５．　「個別対策工法」による液状化防止・軽減効果と実現可能性の検討

本業務の主な目的は、道路と宅地を一体化した液状化対策工法に関する実現可能性を検討することであるが、一体化対策工法（３．で検討した地下水位低下工法、あるいは４．で検討した格子状改良工法等）を施工しただけでは、L1 相当対応とならない場合の補助的な効果を期待する工法として、あるいは一体化対策工法が適用できない場合（例えば、一体化対策の施工について住民合意を得ることが困難な場合がこれに相当する）の代替工法として、個別対策工法についても検討を行うこととしている。

個別に実施可能な液状化対策工法について、既存の建物の有無や沈下・傾斜等の修正履歴の有無なども考慮しつつ、各工法の特徴や技術開発状況を踏まえ、液状化の防止、あるいは液状化の危険性を軽減する（以下、液状化防止・軽減という。）効果、対策実施に伴うリスクおよび費用について検討した。

地震動入力の大きさ等の検討条件、検討した個別の液状化対策工法、液状化防止・軽減効果の検討方法および事業リスクの検討方法、費用算定方法等の概要を以下に示す。

検討条件（入力地震動、地盤条件、対策規模など）

検討条件としては、

・一体化対策の有無

一体化対策工法と併用する場合、または個別対策工法単独の施工の場合について検討した。

・入力地震動の種類

主として L1 相当地震動を想定したが、住民の要望などがあった場合の参考として L2 地震動についても検討した（入力地震動についての詳細は２．２．３を参照）。

・既存建物の有無

更地またはこれと同等の条件である場合と既存建物がある場合について検討した。建物がある場合にはその状態、すなわち被災履歴、沈下・傾斜等の修正履歴などについても考慮した。

・施工単位

1 戸、4 戸、20 戸（1 街区）、100 戸（5 街区）

等である。

なお、地盤条件はモデル地盤（２．２．２参照）とし、宅地内の建物の規模（重量）は住宅モデル（２．２．４参照）を策定している。

検討した個別の液状化対策工法

上記検討条件を踏まえ、個別対策工法検討 WG において検討した液状化対策工法は、

・地盤に直接対策を施して液状化防止・軽減効果を期待する工法

および、

・地盤に直接対策を施さず液状化の発生をある程度は許容して、主に建物側で対策する広義の液状化対策工法

の２種類である。

地盤に直接対策を施す工法としては、

①宅地側の目標性能を満足すること（目標性能については２．２．１参照）

②施工品質の確認ができること、もしくは施工品質確保のための施工管理手法が確立していること

などの観点から、

（１）密度増大工法

（２）間隙水圧消散工法

（３）地盤の強度を上げる工法(浸透固化、地盤不飽和化等)

（４）個別対策工法の組み合わせ

の、４種類の工法を選択して検討した。

主に建物側で行う対策工法としては、

（１）建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（従来型工法）

（２）住宅重量と基礎重量とのバランスで有害な沈下・傾斜を防ぐ工法

（３）液状化による沈下・傾斜修正のためのシステムを建物に組み込む工法

の、３種類の対策原理の異なる工法を選択して検討した。

液状化防止・軽減効果の検討方法

地盤に直接対策を施して液状化を防止あるいは軽減する対策工法について、WG 協力者と連携して工法の特性や施工条件（道路と宅地の一体化対策工法の有無、施工時の既存建物の有無等）を勘案しつつ、L1 相当地震動を想定した試設計案を策定した。

試設計案による仕様をもとに、主として「建築基礎構造設計指針」（日本建築学会編）に示されている FL 値を用いた簡易液状化判定手法（FL 法）と 2 次元動的有効応力解析（FEM 解析、解析コード LIQCA）による検証を行った。

さらに、その結果を利用して、地盤の短期許容応力度（q_a）が建物自重等による接地圧（w）を下回らないこと、パンチング破壊に対する短期許容支持力（R_a）が建物自重等による荷重（W）を下回らないことの検証（パンチング破壊判定）を行った。

地盤の液状化抑制効果について評価方法が確立もしくは提案されておらず、試設計が策定できない場合、あるいは施工実績がないことが理由で試設計案が策定できない等の場合には、FEM 解析による試行錯誤等を経て検討を行った。

なお、2 次元動的有効応力解析においては、隣接する 2 戸の住宅をモデル化しており、モデル街区内すべての住宅で同一の対策を実施していることを想定している。

L1 相当の地震動に対応することを基本として検討したが、参考として、同一仕様における L2 地震動入力時の住宅の沈下量および傾斜量についても検討した。

なお、今回の検討では、地盤の条件や建物荷重、入力地震動に関しては、本業務共通の条件（モデル地盤、モデル住宅、L1 相当地震動・L2 地震動）を用いている。図 5.1 に、検討のフローを示す。

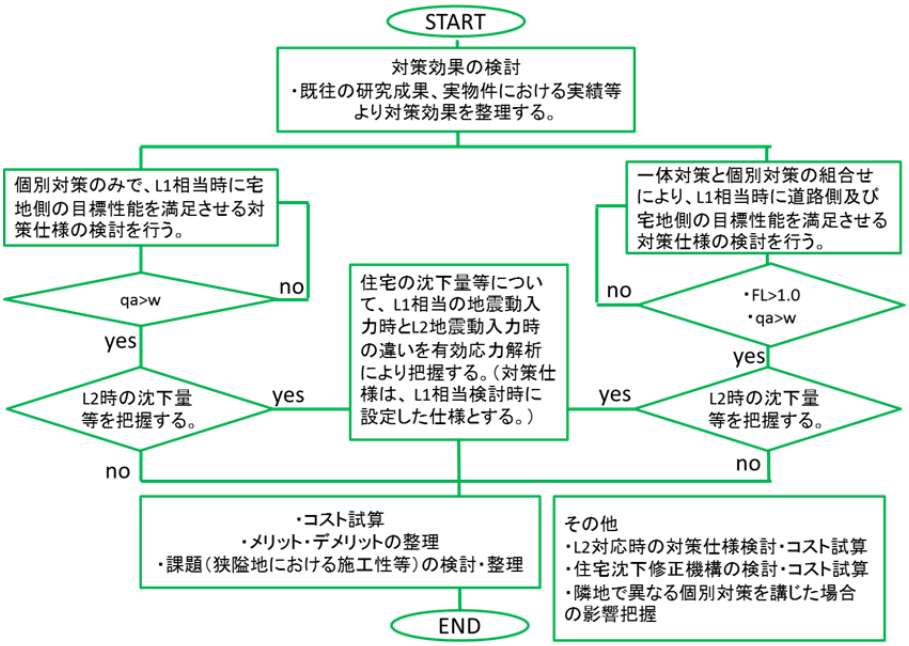


図 5.1　液状化防止・軽減効果の検討フロー

事業リスクの検討方法

地盤の液状化防止・軽減効果についての検討結果と合わせ、各対策工法の持つメリットおよび施工にあたっての課題等について整理した。

費用算定方法

各個別対策工法の施工コストについては、施工単位等が変わると施工コストも変わってくるため、「検討条件」と合わせて算定することとした。また、概算費用の調査では、「液状化対策費」、「維持管理費」および「別途工事費」に大別して整理した。

液状化防止・軽減効果の検討および事業リスクの検討結果については対策工法毎に５．１～５．２にて示す。また、概算費用の検討結果については５．３に示すものとする。

５．１　地盤に直接対策を施して液状化防止・軽減する工法

５．１．１　個別対策工法単独で宅地部の液状化対策を行う場合

ここで検討対象とした工法は（前述のとおり）、

・密度増大工法

・間隙水圧消散工法

・地盤の強度を上げる工法(浸透固化、地盤不飽和化等)

および、いくつかの工法の組み合わせ、の４種類である。

対策工法毎に、敷地条件による施工の制約や対策効果を考慮した上で、WG3 において試設計を行って対策の仕様を決定した。

決定した対策仕様に対して、簡易 FL 判定による検討および 2 次元動的有効応力解析（FEM 解析、解析コード：LIQCA）による検討を経て、地盤の短期許容応力度判定、パンチング破壊による判定を実施した。

各種対策工法の効果は、地盤の液状化発生の有無、地盤の短期許容応力度の判定結果、パンチング破壊による判定結果の 3 点で評価した。

また、L1 相当地震動に対する検討で十分な液状化対策効果が確認された工法のうち、代表的な工法については、FEM 解析による L2 地震動に対する検討も実施した。

（1）密度増大工法

1）工法の概要

密度増大工法は、対象地盤へ砂、丸太、モルタル等を圧入、打設あるいは注入することにより地盤を締固め、地盤の密度を増加させることによって液状化の発生を抑制することを期待する工法である。地盤を締め固めることは、砂粒子間の間隙をより密にするとともに、地中の応力状態等の均質化を図ることが可能であり、地盤全体としての液状化に対する抵抗を増加することになる。

地盤の密度を増大させる程度は改良率（施工対象とする敷地面積に対する、密度増大のための材料打設等を行う部分の面積合計の割合。図 5.2 参照）で表す。

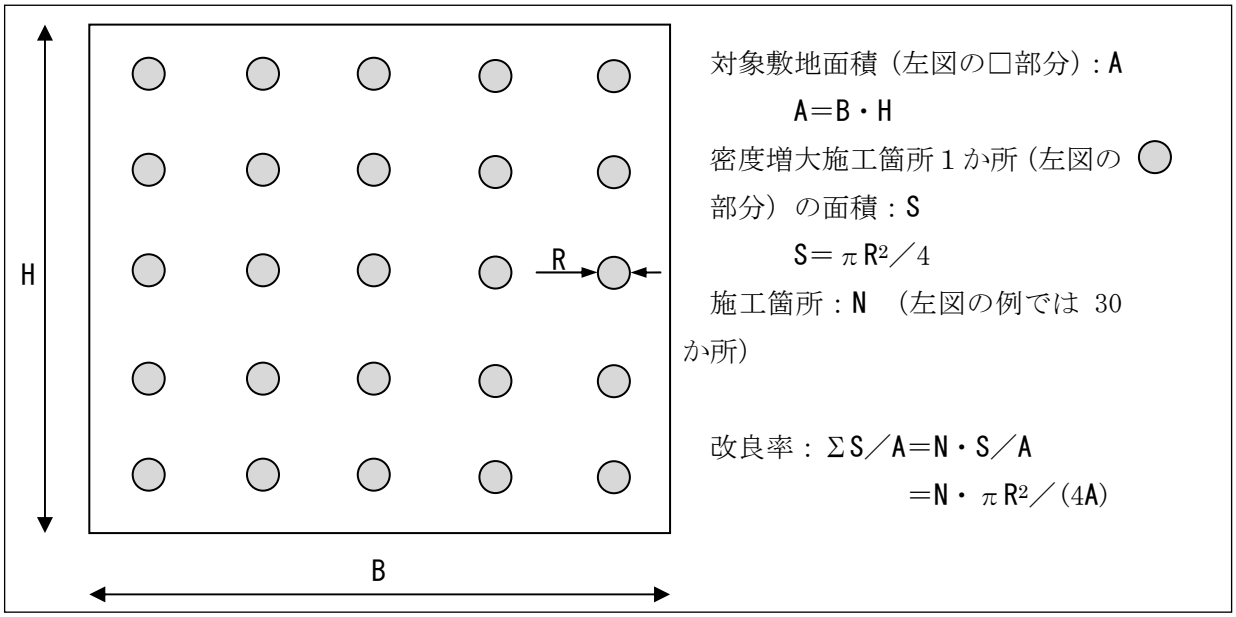


図 5.2　密度増大工法における改良率の考え方

改良率は、対象地盤の状況（土質、N 値など）や目標とする締め固め状態など、設計条件に応じて適宜設定される。

以下、締固めに用いる材料の違いに着目した 3 工法について述べる。

a）砂杭の造成

砂を静的あるいは動的に圧入することにより、地盤中によく締まった砂杭を造成する工法である（図 5.3 参照）。

この工法の特徴としては、締め固めのための材料として砂を用いることにより、将来の配管工事等の支障となりにくいことや、境界部での機能障害が起こりにくいこと、植栽への影響が少ないことなどが挙げられる。また、既存の建物直下への施工にも基本的には対応可能である。ただし、施工時にはある程度大きな作業スペースが必要となる。

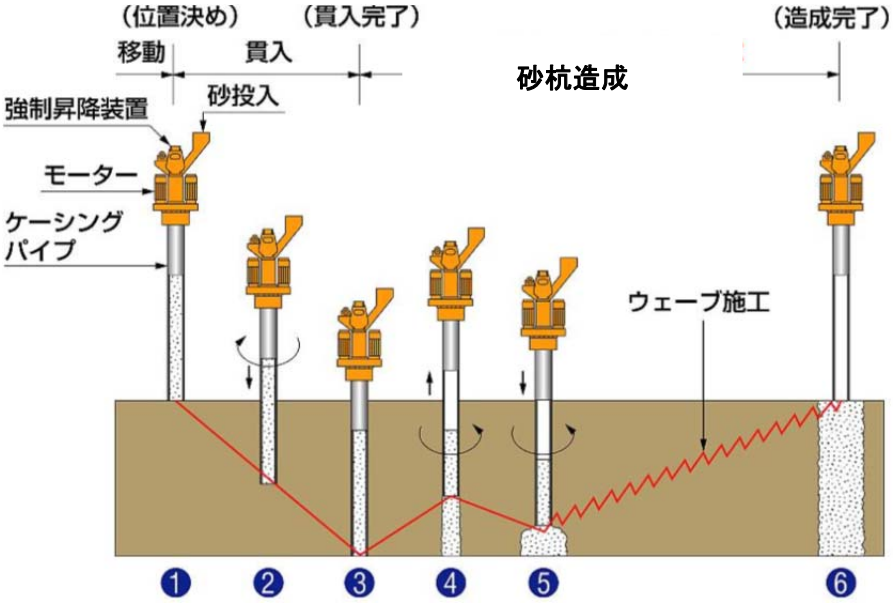


図 5.3　砂杭による締固め施工の概要

b）モルタル柱状改良

ドライモルタルの注入により、原地盤と攪拌混合せずに適当な間隔で柱状体を地盤内に築造する工法である（図 5.4 参照）。

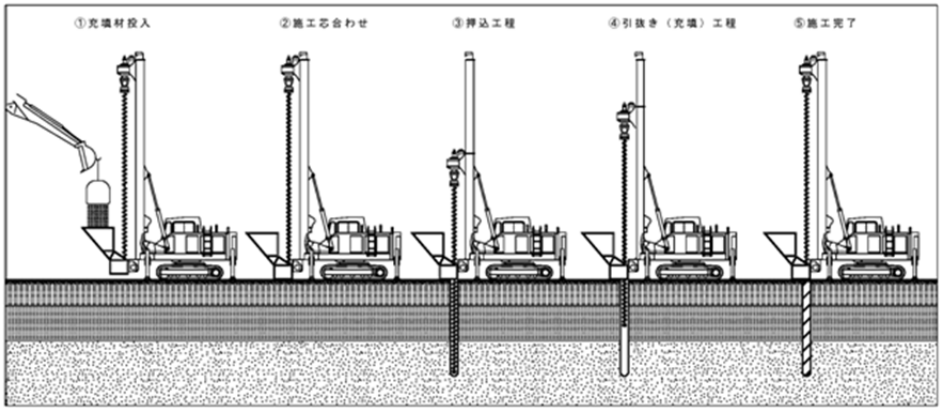


図 5.4　ドライモルタルによる締め固め施工の概要

この工法の特徴としては、小型の施工機械を用いるため、比較的狭隘な場所での施工が可能であること、残土が発生しないこと、施工実績が多いこと等が挙げられる。反面、小型機を用いるため施工深さには限界がある。

ｃ）丸太打設

丸太を適当な間隔で打設することにより、地盤を締め固める工法である（図 5.5 参照）。

この工法の特徴としては、比較的狭隘な場所での施工が可能であること、低騒音・低振動であること、天然素材を用いることで環境負荷が少ないこと、カーボンストック効果が見込まれることなどが挙げられる。一方、地下水位より高位での施工には別途腐朽対策が必要なこと、施工後の埋設物敷設工事等の支障となる場合があることなどが留意点である。

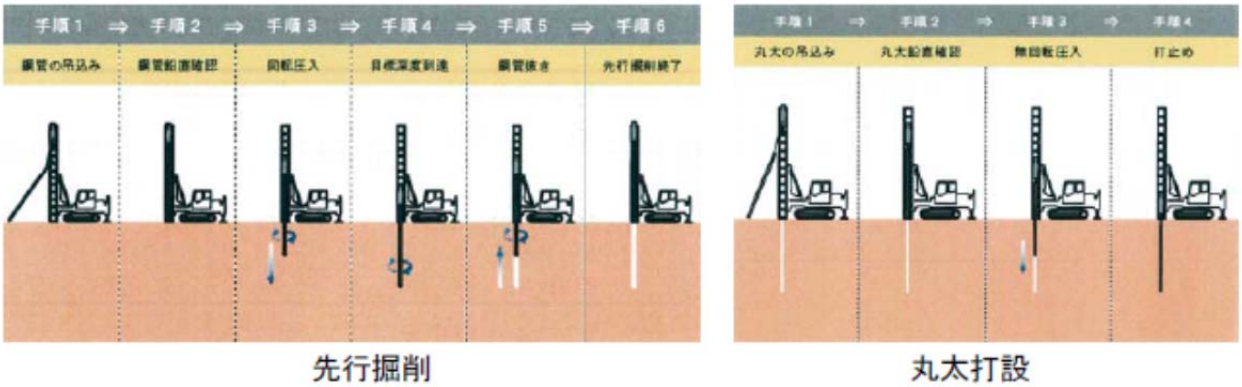


図 5.5　丸太打設による締め固め施工の概要

なお、密度増大工法として上記３種類の他にも、比較的固めのソイルセメントを静的に圧入して締め固めを行う工法が施工されることがあるが、施工後の出来形管理（寸法・形状）や期待される発現効果の確実性等に関して不明確な部分が残される。このため、前述した個別対策工法選定の要件②（施工品質の確認ができること、もしくは施工品質確保のための施工管理手法が確立していること）に鑑み、現時点では類似の工法との同一の評価が困難であると判断しているが、今後これらの問題点を解決できれば同様に扱うことが可能である。

２）対策効果の検討

ａ）対策仕様

地盤の密度増大工法である砂杭打設、モルタル柱状改良、丸太打設では、同じ改良率で地盤改良を行った場合にも、地盤密度を増大させるために用いた材料（例えば、砂杭打設では密に詰めた砂）によってその効果は異なると考えられる。しかし、それらの効果を定量的に設計および 2 次元動的有効応力解析に取り入れることは困難であ

るため、密度増大工法の対策効果を検討する際には、締め固めによる密度増大効果のみを取り入れて検討することとし、砂杭、モルタル柱状体、丸太の剛性は考慮しないこととした。

入力地震動はL1相当地震動とし、新築または建替えを前提とした条件で試設計を行った。

試設計に基づいて決定された対策の仕様（以下、基本仕様）を表5.1に示す。また、基本仕様をもとに改良深度を変更したケースについても追加検討を行った（表 5.2 参照)。対策仕様のイメージを図5.6に示す。

表5.1　密度増大工法の基本仕様

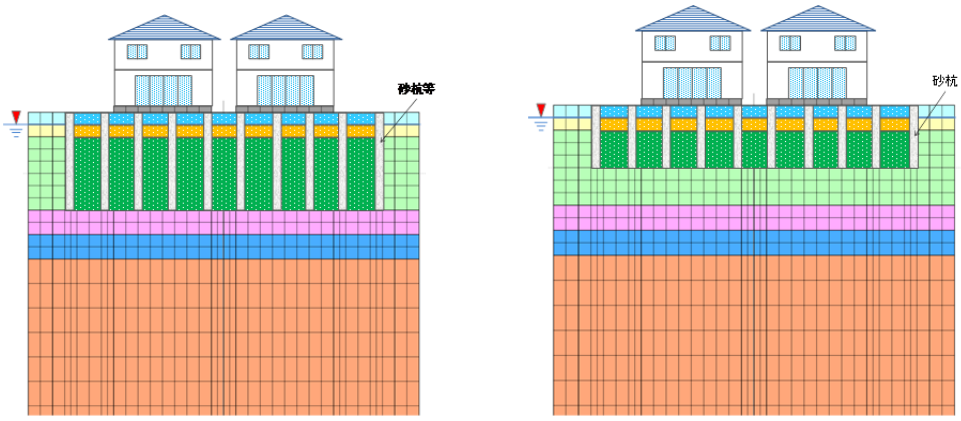
項目	対策仕様(基本仕様)
改良径	700mm*1
改良深さ	GL.-8.0mまで
改良ピッチ	□2.3m*2
改良率	6.6%
改良範囲	敷地内全面(建物直下含む)

*1：図5.2における改良部の直径（R）に相当する。
*2：改良部間隔が1辺2.3mとなる正方形配置の場合、□2.3mと表記。

表5.2　密度増大工法の追加検討仕様

項目	対策仕様(追加検討)
改良径	700mm*1
改良深さ	GL.-5.0mまで
改良ピッチ	□2.3m
改良率	6.6%
改良範囲	敷地内全面(建物直下含む)

*1：図5.2における改良部の直径（R）に相当する。
*2：改良部間隔が1辺2.3mとなる正方形配置の場合、□2.3mと表記。



(a)基本仕様　　(b)追加検討仕様

図 5.6　密度増大工法の対策仕様のイメージ

ｂ）2 次元動的有効応力解析の条件

締め固めによる改良後の地盤のモデル化については、改良後の地盤の液状化強度曲線を推定し、その液状化強度曲線にフィットするよう、各種パラメータを調整した。

改良後の地盤の液状化強度曲線の推定方法およびパラメータの設定方法については、別添資料５－１に示す。

ｃ）対策効果の検討結果

FL 法および FEM 解析による液状化判定、許容応力度判定、パンチング破壊判定の結果を表 5.3 に示す。詳細な解析結果については別添資料５－２および別添資料５－３に示す。

表 5.3　FL 法および FEM での検討結果（密度増大工法）

対策の仕様		改良範囲：敷地内全面改良			
		改良深さ：8m		改良深さ：5m	
計　算　法		FL 法	FEM	FL 法	FEM
液状化判定 FL 法： FL≧１：○ FL＜１：× FEM： Ru≦0.95：○ Ru＞0.95：×	Bs 層	○	○	－	○
	Fs 層	×	○	－	○
	As1 層	○	○	－	○
	As2 層	×	○	－	○
地盤の許容応力度判定 q_a≧w：○ q_a＜w：×		○		－	
パンチング破壊判定 R_a≧W：○ R_a＜W：×		○		－	

注 1) FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。
注 2)「－」は検討を行っていないことを示す。

基本仕様において FL 法による液状化判定では Fs 層および As2 層が液状化する結果となったものの、宅地側の目標性能である地盤の短期許容応力度判定およびパンチング破壊判定のいずれの場合も許容値を満足する結果となった。

試設計を行っていない追加検討仕様についても FEM 解析のみの結果であるが、Bs 層から As2 層まで液状化は発生しない結果となった。

d）L2 地震動に対する検討

イ）検討した L2 対策仕様

a）に示した基本仕様をもとに、この改良深さを大きくした L2 地震動対策仕様を想定（表 5.4 参照）し、L2 地震動が入力された場合に発生しうる建物の沈下や傾斜の程度について FEM 解析により検討した。

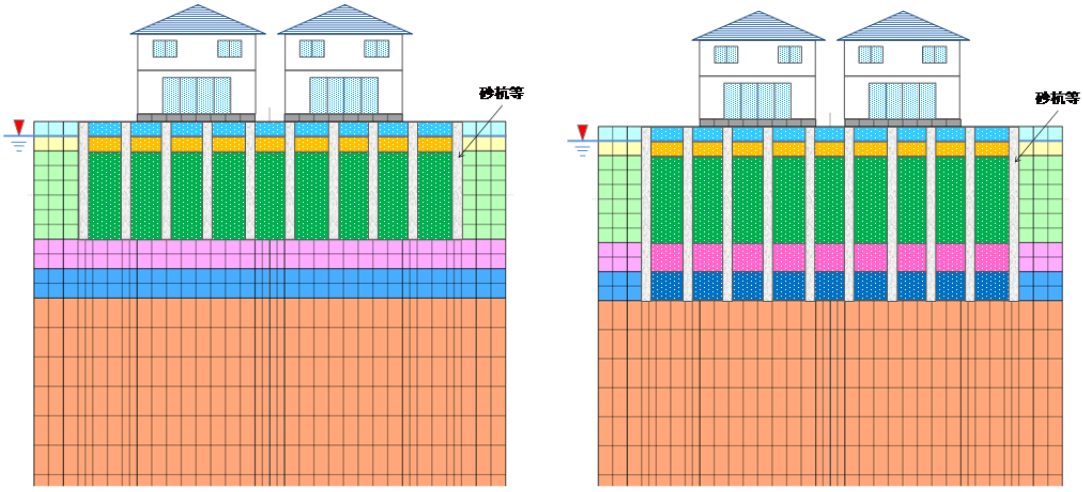
L2 地震動対策を想定した密度増大工法による対策仕様のイメージを図 5.7 に示す。

表 5.4　L2 地震動を想定した密度増大工法の仕様（基本仕様との比較）

項目	基本仕様	L2 対応の仕様
改良径	700mm*1	700mm*1
改良深さ	GL.-8.0m まで	GL.-12.0m まで
改良ピッチ	□2.3m*2	□1.75m*2
改良率	6.6%	12.0%
改良範囲	敷地内全面(建物直下含む)	敷地内全面(建物直下含む)

*1：図 5.2 における改良部の直径（R）に相当する。

*2：改良部間隔が 1 辺 2.3m となる正方形配置の場合、□2.3m と表記。



(a)　基本仕様　　(b)L2 対応の仕様

図 5.7. L2 地震動対策を想定した密度増大工法による対策仕様のイメージ図

ロ）対策効果の検討結果

L2 地震動入力時の FEM 解析による検討結果を表 5.5 に示す。なお、表 5.5 では、参考として無対策地盤に対する検討結果についても FL 法による結果も併せて示している（解析結果の詳細については、別添資料５－２を参照）。

密度増大工法の場合、L2 地震動対応仕様でも液状化をまぬがれることはできないが、FEM 解析による参考値での比較をすると、無対策と比べて地震動終了直後の建物沈下量で 30%程度、建物傾斜量で 40%程度の軽減が認められた。

同様に基本仕様と L2 地震動対応仕様の比較においては、建物沈下量で 10%弱、傾斜量で 20%弱の軽減が認められるものの、改良深さを 1.5 倍、改良率を約 2 倍にしたことから考えると、期待通りの効果が出ているとは言いがたい。

表 5.5　L2 地震動対策効果の検討結果（密度増大工法）

仕様		無対策		基本仕様		L2 対応仕様	
検討方法		FL 法	FEM	FL 法	FEM	FL 法	FEM
液状化判定 FL 法： FL≧１：○ FL＜１：× FEM： Ru≦0.95：○ Ru＞0.95：×	Bs 層	×	○	－	○	－	○
	Fs 層	×	×	－	×	－	×
	As1 層	○	×	－	×	－	×
	As2 層	×	×	－	×	－	×
地震動終了直後の建物の沈下量(cm) ＜参考値＞		－	78	－	59	－	56
地震動終了直後の建物傾斜量 ＜参考値＞		－	-0.113	－	0.082	－	0.068

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。

注 2）「－」は検討を行っていないことを示す。

注 3）建物傾斜量の符号は解析計算上、反時計まわりを正としたものである。

３）適用可能性の検討と課題

以上の対策効果の検討結果より、密度増大工法の場合には、基本仕様、追加検討仕様ともに、単独でのL1相当地震動対応のため液状化対策工法として適用できる（効果を発揮できる）可能性があるものと考えられる。一方、L2 地震動対応のための単独での液状化対策工法としては、効果は十分とは言えず、限定的なものであると考えられる。

密度増大工法を導入施工する際の特徴および留意点と、今後の検討課題を以下に示す。

※一部施工コストに関する特徴も挙げたが、施工の概算費用については別途５．３にて詳述する。

ａ）密度増大工法における共通的特徴と留意点、今後の検討課題など

・ほぼ恒久的な液状化対策であり、地盤の安定化が図れる工法である。

・宅地に適用する場合に、事後の地盤特性の確認方法として、標準貫入試験に代わる簡易な確認方法の確立が必要である。

・実施工事例の蓄積とともに、実際の地震における対策効果の確認・検証のためのデータ蓄積が重要である。

ｂ）砂杭の造成の特徴と留意点

・材料が砂であるため、配管等の将来工事において障害となりにくい。また、植栽等への影響が比較的少ない。

・既存の建物が存在する場合の建物直下への施工も、基本的には可能である。

・建物の際などの境界部分での変形がなだらかであるため、そのような部分での機能障害は生じにくい。反面、砂の圧入により砂柱体を地盤中に造成する工法であるので、造成位置近傍における埋設配管等に変位を生じさせる可能性がある。つまり、施工にあたっては周辺地盤の（特に地下埋設物等の）状況に十分留意する必要がある。

・比較的大きな施工プラントを必要とするため、既存の建物が存在する際の施工や、隣接家屋が接近している場合などには、プラントが道路を占有してしまう等、周辺住民の生活の妨げとなるおそれがある。

・1戸、4戸単位の施工では、通常よりも小型の施工機を用いる等の理由により、相対的に高価となる。反面、施工単位が1街区（20戸）以上で、更地同等で施工できる場合には、大型機による施工が可能となるため、1戸当たりの施工コストを抑制することが可能である。

ｃ）モルタル柱状改良の特徴と留意点

・静的締固め工法としての設計が可能で、常時では杭的作用（摩擦杭としての効果）により、地盤の支持力が担保できる場合がある。このため、多数の施工実績を有する工法である。

・小型の施工機を用いるため、比較的狭隘な場所での施工が可能である。反面、施工深さには限界があるため、L2地震動対応対策で要求するような深度までは対応

できないことが多い。また、N 値 10 以上の地盤に対する施工は難しく、地中障害の影響を受けやすい。

・施工にあたって、掘削や穿孔による残土が発生しない利点がある。また、液状化被害後の噴砂の再利用が可能な場合がある。

・小型の施工機を用いるため、施工戸数の増加によるスケールメリットが期待できない。

d）丸太打設の特徴と留意点

・比較的狭隘な場所での施工が可能であり、相対的には低振動・低騒音であることから、隣接家屋が接近した場所での施工に適している。また、着工から完了までの期間が比較的短いことから、周辺住民生活の妨げとなる度合いが小さい。

・天然素材である丸太を用いるため、地下水汚染などの環境負荷が小さく、地球温暖化対策としてのカーボンストック効果もある程度期待できる。

・丸太自体は液状化しないため、補助的に地盤の支持力を担保可能である。反面、地下水位面より高い位置への施工には別途腐朽対策が必要である（基本的には地下水位より低い位置への施工となる）。

・施工後の埋設物敷設工事等の支障となる場合がある。

（２）間隙水圧消散工法

１）工法の概要

砕石などの高い透水性を有する材料からなるドレーンを砂質地盤中に造成（図 5.8 参照）し、地震時に発生する過剰間隙水圧の発生を抑制して、あるいは消散を促進することによって地盤の液状化を抑制する工法である。

具体的には、地震時の繰返しせん断により直接的に生じる液状化を抑制する効果、下方や側方地盤内発生した過剰間隙水圧の消散により二次的に生じる液状化を抑制する効果などが期待できる。

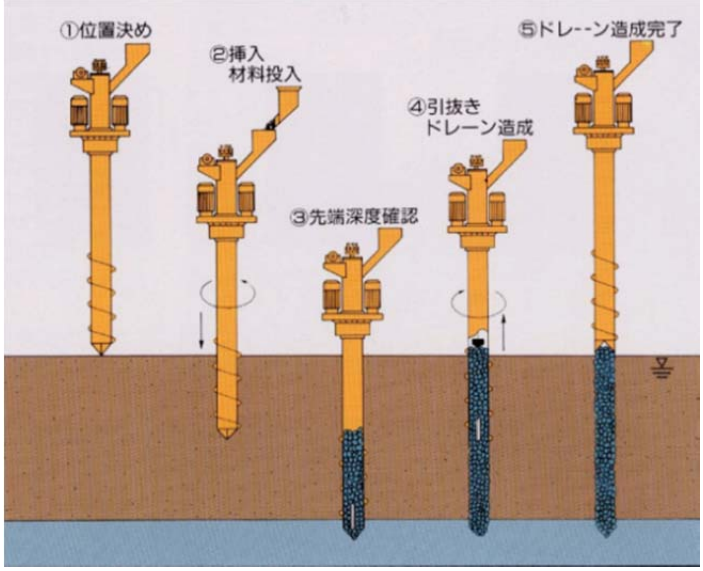


図 5.8　過剰間隙水圧消散工法の施工概要

この工法の特徴としては、材料として砕石を用いることにより、将来の掘削を伴う配管工事等の支障となりにくいことや、植栽への影響がないことなどが挙げられる。大型機と小型機の使い分けにより、ある程度狭い敷地への施工にも対応可能であるが、小型機を用いる場合には施工深度に制限がある点に留意が必要となる。また、この工法は低騒音、低振動の施工が可能で、近接した構造物に変状を与えることが少ないなどの理由により、締め固め工法の施工が困難である場合に用いられることが多いとの報告がある（地盤工学会，2004）。

ここでは、グラベルドレーンを間隙水圧消散工法の代表工法として取り上げ、検討を行っており、工法の適用条件に関しては、更地もしくは敷地内に十分な施工スペースが確保できる場合を想定している。

施工スペースが十分に確保できないなどの理由により、建物直下を除く宅地の周囲部分にしか施工できない場合については、（４）個別対策の組み合わせ　にて間隙水圧遮断工法と併用することを前提とした検討を行っている（その際のドレーン材は、樹脂系積層パイプとした)。

２）対策効果の検討

ａ）対策仕様

入力地震動はL1 相当地震動とし、新築または建替えを前提とした条件で試設計を行った。

試設計に基づいて決定された対策の仕様（以下、基本仕様）を表 5.6 に示す。また、基本仕様をもとに、改良深度を変更したケース、建物直下を改良しないケースなどの追加検討を行った。表 5.7 には追加検討を実施した場合の対策仕様（①～③）を、図 5.9 には対策仕様のイメージ（基本仕様および追加検討仕様）を示す。

表 5.6　間隙水圧消散工法の基本仕様

項目	対策仕様
ドレーン半径	250mm （表層 0.5m はグラベルマットを敷設）
改良深さ	GL.-8.0m
改良ピッチ	□1.6m※
改良範囲	敷地内全面(建物直下含む)

※1 辺を 1.6m とする正方形配置の場合、□1.6m と表記した。

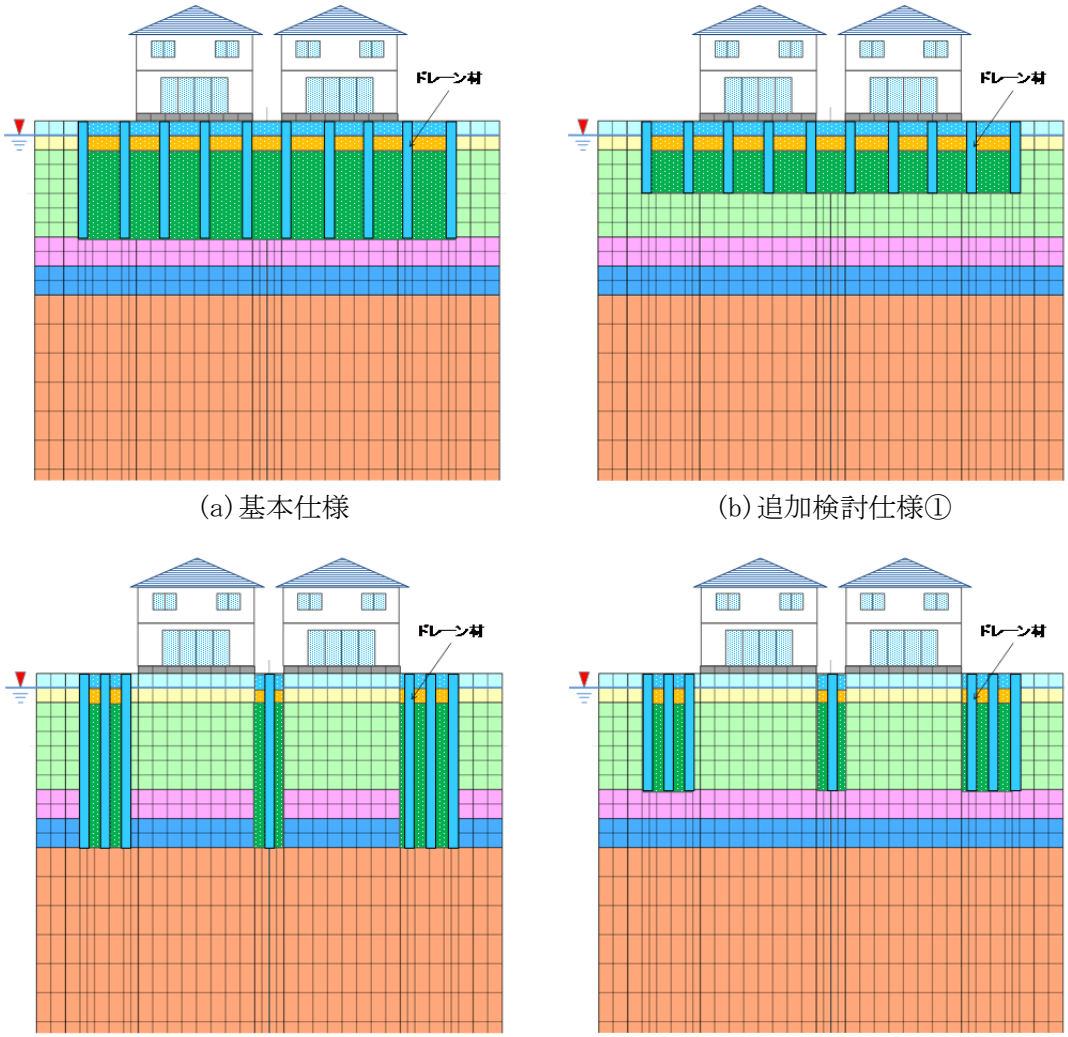
表 5.7　間隙水圧消散工法の追加検討仕様

項目	対策仕様(追加検討)		
	①	②	③
ドレーン半径	250mm （表層 0.5m は、 グラベルマットを敷設）	250mm （表層 0.5m は、 グラベルマットを敷設）	250mm （表層 0.5m は、 グラベルマットを敷設）
改良深さ	GL.-5.0m まで	GL.-12.0m まで	GL.-8.0m まで
改良ピッチ	□1.6m※	□1.6m※	□1.6m※
改良範囲	敷地内全面 (建物直下含む)	建物直下除く 敷地内	建物直下除く 敷地内

※1 辺を 1.6m とする正方形配置の場合、□1.6m と表記した。

ｂ）２次元動的有効応力解析の条件

数値解析では、ドレーン材により敷地内を全面的に改良する場合を想定しているため、地盤は一様にドレーンの排水効果が期待できると仮定した。ドレーン材の液状化対策効果（排水効果）については、関口ら（1985）が提案したマクロエレメント法により表現した。マクロエレメント法に用いるパラメータとしては、ドレーン半径、ドレーンの有効径、ウェルレジスタンス係数があり、いずれも対策仕様から決定される値である（パラメータの詳細な設定方法については、別添資料５－１を参照）。



(a) 基本仕様　(b) 追加検討仕様①

(c) 追加検討仕様②　(b) 追加検討仕様③

図 5.9　間隙水圧消散工法の対策仕様のイメージ

ｃ）対策効果の検討結果

FL 法および FEM 解析による液状化判定、許容応力度判定、パンチング破壊判定の結果を表 5.8 詳細な解析結果については別添資料５－２および別添資料５－３に示す。

表 5.8　FL 法および FEM での検討結果（間隙水圧消散工法）

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="3">対策の仕様</td><td colspan="2">基本仕様</td><td colspan="2">追加検討仕様
①</td><td colspan="2">追加検討仕様
②</td><td colspan="2">追加検討仕様
③</td></tr>
<tr><td colspan="4">改良範囲：敷地内全面改良</td><td colspan="4">改良範囲：建物直下を除く敷地内</td></tr>
<tr><td colspan="2">改良深さ：8m</td><td colspan="2">改良深さ：5m</td><td colspan="2">改良深さ：12m</td><td colspan="2">改良深さ：8m</td></tr>
<tr><td colspan="2">計　算　法</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td></tr>
<tr><td rowspan="4">液状化判定
FL 法：
FL≧１：○
FL＜１：×
FEM：
Ru≦0.95：○
Ru＞0.95：×</td><td>Bs 層</td><td>○</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>Fs 層</td><td>○</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As1 層</td><td>○</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As2 層</td><td>×</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td colspan="2">地盤の許容応力度判定
q_a≧w：○
q_a＜w：×</td><td colspan="2">○</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td></tr>
<tr><td colspan="2">パンチング破壊判定
Ra≧W：○
Ra＜W：×</td><td colspan="2">○</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td></tr>
</table>

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。
注 2)「－」は検討を行っていないことを示す。

基本仕様において FL 法による液状化判定では As2 層が液状化するとの判定となったものの、宅地側の目標性能である地盤の短期許容応力度判定およびパンチング破壊判定のいずれの場合も許容値を満足する結果となった。

試設計を行っていない追加検討仕様についても（FEM 解析のみの結果であるが)、Bs 層から As2 層まで液状化するとの判定とならなかった。

d）L2 地震時の検討

イ）検討した L2 対策仕様

a）に示した対策仕様のうち 2 ケース（基本仕様と追加検討仕様③、表 5.6、表 5.7、図 5.9(a)、(c)を参照）について、L2 地震動が入力された場合に発生しうる建物の沈下や傾斜の程度について FEM 解析により検討した。

ロ）対策効果の検討結果

L2 地震動入力時の FEM 解析による検討結果を表 5.9 に示す。なお、表 5.9 では、参考として無対策地盤の検討結果についても（FL 法による結果も併せて）示している（解析結果の詳細については、別添資料５－２を参照）。

表 5.9　L2 地震動対策効果の検討結果（間隙水圧消散工法）

仕様		無対策		基本仕様		追加検討仕様③	
検討方法		FL 法	FEM	FL 法	FEM	FL 法	FEM
液状化判定 FL 法： FL≧１：○ FL＜１：× FEM： Ru≦0.95：○ Ru＞0.95：×	Bs 層	×	○	－	○	－	○
	Fs 層	×	×	－	×	－	×
	As1 層	○	×	－	×	－	×
	As2 層	×	×	－	×	－	×
地震動終了直後の建物の沈下量(cm)＜参考値＞		－	78	－	77	－	79
地震動終了直後の建物の傾斜量＜参考値＞		－	-0.113	－	-0.108	－	-0.113

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。

注 2）「－」は検討を行っていないことを示す。

注 3）建物傾斜量の符号は解析計算上、反時計まわりを正としたものである。

間隙水圧消散工法の場合、FEM 解析による結果からは、L2 地震動に対して基本仕様、追加検討仕様③いずれの対策の場合にも、液状化の発生を防ぐことはできず、建物の沈下量傾斜量ともに無対策の場合と有意な相違のない結果となった。

図 5.10 に無対策と基本仕様それぞれの Fs 層下部の過剰間隙水圧比の時刻歴を、図 5.11 には、無対策と基本仕様それぞれの地表面加速度の時刻歴を示す。基本仕様では無対策に比べて、液状化の発生を数秒程度遅らせることができているが、振動

開始から 15 秒～18 秒の間で地表面加速度が大きくなっている。これは、無対策地盤では、Fs 層下部が早期に液状化に至るため、地震動が地表面に到達する前に減衰してしまうためと考えられる。一方基本仕様では、間隙水圧消散工法の排水効果により地盤が 18 秒前後まで完全に液状化には至らないため、地表面まで地震動が増幅して(もしくは減衰せずに)伝達してしまうため、建物の沈下量、傾斜量ともに無対策より大きくなるという結果となったと考えられる。

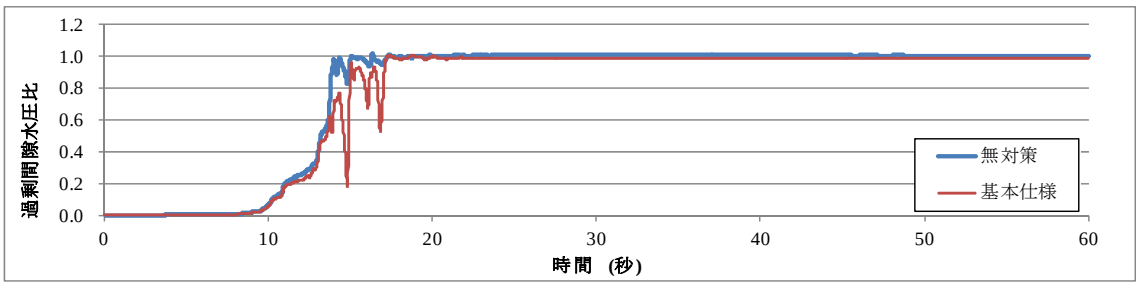


図 5.10　Fs 層下部の過剰間隙水圧比の時刻歴

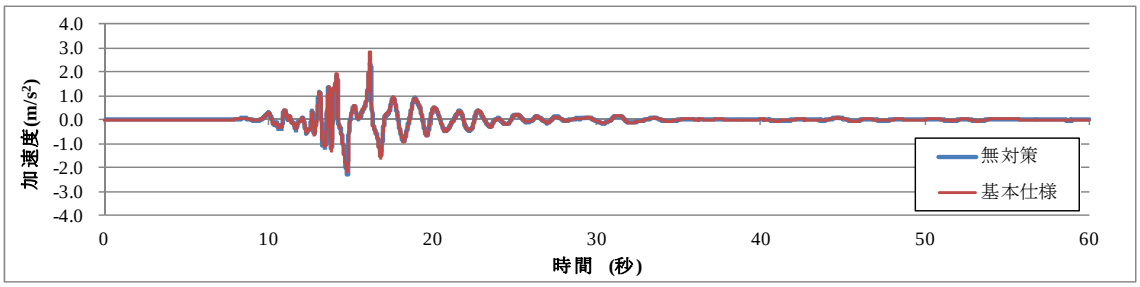


図 5.11　Fs 層下部の過剰間隙水圧比の時刻歴

３）適用可能性の検討と課題

以上の対策効果の検討結果より、間隙水圧消散工法の場合には、基本仕様、追加検討仕様①～③ともに、単独でのL1相当地震動対応のための液状化対策として適用できる（効果を発揮する）可能性があるものと考えられる。

一方、L2 地震動対応のための単独での液状化対策工法として考えると、FEM 解析上はいずれも液状化に至るという結果となった。

間隙水圧消散工法を導入施工する際の特徴および留意点と、今後の検討課題を以下に示す。

※一部施工コストに関する特徴も挙げたが、施工の概算費用については別途５．３にて詳述する。

ａ）間隙水圧消散工法の特徴と留意点

・様々な構造物を対象に施工された実績があり、既設岸壁（例えば、齋藤ら,1991）、建築構造物（例えば、岡本ら,1986）、水処理施設（例えば、神山ら,1989）、地下埋設物（例えば、杉ら,1984）などの事例が報告されている。

・過去の大地震時の液状化防止効果の確認の報告（例えば、運輸省港湾技術研究所,1993、齋藤ら,1995、塩井ら,1996）が多数ある。

・施工については、低騒音、低振動であること、削孔して施工する場合に周辺地盤への影響が比較的小さい。

・設計に用いる地盤の透水係数や体積圧縮係数が、一般的な調査で測定されることが少なく、これらの数値をその他の地盤定数や既往の調査結果から間接的に推定する場合には、設計の精度が落ちる可能性が高い。また、通常の設計法では、敷地内全面を改良すること（面的な改良）を想定しており、一部分のみの改良については設計法は確立していない。これらの点から本工法の適用を考えるに当たっては、今後さらに実証的な研究成果等を補っていく必要がある。

・経年劣化等によりドレーン材が目詰まりすると、所定の液状化対策効果が低減される可能性がある。また、地震が発生し、間隙水圧が消散すると、ドレーン材の目詰まりが起こる可能性があるため、2度目の大地震時には液状化対策効果が十分に得られない可能性がある。ただし、地震後の調査で目詰まりが確認されなかった事例もある（井合ら,1996）。

（３）地盤の強度を上げる工法（浸透固化、地盤不飽和化等）

１）工法の概要

地盤を削孔し、地震時に液状化の発生が懸念される地盤中に薬液や空気を注入することで、注入範囲内の液状化強度を増加させ、液状化の発生を抑制する工法である。

この工法での薬液等の注入方法には、割裂注入と浸透注入の 2 種類があり、割裂注入では地盤を割裂させて薬液を脈状に注入させるため、地盤も脈状に固化する。そのため地盤内に無固化の部分が残り、地盤に大きな変形が生じる可能性がある。一方、浸透注入では薬液等を低圧で地盤内に浸透させるため、対象土層のほぼ全部分が固化あるいは不飽和化し、地盤に大きな変状が生じにくい。本業務では宅地もしくは住宅直下に液状化対策施工を行うことを検討するため、対策実施によって地盤に変状が生じることや、施工品質の管理がしにくい工法を検討することは難しいため、割裂注入方式による工法の検討は行わない（本５章の冒頭、検討した液状化対策工法の項を参照）。ここでは、浸透注入型で施工可能な、地盤を不飽和化する工法を代表例として検討を行った。

地盤を不飽和化する工法は、地盤中に微細気泡を含んだ水を注入して不飽和化させることにより、地震による荷重が作用した場合に注入した空気が圧縮することで過剰間隙水圧の上昇を軽減し、液状化が抑制されることを期待した工法である（図 5.12 参照）。

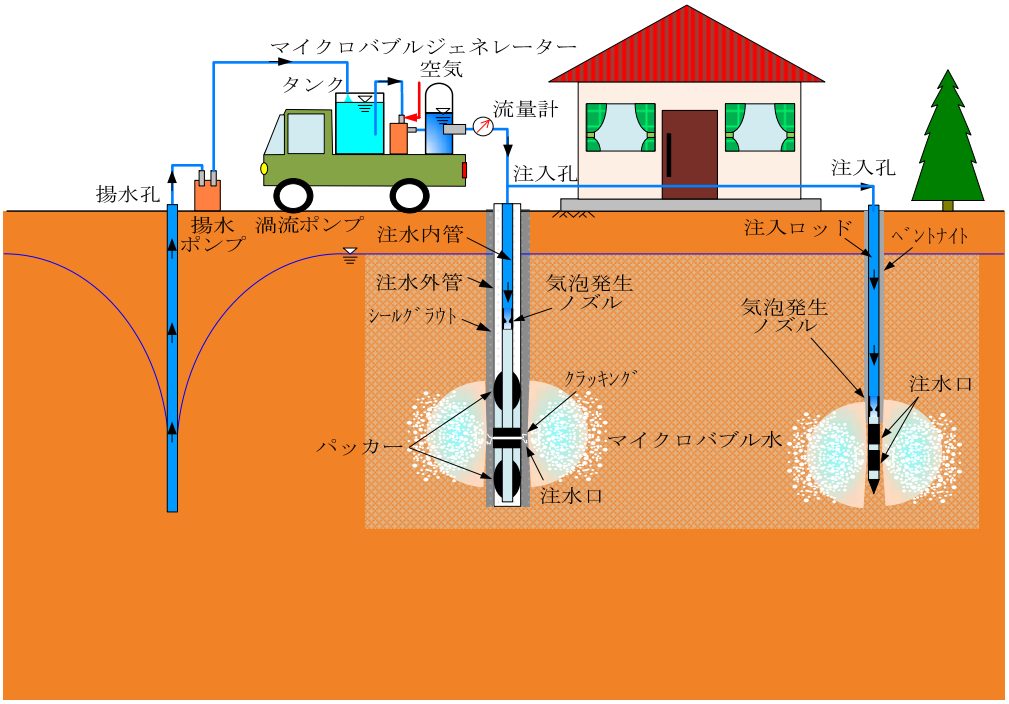


図 5.12　地盤を不飽和化する工法の施工概要

用いる材料が水と空気であるため環境負荷を考えなくてよいこと、施工機材が比較的コンパクトであるため、既存建物の有無にほぼ無関係に施工可能であること、既存埋設物への影響や施工後の埋設工事等に影響がないこと、他の工法との併用が容易であること等が利点として挙げられる。ただし、地盤条件により飽和度低下可能範囲が変化するため、事前の調査や室内試験による確認作業が必要なこと、新しく開発された工法であるため試験施工以外の施工実績がないこと、および施工後の出来型を確認するためには土壌水分計などによる原位置試験が（現状では）必要であり、そのためのコストと時間が必要であることなどが留意点として挙げられる。効果の継続性に関する管理・確認も必要であるが、再注入（再施工）は比較的容易である。なお、空気の他に浸透型の固化剤を使用する工法も提案されている。

２）対策効果の検討

ａ）対策仕様

入力地震動はL1相当地震動とし、当該工法の施工性を考慮(建物が存在していても、図5.13に示すように、建物直下を含む敷地全体に対策可能であると仮定）して、試設計を行った。対策効果を確認するための仕様は表5.10に示すとおりである。

表5.10　地盤を不飽和化する工法の対策仕様

項目	対策仕様
改良範囲	9.6m×12m（基礎下部）
注入孔間隔	2.4m
注入孔本数	20本
改良深さ	GL.-1.0m~-8.0m
飽和度	90%
液状化強度	原地盤の1.8倍 (既往の研究(Okamura,2003)により設定)

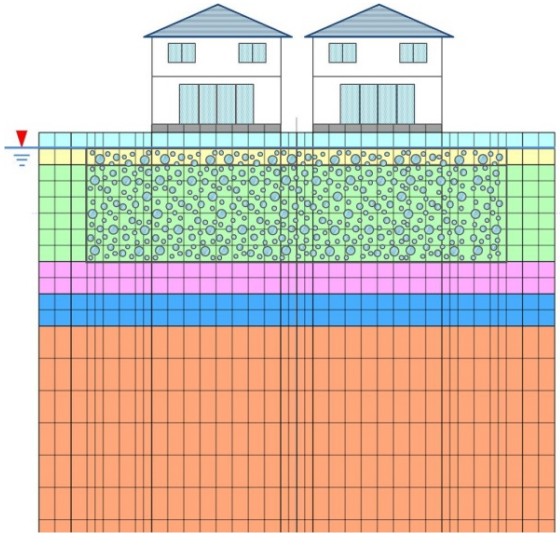


図 5.13　地盤不飽和化工法の対策仕様のイメージ

ｂ）2 次元動的有効応力解析の条件

FEM 解析では、地盤を不飽和化させた効果が施工した範囲内において一様であると仮定し、地盤の液状化強度を増加させた。すなわち、地盤の不飽和化による液状化強度の増大効果を、解析において使用されている間隙の体積弾性係数を変更することで表現した。

本工法に関するこれまでの研究成果に基づいて、液状化強度比が原地盤の 1.8 倍（飽和度 90%）となるように、間隙の体積弾性係数を変更した（パラメータの詳細な決定方法や解析結果については、別添資料５－１及び別添資料５－２を参照）。

ｃ）対策効果の検討結果

FL 法および FEM 解析による液状化判定、許容応力度判定、パンチング破壊判定の結果を表 5.11 に示す。

表 5.11　FL 法および FEM での検討結果

<table>
<tr><th colspan="2">計　算　法</th><th>FL 法
(設計)</th><th>FEM</th></tr>
<tr><td rowspan="4">液状化判定
FL 法：
FL≧１：○
FL＜１：×
FEM：
Ru≦0.95：○
Ru＞0.95：×</td><td>Bs 層</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td>Fs 層</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As1 層</td><td>○</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As2 層</td><td>×</td><td>○</td></tr>
<tr><td colspan="2">地盤の許容応力度判定
q_a≧w：○
q_a＜w：×</td><td colspan="2">○</td></tr>
<tr><td colspan="2">パンチング破壊判定
R_a≧W：○
R_a＜W：×</td><td colspan="2">○</td></tr>
</table>

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。

設計による FL 法での液状化判定で As2 層が液状化するとの判定となったものの、宅地側の目標性能である地盤の短期許容応力度判定およびパンチング破壊判定のいずれの場合も許容値を満足する結果となった。

３）適用可能性の検討と課題

対策効果の検討結果より、地盤不飽和化工法の場合には、設定した対策仕様にて目標性能が達成されうることがわかる。本工法を導入施工する際の特徴および留意点と、今後の検討課題を以下に示す。

ａ）地盤不飽和化工法の特徴と留意点

・施工用の機材が比較的コンパクトであり、既存の建物の有無にはほぼ無関係に施工が可能である。また、建物がある場合にもその直下を含む敷地全体への施工が可能である。

・（本項で検討した工法では）材料が水と空気なので環境負荷がなく、地盤内に改良体等が残らず、植栽などへの影響がほとんどない。加えて、施工時の発生残土が非常に少ない。

・注入部を確保（維持）しておくことで、再改良（再注入）が容易であり、他工法との併用も比較的容易である。

・開発されて間もない工法であるため、試験施工以外の施工実績がない。そのため、設計手法にも不確定要素が見られる。

・地盤の浅い層での改良効果は小さいとの指摘がある。地盤条件によっては、飽和度を低下させることが可能な範囲が変化する。

・大地震時には完全に液状化を防止することは難しい。また、地震により改良効果が減少（空気が喪失）する可能性があり、複数回の地震を想定する場合には、空気の再注入が必要となる場合がある。

b）浸透注入を行う工法の特徴と留意点

・浸透注入工法のため、薬液やマイクロバブル水の注入に時間を要する。

・改良効果の確認方法が飽和度であり、簡易な計測が現時点では難しい。

・施工範囲内における全体的な施工品質の確認が難しく、施工品質確保のための管理手法が完全には確立されていない部分がある。

・施工時にリーク等が発生した場合には、所定の液状化強度が確保できない可能性がある。

・対象地盤の地下水の流れが速い場合には、改良効果が減少する恐れがある（薬液やマイクロバブル水の流出の可能性）。ただし、比較的地下水位の流れの速い現場で、実証実験を実施した結果、150 日程度は飽和度を維持できることが確認されている。

・複数の地震動に対して、改良効果が減少する可能性がある。

c）今後の検討課題

・施工・管理方法に関する検討事項として、簡易な削孔方法および急速注入方法の開発が期待される。

・対策効果に関する未確認事項として、簡易的に地盤の飽和度などの改良効果やその範囲を確認する方法の開発が必要である。加えて、設計法の確立、液状化強度の評価方法の確立等が必要である。

・他工法との併用時の設計法の確立が必要である。

（４）個別対策工法の組み合わせ

１）組み合わせの種類

ここでは、既存の建物がある場合、すなわち建物直下への対策が困難で、建物周辺への対策に限定される場合を想定している。組み合わせの種類としては、

①間隙水圧消散工法と間隙水圧遮断工法(*)の組み合わせ

②間隙水圧消散工法と密度増大工法の組み合わせ

を取り上げて検討する。

(*)間隙水圧遮断工法：対象地盤を鋼矢板や連続地中壁等で囲い込むことにより外側からの水の流入を抑制し、囲われた範囲における地震時のせん断変形を抑制する効果が期待できる工法である（図 5.14 参照）。合わせて周辺部への土砂の側方流動を抑制して液状化による沈下の軽減を図る。この工法単独での液状化抑制効果は限定的であるが、他の個別対策工法との組み合わせることにより、相乗的効果が得られる可能性がある。

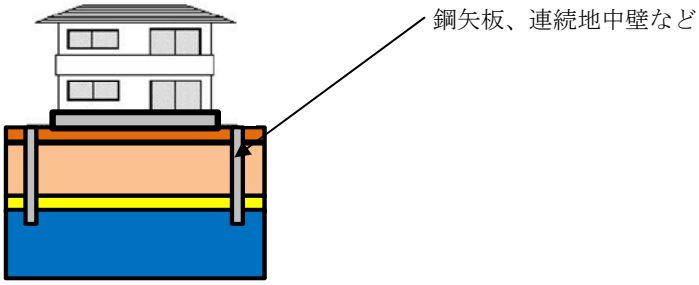


図 5.14　過剰間隙水圧遮断工法のイメージ

①過剰間隙水圧消散工法と過剰間隙水圧遮断工法の組み合わせ

住宅周囲に鋼矢板、連続地中壁等の壁を設け、さらにその壁と建物との間に間隙水圧消散工法を施す組み合わせの工法である（図 5.15 参照）。囲い込まれた部分（遮断壁内部）は狭く、間隙水圧消散のための施工に困難がともなうため、消散能力としては（２）で検討した場合よりも能力の小さい工法を採用せざるを得ない。

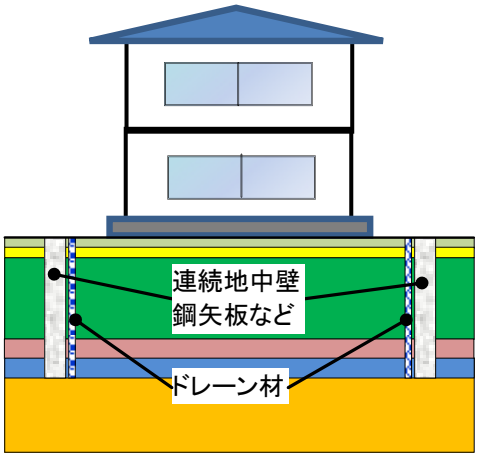


図 5.15　過剰間隙水圧消散工法と過剰間隙水圧遮断工法の組み合わせ（イメージ）

②過剰間隙水圧消散工法と密度増大工法の組み合わせ

ここでは、①と同様に既存の建物がある場合を想定しているが、建物直下を除く敷地内への施工を想定しているため、①と比べれば比較的施工スペースに余裕があるものと考えられる。したがって、過剰間隙水圧消散工法としては、前記（２）と同等の消散能力をもつ工法を採用できることとした。

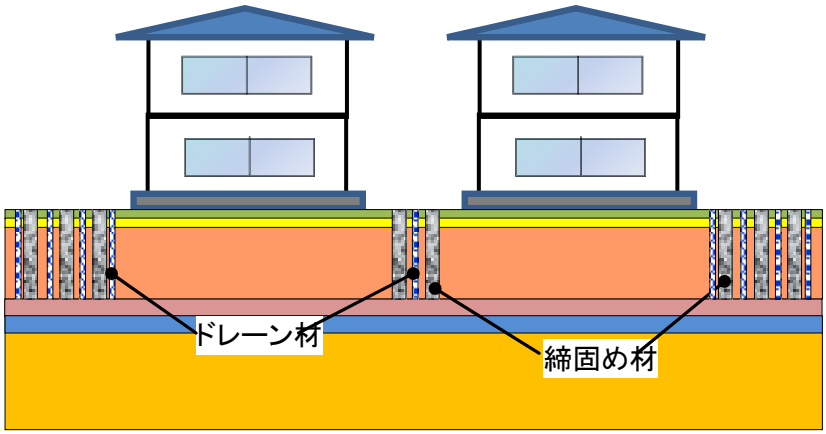


図 5.16　過剰間隙水圧消散工法と密度増大工法の組み合わせ（イメージ）

上記①、②とも、過剰間隙水圧の消散を設計に取り込むための簡易な方法が提案されていないので、現状では建物直下の液状化の可能性については、現地盤の透水係数やドレーン材の透水性等に基づいて、高度な解析に頼らざるを得ない。

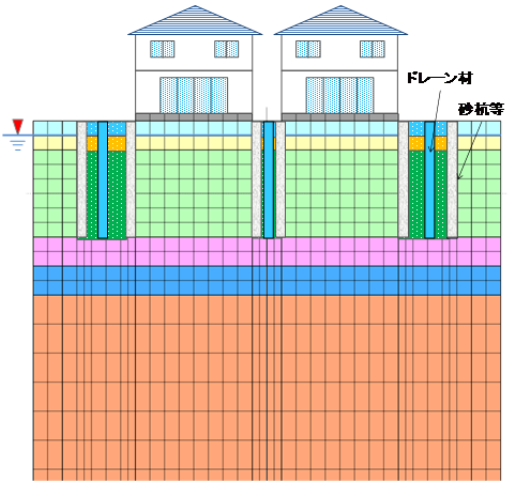
２）対策効果の検討

ａ）対策仕様

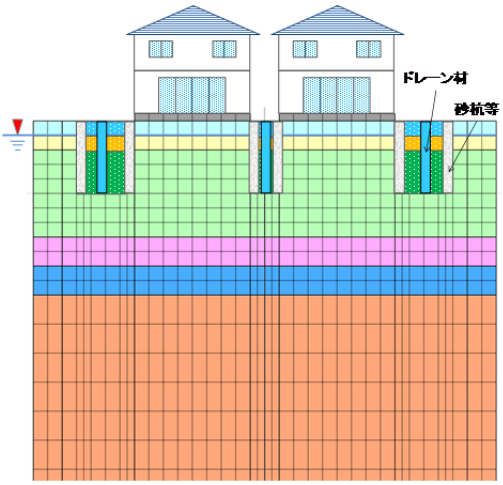
個別対策工法の組み合わせに関する特性や施工条件を勘案し、①、②で示した組み合わせに関して対策仕様を策定した（表 5.12、及び図 5.17 参照）。なお、試設計の検討は行っていない。

表 5.12　個別対策工法の組み合わせによる対策仕様

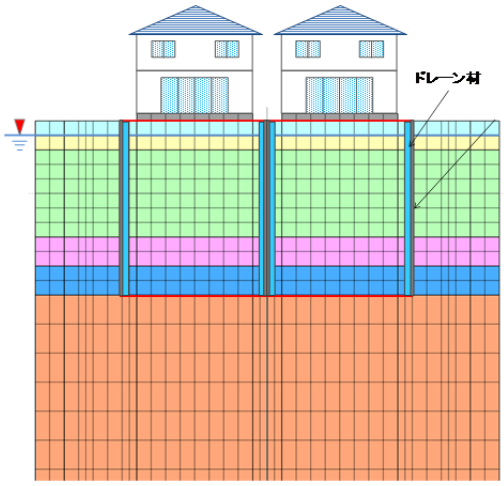
ケース名	個別対策 1 の仕様	個別対策 2 の仕様
ケース 1 ②に相当	間隙水圧消散工法 改良ピッチ 1.6m 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内
ケース 2 ②に相当	間隙水圧消散工法 改良ピッチ 1.6m 改良深度 5.0m 建物直下を除く敷地内	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 5.0m 建物直下を除く敷地内
ケース 3 ①に相当	間隙水圧消散工法 改良ピッチ 20cm 改良深度 12.0m 建物周囲のみ	間隙水圧遮断工法 U 形鋼矢板、型式Ⅱ 施工深度 12.0m



(a) ケース１



(b) ケース２



(c) ケース３

図 5.17　個別対策工法の組み合わせの検討仕様（イメージ）
注）(c) ケース３の赤枠は鋼矢板の加振並行壁を示す）

ｂ）2 次元動的有効応力解析の条件

各組み合わせ対策（ケース１～ケース３、表 5.12 参照）に対して FEM 解析による検証を行う際のパラメータの設定にあたっては、それぞれの個別対策工法ごとの設定手法を組み合わせて用いた（別添資料５－１参照）。

入力地震動は L1 相当地震動とし、既存の建物がある状態を想定した。

ｃ）対策効果の検討結果

FEM での解析結果および FL 値の判定結果を表 5.13 に示す。なお、表 5.13 では、参考として無対策地盤の検討結果についても FL 法による結果も併せて示している（解析結果の詳細については、別添資料５－２を参照）。

表 5.13　FEM 解析での検討結果（組み合わせ工法）

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">対策の仕様</td><td colspan="2">無対策</td><td colspan="2">ケース１</td><td colspan="2">ケース２</td><td colspan="2">ケース３</td></tr>
<tr><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td></tr>
<tr><td rowspan="4">液状化判定
FL 法：
FL≧１：○
FL＜１：×
FEM：
Ru≦0.95：○
Ru＞0.95：×</td><td>Bs 層</td><td>×</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>Fs 層</td><td>×</td><td>×</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As1 層</td><td>○</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As2 層</td><td>×</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td colspan="2">地盤の許容応力度判定
q_a≧w：○、q_a＜w：×</td><td colspan="2">×</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td></tr>
<tr><td colspan="2">パンチング破壊判定
Ra≧W：○、Ra＜W：×</td><td colspan="2">×</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td></tr>
</table>

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。
注 2）「－」は検討を行っていないことを示す。

ケース１～ケース３のいずれの対策仕様でも、L1 相当地震動に対する液状対策としての効果が期待できるという結果となった。

d）L2 地震時の検討

イ）検討した対策の仕様

a)に示したケース１およびケース２の対策仕様について、L2 地震動が入力された場合に発生しうる建物の沈下や傾斜の程度について FEM 解析により検討した(表 5.12 および図 5.17（a)、(b)を参照)。

ロ）対策効果の検討結果

L2 地震動入力時の FEM 解析による検討結果を表 5.14 に示す。参考として、無対策地盤の検討結果についても合わせて示す。なお、表 5.14 では、参考として無対策地盤の検討結果についても（FL 法による結果も併せて）示している（解析結果の詳細については、別添資料５－２を参照)。

個別対策工法の組み合わせの場合、FEM 解析による結果からは L2 地震動に対してケース１、２ともに液状化を防ぐことはできず、建物の沈下量傾斜量ともに無対策の場合と有意な相違のない結果となった。

表 5.14　L2 地震動対策効果検討結果（個別対策工法の組み合わせ）

<table>
<tr><td colspan="2">仕　様</td><td colspan="2">無対策</td><td colspan="2">ケース１</td><td colspan="2">ケース２</td></tr>
<tr><td colspan="2">検討方法</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td></tr>
<tr><td rowspan="4">液状化判定
FL 法：
FL≧１：○
FL＜１：×
FEM：
Ru≦0.95：○
Ru＞0.95：×</td><td>Bs 層</td><td>×</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>Fs 層</td><td>×</td><td>×</td><td>－</td><td>×</td><td>－</td><td>×</td></tr>
<tr><td>As1 層</td><td>○</td><td>×</td><td>－</td><td>×</td><td>－</td><td>×</td></tr>
<tr><td>As2 層</td><td>×</td><td>×</td><td>－</td><td>×</td><td>－</td><td>×</td></tr>
<tr><td colspan="2">地震動終了直後の
住宅の沈下量(cm)
＜参考値＞</td><td>－</td><td>78</td><td>－</td><td>87</td><td>－</td><td>74</td></tr>
<tr><td colspan="2">地震動終了直後の
住宅の傾斜量
＜参考値＞</td><td>－</td><td>-0.113</td><td>－</td><td>-0.126</td><td>－</td><td>-0.107</td></tr>
</table>

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。

注 2）「－」は検討を行っていないことを示す。

注 3）建物傾斜量の符号は解析計算上、反時計まわりを正としたものである。

３）適用可能性の検討と課題

対策効果の検討の結果、L1 相当地震動に対してはいずれのケースも宅地側の目標性能を満足する結果となり、液状化対策工法として適用できる（効果が期待できる）可能性があるものと考えられる。一方、L2 地震動に対しては、液状化は防止できないものの、液状化の発生を遅らせる効果や、沈下量、傾斜を軽減する効果を確認することができる。

組み合わせ工法（だけで対応するケース）に関する特徴や留意点は、それぞれの個別対策工法におけるものと変わりないため割愛するが、今後の検討課題に関しては、各個別対策における検討課題を解決しつつ、組み合わせによる相乗効果についても今後さらに検討が進められることが大切であると考えられる。

５．１．２　一体化対策工法と個別対策工法を併用する場合について

本節５．１．２では、道路と宅地の一体対策だけではL1相当対応とならなかった場合に、個別対策工法を併用してL1相当対応を実現するための検討と、道路と宅地の一体対策のみでL1相当対応が可能であるが、個別対策を併用することでL2対応となる可能性のある場合を想定した検討を行った。

L1相当対応の検討では、対策工法毎に、敷地条件による施工の制約や対策効果を考慮した上で、試設計を行い、対策の仕様を決定した。

決定した対策の仕様に対して、FL値を用いた簡易判定（FL法）による検討、および2次元動的有効応力解析（LIQCA）による検討を行い、地盤の短期許容応力度判定、パンチング破壊による判定を行った。

L2地震動時の検討では、2次元動的有効応力解析により地盤の液状化判定、地震動終了直後の建物の最大沈下量、建物の最大傾斜量を算定し、L2対応となる可能性を検討した。

表5.15に、3章および4章で検討した地下水位低下工法と格子状改良工法の対策仕様に関する検討結果を示す。表5.15のうち、道路側の目標性能（道路部のFL値が1より大きくなる）を満足したものについて、個別対策工法を併用した場合の検討を行った。

L1相当対応の検討をするケース、L2地震時の検討をするケースをそれぞれ分けて以下に示す。

<u>L1相当対応の検討をするケース</u>

道路と宅地の一体化対策のみでは、宅地部がL1相当対応とならない可能性がある場合に、個別対策工法を併用することで宅地部がL1相当対応となる個別対策工法の仕様を決定し、検討を行った。検討した一体化対策の仕様は以下のとおりである。

・格子状改良工法：26m×26mグリッド（道路部2重壁）

<u>L2地震時の検討をするケース</u>

L2地震時の検討を実施した仕様は、道路と宅地の一体化対策のみで宅地部がL1相当対応となる仕様に対して、さらに個別対策工法を併用することで、L2対応となる可能性について検討をした。検討した仕様は以下のとおりである。

・格子状改良工法：26m×26mグリッド（道路部2重壁）＋地下水位1mの低下
・格子状改良工法：13m×13mグリッド（道路部2重壁）

なお、地下水位低下工法についてはL2地震動に対する検討を行っていないが、

① 地下水位が揚水井戸周辺で局所的に変化すること。

② ①に伴い、粘性土層の圧密沈下量が定量的に把握できないこと。

③ 以上の影響を考慮した個別対策工法の試設計できなかったこと。

④ 2次元動的有効応力解析での初期条件の設定が不明であり、得られた結果を他工法との横並びで比較することが困難であること。

などに留意して個別対策工法と併用した検討を今後実施することが大切である。

表5.15　一体化対策の検討結果一覧

道路と宅地の一体化対策		地下水位低下工法	格子状改良工法						
対策の仕様 ※詳細は第3章、第4章を参照		地下水位 GL-5m	13m×13m グリッド		26m×26m グリッド		26m×26m グリッド ＋地下水位 1mの低下		130m×26m グリッド
			道路部 1重壁	道路部 2重壁	道路部 1重壁	道路部 2重壁	道路部 1重壁	道路部 2重壁	道路部 2重壁
道路側	道路部全層で FL≧1：○ 上記以外：×	○	○	○	×	○	○	○	○
宅地側	地盤の短期許容応力度判定 q_a≧w：○ q_a＜w：×	○	○	○	―	―	―	○	―
宅地側	パンチング破壊判定 Ra≧W：○ Ra＜W：×	○	○	○	―	―	―	○	―
個別対策工法を併用した検討の有無		しない	しない	L2対応を検討	しない	L1相当対応を検討	しない	L2対応を検討	しない

注1：表中「－」は検討を行っていないことを示す。

（1）L1相当対応の検討を行うケース

道路と宅地の一体化対策として格子状改良工法（26m×26mグリッド-道路部2重壁）と個別対策工法を併用することでL1相当対応となる仕様について検討を行った。

検討する個別対策工法は、格子状改良工法のみではL1相当対応とならなかった場合に用いる補助的な工法という位置づけであるため、設計時に格子状改良工法の液状化発生抑制効果（せん断変形抑制効果）が取り入れられる工法である必要がある。

格子状改良工法の効果を導入した個別対策工法の設計方法を検討した結果、従来型工法を除けば、密度増大工法のみ試設計が可能となった。

間隙水圧消散工法および個別対策工法の組み合わせと格子状改良工法を併用した場合については、格子状改良工法の液状化発生抑制効果を取りこんだ試設計ができず、地盤の強度を上げる工法（地盤不飽和化工法）については、格子状改良工法の液状化発生抑制効果を取りこんだ試設計が可能であったが、その方法は飽和度を調整する方法であったことから、現時点では飽和度を精緻に管理することが事実上不可能であると判断し、検討を行わないものとした。

したがって、一体化対策と併用する個別対策工法を密度増大工法として検討を行った。

１）工法の概要

格子状改良工法については４．１に、密度増大工法については５．１．１（１）にそれぞれ工法概要に関する記述があるため省略する。

２）対策効果の検討

ａ）対策仕様

入力地震動をL1相当とし、格子状改良工法が施工された条件で密度増大工法の試設計を実施した。格子状改良工法の仕様、試設計によって求められた密度増大工法の仕様（以下、基本仕様）をそれぞれ表5.16および表5.17に示す。参考として、個別対策工法単独時に検討した仕様を追加検討した。追加検討したケースの対策仕様を表5.18に示す。図5.18には検討する各対策仕様のイメージを示す。

表5.16　格子状改良工法の仕様

項目	対策仕様
改良体の設計基準強度	1.5N/mm^2
改良体の一軸圧縮強度	3.6N/mm^2
改良体の初期せん断剛性	930N/mm^2
改良体の径	1.0m
格子間隔	26m×26m(道路部2重壁)
改良長	GL.-1.0m～-13.0m

表5.17　格子状改良工法を併用した密度増大工法の対策仕様

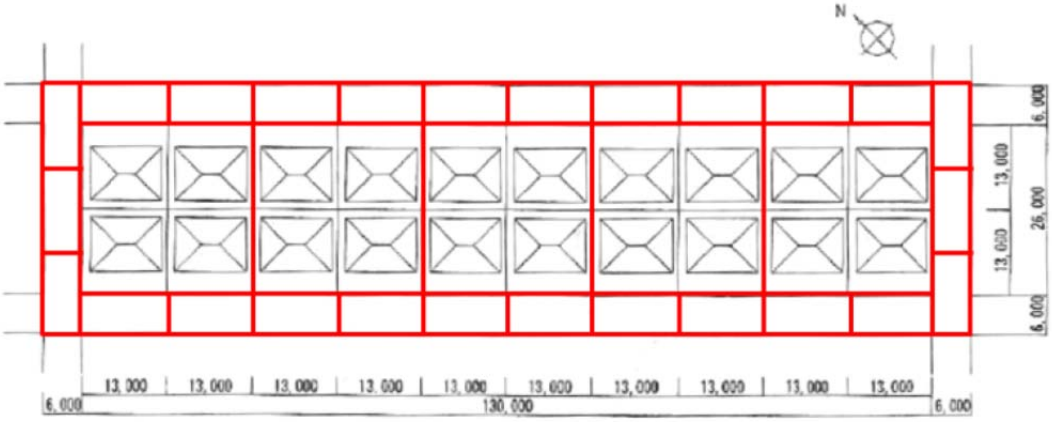
項目	対策仕様(基本仕様)
改良径	700mm
改良深さ	GL.-8.0mまで
改良ピッチ	□3.9m
改良率	2.5%
改良範囲	敷地内全面(建物直下含む)

※1辺を3.9mとする正方形配置の場合、□3.9mと表記した。

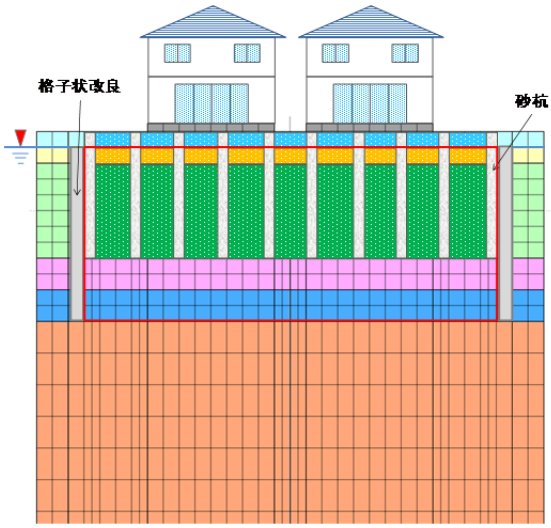
表 5.18　追加検討ケースの密度増大工法の対策仕様

項目	追加検討の対策仕様	
改良径	700mm	700mm
改良深さ	GL.-8.0m まで	GL.-5.0m まで
改良ピッチ	□2.3m※	□2.3m※
改良率	6.6%	6.6%
改良範囲	敷地内全面(建物直下含む)	敷地内全面(建物直下含む)

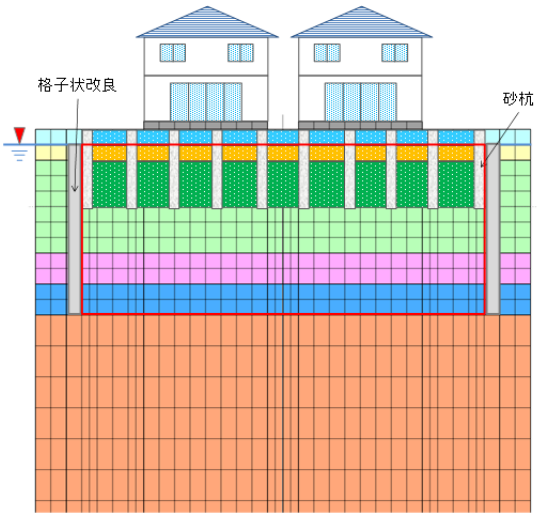
※1 辺を 2.3m とする正方形配置の場合、□2.3m と表記した。



(a)　格子状改良工法の平面図(赤枠は格子状改良工法を示す)



GL.-8.0m まで改良したケース



GL.-5.0m まで改良したケース

(b)立面図(赤枠は加振並行壁を示す)

図 5.18　一体化対策工法と個別対策工法の併用（L1 相当対応）のイメージ

ｂ）2 次元動的有効応力解析の条件

格子状改良工法のモデル化については、４．２．３に示した格子状改良工法のモデル化の方法に加えて、改良壁と地盤との間にはジョイント要素を配置した。密度増大工法の対策効果のモデル化については、５．１．１（１）と同様である（各工法のパラメータの詳細な決定方法については、別添資料５－１を参照)。

ｃ）対策効果の検討結果

FL 法および FEM での液状化判定、許容応力度判定、パンチング破壊判定の結果を表 5.19 に示す。

表 5.19　一体化対策工法と個別対策工法の併用（L1 相当対応）の検討結果

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">対策の仕様</td><td colspan="6">改良範囲：敷地内全面改良</td></tr>
<tr><td colspan="4">改良深さ：8m</td><td colspan="2">改良深さ：5m</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2">改良率：2.5%</td><td colspan="2">改良率：6.6%</td><td colspan="2">改良率：6.6%</td></tr>
<tr><td colspan="2">計算法</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td><td>FL 法</td><td>FEM</td></tr>
<tr><td rowspan="4">液状化判定
FL 法：
FL≧１：○
FL＜１：×
FEM：
Ru≦0.95：○
Ru＞0.95：×</td><td>Bs 層</td><td>○</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>Fs 層</td><td>×</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As1 層</td><td>○</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td>As2 層</td><td>×</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td><td>－</td><td>○</td></tr>
<tr><td colspan="2">地盤の許容応力度判定
q_a≧w：○
q_a＜w：×</td><td colspan="2">○</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td></tr>
<tr><td colspan="2">パンチング破壊判定
Ra≧W：○
Ra＜W：×</td><td colspan="2">○</td><td colspan="2">－</td><td colspan="2">－</td></tr>
</table>

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。

注 2)「－」は検討を行っていないことを示す。

FEM 解析による検討の結果、３つのケースすべてについて L1 相当対応可能であることが確認された。

（２）L2 地震時の対応を検討するケース

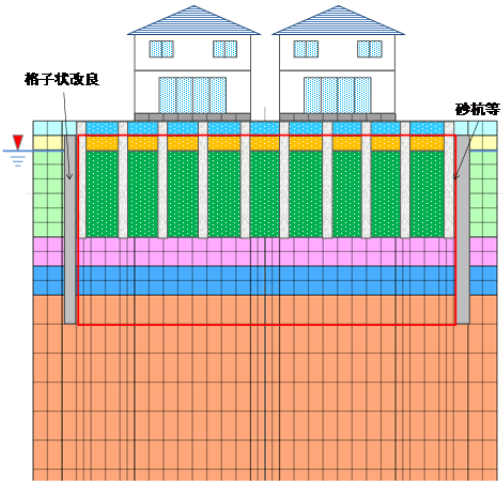
道路と宅地の一体化対策として、宅地側で L1 対応となった「格子状改良工法：26m×26m グリッド(道路 2 重)＋地下水位 1m の低下」および「格子状改良工法：13m×13m グリッド(道路 2 重)」について個別対策工法との併用を想定して L2 地震動時の検討を行った。

１）一体化対策と個別対策工法の組み合わせパターン

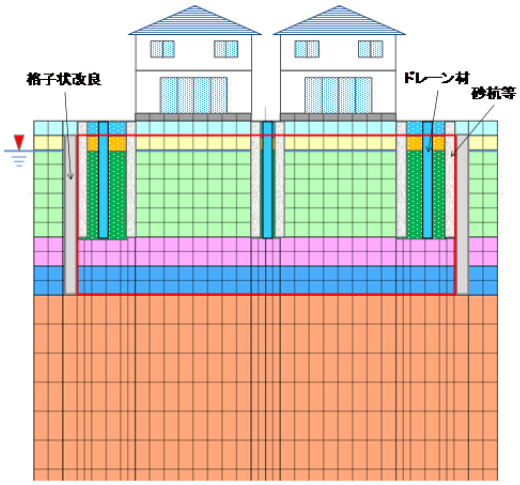
L2 地震動時の対応の検討を行う一体化対策工法と個別対策工法の組み合わせパターンとその仕様を表 5.20 に示す。図 5.19 には検討する各対策仕様のイメージを示す。

表 5.20　L2 対応を行う対策仕様の検討ケース

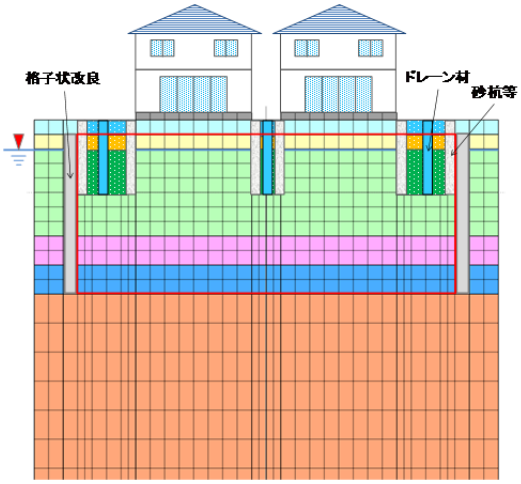
ケース名	一体化対策	個別対策①	個別対策②
ケース１－１	格子状改良工法 26m×26m グリッド (道路部 2 重壁) ＋地下水位低下 GL.-2.0m	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 8.0m 敷地内全面	なし
ケース１－２	格子状改良工法 26m×26m グリッド (道路部 2 重壁) ＋地下水位低下 GL.-2.0m	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内	間隙水圧消散工法 改良ピッチ 1.6m 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内
ケース１－３	格子状改良工法 26m×26m グリッド (道路部 2 重壁) ＋地下水位低下 GL.-2.0m	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内	間隙水圧消散工法 改良ピッチ 1.6m 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内
ケース２－１	格子状改良工法 13m×13m グリッド (道路部 2 重壁)	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 8.0m 敷地内全面	なし
ケース２－２	格子状改良工法 13m×13m グリッド (道路 2 重壁)	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内	間隙水圧消散工法 改良ピッチ 1.6m 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内
ケース２－３	格子状改良工法 13m×13m グリッド (道路部 2 重壁)	密度増大工法 改良率 6.6% 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内	間隙水圧消散工法 改良ピッチ 1.6m 改良深度 8.0m 建物直下を除く敷地内



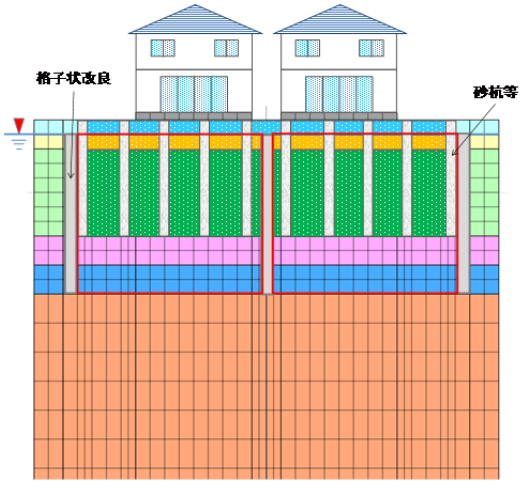
(a)　ケース１－１



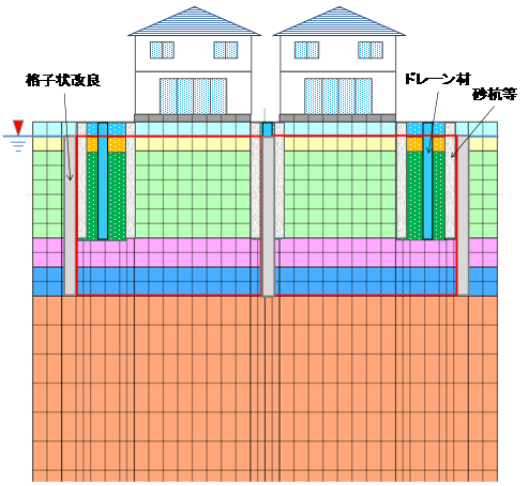
(b) ケース１－２



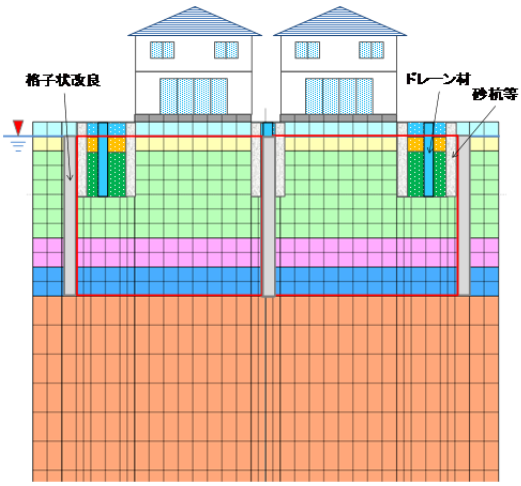
(c)　ケース１－３



(d) ケース２－１



(e)　ケース２－２



(f) ケース２－３

図 5.19　一体化対策と個別対策の組み合わせによる L2 対応仕様のイメージ

２）対策効果の検討結果

FEM 解析による検討結果を表 5.21 に示す。表中には参考として無対策の結果を FL 法の検討結果と併せて示す。

表 5.21　一体化対策工法と個別対策工法の組み合わせ検討結果（L2 地震動対応）

検討ケース		無対策		ケース１－１		ケース１－２		ケース１－３	
		FL 法	FEM	FL 法	FEM	FL 法	FEM	FL 法	FEM
液状化判定 FL 法： FL≧１：○ FL＜１：× FEM： Ru≦0.95：○ Ru＞0.95：×	Bs 層	×	○	－	○	－	○	－	○
	Fs 層	×	×	－	×	－	×	－	×
	As1 層	○	×	－	×	－	×	－	×
	As2 層	×	×	－	×	－	×	－	×
地盤の許容応力度判定 q_a≧w：○、q_a＜w：×		－	－	－	－	－	－	－	－
パンチング破壊判定 Ra≧W：○、Ra＜W：×		－	－	－	－	－	－	－	－
地震動終了直後の建物の沈下量(cm) ＜参考値＞		－	78	－	2	－	4	－	4
地震動終了直後の建物傾斜量 ＜参考値＞		－	-0.113	－	0.001	－	-0.005	－	-0.004

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。

注 2）「－」は検討を行っていないことを示す。

注 3）建物傾斜量の符号は解析計算上、反時計まわりを正としたものである。

表 5.21（続き）　一体化対策工法と個別対策工法の組み合わせ検討結果（L2 地震動対応）

検討ケース		無対策		ケース２－１		ケース２－２		ケース２－３	
		FL 法	FEM	FL 法	FEM	FL 法	FEM	FL 法	FEM
液状化判定 FL 法： FL≧１：○ FL＜１：× FEM： Ru≦0.95：○ Ru＞0.95：×	Bs 層	×	○	－	×	－	×	－	×
	Fs 層	×	×	－	×	－	×	－	×
	As1 層	○	×	－	×	－	×	－	×
	As2 層	×	×	－	×	－	×	－	×
地盤の許容応力度判定 q_a≧w：○、q_a＜w：×		－	－	－	－	－	－	－	－
パンチング破壊判定 Ra≧W：○、Ra＜W：×		－	－	－	－	－	－	－	－
地震動終了直後の建物の沈下量(cm) ＜参考値＞		－	78	－	2	－	2	－	2
地震動終了直後の建物傾斜量 ＜参考値＞		－	-0.113	－	0.000	－	0.000	－	0.000

注 1）FL 法：FL 値による簡易計算法、FEM：2 次元動的有効応力解析を指す。

注 2）「－」は検討を行っていないことを示す。

注 3）建物傾斜量の符号は解析計算上、反時計まわりを正としたものである。

表 5.21 の結果より、検討した６つのケースすべてについて、液状化防止はできないものの、建物沈下や傾斜に関しては大幅な軽減が見込まれる結果となった。しかし、有限要素法による解析という特性を勘案すると、実際に起こりうる現象を完全に再現（表現）しているとは言えない点には留意する必要がある。

また、圧密沈下量について考えると、液状化層厚と沈下量の関係式（5.1 式）から、どのケースにおいても大凡 50cm 程度の沈下が見込まれるものと推測される（図 5.20 参照）。

〔液状化による沈下量〕　＝　〔液状化層厚〕　×　〔沈下率〕

$$\delta\,(\mathrm{cm}) = H_{FL}(\mathrm{m}) \times (\eta : 0.05) \times 100 \quad (5.1\text{ 式})$$

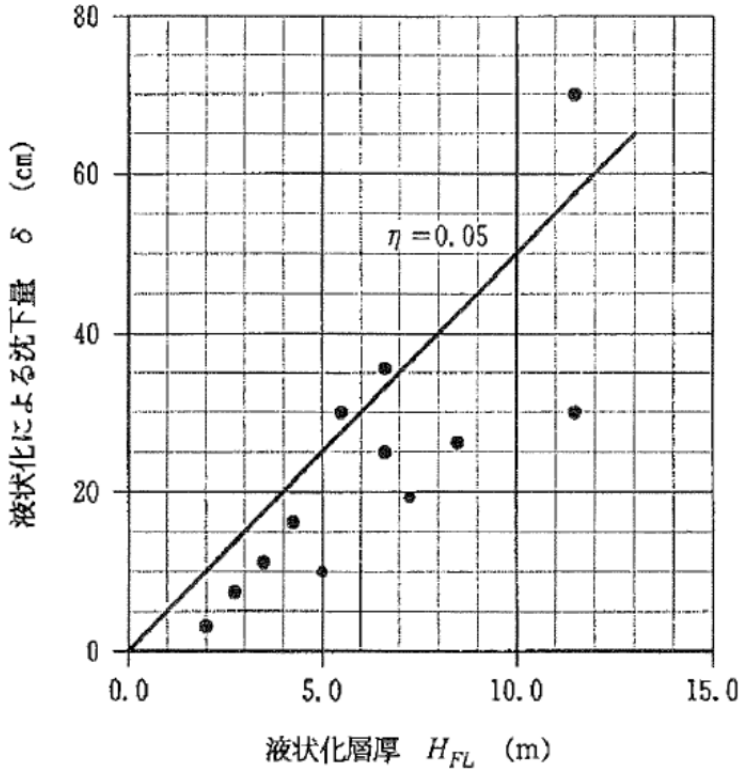


図 5.20　液状化層厚と液状化による沈下量の関係

５．２　直接地盤に施す液状化対策以外の工法

地盤に施す液状化対策以外の工法とは、地盤の液状化を直接防止・軽減させるための工法ではなく、液状化をある程度許容して、主に住宅側で対策する広義の液状化対策工法である。

この対策の方法には、主に対応する方法によって、

・建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（従来型工法）

・住宅重量と地盤の重量とのバランスで有害な沈下・傾斜を防ぐ工法

・沈下・傾斜等を修正するためのシステムをあらかじめ建物側に組み込む工法

の 3 つに大別できる。以下にそれぞれの工法の概要を中心に、特徴や留意点等について述べる※。

※直接地盤に施す液状化対策以外の工法については、（すべてではないが）地盤の許容応力度判定やパンチング破壊に関する検討を加えている。その結果については別添資料５－３を参照されたい。

５．２．１　建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（従来型工法）

建物側に杭などの基礎構造を採用することにより、建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（従来型工法）は、地盤の液状化を直接的に防止する工法ではないが、地盤の液状化時に建物の沈下や傾斜の発生を抑制することが可能な工法である。

具体的な工法としては、杭基礎工法、深層混合処理工があり、それぞれの工法の概要と特徴を以下に示す。

（１）杭基礎工法（図 5.21 参照）

杭基礎工法は、戸建住宅の基礎として利用されることは多くないが、住宅の沈下が予想される軟弱地盤上に建てる住宅では必要に応じて利用され、液状化の危険性のある地盤においても、一般の建築物に使用されている安全性が高く、施工実績のある工法である。ここでは、住宅地での施工を考慮し、比較的省スペースでの施工が可能な小口径の鋼管杭による対策を検討した。

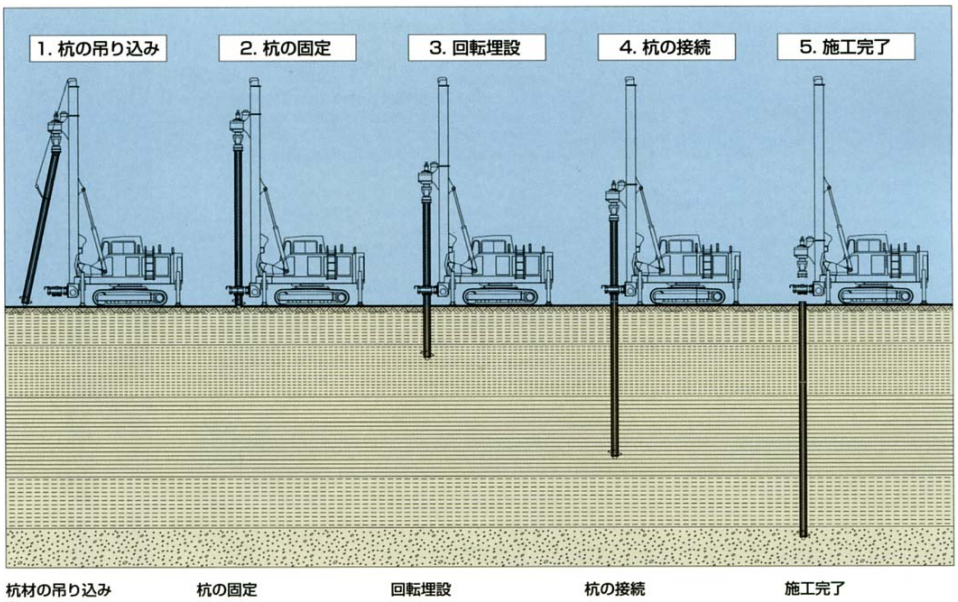


図 5.21　杭基礎工法の施工概要

この工法の特徴としては、省スペースかつ低空頭に対応できるだけでなく、低振動、低騒音で排出残土のない施工が可能である。ただし、既存住宅がある場合には施工ができないので、新規に住宅を建築する際、あるいは曳き家後に施工を行うこととなる。

（２）深層混合処理（柱状地盤改良）工法（図 5.22 参照）

撹拌混合装置の先端からセメント系固化材をスラリーとして地盤に注入し、地盤と固化材を撹拌混合することによって、地盤中に円柱状のコラムを築造する工法である。

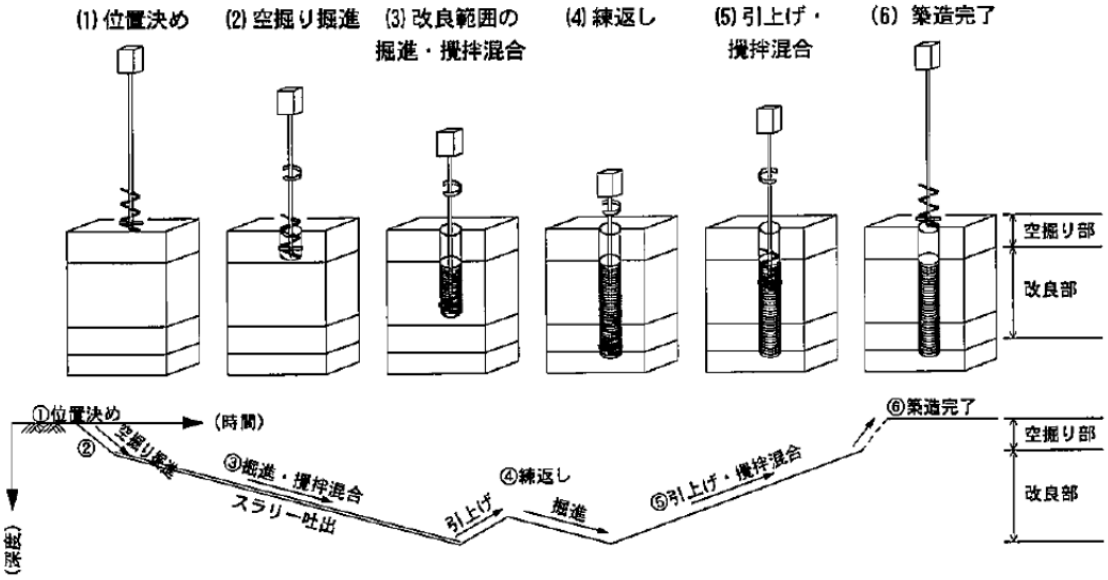


図 5.22　深層混合処理工法の施工概要

この工法の特徴としては、騒音や振動の発生の少ない施工が可能で、構造物の基礎としてだけでなく、多少の締め固め効果や地盤の剛性増加による液状化抑制効果が期待される点にある。

ただし、杭基礎工法と同様に、既存住宅がある場合には施工ができず、新規に住宅を建築する際、あるいは曳き家後に施工を行うことになる。

（３）液状化対策として留意すべき点

建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法の施工実績は多いが、液状化対策として採用する際には、地盤の沈下が生じた際に抜け上がりが生じる可能性があるという点、ネガティブフリクションによる杭体の損傷が生じるおそれがある点などである。

５．２．２　住宅重量と地盤の重量とのバランスで有害な沈下・傾斜を防ぐ工法

地盤が液状化した場合には、液状化した層の水圧とその上部にある土層による荷重はつりあっているが、その土層の上部に住宅があればつり合いのバランスがとれなくなることが多い。しかし土層の厚さによっては、そのせん断抵抗力によって住宅の荷重を支えることが可能である。

建物直下の土層を、本来の土よりも軽い材料で置換することや、地下室を設置しておくことなどによって、このバランスを確保することがより容易になることが考えられる。これが本対策工法の基本的な考え方である。ここでは、浮き基礎工法を例に検討を行った。

（１）浮き基礎工法（図 5.23 参照）

浮き基礎工法では、建物重量と基礎根入れ部分の掘削により排除する土の重量をバランスさせることにより、基礎下地盤の地中応力を増加させることなく、有害な沈下障害等の発生を防ぐことができる。

これまで軟弱地盤対策としての実績は多数報告されており、液状化対策として採用された例は少ないとはいえ、杭基礎等の他の基礎形式に比べて合理的な工法となりうる可能性がある。

ただし、住宅下の地盤が均等に液状化せず、多少の傾きが生じたり、基礎部分から住宅全体が浮き上がってしまうなどの現象が生じる可能性も否定はできない。

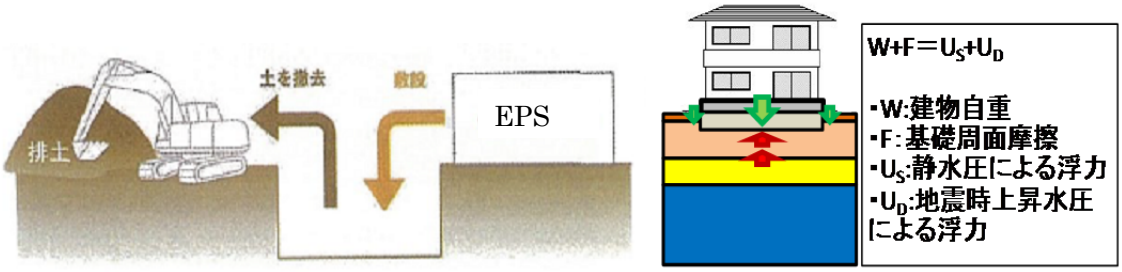


図 5.23　浮き基礎工法の工法概要と原理（イメージ）

（２）その他の工法について

深層混合処理工法と浅層混合処理工法の組み合わせ工法（表層部分 1.0m程度にセメント系固化剤を攪拌混合して盤状に締め固める工法と、５．２．１（２）で示した深層混合処理工法を組み合わせた工法）などで、浅層改良部分を軽量化するなどして浮き基礎工法と同様の考え方が適用できる可能性や、深層混合処理工法により築造されたロの字型の改良壁により格子状改良工法と同様に改良壁内側の地盤の液状化発生を抑制できる可能性があ

るが、現状では一般的に認められた支持力機構に関する考え方が整理されていない。参考として一例を図 5.24 に示す。

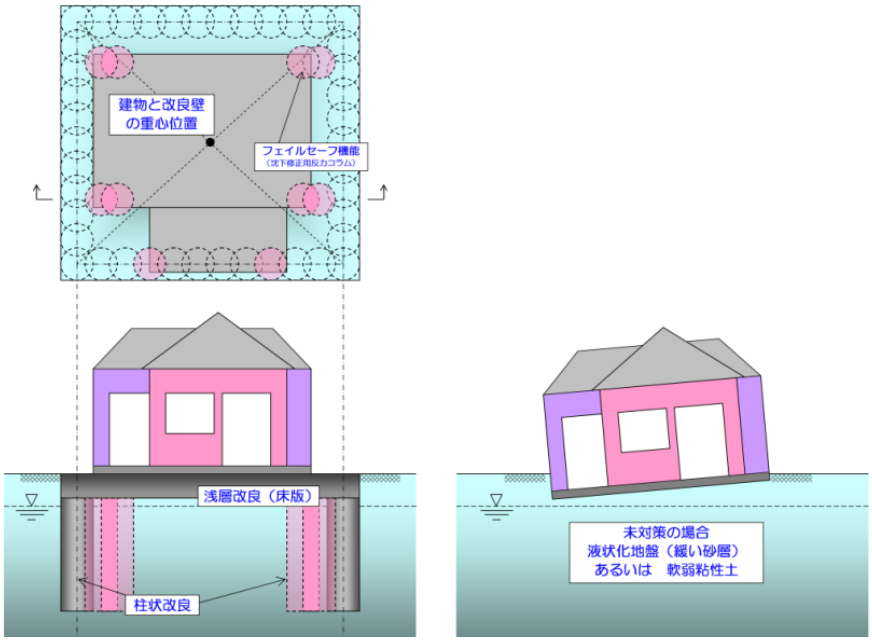


図 5.24　深層混合処理工法と浅層混合処理工法の組み合わせのイメージ

５．２．３　沈下・傾斜等を修正するためのシステムを建物側に組み込む工法

液状化による建物（地盤を含む）の沈下・傾斜等は、建物側に大きな損傷を与えない場合でも、所有者・居住者の生活に支障があることが多くの調査結果等で紹介されている。

住宅に沈下や傾斜修正のためのシステムを建物に組み込むと、地盤の液状化の発生に伴い建物の沈下や傾斜が発生した際に、すみやかに修復することが可能である。建物の供用期間内に液状化がおこるような大地震が発生しない場合には、費用負担が最も小さくなると考えられ、大地震の発生により液状化した場合でも、建物に損傷を与えることなく、迅速に対応可能であるため、広義の液状化対策工法として位置づけられる。

修正方法の違いにより、以下の３つのタイプについて述べる。

・土台修正ヒンジ付アンカーボルトの先組み工法
・ジャッキアップ用反力版先組み工法
・新築時沈下・傾斜修正対応型工法

（1）土台修正ヒンジ付アンカーボルトの先組み工法

1）従来からの修正工法（土台からの建物沈下・傾斜修正工法）の問題点

建物の沈下・傾斜を土台から修正（基礎は傾斜した状態）する方法（図 5.25 参照）は、基礎と土台を緊結するアンカーボルトの伸長が必要になり、アンカーボルトの切断、あるいは基礎コンクリートをハツリとって対応することがあった（写真 5.1 参照）。また、沈下修正の適用範囲の目安が、「修正高さ 100㎜ 以下」とされていた。

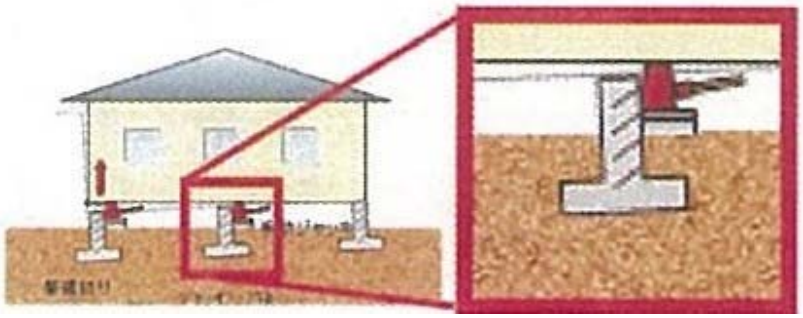


図 5.25　従来からの修正工法の概要（土台からの建物沈下・傾斜修正工法）

a）土台ジャッキアップ時の状態　　b）アンカーボルトの伸長

写真 5.1　従来工法の問題点

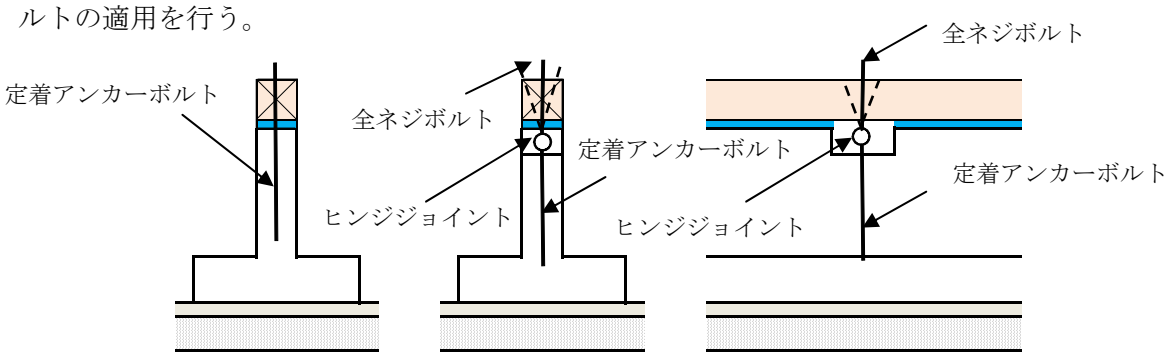
2）提案工法の改善ポイント（図 5.26、図 5.27 参照）

a）「土台と基礎の緊結」に対する性能の維持

アンカーボルトを容易に伸長可能にしておく。

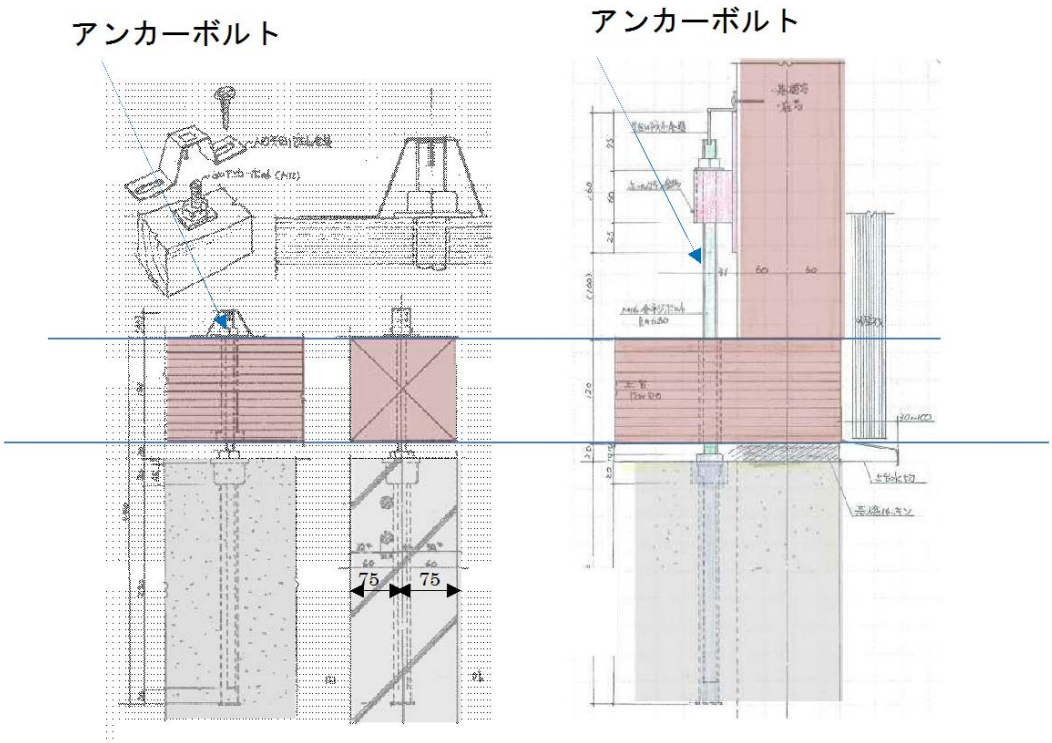
b）修正高さの倍増（200㎜ 程度までの適用）

傾斜修正にも追従できるような、ヒンジ機構を有する全ネジボルト型のアンカーボルトの適用を行う。

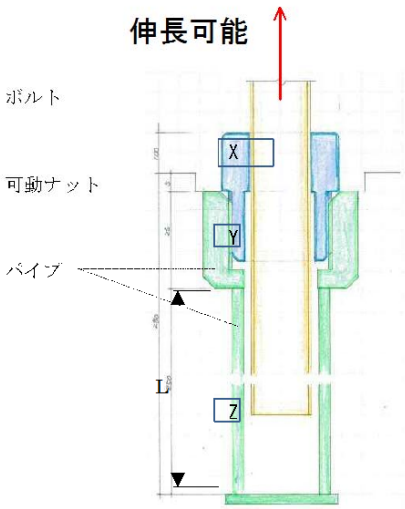


a）従来型　　b）ﾋﾝｼﾞｼﾞｮｲﾝﾄ 30 度程度（断面方向・直交方向共）

図 5.26　従来型とヒンジ機構付伸長可能アンカーボルト



アンカーボルトの設置状況（断面図）



ボルト	材質	建築構造用圧延棒鋼　JIS　G　3138	
	断面積　mm²	φ12⇒113.04mm2	φ16⇒200.96
	長さ　mm	L=420	L=590
可動ナット	材質	建築構造用圧延棒鋼　JIS　G　3138	
	最小断面積　mm²		223.53
パイプ	材質	一般構造用炭素鋼管　JIS　G　3444	
	寸法　mm	φ19.1×t2.0 L=360	φ25.4×t3.0 L=360　L=510
	断面積　mm²	97.39	209.01

注：表面仕上げは電気亜鉛メッキ（ユニクロメッキ）とする。

アンカーボルト部の伸長機構

固定部　X：ボルトと可動ナット
Y：可動ナットとパイプ
Z：パイプとコンクリート

図 5.27　伸長可能なアンカーボルトの設置状況と仕様の例

（２）ジャッキアップ用反力版先組み工法

１）従来からの修正工法（基礎からの建物沈下・傾斜修正工法）の問題点

建物の沈下・傾斜を基礎から修正する方法（図 5.28 参照）は、基礎下ジャッキアップ作業を行う空間の確保が必要になる。この時には、既存建物基礎下での土工事（掘削・埋め戻し等）に関する工事費の増大、および地下水位が高いところでは適用が困難であるとされていた。

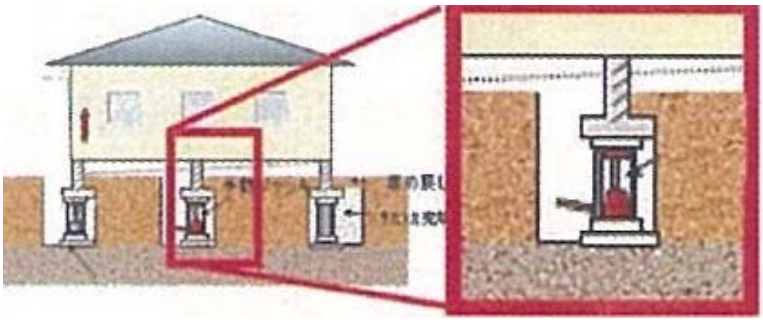


図 5.28　従来からの修正工法の概要（基礎からの建物沈下・傾斜修正工法）

２）提案工法の改善ポイント（図 5.29 および図 5.30 参照）

ａ）基礎からのジャッキアップを容易にする：反力用の耐圧版を基礎下部に設置

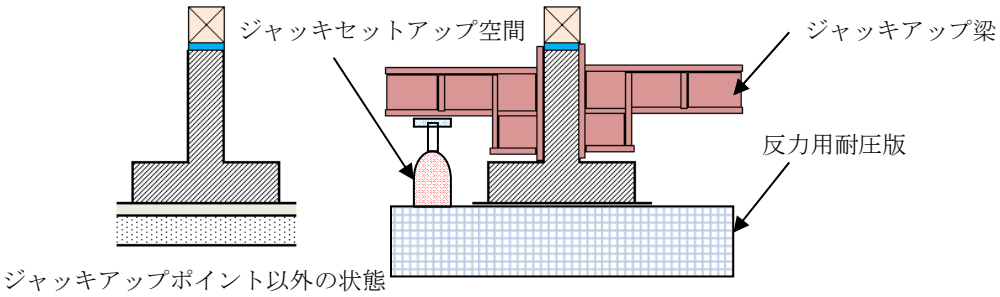
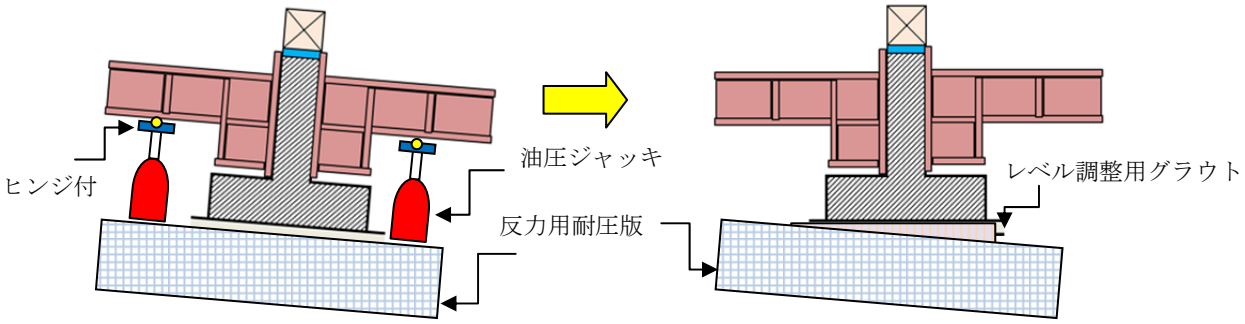


図 5.29　反力用耐圧版とジャッキアップ梁の配置例



ａ）ジャッキアップ状況　　ｂ）沈下・傾斜修正後

図 5.30　反力用耐圧版を利用した沈下・修正の概要

（３）新築時沈下・傾斜修正対応型工法

主に新築時（建替え時を含む）に建物基礎に組み込んでおく工法である。

基礎梁天端に配置した鉄骨土台や外周部等に配置された反力杭を利用して建物の沈下・傾斜を修正するため、沈下・傾斜が大きなものから小さなものまで適切に対応できるものと考えられる（写真 5.2 参照）。また、小さな沈下・傾斜に適したフラットジャッキ（写真 5.3 参照）の有効性も検討課題となる。既存住宅への導入対応が検討課題となる。

写真 5.2　新築時沈下・傾斜修正対応型工法の例

写真 5.3　ﾌﾗｯﾄｼﾞｬｯｷの構造・概要

（補足）存住宅へのシステム対応について（基礎梁補強のポイント：図 5.31～図 5.32 参照）

基礎梁の補強：鉄筋コンクリート部材と鉄骨部材による補強を検討する。

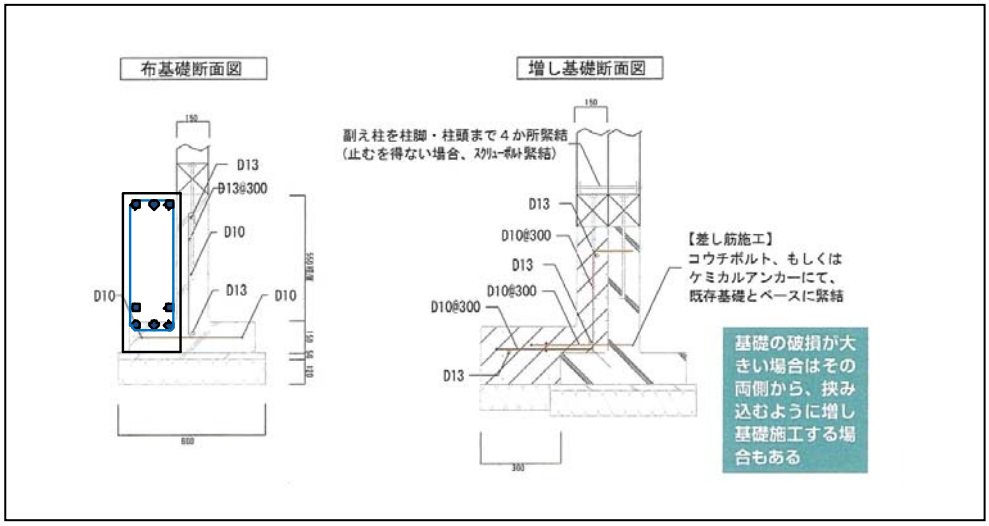
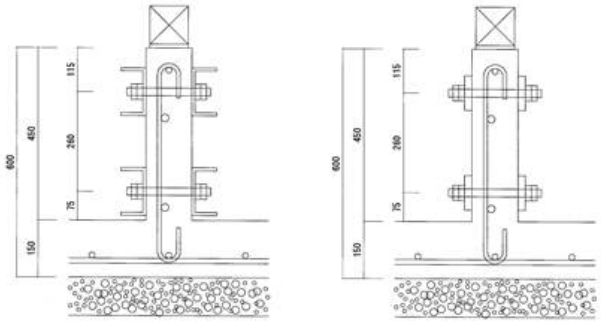
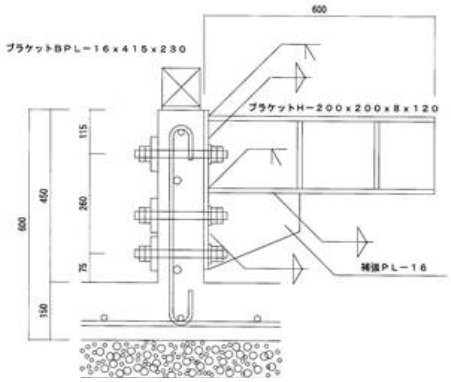


図 5.31　既存基礎梁の鉄筋コンクリート補強の一例

基礎梁補強を鉄筋コンクリート部材で検討する場合は、既存の基礎梁の側面をハツリ、既存基礎梁内部の縦筋と補強梁のせん断補強筋（STP）と現場フレア溶接で緊結する等、十分な応力伝達が可能なように留意する。



a ）既存基礎梁の鉄骨補強案



b）ジャッキアップ梁（ブラケット）

図 5.32　既存基礎梁の鉄骨補強の一例とジャッキアップ梁（ブラケット）設置例

基礎梁補強を鉄骨で補強する方法は、小断面鉄骨部材組合せた方法の他、重量鉄骨を既存基礎梁に抱かせるように配置する方法も考えられる。これらの補強方法は、補強する基礎梁の損傷および劣化状態（現存耐力）や施工条件等によって適切に選定することになる。

＜従来からの修正工法説明用の引用資料＞

＊図は茨城県営日の出住宅集会所ジャッキアップ見学会資料：茨城県建築業協会資料より引用
＊写真は戸建て住宅の基礎・地盤の現状と今後～地盤に起因する不具合は回避できるか～：田村昌仁より引用
＊フラットジャッキの写真は極東鋼弦コンクリート振興株式会社ホームページ・カタログより引用
＊既存梁のＲＣ補強の原図は「地震被災建物　修復の道しるべ：住まい空間研究所」より引用

その他資料
モードセル」システムと「モードセルアンカーボルト」（特許登録済工法）

５．３　概算費用に関する検討

各工法の概算費用調査は、原則として、液状化対策の実現可能性を検討した全ての工法について実施した（施工機械の選定など概算費用を調査できなかったもの等を除く）。なお、数量効果を確認するための対策規模は、「１戸」、「４戸」、「２０戸」、「１００戸」および「５００戸」を設定した。ただし、施工機械の配置等の諸条件等から数量効果が見込めないと判断した工法については、大規模側の検討を省略している。

液状化対策概算費用の別途工事には、「既存住宅無（更地）」の条件については、「既存建物および埋設配管の解体・撤去費」、「新築住宅建築費および設備配管等の復旧費」および「曳家費用および埋設配管の撤去・復旧費」を含まないものとした。

上記の概算費用の調査結果は、「既存住宅解体撤去等費用：100 万～200 万円」、「新築住宅建築等の費用：2,500 万～4,500 万円」および「曳家等の費用：800 万～1,000 万円」になった。

参考費用項目として「維持管理費」については、各工法でその費用が大きく異なるため特別な検討項目とし、「別途工事費」は各工法で大きく異なることがないように工法の特性に関連した項目以外は共通項目（工法の特性項目＋共通項目）として取り扱うことにした。

市街地の液状化対策工法のうち代表的な工法の概算費用は、浦安市において検討された「浦安市液状化対策技術検討調査（平成 23 年度）」委員会の報告書に示されている。

各工法の液状化対策概算費用を、実現可能性の条件等とともに以下に示す。

５．３．１　密度増大工法

（１）砂杭

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅有、既存住宅無、L1 相当地震動、L2 地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅有で L1 相当地震動対応の４戸以下は、 950 万～1,250 万円

・既存住宅有で L1 相当地震動対応の２０戸以上は、 900 万円程度

・既存住宅無で L1 相当地震動対応の４戸以下は、 800 万～1,200 万円

・既存住宅無で L1 地震動対応の２０戸以上は、 250 万円程度

・既存住宅有で L2 地震動対応の４戸以下は、 2,600 万～3,200 万円

・既存住宅有で L2 地震動対応の２０戸以上は、2,500 万～2,600 万円

・既存住宅無で L2 地震動対応の４戸以下は、 2,100 万～2,700 万円

・既存住宅無で L2 地震動対応の２０戸以上は、 750 万円程度

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅有で L1 相当地震動対応の４戸以下は、 400 万～650 万円

・既存住宅有で L1 相当地震動対応の２０戸以上は、 350 万円程度

・既存住宅無で L1 相当地震動対応の４戸以下は、450 万～800 万円

・既存住宅無で L1 地震動対応の２０戸以上は、 150 万円程度

・既存住宅有で L2 地震動対応の４戸以下は、 2,600 万～3,200 万円

・既存住宅有で L2 地震動対応の２０戸以上は、2,500 万～2,600 万円

・既存住宅無で L2 地震動対応の４戸以下は、 2,100 万～2,700 万円

・既存住宅無で L2 地震動対応の２０戸以上は、 750 万円程度

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・４戸以下では小型の施工機械を使用

・既存住宅有の場合は、砂杭の斜め打設および設計品質確認方法

・L2 地震動対応の仕様は、FEM 解析では十分な液状化対策効果が得られていない

（２）モルタル柱状改良体

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅無、L1 相当地震動、に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 600 万～700 万円

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、300 万円程度

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・施工機械の改良（施工深さ８ｍ）および施工実績の蓄積

（３）丸太打設

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅無、L1 相当地震動、に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 500 万～600 万円

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、350 万円程度

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・施工機械の改良（振動圧入方式の検討等）

５．３．２　過剰間隙水圧消散工法

検討した工法：グラベルドレーン

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅無、L1 相当地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅無で L1 相当地震動対応の４戸以下は、 450 万～750 万円

・既存住宅無で L1 地震動対応の２０戸以上は、 300 万～400 万円

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅無で L1 相当地震動対応の４戸以下は、300 万～600 万円

・既存住宅無で L1 地震動対応の２０戸以上は、 250 万円程度

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・ドレーンの目詰まり対策（あるいは、対処方法）

５．３．３　地盤の強度を上げる工法

検討した工法：地盤不飽和化（マイクロバブル水の地盤内への注入）

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅有、既存住宅無、L1 相当地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅有で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 600 万～650 万円

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 450 万～500 万円

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅有で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 450 万円程度

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、350 万～400 万円

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・施工実績の蓄積（実用化課題：施工機械の改良、品質管理方法の確立、設計方法の検証）

・維持管理費が必要（約 5 万円/年）

５．３．４　個別対策工法の組合せ

（１）過剰間隙水圧遮断工法と過剰間隙水圧消散工法の組合せ

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅有、L1 相当地震動、L2 地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

・概算費用試算できず（施工機械等の条件選定困難）

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・施工実績の蓄積（実用化課題：施工機械の改良、品質管理方法の確立、設計方法の検証）

（２）過剰間隙水圧消散工法と密度増大工法の組合せ

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅有、L1 相当地震動、L2 地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

・概算費用試算できず（施工機械等の条件選定困難）

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・施工実績の蓄積（実用化課題：施工機械の改良、品質管理方法の確立、設計方法の検証）

５．３．５　建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（従来工法）

（１）杭基礎（鋼管回転圧入杭）

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅無、L1 相当地震動、L2 地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 750 万～800 万円

・既存住宅無で L2 相当地震動対応（数量効果小）は、750 万～800 万円

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 200 万円程度

・既存住宅無で L2 相当地震動対応（数量効果小）は、750 万～800 万円

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・液状化時には周辺地盤のみが沈下する可能性があり、埋設配管等の補修費が必要

・同上、周辺地盤との段差調整用の土工事等が必要

（２）深層混合処理工法（柱状地盤改良）

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅無、L1 相当地震動、L2 地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 250 万～300 万円

・既存住宅無で L2 相当地震動対応（数量効果小）は、250 万～300 万円

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 250 万～300 万円

・既存住宅無で L2 相当地震動対応（数量効果小）は、250 万～300 万円

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・液状化時には周辺地盤のみが沈下する可能性があり、埋設配管等の補修費が必要

・同上、周辺地盤との段差調整用の土工事等が必要

５．３．６　その他の工法

（１）浮き基礎工法

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅無、L1 相当地震動、L2 地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

・概算費用試算できず（諸条件の影響が過大なため）

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・施工実績の蓄積（実用化課題：施工機械の改良、品質管理方法の確立、設計方法の検証）

（２）深層混合処理（柱状地盤改良）工法と浅層混合処理工法の組合せ

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅無、L1 相当地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 300 万～400 万円

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、300 万～400 万円

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・施工実績の蓄積（実用化課題：設計方法の検証）

・軽微な沈下・傾斜修正に対応可能（40 万～60 万円/沈下・傾斜修正回数）

５．３．７　沈下・傾斜修正のためのシステムを組み込む工法

（１）建物側対策

１）検討した仕様

・当該工法単独：既存住宅有、既存住宅無、L1 相当地震動、L2 地震動に対応

・道路一体化対策工法と組合せる場合：同上

２）検討仕様および対策規模に対する液状化対策概算費用（１戸当り）

ａ）当該工法単独

・既存住宅有で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、360 万円程度

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 200 万円程度

・既存住宅有で L2 地震動対応（数量効果小）は、 360 万円程度

・既存住宅無で L2 地震動対応（数量効果小）は、 200 万円程度

ｂ）道路一体化対策工法と組合せる場合

・既存住宅有で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、360 万円程度

・既存住宅無で L1 相当地震動対応（数量効果小）は、 200 万円程度

・既存住宅有で L2 地震動対応（数量効果小）は、 360 万円程度

・既存住宅無で L2 地震動対応（数量効果小）は、 200 万円程度

３）検討した仕様に対する概算費用に影響する課題

・既存住宅の基礎梁補強時には仕上げ材等の補修費が必要

・沈下・傾斜修正に対応可能（60 万～120 万円/沈下・傾斜修正回数）

５．４　まとめ（個別対策工法）

個別の液状化対策は、浦安市内に存在する既存の住宅（被災住宅、修復済み住宅、無被害住宅）およびこれから建設される新築住宅や立て替え住宅を対象に、合わせて計画されている道路と宅地との一体対策の有無等を勘案して、市民が自らの住宅に対する液状化対策に関する対応を考える上で参考に供する資料として検討されたものである。地盤の液状化に対する対応には、液状化対策の対象となる住宅の状態や地震動のレベル（L1 相当地震動、L2 地震動）に対する対応への考え方によって、多くの選択肢が存在する。従って、個別の液状化対策への対応を考える上で、先ず、対象となる住宅の条件を、別添資料２－４（フロー図）によって確認することが必要である。

フロー図に従えば、先ず、道路と宅地の一体的な液状化対策の対象地域の確認を行う必要がある。道路と宅地の一体的な液状化対策を行う場合には、その効果の評価に依存して、各宅地で追加的な液状化対策を行う必要性の有無の判断が行われる。一般的には、L1 相当地震動への対応は、これらの一体的な対策で十分な対応が図られると考えられるが、種々の条件から、各宅地での個別の対応が求められる可能性は、現状では否定出来ない。また、一体対策では担保されていない L2 地震動への対応を住民が希望する場合には、住民の自主的な判断でその対応を図らねばならない。

自己の宅地が道路と宅地の一体的な対応地域に含まれていない場合には、自ら液状化対策を講じようとすれば、先ず、対象とする地震動のレベルを決める必要がある。個別の液状化対策の検討では、基本的に L1 相当地震動での対策仕様について言及しており、同じ工法で仕様を強化しても必ずしも L2 地震動への対策が十分に検証出来ない場合が含まれている。また、ここでの検討は、現在、評価の精度が実用に供するに十分であるとされる有効応力解析による有限要素法によっているが、解析上、対策の有効性が認められた工法であっても実際の地震を経験してその有効性が十分に検証されていない工法もある。また、解析に使用した地盤の土質試験値などを含む地盤条件は、過去に得られた情報から適切と思われるモデルを定めたものであり、浦安市の全ての地盤に適用出来るとは限らないので、実際の対策工事に際しては、当該地域の地盤調査結果に基づいて再度検討を行うことが大切である。

ここで検討した個別の液状化対策は、所謂、地盤へ直接的に改良などを行って地盤の液状化強度を上げて地盤の液状化を防ぐ工法から、一般の建築物で多用されている杭基礎などの支持力を確保する工法および次善の策として、液状化後に生じる可能性がある傾斜や沈下の修正を容易にする工夫を基礎構造に施すなどの対策の可能性について言及している。

戸建て住宅（４号建築物[脚注(*)参照]）については、議論はあるものの、現在のところ、液状化する地盤に対して、一般の建築物の基礎や地盤に、建築基準法上要求されている規準の全ては適用されていないが、沈下修正を前提とした対策を除き、検討した個別の液状化対策については、基本的に建築基準法において一般の建築物に要求されている考え方に準拠して、住宅の荷重を支える地盤の応力度や杭の支持力を短期許容値以内に収めることを目標している。得られた各個別液状化対策の実現可能性に関する概要は、以下のようである。

(*) ４号建築物：建築基準法第６条による分類のうち、１号建築物（特殊建築物（建築基準法別表第１(い)欄の用途のもの）かつ床面積 100m²を超えるもの）、２号建築物（木造で、階数３以上、または延面積が 500m²を超える、または高さ 13m を超える、または軒高 9m を超える、のいずれかにあてはまるもの）、３号建築物（木造以外で、階数２以上または延面積が 200m²を超えるのいずれかにあてはまるもの）以外の建築物を指す。例えば、木造２階建てで延べ面積が 500m²以下のものは４号建築物（４号建物）と呼ばれる。４号建築物には、建築確認申請時に４号特例という確認申請時の審査簡略化の特例が認められている。

（１）全般的に地盤の液状化強度を高める工法

この工法には、地盤を締め固める工法（密度増大工法）や空気や固化剤を注入する工法（注入工法、不飽和化工法）、排水機能を付加する工法（間隙水圧消散工法）などがある。

密度増大工法には、締め固めるための施工方法の違いによりいくつかの工法がある。砂杭を除けば、実績は少ないが、いずれも、締め固めが必要な範囲で適切に行われれば、十分な効果が期待出来る。新築時における住宅下部地盤を中心に必要な範囲の施工が行われることが基本であるが、既存住宅を対象に住宅周辺での施工のみでは、やや不十分さが否定出来ず、詳細な検討が必要である。また、施工機械の搬入などの制約も大きい。費用は、950 万～1,250 万円(4 戸同時施工時)と一般的な基礎工事費に比べて割高である。

注入工法は、新築、既存住宅の双方の液状化対策に適用可能であるが、施工実績が乏しい新規開発の工法である。対象とする改良範囲に計画通りの施工がなされ、必要な品質が確保されれば、計算などによる評価上の効果は確認出来るものと考えられるが、実際に施工された改良範囲と品質の確認を行う方法の確立が課題として残っている。計画通りの施工がなされた場合には、無対策時の住宅沈下量の相当量を軽減することが可能となっている。

間隙水圧消散工法は、これまでも実績があり、効果もある程度確認されている。しかしながら、基本的には住宅下部における施工が基本であり、施工範囲が個々の宅地の狭い範囲に限られるなどの条件での使用については、設計法自体が確立されていないこともあるため、十分な効果が得られるかどうかについて、地盤条件や施工仕様に関する十分な事前の検討が必要である。施工範囲が広い場合や締固め工法との併用あるいは一体対策における格子状改良などとの組み合わせなどでは相乗効果が期待できる計算結果となったが、実工事に際しては、排水性能に関する条件を、原地盤の調査結果に照らして適切に設定する

ことが大切である。間隙水圧消散工法では、排水材周辺での水圧の上昇が生じれば、排水に伴う多少の沈下は避けられない。小型の施工機械も開発されているが、施工費用は、450万～750万(4戸同時施工時)である。間隙水圧消散工法のL2地震動への対応を考えた場合、対策工法としては不十分であるが、液状化に至る時間を遅らせる効果は認められる。

（２）建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（従来型工法）

一般的な新築の建築物に使用されている杭基礎や深層改良工法（柱状地盤改良工法）であり、実績も多い。液状化する地盤の位置などを適切に評価出来ればL1相当、L2地震動にも設計が可能であり、問題なく使用できる信頼性の高い工法である。液状化する層の深さによるが、８ｍ程度までの施工長で、支持力が確保可能であれば、経済的に通常の軟弱地盤対策と同程度の費用で施工が可能である。必要な長さが深くなると、住宅の基礎工事で使用されている施工機械の範囲を超える場合が多くなり、費用が増大する傾向になる。また、無対策地盤での検討の結果から、地盤の液状化に伴う沈下量は、最大で約20cm程度(L1相当地震時)になると推測されるため、杭の抜け上がりに注意する必要がある。

（３）組み合わせによる対策

上述した対策工法を組み合わせることで、より効果のある対策を実施することが考えられる。特に道路と宅地の一体的な対策と個別対策の組み合わせは、組み合わせの種類により相乗効果の大きい場合も考えられる。例えば、締め固め工法と格子状改良工法は、地盤全体の剛性を高める効果により、L2 地震動時においても無対策に比べ住宅の沈下量を数%オーダーまで抑制できる可能性があること、また、排水対策は、格子壁周辺での液状化の発生を抑制するなどの効果が期待出来ると考えられるが、効果の確認を行うためには、実施工での検討は、地盤調査に基づいた情報による詳細な解析などによらねばならない。適切でない組み合わせ（例えば、丸太打設による地盤の締め固め工法の場合には地下水位以下に丸太を打設する必要があり、地下水位低下工法との併用はほぼ不可能であるなど）となる場合もあるので、注意が必要である。

（４）浮き基礎工法

この工法については、液状化が生じた時の支持力計算の方法について検討した。住宅の荷重を支える方法が、地盤重量の軽減化や構造物よる浮力の利用であり、地盤の液状化自体を抑制する工法ではない。従って、一般的な地盤の支持力を確保する方法とは異なっており、軟弱地盤での沈下対策として使用されることはあるが、液状化対策としての実績は乏しい。浮力に期待する場合には、荷重がバランスするまでに多少の沈下が予想されるほか、浮体としての振動も懸念されるが、数は少ないが実績では、大きな被害は報告されていない。L1相当地震動、L2地震動の大きさにあまり依存しないで効果を期待出来る可能性があるが、施工費用としては、特殊な（軽量な）材料を用いた施工や地下室などの施工費

用が必要である。掘削を行って基礎下に施工出来れば、既存住宅への適用も考えられる。

（５）沈下修正工法による対策

基本的に住宅下部地盤の液状化を許容して、住宅に生じた沈下や傾斜を修正することを目的に、主に基礎構造に必要な工夫を事前に講じておく対策である。L1 相当地震動、L2 地震動にも適用可能であり、費用対効果を考慮すれば次善の策として検討に値するものと考えられる。基礎と土台とのアンカーボルトの構造への工夫や沈下修正に必要な基礎の剛性や強度を予め確保しておくこと、修正用の部材の取り付けを容易にする工夫など住宅の設計時や補強工事の際に検討することが出来る。初期投資が割高となるが、被害が生じなければ、修正費用は発生しない利点もある。

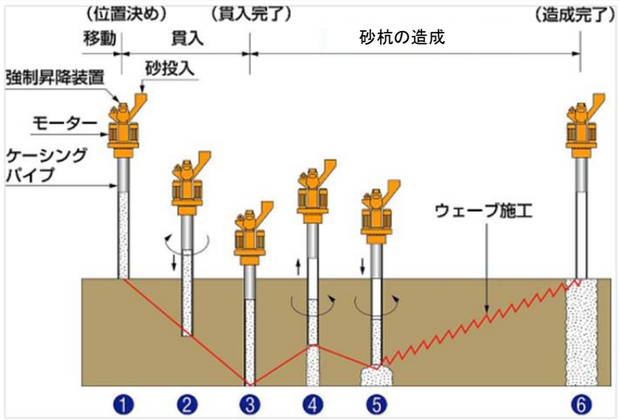
（７）その他の留意点

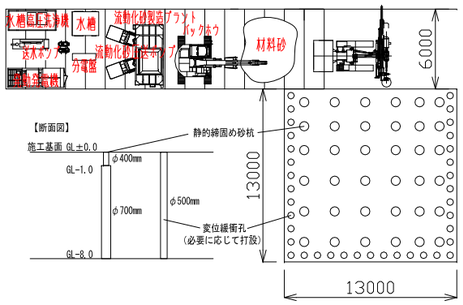
密度増大工法をはじめとする地盤に直接的に対策を施す液状化対策工法であれば、敷地内の建物以外の施設（地下埋設管等）に対してもある程度の効果が期待できるが、杭基礎工法等、建物側で対応する広義の液状化対策工法の場合には、地下埋設管等に対する効果は期待できない。したがって、地下埋設管等、敷地内の建物以外の施設に対する液状化防止・軽減対策が必要な場合には、別途の対応（例えば、宅地内下水道取付管の接続に可撓管を用いたり、伸縮型の流入口を装備した宅内桝の設置等）が必要となる。

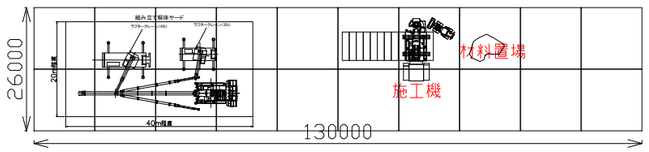
なお、以上述べてきた個別対策工法のうち、主だった工法の概略を、表 5.22～表 5.30 に工法別にまとめた。

表 5.22　密度増大工法（砂杭）

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">密度増大工法【砂杭】</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の概要</td><td>中・大型の施工機械を使用して、地盤に砂杭を造成し、液状化発生の恐れのある砂地盤を締め固めることにより、地盤全体の液状化抵抗力を増加する工法。</td><td rowspan="2">適用性</td><td rowspan="2">・シルト分を多く含む地盤も可能である。
・一般的に、広い更地の液状化対策を行う工法として多く用いられている。対策深度は 15～20m まで可能。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">具体的な工法例</td><td>施工
手順</td><td>ケーシングを地中に貫入、打戻しながら、地上から供給した砂をエアーで強制排出する工程を繰り返すことで、地盤中に締まった砂杭（φ700mm）を造成する。</td></tr>
<tr><td>施工
概念図</td><td>


</td><td rowspan="3">液状化軽減効果の技術的な評価</td><td rowspan="3">地盤の締固めを必要な範囲で適切に施工すれば、効果が期待出来ることが過去の地震でも実証されている。新築時における建物下部地盤を中心に必要な範囲で対策を施工が行われることが基本である。既存建物を対象に建物周辺のみを施工する場合は、対策効果を発揮するためには、詳細な検討が必要である。

メリット
・使用材料が砂であるのため、将来、地中を掘削する場合でも師匠になりにくい。
・施工単位が 1 街区（20 戸）以上となれば、大型機による施工が可能となるため、1 戸当たりの施工コストを抑制することがで　きる。
・液状化が発生した場合でも、建物際などの工事区域の境界において、地盤の変形がなだらかなため、建物やライフライン等に機能障害が生じにくい。
デメリット
・スペースが狭い場合、施工中に工事プラント等が道路を完全に占有してしまうため、周辺住民の生活の妨げとなる場合がある。
・砂杭の打ち込みによる地盤の変位対策ができない場合には、既設建物、隣接家屋、道路、配管等に変位や支障が生じることがある。</td></tr>
<tr><td>特徴</td><td>・締固めのための材料として砂を用いることにより、将来、地中を掘削する場合でも支障になりにくい。
・比較的広い面積の更地を、一括して対策する場合によく用いられている。
・中、大型の施工機械を用いるため、施工時にはある程度大きなスペースが必要である。</td></tr>
<tr><td>施工イメージ</td><td> 

【既存建物なし(1 戸単位の施工)】
※砂杭の打設間隔（位置）は、設計条件によって異なる。
 

【既存建物なし(20 戸単位の施工)】</td></tr>
<tr><td>L1 相当対応の
仕様と概算コスト</td><td>①　体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様φ700mm、改良深さ 8m、改良間隔 2.3m（改良率 6.6%）
・既存建物がある場合：900（20 戸以上一括施工）～1,250（1 戸施工）（万円／戸）
・既存建物がない場合：250（20 戸以上一括施工）～1,200（1 戸施工）（万円／戸）
②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様φ700、改良深さ 8m、改良間隔 3.9m（改良率 2.5%）
・既存建物がある場合：350（20 戸以上一括施工）～700（1 戸施工）（万円／戸）
・既存建物がない場合：150（20 戸以上一括施工）～700（1 戸施工）（万円／戸）
※②には一体化対策工法費用を含まない。</td><td rowspan="2">課題等</td><td rowspan="2">・間隙水圧消散工法などその他の液状化対策工法を併用した場合には、より大きな液状化の抑制効果が期待できる。間隙水圧消散工法と組み合わせる液状化対策工法の設計手法を確立することが望まれる。

・地盤の改良率が大きい場合、地震時に改良区域外縁付近で、地盤の沈下量に差が生じることにより、建物やライフライン等に不具合が生じる可能性がある。</td></tr>
<tr><td>L2 対応の
仕様と概算コスト</td><td>①一体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様φ700mm、改良深さ 8m、改良間隔 2.3m（改良率 12%以上）
・既存建物がある場合：2,600（20 戸以上一括施工）～3,200（1 戸施工）（万円／戸）
・既存建物がない場合：750（20 戸以上一括施工）～2,700（1 戸施工）（万円／戸）
②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様φ700、改良深さ 8m、改良間隔 2.3m（改良率 12%以上）
・既存建物がある場合：2,600（20 戸以上一括施工）～3,200（1 戸施工）（万円／戸）
・既存建物がない場合：750（20 戸以上一括施工）～2,700（1 戸施工）（万円／戸）
※②には一体化対策工法費用を含まない。</td></tr>
</table>

（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

表 5.23　密度増大工法（ドライモルタル）

密度増大工法【ドライモルタル締固め工法】

工法の概要

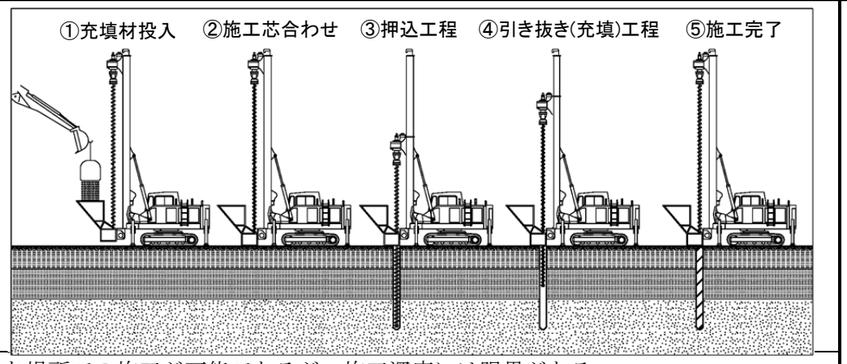
小型の施工機械を使用して、地盤に一定の間隔で乾燥したセメントと砂、砂利を混合したドライモルタルを工事残土が発生しないように柱状に充填することによって、地盤の締固めとモルタルによる強度増加を図り、地盤全体の液状化抵抗力を増加する工法。

具体的な工法例

施工手順

スパイラルロッドを用いて所定の深度まで地盤を押し広げて穴を開け、ロッドを引き抜く際に逆回転させて地中にドライモルタルを連続して充填し、原地盤と混合攪拌することなく直径 180mm 程度のモルタル柱状体を作成する。

施工概念図

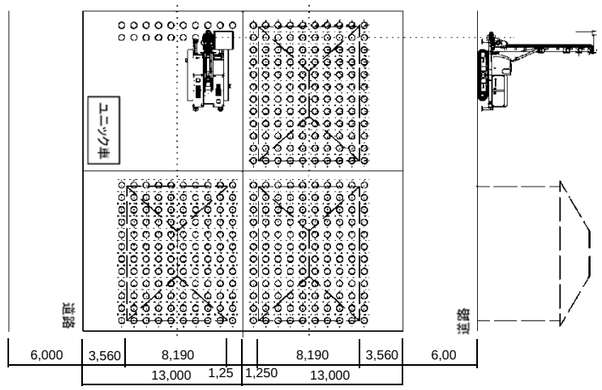


特徴

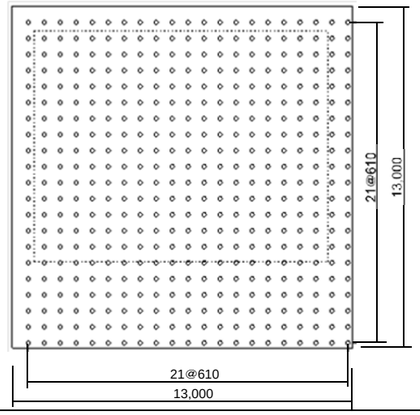
・小型の施工機械を用いるため、比較的狭隘な場所での施工が可能であるが、施工深度には限界がある。
・工事残土が発生しない。

施工イメージ

【施工機械と建物対策の例】



【地盤の液状化対策としての施工例】



※ドライモルタルの打設間隔（位置）は、設計条件によって異なる。

L1 相当対応の仕様と概算コスト

①一体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様φ180mm、改良深さ 8m、改良率 6.6%
・既存建物がある場合：施工できない
・既存建物がない場合：600（20 戸以上一括施工）～700（1 戸施工）（万円／戸）
②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様φ180、改良深さ 8m、改良率 2.5%
・既存建物がある場合：施工できない
・既存建物がない場合：250（20 戸以上一括施工）～300（1 戸施工）（万円／戸）
※②には一体化対策工法費用を含まない。

L2 対応の仕様と概算コスト

・現状では L2 対応は困難である（対応する仕様を実現した施工実績がない）。

適用性

・シルト分を多く含む地盤も可能である。

・N 値が 10 を超えるやや固い地盤では適用ができない。

・施工機械の大きさから、現在はモルタル柱状体を造成することが可能な深度は 8m までである。

液状化軽減効果の技術的な評価

地盤の締固めを必要な範囲で適切に施工すれば、効果が期待出来ることが過去の地震でも実証されている。新築時における建物下部地盤を中心に必要な範囲で対策を施工が行われることが基本である。既存建物を対象に建物周辺のみを施工する場合は、対策効果を発揮するためには、詳細な検討が必要である。

メリット

・静的締固め工法と同様の手法で液状化対策のための設計を行うことができる。
・小型機を用いるため、狭隘地での施工が可能であり、1 戸から対応することができる。
・モルタル柱状体の摩擦杭的作用により建物の支持力が担保できるため、軟弱地盤の基礎補強用としての採用実績が多数ある。
・残土が発生しない。

デメリット

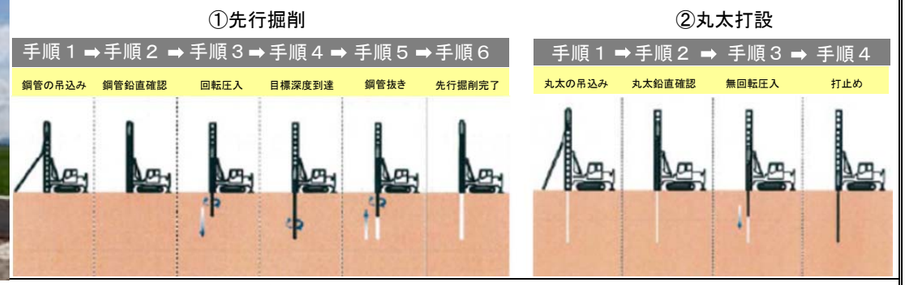
・L1 相当地震動を対象とした施工実績のみがあり、L2 地震動への対応については別途詳細な検討が必要である。
・施工機械の性能上、やや固い地盤（N 値 10 以上）や液状化層が深い地盤（深度 8m 以上）の対策は困難。
・小型機による施工のため地中障害に弱い。

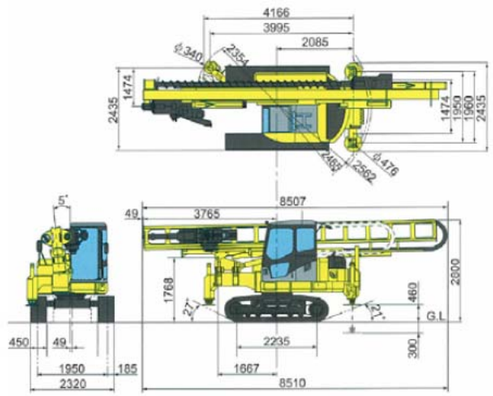
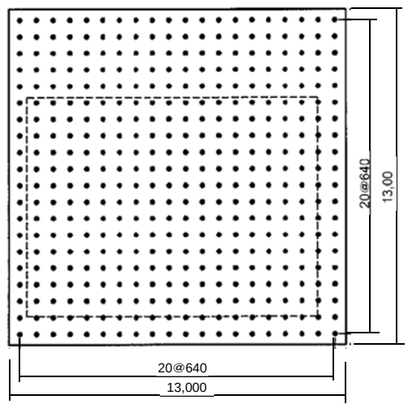
課題等

・実際の地震での対策効果の検証ができていない。このため、施工実績とその結果の検証、蓄積が必要である。
・間隙水圧消散工法などその他の液状化対策工法を併用した場合には、より大きな液状化の抑制効果が期待できる。この場合、間隙水圧消散工法と組み合わせる液状化対策工法の設計手法を確立することが必要である。

（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。
※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

表 5.24　密度増大工法（丸太打設）

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">密度増大工法【丸太打設締固め工法】</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の概要</td><td>中・小型の施工機械を用いて、砂地盤に直径 20cm 程度の丸太を一定の間隔で打ち込み、液状化の発生の恐れのある砂地盤を締め固めることによって、地盤全体の液状化に対する抵抗力を増加する工法。丸太の打設方法には、圧入式と振動式の 2 種類がある。</td><td rowspan="2">適用性</td><td rowspan="2">・シルト分を多く含む地盤も可能。
・技術開発及び施工実績を積み重ねることが必要だが、更地の状態で、一戸単位での対策に適用することが可能。
・現在、建築基準法において、地下水位より浅い位置で基礎として丸太を使用することは禁じられていることから、打設する丸太に腐朽対策等を講じる必要がある。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">具体的な工法例</td><td>施工
手順</td><td>①鋼管を所定の改良深度まで圧入し引抜くことにより先行掘削を行う。
②鋼管圧入により作成された削孔に丸太を無回転で圧入する(施工概念図参照)。</td></tr>
<tr><td>施工
概念図</td><td>
 
</td><td rowspan="2">液状化軽減効果の技術的な評価</td><td rowspan="2">地盤の締固めを必要な範囲で適切に施工すれば、効果が期待出来ることが過去の地震でも実証されている。新築時における建物下部地盤を中心に必要な範囲で対策を施工が行われることが基本である。既存建物を対象に建物周辺のみを施工する場合は、対策効果を発揮するためには、詳細な検討が必要である。

メリット
・狭い箇所での施工が可能であり、低振動・低騒音で丸太を打設することが可能である。
・比較的早く工事に着工でき、施工が早い。
・CO_2 を貯蔵している丸太を用いているため、天然資源の活用、地球温暖化対策になる。
・地下水汚染などの環境負荷が少ない。
・丸太自体は液状化しないため、補助的に支持力を期待できる。
デメリット
・地下水位が浅い位置では丸太に腐朽対策が必要となる。
・打設した丸太が、埋設物敷設工事等の支障となる場合がある。</td></tr>
<tr><td>特徴</td><td>・小型の施工機械を用いて、比較的狭隘な場所で、低騒音・低振動で丸太を打設することが可能である。
・打設した丸太が埋設物敷設工事等の支障となる場合があることに留意する必要がある。</td></tr>
<tr><td colspan="2">施工イメージ</td><td>【施工機械（例）】
 
【丸太の打設例（地盤の液状化対策として）】
 

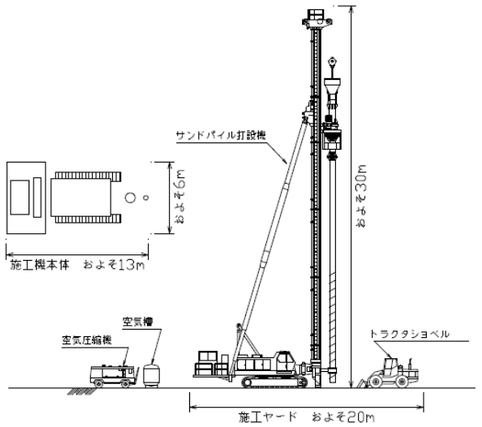
※丸太の打設間隔（位置）は、設計条件によって異なる。</td></tr>
<tr><td colspan="2">L1 相当対応の
仕様と概算コスト</td><td>①一体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様φ190mm、改良深さ 7.5m、改良率 6.6%
・既存建物がある場合：施工できない
・既存建物がない場合：550（20 戸以上一括施工）～600（1 戸施工）（万円／戸）
②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様φ160mm、改良深さ 7.5m、改良率 3.5%
・既存建物がある場合：施工できない
・既存建物がない場合：350（20 戸以上一括施工）～400（1 戸施工）（万円／戸）
※②には一体化対策工法費用を含まない。</td><td rowspan="2">課題等</td><td rowspan="2">・実際の地震での対策効果の検証が行われていない。このため、施工実績とその効果の検証の蓄積が必要である。
・地盤の締固め効果の向上を目指し振動式打設方法の検証が必要である。
・間隙水圧消散工法などその他の液状化対策工法を併用した場合には、より大きな液状化の抑制効果が期待できる。この場合、間隙水圧消散工法と組み合わせる液状化対策工法の設計手法を確立することが必要である。</td></tr>
<tr><td colspan="2">L2 対応の
仕様と概算コスト</td><td>・現状では L2 対応は困難である（対応する仕様を実現した施工実績がない）。</td></tr>
</table>

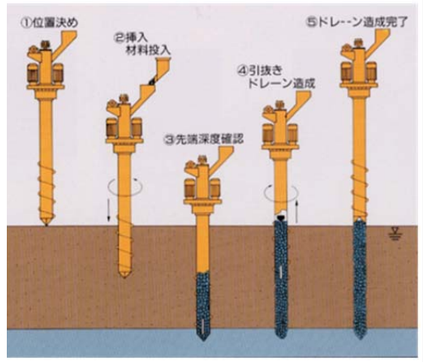
（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

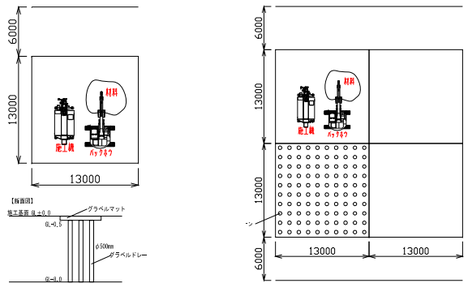
※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

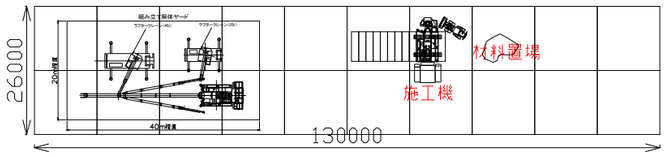
表 5.25　間隙水圧消散工法（グラベルドレーン）

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">間隙水圧消散工法【グラベルドレーン工法】</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の概要</td><td>中・大型の施工機械を用いて、地盤に透水性の高い砕石により水抜き用のドレーン柱を一定の間隔で築造し、地震時に発生する過剰間隙水圧を抑制、あるいは消散させることによって、地盤の液状化を抑制する工法。</td><td rowspan="2">適用性</td><td rowspan="2">・様々な土木構造物を対象とした豊富な施工実績がある。
・原地盤の透水性が悪い場合には、対策として用いることができない場合がある。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">具体的な工法例</td><td>施工
手順</td><td>アースオーガーでケーシングを回転させながら地盤に貫入し、ケーシングを引き抜きながらドレーン材を充填することにより、地盤中に水抜き用の柱状体を造成する。</td></tr>
<tr><td>施工
概念図</td><td>

施工機
 

設備配置（イメージ）
 

施工（ドレーン造成）概要</td></tr>
<tr><td>特徴</td><td>・材料として砕石を用いることにより、将来の配管工事等の支障となりにくい。
・施工に伴う周辺地盤に与える変形などの影響がほとんどなく、植栽への影響がない。
・大型機と中型機の使い分けによりある程度狭い敷地への施工にも対応可能である。
・中型機を用いる場合には施工深度に制限がある点に留意が必要となる。</td></tr>
<tr><td colspan="2">施工イメージ</td><td>※ドレーン材の配置（位置）は、設計条件によって異なる。
 



既存建物なし(1 戸単位)　既存建物なし(4 戸単位)　既存建物なし(20 戸単位)</td><td rowspan="3">液状化軽減効果の技術的な評価</td><td rowspan="3">施工実績が豊富であり、過去の地震においてもある程度の液状化対策効果が確認されている。基本的には、建物下部における施工が基本であるが、施工範囲が個々の宅地の狭い範囲に限られるなどの条件での使用については、地盤条件や施工仕様に関する十分な検討が必要である。一体化対策における格子状改良などとの組み合わせなどでは相乗効果が期待出来る結果となったが、実施工事に対しては、排水性能に関する条件を、原地盤の調査結果に照らして適切に設定することが大切である。

メリット
・低騒音、低振動での施工が可能である。
・施工時に周辺地盤に変位を与える可能性が、密度増大工法に比べて少ない。
デメリット
・敷地全面を改良しない場合(建物直下を除く改良の場合等)の設計法が確立していない。
・ドレーン材が目詰まりすると所定の液状化対策効果が得られない可能性がある。
・L２地震動を対象とした場合の合理的な設計方法は、研究段階である。</td></tr>
<tr><td colspan="2">L1 相当対応の
仕様と概算コスト</td><td>①一体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様φ500mm、改良深さ 8m、改良間隔 1.6m
・既存建物がある場合：施工できない、または施工できる範囲内での効果を見込めない。
・既存建物がない場合：350（20 戸以上一括施工）～750（1 戸施工）（万円／戸）
②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様φ500mm、改良深さ 8m、改良間隔 2.2m
・既存建物がある場合：施工できない
・既存建物がない場合：250（20 戸以上一括施工）～600（1 戸施工）（万円／戸）
※②には一体化対策工法費用を含まない。</td></tr>
<tr><td colspan="2">L2 対応の
仕様と概算コスト</td><td>・FL 法および FEM 解析による検討によっては、目標性能を満足する仕様を策定できない。</td><td>課題等</td><td>・設計時に用いる地盤定数の決定方法を確立する必要がある。

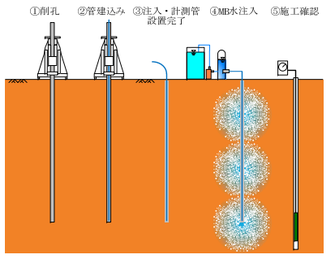
・建物周囲のみを対策する場合の設計方法を確立する必要がある。

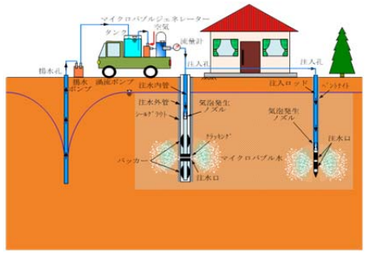
・目詰まり防止対策(あるいは目詰まり後の対策)等によりドレーン材の透水性を維持する必要がある。</td></tr>
</table>

（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

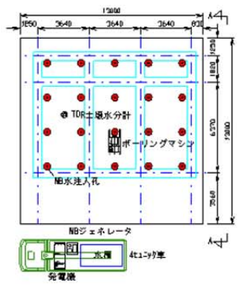
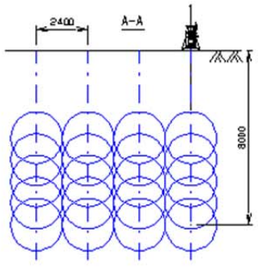
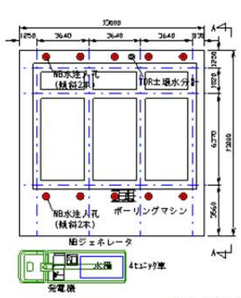
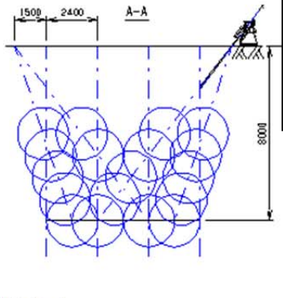
※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

表 5.26　地盤の強度を上げる工法（マイクロバブル水注入工法）

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">地盤の強度を上げる工法【マイクロバブル水注入工法】</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の概要</td><td colspan="2">地下水で飽和した砂地盤にマイクロバブル水（小さな空気の泡を含んだ水）を注入して、地盤を不飽和化させる工法。、地震時には、このマイクロバブル水に含まれる空気が圧縮されて、過剰間隙水圧の上昇を抑制することによって、液状化の発生を抑制する効果が期待できる工法である。</td><td rowspan="2">適用性</td><td rowspan="2">・研究開発、実証実験中の工法である。
・改良する地盤に細粒分が多く含まれる場合には、適用できない場合がある。
・地下水の流れが速い地盤には留意する。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">具体的な工法例</td><td>施工
手順</td><td colspan="2">マイクロバブル水の注入孔、飽和度測定用の計測孔を削孔し、注入管・計測管を設置する。設置した注入管より、マイクロバブル水を注入する。マイクロバブル水注入後の地盤の飽和度を計測し、所定の飽和度となっていることを確認する。</td></tr>
<tr><td>施工
概念図</td><td colspan="2"> 



</td><td rowspan="2">液状化軽減効果の技術的な評価</td><td rowspan="2">新築、既存建物の双方の液状化対策に適用可能であるが、宅地への施工実績が乏しい新規開発の工法である。対象とする改良範囲に計画通りの施工がなされ、必要な品質が確保されれば、計算などによる評価上の効果は期待出来るものと考えられる。

メリット
・材料が水と空気なので環境に優しく、地盤内に改良体等を残さない。
・再改良(再注入)が可能であり、他工法との併用が比較的容易である。
デメリット
・地盤の浅い層での改良効果は期待ができない。
・施工品質の確認が難しく、施工品質確保のための施工管理手法が確立されていない。
・地下水の流れが速い場合には、改良効果が減少する恐れがある。
・大地震時には液状化を完全に防止することは難しい。
・地震により、改良効果が減少(空気が喪失する)する可能性があり、複数回の地震を想定する場合には、空気の再注入が必要となる可能性がある。
・液状化強度の検証のために対象地盤を用いた室内試験が必要となる。</td></tr>
<tr><td>特徴</td><td colspan="2">・使用材料が水と空気であるため環境負荷が小さい。
・施工機材がコンパクトであり、既存建物の有無にほぼ無関係に施工可能である。
・既存の埋設物への影響や施工後の埋設工事等に影響がない。</td></tr>
<tr><td>施工イメージ</td><td colspan="2"> 




既存建物あり　　既存建物なし</td></tr>
<tr><td>L1 相当対応の
仕様と概算コスト</td><td colspan="2">①一体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様　飽和度 90%、不飽和層厚 7m
・既存建物がある場合：600（4 戸一括施工）～650（1 戸施工）（万円／戸）
・既存建物がない場合：450（4 戸一括施工）～500（1 戸施工）（万円／戸）
②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様　飽和度 90%、不飽和層厚 3m
・既存建物がある場合：350（4 戸一括施工）～400（1 戸施工）（万円／戸）
・既存建物がない場合：450（4 戸一括施工）～500（1 戸施工）（万円／戸）
※②には一体化対策工法費用を含まない。</td><td rowspan="2">課題等</td><td rowspan="2">・施工された改良範囲と品質の確認方法を確立する必要がある。

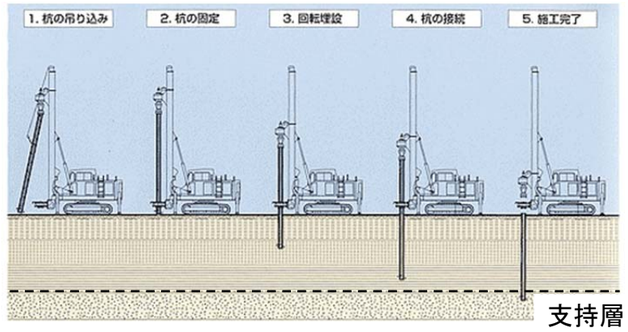
・液状化強度の評価方法の確立が必要である。

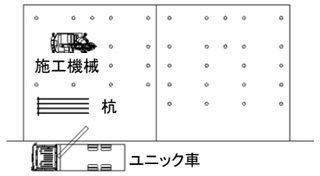
・一体化対策などとの組み合わせで、補助的に使用する場合には、組み合わせ効果を考慮した設計方法の確立が望まれる。</td></tr>
<tr><td>L2 対応の
仕様と概算コスト</td><td colspan="2">・FL 法による試算の結果、L2 の目標性能を満足しない。</td></tr>
</table>

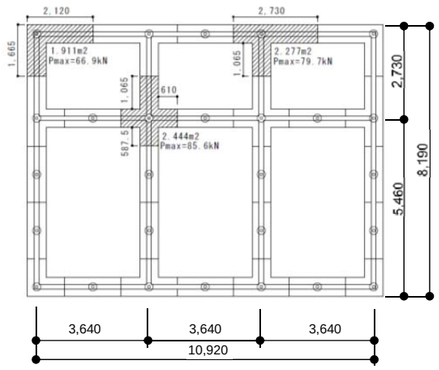
（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

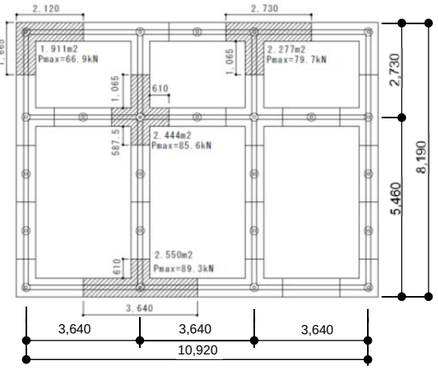
※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

表 5.27　建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（杭基礎工法）

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法(従来型工法)【杭基礎工法】</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の概要</td><td>小型機械により、建物荷重を支持する複数本の鋼管杭などを安定した地盤(支持層)まで施工することで、地盤液状化時にも建物を支持することにより、沈下や傾斜の発生を抑制する工法。</td><td rowspan="2">適用性</td><td rowspan="2">・一般的には新築、建替時に実施する。既存建物がある場合には、曳家や更地にするなどの対応が必要である。
・支持層が深い位置にある場合には、杭長が長くなるため対策費用が高額となる可能性がある。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">具体的な工法例</td><td>施工
手順</td><td>小型の貫入機械で鋼管杭を回転させながら、所定の深度(安定した地盤)まで埋設した後、家屋を建設する。</td></tr>
<tr><td>施工
概念図</td><td>
 
</td><td rowspan="2">液状化軽減効果の技術的な評価</td><td rowspan="2">一般的に建物を建てる地盤の地耐力(長期許容応力度)が 20kN/m² 未満の場合に用いられる工法で、建築の基礎形式として、べた基礎、布基礎と並んで一般的に採用される工法である。地盤が液状化した場合にも、杭の先端が支持層(支持層以深に液状化層がない場合)まで埋設してある場合には、建物に生じる有害な沈下や傾斜を抑制するように水平抵抗についても設計することができる。

メリット
・施工実績が豊富である。
・小型施工機械を用いるため、狭隘地での施工が可能である。
・1 戸単位での施工が可能である。
・既存の設計方法で L2 地震動に対応する対策の実施が可能である。
デメリット
・液状化により地盤が沈下した場合には、杭が抜けあがる可能性がある。
・液状化の発生を抑制する工法でないため、液状化により、地盤が沈下した場合に埋設管等に損傷が生じるおそれがある。また、建物下に間隙が生じ、別途補修費用が必要となる。</td></tr>
<tr><td>特徴</td><td>・省スペース、低空頭に対応が可能で、低振動・低騒音、排出残土が発生しない。
・既存建物がある場合には施工ができない。</td></tr>
<tr><td>施工イメージ</td><td> 

※杭基礎の配置は、設計条件によって異なる。
 

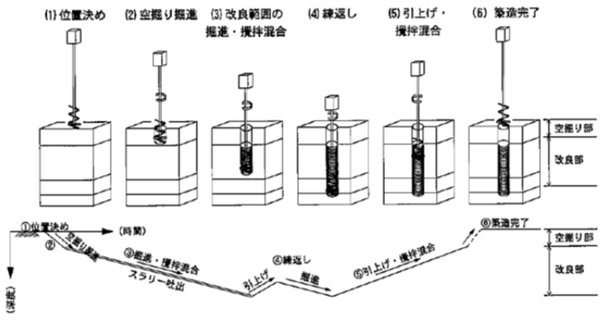
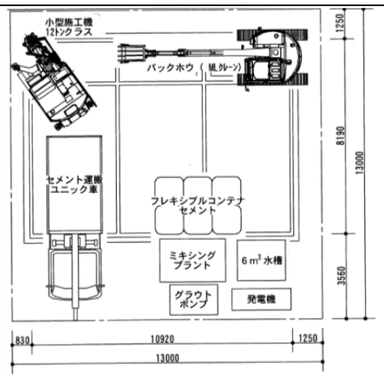
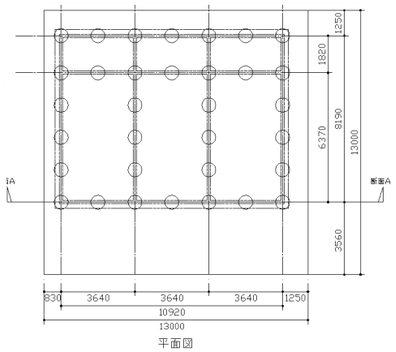
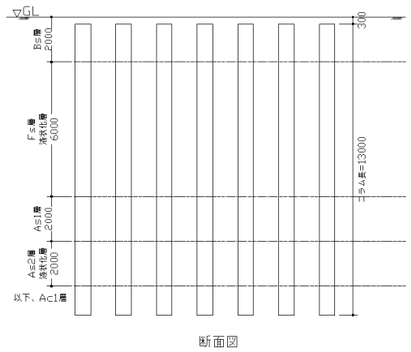
杭先端 GL.-22.0 m の場合
(Fs 層以深で液状化の発生が懸念される場合)
 

杭先端 GL.-8.5m の場合
(Fs 層以深で液状化が発生しない場合)</td></tr>
<tr><td>L1 相当対応の
仕様と概算コスト</td><td>①一体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様　鋼管回転圧入杭φ190.7mm、t=7mm、L=22m、24 セット
・既存建物がある場合：施工できない
・既存建物がない場合：800（万円／戸）（施工規模によらず左の範囲内）
②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様　鋼管回転圧入杭φ101.6mm、t=4.2mm、L=8m、27 セット
（ただし、Fs 層以下で液状化が発生しないと仮定）
・既存建物がある場合：　施工できない
・既存建物がない場合：200（万円／戸）（施工規模によらず左の範囲内）
※②には一体化対策工法費用を含まない。</td><td rowspan="2">課題
等</td><td rowspan="2">・L2 地震動時には、特に周辺地盤が沈下するため、埋設管等に適切な対策が必要となる。</td></tr>
<tr><td>L2 対応の
仕様と概算コスト</td><td>・既存建物がある場合：施工できない
・一体化工法との組み合わせの有無にかかわらず、対策仕様は変わらない（直接的な液状化対策ではない）。
対策仕様　鋼管回転圧入杭φ190.7mm、t=7mm、L=22m、24 セット
・既存建物がない場合：800（万円／戸）（施工規模によらず左の範囲内）</td></tr>
</table>

（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

表 5.28　建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法（柱状改良工法）

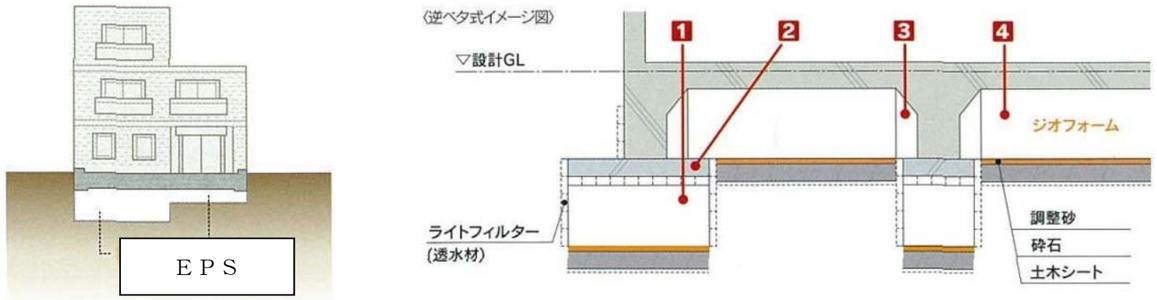
		建物荷重を安定した地盤に伝達する基礎工法(従来型工法)【柱状改良工法】		
工法の概要		小型機械を用いて、建物荷重を支持する複数本の柱状地盤改良体を安定した地盤(支持層)まで施工することで、地盤が液状化した時にも建物を支持することにより、沈下や傾斜の発生を抑制する工法。	適用性	・支持層が深い位置にある場合には、改良長が長くなるため対策費用が高額となる可能性がある。 ・既存建物がある場合には、曳き家や更地にするなどの対応が必要である。
具体的な工法例	施工手順	スラリー状にしたセメント系固化材を地盤に注入しながら土と機械的に撹拌することにより、柱状地盤改良体を築造する	液状化軽減効果の技術的な評価	一般的に建物を建てる地盤の地耐力が 20kN/m² 未満の場合に用いられる工法で、建築の基礎形式として、べた基礎、布基礎と並んで一般的に採用される工法である。地盤が液状化した場合にも、支持層(支持層以深に液状化層がない場合)まで改良されている場合には、建物に生じる有害な沈下や傾斜を抑制するように水平抵抗についても設計することができる。 **メリット** ・施工実績が豊富である。 ・常時にも建物の不同沈下を防止することができる。 ・狭隘地での施工が可能である。 ・比較的安価に、1 戸単位での施工が可能である。 ・既存の設計方法で L2 地震動に対応する対策の実施が可能である。 **デメリット** ・液状化の発生を抑制する工法ではないため、液状化により、地盤が沈下した場合には、埋設管等に損傷が生じるおそれがある。また、建物下に間隙が生じ、別途補修費用が必要となる。
	施工概念図	 ←施工状況（例） 出来形状況（例） ↓  施工手順（概要）		
	特徴	・原地盤を有効利用することができため、排出残土が発生しない。 ・一般的には建物新築時または建替時に実施する。		
施工イメージ		  平面図  断面図 ※柱状地盤改良体の配置は、設計条件によって異なる。		
L1 相当対応の仕様と概算コスト		①一体化工法との組み合わせなしの場合：対策仕様　改良体φ700mm、L=13m、33 セット ・既存建物がある場合：施工できない ・既存建物がない場合：250（20 戸以上一括施工）～300（1 戸施工）（万円／戸） ②格子状改良工法(26m×26m グリッド)併用の場合：対策仕様　改良体φ700mm、L=8m、33 セット（ただし、Fs 層以下で液状化が発生しないと仮定） ・既存建物がある場合：　施工できない ・既存建物がない場合：200（20 戸以上一括施工）～250（1 戸施工）（万円／戸） ※②には一体化対策工法費用を含まない。	課題等	・L2 地震動時には、特に周辺地盤が沈下するため、埋設管等に適切な対策が必要となる。
L2 対応の仕様と概算コスト		・既存建物がある場合：施工できない ・一体化工法との組み合わせの有無にかかわらず、対策仕様は変わらない（直接的な液状化対策ではない）。 対策仕様　改良体φ700mm、L=13m、33 セット ・既存建物がない場合：250（20 戸以上一括施工）～300（1 戸施工）（万円／戸）		

（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

表 5.29　建物重量と基礎重量とのバランスで有害な沈下・傾斜を防ぐ工法（浮き基礎）

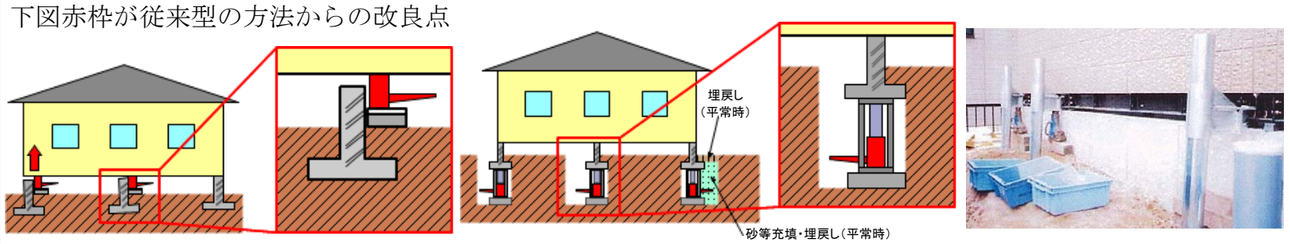
<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="3">建物重量と基礎重量とのバランスで有害な沈下・傾斜を防ぐ工法【浮き基礎工法】</td></tr>
<tr><td colspan="2">工法の概要</td><td>あらかじめ基礎を含めた建物の重量と直下の地盤に生じる浮力を釣り合わせることで、地盤が液状化した場合でも、建物の有害な沈下・傾斜を抑制する工法である。</td><td rowspan="2">適用性</td><td rowspan="2">・実証研究段階にあり、設計手法が確立されていない。
・建設地の土壌（水質を含む）に、ＥＰＳの耐久性に影響する物質が発見された場合には、無害処理等を実施する必要がある。
・既存建物がある場合には、曳家や更地にするなどの対応が必要である。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">具体的な工法例</td><td>施工
手順</td><td>建物の基礎下の土を取り除いて、代わりに軽量なＥＰＳ（発泡プラスチック）を敷き詰める。地中梁下調整コンクリートを打設後、基礎型枠を取り付け、スラブ下にＥＰＳを敷設する(施工概念図を参照)。</td></tr>
<tr><td>施工
概念図</td><td>
</td><td rowspan="3">液状化軽減効果の技術的な評価</td><td rowspan="3">建物の荷重を支える方法が、地盤重量の低減や構造物よる浮力の利用であり、地盤の液状化自体を抑制する工法ではない。従って、一般的な地盤の支持力を確保する方法とは異なっており、軟弱地盤での沈下対策として使用されることはあるが、液状化対策としての施工実績は乏しい。浮力を期待する場合には、荷重がバランスするまでに多少の沈下が予想されるほか、浮体としての振動も懸念されるが、これまでに大きな被害は報告されていない。Ｌ１、Ｌ２の地震動の大きさにあまり依存しないで効果を期待出来る可能性があるが、施工費用としては、特殊な材料を用いた施工や地下室などの施工費用が必要である。基礎下に施工出来れば、既存建物への適用も考えられる。

メリット
・支持層が深いほど他工法と比べてコストメリットが大きくなる。
・軟弱地盤対策として施工実績がある。
・地中障害等の影響を受けにくい。
デメリット
・設計手法が確立していない。
・既存建物がある場合には施工ができない。
・建物規模に対して排土量が多い。</td></tr>
<tr><td>特徴</td><td>・一般的には建物新築時または建替時に施工する。
・建物の規模に対して、掘削量、排土(残土)量が多い。</td></tr>
<tr><td colspan="2">施工イメージ</td><td> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">L1 相当対応の
仕様と概算コスト</td><td>・概算コストの精度に問題があるものの、従来工法(木造布基礎)の基礎構造の施工費と残土処分費を仮定した結果、従来工法に比べて 50～100（万円／戸）程度の増額となる可能性がある。</td><td rowspan="2">課題　等</td><td rowspan="2">・設計手法を確立する必要がある。</td></tr>
<tr><td colspan="2">L2 対応の
仕様と概算コスト</td><td>同上</td></tr>
</table>

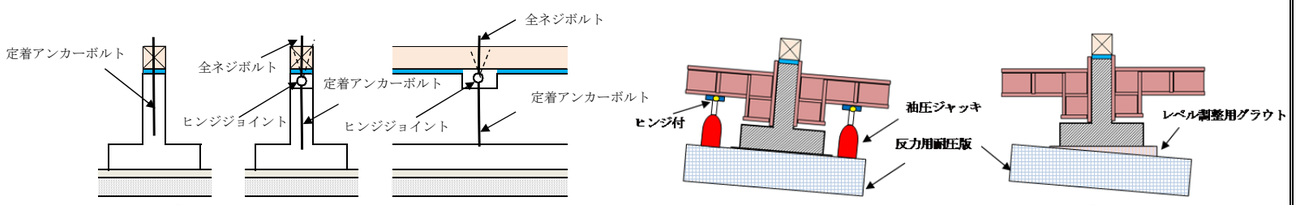
（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

表 5.30　沈下・傾斜修正のためのシステムを組み込む工法

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th colspan="3">沈下・傾斜修正のためのシステムを組み込む工法</th></tr>
<tr><td colspan="2">工法の概要</td><td>「新築または建替え時にあらかじめ沈下・傾斜修正のためのシステムを建物側に組み込む」ことにより、液状化で発生した建物の沈下・傾斜修正を容易に行えるようにするための工法。①土台修正ヒンジ付アンカーボルト先組み工法、②ジャッキアップ用反力版先組み工法、③新築時システム対応などの方法がある。</td><td rowspan="2">適用性</td><td rowspan="2">・実施例は多くはないが、軟弱地盤で建物が沈下、傾斜する場合の修復工法として実用化されている。
・新築、既存建物など建物の状況により施工可能な工法が異なる。
・基礎の状況によっては、補強等が必要な場合がある。
・想定する沈下量に応じて施工方法が異なる。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">具体的な工法例</td><td>施工方法</td><td>①基礎と土台を緊結するアンカーボルトを傾斜修正にも追従できるようにヒンジ機構を有する全ネジボルト型のアンカーボルトにする。
②反力用の耐圧版をあらかじめ基礎下部に設置する。
③基礎梁天端に配置した鉄骨土台や外周部等に配置された反力杭を利用して建物の沈下・傾斜を修正する。</td></tr>
<tr><td>施工概念図</td><td>下図赤枠が従来型の方法からの改良点
 

＊伸長可能なヒンジ機能付アンカーボルト
①土台修正ヒンジ付アンカーボルトの先組み工法
＊ジャッキアップシステムと反力版を先組
②ジャッキアップ用反力版先組み工法
＊反力杭利用して建物を修正する方法
③新築時システム対応（例）
※①②は修正時に必要な支持箇所のみをあらかじめ基礎部に組み込んでおくもの、③は修正用ジャッキ等を含めて組み込んでおくものである。</td><td rowspan="2">液状化軽減効果の技術的な評価</td><td rowspan="2">液状化が発生した場合に、建物に生じた沈下や傾斜を修正することを目的に、主に基礎構造に必要な対策を事前に講じておく対策である。L１相当、L２の地震にも適用可能であり、費用対効果を考慮すれば次善の策として検討に値すると考えられる。基礎と土台とのアンカーボルトの構造への工夫や沈下修正に必要な基礎の剛性や強度を予め確保しておくこと、修正用の部材の取り付けを容易にする工夫など建物の設計時や補強工事の際に検討することが出来る。

メリット
・建物の供用期間内に液状化が発生するような地震動が発生しない場合に、他の液状化対策工法と比較して費用を抑制できる。
デメリット
・液状化により建物が沈下傾斜するたびに修復のための費用が発生する。
・液状化の発生を抑制することはできないため、埋設管等が損傷するおそれがある。</td></tr>
<tr><td>特徴</td><td>従来型の方法(主に被災後に適用されている方法)からの改良を施すことで、建物の沈下・傾斜などの修正を容易に行えるようになる。</td></tr>
<tr><td colspan="2">施工イメージ</td><td> 

a）従来型　b）ﾋﾝｼﾞｼﾞｮｲﾝﾄ30度程度（断面方向・直交方向共）
①土台修正ヒンジ付アンカーボルトの先組み工法
a）ジャッキアップ状況　b）沈下・傾斜修正後
②ジャッキアップ用反力版先組み工法</td></tr>
<tr><td colspan="2">L1 相当対応の仕様と概算コスト</td><td>・既存建物がある場合（既存住宅対応）：360（万円／戸）程度
沈下修正費用（被災後に発生）は別途必要：沈下の程度により 60～120（万円／回）程度
・既存建物がない場合（新築住宅対応）：200（万円／戸）程度
沈下修正費用（被災後に発生）は別途必要：沈下の程度により 60～120（万円／回）程度</td><td rowspan="2">課題等</td><td rowspan="2">・基礎梁補強時に、十分な検討をする必要がある。耐力および剛性不足により建物に有害な変形が生じる可能性がある。

・新築時システム対応のような沈下・傾斜が大きな変形にも対応できる方法が、既存建物に適用できる工夫の検討が望まれる。</td></tr>
<tr><td colspan="2">L2 対応の仕様と概算コスト（L1 相当と同様）</td><td>・既存建物がある場合（既存住宅対応）：360（万円／戸）程度
沈下修正費用（被災後に発生）は別途必要：沈下の程度により 60～120（万円／回）程度
・既存建物がない場合（新築住宅対応）：200（万円／戸）程度
沈下修正費用（被災後に発生）は別途必要：沈下の程度により 60～120（万円／回）程度</td></tr>
</table>

（注）一戸当たりの負担額は概算金額である。また、表中の設計仕様やコストの記載はモデル地盤を前提としたものであり、設計目標や地盤条件、施工方法によっては大きく異なる場合がある。

※一部の図、写真は、民間企業のパンフレット・ホームページより転載させていただきました。

＜５．の参考文献＞

1) 井合進,田中幸芳,棚邊隆,安藤裕,須見光二(1996)：釧路沖地震で液状化を防止したグラベルドレーンの目詰まりに対する有効性について,土木学会第 51 回年次学術講演会発表講演集,第 3 部門,pp244-245.

2) 齋藤彰,伊藤克彦,大石博(1991)：液状化防止対策としての砕石ドレーン工法の施工例,土木学会論文集,No.427,IV-14,pp.49-53.

3) 岡本隆之祐,伊藤克彦,中島豊,大北康治(1986)：第 21 回土質工学研究発表会講演集,pp1867-1868.

4) 神山修,茶山和博,中島豊,田中幸芳(1989)：砕石ドレーン工法の施工が既設構造物に与える影響―埼玉県中川終末処理場―,第 24 回土質工学研究発表会講演集,pp1915-1916.

5) 杉正,戸田晴敏,大野義郎,島岡久壽(1984)：砕石ドレーン工法による液状化対策,基礎工,Vol.12,No.7,pp.109-114.

6) 運輸省港湾技術研究所(1993)：1993 年釧路沖地震港湾施設被害報告,1993.

7) 齋藤彰,伊藤克彦,大柿文治(1995)：－技術開発賞その後－　液状化防止対策としての砕石ドレーン工法の開発,土木学会論文集,No.522,VI-28,pp.35-38.

8) 塩井幸武(1996)：三陸はるか沖地震における液状化現象,第 31 回地盤工学研究発表会講演集,pp.1033-1034.

9) Okamura,M. Ishihara,M. and Ohshita,T. : Liquefaction resistance of sand deposit improved with sand compaction piles, Soils and Foundations, Vol.43, No.5, pp175-187, 2003.