

1. 橋梁用摩擦ダンパーに用いるボールジョイントの性能確認試験

Performance Confirmation Test of Ball Joints Used for Friction Dampers for Bridges

波田雅也* 木村浩之* 山崎 彬* 下村将之*

ー概要ー

筆者らは、橋梁支承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)を設置して耐震性向上を図る技術を提案している。橋梁用に開発したこの摩擦ダンパーは、直交する橋軸方向の地震時挙動に追従できるように、ダンパー本体の両端にボールジョイントを配したピン接合を標準としている(図1)。摩擦ダンパーが所定の性能を発揮するためには、このボールジョイントが早期に塑性化することなく十分な剛性・強度を有していることが必須条件である。

本報は、実大スケールのボールジョイントに対して実施した耐荷性能確認試験について示す。

ー技術的な特長ー

ボールジョイントは、全方向に±15度回転可能な仕様となっている(図1)。本研究では、400kN級摩擦ダンパー用として設計荷重 600kN(=400kN×1.5倍)に対して弾性設計したボールジョイントを2基連結し、15度回転させた状態で試験機内に設置して、軸芯方向に正負交番载荷を行った(写真1)。

試験の結果、設計荷重(600kN)に対して概ね弾性を保持し、さらにその1.5倍以上の荷重を作用させて塑性化した後も、破断や座屈が生じることなく安定した挙動を示すことが確認された(図2、図3)。

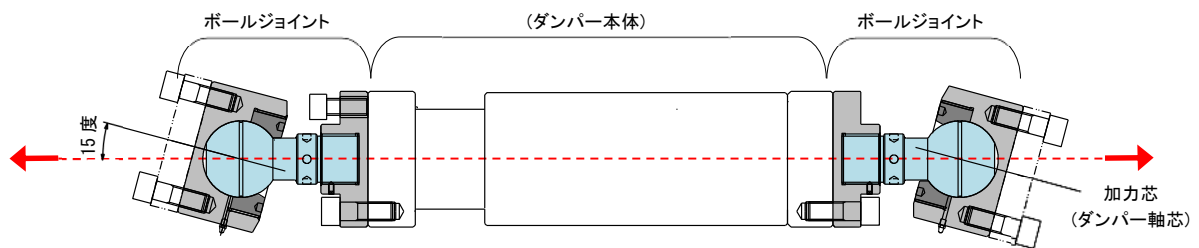


図1 橋梁用摩擦ダンパーの外観（ボールジョイント15度回転時の断面図）

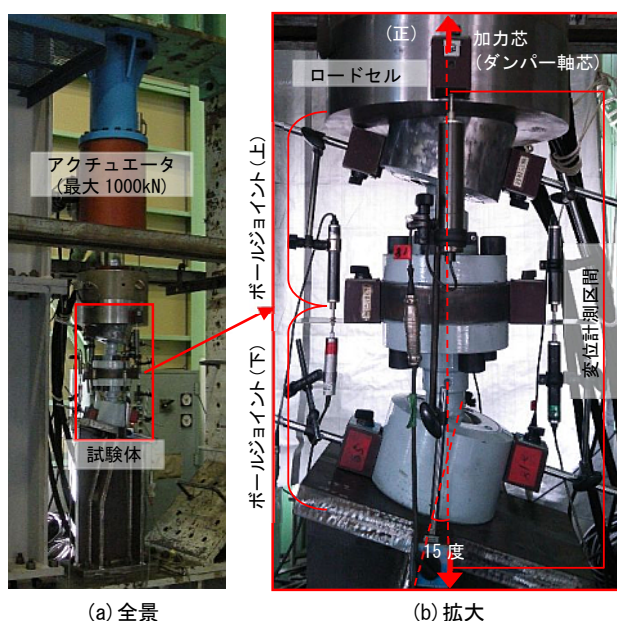


写真1 試験状況

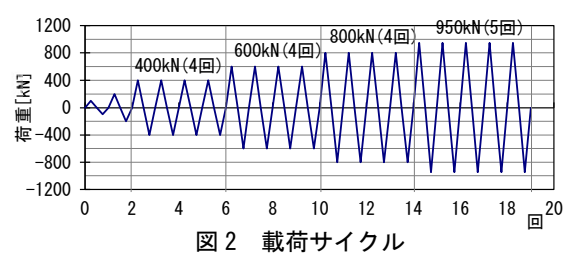


図2 载荷サイクル

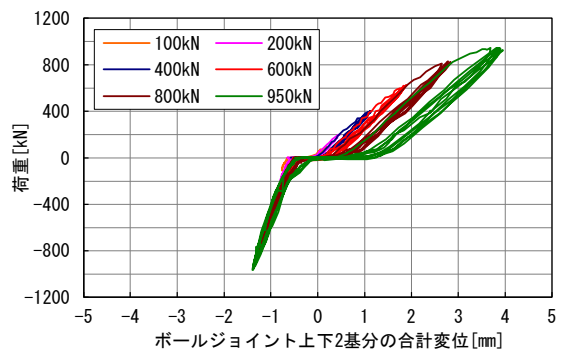


図3 試験結果（荷重－変位履歴）

橋梁用摩擦ダンパーに用いるボールジョイントの性能確認試験 Performance Confirmation Test of Ball Joints Used for Friction Dampers for Bridges

○波田雅也* 木村浩之* 山崎 彬* 下村将之*
Masaya HADA Hiroyuki KIMURA Akira YAMASAKI Masayuki SHITAMURA

ABSTRACT The authors are proposing a technology to improve earthquake resistance by installing friction dampers in the direction orthogonal to the bridge axis of the bridge bearings. As a standard, this friction damper is pin-joined by arranging ball joint members at both ends of the damper body so that it can follow the behavior at the time of an earthquake in the direction of the bridge axis. In order for the friction damper to exhibit the predetermined performance, it is an essential condition that the ball joint has sufficient rigidity and strength without being plasticized at an early stage. This report shows the performance confirmation test performed on a full-scale ball joint member.

Keywords: 摩擦ダンパー, ダイス・ロッド式, 橋梁, 制震, ボールジョイント, 载荷試験
Friction damper, Die and rod type, Bridge, Seismic control, Ball joint, Loading test

1. はじめに

筆者らは、橋梁支承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)を設置して耐震性向上を図る技術を提案している(図1)^{1),2),3)}。橋梁用に開発したこの摩擦ダンパーは、ダイス(金属環)とロッド(金属棒)の嵌め合いを利用した機構で、完全剛塑性型に近い理想的な荷重-変位履歴を描く。橋梁用の摩擦ダンパーは、直交する橋軸方向の地震時変位に追従できるように、ダンパー本体の両端にボールジョイントを配したピン接合を標準としている(図1)。摩擦ダンパーが前述した履歴性能を発揮するためには、このボールジョイントが早期に塑性化することなく、ピン支点としての役割を果たすことが必須条件である。

本報は、実大のボールジョイント部材に対して実施した耐荷性能確認試験について示す。

2. ボールジョイントの概要

本章では、耐荷性能確認試験を行うボールジョイントの概要について示す。

図2は、400kN級摩擦ダンパー(摩擦力:400kN $\pm$ 10%、最大振幅: $\pm$ 100mm)の両端に取り付くボ

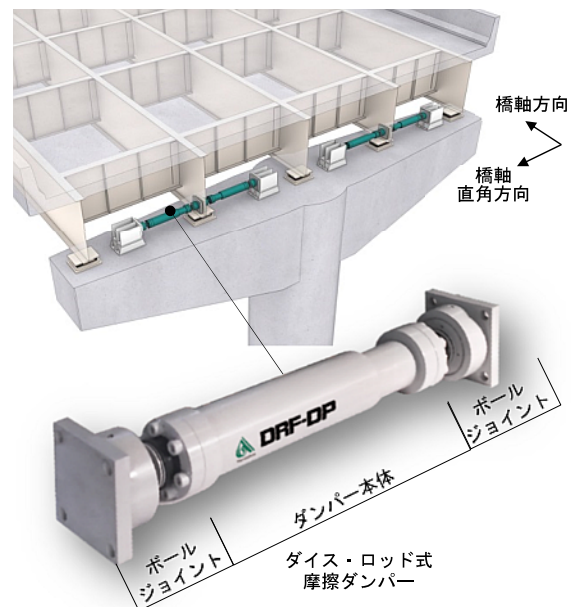


図1 摩擦ダンパーを用いた橋梁耐震補強工法

ールジョイントの断面図である。400kN用として、設計荷重 600kN(=400kN $\times$ 1.5 倍)に対して塑性化しないよう強度設計している。

ボールジョイントは、ボール軸(材質:S45C)の球体部を、球面座(SS400)とボール押え(SS400)で挟み込んでピン支点を成す機構である。球面部には $\pm$ 0.1~0.3mm 程度の隙間(ピンガタ)を設け、滑らかに回転するよう潤滑剤を塗布する。ボール押えにはボール軸の芯棒部が貫通する円錐形の

*技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

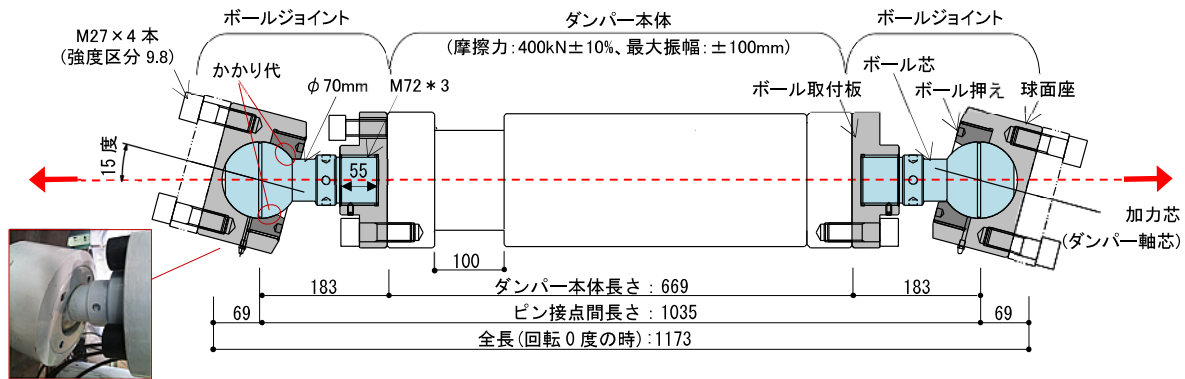


図2 400kN級 橋梁用摩擦ダンパーの外観（ボールジョイント15度回転時の断面図）

孔をあけ、図2のようにダンパー軸芯方向に対して全方向に±15度回転可能な仕様となっている。ボールジョイントの回転可動域を広くするほど、ボール押えの“かかり代”が浅くなり、引張荷重時の強度不足が懸念される。また可動域が狭すぎると、橋軸方向変位 δx に追従しきれない可能性がある。±15度の可動域は、強度と汎用性の両立に配慮している。なお、追従可能な $\delta x = L \times \sin \theta$ (L : ピン接点間長さ、 θ : 回転角)であり、図2のように $L=1,035\text{mm}$ の場合、 $\theta = \pm 15$ 度の可動域で $\delta x=268\text{mm}$ に追従できる。

3. ボールジョイント付き摩擦ダンパーの载荷試験

本章では、基本特性を把握する目的で、400kN級摩擦ダンパーの両端に当該ボールジョイントを設置した状態で行った载荷試験について示す。

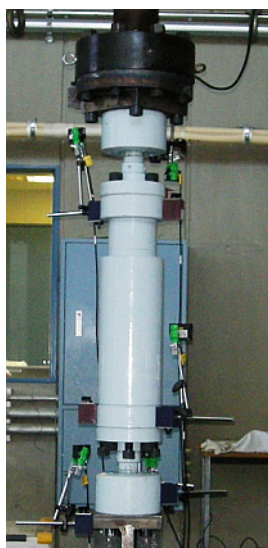


写真1 ボールジョイント付き摩擦ダンパーの試験状況

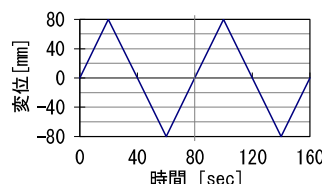
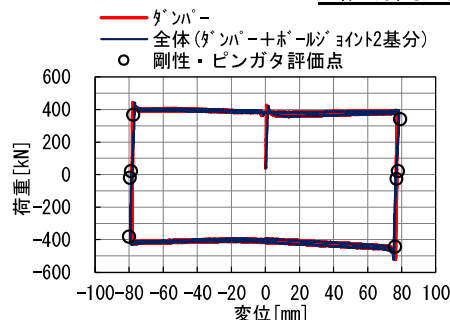
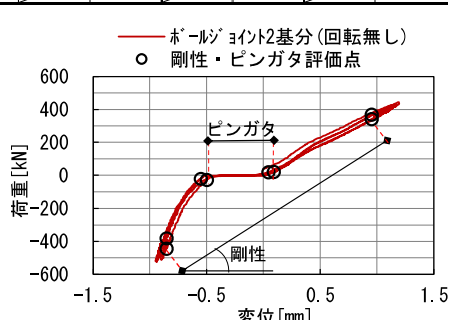


図3 入力波形



(a) ダンパー、全体(ダンパー+ボールジョイント2基)



(b) ボールジョイント上・下2基分

図4 ボールジョイント付き摩擦ダンパーの試験結果（荷重－変位履歴）

3.1 試験方法

試験状況を写真1に、入力波形を図3に示す。ボールジョイントは回転させず試験装置にまっすぐ設置し、アクチュエータによって軸芯方向に変位制御で载荷する。入力波形は、ダンパー製品検査用の三角波¹⁾(速度: 0.4cm/sec一定、振幅: 80mm(最大振幅の80%)、2サイクル)とする。計測項目は荷重、変位(全体、ダンパー、上・下ボールジョイント)とする。

3.2 試験結果

試験で得られた荷重－変位履歴を図4に示す。(a)はダンパーと全体(ダンパー+ボールジョイント上・下2基分)の履歴、(b)はボールジョイント2基分の履歴である。また、試験結果から評価した平均摩擦荷重¹⁾とピンガタ、剛性(ピンガタを含む割線剛性)および摺動時変位(平均摩擦荷重を剛性で除した値)を表1に示す。まず、図4(a)より、

表1 試験結果一覧

平均 摩擦荷重 kN	ボールジョイント上・下2基分		ダンパー		全体	
	ピンガタ mm	剛性 kN/mm	変位 mm	剛性 kN/mm	変位 mm	剛性 kN/mm
408	0.59	425	0.96	893	0.46	288
全体に対する比率			68%	32%	100%	

設定摩擦力どおり約 400kN で荷重が頭打ちとなつて(静止摩擦から動摩擦に切り替わって)摺動し、概ね完全剛塑性の履歴を描いていることがわかる。また、全体の摺動時変位は全体でも 1.42mm と極めて小さく、これを降伏変位とみなすと、1.42mm(100%)の内訳は、ダンパー本体分が 0.46mm(32%)、上・下ボールジョイント 2 基分が 0.96mm(68%)であり、ボールジョイントの割合が高いことがわかる。つぎに、図 4(b)より、ボールジョイントは、塑性化することなく弾性を保持している。また、ボールジョイント 2 基合計で約 0.6mm(±0.3mm、1 基当り±0.15mm)のピンガタがあり、弾性勾配は正側(引張側)が負側(圧縮側)に比べて小さいことがわかる。これまで筆者らは、同一機構のボールジョイントを 50kN～1,200kN 用まで幅広く製作しており 1),4),5),6)、いずれも同様の結果を示すことを確認している。ピンガタは、NC 工作機械によって 0.01mm 単位で切削加工するため、部材の大小にかかわらず同程度の値で製作管理できると考えられる。

以上、摩擦ダンパーに取り付けるボールジョイントの基本特性を確認した。

4. ボールジョイントの耐荷性能確認試験

摩擦ダンパーに取り付いた状態では、ボールジョイントにダンパー摩擦力以上の荷重が作用しないため、ダンパー摩擦力を超える荷重に対する耐荷性能を把握できない。また、前述の図 2 のように 15 度回転した状態では、左右の“かかり代”に偏りが生じ、早期の強度低下が懸念される。

本章では、ボールジョイントを 15 度回転させた状態で、耐荷性能を確認することを目的として行った性能確認試験について示す。

4.1 試験方法

試験状況を写真 2 に、载荷サイクルを図 5 に示す。写真 2 のようにボールジョイント 2 基を連結し、15 度回転させた状態で試験機内に設置して、軸芯方向に正負交番载荷する。载荷サイクルは、

±100kN、±200kN を 1 回ずつ载荷した後、±400kN(ダンパー摩擦力相当)、±600kN(ボールジョイント設計荷重)、±800kN を 4 回ずつ载荷し、さらに±950kN(試験機スペックの限界)を 5 回载荷する。計測項目は、荷重、変位(ボールジョイント上・下 2 基の合計変位)とする。

4.2 試験結果

試験で得られた荷重—変位履歴を図 6 に示す。図 6(a)は、本試験(15 度回転)における±400kN 载荷時の結果を、3 章で前述した図 4(b) : (回転無し)と重ねて示したものである。図 6(a)より、両者の荷重—変位履歴がよく一致しており、回転の有無にかかわらずボールジョイントの基本特性(ピンガタ、剛性)が変わらないことが確認された。つぎに、図 6(b)は、本試験の全サイクルを荷重毎に色分けして示している。図 6(b)より、設計荷重である±600kN 载荷まで、ボールジョイントが概ね弾性挙動していることが分かる。また、それを

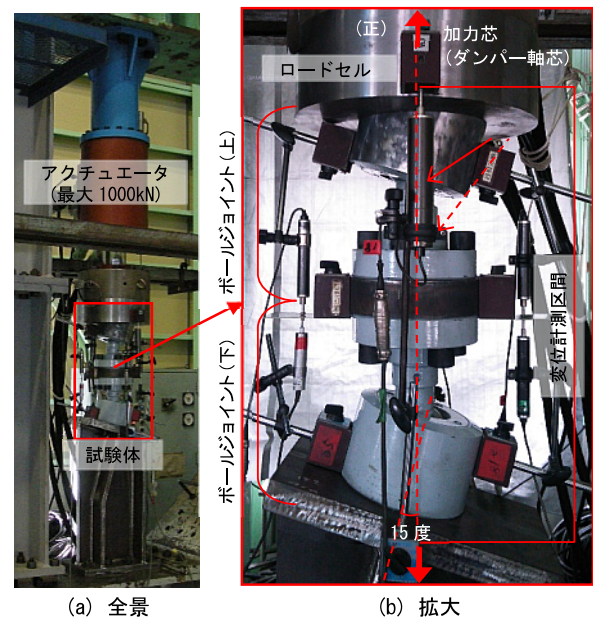


写真 2 ボールジョイントの耐荷性能確認試験状況

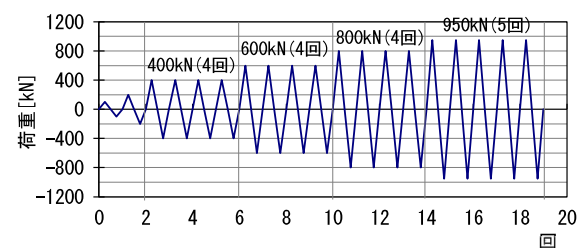
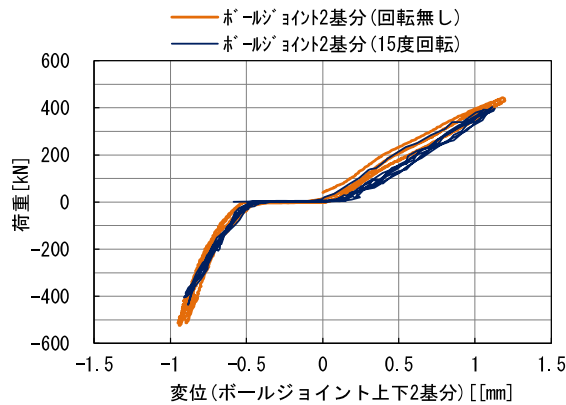
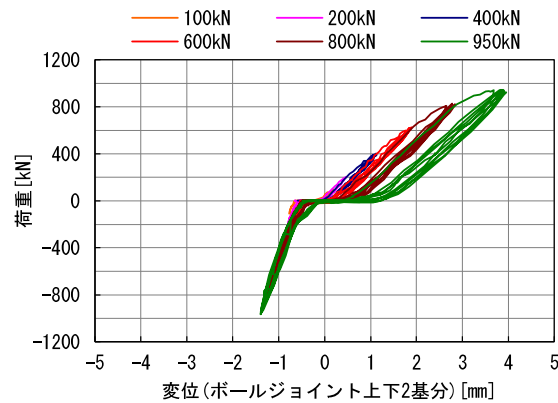


図 5 载荷サイクル



(a) 400kN 載荷抜粋(15 度回転有り無しの比較)



(b) 全サイクル

図 6 ボールジョイントの耐荷性能確認
試験結果(荷重-変位履歴)

超えると引張側で徐々にピンガタが拡大するものの、設計荷重のさらに 1.5 倍以上($\pm 950\text{kN}$)の荷重を繰り返し作用させても破断や座屈することなく、安定した性能を発揮することが確認された。なお、ピンガタの拡大は、かかり代部分の曲げ変形ないし支圧変形によるものと考えられる。

5. まとめ

以上、本報では、400kN 級摩擦ダンパーに取り付ける実大のボールジョイントに対して行った耐荷性能確認試験の概要とその結果について示した。得られた知見を以下に示す。

- (1) ボールジョイントは、15 度回転させた状態でも回転無しの状態と変わらぬ基本特性(ピンガタ、剛性)を発揮する。
- (2) ボールジョイントは、設計荷重 $\pm 600\text{kN}$ (ダンパー摩擦力 400kN の 1.5 倍)を 4 回繰り返し作用させても概ね弾性挙動する。
- (3) 設計荷重を超えると引張側で徐々にピンガタが拡大するものの、 $\pm 950\text{kN}$ (設計荷重の 1.5 倍以上)を 5 回繰り返し作用させても破断や座屈することなく、安定した性能を発揮する。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 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報告集、Vol.39、No.2、pp.859-864、2017.7
- 3) 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
- 4) 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、青木あすなろ建設技術研究所報、Vol.3、pp.1-6、2018.3
- 5) 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
- 6) 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(2019)、I-69