

埋込み基礎構造物の建物と地盤との動的相互作用を考慮した簡易的な地震荷重評価法

構造設計工学講座 福和研究室 小島宏章

1. はじめに

耐震設計に性能規定が導入され、設計者が施主との協議の上で自ら耐震性能を選択する性能設計が進みつつある。このためには、建物の耐震設計をする上で重要な地震荷重を適切に評価する必要がある。

建物と地盤との相互作用の影響は、現行の設計基準では曖昧に扱われている。しかし、相互作用による固有周期の伸び、振動モードの変化、逸散減衰の発生、入力振幅の変化は、建物の応答結果に大きく影響する。動的相互作用解析は、以前からその重要性が指摘されているにも拘わらず、解析が容易でなく、多大な時間とコストを要するため、設計実務に反映されることはほとんどなかった。だが、性能規定化の導入に伴い、従来の研究と実務の隔たりを解消する必要がある。このため、動的相互作用を考慮した地震荷重評価の簡易解法が求められる。

本研究では埋込み基礎構造物を対象に、簡易的な地震荷重の評価法¹⁾を示し、地盤インピーダンスと基礎入力動の評価を行う。

2. 地震荷重評価法の流れ

相互作用効果は1自由度系において容易に考慮できるため、以下の操作を行う。図1(a)に示す基礎固定多自由度系の上部構造物を1自由度系に置換する。次に、相互作用の影響を考慮するために、基礎固定1自由度系の地盤を、動的なばねとダッシュポットに置き換えた図1(b)の連成等価1自由度系に置換する。最後に、モード形を考慮して図1(c)の連成等価多自由度系に置換し、各階の地震荷重を設定する。地震荷重の設定には、以下の前提条件を導入し問題を簡略化する。

[1]地盤インピーダンスは、基礎底面にコーンモデルを、基礎側面に拡幅土柱モデルを用いる。詳細は4.地盤インピーダンスの評価で述べる。

[2]基礎は剛性のみ考慮し、質量は無視する。

[3]上部構造物の各階質量と階高は一定とする。

[4]上部構造物の各階質量は床の重心位置に質点として作用させ、各質点間をせん断ばねでつないだ多質点系モデルとする。

[5]上部構造物の振動モード形は逆三角形分布の1次モードが卓越し、基礎固定時の1次固有周期は階数に比例する。

3. 地震荷重設定

相互作用を考慮した各層の層せん断力を求める。

[1]工学的基礎で定義した5%減衰の加速度応答スペクトル $S_A(T, 0.05)$ を設定する。

[2]上部構造物を等価1自由度系に置換し、基礎を地盤インピーダンス K_{HH}, K_{HR}, K_{RR} で支持させ、連成等価1自由度系にする。1自由度系の等価剛性 \bar{k} 、等価高さ \bar{H} を用いて連成等価複素剛性 \bar{K} は、次式で表される。

$$\frac{1}{\bar{K}(\omega)} = \frac{1}{\bar{k}} + \frac{K_{HH}(\omega)\bar{H}^2 + K_{RR}(\omega) - 2K_{HR}(\omega)\bar{H}}{K_{HH}(\omega)K_{RR}(\omega) - K_{HR}(\omega)^2} \quad (1)$$

地盤の静的ばねを用いて、地盤-建物系の1次固有円振動数 $\bar{\omega}_1$ を求め、インピーダンスをばね定数と減衰定数に定数化する。上式を用いて、相互作用を考慮した等価1自由度系の等価周期 \bar{T} 、等価減衰定数 \bar{h} 、弾性変形率 $\bar{\eta}_E$ 、スウェイ率 $\bar{\eta}_H$ 、ロッキング率 $\bar{\eta}_R$ を求める。ここに、 $\bar{\eta}$ は連成等価1自由度系でのそれぞれの変位を頂点変位により基準化した値である。

[3]相互作用効果による入力動補正関数(基礎入力動) $F(T)$ を評価し、連成等価1自由度系の最大応答加速度を求める。詳しくは5.基礎入力動の評価で述べる。

$$\bar{S}_A(\bar{T}, \bar{h}) = S_A(\bar{T}, 0.05)F(T) \frac{1.5}{1 + 10\bar{h}} \quad (2)$$

[4]連成多自由度系の、弾性変形率 η_E 、スウェイ率 η_H 、ロッキング率 η_R を求める。ここに、 η は連成多自由度系でのそれぞれの変位を頂点変位で基準化した値である。

[5]スウェイ・ロッキングを考慮した連成多質点系の刺激係数 β_m と1次固有モード ϕ_{mj} を η を用いて求める。

[6]各層の層せん断力係数は次式になる。

$$C_{mi} = \left(\frac{\sum_{j=i}^n w_j \beta_m \phi_{mj}}{\sum_{j=i}^n w_j} \right) \bar{S}_A(\bar{T}, \bar{h}) / g \quad (3)$$

2次モード以上の寄与を高さ方向に一定の静的震度として与え、高次モードの寄与を補正する。

$$C_i = \frac{\bar{m}}{nm} C_{mi} + \left(1 - \frac{\bar{m}}{nm} \right) C_B \quad (4)$$

$$C_B = S_A(T, 0.05)_{\max} / g \quad (5)$$

[7]各層の層せん断力を求める。

$$Q_i = C_i \sum_{j=i}^n w_j \quad (6)$$

4. 地盤インピーダンスの評価

埋込み基礎の地盤インピーダンスを、基礎底面にコーンモデルを、基礎側面に拡幅土柱モデルを用いて求めた。図2、図3は半無限一様地盤中の一辺 $2B$ の正方形埋込み基礎(埋込み深さ E)の水平、水平-回転連成、回転インピーダンスの厳密解²⁾と簡易解の比較を示す。縦軸は、水平インピー

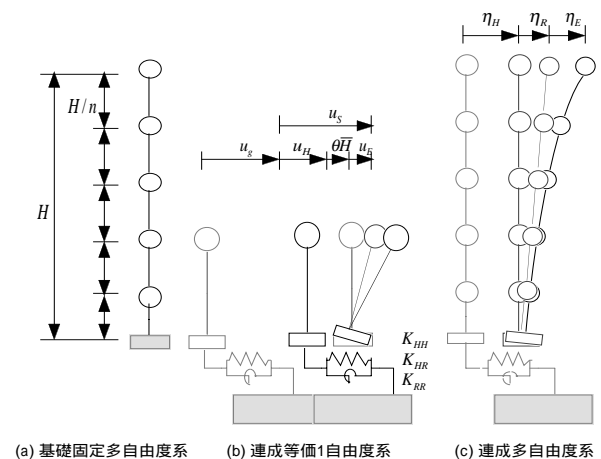


図1 地震荷重設定の流れ

ダンス K_{HH} 、水平-回転連成インピーダンス K_{HR} 、回転インピーダンス K_{RR} の次元に応じ、それぞれ GB, GB^2, GB^3 で除して無次元化した値である。ここに、 G は地盤のせん断剛性である。横軸は無次元振動数 $a_0 = \omega B/V_s$ である。ここに、 V_s はせん断波速度である。地盤のポアソン比と減衰定数は、それぞれ 0.40, 0.02 とした。パラメータとして、埋込み深さ E を基礎底面の半幅 B で基準化した E/B を用いた。 E/B の値は、0.1, 1.0 の2通りとした。得られた簡易解は、水平、回転インピーダンスは、埋込み深さによらず厳密解とほぼ一致した。(図2、図3)

5. 基礎入力動の評価

基礎入力動は、基礎の剛性が地盤振動を拘束する効果を考慮した構造物-地盤系への入力地震動である。図4は半無限一様地盤中の一辺 $2B$ の正方形埋込み基礎に鉛直下方より入射するS波に対する基礎入力動の、厳密解³⁾と簡易解の比較を示す。縦軸は、基礎入力動の水平変位の絶対値 U_G と、回転成分の絶対値 ϕ_G に基礎の半幅 B を掛けた基礎

端での上下変位 $\phi_G B$ を、それぞれ地表面での応答振幅 U で除して無次元化した値である。横軸は無次元振動数 a_0 である。パラメータとして、埋込み深さ E を基礎底面の半幅 B で基準化した E/B を用いた。 E/B の値は、1/3, 2/3, 3/3 の3通りとした。地盤のポアソン比と減衰定数は、それぞれ 0.40, 0.00 とした。得られた簡易解は、水平成分は埋込みが浅い ($E/B = 1/3$) と厳密解に近い値をとるが、深い ($E/B = 3/3$) と異なる。また、回転成分は厳密解に比較し、大きめの評価値を示した。

6. まとめ

水平-回転連成インピーダンスの値は、水平、回転インピーダンスの値に比べ小さい。また、厳密解法の計算負荷を考慮すると、インピーダンス、基礎入力動の簡易解法はよく評価できたといえる。しかし、水平-回転連成インピーダンスと基礎入力動の回転成分に関しては精度向上の必要の余地がある。

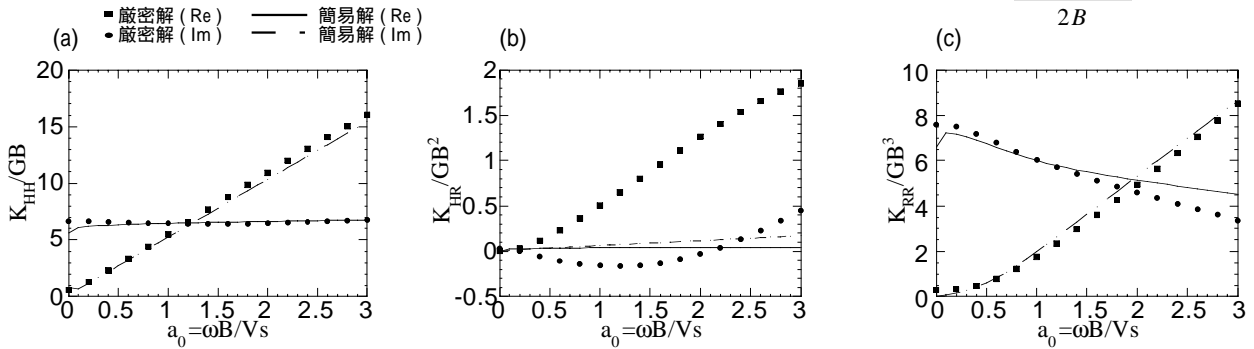
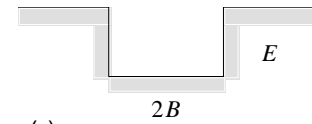


図2 地盤インピーダンスの比較((a)水平、(b)水平-回転連成、(c)回転) $E/B = 0.10$

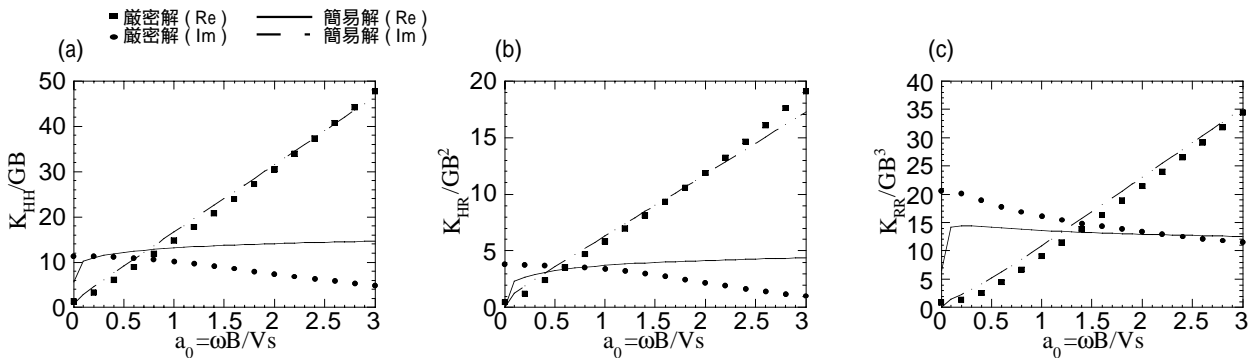


図3 地盤インピーダンスの比較((a)水平、(b)水平-回転連成、(c)回転) $E/B = 1.00$

▼ 厳密解 $E/B = 1/3$ — 簡易解 $E/B = 1/3$
 ● 厳密解 $E/B = 2/3$ - - 簡易解 $E/B = 2/3$
 ■ 厳密解 $E/B = 3/3$ ····· 簡易解 $E/B = 3/3$

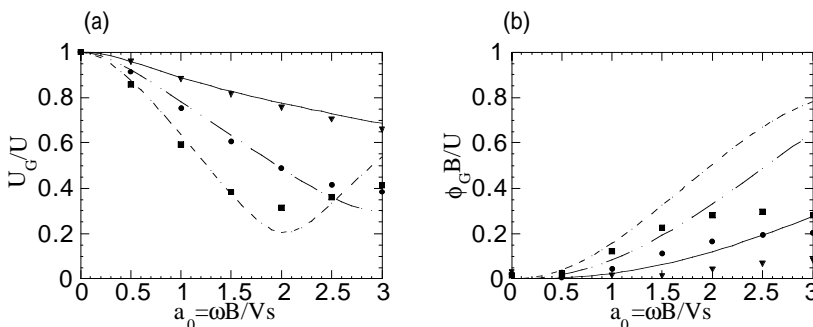


図4 基礎入力動の比較((a)水平成分、(b)回転成分)

<参考文献>

- 1) 松山智恵: 建物と地盤との動的相互作用を考慮した簡易的な地震荷重評価法に関する研究, 1999, 卒業論文
- 2) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996
- 3) Kazuhiro YOSHIDA: Fundamental Studies on Soil-Structure Interaction Problem, Doctoral Thesis, Tohoku University, pp.103-119, 1995