

(71) 群杭基礎構造物の動的解析法とその実務耐震設計法の開発

岡山大学 正員 竹宮 宏和
 岡山大学 学生員 ○田中 宏明
 日本道路公団 正員 角谷 務
 日本技術開発 KK 正員 佐伯 光昭

1. まえがき

本研究は、地盤と群杭基礎の動的相互作用解析を扱ったものである。これまで筆者らの開発した伝達マトリックス手法による解析システムでは、杭-地盤-杭の動的相互作用において地盤反力の算定段階で無限小の厚さの層を考え平面歪解を適用した。今回の報告は、地盤反力の算定段階で、より厳密な3次元波動論解析を採用した群杭解析システムを開発したので、これと前解との比較を行った。そして、これらの成果を実際の橋梁構造物の合理的耐震設計に反映させるべき一試案を示すものである。

2. 定式化

地盤と群杭の動的相互作用場は、Navierの式に支配される混合境界値問題である。弾性体としての杭には、物体力としての慣性力と周辺地盤からの反力としての表面力が作用する。よって、j 杭の

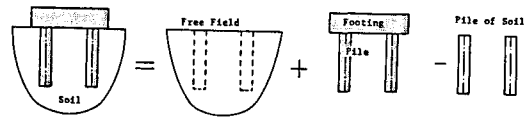


図1 サブストラクチャ化

つり合式は、仮想仕事の表現を採れば、

$$\int_{V_j} \delta \epsilon_{ij}^T \sigma_{ij} dv_j = - \int_{V_j} \delta U_j^T (-\rho \omega^2) U_j dv + \int_{S_j} \delta U_j^T \tau_j ds_j \quad (1)$$

ここに、 ω_j ; 応力、 ϵ_j ; 歪み、 U_j ; 変位、 τ_j ; 表面力を定義している。

地盤-群杭系の解析に際してサブストラクチャ化を行う。単に群杭を地盤から引き抜いた状態では、杭の存在部分に空洞を持つ地盤とストリップ化された群杭となる。ただし両者の間には、変位と応力の連続性が杭の周面位置で保証されなければならない。空洞を持つ地盤の解析は困難であるため、サブストラクチャ化を、図1のように、地盤においては杭部分を土で埋め戻した、つまり自然地盤とする。この地盤内の杭部分に当たる土の挙動は、当然、杭としての挙動を課せられる訳で、地盤杭としての取り扱いを要する。したがって、ストリップ化された群杭の方は、原杭から地盤杭を差し引いたものとなる。

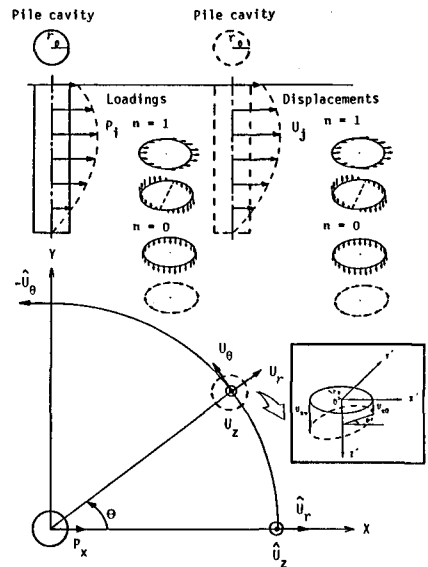


図2 加振パターン

地盤-群杭系の支配方程式を導くに、境界要素法(間接法)の考え方の適用を試みる。杭は構造要素としてのはりの挙動として捉えることができ、有限要素化して多自由度系に置換することができる。このとき、応力よりも断面力が意味を持つ。したがって、式(1)の代りに、

$$-\omega^2 M U_j + K U_j = P_j \quad (2)$$

杭周面上の応力につり合う合力を、直交座標上で評価する。

$$\begin{Bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{Bmatrix} = \int_0^{2\pi} \begin{Bmatrix} t_r \cos \theta - t_\theta \sin \theta \\ t_r \sin \theta + t_\theta \cos \theta \\ t_z \end{Bmatrix} r_0 d\theta, \quad \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \int_0^{2\pi} \begin{Bmatrix} t_z \sin \theta \\ t_z \cos \theta \\ t_\theta \end{Bmatrix} r_0^2 d\theta \quad (3)$$

杭の周面上の表面力を、フーリエ級数展開して表せば、

$$\tau_j = \sum_n H(n\theta) \hat{\tau}_j \quad (4)$$

式(4)のフーリエ級数展開を導入すると、 P_x, M_y には、 $n=1$ の対称フーリエ項、 P_y, M_x には、 $n=1$ の逆対称フーリエ項、 P_z には

$n=0$ の対称フーリエ項、 M_z には $n=0$ の逆対称フーリエ項が

対応する。自然地盤内で与える加振パターン（図2参照）として、杭のはりの自由度に応じた応力分布となるが、杭の周辺で積分すれば、杭の断面力に釣りあうものであればよい。したがって、動的サブストラクチャ法から、自然地盤に外力として、一様なリング加振を採る。Kauselは、これに対する応答（準解析解）を導いているので、本研究ではこれを利用する。群杭基礎を対象とするため、 i 杭位置での加振に対して j 杭位置の応答を計算する操作を、順次、杭の全本数にわたって行う。したがって、直交座標系における並進自由度の応答 U_{xyz} は、

$$U_{xyz} = \mathbf{T} \hat{U}_{r\theta z} H(n\theta) \quad (5)$$

となる。ただし、 $\hat{U}_{r\theta z}$ はフーリエ振幅、 \mathbf{T} は座標変換マトリックス、 $H(n\theta)$ はフーリエ級数係数である。また、回転自由度の評価には次式を用いている。

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{U_{z\pi} - U_{z0}}{2r_0} \right) \equiv \frac{U_{z\pi} - U_{z0}}{2r_0} \quad (6)$$

加振杭と応答杭が一致する場合は、表1にまとめておく。以上から、全杭軸節点に関するフレキシビリティ・マトリックス \mathbf{IG} が定義でき、その逆行列を求めることによって、動的な地盤剛性マトリックス \mathbf{K}_{s_0} を得る。

$$\mathbf{K}_{s_0} = \mathbf{IG}^{-1} \quad (7)$$

先に述べたサブストラクチャ化に従い、地盤-群杭系の動的剛性マトリックス \mathbf{K} は、

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_{s_0} + (\mathbf{K}_{pile} - \mathbf{K}_{soil}^{pile}) \quad (8)$$

となる。但し、 \mathbf{K}_{pile} は有限要素化された杭基礎の動的剛性マトリックス、 \mathbf{K}_{soil}^{pile} は地盤杭の同マトリックスである。最終的には、地盤-群杭系の動的剛性マトリックスを縮小操作により杭頭位置で評価する。そして、剛結されたフーチング底面へ剛体結合条件から統合し、地盤-群杭系の動的剛性とする。

下部構造系に群杭基礎を有する建造物の厳密な地震応答解析は、図3の解析フローに従ってなされる。しかし、解析時間・費用を共に多くを要することから実務解析用には、図4の解析フローを提案する。図3から図4への移行に際して、重要な事項は以下に挙げる通りである。

(I) 群杭の動的解析を単杭解析で置換し、動的群杭効率を以ってそれを修正している。(II) 地盤との相互作用効果を表す振動数依存の複素地盤剛性を定数化している。(III) 上・下部構造系の連成振動を、下部構造系のバネ効果を含んだ形で固有モ

表1 応答の評価

displacement pattern	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
U_x	$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_\theta)$				$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_\theta)$	
U_y		$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_\theta)$		$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_\theta)$		
U_z			\hat{U}_z			
θ_x		$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_\theta)$		$\tan^{-1}(\hat{U}_z/R)$		
θ_y	$\frac{1}{2}(\hat{U}_x + \hat{U}_\theta)$				$\tan^{-1}(\hat{U}_z/R)$	
θ_z						$\tan^{-1}(\hat{U}_z/R)$

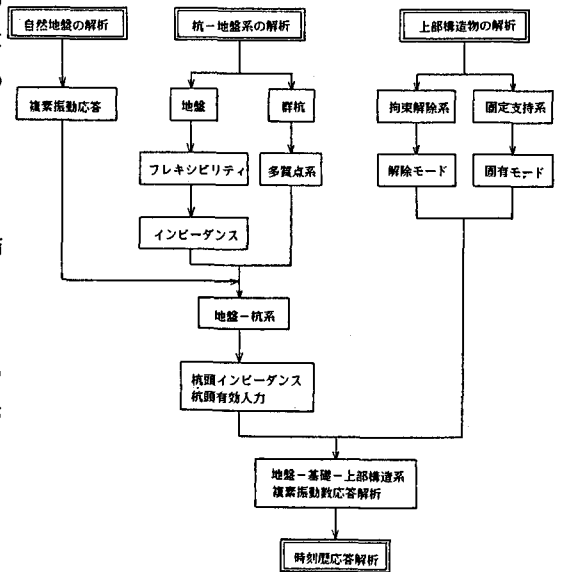


図3 解析フロー

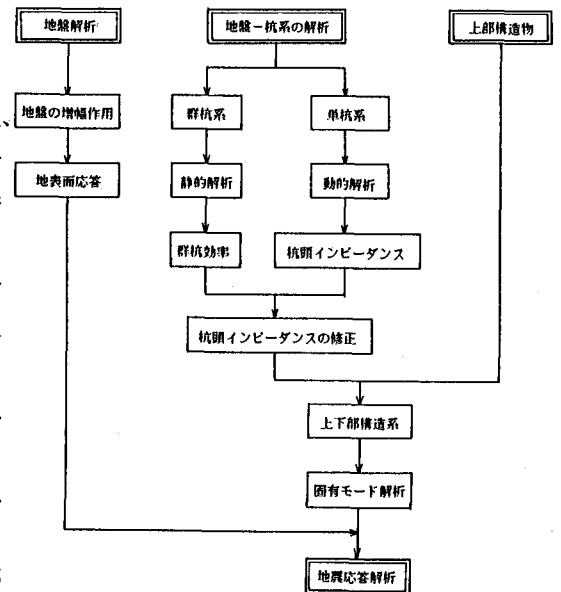


図4 実務解析フロー

ード解析(図5)している。したがって、地盤との相互作用における減衰効果は固有モード減衰定数として導入している。

(IV) 有効入力力の代わりに、自然地盤の地表面応答を使用している。

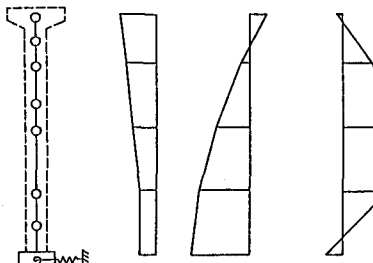
3. 数値的検討

2、3の解析例を採って、本研究における各重要事項の検討を行った。解析地盤の選定は、軟らかい地盤(卓越周期 $T_g = 1.31$ 秒、ケース1)と硬い地盤($T_g = 0.78$ 秒、ケース2)の2種類とした。杭配置は4本杭と9本杭を考えた。(図6参照)

(I) 地盤バネの評価: 下部構造系(地盤-群杭系)より得られたインピーダンス関数を図7に示す。同図から、動的複素剛性の実部は、地盤の卓越振動数以下の範囲でほぼ一定値を示している。同振動数で固定した。(II) 群杭効率: 動的群杭効率を図8に示す。同図より対象とする運動形態によるが、耐震設計上重要な低振動数領域では、1より小さいほぼ一定値を示し、静的解析による群杭効率が動的問題にも使用可能であることを示している。しかし、数Hzより高い振動数になると、動的群杭効率は1より大きくなっている。(III) 下部構造特性を考慮したときの固有モード減衰定数の評価: (I)の地盤バネを含めて固有モードを採り、地盤インピーダンスの虚数部を固有モード座標上で求めた。その際、簡易法を採ることから固有モード間の連成を無視した。固有モード減衰定数としての値を表2にまとめておく。(IV) 時刻歴応答: 基礎面入力波として、100galに調整したELCENTRO波形から地表面応答(図9)を求め、それを入力波とし、フーチング重心及び橋脚先端における変位・加速度応答を図10に示す。

4. 結論

本研究では、群杭基礎を有する橋梁構造物の耐震解析・設計において、上部と下部構造物の動的サブストラクチャ法による厳密な解析法に取って代るべき合理的な近似解法を示したが、その精度は十分に保証されることが、これまでのケーススタディから判っている。



モード次数	1-ST	2-ND	3-RD
振動数 f (Hz)	1.20	7.94	39.07
寄与係数 γ	-35.634	4.030	0.369

図5 モード形状(4本杭、ケース1)

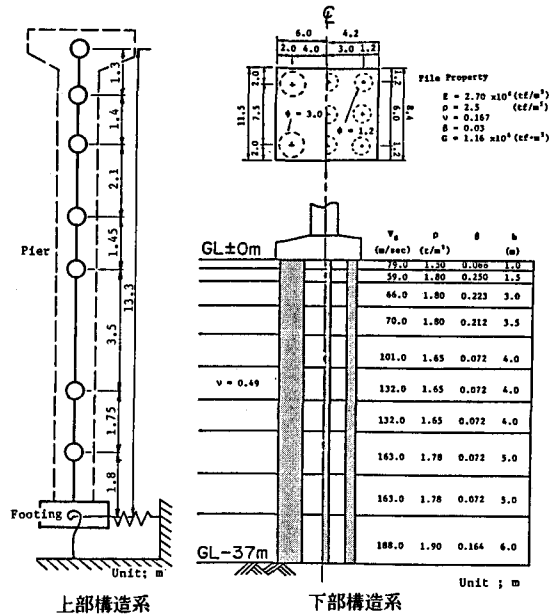
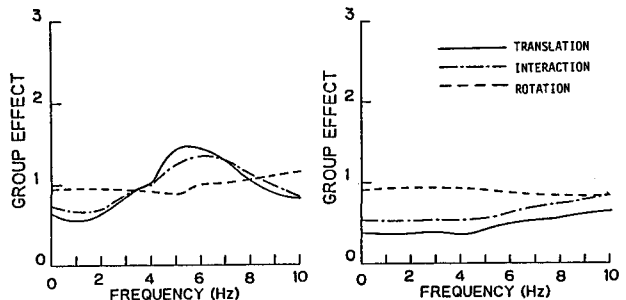


図6 解析対象構造物

図6 解析対象構造物

表2 減衰定数

MODE	4本杭	9本杭
1-ST	0.1504	0.0288
2-ND	0.1008	0.1287
3-RD	0.0478	0.0518
...	...	0.05
6-TH	0.05	0.05



(4本杭、ケース1)

(9本杭、ケース1)

図8 群杭効率

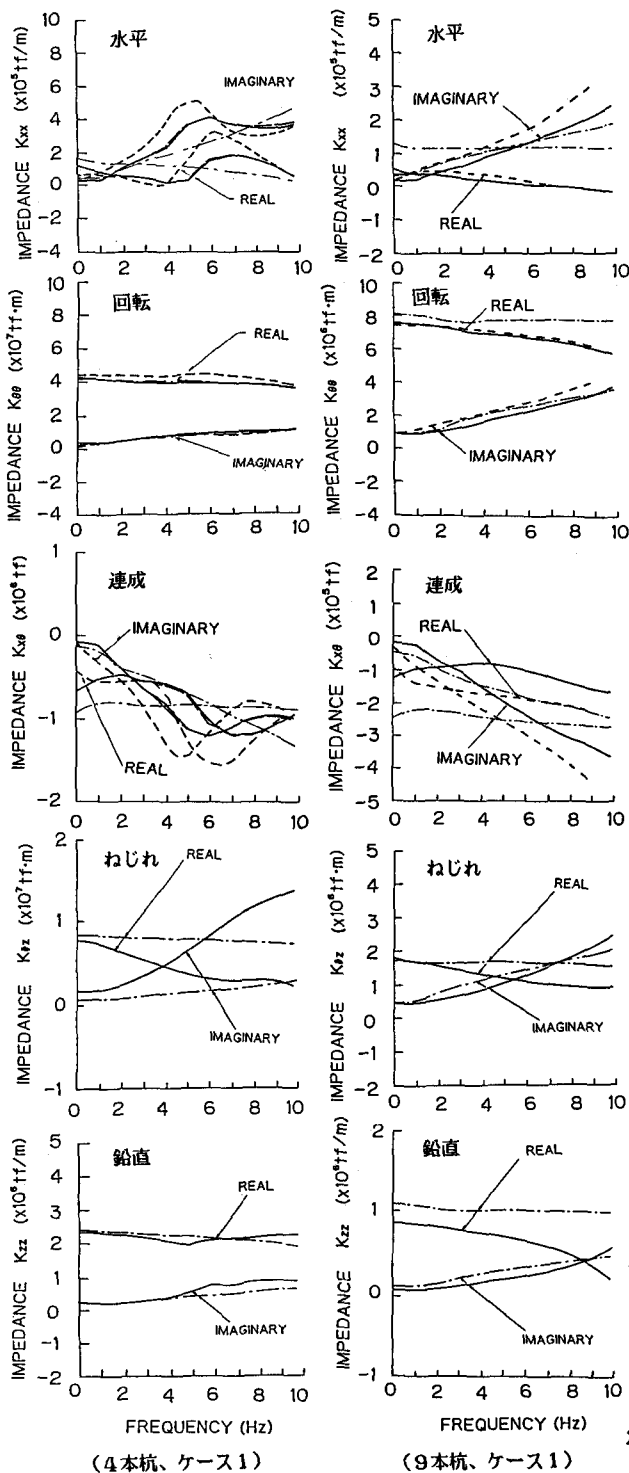


図7 フーチング重心におけるインピーダンス関数

— Green Function
 - - - 単杭解析
 - - - 伝達マトリックス法

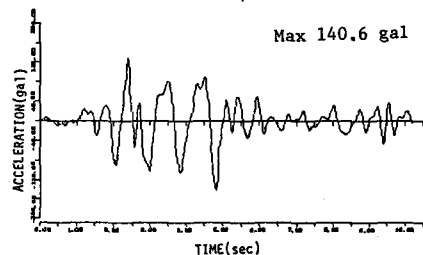
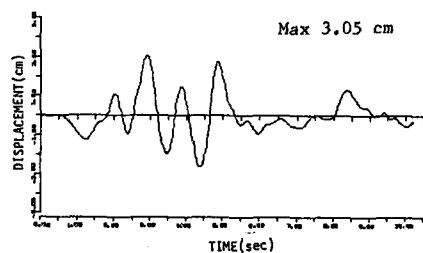


図9 地表面応答(ケース1)

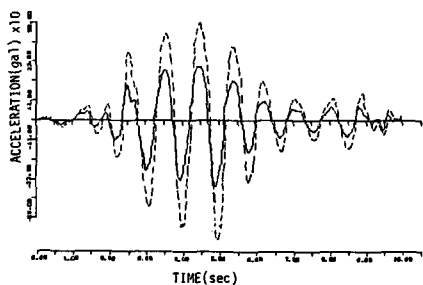
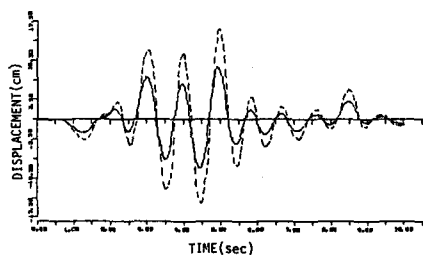


図10 フーチング重心(実線)、天端(点線)の応答(4本杭、ケース1)

参考文献

- 1) Takemiya, H. and Yukawa, Y.: Dynamic Analysis of Grouped Pile Foundation in Layered Soils, Earthq. Eng., Vol. 3, No. 1, pp. 183-193, 1986.
- 2) E., Ksusel and R., Peek: Dynamic Loads The Interior a Layered Stratum, Bulletin of the Seismological Society of America, pp. 1459-1481, 1982.