

摩擦ダンパーを用いた既設橋脚の 地震時損傷制御技術の適用

波田 雅也¹・山崎 彬²・牛島 栄³・
蔵治 賢太郎⁴・松原 拓朗⁵・右高 裕二⁶・山本 一貴⁷

¹正会員 青木あすなろ建設(株) 技術研究所 構造研究部 (〒300-2622 茨城県つくば市要36-1)
E-mail: masaya.hada@aaconst.co.jp

²正会員 青木あすなろ建設(株) 技術研究所 構造研究部 (〒300-2622 茨城県つくば市要36-1)
E-mail: akira.yamasaki@aaconst.co.jp

³フェロー 青木あすなろ建設(株) 技術研究所 (〒300-2622 茨城県つくば市要36-1)
E-mail: sakae.ushijima@aaconst.co.jp

⁴正会員 首都高速道路(株) 保全交通部 保全技術課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1日土地ビル)
E-mail: k.kuraji66@shutoko.jp

⁵正会員 首都高速道路(株) 東京東局 土木保全設計課 (〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町43-5)
E-mail: t.matsubara813@shutoko.jp

⁶正会員 (一財)首都高速道路技術センター構造技術研究所 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目10-11)
E-mail: y.migitaka@tecmed.or.jp

⁷正会員 首都高速道路(株) 技術部 構造技術室 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1-4-1日土地ビル)
E-mail: k.yamamoto576@shutoko.jp

筆者らは、完全剛塑性型の履歴特性を有する“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”を橋梁構造物の上下部接続部に設置することで、レベル1地震動に対して固定支承の条件を満たし、レベル2地震動により生じる慣性力を一定値以下とし、橋脚の損傷を制御する橋梁耐震技術を提案している。本論文では、その技術概要について述べた後、本技術を実際の橋梁耐震補強工事に適用した事例について示す。当該工事では、レベル2地震動時における橋脚基部の応答曲率が補強前に比べて約6割低減する等の補強効果が得られた。また、当該工事で適用した1,000kN級摩擦ダンパーに対して実施した高速載荷実験の結果、摩擦ダンパーが設計時に想定した通りの履歴特性とエネルギー吸収性能を発揮することが確認された。

Key Words : friction damper, die-and-rod, excitation experiment, road bridge, seismic retrofit

1. はじめに

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被災後の早期復旧を確保するための橋脚損傷制御技術が求められている¹⁾²⁾。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、

地中に埋設されている柱基部が塑性化すると、損傷状況の把握が困難であるだけでなく、その復旧は容易ではない。例えば路線延長の75%を高架橋が占める首都高速道路では、大規模地震が生じた際に約9,000基の橋脚が地震を受けることから、複数の橋脚基部に損傷が生じた場合は、高速道路ネットワークの復旧に時間を要する。

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³⁾⁴⁾。しかし、既設橋梁は桁遊間量が小

さく桁衝突が生じ、免震効果が発揮されない。また、粘性減衰機構等の制震装置は、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⁹⁾に対して固定支承条件である既設橋脚に適合しないことが多い。首都高速道路の既設高架橋は、その多くが橋軸方向に固定-可動、橋軸直角方向に固定の支承条件であることから、伸縮装置の損傷を防止するためレベル1地震動に対する支承条件を固定(サイドブロック)とし、かつ、レベル2地震動⁹⁾による固定支承を有する橋脚の損傷を直接制御できる制震装置が求められた。

そこで筆者らは、図-1のように完全剛塑性型の履歴特性を有するダイス・ロッド式摩擦ダンパー(以下、摩擦ダンパー)を橋梁構造物の上下部接続部に設置することで、レベル1地震動に対して固定支承の条件を満たし、レベル2地震動に対して減衰効果を発揮して橋脚の地震時損傷制御を図る橋梁耐震技術を提案している⁹⁾。

本論文では、本技術の概要について述べた後、首都高速11号台場線の橋梁耐震補強工事へ適用された事例について示す。また、当該工事で採用された荷重1,000kN級の摩擦ダンパーについて、レベル2地震動応答時の履歴特性とエネルギー吸収性能を確認するために実施した高速載荷実験の概要について示す。

2. 技術の概要

(1) 摩擦ダンパーの概要

摩擦ダンパーの機構を図-2に、荷重-変位関係の概念図を図-3に示す。摩擦ダンパーは、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、ロッドの外周に締め付け力が生じる仕組みを利用した制震装置である。ダイスとロッドの接触面に摩擦力が発生するシンプルな構造で、最大静止摩擦力に達するまでは撓動(変位)せず、最大静止摩擦力に達すると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制震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⁹⁾。

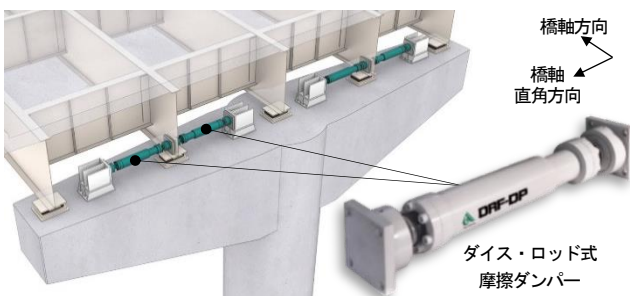


図-1 摩擦ダンパーを用いた橋梁制震化工法

(2) 本技術の適用効果

本技術を橋軸直角方向に用いた場合の概念図を図-4に示す。摩擦ダンパーの完全剛塑性の履歴特性を活かし、レベル1地震動に対してはダンパーにより支承条件を固定とし、レベル2地震動に対してはダンパーが撓動して摩擦減衰による制震効果を発揮するとともに、橋脚に作用する慣性力を一定値以下とする。既往の研究では、RC単柱橋脚を検討対象に時刻歴応答解析や振動台実験が行われ、本技術の適用によりレベル2地震動時の橋脚基部の応答値が半減する等の効果が示されている^{7,8)}。

(3) 開発課題と既往の研究

ダイス・ロッド式の摩擦ダンパーは、もとより既設建築物のブレース補強用として実用化されたものである¹⁰⁾。橋梁に適用する本技術の開発に際しては、「大型化に伴う摩擦抵抗力の安定」と「高速載荷や繰返し載荷、2方向加振に対する性能確認」といった課題があった。本技術では、狭スペースの問題から設置可能なダンパー基数が限定され、さらにエネルギー吸収を摩擦ダンパーに集約させる等の理由から、建築用ブレースとして用いる場合に比べて摩擦力が約2倍(600kN⇒1,200kN)、最

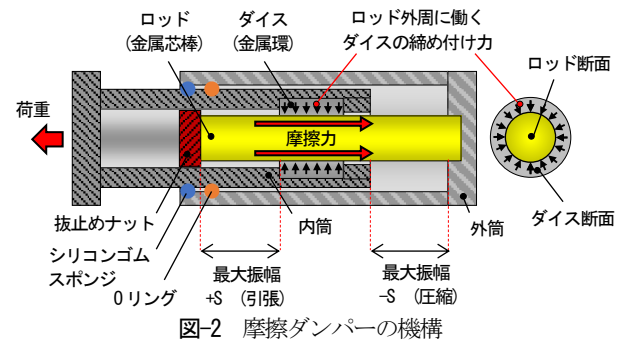


図-2 摩擦ダンパーの機構

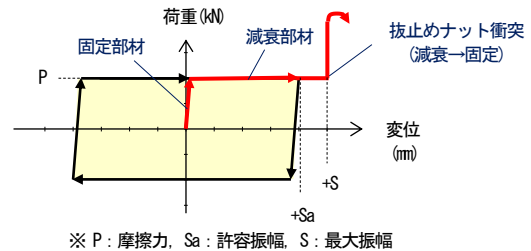


図-3 摩擦ダンパーの荷重-変位関係

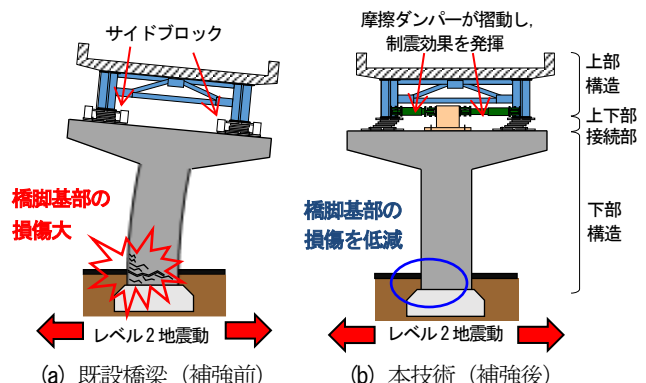


図-4 本技術の適用効果の概念

大振幅が約 8 倍 (±50mm⇒±400mm) に大型化した摩擦ダンパーの性能確認が要求された。大型化するとこれまでのノウハウの流用では摩擦力が安定せず、摩擦面の表面粗さ、潤滑剤の塗布量、ロッド外径とダイス内径の径差を変えて荷重や履歴形状を確認する実験的な試行錯誤によって、安定した摩擦力を得るための諸条件 (材質、寸法等の仕様) を検討した^{7,8,12-14)}。

既往の研究より、最大 100cm/sec (建築ブレース時の約 10 倍) を超える高速載荷時にも摩擦ダンパーが概ね完全剛塑性型の履歴を描くこと、レベル 2 地震応答時の摺動変位量 9~14 回分に対して安定したエネルギー吸収性能を発揮することが示されている⁷⁾。また、振動台実験により、橋軸・橋軸直角方向の 2 方向地震入力に対して、直交方向の入力が悪影響を及ぼすこと無く、1 方向入力と同等の制震効果を発揮することが示されている¹⁵⁾。そのほか、摩擦機構 (ダイス・ロッド) を肉厚の内筒・外筒で覆うとともに、内筒と外筒の間の可動部は、図-2 のように O リングとシリコンゴムスポンジを二重に配置し、水や塵、空気の循環が概ね生じないように適切に防水・防塵処理することで、優れた長期耐久性を有することが、複合サイクル促進試験や暴露試験、水没試験等によって確認されている¹⁶⁻¹⁸⁾。

3. 適用した摩擦ダンパーのレベル 2 地震時特性

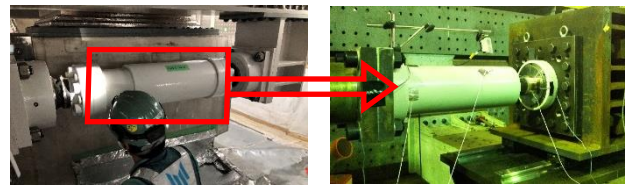
本章では、次章 (4 章) で示す耐震補強工事にて実際に適用した 1,000kN 級摩擦ダンパー (摩擦力の規格値 $P_D: 1,000kN$, 最大振幅 $S: \pm 150mm$) について、レベル 2 地震動応答時の履歴特性とエネルギー吸収性能を確認するために実施した高速載荷実験の結果を示す (写真-1)。

(1) 実験概要

載荷装置は、写真-2 に示す高速サーボ試験機を用いる。実験方法は、摩擦ダンパー本体を軸方向に変位制御で載荷する方法とし、外筒を外した状態で実施する。計測項目は、写真-3 に示す荷重と変位およびダイス表面温度とする。速度は変位を微分して算定し、極性は荷重と変位ともに引張側を正とする。なお、載荷後はダンパーが蓄熱した摩擦熱を空冷し、ダイス表面が常温 (24℃) 以下になってから次の載荷を行う。

(2) 入力波形

入力波の時刻歴波形を図-5 に、諸元を表-1 に示す。入力波は、補強設計における時刻歴応答解析で、レベル 2 地震動入力時に得られた 1,000kN 摩擦ダンパーの応答変位波形 (レベル 2 地震応答波) であり、3 種地盤のタイプ I 地震動が 3 波、タイプ II 地震動が 3 波、計 6 波と



(a) 実現場の設置状況 (b) 高速載荷実験状況
写真-1 実施適用した摩擦ダンパーの高速載荷実験

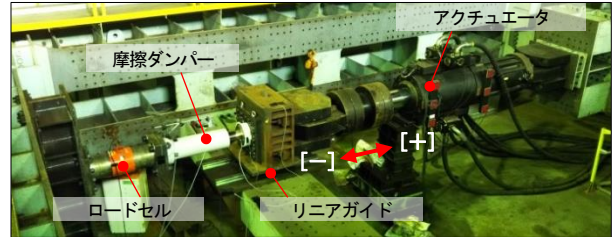
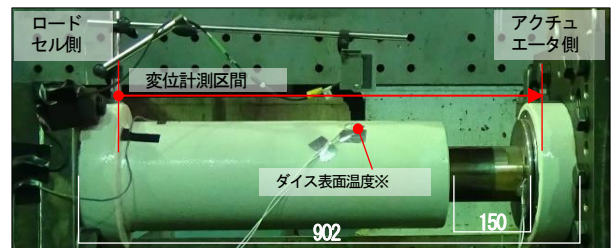


写真-2 実験状況の全景



※内筒に貫通孔をあけ、そこから熱電対を貼付けてダイス表面温度を計測。

写真-3 摩擦ダンパー設置状況

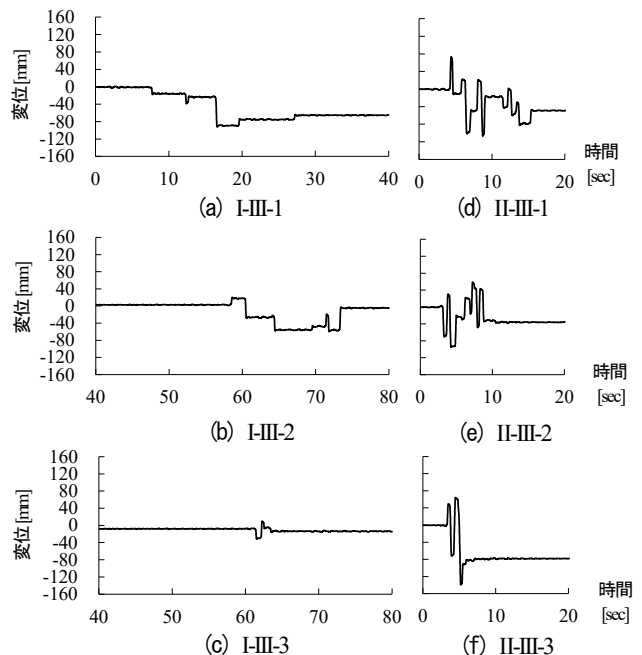


図-5 入力波 (レベル 2 地震応答波) の時刻歴波形

表-1 入力波 (レベル 2 地震応答波) の諸元

試験名	シリーズ	最大変位 δ_{max} [mm]		最大速度 V_{max} [cm/sec]	継続時間 t [sec]	エネルギー吸収量 E [kN・m]
		+	-			
1	I-III-1	1	-92	61	120	142
2	I-III-2	20	-60	53	240	249
3	I-III-3	10	-31	42	240	91
4	II-III-1	73	-106	87	50	865
5	II-III-2	59	-95	100	50	790
6	II-III-3	64	-140	93	50	558

※エネルギー吸収量 E は、摩擦ダンパーの復元力特性を $P_y=1,000kN$, $\delta_y=1.0mm$ のノーマルバイリニアモデルとした補強設計時の解析値。

表-2 実験結果一覧

試験体	試験名	最大荷重		最大速度 V_{max} [cm/sec]	エネルギー吸収量 E [kJ·m]	ダイス表面温度 [°C]		
		+	-			開始	終了	上昇
A	I-III-1	994	-1190	47	151	23	31	8
	I-III-2	1086	-1281	42	283	23	31	8
	I-III-3	1019	-1242	36	101	23	26	3
	II-III-1	1235	-1470	67	983	23	51	29
	II-III-2	1246	-1361	64	902	23	49	26
	II-III-3	1090	-1327	76	686	22	39	18
B	I-III-1	1103	-1341	51	154	23	29	6
	I-III-2	1164	-1341	42	265	23	30	7
	I-III-3	1118	-1293	35	102	23	26	3
	II-III-1	1170	-1296	74	907	19	44	25
	II-III-2	1124	-1357	73	800	23	44	21
	II-III-3	1129	-1341	82	559	24	39	16

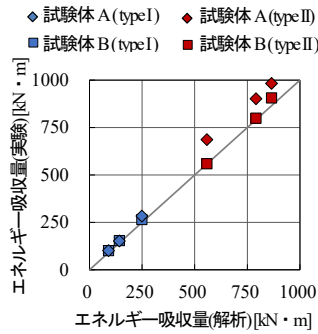


図-7 エネルギー吸収量の実験値と解析値の関係(地震応答)

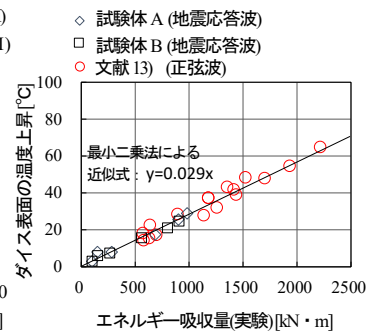


図-8 ダイス表面温度とエネルギー吸収量の関係

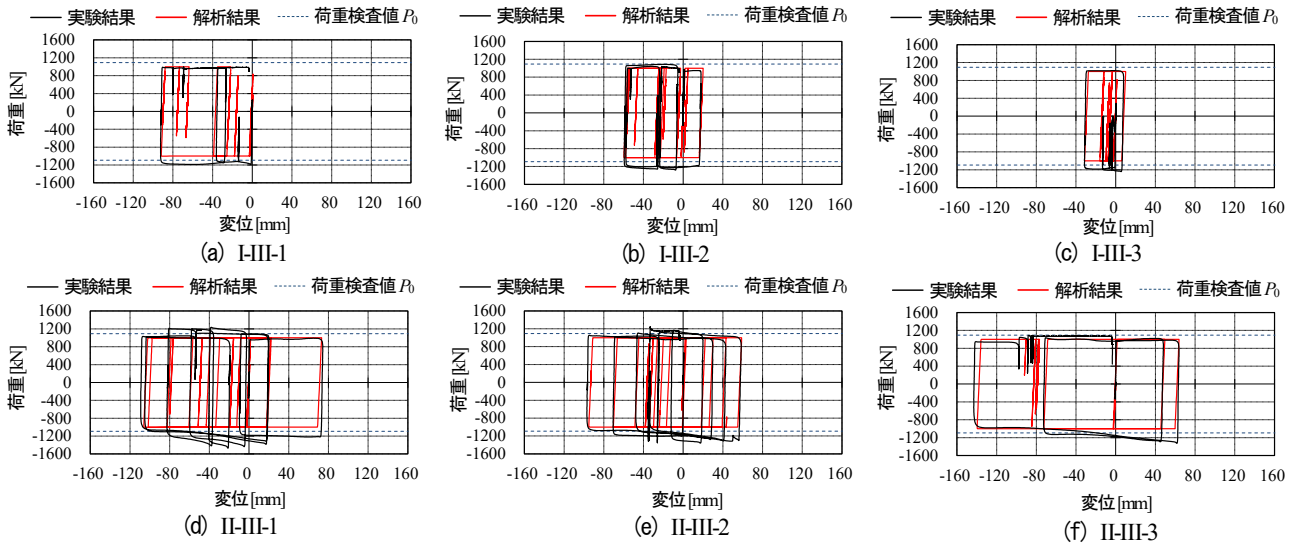


図-6 履歴曲線(試験体 A)

する。なお、試験体数は A, B の計 2 体とする。

(3) 実験結果(履歴特性, エネルギー吸収量)

実験結果一覧を表-2 に、試験体 A の荷重-変位関係(履歴曲線)を図-6 に示す。図-6 より、実験結果の履歴曲線が、解析結果(赤線: $P_y=1,000\text{kN}$, $\delta_y=1.0\text{mm}$ のノーマルバイリニア)と概ね一致し、完全剛塑性型に近い履歴特性を示すことがわかる。最大荷重はいずれも規格値 P_0 の 1.5 倍未満であった。なお、図中の破線は、次章(4 章)で示す摩擦ダンパー製品検査用の静的三角波載荷(0.4cm/sec 一定の低速度で正負交番に変位制御で載荷)から評価した荷重検査値 P_0 (試験体 A: 1,072kN, 試験体 B: 1,126kN)であり、規格値 P_0 より 7~12% 大きい値となっている。また、エネルギー吸収量の実験値と解析値の関係を図-7 に示す。図-7 より、いずれもエネルギー吸収量の実験値が解析値を上回っていることから、1,000kN 摩擦ダンパーが補強設計時に想定した通りのエネルギー吸収性能を発揮していることが確認できる。

(4) 摩擦熱によるダイス表面の温度上昇

摩擦ダンパーは振動エネルギーを摩擦熱に変えて吸収する⁷¹⁾。ダイス表面の温度上昇(載荷終了時の最大温

度と載荷開始時の温度との差分)とエネルギー吸収量の関係を図-8 に示す。図中には、文献 13)で示した同じ 1,000kN 摩擦ダンパーに対する正弦波載荷結果も併せてプロットしている。表-2 と図-8 より、本実験の諸条件における限られた結果ではあるが、レベル 2 地震動時におけるダイス表面の温度上昇は、最大 30°C 程度であった。また、図-8 より、正弦波、地震応答波によらず、エネルギー吸収量が多いほどダイス表面の温度上昇も大きく、概ね正比例の相間関係であることがわかる。

4. 橋梁耐震補強工事への実施適用

本章では、実際の橋梁耐震補強工事に本技術を適用した事例¹⁹⁾について示す。

(1) 工事概要

工事概要を表-3 に、摩擦ダンパー配置個所の平面図を図-9 に、補強前後の全景を写真-4 に示す。本工事は、首都高速道路の芝浦 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地震動に対するロッキングピアの上揚力とT型橋脚の損傷を低減する目的で, 橋軸・橋軸直角方向とも固定支承条件で設計される橋脚の橋軸直角方向の一部に対して本技術による耐震補強工事が実施された.

適用した摩擦ダンパーの組立図を図-10 に示す. 摩擦ダンパーは両端にピン接合部材を配した仕様であり, 台

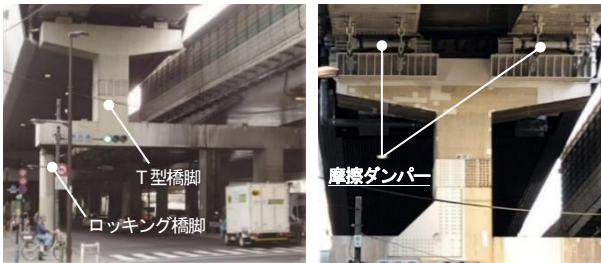
-37 橋脚に摩擦力規格値 P_b : 650kN かつ最大振幅 δ_{max} : $\pm 200\text{mm}$ のタイプを 2 基 (摩擦力の合計: $650\text{kN} \times 2 = 1,300\text{kN}$), 台-41 橋脚に P_b : 1,000kN かつ δ_{max} : $\pm 150\text{mm}$ のタイプを 4 基 (摩擦力の合計: $1,000\text{kN} \times 4 = 4,000\text{kN}$), 計 6 基を適用した. なお, ダンパー摩擦力は, レベル 1 地震動による最大反力 (台-37: 1,273kN, 台-41: 3,971kN) で撓動しない最小の値に設定している.

(2) 既設橋梁の耐震照査

ロッキングピアの耐震補強を実施するにあたり, 橋梁全体での動的解析による耐震性に関する照査を実施した

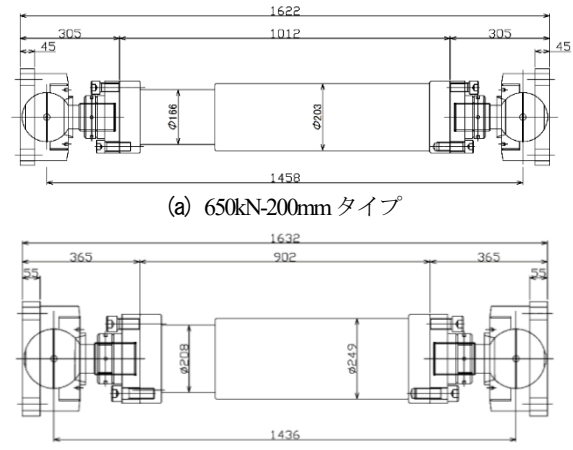
表-3 工事概要

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×2基, 1000kN-150mm×4基



(a) 補強前 (b) 補強後

写真-4 摩擦ダンパー設置前後の外観 (650kN-200mm タイプ)



(a) 650kN-200mm タイプ

(b) 1,000kN-150mm タイプ

図-10 適用した摩擦ダンパーの組立図

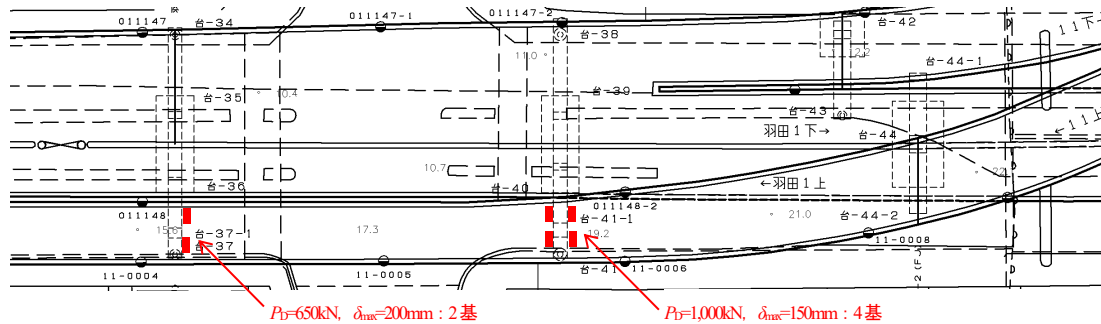


図-9 摩擦ダンパー配置個所の平面図

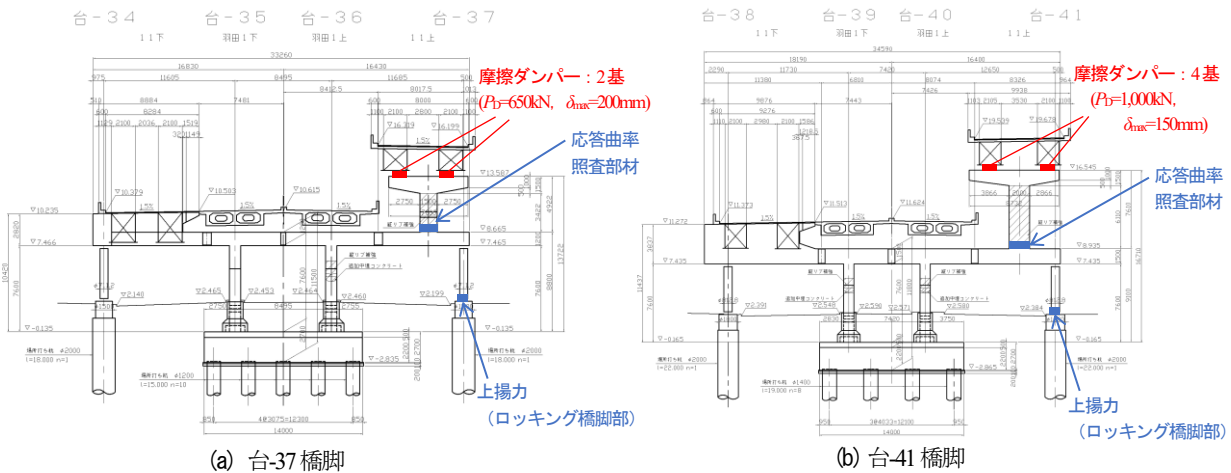


図-11 摩擦ダンパーを設置した橋脚の構造図

ところ、図-11に示す橋脚（台-37，台-41）の横梁上に設置されたT型橋脚の柱基部に許容できない大きな応答が生じていた。また、T型橋脚側の端部に位置するロッキングピアには支承の耐力を上回る大きな上揚力が生じていた。街路上に位置する部材を補強することは、大掛かりな交通規制を要すること等から実質不可である。これらの応答は、T型橋脚が支持する鋼箱桁の慣性力が作用することにより生じていたことから、この慣性力を低減することにより、応答値の低減が期待できる。

一方で、T型橋脚が支持する上部構造の橋軸直角方向の支承条件は固定であり、温度変化やレベル1地震動により支点位置が移動することは許容できない。特に台-37橋脚は、伸縮装置が設置された上部構造の端部を支持することから、橋軸直角方向に桁が移動すると伸縮装置が損傷する。

そこで、レベル1地震動による慣性力に対して固定条件とし、レベル2地震動による慣性力を低減し、橋脚の応答値をコントロールできる本技術を適用した。

(3) レベル2地震動時の応答低減効果

図-11に示す橋脚（台-37，台-41）について、本技術適用前後のロッキングピアの上揚力を表-4に、T型橋脚基部の応答曲率を表-5に示す。表-4に示す通り、ロッキングピアの上揚力を3割以上（設置前：100%⇒設置後：67%（台-37）、67%（台-41））低減させ、表-5に示す通り、橋脚柱基部の応答曲率を大幅に低減（設置前：100%⇒設置後：41%（台-37）、37%（台-41））させることができ、許容曲率 ϕ_a 以下とすることができた。

(4) 本技術適用の効果

本技術を適用した効果を以下に示す。

- 1) T型橋脚基部の応答を許容曲率 ϕ_a 以下とし、街路上に位置する部材の補強を不要とした。
- 2) T型橋脚基部の応答を台-37では降伏曲率以下とすることでレベル2地震動が作用しても損傷しない橋脚とすることができ、地震後の速やかな復旧が可能となった。
- 3) ロッキングピアに作用する上揚力を補強が可能な程度まで低減した。
- 4) 常時・レベル1地震動に対して固定条件のため、補強による伸縮装置の交換を不要とした。
- 5) 支承の各個撃破³⁶⁾のおそれなくなった。
- 6) 摩擦ダンパーが複数回のレベル2地震動の作用に対して安定した機能を発揮するため、地震後の制震装置の交換が不要となった。

(5) 摩擦ダンパーの品質管理

摩擦ダンパーの製品検査項目と合否判定の方法を表-6に、製品検査状況を写真-5に示す。検査項目は外観検査

表-4 レベル2地震動時のロッキング橋脚部の上揚力

橋脚名	レベル2地震動時のロッキング橋脚部の上揚力		
	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)

表-5 レベル2地震動時のT型橋脚基部の応答曲率

橋脚名	レベル2地震動時の橋脚基部の応答曲率		
	既設橋梁(補強前)	本技術(補強後)	補強後/補強前
台-37	1.70 ϕ_y	0.70 ϕ_y	41%(59%減)
台-41	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

表-6 製品検査項目と合否判定の方法

製品検査項目	確認方法	確認の頻度	合否判定の方法
外観検査	1) 鋼材検査	書類 (ミルシート)	口毎 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 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) ストローク検査	載荷振幅:S-5.0mm 載荷速度:任意	全数 載荷振幅の範囲内で最大振幅Sに到達しないこと
	6) 荷重検査	載荷振幅: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 P_0 と規格値 P_B の差が、規格値の0~+20%に収まること

※S: 最大振幅, P_B : 摩擦力の規格値, P_0 : 荷重検査値



(a) 部品構成の説明状況



(b) 寸法検査状況



(c) 載荷検査状況(試験モニター)



(d) 載荷検査状況(全景)

写真-5 製品検査状況(発注者の立会検査時)

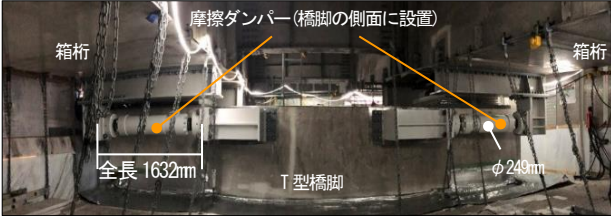
と載荷検査に大別し、本工事に適用した全6基に対して実施している。載荷検査では、速度0.4cm/sec一定の静的三角波載荷によって得られた荷重-変位履歴から切片荷重 γ と平均摩擦荷重 $\bar{\gamma}$ を評価し、規格値 P_B に対して0%以上+20%以内と定めた合格範囲に収まっていることを確認する。合格範囲(0~+20%)は、文献7)で示されている地震応答時の速度や繰返し回数等の各種依存性(レベル2地震時特性: 最大速度90cm/sec超えると荷重が平均10%程度低下)を考慮して定めている。

(6) 施工状況

摩擦ダンパーの施工状況を写真-6に示す。摩擦ダンパーは、上部構造側と下部構造側の各々に設けた鋼製ブ



(a) 補強後全景(台-41) (b) 補強部拡大(台-41)



(c) 1,000kN-150mm タイプ設置完了状況(足場内の全景)



(d) 設置作業状況(650kN) (e) 設置作業状況(1,000kN)

写真-6 施工状況

ラケットに、ゆるみ止め仕様のボルト・ナットを用いて引張接合で取り付ける。接合ボルトの降伏耐力は、ダンパー荷重の製作ばらつきや静止摩擦等による荷重上昇⁷⁾を考慮し、規格値 P_b の1.5倍以上としている。ダンパーの配置は、圧縮側の摩擦荷重が引張側に比べて1割程度大きい特性⁷⁾に配慮し、1橋脚当りの設置数を偶数として、ブラケットを左右対称に配置することで、圧縮側と引張側のダンパーが常に同数となる計画としている。施工上の留意点としては、ダンパー本体の長さ寸法を現場で調節できない(最大静止摩擦荷重に達しないと摺動しない)ことが挙げられる。なお、その対策は幾通りも考えられるが、例えば今回の工事では、写真-6(d)に示すように650kNダンパー本体を両端ブラケットと緊結して一体化した状態で吊り上げ、ブラケットと上・下部躯体とのボルト摩擦接合部で誤差調整する工夫により、施工の省力化を図った。

5. まとめ

以上、本論文では、ダイス・ロッド式摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震技術を、実際の橋梁耐震補強工事に適用した事例について示した。また、当該工事で適用した1,000kN級摩擦ダンパーに対して実施した高速載荷実験の結果について示した。

首都高速道路のような都市内高速道路は、地震発生後に速やかに緊急輸送路としての機能を発揮する必要がある。一方で、その立地条件から高架橋の比率が大きく、1か所でも車両通行に支障をきたす損傷が生じた場合は、

出入口間がすべて通行できなくなるおそれがある。そのようなことを防ぐためには、橋脚に大きな損傷が生じないようにすること、損傷が生じてもただちに補修できるようにすることが極めて重要である。そのため、上下部接続部に設置する制震装置であり、固定支承を有する橋脚の損傷を制御することが可能な“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”を開発し、耐震補強工事に適用した。

首都高速道路では、これらの成果から2020年5月に設計施工要領⁹⁾を改訂し、耐震設計にあたっては、緊急輸送路としての機能確保、第三者被害の防止、早期の復旧性の確保を考慮しなければならないことを規定するとともに、都市内環境では補修が困難となる橋脚基部の損傷を回避するため、レベル2地震動を考慮する設計状況において限界状態²⁾となる部材の位置は、上下部接続部とすることを標準とすることを規定した。また、橋脚の損傷制御が必要となる場合には、上部構造から作用する慣性力の伝達の遮断効果が高い摩擦履歴型の履歴特性を有する摩擦ダンパーを使用することを標準とした。

本技術は、路線全体で相対的に耐震性が劣る橋脚に設置することにより、その損傷を制御するための制震装置として非常に有効であり、固定・可動の支承条件である橋梁に適用できる。首都高速道路においては、大規模地震発生時に都市の復興の支える物流導線として確実に機能するための技術として、今後さらなる適用が期待される。

参考文献

- 1) 川島一彦：兵庫県南部地震から20年—問われる大地震直後の機能維持の重要性—，土木施工，Vol.56，No.9，pp.73-78，2015.9.
- 2) 中央防災会議首都直下地震対策検討ワーキンググループ：首都直下地震の被害想定と対策について(最終報告)，pp.33，2013.
- 3) 土木研究センター：道路橋の免震・制震設計法マニュアル(案)，2011.12.
- 4) 海洋架橋・橋梁調査会：既設橋梁の耐震補強工事事例集，2005.4.
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V，2012.3.
- 6) 首都高速道路株式会社：橋梁構造物設計施工要領[V耐震設計編]，2020.5.
- 7) 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，pp.95-110，2019.5.
- 8) 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，pp.859-864，2017.
- 9) 木村浩之，波田雅也：橋梁用“ダイス・ロッド式摩

- 擦ダンパー”の終局状態に関する実験, 青木あすなる建設技術研究所報, Vol.3, pp.1-6, 2018.3.
- 10) 上田英明, 北嶋圭二: 制震ブレースを用いた耐震補強工法, 青木あすなる建設技術研究所報, Vol.1, pp.1-18, 2016.3.
 - 11) 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, pp.385-390, 1999.
 - 12) 山崎 彬, 波田雅也, 木村浩之, 牛島 栄, 蔵治賢太郎, 松原拓朗, 久保田成是: 1200kN 級の“大容量ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”の開発, 土木学会第 73 回年次学術講演会, I-316, pp.631-632, 2018.
 - 13) 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, I-185, 2020.
 - 14) 波田雅也, 山崎 彬, 牛島 栄, 松原拓朗, 磯部龍太郎, 山本一貴, 太田信之介: 1000kN 級ダイス・ロッド式摩擦ダンパーの断続的繰返し高速載荷実験, 土木学会第 76 回年次学術講演会, I-160, 2021.
 - 15) 和田 新, 右高裕二, 滝本和志, 林 大輔, 磯田和彦, 波田雅也, 藤本和久, 牛島 栄: 2 方向に制震デバイスを設置した場合の制震効果の確認, 土木学会第 72 回年次学術講演会, I-587, pp.1173-1174, 2017.
 - 16) 上田英明, 北嶋圭二, 大西博之, 中西三和, 安達洋: ダンパーを用いた既存 RC 造建物の耐震補強法に関する研究(その 17 摩擦ダンパーの荷重と形状の関係および経年特性), 日本建築学会大会講演梗概集, 構造IV, pp.147-148, 1999.
 - 17) 上田英明, 波田雅也, 土田堯章, 北嶋圭二, 中西三和, 安達 洋: 設置後 20 年が経過した外付け制震ブレースの「摩擦ダンパー」性能確認試験, 日本建築学会大会講演梗概集, 構造II, pp.893-894, 2019.
 - 18) 波田雅也, 木村浩之, 山崎 彬, 藤本和久, 牛島 栄, 蔵治賢太郎, 松原拓朗, 久保田成是: 橋梁の制震化に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの水没実験, 土木学会第 74 回年次学術講演会, I-69, 2019.
 - 19) 波田雅也, 松原拓朗, 牛島 栄: ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(DRF-DP)による橋梁耐震技術, 建設機械施工, Vol.73, pp.21-25, 2021.9.

(Received September 30, 2021)

(Accepted January 10, 2022)

APPLICATION OF EARTHQUAKE DAMAGE CONTROL TECHNOLOGY FOR EXISTING BRIDGE PIERS INSTALLED FRICTION DAMPERS

Masaya HADA, Akira YAMASAKI, Sakae USHIJIMA, Kentaro KURAJI, Takuro MATSUBARA, Yuji MIGITAKA and Kazuki YAMAMOTO

The authors are proposing a bridge seismic technology that installs a "die and rod type friction damper" with the rigid-plastic hysteretic characteristic at the upper and lower joints of a bridge structure. This technology performed the ability to fix support bearings at level 1 earthquake motions and exerts damping effects during level 2 earthquake motions to improve the seismic resistance of piers.

In this paper, after giving an overview of the technology, we will show an example of applying this technology to actual bridge seismic retrofitting work. In this construction, the reinforcement effect was obtained, such as the response curvature of the base of the pier during Level 2 earthquake motion was reduced by about 60% compared to before reinforcement. Furthermore, the high-speed loading experiment for the 1,000kN class friction damper applied in the construction is described. As a result of the experiment, it was confirmed that the friction damper exhibits the rigid-plastic hysteretic characteristic and energy absorption performance as expected at the design.