

## RC ラーメン橋脚に対する湾曲状鋼製ダンパーの適用に関する研究

### STUDY ON APPLICATION OF ARC-SHAPED STEEL DAMPER FOR RC PORTAL FRAMED BRIDGE PIERS

構造及びコンクリート工学分野 山口 達也

#### Abstract

本研究では、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旧設計標準<sup>1)</sup>で設計された鉄道RC ラーメン高架橋に対し、本研究室で開発された湾曲状鋼製ダンパー<sup>2),3)</sup>を使用した際、未だ明らかとなっていない、実大RC ラーメン高架橋に対する本ダンパーの効果や、設計時における留意点を解析的に検討した。得られた結果より、ダンパー設置によるRC ラーメン高架橋の特性、柱中腹部におけるせん断耐荷機構及びダンパー設置方法における設計時の留意点を明らかにした。

When it was used arc-shaped steel damper developed in our laboratory for RC portal frame viaduct of the railway that is designed in the old design standards like poor bending toughness or shear failure, the effect of the damper to the RC portal frame viaduct of the actual size and considerations in the design is not clear yet. In this study, I was examined analytically those things. From the results obtained, I found characteristic of the RC portal frame viaduct by the damper installation, and the considerations of design in damper installation method and shear load-bearing mechanism in the mid-abdominal of the pillars.

#### 1. はじめに

旧設計標準<sup>1)</sup>で設計された、鉄道高架橋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存在している。

このような背景の下、本研究室では、履歴減衰型の鋼製湾曲状ダンパーを開発し、**図-1.1**に示すように、高架橋フレーム内の隅角部に配置することにより、脆性的な破壊を防止すると共に、損傷を制御する耐震補強方法を提案した<sup>2),3)</sup>。本ダンパーには、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)せん断スパン比を小さくし、柱中央部のせん断耐荷機構を変化させることでせん断耐力増大、4)履歴減衰により構造物全体の応答を低減することを期待している。

これまでに、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。さらに、ダンパーの性能の向上を目的として、断面形状の異なるダンパー単体

の要素実験・解析やL型RC 部材に断面形状の異なるダンパーを設置し、断面形状の異なるダンパーの耐震補強効果の把握を行った<sup>4)</sup>。

しかし、ラーメン高架橋モデルでの静的解析および動的解析が十分に行われていないことや、期待している性能の一つである柱中央部のせん断耐荷機構について解析的に未だ明らかになっていない。また、本ダンパーを適用する場合の設計法や施工(設置)に対する留意点が確立されていないのが現状である。

そこで本研究では、本ダンパーを実社会で適用できるようにするため、未だ明らかになっていない 1)実ラメ

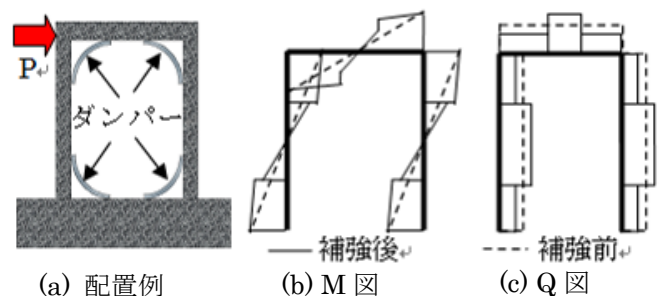


図-1.1 湾曲状ダンパーの配置法と断面力分布

ン高架橋に対する本ダンパーの効果を解析的に明らかにするとともに、2)本ダンパーを使用するにあたり、実設計時において留意すべき点を明らかにし、3)ダンパー設置による柱中腹部のせん断耐荷機構を解析的に明らかにすることを目的としている。

## 2. 時刻歴動的応答解析

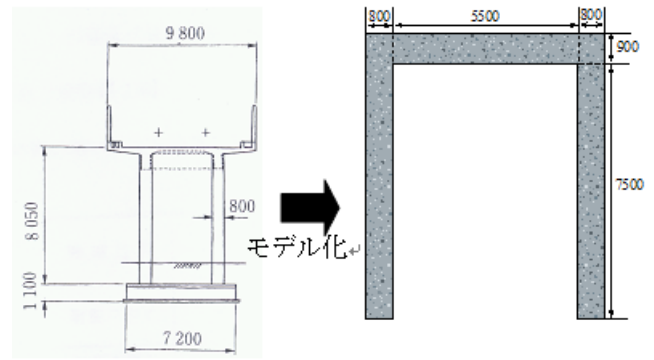
### 2.1 研究対象と解析パラメータ

本研究では、図-2.1.1に示すような兵庫県南部地震以前の基準で設計されたRCラーメン高架橋をモデル化したものを研究対象としている。モデル化の際、柱部の主鉄筋比や、せん断補強筋比を元の高架橋と同等とし、せん断、曲げの各種耐力が同程度となるように設計した。

解析パラメータは2種類の解析ソフトと無補強時を含めた4種類のダンパーの断面形状である。解析ソフトは、実設計でも用いられている骨組み要素を用いた解析ソフト、汎用3次元骨組み構造解析プログラムUC-win/F-RAME(3D)(以下 UC-win)と平面応力要素を用いたコンクリート構造物非線形 FEM 解析プログラム Final である。図-2.1.2に解析対象概略図を示す。

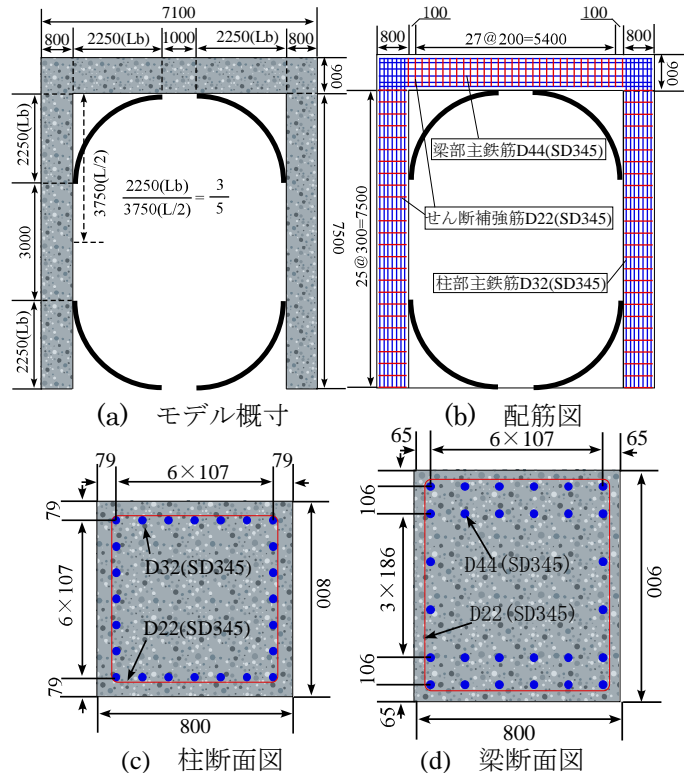
また、ダンパーの断面形状は以前の架構実験<sup>4)</sup>から平鋼、丸形鋼管、H鋼とし、型鋼を使用することを想定した。ダンパー断面寸法は、フーチングの耐力を考慮して、補強による水平耐力の増加を30%程度に留め、補強後の耐力がなるべく等しくなるように塑性断面係数 Z を揃えることで決定した。この際、型鋼を用いると最大寸法のものでも、平鋼は丸形鋼管と H 鋼の塑性断面係数 Z がかなり小さい値となったので、平鋼のみ形鋼の縦横比の一つである H : B=1:3 を参考に、その割合を変えずに拡大したものを想定して用いた。

ダンパー補強区間は小谷の研究<sup>4)</sup>の柱 1/2 長さ(L/2)とダンパー補強区間(Lb)の割合  $(375\text{mm}(Lb)/625\text{mm}(L/2)=3/5)$  と同様とし、 $2250\text{mm}(2250\text{mm}(Lb)/3750\text{mm}(L/2)=3/5)$  とした。表-2.1.1 に解析パラメータを示す。



(a) 旧基準設計の高架橋 (b) 研究対象

図-2.1.1 研究対象



(a) モデル概寸 (b) 配筋図 (c) 柱断面図 (d) 梁断面図

図-2.1.2 解析対象概略図

### 2.2 解析概要

本モデルでは、設計時のダンパー設置時における注意点に関しても検討していたが、特別報告するに値する大きな注意点はなく使用可能であると明らかになったため、UC-win の結果は紙面の都合上割愛することとした。

図-2.2.1 に Final の解析モデルを示す。Final は小谷<sup>4)</sup>の架構実験で再現性が得られたモデル、構成則と同様と

表-2.1.1 解析パラメータ

解析ソフト	ダンパー	名称	RC部(mm)								ダンパー(mm)				Z ( $\times 10^6 \text{mm}^3$ )	断面二次モーメント ( $\times 10^6 \text{mm}^4$ )	
			柱				梁				高さ	幅	直径	板厚			
			柱長さ	断面	主鉄筋比	せん断補強筋比	梁長さ	断面	主鉄筋比	せん断補強筋比				フランジ			ウエブ
UC-win /FRAME (3D)	なし	UC-N	7500	800 $\times$ 800	2.98%	0.32%	5500	900 $\times$ 800	5.21%	0.43%	100	300	318.5	100		0.75	25.0
	平鋼	UC-F												8.4		0.81	98.4
	丸形鋼管	UC-T												11		0.78	85.3
	H鋼	UC-H												11		0.78	85.3
Final	なし	F-N	7500	800 $\times$ 800	2.98%	0.32%	5500	900 $\times$ 800	5.21%	0.43%	100	300	318.5	100		0.75	25.0
	平鋼	F-F												8.4		0.81	98.4
	丸形鋼管	F-T												11		0.78	85.3
	H鋼	F-H												11		0.78	85.3

している。Final はコンクリート部を平面応力要素とし、平鋼、丸形鋼管はビーム要素、H 鋼はフランジ部をビーム要素、ウェブ部を平面応力要素で、ダンパー接合部は、平面応力要素とビーム要素でモデル化を行い、十分剛となるように設置することを考慮して、鋼材の 100 倍の弾性係数とし、柱・梁接合部は十分剛とみなせるよう配筋し、柱・梁接合部および梁部は弾性体とした。ビーム要素は全てファイバーモデルであり、分割した断面ごとの降伏が考慮できるようになっている。

鉄筋は全てトラス要素で、柱、ダンパー設置部は D22 鉄筋をねじ切りして固定することを想定しており、これを弾性体のトラス要素でモデル化を行った。

構成則はコンクリートの圧縮側を修正 Ahmad モデル、引張側を出雲モデルとし、鋼材の効果則は Bauschinger 効果を考慮した移動硬化則を用い、復元力特性は Menegotto-pinto モデルとし完全弾塑性モデルとした。

解析は静的解析として、剛性と耐力の上昇の確認、モデルの妥当性を把握するために、図中の矢印部に強制変位を与えて単調載荷を、履歴減衰によるエネルギー吸収性能を確認するために正負交番載荷を行った。

動的応答解析としては、堅固な地盤を想定し、G0 地盤～G2 地盤の 3 種類の地盤に対し、鉄道標準適合波<sup>1)</sup>のスペクトル I とスペクトル II の 2 種類の地震波を与え、計 6 種類の地震波を入力した。逐次計算法は New mark の  $\beta$  法 ( $\beta=1/4$ ) とし、計算時間間隔は 0.01 秒とした。重量は上部工重量を考慮し、梁に 126tf、柱 1 本当たり 12tf ずつ重量を与えた。動的応答時の剛性は初期剛性とし、減衰は地震波入力方向で刺激係数の大きかった 2 つの固有振動数を用いてレーリー減衰を作成した。動的応答解析は固有値に対する応答を確認するために、動的線形応答解析を、地震波入力時のダンパーの効果を確認するために、動的非線形応答解析を行った。

### 3. 動的解析用モデル解析結果

#### 3.1 静的解析結果

単調載荷結果によって、剛性、耐力は想定通り上昇しており、耐力や破壊形式の観点から、モデルの妥当性を得たが、今回は紙面の都合上割愛する。

図-3.1.1 に正負交番載荷によって得られた、等価粘性減衰定数の結果を示す。ダンパー毎の比較を行うと、H 鋼は部材角 3/1000rad から無補強時よりも高い減衰性能を発揮し、その後も各種ダンパーの中で最も高い減衰性

能を示していることが分かる。丸形鋼管は H 鋼よりもやや大きな部材角 5/1000rad 以降で無補強時よりも高い減衰性能となったが、無補強時と大差はなかった。

本ダンパーを実大の鉄道高架橋に設置する際は、耐力上昇分を 30%程度とすると、ダンパーの大きさに対して柱の大きさが大きいため、H 鋼以外は柱部の減衰効果が支配的となることが明らかになった。

#### 3.2 動的解析結果

図-3.2.1 に G0 地盤におけるスペクトル II 地震波の動的線形応答解析における最大応答値を示す。ダンパー設置の最大応答値について比較すると、F-F に比べ F-T と F-H は大きく応答を低減していることが分かる。

具体的には、全 6 種類の地震波でばらつきはあったが、無補強時から平鋼設置時は 79.1%～100.0%、丸形鋼管設置時は 58.7%～72.0%、H 鋼設置時は 63.8%～82.9%となる最大応答値となった。

図-3.2.2 に動的線形応答解析結果の一例として F-T、F-H の G0 地盤のスペクトル II 地震波の応答結果を示す。

F-T、F-H は同等の応答を示したことから、両者の固有値による応答の差はほとんどないことが分かる。また、表-3.2.1 に単調載荷から得られた初期剛性と、ひび割れ発生時から主鉄筋降伏時までの二次剛性を示す。各種剛性を見ると、初期剛性、二次剛性共に F-T は F-H よりわずかに剛性は高い結果となっていることが分かる。

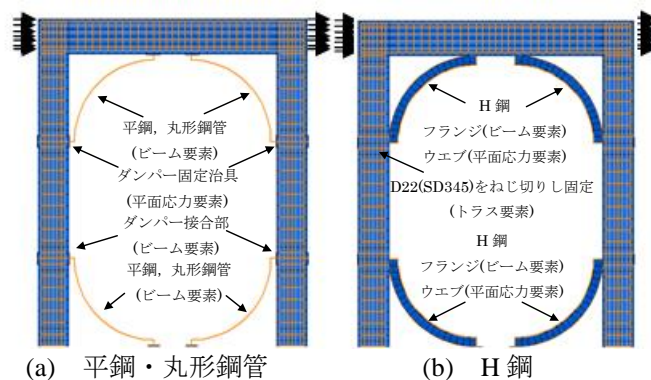


図-2.2.1 Final 解析モデル

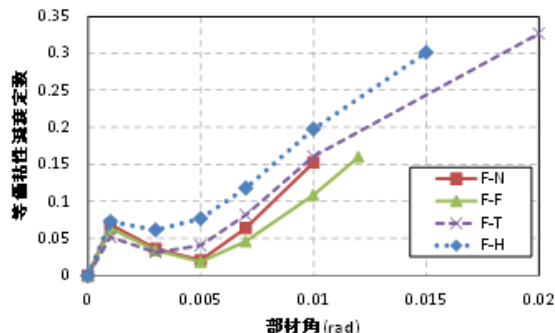


図-3.1.1 等価粘性減衰定数

F-T, F-H についてまとめる. 固有値による応答の差はなく, 初期剛性, 二次剛性共に F-T は F-H よりわずかに剛性は高い結果となっており, 図-3.1.1 より F-H は F-T よりも高い減衰性能を有している. そして, 図-3.2.1 について, 最大応答値に関しては F-T と F-H の応答は F-H が F-T よりもやや大きな応答を示す結果となっている. このことから, 本ダンパーを耐力増分が 30%程度とした際の応答値の低減効果は, 鋼材降伏における履歴減衰の効果よりも, ダンパー設置による剛性の上昇が支配的であることが考えられる.

#### 4. 柱中腹部せん断耐荷機構

##### 4.1 研究対象

図-4.1.1 に柱中腹部せん断耐荷機構確認用解析モデルを示す. 本研究対象は, ダンパー設置前には柱中腹部でせん断破壊が発生し, ダンパー設置後はダンパー設置により, 柱中腹部のせん断スパン比を短くすることで(本対象は  $a/d=1.46$  となるように設定), せん断スパン比の影響を受けて柱中腹部のせん断耐力が上昇するような配筋としている. その上で, ダンパー設置後も柱中腹部でせん断破壊を引き起こせるような設計にしておき, 無補強時から柱中腹部の耐力の上昇がみられるか確認するモデルである. そのため, 2.1 節のモデルから, 主鉄筋本数を減らし, せん断補強筋がないモデルとなっている. また, ダンパーは動的解析用供試体で設置したものと同一断面の丸形鋼管を想定しており, 梁部の配筋は動的解析用モデルと同様である.

表 4.1.1 に解析パラメータを示す. ダンパー, ダンパー設置治具を共に設置していないものを N, ダンパーを設置しておらず, ダンパー設置治具を設置しているものを N-fix, ダンパー設置治具を使用してダンパーを設置しているものを T と名称を決定した. また, 本研究ではダンパーの接合方法も検討しており, 図-4.1.1(c)のように, 柱部をボルト等で貫通しダンパー設置鋼板を取り付け, ダンパー設置を考えたモデル(以下, 貫通固定モデル), T 以外にも, 図-4.1.1(d)のように, 柱断面の中間地点までアンカーを取り付け, そのアンカーにダンパー設置鋼板を取り付けるようなダンパーの設置方法(以下アンカー固定モデル)も考えている. アンカーのみを N に設置したものを N-anc, アンカーとダンパーを設置したものを T-anc と名称を決め解析を行った.

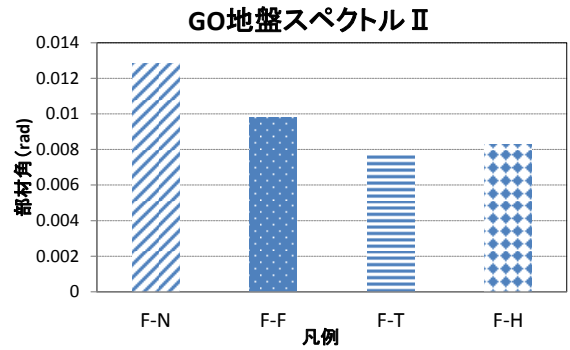


図-3.2.1 G0 地盤スペクトル II 動的非線形解析結果

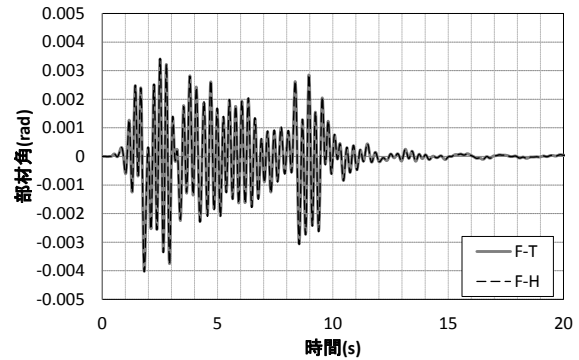


図-3.2.2 G0 地盤スペクトル II 動的弾性応答解析結果

表-3.2.1 初期剛性及び二次剛性の比較

	剛性(MN/rad)			
	F-N	F-F	F-T	F-H
初期剛性	497.8	527.6	599.0	569.6
二次剛性	176.1	199.5	242.1	233.7

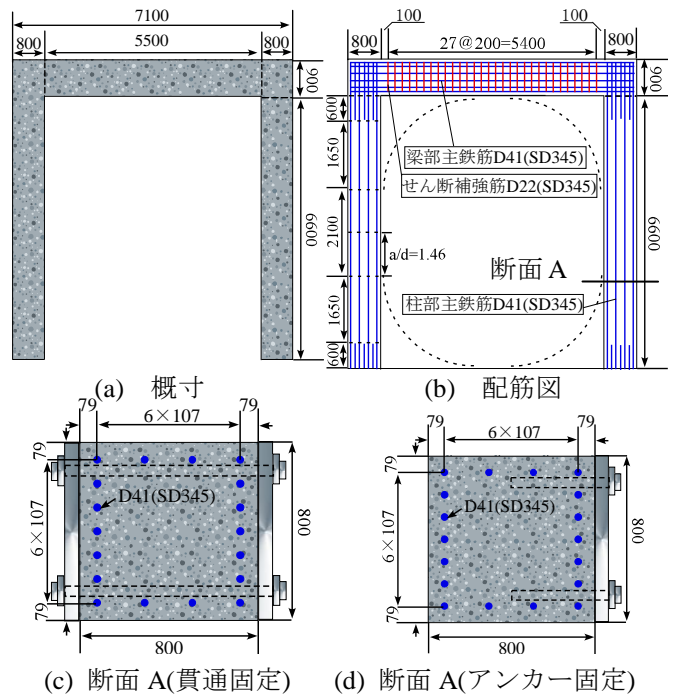


図-4.1.1 柱中腹部せん断耐荷機構確認用モデル

##### 4.2 解析概要

図-4.2.1 に柱中腹部せん断耐荷機構確認用モデルの解析モデル図を示す. 解析条件は前節 2.2 と同様である. しかし, 柱中腹部のせん断耐荷機構の確認にあたり, せ

ん断破壊が起きる可能性のある、柱中腹部の柱高さ方向の要素の大きさと曲げ破壊が決定する柱基部の要素の大きさに差があると、破壊の起きやすさに影響があることがある。そのため、要素の大きさが同等のレベルになるように、破壊が決定し得る柱基部、柱中腹部、ダンパー接合部付近の要素分割を柱高さ方向 150mm に揃えた。

## 5 柱中腹部せん断耐荷機構解析結果

### 5.1 柱中腹部せん断耐力の検討

図-5.1.1 に N, N-fix, T の荷重-部材角関係を示す。図中の  $V_n$  はせん断スパンを考慮しないスレンダービーム算定耐力で、 $V_c$  はせん断スパンを考慮した際の算定耐力<sup>5)</sup>である。解析は全てのモデルで柱中腹部のせん断破壊で終了している。N は柱中腹部のせん断耐力  $V_n$  を少し超えたところで急激に荷重が低下しており、その荷重は 1300kN 程度であった。それに対し、N-fix は 1300kN 付近で、勾配がやや緩やかになるが、荷重は低下せず、1600kN 程度まで荷重は上昇した。

これは、ダンパー設置鋼板とボルトの双方がせん断補強の役割をしたため、柱中腹部の耐力の上昇を導いたのではないかと考えられる。また、T でも同様に 1300kN 付近で勾配は低下するが、N-Fix とは異なり、荷重はその後も上昇し、せん断スパンを考慮した算定せん断耐力式  $V_c$  付近まで荷重の上昇が見られた。この原因については次節 5.2 で考察を行う。

### 5.2 ダンパー設置法によるせん断補強効果の検討

図-5.2.1 に N, N-anc, T-anc の荷重-部材角関係を示す。N-anc では、N-fix から、せん断抵抗するボルト並びに鋼板の量が半分となっているため、せん断耐力の上昇効果は N-fix ほどは見られなかった。

また、図-5.2.2 に T-anc, T のそれぞれの最大荷重時における左柱中腹部から上部における最小主応力図と柱部の耐荷機構の概念図を示す。図-5.2.2 (a)の赤丸部より、T は柱中腹部において柱を押すダンパー設置鋼板からその対角に位置する鋼板に向かって明瞭な最小主応力が作用していることが分かる。これは、図-5.2.2 (c)に示すように、柱を押すダンパー設置鋼板とその対角に位置する鋼板がそれぞれ載荷点と支点の役割を担うことで、T の柱中腹部はディープビーム的機構となり。T は柱中腹部において、耐力が上昇したと考えられる。

図-5.2.2 (b)の赤丸部を見ると、T-anc では、柱を押すダンパー設置鋼板に対して、その対角に位置する鋼板は

なく、直接柱基部に向かって最小主応力が流れていることが分かる。そのため、T-anc の柱中腹部では無補強時と同じく、せん断スパン長が長い際に発生しやすい斜め引張破壊となったため、荷重上昇分は少なく、無補強時とほぼ変わらない最大荷重で、荷重は急激に低下したと考えられる。図-5.2.2 (d)に T-anc の柱部における耐荷機構概念図を示す。これらの結果より、柱中腹部でせん断に対してダンパーに期待する性能を発揮させるためには、ダンパー設置鋼板による柱部への加力に対して、その対角方向に加力を受けるような支点となるような鋼板が必要であると考えられる。

### 5.3 ダンパー設置法による曲げ補強効果の検討

次に、ダンパーの設置法の違いによる曲げ補強効果の検討を行う。前章 2 章の図-2.3(a)の貫通固定モデルでダンパーを設置することを考えたものの丸形鋼管設置時のモデルと、図-5.3.1 に示すように、前節 3.1 と同様のアンカー固定モデルによって丸形鋼管を設置したモデ

表-4.1.1 解析パラメータ

ダンパー	ダンパー設置治具	名称	RC部(mm)				
			柱長さ	断面	柱		せん断補強筋比
					主鉄筋比	せん断補強筋比	
なし	なし	N	6600	800 × 800	5.02%	3.77%	0.00%
なし	鋼板+ボルト	N-fix					
丸形鋼管	鋼板+ボルト	T					
なし	アンカー	N-anc					
丸形鋼管	アンカー	T-anc					

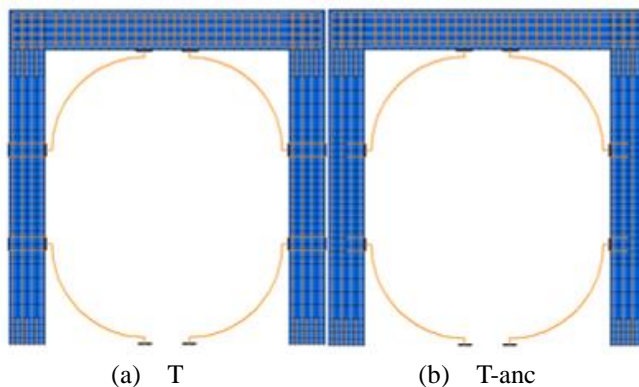


図-4.2.1 解析モデル図

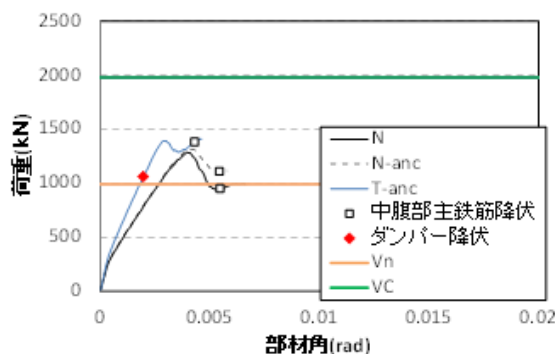


図-5.1.1 N, N-fix, T の荷重-部材角関係

ルでの比較を行い、設置法に関するダンパーの曲げ補強効果の検討を行った。

図-5.3.2 にそれぞれの単調載荷結果を示す。単調載荷結果を見ると、イベント、挙動において両者にほとんど差がないことが分かる。これによって、アンカーで接続した際、無補強時曲げ破壊が先行するモデルでは貫通固定モデルでも、アンカー固定モデルでも結果にはほとんど影響がなく、本ダンパーによって期待している効果が十分発揮できることを確認した。

## 6. まとめ

- 1) 耐力増分 30%程度とした、平鋼、丸形鋼管を実大の鉄道高架橋に設置する際、ダンパーに対する柱の大きさが大きく、柱部の減衰効果が支配的となることを明らかにした。
- 2) 耐力増分 30%程度とした本ダンパーは、応答値低減効果に関して、鋼材降伏における履歴減衰の効果よりも、ダンパー設置による剛性の上昇の影響が大きくなるということを確認した。
- 3) 無補強時と比較して、平鋼設置時は 79.1%~100.0%、丸形鋼管設置時は 58.7%~72.0%、H 鋼設置時は 63.8%~82.9%となる最大応答値となった。
- 4) 柱中腹部のせん断耐力を上昇させるには、ダンパー設置鋼板による柱部への加力に対して、その対角方向に加力を受けるような支点となるような鋼板が必要であることを明らかにした。
- 5) アンカー固定モデルでは、曲げ破壊が先行するモデルに対し、本ダンパーに期待する性能を発揮することを明らかにした。

## 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—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) 小谷 洋平：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，2012.2
- 5) 前田友章：逆対称曲げを受ける鉄筋コンクリート梁のせん断耐力評価法，財団法人 鉄道総合技術研究所，2008.10

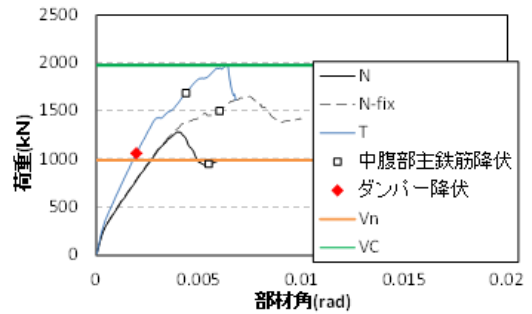


図-5.2.1 N, N-anc, T-anc の荷重-部材角関係

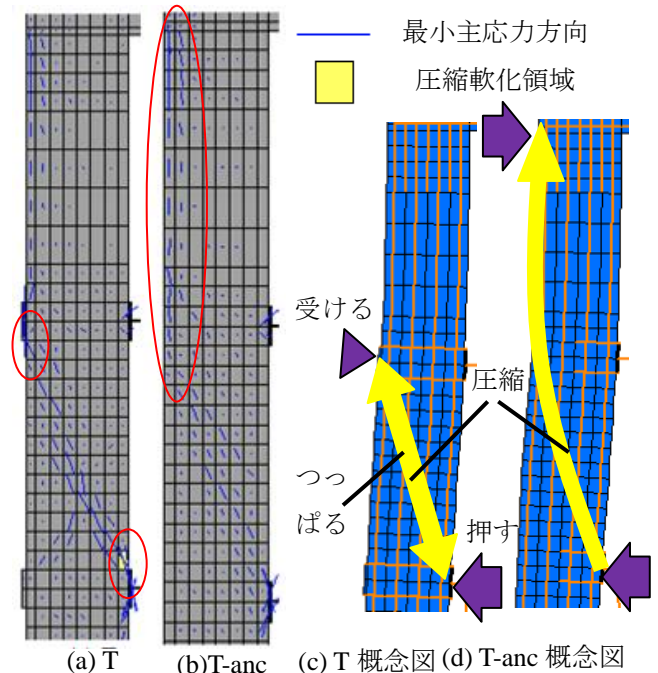


図-5.2.2 最小主応力図及び耐荷機構概念図

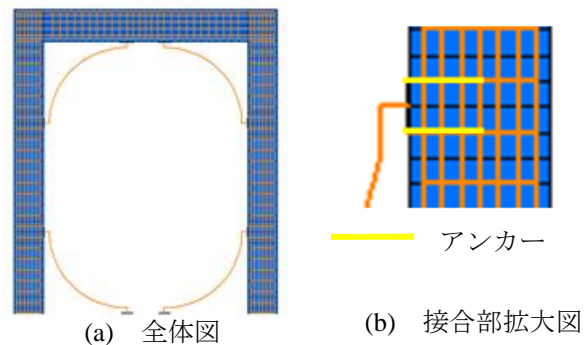


図-5.3.1 アンカー固定モデルの解析モデル図

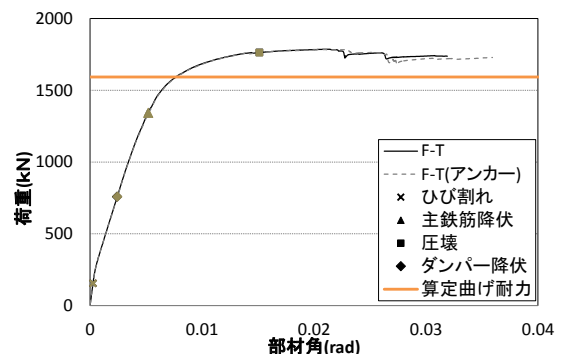


図-5.3.2 単調載荷結果

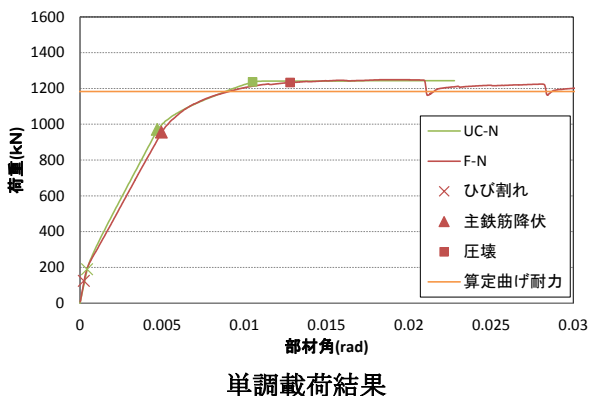
討議

◆討議【山口 隆司先生】

動的解析のモデルの妥当性について教えてください。

◆回答

動的解析のモデルの妥当性は予備解析によって確認しております。下図に無補強時の Final と UC-win の単調荷重結果を示します。まず、最大荷重は算定耐力値とほぼ同程度となっていることが分かります。また、イベントについて比較を行うと、コンクリートの圧壊時の部材角はやや Final が大きいところで発生していますが、その荷重は同程度であり、ひび割れ発生時、主鉄筋降伏時は同様の荷重で発生していることからモデルは妥当であるとしました。

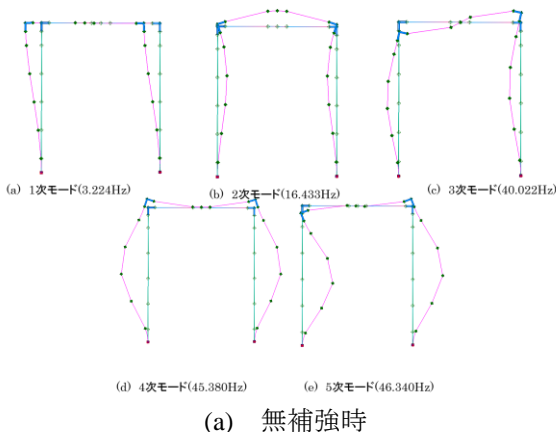


◆討議【松村 政秀先生】

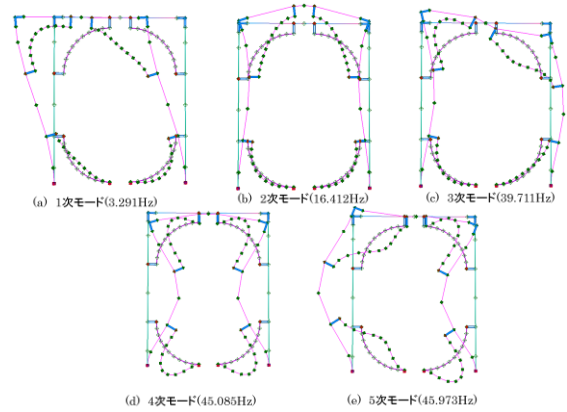
補強にて固有周期、振動モードは変化したのか。

◆回答

今回は解析ソフトの都合上、ダンパー設置時における固有値解析が Final では行えませんでした。UC-win では、固有値解析を行えたので、その結果を図に示します。



(a) 無補強時



(b) 平鋼設置時

図に示す通り、固有モードは変化なく、低次モードでは、固有振動数にもほとんど変化はありません。本ダンパーは、固有振動数による変化を引き起こし、応答を低減する働きを狙うものではないので、固有振動数がこの程度の変化となるということを報告いたします。

◆討議【松村 政秀先生】

静的荷重の死荷重はどのように与えているのか。

◆回答

上部工重量 126tf 分を柱部 2 本に等分し考慮しています。

◆討議【山口 隆司先生、松村 政秀先生】

ダンパーにどのような性能を求めているのか。本ダンパーの役割はどのようなものか。

◆回答

湾曲状鋼製ダンパーには、ダンパー設置による高剛性化及びダンパーの降伏による履歴減衰により、減衰性能を生み出し地震応答の低減を図るものである制振ダンパーとしての性能を求めている。本研究では、RC ラーメン高架橋の基礎の耐力を考え、無補強時から耐力増分 30%程度となるダンパーを設置し、動的非線形応答解析を行った。この時、耐力増分 30%程度のダンパーであると、応答低減に関しては、ダンパー降伏による履歴減衰性能よりもダンパー設置による剛性上昇による影響が大きいことが新たに明らかになった。このため、本研究における耐力増分 30%程度となるダンパーはダンパー設置による剛性上昇によって応答を低減する、耐震部材としての役割をしたと考えられる。本ダンパーを制振部材として使用するためには、断面寸法を大きくする等

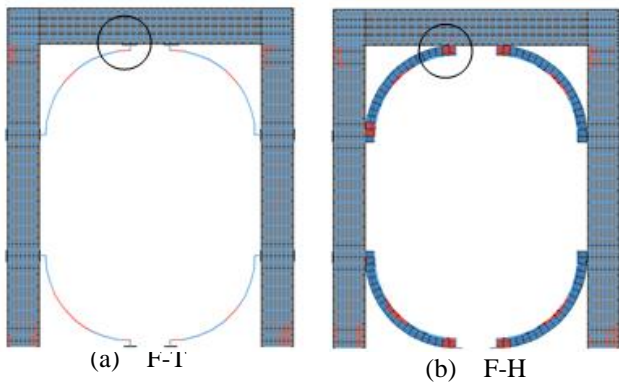
の工夫が必要であると思われます。

◆討議【角掛 久雄先生】

動的応答時，丸形鋼管と H 鋼はどれだけ塑性化しているのか。

◆回答

地震波にはよりますが，丸形鋼管，H 鋼はほぼ全てで降伏が見られました。下に一例として，G0 地盤スペクトルⅡの地震波入力後の鋼材降伏状況図を示します。

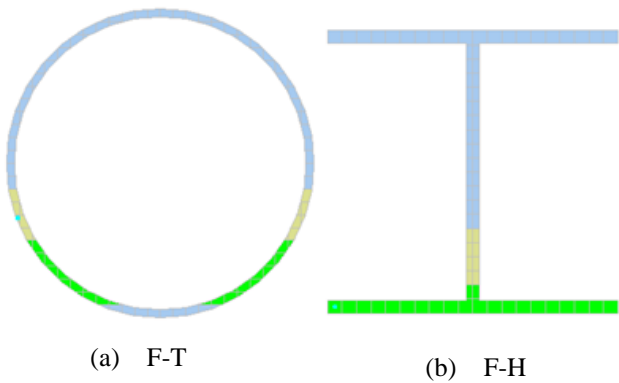


G0 地盤スペクトルⅡ 地震波入力後の状況図

■ 過去に降伏

鋼材降伏状況

また，断面内の降伏範囲を下図に示します。結果は UC-win における降伏範囲を示しており，上図の黒丸部分の地震波後に一度でも降伏した範囲を示しています。



G0 地盤スペクトルⅡ 地震波入力後の状況図

■ 降伏 (46) ■ なし ■ 降伏 (22)

凡例