

# 石造アーチ橋の地震時安定性に関する簡易照査法と補強方法

国土コンサルタンツ(株) 正員 筒井 光男  
九州産業大学 フェロー 水田 洋司  
福岡大学 正員 坂田 力

## 1. はじめに

石造アーチ橋には、紀元前に作られて現存するものがある。その維持管理を含めた経済性は、現在の鋼やコンクリートを用いた橋梁よりも優れている可能性がある。しかしながら、石造アーチ橋では地震時の安定性など未解決の問題が残っており、設計法および解析方法が確立していない。このような状況で、すべての石造アーチ橋に動的解析を行うのも非現実的である。そこで、ある条件を満たしていれば、耐震性を有すると考えられる、見なし規定について検討したので報告する。

## 2. 見なしの考え方と補強案

多くの地震動加速度は 1G を超えないこと、石造アーチ橋の固有振動は、10Hz 前後より高く共振しにくいのために、応答加速度は 1G を超えないことが予測される。このことを踏まえて、耐震設計見なし規定を次の仮定の下に求めた。

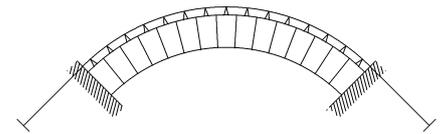


図-1 ケーブル補強イメージ

i) 地震応答加速度は 1G とする。ii) 重力が作用している輪石のみのアーチに、1G を水平に単独で静的に作用させる。この状態で不安定にならない場合に、レベル II に対して、耐震性能 3 を満たすと考える。本論文では耐震補強案として、輪石に沿ってケーブルを配置し張力を導入する案 (図-1) を提案する。

## 3. 面外地震に対する安定

### 3.1 滑動

輪石のみのアーチ (図-2) の水平力  $H$  と摩擦抵抗力  $R$  は下式で近似する。

$$H = \frac{w \cdot f^2}{8f} \quad (1)$$

$$R = H \cdot \alpha \cdot \mu \quad (2)$$

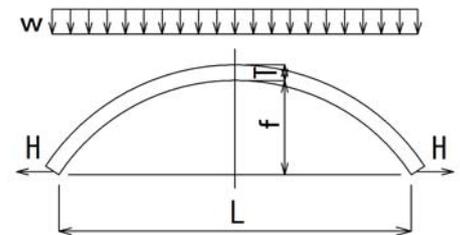


図-2 面外滑動モデル

ここで、 $w$  は単位長さ当たり自重、 $L$  は支間、 $f$  はライズ、 $\mu$  は摩擦係数を示す。 $\alpha$  は張力導入後の軸力の増加率を示す。たとえば、自重と同じ張力を導入するときは  $\alpha=2.0$  である。一方、面外地震時作用剪断力  $Q$  は式 (3) となる。式中、輪石自重は  $w \cdot L$  と近似、 $S$  は水平震度である。 $R > Q$  として整理すると式 (4) となる。

$$Q = \frac{w \cdot L \cdot S}{2} \quad (3)$$

$$\frac{f}{L} = \frac{\alpha \cdot \mu}{4S} \quad (4)$$

上式は、 $\mu=0.5$ 、 $S=1.0$ 、 $\alpha=1.0$  の場合  $f/L < 1/8$ 、 $\alpha=2.0$  の場合  $f/L < 1/4$  であることを示している。

### 3.2 転倒

水平震度 1.0 の場合、鉛直方向荷重と水平方向荷重が同じであり (図-3)、式 (5) を満たすと安定となる。ここで、 $B$  は幅員、 $W$  は自重、重心位置は  $2f/3$  と近似している。 $\alpha$  を導入して整理すると式 (6) となる。

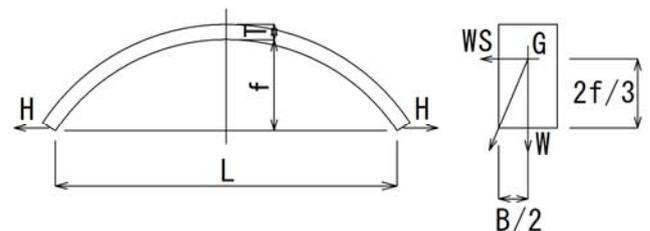


図-3 面外転倒モデル

$$\frac{B}{2} > \frac{2f}{3} \quad (5)$$

$$B > \frac{4f}{3\alpha} \quad (6)$$

#### 4. 面内地震に対する安定

##### 4.1 軸力がゼロにならないライズ支間比

石造アーチ橋の軸力線の偏心率は曲げモーメントを軸力で割った値であり、軸力がゼロになると、偏心率が $\infty$ となり不安定となる。重力が作用している輪石のみのアーチ橋に、水平震度  $S$  の地震が作用したときの軸力がゼロとなるライズ支間比を求めてみる。地震による水平力  $H_e$  は両橋台で均等に受け持つとして、

$$H_e = \frac{w \cdot L \cdot S}{2} \quad (7)$$

式(7)をアーチ水平力  $H \cdot \alpha$  と等しいと置いて整理すると

$$\frac{f}{L} = \frac{\alpha}{4S} \quad (8)$$

よって、 $S=1.0$ 、 $\alpha=1.0$  の場合、 $f/L < 1/4$ 、 $\alpha=2.0$  の場合  $f/L < 1/2$  であれば軸力は零とならない。

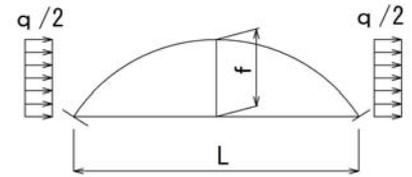


図-4 面内地震モデル

##### 4.2 面内曲げに対する安定

図-4の荷重を受ける固定アーチの基部曲げモーメントは、

$$M = \frac{q \cdot f^2}{8} = \frac{w \cdot L \cdot f \cdot S}{8} \quad (9)$$

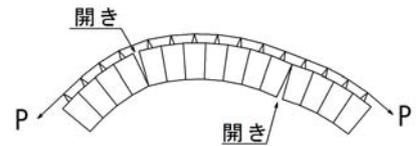


図-5 輪石の開き

いま、輪石の外側にケーブルを配置して、自重分の張力が導入されているとする。この場合、輪石が内側に開く時は、ケーブルは伸びないが、要石を挟んだ反対側では輪石外側が開く必要がある(図-5)。輪石内側が開いても、3ヒンジまでは安定であるため、輪石の外側が開く場合を安定の判断に用いる。ケーブルが伸びると張力が増す。ケーブルの安全率を3.0とすれば、ケーブルは3倍の張力に耐える。このとき軸力作用位置は自重が輪石中央、ケーブルが輪石外縁だから(図-6)、抵抗曲げモーメント  $M_r$  は次式となる。

$$M_r = (0.5+3)H \cdot T \quad (10)$$

$T$  は輪石厚である、式(10)を式(9)と等しいと置くと式(11)式となる。張力を導入しないと式(10)は1/7倍、式(11)は7倍となる。

$$T = \frac{f^2 \cdot S}{3.5L} \quad (11)$$

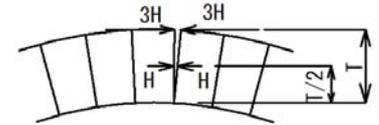


図-6 軸力作用位置

いま、 $f/L$  を  $1/4$  の時、輪石厚式(11)と、文献1)で筆者等が提案した輪石厚式(12)を等しいとおくと、支間86mが得られる。ライズ支間比を  $1/4$  以下に変化させても、支間86m以下では輪石厚式(11)は式(12)より小さい。

$$T > (0.022L + 0.28) \sqrt{\frac{2f}{L}} \quad (12)$$

表-1 結果一覧

対象 \ $\alpha$	$\alpha=1$	$\alpha=2$
面外滑動	$f/L < 1/8$	$f/L < 1/4$
面外転倒	$B > 4f/3$	$B > 2f/3$
軸力残存	$f/L < 1/4$	$f/L < 1/2$
面内安定	$T > 2f^2/L$	$T > f^2/(3.5L)$

#### 5. 結果の整理

結果を整理して表-1に示す。また、ライズ支間比が  $1/4$  以下の場合、支間86m以下であれば面内安定より決まる輪石厚式(11)は提案輪石厚式(12)より小さい。

#### 6. まとめ

通常の支間を有する石造アーチ橋において、次の条件をすべて満たす場合は、水平震度1.0の地震に対して輪石が崩壊しないとみなせることを提案する。さらに、固有振動数が10Hz以上の条件を満たす場合は、レベルII地震に対しても、輪石は崩壊しないと見なせることを提案する。

- i) ライズ支間比が  $1/4$  以下。
- ii) 輪石外側にケーブルを張って自重相当分張力を導入し、定着部を含めたケーブルの安全率が3以上。
- iii) 輪石幅員はライズの  $2/3$  以上。
- iv) 輪石厚は提案式(12)以上。