

E ディフェンスを用いた岩盤斜面の地震時安定性に関する振動台実験

鉄道総合技術研究所 正会員○篠田昌弘 中島進 渡辺健治 佐名川太亮
原子力安全基盤機構 正会員 中村英孝、村田雅明
東北大学 正会員 河井正
日本大学 正会員 中村晋

1. はじめに 現行の原子炉建屋周辺斜面の安定性評価では、力の釣合いに基づくすべり安全率が設計入力地震動に対して許容値を満足することが求められる。実際には、地震中にすべり安全率が 1.0 未満となった後の斜面の不安定化の程度は、安全率が 1.0 を下回る継続時間に依存する上に、岩盤斜面の物理特性、力学特性、形状等により不安定化から崩壊に至る過程は大きく異なる。しかし、現行の評価手法ではこうした点を十分に考慮できないため、(独) 原子力安全基盤機構を中心とする研究グループでは斜面の安定性評価手法の高度化のため、原子炉建屋周辺斜面の崩壊メカニズムの解明と斜面の変形特性や応答特性に関する検討を進めてきた^{例えば 1)}。本論文では、上記の背景のもとで、(独) 防災科学技術研究所、兵庫耐震工学研究センターの実大三次元震動破壊実験施設 (E-Defense) で実施した大型斜面模型の実験結果を報告する。

2. 試験概要 E-Defense を用いた振動台実験では、二基の土槽を連結し、局所的な弱層を有する斜面模型 (三層斜面模型) と、弱層が明瞭でなく地震動の増幅の影響を顕著に受ける斜面模型 (一層斜面模型) の二つの斜面模型に対する加振実験を同時に行った^{2) 3) 4)}。本報では、前者の三層斜面模型の結果を述べる。構築した三層斜面模型および計測機器配置を図 1 に示す。模型地盤のうち、弱層部は、東北硅砂 6 号、ベントナイト、水を重量比 100 : 7 : 10 にて攪拌混合して作製した。なお、本検討では岩盤中に局所的に存在する弱層部のすべりに起因する斜面崩壊時の地震時挙動に着目することを意図して、斜面表面部が先行して崩壊するのを防止するために、表層部に補強材 (KJV-3000) を配置した。表 1 に三軸圧縮試験にて評価した弱層部の強度定数を示す。表 1 中において「事前」は斜面模型構築時に攪拌混合した試料を、試験の養生日数に合わせて三軸試験を行うことで評価した値で、「事後」は加振実験後の斜面模型からクラックなどが発生していない箇所を選定して、サンプリングした供試体の三軸試験を行い評価した値である。斜面模型は、表 1 に示す配合で作製した試料を締め固めて構築した。加振は図 2 に示す観測波を用いて、水平・鉛直同時加振により最大加速度を徐々に増大させる形式で加振を行ったが、加振能力の関係から斜面模型を崩壊させることを意図した加振ケース 22 では、最大加速度 800gal の正弦波 (5Hz10 波) を用いた。表 2 に本報で議論の対象とする加振ケースと加振条件をまとめる。以下では、斜面崩壊時の挙動を安定解析結果との対比とともにまとめる。

3. 斜面崩壊の概況 図 3 に三層斜面模型の正弦波 800gal (加振ケース 22) 加振中の斜面模型の崩壊状況を示す。弱層内にすべり線が生じ、表層部が一体的に崩落していく状況が確認できる。なお、すべり線は加振ケース 21 終了時には断続的ではあるものの、天端からのり尻付近まで生

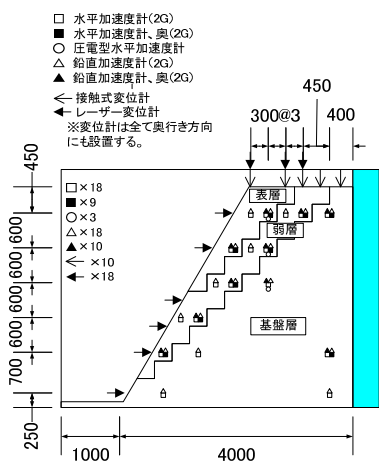


図 1 斜面模型の概要 (単位 : mm)

表 1 地盤試料の強度定数

場所	事前		事後	
	c_p	ϕ_p	c_p	ϕ_p
弱層部				
表層部	8.2 kPa	31.3°	5.1 kPa	32.7°
基盤層	280 kPa	57.0°	—	—

ϕ_p, c_p はピーク時の粘着力、せん断抵抗角を示す

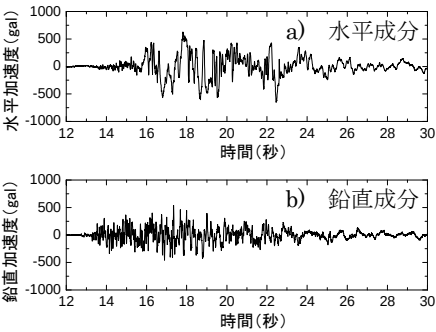


図 2 観測波の時刻歴の例 (加振ケース 20 : 水平 700gal、鉛直 470gal)

表 2 本報で対象とする加振条件

加振ケース	水平*	鉛直*
17	観355gal	観307gal
18	観430gal	観339gal
19	観543gal	観506gal
20	観620gal	観576gal
21	観708gal	-
22	正800gal	-

*正 : 正弦波、観 : 観測波

じていた。既往の要素試験や模型実験によると、すべり線は地盤の強度がピーク強度から残留強度に落ちる過程で発生することが知られており、弱層内部に断続的なすべり線が確認されたことから、本試験の斜面模型においても、崩壊前の加振ケース 21 の段階で、地盤材料は既にポストピークの状態に至っていたことが示唆される。

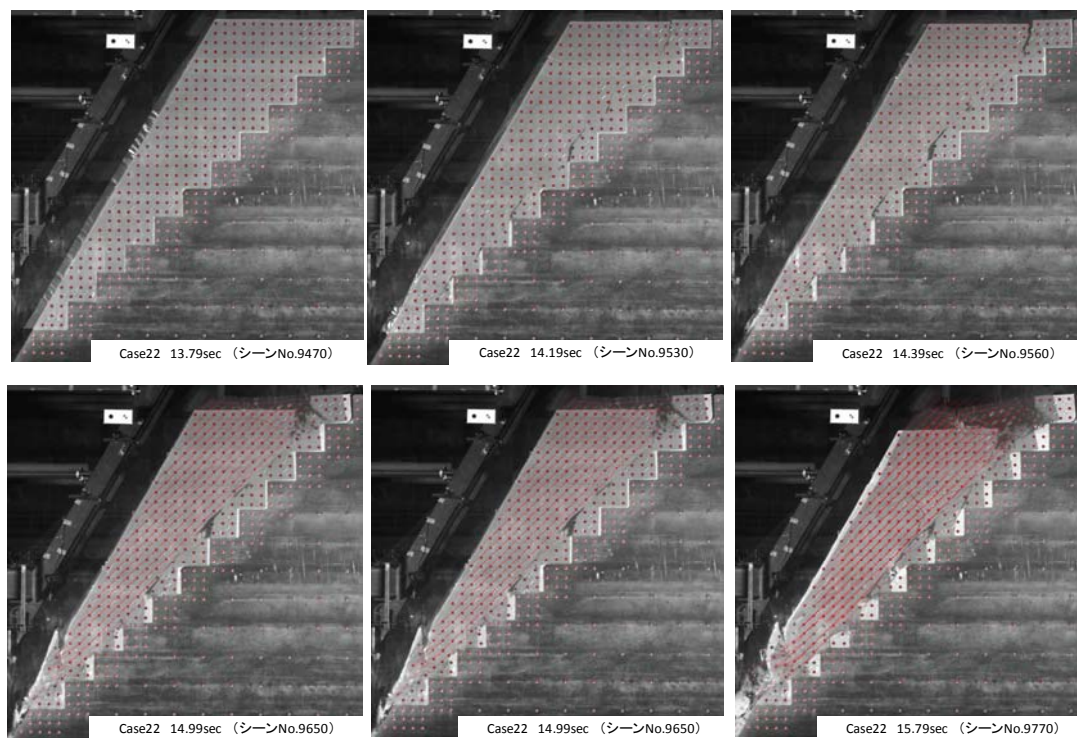


図3 斜面の崩壊状況(加振ケース 22 正弦波水平 800gal 加振中)

4. 安定解析結果との対比 図4に安定解析結果を、図5に加振ケース 20における入力加速度の軌跡を示す。安定解析は、表1に示す事前の強度定数を用いて実施した。まず、図4中、(1)に示した加振ケース 17~20に関して水平・鉛直動の最大加速度をそれぞれ水平・鉛直震度とした場合、加振ケース 19の段階で安全率は1を下回っており、クラックや崩壊挙動が確認されなかった試験結果と整合しない。これは、図5に示す加振ケース 20の入力加速度の軌跡から明らかなように、水平動・鉛直動の最大加速度は同時に作用しないためである。ここで、図5中、①から③の応答加速度を用いて安定解析を行った場合、図4(2)に示すように、いずれの点でも安全率は1にほぼ等しい。これに対して、断続的なクラックが天端からのり面につながった加振ケース 21、クラック発生後に模型を崩壊させる意図で実施した加振ケース 22(図4(3)、(4))では安全率が1を大きく下回っており、斜面模型が崩壊に至った試験結果と比較的良好に整合している。

5. まとめと今後の方針 斜面の安全性評価法の高度化を目的として Eディフェンスにて実施した振動台実験より、斜面の安全性評価にあたって、水平動・鉛直動とその位相を考慮することの重要性が示唆された。今後は、斜面の応答・位相を評価した上で、安定解析を行うための解析ツールを開発していく予定である。

参考文献 1) 篠田ら: 岩盤斜面の地震時安定性評価手法の構築に向けた試み, 第13回地震工学シンポジウム, 日本地震工学会, pp. 2935-2942, 2010. 2) 中村ら: Eディフェンスで実施した大型斜面模型の振動台実験の概要, 第67回土木学会年次学術講演会, 2012(投稿中). 3) 渡辺ら: 画像解析による大型斜面模型の変形挙動の評価, 第67回土木学会年次学術講演会, 2012(投稿中). 4) 中島ら: Eディフェンスを用いた斜面の地震時安定性に関する振動台実験, 第47回地盤工学研究発表会, 2012(投稿中).

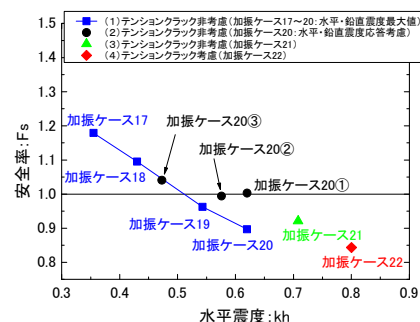


図4 安定解析結果

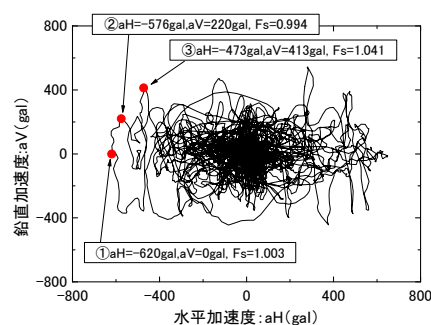


図5 加振ケース 20 入力加速度の軌跡