

グラウンドアンカーの配置および破壊形態に関する解析的検討

鉄道総合技術研究所 (正) ○成田 浩明, 中島 進, 浅野 翔也

1.はじめに 現在, 斜面の安定性評価では力の釣り合いに基づく円弧すべり安定解析が用いられているが, L2 地震のような大規模地震時には適用が困難である. そこで, 筆者らはアンカーで補強された斜面の動的遠心模型実験を対象にアンカーの抵抗・破壊メカニズムを分析し¹⁾, アンカー抵抗力の発現・喪失特性を評価可能な静的非線形 FEM と Newmark 法を用いた新たな評価手法 (以降, 提案手法と称する.) を提案した²⁾. 本稿では, 提案手法を用いてアンカーの配置および破壊形態が地震時変位量に及ぼす影響について検討を行ったので, その結果を報告する.

2. 解析対象 本検討は文献 1) の動的遠心模型実験を対象とし, 文献 2) の検証解析と同じ解析モデルを用いて実施した. 図-1 に実験模型および解析モデルの概要を示す. また, 同図には Newmark 法における変位量算出時に考慮したすべり面も併せて示す. 斜面模型は基盤層, 弱層, 表層の三層で構成し, 実験では鉛直方向 8 段×水平方向 2 列の計 16 本のアンカーで補強された斜面模型に対し, 50G の遠心力のもとで 5Hz10 波の正弦波により水平加振を実施した. 模型実験の詳細は文献 1) を参照されたい.

FEM 解析においてアンカー抵抗力の発現・喪失特性は基盤層への定着部に接点ジョイントを設定し考慮した. また, アンカーのテンドン, 支圧板, 地盤の表層, 基盤層は弾性体とし, 弱層は完全弾塑性体としてモデル化した. 提案手法では, FEM により水平震度に応じたアンカーの抵抗力を算定し, Newmark 法を行う際に FEM で算定したアンカー抵抗力を反映することで降伏震度を段階的に変化させ変位量を求めている. 解析モデル, 解析手法の詳細については文献 2) を参照されたい.

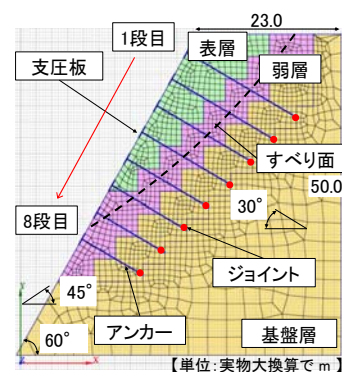


図-1 解析モデル概要

3. アンカーの配置に関する検討 提案手法では, FEM 解析を用いることでアンカーの張力が段階的に発現する特性が評価可能である. そのため, 従来の設計ではアンカーの諸元と定着する岩盤層の特性により均一に評価されていたアンカー張力を, 斜面の形状や地盤の強度・変形特性に応じて評価可能である. 本稿では, アンカーの配置に関する検討として, 1 段ごとにアンカー補強量を変化させ Newmark 法により算定される残留変位量への感度を比較した. Newmark 法で入力する加速度波形は, 鉄道路構造物において L2 地震時の設計に用いられる土構造物照査波³⁾のうち G0 地盤の波形 (最大加速度 543gal) を用いた. 解析ケースはアンカー張力の極限値を 310kN/m に設定し均等に補強したケースを基本とし (Case0), Case1~Case7 として, アンカーの奥行き方向配置間隔が 1/2 になったことを想定し, アンカー張力の極限値を 620kN/m とした重点補強部を 1~7 段目まで 1 段ずつ順に設定し解析を行った. Newmark 法においては, ピーク強度から残留強度への強度低下を考慮し, アンカー張力が極限に達した時刻で瞬時に強度低下させた. また, 重点補強部を 1~7 段目としたのは図-1 に示すようにすべり面が 8 段目のアンカーを通過しないためである. 解析条件および解析結果の一覧を表-1 に示す.

Case0~Case7 の検討の結果, アンカーを均等に配置した Case0 では全てのアンカーが破断し, 12.036m と大きな残留変位が生じた. また, 7 段目を重点補強した Case7 も Case0 と同程度の変位となった. 一方, 2 段目~6 段目を重点補強した Case1~Case6 では残留変位が 1.0m 程度以内に収まっており, 変位の抑制に最も効果があったのは 3 段目を重点補強した Case3 で, 残留変位は 0.225m となった. 図-2 に Case0, Case3 についての Newmark 法の入力加速度と降伏震度および滑動変位の時刻歴を示す. 図-2 より Case0 では加速度の増加によって全てのアンカーが破断するとともに, 弱層地盤の強度低下により降伏震度が 0 に低下し変位が急増している. 一方, Case3

表-1 解析条件および解析結果

ケース	重点補強部	アンカー張力の 極限値【一般部】 (kN/m)	アンカー張力の 極限値【重点補 強部】(kN/m)	地震後残存 アンカー本数 (本)	残留変位量 (m)
Case0	均等配置	310	620	0	12.036
Case1	1段目			6	0.332
Case2	2段目			6	0.307
Case3	3段目			7	0.225
Case4	4段目			4	0.559
Case5	5段目			4	0.568
Case6	6段目			3	1.121
Case7	7段目	310(極限維持)	—	2	12.035
Case8	均等配置			8	0.258

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

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

では弱層地盤の強度低下の影響で降伏震度は低下するものの、アンカーの破断は1本に留まったため降伏震度の低下は限定的であった。アンカーの破断本数が少ないケースほど残留変位も少ないことは表-1からも明らかであり、FEMでアンカー張力が大きい箇所を重点的に補強することで、アンカーの破断を効率的に抑えられると考えられる。

図-3にCase0における水平震度0.1刻みの張力分布と、アンカー破断直前の $kh=0.53$ 時の張力分布を示す。ここで、図-3の縦軸は1~8段目のアンカー位置を示している。自重の影響が支配的な水平震度が小さい領域では下部のアンカー張力が大きい傾向にあり、水平震度が増加し慣性力の影響が相対的に大きくなると、上部のアンカー張力が大きく増加した。また、アンカー破断直前の $kh=0.53$ 時には1~5段目のアンカー張力は同程度で、いずれも極限值付近まで到達しており、アンカーの破断を抑えるためにはこれらのアンカーの補強が必要であることが分かる。

本検討でCase3が最も効果的であったのは、発揮張力の大きい1~5段目アンカーの内、中央に位置する3段目のアンカーが大きな抵抗を発揮することで隣接アンカーの張力増加が抑えられたためと考えられる。また、1~5段目のアンカーを全体的に補強する方がより少ない補強量で残留変位を抑えられることが考えられるため、今後さらに検討を行いたい。

4. 破壊形態が抵抗特性に及ぼす影響

実験模型は、アンカー張力が瞬時に抵抗力を喪失するよう加工したため、これまでのFEM解析でも瞬時に抵抗力を喪失するモデルとした。ここで、アンカーの破壊形態は図-4に示すように、①テンドンの破断、②定着層の地盤の破壊、③アンカー体の定着層からの引き抜け、④テンドンのアンカー体からの引き抜け、⑤支圧部の地盤の破壊の5通りに分類できる。例えば、アンカー抵抗力が③で決まる場合などは、極限值に達した後に維持もしくは徐々に低下する挙動を示すと考えられる(図-4)。そこで、③の破壊形態を想定し、Case0におけるジョイント特性を変更して、アンカー張力が極限值に達した後に極限値を維持するモデルで解析を行った(Case8)。

Case8の解析条件と解析結果を表-1に、Newmark法の入力加速度と降伏震度および滑動変位の時刻歴を図-2に示す。Case8では残留変位が0.258mとなり、Case0と同じアンカー配置でも重点補強をしたCase3と同程度の変位量となった。これは、大規模地震時に斜面やアンカーが不安定化する条件では特に、アンカーの破壊形態をテンドンの破断のような脆性的な破壊形態ではなく、定着層からの引き抜けなど粘り強さに期待できる破壊形態とすることが重要なことを示唆する結果である。しかし、定着層からの引き抜けで極限值が定まる場合でも、アンカーの定着層への支持方式の違いなどにより極限值に達した後の挙動は異なると考えられ、引き抜けから定着層の地盤の破壊に破壊形態が移行することも懸念されるため、これらを考慮した上でアンカー抵抗特性を設定することが望ましい。

5. まとめ 提案手法を用いてアンカーの配置が補強効果に及ぼす影響について検討した結果、慣性力が作用した際に張力増加の大きいアンカーを重点的に補強することが効果的であった。また、アンカー張力が極限値到達後に極限値を維持するモデルで解析を行った結果、同じ補強量でも残留変位が抑えられ、アンカーの破壊形態を考慮することが重要なことが示唆された。今後は形状、強度・変形特性が異なる斜面についても同様の検討を実施しアンカーの合理的な配置を検討したい。なお、本稿に示す実験は、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) 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. 2) 浅野ら: 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, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, 2017.9(投稿中). 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 2012.9.

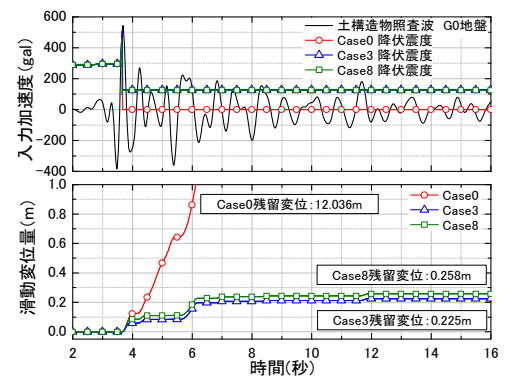


図-2 Newmark法による変位量計算結果

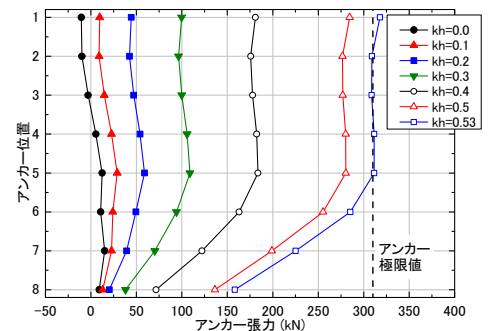


図-3 アンカー張力の分布 (Case0)

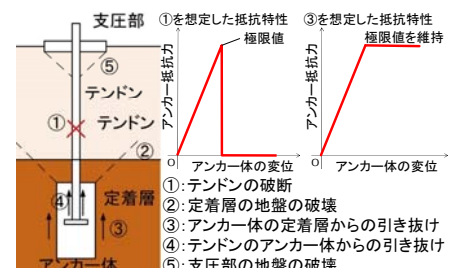


図-4 アンカーの破壊形態、抵抗特性