

1. 摩擦ダンパーを用いた橋梁構造物の制震技術に関する講演報告

Report of a Lecture on Seismic Control Technology for Bridge Structures Using Friction Dampers

波田雅也* 牛島 栄**

－概要－

本報告は、首都高速道路(株)と青木あすなろ建設(株)の共同研究によって開発した「ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRF-DP)を用いた橋梁構造物の制震技術」に関するものである。日本振動技術協会の依頼を受けて、筆者が2020年12月に講演した内容を再編集して纏めた。

本報告では、開発した技術の概要、開発に際して実施した構造実験、ならびに実際の首都高速道路(高速11号台場線)の橋梁耐震補強工事にDRF-DPを適用した事例について紹介する。

－技術的な特長－

本技術は、ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRF-DP : Die & Rod Type Friction Damper)を橋梁構造物の上下部接続部に適用させた新たな制震技術である(図1)。DRF-DPは、ダイス(金属環)とロッド(金属芯棒)の嵌め合いを利用したダンパーである(図2)。最大静止摩擦力に達するまで撓動せず、最大静止摩擦力に達すると一定の摩擦力を保持しながらダイスがロッド上を撓動し、完全剛塑性に近い履歴特性を有する。この特性を活かし、レベル1地震動に対しては固定支承を形成するサイドブロックの役割を果たし、レベル2地震動に対しては固定を開放して上部構造の慣性力を頭打ちにするとともに摩擦減衰による制震効果を発揮する(図3)。本技術の採用により、固定支承で上部構造を支持する橋脚に対して、レベル2地震動時の橋脚の損傷制御が可能となる。

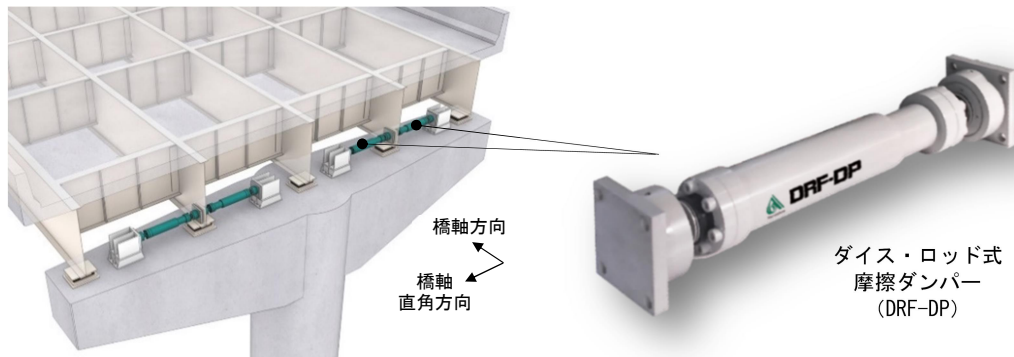


図1 ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRF-DP)を用いた橋梁構造物の制震技術

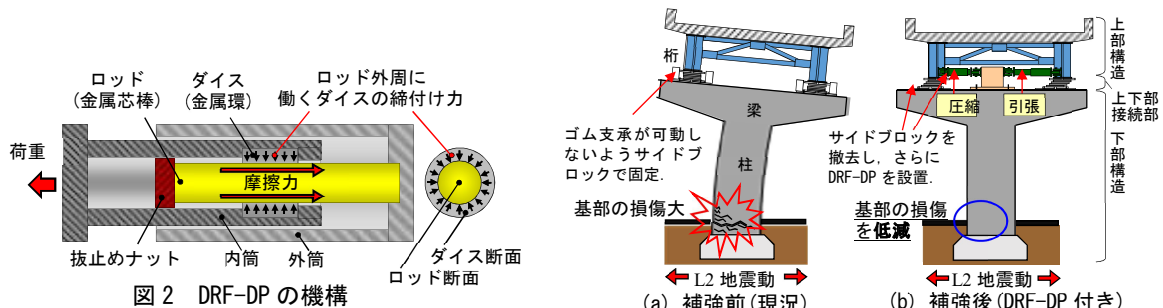


図2 DRF-DPの機構

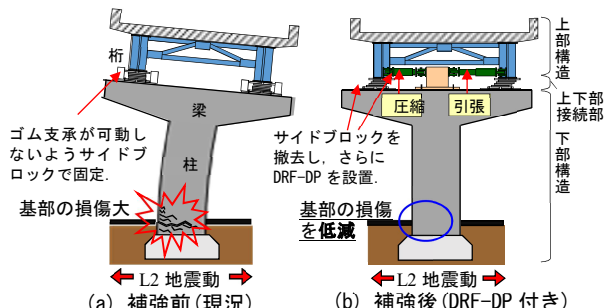


図3 補強効果の概念図(橋軸直角方向の場合)

※本報告は、2020年12月10日に開催された日本振動技術協会 講演会(テーマ: 建築・土木用制振ダンパの応用発展)における講演内容を再編集したものである。本報告の内容は、日本振動技術協会誌2021年4月号に掲載される予定である。

※※本技術は、首都高速道路(株)が2020年5月に発行した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る。また、2021年2月5日付けで国土交通省 新技術情報提供システム(NETIS)に登録されている(登録番号: KT-200137-A)。

摩擦ダンパーを用いた橋梁構造物の制震技術に関する講演報告 Report of a Lecture on Seismic Control Technology for Bridge Structures Using Friction Dampers

○波田雅也*

牛島 栄**

Masaya HADA

Sakae USHIJIMA

1. 技術開発の背景

地震が多発する我が国では、大規模地震時における既設橋梁の橋脚損傷制御と復旧性が課題となっている。兵庫県南部地震以降、地震による落橋や倒壊を防止し、緊急輸送路としての機能を果たすため、主たる塑性化を橋脚柱基部とする支承交換や橋脚巻き立て補強等の耐震補強が施されてきた。しかし、高架橋が延長の 75% を占める首都高速道路では、地表面以下に埋設されている橋脚柱基部が塑性化すると、その損傷程度の把握や補修が困難となり、高速道路ネットワークの復旧に時間を要することが懸念される。また、橋脚が河川堤防や鉄道構造物と一体となっている場合は、それらの損傷を避けるために、橋脚損傷を極力小さく制御することが望ましい。

橋脚損傷を制御する手段として、免震・制震装置の設置が考えられる。しかし、これまでの免制震装置では、固定支承部を有する橋脚には適合しないことが多い。そのため、橋軸方向に固定・可動、橋軸直角方向に固定の支承条件とする箇所が多い首都高速道路の高架橋では、免制震装置による橋脚損傷制御が普及しづらかった。

そこで、摩擦型ダンパー¹⁾²⁾の剛塑性型の履歴特性を活用することで、固定支承を有する橋脚の地震時損傷制御を可能とする新たな橋梁制震化工法を、首都高速道路(株)と青木あすなろ建設(株)との共同研究によって開発した[※]。

本報告では、開発した工法の概要、開発に際して実施した構造実験、ならびに実際の首都高速道路(高速 11 号台場線)の耐震補強工事に適用した事例について紹介する^{※※}。

2. 技術の概要

2.1 摩擦ダンパー (DRF-DP) の特徴

本技術は、ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRF-DP : Dice & Rod Type Friction Damper)を、図 1 のように橋梁構造物の上下部接続部に適用させた国内初の技術であり、固定支承を有する橋脚の地震による損傷制御を可能とする新たな制震技術である。

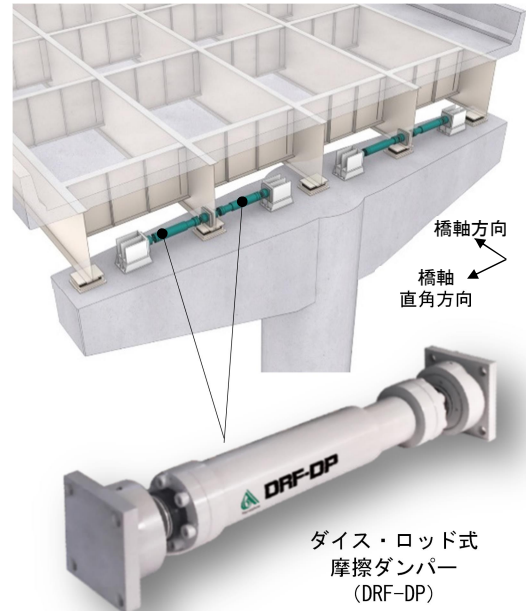


図 1 摩擦ダンパーを用いた橋梁制震化工法

DRF-DP は、図 2 に示すようにダイス(金属環)の内径より少し太いロッド(金属芯棒)をダイスにはめ込むことで、ロッドの外周に締付け力が生じる仕組みを利用した制震ダンパーである。ダイスが内筒側、ロッドが外筒側に固定されており、ロッドに軸力が作用するとダイスとロッドの接触面に摩擦力が発生する。

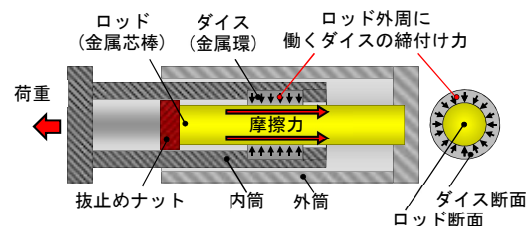


図 2 DRF-DP の機構

DRF-DP は、最大静止摩擦力に達するまでは摺動せず、固定部材(サイドブロック)として機能する。最大静止摩擦力に達すると一定の摩擦力を保持しながらダイスがロッ

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室 **常務執行役員 技術研究所長

※本技術は、首都高速道路(株)が 2020 年 5 月に発行した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る。また、2021 年 2 月 5 日付けで国土交通省 新技術情報提供システム (NETIS) に登録されている (登録番号: KT-200137-A)。※※本報告は、2020 年 12 月 10 日に開催された日本振動技術協会 講演会(テーマ: 建築・土木用制振ダンパの応用発展)における講演内容を再編集したものである。本報告の内容は、日本振動技術協会誌 2021 年 4 月号に掲載される予定である。

ド上を摺動し、完全剛塑性に近い履歴特性を有する減衰部材として機能する。なお、最大振幅に達すると、ロッド先端に設けた抜止めナットがダイスに接触(衝突)し、固定状態となる。図3にDRF-DPの荷重—変位関係を示す。

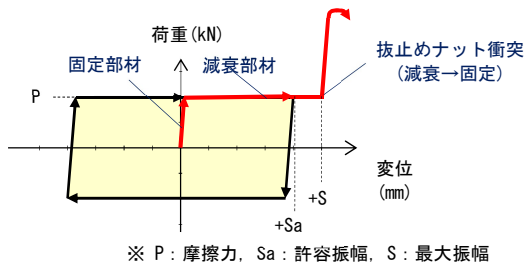


図3 DRF-DPの荷重—変位関係

2.2 本技術による補強効果

本技術による補強効果の概念図を図4に示す。DRF-DPの完全剛塑性の履歴特性を活かし、レベル1地震動に対してはDRF-DPが固定支承を形成するサイドブロックの役割を果たし、レベル2地震動に対しては固定を開放して上部構造の慣性力を頭打ちにするとともに摩擦減衰による制震効果を発揮する。本技術の採用により、固定支承で上部構造を支持する橋脚に対し、レベル2地震動による慣性力をコントロールでき、橋脚の損傷を制御することが可能となる。

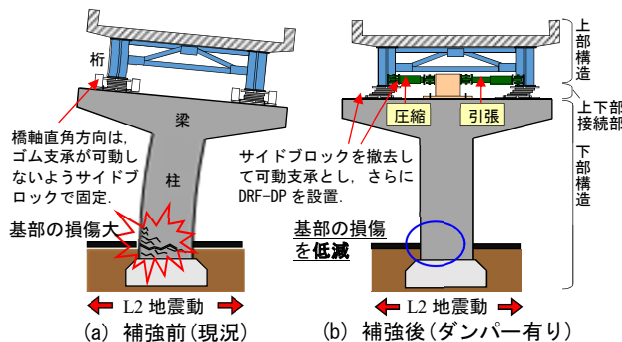


図4 補強効果の概念図(橋軸直角方向の場合)

2.3 DRF-DPの優秀性

既往の制震装置に対する優秀性を以下に示す。

- (1) 粘性減衰機構等の速度比例型の制震ダンパーは、緩速移動に対して剛性を有さず可動するため、レベル1地震動に対して固定支承条件で設計される方向(特に橋軸直角方向)には用いることができない。一方、DRF-DPは、レベル1地震動に対する固定機能とレベル2地震動に対する減衰機能を両立するため、橋軸直角方向等の固定支承部の制震装置として適用できる。
- (2) 一般の固定支承部に用いられる鋼製サイドブロックは、

塑性変形能力が乏しく減衰性能を有さず、また各個撃破による破断・落下被害が懸念される。一方、DRF-DPは、完全剛塑性型の履歴特性で摩擦型減衰を有し、サイドブロックの破断・落下被害を回避できる。

- (3) 橋軸直角方向に適用できる鋼材ダンパーは、大きな変位に対応できず十分な制震効果が得られない場合があり、また塑性ひずみに応じて交換の必要がある。一方、DRF-DPは、 $\pm 200\text{mm}$ といった大変位まで対応でき、また複数回のレベル2地震動に対しても交換を要しない繰返し耐久性を有する。

2.4 適用する橋梁の範囲

本技術の橋梁への適用範囲を以下に示す。

- (1) 上部構造を支承で支持する橋梁構造物(桁橋)に適用し、吊り橋やアーチ橋は適用外とする。
- (2) レベル1地震動に対して固定条件で設計する支承部に適用する。可動支承部において桁温度伸縮による緩速荷重に対してDRF-DPが摺動するような設置は適用外とする。

2.5 DRF-DPの性能を保証する範囲

DRF-DPの性能を保証する範囲を以下に示す。

- (1) ダンパー摩擦力: $50 \sim 1,200\text{kN}$
(製作実績のある範囲内)
- (2) ダンパー最大振幅: $\pm 400\text{mm}$ 以下
(製作実績のある範囲内)
- (3) ダンパー最大速度: $1,650\text{mm/sec}$ 以下
(実験で確認した範囲内)

3. 開発課題と構造実験

本技術は、都市内高速道路管理者として橋梁構造物の建設・管理および様々な課題に精通する首都高速道路(株)と、建築分野にて摩擦ダンパーの独自技術²⁾とノウハウをもつ青木あすなろ建設(株)との約6年にわたる共同研究により実用化に至った。DRF-DPの開発に際しては、「大型化に伴う摩擦抵抗力の安定」と「高速载荷や繰返し载荷、および2方向加振に対する性能確保」に苦心した。本技術では、スペースの問題から設置本数が限定され、従来のように建築用プレースとして使用する場合に比べて摩擦抵抗力が約2倍($600\text{kN} \Rightarrow 1,200\text{kN}$)、最大振幅が約8倍($\pm 50\text{mm} \Rightarrow \pm 400\text{mm}$)に大型化したDRF-DPの製品ラインナップが要求された。大型化するとこれまでのノウハウの流用では安定した摩擦抵抗力が得られないことがわかり、実験的および解析的な試行錯誤の結果、安定した摩擦抵抗力を得るための諸条件(材質、寸法、表面加工等の仕様)の最適解を構築することに成功した。また、本技術では、DRF-DPがレベル2地

震動時に 1,000mm/sec を超える高速度(建築用で性能が確認された速度の 10 倍以上)の撓動に耐えうること、地震後の残留変位を原点位置に戻して繰り返し継続使用できること、さらには橋軸方向と橋軸直角方向の 2 方向地震入力に対して正常に挙動することの検証が要求された。これらについて、実機による高速載荷実験³⁾⁴⁾(写真 1、図 5)や大規模振動台実験⁵⁾(写真 2、図 6)により一つ一つ課題をクリアして実用化に至った。なお、各々の実験の詳細については、参考文献を参照されたい。

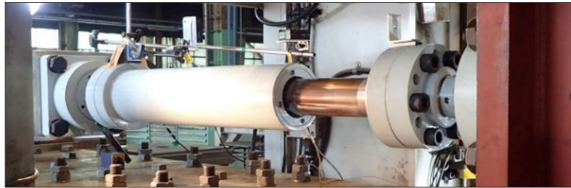


写真 1 高速載荷実験の状況 (600kN-250mm タイプ)

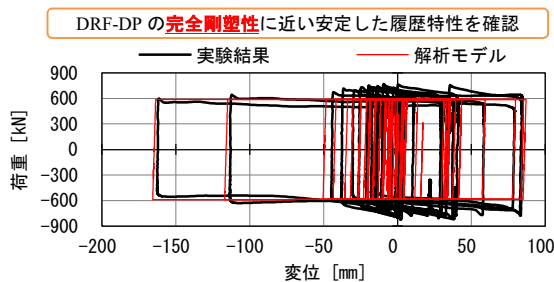


図 5 高速載荷実験の結果の一例
(レベル 2 地震応答、最大速度 1,650mm/sec)

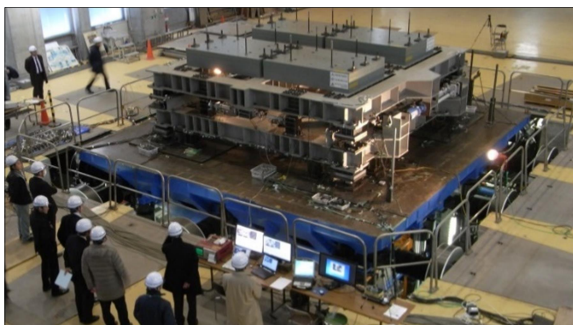


写真 2 大規模振動台実験の状況

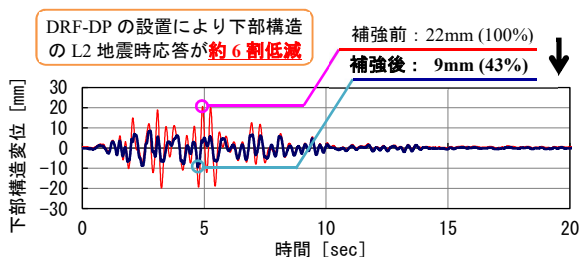


図 6 大規模振動台実験の結果の一例
(レベル 2 地震動 II-II-II 入力時)

4. 橋梁耐震補強工事への適用事例

本章では、実際の首都高速道路の橋梁耐震補強工事に DRF-DP を適用した事例を紹介する。

4.1 工事概要

工事概要を表 1 に、補強前後の全景を写真 3 に示す。本工事は、首都高速芝浦 JCT における台場線と羽田線の接続区間(台 6～台 44)におけるロッキングピア橋脚の改良工事である。主な工事内容は、支承取替工、落橋防止装置工、制震装置工、ロッキングピア補強工等である。対象橋脚は、両端 2 本のロッキングピアを含む 4 本柱で支持され、その上部に T 型橋脚を配した構成となっており、レベル 2 地震動に対する T 型橋脚の損傷を低減する目的で、橋軸直角方向に対して DRF-DP を用いた制震技術が適用された。

表 1 工事概要

発注者	首都高速道路株式会社 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-200mm タイプ × 2 基、1000kN-150mm タイプ × 4 基



写真 3 DRF-DP 設置前後の外観

4.2 直接的な補強効果

本技術による直接的な補強効果として、図 7 に示す橋脚(台-37(P14)、台-41(P15))の基部におけるレベル 2 地震時の応答曲率を、耐震補強前後で比較する。その結果、表 2 に示すとおり、本技術を適用することでレベル 2 地震時における橋脚柱基部の応答曲率が大幅に低減し、許容曲率(Φ_a)以下となった(設置前：100%⇒設置後：41% (P14)、37% (P15))。

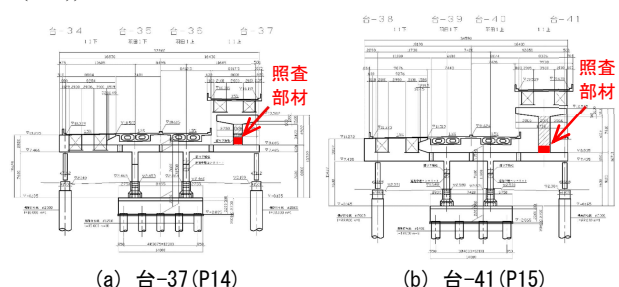


図 7 DRF-DP を設置した橋脚の構造図

表2 DRF-DP 設置による補強効果（応答曲率の比較）

橋梁	レベル2地震時の応答曲率 (=橋脚の損傷程度)		レベル2地震時の 応答曲率の低減率 (=補強後/補強前)
	既設橋梁(補強前)	本技術(補強後)	
台-37 (P14)	1.70 ϕ_y	0.70 ϕ_y	<u>41%</u>
台-41 (P15)	7.06 ϕ_y (1.68 ϕ_a)	2.59 ϕ_y (0.73 ϕ_a)	<u>37%</u>

 ϕ_y : 降伏曲率, ϕ_a : 許容曲率

このように、本技術の適用により、常時・レベル1地震動に対しては、橋軸直角方向の固定条件を変更せず、伸縮装置をそのまま使用可能とし、レベル2地震動に対しては、柱基部の応答を低減し、許容値以下とすることで安全性を確保することが可能となった。

4.3 間接的な補強効果

本技術の間接効果として、以下の効果が挙げられる。

- (1) 常時・レベル1地震動に対して固定条件のため伸縮装置の交換が不要となり、交換費用が削減された。
- (2) 塑性化が支承部に特定され、橋脚の損傷が限定的になったことで、地震後に速やかな復旧が可能となった。
- (3) 補強工事において、交通規制が不要となったことから、規制に伴い発生する渋滞を回避することで時間便益コストが削減された。
- (4) DRF-DP が複数回のレベル2地震動の作用に対して安定した機能を発揮するため、地震後に制震装置の交換が不要となった。

4.4 製品検査と施工状況

DRF-DP の製品検査状況を写真4に、施工状況を写真5に示す。本工事で適用した DRF-DP の数量は、摩擦力：650kN-最大振幅：±200mm タイプが2基、摩擦力：1,000kN-最大振幅：±150mm タイプが4基の計6基であり、補強設計の照査から DRF-DP の製作・施工および製品検査までの一連の工程を全て無事成功裡に終えた。

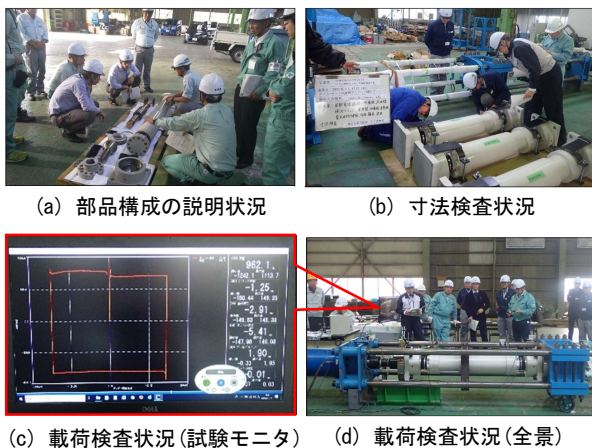
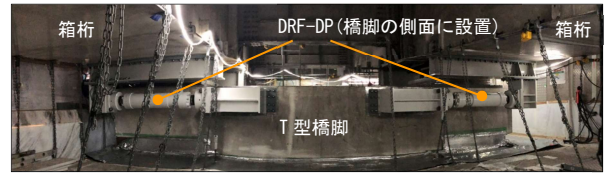


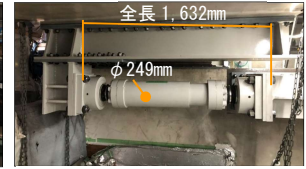
写真4 製品検査状況（発注者の立会検査時）



(a) 設置完了状況（足場内の全景）



(b) 設置作業状況



(c) 設置完了状況（詳細）

写真5 施工状況（1000kN-150mm タイプ）

5. まとめ

道路橋示方書・同解説(平成29年11月)において、「部材等の限界状態2となる部材を選定するにあたっては、少なくとも塑性化する位置及び範囲が、調査及び修復が容易にできることを標準とする」とされた。本工法を用いることで、固定支承を有する橋脚においても、地震後に速やかな調査及び修復が可能な箇所として上下部接続部を限界状態2となる部材とすることができ、橋脚基部の損傷を制御する補強設計が可能となる。また、橋軸方向に対し積層ゴム支承を用いた支承条件を弾性支持とした橋梁においても橋軸直角方向の支承条件は固定とすることが一般的であり、本技術を用いることで損傷を制御できる橋脚は、全国に多数存在する。

本技術は、来るべき大規模地震後における社会インフラ（橋梁）の復旧性を確保し、国民の安全と生活を守るという観点で極めて有意義であり、今後さらなる適用拡大が期待される。

【参考文献】

- 1) 大西博之, 北嶋圭二, 中西三和, 安達 洋: 既存RC造建物の制震補強用摩擦ダンパーに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, 385-390, 1999
- 2) 上田英明, 北嶋圭二: 制震ブレースを用いた耐震補強工法, 青木あすなろ建設 技術研究所報, 第1号, 1-18, 2016
- 3) 波田雅也, 蔵治賢太郎, 右高裕二, 牛島 栄: 橋梁の耐震補強に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの開発, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.2, 95-110, 2019
- 4) 波田雅也, 山崎 彬, 藤本和久, 牛島 栄, 松原拓朗, 山本一貴, 引地宏陽, 磯部龍太郎, 太田信之介: 1000kN 級ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの高速載荷実験, 土木学会第75回年次学術講演会, 1-185, 2020
- 5) 波田雅也, 和田 新, 右高裕二, 牛島 栄: ダイス・ロッド式摩擦ダンパーを用いた橋梁模型の振動台実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, 859-864, 2017