

グラウンドアンカー補強斜面の FEM と Newmark 法を組み合わせた新たな評価手法の提案

鉄道総合技術研究所 正 ○浅野翔也 中島進 成田浩明

1. はじめに 筆者らはこれまで、グラウンドアンカーによって補強された斜面の地震時挙動に関する研究を行い、アンカー抵抗力の段階的な発現・喪失特性が重要であることを把握してきた。また、グラウンドアンカーによって補強された斜面の地震時の評価手法として、Newmark法の適用性を検証³⁾してきたが、Newmark法は、アンカー抵抗力の段階的な発現・喪失特性は考慮できず、斜面の残留変位量を過小に評価する傾向にある。そこで、アンカー抵抗力の特性をFEM解析で評価し、その結果をNewmark法と組合せることで、グラウンドアンカーで補強された斜面に対する新たな評価手法(以下、提案手法と称す。)を提案したので、その妥当性の検証を行った。

2. 提案手法概要 提案手法の概要を図1に示す。提案手法では、まず非線形FEMによりプッシュオーバー解析の要領で段階的に水平震度を増大させ、グラウンドアンカーの抵抗力が喪失する震度を評価する。斜面の変形量はNewmark法を用いて評価するが、その際にFEMにより評価したアンカーの抵抗力発現・喪失特性を反映し、降伏震度を段階的に変化させる。以下では、動的遠心模型実験³⁾を例として、提案手法の妥当性を検証したので、その概要を報告する。

3. 解析対象の概要 図2に斜面模型の概要および解析モデルを示す。図2の斜面模型に対して動的遠心模型実験を行い、遠心力载荷装置により最大で50Gの遠心力のもとで水平加振を実施した。300gal加振時(最大応答 369gal)には、斜面上部において表層および弱層の一部が崩落し、加振終了後には、斜面上部の表層と弱層の境界付近で変形が生じた。その後の400gal加振(最大応答534gal)においては、表層と弱層の境界付近の変形が進行していき、加振中に全てのアンカーが破断し表層がすべり落ち、崩壊に至った。

4. 解析概要 解析で入力した物性値を表1に示す。地盤の表層、基盤層は弾性体としてモデル化し、変形が生じる弱層のみモールクーロンの破壊基準、ドラッガー・プラッガーの塑性ポテンシャルによる弾完全塑性体としてモデル化した。アンカーはロッド要素、支圧板はバー要素を用いていずれも弾性体としてモデル化した。アンカーの抵抗力発現・喪失特性は基盤層への定着部分に節点ジョイントを設定することで考慮した(図2)。今回の実験条件では、極限值に達すると抵抗力が喪失するようにアンカー模型を製作したため、7cm(模型寸法1.4mm)でアンカー抵抗力が喪失するようなモデルとした。3次元の斜面模型を2次元化するにあたり、アンカーの極限值、アンカーおよび支圧板の断面積は、単位奥行きあたりに換算した。20ステップの分割とした自重解析後、アンカーの破断震度を算定するために、慣性力に相当する水平力を段階的にモデル全体に作用させた。1ステップ当たり $Kh=0.005$ 相当の増分で慣性力を200ステップに分割して作用させた。

5. 解析結果(アンカー張力の評価) FEM解析によって評価した、水平震度とアンカー張力の関係を図3に示す。本検討条件では、アンカーの破断過程は、 $Kh=0.395\sim0.410$ の間で生じた。一部のアンカーが破断すると、それまで相対的に張力を発揮していなかったアンカーの負担が増加し、アンカー張力の増加が急激となる傾向が確認できる。解析上のアンカーの破断は4,5段目 ($Kh=0.395$) → 1,2,3,6段目 ($Kh=0.400$) → 7段目 ($Kh=0.405$) → 8段目 ($Kh=0.410$)

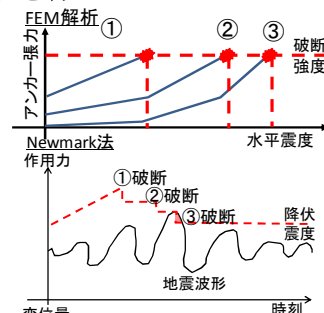
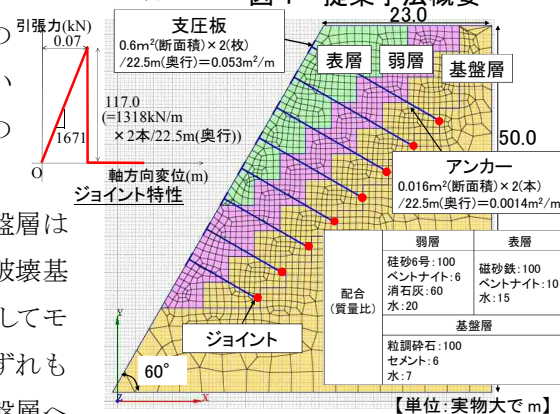


図1 提案手法概要

図2 解析モデル概要
表1 解析モデル物性値

	表層	弱層	基盤層	アンカー	支圧板
	弾性	弾塑性	弾性	弾性	弾性
ポアソン比	0.333	0.333	0.333	0.300	0.340
ヤング率 (kN/m ²)	41,600	41,600	2,500,000	205,000,000	68,300,000
せん断剛性 (kN/m ²)	32,200	32,200	1,250,000	79,000,000	25,500,000
単位体積 重量 (kN/m ³)	30.0	17.0	18.0	77.0	54.0
粘着力 (kN/m ²)	100	90.2	280.5	-	-
内部摩擦 角 (度)	0	29.8	57.4	-	-

キーワード グラウンドアンカー, 斜面, FEM 解析, Newmark 法

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 TEL: 042-573-7261

の順で生じた。模型実験におけるグラウンドアンカーの破断も概ね4グループに分類することが可能であり、各段のアンカーが全数破断に至った順序としては3段目→4,6段目→1,2,5,8段目→7段目であった。模型実験におけるアンカーの破断加速度を、基盤層中央部の加速度計の値で評価すると、3段目のアンカー破断時の水平震度は0.383、それ以降のアンカー破断時の水平震度は0.403であり、これも実験と解析で概ね整合している。

ここで $K_h=0.100$, $K_h=0.375$, $K_h=0.400$ (アンカー破断直前)のアンカー張力分布図を、解析値、実験値ともに図4に示す。図4の縦軸は1段目から8段目のアンカー位置を示している。アンカー位置の1~5段目にかけてアンカー張力が大きくなり、6~8段目にかけて小さくなるアンカー張力の分布傾向は、解析と実験ともに同様である。また、 $K_h=0.100$ では、実験値に比べて解析値の張力は全体的に小さい傾向であり、 $K_h=0.375$, 0.400 では逆の傾向である。これは、実験では50G場での加振に先立ち、25G場で加振を行うなど、初期条件が解析と厳密には整合していないため、水平震度が低いレベルではアンカー張力に差異がでていいると考えられる。

以上、水平震度毎のアンカー張力は、実験値と解析値で差があるものの、アンカー破断時の水平震度は概ね一致することが確認できた。この結果を用いて、アンカーの抵抗・破壊メカニズムを反映した Newmark 法による残留変位量の算定(提案手法)を行う。

6. 解析結果(変形量の評価) 図5に提案手法を用いて解析を行った結果を実測値との比較とともに示す。入力加速度は基盤層中央高さの時刻歴を用いた。また、図5には全グラウンドアンカーの張力の極限值が加振中を通じて同時に発揮されると仮定した Newmark 法の結果も併せて示している。この方法では、アンカーの抵抗・破壊特性を考慮できないため、実測値に対して変位量を過小評価することが明らかである。

これに対して提案手法では、FEM解析で評価したアンカーの抵抗・破壊特性を考慮してNewmark法による変位量の算定を行った。具体的には、入力加速度の時刻歴から既往最大加速度を抽出し、既往最大加速度の値から、当該時刻におけるアンカー張力をFEM解析の結果(図3)を参照して評価した。これにより、アンカー張力が、加速度の増大に伴い段階的に発現する傾向と、極限に達し抵抗力が喪失する挙動を良好に再現できている(図5中段)。変位量については、117秒程度のアンカー破断(張力の喪失)を契機として、変位量が急増する傾向が比較的良好な精度で評価できている(図5上段)。

以上、FEM解析を行うことでアンカー抵抗力の発現・喪失特性が再現可能であり、その特性をNewmark法へ反映させることで変位量評価を精度よく行え、提案手法の妥当性が立証された。

7. まとめ 本稿では、動的遠心模型実験において確認されたアンカーの抵抗力・破壊メカニズムを考慮して、比較的簡易な非線形 FEM と Newmark 法の併用による斜面の耐震性評価手法を提案した。遠心模型実験の検証解析の結果、提案手法により、模型実験で確認されたグラウンドアンカーの抵抗力発現・喪失特性が非線形 FEM で評価可能であり、同特性を考慮した Newmark 法が模型実験結果を比較的良好に再現可能なことを確認した。今後は、地盤、の形状や強度が異なる斜面に対して提案手法を適用し、本稿以外の条件において、提案手法の妥当性を検証していく。なお、本実験は旧原子力安全基盤機構(旧: JNES)の委託事業として実施したものである。

参考文献 1) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説, 2012.5 2) 中島ら: アンカー対策された大型斜面模型の振動台実験, 第48回地盤工学研究発表会, 2013.10 3) 成田ら: グラウンドアンカーで補強された斜面の遠心模型実験および検証解析, 第60回地盤工学シンポジウム, 2016.12

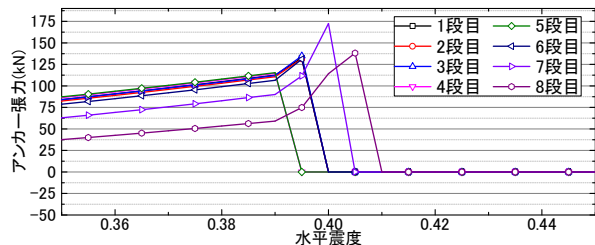


図3 水平震度とアンカー張力の関係(解析)

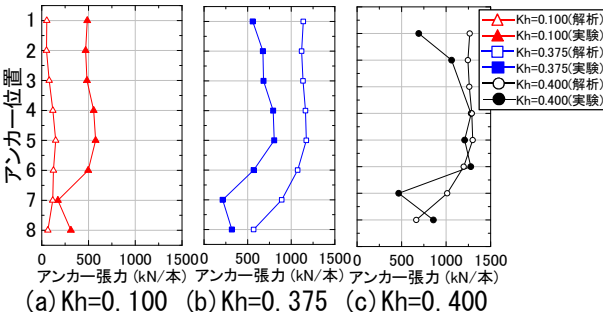


図4 アンカー張力の分布

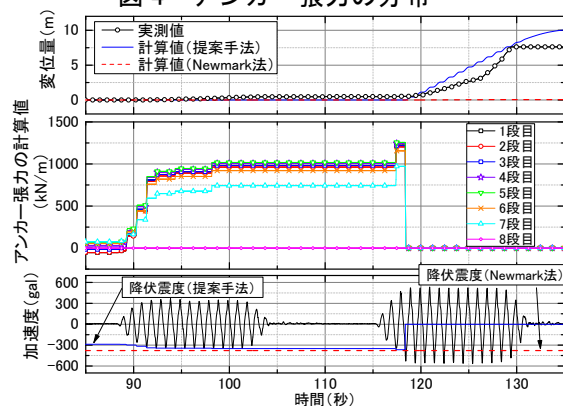


図5 提案手法による計算値と実測値の比較