

1. まえがき 本報は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について示したものであり、さらに本手法に基づき、地震観測を実施している¹⁾道路橋基礎杭の地震時挙動を支配する要因に関して検討を行った。

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 田治見は弾性波動論に基づき、上部工を剛体と仮定した杭基礎構造物の地震時応答解を次式のように導いている²⁾。

$$u_p(z, \omega) = V \cdot F^*(z, \omega) + u_g \cdot G^*(z, \omega) \quad \dots\dots\dots (1)$$

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、 ω は加振円振動数、 u_g は基盤水平変位、 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。ここでは図1に示すように、上部工を1質点バネ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、杭頭に作用する外力 V は、

$$V = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) - m_0(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) + P_e \quad \dots\dots\dots (2)$$

と書ける。ここに、 m_1 および m_0 は上部工およびフーチングの質量、 u_1 および u_0 は上部工およびフーチングの水平変位、 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、

$$u_0 = u_p(H, \omega) \quad \dots\dots\dots (3)$$

とし、さらに(3)式と上部工の系に関する振動方程式、

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 = -m_1(\ddot{u}_g + \ddot{u}_0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

を連立させて解くことにより、 u_1 および u_0 が得られる。また、この場合の杭の曲げひずみは、(1)式を z に関して2回微分することによって求めることができる。

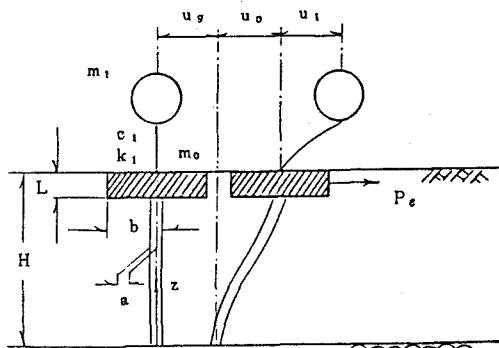


図1 上部工の振動特性を考慮したモデル

3. 杭先端固定条件の下での単杭の地震時応答解の誘導 地震観測を実施している道路橋基礎杭は支持層中に十分根入れされており、杭先端が固定に近い状態になっていると考えられる。田治見解は杭先端ピンの条件で導かれたものであるため、ここでは杭先端固定条件の下での地震時応答解を誘導した。式の詳細な誘導過程は省略するが、杭の曲げ振動を支配する微分方程式において、同次方程式の一般解を考慮し、各々の未定係数を杭頭剛結、杭先端固定の境界条件下で決定することによって次式のように $F^*(z, \omega)$ および $G^*(z, \omega)$ を求めた³⁾。

$$\left. \begin{aligned} F^*(z, \omega) &= A_1 \left\{ \sin \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \alpha_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} + B_1 \left\{ \cos \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \beta_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} \\ &+ C_1 \left\{ \sinh \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \gamma_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} + D_1 \left\{ \cosh \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \delta_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} \\ G^*(z, \omega) &= A_2 \left\{ \sin \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \alpha_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} + B_2 \left\{ \cos \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \beta_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} \\ &+ C_2 \left\{ \sinh \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \gamma_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} + D_2 \left\{ \cosh \lambda z + \sum_{n=1,3,\dots} \bar{f}(\omega) \delta_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \right\} \\ &+ \left(\frac{\omega}{\omega_g} \right)^2 \sum_{n=1,3,\dots} g(\omega) \sin \frac{n\pi z}{2H} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \tan \lambda H \frac{\zeta_1(\omega)}{\Gamma(\omega)} + \frac{1}{2\lambda^3 E I \cos \lambda H}, & A_2 &= \tan \lambda H \frac{\zeta_2(\omega)}{\Gamma(\omega)}, & B_1 &= -D_1 = \frac{\zeta_1(\omega)}{\Gamma(\omega)} \\ C_1 &= \tanh \lambda H \frac{\zeta_1(\omega)}{\Gamma(\omega)} - \frac{1}{2\lambda^3 E I \cosh \lambda H}, & C_2 &= \tanh \lambda H \frac{\zeta_2(\omega)}{\Gamma(\omega)}, & B_2 &= -D_2 = \frac{\zeta_2(\omega)}{\Gamma(\omega)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、ここでは単杭に関して述べたが、筆者らは群杭効率および荷重分担率を考慮することによって、上記理論が群杭基礎にも適用可能であることを文献(3)で報告している。

4. 観測記録に基づく道路橋基礎杭の地震時挙動支配要因に対する検討 P_e はフーチングを円筒剛体と仮

定し、フーチング側面に作用する振動土圧⁴⁾として評価した。解析定数を表1に示す。

また、図2から図5に解析結果を示した。

図2は基盤に対するフーチング部の平均周波数伝達関数と位相曲線について示したもので、図3は単位の基盤入力変位に対する杭頭部および杭先端部の曲げひずみ周波数応答関数について、それぞれ観測記録と解析結果の比較を行ったものである。いずれの解析結果も観測記録と良く一致している。周期1.40秒は当該地盤の卓越周期であり、周期0.73秒は地盤・杭・上部工の連成系による上部工の共振周期である。杭頭部の曲げひずみはこの2つの周期でピークをとるが、杭先端部では周期0.73秒のピークは見られず、上部工の振動が杭先端部に及ぼす影響は少ないと考えられる。図4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り、破線は地盤振動による曲げひずみを表している。杭頭部では上部工の振動による影響は大きい、杭先端部では圧倒的に地盤の振動に支配されていることがわかる。図5は神奈川・山梨県境地震(M=6.0、Δ=42km、D=20km)記録に基づく地震応答解析結果について示したものであり、杭頭部および杭先端部での曲げひずみ波形に関して観測記録と比較している。これより解析結果は観測記録に良く対応していることがわかる。

5. あとがき 本報で使用した基礎杭の地震記録は、神奈川県藤沢市に建設された道路橋に対して行っている地震観測から得られたもので、この観測を実施する上で藤沢市建設局西野康雄氏はじめ多くの方々に多大な便宜を計った頂いた。記して深謝の意を表すものである。

6. 参考文献 (1) Ohira, A., Tazoh, T., Dewa, K., Shimizu, K. and Shimada, M.: Observations of Earthquake Response Behaviors of Foundation Piles for Road Bridge, Proc. of the 8th WCEE, July, 1984. (2) 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。(3) 大平彰、田蔵隆、中松新、清水勝美: 軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究、土木学会論文集第1部門、投稿中。(4) 飯場正紀: 構造物-杭-地盤連成系モデルの設定、日本建築学会東海支部報告集、1984年2月。

表1 解析定数

地盤	杭	上部工
$\mu_g = 443.15 \text{ tf/m}^2$	$a = 0.30 \text{ m}$	$m_1 = 223.47 \text{ tf s}^2/\text{m}$
$\nu_g = 0.493$	$b = 20.00 \text{ m}$	$c_1 = 112.33 \text{ tf s/m}$
$w_g = 1.33 \text{ tf/m}^3$	$I_p = 7.2974 \times 10^{-4} \text{ m}^4$	$k_1 = 35288.87 \text{ tf/m}$
$T_g = 1.40 \text{ s}$	$w_p = 0.4639 \text{ tf/m}^3$	$m_0 = 81.63 \text{ tf s}^2/\text{m}$
$h_g = 0.10$		$b = 6.77 \text{ m}$
$H = 20.00 \text{ m}$		$L = 2.00 \text{ m}$

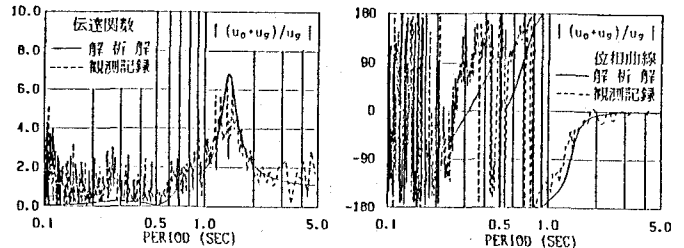


図2 フーチング部の周波数伝達関数と位相曲線

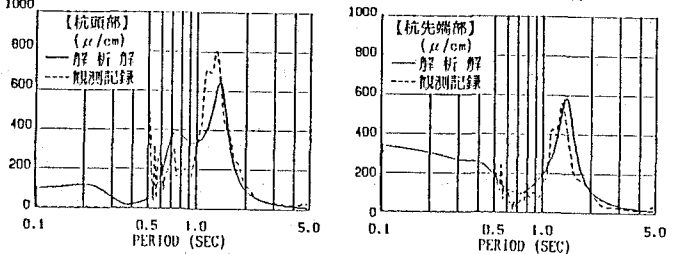


図3 曲げひずみ周波数応答関数

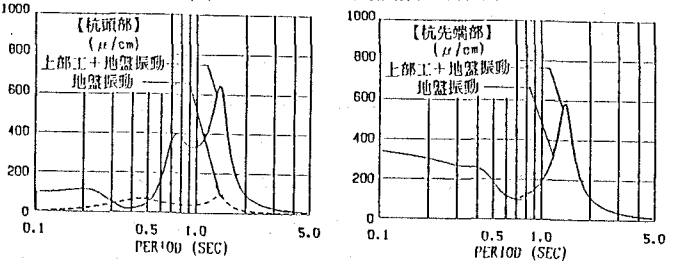


図4 上部工と地盤振動による曲げひずみの分離

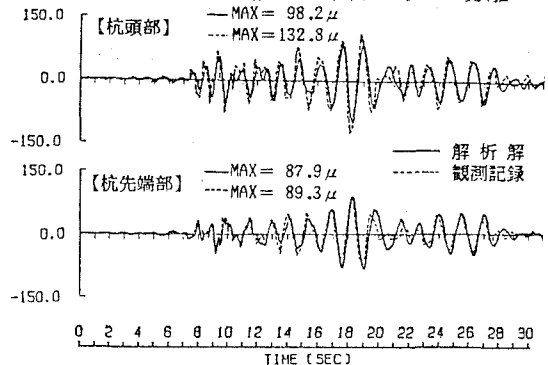


図5 地震応答解析による曲げひずみ