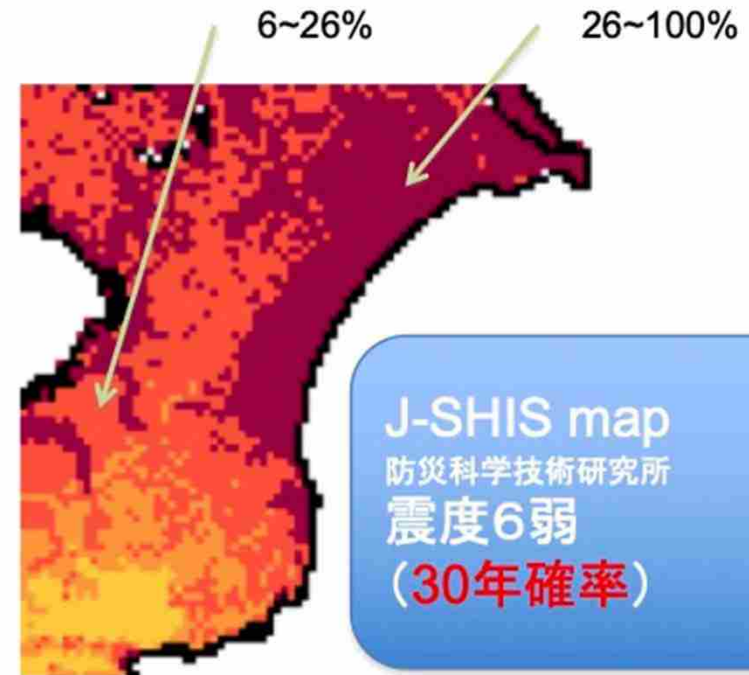


地盤の液状化への備えと設計者の役割

一般財団法人ベターリビング
二木幹夫

2020年9月11日
千葉県建築士事務所協会

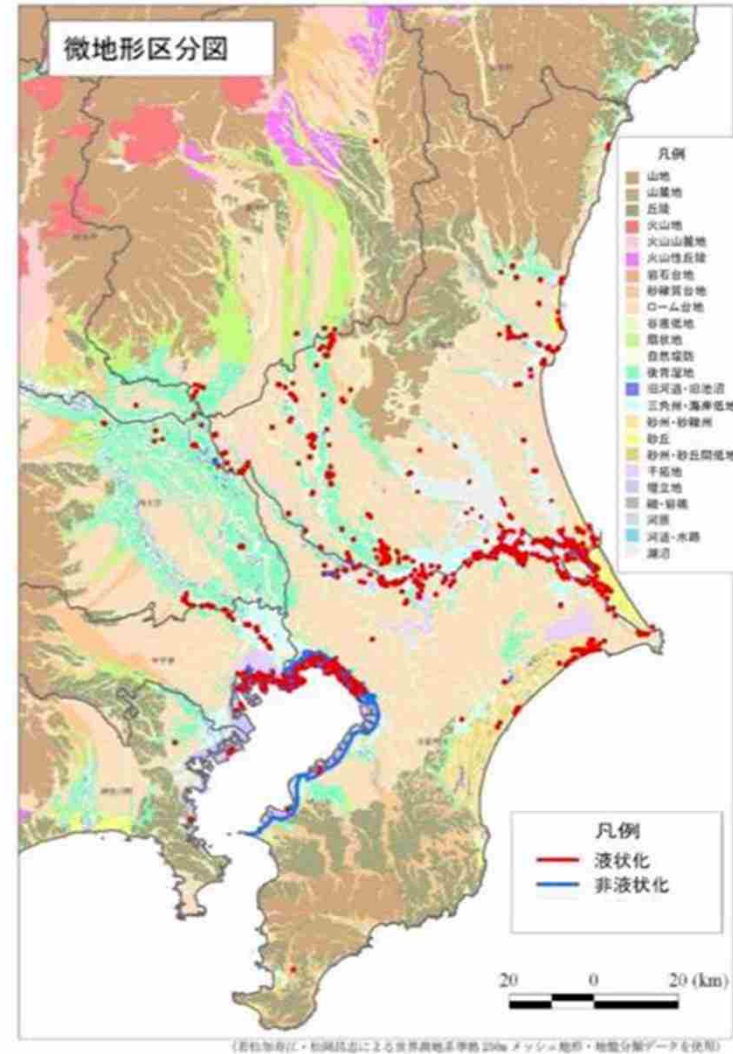
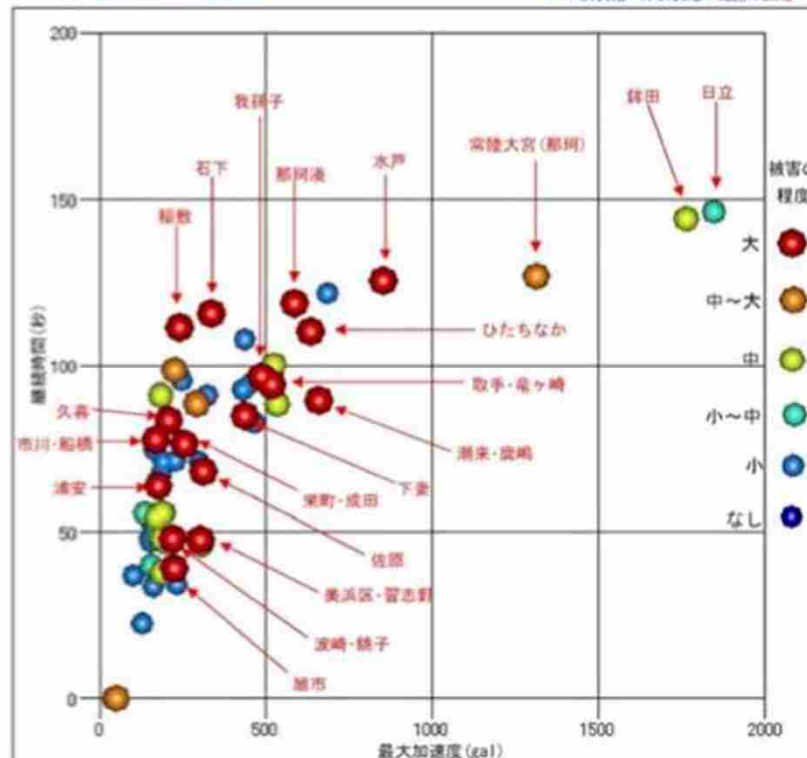
千葉県液状化マップ



液状化危険度		対策等の要否
高い	PL値>15	液状化に関する詳細な調査、液状化対策が必要な場合がある
やや高い	15≥PL値>5	重要な構造物に対して、詳細な調査、液状化対策が必要な場合がある
低い	5≥PL値>0	特に重要な構造物に対して、詳細な調査が必要な場合がある
極めて低い	PL値=0	液状化に関する詳細な調査は不要である
液状化対象外		山地・丘陵・台地などの地形区分や地盤モデルにより、液状化が発生する可能性の無い地域

液状化しやすさ	
赤	しやすい
黄	ややしやすい
緑	しにくい
青	きわめてしにくい
白	液状化対象外

東北地方太平洋沖地震の液状化被害調査



関東地方整備局報告書H23/8(HPから)

I.液状化判定—II.被害想定—III.対策

地盤の液状化対策を行う場合には、地盤の液状化が**宅地・建築物に与える影響を想定し、その結果に応じて発生し得る被害に適切に備える**事が大切である。

* 被害の形態例:(A)地震時に大きく傾斜や沈下、(B)地震後にゆっくり沈下、(C)地震後に横へ移動と沈下、(D)地震時に宅地全体に変状を呈する

建築物被害の原因／被害の形態	A	B	C	D
支持力の低下(1次液状化)	●			
支持力の低下(2次液状化)		●		●
大きな圧縮沈下	●		●	
流動化現象(水平移動)	●		●	
滑動崩落(水圧の発生)				●

1. 液状化判定について

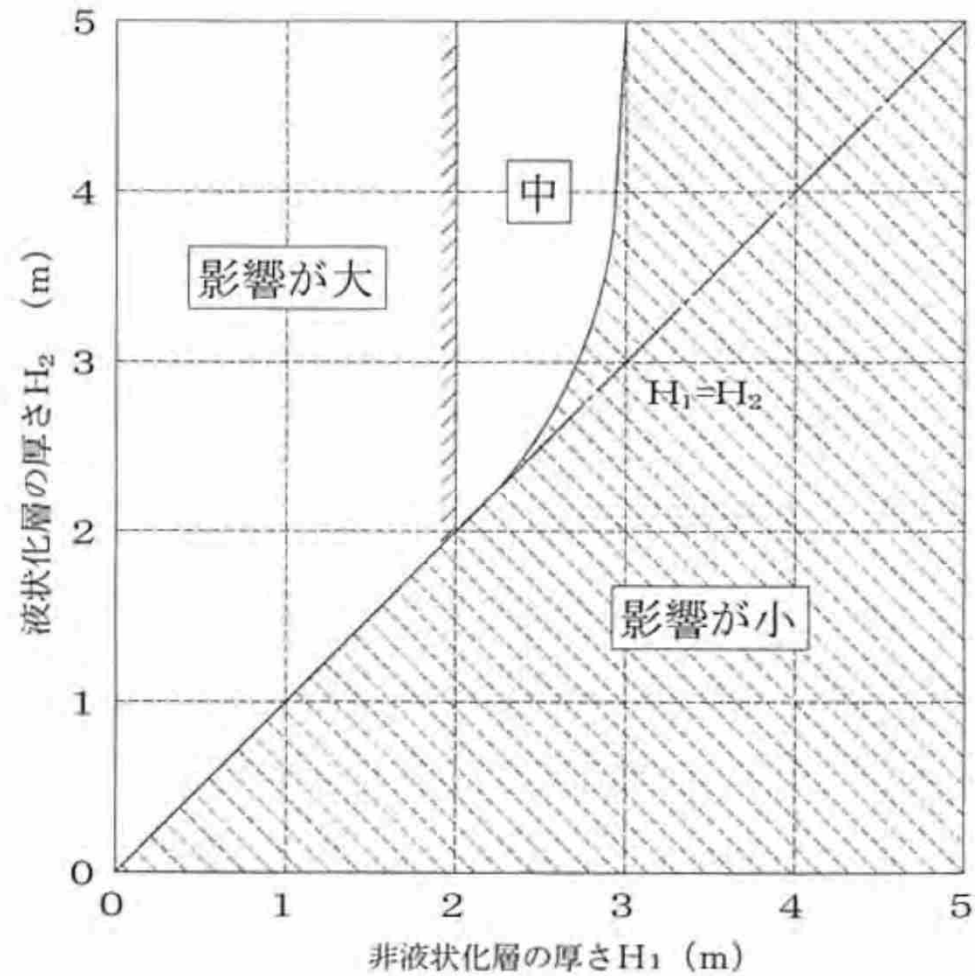
* **小規模建築物(4号)**以外では、**建築基準法**に従った扱いになる。基本的には、学会指針による標準貫入試験を用いたFI法が多く、動的解析による外力設定、有効応力解析による水圧の評価などが行われる場合がある。

* **小規模建築物**では、FI法が用いられる事もあるが、簡易な評価方法(H1-H2)による評価や**スウェーデン式サウンディング試験**を用いた(FI)方法が提案されている(**サンプリング+地下水位測定**などの追加)。

簡易判定法の評価

- ①FI法は、液状化の可能性がある地盤を見逃し無く評価可能であるが、液状化しない場合が少なくない(安全側に評価)。
- ②P_L法も、液状化の危険度をほぼ評価出来るが、見逃しがある場合がある。評価する層の厚さなどを考慮すると改善出来る可能性がある。
- ③**非液状化層(H1-H2法)は、誤差が大きい。**
- ④国土庁法(微地形+Nsw/5mまで)は、ほぼ、適用可能である。
震度5強程度では、液状化する地盤は、埋立地、埋土、河川改修などの人工地盤がほとんどであると考えて良い。従って、**微地形分類を丁寧に探る**ことは有効である。
- ⑤FIから沈下量Dcyを算定し、液状化の可能性、定量的な沈下量、位置を考慮して対策を考えることは有益である。
→国土交通省基準整備事業(H27)での結論
- ⑥**液状化マップの精度の課題**が浮上(熊本地震で精度に課題)

H1-H2法

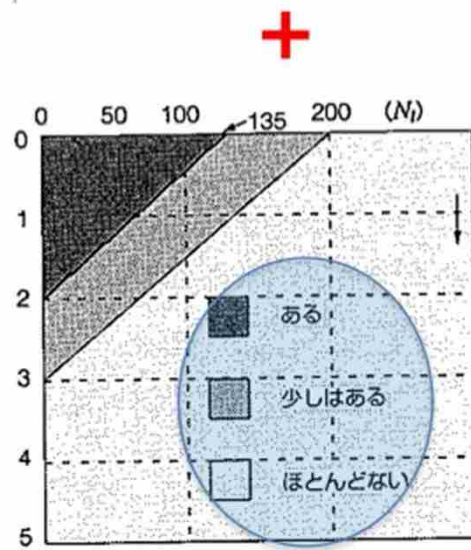


液状化しやすい地盤の目安

微地形分類 + サウンディング試験

地盤の液状化可能性の程度	微地形分類
大	自然堤防縁辺部、比高の小さい自然堤防、蛇行州、旧河道、 旧池沼 、砂泥質の河原、砂丘末端緩斜面、人工海浜、砂丘間低地、 埋立地 、湧水地点(帯)、盛土地
中	デルタ型谷底平野、緩扇状地、自然堤防、後背低地、湿地、三角州、砂州、 干拓地
小	扇状地型谷底平野、扇状地、砂礫質の河原、砂礫州、砂丘、海浜

N_i : 液状化層の N_{sw} の値と非液状層などから決まる値



N_i による判定結果	微地形分類からの判定結果		
	ある	少しはある	ほとんどない
大	■	■	■
中	■	■	■
小	■	■	■

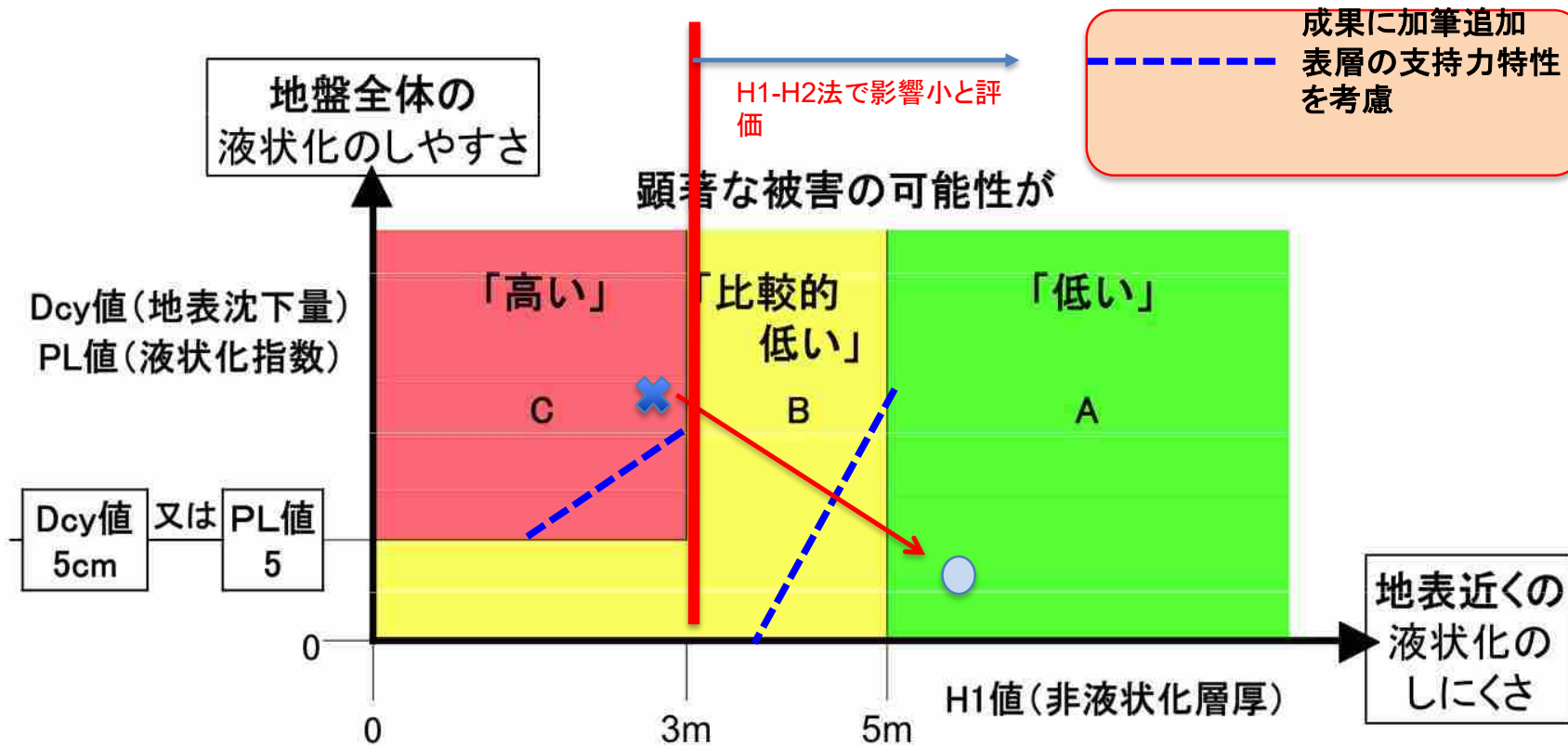
■ 可能性大
■ 可能性中
■ 可能性小

建築技術 2002年3月 液状化の検討例

液状化による被害の危険性評価 (H1~Dcy法)

宅地造成時に参照一→小規模住宅でも使用

ボーリングデータを基に、「建築基礎構造設計指針(日本建築学会)」等により、各種数値を算定し、下図により3段階で評価。(算出手法の一部を微修正。)



※ 中地震動(震度5程度)に対する宅地の液状化被害の可能性の程度の目安を示すもので、個別には建物特性等によって被害発生状況は異なり、被害の有無等を保証するものではない。

II 判定方法

FI から沈下量 D_{cy} を算定し液状化の可能性を考える方法が、**沈下量とその位置も判明**し、対策上有望である。

換算N値からの補正

(建築基礎構造設計指針による)

$N \rightarrow N_1 = v(100/\sigma') \cdot N$ (応力補正)

$N_a = N_1 + \Delta N_f$: (細粒分補正)

それぞれの液状化層で

剪断ひずみ γ_{cyi} を求め、 D_{cy} を計算

$$D_{cy} = (\sum \gamma_{cyi} \cdot H_i) / 100$$

(単位: kN, m)

H_1 非液状化

H_2 **液状化** γ_{cy2}

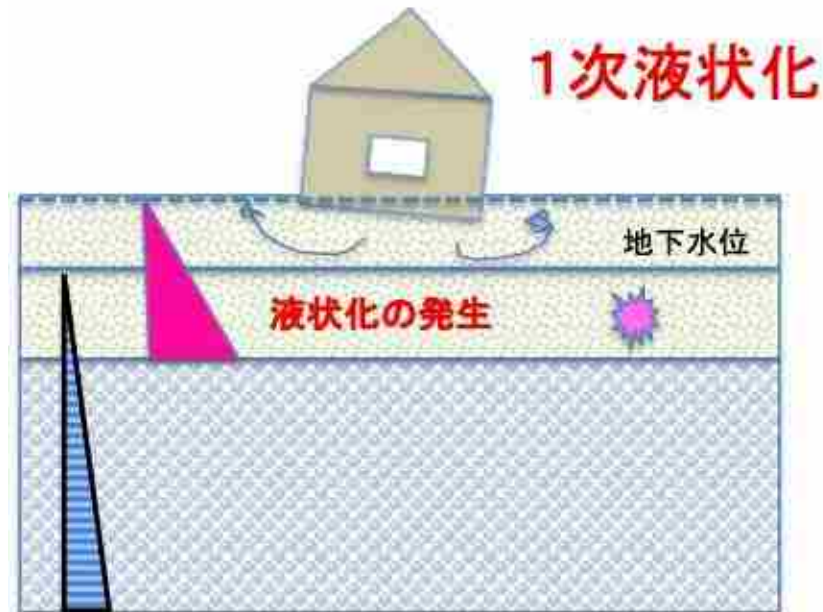
H_3 **液状化** γ_{cy3}

H_4 非液状化

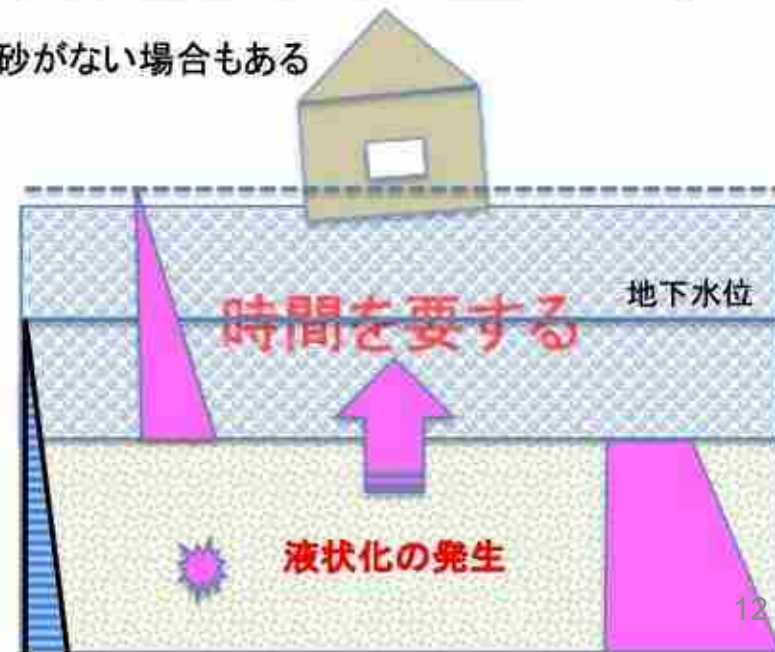
II. 地盤の液状化による被害想定

周辺地形、地盤プロフィール、基礎構造などから、地盤が液状化する可能性（深さ、液状化の程度／ D_{cy} ）に照らし、地盤の液状化による被害の状況を想定することが必要である。

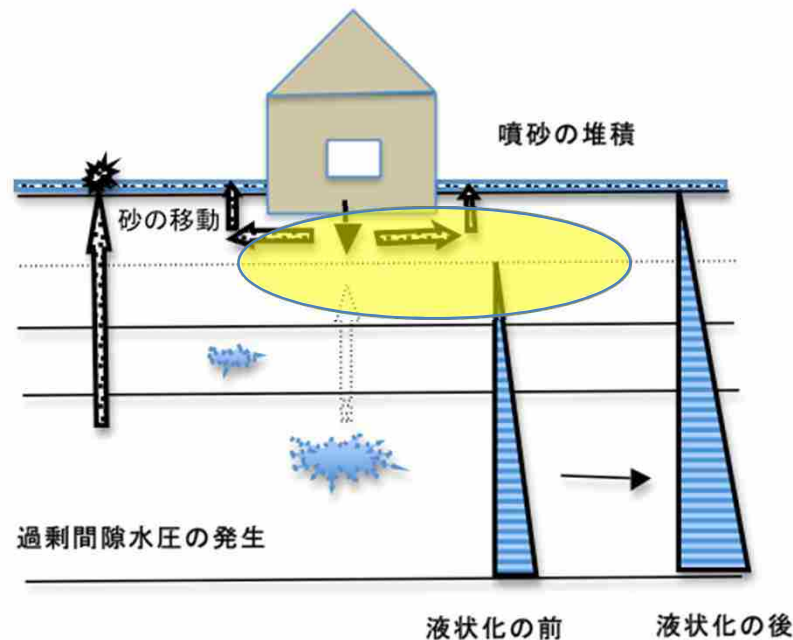
被害想定1 表層あるいはやや深い地盤の液状化



噴砂がない場合もある



1次、2次液状化による障害



① 表層部での支持力低下、時には流動化

1次: 剪断力による直接的な液状化 → 不同沈下

2次: 表層部への浸透流(透水力)による有効応力の低下が原因 → 不同沈下

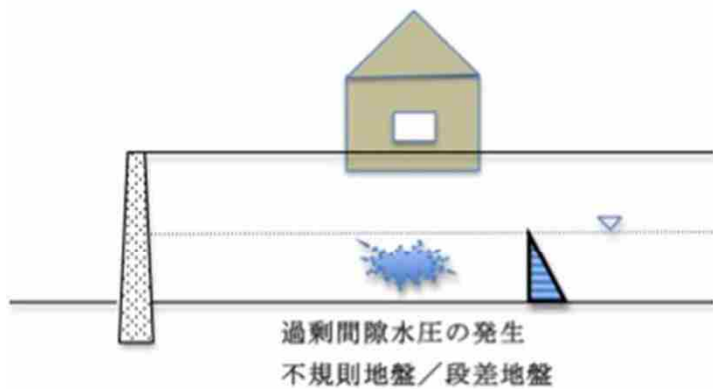
② 液状化層での沈下

全域で自重による圧縮

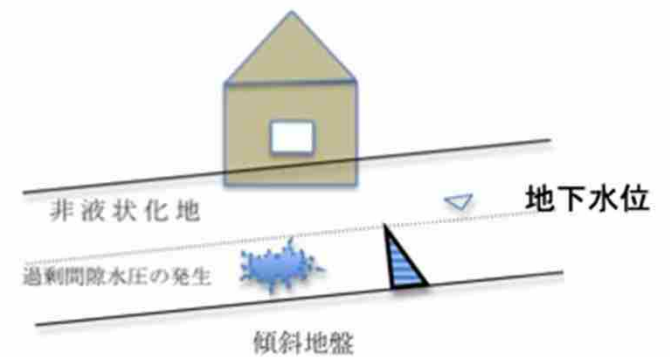
(全体沈下、一部不同沈下)

③ 噴砂の堆積(除去が必要)

被害想定2 側方流動



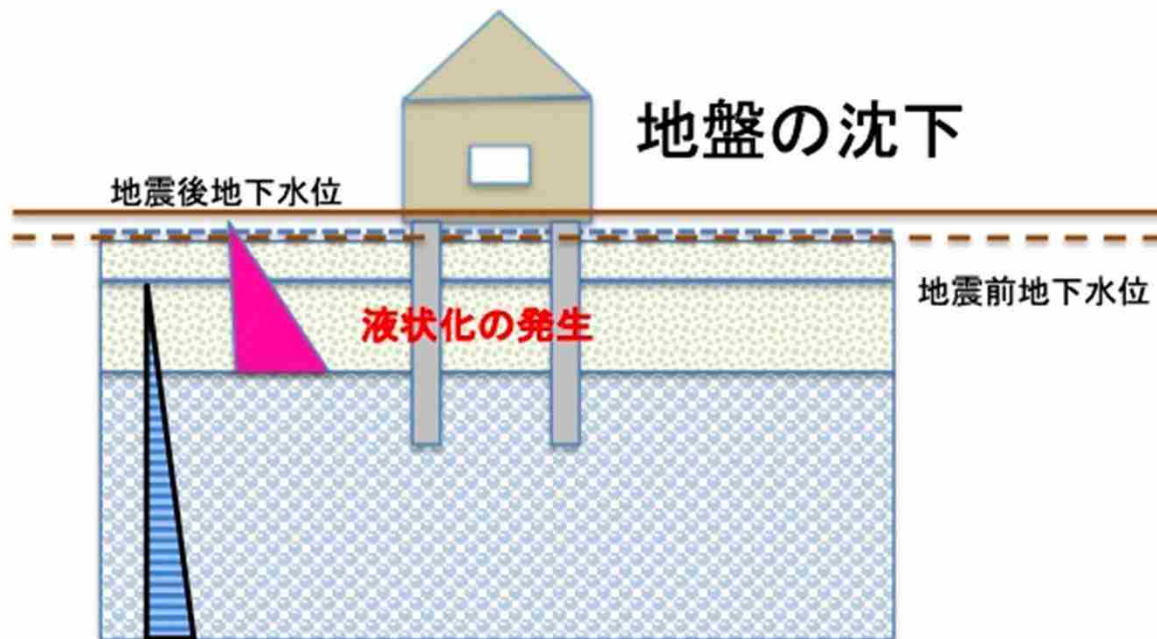
地盤が液状化に伴い側方に移動することにより不同沈下、基礎の破断などが生じる



傾斜地、護岸隣接地、埋め地など



被害想定3 杭等の抜け上がり



基礎は健全であるが、基礎下に空洞が残る。以後、生活上の支障が生じる

被害想定4 滑動崩落



大規模に、宅地の盛土が斜面方向に変形あるいは沈下する。原因は、盛土内の水圧が上昇することが主原因であるが、平地の液状化とは区別されている。宅地の分野で、法律用語として「滑動崩落」が使用されている。

不同沈下、段差、移動など、いろいろな形態の障害が生じる。

建築研究所大型振動台実験(つくば)

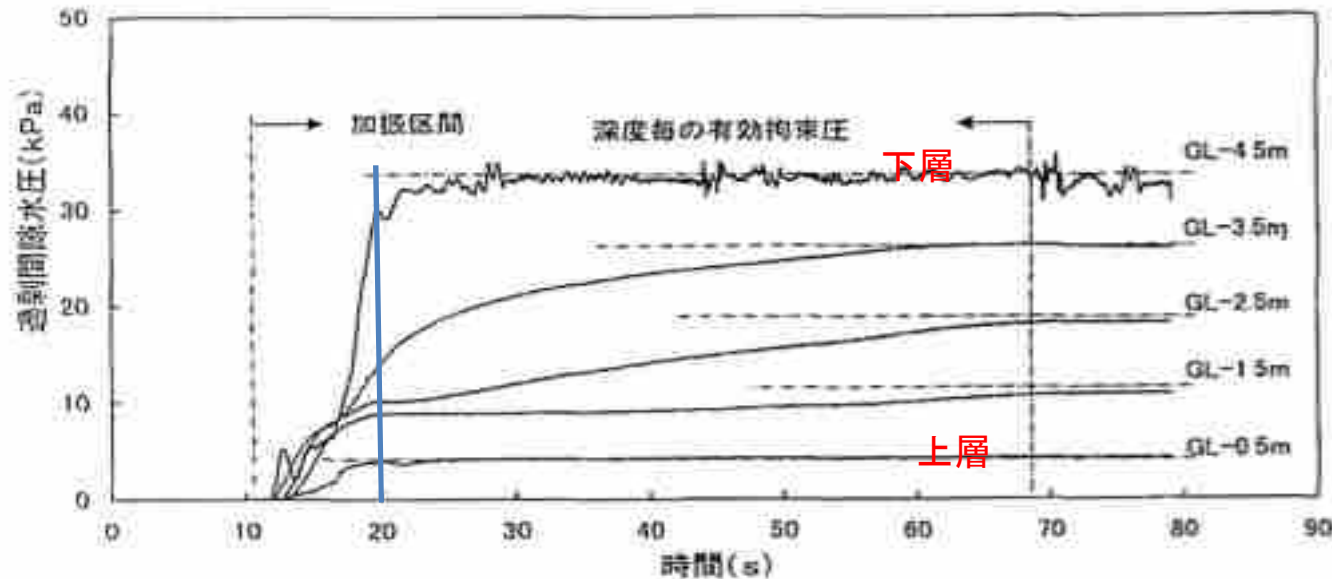


大型振動台による効果確認実験

装置寸法: 深さ5m × 幅3.6m × 長さ10m, 総体積 $V=180\text{m}^3$

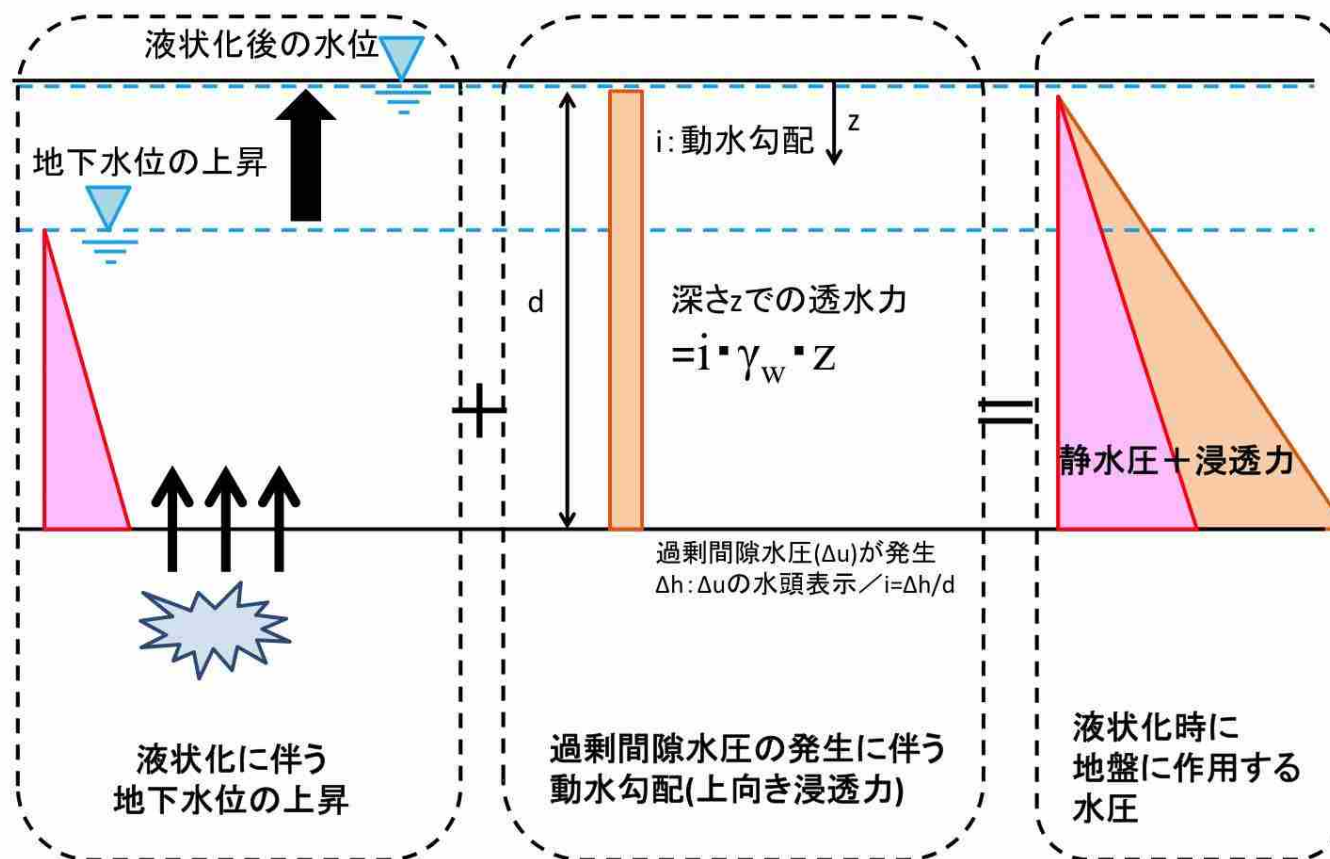
地盤材料: 栃木県産の日光珪砂6号

下層の水圧が上方に伝搬する
→2次液状化現象の発生

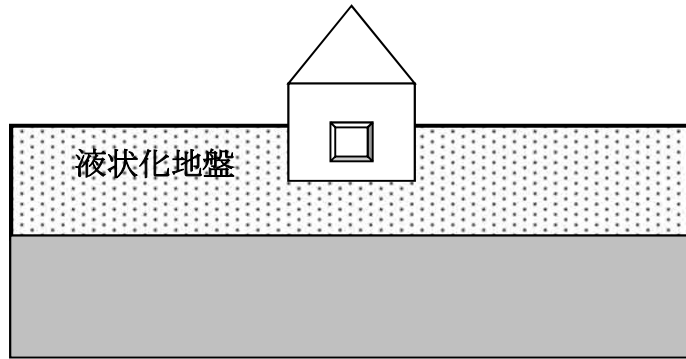


液状化時の水圧の上方への伝搬

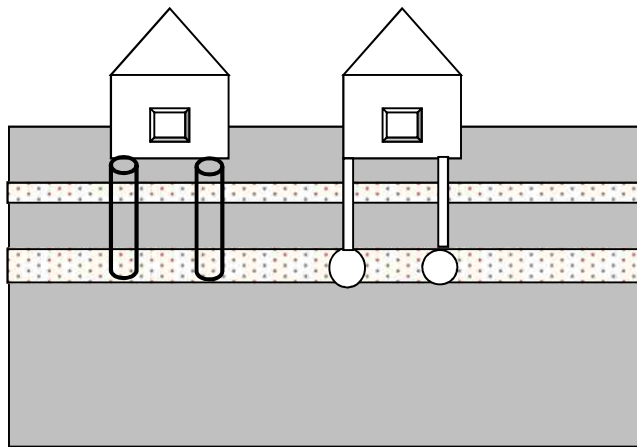
過剰間隙水圧による透水力の考え方



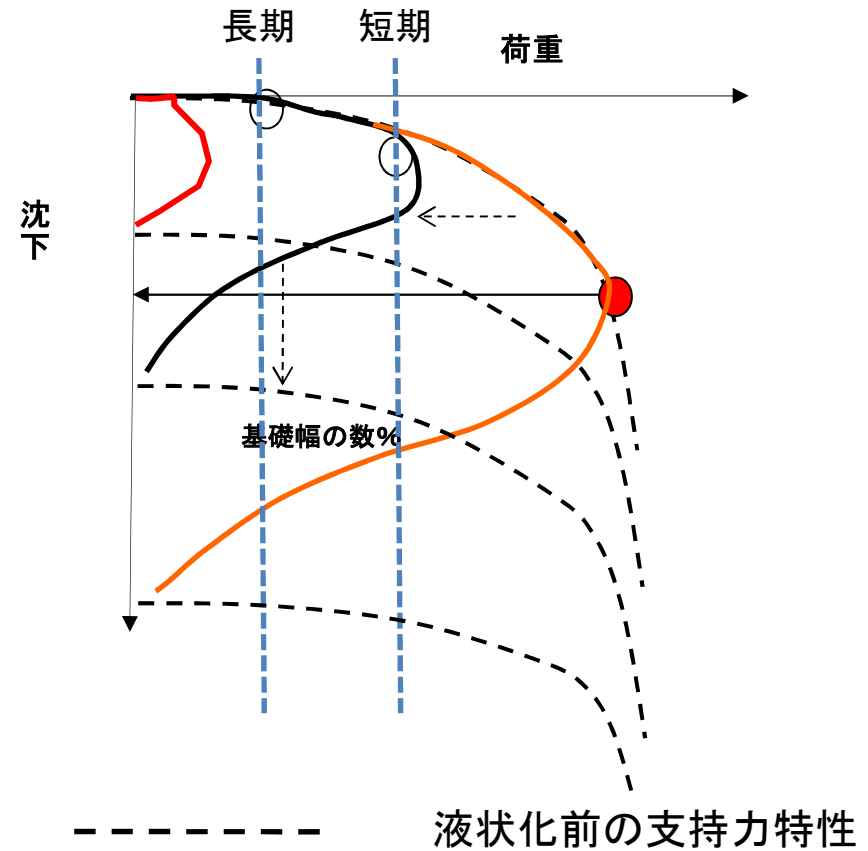
液状化する地盤の抵抗力の低下



a) 直接基礎下部が液状化する場合
地盤支持力(許容応力度)の低下



b) 中間層支持の杭基礎など杭基礎の
支持力低下(周辺あるいは支持層が
液状化する場合)



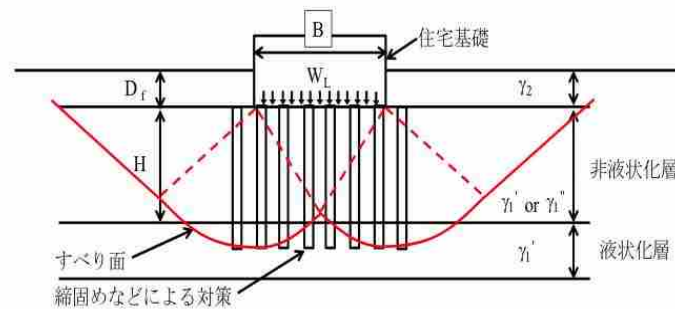
基本的検討方法

べた基礎、表層改良、締固め、ドレーン型改良地盤

地盤の許容応力度計算方法

(上昇する水圧の評価が必要)

局所せん断破壊



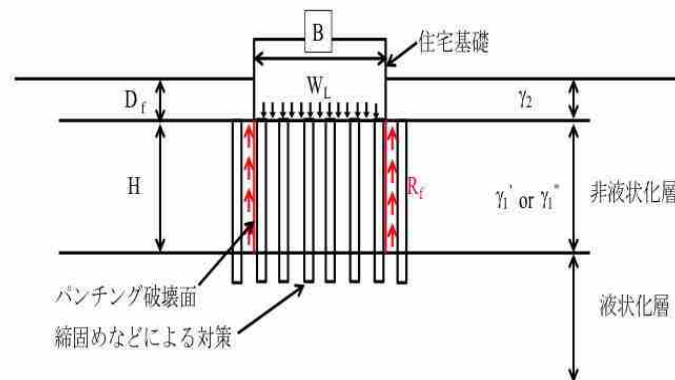
$$q_a = \frac{2}{3} (i_c \cdot \alpha \cdot C \cdot N_c + i_r \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_r + i_q \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q)$$

$$\gamma_1 = \gamma_{1' liq} + \frac{z}{B} \cdot (\gamma_1' - \gamma_{1' liq})$$

$$\gamma_{1'} = (1 - r_u) \cdot \gamma_1''$$

q_a : 地盤の許容力度 $\gamma_{1' liq}$: 液化化層の地盤の単位体積重量
 γ_1' : 非液化化層の地盤の単位体積重量
 γ_1'' : 震動前の地盤の単位体積重量

パンチング破壊



$$R_a = \frac{2}{3} R_f$$

$$R_f = \frac{1}{2} \cdot K_0 \cdot \gamma_1' \cdot H^2 \cdot \tan \phi \cdot (B + L) \cdot 2$$

$$\gamma_1' = (1 - r_u) \cdot \gamma_1''$$

R_a : 地盤の許容応力(支持力) γ_1' : 非液化化層の地盤の単位体積重量
 γ_1'' : 震動前の地盤の単位体積重量

III. 設計者としての液状化対策への 備えと役割

被害の想定内容に応じて液状化対策の目標を設定し、基礎構造との関係を考慮して、建築基準法に沿って、設計上の配慮を行い、建築物の安全性を確保することが基本である。

液状化層の厚さ、位置、推定沈下量などから適切な対応案を検討する。

(1) 小規模建築物以外では、短期での杭基礎、終局時での杭基礎＋地盤改良が中心的な対応である。

(2) 小規模建築物(4号建築物)などでは、同じ対応が取られてきていない。2020年3月に、構造設計図書¹⁾の保存が義務付けられたことを受け、実質的に、設計者は構造設計上の配慮が重要である。

構造計算書の保存

背景

熊本地震を契機として、木造住宅における耐震性の確保が重要との認識から4号特例に対する見直しに関して「日本弁護士連合会」からの申し入れなどが契機となる。

検討内容の曖昧さが、建築士の保護に支障をきたすことから改正に踏み切る。

図書の保存期間は、15年に変更され、罰則規定として30万以下の罰金がある。

構造計算の対象として、基礎構造への関心は、今のところ希薄であるが、影響は大きい。液状化地盤での検証方法では、難しい点が多い(設計方法、対策方法の設計など)。

建築士法施行規則第21条の改正

1. 配置図、各階平面図、二面以上の立面図、二面以上の断面図、**基礎伏図**、各階床伏図、小屋伏図、構造詳細図、**構造計算書等**(※)、工事監理報告書の**保存を義務化**
2. 保有水平耐力計算、限界耐力計算、**許容応力度等計算**などの構造計算書
3. 仕様規定の適用除外の**ただし書で必要な構造計算**、燃えしろ設計に係る構造計算等の構造の安全性を確認するために行った構造計算の計算書
4. 壁量計算、四分割法の計算、N値計算に係る図書
5. **令第38条第4項の構造計算(基礎に係る構造計算)**

大臣が認めた構造計算方法(告示1347号2)による

* 実況に応じた土圧、水圧などによる令82条第一～第三に定める構造計算

* 構造計算に伴って、自重による沈下、その他の地盤変形による**有害な変形、損傷、沈下**が生じないことを確かめること

建築基準法などと地盤の液状化

構造計算に関連して、

1) 82条の6: 許容応力度計算

構造計算を行うに当たって使用する材料の強さ(令第89条~令94条)

2) 93条: 地盤調査と地盤の許容応力度

→別表(砂質地盤): 液状化の危険がない場合に限り、許容応力度を設定(50kN/m²)

3) 地盤調査については、液状化試験を示していないが、杭の許容支持力の算定で、液状化する地盤の周辺摩擦を除外することを規定(告示1113号)

4) 品確法に関連して、地盤の液状化に関連して、「特記」による表示を推奨し、関連して、スウェーデン式サウンディング試験を利用した液状化判定手法を提示している。

5) 地盤改良指針(BCJ&CBL/2018)で、液状化時の対応を提案

リスク管理上の観点

ISO的リスク管理 (ISO3100:リスクマネジメント)

リスクとは? : 期待される結果 (目標) に対する不確かさの影響

リスクは、悪い影響、良い影響を含むが、悪い影響の最小化を目指すのが一般的な管理内容となっている。

地盤の液状化対策に対して**期待する事**

対策費用の最小化

地震後の継続使用
インフラを含む (避難回避)

建築物への被害最小化

コミュニティの維持
広い範囲の液状化回避

● 沈下低減 (無しを含む)
(相対、絶対)

地震時の振動の低減

● 人命の確保 (最低限の要求)

現状での液状化対策に対する目標

1) **大地震時**: 人命の確保(最低限の要求)は、無対策でも担保されているとしている。

建築では、**対策は要求していない**(実態は、いろいろ)。

「滑動崩落」対策事業(宅地盛土)では、コミュニティの維持確保などから、**対策事業を推進**している。地域としての液状化対策も、推奨しているが、**課題が多い**。

2) **中地震時**: 建築物への有害な沈下抑制、損傷制御の観点から、液状化対策へも必要性を啓蒙している(小規模建物では、曖昧になっていたが、**今後は対策の実施が基本**であると考えられる。)

建築物の沈下対策が主となっているが、目標の設定が曖昧なことが多い。

一般の建築物では、**支持力確保の観点から、支持層までの杭基礎などとし、液状化への備えを兼ねている**場合が多い。

液状化対策に関する考え方

現状では、下記のような無対策を含めた対処が存在する。

- (1) 住宅の沈下を許さない。(大地震、中地震)
- (2) 住宅の沈下をある程度許容し、対策の程度を調整出来るようにする。(大地震、中地震)

リスク管理的な考え方としては、以下の考え方がある。

- (3) 液状化による被災後に再建可能(生活可能)な対応を考慮しておく(大地震、中地震)。主に経済性優先の選択
- (4) 技術的な対応を取らない

後日、新たな問題を発生する可能性は否定できないが、

- 1) 地震保険に加入して、経済的損失を担保(経済性か?)
- 2) 対応しない(現状容認/振動低減への期待)

2020年の設計図書^①の保存の義務化を受けて、設計上の配慮を
実質的に担保するには、(3)、(4)の選択は、中地震時の液状
化対策としては難しくなる。

小規模建築物に適用可能な液状化対策(例)

対策の方法	特徴	工法名	技術的な評価	住宅での適用性
締め固め工法	液状化を起こさせない	サンドコンパクション、パイプロフローテーション、ロッドコンパクションなど	実績があるが、振動を伴う。広範囲な敷地に適する。	市街地では周辺環境への配慮が必要 費用が高い
構造物による支持	液状化を許容し、深い地盤で荷重を支持する	杭、壁杭	実績があるが、基礎下に隙間が生じる	適用性は高い。 やや費用が高い
固化による地盤改良	固化による非液状化地盤の構築	柱状改良 浅層改良	施工方法を工夫すれば有望。施工深さに留意が必要。	住宅に普及している工法であり、適用性が高い
排水材の利用	排水機能によって過剰間隙水圧の発生を抑制、水圧の速やかな消散	サンドドレーン、グラベルドレーン、排水パイプ	沈下を伴う可能性が高い。建築物への実績が少ない。効果の確認が少ない。	施工性や効果の面で、更なる要検討。
木杭や礫杭	砂の締め固め効果 荷重の支持	打設工法	木杭は地下水位が高いことが条件	可能性は高い 周辺への影響に留意
浮き基礎	液状化時に沈下が生じないように浮力を利用する	発泡材料による人工地盤の敷設工法	荷重のバランスに留意、浮力の評価が未知。材料の耐久性など	実績を評価すれば可能性は有り。