

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

国士舘大学 正会員 ○橋本 隆雄

IMAGEi Consultant 正会員 磯部 有作

日測 非会員 松尾 拓 石作 克也

1. 研究の目的

2016年熊本地震はMj6.5の前震及びMj7.3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・近藤らが開発した図-1に示す累積示力線法¹⁾を用いた設計水平震度の評価が求められている。筆者らは、これまでに熊本城石垣を対象とした3次元地盤モデルの構築と2次元FEM地震応答解析²⁾を行っている。そこで、本研究では、図-2に示す熊本城全域で主に地震前の既存測量がある32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目的としている。

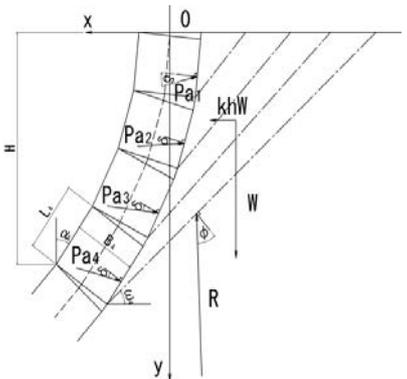


図-1 累積示力線法の計算方法

2. 累積示力線による安定性評価

示力線法は、同じ勾配で積み上げられた擁壁を対象とし、天端に向かうに伴い勾配が急になる寺・宮勾配などで築造される石垣の計算することができない。そこで、各石垣タイプの断面において図-1に示す累積示力線法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、土圧と石垣の自重による合力の軌跡から限界水平震度を求めた。

3. 解析結果

石垣各タイプの累積示力線法による限界水平震度(k_h)と地盤加速度(ga_1)の関係を被害状況(崩壊・孕み)から評価した結果、図-3に示す耐震性能となり、以下のことが明らかとなった。

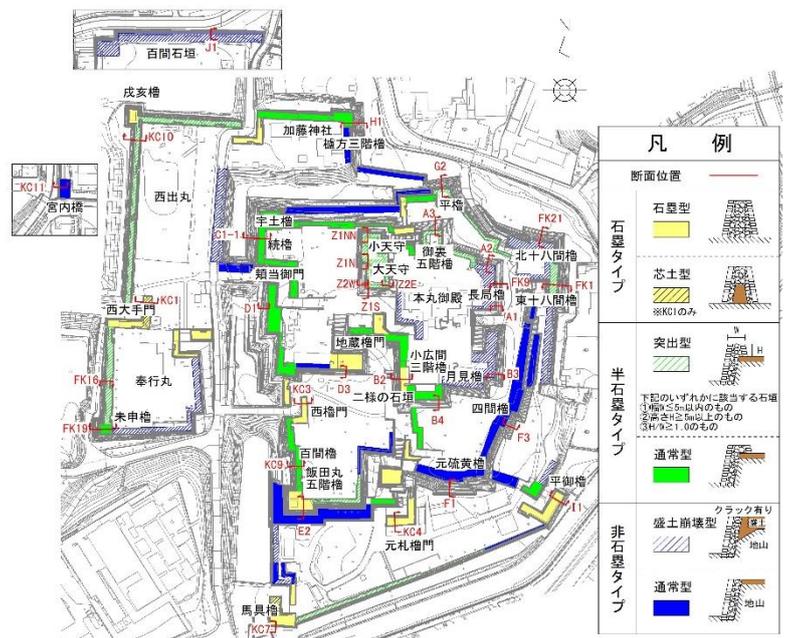


図-2 全石垣の断面位置

- (a) 石垣タイプ石垣型：ほとんど限界水平震度 $k_h \leq 0.1$ で崩壊している。
- (b) 半石垣タイプ突出型：平櫓 (G2) の孕みを除き、ほとんど限界水平震度 $kh \leq 0.2$ で崩壊している。
- (c) 半石垣タイプ通常型：限界水平震度 $k_h \leq 0.25$ でも孕みで、崩壊しているものは無い。
- (d) 非石垣タイプ盛土型 ($\phi = 45^\circ$)：限界水平震度 $k_h \leq 0.15$ で崩壊している。その他は孕みを生じている。
- (e) 非石垣タイプ盛土型 ($\phi = 35^\circ$)：背後地盤が盛土なため、内部摩擦角 ϕ を低減し $\phi = 35^\circ$ とした。その結果、最も大きな限界水平震度の孕みを生じている月見櫓 (B3) が $k_h \leq 0.20$ となった。
- (f) 非石垣タイプ通常型：宮内橋 (KC11) は過去の修復箇所で勾配が急なため $kh=0.06$ で崩壊している。その他は、崩壊していない。
- (g) 全石垣タイプ：石垣タイプでの累積示力線による安定性評価では、石垣<非石垣タイプ盛土型<半石垣突出型<半石垣通常型<非石垣通常型の順となった。

4. まとめ

- (a) 石垣タイプの耐震性能は、石垣<非石垣タイプ盛土型<半石垣突出型<半石垣通常型<非石垣通常型となった。
- (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。

キーワード 石垣, 熊本城, 城壁, 示力線, 安定解析, FEM 解析

連絡先 〒154-8515 東京都世田谷区世田谷 4-28-1 国士舘大学理工学部理工学科 TEL03-5481-3251

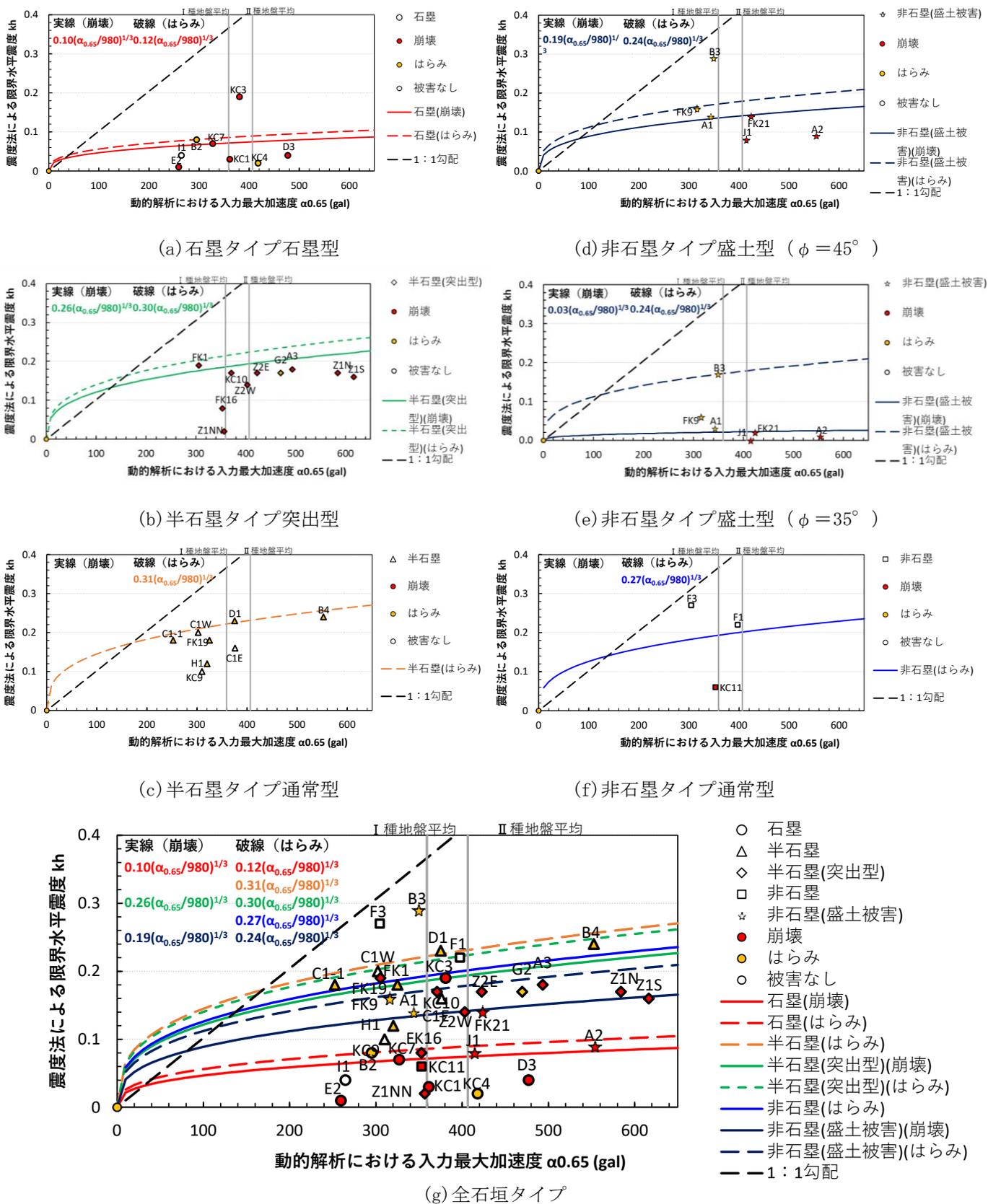


図-3 熊本城全域の累積示力線法による限界水平震度 (k_n) と地盤加速度 (gal) の関係

参考文献

- 1) 橋本 隆雄, 近藤 和仁, 石作 克也: 熊本城石垣の示力線による安定性照査の適用性について, 第73回年次学術講演会, 土木学会, pp. I-581, 2018.9.
- 2) 橋本 隆雄, 磯部 有作, 松尾 拓, 石作 克也: 熊本城内の石垣を対象とした3次元地盤モデルの構築と2次元地震応答解析, 国土館大学理工学部紀要 13, pp. 113-119, 2021.3.