

液状化対策工法の検討

1. 液状化対策工法について

(1) 液状化の発生抑制の原理と対策方法および対策工法

液状化の発生を抑制するには、

- ① 地盤の液状化強度を増大させる
- ② 地盤内の応力・変形に関する条件や間隙水圧に関する境界条件を液状化し難いものにさせる。

ことが考えられ、その原理は以下に示すものが挙げられる。

【液状化強度の増大】

- ① 密度の増大
- ② 液状化しにくい粒度分布
- ③ 土粒子骨格の安定化
- ④ 飽和度の低下

【応力・変形および間隙水圧に関する条件の改良】

- ⑤ 過剰間隙水圧を速やかに消散
- ⑥ 液状化した周辺からの過剰間隙水圧の遮断
- ⑦ 初期有効応力を増大させることにより、せん断応力の初期有効応力に対する比を低下
- ⑧ 地震時に生じるせん断変形の抑制

液状化の発生を抑制する原理と工法を図.1に示す。

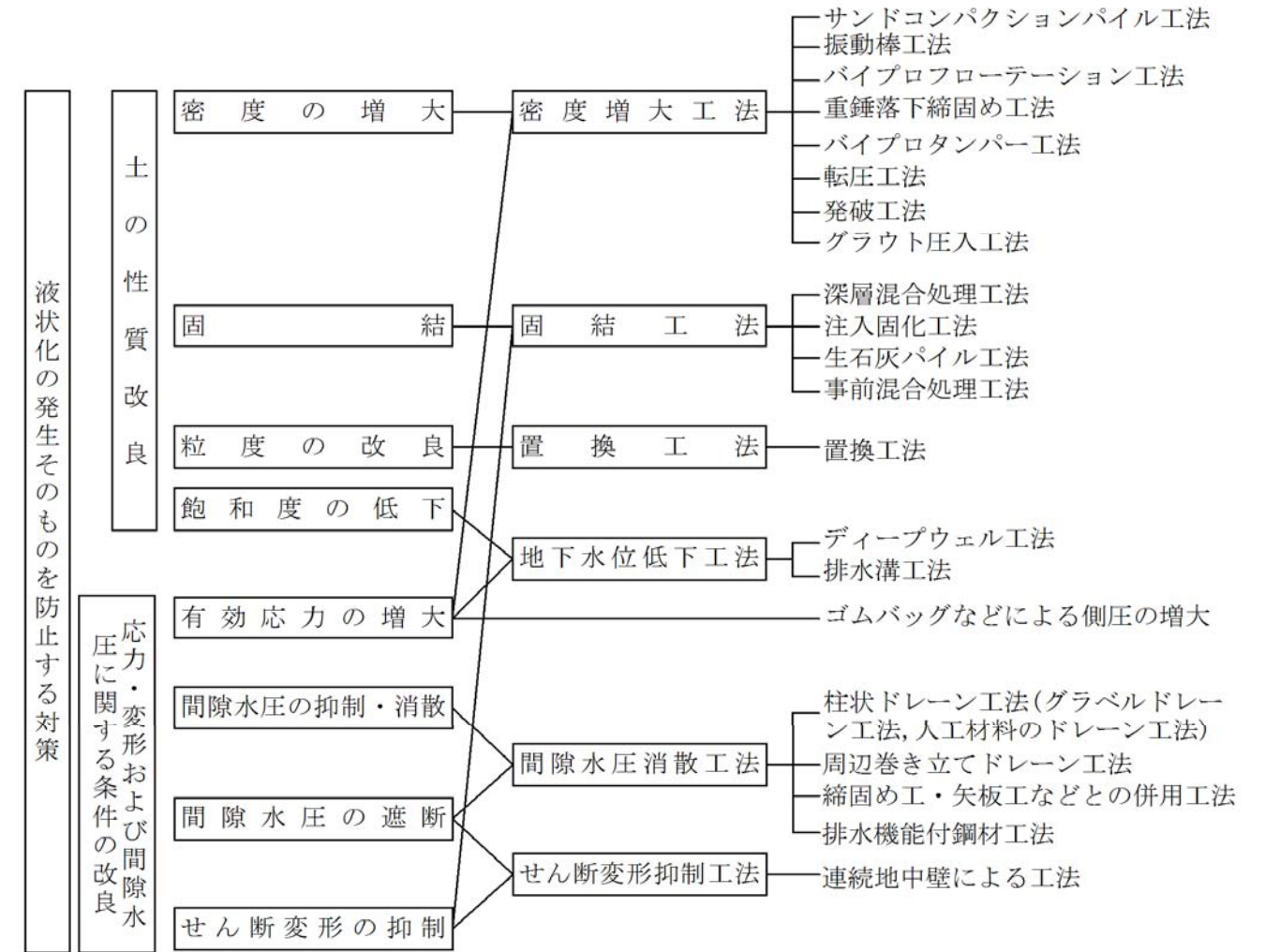
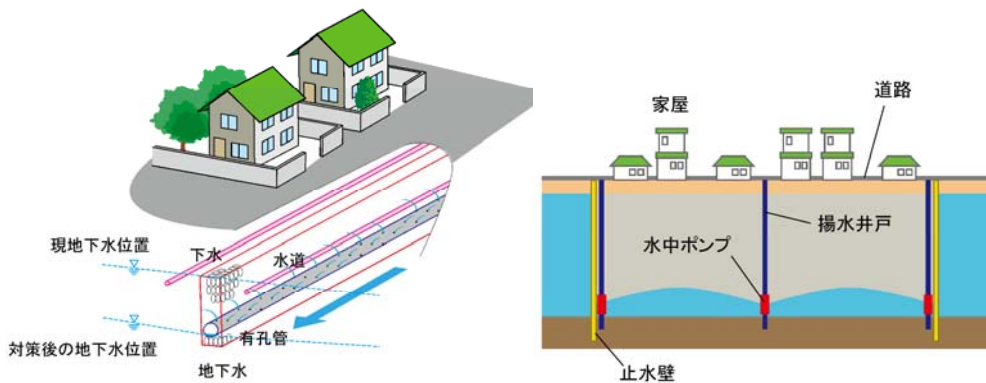
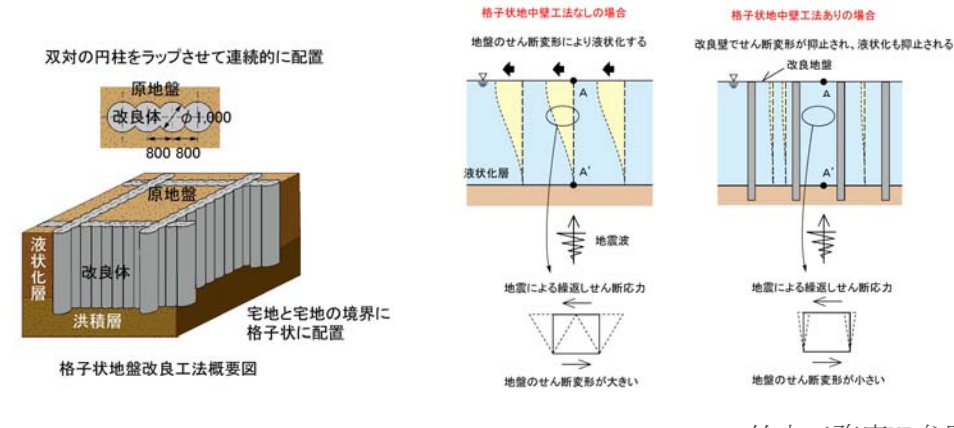
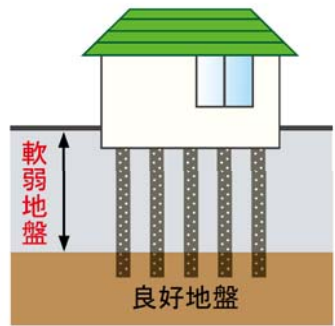


図-10.1 液状化の発生を抑制する対策の原理と工法
 出展「地盤工学・実務シリーズ18 液状化対策工法 社）地盤工学会」

(2) 道路と宅地の一体的な液状化対策に適用可能な液状化対策工法について

道路と宅地の一体的な液状化対策工法として、国土交通省のガイダンスとして示されているものは、下記に示す「地下水位低下工法」および「格子状地中壁工法」である。また、家屋に隣接して十分なスペースが確保できる場合には、曳き家をした宅地の改良を行うことも考えられる。

表-10.1 道路と宅地の一体的な液状化対策に適用可能な液状化対策工法

工法名	特徴	イメージ図	適用性	施工性	経済性	備考
地下水位低下工法	地下水位を低下させ、非液状化層厚を増大させるとともに、地下水位以深における拘束圧が増大し、液状化強度を大きくする。		粘土層が堆積する地盤条件においては、圧密沈下が懸念される。	道路直下に、ドレーン管を埋設し、周辺の地下水位を集水、自然流下によって地下水位を低下させる方式（自然流下方式）と、地盤内に止水壁を打設し、揚水井戸を設けポンプによって水を汲み上げる方式（汲み上げ井戸方式）がある。いずれも道路部分のみで施工が完結する。	道路部だけの施工であることから、宅地部分の費用はわずかであると想定される。維持管理費等の官民費用分担については検討が必要である。	兵庫県尼崎市、柏崎市の住宅地の液状化対策として実施された事例がある。
格子状地中壁工法	地中に柱列状の固化壁を造成し、これらを格子状に配置し液状化地盤を囲い込むことで、地盤のせん断変形を抑制し液状化を抑制する工法である。		施工可能な格子間隔によっては、せん断変形抑止効果が期待できない場合がある。	宅地と宅地の境界に施工する場合、高圧噴射工法を採用する。幅1m以上の施工スペースが必要である。施工ヤードを設けるために、宅地と宅地の境界の塀や植栽の撤去が必要な場合がある。	道路部および宅地と宅地の境界において施工する必要がある。宅地部分については、所有者が負担する必要があるため、格子間隔によっては高額になる場合がある。	宅地での施工実績がない。
曳き家工法+表層地盤改良(柱状改良)工法	曳き家し、一体を更地状態にする。軟弱地盤中にセメント系固化材を注入・攪拌し柱状の改良杭を作る工法である。改良深度を調整することにより、非液状化層厚を設定することができる。良好な地盤まで改良した場合には、液状化による建物の沈下を抑制することができる。		液状化対象層厚によっては適用が難しい場合がある。	更地状態にすることにより、施工スペース等の問題が少ない。	曳き家の費用が必要となる。また、宅地部分の施工に対して、所有者の費用負担が発生する。	

(3) 市街地液状化対策事業の検討委員会毎の液状化対策工法検討状況

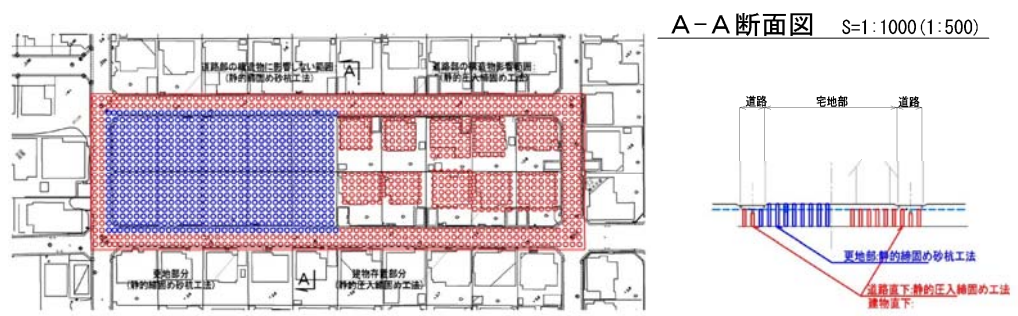
検討委員会を設置している11自治体について、液状化対策工法の検討状況を下記にまとめた。

主に地下水位低下工法について検討しているのは、潮来市、神栖市、久喜市であり、いずれも実証実験等を行っている。また、格子状地中壁工法を検討しているのは、浦安市のみである。その他の工法として、我孫子市では、締め固め工法を検討している。

表10-2 (a) 検討委員会毎の液状化対策工法検討状況 (その1)

自治体名	委員会開催情報	液状化対策工法の検討	金額
ひたちなか市	ひたちなか市液状化対策検討委員会	HP掲載情報なし	
鹿嶋市	鹿嶋市液状化対策検討委員会	HP掲載情報なし	
潮来市	潮来市液状化対策検討委員会	日の出地区を対象に地下水低下工法を選定 (実証実験を実施し、その結果をうけ、地下水低下工法を採用した。) 	
稲敷市	稲敷市市街地液状化対策事業計画策定検討委員会	液状化対策工法検討中	
神栖市	神栖市液状化対策検討委員会	鰐川、堀割1・2丁目地区：地下水低下工法を選定（合意形成中） 堀割3丁目地区：地下水低下工法を選定（合意形成中） 豊田・昭田地区：液状化対策について検討中 深芝・平泉地区：液状化対策について検討中 深芝南・平泉東地区：平泉東地内において、不飽和化工法の実証実験中 その他地区：地盤調査中 ※詳細な検討結果については、公開されていない。	
旭市	旭市液状化対策検討委員会	液状化対策工法検討中	
浦安市	浦安市液状化対策実現可能性技術検討委員会	格子状地中壁工法で確定（合意形成中） 液状化対策の有効性については、FL値を用いて評価している。  	概算工事費：約7億円～9億円/地区（1街区=20戸とし5街区で100戸） そのうち、個人負担は100万円～200万円 

表10-2 (b) 検討委員会毎の液状化対策工法検討状況 (その2)

自治体名	委員会開催情報	液状化対策工法の検討	金額
我孫子市	我孫子市液状化対策検討委員会	<p>地下水低下工法(自然流下)は、地下水低下に伴う宅地地盤の影響が懸念され、また暗渠配水管の施工が困難であることから、採用できないこととなった。格子状地中壁工法については、多大な住民負担が生じるため採用できないこととなった。</p> <p>調査地区においては全壊家屋の撤去が始まり、空地が多数点在している状況であるため、宅地と公共施設の一体的な液状化対策として、更地に対して特に有効な締固め工法の採用を検討中。</p> <p>(道路部直下および建物直下では、静的圧入締固め工法を採用し、更地部では静的締固め砂杭工法を採用する)。</p>  <p>補足：地下水低下の影響について検討した結果、Dcy=10cm未満、PL=5cm程度未満、地下水低下に伴う沈下量=30cm程度、沈下時間は、残留沈下量3cmまで約1100日必要、という検証結果となった。</p>	<p>締固め工法 (1宅地、200m²当)</p> <p>概算工事費：2億円/ha程度</p> <p>維持管理費：不要</p> <p>住民負担：◎300万円程度(建物有)</p> <p>※建物1F床面積100m²当</p> <p>※3万円/m²(1F床面積)</p> <p>◎150万円程度(更地)</p> <p>※7.5万円/m²</p>
千葉市	千葉市液状化対策推進委員会	地下水低下工法(自然流下)と深層混合処理工法(格子改良)について検討中	
習志野市	習志野市液状化対策検討委員会	格子状地中壁工法を主体に検討中。 地震応答解析により対策効果を検討する予定。	
久喜市	久喜市液状化対策検討委員会	地下水低下工法について実証実験中	

2. 対策工法の検討目的

東日本大震災により液状化被害を受けた家屋を対象に、再度の液状化による被害の抑制を図るため、考慮する地震動と目標性能を設定し、地盤条件や街区の条件等を考慮した経済的で所要の対策効果が得られる工法を得ることを目的とする。

3. 対策工法の検討方針

一般住宅へ適用可能な液状化対策工法としては、多く区分けて以下の2つの方法がある。

- ① 地下水位低下工法
- ② 格子状地中壁工法

これらの工法については、地盤条件により適・不適があることから、最初に国総研の簡易評価シートを用い、工法の適用可能性の目安を得ることとする。次に、検討地点に適した工法について、対策効果を定量的に評価できる方法により詳細な検討を実施する。

4. 対策工法の検討フロー

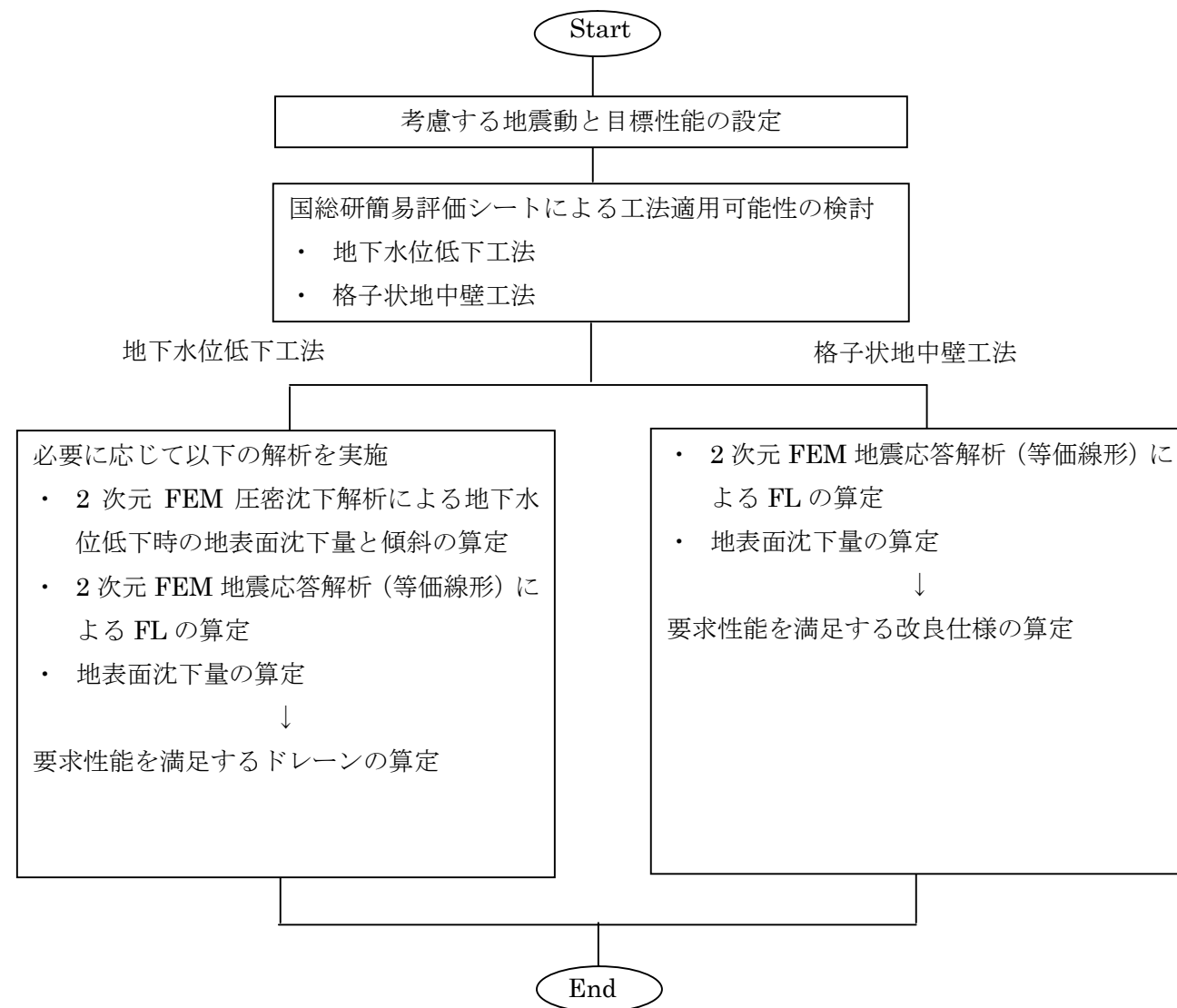


図-10.2 対策工法の検討フロー

5. 対策工法の検討において考慮する地震動と目標性能の設定

(1) 対策工法の検討において考慮する地震動

ガイダンス案においては、想定地震動の大きさについて以下のように示されている。

出典：液状化被災市街地における地下水位低下工法の検討・調査について（ガイダンス案）

1) 想定地震動の大きさ

液状化対策の検討を行うためには、目標とする地盤の液状化による被害の抑制効果を想定することが必要となる。液状化対策として期待される水準を定めるには、対象とする地震動の大きさとこの荷重に対する応答値としてどのような指標により液状化の抑制効果を把握するかを想定しておくことが必要となる。

地震動の大きさとしては、各被災自治体（市町村等）において地域の社会的、経済的状況を踏まえた検討に資するため、基本的に以下の3タイプの検討が想定される。

- ① タイプ1：200gal、M7.5（中地震による中程度の揺れ）
- ② タイプ2：200gal、M9.0（巨大地震による中程度の揺れ）
- ③ タイプ3：350 gal、M7.5（直下型地震による大きな揺れ）

ここで、道路等の公共施設と宅地の一体的な対策を講じることを考えると、公共施設用地における要求水準と宅地における要求水準に一定の整合性が図られていることが求められる。地続きである公共施設と宅地の一体的な対策を考える場合には、液状化現象への対応を考慮する基本的な外力としては、まずは、中程度の揺れに対して安全性が確保されていることが重要となる。

ただし、即地的な状況を踏まえながら、例えば、被災を受けた地域における今次災害での地震動（東日本大震災において記録された巨大地震動のM9.0の等価繰り返し回数による影響）や、既往最大の地震（巨大地震による大きな揺れ）が発生した場合における地盤状況等についても把握し、液状化対策の効果や、液状化が発生した場合に想定される被害についても想定をしておくことで、事業に対する市民の理解の促進、合意形成等における目安とすることも考えられる。

この中では、以下の考えが示されている。

- ・ 公共施設における要求水準と宅地における要求水準に一定の整合性が求められる。
- ・ 一体的な対策を考える場合、まずは中程度の揺れに対して安全性が確保されることが重要。
- ・ 中程度のゆれに対して家屋に軽微な損傷が生じる程度を目安とする。

本検討では、上記事項を考慮し、中程度の揺れに対する家屋の安全性を確保することとし、対策工法の検討に対して以下の地震動を考慮する。

- ・ タイプ1：200gal、M7.5（中地震による中程度の揺れ）
- ・ タイプ2：200gal、M9.0（巨大地震による中程度の揺れ）

対策工法の検討において考慮する地震動を含めた液状化の検討に用いる地震動のまとめを表-10.3に示す。

表-10.3 液状化の検討に用いる地震動のまとめ

検討目的	地震動設定の考え方	対象地震	検討地点	簡易法		詳細法(地震応答解析)	
				設定地震動	設定理由	設定地震動	設定理由
液状化の検証	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易法に用いる地震動は、対象地区内あるいは近傍における地震観測記録の地表最大加速度を用いる。 ・詳細法に用いる地震動は、対象地区近傍の地表面での地震観測記録を基盤への引き戻し計算により、基盤での時刻歴波形を設定する。 	東日本大震災	佐原	$\alpha_{max}=254\text{gal}$ ($0.65\alpha_{max}=165\text{gal}$)	佐原地区内の香取市役所における観測記録(地表最大加速度)を用いる。	⑦佐原(台地部)の地表での観測記録を基盤面に引き戻した波形	市役所位置の地盤は表層が厚いため、良好な地盤である佐原(台地部)で引き戻し計算を実施する。
			小見川	$\alpha_{max}=173\text{gal}$ ($0.65\alpha_{max}=113\text{gal}$)	小見川地区では、観測記録が得られていない。このため、近傍の小見川支所の観測記録(地表最大加速度)を用いる。	④小見川支所の地表での観測記録を基盤面に引き戻した波形	小見川地区では、観測記録が得られていない。このため、近傍の小見川支所の観測記録での引き戻し計算を行う。
			府馬	$\alpha_{max}=399\text{gal}$ ($0.65\alpha_{max}=259\text{gal}$)	府馬地区では、観測記録が得られていない。このため、近傍の山田支所の観測記録(地表最大加速度)を用いる。	③山田支所の地表での観測記録を基盤面に引き戻した波形	府馬地区では、観測記録が得られていない。このため、近傍の山田支所の観測記録での引き戻し計算を行う。
			利根川以北	$\alpha_{max}=254\text{gal}$ ($0.65\alpha_{max}=165\text{gal}$)	利根川以北では、観測記録が得られていない。このため、近傍の香取市役所の観測記録(地表最大加速度)を用いる。	⑦佐原(台地部)の地表での観測記録を基盤面に引き戻した波形	利根川以北では、観測記録が得られていない。このため、近傍の佐原(台地部)の観測記録での引き戻し計算を行う。
再液状化の検討	<ul style="list-style-type: none"> ・ガイドランス(案)に従い、タイプ1、2、3の地震動を設定する。 ・検討地点の地域性を考え、千葉県地震被害想定調査で想定している地震についても検討を行ったが、ガイドランス(案)に示されたタイプ3の地震動に包含されることから、再液状化の検討にはタイプ1、2、3を用いることとする。 	タイプ1 中地震による中程度の揺れ	佐原	地表最大加速度200gal, M7.5	ガイドランス(案)に示された、タイプ1地震動の地表最大加速度と地震のマグニチュードとして設定。	建築基礎構造設計指針(損傷限界状態検討用)基盤加速度応答スペクトルの適合波	ガイドランス(案)では、基盤における地震動は示されていない。「建築基礎構造設計指針」では、損傷限界状態検討用地震動として、工学的基盤面での加速度応答スペクトルが示されている。タイプ1地震動は、損傷限界状態検討用地震動に相当すると考えられることから、基盤加速度応答スペクトルに適合する模擬波形を作成する。
			小見川	地表最大加速度200gal, M7.5			
			府馬	地表最大加速度200gal, M7.5			
			利根川以北	地表最大加速度200gal, M7.5			
		タイプ2 巨大地震による中程度の揺れ	佐原	地表最大加速度200gal, M9.0	東日本大震災相当の地震動であるが、佐原地区以外は観測記録が得られていない。液状化の検証では、対象地区近傍の地震観測記録より地表最大加速度を設定したが、液状化対策を考慮した場合、各地区で地震動のレベルを合わせることが望ましい。このため、ガイドランス(案)に示されたタイプ2の地表最大加速度と地震のマグニチュードとして設定する。	液状化の検証用加速度時刻歴波形	東日本大震災相当の地震動であり、各地区近傍の地表面の地震観測記録より基盤位置での引き戻し波形を用いる。
			小見川	地表最大加速度200gal, M9.0			
			府馬	地表最大加速度200gal, M9.0			
			利根川以北	地表最大加速度200gal, M9.0			
		タイプ3 直下型地震による大きな揺れ	佐原	地表最大加速度350gal, M7.5	ガイドランス(案)に示された、タイプ3地震動の地表最大加速度と地震のマグニチュードとして設定。	建築基礎構造設計指針(終局限界状態検討用)基盤加速度応答スペクトルの適合波	ガイドランス(案)では、基盤における地震動は示されていない。「建築基礎構造設計指針」では、終局限界状態検討用地震動として、工学的基盤面での加速度応答スペクトルが示されている。タイプ3地震動は、終局限界状態検討用地震動に相当すると考えられることから、基盤加速度応答スペクトルに適合する模擬波形を作成する。
			小見川	地表最大加速度350gal, M7.5			
			府馬	地表最大加速度350gal, M7.5			
			利根川以北	地表最大加速度350gal, M7.5			
液状化対策検討	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水位低下工法および格子状地中壁工法の検討・調査ガイドランス(案)では、公共施設と宅地の要求水準に一定の整合性が求められることを考慮して、中程度の揺れに対して安全性を確保することが重要であるとしている。このため、中地震による中程度の揺れを対象にしたタイプ1の地震動を検討地震動として設定する。 ・また、今次災害に対する安全性も考慮して、東日本大震災相当のタイプ2地震動についても検討地震動として設定する。 	タイプ1 中地震による中程度の揺れ	佐原	地表最大加速度200gal, M7.5	ガイドランス(案)に示された、タイプ1地震動の地表最大加速度と地震のマグニチュードとして設定。	建築基礎構造設計指針(損傷限界状態検討用)基盤加速度応答スペクトルの適合波	ガイドランス(案)では、基盤における地震動は示されていない。「建築基礎構造設計指針」では、損傷限界状態検討用地震動として、工学的基盤面での加速度応答スペクトルが示されている。タイプ1地震動は、損傷限界状態検討用地震動に相当すると考えられることから、基盤加速度応答スペクトルに適合する模擬波形を作成する。
			小見川	地表最大加速度200gal, M7.5			
			府馬	地表最大加速度200gal, M7.5			
			利根川以北	地表最大加速度200gal, M7.5			
		タイプ2 巨大地震による中程度の揺れ 東日本大震災相当	佐原	地表最大加速度200gal, M9.0	東日本大震災相当の地震動であるが、佐原地区以外は観測記録が得られていない。液状化の検証では、対象地区近傍の地震観測記録より地表最大加速度を設定したが、液状化対策を考慮した場合、各地区で地震動のレベルを合わせることが望ましい。このため、ガイドランス(案)に示されたタイプ2の地表最大加速度と地震のマグニチュードとして設定する。	液状化の検証用加速度時刻歴波形	東日本大震災相当の地震動であり、各地区近傍の地表面の地震観測記録より基盤位置での引き戻し波形を用いる。
			小見川	地表最大加速度200gal, M9.0			
			府馬	地表最大加速度200gal, M9.0			
			利根川以北	地表最大加速度200gal, M9.0			

(2) 対策工法における目標性能の設定

ガイダンス案においては、液状化抑制効果の指標として以下の事項が示されている。

- ・ 非液状化層厚 (H1) の確保
- ・ 地表変位 (沈下) (Dcy) の抑制

また、地下水位低下に伴う圧密沈下により、以下の問題が生じないこととしている。

- ・ 建物の不同沈下による傾斜が生じない
- ・ 長期にわたり宅地地盤が道路より高く、将来的に問題が生じない

1) 非液状化層厚の確保

非液状化層厚については、地下水位低下工法と格子状地中壁工法で目安位置が異なっており、おのの以下のように示されている。

2) 一定の非液状化層厚の確保

地盤の液状化による家屋のめり込み沈下量や不同沈下量・傾斜量を推定することは、地震動や地質状況のみならず、基礎の構造形式、家屋の平面・立面形状、荷重分布、敷地条件等によって大きく異なり、個別の家屋についてそれらを定量的に把握することは困難であるが、まずは、液状化に対する宅地における対策の水準として、中程度の揺れに対して、家屋に軽微な損傷が生じる程度を目安とすることが考えられる。

また、これまでの研究成果等によると、

- ①一般的に、建築物の基礎の構造設計は地盤の許容応力度に基づいていることから、基礎下から 2.0 m 以上の支持地盤を確保することが望ましいこと
- ②非液状化層厚 H_1 を最低 3.0m 以上確保すれば、200gal 程度の揺れによる影響が少ないこと
- ③実験・解析等から、表層盤上改良等により、めり込み沈下による影響を軽減できることが想定されること

などから、図-6 に示すように非液状化層厚 $H_1 \geq 3.0\text{m}$ を確保すれば、地盤の液状化の抑制効果が見られ、中程度の揺れに対しての公共施設・家屋の安全性を確保するための条件の一つとなるものと見込まれる。

以上のような観点に留意しつつ、個別の被災市街地における地盤状況や家屋の被災状況の分布等を勘案しながら、より詳細な検討を行うことで、所要の非液状化層厚を設定することも想定される。

出典：液状化被災市街地における地下水位低下工法の検討・調査について（ガイダンス(案)）国土交通省都市局 H25. 1

2) 地表面から一定の層厚における地盤の液状化の抑制

地盤の液状化による家屋のめり込み沈下量や不同沈下量・傾斜量を推定することは、地震動や地質状況のみならず、基礎の構造形式、家屋の平面・立面形状、荷重分布、敷地条件等によって大きく異なり、個別の家屋についてそれらを定量的に把握することは困難である。そこでまずは、液状化に対する宅地における対策の水準として、中程度の揺れに対して、家屋に軽微な損傷が生じる程度までに被害を抑制することを目安とすることが考えられる。

一般的に、一定の層厚について建築物の支持地盤を確保することで、地震時のめり込み沈下による家屋への影響を軽減できることが想定される。しかし、格子状地中壁工法においては、地下水位の高さは対策前と同程度であるものと考えられ、地下水位が高い地域にあっては、めり込み沈下に対する影響についても十分に考慮する必要がある。

これらの状況を踏まえ、格子状地中壁工法の効果の発現にあたっては、一定以上の改良深さとする事で、FL 値が 1 以上となる層厚について、地表面から 5m 程度を確保することが必要となるものと想定される。なお、5m より深い層が液状化する場合にはめり込み沈下は発生し難いものの液状化後に圧縮による地盤の沈下は発生するので、その影響に関して留意が必要である。

出典：液状化被災市街地における格子状地中壁工法の検討・調査について（ガイダンス(案)）国土交通省都市局 H25. 4

以上を踏まえ、本検討では目標性能として以下の非液状化層厚の確保を設定する。

表-10.4 液状化対策工における目標性能としての非液状化層厚 H1

対策工法	非液状化層厚 H1 の値 (m)	設定理由
地下水位低下工法	3 m 以上	既往の研究成果より H1 を 3m 以上確保すれば、200gal 程度の揺れによる影響が少ないことによる。
格子状地中壁工法	5 m 以上	格子状地中壁工法では、地下水位は対策前と同程度であり、めり込み沈下による影響を考慮し 5m 以上とした。

2) 地表変位 Dcy の抑制

地表変位の目安値としては、地下水位低下工法および格子状地中壁工法ともに以下の事項が示されている。

3) 地表変位 Dcy

道路、下水道などの公共施設（土木構造物）は、中程度の揺れに対して施設が損傷することなく、あるいは軽微な損傷があっても施設に求められる一定の性能が継続的に発揮できることが期待される。このため、公共施設と宅地の一体的な液状化対策を行う場合、公共用地については、これらの地震動に対して原則として液状化による被害が発生しないこと、または液状化による地盤の変形量が一定程度以下であることが想定される。また、宅地は、表-5 のように建築基礎構造設計指針（2001 年、日本建築学会）に定める液状化判定法（ F_L 法）に基づき、沖積砂層を含む地盤の変形を考慮した地表変位 Dcy が小さい（概ね 5~10cm 以内）ことが期待される。

道路と宅地の一体的な対策を講じる場合、それぞれの期待される要求水準に整合が図られることが求められるが、ここでは、地盤の変形を考慮した地表変位 $Dcy \leq 10\text{cm}$ を目安としつつ、この他の照査方法でも適切な方法があれば、その方法で検討を行うことも考えられる。例えば、過剰間隙水圧の消散に伴う体積圧縮ひずみによる地盤の沈下量の推定方法については、 Dcy から推定する方法以外にも、室内繰返しせん断試験により非排水状態で液状化試験を行った後に、排水状態にして過剰間隙水圧を消散させて液状化後の体積圧縮ひずみを直接求めた試験結果をもとに、液状化に対する安全率 F_L をパラメータとした図-7 に示す関係が、石原・吉嶺により提案されているので、これを用いることもできる。

表-5 地表変位 (Dcy) と液状化の程度⁸⁾

Dcy (cm)	液状化の程度
0	なし
~ 05	軽微
05 ~ 10	小
10 ~ 20	中
20 ~ 40	大
40 ~	甚大

以上を踏まえ、本検討では目標性能として以下の地表変位の制限値を設定する。

表-10.5 液状化対策工における目標性能としての地表変位 Dcy

対策工法	地表変位 Dcy の値 (cm)	設定理由
地下水位低下工法 格子状地中壁工法	10cm 以下	地盤の変形を考慮した地表変位 $Dcy \leq 10\text{cm}$ としたガイダンス(案)に準拠

3) 圧密沈下量の抑制

圧密沈下に対しては、ガイダンス案において以下の事項が示されている。

日本建築学会の「建築基礎構造設計指針」および「小規模建築物基礎設計指針」では、表-6 に示す通り、沈下の種類、基礎形式などに応じて、限度とする値が示されているが、参考値として沈下量がこれらを上回らないことを確認することが必要と想定される。

ただし、地下水位低下に伴う圧密沈下の影響は、敷地単位または公共施設用地と宅地にまたがり均等に圧密沈下が生じる場合においては、傾斜または高低差による機能障害等への影響は比較的小さいと想定される。地盤の沈下による影響、支障を考慮する際には、複数の地点における想定圧密沈下量(ΔS)より、表-7、-8 に示されているように、傾斜または高低差を推定し、これらの傾斜量等による影響が軽微であることを確認することが求められる。この場合、例えば地質状況が比較的広域に渡り均質な状態であることが期待される地域については、工法の選択にあたり確認したボーリングデータ等から傾斜量等を推定することが考えられるが、地質状況が複雑であったり、不連続が発生していることが想定される場合等にあつては、必要に応じてより稠密なボーリングデータから傾斜量等を推定するなど、入念な調査が行われることが望ましいものと考えられる。

表-6 沈下量の限度値の参考値^{7),8)}

沈下の種類 基礎形式	即時沈下		圧密沈下	
	布基礎	べた基礎	布基礎	べた基礎
標準値	2.5	3～(4)	10	10～(15)
最大値	4	6～(8)	20	20～(30)

標準値：不同沈下による亀裂がほとんど発生しない限度値
 最大値：幾分か不同沈下亀裂が発生するが障害には至らない限度値
 ()：剛性の高いべた基礎の値

表-7 傾斜角と機能的障害程度の関係⁷⁾

傾斜角	障害程度	区分
3/1000 以下	品確法技術的基準レベル-1 相当	1
4/1000	不具合が見られる	2
5/1000	不同沈下を意識する 水はけが悪くなる	
6/1000	品確法技術的基準レベル-3 相当、不同沈下を強く意識し申し立てが急増する	3
7/1000	建具が自然に動くのが顕著に見られる	
8/1000	ほとんどの建物で建具が自然に動く	4
10/1000	配水管の逆勾配	
17/1000	生理的な限界値	

表-8 不同沈下の設計目標値の参考値⁷⁾

不同沈下	設計目標値
傾斜角	3 /1000 以下
変形角	2.5/1000 以下

出典：液状化被災市街地における地下水位低下工法の検討・調査について（ガイダンス(案)）

地下水位低下による圧密沈下については、建物の不同沈下による傾斜が生じないようにする必要がある。建物の不同沈下の算定は、FEM 解析などの詳細検討が必要になる。このため、本検討では表-6 に示す沈下量の限度値の参考値を考慮し、布基礎を想定した標準値の沈下量 10cm を目安とする。

詳細な検討を実施した場合の不同沈下については、表-7 および表-8 より不具合が見られないとされる傾斜角 3 / 1000 を目標値とする。

表-10.6 地下水位低下工法における圧密沈下に対する目標値

項目	目標値	設定理由
圧密沈下量	10cm 以下	布基礎を想定した圧密沈下量の標準値 10cm として設定
建築物傾斜角	3/1000	品確法技術的基準レベル-1 相当の不具合が生じないと見られるレベル

4) 対策工法における目標性能の設定のまとめ

対策工法における目標性能を表-10.7 に示す。

表-10.7 対策工法における目標性能

項目	地下水位低下工法	格子状地中壁工法
非液状化層厚 (H1) の確保	3m 以上	5m 以上
地表面沈下量 Dcy の制限	10cm 以内	10cm 以内
圧密沈下量 (ΔS) の抑制	10cm 以内 (概略検討時) 傾斜角 3/1000 以内 (詳細検討時)	—

6. 対策工法の検討方法

(1) 国総研簡易計算シート

1) 地下水位低下工法簡易計算シート

国総研より地下水位低下工法について、地盤調査データと想定する地震規模を入力することにより、地下水位を現状よりどれだけ低下させるかに対応した液状化対策の効果と、この工法の副作用である下部粘性土層の圧密沈下量を簡単に算定できる以下のエクセルシートが提供されている。

「地域で取り組む地盤の液状化対策のための地下水位低下の効果・影響簡易計算シート（試行版）」

2013.1 国土交通省 都市局・国土技術政策総合研究所

a) 入力概要

調査地点ID			〇〇地区		
項目名			メモ等		
現状地下水位	1	m			
低下後地下水位	3	m			

条件	地表面加速度 (gal)	震源 (マグニチュード)
1.0	200	9.0
2.0	350	7.5
3.0	160	9.0

この色のセルに入力します。

深度 (m)	土質	細粒分含有率 FC (%)	N値	単位体積重量 (kN/m ³)	飽和度 (%)	砂礫 50%粒径 D50 (mm)	地盤内 空気 混入	液状化判定 対象層
0.5	表土	66.0	2	15.68	100			
1.0	表土	66.0	2	15.68	100			
1.5	砂質土	21.0	4	15.68	100			
2.0	砂質土	21.0	5	15.68	100			
2.5	砂質土	21.0	5	15.97	100			
3.0	砂質土	21.0	5	15.97	100			
3.5	砂質土	21.0	5	15.97	95			
4.0	砂質土	21.0	5	15.97	95			
4.5	砂質土	21.0	6	15.97	100			
5.0	砂質土	21.0	6	15.97	100			
5.5	砂質土	21.0	6	15.97	100			
6.0	砂質土	21.0	6	15.97	100			
6.5	砂質土	21.0	7	16.37	100			
7.0	砂質土	21.0	7	16.37	100			
7.5	砂質土	21.0	7	16.37	100			
8.0	砂質土	21.0	7	16.37	100			
8.5	砂質土	21.0	7	16.37	100			
9.0	砂質土	21.0	7	16.37	100			
9.5	粘性土	45.0	2	16.76	100			
10.0	粘性土	45.0	2	16.76	100			

※地下水位低下工法簡易計算シートで考慮する地震動は、地表面加速度と地震のマグニチュードを任意に設定可能

圧密沈下量入力・計算シート

調査地点ID			〇〇地区		
項目名			メモ等		
現状地下水位	1	m			
低下後地下水位	3	m			
地下水低下量	2	m			

e-logp法		Cc法	
圧密沈下量	3	cm	
圧密沈下量	8	cm	

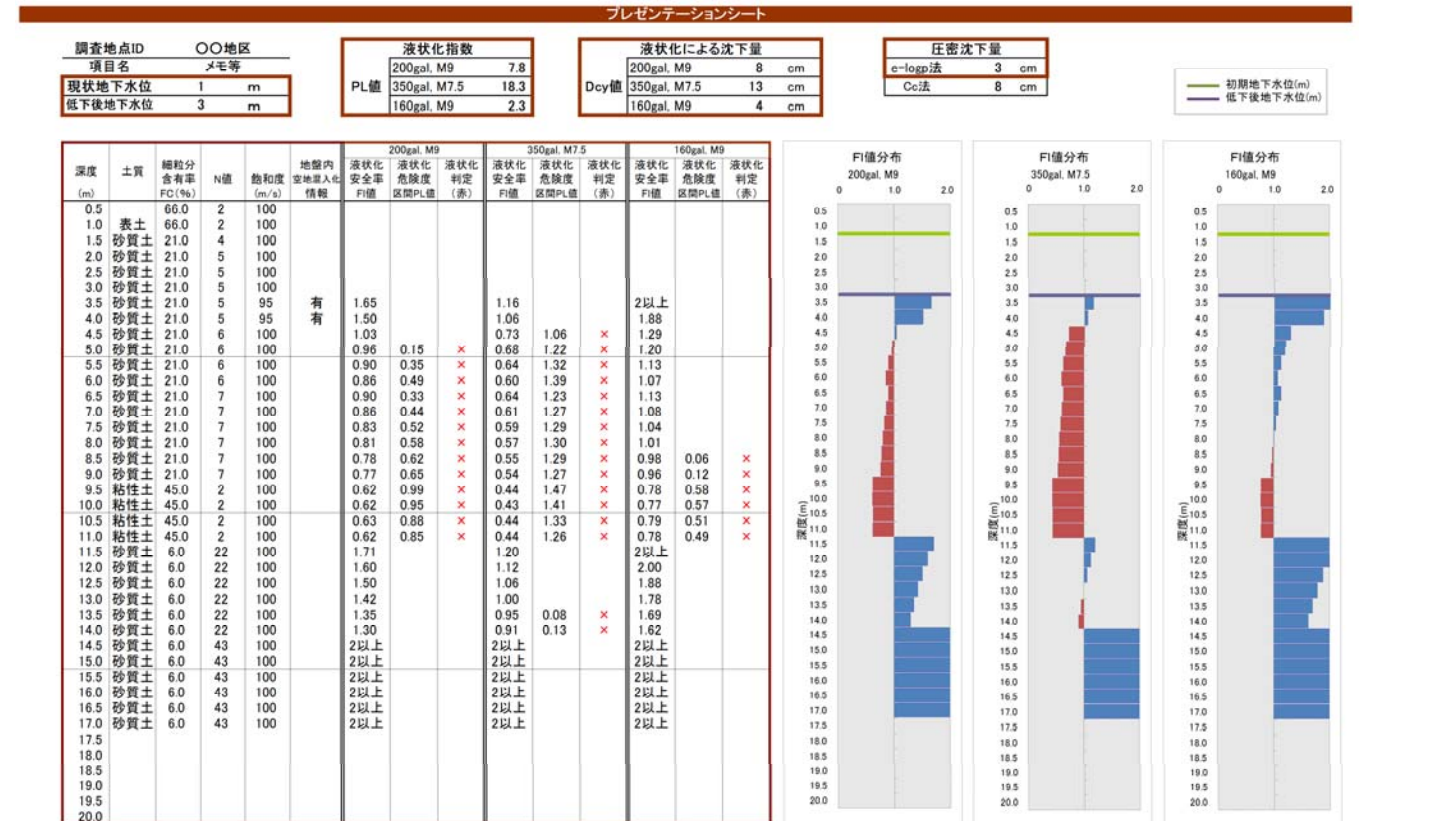
この色のセルに入力します。

深度 (m)	土質	単位体積重量 (kN/m ³)	初期間隙比 e ₀	圧縮係数 Cc	e-logp曲線番号	地下水位 低下前の有効応力 σ'z (kPa)	地下水位 低下後の有効応力 σ'z (kPa)	Cc法による 圧密沈下量 (cm)	e-logp法による 圧密沈下量 (cm)
2.0	表土	2.0	16.0	0.7	0.00	16.00	16.00	0.00	0.00
4.0	砂質土	2.0	16.3	1.7	0.00	28.70	48.30	0.00	0.00
6.0	砂質土	2.0	16.3	1.1	0.00	41.70	61.30	0.00	0.00
9.0	粘性土	3.0	16.7	1.1	0.46	58.55	78.15	8.40	3.21
11.0	砂質土	2.0	17.1	0.9	0.00	76.20	95.80	0.00	0.00
14.0	砂質土	3.0	16.8	1.5	0.00	94.00	113.60	0.00	0.00
17.0	砂質土	3.0	17.2	0.9	0.00	115.60	135.20	0.00	0.00
32.0	砂質土	15.0	17.6	1.0	0.00	185.20	204.80	0.00	0.00
47.0	礫質土	15.0	17.6	1.0	0.00	302.20	321.80	0.00	0.00

e-logp曲線入力										
番号	1		2		3		4		5	
	p(kN/m ²)	e	p(kN/m ²)	e	p(kN/m ²)	e	p(kN/m ²)	e	p(kN/m ²)	e
1	0	1.528	0	1.528						
2	9.8	1.513	19.61	1.494						
3	19.61	1.494	39.22	1.46						
4	39.22	1.46	74.43	1.408						
5	74.43	1.408	156.9	1.309						
6	156.9	1.309	313.7	1.171						
7	313.7	1.171	627.5	1.038						
8	627.5	1.038	1255	0.907						
9	1255	0.907								
10	9.8	0.987								

p: 圧縮応力 (kN/m²)
e: 間隙比

b) 結果概要



液状化抑制効果計算シート															
調査地点ID			〇〇地区			条件		震源		修正係数		液状化危険度		地盤水平変位量	
項目名			メモ等			地表面加速度 (gal)		(マグニチュード)		修正係数 γ _h		PL値		Dey(cm)	
現状地下水位	1	m	200	9.0	0.80	7.8	8								
低下後地下水位	3	m	350	7.5	0.65	18.3	13								
			160	9.0	0.80	2.3	4								

深度 (m)	土質	細粒分含有率 FC (%)	N値	飽和度 (%)	砂礫 50%粒径 D50 (mm)	地盤内 空気 混入	200gal. M9		350gal. M7.5		160gal. M9				
							液状化危険度 PL値	液状化危険度判定	液状化危険度 PL値	液状化危険度判定	液状化危険度 PL値	液状化危険度判定			
0.5	表土	66.0	2	100			7.84	7.84	7.84	0.99	7.07	12.60	19.67	0.23	0.16
1.0	表土	66.0	2	100			15.68	15.68	15.68	0.99	5.00	12.60	17.60	0.19	0.23
1.5	砂質土	21.0	4	100			23.52	23.52	18.62	0.98	9.18	8.10	17.28	0.19	0.16
2.0	砂質土	21.0	5	100			31.36	31.36	21.56	0.97	10.66	8.10	18.76	0.21	0.16
2.5	砂質土	21.0	5	100			39.20	39.20	24.65	0.96	9.97	8.10	18.07	0.20	0.16
3.0	砂質土	21.0	5	100			47.04	47.33	27.73	0.96	9.40	8.10	17.50	0.19	0.16
3.5	砂質土	21.0	5	95			55.88	50.42	30.62	0.95	8.92	8.10	17.02	0.28	0.17
4.0	砂質土	21.0	5	95			63.30	53.50	33.90	0.94	8.50	8.10	16.60	0.27	0.18
4.5	砂質土	21.0	6	100			71.28	58.59	36.99	0.93	9.77	8.10	17.87	0.20	0.19
5.0	砂質土	21.0	6	100			79.27	59.67	40.07	0.93	9.38	8.10	17.48	0.19	0.20
5.5	砂質土	21.0	6	100			87.26	62.76	43.16	0.92	9.04	8.10	17.14	0.19	0.21
6.0	砂質土	21.0	6	100			95.24	65.84	46.24	0.91	8.73	8.10	16.83	0.18	0.21
6.5	砂質土	21.0	7	100			103.43	69.13	49.53	0.90	8.45	8.10	16.56	0.20	0.22
7.0	砂質土	21.0	7	100			111.61	72.41	52.81	0.90	9.54	8.10	17.64	0.19	0.23
7.5	砂質土	21.0	7	100			119.80	75.70	56.10	0.89	9.25	8.10	17.35	0.19	0.23
8.0	砂質土	21.0	7	100			127.98	78.98	59.38	0.88	8.99	8.10	17.09	0.19	0.23
8.5	砂質土	21.0	7	100			136.17	82.27	62.67	0.87	8.75	8.10	16.85	0.18	0.24
9.0	砂質土	21.0	7	100			144.35	85.55	65.95	0.87	8.53	8.10	16.63	0.18	0.24
9.5	粘性土	45.0	2	100			152.73	89.03	69.43	0.86	2.38	10.50	12.88	0.15	0.24
10.0	粘性土	45.0	2	100			161.11	92.51	72.91	0.85	2.32	10.50	12.82	0.15	0.24
10.5	粘性土	45.0	2	100			175.98	102.48	82.88	0.84	2.17	10.50	12.67	0.15	0.24
11.0	粘性土	45.0	2	100			184.36	105.96	86.36	0.84	2.13	10.50	12.63	0.15	0.24
11.5	砂質土	6.0	22	100			192.59	109.29	89.69	0.83	23.00	1.20	24.20	0.41	0.24
12.0	砂質土	6.0	22	100			200.82	112.62	93.02	0.82	22.58	1.20	23.78	0.38	0.24
12.5	砂質土	6.0	22	100			209.05	115.95	96.35	0.81	22.19	1.20	23.39	0.36	0.24
13.0	砂質土	6.0	22	100			217.28	119.28	99.68	0.81	21.81	1.20	23.01	0.34	0.24
13.5	砂質土	6.0	22	100			225.51	122.61	103.01	0.80	21.46	1.20	22.66	0.32	0.24
14.0	砂質土	6.0	22	100			233.74	125.94	106.34	0.79	21.12	1.20	22.32	0.31	0.24
14.5	砂質土	6.0	22	100			242.17	129.47	109.67	0.78	40.61	1.20	41.81	0.65	0.24
15.0	砂質土	6.0	43	100			250.60	133.00	113.40	0.78	39.97	1.20	41.17	0.69	0.24
15.5	砂質土	6.0	43	100			259.03	136.53	116.93	0.77	39.37	1.20	40.57	0.76	0.24
16.0	砂質土	6.0	43	100			267.46	140.06	120.46	0.76	38.78	1.20	39.98	0.73	0.24
16.5	砂質土	6.0	43	100			275.89	143.59	123.99	0.75	38.23	1.20	39.43	0.68	0.24
17.0	砂質土	6.0	43	100			284.32	147.12	127.52	0.75	37.70	1.20	38.90	0.64	0.24
17.5															
18.0															
18.5															
19.0															
19.5															
20.0															

2) 格子状地中壁簡易計算シート

国総研より格子状地中壁工法について、地盤状況（N値、液状化層厚、細粒分含有率など）と対策として適用する地中壁の格子の大きさや強度をプルダウンメニューから選択することによって液状化に対する安全率（FL値）と液状化による沈下量（Dcy値）を簡単に算定できる以下のエクセルシートが提供されている。

「地域で取り組む地盤の液状化対策のための格子状地中壁工法の効果・影響簡易計算シート（試行版）」

2013.2 国土交通省 都市局・国土技術政策総合研究所

※格子状地中壁簡易計算シートで考慮する地震動は、以下の2種類

- ・地震波 a（タイプ 2）：地表面加速度 200gal、マグニチュード 9.0
- ・地震波 b（タイプ 3）：地表面加速度 350gal、マグニチュード 7.3

<入力条件>

- 各地区の地盤条件をドロップダウンリストから選択します。選択できる数値は下記の通りです。該当する条件がこの範囲を超える場合は適用対象外となります。
- N値: 3.5, 10, 15
- 液状化層厚: 5, 10, 15, 20m
- 細粒分含有率Fc: 0, 10, 20, 30%
- 地下水位: 1, 2m

・N値は液状化層となる砂層のN値を選択します。

・液状化層厚は地表からの砂層の厚さです。

・細粒分含有率は地盤調査の結果に基づいて設定します。30%を超える場合は30%としてください。

・地下水位は季節変動を考慮しない平均的な水位を選択します。2mより深い場合は2mとしてください。

・地中壁のメニューでは地中壁の幅と奥行きを組み合わせてドロップダウンリストから選択します。例えば12×15とは幅12m、奥行き15mごとに地中壁があるという条件になります。該当する条件がない場合は、対象面積が最も近いものを選択してください。

・地中壁強度は0.75、1.0、1.5、3.0N/mm²の4種類から選択できます。

・地中壁の強度は1.5N/mm²を標準と考慮してください。

・改良深さは液状化層厚と同じです。壁厚は85cmを想定しています。これは円形の改良径1mを一部ラップさせながら壁状に改良する工法を想定したものです。

格子状地中壁工法の効果の簡易評価シート

<計算位置>

・FL値の計算位置は地中壁がある場合の、壁間の中央地点です。

<沈下量>

・無対策と対策後の液状化による沈下量が建築学会基準で計算されます。

・液状化による沈下量はFL値が1.0より小さい地層に対して計算されますが、住宅の重さは考慮されていません。

・この数値もFL値とともに工法の適用可否を判断する目安となります。

地震波 a (M=9.0)		地震波 b (M=7.3)	
無対策	対策後	無対策	対策後
14.3	2.9	17.9	8.3

液状化による沈下量Dcy値 (cm)

深度 (m)	土質	細粒分含有率 Fc (%)	地震波 a (M=9.0)		地震波 b (M=7.3)	
			無対策 FL値	対策後 FL値	無対策 FL値	対策後 FL値
0.5	表土					
1.0	表土					
1.5	砂質土	20.0	1.01	1.86	0.65	1.28
2.0	砂質土	20.0	0.85	1.77	0.55	1.21
2.5	砂質土	20.0	0.76	1.71	0.48	1.16
3.0	砂質土	20.0	0.71	1.71	0.44	1.14
3.5	砂質土	20.0	0.67	1.72	0.42	1.13
4.0	砂質土	20.0	0.64	1.70	0.40	1.11
4.5	砂質土	20.0	0.62	1.69	0.38	1.08
5.0	砂質土	20.0	0.61	1.63	0.37	1.02
5.5	砂質土	20.0	0.60	1.57	0.36	0.97
6.0	砂質土	20.0	0.60	1.46	0.36	0.90
6.5	砂質土	20.0	0.59	1.38	0.35	0.84
7.0	砂質土	20.0	0.59	1.25	0.35	0.76
7.5	砂質土	20.0	0.59	1.15	0.35	0.70
8.0	砂質土	20.0	0.59	1.03	0.35	0.64
8.5	砂質土	20.0	0.58	0.94	0.35	0.58
9.0	砂質土	20.0	0.58	0.83	0.35	0.53
9.5	砂質土	20.0	0.57	0.76	0.35	0.48
10.0	砂質土	20.0	0.57	0.64	0.36	0.40
10.5	砂質土					
11.0	砂質土					
11.5	砂質土					
12.0	砂質土					
12.5	砂質土					
13.0	砂質土					
13.5	砂質土					
14.0	砂質土					
14.5	砂質土					
15.0	砂質土					
15.5	砂質土					
16.0	砂質土					
16.5	砂質土					
17.0	砂質土					
17.5	砂質土					
18.0	砂質土					
18.5	砂質土					
19.0	砂質土					
19.5	砂質土					
20.0	砂質土					

<地震波>

・計算する地震波はaとbの2種類です。

・地震波aは、東日本大震災の夢の島観測地震波(地震のマグニチュード9.0を用いて、地表加速度200gal相当の入力としています。これは、震度5程度の揺れが長時間継続するケースです。

・地震波bは中央防災会議が想定している東京湾北部地震波(地震のマグニチュード7.3、地表加速度350gal相当)です。これは、いわゆる直下型地震を想定したものです。

<計算表>

・深度(地表からの深さ)0.5mごとに液状化安全率FL値を計算します。

・FL値に住宅の重さは考慮されていません。

・FL値が1.0より小さい場合は「液状化する」と判定され、液状化判定欄に「×」が表示されます。1.0より大きい場合は「液状化しない」と判断され空欄となります。

・計算結果は地震波a,bの2つに対して行われます。

・対策効果の確認のため、無対策の場合の計算結果も表示されます。

・格子状地中壁が地震により壊れる可能性がある場合は「検討対象外」である旨が表示されます。この表示が出た場合は地中壁の強度を変更してください。

このシートの計算条件

- ・地表から液状化層となる砂層が続く地盤を想定しています。
- ・少なくとも4戸以上の住宅の敷地が連続してあり、その周囲には幅4m~9mの道路がある街区を想定しています。

(2) 2次元 FEM 圧密沈下解析

2次元 FEM 圧密沈下解析は、地下水位低下後の有効応力の増加に対する圧密沈下による地盤変形量を算定することができる。これにより、地表面の沈下量や建物位置の傾斜角を算定できる。解析モデル概念図を図-10.3 に示す。

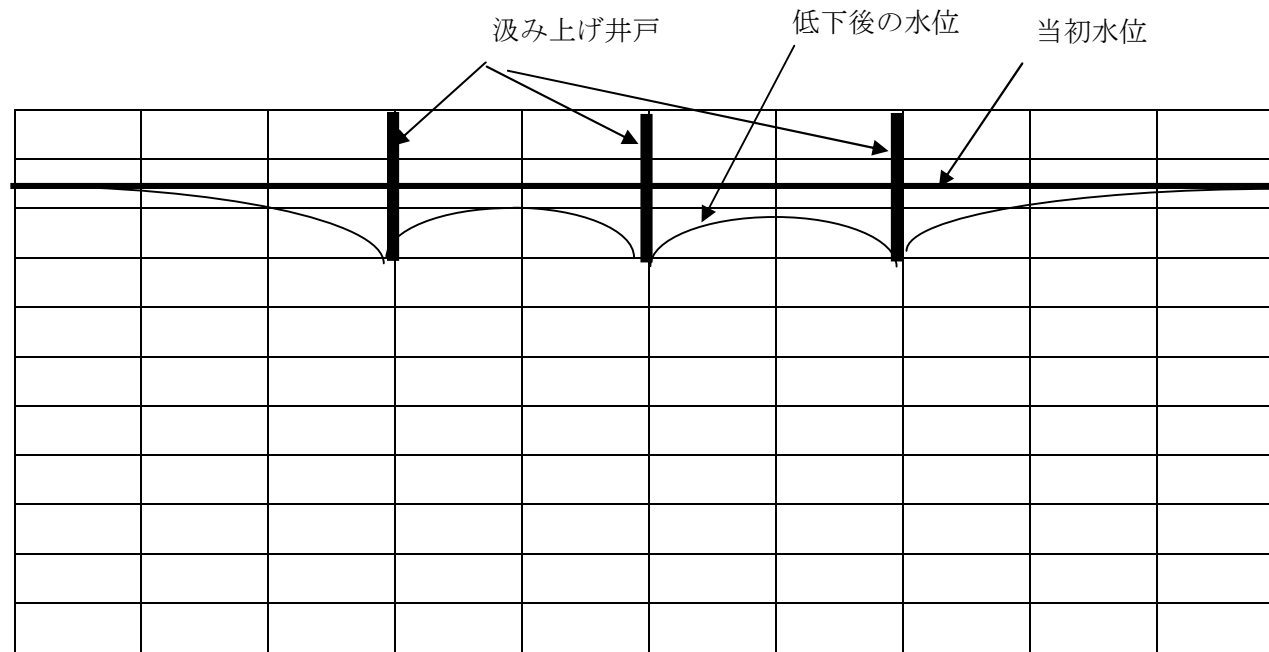


図-10.3 2次元 FEM 圧密沈下解析モデル概念図

(3) 2次元 FEM 等価線形地震応答解析

2次元 FEM 等価線形地震応答解析は、地下水位低下後の地盤条件や格子状地中壁による拘束効果をモデル化することができ、解析結果から地盤の液状化に対する安全率 (FL 値) を算出することができる。解析モデル概念図を図-10.4 に示す。

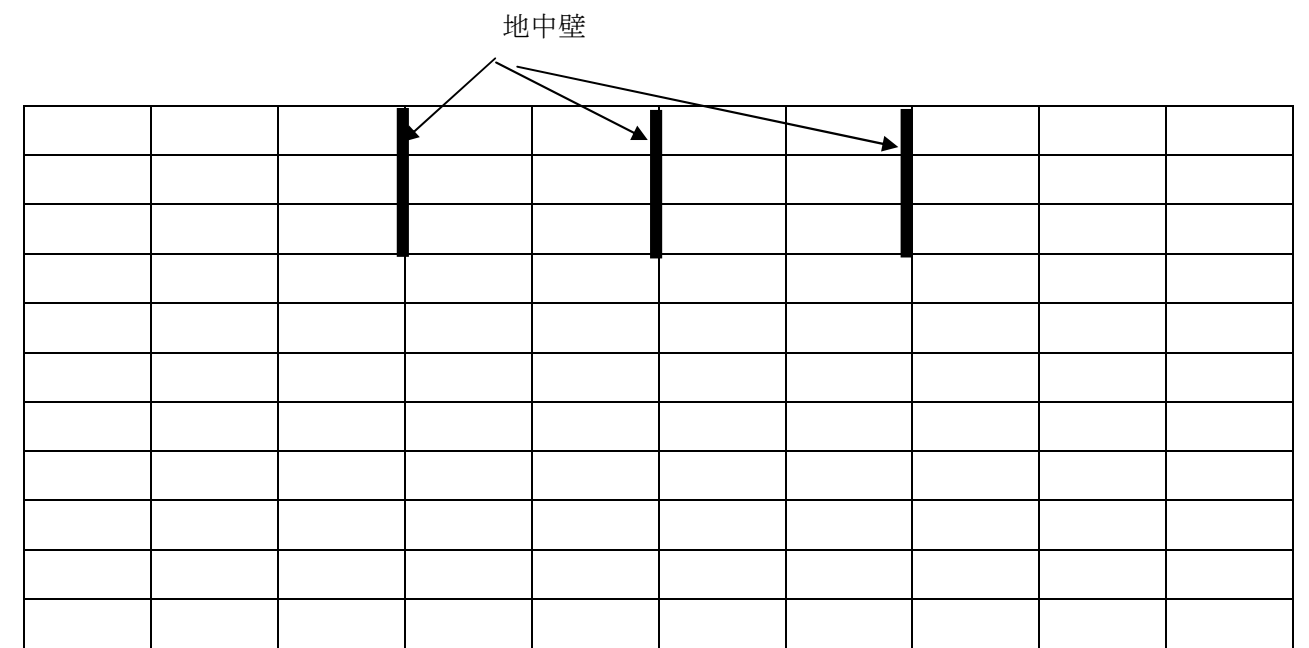


図-10.4 2次元 FEM 等価線形地震応答解析モデル概念図