

セッション2 斜面安定性評価(対策工)

電力中央研究所 原子力リスク研究センター

石丸 真

土木学会 原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会講演会
「原子力施設に関する地盤安定性評価技術の現状—どこまでできて、何が課題か—」

2020年7月28日

電力中央研究所

従来技術(現行の評価手法)

- 現行の評価手法(等価線形解析によるすべり安全率評価)は、すべり破壊による変位・移動が生じる可能性の有無を評価するもの。
- すべり安全率が基準値を上回る範囲においては、妥当な評価手法として認知。
- 大規模な地震に対して、瞬間的にすべり安全率が基準値を下回るとは対策工などに直結。

等価線形解析によるすべり安全率評価

- ・ 地盤剛性を等価線形として評価
- ・ 地震力は設計地震動(加速度時刻歴)を入力(水平動, 鉛直動同時入力)
- ・ 想定したすべり線のすべり安全率時刻歴を算定
- ・ 強度特性は静的強度を採用

$$S.F. = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

S.F.: すべり安全率
R_i: 各要素のすべり線上の抵抗力
S_i: 各要素のすべり線上のせん断力

等価線形解析によるすべり安全率評価(現行の評価手法)
変位・移動が生じる可能性の判定

OK

終了

NG: 変位・移動の可能性あり

対策工など

はじめに

- 本セッションでは、地震力に対する地盤安定性評価を対象とする。
- 従来、原子力発電所の基礎地盤および周辺斜面の地震時安定性については、等価線形化法を用いた動的有限要素解析(以下、「等価線形解析」)によるすべり安全率評価が基本とされている。
- 2011年東北地方太平洋沖地震の後に制定された実用発電用原子炉に係る新規規制基準(平成25年7月)およびその適合性審査では、設計用の地震動(基準地震動)が大きくなる状況にあるとともに、確率論的リスク評価により設計を超えた地震力も想定した評価が必要となっている。
- 等価線形解析によるすべり安全率評価は、すべり破壊により変位・移動が生じる可能性を評価する(生じないことを確認する)ものであり、定量的な変位量・移動量を評価する手法ではない。このため、リスク評価・アクシデントマネジメントを視野に入れた場合、等価線形解析によるこれまでの安定性評価を踏まえた、新たな評価体系・評価手法が必要となる。

現行の評価手法の課題

- 下記の斜面を対象とした実験では、すべり安全率が1を下回っても崩落など急激な不安定状態とならないことを確認。
- 基準値を下回るほどの大規模な地震に対して、変位量・移動量を定量的に評価できる手法の実用化が望まれる。

【斜面を対象とした動的遠心力模型実験】(石丸ら, 2017)

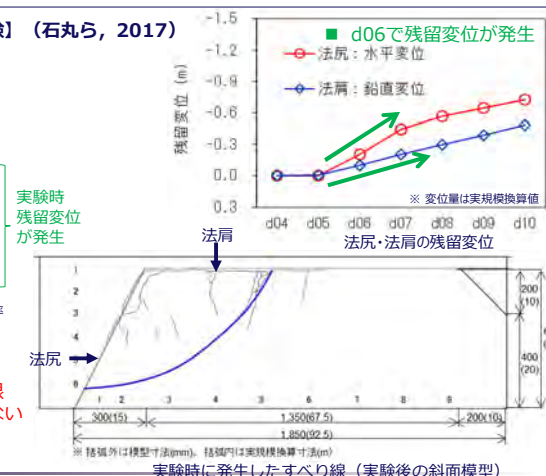
入力加速度の最大値と最小すべり安全率

加振ステップ	水平動 (m/s ²)	鉛直動 (m/s ²)	最小すべり安全率
d04	1.44	0.49	1.77
d05	3.24	1.02	1.29
d06	3.82	1.43	0.91
d07	5.10	2.07	0.77
d08	5.71	2.68	0.64
d09	6.15	3.05	0.54
d10	7.04	3.14	0.52

※1 加速度は実規模換算値

※2 加振ステップによっては実験時に発生したすべり線と最小すべり安全率のすべり線は一致しない場合もある。

- d06以降で1を下回る → 妥当
- 1を下回っても実験の残留変位は有限 → 崩落など急激な不安定状態にならない



現行の評価手法の課題

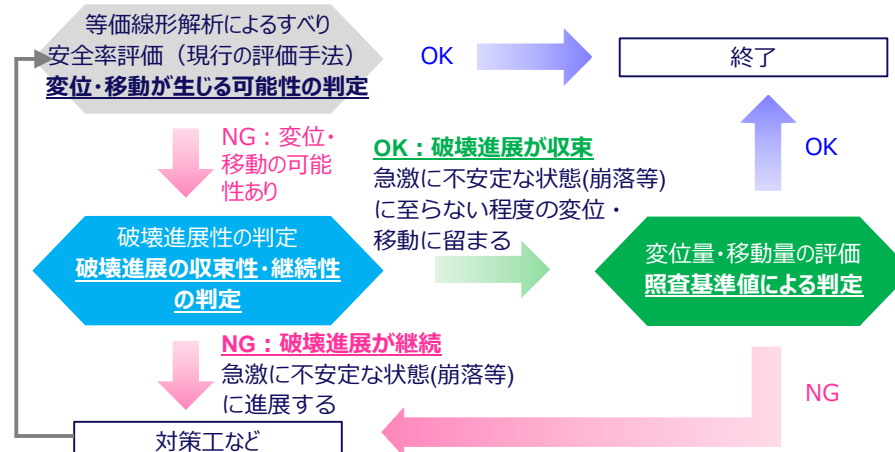
斜面对策工

- 斜面对策工の地震力に対する安定性評価手法は明記されていない。(他基準等を参考に設計を行い、等価線形解析によるすべり安全率に基づき評価を実施。)
- 既往基準類における設計法と耐震性能評価法の現状 (グラウンドアンカー工、抑止杭工)
 - 極限平衡法等により斜面の滑動安定性に関する計画安全率を得るために必要な抑止力を求め、その抑止力を負担できるグラウンドアンカー、抑止杭等を設計
 - グラウンドアンカー工を考慮したFEM等による耐震評価法や地震時におけるアンカー体(定着部)の塑性化、アンカー張力の増減の影響について特に記述なし。
 - 岩盤を含む斜面の抑止杭工を考慮したFEM等による数値解析法について一部基準の中で記述されているが、耐震設計法は明確に規定されていない。

基準	発行年	発行者
① グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説 (JGS4101-2012)	2012年	(公社)地盤工学会
② 道路土工 切土工・斜面安定工指針 (平成21年度版)	2009年	(社)日本道路協会
③ グラウンドアンカー設計・施工要領 (平成19年8月)	2007年	東・中・西日本 高速道路(株)
④ 新版 地すべり鋼管杭設計要領	2003年	(社)地すべり対策技術協会
⑤ 改訂新版 建設省河川砂防技術基準(案)同解説 設計編	1997年	(社)日本河川協会

新しい評価手法

- 「変位量・移動量の評価」を組み込んだ基礎地盤および周辺斜面の安定性評価フ
- (原子力土木委員会・地盤安定解析高度化小委員会・破壊進展を考慮した安定性評価WG)
- 現行の評価手法の適用範囲を超えた大規模な地震に対して合理的な安定性評価が期待できる。



新しい評価手法

原子力発電所耐震設計技術指針

JEAG4601-2015

- 動的解析(時刻歴応答解析)と対策工を含む評価フローは示されているものの、具体的な解析技術・評価手法は示されていない。

(「破壊進展性の判定」は照査基準値を適切に設定することにより、「変位量・移動量の評価」に含まれると考えられることから、右の評価フローでは「動的解析(時刻歴応答解析)」等を用いた安定性評価にまとめられている。)

- 動的解析(時刻歴応答解析)と、対策工に関して、具体的な解析技術や評価手法の拡充が必要。



附属 3.1 基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価の流れ

本セッションの発表内容 (斜面对策工)

1. 斜面の地震時安定性評価におけるアンカー工定着部の評価 (その1) —モデル斜面を対象とした評価事例—
森 聡 (ニュージェック)
2. 斜面の地震時安定性評価におけるアンカー工定着部の評価 (その2) —人工軟岩に対するアンカー引抜き試験—
小早川 博亮 (電力中央研究所)
 - アンカー工定着部の岩盤の破壊と、その後のアンカー工の補強効果に着目した検討
3. 抑止杭によって補強された岩盤斜面の遠心力模型実験に関する数値解析
日高 功裕 (電力中央研究所)
 - 変位量評価を念頭に、抑止杭工を設置した斜面の動的遠心力模型実験を対象として、時刻歴非線形解析の適用性に関して検討

斜面の地震時安定性評価におけるアンカー工定着部の評価(その1)
—モデル斜面を対象とした評価事例—

地盤安定性評価小委員会講演会
2020年7月28日

ニュージェック 正会員 ○森 聡 西村昇
電力中央研究所 正会員 小早川博亮 石丸真
関西電力 正会員 小澤和弘

検討の背景:

□重要構造物周辺斜面の地震時安定性評価

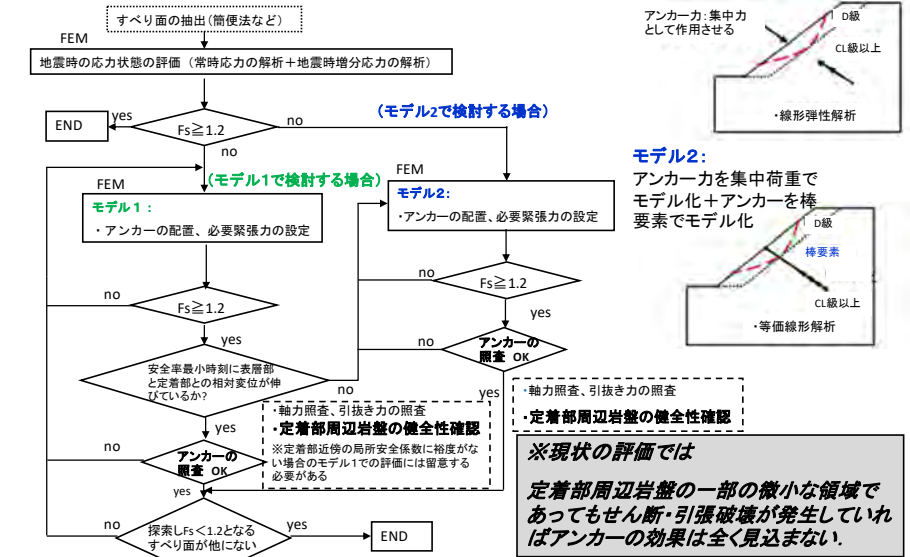


図1 地震時の斜面安定性評価フロー(案)

□入力地震動レベルの増大

アンカー定着部周辺岩盤に部分的に引張・せん断破壊が生じる場合が発生することがあり,そのような場合には,アンカーの効果が見込めなくなる場合がある.

実際のアンカーにおいては,

定着部周辺岩盤の部分的な破壊だけでは,極限アンカー力の低下に大きく寄与しない可能性があることや地山からの拘束圧による残留アンカー力も作用することも期待できる.

・そのような効果を定量的に考慮できれば,地震動レベルの増大にも対応した合理的な評価ができる可能性がある.

□本報告

(その1)モデル斜面を対象にアンカー定着部周辺岩盤の健全性の考え方の違いが,すべり安全率評価に与える影響を例示.

現状のアンカー定着部の評価法を用いる場合と,極限アンカー力を低減させない場合ですべり安全率の評価を実施しアンカー力の低減を考慮しない場合には,現状より合理的な評価ができる可能性があることを例示した.

(その2)アンカーの定着部における周辺岩盤の健全性と極限アンカー力の関連性について実験的に検討.

アンカー周辺岩盤の拘束圧の違いや部分的な破壊を想定した種々の条件下でアンカー引抜き試験を実施し,定着部近傍の拘束圧や岩盤の損傷がアンカーの極限アンカー力に与える影響について実験的に評価し考察した.

□(その1)モデル斜面における定着部周辺岩盤の評価と滑り安全率の例示

モデル斜面の概要

・解析モデル

最上段アンカー：自由長40m＋定着長10m
 アンカー：自由長30m＋定着長10m
 奥行：2m間隔に打設
 緊張力：1250kN/本

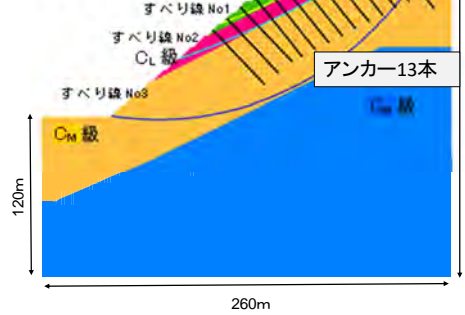


図2 解析モデル

・入力地震動

基本ケース：
 最大加速度6.0m/s²
 (600gal) 相当

地震動増大を想定したケース
 最大加速度8.0m/s²
 (800gal) 相当

表1 解析に用いた物性値

項目	単位	D級 岩盤	CL級 岩盤	CM級 岩盤	CH級 岩盤
静弾性係数E _s	MPa	500	1,000	4,000	6,000
静ポアソン比 N _s	-	0.35	0.30	0.25	0.20
単位体積重量 γ	kN/m ³	20	23	25	26
粘着力 C	kPa	100	300	1000	1500
内部摩擦角 φ	-	20	33	45	50
S波速度 V _s	m/s	500	1200	1800	2000
初期せん断剛 G ₀	MPa	500	3300	8100	11000
ひずみ依存特 性G ₀ ~γ	-	1/(1+ 4.5·γ ^{0.5})	3300	8100	11000
動弾性係数 E _d	MPa	1400	9200	22000	29000
動ポアソン比 ν _d	-	0.43	0.40	0.37	0.35
初期減衰定数 H	%	3.0	3.0	3.0	2.0
ひずみ依存特 性h~γ	%	11.4·γ ^{0.2} +2.0	3.0	3.0	3.0

・解析に用いた地震動

引き戻し後

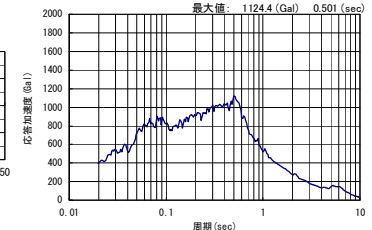
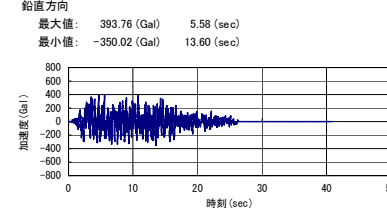
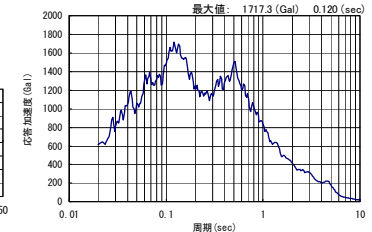
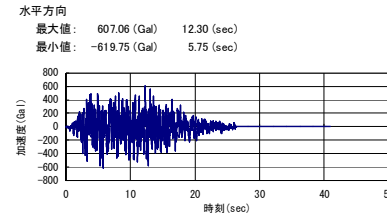


図4 加速度時刻歴波形と応答加速度スペクトル(h=5%)

※モデル斜面検討用スペクトル波（最大加速度4.5m/s²）の入力地震動の振幅を調整して最大加速度6.0m/s²（600gal）、8.0m/s²（800gal）相当の入力地震動とした。

□局所安全率分布とすべり安全率

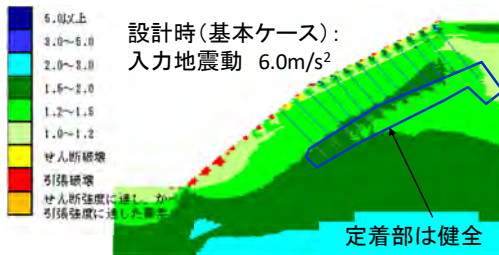


図5 すべり安全率最小時刻における局所安全係数分布(6.0m/s²)

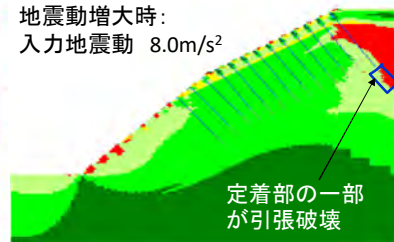


図6 すべり安全率最小時刻における局所安全係数分布(8.0m/s²)

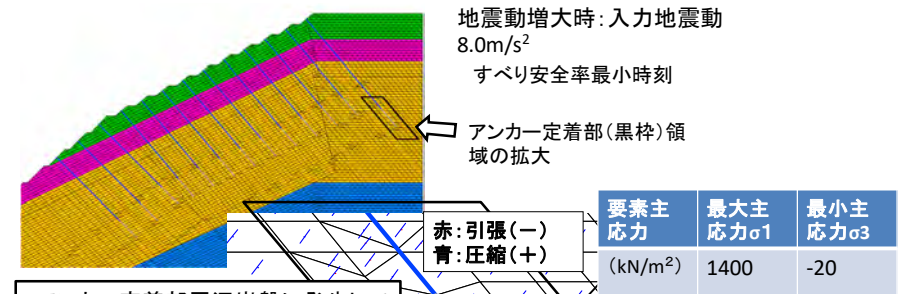
表2 すべり安全率

アンカーの初期緊張力 1250kN/本

対象すべり線 No.	最大加速度 6.0(m/s ²) 斜面安定性評価フロー案の場合				最大加速度 8.0(m/s ²) 斜面安定性評価フロー案の場合			
	抵抗力 (t)	滑動力 (t)	最小すべり安全率	発生時刻 (秒)	抵抗力 (t)	滑動力 (t)	最小すべり安全率	発生時刻 (秒)
1 (D級内)	15791	10414	1.516	12.41	15196	12736	1.193	12.41
2 (CL級内)	59837	30852	1.939	12.41	55804	36238	1.539	12.41
3 (CM級内)	355122	126744	2.801	12.40	328965	137257	2.396	12.41

1.2以下となるケース

□アンカー一定着部周辺岩盤の主応力



・アンカー一定着部周辺岩盤に発生している引張応力は、小さい。
 ・引張応力は、アンカー軸方向に対して概ね平行になっている。(引張り破壊が生じる場合は、破壊面がアンカー軸方向に交差する方向)

・(その2)の実験では、極限アンカー力は、定着部の岩盤がある程度保たれていれば維持されること、極限アンカー力を超えたアンカー力が作用しても、残留アンカー力は維持されることが示唆されている。

図7 アンカー一定着部周辺岩盤の主応力分布

□局所安全率分布とすべり安全率

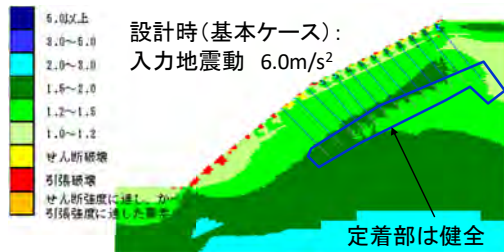


図5 すべり安全率最小時刻における局所安全係数分布(6.0m/s²)

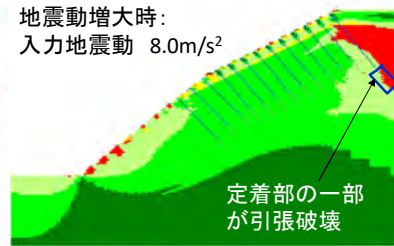


図6 すべり安全率最小時刻における局所安全係数分布(8.0m/s²)

表2 すべり安全率

アンカーの初期緊張力 1250kN/本

1.2以下となるケース

対象すべり線	最大加速度 6.0(m/s ²) 斜面安定性評価フロー案の場合				最大加速度 8.0(m/s ²) 斜面安定性評価フロー案の場合				最大加速度 8.0(m/s ²) 極限アンカー力を低減させない場合			
	抵抗力 (t)	滑動力 (t)	最小すべり安全率	発生時刻 (秒)	抵抗力 (t)	滑動力 (t)	最小すべり安全率	発生時刻 (秒)	抵抗力 (t)	滑動力 (t)	最小すべり安全率	発生時刻 (秒)
1 (D級内)	15791	10414	1.516	12.41	15196	12736	1.193	12.41	15418	12658	1.218	12.41
2	59837	30852	1.939	12.41	55804	36238	1.539	12.41	57999	36164	1.603	12.41

定着部周辺岩盤の一部に破壊が生じていても、アンカー力のある程度見込むことができれば、地震時の斜面安定性評価がより合理的になる可能性がある。

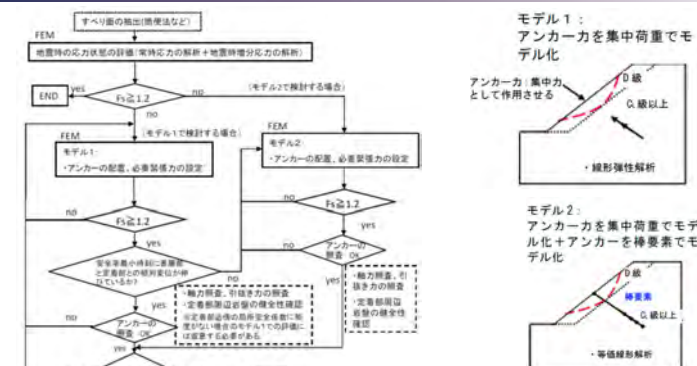
まとめ

・現状のアンカー定着部の評価法を適用するとすべり安全率の評価基準を満たされないが、極限アンカー力の低減を考慮しない場合には、すべり安全率が評価基準を満たす評価事例を示した。

・後述する実験では、定着部の軽微な損傷であれば、極限アンカー力がある程度維持される可能性があること、残留アンカー力もある程度は見込める可能性があることが示唆されている。

・これらの知見を反映できれば、地震動増大時においても斜面の安定性評価がより合理的になる可能性があることが確認できた。

アンカー工の地震時安定性評価フロー



西村ほか(2013):アンカー工を有する斜面の地震時安定性評価, 第52回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp124-125

アンカー定着部周辺の岩盤が引張破壊を生じてもアンカーの効果はある程度維持されるのではないかと?

- その1:モデル斜面を対象とした評価事例
- その2:人工軟岩に対するアンカー引き抜き試験

斜面の地震時安定性評価における アンカー工定着部の評価(その2) —人工軟岩に対するアンカー引抜き試験—

電力中央研究所 ○小早川博亮, 石丸真, 関口陽, 岡田哲実
セレス 平賀健史
関西電力 小澤和弘

土木学会 原子力土木委員会 地盤安定性評価小委員会講演会「原子力施設に関する地盤安定性評価技術の現状—どこまでできて、何が課題か—」

2020年7月28日

※本内容は電力9社, 日本原子力発電(株), 電源開発(株), 日本原燃(株)による原子力リスクセンター共通研究(平成29年度)によって得られた成果である。

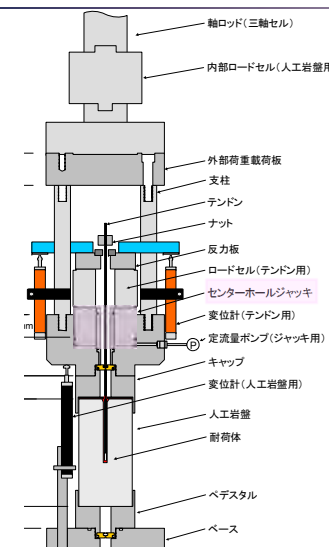
※本内容は, 土木学会第73回年次学術講演会札幌大会(2018年8月29日)にて発表したものである

RI 電力中央研究所

本報告の目的

- ◆ **定着部付近の岩盤の損傷がアンカー力に及ぼす影響**を明らかにする
- ◆ このために, アンカー体および周辺岩盤を模擬した小型模型に対して**アンカー引抜き試験**を実施し, 極限アンカー力を超えた引張り力が作用した場合の挙動を調べる。

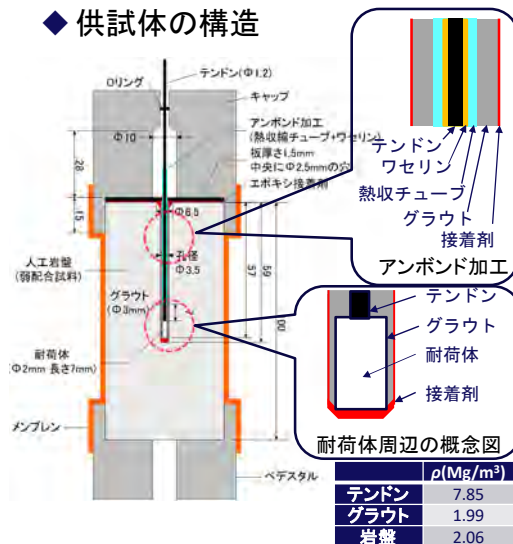
アンカー引き抜き試験



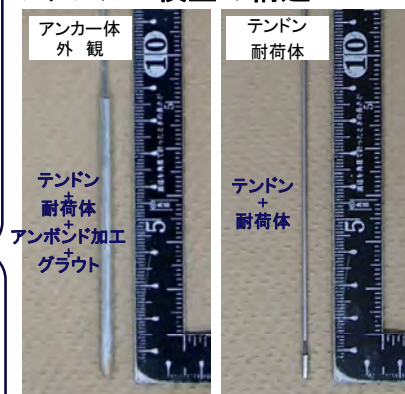
1. 人工岩盤の上面にキャップ, センターホールジャッキ, 反力板を置く。
2. ジャッキの荷重は, テンドンに取り付けられたナットを介してテンドンに伝達され, 引き抜く機構

模型の構造

◆ 供試体の構造



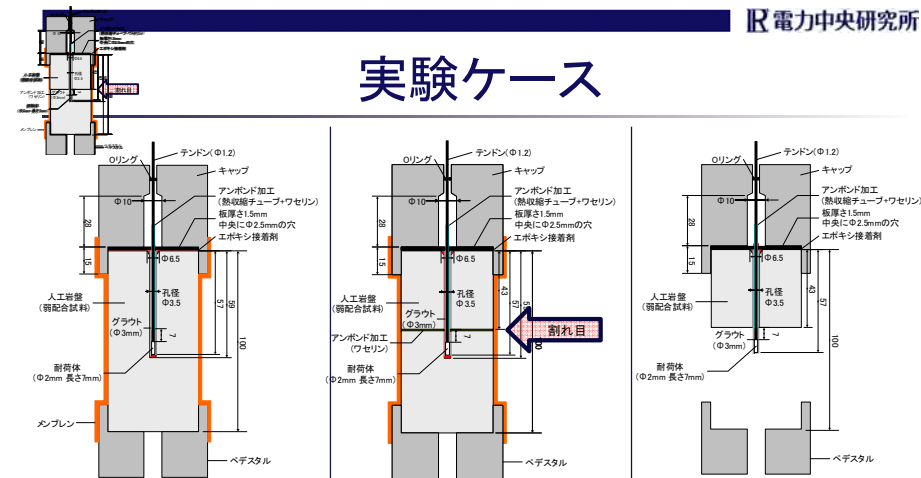
◆ アンカー模型の構造



耐荷体周辺の概念図

	ρ (Mg/m ³)	E (GPa)	ν	強度 (MPa)	材料
テンドン	7.85	206	0.30	770 (引張)	炭素鋼 SK4
グラウト	1.99	4.04	0.30	55.5 (圧縮)	早強セメント
岩盤	2.06	1.61	0.42	0.49 (圧縮)	人工軟岩

実験ケース



case1

・拘束圧の影響

・0, 100, 200, 400kPa各2本

case2

・耐荷体周辺の岩盤割れ目の影響

・0, 100, 200, 400kPa各2本

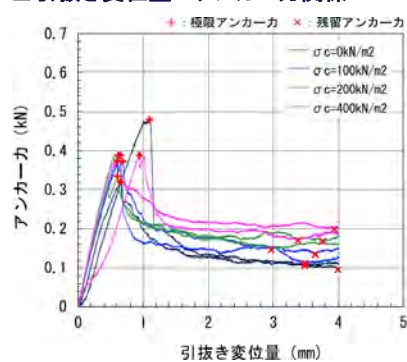
case3

・アンカー体の強度

・5本

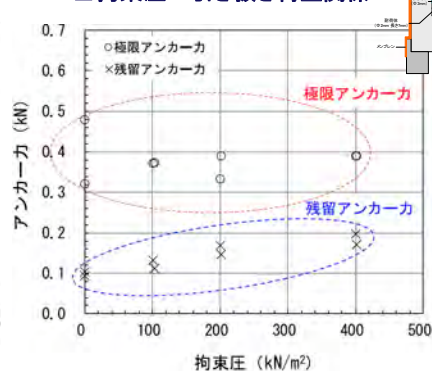
実験結果(1) 拘束圧の影響 (case1)

■ 引抜き変位置—アンカー力関係



※残留荷重は、ピーク荷重を過ぎた後、引抜き変位が4mmに到達するまでの引抜き荷重の最小値とした。

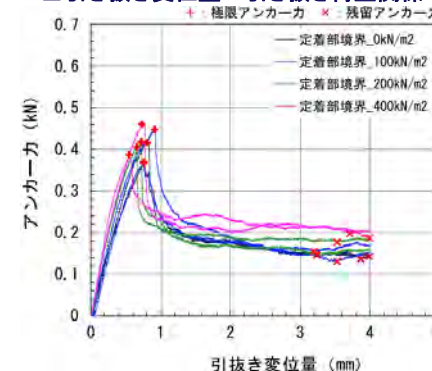
■ 拘束圧—引き抜き荷重関係



- ①ピーク強度：約0.30~0.50kNの範囲に分布し、拘束圧依存性は顕著でない
- ②残留強度：拘束圧が増すと引抜き荷重は大きくなる、拘束圧依存性が認められる

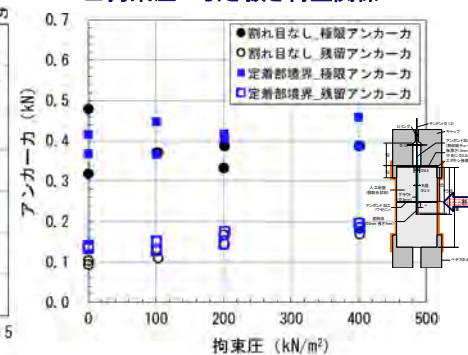
実験結果(2) 岩盤割れ目の影響 (case2)

■ 引き抜き変位置—引き抜き荷重関係



※残留荷重は、ピーク荷重を過ぎた後、引抜き変位が4mmに到達するまでの引抜き荷重の最小値とした。

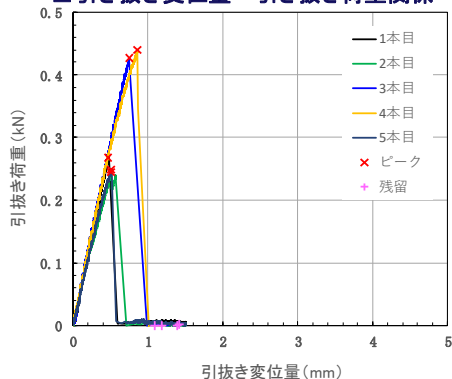
■ 拘束圧—引き抜き荷重関係



- ①ピーク強度：約0.30~0.50kNの範囲に分布し、拘束圧依存性は顕著でない
- ②残留強度：拘束圧が増すと引抜き荷重は大きくなる、拘束圧依存性が認められる
⇒case1と同じ傾向。今回設定した割れ目は、ほとんど影響しないといえる。

実験結果(3)アンカー一体の強度(case3)

■ 引き抜き変位置—引き抜き荷重関係

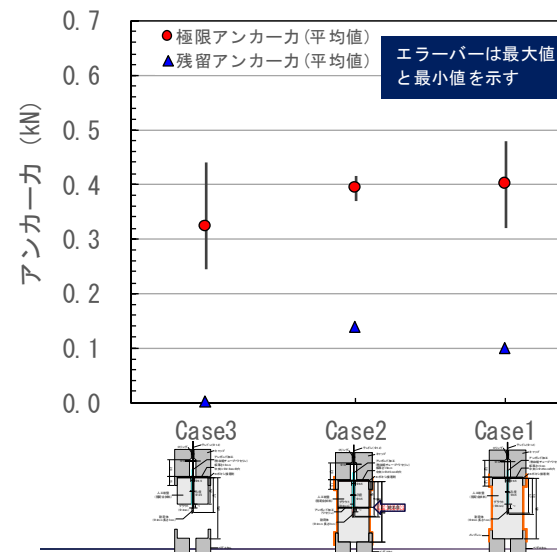


本数 (本目)	ピーク荷重 (kN)	残留荷重 (kN)
1	0.27	0.00
2	0.25	0.00
3	0.43	0.00
4	0.44	0.00
5	0.25	0.00

※残留荷重は、ピーク荷重を過ぎた後、引き抜き変位が1.5mmに到達するまでの引き抜き荷重の最小値とした。

- ①ピーク強度：約0.25~0.45kNの範囲に分布し、case1,2に比べてやや小さい
- ②残留強度：アンボンド部の摩擦のみで残留荷重は0kN。

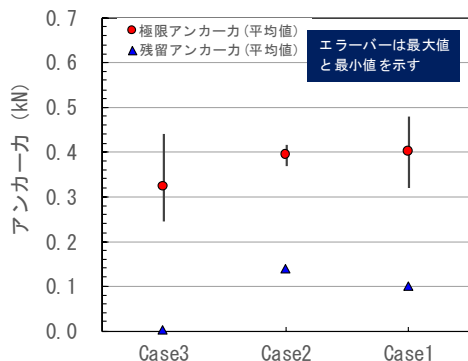
考察(1) 極限アンカー力



- Case3は、case1,2の8割程度
⇒この差は定着部周辺岩盤の寄与による
⇒case3はアンカー一体の強度のみ(周辺岩盤の寄与がない)ため残留が0。Case1,2は周辺岩盤の寄与があるため、残留が発揮
⇒さらに、残留がある場合には、拘束圧依存性が発揮されている

↓
• 極限アンカー力を越える荷重が作用した際にはアンカー力は低下するがアンカー**定着部周辺の岩盤が“存在”すれば**、残留アンカー力程度は保持される

考察(2)定着部周辺とアンカー力



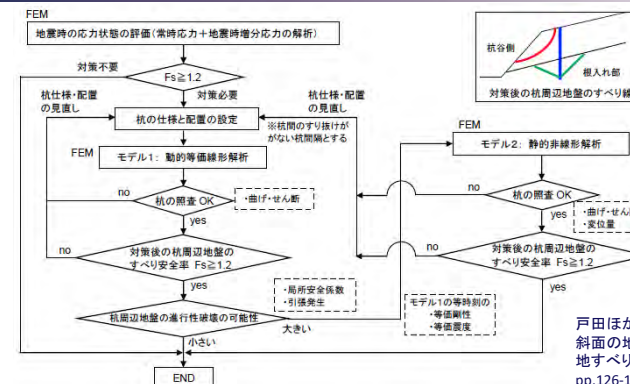
■ 定着部周辺岩盤に必要な健全な状態

- Case2とcase1とほとんど変化ない
⇒case2程度の割れ目はアンカー力に影響しない。
- 定着部周辺の岩盤は、地震の継続により破壊すると仮定し、その状態を保守的にcase3の無拘束状態と考える
⇒極限アンカー力は保たれている
- ただし、case3には定着部周辺に地盤がなく、アンカー力を周辺に伝達できない。
⇒定着部よりも浅い土塊が移動する場合は、アンカー頭部周辺地盤が損傷する場合は、設計に反映すべきではない

まとめ

- ◆ 直径50mmの円柱供試体に対するアンカー引き抜き試験を実施した。
- ◆ 定着部周辺の地盤がある程度健全であれば残留アンカー力は保持される。
- ◆ 残留アンカー力には拘束圧依存性がある。
- ◆ 周辺岩盤が破壊したとしてもアンカー一体が健全であれば極限アンカー力は保たれる。

抑止杭工の地震時安定性評価フローと本研究の目的



戸田ほか(2013):抑止杭工を有する斜面の地震時安定性評価, 第52回地すべり学会研究発表会講演集, pp.126-127

フローに沿って設計した場合、斜面の安定性が確保されているか？
⇒抑止杭工を設置した斜面の動的遠心力模型実験を実施し、フローの検証が実施されている(小早川ほか, 2017)。

本研究では、今後の評価手法としての変位量評価を見据え、抑止杭工を設置した斜面の動的遠心力模型実験を対象に、残留変位量の再現性の観点から時刻歴非線形解析の適用性に関して検討した。

抑止杭によって補強された岩盤斜面の遠心力模型実験に関する数値解析

電力中央研究所 ○日高 功裕
電力中央研究所 小早川博亮
電力中央研究所 石丸 真

地盤安定性評価小委員会講演会
2020年7月28日

※本内容は、土木学会第74回年次学術講演会高松大会(2019年9月3日)にて発表したものである

発表内容

動的遠心力模型実験(小早川ほか, 2017)

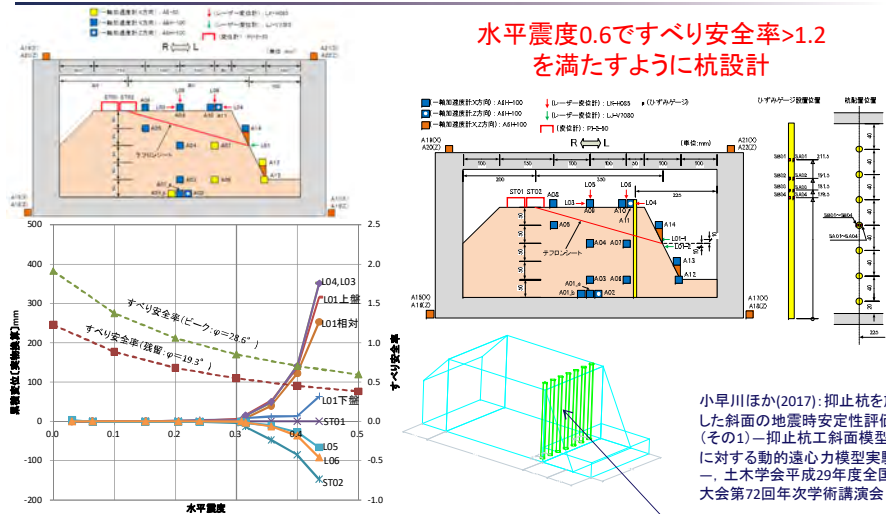
模型実験に対する時刻歴非線形解析

発表内容

動的遠心力模型実験(小早川ほか, 2017)

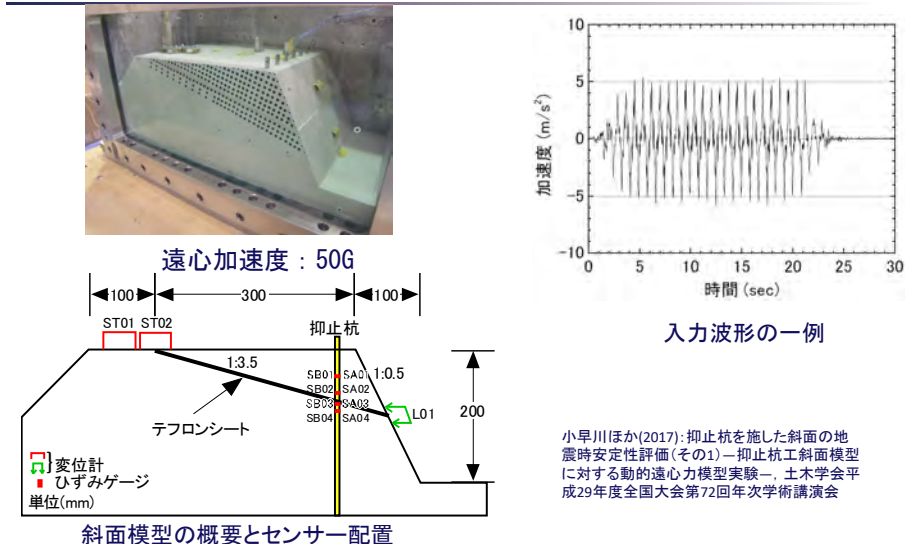
模型実験に対する時刻歴非線形解析

実験条件 抑止杭の設計



杭を設置する前の斜面模型の実験結果

実験方法 斜面模型の概要と加振条件



斜面模型の概要とセンサー配置

入力加速度と累積変位の関係

○入力最大加速度

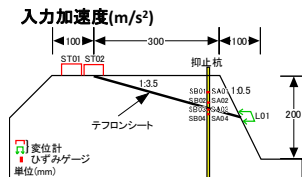
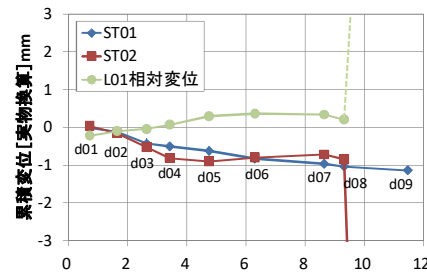
ステップ	$a_n (m/s^2)$
d01	0.72
d02	1.64
d03	2.65
d04	3.42
d05	4.76
d06	6.31
d07	8.64
d08	9.32
d09	11.47

↓設計超

※最小すべり安全率は6.31 m/s^2 で0.962、8.64 m/s^2 で0.829

※等価線形解析によるすべり安全率評価は実験結果に対して保守的な評価

○累積変位



小早川ほか(2017): 抑止杭を施した斜面の地震時安定性評価(その1) - 抑止杭工斜面模型に対する動的遠心力模型実験 - 土木学会平成29年度全国大会第72回年次学術講演会

発表内容

動的遠心力模型実験(小早川ほか, 2017)

模型実験に対する時刻歴非線形解析

非線形解析手法の概要(1) ※圧縮:正

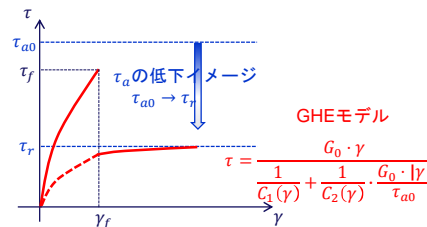
項目		本研究で適用した構成モデル (2次元全応力非線形)
基本 構成則	特徴	多重せん断ばねモデル (Towhata and Ishihara, 1985)
	骨格曲線	破壊前の骨格曲線: GHEモデル (地震時の拘束圧依存なし) 破壊後の骨格曲線: 残留強度に基づくGHEモデル
	履歴曲線	減衰調整したMasing則 (履歴曲線は双曲線モデル)
	異方性	考慮なし
強度 設定	せん断破壊後 せん断強さの扱い	せん断破壊後のひずみの発生量に応じて残留強度まで低下 (残留強度は地震時の拘束圧依存)
	せん断破壊後 引張り強さの扱い	せん断破壊後のひずみの発生量に応じてゼロまで低下
	引張り破壊後 せん断強さの扱い	引張り破壊面の数に応じて残留強度まで低下 (残留強度は地震時の拘束圧依存)
	引張り破壊後 引張り強さの扱い	引張り破壊面の数に応じてゼロまで低下
応力再配分の方法		①せん断破壊に対して、平均主応力固定でモールの応力円を縮小 ②引張り破壊に対して、最大主応力固定でモールの応力円を縮小 (この処理の後でもせん断強さを超過している場合は、最小主応力固定でモールの応力円を縮小) ③作用外力と応力から算定した内力の差(不釣合力)を作用

非線形解析手法の概要(2)

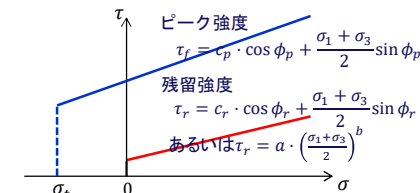
■材料非線形モデル

破壊前: GHEモデル
(規準せん断強さ $\tau_a = \tau_{a0}$:一定値)

破壊後: GHEモデル
(規準せん断強さ $\tau_a = \tau_{a0} \rightarrow \tau_r$)



■破壊判定



○せん断破壊の判定
 $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \geq \tau_f$

○引張り破壊の判定
 $\sigma_3 \leq \sigma_t$

■せん断破壊後の強度低下

$$\tau_{as} = \tau_r + \frac{(\tau_{a0} - \tau_r)}{(A \cdot \gamma^p + 1)}$$

$$\sigma_{ts} = \frac{\sigma_{t0}}{(A \cdot \gamma^p + 1)}$$

石丸真, 岡田哲実: 動的解析で用いる岩石の非線形モデルの改良, 第46回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.123-126, 2019.

引張り破壊面比率による強度低下

■引張り破壊後の強度低下のモデル化

- 引張り破壊後のせん断強さおよび引張り強さを破壊面の数に応じて等方的に低下。
- 破壊面の角度は主応力面で規定し、ある角度で分割した平面上で、破壊面の数 n_f をカウント (累計)。

・パラメータ

N : 平面上の分割数 (右図の場合は 30° 分割で6)

α_1 : 強度低減係数

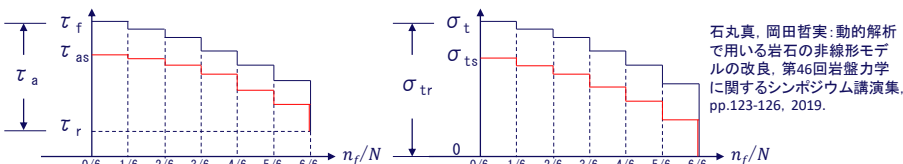
○引張り破壊後の規準せん断強さ

$$\tau_a = \tau_{as} \cdot (1 - n_f/N)^{\alpha_1} + \tau_r \cdot \{1 - (1 - n_f/N)^{\alpha_1}\}$$

○引張り破壊後の引張り強さ

$$\sigma_{tr} = \sigma_{ts} \cdot (1 - n_f/N)^{\alpha_1}$$

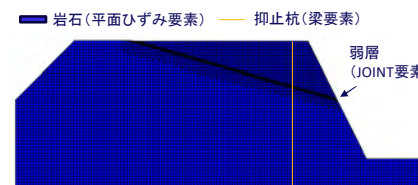
※1 τ_{as} , σ_{ts} : せん断破壊後のひずみ軟化を考慮した規準せん断強さ, 引張り強さ



石丸真, 岡田哲実: 動的解析で用いる岩石の非線形モデルの改良, 第46回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.123-126, 2019.

解析条件

●斜面模型の形状



●境界条件

- 側方: ジョイント要素 底面: 完全固定

●自重解析

- 動解と同じ非線形物性を使用して実施

●計算時間刻み・残差力処理

- 計算時間刻み: 5.0×10^{-5} 秒
- 反復計算: なし
- 残差力: 次ステップ持越し

●解析物性値(岩石, σ : 拘束圧[kPa])

密度	t/m ³	2.07
静・動ポアソン比		0.42
初期せん断弾性係数	kPa	9.330×10^5
せん断強さ(健全)	kPa	$267.1 + \sigma \tan 34.7^\circ$
せん断強さ(残留)	kPa	$4.61 \sigma^{0.70}$
分割数N		12
調整パラメータ α_1		0.5
引張り強さ	kPa	case0: 41.4 case1: 84.8 case2: 385.7 case3: 51.3

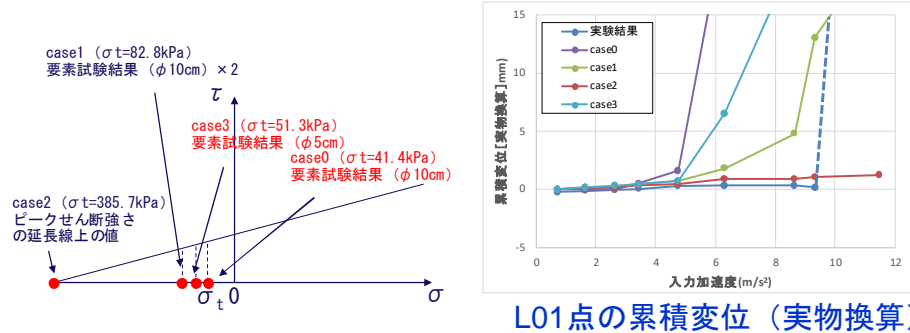
●解析物性値(弱層, σ : 拘束圧[kPa])

密度	t/m ³	2.10
静・動ポアソン比		0.49
初期せん断弾性係数	kPa	2.800×10^3
せん断強さ(健全)	kPa	$\sigma \tan 28.6^\circ$
せん断強さ(残留)	kPa	$\sigma \tan 19.3^\circ$
引張り強さ	kPa	0.0

※抑止杭の物性値は面積比により低減

解析結果(変位の残留値)

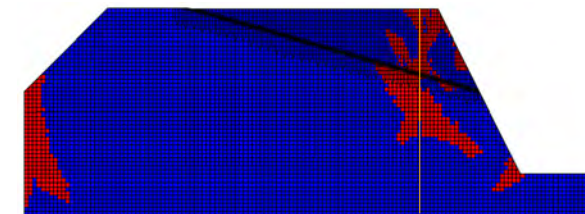
引張り強さの寸法効果等を考慮し、引張り強さに関してパラメトリックスタディを実施



- ・ case1, 3では等価線形解析ですべり安全率が1.0を下回った最大加速度 6.31 m/s^2 の加振ステップ以降、残留変位が累積
- ・ case2では最大加速度 11.47 m/s^2 の加振ステップでも残留変位がほとんど発生せず、実験結果に対して過小評価

解析結果(破壊状況: case3)

赤: 引張り破壊した要素



最大加速度 6.31 m/s^2 の加振ステップ終了時

- ・ せん断破壊の履歴は確認されず、引張り破壊のみ
- ・ 抑止杭周辺の引張り破壊が結果に影響

まとめ

●本研究では、今後の評価手法としての変位量評価を見据え、抑止杭工を設置した斜面の動的遠心力模型実験を対象に、残留変位量の再現性の観点から時刻歴非線形解析の適用性に関して検討した。

●解析では、抑止杭周辺岩盤の引張り破壊が顕著であり、岩盤の引張り強さに関してパラメトリックスタディを実施したところ、斜面の残留変位量に大きく影響することを確認した。

●今後、残留変位量のより定量的な評価のため、抑止杭周辺岩盤の強度および剛性の再評価、ならびに弱層の剛性の再評価などを行う予定である。