

アーチ輪石の崩壊荷重を弾性骨組解析法で算定する一提案

建設プロジェクトセンター 正員 筒井 光男
 熊本大学 フェロー 山尾 敏孝
 建設プロジェクトセンター 村井 辰也

1. はじめに

アーチ形式を有する石橋は輪石・壁石・中詰で構成された構造であるために、解析は個別要素法や有限要素法などが用いられることが多い。崩壊荷重を通常の骨組解析法で求めることが出来れば、通常業務で使用するソフトを利用出来て便利である。ここでは、アーチ輪石を対象に軸力線を用いた弾性骨組解析法で崩壊荷重を算定する方法の提案をする。

2. 軸力線を用いた弾性骨組解析法

自重が作用して自立している図-1のような固定支持されたアーチ輪石を考えると、軸力線は輪石の内部に収まっている。この系に荷重を加えると軸力線が移動し、一部は輪石目地上端あるいは下端（以下目地端部と記す）に達し、残りは石材内部に収まっている状態から、目地端部がヒンジ状態になる。さらに荷重を増加させると、既に出来たヒンジ部の軸力線は固定され、残りの軸力線が移動して他の目地端部がヒンジ状態となり、最終的にヒンジが4個できると輪石は崩壊に至る。この構造系の変化を弾性骨組解析法で解くことによりアーチ輪石の崩壊荷重の計算が可能となる。なおこの方法では、荷重が増加してもヒンジの位置は変化しないものと仮定する。以下に解析手順を示す。

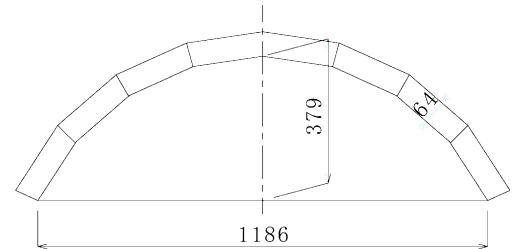


図-1 解析対象のアーチ輪石

- 1) 図-1のアーチ輪石を図-2のように骨組解析用にモデル化する。なお、骨組部材は輪石中心とし、死荷重を作用させた後、荷重を作用させる。
- 2) 荷重が増加すると目地端部にヒンジが発生するので、この位置に節点を設けてアーチ部材と連結する。ヒンジ部の節点の設け方は2種類ある。内側の目地端部が開くときは、図-3 (a)に示すようにΛ型の形状となる。また、逆に外側が開くと上下反転したV型形状となる。基部では 図-3 (b)に示す形状あるいはその反転形状となる。ヒンジ節点は回転自由とする。なお、これらのヒンジをΛヒンジ、アーチ部材とヒンジを繋ぐ部材をΛヒンジ部材と呼ぶ。
- 3) Λヒンジでは曲げモーメントは生じないが、輪石部材には偏心モーメント $M_0 = N \cdot \delta$ が作用する。 N はその位置での軸力、 δ は偏心量で輪石厚の1/2である。この M_0 は軸力が変化するとに伴い変化する。荷重の増加に対して、この M_0 と残りの部分の曲げモーメントが変化して抵抗する。そして、残りの部分のモーメントが抵抗モーメントに達すると新たにヒンジが発生する。なお、抵抗モーメント M_r は新たなヒンジ位置での軸力 N に輪石厚の1/2を乗じた値となる。
- 4) 新たなヒンジ部にΛヒンジを追加する手法を繰り返し、3個目のヒンジ発生後、作用モーメント M_s が M_r と一致する箇所が4個目のヒンジとなり、輪石は崩壊する。なお、アーチ輪石のモデルによっては3個目と4個目が同時にヒンジに至る場合もある。

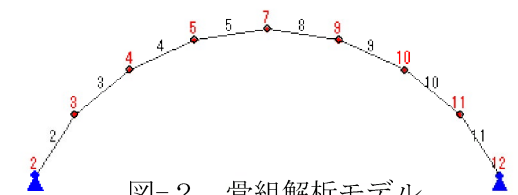
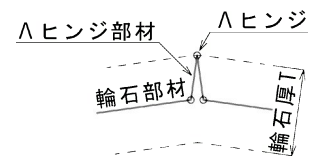
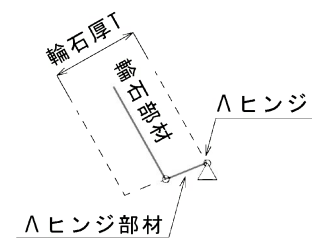


図-2 骨組解析モデル



(a) 外側ヒンジモデル



(b) 基部外側ヒンジモデル

図-3 ヒンジモデル

3. 計算例

(1) アーチ輪石のアーチクラウン部に集中荷重

文献1)にアーチ輪石模型に集中荷重を載荷する実験がある。模型諸元は支間1186mm、ライズ379mm、輪石厚 $T=64$ mm、幅400mm、輪石数は39個である。この模型のアーチクラウン部に集中荷重を載荷した

場合の崩壊荷重は40kg弱であった。

そこで、この模型を対象にして提案法で解いてみることにした。解析モデルは、図-2に示すような輪石数を8個、石材の比重は2.2とした。死荷重が作用するアーチ輪石のクラウン部(節点7)に集中荷重が作用している。集中荷重を増加させると、図-4に示すような曲げモーメント図となり、曲げモーメント大きいクラウン部外側にヒンジが出来るので、そこに Λ ヒンジを設ける(図-5)。さらに集中荷重を増すと、次に曲げモーメントが大きくなる両基部外側にヒンジが出来るため、ここに Λ ヒンジを追加したモデルを図-6のように作成する。この系で、次に曲げ大きい1/4点、3/4点付近の曲げモーメントが抵抗値と同じになる時が崩壊荷重となる。荷重を増減させて計算すると、39kgfのときに一致した。これが崩壊荷重であり、文献1)の実験値とほぼ一致していることがわかる。

$$1/4, 3/4点付近のM_s = 0.0230 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (1)$$

$$1/4, 3/4点付近のM_r = -0.719 \times 0.032 = -0.0230 \text{ kN}\cdot\text{m} \quad (2)$$

(2) 円弧アーチに水平地震荷重

文献2)にアーチ輪石のみの橋の解析結果がある。諸元はアーチ半径 $R=10\text{m}$ 、中心角 157.5° $T/R=0.15$ 、輪石数7である(図-7)。このモデルの崩壊水平震度0.37であったので、提案法で計算して比較することにした。自立しているアーチに左から水平地震荷重を作用させると、まず曲げモーメントが大きい右基部外側にヒンジが出来、ここに Λ ヒンジを設ける。さらに荷重を増すと、曲げモーメントが大きいクラウン左格点にヒンジが出来る。図-8は Λ ヒンジを追加したモデルで、荷重を増すと水平震度0.37のとき左基部および右L/4点付近の作用モーメントと抵抗モーメントがほぼ一致した。左基部 $M_r=11.87 \times 0.75=8.90$ 、 $M_s=8.86$ 、8部材右 $M_r=11.29 \times 0.75=8.47$ 、 $M_s=8.43$ 、単位はすべて $\text{kN}\cdot\text{m}$ 。この崩壊水平震度は文献2)の解析値と一致した。各部材の断面力から偏心量を求めて作成した崩壊時の軸力線位置を図-9に示した。

文献1)の模型実験値および文献2)の解析値と本解析法の結果より算定値はほぼ良い対応を示した。今後他のモデルについても比較検証する予定である。部材の断面性能は、 Λ 部材も含め輪石の形状から算出したものを使用した。ヒンジ位置は固定されるために移動荷重には適さないが、軸力線図が正であれば崩壊荷重は正しいと考えられるため、ヒンジの発生順序は崩壊荷重の大きさには影響しないものと考察される。

4. おわりに

アーチ輪石の崩壊荷重を、軸力線を用いた弾性骨組解析で良い精度で算定する方法を提案した。石橋の点検・診断・補修に役立てば幸いである。

参考文献

- 九州橋梁・構造工学研究会、石橋の設計ガイドラインと維持管理ガイドライン、2014.6 P. III-29
- Matthew J. DeJong, Seismic Assessment Strategies for Masonry Structures, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY、June、2009、P40

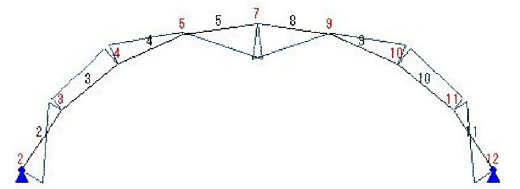


図-4 曲げモーメント

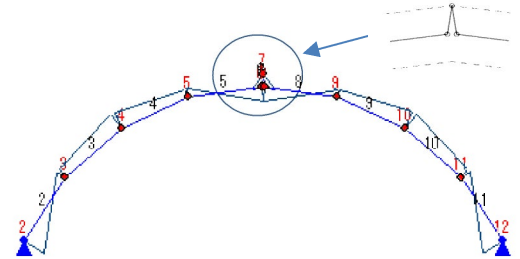


図-5 クラウン Λ ヒンジモデル

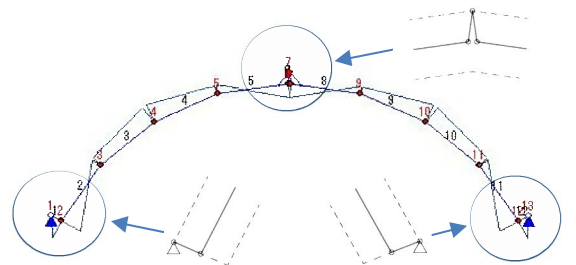


図-6 クラウン、両基部 Λ ヒンジモデル

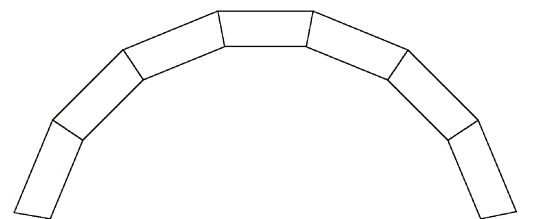


図-7 アーチ輪石7個モデル

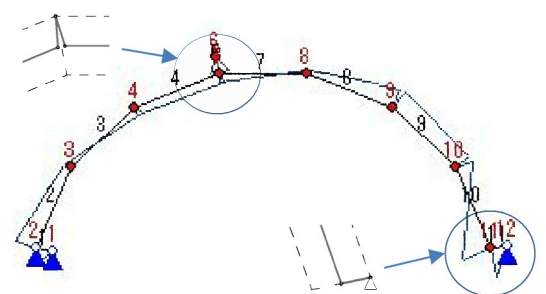


図-8 右基部、L/4 Λ ヒンジモデル

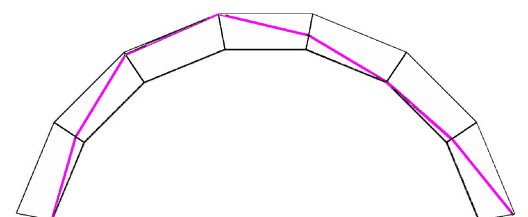


図-9 軸力線図