

皿ばねを用いた柱脚部浮き上がり制振システムの静的載荷試験

正会員 ○横山晴紀*1 同 速水奨悟*2
同 朝川剛*3 同 深澤協三*4
同 山川誠*5 同 永野康行*6

制振構造 柱脚浮き上がり 皿ばね
鋼構造 静的載荷試験 高アスペクト比

1. はじめに

制振手法の一つとして浮き上がりを許容することにより地震力を軽減する構造システムについての研究が行われている。柱浮き上がり時のベースプレートのロックングを利用した制振構造システムの効果は理論的・実験的に実証されている^(例えば 1)~4)。また制振部材と併用する事例としてメゾンエルメス銀座は粘性ダンパーと1層の柱が並列に設置されている。建物に一定以上の地震力が加わると、柱脚が浮き上がることで建物の固有周期を変化させ、さらに粘性ダンパーの効果で付加減衰を与えることで制振部材として機能し地震力を低減する^{5), 6)}。それら研究はベースプレートの剛性や粘性ダンパーを使用したものであるのに対し速水らは鋼構造骨組み柱脚部にばね部材を直列配置したシステムを提案した。そこではアスペクト比の高い鋼構造骨組モデルにおいて、1層柱脚にそのシステムを採用しロックング変形を能動的に起こしたうえで粘性ダンパーをシステムと並列に配置して時刻歴応答解析を行った。その結果から層間変形角の制約下でアスペクト比の高い建物の制振システムとして有効であることが示された⁷⁾。ただし、これまでに柱脚部にばね部材を直列配置したシステムの実験による検証は行われていない。

本稿では、鋼構造骨組の柱脚部に皿ばねを配したシステムについて実験を行い、その水平荷重一層間変位関係について、ばね部材を用いていない柱脚と比較する。それにより、本システムの力学的性状を把握する。

2. 実験概要

本実験には Fig. 1 に示す試験体を使用する。実際のフレームに対して 1/2~1/3 程度の縮小モデルを想定し、スパン 1.5m, 高さは柱部分 1.5m と皿ばね長 (変動), 使用部材は Table 1 に示すものを用いる。皿ばねを設置するガイドはベースプレートを貫通しておりその隙間は周囲 1mm である。本研究では初めに皿ばね部の初期状態として皿ばねの最大たわみ量 (理論値) の半分の荷重 27.3kN が軸力として加わっていることを想定し鉛直荷重を加えたのち、水平力の正負繰返し載荷により柱脚システムの弾性域での挙動を確認する。さらに安全確保のため鉛直荷重を 10.0kN に減少させ水平力の繰返し載荷により柱脚浮き上がり時の挙動を確認する。

皿ばねを使用しない基本柱脚モデルとして、ベースプ

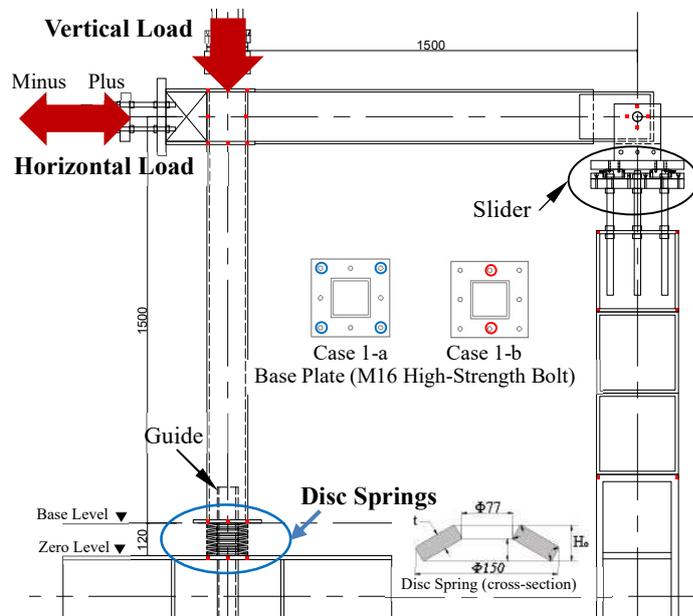


Fig. 1. Vibration Control Column Detail (Unit: mm)

Table 1. Members

Column	STKR400	□-150x150x9
Beam	SS400	H-200x100x5.5x8
Guide	STKM13A	○-76.3x12
Disc Spring	No. / H ₀ (mm) / t (mm)	MDS75-1 / 10 / 6
	Deflection 0% / 50% / 100% (mm)	0 / 2 / 4

レート四隅をボルト接合したモデルを Case 1-a, ベースプレートを Fig. 1 柱芯 2 か所でボルト接合したモデルを Case 1-b とする。また、柱脚部に皿ばね (MDS75-1)⁸⁾ を直列配置となるよう 12 枚 (ばね剛性 $K=1.1\text{kN/mm}$) 交互に重ねたモデルを Case 2 とする。さらに、Case 2 のモデルで柱脚浮き上がり時の挙動を確認したものを Case 3, その際にガイドとベースプレートの孔の間に潤滑剤 (鉱物油, 防錆剤, 石油系溶剤を含む) を塗布したものを Case 4 とする。ゼロレベルと柱梁芯交点に変位計を設置し層間変位を計測する。

また、実験値の考察のため構造解析ソフト Opensees⁹⁾ を用いてフレームモデルで増分解析し結果の比較を行った。その際、柱脚の境界条件はばね部材と柱脚接合部には鉛直方向ローラー支点となるよう設定した。また、解析時の皿ばねの履歴特性は弾性域と離間を想定したバイリニアモデルとし実験後に皿ばねの部材試験を行った際に得られた剛性を有するばね部材とした。

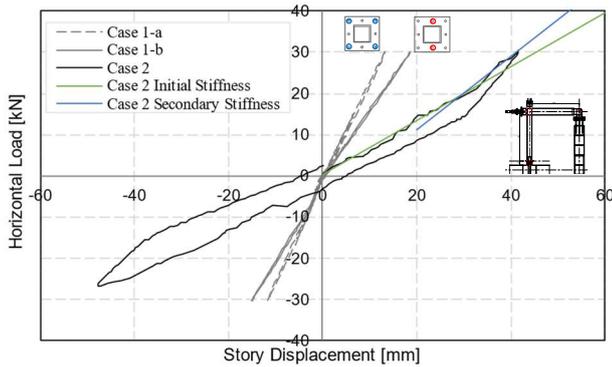


Fig. 2. Elastic Deformation Test



Fig. 3. Guide

Table 2. Stiffness (Horizontal Load - Story Displacement)

	Unit: kN/mm		
	Ini. Stiffness	2nd Stiffness	Slip
Case 1-a (Quad Bolt)	2.25	—	—
Case 1-b (Double Bolt)	1.62	—	—
Case 2 (Disc Spring)	0.66	0.89	—
Case 3 (Disc Spring)	—	0.89	0.10
Case 4 (Disc Spring + Lubricant)	—	0.84	0.02
Push-Over Analysis	0.84	—	0.03

3. 実験結果

弾性範囲内の実験では水平加力約 20.0kN で皿ばね無荷重時の高さに達し、ベースプレートが傾いた後、ベースプレートの浮き上がりが生じた。

Fig. 2 に弾性域での静的載荷試験の水平荷重一層間変位関係を示す。グラフの初期剛性および二次剛性は最小二乗法により傾きを求めた。水平荷重 0kN から 20.0kN の範囲での剛性に対して同荷重 20.0kN を超えると剛性が上昇した。また、グラフの剛性のばらつきが大きいのは加力中に金属のこすれる音が確認されたことや Fig. 3 のように実験後のガイドに摩耗痕がみられることから層間変位が大きくなることでベースプレートとガイドが接触し摩擦力が生じていたためであると考えられる。

次に、柱脚浮き上がり時の水平荷重一層間変位関係を Fig.4 に示す。グラフの二次剛性およびスリップ時の剛性は弾性範囲内での実験と同様最小二乗法により傾きを求めた。また、Case 3 の二次剛性については静止摩擦力による剛性の上昇と、垂直荷重が先の実験に対し約 17kN 減らした状態での計測であることを踏まえて水平加力が 3kN (変位基準で弾性範囲の実験の水平 17kN 荷重時と同等の状態) となったところから剛性値算出用のデータサンプルを得るものとする。Fig. 2, Fig. 4, および Table 2 に水平加力一層間変位関係における剛性を示す。浮き上がり挙動時の実験では Case 2 と Case 3 の二次剛性であることが確認できたうえで潤滑剤を塗布すると二次剛性ではわずかに、皿ばね離間後のスリップ状態では大幅に、剛性を低減し増分解析による結果と一致することが分かった。

*1 東京電機大学大学院先端科学技術研究科博士課程 修士(工学)
 *2 株式会社 U'plan 修士(工学)
 *3 東京電機大学未来科学部建築学科 准教授・修士(工学)
 *4 東京電機大学未来科学部建築学科 客員教授・博士(工学)
 *5 東京理科大学工学部建築学科 教授・博士(工学)
 *6 兵庫県立大学大学院減災復興政策研究科 教授・博士(工学)

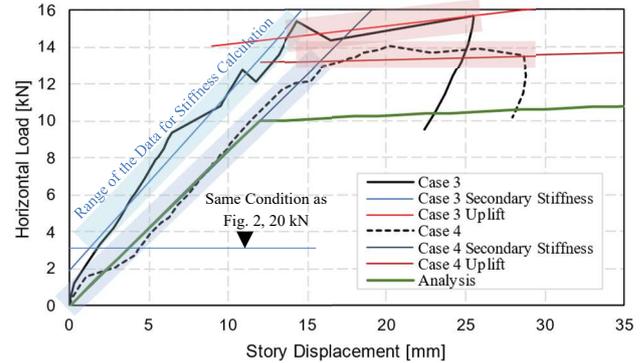


Fig. 4. Uplift Deformation Test

一方で、初期剛性が低い要因としてはガイドとベースプレートや皿ばね内径との隙間などが想定されるが検証については今後の課題である。

4. まとめ

本稿では鋼構造骨組の柱脚部に皿ばねを配したシステムについて実験を行い、その荷重一層間変位関係について検証を行い、以下の知見が得られた。

- (1) 本システムは水平荷重一層間変位関係でベースプレートが皿ばね無荷重時の高さに達したときとベースプレート浮き上がり時に剛性が変化する非線形の履歴特性である。
- (2) 潤滑剤により皿ばね離間後のスリップ時の剛性を軽減できる。
- (3) 初期剛性が想定と比べて低い点について今後検証する必要がある。

謝辞

本研究は、本研究は元東京電機大学新井蒼生氏の学位論文を加筆修正したものである。また、JSPS 科研費 JP22K04420 (研究代表者: 山川 誠, 耐震レジリエンス/ロバスト性向上のための数値実験システムの開発) による成果の一部である。さらに、実験に際し平和発條株式会社より皿ばね並びに皿ばねに関するデータをいただいた。ここに記し、謝意を表す。

参考文献

- 1) Huckelbridge, A.A., Earthquake Simulation Tests of a Nine Story Steel Frame with Columns Allowed to Uplift, EERC, UCB/EERC-77/23, University of California, Berkeley, CA, 1977.
- 2) 緑川光正, 小豆畑達哉, 石原直, 和田章: 地震応答低減のためベースプレートを浮き上がり降伏させた鉄骨加工の動的挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 572 号, pp.97-104, 2003.10
- 3) 緑川光正, 須藤智文, 麻里哲広, 小豆畑達哉, 石原直: ベースプレート降伏により柱脚浮き上がりを許容した 10 層鉄骨架構の 3 次元地震応答, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 637 号, pp.495-502, 2009.3
- 4) 緑川光正, 堀藤健, 石原直, 小豆畑達哉, 草刈崇志, 麻里哲広: ベースプレート降伏により柱脚浮き上がりを許容した鉄骨造縮小模型架構の 3 次元振動台地震応答実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 647 号, pp.213-221, 2010.1
- 5) 新建築, 新建築社, pp.68-87, 2001.8
- 6) 田中浩一, 伊藤浩二, 松田隆: ロッキング基礎の開発, 大林組技術研究所報, No.67, 2003.12
- 7) 速水奨悟, 朝川剛: 柱脚部に皿ばねを用いた柱脚浮き上がりによる制振システムの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 21297, pp.593-594, 2022.9
- 8) HHK 平和発條株式会社: MDS 皿ばね <https://www.hhk.co.jp/product/4> (2024 年 1 月閲覧)
- 9) PEERC: Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) v3.5.0. UCB, CA. Available at <http://opensees.berkeley.edu/>, 2023

*1 Graduate School of Advanced Science and Technology, Tokyo Denki Univ., M.Eng.
 *2 U'plan Co.,Ltd, M.Eng.
 *3 Assoc. Prof., School of Sci. and Tec. for Future Life, Tokyo Denki Univ., M.Eng.
 *4 Visiting Prof., School of Sci. and Tec. for Future Life, Tokyo Denki Univ., D.Eng.
 *5 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Tokyo Univ. of Science., D.Eng.
 *6 Prof., Grad. Sch. Dis. Res. and Gov., Univ. of Hyogo, D.Eng.