

パッシブ型負剛性摩擦デバイスの開発と 振動台実験による免震性能の検証

 家村 浩和¹・河内山 修²・豊岡 亮洋³・下田 郁夫⁴・徳岡 真司⁵・森本 慎二⁶
¹京都大学教授 工学研究科都市社会工学専攻(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂) E-mail: iemura@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp
²オイレス工業(株)第三事業部技術開発部(〒 326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000 番地) E-mail: kouchiyama@oiles.co.jp
³京都大学助教 工学研究科都市社会工学専攻(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂) E-mail: toyo@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp
⁴オイレス工業(株)研究開発本部長(〒 252-0811 神奈川県藤沢市桐原 8) E-mail: shimoda@oiles.co.jp
⁵京都大学修士課程 工学研究科都市社会工学専攻(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂) E-mail: tokuoka@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp
⁶京都大学修士課程 工学研究科都市社会工学専攻(〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂) E-mail: tokuoka@catfish.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究では,構造物の絶対応答の低減に効果を有するとされる負剛性制御を,センサーや制御装置を用いな いパッシブ機構により実現することが可能な負剛性摩擦デバイスを開発した.このデバイスは,一般的に用い られている球面すべり支承と同様の機構を有するが,曲率を負に設定することで容易かつ安価に負剛性を発揮 させることが可能である.本研究では,提案するデバイスの模型試験体を製作し,桁模型を用いた振動台実験 によりデバイスの動的挙動を検証した.その結果,提案したデバイスは曲率および作用死荷重から定まる負剛 性を良好な精度で発揮することが可能であり,地震動作用下において桁の絶対加速度応答を大幅に低減可能で あることを実験的に明らかにした.

Key Words : Negative stiffness control, Absolute response reduction, Passive negative stiffness device, Shaking table tests

1. はじめに

従来,地震力に対する構造物の設計においては,地 震に対して構造物を強く造るという耐震設計法が主流 であったが,近年では地震力を抑制または制御し,地 震力によるエネルギーが構造物に伝わらないようにす る免震・制震という考え方が土木および建築構造物の設 計に導入されつつある.これらの振動制御技術の基本 的な考え方は,構造系の長周期化により絶対加速度応 答の低減を図るとともに,エネルギー吸収装置等を導 入することにより地震エネルギーを効率的に逸散,減 衰させることにある.こうした機能を実現する振動制 御手法としてはアクティブ,セミアクティブ,パッシブ 制御など,振動制御装置としては免震装置やアクチュ エータ,ダンパー装置など数多くのものが提案および実 用化されている.

こうした制震技術の中で,近年特に負剛性制御と称 する制御が提案され注目されている.これは,振動制御 デバイスを,変形に対してこれを線形的に加速するような制御力を与えるように制御する手法である.すなわち,制御力は負の剛性と変形の積で与えられる.この負の剛性を構造系に導入することにより,構造系が有している正の剛性が見かけ上低減されるため,系の固有周期を長周期化することが可能となる.免震構造の原理に従えば,一般的には系を長周期化させることにより絶対加速度応答を低減させることが可能であり, これが負剛性制御の基本的な考え方である.

負剛性は,LQ制御やスカイフック制御など,アクティ ブ制御理論から導出される最適制御力において一般的 に発現することが知られており¹⁾,既往の研究では,長 大橋など実構造を対象とした数値解析的検討がいくつ か行われており,通常の粘性ダンパーと比較した負剛 性制御ダンパーの優位性が示されている²⁾.

しかし,負剛性とは,物理的には変形をより増大させ る方向に荷重を生じさせる作用を有するため,この負 剛性制御を実構造へ適用する場合,通常アクチュエー タのようなアクティブ装置により実現する必要がある. この場合,外部からのエネルギー供給に加え,制御回路 や制御装置,センサーなどが必要となり,アクティプ制 御自体の信頼性の問題もあり実構造への適用は難しい と考えられる.また,減衰力を実時間で可変とするこ とが可能なバリアブル粘性ダンパーを用い,セミアク ティプ制御によりこうした負剛性を発現させる試みも 行われているが,アクティプ制御と同様に制御装置や 制御則,センサー等を必要とするため初期導入コスト, 長期信頼性などの面で現実的ではないと考えられる.

そこで,本研究では,外部からのエネルギー供給お よび制御装置を必要とせず,装置自体の物理的作用に より負剛性を発揮させる,パッシブ型負剛性摩擦デバ イスの開発を行った.また,装置の模型を製作して振 動台実験を行い,提案したデバイスの地震時動特性を 実験的に検証した.

2. パッシブ負剛性摩擦デバイスの概要

(1) 提案する装置の概要

図-1 に,提案するパッシブ負剛性摩擦デバイスの概 要を示す.このデバイスは,支承部のように桁と橋脚 の間に設置することを想定しており,桁に設置する部 分としては逆凸形状の治具にステンレスすべり板を取 り付けたものを用いる.これに対して,橋脚側はPTFE の小片を貼り付けた受け材を有する構造となっている. これは,建築構造物などで用いられる振り子型摩擦支 承(FPS)³⁾⁴⁾とほぼ同様の構造および材料となってい る.ただし,ステンレスすべり板に通常の FPS とは逆 の負の曲率を付けることで,重力の作用により変形を 増大する方向に反力を発生させ,負剛性を有する制御 力をを容易に発揮させることができる.また,受け材の 基部はピボットとし,上部すべり板の形状に合わせて 回転することで常にほぼ一定の支圧面積を確保する構 造としている.この機構により,すべり板とPTFEの摩 擦による安定したエネルギー吸収を行うことができる.

負剛性摩擦デバイスに重量 W が上載した場合, すべり板の曲率を R, すべりによる摩擦力を F_f とすれば, 提案するデバイスの荷重は幾何形状より次式のように与えられる.

$$F(x, \dot{x}) = -\frac{W}{R} \cdot x + F_f \cdot \operatorname{sgn}(\dot{x}) \tag{1}$$

$$= Kx + F_f \cdot \operatorname{sgn}(x) \quad (K < 0) \tag{2}$$

すなわち,作用鉛直力および曲率半径を制御すること によりパッシブに負剛性を発現することが可能である.



図-1 提案するパッシブ負剛性摩擦デバイスの概要

表-1 大型振動台諸元

| 寸法 | | $5.0\times3.0\ m$ |
|---------|---------|---------------------|
| 最大上載荷重 | | 150 kN |
| 有効ストローク | x 軸(長手) | \pm 300 mm |
| | y 軸(短辺) | \pm 250 mm |
| | z 軸(鉛直) | $\pm~200~\text{mm}$ |
| 最大加振加速度 | x,y,z | \pm 1.0 G |
| 周波数範囲 | | DC ~ 50Hz |

3. 振動台実験の概要

提案したパッシブ負剛性摩擦デバイスの動的特性を 把握するため,小型の模型を製作し,桁を模した供試 体およびゴム支承とともに振動台で加振を行った.

大型振動台の概要

実験を行う振動台としては,京都大学防災研究所の 強震応答実験施設に存する大型振動台を用いた.振動 台の諸元を表-1 に示す.

(2) 試験体の概要

実験供試体としては,図-2 に示すように,重量約 100kNの桁模型を用い,これを試作した負剛性摩擦デ バイス4基およびゴム支承2基により支える構造とし た.ゴム支承は円形の天然ゴム支承を用い,桁の鉛直 変動を吸収するため図-2 正面図のように水平に設置し た.ゴム支承の剛性は一基あたり127 kN/mである.こ れより,負剛性摩擦デバイスを設置しない場合の試験 体の固有周期は約1.25 secとなる.負剛性摩擦デバイ スの設計は,これらの諸元および入力地震動の特性に 基づいて行った.その詳細については次章で述べる.な お,本実験は負剛性摩擦デバイスの動特性を把握する ための要素実験を目的としているため,今回用いた桁 模型および固有周期は必ずしも実際の構造系の縮小モ デルとはなっていない.



図-2 試験体の概要

計測としては,桁および振動台の絶対加速度,絶対 変位を中心に測定を行った.また,負剛性摩擦デバイス の基部にはそれぞれ3分力計を設置し,個々のデバイ スが発揮する水平荷重および鉛直支持力を直接計測し た.なお,鉛直支持力については,桁の重量を4基の デバイスでほぼ均等に支持するように,試験ごとに作 用鉛直力の計測を行い,桁設置位置の微調整を行った.

(3) 振動台への入力地震動

振動台への入力としては,阪神淡路大震災(1995)に おいて観測された神戸海洋気象台記録のEW成分波(以 下,JMA Kobe EW),およびJR 鷹取駅観測記録のEW 成分(以下,JR 鷹取EW)の2種類の実地震加速度波 形を用いた.これらの波形の5%減衰下における絶対加 速度応答スペクトルを図-3に示す.このように,JMA Kobe EW は比較的短周期側に,JR 鷹取 EW は短周期 から比較的長周期側に渡ってパワーを有する地震動と なっている.なお,実験は振動台の変位制約等の関係 から,2つの地震動ともに元波形を0.4倍したものを入 力加速度として与えた.この場合,最大加速度はKobe EW において 306.4 gal,JR 鷹取 EW については 269.0 gal となる.

4. パッシブ負剛性摩擦デバイスの設計

(1) 設計方針

実験で用いる試験体特性および試験条件をもとに,本 実験で試験を行う負剛性摩擦デバイスの設計を行った.



図-3 絶対加速度応答スペクトル(5%減衰)

設計に際して考慮した主要な条件は以下の通りである.

- (a) 安定した支圧の確保および実験の安全性の観点から,デバイスの最大応答変位を 50~100 mm 程度とする
- (b) 摩擦面に対する作用面圧は実際の橋梁での使用条 件に近いものとする
- (c) 性能比較のため,負剛性の値の異なる2種類のデ バイスを製作する.また,曲面をつけない通常の 平面すべり摩擦デバイスについても試験を行う

このうち, (a),(c) については数値解析により検討を 行った.また(b) については,1支承あたりの作用鉛直 力が約25 kN であることから,受け材の PTFE の寸法 を35 mm 程度にすることで面圧20 MPa を確保した.

(2) 数値解析による検討

試作する負剛性摩擦デバイスに与える負剛性の設計 値を決定するため,事前に実験供試体を模した数値解 析を行った.解析に用いたモデルを図-4に示す.この ように,実験で用いる重量 W=100 kN の桁,および線 形剛性を有するゴム支承モデルにより構成される一自 由度振動系に対して,負剛性および摩擦履歴を有する モデルを組み込む.この負剛性をパラメータとして,最 大絶対応答加速度,および振動台と桁との最大相対応 答変位を求めた.

負剛性摩擦デバイスのモデル化については,図-2 で 示したようにデバイスは桁に4基設置するが,解析に おいてはこの4基がすべて同じ挙動をすると仮定し,4 基分の特性を一つのモデルで表現した.また,摩擦力に ついても桁の鉛直荷重がデバイスに均等に作用し,か つ摩擦係数の速度依存性の影響は小さいと仮定した.以 上のことから,負剛性摩擦デバイス4基分の合計特性 を表すモデルとして式(3)を用いた.

$$F(x,x) = -k_{ns} \cdot x + \mu \cdot W \cdot \operatorname{sgn}(x) \tag{3}$$

ここに, μ は PTFE とステンレスの摩擦係数として 0.1 を設定している.ここで,式 (3) における -k_{ns} を



図-4 負剛性パラメータ決定のための解析モデル



図-5 負剛性の変化に伴う最大応答の推移

パラメータとして解析を行った.なお,本実験で用いるゴム支承の剛性は254 kN/m であるため,パラメータ解析においては構造全体の剛性が解析上負の値もしくは過度に小さな値とならないよう,付与する負剛性の上限を-200 kN/m とした.なお,解析は Newmark- β 法(β =1/4)により行い,構造減衰は0とした.

図-5(a) には,入力地震動のレベルを元波形の 0.4 倍 にスケーリングした場合の,桁変位応答の最大値を示 す.このように,負剛性を増加させた場合,負剛性 0 (平面すべり支承)と比較してそれほど大きな変位の増 加はみられない.これは,入力地震動の特性にもよる が,みかけの剛性が低下したことにより等価減衰が大 きくなり,剛性低下による変位の増大を抑制している のではないかと考えられる.

図-5(b) には,絶対加速度応答の最大値の推移を示す. この図から,絶対加速度については負剛性の増加に伴いほぼ単調減少しており,本解析で想定した負剛性が 実際に発現した場合,平面すべり支承を用いた場合と 比較して絶対加速度応答すなわち桁慣性力の低減が期 待できることが分かる.

表-2 試作したデバイスの特性

| | 曲率半径 | 負剛性(4基計) |
|--------|----------|-------------|
| デバイス A | 828 mm | -118.4 kN/m |
| デバイス B | 497 mm | -205.9 kN/m |
| 平面すべり | ∞ | |

以上の解析結果をもとに,実験において負剛性の効 果すなわち絶対加速度応答の低減効果が明確に現れる と想定される-200 kN/m 程度(以下,デバイスB),お よび比較のためこの半分の-100 kN/m 程度(以下,デバ イスA)に負剛性を設定した2種類の供試体を製作する こととした.なお,比較のため曲率をつけない平面す べり支承(以下,図中ではFlat)についても製作した. 実際に製作した供試体の特性を表-2 に示す.

実験結果と考察

(1) 正弦波加振による共振点の推定

地震波加振試験に先立って,正弦波加速度を入力し, 振動台の加速度と桁の絶対加速度の比,すなわち加速 度伝達特性を求めることにより,負剛性を導入するこ とによる共振点の変化を計測した.加振振幅は,予備 加振の結果を基にデバイスがある程度のストロークを 持って定常振動する 120 gal とし,周波数は 0.5Hz から 2Hz までの間で設定した.伝達特性は,定常振幅値に より計算した.平面すべり,デバイスA,デバイスB そ れぞれについての伝達特性を図-6 に示す.

この図より平面すべりの場合は桁重量とゴム支承の 特性から予測される 1.2 sec 付近に明確なピークが観察 されるが,負剛性摩擦デバイスを導入することにより, ピークの値が減少し,かつ共振点が長周期側に移動し ていることが分かる.この結果より,負剛性摩擦デバ イスにより固有周期が変化し,あわせて等価減衰定数 が上昇していることが確認された.

(2) 地震波加振による絶対加速度応答低減効果

次に,地震動を入力した場合の動的応答について実験を行った.図-7 には,Kobe EW 地震動を入力した場合について,桁慣性力と桁振動台相対変位の履歴を示す.図では,平面すべり支承を用いた場合および負剛性摩擦デバイス A,B を用いた場合それぞれについて比較を行っている.図-8 には,JR 鷹取 EW 地震動を入力した場合についての同様の比較である.

このように,実験で用いた2つの地震動いずれに対しても,負剛性を導入することにより,平面すべり支承 を用いた場合と比較して慣性力履歴の傾きが減少して



図-6 入出力伝達特性(正弦波入力,絶対加速度)



図-7 桁慣性力-桁と振動台の相対変位履歴(Kobe EW×0.4)



図-8 桁慣性力-桁と振動台の相対変位履歴(JR 鷹取 EW×0.4)

いる.これは,負剛性摩擦デバイスの導入により構造 系のみかけの剛性が低下したためである.これに伴い, 最大慣性力は平面すべり支承の場合と比較して大幅に 低減されていることが分かる.正側および負側の応答 それぞれについて,デバイスごとの最大慣性力の比較 を表-3に示す.この結果を事前の数値解析結果と比較



図-9 負剛性摩擦デバイスの 4 基分の荷重-変位関係 (Kobe EW×0.4)



図-10 負剛性摩擦デバイスの 4 基分の荷重-変位関係 (JR 鷹取 EW×0.4)

表-3 最大慣性力比較 (± 側, kN)

| | 平面すべり | デバイス A | デバイス B |
|----------|--------|--------|--------|
| Kobe EW | 26.79 | 18.81 | 16.07 |
| | -19.01 | -15.59 | -14.05 |
| JR 鷹取 EW | 24.84 | 16.48 | 13.57 |
| | -28.73 | -22.09 | -19.39 |

すると,実験結果の方が若干応答が大きくなっている ものの,応答レベルおよび負剛性による応答の増減傾 向は概して解析結果と良好な一致を示しており,設計 段階で想定した負剛性が実験において効果的に発現し たものと考えられる.

また,負剛性摩擦デバイス自体の履歴挙動について は,図-9に,Kobe EW 入力の場合について,設置した デバイス4基分の計測荷重を合計した総荷重と桁の相 対変位応答の履歴を示す.図-10は,JR 鷹取 EW を入 力した場合の同様の履歴である.これらの履歴から,い ずれの地震動入力の場合も安定した負剛性および摩擦 力が発揮されていることが分かる.また,デバイスA とBを比較すると,明らかにデバイスBの方がより大きな負剛性を発揮しており,すべり曲面の曲率により 負剛性値を制御することが可能であることが示された.

6. 結論

本研究では,構造物の絶対応答の低減に効果を有す る負剛性制御を,センサーや制御装置を用いないパッシ ブ装置により実現することが可能な負剛性摩擦デバイ スを開発するとともに,振動台および桁模型を用いて, 提案したデバイスの動的加振試験を行い,その性能を 確認した.本研究で得られた知見は以下の通りである.

- (a) 振り子型摩擦支承の原理を応用して,負剛性を有す る制御力を外部からのエネルギー供給やセンサー 情報なしに実現するパッシブ型摩擦デバイスを開 発した.このデバイスは逆凸型のすべり面を有し た簡易な構造であり,重力の作用により負剛性を 発揮させるものである.
- (b) 桁模型およびゴム支承を有する振動系を振動台上 に構築し、ここに提案する負剛性摩擦デバイスの 模型を設置して加振試験を行った.模型は、異な る負剛性を有する2種類のものを設計した。
- (c) 正弦波加振試験により,負剛性摩擦デバイスを導入することで,構造系の見かけの剛性が低下して系が長周期化するとともに,等価減衰定数の増加により応答のピークが減少することを確認した.
- (d) 周波数特性の異なる2種類の地震波を用いた加振 試験により,提案するデバイスが非定常振動下に おいても安定した負剛性を発現することを確認し た.これにより,桁の絶対加速度応答を大幅に低 減可能であることを実験的に明らかにした.

謝辞: 本研究は,鉄道・運輸機構基礎研究制度に基 づく助成金により実施した.デバイスの試作および実 験の遂行にあたっては,オイレス工業の宮崎充氏,仲 村崇仁氏をはじめとする諸氏にご指導・ご協力を頂い た.また,京都大学防災研究所の市川信夫技官,(有)野 村重機殿には実験の実施,試験体の設置等において多 大なるご協力を頂いた.ここに記して関係各位に謝意 を示す次第である.

参考文献

- 1) 樋口匡輝: 地震時の絶対応答制御における負剛性パラメー タの効果に関する研究,京都大学修士論文,2006.
- Iemura, H. and Pradono, M. H. : Passive and Semi-Active Seismic Response Control of a Cable-Stayed Bridge, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9, pp. 189– 204, 2007.
- Wang, Y. P., C. L. L. and Liao, W. H. : Seismic Response Analysis of Bridges Isolated with Friction Pendulum Bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 1069–1093, 1998.
- Fenz, D. M. and Constantinou, M. C. : Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, pp. 1403–1424, 2006.
- 5) Toyooka, A.: 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.
- 河内山修:パッシブ型負剛性震動エネルギー吸収装置の開発と応用に関する研究,京都大学博士論文,2007.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書·同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 8) The MathWorks, Inc.: MATLAB R2007a online help, 2007.

(2007.6.29 受付)

DEVELOPMENT OF THE PASSIVE NEGATIVE STIFFNESS FRICTION DEVICE AND ITS VERIFICATION TESTS THROUGH SHAKING TABLE

Hirokazu IEMURA, Osamu KOUCHIYAMA, Akihiro TOYOOKA, Ikuo SHIMODA, Masashi TOKUOKA and Shinji MORIMOTO

The negative stiffness control has a capability to elongate the natural period of the structure by means of the negative stiffness that reduce or eliminate the "positive" stiffness of the structure, and absolute acceleration of the structure are reduced accordingly. In this research, the new device realizing a negative stiffness in a passive manner was developed. The developed device is a typical slide bearing, except that the inverted convex curve is introduced on the sliding plate in order to generate the negative stiffness. Unlike the ordinal slide support, the inverted slope transmits the vertical load to the horizontal force that accelerates the deformation. The prototype of the proposed device was assembled, and its performance was investigated by the shaking table test using a girder model with rubber bearings. Through series of experiments, it was observed that the structure's total stiffness due to the rubber supports could be declined by means of the negative stiffness.