

於：建設技術フェア 2022in中部

2022.10.5

技術名称：

# 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震工法

副題：

## ダイス・ロッド式摩擦ダンパー（DRFダンパー）



技術研究所 構造研究部  
主任研究員

**波田 雅也**

博士(工学)，一級建築士  
日本大学客員研究員



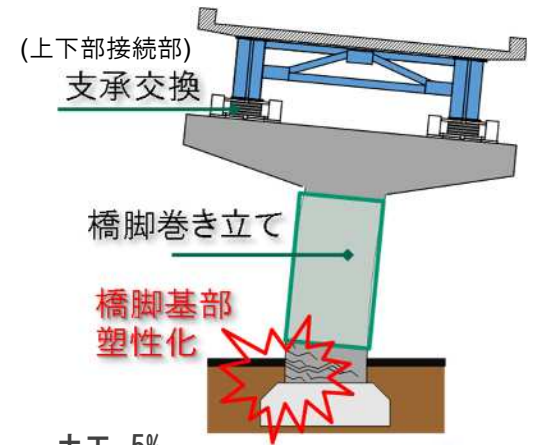
## 目次

1. 開発の背景
2. DRFダンパーの仕組み・性能
3. 技術概要・効果
4. 実橋梁への適用事例
5. DRFダンパーを用いた橋梁の設計
6. 構造実験
7. まとめ・補足

# 1. 開発の背景（橋梁と既往技術の課題）

大規模地震発生時の橋梁の**損傷制御**および**復旧性**が課題です。

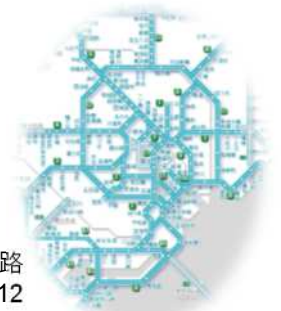
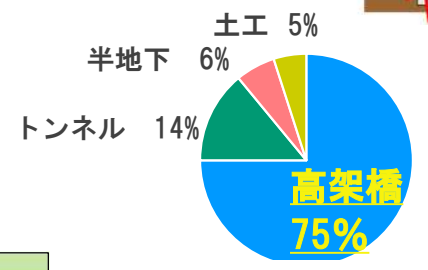
**既設橋梁**  
支承交換・橋脚巻き立て等、塑性化を橋脚基部とする耐震補強を実施済み  
→地中深くの橋脚基部が塑性化  
⇒**点検・補修が難しくなり、十分な復旧性の確保が困難な場合がある**



首都高速道路延長の**75%が高架橋**

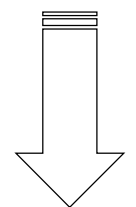
地震後  
重要事項

- ・緊急輸送路としての機能確保できること
- ・点検・補修が容易で道路ネットワークを早期に復旧できること



首都高速道路  
社会資本整備審議会資料 2020.12

橋脚の損傷を極力を小さくする手段……  
**免震・制震装置を用いて上下部接続部(支承部)を塑性化させることが有効**



**橋軸直角方向**: 常時・L1地震時は桁伸縮装置を損傷させない⇒**支承部を固定条件**

**固定側の橋脚は、免・制震装置を用いた補強は普及していない**



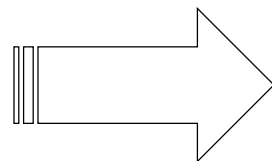
桁伸縮装置

# 1. 開発の背景 (本技術のイメージ)

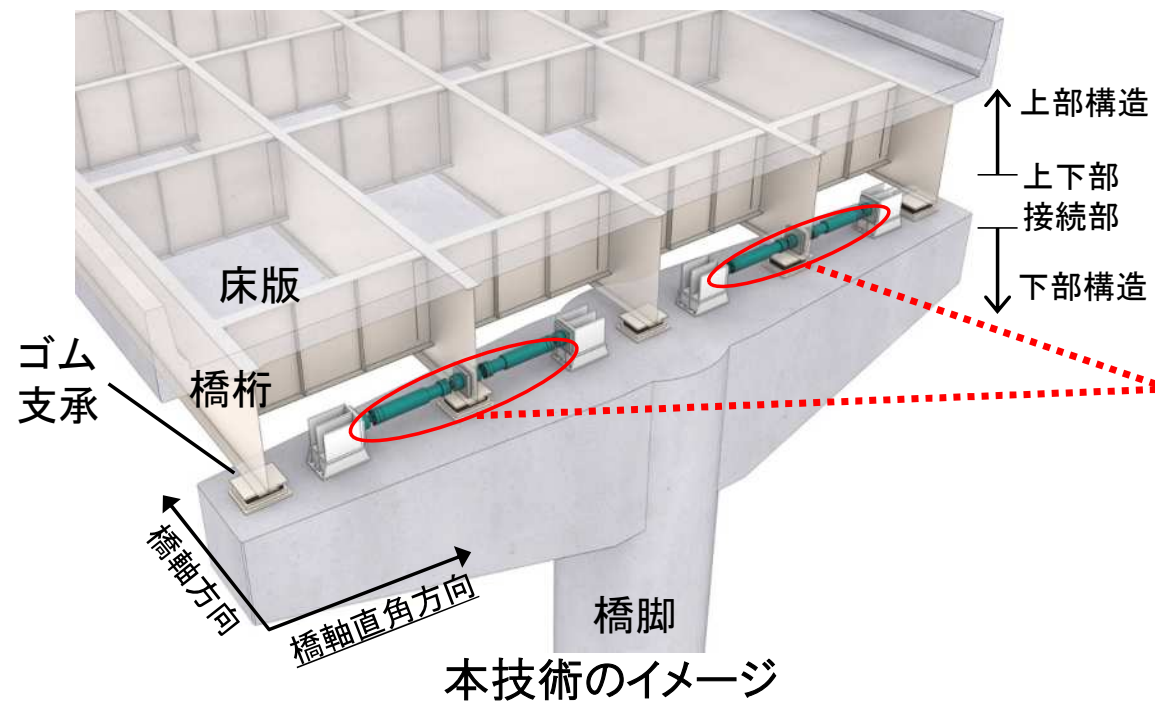
ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRFダンパー)を橋梁の上下部接続部に設置することで、**固定**  
**支承側の橋脚の制震化**を実現する新たな橋梁耐震化工法です。(首都高速道路(株)と共同開発)

レベル1地震時：**固定支承条件を満足**

レベル2地震時：**繰返し制震機能を発揮**



橋軸直角方向の  
**地震時損傷制御** ✓



**ダイス・ロッド式摩擦ダンパー (DRFダンパー)**

DRFダンパーの外観パース

# 1. 開発の背景（建築物のブレース補強用摩擦ダンパーを応用）

RC造建築物のブレース補強用として摩擦ダンパーを実用化し、実績多数（約100棟、ダンパー4000基以上）

＜橋梁用DRF-DP＞

建築用摩擦ダンパーで培った技術・ノウハウを橋梁の制震化に応用

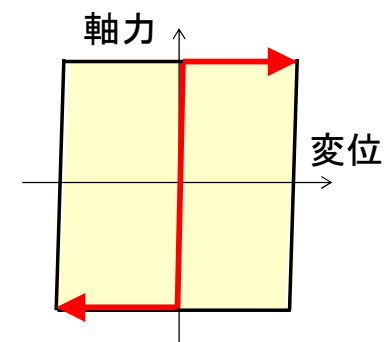
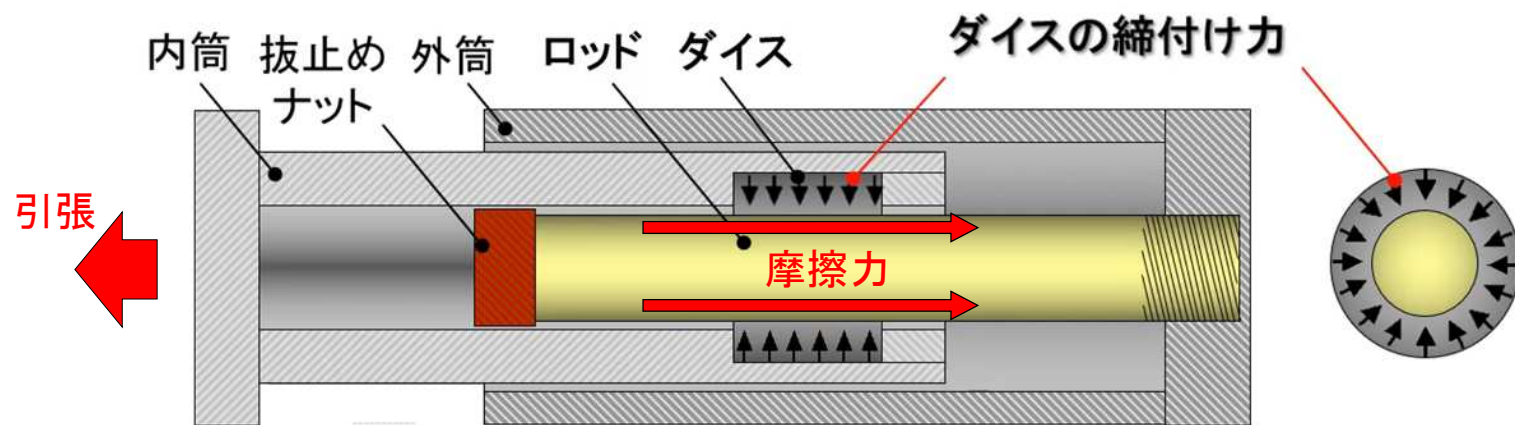
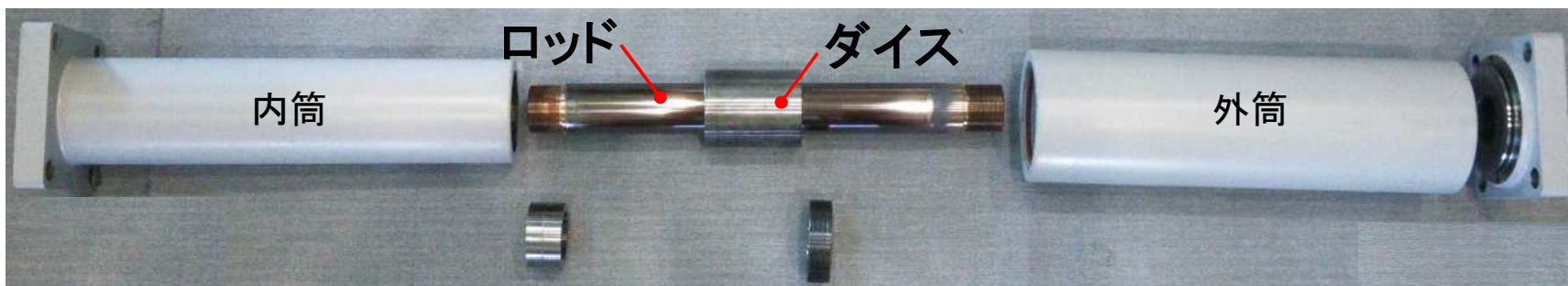


摩擦ダンパー付き制震ブレースを用いた既設RC造建築物の外付け耐震補強工法

## 2. DRFダンパーの仕組み・特長（摩擦機構）

ダイス（金属の環）とロッド（金属の芯棒）の嵌め合いを利用した摩擦型の制震ダンパーです。

- ダイス内径より若干太いロッドを強制的に嵌め込むことで、一定の締付け力が作用した状態
- 軸方向に押し引きされると、ダイス・ロッド接触面に摩擦力が発生
- 所定の荷重未満では摺動せず（固定）、所定の荷重に達すると一定の摩擦力を維持して摺動する



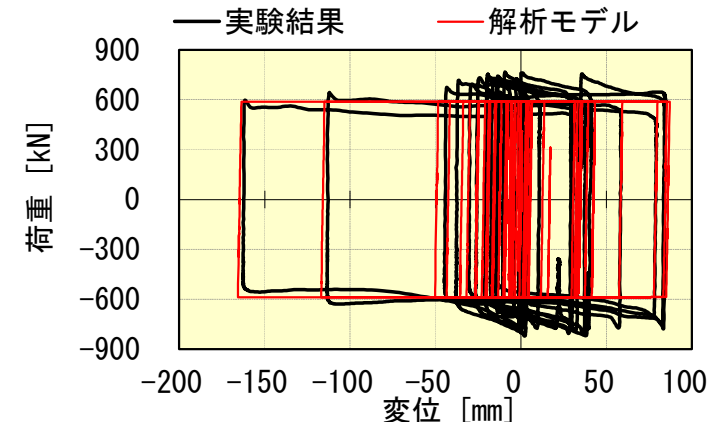
荷重-変位関係

完全剛塑性型  
の履歴特性

## 2. DRFダンパーの仕組み・特長（特長・機能）

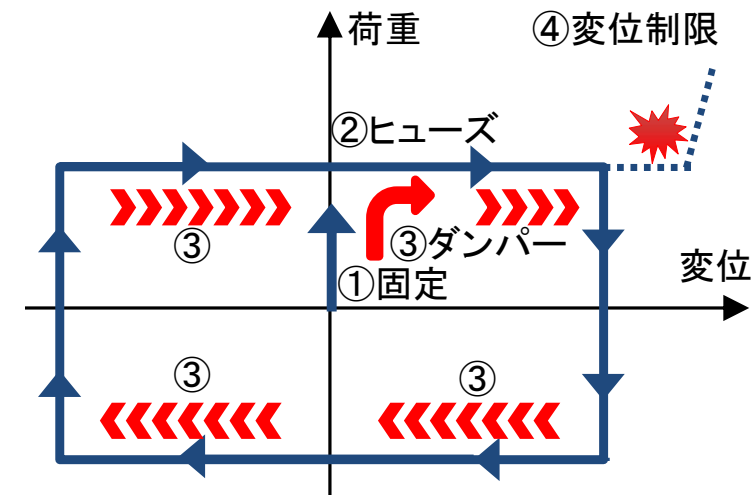
### ★DRFダンパーの特長

- 金属同士の摩擦を活用した、シンプル&コンパクトな構造です。
- 速度・振幅・温度の依存性が小さいダンパーです。
- 優れたエネルギー吸収性能を発揮します。
- 多数回の地震にも安定した性能を発揮します。
- 長期間にわたって安定した性能を発揮します。



### ★地震荷重や上部構造の挙動に応じて4段階の機能を発揮

- ①固定機能** 設計値未満の荷重に対しては、静止摩擦により支承の横変位を固定するサイドブロックとして機能します。
- ②ヒューズ機能** 設計値以上の荷重が作用すると固定を解放するヒューズとなり、上部構造の慣性力を頭打ちにします。
- ③ダンパー機能** 一定の摩擦力で振動エネルギーを摩擦熱に変えて吸収するダンパーとして、制震効果を発揮します。
- ④変位制限機能** 最終的には落橋を回避する変位制限ストッパー(横変位拘束構造または落橋防止装置)の一部として機能します。

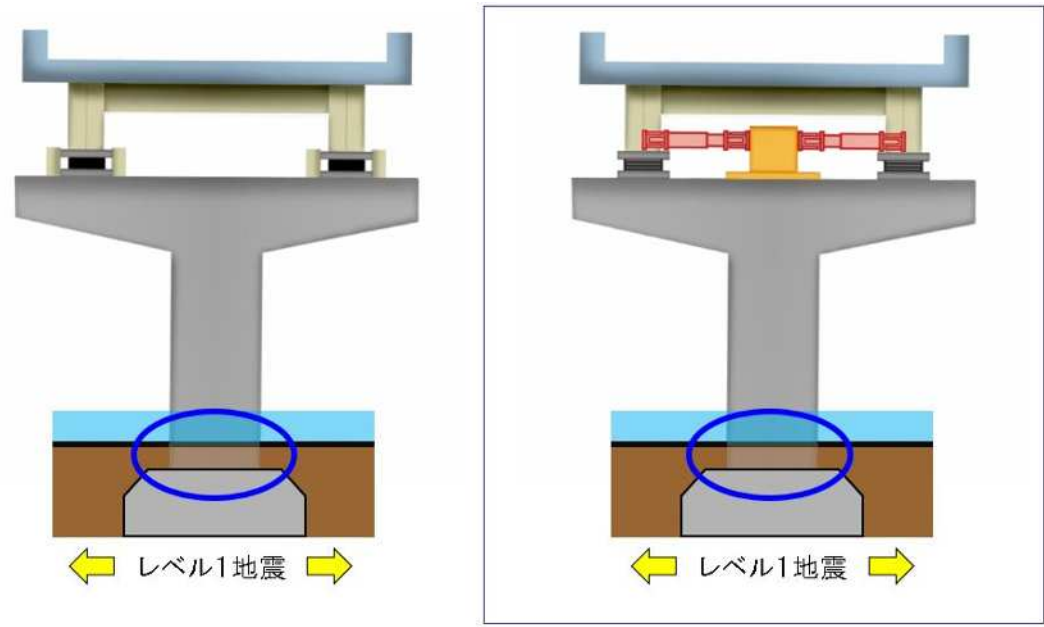


DRFダンパーの機能

### 3. 技術概要・効果 (DRFダンパーによる耐震補強【前・後】の地震時挙動)

レベル1地震時 (稀に発生する中地震)

ダンパーが固定部材(サイドブロック)の役割  
⇒ 桁ずれ(支承変位)の発生を防止  
※桁伸縮装置の損傷を回避

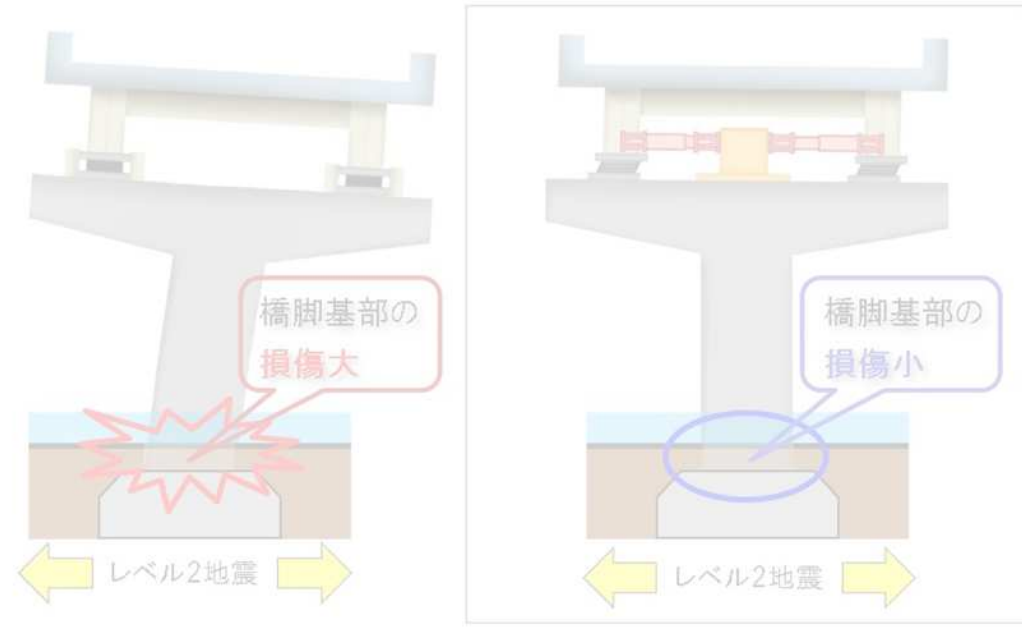


既設橋梁(補強前)

本技術(補強後)

レベル2地震時 (極稀に発生する巨大地震)

ダンパーが摺動  
⇒ 上部構造の慣性力を頭打ちにするとともに、制震機能を発揮、橋脚基部の損傷を大幅に低減



既設橋梁(補強前)

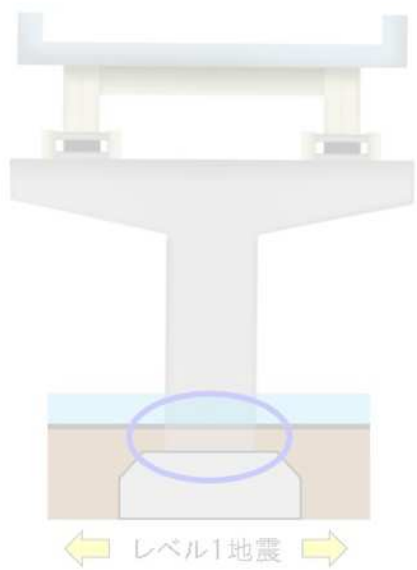
本技術(補強後)



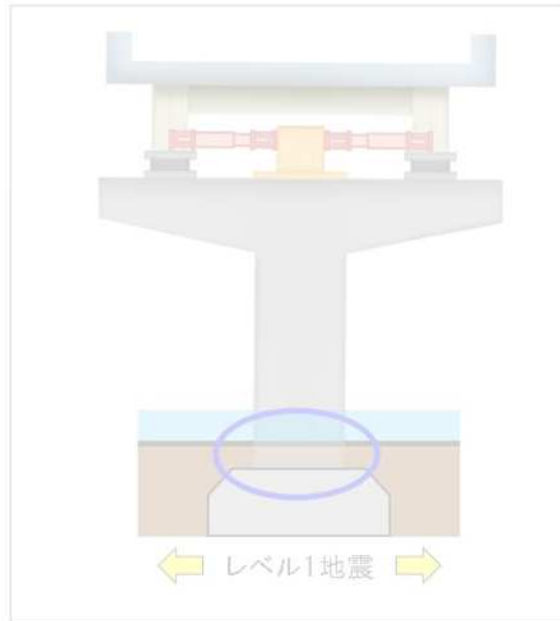
### 3. 技術概要・効果 (DRFダンパーによる耐震補強【前・後】の地震時挙動)

レベル1地震時 (稀に発生する中地震)

固定部材(サイドブロック)の役割  
⇒ 桁ずれ(支承変位)の発生を防止  
※桁伸縮装置の損傷を回避



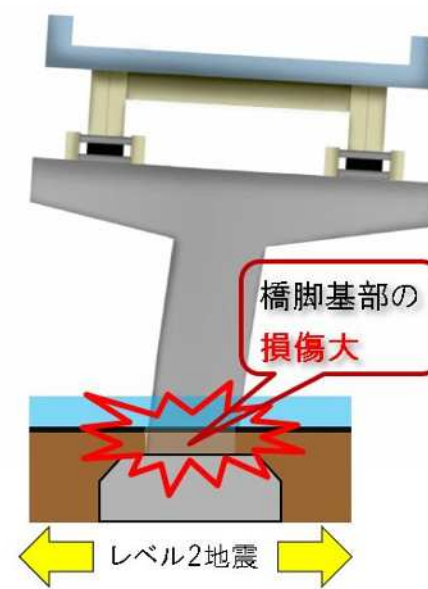
既設橋梁(補強前)



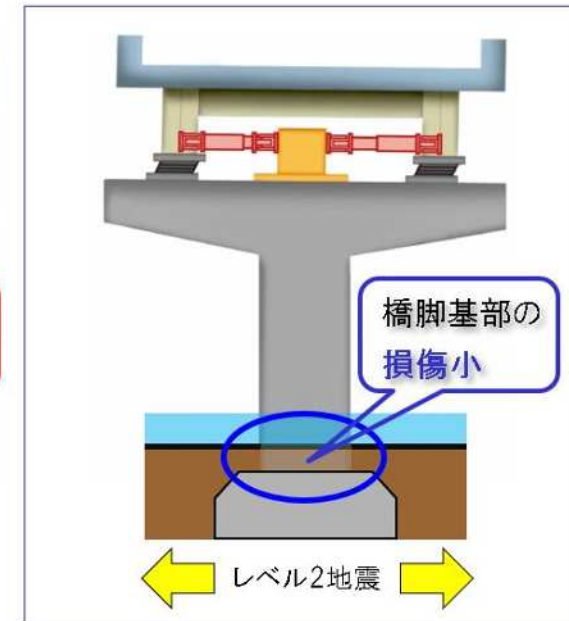
本技術(補強後)

レベル2地震時 (極稀に発生する巨大地震)

ダンパーが摺動  
⇒ 上部構造の慣性力を頭打ちにするとともに、制震機能を発揮、橋脚基部の損傷を大幅に低減



既設橋梁(補強前)

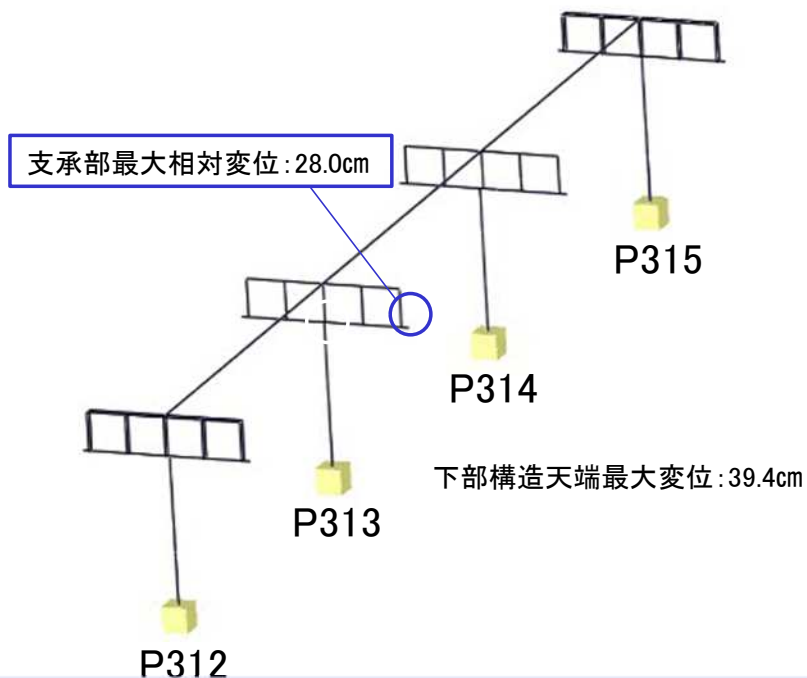


本技術(補強後)

### 3. 技術概要・効果 (鋼3径間連続鉄桁の動的解析結果の一例)

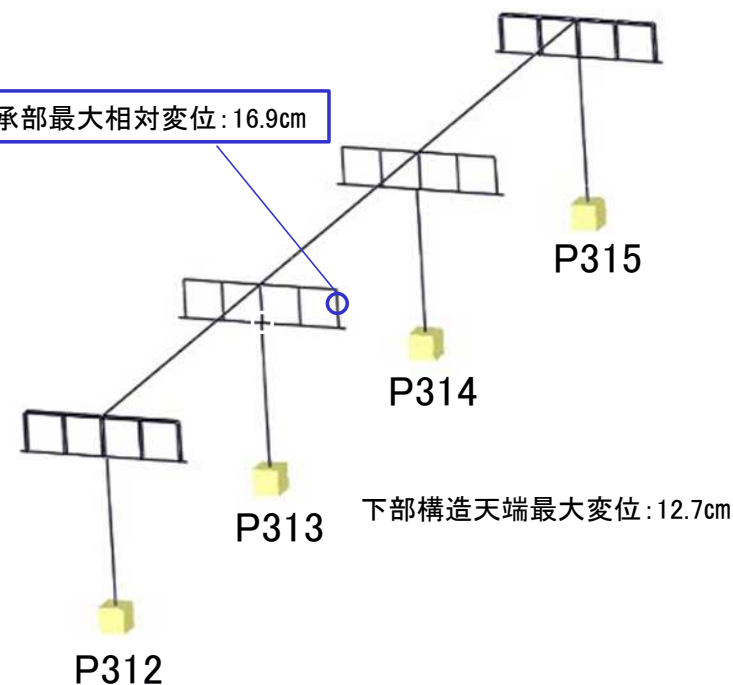
【動画】

- 下部構造:T型単柱RC橋脚、 上部構造:3径間連続の5主鋼I桁橋
- 橋軸直角方向にDRFダンパーを設置、 入力地震動はⅡ-Ⅲ-3:H7兵庫県南部地震(道示V)



- 橋脚基部が塑性化し、橋脚に残留変位が生じる  
⇒基部の補修に時間を要し、早期復旧が難しい

DRFダンパーなし (ゴム支承のみ) 【補強前】



- DRFダンパーが摺動し、支承部に残留変位が生じる  
⇒緊急輸送路としての**車両通行OK**(地上部のため復旧も容易)
- 橋脚に残留変位が生じない  
⇒基部の補修が不要で、道路ネットワーク**早期復旧が可能**

DRFダンパー有り (ゴム支承+摩擦ダンパー) 【補強後】

## 4. 実橋梁への適用事例（工事概要）

### 工事概要

【発注者】首都高速道路(株)東京東局  
【工事名】(修)構造物改良工事29-2-3  
【工事場所】東京都港区海岸二丁目  
                  高速11号台場線(台-6~台-44)  
【工期】平成29年12月29日~令和3年5月11日  
【ダンパー数】650kN×2基、1000kN×4基

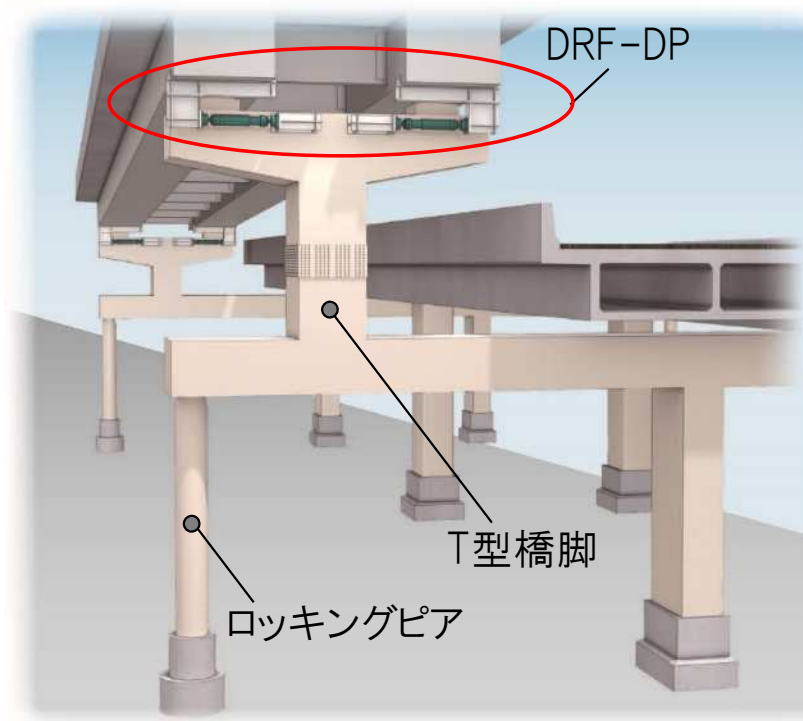
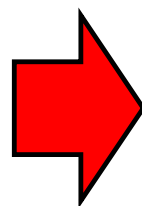
本技術適用の目的

既設橋梁の固定支承部の  
**橋軸直角方向の耐震補強策**

- ・T型橋脚の曲率低減
- ・ロッキングピアの上揚力低減



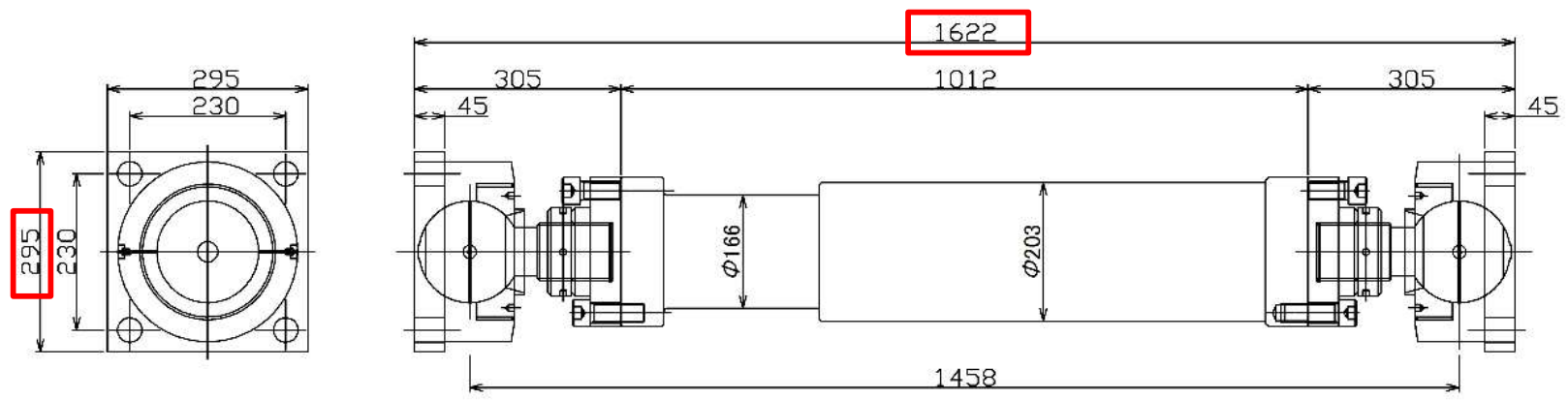
既設橋梁  
(補強前)



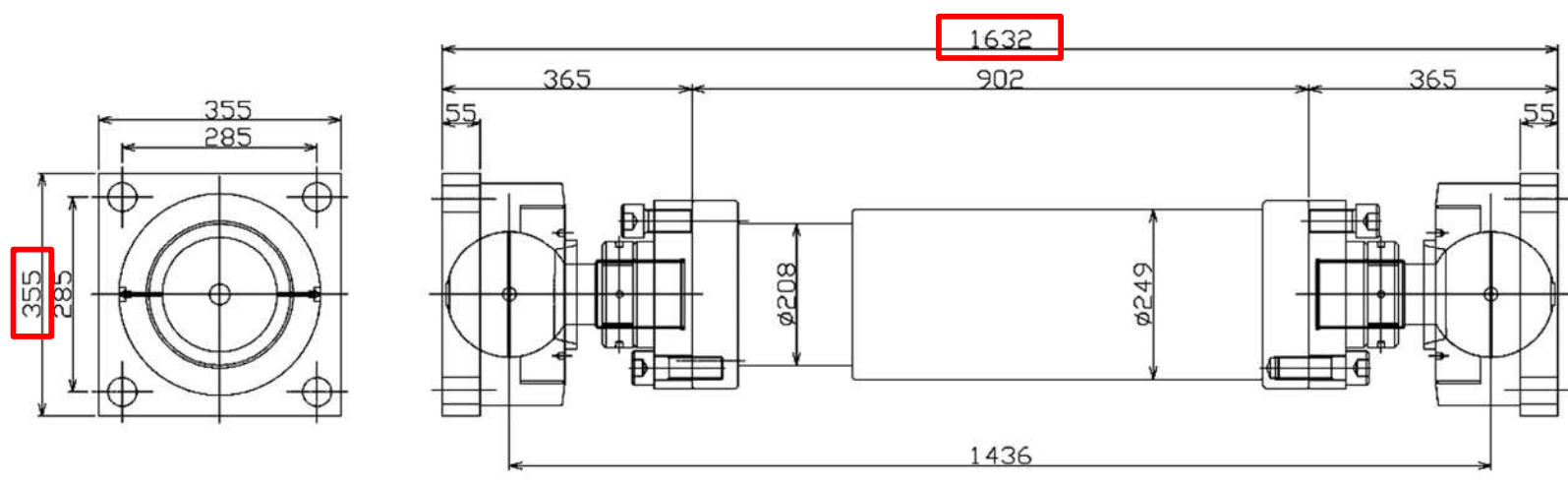
本技術  
(補強後)

## 4. 実橋梁への適用事例（採用されたDRFダンパーの仕様）

【ダンパー数量】 650kN-200mmタイプ×2基、1000kN-150mmタイプ×4基



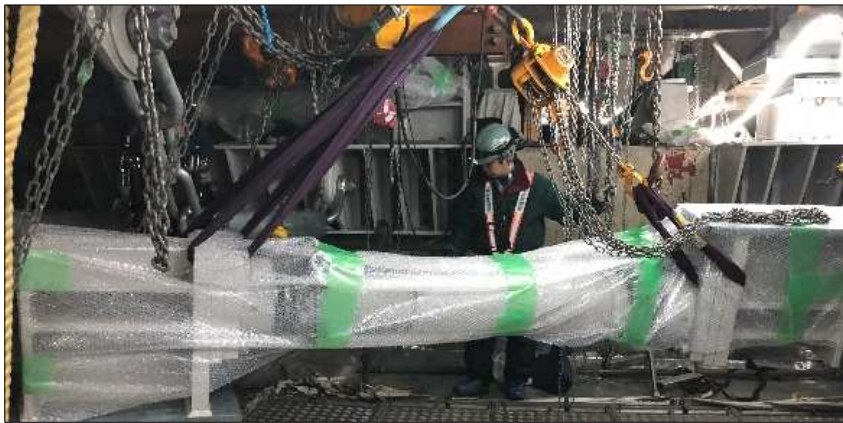
**650kNタイプ**  
・摩擦力の規格値: 650kN  
・最大振幅: ±200mm



**1000kNタイプ**  
・摩擦力の規格値: 1000kN  
・最大振幅: ±150mm

## 4. 実橋梁への適用事例 (設置状況 1/2)

650kN-200mmタイプのDRFダンパー設置状況 (橋脚上面に設置した例)



(a) 設置状況



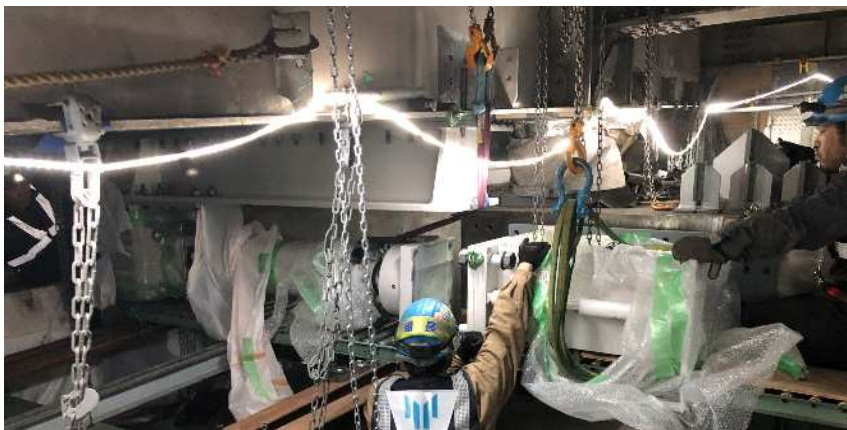
(b) 設置完了の詳細



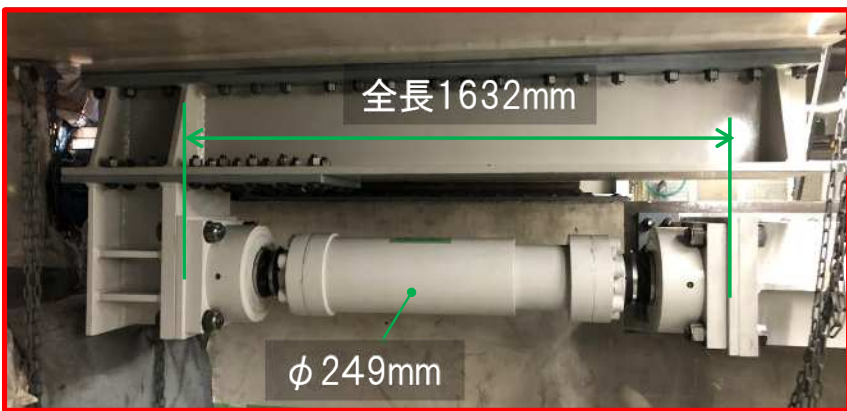
(c) 設置完了の全景

## 4. 実橋梁への適用事例 (設置状況 2/2)

1000kN-150mmタイプのDRFダンパー設置状況 (橋脚側面に設置した例)



(a) 設置状況



(b) 設置完了の詳細



(c) 設置完了の全景

## 4. 実橋梁への適用事例（品質管理）

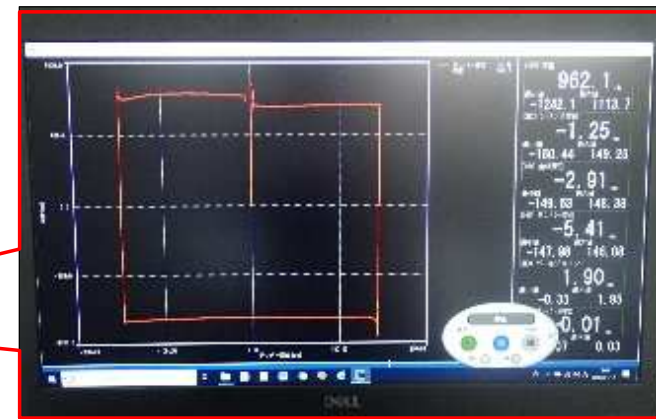
DRFダンパーは出荷する**全数**に対して**製品検査**を行い、**品質管理**を徹底しています。



(a) 寸法検査状況



(b) 載荷検査状況

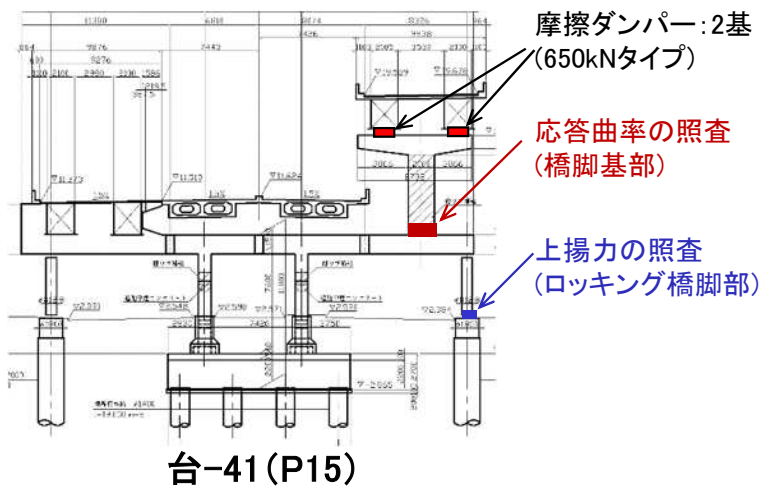
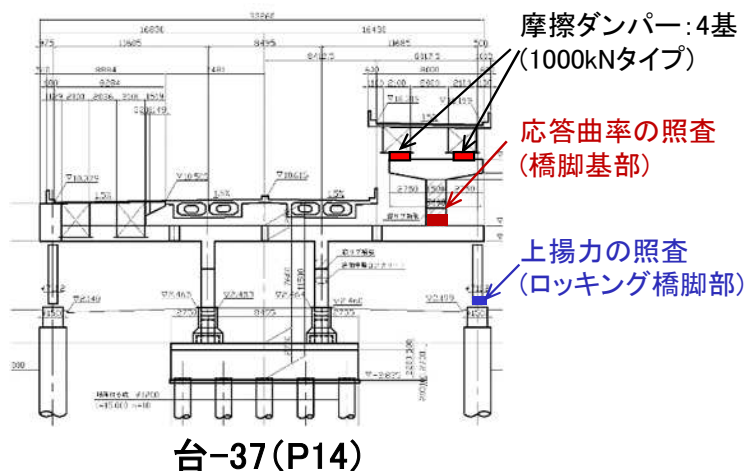


(c) 製品出荷状況

	製品検査項目	確認方法※1	確認の頻度	合否判定の方法※1
外観検査	1) 鋼材検査	書類（ミルシート）	ロット毎	規格値以内であること
	2) 外観検査	目視	全数	有害な損傷等がないこと
	3) 寸法検査	実測、書類	全数	全長、ボルトピッチ等の現場取付け時に必要な寸法が許容差以内であること
	4) 塗装検査	実測、書類	全数	管理誤差以内であること
載荷検査	5) ストローク（移動量）検査	載荷振幅：最大振幅S-5.0mm 載荷速度：任意	全数	載荷振幅の範囲内で最大振幅に到達しないこと
	6) 荷重検査	載荷振幅：最大振幅S×80% 載荷速度：0.4cm/sec一定 入力波形：三角波，2サイクル	全数	荷重検査値と規格値との差が，規格値の0%～20%以内に収まること

## 4. 実橋梁への適用事例（工事状況／補強効果）

レベル2地震時の応答値が大幅に低減し、地震後の速やかな復旧が実現可能となりました。



### 損傷制御効果(補強前後の最大応答値の比較)

橋梁	レベル2地震動時のロックン橋脚部の上揚力		
橋脚名	既設橋梁(補強前)	本技術(補強後)	補強後／補強前
台-37	2351kN	1576kN	67%(33%減)
台-41	2114kN	1432kN	67%(33%減)

橋梁	レベル2地震動時の橋脚基部の応答曲率		
橋脚名	既設橋梁(補強前)	本技術(補強後)	補強後／補強前
台-37	1.70φ <sub>y</sub>	0.70φ <sub>y</sub>	41%(59%減)
台-41	7.06φ <sub>y</sub> (1.68φ <sub>a</sub> )	2.59φ <sub>y</sub> (0.73φ <sub>a</sub> )	37%(63%減)

復旧時の基部補修やそれに伴う交通規制が不要

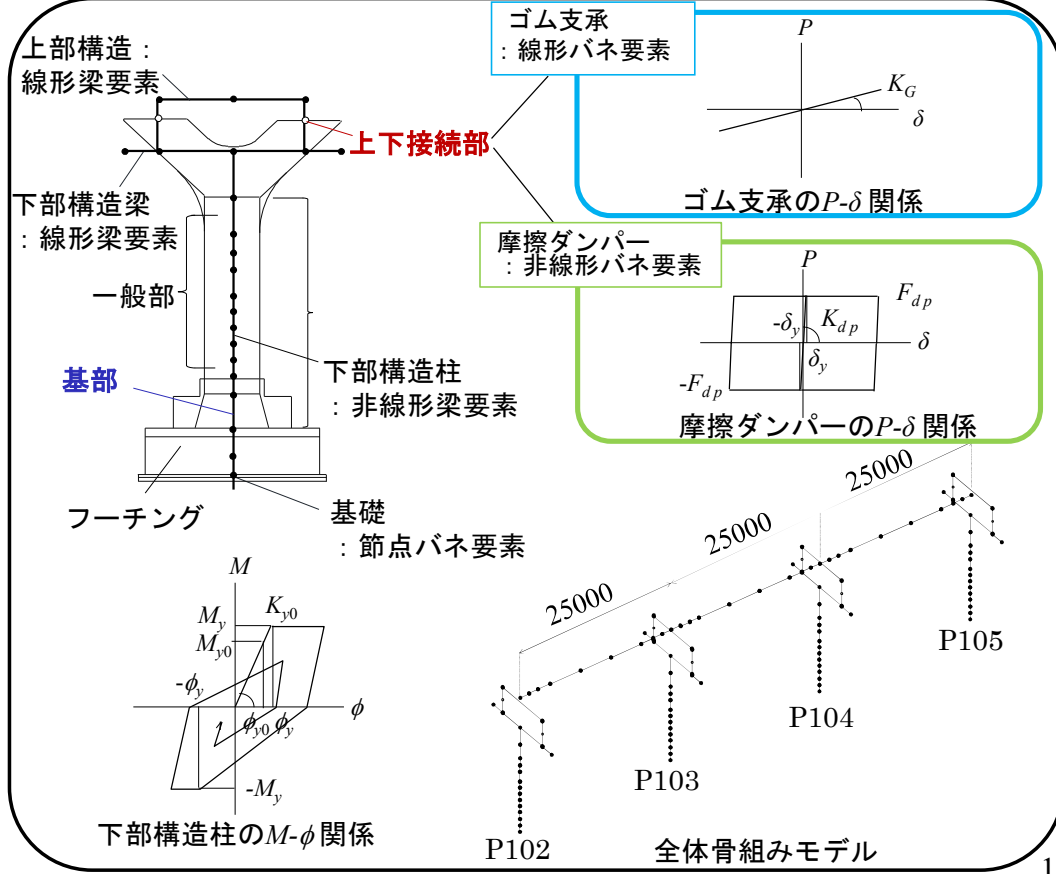
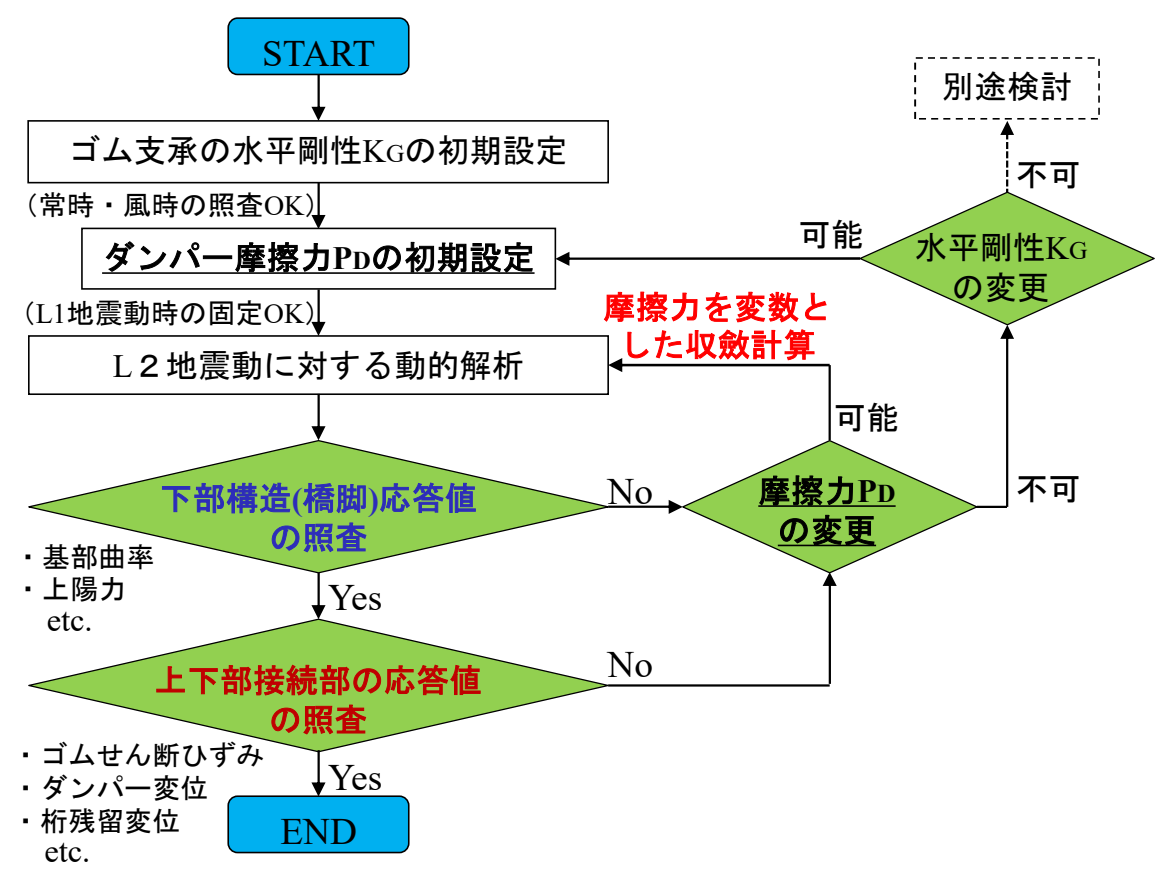
復旧に要するコスト削減 ✓

期間短縮&時間便益コスト削減 ✓



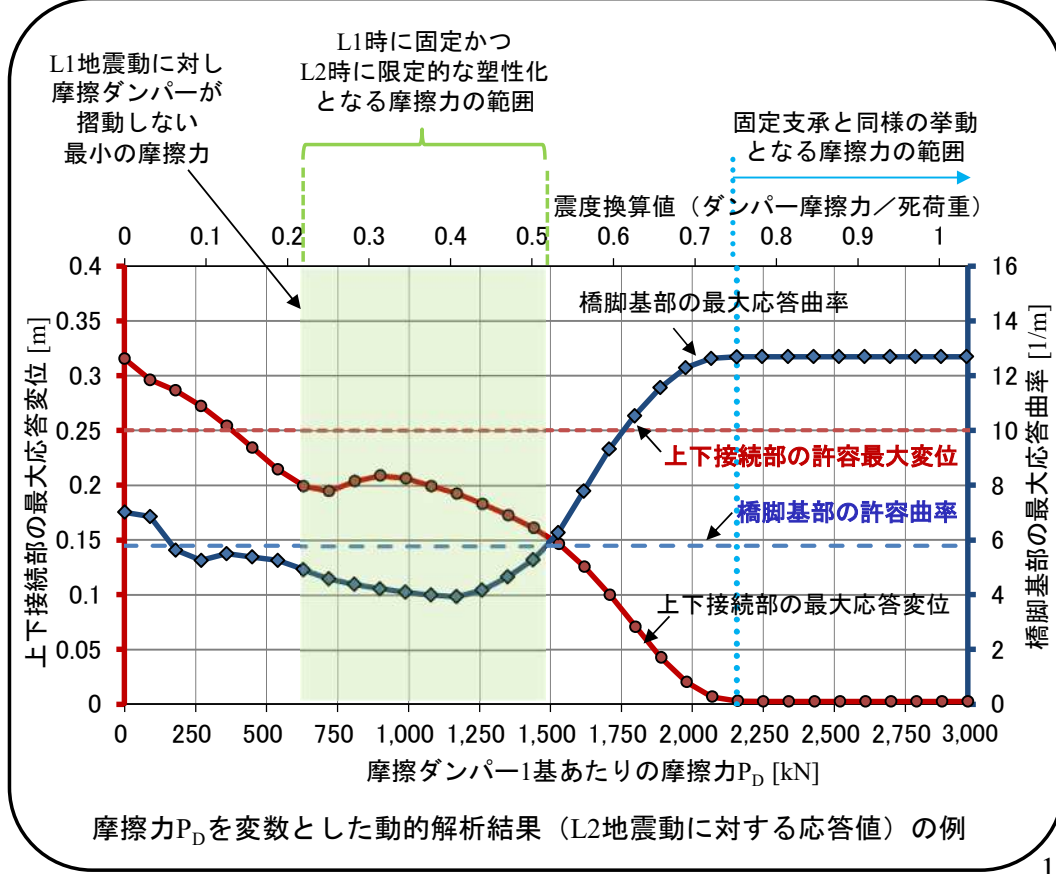
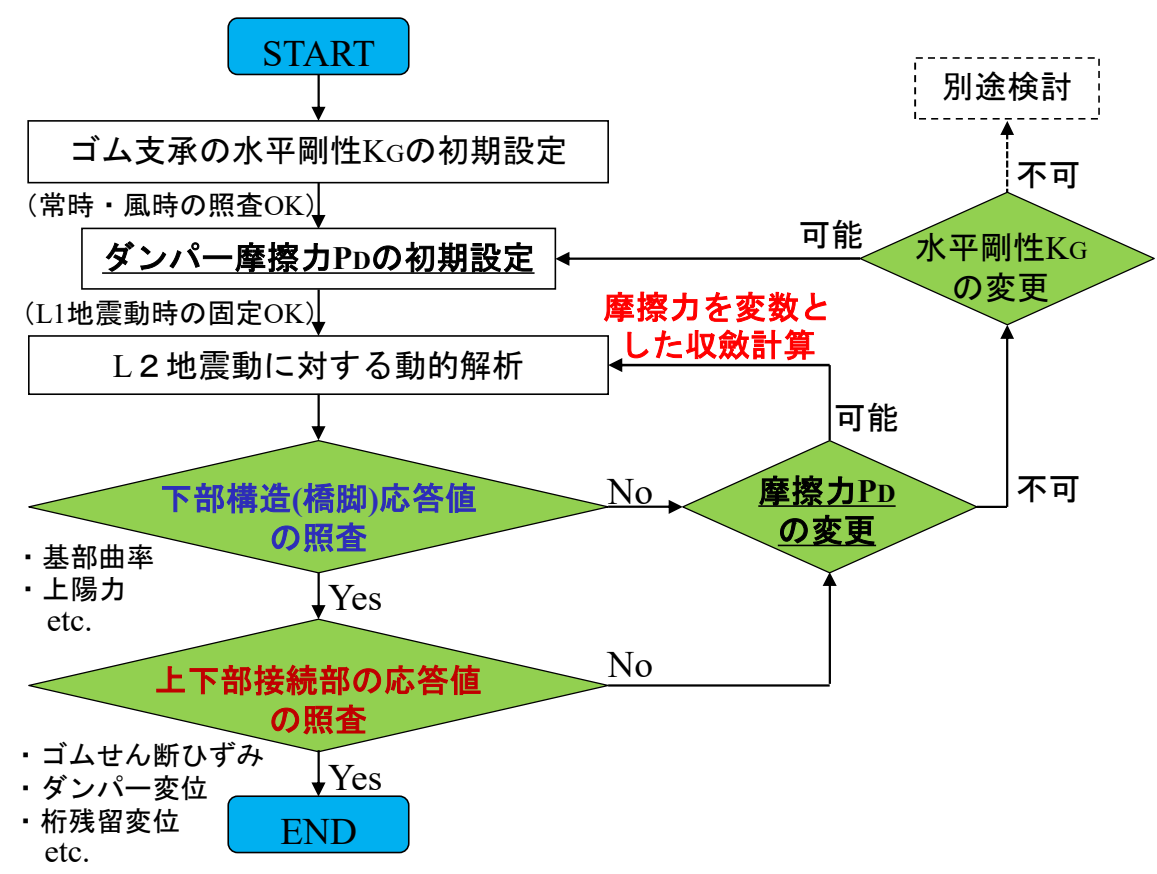
# 5. DRFダンパーを用いた橋梁の設計 (ダンパー摩擦力の設定フロー)

- DRFダンパーは、首都高速道路(株)発行の「橋梁構造物設計施工要領 V耐震設計編」にスペックインされています。
- DRFダンパーの摩擦力の最適値や橋脚の応答値の算出は、橋梁全体系モデルの動的解析(時刻歴応答解析)による。
- 摩擦力は、L1地震動に対し固定、かつL2地震動に対し制震効果が高い値を、収斂計算によって算出。
- 橋脚(下部構造)応答値の目標は、L2地震時に弾性範囲または免震橋に準じた限定的な塑性化を超えないこと。



# 5. DRFダンパーを用いた橋梁の設計 (ダンパー摩擦力の設定フロー)

- DRFダンパーは、首都高速道路(株)発行の「橋梁構造物設計施工要領 V耐震設計編」にスペックインされています。
- DRFダンパーの摩擦力の最適値や橋脚の応答値の算出は、橋梁全体系モデルの動的解析(時刻歴応答解析)による。
- 摩擦力は、L1地震動に対し固定、かつL2地震動に対し制震効果が高い値を、収斂計算によって算出。
- 橋脚(下部構造)応答値の目標は、L2地震時に弾性範囲または免震橋に準じた限定的な塑性化を超えないこと。

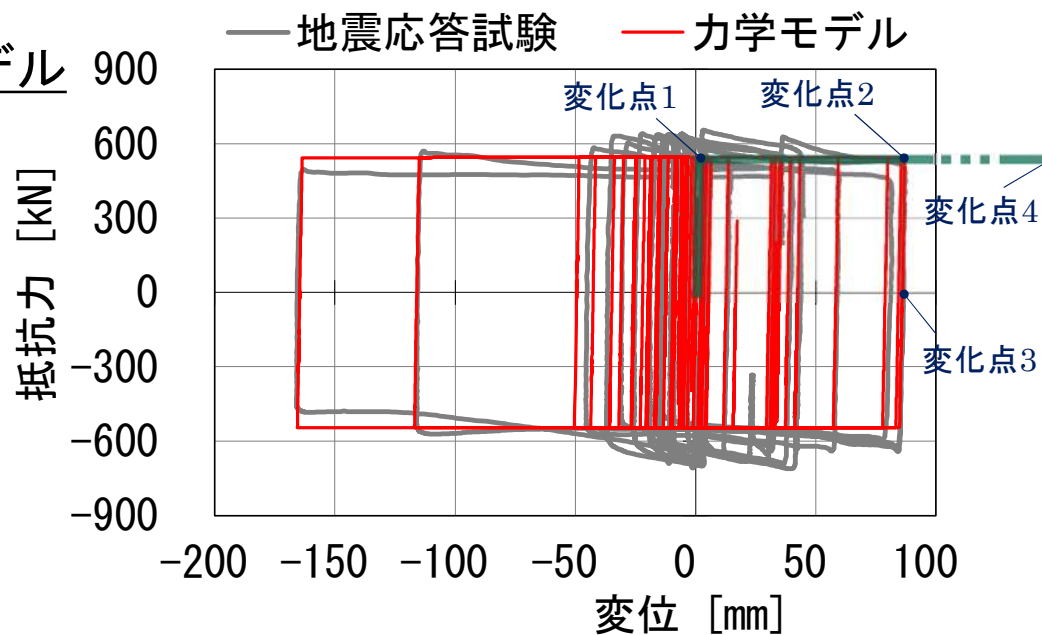


## 5. DRFダンパーを用いた橋梁の設計 (DRF-DPの力学モデル)

- **摩擦力の規格値 $P_D$** は、製品検査での静的な目標摩擦力 $P_0$ から10%減じた値( $P_D = P_0 / 1.1$ )であり、地震応答時の速度や繰り返し回数等の各種依存性をあらかじめ考慮した値。
- 動的解析に用いるDRF-DPの力学モデルは、 $P_D$ 頭打ちの**完全弾塑性型バイリニアモデル**。
- 摺動開始変位 $\delta_y$ は、ダンパー本体部:  $\pm 1.0\text{mm}$ 、両端の接合部を含める場合:  $\pm 2.0 \sim 5.0\text{mm}$ 程度で適宜設定。
- ダンパー許容変位 $\delta_a$ は、最大振幅 $\delta_{\max}$ の80%。 $(\delta_a = \delta_{\max} \times 0.8)$
- 取付部設計時のダンパー作用力は、製作ばらつきや静止摩擦等の荷重上昇を考慮し、規格値 $P_D$ の1.5倍以上。

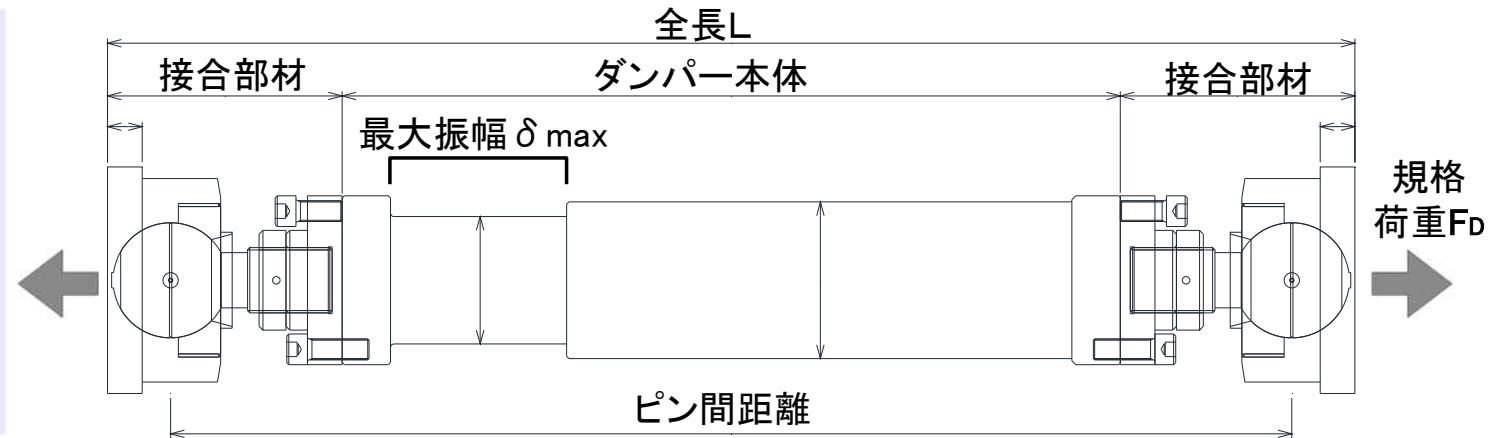
$P_D=550\text{kN}$ 、 $\delta_{\max}=250\text{mm}$ ( $\delta_a=200\text{mm}$ )の力学モデル

変化点	変位量 [mm]	摩擦力値 [kN]	変化点の定義	備考
1	$\delta_y$ (1.0mm)	$P_D$ (550kN)	摺動開始変位 (第1折れ点)	動的解析で 用いる復元 力特性
2	A	$P_D$ (550kN)	ピーク変位A到達時 ( $A \leq \delta_a$ )	
3	$A - 1.0$	$P_D$ (550kN)	ピーク変位A後の除荷時	
4	$\delta_{\max}$	$P_D$ (550kN)	$\delta_{\max}$ 到達時 (ストッパー作動時)	



## 5. DRFダンパーを用いた橋梁の設計（製品ラインナップ）

- ラインナップは、規格荷重200～1200kN、最大振幅50～350mm。
- 規格値は、荷重：50kN刻み、振幅：50mm刻みで、中間サイズも製作可能です。  
（寸法・重量は変更する場合有り）



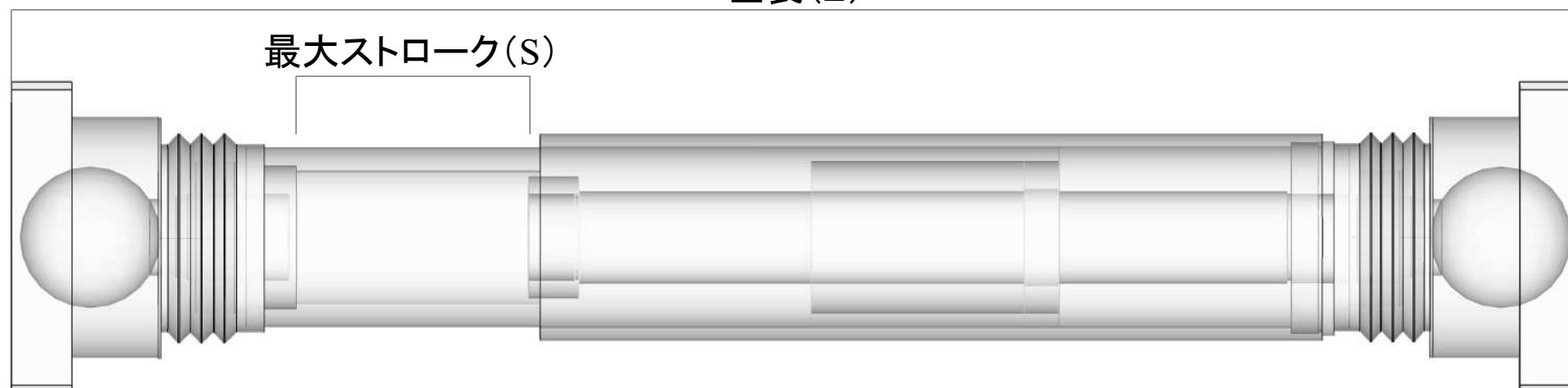
製品ラインナップ(規格荷重と最大振幅および全長、ピン間距離、全重量)

最大振幅 $\delta_{max}$ (mm)	寸法 全重量	摩擦抵抗力の規格荷重 $F_D$ (kN)					
		200kN	400kN	600kN	800kN	1000kN	1200kN
±100mm	全長 L (mm)	929	1,049	1,184	1,322	1,402	1,482
	ピン間距離 (mm)	837	933	1,044	1,158	1,222	1,286
	全重量 W (kgf)	83	147	236	343	465	591
±200mm	全長 L (mm)	1,199	1,329	1,482	1,587	1,702	1,782
	ピン間距離 (mm)	1,107	1,213	1,342	1,423	1,522	1,586
	全重量 W (kgf)	125	204	304	425	519	652
±300mm	全長 L (mm)	1,564	1,627	1,757	1,867	1,975	2,072
	ピン間距離 (mm)	1,392	1,511	1,617	1,703	1,795	1,876
	全重量 W (kgf)	190	276	396	516	610	768

## 5. DRFダンパーを用いた橋梁の設計（製品ラインナップ）

- ラインナップは、規格荷重200～1200kN、最大ストローク50～350mm。
- 規格値は、荷重：50kN刻み、振幅：50mm刻みで、中間サイズも製作可能です。
- 2022年10月現在の一覧表で、寸法・重量は変更する場合があります。

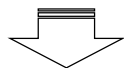
全長(L)



最大ストローク S (mm)		摩擦荷重 (kN)					
		DRF200	DRF400	DRF600	DRF800	DRF1000	DRF1200
±200	全長 L (mm)	1026	1326	1492	1568	1644	1749
	重量 W (kg)	95	206	311	430	557	707
±300	全長 L (mm)	1434	1563	1736	1820	1912	2026
	重量 W (kg)	144	242	386	505	654	768

## 6. 構造実験1 (DRFダンパーの高速載荷実験 1/2)

橋脚の上下部接続部に適用する場合、L2地震時には**最大100cm/sec**を超える高速度かつ**最大150mm**を超える大振幅で撓動することが想定されます。(RC造建物のブレース補強で適用する場合は、10cm/sec程度かつ15mm程度)

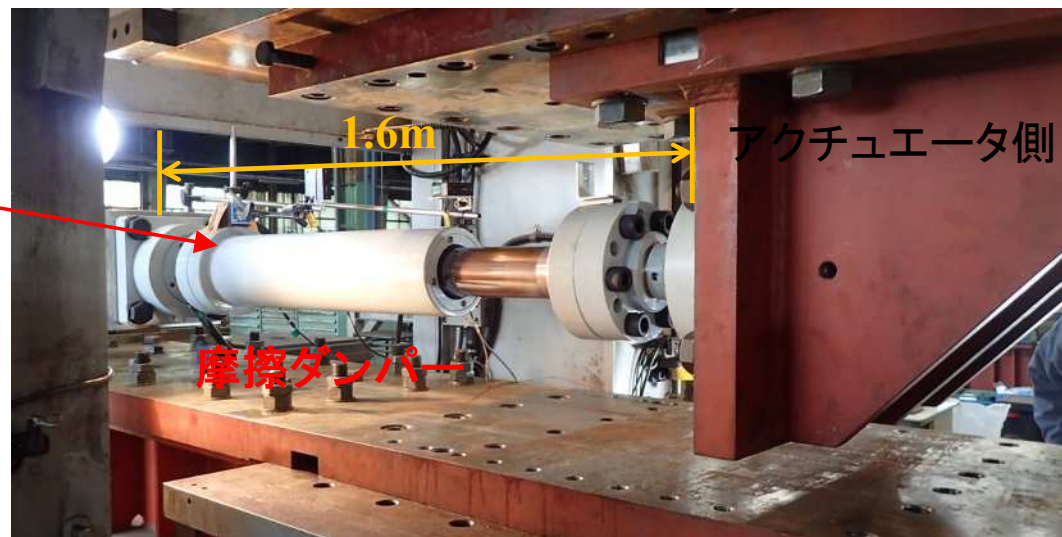
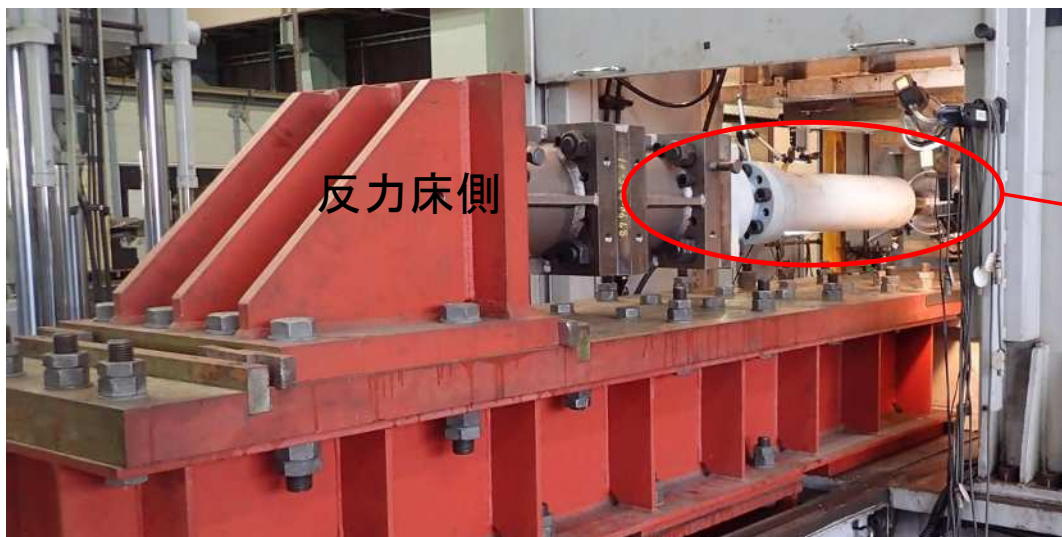
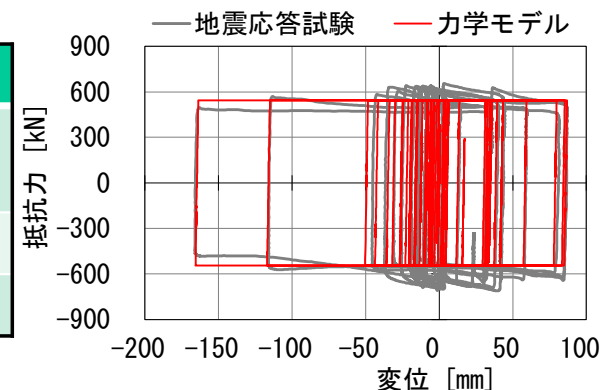


DRFダンパーの実製品に対して、  
L2地震を想定した高速載荷実験を実施

DRFダンパー本体の優れた**剛塑性型の履歴特性**  
および**エネルギー吸収性能**を確認しました。

### 試験体概要

規格荷重 (目標値)	550kN (600kN)
最大振幅	±250mm
試験体数	11体

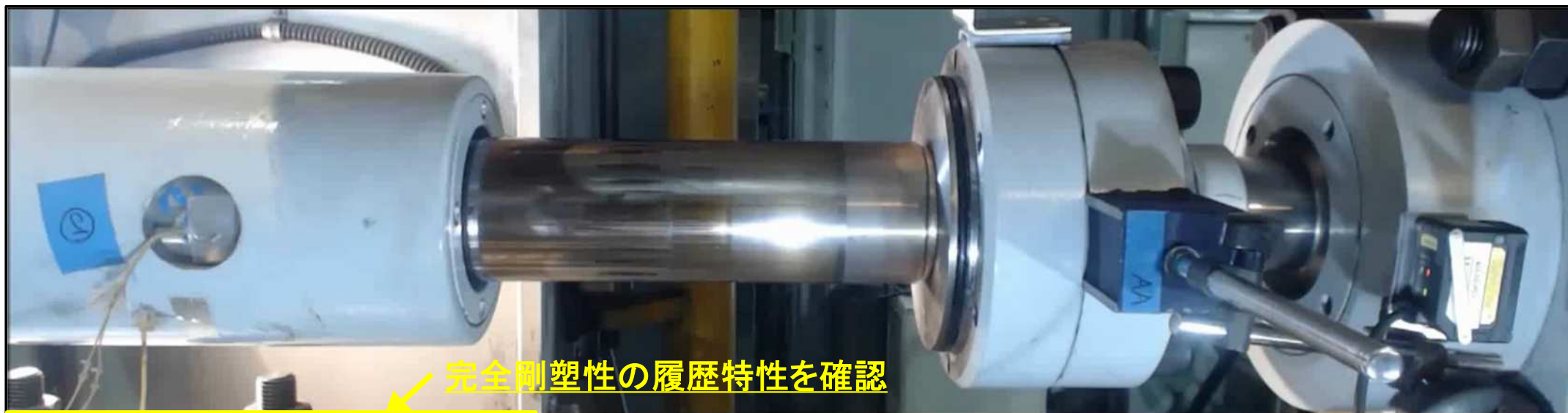


## 6. 構造実験1 (DRFダンパーの高速载荷実験 2/2)

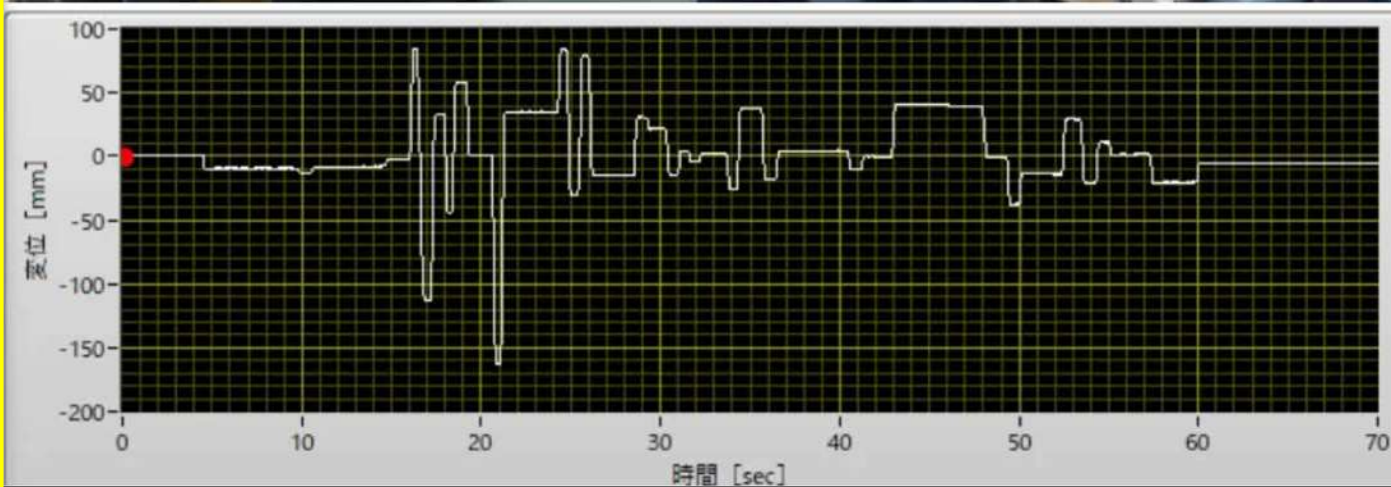
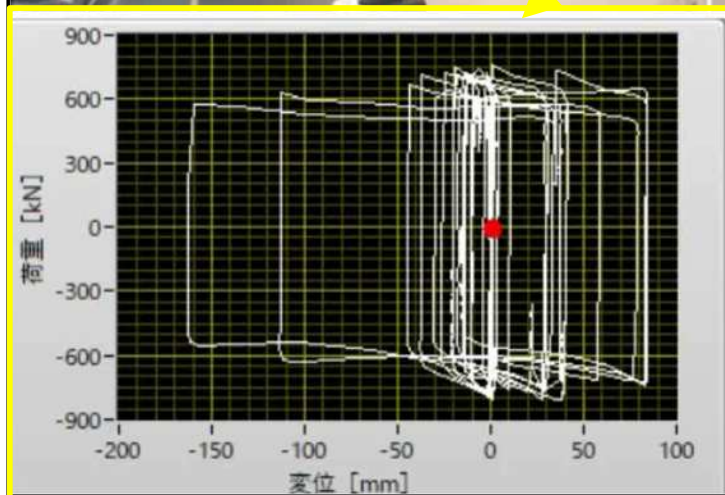
【動画】

レベル2地震応答波(道示 I - III - 3) <継続時間:180sec, 最大速度122cm/sec>

※DRF-DP付き橋梁の動的解析結果のダンパー応答変位波形



完全剛塑性の履歴特性を確認

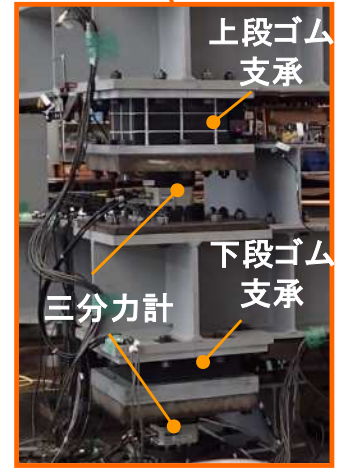
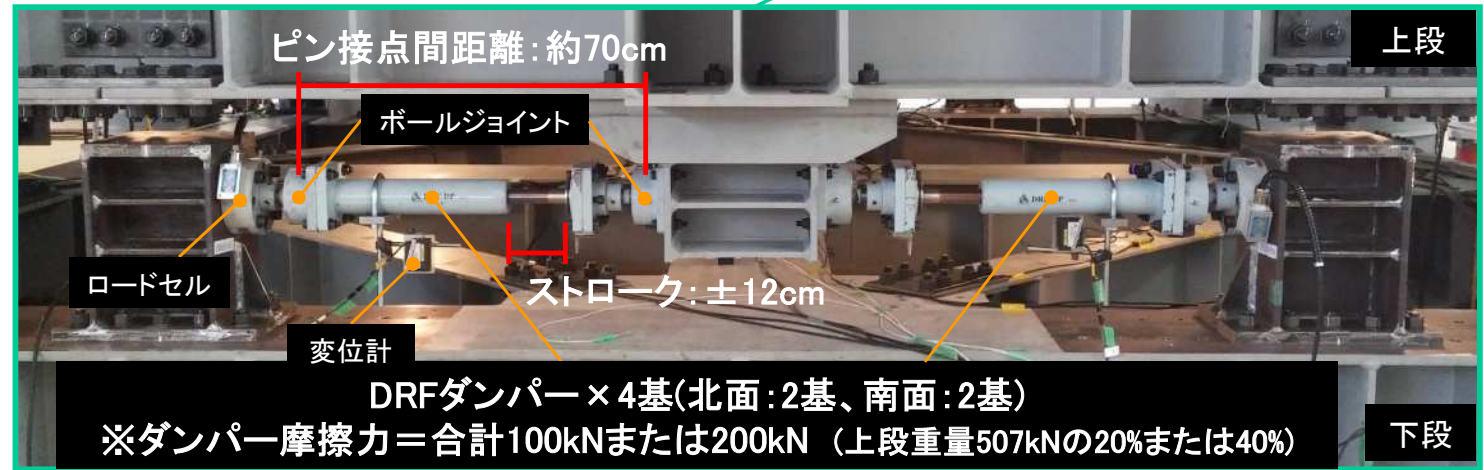
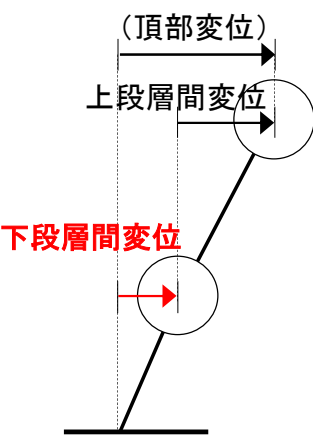
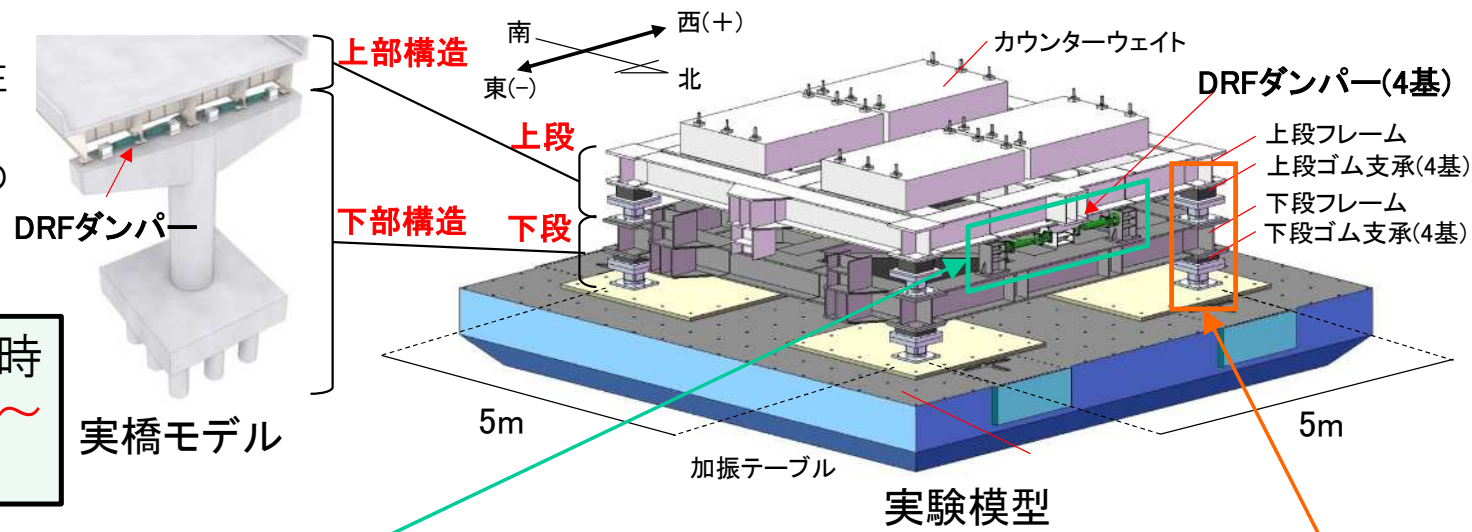


# 6. 構造実験2 (DRFダンパー付き橋梁全体の大規模振動台実験)

DRFダンパー付き橋脚全体としての地震時挙動と効果を検証するために、大規模な振動台実験を実施しました。

- 実験模型(5×5m、約50トン)は、RC単柱橋脚1本(実橋モデル)を2質点系で模擬
- 実験模型の上段・下段が、実橋モデルの上部・下部構造に相当(縮尺1/2.2)
- L1・L2地震動を入力

DRFダンパー設置により、L2地震時の橋脚変形(下段層間変位)を30~70%低減できることを確認しました。



場所: 国立研究開発法人土木研究所、 期間: 2016年1月~3月 24



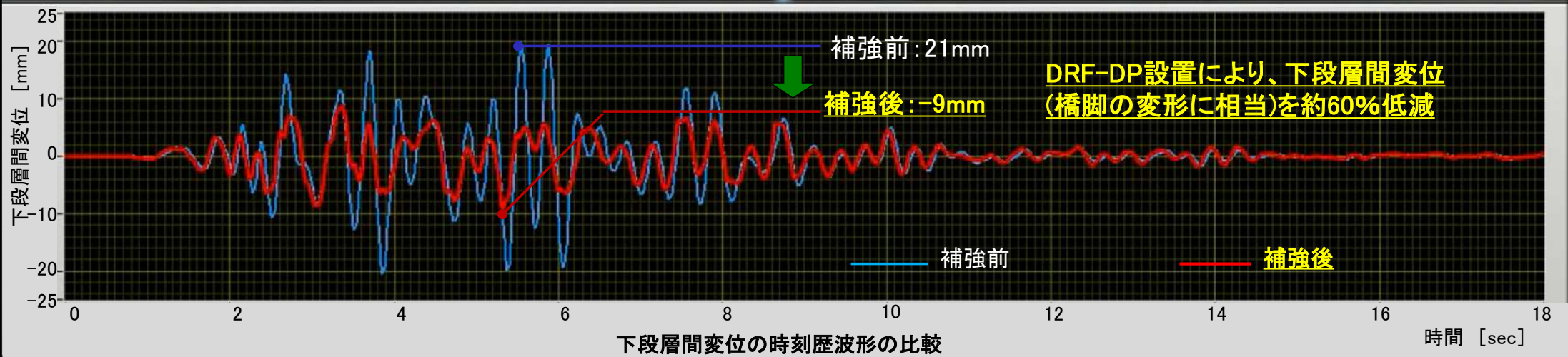
## 6. 構造実験2 (DRFダンパー付き橋梁全体の大規模振動台実験)

【動画】

レベル2タイプII地震動(道示II-II-2)入力時におけるDRF-DP有り・無しの地震時挙動を比較

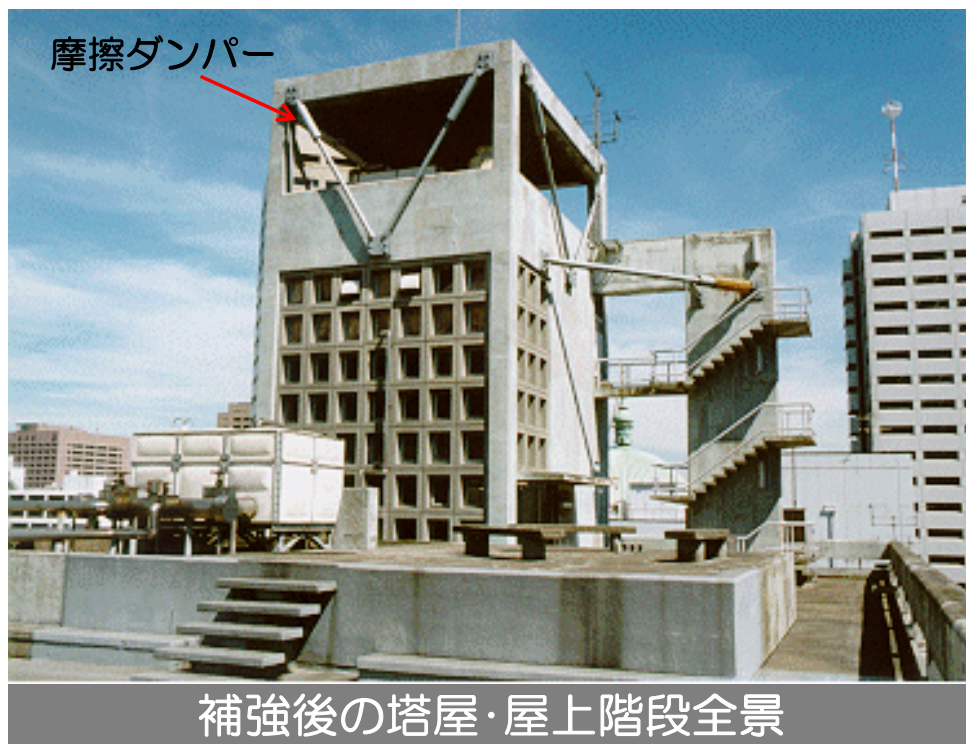
DRFダンパーを設置しない場合(補強前)

100kNのDRFダンパーを設置した場合(補強後)

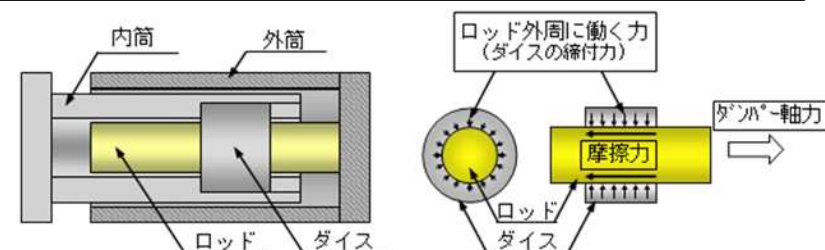


## 6. 構造実験3 (竣工後20年が経過したDRFダンパーの性能確認)

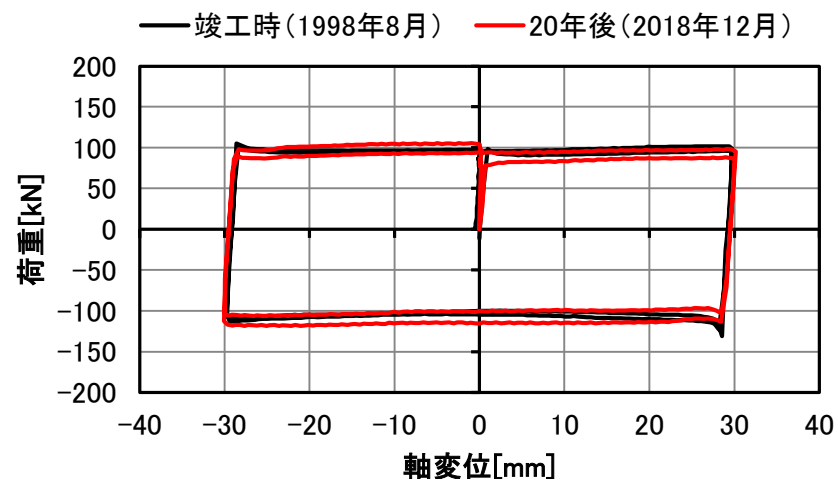
日本大学駿河台校舎5号館塔屋(DRFダンパーによる耐震補強第1号建物)の解体に伴い、竣工後20年が経過した摩擦ダンパー実機を回収し、性能確認試験を実施しました。



補強当時と比べて**ほぼ荷重変化なし**



DRFダンパーの構成と機構



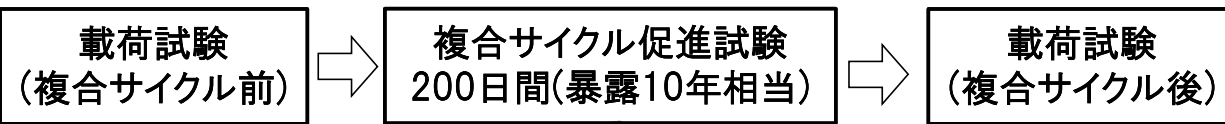
DRFダンパー性能の経年変化

### 工事概要

- 4階建て塔屋の東、西、南面および屋上階段へ、DRFダンパーを組込んだ制震ブレース(計7本)を設置
- 1998年9月に補強工事完了

## 6. 構造実験4 「複合サイクル促進試験」により経年変化を検証

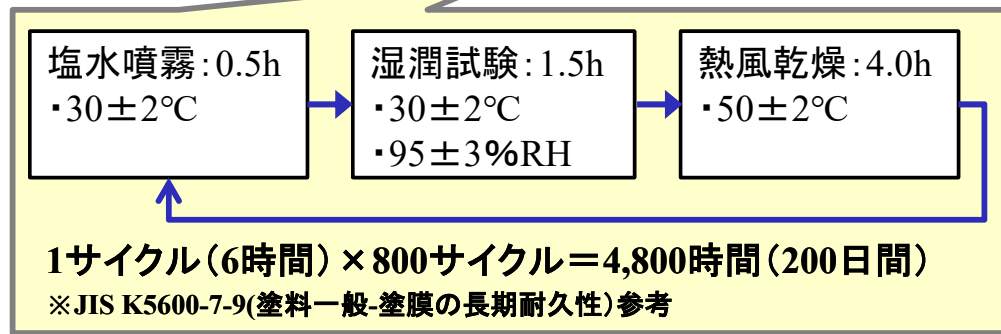
暴露10年相当の複合サイクル促進試験を実施し、長期耐久性を確認しました。



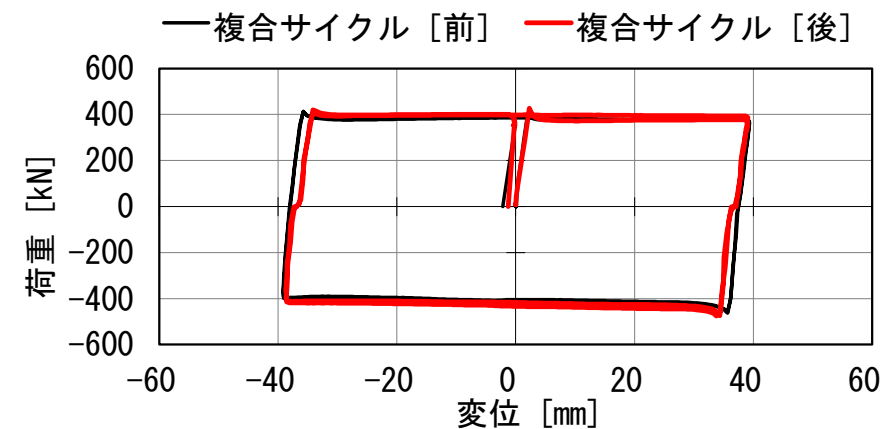
促進試験前後でほぼ荷重変化なし



複合サイクル試験状況



複合サイクル試験後(800サイクル終了)状況



摩擦荷重の変化: +5%未満

複合サイクル前後荷重実験(荷重-変位関係)

## 6. 構造実験5 (過酷なシチュエーションを想定した「水没試験」)

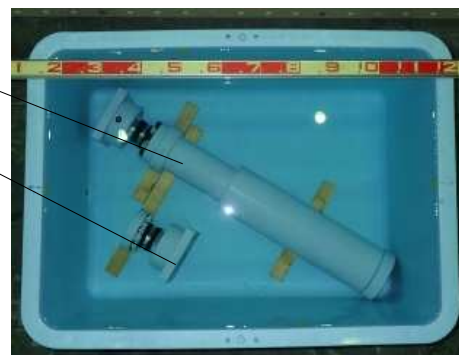
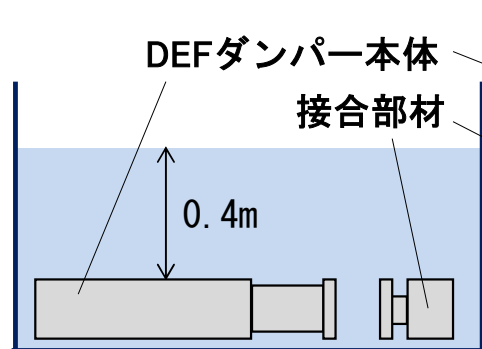
橋梁に設置した摩擦ダンパーが水没するという低確率なシチュエーションを再現した水没試験により、DRFダンパーの**防水性**や**耐水性**を確認しました。



DRFダンパー設置状況

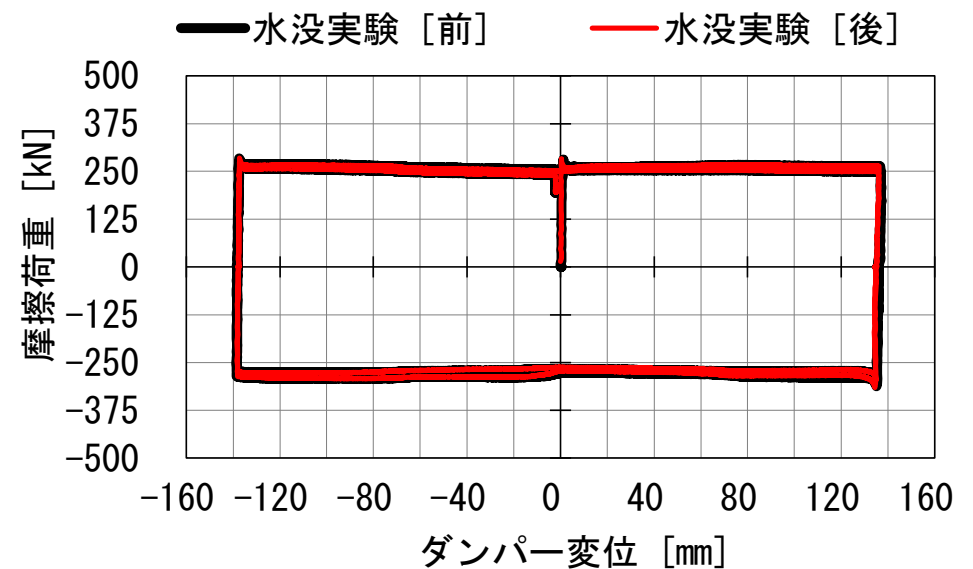


冠水被害の事例  
(渡月橋\_2013年台風18号)



JIS規格に基づく水没試験 (24時間以上)

水没前後で**ほぼ荷重変化せず**、実用上十分な防水性・耐水性を有することを確認



水没試験前後のダンパー性能の変化

## 7. まとめ・補足（本技術の説明まとめ）

1. L2地震時の復旧性に優れる橋梁の耐震補強策として免震・制震化が考えられるが、L1地震時に固定条件とする等の理由から、既存技術は橋軸直角方向に普及していない。
2. ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRFダンパー)を応用し、橋軸直角方向の制震化を実現する新たな橋梁耐震化工法を、首都高速道路(株)との共同研究により実用化しました。
3. DRFダンパーは、ダイスとロッドの嵌め合いを利用した当社独自の摩擦型制震ダンパーで、完全剛塑性型の履歴特性を有することが特長です。
4. DRFダンパーは、L1地震時には固定部材として、L2地震時には減衰部材として働きます。
5. DRFダンパーは、固定支承条件の橋脚(おもに橋軸直角方向)に適用でき、L2地震時における橋脚の損傷を大幅に低減することが可能です。
6. 下部構造の耐震補強が困難な既設橋梁にて特に有効です。また、地中に埋設している基部・基礎部の補修が不要となり、地震後の道路ネットワークの早期復旧を実現します。
7. 設計において、DRFダンパーの摩擦力は、橋梁全体系モデルの動的解析により、L1地震動に対し固定、かつL2地震動に対し制震効果が高い値を、収斂計算によって算出します。
8. DRFダンパーの力学モデルは、完全弾塑性型バイリニアとします。耐荷性能、エネルギー吸収性能、長期耐久性能などは、様々な構造実験によって確認されています。

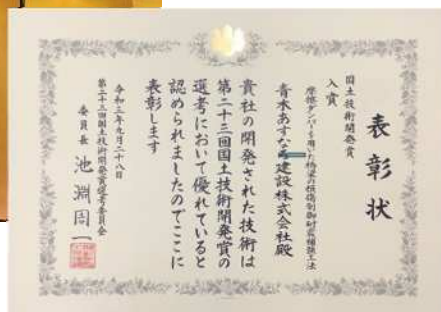
## 7. まとめ・補足 (DRFダンパーの普及促進に向けた最近の取り組み)

- 1) **NETIS**(国土交通省・新技術情報提供システム)への**登録完了**(2021年2月5日)
  - 新技術にかかわる情報の共有や提供を目的とした国土交通省が運営する新技術情報提供システム。公共工事でNETIS登録技術を採用した場合、請負業者には総合評価方式への加点、工事成績への加点が与えられるなどのメリットがある。
- 2) 「**ダイス・ロッド式摩擦ダンパー®**」、「**DRF-DP®**」の**商標登録完了**(2021年4月16日)
- 3) **第23回国土技術開発賞**にて本技術が**入賞**(2021年9月28日)
  - 技術名称:摩擦ダンパーを用いた橋梁の損傷制御耐震補強工法
  - 応募者 :首都高速道路(株)、青木あすなる建設(株)



表彰式(リモート開催)の様子


表彰状



### <今後の展開>

現在、**実装第二弾**として、首都高1号上野線の耐震補強(DRFダンパー:計26基)が**工事中**。

DRFダンパーの有効性が広く理解され、全国の高架橋や橋梁の防災対策に活用されることを期待しています。



END  
ご清聴ありがとうございました