

## I-198

## 石造構造物の安定と応力解析

大成建設 正員 ○田中 朝一 熊本大学 正員 崎元 達郎  
 熊本大学 学生員 岡崎 邦宏 熊本大学 学生員 持田 拓児

1. まえがき: 近年、石橋など現存する石造構造物が長年の風化の影響により破壊に至っている事から、維持管理に関する技術的検討及び耐荷力解析手法の開発が要求されている<sup>1)</sup>。本研究は、静的釣り合い条件下で石の様な接触部を有する多角形要素集合構造の安定評価及び応力解析手法の開発を目的としている。解析法として接触要素を用いた有限要素法を使用し、石と石の接触部分にはバネ要素を導入している。解析モデルとして、実際の石橋のアーチ部を考え、解析法の適用性と問題点を検討した結果について報告する。

2. 接触のモデル化: 石造構造物は、各岩石の境界に複数の接触部を有して構成されており、外荷重や自重の作用による構造の変形は、この接触部のすべりや分離に関する接触力の発生によって起こると考えられる。本解析では、岩石間の接触を図-1に示す様に岩石Aの面上の点lと岩石Bの角の点mの点接触で仮定している。また、接触点lm間には仮想バネの概念が用いられており、点lを含む接触面に対する法線方向バネ定数 $k_n$ と接線(せん断)方向バネ定数 $k_s$ が導入されている。この2本のバネ定数は、石材圧縮実験及び石材せん断実験<sup>2) 3)</sup>により得られる値である。点lm間の距離 $L$ は、初期状態でゼロとされている。各岩石は重なる事が可能で、接触点の相対変位により、法

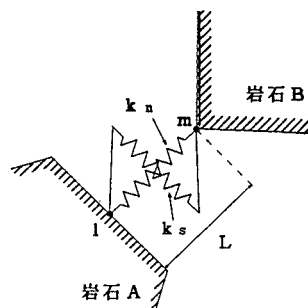


図-1 接触のモデル化

線方向及び接線(せん断)方向の接触力が得られる。また、法線方向の引張接触力に対する抵抗は存在せず、岩石間の相対すべりはクーロンの摩擦法則により決定され、最大摩擦力を越えないと仮定する。

3. 解析の方法: 二次元平面応力問題ととらえ、岩石接触部に上記の接触モデルを導入し、岩石自身は等方性弾性体とみなし、三角形平板要素を用いて有限要素メッシュ分割を行っている。

- 1) 初期荷重の設定: 各岩石の自重と外荷重により計算される。岩石の自重は、各三角形要素の重さを各要素の3節点に均等に分配している。
- 2) 構造解析: 微小変位理論の下、岩石自身の三角形要素と接触部のバネ定数により形成される全体剛性マトリックスにより各節点変位を求める。
- 3) 接触力の計算: 2)で得られた節点変位を用いて図-2に示す様な接触部の相対変位増分を求め、次式を用いて各方向の接触力を計算する。

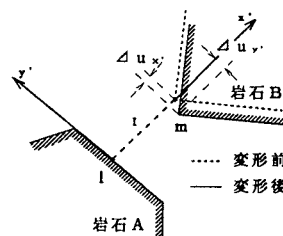


図-2 接触点の相対変位増分

$$\text{法線方向 } P_x' = k_n \Delta u_x'$$

$$\text{接線方向 } P_y' = k_s \Delta u_y'$$

- 4) 分離の判定: 法線方向接触力が $P_x' > 0$ を満たす時分離したと判定され、その時の引張接触力を仮想の力(不釣り合い力)として次の繰り返し計算で分離点に作用させる。また、バネ定数 $k_n$ は半分の値に修正される。
- 5) すべりの判定: 接触部の静止摩擦係数を $\mu$ とすると $P_y' > \mu P_x'$ を満たす時すべると判定され、次式で与えられる限界摩擦力を越える力を仮想の力として次の繰り返し計算ですべり発生点に作用させる。

$$\Delta P_y' = P_y' - \mu P_x'$$

また、せん断バネ定数 $k_s$ は次式のように修正される。

$$k_s(\text{NEW}) = \frac{\mu P_x'}{\Delta u_y'}$$

ここで、 $\Delta u_y'$ : 接触面の接線方向の全体相対変位

- 6) 解の収束: 分離、すべりが生じたならば、4)、5)の修正を行い繰り返し計算が行われる。分離及びすべりに関する仮想力(不釣り合い力)が解消されれば、解析対象モデルは安定であると評価される。逆に仮想力が一定の大きさを維持したり増加し続ける傾向にある時は不安定と評価される。

4. 解析モデル：鹿児島県玉江橋の石材アーチ部を図-3に示す様にモデル化を行い、両端固定アーチと仮定して検討する。バネ定数 $k_a$ 、 $k_s$ は、鹿児島県武之橋アーチ部石材の実験値<sup>2)3)</sup>を使用することとし、 $k_a=255\text{kg/cm}^2/\text{cm}$ 、 $k_s=500\text{kg/cm}^2/\text{cm}$ とした。アーチは、支間長 $L=10.1\text{m}$ 、ライズ $f=3.7\text{m}$ 、石材24個の1連アーチと支間長 $L=11.5\text{m}$ 、ライズ $f=4.3\text{m}$ 、石材30個の2連アーチの2種類について解析を行う。各アーチ部石材1個の形状寸法は、1辺 $0.5\text{m}$ の立方体とし要素分割は2分割と4分割の2種とする。石材の諸量は実験値<sup>2)3)</sup>より弾性定数 $E=0.5 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.16$ 、密度 $\rho=2.0 \times 10^{-3} \text{kgf/cm}^3$ 、静止摩擦係数 $\mu_s=0.65$ とした。アーチの上載荷重は、図-4に示す様な3種類の分布形状について検討した。

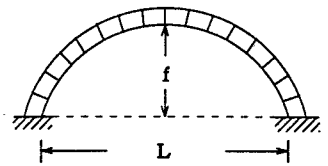


図-3 解析モデル

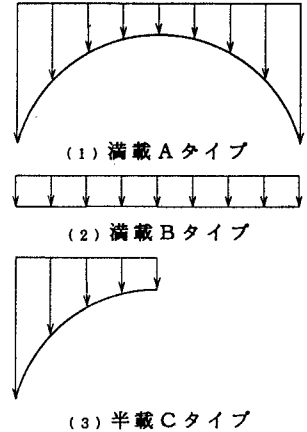


図-4 上載荷重分布

5. 結果：図-5～図-7に一例として、1連アーチ要素2分割の結果を示す。各結果の図は、初期形状を点線で、変位を各倍率で示した変形モード図を実線で表現している。満載A、Bタイプについては安定と評価され、解析結果の実際の変形量は、アーチクラウン部で満載Aタイプは約 $4\text{mm}$ 、満載Bタイプは約 $6\text{mm}$ とライズ $f=3.7\text{m}$ に対して微小な変位量であることが確認されている。変形モード図において、重なりやずれを示す箇所が見られるが、重なりは石材間の軸力（圧縮分布）の大きさを示し、ずれはせん断力の大きさを示している。応力解析については、固定円弧アーチの連続体としての微小変位理論解を用いるとアーチ基部の軸応力が $4.0\text{kgf/cm}^2$ となるのに対して、本解析による軸応力は約 $5.0\text{kgf/cm}^2$ となり良好な値を示している。

これに対し、半載Cタイプについては分離とすべりが同時に発生し、不安定構造と評価された。図-7に示す様に、石材間に大きな開き（分離）が生じている事から、明らかに不安定であると言える。また、応力解析については、計算回数が増加するにつれて反力値等に誤差が含まれてくる。これはバネ定数の修正時に石本体の剛性との相対差が大きくなる事で桁落ち等によりマトリックスが特異となる事が原因と思われる。以上の事から、変形モード図を描く事により構造内の圧縮力分布、せん断力分布を知る事ができ安定性評価の良い資料となり得ると言える。今後は、計算誤差を解消するためにバネ定数の修正法の改良を行い、石造構造物の耐荷力を評価する為のプログラム開発を行う予定である。

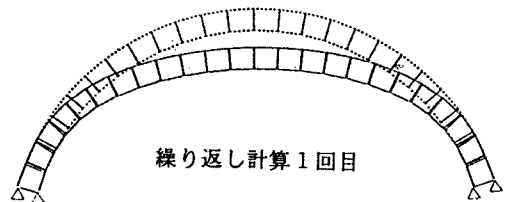


図-5 満載Aタイプの結果（変位250倍）

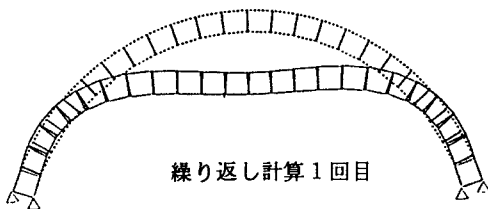


図-6 満載Bタイプの結果（変位250倍）

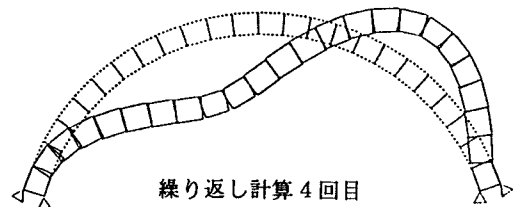


図-7 半載Cタイプの結果（変位30倍）

参考文献 1)馬場俊介、岩本雅伸：石造アーチ橋固有の技術の構造的評価、土木史研究 第12号、1992.6、P.25～P.36

2)崎元達郎 他：石造アーチに用いられる溶結凝灰岩の力学定数を求める実験、土木学会西部支部研究発表会、1995.3

3)崎元達郎 他：石造アーチに用いられる溶結凝灰岩の力学定数を求める実験、土木学会第50回年次学術講演会、1995.9