

## ダンパーで耐震補強された鋼アーチ橋の 解析手法に関する一考察

瀧本 耕大<sup>1</sup>・澤田 守<sup>2</sup>・西田 秀明<sup>1</sup>・星隈 順一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 修(工) 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター 熊本地震復旧対策研究室  
(〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574)

<sup>2</sup>正会員 修(工) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 国土技術政策総合研究所 社会資本マネジメント研究センター 熊本地震復旧対策研究室  
(〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村大字河陽3574)

### 1. はじめに

平成28年熊本地震では、制震ダンパーが設置された鋼上路アーチ橋に損傷が生じた事例が報告されている<sup>1)</sup>。当該橋では、耐震補強を目的とし、上下部構造間に粘性ダンパー、端支柱間やアーチリブ間にブレース状のダンパー（座屈拘束ブレース）が設置されていたが、実際の地震荷重作用時に、設計で想定したような挙動が生じたのか検証しておくことが重要である。

そこで本研究では、当該橋を対象に端支柱の基部および座屈拘束ブレースの接合部に着目して非線形動的有限要素解析を行い、そのモデル化手法が橋梁の地震時応答に及ぼす影響について検討を行った。

### 2. 対象橋梁とその損傷概要

#### (1) 対象橋梁

本研究の対象橋梁は1971年に竣工した橋長 110 m、幅員 9 m、上路式2ヒンジの鋼アーチ橋である。対象橋梁の一般図を図-1に示す。下部構造は、AA1側の拱台には深礎杭が設置されており、AA2側の拱台は直接基礎である。アーチ基部両端の支承構造はピン支承である。A1橋台およびA2橋台はともに直接基礎の逆T式橋台および支承構造は線支承である。図-2に対象橋梁の端支柱部断面図を示す。2009年に耐震補強が実施され、補剛桁と橋台の間に粘性ダンパー、端支柱と端支柱支材の間およびアーチリブの間にブレース状のダンパー（座屈拘束ブレース）、端支柱上にせん断ストッパーが設置されている。

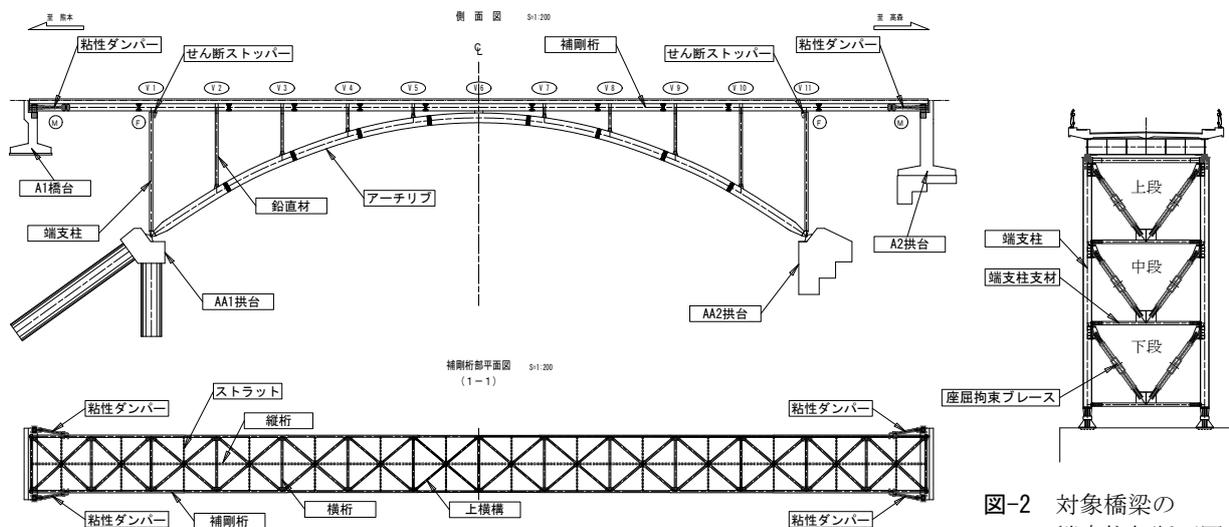
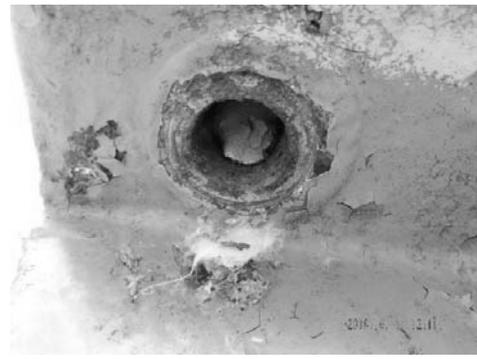
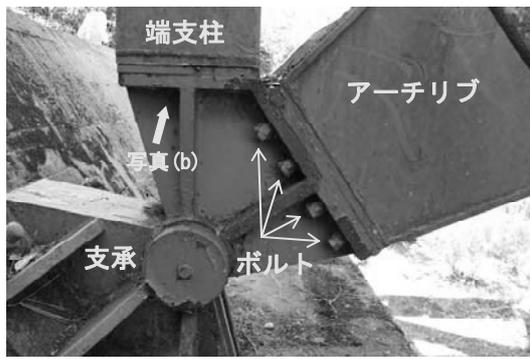


図-1 対象橋梁の一般図

図-2 対象橋梁の  
端支柱部断面図



(a) 端支柱基部の接合部（全体）

(b) 端支柱基部の接合部（ボルト孔）

写真-3 端支柱基部の接合部の状況

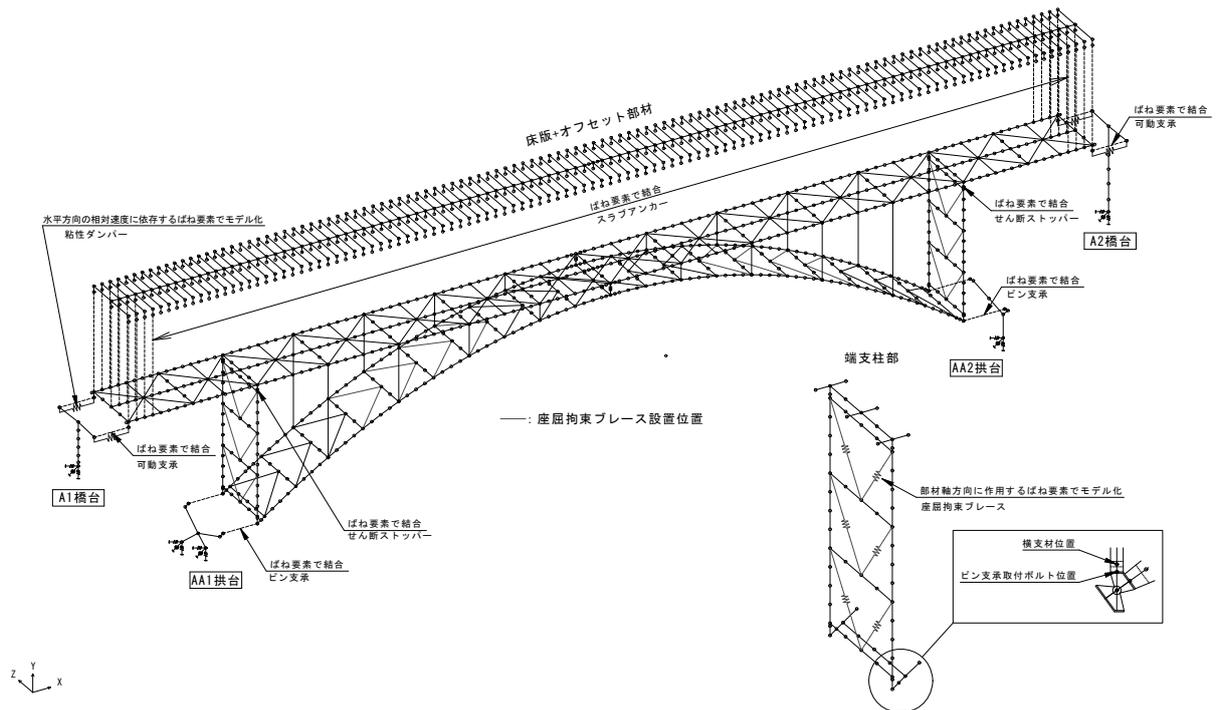


図-4 モデル概要

## (2) 損傷概要

平成28年熊本地震により、A1橋台およびA2橋台の左右両端部に取り付けられた橋軸直角方向の変位制限構造（粘性ダンパーの取付部を兼用）であるコンクリートブロックで損傷が生じた。また、AA1側（左側）およびAA2側（左右両側）の端支柱とピン支承との接合ボルトの破断が生じた（写真-3）。一方で、端支柱間に設置された座屈拘束ブレースにはダンパーが作動した痕跡が見られず、その接合部においても損傷が確認されていない。また、いずれの端支柱上のせん断ストッパーにおいても損傷は確認されていない。

## 3. 解析モデル

本研究で用いる鋼材のYoung係数およびPoisson比

は道路橋示方書<sup>2)</sup>に基づいてそれぞれ $2.00 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>、0.30とし、弾塑性体については、von Misesの降伏条件を用い、弾塑性接線係数がYoung係数の10<sup>-1</sup>倍となるように硬化係数を設定した。なお、本研究では活荷重を考慮せず、死荷重は、対象橋梁の当初設計時の鋼材重量および床板材料計算書から算出された単位体積重量をもとに各鋼部材の節点に対して作用させることとし、コンクリート部材の単位体積重量は24.5 kN/m<sup>3</sup>としている。橋梁全体系の地震応答特性を検証するために橋梁全体をモデル化した。モデルの概要を図-4に示す。

入力地震動を道路橋示方書のレベル2タイプII地震動の2波目とし、線形化有限変位理論に基づいた時刻歴応答解析を行った。地震波は橋軸直角方向へ作用させた。また、使用した解析プログラムはTDAPIIIで、積分時間間隔は0.01 sとした。

表-5 解析ケースとモデル化に用いた要素

解析ケース	構造部位	要素	
全ケース共通	アーチリブ, 補剛桁, 端支柱, 端支柱支材, 鉛直材, 支材, 下横構, 横桁, ストラット, 上横構	ファイバー要素	
	RC床板, 橋台, 拱台	線形はり要素	
	支承	線形ばね要素	
	粘性ダンパー	非線形粘性要素 (速度依存型)	
	基礎-地盤系	線形ばね要素 (S-Rばね)	
case-A	case-A共通	端支柱基部のボルト接合部	剛結合
	case-A I	座屈拘束ブレース	非線形ばね要素 (曲げを受け持たない)
		座屈拘束ブレースの接合部	ピン結合
	case-A II	座屈拘束ブレース	非線形ばね要素+線形はり要素 (二重部材: 曲げを受け持つ)
		座屈拘束ブレースの接合部	剛部材 (剛体要素)
	case-A III	座屈拘束ブレース	非線形ばね要素+線形はり要素 (二重部材: 曲げを受け持つ)
		座屈拘束ブレースの接合部	線形はり要素 (ガセットプレートの引張荷重に対する有効幅を考慮した剛性を与える)
			非線形ばね要素 (剛なばね, ただし, 鉛直方向は引張側で降伏応力に達した以降は荷重を負担しない)
	case-B	端支柱基部のボルト接合部	非線形ばね要素 (剛なばね, ただし, 鉛直方向は引張側で降伏応力に達した以降は荷重を負担しない)
座屈拘束ブレース		非線形ばね要素 (曲げを受け持たない)	
座屈拘束ブレースの接合部		ピン結合	

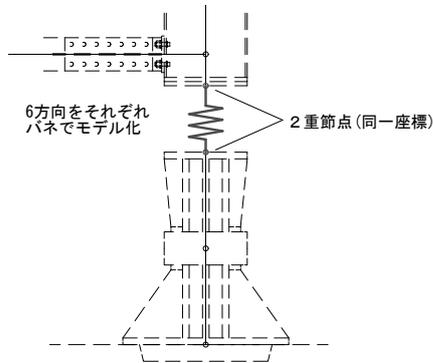


図-6 case-Bにおける端支柱基部のボルト接合部のモデル化

対象橋梁の各部材のモデル化に用いた要素を表-5に示す。粘性ダンパーは速度依存型の非線形粘性要素でそれぞれモデル化した。拘束条件として、橋台部の可動支承は橋軸直角方向および鉛直方向の並進のみを拘束するものとし、端支柱上はせん断ストッパーを考慮して橋軸まわりの回転以外を拘束し、拱台部のピン支承は橋軸直角方向まわりの回転以外を拘束した。また、端支柱とピン支承の接合部は、地震荷重作用時の橋梁の応答特性を比較するために、2ケースのモデル化手法を検証する。1つ目が端支柱基部のボルト接合部を剛結合としてモデル化したcase-A (case-AI・case-AII・case-AIII)であり、2つ

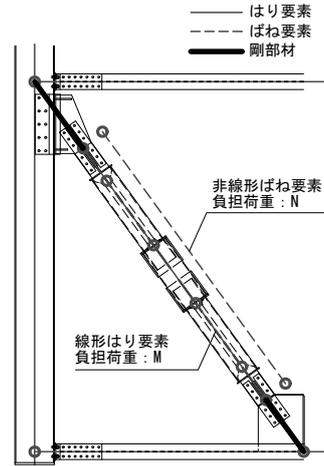


図-7 case-AIIにおける座屈拘束ブレースのモデル化

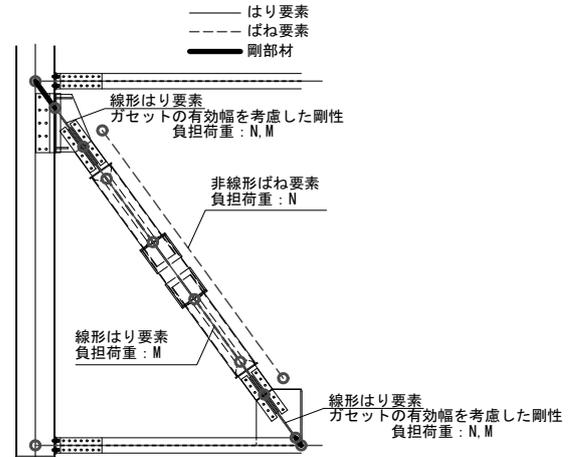


図-8 case-AIIIにおける座屈拘束ブレースのモデル化

目がピン支承と端支柱のボルト接合部に二重節点を設け、端支柱の部材軸方向についてのみ、ボルトの降伏応力に相当する降伏荷重に達した後は荷重に対して抵抗しない非線形ばね(図-6)でモデル化したcase-Bである。

さらに、端支柱および端支柱支材と座屈拘束ブレースの接合部のモデル化が地震応答特性に及ぼす影響を検証するため、3ケースのモデルを検証する。1つ目が座屈拘束ブレースを軸力のみ受け持つ非線形ばね要素でモデル化したcase-AIである。2つ目が、図-7に示すように座屈拘束ブレースを曲げモーメントを受け持つ線形はり要素と軸力のみを受け持つ非線形ばね要素の二重部材で、非線形のガセットプレート部分を剛部材でモデル化したcase-AIIである。3つ目は、図-8に示すように、座屈拘束ブレース部分のモデル化はcase-AIIと同様とし、ガセットプレート部分について、ボルト接合されたガセットプレートの引張荷重に対する有効幅<sup>3)</sup>を考慮した剛性をもつ線形はり要素によりモデル化したcase-AIIIである。なお、解析モデルの規模として、代表的に、case-AIの節点数が1447、要素数が3212である。

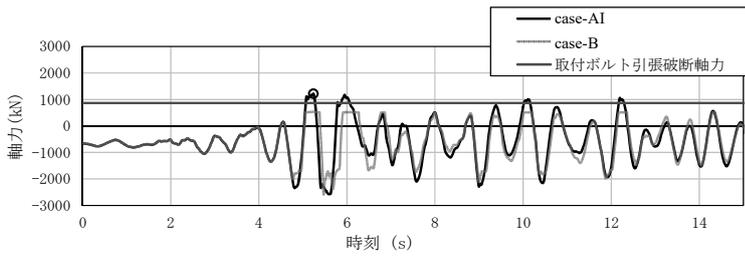


図-9 端支柱基部のボルト接合部における軸力の時刻応答

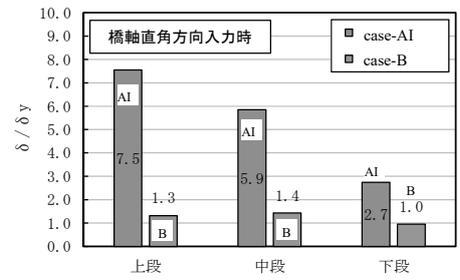
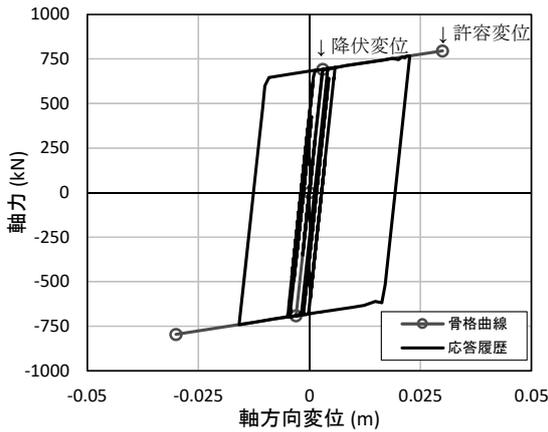
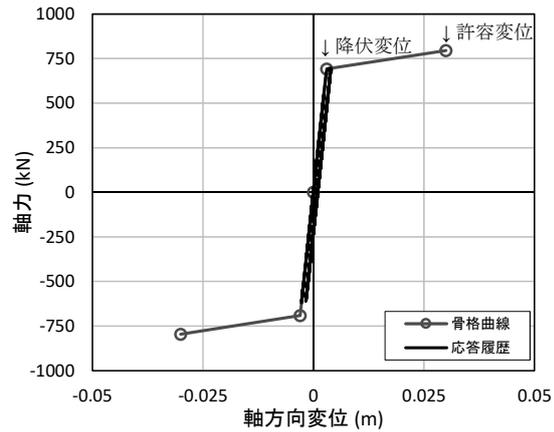


図-10 座屈拘束ブレースの軸方向の応答塑性率



(a) case-AI



(b) case-B

図-11 座屈拘束ブレースの軸方向の応答履歴曲線

#### 4. 解析結果と考察

##### (1) 端支柱基部の接合部のモデル化が地震応答特性に及ぼす影響

端支柱基部のボルト接合部の軸力の時刻歴応答波形を図-9に示す。今回用いた耐震設計用の入力地震動に対しては、case-AIではボルトの引張破断軸力を超える応答が生じていることがわかる。図-10には座屈拘束ブレースの軸方向の応答塑性率を示す。応答塑性率とは、降伏変位  $\delta_y$  に対する応答塑性変位  $\delta$  の比である。case-Bでは、座屈拘束ブレースの応答塑性率は1.0から1.4程度となっているのに対し、case-AIでは、座屈拘束ブレースの応答塑性率は2.7から7.5と、両者を比較すると、case-Bにおける座屈拘束ブレースの応答塑性率が小さくなっている。このことは図-11に示すcase-AIとcase-Bの座屈拘束ブレースの軸方向の応答履歴曲線を比較してみても、損傷モデルの場合には座屈拘束ブレースのエネルギー吸収量が小さくなっているのに対して、健全モデルの場合にはそのエネルギー吸収量が相対的に大きいことがわかる。

また、図-12は端支柱の軸方向の応答塑性率の高さ方向の分布を示したものである。case-Bにおける端支柱基部のひずみはcase-AIよりも大きな値とな

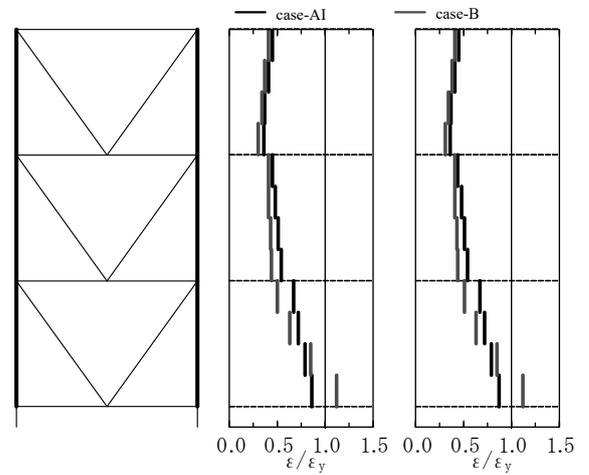


図-12 端支柱の軸方向の応答塑性率

っているが、これは、座屈拘束ブレースがエネルギー吸収をする前に端支柱と支承との接合部のボルトの破断が先行したためと考えられる。

よって、本研究の対象とするような上路式2ヒンジの鋼アーチ橋では、耐震補強設計時に期待する座屈拘束ブレースによるエネルギー吸収を機能させるためには、端支柱基部のボルト接合部の破断を先行させないことが重要と言える。

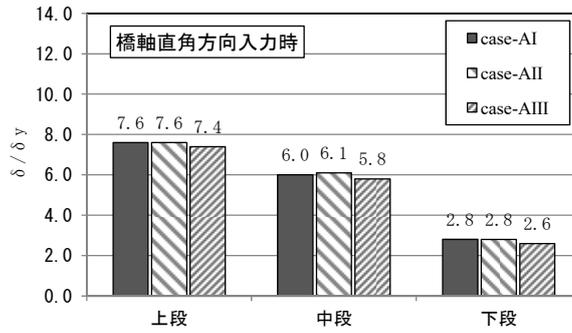


図-13 座屈拘束ブレースの軸方向の応答塑性率

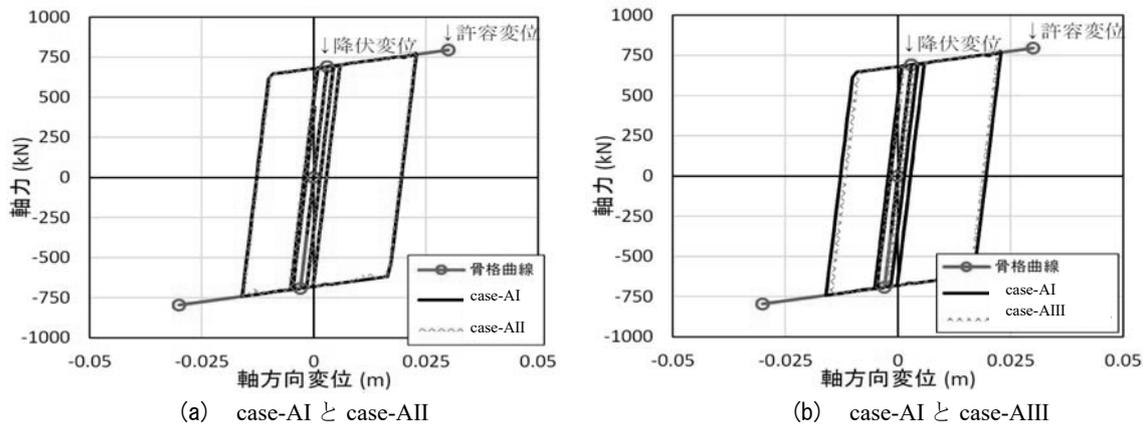


図-14 座屈拘束ブレースの軸方向の応答履歴曲線

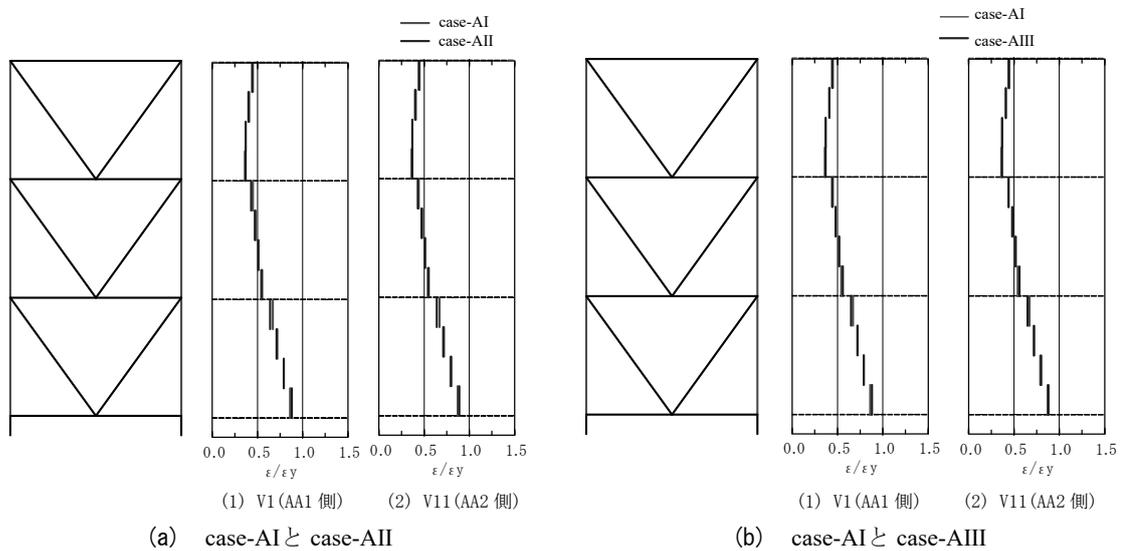
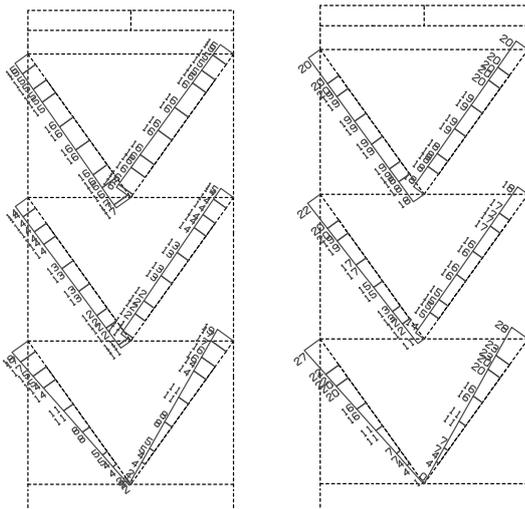


図-15 端支柱の軸方向の応答塑性率

(2) ダンパーの接合部のモデル化が地震応答特性に及ぼす影響

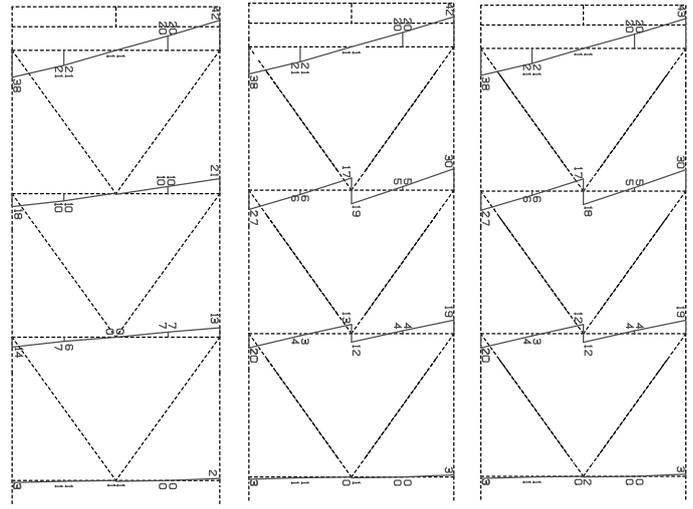
図-13はcase-AIおよびcase-AII, case-AIIIにおける座屈拘束ブレースの軸方向の応答塑性率を比較したものである。今回入力した地震波に対しては、各ケースでの応答値に大きな違いは見られないことがわかる。また、図-14は座屈拘束ブレースの軸方向の応答履歴曲線を示しており、case-AIとcase-AII,

case-AIとcase-AIIIのそれぞれを比較すると、応答値に大きな違いは見られない。図-15は端支柱の軸方向の応答塑性率の高さ方向の分布を示しており、case-AIとcase-AII, case-AIとcase-AIIIを比較すると、応答値の大きな違いは見られない。今回検証した解析ケース (case-AI・case-AII・case-AIII) では応答値に大きな差異が生じないことが分かった。



(a) case-AII (b) case-AIII

図-16 座屈拘束ブレースの曲げモーメント  
(kN・m：橋軸直角方向まわり)



(a) case-AI (b) case-AII (c) case-AIII

図-17 端支柱支材の曲げモーメント  
(kN・m：橋軸直角方向まわり)

図-16にcase-AIIとcase-AIIIにおける座屈拘束ブレースに生じる橋軸方向まわりの曲げモーメント図を示す。座屈拘束ブレースの曲げおよび部材端の剛な結合条件をモデル化することにより、座屈拘束ブレースの両端で曲げモーメントが生じていることがわかる。また、図-17にcase-AIおよびcase-AII、case-AIIIの端支柱支材に生じる橋軸方向まわりの曲げモーメント図を示す。座屈拘束ブレースの接合部で曲げモーメントが伝達されないモデル化を行った場合（case-AI）に対して、座屈拘束ブレースの接合部で曲げモーメントが伝達されるモデル化を行った場合（case-AIIおよびcase-AIII）では、端支柱支材の端支柱接合部における曲げモーメントが約1.5倍に増加していることがわかるが、絶対値は小さいため、曲げモーメントの増加による橋梁全体系の応答値の大きな変化は生じていない。ただし、さらに大きな曲げモーメントが生じる状況であれば、支材が降伏し、座屈拘束ブレースのエネルギー吸収性能に影響を及ぼす可能性も考えられるので、注意は必要であるといえる。

## 5. まとめ

本研究では、制震ダンパーを有する上路式2ヒンジの鋼アーチ橋を対象として、端支柱基部のボルト接合部のモデル化や、ブレース状のダンパーの接合部のモデル化の違いが地震応答特性に及ぼす影響について考察した。本検討により得られた知見は以下の通りである。

- 地震時に端支柱基部のボルト接合部において、ボルトの破断が先行して生じると、ブレース状のダンパーによるエネルギー吸収が発揮できない状態となる可能性が示唆された。
- 今回の検討対象とした損傷事例では、端支柱および端支柱支材に接合されたブレース状のダンパーの接合部のモデル化が、地震応答特性に及ぼす影響に大きな差は無かった。

## 参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，土木研究所：平成28年（2016年）熊本地震土木施設被害調査報告，国総研資料 No. 967/土研資料 No. 4359，2017。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編II鋼橋編，2017。
- 3) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，pp.259-290，2012。