

地盤の非線形復元力特性を考慮した タワーピア系の応答解析

京都大学工学部 正員 山田善一
全日本コンサルタント 正員 三宅龍雄

1. まえがき

従来の吊橋タワーピア系の耐震解析では、系全体を線形系とみなして解析されてきたが、高レベルの地震動においては系の非線形履歴特性による応答性状も論じる必要がある。本研究は、地盤の非線形復元力特性に注目してその非線形効果がタワーピア系の応答性状にどのような影響をおよぼすか検討する。地盤の非線形モデルとしては双一次履歴型のものを考え、このタワーピア系は非比例減衰系として解析される。地震外力には不規則外力を使用し、応答共分散値は等価線形化手法と複素固有値解析を利用した不規則振動解析によって求められる。

2. 非線形地盤と等価線形化手法

双一次履歴復元力特性を有する地盤上のピアの復元モーメント $M(\theta)$ と回転角 θ の関係は図1のように近似的に双一次型に置換できる¹⁾ すなわち、

$$M(\theta) = K_R \phi(\theta) \quad (1)$$

ここで、 K_R は線形回転バネ定数である。

いま、非線形系となるピア部の運動方程式を

$$\ddot{\theta} + 2\beta_R \omega_R \dot{\theta} + \omega_R^2 \phi(\theta) = f(t) \quad (2)$$

とする。ここで、 ω_R と β_R はそれぞれ微小振動時での固有振動数および減衰定数である。等価線形系の運動方程式は次式で与えられる。

$$\ddot{\theta} + 2\beta_{eq} \omega_{eq} \dot{\theta} + \omega_{eq}^2 \theta = f(t) \quad (3)$$

ここで、 β_{eq} は等価減衰定数、 ω_{eq} は等価固有振動数である。本研究では、ランダム入力に対する等価線形化手法に竹宮²⁾の消散エネルギー率の一致および応答平均振動数の一致の規範に基づく手法を用いた。

3. 不規則振動解析

非線形地盤上のタワーピア系の等価線形系としての運動方程式は次式で与えられる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \ddot{z}_0(t) \quad (4)$$

ここで、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ はタワー部とピア部の減衰を独立に与えた等価減衰マトリクス、 $[K]$ は等価剛性マトリクス、 $\{x\}$ は変位ベクトル、 $\{F\}$ は外力係数ベクトル、 $\ddot{z}_0(t)$ は平均値零、スペクトル密度 $S_0(t)$ の white noise である。式(4)にステートベクトル $\{u\} = \{\dot{x}\}^T \{x\}^T$

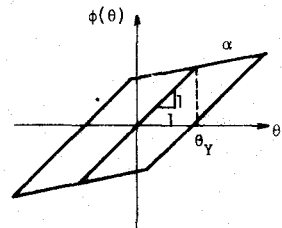


Fig. 1 Foundation Characteristic

を導入すると

$$\{u\} + [D]\{u\} = \{Q\} \ddot{z}_0(t) \quad (5)$$

ここに

$$[D] = \begin{bmatrix} [M]^{-1}[C] & [M]^{-1}[K] \\ -[I] & [0] \end{bmatrix} \quad \{Q\} = \begin{bmatrix} [M]^{-1}[F] \\ \{0\} \end{bmatrix}$$

となる。応答共分散マトリクス $[R_u] = E(\{u\}\{u\}^T)$ は、式(5)を変換して次の微分方程式を解くことにより得られる。

$$\frac{d}{dt}[R_u] + [D][R_u] + [R_u][D]^T = 2\pi S_0(t)\{\{Q\}\{Q\}^T\} \quad (6)$$

式(6)に座標変換 $\{u\} = [\Phi]\{r\}$ を導入して簡単にすると

$$\frac{d}{dt}[R_r] + \begin{bmatrix} \lambda & \\ & \lambda \end{bmatrix} [R_r] + [R_r] \begin{bmatrix} \lambda & \\ & \lambda \end{bmatrix} = [G(t)] \quad (7)$$

ただし、 $[R_r] = [\Phi]^{-1}[R_u][\Phi]^{-T}$

$$[G(t)] = 2\pi S_0(t)[\Phi]^{-1}\{\{Q\}\{Q\}^T\}[\Phi]^{-T}$$

であり、 λ は $|[D] - \lambda[I]| = 0$ の複素固有値、 $[\Phi]$ はその複素モードマトリクスである。式(7)の解は step by step の計算により容易に求まる³⁾

$$[R_r]_{ij} = \frac{[G(t_i)]_{ij}}{\lambda_i + \lambda_j} \left\{ 1 - \exp[-(\lambda_i + \lambda_j)\Delta t] \right\} + [R_r]_{ij} \exp[-(\lambda_i + \lambda_j)\Delta t] \quad (8)$$

4. 数値計算結果

タワーピア系を9自由度にモデル化し、図2のように固有振動数の接近する地盤条件と固有振動数が分離した地盤条件について応答解析した。図3~5に見られるように、ピアの変位応答は履歴減衰の効果で線形解析値よりも小さくなっている。一方、タワーの応答性状には地盤の履歴減衰による応答値の減少も見られるが、それよりも剛性劣化によるタワーの振動形態の変化がより支配的な影響をおよぼしている。その他の計算結果は当日発表の予定である。

参考文献

- 1) Yamada, Y. & Takemiya, H.; Mem. of the Faculty of Eng. Kyoto Univ., Vol. 36, 1975, pp. 405-426
- 2) 竹宮宏和; 土木学会論文報告集, No. 219号, 1973
- 3) Takemiya, H.; 関東地震50周年記念シンポジウム講演集 1973, pp. 373-380

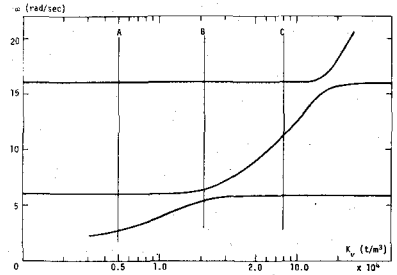


Fig. 2 Natural Frequencies

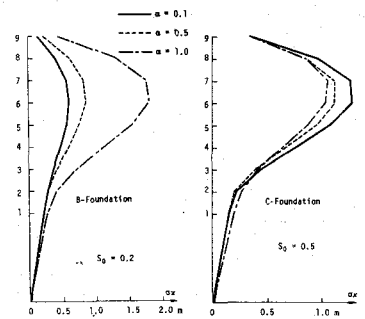


Fig. 3 r.m.s. Responses

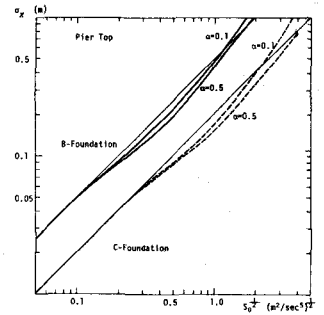


Fig. 4 r.m.s. Displacement

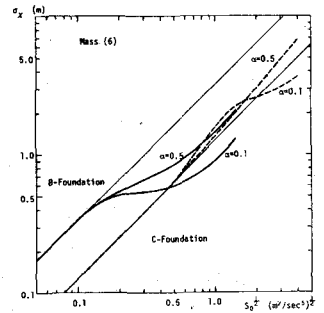


Fig. 5 r.m.s. Displacement