

## 液状化地盤における杭基礎の非線形地震応答解析

伊藤 浩二 後藤 洋三

Effective Stress Analyses Considering Pile Non-Linearity  
on Liquefiable Ground

Koji Ito Yozo Goto

## Abstract

In recent years, the response characteristics of pile foundations on liquefiable ground have been subjects of importance during strong earthquakes and post-liquefaction accompanying lateral ground spreading. This paper describes a simple method of expressing pile non-linearity considering axial force fluctuation on pretensioned concrete piles and analytical results for pile foundations actually damaged during the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. It is concluded that the severe damage to pile foundations during this earthquake occurred on the upper and lower bounds between liquefiable and non-liquefiable ground. The damage at these bounds was enlarged by the large ground displacement accompanying accumulation of excess pore-water pressure before full liquefaction of the ground occurred and was mainly affected by the ground displacement rather than the inertial effect of the foundations.

## 概 要

レベル2地震動における液状化地盤の杭基礎の耐震性検討を行うために、既製コンクリート杭(PC杭)を対象とした軸力変動を考慮した簡便な杭の非線形性のモデル化手法を示した。1995年兵庫県南部地震において液状化ならびに側方流動で被災した埋立地盤の杭基礎の地震応答解析より、液状化が生じる可能性のある埋立地盤の杭基礎は、地震動の初期に杭頭、地下水位近傍(液状化層と非液状化層の上面の境界)、層境界(液状化層と非液状化層の下面の境界)で損傷し、その後完全液状化前の過剰間隙水圧の蓄積過程で生じる地盤変位の影響で地下水位近傍、層境界の損傷が進展すること、地下水位近傍と層境界の杭の損傷は、基礎慣性力の影響と比較して地盤変位の影響が顕著であることが示された。

## 1. はじめに

1995年1月17日の兵庫県南部地震では、沿岸部の埋立地盤において、液状化ならびに側方流動による杭基礎の被害が多く発生した<sup>1)</sup>。レベル2地震動における液状化地盤の杭基礎の耐震性を検討する場合、杭の非線形性の影響、ならびに建物からの水平力、転倒モーメントと同様に地盤変位による影響を適切に考慮することが重要と考えられる。

本研究では、最初に、既製コンクリート杭(PC杭)を対象とした軸力変動を考慮した簡便な杭の非線形性のモデル化手法を提案する。

次に、1995年兵庫県南部地震において、液状化ならびに側方流動により被災したPC杭で支持された埋立地盤の建物を対象として、杭の非線形性を考慮した地震応答解析を行い、軸力変動を考慮した杭の非線形性の影響、周辺地盤で液状化が生じる場合の杭基礎の損傷過程を被災事例との比較から検討する。

さらに、液状化が生じる可能性の高い埋立地盤の杭基礎において、地盤変位が杭基礎の耐震安全性に及ぼす影響を地震応答解析から検討する。

## 2. 杭の非線形性のモデル化

建物からの転倒モーメントによる軸力変動が生じる場合のPC杭の非線形性は、既往の高強度プレストレストコンクリート杭(PHC杭)の変形性能<sup>2)</sup>に基づいて、以下の方法でモデル化した。

PC杭の復元力特性は、Fig. 1のひび割れモーメント $M_{cr}$ とひび割れ時の曲率 $\kappa_{cr}$ 、破壊モーメント $M_u$ と破壊時の曲率 $\kappa_u$ を第1,第2折れ点とするトリリニア型、履歴特性は原点指向型を仮定した。

軸力変動による $M - \kappa$ 関係の変化は、Fig. 2, 3に示す関数でそれぞれ近似した $M_u, M_{cr} - N$ 関係、 $\kappa_u, \kappa_{cr} - N$ 関係を用いて考慮した。 $\kappa$ の常時から終局時の荷重経路において、杭応力が $M_{cr} - N$ 関係を超過する場合は、その軸力に応じた $M_u$ と $M_{cr}$ 、 $\kappa_u$ と $\kappa_{cr}$ をFig. 2, 3に示す関数より算出し、 $M - \kappa$ 関係の第2勾配を $(M_u - M_{cr}) / (\kappa_u - \kappa_{cr})$ で設定した。杭応力が $M_u - N$ 関係を超過する場合は、杭応力を $M_u - N$ 関係へ修正した。

Fig. 2, 3に示す関数の各係数は、PC杭の設計数値と標準寸法、長期軸力からの軸力変動を想定した3水

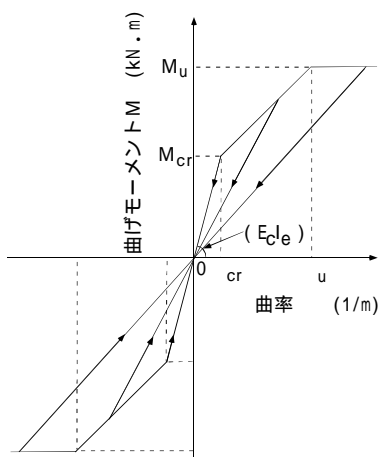


Fig. 1 復元力特性と履歴特性  
Characteristics of Skeleton Curve and Hysteresis Loop

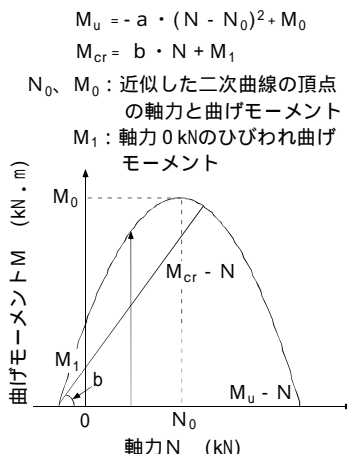


Fig. 2  $M_u, M_{cr} - N$ 関係  
Relationship between Ultimate and Cracking Moment and Axial Force

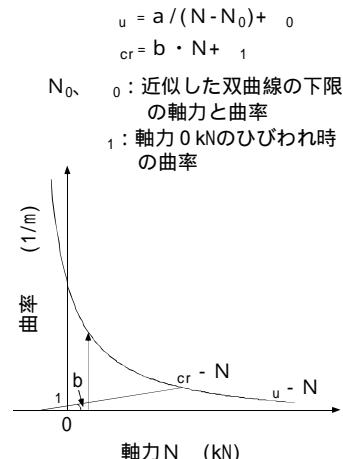


Fig. 3  $u, cr - N$ 関係  
Relationship between Ultimate and Cracking Curvature and Axial Force

準の軸力において、ファイバーモデルによる  $M - N$  関係から得られる  $M_{cr}, M_u, cr, u$  と 3 水準の軸力の関係から設定される。

### 3. 解析対象

解析対象は、1995年1月17日の兵庫県南部地震で杭基礎の被害が生じた屋外機械基礎である<sup>3), 4), 5)</sup>。本基礎の構内位置を Fig. 4 に示す。

当該地点は、昭和40年頃に埋め立てられ、上層よりまさ土からなる埋土層、海成粘土が主体の沖積層、粘性土と砂質土の薄層互層からなる洪積層で構成される。建設当時(昭和49年)は、地盤改良などによる液状化対策は特に実施されていない。

被災後調査では、液状化が生じたと推定される噴砂、地盤沈下 10~70 cm、南西両護岸で水平移動が確認され、機械基礎は、最大沈下量 18 cm、水平移動 36 cm、長辺方向 1/166、短辺方向 1/130 の傾斜が生じた。

機械基礎の諸元を Fig. 5 に示す。機械基礎は、総重量 15651 kN (基礎マット重量 11938 kN, 機器重量 3713 kN) を 22 本の PC 杭 (500 mm A種,  $l = 35$  m) で支持される。

機械基礎の沈下、水平移動の要因を把握するために実施された、被災後の基礎下約 1 m の試掘による基礎杭頭部の目視調査、CCD カメラによる基礎杭深部の内面調査の内、No. 3 杭の被災状況を Fig. 6 に示す。機械基礎周辺の地層構成 (B2) を同図中に示すとともに、構内の代表的な PS 検層結果 (B1) を Fig. 7 に示す。PC 杭は埋土層と沖積粘土層の境界近傍で破損し、地下水位近傍でもひび割れが生じている。

### 4. 解析方法

機械基礎の被害の概要より、PC 杭の被災は、液状化に伴う強震時の地盤変位と護岸の水平移動に伴う側方

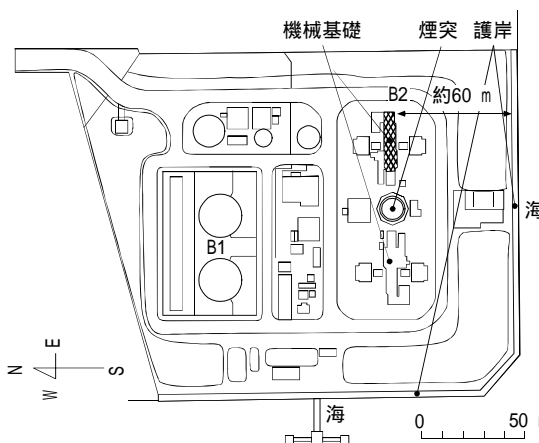


Fig. 4 構内位置  
Location of Damaged Machine Foundation and Adjacent Facilities

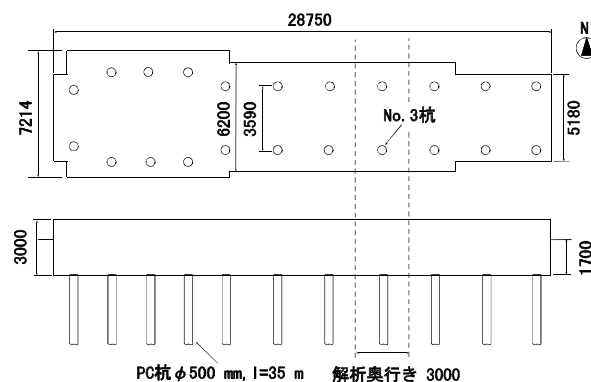


Fig. 5 機械基礎の諸元  
Machine Foundation with PC Pile

流動の複合した影響と推察される。解析では、強震時における杭基礎の応答に着目した機械基礎 - 杭 - 地盤系の 2 次元有効応力解析<sup>6)</sup>を用い、最初に自由地盤の 1 次元モデルの地震応答解析を行い、次にその結果を用いながら 2 次元モデルの解析を行った。

解析モデルを Fig. 8 に示す。機械基礎は、Fig. 5 の破線で示す 2 本の PC 杭を含む基礎短辺 6.2 m、奥行き 3.0 m をモデル化した。奥行き相当の基礎マット重量は 1312 kN、機器重量 672 kN、機器重心 5.54 m を仮定し、基礎マットは集中質量と回転慣性( = 529.2 t・m<sup>2</sup> )、機器は集中質量を有する剛なはり要素とした。

PC 杭は、2. の非線形性を考慮したはり要素とし、長期軸力は、機械基礎の総重量を杭本数で除した 711.5 kN を仮定した。

Fig. 6 の N 値の深度分布、Fig. 7 の PS 検層結果を基に、地下水位 (G.L. -3.85 m) 以浅の B<sub>U</sub> 層を一相の非線形材料、地下水位以深の B<sub>U</sub> 層 ~ D<sub>S</sub> 層を二相の非線形材料とした。液状化対象層 (B 層) の構成モデルのパラメータは、室内試験から得られた液状化強度比 R<sub>20</sub> ( B<sub>U</sub> 層 : 0.21, B<sub>L</sub> 層 : 0.28 ) を基に設定した。

主な地盤定数を Table 1 に示す。ここで、自由地盤の 1 次の卓越周期は 0.7 秒程度である。

入力地震波は、神戸市開発局によるポートアイランド鉛直アレー地震観測記録を用いて分離された G.L. -32 m の基盤入射波 (2E) を用い、解析は継続時間 25 秒とした<sup>7)</sup>。加速度波形を Fig. 9 に、加速度応答スペクトルを Fig. 10 に示す。

解析では、PC 杭の軸力変動を考慮した場合と考慮しない場合 (以下、軸力変動ありとなし)、機器ならびに基礎マットの重量を考慮した場合と考慮しない場合 (以下、基礎重量ありとなし) との比較により、杭の非線形性の影響、地盤変位が杭基礎の応答に及ぼす影響を検討した。

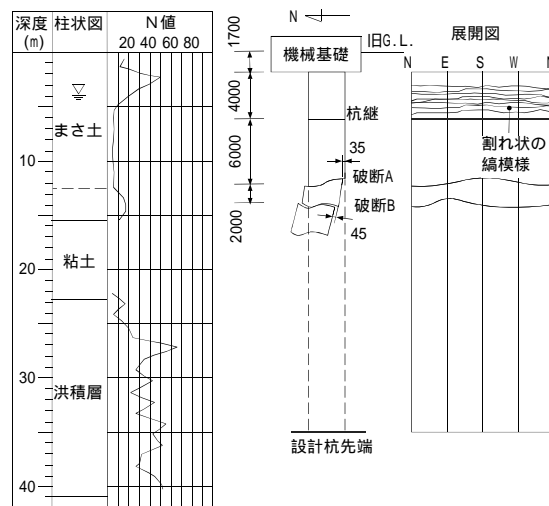


Fig. 6 地盤構成と被災状況  
Soil Profile and Damage of PC Pile

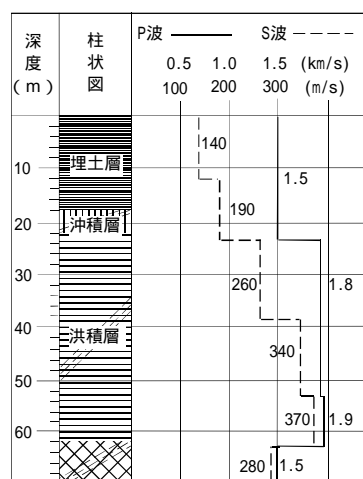


Fig. 7 PS 検層結果  
Soil Profile and PS-Logging

Table 1 地盤定数  
Soil Properties

地層区分	深度 m	$t$ t/m <sup>3</sup>	$V_s$ m/s	$k$ cm/s	$R_{20}$	$\rho$	$\phi$
B <sub>U</sub>	-12.5	1.8	140	$5.0 \times 10^{-3}$	0.21	26.6	40.5
B <sub>L</sub>	-15.5	1.8	190	$1.1 \times 10^{-2}$	0.28	26.6	42.8
A <sub>C</sub>	-23	1.6	190	$2.2 \times 10^{-8}$	-	-	35.0
D <sub>S</sub>	-39	2.0	260	$2.4 \times 10^{-5}$	-	-	38.0

$t$ : 質量密度、 $V_s$ : S波速度、 $k$ : 透水係数、 $R_{20}$ : 液状化強度比、 $\rho$ : 変相角、 $\phi$ : 内部摩擦角

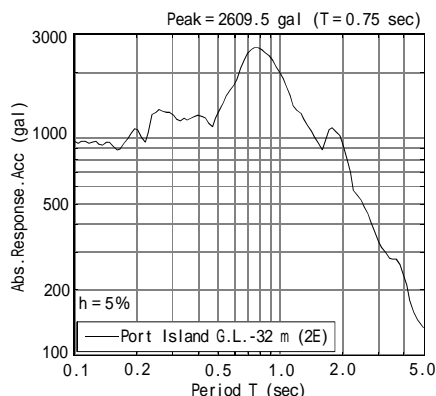


Fig. 10 加速度応答スペクトル  
Response Spectrum of Input Acceleration

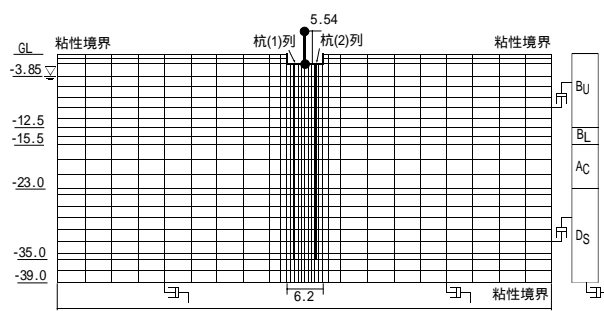


Fig. 8 解析モデル  
Analytical Model

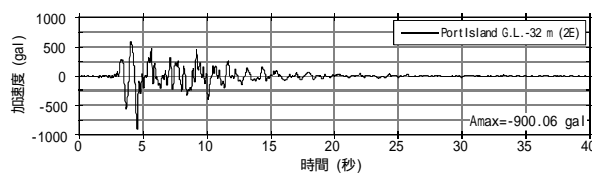


Fig. 9 加速度波形  
Time History of Input Acceleration

Table 2 設計数値  
Design Properties of PC Pile

		PC 杭 500 mm A 種			
		0	980	1960	
軸力	N	kN			
弾性係数	$E_c$	$\text{kN/m}^2$	$3.92 \times 10^7$		
せん断弾性係数	$G_c$	$\text{kN/m}^2$	$1.67 \times 10^7$		
断面2次モーメント	$I_e$	$\text{m}^4$	0.002474		
断面積	$A_e$	$\text{m}^2$	0.1083		
破壊モーメント	$M_u$	$\text{kN}\cdot\text{m}$	172.8	331.5	447.4
ひび割れモーメント	$M_{cr}$	$\text{kN}\cdot\text{m}$	111.5	201.1	290.7
破壊時の曲率	$u$	1/m	$3.52 \times 10^{-2}$	$1.84 \times 10^{-2}$	$1.13 \times 10^{-2}$
ひび割れ時の曲率	$cr$	1/m	$1.15 \times 10^{-3}$	$2.07 \times 10^{-3}$	$3.00 \times 10^{-3}$

Table 3 モデル定数  
Model Parameters

		PC 杭 500 mm A 種	
$M_u - N$ 関係	a	m/kN	$2.282 \times 10^{-5}$
	$N_0$	kN	4124.0
	$M_0$	$\text{kN}\cdot\text{m}$	552.0
$M_{cr} - N$ 関係	b	m	0.0914
	$M_1$	$\text{kN}\cdot\text{m}$	111.5
$u - N$ 関係	a	(1/m)*kN	59.4
	$N_0$	kN	-1434.6
	0	1/m	$-6.194 \times 10^{-3}$
$cr - N$ 関係	b	(1/m)/kN	$9.439 \times 10^{-7}$
	1	1/m	$1.150 \times 10^{-3}$

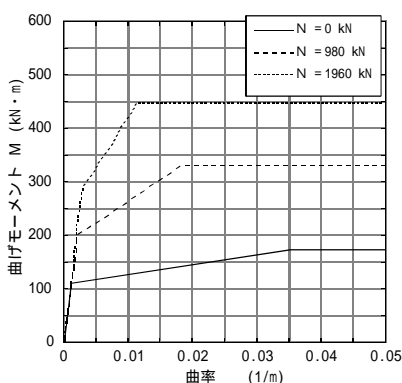


Fig. 11 M - 関係  
Relationship between Moment and Curvature

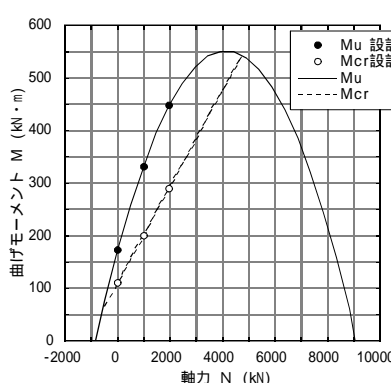


Fig. 12  $M_u, M_{cr} - N$ 関係の比較  
Relationship between Ultimate and Cracking Moment and Axial Force

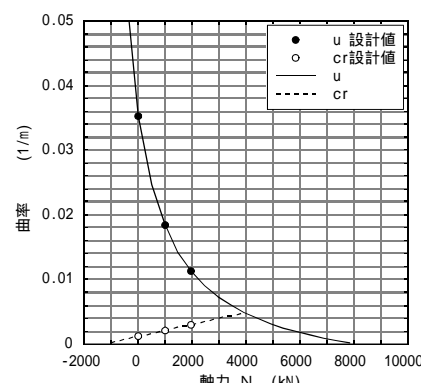


Fig. 13  $u, cr - N$ 関係の比較  
Relationship between Ultimate and Cracking Curvature and Axial Force

## 5. PC 杭のモデル定数

PC 杭 500 mm A 種の設計数値，標準寸法<sup>8)</sup>を用いて，長期軸力からの軸力変動を想定した  $N = 0, 980, 1960$  kN の 3 水準における  $M -$  関係の計算から得られた  $M_{cr}$  と  $cr$ ， $M_u$  と  $u$  を Table 2 に，仮定した  $M -$  関係を Fig. 11 に示す。Table 2 の設計値を満足するように設定した PC 杭のモデル定数を Table 3 に， $M_u$ ， $M_{cr} - N$  関係， $u$ ， $cr - N$  関係と設計値との対応を Fig. 12, 13 に示す。

## 6. 解析結果と考察

### 6.1 杭の非線形性の影響

6.1.1 地盤 自由地盤の地表の加速度，埋土層中央 (G.L.-8.2 m) の過剰間隙水圧比とせん断ひずみの時刻歴を Fig. 14 に示す。埋土層では 10~15 秒で液状化が生じ，埋土層のせん断ひずみは，過剰間隙水圧比が 1.0 まで上昇する以前の 10 秒付近で最大となり，3.5% 程度生じている。

6.1.2 機械基礎 軸力変動ありの機器からの転倒モーメントとせん断力の時刻歴を Fig. 15 に示す。転倒モーメントとせん断力は，地表で最大加速度が生じる 5 秒付近で最大である。

6.1.3 杭 軸力変動ありの杭 (1)，(2) 列の杭頭，地下水水位近傍 (液状化層と非液状化層の上面の境界)，埋土層と沖積粘土層の境界 (液状化層と非液状化層の下面の境界) における杭応力と曲率の時刻歴を Fig. 16~19 に示す。図中には，長期軸力 ( $= 711.5$  kN) におけるひび割れモーメント  $M_{cr}$  ( $= 176.5$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ )，破壊モーメント  $M_u$  ( $= 292.5$   $\text{kN}\cdot\text{m}$ )，ひび割れ時の曲率  $cr$  ( $= 0.00182$  1/m)，破壊時の曲率  $u$  ( $= 0.0215$  1/m) を並記している。

杭頭の杭応力，曲率は 5 秒付近，地下水水位近傍では 5 秒と 10 秒付近，層境界では，Fig. 14 の埋土層のせん断ひずみの時刻歴に対応して，液状化が生じる前の 10 秒付近で最大である。したがって，杭頭では基礎慣性力の影響，層境界では地盤変位の影響が大きい，地下水水位近傍では，基礎慣性力の影響と同様に地盤変位の影響も大きいと考えられる。基礎慣性力の影響が大きい杭頭，地下水水位近傍では，最大軸力が生じる 5 秒付近で，軸力変動に応じた PC 杭の復元力特性，履歴特性の考慮により，低軸力時の杭 (1) 列と高軸力時の杭 (2) 列の杭応力，曲率に明瞭な差が生じている。

軸力変動ありの杭 (2) 列の杭頭，地下水水位近傍，層境界における  $M - N$  関係， $M -$  関係を Fig. 20 に示す。図中には，Fig. 2, 3 に示す  $M_u$ ， $M_{cr} - N$  関係， $u$ ， $cr - N$  関係から得られる任意の軸力における  $u$ ，

$c_r$ を並記している<sup>9)</sup>。

杭(2)列の杭応力と曲率は、高軸力時において杭頭で  $M_{cr}$  -  $N$  関係,  $c_r$ を超過する程度であるが、地下水位近傍、層境界では  $M_u$  -  $N$  関係,  $u$  近傍まで生じ、杭頭と比較して損傷程度が大きくなっている。

地下水位近傍の  $M$  -  $N$  関係では、低軸力時と高軸力時の変形特性の違いが明瞭にみられ、低軸力時では曲げ耐力が小さく履歴ループが大きいが、高軸力時では曲げ耐力が大きく履歴ループが小さくなっている。

軸力変動あり、なしの杭(1), (2)列の杭応力と曲率の深度分布を Fig. 21, 22 に示す。図中には、長期軸

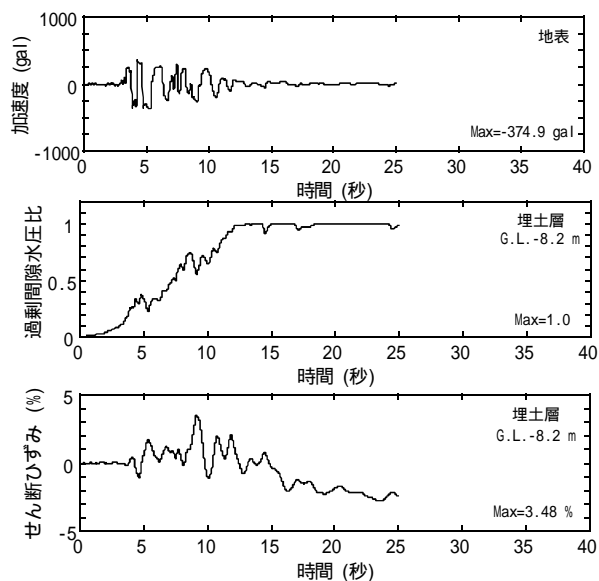


Fig. 14 応答波形 (自由地盤)  
Time History on Free Field of Ground

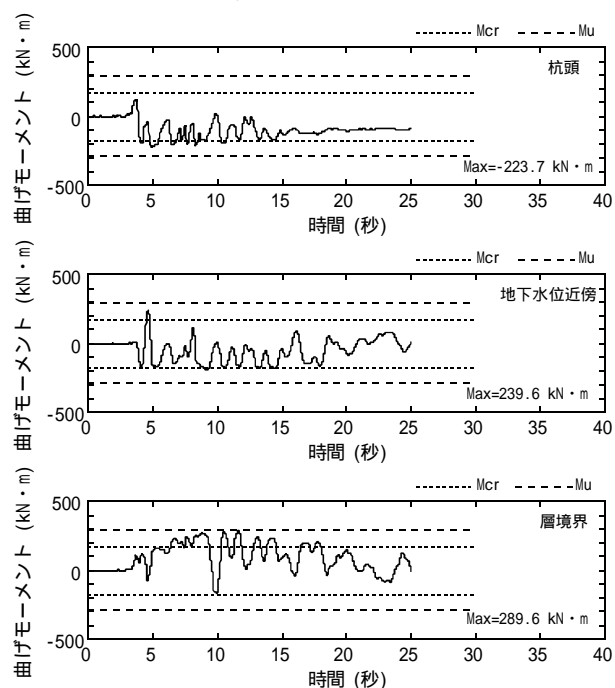


Fig. 16 応答波形 (軸力変動あり, 杭(1)列)  
Time History of Moment on Pile (1)

力における  $M_{cr}$  と  $M_u$ ,  $c_r$  と  $u$  を並記している。

軸力変動なしの杭応力と曲率は、杭(1), (2)列で同様である。一方で軸力変動ありの杭応力は、低軸力側となる杭(1)列、高軸力側となる杭(2)列の曲げ耐力ならびに変形特性の違いにより、軸力変動なしと比較して杭(1)列で小さく杭(2)列で大きくなり、曲率も杭(1), (2)列で異なっている。したがって、強震時の杭の耐震安全性を評価する場合は、軸力の変動による杭の変形性能を適切に考慮する必要があると考えられる。

軸力変動ありの Fig. 16~22 の杭応力と曲率の応答より、Fig. 6 の PC 杭の被災は、地震動の 5 秒付近で杭頭、地下水位近傍、層境界で損傷が生じ、過剰間隙水圧の上昇に伴い地盤変位が増加する地震動の 10 秒付近で、地下水位近傍、層境界の損傷がさらに進展したと推察される。

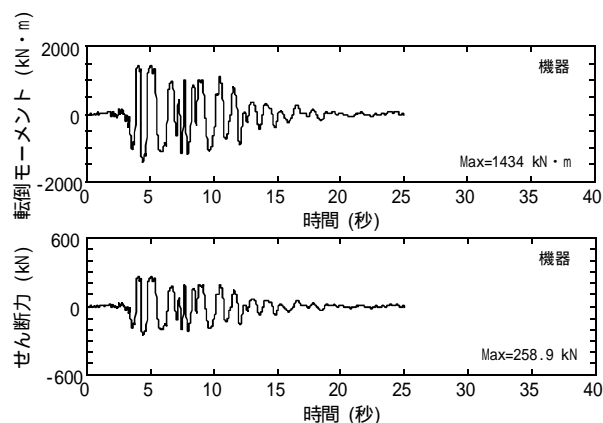


Fig. 15 応答波形 (軸力変動あり)  
Time History on Machine Foundation

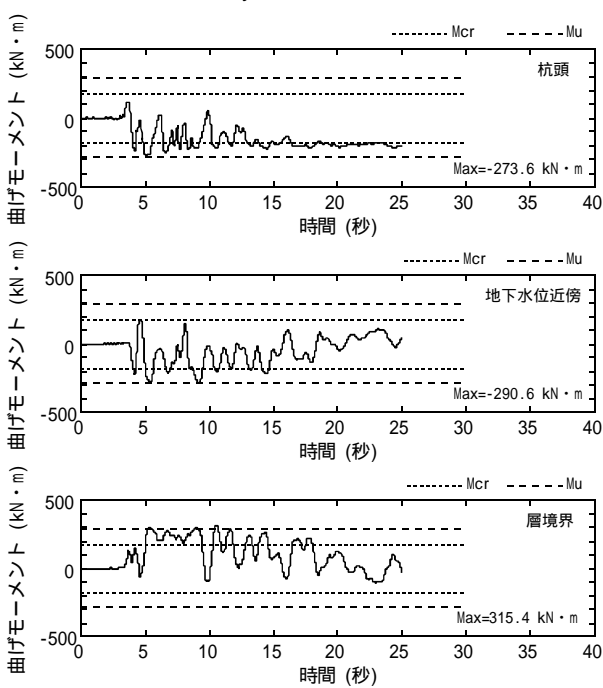


Fig. 17 応答波形 (軸力変動あり, 杭(2)列)  
Time History of Moment on Pile (2)

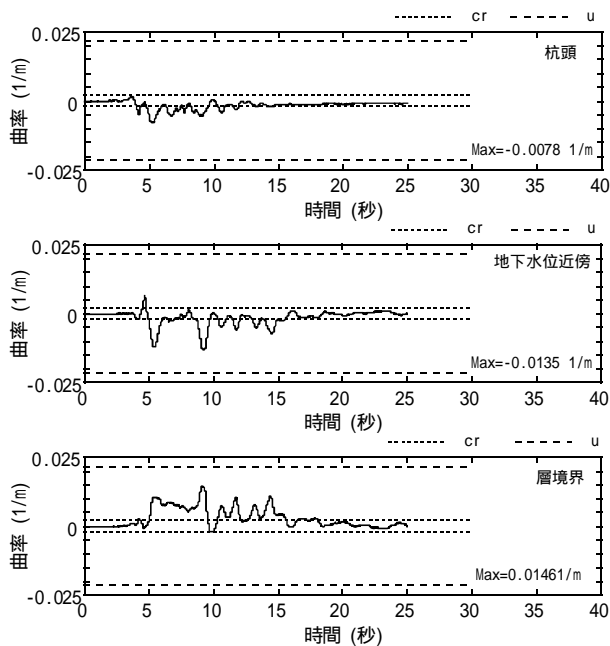


Fig. 18 応答波形（軸力変動あり，杭(1)列）  
Time History of Curvature on Pile (1)

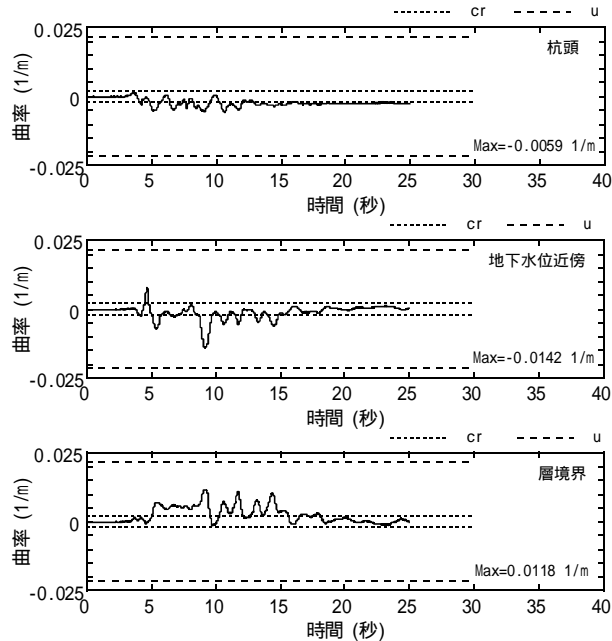


Fig. 19 応答波形（軸力変動あり，杭(2)列）  
Time History of Curvature on Pile (2)

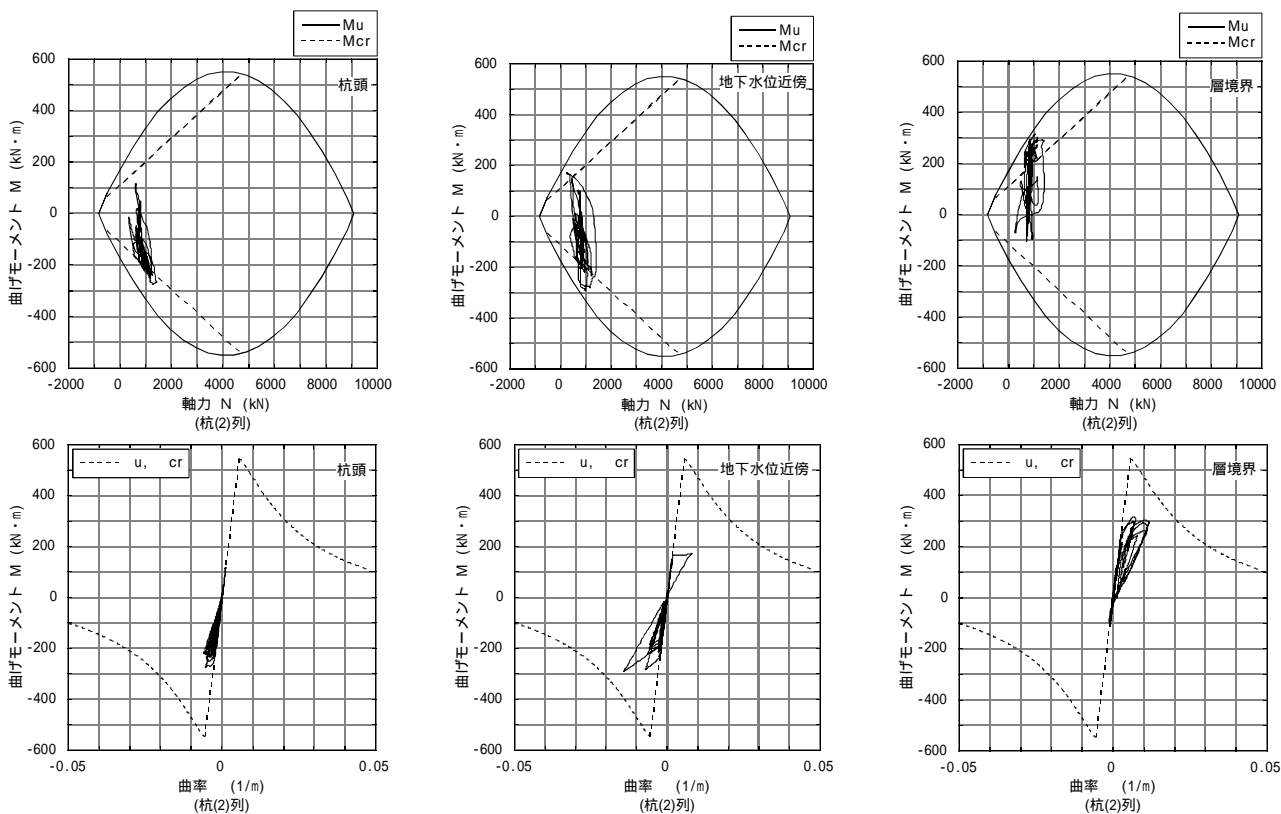


Fig. 20 M - N関係，M - 関係（軸力変動あり，杭(2)列）  
Relationship between Moment and Axial Force and Relationship between Moment and Curvature on Pile (2)

## 6.2 地盤変位の影響

6.2.1 地盤 基礎重量あり，なしの基礎中心線の加速度，変位，過剰間隙水圧比，せん断ひずみの深度分布を Fig. 23, 24 に示す。埋土層では，地下水位直下の

層を除いてほぼ全層で液状化が生じ，せん断ひずみは3%程度生じている。基礎重量ありの加速度，変位，せん断ひずみは，基礎重量なしと比較して，埋土層中央以浅の深度で大きくなっている。

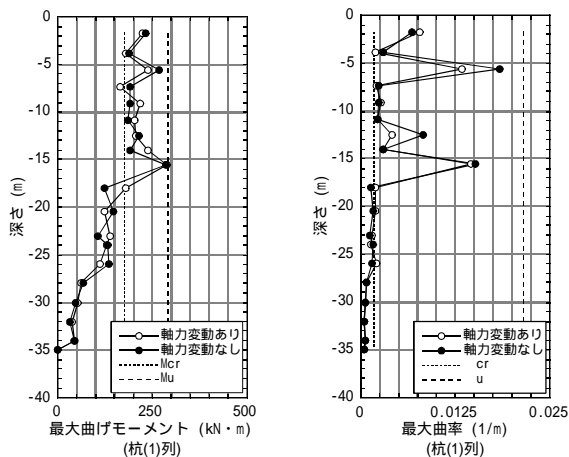


Fig. 21 杭応力と曲率の深度分布 (杭(1)列)  
Pile Stress and Curvature on Pile (1)

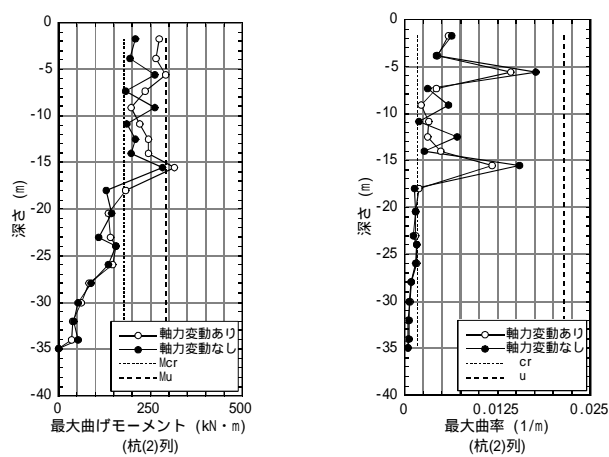


Fig. 22 杭応力と曲率の深度分布 (杭(2)列)  
Pile Stress and Curvature on Pile (2)

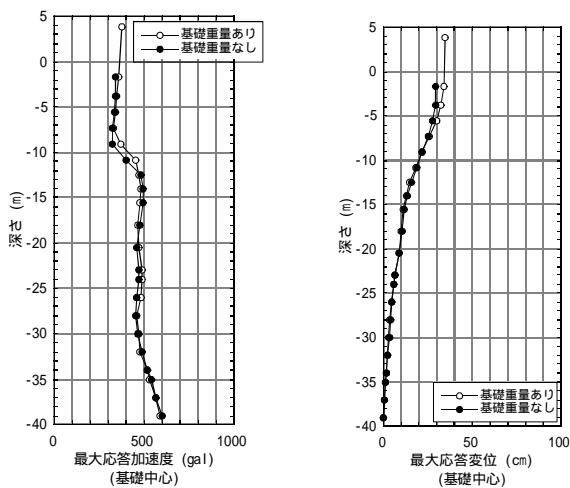


Fig. 23 加速度, 変位の深度分布  
Acceleration and Displacement

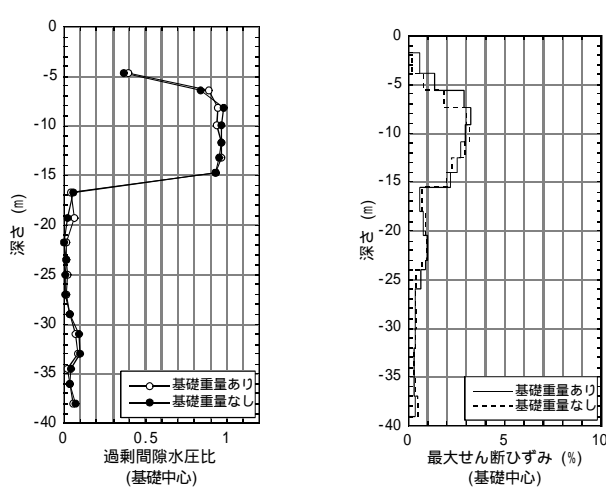


Fig. 24 過剰間隙水圧比, せん断ひずみの深度分布  
Excess Pore-Water Pressure Ratio and Shear Strain

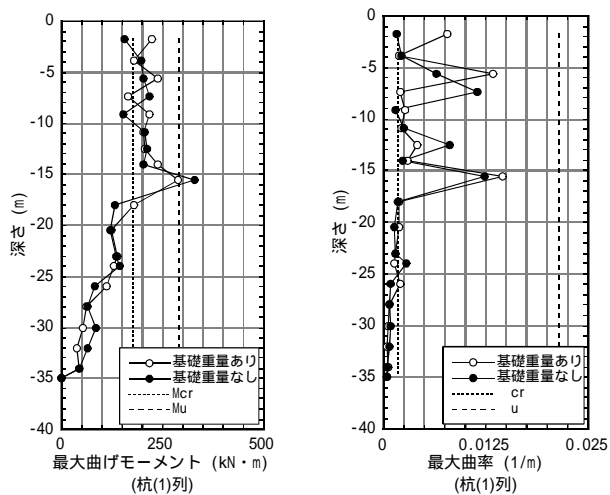


Fig. 25 杭応力と曲率の深度分布 (杭(1)列)  
Pile Stress and Curvature on Pile (1)

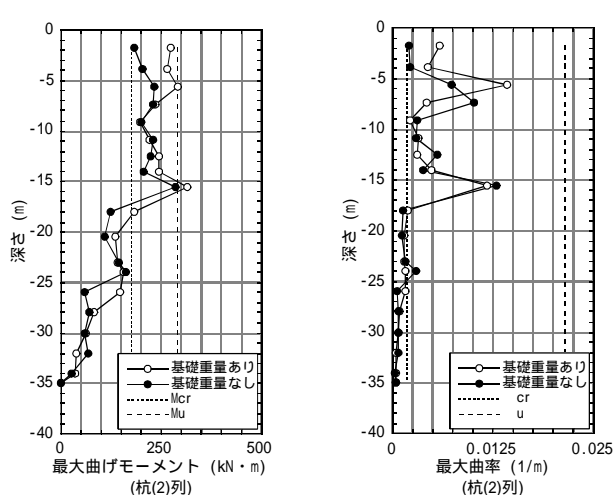


Fig. 26 杭応力と曲率の深度分布 (杭(2)列)  
Pile Stress and Curvature on Pile (2)

6.2.2 杭 基礎重量あり, なしの杭(1), (2)列の杭応力と曲率の深度分布を Fig. 25, 26 に示す。図中には, 長期軸力における  $M_{cr}$  と  $M_u$ ,  $c_r$  と  $u$  を並記している。

基礎重量なしの杭応力と曲率は, 杭(1), (2)列で同様であり, 基礎重量ありと同様に, Fig. 24 の液状化層と非液状化層の境界, せん断ひずみが急変する深度の

地下水位近傍，層境界で大きくなる。

基礎重量ありの杭応力と曲率は，基礎重量なしと比較して杭頭で1.5倍程度，地下水位近傍で1.2倍程度，層境界を含む埋土層中央以深でほぼ同様であることから，基礎慣性力の影響は概ね埋土層中央以浅で生じ，地下水位近傍，層境界では，基礎慣性力より地盤変位の影響が大きくなっている。

したがって，液状化地盤の杭の耐震安全性を検討する場合には，地下水位近傍，層境界の杭応答に及ぼす地盤変位の影響を適切に考慮する必要があると考えられる。

## 7. まとめ

軸力変動による杭の非線形性の考慮，および液状化地盤における杭基礎の地震応答解析より得られた知見は，以下の通りである。

- 1) 液状化地盤の杭基礎は，兵庫県南部地震で得られた地震動において，地震動の初期に杭頭，地下水位近傍，層境界で損傷し，その後，過剰間隙水圧の上昇による軟化に伴う地盤変位の影響で，地下水位近傍，層境界の損傷が進展する。
- 2) 液状化地盤の杭応答は，杭頭，地下水位近傍で基礎慣性力と地盤変位による影響が大きい，層境界では地盤変位による影響が顕著である。
- 3) 液状化地盤の杭の損傷は，杭頭と比較して，地下水位近傍，層境界で大きくなる場合がある。
- 4) 基礎からの転倒モーメントによる軸力変動が大きい杭基礎の設計では，軸力変動により杭の曲げ耐力ならびに履歴特性が異なることから，その変形特性を適切に評価し考慮する必要がある。

## 謝辞

本検討を実施するにあたり，解析対象に関する詳細な資料を提供いただき，関西電力（株）関係各位に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会（兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会）：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告集，pp.1-400，（1996）
- 2) 岩本勲，浅野真一郎，山田淳，中野富雄：正負交番載荷を受ける高強度プレレストレストコンクリート杭の変形性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.635-638，（1998）
- 3) 古和田明，松村孝夫，山田淳：大型機械基礎における杭の被害とその対応，基礎工，Vol.24，No.11，pp.120-125，（1996）
- 4) 山田淳，古和田明，松村孝夫，前田昇，田中耕太郎：兵庫県南部地震における杭基礎の被害とその解析的検討，日本建築学会近畿支部研究報告集，第36号，pp.81-84，（1996）
- 5) 松村孝夫，森田一宏，山田淳，前田昇，後藤洋三，伊藤浩二：兵庫県南部地震で被災した杭基礎構造物の解析的検討（その1）～（その2），日本建築学会大会学術講演概要集，pp.635-638，（1996）
- 6) 伊藤浩二：動的有効応力解析プログラム「EFFECT」（その1）-基礎理論と地盤構成モデル-，大林組技術研究所報，No.51，pp.7-14，（1995）
- 7) 阪神淡路大震災・地盤調査研究会：平成9年度報告書，pp.1075-1080，（1998）
- 8) 近畿コンクリート工業株式会社：CONCRETE PILES 設計資料（土木） N～M Interaction Curves ONA パイル NCS-PC パイル Hi-ONA パイル SPN-ONN パイル。
- 9) 酒向裕司，宮本裕司，池田孝：杭の軸力変動を考慮した杭基礎の地震応答，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.375-376，（1998）