

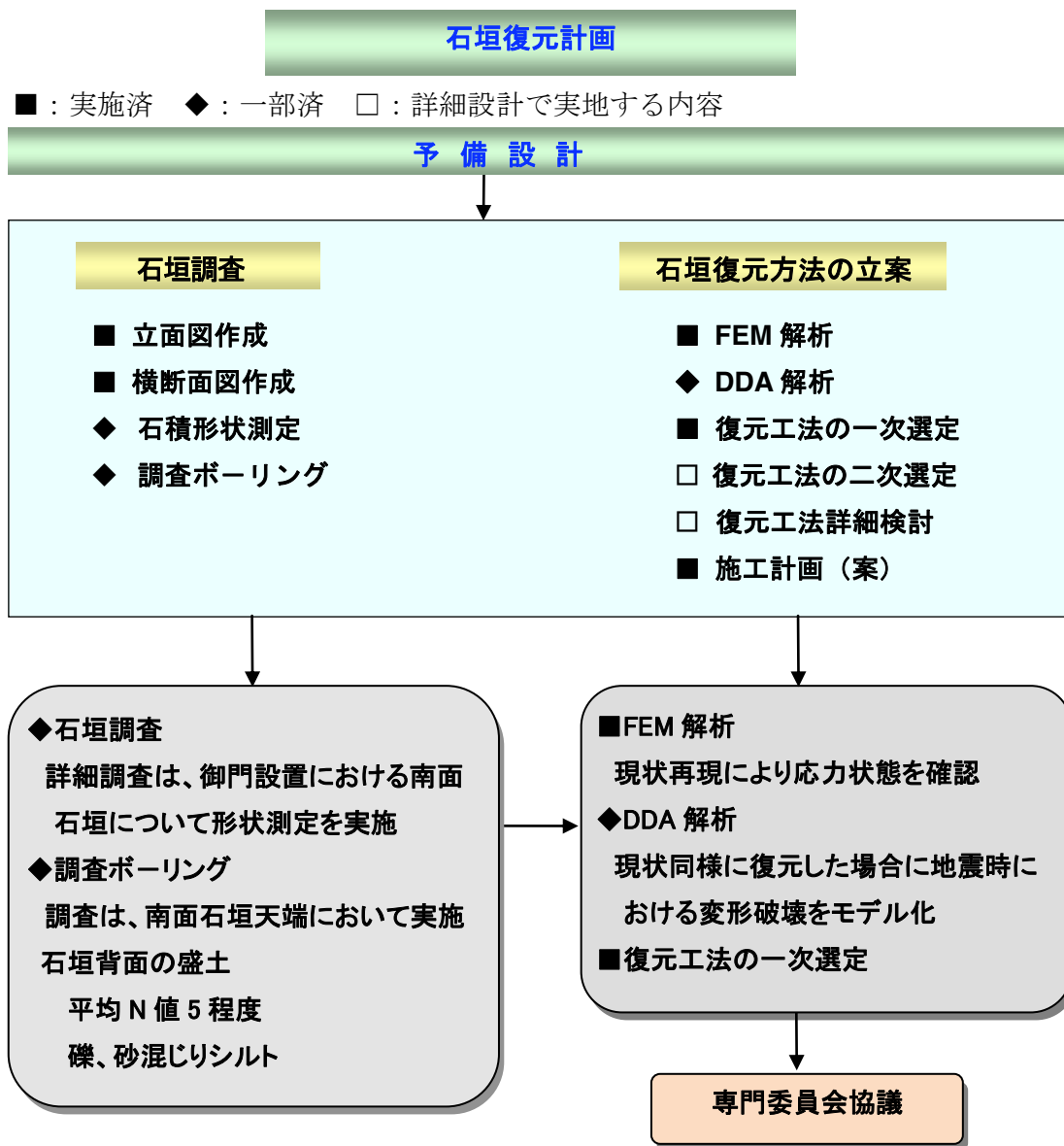
平成 25 年度 第 3 回山里口御門復元考証専門委員会
石垣復元検討資料



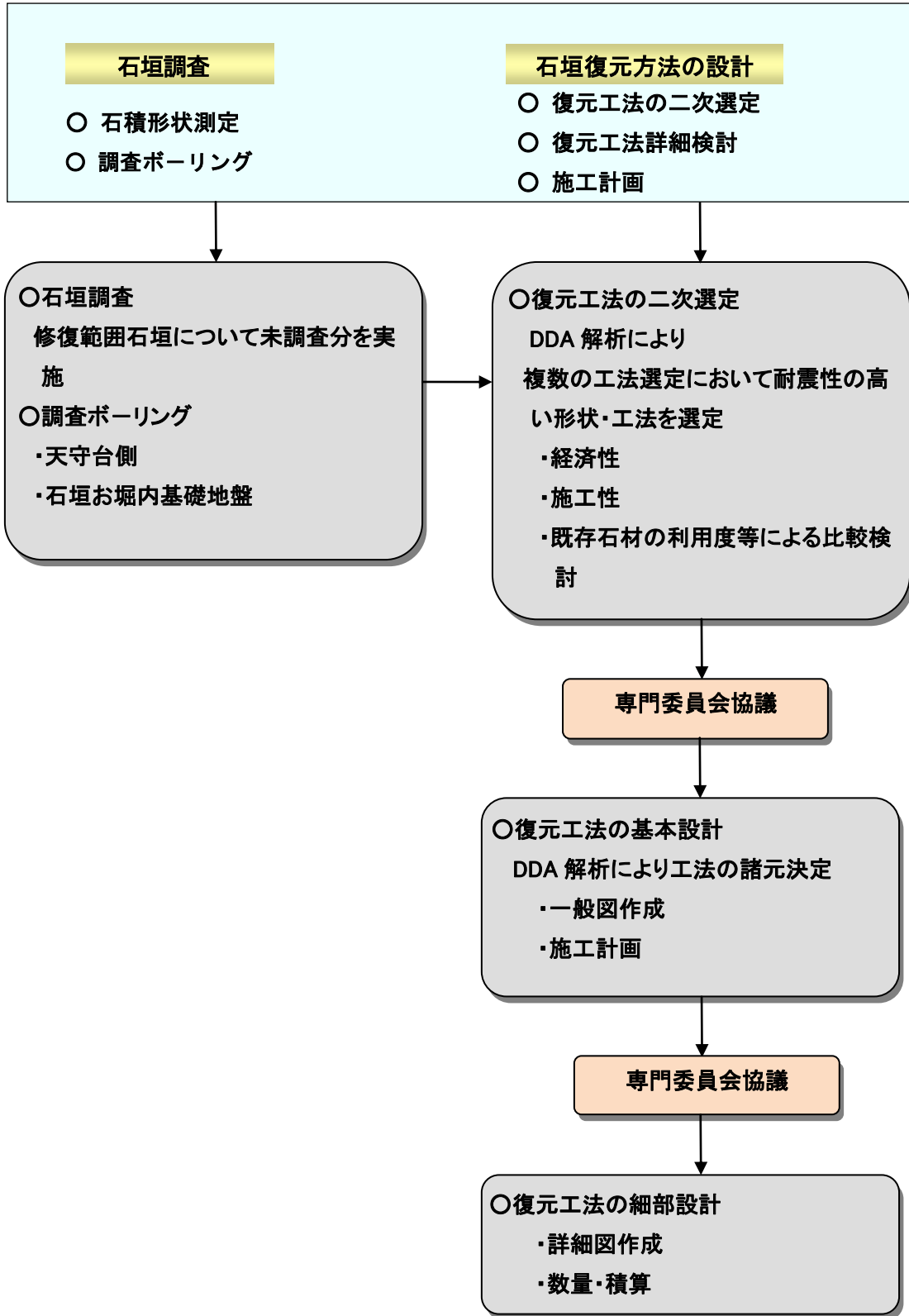
平成 26 年 2 月 14 日

福井県総合政策部交通まちづくり課

山里御門関連石垣復元全体フロー（案）



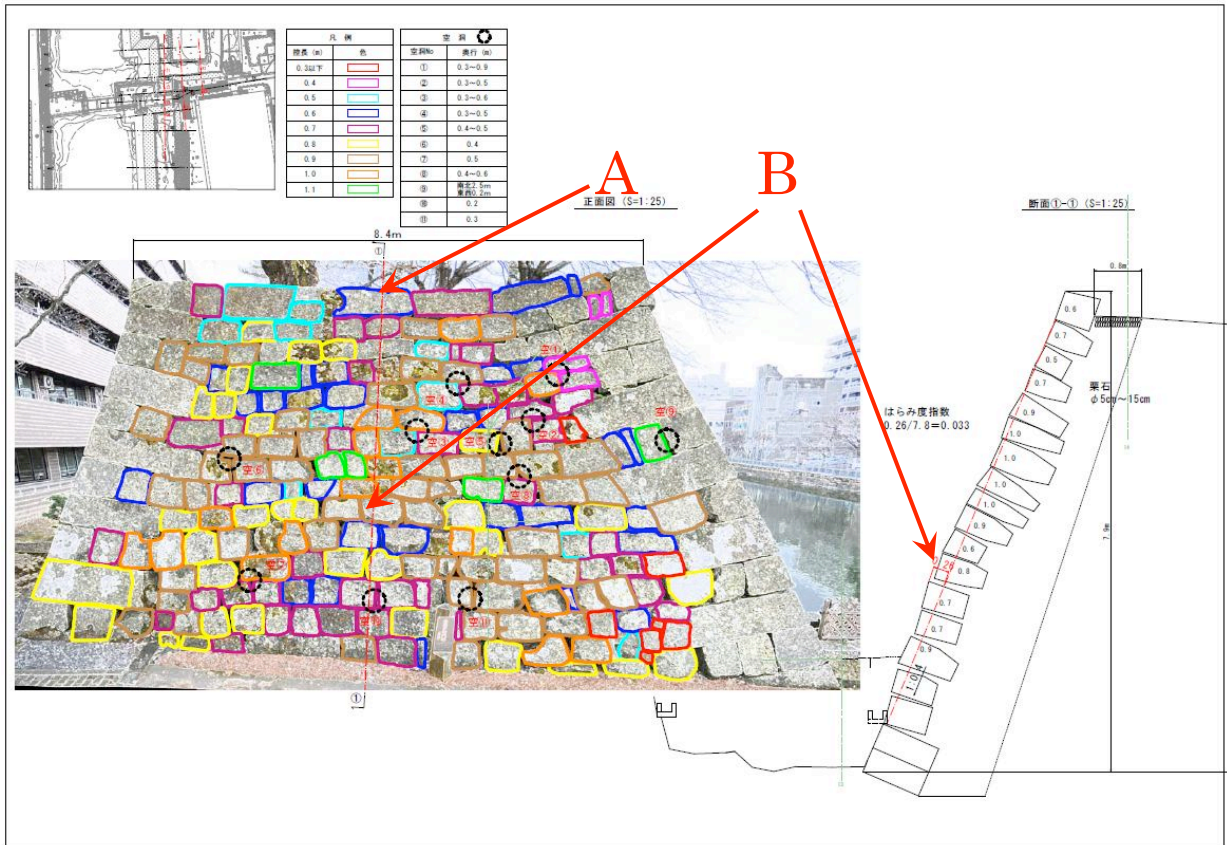
詳細設計



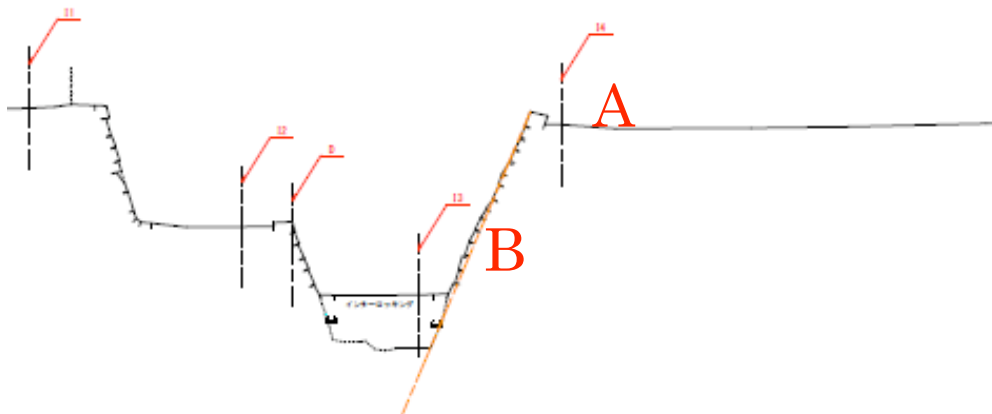
石垣復元方法の立案

■石垣変形状況

図1は石垣の変状を示すものである。図1(a)のA点は沈下していること、B点のはらみだしている、(b)のAは沈下、Bははらみだしていることが分かる。この事実から、図1(b)のA、Bの間の地山が緩んでいることが容易に推察でき、AとBの間にすべり面が存在しているものと想定される。



(a)正面写真と断面図



(b)断面図

図1 石垣の変状

■FEM 解析

FEM 解析とは

有限要素法解析（FEM 解析）とは構造物全体を小さな要素に分解し、それぞれの要素を結合することにより実際の形状を表現する。これを解析モデルと呼ぶ。各要素には固有の物性値を与えることができる。解析モデルに外力（または自重）を作用させたときの各要素の変形を求める。要素の変形が求まると要素内のひずみが求まり、要素内の応力を求めることができる。

FEM 解析により現状の変形を再現させる。

数百年における石垣の劣性化や裏込め土の強度低下による変形を再現するために、地山の物性を低下させることにより再現する。また、再現する際の現状の安全率に関しては、以下のことから $F_s=1.0$ 程度と想定した。

- ①調査ボーリングにおいて背面土は N 値 5 程度である（P18 柱状図添付）。
- ②福井地震で近接する石垣が倒壊している。
- ③当該石積は両角に拘束されている点ではらみは小さいが、周囲の石垣のはらみ度は、通常では倒壊していてもおかしくない数値（はらみ指数 0.06）である。

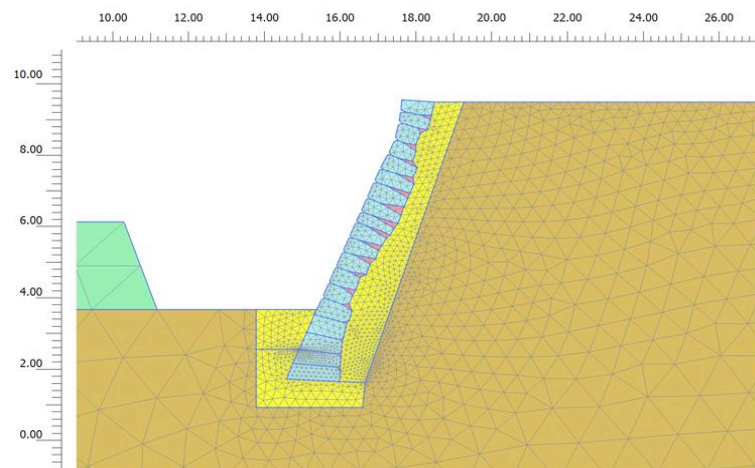
現在の石垣の変形状況

- ①石垣下部のはらみ出し。最大で 26cm 程度のはらみ出し。
- ②石垣上部の地盤の沈下。45~50cm 程度

変状の原因として、地盤の降雨に伴う強度低下や地震等が考えられる。

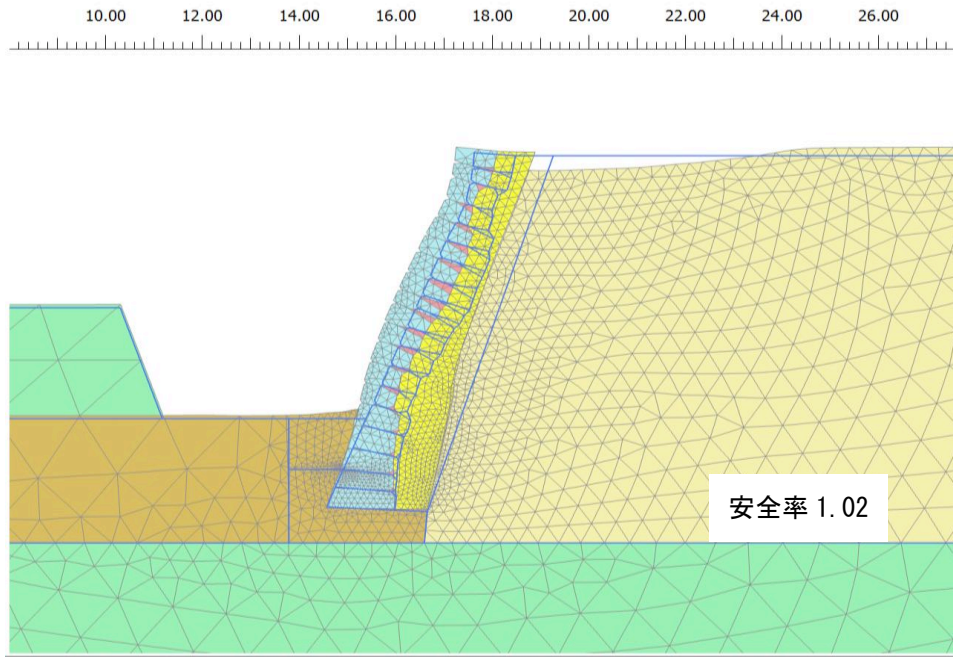
解析モデルにおける物性値の設定

名称		現状地盤	石垣	裏込め	間詰部	
本体 物性値	単位体積重量	kN/m ³	19	24	21	21
	変形係数	kN/m ²	3.50E+03	5.00E+05	2.00E+04	3.50E+03
	ポアソン比		0.35	0.3	0.3	0.35
	粘着力	kN/m ²	10~0	250	10	0
	内部摩擦角	°	35~22	40	40	30
	引張強度	kN/m ²	2~0	5	2	0



解析モデル図

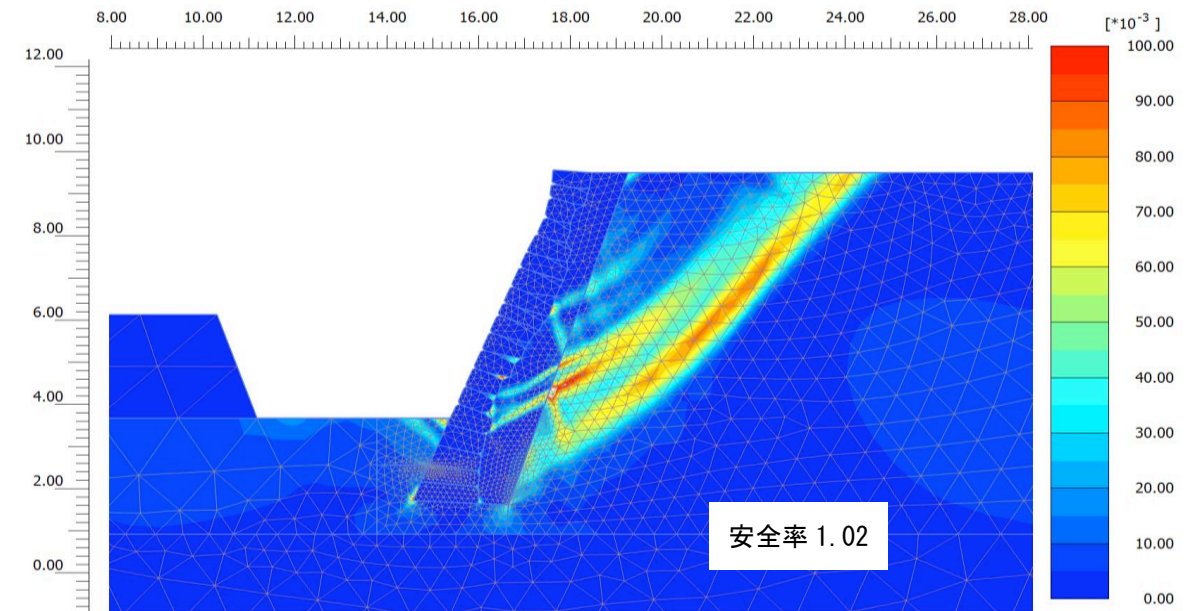
解析結果



変形図 $|u|$ (縮尺 3.00 倍)

最大値 = 0.2123 m (要素 3310 at 節点 10684)

解析結果から、石垣上部の地盤の沈下は 20cm 程度、石垣表面に沿った変形は石垣表面付近のベクトル図から 16cm 程度の変形を示す。この時の安全率は $FS=1.02$ である。オーダー的に実測に近い値を示す。

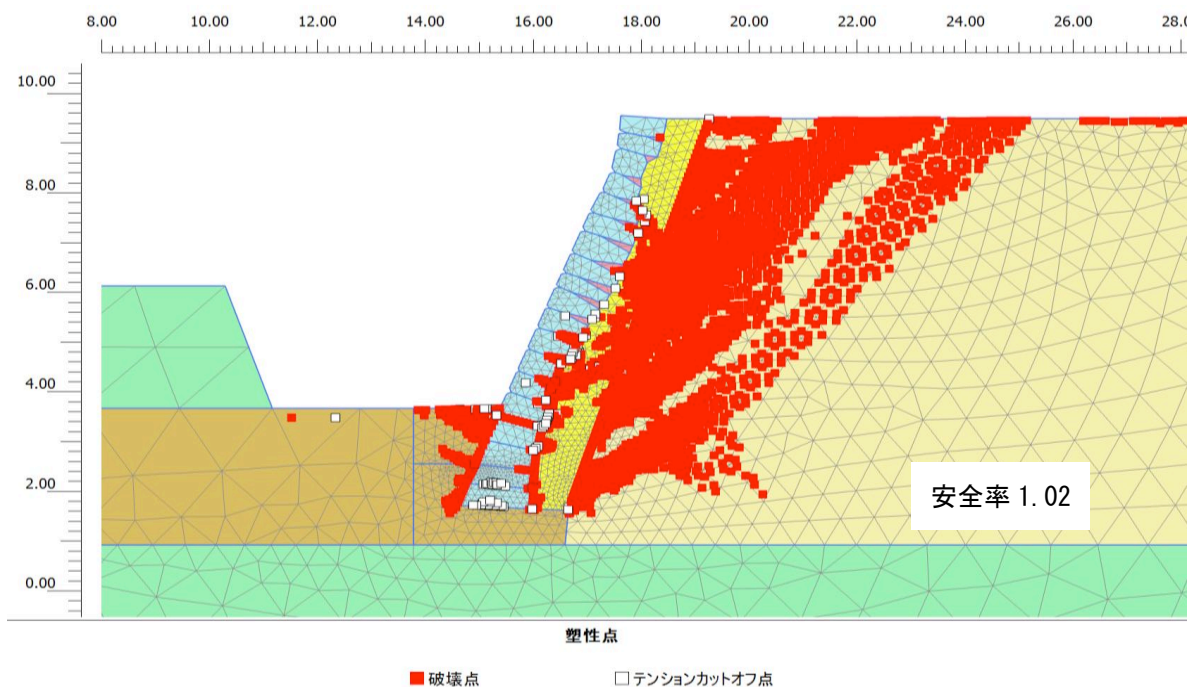


全偏差ひずみ γ_s

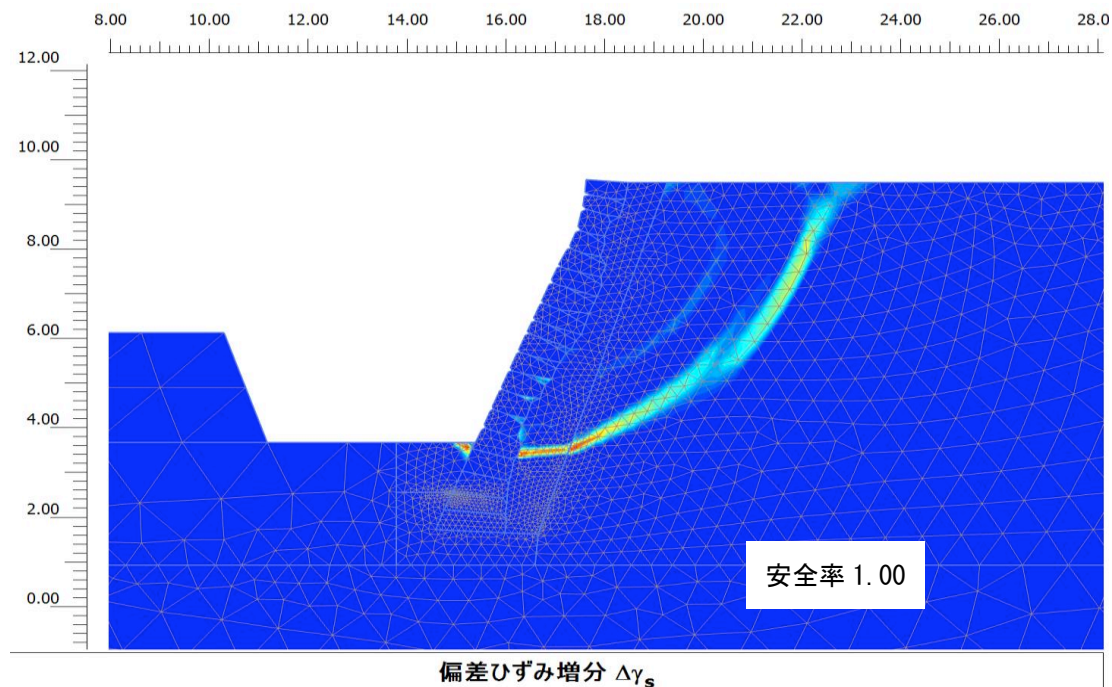
最大値 = 0.1723 (要素 3537 at 節点 4722)

最小値 = 9.474×10^{-6} (要素 4575 at 節点 8063)

塑性点の分布図からは、地山の塑性領域と裏込めおよび石垣の接続部の一部に塑性領域が広がっていることがわかる。



安全率が 1.0 となる場合、すなわち崩壊する時の全偏差ひずみ分布を示す。円弧すべり的な崩壊形態を示している。この崩壊時の推定すべり面形状を DDA 解析に反映する。



最大値 = 0.01515 (要素 1474 at 節点 2567)

最小値 = 0.06717×10^{-9} (要素 28 at 節点 1)

FEM で得られた「安全率が 1.0 となる場合の全偏差ひずみ図

(物性値：現状地盤 $\phi = 22^\circ$ $C = 0 \text{KN/m}^2$)

■DDA 解析

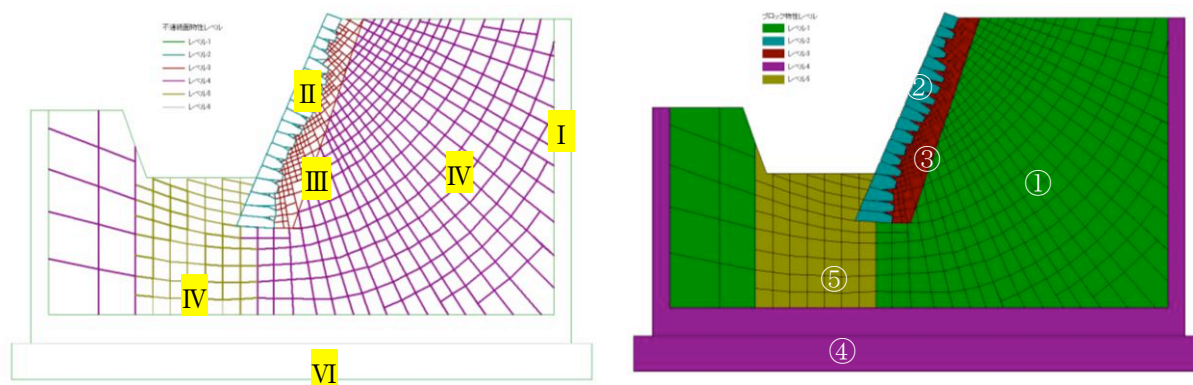
DDA 解析とは

不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis: DDA) は、G. H. Shi によって開発され、任意形状の弾性体多角形ブロック (要素) の集合体における変位・変形を、動的・準静的に解析する手法である。近年、岩盤崩壊や落石解析における適用が活発で、地すべりの移動挙動予測への適用も注目されている。今回の DDA 解析では、石垣復元において、現状をそのまま復元した場合の地震時の安定性について検討するものである。

解析モデルと物性値

解析モデルにおける物性値の設定

層	ブロック				不連続面		
	物性番号	単位体積重量 (KN/m ³)	弾性係数 (tf/m ²)	ポアソン比(-)	物性番号	内部摩擦角 (°)	粘着力 (KN/m ²)
基盤 (背面部)	①	19	100,000	0.3	IV	25	0~15
積石 (石垣)	②	26	1,000,000	0.25	II	35	0
裏込め石 (栗石)	③	26	100,000	0.25	III	35	25
周辺ブロック*	④	19	10,000,000	0.3	I	30	0
基盤 (道路部)	⑤	19	100,000	0.3	V	30	50
下部ブロック	④	19	100,000	0.3	VI	0	0



解析モデル図

解析方法

解析は、自重静的解析、自重動的解析及び地震解析の3段階で実施する。

モデル化は FEM 解析による $F_s=1.0$ となる全偏差ひずみ分布を使用し、最もひずみの大きくなる帯状の分布を滑り線の形状と推察しこれに合わせた円弧状の不連続面とする。解析では、定数を仮定し、動的解析で常時の均衡状態を確認した上で地震力を作用させる。地震動的解析の外力は、「自重+地震力」が考えられる。地震力については、実際の地震の観測加速度波形 (兵庫県地震の観測加速度波形を用いた) をモデル外側の箱型ブロックに作用させる。

解析結果

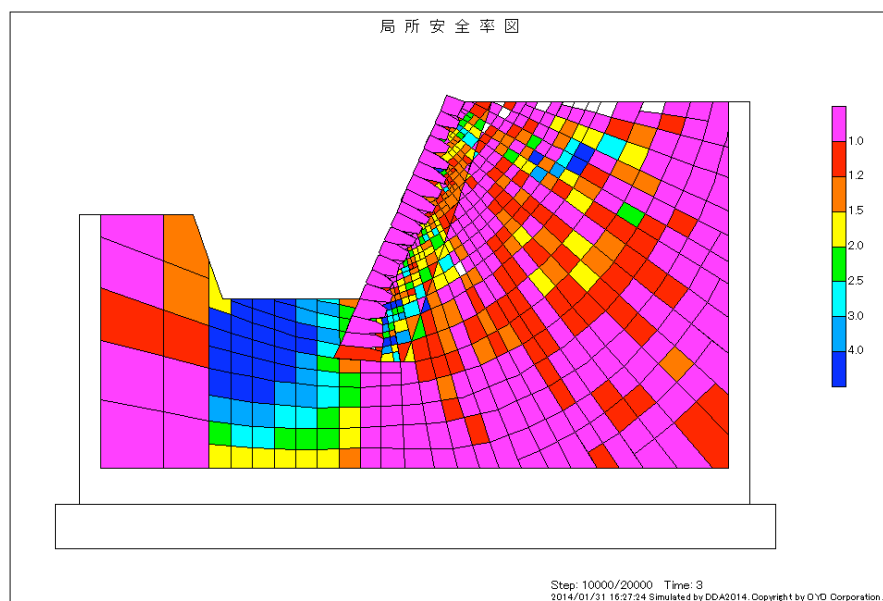
石垣を復元し、地震加速度 50~100gal を作用させた。その結果、解析 A の仮定した地盤定数 ($\phi=25^\circ$ $C=0\text{KN/m}^2$) では、自重解析で崩壊したため、現況を再現していない。解析 B の仮定した地盤定数 ($\phi=25^\circ$ $C=10\text{KN/m}^2$) では、自重で安定が確認されたが地震解析では地震加速度 50~100gal (震度 4~5 弱) を作用させた場合、崩壊に至った。

解析ケースと結果

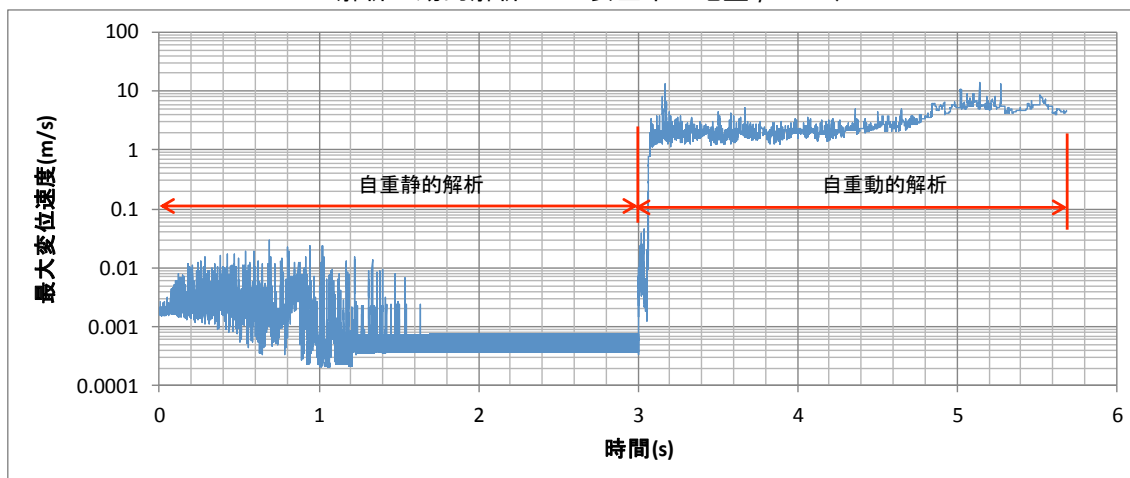
解析	解析内容	地盤摩擦角 ϕ	地盤粘着力 CKN/m^2	地震力	結果
A	自重解析	25	0	-	自重動的解析で崩壊
B	自重解析+地震解析	25	10	X 方向 50~100gal	自重安定・地震で崩壊

解析図

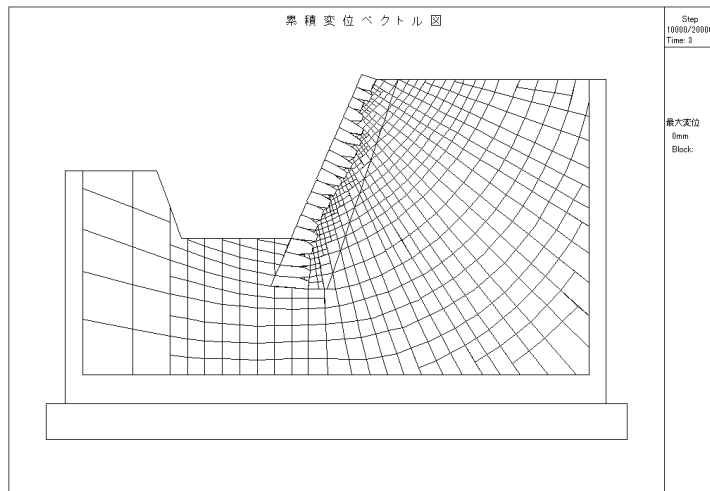
解析 A 解析図



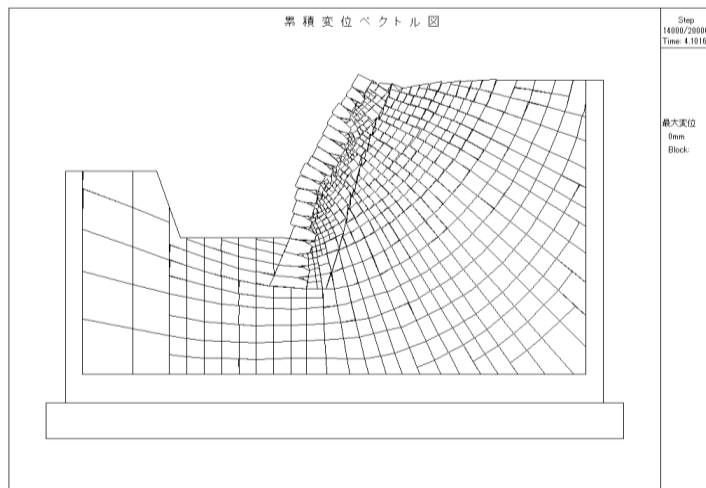
解析 A 動的解析 3.0s 安全率 : 地盤 $\phi=25$ 、 $c=0$



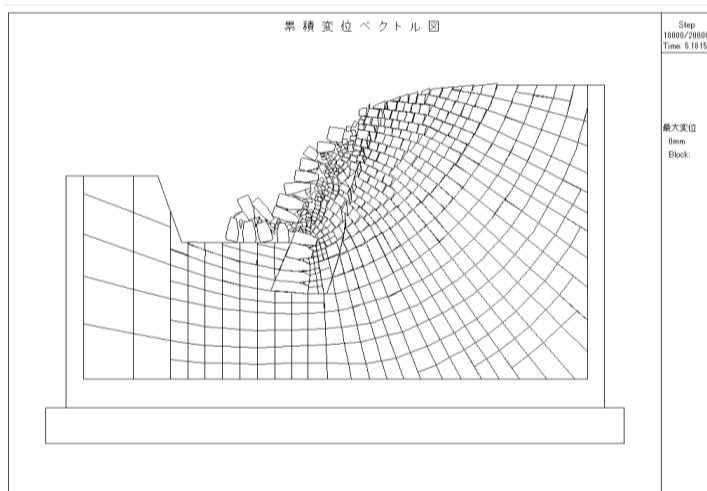
最大変位速度時刻歴



3.0s



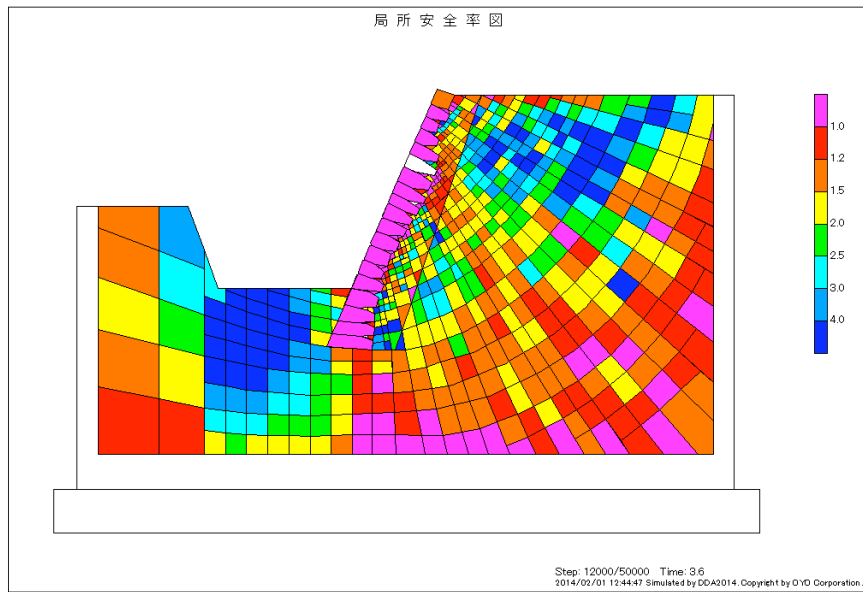
4.1s



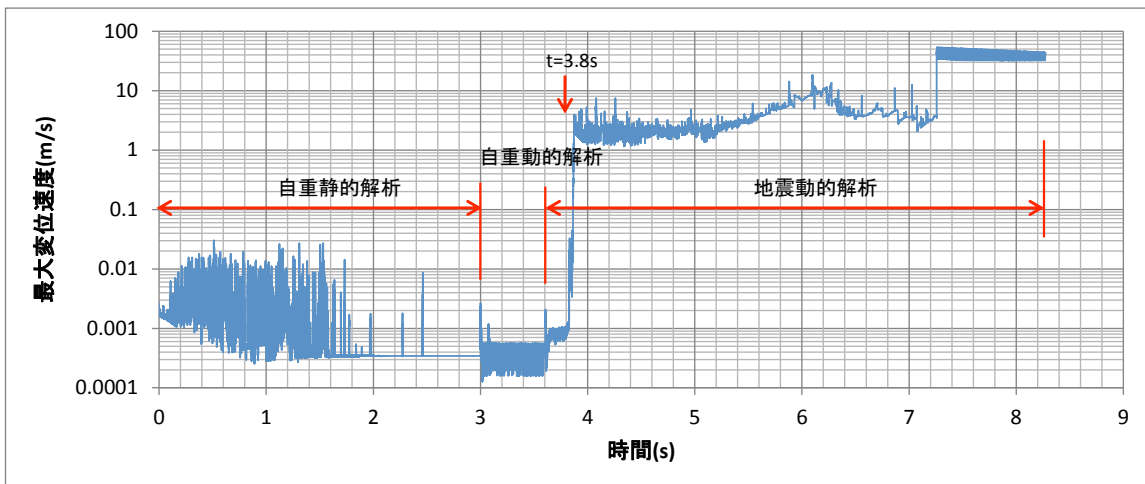
5.18s

解析 A の変形歴 (地盤 $\phi = 25$ 、 $c = 0$)

解析 B 解析図

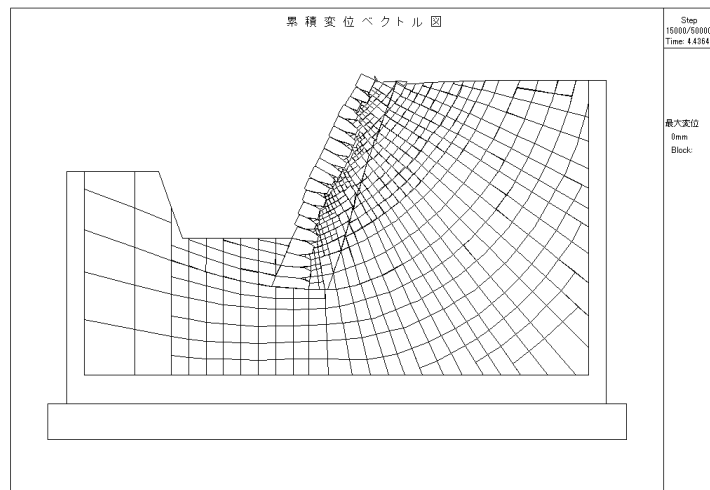


解析 B 動的解析 3.6s 安全率：地盤 $\phi = 25$ 、 $c = 10$

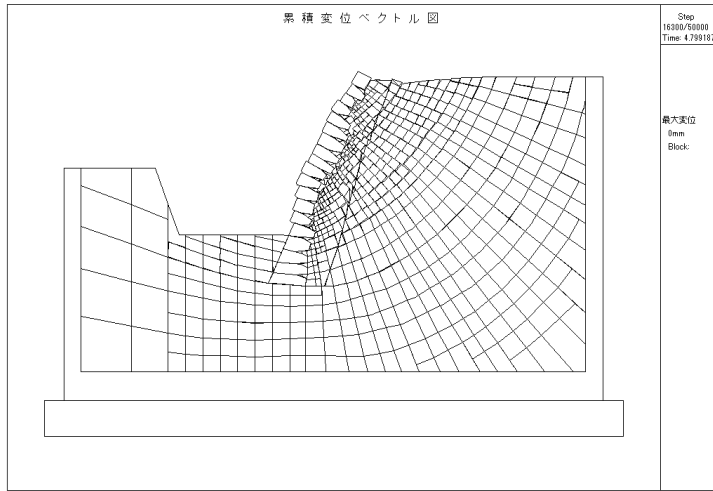


最大変位速度時刻歴

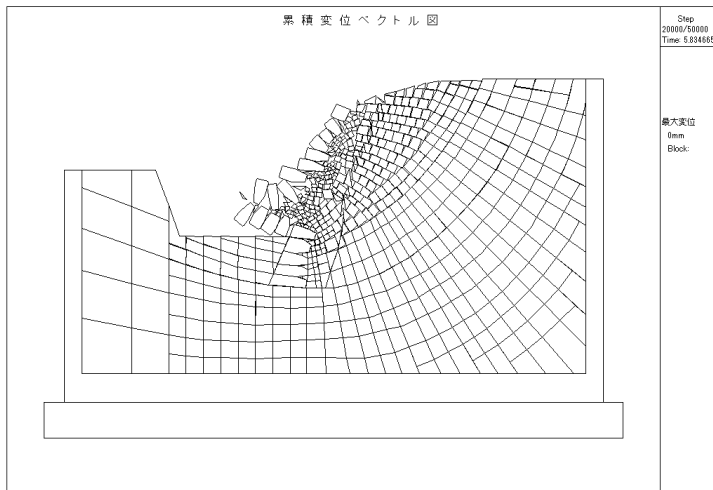
地震動 100gal を作用の場合の解析図



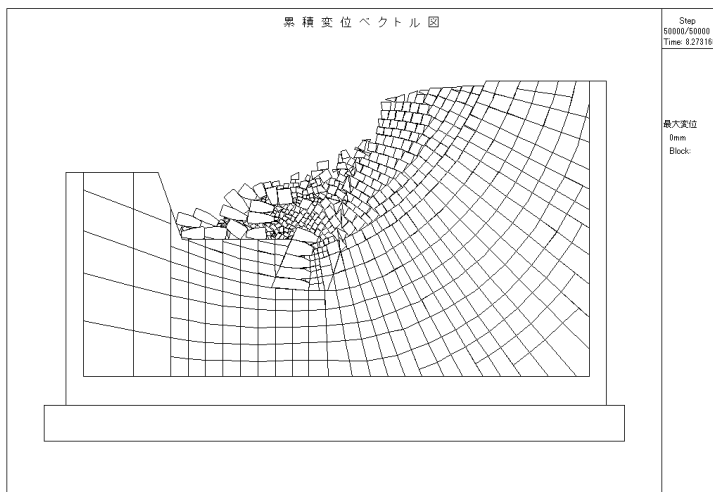
4.44s



4.80s



5.83s



8.27s

解析 B の変形歴 (地盤 $\phi=25$ 、 $c=10$)

■考察

今までの解析で、現状による復元とした場合、震度 4~5 程度で倒壊するとの結果から、地震に対して非常に安定性が低いと見なされる。この点を以下のように考察する。

石垣の崩壊形態から見ると、石垣背後の地盤に均等に円弧不連続面を配置していることに対して、石垣の中・下部が最初にはらみだしている (4.8s)。これは、石垣中・下部の滑り破壊に対する抵抗力が低いことを容易に推察できる。

①石垣の安定性が低い要因として、

●地盤の強度が低いこと。

●当該モデルにおいてははずり面が作用している下位石積形状に課題があること。

と推察される。

②実際には以下の地震を経験している。

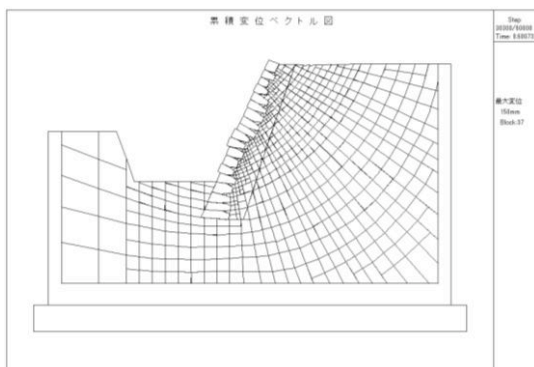
福井地震 S23 : 震度 7

福井地震後 S27 年・S38 年・H7 年・H19 年 : 震度 4

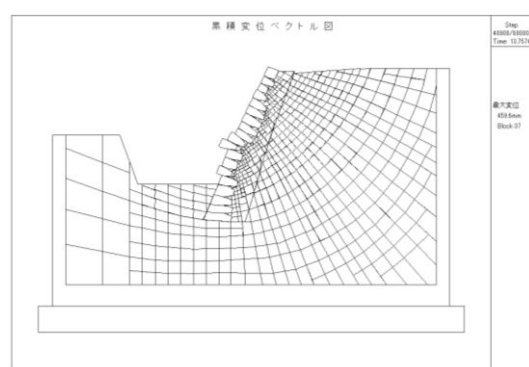
●震度 4 を経験している現状を考慮するために、速度減衰を導入し、地震動のエネルギーロスを表現した解析手法により実際の変状崩壊と整合を図ることが必要と考える。

(速度減衰を導入したトライ解析)

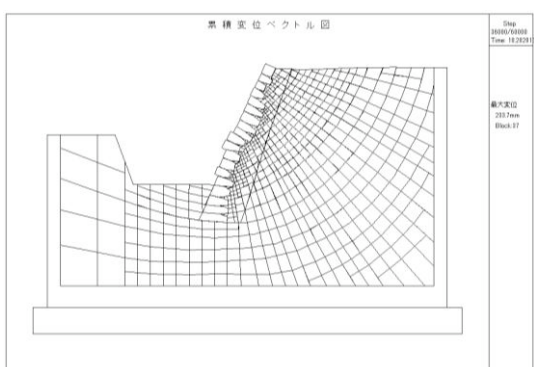
対象 : モデル B ($\phi=25^\circ$ $C=10\text{KN/m}^2$ 地震力 50gal : 震度 4)



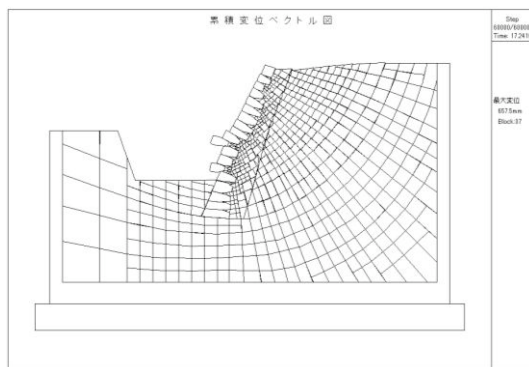
地震後 4.18s



地震後 4.18s



地震後 4.18s



地震後 4.18s

解析では、完全崩壊ではなく残留変形を計算することが可能となり、現状との一致性が得られるようである。

③城址全体の石垣解析との整合を図る上で

- 背面土の強度特性を力学試験等で把握することが望まれる。
- 一般部（堀に面した石垣）石垣形状を同様に解析し、整合性を図る必要がある。

以上を踏まえて、御門の安定を確保する上での目標とする耐震性に対し必要な形状変更、又は補強を併用した復元を提案する。

参考資料：震度の階級（地震と加速度の目安）

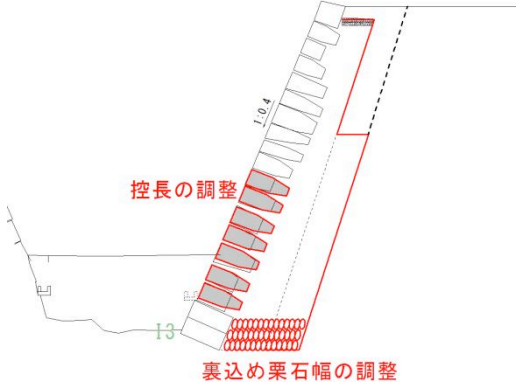

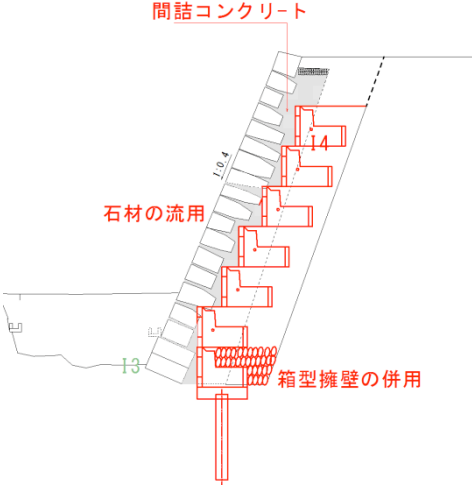
震度の階級：地震と加速度の目安

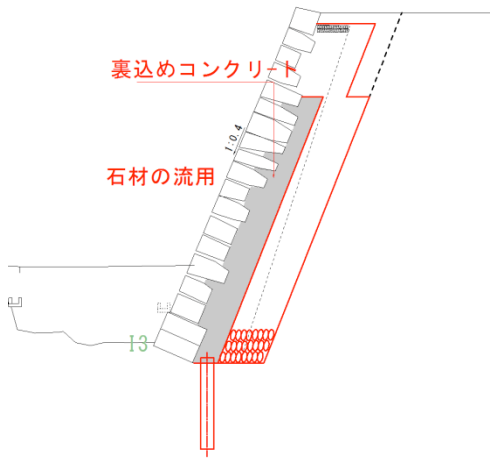
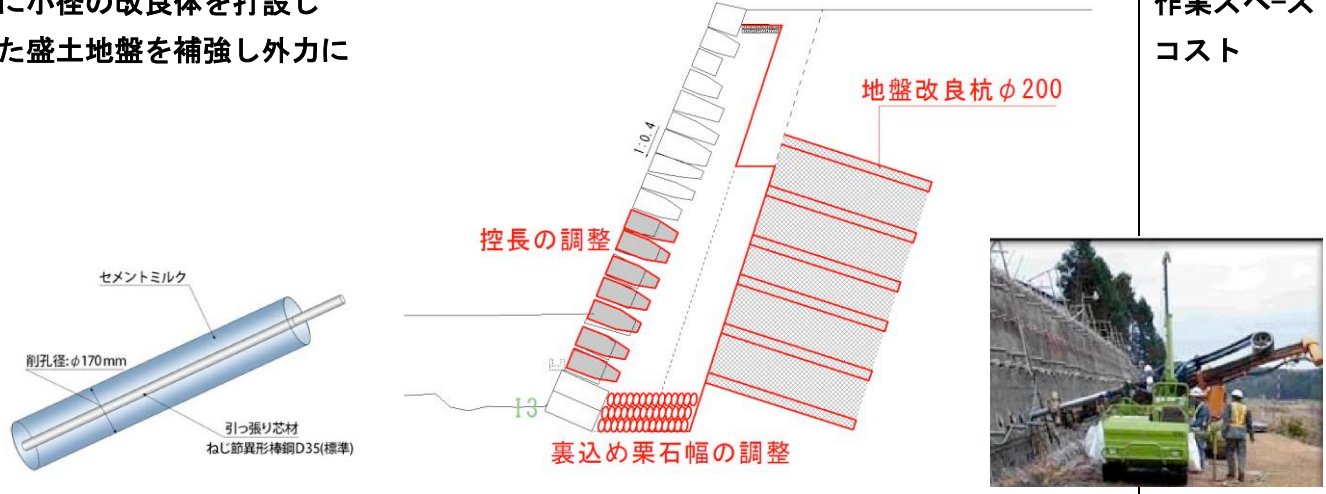
階級	説明	相当加速度
震度0	人体には感じない。地震計に記録される程度。	0～0.8ガル
震度1	静止している人や、特に注意深い人のみが感じる。	0.8～2.5ガル
震度2	大勢の人が感じる程度、戸障子がわずかに動く。	2.5～8.0ガル
震度3	家屋が揺れ電灯等の吊下げものは相当揺れる。	8.0～25ガル
震度4	家屋の揺れは相当激しく花瓶などは倒れ多くの人は戸外に飛び出す。	25～80ガル
震度5	壁に亀裂が走り、煙突／石垣等が破損する程度。多くの人が強い恐怖を感じ、行動の支障を感じる。棚においてある物、食器、本、TVが落ちたり、家具が倒れたりする。 耐震性の低い家屋は壁、柱に破損を生ずる。 中程度の地震：普通は震度5でも80～100ガルが多い	80～250ガル
震度6	家屋の倒壊は30%以下で多くの人は立っていることができない。 固定していない重い家具が殆ど移動、転倒する。 耐震性の低い家屋は倒壊する。 極めて大きい地震(300～400ガル)の表現が該当 関東大震災：震度6 300～400ガル	250～400ガル
震度7	家屋の倒壊は30%以上で山崩れ／地割れ／断層を生ずる。 耐震性の高い建物でも傾いたり、大きな破壊を受ける。 自分の意思では行動できないほど揺れる。 阪神淡路大震災：震度7 600～800ガル	400ガル以上


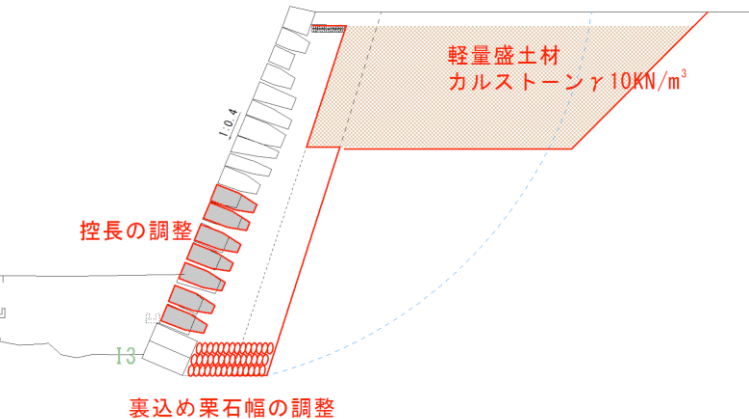
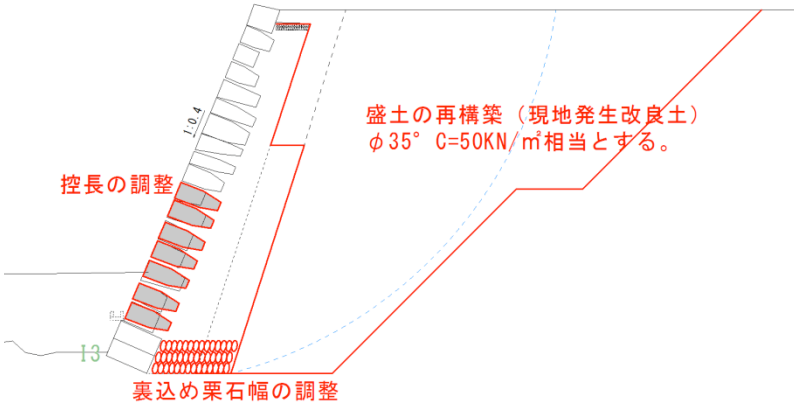
※震度階級の変更に伴い、震度5(強震)、震度6(烈震)などの震度名称は廃止された。

■復元工法の一次選定

復元工法として以下の復元方法について委員会に諮るものである。

工法	工法概要・概要図	課題
<p>①在来工法案</p>	<p>在来工法の石積工に準拠 下部の控え長の調整 裏込め栗石厚さ・形状の調整 目標の耐震性を得ない場合は経済性を考慮の上 ④⑤⑥を併用する。</p> 	<p>石材の調達</p>
<p>②箱型ブロック併用案</p> 	<p>石材の背面に箱型擁壁を構築し石材+ブロック+栗石による高い一体性を得ることで外力に抵抗する。 石材とブロックは鉄筋+間詰コンクリートで連結する。 石積の柔構造性に類似した構造である。</p> 	<p>コスト</p>

工法	工法概要・概要図	課題
<p>③コンクリート併用案</p>	<p>石材の代替えとして、コンクリートを用いて外力に抵抗する。 福井震災復旧工で採用されている。</p> 	<p>剛構造となり本来の石積としての特性を失う</p>
<p>④⑤⑥は在来工法（同諸元）または①②③の補助工法との組み合わせ工法</p>		
<p>④背面盛土補強案</p>	<p>床張掘削面に小径の改良体を打設し強度低下した盛土地盤を補強し外力に抵抗する。</p> 	<p>作業スペース コスト</p>

工法	工法概要・概要図	課題
<p>⑤背面盛土軽量案</p>	<p>背面盛土の一部を必要範囲で軽量化し、土圧の低減を図る。 通常の盛土材と同施工</p>  	<p>コスト 2万円/m³ 樹木の全伐採</p>
<p>⑥背面土再構築案</p>	<p>背面盛土を広範囲で掘削し地盤改良後に再構築する</p> 	<p>大規模土工 天守台周辺は対応不可 樹木の全伐採</p>

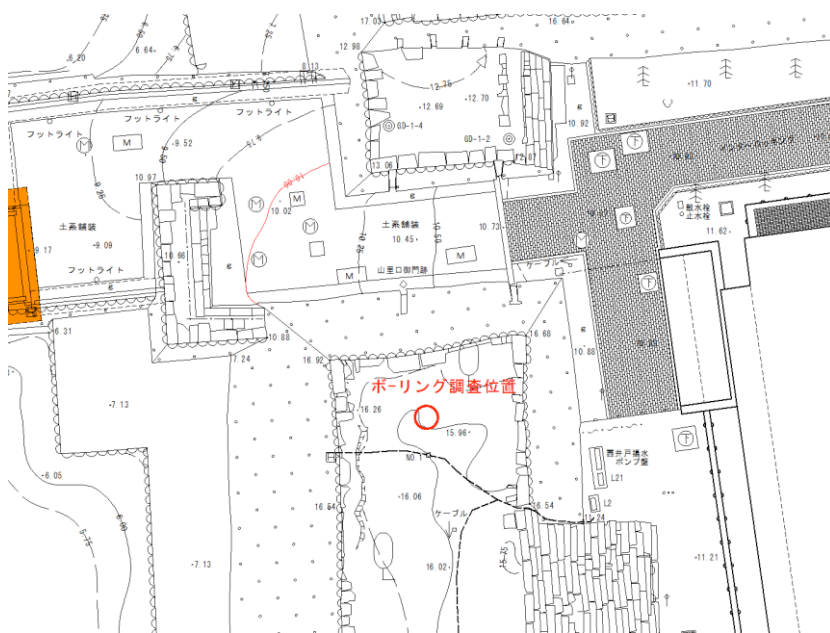
■施工計画案

施工手順

- ①大型土のうによる仮締切
- ②施工エリア排水：ドライにすることで石垣全体の確認が容易
施工中の変位の有無の確認が容易
施工性が向上
- ③底泥固化処理
- ④整地
- ⑤仮設道路設置
- ⑥仮排水路設置
- ⑦敷ガラ整地
- ↓
- ⑧解体・復元作業



■ボーリング調査資料



ボーリング柱状図

調査名 山里口御門復元整備基本設計業務

ボーリングNo

事業・工事名

シートNo

ボーリング名	B-1	調査位置	福井市大手町3丁目			北緯	36° 3' 54.1"			
発注機関	国京建築設計工房			調査期間	平成 26年 1月 9日 ~ 26年 1月 11日		東経	136° 13' 14.4"		
調査業者名	関中日地質 電話 (0776-41-8633)		主任技師	中川 正一		現代場代理人	中川 正一 コ鑑定者 中川 正一		ボーリング責任者	板垣 光雄
孔口標高	角 180° 方 北 0° 上 90° 270° 東 90° 下 0° 西 180° 南		地盤勾配	水平0°		使用機種	YBM-05		ハンマー落下用具	自動落下
総掘進長	44.00m		エンジン	ヤンマー NFA D9-HK		ポンプ	GP-5			

標尺 (m)	層高 (m)	柱状図	土質区分	色相対調度	相対密度	相対稠度	記号	孔内水位 (m) / 測定月日	標準貫入試験				原位置試験 深 (m)	試験名 および結果	試料採取 深 (m)	採取方法	室内試験 (月日)	掘進 (日)											
									深 (m)	10cmごとの打撃回数	貫入量 (cm)	値																	
1			盛土	茶褐			雑、砂混じりシルト 粘土主体で細灰岩からなる風化土及び風化礫を所々挟む 含水量は中位~やや高い状態である 6.00m~7.00m付近には細粒分を多く混入する	1.15	1	1	2																		
2																			2.15	1	2	1	4						
																			2.45				30						
3																			3.15	1	2	2	5						
																			3.45				30						
4																			4.15	2	2	2	6						
							4.45				30																		
5							5.15	1	2	3	6																		
							5.45				30																		
6							6.15	2	2	3	7																		
							6.45				30																		
7	6.90	6.90					7.15	1	2	1	4																		
							7.45				30																		
8			砂質シルト				8.15	2	2	2	6																		
							8.45				30																		
9				暗灰			9.15	2	2	2	6																		
							9.45				30																		
10	3.00	9.90					10.15	2	2	2	6																		