

3次元DEMによる実物大石垣の振動シミュレーション

○法政大学大学院 森田大成
酒井久和 (法政大学) 小野祐輔 (鳥取大学)
橋本隆雄 (国士舘大学) 池本敏和 (金沢大学) 宮島昌克 (金沢大学)

研究の流れ

2

石垣や櫓などの構造物に対して十分な精度を持つ3次元解析手法は未だ確立されていない

レンガと玉石を用いた
小型石垣模型の傾斜実験を実施

積み石部

栗石部

積み木の模型振動実験

玉石の安息角試験

先行研究

クランプモデルで再現解析

クランプモデルで再現解析

多面体とクランプモデルを用いて
傾斜実験に対する再現解析を実施

多面体モデル

クランプモデル

より優れたモデルで**実物大石垣の振動実験の解析**を行う

研究背景

1

地震に脆弱な石垣構造物

熊本地震により熊本城の石垣が崩壊、重要文化財も多数被害を受けた修復と耐震補強が求められるが、耐震補強効果を示す根拠が必要である
数値解析を使用



熊本城石垣崩壊現場



熊本城櫓の崩壊

撮影日:2017年6月20日
撮影者:大塚 鎮

小型石垣模型の傾斜実験

3

実験モデルと計測

積み石要素：整形したレンガ 栗石要素：18~22mmの玉石
高さ根石の固定の有無変えて**4ケース**実施した(2×4個 or 2×3個)
崩壊後にレンガの変位と傾斜台の角度を計測する



実験台 小型ジャッキ
毎秒1度の傾斜角を発生させる



崩壊後状態
基準線からのレンガの最終変位を取得

4 YADE (Yet Another Dynamic Engine)

■解析コードYADE

拡張可能な**オープンソース**で構成
3次元DEMによる解析が可能
 C++言語：新たなアルゴリズム実装
 Python言語：シミュレーション制御

振動を与える
モデルを傾斜する コードがない

↓

地震波を入力するプログラム
 → **振動実験の再現解析**
 モデルの傾斜制御するプログラム
 → **傾斜実験の再現解析**

引用：YADE Documentation. The Yade Project. <http://yade-dem.org/doc/>

6 模型振動実験の数値シミュレーション

■解析パラメータ・ケース

	弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比	減衰定数	摩擦係数	計算時間 間隔(s)
	1.303×10 ⁶	0.5	0.03	0.151	4.0×10 ⁻⁷

解析ケース	奇数段の半径 (mm)	偶数段の半径 (mm)	要素重合比	要素数
B-1-1	0.7	0.6	1.143	13,145
B-1-2	0.7	0.6	1.000	10,297
B-2-1	0.8	0.7	1.143	9,737
B-2-2	0.8	0.7	1.000	7,729
B-3-1	0.9	0.8	1.143	7,577
B-3-2	0.9	0.8	1.000	6,105
B-4-1	1.0	0.9	1.143	6,065
B-4-2	1.0	0.9	1.000	4,813
B-5-1	1.1	1.0	1.143	4,925
B-5-2	1.1	1.0	1.000	3,921

Case B-1-1

5 模型振動実験の数値シミュレーション

実験概要(引用：大塚) YADEモジュール

変位を追跡
 振動台に固着
 地震波
 表面が粗い

密な球要素配置
 表面要素配置
 完成モデル

一辺25mm 積み木4段

7 模型振動実験の数値シミュレーション

■Case.B-1-1の解析結果

地震動プログラムを**外力を加える**→**加速度変更**に改良した

0.0s

解析速度が**50倍**となり
 実験を高**精度**で再現した

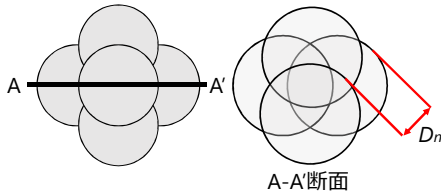
→ **レンガモデル**に適用

安息角試験の数値シミュレーション

8

■ 玉石のクランプモデル(引用: 大塚)

大きさを任意に変更できる最小球数である
6個の球形要素によりクランプモデルを作成



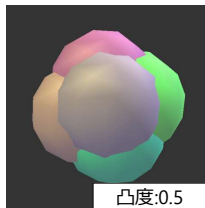
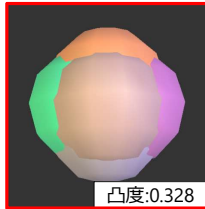
堀口ら (2011) の提案式

$$Dn = \beta D$$

$$\theta = 60.0 \beta^{0.60}$$

θ : 安息角(°) D : 直径

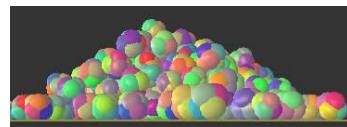
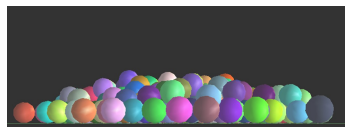
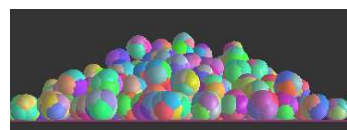
β : 凸度(0.0~1.0) Dn : 非重複領域の長さ



安息角試験の数値シミュレーション

9

■ 解析結果まとめ(引用: 大塚)

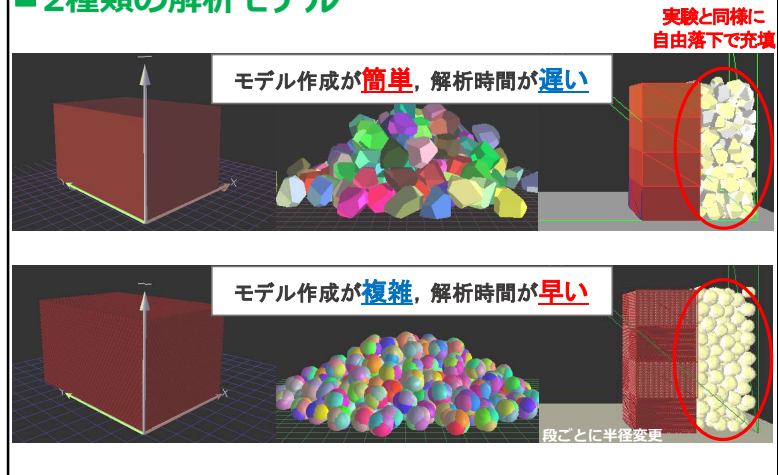


	試験値	Case2.1	Case2.2
安息角(°)	30.75	30.40	傾斜解析の玉石に使用

傾斜実験の数値シミュレーション

10

■ 2種類の解析モデル



傾斜実験の数値シミュレーション

11

解析ケース

パラメータ

Case.I-P: 多面体 Case.I-C: クランプ

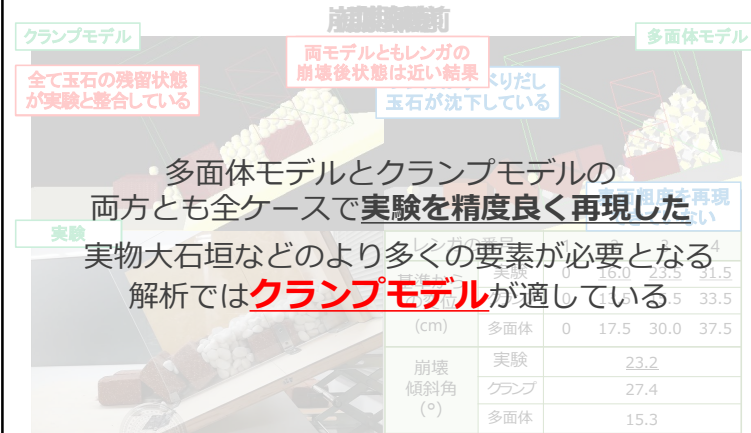
下線: 試験値 その他: 論文などから引用

Case.I-P	レンガの個数	根石固定の有無	奇数段の半径	偶数段の半径	要素数	玉石	レンガ	木材	アクリル板
						密度 (kg/m³)	弾性係数 (KN/m²)	ポアソン比	摩擦係数
Case.I-P-1	2 × 4	無	単体の要素		181	2,500	2,160	400	1,190
Case.I-P-2		有			183	6.97 × 10 ⁶	5.00 × 10 ⁶	1.00 × 10 ⁶	3.00 × 10 ⁶
Case.I-P-3	2 × 3	無			150	0.3	0.22	0.5	0.35
Case.I-P-4		有			152	0.3	0.22	0.5	0.35
Case.I-C-1	2 × 4	無	1.2 mm	1.4 mm	43,638	30.75	<u>0.73</u>	0.4	0
Case.I-C-2		有	43,640	30.75	<u>0.73</u>	0.4	0		
Case.I-C-3	2 × 3	無	1.4 mm	1.2 mm	32,730	0.3			
Case.I-C-4		有	32,732	5.0 × 10 ⁻⁶					

再現解析結果

12

レンガ2×4個(根石固定)の実験と解析の比較

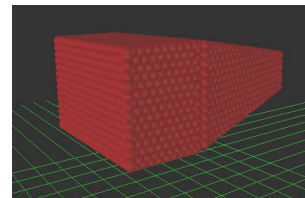
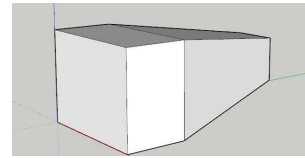


解析モデル

14

築石解析モデル

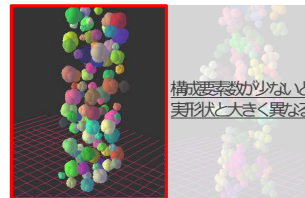
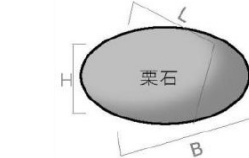
平均寸法よりスケッチアップで枠組み領域を作成



白色:13.8mm 水色:15.18mm

栗石解析モデル

平均寸法より2通りの方法で栗石モデルを作成



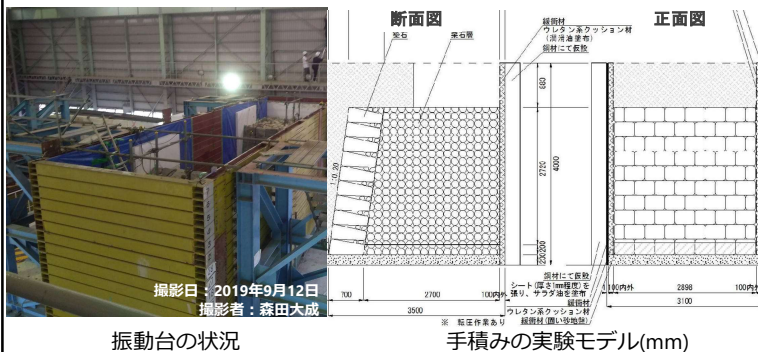
構成要素が少なくと表面状と大きく異なる

既存のモデル 扁平有のモデル

実物大石垣の振動台実験

13

- 防災科学技術研究所で実施されたもので熊本城の宇土櫓石垣を想定
- 無対策2ケース, 対策工4ケースに対して最大650gal加振する
- 解析対象ケースは手積みモデル(無対策)と鉄筋挿入アンカーモデル(対策工)



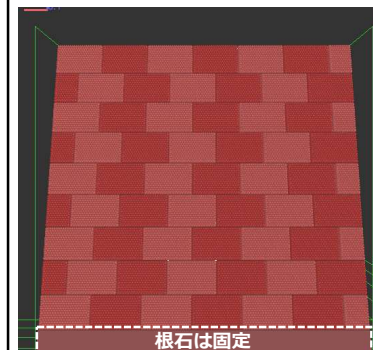
引用: 熊本城石垣施工実験及び振動実験業務報告書

解析モデルの構築シミュレーション

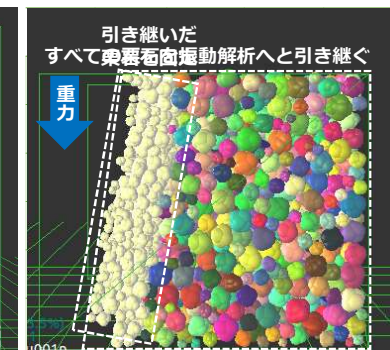
15

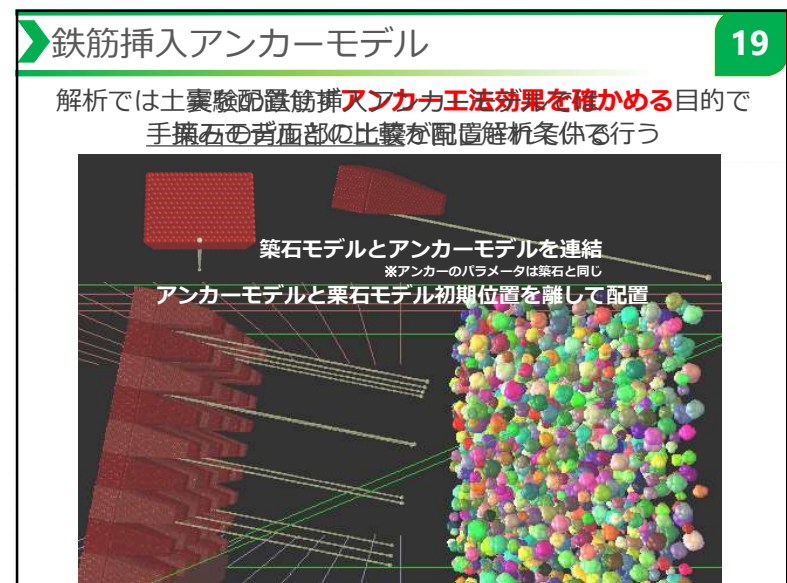
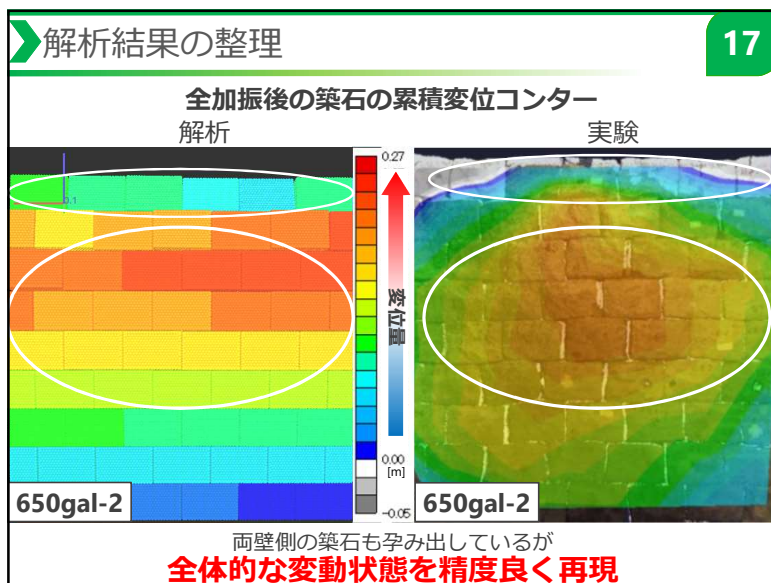
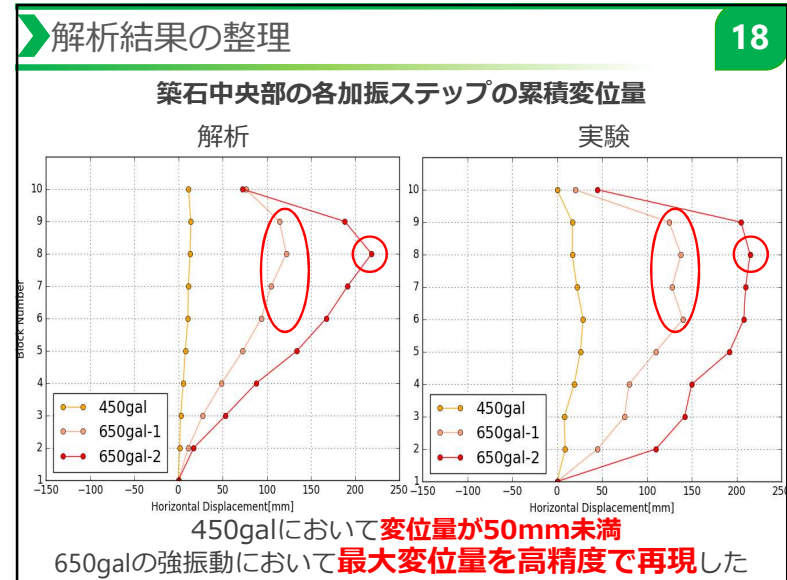
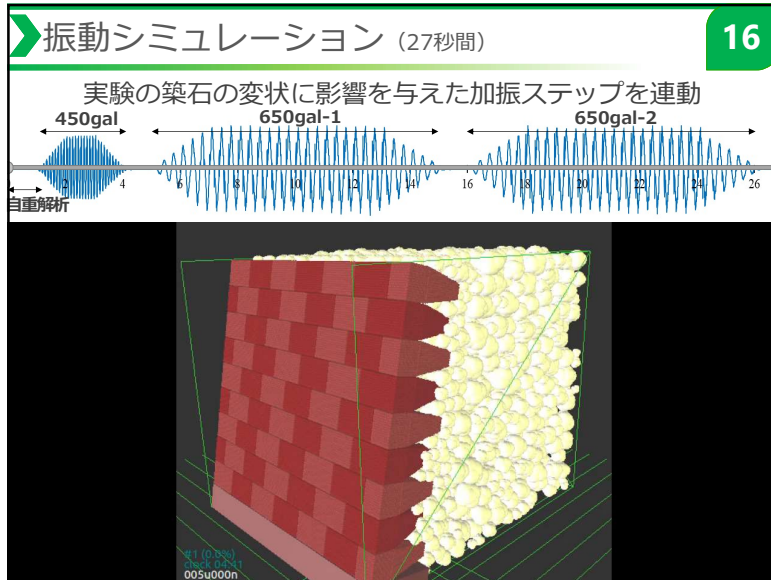
一度の充填では実験の栗石層の初期状態を再現できないため築石隙間付近・残りの背面部の2回に分けて充填解析を実施

築石モデルの配置



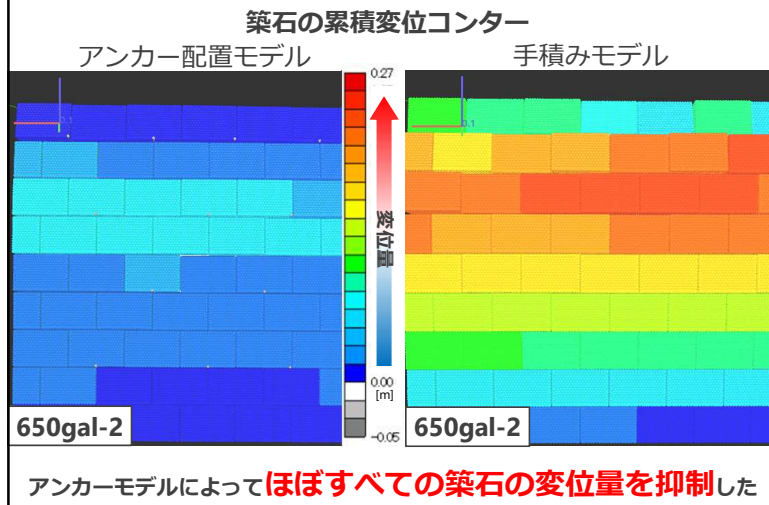
栗石層の充填





解析結果の整理

20



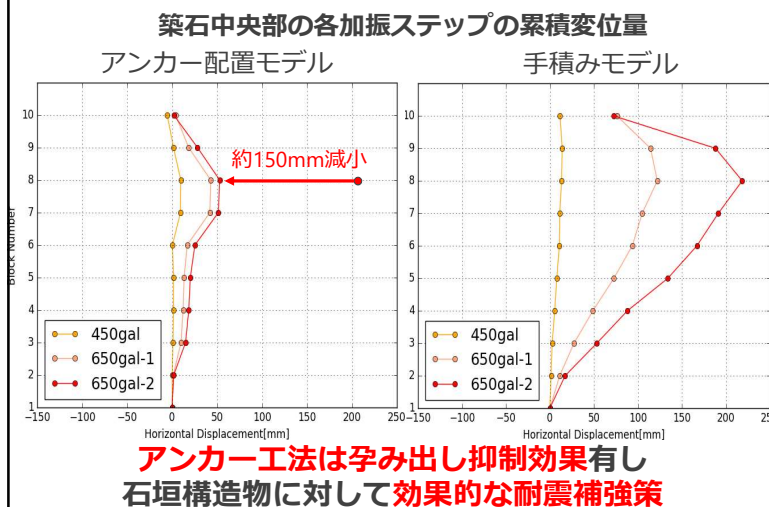
まとめ

22

- 研究の成果
 - ・球形要素を用いて表面の噛み合わせが発生しないクランプモデルを作成した
 - ・積み木の模型振動実験と小型石垣模型の傾斜実験の**精度良く**再現した
 - ・実物大石垣の振動台実験の変形状態と最大変位量を**高精度で再現**した
 - 研究の新規性
 - ・**実物形状の3次元築石モデル**を構築，DEMによる振動解析を実施
 - ・**3次元数値シミュレーションにてアンカー工法の孕み出し抑制効果**の確認
 - 課題
 - ・栗石モデル全体の空隙率の再現
 - 予定・展望
 - ・残りの実験ケースに対するシミュレーション
 - ・実際に熊本城が受けた地震動の入力（水平方向827gal・鉛直方向500gal）
- ➡ 石垣に対する耐震補強策の効果がより明確になり，文化財である城郭石垣の修復と防災に貢献できる

鉄筋挿入アンカーモデル

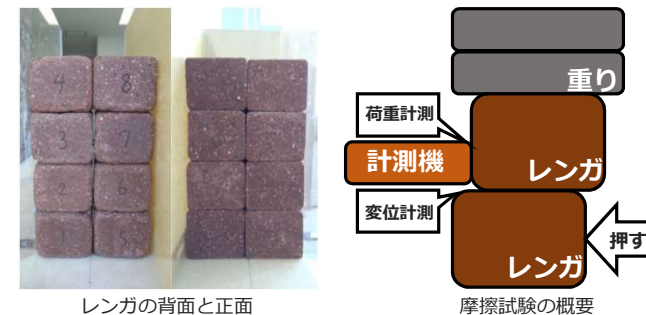
21



小型石垣模型の傾斜実験

レンガの摩擦試験

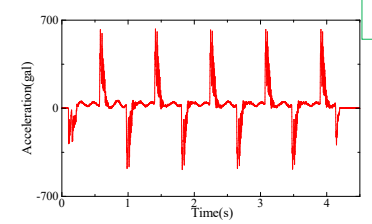
小型石垣の積み石要素として85×60×50mmの寸法のレンガを使用する摩擦試験を実施してレンガ間の摩擦係数を取得した
ここで求めた摩擦係数を再現解析で使用する



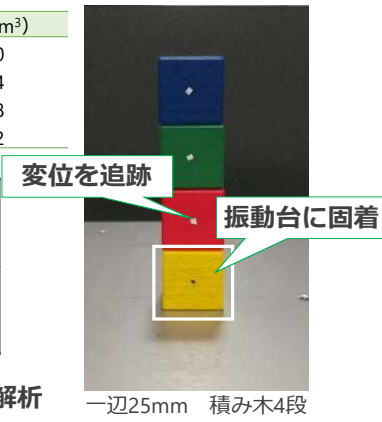
▶ 模型振動実験の数値シミュレーション

■ 模型振動実験 (引用: 大塚)

	質量 (g)	密度 (kg/m ³)
黄	9.9	633.60
赤	11.0	704.64
緑	11.1	711.68
青	10.3	657.92



クランプモデルを用いて再現解析



一辺25mm 積み木4段

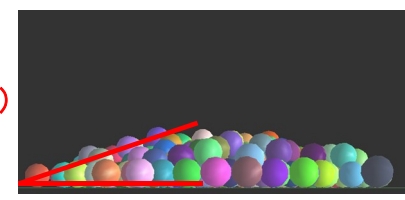
▶ 安息角試験の数値シミュレーション

■ 単一球形要素による解析 (引用: 大塚)

試験値より**10度程度**
低い結果に



クランプモデル(集合体)
で玉石モデルの作成



▶ 小型石垣模型の傾斜実験

■ 安息角試験 (引用: 大塚)

栗石要素として玉石を使用
寸法: 18~22mm (やや扁平あり)

アクリルボックスに玉石を充填
寸法: 10×10×20cm

試験を**10回**実施



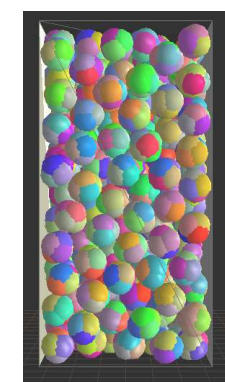
平均値
30.75度

再現解析に使用する安息角



▶ 安息角試験の数値シミュレーション

■ 解析ケース・パラメータ



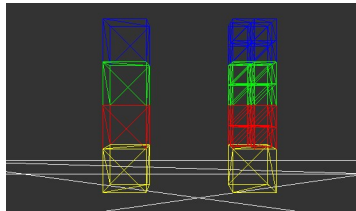
Case2.1(seed1)

	凸度β	初期位置	
Case2.1	0.328	seed1~10	
Case2.2	0.5		
	玉石	アクリルボックス	木板
弾性係数 (kN/m ²)	1.62×10 ⁴	3.00×10 ⁶	1.00×10 ⁶
ポアソン比	0.3	0.35	0.5
摩擦係数	30.75 (内部摩擦角)	0	0.4
密度(kg/m ³)	2,500	1,190	400
減衰定数	0.3		
計算時間 間隔(s)	5.0×10 ⁻⁶		

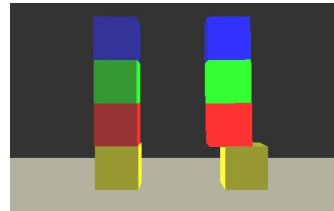
▶ 模型振動実験の数値シミュレーション

■ 地震動プログラムの改良

クランプモデルに対しての**外力を加える**地震動プログラム



初期状態(左: 単体, 右: クランプモデル)

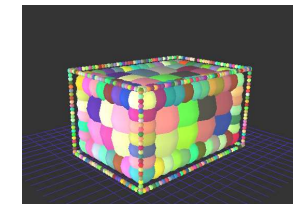
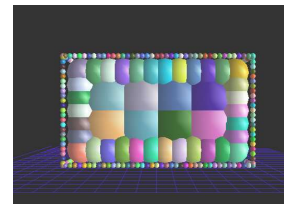
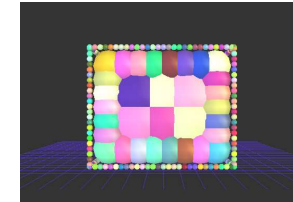
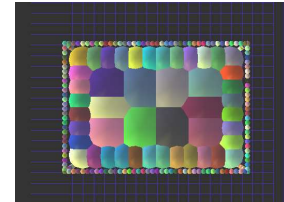


0.2秒後(左: 単体, 右: クランプモデル)

同じモデル(物性値)であるのに力が加わり過ぎている

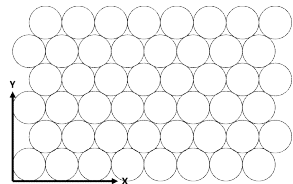
▶ 傾斜実験の数値シミュレーション

■ レンガクランプモデル



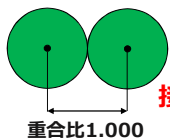
▶ 模型振動実験の数値シミュレーション

■ 表面要素の配列パターン



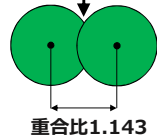
■ 要素重合比

球粒子の直径は隣り合う粒子の中心距離の何倍か



接している

重合比1.000



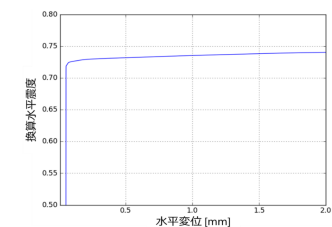
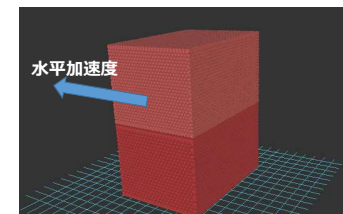
3粒子の

隙間が埋まる

重合比1.143

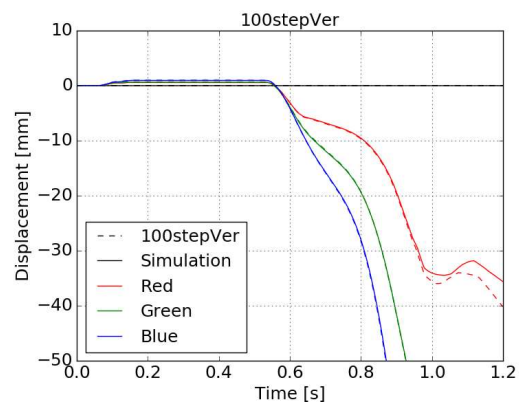
▶ 摩擦検証

上段のモデルに水平加速度を解析の安定性を考慮して約70gal/sの加速度で増加
縦軸は水平加速度を重力加速度で除した換算水平震度



	上段粒径 (mm)	下段粒径 (mm)	上段のモデルの要素サイズ比	要素重合比	要素数	見かけの摩擦係数
Case1	1.4	1.2	0.028	1.143	10,907	0.741
Case2	2.2	2.0	0.044	1.000	3,217	0.788
Case3	2.2	2.0	0.044	1.143	4,199	0.754
Case4	3.3	3.0	0.066	1.333	2,415	0.778
Case5	3.3	3.0	0.066	2.000	4,315	0.781
Case6	4.4	4.0	0.088	2.000	2,833	0.763
Case7	6.6	6.0	0.132	2.000	1,217	0.825
Case8	6.6	6.0	0.132	4.000	4,141	0.756
Case9	6.6	6.0	0.132	2.667	2,029	0.818
Case10	8.8	8.0	0.176	4.000	2,019	0.774

地震動プログラム変更

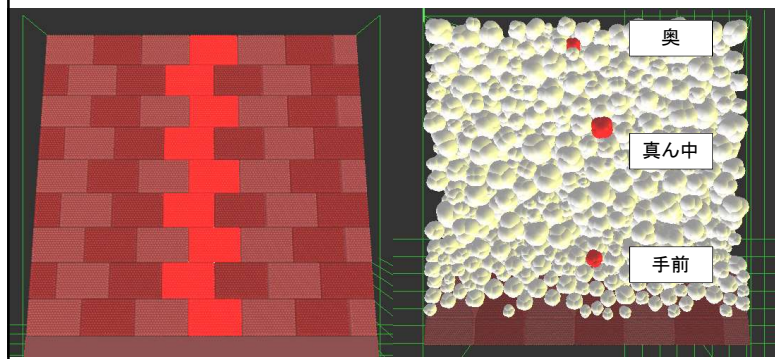


沈下量

加振ステップ	解析結果 (mm)			実験結果 (mm)		
	手前	真ん中	奥	手前	真ん中	奥
5 (450gal)	60.26	61.83	46.24	13.16	14.71	13.32
6 (650gal)	200.32	258.20	343.30	80.63	94.11	66.65
7 (650gal)	288.35	362.47	476.38	172.29	161.84	142.48

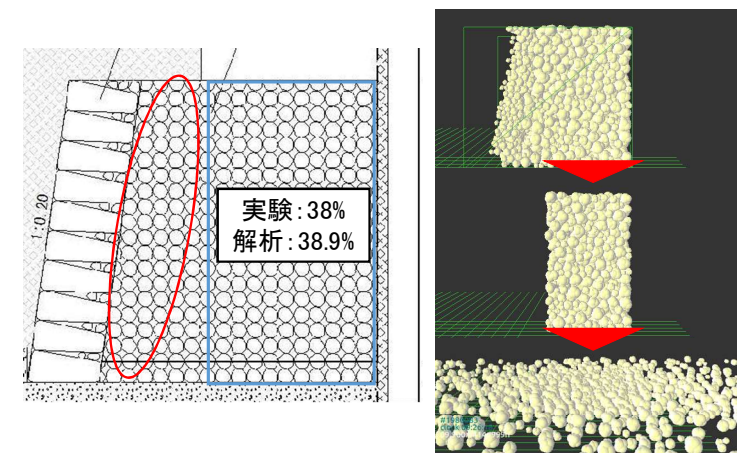
加振ステップ	手積み (mm)			アンカー (mm)		
	手前	真ん中	奥	手前	真ん中	奥
5 (450gal)	60.26	61.83	46.24	35.59	62.56	63.31
6 (650gal)	200.32	258.20	343.30	97.74	139.95	228.70
7 (650gal)	288.35	362.47	476.38	126.34	186.69	260.01

計測箇所

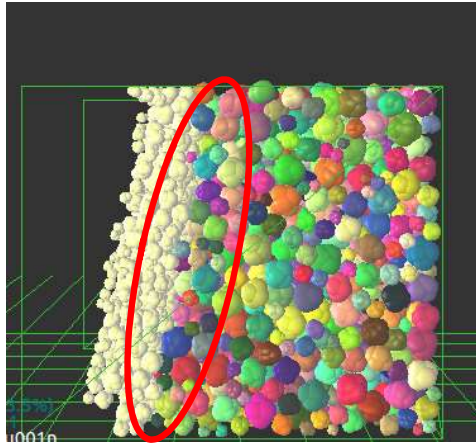


空隙率算出

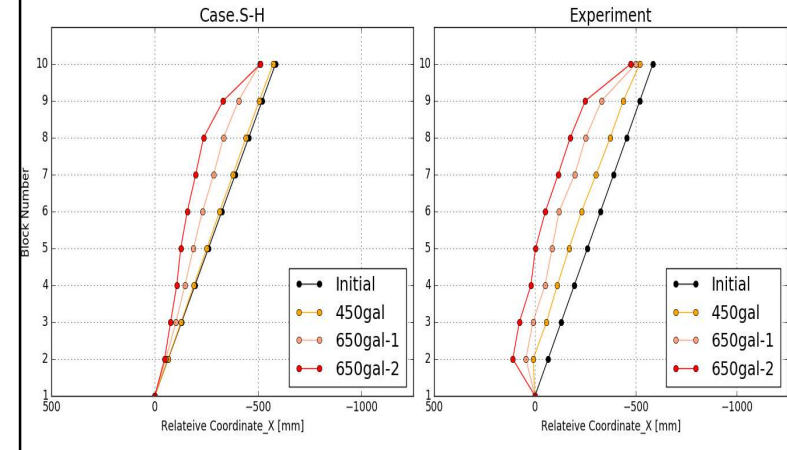
栗石モデルが床に与える力から空隙率を算出



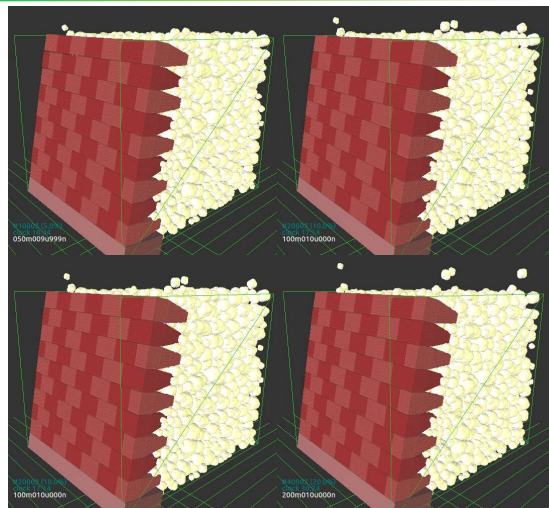
沈下量の再現



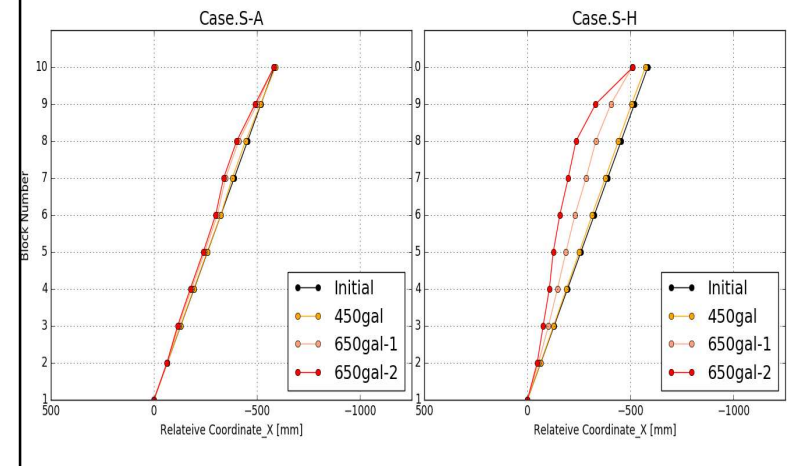
補足

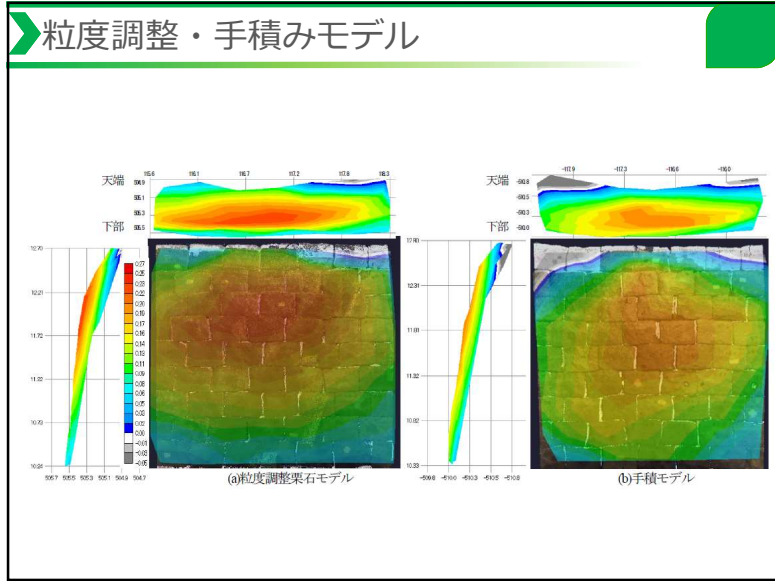
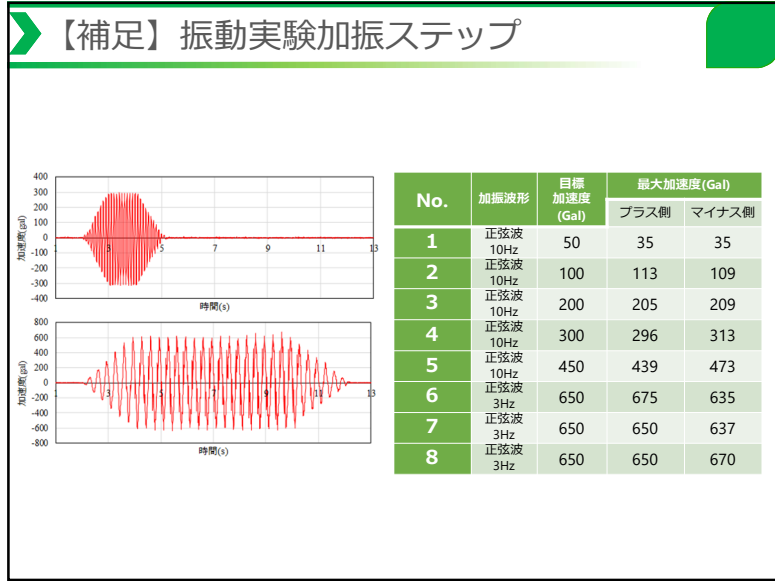
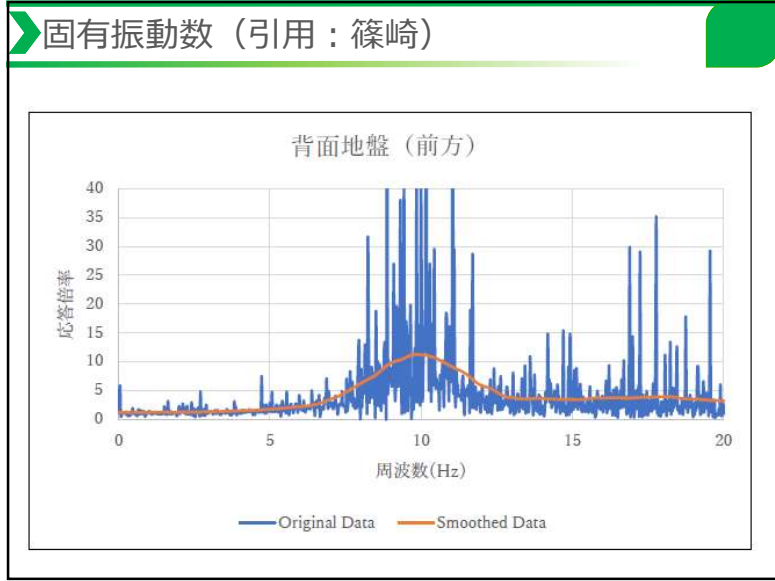
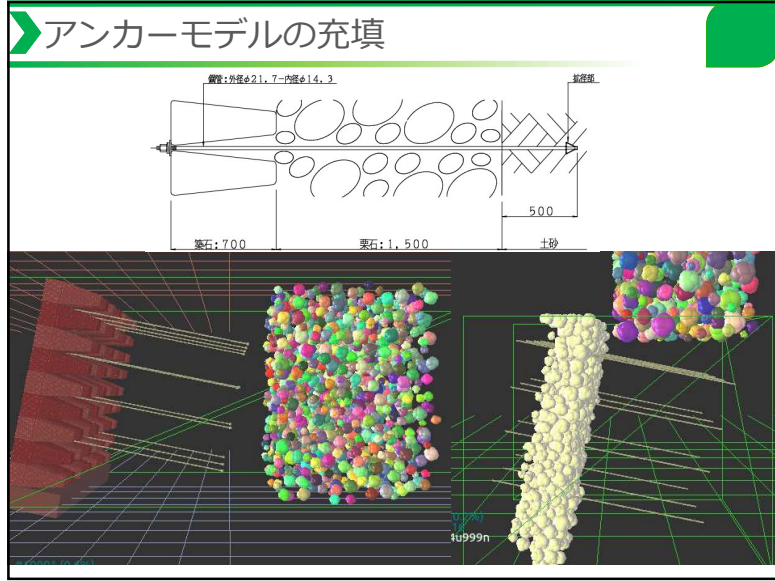


自重解析 (減衰0.999→0.03)

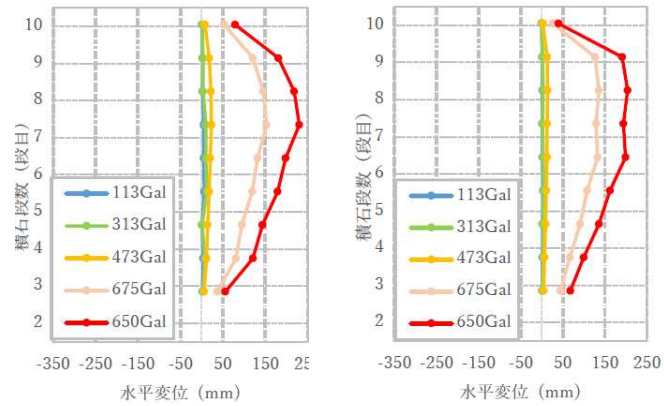


補足

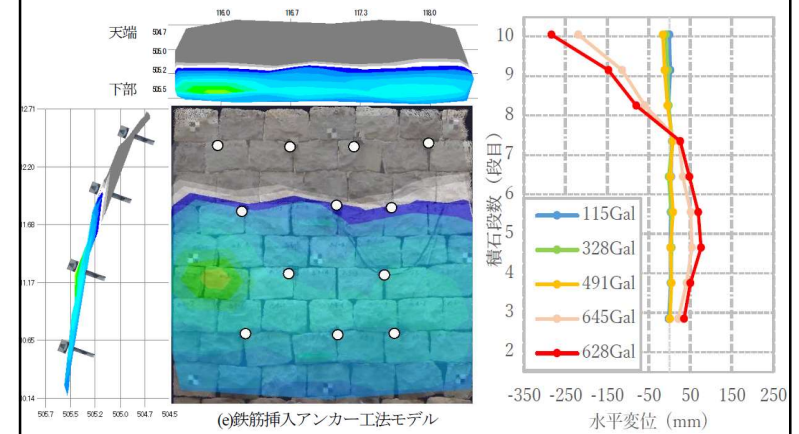




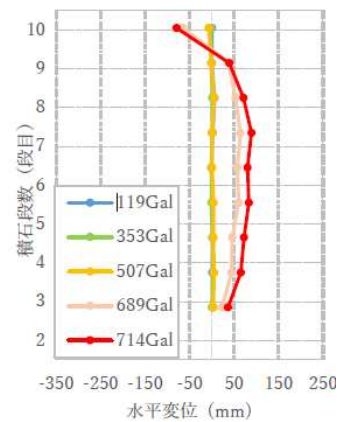
▶ 粒度調整・手積みモデル



▶ 実験アンカーモデル



▶ ジオテキスタイル巻き込みモデル



▶ 筒状固結アンカー工法

