

地下構造物横断方向に適用する静的耐震設計法に関する考察

戸田建設 正会員 村井和彦  
九州大学 フェロー 大塚久哲  
九州大学 正会員 矢葺 亘

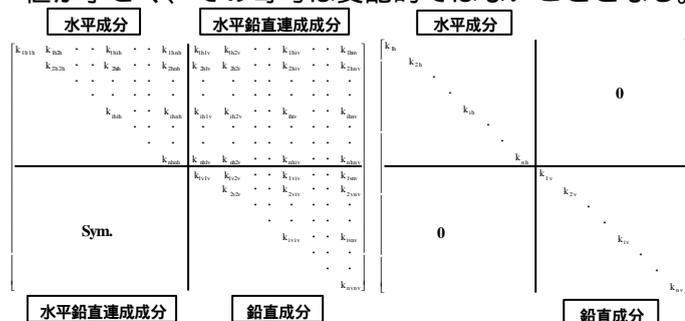
1. はじめに 地下構造物横断方向の耐震設計に適用する応答変位法は、設計指針にも規定されており、広く一般に普及した方法となっている。しかしながら、これを FEM モデルを用いた場合と比較すると、断面力の精度は必ずしも良いとは言い難く、地盤バネの合理的設定法の検討が課題であるとの指摘<sup>例え<sup>1</sup></sup>もなされている。このような点に関して筆者らは、応答変位法の計算精度を、断面力とともに地震時外力にも着目して比較し、この問題は、地盤バネと地盤インピーダンスマトリックス(以下インピーダンスと略称する)の相違に帰着していることを示している<sup>2)</sup>。本論では、このような知見を踏まえ、地下構造物横断方向を対象とした精度良い静的耐震設計法について、実務設計の観点より考察を加えるものである。

2. 応答変位法の基本式 応答変位法の基本式(1)は、地盤と構造物の動的相互作用問題を扱う動的ウァストラフ法<sup>3)</sup>の概念を地下構造物横断方向に適用し、これを静的問題に帰着することにより導かれた<sup>3)</sup>ものである。

$$\begin{bmatrix} [K_{SS}] & [K_{SI}] \\ [K_{IS}] & [K_{II}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{r_S\} \\ \{r_I\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K^{G_{10}}]\{r_I\} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_{SS}] & [M_{SI}] \\ [M_{IS}] & [M_{II}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{r}_S\} \\ \{\ddot{r}_I\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K^{G_{10}}]\{r_I\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [K^{G_{10}}]\{r^{G_1} - r_I\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、[M]：質量マトリックス、[K]：構造物剛性マトリックス、{r}：変位ベクトル、[K<sup>G<sub>10</sub></sup>]：インピーダンスマトリックス、S：地盤と接しない構造物節点を示す添字、I：地盤と接する構造物節点を示す添字、f：自由地盤を示す添字  
文献<sup>2)</sup>では、上式の物理的根拠を再評価して、応答変位法の計算精度は、地盤バネとインピーダンスの相違、すなわち、式(1)各項のうち、インピーダンスに係る右辺外力項第2項(地震時土圧項)と、左辺第2項(計算モデルの支持条件項)の精度に帰着することを示している。

3. インピーダンスと地盤バネの比較 ここでは、インピーダンスとマトリックス表記した地盤バネの要素値を比較し、その相違を検討する。インピーダンスは、図-1に概念を示すように、2n × 2n (n：空洞表面の節点数)の正方行列であり、相反作用の定理より対称行列となるため、自由度は n(2n+1)となる。これに対して、地盤バネは、図-2に概念を示すように、2n × 2n の正方対角行列であり、自由度は 2n と、インピーダンスに比して縮約されていることとなる。図-3は、文献<sup>2)</sup>で対象とした地盤及び構造物条件における静的インピーダンスの水平および水平鉛直連成成分各要素値の分布傾向を、同じ縮尺で示したものである。これらより、水平成分では対角近傍要素の絶対値が大きいとともに、異符号の値も存在しているのに対し、それ以外では値が小さくなっていることがわかる。なお、このような傾向は、鉛直成分についても同様である。一方、水平鉛直連成成分は全般的に値が小さく、その寄与は支配的ではないこととなる。また、図-4は、同じ条件のケースを対象に、空洞表面のうち側壁中央節点に着目し、水平成分のインピーダンス要素値と着目点からの距離の関係を、地盤バネの値とともに示したものである。これらより、インピーダンスの各要素値は、着目点の値が最も大きく、その隣接節点では逆符号の値となっていることがわかる。また、荷重作用点からの距離に応じて値は徐々に小さくなる傾向にある。このような分布が得られるのは、FEM



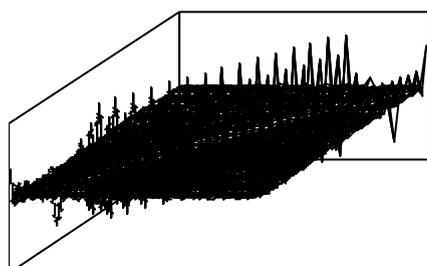
のうち側壁中央節点に着目し、水平成分のインピーダンス要素値と着目点からの距離の関係を、地盤バネの値とともに示したものである。これらより、インピーダンスの各要素値は、着目点の値が最も大きく、その隣接節点では逆符号の値となっていることがわかる。また、荷重作用点からの距離に応じて値は徐々に小さくなる傾向にある。このような分布が得られるのは、FEM

図-1 インピーダンス概念

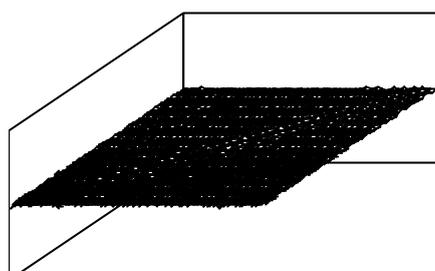
図-2 地盤バネマトリックス概念

Keywords：地下構造物横断方向、静的耐震設計法、地盤バネ、インピーダンスマトリックス、実務設計

連絡先：〒 104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1 戸田建設土木設計室 Tel.03-3535-1607 Fax.03-3564-0475



(a) 水平成分



(b) 水平鉛直連成分

図-3 インピーダンス要素値分布

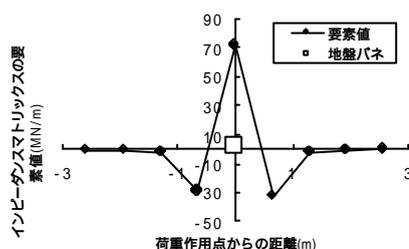


図-4 インピーダンス要素値-着目点距離

変形も卓越するなど、厳密には多自由度系の収束計算となるとともに、構造モデルにおける支持条件のみならず、作用させる地震時土圧にも、このようなモデル化の相違の影響が生じる。さらに、地下構造物が非線形領域に入る場合は、発生する損傷程度に相応した変形の評価が必要となるとともに、モデルの精度が塑性率などの結果に及ぼす影響が大きいため、収束判定を厳密にする必要がある。したがって、地下構造物横断方向に適用する応答変位法は、精度良い実務設計手法として合理化を図るよりも、むしろ、定性的な傾向を捉える1つの簡易手法として位置づけることが合理的であると考えられる。また、複雑な条件の設計に応答変位法を適用する場合は、さらに慎重な議論考察が必要となる。一方、式(1)で示した応答変位法の基本式において、地盤バネではなくインピーダンスを用いることにより、計算精度を向上させる方法もある。この方法は、地盤を等価線形弾性体としてモデル化できる場合は、構造物が非線形領域に入る場合や条件が複雑な場合も含め、任意の構造物剛性や変形に対して精度良い評価ができるものと考えられる。これを静的 FEM による方法と比較すると、その精度が等価であるとともに、構造物、すなわち、空洞地盤の形状が同じであれば、地盤の影響が分離できることとなり、構造物に関する非線形特性や剛性などのパラメータ解析に対し、実務設計上の利点がある。しかしながら、インピーダンスの算定や梁モデルへの組み込みなどは、広く普及しているコードでは対応できないため、汎用性に劣る。したがって、実務設計において精度良い地下構造物横断方向の耐震設計を合理的に行うためには、演算時間やデータ容量は大きくなるものの、汎用性にも優れ、上記煩雑な手順が回避できる FEM による相互作用のモデル化を用いることが現実的と考えられる。

**参考文献** 1) 土木学会地震工学委員会「耐震設計の方向と基本課題」耐震性研究小委員会報告,1998.3 2) 村井ら地震時外力に着目した地下構造物横断方向に適用する応答変位法の計算精度と地盤バネに関する考察「土木学研究論文報告集第10巻,2000.11 3) 立石「応答変位法におけ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/ -18,pp.157-166,1992.1 4) 日本道路協会「駐車場設計施工指針同解説,1992.11 5) 鉄道総合技術研究所「編鉄道構造物等設計標準同解説耐震設計,1999.10

して評価しているためと考えられる。一方、地盤バネの値は、インピーダンスの要素値に比べて非常に小さいものとなっている。これは、インピーダンスの正負の分布値を1点の値に縮約しているためであり、空洞地盤を等価に離散化したものとして評価しているためと考えられる。また、このように自由度を縮約する際に付加される条件は、 $n(2n-1)$ 個存在する各節点間の幾何学的関係であり、例えば駐車場指針<sup>4)</sup>に規定されている地盤バネは、その算出過程において、構造物が剛体であるとの条件が付加されていることとなる。したがって、文献<sup>2)</sup>に示した応答変位法の計算精度に関する知見は、構造物剛性が大きいと変形が剛体に近似できるため断面力や相互作用力の精度が良いが、構造物剛性が小さいと地盤バネ算定において与える幾何条件と結果として得られる構造物変形の適合性が十分ではないため精度が低下すると説明できる。また、文献<sup>1)</sup>における、本来地盤バネは変形に相応して相違するとの知見とも等価なものとなっている。

**4. 静的耐震設計法の高度化に関する考察** 以下では、地下構造物横断方向に適用する静的耐震設計法の高度化について、上記相互作用のモデル化に着目し、実務的な観点より考察する。上記知見より、応答

変位法の計算精度を向上させるためには、地盤バネの算出過程、すなわち、インピーダンスの自由度を縮約する条件として、構造物変形との適合性を考慮することが必要となる。構造物の地震時変形がせん断変形のみに限定する場合、このような適合性の評価は鉄道標準<sup>5)</sup>に示されている応答係数を評価指標とした1自由度系の収束問題に帰着することが可能である。しかしながら、構造物の変形は、例えば剛性が小さい場合は曲げ