

平成21年度 技術発表会

## 鋼橋の制震技術の最前線

— 鋼橋に用いられる  
制震デバイスとその効果 —

日本橋梁建設協会 技術委員会 設計小委員会

## 本日の内容

1. 鋼橋の耐震設計の動向
2. 制震デバイスってどんなもの？
3. 鋼橋で活躍する制震デバイス
4. 制震デバイス使用上の注意
5. 新設橋への適用検討
6. まとめ

2

### 1 鋼橋の耐震設計の動向

# 制震って？

3

### 1 鋼橋の耐震設計の動向

## 地震にどう対処するか

耐震 える	免震 れる	抑制 する
----------	----------	----------

4

### 1 鋼橋の耐震設計の動向

# 耐震 える

大きな地震力に対して  
構造部材の強度を高めて  
抵抗しよう

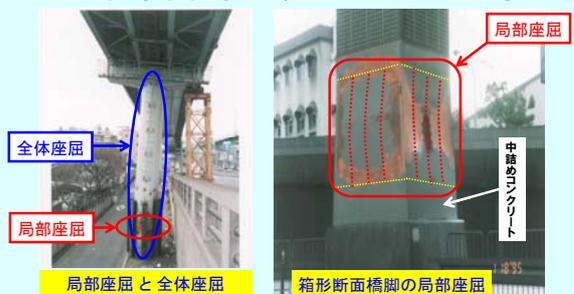
高強度の材料   大きな部材断面

**問題点** どのような規模の地震を受けても弾性域内の  
応答で収まるような強度設計は不経済  
(そもそも地震規模の上限が確定できない)

5

### 1 鋼橋の耐震設計の動向

## 兵庫県南部地震(1995年)の衝撃



⇒ 「耐える」思想の見直し

6

1 鋼橋の耐震設計の動向

**耐震  
えて  
粘る** 兵庫県南部地震(1995年)以後  
大規模地震による作用力が  
部材の耐力を超えても  
⇒ 部材は降伏後も適度に塑性変形  
↓  
橋全体の崩壊・倒壊には至らせない

**問題点** 残留変形が大きいと復旧に時間がかかる

7

1 鋼橋の耐震設計の動向

**免震  
れる** 地震力が橋になるべく  
伝わらないようにしよう  
橋を柔らかく支持する  
↓ ↓  
固有周期を長くし 共振の影響を小さくする  
下部工の負荷軽減

**問題点** 周期が長くなると変位も大きくなる  
アーチ橋やラーメン橋には適用できない

8

1 鋼橋の耐震設計の動向

**抑制  
震  
する** 大地震を受けても構造部材に生じる  
作用力と応答変位は小さく抑えよう  
地震エネルギーを吸収して減衰させる  
地震動を打ち消す力を作用させる  
↓  
損傷しても橋の耐荷性能への影響は少なく  
取替できる犠牲部材(=制震デバイス)の採用  
主要部材に生じる  
◆ 作用力をコントロール ⇒ 損傷させない  
◆ 応答変位をコントロール ⇒ 復旧が速やか

9

1 鋼橋の耐震設計の動向

**建築構造物の耐震設計**  
制震・免震設計が主流  
鎌倉大仏も免震対策済み  
大仏本体と台座間にステンレス板を設置(すべり免震機構)



10

1 鋼橋の耐震設計の動向

**鋼橋の耐震対策(従来の主流)**  
兵庫県南部地震(1995年)  
免震支承  
橋脚など下部工の負担を軽減  
長周期化により共振の影響を小さくする  
落橋防止装置  
落橋や橋桁継ぎ目部の段差発生を防ぐ  
桁橋の対策が先行  
アーチ橋など特殊橋梁の対策は遅れていた  
道路橋示方書改訂(2002年)

11

1 鋼橋の耐震設計の動向

**道路橋示方書改訂(2002年)**  
レベル2地震に対して、B種の橋(=重要な橋)は  
◆ 高速道路と一般国道の橋は全部  
◆ 損傷すると2次災害の可能性が大きい橋(複断面、跨線橋、跨道橋)  
◆ 被災時に地域のライフラインとなる橋  
◆ 損傷が限定的なものにとどまり  
◆ 橋としての機能の回復が速やかに  
性能(=耐震性能2)が行い得る  
が要求されるようになった  
出典: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 P.8~9

12

1 鋼橋の耐震設計の動向

## 道路橋示方書改訂(2002年)

塑性化部材の設定について指針が示された

「耐震性能2」に対する橋の限界状態  
⇒ 部材の塑性変形が許される

ただし 塑性化を考慮した部材のみ  
部材の修復が容易に行い得る範囲内

確実にエネルギー吸収を図れ  
速やかに修復を行えることが要求される

— 塑性化部材 (制震デバイス)  
橋の構造特性を踏まえ適切に組み合わせる

**制震デバイスの導入**

出典: 道路橋示方書・同解説V 耐震設計編 P.32 13

1 鋼橋の耐震設計の動向

## 鋼橋にも制震設計を

2003年 (社)日本鋼構造協会  
土木鋼構造物の動的耐震性能照査法と耐震性向上策

2006年 (社)日本鋼構造協会  
**鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン**

2008年 (社)土木学会  
**鋼・合成構造標準示方書 耐震設計編**

制震設計導入メリットの認知度が向上

14

1 鋼橋の耐震設計の動向

低降伏点鋼材を用いた制震ダンパーの採用実績 → **急増の傾向**

現状は 既設橋の耐震補強が中心

アーチ橋など特殊橋梁の耐震対策を推進

新設橋における採用はまだ少ない

維持・修繕時代の到来  
⇒ 新設橋の建設に充当できる予算は相対的に減少

制震設計の普及による耐震対策コストの増減が望まれる

出典: 日経コンストラクション 2009年4月24日号 P.55 15

2 制震デバイスってどんなもの?

### ■ 制震構造の分類

橋梁の大規模地震対策向け ⇒ **パッシブ型の内蔵型ダンパーが主流**

- アクティブ型: 制御力付加方式 (振動を打ち消す力を作用させる) ◆ 橋梁では主に風対策としての採用が中心
- セミアクティブ型: 構造特性可変方式 (可変剛性) 剛性や減衰を変化させてパッシブ型の振動低減効率の向上を図る (少量の外部エネルギーおよび制御システム必要) ◆ 橋梁の耐震対策としての適用については検討段階
- パッシブ型: 減衰付加方式 (免震) 高動エネルギーを吸収して減衰させる
  - 質量ダンパー: TMD, スロッシング・ダンパー
  - 内蔵型ダンパー: 摩擦型ダンパー (鋼材、鉛、厚層、形状記憶合金), 粘性型ダンパー (オイル、粘弾性)
  - 連結型ダンパー: ジョイントダンパー
- ハイブリッド型

出典: 制震構造の分類 [太田ら, 2001] 16

2 制震デバイスってどんなもの?

### ■ 橋梁の耐震対策に用いられるダンパー (その1)

#### 免震ダンパー

形状	特徴
鉛プラグ入り積層ゴム系 (ボックス) 	鉛プラグ入り積層ゴムや高減衰積層ゴムを利用した制震ダンパー
高減衰積層ゴム系 (ボックス) 	免震支承と同等のバイリニア特性を呈する

17

2 制震デバイスってどんなもの?

### ■ 橋梁の耐震対策に用いられるダンパー (その2)

#### 鋼材ダンパー (鋼材の弾塑性履歴型)

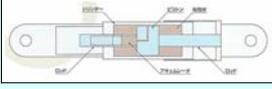
形状	特徴
軸降伏型 (ロッド) 	鋼材の軸方向力の弾塑性履歴により減衰を付与する
せん断降伏型 (パネル) 	鋼材のせん断の弾塑性履歴により減衰を付与する

18

2 制震デバイスってどんなもの？

■ 橋梁の耐震対策に用いられるダンパー（その3）

粘性ダンパー

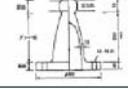
形状	特徴
<b>ピンガムマテリアルダンパー（シリンダー）</b> 	<b>摩擦履歴型</b> 特殊充てん剤が設定した抵抗力で擬塑性特性を呈することにより摩擦履歴と同様な履歴を呈する
<b>シリコンオイルダンパー（シリンダー）</b> 	<b>粘性履歴型</b> ・高粘性体（シリコンオイル）を用いたダンパー ・減衰抵抗力は速度のべき乗に比例

19

2 制震デバイスってどんなもの？

■ 橋梁の耐震対策として適用検討中のダンパー

曲げ降伏型 鋼材ダンパー（鋼材の弾塑性履歴型）

形状	特徴
<b>（ロッド）（パネル）</b> 	鋼材の曲げの弾塑性履歴により減衰を付与する

MRダンパー（摩擦履歴型）

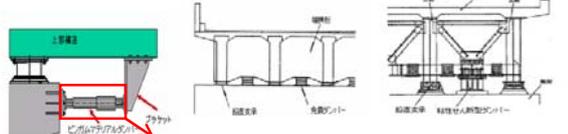
形状	特徴
<b>（シリンダー）</b> 	MR流体を磁場の中におくことにより数ミリ秒のうちに粘性流体から降伏強度をコントロールする準粘性流体にまで変化させる

20

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁における制震デバイスの適用箇所（その1）

下部工と上部工の間



橋桁の温度伸縮時の緩やかな変位速度に対しては抵抗力の小さいダンパー

21

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁における制震デバイスの適用箇所（その2）

構造体のフレーム内

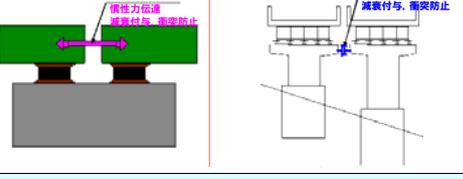


22

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁における制震デバイスの適用箇所（その3）

上部工と上部工の間



ジョイントダンパー  
・粘性力伝達  
・衝撃付与、衝撃防止

ジョイントダンパー  
・減衰付与、衝撃防止

23

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例（新設橋）

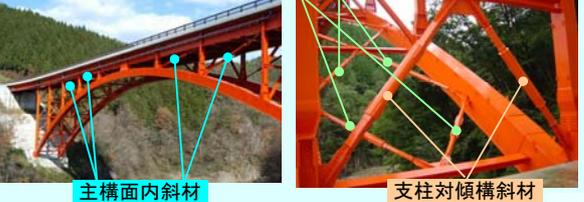
王渡橋（広島県）

鋼上路式ローゼ橋  
 ・アーチ支間 99m  
 ・ライズ 17.5m  
 ・主構間隔 7.35m

軸降伏型 鋼材ダンパー（制震ブレース）を適用



下横構斜材



主構面内斜材

支柱対傾構斜材

24

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 制震ブレースのはたらき **王渡橋 (広島県)**

常時、レベル1地震時 弾性部材として機能するように設計 (降伏に対して所定の安全率を確保する)

レベル2地震時 ブレースの芯材部(低降伏点鋼)が降伏して塑性変形することで地震エネルギーを吸収し、主要部材に生じる応答を低減

各部位の制震ブレースが主な応答低減効果を発揮する地震動の方向

橋軸方向地震動対策  
主構面内斜材

橋軸直角方向地震動対策  
下横構斜材

支柱対傾構斜材

25

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 制震ブレース工法の導入効果 (その1)

◆ 事業の進行中に道路橋示方書が改訂 所要耐震性能が高められた

レベル2地震対策を検討

◆ 制震ブレース工法の採用により 従来の断面補強工法に対して 耐震対策後の鋼重が1.2%低減 上部工全体工事費では約5%低減

新設橋において 経済的な耐震対策を実現

項目	鋼重 (ton)
従来断面補強工法	591ton
耐震対策前鋼重	500ton
耐震対策後鋼重	519ton
低減率	1.2%低減

26

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 制震ブレース工法の導入効果 (その2)

下部工に作用する水平反力の比較

橋軸方向水平反力: 72%低減

橋軸直角方向水平反力: 79%低減

下部工への影響も 大幅に低減

27

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例 (既設橋の耐震補強 その1)

菅波大橋 (国土交通省 東北地方整備局)

粘性ダンパー (上構工と下構工の間)

制震ブレース (増支柱斜材交換)

粘性ダンパー (上構工と下構工の間)

制震ブレース (下横構斜材交換)

鋼上路式ランガー桁橋  
主径間 74m  
主構間隔 9.3m

28

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例 (既設橋の耐震補強 その1)

菅波大橋 (国土交通省 東北地方整備局)

橋軸方向地震動対策

上部工(補剛桁)

下部工(橋台)

粘性ダンパー

ダンパーブラケット

上部工桁端と下部工との間に粘性ダンパー(シリンダー型)を適用

29

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例 (既設橋の耐震補強 その1)

菅波大橋 (国土交通省 東北地方整備局)

橋軸直角方向地震動対策

支柱対傾構斜材

下横構斜材

軸降伏型 鋼材ダンパー (制震ブレース)を適用

写真: (株)木間橋

30

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例（既設橋の耐震補強 その2）

柳沢第三橋（中日本高速道路（株））

粘性ダンパー（上部工と下部工の間） 橋軸方向地震動対策

8径間連続 鋼上路式トラス橋  
 ・橋長 236m  
 ・支間 20.25 + 6@32.4 + 20.25m  
 ・主構間隔 8.0m

上部工桁端と下部工との間に粘性ダンパー（シリンダー型）を適用

31

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例（既設橋の耐震補強 その2）

柳沢第三橋（中日本高速道路（株））

橋軸方向地震動対策

粘性ダンパー（上弦材側）

粘性ダンパー（下弦材側）

可動または免震支承への交換に伴う地震時移動量の増加を抑制

32

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例（既設橋の耐震補強 その3）

平林大橋（広島高速道路公社）

鋼方柱ラーメン橋  
 ・主径間 54m  
 ・主構間隔 7.2m

橋軸方向地震動対策

粘性ダンパー（桁端）

制震ブレース（脚柱対傾構斜材取付）

脚柱対傾構斜材

橋軸直角方向地震動対策

33

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例（既設橋の耐震補強 その3）

平林大橋（広島高速道路公社）

橋軸直角方向地震動対策

軸降伏型 鋼材ダンパー（制震ブレース）を適用

脚柱対傾構斜材

補強前	補強後
P2 脚柱 2.0 3.4	P2 脚柱 0.7 0.7
P3 脚柱 1.0 2.8	P3 脚柱 0.9 0.8

図中の数値 発生応力度 / 降伏・座屈応力度 (許容値以内 ≤ 1.0 < 応力超過)

34

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 橋梁への適用事例（既設橋の耐震補強 その4）

大上橋（秋田県）

せん断降伏型 鋼材ダンパーを設置 橋軸方向地震動対策

4径間連続 鋼桁橋  
 ・橋長 167.9m

3径間連続 鋼桁橋  
 ・橋長 167.8m

3径間連続 鋼桁橋  
 ・橋長 167.8m

せん断降伏型 鋼材ダンパー（各橋の中間橋脚1箇所）

下部工（RC橋脚、基礎）の補強規模が軽減

35

3 鋼橋で活躍する制震デバイス

■ 設置状況

大上橋（秋田県）

36

3 鋼橋で活躍する制震デバイス  
大上橋 (秋田県)

### ダンパーの導入効果

補強のみ	せん断降伏型ダンパー設置
橋脚巻き立て: 9橋脚	橋脚巻き立て: 9橋脚 (補強量減少)
基礎補強: 3橋脚	基礎補強: 不要
	制震デバイス: 設置3箇所
	59%減
	7ヵ月短縮 (40%減)
工期: 17.5ヵ月	工期: 10.5ヵ月

工費低減効果

37

### 4 制震デバイス使用上の注意

#### ■ 制震ダンパー適用上の留意点

**粘性ダンパー**

- ・ 応答変位に、**温度移動量**、**設置余裕量**を見込む。
- ・ **速度依存性** (速度大→抵抗力大) の影響を考慮した方がよい。
- ・ 維持管理では、**粘性体の漏れ**、**ダンパー金属部の腐食**に留意。

**鋼材ダンパー**

- ・ 軸降伏型ダンパーは、**常時の温度変化の影響を受けない部位**に適用する。(アーチ橋やトラス橋の横構、対傾構斜材等)
- ・ **せん断降伏型ダンパー**は、**常時の温度変化の影響をかわす構造とするか**、**影響を受けないガセット部に設置する**。
- ・ 風荷重やレベル1地震動に対して、**弾性範囲で設計する**。
- ・ 維持管理では、**鋼材の腐食**に留意。

38

### 4 制震デバイス使用上の注意

#### ■ 制震ダンパーの解析モデル

**粘性ダンパー**

- 粘性型ダンパー
- 粘性型ダンパー (リリースバルブ付)
- 摩擦履歴型

**鋼材ダンパー**

- バイリニアモデル 軸降伏型ダンパー
- せん断降伏型ダンパー
- トリリニアモデル せん断降伏型ダンパー

制震ダンパーの種類に応じ、適切な解析モデルを作成する。

39

### 4 制震デバイス使用上の注意

#### ■ モード減衰の設定 (粘性ダンパーの場合)

常時で**可動部分**にダンパーを設置する場合

固有振動解析で求めたモード減衰が、ダンパー剛性の影響を受ける

固有振動解析で用いるダンパー剛性を①無し、②等価剛性、③2次剛性を用いる。安全側としては①が良い。

40

### 4 制震デバイス使用上の注意

#### ■ モード減衰の設定 (鋼材ダンパーの場合)

常時で**固定部分または構造部材**にダンパーを設置する場合

固有振動解析で求めたモード減衰が、ダンパー剛性の影響を受ける

固有振動解析で用いるダンパー剛性を①初期剛性、②等価剛性を用いる。安全側としては①が良い。

41

### 4 制震デバイス使用上の注意

#### ■ 制震ダンパーの照査

**粘性ダンパー**

- ・ 最大応答変位に、**温度移動量**、**設置余裕量**を考慮したストロークが製品の規格内か照査する。
- ・ **最大速度**が製品の規格内か照査する。

**鋼材ダンパー**

- ・ 軸降伏型ダンパーは、**最大軸ひずみ (1.5~2.5%程度)**、**累積塑性変形倍率 (500~1000程度)**の照査を行う。
- ・ **せん断降伏型ダンパー**は、**最大せん断ひずみ (12%程度)**、**累積塑性変形倍率 (1000程度)**の照査を行う。

累積塑性変形倍率  $\eta = \sum \delta_{p1} / \delta_y$

42

作用力

変位

4 制震デバイス使用上の注意

### ■ 制震ダンパーの性能確認試験

**粘性ダンパー**

- 全数の性能確認試験を行い、作用力と変位および速度の関係を確認する。

**鋼材ダンパー**

- 同じロット内で抜き取り破壊試験を行い、降伏荷重、最大耐力、繰り返し性能の確認をする。

性能試験方法は発注者ごとの基準にあわせるが、明確でない場合は各社の社内基準による。  
 例：制震構の設計要領：東日本高速道路橋、中日本高速道路橋、西日本高速道路橋、平成19年3月

43

4 制震デバイス使用上の注意

### ■ 制震ダンパーの取付部

取付部が弱点とならないように設計することが必要である。  
 粘性ダンパーでは速度依存性により、鋼材ダンパーでは鋼材の塑性化に伴って耐力が増加するため、その影響を考慮する必要がある。

(a) 両端ピン (b) 片側固定 (c) 両端固定

44

5 新設橋への適用検討

### ■ 鋼上路式アーチ橋への適用検討

対象橋図  
 鋼上路式アーチ橋  
 ・アーチ支間 114m  
 ・ライズ 16.9m  
 ・主構間隔 6m

橋軸直角方向地震動に対するダンパーの効果を検証（動的解析3ケース）  
 1次設計 (Case-1)、断面補強 (Case-2)、ダンパー設置 (Case-3)

45

5 新設橋への適用検討

### ■ 適用するダンパー

鋼上路式アーチ橋への適用検討

せん断降伏型ダンパー

下横構および鉛直材対傾構のガセット部にせん断降伏型ダンパーを適用

取付け構造

常時、レベル1地震時 固定機能  
 レベル2地震時 エネルギー吸収

せん断パネル (低降伏点鋼板)

せん断パネル降伏  
 ・限界ひずみ  $\gamma_{pu} = 0.12$

構造および機能

46

5 新設橋への適用検討

### ■ 動的解析による設計

動的解析モデル

- 剛部材やダンパー部材を除き、ファイバー要素でモデル化
- ダンパーはトリニア型の非線形パネでモデル化
- 橋軸直角方向の地震動 (JR 鷹取駅調整波 EW 成分)

境界条件	前進変位			回転変位		
	x軸	y軸	z軸	x軸	y軸	z軸
橋脚附支点 (ゴム支)	自由	固定	自由	自由	自由	自由
橋柱支点 (ピン支)	固定	固定	固定	自由	自由	固定
アーチリブ支点 (ピボット支)	固定	固定	固定	自由	自由	自由

47

5 新設橋への適用検討

### ■ ダンパーの設置位置および諸元

ダンパー設置位置：下横構および鉛直材対傾構のガセット部

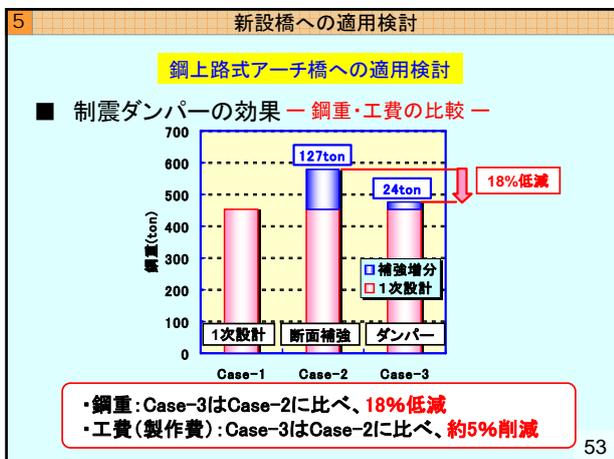
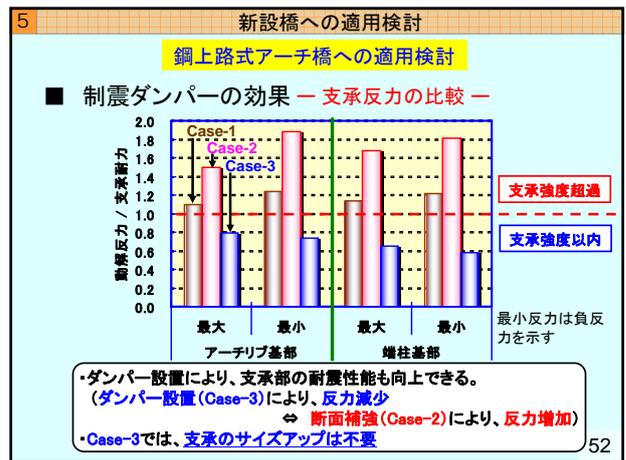
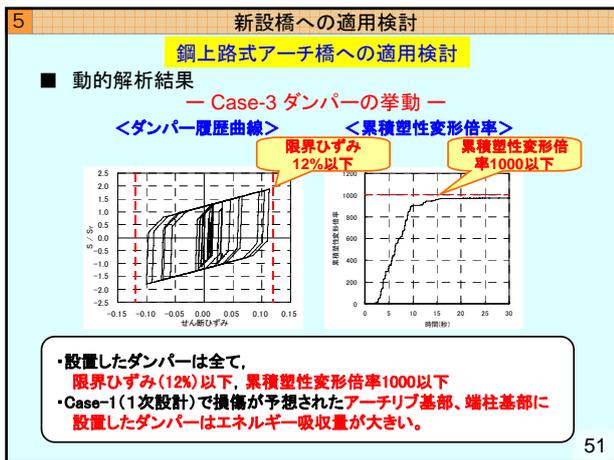
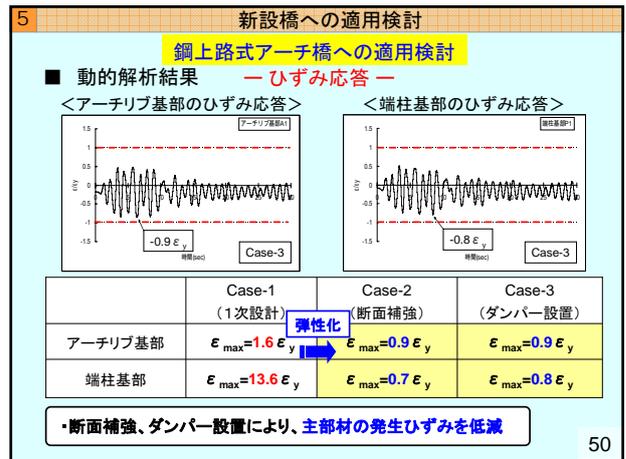
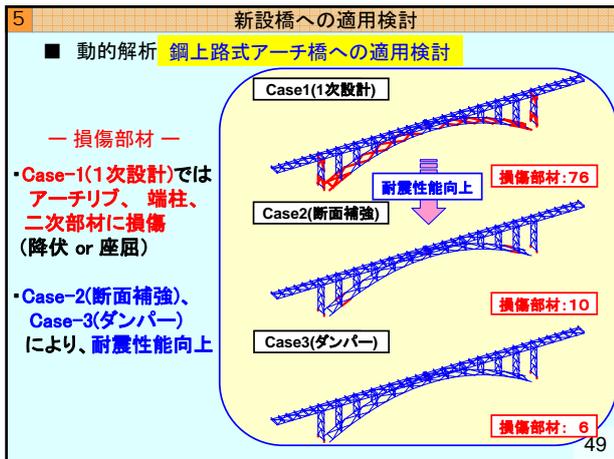
最大サイズ口300mmを3ヶ

トリニアモデル  
 フランジが降伏  
 せん断パネルが降伏

水平力 kN  
 1636.8  
 2115.0  
 3142.2

0 0.507 4.204 36mm 水平変位

48



6 まとめ

制震デバイスを的確に用いることで  
鋼橋の効率的な耐震対策が可能に

- ◆ 鋼橋の耐震対策として各種制震デバイスの採用事例が急増  
⇒ 現状は既設橋の耐震補強向け中心
- ◆ 新設橋への制震設計適用はまだ少ない  
⇒ 新設アーチ橋での実績 および 今回実施の試算結果より適用メリットを確認  
⇒ 今後の普及拡大による耐震対策コストの縮減が期待される
- ◆ 制震デバイスの性能を確実に発揮させるための留意点  
適材適所 ⇒ 温度伸縮や常時荷重の影響、抵抗力の速度依存性を考慮  
モデル化は適切か ⇒ 履歴特性、減衰の評価  
応答は許容値内か ⇒ 最大変位(ひずみ)、変位速度、累積塑性変形倍率  
橋梁本体への取付部の耐力照査 ⇒ 弱点になっていないか

54

平成21年度 技術発表会

## 鋼橋の制震技術の最前線

# 終

ご清聴ありがとうございました