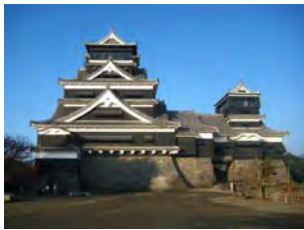


変状進行中の城郭石垣の モニタリングと崩壊危険度 評価手法の提案



熊本城face bookより転載

長崎大学大学院 杉本 知史

研究背景・目的

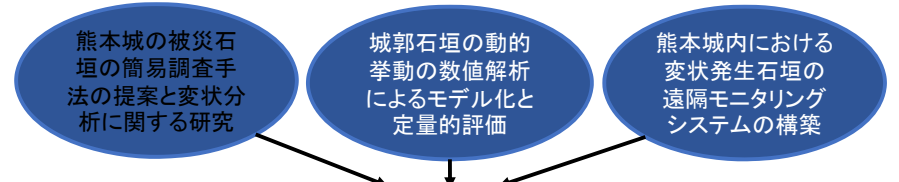
熊本地震で熊本城の石垣は甚大な被害が生じた



城郭石垣は文化財としての位置付けから、保存が優先され土木構造物としての評価が進んでいない



城郭石垣の崩壊メカニズムの解明や危険度評価手法の提案は急務である。

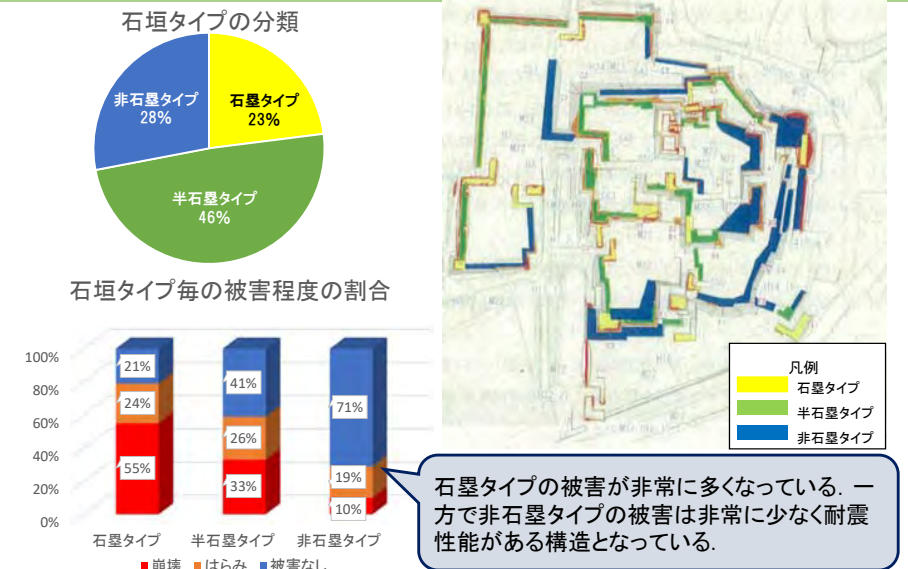


モニタリングと数値シミュレーションによる力学的安定性の評価手法の提案

石垣の種類及び被害状況

	石垣タイプ	半石垣タイプ	非石垣タイプ
構成材料	石垣石と栗石のみ	石垣石、栗石と背面地盤	石垣石と背面地盤のみ
特徴	高さ：低い 勾配：急	高さ：高く 勾配：やや緩い	高さ：高い 勾配：緩い

石垣の種類及び被害状況

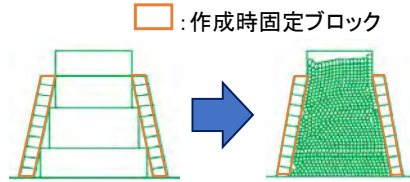


解析モデルの作成

個別要素法は、個々の要素の運動を評価できる解析手法である。そのため、石垣や石橋などの不連続な解析を行う上で非常に適している。しかし、**実モデルに近い解析モデルを作成**しなければ満足いく崩壊の再現とはならない。

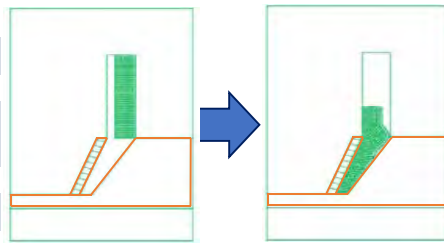
石罫タイプ

- モデル内部に四つのブロック作成
- 各ブロックを40cm四方にカット
- 左右交互に1回加振し、その後重力を作用



半石罫タイプ

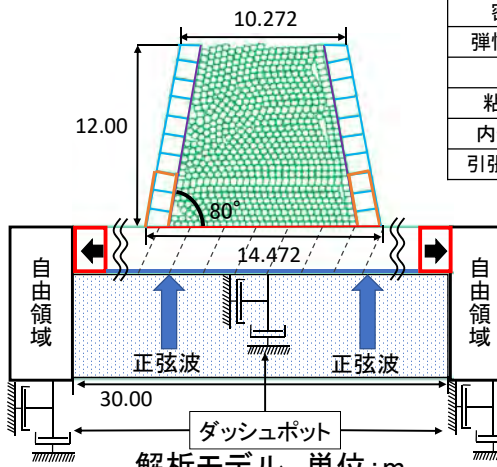
- モデル上部に栗石ブロック作成
- スムーズに落下させる為に、栗石ブロック左部削除
- 重力場によって栗石を自由落下する



解析条件

条件	ケース		
石垣タイプ	石罫タイプ	半石罫タイプ	非石罫タイプ
石垣形状(勾配)	60°	70°	80°
石垣石表面のせん断抵抗角	15°	35°	50°
栗石表面のせん断抵抗角	15°	45°	

解析条件



項目	背面土	石垣石	栗石
密度 ρ (g/cm ³)	2.2	2.5	2.2
弾性係数 E (MN/m ²)	50	50×10^3	50×10^3
ポアソン比 ν	0.3	0.25	0.25
粘着力 c (KN/m ²)	100	7.0×10^4	7.0×10^4
内部摩擦角 ϕ (°)	30	45	45
引張強度 σ (MN/m ²)	0	3.5	3.5

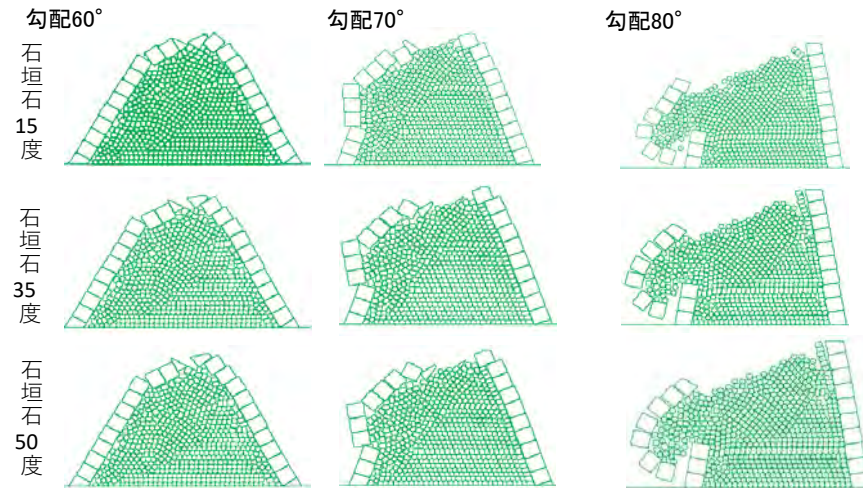
項目	背面土・石垣石間	石垣石間
せん断抵抗角 ϕ (°)	15	15
引張強度 σ (MN/m ²)	0	0

波形	周波数 (Hz)	振幅 (m/sec)
正弦波	10	1.0

- 石垣石 (弾塑性要素)
- 栗石 (弾性要素)
- 基礎部 (固定要素)
- 砂質地盤 (弾塑性要素)
- エネルギー伝達境界
- 固定ブロック
- 石垣石・栗石間
- 背面土・石垣石間
- 背面土・栗石間

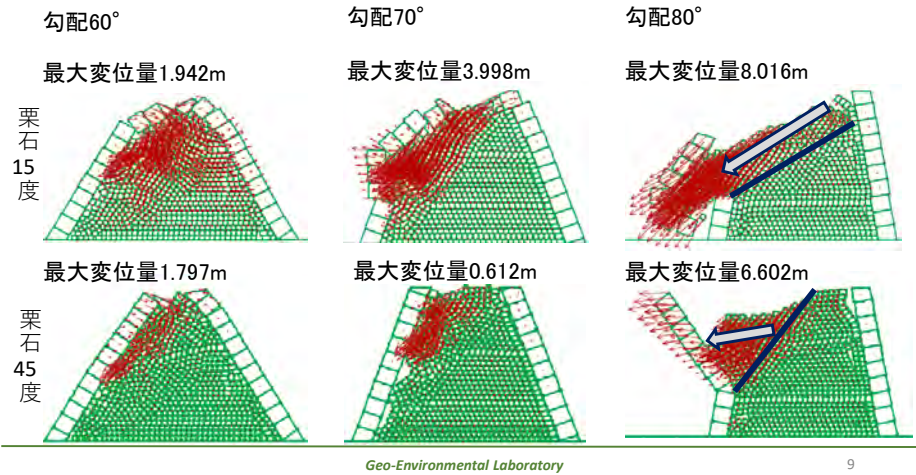
解析結果(石垣石表面のせん断抵抗角3ケース)

✓石垣石の各ケースで、ほぼ類似の変形量・崩壊形態となった
以降では栗石のせん断抵抗角のみでの比較とする



解析結果(栗石表面のせん断抵抗角2ケース)

- ✓ 抵抗角15度ではすべての勾配で崩壊が発生している
- ✓ 上部栗石が地震により、空隙を詰める形で変位している
- ✓ 勾配80°では、栗石表面の粗さによって、栗石の崩れる範囲に大きな違いがある

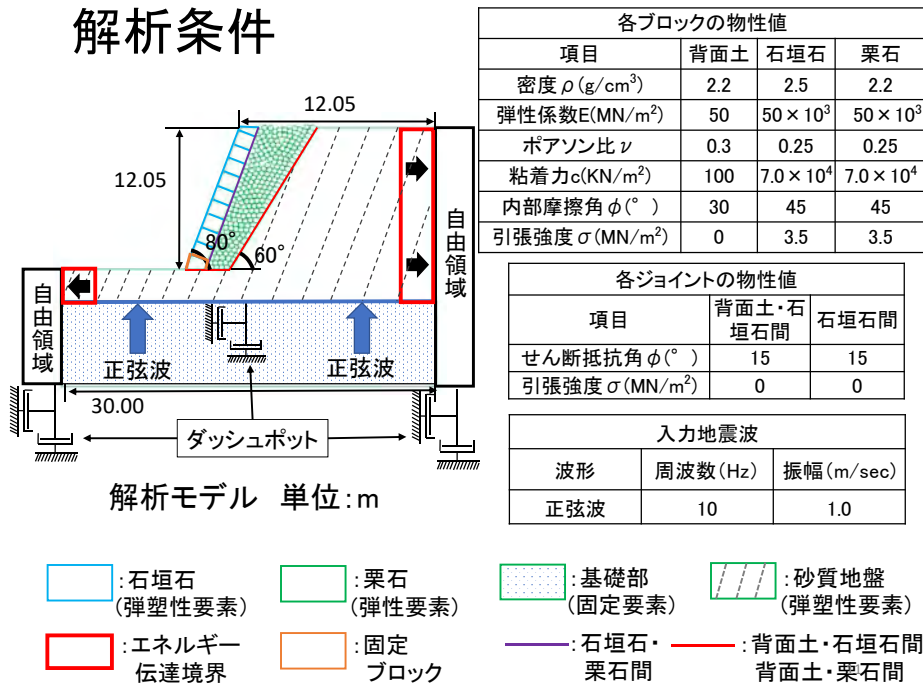


解析条件

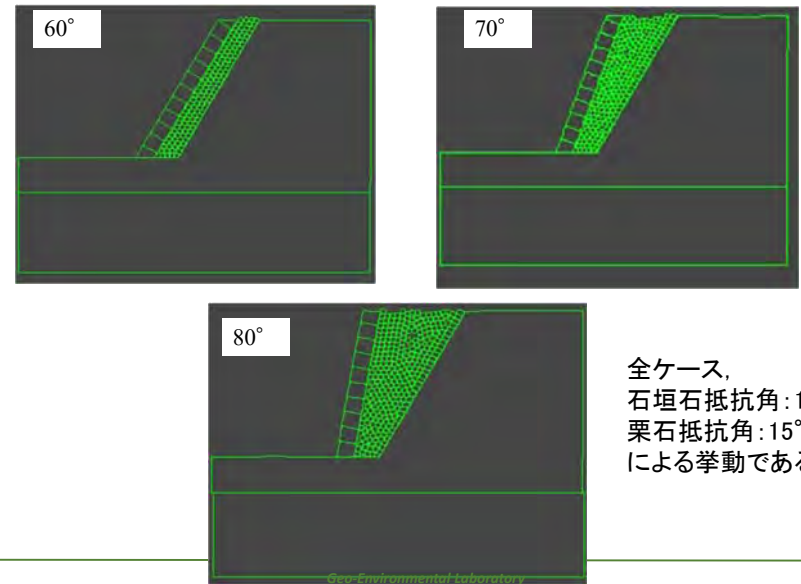
条件	ケース		
	石壘タイプ	半石壘タイプ	非石壘タイプ
石壘形状(勾配)	60°	70°	80°
石壘石表面のせん断抵抗角	15°	35°	50°
栗石表面のせん断抵抗角	15°	45°	

Geo-Environmental Laboratory 10

解析条件

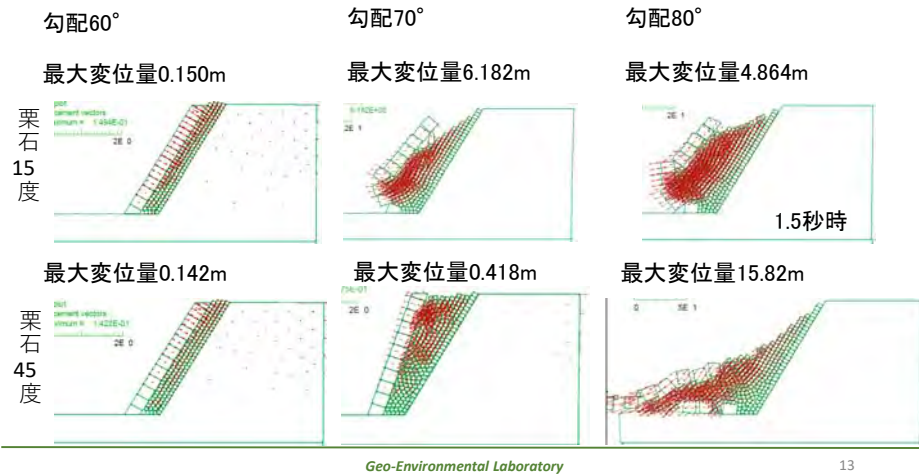


解析結果(異なる勾配における崩壊挙動)



解析結果(栗石表面のせん断抵抗角2ケース)

✓勾配60°では背面地盤方向に変位している→石垣の主働土圧の方が大きい
 ✓崩壊に至るケースは、栗石が石垣石に沿って鉛直下向きに変位し、下部石垣を押し出す形で崩壊に至っている

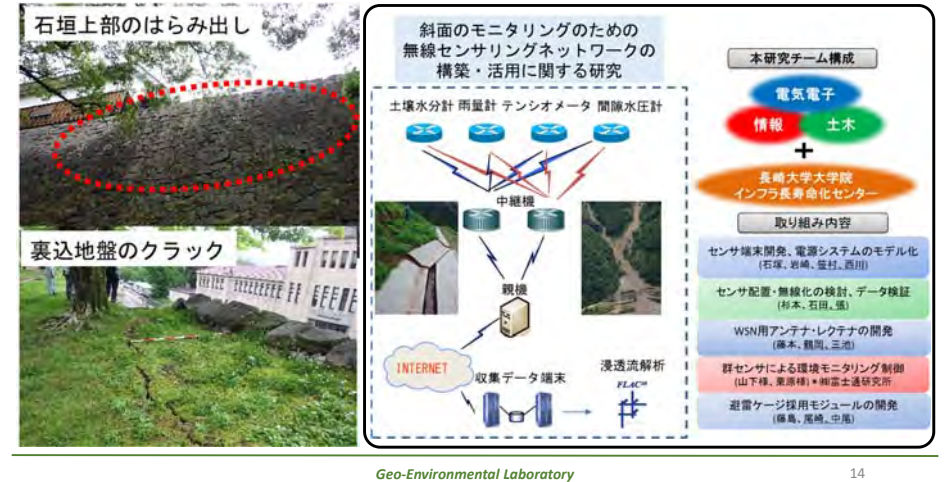


モニタリングシステムの設置個所とイメージ

公益社団法人 地盤工学会

平成28年熊本地震地盤災害調査団 調査報告より

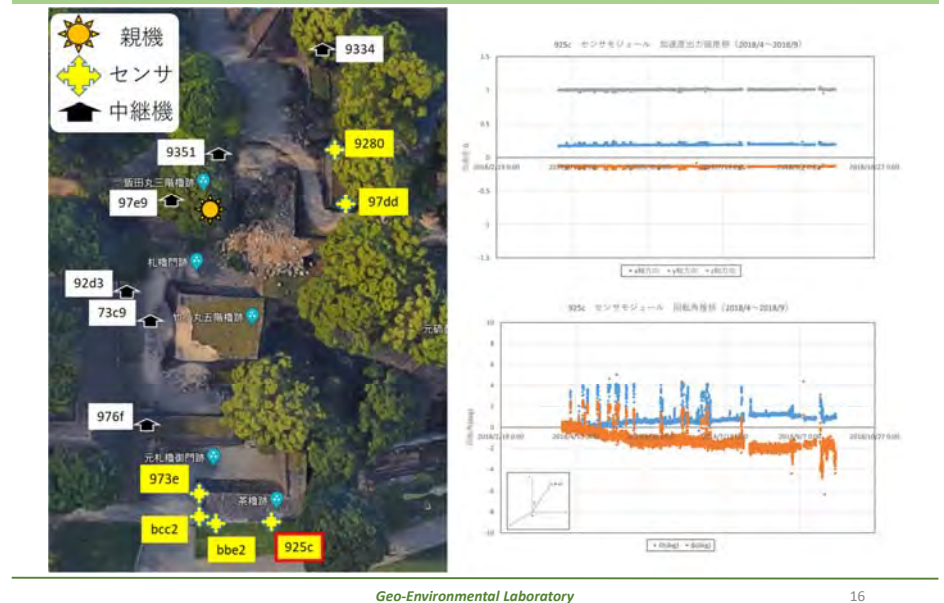
被災後、不安定な状態で自立している石垣や裏込地盤の安定性評価の必要性



モニタリングシステムの設置個所とイメージ



モニタリングシステムの観測結果例(2018/4-2018/9)



まとめ

- ✓各タイプでの解析結果の被害状況は、石垣石と栗石で構成された**石壘タイプ**が最も崩壊ケースが多かった。次に崩壊が多く確認されたタイプが、石垣石、栗石、背面地盤で構成された半石壘タイプである。最も崩壊が少なかったタイプは石垣石と背面地盤のみで構成された**非石壘タイプ**である。
→**実際の被害状況と同じ結果**となった。
→**栗石が大きく崩壊に影響**を及ぼしていると考えられる
- ✓崩壊要因としては、**栗石のせん断抵抗角**が大きく起因している。石垣石のせん断抵抗角は崩壊に概ね大きな影響を及ぼさなかった。
→栗石内部の間隙比が大きい場合、地震動による外力によって鉛直下向きに詰められていき、その時発生する**主動土圧**が**石垣石の受動土圧**より大きくなった際に下部石垣から崩壊に至ったと考えられる。
- ✓通信モジュールと加速度センサを用いた遠隔によるモニタリングシステムを構築した。
→安定した運用を継続的に行うとともに、加速度的な変化が見込まれる不安定な石垣の特定につなげる。

この度は、本研究課題に対し助成を賜りましたことをお礼申し上げます。

引き続き、城郭石垣を中心として築石構造物の安定性評価のための研究に取り組んで参ります。

一般財団法人大成学術財団様、熊本城調査研究センター様、その他本研究にご協力いただいたみなさまに対し、謝意を表します。

ご清聴ありがとうございました。