

論文 既設橋梁の耐震性向上に用いるダイス・ロッド式摩擦ダンパーの開発

波田 雅也*1・蔵治 賢太郎*2・右高 裕二*3・牛島 栄*4

要旨: 近年, 地震直後における橋梁の機能維持が課題となっている。兵庫県南部地震以降は, 最低限の耐震補強として落橋・倒壊対策が施されてきたが, 落橋を免れても損傷が甚大で交通機能を維持できなければ, 被災地への救援物資輸送といった利用もできない。そこで筆者らは, 既設橋梁の支承部に“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”を設置することにより, レベル2の大地震に対し橋脚基部を弾性範囲ないし限定的な損傷に留め, 地震直後も交通機能を維持できる耐震補強工法の開発を進めている。本報では, 本工法の概要および補強効果について述べた後, 橋梁用に大容量化した摩擦ダンパーの高速加振実験について述べる。

キーワード: 摩擦ダンパー, ダイス・ロッド式, 既設橋梁, 制震, 耐震補強

1. はじめに

近年, 地震直後における橋梁(公共インフラ)の機能維持が大きな課題となっている¹⁾²⁾。兵庫県南部地震以降は, 既設橋梁に対する最低限の耐震補強として地震時の落橋・倒壊を防止するような対策が施されてきた。しかしながら, 落橋を免れたとしても, 損傷が甚大で交通機能を維持することができなければ, 救援物資の輸送といった災害時における公共インフラの役割を果たすことができない。そこで筆者らは, 既設橋梁の上部工と下部工の間(支承部)に“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”を設置することにより, レベル2の大地震に対し橋脚基部を弾性範囲ないし限定的な損傷に留め, 地震直後も交通機能を維持できる高性能な耐震補強工法の開発を進めている。ダイス・ロッド式摩擦ダンパー(以下, 摩擦ダンパー)は, 建築分野において実用化³⁾されており, 耐震補強の用途で多くの実績を有している。また, 橋梁分野においても摩擦系ダンパーを用いた制震構造が着目されている⁴⁾⁵⁾。本報では, 本工法の概要および補強効果の一例について述べた後, 橋梁用に大容量化した摩擦ダンパーの高速加振実験について述べる。

2. 工法概要

2.1 工法概念

本工法の概要を図-1に示す。本工法では, 既設橋梁の支承部の橋軸方向ないし橋軸直角方向に摩擦ダンパーを設置する。摩擦ダンパーは完全剛塑性に近い履歴特性を有するため, L1地震動(中小地震)に対しては支承変位(下部工の天端に対する上部工の水平相対変位)を拘束する固定部材として機能し, L2地震動(大地震)に対しては振動エネルギーを吸収して橋梁の揺れを抑制する減衰部材として機能する。

橋軸直角方向に本工法を採用した時の補強効果の概念図を図-2に示す。既設橋梁の場合, 支承部がサイドブロックによって固定されており, L2地震動に対して橋脚基部の大きな損傷(塑性化)が避けられない。一方, 本工法では, L2地震動に対して支承部を可動とすることで, 長周期化による入力低減を図るとともに, 摩擦ダンパーが地震エネルギーを効率的に吸収することで, 支承変位を抑制し, さらに橋脚基部の損傷を大幅に低減できる。

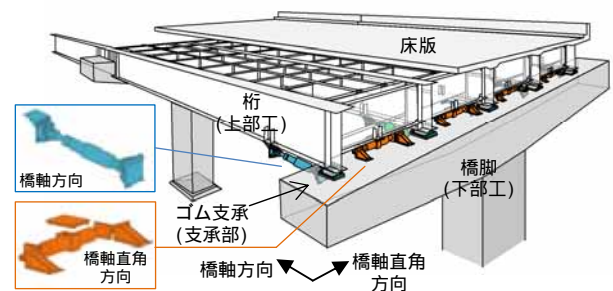


図-1 本工法概念

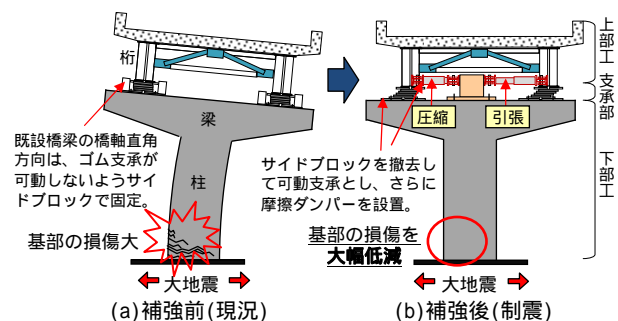


図-2 補強効果概念図

2.2 摩擦ダンパーの概要

摩擦ダンパーの機構を図-3に, 部品構成を写真-1に示す。摩擦ダンパーは, ダイス内径より少し太いロッド

*1 青木あすなる建設(株) 技術研究所 耐震リニューアル研究室 (正会員)

*2 首都高速道路(株) 東京西局 第一保全工事事務所 工事・点検長

*3 首都高速道路(株) 本社 技術部 技術推進課

*4 青木あすなる建設(株) 執行役員 技術研究所長 博士(工学) (正会員)

ドをダイスにはめ込むことにより、ロッドの外周に常に締付け力が生じる仕組みを利用したダンパーである。ダイスが内筒に、ロッドが外筒に固定されており、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。地震時には、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、振動エネルギーを摩擦熱に変換して消散する。ダイスには焼入れを施した鋼材、ロッドにはりん青銅を使用し、ダイスとロッドの形状(ロッド太さ、ダイスとロッドの内外径差および接触長さ)を変えることで摩擦荷重を調整する。なお、ダイスとロッドの接触面には固体潤滑剤を塗布し、0.4cm/sec未満の低速度でゆっくりと摺動させて馴染ませる工程を数回繰り返すことで、摩擦荷重と履歴形状を安定させている。

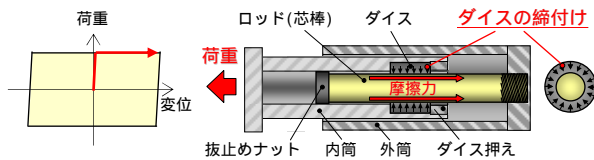


図-3 摩擦ダンパーの機構



写真-1 摩擦ダンパーの部品構成

3. 補強効果の検討(時刻歴応答解析の一例)

本章では、本工法の補強効果を検討するため、橋軸直角方向を対象に実施した時刻歴応答解析の一例を示す。

3.1 解析諸元

3.1.1 対象橋梁

対象橋梁は、3径間連続のプレストレスト・コンクリート床版橋とする。下部工は、3.0m角の正方形断面の単柱RC橋脚であり、鋼板巻き立て補強が施されている。橋軸直角方向の現況は、ゴム支承の両側にサイドブロックが設置され、支承変位が拘束された固定支承となっている。なお、橋軸方向は地震時水平力分散構造⁶⁾とする。

3.1.2 解析モデル

骨組モデルは、3次元立体モデルとする。構造部材は、上部工を線形梁要素、ゴム支承を線形バネ要素、摩擦ダンパーを非線形バネ要素、下部工梁を線形梁要素、下部工柱を非線形梁要素でそれぞれモデル化する。下部工柱の非線形特性はM-φ関係でモデル化し、復元力特性には最大点指向剛性低下型のバイリニアモデルを用いる。摩擦ダンパーの非線形特性はP-δ関係でモデル化し、復元力特性には完全弾塑性型のバイリニアモデルを用いる。減衰特性はレーリー型とし、摩擦ダンパーを除く各部材の減衰定数には、道路橋示方書⁶⁾に示される標準値を用いる。

3.1.3 解析方法

解析方法は、Newmark β法(β=0.25)による時刻歴応答解析とし、積分時間間隔は2/1000秒とする。

3.1.4 入力地震動

入力地震動は、道路橋示方書⁶⁾に示されるⅢ種地盤のL2地震動6波(タイプⅠ(プレート境界型):3波、タイプⅡ(内陸直下型):3波)とする。後述の解析結果では、L2地震動6波のうち、Case3(制震)の基部曲率がとくに大きかった波形をタイプⅠ、タイプⅡから1波ずつ選定して示す。なお、L1地震動時の検討(摩擦ダンパーが固定部材として機能すること)については、稿を改め報告する。

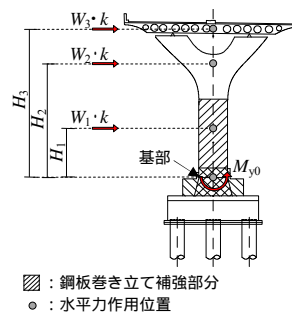
3.2 ダンパー摩擦荷重の設定

水平震度の設定条件を図-4に、橋脚1基当たりのダンパー摩擦荷重の設定値を表-1に示す。本工法では、発生頻度の高い中小地震動に対して摩擦ダンパーを稼働させず、極稀に生じる大地震時に摩擦ダンパーを稼働させ、補修困難である橋脚基部の損傷を低減させるという観点から、摩擦荷重は、橋脚基部が初降伏⁶⁾に至る時にダンパーが稼働し始めるように式(1)を用いて設定した。

$$P_d = W_3 \cdot k \quad \dots(1)$$

ここで、

$$k = M_{y0} / (H_1 \cdot W_1 + H_2 \cdot W_2 + H_3 \cdot W_3)$$



■: 鋼板巻き立て補強部分
○: 水平力作用位置

図-4 水平震度の設定条件

表-1 橋脚1基当たりのダンパー摩擦荷重の設定値

荷重作用位置	上部工	H ₃	m	17.6
	梁	H ₂	m	14.5
地震時重量	上部工	W ₃	kN × 10 ³	11.5
	梁	W ₂	kN × 10 ³	2.6
基部の初降伏曲げモーメント	柱	W ₁	kN × 10 ³	3.2
		M _{y0}	kN · m × 10 ³	105.9
水平震度	k	-	-	0.4
ダンパーの摩擦荷重	P _d	kN × 10 ³	-	4.7

初降伏: 最外縁にある鉄筋の降伏時。

3.3 解析 Case

解析 Case を表-2に示す。本検討では、橋軸直角方向にサイドブロックを設置して固定支承とした現況の状態を Case1(現況)、サイドブロックを撤去しゴム支承のみとした状態を Case2(非制震)、さらに摩擦ダンパーを設置した状態を Case3(制震)とする。

表-2 解析 Case(橋軸直角方向)

解析Case		ゴム支承の水平バネ剛性	1次固有周期(橋軸直角)
Case1	現況 (固定支承)	-	1.14 sec
Case2	非制震 (ゴム支承)	30 kN/m × 10 ³	1.61 sec
Case3	制震 (ゴム支承 + 摩擦ダンパー)	30 kN/m × 10 ³	1.14 sec

3.4 解析結果

3.4.1 橋脚基部の損傷

橋脚基部の最大応答曲率および塑性率一覧を表-3に、

橋脚基部の履歴曲線(M-φ関係)を図-5に示す。まず、Case1(現況)およびCase2(非制震)では、タイプI、タイプII地震動ともに橋脚基部が大きく塑性化(μ=6~9)している。また、橋梁の継続使用可否の目安とする限定的な損傷に留めるための許容曲率を上回っている。一方、Case3(制震)では、基部の曲率が大幅に低減され、タイプI地震動では弾性域に留まっている。さらに、タイプII地震動においても、Case1(現況)に比べて基部の曲率が60%以上低減されており、かつ許容曲率を下回っていることから、本工法の有効性が確認できたといえる。

表-3 橋脚基部の応答曲率および塑性率一覧

解析Case	降伏 ¹ 曲率 _y	許容 ² 曲率 _a	最大応答値			
			タイプ (- -3)		タイプ (- -3)	
			曲率	塑性率 μ	曲率	塑性率 μ
			1/m × 10 ⁻³	/ y	1/m × 10 ⁻³	/ y
Case1 現況	1.28	5.78	8.46	6.6	11.94	9.3
Case2 非制震			10.90	8.5	10.93	8.6
Case3 制震			1.21	0.9	4.24	3.3

- 1: 降伏曲率は、降伏曲げモーメントが終局水平耐力時の曲げモーメントに等しいものとして算定⁶⁾。バイリニアモデルの折れ点。
- 2: 許容曲率は、L2地震に対し限定的な損傷に留めるために、免震橋の許容曲率に準じて一般橋梁(耐震性能2)の0.5倍と厳しく設定^{6), 7)}。

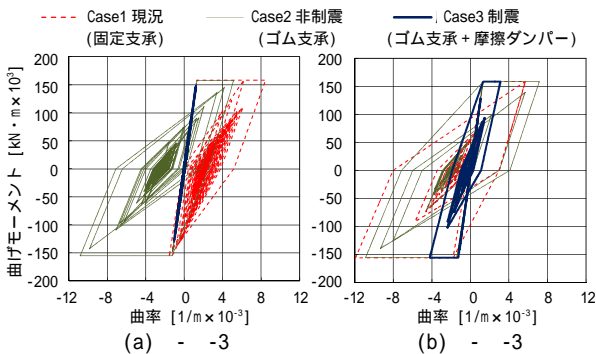


図-5 橋脚基部の履歴曲線(M-φ関係)

3.4.2 支承部変位

最大応答支承変位および残留変位を表-4に、支承変

表-4 最大支承変位および残留変位一覧

解析Case	許容 支承変位	タイプ (- -3)		タイプ (- -3)	
		最大応答 支承変位	残留 支承変位	最大応答 支承変位	残留 支承変位
		m	m	m	m
Case1 現況	-	0	0	0	0
Case2 非制震	0.25	0.34	0	0.35	0
Case3 制震		0.17	0.004	0.21	0.036

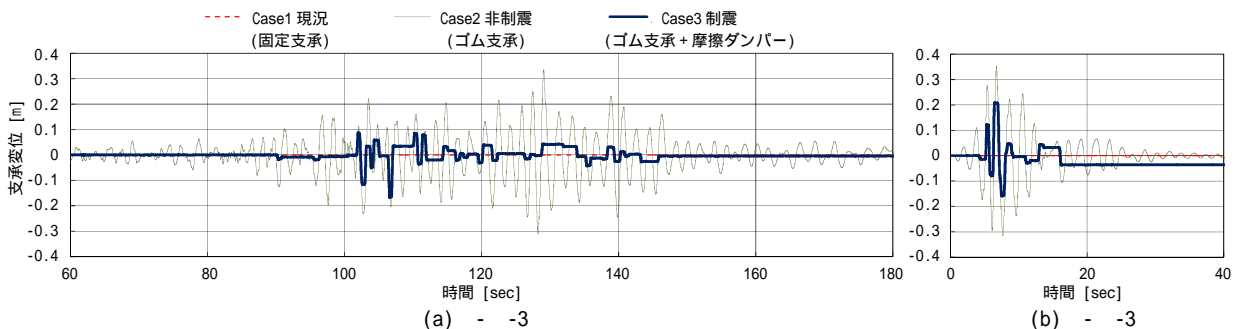


図-6 支承変位の時刻歴波形

位の時刻歴波形を図-6に示す。表中の許容支承変位は、支承ゴム総厚の200%としている。まず、摩擦ダンパー設置前のCase2(非制震)では、支承最大変位が0.35m程度と大きく、許容支承変位を上回っている。一方、摩擦ダンパー設置後のCase3(制震)では、Case2に比べて最大支承変位が大幅に低減され、許容変位以内に留まっている。なお、Case3の残留変位は0.036m程度と小さく、地震直後の緊急車両通行等には支障無いものと考えられる。

4 摩擦ダンパーの高速加振実験

本章では、摩擦ダンパーの①基本特性、②L2地震時特性および③繰返し耐久性性能を確認するために実施した高速加振実験の概要および結果について示す。

4.1 実験概要

4.1.1 試験体

試験体は3体(上記①~③)を確認するために各々1体とし、最大ストロークは±250mm、摩擦荷重588kN(60tf)を目標に製作した。試験体製作時の荷重確認試験結果を図-7および表-5に示す。荷重確認試験は、振幅200mm、速度0.4cm/secの三角波を2サイクル与え、2サイクル目の摩擦荷重(切片荷重 $P_{\delta=0}$ 、平均摩擦荷重 P_{ave})を図中に示す要領で評価した。表-5より、 $P_{\delta=0}$ 、 P_{ave} とも目標値の±10%程度に収まっている。なお、表中の P_{ave} を各試験体の基準値 P_0 と定義する。

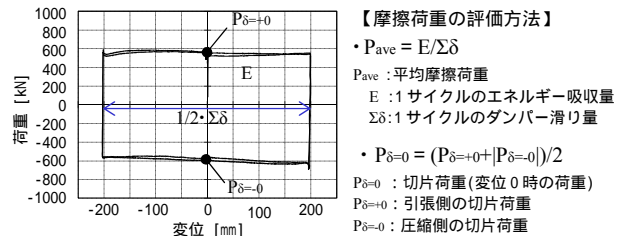


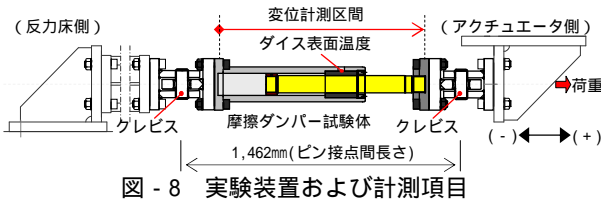
図-7 製作時の履歴形状と荷重評価方法

表-5 製作時の荷重確認試験結果

No.	実験項目	製作時の摩擦荷重 [kN]		目標値 [kN]	製作/目標
基本特性	切片荷重 $P_{=0}$	575		588	97.8%
	平均摩擦荷重 P_{ave}	578			98.3%
地震時特性	切片荷重 $P_{=0}$	607		588	103.2%
	平均摩擦荷重 P_{ave}	600			101.9%
繰返し耐久性	切片荷重 $P_{=0}$	651		588	110.6%
	平均摩擦荷重 P_{ave}	634			107.7%

4.1.2 実験方法

実験装置および計測項目を図-8に、実験状況を写真-2に示す。加振方法は、摩擦ダンパーの両端に取付けたクレビスを介して反力床およびアクチュエータに固定し、軸方向に変位制御で加振する。計測項目は、荷重、変位およびダイス表面温度とし、速度は変位を微分することで算定する。荷重、変位とも引張側を正とする。サンプリング周波数は500Hzとし、荷重および速度は25Hzでハイカットフィルタ処理する。なお、各加振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(23℃)以下になったことを確認してから次の加振を行う。



4.2 基本特性確認実験

4.2.1 入力波形

基本特性確認実験の入力波形を図-9に示す。入力波形は、目標振幅2サイクルの前後に漸増、漸減波を2サイクルずつ加えた計6サイクルの正弦波とする。摩擦荷重($P_{\delta=0}$, P_{ave})は4サイクル目(目標振幅2サイクル目)で評価する。実験パラメータを表-6に示す。加振ケースは、目標振幅と振動数をパラメータとして最大速度を変化させた計12ケースとし、No.1~No.12の順で加振を行う。

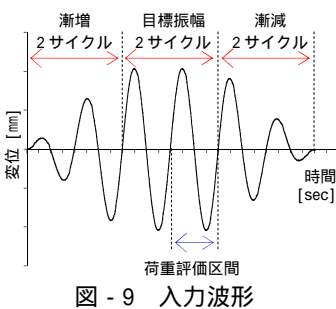


表-6 実験パラメータ

No	シリーズ	目標振幅 [mm]	振動数 [Hz]	最大速度 [cm/sec]
1	50mm	50	0.20	6
2	シリーズ	50	2.0	63
3	50	50	4.0	126
4	100mm	100	0.10	6
5	シリーズ	100	1.0	63
6	100	100	2.0	126
7	200mm	200	0.050	6
8	シリーズ	200	0.50	63
9	200	200	1.0	126
10	1.0Hz	50	1.0	31
11	シリーズ	150	1.0	94
12	240	1.0	151	

4.2.2 実験結果

No.9(目標振幅 200mm, 振動数 1.0Hz)の履歴曲線を図-10に示す。漸増、漸減の各2サイクルを細線(橙, 紫), 目標振幅2サイクルを太線(黒)で示し、試験体製作時の

基準値 P_0 を破線(青)で示している。図より、摩擦荷重は、最初の漸増2サイクルの間で大きく低下した後、3サイクル目以降はほぼ一定となっている。また、目標振幅2サイクル(3-4サイクル目)に着目すると、1サイクル間に時々刻々と速度変化(変位ゼロで最大速度 126cm/sec, 変位 200mm で速度ゼロ)する正弦波入力においても、摩擦ダンパーは概ね完全弾塑性型の履歴形状を示すことから、摩擦荷重の速度依存性は認められない。

各実験結果の最大振幅2サイクルの履歴曲線を抽出し、振幅シリーズ毎に重ね合わせたものを図-11に示す。また、全12ケースの切片荷重 $P_{\delta=0}$ と平均摩擦荷重 P_{ave} の関係を図-12に、最大速度と平均摩擦荷重 P_{ave} (基準値 P_0 で除して無次元化)の関係を図-13に示す。まず、図-11より、各振幅シリーズとも振動数によらず概ね完全弾塑性型の履歴形状を示すが、いずれも振動数が大きくなるにつれて摩擦荷重が低下していることがわかる。図-12より、切片荷重 $P_{\delta=0}$ と平均摩擦荷重 P_{ave} の差が小さいことから、安定した履歴特性を有することがわかる。また、図-13より、入力する正弦波の最大速度と平均摩擦荷重 P_{ave} との間には、負の相関関係が認められる。これは、摺動時に生じる摩擦熱の影響と考えられる⁴⁾。

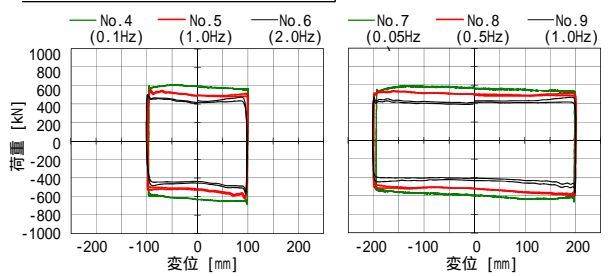
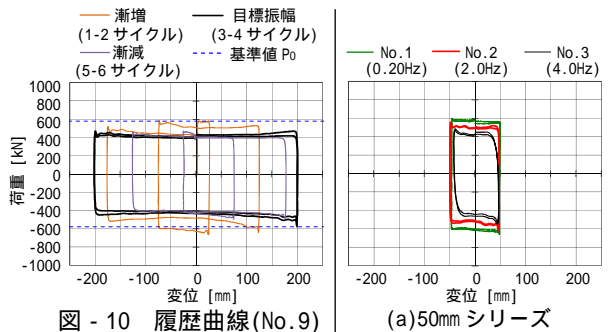
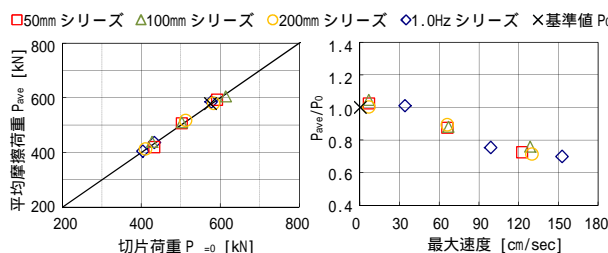


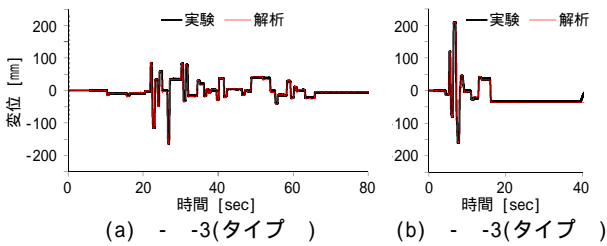
図-11 振幅毎の履歴曲線(3-4サイクル)の比較



4.3 地震時特性確認実験

4.3.1 入力波形

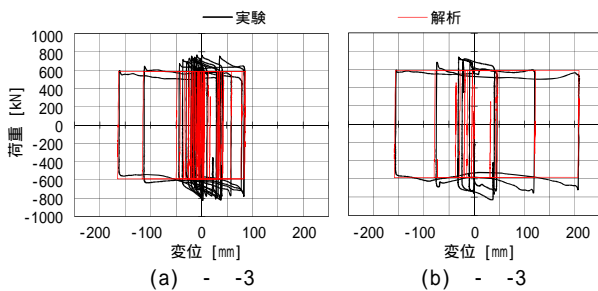
地震時特性確認実験の入力波形を図 - 14 に示す。入力波形は、時刻歴応答解析で得られた摩擦ダンパーの変位応答波形であり、3 章(図 - 6)で示した支承変位波形と同一である。タイプ I 地震動(I-III-3)は、継続時間 240sec のうちダンパーが摺動した 80 秒間(80~160sec)を抜き出して入力する。なお、摩擦ダンパーの解析時の履歴特性は、完全弾塑性型のバイリニアモデル(摩擦荷重 588kN、滑り出し変位 1.0mm)である。



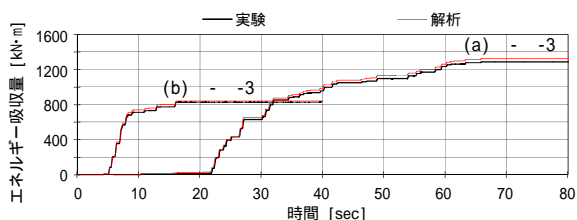
(a) - -3(タイプ) (b) - -3(タイプ)
図 - 14 入力波形(地震応答波)

4.3.2 実験結果

実験で得られた履歴曲線を図 - 15 に、エネルギー吸収時刻歴を図 - 16 に、それぞれ解析結果と比較して示す。また、実験で得られた最大荷重、最大変位、最大速度およびエネルギー吸収量を、解析値と比較して表 - 7 に示す。図 - 15 より、小振幅時に荷重が高く、大振幅時に荷重が低くなる傾向がみられるものの、概ね安定した完全弾塑性型の履歴形状を示している。また、図 - 16 より、実験で得られたエネルギー吸収時刻歴は、解析時のそれとほぼ一致していることがわかる。すなわち、L2 地震動に対し、摩擦ダンパーが解析時に想定した通りのエネルギー吸収性能を有することが確認できたといえる。



(a) - -3 (b) - -3
図 - 15 履歴曲線



(a) - -3 (b) - -3
図 - 16 エネルギー吸収時刻歴

表 - 7 実験値と解析値の比較

	L2地震波	最大荷重 [kN]		最大変位 [mm]		最大速度 [cm/sec]		エネルギー量 [kN·m]	
		+	-	+	-	+	-		
(a)	-3(タイプ)	実験	766	-822	85	-163	120	-100	1289
		解析	588	-588	87	-166	122	-99	1326
		実/解	130%	140%	98%	98%	98%	102%	97%
(b)	-3(タイプ)	実験	734	-831	209	-157	163	-140	847
		解析	588	-588	209	-159	179	-142	842
		実/解	125%	141%	100%	99%	91%	99%	101%

4.4 繰返し耐久性確認実験

4.4.1 入力波形

繰返し加振の入力波形を図 - 17 に示す。本実験では、L2 地震時に相当するエネルギー吸収量を定常加振によって断続的に多数回経験した場合の履歴特性を確認する。具体的には、振動数 1.0Hz、目標振幅 100mm を 5 サイクル(漸増・漸減波を 2 サイクルずつ加え、計 9 サイクル)の正弦波繰返し加振を計 9 回行う。

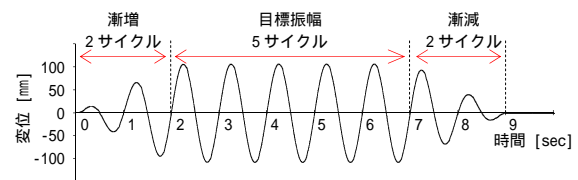


図 - 17 入力波形(繰返し加振)

4.4.2 実験結果

履歴曲線の一覧を図 - 18 に示す。図中には、試験体製作時の基準値 P_0 を破線で示している。図より、摩擦ダンパーの履歴形状は、繰返し 1~8 回目までは概ね安定した完全弾塑性型の履歴形状を示すことがわかる。そして、繰返し 9 回目に荷重が大きく乱れ、不安定な履歴形状となった。また、繰返し 1 回目のエネルギー吸収履歴を図 - 19 に示す。図中には、L2 地震時の解析結果を合わせて示している。図 - 19 より、繰返し加振 1 回のエネルギー吸収量は約 1300kN·m であり、およそ L2 地震動 1 回分に相当することがわかる。さらに、加振中のサイクル毎の平均摩擦荷重 P_{ave} (基準値 P_0 で除して無次元化)推移を図 - 20 に示す。図 - 20 より、1 回目はサイクル毎の荷重変化が大きく、最大で約 40% 荷重低下したが、2 回目以降は徐々にサイクル毎の荷重変化が小さくなっていることがわかる。このように、加振毎に履歴形状が徐々に変化していく特性は、摩擦面の馴染みと摩耗の影響と考えられる^{3), 8)}。なお、繰返し 8 回目において、摩擦面に塗布した固形潤滑剤が筋状に剥がれ、部分的にロッド素地(りん青銅)が露わになる様子が観察された。

5 まとめ

以上、本報告では、摩擦ダンパーを用いた既設橋梁の耐震補強工法の概要および補強効果の一例について述べた後、橋梁用に大容量化した摩擦ダンパー高速加振実験について述べた。得られた知見を下記に示す。

1) 3径間連続桁の単柱 RC 造橋脚の橋軸直角方向を対象とした時刻歴応答解析の結果、本工法を用いて耐震補強することにより、補強前に比べて橋脚基部の損傷(曲率)を約 60%低減できた。

2) 基本特性確認実験の結果、摩擦ダンパーは最大速度 100cm/sec を超える正弦波加振時も安定した完全弾塑性型の履歴形状を有することがわかった。また、入力する正弦波の最大速度と平均摩擦荷重との間には、負の相関関係が認められた。

3) 地震時特性確認実験の結果、摩擦ダンパーは L2 地震に対して解析時に想定した通りのエネルギー吸収性能を發揮した。

4) 繰返し耐久性確認実験の結果、摩擦ダンパーは L2 地震時に相当するエネルギー量を断続的に 8 回経験しても、安定したエネルギー吸収性能を發揮した。

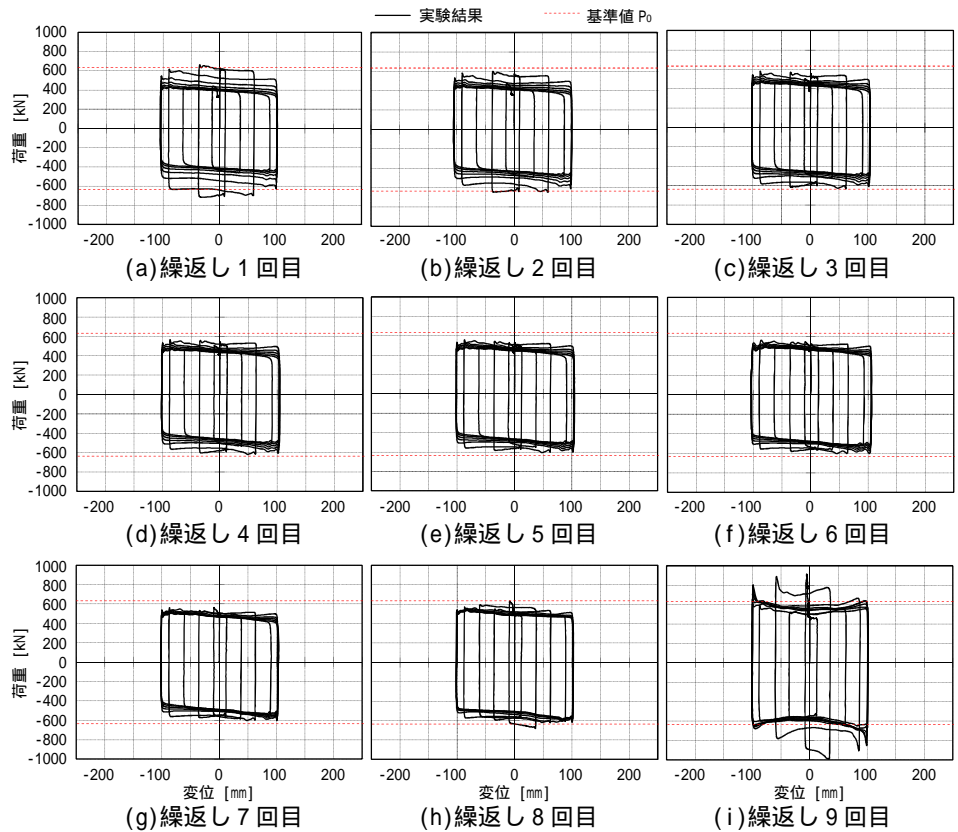


図 - 18 繰返し加振 1~9 回目の履歴曲線一覧

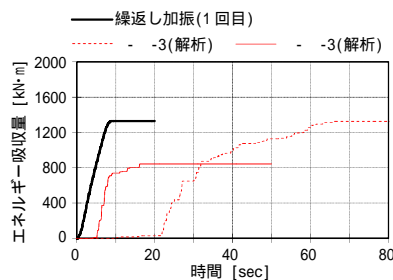


図 - 19 エネルギー吸収時刻歴

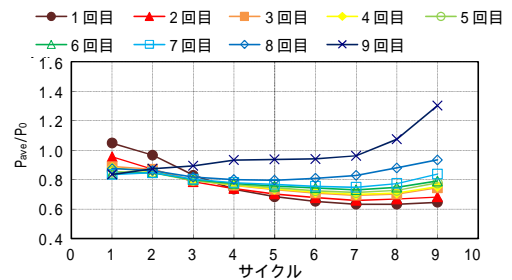


図 - 20 サイクル毎の平均摩擦荷重 P_{ave} 推移

謝辞

本研究は、首都高速道路(株)と青木あすなろ建設(株)の共同研究「既設橋梁の耐震性向上技術に関する研究」に関する研究成果の一部である。その成果は、首都高速道路(株)より発行された「橋梁構造物設計施工要領(平成 27 年 6 月版) V 耐震設計編の 4.4 制震デバイスに反映された。最後に、本研究の計画・遂行および結果のまとめに際して、関係各位には懇切丁寧に指導して頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 川島一彦：兵庫県南部地震から 20 年一問われる大地震直後の機能維持の重要性一，土木施工，VOL.56，No.9，pp.73-78，2015.9
- 2) 蔵治賢太郎：高性能制震デバイスと支承サイドブロックの開発，土木施工，VOL.56，No.9，pp.89-92，2015.9
- 3) 北嶋圭二ほか：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

- 4) 武田篤史ほか：摩擦型ダンパーを用いた橋梁系の振動台実験，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.67，No.3，pp.628-643，2011
- 5) 斎藤次郎ほか：摩擦履歴型ダンパーの適用とその実例，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.133-138,2003.1
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.3
- 7) 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
- 8) 上田英明ほか：400kN 摩擦ダンパー並列配置による大容量制震ブレースの開発(その 1 400kN 摩擦ダンパーの繰返し限界性能)，日本建築学会学術講演梗概集(中国)，B-2，pp.533-534，2008.9