

# 鋼矢板を用いた地下水位低下による街区レベルでの液状化抑止工法の開発

研究代表者 千葉大学大学院工学研究科 教授 中井正一

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

2011年3月の東北地方太平洋沖地震により、首都圏湾岸部埋立地の戸建住宅密集地帯では広範囲に液状化被害が発生した。図1は、地震直後に我々が行った千葉市美浜区における液状化被害分布（噴砂被害の程度）を表している<sup>1)</sup>。美浜区は全域が浚渫埋立地であり、液状化はほぼ全域で発生しているが、被害分布には場所による大きな偏りのあったことが分かる。これは、同じ埋立地でも場所によって地盤構造が大きく変化していることに起因しており<sup>1)</sup>、その地盤構造の変化は、浚渫埋立工法そのものまで遡る可能性のあることが分かっている<sup>2)</sup>。美浜区の中央部付近は閑静な住宅地（戸建て、集合住宅）が広がっており、特に戸建て住宅地では液状化被害が顕著であった<sup>3)</sup>。

従来、軟弱地盤上の戸建住宅では、支持力の確保と不同沈下の抑止を目的に、小口径摩擦杭や地盤の柱状改良などの対策はされてきたものの、液状化対策がなされることはごく希であった。そもそも戸建住宅を対象とした液状化対策工法はほとんどなく、あっても高コストである。このような背景から、東北地方太平洋沖地震後、既存戸建住宅地を対象とする液状化対策工法の開発が急務となり、国土交通省による開発テーマ募集が行われ<sup>4)</sup>、7件の課題が選定された<sup>5)</sup>。筆者らの提案する「鋼矢板囲い込み・地下水位低下併用による液状化抑止工法の開発」もその中の1課題である。宅地については、個々の宅地ごとに施工する対策工法では非効率であることから、新たな枠組みでは、街区一体型の対策工法となっている。この枠組みを受け、千葉市においても、まず、液状化被害が甚大であった美浜区の一画にモデル地区を設定し、街区一体型地下水位低下工法の適用を検討中である。

### 1.2 地下水位低下工法

図2に、地下水位低下工法概念図を示す。この工法は、鋼矢板による遮水壁内で地下水を

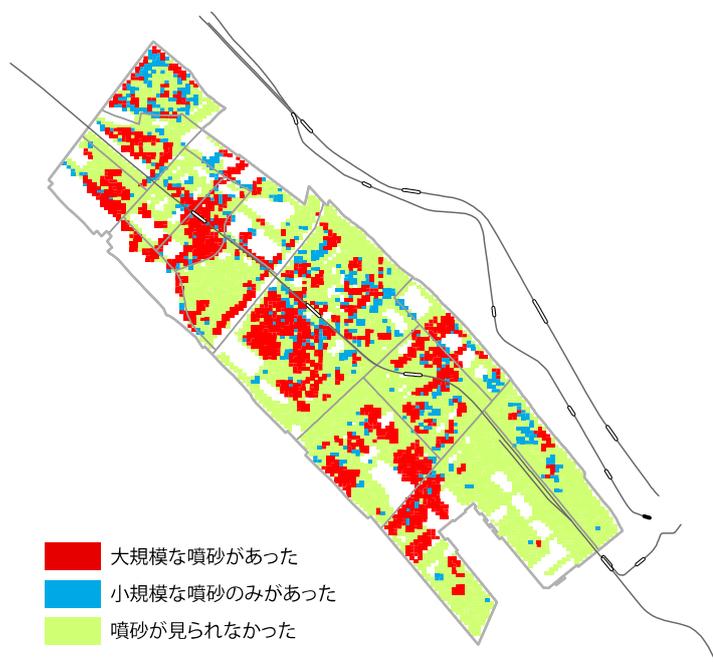


図1 千葉市美浜区における液状化被害（噴砂分布）

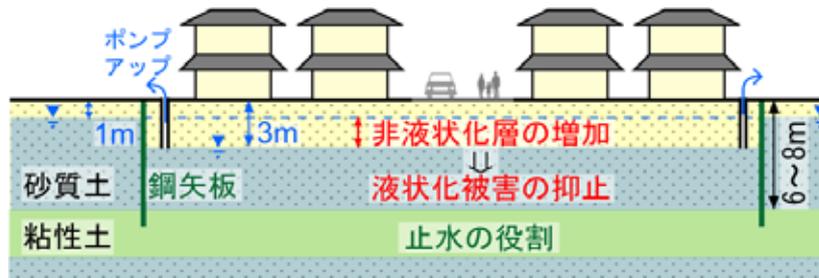


図2 地下水位低下工法概念図

揚水することで水位を低下させ、地盤の有効応力増加による液状化抑止効果を期待する。他の工法と比べて初期コストが低く、既存の戸建住宅地に対して広範囲に施工が可能であり、国土交通省が推進する街区一体型の液状化対策工法の一つとなっている<sup>6)</sup>。

### 1.3 本研究の目的

本研究は、千葉市美浜区における液状化対策モデル地区を対象に、筆者らが提案する鋼矢板囲い込み・地下水位低下併用による液状化抑止工法の効果を遠心模型実験により検証するとともに、千葉市の実証実験に参画することにより現地においてその適用可能性を探ろうとするものである。

## 2. 遠心模型実験<sup>7)</sup>

小型の模型地盤であってもある程度深い実地盤の応力状態を再現できる実験手法として遠心模型実験がある。これは、模型試験体に遠心力（ここでは 30g）を加えることにより、見かけの単位体積重量を増やすことにより実現される。地盤の液状化特性は深さにより変化するため、本研究ではこの方法を採用している。

### 2.1 実験概要

表1に実験ケースを示す。Case 1、Case 1'は全体の地下水位がそれぞれ GL-1m、-0.5m の無対策地盤を想定したものである。また Case 2 は全体の地下水位を-3m まで下げたもの、Case 3 は矢板に囲まれた範囲のみ地下水位を-3m まで下げたものであり、共に対策地盤を想定している。Case 3 は矢板による影響の検討である。

表 1 実験ケース

実験ケース	地下水位 (GL-)	矢板
Case 1	1m	無
Case 1'	0.5m	
Case 2	3m	
Case 3	3m(矢板内),1m	有

図3に実大換算寸法の Case 3 計器配置図を例として示す。実験模型は、せん断土槽（内寸 770mm×470mm×370mm）を用いる。地盤は相対密度 35%の 7号珪砂+カオリン 5%

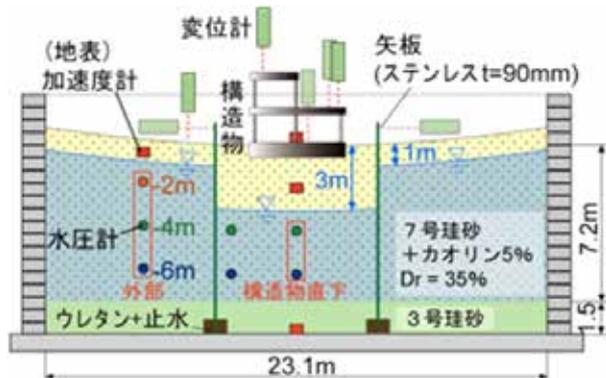
を空中落下法により撒き、間隙流体（シリコンオイル）を浸透させて作成する。途中、所定の深度に水圧計を設置する。地表の中央に直接基礎の住宅を模擬した構造物模型を設置している。底面の大きさは実大換算で4.5m角、根入れ深さは0.5m、全体の平均接地圧は21.8kPaである。構造物は傾斜が発生しやすいよう左側に偏載しており、接地圧は偏載部分が25.9kPa、偏載のない部分が17.9kPaである。

この実験模型に30gまで遠心加速度を与え、水圧計と変位計の値が安定した後に、水平方向（図3の左右方向）の加振を行う。入力波は最大加速度200cm/s<sup>2</sup>、周波数2Hz、漸増60波、定常20波、漸減5波の正弦波を目標とした。

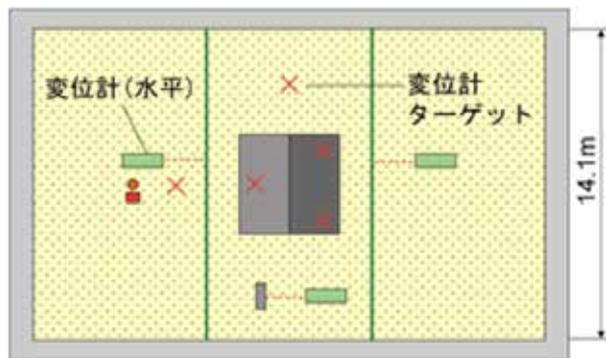
## 2.2 実験結果

図4に加振直後までの各ケースにおける入力加速度波形（土槽底部）、地表加速度、構造物加速度、構造物直下と外部の過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。なお、以下の結果は全て実大換算したものである。地表と構造物の加速度が、ある深度の層における液状化に伴い低減している。構造物直下の過剰間隙水圧比では、構造物による有効上載圧増分により、外部の過剰間隙水圧比と比べて浅い深度の値が小さくなっている。外部の過剰間隙水圧比について、Case 1、1'などでは地下水位直下の-2m以深で値が1に近づき液状化に至っているのに対し、Case 2では地下水位直下の-4mで値は1に達しておらず液状化に至らない。よって地下水位を-3mまで下げると、低下した地下水位よりも深い層まで液状化が抑止されていることがわかる。

図5に加振開始から水圧の消散がほぼ完了している2500秒までの構造物直下と外部の過剰間隙水圧、中央の地盤沈下量、構造物の沈下量と傾斜の時刻歴を示す。地下水位が深いケースほど過剰間隙水圧の消散が早く、それに伴い沈下量も小さくなる。構造物直下の過剰間隙水圧について、Case 3ではCase 2より水圧の消散が遅いことから、矢板により水圧の消散が妨げられることで沈下量が大きくなっていると推察する。構造物の傾



(a) 断面図



(b) 平面図

図3 模型試験体（土槽）と計器の配置  
(Case 3、実大換算寸法)

斜は対策地盤の Case 2、 Case 3 では 1/1000 以下に抑えられた。Case 3 の傾斜が Case 2 より小さいのは、矢板の側方拘束効果によるものと考えられる。

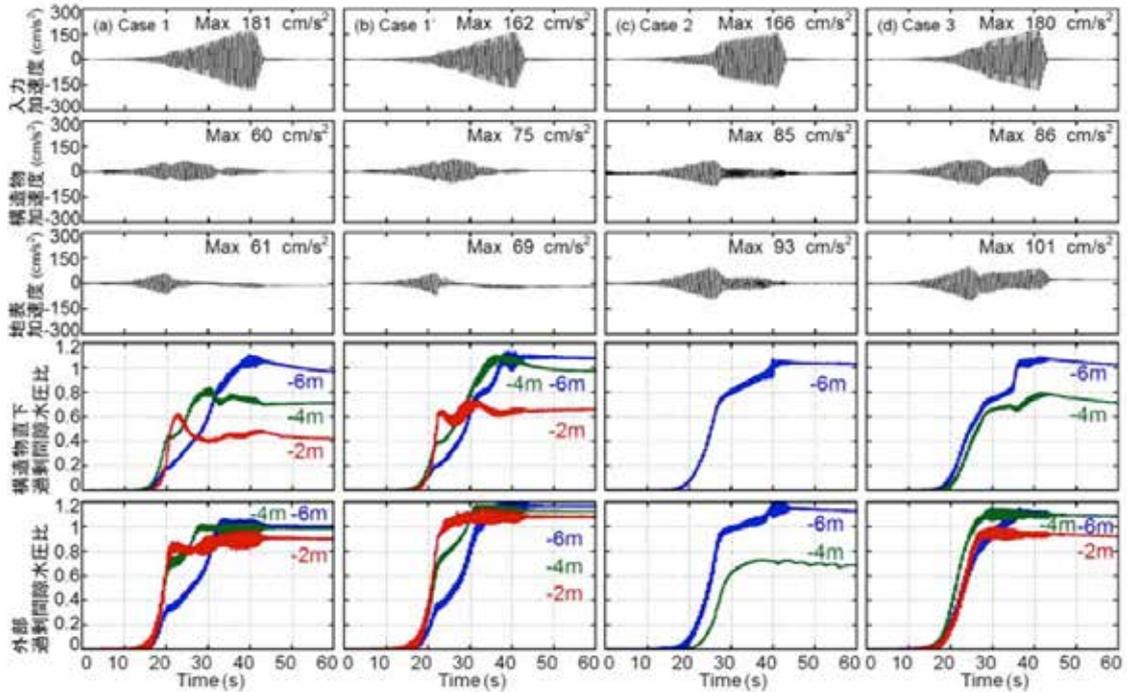


図4 各計測点における加速度波形、過剰間隙水圧比の時刻歴

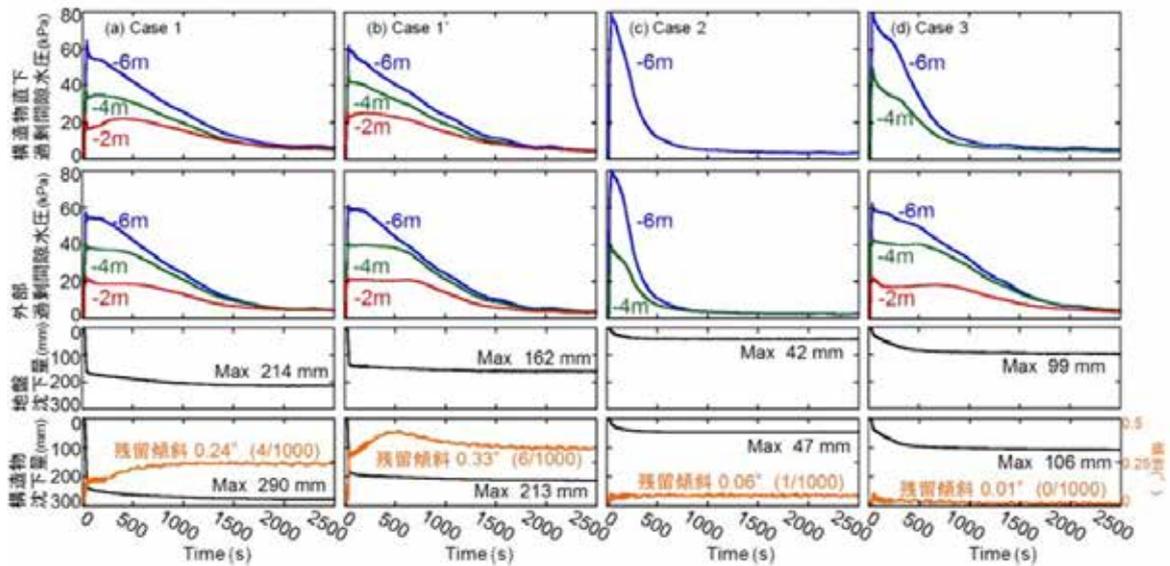


図5 過剰間隙水圧、地盤沈下量、構造物の傾斜と沈下量の時刻歴

### 3. 実証実験

千葉市では、東北地方太平洋沖地震による美浜区での液状化被害を受け、将来の地震に備えた液状化対策の実施を検討している。最初のモデル地区では、地下水位低下工法の適用が可能なことから、その施工可能性や地下水位低下による影響を検討するため、地区内の小公園において実証実験を行った<sup>8)</sup>。本研究ではこの実証実験に参画し、独自の視点から検討を行った。

#### 3.1 実証実験の概要

図6に、千葉市美浜区における地下水位低下実証実験場の平面図と、研究にあたり行った試験、観測項目を共に示す。長辺43m、短辺22mの鋼矢板による遮水壁を設け、その端部にドレーンパイプを設置し立坑より地下水を揚水することで地下水位を一定値まで低下させる。試験、観測は水位非低下時と低下時に行い、結果を比較する。

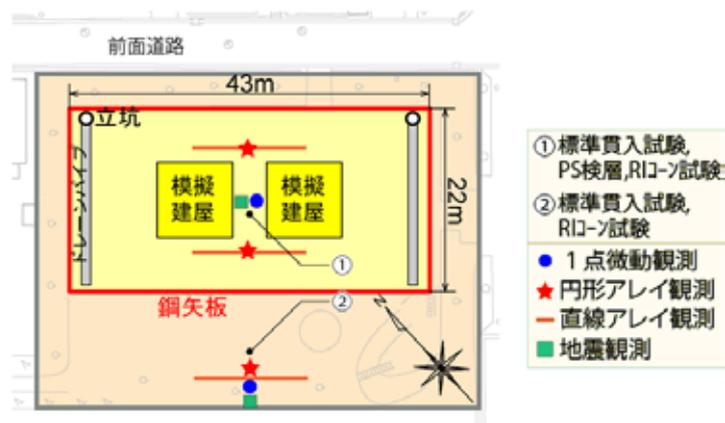


図6 実証実験配置図および原位置試験位置図

#### 3.2 原位置試験

実証実験地において、標準貫入試験、PS 検層、RI コーン試験を行った。標準貫入試験により  $N$  値、土質区分を計測する。PS 検層はダウンホール法及びサスペンション法により行い、得られた走時曲線より P 波速度 ( $V_p$ )、S 波速度 ( $V_s$ ) を計測する。地下水位低下時と回復後で計測を行った RI コーン試験により GL-6.5m までの詳細な土質区分、土の密度、含水比を計測し、飽和度を算出する。図7に標準貫入試験、PS 検層より得られた GL-40m までの結果を示す。図8 に地下水位低下時、回復後、遮水壁外における RI コーン試験結果の比較図を示す。

##### 3.2.1 標準貫入試験結果

図7より、標準貫入試験結果の主だった特徴を示す。土質区分から、GL-5.6m~8.25m はシルト層となっており、地下水位低下時に下部からの透水を抑制する効果が期待できる。それ以深 GL-28.75m までは砂質土となっているが、細粒分を含む層が多くみられる。

表層3mまでの埋土はN値6~9とやや大きいものの、それ以深からシルト層下部のGL-8.25mまではN値0~3と軟弱な地盤となっている。

### 3.2.2 PS 検層結果

次に、PS 検層結果の主だった特徴を示す。 $V_s$ は、表層4mまでは120m/s、それ以深からシルト層下部のGL-8.25mまでは100m/sと、N値と概ね整合した結果が見られる。それ以深は段階的に速度が上昇するものの、GL-26m~31mのシルト層では若干の低下がみられる。GL-35m以深では $V_s$ は400m/sを超えており、工学的基盤と見なすことができる。

地下水位低下時における計測はGL-6mまで行った。通常時に比べ、 $V_s$ は表層1.5mまでは85m/sと低下したが、それ以深は120m/sが-6mまで続く。その下部シルト層では $V_s$ の変化はなく100m/sのままと推定される。 $V_p$ における傾向も同様で、-2mまでは290m/sと低下したが、それ以深は1720m/sと急激に増加する結果となった。

### 3.2.3 飽和度調査 (RI コーン試験) 結果

図8より、地下水位低下時と回復時での飽和度変化について考察する。水位低下時では、砂質土において、地下水位低下時の飽和度の低下が顕著に認められる。標準貫入試験では把握できなかった薄い砂質シルト層 (GL-1.75m~2.35m) が確認でき、その直上の砂層 (GL-1.5m~1.75m) では、砂質シルト層の止水の影響を受け、降雨等が水溜りのように滞っており、飽和度が高い。

水位回復時では、粘性土以深 GL-2.35m~2.7m

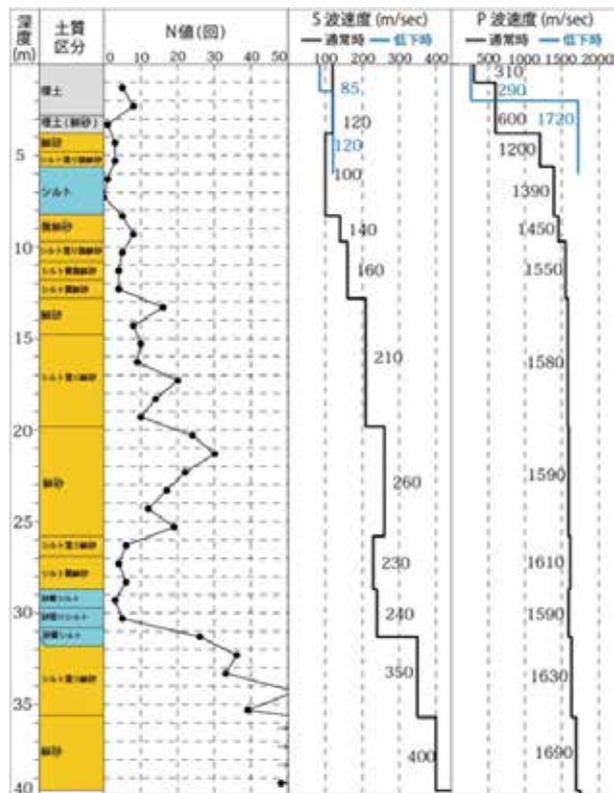


図7 標準貫入試験・PS 検層結果

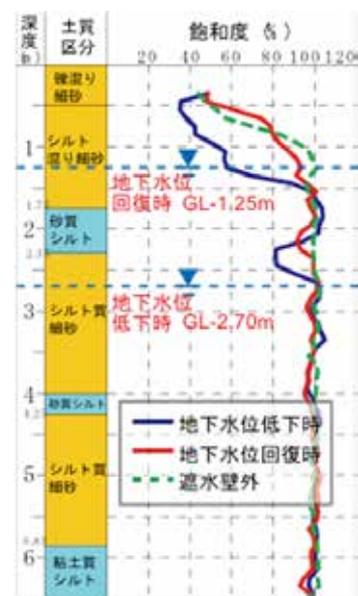


図8 RI コーン貫入試験結果

の砂質土は飽和状態にあると判断されるが、地下水位以深～粘性土以浅 GL-1.25m～1.75m の砂質土は、飽和度が概ね 91～98%を示していることから不飽和状態と推定される。よって、地下水位低下を施した後、水位を回復させたとき、地下水位以深であれども飽和状態には至らず、液状化抑止効果が期待できる可能性がある。

#### 4. 有効応力解析による検討

##### 4.1 解析概要

地下水位低下工法の有用性を検討するため、時刻歴応答解析を行った。解析には有限要素法による一次元有効応力解析法を用いた。まず、遠心模型実験結果の再現解析を行い、解析手法の妥当性を確認した。次に、千葉市による地下水位低下工法の適用モデル地区を対象に、同工法による液状化抑止効果の検証を行なった。地盤の構成則として、応力ひずみ関係に修正 R-O モデル<sup>9)</sup>、ダイレイタンス特性におわんモデル<sup>10)</sup>を、解析プログラムは Soil Plus を用いた。

##### 4.2 遠心模型実験の再現解析

解析手法の妥当性を検証するため、遠心模型実験の再現解析を行った。図 9 に実験の模型図を示す。解析により再現する実験ケースは地下水位 -1m、-3m の 2 つであり、表 2 に使用した地盤物性値を示す。 $V_s$  は実験時にベンダーエレメントから得られた計測値の近似式によって算出した。表 3 に、解析で用いたおわんモデル及び修正 R-O モデルのパラメータを示す。解析モデルは実験と同様の GL-12m までを 0.25m メッシュで作成した土柱モデルとした。境界条件は底面には固定境界、側面には繰り返し境界を用いた。振動数 2Hz、加振時間 42.5s の正弦波を入力波とした。

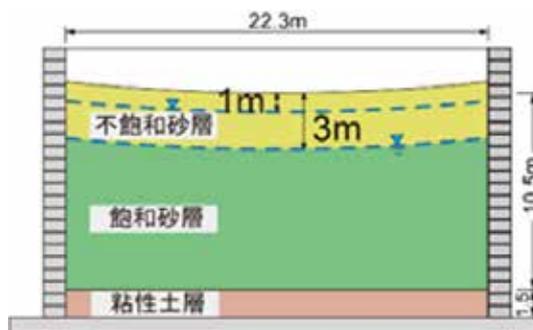


図 9 実験模型図

表 2 実証実験サイトの地盤物性

深度(m)	種別	層厚(m)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	Vs(m/s)	ポアソン比
1 3	不飽和砂	1 3	1.70		0.33
10.5	飽和砂	9.5 7.5	1.98	73.07* $\sigma^{0.25}$ -21.35	0.33
12	粘性土	1.5	1.60		0.45

表 3 再現解析におけるパラメータ

深度(m)	おわんモデル						修正 R-O モデル	
	A	B	C	D	$X_c$	$C_u/(1+e_0)$	$\alpha$	$h_{max}$
0~0.5	-1		1		0.04			
0.5~1	-1		1		0.04			
1~1.5	-1		1		0.04			
1.5~2.25	-1		1		0.04			
2.25~3.5	-1	1.4	3	40	0.04	0.006	0.000513	0.24
3.5~4.75	-1.5		6		0.04			
4.75~6.75	-1.5		6		0.04			
6.75~8.5	-2		9		0.04			
8.5~10.5	-2.5		12		0.04			
10.5~12							0.001350	0.2

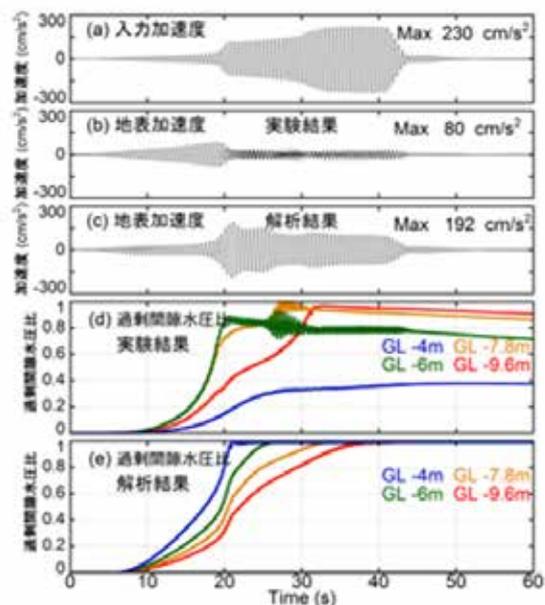
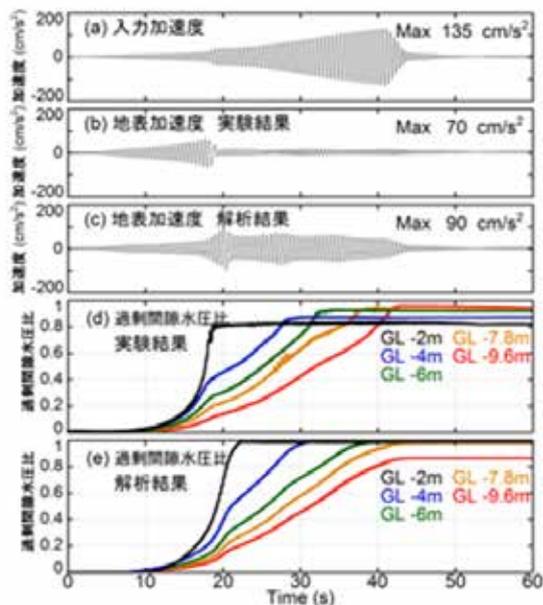


図 10 結果の比較（地下水位-1m の場合） 図 11 結果の比較（地下水位-3m の場合）

図 10 に地下水位-1m ケースの実験結果とそのモデルでの解析結果を入力加速度、地表加速度、過剰間隙水圧比の時刻歴で示す。地表加速度について(b)、(c)より、それぞれ加振開始後 20s 付近で応答が減少しており、液状化の発生を確認できる。過剰間隙水圧比について(d)、(e)より、表層から深部へと順に比が 1 に達し、液状化に至っている様子が再現できていることが確認できる。各深度の液状化発生時刻を比較すると、実験に比べ解析では若干の遅れが見られる。水圧比の上昇過程は概ね再現できているが、実験では液状化に至る直前に水圧比が急上昇しているのに対し解析ではそれが見られない。そのため実験における GL-9.6m が加振終了直前で液状化に至っているが、解析では液状化に至っていない。

図 11 に地下水位-3m ケースの実験結果とそのモデルでの解析結果を入力加速度、地表加速度、過剰間隙水圧比の時刻歴で示す。(b)、(c)の地表加速度について、実験では 20s 付近で地表加速度 80cm/s<sup>2</sup>程度で液状化に至っているが、解析では液状化発生の直前 20s 付近で 192cm/s<sup>2</sup>まで加速度が上昇している。

(d)、(e)の過剰間隙水圧比を比較すると、実験では、地下水位直下の GL-4m 層では液状化に至っていないが、解析では液状化に至る。実験では間隙水圧が上昇する際に、上部の不飽和層へ水圧が消散することで地下水位直下の層の水圧上昇を抑制していた。しかし、本解析は一相系の有効応力解析であるため、水圧の消散を考慮できていない。そのため、有効応力の小さな浅い層から液状化が発生していると考察できる。そして、GL-6m～GL-9.6m までの水圧上昇過程は概ね再現できていることがわかる。

以上より、模型実験の再現解析は水圧の消散に関する評価を除き、概ね妥当な結果が得られたと考察できる。

### 4.3 工法適用地区モデルでの解析

千葉市美浜区における工法適用地区での本工法の液状化抑止効果を確認するため、実証実験地の地盤をモデル化し解析を行った。解析モデルは図7に示す試験結果より、工学的基盤に達したと考察されるGL-35mまでを0.25mメッシュで作成した土柱モデルとした。解析に用いたパラメータを表4に示す。入力波は、東北地方太平洋沖地震の際に現地に近い台地上の稲毛台で観測された地表記録を基盤露頭波として変換した2E入力波を使用した。そのため、モデル底部境界条件には粘性境界を適用した。側面境界条件は繰り返し境界とした。

図12に、地下水位GL-1mケースとGL-3mケースでの解析結果を、入力加速度、地表面加速度、過剰間隙水圧比の時刻歴で示す。(b)、(c)の地表加速度を比較すると、水位低下時の記録に若干の増幅が見られる。これは、別途実施した常時微動観測や地震観測結果の分析から、短周期成分での増幅が原因と考えられる。過剰間隙水圧比について、(d)の水位非低下時では加振開始後90s付近でGL-4mの比が1に達し、液状化していることがわかる。他の層では液状化には至っていないが、GL-2mでは水圧比は0.9程度まで上昇しており、実際の地震時には液状化に至った可能性がある。この結果は、概ね実被害調査結果<sup>1),3)</sup>と整合すると言える。一方、(e)の水位低下時では、有効応力の増加とせん断剛性の増加により、過剰間隙水圧比の急激な上昇は見られず、全ての層において液状化には至っておらず、液状化抑止効果を確認することができた。

表4 モデル地区における解析パラメータ

深度(m)	おわんモデル						修正R-Oモデル	
	A	B	C	D	X <sub>i</sub>	C <sub>v</sub> /(1+e <sub>s</sub> )	α <sub>0</sub> α <sub>1</sub> α <sub>2</sub>	h <sub>max</sub>
0~2.0	-1		2		0.1			
2.0~3.0	-1		3		0.11			
3~4	-1	1.4	5	40	0.12	0.006	0.000513	0.24
4~4.75	-1		6		0.14			
4.75~5.5	-1		7		0.16			
5.5~7							0.001350	0.2
7~8.25								
8.25~9.75	-1.5		7		0.18			
9.75~12.75	-1.5		7		0.2			
12.75~16.25	-1.5	1.4	8	40	0.2	0.006	0.000513	0.24
16.25~19.75	-1.5		9		0.2			
19.75~25.75	-2		10		0.22			
25.75~28.75	-1.5		7		0.2			
28.75~31.25							0.001350	0.2
31.25~35	-4	1.4	14	40	0.3	0.006	0.000513	0.3

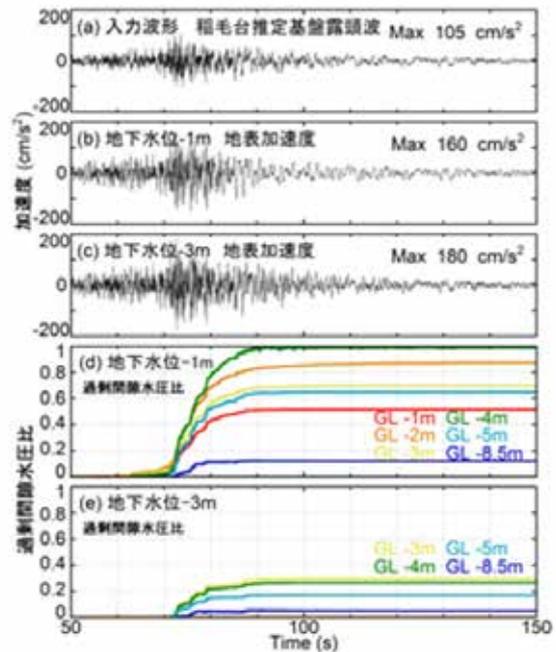


図12 モデル地区における解析結果

## 5. おわりに

本研究では、千葉市美浜区における液状化対策モデル地区を対象に、鋼矢板囲い込み・地下水位低下併用による液状化抑止工法の効果を遠心模型実験により検証するとともに、千葉市の実証実験に参画することにより現地での適用可能性を探った。得られた知見は以下の通りである。

- ・ 遠心模型実験では、低下した地下水位よりも深い層まで液状化が抑止された。また、対策地盤では、加振後の過剰間隙水圧の消散が早まり、沈下を軽減する効果が見られる。また、構造物の傾斜を無対策地盤に比べ 1/4 以下に抑制できるとともに、構造物の傾斜を抑止する効果が得られた。
- ・ 原位置試験により、表層の剛性が増加することを確認した。
- ・ 解析により、実地盤における地下水位低下工法の液状化抑止効果を確認した。また、上部不飽和層への水圧消散が液状化抑止に影響を及ぼすことが確認できた。

なお、本研究の実施に当たり、公益財団法人 JFE21 世紀財団の助成を得ました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 関口徹、中井正一：千葉市美浜区の液状化被害に与えた表層地盤構造の影響、日本地震工学会論文集、第 12 巻、第 5 号（特集号）、pp. 21-35、2012.10
- 2) 中井正一、関口徹：東北地方太平洋沖地震による千葉市美浜区における液状化被害分析、物理探査、第 66 巻、第 1 号、pp. 37-43、2013.1
- 3) 日本建築学会：「建築基礎構造・津波の特性と被害」、東日本大震災合同調査報告書：日本建築学会編 9、2015（刊行予定）
- 4) 国土交通省：平成 23 年度第 3 次補正予算 建設技術研究開発助成制度の公募について、[http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08\\_hh\\_000165.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000165.html)
- 5) 国土交通省：平成 23 年度補正予算建設技術研究開発助成制度「震災対応型技術開発公募」採択課題決定について、[http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08\\_hh\\_000169.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000169.html)
- 6) 国土交通省：液状化被災市街地における地下水位低下工法の検討・調査について(ガイダンス(案))、2013.1
- 7) 堀内佑樹、関口徹、中井正一、眞野英之：鋼矢板囲い込み・地下水位低下併用による液状化被害抑止効果の検討、第 49 回地盤工学研究発表会、pp.1121-1122、2014.7
- 8) 千葉市：第 5 回液状化対策推進委員会資料、2014 年 3 月 26 日、<http://www.city.chiba.jp/toshi/toshi/shigaichi/download/dai5kaishiryoku.pdf>
- 9) 地盤工学会：わかりやすい土質力学原論 [第一回改訂版]、1992
- 10) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究、名古屋工業大学博士論文、1997