

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

頭井 洋¹・田中賢太郎²・松村 政秀³・佐合 大⁴・新名 裕⁵

¹正会員 工博 摂南大学教授 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 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）

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 構造機材本部 市場開発部（〒332-8502 埼玉県川口市川口2-2-7）

1. まえがき

地震時の最大応答変位を抑制できる耐震補強法として、鋼トラス橋および鋼アーチ橋にせん断パネル型ダンパー¹⁾や軸力降伏型のダンパーブレース^{2)・3)}等のエネルギー吸収装置の適用が検討されている。一方、高架橋の耐震対策として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に低減できる一方で、上部構造の応答変位が増大することから、桁間衝突が生じる可能性が懸念される。そこで、エネルギー吸収型桁連結装置として、曲げ降伏型の制震装置（鋼製ベローズ）を桁間に設置する方法が検討されている。著者らは、鋼製ベローズの力学的特性を実験により明らかにするとともに、高架橋への設置効果を解析的に検討してきた⁴⁾⁵⁾。

鋼製ベローズにより桁間を連結することによって地震時には最大応答変位の低減と桁間衝突の防止が期待できるが、常時には桁の温度伸縮による繰返し変位が鋼製ベローズに作用する。従来より検討されてきた鋼製ベローズ（以降、従来型鋼製ベローズという）は、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弱点となることが懸念された。例えば、鋼製ベローズのサイズ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が、設置スペースや施工性の観点から、できるだけ小型の鋼製ベローズを用いることが望ましい。

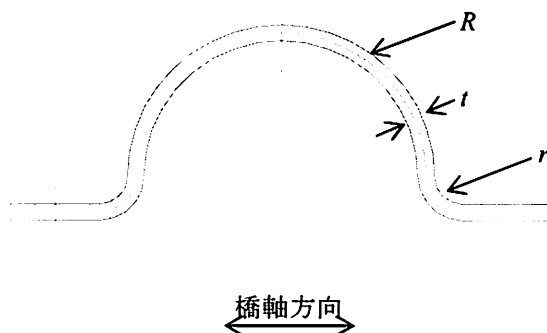
そこで、本研究では、耐久性向上を目的として改良した鋼製ベローズ（新型鋼製ベローズという）を考案し、載荷実験の実施に先立ち、作用最大および最小ひずみに着目してその疲労強度の向上効果を有

限要素解析により検討する。

2. 従来型および新型鋼製ベローズ

(1) 従来型鋼製ベローズ

図-1に従来型鋼製ベローズの形状と各寸法の記号を示す。鋼製ベローズは、加工半径 $R=100\sim400$ mmの円筒部と $r=50\sim200$ mmの小円部を有する板厚 $t=10\sim30$ mm程度の曲げ加工した鋼板であり、2枚1組にして桁端部などへ摩擦接合により直接、連結する。



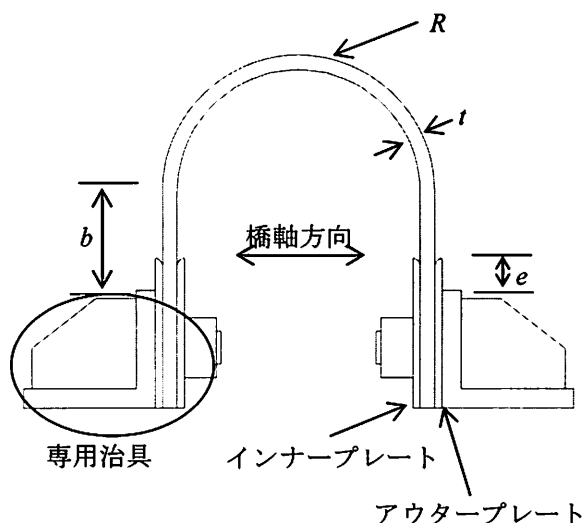
R ：円筒部半径， r ：小円部， t ：板厚

図-1 従来型鋼製ベローズの断面図

(2) 新型鋼製ベローズ（U字型鋼製ベローズ）

図-2に新型鋼製ベローズの形状を示す。新型鋼製ベローズは、従来型から小円部を除去した、板厚 $10\sim30$ 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、長さ b の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連結する。

また、専用の取り付け治具には応力集中の緩和を目的として、突出長 e を考慮した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-2 新型鋼製ペローズの断面図

3. 鋼製ペローズの有限要素法解析

解析に用いる従来型および新型鋼製ペローズの寸法は、過去に実施した載荷実験に用いた従来型鋼製ペローズの形状・寸法を参考にして決定する。従来型および新型鋼製ペローズを2次元でモデル化し、橋軸方向に強制変位を作用させて、荷重変位関係および最大ひずみの値を比較する。強制変位量としては、地震時に十分なエネルギー吸収が期待でき、かつ常時の桁の温度伸縮量に比べ十分大きな ± 30 mm（鋼製ペローズの降伏変位 δ_y の7.5倍程度）を作用させる。また、従来型および新型鋼製ペローズにおいて、形状の変更や固定条件の工夫による作用ひずみの分布、とりわけ、最大ひずみと最小ひずみの値と発生箇所に着目する。

従来型および新型鋼製ペローズの寸法をそれぞれ表-1および表-2に示す。鋼製ペローズの製作材料は低降伏点鋼LY225（ $\sigma_y=225$ N/mm²）である。従来型鋼製ペローズの寸法は $R=80$ mm， $r=20$ mm， $b=0$ ， $t=9$ mm， $\delta_y=3.3$ mm（解析モデルBE），新型鋼製ペローズは $R=80$ mm， $b=60$ mm， $\delta_y=4.0$ mm，インナープレートおよびアウタープレートは板厚 $t_p=4.5$ mm， $e=15, 30$ mmである。

表-1 従来型鋼製ペローズの形状（単位：mm）

	円筒部 半径 R	小円部 半径 r	直線 長さ b	板厚 t	高さ
BE	80	20	0	9	100

表-2 新型鋼製ペローズの形状（単位：mm）

	円筒部 半径 R	直線 長さ b	突出部 長さ e	板厚 t	高さ
UB	80	60	15 30	9	100

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、従来型および新型鋼製ペローズの両解析モデルともに板厚方向に対して10分割とした。

図-3 に従来型および新型鋼製ペローズの解析モデル（1/2 モデル）を示す。従来型鋼製ペローズは引張変形時に小円部がウェブに接触するので、桁のウェブ部分についてもモデル化し、鋼製ペローズ本体と桁とが接触する部分には、接触要素を用いて実挙動と近い設置状況を設定する。

図-4 に新型鋼製ペローズの解析モデル（1/2 モデル）を示す。新型鋼製ペ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モデル化した。図-5 に新型鋼製ペローズの接合部周辺の拡大図を示す。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、モデル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ペ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。

インナープレートおよびアウタープレートには、普通鋼板（ $\sigma_y=300$ N/mm²）およびばね鋼板（ $\sigma_y=1,080$ N/mm²）の2種類を設定し、それぞれ $E/100$ （ E ：ヤング率）の2次勾配を有するバイリニア型の特性を仮定し、移動硬化則を考慮する。境界条件は、解析モデルの片方（左側）を固定、もう片方（右側）の橋軸直角方向を固定し、橋軸方向に強制変位を与えた。表-3 には解析ケースを示す。従来型鋼製ペローズの解析ケースはBEで1ケース、新型鋼製ペローズの解析ケースは、インナープレートおよびアウタープレートを設置しないUB_0、インナープレートおよびアウタープレートを設置したUB_1e30（普通鋼板， $e=30$ mm），UB_2e15（ばね鋼板， $e=15$ mm）およびUB_2e30（ばね鋼板， $e=30$ mm）の4ケースである。

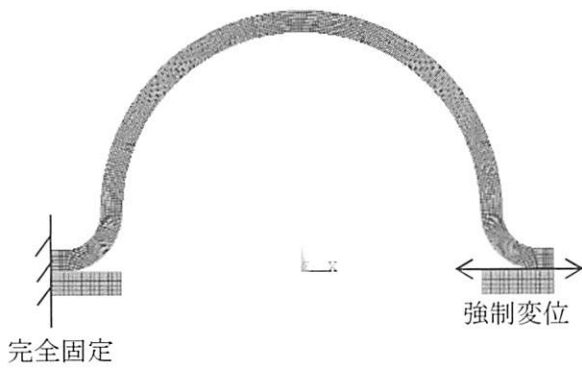


図-3 解析モデル（従来型鋼製ベローズBE）

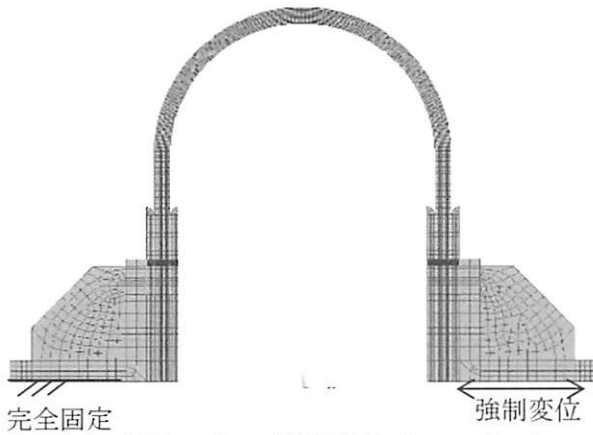


図-4 解析モデル（新型鋼製ベローズUB）

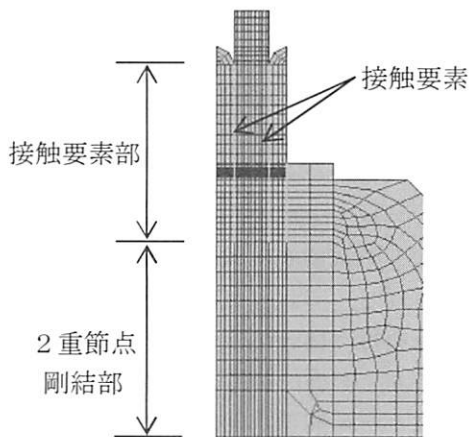


図-5 新型鋼製ベローズUBの接合部周辺の拡大図

表-3 解析ケース

解析ケース	備考
BE	従来型 ($R=80$, $r=20$, $t=9$, LY225)
UB0	新型：インナーおよびアウトプレートなし
UB_1e30	新型：インナーおよびアウトプレートあり（普通鋼板, $e=30$ mm）
UB_2e15	新型：インナーおよびアウトプレートあり（ばね鋼板, $e=15$ mm）
UB_2e30	新型：インナーおよびアウトプレートあり（ばね鋼板, $e=30$ mm）

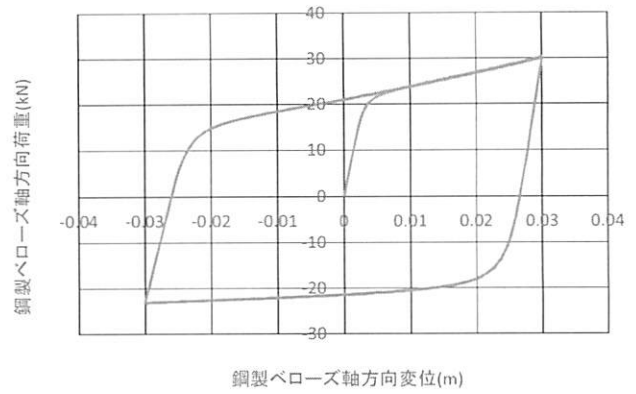


図-6 荷重変位関係（従来型BE）

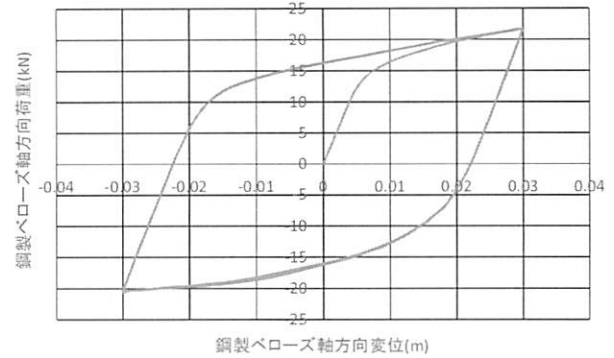


図-7 荷重変位関係（新型UB_2e30）

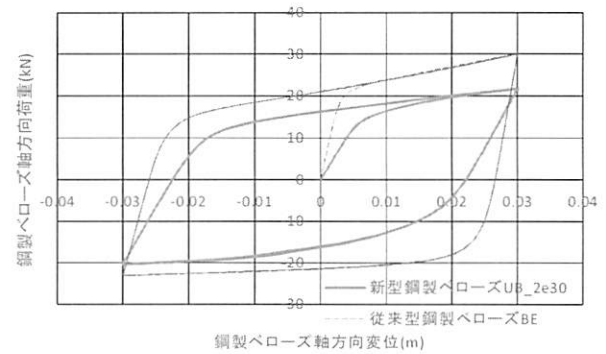


図-8 荷重変位関係（BEおよびUB）

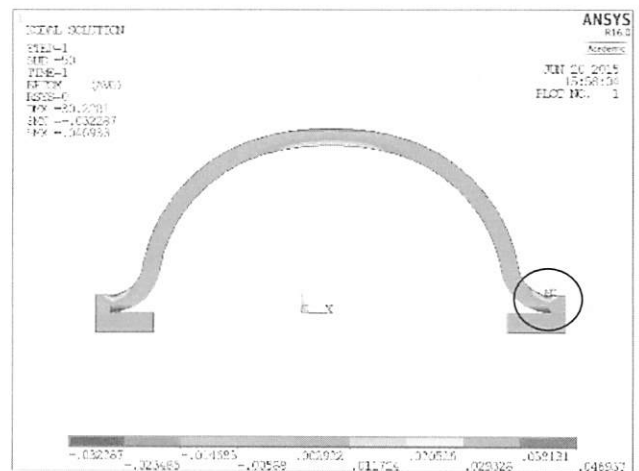


図-9 ひずみコンター図
（従来型BE, 引張30 mm）

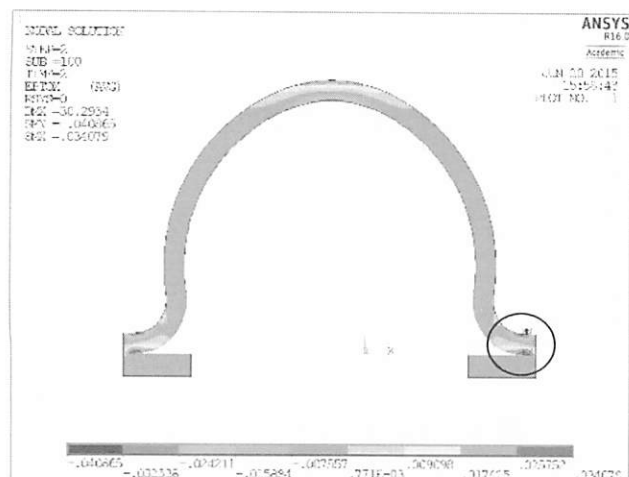


図-10 ひずみコンター図
(従来型BE, 圧縮30 mm)

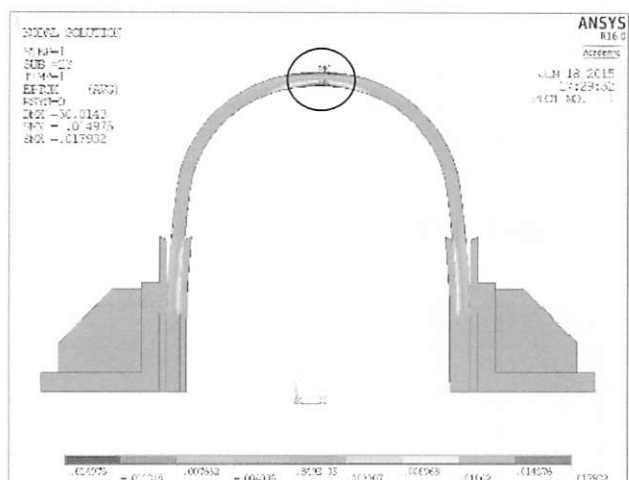


図-11 ひずみコンター図
(新型 UB_2e30, 引張 30 mm)

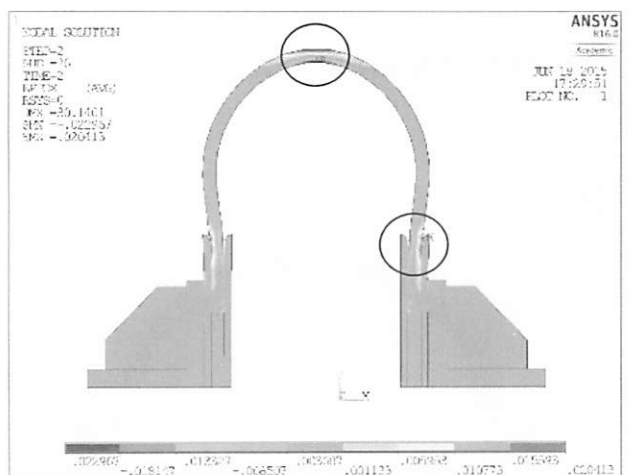


図-12 ひずみコンター図
(新型 UB_2e30, 圧縮30 mm)

表-4 最大・最小ひずみ

解析ケース	引張 30 mm		圧縮 30 mm	
BE	0.0469	-0.0323	0.0341	-0.0409
UB_0	0.0363	-0.0350	0.0322	-0.0321
UB_1e30	0.0230	-0.0267	0.0254	-0.0255
UB_2e15	0.0184	-0.0187	0.0295	-0.0304
UB_2e30	0.0179	-0.0150	0.0204	-0.0230

図-6 および図-7 に従来型 BE の荷重変位関係および新型鋼製ベローズ UB_2e30 の荷重変位関係を示す。縦軸は鋼製ベローズの軸方向荷重、横軸は荷重載荷方向の変位を示す。図-6 および図-7 に示すように、降伏変位の数倍の変位が作用する場合でも、従来型鋼製ベローズは安定した履歴特性を描いていることがわかる。

図-8 には、従来型 BE および新型 UB_2e30 の荷重変位関係を比較して示す。両形式でサイズはほぼ同等であるが、引張 30 mm のときの荷重を比較すると、従来型 BE が 30 kN 程度であったのに対し、新型 UB_2e30 では 22 kN、圧縮 30 mm のときでは、従来型 BE が 23 kN 程度であったのに対し、新型では 20.5 kN であった。また、両形式で、1 次剛性の傾きや降伏荷重にも差が認められたが、これらの差は、小円部の有無による影響であると考えられる。とりわけ、従来型の小円部には小さな半径での曲げ加工により大きな曲げひずみが残留するため、鋼製ベローズ軸方向荷重が大きくなったと考えられる。引張変形時には伸び剛性の影響も加算され、鋼製ベローズ軸方向荷重がさらに大きくなったと考えられる。

以上のように、これまで提案してきた従来型と新型の鋼製ベローズとの荷重変位関係に差が認められやや違いが見られる。ベローズの履歴特性は、強地震時の動的解析を行う場合には履歴型の非線形ばねとして扱われることが多いので、新型のように引張側荷重変位特性と圧縮側荷重変位特性とが近いほうが設計に使いやすいと考えられる。また、従来型鋼製ベローズにおいても、引張側特性と圧縮側特性に違いはあるが、正確に解析設定すればばね特性に置き換えることにおいては問題はない。

図-9 および図-10 に従来型 BE のひずみのコンター図を、図-11 および図-12 に新型 UB_2e30 のひずみのコンター図を示す。○印が最大ひずみ値の発生位置であり、表-4 には、全解析ケースのひずみの最大値をまとめている。従来型 BE では、引張時に 0.0466、-0.0322 のひずみが、圧縮時に 0.0338、-0.0407 のひずみが生じる。最大ひずみの発生個所は、接合部小円部であり、従来型鋼製ベローズのように

円筒部と小円部を有しているベローズ形状では、曲げ加工の影響が大きい小円部が繰り返し変形を受ける場合に疲労強度が低下する可能性がある。ただし、小円部の半径を円筒部半径と同等かそれに近い大きさに設定することにより最大発生ひずみを低減できる。一方、新型鋼製ベローズではいずれの解析ケースもひずみの最大値が減少しており、UB_2e30 では、従来型から小円部をなくすとともに、直線部の応力集中緩和のためのインナープレートおよびアウタープレート設置することによって、ひずみが円筒部中央や直線部に分散して作用し、最大値も従来型 BE と比較して 50%程度軽減できていることがわかる。

図-13 および図-14 に新型 UB_2e15 のひずみのコンター図を示す。引張時、圧縮時とも直線部と取り付け治具の接触位置で最大および最小ひずみが発生している。また、プレートの突出長 e がひずみの最大値に影響を及ぼし、突出長が長い UB_2e30 が UB_2e15 よりも最大値が小さいことがわかる。

図-15 および図-16 に新型 UB_1e30 のひずみのコンター図を示す。突出長 $e=30\text{ mm}$ でインナープレートとアウタープレートの鋼種に着目すると降伏点が高いばね鋼板を用いる方が発生ひずみの最大値が小さいことがわかる。これは、インナープレートおよびアウタープレートを普通鋼板で製作する場合には、鋼製ベローズの変形に伴いインナープレートおよびアウタープレートが塑性変形するためであり、複数回の繰り返し変形を受けると、塑性変形が生じるとプレートを挿入することによる応力低減効果は期待できない。

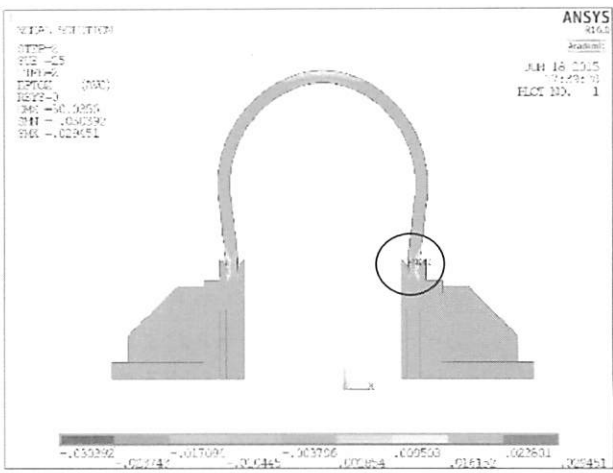


図-14 ひずみコンター図
(新型UB_2e15, 圧縮30 mm)

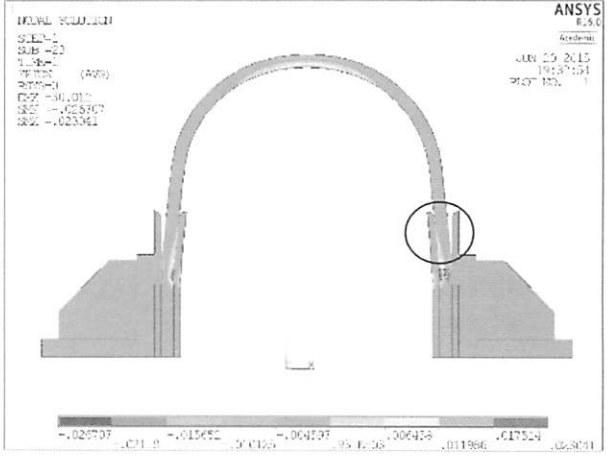


図-15 ひずみコンター図
(新型UB_1e30, 引張30 mm)

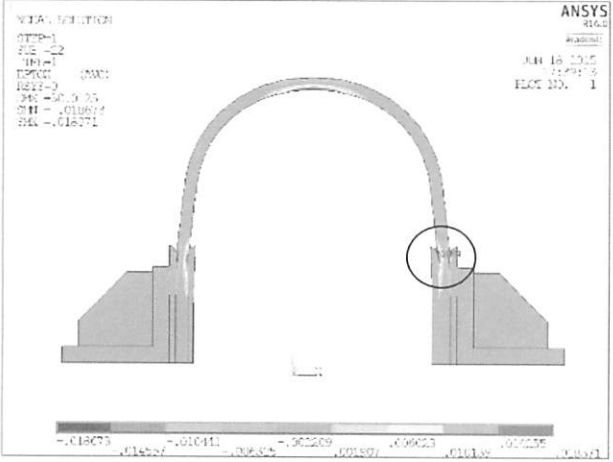


図-13 ひずみコンター図
(新型UB_2e15, 引張30 mm)

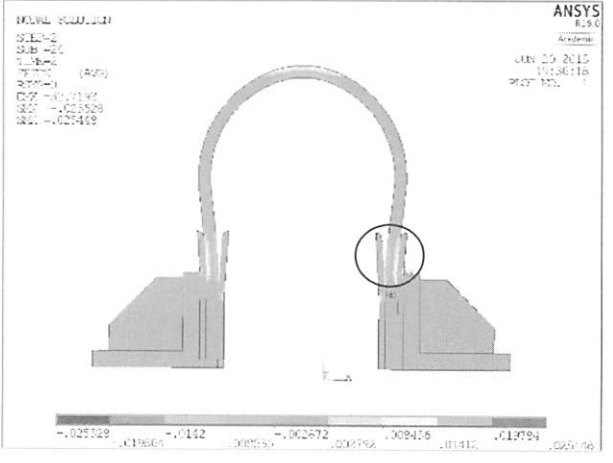


図-16 ひずみコンター図
(新型UB_1e30, 圧縮30 mm)

4. まとめ

本研究では、疲労強度向上を目的として従来型鋼製ベローズからひずみ集中が生じていた小円部を除去した新型鋼製ベローズおよび従来型鋼製ベローズを対象として、降伏変位の7~8倍の圧縮あるいは引張の強制変位を与えるFEM解析を実施した。

その結果、従来型鋼製ベローズが有していた小円部をなくし、かつインナープレートおよびアウタープレートを用いて応力集中の緩和を図ることによって、ひずみが円筒部や直線部に分散して分布するとともに、ひずみの最大値・最小値を大幅に低減できることがわかった。新型鋼製ベローズにおいても、降伏変位の数倍の変位作用に対して安定した履歴ループを描き、従来型鋼製ベローズと同様にエネルギー吸収が期待できることがわかった。また、最大ひずみの低減は鋼製ベローズの疲労寿命の向上に有効であると考えられ、今後、疲労試験を実施し、新型鋼製ベローズの耐疲労特性を確認する予定である。

謝辞：本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金・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) 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，第16回鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，2008.11.
- 2) 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，土木学会，Vol.58A，pp.423-435，2012.3.
- 3) 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.
- 4) 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，2005.12.
- 5) 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.