

剛体ばねモデルを用いた歴史的建造物の挙動シミュレーション

金沢大学工学部 正会員 北浦 勝

金沢大学工学部 正会員 池本 敏和

金沢大学工学部 学生 ○川崎 陽一

1. はじめに

歴史的建造物の保存が叫ばれて久しいが、城郭の石積みなど数百年立つ建造物は、改修の必要性が出てきている。石積みは外見もよく耐久性にも優れている反面、欠点も多いため、工法は経験に頼らざるを得ず、科学的なメスが入れられていないのが現状である。そこで、本研究では剛体ばねモデルを用いて石積みの方学的挙動をシミュレートし、その安定性を検討した。

2. 石積みの特徴

社寺、城郭などの建築分野や斜面の土留、堤防、橋などの土木分野、さらに造園に至るまで、石積みは近代まで土木建設の主流であったが、その後セメントに取って代わられた。このような経緯には次のような石積みの特徴が関係している。

- | | | | |
|----|------------------|----|-------------------------|
| 利点 | ・耐久性に優れている。 | 欠点 | ・石の境界面は不連続で、引っ張りに抵抗しない。 |
| | ・自然とよく調和する。 | | ・施工が比較的難しく、時間がかかる。 |
| | ・用途により積み方を選択できる。 | | ・石自体の質、形が不均一で設計が難しい。 |

特に欠点にあるように、石積み全体としては不連続体なので、近年まで科学的な解析が困難であった。しかし、経験的には主に次のようなことが分かっている。

- ・石の胴を水平より上げず、下げて積むのが良い。
- ・小石や砂礫を石の裏にしっかりと込める。
- ・法勾配は内側にカーブを描く積み方が堅固である。

そこで、これらの経験則をもとに安定解析を行なった。

3. 解析方法、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もので、要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いて、エネルギーを評価する。その結果、破壊線が得られ、不連続体に対する解析が可能である。変位パラメータは重心に設定し、三角形の平面要素の場合、自由度は3となる（図1）。2要素間の相対変位を δ とすると、要素間のばねに蓄えられるエネルギー V は、

$$V = \frac{1}{2} \int (\delta^T \cdot D \cdot \delta) dA$$

で与えられる。ここで、 D はばね係数行列、 A は要素面積である。Castiglianoの定理から、1つの接触面に対する剛性方程式は、

$$F = \frac{\partial V}{\partial \delta} = K \cdot u$$

となる。ここで F は外力、 K はばね剛性行列、 u は要素重心の剛体変位である。

解析モデルとして、図2のような石積み进行を想定する。塗りつぶした要素は石、その他は石の裏に込める小石や砂礫の集合要素とする。荷重と

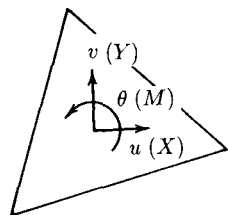


図1 要素の自由度、荷重

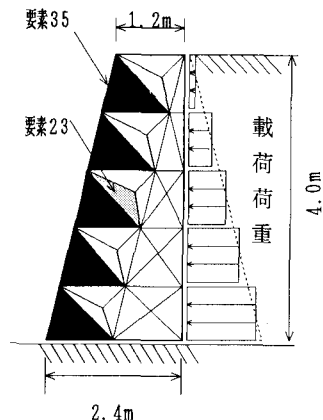


図2 解析モデルの概略

して、横方向から土圧の三角形分布荷重を境界要素ごとに集中して作用させる。このとき荷重の総計は5 tfとなる。このような荷重を標準荷重 P_0 と呼ぶ。破壊条件にはトレスカの条件を用い、材料定数を表1のように定める。ここに E は弾性係数、 ν はポアソン比、 γ は単位体積重量、 C はせん断強さである。要素分割としては、図3 (a)を基準のモデルとし、これ以外に法勾配の異なる3モデル(b), (c), (d)と、石の積み方の異なる2モデル(e), (f)、さらに(a)と同形で要素23が空隙のモデル(g)を解析対象とした。

4、解析結果、考察

図4に(a)と(g)の変位モードを、図5に(e), (f)の崩壊時のすべり線を示す。また、図6に荷重 P と標準荷重との比(P/P_0)と、要素35の重心の水平変位の関係を示す。図中の×印は最大変位が急増したため崩壊と判断した点を示す。まず、4種類の勾配の異なるモデルの強度を比較する。図6を見ると、勾配の緩やかな方が強度は大きいといえる。ただ、2つの勾配を組み合わせたモデルは、基準モデルとほとんど差はなく、本シミュレーションの範囲内では勾配の変化による効果は現れなかった。また、石の積み方による強度の比較では、図6に示す通り、石の胴を下げた積み方は P_0 の約3倍の荷重まで耐え得るのに対して、胴を上げた積み方は強度が前者の半分以下である。これは、(e)

表1 材料定数

	E (tf/m ²)	ν	γ (tf/m ³)	C (tf/m ²)
石	2.0×10^5	3.0	2.2	10.0
内部	2.0×10^4	3.0	1.8	2.0

のすべり線が横方向に発達していることから分かるように、横方向の剛性が小さいためであると考えられる。モデル(g)以外は一応、標準的な土圧には耐えられるものの、土圧に加えて降雨などによる水圧の影響を考えると、安全であるとはいえない。なお、空隙のあるモデル(g)は標準荷重に満たないうちに崩壊した。変位モードを見ると、空隙に向かって要素が落ち込んでいるのが分かる。

5、おわりに

以上のシミュレーションより、石の積み方は胴を下げて積む方が強度が大きいことや、小石や砂礫を隙間なく詰めることが石積みの強度を上げる条件であることが分かった。これは経験則と一致しており、このことから、静的な石積みの挙動メカニズムがある程度近似できたと考えている。さらに、地震の入力がある場合の動的解析についても現在検討中であるので、講演時に発表したいと考えている。

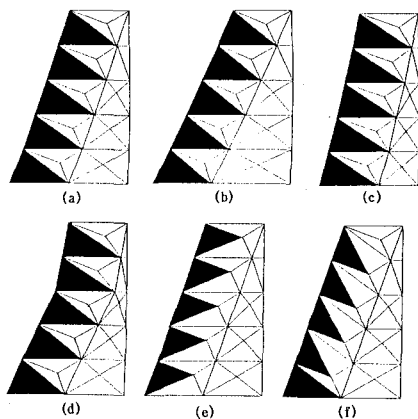


図3 解析モデルの要素分割

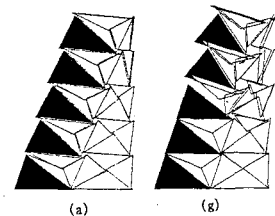


図4 変位モード

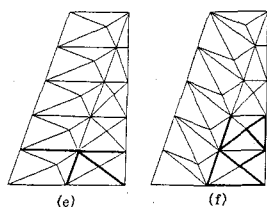


図5 崩壊時のすべり線

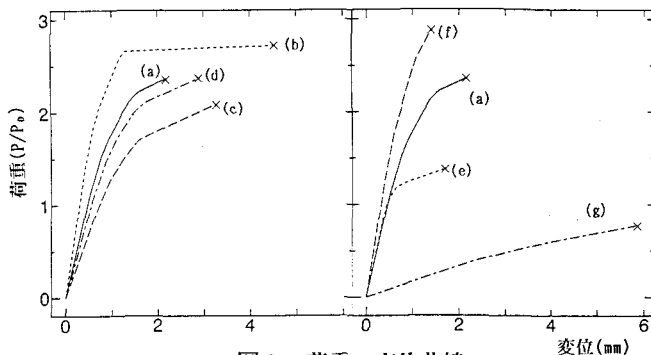


図6 荷重-変位曲線

参考文献

- 1) 竹内則夫: 地盤力学における離散化極限解析、倍風館、pp. 10-13、1991.
- 2) 大久保森造: 石垣の秘法とその解説、理工図書、pp. 105-109、1987.