

陰的応力計算法による時刻歴応答解析の応答加速度を用いたニューマーク法に関する検討

石川工業高等専門学校 学生会員 ○福森 雄基
 石川工業高等専門学校 稲場 光太郎
 石川工業高等専門学校 正会員 新保 泰輝
 五大開発株式会社 三谷 浩司
 株式会社複合技術研究所 Duttine Antoine

1. はじめに

近年、我が国では大阪府北部地震や北海道胆振東部地震などの巨大地震が発生しており、数多くの盛土が被害を受けている。現在、地震による盛土の安定照査方法としてニューマーク法が汎用されている。ニューマーク法は、地盤物性と地震波形を用いて数百のすべり円弧に対して残留変形量（以下、すべり量）を求める手法であり、すべり量が最大値を示す円弧を想定すべり面として対策検討を行う。また、30m 以上の高盛土等においては、盛土内で加速度が増幅したり減衰したりすることで、入力加速度（地震波形）と応答の加速度が大きく異なる。そこで、鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾や NEXCO 設計要領土工編では、当該モデルの地震応答解析を実施し、解析で得られた応答加速度を用いたニューマーク法が利用されている。一方、これらの解析において、地震応答解析には GHE モデルや RO モデルが汎用されている。T.Shimbo¹⁾は RO モデルや HD モデル、GHE モデルなどの骨格曲線/履歴曲線を有する簡易な構成式の陰的な応力計算法を提案している。提案手法では、偏差応力と偏差ひずみの方向が同一と仮定し、応力をひずみの関数として得ている。そのため、ひずみがステップ依存性を持たない限り、応力計算時に応力のステップ依存性はない。ただし、FEM 等の境界値問題に導入した場合、ひずみは解析時間間隔に依存するため、応力もまた依存性を有する。提案方法に関するこれらの検討は行われていない。そこで、本研究では T.Shimbo が提案する陰的応力計算法を FEM に導入し、更にレイリー減衰を考慮した定式化を用いて応力-ひずみ関係の解析時間間隔依存性を検証する。また、解析時間間隔を変更した場合に得られる応答加速度とそれを用いたニューマーク法に関する解析時間間隔依存性も検討する。

2. 定式化

入力地震波とレイリー減衰を考慮した線形等方弾性体の運動方程式は次式に示す通りである。

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} + \alpha \rho \dot{\mathbf{u}} = \text{div} \boldsymbol{\sigma} + \beta \text{div} \dot{\boldsymbol{\sigma}} + \mathbf{b} - \rho \ddot{\mathbf{u}}_g \quad (1)$$

ここで、 α 、 β はレイリー減衰のパラメータである。上式を離散化すると、周知の MCK 型の全体剛性方程式が得られる。そこで本研究では式(1)を基に定式化を行う。上式の応力速度 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$ に関して微分の連鎖則を用いると次式が得られる。

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{d}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{d}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{d}\} = \{\mathbf{F}^{\text{ext}}\}. \quad (2)$$

$$[\mathbf{C}] := \alpha [\mathbf{M}] + \beta \left[\int \mathbf{B}^T \dot{\boldsymbol{\sigma}} d\Omega \right], [\mathbf{K}] := \left[\int \mathbf{B}^T \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \mathbf{B} d\Omega \right], \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} = \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} (\mathbf{B} \dot{\mathbf{d}})$$

ここで $\partial \boldsymbol{\sigma} / \partial \boldsymbol{\varepsilon}$ は Consistent 接線剛性テンソルである¹⁾。紙面の都合上、陰的な応力計算方法に関しては文献 1)を参照したい。

3. ステップ依存性

解析モデルは図-1、図-2 に示す高さ 32m の高盛土を用いた。地層 1 は HD モデル、地層 2 は線形弾性体とした。地層 1 は単体積重量 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ 、ヤング係数 $E = 400 \text{ MPa}$ 、初期せん断剛性 $G_0 = 150 \text{ MPa}$ 、レイリー減衰 $\alpha = 0.01253$ 、 $\beta = 0.00019$ 、内部摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ 粘着力 $C = 10 \text{ kPa}$ とした。地層 2 は、単体積重量 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 、ヤング

キーワード 陰的応力計算法、地震応答解析、ニューマーク法、ステップ依存性

連絡先 〒929-0342 石川県河北郡津幡町北中条 石川工業高等専門学校 TEL 076-288-8166

係数 $E=800\text{MPa}$ ，初期せん断剛性 $G_0=300\text{MPa}$ ，レイリー減衰 $\alpha=0.01253$ ， $\beta=0.00019$ とした．動的減衰特性は文献 2) の豊浦砂の値を用いた．解析入力波形には道路橋示方書の兵庫県南部地震を用いた．解析時間間隔を $\Delta t = 0.01\text{sec}$ ， 0.001sec ， 0.0001sec とした軸差ひずみ—軸差応力関係を図-3，応答加速度を図-4 に示す．図-3 に示すように 75m，92m 位置共に $\Delta t=0.001\text{sec}$ ， 0.0001sec は同じ曲線を示している．ただし， $\Delta t=0.01\text{sec}$ は 92m 位置で大きく異なる軸差ひずみ—軸差応力を示した．これは図-4 a) に示すように，75m 位置では比較的小さい応答加速度の差が，加速度が伝搬していく過程で差が蓄積し，図-4 b) に示す天端付近で大きくなったためと考えられる．

4. ニューマーク法の結果比較

時間間隔 $\Delta t=0.01\text{sec}$ ， 0.001sec ， 0.0001sec として得られた応答加速度を用いてニューマーク法を実施した．最小降伏震度の円弧（降伏震度 0.196，中心座標 206m，146m，半径 85m）を用いて，円弧内の応答加速度の質量平均を求めた．円弧内の平均応答加速度を図-5 に示す．また，ニューマーク法の結果を図-6 に示す．図-5 に示すように平均応答加速度には顕著な差がみられない．これは円弧範囲内の各節点の応答加速度を平均化することで，図-4b) に示すような解析結果の差が相対的に小さく扱われるためと考えられる．したがって，差の小さい応答加速度を用いるため，図-6 に示すニューマーク法の結果も同様の値を示した．ただし，前節の結果より， Δt によらずニューマーク法の結果が同一であっても，局所的な応答加速度や応力ひずみ関係が異なっている可能性があるため運用には注意を要する．

5. おわりに

本稿では，GEH モデル等の陰的応力計算法を FEM に導入し，時間間隔による依存性を検証した．また，その依存性がニューマーク法へどのような影響を与えるか検討した．その結果，以下に示す知見を得た．

- 陰的応力計算法を用いた FEM では，地震観測間隔の 1/10 程度で応力ひずみ関係や応答加速度が収束する．
- 時間間隔 Δt を変更した結果，応答加速度が平均化されることでニューマーク法の結果に顕著な差はみられない．ただし，局所的な応答状態は異なる可能性がある．

参考文献

- 1) T.Shimbo, On an implicit stress-calculation algorithm for a multidimensional constitutive law using a skeleton curve, Soils and Foundations, Vol.58, No.2., pp.483-492, 2018.
- 2) 国土交通省鉄道局：鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物，丸善書店，2013.

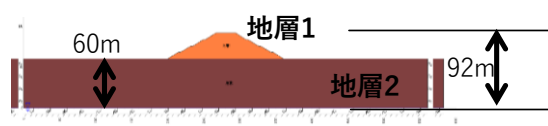


図-1 高盛土の解析モデル

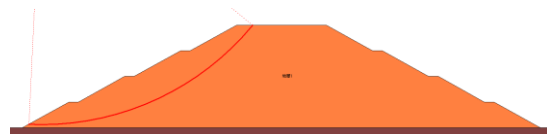
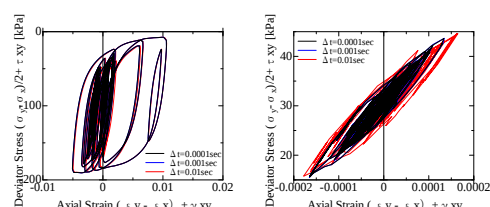


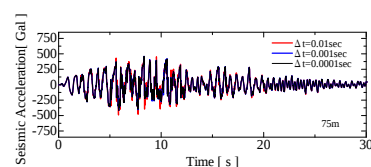
図-2 高盛土と円弧すべり形状



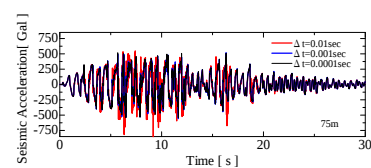
a) 75m

b) 92m

図-3 偏差ひずみ—偏差応力図



a) 盛土中心 高さ 75m



b) 盛土中心 高さ 92m

図-4 応答加速度波形

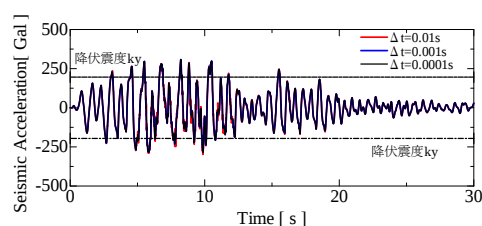


図-5 円弧内の平均応答加速度

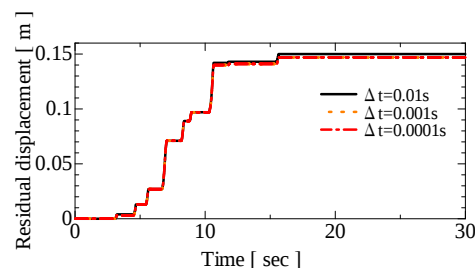


図-6 ニューマーク法の結果