

第2章 液状化対策工法の内容

2.1 液状化対策工法の調査方法

東北地方太平洋沖地震以降、建物の液状化対策への関心が高まっており、新たな液状化対策工法の開発も考えられる。

本章では、液状化対策工法の実施状況を調査するにあたり、種々の液状化対策工法の特徴をまとめるとともに、施工方法や内容を踏まえて液状化対策工法を体系的に整理した。調査方法は液状化対策に関する種々の文献調査^{2.1) ~2.13)}を基本とし、必要に応じて関連する企業へ施工実態等に関するヒアリング等で記載内容を補った。最新の液状化対策工法も把握できるよう、東北地方太平洋沖地震後の文献も調査対象に含めた。

2.2 液状化対策工法の体系化および各工法の特徴

各文献における液状化対策の分類方法を参考にすると、液状化対策の考え方は表 2.1 に示す 3 つに分類される。1 つ目の「地盤の液状化の抑制」(2.2.1 節参照) および 2 つ目の「建物の傾斜・沈下の軽減」(2.2.2 節参照) は地震被害を受ける前に対策する工法である。3 つ目の「建物の傾斜・沈下の修復」(2.2.3 節参照) は、液状化被害を受けた後に修復する工法である。液状化被害の防止・軽減という液状化対策の趣旨とは異なるが、特に戸建て住宅において特徴的な工法であるため、今回の調査では対策のひとつとして整理した。

2.2.1～2.2.3 節に各分類の液状化対策工法について記載する。

表 2.1 液状化対策工法の分類

液状化対策の考え方	対策の方法	液状化対策工法
地盤の液状化の抑制 (2.2.1 節)	密度の増加	密度増大工法
	地盤の不飽和化	空気注入工法
	間隙水圧の消散	ドレーン工法
	地盤変形の抑制	囲い込み工法
	有効応力の増加	地下水低下工法 盛土工法
建物の傾斜・沈下の軽減 (2.2.2 節)	支持力の確保・増強	杭工法
		深層混合処理工法
		浅層混合処理工法
		注入工法
		置換工法
	基礎剛性の増強	基礎形式をべた基礎とする方法
	傾斜の抑制	浮き基礎工法
浮き上がり防止用杭等の活用		
水圧上昇の抑止工法		
建物の傾斜・沈下の修復 (2.2.3 節)	傾斜・沈下を修復	ポイントジャッキ工法
		耐圧版工法
		鋼管圧入工法
		注入工法
		傾斜修正機構を事前に組み込む方法

2.2.1 地盤の液状化の抑制

地盤の液状化の抑制とは、建物下部の地盤あるいは敷地地盤の液状化発生そのものを抑える方法である。当該工法については、地盤の液状化発生を抑制するための原理、具体的には表 2.1 のとおり、密度の増加、地盤の不飽和化、間隙水圧の消散、せん断変形の抑制、有効応力の増加に分類した。

(1) 密度増大工法

密度増大工法とは、地盤を締め固めることにより地盤の密度を増大させ液状化の発生を抑制する工法である。締め固める方法としては、表 2.2 に示すとおり、砂やモルタルを地盤に注入する方法や丸太等の木材といった柱状の部材を地面に圧入する方法がある。土木施設で施工実績が多い。大型機械による施工が基本となるが、最近では、住宅等、建築分野向けの工法が開発されている。また、施工管理および品質管理方法については概ね確立しているようである。ただし、木杭を使用し、これに支持力性能を期待する工法の場合は、建築基準法における諸規程への適合性確認が必要となる。

なお、新築建物への個別対応が基本となり、施工後の維持管理は基本的には不要である。改良ピッチを密にすることにより、中規模地震や大規模地震にも対応出来る可能性がある。

表 2.2 密度増大工法における使用材料等による施工方法の違い

主な使用材料、 施工機材	施工概要	既存建物への 適用可能性
砂、碎石、リサイクル材	砂等を地盤中に静的に回転圧入することにより締め固める。サンドコンパクションパイル工法と呼ばれる。ケーシングパイプを用いて改良材の打ち戻しを行う方法や、柱状改良体はコンクリートにより築造し建物荷重等を負担する方法もある。	適用不可
流動化砂	小型施工機により静的に締め固める。サンドコンパクションパイル工法のひとつとして分類されるが、斜め施工により既存建物にも適用できる可能性がある。	斜め施工ができるため適用できる可能性がある。
モルタル	地盤中にスクリーロッドを回転圧入し、引き上げ時にドライモルタルを投入し改良体を築造する。静的締め固め工法と呼ばれる。	適用不可
木材	小型施工機により丸太を地盤中に圧入させる。静的圧入工法と呼ばれる。	適用不可
鋼製棒	鋼製の棒を地中に打ち込み、振動や衝撃を加えることにより地盤を締め固める。排水と併用することもある。ロッドコンパクション工法と呼ばれる。	適用不可
振動機	棒状の振動機を水の噴射と振動によって貫入し、水締めと振動により砂地盤を締め固めるとともに、生じた空隙に砂利等を充填して地盤を改良する。パイプフロートション工法と呼ばれる。	適用不可
重錘	鋼やコンクリート製の重錘をクレーンを用いて高所から落下させ地盤を締め固める。重錘落下締め固め工法と呼ばれる。	適用不可

(2) 空気注入工法

空気注入工法とは、表 2.3 に示すような地盤内に微細な気泡を含んだ水を注入することにより、地盤を不飽和化させる工法である。地盤が不飽和状態になると地震時の間隙水圧の上昇が抑制され、液状化が抑制される。文献調査では実物件の施工事例は見つけられなかったが、水や空気を使用し、既存建物にも対応出来る可能性があり、近年開発が進んでいる。実用化されれば、建築分野における適用性は高いと考えられる。ただし、施工後に地盤中における水や空気の溶存状態を確認する必要がある。

表 2.3 空気注入工法における使用材料等による施工方法の違い

主な使用材料、 施工機材	施工概要	既存建物への 適用可能性
マイクロバブル水	直径が数マイクロメートルの微細気泡を含んだ水を地盤中に注入することにより、地盤を不飽和化させ、液状化による被害を抑制する。	可能
空気	地盤中に空気を注入することにより、地盤を不飽和化させ、液状化による被害を抑制する。	可能

(3) ドレーン工法

液状化は地震の揺れにより地盤中の水圧（間隙水圧）が上昇することで発生する。ドレーン工法は、表 2.4 に示すようなドレーン材を地盤に配置することによって、水圧の上昇を抑制する工法である。土木分野において実績が多い工法である。密度増大工法や囲い込み工法等と併用することで液状化抑止効果が増す等の幅広い使い方が期待できる。

建築分野において使用するためには、施工管理方法および設計方法（改良ピッチの設定方法等）を確立させる必要があると考えられる。

表 2.4 ドレーン工法における使用材料等による施工方法の違い

主な使用材料、 施工機材	施工概要	既存建物への 適用可能性
砕石	砕石を柱状に築造し、その周辺地盤の過剰間隙水圧の上昇を抑制する。	適用不可
人工ドレーン材	通水方向にスパイラルパイプ状の空洞部を有した排水材により水圧消散効果を期待する。	外周部に設置することで効果が期待出来る可能性がある。

(4) 囲い込み工法

囲い込み工法とは、表 2.5 に示すような柱状の地盤改良体や鋼製の板等で地盤を格子状等の形状で囲って地盤変形を抑制することで地盤の液状化を防ぐ工法である。施工された建物が兵庫県南部地震を経験する等、建築分野においては比較的古くから実績がある。大型施設への採用が主であったが、最近では、小型機械による施工技術が開発され、戸建て

住宅等への適用性も広がりつつある。また、小型の機械を使ったスラリーの高圧噴射による工法は既存建物の下部地盤や既存建物間の敷地境界部分における施工が可能であり建築分野における適用性が高い。

表 2.5 囲い込み工法における使用材料等による施工方法の違い

主な使用材料、 施工機材	施工概要	既存建物への 適用可能性
セメント	柱状地盤改良体を格子状に設置することで、地盤のせん断変形を抑制し、液状化の発生を防ぐ。	可能
	セメント系固化剤を水と混ぜたスラリーと呼ばれる泥状物と圧縮空気を専用ロッドにより高圧噴射し原地盤と攪拌し、柱状あるいは格子状等の地盤改良体を築造する。	適用できる可能性がある。
鋼矢板	薄い鋼矢板を地盤中に圧入し、壁状に囲い込む。	適用不可

(5) 地下水低下工法

地下水位低下工法とは、地下水位を低下させることで地盤内の水圧を低下、すなわち地盤の有効応力を増加させることにより地盤の液状化発生を抑制する工法である。既存の住宅地を広域的に液状化対策することが可能である。排水ポンプ等を用いて地下水位の高さを強制的に低下させ、地表面下の地盤を非液状化層とするディープウェル工法と呼ばれる工法があり、既存住宅にも適用可能である。

一方で、この工法には周辺施設への沈下障害や、維持管理費等の課題がある。また、実施にあたっては、当該地域住民や自治体との合意形成が必要であり、検討段階で採用が見送られる場合もある。

(6) 盛土工法

盛土工法とは、盛土の自重により地盤を加圧させ地表面地盤の有効応力を増加させることで地盤の液状化発生を抑制する工法である。建物を建設するために地盤を形成する工法であり、既存建物への適用は出来ない。種々の地震被害報告書において、多くの戸建て住宅にて採用されているとの記録があるが、液状化対策として盛土されていたかどうかは不明である。

2.2.2 建物の傾斜・沈下の軽減

建物の傾斜・沈下の軽減とは、地盤の液状化は許容するが、建物の支持力を確保することで地盤の液状化により生じる建物の傾斜・沈下の被害の軽減を図る方法である。

(1) 杭工法

杭工法とは、地盤に表 2.6 に示すような杭上の部材を埋設して建物を支える支持力を確保することで傾斜や沈下を抑制する工法である。杭工法は、液状化対策というよりも建物の支持力を確保するために採用される場合が多い。建築分野における施工実績が多く、建築基準法への適合性が確認された材料が使用されることから施工管理が確立されている。

新築建物への個別対応が基本となり、施工後の維持管理は不要である。杭本数や断面諸元を考慮することにより、中規模地震や大規模地震にも対応出来る可能性がある。

なお、杭先端以深に液状化層を残さない場合（いわゆる支持杭とする場合）において建物被害はほとんど報告されていないが、杭先端部が液状化層あるいは杭先端以深に液状化層が存在する場合（いわゆる摩擦杭とする場合）には、建物が液状化被害を受ける可能性がある。杭工法は地盤の液状化の発生を抑制できないため、杭により建物の支持力を確保した場合であっても地盤の液状化により建物基礎周りが沈下し段差が発生する場合もある。

表 2.6 杭工法における使用材料等による施工方法の違い

主な使用材料、 施工機材	施工概要	既存建物への 適用可能性
鋼管	羽根付き杭を回転貫入により地盤中に埋設する。	適用不可
木杭	加振により木杭を圧入する。	適用不可

(2) 深層混合処理工法

深層混合処理工法とは、現地土と表 2.7 に示すような固化材を混合攪拌して地盤中に改良体を築造し支持力を確保する工法である。改良体が柱状であるため柱状地盤改良工法とも呼ばれる。改良体を築造するにあたっては、改良体の強度や間隔、施工深さなどを決める必要がある。建築分野、特に戸建て住宅への施工実績が多い。建築基準法に定められている設計基準強度を確保するためには、建築分野における設計・品質管理に関する指針類に従い対応することが重要である。新築建物への個別対応が基本となり、施工後の維持管理は不要である。

表 2.7 深層混合処理工法における使用材料等による施工方法の違い

主な使用材料、 施工機材	施工概要	既存建物への 適用可能性
セメントおよびセメント系 固化材	スラリーと原地盤を専用ロッドを用いて攪拌し、柱状地盤改良体を築造する。改良体の心材に羽根付き鋼管杭を設置する方法もある。	適用不可
セメント系固 化材	セメントスラリーを注入し、トレンチャーで上下方向に混合攪拌する。	適用不可
セメント	掘削ロッドを地盤に貫入させ、押し上げにより築造した孔壁にセメントミルクを注入し改良体を築造する。	適用不可
セメント系固 化材	スラリーと圧縮空気を専用ロッドにより高圧噴射し原地盤と攪拌し、楕円形または柱状の地盤改良体を築造する。	可能

(3) 浅層混合処理工法

浅層混合処理工法とは、重機を使って軟弱な表層地盤を掘削し、支持力確保のためにセメント系固化材と混合攪拌した上で埋め戻す工法である。建築分野、特に戸建て住宅への施工実績が多い。戸建て住宅においては、改良体の強度が低いため品質確認のための試料採取が困難であることや強度発現までに日数を要する等の課題がある。新築建物への個別対応が基本となり、施工後の維持管理は不要である。

(4) 注工法

注工法とは、地盤に薬液等を注入することで支持力を確保する工法である。近年、土木分野で採用されつつある工法であり、注入孔の位置を検知しながら掘削・注入ができると言われている。出来型（改良体の形状と強度）の確認が課題であるが、既存建物への適用性は高いものと考えられる。注入材としては、シリカ系注入材や極超微粒子セメント等が使われることが多い。

(5) 置換工法

置換工法とは、軟弱な表層地盤を支持力確保が可能な地盤に置換する工法である。置換する材料としては、表 2.8 に示すようなコンクリートブロックや砕石等が挙げられる。建築分野、特に戸建て住宅への施工実績が多い工法である。現地土を使用する浅層混合処理工法に比べて、諸元が明らかな材料により置換するため安定した品質確保が可能であると考えられる。ただし、浅層混合処理工法と同様に、置換（あるいは改良）した深度よりも深い位置に液状化層が残る場合には、支持力確保が難しく、適用条件が限定的である。

表 2.8 置換工法における使用材料等による施工方法の違い

主な使用材料、施工機材	施工概要	既存建物への適用可能性
コマ型コンクリートブロック	軟弱地盤をコンクリートブロックに置き換える。	適用不可
砕石	軟弱地盤を砕石に置き換える。	適用不可
軽量土、ジオグリッド	表層地盤を軽量土に置き換え、かつジオグリッドを敷設し沈下や段差の発生を抑制する。	適用不可

(6) 基礎形式をべた基礎とする方法

べた基礎は布基礎に比べて基礎の剛性が高いことを利用し、建物の局所的な沈下や傾斜を抑制する工法である。種々の地震被害報告書において、多くの戸建て住宅にて採用されているとの記録がある。また、文献^{2.6)}においては、基礎の剛性を高めることによって、建物のへの字型の変形等の被害を防止し、建物が一体傾斜した場合でも、その復旧を可能にしようとするものであるとの記載がある。

(7) 浮き基礎工法

浮き基礎工法とは、地震時に建物基礎に作用する浮力と、建物自重との釣り合いを考慮することで、地盤が液状化した場合の建物の傾斜や沈下を抑制することを目的とする工法である。建築分野の小規模な建物にて施工実績が多い。置換工法と同様に諸元が明らかな材料により置換するため安定した品質確保が可能であると考えられる。また、置換した範囲よりも深い位置で地盤の液状化が発生した場合においては、置換した EPS 材 (expanded polystyrene の略で発泡スチロールのような材料) 等の軽量材部分に浮力が作用することにより、建物の傾斜や沈下を抑制できる可能性がある。

(8) 浮き上がり防止用杭等の活用

堅固な地盤に杭や矢板を支持させることで、建物の傾斜を抑制する工法である。地下階を有する構造物や地中構造物で活用されている可能性がある工法である。

(9) 水圧上昇の抑止工法

水圧上昇の抑止工法とは、水圧上昇を抑える目的で基礎下を含む近傍地盤を礫材に置換し建物の傾斜を抑制する工法である。既存建築物の場合は、基礎周囲の地盤を地盤改良体により囲いその上部を礫材に置換する。囲い込み工法との組み合わせで使われることがある。近年、既存建物の付帯設備等で採用されつつある。

2.2.3 建物の傾斜・沈下の修復

液状化により傾斜や沈下した建物を修復する工法である。この場合、地盤の液状化も、建物の傾斜・沈下も許容することになる。戸建て住宅等、建築基準法第6条第1項4号に該当する場合の対応方法として挙げられている。最近では、主に戸建て住宅において、建物が傾斜した場合に簡易に修復できるよう新築時に予め修正機構を施すといった工法も見られる。以下(1)～(5)に示す各工法は、いずれも主に戸建て住宅等の小規模な建物を対象とした工法である。

(1) ポイントジャッキ工法

ポイントジャッキ工法とは、建物が傾斜・沈下した場合に、土台下にジャッキを挿入し傾斜・沈下を修正する工法である。比較的、安価に対応できるが、基礎の一部を斫る必要がある等の課題もある。

(2) 耐圧版工法

耐圧版工法とは、液状化により傾斜・沈下した建物の基礎下の地盤を掘削し、築造した耐圧版を反力にしてジャッキアップにより建物を基礎から持ち上げる工法である。基礎から持ち上げるため、修復時における土台や基礎への影響はポイントジャッキ工法と比べて少ないと考えられる。

(3) 鋼管圧入工法

鋼管圧入工法とは、基礎下の地盤を掘削して1m程度の鋼管を地盤中に圧入し、この鋼管を反力にしてジャッキアップにより建物を基礎から持ち上げる。アンダーピニング工法とも言われている。圧入した鋼管を反力にして建物を基礎下から持ち上げることができるが、施工スペースや費用に制約がある。

(4) 注入工法

工法自体は2.2.2(4)の注入工法と同じであるが、基礎下への薬液等の注入により傾斜・沈下した建物を修復する目的で使われることがある。薬液のほかにウレタンやグラウト(空隙を埋めるための液体)等も使用される。安価で対応可能であるが、注入剤固化後の強度や持ち上げ量(建物の傾斜量)を管理することが難しい。

(5) 傾斜修正機構を事前に組み込む方法

傾斜修正機構を事前に組み込む方法とは、住宅の基礎部分に特殊なアンカーボルトを予め施しておくことで、液状化により建物が傾いた場合にアンカーボルトを利用して建物を土台から持ち上げることで傾斜・沈下を修復する方法である。戸建て住宅への適用工法として、近年、開発された工法である。本工法は、事後の対応を省力化することために、最小限の準備を事前に施すという考え方に基づく。