

剛体ばねモデルを用いた金沢城址石垣の地震時安定解析

金沢大学 学生		○米倉 良介
金沢大学工学部	正会員	池本 敏和
金沢大学工学部	正会員	宮島 昌克
金沢大学工学部	フェロー	北浦 勝

1. はじめに

石垣は美観、耐久性に優れ、さらに環境にやさしいという利点がある。しかし、石垣は複雑な構造のため、力の伝播を解明することが困難で、科学的な設計方法が確立されていない。そのため、今日まで石工（いしく）と呼ばれる職人により、先祖から伝わる方法をもとに施工や改修が行われてきた。しかし、継承者不足により既存の石垣の中には十分なメンテナンスが行われず、老朽化による崩壊の危険性が高くなっているものが存在している。また、石垣の外部からは内部の様子を見ることができないため、危険であるか安全であるのかという判断も行えないのが現状である。このようなことから、石垣の特性を科学的に解明することが、既存の石垣の強度診断や補強方法を検討するために必要である。

そこで、本研究では築後 400 年を経過した金沢城址の石垣を対象に、モデル化を行い、剛体ばねモデルを用いて、水平力が作用した場合の石垣の挙動を解析する。

2. 解析手法

2.1 剛体ばねモデル

解析には、剛体ばねモデル（川井モデル）を用いる。このモデルでは要素自身を剛体と仮定し、各要素境界面上にばねを設ける。要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いて、エネルギーが評価される。その結果、破壊線が得られ、不連続体に対する解析が可能となる。変位パラメーターは重心に設定し、自由度は 3 である。解くべき方程式は、

$$F = Ku$$

となる。ここで、 F は荷重項、 K は剛性マトリックス、 u は要素重心の剛体変位である。また、 τ はせん断力、 σ は垂直応力である。

2.2 破壊基準

せん断に対する降伏条件として、図 1 のようなモール・クーロンの条件を用いる。このとき、引っ張り領域については考えず、圧縮方向のみを考える。また、せん断応力に対しては、すべての要素間において降伏条件をチェックする。材料定数の異なる境界では、境界から重心までの距離で重みをつけた材料定数の平均値を用い、変位の荷重増分解析を行う。

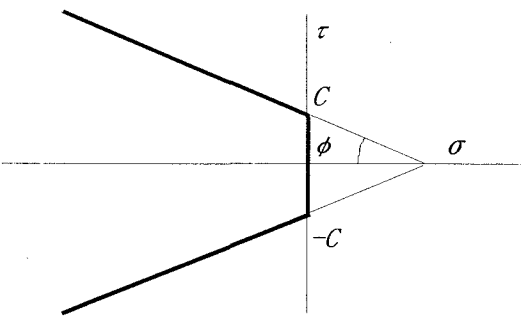


図 1 モール・クーロンの条件

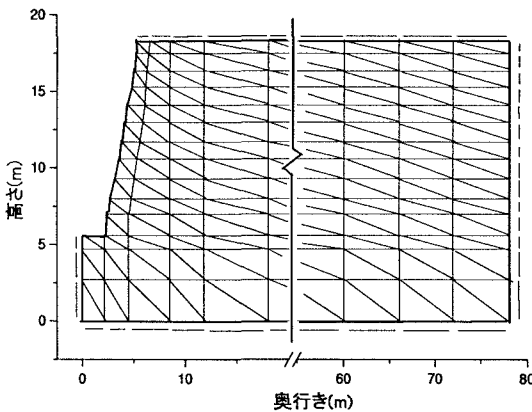


図 2 解析モデル

3. 解析モデル

本解析では、金沢城址石垣のモデルとして図 2 のモデルの静的解析を行う。総節点数は 229、要素数は 415、ばねの数は 614 である。石垣の高さは約 12m で、基盤の高さは 5.5m である。材料定数は表 1、材料の区分

は図 3 のようになっている。

図中には、三角形要素の他に、線要素が存在する。本解析法では、有限要素法のように各接点に荷重を作用させることができないことから、このような線要素を考え、この要素に荷重を載荷する。また、モデル最下部の線要素は境界条件のために必要である。

表 1 材料定数

番号	地盤分類	単位体積重量 (kN/m^3)	ヤング率 (kN/m^2)	ポワソン比	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	粘着力 C (kN/m^2)
1	石垣	24.5	1.96×10^6	0.3	0.3	294
2	盛り土	19.6	1.48×10^5	0.45	0.45	0
3	粘性土層	19.6	2.37×10^5	0.49	0.49	0
4	石垣裏込め材	19.6	9.39×10^5	0.47	0.47	0
5	上部礫層	19.6	4.19×10^5	0.48	0.48	0
6	砂質土層	19.6	4.19×10^5	0.48	0.48	0
7	下部礫層	20.6	8.04×10^5	0.48	0.48	0

4. 解析結果

解析条件としては、裏込め材の方向から水平方向の荷重を想定し、静的な地震荷重を考えた。図 4 は水平震度に換算すると 0.2 の荷重を加えた時の石垣部分 1、2、3 の荷重増分率と変位量の関係である。これから、下部より上部の方が、また基本的には、水平より鉛直の方が変位の大きいことがわかる。また図 5 から、すべりの発生している要素は裏込め材の部分に集中していることがわかる。すべり線が発達しているものの、崩壊には至っていない。

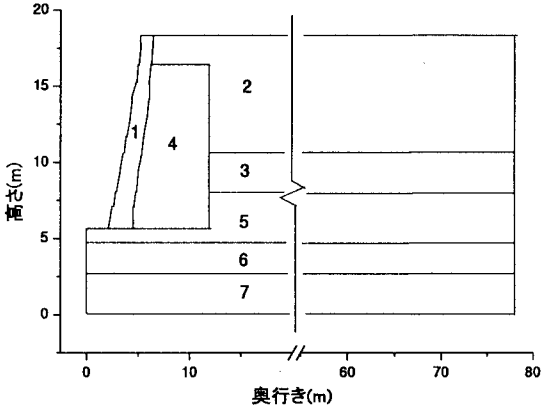


図 3 材料区分

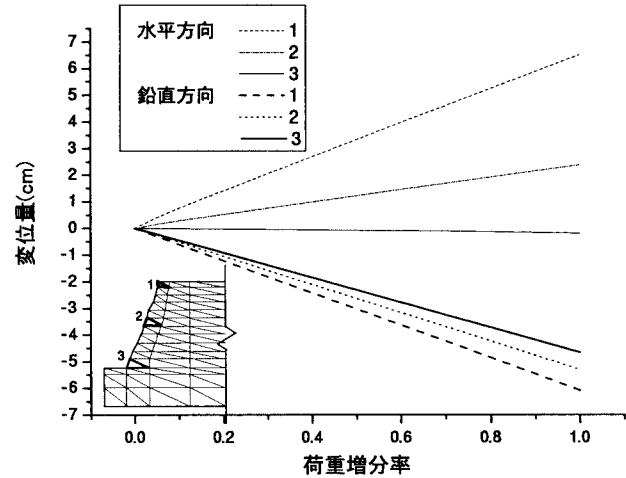


図 4 荷重増分率と変位量の関係

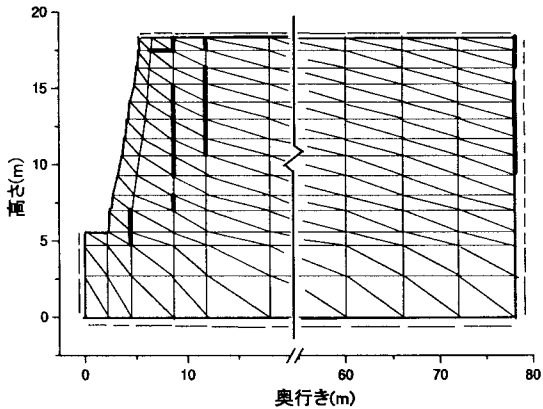


図 5 すべり線

5. まとめ

本研究では、静的な地震荷重による、石垣の地震時の安定性について解析を行った。解析結果によると、本石垣のモデルは水平震度に換算すると 0.2 の荷重では崩壊しないことがわかった。しかしながら、裏込め材の部分にすべりが多く生じているので、この部分の対策が必要なこともわかる。今後は大きい地震動に対する安定性の評価、さらには動的解析を行う予定である。

参考文献：1)川井忠彦、竹内則雄：離散化極限解析プログラミング、培風館、1990。