土木学会 地震工学委員会 城壁の耐震診断・補強に関する研究小委員会 主催
『 城壁の耐震診断・補強に関するシンポジウム 』

2016年熊本地震における熊本城石垣の の動的FEM解析による被害要因分析

国士舘大学理工学部　橋本　隆雄
株式会社IMAGEi Consultant　磯部　有作
株式会社日測　松尾　拓
株式会社日測　石作　克也

研究の目的

- 2016年熊本地震はM$_j$6.5の前震及びM$_j$7.3の本震により熊本県全域に大きな被害をもたらした．熊本城は石垣全体の30％が崩壊や孕みの被害が生じ，石垣全体の簡易な橋本・近藤らが開発した累積示力線法を用いた設計水平震度の評価が求められている．
- 熊本地震を契機として，城郭石垣の耐震性能の診断及び補強工法の検討が望まれている．
- しかし，石垣の耐震性能の検証は，これまで石垣崩壊箇所の一部の検証は行われているが，城郭全体石垣の地盤も含めた地震動の影響についてはまだ十分に行われていない。

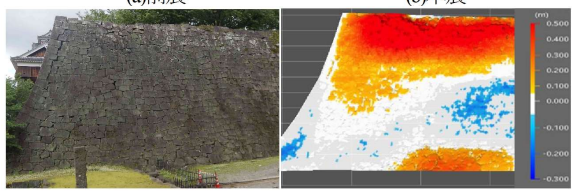
- そこで，本研究は地盤の3次元空間の推定し連続体解析であるFEMを用いて，熊本城全域で主に地震前の既存測がある35箇所を対象に，石垣で算定される応答加速度や応答速度に着目した解析により，熊本城石垣の被害要因分析及び累積示力線による安定性評価することを目的としている．

2016年熊本地震による熊本城の被害状況

■熊本地震による重要文化財北十八間櫓石垣の崩壊

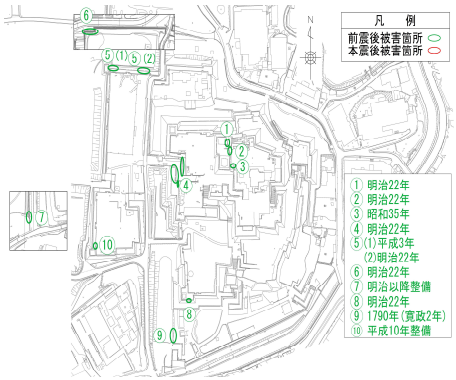
(a)前震　(b)本震

■飯田丸平櫓石垣の孕み状況

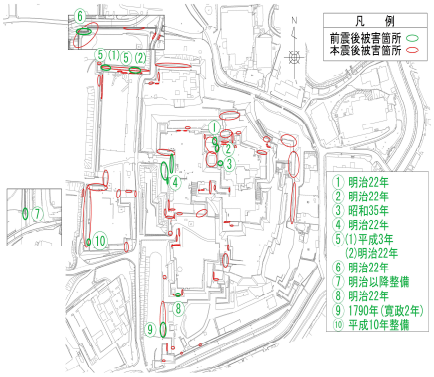


(a)地震後の状況　(b)3D レーザーを用いた孕み分析

熊本地震による石垣被害状況

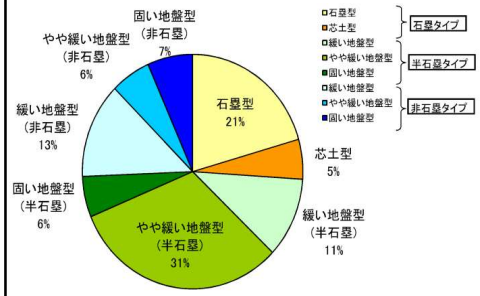


(a)前震

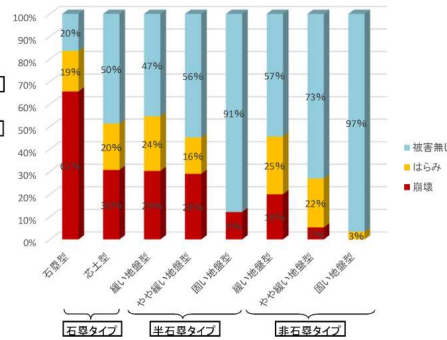


(b)前震+本震

石垣タイプ毎の被害程度の分析



■石垣タイプ毎の分類



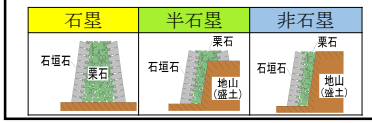
■石垣タイプ毎の被害程度の割合

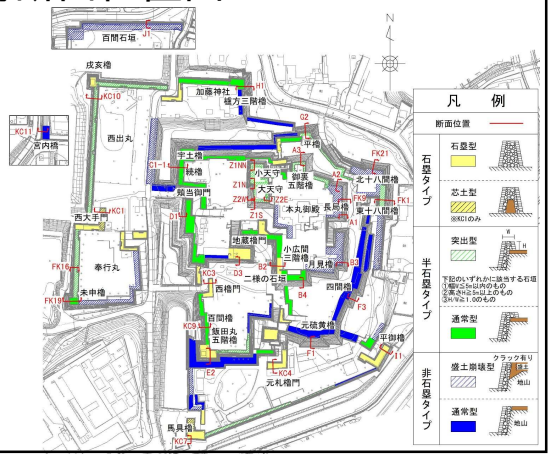
石垣タイプ及び検討断面位置図

①石垣タイプ：石垣の内部が栗石のみで構成されているもの．平地に突出して建つ櫓台や郭部の石垣など．

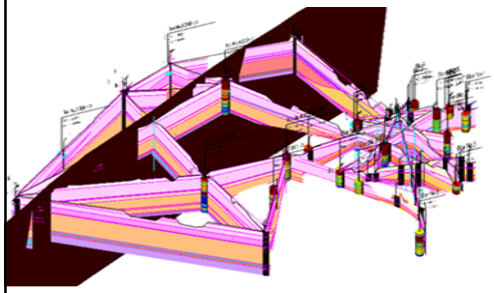
②半石垣タイプ：石垣が背面側の地面より立ち上がり，背面が栗石層と地山（盛土）で構成されているもの．

③非石垣タイプ：石垣が築石と栗石層からなり，背面側の地面より立ち上がりがなく背面が栗石層と地山のもの．

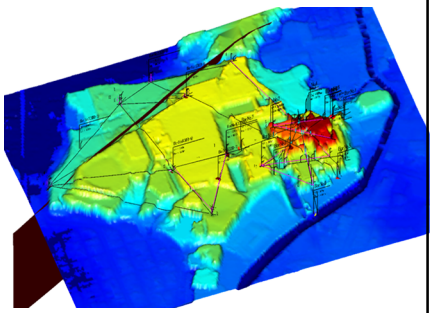




地盤の３次元空間の推定

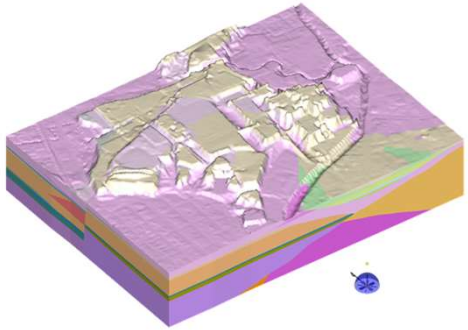


■地層分布と立田山断層の位置関係

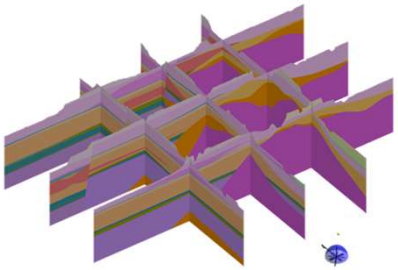


■地形面と立田山断層の位置関係

推定後の地質モデル

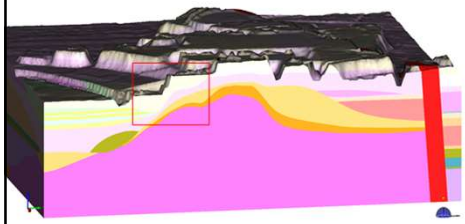


■3次元全体俯瞰図

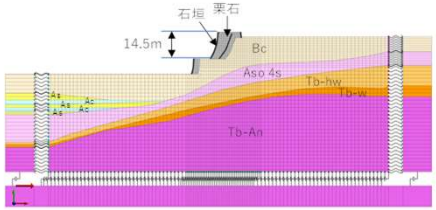


■任意断面の切取り図

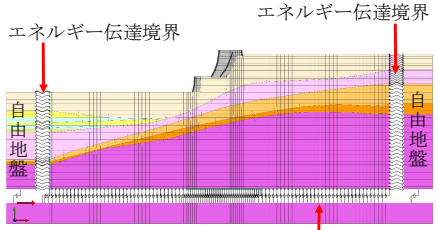
解析用モデル



■3次元地質モデルからの切取り断面

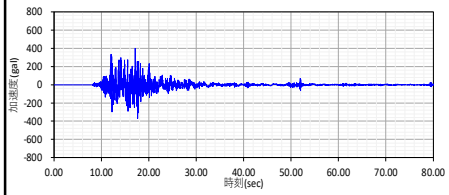


■解析メッシュ図

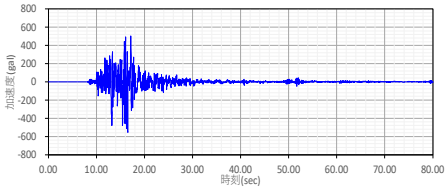


■境界条件図

入力地震動と地盤の物性値



(a)EW方向



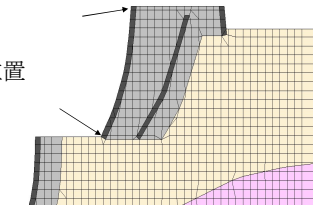
(b)NS方向

土層名	質量密度 ρ(t/m^3)	N値	N値換算のせん断波速 Vs(m/s)	PS検層 Vs(m/s)	有効鉛直応力 σ_v'(kPa)	平均有効拘束圧 σ_m'(kPa)	せん断弾性係数 G_0(kPa)
石材	2.00		300	300			180000
栗石	2.00		300	300			180000
Bc	1.70	–	–	100.0	123.41	82.27	17000
As	1.74	7	149.3		287.79	191.86	38800
Ac	1.54	4	151.8		350.66	233.77	35500
m-tr	2.04	38	269.0		393.58	262.38	147600
Aso-4s	1.70	22	224.2	425.0	323.53	215.69	307100
Tb-hw	1.70	17	–	370.0	451.95	301.30	232700
Tb-An/Tb-w	2.10	50	–	540.0	890.94	593.96	612400

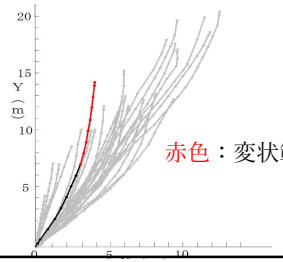
被害状況との比較分析

天端出力位置

底面出力位置

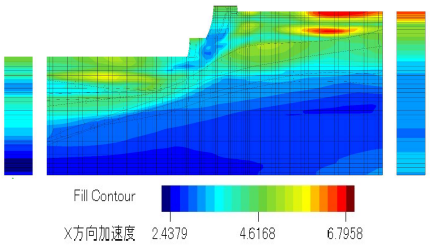


■応答結果出力位置図

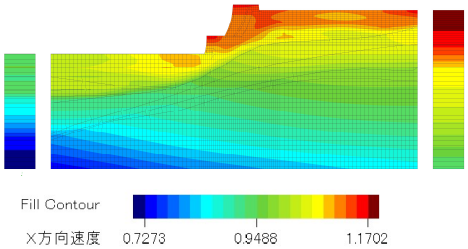


赤色：変状範囲

解析結果

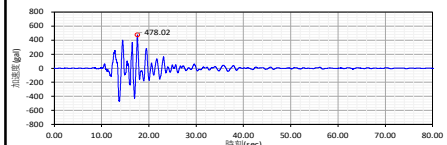


■最大水平加速度分布図

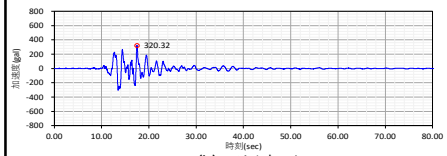


■最大水平速度分布図

石垣の加速度・速度の応答値



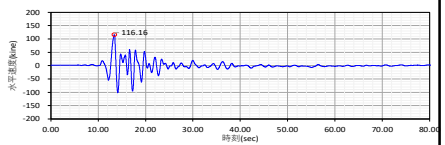
(a) 石垣天端



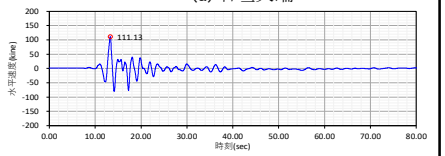
(b) 石垣底面

天端最大加速度（gal）	478.0
底面最大加速度（gal）	320.3
天端最大加速度/底面最大加速度	1.49

■石垣の速度の応答値



(a) 石垣天端

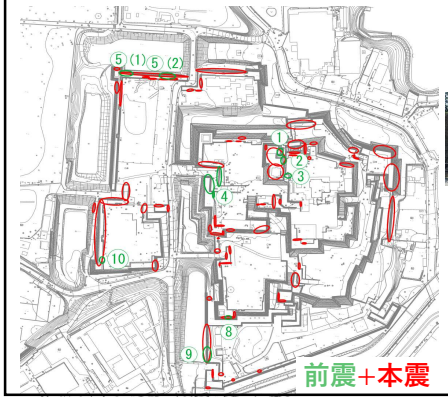


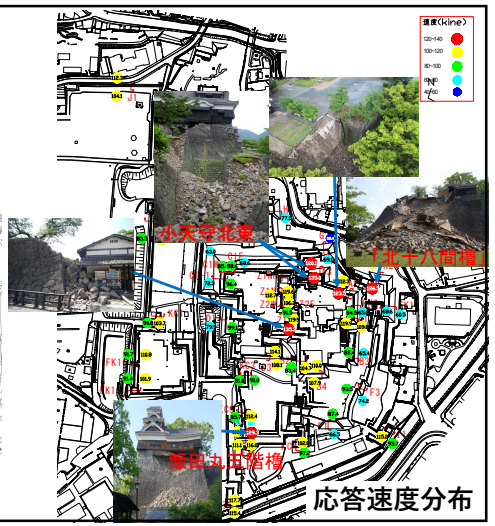
(b) 石垣底面

天端最大速度（kine）	116.2
底面最大速度（kine）	111.1
天端最大速度/底面最大速度	1.05

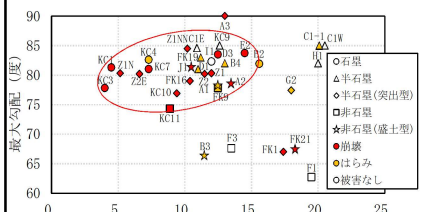
■石垣の速度の応答値

石垣における応答速度分布結果

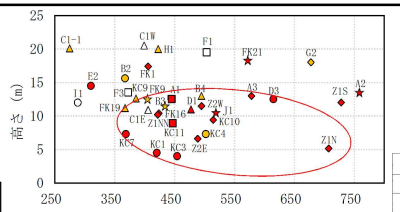




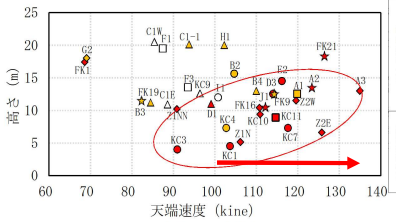
全石垣の被害分析結果(1)



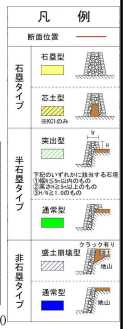
(a)最大勾配と高さ



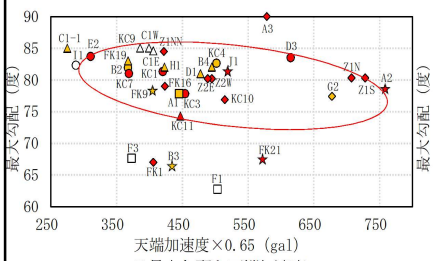
(b)高さと天端加速度



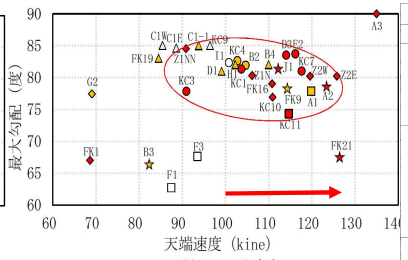
(c)高さと天端速度



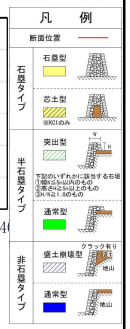
全石垣の被害分析結果(2)



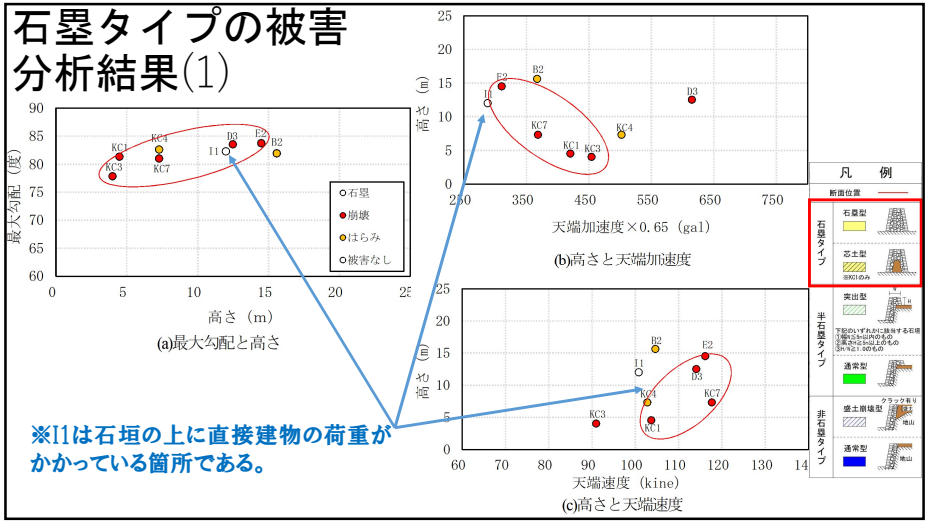
(d)最大勾配と天端加速度



(e)天端幅と天端速度

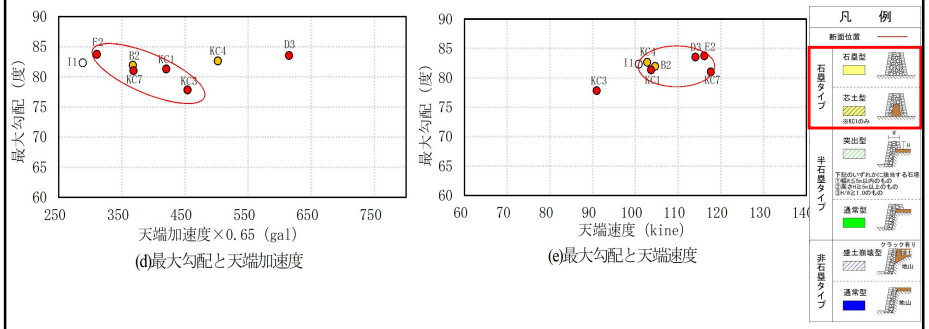


石垣タイプの被害分析結果(1)

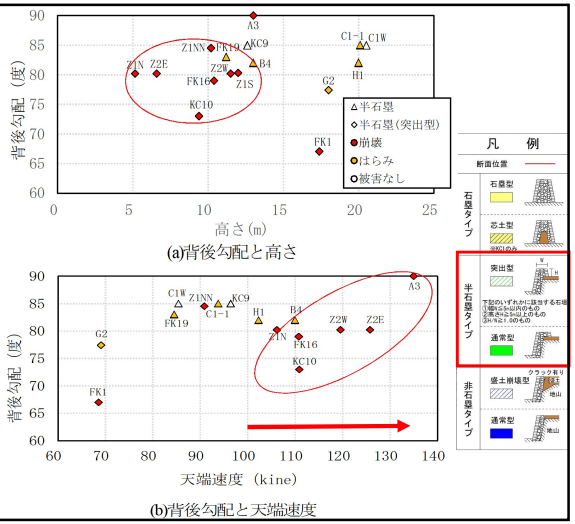


※I1は石垣の上に直接建物の荷重がかかっている箇所である。

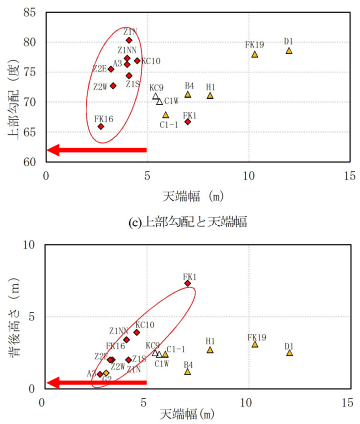
石垣タイプの被害分析結果(2)

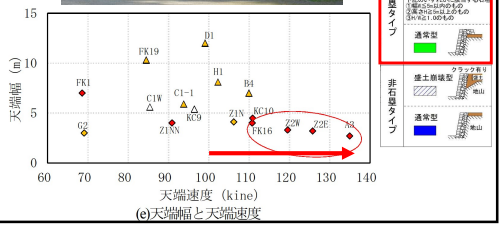


半石垣タイプの被害分析結果(1)

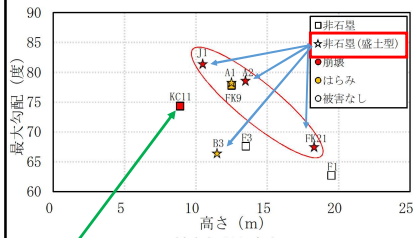


半石垣タイプの被害分析結果(2)



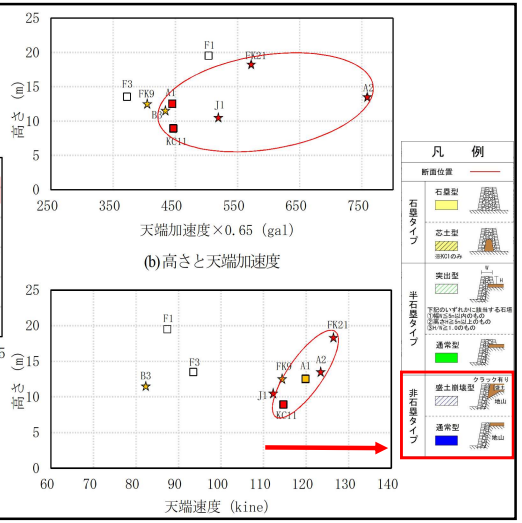


非石垣タイプの被害分析結果(1)



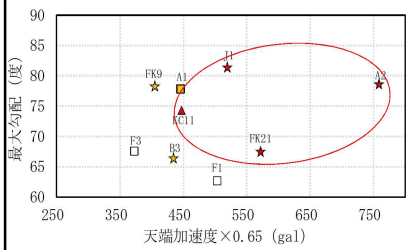
(a)最大勾配と高さ

※KC11は宮内橋の被害で断層上にの石垣がある箇所である。

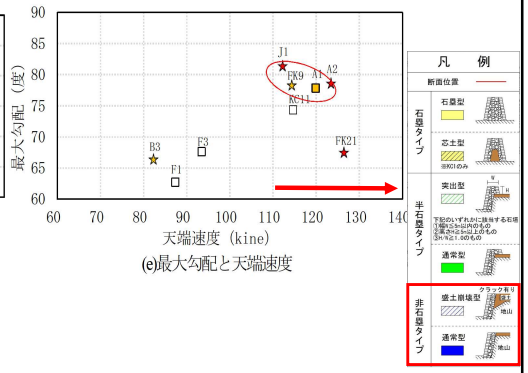


(b)高さと天端加速度

非石垣タイプの被害分析結果(2)

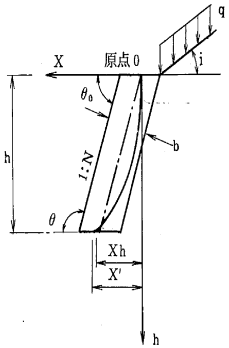


(d)最大勾配と天端加速度

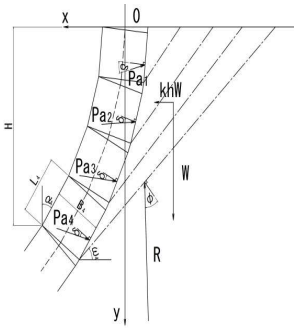


(e)最大勾配と天端速度

熊本城石垣における累積示力線法を用いた耐震性能の検証



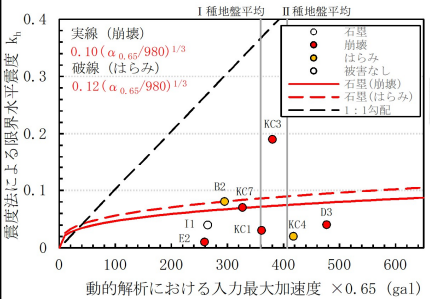
■示力線法の計算方法



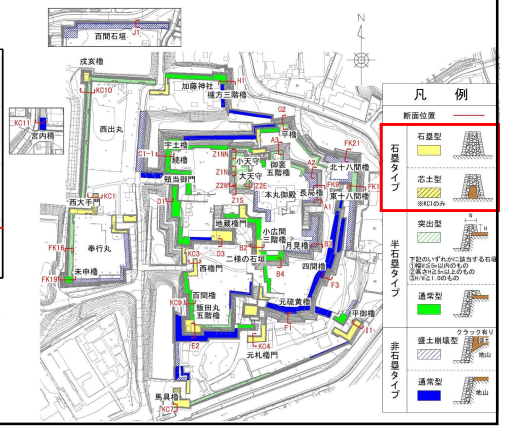
■累積示力線法の計算方法

- ➢1段ごとに積み勾配が異なる積み石に作用する土圧を試行くさび法により算定し，石垣の築石に加わる土圧と石垣の自重による合力の軌跡が下の築石に作用する累積示力線法を開発した．
- ➢35箇所を対象に，累積示力線法による限界水平震度とFEM解析による地盤加速度の関係及び被害状況（崩壊・孕み）から石垣タイプの耐震性能の検証を行った．

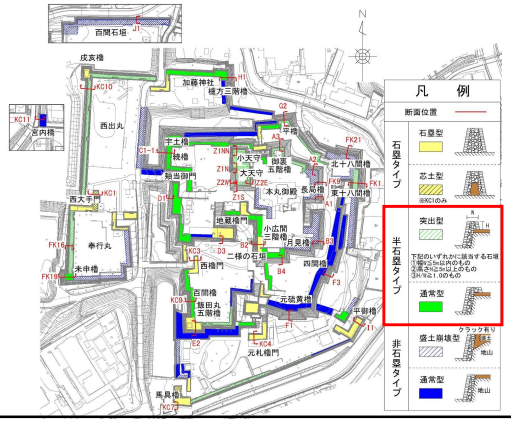
石垣タイプのk_hとgalの関係

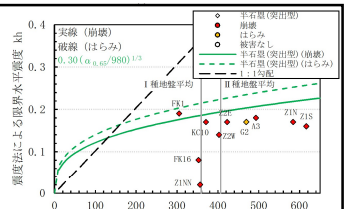


(a)石垣タイプ

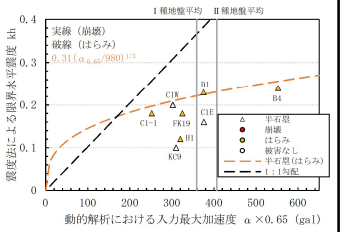


半石垣タイプのk_hとgalの関係



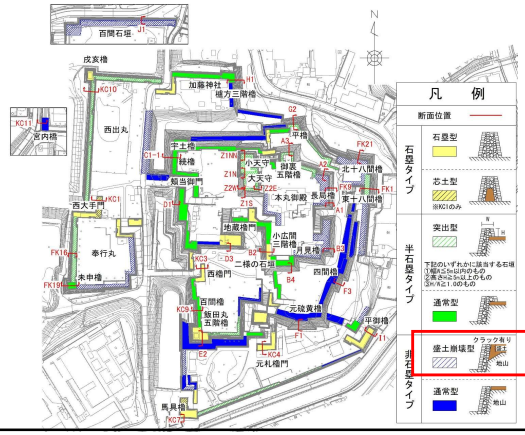


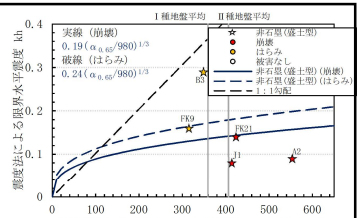
(b)半石垣タイプ突出型



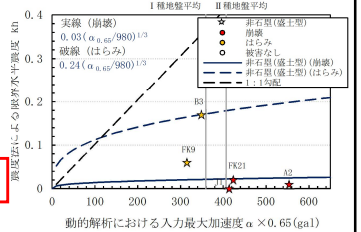
(c)半石垣タイプ通常型

非石垣タイプ（盛土型）のk_hとgalの関係



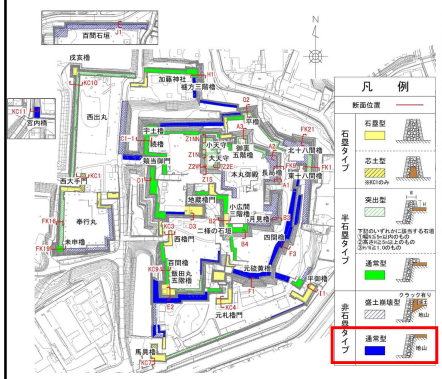


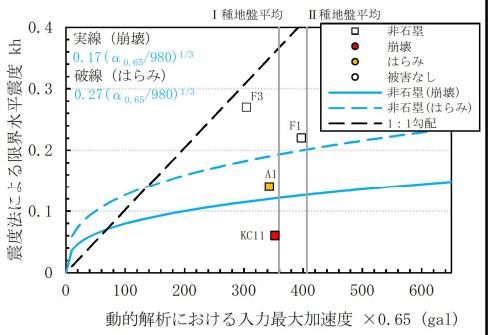
(d)非石垣タイプ盛土型（φ=45°）



(e)非石垣タイプ盛土型（φ=35°）

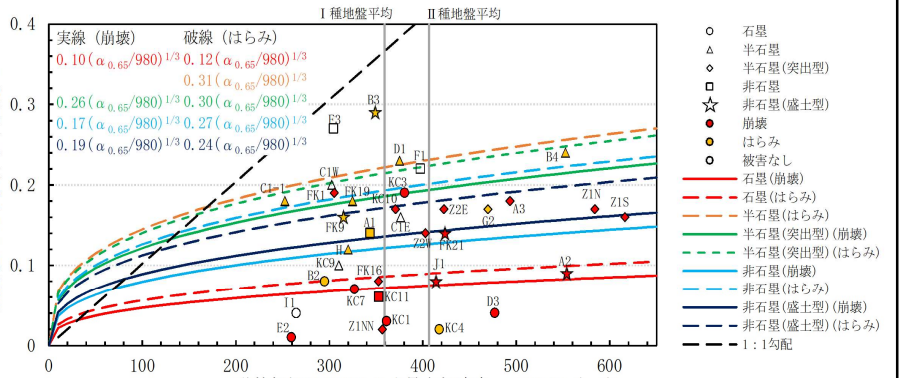
非石垣タイプ（通常型）のk_hとgalの関係





(f)非石垣タイプ通常型

熊本城全域のk_hとgalの関係



(g)全石垣タイプ

全体のまとめ

(1)熊本城石垣の被害要因分析

(a)石垣構造の被害要因としては，石塁，半石塁の突出型，非石塁の盛土型の崩壊が多い．

(b)全石垣の被害要因としては，石垣高さよりも上部勾配と天端速度の影響を受けている．

(c)半石塁の被害要因としては，突出型の構造石垣高さよりも背後勾配と天端速度の影響を受けている．

(2)熊本城石垣における累積示力線法を用いた耐震性能の検証

(a)石垣タイプの耐震性能は，石塁＜非石塁タイプ盛土型＜半石塁突出型＜半石塁通常型＜非石塁通常型となった．

(b)累積示力線法を用いた熊本地震で検証では，大規模地震動の設計水平震度k_h＝0.20程度が妥当と考えられる．

30