

基礎の入力損失効果を考慮した 所要降伏震度スペクトルに関する研究

齊藤正人¹・西村昭彦²

¹正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構技開 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

²フェロー 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構技開 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

ケーソン基礎等の大型基礎は、基礎の剛性、寸法の効果により入力損失が生じ、地表面で得られる加速度応答よりも振幅の低減した応答が基礎天端で得られることがある。これを有効入力動と呼び、著者等はこれまでに弾性波動論によるケーソン基礎の有効入力動の理論解、3次元 FEM 解析による互層地盤における大型基礎の有効入力動の動特性等を検討してきた。現在、鉄道構造物の耐震設計法では所要降伏震度スペクトルによる応答値の算定が主体である。そこで本研究では、この所要降伏震度スペクトルに入力損失効果が与える影響を把握し、設計実務にそれらを導入する手法について検討を行なった。

Key Word : Effective Seismic Motion, Demanded Strength Spectrum, Seismic Design

1. はじめに

現在、鉄道構造物の耐震設計法では対象構造物の動的な挙動を把握するため、動的解析法が主体となっている。地震時には構造物と基礎の間に動的な相互作用が生じ、構造物の応答値に大きく影響を与えるため、動的解析を行なう際、この動的相互作用を十分に考慮する必要がある。とくにケーソン基礎等の大型基礎は、大きな船がさざ波に揺れない様に、基礎の剛性・寸法による入力損失効果が生じ、地表面位置での自由地盤の応答に比べて低減された値を示すことがある。この地震動を有効入力動と呼び、その動特性を定量的に把握することで、より経済的な耐震設計が可能となる。この有効入力動に関して、すでに著者らは弾性波動論に基づくケーソン基礎の有効入力動に関する理論解の誘導¹⁾、また、3次元 FEM 解析を用いた互層地盤中におけるケーソン基礎の有効入力動の研究²⁾を行い、その動特性の定量的、且つ定性的な把握をおこなった。また、実際のケーソン基礎構造物を2質点3自由度系のSRモデルに置換し、地表面地震動と有効入力動を入力した場合の応答値の影響を比較してそ

の有用性を検証した³⁾。しかしながら、この有効入力動を耐震設計に導入するにあたり、現在の設計実務の動的解析法では非線形スペクトル法が主体であることを考慮する必要がある。ここで非線形スペクトル法とは、1自由度モデルに全体構造系の履歴を持たせて動的解析を行い、等価固有周期を横軸に、降伏震度を縦軸に取り応答塑性率 μ をパラメータに図表化した所要降伏震度スペクトルを用いて構造物の非線形応答値を求める解析法である。そこで本研究では、非線形履歴特性を有する1自由度モデルに、本論文で示す有効入力動を入力して、入力損失効果が構造物に与える影響を定性的、定量的に把握すると共に、非線形スペクトル法への導入手法を示す。

2. 有効入力動のモデル化

有効入力動は基盤に入力される地震動の振動数成分に大きく依存するため、一般に有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$ を指標として表現される。ここで有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$ は、基礎に剛性のみを付加した状態での地表面レベルの加速度応答 $\ddot{u}_f$ と、自然地盤での地表面加速度応答 $\ddot{u}_s$ の比を各振動

数成分毎に表記したものであり、次式で表される。

$$\eta_{eff}(\omega) = |\ddot{u}_f(\omega) / \ddot{u}_s(\omega)| \quad (1)$$

既往の研究から、この $\eta_{eff}(\omega)$ は表層地盤の固有円振動数 ω_g において最も低下することが分かっており、その低下程度については、地盤の剛性、基礎く体の剛性寸法等に大きく影響を受けることが分かっている¹⁾。また、1 次固有振動数よりも高次の振動数領域については、地盤の減衰特性や層構成の違いにより傾向が異なることが判明している²⁾。特に、ケーソン基礎の回転入力動は高次振動数領域で増加する傾向が見られる。そこで、有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$ を(2)式のようにモデル化する。

$$\eta_{eff}(\omega) = \left. \begin{aligned} & \frac{2}{3}(1 - \eta_g) \left[\cos\left(\frac{2}{3}\pi \cdot \frac{\omega}{\omega_g}\right) - 1 \right] + 1 \quad (\omega \leq \omega_g) \\ & - \frac{3}{4}(1 - \eta_g) \left[\left(\frac{\omega}{\omega_g} \right) - 1 \right] + \eta_g \quad (\omega_g \leq \omega \leq 2\omega_g) \\ & = \frac{1}{4}(3 + \eta_g) \quad (2\omega_g \leq \omega) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 ω ：円振動数(rad/sec)

ω_g ：表層地盤の固有円振動数(rad/sec)

η_g ：有効入力評価係数

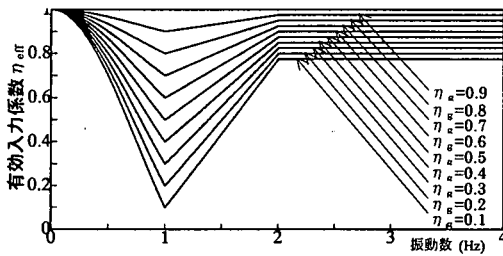


図1 有効入力係数 η の振動性状
(地盤の固有振動数 1.0Hz を想定した場合)

(2)式をグラフ上で表すと図1となる。これは地盤の固有振動数 f_g が 1.0Hz の場合である。この(2)式は地盤の固有振動数までを余弦関数で表し、地盤の固有振動数で η_g となり、そこから固有振動数の 2 倍の振動数までを凹値 $(1 - \eta_g)$ の 3/4 まで線形的に回復し、それ以降は一定値を保つものである。この回復は前述の通り、層構成と減衰特性による効果、回転入力動の影響を考慮したものである。ここで、 $\eta_{eff}(\omega)$ は η_g が定まると一義的に決定されるものであり、 η_g は入力損失効果の大きさを表す指標

で有効入力評価係数と呼称する。この η_g は地盤剛性、基礎寸法等から定まるものであり、弾性波動論から誘導される理論解は非常に複雑である。そこで、 η_g の値は主として表層地盤の 1 次モードに支配されることから、理論解の 1 次モードのみ抽出し工学的判断に基づいて近似解を誘導した。近似式は(3)式で表される。

$$\eta_g = \frac{3}{2} \left[\frac{\Phi_R + (4/\pi - 2)\beta_{eff} + (16/\pi)\gamma}{\Phi_I + 2(1 - 4/\pi)\beta_{eff} + (8/\pi)^2\gamma} \right] + \eta_r \quad (3)$$

ここに、

$$\beta_{eff} = (G_s A / EI) (2L / \pi)^2, \gamma = (L/D) (G_s / G_r) (1 - \nu_r)$$

$$\Phi_R = \left[0.22 + (1/6) \sqrt{(1 - 2\nu_d)/2(1 - \nu_d)} \right] \left[(\pi D/4L)^2 h_{ge} \right]^{0.9}$$

$$\Phi_I = \left[0.23 + (1/3) \sqrt{(1 - 2\nu_d)/2(1 - \nu_d)} \right] \left[(\pi D/4L)^2 h_{ge}^{-0.43} \right]^{0.7}$$

$$\eta_r = (3 - 0.02\nu_{sd}) \left[0.01 + 0.4(D/L - 0.2)(h_g - 0.15) \right]$$

ここで、

G_s ：表層地盤全体の等価せん断弾性係数(KN/m²)

A ：基礎く体の断面積(m²)

EI ：基礎く体の曲げ剛性(KN・m²)

G_r ：基盤層のせん断弾性係数(KN/m²)

ν_d ：表層地盤の動ポアソン比

ν_r ：基盤地盤の動ポアソン比

h_{ge} ：表層地盤の等価減衰定数

v_{sb} ：表層地盤全体の等価せん断弾性波速度(m/s)

L ：基礎長(m)

有効入力評価係数 η_g の理論解と近似解の比較結果例を図2に示す。一般に設計で適用する諸数値範囲において良好に一致することがわかる。

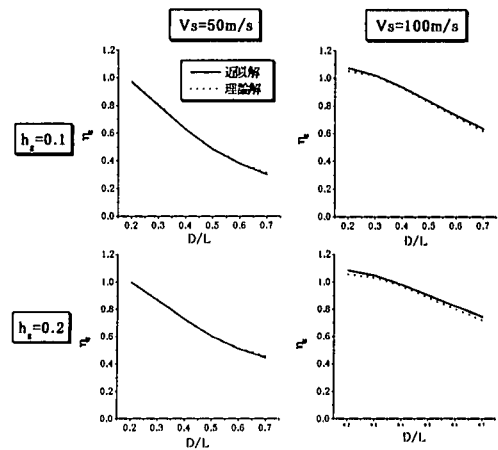


図2 有効入力評価係数 η_g の近似解と理論解の比較

3. 有効入力動が構造物の応答に与える影響

ここでは、 η_g を 1.0 から 0.2 まで 0.2 刻みで変化させて、非線形復元力特性を有する 1 自由度系モデルの応答

値に与える影響について検討する。有効入力動は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(案)」に示す地表面地震動に対して、2. で定めた有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$ をそのフーリエ振幅スペクトルに乗じて求める。地盤は 8 種類に分類されており、ここではケーソン基礎の施工頻度が多い G3 地盤($T_g=0.25\text{ s}\sim 0.50\text{ s}$)を対象とする。有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$ は地盤の固有周期を設定する必要がある、ここでは初期の地盤固有周期 T_g を 0.25(s) に設定する(図 3)。この地震波は地盤の非線形性を考慮したものであり、有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$ も同時に歪みレベルを考慮し、地盤固有周期をその 2 倍の 0.50(s) として有効入力動を計算すると、図 4 に示す波形となる。この 2 倍という値は、等価線形化法に基づく 1 次元地盤解析から統計的に算出した値である。波形から分かるように、 η_g の値が小さくなる、つまり入力損失効果が大きくなるに従い、振幅が低減し高次振動数成分のフィルター効果が現れている。図 5 にはこの波形を用いて作成した所要降伏震度スペクトルを各応答塑性率 μ 毎に示したものである。ここで 1 自由度系に与える非線形特性は Clough モデルを使用している。減衰特性は、減衰定数 h を $0.08/T$ (T は構造物の等価固有周期) で与え、上限値 0.2, 下限値 0.1 と設定する。 η_g による降伏震度の変化を定量的に評価するため、損失効果のないスペクトル($\eta_g=1.0$)の降伏震度でそれぞれのスペクトルの降伏震度を除した値を図 6 に示す。図 6 から、それぞれの応答塑性率において η_g が小さくなると降伏震度が低減し、設計で考慮すべき震度が低減できることがわかる。またその低減効果は、応答塑性率 μ が 1.0 の場合、つまり弾性応答のときに最も大きく、非線形性が進むにつれてその程度が小さくなることがわかる。G4 地盤も同様に解析を行なうと、図 7 に示すように同様の傾向が見られる。なお、他の地盤種別においても同じ傾向であった。この現象は、非線形化が進行すると入力地震動により生じる運動エネルギーが、塑性変形に伴う履歴減衰に消費されるようになり、降伏震度の微小な変化が履歴減衰量に大きく影響を与えることから、降伏震度があまり低下しなくなるものと考えられる。

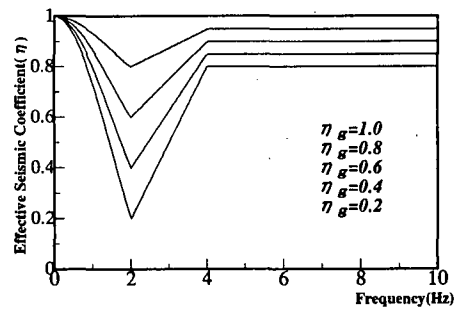


図 3 G3 地盤を対象とした有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$

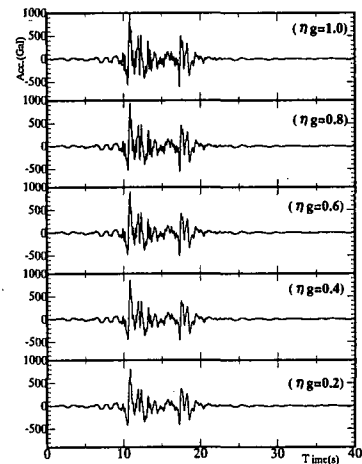


図 4 G3 地盤を対象とした有効入力動

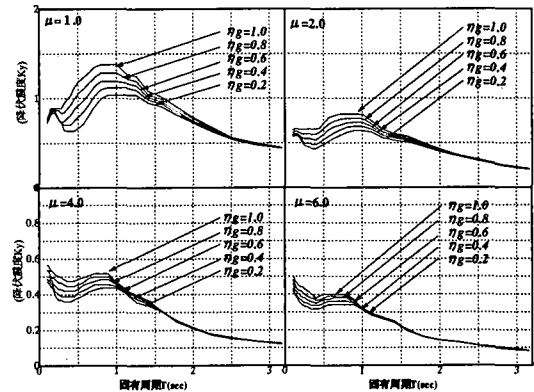


図 5 有効入力動を考慮した所要降伏震度スペクトル(G3 地盤)

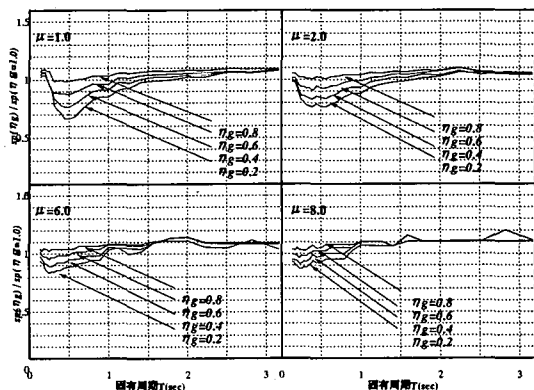


図 6 G3 地盤の降伏震度比

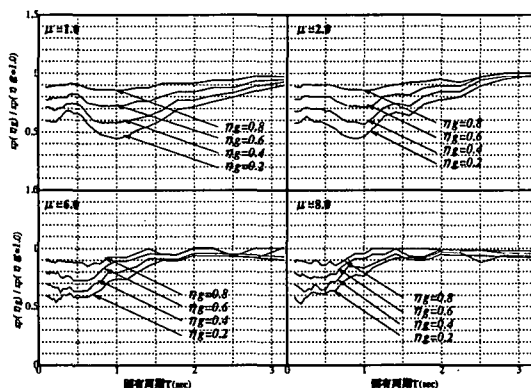


図7 G4地盤の降伏震度比

次に、有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$ と降伏震度比の関係について検討する。まず、図3に示した有効入力評価係数 η_g を振動数軸から周期軸に変換したグラフを図8に示す。

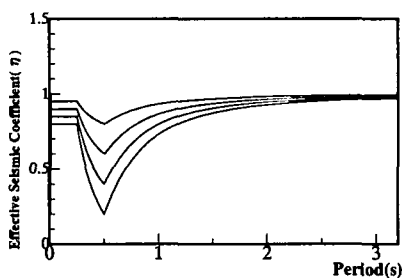


図8 周期領域に変換した有効入力係数 $\eta_{eff}(\omega)$

図6に示す応答塑性率 $\mu = 1$ に対応する降伏震度比と図8を比較すると、およそ相似形になっていることが分かる。また、弾性範囲にある $\mu = 1$ については、降伏震度比が最小となる周期と、有効入力係数が最小となる周期が一致している。この周期での降伏震度比を ξ_g とすれば、以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned} \xi_g &= 0.5 \eta_g + 0.5 \quad (\text{G3地盤}) \\ &= 0.7 \eta_g + 0.3 \quad (\text{G4地盤以上}) \end{aligned} \quad (4)$$

また非線形化が進行すると、降伏震度比が最小値となる周期が短周期側に移行する傾向にある。これは、構造物の非線形化に伴う構造物系の長周期化が生じることが原因である。つまり、有効入力係数が最小となる周期に最も影響を受ける構造物は、非線形化する前に短周期側に固有周期を有し、非線形化することで長周期化し、有効入力係数が最小となる周期にその周期が一致する構造物である。そのため、塑性率が大きいと長周期化の程度が大きくなるため、降伏震度比が最小となる周期が短周期側に移行するのである。

有効入力係数が最小値となる周期における降伏震度比

の値を ξ_f とし、図6からその周期での値を読み取り、応答塑性率 μ と ξ_g を用いて表せば次式で与えることができる。

$$\xi_f = 0.1(1 - \xi_g)(\mu - 1) + \xi_g \quad (5)$$

実務設計を考慮すれば、短周期側の移行を無視することは安全側になるためこれを無視し、降伏震度比の形状を図8に近似させて、降伏震度比を次式で与える。

$$\begin{aligned} \xi_{eff} &= \frac{1}{2}(1 + \xi_g) \quad \left(0 \leq T \leq \frac{T_g}{2}\right) \\ &= \left[\frac{1}{2}(1 + \xi_g) - \xi_f\right] \left[\left(\frac{T_g}{T}\right) - 1\right] + \xi_f \quad \left(\frac{T_g}{2} \leq T \leq T_g\right) \\ &= \frac{T_g}{T_{eq}}(\xi_f - 1) + 1 \quad (T_g \leq T) \end{aligned} \quad (6)$$

また、応答塑性率 $\mu = 1.0$ と 8.0 とした場合、(6)式を図化すれば図9となり、図6と良好に一致する。

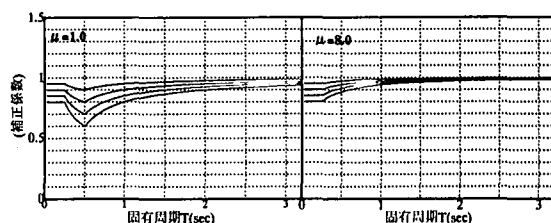


図9 G3地盤の降伏震度比提案式

したがって、入力損失効果を考慮しない状態で求まる応答塑性率 μ を算定し、(5)(6)式から降伏震度比 ξ_{eff} を求めた後、降伏震度をこの降伏震度比 ξ_{eff} 除して応答塑性率を再度求めることで、有効入力動を考慮した応答塑性率 μ を算定することができる。

4. おわりに

入力損失効果が所要降伏震度スペクトルに与える影響を把握し、設計への適用手法を示した。実設計ではこのような特性を工学的判断に基づき適用する必要がある。

参考文献

- 1) Masato Saito, Yoshitaka Muro, Akihiko Nishimura: Study on Effective Seismic Motion of Caisson Foundation with Flexural and Rocking Motions, 10th JEES, 1998.
- 2) 齊藤正人, 室野剛隆, 西村昭彦, 金田孝治: 互層地盤に埋設されたケーソン基礎構造物の有効入力動に関する解析的研究, 第53回土木学会年次講演会講演概要集, 1998.
- 3) 齊藤正人, 室野剛隆, 西村昭彦: 入力損失効果が非線形復元力特性を有するケーソン基礎構造物に与える影響についての研究, 第53回土木学会年次講演会講演概要集, 1998.