

# 湾曲状型鋼ダンパーを用いた耐震補強に関する研究

構造及びコンクリート工学分野 大木 皓平

## Abstract

旧基準で設計された鉄道高架橋の中にはせん断補強筋が少なく、脆性的な破壊を示す可能性のあるものがある。そのような高架橋の耐震補強をするために湾曲状ダンパーを開発した。ラーメンの隅角部にダンパーを設置することにより、全体の耐力を上昇させ、せん断破壊を防ぎ、かつ履歴減衰に応答変位を抑制するものである。より効果的な耐震補強を実現するために、断面形状を検討・設計し、要素実験を行い、解析により耐震補強効果の検討を行った。本研究では、要素実験によりダンパーの履歴特性を明らかにし、減衰性能を定量的に評価した。また、ダンパーで補強した高架橋の解析結果から、耐力と剛性の上昇を確認し、動的解析を行うことにより、応答部材角の低減を確認した。

## 1. はじめに

現行の鉄道構造物等設計標準<sup>1)</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。ただし、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、インフラ施設としての社会的役割の観点から、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。一方で、旧基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いものが多い。

そこで、履歴減衰型の鋼製湾曲状ダンパー<sup>2), 3)</sup>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考案した。湾曲状ダンパーの特長は、1) 形状を湾曲にすることで座屈を防止、2) 変形モードを曲げ型

にできる、3) 曲げ応力による塑性域の拡がりによる大きなエネルギー吸収を期待できる等が挙げられる。この湾曲状ダンパーを図-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) 柱材端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増大、4) 履歴減衰により構造物全体の応答を低減するものである。また、高架下の空間利用性もあがるといった特長もある。すなわち、せん断破壊するものやせん断破壊する可能性の大きいもの、曲げ靱性の足りないもの全てに対して、脆性的な破壊を防ぎ、かつ地震応答変位を小さくするものである。

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、小変形域で期待した程の履歴減衰によるエネルギー吸収性能は得られなかった。早期の部材角での履歴減衰によるエネルギー吸収性能を高くするためには、小さな変形での湾曲状ダンパーの降伏を促し、鋼材がより効率的に塑性化をするようなダンパーを開発する必要がある。ダンパーの性能を高くするには、ダンパーの断面形状を検討することが必要であり、安価なダンパーを作製するためには型鋼を用いることが考えうる。

本研究は型鋼を用いた湾曲状ダンパーで耐震補強を施した実大高架橋の耐震性能の向上を目的として、ダンパーの設計、要素実験を行い、解析により耐震補強効果を検討するものである。

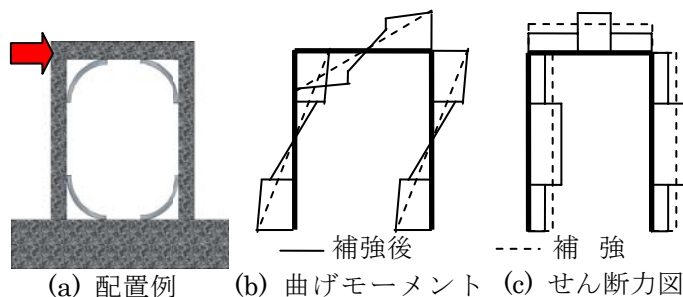


図-1.1 湾曲状ダンパーの配置法と断面力分布

## 2. 型鋼を用いた湾曲状ダンパーの履歴特性

### 2.1 ダンパー設計

本研究での要素実験では、荷重装置の大きさを考慮して 1/6 モデルとし、ダンパー半径  $L_B$  は 375mm とした。

ダンパーの耐力を算定するに当たって、図-2.1 に示す簡易モデルを考え、各断面が全塑性状態にあると仮定して、釣り合いよりダンパー端部の曲げモーメントを算定して設計モーメント  $M_d$  とした。算定して、決定したダンパー一覧を表-2.1 に示す

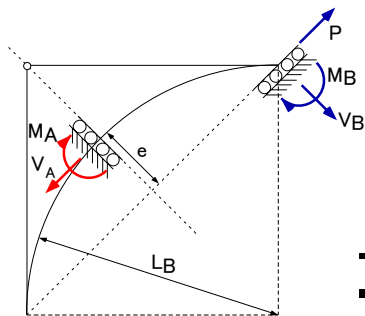


図-2.1 簡易骨組みモデル

考えられる。部材角 3/100 以降になると、細幅 H 鋼は横倒れ座屈による急激な圧縮側での荷重低下が見られるため、等価粘性減衰定数は小さくなっている。だが、他の 4 体のダンパーについては 40% 以上の等価粘性減衰定数を示している。

表-2.1 ダンパー一覧 単位：mm

鋼形式		H	B	R	t	Mu(kNm)
中実	平鋼	22	58			1.6
	丸鋼			36		1.8
中空	丸形鋼管			49	3.2	1.5
新規 H 鋼	広幅 (1:1)	45	46		3.2	1.6
	細幅 (2:1)	58	30		3.2	1.6

### 2.2 予備解析

#### 2.2.1 解析概要

ダンパーの履歴性状を解析的に検討するため、汎用 3 次元骨組解析プログラム UC-win/FRAME(3D) を用いて解析を行った。湾曲状ダンパーは 1/4 円弧、材料は SS400 とする。解析モデルを図-2.2 に示す。ダンパーの要素は全てファイバー要素とし、材料特性はバイリニアモデルとした。図の矢印位置で強制変位を与え、有限変形理論で解析を行った。

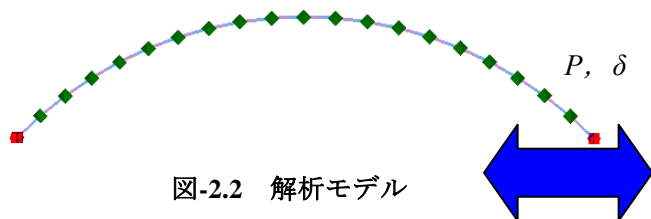


図-2.2 解析モデル

#### 2.2.2 荷重-部材角関係

荷重-部材角関係を図-2.3 に示す。部材角は  $\theta = \delta / L_B$  で定義している。引張時において部材角が大きくなると、軸引張力の影響により荷重が急激に大きくなった。また、引張と圧縮を比較すると、幾何形状の影響により、いずれの部材角においても引張時の荷重のほうが大きくなった。いずれのダンパーも非対称な紡錘形の履歴となり、効率的な履歴減衰性能を示すと考えられる。しかし細幅 H 鋼のみ圧縮側の荷重が急激に低下し、復元力がスリップ形となっている。これは変形と共に面外方向への変形が出て横倒れ座屈をしているためである。

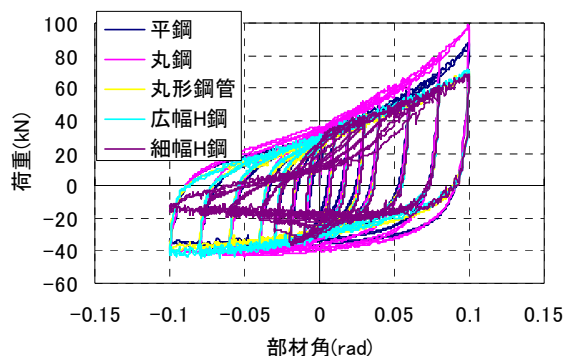


図-2.3 荷重-部材角関係

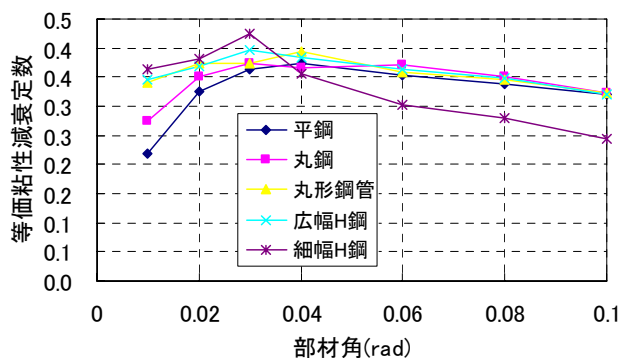


図-2.4 等価粘性減衰定数

#### 2.2.3 等価粘性減衰定数

等価粘性減衰定数を図-2.4 に示す。等価粘性減衰定数は 2 種類の H 鋼と丸形鋼管が部材角 1/100 と早い段階から等価粘性減衰定数は大きくなり、平鋼と丸鋼の中実断面の 2 種類は等価粘性減衰定数が他と比較して小さくなった。つまり部材角 3/100 までの変形であれば、細幅 H 鋼、広幅 H 鋼、丸形鋼管といった順に減衰効果が大きいと考えられる。これらは中実断面のダンパーに比べて、断面高さが大きいことから、早い段階での履歴減衰によるエネルギー吸収性能が高くなると

### 2.3 実験方法

要素実験は MTS 社製試験機を用いて、図-2.5 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。治具の都合上ダンパーの半径は 313mm とする。供試体は表-2.1 に示す 5 体で、H 鋼は鋼板を溶接することにより作製した。

荷重は部材角が 1/1000, 3/1000, 6/1000, 1/100, 2/100,

3/100, 4/100, 6/100, 8/100, 10/100 となる変位で交番载荷をし、各ダンパーの材料特性は表-2.2 に示す。

## 2.4 実験結果

### 2.4.1 荷重-部材角関係

荷重-部材角関係を図-2.6 に示す。部材角は  $\theta = \delta/L$  で算定する。丸形鋼管と両 H 鋼はダンパー端部の早期の破断により、途中で载荷を終了している。湾曲状ダンパーは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る。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、圧縮側で荷重低下している。

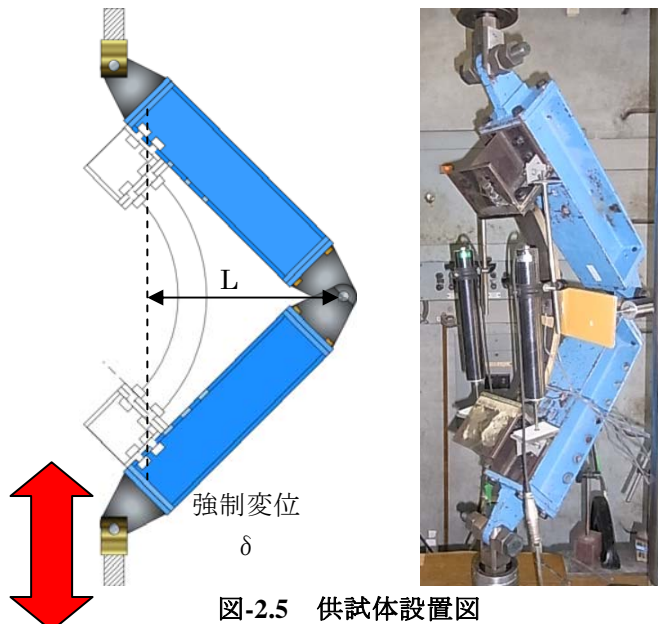


図-2.5 供試体設置図

### 2.4.2 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を図-2.7 に示す。湾曲状ダンパーはラーメン高架橋隅角部の 4 箇所への設置を考えるので、引張側と圧縮側を平均した結果を示す。両 H 鋼が高い減衰性能を示している。細幅 H 鋼はダンパー端部の溶接部の割れにより、部材角 4/100 までの値しか取れていないが、全部材角にわたって大きい値を示している。平鋼と丸鋼と丸形鋼管に関しては、部材角 6/100 程度まで、丸鋼が平鋼と丸形鋼管よりも大きい値を示しているが、それ以降は丸形鋼管が大きな値をとる。

## 2.5 実験結果の解析

### 2.5.1 解析概要

実験の評価をするため、汎用 3 次元骨組み解析プログラム UC-win/FRAME(3D)を用いて解析を行った。解析モデルを図-2.8 に示す。対象は载荷フレームまで含めた実験装置である。要素は全てファイバー要素を用いて、材料特性は実験で得られた材料特性を元にモデル化をした。平鋼と丸鋼はトリリニアモデルとし、丸形鋼管と両 H 鋼はバイリニアモデルとした。構成則は Bauschinger 効果を考慮した移動硬化則とし、復元力特性は修正 Menegotto-Pinto モデルとしている。载荷は部材角が 5/1000, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 6/100, 8/100, 10/100 となるように強制変位を行う。

### 2.5.2 荷重-部材角関係

図-2.9 に荷重-部材角関係を示す。部材角はダンパー端部の変位から算出している。図中の赤線は実験値を示しており、青線は解析値を示している。

平鋼と丸鋼に関して、共に引張側では部材角 6/100

表-2.2 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> )	伸び (%)
平鋼	207	278.9	1349	0.27	440	43.3
丸鋼	207	250.0	1206	0.29	446	35.9
丸形鋼管	207	323.7	1559	0.28	468	34.7
H鋼	204	341.3	1670	0.29	440	39.6

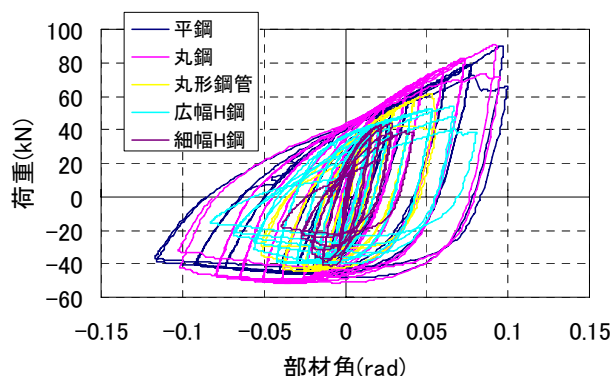


図-2.6 荷重-部材角関係

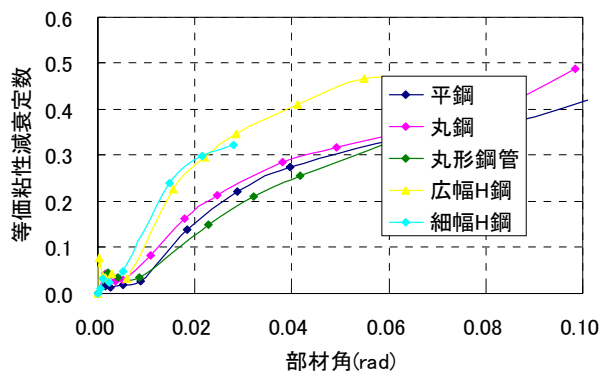


図-2.7 等価粘性減衰定数

までは解析値が下回っているが、8/100 で解析値が実験値を超える結果となった。圧縮側は実験値と比較して解析値が下回る結果となった。また、復元力について、引張時と圧縮時と共に解析値の方が大きな履歴を



示す結果となった。この解析で大まかな挙動は捉えることは出来たが、精度の悪い結果となった。これらはダンパーの接合条件や載荷治具のピンの遊び、大変形域での変形の局所化などの影響によるものであると考えられる。また、本研究において、鋼材は引張試験のみで材料定数を決めており、繰返し載荷下における履歴特性が明らかとなっていなかったために復元力特性に影響を与えたと考えられる。

丸形鋼管と広幅 H 鋼に関して、引張時と圧縮時、ともに良好な結果が得られている。実験で荷重低下が発生しているが、これはフランジ部の座屈によるものであるためである。座屈発生部材角まで、このモデルで再現できると考えられる。また、復元力については平鋼と丸鋼と同様に、解析値の方が大きな履歴を示す結果となった。

細幅 H 鋼に関して、圧縮時と引張時で良好な結果が得られている。実験で発生した横倒れ座屈が解析でも表現することができ、荷重低下の過程を追うことが出来ている。

全供試体を通じて局所座屈や、復元力特性の点では、

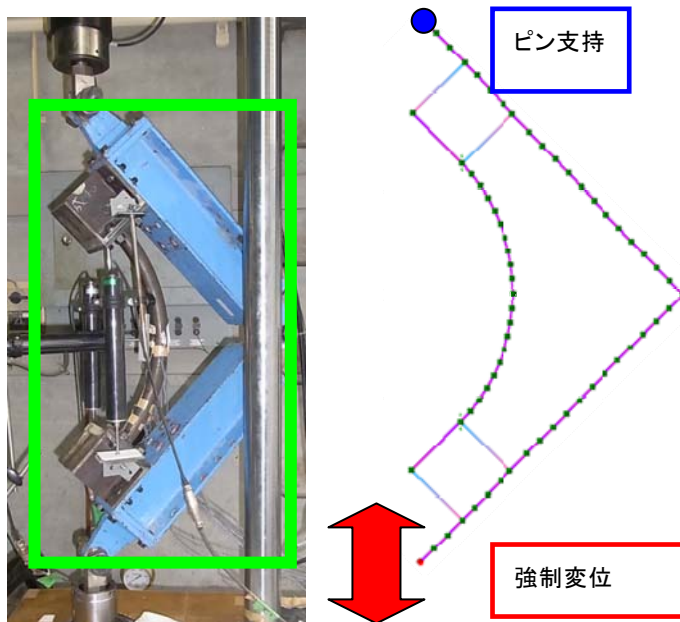


図-2.8 解析モデル

あまり精度は良くないが、おおよその挙動は再現できたと考える。

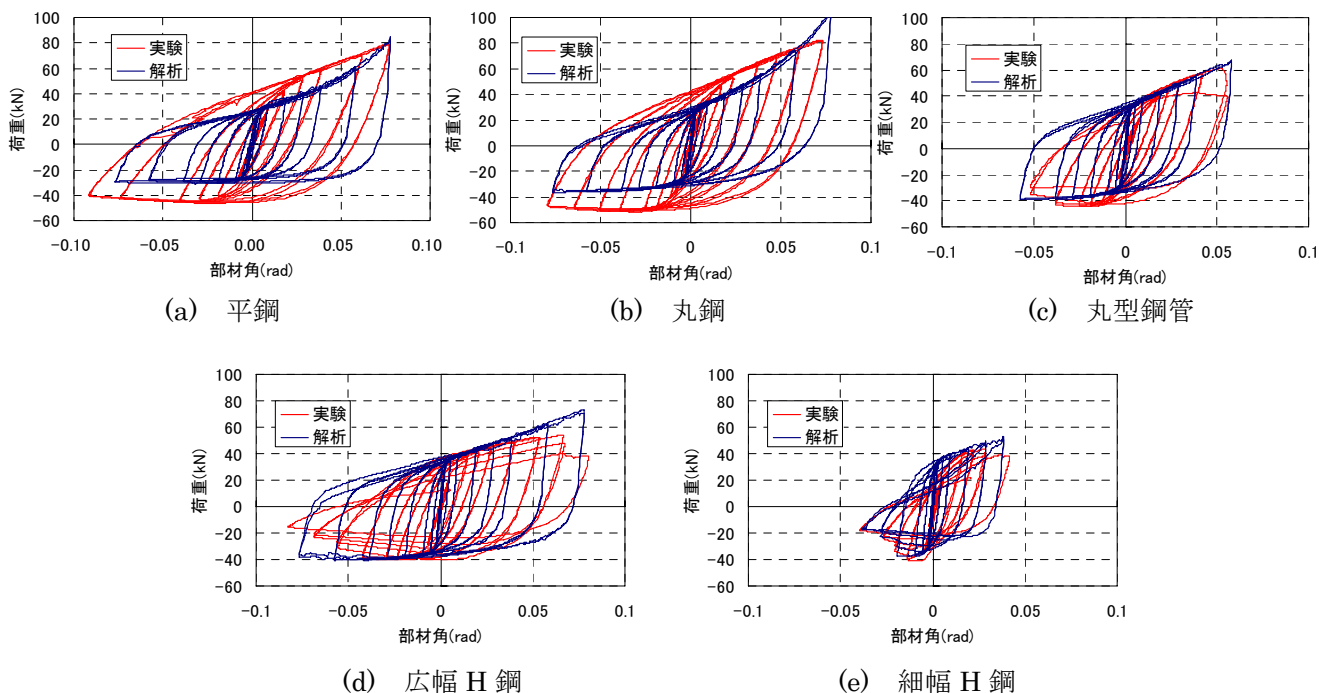


図-2.9 荷重-部材角関係

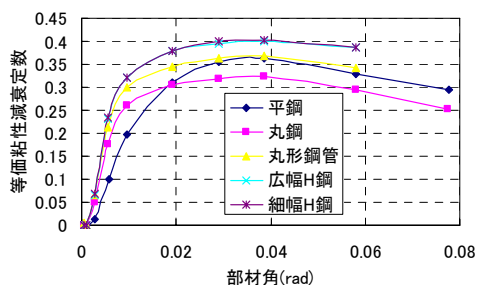


図-2.10 等価粘性減衰定数

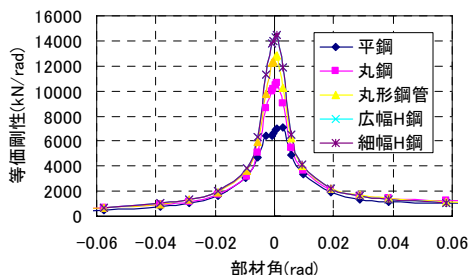


図-2.11 等価剛性

### 2.5.3 等価粘性減衰定数

図-2.10 に等価粘性減衰定数を示す。また、図-2.11 に等価剛性を示す。等価粘性減衰定数は引張側と圧縮側で履歴が異なるので値も異なるが、ラーメンの隅角部 4 箇所への設置を想定しているの、図は引張側と圧縮側の平均値を示している。実験値と同様に、両 H 鋼の等価粘性減衰定数が他のダンパーより値が大きくなっていることから、優れた減衰性能を示していることがわかる。平鋼は部材角 2/100 までは等価粘性減衰定数が最も低いが、部材角 3/100 を越えると、丸形鋼管に近い値を示す結果となった。これは平鋼ダンパーの断面高さが低いため、断面が十分に塑性化するのが遅いためであると考えられる。また丸鋼は部材角 1/100 程度までは等価粘性減衰定数は大きくなっていくが、それ以降は大きくなり、最終的には一番低い値となっている。

等価剛性は引張側と圧縮側で部材角 2/100 程度までは類似した値を示しているが、それ以降になると引張側の方が大きな値を示す。これは軸引張力の影響による荷重の増大が考えられる。

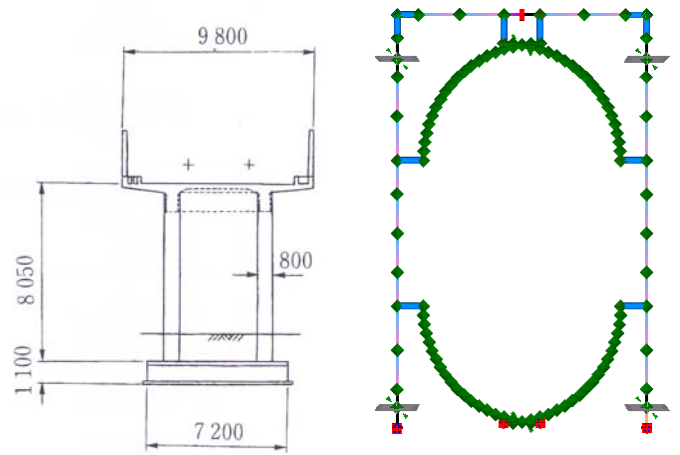


図-3.1 対象高架橋

図-3.2 解析モデル

表-3.1 ダンパー一覧 単位:mm

鋼種	H	B	R	tw	tf	$M_d$ (kNm)
平鋼	100	300				230.0
丸鋼			160			251.8
丸形鋼管			267.4	8		255.3
広幅H鋼	200	204		12	12	236.3
細幅H鋼	300	150		6.5	9	232.7

## 3. 型鋼を用いた湾曲状ダンパーの高架橋への適用

### 3.1 解析概要

ダンパーによる耐震補強効果を検討するために、汎用 3 次元骨組解析プログラム UC-win/FRAME(3D)を用いて解析を行った。対象高架橋を図-3.1 に示し、解析モデルを図-3.2 に示す。せん断補強筋比は規定の最低量である 0.15%とした。補強に用いたダンパー一覧を表-3.1 に示す。境界条件は柱基部とダンパーの下部を完全固定としている。RC フレームは弾性梁要素を用いて、柱の上下端部に塑性ヒンジを考慮した非線形回転バネ<sup>7)</sup>を挿入している。ダンパーはファイバー要素を用いている。柱梁接合部とダンパーの接合部は柱、梁、ダンパーのそれぞれの高さを考慮して剛体要素を用いた。柱端部の非線形回転バネは鉄道構造物等設計標準に定められたテトラリニアモデルを用いて、履歴特性は Takeda モデルとしている。柱基部の非線形回転バネ特性を図-3.3 に示す<sup>4)</sup>。

本研究においては、剛性と耐力の上昇を確認するために単調荷重を、履歴減衰によるエネルギー吸収性能を確認するために交番荷重を静的解析により行った。荷重は梁の中央で行い、単調荷重は部材角 3/100 まで荷重し、交番荷重は部材角が 5/1000, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 6/100, 8/100 となるように 2 サイクルずつ荷重した。また、実際の応答変位抑制効果を検討するために動的非線形応答解析を行った。動的解析は梁の節点を質点として上部構の重量から 183t を与え、図-3.4 に示すような鉄道標準適合波<sup>1)</sup>を与えた。

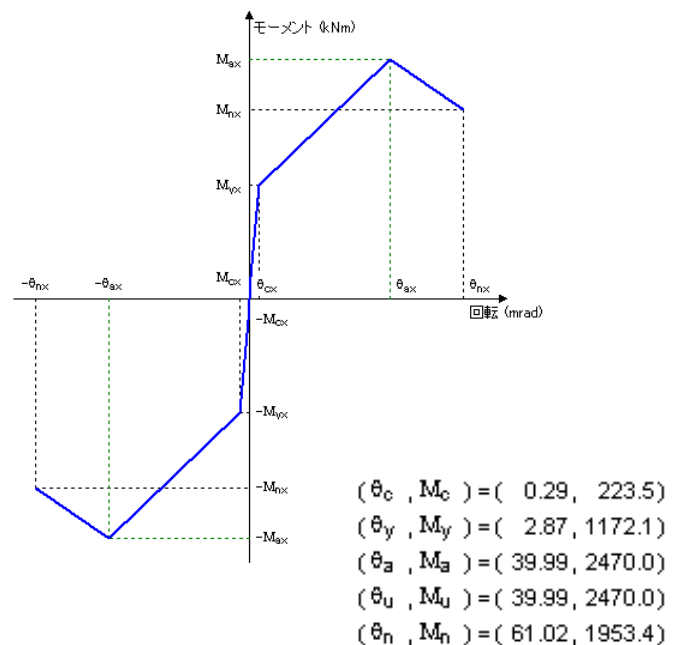


図-3.3 非線形バネ特性

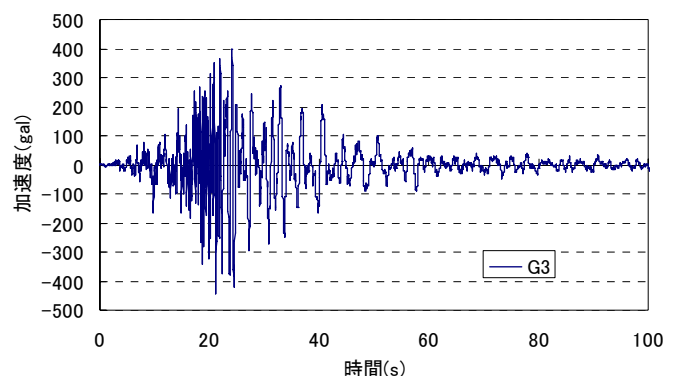


図-3.4 鉄道標準波(スペクトル I G3 地盤)

## 3.2 解析結果

### 3.2.1 荷重-部材角関係

図-3.5, 図-3.6 に荷重-部材角関係を示す. 図-3.5 には単調載荷した結果を, 図-3.6 には交番載荷した結果を示す. 図-3.5 より耐力の上昇が確認できる. 最大耐力は 1.3 倍強となっており, 丸形鋼管が最大で 1.4 倍の耐力上昇となっている. これはダンパー自体の全塑性モーメントが大きいためであると考えられる.

### 3.2.2 等価粘性減衰定数

等価粘性減衰定数を図-3.7 に示す. 初期の部材角では等価粘性減衰定数に大きな違いは見られないが, 部材角 2/100 を超えると, 広幅 H 鋼が卓越したエネルギー性能を示している. また, 等価剛性に関しては, 細幅 H 鋼と丸形鋼管が初期の部材角で大きな値を示している. これはダンパーを設置したことによる高剛性化によるものであり, これにより応答変位の低減が期待できる.

### 3.2.3 動的解析結果

図-3.8 に動的解析結果を示す. 示しているのは最大応答部材角である. なお, 結果はスペクトル I の結果のみ示す. ダンパーを設置することにより, 平鋼ダンパーで平均 80%, 細幅 H 鋼ダンパーで 43%に最大応答部材角は低減される.

## 4. 結論

- (1) 各ダンパーの履歴性状を明らかにした.
- (2) 等価粘性減衰定数を算定することによりエネルギー吸収性能を定量的に評価し, 両 H 鋼のエネルギー吸収性能が高いことを示した.
- (3) 実験結果の解析よりおよそその挙動を追うことができた.
- (4) 高架橋に適用した解析結果より, 耐力上昇を確認した.
- (5) 交番載荷結果よりダンパーを含めた RC フレームの履歴特性を明らかにした.
- (6) また, 大変形では広幅 H 鋼が高い減衰性能を示す.
- (7) ダンパーを設置することにより, 最大応答部材角を低減し, 細幅 H 鋼で 43%程度まで低減される.

## 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—耐震設計, 1999
- 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, 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—コンクリート構造物, 2004

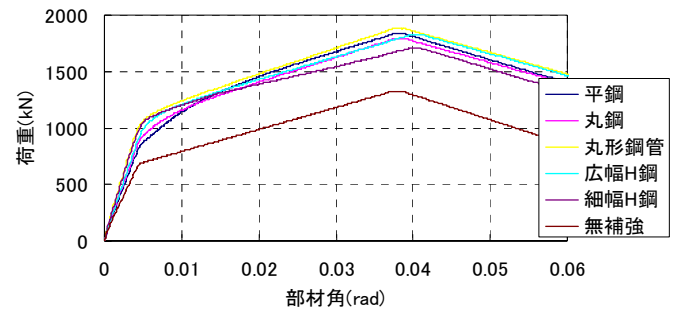


図-3.5 解析結果(単調載荷)

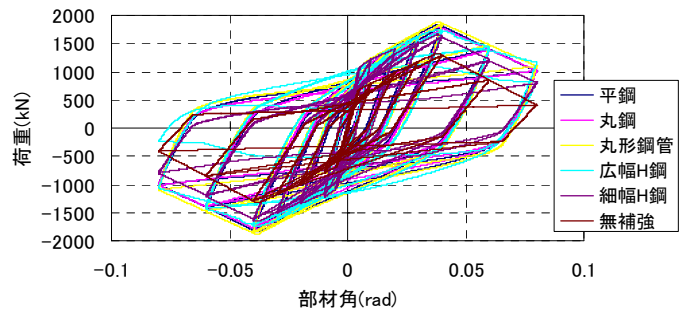


図-3.6 解析結果(交番載荷)

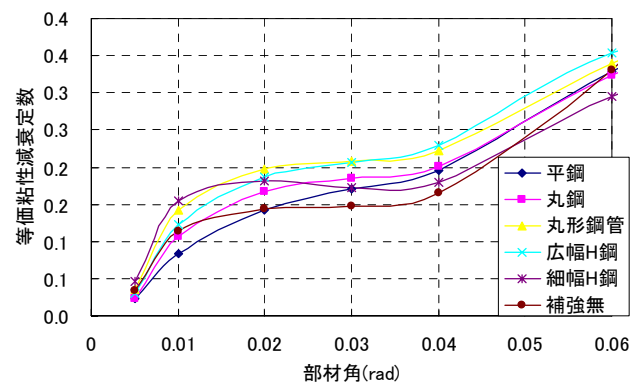


図-3.7 等価粘性減衰定数

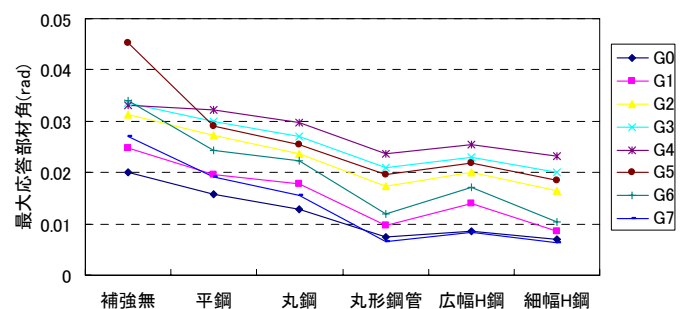


図-3.8 解析結果(動的解析)

◆討議 [ 山口 隆司 ]

ダンパーの効果は断面定数の変化だけで決まるのではないか？

◆回答:断面定数による影響が大きいことも事実です。しかし、エネルギー吸収性能は断面形状等により、差が生じると考えています。

◆討議 [ 山口 隆司 ]

塑性加工の影響は解析に入れているのか？

◆回答：塑性加工の影響は解析で考慮していません。しかし、塑性加工の影響を考慮することも今後の課題となると考えています。

◆討議 [ 山口 隆司 ]

実験結果と解析結果が合わないのは塑性加工の影響が出ているのではないか？

◆回答：塑性加工による影響は出ていると考えられます。他にもダンパー中央部への変形の集中、繰返し応力下の履歴特性による影響も考慮しなければならないと考えています。

◆討議 [ 谷口 与史也 ]

耐力を揃えているのに履歴減衰に違いがあるのはなぜか？

◆回答：終局耐力を揃えても、断面形状や断面高さにより降伏耐力はそれぞれ異なります。降伏部材角は断面高さに依存すると考えられますが、降伏後の塑性域の拡がりには断面形状により異なるので履歴減衰に差が生じます。

◆討議 [ 谷口 徹郎 ]

地震等による荷重を受けたときに、ダンパーを交換するだけで補修することは可能か？

◆回答：ダンパーはRCラーメンの降伏よりも早く塑性化します。そのことから、残留変形が大きくなければ、ダンパーを交換するだけで補修は可能であると考