

第23回 国土技術開発賞 入賞

摩擦ダンパーを用いた橋梁の 損傷制御耐震補強工法

ダイス・ロッド式摩擦ダンパー（DRF-DP）の開発

〔受賞者〕 首都高速道路株式会社／青木あすなろ建設株式会社

〔本稿執筆者〕 首都高速道路株式会社

青木あすなろ建設株式会社

くらじ けんたろう

蔵治 賢太郎

うしじま さかえ はだ まさや

牛島 栄、波田 雅也

以下に、第23回 国土技術開発賞で入賞した「摩擦ダンパーを用いた橋梁の損傷制御耐震補強工法」を紹介します。

1. はじめに

地震が多発する我が国では、大規模地震時に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、従来の免制震装置は、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難かった。

そこで筆者らは、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開発した。

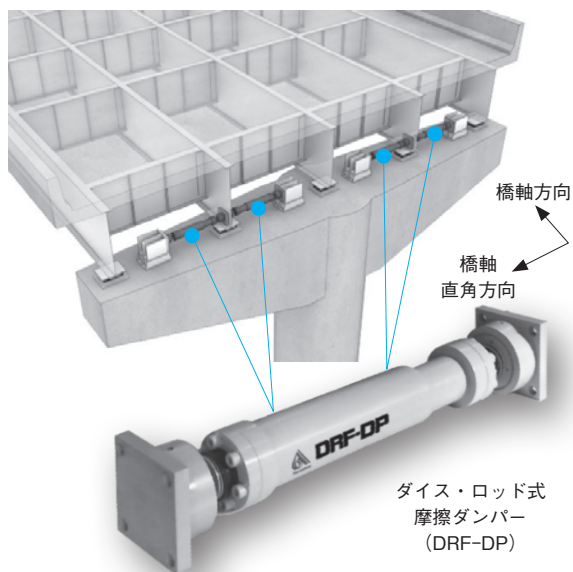
本稿では、開発した工法の概要、開発に際して実施した構造実験、ならびに実際の橋梁耐震補強工事への適用事例について紹介する。

2. 技術の概要

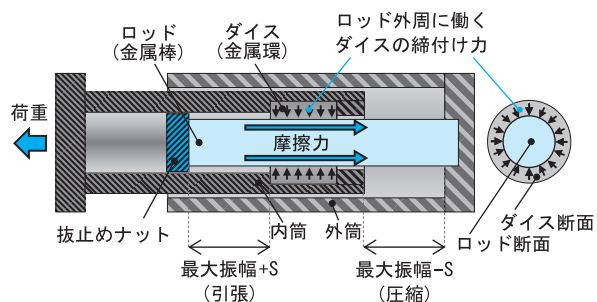
本技術は、開発した制震装置ダイス・ロッド式摩擦ダンパー（以下、「DRF-DP」という）を、図－1のように橋梁構造物の支承部に適用させた制震技術である。本技術により、固定支承を有する橋脚の地震時の損傷制御が可能となる。以下に本工法の概要を示す。

(1) DRF-DP の特徴

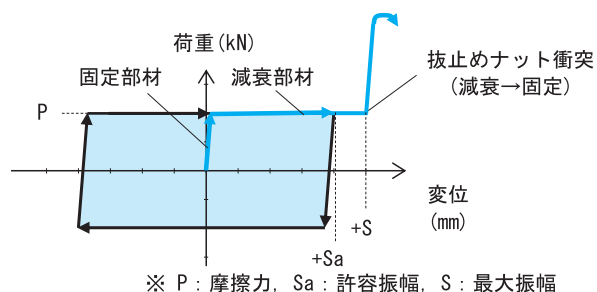
DRF-DP は、図－2に示すようにダイス（金属環）の内径より少し太いロッド（金属棒）をダイスにはめ込むことで、ロッドの外周に締付け力が生じる仕組みを利用した制震ダンパーである。



図－１ 摩擦ダンパーを用いた橋梁制震化工法



図－２ DRF-DP の機構



図－３ DRF-DP の荷重－変位関係

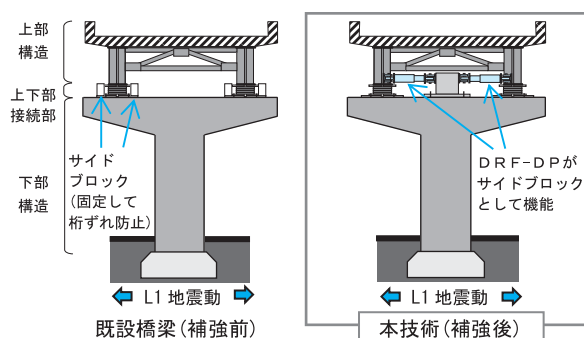
ダイスが内筒側，ロッドが外筒側に固定されており，ロッドに軸力が作用するとダイスとロッドの接触面に摩擦力が発生する。

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，

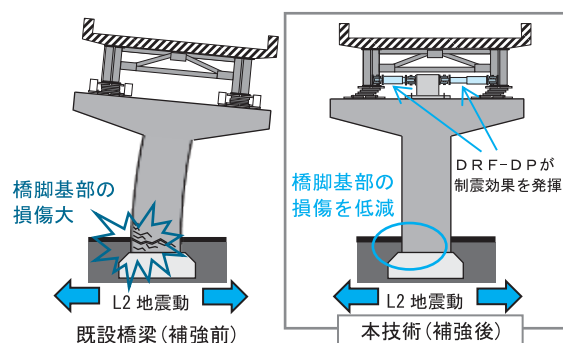
固定状態となる。図－３に DRF-DP の荷重－変位関係を示す。

(2) 本技術による補強効果

本技術による補強効果の概念を図－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。



(a) レベル１地震動時（中小地震時）



(b) レベル２地震動時（大地震時）

図－４ 補強効果の概念図（橋軸直角方向の場合）

(3) DRF-DP の優秀性

既往の制震装置に対する DRF-DP の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性能を有し、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、 ± 200 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り返し耐久性を有する。

(4) 適用する橋梁の範囲

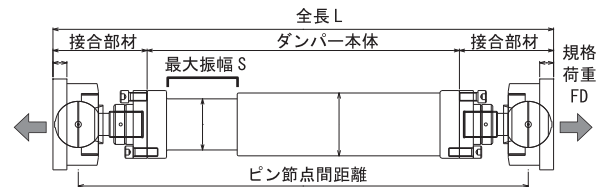
本技術の橋梁への適用範囲を以下に示す。

- ① 上部構造を支承で支持する橋梁構造物（桁橋）に適用する。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。

(5) DRF-DP の性能を保証する範囲

DRF-DP の外観を図－5 に、製品ラインナップを表－1 に示す。DRF-DP は、表記以外でも荷重 50 kN 刻み、最大振幅 50 mm 刻みで中間サイズも製作可能である。なお、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 ～ 1,200 kN
（製作実績のある範囲内）
- ② ダンパー最大振幅： ± 400 mm 以下
（製作実績のある範囲内）
- ③ ダンパー最大速度：1,650 mm/sec 以下
（実験で確認した範囲内）



図－5 DRF-DP 外観図

表－1 製品ラインナップ

最大 振幅 S (mm)	寸法と全重量	摩擦力の規格荷重 FD (kN)					
		200	400	600	800	1,000	1,200
± 100	全長 L (mm)	929	1,049	1,184	1,322	1,402	1,482
	ピン間 (mm)	837	933	1,044	1,158	1,222	1,286
	全重量 (kgf)	83	147	236	343	465	591
± 200	全長 L (mm)	1,199	1,329	1,482	1,587	1,702	1,782
	ピン間 (mm)	1,107	1,213	1,342	1,423	1,522	1,586
	全重量 (kgf)	125	204	304	425	519	652
± 300	全長 L (mm)	1,564	1,627	1,757	1,867	1,975	2,072
	ピン間 (mm)	1,392	1,511	1,617	1,703	1,795	1,876
	全重量 (kgf)	190	276	396	516	610	768

3. 開発課題と構造実験

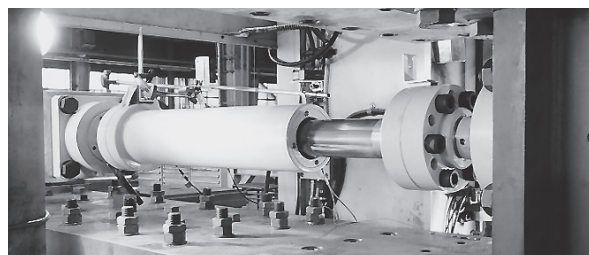
DRF-DP の開発に際しては、「大型化に伴う摩擦抵抗力の安定」と「高速載荷や繰り返し載荷、および 2 方向加振に対する性能確保」に苦心した。

本技術では、スペースの問題から設置本数が限定され、エネルギー吸収を DRF-DP に集約させる等の理由から、従来のように建築用ブ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 kN $\Rightarrow$ 1,200 kN）、最大振幅が約 8 倍（ ± 50 mm $\Rightarrow$ ± 400 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分かり、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。

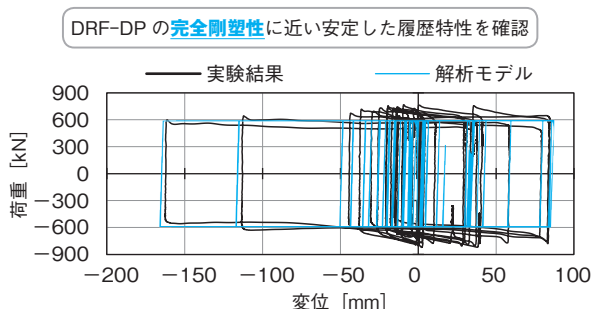
また、本技術では、DRF-DP がレベル 2 地震動時に 1,000 mm/sec を超える高速度（建築用で性能が確認された速度の 10 倍以上）の摺動に耐えうること、地震後の残留変位を原点位置に戻して繰り返し継続使用できること、さらには橋軸方向と橋軸直角方向の 2 方向地震入力に対して正常

に挙動することの検証が要求された。

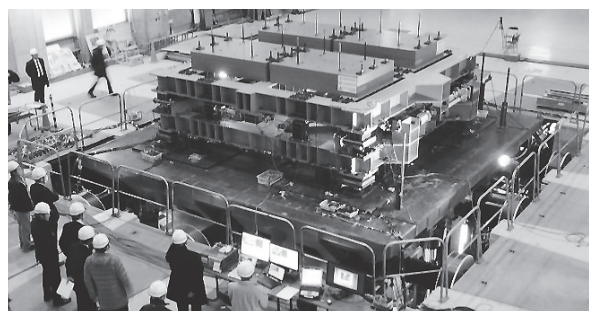
これらについて、実機による高速載荷実験^{3),4)} (写真－1, 図－6) や大規模振動台実験⁵⁾ (写真－2, 図－7) により一つ一つ課題をクリアして実用化に至った。なお、各々の構造実験の詳細については、参考文献を参照されたい。



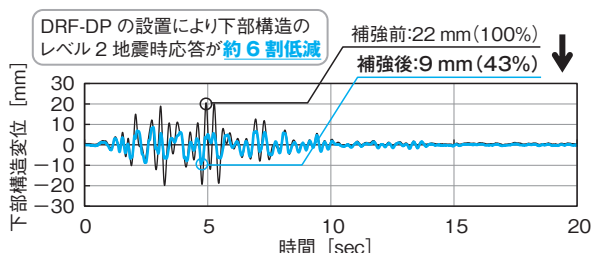
写真－1 高速載荷実験の状況
(600 kN-250 mm タイプ)



図－6 高速載荷実験の結果の一例
(レベル2地震応答波, 最大速度 1,650 mm/sec)



写真－2 大規模振動台実験の状況



図－7 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

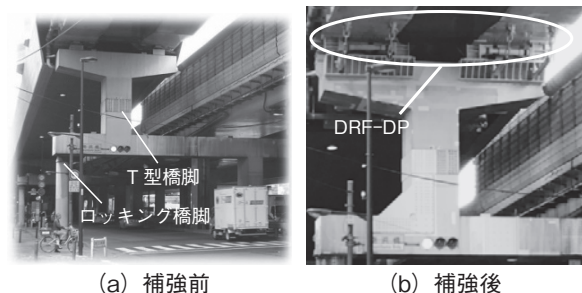
本章では、実際の首都高速道路の橋梁耐震補強工事に DRF-DP を適用した事例を紹介する。

(1) 工事概要

工事概要を表－2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－2 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	650 kN-200 mm × 2基, 1000 kN-150 mm × 4基



写真－3 DRF-DP 設置前後の外観
(650 kN-200 mm タイプ)

(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－8, 9に示す橋脚（台-37 (P14), 台-41 (P15)）の基

強前後で比較した。その結果、表－3 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））。

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。

表－3 耐震補強前後の応答曲率の比較

橋梁	レベル2地震時の応答曲率（＝橋脚の損傷程度）		
橋脚名	既設橋梁（補強前）	本技術（補強後）	補強後 / 補強前
台-37（P14）	1.70 ϕ_y	0.70 ϕ_y	41%（59% 減）
台-41（P15）	7.06 ϕ_y （1.68 ϕ_a ）	2.59 ϕ_y （0.73 ϕ_a ）	37%（63% 減）

ϕ_y ：降伏曲率， ϕ_a ：許容曲率

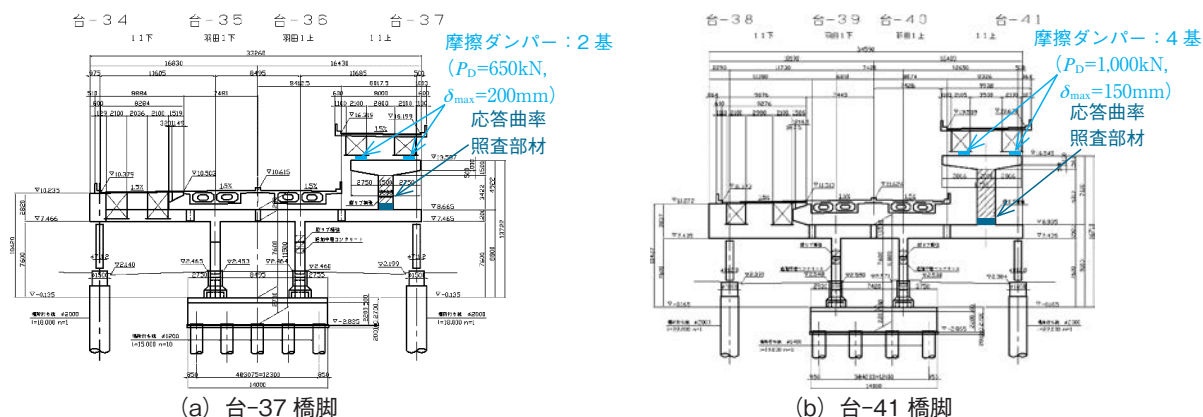
(3) 間接的な補強効果

本技術の間接的効果として、以下の効果が挙げられる。

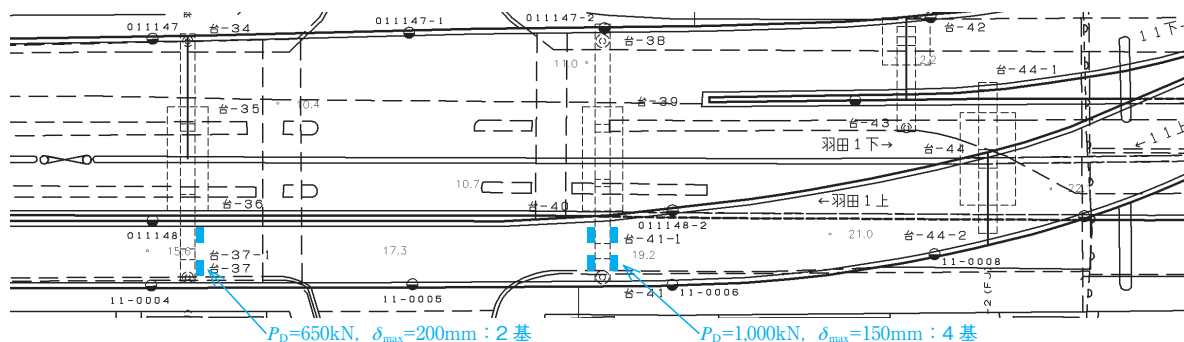
- ① 常時・レベル1地震動に対して固定条件のため伸縮装置の交換が不要となり、交換費用が削減された。
- ② 塑性化が支承部に特定され、橋脚の損傷が限定的になったことで、地震後に速やかな復旧が可能となった。
- ③ 補強工事において、交通規制が不要となったことから、規制に伴い発生する渋滞を回避することで時間便益コストが削減された。
- ④ DRF-DP が複数回のレベル2地震動の作用に対して安定した機能を発揮するため、地震後に制震装置の交換が不要となった。

(4) 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：650 kN- 最大振幅：±

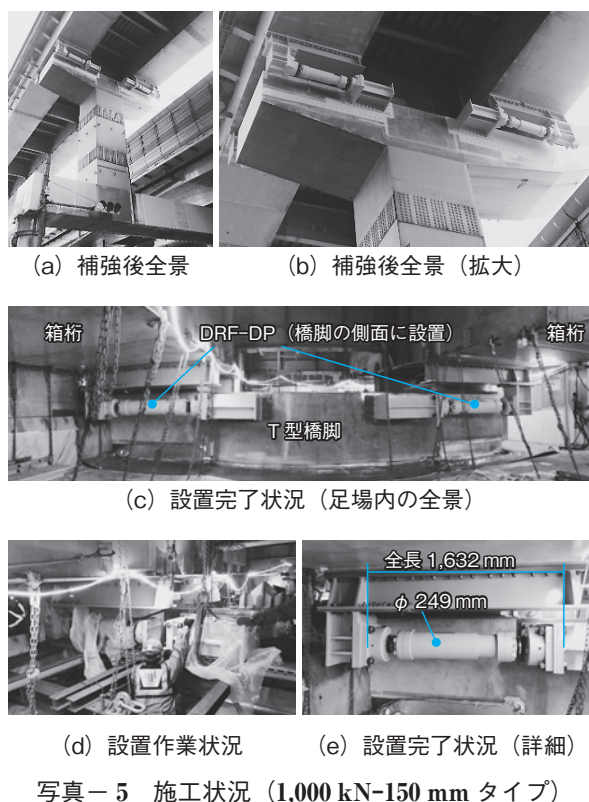
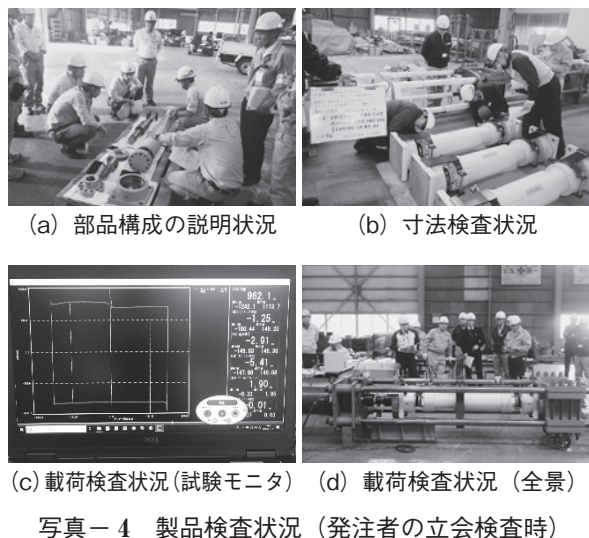


図－8 DRF-DP を設置した橋脚の構造図



図－9 DRF-DP 配置個所の平面図

200 mm タイプが2基、摩擦力：1,000 kN- 最大振幅：±150 mm 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。



5. おわりに

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および範囲が、調査およ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およ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。

現在、実装第 2 弾として、首都高速 1 号上野線の耐震補強工事への採用が確定し、準備工事が進められている。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 (1999), pp.385-390
- 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 (2016), pp.1-18
- 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 (2019), pp.95-110
- 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 (2020), I-185
- 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 (2017), pp.859-864