

9. 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

Final State of “Die and Rod Type Friction Damper” for Bridges

木村浩之* 波田雅也*

ー概要ー

筆者らは、“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー（以下、摩擦ダンパー）”を用いた既設橋梁の耐震補強工法を提案している（図1）。摩擦ダンパーは、ダイス（金属環）とロッド（金属棒）の接触面に生じる摩擦力を利用したダンパーであり、完全剛塑性型の履歴特性を有するという特長を活かし、レベル1地震時には「固定部材」として機能し、レベル2地震時には「減衰部材」として機能する。また、ロッドの先端に抜止めナットを取り付けることで、設計での想定を上回る変位が生じた場合には「落橋防止構造または横変位拘束構造」（以下、ストッパー）として機能する（図2、写真1）。

本報では、摩擦ダンパーの終局状態および各部品の設計強度と実際の強度との対応を確認することを目的として実施した引張実験について述べる。

ー技術的な特長ー

設定荷重 50kN の摩擦ダンパーに対して終局状態の検証実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) ロッドねじ部のねじ山がせん断破壊し、設計通りの終局状態となった。
- 2) 実験で得られた最大耐力は算定値の約 1.1 倍大きかった。
- 3) 最大耐力は設定摩擦荷重の約 5.7 倍であり（図3）、道路橋示方書で示されているストッパーとしての要求性能を満足することが可能である。



図1 摩擦ダンパーを用いた既設橋梁の耐震補強工法

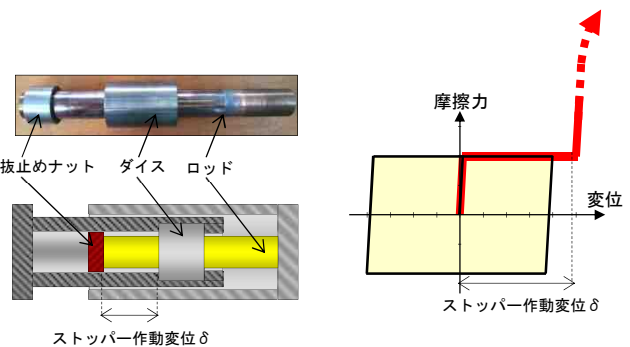


図2 摩擦ダンパーの機構

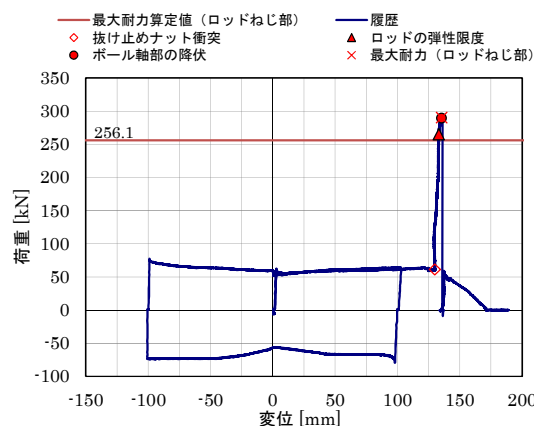


図3 荷重と試験体変位の関係



写真1 摩擦ダンパーの構成部品

※本報は、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。

*技術研究所耐震リニューアル研究室

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 Final State of “Die and Rod Type Friction Damper” for Bridges

○木村 浩之* 波田 雅也*
Hiroyuki KIMURA Masaya HADA

ABSTRACT A seismic retrofit method that can significantly reduce damage to bridge pier bases against a Level 2 earthquake by installing Die-and-rod friction dampers (DRF-dampers) have been developed. DRF-dampers function as fixing members of the bridge during the Level 1 earthquake and damping members during the Level 2 earthquake. The anti-slipping nut, one of the parts of the DRF-damper, prevents the rod from slipping out of the die. In addition, anti-slipping nut works as a stopper when a displacement larger than the design occurs. This paper presents the results of tensile test of the DRF-dampers. Shear failure occurred in the thread of the anti-slipping nut, the DRF-damper was in the final state as designed. Experimental values of each part fit design values, and the maximum proof stress is about 5.7 times the design friction load.

Keywords： 摩擦ダンパー、ダイス・ロッド、道路橋、耐震補強、終局状態、引張実験、最大耐力
Friction Damper, Die and Rod, Road Bridge, Seismic Retrofit, Final State, Tensile Test, Maximum Proof Stress

1. はじめに

筆者らは、既設橋梁の上下部接続部の橋軸直角方向に“ダイス・ロッド式摩擦ダンパー”(以下、摩擦ダンパー)を設置することで、レベル2地震時における橋脚基部の応答を大幅に低減できる耐震補強工法を提案している¹⁾。

摩擦ダンパーは、ダイス(金属環)とロッド(金属棒)の接触面に生じる摩擦力を利用したダンパーである(図1)。完全剛塑性型に近い履歴形状を有するという特長を活かし、レベル1地震動時には「固定部材」として機能し、レベル2地震動時には「減衰部材」として機能する。

また、摩擦ダンパーはロッド先端に抜止めナットを取り付けることで、ダイスからのロッドの抜け出しを防止している。これにより、レベル2地震動での想定を上回る支承変位が生じた場合には、摩擦ダンパーが「落橋防止構造」または「横変位拘束構造」(以下、ストッパー)として機能する構造になっている(図1)。

しかしながら、摩擦ダンパーをストッパーとして機能させるに際しては、十分な耐力を発揮するだけでなく、終局状態(何処からどのように破壊するか)が明解であることが求められる。

本報では、摩擦ダンパーのストッパーとしての機能に焦点を置き、終局状態を把握するとともに耐力の算定値と実験値の対応を確認することを目的とした検証実験について述べる。

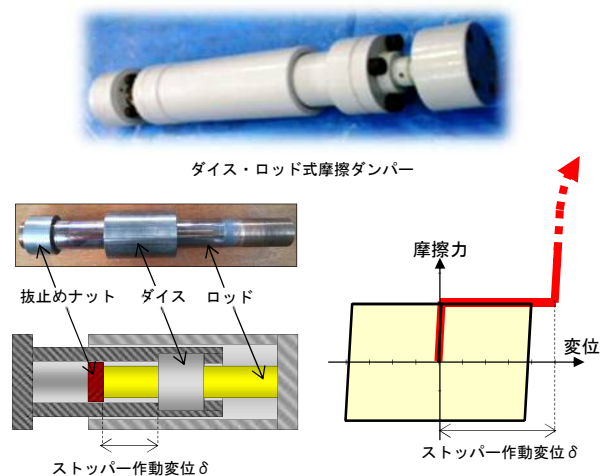


図1 摩擦ダンパーの機構

*技術研究所耐震リニューアル研究室

※本報は、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。

2. 摩擦ダンパー試験体の概要

2.1 摩擦ダンパー試験体

摩擦ダンパー試験体の外観を写真1に示す。試験体は、設定摩擦荷重(F_f): 50kN、ストッパー作動変位: $\pm 125\text{mm}$ の小型摩擦ダンパーとし、計3体(No.1~No.3)作製した。

ダンパー両端には全方向 15° 回転可能なボールジョイントを取付けた。また、終局状態の目視観察のために防水・防塵用の外筒は取り外した。

2.2 構成部品と材質・規格、組立図

構成部品を写真2に、材質・規格一覧を表1に示す。また、組立図を図2に示す。

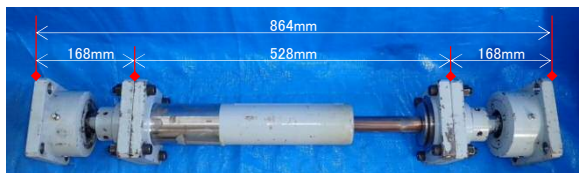


写真1 試験体の外観

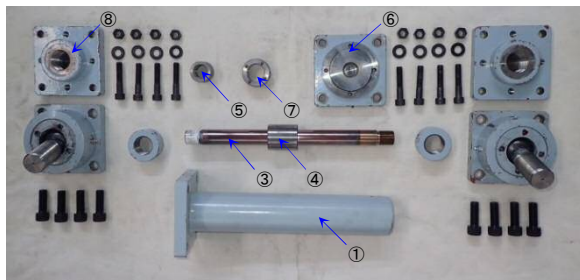


写真2 試験体の構成部品

表1 試験体の構成部品の材質・規格

番号	名称	材質	JIS規格
①	内筒	機械構造用炭素鋼鋼管 一般構造用圧延鋼材	JIS G3445 STKM13A JIS G3101 SS400
②	外筒	機械構造用炭素鋼鋼管	JIS G3445 STKM13A
③	ロッド	りん青銅	JIS H3270 C5191B-H
④	ダイス	クロムモリブデン鋼(H鋼)	JIS G4052 SCM440H
⑤	抜止めナット	機械構造用炭素鋼鋼材	JIS G4051 S45C
⑥	ロッドベース	一般構造用圧延鋼材	JIS G3101 SS400
⑦	ダイス押え	一般構造用圧延鋼材	JIS G3101 SS400
⑧	ボールジョイント	一般構造用圧延鋼材	JIS G3101 SS400

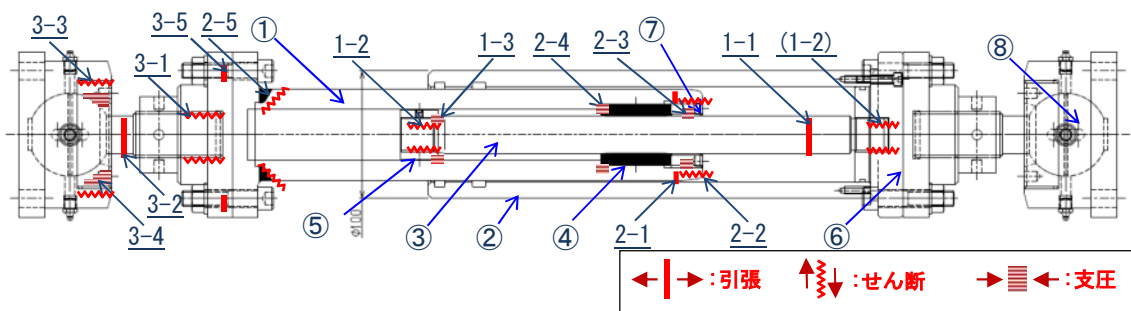


図2 組立図 (摩擦ダンパーの強度算定箇所)

摩擦ダンパーは、主に表1中の①~⑧の部品で構成され、各部品にねじ加工等を施し互いに接合することで1基のダンパー部材を形成している。

(a) 摩擦機構

摩擦機構は、ダイス(③)とロッド(④)で構成する。ダイス内径より少し太いロッドをダイスにはめ込むことで、ロッドの外周に常に締付け力が生じ、ダイスがロッド上を滑動する時にダイスとロッドの接触面に摩擦力が発生する。(図1、図2)

(b) 組立図

ロッド(③)は両端にねじ加工を施し、一端はロッドベース(⑥)を介してボールジョイント1(⑧)に接続し、他端は抜止めナット(⑤)を設置する。

ダイス(④)は、内筒(①)とダイス押え(⑦)によって挟み込むように固定し、内筒を介してボールジョイント2(⑧)に接続する。

(c) ストッパー作動変位(最大ストローク)

ストッパー作動変位は、ロッド長さで調節する。ストッパー作動変位に達すると、圧縮側(ダンパー全体が縮む方向)では内筒がロッドベースに衝突し、引張側(ダンパー全体が伸びる方向)では抜止めナットがダイスに衝突する。

2.3 強度算定 (引張荷重時)

本研究では、落橋およびRC躯体損傷防止²⁾の観点から引張側に着目する。以下、各部品接合部の強度(引張・せん断・支圧)算定結果を示す。

(a) 許容耐力、最大耐力の算定値

各部品接合部の許容耐力の算定値を小さい順に並べて表2に示す。また、同様に最大耐力の算定値を表3に示す。表中に示す算定No. (1-1~1-3、

2-1～2-5、3-1～3-5)は、図2中に示す番号と対応している。なお、表中の安全率は、各耐力算定値を $F_y (=50\text{kN})$ で除したものである。

摩擦ダンパーは、完全剛塑性に近い履歴形状を発揮させるために、 F_y を 1.5 倍した設計作用力 $F_d (=F_y \times 1.5 = 75\text{kN})$ に対して各部品接合部が許容耐力未満となるように設計した。許容耐力および最大耐力は、道路橋示方書(H.24 版)³⁾や機械便覧⁴⁾に準拠し、それぞれ許容応力度と引張強度を用いて算定した。算定手順の詳細は省略する。

(b) 終局状態の想定

表3より、摩擦ダンパーの終局状態は、最大耐力算定値が最小であるロッドねじ部のねじ山のせん断強度(No.1-2)で決定するものと想定される。なお、各部品接合部の耐力バランスは、同じ材質・規格の構成部品で製作した橋梁用摩擦ダンパー(600kN、±250mm)¹⁾と同程度とした。

3. 終局状態の検証実験

3.1 载荷装置

実験状況を写真3に示す。本実験には、青木あすなろ建設(株)が所有する疲労試験機を用いた。

载荷方法は試験体3体とも共通とし、初めに振幅±100mmで正負交番に1サイクル载荷した後、抜止めナットによるストッパーを作動させる引張方向に、終局状態に至るまで静的に载荷した。

3.2 計測項目

計測項目は、荷重、軸変位および軸ひずみとし、疲労試験機先端のロードセル、外部変位計およびひずみゲージによって計測した。計測項目の内訳は、軸変位が全体、ダンパー、ボールジョイント(ジョイント1、ジョイント2)の4ヶ所、軸ひずみがロッド、ボールジョイント軸部(ボール軸)、内筒の3ヶ所とした。

4. 実験結果(試験体 No. 1)

本章では、一例として試験体 No.1 の実験結果

表2 許容耐力算定値 到達順序

順序	算定No.	部位	荷重 [kN]	安全率
1	1-2	ロッドねじ部のせん断強度	88.3	1.77
2	1-3	抜止めナット(ダイス)の支圧強度	91.8	1.84
3	2-4	内筒(ダイス)の支圧強度	102.8	2.06
4	3-5	ボルト接合部の引張強度	121.3	2.43
5	1-1	ロッドの引張強度	122.5	2.45
6	2-5	内筒の溶接強度	122.5	2.45
7	3-1	ボール軸ねじ部のせん断強度	130.8	2.62
8	3-2	ボール軸部の引張強度	145.3	2.91
9	2-2	ダイス押えねじ部のせん断強度	149.3	2.99
10	2-3	ダイス押えの支圧強度	211.1	4.22
11	3-3	ボール押えねじ部のせん断強度	281.8	5.64
12	2-1	内筒の引張強度	308.8	6.18
13	3-4	ボール押えの支圧強度	359.9	7.20

※支圧強度は許容耐力のみ

※表2は許容応力度の割増係数=1.0とした算定値(道示³⁾)

表3 最大耐力算定値 到達順序

順序	算定No.	部位	荷重 [kN]	安全率
1	1-2	ロッドねじ部のせん断強度	256.1	5.12
2	1-1	ロッド引張強度	293.6	5.87
3	3-5	ボルト接合部の引張強度	303.5	6.07
4	2-5	内筒の溶接強度	355.1	7.10
5	3-1	ボール軸ねじ部のせん断強度	379.4	7.59
6	3-2	ボール軸部の引張強度	414.9	8.30
7	2-2	ダイス押えねじ部のせん断強度	461.9	9.24
8	3-3	ボール押えねじ部のせん断強度	817.2	16.34
9	2-1	内筒の引張強度	882.2	17.64

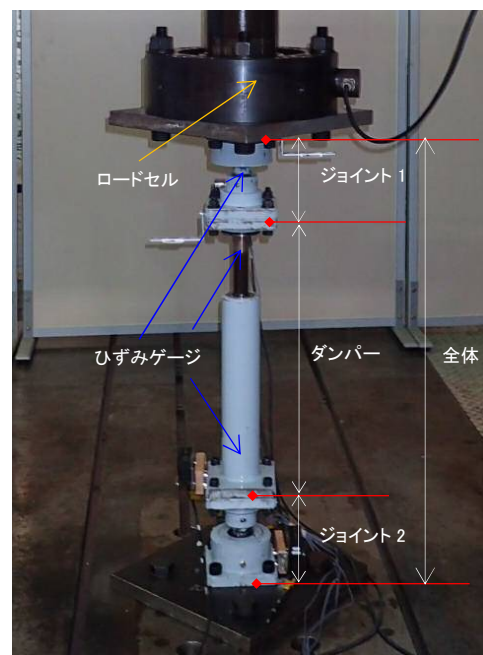


写真3 実験状況

について示す(表4、図3、図4、写真4)。

なお、No.2、No.3は、No.1と同様の結果が得られたため、紙面の都合上、詳細は割愛する。

4.1 荷重－変位関係と終局状態

- 1) 1サイクル中の平均摩擦荷重は62.4kNであり、 F_y に対し約1.2倍大きかった。…図3(a)

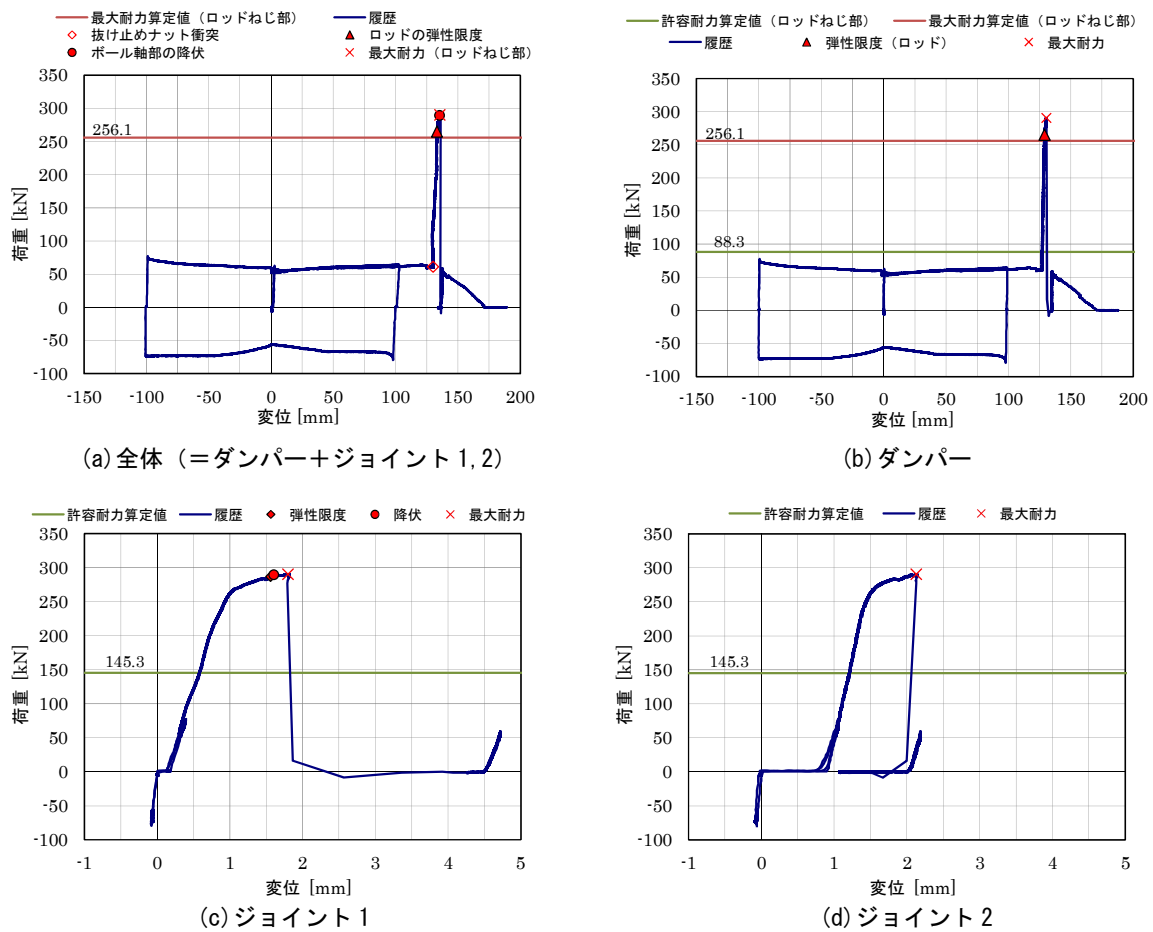


図3 各部の荷重—変位関係

- 2) ダンパー変位125mm程度で抜止めナットがダイスに接触すると、変位が抑制され、急激に荷重が増大した。…図3(a)
- 3) 最大荷重到達前に上下ともボールジョイント軸部が降伏した。…図3(c)、(d)
- 4) 最大荷重は、290.3kNと F_y に対して約5.8倍大きかった。…図3、表4
- 5) 抜止めナット側のロッドねじ部のせん断破壊によって終局状態が決定し、最大荷重到達後は、急激に耐力が低下した。…図3(a)、写真5(b)
- 6) ロッドねじ部が破断した後、ダイスがロッドから抜けて接触面積が小さくなるにつれ徐々に摩擦荷重が50kNから低下し、完全に抜けきったところ(変位175mm程度)で0kNとなった。…図3(a)、写真5(a)

表4 イベント発生順序と荷重・変位一覧

イベント	荷重 [kN]	全体変位 [mm]	ダンパー変位 [mm]	図中のマーク
ストッパー作動	61.1	129.7	125.7	◇
ロッドの弾性限度	265.0	133.0	127.7	▲
ボール軸部の降伏	289.3	135.2	129.0	●
最大耐力	290.3	135.4	129.1	×



(a) 全体


(b) ロッドねじ部
(抜止めナット側)

写真4 終局状態

4.2 荷重—ひずみ関係

実験で得られたロッド、ボール軸、および内筒の荷重—ひずみ関係について、以下では 0.03% オフセット耐力を弾性限度、0.2% オフセット耐力を降伏として評価した。(図 4)

- 7) ロッドについては、265.0kN で弾性限度に達しているものの降伏に達することなく、ダンパー終局時(最大耐力 290.3kN 到達時)もある程度の剛性を保持していた。…図 4(a)
- 8) ボール軸部については、286.6kN で弾性限度に達した後、289.3kN で降伏に達し荷重が頭打ちとなった。…図 4(b)
- 9) 内筒については、最大荷重到達時においても弾性域に留まった。…図 4(c)

5. 実験結果 (No. 1～No. 3) と算定値の対応

本章では、各試験体の最大耐力、終局状態および実験結果と計算結果の対応を比較・検討する。各試験体の実験結果と算定結果を表 5 に示す。

5.1 最大耐力(最大荷重)

- 10) 最大耐力の実験値は 272.9kN～290.3kN の範囲(平均 284kN)であり、算定値 256kN(表 3 中の No.1-2)に対して約 1.1 倍大きかった。また、設定摩擦荷重 F_f (50kN)に対しては約 5.7 倍大きかった。…表 5

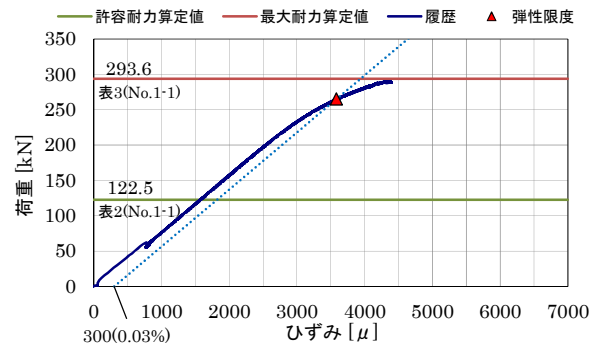
5.2 終局状態

- 11) いずれの試験体も、抜止めナット側のロッドねじ部がせん断破壊し、終局状態に至った。これは、算定結果(表 3)とも良く対応する。…表 3、表 5
- 12) 最大耐力が若干小さかった No.2 を除く試験

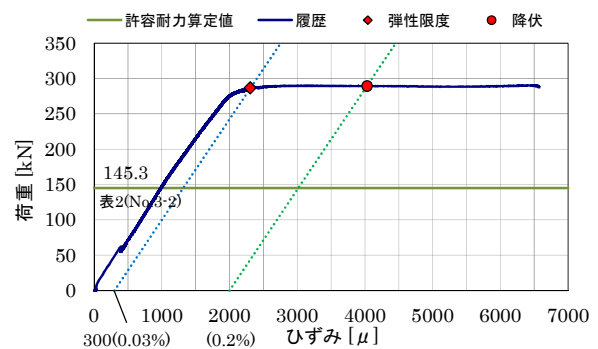
体(No.1、No.3)では、ボール軸部も降伏に達していた。…表 5

5.3 ストッパー作動変位(ダンパー)

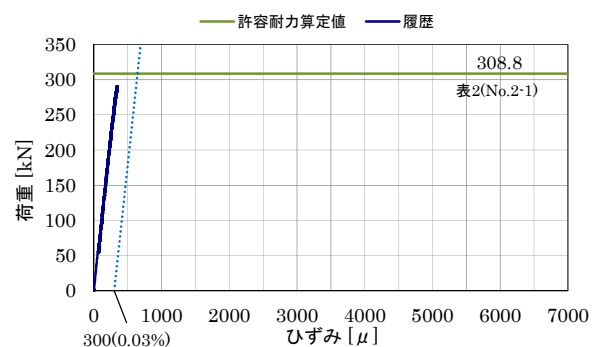
- 13) いずれの試験体も、ストッパー作動変位および最大耐力時変位に大きな差異は無かった。



(a) ロッド



(b) ボール軸部(ジョイント1)



(c) 内筒

図 4 各部の荷重—ひずみ関係

表 5 各試験体の実験結果と算定値

試験体	ストッパー作動変位 δ[mm]	最大耐力時変位 [mm]	最大耐力 [kN]	安全率 [最大/設定]	終局状態	備考
No.1	125.7	129.1	290.3	5.81	ロッドねじ部のせん断破壊	ボール軸部降伏
No.2	126.8	129.4	272.9	5.46	ロッドねじ部のせん断破壊	ボール軸部降伏せず
No.3	125.0	128.3	287.2	5.74	ロッドねじ部のせん断破壊	ボール軸部降伏
平均値	125.8	128.9	283.5	5.67	—	—
算定値	125	—	256.1	5.12	ロッドねじ山のせん断強度	—

6. 摩擦ダンパーのストッパー機能の検討

本章では、摩擦ダンパーがストッパーとして要求される耐力を満足するか、道路橋示方書 V 耐震設計編³⁾に記載されている式により算出、検討する。既往の研究より、摩擦ダンパーの設定荷重の最適値は、上部構造重量の 0.2~0.4 倍とされており⁵⁾、本検討では摩擦ダンパーの設定荷重 F_y を死荷重反力 R_d の 0.3 倍とする。

6.1 落橋防止構造

落橋防止構造の耐力は、以下の式(1)より算出する設計地震力以上でなければならない。

$$H_F = P_{LG} \cdots (1)$$

ただし、 $H_F \leq 1.5R_d$

H_F : 落橋防止構造の設計地震力 [kN]

P_{LG} : 当該支点を支持する下部構造の橋軸方向の水平耐力 [kN]

R_d : 死荷重反力 [kN]

$F_y=0.3R_d$ より、 $H_F \leq 5F_y$ が成り立ち、摩擦ダンパーが落橋防止構造として機能するには設定摩擦荷重の 5 倍以上の耐力が要求される。本実験では $F_y=50\text{kN}$ より、 $H_F \leq 250\text{kN}$ となり、いずれの試験体の最大耐力もこの要求を満足した。

6.2 横変位拘束構造

横変位拘束構造の耐力は、以下の式(2)より算出する。

$$H_s = P_{TR} \cdots (2)$$

ただし、 $H_s \leq 3k_h R_d$

H_s : 横変位拘束構造の設計地震力 [kN]

P_{TR} : 当該支点を支持する下部構造が橋軸直角方向の水平耐力 [kN]

k_h : レベル 1 地震動に相当する設計水平震度で、式(3)より算出

R_d : 死荷重反力 [kN]

$$k_h = c_z k_{h0} \cdots (3)$$

k_h : レベル 1 地震動の設計水平震度

k_{h0} : レベル 1 地震動の設計水平震度の標準値

c_z : レベル 1 地震動の地域別補正係数(最大 1.0)

本検証では、 k_{h0} および c_z が取りうる最大値を用いるものとし、 $k_{h0}=0.30$ (固有周期 $0.34 \leq T \leq 1.50$ 、III 種地盤)、 $c_z=1.0$ (地域区分 A1、A2)より、 $k_h=0.3$ とする。 $F_y=0.3R_d$ より、 $H_s \leq 3F_y$ が成り立ち、摩擦ダンパーが横変位拘束構造として機能するには設定摩擦荷重の 3 倍以上の耐力が要求される。本実験では $H_s \leq 150\text{kN}$ となり、いずれの試験体の最大耐力もこの要求を満足した。

7. おわりに

設定摩擦荷重 50kN の摩擦ダンパーに対して終局状態の検証実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 抜止めナット側のロッドねじ部がせん断破壊し、設計通りの終局状態となった。
- 2) 摩擦ダンパーの最大耐力(平均 284kN)は、算定値 256kN に対して約 1.1 倍大きく、設定摩擦荷重(50kN)に対して約 5.7 倍大きかった。
- 3) 摩擦ダンパーがストッパー(落橋防止構造、横変位拘束構造)として機能するためには設定摩擦荷重の約 3~5 倍の最大耐力が要求される。本実験の結果、その要求を満足できることが確認された。

【参考文献】

- 1) 波田雅也, 蔵治賢太郎, 右高裕二, 牛島栄: 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, コンクリート工学年次論文集 Vol.38, No.2, pp.1003-1008, 2016.
- 2) 日本橋梁建設協会: 熊本地震橋梁被害調査報告書, 2016.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2012.
- 4) 日本機械学会: 機械工学便覧 A4 材料力学, 丸善, 1989.
- 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, pp.859-864, 2017.