

大島昭彦¹・長屋淳一²・折橋恒春³・○野牧優達⁴

¹ 大阪市立大学大学院・² 地域地盤環境研究所・³ 五洋建設・⁴ 応用地質

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災を経て、宅地や港湾域を対象とした液状化判定と液状化対策が喫緊の課題となっている。本論文では、まず宅地の液状化判定を行う地盤調査方法として、既存の比較的簡易な動的・静的サウンディング試験を高精度化し、地下水位測定と試料採取を併用する試験に改良したもの、及び試験結果から間接的な土質判定を行うことができる新しい地盤調査方法を紹介する。次に、港湾域と宅地を対象とした液状化対策工法の最近の動向、及び各工法の特徴や課題をまとめる。

2. 宅地の液状化判定のための地盤調査方法

土木構造物や中規模以上の建築物の基礎地盤の液状化判定は、一般にボーリング調査による標準貫入試験の N 値と採取試料の粒度試験による細粒分含有率 F_c 値などを用いて、道路橋示方書¹⁾、建築基礎構造設計指針²⁾による F_L 法で行われる。また、最近では電気式コーン貫入試験（三成分コーン貫入試験）に基づく液状化判定も行われる。しかし、宅地を対象とした場合、その標準的な地盤調査方法であるスウェーデン式サウンディング試験では液状化判定はできない。一方、ボーリング調査を宅地に適用するのはコスト的に無理がある。そこで、従来は深度 5m までに存在する飽和砂層の層厚から液状化の影響が地表面に及ぶ程度を判定する簡易な判定法³⁾が用いられてきた。しかし、東日本大震災での宅地の液状化被害の大きさから、この方法では不十分であり、現在、液状化検討深度は 10~20m 程度まで拡張し、 F_L 法で判定できる低コストな地盤調査方法が要求されている。

2.1 既存の地盤調査方法とその改良

コストを上げずに宅地の液状化判定を行うためには、既存のスウェーデン式サウンディング（SWS）試験や最近宅地調査によく用いられるようになった大型動的コーン貫入試験（通称：ラムサウンディング、SRS）と中型動的コーン貫入試験（通称：ミニラム、MRS）を高精度化し、試料採取と地下水位測定を併用するのが最も現実的と考えられる。

SWS 試験から得られる荷重 W_{sw} (kN) と半回転数 N_{sw} (回) は、稻田⁴⁾による次式によって標準貫入試験の N 値に換算することが一般に行われる。

$$N = 2W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad [\text{礫・砂・砂質土}] \quad (1)$$

$$N = 3W_{sw} + 0.050N_{sw} \quad [\text{粘土} \cdot \text{粘性土}] \quad (2)$$

ただし、図-1に示すように最近の調査⁵⁾では両式による換算 N 値はかなりばらつきが大きいことから、換算 N 値に頼らないことも念頭にロッドの周面摩擦の補正を含めて W_{sw} , N_{sw} 値の高精度化が必要と考えられる。

SRS, MRS 試験では、単管式によるロッドの周面摩擦の影響を除くために、測定打撃回数 N_{dm} に対してロッドの回転トルク M_v を測定して次式で補正打撃回数 N_d を求める。

$$N_d = N_{dm} - \beta M_v \quad (3)$$

ここに、 β はトルクによる周面摩擦補正係数で、試験の打撃仕様のみで決まり、SRS で 0.040、MRS で 0.139 となる。

SRS 試験は、質量 63.5kg のハンマーを高さ 50cm から自由落下させ、貫入量 20cm 每の打撃回数を測定する。標準貫入試験と単位貫入量当たりのエネルギーが同じであるため、次式で N 値に換算できると言われている。

$$N=N_d \quad (4)$$

図-2 に示すように最近の調査⁶⁾では、砂質土では式(4)が成り立つが、粘

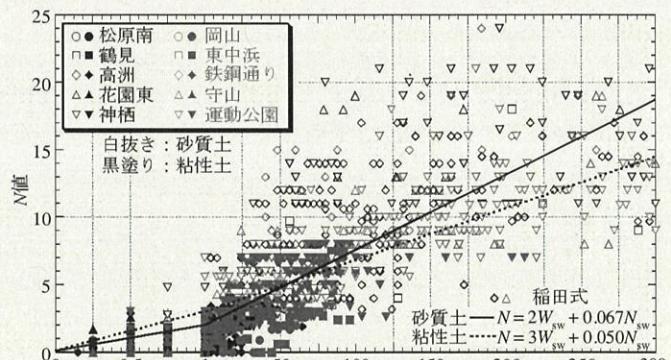


図-1 最近の調査による W_{sw} , N_{sw} と N 値の関係⁵⁾

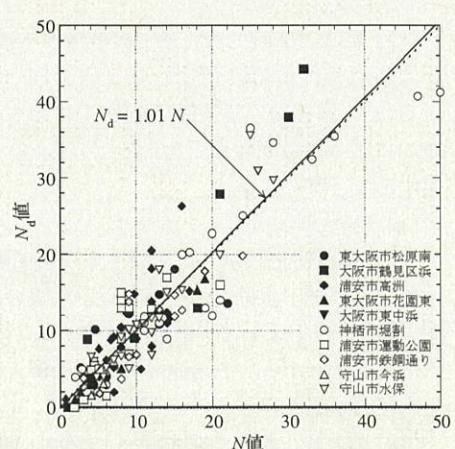


図-2 最近の調査による N_d と N 値の関係⁶⁾

性土では $N_d > N$ となることが報告されている。土質によって対応関係が変わるのは、先端が中実なコーンと中空のサンプラーでは貫入機構が異なることで説明できる⁷⁾。

MRS 試験は、質量 30kg のハンマーを高さ 35cm から自由落下させ、貫入量 20cm 毎の打撃回数を測定する。コーン単位面積当たりのエネルギーが SRS 試験の 1/2 となるため、打撃回数を 1/2 に補正することで SRS 試験と同等な N_d 値が得られるとしている。MRS 試験の打撃回数の補正是一般に次式⁸⁾が用いられる。

$$N_d = N_{dm} / 2 - 0.16 M_v \quad (5)$$

式(5)中の 0.16 は、式(3)の周面摩擦補正係数 β であるが、SRS 試験の N_d 値に合うように決められた値⁸⁾である。式(5)から SRS 試験相当の N_d 値が得られるので、式(4)から MRS 試験からも換算 N 値が得られる。

一方、式(3)からは MRS 試験では $\beta=0.139$ で、かつ周面摩擦補正した後でエネルギー補正する方が正しいと考えられる。その場合の補正式は次式⁷⁾となる。

$$N_d = (N_{dm} - 0.139 M_v) / 2 \quad (6)$$

従来補正の式(5)と新補正の式(6)のどちらがよいかについては、文献 9)で比較結果が報告されているが、SRS 試験と MRS 試験では打撃効率による違いもあり得るので、今後の課題とされている。

次に、土質判定のために、試料採取して粒度試験を行うことが最も直接的な方法である。SWS 試験や SRS、MRS 試験では試験終了後の孔を利用して、土試料を採取する簡易サンプラー（板バネ式、開閉式、スパイラル式、先端式など）が既に試作されている¹⁰⁾。さらに、別孔で 10m 程度の深度まで連続的に試料が採取できる手動式、自動式バイブロサンプラーも開発されている。一方、地下水位の測定は、試験後に引き抜いたロッドの周面部に付着した水の位置をスケールで計測する方法、試験後の孔に水位計を挿入して測定する方法が試行されている。さらに、孔内地下水位を中空ロッドと比抵抗電極を用いて測定する装置も開発されている¹⁰⁾。

以上から、 N 値相当の地盤強度が得られ、土質判定と地下水位の情報から、 F_L 法による液状化判定が可能となる。

2.2 新しい地盤調査方法

2.2.1 PDC（ピエゾドライブコーン）

ピエゾドライブコーン（液状化ボテンシャルサウンディング：Piezo Drive Cone, PDC）¹¹⁾は、中型動的コーン貫入試験（MRS）装置の先端コーンに内蔵した間隙水圧計で打撃貫入時に地盤内で発生する過剰間隙水圧を計測し、換算 N 値とともに土質判定ができる新しい地盤調査方法である。

PDC の測定装置は、図-3 に示す以下の装置から構成される。①先端コーン（過剰間隙水圧を計測する圧力センサ内蔵）、②変位計、③トリガー（打撃貫入開始を検知し、データ収録装置に知らせるセンサ）、④データ収録装置、⑤動的貫入装置（標準仕様は MRS 試験機を利用）。なお、PDC では、変位計で 1 打撃毎に貫入量を測定して 20cm 贯入量に換算することにより、1 打撃毎に N_d 値を算出することができる。換算 N 値を求める方法は 2.1 と同様である。

PDC による連続的な打撃で累積される残留間隙水圧 u_R を有効上載圧 σ_v' で除した累積間隙水圧比 u_R/σ_v' と、同一深度の採取試料の粒度試験による F_c の関係図（経験図）を図-4 に示す。両者の相関性は良いため、PDC による累積間隙水圧比 u_R/σ_v' から式(7)を用いて細粒分含有率 F_c を推定することができる。

$$F_c = 18 \cdot u_R / \sigma_v' \quad (7)$$

次に、地下水位 GWL は累積する残留間隙水圧 u_R の深度分布から推定する。 u_R は地下水位以浅ではゼロから負の値を示し、地下水位以深では正の値を示す。よって、累積間隙水圧 u_R が負から正に転ずる深度を地下水位 GWL とする。その他、調査後の貫入孔を利用して水位計による地下水位の確認も行う。

PDC の液状化判定手順を図-5 に示す。前述のとおり、 N 値、細粒分含有率 F_c 、及び地下水位 GWL は PDC の計測データによって得られる。一方、単位体積重量 γ は PDC では評価できないことから、仮定により有効上載圧 σ_v' の計算を行い、 F_c を算出した時点で最初に仮定した γ の妥当性を確認する。そして、必要に応じて γ を修正し、一連の計算を再度行う。

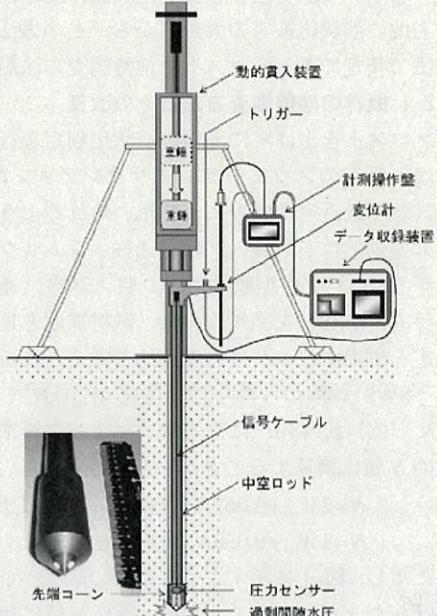


図-3 PDC 試験装置の概要図

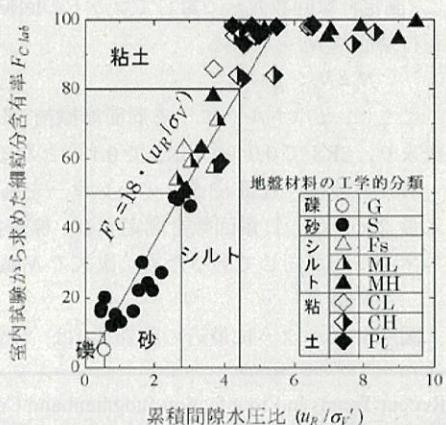


図-4 累積間隙水圧比と細粒分含有率の関係

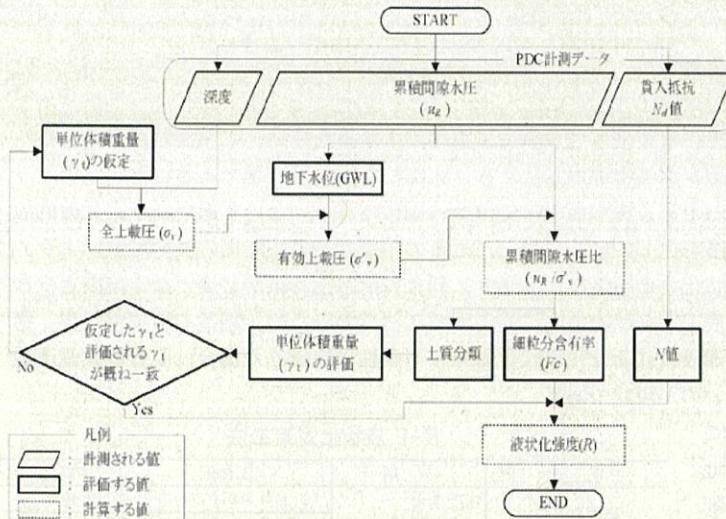


図-5 PDCによる液状化判定手順

また、塑性指数 I_p は液状化判定の対象層を設定する際に用いるが、PDC では I_p を評価することができない。PDC の液状化判定では、液状化判定の対象層の決定は、細粒分含有率 F_c のみで行い、 F_c が 50% 未満の土層を液状化判定の対象層としている。

PDC による液状化判定と従来の標準貫入試験の N 値及び粒度試験による液状化判定の比較例を図-6 に示す。図中の液状化抵抗率 F_L は、道路橋示方書¹¹⁾に準拠して算出したものであり、レベル 2 地震動のタイプ I (プレート境界型の大規模地震動) について求めたものである。

PDC を用いた評価結果は、従来法と概ね良い相関を示している。また、PDC では 1 打撃毎に結果が得られるため、深度方向の地盤の不均一性を詳細に把握することができる。

2.2.2 SDS (スクリュードライバーサウンディング)

スクリュードライバーサウンディング (SDS) 試験¹²⁾は、SWS 試験の全自動装置を改造して、回転トルク、鉛直荷重、貫入量を計測し、ロッドの周面摩擦による補正を行うのと同時に、鉛直荷重とトルクの増加傾向から連続的に土質を判定するものである。主として戸建住宅などの小規模構造物のための地盤調査として利用されている。

SDS 試験では、ロッドの周面摩擦を補正するために以下の試験方法を採っている。

- ① 試験中は常にロッドを一定速度 (25 rpm) で回転させる。
- ② 25cm 貫入まで、鉛直荷重を 7 段階 (0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1 kN) で付与する。
- ③ 各段階で、回転トルク、鉛直荷重、貫入量を計測する。
- ④ 25cm 貫入後に、ロッドを 1cm 引き上げてロッドを回転させ、回転トルクを計測する。この値からその深度でのロッドに作用する周面摩擦応力を推定し、回転トルクと鉛直荷重のそれぞれからロッドによる摩擦抵抗分を差し引き、補正トルク・補正荷重を算定する。

また、試験データを塑性論アナロジーモデルの概念を用いて二次処理をすることによって土質判定（細粒分含有率 F_c の推定）ができるとされている。

図-7 に茨城県神栖市で実施された SDS 試験の結果を示す。図(a)は標準貫入試験結果で、1.2m の埋土層の下に細砂層、シルト層、砂混りシルト層と続く地層である。図(b)に SDS による補正トルク T の深度分布を示す。砂のような ϕ 材料では、鉛直荷重 (図(c)の補正荷重 W) の増加につれて T が大きくなるので、 T はギザギザした形状を示し、粘土やシルトのような c 材料では、鉛直荷重が増えてても T は増加しないため、滑らかな曲線となる。すなわち T の形状から土質判定ができる。また、 T と W による区間エネルギー dE が N 値と相関性が高いとされている。

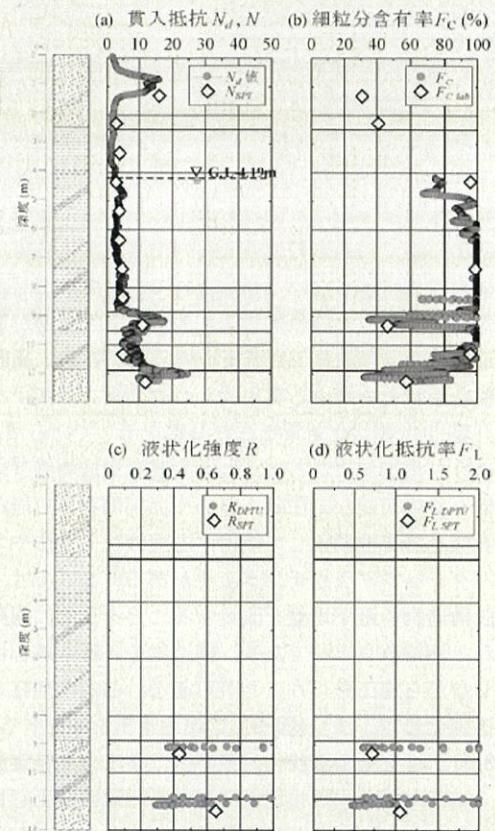


図-6 PDC と従来法の比較例

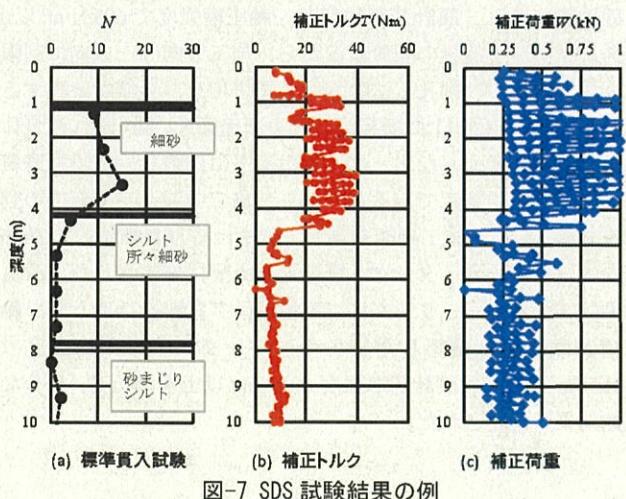


図-7 SDS 試験結果の例

3. 液状化対策工法の事例

3.1 港湾域における事例：既設構造物直下の液状化対策

3.1.1 港湾域の液状化対策の現状

港湾域には、防波堤や護岸等の防潮ライン及びその背後地には倉庫や工場等の大規模な流通・工業施設が多くある。これらの基礎となる地盤は、高度成長に伴い水際線が海域に進出したため、人工的な海面埋立地であることが多い。一般に海面埋立地は、土砂を海中に投入して造成するため、海水面以深では締め固められていない状態であり、比較的液状化し易く、過去の地震においても液状化被害が多く生じている。また、近年の強振動や継続時間の長い地震により、従来は液状化しないと判定されていた区域でも液状化する可能性が高まり、新たに液状化対策が必要となる施設も少なくない。従来の液状化対策工法は、ほとんどが地表面から鉛直方向に施工する工法であるため、地盤の造成完了後、構造物の建設前に施工されていた。このため、施設建設後に新たに液状化対策の必要性に迫られた場合、既存施設直下地盤を液状化対策する実用的方法が少ないのが現状である。

表-1は液状化対策工法の分類を示しているが、このうち港湾域にあるような大型既設構造物直下の地盤へ対応可能な工法は、斜めや曲線削孔が可能な削孔機を施工機械として使用する薬液注入工法やコンパクショングラウチング工法がある。ここでは、既設構造物の直下地盤を改良することを目的に開発された地盤改良工法であり、構造物や各種施設を供用しながら施工を行うことが可能な「曲がり削孔式浸透固化処理工法」(図-8)の適用事例を紹介する。

3.1.2 埋立地の液状化対策事例：ケミカル特定タンク地盤耐震補強工事¹³⁾

本工事は、大規模地震に対する耐震性向上を目的として特定屋外貯蔵タンク3基の基礎地盤の液状化対策を実施したものである。対象のタンクは他のタンクおよび配管に囲まれており、従来の直線的な鉛直および斜削孔では配管や他の施設の一部撤去が必要となるため、施工時にタンクの供用を一時停止する必要があった。このため、曲がり削孔工法による浸透固化処理工法を採用した。表-2に工事概要を示す。

曲がり削孔工法は、削孔位置制御機構と削孔位置検出機構で構成される。削孔位置および方向制御は、先端をテーパー形状とした削孔ビットで、回転掘削(直進時)と押し込み貫入(方向変化時)で方向を制御する。位置検出は、ロッドの曲率を計測して先端の位置を検知する「3D曲がりセンサ」と絶対方位を計測する「超小型ジャイロ」から構成されている(図-9)。

浸透固化処理工法¹⁴⁾は、既設構造物の直下地盤を液状化対策することを目的に開発された地盤改良工法であり、特殊シリカ系の浸透性の良い溶液型恒久薬液を使用する。この薬液を低圧で広範囲($\phi 2\sim 4m$)に地盤に浸透させることで、既設構造物への影響(隆起等の地盤変位)を生じさせずに地盤中の間隙水を薬液に置き換えることで液状化を防止する(図-10)。本工事の改良対象地盤はN値6~9の砂地盤であり、設計基準強度は一軸圧縮強度で $60kN/m^2$ 以上と規定された。

タンク周辺の施設の配置状況から、施工方向は一方向に制限されたが、曲がり削孔工法と斜削孔を併用し、全域を改良することができた。図-11に削孔及び改良断面図を、図-12に改良体配置平面図を示す。なお、本工事は過去に例のない危険物貯蔵タンクの供用中施工であることから、施工中のタンク変位の動態観測を行い、全施工期間を通して変位は管理目標値の±2mm以内にほぼ収まり、タンクへ影響を与えずに施工された。改良効果は3ヶ所のボーリングにて不搅乱コア試料を採取し、一軸圧縮試験により確認した。各ボーリングコアの平均強度は $100kN/m^2$ となり、設計基準強度 $60kN/m^2$ 以上を満たし、十分な改良効果が確認された。

表-1 液状化対策工法

工 法	分 類	工法例	作業方向
締固め工法	密度増大 (ϕ の増加)	サンドコンパクションパイ コンパクショングラウチン	鉛直・斜・曲線
間隙水圧消散工法	間隙水圧上昇抑制	グラベルドレーン	鉛直
せん断変形抑制工法	間隙水圧遮断	シートパイル	鉛直
地下水位低下工法	飽和度低下 (u の低減)	ディープウェル	鉛直
空気注入不飽和化工法		マイクロバブル水注入	鉛直・斜
固化処理工法	固 結 (c の増加)	深層混合処理 高压噴射攪拌	鉛直
薬液注入工法		浸透固化処理	鉛直・斜・曲線

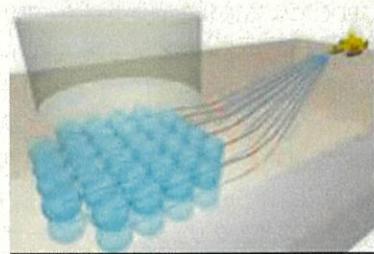


図-8 曲がり削孔式浸透固化処理工法の概念図

表-2 工事概要

対 象 タンク	タンク内容	タールほか
	公称容量	1,400 kL
	タンク内径	14.0 m
	タンク数	3 基
削孔本数	28 本	
削孔延長	1,252 m	
曲率×曲線数	30 mRx1ヶ所	
改良深度	GL-3.3m ~ -8.3m	
対象土量	4,960 m ³	
使用薬液	エコシリカII	



図-9 削孔位置制御および検出機構

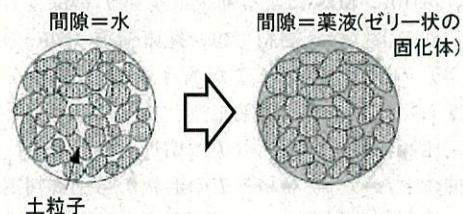


図-10 浸透固化処理工法改良概念図

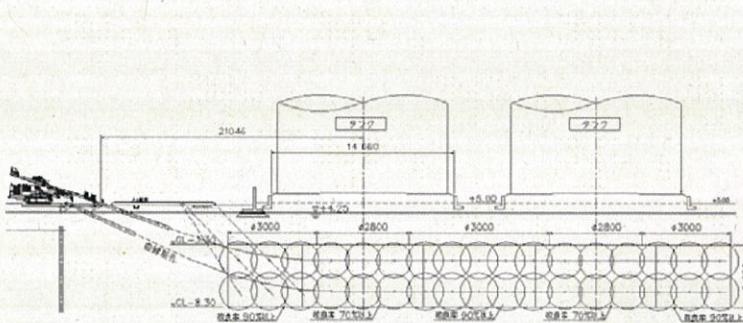


図-11 削孔および改良断面図

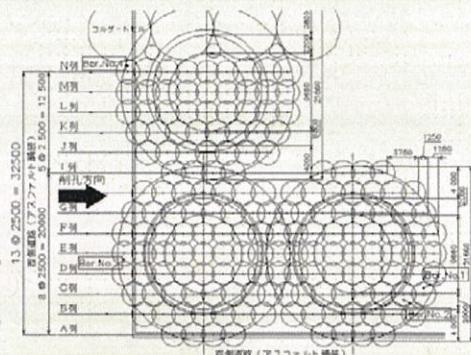


図-12 改良体配置平面図

3.2 宅地地盤における事例

ここでは、まず宅地地盤の液状化対策について整理し、次に近年、既設住宅の経済的な液状化対策方法として注目されている空気による液状化対策（エアデス工法およびマイクロバブル水注入工法）について紹介する。

3.2.1 宅地地盤の液状化対策の現状¹⁵⁾

宅地地盤の液状化対策としては、新築住宅を対象とした対策と既設住宅を対象とした対策とに分けられる。新築住宅を対象とした対策は、一般建築物に実績がある締固め工法、固化工法、変形抑制工法、排水促進工法などの液状化を防止する対策と住宅が軽量であるがゆえに適用可能な液状化を許容した対策がある。また、既設住宅を対象とした対策は、施工スペースが限られることや対策費用が高額であるために実績のある工法は多くないが、①地下水位低下工法、②変形抑制工法などが挙げられる。表-4にこれらの液状化対策工法の概要と留意点をまとめた。

3.2.2 空気による液状化対策^{16),17),18)}

既設住宅を対象とする液状化対策には、これまで住宅が建ったままの状態で容易に講じることのできる液状化対策技術がなかつたが、比較的容易、安価かつ環境にやさしい工法として地盤中に空気を注入して地盤の液状化を抑制する方法が注目されている。この工法の原理は、図-13に示すように圧力を受けると縮む性質を持つ空気がクッションの役割をすることにより地震動による水圧の上昇を抑え、液状化の発生を抑制するものである。

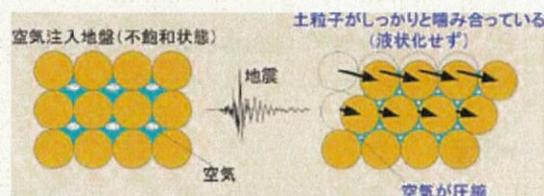


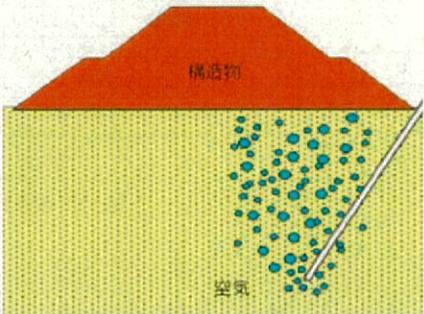
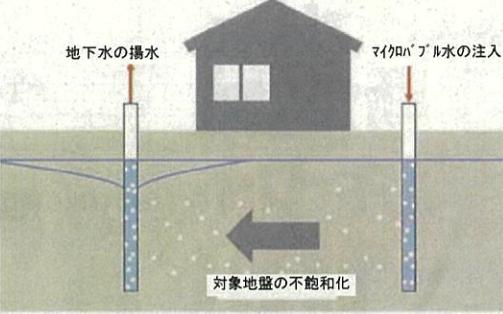
図-13 空気による液状化対策の原理

現在、研究されている工法としては、エアデス工法^{16),17)}、マイクロバブル水注入工法^{16),18)}がある。表-5にこれらの工法の概要をまとめた。これらの工法の特徴は、①他の液状化対策工法に比べて安価である、②施工に伴う環境付加を軽減できる、③狭隘なスペースでも施工可能である、ことが挙げられる。両工法ともフィールドでの実証実験が実施され、施工方法や効果確認が行われているが、一方で、実用化に向けての課題としては、①地盤の浅いところでは効果が薄い、②注入した空気の持続性の効果、③注入した空気の長期的なメンテナンス方法などがある。これらの課題をクリアにし、早期に設計法と施工法が確立されることが望まれる。

表-4 宅地地盤の液状化対策方法

		工 法	工法概要
新築住宅 を対象と する対策	液状化防止 対策	締固め工法	砂・碎石・低流動モルタルを杭状に圧入する
		変形抑制工法	建物直下にソイルセメント地中壁をセルまたは格子状に設け、地震時には地中壁の剛性によって内部地盤のせん断変形を抑制し、液状化を防止する。
		排水促進工法	水抜き用のドレン柱を透水性の高い碎石で築造し、地震時の過剰間隙水圧を抑制する。
		固化工法	機械式攪拌や浸透注入により液状化の可能性のある全層を固化するものである。
既設住宅 を対象と する対策	液状化を許 容した対策	べた基礎	基礎剛性を高めて不同沈下を抑制することを目的とした対策。液状化しても地表面への影響が小さいと判定されれば対応できる。
		表層地盤改良	液状化層上部を盤状改良することにより液状化層厚を減少させ、かつ改良層の剛性や荷重分散によって不同沈下量を抑制する。
		柱状地盤改良	改良体の中間部の土層が液状化しても、その下部層の摩擦抵抗や先端支持力により鉛直支持力を確保し、建物の沈下を抑制する。
		小口径杭による地盤 補強	小口径杭により中間部の土層が液状化しても、その下部層の摩擦抵抗や先端支持力により鉛直支持力を確保し、建物の沈下を抑制する。
	地下水位低下工法	地下水位低下工法	地下水位を液状化層下端または中間まで低下させることにより、液状化防止あるいは液状化層の厚さを減少させて建物沈下を抑制する。
		変形抑制工法	変形抑制工法の概要は、建物外周部地盤を鋼矢板や固化壁で囲うことによって、液状化防止（液状化程度の低減）または液状化による地盤の側方流動を防止し、有害な沈下を抑制する。

表-5 空気による液状化対策工法の概要

	エアデス工法 ¹⁷⁾	マイクロバブル水注入工法 ¹⁸⁾
空気注入方法	ボーリングで削孔した地盤に注入管を入れて、汎用のコンプレッサーから空気を注入する。	加圧式マイクロバブルジェネレーターで生成したマイクロバブル水を地盤に流して地下水と置き換えて、地盤に気泡を含ませる。
注入のイメージ		
空気注入のモニタリング	空気と水の電気電導性の違いを利用して、電機抵抗の変化を測定することにより、空気の注入度合いを把握	挿入式 TDR 土壌水計により飽和度を計測

4. おわりに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、港湾域や戸建住宅が液状化によって大きな被害を受けた。特にこれまで、戸建住宅では地盤調査や液状化対策に多くの費用を要するために、液状化に対する十分な対策を実施しないまま計画を進めることができたが、今回の被災により宅地地盤における液状化判定のための地盤調査方法や液状化対策の実用化に向けた研究開発が産官学を合わせて精力的に行われている。新築住宅については既往の液状化対策技術で十分対応可能と思われるが、既設住宅については実用化に多くの課題があり、早急な対応が求められている。

なお、本論文は地下水地盤環境に関する研究協議会に設けられた地盤環境保全対策研究委員会のワーキンググループの活動成果としてとりまとめたものである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、pp.133-143、2012
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.61-65、2001.
- 3) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針、pp.88-92、2008.
- 4) 稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について、土と基礎、Vol.8、No.1、pp.13～18、1960.
- 5) 鈴木達也・大島昭彦・平田茂良・深井公・下平祐司・金哲鎬：スウェーデン式サウンディング試験結果と N 値・ q_u 値との相関性の再検討、第48回地盤工学研究発表会、No. 159、pp.317-348、2013.
- 6) 三田大貴・大島昭彦・平田拓也・山田卓・平田茂良・柴田芳彦：大型動的コーン貫入試験結果と N 値・ q_u 値との相関性の検討、第48回地盤工学研究発表会、No. 181、pp.361-362、2013.
- 7) 大島昭彦：浦安一斉試験における各種動的サウンディング試験の比較、浦安地盤調査一斉試験報告会論文集、pp.65-70、2012.
- 8) 菅原紀明・鈴木勝久・菅原章治：小型動的貫入試験機の開発とその利用、全地連「技術フォーラム'97」講演集、pp.461-464、1997.
- 9) 平田拓也・大島昭彦・平田茂良・深井公：大型・中型動的コーン貫入試験【SRS・MRS】の比較例（第2報）、土木学会第68回年次学術講演会、III-229、2013.
- 10) 小川正宏・金哲鎬・大島昭彦・平田茂良・市村仁志・深井公・諫訪靖二：滋賀県守山市における地盤調査一斉試験（その12：地下水測定、試料採取）、第48回地盤工学研究発表会、No. 97、pp.193-194、2013.
- 11) 澤田俊一・塙本良道・石原研而：間隙水圧測定を伴う動的貫入試験方法—その6 液状化強度—、第50回地盤工学シンポジウム、pp.1-6、2005.
- 12) 大和真一・末政直晃・田中剛：スウェーデン式サウンディング試験による地盤判定の試み、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.455-456、2007.
- 13) 林健太郎・植田勝紀・大原修・猪足昇：浸透固化処理工法の施工事例、基礎工、vol.34、No.4、pp.49-51、2006.
- 14) 浸透固化処理工法技術マニュアル（2010年版）、(財)沿岸技術研究センター、2010.6
- 15) 真島正人：小規模建築物の液状化対策、基礎工、Vol.40、No.10、pp.26-29、2012.
- 16) 日経コンストラクション 2012.6.15 : TOPICS 新技術 空気で防ぐ地盤の液状化、pp.58-61、2012.
- 17) 岡村未対：新しい液状化対策技術—空気注入不飽和工法（Air-Des工法）—、地盤工学会誌、Vol.60、No.5、pp.12-15、2012.
- 18) 国土交通省国土技術政策総合研究所 都市研究部：宅地地盤液状化対策のためのマイクロバブル水注入工法による地盤内注入空気の持続性計測 報告書、2011.