

清水建設(株) (正)田蔵 隆 (正)中松 新 (正)清水 勝美 (正)若原 敏裕

1. まえがき 田治見は弾性波動論に基づき、上部工を剛体と仮定した単杭の地震時応答解を導いている。本報は上部工が振動系である場合の杭基礎構造物の地震応答解析手法ならびに田治見理論の群杭基礎に対する応用について示したものである。

2. 上部工の振動特性を考慮した杭基礎構造物の地震応答解析手法 上部工を剛体と仮定した杭基礎構造物の地震時応答解は次式のように導かれている¹⁾。 $u_p(z, \omega) = V \cdot F^*(z, \omega) + u_g \cdot G^*(z, \omega) \cdots (1)$ ここに、 u_p は基盤に対する杭の相対水平変位、 z は杭先端から上方に定めた座標変数、 u_g は基盤水平変位、 ω は加振円振動数、 V は杭頭に作用する水平外力であり、上部工が質量 m の剛体である場合 $V = -m\{\ddot{u}_p(H, \omega) + \ddot{u}_g\}$ となる。また、 $F^*(z, \omega)$ は杭頭水平荷重に対する杭・地盤系の複素剛性の逆数、 $G^*(z, \omega)$ は基盤変位 u_g に対する地盤のせん断振動による杭変位の増幅係数である。なお、 $F^*(z, \omega)$ および $G^*(z, \omega)$ の式の詳細については文献(1)に譲る。いま、図1に示すように上部工を1質点ばね系でモデル化した場合について考えることにする。この場合、杭頭に作用する水平外力は、 $V = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) - m_0(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) + P_e \cdots (2)$ と書ける。ここに、 m_1 、 u_1 および m_0 、 u_0 は上部工およびフーチングの質量ならびに水平変位であり、 P_e はフーチングに作用する土圧である。(2)式を(1)式に代入し、さらに、 $u_0 = u_p(H, \omega) = V \cdot F^*(H, \omega) + u_g \cdot G^*(H, \omega) \cdots (3)$ とし、(3)式と上部工の系に関する振動方程式、 $m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) \cdots (4)$ を連立させて解くことにより、 u_1 および u_0 が基盤変位 u_g の関数として得られる^{2) 3)}。また、杭の曲げひずみは(1)式を z に関して2回微分することによって得ることができる。

3. 群杭基礎に対する応用 (3)式において V および u_g は杭本数によって変化しないことから、前節の議論の群杭基礎に対する応用は $F^*(H, \omega)$ および $G^*(H, \omega)$ を群杭基礎として定義することにあると言える。各杭の杭頭が剛なフーチングに結合されていれば、すべての杭頭変位は同じになる。このことから、杭頭水平荷重に対する群杭基礎の杭頭複素剛性 $1/F^*a(H, \omega)$ は各杭を並列ばねと見なすことにより、次式のように定義できる。 $F^*a(H, \omega) = F^*(H, \omega) / (N \cdot e^{i\phi_N(\omega)}) \cdots (5)$ ここに、 $1/F^*(H, \omega)$ は杭頭水平荷重に対する単杭の杭頭複素剛性であり、 $e^{i\phi_N(\omega)}$ は杭頭水平定常加振による群杭効率である。また、 N は杭本数である。一方、群杭基礎としての $G^*a(H, \omega)$ は基盤変位 u_g に対して、地盤振動によって生じる杭頭変位が単杭の場合に比較してどのようになるかで定義されるものである。いま、この差異が係数 $e^{i\phi_N(\omega)}$ で表されるものとして、これを次式のように定義した。 $G^*a(H, \omega) = e^{i\phi_N(\omega)} \cdot G^*(H, \omega) \cdots (6)$ ここに、 $G^*(H, \omega)$ は単杭の場合の地盤振動による杭頭変位の増幅係数である。 $e^{i\phi_N(\omega)}$ はこの場合地盤振動による群杭効率といった見方ができる。

4. 観測記録に基づく群杭基礎構造物の地震応答解析 軟弱地盤に建設された道路橋において、基礎杭の地震時挙動特性の解明を目的として地震観測を実施している⁴⁾。図2は地震計配置について示したものである。本節では上記手法に基づき、地震観測の対象とした橋脚の基礎杭に対する地震応答解析結果について示す。表1は解析定数について示したものである。ここでは $e^{i\phi_N(\omega)}$ に関しては小坪・高西らの理論⁵⁾ によって求めた静的杭頭水平荷重に対する群杭効率 $e^{i\phi_N} = 0.125$ を用い、 $e^{i\phi_N(\omega)}$ に関してもその周波数依存性を無視し、弾性論に基づいて解析的⁶⁾ に求めた値に斜杭の効果を考慮し、 $e^{i\phi_N} = 0.750$ とした。図3は解析結果と観測記録に基づく基盤に対する橋脚フーチング部の平均周波数伝達関数と比較したものである。図4は単位の基盤入力変位に対する計測杭の杭頭部および杭先端部の曲げひずみの平均周波数応答関数について検討したものである。いずれも観測結果と解析結果はかなり良い対応関係にあることがわかる。なお、計測杭の曲げひずみの検討においては、静的杭頭水平荷重ならびに地盤変形による荷重分担率を考慮している。図5は杭の曲げひずみの発生要因について検討したものである。図中の破線は(1)式の右辺第2項に相当する地盤振動による曲げひずみであり、実線は杭の全曲げひずみを表している。これより、杭頭部では上部工の慣性力が曲げひずみの発生に大きな影響を与えているが、杭先端部では地盤振動に大きく支配されていることがわかる。図6は地盤地表部で最大加速度 113.6 cm/sec^2 を与えた昭和58年8月8日の神奈川・山梨県境地震 ($M = 6.0$ 、 $\Delta = 42 \text{ km}$ 、 $D = 20 \text{ km}$) の記録に基づく地震応答解析結果について示したもので、杭頭部および杭先端部での曲げひずみ記録について比較したものである。解析結果は

観測記録を十分模擬したものになっている。

5. あとがき 基礎杭の曲げひずみが地盤振動に大きく支配されているという検討結果は重要であり、このことに対する配慮が今後の杭基礎の耐震設計において必要であると言えよう。なお、地震観測を行う上で藤沢市建設局西野康雄氏はじめ多くの方々にご多大な便宜を計った頂いた。また、本研究において、九州大学小坪清真教授、鳥野清助教授ならびに九州工業大学高西照彦助教授から貴重なご意見を賜った。記して深謝の意を表すものである。

表 1 解析定数

地 盤	杭	上 部 工
$\mu_g = 443.15 \text{ tf/m}^2$	$a = 0.30 \text{ m}$	$m_1 = 223.47 \text{ tf s}^2/\text{m}$
$\nu_g = 0.493$	$\ell = 20.00 \text{ m}$	$c_1 = 112.33 \text{ tf s/m}$
$w_g = 1.33 \text{ tf/m}^3$	$I_p = 7.2974 \times 10^{-4} \text{ m}^4$	$k_1 = 35288.37 \text{ tf/m}$
$T_g = 1.40 \text{ s}$	$w_p = 0.4639 \text{ tf/m}^3$	$m_g = 81.53 \text{ tf s}^2/\text{m}$
$h_g = 0.10$		$b = 6.77 \text{ m}$
$H = 20.00 \text{ m}$		$L = 2.00 \text{ m}$

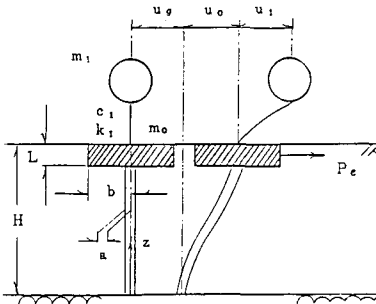


図 1 上部工の振動特性を考慮した解析モデル

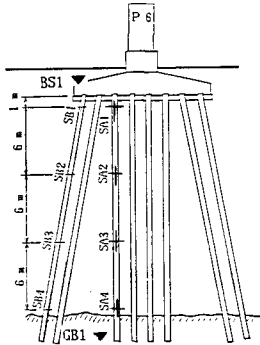


図 2 地震計およびひずみ計の配置図

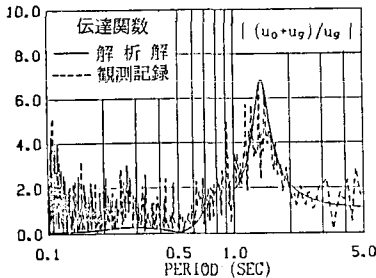


図 3 フーチング部の周波数伝達関数

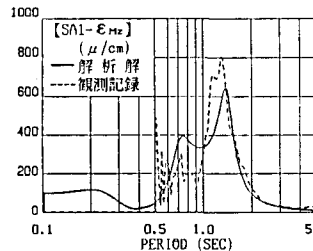


図 4 曲げひずみ周波数応答関数

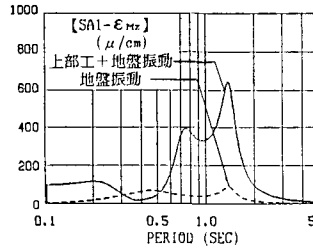


図 5 上部工と地盤の振動による曲げひずみの分離

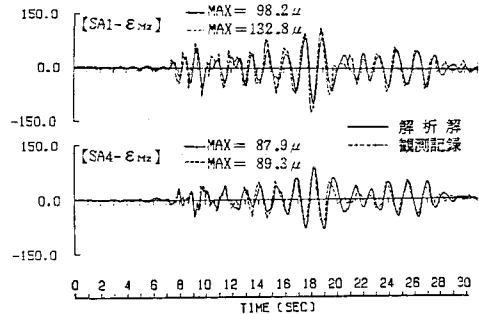


図 6 地震応答解析による曲げひずみ波形

6. 参考文献

- (1) 田治見宏：深い基礎を有する構造物の地震時応答について、第2回日本地震工学シンポジウム、1966年10月。
- (2) 田蔵隆、中松新、清水勝美、若原敏裕：上部工の振動特性を考慮した杭基礎構造物の地震応答解析手法、第12回土木学会関東支部技術研究発表会、1985年3月。
- (3) 田蔵隆、中松新、清水勝美、若原敏裕：観測記録に基づく道路橋基礎杭の地震応答解析、第20回土質工学研究発表会、1985年6月。
- (4) Ohira, A., Iazoh, T., Dewa, K., Shimizu, K. and Shimada, M.: Observations of Earthquake Response Behaviors of Foundation Piles for Road Bridge, Proc. of the 8th WCEE, Vol. III, July, 1984.
- (5) 小坪清真、高西照彦、鳥野清、園田敏矢：多柱基礎の荷重分担率と群杭効果、土木学会論文報告集、第312号、1981年8月。
- (6) 若原敏裕、大平彰、小坪清真、高西照彦、鳥野清：地盤変形による群杭効率の解析的研究、九州大学工学集報、投稿中。