

各論 小規模建築物の液状化対策

真島 正人*

1. はじめに

東日本大震災以降、宅地の液状化危険度判定のための地盤調査法や液状化対策に関する研究開発が産官学をあげて精力的に行なわれている。既存建物を対象とした液状化対策の実用化までにはしばらく時間を要すると思われるが、本書では地震被害分析結果、一般建築物への適用実績、最近の研究開発動向などを踏まえ、新築住宅・既存住宅それぞれの液状化対策として実現可能性のある工法の概要と、住宅の特殊事情（施工環境・効果・工事費など）に配慮した適用上の留意点について述べる。

2. 新築建物を対象とした液状化対策

新築建物の液状化対策には、一般建築物と同様な抜本的対策と、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とがある^{1)~5)}。

2.1 抜本的な液状化対策

一般建築物に実績のある方法として、図-1に示す締固め工法、固化工法、変形抑止工法、排水促進工法などの液状化防止対策と杭基礎がある。

① 締固め工法：砂・碎石・低流動モルタルを杭状に圧入して地盤を締固めて液状化を防止するものである。建築・土木ともに実績多く、常時荷重に対する支持力増加や沈下対策にもなり、設計法も整備されている。最近では、木杭などを密に打設することにより、締固め効果と鉛直支持力増加の双方を期待する工法も開発中である。

〈留意点〉液状化防止には原地盤に対して10%前後の圧入率が必要になり、施工時の地盤変位は避けられない。よって、施工順序の工夫や外周部に変位吸収孔を設けるなどの対応が必要となる。また、施工機械を反力として杭状体を圧入するため比較的大型の施工機械が必要であるが、住宅用として普及させるには小口径の杭体を効率よく構築できる小型施工機の開発が必要である。

② 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ものである。実績も多く、常時荷重に対する支持力増加や沈下対策にもなる。特に、住宅では液状化層の

直下に支持層が存在しない場合や防振対策としても有効である。

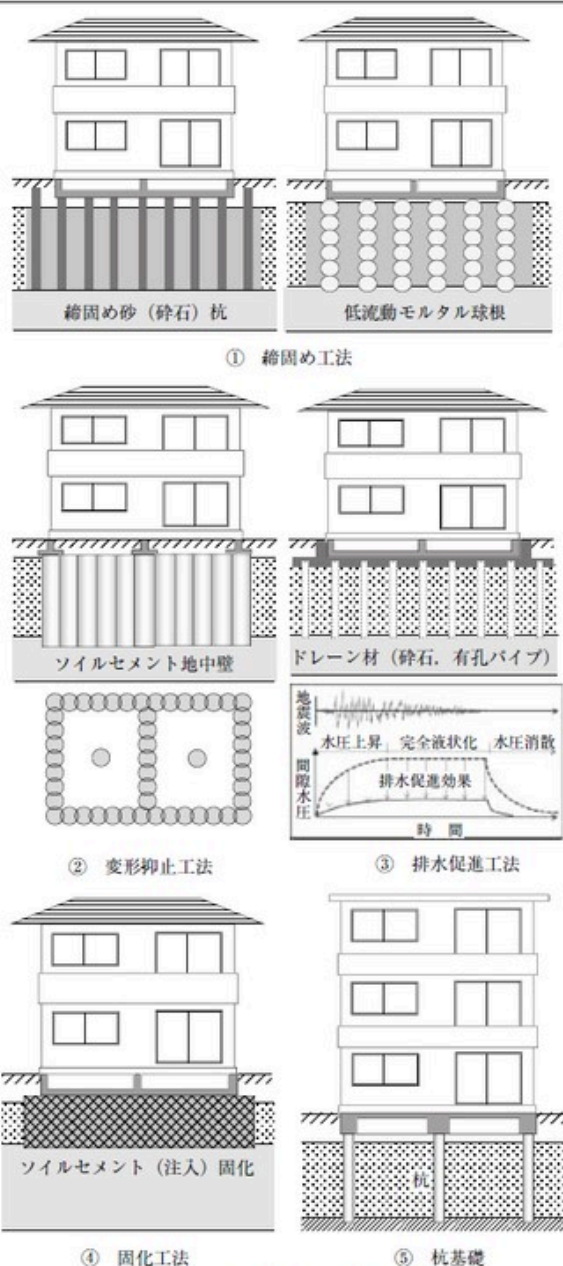


図-1 抜本的な液状化対策

〈留意点〉 設計には高度な技術を要するが、日本建築学会地盤改良設計指針案²⁾が参考になる。間隔が広いと効果が低く、改良体を確実にラップさせることが難しいほか、敷地境界や擁壁近傍では施工時の地盤変位に留意する必要がある。また、径600mm以下の単軸攪拌機では改良体がラップしない危険性があるので、多軸攪拌、連続攪拌方式あるいは噴射攪拌方式を採用するのが望ましい。

- ③ 排水促進工法：地盤中に高透水性のドレーン材（有孔パイプ・砕石杭）を密に打設し、地震時に上昇しようとする間隙水圧をドレーン材によって逸早く消散させて水圧上昇を抑制するものである。締固め工法ほど大型施工機械を必要としないこと、振動や地盤変位が小さいので市街地あるいは既存構造物近傍での液状化対策として、兵庫県南部地震までの実績は多い。

〈留意点〉 設計には数多くの地盤データ（ドレーン材を含む）が必要であり、ドレーン間隔がこれらデータによって大きく変化する。また、従来から粘り強さに欠けるとの指摘があり、大地震への対応が難しい。さらに、細粒分を多く含む砂質土には不適、施工範囲が狭いと周辺地盤の水圧上昇の影響を受ける、排水性能を長期間維持するには材料選定・施工法に精緻さが必要など、適用上の課題も多い。一方、排水を伴うため地盤沈下は避けられないので、適用に際しては締固め工法と併用するなどの対応が必要と思われる。

- ④ 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。液状化層が浅く、薄い場合には経済的かつ有効な方法である。

〈留意点〉 地下水位以深の液状化層を固化するわけで

あるから、バックフォーによる混合攪拌方式では地下水を下げた状態で施工しない限り、均一に混合することが難しい。特殊な施工機械を使用する場合を除き、適用深度は最大でも2m程度と思われる。一方、浸透注入では細粒分を多く含む液状化層には、効果が低い、改良効果の確認が難しい、および周辺地盤への固化材の流失などの課題があり、戸建住宅での実績はほとんどない。

- ⑤ 杭基礎：中間部の砂層が液状化しても杭材の水平抵抗と鉛直支持力によって建物沈下を抑止するものである。杭基礎を採用するのは住宅の中でも比較的重いRC系壁構造の建物や独立基礎で設計される鉄骨系ラーメン構造の建物と予想される。一般の建物と同様、建築基礎設計指針に準じ、液状化を考慮して杭の耐震設計を行なう。

〈留意点〉 柱状改良や小口径鋼管による地盤補強と異なっており杭頭部と基礎スラブを一体化させるため、基礎が大型化する。また、液状化後の地盤沈下によって基礎下に空隙ができるので、設備配管のフレキシブル化、空隙への充填処理が必要となる。

2.2 液状化を許容した対策

地耐力増加対策として採用されたべた基礎や地盤補強を行なった住宅でも、周辺地盤は液状化によって沈下したものの、建物被害は軽微であったとの報告も多い。このような経験を踏まえると、液状化層厚や液状化危険度に応じて適切な工法選定と設計を行えば、抜本的対策でなくても小規模建物であれば液状化対策として有効と思われる。図-2は、住宅の液状化対策として適用可能な基礎・地盤補強方法を示したものである。

- ① 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。液状化層が薄く、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。〈留意点〉 沈下は避けられないので、液状化が生じた場合の地盤沈下量や建物のめり込み沈下量を予測し、影響の程度を十分検討しておく必要がある。図-3に該当する条件⁶⁾や同図に当てはまらなくても D_0 や P_L が5を上回る場合、傾斜角3/1,000以上が予想される場合には、より有効な対策を採用すべきである。あるいは、有害な不同沈下が生じた場合の対策として、できる限り低コストで沈下修正可能な基礎や仕組みを採用しておく必要がある。

- ② 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建物に有害となる不同沈下量を抑制するものである。液状化層として残置される非改良層が薄く、液状化しても地表面への影響小と判定されれば対応できる。非改良層が厚い場合でも広いエリアを改良すれば、不同沈下の抑制には有効と思われる。最近では、柱状改良と併用する工法も開発されている。

〈留意点〉 べた基礎と同様、沈下は避けられないので、液状化が生じた場合の沈下量を予測し、影響の程度を十分検討しておく必要がある。地表面への影響を非液



状化層 H_1 と液状化層 H_2 の関係より判定する場合³⁾、 H_1 層が広く分布していることを想定しているのに対して、単一建物では改良範囲が局部的であることに十分注意する必要がある。液状化層が厚い場合には単一建物への適用は避けるべきであるが、適用する場合には建物外周部の改良範囲を広く取る、または、不同沈下の発生を想定して簡便に修復可能な対応策を考慮しておく必要がある。

- ③ 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、建物沈下を抑止するものである。建物が軽量であることや液状化後は建物から基礎への慣性力がきわめて小さいことを前提として、水平力に対する検討は液状化前の水平地盤反力を用いで行ない、液状化後は鉛直支持性能のみ確保することを目的としたものである。

〈留意点〉 柱状地盤改良を行なった建物でも、 N 値5～10の砂層で改良体を支持させていた建物では液状化による沈下被害が報告されているので、改良体を非液状化層に定着させる必要がある。液状化層に留める場合には、①、②と同様な沈下に対する検討が不可欠である。一方、改良体は靱性に乏しいので液状化層が厚い地盤、地表面や液状化層が傾斜している地盤など、液状化により大きな地盤変状が予想される場合には、改良体に鋼製芯材を挿入して靱性を高める必要がある。

- ④ 小口径杭による地盤補強：③と同様な考え方で設計するものである。杭基礎との違いは基礎と杭頭を一体化せず、杭体により地盤を補強するという考え方に基づいている。杭体を非排土で密に打設すれば、ある程度の締固め効果も期待できる。

〈留意点〉 通常、杭状地盤補強では基礎根入れ部の受働抵抗や基礎スラブ底面の摩擦抵抗を考慮して、水平力に対する検討は省略されるが、液状化により大きな地盤変状が予想される場合には、水平力に対する検討や杭頭を基礎にのみ込ませるなどの対策が不可欠であり、靱性の乏しい無筋の小口径モルタル杭やコンクリート杭も使用を避けるべきである。また、液状化後の地盤沈下によって基礎下に空隙ができるので、その対策が必要となる。

2.3 沈下修復を前提とした対策

中地震に対しては液状化被害を軽微に抑えるための対策を講じなければならないが、大地震までを想定して液状化対策を行なうとなると、地盤条件によっては工事費が負担限度額を上回ることも少なくない。中地震程度までを前記方法で対策し、それ以上の地震に対しては構造耐力の低下や重大な機能障害が生じない程度の沈下を許容しつつ、液状化によって不同沈下が生じた場合には、簡便かつ低コストで沈下修復可能な以下①～③の方法を採用することも有効と思われる。

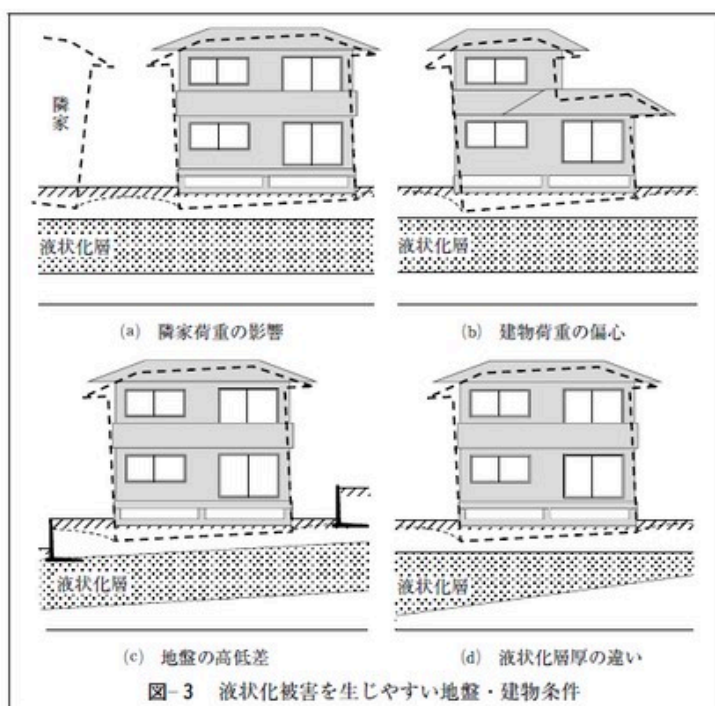


図-3 液状化被害を生じやすい地盤・建物条件

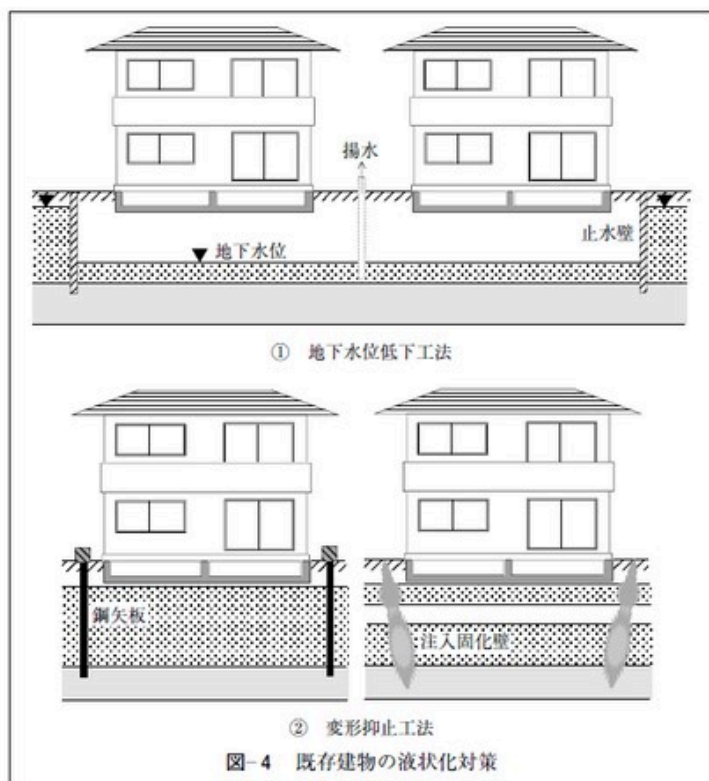
- ① 表層改良や柱状改良を行ない、不同沈下が生じた場合には改良部を反力として建物を修復する。
 - ② 二重構造の基礎とし、不同沈下が生じた場合には下部の基礎スラブを反力として建物を修復する。
 - ③ 基礎と建物とを簡単に切離せる構造とし、不同沈下が生じた場合には基礎を反力として建物を修復する。
- 〈留意点〉 液状化により建物本体の構造耐力の低下や雨漏りなど機能障害を起こすような過大な不同沈下が生じた場合には、沈下修復しても住宅としての性能を回復できない。敷地に高低差がある場合や液状化層厚が異なる場合など、過大な不同沈下が予想される場合には採用は避けるべきである。また、上記②、③を採用する場合でも、表層地盤改良を行なって不同沈下量を極力抑制するとともに、修復時の反力を確保するのが望ましい。

3. 既存建物を対象とした液状化対策

既存建物では施工スペースを十分に確保することができないことや費用のわりには対策に高額を要するため、実績のある工法は多くはない。

- ① 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ものである。地下水位低下の方法には、建物の外周部に不透水まで達する止水壁を設けて内部地盤の地下水を汲上げる(図-4①)か、外周部に深い溝を設けて自然排水させる方法がある。単一建物への適用実績はないが、広いエリアの地下水位を低下させる方法は数例の実例がある。

〈留意点〉 地下水位が低下すると有効応力の増加により地盤沈下は避けられない。埋立地盤や沖積地盤など



に適用する場合には、圧密の有無や沈下量を予測しておくことが重要である。特に広いエリアの地下水位を低下させる場合には、地盤の不均一性、地中埋設物、地盤改良の有無の影響により沈下量を正確に予測することは難しいので、余裕を持った計画が必要である。液状化を防止できても沈下障害が発生することになれば、莫大な補償を迫られることになる。このリスクを軽減するため、地下水位を液状化層に留める場合には液状化により地盤沈下が生じるので、これに対する配慮も必要である。地下水位低下工法では、揚水設備の維持管理、地下水位や建物沈下量（傾斜角）のモニタリングなど継続的なシステム構築が不可欠である。

- ② 変形抑止工法：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ものである（図-4②）。施工に合わせて、建物直下の液状化層を注入固化すればより効果的である。最近では、道路下部に地中壁を設けて街区全体を対策する工法の研究開発も進められている。
- 〈留意点〉 鋼矢板を建物外周地盤に打設する方法は敷地スペース、地中の設備配管、コストの面で課題も多い。狭いスペースで打設可能な施工機械の開発、低コスト化が実用化には不可欠である。注入工法では出来形確認、周辺地盤への注入液の流失、近隣建物への影響など、実用化に向けて解決すべき課題も多い。

- ③ 液状化で被災した建物の再液状化対策：液状化によって沈下障害を生じた建物の修復には、ポイントジャッキ・耐圧版・鋼管圧入・注入工法などが採用される。このうち、鋼管圧入工法は液状化の可能性のない硬質層まで鋼管を圧入すれば再液状化対策になる。注入工法でも、リフトアップ用の注入に合わせて浸透性の高い固化材を液状化層に注入したり、低流動モルタルにより地盤を締め固めながらリフトアップすれば再液状化対策になる。

〈留意点〉 鋼管圧入工法は新築建物の場合とは異なり、基礎下の狭い空間で長さ70～80cmの鋼管を多数接続しながら圧入しなければならない。通常は溶接継手を採用するが、溶接部の品質管理が確実とはいえない。液状化時には大きな水平変位を生じることになるので、品質が確実な機械式継手を採用すべきと思われる。注入工法では、建物の沈下修復には割裂注入、液状化層の固化には浸透注入を行なう必要がある（注入材が異なる）。沈下修復の実績は多いものの、液状化対策と併用する場合には、注入手順、施工改良効果の確認、注入材の敷地外への流失、近接建物への影響などの課題がある。

4. おわりに

小規模建築物に適用可能な液状化対策と採用に当たっての留意点や課題について述べた。新築建物については地盤調査の充実や施工機械の小型化などにより既往の液状化対策技術で十分対応可能と思われるが、既存建物については実用化に当り解決すべき課題も多く早急な対応が望まれている。一方、居住者に液状化の危険性や対策の必要性を納得させるには、技術の向上と法制度の整備が両輪となる。また、液状化対策を実施するからには、設計者は対策効果に対する説明責任と結果責任が発生する。予算の都合上、液状化の発生あるいは沈下を許容する対策を選択した場合を含め、今後は想定地震力と予想される現象（不同沈下や基礎下空隙など）について、居住者にわかりやすく説明することが不可欠である。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：液状化対策工法，2004，7
- 2) 日本建築学会編：建築基礎のための地盤改良設計指針案，2006，11。
- 3) 日本建築学会編：小規模建築物基礎設計指針，2008，2。
- 4) 住宅の液状化対策：日経BP社，2011，12。
- 5) 戸建住宅基礎の液状化対策＋修復対策工法：建築技術，2012，2。
- 6) 河野，渡辺他：東日本大震災による住宅被害のアンケート調査—その1，2，2012年度日本建築学会大会，2012，9。