

2013年度(第5回)免震構造・制振構造に関わる研究助成の成果報告

参考テーマ部門

「ばね鋼ダンパーによる中低層建築物の残留変形抑止と早期機能回復に関する研究」

山川 誠 (東京電機大学 未来科学部 准教授・博士 (工学))

二瓶 光希 (TDU建築設計事務所)

立花 正彦 (東京電機大学 未来科学部 教授・工博)

深澤 協三 (日本建設業経営協会中央技術研究所 工博)

中村 拓造 (中村物産 (有))

山内 泰之 (東京電機大学 未来科学部 客員教授 工博)

1 はじめに

東日本大震災における災害対応とその検証から、社会的インフラに対するレジリエンス強化が求められるようになってきている。レジリエンスとは、社会がそなえるしなやかな復元を意味し、構造物や都市・社会が地震などの災害を受けた状態からの回復力、外乱に対する抵抗力を意味する^[1]。建築基準法での想定レベルを超える地震動の発生、危険性が指摘され、想定外の外乱に対しても、よりレジリエントで高い安全性を確保することが求められる。地域の耐災性向上という意味においては、床面積で9割強を占める中低層建物への対応が有効である。中低層建物の早期機能回復性を実現させることを目的とし、ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーの提案・検討を行う^[2, 3]。

1.1 ダンパー概要と特徴

図1に示されるように上下の円弧状に曲げ加工した2枚のばね鋼と、その中心に組み込まれた低降伏点鋼から本ダンパーは構成され、図2のように建物の層間に設置する^[4, 5]。

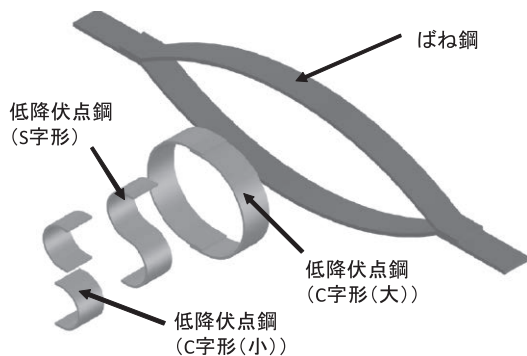


図1 ダンパー概要

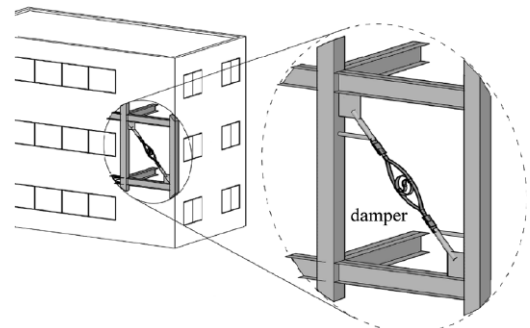


図2 建築構造へのダンパー設置例

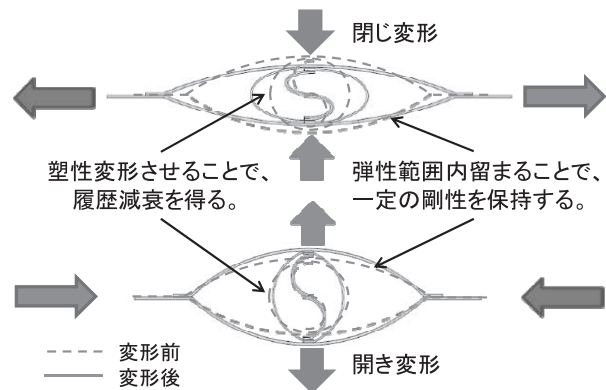


図3 ダンパーの基本挙動

ダンパーの基本的な挙動は図3に示す通りであり、ばね鋼の引張・圧縮により中央部の低降伏点鋼が塑性変形を行い、履歴減衰が得られる。

ばね鋼は、通常の建築構造用鋼材に比べて高い弾性限、引張強さ、および耐疲労限を示す。この性質に由来し本ダンパーにおいては、1) 大変形を与えても、ばね鋼自体は弾性を保ち、2) 引張側と圧縮側では非対称な挙動を示し、引張側では変形が増大するにつれて剛性が増加するハードニング効果が見られる。

2 静的荷重実験による荷重変形曲線

使用材料の機械的性質を表1に、ダンパー形状及び寸法を図4に示す。

表1 使用材料の機械的性質

	鋼材質	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
低降伏点鋼	LY100	6	111	292	49
ばね鋼	SUP9A	10	1,240	1,334	9

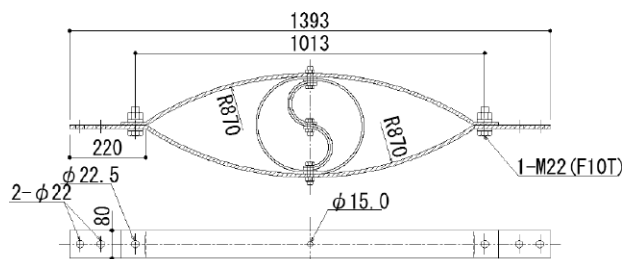


図4 ダンパー形状及び寸法

共著者らは、階高3mで45度方向にブレース状にダンパーを配置した場合に、層間変形角が1/300、1/150、1/100、1/75、1/60となるように正負繰り返し漸増荷重を行った^[4, 5]。試験体の荷重変形曲線を図5に示す。同図の縦軸は試験体に荷重した軸方向力、横軸は、ばね鋼接合ボルト間軸変形を示す。層間変形角1/100相当でハードニング効果が顕著となり、層間変形角1/60相当まで繰り返し荷重しても非線形弾性挙動を示す。

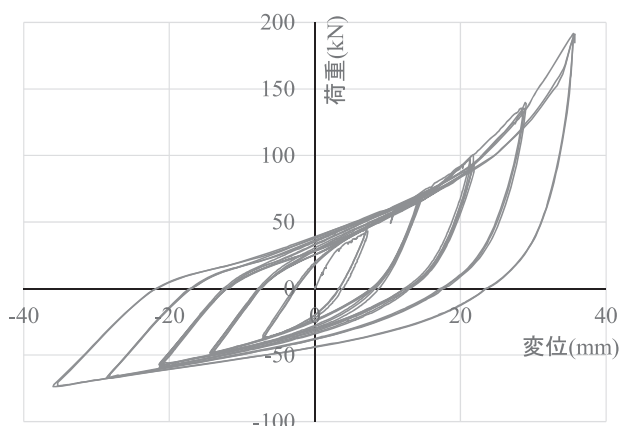


図5 静的荷重実験による荷重変形曲線

3 ダンパーの履歴モデル

鋼材ダンパーの履歴モデルとしては、Bi-linear型、Ramberg-Osgood型、修正Bi-linear型等が用いられることが多い。ただし、このような骨格曲線に基づく代数的モデルでは実装が煩雑となり、拡張が容易で

はないことも指摘されている^[6]。このような欠点がなく、実装が容易な塑性論に基づく履歴モデルを採用する。ここでは、塑性論モデルの一つとして知られるOzdemirモデル^[7]の拡張を提案する。

Ozdemirモデルの考え方に基づいた上で、1) 引張側と圧縮側で非対称挙動を示し、2) 引張側変形が増大するにつれて剛性が増加するような履歴モデルを提案する。ダンパーによる復元力を

$$F_D = F_D^A + F_D^H \quad (1)$$

と表し、非対称挙動とハードニング効果に各項がそれぞれ対応するようにする。

非対称挙動項の弾性構成則、および非弾性ひずみの発展則をそれぞれ

$$\dot{F}_D^A = K_D^A (\dot{d} - \dot{d}_{in}), \quad (2)$$

$$\dot{d}_{in} = |\dot{d}| \cdot \text{sgn}(\xi) \cdot |\xi|^n, \quad (3)$$

と与える。ここで、 F_D^A は軸方向力、 d は軸方向変形、 d_{in} は軸方向変形の非弾性成分、 K_D^A は弾性剛性、 ξ は正規化された過応大力とする。さらに、過大応力 ξ 、一次元応力 β の発展則、履歴ループ形状定数 n をそれぞれ

$$\xi = \frac{F_D^A - \beta}{Y}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \{ (Y^+ + \beta^+) + (Y^- + \beta^-) \}, \quad (5)$$

$$n = \begin{cases} n^+ & (\dot{d} \geq 0) \\ n^- & (\dot{d} < 0), \end{cases} \quad (6)$$

$$\dot{\beta}^+ = \alpha^+ K_D^A \dot{d}_{in}, \quad \dot{\beta}^- = \alpha^- K_D^A \dot{d}_{in}, \quad (7), (8)$$

$$Y = \frac{1}{2} \{ (Y^+ + \beta^+) - (Y^- + \beta^-) \}, \quad (9)$$

と与える。ここで、引張側と圧縮側でそれぞれ異なる移動硬化を仮定しており、 $(\cdot)^+$ は引張側、 $(\cdot)^-$ は圧縮側の量を表す。また、 Y は平均降伏軸方向力、 α は移動硬化係数とする。

ハードニング項の軸方向力-軸方向変形関係を

$$F_D^H = \eta_1 \exp(\eta_2 d) \quad (10)$$

と与える。ここで、 η_1 、 η_2 はハードニングの度合いを表す係数である。

第2節に示した実験データから、必要となるモデルパラメータ値を非線形最小二乗法により推定する。得られたパラメータ値を表2に示す。なお、表2に示されたものは、軸方向変形の単位をmm、軸方向力の単位をkNとした場合の値である。表2のパラメータ値を用いて得られる荷重変形曲線と、実験データの荷重変形曲線を図6に示す。

表2 モデルパラメータ値

K_D^A	6.45 kN/mm		
Y^+	47.1 kN	Y^-	-51.6 kN
α^+	0.25	a^-	0.11
n^+	2.96	n^-	1.00
η_1	4.38	η_2	0.08

(単位：mm, kN に対して)

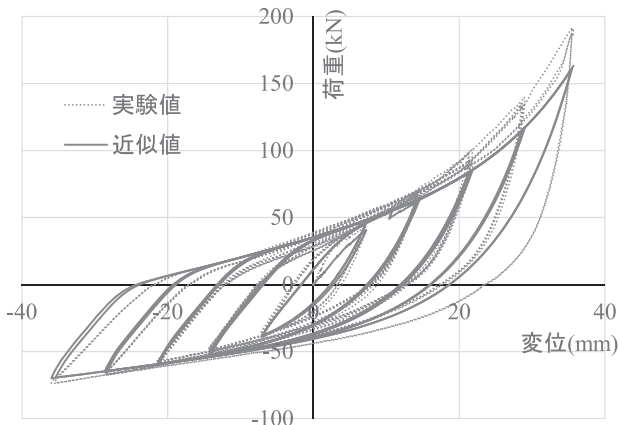


図6 荷重変形曲線の比較

4 数値解析例

前節までに提案した履歴モデルを用いた数値解析により、提案ダンパーの有効性を検討する。対象建物はS造地上3階建ての事務所とする。図7に本建物の平面図及び軸組図を示す。水平地震力はY方向にのみ作用させる。柱梁断面形状及び階高・スパンを表3に、外力分布をAi分布として得られた層せん断力-層間変形角関係曲線、およびトリリニア型として近似した主体架構の復元力特性を図8に示す。

各層を質点とした3層せん断質点系モデルに、主

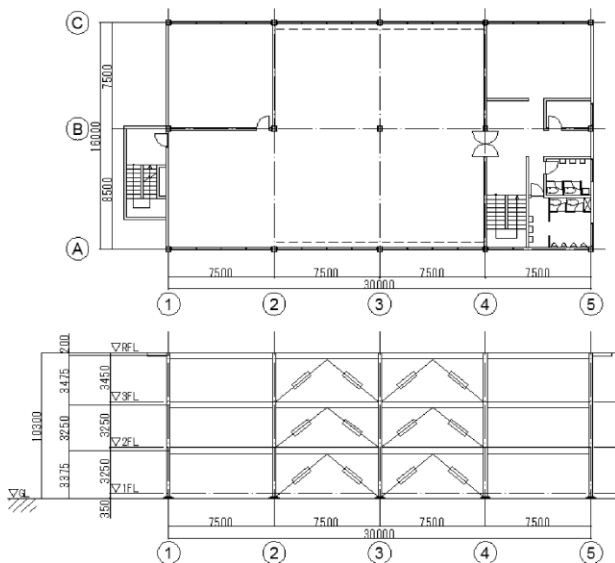


図7 基準階平面図・軸組図

表3 柱梁断面形状及び階高・スパン

柱	階	断面形状	階高	1階	3.60m
	1~3階	H-250×250×9×14	2階	3.25m	
			3階	3.45m	
梁	階	断面形状	ブレース側(Y方向)	7.5m	
	R階	H-400×200×8×13	ラーメン側(X方向)	8.5m	
	2~3階	H-450×200×9×14			

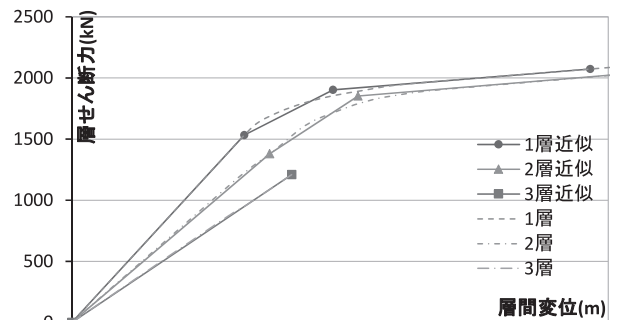


図8 層せん断力-層間変形角関係曲線

体架構をモデル化し、Newmark β 法による時刻歴応答解析を行う。平均加速度法として $\beta=1/4$ 、積分時間刻みを0.001秒と与える。モデルの減衰係数として、1次の減衰定数を2%に与えた初期剛性比例減衰を与える。設計用地震動として観測記録波 El Centro 1940NSを用いる。この地震動のPGA (最大地動加速度)は341.7cm/s²であり、これをEl Centro (原波)と呼ぶ。PGV (最大地動速度)が50cm/sとなるように規準化したものをEl Centro (Lv2)、振幅をさらに2.3倍したものをEl Centro (大振幅)と、以降では呼ぶ。表4にそれぞれの地震動のPGAとPGVを示す。

図9に各地震動に対するダンパーの応答軸方向力-軸方向変形関係曲線を示す。静的漸増載荷実験により得られた荷重変形関係と近い挙動を示している

表4 設計用地震動PGA、PGV

地震動	PGA(cm/s ²)	PGV(cm/s)
原波	341.7	33.5
Lv2	509.1	50.0
大振幅	1171.0	115.0

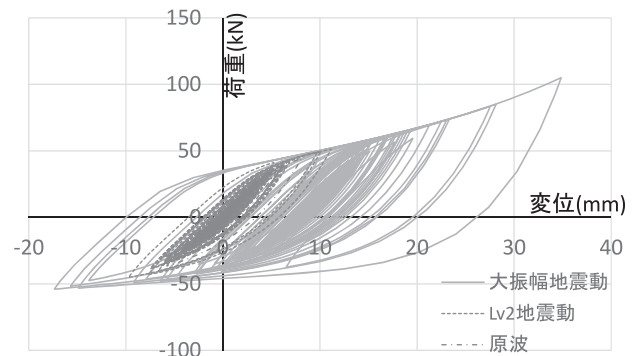


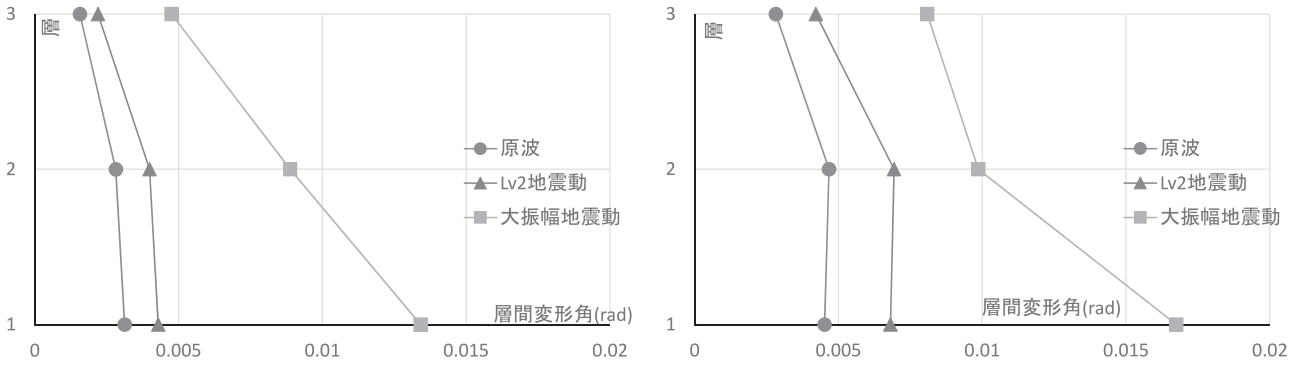
図9 ダンパー応答における荷重変形曲線

表5 最大応答層間変形角 (1/1000rad)

層	ダンパー無し			ダンパー有り			最大応答低減率		
	原波	Lv2	大振幅	原波	Lv2	大振幅	原波	Lv2	大振幅
1層	4.52	6.81	16.75	3.12	4.29	13.42	31%	37%	20%
2層	4.67	6.93	9.87	2.82	3.99	8.88	40%	42%	10%
3層	2.82	4.22	8.09	1.57	2.20	4.76	44%	48%	41%

表6 第1層残留変形角 (1/1000rad)

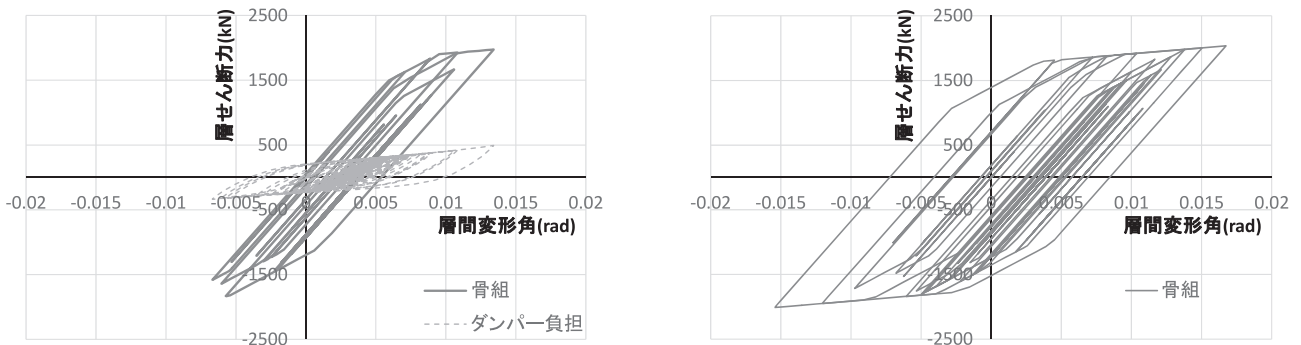
地震動	ダンパー		残留変形低減率
	無し	有り	
原波	0.05	0.03	37%
Lv2	0.23	0.04	80%
大振幅	3.70	3.29	11%



(a) ダンパー有り

(b) ダンパー無し

図10 最大層間変形角



a) ダンパー有り

b) ダンパー無し

図11 第1層応答層せん断力-層間変形角：El Centro (大振幅)

ことがわかる。よって実験データから得られた変形レベルの範囲内では精度よく荷重変形曲線を再現できていると言える。

各地震動における最大応答層間変形角を表5にまとめる。さらに図10にダンパー配置有無の場合をそれぞれ図示する。原波とLv2地震動では各層において3~4割程度の応答低減が実現されている。図11に大振幅地震動に対する第1層の応答層せん断力-層間変形角関係曲線を示す。図11 (a) にダンパーを配置した場合の応答、骨組とダンパーが負担するせん断力を、図11 (b) にダンパーを配置しない場合の骨組応答をそれぞれ示す。大振幅地震動では、ダンパーを配置しても主体架構は大きく塑性化している。しかし、変形の大きい領域で第1層への変形集積が抑制されており、ダンパーのハードニング効果による建物全体の接線剛性の確保が寄与しているも

のと考えられる。さらに、第1層の残留変形(層間変形角)を表6にまとめる。ダンパー配置により残留変形は小さくなるが、大振幅地震動時の低減率は10%程度に止まる。この結果からは残留変形抑止に本ダンパーが特に有効とは言えず、今後の課題である。

5 結論

本研究から得られた結論は以下の通りである。

1. 塑性論に基づく履歴モデルであるOzdemirモデルを拡張し、非対称挙動およびハードニング効果を表現でき、かつ実装の容易な履歴モデルを提案した。
2. 実験データが得られている変形レベルの範囲内では、静的载荷実験による荷重変形曲線を精度よく再現できた。

3. PGVを50cm/sに規準化した地震動では最大応答層間変形角が3~4割程度低減され、PGVが100cm/sを超えるような地震動に対しても、第1層への変形集中が緩和された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、松塚尚幸氏（元東京電機大学大学院生、現株式会社クロスファクトリー）から多大な協力を受けた。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 牧紀男, 寺川政司, 竹内泰: 特集前言 リジエンスというメッセージ, 日本建築学会 建築雑誌 127 (1629), pp.10-11, 2012.
- 2) Yamakawa, M., Tatibana, M., Hukazawa, K., Nihei, M., Ohsaki, M., Nakamura, T. and Yamanouchi, H.: Parameter Identification and Numerical Analysis of Spring Steel Damper with A Heuristic Optimization Approach, The 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems (CJK-OSM8), Gyeongju, Korea, Paper No. 104, 2014.
- 3) 田畑正幸, 山川誠, 立花正彦, 深澤協三, 二瓶光希, 中村拓造: ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーの数値解析モデル提案・検討, 計算工学講演会論文集 Vol.19, E-4-1, 2014.
- 4) 倉島翔史, 松塚尚幸, 深澤協三, 立花正彦, 中村拓造, 山内泰之: ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーに関する実験的研究(その1) 実験計画, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.887-888, 2012.
- 5) 松塚尚幸, 倉島翔史, 深澤協三, 立花正彦, 中村拓造, 山内泰之: ばね鋼と低降伏点鋼を用いた弾塑性ダンパーに関する実験的研究(その2) 実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.889-890, 2012.
- 6) Mettupalayam, V.S. and Reinhorn, A.M.: Hysteretic models for deteriorating inelastic structures, Journal of Engineering Mechanics 126(6), pp.633-640, 2000.
- 7) Ozdemir, H.: Nonlinear transient dynamic analysis of yielding structures, PhD Dissertation, University of California, Berkely, 1976.