

輪石の開閉を伴う石橋の揺れと耐震性についての一考察

建設プロジェクトセンター 正会員 筒井光男

1. はじめに

石橋が輪石の開閉を伴って揺れる時の、釣り合いに考察を加えた。そして、落ちるように揺れるという提案をした¹⁾。また、石橋の崩壊について報告した²⁾。今回は、釣り合い式中の揺れを表す係数 β を極座標表示することにより新たに見える点、そして軸力線の偏心を考慮する場合について考察を加えた。

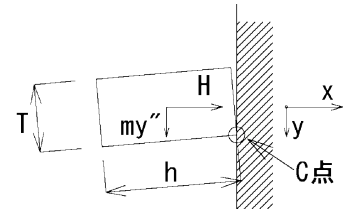


図-1 単輪石モデル

2. 文献1)2)の概要

石橋から輪石一つを取り出したモデル図-1 (単輪石と呼ぶ) のc点回り回転モーメントの釣り合いは回転角が小さい時は式(1)となる。この式が輪石のみの石橋 (図-2) に適用できると考える。

$$y'' = -\beta g \quad (1)$$

ここで、

$$\beta = \frac{TL^2}{8fh^2} \quad (2)$$

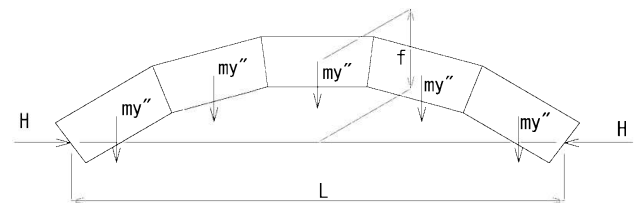


図-2 石橋モデル

y は輪石の鉛直位置、 $''$ は2階微分、 g は重力加速度、 T は輪石厚、 L はアーチ支間、 f はライズ、 h は単輪石の場合は輪石長であるが、石橋の場合はそれに相当する長さとなる。図-1の m は輪石質量、 H はアーチ水平力 $\frac{wL^2}{8f}$ 、 H に含まれる w は分布自重 $\frac{mg}{h}$ 。文献2)の主内容は、a)崩壊現象は質量に影響されない。b)崩壊は速度による。c)崩壊を起こす速度は縮尺比の平方根に比例する。d) β は石橋の揺れを表す係数である。

3. 釣り合い式についての考察

3.1 極座標表示

円弧の半径 R と $L \cdot f$ の関係 $L^2 = 8fR - 4f^2$ 、 $f = R(1 - \cos \frac{\theta}{2})$ 、さらに $h = R \cdot \Phi$ として式(2)に代入すると、

$$\beta = \frac{T(1 + \cos \frac{\theta}{2})}{2R\Phi^2} \quad (3)$$

ここで、 θ は中心角であり半円のとき 180° である。アーチの多くが円弧であるため、この表示は有意義である。たとえば、 R と θ および Φ を固定して T のみ大きくなると、 β は T に比例して増加し、その傾きは $1 + \cos(\theta/2)$ に比例する。形状が同じで縮尺が異なる場合は T/R と θ および Φ は変わらないので β は変わらない。これは式(2)と同様である。

3.2 偏心の影響

文献(1)(2)および§3.1では、単輪石の釣り合い式(1)が石橋に適用できるものとして考察を進めてきた。これは軸力線が輪石中心にあるという条件のもとで成立する。しかし石橋では、必ずしも輪石中心には無い。その影響について考察する。カテナリーを逆さにしたアーチは、軸力線が輪石中心を通ることを利用して偏心量を調べる。図-3はカテナリーと半円および $f/L=1/4$ 、中心角 106° の円を重ねたものである。半円の場合、円弧とカテナリーの差は半径の約10.6%であり、輪石厚がそれ以上ないと自立しない。 f/L が $1/4$ の時、差は半径の1.5%と小さい。このように中角が大きいとき偏心量は大きく、中心角が小さいと偏心量は小さい。このことから、 θ が大きい時は偏心の影響を考慮する必

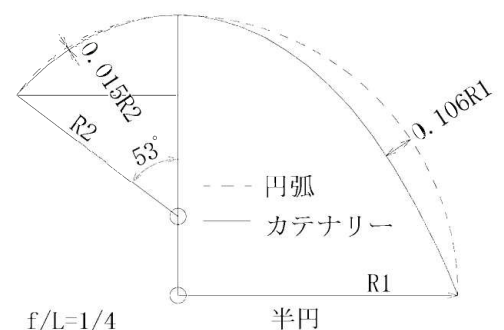


図-3 カテナリー・円

要があることが判る。その方法として、偏心量だけ輪石厚が小さくなると近似することを提案する。その場合、式(2)(3)は(4)(5)となる。式中の δ は偏心量であり、半円の時は $0.106R$ である。

$$\beta = \frac{(T-\delta)L^2}{8fh^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{(T-\delta)(1+\cos\frac{\theta}{2})}{2R\phi^2} \quad (5)$$

3.3 考察

釣り合い式より、 βg は輪石のみにより構成される石橋の輪石が開閉を始める橋軸方向加速度(限界加速度と呼ぶ)でもある。 $\delta=0$ の時は、式(1)(2)(3)となり、4つの変数 $T \cdot L \cdot f \cdot h$ あるいは $T \cdot R \cdot \theta \cdot \phi$ より計算できる。 h と ϕ 以外はアーチの外形寸法により決まる。 h と ϕ の値は、崩壊時の形状(以後モードと呼ぶ)のヒンジ間距離によると推察される。形状が同じで縮尺比のみ違う場合は、崩壊時のモードも同じと考えられ、 L/h および ϕ は変わらないため、 β も変わらない。 h および ϕ の値については、今後研究を進める予定である。 β が決まると微分方式が確定し、崩壊速度等を直接求めることができる可能性が考えられる。

4. 既往データと比較

図-4は文献3)4)の輪石のみのアーチ石橋の限界加速度の解析値をプロットしたものである。縦軸は限界加速度の g に対する割合 λ (本論文の β に相当)、横軸は輪石厚の半径に対する割合。 $\theta=157.5^\circ$ の値は文献3)、他は文献4)のデータより計算して求めた。これを見ると、i) T/R と λ の関係はほぼ直線である。ii) θ が小さくなるに従い勾配が大きくなる。iii) $\lambda=0$ である横軸との交点は半円の場合で半径の1割程度である。iv) 中心角が小さくなるに従い、横軸と交差する点が原点に近くなり、偏心の影響が小さくなる。これらはすべて§3.1および§3.2と合致する。

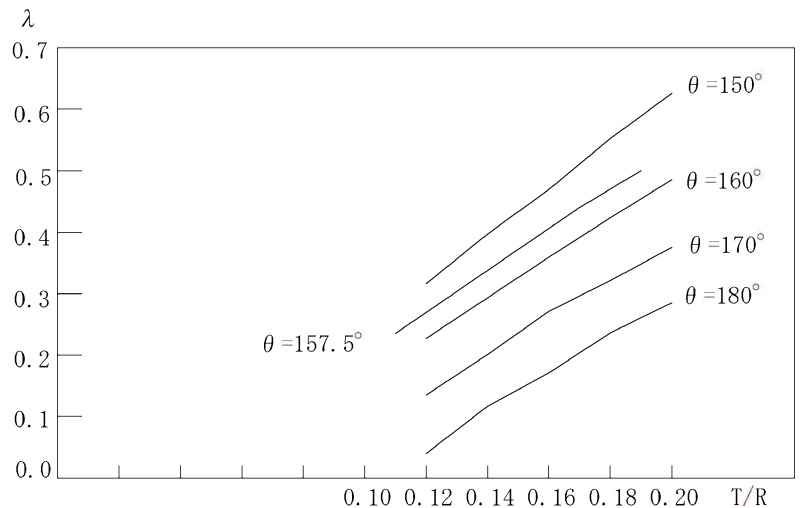


図-4 輪石厚/半径・ λ 図

5. 簡易実験との比較

図-5は木製石橋模型を傾斜させた実験の写真である。諸元は $L=37.3\text{cm}$ 、 $f=10.5\text{cm}$ 、 $T=3.8\text{cm}$ 、 $R=21.8\text{cm}$ 、中心角 θ は 117° 。実験の崩壊角は 37° であった。偏心の影響はないものとし、さらに h を1ブロック長 9.0cm として式(2)を用いて β を計算すると 0.777 となる。この場合の崩壊角は $\tan^{-1}\beta=38^\circ$ と実験値に近い値となる。また、偏心量 δ を図-2の方法で求めると半径の 2.2% となった。その影響を考慮すると、 β は上記の 87% の 0.676 、崩壊角は 34° となる。

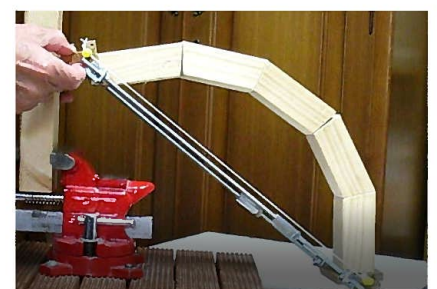


図-5 簡易崩壊実験

6. おわりに

輪石の開閉を伴う石橋の揺れの釣り合い式中の、揺れを表す係数 β を極座標表示とし、そして軸力線の偏心を考慮する場合について考察を加えた。石橋の耐震性の解明に役立てば幸いである。

参考文献：

- 1) 筒井、坂田、輪石の開閉を伴う石橋の揺れに関する一考察、平成29年度土木学会年次学術講演会概要集 I 497、2017.9
- 2) 筒井、坂田、石橋の崩壊に関する一考察、平成29年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集 I -012、2018.3
- 3) Matthew J. DeJong, Seismic Assessment Strategies for Masonry Structures, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, June, 2009, figure5-5
- 4) M. J. DeJong etc. Equivalent rocking systems: Fundamental rocking parameters, 15WCEE, 2012, Figure6