

徳島大学工学部 正員 宇都宮 英彦
 徳島大学工学部 正員 沢田 勉
 京都大学大学院 学生員 野田 茂

1. まえがき 本研究は、不規則外力を受ける地盤の非線形復元力特性がタワー-ピア系の応答特性に与える影響を検討したものである。強震を受けた場合、その基礎地盤は弾性限を越えた非線形応答を示し、入力エネルギーを履歴エネルギーとして消散する。合理的、経済的設計を目指すには、これを的確に把握し、設計変数として導入する必要がある。その設計の前段階である本報告は、双一次履歴系としての地盤の等価線形化と非比例減衰性を含む複素固有値解析の試みで、ランダム振動論から耐震性の評価を量るものである。その主眼は文献(1)の拡張として、等価連成系のフィードバック効果を考慮し、耐震的には無視できない重要な要素を得ている。本解析法は実用性に富むものと思われる。

2. 解析とその結果 非線形地盤上のタワー-ピア系 (Fig. 1) の運動方程式は次式で与えられる。

$$[M]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [K]\{\Phi(x)\} = \{\dot{M}\}\ddot{z}_0(t) \quad (1)$$

ここで $[M]$, $[c]$, $[K]$ は質量、減衰、剛性マトリックス、 $\{x\}$, $\{\Phi(x)\}$ は線形非線形変位ベクトル、 $\{\dot{M}\}$ は外力係数ベクトル、 $\ddot{z}_0(t)$ は平均値零の定常ホワイトノイズあるいは定常および非定常フィルタードホワイトノイズを示している、減衰量については特殊な合理的評価方法を用いた。

いま 双一次履歴系を有する鉛直方向地盤特性を考えると、Fig. 2 のような復元力モーメントの特性 $\phi(\theta)$ はピア-自重とその側面地盤の影響のため、みかけ上の分枝比 α をもつ双一次履歴型 $\phi(\theta)$ に移行する。系の1次と2次の振動数が接近する地盤領域(A)と分離領域(B)に関して、Tableはこの α の度合いを示している。

ただし、 $\alpha' = (\alpha - \gamma) / (1 - \gamma)$

$$\gamma = (m_p g e_0 - K_R) / \check{K}_R \quad (2)$$

ここで、 $m_p g e_0$ = ピアの転倒モーメントの項、 K_R = 周辺側面地盤の水平およびせん断力による回転バネ定数、 \check{K}_R = 鉛直地盤反力による微小線形回転バネ定数

したがって、非線形系あるいは等価線形系となるピア一部の運動方程式は、

$$\ddot{\theta} + 2\beta_R \omega_R \dot{\theta} + \omega_R^2 \phi(\theta) = N_p \ddot{z}_0 \quad (4)$$

あるいは、

$$\ddot{\theta} + 2\beta_{eq} \omega_{eq} \dot{\theta} + \omega_{eq}^2 \theta = N_p \ddot{z}_0 \quad (5)$$

ここで、 β_R , ω_R は微小振動時の、 β_{eq} , ω_{eq} は等価線形時の減衰定数と固有振動数を、 N_p は外力係数を表す。

等価線形パラメータと応答共分散間にはフィードバック効果が存在するため、本研究では、これにはその2者の最適な関係を見出すという手法を採った。とくに、等価線形化手法には非線形履歴系の力学モデルにおけるクローンスライダの動きに注目した文献(2)の方法を応用し、

$$\omega_R^2 \left\{ \alpha' + (1 - \alpha') \frac{E[\theta_0^2]}{E[\theta^2]} \right\} + 2\beta_R \omega_R \frac{E[\dot{\theta}^2]}{E[\theta^2]} = \omega_{eq}^2 + 2\beta_{eq} \omega_{eq} \frac{E[\dot{\theta}^2]}{E[\theta^2]} \quad (6)$$

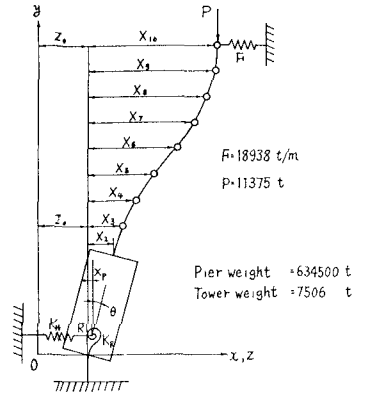


Fig. 1 Tower and pier system considered

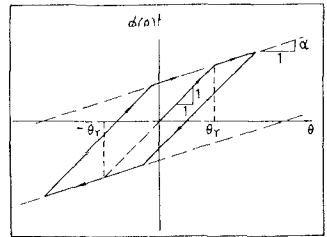


Fig. 2 Restoring force characteristics of nonlinear foundation

Table Variation of slope ratio α

α	K_R	A	B
0.75		0.80275	0.76207
0.5		0.60550	0.52413
0.25		0.40825	0.28620
0.1		0.28991	0.14344

$$\beta_{req} = \beta_R \frac{\omega_R}{\omega_{req}} + \frac{1}{2} \frac{\omega_R^2}{\omega_{req}} \frac{E[\phi(\theta)\theta]}{E[\theta^2]} - \frac{1}{2} \frac{\omega_{req}}{\omega_R} \frac{E[\theta\dot{\theta}]}{E[\theta^2]} \quad (7)$$

ここに、 θ_0 は $(1-\alpha)K_R$ の伸びであり $E[\cdot]$ は期待値を表わす。

その結果、(1)式は、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C_{eq}]\{\dot{x}\} + [K_{eq}]\{x\} = \{M\}\ddot{z}_0(t) \quad (8)$$

となる。この式で表わされる系のランダム応答解析で、まず評価しなければならない量は応答共分散マトリックスである。しかし、非比例減衰系となるので古典的モード解析ができなくなり、本研究は複素固有値解析によりモード減衰を求めた近似応答を考えている。

Fig 3~6に 結果の一部が示されている。これらの図より、ピアーの応答は一般に履歴減衰の作用で線形値よりも小さいことがわかる。一オ タワー部の応答値は基礎の剛性劣化によるピアーのロッキングモードの変化が支配的である。低次モードの2つが接近している地盤領域(A)では、履歴減衰と地盤剛性の劣化の効果により、タワーピアー系全体の応答が小さくなり、かなりの安全側と考えられる。モードが完全に分離している地盤領域(B)では、履歴減衰の効果よりも地盤剛性劣化による振動モードの接近現象をきたして、変位応答が増幅し危険側となる。とくに 本研究の主な成果は、この領域(B)において、強い非線形特性による基礎剛性の劣化に伴い、応答の急激な増大をきたすことである。しかも、履歴減衰の増加によってモード減衰がピアーのよくゆるるモードに集中し、加振レベルのわずかな差で応答振幅の変曲点が存在することがある。これらの点は、地盤内の塑性変形の面から従来の線形解析に信頼性の立場において十分な合理的設計を期待すべきことを示している。とくに、耐震上の改善で重要な因子であり、十分な注意が必要であると判明した。また、本解析法の予想は実用的にも有益で容易である。

非定常応答などについても若干の結果を得たが、その詳細などについては当日発表の予定である。

3 参考文献 (1). Y.Yamada & Takemiya, H; Random Response

Analysis of a Long-span Suspension Bridge Tower and Pier with Consideration of Nonlinear Foundation, Mem. of Fac. of Eng., Kyoto Uni., Vol. 36, Part 4, 1975, pp.405-426. (2) L.D.Lutes & Takemiya, H; Random Vibration Response of Bilinear Oscillators, A.S.C.E., EM2, Vol.100, 1974, pp.343-359.

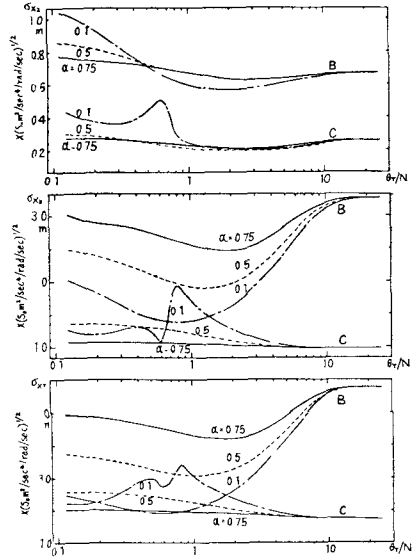


Fig 3 Variation of rms displacement and velocity with nonlinear foundation (unit: noise excitation)

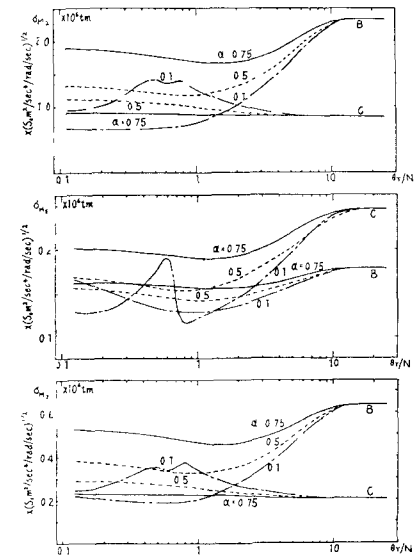


Fig 4 Variation of rms bending moment and derivative bending moment with nonlinear foundation (unit: noise excitation)

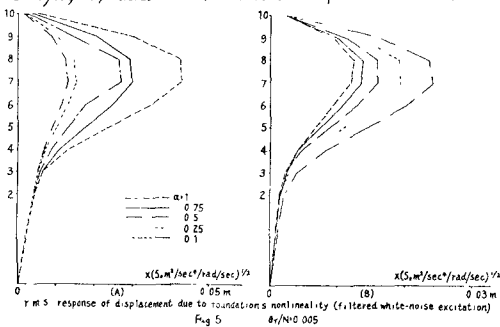


Fig 5

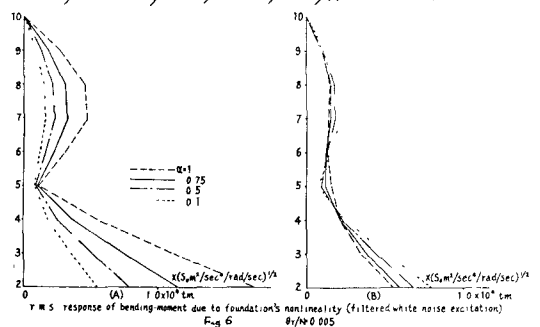


Fig 6