

第I部門

パッシブ負剛性すべり支承の開発とその性能評価

京都大学工学部

学生員 ○森本 慎二

京都大学工学研究科

正会員 豊岡 亮洋

京都大学工学研究科

フェロー 家村 浩和

1. 概要

構造物の振動制御手法の研究において、負の剛性を有するデバイスにより構造物のみかけの剛性を低下させ、絶対応答の低減を図る負剛性制御が注目を集めている。この負剛性制御はアクティブ制御やセミアクティブ制御といった手法で実現されてきたが、これらの手法はエネルギー供給や、センサー、複雑な制御を必要とすることなどの問題点があった。そこで、本研究ではエネルギー供給などを必要としないパッシブ制御で負剛性を与えるすべり支承を新たに開発し、桁模型と組み合わせたモデルの振動台実験を行った。また、装置の復元力モデルを提案した。

2. パッシブ負剛性すべり支承

2. 1 負剛性制御

負剛性制御とは式(1)に示すような制御力を与えることにより絶対応答の低減を図るものである^[1]。

$$F = K_D x + C_D \dot{x} \quad (1)$$

ここに、 $K_D (< 0)$ はみかけ上の負剛性、 $C_D (> 0)$ はみかけ上の粘性である。構造物に負の剛性を与えることにより構造系全体としての剛性を低下させ、長周期化することにより絶対加速度応答の低減を図るものである。

2. 2 パッシブ負剛性すべり支承の開発

今回開発したパッシブ負剛性すべり支承の模式図を図1に示す。このように、提案する支承は曲面を持ったステンレスのすべり板と、すべり板との接触面にテフロンを用いたすべり材からなっている。すべり板は曲面が下を向くように桁下面に固定され、すべり材は台に設置した回転軸受けの上に置かれ自由に回転できるようになっている。

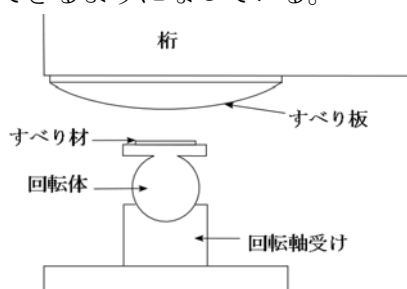


図1 パッシブ負剛性すべり支承の模式図

2. 3 パッシブ負剛性すべり支承の復元力特性

パッシブ負剛性すべり支承の復元力特性はすべり板の曲率および、すべり板とすべり材の間の摩擦力によって決定される。すなわち負剛性 K 、変位 x 、摩擦係数 μ 、支持荷重 W を用いて以下の式で表される。

$$F = K \cdot x + \text{sgn}(\dot{x}) \cdot \mu \cdot W \quad (2)$$

ここで負剛性とすべり板の曲面の関係を図2を用いて示す。まず、すべり材がすべり板の球面に沿って中心角 θ 変位すると、水平変位としては $R \sin \theta$ 変位することになる。ここで、支承（すべり材）に対する垂直抗力を N とし、鉛直支持荷重を W とすると $N = W \cos \theta$ である。 N を水平成分と鉛直成分に分解し、水平成分を N_h とすると $N_h = N \sin \theta = W \cos \theta \sin \theta$ である。 N_h の方向は、従来の正の剛性を持った支承の荷重とは逆方向となるのでこれを負剛性による復元力と考えると

$$N_h = K \cdot x \quad (3)$$

$$\Leftrightarrow -W \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta = K \cdot R \cdot \sin \theta \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow K = -\frac{W}{R} \cdot \cos \theta \quad (5)$$

となる。ただし、回転が小さい範囲では

$$K = -\frac{W}{R} \quad (6)$$

となり、死荷重と曲率により剛性を制御することができる。

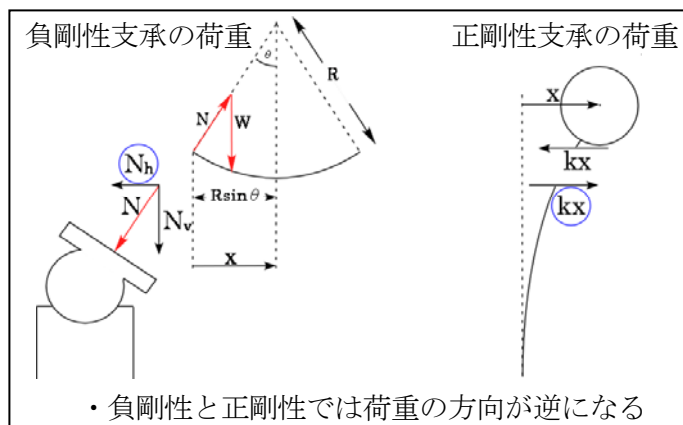


図2 負剛性と曲率の関係

3. 振動台実験による装置の性能の検証

2で提案したデバイスの成立性を検証するため負剛性すべり支承のモデルを製作し橋桁、積層ゴム体からなる橋梁上部工を模擬した供試体とともに大型振動台で加振した。負剛性すべり支承は $R=828\text{mm}$ 、 $\mu=0.1$ の材料（テフロンとステンレス）を用い4基設置した。積層ゴム体は剛性 0.127 kN/mm のものを2基用いた。桁の自重は 98kN であり4基の支承にほぼ均等に死荷重が作用するように調整した。従って式(5)によれば支承1基の負剛性は 0.03 kN/mm となる。図3に供試体設置図を示す。入力波としては振幅 120gal 、周波数 $0.7, 1.0, 1.5\text{Hz}$ の3種類の正弦波を用い、負剛性すべり支承の発揮する荷重を3分力計により直接計測した。図4左側に周波数 0.7Hz における実験結果から得られた、すべり支承4基分を合計した変位-荷重関係を示す。このように提案する機構により実際に負剛性が発現されていることがわかる。

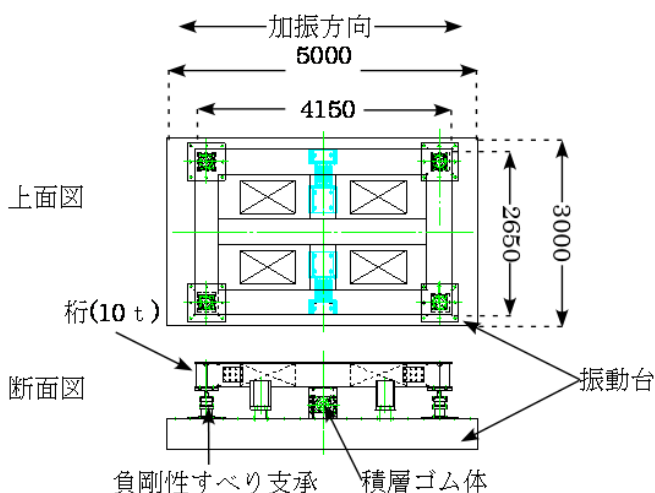


図3 供試体設置図

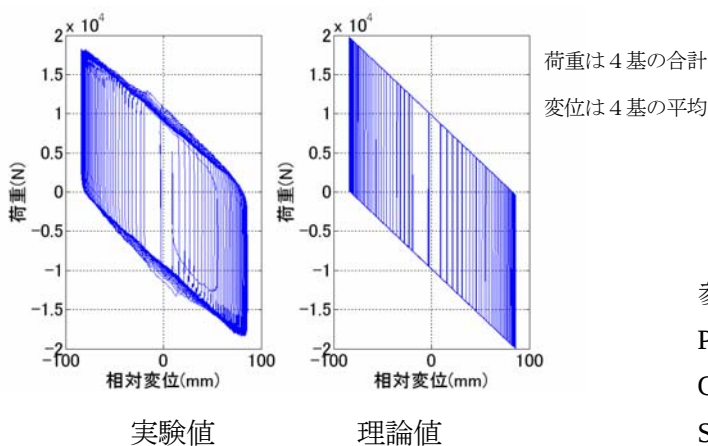


図4 支承の変位-荷重関係

4. 理論値による装置の復元力のモデル化

装置が理論的に発揮する復元力として式(2)を仮定し、 K を式(6)、 R として実験で用いた供試体のすべり板の曲面の半径である 828mm 、 μ をテフロンとステンレスの摩擦係数である 0.1 、 W に桁重量 98kN を与えモデル化した。図4右側は x に実験で計測した桁と振動台の相対変位を与えた変位-荷重関係である。この理論値が実験値とどれくらい合致しているかを検証するため、剛性、最大荷重、履歴によって吸収されるエネルギーの三点を指標とし誤差を求めた。すなわち

$$\text{誤差} = \frac{\text{理論値} - \text{実験値}}{\text{実験値}} \times 100 \quad (\%) \quad (7)$$

とした。その結果を図5に示す。剛性、最大荷重、履歴によって吸収されるエネルギーとともに概ねよくあっている。

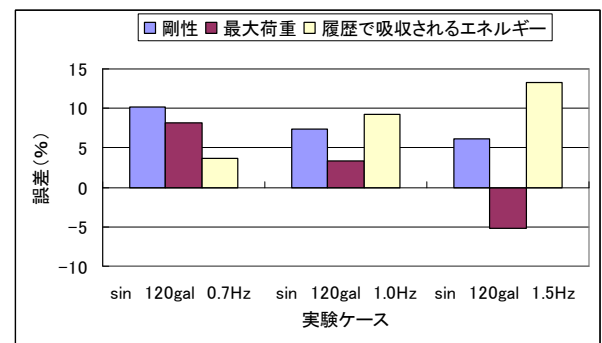


図5 実験値と理論値の比較

5. 結論

1. パッシブ制御で負剛性を与える制震装置を開発した。
2. パッシブ負剛性すべり支承が与える負剛性は式(5)で与えられ、変位が小さい場合には曲率と死荷重の関係である式(6)で与えられる。
3. 振動台を用いた加振実験によりパッシブ負剛性すべり支承が実際に負剛性を与えることを確認した。
4. 理論的に装置が発揮する復元力として式(2)を仮定して装置のモデル化を行い実験値と比較したところ、概ね良好な結果を得た。

参考文献[1] Hirokazu Iemura and Mulyo Harris Pradono : Passive and Semi-Active Seismic Response Control of a Cable-Stayed Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.9, pp189-204, 2002