

# (93) 液状化に起因する地盤の側方移動を受けるPHC杭の応答

大同コンクリート工業(株) 正員 宮坂享明

山口大学工学部 正員 三浦房紀

山口大学工学部 正員 坂尾和男

## 1. まえがき

新潟地震の際、液状化に起因する表層地盤の側方移動によって多くのRC杭が被害を受けていることが明らかとなった。これに伴って、杭の破壊メカニズムを解明すべくいくつかの解析が行われているが、これらはいずれもその目的からRC杭の解析に限られている<sup>1)~3)</sup>。しかしながら、現在基礎に用いられている杭は90%以上がPHC杭であり、これらのPHC杭はRC杭に比べて曲げモーメントに対して相当高い耐力を有している。そこで本研究は、これらPHC杭が地盤の側方移動を受ける時どのような挙動を示し、RC杭の応答とどのように異なるかを調べたものである。

## 2. 解析方法

数値解析は、コーネル大学で開発され、筆者の一人が改良を加えた埋設構造物の非線形変位応答解析用プログラム「B-STRUCT」を用いた。このプログラムは、有限要素法に基づいており、線状構造物の幾何学的非線形性、材料非線形および地盤の材料非線形性を考慮に入れることができる。

本研究では、杭は幾何学的非線形性を有するビーム要素と非線形曲げモーメント-たわみ特性を有する回転ばね-スライダー要素を交互に直列に配列することでモデル化し、地盤はバイリニアのばね-スライダー要素でモデル化した。この様子を図-1に示す。またこの図に示すように、地盤の変位分布は表層の非液化化層は一定、その下の液化化層は直線的に変化するという台形分布を仮定している。

非線形曲げモーメント-たわみ関係は図-2に示すようにトライリニアを仮定した。ここに、 $M_c$ 、 $M_u$ 、 $d_c$ 、 $d_u$ 、はそれぞれクラッキングモーメント、終局モーメントであり、 $d_c$ 、 $d_u$ 、はそれぞれその時のたわみである。この $d_u$ のうち図中の $d_c$ はビーム要素のたわみで、残り $d_p$ が回転ばねの第2勾配で受け持たれる。すなわち、回転ばね-スライダー要素は図-3

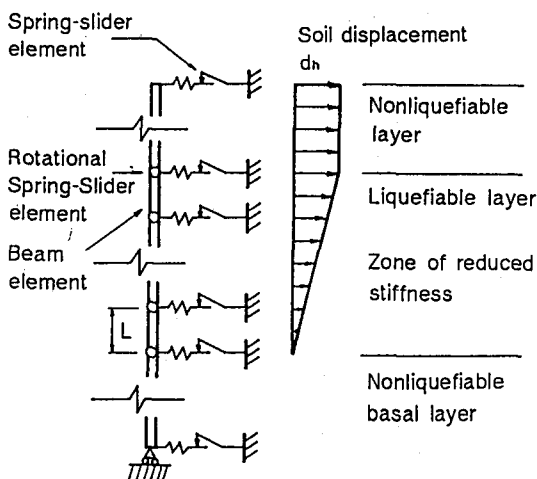


図-1 杭-地盤系のモデル図

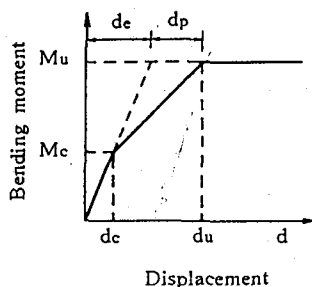


図-2 杭の非線形モデル

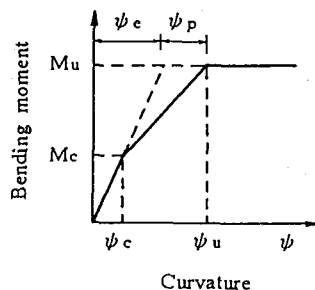


図-3 回転ばね-スライダーモデル

のような特性を有する。この第2勾配を表すばね定数kwは次式で与えられる<sup>4)</sup>。

$$k_w = \frac{n+1}{2} \frac{l}{du-de} M_u \quad (1)$$

ここに、n は杭1本をモデル化するのに用いたビーム要素の数、l は杭の長さ、du、deはそれぞれ次式で与えられる。

$$du = \frac{1}{\psi_r} - \sqrt{\frac{1}{\psi_r^2} - l^2} \quad de = \frac{1}{\psi_r} - \sqrt{\frac{1}{\psi_r^2} - l^2} \quad (2)$$

ここに $\psi_u$ 、 $\psi_c$ は終局状態及びクラッキングモーメント状態の杭の曲率であり、実験あるいは後述する曲率—軸力曲線( $\psi$ —N曲線)から求めることができる。次に地盤はバイリニアを仮定している。降伏力 $F_y$ はハンセンによって与えられた次式を用い<sup>5)</sup>、ばね係数 $k_n$ は次式を用いて求めた<sup>6)</sup>。

$$F_y = \sigma_z' N q D L \quad k_n = n_n z L \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_z'$ は、その節点における有効応力、 $N_q$ はハンセンによって提案された無次元係数(内部摩擦角の関数)、D、Lはそれぞれ杭径とその節点の受け持つ杭の長さである。また、 $n_n$ はテルツァギーによって提案されている地盤反力係数であり、zはその点の地表面からの深さである。

### 3. 解析モデル

本研究では、杭径35、45、60cmのRC杭とPHC杭、計6通りの杭に対して解析を行った。杭の諸元を表-1にまとめて示す。表中の $M_u$ 、 $M_c$ 、 $\psi_u$ 、 $\psi_c$ は以下のようにして求めた。図-4(a)は径35cmのRC杭の終局状態におけるM—N、 $\psi$ —N曲線であり、(b)はクラッキングモーメント状態におけるそれらである。これらの曲線は、与えられた杭の断面、鉄筋あるいはPC鋼の径と本数、及びこれらの応力—ひずみ曲線から計算することができる。また、杭の長さ $l = 11\text{m}$ 、ビーム要素の数 $n = 21$ を用いている。地盤条件は、新潟地震の際RC杭の破壊が生じたNビルディングのサイトを参考にして決めた。用いた $n_n$ の値を表-2に示す。地盤の側方変位は先述のように台形分布を仮定し、地表面で最大1mとなるまで解析を行った。なお、液状化層の地盤ばねは1/50に低減したものをを用いた。

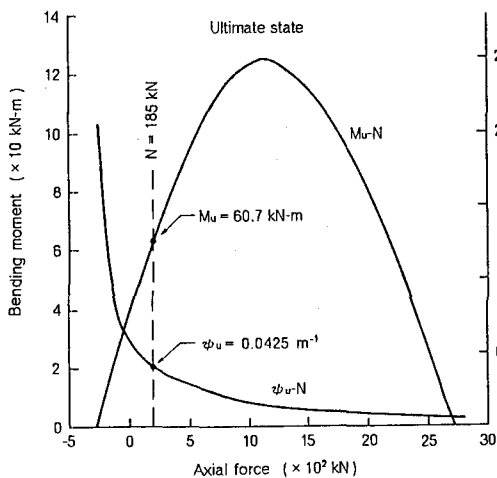


図-4 (a) 終局状態

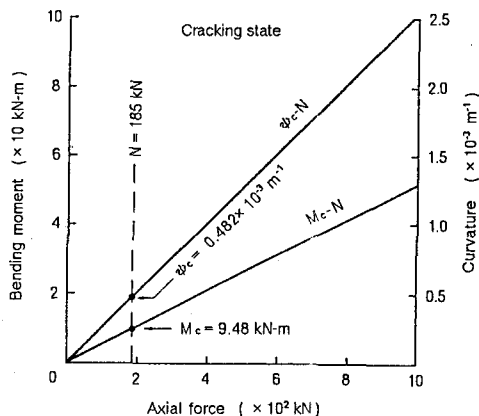


図-4 (b) クラッキング状態

表-1 杭の諸定数

杭径 (m)	R C PHC	$M_c$ (t·m)	$M_u$ (t·m)	$k_w$ (t·m/rad)
0.35	R C	0.967	6.19	278
	PHC	4.05	6.98	220
0.45	R C	3.26	25.3	755
	PHC	9.63	18.7	866
0.60	R C	8.55	44.0	1980
	PHC	22.6	40.5	2510

表-2 地盤反力係数 $\gamma_h$

地層	$\gamma_h$ (t/m <sup>3</sup> )
地表面非液状化層	250
液状化層	2.8
基盤非液状化層	1120

4. 解析結果

図-5、6、7に杭径35cm、45cm、60cmのHPC杭の応答を示す。図(a)は杭の変位分布の変化の様子、(b)は液状化層とその上下の

非液状化層との境界、すなわち深さ3.0m、8.5mにおける杭の曲げモーメントの変化の様子を示したものである。図(a)を比較すると、いずれの場合にも下の境界では折れ曲がっているのに対し、上の境界では杭径が大きくなるにしたがって曲がり小さくなっている。図(b)中のUは上の境界を、Lは下の境界を表している。これらより、杭径35cmの場合には上下両境界とも終局モーメントに達しており、塑性ヒンジが生じていること、45cmの場合には下側境界では塑性ヒンジが生じており、上側境界ではクラックが発生していること、60cmの場合には下側境界では塑性ヒンジが生じているが上側境界ではクラックも生じていないことが分かる。このように地盤の側方流動に対しては、杭径は非常に大事なファクターとなる。

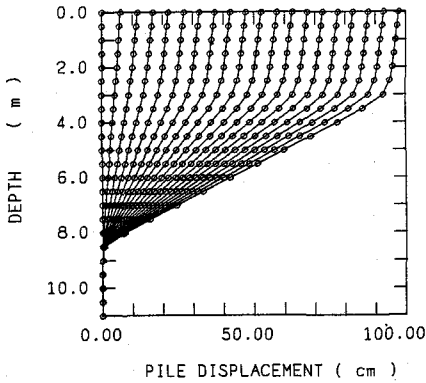


図-5 (a) 変位分布-35cm PHC杭

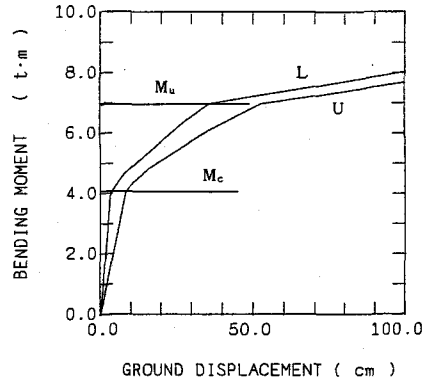


図-5 (b) モーメントの変化-35cm PHC杭

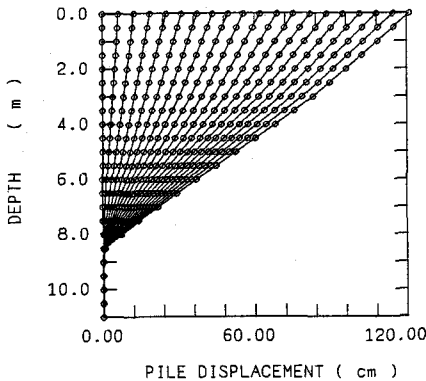


図-6 (a) 変位分布-45cm PHC杭

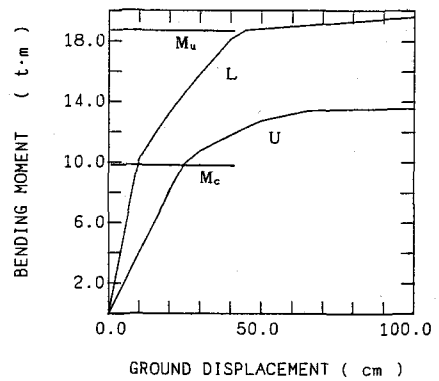


図-6 (b) モーメントの変化-45cm PHC杭

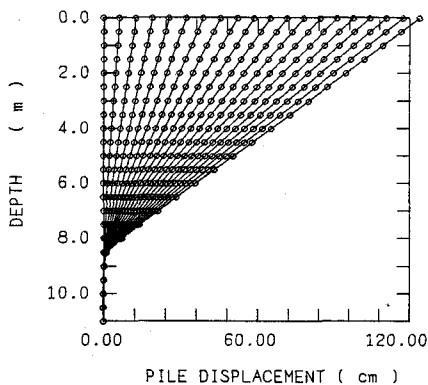


図-7 (a) 変位分布-60cm PHC杭

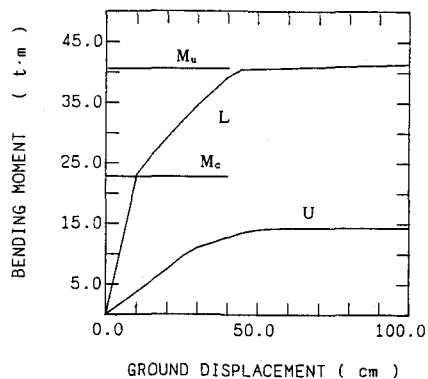


図-7 (b) モーメントの変化-60cm PHC杭

図-8は径60cmのRC杭の上下境界における曲げモーメントと地盤変位の関係を示したものである。これに対応する図-7 (b)と比較すると、RC杭のほうが極めて小さい地盤変位でクラックが生じることが分かる。これはPHC杭の方が $M_c$ が大きいことによる。一方、塑性ヒンジはPHC杭のほうが小さい地盤変位で生じることがわかる。これはPHC杭の方が $M_u$ が小さいことによるためであるが、これは同じ軸力に対してたまたまPHCの $M_u$ が小さかったからであり、適切な軸力を与えればPHC杭の方が2倍近く $M_u$ が大きくなり、この関係は逆転する。この点に関する検討は別の機会に譲りたい。

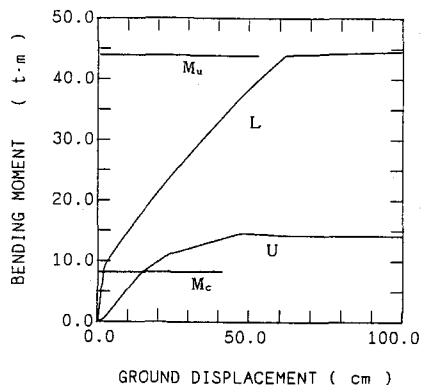


図-8 モーメントの変化-60cm RC杭

#### 参考文献

- 1) M.Hamada, S.Yasuda, R.Isoyama and K.Emoto: Study on Liquefaction Induced Permanent Ground Displacements, Assoc. for The Development of Earthquake Prediction, pp.51-57, 1986
- 2) H.E.Stewart, F.Miura and T.D.O'Rourke: Pile Damage to Large Ground Displacement, Proc. of 1st Japan-U.S. Workshop on Liquefaction, Large Gound Deformation and Their Effects on Life-Line facilities, pp.173-182, 1988
- 3) F.Miura, H.E.Stewart and T.D.O'Rourke: Lateral Spreading Effects on Pile Foundation, Proc. of 2nd U.S.-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines, pp.295-307, 1989
- 4) F.Miura and TD.O'Rourke: Nonlinear Analyses of Piles Subjected to Liquefaction Induced Large Ground Deformation, Proc. of 3rd Japan-U.S. Workshop on Earthquake Resistant Design of Life-line Facilities and Counermeasures for Soil Liquefaction, (in Printing)
- 5) J.B.Hansen: The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces, Bull. 12, Danish, Geotech. Institute, Copenhagen, pp.1-9, 1961
- 6) K.Terzaghi, Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction, Geotechnique, Vol.5, No.4, pp. 297-326, 1955