

疲労試験およびFEM解析による U型鋼製ペローズの疲労強度の検討

田中賢太郎¹・頭井 洋²・松村 政秀³・佐合 大⁴・境田 孝吉⁵

¹正会員 博(工) 摂南大学准教授 理工学部都市環境工学科（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8）

²正会員 工博 摂南大学名誉教授（〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8）

³正会員 博(工) 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

⁴正会員 高田機工株式会社 設計部設計課（〒556-0011 大阪市浪速区難波中2-10-70）

⁵正会員 株式会社川金コアテック 営業部（〒530-0012 大阪市北区芝田1-14-8）

1. まえがき

平成 7 年に発生した兵庫県南部地震において、上部構造の落下につながる可能性がある隣接桁同士の衝突や橋脚、基礎等の下部構造に甚大な被害が生じた¹⁾。特に橋脚の被害が大きかったことを受け、耐震性能の低い橋梁では橋脚の耐震補強が行われた。

基礎構造の耐震補強法^{2), 3)}も研究されてきている。しかしながら、基礎構造の耐震補強はコストがかかり、施工困難な場合が多い。そこで、基礎構造を直接耐震補強するのではなく、比較的補強が容易な上部構造に制震対策を行うことにより、下部構造に伝わる水平地震力を低減できれば、高架橋の耐震性能の向上や基礎構造に対する直接的な耐震補強が不要もしくは、低減することが可能になり、経済的な耐震補強法となりえる^{4) ~ 6)}。そこで、橋梁全体の耐震性向上を目的として、主に免震支承を用い、上部構造の長周期化と減衰の付加により地震時応答を低減する耐震性能の向上策が採用されている。免震支承を採用すると、下部構造へ伝達される地震力は大幅な低減が期待できる一方で、上部構造の応答変位が増大することから、隣接桁間の衝突が生じることが懸念される。

そこで、著者らは制震デバイスとして、曲げ降伏型の制震装置（鋼製ペローズ）を桁間に設置する方法を提案している。これまでに、連続高架橋を対象にエネルギー吸収型桁連結装置として鋼製ペローズを用いた場合の効果を検討し、レベル2地震動に対し安定した繰り返し履歴ループを描く鋼製ペローズにより桁間を連結することによって、上部構造の最

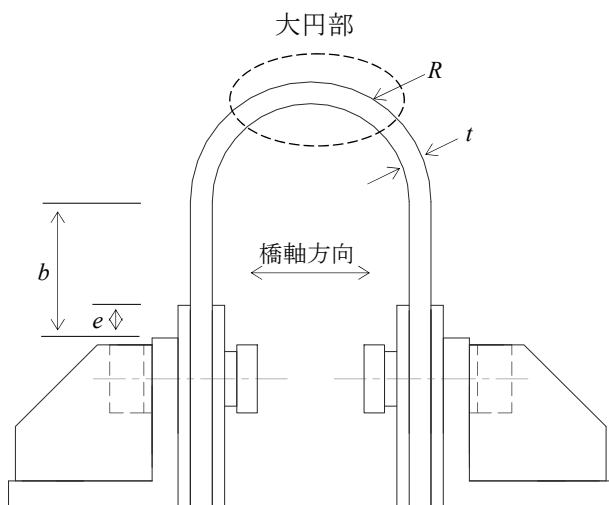
大応答変位の低減、下部構造へ伝達される地震時慣性力の低減と隣接桁間の衝突防止が期待できることを明らかにしてきている^{7) ~ 10)}。従来より検討されてきた鋼製ペローズは、大小2種類の曲げ加工部を有するΩ型形状であることから、曲げ加工された小円部のひずみが最大となり、常時の繰返し変形に対してこの小円部が繰返し変位に対して弱点となることが懸念された¹⁰⁾。円弧部の曲げ半径を大きくすることによって疲労耐久性の向上が期待できるものの設置スペースの制限から、できるだけ小型であることが望まれる。

そこで、本研究では、耐久性向上を目的として従来構造であるΩ型を改良した鋼製ペローズ（U型鋼製ペローズという）を対象に最大および最小ひずみに着目して疲労強度の向上効果を有限要素解析により検討し、その結果に基づいて形状寸法を決定した諸元を有する試験体の疲労実験結果の一部を報告する。

2. U型鋼製ペローズの概要

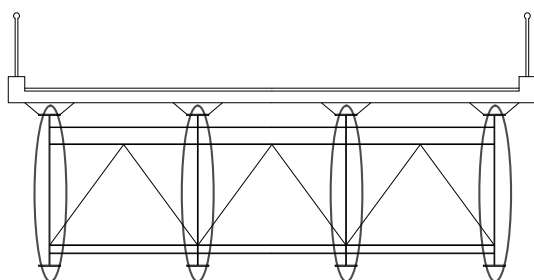
図-1にU型鋼製ペローズの形状を、図-2には設置場所例を示す。U型鋼製ペローズは、Ω型から小円部を除去し、板厚10~30 mm程度の鋼板を半円筒状に曲げ加工したU字型の形状であり、直線部に治具を取り付け2枚1組にして桁端部などへ摩擦接合により定着する。隣接する上部構造間の相対変位が鋼製ペローズの変位となる。円筒部の半径を R 、直線高さを b 、板厚を t としている。また、直線部の定着部

近傍における応力集中の緩和を目的として、突出長 e を有するインナープレートおよびアウタープレートを設置する。



R : 円筒部半径, b : 直線部の長さ, e : 突出長,
 t : 板厚

図-1 U型鋼製ベローズの断面図



○ : 鋼製ベローズの設置場所例

図-2 鋼製ベローズの設置場所例

3. 有限要素法解析によるU型鋼製ベローズの形状検討

(1) 解析モデルおよび解析手法

後述する疲労実験に用いるU型鋼製ベローズの形状を選定する上で、 R/t に着目変数とし、解析に用いるU型鋼製ベローズの寸法を表-1に示す。鋼製ベローズの製作材料はSN490Cであり、引張試験の結果より、降伏点 σ_y は360 N/mm²、ヤング率 E は204,700 N/mm²である。材料構成則はバイリニア型の応力-ひずみ関係を用い、ひずみ硬化則は移動硬化則を用いた。解析には、「ANSYS 16.0」を用い、四角形4

節点平面ひずみ要素によりモデル化し、板厚方向に10分割した。インナープレートおよびアウタープレートの板厚 t_p は、薄すぎると剛性が不足し応力の緩和効果が期待できず、厚すぎると過度な応力集中が生じるので、鋼製ベローズの形状に応じて適切に設定する必要がある。そこで、FEM解析による試行により、鋼製ベローズ本体の板厚 t の約半分の板厚 t_p =約10 mm、 e =20, 21 mmと設定すると適切な剛性が得られることを確認した。インナープレートおよびアウタープレートの材料は引張強度383 N/mm²級の鋼板（引張試験の結果）であり、 $E/100$ の2次勾配を有するバイリニア型の特性を仮定した。インナープレートおよびアウタープレートについては4分割した。

図-3にU型鋼製ベローズの解析モデルを示す。U型鋼製ベローズはインナープレートおよびアウタープレート、取り付け専用治具を含めてモデル化した。図-4にU型鋼製ベローズの接合部周辺の拡大図を示す。同図に示すように、モデル下部は、ボルト接合によって拘束されているので、2重節点でカップリング要素による剛結とした。一方、固定上部はボルト接合による拘束効果は小さいことから、ボルトヘッド位置より上方の鋼製ベローズ本体とインナープレートおよびアウタープレートとの間には、接触要素を設定した。

解析モデルの片方（左側）を固定し、もう片方（右側）の橋軸直角方向を固定して橋軸方向に強制変位を±40 mm 与え、荷重-変位関係および形状の変更や固定条件の違いによる作用ひずみの分布、最大ひずみ振幅値と発生箇所に着目する。

表-1 U型鋼製ベローズの形状検討ケース

解析番号	解析ケース名	R (mm)	b (mm)	e (mm)	t (mm)	t_p (mm)
1	R80b65t9tp10	80	65	20	9	10
2	R80b65t16tp10	80	65	20	16	10
3	R80b100t16tp8.3	80	100	21	16	8.3
4	R80b200t16tp10	80	200	20	16	10
5	R112b65t16tp10	112	65	20	16	10
6	R95b65t19tp10	95	65	20	19	10

(2) 形状検討の結果

図-5 には全解析ケースの荷重－変位曲線を、表-2 には大円部頂上の内側のひずみ振幅をまとめている。図-6～図-9 には、解析番号 3 を代表ケースとして、変形図やコンター図を示す。

R80b65t9e30tp10, R80b60t9e30p10 の 2 つのケースは橋軸成分のコンター図から治具との接続部付近に最大と最小のひずみが生じ、この箇所の疲労損傷が懸念され、効率良いエネルギー吸収が期待できないことから最適とは言えない。一方、R80b200t16e30p9 では接続部付近での疲労損傷が生じにくく、効率良いエネルギー吸収が期待できることが確認できたが、エネルギー吸収量や降伏強度が低いことから b を短くした解析番号 3 の R80b100t16e21tp8.3 を選定した。

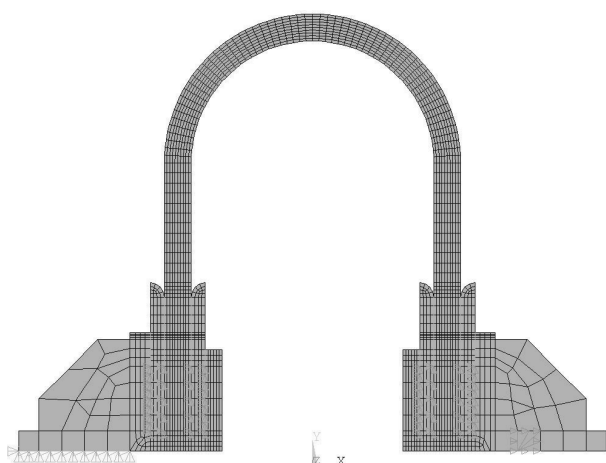


図-3 解析モデル (U型鋼製ベローズ)

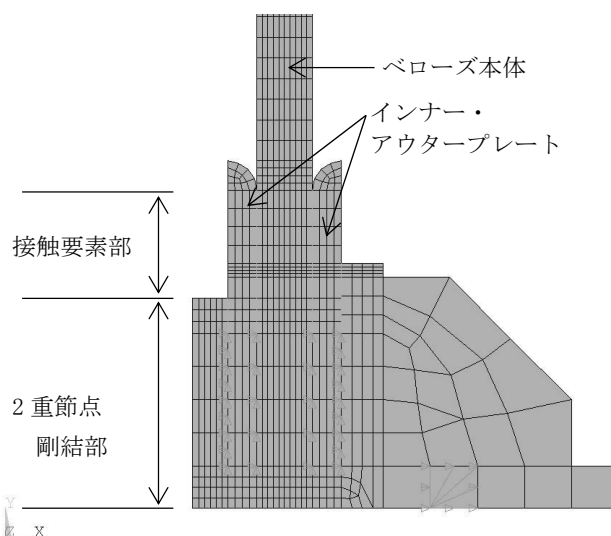


図-4 接合部周辺の拡大図

表-2 大円部頂上裏のひずみ振幅

解析番号	解析ケース名	ひずみ振幅	発生位置
1	R80b65t9tp10	0.08841	直線部
2	R80b65t16tp10	0.08780	大円部
3	R80b100t16tp8.3	0.06420	大円部
4	R80b200t16tp10	0.03808	直線部
5	R112b65t16tp10	0.06032	直線部
6	R95b65t19tp10	0.08039	大円部

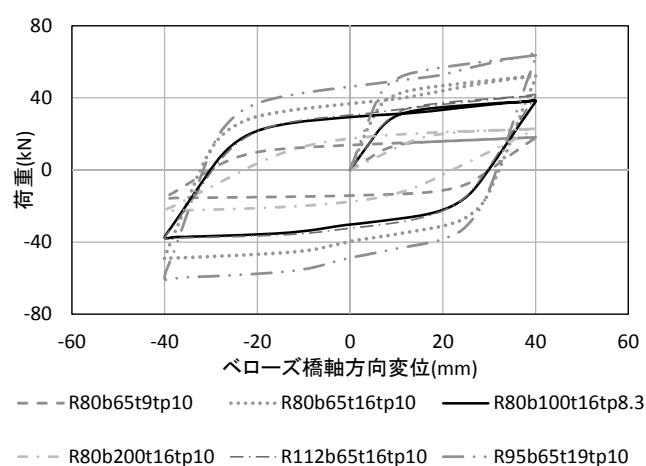


図-5 荷重－変位曲線 ±40mm 橋軸方向変位図

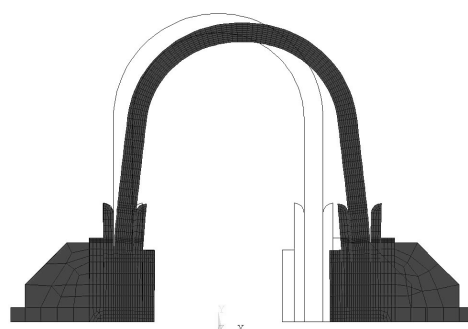


図-6 R80b100t16e21tp8.3±40mm
橋軸方向変位図 (引張側)

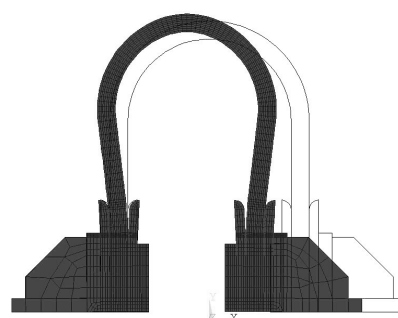


図-7 R80b100t16e21tp8.3±40mm
橋軸方向変位図 (引張側)

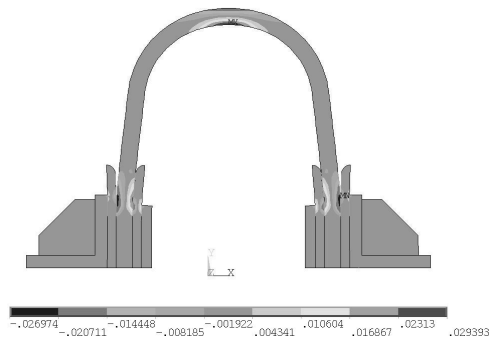


図-8 R80b100t16e21tp8.3 ±40mm
橋軸成分コンター図（引張側）

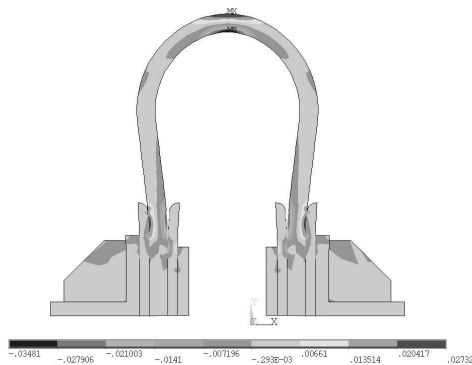


図-9 R80b100t16e21tp8.3 ±40mm
橋軸成分コンター図（圧縮側）

4. U型鋼製ベローズの疲労試験

(1) 载荷条件

载荷には摂南大学が所有する最大荷重 100 kN、ストローク±50 mm の疲労試験機を用いる。鋼製ベローズは板厚 $t=16$ mm の SN490C を高さ 50 mm, $R=80$ mm, $b=100$ mm に加工し、インナー・アウタープレートの板厚は $t_p=8.3$ mm とした。疲労試験は、U 型鋼製ベローズ（UB）のインナー・アウタープレートは引張強度 383 N/mm² 級の鋼板（引張試験の結果）である。実験では 1 本の M24 高力ボルトを用いて、U 型鋼製ベローズの両端部を実験治具に固定する。写真-1 に設置状況を示している。U 型鋼製ベローズにひずみゲージを取り付け、ひずみ量を測定する。実験では焼きなましの有無による U 型鋼製ベローズの性能の比較も行った。

試験装置上側を固定し、下側に上下方向の強制変位を与える。実験では、予備载荷として、 $\pm\delta_y$ (δ_y : U 型鋼製ベローズの降伏変位であり、設計式より算定⁸⁾) を 3 サイクル与えたのち、所要の変位を破断が生じるまで与え続ける。強制変位量として、 $\pm 4\delta_y$,

$\pm 6\delta_y$ を作用させる。载荷速度は、JIS に定められている低サイクル疲労試験方法を参考とし、計測しているひずみ値で 1,000 μ /s 以下となるように設定した。なお、図-1 に示す w は 10 mm, 角ワッシャーの板厚は 9 mm である。

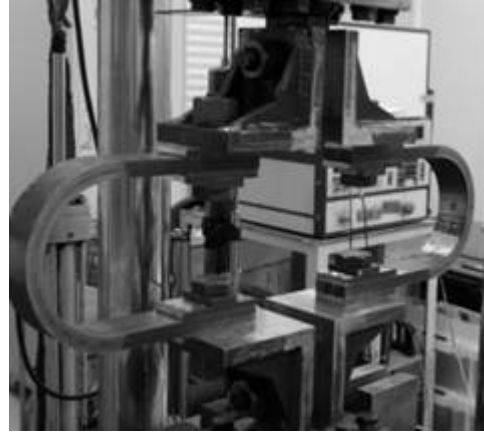


写真-1 疲労試験状況

(2) 疲労試験の結果

表-3 に耐力低下率 10% 時の回数と破断回数を示す。図-10 に、試験ケース $\pm 4.0\delta_y$, $\pm 6.0\delta_y$ について、図-11 には $\pm 6.0\delta_y$ を载荷した際の、焼きなまし有無による耐力低下率の差異を示す。横軸に繰返し回数を、縦軸には耐力低下率を示す。耐力低下率 10% 時の回数は、 $\pm 4.0\delta_y$ の場合 292 回、 $\pm 6.0\delta_y$ の場合 105 回であった。試験ケース $\pm 6\delta_y$ SR の耐力低下率 10% 時の回数は、102 回であった。写真-2 に示すように破断箇所は、両ケースとも大円部であった。インナープレートおよびアウタープレートの設置により、直線部の集中ひずみが緩和でき大円部で破断した。



写真-2 破断箇所（R80b100t16e21tp8.3±6 δ_y ）

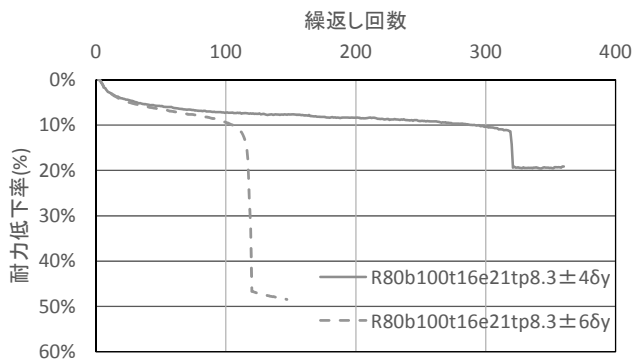


図-10 荷重－変位関係 (R80b100t16e21tp8.3 ± 6δy)

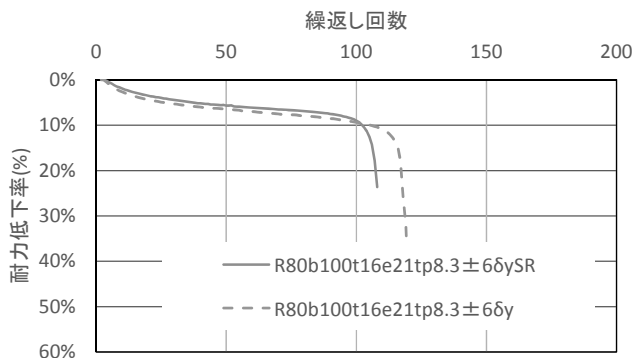


図-11 荷重－変位関係 (R80b100t16e21tp8.3 ± 6δy)

表-3 耐力低下率 10%時の回数と破断回数

試験ケース	耐力低下率 10%時の回数	破断時 回数
R80b100t16e21tp8.3±4δy	292	360
R80b100t16e21tp8.3±6δy	105	117
R80b100t16e21tp8.3±6δySR	102	107

SR：焼きなまし処理あり

(3) 疲労試験とFEM解析の結果比較

図-12 には、試験ケース±6δyの1サイクル目、11サイクル目の荷重－変位関係を解析結果も併記して示す。安定した履歴ループを描き、実験と解析との結果はほぼ一致し解析により実験結果を再現できている。FEM解析と実験で得られたデータの変位量が最大・最小の時の荷重は解析と実験で大きな違いがないことがわかる。実験の1サイクル目の圧縮時の荷重が大きくなっている理由は変位量を大きく与えたことにより1サイクル目にアウトプレートが変形しそれによりアウトプレートの受け持つ荷重が増えたと考えられる。11サイクル目ではアウトプレートの変形が進み引張り時と近い荷重になっている。変位量が最大・最小の時の再現はできているが、変位量が最大・最小に至るまでの途中段階の再現ができていないので解析の改善が必要と考えられる。

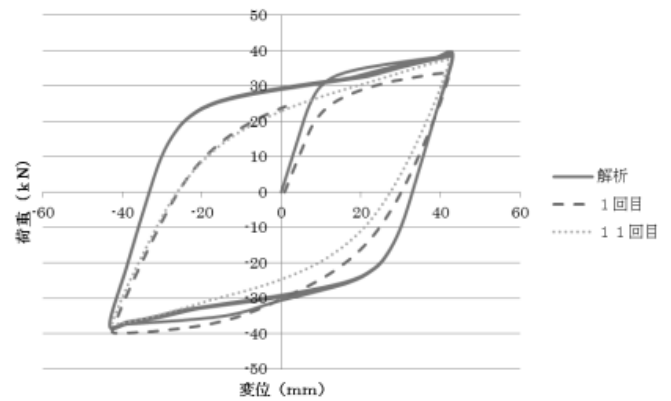


図-12 荷重－変位関係 (R80b100t16e21tp8.3 ± 6δy)

5. まとめ

FEM解析により疲労試験実施用のU型鋼製ベローズの形状を決定し、決定した形状の疲労試験およびFEM解析を実施した。本研究では、まずFEM解析で最適なU型鋼製ベローズの寸法の決定を行うために6種類のU型鋼製ベローズに±40 mmの変位を与えその結果最大のひずみ振幅は大円部中央の裏側で生じることを確認した上で、最適な寸法のU型鋼製ベローズとしてR80b100t16tp8.3と決定した。

実験では、R80b100t16e21tp8.3を用い焼きなましの有無に着目した。その結果、耐力低下率と荷重振幅において焼きなましの効果はそれほど大きくはなかった。

疲労試験結果とFEM解析の結果を比較した結果、ほとんどのケースにおいて変位量が最大・最小の時の荷重値は実験結果と解析の結果で大きな差はなく、解析による再現性はできていると考えられる。今回はR/t=5のケースを対象に疲労試験を実施したが、引き続き、さらに同サイズの±1δy～±10δyまでの疲労試験を実施して、S-N曲線を作成する。また、他にも性能のいいU型鋼製ベローズの形状選定を行っていく必要がある。

今後は、橋軸方向に加えて橋軸直角方向にも地震荷重が作用する場合についての疲労強度特性や極低サイクル領域の疲労特性とそれを考慮した設計法など実橋への適用に向けて必要な課題の検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究の一部は文部科学省平成28年度科学研究費補助金・基盤研究（C）（研究代表者：頭井洋），課題番号：26420469の助成を受けて行ったものである。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告，土木構造物の被害・橋梁，土木学会他，1996.12.
- 2) 浦野和彦，足立有史，河邑 眞：地盤固化体を用いた杭基礎の耐震補強工法に関する3次元FEM解析，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1075-1087，土木学会，2010.3
- 3) 藤原寅士良，谷口善則，野澤伸一郎，渡邊明之，石橋忠良：基礎スラブを用いた杭基礎の耐震補強効果に関する実験的研究，土木学会論文集A，Vol.65 No.2，pp.310-320，2009.
- 4) 山本貴之，佐合 大：せん断パネル型制震ストッパーによる上路トラス橋への制震効果の検討，鋼構造年次論文報告集，Vol.16，pp.333-340，日本鋼構造協会，2008.11.
- 5) 今瀬史晃，舟山淳起，宇佐美勉，王 春林，野中哲也，菅付紘一：BRBによる鋼製剛結トラスの耐震性向上効果，構造工学論文集，Vol.58A，pp.423-435，土木学会，2012.3.
- 6) 宇佐美勉，今瀬史晃，舟山淳起，野中哲也：鋼およびアルミニウム合金製座屈拘束ブレースを設置した鋼トラス構造の耐震性能比較，土木学会土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.69，No.3，pp.439-451，2013.
- 7) 田中賢太郎，頭井 洋，北田俊行，松村政秀：橋軸直角方向の性能も考慮したエネルギー吸収型橋桁連結装置の制震効果について，鋼構造論文集，第12巻，第48号，pp.77-88，日本鋼構造協会，2005.11.
- 8) 頭井 洋，田中賢太郎，松村政秀，吉田雅彦，佐合大：桁制震装置の桁温度伸縮に対する一設計法と最大応答変位予測法，鋼構造論文集，Vol.19，No.75，pp.41-53，日本鋼構造協会，2012.9.
- 9) 頭井 洋，田中賢太郎，松村政秀，佐合 大，新名裕：地震動と温度伸縮の影響を受けるエネルギー吸収型桁連結装置（新型鋼製ベローズ）のFEM解析による形状検討，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.97-102，土木学会，2015.7.
- 10) 田中賢太郎，頭井 洋，松村政秀，佐合 大，新名裕：低サイクル疲労試験によるU型鋼製ベローズの疲労強度，鋼構造年次論文報告集，pp.598-603，第24巻，6 Pages，日本鋼構造協会，2016.11.