

住宅地盤の液状化対策工法

若命善雄●(株)設計室ソイル+真島正人●(株)大成建設建築技術研究所

はじめに

大地震時に液状化現象が生じると、地盤の支持力が低下して建物が著しく傾斜したり、構造躯体や仕上げ材に大きな破損を受ける。新潟地震や宮城県沖地震、そして兵庫県南部地震などで大きな被害をもたらしたことは記憶に新しい。

改正建築基準法では、地下水位の高い砂質地盤であれば液状化判定を行って地盤の許容支持力算定を行うことが新たに規定され、戸建住宅でも液状化対策の重要性が高まっている。しかし、一般に液状化対策技術は多くが中規模から大規模の土木構造物や建築物を対象としており、戸建住宅に適した液状化対策技術の開発が課題となっている。

本報では、戸建住宅に適用可能な液状化対策の考え方と適用例を紹介する。

戸建住宅の液状化対策の考え方

液状化の予想される地盤は主にシルト・粘土分の少ない砂質地盤であり、液状化の可能性さえなければ戸建住宅の基礎としては、布基礎で十分であることが多い。しかし、いったん液状化が発生すると、地盤強度が低下して布基礎では支持力不足になる。また、傾斜地や段差のある地盤では地滑りや側方流動を起こす。

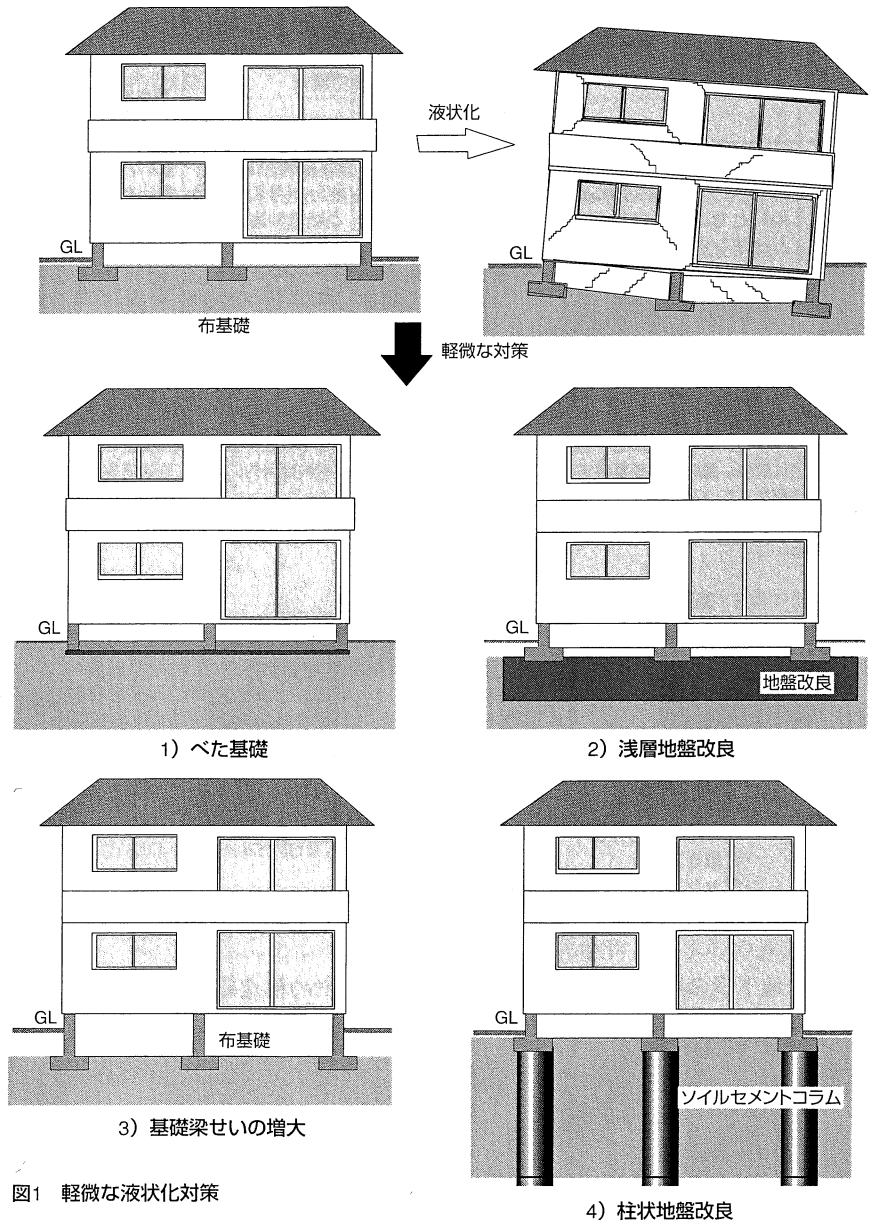
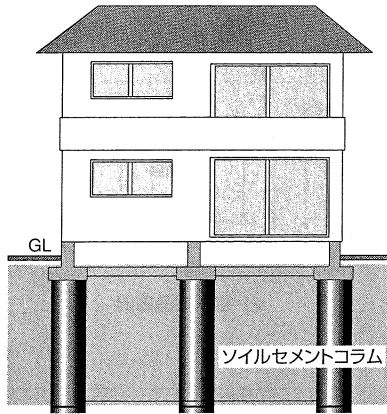


図1 軽微な液状化対策

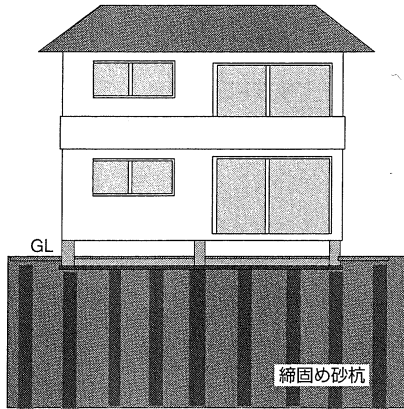
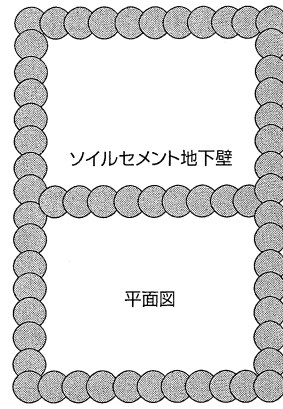
さらに、地震後には、砂粒子間の水が抜け地盤沈下を起こす。このような現象が発生すると、建物の倒壊、不同沈下、傾斜、壁の亀裂などが発生し、安全性や使用性に障害をもたらすことになる。

一方、戸建住宅でも液状化による

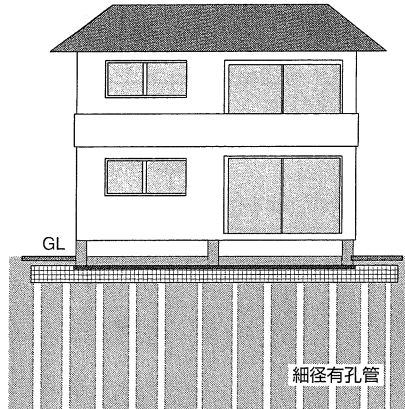
被害を完全に防ぐには、液状化の発生を防止したり、液状化しても建物が被害が及ばないように堅固な杭で支持するなどの対策を行うのが望ましい。しかし、液状化対策を行う場合には、敷地条件、建物規模、構造形式、コストなどが制約条件となり、



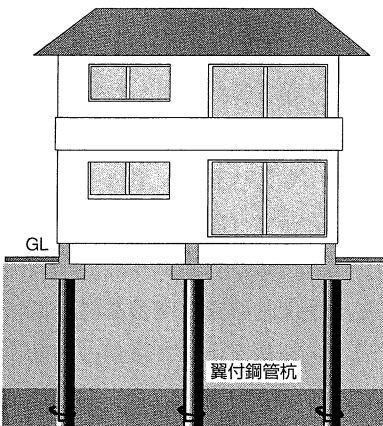
1) 格子状地盤改良



2) 締めめ砂杭工法



3) 排水促進工法



4) 杭基礎

図2 本格的な液状化対策

必ずしも十分な対策を施すことができないことが多い。

液状化が発生が予想される地盤に戸建住宅を建設する場合には、上記の制約条件を考慮して、以下に示す軽微な対策から本格的な対策までのメニューから実現可能な対策を選択することになる。

軽微な液状化対策

軽微な液状化対策としては、図1に示すようなべた基礎の採用、基礎

梁せいの増大、浅層地盤改良、柱状地盤改良などが考えられる。

1) べた基礎

べた基礎を採用しても、液状化あるいは液状化による建物の沈下を完全に抑止することはできないが、基礎の面積を広げることにより接地圧が減少し、支持力不足による基礎の沈下を抑制できる。また、使用限界を超える傾斜が生じた場合でも、躯体の剛性を高めているため壁の亀裂などの発生を抑制でき、かつ、比較的容易に沈下の修復を行うことができる。

ただし、傾斜地や段差のある敷地、液状化の予想される砂層が厚い、あるいは、厚さが極端に異なる地盤への適用に当たっては慎重に対処する必要がある。

2) 浅層地盤改良

基礎直下のおおよそ50~100cmの地盤をセメント系固化材により版状に改良し、その上部に布基礎を構築

するものである。べた基礎が構造体であるのに対して、浅層地盤改良は地業として位置づけられる。

この方法を採用すれば、べた基礎と同様、接地圧の低減や表層地盤の剛性増加により、不同沈下量を抑制できる。適用上の留意点はべた基礎と同様である。

3) 基礎梁せいの増大

布基礎や浅層地盤改良ほどの効果、つまり、沈下量そのものを低減することはできないが、躯体剛性の増加により局部的な不同沈下や壁の亀裂を抑制できる。また、使用限界を超える傾斜が生じた場合でも、剛性を確保しているため比較的容易に沈下修復ができる。浅層地盤改良と組み合わせることによって、より高い効果を期待できる。

適用上の留意点はべた基礎や浅層地盤改良と同様である。

4) 柱状地盤改良

戸建住宅用の地盤改良としてソイルセメントコラムを構築する柱状地盤改良工法がよく採用される。兵庫県南部地震では、柱状地盤改良を行った建物の被害が極めて少なかったとの報告がある。

柱状地盤改良の液状化防止効果を数値的に評価することは難しいが、改良体による地盤の変形抑制効果、沈下抑止効果がある程度期待できるものと考えられる。

ただし、液状化そのものを完全に防止できるわけではないので、液状化層厚が厚い場合にはべた基礎あるいは浅層地盤改良と併用し、建物が万が一傾斜した場合の対応を考慮しておくことが望ましい。

本格的な液状化対策

本格的な液状化対策としては、図2に示すような液状化そのものを防止あるいは抑制する方法と、杭基礎が考えられる。

1) 格子状地盤改良

表1 M と N_{eq} の関係

マグニチュード M	5~6	7~7.1/2	8~8.1/4
等価繰返し回数 N_{eq}	5	15	25

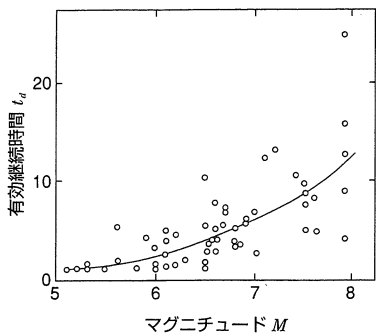


図5 地震マグニチュード M と有効継続時間 t_d の関係

戸建住宅への液状化対策の適用例

前述した本格的な液状化対策のうち、排水促進工法の一つであるドレーンパイプ工法を戸建住宅に適用した事例を紹介する。

ドレーンパイプ工法の原理

本工法は、液状化の可能性の高い地盤中に、直径5~10cmのポリエチレン製の耐圧・有孔パイプ（以下ドレーンパイプと呼ぶ）ケーシングオーガーを用いて60~120cmの間隔で垂直または斜めに埋め込んで、排水距離を短縮しておき、未対策地盤では液状化を起こすような地盤中に発生する過剰間隙水圧をいち早くドレーンパイプ内に流入させて、液状化の原因となる地下水圧（間隙水圧）の上昇を抑制する排水促進工法である。地下水圧の上昇を抑制することにより、地盤の支持力と剛性の低下を低減できる。

図3にドレーンパイプ工法の原理を、図4に設計のフローチャートを示す。

ドレーンパイプ間隔決定の順序

ドレーンパイプ間隔は次の手順で決定する。

①最大間隙水圧の半径方向平均値

表2 土粒子の透水係数（土質工学ハンドブック）

土質	土粒子の径 (mm)	透水係数 (cm/s)
微細砂	0.05~0.10	0.001~0.005
細砂	0.10~0.25	0.005~0.01
中砂	0.25~0.50	0.01~0.1
粗砂	0.50~1.00	0.1~1.0
小砂礫	1.00~5.00	1.0~5.0

(u_{max}/σ'_{0})_{ave}の設定

0.2~0.5（通常は0.3）

②ドレーンパイプ半径 a の決定

$a=2.5$ または 5 cm

③地震力の設定

マグニチュード $M=7.5\sim 8.0$

④主要動の等価繰返し回数

$N_{eq}=25$ 回（表1）

⑤地震動の有効継続時間 t_d の決定

図5より、

$M=7.5$ の場合、 $t_d=9$ 秒

$M=8.0$ の場合、 $t_d=12$ 秒

⑥地盤の透水係数

原則として現位置透水試験、室内透水試験によって決定する。ただし、測定値はかなりばらつくことが多いので、表2、表3の値を参考にして妥当な値を採用する。透水試験を実施していない場合についても、これらの値を総合して決定する。

⑦地盤の体積圧縮係数 m_v

動的変形試験を実施した場合は、せん断ひずみ $\gamma=1\times 10^{-2}$ に対応するせん断弾性係数 G とポアソン比 ν （=0.3）を用いて、式1より E を求め、この E を式2に代入して m_v を求める。標準貫入試験による N 値のみが得られている場合には N 値より E を推定する。

$$E=2(1+\nu)G \quad \text{《式1》}$$

$$m_v=\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)E} \quad \text{《式2》}$$

⑧時間係数 T_d

$$T_d=\frac{k \cdot t_d}{m_v \cdot \rho_w \cdot g \cdot a^2} \quad \text{《式3》}$$

k : 透水係数 (cm/秒)

t_d : 有効継続時間 (秒)

m_v : 体積圧縮係数 (cm²/N)

表3 クレーガーによる D_{20} と透水係数 k の関係

D_{20} (mm)	k (cm/sec)	土質分類
0.005	3.00×10^{-6}	粗粒粘土
0.01	1.05×10^{-6}	細粒シルト
0.02	4.00×10^{-5}	
0.03	8.50×10^{-5}	粗粒シルト
0.04	1.75×10^{-4}	
0.05	2.80×10^{-4}	
0.06	4.60×10^{-4}	
0.07	6.50×10^{-4}	
0.08	9.00×10^{-4}	極微粒砂
0.09	1.40×10^{-3}	
0.10	1.75×10^{-3}	
0.12	2.60×10^{-3}	
0.14	3.80×10^{-3}	
0.16	5.10×10^{-3}	微粒砂
0.18	6.85×10^{-3}	
0.20	8.90×10^{-3}	
0.25	1.40×10^{-2}	
0.30	2.20×10^{-2}	
0.35	3.20×10^{-2}	
0.40	4.50×10^{-2}	中粒砂
0.45	5.80×10^{-2}	
0.50	7.50×10^{-2}	
0.60	1.10×10^{-1}	
0.70	1.60×10^{-1}	
0.80	2.15×10^{-1}	粗粒砂
0.90	2.80×10^{-1}	
1.00	3.60×10^{-1}	
2.00	1.80×10^{-1}	細礫

$$k=C_s(0.7+0.03t)D_{10}^2 \text{ (cm/s)}$$

t : 水温 (°C)

C_s : 下表による

C_s	砂の状態
150	均等粒子の場合
116	細砂のゆるくしまった場合
70	細砂のしまった場合
60	大小粒子混合の場合
46	非常に汚れたとき

ρ_w : 水の密度

g : 重力加速度

a : ドレーンパイプの半径

⑨繰返し回数比 (N_{eq}/N_i)

(N_{eq}/N_i) は原則として、液状化試験により求めた設計加速度に対応する液状化までの繰返し回数 N_i と、表1に示した $M-N_{eq}$ 関係 ($M=0.75, 8.0$ でそれぞれ $N_{eq}=20, 25$)より決定する。

試験を実施していない場合には、液状化に対する抵抗率 F_L を用いて、式4によって求める。この際、 F_L としては液状化砂層の平均的な値を用いる。

$$\frac{N_{eq}}{N_i}=\left(\frac{1}{F_L}\right)^{\frac{1}{0.17}} \quad \text{《式4》}$$

⑩ a の決定

前述のソイルセメントコラムをラップさせながら連続的に壁状（格子状、または箱形）に構築すれば、地中連続壁による地盤のせん断変形抑制効果により液状化を防止することができる。液状化層先端まで地中連続壁を構築すれば理想的であるが、液状化層が厚い場合にはコストがかさみ、採用は難しい。

ただし、液状化層の全体を壁で囲うことができなくても、少なくとも建物幅の1/2程度の深さまで壁を設ければ著しい（不同）沈下は抑制できると考えられる。このような場合にも、布基礎でなく、べた基礎を採用するのが望ましい。

2) 締め固め砂杭工法

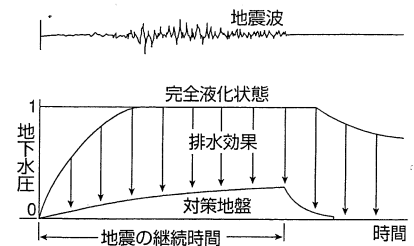
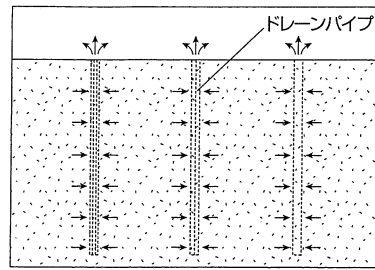
液状化防止対策として、振動衝撃あるいは静的に地盤を締め固めながら直径60~70cm程度の砂杭を構築して液状化を防止する地盤改良工法は、昭和30年代より採用されている。

戸建住宅では、一般構造物用の大型重機あるいは振動衝撃を発生する重機で施工することはできないが、30~40cm程度の砂杭あるいは砕石杭を静的に圧入する方法であれば、十分適用できると考えられる。ただし、戸建住宅では改良面積が極めて小さいことや、敷地外の地盤変位には十分留意する必要がある。

また、すでに述べたように、液状化層のすべてを改良できれば理想的であるが、少なくとも建物幅の1/2程度の深さまでを改良できれば、著しい（不同）沈下は抑制できると考えられる。

3) 排水促進工法

液状化防止対策の1つとして、砂地盤中に透水性の高い砕石の柱や合成樹脂製の有孔パイプを埋設しておいて、大地震時に上昇する水圧をこれらの排水材を通じていち早く消散させる、いわゆる排水促進工法があ



1) 水の流れ
2) 排水促進効果
図3 ドレーンパイプ工法の原理と効果

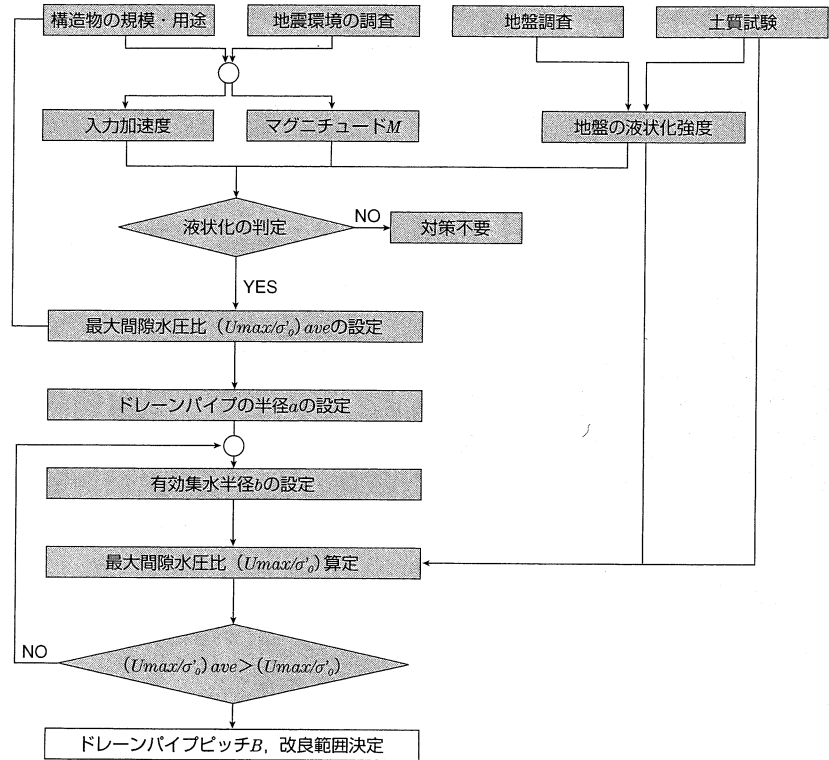


図4 設計フローチャート

る。締め固め砂杭工法と同様、戸建住宅では大規模な重機で施工することはできないが、直径5~10cmの有孔パイプを埋設する方法であれば、十分適用できると考えられる。

ただし、戸建住宅では改良面積が極めて小さいことや、排水促進工法では沈下を伴うことに留意する必要がある。したがって、杭基礎と併用するのが望ましいが、直接基礎を採用した場合には少なくともべた基礎を採用する必要がある。

また、基礎スラブの下部にパイプから上昇してきた地下水を外部に逃がすための砕石マット層を設けることも必要である。

4) 杭基礎

砂地盤上の戸建住宅の基礎として杭基礎を採用することはほとんどないが、液状化の恐れのない地層まで杭を設置し、液状化しても建物荷重を安全に支持させる方法は極めて有効な方法である。最近では、戸建住宅を対象とした先端翼付の小口径鋼管杭を回転埋設する工法が多数開発されており、大型重機を使用せずに施工することができる。

ただし、液状化層における杭の周面摩擦力や地盤の水平抵抗を期待することができないので、杭を液状化しない地層に十分貫入させること、水平力が作用しても建物を安全に支持できることを数値的に確認しておく必要がある。

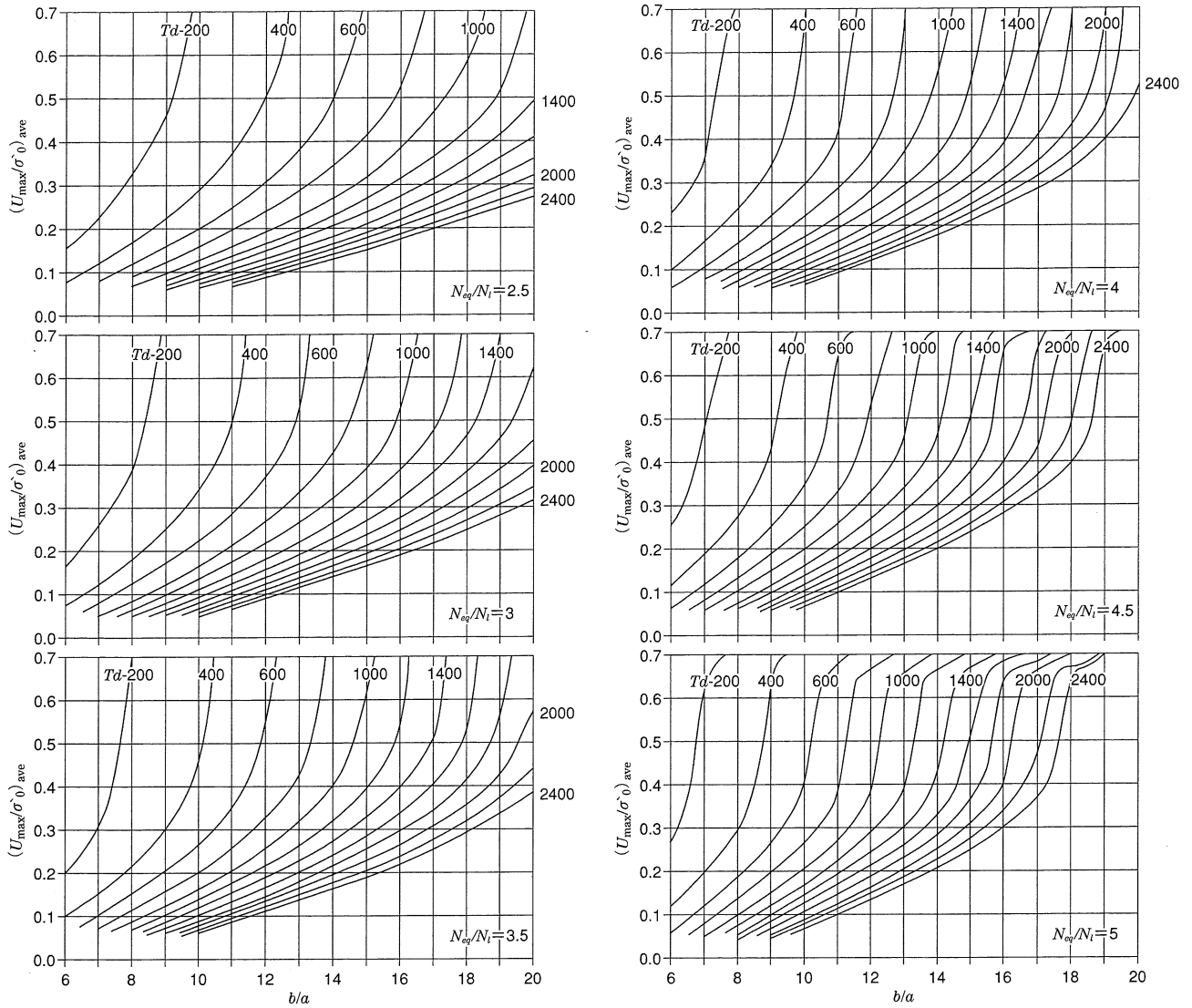


図6 最大間隙水圧の半径方向平均値 ($N_{eq}/N_i=2.5\sim 5.0$)

図6により, (N_{eq}/N_i), (U_{max}/σ'_0)_{ave}, t_d に対応する b/a を求める。

⑪ ドレインパイプ間隔 B の決定

正方形配置か三角形配置かを決定し, B を下式より求める。

$$\text{正方形配置} \cdots B = \frac{2b}{1.13} \quad \text{【式5】}$$

$$\text{三角形配置} \cdots B = \frac{2b}{1.05} \quad \text{【式6】}$$

改良範囲

改良深度は, 液状化判定による液状化抵抗率 F_L が1.0以下になる土層までとする。ただし, F_L が1.0以下となる土層の層厚が薄く, 液状化抵抗指数 P_L が5.0以下の場合には対策を行わない。

一方, 建物外周部の改良範囲は,

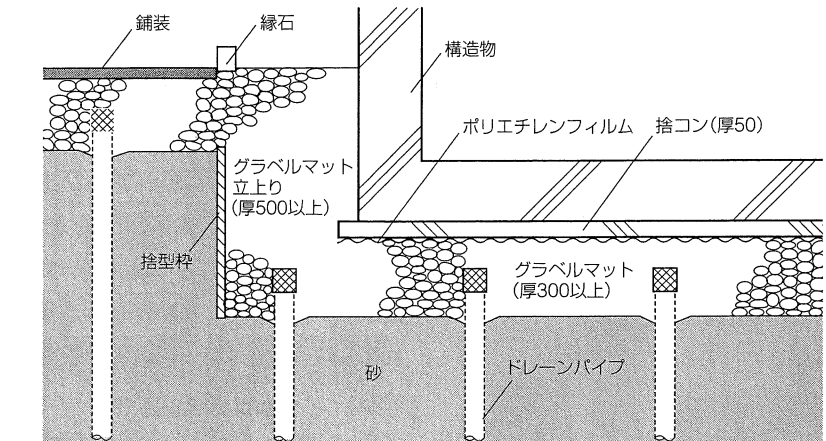


図7 砕石マット断面詳細図

直接基礎で改良深度の1/2以上, 杭基礎で改良深度の1/4~1/2を原則とする。ただし, 敷地に制限がある場合は別途検討し, パイプを密にするなどの対策を施す。

砕石マット

砕石(グラベル)マットには6号

または7号砕石を用い, 厚さは30cm以上とする。また, マット上面はポリエチレンフィルムなどで養生する。断面図の例を図7に示す。

設計例

1) 設計条件

- 敷地面積: 225m²

表4 計算に用いた地盤定数(液状化層の平均値)

N 値	F_L 値	透水係数 k (cm/sec)	体積圧縮係数 m_v (cm ² /N)
7.2	0.8	0.014	8.0×10^{-4}

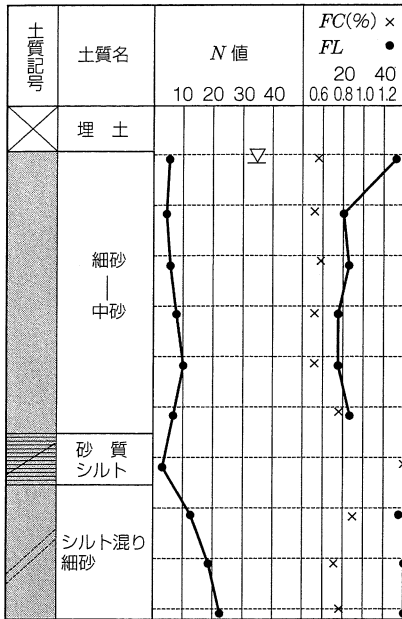


図8 土質柱状図とFL値

- 建物条件：戸建住宅（木造2F），
- 建築面積：78m²
- 地盤条件：深さ6m付近まで液状化の可能性のある緩い砂層が堆積（図8）

2) 液状化判定結果

地表面における設計用水平加速度を200gal，地震の想定Mを7.5に設定した場合の深度GL-10mまでとした場合の液状化判定結果を図8に示す。同図によれば，深さ1~6mの範囲で $F_L=0.8$ 前後の値を示し，液状化の可能性が高いと言える。

3) ドレーンパイプ間隔の計算

$\phi=10$ cmのドレーンパイプを使用した場合の計算結果を以下に示す。なお，計算には表4の地盤定数を用いた。

- ①最大間隙水圧の半径方向平均値 $(U_{max}/\sigma'_0)_{ave}$
本文に準じて，0.3を採用
- ②ドレーンパイプ半径 a
 $10/2=5$ cm
- ③設定地震力

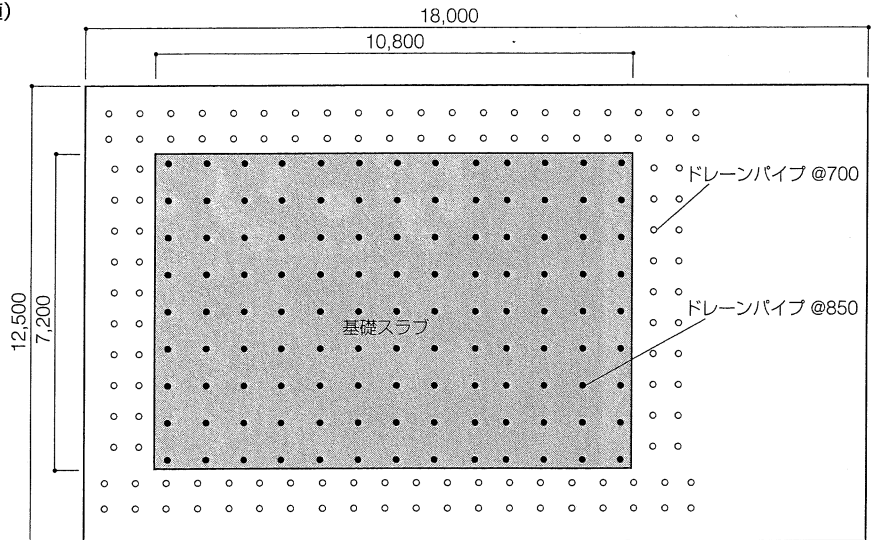


図9 基礎とドレーンパイプの配置図

- $\alpha_{max}=200$ gal, $M=7.5$
- ④地震動の有効継続時間 t_d
図5より， $t_d=9$ 秒
- ⑤地盤の透水係数 k ，体積圧縮係数 m_v

k は表2，表3より， m_v は $\nu=0.3$ ， $E=1400N$ として式1より計算。

⑥時間係数 T_d

$$\text{式3より } T_d = \frac{k \cdot t_d}{m_v \cdot \rho_w \cdot g \cdot a^2} = 630$$

⑦繰返し回数比

液状化試験を実施していないので式3より求めた。

$$\frac{N_{eq}}{N_l} = \left(\frac{1}{F_L} \right)^{0.17} = 3.8 \rightarrow 4.0$$

⑧打設間隔 B

図6中の $N_{eq}/N_l=4$ を採用し， $(U_{max}/\sigma'_0)_{ave}=0.3$ と $T_d=630$ より， $b/a=10$

$$b=10a=10 \times 5=50 \text{ cm}$$

式5より，

$$B=2 \times 50 / 1.13=88 \text{ cm}$$

打設間隔は，安全側を考慮して85cm，正方形配置とした。

⑨改良範囲

ドレーンパイプの打設深さは，GL-0.8m~-6.3m ($L=5.3$ m)とした。建物外周部には70cm間隔で2列配置した。

図9に基礎とドレーンパイプの配

置図を示す。

おわりに

液状化による建物の被害は，常時の荷重によって生じる建物の沈下障害と異なって，建物の供用期間中に必ず発生するわけではないが，地下水位が高く緩い砂地盤で大地震が起これば発生する危険性が極めて高いといえる。

経済状態の厳しい昨今では，戸建住宅に液状化対策を行うか否かの判断は迷うところではあるが，最近では，各地方公共団体から液状化危険度マップが発行されており，そのマップから建設予定地が液状化の可能性が高いか否かを予測し，液状化の可能性が高い地域では，経済的に許す限りより確実な液状化対策を行うことが望ましい。

(わかめ よしお，まじま まさと)

【参考文献】

- 1) 岩崎敏男他：不攪乱砂質土の非排水動的強度の正規化表示，第13回土質工学研究発表会梗概集，pp.465~468，1978
- 2) 安田進：FLと過剰間隙水圧比の関係，第21回土質工学研究発表会梗概集，pp.841~842，1986
- 3) 常田賢一他：地盤の流動化特性および影響に関する実験的検討，第16回土質工学研究発表会梗概集，pp.629~632，1981