

石材の摩擦モデル構築と石アーチ模型解析への適用

熊本大学工学部 学生員○藤田 千尋 熊本大学大学院 学生員 古賀 圭一郎
熊本大学大学院 フェロー 山尾 敏孝

1. はじめに

日本の石橋の多くが九州に存在しているが、石橋にはアーチ輪石や壁石等に種々の石材が使用されている。阿蘇噴火に伴う灰石と呼ばれる溶結凝灰岩をはじめ、天草の砂岩、花崗岩、安山岩のなどがある¹⁾。これらの石材に関する材料特性は地質分野では調査されているが、石橋で使用可能な力学的特性を求めてなく、データが少ないのが現状である。著者らは、熊本県内の石造アーチ橋に使われている石材を中心に収集し、乾燥密度や弾性係数と圧縮強度の関係を調べ、材料特性を把握してきた²⁾。本研究では、得られたせん断試験等の材料試験結果より、摩擦モデルであるすべり変位の関係を構築した。この関係を解析手法に組み込み、せん断試験の解析や石アーチ模型実験の解析を試み、実験結果と比較検討を行なって解析手法の妥当性について検討した。

2. 石材の材料試験と石アーチ模型の集中荷重実験

使用した石材は、採取場所の異なる溶結凝灰岩、安山岩、砂岩、花崗岩の4種類である。圧縮強度試験は、直径50mm、高さ100mmの円柱状の試験体を用いて弾性波速度試験と圧縮強度試験を実施した。試験では堆積方向Vと堆積層方向Hの2方向から供試体を製作した。なお、安山岩は層方向がないため異方向から製作した。圧縮強度試験では圧縮強度、ヤング率、ポアソン比および乾燥密度を計測した。

次に、石材間のせん断特性を把握するために、石材(100x100x50mm)2枚を鋼ボックスに上下にそれぞれはめ込み、石材間における接触面を再現した。石橋の軸力に相当する荷重を鉛直下向きに作用させ、すべりが発生するまでの水平変位を計測した。また、使用した鉛直荷重は石橋の平均的な自重による作用応力を別途計算した結果より、 0.58N/mm^2 、 1.15N/mm^2 、 1.75N/mm^2 の3パターンとした。上下ボックスの相対変位を測ることですべり発生変位を求めた。

図2は実験に使用した石アーチ模型で、スパン900mm、ライズ180mmのスパンライズ比0.2の形状を有する3列の石アーチとした。実験ではL/2点に集中荷重を作用させる静的荷重とした。図中に示すのは、測定に使用したひずみゲージと変位計で、図に示す位置に設置し、石アーチ模型の変形挙動や応力状態を調べた。また、石材間の応力分布を測定するため応力測定紙を間に挟んで測定した。荷重はL/2点に剛板を載せて、単調増加で5000Nまで荷重増荷した。なお、集中荷重のためL/4点と3L/4点が膨らむため、拘束板で固定した。

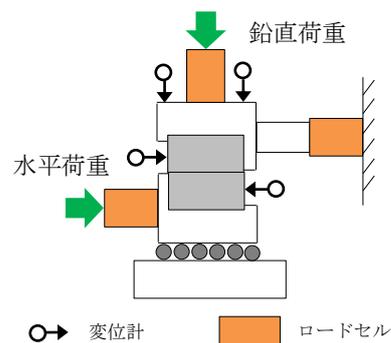


図1 せん断試験装置

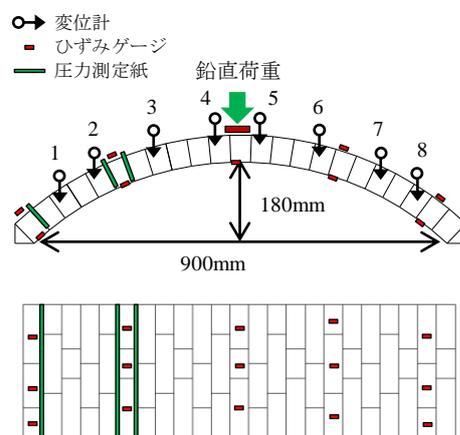


図2 スパンライズ比0.2の石アーチ模型

3. 解析モデルの概要

汎用プログラムABAQUS³⁾を用いて、せん断試験の2次元解析と3次元解析を実施し、図3に2次元解析モデルの例を示す。実験と同様の寸法のモデルを作成し、個々の石材を2軸方向に8分割ずつ分割した。3次元モデルの場合は3軸方向に4分割ずつに分割した。境界条件は、実験と同様に固定し、鉛直荷重は実験と同じように3パターンの荷重を与え、下側の石に強制変位を与えて荷重を作用させた。また、石アーチ模型にはここで誘導した摩擦モデルを導入し、2次元モデルを製作した⁴⁾。石材は溶結凝灰岩、花崗岩、砂岩の3種類を使用し、実験で得られた材料特性を用いた。

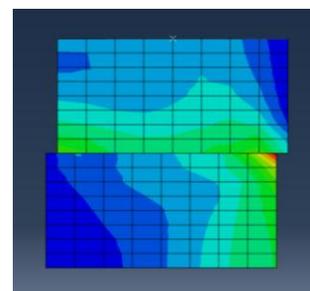


図3 2次元せん断解析モデル

4. 結果および考察

圧縮試験の結果を図4にせん断試験の結果の一例を図5に示す。圧縮強度とヤング率の関係をみると両者には

ある程度の相関関係があることが分かるが、また、堆積方向による差も少し生じている。花崗岩や安山岩に比べると石橋に多く用いられている溶結凝灰岩は、バラツキがあるものの比較的強度が小さいことがわかる。溶結凝灰岩は生成時期の違いや溶結の度合い等が異なるため差が生じたものである。

図5は、せん断試験で得られたせん断応力とすべり変位の結果を、3パターンの軸力ごとでそれぞれまとめて示した。縦軸にせん断応力 $\tau(N/mm^2)$ を横軸にすべり変位 $U(mm)$ をせん断試験の石材幅 b で除して無次元化で示した。無次元化したすべり U/b と、せん断応力の大きさ τ について、最小2乗法でせん断応力の大きさを近似した結果、次式が得られた

$$\tau = 261.5(U/b) - 0.31 \quad (1)$$

せん断方向における石材の長さや種類が変わっても、これまでの研究結果と同様にすべり発生時の応力が大きいほど滑りにくいという傾向は変わらなかった。

図6は代表的な溶結凝灰岩、花崗岩、砂岩を対象に、2次元モデルを用いてせん断解析を行い、実験結果と比較して示した。すべり変位はそれぞれ実験値と同様に無次元化している。溶結凝灰岩については、すべり発生時の変位は実験値と解析値と多少差があるが、最大せん断応力是对応している。これは砂岩でも同様な結果となった。しかし、圧縮強度が大きい花崗岩の解析値は軸力を変化させてもせん断応力が実験値より小さくなった。3種類の石材に共通しているのはすべりが発生するまでの剛性はよく対応していることである。今後、他の石材及び3次元モデルにより検討する予定である。

図7はスパンライズ比0.2の石アーチ模型の静的載荷試験より得られた鉛直変位挙動を示している。アーチクラウン部のL/2点の変位が大きく、乱れはあるものの妥当な挙動である。L/4点と3L/4点は多少反対側に膨らんだ。なお、本研究で提案するすべり変位関係を用いた解析手法による石アーチ模型の解析値と実験値の比較検討及び圧力測定紙の結果については当日発表の予定である。

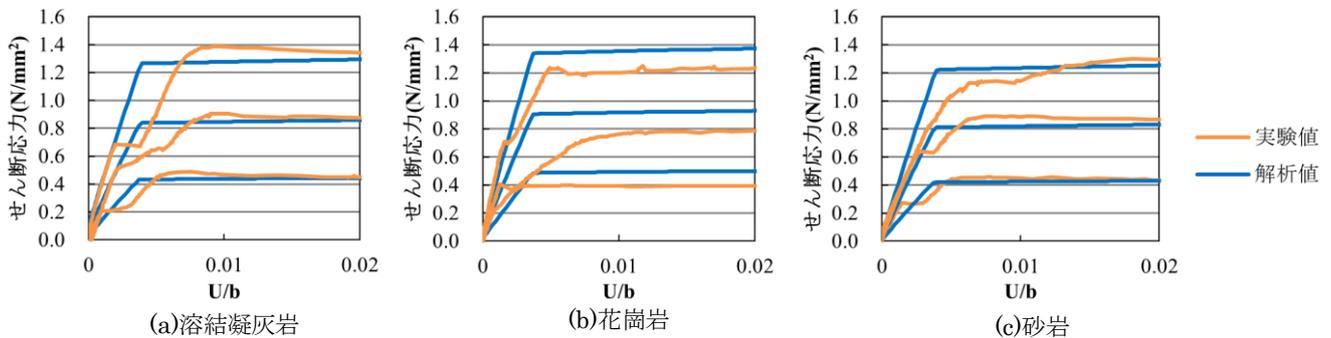


図6 せん断試験および解析値の比較

参考文献

- 1)九州構造・橋梁工学研究会(KABSE)：石橋の維持管理に対する健全度診断と点検要領, 2010年
- 2)工藤 祐資：石橋の3次元動的解析手法の開発と・・・, 熊本大学自然科学研究科, 平成21年度修士論文, 2010
- 3) ABAQUS：Analysis User's Manual Version 6.10：SIMULIA, DASSAULT SYSTEMS, 2010
- 4)古賀 圭一郎 他2名：石材間摩擦に着目した・・・, 土木学会西部支部研究発表会, 2012.3

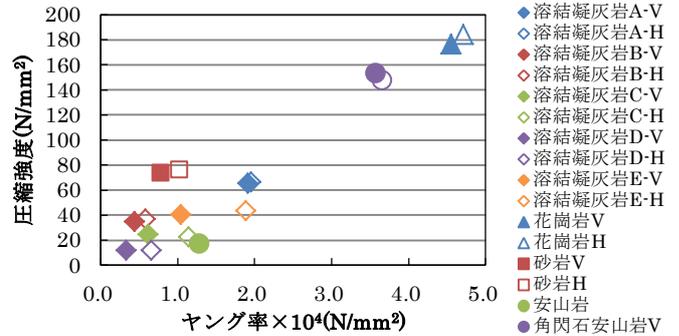


図4 ヤング率と圧縮強度の関係

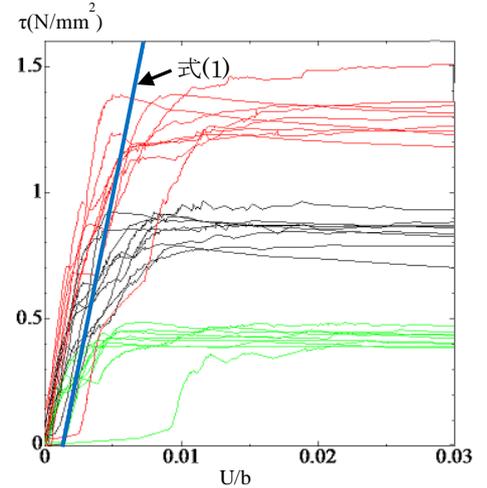


図5 すべり変位とせん断応力の関係

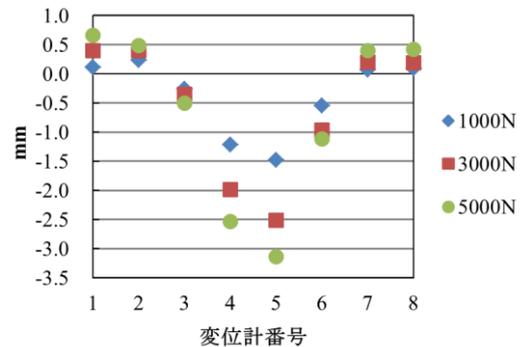


図7 石アーチ模型の鉛直変位挙動