

石橋の崩壊に関する一考察

(株) 建設プロジェクトセンター 正会員 筒井光男
福岡大学 正会員 坂田 力

1. はじめに

筆者等は、輪石の開閉を伴う石橋は落ちるように揺れているという提案をした¹⁾。今回は、崩壊に直接影響する要因や相似則について考察を加えたので紹介する。

2. 文献1)概要

図-1の輪石一個を取り出したモデル（以下単輪石と呼ぶ）のC点回りの釣合いより。

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

ここで、 $''$ は2階微分、 y は輪石重心鉛直座標、 $\beta = \frac{TL^2}{8fh^2}$ 、 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 は単輪石長さ。図-1の m は輪石質量、 H はアーチの水平力 $\frac{wL^2}{8f}$ 、 w は自重 $\frac{mg}{h}$ 。式(1)は落下の式 $y'' = -g$ に似ている。これが、単輪石が落ちるように揺れる根拠である。図-2に石橋モデルを示す。単輪石モデルを組み合わせたものが石橋であるから、全体は要素の特性を引き継ぐと考え、釣合い式は式(1)とし、 h の取り方が変わると考える。

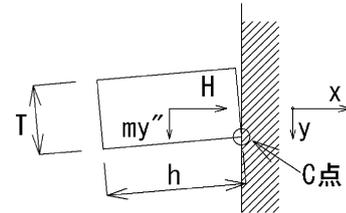


図-1 単輪石モデル

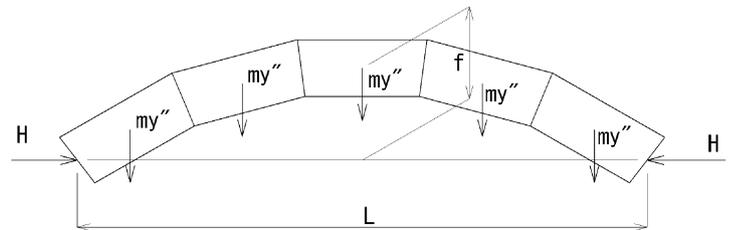


図-2 石橋モデル

3. 考察

3.1 質量の影響

釣合い式(1)には質量 m は含まれていないので、揺れは質量に影響されない。ガリレオがピサの斜塔から重さの違う物を落とした実験を思い起こすまでもなく、サイズが同じであれば輪石の開閉を伴う揺れは質量には関係無いこととなる。

3.2 崩壊と初速の関係

橋軸方向荷重を受ける石橋は、4つのヒンジが出来て、その移動による回転角が限界値を越えたら崩壊し、超えなければ元に戻る（以下、この限界値を限界移動量及び限界角と呼ぶ）。ボールを投げ上げる時の頂点高は初速に依存するために、崩壊は初速によることが推察できる。なお、文献2)において畑野は、角柱の転倒や粒体斜面の振動崩壊実験結果を示し、速度によって規定される範囲が広いと言っている。

3.3 縮尺模型

いま、実橋と縮尺 $1/n$ の模型がある場合、 T/f 、 L/h が同じとすれば、 β は同じとなる。 β が同じであれば、初速が同じ場合、 t 秒後の移動量は同じである。このとき、実物部材の回転角は $1/n$ となる。崩壊するためには、実物は模型の n 倍の移動が必要となる。式(1)を積分して、 $t=0$ のとき、初速 $=C$ 、 $y=0$ と置くと次式となる。

$$y = \frac{c^2}{2\beta g} \quad (2)$$

式(2)より、移動量を n 倍にするためには初速は \sqrt{n} 倍必要となることが判る。このことから、大きい石橋は小さい石橋よりも壊れにくいということになる。

3.4 輪石厚の影響

単輪石の厚さが n 倍になったとすると β は n 倍となる。このとき、重力が n 倍の空間における動きと同様となり、同一初速に対する移動量は $1/n$ 倍となる。限界移動量は n 倍となるので、崩壊のためには n 倍の初速が必要となる。石橋の場合は輪石厚が変わると4ヒンジで揺れる形状（弾性振動のモードに当たる）が変わる可能性がある。その場合は h が変り、さらに β が変わる。

3.5 相似則

支配的な物理法則が重力と慣性力であるからフルード数がパイナンバーとなる。

$$\text{フルード数} = \frac{v^2}{Lg} \quad (3)$$

ここで、 v は速度、 L は長さである。式(1)の β も無次元であり、輪石の開閉を伴う石橋の揺れ方を示す。例えば、 β が同じ値であれば、初速に対する移動量は同じである。

4. 既存データとの整合

文献3)に石橋の崩壊荷重図（図-3）がある。図は輪石厚半径比0.15、中心角157.5度とし、支間を1m、5m、10m、20mと変えた場合の崩壊荷重の解析値を示している。図-3の縦軸は荷重の加速度強さ、横軸はその持続時間である。文献3)の解析方法は本提案とは異なるが、整合を調べてみる。加速度に持続時間を乗じると速度になるので、それを縦軸としプロットしたのが図-4である。図-4の中で、図-3の漸近線に近い右側2点を除くと速度がほぼ一定となり、§3.2と合致する。平均値を図中に破線で示している。支間20m、10m、5m、2mでそれぞれ0.60(1.0)、0.43(0.72)、0.30(0.50)、0.13(0.22)である（括弧内は比率を示す）。§3.3によると崩壊する速度は縮尺の平方根に比例し、それぞれ1.0、0.707、0.5、0.22となる。両者はほぼ一致していることが判る。

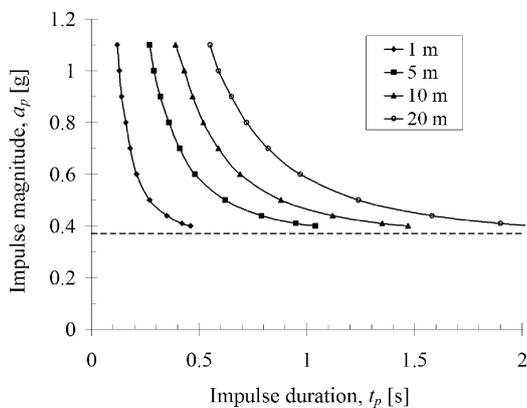


図-3 文献3)Figure 5-4 崩壊図

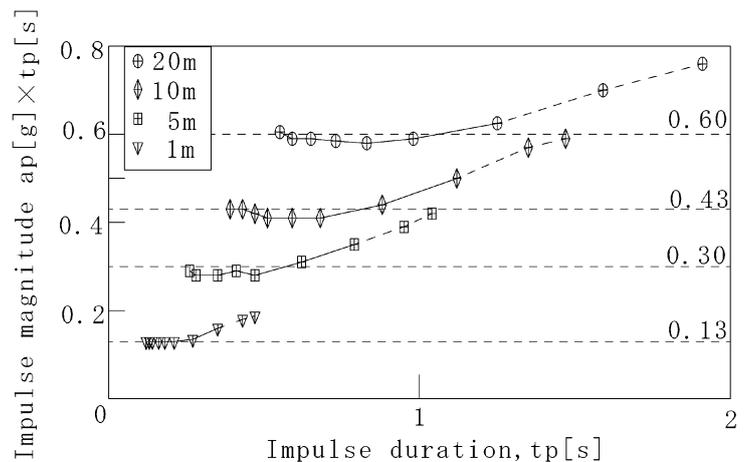


図-4 図-3の縦軸を速度に変換

5. おわりに

筆者等は、輪石の開閉を伴う石橋は落ちるように揺れているという提案をした¹⁾。今回は、崩壊に影響する要因や相似則について考察を加えた。本文が、石橋の耐震性能解明および設計や維持管理に役立てば幸いである。今後、模型実験及び解析による検証を進める予定である。

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年度土木学会年次講演会概要集 I - 497、2017.9
- 2) 畑野、地震の強さを決定する要素について、土木学会誌Vol. 35-8、P21~24、昭和25年8月
- 3) Matthew J. DeJong、Seismic Assessment Strategies for Masonry Structures、MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY、June、2009