

鉱さい集積場の3次元すべり安定性評価による無被害事例の検証解析

大成建設(株) 正会員○広重敬嗣, 正会員 石井 亘, 正会員 立石 章
JX 金属(株) 山田誠之, 田口裕之, 須本祥太

1. はじめに

近年, 大規模地震や集中豪雨に伴う斜面災害が大きな問題となる中で, 斜面安定対策の合理的な設計手法が求められている. 従来の設計においては, 2次元断面解析でのすべり安全率による解析方法が用いられてきた. しかし, 実際の斜面崩壊は3次元的なすべり面形状を成していることから, 3次元のすべり形態を考慮することで, 従来の設計よりも解析の高精度化が図られ, 安定対策工の合理化につながる可能性がある. 筆者らは, 安田・安達^{1),2)}による地盤の液状化を考慮した2次元FEM解析に基づくすべり安全率算定手法を3次元FEMモデルに適用したプログラムを, (株)アーク情報システムと共同開発した. 本研究では, 鉱さい集積場の無被害事例を対象として, 3次元すべり面による安定性評価方法の妥当性を検証した.

2. 検証解析の対象事例

本研究では, 2011年東北地方太平洋沖地震において斜面の崩壊や滑動等の被害が生じなかった宮城県の内盛式鉱さい集積場を検証解析の対象とした. 本集積場について, 2次元および3次元のFEMモデルを作成し, 各モデルによるすべり安定評価を実施した.

3. 解析手法

FEM解析を用いたすべり安全率の算定フローを図1に示す. 全応力地震応答解析には等価線形化法プログラムFDAPⅢを用いた. 液状化評価解析では, 累積損傷度理論に基づき過剰間隙水圧比の時刻歴を求めた. すべり安全率算定解析においては, 下式によりすべり面の全体すべり安全率を求めた.

$$F_s(t) = \frac{\sum \tau_{f,k}(t) A_k}{\sum \tau_{nsd,k}(t) A_k}$$

ここに, $F_s(t)$: すべり面の全体すべり安全率時刻歴, $\tau_{f,k}(t)$: すべり面要素のせん断強度時刻歴, $\tau_{nsd,k}(t)$: すべり面要素におけるすべり方向のせん断応力時刻歴, A_k : すべり面要素 k の面積である.

4. 解析モデルおよび解析条件

解析モデルおよび地盤物性値を図2, 表1に示す. 地盤物性値と3次元FEMモデル(集積場1/2モデル)は, 原ら³⁾および広重ら⁴⁾と同様の条件とした. 一方, 2次元解析では, 3次元解析モデルの集積場中央断面と同一のメッシュ分割とした平面ひずみ要素によるFEMモデルを用いている.

また, 2次元解析におけるすべり面は図2中に白い破線で示した円弧すべり面(半径 $r=205\text{m}$)とした. これに対し, 3次元解析のすべり面は, 集積場中央断面において2次元モデルの円弧すべり面と一致させ, これを斜面横断方向に延長した円筒と, モデル側方の境界面に沿う平面とを組合わせて作成した.

キーワード 鉱さい集積場, 3次元すべり, 液状化

連絡先 〒163-0606 新宿区西新宿1-25-1 大成建設(株)土木設計部 TEL 03-5381-5418

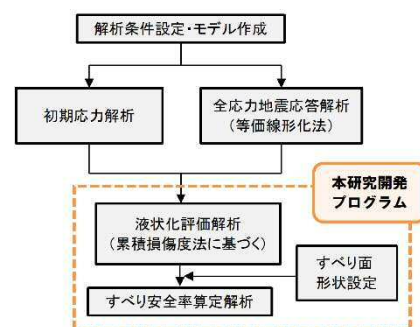


図1 解析フロー

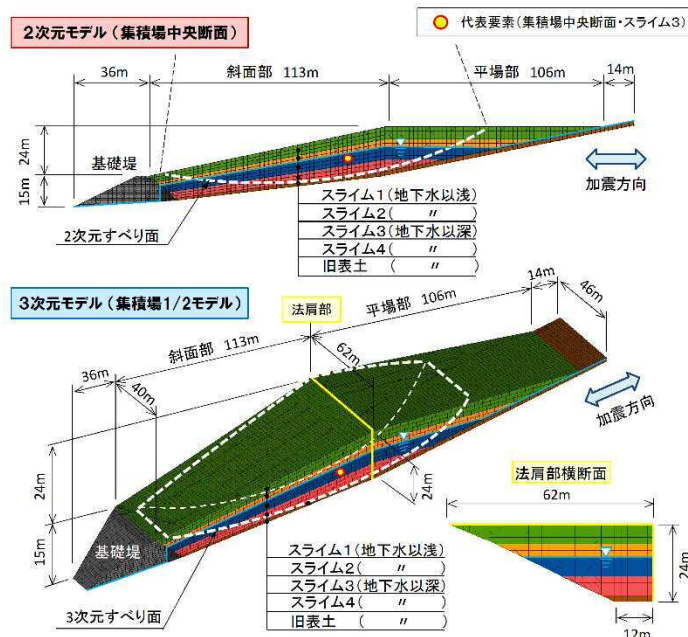


図2 解析モデル

表1 解析用物性値一覧

土層	単位 体積 重量 (kN/m ³)	全応力地盤応答解析				液状化評価解析		すべり安全率算定解析			
		S波 速度 (m/s)	初期せん断 剛性 (kN/m ²)	動的 ポアソン比	非線形 特性	過剰間隙 水圧上昇 の考慮	液状化 強度比 RL20	粘着力 C' (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)		
基礎堤	20.0	370	279,000	0.35	ひずみ 依存 剛性低下	なし	—	0.0	40.0		
スライム1	18.8	120	27,600	0.46				あり	0.165	0.0	44.4
スライム2		160	49,100							2.4	
スライム3	18.9	210	85,000	0.49	ひずみ 依存 剛性低下	あり	0.165			1.3	
スライム4		240	111,000					1.3			
旧表土	18.9	380	278,000	0.47				なし	—	2.4	44.4

入力地震動を図 3 に示す。本入力地震動は、東北地方太平洋沖地震の藤沢観測波を用いて当該集積場の旧表土下面（変位固定条件）位置における E+F 波として作成したものである。

5. 解析結果

図 2 に示した代表要素において、液状化評価解析により得られた過剰間隙水圧比の時刻歴を図 4 に示す。また、すべり安全率算定解析による全体すべり安全率の時刻歴結果を図 5 に、全体すべり安全率が最小となる時刻（ $t=62.2$ 秒）における、要素すべり安全率コンター図を図 6 に示す。ここで、要素すべり安全率とは、すべり面によって切断された個々の有限要素の切断面上に発生するせん断応力とせん断強度の比として求められる安全率を示す。

図 4 より、液状化対象層における過剰間隙水圧比が段階的に上昇する過程が表現されていることが分かる。

次に、図 5 より全体すべり安全率は、地震動開始前（慣性力なし）、地震動開始後（慣性力作用時）のいずれにおいても 2 次元解析 < 3 次元解析であり、3 次元解析ではすべり面側方の抵抗の効果が表れていると考えられる。これは、地下水位面以深の要素におけるせん断強度は、過剰間隙水圧の上昇に伴い徐々に減少することとなるが、図 6 から明らかなように、3 次元解析では 2 次元解析と比較してすべり面全体に占める地下水位以深の要素の割合が小さいことが要因であると考えられる。すなわち、3 次元解析においては、過剰間隙水圧の上昇に伴って地下水位以深の要素の抵抗力は減少するものの、地下水位以浅のすべり面における抵抗力が保たれることで、2 次元解析に比べて全体すべり安全率が大きく保持されているものと考えられる。

くり返しとなるが、当該集積場は東北地方太平洋沖地震において被害を生じなかった。一方、図 5 に示すように、2 次元解析では地震慣性力作用時には全体すべり安全率が 1 を下回るのに対し、3 次元解析では全時刻において 1 を上回る結果となっている。上述した通り、この結果の差異は 2 次元解析では考慮されないすべり面側方の抵抗が 3 次元解析においては考慮されるためであるが、3 次元 FEM モデルを用いた本検証解析によって、2 次元解析では説明困難であった実現象を合理的に説明することができたと考えられる。

6. まとめ

本研究では、地盤の液状化（過剰間隙水圧の上昇）を考慮した 3 次元すべり安全率算定プログラムを開発し、鉦さい集積場の無被害事例を対象に 2 次元解析との比較を行った。その結果、2 次元解析による評価法では

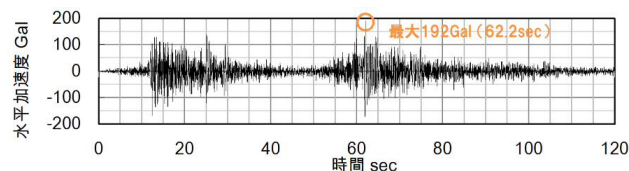


図 3 旧表土下面における入力地震動（E+F 波）

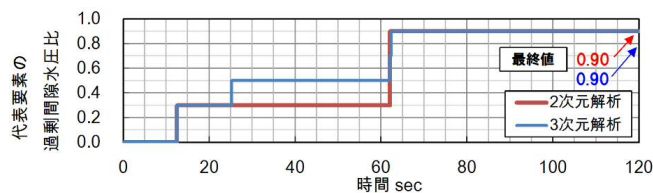


図 4 代表要素における過剰間隙水圧比時刻歴

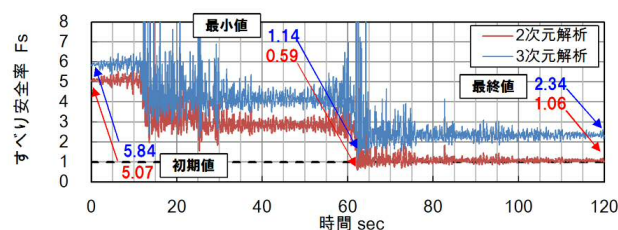


図 5 全体すべり安全率時刻歴

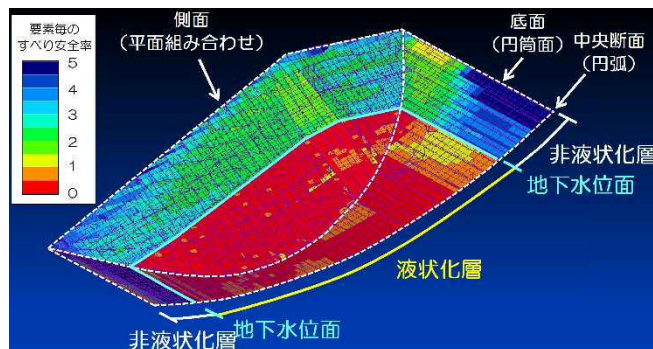


図 6 3 次元解析による要素すべり安全率コンター図（時刻 $t=62.2$ sec）

説明できなかった当該集積場の地震時安定性を、3 次元解析により合理的に説明することができた。本解析結果は、3 次元すべり面による斜面安定性評価の妥当性を裏付ける一事例となるものと考えられる。今後は、これらの検証解析結果に基づき、3 次元すべりを考慮した設計の評価方法を提案していく予定である。

参考文献

- 1) 安田，安達：ニューマーク法を用いた地震時盛土すべり変位量の推定，地盤工学会誌 Vol. 58, No.12, pp.52-53, 2010.
- 2) ㈱地盤ソフト工房：液状化安全率計算システム EXCESS/Win マニュアル, pp.26-37, 2012 年 7 月.
- 3) 原ら：鉦さい堆積場のレベル 2 地震動に対する耐震設計に関する研究（その 3）～2 次元・3 次元地震応答解析による地震時挙動の評価～，土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.
- 4) 広重ら：鉦さい集積場における累積損傷度理論を用いた液状化の評価，土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.