

地盤ばねを用いた地中構造物の非線形応答変位法に関する理論的考察

国立研究開発法人土木研究所 正会員 ○谷本俊輔, 佐々木哲也

1. はじめに 地中構造物の断面方向の耐震設計に用いる応答変位法では、サブストラクチャー法としての解釈に基づき、動的FEMの近似解を与えるような地盤ばねや荷重の設定方法が示されている¹⁾²⁾。しかし、当時の理論は(等価)線形解析を前提としたものであったため、大規模地震動に対する耐震性評価において、構造物、地盤あるいは両者の接触面上での非線形挙動を直接的に考慮する場合の適用方法が明らかにされていない。そこで、本報では、従来の応答変位法の基礎理論を非線形問題に拡張した非線形応答変位法における荷重や地盤ばね等の設定方法について、理論的に考察した結果を報告する。

2. 理想的な全体系モデル 構造物と地盤を模した多数の有限要素が適切に配置され、その節点群が S' : 構造物のうち接触面上のもの, S : 構造物のうち S' 以外のもの, G' : 地盤のうち接触面上のもの, G : 地盤のうち G' 以外のもの の4種類によって構成された理想的なモデルを考える(図-1)。 S' と G' はいわゆる二重節点であり、接触面でのすべり・剥離を表現するためのジョイント要素によって接続されているとする。また、構造要素、地盤要素およびジョイント要素には材料非線形性が適切に与えられているとする。

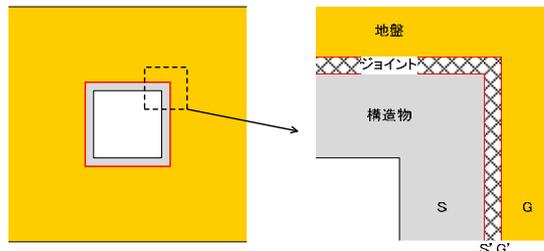


図-1 接触面でのすべり・剥離を考慮した理想的な全体系モデル

系が材料非線形性を有するため、運動方程式(つり合い式)の解法として直接積分法を適用することとする。このため、以降では状態変数を全て増分形で表すこととする。

系が材料非線形性を有するため、運動方程式(つり合い式)の解法として直接積分法を適用することとする。このため、以降では状態変数を全て増分形で表すこととする。

3. 系の分割 地震時における全体系モデルの運動方程式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} M_S^S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_S^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_G^G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_G^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{u}_S \\ \Delta \ddot{u}_{S'} \\ \Delta \ddot{u}_{G'} \\ \Delta \ddot{u}_G \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{SS}^S & C_{SS'}^S & 0 & 0 \\ C_{S'S}^S & C_{S'S'}^S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{G'G'}^G & C_{G'G}^G \\ 0 & 0 & C_{GG'}^G & C_{GG}^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{u}_S \\ \Delta \dot{u}_{S'} \\ \Delta \dot{u}_{G'} \\ \Delta \dot{u}_G \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{SS}^S & K_{SS'}^S & 0 & 0 \\ K_{S'S}^S & K_{S'S'}^S + K_{S'S'}^I & K_{S'G'}^I & 0 \\ 0 & K_{G'S'}^I & K_{G'G'}^I + K_{G'G'}^G & K_{G'G}^G \\ 0 & 0 & K_{GG'}^G & K_{GG}^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_S \\ \Delta u_{S'} \\ \Delta u_{G'} \\ \Delta u_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$[M]$, $[C]$, $[K]$ はそれぞれ質量, 減衰, 剛性マトリックス, $\{\Delta \ddot{u}\}$, $\{\Delta \dot{u}\}$, $\{\Delta u\}$ はそれぞれ加速度増分, 速度増分, 変位増分ベクトルである。また, 上付きの添え字 S , G , I はそれぞれ構造要素, 地盤要素, ジョイント要素を表し, 下付きの添え字は対応する自由度を表している。なお, 接触面上におけるエネルギー損失の主たる要因は履歴減衰であると考えられるため, ジョイント要素の速度比例減衰を無視している。

ここで, 全体系を構造物系と地盤系に分割する(図-2)。このとき, ジョイント要素については, 地盤系に含めると以降の式展開が複雑となるため, 構造物系に含めることとする。すなわち, 節点 G' を境界面として系を分割する。

$$\begin{bmatrix} M_S^S & 0 & 0 \\ 0 & M_S^S & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{u}_S \\ \Delta \ddot{u}_{S'} \\ \Delta \ddot{u}_{G'} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{SS}^S & C_{SS'}^S & 0 \\ C_{S'S}^S & C_{S'S'}^S & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{u}_S \\ \Delta \dot{u}_{S'} \\ \Delta \dot{u}_{G'} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{SS}^S & K_{SS'}^S & 0 \\ K_{S'S}^S & K_{S'S'}^S + K_{S'S'}^I & K_{S'G'}^I \\ 0 & K_{G'S'}^I & K_{G'G'}^I \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_S \\ \Delta u_{S'} \\ \Delta u_{G'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\Delta f_{G'} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} M_G^G & 0 \\ 0 & M_G^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{u}_{G'} \\ \Delta \ddot{u}_G \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{GG}^G & C_{GG'}^G \\ C_{G'G}^G & C_{G'G'}^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \dot{u}_{G'} \\ \Delta \dot{u}_G \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{GG}^G & K_{GG'}^G \\ K_{G'G}^G & K_{G'G'}^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_{G'} \\ \Delta u_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta f_{G'} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

上2式では, 2つの系の境界面において変位増分 $\{\Delta u_{G'}\}$ を一致させる(変位適合条件)と同時に, 荷重増分 $\{\Delta f_{G'}\}$ を作用・反作用の関係として与えている。これら2条件が満たされる限り, 全体系と分割系は同一の解を与える。

4. 変形過程の分解 相互作用の影響を受けた地盤系の変位増分 $\{\Delta u\}$ の発生過程を次のように分解する(図-2)。

$$\begin{Bmatrix} \Delta u_{G'} \\ \Delta u_G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta u_{G'}^C \\ \Delta u_G^C \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta u_{G'}^F \\ \Delta u_G^F \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta u_{G'}^O \\ \Delta u_G^O \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta u_{G'}^R \\ \Delta u_G^R \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta u_{G'}^F \\ \Delta u_G^F \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$\{\Delta u^C\}$ は構造物位置を空洞で置き換えた地盤の地震動による変位増分であり, $\{\Delta u^F\}$ は $\{\Delta u^C\}$ を $\{\Delta u\}$ と一致させるた

キーワード 地中構造物, 耐震設計, 応答変位法, 地盤ばね

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 (国研)土木研究所 土質・振動チーム TEL.029-879-6771

めに必要となる強制変位増分である。また、 $\{\Delta u^0\}$ は構造物設置前の地盤（原地盤）の地震動による変位増分であり、地盤が水平成層状である場合は1次元地震応答解析によって得られる。 $\{\Delta u^R\}$ は原地盤における境界面上の応力増分が零となるように解放した場合に発生する変位増分であり、これを $\{\Delta u^0\}$ に加えたものが $\{\Delta u^C\}$ となる。

以上の変形過程に対応し、境界面上の相互作用力の増分 $\{\Delta f_G\}$ も、次のように分解することができる。

$$\{\Delta f_G\} = \{\Delta f_G^C\} + \{\Delta f_G^F\} = \{\Delta f_G^F\}, \quad \{\Delta f_G^C\} = \{\Delta f_G^0\} + \{\Delta f_G^R\} = \{0\} \quad (5)$$

5. 基礎式の誘導 式(4), (5)の強制変位 (添え字: F) と応力解放 (添え字: R) の過程においては、慣性力と減衰力の増分が十分に小さいと仮定する。このとき、式(3)~(5)より相互作用力の増分 $\{\Delta f_G\}$ は次式で与えられる。

$$\{\Delta f_G\} = \left([K_{G'G'}^C] - [K_{G'G'}^C][K_{GG}^C]^{-1}[K_{GG'}^C] \right) \{\Delta u_G^F\} = [k^G] \{\Delta u_G^F\} = [k^G] \left(\{\Delta u_G\} - \{\Delta u_G^0\} \right) - \{\Delta f_G^R\} \quad (6)$$

$[k^G]$ は地盤系と等価なばね要素群の剛性マトリックスである。式(6)を式(2)に代入し、さらに静的問題に置き換えるために式(2)の減衰力項を無視して単純化すると、図-3に示すような非線形応答変位法の基礎式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{SS}^S & K_{SS'}^S & 0 \\ K_{S'S}^S & K_{S'S'}^S + K_{S'S'}^I & K_{S'G'}^I \\ 0 & K_{S'G'}^I & K_{G'G'}^I + k^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_S \\ \Delta u_{S'} \\ \Delta u_{G'} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ k^G \Delta u_G^0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta f_G^R \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} M_S^S & 0 & 0 \\ 0 & M_{S'}^S & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \ddot{u}_S^0 \\ \Delta \ddot{u}_{S'}^0 \\ \Delta \ddot{u}_{G'}^0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

左辺はジョイント要素 $[K]$ を介して構造要素 $[K^S]$ と地盤ばね要素 $[k^G]$ を接続したモデルを表している。右辺の荷重増分の基となる $\{\Delta u_G^0\}$, $\{\Delta f_G^R\}$, $\{\Delta \ddot{u}^0\}$ はいずれも地盤の1次元地震応答解析より得られるものであり、次のように与える。

第1項：地盤ばねの剛性 $[k^G]$ と原地盤の変位増分 $\{\Delta u_G^0\}$ の積であり、節点 G'に与える。ただし、地盤を非線形として扱う場合は、 $[k^G]$ の経時変化の影響を適切に反映させるため、 $\{\Delta u_G^0\}$ を地盤ばね要素の固定端（節点 G'でない方）に強制変位として与える必要がある。

第2項：境界面上の周面せん断力であり、節点 G'に与える。

第3項：構造物の慣性力であり、節点 S, S'に与える。

以上の定式化に基づくと、全体系の近似解を得る上では上記3種類の作用を見込む必要があり、これらを適切な位置に与えるためには地盤ばね要素とジョイント要素を区別した図-3の節点・要素配置が必要となる事が分かる。また、このように配置したジョイント要素の摩擦強度は、全体系におけるそれと同様に、大規模地震動による相互作用力（第1項と第2項の和）を規制する役割を果たすこととなる。

6. まとめ 本報では、地盤ばねを用いた地中構造物の非線形応答変位法の基礎式を導いた。今後は実験や動的 FEM 等との比較による検証を行っていききたい。

参考文献 1) 川島一彦: 地下構造物の耐震設計法, 鹿島出版会, 1994., 2) 立石章: 応答変位法による地震荷重の作用方法に関する研究, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.157-166, 1992.1.

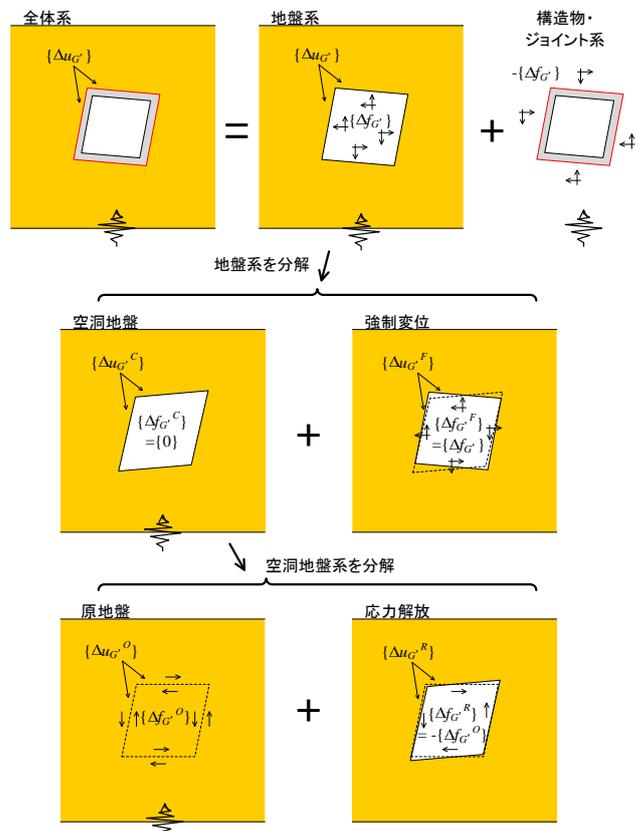


図-2 系の分割と地盤変位の分解

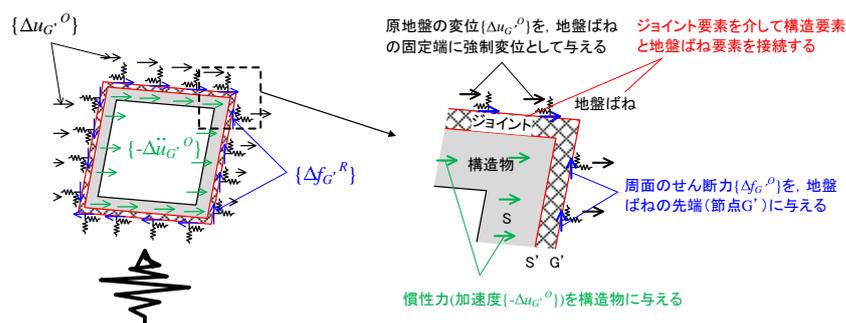


図-3 地盤ばねを用いた地中構造物の非線形応答変位法の概念図