

数値解析を用いた石積み擁壁の安定性の検討

高松工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻 学生会員 ○松本 陽介
高松工業高等専門学校 建設環境工学科 正会員 土居 正信

1. はじめに

我が国では古くから城壁や護岸に石積み工法を用いており、現在でも石積み工法が用いられることは少なくない。しかし、石積み工法にはコンクリート工法のような明確な設計指針が存在しない。そのため石積みの新規建設、改修工事に向けての明確な設計指針が必要であると考えられる。そこで、数値解析により、石積み擁壁の設計指針確立に必要な資料を検討する。本論文では、石積みを形成する岩石同士の接触面の長さや角度に着目し、それらが石積み擁壁の安定性に与える影響を確認した。

2. 数値解析

解析には、石積み擁壁を構成する岩石同士の接触面を比較的簡単に表現することが可能であるジョイント要素を用いた有限要素法を使用している。解析対象となる石積み擁壁モデル(図-1)において、岩石要素(図-2)を従来の有限要素、岩石接触面(図-3)をジョイント要素で表現した。ここで、ジョイント要素とは、接触面を表現する厚みの無い平滑さや粗さ、表面の凸凹の強さなどを含んだ要素のことである。

図-2 に示すように岩石要素を三角形要素に分割し、つり合い式より解析する(式-1)。

$$\{\Delta F\}_i = [K]_i \{u\} \quad (1)$$

$$[K]_i = \frac{1}{4a} [L_i]^T [L_i]^T [C] [L_i] [L_i] \quad (2)$$

ここで、 $\{\Delta F\}$ は外力ベクトル、 $[K]$ は要素剛性マトリックス、 $\{u\}$ は節点の変位量を意味する。また、 a は三角形要素の面積、 $[L_i]$ はひずみ-変位の関係マトリックス、 $[L_i]$ は座標変換マトリックス、 $[C]$ は応力-ひずみの関係マトリックス、 T は転置行列を表す。

同様に、ジョイント要素についてもつり合い式から解析を行う(式-3)。なお、ジョイント要素のつり合い式における要素剛性マトリックス $[K]$ は岩石要素のそれとは異なる。

$$\{\Delta F\}_j = [K]_j \{u\} \quad (3)$$

石積み擁壁の総変位量は式(1)、(2)を重ね合わせ、

反復計算より求める。反復計算は剛性マトリックス $[K]$ を変化させず、荷重項 $\{\Delta F\}$ を随時変化させる荷重伝達法により行う。解の収束は、反復計算前後の解を比較することにより判定する。

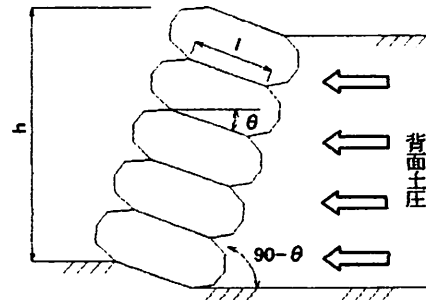


図-1 石積み擁壁の解析モデル

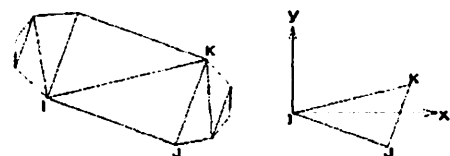


図-2 岩石要素のモデル化

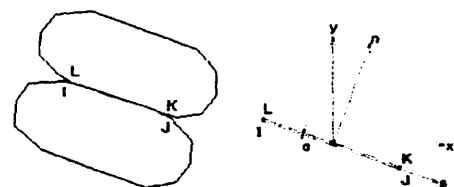


図-3 岩石接触面のモデル化

3. 解析対象

解析は図-1 に示す石積み擁壁の岩石接触長 l 、接触角 θ および石積みの傾き $90-\theta$ を変化させ行い、それらが石積みを設置できる限界高さ h に及ぼす影響を調べる。石積みを構成する岩石は全て同一形状とし、物性値は一般的な花崗岩のものを使用した。なお、岩石の物性値は石積みの挙動・安定性にはほとんど影響しない。石積みの挙動・安定性への影響は岩石接触面の物性値であるせん断剛性率 k_s 、ジョイントの摩擦角 ϕ の影響が大きい。せん断剛性率 k_s は岩石の挙動、摩擦角 ϕ は岩石の安定性に影響する(図-4、図-5)。なお、図中の変位量 S とは、石積みを構成する最上段の岩石要素の変位量を表す。

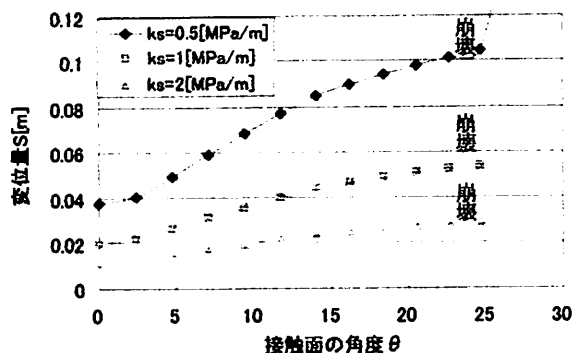


図-4 せん断剛性率 k_s の影響

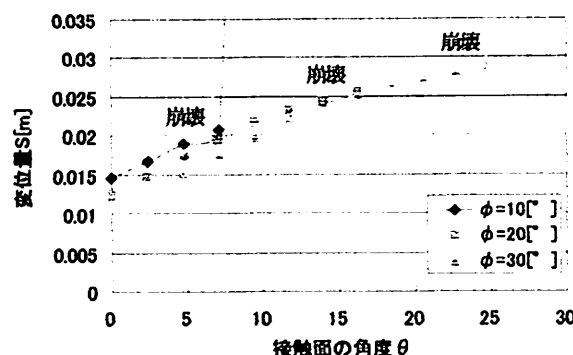


図-5 摩擦角 ϕ の影響

4. 解析結果

図-6 は接触角 $\theta = 0^\circ \sim 25^\circ$ における岩石接触面の長さ l の変化に伴う石積みの崩壊高さ、及び始動高さを示した図である。ここで、崩壊高さとは有限要素法解析により解の収束性がなくなる高さを、始動高さとは、石積みに変位が生じる高さを表す。

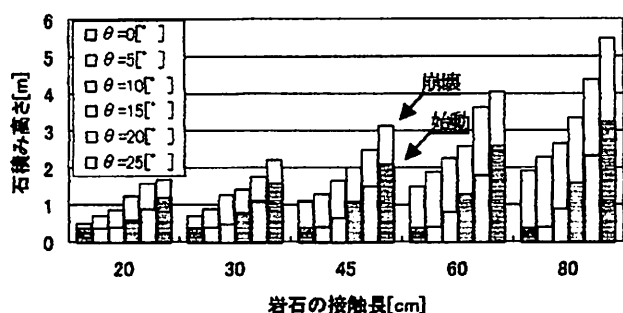


図-6 石積みの崩壊高さと始動高さ

4.1 崩壊高さについて

図-6 より崩壊高さは接触面の角度 θ 、接触長 l の増加に伴い高くなることが分かる。接触角 θ の崩壊高さへの影響度合いは岩石の接触長 l により異なる。岩石が接触している面が大きいほど接触角 θ の影響を大きく受ける傾向があり、その傾向は曲線関係(図-7(a))となる。また、接触面の長さ l の崩壊高さへの影響は接触角 θ の増加により傾きが大きくなる直線関係(図-7(b))となる。

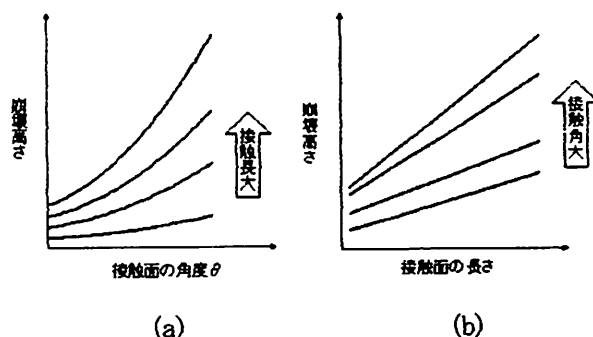


図-7 崩壊高さへの影響

4.2 始動高さについて

図-6 より、始動高さも接触角 θ 、接触長 l の増加に伴い高くなることが分かる。ただし、崩壊高さと異なり接触角 θ が小さい範囲では接触面の長さ l 及び接触角 θ の影響をほとんど受けない(図-8(a), 図-8(b))。始動高さと接触角 θ 、及び始動高さと接触長 l の関係は接触角 θ が小さい場合を除き崩壊高さ同様、曲線関係、直線関係で表現できる。

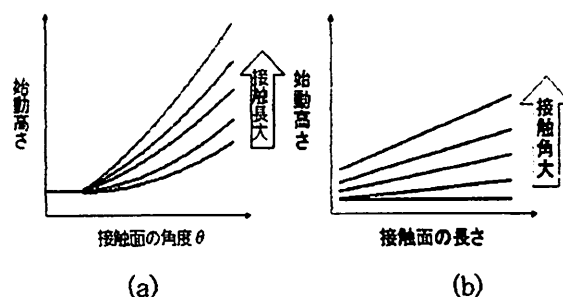


図-8 始動高さへの影響

5. まとめ

ジョイント要素を用いた有限要素法により石積み擁壁の安定解析した結果を以下にまとめる。

- ①石積み崩壊高さ、及び始動高さは岩石の接触角 θ ならびに接触長 l に依存し、それらは曲線関係、直線関係にある。
- ②岩石接触角 θ が小さい場合、石積みの始動を抑制する効果は低い。

今後、次の項目について検討を行う。

- ①石積みの高さに対する接触角 θ 及び接触長 l の関係を二次関数及び一次関数であると仮定し、それらの係数を求める。
- ②始動から崩壊までに至る挙動を、時間要素を加え検討する。

参考文献

- 1) 不連続性岩盤の地質工学: R. E. グッドマン原著, 赤井浩一, 川本脩万, 大西有三 共訳