

第I部門

絶対応答低減のためのパッシブ負剛性すべり支承の開発と振動台実験

京都大学大学院工学研究科
 京都大学大学院工学研究科
 京都大学大学院工学研究科

学生会員 ○徳岡 真司
 正会員 豊岡 亮洋
 フェロー 家村 浩和

1. はじめに

本研究は、構造物に発生する入力そのものを低減させることを目的とした制震分野に関する研究である。構造物の地震時応答、特に絶対応答を低減する手段として、負剛性パッシブ制御手法の有効性について、振動台実験により検討を行った。まず、パッシブに負剛性を発揮する負剛性すべり支承を新たに開発した。このパッシブ負剛性すべり支承を免震支承および桁模型と組合わせたモデルに対して振動台実験を行い、従来のすべり支承を適用した場合の地震時応答と比較することによって、その有効性を検証した。さらに、得られたデータを詳細に検討することで、本デバイスがもたらす制震効果のメカニズムを明らかにした。

2. パッシブ負剛性すべり支承

(1) 負剛性の概念

負剛性制御とは、次のアルゴリズムに従って、デバイスに制御力を与えるアクティブ制御手法として考案されたものである^[1]。

$$F(t) = K_D x(t) + C_D v(t) \quad (1)$$

ここに、 $K_D (< 0)$ は見かけの上の負剛性、 $C_D (> 0)$ は見かけの上の粘性である。このように、構造物に負の剛性を与えることにより、構造系が有する剛性を見かけ上減少させる。その結果構造系が長周期化するため、負剛性制御の適用は構造物の絶対加速度応答を低減するのに効果的であると考えられる。なお、式(1)はアクティブ制御における制御力であるので、見かけ上の負剛性が発揮されていれば、第2項制御力は特に粘性形によるものである必要はない。したがって、本研究で開発したパッシブ負剛性すべり支承は、摩擦力による減衰を与えている。

(2) パッシブ制御

構造物の振動制御手法は、大きく分けて3つのものがある。アクティブ制御・セミアクティブ制御およびパッシブ制御である。アクティブ制御は制御力を発揮するために外部からのエネルギー供給を必要とし、また構造物の変位等を計測する必要がある。セミアクティブ制御については、ダンパーの物理的制約から純粋な負剛性制御を発現することができない(これを擬似負剛性制御と呼ぶ^[2])。また、セミアクティブ制御を実構造物



図-1 パッシブ負剛性すべり支承 (R=476 mm)

に適用した例はまだ報告されていない。一方、パッシブ制御は負剛性の発現こそまだ報告されていないものの、外部からのエネルギー供給や変位計測のためのセンサーを必要とせず、構造物に適用しやすい制御手法である。このような観点から、本研究ではパッシブ制御手法で負剛性を発現するようなデバイスを開発することを目的とした。

(3) パッシブ負剛性すべり支承の構造

パッシブ負剛性すべり支承は、FPS(Friction Pendulum System)を逆にしたような構造である。したがって、パッシブ負剛性すべり支承が発揮する負剛性は、すべり板曲面円弧が水平方向変位にできるとき、近似上部工重量 W (N) およびすべり板の曲面半径 R (mm) を用いて

$$k_{ns} = \frac{W}{R} \quad (2)$$

のように表すことができる。図-1は曲面半径が476 mm であるようなパッシブ負剛性すべり支承の図である。

3. 振動台実験による効果の検証

(1) 負剛性の発現

兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測記録EW成分(以下、JMA KobeEW)を加振レベル0.4倍にして入力した時に、得られた桁慣性力-変位曲線が図-2である。図のように、すべり板の負剛性値が大きくなるにつれて、構造系の2次剛性が低下していることがわかる。このように、本デバイスを用いることで、実際に負剛性が発現していることが確認された。

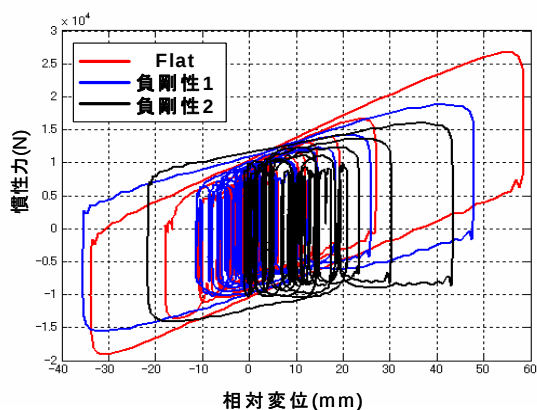


図-2 JMA KobeE W の桁慣性力-変位曲線

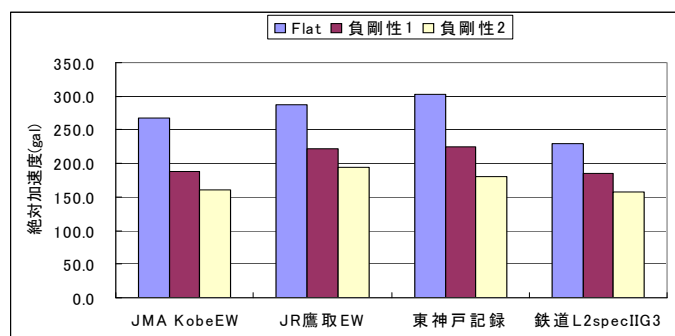


図-3 各地震波・各ケースの絶対加速度応答

(2) 絶対応答の低減

図-3は本実験で使用した入力地震波であるI種地盤用のJMA KobeE W, II種地盤用の兵庫県南部地震JR鷹取駅記録EW成分(以下, JR鷹取EW), III種地盤用の同阪神高速東神戸大橋周辺記録(以下, 東神戸記録), また, 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)における鉄道構造物レベル2スペクトルII3種地盤用(以下, 鉄道構造物レベル2スペクトルII(G3))に対して, 各ケースの絶対加速度応答をグラフにして表したものである。図のように, 負剛性の値が大きくなるにつれて, 絶対加速度応答が低減されていることがわかる。同様に, 絶対変位応答においてもその低減効果は確認されているが, 図は紙面の都合上割愛した。

(3) 低減効果のメカニズム

これらの低減がもたらされることの原因を調べるために, 等価線形解析を行った。その結果は, どの入力地震波においても負剛性が大きくなるにつれて等価剛性は低下し, 等価減衰定数は上昇しているようなものであった。したがって, 構造物に負の剛性が与えられることによって, 構造物の固有周期が長周期化し, さらに高減衰化することによって, それぞれが応答低減に寄与しているものと考えられる。しかし, 応答には一様の結果が得られない部分もあった。これは, 入力地震波ごとに

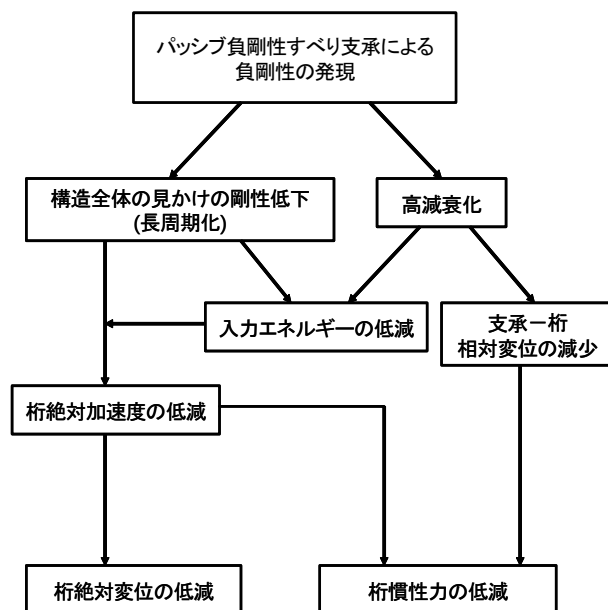


図-4 応答低減のメカニズム

長周期化による効果が強く影響するものと, 減衰による効果が強く影響するものとそれぞれ特徴が分かれることが原因であることが各地震波のスペクトルを求めることでわかった。特に, JMA KobeE Wは長周期化・高減衰化の両方が強く影響する地震波である。

以上のようなことをふまえて, このパッシブ負剛性すべり支承を用いることによって得られる制震効果のメカニズムを示したものが図-4である。

4. おわりに

本研究では, 制震分野において従来提案されてきた負剛性の概念をパッシブ制御で発現できるようなデバイスであるパッシブ負剛性すべり支承を新たに開発した。その上で本デバイスが, 絶対応答低減という点において有効であることを振動台実験を行うことにより示した。また, 本デバイスを導入することにより得られる絶対応答低減のメカニズムを明らかにし, 本デバイスの有効性を確認した。

参考文献

- [1] Hirikazu IEMURA and Mulyo Harris Pradono : Passive and Semi-Active Seismic Response Control of a Cable-Stayed Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.9, pp.189-204, 2002.
- [2] Akihiro TOYOOKA : Development of the Inertia Force Driven Hybrid Loading System and Pseudo-Negative Stiffness Control Method for a MR Damper, 京都大学博士論文, 2003年.