

# RC ラーメン橋脚への湾曲状鋼製ダンパーの耐震補強効果

構造及びコンクリート工学分野 小谷 洋平

## Abstract

旧設計標準<sup>1)</sup>で設計された鉄道 RC ラーメン高架橋の中には、せん断破壊先行または曲げ降伏先行であっても靱性に乏しいものが存在する。そのような高架橋に対する耐震補強方法として、湾曲状鋼製ダンパーを用いた補強方法を提案し補強効果が確認された<sup>2), 3)</sup>。本研究では、ダンパー設置による RC ラーメン高架橋の耐震性能の更なる向上、特に小変形域での減衰性能の向上を目指し、種々の断面形状を有するダンパーを RC ラーメン橋脚に設置した際の耐震補強効果を確認するために、RC 架構にダンパーを設置した模型実験・数値解析を行った。得られた結果より、ダンパーの設置によりせん断破壊型から曲げ破壊型への破壊形式の移行、エネルギー吸収に富んだ履歴性状への移行、またダンパーの断面形状を変化させることによる早期の減衰効果の発揮を確認した。

## 1. はじめに

現行の鉄道構造物等設計標準<sup>4)</sup>において、レベル 1 地震動に対しては修復性・使用性の観点から、部材が損傷せずに機能が維持でき、かつ過大な変位を生じないこと（耐震性能 I）が要求される。レベル 2 地震動に対しては、構造物系が崩壊しないこと（耐震性能 III）が要求されるが、新幹線鉄道および大都市旅客鉄道などの重要度の高い構造物に対しては、構造物系が崩壊しないことはもちろん軽微な補修で早期に機能が回復できること（耐震性能 II）が要求される。しかし、旧設計標準で設計された既存高架橋の中にはせん断補強筋が少なく、せん断破壊先行または曲げ降伏先行であったとしても靱性に乏しく、要求性能を満足しない構造物が多くある。

このような背景の下、履歴減衰型の湾曲状鋼製ダンパーを開発し、高架橋フレーム内への効果的配置により、脆性的な破壊を防止するとともに、損傷を制御する耐震補強方法を提案した<sup>2), 3)</sup>。本ダンパーの特徴は、座屈の防止と曲げ応力による塑性域の拡がり確保で

きることが挙げられる。図-1.1 に示すように、ラーメン高架橋の隅角部に設置することにより、1)全体の耐力と剛性を増大、2)柱端部でダンパーの水平力負担により、柱の作用せん断力を低減、3)柱中央部で作用せん断力が大きくなるが、ディープビーム効果によりせん断耐力を増大、4)履歴減衰により構造物全体の変形応答を低減するものである。すなわち、せん断破壊の危険性の高いものや曲げ靱性の足りないものを対象に、脆性的な破壊を防ぐとともに地震応答変位を抑制しようとするものである。

湾曲状ダンパーを RC 模型フレームに組み込んだ交番載荷実験・解析<sup>3)</sup>が行われ、湾曲状ダンパーの耐震補強効果が確認された。しかし、実験において用いたダンパーは小変形域で十分なエネルギー吸収性能が得られなかった。そこで小変形域でのエネルギー吸収性能の向上を目指し、ダンパーの断面形状をパラメータとした要素実験<sup>5)</sup>が行われ、断面形状の違いによる履歴特性、エネルギー吸収性能の違いが明らかにされた。

そこで本研究では、湾曲状ダンパー設置による RC ラーメン橋脚の耐震補強効果の更なる向上、とりわけ小変形域での減衰性能の向上を目指し、ダンパー単体の実験結果<sup>5)</sup>を踏まえ、湾曲状ダンパーを RC ラーメン橋脚に設置した際の履歴特性や減衰性能、耐震補強効果を実験・解析によって検討するものである。

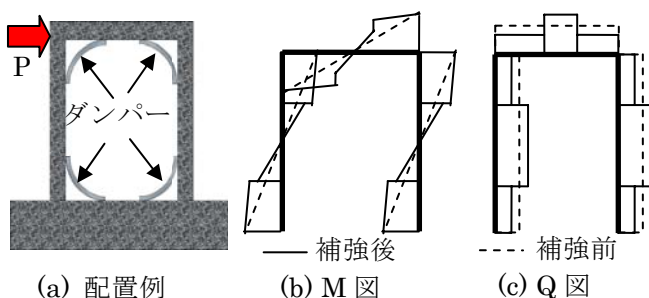


図-1.1 湾曲状ダンパーの配置法と断面力分布

## 2. ダンパー単体の履歴特性

### 2.1 実験概要

既往のダンパー単体での要素実験<sup>5)</sup>では、表-2.1 に

示す 5 種の断面形状に対し、その端部の曲げ耐力  $M_u$  が出来るだけ一定となるように断面寸法を決定した。なお、ダンパーの材質は SS400 級とした。要素実験は MTS 社製の载荷試験機 (容量 250kN) を用いて、図-2.1(a)における矢印位置において、強制変位を与えることにより行った。計測項目は、図-2.1 に示すように、荷重、変位、ダンパーのひずみである。供試体は表-2.1 の 5 体で、断面寸法と断面定数、設計曲げ耐力  $M_u$  を同表に示す。载荷はダンパーの部材角が 1/1000, 3/1000, 6/1000, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 6/100, 8/100, 10/100 となる変位で各 2 回の交番载荷を行った。

表-2.1 供試体一覧 単位: mm

型式	高さ	幅	直径	板厚	A (mm <sup>2</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )	Z (mm <sup>3</sup> )	$M_u$ (kNm)
中実	平鋼	22	58		1276	$5.1 \times 10^4$	$7.0 \times 10^3$	1.6
	丸鋼			36	1018	$8.2 \times 10^4$	$7.8 \times 10^3$	1.8
中空	丸形鋼管		49	3.2	456	$1.2 \times 10^5$	$6.6 \times 10^3$	1.5
H鋼	広幅	45	46	3.2	418	$1.4 \times 10^5$	$7.4 \times 10^3$	1.6
	細幅	58	30	3.2	357	$1.8 \times 10^5$	$7.4 \times 10^3$	1.6

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 荷重-部材角関係

ダンパーの荷重 - 部材角関係を図-2.2 に示す。いずれの供試体も湾曲状ダンパーの特徴である軸引張力の影響により、圧縮側より引張側の方が荷重が大きくなっているが、どれも類似した紡錘形の履歴曲線となっている。ただし、丸形鋼管と広幅 H 鋼はダンパー中央部での局部座屈により圧縮側で荷重低下が見られた。また、細幅 H 鋼はダンパー全体にわたる横倒れ座屈が発生したため、圧縮側で大きく荷重が低下している。

### 2.2.2 等価粘性減衰定数

荷重 - 部材角関係から算出した等価粘性減衰定数 - 部材角関係を図-2.3 に示す。ダンパーはラーメン高架橋隅角部の 4 箇所への設置を想定して、引張側と圧縮側を平均した結果を示す。両 H 鋼は全部材角にわたって大きな値を示しており、小さな部材角でも履歴減衰による高いエネルギー吸収性能が見られた。また、その他については平鋼、丸鋼、丸形鋼管と断面高さが大きくなるほど大きくなっている。

以上のことより、小変形域でのエネルギー吸収性能と座屈等の変形の安定性を考慮すると、広幅 H 鋼(以降、H 鋼は広幅を示す)、丸形鋼管が架構に設置した際に高い減衰性能、耐震性能を発揮すると考えられる。

## 3. RC 部材にダンパーを設置した模型実験

### 3.1 実験概要

本実験では、図-3.1 に示すような 1/6 に縮尺した RC ラーメン橋脚の隅角部を作製し、正負交番载荷実験を

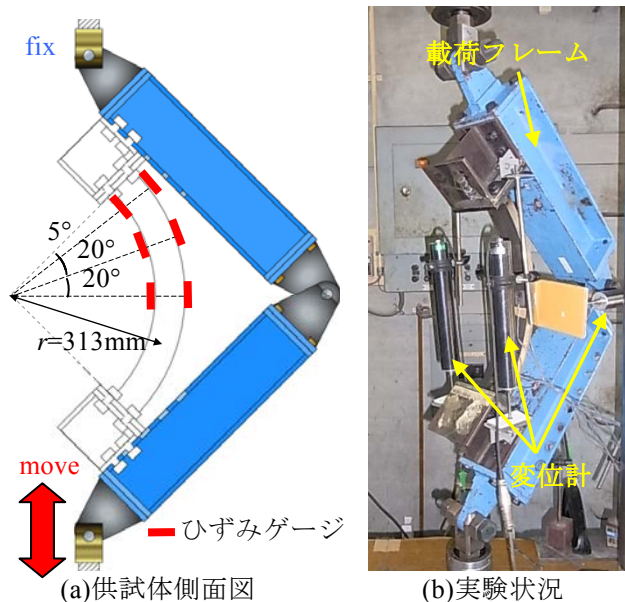
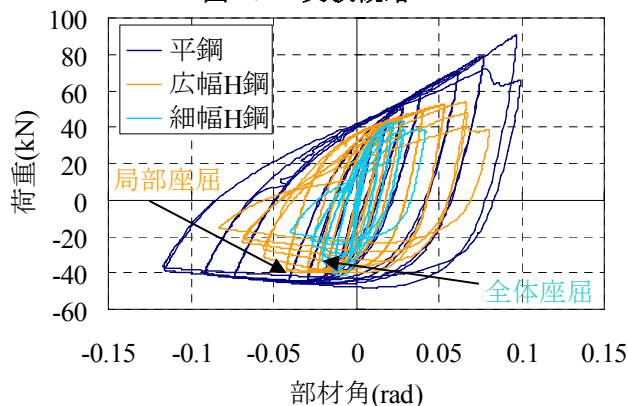
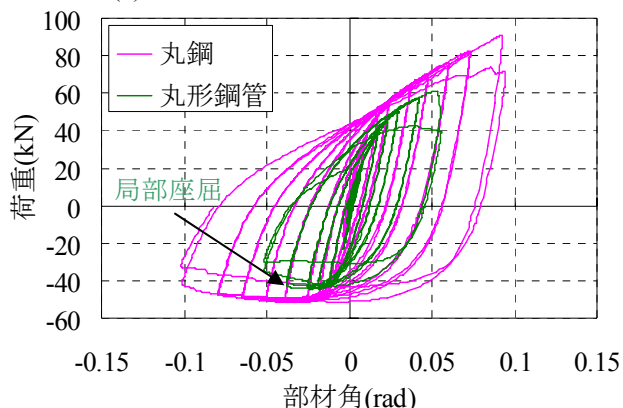


図-2.1 実験概略



(a) 平鋼, 広幅 H 鋼, 細幅 H 鋼



(b) 丸鋼, 丸形鋼管

図-2.2 荷重-部材角関係

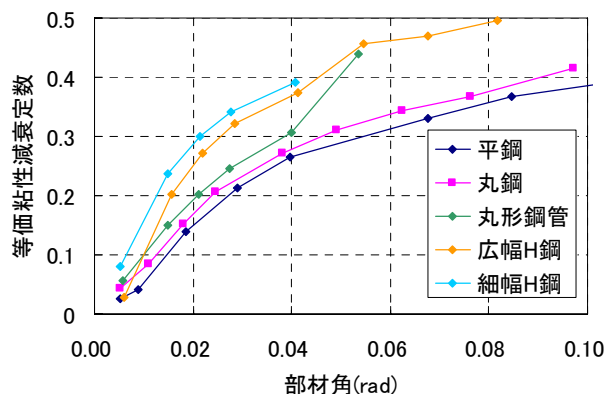


図-2.3 等価粘性減衰定数-部材角関係

行う。本実験ではダンパー設置による履歴特性やエネルギー吸収性能、破壊形式の移行、補強効果を確認するため、実験パラメータに RC 部材の配筋とダンパーの断面形状を設定した。RC 部材に関しては、無補強時に曲げ破壊が先行するもの(M 型)とせん断破壊が先行するもの(S 型)の 2 種類とした。ダンパーの断面形状に関しては、前述のダンパー単体の実験結果より H 鋼と丸形鋼管、また以前の架構実験<sup>3)</sup>で用いた平鋼の 3 種類とし、補強後の耐力を一定とするために塑性断面係数 Z になるべく等しくなるよう断面寸法を決定した。供試体パラメータの一覧を表-3.1 に示す。また各材料の材料定数を表-3.2~表 3.4 に示す。

荷重は図-3.1 に示すようにダンパー単体の実験と同様に行った。荷重プログラムは RC 部材角が 1/1000, 3/1000, 5/1000, 7/1000, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 5/100, 6/100 となる変位で各 2 回の正負交番荷重を行う。なお部材角  $\theta$  は  $\delta/L$  とし、 $\delta$  は測定した供試体変位、L は図-3.1(a)に示す長さとした。測定項目は荷重、供試体変位、主鉄筋ひずみ、ダンパーひずみである。

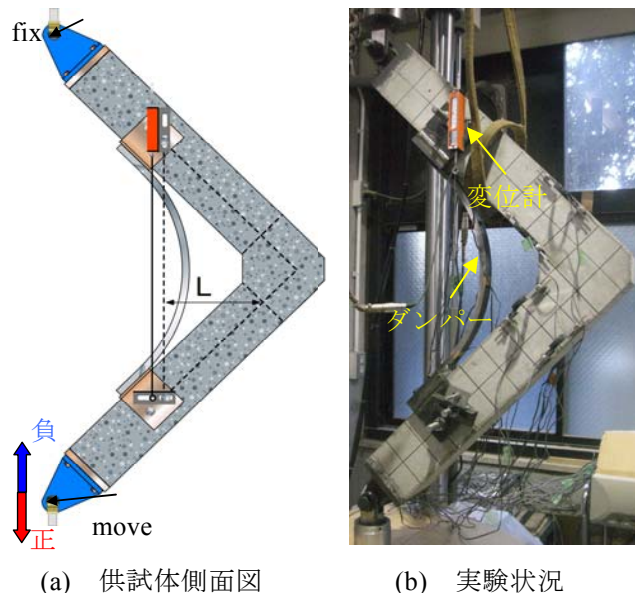


図-3.1 実験概略

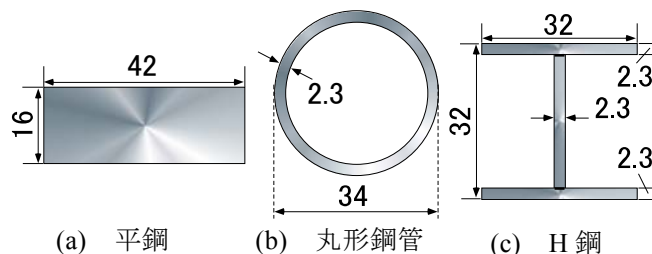


図-3.2 ダンパー断面形状

表-3.2 ダンパー材料特性

鋼種	ヤング率 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (μ)	ポアソン比	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
平鋼	210	317	1511	0.27	462
丸形鋼管	198	389	1964	0.27	446
H鋼	214	326	1526	0.28	444

表-3.3 鉄筋材料特性

鉄筋種	ヤング率 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D13	199	384	1929	571
D16	200	462	2314	611
φ4	214	481	2249	536

表-3.4 コンクリート材料特性

材齢	ヤング率 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
7		22.5	1.89	
41	23.0	28.4	2.36	0.17
50	23.0	26.9		0.15
59	24.3	27.6	2.23	0.17

### 3.2 実験結果

#### 3.2.1 履歴特性

図-3.3 に実験で得られた荷重-部材角関係を示す。M 型、S 型いずれも無補強時に吸収エネルギーの小さいスリップ型の履歴性状を示しているのに対し、ダンパーの設置により吸収エネルギーに富んだ紡錘形のものに移行していることが確認できる。ダンパーの断面形状による比較を行うと、平鋼よりも丸形鋼管を設置した供試体が緩やかな復元力特性を示しており、エネルギー吸収性に優れているといえる。なお、H 鋼に関しては、実験時にダンパー端部での RC 部から離間した浮き上がりが確認されており、期待したほどの耐力・履歴特性を発揮するに至らなかった。

#### 3.2.2 破壊性状

図-3.4 に実験で得られたコンクリートのひび割れ性状を示す。せん断破壊に至るように配筋した S-N 供試体では柱中腹部の斜めひび割れや、主鉄筋に沿った付

表-3.1 供試体一覧

	ダンパー	供試体名	RC供試体寸法(単位:mm)					ダンパー寸法(単位:mm)									
			柱長さ	断面	主鉄筋	主鉄筋比	せん断補強筋	せん断補強筋比	高さ	幅	直径	板厚	A (mm <sup>2</sup> )	I (mm <sup>4</sup> )	Z (mm <sup>3</sup> )		
曲げ破壊型 供試体 (M型)	無し	M-N	625	135× 135	D13 (SD345)	2.78%	φ4 (SWM-P)	0.23%	16	42			1276	1.4×10 <sup>4</sup>	7.0×10 <sup>3</sup>		
	平鋼	M-F															
	丸形鋼管	M-T								34	2.3	456	2.9×10 <sup>4</sup>	6.6×10 <sup>3</sup>			
	H鋼	M-H								32	32	2.3	418	3.7×10 <sup>4</sup>	7.4×10 <sup>3</sup>		
せん断破壊型 供試体 (S型)	無し	S-N	625	135× 135	D16 (SD390)	4.36%			16	42			1276	1.4×10 <sup>4</sup>	7.0×10 <sup>3</sup>		
	平鋼	S-F															
	丸形鋼管	S-T								34	2.3	456	2.9×10 <sup>4</sup>	6.6×10 <sup>3</sup>			
	H鋼	S-H								32	32	2.3	418	3.7×10 <sup>4</sup>	7.4×10 <sup>3</sup>		

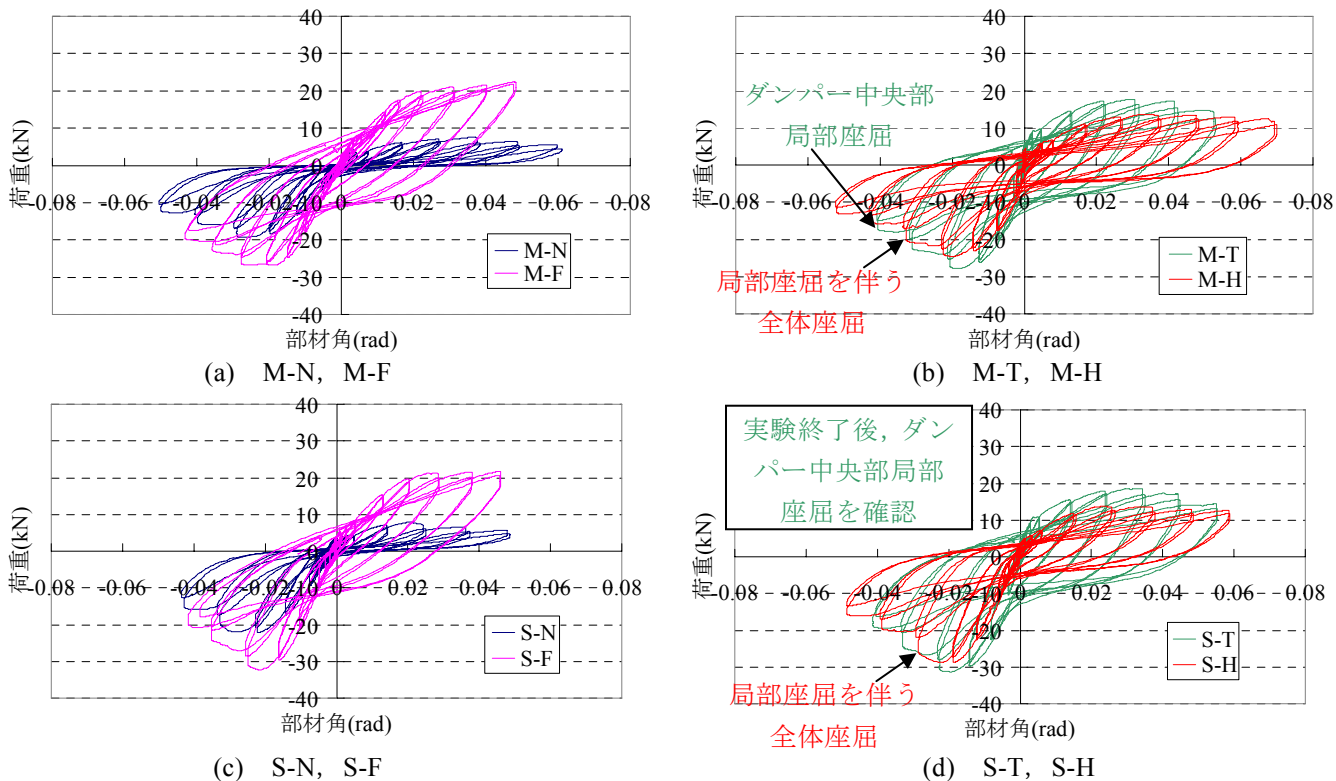


図-3.3 荷重-部材角関係 実験結果

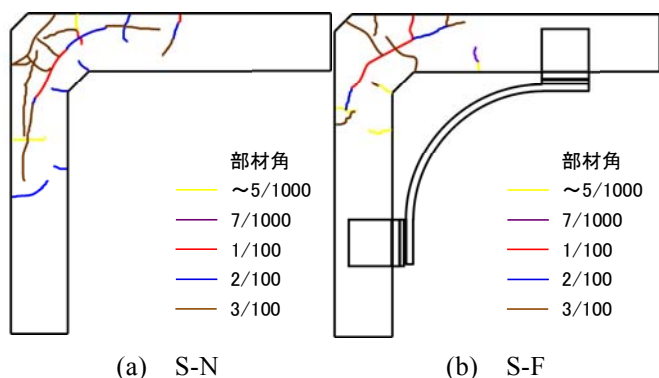


図-3.4 ひび割れ性状 3/100rad

着割裂ひび割れが確認されたが、ダンパーを設置した S-F 供試体では、斜めひび割れや付着割裂ひび割れが抑制されており、ダンパー設置によるせん断損傷の抑制効果が確認された。

### 3.2.3 減衰効果

図-3.5 に実験で得られた荷重-部材角関係より算出した等価粘性減衰定数-部材角関係を示す。M 型供試体に関して、M-T, M-H は部材角 1/100 時点で既に高いエネルギー吸収性能を示しており、その後も高い値で推移している。一方 M-F に関しては部材角 3/100 以降に減衰効果を発揮している。S 型供試体に関して、S-T, S-H が部材角 2/100 程度から、S-F は部材角 3/100 以降で減衰効果を発揮しているのが分かる。

以上のことから丸形鋼管・H 鋼は部材角 2/100 以前から、平鋼は部材角 3/100 以降で減衰効果を発揮することが確認された。

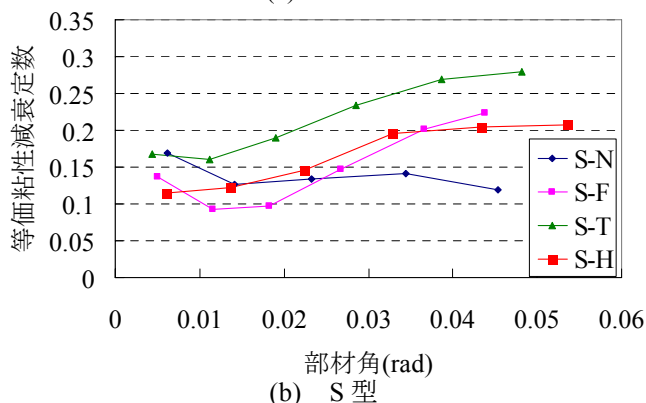
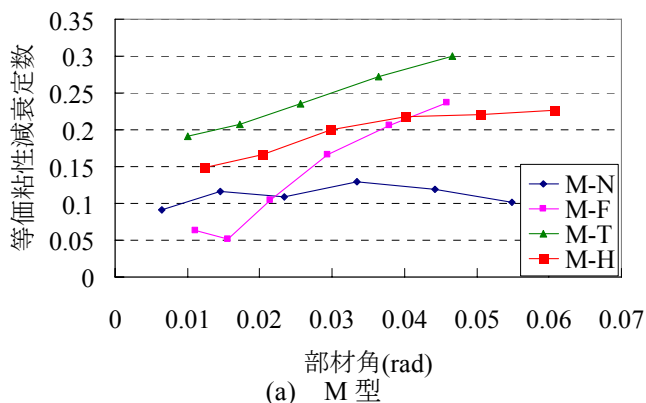


図-3.5 等価粘性減衰定数-部材角関係

## 4. 実験結果に対する数値解析的検討

### 4.1 解析概要

実験結果の評価を行うため、有限要素法解析ソフト FINAL を用いて解析を行う。解析モデルを図-4.1 に示

す。コンクリートと冶具は平面応力要素，鉄筋はトラス要素，ダンパーはビーム要素でモデル化した。なお H 鋼のモデル化に関しては断面形状による塑性域の広がり表現するため，フランジはビーム要素，ウェブは平面応力要素でモデル化した。材料構成側に関して，コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線は修正 Ahmad モデル，テンションスティフニング特性は出雲モデル，ダンパーは Bauschinger 効果を考慮でき，移動硬化側に適用される修正 Menegotto-Pinto モデルとした。

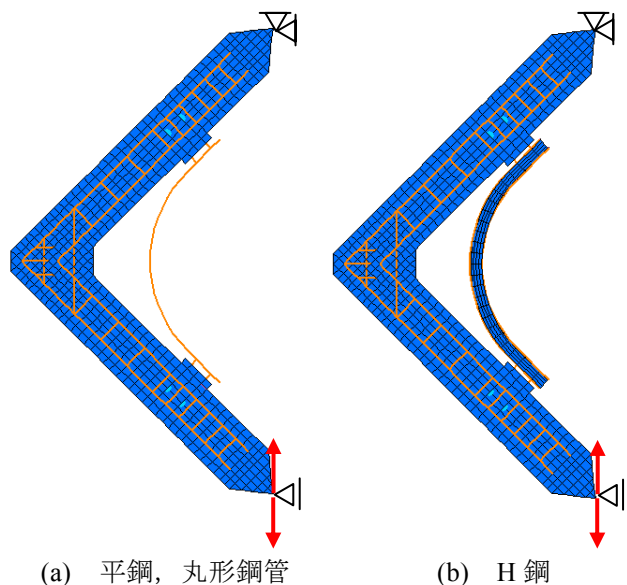


図-4.1 解析モデル

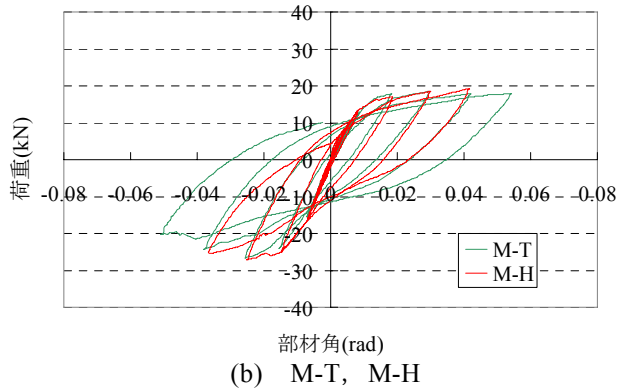
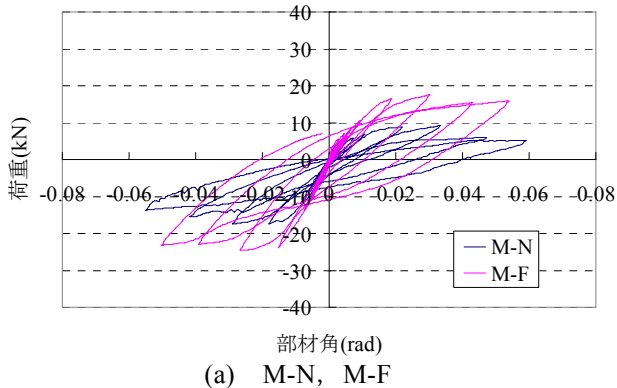


図-4.2 荷重-部材角関係 解析結果 M 型

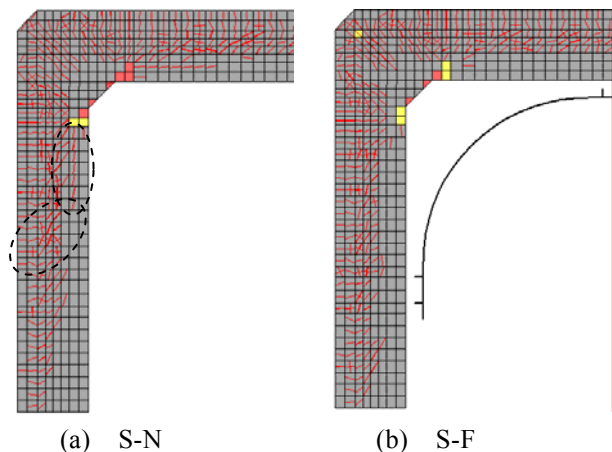


図-4.3 ひび割れ図 S 型 3/100rad

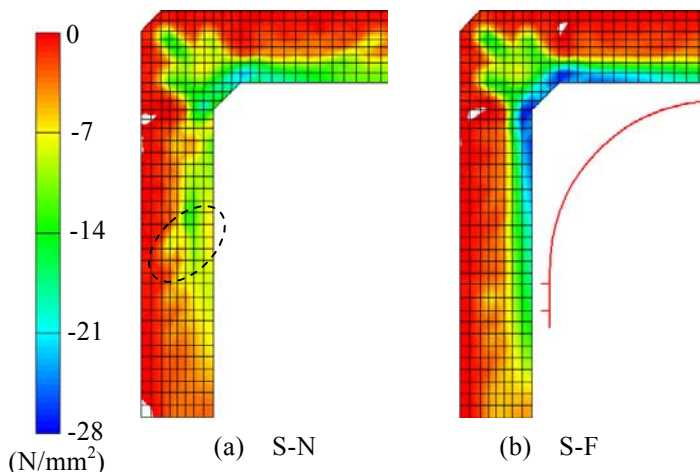


図-4.4 最小主応力コンター図 S 型 3/100rad

## 4.2 解析結果

### 4.2.1 履歴特性

図-4.2 に解析で得られた M 型の荷重-部材角関係を示す。履歴性状に関して，実験と比べると無補強時の復元力特性に違いが見られるが，実験と同様にダンパーを設置することで履歴性状が紡錘形に移行していることや，耐力・剛性がほぼ一致していることから，実験結果を概ね再現出来ていると言える。また実験時に十分な耐力・履歴特性を発揮出来ていなかった H 鋼も，解析では端部の接続が十分剛であるため，他の供試体と同程度，もしくは高い性能を発揮していることが分かり，ダンパーと RC 架構との接続が十分剛であれば期待した性能を発揮することが期待できると考えられる。

### 4.2.2 破壊性状

図-4.3, 図-4.4 に解析で得られた S 型のひび割れ図及び最小主応力コンター図を示す。無補強時に図中点線部に示すようなせん断破壊型特有の明瞭なせん断ひび割れや主鉄筋に沿った付着割裂ひび割れ，コンター図に示すような斜め方向の圧縮応力の流れが確認されるが，ダンパーを設置することで，前述のひび割れが抑制され，また斜め方向の圧縮応力が発生せず，曲げ破壊型の応力状態へと移行していることが認められる。

### 4.2.3 減衰効果

図-4.5 に解析で得られた M 型供試体の荷重-部材角関係から算出した等価粘性減衰定数-部材角関係を示す。なお、M-H は解析において部材角 3/100 以降に実際には起こらなかったダンパーの変形が発生したため、以降の算出結果は削除した。部材角 1/100 まではダンパー設置の有無によらずほぼ同じ値を示しているのに対し、部材角 2/100 程度で H 鋼・丸形鋼管が、部材角 3/100 程度で平鋼が減衰効果を発揮している。これは図-4.6 に示すダンパーに平鋼を用いた既往の架構実験<sup>3)</sup>で得られた結果とも同等な傾向を示していることが分かる。さらに解析で得られた荷重-部材角関係から、RC・ダンパーそれぞれの履歴を抽出したものの一例を図-4.7 に示す。このように抽出したダンパーの履歴から算出した等価粘性減衰定数を図-4.8 に示し、前述 2 章のダンパー単体の要素実験結果と比較すると、平鋼に関しては小さな部材角で要素実験の方が高い値を示しているが、H 鋼・丸形鋼管は要素実験と同等の値を示していることが分かり、RC 架構に設置した際にもダンパー単体の実験と同等のエネルギー吸収性能を発揮すると考えられる。

つまり、RC 架構に設置した際にもダンパーの断面形状を H 鋼、丸形鋼管に代えることで減衰効果を平鋼よりも早期に発揮し得ることが分かった。

## 5. 結論

本実験・解析により得られた結論を以下に示す。

- 1) 破壊性状に関して、せん断破壊に至るように設計した RC 供試体に対してダンパーを設置することでひび割れ性状・応力状態を曲げ破壊型へ移行できることを確認した。
- 2) 履歴性状に関して、無補強時にスリップ型を示す供試体に対してダンパーを設置することでエネルギー吸収性能に富んだ紡錘形に移行することを確認した。
- 3) 減衰効果に関して、平鋼を用いた既往架構実験で部材角 3/100 から減衰効果を発揮した傾向が本実験・解析でも確認され、それに対して H 鋼・丸形鋼管を設置した供試体が部材角 2/100 以前で減衰効果を発揮することが確認された。

## 参考文献

- 1) 財団法人 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—コンクリート構造物，1992
- 2) 島端 嗣浩：湾曲状仕口ダンパーの耐震補強へ適用に関する研究，大阪市立大学大学院工学研究科修士論文，2008.2
- 3) 中田 裕喜：湾曲状ダンパーによる高架橋耐震補強方法に関する研究，大阪市立大学大学院工学研究科修士論文，

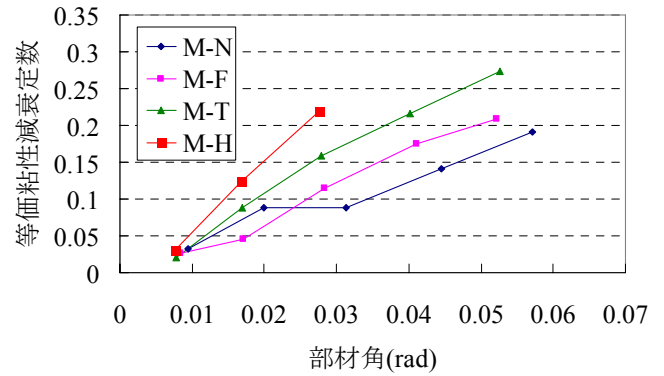


図-4.5 等価粘性減衰定数-部材角関係 M 型

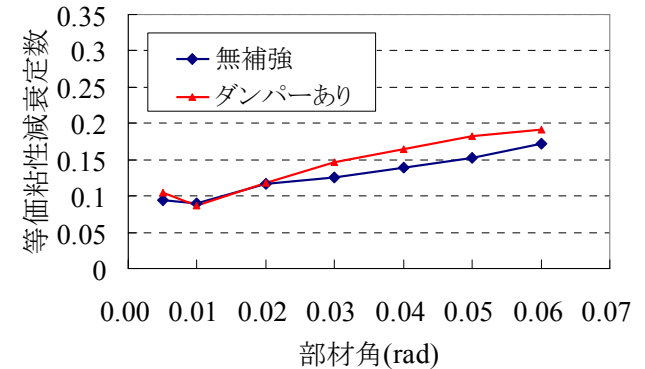


図-4.6 既往架構実験結果<sup>3)</sup>

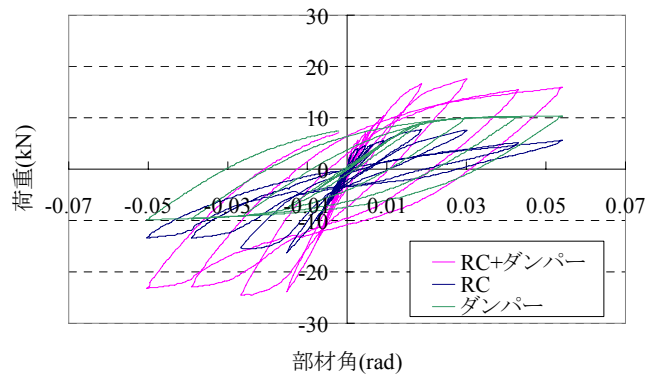


図-4.7 RC・ダンパー履歴の抽出例 M-F

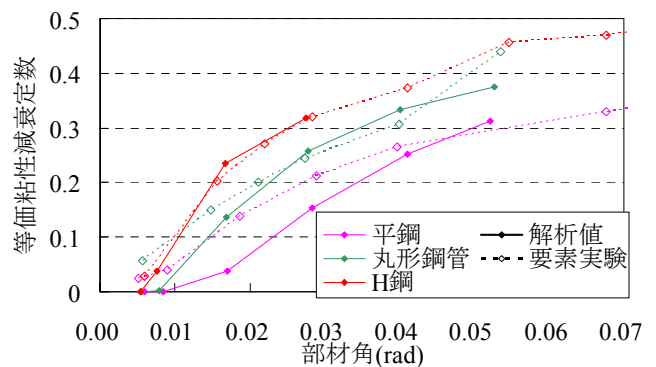


図-4.8 ダンパー単体での比較結果 M 型

2009.2

- 4) 財団法人 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説—耐震設計，1999
- 5) 大木 皓平：湾曲状型鋼ダンパーを用いた耐震補強に関する研究，大阪市立大学大学院工学研究科修士論文，2011.2

## 討議等

### ◆討議 [ 吉中 進 先生 ]

部材角 2/100 は実際にはどの程度の規模の地震が作用することを想定しているのか、またその部材角にどういう意味合いがあるのか？

◆回答：部材角 2/100 は現行の鉄道構造物等設計標準において、レベル 2 地震動が作用した際に耐震性能Ⅱを満足するための残留応答変位に対応しています。

### ◆討議 [ 藤本 益美 先生 ]

ダンパーの材質を SS400 よりも高級なものを用いると性能はどうなるのか？

◆回答：低降伏点鋼などを用いければより早期の減衰効果が期待できると考えられますが、現段階では経済性を考慮して SS400 での適用を考えています。

### ◆討議 [ 谷口 徹郎 先生 ]

RC 供試体の M 型と S 型はどういう違いがありますか？

◆回答：M 型と S 型では主鉄筋およびせん断補強筋の配筋状況に違いがあり、M 型はダンパーを設置しない状態で曲げ破壊が、S 型はせん断破壊が先行して起こるように設計したのになります。

### ◆討議 [ 吉中 進 先生 ]

S 型、M 型の供試体には実構造物ではどのような意味合い、違いがありますか？

◆回答：S 型は旧基準で設計されたせん断補強筋が少なく、脆性的に破壊するものとしての位置づけで、ダンパー設置による破壊形式の移行を確認するために設けました。なお M 型は主に現行の設計基準で曲げ破壊型であるが韌性に乏しいものとしての位置づけで、主に減衰効果を把握するために設けました。

### ◆討議 [ 角掛 久雄 先生 ]

解析で抽出したダンパーの等価粘性減衰定数と要素実験との比較において、平鋼が要素実験と解析で違う値を示していることの原因は何ですか？

◆回答：要素実験ではダンパーを湾曲状にする際に塑性変形を与えており、その影響が復元力特性に現れていると考えています。

### ◆討議 [ 谷口 徹郎 先生 ]

ダンパーを設置すると、柱中腹部では作用せん断力が増大すると考えられますが、せん断破壊はしないのですか？

◆回答：ダンパーを設置することによって柱中腹部のせん断スパン比が小さくなり、ディープビーム効果によってせん断耐力が増大し、それ増大したせん断耐力によって抵抗します。