

# 住宅が建ったまま行える宅地地盤の液状化対策技術の開発 (研究成果の概要)

2011年4月 国土技術政策総合研究所都市計画研究室

## 1. 目的

長期間存続可能な住宅ストックを支える宅地地盤に関する技術的基準の確立に向けて、現に住宅が存する市街地内の宅地地盤に対して実用的に普及可能な液状化対策技術を早急に開発する必要から、地盤内空気注入法に着目して、その有効性の実証するとともに、実用化に向けた技術的課題を提示する。

## 2. 技術開発の緊急性

- 既に都市拡大の時代を過ぎたわが国において、多世代利用型超長期住宅が建つ場所は、大部分が既存の宅地となる。既存宅地の地盤条件は多様であるが、超長期間に存続する住宅の宅地としては、その耐震性能が、住宅の存続期間に遭遇するレベルの地震強度に対応して、住宅に機能障害を生じさせないものであることが必要である。
- 宅地地盤の液状化は、中程度の地震(震度5弱以下)では滅多に発生することはないが、大規模な地震(震度5強～6以上)になると地盤条件によって発生し、いったん発生すると住宅に修復が困難又は著しく費用を要する被害をもたらす。このため、超長期住宅を支える宅地地盤の性能基準は、大規模な地震に遭遇しても少なくとも表層地盤において液状化を生じないレベルで設定する必要がある。
- 現状において、液状化被害が想定される住宅・宅地は、決して少なくない。例えば、中央防災会議首都圏直下地震対策専門調査会報告においては、全壊棟数が約33,000棟と推計されているが、これは火災焼失を除く建物被害の約17%を占める。また、東京都調査では都区部の約46%が液状化危険度A地域とされており、被害推計では火災を除く約3分の1が液状化によるとされている。政府の「新成長戦略(基本方針)」(閣議決定)では「耐震性が不十分な住宅の割合を5%に下げる」とされており、既存宅地の液状化対策は喫緊の課題である。
- 宅地地盤の液状化対策工法は各種あるが、一般的な工法はいずれも造成時や建替時など建物がない状態での施工を必要とする。しかし、既存宅地における液状化防止のための耐震改修は、建物が密に建てこんだ市街地においても、住宅が建ったまま、安全、静穏かつ安価に行うことができることが求められる。
- このため、本総合技術開発プロジェクトでは、既存宅地に適した液状化対策において、有望な技術を実証的に提示することを目指すこととした。これによる成果は、主として戸建て形式の長期優良住宅の宅地地盤に関する認定基準の整備に反映することを想定しているとともに、都市の防災においてこれまで行政施策に着手できていない既成市街地の液状化対策に対して技術的打開の可能性を示唆するものとなる。

### 3. 実証実験のステップと成果のポイント

#### 【1年目(2008年度)】

##### (1) 目標

既造成の宅地の液状化対策に有効な技術的方法の存在を実証する。

##### (2) 方法

住宅が建て込んだ市街地中でも比較的静穏かつ安価に施工できる可能性のある液状化対策として、地盤内にマイクロバブル水を注入する方法を選択し、実大サイズの砂地盤試験体を不飽和化して、加振実験により効果を検証する。

- ・ **実験装置:** 大型せん断土槽(10m×3.6m×深さ5m、(独)建築研究所所有)
- ・ **試験体:** 砂地盤;N値6~7程度、地下水位位置; -0.3m、中央部に重さ約1.5t/m<sup>2</sup>の住宅に見立てたおもりを置き沈下量を可視化
- ・ **入力振動:** 加速度; 50ガル、100ガル、150ガル、周波数; 2Hz、回数:20回
- ・ **空気注入の方法:** 土槽最下部からマイクロバブル水を注入(この方法は静かで場所をとらず、材料も安価で安全なため、実用化に優れると期待できることから選択)

(注)マイクロバブル: 直径数十マイクロメートルの微小な気泡。水と混合した時、長時間水中に滞在し続ける性質がある。

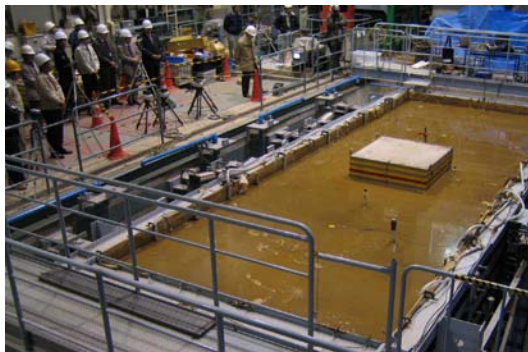


図1 実験風景

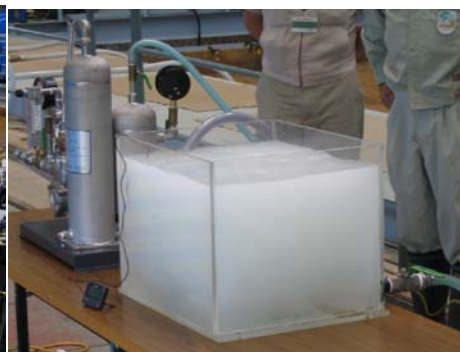


図2 マイクロバブル水

##### (3) 実験計画と予測

- ・ **検証実験の方法:** ゆるい砂地盤の大規模な試験体(N値6~7程度、深さ5m弱)をつくり、この同じ条件の地盤に下部約-5mから「マイクロバブル水(ケースA)」と「脱気水(ケースB)」を注入し、加振して2つのケースを比較。
- ・ **予測:** 加振の加速度を強くしていくと(50gal→100gal→150gal)、ケースBが先に液状化を起こし、ケースAは耐えるはずである。
- ・ **外形的な実験結果:** 予測に反し、外形的にはほぼ同じ結果が観察された。すなわち、マイクロバブル水と脱気水のどちらも、入力(土槽下部)50gal および 100gal では地表面が液状化せず、150gal で液状化が見られた。このため、計測値からその理由を追求した。

	マイクロバブル水注入地盤			脱気水注入地盤		
地盤剛性	N値6～7程度			N値6～7程度		
推定飽和度 (地表付近)	78%			84%		
入力加速度 (アクチュエーター)	50gal	100gal	150gal	50gal	100gal	150gal
地表付近の 最大加速度	80gal	180gal	300gal	80gal	200gal	160gal
液状化の状況 (地表付近)	せず	せず	液状化	せず	せず	せず
(深い層)	せず	せず	せず	せず	液状化	液状化

図3 外形的観察における実験結果

#### (4) 計測値からの考察

- 脱気水注入地盤の表面が液状化しなかった理由：地盤下部の飽和度の高い層が瞬時に液状化し、上部に地震動を伝えなくなった。⇒地盤自体が「免振」化。

深さ	$\sigma_z'$ Kgf/cm <sup>2</sup>	マイクロバブル水注入地盤		脱気水注入地盤	
		100gal	150gal	100gal	150gal
-0.8m	0.10	0.26	1.23	0.15	0.40
-1.8m	0.18	0.31	0.85	0.20	0.30
-3.8m	0.36	0.25	0.22	0.40	0.37
-4.8m	0.45	0.16	0.18	0.92	0.98
液状化	なし	なし	地盤上部で発生	なし	深い箇所ですら急速に発生

表4 地盤の深さごとの過剰間隙水圧比(最大値)

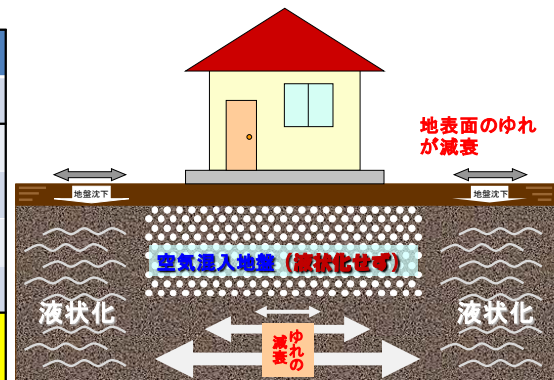


図5 「液状化免振地盤」の概念図

#### (5) 実験成果のポイント

- 比較的緩い砂地盤(N値6～7程度)でも、空気を多く含む層(飽和度 80%程度)では最大加速度 200 ガル程度の揺れに対して液状化を発生しなかった。これにより、少なくとも震度5弱相当の地震には有効であることが示された。
- 一方、無対策の地盤(マイクロバブル水を注入しなかった試験体)では、土槽下部の加振により深い層において小さな地震動でも液状化が発生したが、それにより逆に浅い層への地震入力が増加して建物沈下が小さくなるという実験結果が得られた。
- 既往研究により表層の非液状化層が3m程度あれば200ガルの入力に対し、6m程度あれば300ガルの入力に対し、深層部が液状化しても地表に液状化が達しないことが示されており、こうしたこととあわせて考察すると、表層数メートルのみを不飽和化し、深層を液状化層とすることで、大きな地震動に対しても建物被害を軽減できる方法(液状化免震技術)の可能性が示唆された。

## 【2年目(2009年度)】

### (1) 目標

世代利用型超長期住宅を支える宅地が備える必要のある耐震性能(遭遇する可能性の高いレベルの地震(震度6相当を想定)に対して継続使用が困難な被害を建物に与えない)の確保について、空気注入法によって達し得る宅地地盤の存在を実証する。

### (2) 方法

一定の締固め度の砂質地盤模型に震度6相当の地震動を入力し、空気注入の有無によって、液状化の発生の違いを確認する。実験には、遠心力载荷試験装置を用いる。

- ・ **実験装置:** 遠心力载荷試験装置(土木研究所所有、回転半径 6.6m)により、小型剛土槽(150cm×30cm×深さ 50cm)を50G場にして加振
- ・ **試験体:** 江戸崎砂(少量の細粒分を含む)、値 $\approx$ 92%(N値 $\approx$ 16に相当、通常の沖積平野又は埋立地を想定)、初期状態は真空室内で水を注入し完全飽和状態とする
- ・ **入力振動:** 正弦波250Gal(震度6弱相当)、正弦波400Gal(震度6強相当)、神戸波の3種類
- ・ **空気注入の方法:** 遠心場(20G)において、土槽最下部から初期設定の飽和水を抜き、マイクロバブル水を注入

(注)D値(締固め度) $\approx$ 92%は、3軸試験による6供試体(D値(85%、90%、95%) $\times$ (飽和、不飽和))の結果および50G場における試加振の結果(D値 88%と92%を比較)から設定した。



図6 実験装置(遠心力载荷試験装置)



図7 試験体土槽

### (3) 実験ケースと液状化の状況

実験目的	試験体	設定飽和度	入力地震動	液状化
液状化抑制効果の確認	Case1	100%	250Gal(震度6弱)、400Gal(震度6強)、正弦波、1Hz、20波	発生
	Case2'	平均 94%		抑制
液状化免振地盤の挙動と効果	Case3	上層 90%、下層 100%	神戸波	上層なし、下層発生
阪神大震災級における防災効果	Case4-1	左半分:100% 右:上層 90%、下層 100%		左:発生、右:上層なし、下層発生
	Case4-2	左:100%、右:平均 87% (マイクロバブル水注入)	左:発生、右:なし	

#### (4) 実験成果のポイント:

阪神大震災相当の地震動の入力に対して、N値16程度の砂質地盤において、地下水層の飽和度を90%程度とすることにより、液状化の発生が防がれることを確認した。このことは、平坦な沖積平野や埋立地に広くみられる地盤条件における空気注入法の有効性を示している。

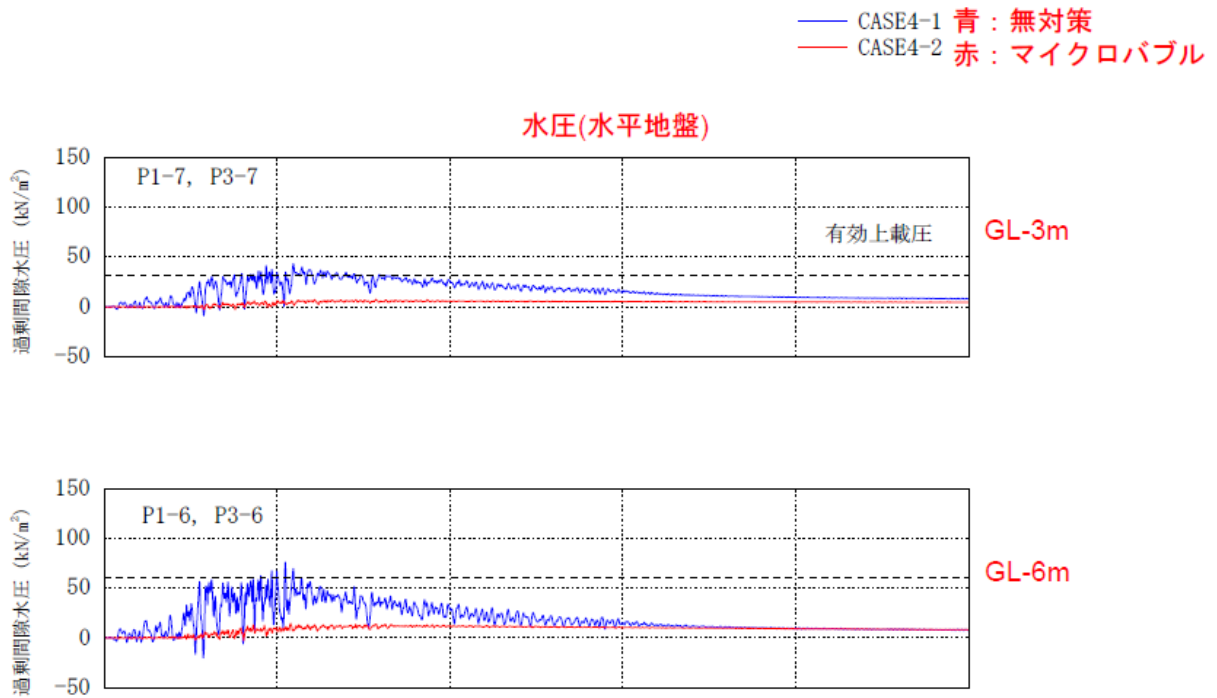


図8 阪神大震災相当の地震波の入力による液状化発生の違い

【3年目(2010年度)】

(1) 目標:

実地盤において、空気注入の実用性および注入した空気の耐用性を確認する。

(2) 方法:

実地盤の液状化層にマイクロバブル水を注入し、不飽和地盤をつくるとともに、飽和度の時間経過による変化を計測

- ・ **実験サイト:** 江戸川河川敷(埼玉県三郷市)、深さ GL-4m 付近に N 値≒15 前後の砂層
- ・ **注入実験A:** 垂直ボーリング孔で深さ GL-4.35m の位置からマイクロバブル水を注入。この孔から水平距離 0.5m、1.5m、4.0m の地点に可動式 TDR の計測孔を設け、不飽和化の拡がりを測定
- ・ **注入実験B:** 住宅に覆われた部分として地表に6m角の四角形を想定し、その周囲からマイクロバブル水を注入して住宅下の不飽和化を測定。実用化工法に向けて、注入には簡易なミニラム孔と角度 60° の斜め孔を使用
- ・ **注入空気の耐用性測定:** 注入後 120 日以上の間、飽和度の変化を観測



図9 実験サイトの風景

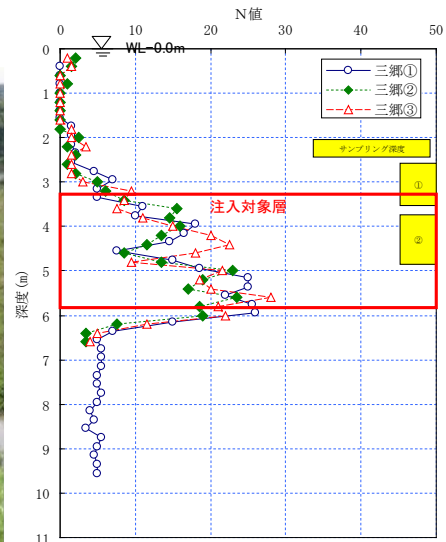


図10 実験サイトのボーリング結果

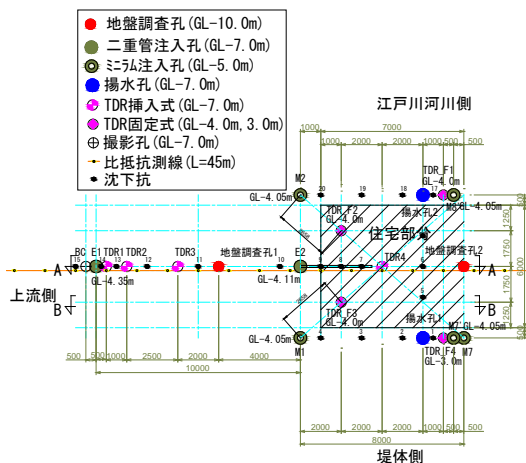


図11 実験サイトプラン(平面図)

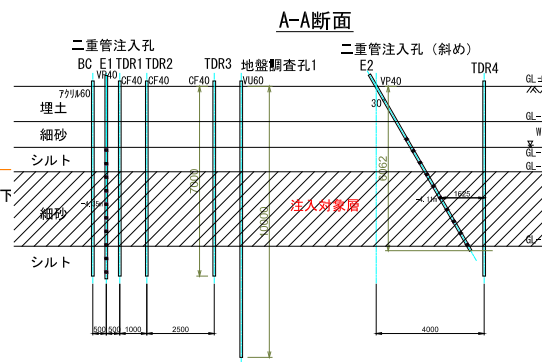


図12 実験サイトプラン(地下断面図)

### (3) 実験結果のポイント

- 1) 地盤面下の飽和度は、マイクロバブル水の注入開始後速やかに低下し、安定する。実測では、約6l/分の注入速度でおよそ3m<sup>3</sup>注入すれば十分安定域に達しており、実用化段階において短期間の工期とできる可能性がある。
- 2) 注入空気の拡がりは、飽和度90%をターゲットにすると、水平方向には1.5m程度が限界。垂直方向には注入深度より上方向に動き、下方向の飽和度低下には余り寄与しない。
- 3) 残留空気の耐用性については、飽和度が注入停止直後に数パーセント上昇し、その後はほぼ横ばいとなる傾向がみられた。実測は注入後約6ヶ月経過まで行ったが、大きな変動はなく不飽和状態が維持された。

図13 マイクロバブル水注入による飽和度の変化(断面深さ方向、注入量別)

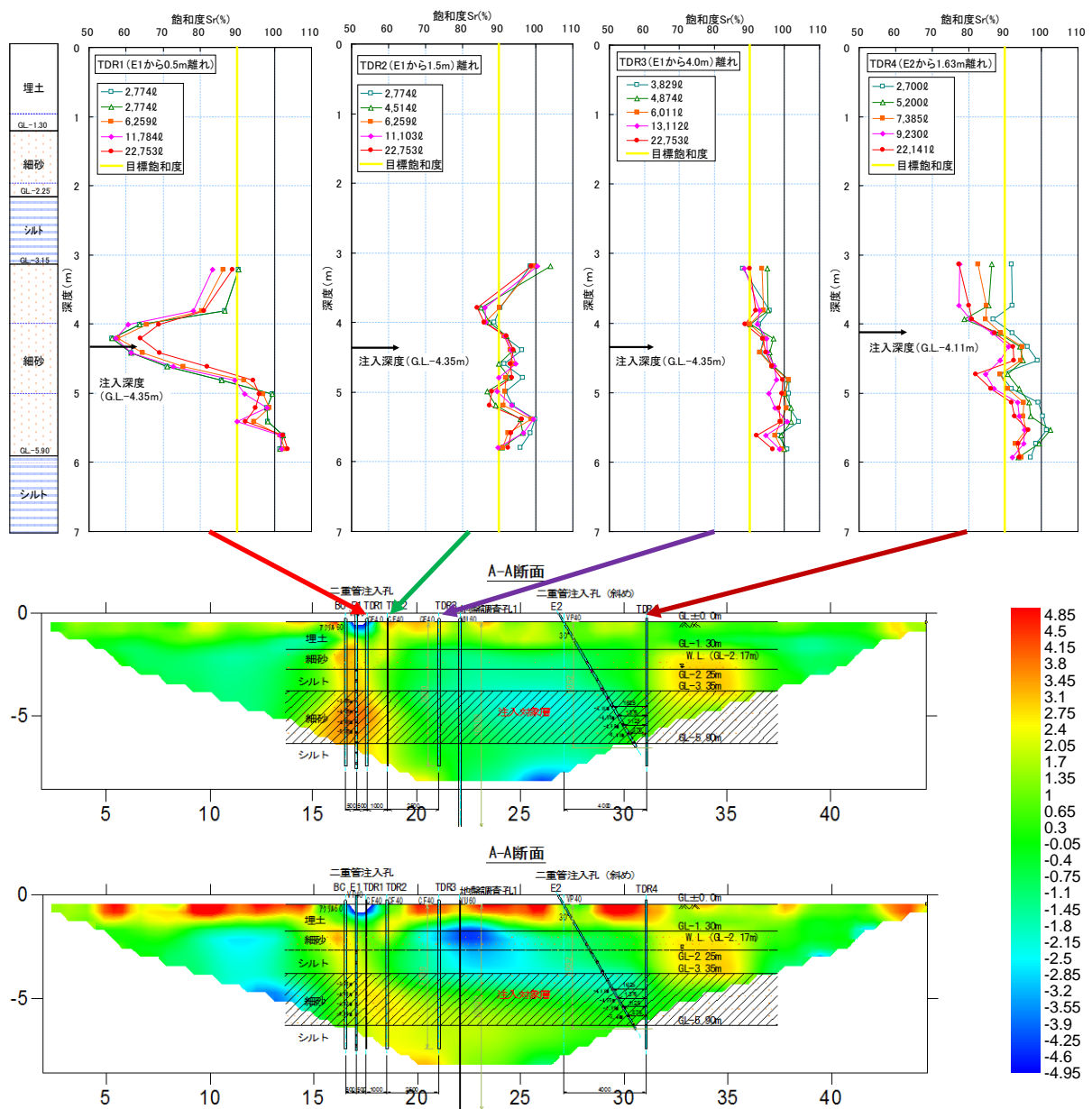


図14 比抵抗測定による地盤内の空気の分布(上は注入初日、下は2日目)

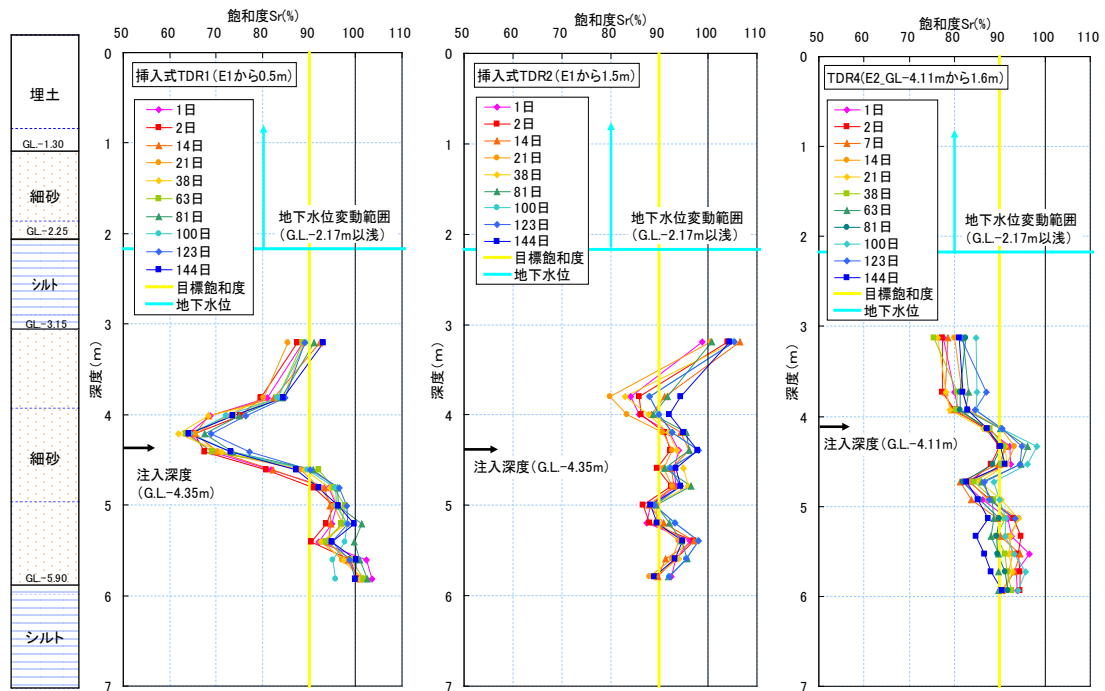


図15 飽和度の時系列変化(可動式 TDR 計による断面深さ方向、注入後経過日数別)

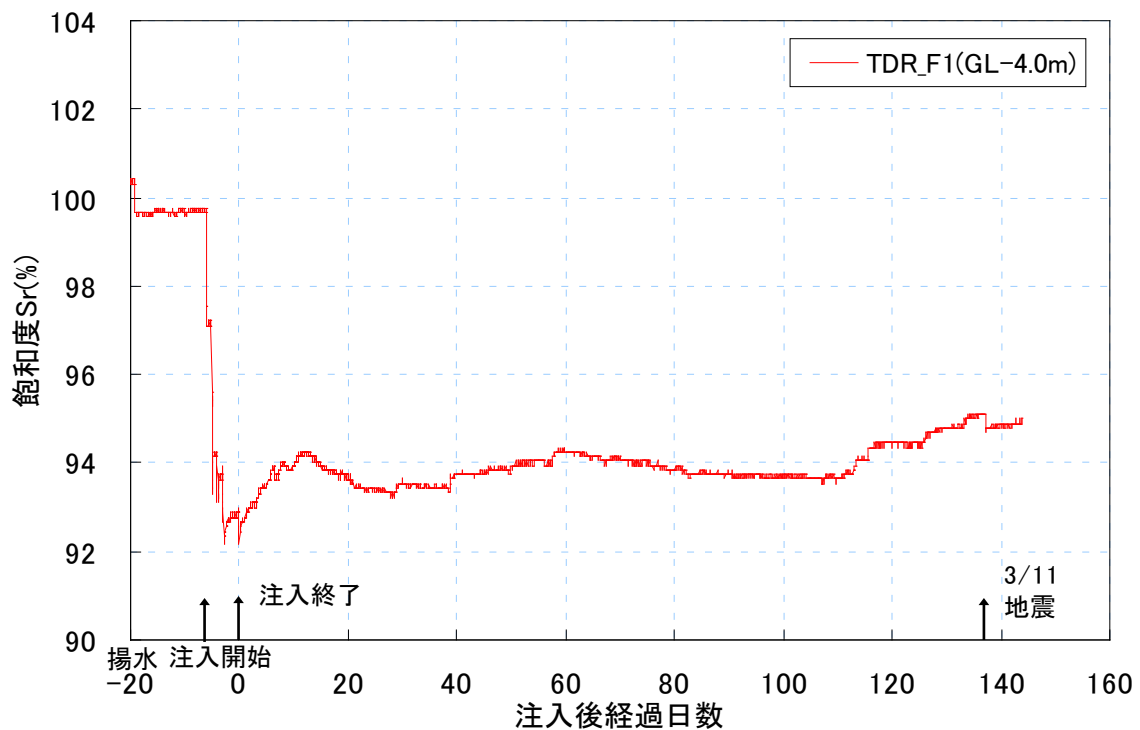


図16 飽和度の時系列変化(埋込み固定式 TDR 計)



#### 4. 成果活用の方向

- 地盤の液状化は、中規模地震での発生は稀だが大規模地震では広範に発生し、人命の損失に至ることは稀だが建物を全壊被害に至らしめるという性質がある。これがかんがみると、液状化は、いわゆる建築基準法のメルクマール(中程度の地震では建物被害を受けず、大地震では建物が損傷することはあるが人命は守られる)には入らないが、長期に使用する建物が被ってはならない被害であると言ってよい。
- 現行の長期優良住宅認定基準(長期使用構造等とするための措置及び維持保全の方法の基準)は、耐震性の基準に地盤に関する事項を含んでいないが、「極めて稀に発生する地震に対して継続利用のための改修が容易」であることをメルクマールとするならば、宅地地盤の要件として「地表面において液状化を発生しないこと」を要件に追加することが必要である。
- 既存住宅については、これまで住宅が建ったまま市街地の中で比較的容易に講じることのできる液状化対策技術がなかったが、本総合技術開発プロジェクトにより空気注入法によって実用性のある技術の不在を打開できる見通しを得ることができた。
- この工法は、圧力を受けると縮む性質を持つ空気が、地震動による水圧の上昇を抑えるクッションの役割をすることにより液状化の発生を抑制するものである。この方法によれば、戸建て住宅などが既に建っている宅地においても、住宅が経ったままの状態、地盤液状化対策を簡単、安価かつ環境にやさしい方法で行えることが期待できる。また、この工法には、他の地盤改良工法と異なり空気が混入する以外に地盤そのものを変化させないので、その後宅地地盤に何らかの手を加える必要が生じた場合にも何の障害も残さないという大きな利点もある。
- この研究の成果および既往の知見を踏まえて、既存住宅にかかる長期優良住宅認定基準においても、宅地地盤の液状化防止措置を要件に含めることが検討が必要と考えられる。

なお、詳しい実験データ等は、国総研ホームページで公開しています。下記 URL、または国総研トップページから「宅地防災」のバナーをクリックすればご覧になれます。

<http://www.nilim.go.jp/lab/jbg/takuti/takuti.html>