

ジョイント要素を用いた石積み擁壁の安定解析における解の収束性の検討

松本陽介*, 土居正信**, 川染徹也**

Examination on Convergence of Solution Concerned with Stony-wall Stability Analysis Using Joint Element

Yousuke Matsumoto*, Masanobu Doi**, Tetsuya Kawasome**

Abstract

The result of the stable calculation of stony-walls can obtain the basic document for design procedures. The purpose of this study is to examine a criterion of stability by a calculation. In this study the analysis was performed by FEM which has joint elements. To evaluate the criterion of stability, the results of FEM calculation were compared with other methods. From these comparisons, it was formed that the criterion of the stability in a static range.

Keywords : FEM , joint element , stony-wall

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。高松市においては数百年も昔に建設された高松城城壁がある。現在は今後起こりえる可能性がある大地震に向けて擁壁の修復工事を行っているところである(写真-1)。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、石積み擁壁の挙動・安定性を検討することにより設計指針の確立を目指す。本研究では、数値解析手法を用いて石積みの安定性を解析する際に重要となる安定・不安定の判断基準を示力線による解析と比較し検討する。また、解析入力データによる解析結果への影響も確認する。

2. 数値解析

2-1 解析手法

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できるジョイ

ント要素を用いた有限要素法を使用している。ジョイント要素を用いた有限要素法とは、各要素の接触面に変形特性を与え、反復計算により解(変形挙動)の収束判定を行うものである。岩石要素の解析には従来の有限要素を、岩石接触面の解析にはジョイント要素を用いる。ここで、ジョイント要素とは、接触面(図-1)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。反復計算においては、系の全体剛性マトリックスは最初に求めたものを変更せず、力のつり合いを保つための新たな荷重を導入して計算を続ける荷重伝達法を採用した。収束判定は、繰り返し回数 i 回目と $i+1$ 回目における、節点全体の変位を比較することにより判断する(図-2, 図-3)。



写真-1 高松城改修工事現場

原稿受理 平成 19 年 11 月 28 日

*高松工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻

**高松工業高等専門学校 建設環境工学科

(〒761-8058 高松市勅使町 355 TEL087-869-3921)

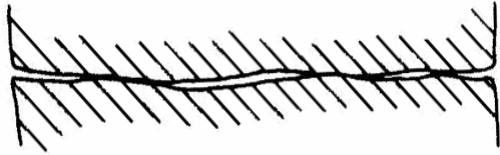
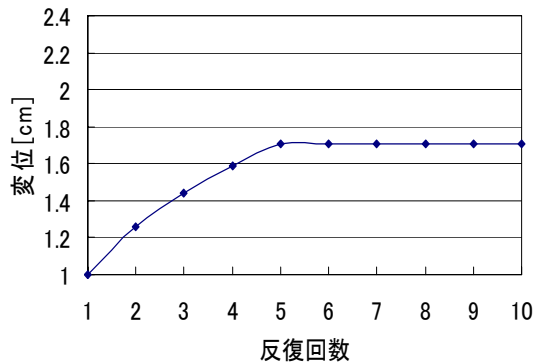
図-1 岩石同士の接触面¹⁾

図-2 解の収束性がある場合の変位の様子

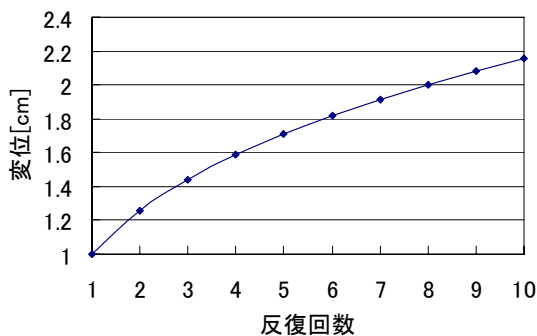


図-3 解の収束性が無い場合の変位の様子

2-2 解析対象

図-4 に解析の対象となる石積みの一例を示す。本研究では石積みの高さ、接触面の条件、作用する土圧などを変化させ解析を行う。

ジョイント要素を用いて解析を行う場合、ジョイント要素の入力データのうち岩石接触面のせん断剛性率 K_s 、接触面の摩擦角 ϕ および接触面の角度 θ が数値解析上、石積みの挙動に影響を与える。解析ではせん断剛性率 K_s 、接触面の摩擦角 ϕ 、接触面の角度 θ を変化させ検討を行う。他の入力データとして、岩石表面の一軸圧縮強度 q_u 、圧縮強度に対する引張強度比 T_0/q_u 、ジョイントの閉合基準 V_{mc} があるが、これらの値は、直接石積み挙動の計算には影響しないので一定値とし、一般的な値を使用する。また、岩石要素の入力データも同様に一般的な岩石の値を使用する。

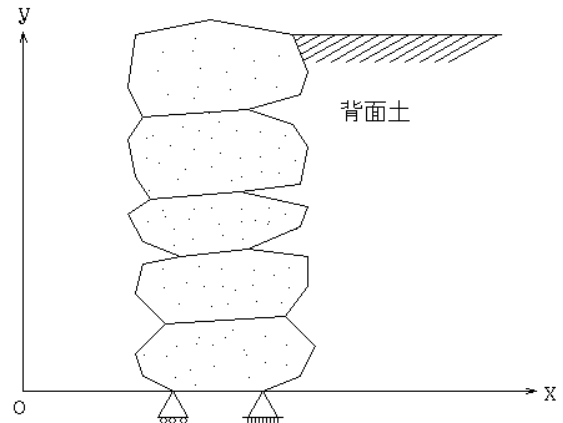


図-4 石積み擁壁モデル図

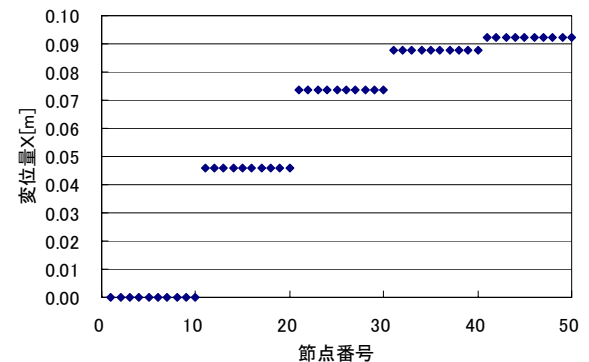


図-5 節点ごとの変位量

解析は最も変位が大きく出る最上部の岩石要素の節点に着目する。なお、図-5 において節点番号の大きいほうが上段の岩石要素を示す。

2-3 示力線の考え方

図-6 は石積みにかかる力の作用点を水平方向 x 、鉛直方向 y として表したものである。なお、示力線による計算では石積み全体を 1 つのブロックとして扱う。

作用点は、壁体天端では壁体中央となるが、下に向かって位置が少しずつ外側に变化していく。その様子を式(1)のように表すことができる。

$$X_0 = \frac{c \gamma}{6 \gamma_s b \sqrt{1 + \cot^2 \theta_0}} y^2 + \left(\frac{cq}{2 \gamma_s b \sqrt{1 + \cot^2 \theta_0}} + \frac{\cot \theta_0}{2} \right) y \quad (1)$$

作用点のはたらく位置が壁体中心線 (OB 線) より内側 (壁体内部) にあれば安定、中心線より外側いくほど不安定となり、壁体の外側に出ると構造計算上は転倒となる。

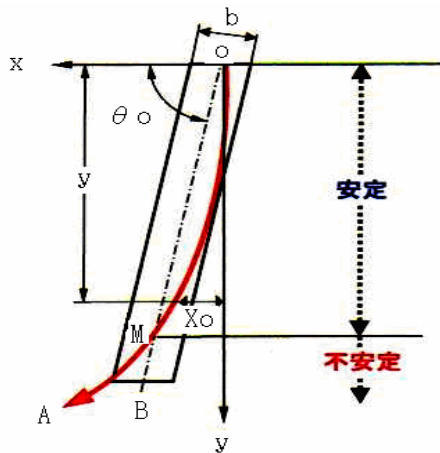


図-6 示力線³⁾

x_0 : 壁体頂部中心点から合力作用位置までの水平距離
 y : 壁体頂部中心点から合力作用位置までの鉛直距離
 c : 土圧係数
 γ : 裏込土の単位体積重量
 γ_s : 壁体の単位体積重量 b : 壁体の控長
 q : 過載荷重 θ_0 : 壁体の勾配

3. ジョイント要素による解析結果への影響

3-1 解析結果

ジョイント要素の入力データのうち安定性に影響を与える要因である岩石接触面のせん断剛性率 K_s 、摩擦角 ϕ 及び接触面の角度 θ を変化させ解析を行い、解析結果への影響を調べた。

図-7 は縦軸に解析対象節点の接触面に平行な変位量 S 、横軸に接触面の角度 θ の変化を表す。接触面の角度 θ を $0^\circ \sim 30^\circ$ の間で変化させ、せん断剛性率 K_s をパラメータとして岩石の挙動を解析している。変位量が極端に大きく出ているところが、解の収束性が無くなる場所である。図からせん断剛性率 K_s が小さいと岩石の変位量が大きく現れることが分かる。また、せん断剛性率 K_s に関わらず、接触面の角度 θ が 25° 付近で解の収束性がなくなっている。

図-8 は縦軸に解析対象節点の接触面に平行な変位量 S 、横軸に接触面の角度 θ の変化を表す。接触面の角度 θ を $0^\circ \sim 30^\circ$ の間で変化させ、摩擦角 ϕ をパラメータとして岩石の挙動を解析している。摩擦角 ϕ の値が小さいと、解の収束性が無くなる接触面の角度 θ も小さくという結果が得られた。

図-9 は縦軸に解析対象節点の x 軸方向の変位量 X 、横軸に摩擦角 ϕ の変化を表し、岩石の挙動に対して解析を行った結果である。摩擦角 ϕ の

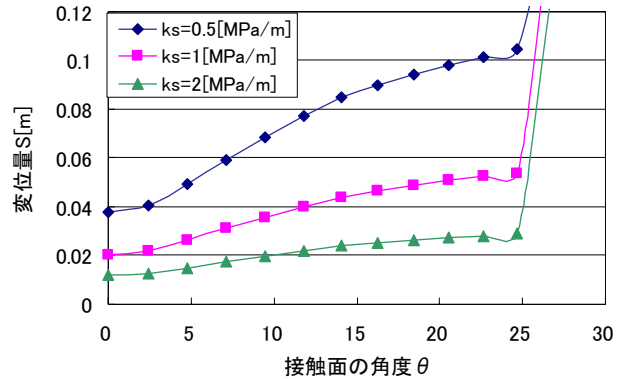


図-7 石積みの挙動へのせん断剛性率 K_s の影響

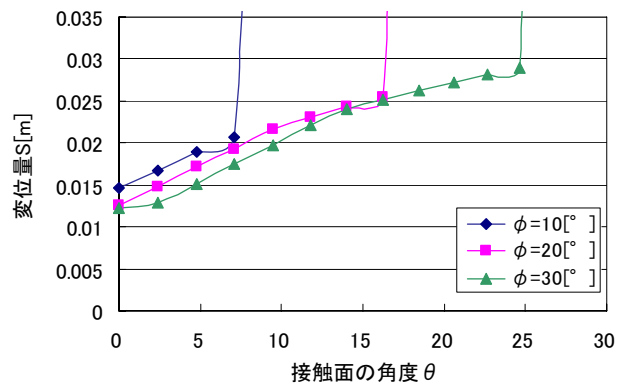


図-8 接触面の角度 θ と岩石変位量 S の関係

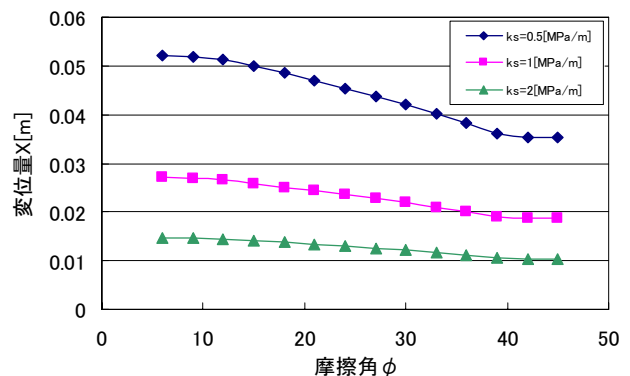


図-9 摩擦角 ϕ とせん断剛性率 K_s の影響

増加に伴い岩石の変位量は減少している。減少の割合はせん断剛性率 K_s が小さいほど顕著になる。また、せん断剛性率 K_s が小さいほど岩石の変位は大きい。

3-2 考察

図-7 において、せん断剛性率 K_s に関係なく解の収束性が無くなっている。しかし、せん断剛性率 K_s の違いにより岩石の変位量は大きく変化している。これより、せん断剛性率 K_s は解の収束性には関係なく、岩石の変位量のみに影響していることが分かる。

図-8からは、摩擦角 ϕ の違いにより解の収束性が無くなるタイミングが変化していることが読み取れる。これより、摩擦角 ϕ は解の収束性に関係していると考えられる。また、図-9よりせん断剛性率 K_s が大きくなると摩擦角 ϕ が変位量に与える影響は少なくなることが分かる。ここで、接触面の摩擦角 ϕ は、接触面の摩擦抵抗 τ の変化に関わる係数である。よって、摩擦抵抗 τ はクーロンの摩擦則より式(2)で表現される。

$$\tau = \sigma \tan(\phi) \quad (2)$$

なお、本解析では粘着力 c は考慮しないものとしている。

解析では、鉛直荷重は石積みの自重のみを考慮しているため、式(2)における垂直応力 σ が小さい。そのため、すべり変位に対する抵抗力は摩擦角 ϕ の影響をあまり受けていないと考えられる。

4. 石積み擁壁の安定性と解の収束性の関係

4-1 解析結果

図-8において摩擦角 ϕ が 0° の場合は接触面の角度 θ が 0° かつ荷重が作用していない場合を除き全ての場合において解の収束性は無くなった。

図-10は縦軸に解析対象節点のx軸方向の変位量 X 、横軸にせん断剛性率 K_s の変化を表している。せん断剛性率 K_s を0～10[MPa/m]の間で変化させ、岩石の挙動に対して解析を行った。図-7のように解に収束性が無くなることは無かったが、せん断剛性率 K_s が小さいほど変位量が大きく現れ、解が収束している。

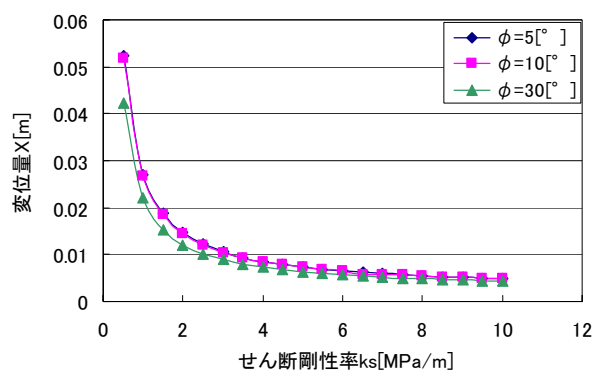


図-10 せん断剛性率 K_s と岩石変位量 X の関係

4-2 考察

図-7において、解の収束性がなくなる接触面の角度 θ では土圧および自重による作用力が摩擦抵抗力を上回り、石積みの滑り出しを表している

考えられる(図-11)。

仮に、現実の石積みで接触面の摩擦抵抗が0の状態を作り出すことができれば、接触面の角度の変化や微小な外力の作用により、石積みはすべりを起こす。解析上では摩擦角 ϕ を 0° にすることでこれを表現することができ、摩擦角 ϕ が 0° の場合は例外を除き解の収束性が無くなることが分かっている。これらのことから、解の収束性が無くなる場合、石積みは不安定であると考えられることができる。

しかし、同様に解の収束が安定につながるとは限らない。図-10においてせん断剛性率 K_s が小さければ、大きな変位量の範囲で解が収束している。その状態が図-12にあたる。解析上では解が収束し石積みは安定しているように見えるが、実際石積みは大きく変形し崩壊寸前の状態に見える。このことから、安定の判断基準は別途検討項目を設ける必要があると考えられる。

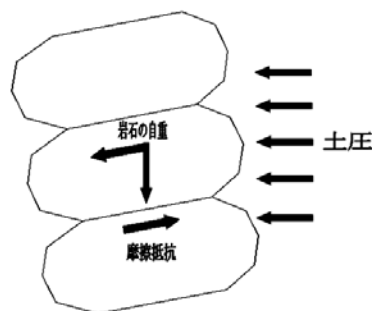


図-11 石積み擁壁に作用している力

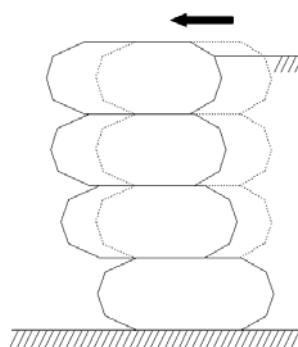


図-12 石積みの移動

5. 安定の判断基準

5-1 解析結果

4. より、有限要素法による解析では変位量の制限が必要であると考えられる。そこで、示力線による擁壁の安定解析を行い、有限要素法による解析と比較することで変位量の制限を設けることにした。これにより、解が収束する場合における石積み崩壊を判断することが可能となると考えた。

表-1 示力線による解析結果

水平震度 K_h		0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
角度 θ [°]	30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	20	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×
	10	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×
	0	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

示力線による解析では作用土圧、擁壁のサイズ等の条件は有限要素法による解析と同じものとして解析を行っている。(図-13)ただし、示力線による解析では石積みを1つのブロックとして取り扱うので岩石接触面の条件を考慮することはできない。解析では接触面の角度 θ 、それに連動して擁壁の傾きを変化させる。さらに擁壁への作用土圧を水平震度 K_h の導入により変化させ解析している。図-14に接触長に対するせん断剛性率 K_s の目安が記させている。3.より、FEM解析において岩石接触面の条件のうち、せん断剛性率 K_s を大きくすると石積みの変位量は解析上小さくなることが分かっている。そこで、解析モデルに対応するせん断剛性率 K_s の上限にあたる数値を用い、変位量を最小として解析を行った。

示力線による解析結果を表-1に、有限要素法による解析結果を図-15に示す。なお、表-1において[○]は安定を[×]は不安定(転倒)を表す。図-15は縦軸に解析対象節点の接触面に平行な変位量 s 、横軸に石積みに働く水平震度 K_h の変化を表す。土圧係数に影響する水平震度 K_h を0~0.5の間で変化させ、岩石接触面を受け盤方向へと傾ける角度 θ をパラメータとして解析を行っている。また、表-1より石積み擁壁が不安定となるポイントを示力線限界点と称し図-15に記載している。

5-2 考察

示力線による解析(表-1)では、擁壁の角度 θ の傾きによって転倒に対する安定性が変化していることがわかる。また、このことはFEM解析(図-15)からも読み取ることができる。擁壁を傾けることによって、転倒に対する抵抗力が増加していると考えられる。

示力線解析(表-1)とFEM解析(図-15)を比較すると、接触面角度 θ が 0° の場合に対してはどちらの場合も早い段階で不安定となるが、接触面角度 θ が 10° 以上では示力線での解析の方が先に不安定となる傾向がある。これはFEM解析では接触面の抵抗力も考慮しているため、石積みの土圧に対する抵抗力が増加したと考えられる。ただし、構造物を設計する場合、構造物全体を一体として

考える場合が多く、石積み擁壁も例外ではない。そのため、石積み擁壁の設計において安定性の判断基準を設ける場合は、石積みを1つのブロックとして考える示力線解析の転倒限界に合わせるべきであると考えた。図-15より、変位量が約0.005[m]を超えると示力線による解析では不安定となっていることが分かる。解析ではせん断剛性率 K_s の上限値を使用していることから、石積みの変位量は解析において最小の値を示していたこととなる。これより、石積み擁壁の安定解析において、変位量が0.005[m]以下であることを安定条件とすることで解が収束する場合においても安定性の判断が可能となる。ただし、安定判断基準値が0.005[m]以下という数値は引き続き解析を続け更に詳しく検討をしていく必要がある。

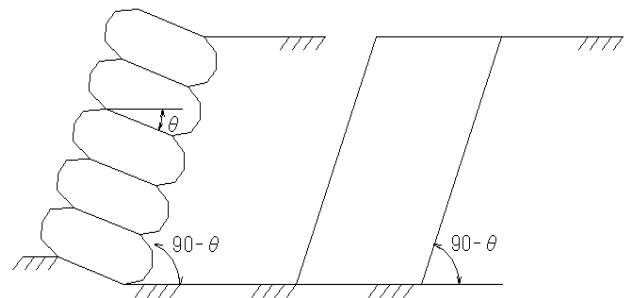
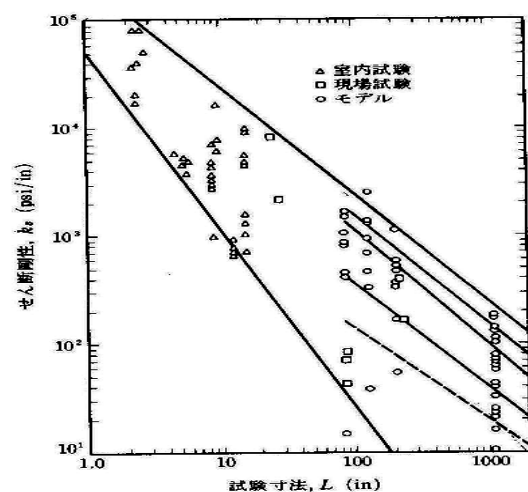


図-13 FEMモデル図と示力線モデル図の関係

図-14 せん断剛性率 K_s と岩石接触長の関係¹⁾

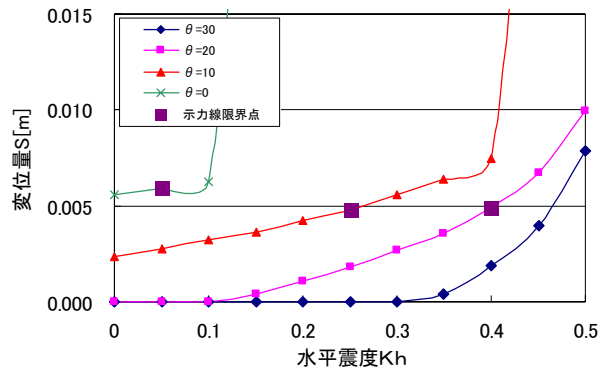


図-15 FEM 解析結果

6. まとめ

数値解析により石積み擁壁の安定計算を行い、接触条件が石積みの挙動に及ぼす影響及び安定性の判断基準を検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 接触条件の入力データのうちせん断剛性率 K_s は岩石の変位量に影響を及ぼす。

- 2) 接触条件の入力データのうち接触面の摩擦角 ϕ は解析において解の収束性に影響する。また、若干ではあるが岩石挙動にも影響を与える。
- 3) 解の収束性が無くなることは、石積み擁壁が不安定になることにつながる。
- 4) 解が収束する場合については、変位量の制限を設ける必要がある。本研究では岩石変位量が 0.005[m] 以下であるなら石積みは安定という結論に至ったが、この数値については更なる検討が必要である。

7. 参考文献

- 1) R・E グッドマン 原著，赤井浩一・川本朧万・大西有三 共訳：不連続性岩盤の地質工学 pp141, pp236-335
- 2) 川本朧万，林 正夫：地盤工学における有限要素解析 pp254-287
- 3) まつみ Internet：お城について考える
<http://www.d1.dion.ne.jp/~mthouse/index.html>