

煉瓦・石材による離散体構造物の FE 解析

○九州大学

学生会員 山下 和也

九州大学大学院

正会員

浅井 光輝

九州大学大学院

学生会員 木村 嘉之

九州大学大学院

正会員

園田 佳巨

1. 緒言

煉瓦・石材を組み上げた建造物の歴史は深く、起源は紀元前の西洋の石造アーチ構造に遡る。我が国においては、明治から大正末期までの間に数多く建設されてきたが、構造物に要求する性能の向上により、現在では新設されていない。コンクリート・鋼構造など近代的な構造物に囲まれる現在では、逆に煉瓦・石材構造物の文化財価値が見直され、維持管理を望む声が多い。こうした現状を鑑み、本研究では離散体構造物の強度特性を精緻に評価し得る数値解析技術の確立を目指す。

2. FEM による離散体構造物の取扱い

離散体構造の数値解析では、剛体バネモデル (RBSM) がこれまでに適用された例が多い。これは、バネ剛性を変化させることで、接触から剥離までの状態を模擬しやすいとの理由からである。ただし、固体の変形から接触摩擦現象までをすべてバネ剛性に集約させるため、物理的な解釈を困難にし兼ねない。そこで、より正確に接触摩擦現象を取り扱う方針により、各離散体内部を要素に分割し、離散体同士の干渉はすべて接触摩擦現象として取り扱う「離散化 FEM モデル」の導入を検討した (図-1 参照)。また、離散体内部を複数の要素に分割したのは、接触する面 (二次元的には辺) に複数の節点を配置させることで、一点だけの接触時に見られる離散体の回転を拘束するためである。

ここで、接触判定が行われるまでは離散体間には何の拘束もされず、その結果構造系全体の剛性行列は不定行列となる。このため、一般的な準静的解析は行えず、本研究では人工粘性を用いた動的問題として取り扱うことにした。以下の解析では、汎用非線形構造解析ソフト MSC.MARC を使用し、時間積分としてはフーボルト法を選択した。

3. Coulomb-Orowan 摩擦モデルの導入

摩擦現象は次式に示す Coulomb 則によりモデル化させることが多い。

$$f_c = \mu \cdot f_n \quad (1)$$

ここで、 μ は静止摩擦係数であり、 f_c は限界摩擦力、 f_n は接触力の法線方向成分を示す。実現象において限界摩擦力 f_c^{lim} は、初期レベルにおいては Coulomb 則に従い接触力に比例的に増加するものの、図-2 に示すようにある上限がある。

本研究では、こうした現象を簡易的に表現する Coulomb-Orowan モデル (図-2 中に示すバイリニアモデル) を採用し、限界摩擦力の上限値が与える影響を数値的に議論することにした。

4. 数値解析例

図-3 に示す単純なアーチ橋モデルを用い、材料パラメータである摩擦係数、限界摩擦力の上限値を変動させたときの橋梁全体の強度の変化についての数値実験を行った。なお、石材の 1

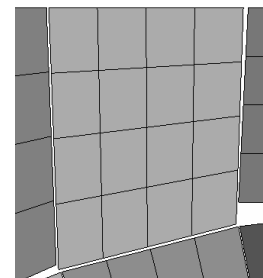


図-1. 離散化 FEM モデルの概念図

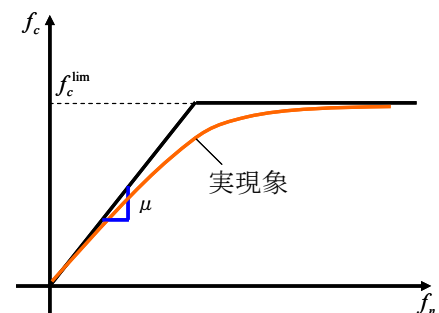


図-2. Coulomb-Orowan の摩擦モデル

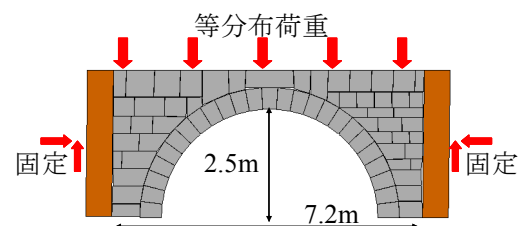


図-3. 解析モデル

ブロックを 4×4 の要素に分割した。また、限界摩擦力の上限値以外の材料定数、摩擦係数は文献[1]を基に表-1, 2 のように設定した。

まず、摩擦現象が古典的な Coulomb 則に従うものとし、摩擦係数を表の値より $\pm 10\%$ 変化させた。この結果の荷重-変位関係を図-4 にまとめて示す。全体的に解の振動があるものの、荷重に比例し変位が単調に増加している。また、摩擦係数は全体の挙動にさほど影響を与えていない。

次に、Coulomb-Orowan モデルを採用し、限界摩擦力の上限値を $0.1(\text{N/mm}^2)$ 、 $1.0(\text{N/mm}^2)$ と変動させた際の結果を図-5 に示す。上限値の設定により、荷重-変位関係からも明らかに構造全体の終局強度が観測されるようになり、図-6 に示す変形図に示すようにアーチ下部の輪石が滑りはじめ、抜け落ちるといった崩壊現象が表現されていた。上限値を設定しない場合においては、鉛直荷重の総重量が $3000(\text{kN})$ に達した時 (図-5 中の×印)、図-7 に示すように輪石に集中する圧縮応力が石材の圧縮強度 $36(\text{N/mm}^2)$ に達しており、輪石の圧壊が先行する崩壊現象となることを示唆している。過去の知見より考察すると、図-6 に示すような崩壊現象が現実的であり、限界摩擦力に上限値を設定する Coulomb-Orowan モデルが妥当であるものと考えられる。また、図-7、図-8 に示すように、離散化 FEM モデルによれば、石材内部の応力分布が容易に評価でき、構造全体の崩壊予測と同時に材料破壊の危険性が評価できる。

5. 結論

本研究では、煉瓦・石材による構造物の強度特性評価に向け、離散化 FEM モデルの可能性を検証した。数値解析例を通して、固体の変形と接触問題を個別に扱うことで物理的解釈が明確に崩壊現象を再現することができることを確認し、結果として古典的な Coulomb 摩擦モデルには改善が必要であるとの結論を得た。今後、摩擦モデルの改善に関連した材料パラメータの合理的な決定法が求められる。

参考文献

- [1] 劉玉擎ほか：ボロノイ分割を用いた石造アーチ橋の力学挙動解析，土木学会第 51 回年次学術講演会概要集，1-App.238-239，1996

表-1. 材料定数

	ヤング率 (N/mm^2)	ポアソン比	密度 (Ns^2/mm^4)
石材	4508	0.103	1.93×10^{-9}
土	76	0.270	1.50×10^{-9}

表-2. 摩擦係数

	石材	土
石材	0.669	0.584
土	0.584	

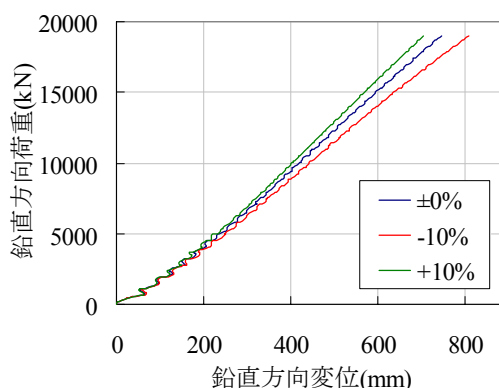


図-4. 摩擦係数による荷重-変位関係の差異

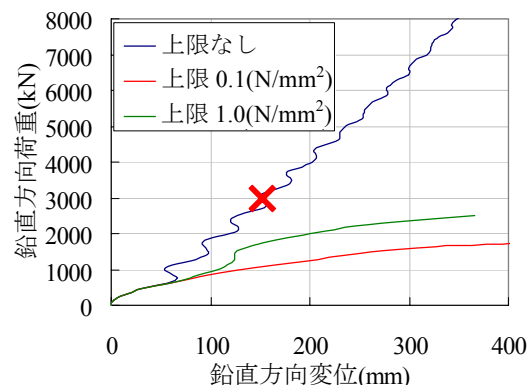


図-5. 限界摩擦力による荷重-変位関係の差異

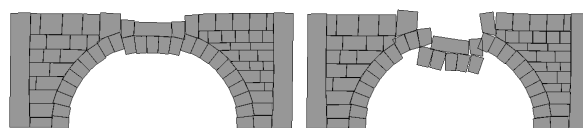


図-6. 崩壊前後のモデル図

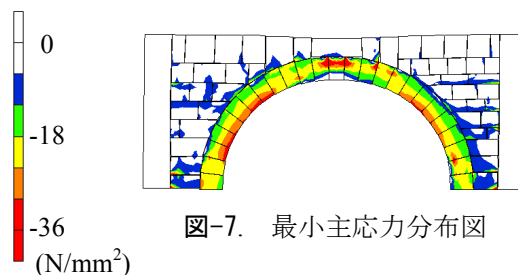


図-7. 最小主応力分布図

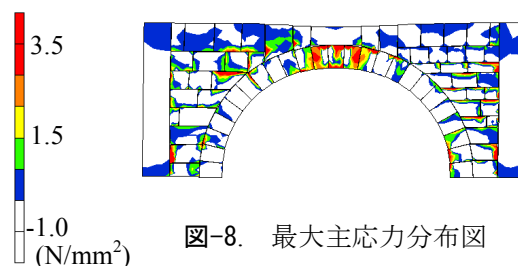


図-8. 最大主応力分布図