

地盤ひずみに着目した修正震度による 応答震度法の適用性と地震荷重の位置付け

西山誠治¹・川満逸雄²

¹日建設計シビル 技術開発部 (〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3)

E-mail:nishiyama@nikken.co.jp

²日建設計シビル 技術開発部 (〒102-8117 東京都千代田区飯田橋2-18-3)

E-mail:kawama@nikken.co.jp

地下構造物のFEMを用いた静的解析として応答震度法がよく用いられる。応答変位法のような地盤ばねの不明確さがなく、地盤を含めた解析モデル全体に震度を与えるという荷重作用方法も比較的簡便で、有用な手法である。その震度は、ある時刻の加速度分布から算定されるのが一般的である。しかし、減衰の影響が大きい場合では、加速度から求まる震度では十分な解析精度が保てないことがある。そこで、地盤ひずみに着目した修正震度を定義し、この修正震度による応答震度法によれば精度が向上することを示す。さらに、修正震度により求まる地震時荷重を、FEMを用いた他の静的解析手法の地震荷重と比較して、その位置付けを確認する。

Key Words : Underground structure, Soil-structure system, equivalent static distributed inertia force, FE model.

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、大開駅の被害を教訓として、開削トンネル等の地下構造物についても、積極的に耐震設計・検討が実施されるようになってきた。

設計基準としては、従来からの梁ばねによる応答変位法がよく採用されている。一方で、さらに精度のよい方法として、地下構造物のFEMを用いた静的解析として応答震度法¹⁾がよく用いられる。

応答震度法は、応答変位法のような地盤ばねの不明確さがなく、地盤を含めた解析モデル全体に震度を与えるという荷重作用方法も比較的簡便で、有用な手法である。その震度は、ある時刻の加速度分布から算定されるのが一般的である。

一方、近年レベル2地震動など大きな地震力を対象とすることが多くなった。条件によっては、地盤ひずみが大きくなり、大きな履歴減衰を示す領域に至ることも多い。このような場合は、減衰の影響が大きくなり、加速度から求まる震度では十分な解析精度が保てないことがある²⁾。

そこで、本研究では地盤ひずみに着目した修正震度を定義し、この修正震度による応答震度法によれば精度が

向上することを示す。さらに、修正震度により求まる地震時荷重を、FEMを用いた他の静的解析手法の地震荷重と比較して、その位置付けを確認する。

2. 検討条件

対象構造物は、1層2径間の鉄道一般軌道部の開削トンネル(図1)とする。地盤は、表層の厚さ20mの一樣地盤(沖積粘性土 $N=3$, $V_s=140$ m/s, $\gamma=16$ kN/m³)を対象とし、下部に基盤層をモデル化する。トンネルの土被りは5mとする。地盤には沖積粘性土の動的変形特性を考慮する(図2,3)。応答震度法では地盤は1次元解析の収束剛性を用い、構造物は全断面有効の弾性体とした。FEMモデルの幅は構造物の影響を受けない範囲として190mとした。これは、応答震度法を実施した場合に、側方の地盤変位が地盤応答解析と十分に整合するまで広げて検討して定めた。

入力地震動は、地盤のひずみが大きくなり、地盤の履歴減衰の影響が大きくなる場合を想定し、鉄道基準のレベル2地震動スペクトルを用いる(図4)。

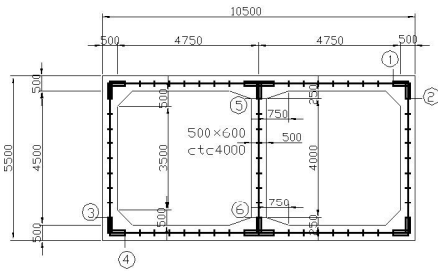


図 1 対象構造物

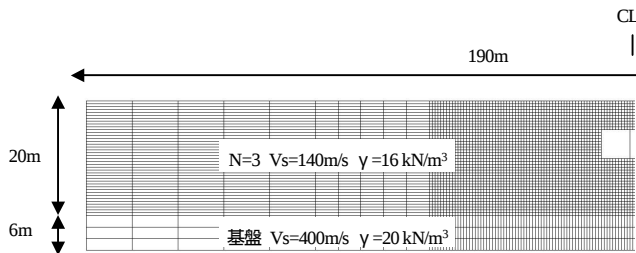


図 2 全体モデル

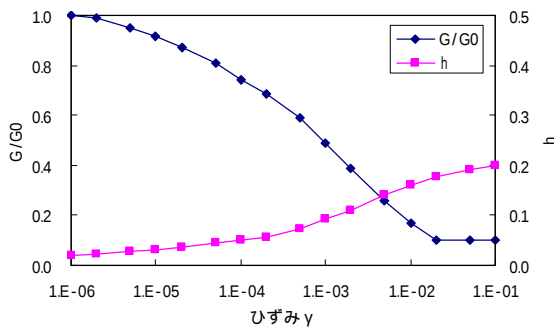


図 3 動的変形特性(表層中間深度)

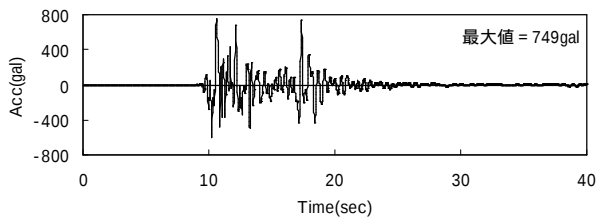


図 4 入力地震動

3. 検討結果

(1) 1次元地盤応答

等価線形化法による1次元地盤応答解析(SHAKE)を実施する。構造物上下版間の変位が最大時刻の応答値の分布を図5に示す。地盤のひずみレベルは1～2%程度であり、収束減衰値は15%程度と大きめである。さらに、着目時刻では速度応答がある程度存在している。

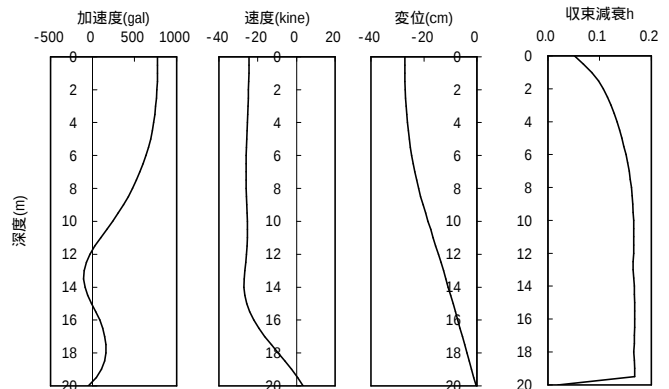
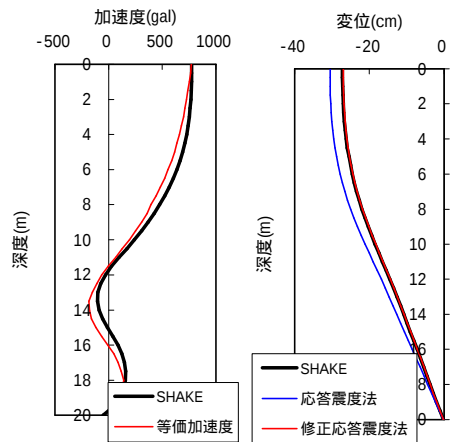


図 5 1次元解析結果(層間変位最大時)

(2) 応答震度法

1次元解析の収束剛性を用い、着目時刻の加速度分布を用いた応答震度法の結果を図6に示す。ここでは、応答震度法の結果として、全体モデル側方端部の遠方地盤に着目した。この部位は、地盤のみを解析しているため、1次元解析結果と比較できるが、応答震度法の変位分布では1次元解析結果と整合していないことが分かる。減衰力を無視しているためと考えられる。



(1) 等価震度 (加速度) (2) 応答震度法結果 (遠方地盤変位)

図 6 応答震度法に用いる震度と応答震度法の結果

(3) 修正震度による応答震度法

地盤歪みに着目した修正震度を考える。これは岩盤中の地下空洞の耐震設計等で用いられている手法と同様であるが、軟質地盤でひずみが大きく、減衰力の影響が大きい場合に着目してこそ有効な方法と考えられる。

最終的に地盤に再現したいのは地盤ひずみ γ であるので、収束剛性 G_{eq} を用いて、せん断応力 $\tau = G_{eq} \times \gamma$ とし、これを再現する震度を以下のように算出する。

$$k_{heq} = (\tau_{i-1} - \tau_i) / (h_i \cdot \gamma_i)$$

ここに、 k_{heq} ：等価震度， τ_i ： i 層のせん断応力，
 τ_{i-1} ： $i-1$ 層のせん断応力， h_i ： i 層の層厚，
 γ_i ： i 層の単位重量

このようにして算出した等価震度(加速度)を図 6(1)に示し、この修正震度による応答震度法の結果(修正応答震度)を図 6(2)示す。修正震度を用いた場合の遠方地盤の変位分布は 1 次元地盤解析結果(SAHKE)に一致する。

(4) 構造物の断面力の確認

応答震度法に用いる加速度の違いが、構造物の断面力に及ぼす影響を調査する。

比較の基準とするために、SHAKEの収束剛性を用いた弾性動的解析を実施した。これによる地震時増分断面力を基準として、応答震度法、等価加速度による修正応答震度法の地震時増分断面力を比較して図 7 に示す。同図の 1 ～ 6 は、図 1 に示す対象構造物の断面力の着目点である。

動的解析と比較すると、応答震度法は断面力を過大評価しているが、修正応答震度法は動的解析とほぼ整合する。当然ながら、図 6 に示す地盤変位の影響が表れた結果である。

これらは曲げモーメントについて比較を行ったが、軸力やせん断力および層間変形量などについても同様の傾向である。

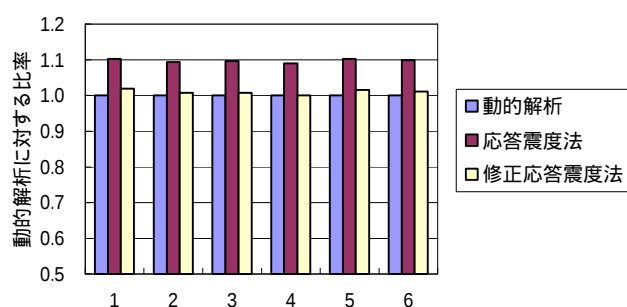


図 7 断面力(曲げモーメント)の比較

(5) 減衰の影響の確認

通常の加速度による応答震度法と、等価加速度による応答震度法の結果の差異が、減衰の影響であることを確認する。

減衰の影響が小さい場合として、1 次元地盤解析の収束剛性を用い、減衰を小さく、全層で $h=0.02$ として地盤応答解析を実施した。上下版相対変位最大時刻の結果を図 8 に示す。この場合でも、速度応答がある程度存在し

ている時刻であることが分かる。

この時刻の加速度分布から算定した震度およびひずみに等価な修正震度を併せて図 9 に示す。これより、両者は一致しており、減衰の影響が小さい場合は、震度と修正震度は一致することから、応答震度法で整合の悪い場合は、減衰の影響と考えられる。

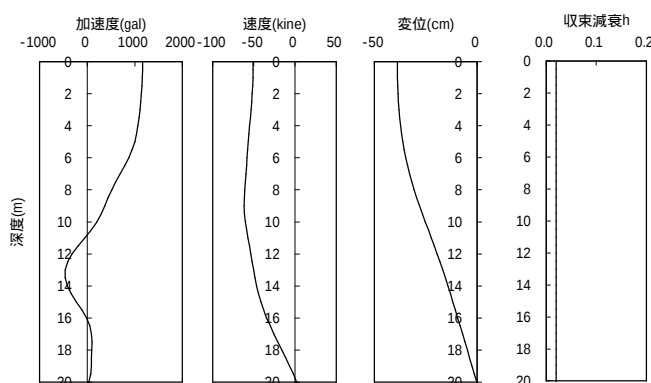


図 8 1 次元解析結果(減衰 0)

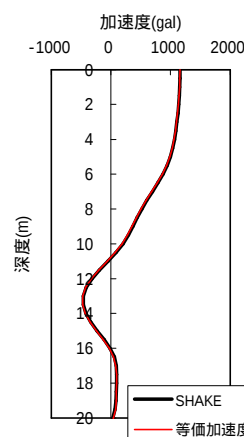


図 9 等価震度(加速度)(減衰 0)

4. 修正応答震度の考察

FEMを用いた解析法として応答震度法とFEM応答変位法³⁴⁾がある。減衰力を無視できる場合、両者は等価であることが、立石により示されている³⁾。しかし、減衰の影響がある場合は、FEM応答変位法の方が精度がよい¹²⁾。

FEM応答変位法は、空洞系のFEMモデルにおいて自然地盤と同じ変形を生じさせる節点力を、構造物・地盤系の解析モデルに載荷し、構造物周辺には周面せん断力を載荷する方法である。自然地盤と同じ変形を生じさせる接点力を用いることから、ひずみに着目して荷重を構築しているといえる。ひずみに起因する復元力は、慣性力および減衰力とつりあっているため、FEM応答

変位法は減衰力の影響も考慮した荷重形態といえる。

一方、応答震度法では、加速度すなわち慣性力に着目している。これと釣り合うのは、復元力(ひずみ)および減衰力であるので、慣性力のみでの考慮では、減衰力の影響が大きい場合は、ひずみの再現性が悪い場合がある。

本研究で用いた修正震度は、ひずみによる復元力(=慣性力+減衰力)から算定されているため、これによりひずみが再現できる。これは、遠方地盤ではFEM応答変位法における自然地盤変位を再現する等価な節点力に相当する。構造物近辺では、FEM応答変位法では周面せん断力を載荷する必要があるが、応答震度法ではこれに相当するせん断力が自動的に発生することになる。いこれより、修正震度による応答震度法は、減衰の影響がある場合においても、FEM応答変位法と等価な地震荷重と考えられる。

FEM応答変位法は、空洞地盤に自然地盤変位を発生させる節点力の算定には、一般にはマトリクス演算を必要とし、汎用の解析コードでの解析は困難である。さらに、構造物周囲には周面せん断力を載荷するなど、やや煩雑な手順が必要となる。

一方、応答震度法は、同一深度の地層毎に等価な重量を設定して横方向に一樣な震度を与えれば、汎用の解析コードで比較的簡便に計算できる利点がある。よって、修正震度による応答震度法は、応答震度法の簡便さはそのままに、FEM応答変位法と同等の精度の検討が可能になる有用な手法と考えられる。

5. まとめ

地下構造物のFEMを用いた静的解析である応答震度法について検討した結果以下のことが分かった。

- ・地震力が大きく、地盤の減衰の影響が大きい場合では、加速度から求まる震度では十分な解析精度が保てないことがある。

- ・これを解決するために、地盤ひずみに着目した修正震度を定義し、この修正震度による応答震度法によれば精度が向上することを示した。
- ・修正震度による応答震度法は、応答震度法の簡便さはそのままに、FEM応答変位法と同等の精度の検討が可能になる有用な手法と考えられた。

なお、大きな地震力に対する等価線形化法による地盤解析の適用性は議論の余地があると考えられる。地盤・構造の非線形性を考慮した非線形の応答震度法などを検討する必要があると考えられる。

謝辞

本検討の解析モデルや条件の一部は、土木学会地震工学委員会 地下構造物の合理的な地震対策研究小委員会(委員長 岩楯敬広：首都大学東京都市環境学部教授)WG3/ SWG1における検討モデルを使用させて頂きました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) 片山幾夫 他：地下構造物の実用的な準動的解析手法「応答震度法」の提案，第40回土木学会年次学術講演会,1984
- 2) 佐藤成，劉如山：地下構造物の横断方向の耐震設計における静的FEM解析法の適用性について，第33回地盤工学研究発表会，1998年など
- 3) 立石章：静的FEMを用いた地中構造物横断面方向の耐震計算法における地震荷重の作用方法の研究，土木学会論文集No519/I-32
- 4) 大田他：応答変位法を用いた地下構造物の耐震検討について，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，1997

(2005.?? 受付)