

## 地下構造物の変位を指標とした非線形応答震度法による耐震性能評価

(株)日建設計シビル 正会員 西山誠治  
 (株)日建設計シビル 正会員 川満逸雄  
 (財)鉄道総合技術研究所 正会員 羽矢 洋

1. はじめに 強震動に対する構造物の耐震性能の照査では、「構造物の損傷過程にまで立ち入って構造物の耐震性能を照査する」ことが望ましい。この観点から橋脚等の地上構造物では静的非線形解析によるプッシュオーバー・アナリシが用いられ、耐震性能照査においては、道路関係では荷重(保有水平耐力)を、鉄道関係では変位(曲率や回転角)を主な指標としている。一方、地下構造物への同手法の検討例は多くない。地下構造物の耐震性照査手法では、外力が地盤と構造の相互作用により定まるため地盤・構造それぞれの剛性が変形に応じて変化するのが望ましい。さらに、RC部材の性能評価においては、非線形関係に最大耐力以降の負勾配を考慮し、変位を指標とするのが望ましい。

そこで本研究では、地下構造物の変位を指標とした非線形応答震度法による耐震性能評価手法を提案する。検討手法の特徴を地下構造物の種々の解析手法と比較することにより明らかにするとともに、手法の妥当性を直接積分法による動的解析結果と比較することにより検証する。

2. 変位を指標とした非線形応答震度法 地下構造物の静的地震応答解析法としては、地盤ばねの問題を回避できる応答震度法やFEM 応答変位法などが望ましいが、これらの手法では、一般に、地盤は等価線形法の収束剛性等による弾性体として評価されるため、最終の荷重状態以外での地盤剛性は正確ではない。これを解決するには、応答震度法で地盤に直接非線形性を考慮すればよい。なお、FEM 応答変位法では自然地盤の地盤変位を生じさせる等価節点を算出する過程で地盤が弾性体である必要があるため、地盤に非線形性を直接考慮するのは困難である。

つぎに、1次元地盤解析で算出された対象時刻の慣性力を2次元FEM解析モデルに与えるが、減衰などの影響により2次元解析の遠方地盤での地盤変位量は、1次元解析より大きく算出される場合がある。そこで、まず、1次元の地盤解析では履歴減衰のみを考え内部減衰は極力小さくするものとする。つぎに、慣性力は分布のみを用い、絶対値は遠方地盤の変位量によって定めるものとする。すなわち、1次元解析結果の慣性力を、分布形は固定したままで分割载荷し、遠方の地盤変位が1次元解析に等しい時点を構造物の応答値とする。さらに荷重を载荷することにより、構造物の終局状態を確認できる。以上をまとめて図1に示す。

### 3. 妥当性の検証

3.1 検討条件 妥当性の検証は、図2に示す大開駅を対象に、非線形応答震度法と逐次積分法による非線形動的解析およびその他の各種の静的解析非線形解析との比較により行う。入力地震動は神戸ポートアイランド<sup>®</sup>(GL-83m)の方向補正波を用いた。

正解とする逐次積分法による非線形動的解析は、地盤はROモデルとした。要素別リー・減衰を用い可能な限り小さな粘性減衰とし主に履歴減衰のみを考慮した。非線形応答震度法

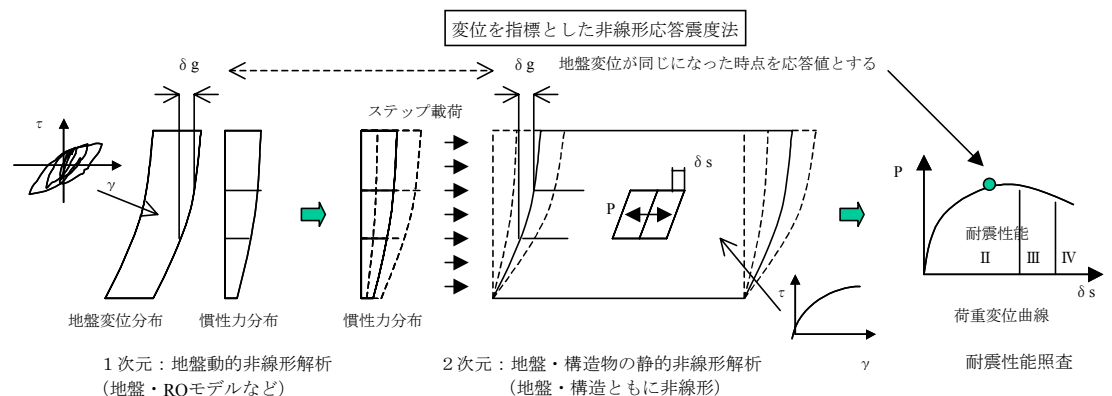


図1 地下構造物の変位を指標とした非線形応答震度法による耐震性能評価

キーワード：開削トンネル、非線形応答震度法、荷重変位曲線

連絡先：〒112-8565 東京都文京区後楽2-2-23 TEL(03)3817-0514 FAX(03)3817-0517

は地盤の非線形性を RO モデルで考慮し、震度は構造物深度での自然地盤の層間変位が最大となる時刻の 1 次元動的な非線形解析結果を用いた。その他の解析法は、地盤ばねや有限要素と構造物を一体で解く手法として、応答変位法、FEM 応答変位法を取り上げた。さらに構造体のみをモデル化する方法として、簡易応答変位法および地盤と構造物一体で FEM 等価線形解析によって算出した相互作用力を非線形フレームに載荷する方法（動的解析（等価線形））を取り上げた。これらの手法では地盤の解析に等価線形法（shake）を用い地盤剛性等は収束剛性とした。なお、いずれも構造物はトリリニアの非線形特性を用いた。この他、詳細な条件および解析手法の説明は文献<sup>1)</sup>を参考にされたい。

### 3.2 検討結果

地下構造物の応答値として層間変位—層せん断力関係に着目する。これは構造物全体の曲げ変形と発生せん断力の両方を表現する指標と位置づける。

逐次積分法による動的解析と非線形応答震度法および FEM 応答変位法を比較して図 3 に示す。動的解析では初載荷時の履歴に着目する。非線形応答震度法では逐次動的解析とよい整合が得られているが、FEM 応答変位法では、最終荷重時は動的解析と整合が良いが、変形の小さい領域では剛性を過小評価していることが分かる。これは、地盤剛性は応答最大時の収束値であるため、変形が小さな状態では地盤剛性を過小評価しているためと考えられる。FEM 応答変位法で地震力を 33%~93%としたときの収束剛性を用いて解析した結果を図 3 に併せて示すと動的解析と整合が良くなるが、解析は煩雑である。一方、非線形応答震度法、変形量に応じて地盤の非線形性が自動的に考慮されるため動的解析と整合がよいと考えられる。

等価線形法の収束剛性を用いた各解析手法との比較を図 4 に示す。逐次積分法の動的解析（RO）と比較すると、いずれも荷重変位関係の初期剛性が弱い。FEM 応答変位法と同様の理由である。

なお、被害の説明の観点からは損傷状況はいずれの手法も 10~20mm の変形量で側壁・床版の隅角部で  $M_y$  が現れ、中柱のせん断破壊で終曲を迎えた。動的解析を基準にするといずれも変形が同等か若干大きく安全側の結果である。

**4. まとめ** 地下構造物の変位を指標とした非線形応答震度法による耐震性能評価について検討した。検討した手法は、既存の応答震度法の使い方を工夫し再定義したものであるが、他の手法と比較して、小変形領域から大きな変形領域まで、直接積分法による動的解析結果との整合がよいことが分かった。構造物の損傷過程に立ち入る場合、最終荷重時のみならず、その前後の状態においても精度よく構造物の状態を再現することが望ましく、地盤・構造の非線形性を同時に考慮できる手法が重要となる。今後、繰返しによる損傷の影響、さらに大变位領域での適用性を、種々の地盤条件にて検討し、適用範囲を明確にする予定である。

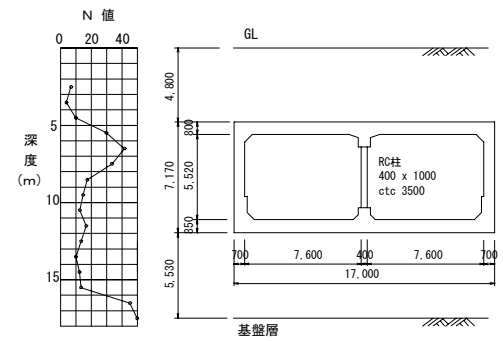


図2 対象構造物

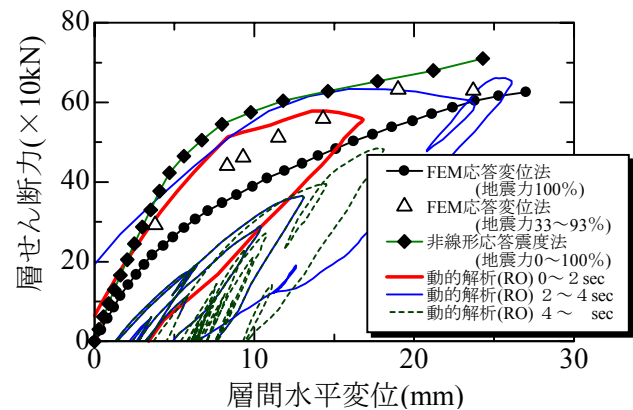


図3 動的解析、非線形応答震度法、FEM応答変位法の比較

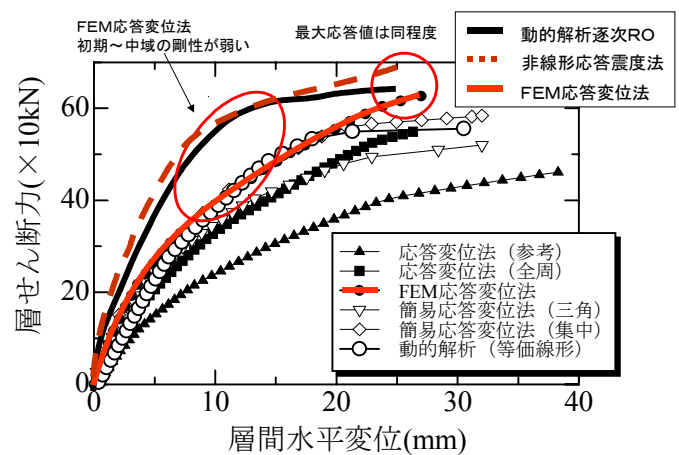


図4 収束剛性を元にした各手法の比較