

# 杭基礎の統計的フラジリティーカーブの開発と被害予測への応用

長谷川 正幸 田地 陽一  
(技術研究所) (技術研究所)

## Development of Empirical Fragility Curves for Pile Foundations and Application to Estimation of Foundation Damage States

by Masayuki Hasegawa and Yoichi Taji

### Abstract

Fragility curves for pile foundations are developed for design purpose based on the damage data during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. Each fragility curve is modeled by a lognormal distribution function for ground settlement, whose median and log standard deviation are estimated by using the maximum likelihood method. Two damage states are defined to represent moderate and major damage, which correspond to the inclination angle of the footing of 1/300 and more, and 1/100 and more, respectively. As an application of the resulting curves, a simple design chart to estimate the foundation damage against the settlement caused after an earthquake is proposed.

### 概要

兵庫県南部地震の被害データを用いて、地盤沈下量を確率変数とした杭基礎の統計的フラジリティーカーブを導出した。ここに、既製杭と場所打ち杭のコンクリート杭を対象とし、その特性値（沈下量の中央値と対数標準偏差）の推定にあたっては最尤法を適用した。フラジリティー評価にあたっては、杭基礎の被害モードを観測値から参照可能な基礎傾斜角に基づいて定め、それぞれ 1/300 と 1/100 を閾値として被害事象を 3 段階に分類した。その応用として、被害モードの発生確率の観点から、地盤沈下量に対する実用的な被害予測チャートを考案し、これより液状化地盤における杭基礎の被害予測事例を示した。

### § 1. はじめに

近年、不動産証券化に伴う建物の資産価値評価や企業の災害時事業継続計画などの普及によって、建物の耐震性能評価に確率論的アプローチによる地震リスク評価が取り入れられるようになった。地震リスク評価にあたっては、地震動強さなどの外乱に対して、建物の脆弱性を定量的に与えるフラジリティーの情報が不可欠である。このため、建物の構造躯体はもちろん、非構造部材や設備機器・家具什器に至るまで多くのフラジリティーが開発されてきた<sup>1)~4)</sup>。また、フラジリティーは昨今の災害時事業継続において、施設の地震被害想定にも有用されており、その工学的利用価値は高い<sup>5)</sup>。

これまで種々のフラジリティーが開発されてきたが、基礎構造の損傷を表現する有効なフラジリティーモデルは未だ見当たらないのが実状と言える。それは基礎構造の場合、地震被害統計が上部構造に比して少なく、フラジリティーの開発に有効な被害データが限られていること、さらに基礎構造には二次設計が導入されて

おらず、大地震時の耐震性能評価手法や設計クライテリアが確立されていないことなどによるものと考えられる<sup>6)</sup>。

建物の地震被害は種々の要因が複雑に関係して生じるものであるが、巨視的には図-1のようなイベントツリーで被害要因と被害事象を整理することができる。ここに、同図の分岐点にある  $P_i(i=A,B,C)$  は各被害要因の発生確率で、一般に上述のフラジリティーから与えられる。これから分かるように、建物の主たる被害要因は上部構造の振動被害と地盤変状による基礎被害となる。このうち、建物については対応するフラジリティーが多く提供されていることは先述の通りである。しかしながら、第一義的な被害要因となる地盤変状については、先述の観点から図示のようにブランチを単純な構造とする場合が多い。そのフラジリティー評価も、エキスパートの経験値によるのが実情と言える。典型的な例が液状化被害である。上部構造の被害が目立たない建物でも、地盤変形に伴う杭の損傷などで基礎が沈下・傾斜し、建物機能を喪失した事例は良く知られている。

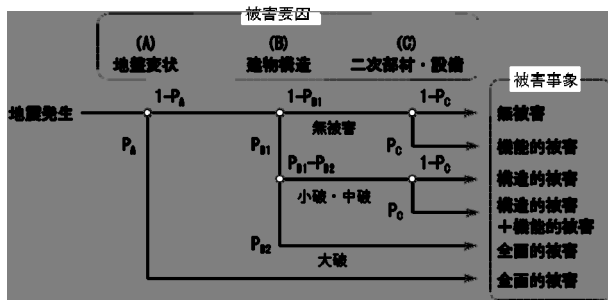


図-1 イベントツリーによる被害要因と被害事象

建物の地震リスク評価に基礎構造の被害を適切に取り入れるためには、基礎構造のフラジリティの開発が急務である。本論では、上述の観点から、兵庫県南部地震における被害調査データを用いて、既製杭と場所打ち杭を対象とした杭基礎の統計的フラジリティモデルの作成を試みる。まず、最尤法によるフラジリティカーブの導出方法を示す。これより、既製杭と場所打ち杭について、全体と杭種別のフラジリティ評価を行う。つぎに、フラジリティを利用した確率的な被害予測手法について提案し、液状化地盤における適用例を紹介する。

## § 2. 杭基礎の被害データと被害モード

### 2.1 用いた被害データの属性

建設省建築研究所<sup>7)</sup>が兵庫県南部地震で調査した被害統計資料を採用し、これよりフラジリティ評価のためのデータサンプルを選定した。同資料には基礎構造に被害のあった建物を中心として、161棟の調査データが収録されている。このうち、直接基礎と鋼管杭の被害事例を除き、ここでの目的から基礎構造の被害に関係する沈下量と傾斜角がともに観測収集されている既製杭(30棟)と場所打ち杭(17棟)の47棟をデータサンプルとして用いた。全47棟の沈下量と傾斜角の散布図を既製杭と場所打ち杭の分類で図-2に示す。このうち同図(b)と(c)は、杭種別ごとに後述の杭損傷度で分類してある。なお、これらの図には杭基礎の被災度判定<sup>8)</sup>で用いられる最少クライテリアの基礎傾斜角： $R=1/300$ を被害の目安として載せた。

同図より、沈下量と傾斜角の関係にばらつきはあるものの、一般に沈下量が大きな被害ほど傾斜角も大きくなる傾向が認められる。また、杭種別で比較すると、場所打ち杭の方が沈下量と傾斜角は小さな範囲に分布し、目安として示した $R=1/300$ を超過する確率も相対的に小さい。これは場所打ち杭の被害データが少ないこともあるが、兵庫県南部地震における杭の被害特性を考えると、杭種による変形性能の相違が被害事象に

発現したものと推測される。この点については、以後に行うフラジリティ評価の対象とする。

図-3には、被害の目安とした $R=1/300$ の超過確率を沈下量に対する被害率として掲載した。ただし、ここでは精度確保の観点から、沈下量を適当に区分して、各区間内のサンプル数が少なくとも10棟程度は確保できるように区間を定めた。したがって、被害率の精度は高々10%程度となる。このようにマクロな被害率ではあるが、沈下量が5~10cmの範囲になると、基礎傾斜角で $R \geq 1/300$ となる被害が約50%の確率で発現することが分かる。すなわち、被害モードが $R \geq 1/300$ の場合の50%被害率沈下量は5~10cmで、中央値はこの区間に推定される。サンプル数が少ないため、ここでは区間沈下量に応じた被害率として示したが、これも沈下量に対して不連続な一種のフラジリティと言える。

さて、被害データの属性は原資料に詳しいが、主要な点を整理すると以下の通りである<sup>7)</sup>。

- ①調査地点は神戸市・芦屋市・西宮市・宝塚市・伊丹市・尼崎市に分布しているが、神戸市東灘区・灘区の被害事例が大半を占める。これらの地域の地震動強さはほぼ震度6以上と推定され、震度7の地点も数例含まれている。
- ②上部構造の被害は無被害・軽微から大破まで分布しているが、中破以下の建物被害が80%以上を占める。なお、建物構造は低層のS造が3棟あるのみで、他はRC造またはSRC造であり、規模は5階以上の中高層建物が大半を占める。
- ③竣工年代は不明が2棟、60年代以前が2棟、それ以外は70年代以降の建物で、80年代の竣工が最も多い。ここに、各年代で基礎構造の被災率に有意な差はなく、上部構造のように年代別被災率に明確な相違は見られない。
- ④地形は傾斜地が5例のみで、それ以外は平坦地である。地盤変状は液状化・沈下・崩壊について記載されているが、このうち地盤崩壊は2例のみで、液状化または沈下が大半を占めている。
- ⑤既製杭はSC杭が1例のみで、それ以外はPC杭とPHC杭である。場所打ち杭はベント杭とアースドリル杭である。全47棟の半数以上で掘り出し調査が実施されたものと考えられ、杭の損傷度<sup>7)</sup>がI~Vの範囲で記載されている。このうち90%は損傷度Ⅲ以上である(I, II, …の昇順に損傷度大)。

以上を要約すると、ここで用いる被害データは比較的地震動の大きな平坦地において、建物被害は中破またはそれ以下であるが、液状化などにより地盤変状の卓越した基礎構造の被害が対象となっている。したがって、以後に導出する杭基礎のフラジリティは、杭

種が既製杭と場所打ち杭のコンクリート杭で、建物の慣性力による杭頭被害だけではなく、地盤の強制変形による被害を含む範囲が適用事象となる。

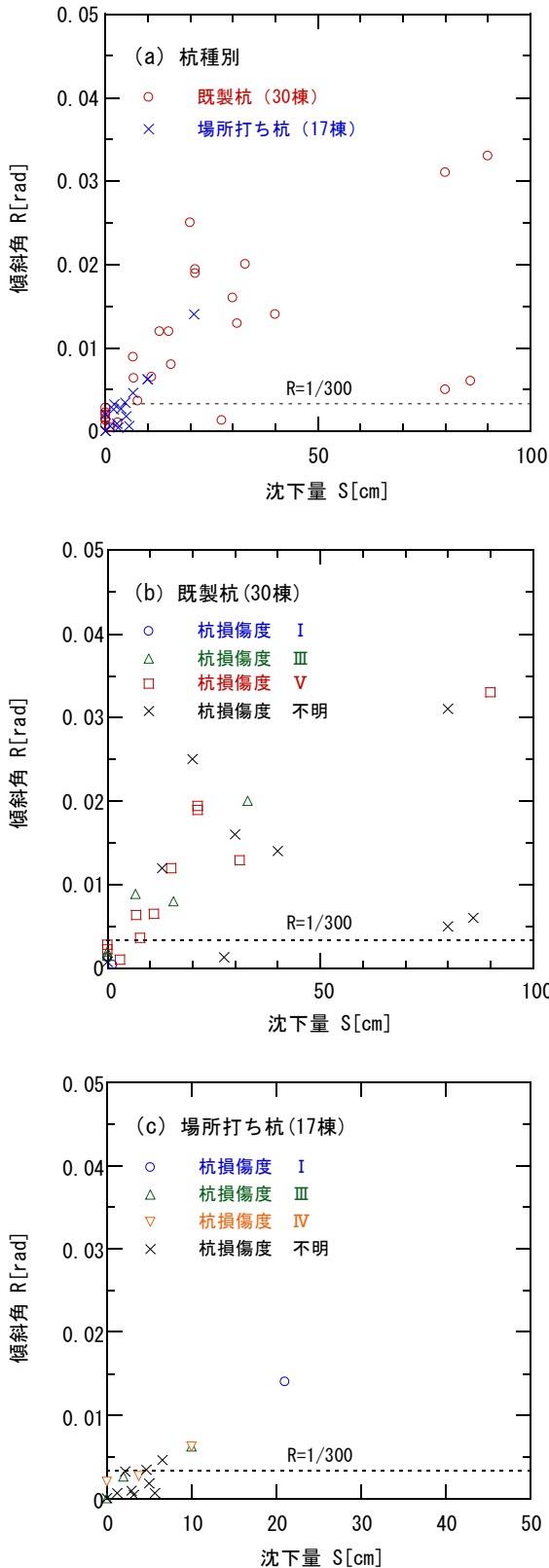


図-2 フラジリティ評価に用いる被害データ

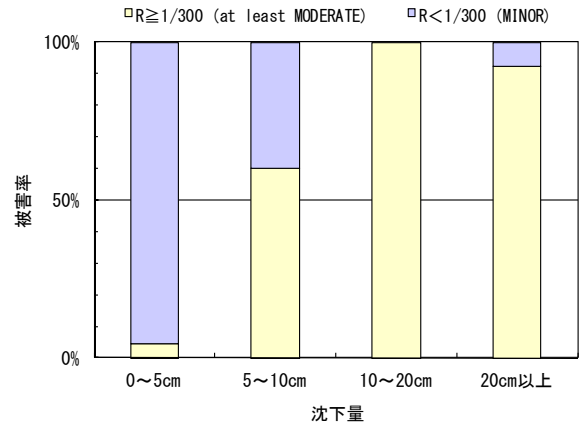


図-3 基礎傾斜角が 1/300 を超える杭基礎の被害率

## 2.2 被害モードの定義

フラジリティ評価にあたっては、あらかじめ被害モードを定義しておく必要がある。すなわち、どのような状態の被害についてフラジリティを評価するか的前提条件が必要となる。この点に関連して、先の資料<sup>7)</sup>では、沈下量と基礎傾斜角の組合せによって被災度区分を定めている。同区分では、基礎傾斜角について  $R=1/300$ 、 $1/150$ 、及び  $1/75$  を閾値とし、これに基づいて被害モードを無被害・小破・中破・大破に分類している。フラジリティ評価にあたり、この分類による被害モードを採用するには、データサンプルが限られていることもあって、やや細分に過ぎる。

一方、同様に被害調査に基づいた研究として、丸岡ら<sup>9)</sup>は兵庫県南部地震の被災建物について基礎の被災度調査を行い、掘り出し調査を実施した 34 棟の杭基礎について、杭損傷度に基づいた被災度区分と最大傾斜角との関係をまとめている。これには復旧方法が明記されており、解体・ジャッキアップ(新設杭打設または直接基礎変更)・増杭+杭頭補強・杭頭補強(鋼板巻き、樹脂注入)・無補強の順に復旧難易度が分類されている。同文献を参照すると、ばらつきはあっても最大傾斜角が大きな被害ほど、一般に復旧難易度も高くなる傾向が認められ、最大傾斜角で  $1/100 \sim 1/75$  を超えれば、解体または大規模復旧となる比率が高くなる。

以上の考察から、ここでは被害モードを“MINOR”、“MODERATE”、及び“MAJOR”の3段階に分類し、その閾値を基礎傾斜角で  $R=1/300$  と  $1/100$  とする。すなわち、 $R < 1/300$  を「復旧難易度：低」に位置付けて被害モードを“MINOR”とする。また、 $R \geq 1/100$  を「復旧難易度：高」に位置付けて被害モードを“MAJOR”とし、中間域の  $1/300 \leq R < 1/100$  を“MODERATE”で定義する。この定義に従えば、図-3の被害率は「少なくとも MODERATE」になる被害モードの発現率を表示したことになる。

### § 3. 統計的フラジリティーカーブの導出方法

フラジリティーモデルの作成にあたり、以下の仮定・条件を設ける。

- ① 杭基礎のフラジリティーモデルにおいて、確率変数は被害データから参照可能な沈下量： $S$  とする。
- ② フラジリティーカーブは確率変数として定めた沈下量に対し、ある特定の被害モードが発現する確率を与えるものとする。被害モードは前章で述べたように、観測値として参照可能な基礎傾斜角： $R$  に基づいて定め、 $R \geq 1/300$ （少なくとも“MODERATE”）と  $R \geq 1/100$ （“MAJOR”）の被害事象を対象とする。
- ③ フラジリティーカーブの形状は、対数正規分布の累積分布関数に従うものとする。

以上の仮定・条件の下で、 $R \geq 1/300$  の被害モードに対するフラジリティーを  $F_j$ 、 $R \geq 1/100$  のそれを  $G_j$  とすると、これらは次のように与えられる。

$$F_j = \Phi\left(\frac{\ln(S_j/S_{m1})}{\zeta}\right) ; \quad G_j = \Phi\left(\frac{\ln(S_j/S_{m2})}{\zeta}\right) \quad (1)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$  は標準正規分布関数、 $\ln(\cdot)$  は自然対数である。また、 $S_{m1}$  と  $S_{m2}$  は各被害モードにおける沈下量の中央値で、 $\zeta$  は対数標準偏差である。ただし、 $\zeta$  については各被害モードで共通に与える。さて、最尤法を適用して式(1)の特性値： $S_{m1}$ 、 $S_{m2}$ 、 $\zeta$  を最尤推定量として求める。それには、被害データの観測値として与えられる沈下量： $S_j$  ( $j=1, 2, \dots, N$ ) に対して尤度関数： $L(S_1, S_2, \dots, S_N; S_{m1}, S_{m2}, \zeta)$  を新たに導入し、これを最大化するように特性値を推定すれば良い。いま、ある沈下量の観測値  $S_j$  が実現する確からしさは、 $S_j$  におけるフラジリティーの値に比例すると考えて良いから、ここでは尤度関数を次式で置く<sup>10), 11)</sup>。

$$L = \prod_{j=1}^N (F_j)^{\alpha_j} (1-F_j)^{1-\alpha_j} \cdot (G_j)^{\beta_j} (1-G_j)^{1-\beta_j} \quad (2)$$

または、計算精度を考慮して、

$$\ln(L) = \sum_{j=1}^N [\alpha_j \ln(F_j) + (1-\alpha_j) \ln(1-F_j)] + \sum_{j=1}^N [\beta_j \ln(G_j) + (1-\beta_j) \ln(1-G_j)] \quad (3)$$

ここに、 $N$  は沈下量のサンプル数で、具体的には図-2のプロット総数 (47 棟) になる。また、式(2)の  $\alpha_j$  と  $\beta_j$  は、特定の被害モードが発現する場合 ( $\alpha_j, \beta_j=1$ ) と非

発現の場合 ( $\alpha_j, \beta_j=0$ ) の二項反応で、上述の②より下式のように与えられる。

$$\alpha_j = \begin{cases} 1 & \dots & R_j \geq 1/300 \\ 0 & \dots & R_j < 1/300 \end{cases} ; \quad \beta_j = \begin{cases} 1 & \dots & R_j \geq 1/100 \\ 0 & \dots & R_j < 1/100 \end{cases} \quad (4)$$

ここでは、式(3)の尤度関数を最大化するように特性値： $S_{m1}$ 、 $S_{m2}$ 、 $\zeta$  を定める。それには、 $S_{m1}$ 、 $S_{m2}$ 、 $\zeta$  について次の連立方程式を解けばよい。

$$\frac{\partial \ln(L)}{\partial S_{m1}} = \frac{\partial \ln(L)}{\partial S_{m2}} = \frac{\partial \ln(L)}{\partial \zeta} = 0 \quad (5)$$

以上が最尤法の論理的根拠であるが、実際の数値計算にあたっては、式(3)に simplex 法を適用して最適解を求める手続きをとる。具体的な計算手順は以下の通りである。

- ① 中央値と対数標準偏差に適切な初期値を設定し、これを  $(S_{m1}^0, S_{m2}^0, \zeta^0)$  とする。
- ② 初期値に対してデータサンプルの沈下量： $S_j$  ( $j=1, N$ ) を式(1)に代入し、 $F_j$  と  $G_j$  を求める。しかる後、対応するデータサンプルの基礎傾斜角： $R_j$  ( $j=1, N$ ) を参照して式(3)の尤度関数を求め、これを  $L^0$  とする。
- ③  $(S_{m1}^0, S_{m2}^0, \zeta^0)$  に適当な増分を与えて新たに  $(S_{m1}^1, S_{m2}^1, \zeta^1)$  を設定し、同様に式(3)の尤度関数を計算して  $L^1$  とする。
- ④  $L^0$  と  $L^1$  を比較し、 $L^0 \leq L^1$  ならば  $1 \rightarrow 0$  に置き換えて③に戻り計算を繰り返す。 $L^0 > L^1$  ならば  $(S_{m1}^0, S_{m2}^0, \zeta^0)$  を最尤推定量とし、求めるべき式(1)の特性値： $S_{m1}$ 、 $S_{m2}$ 、 $\zeta$  とする。

### § 4. 杭基礎のフラジリティー評価

#### 4.1 コンクリート杭のフラジリティー

全サンプル数 (47 棟) を用いて、既製杭と場所打ち杭を対象としたコンクリート杭のフラジリティー評価を行う。最尤推定量として求めたフラジリティーモデルの特性値 (中央値と対数標準偏差) を表-1に、これより描いたフラジリティーカーブを図-4に示す。同表には、特性値の推定誤差として、標準偏差と変動係数を併記し、同図には用いた沈下量のサンプルを式(4)の二項反応に従ってプロットした。なお、推定誤差として表示した標準偏差は、特性値の共分散行列の対角項から評価した。

これらの図表より、 $R \geq 1/300$  (少なくとも“MODERATE”) となる被害モードの中央値は約 5cm と推定され、図-3の結果に対応する。また、 $R \geq 1/100$

（“MAJOR”）の場合は約 20cm と推定され、推定誤差は両者とも変動係数で 30%以下となる。ここでの中央値は、当該被害モードの 50%被害率沈下量を意味するから、 $R \geq 1/300$  の場合に何らかの復旧を要する被害事象が発現し、 $R \geq 1/100$  では大規模復旧や解体を要する被害事象が発現する沈下量の平均値に相当にする。被災度判定で用いられる沈下量の閾値<sup>8)</sup>や既往の調査研究<sup>例えば 12), 13)</sup>を参照すると、これらはコンクリート杭のフラジリティーとして、ほぼ妥当な推定量と言える。

表-1 フラジリティーモデルの特性値  
(既製杭と場所打ち杭を対象としたコンクリート杭)

特性値	中央値 ( $S_m$ )		対数標準偏差 ( $\zeta$ )
	$R \geq 1/300$	$R \geq 1/100$	
基礎傾斜角			
推定値	5.03	20.16	0.935
標準偏差	1.36	4.67	0.194
変動係数	0.27	0.23	0.21

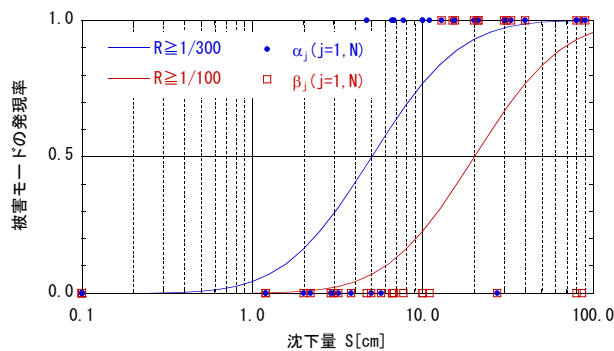


図-4 コンクリート杭のフラジリティーカーブ

#### 4.2 既製杭と場所打ち杭の杭種別フラジリティー

ここでは、前節のフラジリティーを既製杭と場所打ち杭に分離する。基本的な導出方法は §3 で述べた通りであるが、分離にあたりデータサンプルのセットを既製杭と場所打ち杭に分けて同方法を踏襲したのでは、前節のフラジリティーと不整合になる。そこで、 $R \geq 1/300$  と  $R \geq 1/100$  に対するフラジリティーの中央値を既製杭では  $(S_{m1}, S_{m2})$ 、場所打ち杭では  $(S_{m3}, S_{m4})$  とし、ここでも対数標準偏差： $\zeta$ は共通に与えて、下式のように尤度関数を設定する。

$$L \equiv L(\{S_j\}^T, \{S_k\}^T; S_{m1}, S_{m2}, S_{m3}, S_{m4}, \zeta) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \{S_j\} &= (S_1, S_2, \dots, S_{N_a})^T, \\ \{S_k\} &= (S_1, S_2, \dots, S_{N_b})^T; \quad N_a + N_b = N \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $S_j(j=1, N_a)$ は既製杭の沈下量、 $S_k(k=1, N_b)$ は場所

打ち杭の沈下量である。それぞれ図-2から  $N_a=30$  及び  $N_b=17$  で与えられ、最尤推定量を求めるためのサンプル数は  $N=47$  棟となる。さて、 $R \geq 1/300$  と  $R \geq 1/100$  に対するフラジリティーを既製杭では  $(F_j, G_j)$ 、場所打ち杭では  $(H_k, I_k)$  とすれば、これらは式(1)のように標準正規関数で与えられる。また、式(4)に相当する二項反応を既製杭では  $\alpha_j$  と  $\beta_j$  で、場所打ち杭では  $\gamma_k$  と  $\nu_k$  で表現すると、式(6)の尤度関数は具体的に次式で書ける。なお、以後の計算手続きは §3 で述べた通りである。

$$\begin{aligned} L &= \prod_{j=1}^{N_a} (F_j)^{\alpha_j} (1-F_j)^{1-\alpha_j} \cdot (G_j)^{\beta_j} (1-G_j)^{1-\beta_j} \\ &\times \prod_{k=1}^{N_b} (H_k)^{\gamma_k} (1-H_k)^{1-\gamma_k} \cdot (I_k)^{\nu_k} (1-I_k)^{1-\nu_k} \end{aligned} \quad (8)$$

杭種別フラジリティーモデルの特性値を表-2に、これより求めた既製杭と場所打ち杭のフラジリティーカーブを図-5に示す。ここでも、特性値の一覧表には推定誤差を併せて示し、図には沈下量のデータを二項反応に従ってプロットしてある。まず、表-2より既製杭と場所打ち杭に分離したフラジリティーの推定中央値は、前節のそれに比べてばらつきが大きく、変動係数で 30%以上となる。推定誤差は前節に比してやや大きくなるものの、既製杭と場所打ち杭を比較すると、50%発現率を与える沈下量は場所打ち杭の方が既製杭に比して大きく、場所打ち杭でフラジリティーの強くなる傾向が明瞭である。とくに、この傾向は  $R \geq 1/100$  の被害モードで顕著と言える。

上述のフラジリティーに見られる強弱の差異は、既製杭と場所打ち杭における変形性能の相違によるものと考えられる。§2 で述べたように、ここでのフラジリティーは地盤変形の卓越した兵庫県南部地震の被害データに基づいているため、杭の変形性能の相違がより強調されたものと推測される。

### §5. 杭基礎の被害予測手法

#### 5.1 確率的な被害予測の考え方

ある耐震性能を有する建物または基礎が、ある強さの地震動を受けたとき、どのような被害となるかの簡単な目安があると便利である。このような目的に対して、上部構造の建物では被害予想マトリックスが提案されている<sup>5)</sup>。このような予測手法が基礎構造にもあれば、種々の目的に対して有用となろう。ここでは、これまでに導出したフラジリティーを利用して、同様に杭基礎の被害予測チャートの作成を試みる。

表-2 既製杭と場所打ち杭で層別したフラジリティーモデルの特性値

特性値	中央値 ( $S_m$ )				対数標準偏差 ( $\zeta$ )
	既製杭 (30棟)		場所打ち杭 (17棟)		
杭種					
基礎傾斜角	$R \geq 1/300$	$R \geq 1/100$	$R \geq 1/300$	$R \geq 1/100$	
推定値	3.65	17.43	6.13	36.00	1.070
標準偏差	1.80	5.81	2.51	19.24	0.260
変動係数	0.49	0.33	0.41	0.53	0.24

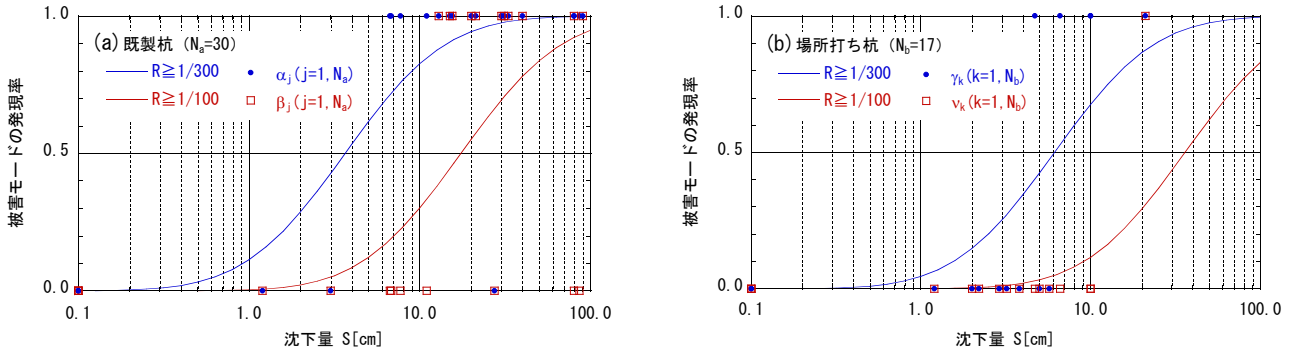


図-5 既製杭と場所打ち杭で層別した杭基礎のフラジリティーカーブ

基本的な考え方を模式化して図-6に示す。これを参照すると、フラジリティーから得られる被害モードの発現率は、任意の沈下量(図では $S_i, S_j, S_k$ )に対して、被害モードの小さな順に累積した確率バーチャートで表現できる。ここで、どの被害モードを代表被害モードとするかは、被害予測の目的によって異なる。先の文献5)では、建物の被害額に着目するため、90%非超過確率の被害モードを代表被害モードに選定している。これは、累積確率において90%は当該の被害モードを超えないことを意味するから、事実上の最大被害にあたる。図-6の例で示すと、沈下量: $S_k$ であれば最大被害は“MAJOR”と予想される。一方、施設の保全を目的とした地震防災計画などに着目するのであれば、むしろ50%非超過確率として、平均的に起こりそうな被害で代表する方が有用と言える。図-6の例では、沈下量: $S_k$ における平均被害は“MODERATE”になる。

90%または50%非超過確率の代表被害モードを沈下量に応じて定めるには、あらかじめ相当する確率を与える沈下量をフラジリティーから逆算しておく都合が良い。これが50%非超過確率では中央値となることは自明であろう。図-6には、90%非超過確率での沈下量を( $S_1, S_2$ )で記した。90%非超過確率はフラジリティーでは10%超過確率として与えられるから、その10%発現率沈下量を $S_{10\%}$ とすると、

$$\frac{\ln(S_{10\%}/S_m)}{\zeta} = \Phi^{-1}(0.1) \quad (9)$$

$$\rightarrow S_{10\%} = \exp[\zeta \cdot \Phi^{-1}(0.1) + \ln(S_m)]$$

ここに、 $\Phi^{-1}(\cdot)$ は標準正規分布関数の逆関数である。これより( $S_1, S_2$ )を求め、 $S_1 \sim S_2$ の線分で表示すると図-7のようになる。同図(a)には予想最大被害として90%非超過確率を、同図(b)には予想平均被害として50%非超過確率を載せた。図示のように沈下量が線分範囲の $S_1 < S < S_2$ であれば、代表被害モードは“MODERATE”になる。沈下量が線分範囲外で $S < S_1$ であれば“MINOR”、 $S > S_2$ であれば“MAJOR”となる。

## 5.2 被害予測チャート

地盤変状が予想される施設の地震被害想定において、前節の図-7は有用である。ここでは、これを実用的な被害予測チャートへ変換してみる。被害予測チャートの提供にあたっては、沈下量を適当に区分し、その代表沈下量に対して区間内の代表被害モードを充当するように作成する。この方が、本来は不確実な被害予測に対して適当と考えられる。沈下量の区間設定にあたり、液状化判定で危険度の評価基準に用いられる沈下量の区分を採用する<sup>14)</sup>。これは、5cm以下(軽微)、5~10cm(小)、10~20cm(中)、20~40cm(大)、40cm以上(甚大)の5区間に分類されている。ただし、括弧内は当該区間における液状化ハザードの評価基準を意味する。

これらの区間について代表被害モードを定めるには、図-6で示した累積確率バーチャートを作成すればよい。ここに、区間内の代表沈下量は区間中央値とし、40cm以上の場合は最小の40cmとする。例として、 $S=7.5$ cm(5~10cm区間)と $S=30$ cm(20~40cm区間)

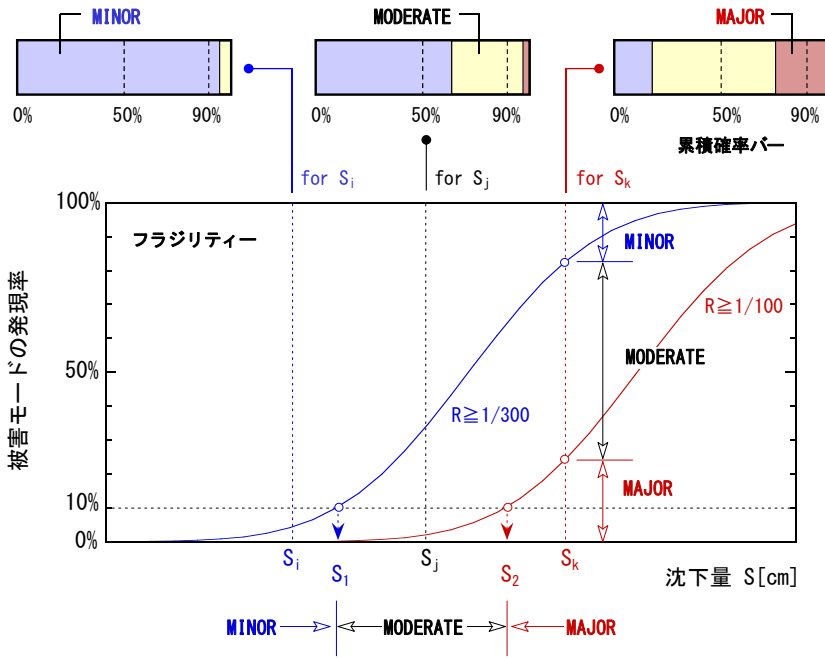


図-6 フラジリティを利用した確率的な被害予測手法の考え方

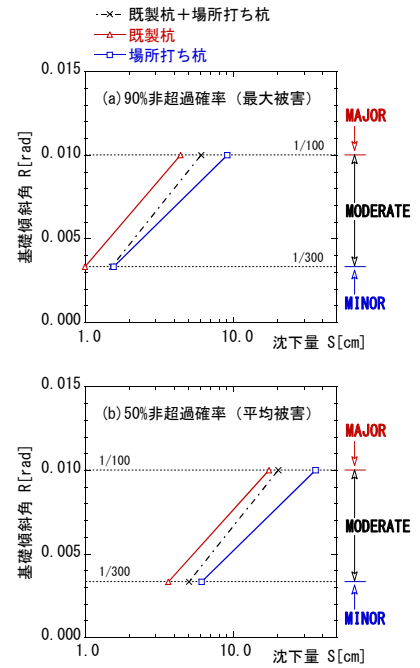


図-7 代表被害モードの沈下量

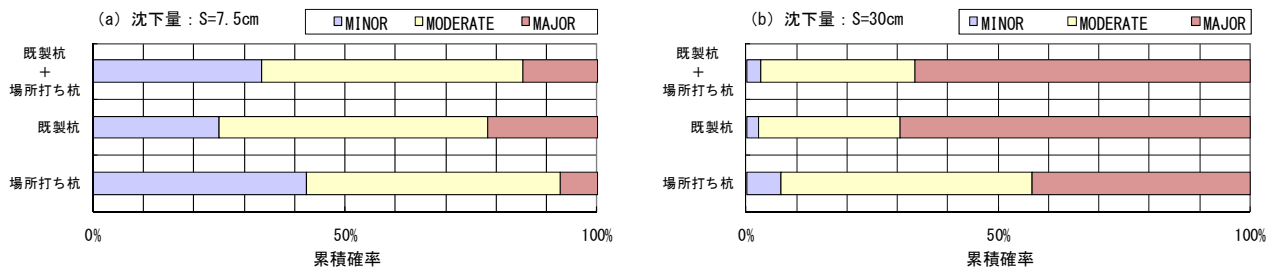


図-8 被害モードの累積確率バーチャート

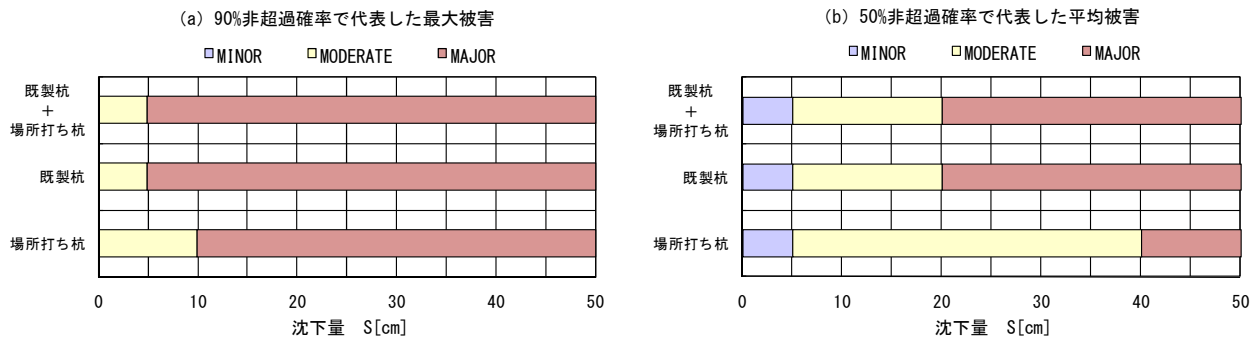


図-9 区分沈下量に対する杭基礎の被害予測チャート

について作成した累積確率バーチャートを図-8に示す。このような図をすべての代表沈下量について作成し、被害予測の目的に応じて適切な被害モードを選択すれば、当初の目的である既製杭と場所打ち杭を対象とした杭基礎について、実用的な被害予測チャートを作成できる。

図-9には、(a)最大被害と(b)平均被害の予想指標を

区分沈下量のバーチャートで示した。同図の適用により、例えば液状化判定において沈下量が推定できれば、当該ハザードにおける杭基礎の被害の目安を判断できよう。ただし、図(a)のように起こりそうな最大被害を90%非超過確率で評価すると、わずかな沈下量で“MAJOR”と予想されることに注意を要する。このような予想指標は目的に応じた確率指標として提供でき

るが、被害予測における不確実性や、ここで定義可能な被害モードが高々3段階に過ぎないことを考慮すると、現状では図(b)に示した平均的な被害モード、または最も占める確率の高い卓越被害モードで代表することが推奨される。

### 5.3 液状化地盤における適用例

前節で提案した図-9のチャートを活用して、液状化地盤における杭基礎の地震被害予測を行う。ここでは、沿岸部の典型的な埋立地盤を想定し、同敷地において鉄骨造平屋の工場または倉庫のように、建物被害よりも基礎被害の方が卓越しやすいケースを考える。想定敷地と建物配置の概要を図-10に示す。同敷地にはNo.1~8のボーリング調査地点があり、すべての地点でボーリング柱状図が得られている。このうち、No.4とNo.8を代表として図-11に示す。敷地は平坦地に位置しており、同図から地層は地表より深度約15mまでが砂層、それ以降でN値5~10程度の粘土またはシルトが連続する沖積地盤である。地震時には比較的揺れやすい層序となっており、地表深度約15mの砂層における液状化危険度が問題となる。

このような想定敷地において、まずNo.1~8のボーリング柱状図をもとに各地点の液状化判定<sup>14)</sup>を実施する。ここに、地表最大加速度は液状化地盤でほぼ最大の $A_{max}=350\text{cm/s}^2$ を、地震マグニチュードは $M=7.5$ を想定する。また、詳細な地盤調査資料が不明な場合、各地層の単位体積重量と細粒分含有率は土質に応じた推奨値を用いる。各地点の液状化判定を行い、液状化層での繰返しせん断歪みを体積歪みに読み替えて沈下量を求め、これを残留沈下量の深度分布として示すと図-12のようになる。これより、敷地平均で約30cmの沈下を生じることになるが、敷地内では沈下量が大きく異なり、No.4地点では40cm以上(甚大)、No.8では10cm未満(小)の結果が得られる。これらの沈下量を敷地全体のコンター図として図-13に示す。

以上から敷地全体の沈下量を推定できたので、図-9のチャートを利用して建物基礎の被害想定を実施する。ここで、建物の基礎構造は表-3の杭基礎を想定する。また、図-9の適用にあたっては、同図(b)を採用して予想平均被害で評価する。各建物における杭基礎の被害想定結果を表-3及び図-13のコンター図に併せて示す。これから分かるように、例えばA棟とB棟を比較すると、敷地全体の液状化危険度はA棟側において高いと言えるが、A棟は変形性能が優位な場所打ち杭で支持されているため、既製杭支持のB棟よりも被害は小さいと予想される。いずれも基礎直下の液状化対策は必要と考えられるが、建物の重要度が同等であれば、対策優先度はB棟と判断される。図-9は

区分沈下量に対する杭基礎の簡単な被害予測チャートであるが、このように対策立案などにおいて合理的な判断材料を提供することができる。

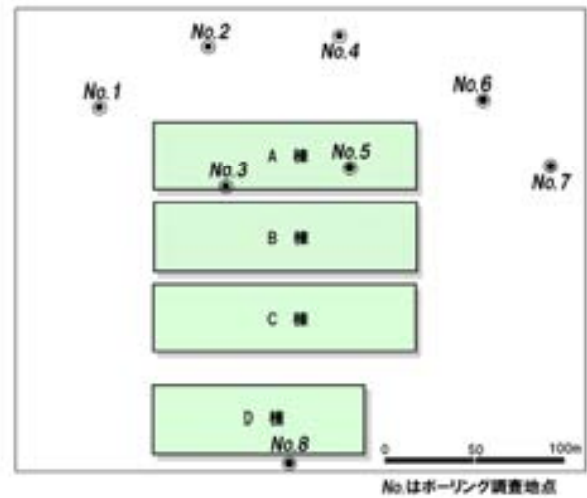


図-10 想定敷地と建物配置の概要

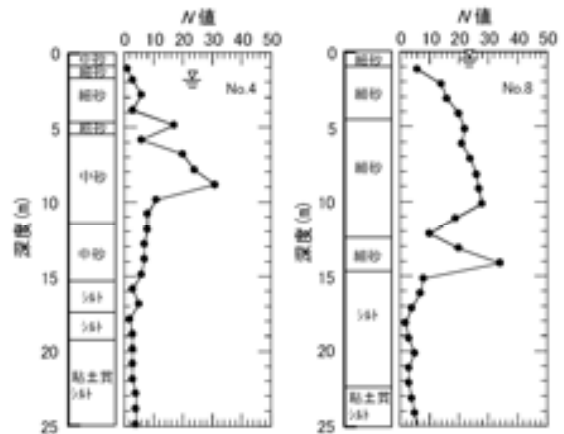


図-11 ボーリング柱状図 (No.4 と No.8)

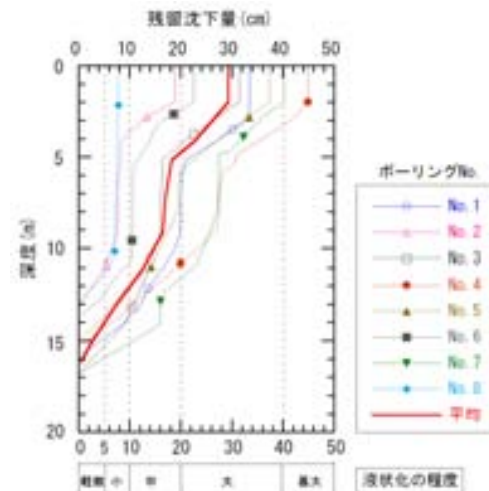


図-12 残留沈下量の深度分布



表-3 建物基礎構造と被害想定結果

名称	杭種	沈下量	予想被害
A棟	場所打ち杭	30~40cm	MODERATE
B棟	既製杭(RC)	30~35cm	MAJOR
C棟	既製杭(RC)	20~30cm	MAJOR
D棟	コンクリート杭 <sup>註)</sup>	20cm以下	MODERATE

註) 設計図書不明によりコンクリート杭を想定

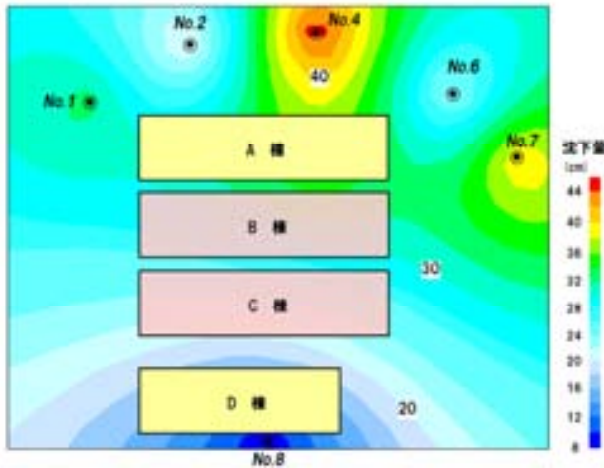


図-13 想定敷地の残留沈下量と被害想定結果

## § 6. まとめ

本論では、兵庫県南部地震の被害データを用いて、杭基礎の統計的フラジリティーカーブを導出した。既製杭と場所打ち杭のコンクリート杭を対象とし、曲線形状は対数正規分布の累積分布関数を仮定して、その特性値となる沈下量の中央値と対数標準偏差の推定には最尤法を適用した。まず、コンクリート杭としてのフラジリティー評価を行い、このフラジリティーを分離することで、既製杭と場所打ち杭の杭種別フラジリ

ティー評価を行った。つぎに、導出したフラジリティーカーブを利用して、地盤沈下量に対する実用的な杭基礎の被害予測チャートを作成し、液状化地盤における適用例を紹介した。以下に、結論をまとめて示す。

- ① 既製杭と場所打ち杭を対象としたコンクリート杭のフラジリティーモデルの特性値を表-1に、その曲線を図-4に提示した。ここに、基礎傾斜角が  $R \geq 1/300$  (少なくとも“MODERATE”)となる被害モードの中央値は約5cm、 $R \geq 1/100$  (“MAJOR”)の場合は約20cmと推定される。推定誤差は変動係数で30%以下である。ここでの中央値は、 $R \geq 1/300$ で何らかの復旧を要する被害が発現し、 $R \geq 1/100$ で大規模復旧や解体を要する被害が発現する平均沈下量の目安を与える。
- ② 既製杭と場所打ち杭の杭種別フラジリティーモデルの特性値を表-2に、その曲線を図-5に提示した。両者を比較すると、中央値は場所打ち杭の方が既製杭に比して大きく、杭の変形性能の相違がフラジリティーの強弱として顕れる。この傾向は  $R \geq 1/100$ の被害モードでより顕著となる。ここでの結果は、地盤変形の卓越した兵庫県南部地震の被害データに基づいているため、両者の変形性能の相違がより強調されたものと推測される。
- ③ フラジリティーの応用として、被害モードの累積確率を90%非超過確率で代表した場合の最大被害と、50%で代表した場合の平均被害の予想指標とを、それぞれ区分沈下量に対する実用的な杭基礎の被害予測チャートで図-9に提示した。被害予測にあたり、現状では同図(b)に提示の平均的な予想指標の適用が推奨される。提案のチャートを適用することによって、杭基礎の被害の目安が判断可能であり、合理的な対策立案に資することができる。

#### <参考文献>

- 1)林康裕, 鈴木祥之, 宮腰淳一, 渡辺基史:“耐震診断結果を利用した既存 RC 造建築物の地震リスク表示”, 地域安全学会論文集, No.2, 2000, pp.235~242.
- 2)諏訪仁, 神田順:“兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備被害率曲線”, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.633, 2008, pp.1935~1941.
- 3)金子美香:“地震時における家具の転倒率推定方法”, 日本建築学会構造系論文集, No.551, 2002, pp.61~68.
- 4)岡田成幸, 鏡味洋史:“震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成”, 地震, Vol.44, 1991, pp.93~108.
- 5)大久保浩光, 松井伸夫, 武田正紀, 後藤盛昌:“地震時における建物被害評価手法”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003, pp.17~18.
- 6)日本建築学会基礎構造運営委員会:“大地震時の杭基礎の耐震設計—2次設計を導入するのに何が必要か—”, 日本建築学会大会(中国)PD資料, 2008.
- 7)二木幹夫, 上之藺隆志, 中田慎介:“建築基礎の被災度区分判定指針及び復旧技術例”, 建設省建築研究所, 建築研究資料, No.90, 1997.
- 8)日本建築防災協会編:“震災建築物等の被災度区分判定基準および復旧技術指針”, 2001, pp.15~18.
- 9)丸岡正夫, 青木雅路, 佐藤英二, 平井芳雄, 宮川治雄, 渡辺哲夫:“兵庫県南部地震における震災建物基礎の被災度調査”, 日本建築学会技術報告集, No.5, 1997, pp.85~90.
- 10)中村孝明, 長沼敏彦, 静間俊郎, 篠塚正宣:“統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究”, 第10回日本地震工学シンポジウム講演論文集, Vol.3, 1998, pp.3165~3170.
- 11)Shinozuka, M.:“Statistical Analysis of Fragility Curves”, Proc. of Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, Taipei, Taiwan, R.O.C., 1999, pp.1~18.
- 12)社本康広, 佐藤正義, 二木幹夫, 嶋津伸一:“埋立て地盤の液状化による杭の変形調査”, 土と基礎, Vol.44, No.3, 1996, pp.25~27.
- 13)時松孝次:“地盤および基礎構造から見た建物被害”, 土と基礎, Vol.44, No.2, 1996, pp.14~18.
- 14)日本建築学会編:“建築基礎構造設計指針”, 2002, pp.61~72.