

盛土の強地震動崩壊の 粘塑性有限要素法シミュレーション

小宮一仁¹・赤木寛一²・○玉野亮人³・高橋正光³

¹正会員 工博 千葉工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

²正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

³工学士 ケミカルグラウト株式会社 技術本部設計部 (〒107-8309 東京都港区元赤坂 1-6-4 安全ビル)

In this study, the embankment collapse processes due to the earthquake are modelled using the finite element method in order to investigate the effect of these collapse processes on the earthquake resisting of the embankment. The collapse of embankment is simulated using the visco-plastic flow analyzing technique which is integrated into the elasto-plastic dynamic FEM analysis. The proposed modelling techniques of embankment collapse are applied to simulate vibrating laboratory tests and the numerical results are compared with the lab-tests' measurements.

Key Words: finite element method, earthquake, embankment, collapse

1. まえがき

兵庫県南部地震では、鉄道や道路あるいは河川堤防等の盛土構造物が崩壊し甚大な被害をもたらした。このような強地震動作用時の盛土構造物の崩壊メカニズムについては未解明な点が多く、設計段階においても合理的な耐震性の評価が難しい。本研究は、一般的な弾塑性動的過渡応答有限要素法解析に盛土崩壊過程をシミュレーションする粘塑性有限要素法解析を組み合わせることによって、強地震動作用時の盛土崩壊の特徴について基礎的な考察を行ったものである。

2. 粘塑性有限要素法解析

本研究の有限要素法解析は、通常の弾塑性動的過渡応答有限要素法解析と粘塑性流動有限要素法解析を組み合わせたものである。解析フローは次のとおりである。まず、一般的に用いられている陽的弾塑性動的過渡応答有限要素法解析によって各要素の応力を計算する。本解析では、砂地盤盛土の崩壊を計算するために、構成則には Mohr-Coulomb の破壊規準を用いる。要素の応力状態が、Mohr-Coulomb の破壊規準に達しないうちは、要素には弾性変形が生じるとして、自重を考慮した動的過渡応答有限要素法解析によって各節点の変位を計算する。一般的

な弾塑性解析では、要素の応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達した場合は、破壊規準を降伏曲面として弾塑性節点変位を計算する。しかしながら、本解析では要素の応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準に達した時点で地盤は破壊したとし、破壊後の地盤の変位挙動を決定する手段として粘塑性流動有限要素法解析を用いた。粘塑性流動有限要素法解析では、まず破壊規準に達した時点の要素の弾性応力を一時的な超過応力と見なし、超過応力から得られた要素のストレッチングを Hohenemser と Prager¹⁾によって提案された次式の一般化 Bingham 流動則で計算した。

$$2\eta v_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F \cdot S_{ij} & (F \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 η は塑性粘度、 v_{ij} はストレッチング、 S_{ij} は偏差応力テンソル、 τ_y は降伏規準 (ここでは Mohr-Coulomb の破壊基準値を用いる)、 J_2 は偏差応力テンソルの第2不変量、 F は次式で表される降伏関数である。

$$F = 1 - \frac{\tau_y}{\sqrt{J_2}} \quad (2)$$

次に(1)式で求まる要素のストレッチングに弾性剛性マトリクスを乗じて計算される応力を生じさせるのに必要な節点力を積分により逆算し、この節点力を用いて弾性計算を行って要素の変形を決定した。ここで、本解析の特徴を示すために、図-1に示すような、平面ひずみ状態にある高さ3.0m、幅1.0mの下端固定コンクリート製単柱を模した材料の振動解析を行った結果を示す。解析では単柱下端の固定端に最大加速度 9.8m/s^2 、周波数 4.0Hz の水平方向正弦波を与えた。表-1に解析に用いた入力パラメータを示す。有限要素には、平面ひずみ8節点アイソパラメトリック要素を用いた。

図-2は振動開始からの経過時間と、単柱上端中央A点(図-1参照)の水平変位の関係を示したものである。図中には粘塑性解析を組み込んだもの、および粘塑性解析を組み込まない通常の動的過渡応答弾塑性有限要素法で得られた応答変位を示してある。図から、粘塑性解析を組み込んだ場合も組み込まない場合も、要素が破壊に達するまでは同じ変位挙動を示していることがわかる。しかし、振動開始から約 0.225sec 経過後に単柱最下部の要素が降伏に達し、粘塑性解析を組み込んだ解析では粘塑性変形が生じた。このため、降伏後単柱全体が正の水平変位方向(図-1の右側)に移動し始め、降伏後も左右の振動応答を繰返す一般的な動的過渡応答弾塑性有限要素法解析とは異なる挙動を示した。

3. 強地震動による盛土崩壊の粘塑性有限要素法解析

ここでは、2.に示した粘塑性有限要素法を用いて、強地震動による盛土崩壊のシミュレーションを行う。解析対象は、豊浦砂を用いて行われた振動台模型実験

表-1 単柱解析入力パラメータ

| | |
|------------------|-----------------------------------|
| 弾性係数 E | 31.0 GPa |
| ポアソン比 ν | 0.20 |
| 質量密度 ρ | 2.6 t/m^3 |
| 粘着力 c | 6.9 MPa |
| 単軸引張強度 f_t | 4.9 MPa |
| 単軸圧縮強度 f_{cu} | 39.2 MPa |
| 摩擦角 ϕ^* | 62.7 deg |
| 塑性粘度 η^{**} | $11.6 \text{ GPa}\cdot\text{sec}$ |
| タイムステップ dt | 0.00003sec |

* ϕ は、 $\frac{f_t}{f_{cu}} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$ より計算。

** η は、 $\eta = 1680 \cdot c^2$ より計算。

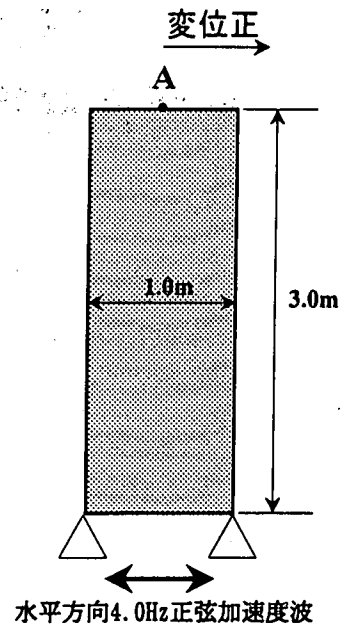


図-1 単柱解析モデル

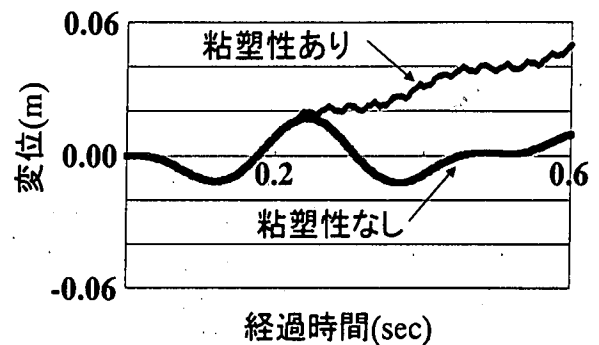


図-2 経過時間と応答変位の関係

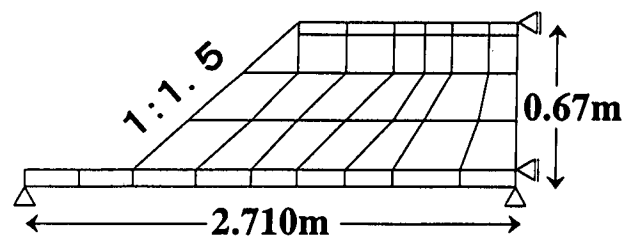


図-3 盛土解析モデル

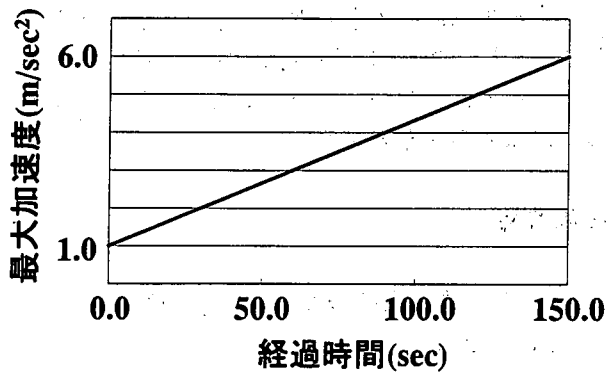


図-4 入力最大加速度

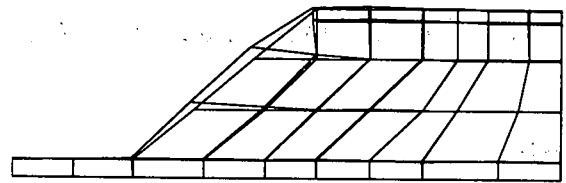


図-6 解析結果 (40秒経過後)

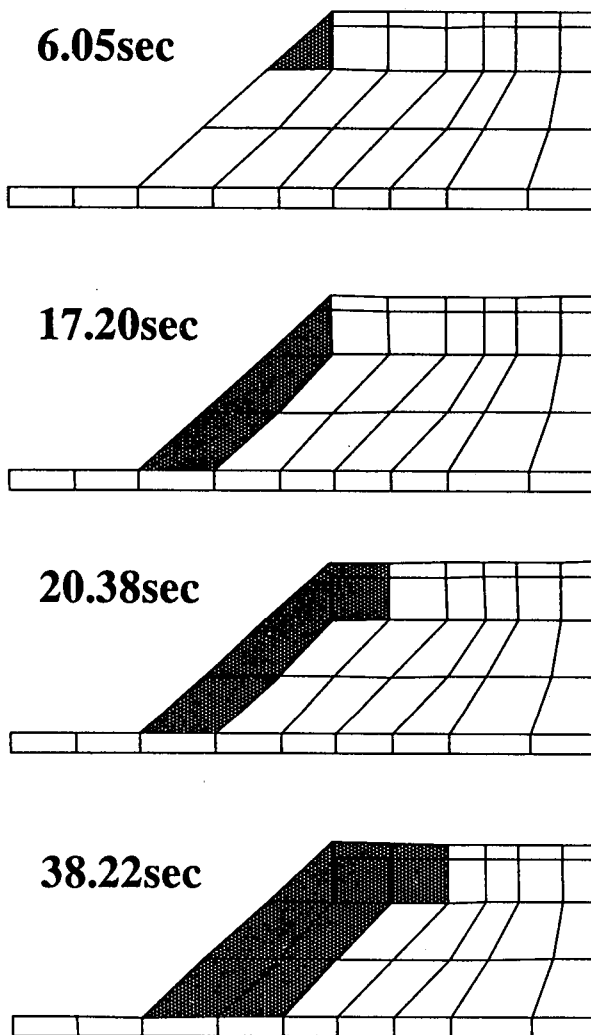


図-5 粘塑性領域の進展状況

表-2 盛土解析入力パラメータ

| | |
|---------------|----------------------|
| 弾性係数 E | 4.5 MPa |
| ポアソン比 ν | 0.38 |
| 質量密度 ρ | 1.8 t/m ³ |
| 粘着力 c | 20.0 kPa |
| 摩擦角 ϕ | 42.0 deg |
| 塑性粘度 η^* | 33.6 MPa·sec |
| タイムステップ dt | 0.00003sec |

* η は、 $\eta = 1680 \cdot c^{2.0}$ より計算。

である。図-3に解析モデルの概略、また表-2に入力パラメータを示す。振動加速度は図-3に示すモデルの下端の節点に水平方向に作用させた。入力加速度波は、図-4のように最大加速度の大きさを振動開始時の 1.0 m/s^2 から 120 秒後の 1.0 m/s^2 まで経過時間に比例して増加させた周波数 4.0Hz の水平方向正弦波である。

図-5は粘塑性変形に移行した要素の進展状況を示したものである。図中の時間は、振動開始後の経過時間を示している。この計算では、振動開始後 6.05sec 経過後に盛土法面頂部の要素が破壊し粘塑性変形に移行した。その後破壊した要素は、盛土の法面表層部に沿って下方に進展し、17.2sec 後には法面表層部全体に破壊=粘塑性変形が生じた。20sec を越えると、破壊領域は法面表層から盛土の奥へと広がり、奥部においても法面表層と同じように法面の上部から下部へと破壊領域が進展した。

粘塑性解析を組み込むことによって、破壊後の要素には粘塑性流動変形が生じる。図-6は、振動開始後 40.0sec 後の有限要素メッシュの変形状態を示したものである。図から、振動開始後早い時期に粘塑性変形が

生じた盛土表層部に大きな変形が生じていることがわかる。本解析の対象とした振動台実験では、最初盛土法面表層部のすべり崩壊が確認され、崩壊領域は徐々に法面表層部から盛土の奥へと進展することも確認された。以上の結果から、解析では法面表層部から進展する強地震動作用時の盛土崩壊の特徴が再現できたと考える。

4. 結論

本研究は、一般的な弾塑性動的過渡応答有限要素法解析に粘塑性有限要素法解析を組み込むことによって、強地震動作用時における盛土構造物の崩壊過程の解析を行ったものである。解析では、実験等によって確認されている法面表層部から進展する地震動作用時の盛土崩壊の特徴を再現することができた。

謝辞

本解析は、土木学会地震工学委員会高地震力に対する土構造物の耐震設計法に関する研究小委員会における一斉解析の一部であることを記し、同小委員会に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) Fung, Y. C. 著, 大橋義夫ら訳: 連続体の力学入門, 培風館, p. 225-227, 1974
- 2) Akagi, H. & Komiyama, K.: Earth pressure applied to tunnel due to the settlement of soft clay, Proceedings of The International Conference on Geotechnical Engineering (Geo-coast'91), Vol. 1, p. 153-158, 1991