

**「熊本地震が突き付けた課題」**  
**熊本城石垣及び擁壁の被害分析**

**国士舘大学理工学部 まちづくり学系教授**  
**工学(博士) 橋本 隆雄**

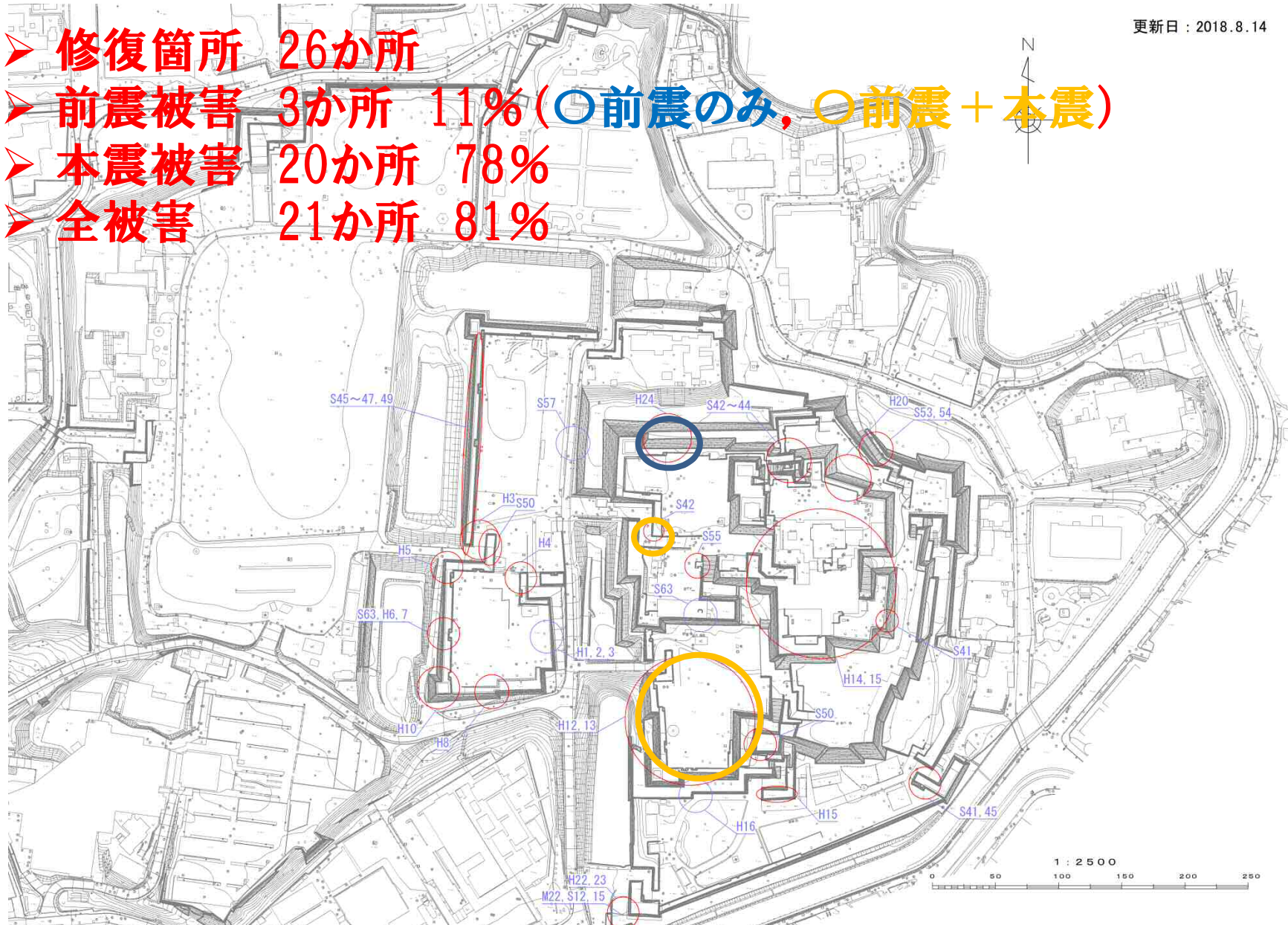
# 1. 熊本城石垣の被害分析

熊本城調査研究センターのご協力をいただき調査させていただきました。

# 過去の修復箇所の前震・本震の被害

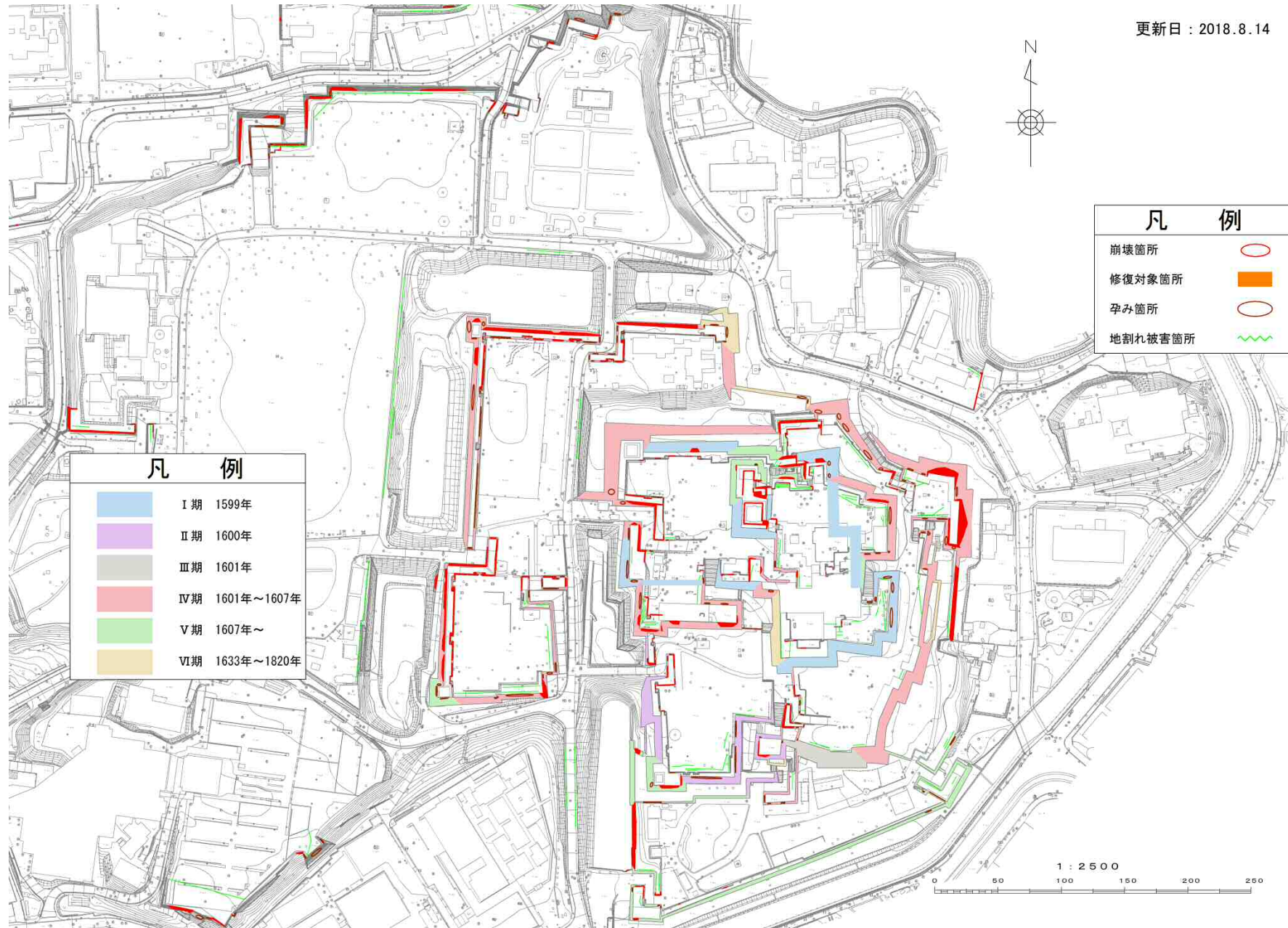
更新日：2018.8.14

- 修復箇所 26か所
- 前震被害 3か所 11% (○前震のみ, ○前震+本震)
- 本震被害 20か所 78%
- 全被害 21か所 81%

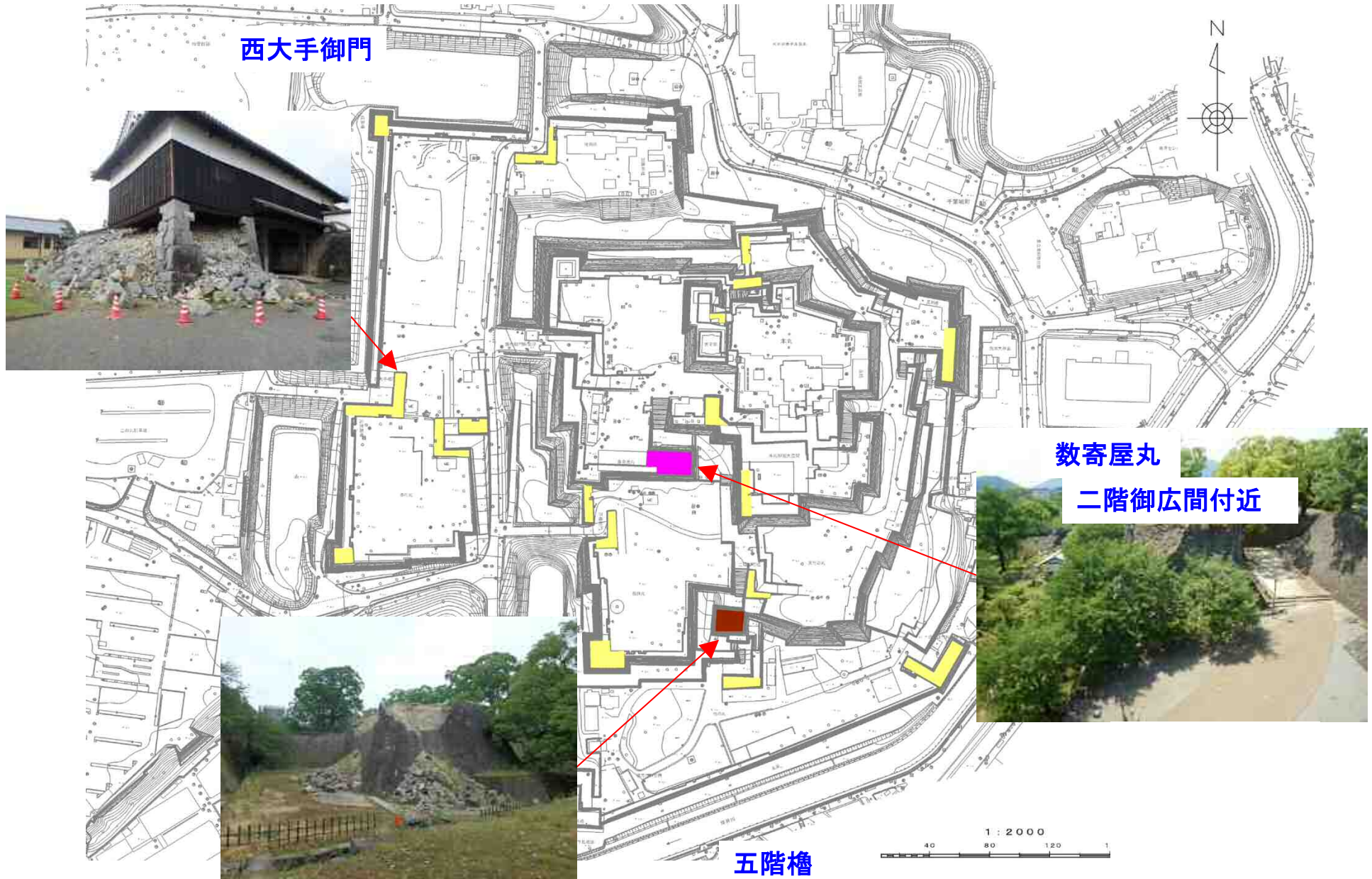


# 石垣構築年代と被害箇所

更新日：2018.8.14



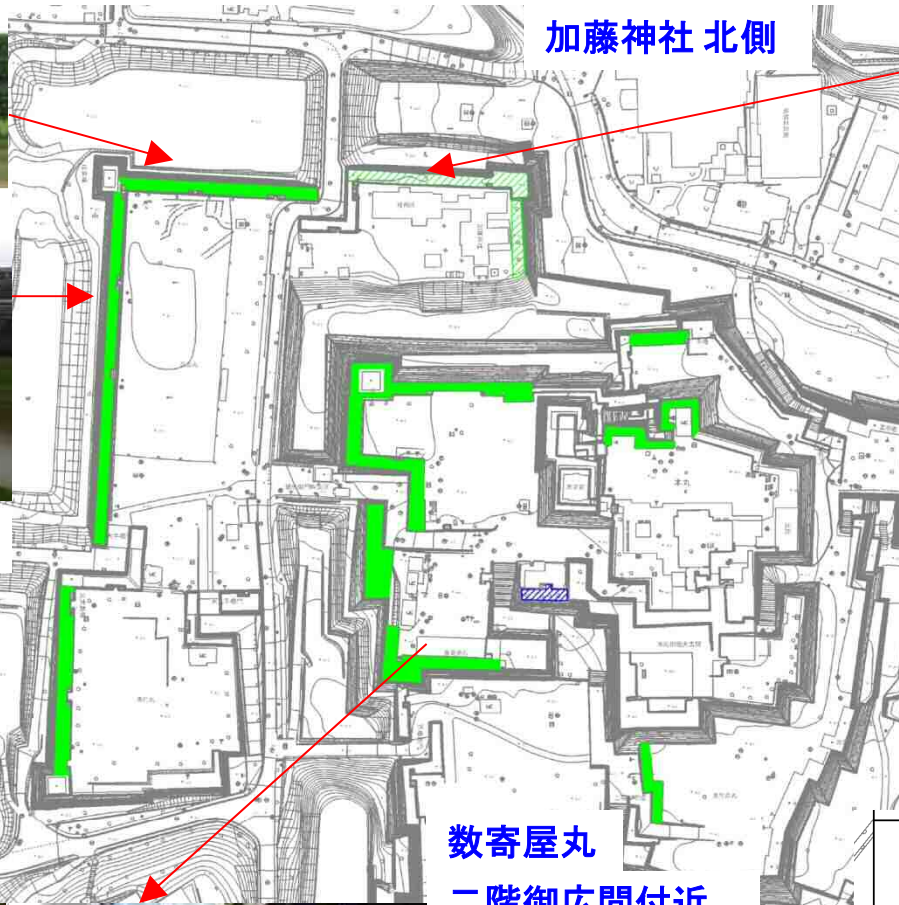
# 石墨タイプ



# 半石墨タイプ




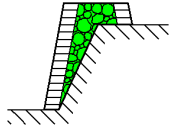

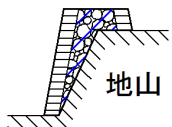
戌亥(いぬい)櫓 南側



加藤神社 北側

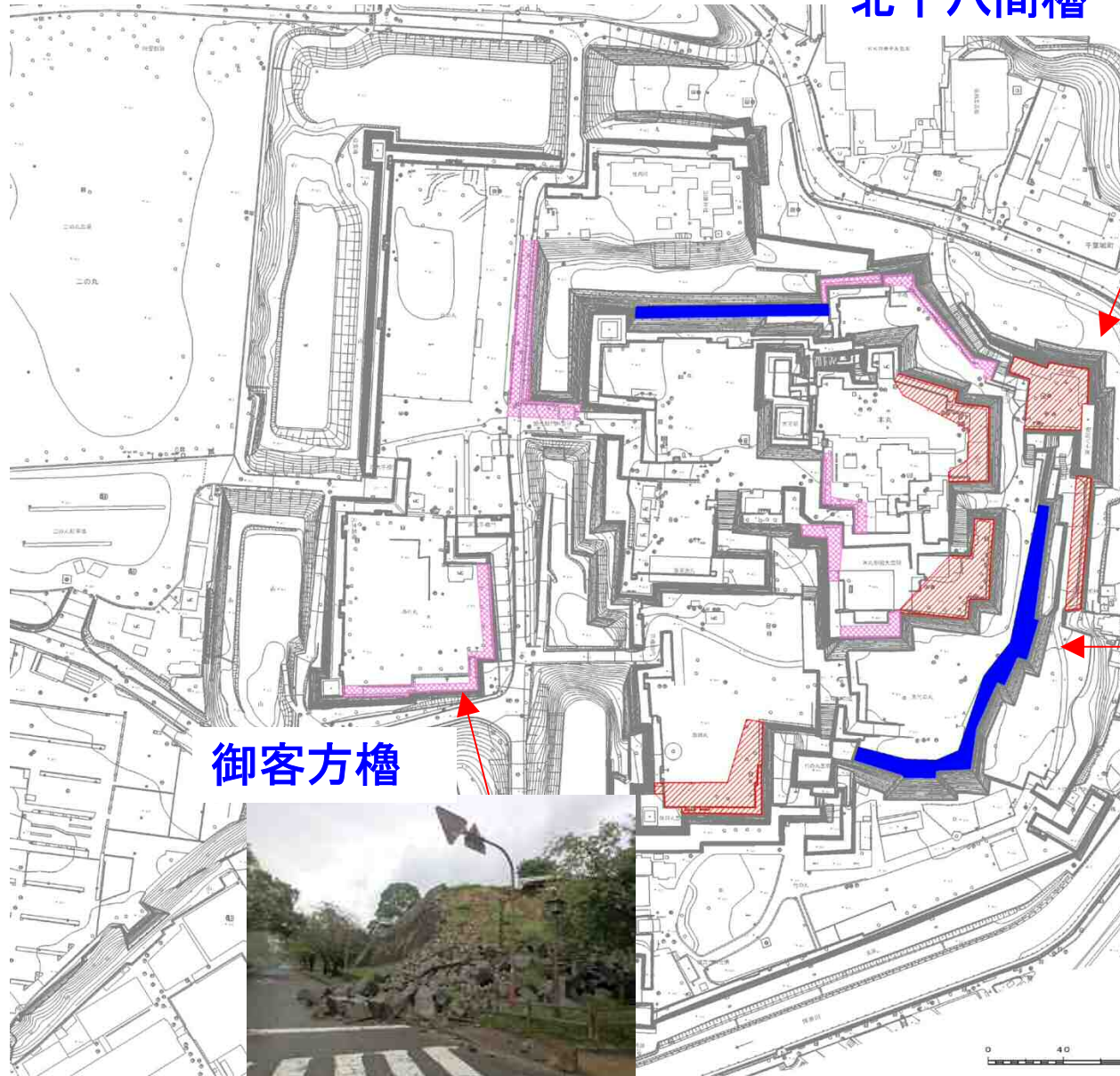
数寄屋丸  
二階御広間付近



半石墨タイプ	半石墨型 	
	地山型 	

# 非石墨タイプ

北十八間櫓



源之進櫓

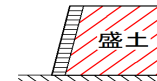


御客方櫓

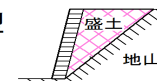


非石墨タイプ

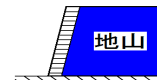
盛土型



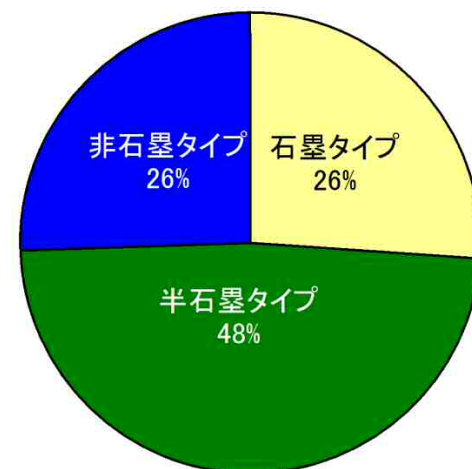
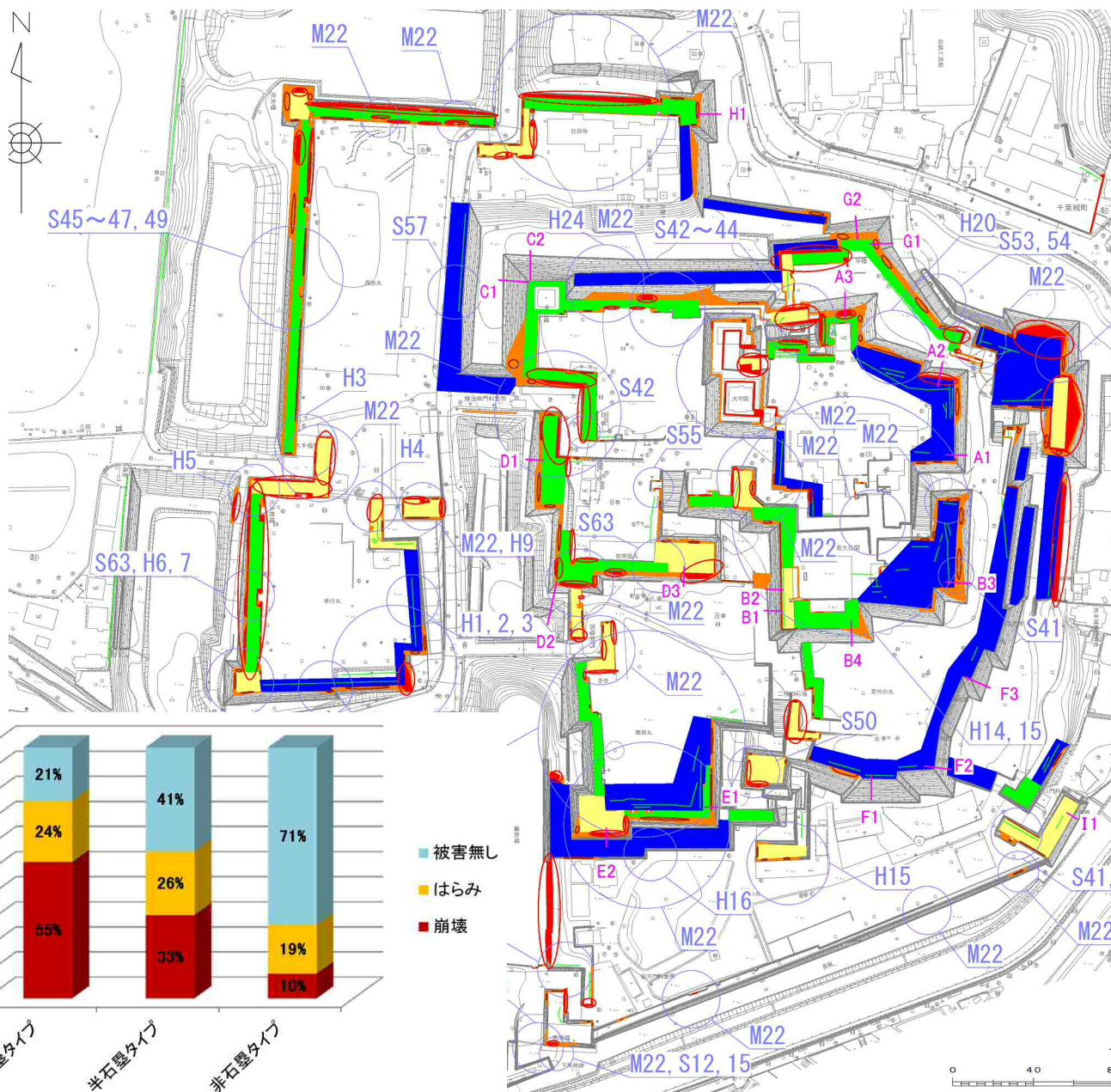
半盛土型



地山型



# 石垣タイプ毎の被害程度

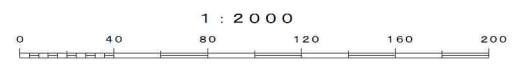
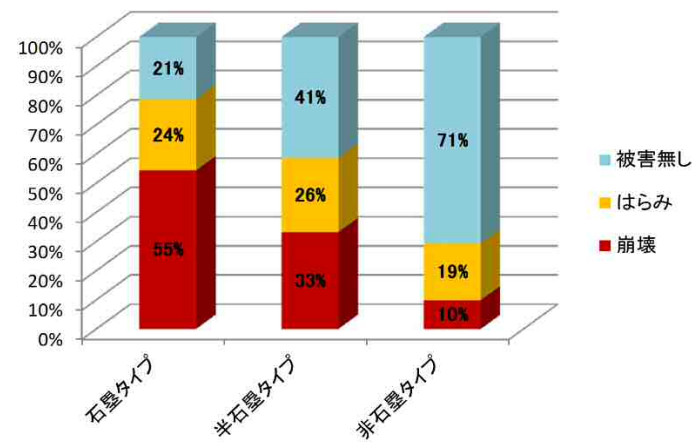


凡例

修復対象箇所	
崩壊箇所	
孕み箇所	
地割れ被害箇所	
断面計測箇所	

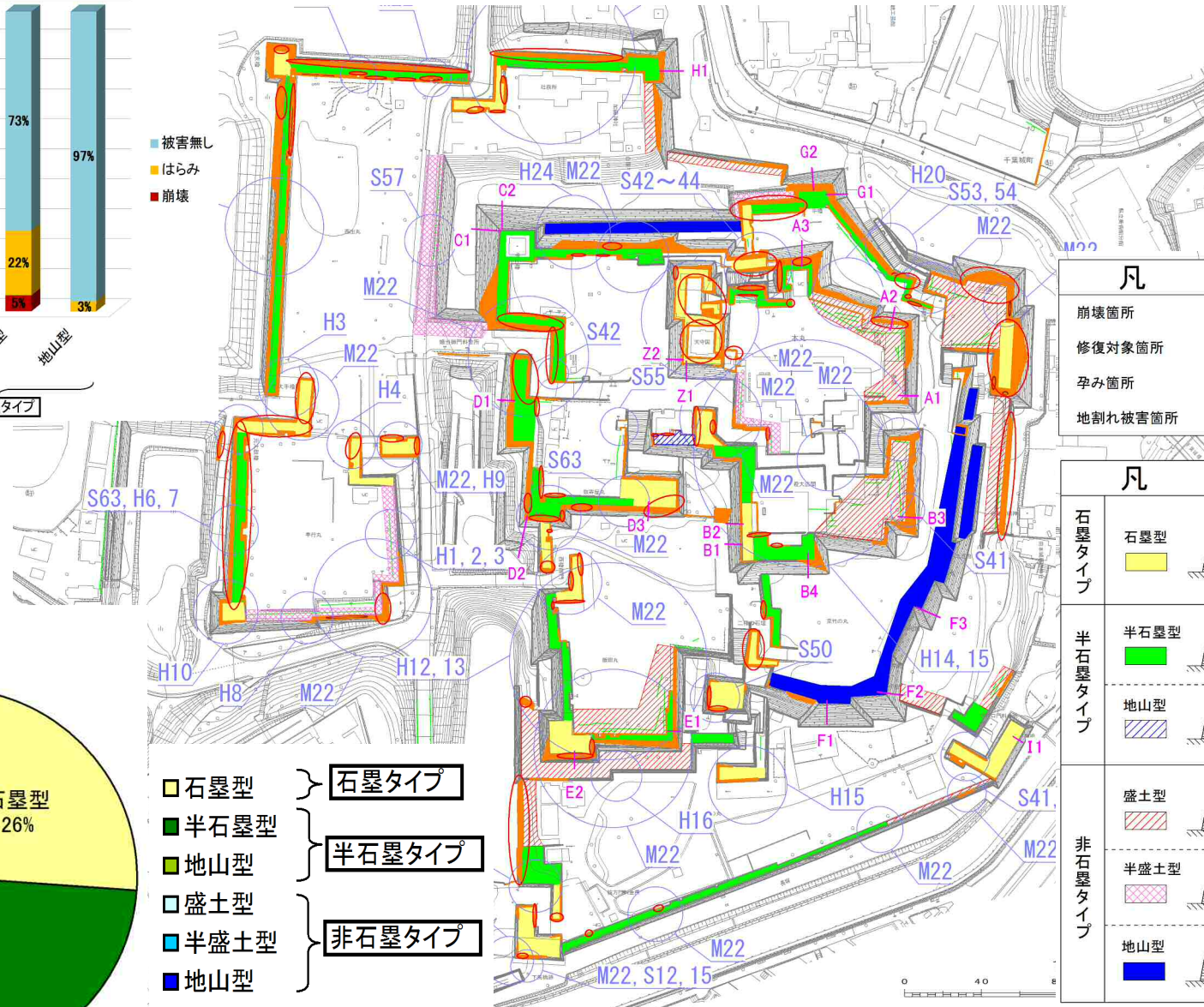
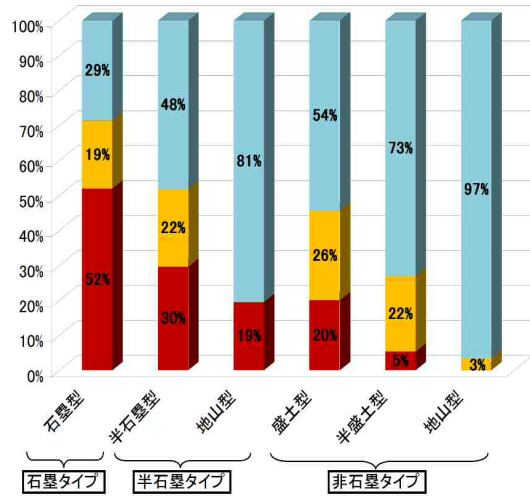
凡例

石罫タイプ	
半石罫タイプ	
非石罫タイプ	



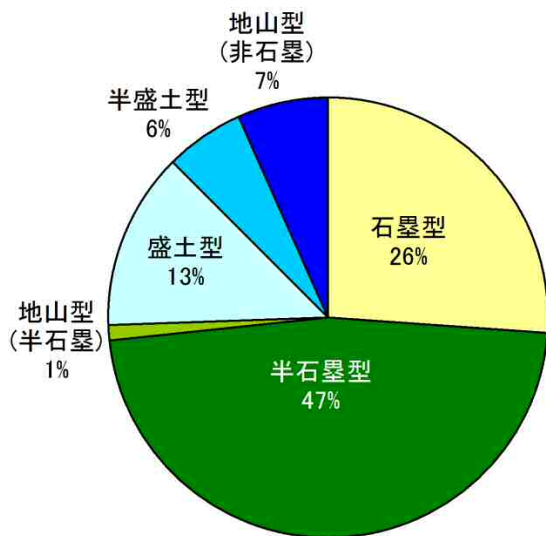


# 詳細な石垣タイプ毎の被害程度



凡例	
崩壊箇所	
修復対象箇所	
孕み箇所	
地割れ被害箇所	

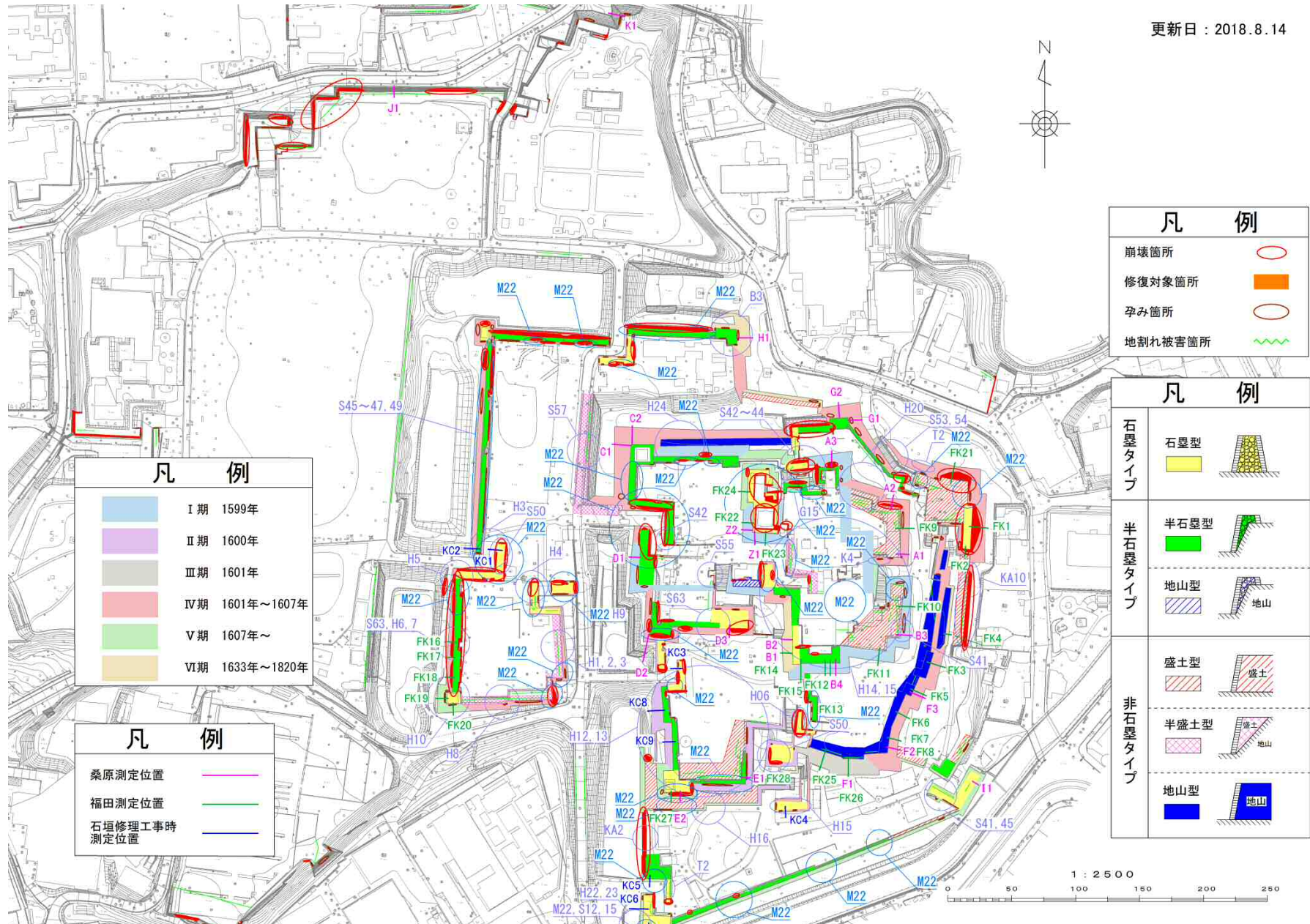
凡例	
石垣タイプ	石垣型
半石垣タイプ	半石型
	地山型
非石垣タイプ	盛土型
	半盛土型
	地山型



	石垣型	石垣タイプ
	半石型	
	地山型	半石垣タイプ
	盛土型	
	半盛土型	非石垣タイプ
	地山型	

# 石垣構築年代と石墨タイプ

更新日：2018.8.14



凡 例	
<span style="background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	I期 1599年
<span style="background-color: #DDA0DD; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	II期 1600年
<span style="background-color: #808080; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	III期 1601年
<span style="background-color: #F08080; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	IV期 1601年～1607年
<span style="background-color: #90EE90; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	V期 1607年～
<span style="background-color: #FFD700; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 15px;"></span>	VI期 1633年～1820年

凡 例	
<span style="border-bottom: 1px solid purple; width: 20px; display: inline-block;"></span>	桑原測定位置
<span style="border-bottom: 1px solid green; width: 20px; display: inline-block;"></span>	福田測定位置
<span style="border-bottom: 1px solid blue; width: 20px; display: inline-block;"></span>	石垣修理工事時測定位置

凡 例	
<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>	崩壊箇所
<span style="background-color: orange; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>	修復対象箇所
<span style="border: 1px solid red; border-radius: 50%; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>	孕み箇所
<span style="border-bottom: 1px dashed green; width: 20px; display: inline-block;"></span>	地割れ被害箇所

凡 例	
石墨タイプ	石墨型
	<span style="background-color: yellow; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
半石墨タイプ	半石墨型
	<span style="background-color: green; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
地山タイプ	地山型
	<span style="background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
非石墨タイプ	盛土型
	<span style="background: repeating-linear-gradient(-45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
	半盛土型
	<span style="background: repeating-linear-gradient(45deg, transparent, transparent 2px, black 2px, black 4px); width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>
地山型	
<span style="background-color: blue; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span>	

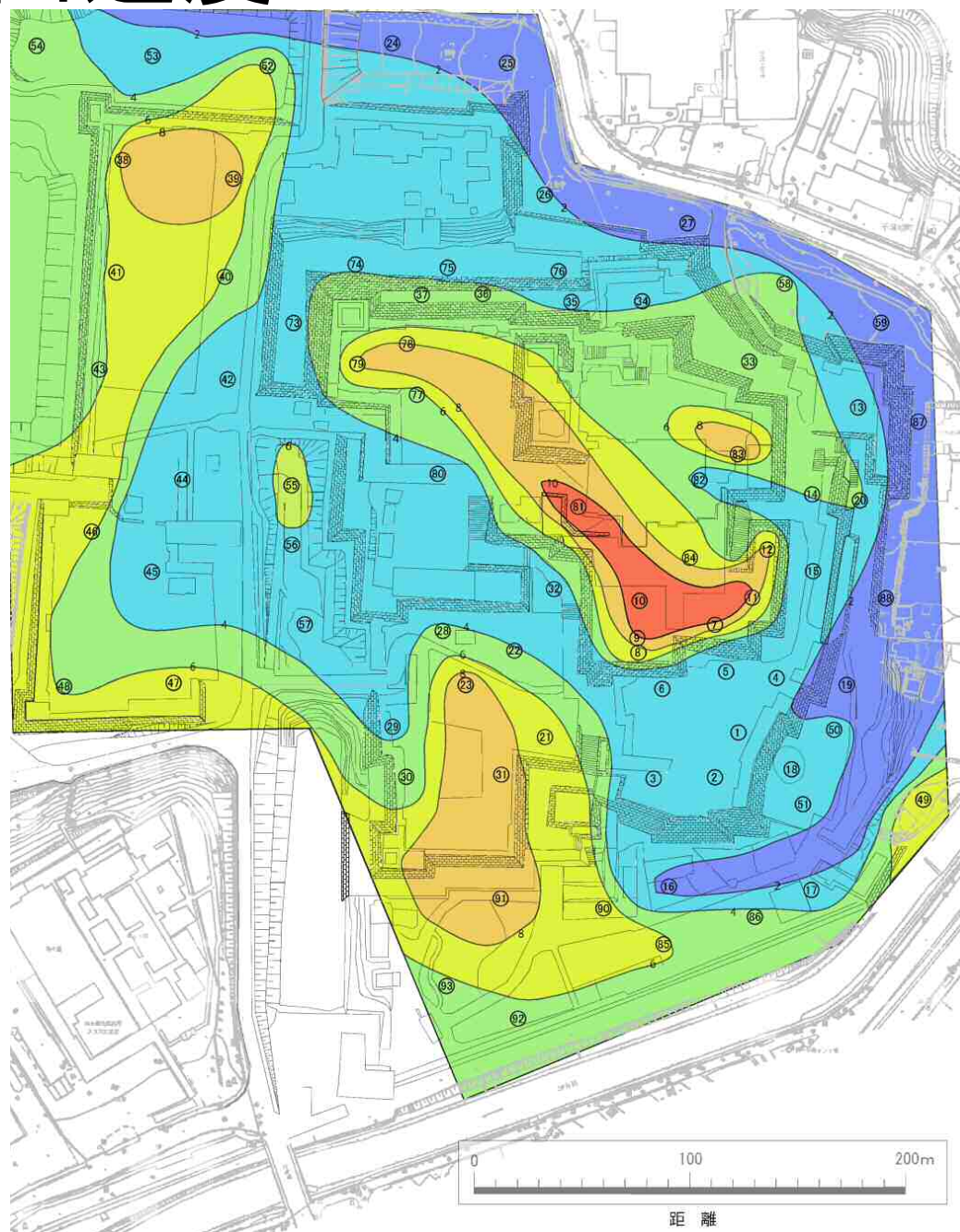


# 地表面探查結果





# S波速度150m/s上面速度 (微動アレイ探査)



# 示力線法による石垣の安定性の検討

一般的な示力線法による照査式は、同じ勾配で積み上げられた擁壁を対象としているため、天端に向かうに伴い勾配が急になる寺勾配や宮勾配などで築造される石垣の計算を行なえない。

そこで、試行くさび法により1段ごとに積み勾配が異なる積み石に作用する土圧を算定し、これにより示力線を求めた。

・石垣に作用する土圧(常時)

$$Pa_n = \frac{W_n \cdot \sin(\omega_n - \phi) - \sum \{Pa_i \cdot \cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_i)\}}{\cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_n)}$$

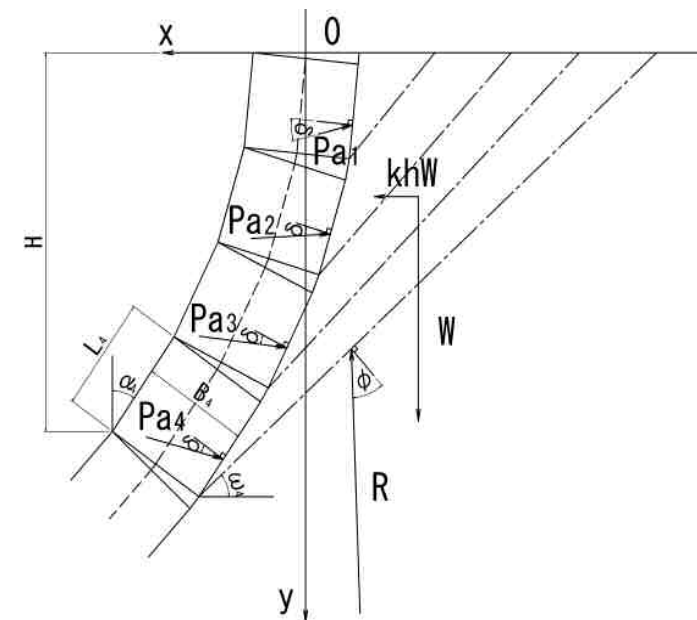
・石垣に作用する土圧(地震時)

$$Pae_n = \frac{We \cdot \sin(\omega_n - \phi + \theta) - \sum \{Pae_i \cdot \cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_i)\}}{\cos(\omega_n - \phi - \delta - \alpha_n)}$$

・合力の作用位置(示力線)

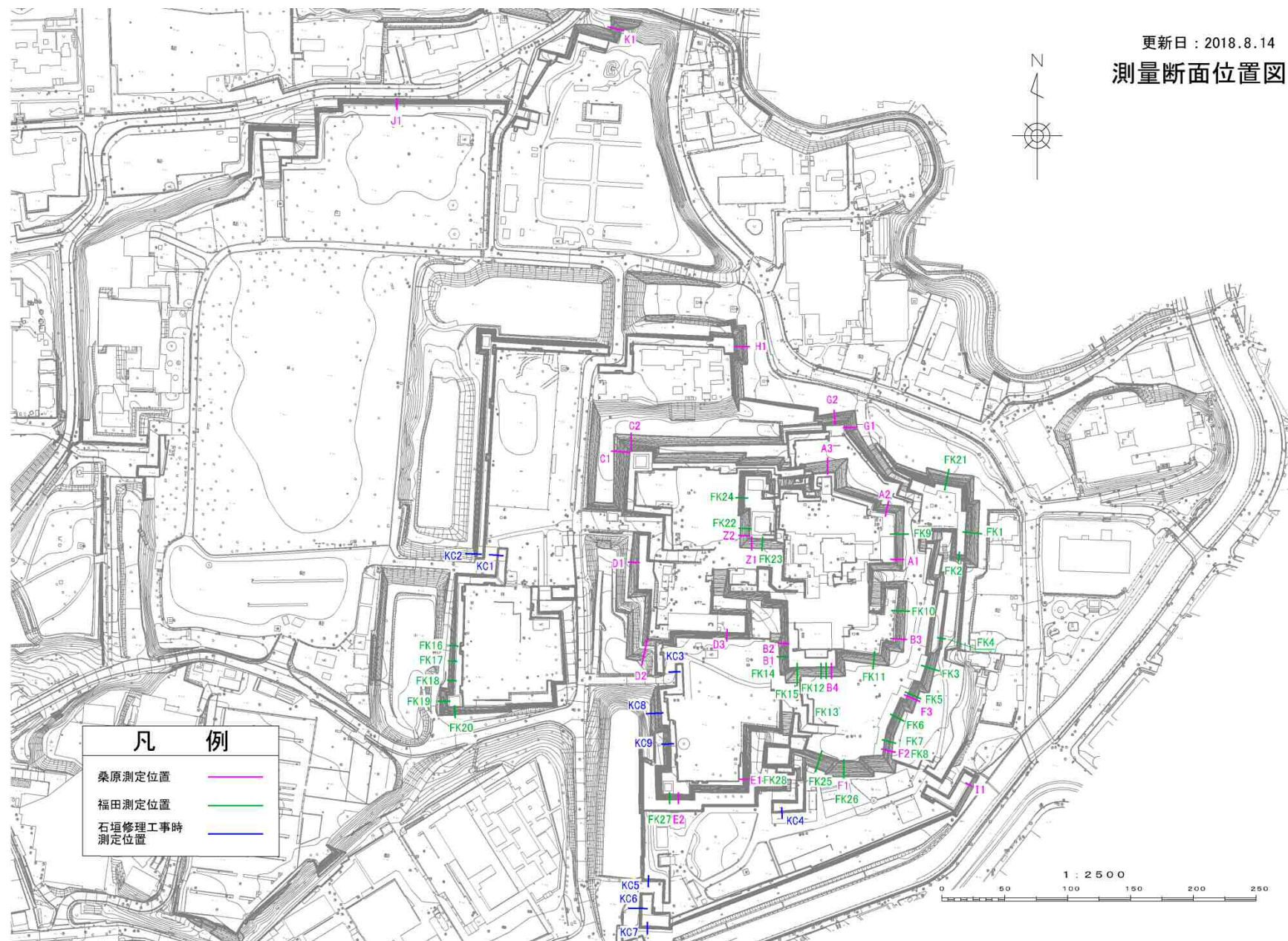
$$d_i = \sum (M_i / V_i)$$

ここに、Pa: 常時の土圧、Pae: 地震時の土圧、 $\omega$ : 滑り角、 $\delta$ : 壁面摩擦角、 $\alpha$ : 積み石の勾配、 $\theta$ : 地震時合成角(=tan<sup>-1</sup>kh)、W: すべり土塊重量、We: すべり土塊重量とそれに起因する慣性力との合力、kh: 水平震度、L: 積み石の法長、d: 荷重合力の作用点までの距離、M; モーメント、V; 鉛直力

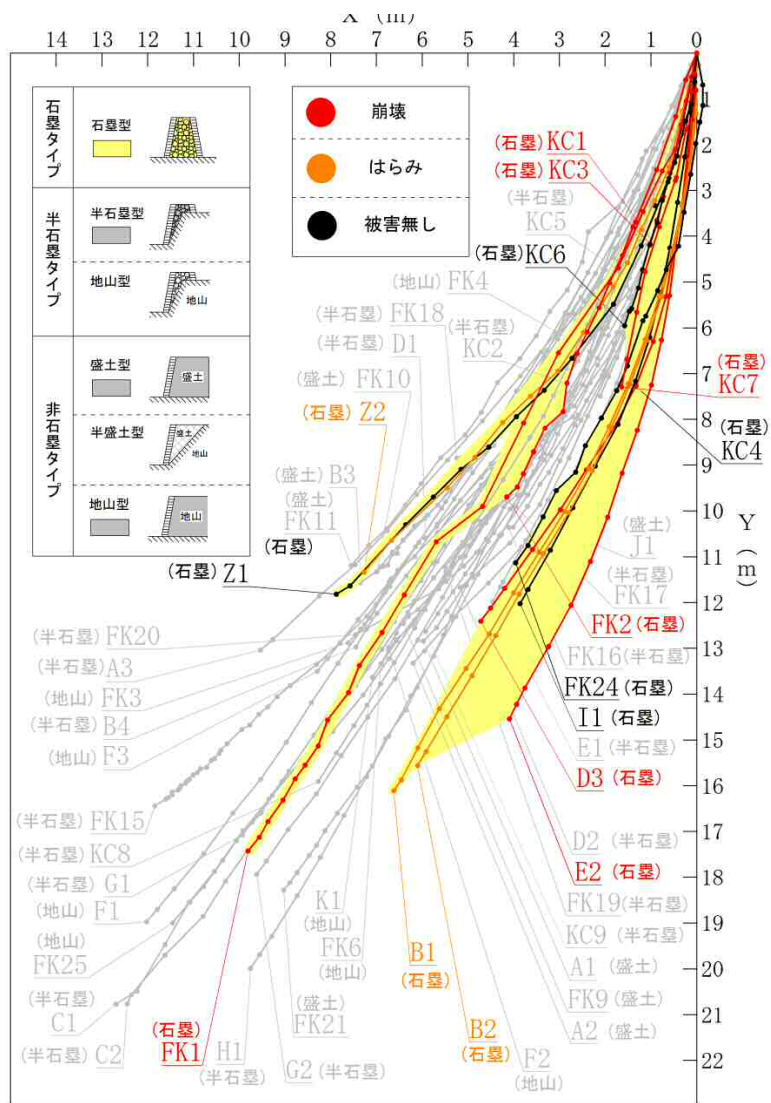


# 地震前の測量断面位置図

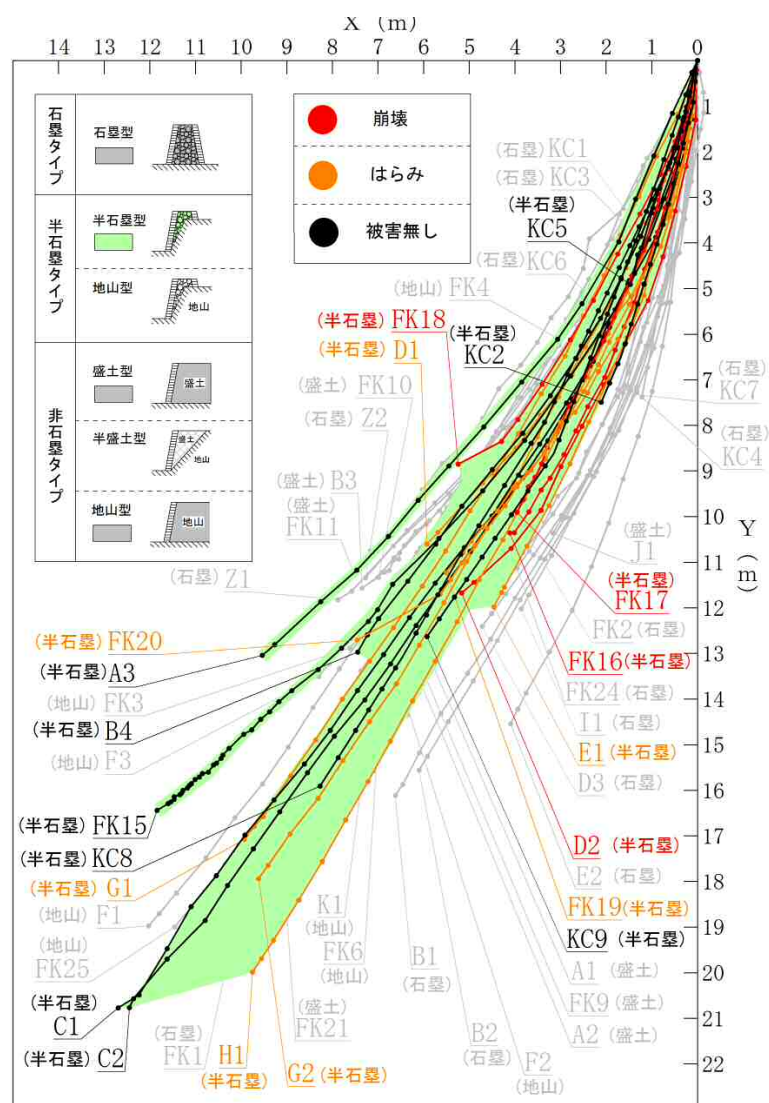
更新日：2018.8.14  
測量断面位置図



# 石垣の6形状と被害



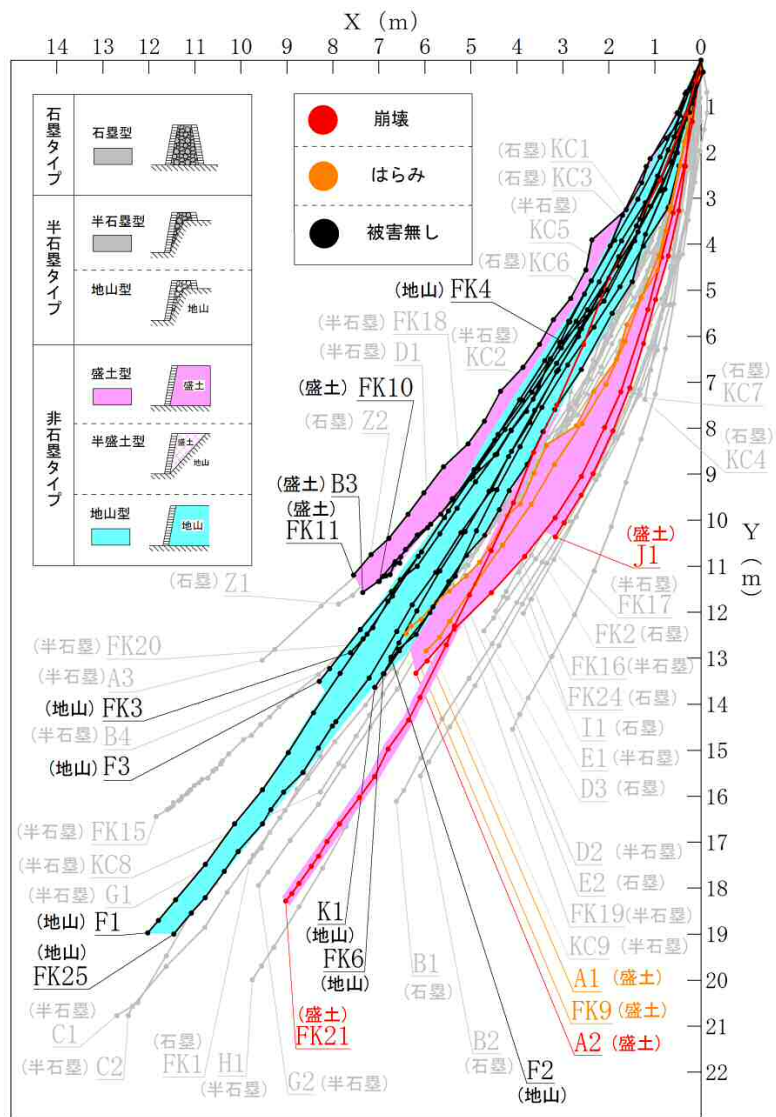
(a) 石壘



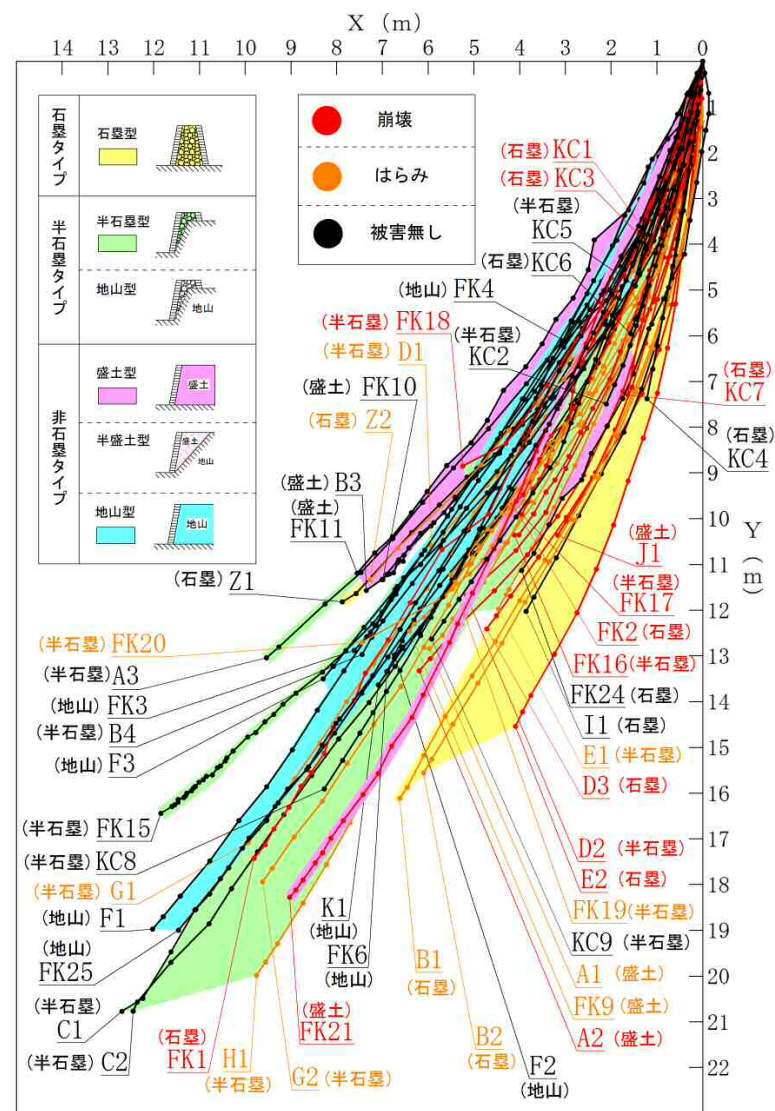
(b) 半石壘



# 石垣の6形状と被害



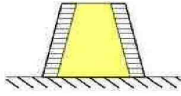
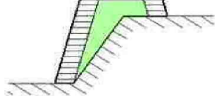
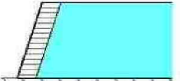
(c) 非石壁



(d) 全体

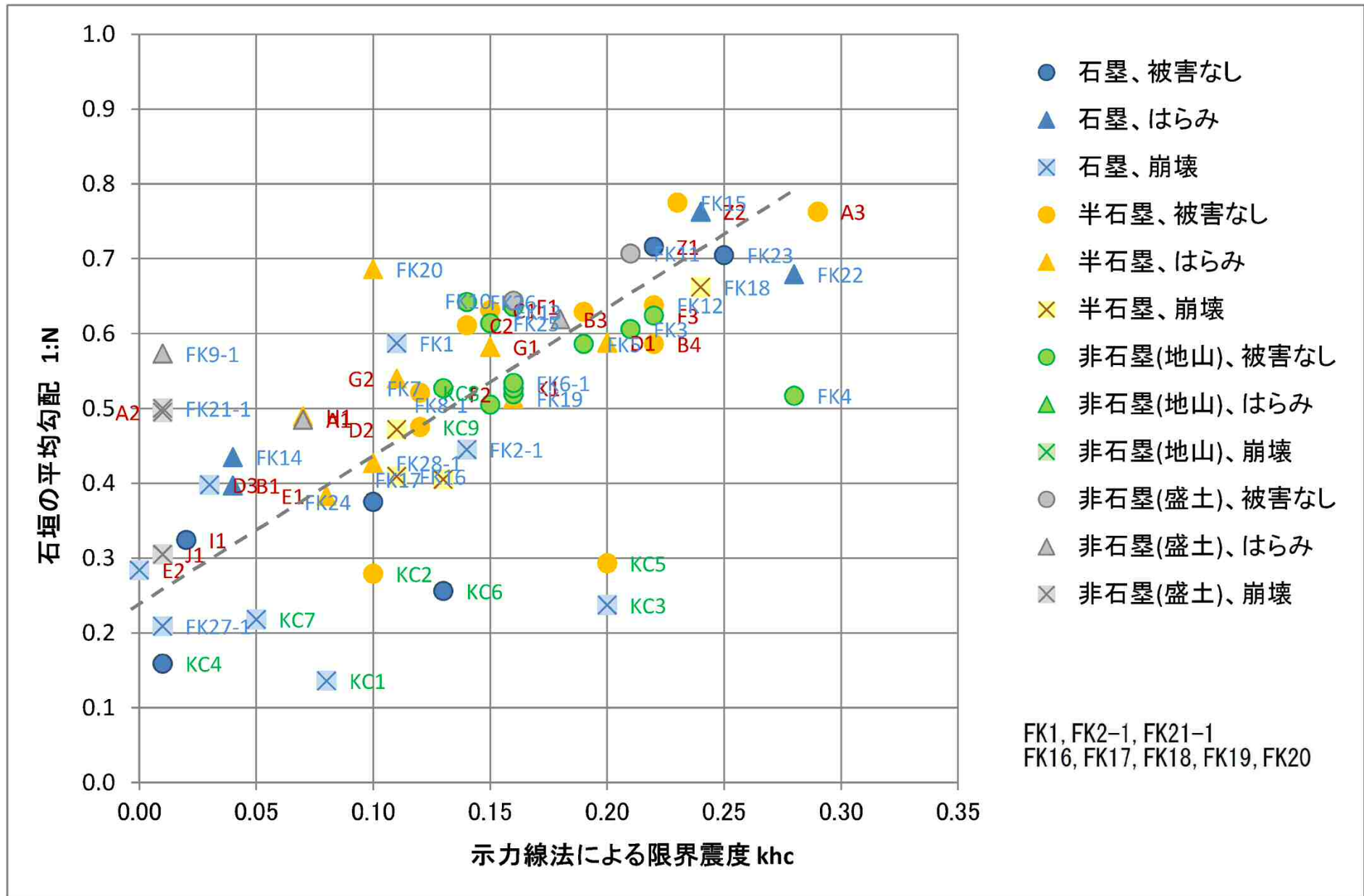
# 示力線による計算

示力線法による限界震度の計算結果一覧

	被害なし			はらみ			崩壊			
	No.	震災前	(震災後)	No.	震災前	(震災後)	No.	震災前	(震災後)	
石塁 	I1	0.02	( 0.01 )	B1	0.04	( 0.06 )	D3	0.03	( )	
	Z1	0.22	( 0.24 )	Z2	0.24	( )	E2	0.00	( )	
	FK23	0.25	( )	FK14	0.04	( )	FK1	0.11	( )	
	FK24	0.10	( )	FK22	0.28	( )	FK2-1	0.14	( )	
	KC4	0.00	( )				FK27-1	0.01	( )	
	KC6	0.13	( )				KC1	0.08	( )	
							KC3	0.20	( )	
						KC7	0.05	( )		
半石塁 	A3	0.29	( )	D1	0.20	( 0.22 )	D2	0.11	( )	
	B4	0.22	( 0.21 )	E1	0.08	( 0.06 )	FK16	0.11	( )	
	C1	0.15	( 0.15 )	G1	0.15	( 0.15 )	FK17	0.13	( )	
	C2	0.14	( 0.15 )	G2	0.11	( 0.11 )	FK18	0.24	( )	
	FK12	0.22	( )	H1	0.07	( 0.06 )				
	FK13	0.19	( )	FK19	0.16	( )				
	FK15	0.23	( )	FK20	0.10	( )				
	KC2	0.10	( )	FK28-1	0.10	( )				
	KC5	0.20	( )							
	KC8	0.12	( )							
KC9	0.12	( )								
非石塁 	地山	F1	0.16	( 0.16 )						
		F2	0.16	( 0.19 )						
		F3	0.22	( 0.22 )						
		K1	0.16	( )						
		FK3	0.21	( )						
		FK4	0.28	( )						
		FK5	0.19	( )						
		FK6-1	0.16	( )						
		FK7	0.13	( )						
		FK8-1	0.15	( )						
	FK25	0.15	( )							
	FK26	0.14	( )							
	盛土	FK10	0.16	( )	A1	0.07	( 0.07 )	A2	0.01	( )
		FK11	0.21	( )	B3	0.18	( 0.18 )	J1	0.01	( )
				FK9-1	0.01	( )	FK21-1	0.01	( )	
平均		0.17	( 0.17 )		0.12	( 0.11 )		0.08	( )	

( )は震災後の石垣断面に対する計算結果  
 限界震度＝示力線が石垣前縁と交差する水平震度

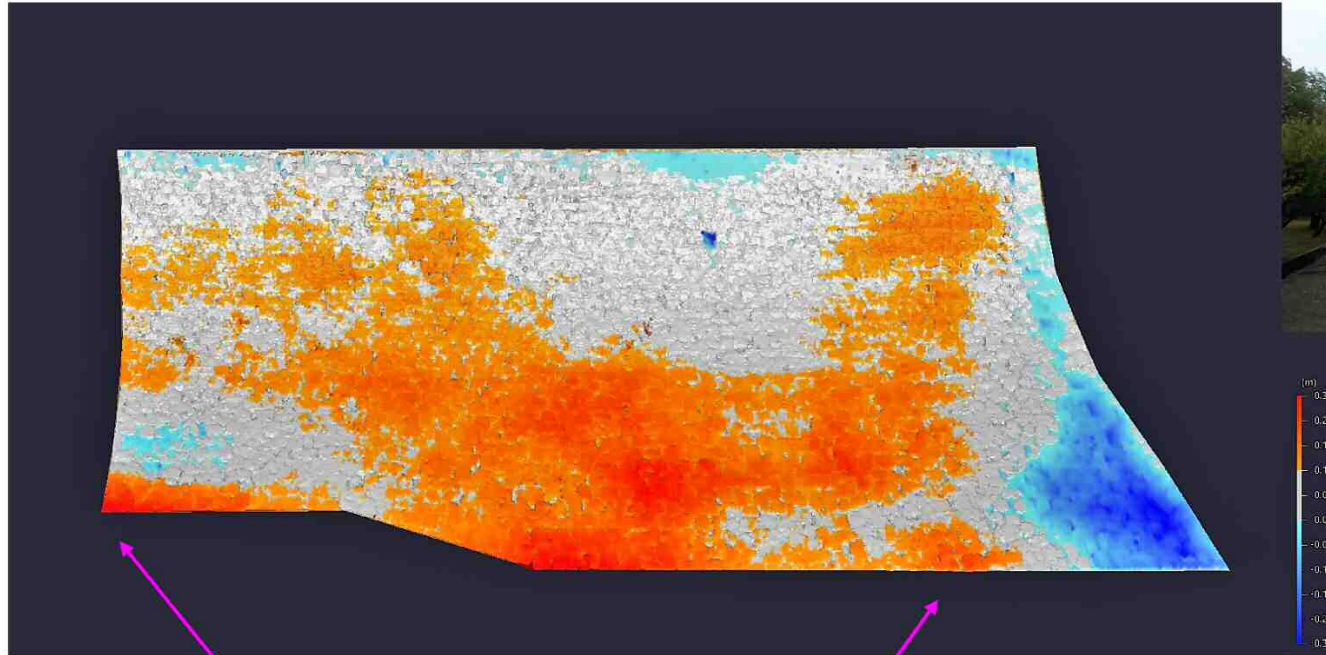
# 示力線法による限界震度



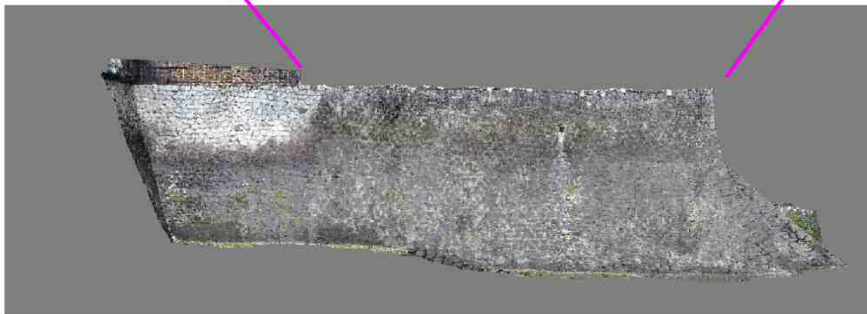


# 二様の石垣 (段彩図:S59桑原データ比較)

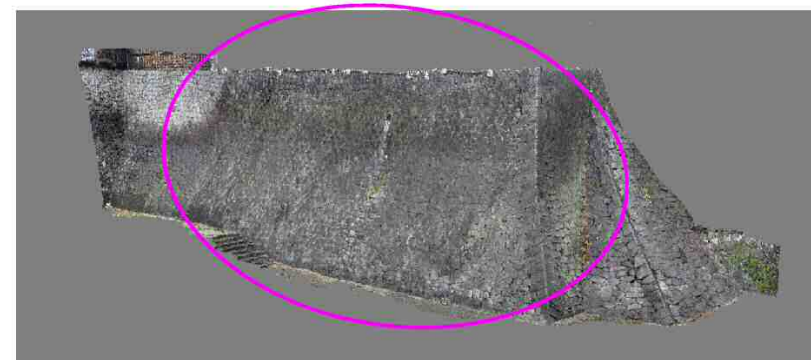
二様の石垣(段彩図:S59桑原データ比較)



南側から撮影

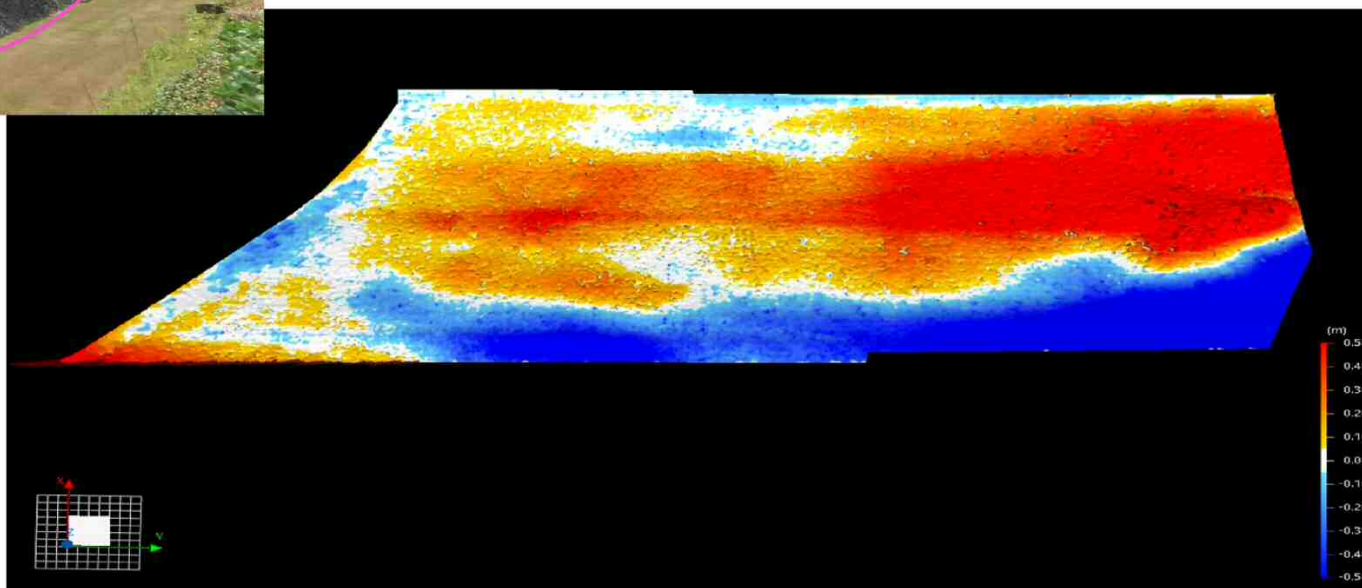


3Dモデル



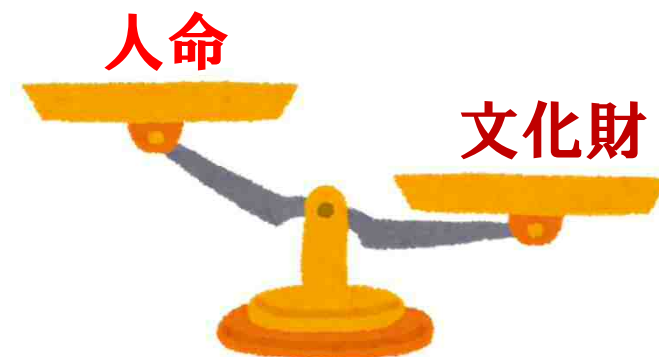
3Dモデル

# 宇土櫓(西側)の石垣 (段彩図: 基準断面データ比較)



# 課題

- 過去の石垣修復したものの8割以上が崩壊した。
  - 孕みを生じている箇所が多く、崩壊しやすい。
  - 歴史的文化財であるため、元通りの戻せとの意見が多くある。特に、城郭の入り口にある石塁の高さが低いものが流動化して崩壊している。
  - 熊本地震は夜間に発生しているため、人命に被害がないため、石垣の復興に耐震対策が考慮されていない。
- ⇒ 昼間に地震が発生したら、多くの人命が失われている可能性が非常に高い。保障や国際問題にも発展することも予想される。
- ⇒ 危険性が高い石垣は、形状を従来のままにして、石垣内に補修・補強を導入して耐震性を高めることが重要である。



## 2. 石積擁壁の被害分析

被災宅地危険度判定士が行った判定帳票は、国土交通省国土技術政策総合研究所及び国土交通省都市局都市安全課から資料を提供して頂きました。



# 宅地擁壁の被害状況



(a) 練石積擁壁の縦クラック (益城町) (b) 擁壁の上部宅地地盤の沈下 (益城町)



(c) 練石積擁壁の横クラック (益城町) (d) 練石積擁壁のコーナー部の崩壊 (益城町)

# 宅地擁壁の被害状況



(e) 練石積擁壁の倒壊 (西原町)



(f) 練石積擁壁の倒壊 (南阿蘇村)



(g) 空石積擁壁の崩壊 (西原町)



(h) L型擁壁の倒壊 (南阿蘇村)

# 宅地擁壁の被害状況



(i) 練石積擁壁の倒壊



(j) 練石積擁壁の倒壊



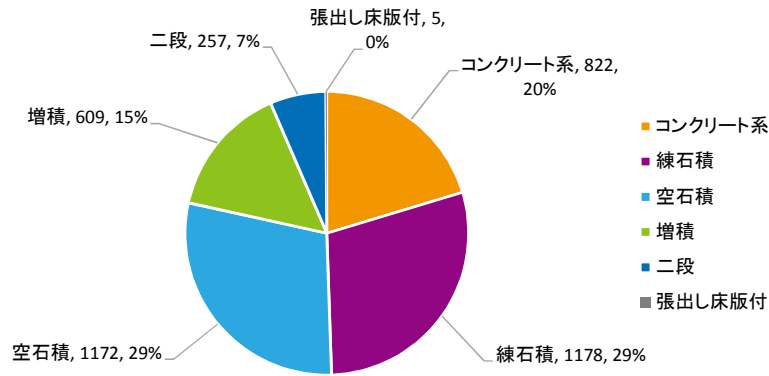
(k) 空石積擁壁の崩壊



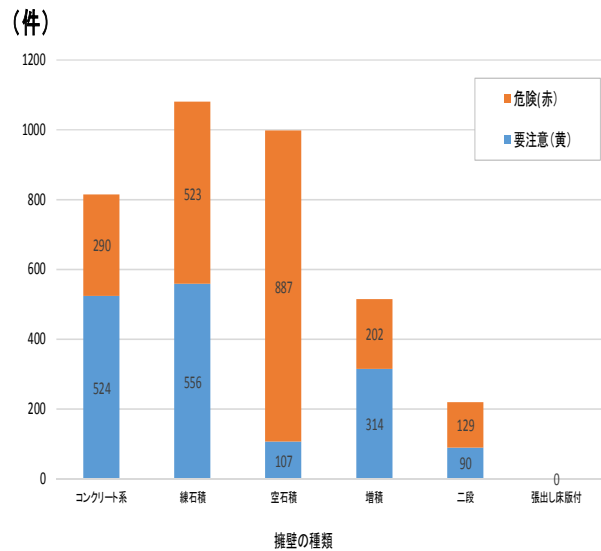
(l) 空石積擁壁の崩壊

# 被災宅地擁壁の種類

被災宅地擁壁は空石積擁壁29% (約1/3), 増積擁壁, 二段擁壁を合わせた既存不適格擁壁が全体の51% (1/2) を占めている。

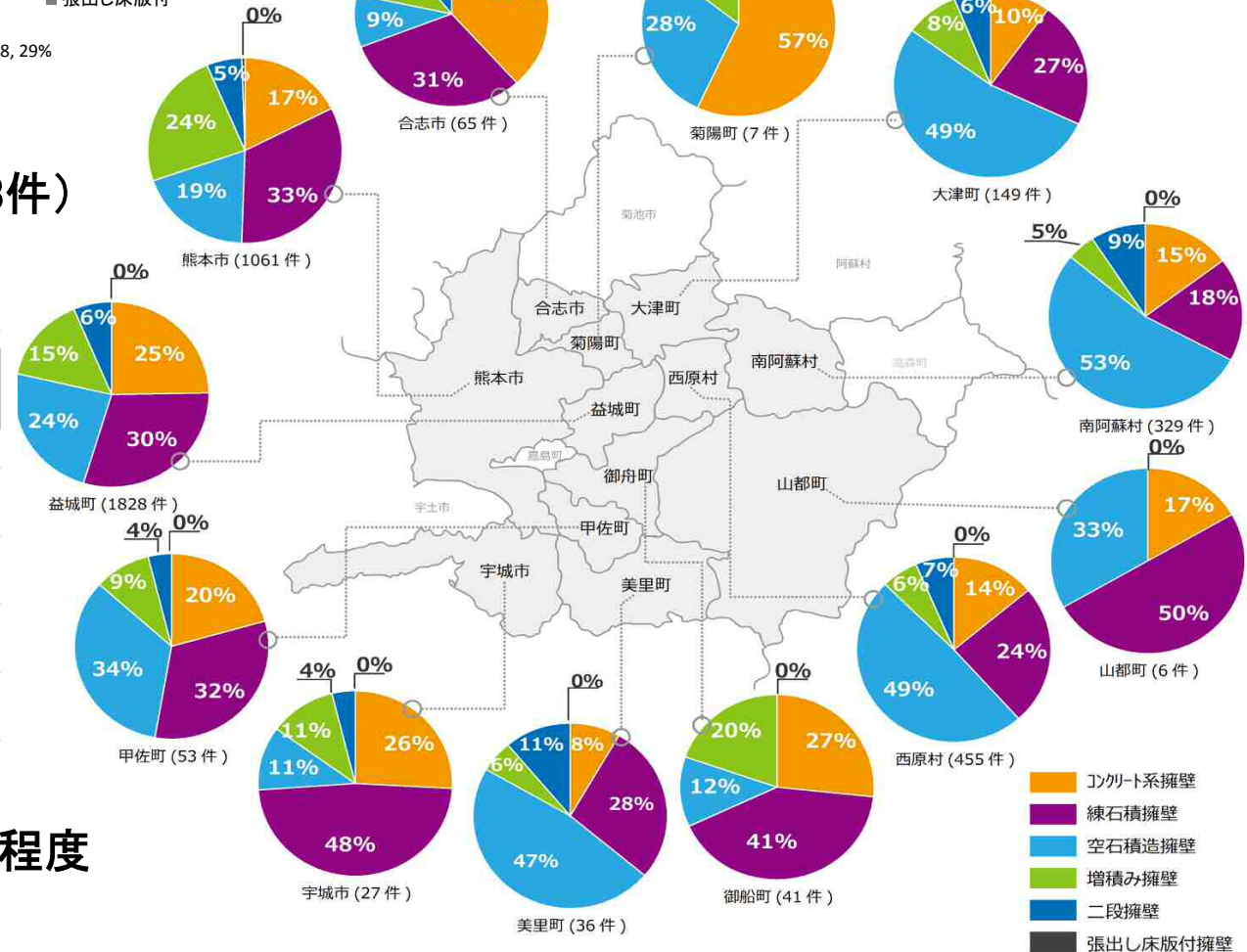


## 被災擁壁の種類 (総件数4,043件)



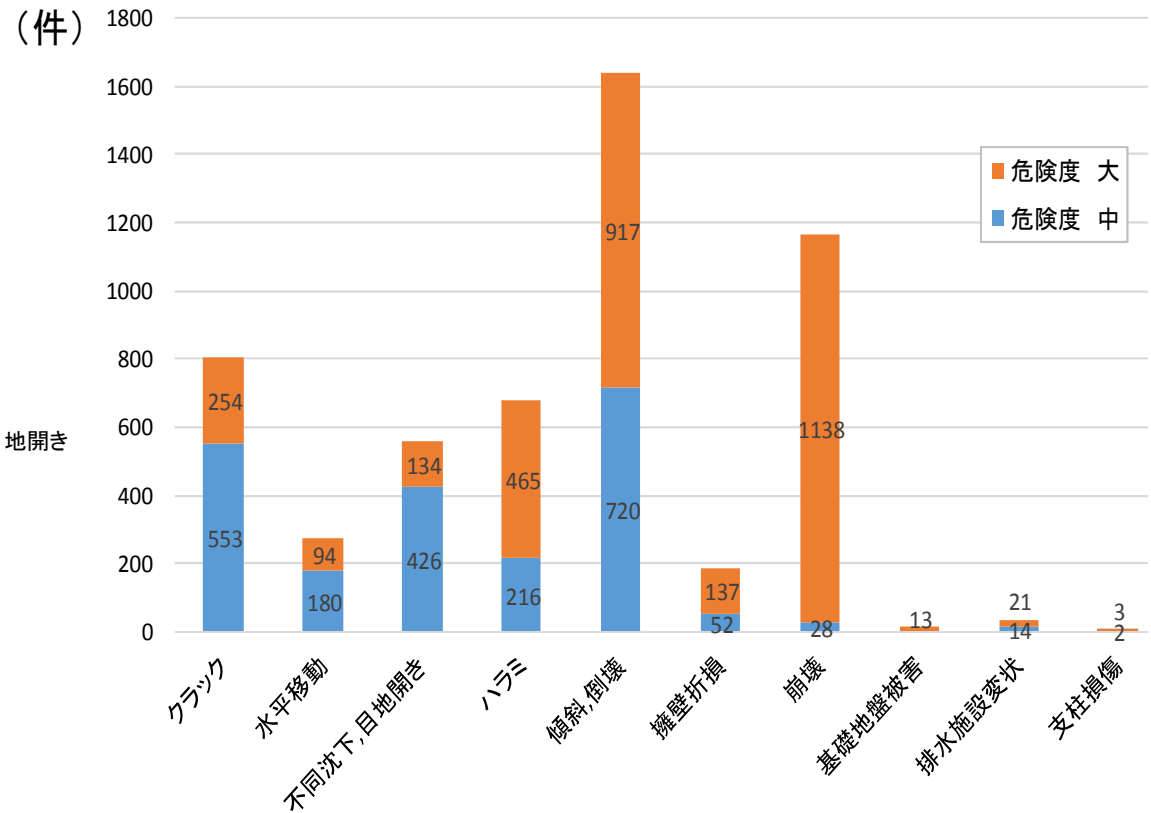
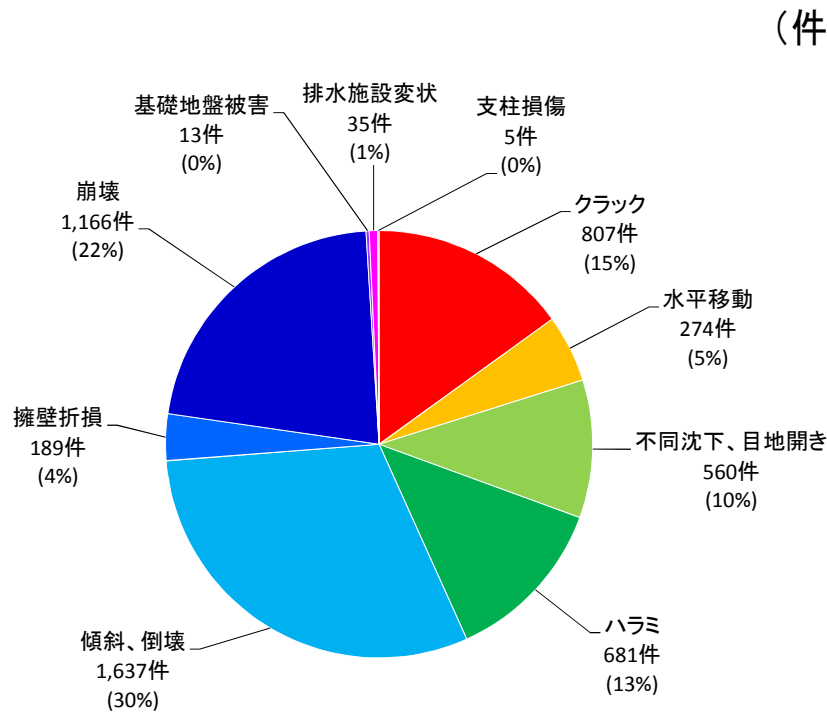
## 被災宅地擁壁の種類と被害程度

- コンクリート系
- 練石積
- 空石積
- 増積
- 二段
- 張出し床版付



- コンクリート系擁壁
- 練石積擁壁
- 空石積造擁壁
- 増積み擁壁
- 二段擁壁
- 張出し床版付擁壁

# 被災宅地擁壁の分類

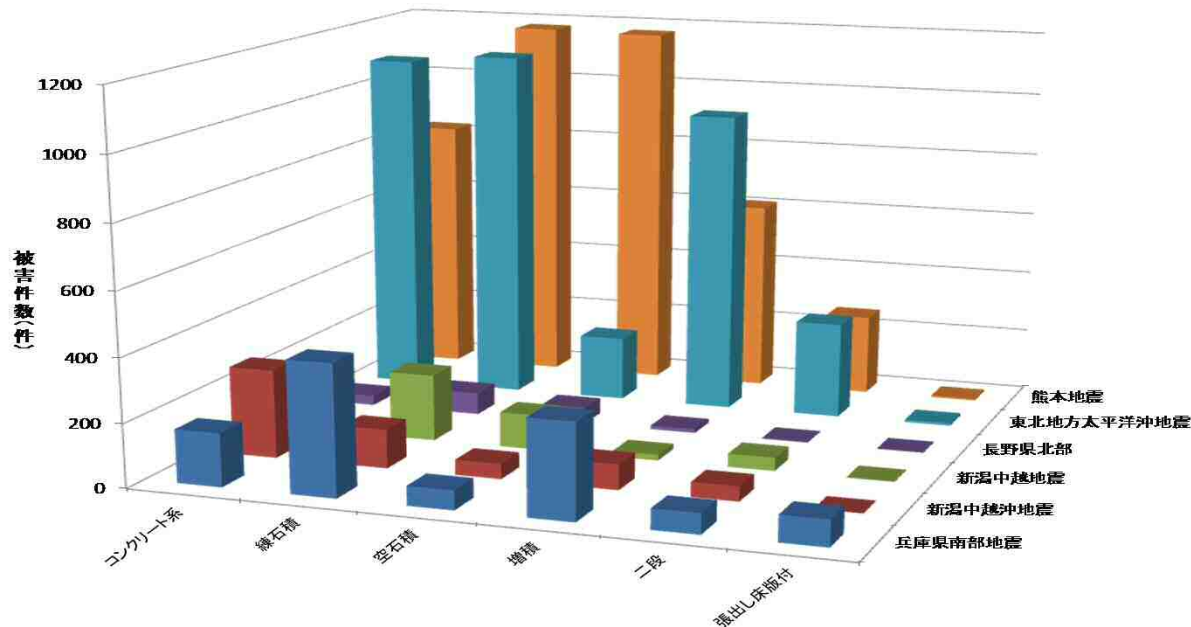
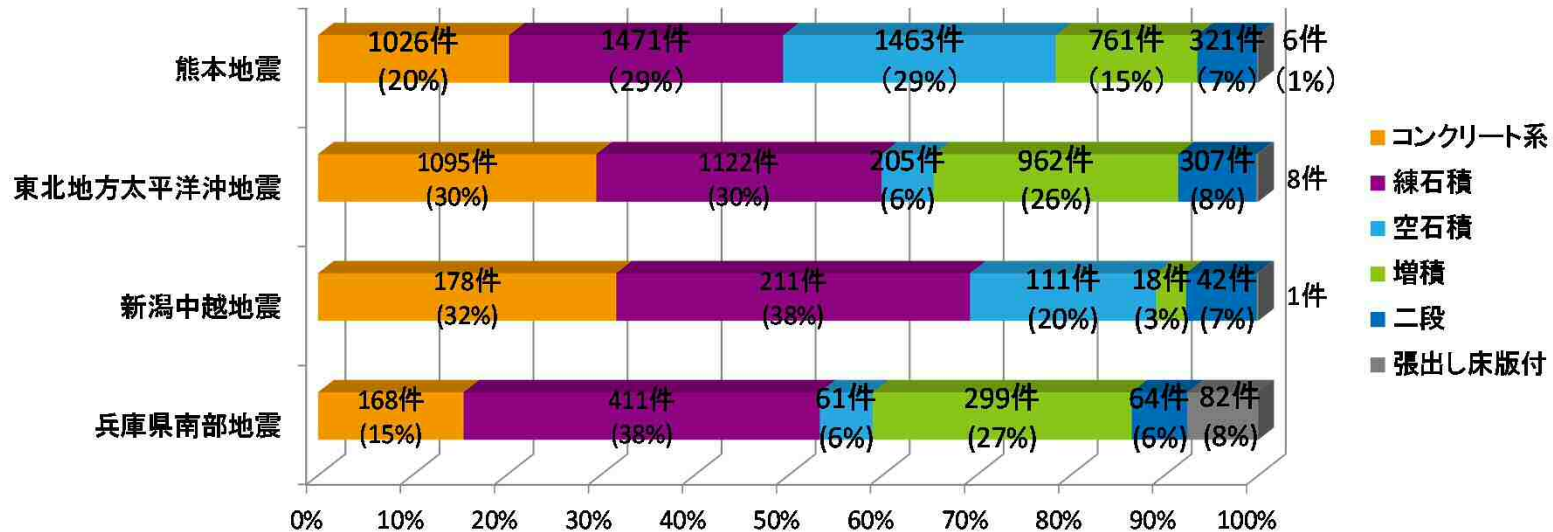


## 被災宅地擁壁の分類

## 被災宅地擁壁分類と被害程度

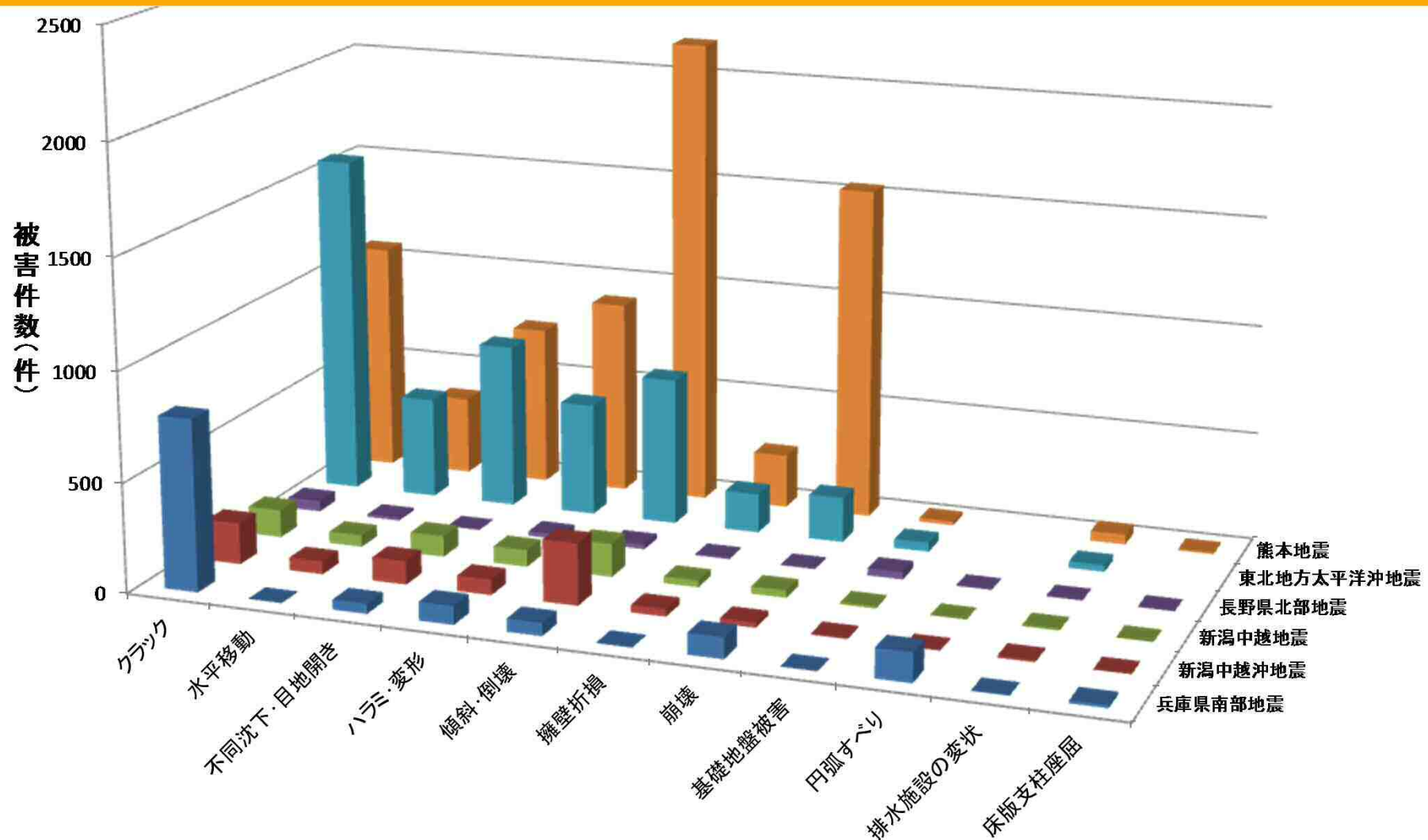
- ✓ 被災宅地擁壁の分類では、地震動が大きかったことと空石積擁壁が非常に多いことから**傾斜・倒壊及び崩壊の被害が非常に多くなっている。**

# 熊本地震と過去の地震との比較



✓ 熊本地震と過去の地震の比較では、**空石積擁壁が非常に多い。**

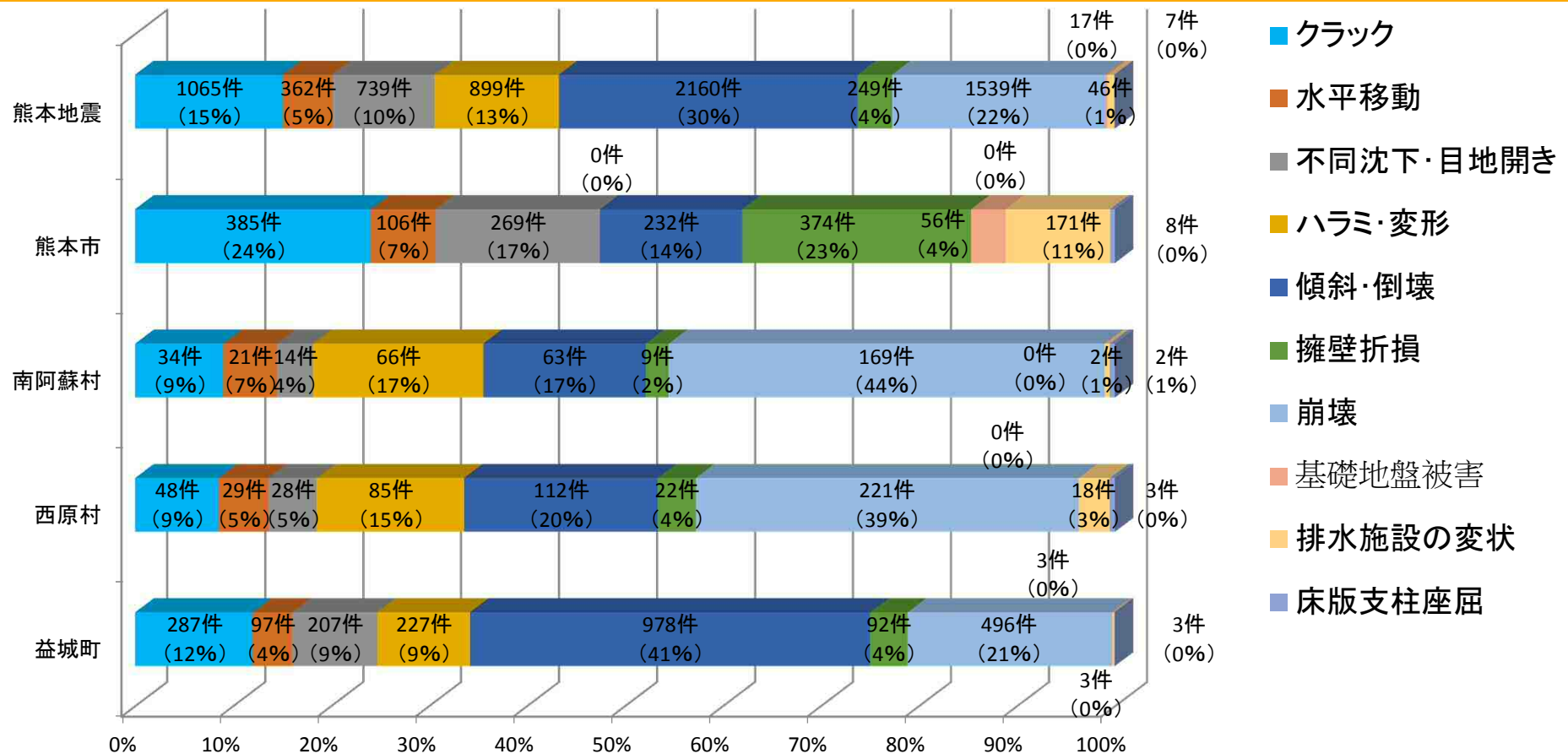
# 被災宅地擁壁の変状項目の分類



- ✓ 熊本地震の宅地擁壁の変状では、地震動が大きかったことと空石積擁壁が非常に多いことから**傾斜・倒壊及び崩壊の被害が非常に多くなっている。**

# 被災宅地擁壁の変状項目の分類

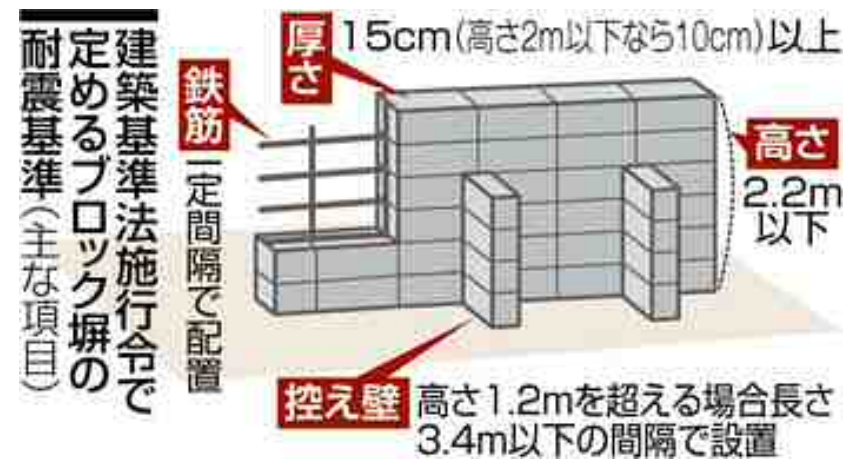
## — 熊本地震4市町村の比較 —



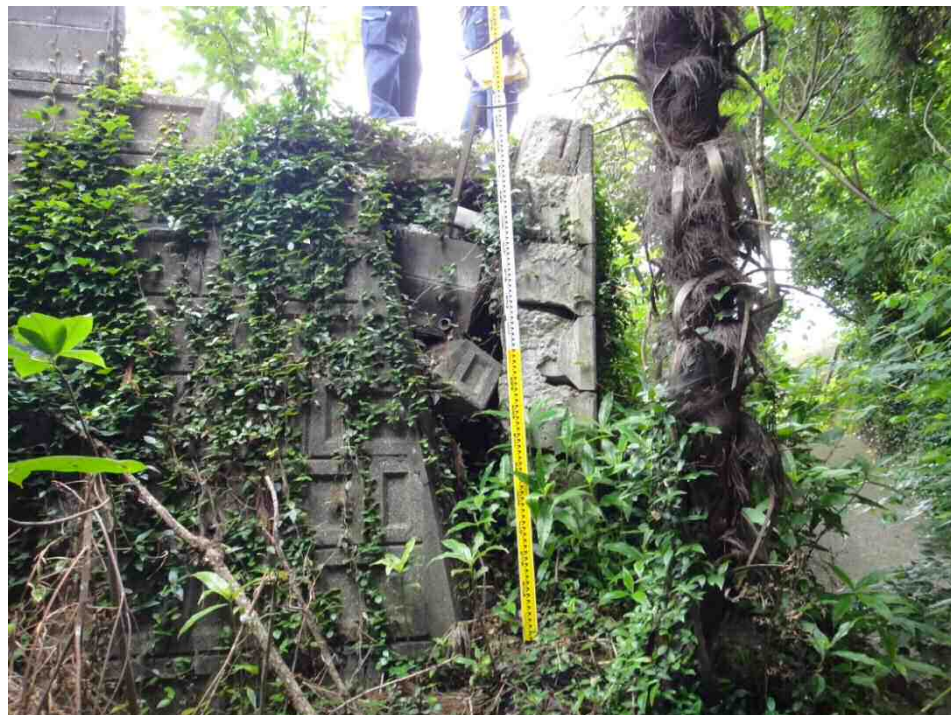
✓ 熊本市はクラック，折損，不同沈下・目地開きが多く，西原町と南阿蘇村は崩壊，傾斜・倒壊，ハラミ・変形が多く，益城町は傾斜・倒壊，崩壊が多くなっている。



# 大阪北部地震におけるブロック塀の倒壊



# 地震前の練石積擁壁の構造



- 間地石の間に隙間がある。
  - 胴込めコンクリートのみで裏込コンクリートがない。
  - 水抜き穴が無い。
  - 宅造法の断面ではなく、道路と同様な同一断面となっている。
- ⇒土圧・水圧・地震力に耐えられない。

# 熊本地震後の益城町擁壁復旧状況



- ブロック塀を擁壁として採用している。
  - 水抜き穴がない。
  - 基礎部は空石積擁壁である。
- ⇒土圧・水圧・地震力に耐えられない。  
⇒補助金を出している。




# 地域別補正係数(道路土工指針)

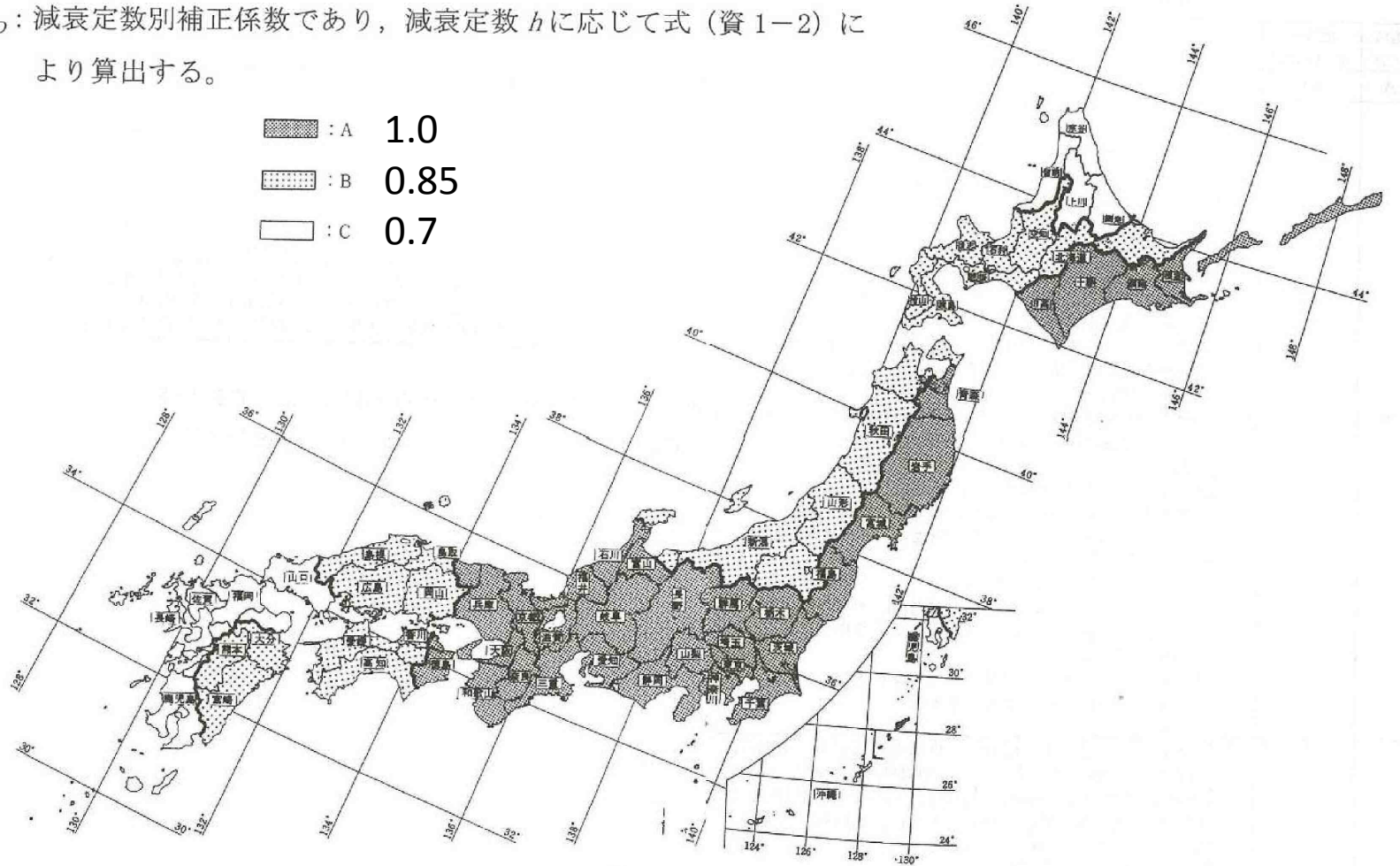
$$S = c_z c_D S_0 \dots\dots\dots (資 1-1)$$

ここに、 $S$  : レベル1地震動の加速度応答スペクトル (1 gal 単位に丸める)

$c_z$  : (3)に規定する地域別補正係数

$c_D$  : 減衰定数別補正係数であり、減衰定数  $h$  に応じて式 (資 1-2) により算出する。

-  : A 1.0
-  : B 0.85
-  : C 0.7



資図 1-4 地域区分図

# 地域別補正係数(道路橋示方書・同解説)

C	0.7	(三)	北海道のうち旭川市、留萌市、稚内市、紋別市、士別市、名寄市、上川郡(上川支庁)のうち鷹栖町、当麻町、比布町、愛別町、和寒町、剣淵町、朝日町、風連町及び下川町、中川郡(上川支庁)、増毛郡、留萌郡、苫前郡、天塩郡、宗谷郡、枝幸郡、礼文郡、利尻郡、紋別郡 山口県、福岡県、佐賀県、長崎県 熊本県のうち八代市、荒尾市、水俣市、玉名市、本渡市、山鹿市、牛深市、 <b>宇土市</b> 、飽託郡、宇土郡、玉名郡、鹿本郡、葦北郡、天草郡 大分県のうち中津市、日田市、豊後高田市、杵築市、宇佐市、西国東郡、東国東郡、速見郡、下毛郡、宇佐郡 鹿児島県
		(四)	沖縄県

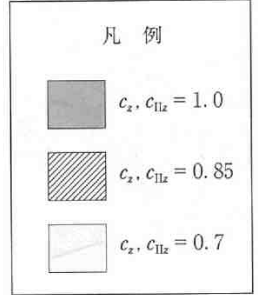
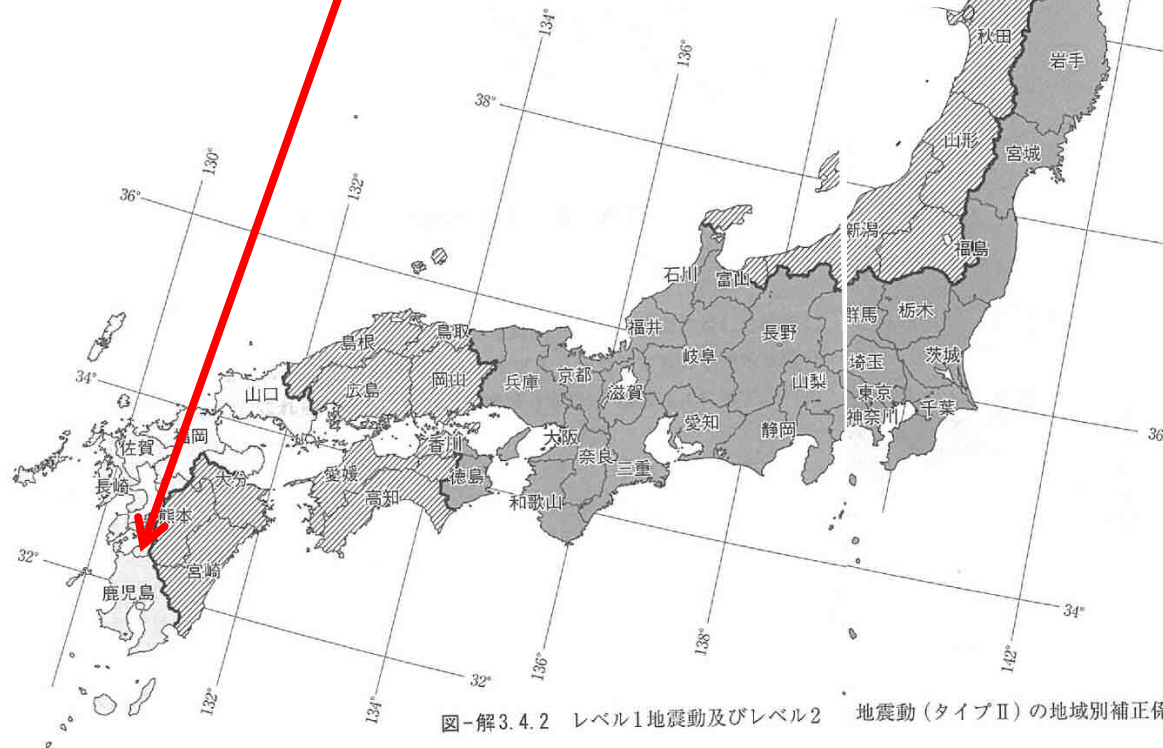
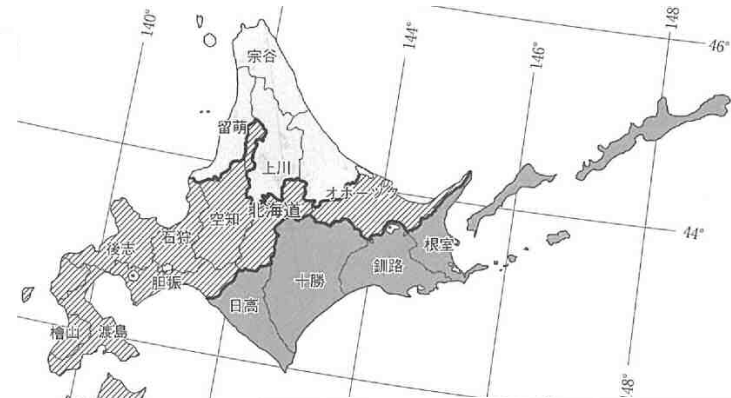
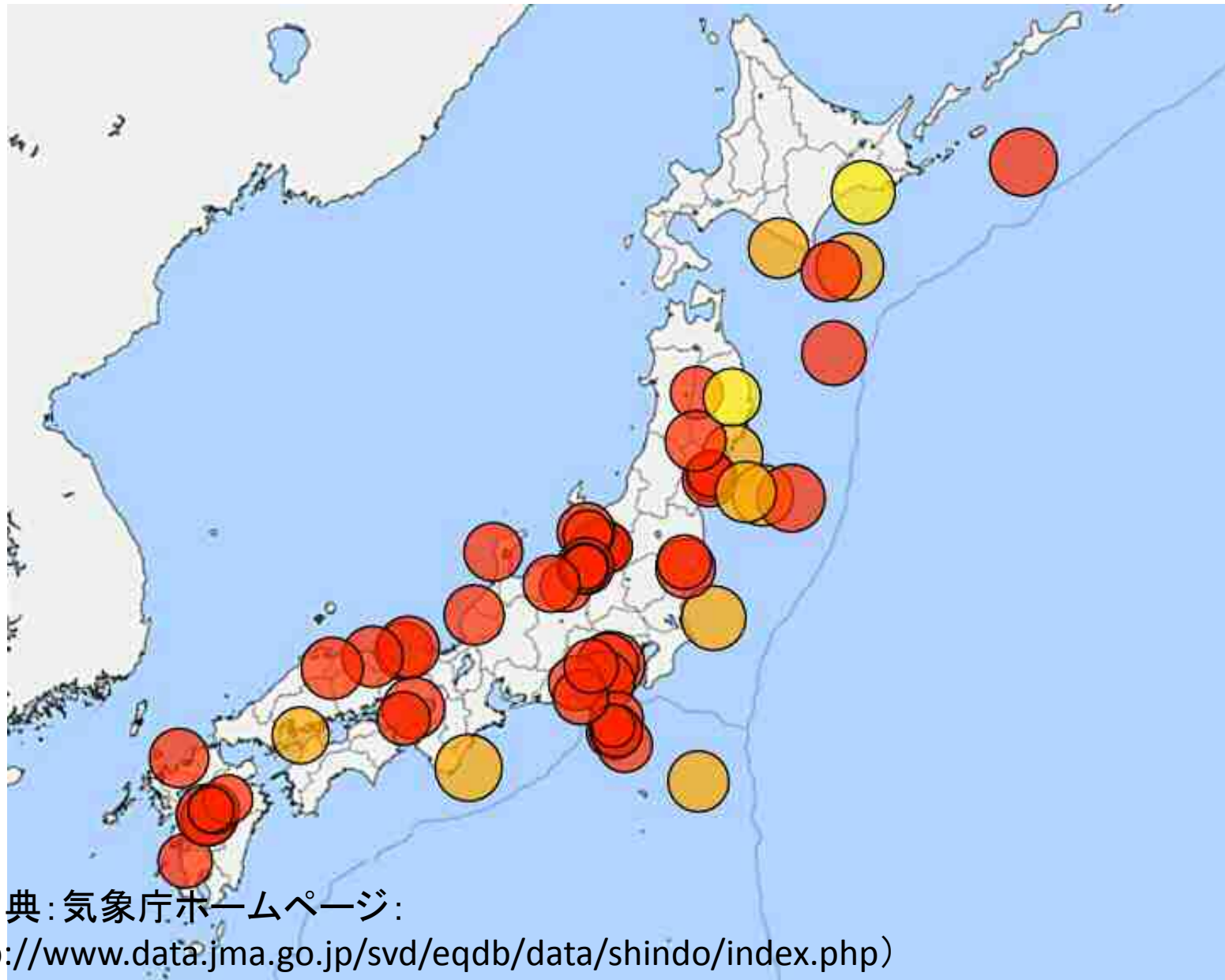


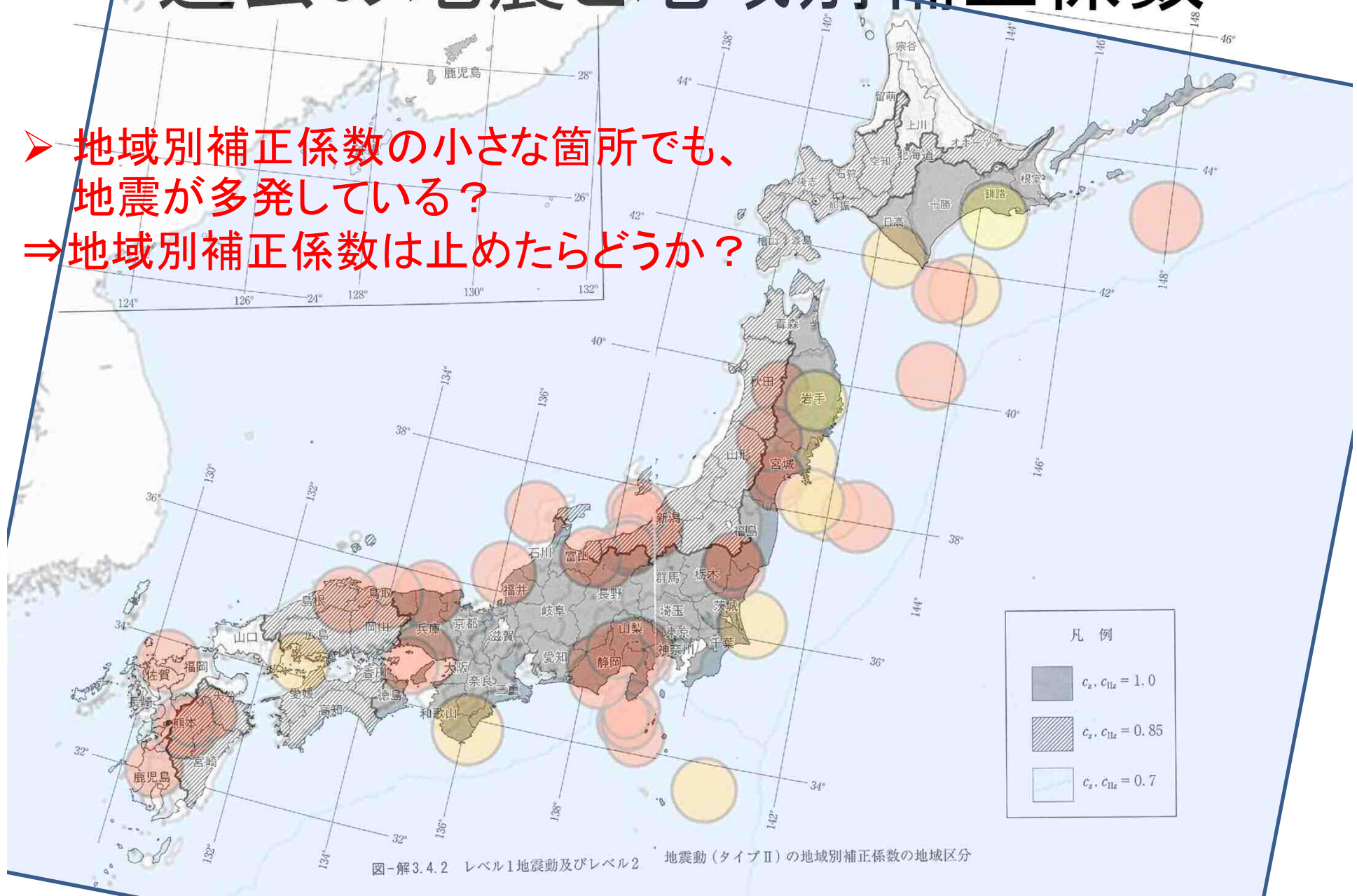
図-解3.4.2 レベル1地震動及びレベル2 地震動(タイプII)の地域別補正係数の地域区分

# 過去93年間の震度6弱以上の地震の震源地



# 過去の地震と地域別補正係数

- 地域別補正係数の小さな箇所でも、地震が多発している？
- ⇒ 地域別補正係数は止めたらどうか？



# 課題

- ✓ 熊本地震の被災擁壁は空石積擁壁29% (約1/3), 増積擁壁, 二段擁壁を合わせた既存不適格擁壁が全体の51% (1/2) を占めている。
- ✓ 被災後の擁壁が、従来よりも耐震性能がないブロック塀を擁壁として採用している。  
⇒ 擁壁の開発許可や建築確認申請を徹底すべきではないか (住民や行政の認識不足)。
- ✓ 擁壁の地域別補正係数は過去93年間の震度6弱以上の地震の震源地と比較して、小さいと箇所でも地震が多発している。宇土市は、市役所庁舎が倒壊しているが、 $c = 0.7$ である。  
⇒ 地域別補正係数で低減することは止めた方がいいのではないか。





ご清聴ありがとうございました。