被害を軽減する対策

上部構造物の面積が大きい場合、液状化発生を抑制しなければならない範囲が広大になり、対象地盤の地震時液状化を完全に防止することが難しい場合がある。そのため、液状化は発生してしまっても、上部構造物が沈下、傾斜する被害を軽減するためことを目的とした方法である。

具体的な工法としては、構造物の直下に杭と呼ばれるコンクリートや鋼製の円柱状の物体を埋め込み、堅固な地盤との反力や周辺地盤との摩擦力で上部構造物を支持する工法（杭基礎工法）、液状化に伴う上部構造物の側方変位を抑制する方法（ジオグリッドによる補強）などが挙げられる。

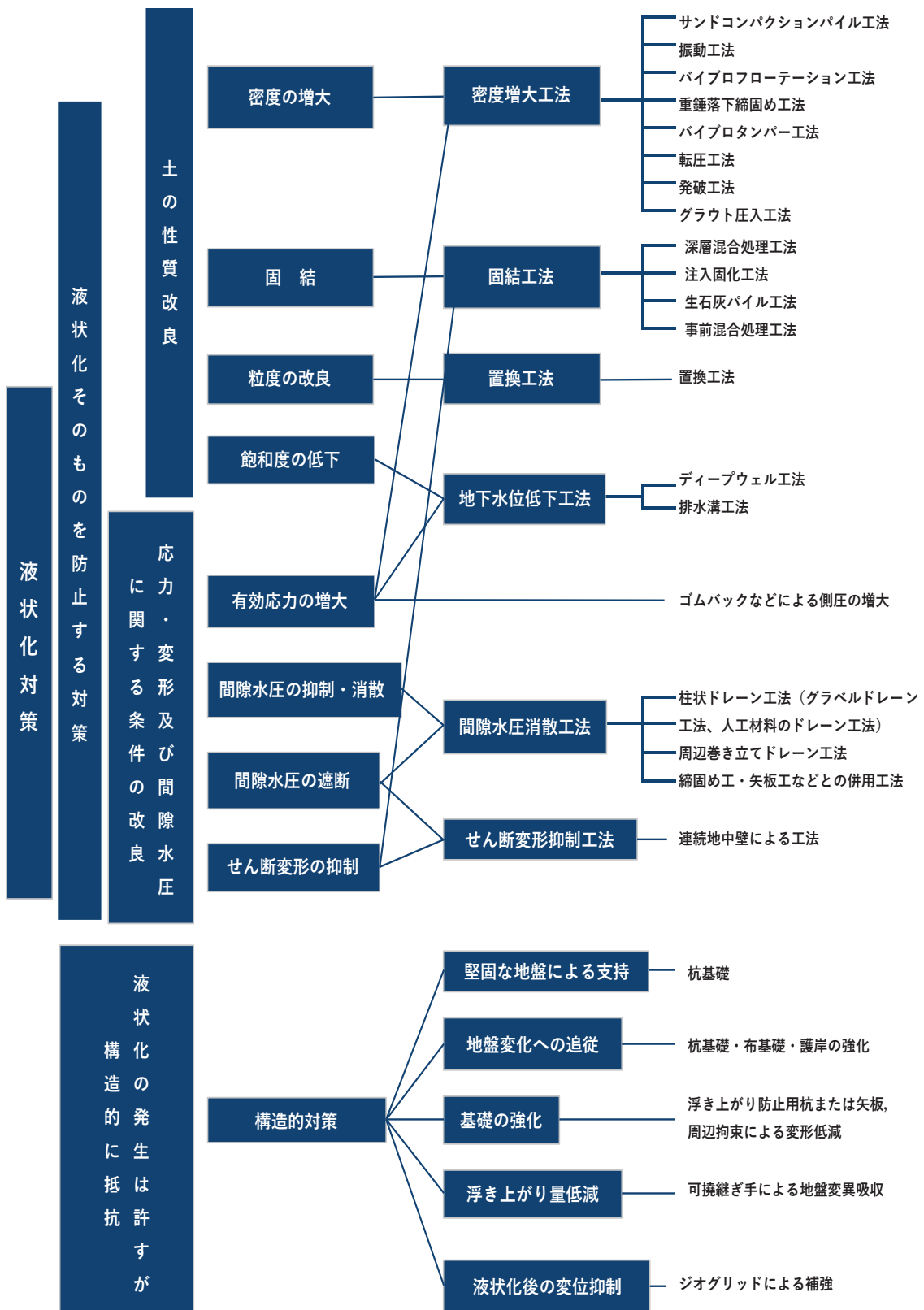


図-1.8 既往の液状化対策工法の分類<sup>1-27)</sup>

#### 1.4.1 住宅に適応可能な液状化対策工法

既設住宅を対象とした液状化対策工法は、既設住宅のみを対象とした場合と、既設住宅と道路を一体的に対策する場合に大別できる。実際に施工されている工法の例として、2011年東北地方太平洋沖地震で被災した千葉県浦安市<sup>1-28)</sup>と2016年熊本地震で被災した熊本県熊本市<sup>1-29)</sup>では地下水位低下工法が、2018年北海道胆振東部地震<sup>1-30)</sup>では薬液注入工法などが施工されている。これらの工法は、液状化被害後に再発防止のために施工されており、予防としての液状化対策工法は少ないのが現状である。その原因として以下の点が考えられる。

1. すでに住宅が建っているため、住宅に沈下や傾斜の被害を与えないために周辺地盤を乱してはいけない
2. 住宅地などでは、広大な施工場所が少ないため施工箇所が狭小である
3. 施工費用が割高である。

上記3つの原因を解決できる工法のなかで、検討した対策工法を既設住宅のみを対象とする場合と、既設住宅と道路を一体的に対策する場合に分け、対象とした各工法を以下に説明する。

##### [既設住宅のみを対象とする場合]

- ・密度増大工法
- ・高圧噴射攪拌工法
- ・薬液注入工法
- ・人工ドレーン工法

##### [既設住宅と道路を一体的に対策する場合]

- ・杭状改良工法
- ・格子状改良工法（深層混合処理工法）
- ・地下水位低下工法

### [密度増大工法(締固め工法)]

密度増大工法とは、地盤を締め固めることにより、砂粒子間の間隙を小さくするとともに、堆積状況の変化（地中の応力状態や地盤の均質化）などを図ることにより、地盤全体として液状化に対する抵抗を増加させる方法である。その中でも、小径のロッドを地中に貫入し、特殊注入ポンプで地盤中に砂やモルタルなどの材料を圧入する静的圧入タイプ（**図-1.9 参照**）の方法の場合、斜め削孔や曲がり削孔によって既設住宅にも施工が可能である（**写真-1.35 参照**）。

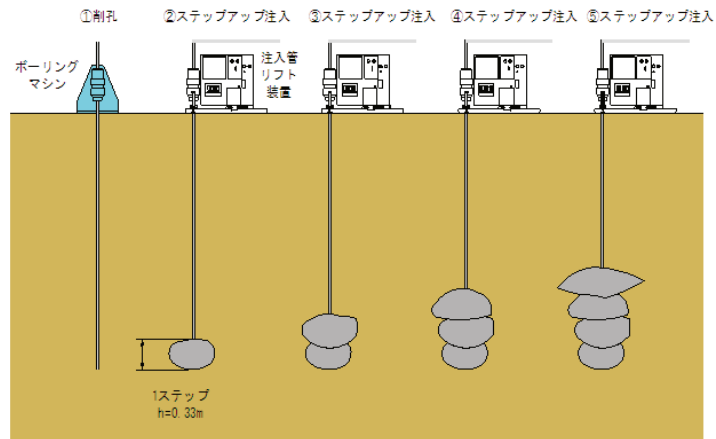


図-1.9 静的圧入タイプの施工手順 1-31)



写真-1.35 斜め施工の様子 1-31)

### [高圧噴射攪拌工法]

高圧噴射攪拌工法は、径の細いロッドを地盤中に貫入し、ロッド先端からスラリーを高圧で吐出することによって地盤を切削混合して改良体を形成する工法である。一般には、単管や二重管、三重管などを用いた方法が使い分けられており、工法に応じて大小様々な仕様の改良体を造成する。ロッドを地盤中に貫入するだけでよいので、施工機械のコンパクト化を図ることが可能である。図-1.10 に示すように、従来技術と同等以上の改良品質を確保しながら、狭隘空間での施工を可能とする超小型機械も活用されている。



図-1.10 超小型の高圧噴射攪拌施工機<sup>1-32)</sup>

[薬液注入工法]

薬液注入工法とは、地盤内に水ガラス、特殊シリカ液、高分子系薬液などを注入することで、地盤内に改良体を形成し地盤の強度や止水性を増加させる工法である。その中でも本研究で対象とした特殊シリカ液を用いた場合、地盤内に注入した特殊シリカ液が土粒子の周辺に付着することで(図-1.11 参照)、地盤の内部摩擦角(せん断抵抗角)を変化させず、粘着力を付加し地盤液状化を抑制することができる。他にも、本研究で対象とする工法はセメント系改良による液状化対策と異なり、薬液注入後に即座に出来高確認を行うことが可能<sup>1-33)</sup>で施工不良が発生しづらく、既設住宅を対象とした場合に有意であることもメリットである。

また、従来の薬液注入工法では、注入管付近からの薬液漏洩、割裂脈の発生及びそれらに伴うコスト高、多層地盤では透水係数の高い層に流れやすい等の問題が指摘されていた。しかし、赤塚らが開発した新たな薬液注入工法<sup>1-34)</sup>では、従来の工法と比較すると注入圧力を低く抑えることができ、透水性の高い層への浸透集中を防ぐとともに、一回の改良半径を大きくすることが可能となっている。それに伴い、図-1.12 に示すように、従来の工法と比較し約 1/4 にコストダウンが可能となっている<sup>1-35)</sup>。

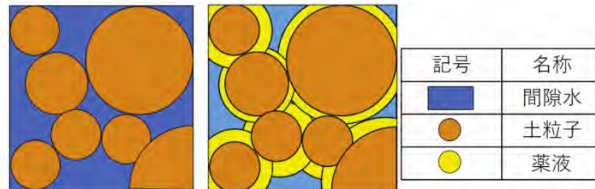


図-1.11 特殊シリカ液を用いた薬液注入工法のイメージ  
(左図：自然地盤 右図：改良地盤)



※削孔費には、地山パッカ充填、シール材充填費含む  
注意事項：削孔、注入速度、薬液シリカ濃度は、モデルケースを対象にしたものであって、周辺状況、地盤種別により価格は変化する。

図-1.12 新しい薬液流入工法と従来の工法の費用比較<sup>1-35)</sup>

### 〔人工ドレーン工法〕

人工ドレーン工法とは、地盤内に透水性の高いドレーン材を適切な間隔で挿入することで、地震時に発生する過剰間隙水圧の消散を促進させて地盤の液状化を防ぐ工法である。その中でも吉原の開発した工法<sup>1-36)</sup>は、小型回転圧入装置（写真-1.36 参照）を用いて地盤にポリプロピレンを原料とした人工のドレーン材を打ち込む（写真-1.37 参照）。打設の際は、先端部に樹脂製の使い捨て先端ビットを付けて人工ドレーン材を回転圧入する。小型の回転圧入装置を用いているので、狭隘な施工環境に対しても施工が可能となっている。



写真-1.36 小型回転圧入装置<sup>1-36)</sup>



写真-1.37 ドレーン圧入施工<sup>1-36)</sup>



### 1.4.2 各工法の経済性評価

地盤改良のコストは、地盤条件、外力条件などの設計に起因するものと、現場条件や周辺環境などの施工に起因するもので変化する。図-1.13<sup>1-37)</sup>は、一般の地盤改良の施工面積と1m<sup>2</sup>あたりの地盤改良コストを試算したものである。これによると、1,000m<sup>2</sup>を超えると従来の大型施工機械での施工が可能であり、それ以下になると種々の制約・条件によって、施工費用が上昇することがわかる。

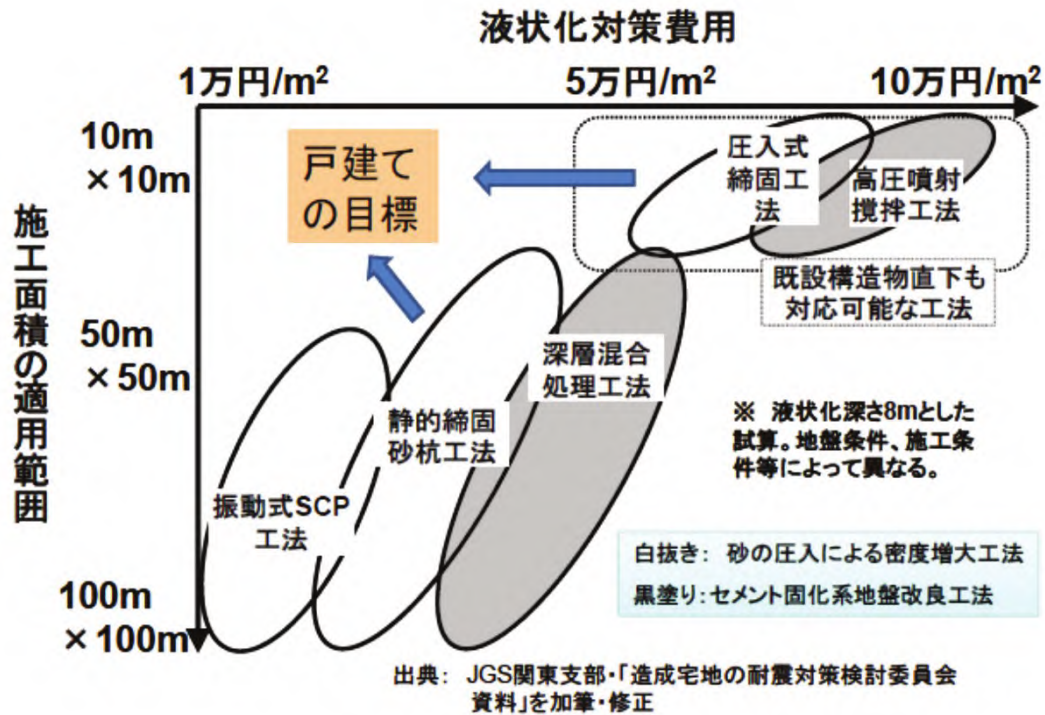


図-1.13 施工面積と液状化対策費用<sup>1-37)</sup>

前述した工法の中で、密度増大工法、高圧噴射攪拌工法、薬液注入工法について地盤工学会では対策費用の試算を実施している<sup>1-37)</sup>。対象とする施工範囲は、一般的な工事スケールを想定するために20戸(3,000m<sup>2</sup>)のケースを設定し、それ以下については最も小さな単位である1戸(150m<sup>2</sup>)の場合と、スケール差を照査するために3戸(450m<sup>2</sup>)の場合を設定した。

以下に詳細な条件を述べる。

① 地盤条件

- ・ 相対密度 50%、地下水位 1m、細粒分の少ない細砂

② 改良に関する条件

- ・ 改良厚さを 1.5m、3.0m、4.5m の 3 通り

③ 現場条件

- ・ 施工基盤は特に支障の無いものとした。
- ・ 既設の場合の隣家や外構については施工に支障となるものは特に無いものとした。
- ・ 現場までの搬入路には障害が無く、施工機械の運搬、材料の運搬について特別な措置を施す必要は無いものとした。
- ・ 地中に施工の障害となるようなものは存在しないものとした。
- ・ プラントや材料の置き場などについては支障なくできるものとした。
- ・ 施工に際しての補助工法などは特に必要ないものとした。

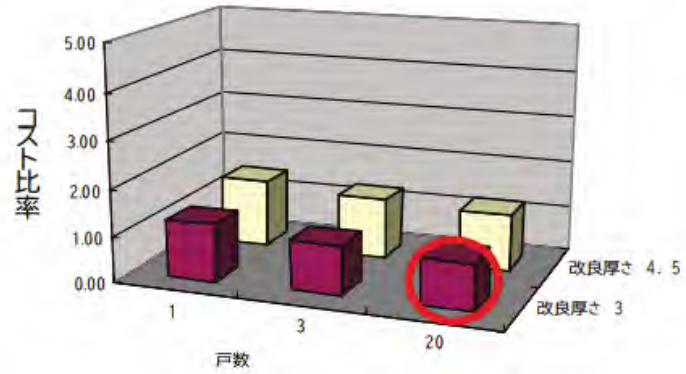
④ 周辺環境

- ・ 周辺に施工上配慮すべき施設等はなく、施工時間は昼間 9 時から 17 時まで 8 時間を確保できるものとした。
- ・ 現場作業員等は通勤できるものとした。
- ・ 使用する水や排水などに関する制約は無いものとした。

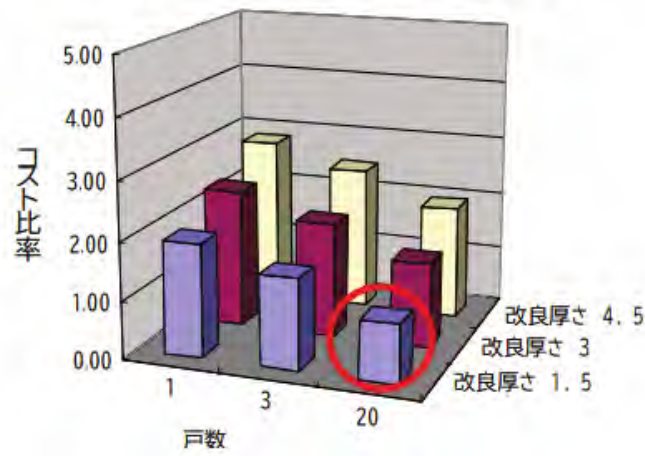
試算結果を図-1.14 に示す。なお、図中の赤丸部分は各工法のコスト比率の基準とした 20 戸改良深さ 1.5m の部分を表している。

密度増大工法（静的圧入タイプ）や薬液注入工法では施工面積による変動が小さい。しかしながら、密度増大工法（静的圧入タイプ）では施工機械の運搬費と組立解体費などの固定費が存在する。また、その比率が大きいため、改良深さ、すなわち施工数量による対策費用の変動も小さくなる。一方の薬液注入工法は、固定費そのものが小さいため、改良深さ（施工数量）による対策費用の変動が顕著になる。また、高圧噴射攪拌工法では、施工面積による対策費用の変動も現れている。高圧噴射攪拌工法の場合には、材料供給のためのプラントなどの装備に一定の固定費がかかるためであるが、施工費とのバランスにおいては大きくないため、改良深さによる変動も現れている。

密度増大工法（静的圧入タイプ）



固化工法（高圧噴射攪拌工法）



固化工法（薬液注入工法）

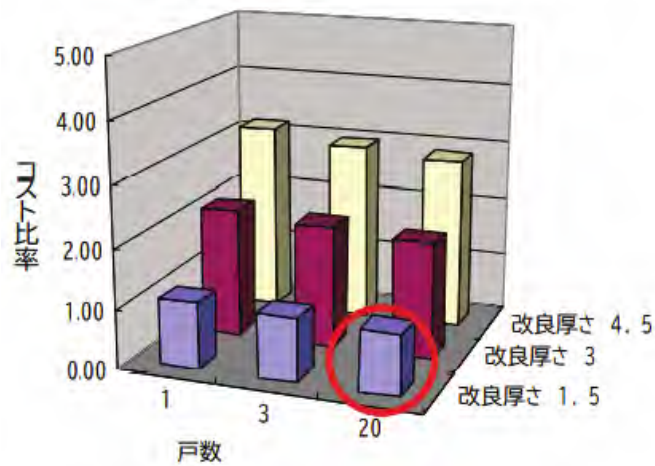


図-1.14 施工面積による対策費用の変動<sup>1-37)</sup>

### [杭状改良工法]

杭状改良工法とは、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工法である。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す。

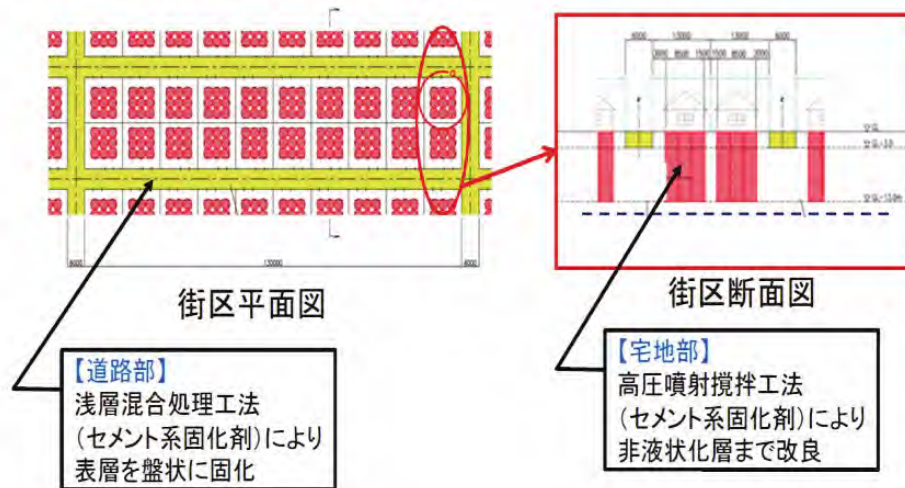


図-1.15 杭状改良工法の概要<sup>1-36)</sup>

### [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、対策費用が割高。
- ・ 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 百万円/戸程度）。

**[格子状改良工法（深層混合処理工法）]**

深層混合処理工法とは、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り、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す。

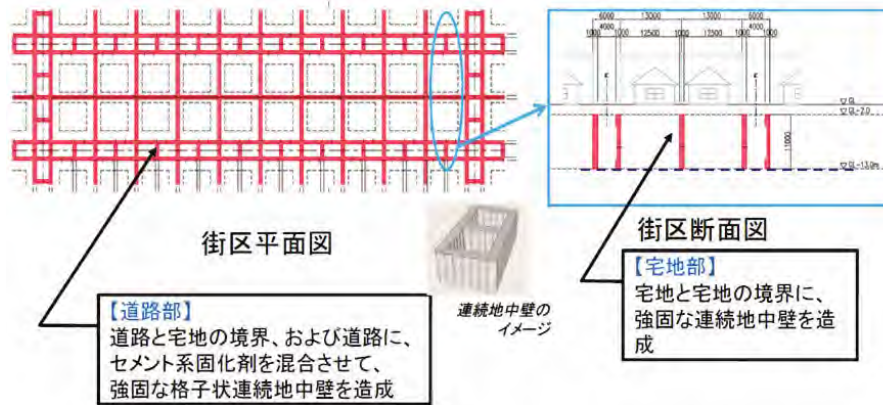


図-1.16 格子状改良工法（深層混合処理工法）の概要 1-36)

**[特徴・課題]**

- ・ 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）。

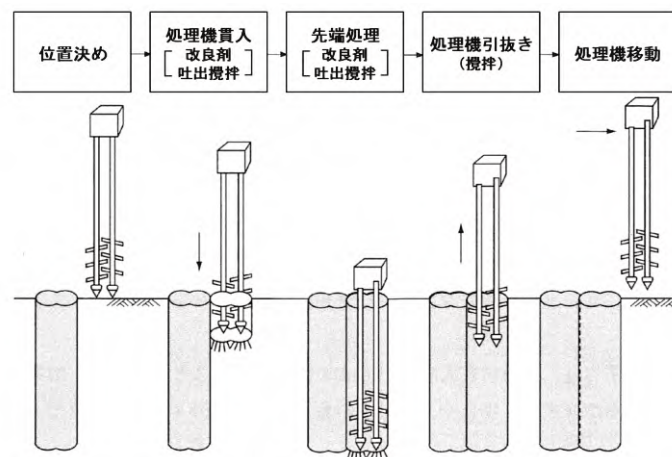


図-1.17 格子状改良工法（深層混合処理工法）の工法概念図 1-36)

### [地下水位低下工法]

地下水位低下工法とは、道路直下と宅地地盤内に配水管を敷設して、地下水を下げることで、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す。

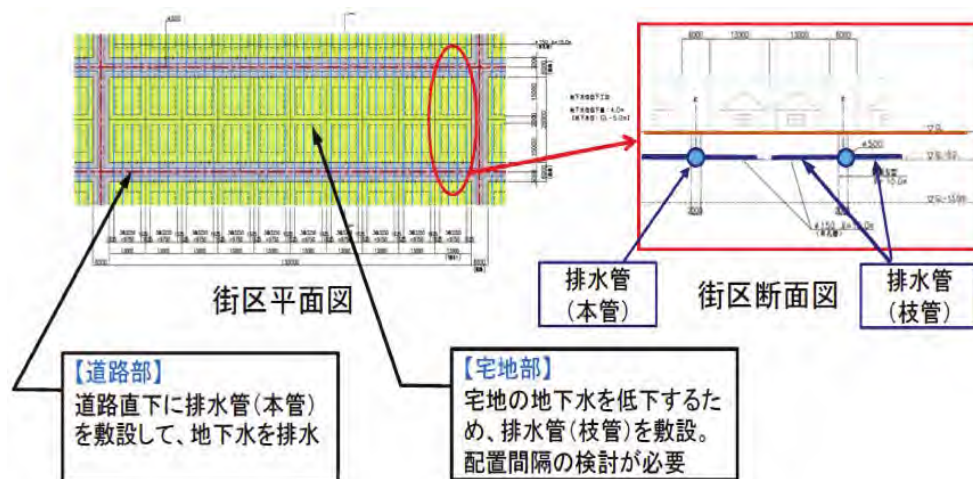


図-1.18 地下水位低下工法の概要図 1-36)

### [特徴・課題]

- ・ 地下水位低下量と液状化対策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場合がある。

## 1.5 地震後の家屋復旧費用

戸建住宅の液状化による沈下傾斜の修復工法として、プッシュアップ工法、硬質ウレタン注入工法、液剤注入工法、耐圧盤工法、アンダーピニング工法などがある。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。住宅の沈下傾斜修復工法と適用基礎、費用等を表-1.3 に示す。

表 1-3 既設住宅地の液状化対策工法と評価<sup>1-38)</sup>

工法	プッシュアップ工法	硬質ウレタン注入工法	液剤注入工法	耐圧盤工法	アンダーピニング工法
基礎	ベタ基礎 布基礎	ベタ基礎	ベタ基礎	ベタ基礎 布基礎	ベタ基礎
直せる傾き	10cm程度	5cm程度	条件なし	条件なし	条件なし
工事費用 (万円)	200～300	350～600	300～600	500～700	600～1,000
工事期間	2～3週間	1～3週間	1～2週間	2～5週間	1～2ヶ月

### 1.5.1 液状化被害認定について

液状化によって被害を受けた住宅は、申請することにより市町村から「当該災害による被害の程度を証明する書面」を受け取ることができる<sup>1-38)</sup>。その認定までのフロー図のうち、木造、プレハブ住宅の場合を図-1.19 に、鉄筋コンクリートなどの非木造の場合を図-1.20 に示す。各項目の判定基準について、以下に記す。

#### 第1次調査

第1次調査とは、外観の損傷状況の把握、住宅の傾斜の計測及び住宅の主要な構成要素（外観から調査可能な部分に限る）ごとの損傷程度等を、目視にて把握する調査である。

##### 【傾斜】

住家に不同沈下があるかどうかを外観目視調査により把握するとともに、外壁又は柱の傾斜を下げ振り等により測定し、判定を行う。傾斜は原則として住家の1階部分の外壁の四隅又は四隅の柱を計測して単純平均したものとす。傾斜が1/20 以上の場合は、当該住家の損害割合を50%以上とし、「全壊」と判定する。住家に不同沈下があり、かつ、傾斜が1/60 以上1/20 未満の場合は、当該住家の損害割合を40%以上50%未満とし、「大規模半壊」と判定する。住家に不同沈下があり、かつ、傾斜が1/100 以上1/60 未満の場合は、当該住家の損害割合を20%以上30%未満とし、「半壊」と判定する。また、傾斜が1/100 未満である場合は、傾斜による判定は行わない。

### 〔住宅のめり込み沈下〕

住家の基礎等の地盤面下へのめり込み状況を外観目視調査により把握し、判定する。なお、水害によって土砂等が住家及びその周辺に一樣に堆積している場合、堆積した土砂等により上昇した面を地盤面として取り扱う。住家の床上 1m までのすべての部分が地盤面下に潜り込んでいる場合は、当該住家の損害割合を 50%以上とし、「全壊」と判定する。住家の床までのすべての部分が地盤面下にめり込んでいる場合は、当該住家の損害割合を 40%以上 50%未満とし、「大規模半壊」と判定する。基礎の天端下 25cm までのすべての部分が地盤面下にめり込んでいる場合は、当該住家の損害割合を 20%以上 30%未満とし、「半壊」と判定する

## 第 2 次調査

第 2 次調査は、第 1 次調査を実施した住家の被災者から申請があった場合に実施し、第 1 次調査で実施した外観目視調査だけでなく、内部立入調査によって住宅の傾斜の計測及び住宅の主要な構成要素ごとの損傷程度等も把握する調査である。ただし、調査棟数が少ない場合においては、第 1 次調査を実施せず、第 2 調査から実施する場合もある。

原則として、申請者の立会いの下で内部立入調査を行う必要があるが、倒壊の危険がある等、内部立入調査ができない相当の理由がある場合には、内部立入調査ができるようになるまで外観目視調査のみでも可としている。

### 〔部位〕

#### 1) 住家の傾斜が 1/60 以上 1/20 未満の場合

##### ① 住家の床までのすべての部分が地盤面下にめり込んだ場合

床の損害割合を 10%とし、1 階の外壁及び内壁の損傷率を 100%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

##### ② 基礎の天端下 25cm までのすべての部分が地盤面下にめり込んだ場合

床の損害割合を 10%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

##### ③ 基礎の天端下 25cm までの部分のうち、地盤面下にめり込んでいない部分がある場合

床の損害割合を 10%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

#### 2) 住家の傾斜が 1/100 以上 1/60 未満の場合

##### ① 住家の床までのすべての部分が地盤面下にめり込んだ場合

基礎のめり込みによる損害割合及び床の損害割合をそれぞれ 10%とし、1 階の外壁及び内壁の損傷率を 100%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

##### ② 基礎の天端下 25cm までのすべての部分が地盤面下にめり込んだ場合

基礎のめり込みによる損害割合及び床の損害割合をそれぞれ 10%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。



- ③ 基礎の天端下 25cm までの部分のうち、地盤面下にめり込んでいない部分がある場合  
床の損害割合を 10%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

3) 住家の傾斜が 1/100 未満の場合

- ① 住家の床までのすべての部分が地盤面下にめり込んだ場合

基礎のめり込みによる損害割合を 10%とし、1 階の床、外壁及び内壁の損傷率を 100%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

- ② 基礎の天端下 25cm までのすべての部分が地盤面下にめり込んだ場合

基礎のめり込みによる損害割合を 10%とし、1 階の床の損傷率を 100%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

- ③ 基礎の天端下 25cm までの部分のうち、地盤面下にめり込んでいない部分がある場合

原則として、各部位の損害割合から住家の損害割合を算定する。床下に堆積した砂を除去するため、床の一部（床板等）の取り外しが必要である場合においては、床の損傷の程度Ⅳ（損傷程度 75%）と判定するとともに、液状化による基礎の損傷率を 10%とした上で、その他の部位の損害割合とあわせて、住家の損害割合を算定する。

**【第1次調査】**

**(1) 外観による判定**

- ①一見して住家全部が倒壊
- ②一見して住家の一部の階が全部倒壊
- ③地盤の液状化等により基礎のいずれかの辺が全部破壊かつ基礎直下の地盤が流出

いずれかに該当

**全壊**  
(損害割合50%以上)

**(2) 傾斜による判定**

**(3) 住家の潜り込みによる判定**

傾斜による判定と住家の潜り込みによる判定の被害程度の大きい方を採用  
傾斜が1/100未満である場合、傾斜による判定は行わない

外壁又は柱の傾斜が1/20以上

床上1mまでのすべての部分が地盤面下に潜り込み

いずれかに該当

**大規模半壊**  
(損害割合40%以上50%未満)

不同沈下があり、傾斜が1/60以上1/20未満

床までのすべての部分が地盤面下に潜り込み

いずれかに該当

**半壊**  
(損害割合20%以上30%未満)

不同沈下があり、傾斜が1/100以上1/60未満

基礎の天端下25cmまでのすべての部分が地盤面下に潜り込み

いずれかに該当

上記のいずれにも該当しない

該当

**地震・水害等通常の被害認定調査へ**

**【第2次調査】**

被災者から申請があった場合

**(1) 外観による判定**

- ①一見して住家全部が倒壊
- ②一見して住家の一部の階が全部倒壊
- ③地盤の液状化等により基礎のいずれかの辺が全部破壊かつ基礎直下の地盤が流出

いずれかに該当

**全壊**  
(損害割合50%以上)

**(2) 傾斜による判定**

外壁又は柱の傾斜が1/20以上

いずれにも該当しない

該当

**(3) 住家の潜り込みによる判定**

床上1mまでのすべての部分が地盤面下に潜り込んでいる

該当しない

該当

**(4) 部位による判定**

各部位の損傷程度等(及び傾斜)から住家の損害割合を算定する。

住家の損害割合

- 50%以上
- 40%以上50%未満
- 30%以上40%未満
- 20%以上30%未満
- 10%以上20%未満
- 10%未満

該当しない

**全壊**

**大規模半壊**

**中規模半壊**

**半壊**

**準半壊**

**準半壊に至らない(一部損壊)**

**【被災者から再調査の依頼があった場合の対応】**

被災者から再調査の依頼があった場合

被災者の依頼の内容を精査した上で、必要に応じて再調査を実施

図-1.19 災害認定までのフロー図 (木造・プレハブの場合)<sup>1-39)</sup>

## 【第1次調査】

### (1) 外観による判定

- ①一見して住家全部が倒壊
- ②一見して住家の一部の階が全部倒壊

いずれかに該当

### (2) 傾斜による判定

いずれにも該当しない

- ①外壁又は柱の傾斜が1/30以上
- ②(基礎ぐいを用いる住家について、)外壁又は柱の傾斜が1/60以上かつ最大沈下量又は最大露出量が30cm以上

いずれかに該当

### (3) 部位<sup>※</sup>による判定

該当しない

柱又は梁の損傷率が75%以上

該当

各部位の損傷程度等(及び傾斜)から住家の損害割合を算定する。

住家の損害割合

50%以上

40%以上50%未満

30%以上40%未満

20%以上30%未満

10%以上20%未満

10%未満

該当

該当

該当

該当

該当

該当

該当

**全壊**  
(損害割合50%以上)

**全壊**

**大規模半壊**

**中規模半壊**

**半壊**

**準半壊**

**準半壊に至らない  
(一部損壊)**

## 【第2次調査】

被災者から申請があった場合

### (1) 外観による判定

- ①一見して住家全部が倒壊
- ②一見して住家の一部の階が全部倒壊

いずれかに該当

### (2) 傾斜による判定

いずれにも該当しない

- ①外壁又は柱の傾斜が1/30以上
- ②(基礎ぐいを用いる住家について、)外壁又は柱の傾斜が1/60以上かつ最大沈下量又は最大露出量が30cm以上

いずれかに該当

### (3) 部位による判定

該当しない

柱(又は耐力壁)又は梁の損傷率が75%以上

該当

各部位の損傷程度等(及び傾斜)から住家の損害割合を算定する。

住家の損害割合

50%以上

40%以上50%未満

30%以上40%未満

20%以上30%未満

10%以上20%未満

10%未満

該当

該当

該当

該当

該当

該当

該当

**全壊**  
(損害割合50%以上)

**全壊**

**大規模半壊**

**中規模半壊**

**半壊**

**準半壊**

**準半壊に至らない  
(一部損壊)**

### 【被災者から再調査の依頼があった場合の対応】

被災者から再調査の依頼があった場合

被災者の依頼の内容を精査した上で、必要に応じて再調査を実施

図-1.20 災害認定までのフロー図 (非木造の場合)<sup>1-39)</sup>

## 1.5.2 保障費用

### (1) 民間の保険料<sup>1-40)</sup>

住宅の地盤液状化被害は、地震保険によって保障される。支払いは、建物（表-1.4）と家財（表-1.5）に分けられて支払いが行われる。支払いの上限もあり、建物が5,000万円、家財が1,000万円まで保証される。

表-1.4 建物の保険料<sup>1-40)</sup>

傾斜・沈下の状況	保険金
傾斜1度超・沈下30cm以上	保険金額100%
傾斜0.8度超1度以下・沈下20cm超30cm以上	保険金額60%
傾斜0.5度超0.8度以下・沈下15cm超20cm以下	保険金額30%
傾斜0.2度超0.5度以下・沈下10cm超15cm以下	保険金額5%

表-1.5 家財の保険料<sup>1-40)</sup>

損害状況	保険金
時価額80%以上の損害	保険金100%
時価額60%以上80%未満の損害	保険金60%
時価額30%以上60%未満の損害	保険金30%
時価額の10%以上30%未満の損害	保険金5%

## (2) 浦安市の保証

2011年東北地方太平洋沖地震で大きな被害を受けた浦安市では、住宅の液状化被害に対して以下の保証<sup>1-41)</sup>を行っている。

### 千葉県液状化等被害住宅再建支援事業補助金（半壊・一部損壊）

#### [対象]

市内の一戸建て住宅に居住していた被災世帯であって、次のいずれかに該当する世帯

- ・ 地盤被害により「半壊に至らない（一部損壊）」被害を受けた住宅を解体した世帯（住宅解体世帯）
- ・ 地盤被害により「半壊」または「半壊に至らない（一部損壊）」被害を受けた住宅の地盤を復旧（基礎の修復を含む）した世帯（住宅地盤復旧等世帯）
- ・ 「半壊」被害を受けた住宅を補修した世帯（半壊住宅補修世帯）

#### [補助金額]

以下の表-1.6に示す。

表-1.6 補助金額<sup>1-41)</sup>

	支給単位	支給額
住宅解体世帯	複数世帯 100万円	単数世帯 75万円
住宅地盤復旧等世帯	複数世帯 100万円	単数世帯 75万円
半壊住宅補修世帯	25万円	

### 千葉県液状化等被害住宅再建支援事業補助金（半壊・一部損壊）<sup>1-41)</sup>

市内に一戸建て住宅を所有していた被災世帯であって、申請時にこの住宅に居住していて、次のいずれかに該当する世帯

- ・ 住宅の建替え工事を行った世帯（住宅建替え世帯）
- ・ 住宅の地盤復旧工事または基礎の修復を行った世帯（住宅地盤復旧等世帯）
- ・ 全壊または大規模半壊世帯で住宅の補修を行った世帯（全壊等住宅補修世帯）
- ・ 半壊世帯で住宅の補修を行った世帯（半壊住宅補修世帯）

#### [補助金額]

- ・ 住宅建て替え世帯＝100万円
- ・ 住宅地盤復旧等世帯＝100万円
- ・ 全壊等住宅補修世帯＝100万円
- ・ 半壊住宅補修世帯＝25万円

## 1.6 本研究の目的

前節までに、過去の地震による液状化被害をまとめた。その被害を減らすためには液状化対策の普及が必要であると考えた。液状化対策の普及のためには、以下に示す2つの問いに答えることが重要であると考えた。

1. 対象とする住宅の地盤が、地震発生時に液状化が発生するのか
2. 地震による地盤液状化発生時に、住宅に沈下、傾斜などの被害がどの程度発生するのか

問い1に答えるための方法として、ハザードマップ、住宅を対象とした簡易液状化判定などが存在するが、それぞれ以下に示す課題があった。

### [ハザードマップ]

1. 作製するメッシュ間隔が250mメッシュであるため、そのメッシュ内で同様の地盤であれば住宅に適用できるが、同様な地盤でない場合には適用できない。
2. ハザードマップが準備されていない地域では、液状化危険度を把握できない。

### [住宅を対象とした簡易液状化判定]

3. 住宅直下および周辺の地盤状況を考慮することができない。

既往の液状化対策のなかでも、既設住宅を対象とした場合には、以下の要件があるため、施工できる工法が限られるのが現状である。

### [液状化対策工法]

1. 既設住宅に沈下や傾斜の被害を与えないために、周辺地盤を乱してはいけない。
2. 住宅地などでは、広大な施工場所が少ない場合が多く、大規模な施工機械が使用できない。
3. 住宅が傾いた後に、ジャッキアップによって修復する費用が約400万円程度と見込まれるため、それより安価である必要がある。

また、問い2に答えるためには、模型実験や数値解析を用いられる場合が多いが、模型実験は費用や時間の制約上、重力場で行われることが多く、定性的な評価にとどまっている。

本研究は、上記の課題を解決し、既設住宅の液状化被害を減らすために、以下に示す取り組みを行った。

液状化による既設住宅の沈下や傾斜を精度よく予測するためには、住宅直下だけでなく、その周辺の地盤情報も把握しなければならない。本研究では、地表面に線状に複数設置した速度計（ジオフォン）を用いて、深さ方向の面的なせん断波速度分布を得ることができる2次元表面波探査及び、リニア微動アレイ探査を実施した。得られたせん断波速度分布から、液状化危険度判定が可能か否かを検討した。

既設住宅を対象とした液状化対策工法として、新たな薬液注入工法に着目した。液状化対策効果を把握するためには、先に述べた品確法が要求する傾斜量を満たす必要があり、定性的ではなく定量的な対策効果の判定が必要である。そのため、相似則を満足できる遠心場模型振動台実験を用いて改良効果の定量的な把握を行った。次いで、実験で得られた対策効果を3次元有効応力

FEM で再現した。さらに、実験で検討した条件以外のケースについても数値解析を行い、液状化対策効果の予測効果を検討した。

## 1.7 本論文の構成

本論文は、第1～5章によって構成される。各章の内容を以下に示す。

### [第1章]

本研究の位置づけと背景について述べた。また、液状化発生メカニズム、液状化危険度判定に用いられるハザードマップについて述べたのち、既設住宅で施工が可能な液状化対策工法とその対策費用についてまとめた。最後に、本論文の構成について示した。

### [第2章]

住宅周辺の地盤状況を簡易に得る方法の妥当性について検討した。その方法として、地表面に線状に複数設置した速度計を用いて、深さ方向の面的なせん断波速度分布を得ることができる、2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査に着目し、液状化被害が確認された地域で実施した。得られたせん断波速度分布に基づいて、地盤の液状化危険度を表現する $P_L$ 値の算出を試みた。

### [第3章]

新たな薬液注入工法の住宅沈下量抑制効果を定量的に把握するために、遠心場模型振動台実験を実施した。対策深度及び対策範囲を変えることで経済的な対策の有り方を検討した。

### [第4章]

第3章で得られた薬液注入工法の住宅沈下抑制効果をより詳細に検討するために、3次元有効応力FEM(LIQCA3D17)による実験の再現解析を行った。実験以外のケースについても追加解析を実施し、詳細な改良効果の把握に努めた。

### [第5章]

結論であり、本研究のまとめと今後の課題及び展望を述べる。

本論文の構成フローを図-1.21に示す。



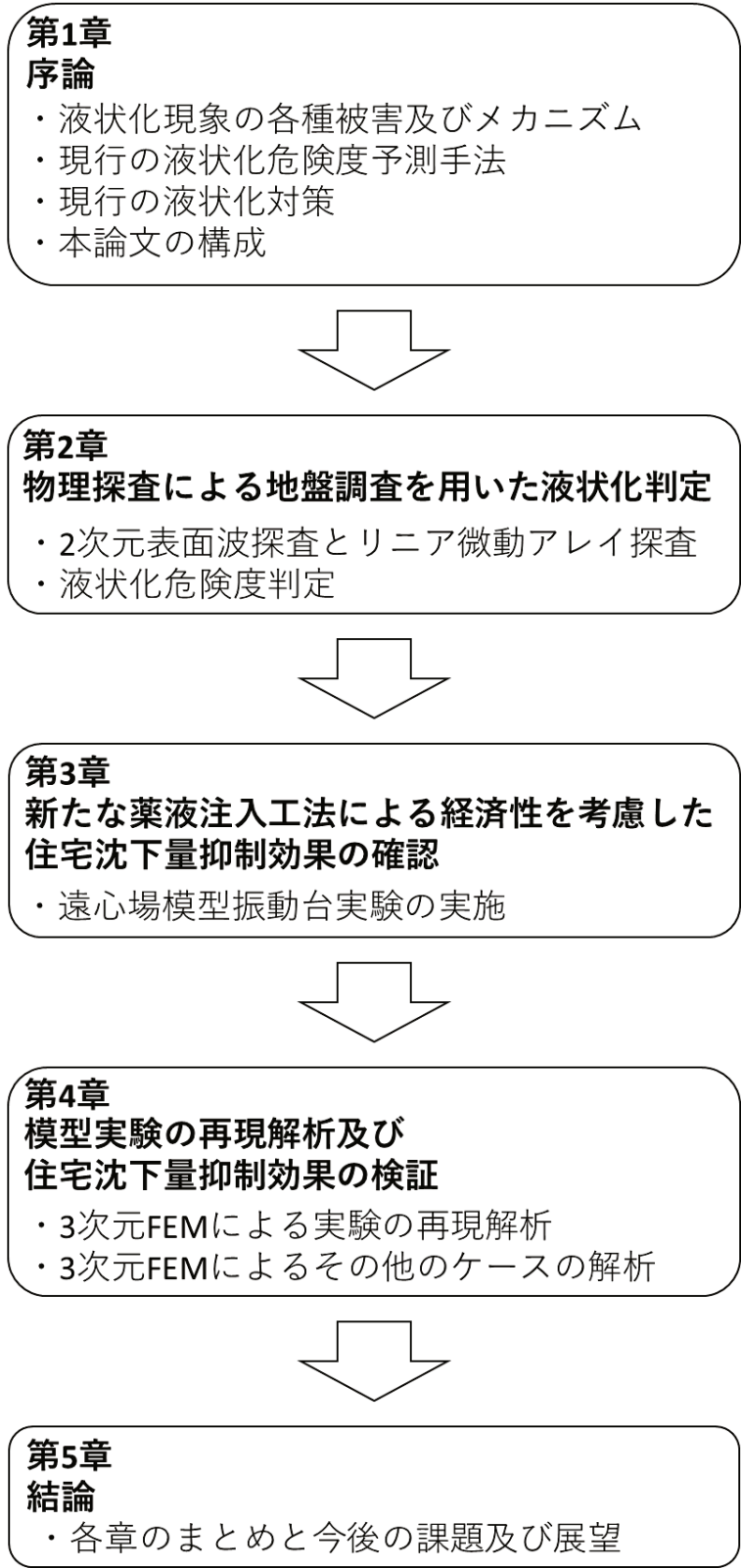


図-1.21 本論文のフロー

## 参考文献

- 1-1)内閣府: 平成 22 年度版防災白書, 第 1 章, 2010, 7.
- 1-2)国土交通省: 住宅の品質確保の促進等に関する法律, 平成 12 年建設省告示第 1653 号.
- 1-3)宇野英隆, 遠藤佳宏: 人の平衡感覚に関する研究:傾いた床での生活の限界, 日本建築学会  
計画系論文集, No. 490, pp. 119-125, 1996.
- 1-4)気象庁: 顕著な災害を起こした自然現象の名称について,  
URL: <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/meishou/meishou.html>, (2023 年 2 月 14 日アクセス).
- 1-5)防災科学研究所:1964 年新潟地震オープンデータ特設サイト,  
URL: <https://ecom-plat.jp/19640616-niigata-eq/index.php?gid=10011>, (2023 年 2 月 14 日アクセス).
- 1-6)一般社団法人 日本損害保険協会: 地震保険 50 年の歩み,  
URL: <https://www.jishin-hoken.jp/50th/>, (2022 年 2 月 14 日アクセス).
- 1-7)基礎地盤コンサルタンツ株式会社: 日本海中部地震,  
URL:<https://www.kiso.co.jp/activities/earthquake-report/1983nihonkai.html>, (2023 年 2 月 14 日アクセス).
- 1-8)基礎地盤コンサルタンツ株式会社: 釧路沖地震,  
URL: <https://www.kiso.co.jp/activities/earthquake-report/1993kushiro.html>, (2023 年 2 月 14 日アクセス).
- 1-9)基礎地盤コンサルタンツ株式会社: 北海道南西沖地震,  
URL: <https://www.kiso.co.jp/activities/earthquake-report/1993nansei.html>, (2023 年 2 月 15 日アクセス).
- 1-10)気象庁: 「阪神・淡路大震災から 20 年」特設サイト,  
URL: [https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/1995\\_01\\_17\\_hyogonambu/index.html](https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/1995_01_17_hyogonambu/index.html), (2023 年 2 月 15 日アクセス).
- 1-11)神戸市: 阪神・淡路大震災 写真から見る震災,  
URL: <https://www.city.kobe.lg.jp/a44881/bosai/disaster/earthquake01/earthquake03/index.html>, (2023 年 2 月 15 日アクセス)
- 1-12)基礎地盤コンサルタンツ株式会社:鳥取県西部地震,  
URL: <https://www.kiso.co.jp/activities/earthquake-report/2000tottori.html>, (2023 年 2 月 15 日アクセス).
- 1-13)若松加寿江, 吉田望, 規矩大義: 2004 年新潟県中越地震による液状化現象と液状化発生地点の地形・地盤特性, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, p263-276, 2006.
- 1-14)沼田淳紀, 上明戸昇, 池田隆明: 2007 年能登半島地震における液状化, 土木学会地震工学論文集, No.29, pp.20-29, 2007.
- 1-15)公益社団法人土木学会: 2007 年能登半島地震被害調査報告書,  
URL: <https://www.jsce.or.jp/report/42/report.shtml>, (2023 年 3 月 1 日アクセス).
- 1-16)国土交通省: 宅地液状化被害可能性判定に係る技術指針,  
URL: [https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi\\_tobou\\_tk\\_000053.html](https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000053.html), (2022 年 9 月 18 日アクセス).
- 1-17)若松加寿江, 先名重樹:2011 年東北地方太平洋沖地震による東北地方の液状化発生と土地条件, 日本地震工学会論文集, Vol.14, No.2, pp.124-143, 2014.
- 1-18)地盤.jp: URL: <https://www.ziban.jp/ekijoka.html>, (2022 年 10 月 9 日アクセス).

- 1-19)気象庁: 【気象庁技術報告】平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震調査報告,  
URL: [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/gizyutu\\_133.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/gizyutu/133/gizyutu_133.html), (2023 年 2 月 16 日アクセス).
- 1-20)基礎地盤コンサルタンツ株式会社: 平成 28 年(2016 年)熊本地震,  
URL: <https://www.kiso.co.jp/activities/earthquake-report/kumamotoEQreport2016.html>, (2023 年 2 月 22 日アクセス).
- 1-21)地盤工学会: 平成 28 年 4 月 熊本地震災害,  
URL: [https://www.jiban.or.jp/?page\\_id=2561](https://www.jiban.or.jp/?page_id=2561), (2023 年 2 月 24 日アクセス).
- 1-22)地盤工学会: 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団最終報告書,  
URL: [https://www.jiban.or.jp/?page\\_id=11421](https://www.jiban.or.jp/?page_id=11421), 2019,8(2022 年 9 月 24 日アクセス).
- 1-23)岐阜市:岐阜市総合安全読本,  
URL: <https://www.city.gifu.lg.jp/kurashi/bousai/1001378/index.html>, (2022 年 9 月 14 日アクセス).
- 1-24)日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 丸善出版株式会社, pp.49-56, 2019.
- 1-25)国土交通省: 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並びにそ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等を定める件, 平成 13 年 7 月 2 日国土交通省告示第 1113 号.
- 1-26)日本建築学会: 小規模建築物基礎設計指針, 2008.
- 1-27)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>, (2019 年 10 月 15 日アクセス).
- 1-28)浦安市ホームページ 液状化対策事業,  
URL: <https://www.city.urayasu.lg.jp/todokede/shinsai/ekijoka/index.html>, (2022 年 9 月 17 日アクセス).
- 1-29)熊持市ホームページ 熊本市液状化対策技術検討委員会  
URL: [https://www.city.kumamoto.jp/hpKiji/pub/detail.aspx?c\\_id=5&id=16165](https://www.city.kumamoto.jp/hpKiji/pub/detail.aspx?c_id=5&id=16165), (2022 年 9 月 17 日アクセス).
- 1-30)札幌市ホームページ 北海道胆振東部地震における地震被害対策 清田区塚里区,  
URL: <https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/stn/satozuka.html>,(2022 年 9 月 16 日アクセス).
- 1-31)東興ジオテック静的圧入締固め(CPG)工法(コンパクトシロウチング工法),  
URL: <https://www.toko-geo.co.jp/construction/show/97>,(2022 年 9 月 18 日アクセス).
- 1-32)ケミカルグラウト株式会社: 工法紹介 エコタイト-S,  
URL: <https://www.chemical-grout.co.jp/-technical/jetgrout/ecotights.html>,(2022 年 9 月 18 日アクセス).
- 1-33)大野康年, 苅谷敬三, 村田芳信, 花田有紀, 山本圭吾, 八嶋厚, 伊藤孝芳, 下坂賢二, 赤塚光洋: 薬液注入改良体の電気比抵抗を用いた出来高確認,京都大学学術リポジトリ, D303, 2021.
- 1-34)赤塚光洋, 大野康年, 伊藤孝芳, 下坂賢二, 八嶋厚, 村田芳信, 苅谷敬三, 花田有紀: 注入効率と品質を向上させた薬液注入工法の開発 —新しい地山パッカと特殊シール材の効果—, 土木学会論文集, Vol.77, No.1 , pp. 70-86, 2021.
- 1-35)ハイグリップグラウト工法研究会総会 ハイグリップグラウト工法を用いた既設戸建住宅の液状化対策, 2022.7.7.

- 1-36)吉原孝保: 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, 岐阜大学博士学位論文, 2019.
- 1-37)地盤工学会: 浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究,  
URL: [https://www.jiban.or.jp/?page\\_id=426](https://www.jiban.or.jp/?page_id=426), (2022年9月18日アクセス).
- 1-38)家の傾きは直せる! おすすめの家屋傾斜修正会社:  
URL: <https://www.naoseru-house-inclination.com/correct/price.html>, (2022年10月30日アクセス).
- 1-39)内閣府: 災害に係る住家の被害認定,  
URL: <https://www.bousai.go.jp/taisaku/unityou.html>, (2023年2月24日アクセス).
- 1-40)ほけん ROOM, URL: <https://hoken-room.jp/fire/8277>, (2022年10月30日アクセス).
- 1-41)浦安市 平成23年11月24日 第1回復興計画検討委員会 住宅・生活再建支援制度の概要,  
URL: [https://www.city.urayasu.lg.jp/\\_res/projects/default\\_project/\\_page\\_/001/002/935/09\\_siennseido.pdf](https://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/935/09_siennseido.pdf), (2022年10月30日アクセス).

## 第2章 面的な地盤調査法を用いた液状化判定

日本では、地盤状況を把握するためにボーリング試験やSWS試験（旧:スウェーデン式サウンディング試験、現:スクリューウエイトサウンディング試験）が広く使用されている。これらの調査技術は、地盤の状態を直接測定できるため、得られる情報はある程度の精度が保証されているが、時間がかかり大変な労力が求められる。また、平面的には点の情報しか得ることができない。本研究では、迅速かつ正確に面的な情報を所得できる調査技術として、物理探査手法の一つである2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査に着目した。2次元表面波探査は広範囲にわたる地盤情報を、リニア微動アレイ探査は2次元表面波探査と比べてより深い深部までの地盤情報を得ることができる手法である。これらの物理探査手法のメリットとして、同様の物理探査として有名な屈折法の場合、地表面に硬い層が存在すると、地中の地盤から屈折して計測器に届く波よりも、地表面を伝う波のほうが早く到達してしまうため、計測不良となってしまう<sup>2-1)</sup>が、これらの物理探査手法では周波数ごとに異なる位相速度を求めることで、地表面から地盤の深部までの表面波速度構造を得ることができる。また、表面波の伝達速度はせん断波速度の約92%であり、評価した速度構造をせん断波速度構造として評価することができる。そのため、住宅地の道路などがアスファルトやコンクリートなどの硬い層で覆われていても計測ができるという利点がある。この調査手法によって得られた地盤情報を用いて液状化の危険度判定を行った。

### 2.1 2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査

#### [2次元表面波探査]

2次元表面波探査とは、地表面の振動を計測できる受信機（本研究では速度計（ジオフォン）を使用）を数mピッチで設置し、カケヤで振動を発生させることで、地面に揺れを与え、地中を表面波が伝わる速さを求めることで、せん断波速度分布を計算し、地盤の硬軟を判断する調査方法である(図-2.1 参照)。周波数によって伝達速度が異なる「分散」<sup>2-1)</sup>という特性を利用して、地表面から地下に至る表面波の速度分布を取得する。また、表面波速度とせん断波速度は、ほぼ等しいことがわかっている<sup>2-1)</sup>ので、探査結果はせん断波速度分布として整理することができる。計測方法としては、振動させる箇所（以下、起振点と呼ぶ）をずらし、起振、計測、移動を複数回行うことで、計測を行った。

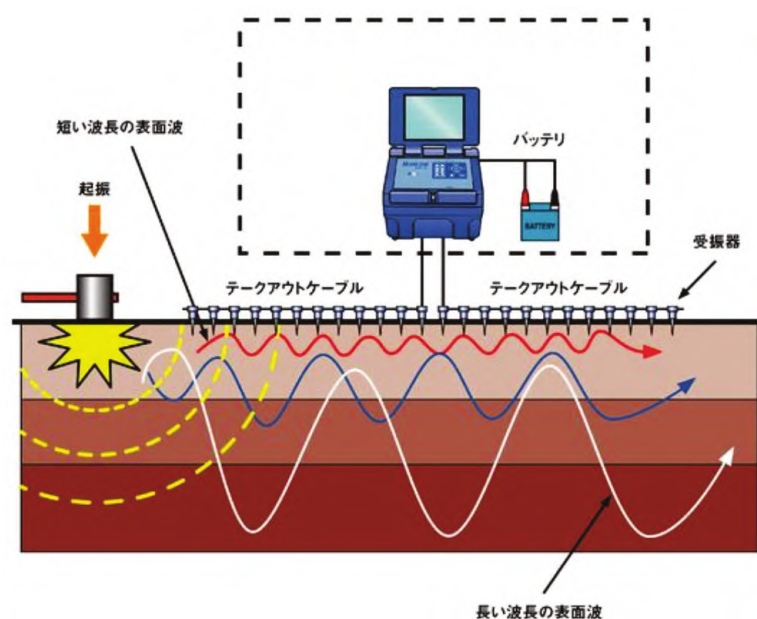


図-2.1 2次元表面波探査の計測方法<sup>2-2)</sup>

受信機から得られた結果を用いて、周波数-見かけ速度分布に変換し分散曲線を作成し、これに対して、非線型最小二乗法を用いた1次元の逆解析を施して1次元の速度構造（深度方向）を得る。この1次元の横方向速度構造を並べることで2次元せん断波速度構造とすることで、面的な表現が可能である（**図-2.2 参照**）。

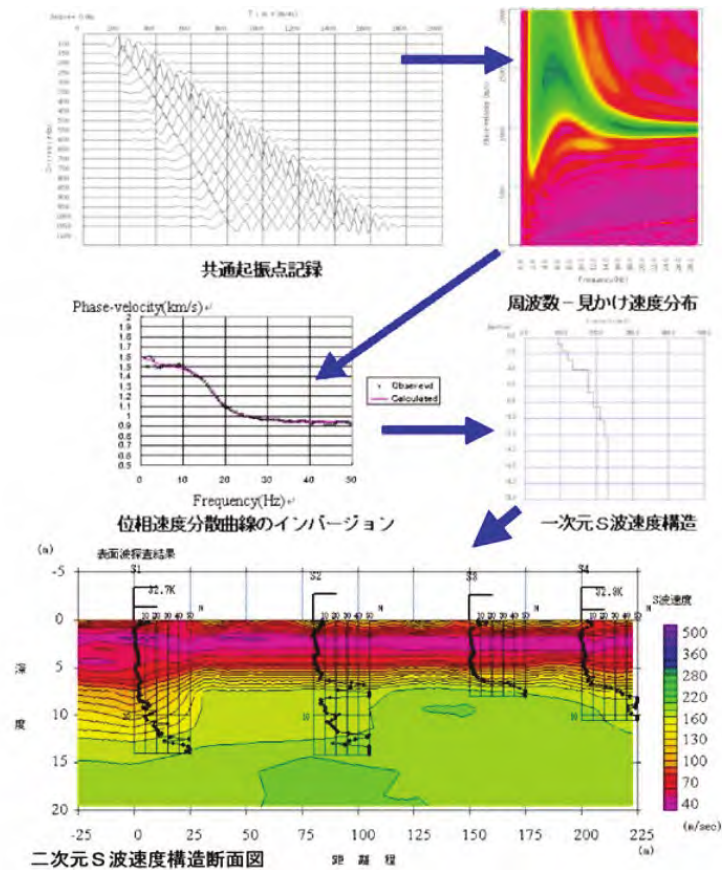


図-2.2 2次元表面波探索結果の一例<sup>2-2)</sup>

[リニア微動アレイ探索]

リニア微動アレイ探索は人工震源を必要とせず、自然に存在する微動振動に含まれる表面波を利用する探索手法である。図-2.3 に示すように、微動は交通振動、工場振動等の人間活動及び波浪、天候等の自然現象に起因する地表の微小な振動を指し、微動振動は実体波と表面波により構成されているが、主体となる波は表面波とされている。微動アレイ探索は地表において複数の地震計を群設置（アレイという）して、微動信号を同時に記録し、データ解析により地下構造を反映する表面波の位相速度（伝播速度と周波数の関係）を抽出する。そして、逆解析により地下のせん断波速度分布を求める探索手法である。この過程を簡単に図-2.4 にまとめる。

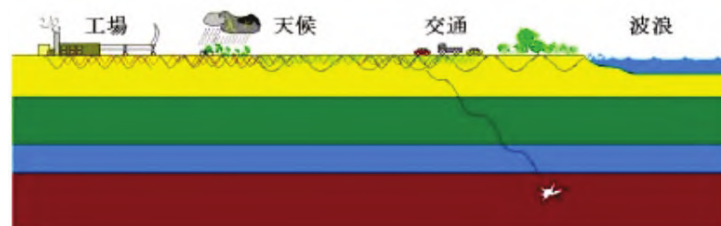


図-2.3 微動の起因（概念図）<sup>2-3)</sup>

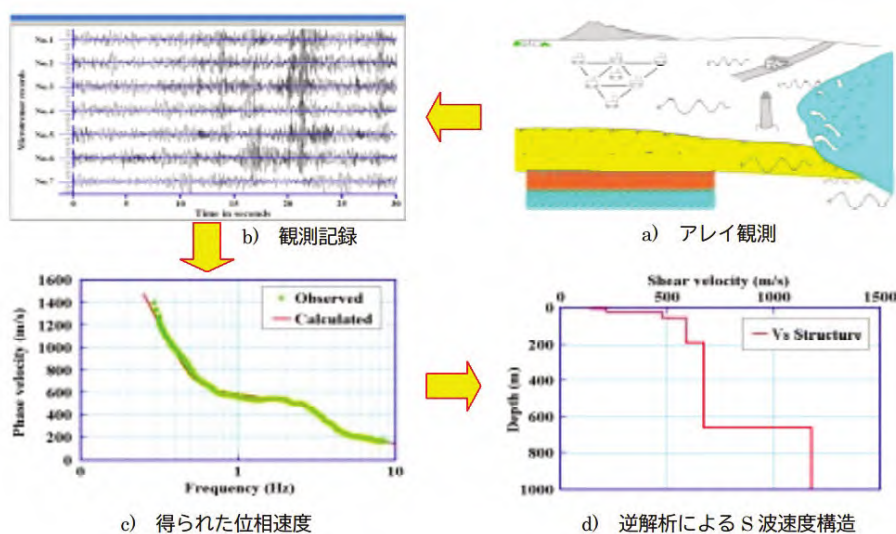


図-2.4 微動アレイ探査の流れ<sup>2-3)</sup>

本研究では、カケヤと呼ばれる木製ハンマーを用いた能動的2次元表面波探査だけでなく、微動を用いた受動的表面波探査（パッシブ線形計測と呼ぶ）も実施した。

本研究の能動的2次元表面波探査では、データ測定直後にせん断波速度分布を算出できるシステムを新たに開発し適用した。微動アレイ計測では、地震計を円形、正三角形、L字型に配置するのが一般的である。本研究では、Kitaら<sup>2-4)</sup>が提案した地震計の直線配置法を適用した。このため、本研究で扱う微動アレイ探査はリニア微動アレイ探査と呼ぶ。

## 2.2 対象地域

2011年のクライストチャーチ地震で大きな被害を受けたニュージーランド・クライストチャーチにおいて、2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査を実施した<sup>2-5), 2-6)</sup>。調査地点および計測線を図-2.5に示す。調査地点1、2は河川に沿う形で、調査地点3は河川と横断する方向で計測した。これらの地域では、地盤の液状化により家屋の傾きや沈下などの被害が確認されており<sup>2-7)</sup>、その被害分布を図-2.6に示す。この図は、大規模～中規模の液状化被害を赤に、中～小規模の液状化被害を黄に、住宅に被害はないが道路で噴砂などの被害が確認された場所をピンクで示している。

次に2010年のカンタベリー地震時に地盤工学会が行ったSWS試験の場所およびその結果を図-2.7～-2.9に示す<sup>2-8)</sup>。この地盤は、深度7mまで換算N値が10以下の層が続く軟弱な地盤であることがわかっている。

調査するにあたって、調査地は2011年のクライストチャーチ地震以降の規制区域であるため、2017年に余川らが行った調査時点では周辺地域には常時振動はない。そのため、固有振動数4.5Hzの速度計を2m間隔で設置し、計測器の間をカケヤで起振することで表面波を発生させ2次元表面波探査を実施した。また、リニア微動アレイ探査は、固有振動数2Hzの速度計5mを間隔で設置し、その計測線の横を調査車両で往復運動させることで表面波を発生させ測定した。

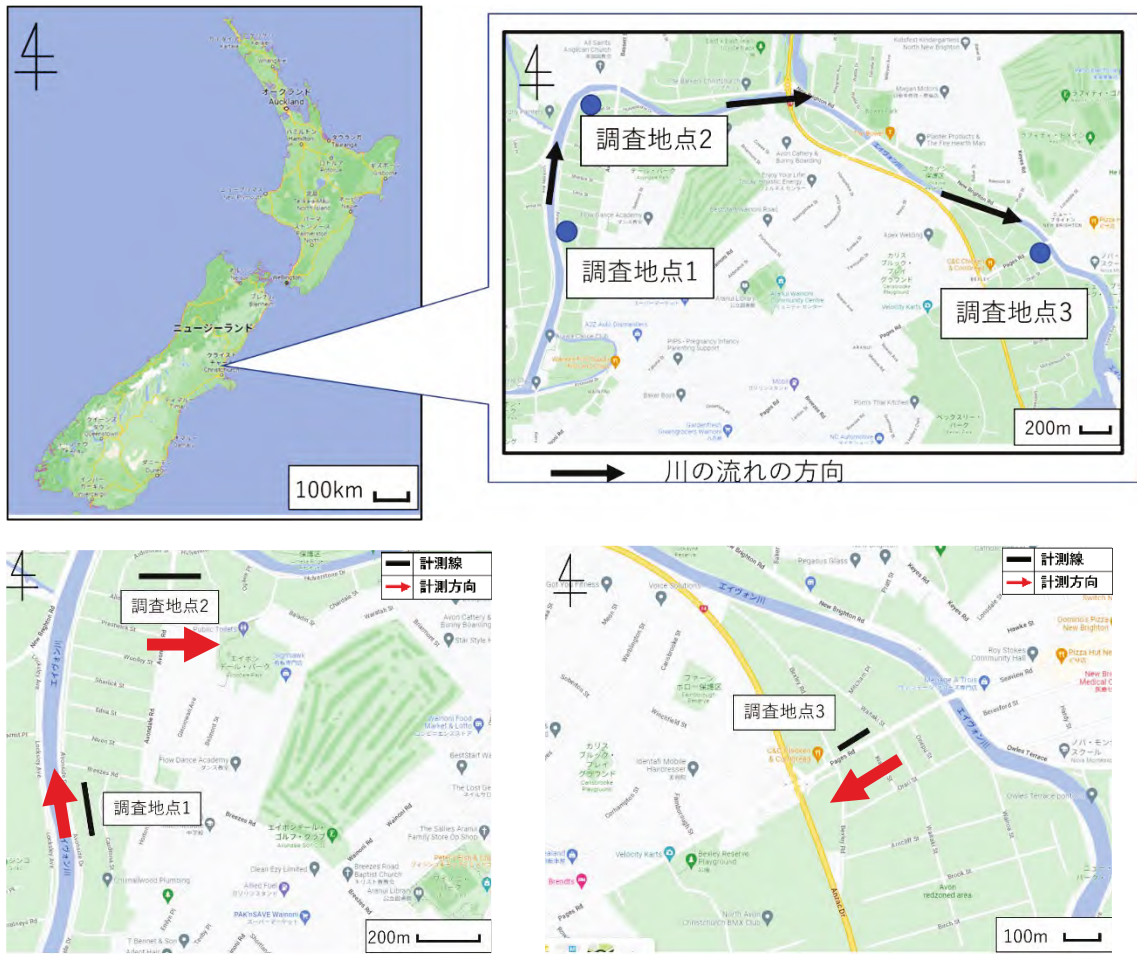


図-2.5 対象地域および計測線 2-5)、2-6)

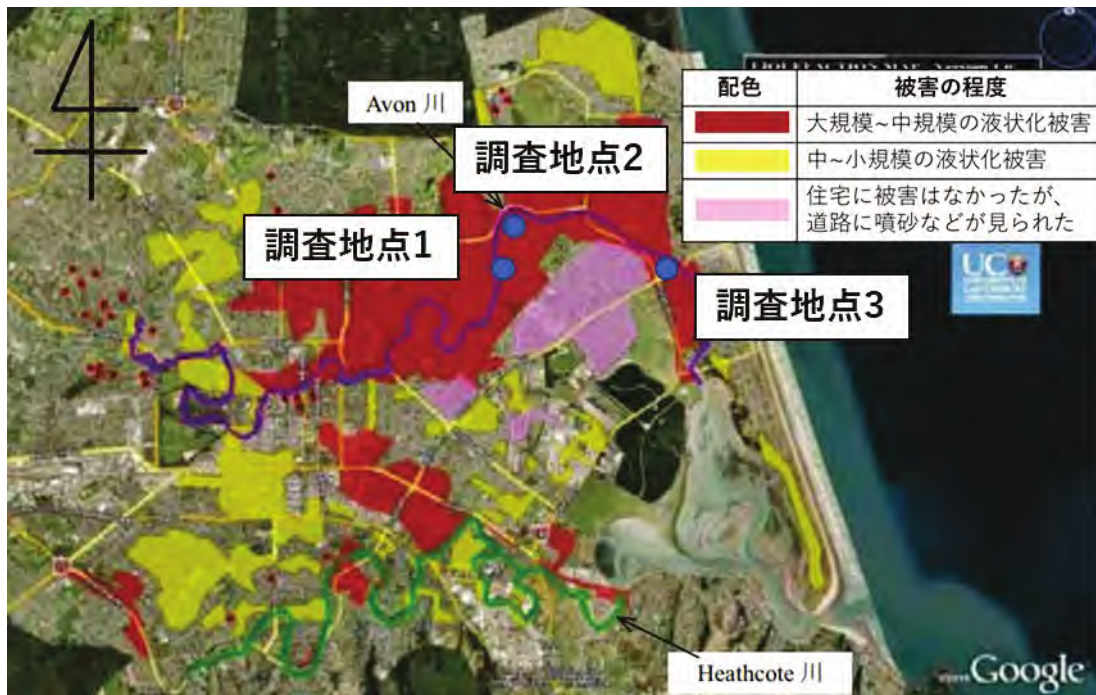


図-2.6 2011年クライストチャーチ地震の液状化被害図 2-7)





図-2.7 2011年クライストチャーチ地震の液状化被害図<sup>2-8)</sup>

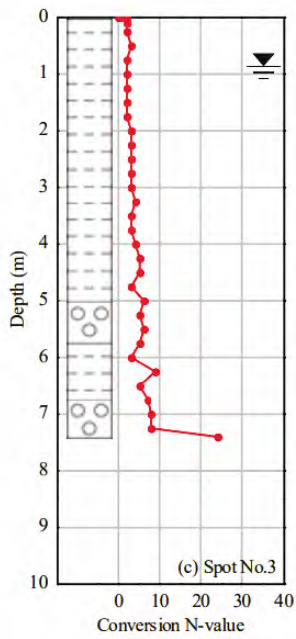


図-2.8 SWS試験地1のSWS試験結果<sup>2-8)</sup>

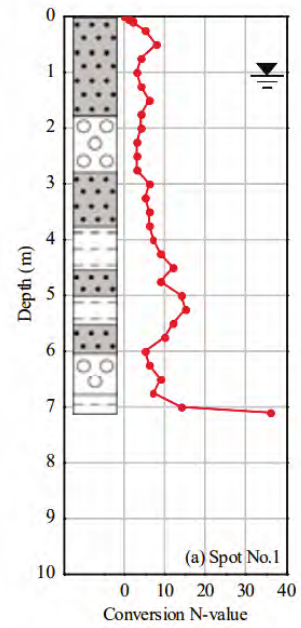


図-2.9 SWS試験地2のSWS試験結果<sup>2-8)</sup>

### 2.3 調査結果

調査地点 1、2、3 における計測線に沿った 2 次元表面波探査の結果を図-2.10 ~ -2.12 に示す。また、調査地点 1、2、3 におけるリニア微動アレイ探査の結果を図-2.13 ~ -2.15 に示す。調査結果より、2 次元表面波探査では深度 15m までの地盤のせん断波速度分布が、リニア微動アレイ探査では地表から深度 30m までのせん断波速度分布が把握できることがわかった。また、地表から 7m 付近でせん断波速度が低い層が存在することもわかった。この結果は、地盤工学会が実施した SWS 試験の結果<sup>2-7)</sup>でも地表から 7m 付近までは N 値が低い層として確認されており、同様の結果を示したことから 2 次元表面波探査とリニア微動アレイ探査の結果の妥当性を示すことができた。他にも、調査地点 3 では、せん断波速度が低い層がわずかに河川方向 (0m 方向) に向かって傾斜していることが確認できた。

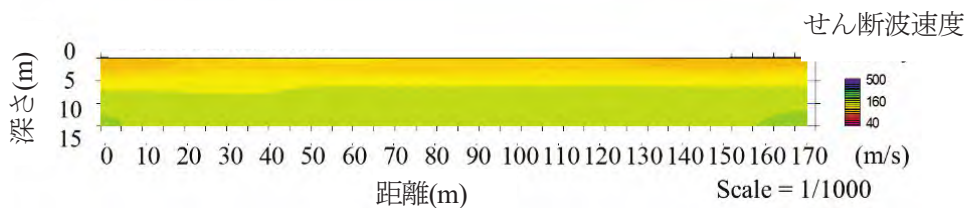


図-2.10 調査地点 1 の 2 次元表面波探査の結果

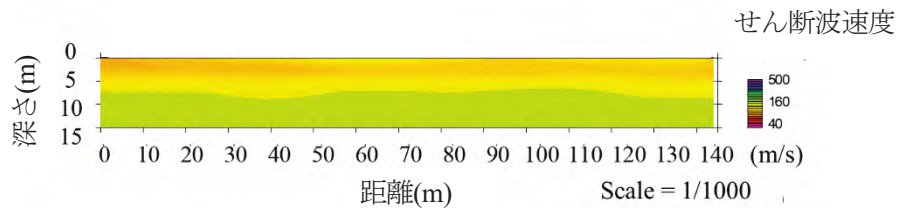


図-2.11 調査地点 2 の 2 次元表面波探査の結果

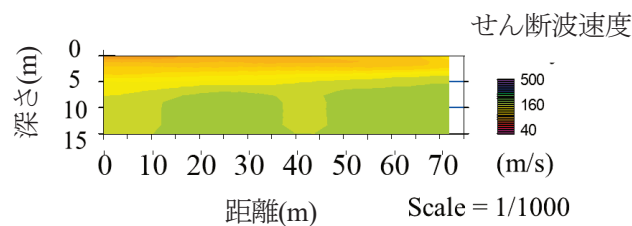


図-2.12 調査地点 3 の 2 次元表面波探査の結果

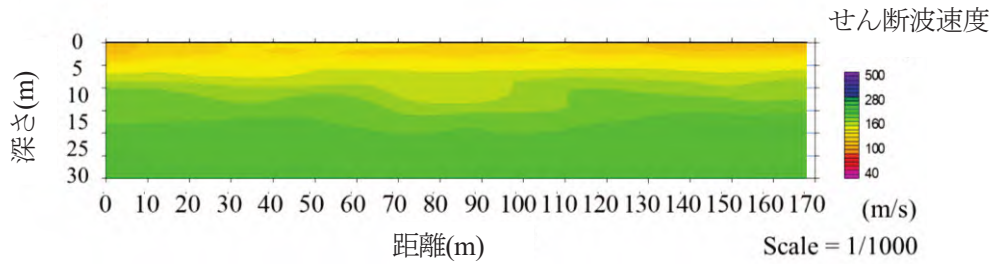


図-2.13 調査地点 1 のリニア微動アレイ探査の結果

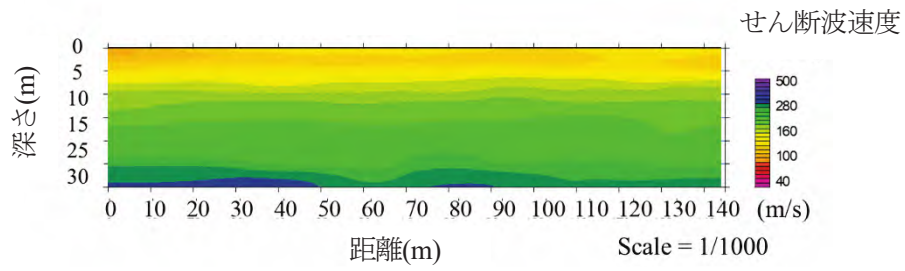


図-2.14 調査地点 2 のリニア微動アレイ探査の結果

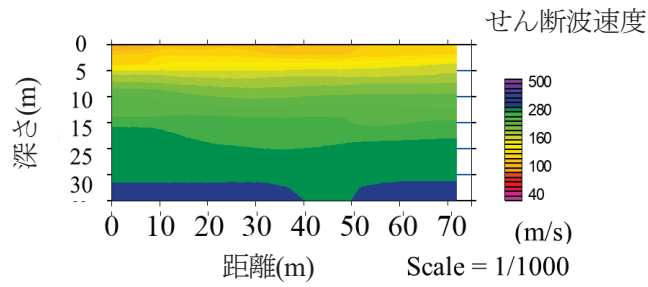


図-2.15 調査地点 3 のリニア微動アレイ探査の結果

## 2.4 液状化危険度判定

2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査の結果より、第1章にて述べた $P_L$ 法を用いて液状化危険度の判定を行った。液状化強度比の測定に用いた加速度は、震度の影響を調べるために中規模程度の地震を想定した220galと大規模地震を想定した350galを用いた。図-2.16～-2.18に加速度220galでの調査地点1、2、3の $F_L$ 値の結果を示す。また、加速度350galでの $F_L$ 値の結果を図-2.19～-2.21に示す。これらの結果から、せん断波速度が小さいほど液状化危険度が高いことがわかる。他にも、地層の傾斜が確認された調査地点3では、内陸側(70m方向)の液状化危険度が低いことがわかった。これは、20m～70mまでが自然堤防となっているため、液状化危険度が低くなっていると考えられる。

次に $P_L$ 値の算出式を用いて、液状化危険度の評価を行った。図-2.22、-2.23、-2.24に、加速度220galの調査地点1、2、3における $P_L$ 値の結果を示す。また、加速度350galの調査地点1、2、3の $P_L$ 値の結果を図-2.25、-2.26、-2.27に示す。図-2.18～-2.23までの全ての図の赤線は $P_L$ 値15、緑線は $P_L$ 値5、黒線はその調査地点での $P_L$ 値を示している。 $P_L$ 値の結果から、せん断波速度が小さいほど液状化の危険度が高くなることがわかる。次に、220galの $P_L$ 値の結果から、調査地点2ではすべての側線で $P_L$ 値15を超えており、液状化危険度がとても高いことがわかった。最後に350galの $P_L$ 値の結果では、調査地点1、2、3で $P_L$ 値が15を超えており、大規模地震が発生した場合には液状化が発生する危険度がとても高いことがわかった。今回、各種物理探査及び液状化危険度の評価を行ったすべての調査地点は、2011年クライストチャーチ地震で甚大な液状化被害が確認された箇所と合致しており、そのすべての調査地点で高い液状化危険度を示すことができた。

各調査地点の結果を比較すると、図-2.18、図-2.21に示す調査地点3では、液状化危険度が低い地域が広く分布していることがわかる。これは、調査地点3は調査地点1、2に比べ、10mより深い地層のせん断波速度分布が大きいためである。他にも、本調査法はあくまで地盤の硬軟を把握できることにとどまっているため、ピートのような液状化危険度が低く、せん断波速度も低い地盤材料が計測範囲に存在する場合、本調査法だけでは液状化危険度を正しく把握することが難しい<sup>2-9)</sup>。そのため、サンプリングなどの地盤材料を把握することができる試験を併用する必要がある。例えば、SWS試験、小型動的コーン貫入試験<sup>2-10)</sup>、スクリュードライバー探査<sup>2-11)</sup>などの簡易な調査手法を組み合わせることで表面波探査を行えば、より正確な判断が可能となる。

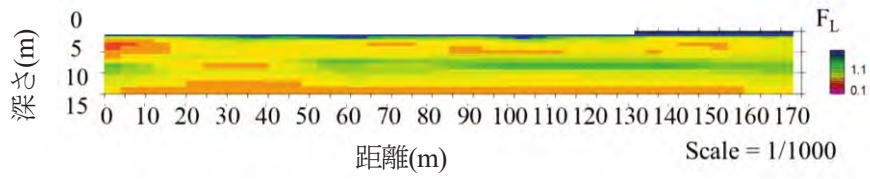


図-2.16 加速度 220gal の調査地点 1 における  $F_L$  値の結果

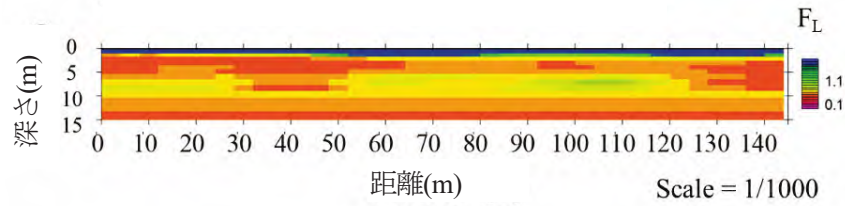


図-2.17 加速度 220gal の調査地点 2 における  $F_L$  値の結果

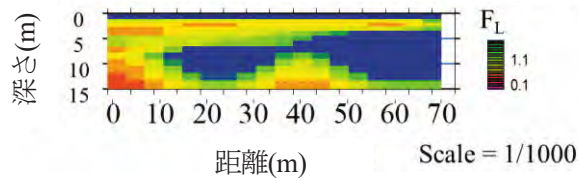


図-2.18 加速度 220gal の調査地点 3 における  $F_L$  値の結果

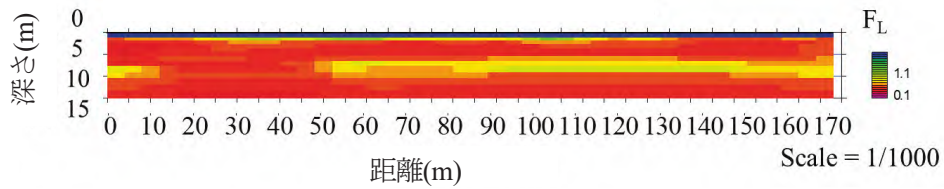


図-2.19 加速度 350gal の調査地点 1 における  $F_L$  値の結果

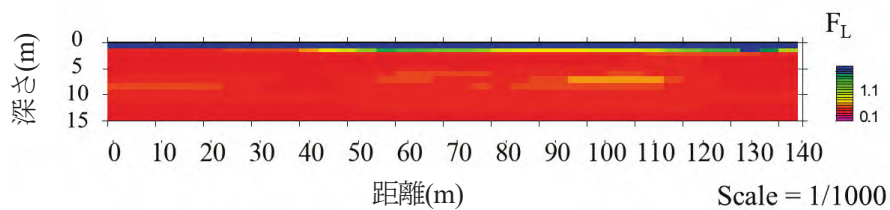


図-2.20 加速度 350gal の調査地点 2 における  $F_L$  値の結果

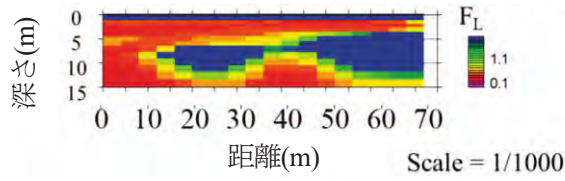


図-2.21 加速度 350gal の調査地点 3 における  $F_L$  値の結果

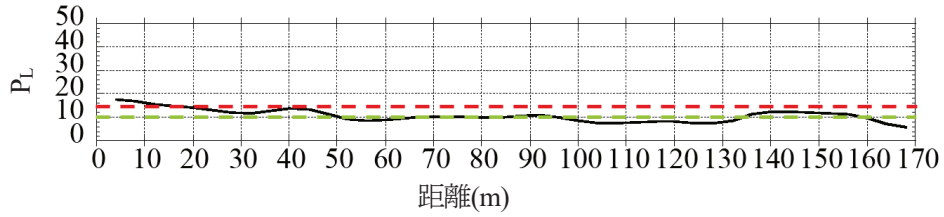


図-2.22 加速度 220gal の調査地点 1 における  $P_L$  値の結果

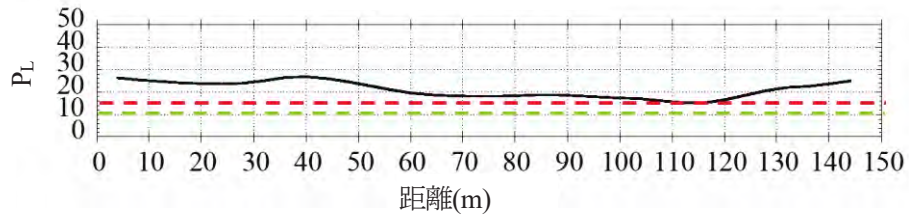


図-2.23 加速度 220gal の調査地点 2 における  $P_L$  値の結果

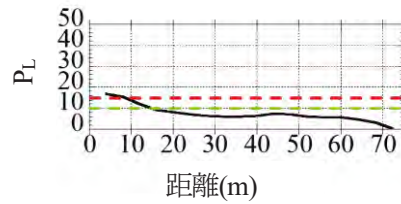


図-2.24 加速度 220gal の調査地点 3 における  $P_L$  値の結果

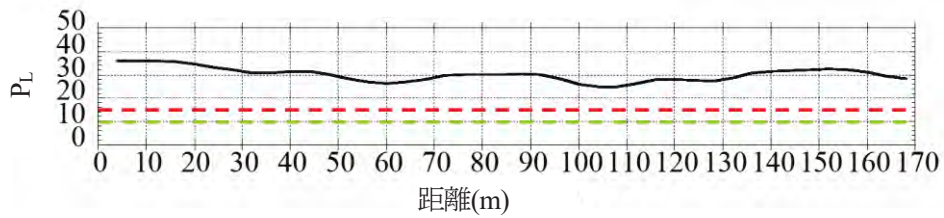


図-2.25 加速度 350gal の調査地点 1 における  $P_L$  値の結果

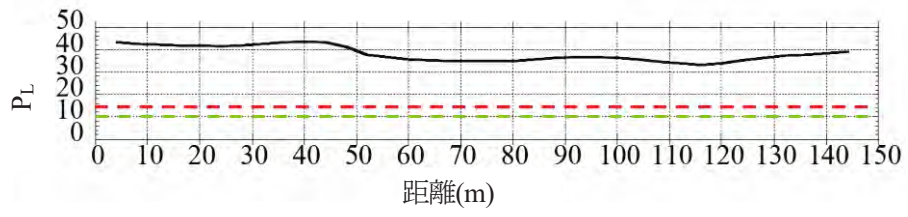


図-2.26 加速度 350gal の調査地点 2 における P<sub>L</sub> 値の結果

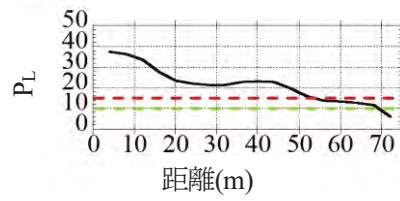


図-2.27 加速度 350gal の調査地点 3 における P<sub>L</sub> 値の結果

## 2.5 まとめ

住宅直下及びその周辺の地盤情報を得る方法として、2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査に着目した。その調査手法を用いて、2011年クライストチャーチ地震により広範囲で液状化被害が確認されたニュージーランド、クライストチャーチで現場調査を行った。

その結果、すべての調査地点で計測線に沿ったせん断波速度分布を把握することができ、地表面から7m付近までにせん断波速度が低い層が存在することも把握できた。この結果は、2010年に地盤工学会が行ったSWS試験結果と合致しており、2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査結果の妥当性を示すことができた。他にも、調査地点3では地層が傾斜していることも確認することができた。

次に、得られた結果を用いて液状化危険度判定である $P_L$ 法で地盤の液状化危険度を評価した。実際の液状化被害が確認された箇所と液状化危険度の結果を比較すると、液状化の被災箇所と液状化危険度が高い場所が合致しており、液状化危険度も正確かつ広範囲に評価できることがわかった。

各調査地点の結果を比較した結果、調査地点3のみ液状化危険度が低く判定された。これは深度10mより深い層のせん断波速度が大きいためである。他にも、ピートなどの地盤材料の場合、地盤の硬軟を把握できる本手法だけでは液状化危険度を把握することが難しいと考えられる。そのため、SWS探査、小型動的コーン貫入試験、スクリュードライバー探査などの簡易な調査手法を組み合わせることにより、より高精度な液状化危険度判定が可能になると考えられる。



## 参考文献

- 2-1)土質工学会: 土質基礎工学ライブラリー21 土の基礎の物理探査 土質工学会編, 社団法人土質工学会, 1981.
- 2-2)エイト日本技術開発: 表面波探査,  
URL: [https://www.jasdim.or.jp/gijutsu/-gakekuzure\\_joho/tyosa/hyomenha/model.html](https://www.jasdim.or.jp/gijutsu/-gakekuzure_joho/tyosa/hyomenha/model.html), (2022年10月13日アクセス).
- 2-3)中央開発株式会社: 地下浅部から大深部までのS波速度構造を求める微動アレイ探査,  
URL, <http://www.cknet.co.jp/pdf/tk/Array.pdf>, (2022年10月13日アクセス).
- 2-4)Kita, T., Hayashi, K., and Haldun, B.: The Development of a 2Dimensional Microtremor Survey Method based on SPAC Method using Sequential Linear Arrays, Proc. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, pp.115-120, 2011.
- 2-5)Higuchi, S., Yokawa, H., Yashima, A., Murata, Y., Kariya, K., M.Cubrinovski. and Sugii, T.: Liquefaction damage prediction of residential land and houses using geophysical survey results, Proc.16th Int.Conference of IACMAG, 2, pp.727-734, 2021.
- 2-6)Higuchi, S., Yashima, A., Murata, Y., Kariya, K. and Yokawa, H.: Liquefaction Evaluation of Residential Land using Geophysical Survey, Proc.CREST2020, pp.965-975, 2021.
- 2-7)地盤工学会: 2011年ニュージーランド Christchurch 地震に対する災害緊急調査団 報告書,  
URL: <https://www.jiban.or.jp/file/saigai/2011christchurch.pdf>, (2022年10月9日アクセス).
- 2-8)地盤工学会: ニュージーランド Darfield 地震災害緊急調査団報告書,  
URL: [https://www.jiban.-or.jp/?page\\_id=2475](https://www.jiban.-or.jp/?page_id=2475), (2022年12月27日アクセス).
- 2-9)林宏一, 平出務, 飯場正紀: 表面波探査と微動アレイ探査による石川県穴水町中心部の地盤構造調査, 物理探査, Vol.61, No.6, pp.483-498, 2008.
- 2-10)村田芳信, 佐藤将, 岩田麻衣子, 沢田和秀, 八嶋厚: 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, 2012.
- 2-11)菅野安雄, 大和眞一, 末政直晃, 田中剛, 大島昭彦: 浦安市における各種静的サウンディング試験の比較(その7: SDS), 浦安地盤調査一斉試験報告会論文集, pp.49-50, 2012.

### 第3章 新たな薬液注入工法による経済性を考慮した住宅の沈下抑制効果の確認

液状化対策工法の検討実験は、重力場で行われることが多い。これは、実際の住宅や河川堤防、橋梁などの上部構造物およびその直下の地盤を同等の大きさで作製するには、時間と費用に限界があるため、長さのスケールを 1/10 や 1/50 などを設定し、それに各種地盤や住宅の長さを合わせて実験を行っているためである。しかし、重力場で行われる検討実験では、地盤の応力状態を再現できないなどの相似則の考慮に限界がある。地盤の液状化現象は、地盤内の有効応力の状態に大きく影響されるため、重力場の実験では液状化対策工法の効果も定性的な結果にとどまっている。そこで本研究では、相似則をより満足できる遠心場による模型振動台実験（写真-3.1、図-3.1、表-3.1 参照）にて、薬液注入工法の対策効果を検討した。本研究では、京都大学防災研究所に設置されている遠心場载荷装置を用いて実験を行った。



写真-3.1 遠心場载荷試験機

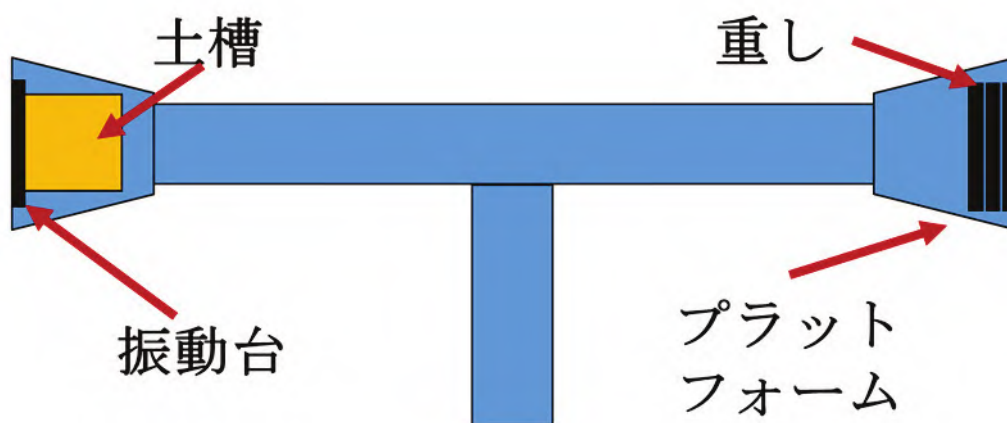


図-3.1 遠心場载荷試験機概要図

表-3.1 遠心場载荷試験機の概要

最大回転数(rpm)	260
最大遠心力(G)	200
アーム有効半径(m)	2.5
載積荷重(kN)	100
振動加速度(G)	50
最大変位(mm)	±5.0
最大周波数(Hz)	100

### 3.1 遠心場模型振動台実験<sup>3-1), 3-2)</sup>

遠心载荷実験には水平方向にのみ加振可能な油圧式サーボアクチュエータを使用し、土槽には剛土槽(写真-3.2 参照)を用いた。検討実験は遠心場の相似則を用いて縮尺 1/50 とし、模型住宅の接地圧は偏心などの荷重の偏りのない木造 2 階建てを想定した 19.7kPa とした。相似側を用いた 1/50 の縮尺を表-3.2 に示す。間隙水にはメトローズ溶液を用い、粘度は水の 50 倍である 50mPa・s となるようにメトローズ溶液を作製した。使用したメトローズは信越化学工業株式会社の 90SH-100 を用いた(写真-3.3 参照)。地盤材料は豊浦砂(表-3.3 参照)を使用し、模型地盤の相対密度は 60%を目標とした。その粒径加積曲線を図-3.2<sup>3-4)</sup>に示す。

表-3.2 1/50 スケールの相似則<sup>3-3)</sup>

	寸法	変位	速度	加速度	応力	時間	透水係数
実物	1	1	1	1	1	1	1
遠心実験	1/50	1/50	1	50	1	1/50	1/50

表-3.3 豊浦砂の物理パラメータ

土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.637
最大間隙比(-)	0.965
最小間隙比(-)	0.610
平均粒径(mm)	0.17
均等係数(-)	1.40

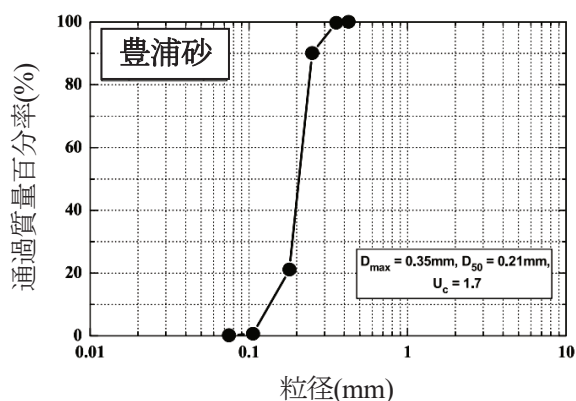


図-3.2 豊浦砂の粒径加積曲線<sup>3-4)</sup>

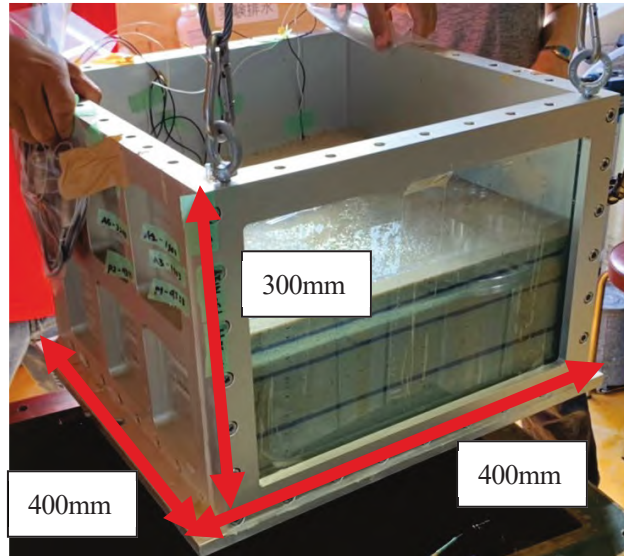


写真-3.2 剛土槽



写真-3.3 メトローズ

模型地盤の作製は以下の通りに行った（図-3.3 参照）。

- 1) 空中落下法により、ホoppa（写真-3.4 参照）を用いて乾燥地盤を作製する。このときにホoppaと地盤との距離が遠い場合、作製した地盤の相対密度が高くなってしまうため、地盤との距離を離しすぎないように注意する。次に、加速度計や水圧計などの計測器を設置する高さまで地盤を作製した後、一旦地盤の作製を中断し、地盤内に各種計測器を設置した（写真-3.5 参照）。また、改良地盤を対象とした実験の場合は、あらかじめ薬液を混ぜた改良体を作製し、規定の高さまで乾燥地盤を作製した後、その改良体を設置し地盤作製を行う。
  - 2) 作製した乾燥地盤を脱気槽（写真-3.6 参照）に入れる。
  - 3) 乾燥地盤を脱気する。
  - 4) 脱気後、1時間ほど炭酸ガスを注入する。
  - 5) 3)、4)を2回繰り返す。
  - 6) 再度乾燥地盤を脱気し真空状態の脱気槽内で、あらかじめ脱気してあるメトローズ溶液を地盤上面より注入する（写真-3.7 参照）。メトローズ溶液を作製する際には、粉体のメトローズがきちんと混ざるように水を沸騰させることで溶けやすくし、固まらないように注意する。
  - 7) 飽和度の確認後、脱気槽より取り出し直接基礎の模型住宅及びレーザー変位計等を設置する。
- 以上の手順により模型地盤を作製した後、模型地盤と計測器等の重量と同等の重りをカウンターウェイトとしてプラットフォーム内に載荷し、遠心加速度 50G に到達させ、加振を行った。改良体の1軸圧縮強度は、液状化しない強度（ $F_L \geq 1.0$ ）として 50kPa を目標として作製した。

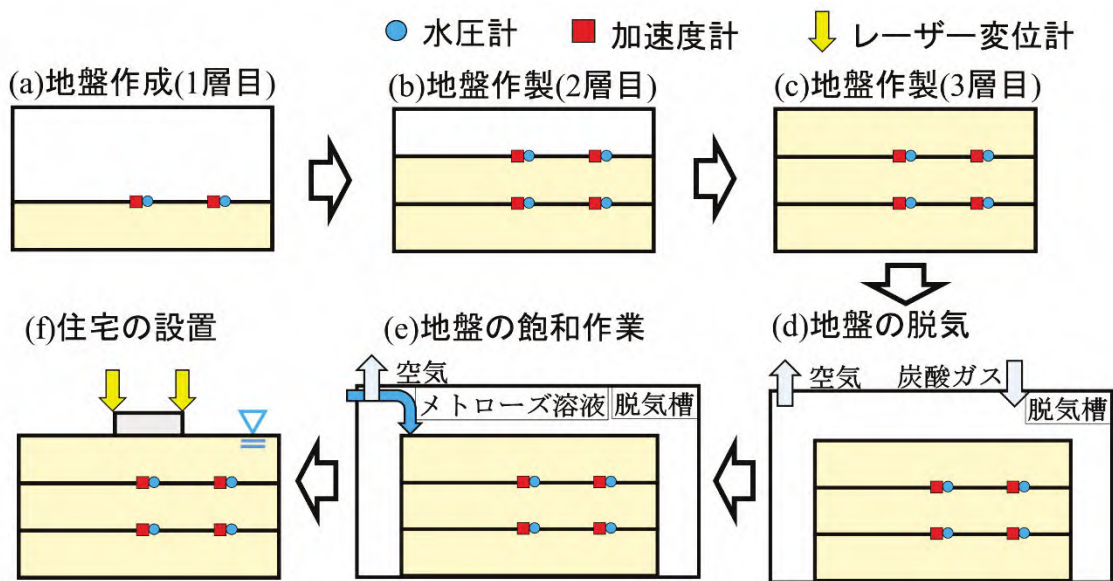


図-3.3 無対策の地盤作製の概要図

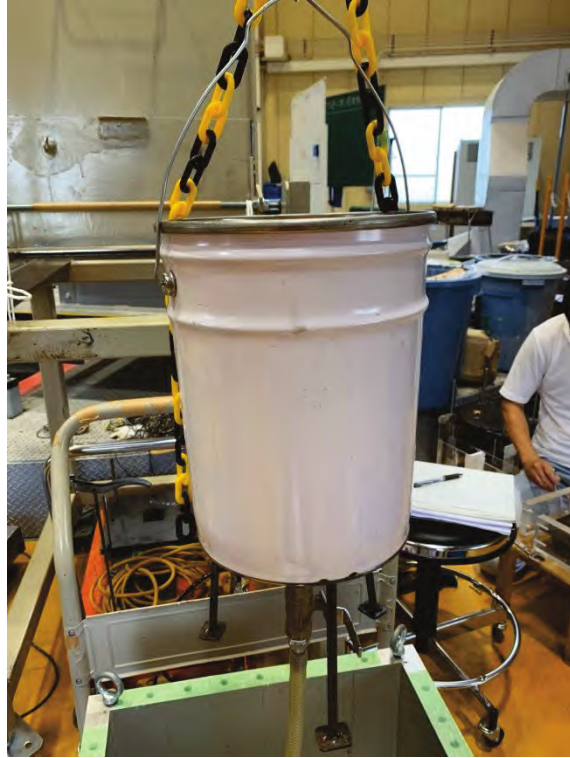


写真-3.4 地盤作製に用いたホツパ

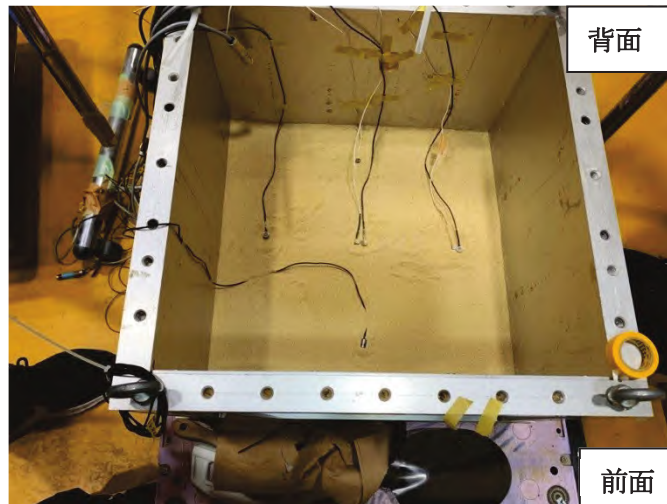


写真-3.5 計測器設置の様子

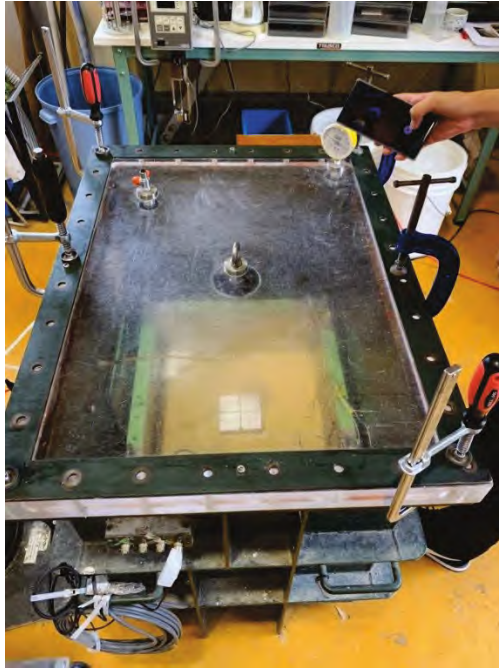


写真-3.6 脱気槽

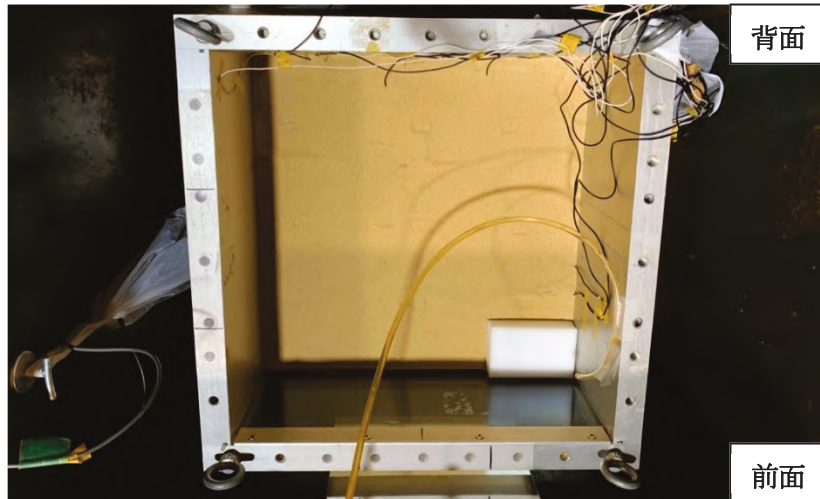


写真-3.7 粘性流体注入の様子

### 3.2 実験条件

入力波は、国土交通省が発表している周期及び加速度と震度の関係図<sup>3-5)</sup> (図-3.4 参照) を用いて震度 6 弱を想定した周波数 1Hz、最大加速度  $2\text{m/s}^2$ 、漸増 10 波、定常 20 波、漸減 10 波の増幅減衰正弦波を使用した (図-3.5 参照)。模型住宅は、実験容器の都合上、実スケールにして  $5\text{m} \times 5\text{m}$  の比較的小規模な住宅を用いて実験を行った。

次に、各ケースの検討条件を表-3.4 に示す。検討内容は無対策が 1 ケース、対策工法の検討として、既設住宅を想定し住宅外縁部に改良体を設置した場合 (以下、**スカート改良**と呼ぶ)、新設住宅を対象とし住宅基礎下全面に改良体を設置した場合 (以下、**全層改良**と呼ぶ) の 2 ケースを深さが異なる 2 ケースの計 4 ケースで検討した。なお、改良を行っていない case0 については同じ条件で実験を 2 回行うことで再現性を確認している。計測器の設置状況を表した配置図のうち、例として無対策 (case0) の配置図を図-3.6 に、改良した条件のうち、case1 の配置図を図-3.7 に示す。

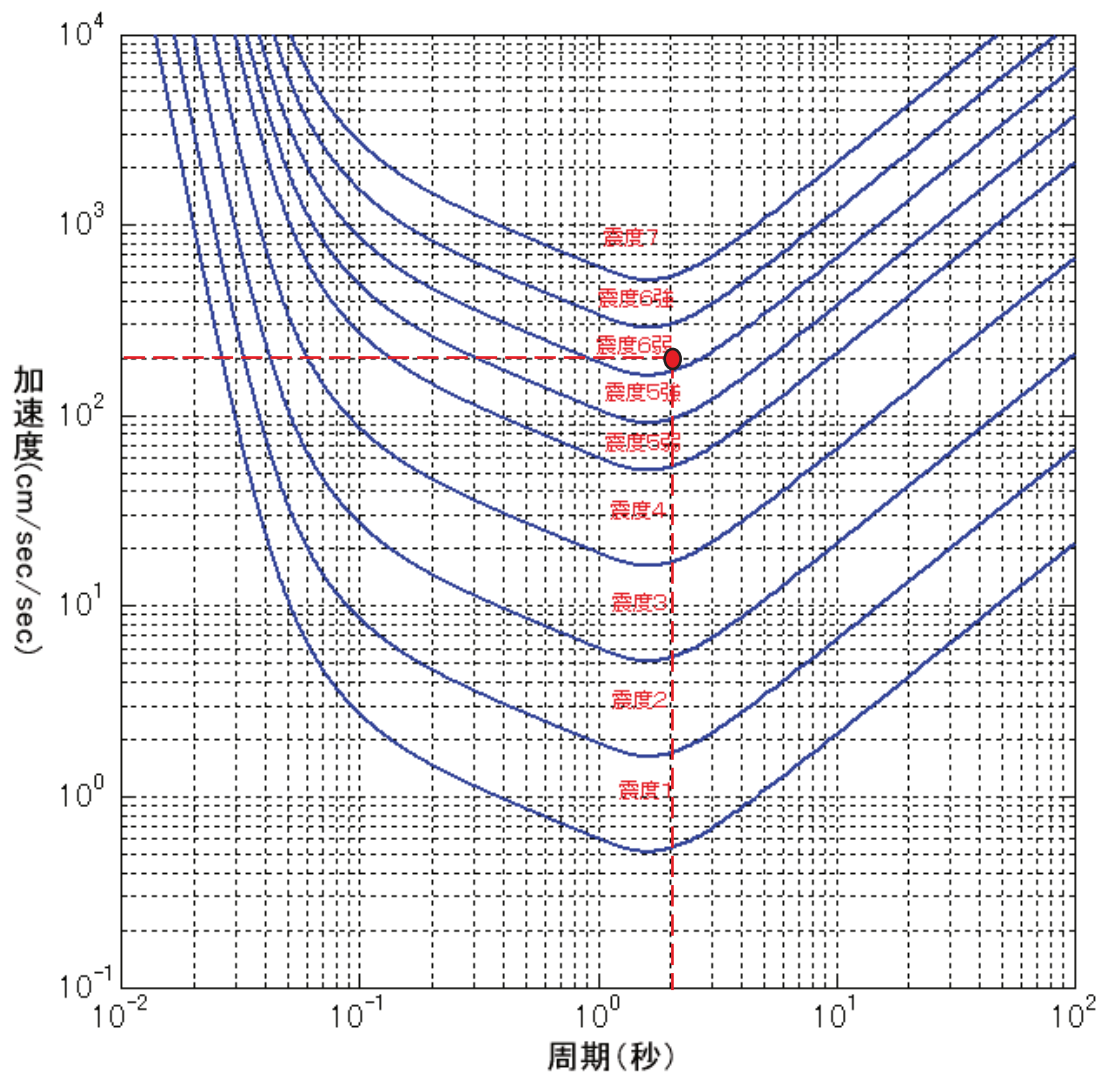


図-3.4 周期及び加速度と震度の関係<sup>3-5)</sup>



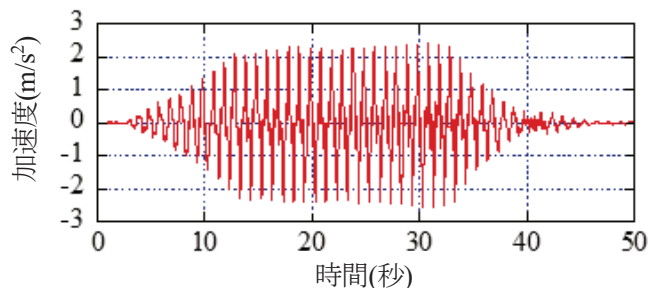


図-3.5 case0 のときの振動台応答

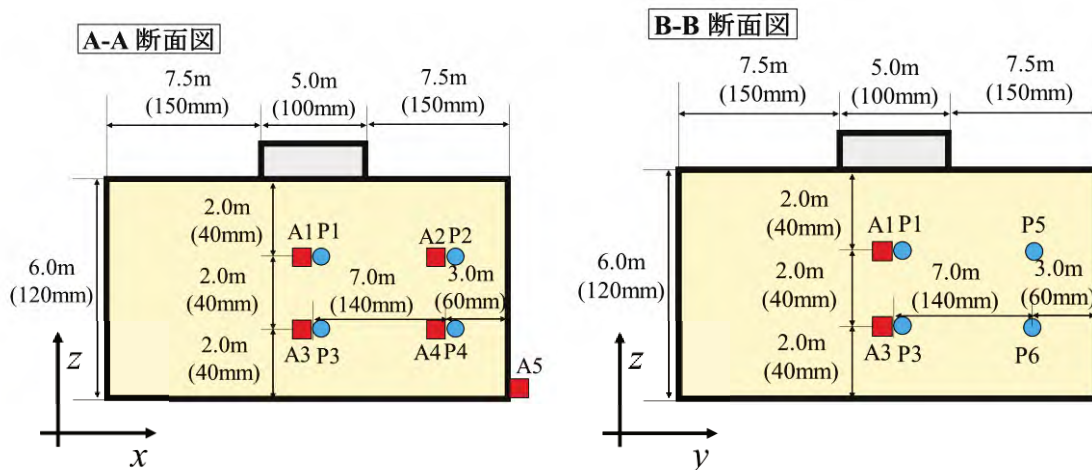
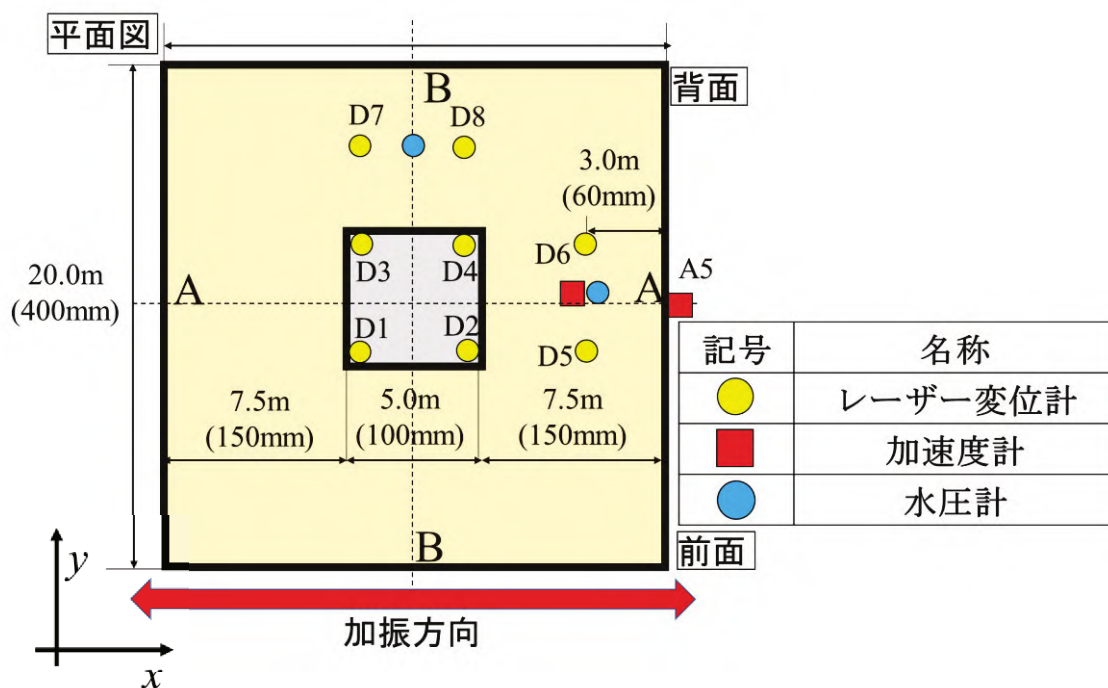


図-3.6 case0 の実験概要図

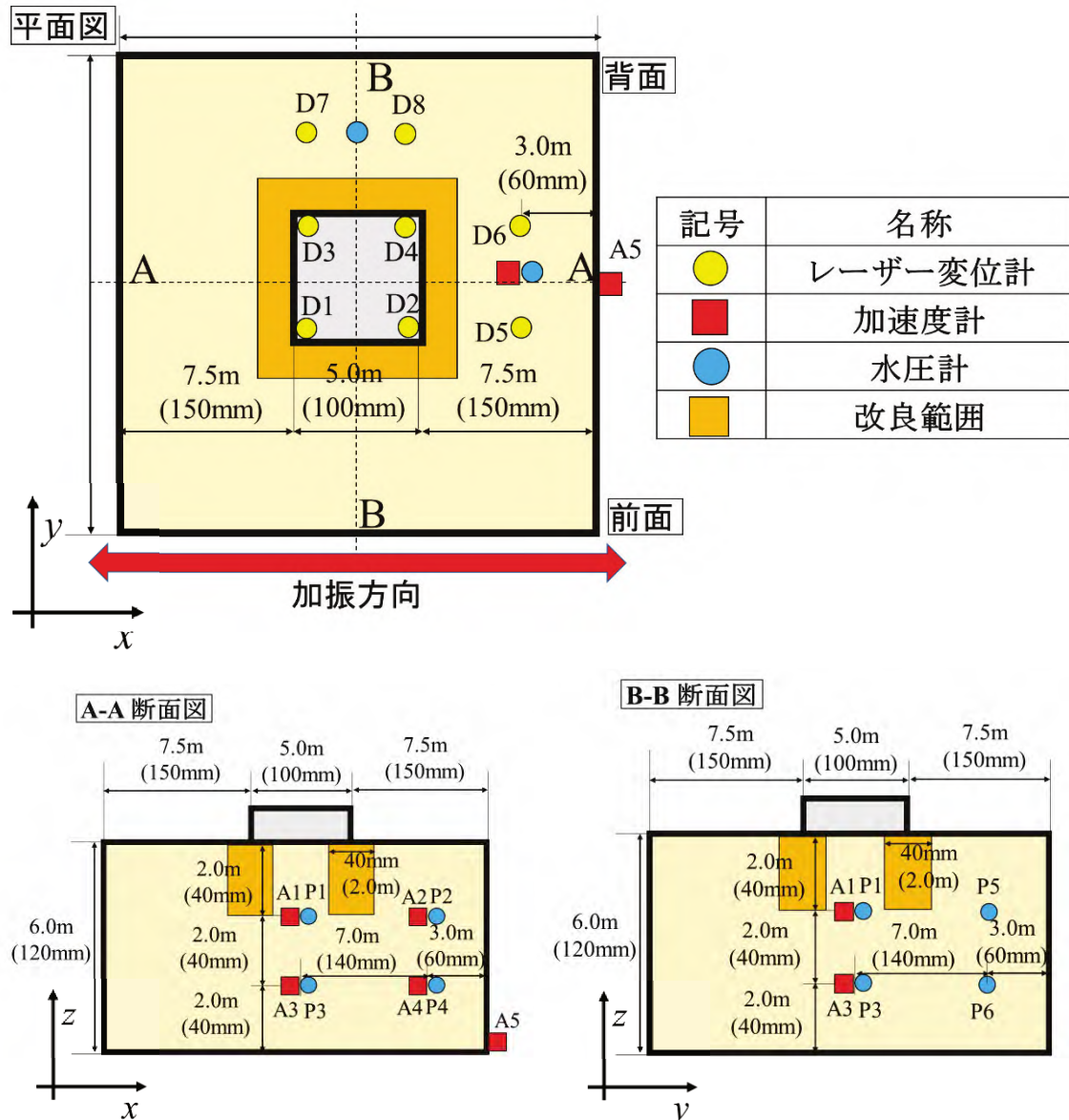


図-3.7 case1の実験概要図

表-3.4 検討条件

検討番号	改良深度	改良範囲
case0	なし	なし
case1	2m	スカート改良
case2	4m	スカート改良
case3	2m	全層改良
case4	4m	全層改良

### 3.3 実験結果と考察

各検討ケースにおけるメトローズ溶液を用いた模型地盤の飽和度は95%程度であった。なお、実験結果は相似則を考慮して実スケールの長さ、時間でまとめた。

#### 〔間隙水圧〕

各検討ケースの間隙水圧計における過剰間隙水圧の時刻歴を図-3.8 ~ -3.13 に示し、図中の赤線はその深度での自由地盤の有効上載圧を示す。未改良及び改良したケースすべてにおいて、住宅から離れた自由地盤に近いP2、P5（深度2m）は20kPaまで、P4、P6（深度4m）は40kPaまで上昇しており液状化したことがわかる。また、P2、P4、P5、P6の水圧の上昇と消散の傾向を比較すると、未改良、改良にかかわらず同様の傾向を示しており、各実験の再現性が確認できた。

次に、住宅直下のP1に着目すると、スカート改良を施したcase1、2の水圧が25kPa程度まで大きくなっていることがわかる。この原因として、無対策の場合には、液状化により住宅が沈下した際に住宅直下の地盤が左右に変形することが考えられる。しかし、スカート改良を施すことで、改良体によって囲まれた住宅直下の自然地盤が左右に変形することができず、住宅の沈下による自由地盤が圧縮変形を受けにくくなったため、単純せん断モードの変形を示し（図-3.14参照）過剰間隙水圧が上昇しやすくなったと考えられる。

#### 〔住宅・地盤沈下量〕

各検討ケースでの、住宅の最大沈下量と最小沈下量より算出した住宅の傾斜量のまとめを図-3.15に示す。この結果より、case1を除いたすべてのケースにおいて、ほぼ同等の傾斜量を示しており、住宅モデルによる傾斜量の影響が少ないことがわかった。

各検討ケースの住宅沈下量の時刻歴を図-3.16 ~ -3.20に、地盤沈下量の時刻歴を図-3.21 ~ -3.25に示す。すべてのケースにおいて、加振方向に対して土槽外壁の間に住宅モデルを挟んでいるD5、6と、住宅モデルを挟んでいないD7、8で沈下量の大きさが異なることがわかる。つまり、建物が密集している地盤に相当する計測番号D5、6の沈下量が、建物が密集していない地盤に相当する計測番号D7、8の沈下量に比べて小さくなっている。この傾向は実際の液状化被害でも確認されており、実験が実際に観測された液状化地盤上の戸建住宅の液状化傾向を近似していることがわかる（図-1.1参照）。また、D5、6に着目すると、D6の沈下量がD5の沈下量より大きくなる傾向がすべてのケースで確認された。この原因として、平面図奥行き方向に計測機のコードを接続しており、そのコードが水道となって排水が促進され微細な粒子が水とともに抜け出ること、沈下量が増大したと考えられる。

#### 〔めり込み沈下量〕

各検討ケースの模型住宅（計測番号D1 ~ D4）の平均沈下量から地盤全体（計測番号D5 ~ D8）の平均沈下量を差し引いた住宅のめり込み沈下量の加振終了時刻である50秒時の結果を図-3.26に示す。各検討ケースの結果より、無対策の場合には約27cmあっためり込み沈下量を、対策を施すことで約7cmまで抑制できることがわかった。また、対策深度を深くすることで、約7cm以下にめり込み沈下量を低減できることもわかった。次に、めり込み沈下量と傾斜の関係図（図-1.1再掲）を再掲する。同図中の赤丸は品確法に記載されている傾斜6/1,000となる沈下量の位置を示しており、図-3.26の赤線は住宅があまり密集していない地区で許容されるめり込み沈下量（約9cm）を、青線は住宅が密集している地区で許容されるめり込み沈下量（約5cm）を示している。その結果より、住宅があまり密集していない場合には対策深度2mでも十分な対策効果を得られることもわかった。しかし、住宅が密集している場合には対策深度4mまでの対策が必要であることもわかった。この原因として、

振動台実験においては、住宅モデルのごく近傍に剛土槽の境界が存在している。したがって、実験が図-1.1 にみられる「住宅が密集している地区」 もしくは「住宅があまり密集していない地区」のいずれをモデル化しているのかは定量的に判断することはできないことが考えられる。

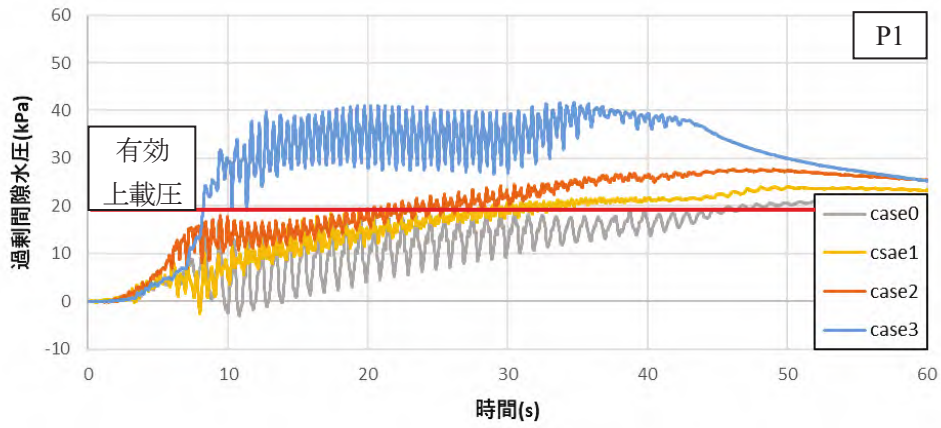


図-3.8 過剰間隙水圧の結果

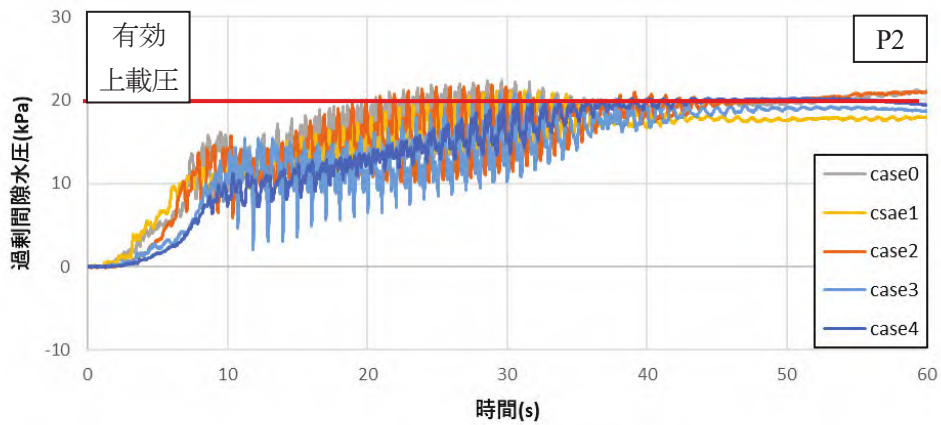


図-3.9 過剰間隙水圧の結果

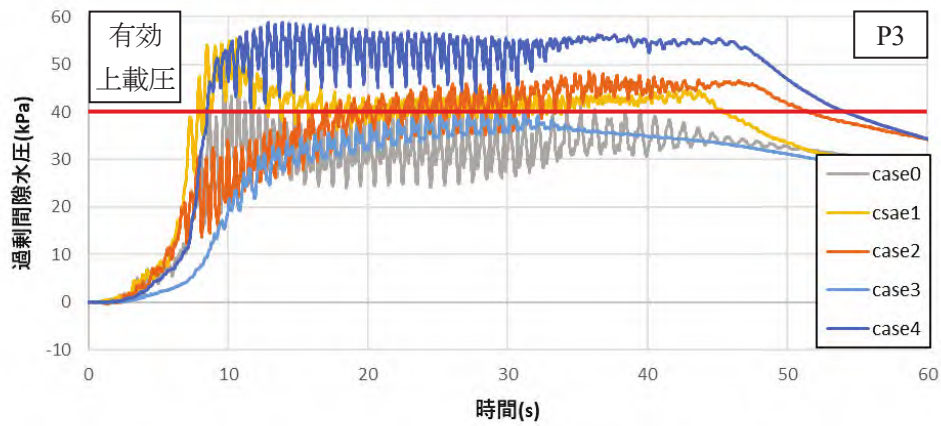


図-3.10 過剰間隙水圧の結果

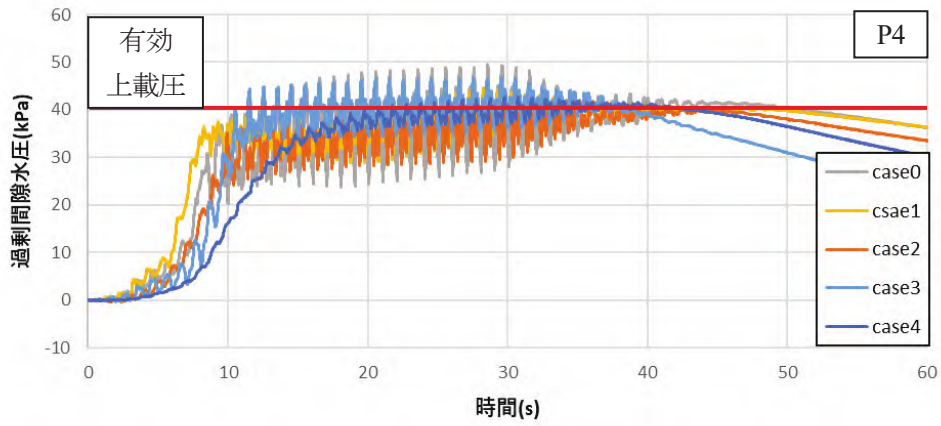


図-3.11 過剰間隙水圧の結果

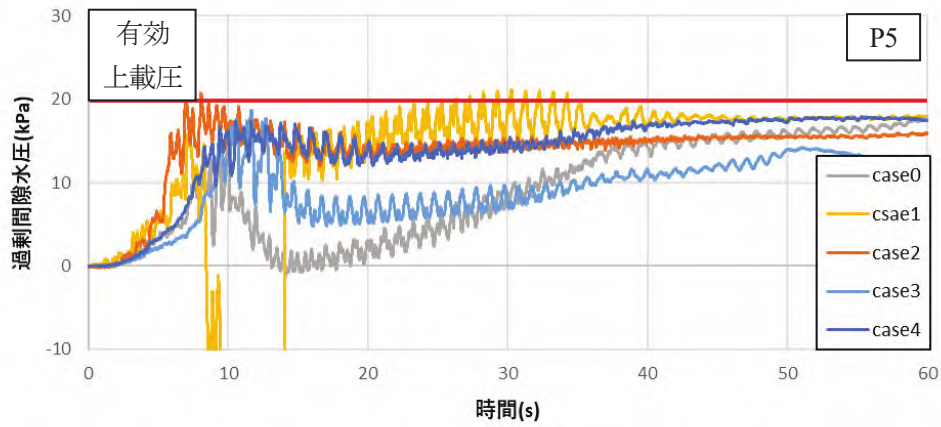


図-3.12 過剰間隙水圧の結果

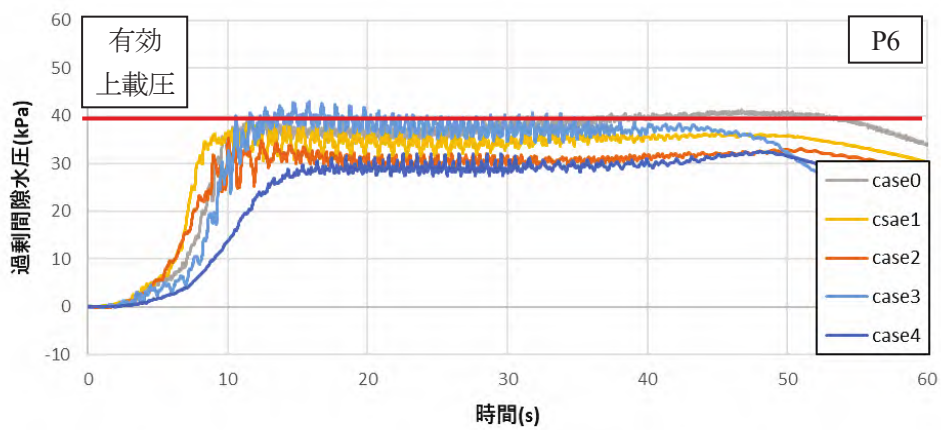
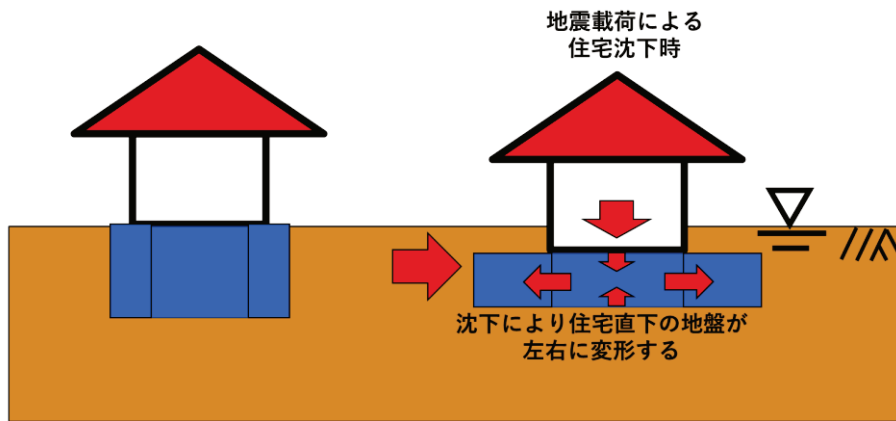


図-3.13 過剰間隙水圧の結果

### 未改良地盤



### 改良地盤

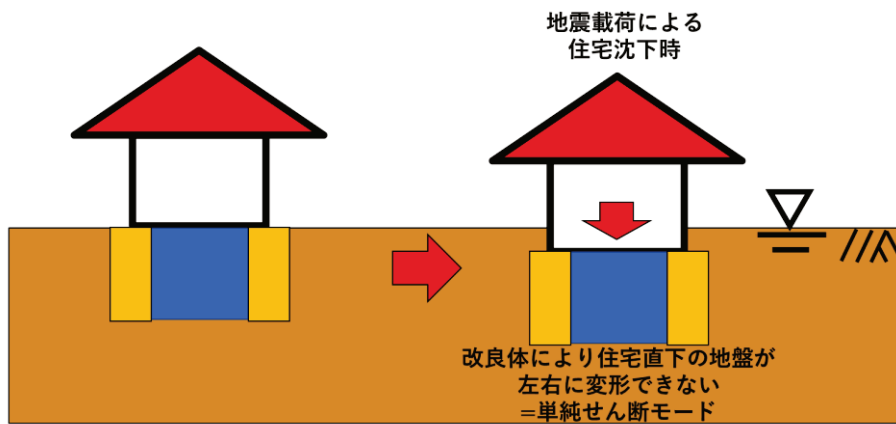


図-3.14 未改良地盤と改良地盤の住宅直下の地盤の変形の様子

### 傾斜角

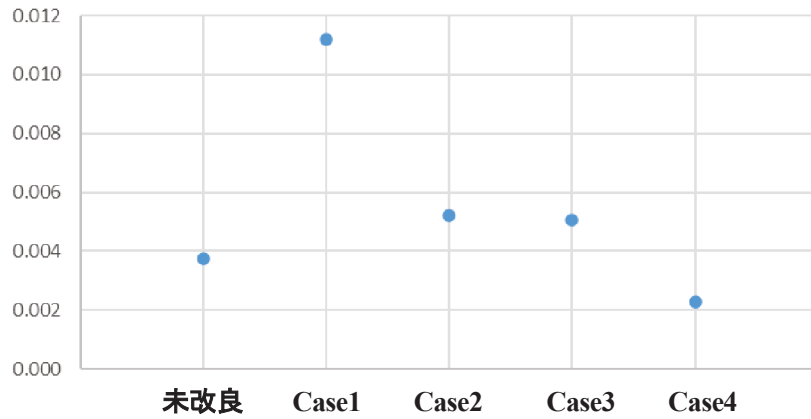


図-3.15 住宅の傾斜量 (比較)

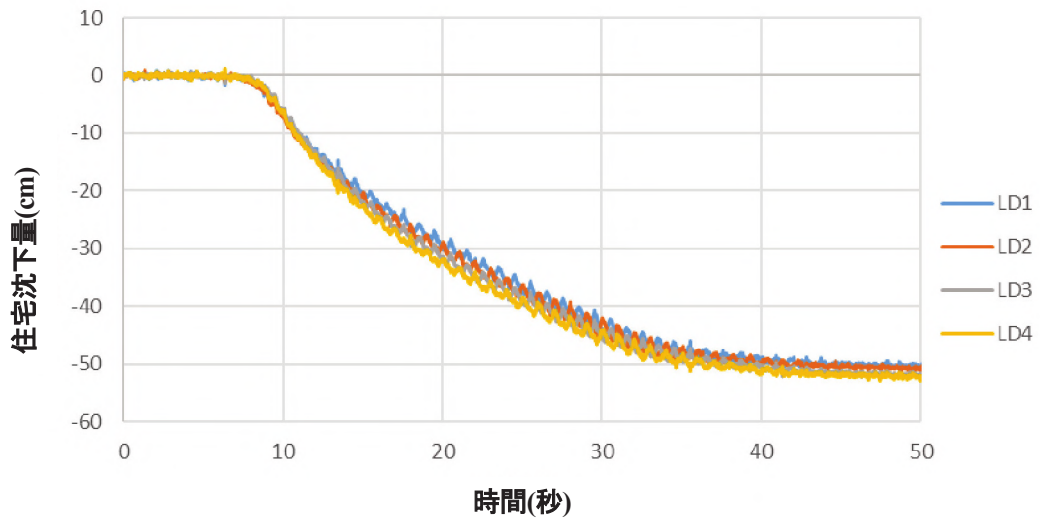


図-3.16 case0 の住宅沈下量

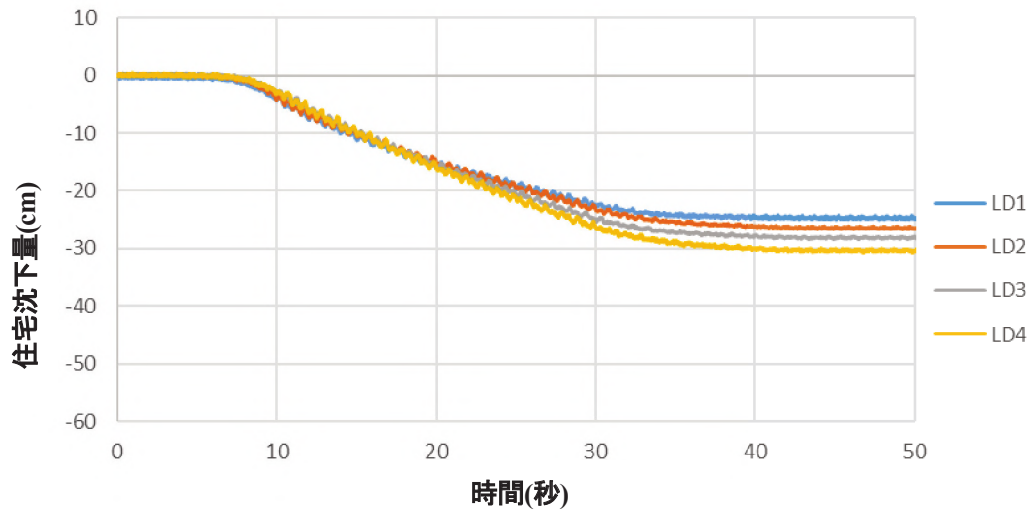


図-3.17 case1 の住宅沈下量

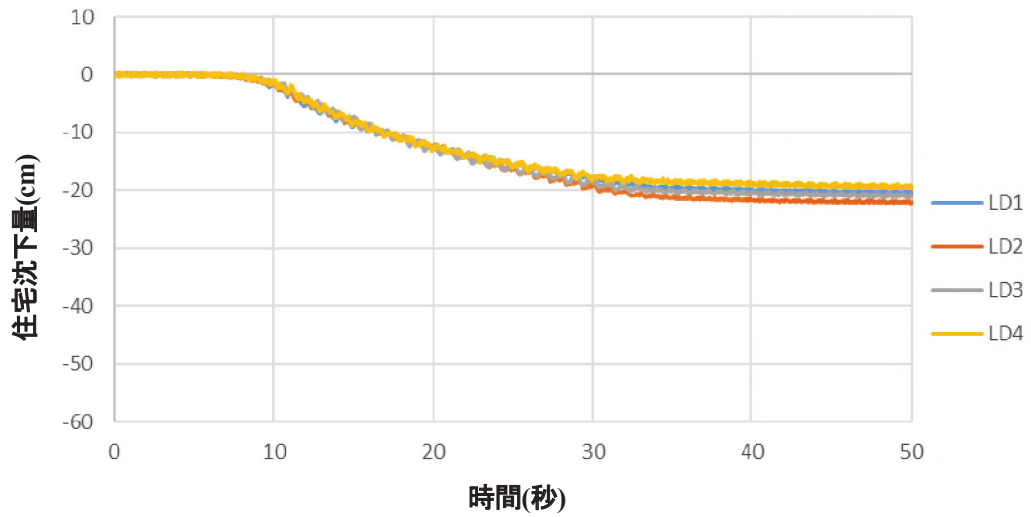


図-3.18 case2 の住宅沈下量

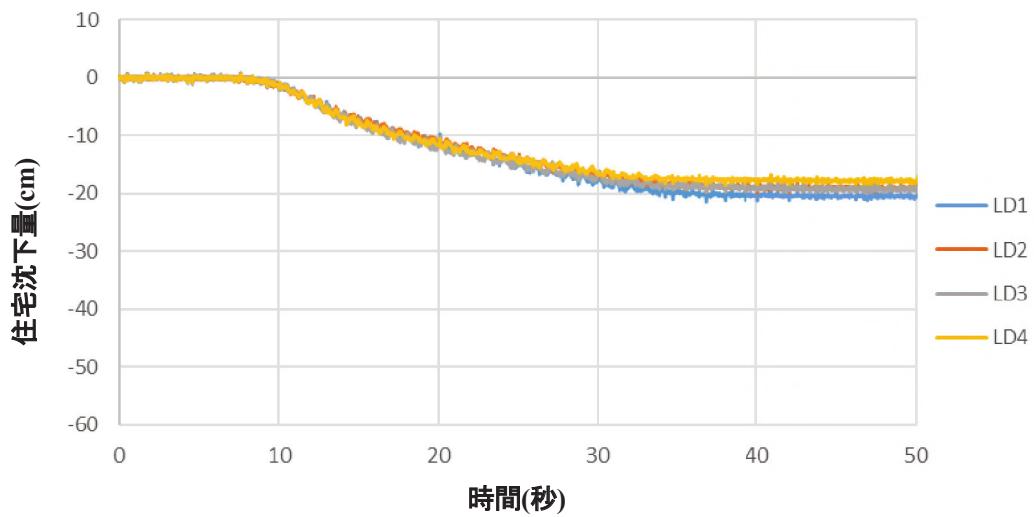


図-3.19 case3 の住宅沈下量

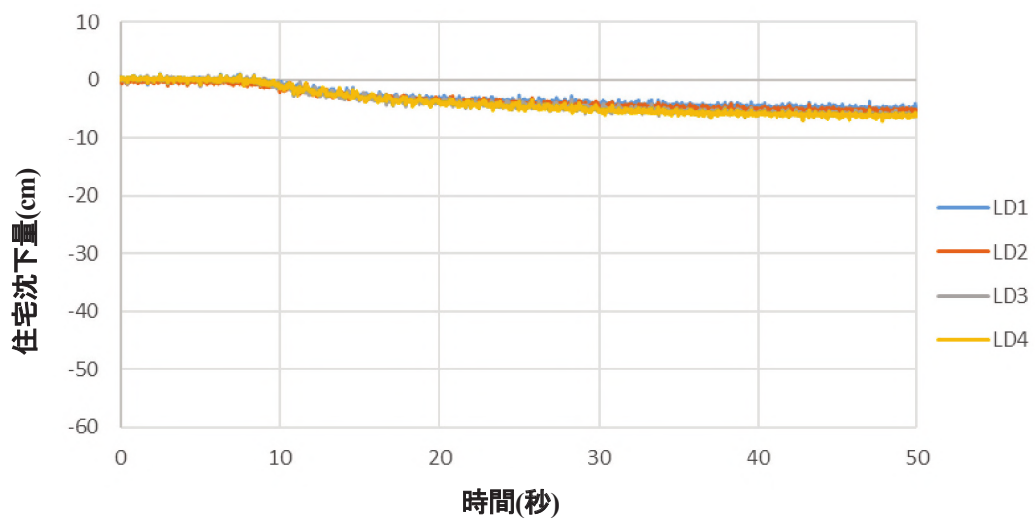


図-3.20 case4 の住宅沈下量



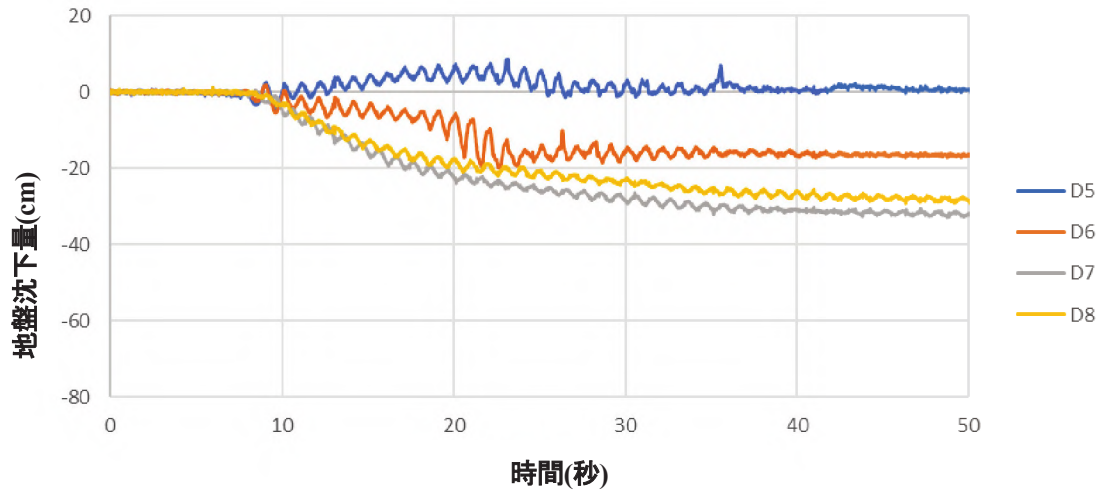


図-3.21 case0 の地盤沈下量

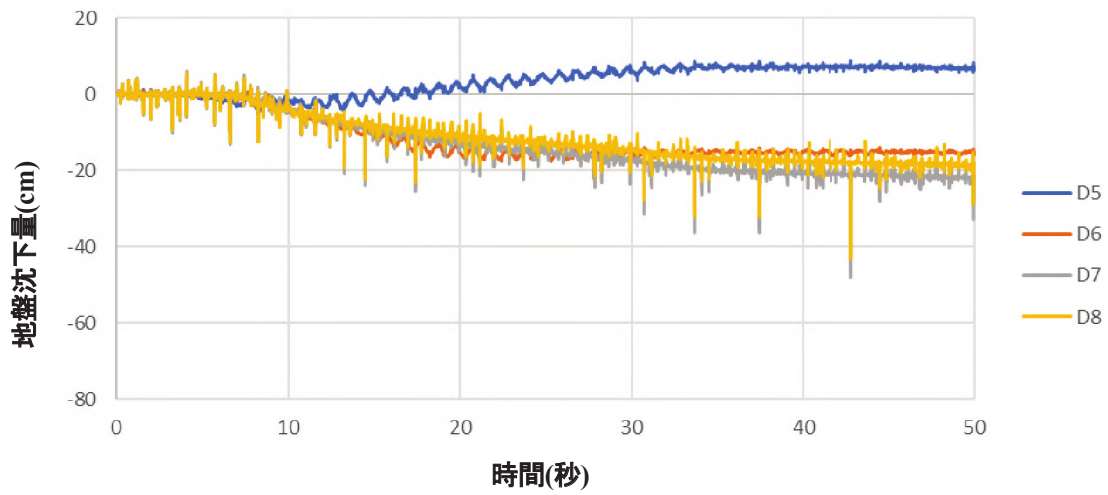


図-3.22 case1 の地盤沈下量

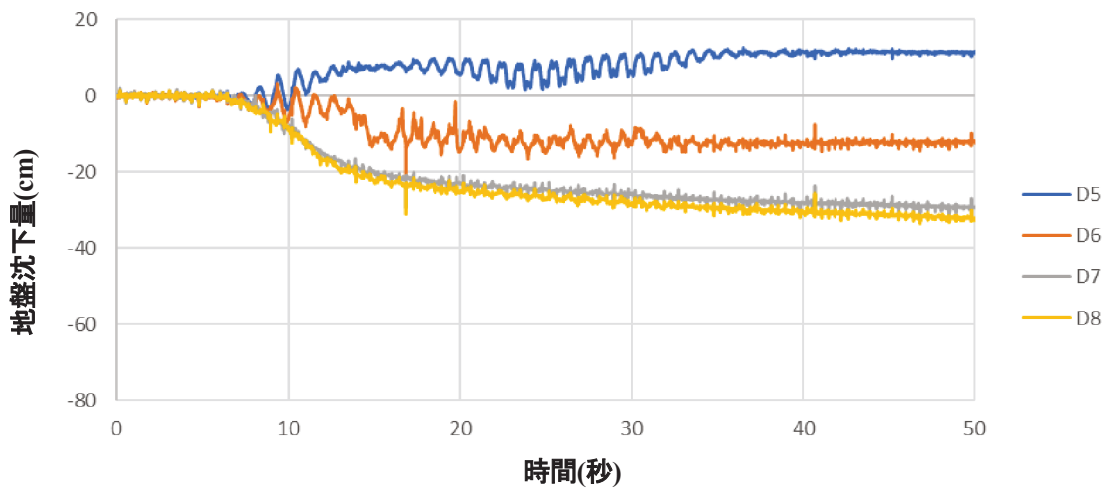


図-3.23 case2 の地盤沈下量

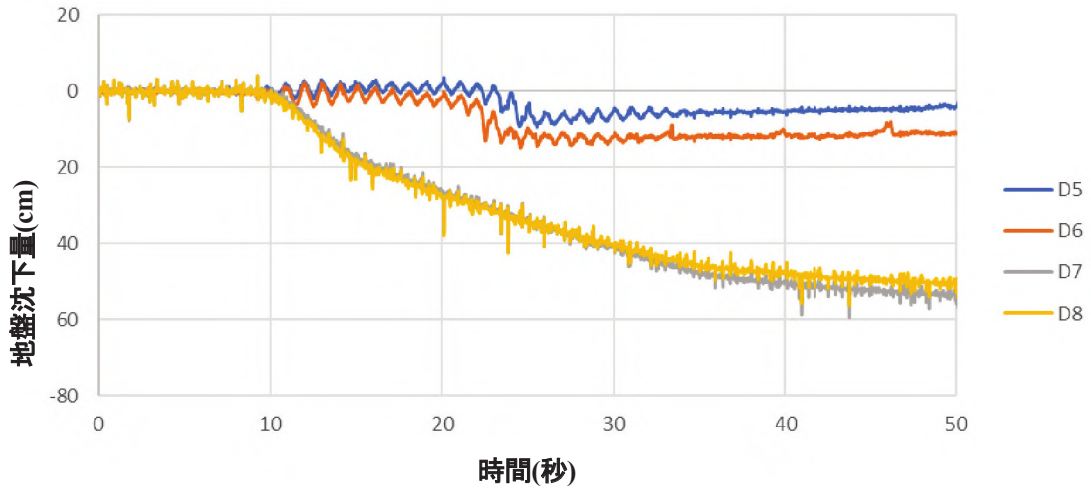


図-3.24 case3 の地盤沈下量

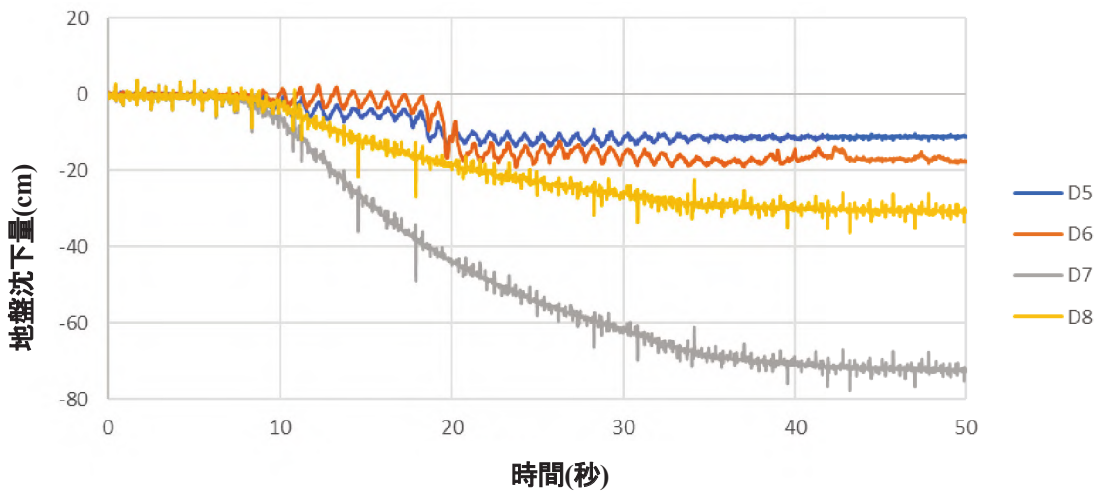


図-3.25 case4 の地盤沈下量

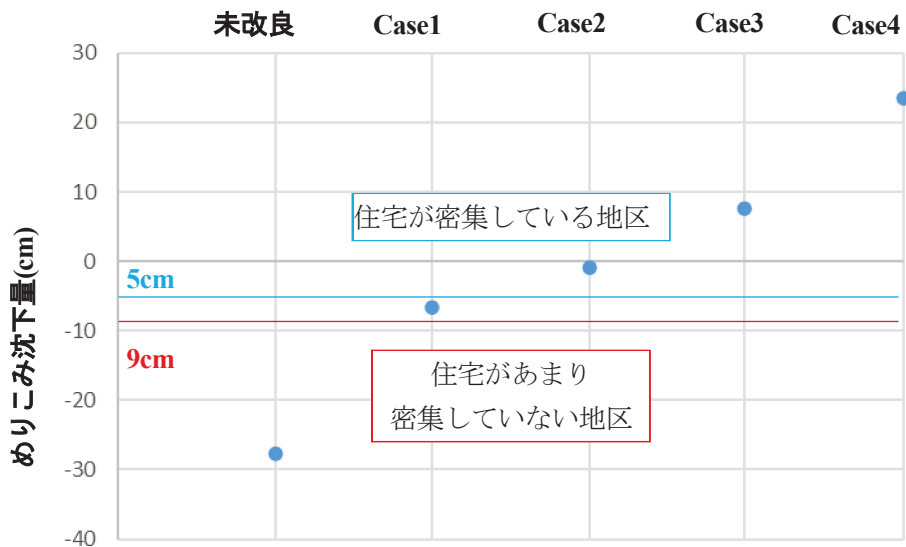
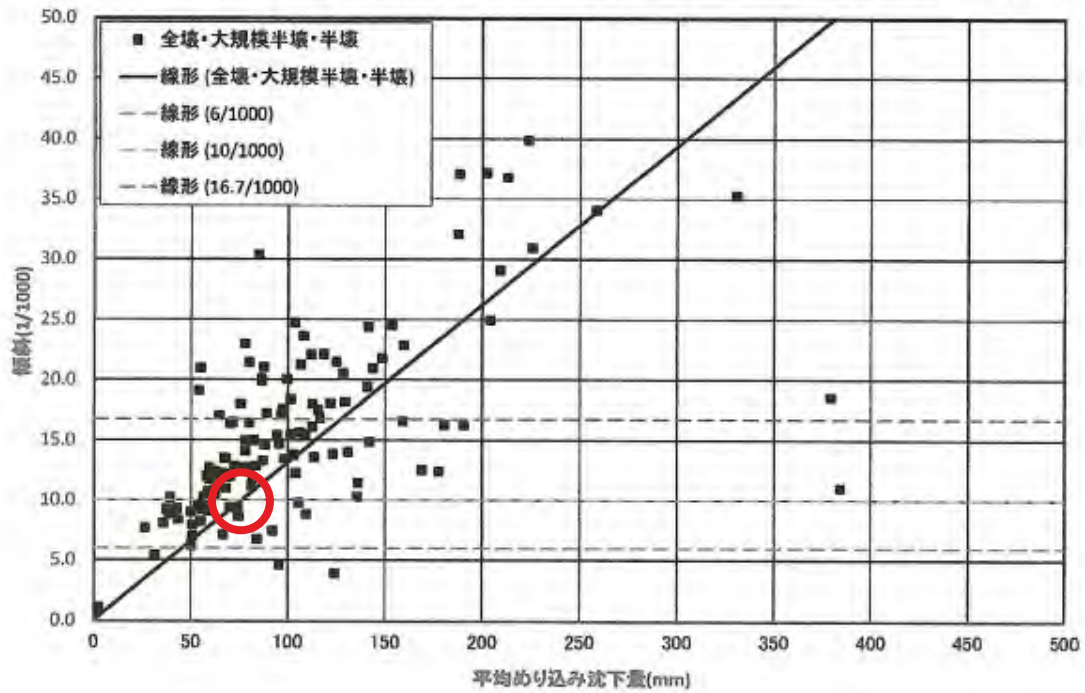


図-3.26 めり込み沈下量 (比較)

$$\text{傾斜角 } \theta (1/1,000) = 0.13 \times \text{平均めり込み沈下量 } S_{av} \text{ (mm)}$$



$$\text{傾斜角 } \theta (1/1,000) = 0.07 \times \text{平均めり込み沈下量 } S_{av} \text{ (mm)}$$

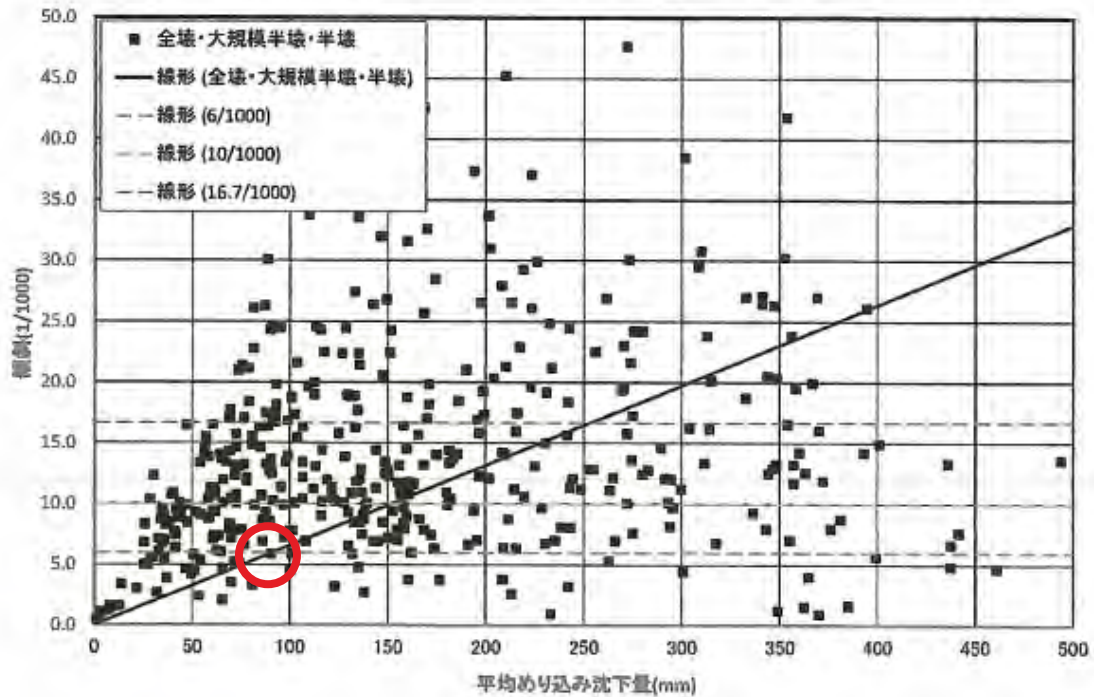


図-1.1 再掲 戸建て住宅のめりこみ沈下量と傾斜角の関係図<sup>1-16)</sup>  
 (上図：住宅が密集している地区 下図：住宅があまり密集していない地区)

### 3.4 まとめ

時間や費用の制約上、重力場で実験されることが多く、定性的な結果にとどまっている液状化対策工法の対策効果を定量的に確認するために、遠心場模型振動台を用いて、液状化対策工法の1つである薬液注入工法の液状化対策効果を検討した。検討したケースは、無対策のケースと薬液注入工法による改良範囲および改良深度を変化させたケースである。改良範囲は、住宅直下の地盤を全面改良したケースと、既設住宅でも施工できることを考え、住宅外縁部のみに絞ったスカート改良のケースで行い、対策深度は、自由地盤の最大深度6mのうち、深度2mまたは4mまでを改良した場合の計4ケースで検討した。実験は、地表面まで地下水位がある非常に厳しい条件のもとで、震度6弱相当の地震を発生させた場合の対策効果を確認した。また、模型住宅は、実スケールと比較した際に住宅としては比較的小さい規模の住宅を用いた。

その結果、対策を施すことで住宅のめり込み沈下量を低減できることがわかった。また、「住宅があまり密集していない」場合には、対策深度2mで品確法に定められた許容傾斜量6/1,000に相当する住宅のめり込み沈下量以下に抑えることが確認できた。過剰間隙水圧について、住宅から離れた自由地盤に近い場所での過剰間隙水圧の上昇と消散の傾向を比較すると、どのケースにおいても同様の傾向を示しており、改良の有無に関わらず各検討実験の再現性が確認できた。また、スカート改良内部の過剰間隙水圧が、未改良と比較すると大きくなっていることがわかった。この原因として、無対策の場合には、液状化により住宅が沈下した際に住宅直下の地盤が左右に変形することが考えられる。しかし、スカート改良を施すことで、改良体によって囲まれた住宅直下の自然地盤が左右に変形することができず、自由地盤が住宅の沈下による圧縮変形を受けにくくなったため、単純せん断モードの変形を示したことにより、過剰間隙水圧が上昇しやすくなったと考えられる。

## 参考文献

- 3-1) 荻谷敬三, 大野康年, 花田有紀, 山本圭吾, 樋口翔太郎, 八嶋厚, 村田芳信, 伊藤孝芳, 渦岡良介: 動的遠心力載荷試験による戸建住宅地盤の薬液注入液状化対策の効率化評価, 京都大学学術リポジトリ, D302, 2021.
- 3-2) 花田有紀: 電気検層を用いた薬液注入工法の出来高確認, 岐阜大学学位論文, 2021.
- 3-3) 風間基樹, 稲富隆昌: 遠心力載荷模型実験手法の振動実験への適用について, 土木学会論文集, 第 477号, pp.83-92, 1993.
- 3-4) 堤千花, 佐藤剛司, 古関潤一: 動的および静的に求めた乾燥豊浦砂の弾性変形係数, 生産研究, No.58, Vol.6, pp.521-524, 2006.
- 3-5) 国土交通省気象庁: 震度と加速度,  
URL: <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu-/comp.htm>, (2023/2/22 アクセス).

## 第4章 模型実験の再現解析及びめり込み沈下量抑制効果の確認

### 4.1 3次元解析の必要性

現在、液状化対策の対策効果を確認するための数値解析は、数多く実施されている。例えば、余川らは SPH<sup>41)</sup>法及び有限要素法（以下、FEM と呼ぶ）<sup>42)</sup>を用いた数値解析によって、住宅のめり込み沈下量を把握している。他にも、地盤工学会の浅層盤状改良による宅地の液状化対策研究委員会では、地盤改良工法の液状化対策効果を2つの FEM ソフトで比較検証している<sup>43)</sup>。しかし、その多くは2次元で行われており、住宅の傾斜が発生する場合には奥行方向にも傾斜が考えられるため、3次元の挙動を示す住宅の傾斜問題では再現することに限界がある。そこで本章では、3次元で行われた遠心場模型振動台実験を、3次元の有効応力に基づいた液状化解析プログラム LIQCA3D17 (Computer Program for Liquefaction Analysis) で再現することで、実験では確認できない地盤内部の有効応力や地盤内の変位などを確認する。これにより、薬液注入工法の対策効果を詳細に検討する。また、実験を再現した際に設定した解析パラメータを用いて、実験では実施することができなかった他条件についても解析を実施した。

### 4.2 液状化解析プログラム LIQCA の概要

本研究では、液状化現象を再現する解析手法として、3次元の有効応力に基づいた液状化解析プログラム LIQCA3D17 (Computer program for Liquefaction Analysis)<sup>44)</sup>を用いた。LIQCA3D17はFEMを用いた動的な有効応力プログラムのことで、地震中や地震後の排水解析が可能であり、過剰間隙水圧消散後の圧密解析が可能である。また、同じ液状化強度曲線であっても、有効応力径路や応力～ひずみ関係の異なる土の挙動を再現できるなどの特徴がある。FEMを用いた3次元動的解析にはLIQCAのほか、Finite element analysis of Liquefaction Program (FILP と呼ばれる)<sup>45)</sup>や地盤解析総合プログラム All Soils All States All Round Geo-analysis Integration (GEOASIA と呼ばれる)<sup>46)</sup>などが存在する。

### 4.3 支配方程式

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<sup>47), 48), 49)</sup>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 $U$ 及び間隙水圧 $p$ 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<sup>47)</sup>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を定義<sup>41)</sup>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。

次に支配方程式の離散化について述べる。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う。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<sup>412)</sup>を拡張した有限体積法<sup>413)</sup>を用いる。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する。これにより、計算自由度の低減と非排水条件でのshear locking の回避が可能となる<sup>414)</sup>。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と考えている。一方、時間離散化には陰解法であるNewmarkの $\beta$ 法を用いる。

以下に固相（土骨格）の変位 $u$ と間隙水圧 $p$ を未知数とした $u - p$ 定式化におけるつりあい式と連続式の誘導を示す。その際に以下を仮定する。

- 1) ひずみは微小ひずみである。
- 2) 間隙率、液相（間隙水）の透水係数の空間に対する勾配は十分に小さい。
- 3) 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。
- 4) 土粒子は非圧縮性である。
- 5) 温度変化は無視する。

#### 4.3.1 混合体の密度

混合体の単位体積に対する固相の見かけの密度 $\bar{\rho}^s$ 及び液相の見かけの密度 $\bar{\rho}^f$ は間隙率 $n$ を用いて以下のように表すことができる。

$$\bar{\rho}^s = (1 - n)\rho^s \quad \dots (4.1)$$

$$\bar{\rho}^f = n\rho^f \quad \dots (4.2)$$

ここに、 $\rho^s$ ：固相の密度、 $\rho^f$ ：液相の密度である。さらに、混合体の密度 $\rho$ は以下のように表すことができる。

$$\rho = \bar{\rho}^s + \bar{\rho}^f = (1 - n)\rho^s + n\rho^f \quad \dots (4.3)$$

#### 4.3.2 混合体の応力

多孔質体理論において全応力と有効応力の関係は、間隙水圧 $p$ を用いて以下のように表現できる。

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - p\delta_{ij} \quad \dots (4.4)$$

ここに、 $\sigma_{ij}$ ：全応力テンソル、 $\sigma'_{ij}$ ：有効応力テンソル、 $\delta_{ij}$ ：クロネッカーの $\delta$ である。なお、応力の符号は引張り方向を正とし、間隙水圧は圧縮方向を正とする。また、全応力は固相及び液相に作用する部分応力の和として以下のように表現できる。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^s + \sigma_{ij}^f \quad \dots (4.5)$$

ここに、 $\sigma_{ij}^s$ ：固相の部分応力テンソル、 $\sigma_{ij}^f$ ：液相の部分応力テンソルである。

固相と液相それぞれの部分応力テンソルは以下のように求めることができる。

$$\sigma_{ij}^s = \sigma'_{ij} - (1 - n)p\delta_{ij} \quad \dots (4.6)$$

$$\sigma_{ij}^f = -np\delta_{ij} \quad \dots (4.7)$$

### 4.3.3 変位とひずみの関係

仮定 1)より、固相と液相に対するひずみと変位の関係は以下のように定義できる。

$$\varepsilon_{ij}^s = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i^s}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^s}{\partial x_i} \right) \quad \dots (4.8)$$

$$\varepsilon_{ij}^f = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i^f}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j^f}{\partial x_i} \right) \quad \dots (4.9)$$

ここに、 $\varepsilon_{ij}^s$  : 固相のひずみテンソル、 $\varepsilon_{ij}^f$  : 液相のひずみテンソル、 $u_i^s$  : 固相の変位ベクトル、 $u_i^f$  : 液相の変位ベクトルである。なお、ひずみは引張成分を正とする。

また、固相のひずみ速度テンソルは、仮定 1)より、ひずみ成分を時間微分して次のように表現できる。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^s = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{u}_i^s}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j^s}{\partial x_i} \right) \quad \dots (4.10)$$

ここに、ドット( $\dot{\cdot}$ )は、物質時間微分を示す。

### 4.3.4 構成式

フックの法則から固相の応力とひずみの関係は、有効応力増分テンソルと固相のひずみ増分テンソルの関係として定義できる。

$$\Delta \sigma'_{ij} = D_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl}^s \quad \dots (4.11)$$

ここに、 $\Delta \sigma'_{ij}$  : 有効応力増分テンソル、 $D_{ijkl}$  : 構成関係テンソル、 $\Delta \varepsilon_{ij}^s$  : 固相のひずみ増分テンソルである。

液相については、粘性抵抗を考慮しないとすると、以下の構成式になる。

$$p = -K^f \varepsilon_{ij}^f \quad \dots (4.12)$$

ここに、 $K^f$  : 間隙流体の体積弾性係数である。

### 4.3.5 質量保存則

質量保存則は、固相と液相に対して、それぞれ以下のように表すことができる。

$$\frac{\partial \bar{\rho}^s}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho}^s \dot{u}_i^s)}{\partial x_i} = 0 \quad \dots (4.13)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}^f}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho}^f \dot{u}_i^f)}{\partial x_i} = 0 \quad \dots (4.14)$$



### 4.3.6 運動量保存則

運動量保存則は、固相と液相に対してそれぞれ以下のように表せる。

$$\bar{\rho}^s \ddot{u}_i^s - R_i = \frac{\partial \sigma_{ij}^s}{\partial x_j} + \bar{\rho}^s b_i \quad \dots (4.15)$$

$$\bar{\rho}^f \ddot{u}_i^f + R_i = \frac{\partial \sigma_{ij}^f}{\partial x_j} + \bar{\rho}^f b_i \quad \dots (4.16)$$

ここに、 $b_i$  : 物体力、 $R_i$  : 液相の固相に対する相対運動に伴う相互作用力を表す項<sup>415)</sup>であり、以下の式に表される。

$$R_i = n \frac{\gamma_w}{k} \dot{w}_i \quad \dots (4.17)$$

$$\dot{w}_i = n(\dot{u}_i^f - \dot{u}_i^s) \quad \dots (4.18)$$

ここに、 $k$  : 透水係数 (等方的と仮定しスカラーで表す)、 $\dot{w}_i$  : 液相の固相に対する平均的な相対速度ベクトル、 $\gamma_w = \rho^f g$  ( $g$ は重力加速度) は水の単位体積重量である。

次に、液相に対する運動量保存則である式(4.16)に式(4.18)を考慮して考えると次式が得られる。

$$\bar{\rho}^f \ddot{u}_i^s + \frac{\bar{\rho}^f}{n} \dot{w}_i + R_i = \frac{\partial \sigma_{ij}^f}{\partial x_j} + \bar{\rho}^f b_i \quad \dots (4.19)$$

ここで、仮定3)を考慮 ( $\ddot{u}_i^s \gg \dot{w}_i$ ) すると、次式のように近似できる。

$$\bar{\rho}^f \ddot{u}_i^s + R_i = \frac{\partial \sigma_{ij}^f}{\partial x_j} + \bar{\rho}^f b_i \quad \dots (4.20)$$

さらに、式(4.20)に式(4.2)、(4.6)、(4.16)を代入すると次式が得られる。

$$\rho^f \ddot{u}_i^s + \frac{\gamma_w}{k} \dot{w}_i = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho^f b_i \quad \dots (4.21)$$

ここで、右辺第2項は重力による物体力とし、時間依存項を無視すると以下の式が得られる。

$$- \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho^f b_i = 0 \quad \dots (4.22)$$

したがって、 $b_i = g$ とすると、 $p = \rho^f g x_i$ となり、間隙水圧は静水圧となる。

また、式(4.21)を $\dot{w}_i$ について整理すると、次式が得られる。

$$\dot{w}_i = - \frac{k}{\gamma_w} \left( \rho^f \ddot{u}_i^s + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho^f b_i \right) \quad \dots (4.23)$$

ここで、加速度項を無視し、 $x_1$ 方向を重力方向の座標と考え、 $b_i = g$ とすると、次式が得られる。

$$\dot{w}_i = - \frac{k}{\gamma_w} \left( \frac{\partial p}{\partial x_1} - \rho^f g \right) = -k \frac{\partial}{\partial x_1} \left( \frac{p}{\gamma_w} - x_1 \right) = -k \frac{\partial h}{\partial x_1} \quad \dots (4.24)$$

ここで、 $h$  : 全水頭であり、以下のように表す。

$$h = \frac{p}{\gamma_w} - x_1 = \frac{p}{\gamma_w} + z \quad \dots (4.25)$$

ここで、 $z = -x_1$ 、 $z$  : 位置水頭、 $\frac{p}{\gamma_w}$  : 圧力水頭である。このように、式(4.24)は Darcy 則となっ

ており、式(4.16)で示した液相に対する運動量保存則は Darcy 則を一般的に表現したものである。以上で、支配方程式を導くうえでの基礎式を示した。

次に、混合体のつりあい式を導く。式(4.15)、(4.16)の両辺をそれぞれ加えると、混合体に対する運動量保存則が次式のように得られる。

$$\bar{\rho}^s \ddot{u}_i^s + \bar{\rho}^f \ddot{u}_i^f = \frac{\partial \sigma_{ij}^s}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}^f}{\partial x_j} + \bar{\rho}^s b_i + \bar{\rho}^f b_i \quad \dots (4.26)$$

式(4.26)に、式(4.3)、(4.5)、(4.17)を代入して整理し、仮定3)を考慮して近似すると次式が得られる。

$$\rho \ddot{u}_i^s = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad \dots (4.27)$$

この式が、混合体に対するつりあい式である。

#### 4.3.7 連続式

固相の質量保存則（式(4.13)）に式(4.1)を代入し展開すると次式が得られる。

$$(1-n) \frac{\partial \rho^s}{\partial t} + \rho^s \frac{\partial(1-n)}{\partial t} + \rho^s \frac{\partial((1-n)\dot{u}_i^s)}{\partial x_i} + (1-n)\dot{u}_i^s \frac{\partial \rho^s}{\partial x_i} = 0 \quad \dots (4.28)$$

同様に、液相の質量保存則（式(4.14)）に式(4.2)を代入し展開すると次式が得られる。

$$n \frac{\partial \rho^f}{\partial t} + \rho^f \frac{\partial n}{\partial t} + \rho^f \frac{\partial(n\dot{u}_i^f)}{\partial x_i} + n\dot{u}_i^f \frac{\partial \rho^f}{\partial x_i} = 0 \quad \dots (4.29)$$

式(4.28)に $\frac{\rho^f}{\rho^s}$ を乗じて、式(4.29)と両辺を加えると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} & \rho^f \left( \frac{\partial(1-n)}{\partial t} + \frac{\partial n}{\partial t} \right) + \rho^f \frac{\partial(n\dot{u}_i^f - \dot{u}_i^s)}{\partial x_i} + \rho^f \frac{\partial \dot{u}_i^s}{\partial x_i} + \\ & n \left( \frac{\partial \rho^f}{\partial t} + \dot{u}_i^f \frac{\partial \rho^f}{\partial x_i} \right) + (1-n) \frac{\rho^f}{\rho^s} \left( \frac{\partial \rho^s}{\partial t} + \dot{u}_i^s \frac{\partial \rho^s}{\partial x_i} \right) = 0 \end{aligned} \quad \dots (4.30)$$

式(4.30)において、第1項は0である。さらに、式(4.9)及び式(4.17)を代入し、両辺を $\rho^f$ で割ると次式が得られる。

$$\frac{\partial \dot{w}_i}{\partial x_i} + \varepsilon_{ii}^s + \frac{n}{\rho^f} \left( \frac{\partial \rho^f}{\partial t} + \dot{u}_i^f \frac{\partial \rho^f}{\partial x_i} \right) + \frac{1-n}{\rho^s} \left( \frac{\partial \rho^s}{\partial t} + \dot{u}_i^s \frac{\partial \rho^s}{\partial x_i} \right) = 0 \quad \dots (4.31)$$

ここに、 $\varepsilon_{ii}^s$ ：固相の体積ひずみ速度である。さらに、式(4.31)の物質時間微分を考慮すると次式が得られる。

$$\frac{\partial \dot{w}_i}{\partial x_i} + \varepsilon_{ii}^s + \frac{n}{\rho^f} \dot{\rho}^f + \frac{1-n}{\rho^s} \dot{\rho}^s = 0 \quad \dots (4.32)$$

ここで、仮定4)より固相の土粒子は非圧縮性( $\dot{\rho}^s = 0$ )であるため、

$$\frac{\partial \dot{w}_i}{\partial x_i} + \varepsilon_{ii}^s + \frac{n}{\rho^f} \dot{\rho}^f = 0 \quad \dots (4.33)$$

さらに、式(4.33)の左辺第3項は間隙水の圧縮性を示す項に、仮定5)より温度の影響を無視した場合、間隙水自体の質量 $\rho^f V^f$ の時間変化は0であるため、次式が成り立つ。

$$\frac{D(\rho^f V^f)}{Dt} = 0 \quad \dots (4.34)$$

この式を変形すると次式が得られる。

$$\frac{\dot{\rho}^f}{\rho^f} = -\frac{\dot{V}^f}{V^f} = -\varepsilon_{ii}^f \quad \dots (4.35)$$

これに、液相の構成式である式(4.11)を代入すると次式が得られる。

$$\frac{\dot{\rho}^f}{\rho^f} = \frac{\dot{p}}{K^f} \quad \dots (4.36)$$

式(4.36)を式(4.33)に代入すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial \dot{w}_i}{\partial x_i} + \dot{\varepsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K^f} \dot{p} = 0 \quad \dots (4.37)$$

ここで、仮定 3)を用いて式(4.23)のように $w_i$ を固相の変位と間隙水圧で表すと、次式が得られる。

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{k}{\gamma_w} \left( \rho^f \dot{u}_i^s + \frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho b_i \right) \right] + \dot{\varepsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K^f} \dot{p} = 0 \quad \dots (4.38)$$

ここで、物体力 $b_i$ は一定で、仮定 2)より透水係数 $k$ と液相の密度 $\rho^f$ の空間に対する勾配は十分小さいとし、式(4.9)を考慮すると、最終的に得るべき連続式は次式のように得られる。

$$\frac{k}{\gamma_w} \left( -\rho^f \dot{\varepsilon}_{ii}^s - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} \right) + \dot{\varepsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K^f} \dot{p} = 0 \quad \dots (4.39)$$

以上で、得るべき方程式であるつりあい式と連続式を導くことができた。以下に再度つりあい式(式(4.27))と連続式(式(4.39))に示す。

$$\rho \dot{u}_i^s = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho b_i \quad \dots (4.27)$$

$$\frac{k}{\gamma_w} \left( -\rho^f \dot{\varepsilon}_{ii}^s - \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} \right) + \dot{\varepsilon}_{ii}^s + \frac{n}{K^f} \dot{p} = 0 \quad \dots (4.39)$$

### 4.3.8 地盤の構成式

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あるが、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（ここではせん断ひずみ10%程度）までを再現できるモデルが必要である。LIQCAでは、この条件を満たす砂の構成式として、Okaら<sup>44)</sup>の繰返し弾塑性モデル（以下、Oka modelと呼ぶ）を用いている。このモデルはOkaら<sup>44)</sup>のモデルをベースに、Tateishiら<sup>416)</sup>がより多様な砂の繰返し挙動を再現できるように、種々の拡張を行ったものである。この構成式には以下のような特徴がある。

- 1) 応力パラメータとして相対応力比<sup>417)</sup>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<sup>418), 419)</sup>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、地震時の様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<sup>420)</sup>を導入し、これにより変相応力比を決定することで、過圧密に伴うダイレイタンシー量の減少などを表現できる。
- 4) 一般化した流動則<sup>421)</sup>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シー関係を再現することができる<sup>416)</sup>。
- 5) 塑性ひずみ量に依存したせん断係数を用いることにより、せん断ひずみ10%程度までの砂の挙動を再現することができる<sup>416)</sup>。

ここでは、以下の基本的な仮定に基づき構成式の定式化を示す。

- 1) 微小ひずみ理論
- 2) 弾塑性理論
- 3) 非関連流動則
- 4) 過圧密境界曲面の概念
- 5) 非線形移動硬化則

#### (1) 過圧密境界曲面

正規圧密領域を $f_b > 0$ とし、過圧密領域を $f_b < 0$ とした場合に、その境界を表す式を次式で与える。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \left\{ \frac{(\sigma'_m)}{(\sigma'_{mb})} \right\} = 0 \quad \dots (4.40)$$

$$\bar{\eta}_{(0)}^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)} \quad \dots (4.41)$$

$$\eta_{ij}^* = \frac{s_{ij}}{\sigma'_m} \quad \dots (4.42)$$

ここに、 $\sigma'_m$ ：平均有効応力、 $s_{ij}$ ：偏差応力テンソル、 $M_m^*$ ：体積圧縮ひずみが最大となるときの応力比 $\eta^* = \sqrt{\eta_{ij} \eta_{ij}}$ （いわゆる変相応力比）、 $\eta_{ij(0)}^*$ ：異方圧密後の $\eta_{ij}^*$ の値である。ここでは、 $\sigma'_{mb}$ は塑性体積ひずみの関数として次式で与えられる。

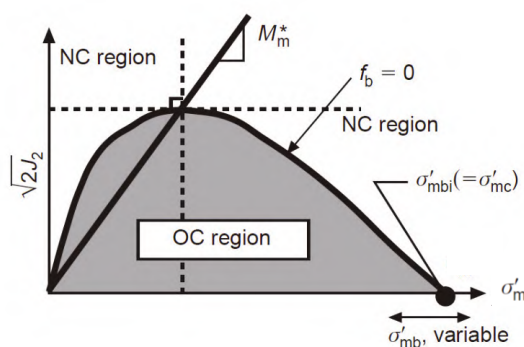
$$\sigma'_{mb} = \sigma'_{mbi} \exp \left( \frac{1+e}{\lambda-\kappa} v^P \right) = OCR^* \sigma'_{m0} \exp \left( \frac{1+e}{\lambda-\kappa} v^P \right) \quad \dots (4.43)$$

ここに、 $\sigma'_{mbi}$ ： $\sigma'_{mb}$ の初期値、 $\sigma'_{m0}$ ：初期平均有効応力、 $e$ ：間隙比、 $\lambda$ ：圧縮指数、 $\kappa$ ：膨潤指数、 $v^P$ ：塑性体積ひずみである。

一般に等方圧密された土の $\sigma'_{mbi}$ は先行圧密応力 $\sigma'_{m0}$ に対応するが、砂の場合、材料異方性・供試体の作成方法・締固め度・エイジングなどの影響を受け、 $\sigma'_{mbi}$ は必ずしも $\sigma'_{m0}$ に一致しない。そこで、ここでは、 $\sigma'_{mbi}$ は砂の体積変形特性を考慮して決定されることとし、そのパラメータとして擬似過圧密比 $OCR^* = (\sigma'_{mbi}/\sigma'_{m0})$ を定義する。

また、**図4.1**で示すように過圧密境界曲面と平均有効応力軸との交点は $\sigma'_{mc}$ として、次式で与えられる。図中の縦軸 $\sqrt{2J_2}$ は偏差応力ベクトルの第二不変量 $J_2 = (s_{ij}s_{ij})/2$ の2倍の平方根を示している。

$$\sigma'_{mc} = \sigma'_{mb} \exp\left(\frac{\eta_{(0)}^*}{M_m^*}\right) = \sigma'_{mb} \exp\left(\frac{\sqrt{\eta_{ij(0)}^* \eta_{ij(0)}^*}}{M_m^*}\right) \quad \dots (4.44)$$



**図4.1 過圧密境界曲面<sup>44)</sup>**

このようにこのモデルでは、初期応力の異方性が過圧密境界曲面の形状に影響することになるが、ここでは初期応力異方性の影響は繰り返しせん断履歴の蓄積に伴って消失すると仮定し、次式(4.45)、(4.46)、(4.47)のようにパラメータ $\zeta$ を導入して修正する。

$$\sigma'_{mc} = \sigma'_{mb} \exp\left(\frac{\eta_{(0)}^* \zeta}{M_m^*}\right) \quad \dots (4.45)$$

$$\zeta = -C_d \gamma^{p*} = -C_d \int d\gamma^{p*} \quad \dots (4.46)$$

$$d\gamma^{p*} = \sqrt{de_{ij}^p de_{ij}^p} \quad \dots (4.47)$$

ここで、 $\gamma^{p*}$ ：塑性せん断ひずみの初期状態からの累積値、 $de_{ij}^p$ ：塑性偏差ひずみテンソルの増分値、 $C_d$ ：異方性の消失速度を制御する材料定数である。なお、初期等方圧密状態では、 $\eta_{(0)}^* = 0$ となり、式(4.44)と(4.45)は等価となる。

(2) 降伏曲面

ここでは2つの降伏曲面を考える。初めに、応力比の変化に対する降伏関数 $f_y$ は次式(4.48)で与えられる。

$$f_y = \sqrt{(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)} - k = 0 \quad \dots (4.48)$$

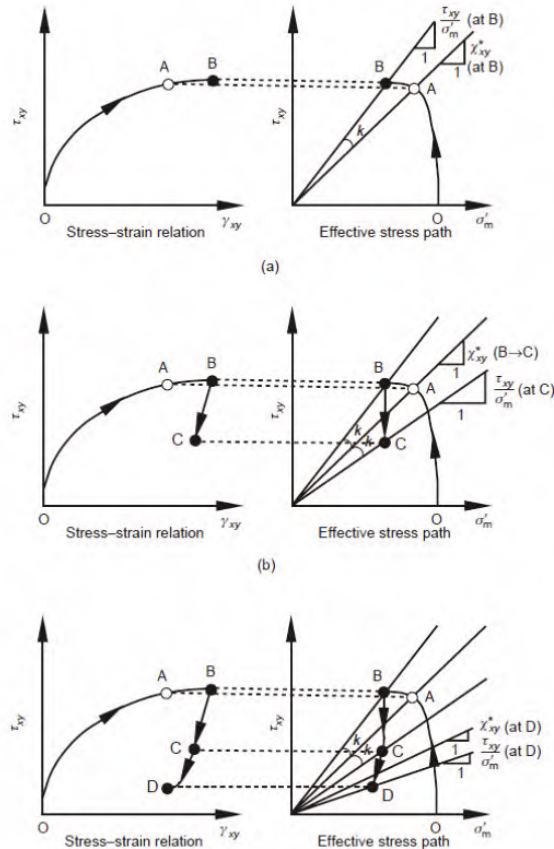


図-4.2 非線形移動硬化則パラメータの挙動の概念図<sup>4-4)</sup>

弾塑性過程 (O→A→B)、(b) 弾性過程 (B→C)、(c) 弾塑性過程 (C→D)

ここに、 $k$  : 弾性域を定義する数値パラメータ、 $\chi_{ij}^*$  : 非線形移動硬化パラメータである。 $\chi_{ij}^*$ は応力比 $\eta_{ij}^*$ と同じ次元にあり、back stressとも呼ばれ、図-4.2で示すように現在の応力比に追従するように挙動する。非線形移動硬化パラメータの発展則は次式で定義される。

$$d\chi_{ij}^* = B^*(A^*de_{ij}^p - \chi_{ij}^*d\gamma^{p*}) \quad \dots (4.49)$$

ここに、 $B^*$ 、 $A^*$  : 材料パラメータであり、破壊応力比 $M_f^*$ 及び平均有効応力で除した無次元化初期塑性せん断係数 $G^P$ とそれぞれ次のような関係にある。

$$A^* = M_f^* \quad \dots (4.50)$$

$$B^* = \frac{G^P}{M_f^*} \quad \dots (4.51)$$

さらに、パラメータ $B^*$ には次のような発展則を適用することも可能である。

$$dB^* = C_f(B_1^* - B^* d\gamma^{p*}) \quad \dots (4.52)$$

ここに、 $C_f$ 、 $B_1^*$  : 材料パラメータである。この移動硬化則の特徴は、式(4.49)中の右辺第2項の非線形項 $\chi_{ij}^*d\gamma^{p*}$ にあり、この項を無視するとPragerの線形移動硬化則に対応する。

(3) 塑性ポテンシャル関数

塑性ポテンシャルは次式で与えられる。

$$g = \bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \ln \left( \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{ma}} \right) = 0 \quad \dots (4.53)$$

$$\bar{\eta}_x^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)} \quad \dots (4.54)$$

ここに、 $\sigma'_{ma}$  : 定数、 $\tilde{M}^*$ については、以下の式(4.55)で算出される。

$$\tilde{M}^* = \begin{cases} M_m^* & (f_b \geq 0) \\ -\frac{\eta^*}{\ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mc}}} & (f_b < 0) \end{cases} \quad \dots (4.55)$$

このように塑性ひずみ増分の方向を制御する $\tilde{M}^*$ は応力状態に依存した変数となり、過圧密領域では変相応力比 $M_m^*$ よりも小さくなる。なお、一旦 $\tilde{M}^*$ が $M_m^*$ に達した後は、 $\tilde{M}^* = M_m^*$ と仮定する。これは、その応力比で構造崩壊が発生すると仮定しているためである。

### 4.3.9 改良砂を対象とした構成式

現在、2次元のLIQCA（以下、LIQCA2Dと呼ぶ）には薬液注入工法によって作製された改良砂を考慮した構成式が導入されているが、3次元のプログラムであるLIQCA3Dには改良砂を対象とした構成式は導入されていない。そのため、LIQCA3Dに大野<sup>423)</sup>の構成式を導入することで、薬液注入工法の効果を検証解析した。

改良砂の繰返し弾塑性構成式（以下、改良砂モデルと呼ぶ）は、上記のOka model<sup>44)</sup>を拡張して誘導されている。改良砂の繰返し載荷試験から、特殊シリカによる改良土は次のような特性を持っていることが示されている。

- 1) 破壊条件として粘着力成分を有する。
- 2) 繰返し載荷時のひずみの発生は、繰返し回数とともにその増加量が減少し最終的に収束する。
- 3) 繰返し載荷に伴い、変相線が有効応力径路で初期の変相線より内側に移動する傾向がある。これにより、正のダイレイタンスーが発揮される領域が拡大し、変形が抑制される。

改良砂の構成式は過圧密境界面、塑性ポテンシャル、降伏関数と移動硬化則の3つが拡張されており、その詳しい拡張の式を以下に示す。

#### (1) 過圧密境界面

改良砂が粘着力を有することを考慮し、砂の繰返し弾塑性モデルを以下の式(4.56)、(4.57)のように拡張した。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}^* + M_m^* \ln \left( \frac{\sigma'_m + b}{\sigma'_{mb} + b} \right) = 0 \quad \dots (4.56)$$

$$\bar{\eta}_{(0)}^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)(\eta_{ij}^* - \eta_{ij(0)}^*)} \quad \dots (4.57)$$

ここで、 $f_b$ ：過圧密境界面を表すパラメータ（ $f_b \geq 0$ ）で正規圧密状態、（ $f_b < 0$ ）で過圧密状態）、 $\bar{\eta}_{(0)}^*$ ：圧密終了後の相対応力比、 $M_m^*$ ：変相応力比、 $\sigma'_m$ ：平均有効応力、 $\sigma'_{mb}$ ：塑性体積ひずみの関数、 $b$ ：粘着力を考慮したスカラーパラメータ、 $\eta_{ij}^*$ ：現在の応力比、 $\eta_{ij(0)}^*$ ：圧密終了後の応力比である。

さらに、現在の応力比 $\eta_{ij}^*$ は $b$ を考慮して表すと以下の式(4.58)となる。

$$\eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{(\sigma'_m + b)} \quad \dots (4.58)$$

同様に圧密終了後の応力比 $\eta_{ij(0)}^*$ は式(4.59)となる。

$$\eta_{ij(0)}^* = \frac{S_{ij(0)}}{(\sigma'_{m(0)} + b)} \quad \dots (4.59)$$

ここで、 $S_{ij}$ ：偏差応力テンソル、 $S_{ij(0)}$ ：圧密終了後の偏差応力テンソル、 $\sigma'_{m(0)}$ ：圧密終了後の平均有効応力である。



(2) 塑性ポテンシャル

次に、塑性ポテンシャル $g$ を $b$ を用いて拡張すると以下の式(4.60)、(4.61)となる。

$$g = \bar{\eta}_x^* + \tilde{M}^* \ln \left\{ \frac{(\sigma'_m + b)}{\sigma'_{ma}} \right\} = 0 \quad \dots (4.60)$$

$$\bar{\eta}_x^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)(\eta_{ij}^* + x_{ij}^*)} \quad \dots (4.61)$$

ここで、 $\tilde{M}^*$ ：応力状態に依存した塑性ひずみ増分の方向を制御する変数、 $\sigma'_{ma}$ ：定数、 $x_{ij}^*$ ：移動硬化パラメータである。

さらに、変相角に相当する変相応力比については以下の式(4.62)～(4.64)のように拡張した。

$$\tilde{M}^* = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{M_m^*}{1 + \left( \frac{M_m^*}{\tilde{M}_{(n)}^*} - 1 \right) \exp(-\alpha_1^* \gamma_{ap}^{p*})} & (f_b \geq 0) \\ -\frac{\eta^*}{\ln \frac{\sigma'_m + b}{\sigma'_{mc} + b}} & (f_b < 0) \end{array} \right\} \quad \dots (4.62)$$

$$\tilde{M}_{(n)}^* = -\frac{\eta^*}{\ln \frac{\sigma'_m + b}{\sigma'_{mc} + b}} \quad \dots (4.63)$$

$$\gamma_{ap}^{p*} = \int_{\gamma^p(\eta^*=M_m^*)}^{\gamma^p} d\gamma^p \quad \dots (4.64)$$

ここで、 $\alpha_1^*$ ：低減定数、 $\gamma_{ap}^{p*}$ ：変相応力比後の蓄積塑性偏差ひずみ、 $\sigma'_{mc}$ ：過圧密境界面と平均有効応力軸との交点である。

Oka model<sup>44)</sup>では、変相角に到達すると $\tilde{M}^* = M^*$ 一定と仮定していた。これは、その応力比で構造崩壊が発生すると仮定していたからである。一方、改良砂の構成式では、構造崩壊が急激ではなく、徐々に発生すると考え、ロジスティック関数を用い表現した。

さらに、 $b$ の初期値である $b_0$ もひずみの進行とともに消滅するとし、破壊応力比 $M_f^*$ も以下のように変化すると仮定する（**図-4.3 参照**）と以下の式(4.65)、(4.66)になる。

$$b = b_0 \exp(-\alpha_2^* \gamma_{ap}^{p*}) \quad \dots (4.65)$$

$$M_f^{*'} = M_{f0}^* \frac{(\sigma'_m + b_0)}{(\sigma'_m + b)} \quad \dots (4.66)$$

ここで、 $\alpha_2^*$ ：低減定数、 $M_{f0}^*$ ： $M_f^*$ の初期値であり単調載荷試験により求められる。過圧密境界面と塑性ポテンシャルの関係図を**図-4.4**に示す。

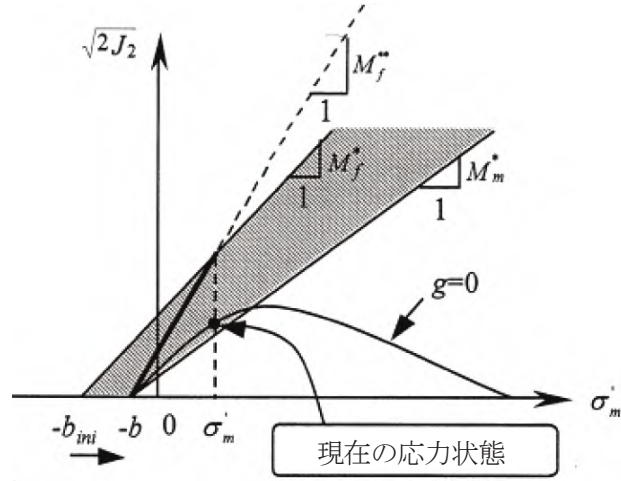


図-4.3  $b$ と破壊応力比 $M_f^*$ の変化<sup>4-22)</sup>

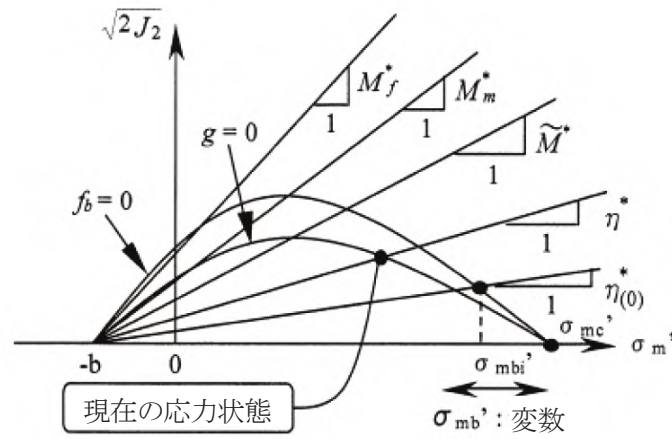


図-4.4 過圧密境界面と塑性ポテンシャル<sup>4-22)</sup>

(3) 降伏関数と移動硬化則

降伏関数 $f_y$ は以下の式(4.67)及び(4.61)、(4.58)で与えられる。

$$f_y = \bar{\eta}_x^* - k = 0 \quad \dots (4.67)$$

$$\bar{\eta}_x^* = \sqrt{(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)(\eta_{ij}^* - x_{ij}^*)} \quad \dots (4.61)$$

$$\eta_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{(\sigma'_m + b)} \quad \dots (4.58)$$

ここで、 $k$  : 弾性域を定義する数値パラメータである。

#### 4.3.9.1 改良砂モデルの検証解析

改良砂モデルの導入に従い、LIQCA2D17 と LIQCA3D17 で同様な 1 要素において応答が同じであるかを検証解析した。境界条件は、LIQCA2D では要素下部を全方向 (x, y 方向) 固定、その他の節点は奥行き方向 (y 方向) を固定、要素上部の節点は x 方向に対して等変位境界を設定した。LIQCA3D では要素下部を全方向 (x, y, z 方向) 固定とし、その他の節点は加振方向以外の方向 (y, z 方向) を固定、要素上部の節点は x 方向に対して等変位境界を設定した。排水境界は要素上部のみ排水とし、他の部分は非排水とした。荷重は要素下部より一定の正弦波で加振した。検討条件は、入力する正弦波の振幅、周波数、加振時間によって検討し、要素内に発生する各種応力を有効応力径路にて検証した。その検証条件図、材料パラメータ及び検討ケースを以下の**図-4.5**、**表-4.1** 及び**表-4.2** にそれぞれ示す。Newmark の  $\beta$  法の係数である  $\beta$ 、 $\gamma$  は解析の安定を図るためにそれぞれ 0.3025、0.6 を用いた<sup>423)</sup>。また、質量比例減衰ならびに剛性比例減衰は過去の解析事例に則り、0、-0.0023 とした<sup>424)</sup>。

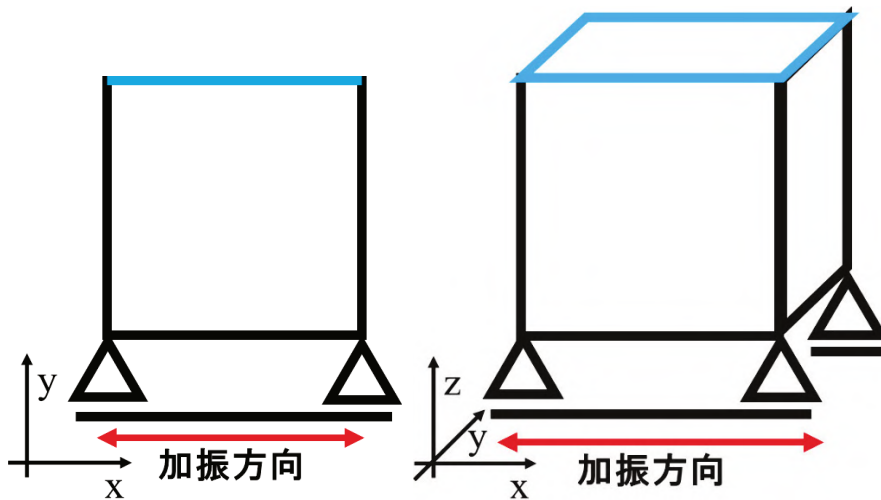


図-4.5 LIQCA2D17 と LIQCA3D17 の検討条件図

表-4.2 検討ケース

検討ケース	振幅(kPa)	周波数(Hz)	入力時間(秒)
case1	1	1	4
case2	1	1	100
case3	1	10	4
case4	10	1	4
case5	10	1	1,000
case6	50	1	1,000
case7	100	1	4

表-4.1 材料パラメータ

パラメータ名		改良土
Newmarkの $\beta$ 法の係数	$\beta$	0.3025
Newmarkの $\gamma$ 法の係数	$\gamma$	0.600
質量比例減衰の定数	$\alpha_0$	0.000
剛性比例減衰の定数	$\alpha_1$	-0.0023
間隙水の単位体積重量	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9.8
重力加速度	$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9.8
初期間隙比	$e_0$	0.752
圧縮指数	$\lambda$	0.025
膨張指数	$\kappa$	0.0025
無次元化初期せん断係数	$G_0/\sigma'_m$	1317
透水係数	$k$ (m/s)	$2.2 \times 10^{-6}$
密度	$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.8
変相応力比	$M^*_m$	0.71
破壊応力比	$M^*_f$	0.96
硬化関数中のパラメータ	$B^*_0$	6,000
〃	$B^*_1$	60
〃	$C_f$	0
規準ひずみ(塑性剛性)	$\gamma^{P^*}_r$	0.002
規準ひずみ(弾性剛性)	$\gamma^{E^*}_r$	0.020
ダイレイタンシー係数	$D^*_0$	1.0
〃	$n$	2.0
異方性のパラメータ	$C_d$	2000
改良体パラメータ	$b^*_0$	5.0
改良体パラメータ	$\alpha^*_1$	5.0
改良体パラメータ	$\alpha^*_2$	50.0

### 4.3.9.2 検証結果

LIQCA2D17 及び LIQCA3D17 の有効応力経路の比較図とせん断応力-ひずみ曲線の比較を図4.6 ~ 4.12 に示す。比較検証の結果より、LIQCA2D17 及び LIQCA3D17 で同じ結果が算出されたので、改良砂モデルが適正に導入されていることが確認できた。

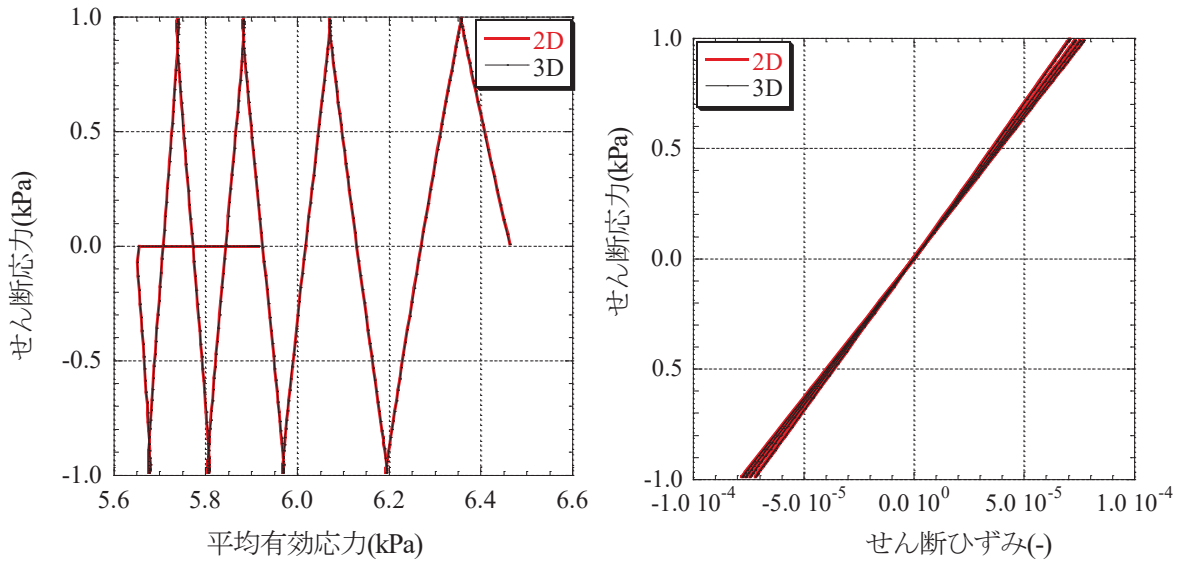


図-4.6 case1 の検討結果

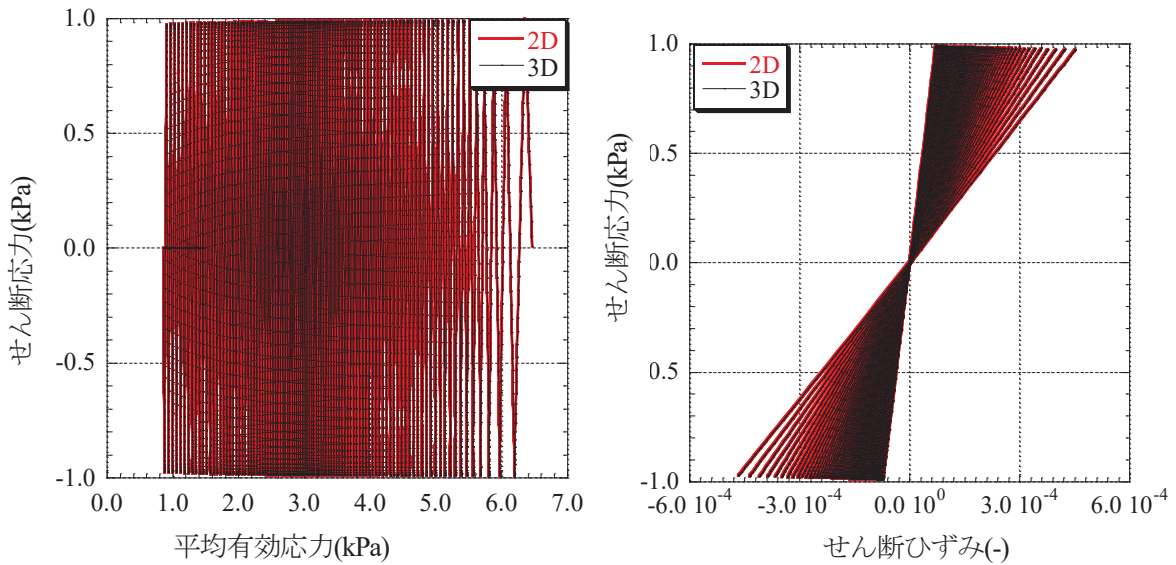


図-4.7 case2 の検討結果

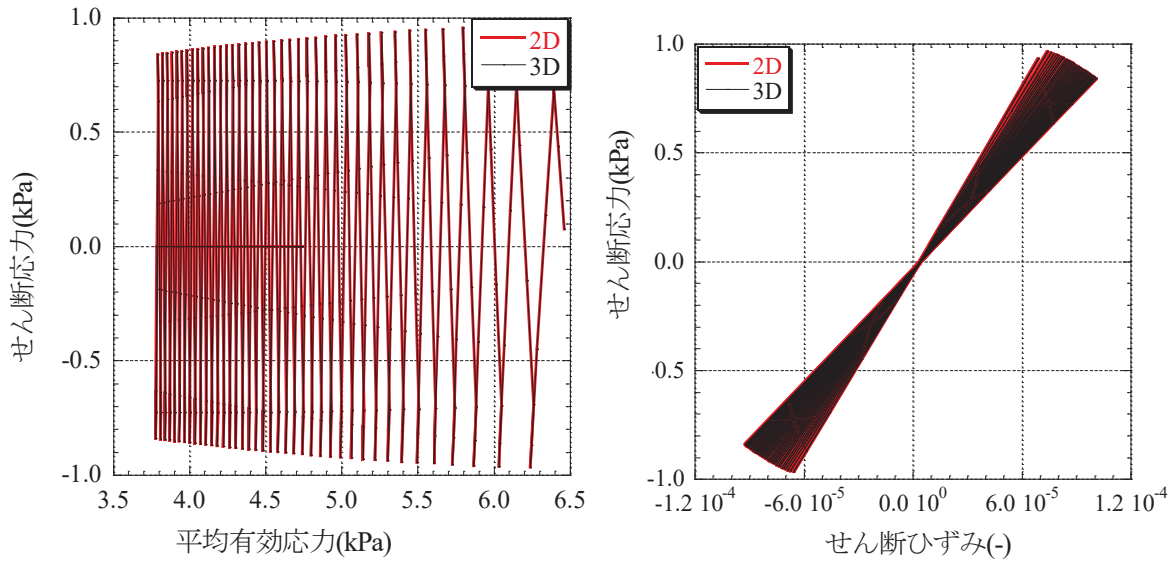


図-4.8 case3の検討結果

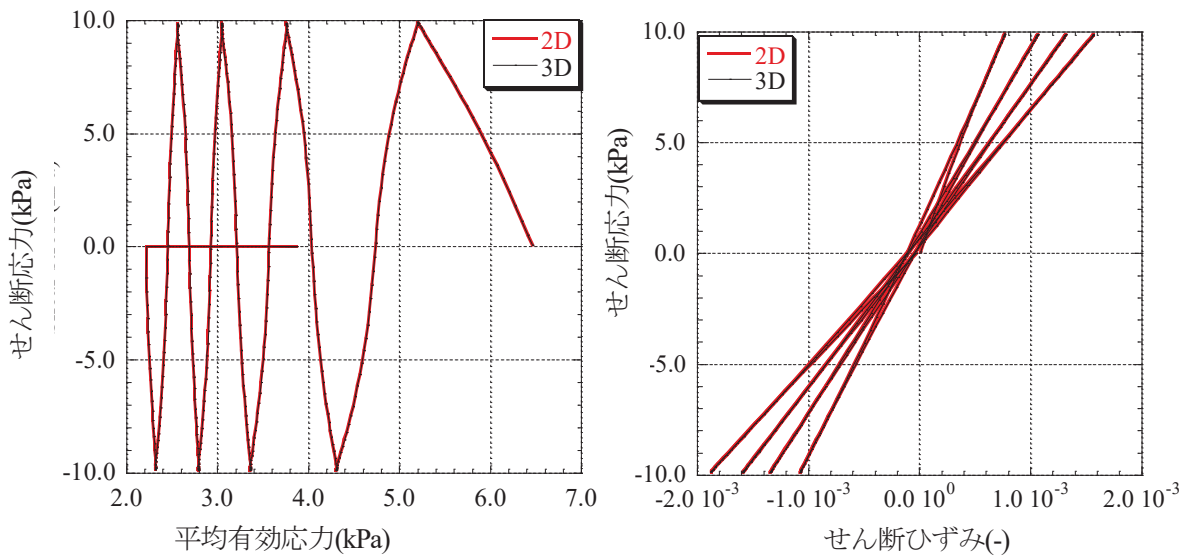


図-4.9 case4の検討結果

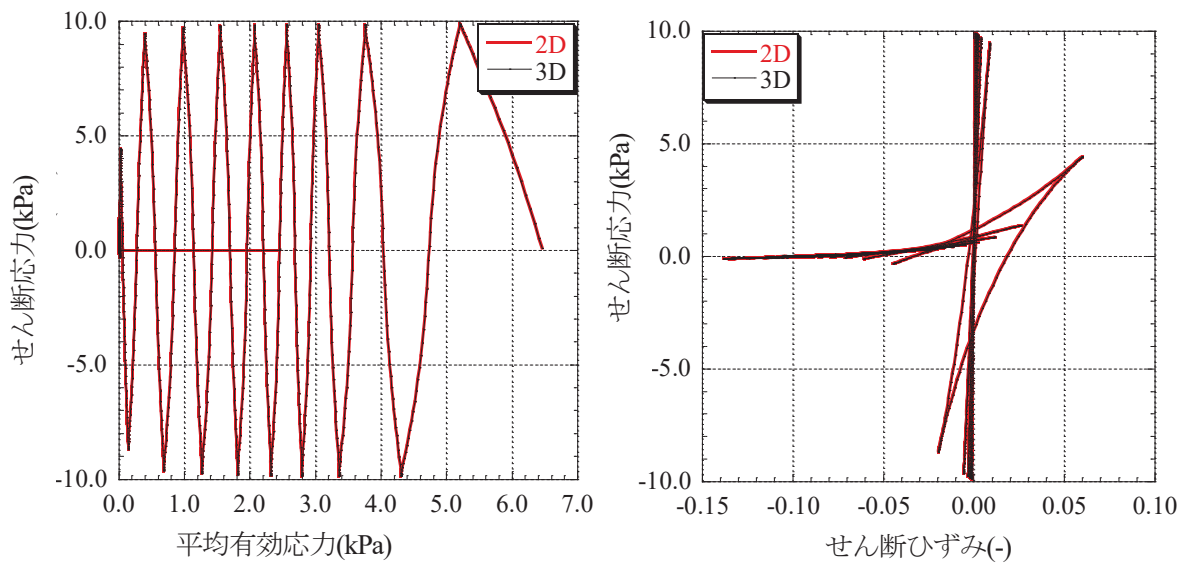


図-4.10 case5の検討結果

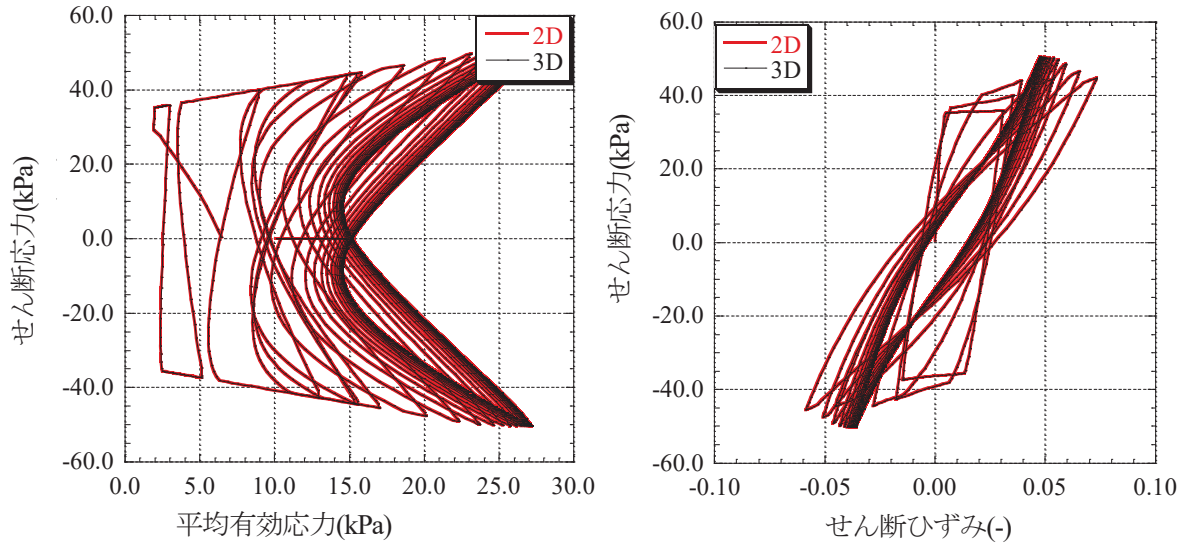


図-4.11 case6 の検討結果

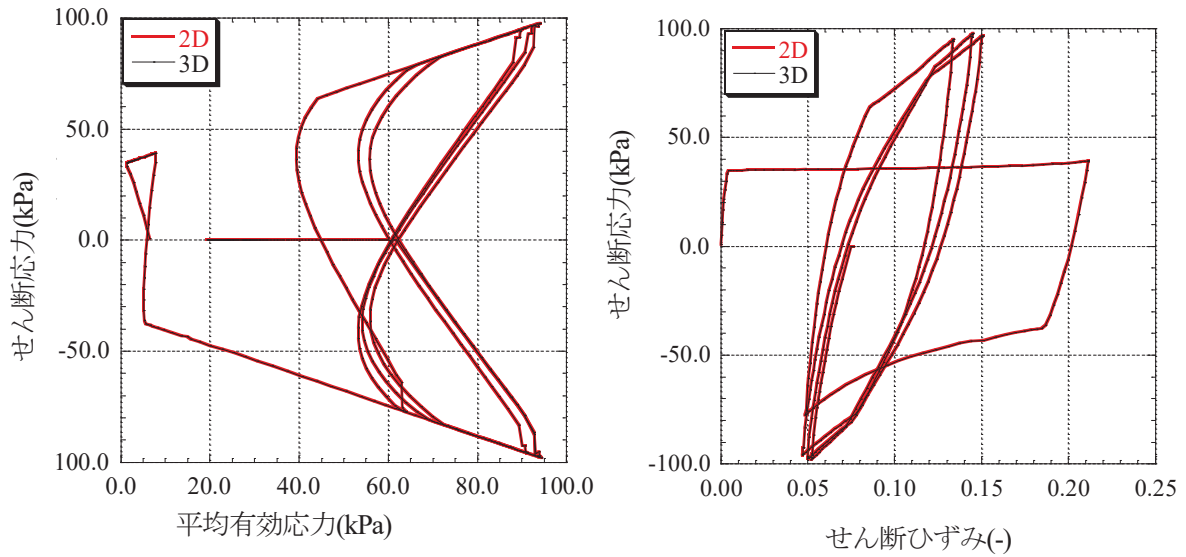


図-4.12 case7 の検討結果

#### 4.4 遠心場模型振動台実験の再現解析

改良砂モデルを導入した LIQCA3D17 を用いて、前章で行った遠心場模型振動台実験の再現を試みた。実験の対称性を考慮し、ハーフメッシュで再現解析したため、節点数及び要素数は、それぞれ 2,736 及び 2,092 である。解析領域は、遠心場模型振動台実験をリアルスケールに変更した大きさとした。変位の境界条件として、底面は、全方向 ( $x, y, z$ ) 固定とし、側方の境界は、 $x$  面は  $x$  方向固定、 $y$  面は  $y$  方向固定とした。水理境界条件として、地下水面の位置である地表面を排水境界とし、その他の境界面はすべて非排水境界とした。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、遠心場模型振動台実験で入力した **図-3.4** の加速度波形を用いた。計算時間増分は 0.002 秒、Rayleigh 減衰として、初期剛性比例型を用いた。地盤材料パラメータは、LIQCA のマニュアルに記載されている相対密度 60%の結果と比較し、繰返し回数 20 回に着目し地盤パラメータを設定した。再現解析の材料パラメータを **表-4.3** に示し、**図-4.13**、**図-4.14** に要素シミュレーション及び繰返し三軸試験の液状化強度曲線を示す。また、検討ケースの一覧を **表-4.4** に示し、**図-4.15** に再現解析に用いた有限要素メッシュを、検討した case の改良範囲等を示した有限要素メッシュを **図-4.16 ~ 4.20** に示す。

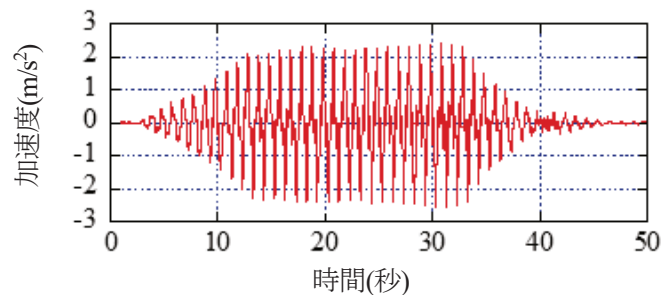


図-3.4 再掲 case0 のときの振動台応答

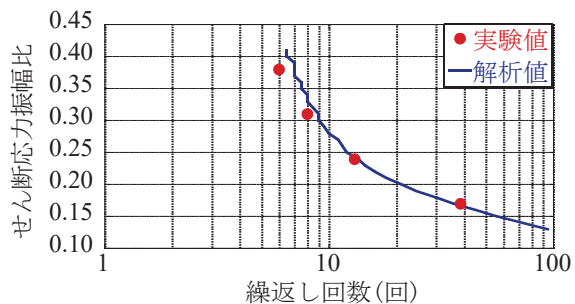


図-4.13 地盤パラメータの液状化強度曲線

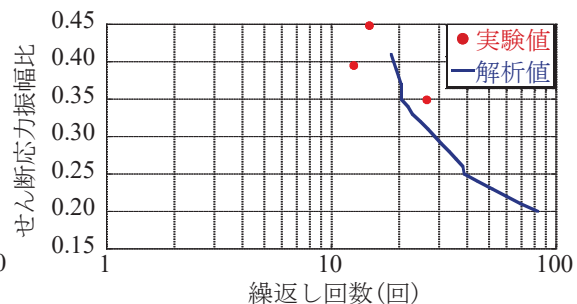


図-4.14 改良体の液状化強度曲線



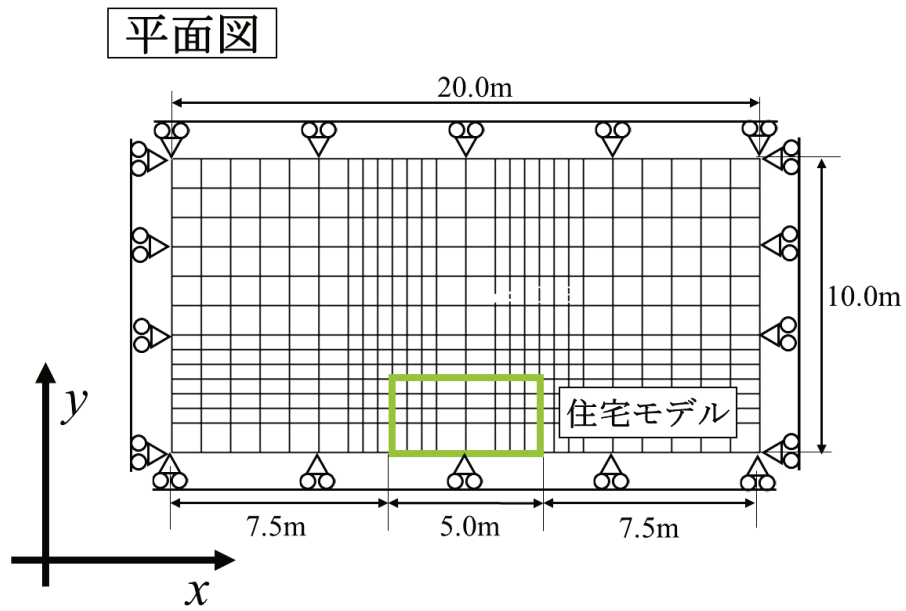
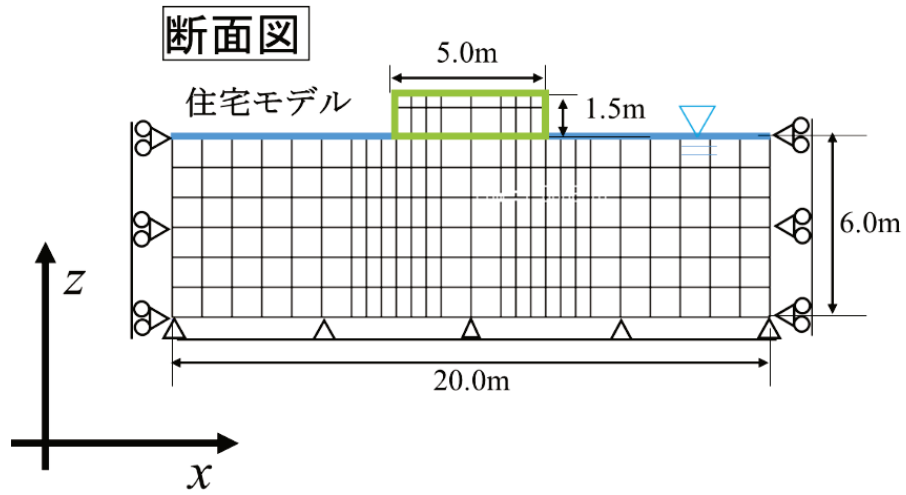


図-4.15 有限要素メッシュ及び境界条件

表-4.3 解析パラメータ

パラメータ名		地盤	改良体	模型住宅
Newmarkのβ法の係数	$\beta$		0.3025	
Newmarkのβ法の係数	$\gamma$		0.600	
質量比例減衰の定数	$\alpha_0$		0.000	
剛性比例減衰の定数	$\alpha_1$		-0.007	
間隙水の単位体積重量	$\gamma_w(\text{kN/m}^3)$		9.8	
重力加速度	$g(\text{m/s}^2)$		9.8	
Lamé定数	$\lambda$			$6.2 \times 10^8$
Lamé定数	$\mu$			$1.0 \times 10^8$
初期間隙比	$e_0$	0.752	0.752	0.500
圧縮指数	$\lambda$	0.025	0.025	
膨張指数	$\kappa$	0.0025	0.0025	
無次元化初期せん断係数	$G_0/\sigma'_m$	1317	1317	
透水係数	$k(\text{m/s})$	$5.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$	
密度	$\rho(\text{t/m}^3)$	1.97	1.97	2.1075
変相応力比	$M^*_m$	0.71	0.71	
破壊応力比	$M^*_f$	0.96	0.96	
硬化関数中のパラメータ	$B^*_0$	13500	13500	
〃	$B^*_1$	60	60	
〃	$C_f$	0	0	
規準ひずみ(塑性剛性)	$\gamma^{P^*}_r$	0.002	0.002	
規準ひずみ(弾性剛性)	$\gamma^{E^*}_r$	0.020	0.020	
ダイレイタンシー係数	$D^*_0$	2.0	2.0	
〃	$n$	2.0	2.0	
異方性のパラメータ	$C_d$	2000	2000	
改良体パラメータ	$b_0$		5.0	
改良体パラメータ	$\alpha^*_1$		5.0	
改良体パラメータ	$\alpha^*_2$		50.0	

表-4.4 検討ケース一覧

検討番号	改良深度	改良範囲
case0	なし	なし
case1	2m	スカート改良
case2	4m	スカート改良
case3	2m	全層改良
case4	4m	全層改良

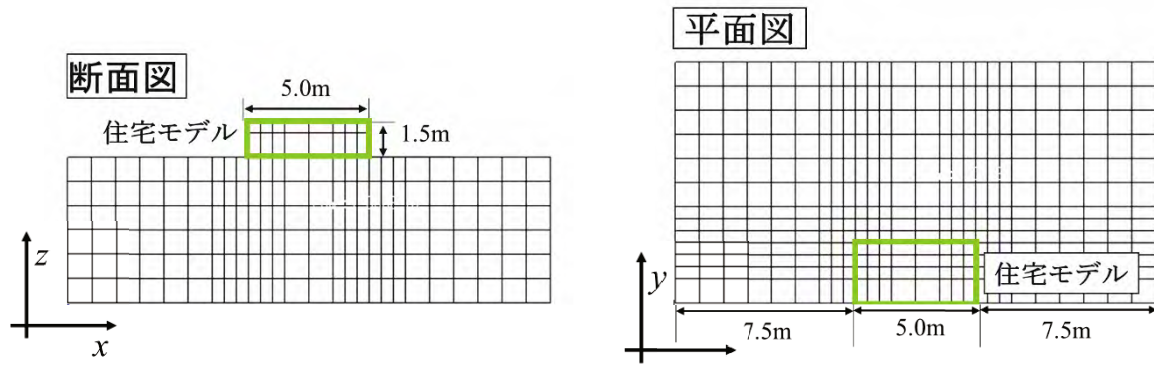


図-4.16 case0 有限要素メッシュ概要図

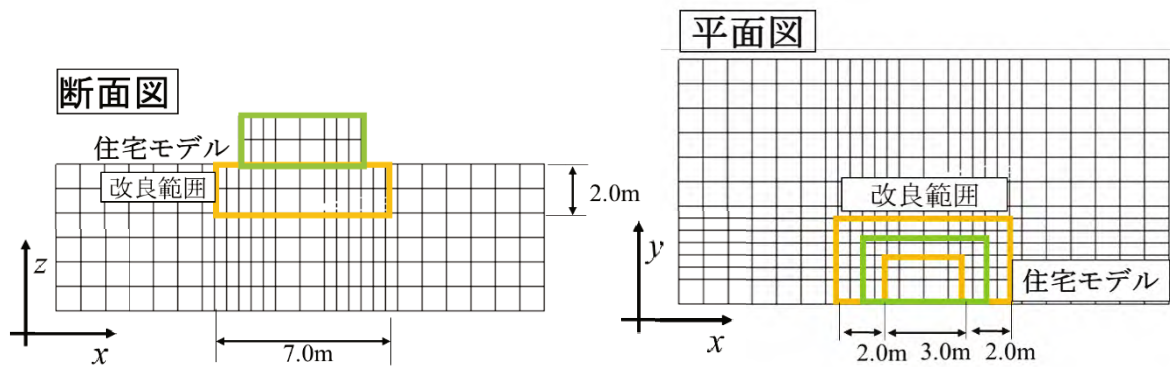


図-4.17 case1 有限要素メッシュ概要図

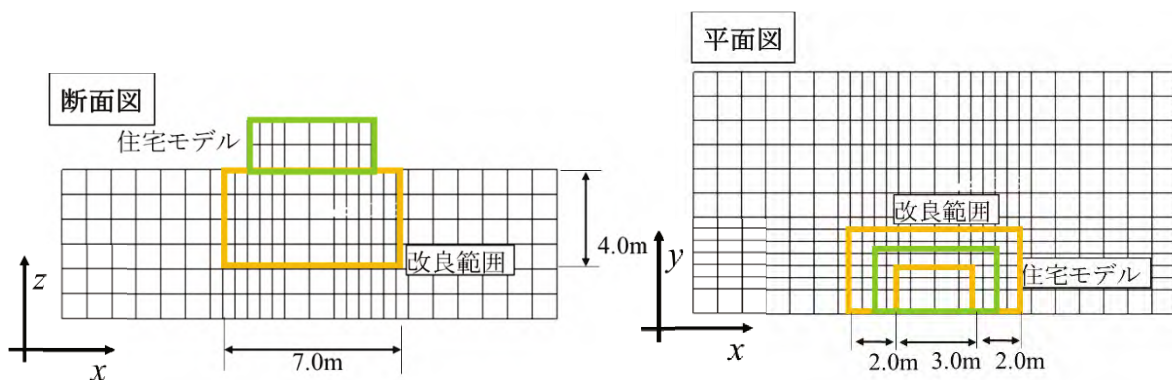


図-4.18 case2 有限要素メッシュ概要図

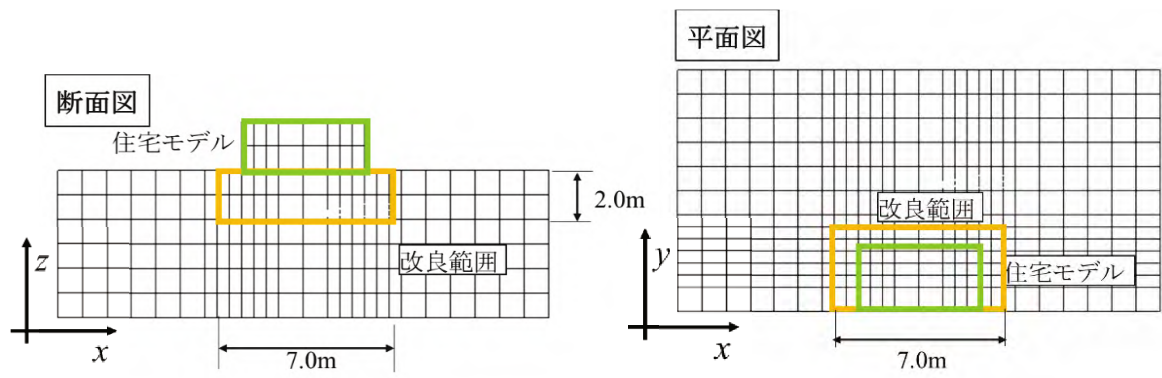


図-4.19 case3 有限要素メッシュ概要図

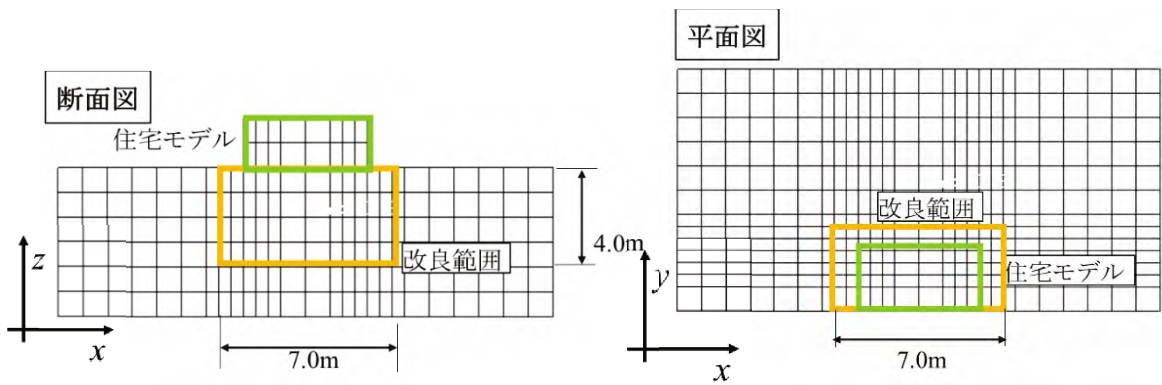


図-4.20 case4 有限要素メッシュ概要図

#### 4.4.1 検証結果と考察

##### [地盤の透水係数]

初めに、無対策地盤について透水係数を  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}^{(4.24)}$  で再現解析したところ、地盤内の間隙水圧が消散せず、実験を再現できなかった。これは液状化時に地盤の透水係数が上昇したためと考えられる<sup>4.25)</sup>。そのため、実験で影響があった計測器周辺の水道（みずみち）や、土槽壁面付近での水の抜けやすさ、液状化時の透水係数の上昇を加味し、地盤の透水係数を変化させて検討した。検討としては、地盤の透水係数を均一に 50 倍、100 倍した場合と、土層壁面の境界付近における地盤に対して面外方向に排水条件を設定し境界付近の地盤の間隙水圧の上昇を抑制した場合の計 3 ケースで検討した。その結果を図 4.21 ~ 4.25 に示す。実験結果と比較したところ、地盤透水係数を 50 倍にした場合に、実験時の水圧の上昇傾向と消散傾向を精度よく再現することができた。以上の結果から、地盤の透水係数を  $5.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$  とし、以降の再現解析を行った。

##### [間隙水圧]

各種検討ケースの過剰間隙水圧の時刻歴を図 4.26 ~ 4.31 に示す。図中の赤線は自由地盤での初期有効上載圧を示している。自由地盤である P2、4、5、6 の解析結果に着目すると、過剰間隙水圧の傾向がおおむね合致していることがわかった。次に、振動時である 0 秒から 40 秒までに着目すると P1 ~ P4 の水圧が振動しているのがわかる。しかし P5、P6 は振動が小さくなっている。この原因として、加振方向に対して容器外部までの距離が近く、境界条件による影響を受けているためと考えられる。また、スカート改良の改良体内部である P1 では無対策より過剰な水圧が発生していることがわかった。この原因として、改良体が矢板のような効果を発揮し、住宅の沈下を抑えたことで、住宅直下地盤が住宅沈下による圧縮の応力上昇を受けず、単純せん断のような変形モードが卓越し、液状化しやすくなっていることが考えられる。また、地震により上昇した間隙水圧が改良体に阻まれることにより周辺地盤へ逃げるができず、水圧が初期有効応力に達したものと考えられる。

##### [めり込み沈下量]

各ケースにて住宅沈下量から実験でレーザー計測器を設置した位置における地盤沈下量を差し引いためり込み沈下量の時刻歴を図 4.32 に示す。数値解析では「スカート改良」と「全層改良」で大きな差がなく、同様の改良効果を確認した。この原因として、スカート内部の地盤が改良体と一体となった挙動を示していると考え、「スカート改良」内部の地盤について有効応力径路を用いて検討した。その結果を図 4.33 に示す。無対策の結果と比較すると、「スカート改良」での改良体内部のせん断応力が大幅に抑制されており、改良体と一緒に変位したことで「全層改良」と同様の対策効果が得られたと考えられる。この様子は解析の変形図でも確認できた（図 4.34 ~ 4.38 参照）。変形図より、改良体を挿入することで無対策では横に大きく変位していた箇所の変形が大きく抑制されることで住宅の沈下が抑制されることもわかった。

[改良体内部の有効応力径路]

再現解析における case1 及び case3 の改良体端部の有効応力径路と case0 の同じ位置の有効応力径路を図-4.39 に示す。case0 における有効応力径路の平均有効応力に着目すると、平均有効応力が 0 に近い値に達しており、要素が液状化していることがわかる。一方、case1 及び case3 の平均有効応力に着目すると、case0 と同様に平均有効応力が 0 に近い値に達している。次に、zx 方向のせん断応力に着目すると、case0 では平均有効応力の減少とともに zx 方向のせん断応力も減少していき、最終的には 0 に近い値を示している。しかし、改良を施した case1、3 では、加振終了後である 50 秒時点で初期の値とほぼ同等の値を示していることがわかる。これは、改良体モデルにおける粘着力成分の効果によるものであり、この効果により改良部分が破壊していないことがわかる。これは、case0、1、3 の変形図である図-4.34、-4.35、-4.37 を比較すると、case1、3 の改良体部分は大きく変形していないことからわかる。

最後に、実験と解析の各種対策工法における加振開始から 50 秒後のめり込み沈下量の結果を図-4.40 に示す。結果より、対策した結果ではおおむね実験結果と合致しており、対策効果を定量的に把握することができた。

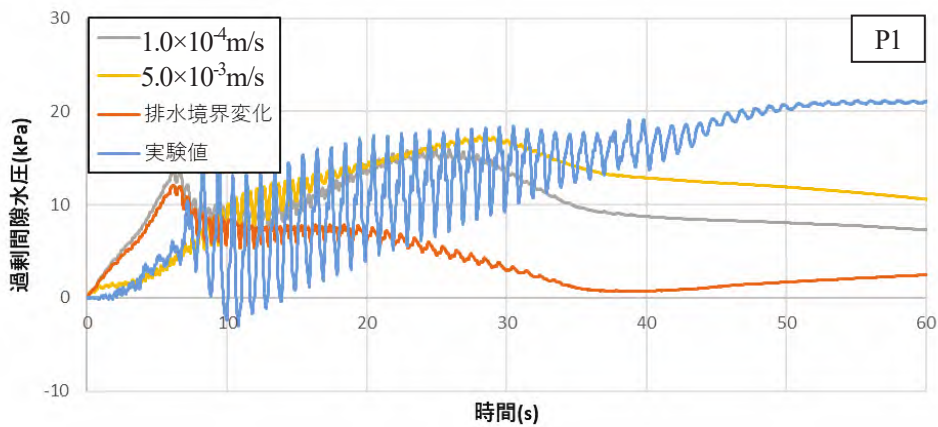


図-4.21 P1 の過剰間隙水圧の時刻歴

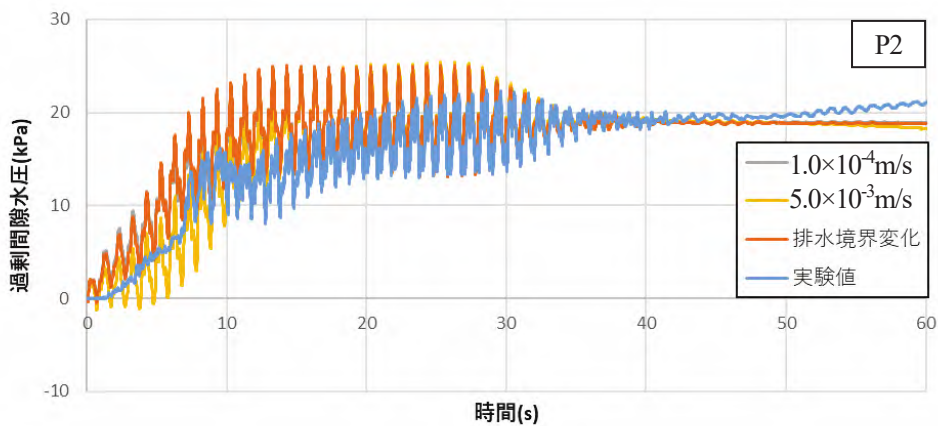


図-4.22 P2 の過剰間隙水圧の時刻歴

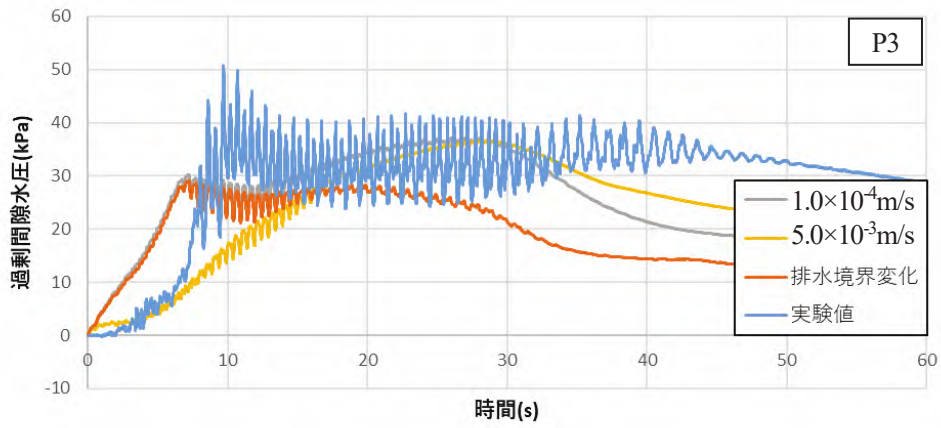


図-4.23 P3の過剰間隙水圧の時刻歴

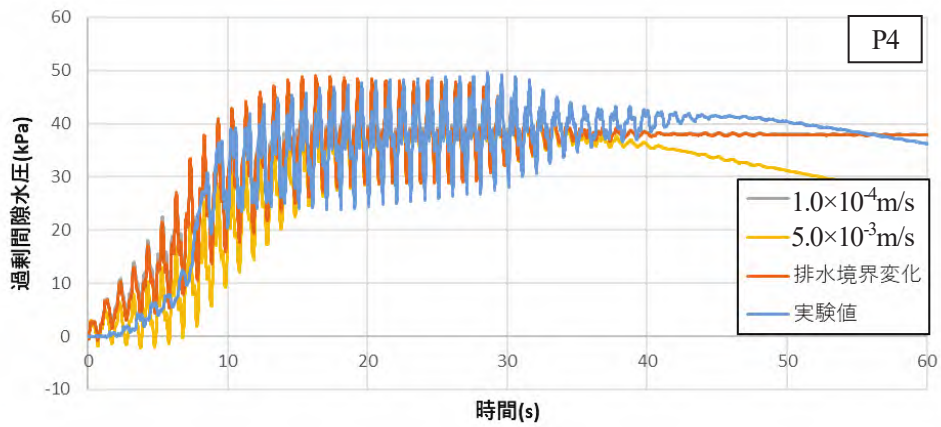


図-4.24 P4の過剰間隙水圧の時刻歴

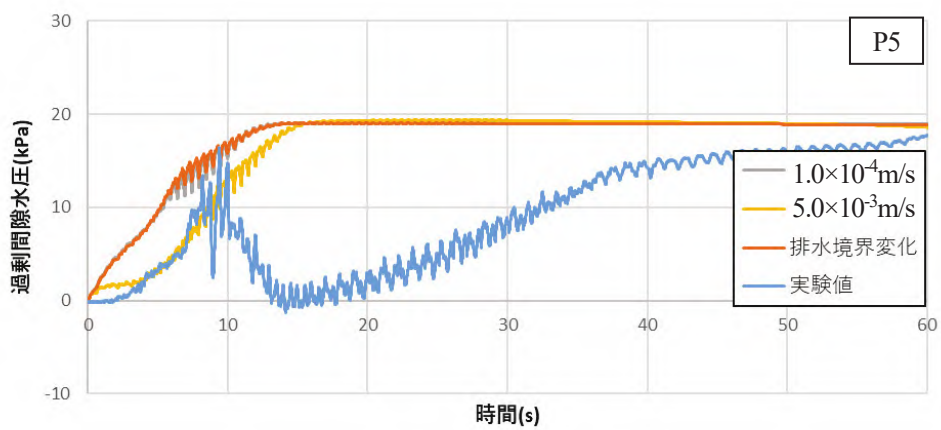


図-4.25 P5の過剰間隙水圧の時刻歴

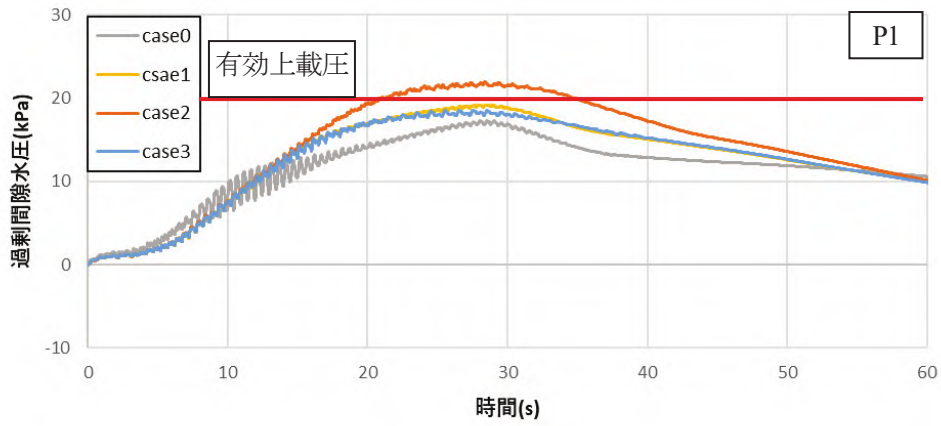


図-4.26 P1の過剰間隙水圧の時刻歴

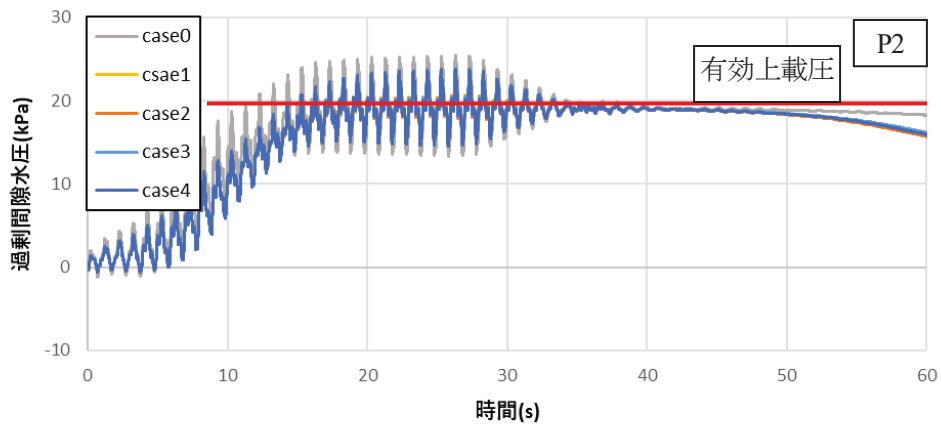


図-4.27 P2の過剰間隙水圧の時刻歴

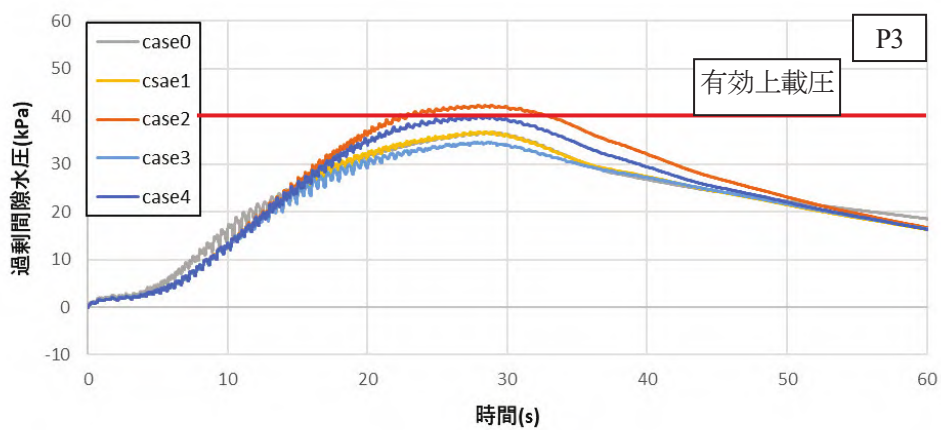


図-4.28 P3の過剰間隙水圧の時刻歴



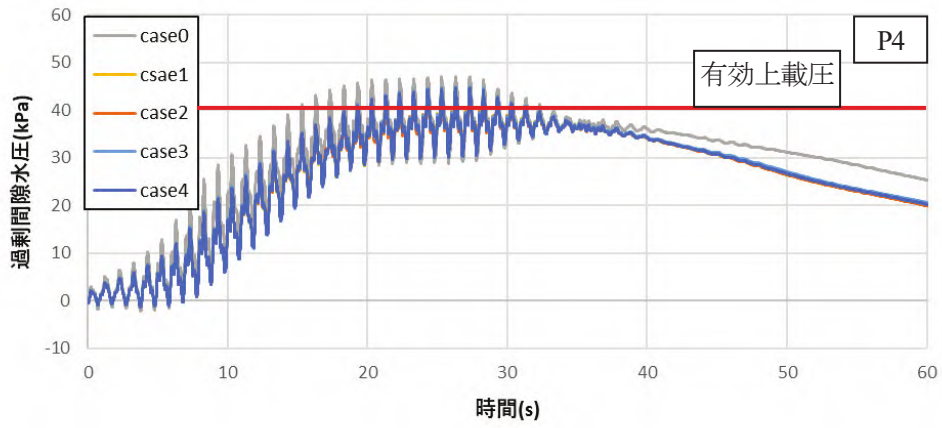


図-4.29 P4の過剰間隙水圧の時刻歴

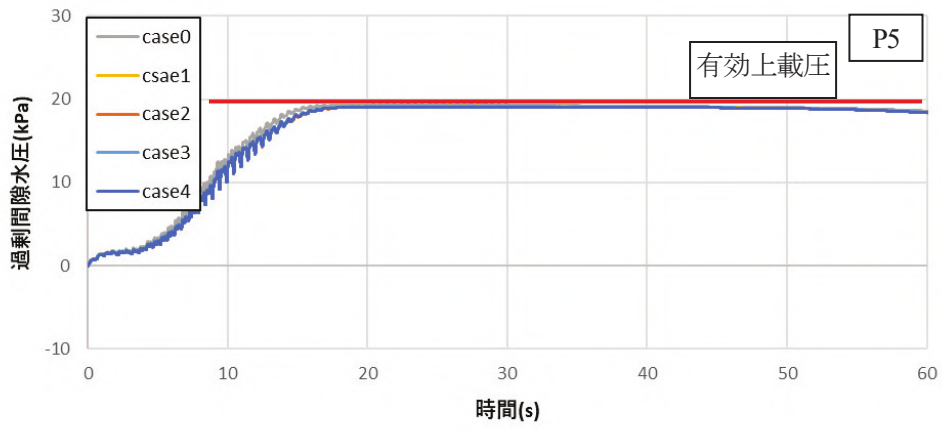


図-4.30 P5の過剰間隙水圧の時刻歴

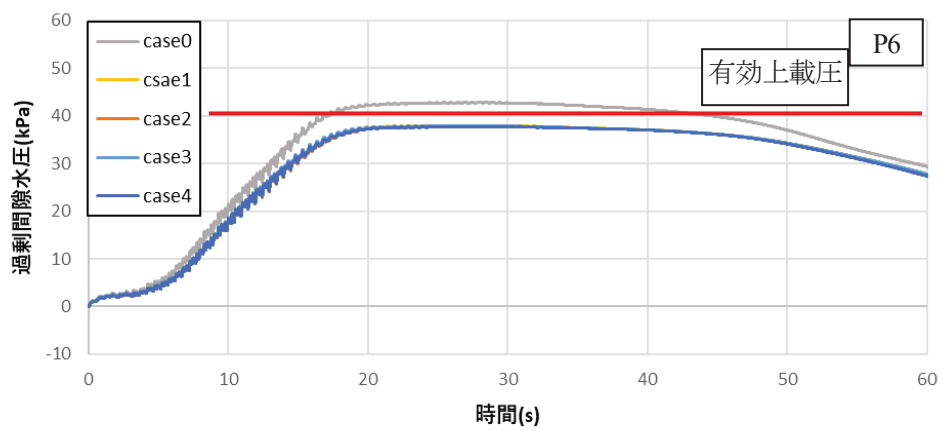


図-4.31 P6の過剰間隙水圧の時刻歴

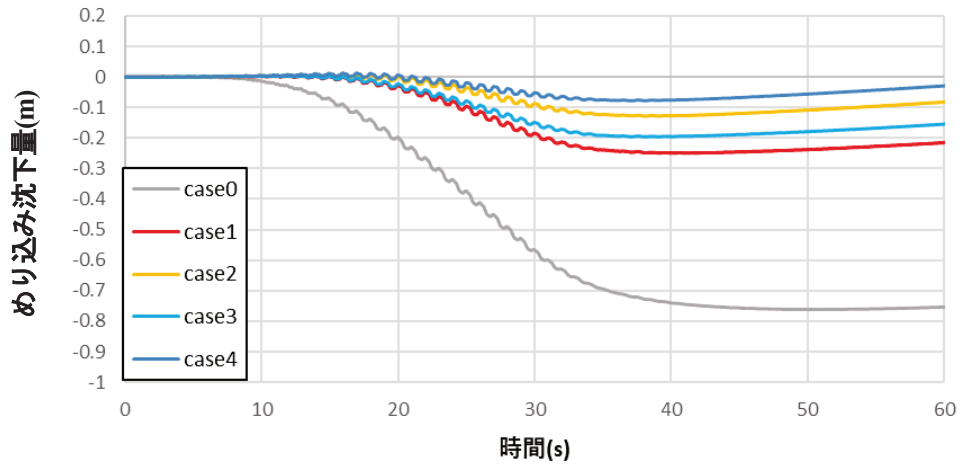


図-4.32 めり込み沈下量の時刻歴

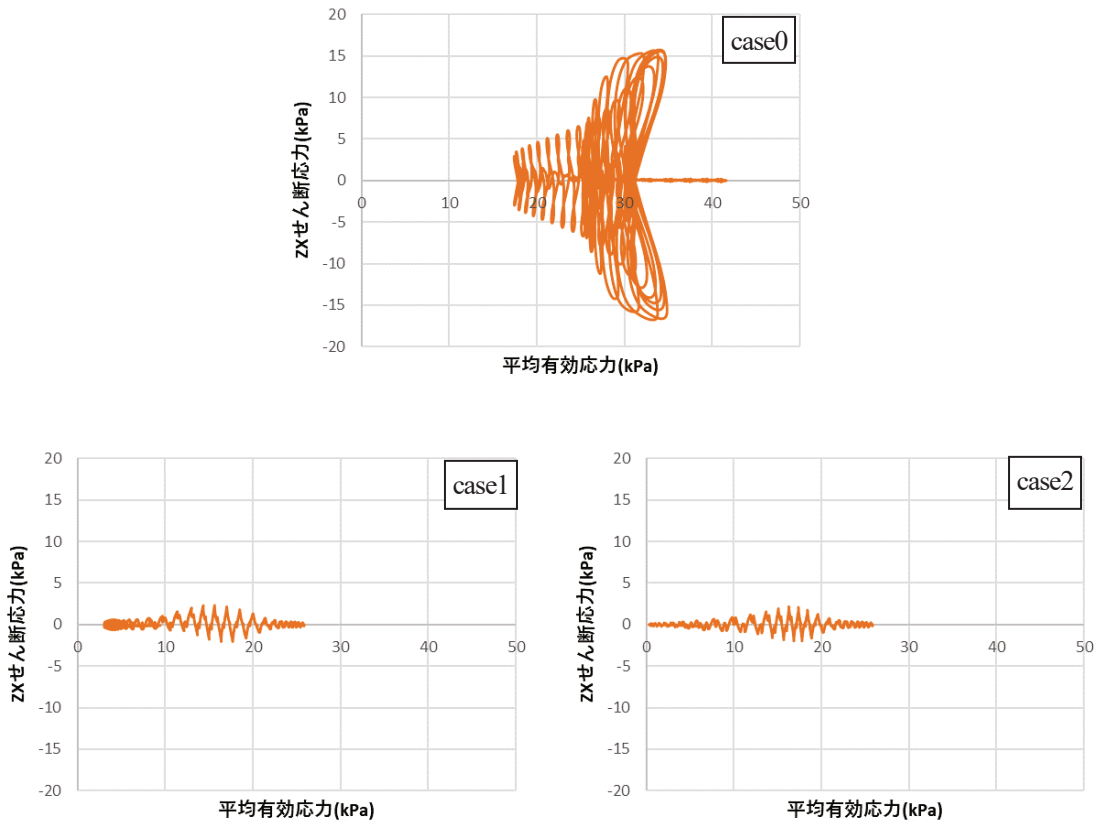


図-4.33 改良体内部の有効応力径路

case0

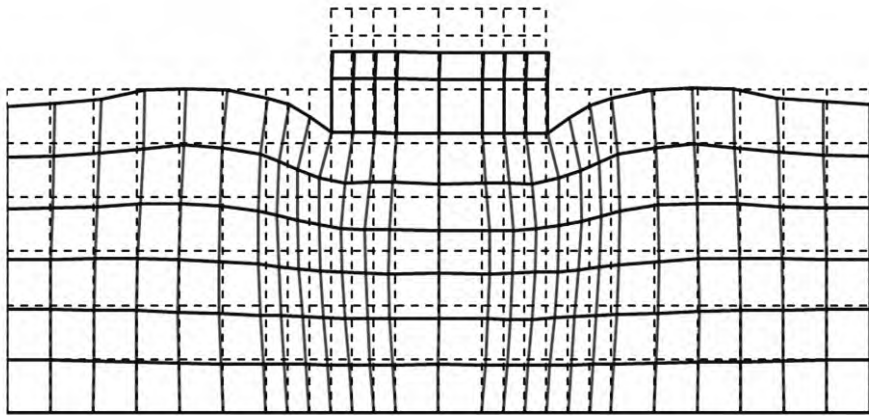


図-4.34 case0の変形図

case1

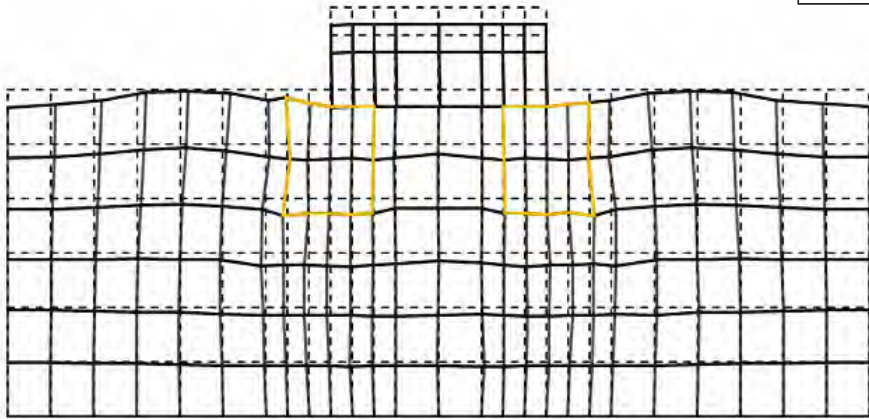


図-4.35 case1の変形図

case2

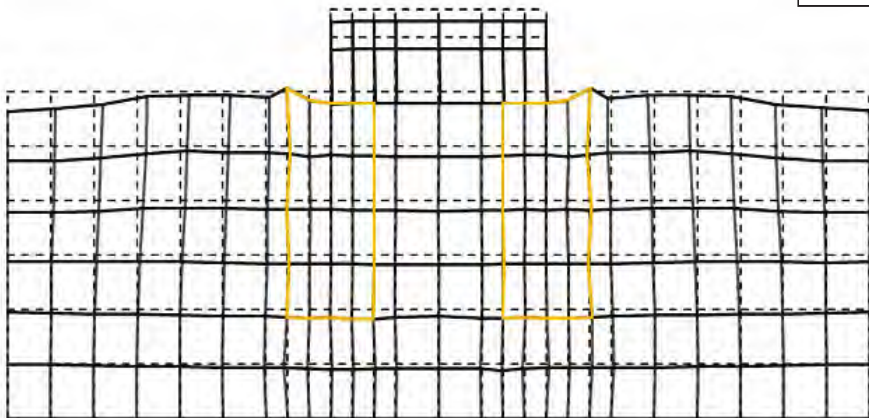


図-4.36 case2の変形図

case3

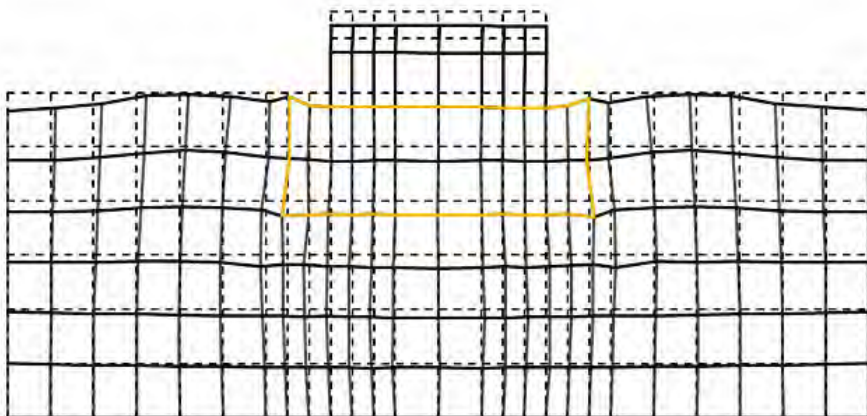


図-4.37 case3の変形図

case4

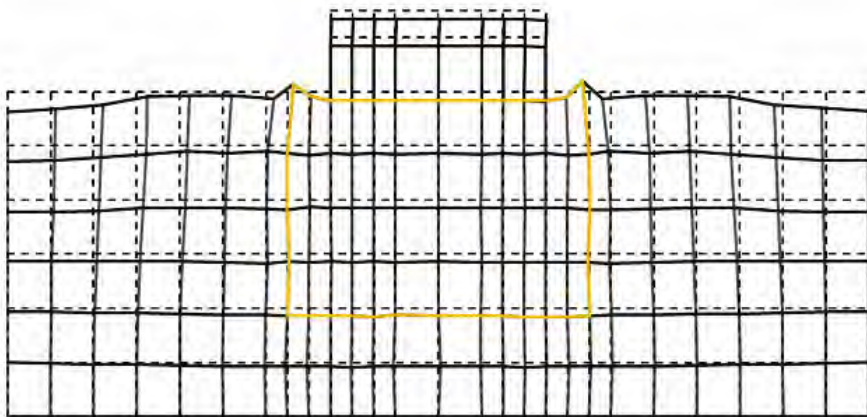


図-4.38 case4の変形図

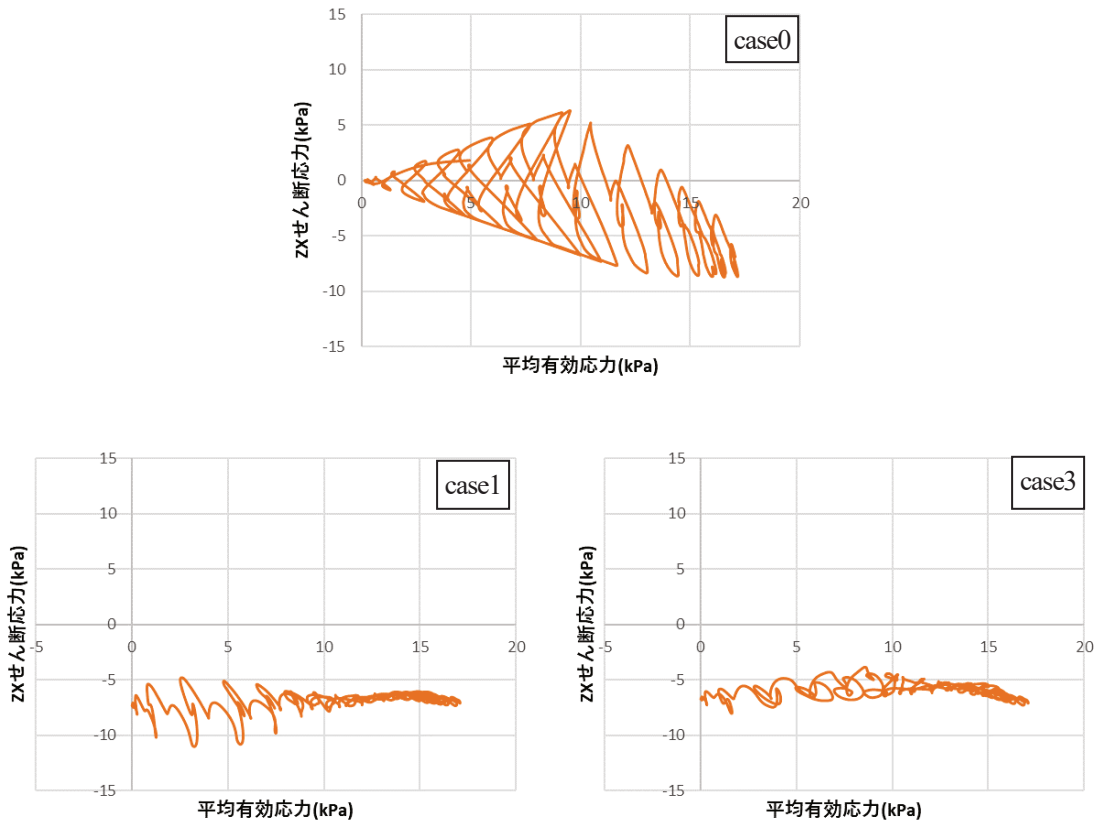


図-4.39 改良体端部の有効応力経路

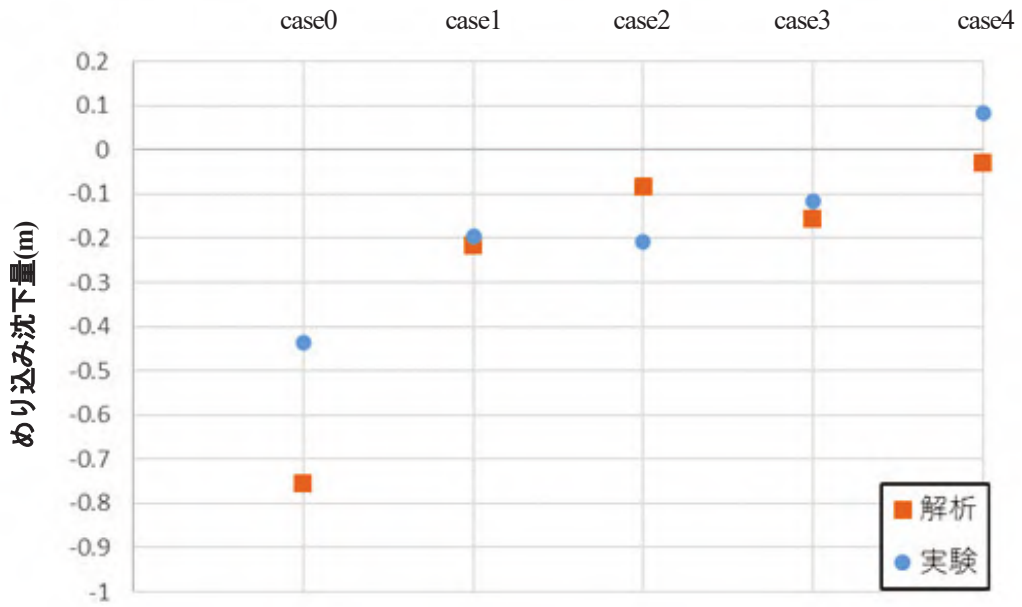


図-4.40 めり込み沈下量のまとめ

#### 4.5 住宅規模と液状化層を変更した解析

前節で用いた解析パラメータを用いて他条件での追加検討を行った。検討条件を表-4.4 に、メッシュ図を図-4.41、-4.42 に示す。検討内容は、第 1 章の薬液注入工法のコスト比較（図-1.12 参照）で使用された住宅と同じ大きさになるように住宅の一边の大きさを  $8\text{m} \times 8\text{m}$  に変更した。また、模型実験及び再現解析で確認された住宅の沈下量に対する境界の影響を考慮して、自由地盤の長さを  $7.5\text{m}$  から  $30\text{m}$  に拡張した。その後、解析深度を 2 倍にすることで、液状化層厚を 2 倍と想定し、より厳しい条件での検討も行った。さらに、解析深度の増加に従い、改良深度を「スカート改良」、「全層改良」で改良深度  $2\text{m}$ 、 $4\text{m}$ 、 $6\text{m}$ 、 $8\text{m}$  で対策効果を検討した。

表-4.4 各解析条件の検討内容

ケース名	住宅の大きさ(m)	周辺地盤(m)	地盤深さ(m)
再現解析	$5 \times 5 \times 1.5$	7.5	6
caseA	$8 \times 8 \times 1.5$	30	6
caseB	$8 \times 8 \times 1.5$	30	12

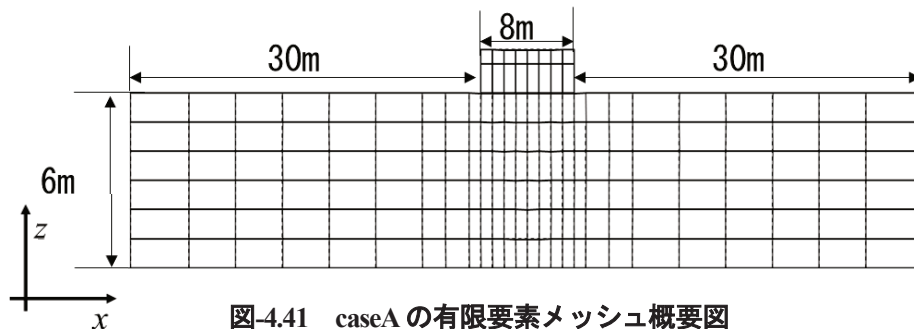


図-4.41 caseA の有限要素メッシュ概要図

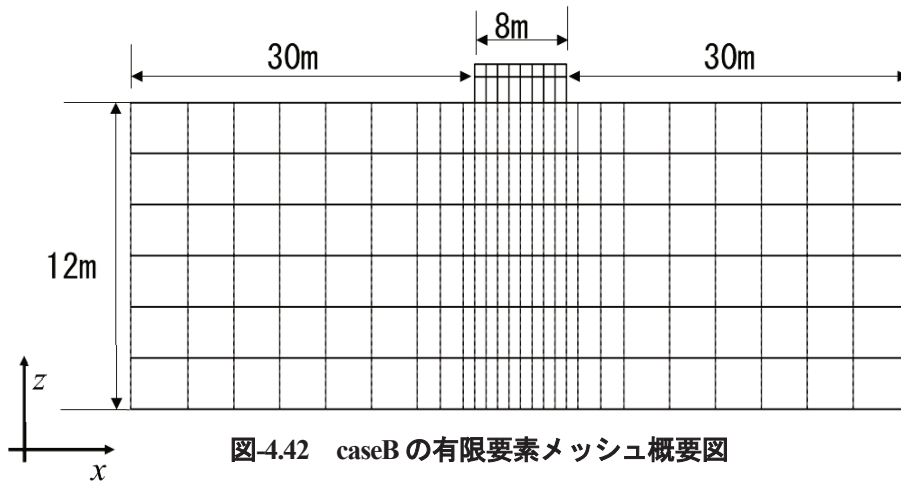


図-4.42 caseB の有限要素メッシュ概要図

#### 4.5.1 検討結果と考察

各種検討によって得られた地震発生より 60 秒後の住宅のめり込み沈下量のまとめを図-4.43 及び図-4.44 に示す。めり込み沈下量の結果より、どの検討ケースでも再現解析と同様に、対策深度を深くすればめり込み沈下量を抑制できることがわかった。また、「スカート改良」と「全層改良」の改良範囲を比較したところ、液状化層厚が厚くなることで、「スカート改良」と「全層改良」で同様の対策効果を得ることは難しいことがわかった。液状化層を厚くした場合でも、めり込み沈下量を抑制できることはわかったが、図-1.1 の住宅のめり込み沈下量と傾斜角の関係図で示した許容めりこみ沈下量である 0.09m まで抑制することは難しい。そのため、液状化層厚が厚い場合、めり込み沈下量を抑制するためには、改良深度をさらに深くする必要があることもわかった。

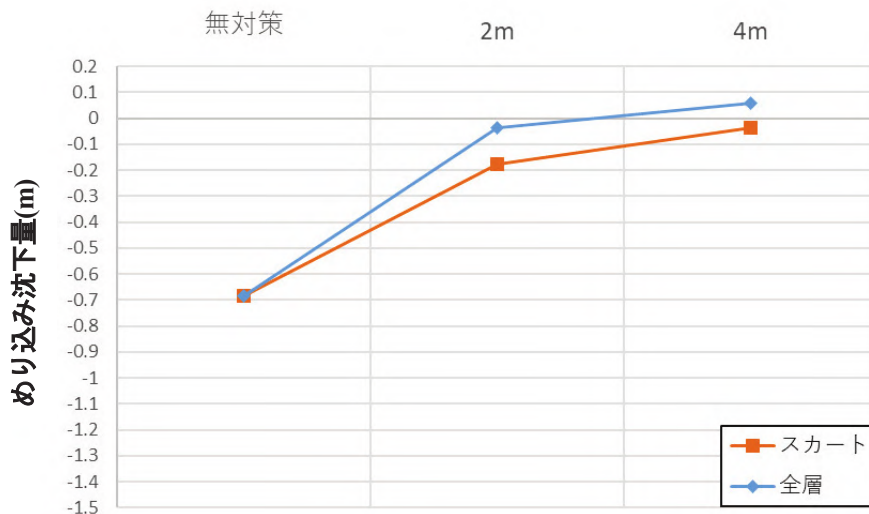


図-4.43 caseA におけるめり込み沈下量の結果

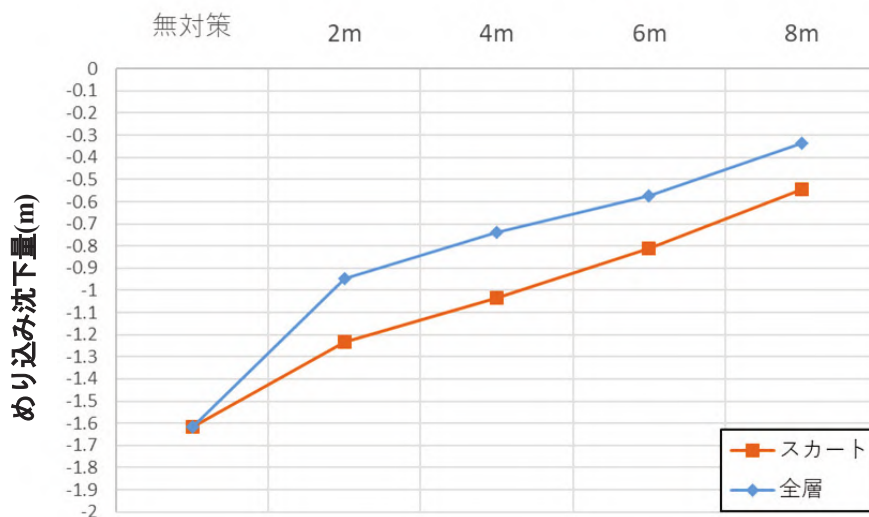


図-4.44 caseB におけるめり込み沈下量の結果

#### 4.6 まとめ

本研究では、遠心場模型振動台実験を再現して、地盤の内部応力状態や有用な改良範囲を検討する手法として、LIQCA3D17を用いた。LIQCA3D17に、薬液注入工法の効果が表現できる改良砂モデルを導入し、1要素での検証解析を行った。検証は、すでに改良砂モデルが導入されているLIQCA2D17の結果との比較により行った。様々な条件で検討した結果、LIQCA2D17とLIQCA3D17で同じ結果が確認されたため、LIQCA3D17へ正しく改良砂モデルを導入できたことがわかった。

導入した改良砂モデルを用いて遠心場模型振動台実験の再現解析を行った。解析結果は実験の結果をおおむね再現することができた。また、「スカート改良」と「全層改良」の改良効果には、ほとんど違いが見られなかった。要因として、「スカート改良」では改良体の側方変位が大幅に抑制されていたことが考えられる。また、改良を施すことで、無対策では側方に大きく変位していた箇所の変形が大きく抑制されており、結果として住宅のめり込み沈下が抑制される。

次に、検討地盤が境界の影響を受けないように自由地盤の領域を拡大し、住宅の大きさを5m×5mから8m×8mに変更した場合のケーススタディを行った。その結果、住宅規模が大きくなった場合には、「スカート改良」と「全層改良」による対策効果の違いが大きくなることがわかった。さらに、液状化層厚が厚くなると、めり込み沈下量を抑制するには、改良深度を深くする必要があることがわかった。



## 参考文献

- 4-1)Yokawa, H., Nonoyama, N., Yashima, A., Higuchi, S. and Sugii, T.: Effect of ground parameters on housing settlement prediction by simplified liquefaction analysis, Proc.16th Int.Conference of IACMAG, 2, pp.735-742,2021.
- 4-2)余川弘至, 野々山栄人, 八嶋厚, 吉原孝保: 液状化による戸建て住宅沈下を定量的に予測するための簡易解析, 日本建築学会構造系論文集, No. 733, pp. 423-432, 2017.
- 4-3)公益社団法人地盤工学会, 浅層盤状改良による宅地の液状化対策研究委員会: 浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究, pp.360-412, 2012.
- 4-4)Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic strain dependency of the shear modulus, Geotechnique, 49, 5, pp.661-680, 1999.
- 4-5)Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, soils and foundations, Japanese Society of soil Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.1-15, 1992.
- 4-6)Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. : Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, Soils and Foundations, Vol.48, No.6, pp,771-790, 2008.
- 4-7)Biot, M.A.: General theory of three-dimensional consolidation, Journal of Applied Physics, Vol.12, No.4, pp. 155-164, 1941.
- 4-8)Biot, M.A.: Theory of elasticity and consolidation for porous anisotropic solid, Journal of Applied Physics, Vol.26, No.2, pp.182-1815, 1955.
- 4-9)Biot, M.A: 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, 1956.
- 4-10)Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol.52, pp.209-245, 1994.
- 4-11)Christian, J.T. and Boehmer, J.W.: Plane strain consolidation by finite elements, Journal of Soil Mechanics, ASCE, Vol.96, No.SM4, pp.1435-1457, 1968.
- 4-12)赤井浩一, 田村武: 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, 1978.
- 4-13)河村哲也: 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, 1995.
- 4-14)久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, pp.161-175, 1995.
- 4-15)Lewis, R.W. and Schrefler, B.A.: The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media, second edition, John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- 4-16)Tateishi, A., Taguchi, Y., Oka, F. and Yashima, A.: A cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions, Proc., First Int. Sym. on Earthquake Geotechnical Engineering, IS-TOKYO'95, pp.399-404, 1995.
- 4-17)Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clay, Proceedings of Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Specialty Session No.9, Constitutive equations of soils, pp.163-175, 1977.
- 4-18)Frederick, C.O. and Armstrong, P.J. : A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect, C.E.G.B. Report RD/B/N 731, 1966
- 4-19)Chaboche, J.L. and Rousselier, G.: On the plastic and viscoplastic constitutive equations Part I and Part II, Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, Vol.105, pp.153-164, 1983.
- 4-20)Oka, F.: Constitutive equations for granular materials in cyclic loading, Proceedings of IUTAM Conference on Deformation and Failure Materials of Granular Materials, Delft, pp.297-306, 1982.
- 4-21)Naghdi, P.M. and Trapp, J.A.: Restrictions on constitutive equations of finitely deformed elasto-plastic materials, Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, Vol.28, Pt.1, pp.25-46, 1975.

- 4-22)大野康年：特殊シリカ液を用いた浸透注入改良砂の力学特性と地盤改良技術に関する研究, 京都大学博士論文, 2006.
- 4-23)液状化解析手法 LIQCA 開発グループ:LIQCA2D (2009年公開版) 資料, 2009.
- 4-24)液状化解析手法 LIQCA 開発グループ:LIQCA2D20・LIQCA3D20 (2020年公開版) 資料, 2020.
- 4-25)渡邊唯, 海野寿康, 加村晃良:砂質土における非排水繰り返しせん断履歴後の透水係数の変化, 土木学会論文集, 第 77 号, pp.386-391, 2021.

## 第5章 結論

地震の発生が多い日本では、地震による液状化の被害も数多く報告されている。したがって、地震によって地盤の液状化が発生するか否かを判定し、その危険度を把握することが重要である。住宅一軒を対象とした液状化危険度判定は、SWS 試験などの結果を用いて行われる。

液状化被害の軽減を目的とした対応策も積極的に検討され、戸建住宅への対策工法も開発されている。しかし、既設住宅を対象とした液状化対策工法は、周辺地盤を乱さず、施工場所が狭小で、施工費用が安価であることが求められるため、適用できる対策工法に限られる。また、住宅の周辺状況によって、沈下と傾斜の関係が異なることも確認されており、対策を施す住宅の地盤情報だけでなく、周辺の地盤及び利用状況も把握する必要がある。

そこで本研究では、周辺地盤の調査から既設住宅直下の地盤情報を含んだ、ある程度広域的な地盤情報を把握することができる2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査に着目した。また、既設住宅でも施工可能な液状化対策工法として、薬液注入工法に着目した。初めに、2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査で得られた地盤情報から、液状化判定を行う方法を示した。次に、薬液注入工法の対策効果を定量的に把握するために、遠心場模型振動台実験を実施した。遠心場模型振動台実験を3次元 FEM で再現することによって、経済的な液状化対策工法について詳細に検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

### 第1章 序論

本研究の背景とともに位置づけについて述べた。過去の大規模な地震による住宅の液状化被害について述べたのち、液状化のメカニズム、傾斜した住宅の復旧費用や保険などについて紹介した。その後、液状化発生の危険度を調査する方法についてまとめた。さらに、既設住宅を対象とした液状化対策工法を概観した。

### 第2章 面的な地盤調査法を用いた液状化判定

自治体が提供する液状化ハザードマップでは得ることが難しい住宅一軒当たりの地盤情報を得る方法として、2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査に着目した。2011年クライストチャーチ地震で液状化被害が確認され、現在レッドゾーンに指定され誰も住むことができないニュージーランド・クライストチャーチ郊外の住宅地を対象に調査を行った。

その結果、地表面から7m付近までややせん断波速度が低い地盤が存在することがわかり、地盤の地層がわずかに傾斜していることもわかった。この結果は地盤工学会が2010年に行ったSWS試験結果でも同様の結果を示していた。

次に得られた地盤情報を用いて、液状化危険度判定法の一つである  $P_L$  法による液状化判定を行った。その結果、すべての地域において液状化の危険度が高いと判定され、レッドゾーンに指定されている場所を正確に再現することができた。しかし、ピートのようなせん断波速度が小さいが、液状化の危険度が低いような地盤材料が存在する場合には、本手法での判別は難しいため、簡易な計測手法（例えば、SWS 試験）と組み合わせることで、より高精度な液状化危険度が把握できる。

### 第3章 新たな薬液注入工法による経済性を考慮した住宅の沈下量抑制効果の確認

薬液注入工法の住宅のめり込み沈下量抑制効果を定量的に確認するために、遠心場模型振動台実験を実施した。検討したケースは、薬液注入工法の対策範囲として住宅直下の地盤を全面改良する「全層改良」と、住宅外縁部のみを対策する「スカート改良」である。また、改良深度においては、それぞれ改良深度 2m, 4m 対策を施した場合の対策効果を検討した。

その結果、改良体によって囲まれた地盤が住宅沈下による地盤の圧縮変形を受けにくくなったことで単純せん断モードの変形を示し、過剰間隙水圧が上昇しやすくなっていることがわかった。地盤の沈下量においては、地盤内に設置した各種計測器の影響により、水道（みずみち）が形成され、排水が促進されていることが考えられた。住宅のめり込み沈下量においては、対策を施すことで住宅のめり込み沈下量を抑制できることがわかった。また、同じ対策深度における「全層改良」と「スカート改良」を比較したところ、ほぼ同等の住宅のめり込み沈下量抑制効果を示すことがわかった。対策深度 2m で、「全層改良」と「スカート改良」ともに品確法で要求される傾斜量 6/1,000 以下をほぼ満足することがわかった。

### 第4章 模型実験の再現解析およびめり込み沈下量抑制効果の検証

遠心場模型振動台実験で得られたデータについて、再現解析を行った。再現性を高めるために、改良砂を対象とした改良砂モデルを 3 次元 FEM である LIQCA3D17 に導入した。実験結果から観察された計測器のコード付近や容器周辺の透水性の良さを考慮し、豊浦砂の透水係数を  $1.0 \times 10^{-4} \text{m/s}$  から  $5.0 \times 10^{-3} \text{m/s}$  と上昇させて再度検討した結果、水圧の上昇・消散傾向をおおむね再現することができた。

再現解析の結果、実験でも確認された「スカート改良」における改良体に囲まれた地盤内で高い過剰間隙水圧が確認された現象が、解析でも確認できた。次に、実験で得られた「スカート改良」と「全層改良」が同様な対策効果となることについては、「スカート改良」の改良体に囲まれた地盤が改良体と一体となって動くことで、「全層改良」と同様の改良結果が得られることがわかった。最後に、各対策におけるめり込み沈下量を実験と解析で比較した結果、解析結果がおおむね実験結果と合致しており、対策効果を定量的に再現することができた。

次に、再現解析で用いた地盤定数を使用して、ケーススタディを行った。検討したケースは、住宅規模と液状化層の深さである。その結果、液状化層を深くした場合でも、薬液注入によりめり込み沈下量を抑制できることはわかったが、許容めり込み沈下量である約 0.1m まで沈下量を抑制することはできなかった。液状化層厚が厚くなると、めり込み沈下量を抑制するためには、改良深度をさらに深くする必要があることもわかった。

以上の研究成果より、既設住宅における面的な地盤調査法を用いて液状化危険度判定が可能であること、薬液注入工法の対策範囲を「スカート改良」とすることで十分なめり込み沈下量抑制効果を得られることがわかった。この結果は既設住宅における液状化対策工法の普及を加速させる一助になると考える。

## 課題と展望

### [2次元表面波探査及びリニア微動アレイ探査]

2次元表面波探査とリニア微動アレイ探査を用いて、面的な液状化危険度を把握することはできた。また、周辺の地盤情報なども併せて得ることができることもわかった。そのため、本研究の計測手法を広く普及することができれば、施工主が周辺地盤の影響も考慮した液状化危険度を把握することができるようになる。その判定結果から液状化危険度が高い箇所をより多くの人を知ることができれば、液状化対策の普及率上昇につながり、住宅直下の地盤液状化による住宅被害だけでなく、北海道胆振東部地震のような周辺地盤の影響による住宅被害を減らすことができるのではと考える。

### [液状化対策工法]

薬液注入工法だけでなく、既設住宅で施工可能な他の対策工法の液状化対策効果を検討する必要がある。それぞれの対策工法の効果を確認し、対象住宅に対して適切な液状化対策工法の選択肢を増やすことができれば、液状化対策を施工する人が増え、液状化被害を減らすことができると信じる。幸いにも、本研究で用いた3次元FEM(LIQCA3D17)は薬液注入工法に対して、定量的な解析能力を示すことがわかったので、他の工法についても、経済的な改良範囲と改良深度を検討する際に役立つと考える。

## 謝辞

本論文は、岐阜大学工学部社会基盤工学科 八嶋厚教授、岐阜大学工学部所属インフラマネジメント技術研究センター 沢田和秀教授、中部大学工学部都市建設工学科 余川弘至准教授のもと、筆者が中部大学工学研究科修士1年から岐阜大学博士後期課程までの約5年の研究成果をまとめたものです。また、岐阜大学工学部社会基盤工学科 大谷具幸教授、同 神谷浩二教授、八嶋厚教授、沢田和秀教授には本論文の審査をしていただきました。先生方の熱心なご指導により学位論文をまとめるに至ったことを心より感謝いたします。

八嶋厚教授には、中部大学修士2年から博士課程3年までの4年間、大変お世話になりました。研究では、本論文及び研究内容のすべてにおいてご指導いただきました。特に遠心模型実験を再現解析する際に、多大なるご指導をいただきました。また、お忙しい中お聞きしたいことがありお伺いした時も、いやな顔せず対応していただけたこと、誠に感謝しております。研究だけでなく、研究のありかたや博士課程としての心構え、先輩として指導する際の心構えなどをお教えいただきました。ほかに、博士1年の時に新型コロナウイルスによる感染爆発により、大学生生活で困っていた際にもお助けいただけたこと、大変感謝しております。八嶋教授の熱心なご指導により本論文を執筆できたこと、厚く感謝申し上げます。大変ありがとうございました。

沢田和秀教授には、本論文の作成においてご指導いただきました。拙い文章や考察内容について鋭いご指摘を多くいただき、大変になりました。うまく説明ができないときでも、根気強く導いてくださり、ありがとうございました。ほかに、就職におけるESや面接練習を夜分遅くまで付き合っていたいただき、大変ありがとうございました。修了までの1年間、ご迷惑しかおかけしていませんでしたが、何度も優しくご指導いただき、大変感謝しております。ありがとうございました。

学位論文審査委員会主査である大谷具幸教授からは、公聴会並びに論文審査において、第2章の計測現場であるニュージーランド・クライストチャーチに対して、地質学に基いた貴重なご意見を多数いただきました。至らない部分が多数存在しましたが、多くのご指導いただき、ありがとうございました。

学位論文審査委員会副査である神谷浩二教授からは、公聴会並びに論文審査において、第4章における数値解析に対する貴重なご意見を多数いただきました。論文でも不出来な点が多数あり、その点について詳細にご指摘いただけたこと、大変感謝いたします。ありがとうございました。

余川弘至准教授には、学部生3年生の授業の1つである部門創生Bから現在に至るまで、公私ともに大変お世話になりました。自身が修士課程並びに博士課程に進む決断をしたのは、余川准教授にアドバイスをいただいたからです。そのアドバイスがなければ、私は学部4年生で就職していたと思います。人生の転換期に余川准教授という大恩人に出会えたことに深く感謝いたします。研究面では、LIQCAの解析方法や重力場の模型実験の方法など様々なことを学ばせていただきました。また、何度もへこたれる自分を叱咤しながら導いてくださったこと、大変感謝しております。また、就職先で悩んでいた際に、来年度からの就職先であるベターリビングをご紹介いただいたこと、深く感謝いたします。研究面だけでなく、私生活においても、趣味である釣りなどに連れ出していただきました。どれだけ一緒に行っても、自身のセンスがなく一向に上達しませんでした。それでも大変楽しかったです。学部3年から博士後期課程3年までの7年間、ご迷惑をおかけしてばかりでしたが、余川准教授に出会えたこと、教えていただいたことに大変感謝しております。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 村田芳信先生には、現場計測で電気探査、2次元表面波探査、リニア微動アレイ探査だけでなく、小型自動貫入試験や電気検層試験などの多彩な計測をお教えた

できました。不器用な自分を時に厳しく時に優しくお教えいただいたこと、感謝いたします。また、本論文2章を執筆する際に、わからないことを丁寧にお教えいただき、深く感謝いたします。

岐阜大学に所属なさっていた荻谷敬三先生には、1年間という短い間ではございましたが、現場計測や薬液注入工法に関わる実験でご指導いただきました。いつも暖かく見守っていただき、感謝しております。ありがとうございました。

中部大学に所属なさっていた浅野憲雄先生には、中部大学で学部4年生から修士課程までの3年間、岐阜大学での博士課程3年間の計6年間お世話になりました。発表のコツや、地質と地名の関係など、とても面白い話から研究のご相談まで大変お世話になりました。浅野先生から教えていただいた、地域の住民から得られる情報を大切にすることを社会にでてからも心がけようと思います。ありがとうございました。

中部大学 故山田公夫教授には、中部大学学部4年生時にご指導をお受けしました。自身が修士課程並びに岐阜大学博士課程に進む際にも、「がんばれ」と力強く応援していただけたこと、深く感謝いたします。私の博士課程中に急逝されてしまい、最後の公聴会での様子をお見せできなかったことが心残りではありますが、山田教授からお教えいただいたことを胸にこれからも頑張っていきます。山田公夫教授のご冥福をお祈り申し上げます。

中部大学 杉井俊夫教授には、修士課程の副査や、博士課程の投稿論文で貴重なご意見をいただきました。また、自身が博士課程に進むかを悩んでいる際には、お忙しい中貴重なお時間を割いていただき、相談に乗ってくださりました。大変ありがとうございました。

京都大学 渦岡良介教授には、京都大学学術リポジトリの論文での貴重なご意見をいただきました。また、遠心場模型振動台実験機を快く貸し出していただいたこと、誠にありがとうございました。

太平洋基礎工業株式会社 大野康年様には、遠心場模型振動台実験及び供試体作成に関して、貴重なご意見と資料をいただきました。また、第1章での薬液注入工法の費用比較していただいたことも含めて、ここに深く感謝いたします。ありがとうございました。

ニュージーランドカンタベリー大学 Prof. Misko Cubrinovski 先生には、第2章のニュージーランドでの現場計測において多大なる協力をいただきました。感謝申し上げます。

防衛大学校 野々山栄人准教授には、投稿論文の作成に当たり、鋭いご指摘を数多くいただきました。また、ご協力いただいたこと、誠に感謝いたします。

岐阜大学八嶋・沢田研究室の秘書である熊田素子様には、事務的なお手伝いだけでなく、就職の際のESの添削及び面接練習など、数多くの面でお助けいただきました。また、社会人でのマナー講座もお教え願えたこと、深く感謝申し上げます。大変ありがとうございました。

岐阜大学の八嶋・沢田研究室及び中部大学の余川研究室の先輩、後輩たちには、精神的、研究的に大変助けていただきました。そのなかでも、中部大学の津田先輩には、岐阜大学に進学してからも電話にて何度も気にかけていただき、精神的にとっても助かりました。岐阜大学の花田有紀さん、山本圭吾くん、孫源峰くんには、遠心力場模型振動台実験において、自身が実験に参加できないときにお手伝いいただきました。ここに深く感謝申し上げます。岐阜大学の横井成長くんは、実際の地盤調査の様子や現場で知り得た知識などをお教えいただいたこと、大変感謝いたします。岐阜大学の林幹之くんには、数値解析に関する意見や情報などを交換できたこと、感謝いたします。

本論文の執筆にあたり、上記で述べた人達以外にも多くの方に助けて頂いたため、執筆することができました。重ねて感謝申し上げます。最後に、精神的に助けて頂いた友人と、金銭面、精神面で多大なる支援をいただいた両親に深く感謝します。

樋口 翔太郎