

報文

# 小規模建築物を対象とした液状化対策とパイルド・ラフト基礎の設計法

真島 正人\*

## 1. はじめに

過去の地震被災事例を教訓として、小規模建築物基礎設計指針<sup>1)</sup>には地盤の液状化判定と液状化対策が示されている。しかし、一般の建物と異なり、地盤調査はスウェーデン式サウンディング試験（SWS試験）が中心であるため、 $N$ 値や細粒分含有率 $F_c$ による液状化判定<sup>2)</sup>はできない。そのため、同指針には微地形に基づく概略判定と液状化の影響が地表面に及ぶか否かの判定法<sup>3)</sup>のみが示されている。後者の判定法では $200\text{cm/s}^2$ 程度の地震動を想定し、表層部に非液状化層が2m以上存在すれば、地表面への影響は小さいとされる。しかし、新潟中越沖地震では、地表面から盛土や粘性土を含む非液状化層が3.5m程度存在したにも関わらず、10cm以上の不同沈下が生じ、沈下修正工事を余儀なくされた被災事例もある。また、同指針には液状化対策の図例も示されているが、対策の必要性の判定、対策の計画・設計までの詳細な検討手順や方策が示されていない。

一方、同指針では支持力増加や沈下対策として、杭状地盤補強工法の設計法が示されている。この工法は、柱状改良体や小口径鋼管杭によって直接基礎の下部を地盤補強するという、一種のパイルド・ラフト基礎の考え方を採用している。ただし、具体的な設計法では杭状体の鉛直支持力に頼る杭基礎の支持力計算法を取入れ、沈下量を算出する方法も等価荷重面法が示されているのみで

ある。つまり、パイルド・ラフト基礎としての具体的な設計法が示されていない。

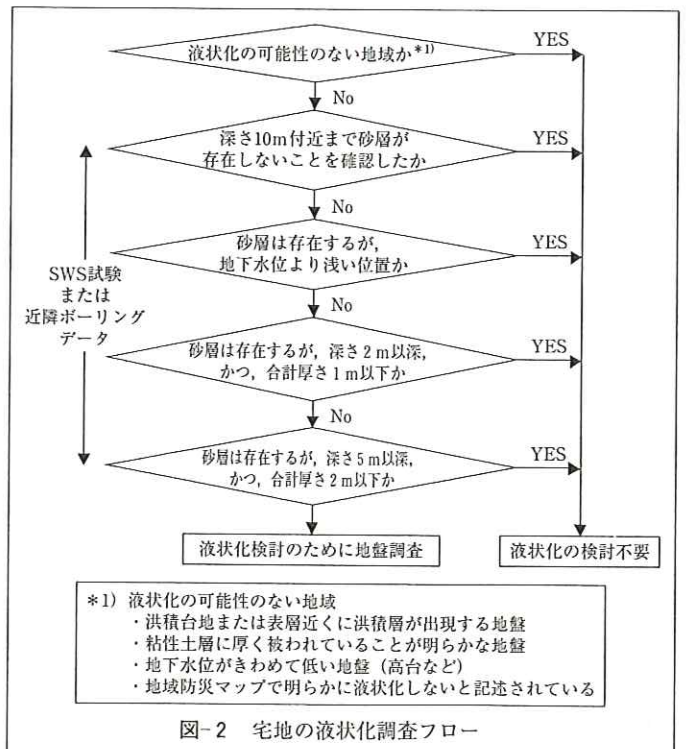
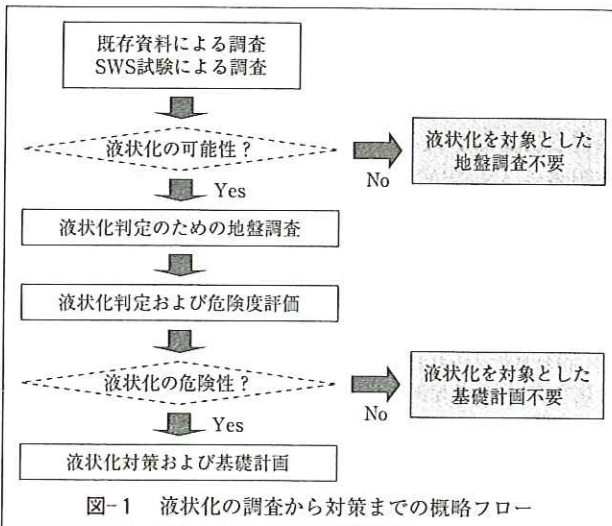
本書では、上記2つの課題に対してその対応策を示す。

## 2. 液状化対策

宅地の液状化危険度評価から対策立案までの概略フローを図-1に示す。まず、既存の資料と通常実施するSWS試験に基づいて液状化の可能性を大まかに評価し、これらでは判断できない場合に限り、液状化の判定が可能な地盤調査を実施する。次に、地盤調査結果に基づいて液状化判定と液状化危険度を評価し、液状化による被害が予想される場合には、液状化の程度や計画済の基礎条件に応じて対策を立案・設計する。

### 2.1 液状化の危険度の調査フロー

図-2に、既存資料とSWS試験に基づく液状化危険度の調査フローを示す。まず地形・地質図、地盤図、近隣ボーリングデータ、地方公共団体が発行する地域防災マップや地盤図などから、同図の\*1)の項目に該当するか否かを判断する。液状化の可能性のない地域である



\* MAJIMA Masato (株)設計室ソイル 取締役社長, 工博 | 東京都中央区日本橋3-9-12 第六中央ビル7F



場合には、追加の調査や対策は必要ない。

## 2.2 液状化対策の必要性の判断

図-3に、液状化の判定から対策立案までのフローを示す。液状化検討のための地盤調査と液状化判定については、既に本書に記述されているので詳細は省略するが、標準貫入試験、粒度試験、三成分コーン貫入試験を実施し、 $F_L$ 、 $D_{cy}^{1)}$ 、液状化指数 $P_L^{4)}$ 、および液状化に伴う地盤沈下量と基礎のめり込み量 $^{5)}$ を求める。また、前述の地表面への影響を判定する。これらの数値をもとに、図-3のフローに従って液状対策の必要性、および対策が必要な場合には対策方法を選択する。

## 2.3 液状化対策方法の選定と計画

戸建て住宅では経済性や敷地の制約上、抜本的な液状化対策が困難なことが多い。図-4は戸建て住宅に適用可能な対策、図-5は選定基準と設計上の目安を示したものである。液状化を前提とした対策としては、①布基礎からべた基礎への変更、②層状地盤改良、③柱状地盤改良、④小口径杭による地盤補強、⑤杭基礎が考えられ

る。

- ① 布基礎からべた基礎への変更：基礎剛性を高めて不同沈下を抑制することを目的とした対策。 $P_L \leq 5$ 、 $D_{cy} \leq 5$  cm、液状化による地表面への影響が小さければ、対応できると考えられる。
- ② 層状地盤改良：液状化層の一部または全体を層状改良することにより、液状化層厚を減少させ、かつ地盤剛性の向上（不同沈下抑制）を目的とした対策。液状化深さが3m以内、改良厚さが2m以内であれば、①と同様、対応可能と考えられる。
- ③ 柱状地盤改良：過去の被災事例や振動台による液状化実験によれば、建屋の応答加速度は液状化直前が最大となり、液状化後は地盤のエネルギー吸収効果により低下するという報告に基づいた考え方である。つまり、液状化後は建屋から基礎への慣性力がきわめて小さいことを前提として、水平力に対する検討は液状化前の水平地盤反力を用いて行い、液状化後は鉛直支持性能のみ確保することを目的としたものである。一般の

杭基礎では、地盤が液状化すると地盤変位が杭体に外力として作用することが知られているが、戸建て住宅用の改良長は7~8m以下となることが多いので、改良体先端地盤が液状化せず、かつ液状化層の周面摩擦抵抗を無視しても鉛直支持力を確保できれば、十分対応できると考えられる。

- ④ 小口径鋼管：小規模指針では、小口径鋼管は柱状改良と同様に地盤補強に位置づけられている。つまり、柱状改良と同様な考え方で対応できるようにも思われる。ただし、以下の点に留意する必要がある。

- ・柱状改良より深くまで設置することが多く、長さ径比も柱状改良が最大10程度であるのに対して、小口径杭では100前後となる場合も多い。
- ・杭頭と基礎スラブを緊結しないので、杭頭部はピンに近い状態にある。したがって、柱状改良体に比較すると、地盤の水平変位に対する抵抗力が小さく、杭頭部で大きな水平変位が生じると予想される。当然、座屈に対す

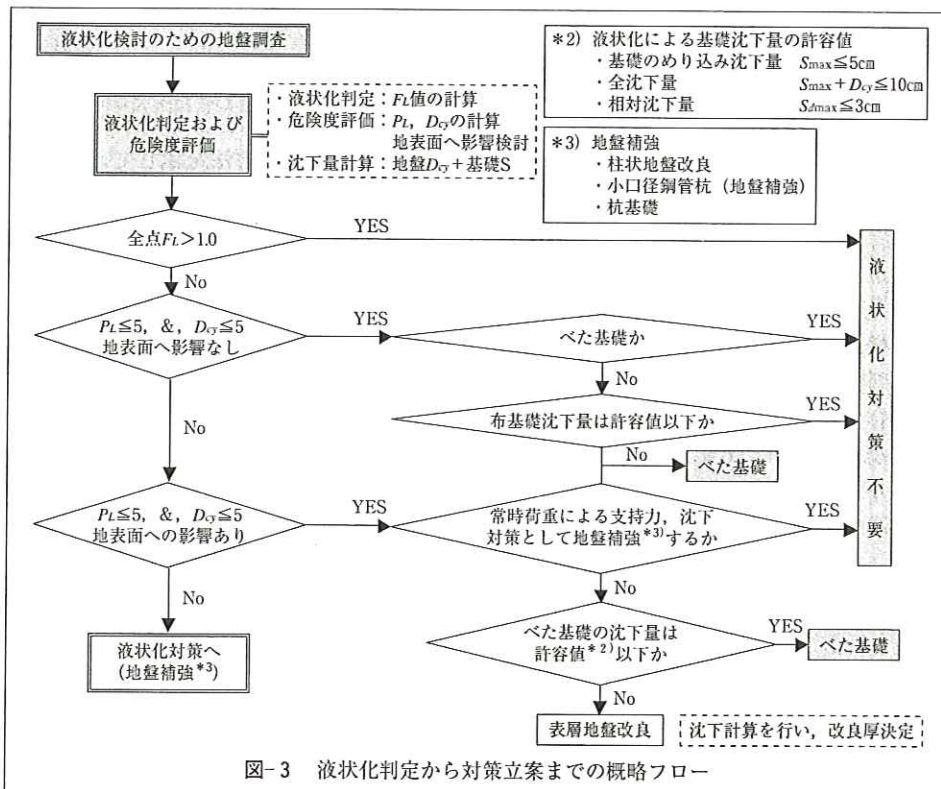


図-3 液状化判定から対策立案までの概略フロー

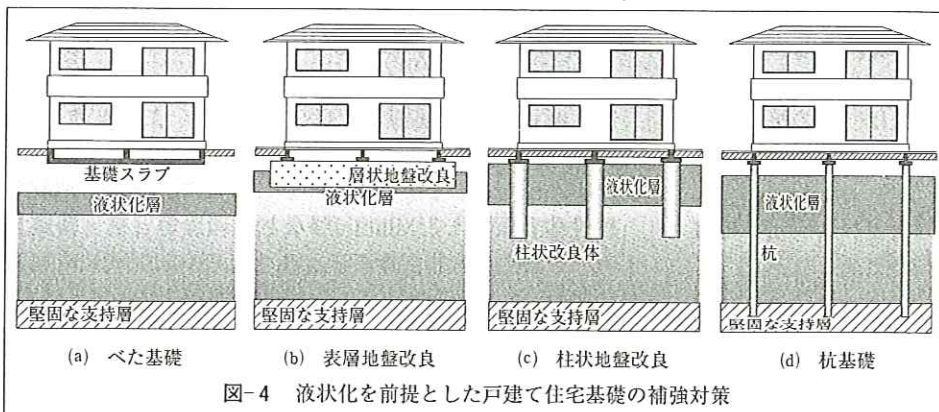
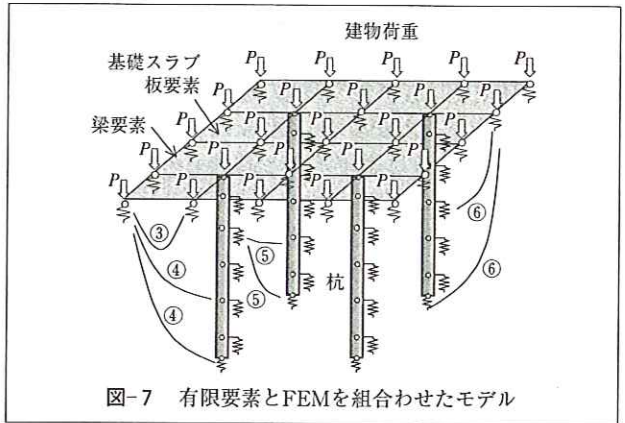
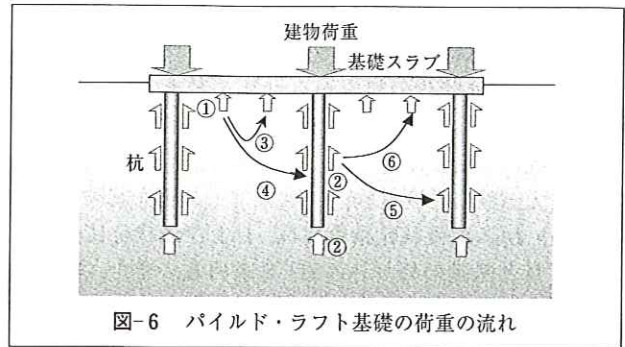
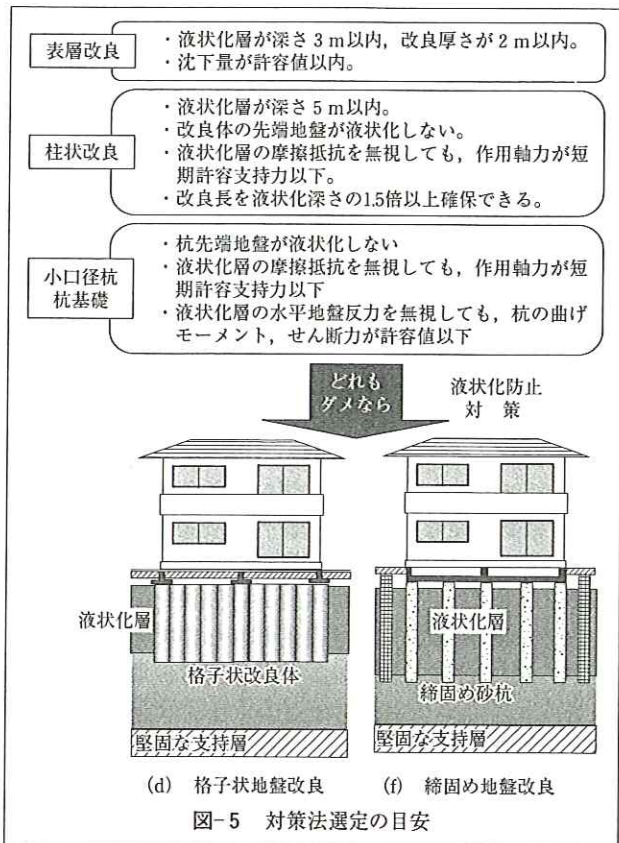


図-4 液状化を前提とした戸建て住宅基礎の補強対策





る十分な配慮が必要となる。

⑤ 杭基礎：杭基礎を採用するのは戸建て住宅の中でも比較的重い3階建てやコンクリート系の建物と予想される。したがって、一般の建物と同様、基礎指針に準じた考え方で設計する必要があると判断される。

上記5種類の対策で対応できない場合には、格子状固化工法や締固め工法を採用せざるを得ない。なお、上記方法は敷地が平坦であり、各宅地レベルで対応可能な対策案である。液状化に伴う大規模な地滑りや側方流動に対応できるものではない。

### 3. パイルド・ラフト基礎

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎では過大な(不同)沈下量が生じる危険性がある場合に、杭基礎より経済的な基礎工法として採用される。その支持機構や設計法は基礎指針に示されているが、図-6に示すように、建物から基礎に作用した荷重は①スラブから直接地盤に、また②杭周面と先端から地盤に伝達される。さらに、①で地盤に作用した荷重の反力は、③別の部位の地盤や④杭に、杭から地盤に作用した荷重の反力は⑤別の杭や⑥別の部位の地盤に伝達され、それぞれが複雑に影響する。設計のポイントは、基礎スラブと杭との荷重分担と沈下予測精度である。そのためには、地盤定数の設定と地盤—杭体—ラフトの解析モデルの構築が重要となる。

#### 3.1 地盤定数の設定

本来は、詳細な地盤調査、土質試験を行って変形係数やせん断強度を決定する必要がある。しかし、戸建て住宅では、SWS試験のみを実施することが多い。そこで、

$W_{sw}$ ,  $N_{sw}$ から地盤定数を決定する方法を示しておく。

##### 3.1.1 圧密沈下の可能性判定

式(1)により圧密沈下の判定を行なう。

$$p_{cz} \geq \sigma'_z (\text{kN/m}^2) \dots\dots\dots(1)$$

$p_{cz}$  : 深さ $z$ における圧密降伏応力で、式(2)による。

$\sigma'_z$  : 深さ $z$ における有効土被り圧に建物荷重による増加応力を加算して求めた値

$$p_{cz} = \max [1.5 \cdot q_{uz}, \gamma'_{ave} \cdot z] (\text{kN/m}^2) \dots\dots\dots(2)$$

$q_{uz}$  :  $W_{sw}$ による推定一軸圧縮強さ

$\gamma'_{ave}$  : 深さ $z$ までの有効単位体積重量

##### 3.1.2 即時沈下量計算用のヤング率

非圧密層については、換算 $q_u$  (粘性土)、換算 $N$ 値を用いてヤング率 $E$ を求める。

$$E = 100 \cdot q_u \quad (\text{粘性土}) \quad (\text{kN/m}^2) \dots\dots\dots(3)$$

$$= 1,400 \cdot N \quad (\text{砂質土})$$

##### 3.1.3 圧密計算用のヤング率

式(1)を満たさない層は、見掛け上のヤング率 $E_c$ を式(4)により求める。杭状体先端から上部 $L/3$ 以深に式(1)を満たさない層が存在する場合にも同様とする。

$$E_c = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{m_v} (\text{kN/m}^2) \dots\dots\dots(4)$$

$m_v$  : 体積圧縮係数で、 $1/(80 \times q_u/2)$ より推定

#### 3.2 計算方法

パイルド・ラフト基礎の一般的な計算方法は、地盤を弾性体と仮定したMindlin解などの理論解と杭・基礎スラブを梁要素・板要素でモデル化した有限要素法を組合せた方法が一般的である(図-7参照)。しかし、戸建て住宅では物件ごとにこのような複雑な解析を行なうのは時間的にも経済的にも難しい。この点を考慮して、小規模指針では図-8(b)に示す等価荷重面法による圧密沈



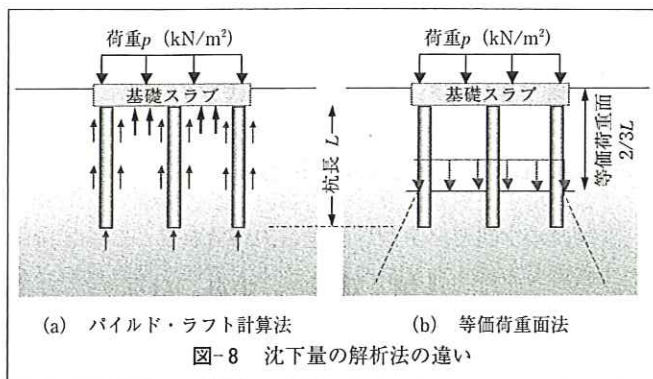


図-8 沈下量の解析法の違い

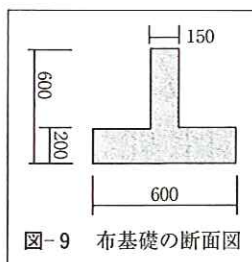


図-9 布基礎の断面図

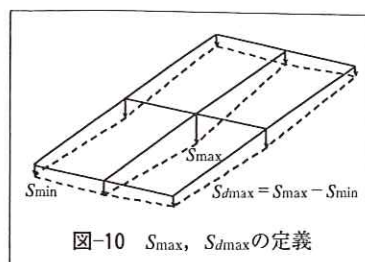


図-10 Smax, Sdmaxの定義

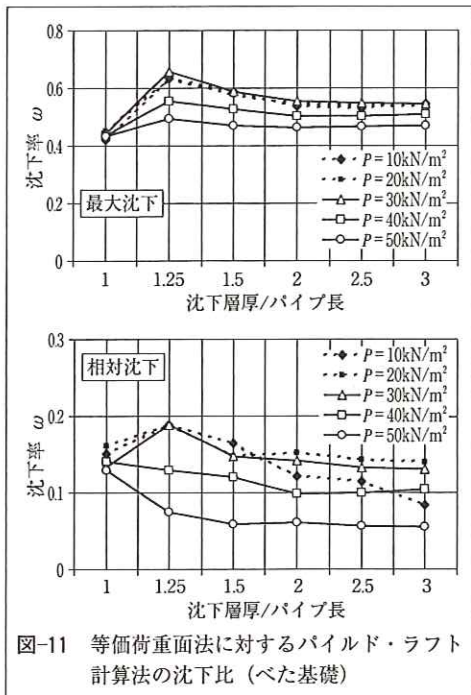


図-11 等価荷重面法に対するパイルド・ラフト計算法の沈下比 (べた基礎)

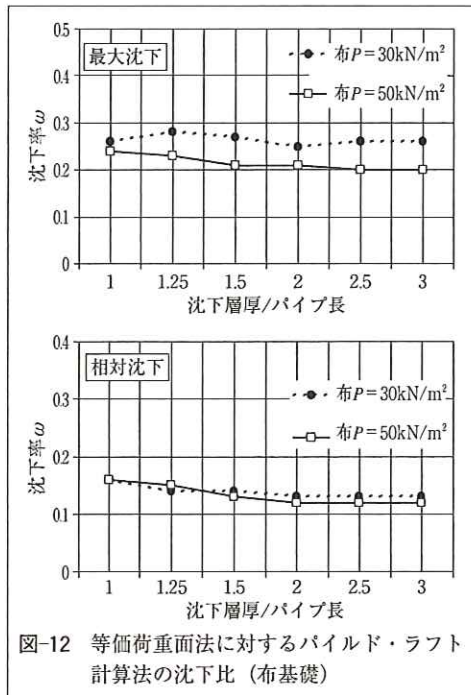


図-12 等価荷重面法に対するパイルド・ラフト計算法の沈下比 (布基礎)

下予測法を示している。しかし、この方法では正確な(相対)沈下量の評価は難しく、沈下予測の精度を高める必要がある場合には、図-7のような計算法によらざるを得ない。

図-11、図-12は、直径5cmの細径鋼管を用いた地盤補強(パイルド・ラフト基礎)を想定して、図-8(a)、(b)の最大沈下量 $S_{max}$ と相対沈下量 $S_{dmax}$ を、平均荷重度と沈下層厚/パイプ長をパラメータとして計算した結果(等価荷重面法による沈下量に対するパイルド・ラフト計算法の比率 $\omega$ )を示したものである。ただし、基礎外寸法は $6\text{m} \times 10\text{m}$ 、布基礎は田の字型、幅 $0.6\text{m}$ とした。図-11、図-12から明らかなように、最大沈下量 $S_{max}$ はべた基礎ではほぼ60%以下、布基礎で30%以下、相対沈下量 $S_{dmax}$ はいずれの基礎も20%以下となる。 $S_{max}$ と $S_{dmax}$ の比率 $\omega$ は補強工法によって異なると予想されるが、事前に比較解析を行って両図のようなグラフを作成しておけば、等価荷重面により $S_{max}$ と $S_{dmax}$ を求め、これに $\omega$ を乗じることにより、比較的簡単にパイルド・ラフト基礎の(相対)沈下量を推定できる。

### 3.3 設計上の留意点

SWS試験により換算した地盤定数は土質ごとのばら

つきが大きいので、余裕を持った定数設定を行なうべきである。

一方、一般建築物でパイルド・ラフト基礎を採用する場合には、常時の鉛直荷重対して直接基礎のみで必要支持力(長期許容支持力)を確保し、杭には極限支持力の $1/2 \sim 2/3$ 程度を負担させ、摩擦杭的な扱いになることが多い。これに対して、小規模指針で取扱う杭状地盤補強は、まず杭体によって必要支持力を確保することが前提となっている。厳密な計算をしない以上、安全性に配慮したものと思われる。ただし、小口径鋼管杭は先端拡大翼や掘削用プレートを取付けて回転掘削により埋設することが多く、施工時に杭周面地盤を乱すため、鉛直支持力の多くを先端

抵抗に期待している。このような支持杭的に扱う補強工法は、支持機構から判断してパイルド・ラフト基礎(あるいは地盤補強)というよりは、頭部を基礎スラブに緊結しない杭基礎として扱うべきではないと思われる。

## 4. あとがき

小規模指針には十分記述されていない戸建て住宅の液状化対策とパイルド・ラフト基礎(地盤補強)の対応策について示した。戸建て住宅では、経済性や時間的な制約から詳細な検討を行なうのは難しいが、真の経済性や安全性を追求するのであれば、詳細な地盤調査や計算方法を採用するのが望ましい。

## ■参考文献

- 1) 日本建築学会編：小規模建築物基礎設計指針，2008。
- 2) 日本建築学会編：建築基礎構造設計指針，2001。
- 3) Ishihara, K. : Stability of Natural Deposits during Earthquakes, Proc. of 11th ICSMFE, 1985.
- 4) 岩崎他：地震時地盤液状化の程度と予測について，土と基礎，1980。
- 5) 地盤工学会関東支部：既設造成宅地の耐震性調査から対策まで，2007。