

第 I 部門

U 型鋼製ベローズの製法や固定端条件の違いによる疲労強度の検討

摂南大学大学院 学生員 〇内山 昌哉
正会員 頭井 洋
高田機工株式会社 正会員 佐合 大

摂南大学 正会員 田中 賢太郎
京都大学大学院 正会員 松村 政秀
株式会社川金コアテック 正会員 姫野 岳彦

1. はじめに

桁端部における地震時の変位を低減し衝突を防止する制震方法として、エネルギー吸収型連結装置（鋼製ベローズ）の実用化が検討されている。鋼製ベローズ（図-1）は鋼板を半円筒状に曲げ加工して製作するため、曲げ加工時のプレスによって縁に生じるへこみ（写真-1）が疲労強度に悪影響を及ぼす可能性がある。また、塗装による防錆処理の前にグラインダー処理（GR 処理）を施すことがあり、これが疲労強度にどの程度影響するか調べる必要がある。さらに、U 型ベローズ固定端に挿入するインナー・アウタープレート（io プレート）の材質、板厚、突出長などの最適条件を求める必要がある。

本研究では、これらベローズの GR 処理効果と io プレートに高張力鋼板 WEL-TEN780（WEL）を用い、ベローズ固定端の変形を抑えることによる応力緩和効果を調べるために疲労試験を行う。また、FEM 解析により試験結果を再現できているかどうかを検討する。

2. FEM 解析の概要

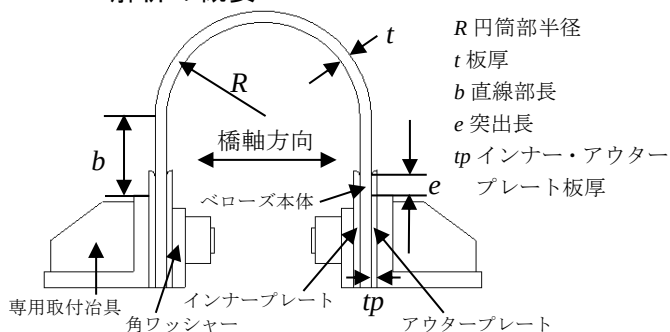


図-1 U 型鋼製ベローズの形状



写真-1 ベローズ円筒部に生じるへこみ

鋼製ベローズの鋼板材料は SN490C を用い、引張試験の結果より、降伏強度 360N/mm^2 、ヤング率 E は $204,700\text{N/mm}^2$ である。材料構成則として

$E/100$ の 2 次勾配を有するバイリニア型の応力-ひずみ関係と移動硬化則を用いた。io プレートの製作材料は、降伏強度 383N/mm^2 級（引張試験結果）の鋼板と、降伏強度 790N/mm^2 （ミルシート）の WEL の 2 種である。U 型鋼製ベローズは io プレートと専用取付治具を含めてモデル化した。FEM 解析では、図-1 に示す U 型鋼製ベローズ（片側）を対象に 2 次元平面ひずみを仮定し、四角形 4 節点ひずみ要素を用いる。解析ソフトウェアは ANSYS16.0 を使用した。メッシュ分割はベローズの板厚方向に 10 分割とした。

3. 疲労試験の概要

昨年度および今年度実施した試験を表-1 に示す。試験ケース名は試験番号 1 を例にとると、 $R=80\text{mm}$, $t=16\text{mm}$, $b=100\text{mm}$, $e=21\text{mm}$, $tp=8.3\text{mm}$, GR 処理ありを表す。ケース 1~3 では変位振幅 $\pm 6\delta_y$ を与えた場合のベローズ本体の GR 処理および io プレート材料の相違によるベローズの疲労強度の比較を、ケース 4, 5 では $\pm 2\delta_y$ を与えた場合のベローズ本体の io プレート材料の相違によるベローズの疲労強度の比較を行う。疲労試験には、摂南大学が所有する最大荷重 100kN 、ストローク $\pm 50\text{mm}$ の疲労試験機を用いた。ベローズの円筒部中央の表裏にひずみゲージを貼り付け、発生ひずみを測定した。予備载荷として $\pm \delta_y$ ($\delta_y=7.2\text{mm}$) を 3 サイクル与えたのち、 $\pm 6\delta_y$ および $\pm 2\delta_y$ を破断に至るまで繰返し载荷した。

4. 試験結果および解析結果との比較

表-2 に各ケースの試験結果を示す。表には完全破断時の回数、最大荷重よりの耐力低下率 10%時

表-1 U 型鋼製ベローズ疲労試験ケース（SN490C）

試験番号	試験ケース名	io プレートの材料	変位振幅 ($\delta_y=7.2\text{mm}$)
1	R80t16b100e21tp8.3GR	降伏強度 383N/mm^2 級の鋼板	$\pm 6\delta_y$
2	R80t16b100e21tp9.0WEL	WEL-TEN780	
3	R80t16b100e21tp8.3 ¹⁾	降伏強度 383N/mm^2 級の鋼板	
4	R80t16b100e21tp9.0WEL	WEL-TEN780	$\pm 2\delta_y$
5	R80t16b100e21tp8.3 ²⁾	降伏強度 383N/mm^2 級の鋼板	

Masaya UCHIYAMA, Kentaro TANAKA, Hiroshi ZUI, Masahide MATSUMURA, Dai SAGO and Takehiko HIMENO tanaka@civ.setsunan.ac.jp

の回数および破断時をエネルギー吸収量 100%としたエネルギー吸収量 70%時の回数を示している。また、ケース 5 は共同研究先にて実施した試験データをもとに整理した結果を掲載している。

図-3 に、例として $\pm 6\delta_y$ の GR 処理および io プレート材料の相違による耐力低下率の差異を示す。横軸に加振回数を、縦軸には耐力低下率を示す。GR 処理の効果による疲労特性は、GR 処理しない場合と大きな違いはなく、防錆処理を施す際の GR 処理が疲労強度に与える影響は小さいという結果が得られた。io プレートに高強度鋼板を用いた場合の疲労特性についても、疲労強度に与える影響は小さいという結果が得られた。これは io プレートを高強度にすることで、ベローズ直線部 b (図-1) 固定端近傍の拘束力が増加し、ベローズ円筒部のひずみが少し増加したために、破断回数が減少したと考えられる。WEL は高価なこともあり、降伏強度 383N/mm^2 級の鋼板を用いる方が妥当といえる。

図-4 にケース 3 の $\pm 6\delta_y$ の 1, 50, 100 サイクル目の荷重-変位関係と解析結果とを示す。安定した履歴ループを描き、試験と解析との結果はほぼ一致し、とくに両者の変位量が最大・最小のときの荷重に関しては大きな違いはない。しかし、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おらず、解析値の方がやや過大なエネルギー吸収量を与える。

図-5 に円筒部中央裏側におけるひずみの試験値と解析値を示す。横軸にベローズの変位を、縦軸には円筒部中央裏側のひずみを示す。 $\pm 1\delta_y$ の場合は試験値と解析値とはよく一致しているが、 $0 \sim +6\delta_y$ の場合は、変位が 10mm より大きくなるにつれ、試験値は解析値に比べ小さくなっている。この差は変位が 10mm を超えると、供試体とひずみゲージとの間に剥がれが生じたことが一因と考えられる。

5. まとめ

- (1) 塗装による防錆処理を施す際に実施される GR 処理が疲労強度に与える影響は小さい。
- (2) io プレートに高強度鋼板を用いても、疲労強度に与える影響は小さい。
- (3) ひずみ量を評価するために試験値と FEM 解析

値とを比較したが、ベローズの R/t が小さく曲率を有するため、ゲージの接着強度を確保しにくく、変位が 10mm を超えるとひずみの正確な計測が難しくなる。変位が 10mm までは試験値と解析値とはよく一致しており、FEM 解析値を損傷評価のひずみ値に用いることとする。

<参考文献>

- 1) 田中賢太郎他：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，第 25 回鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，第 25 巻，pp.328-334，2017.11.
- 2) アハメド アラファト他：U 型鋼製ベローズの繰返し載荷実験と解析，第 25 回鋼構造年次論文報告集，日本鋼構造協会，第 25 巻，pp.319-327，2017.11.

表-2 各ケースの破断，10%耐力低下，エネルギー吸収量 70%時の回数

試験番号	試験ケース名	破断回数	耐力低下率 10%時の回数	エネルギー吸収量 70%時の回数
1	R80t16b100e21tp8.3GR	115	100	82
2	R80t16b100e21tp9.0WEL	119	103	83
3	R80t16b100e21tp8.3 ¹⁾	124	105	89
4	R80t16b100e21tp9.0WEL	1525	761	1083
5	R80t16b100e21tp8.3 ²⁾	1688	235	1170

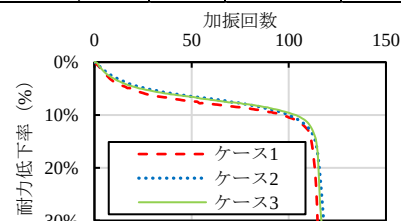


図-3 試験結果の比較 ($\pm 6\delta_y$)

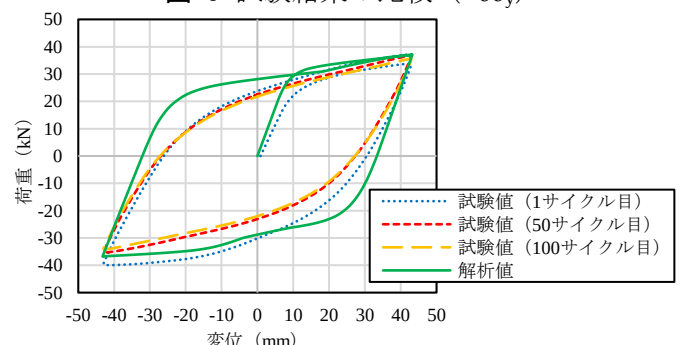


図-4 荷重-変位関係 (ケース 3)

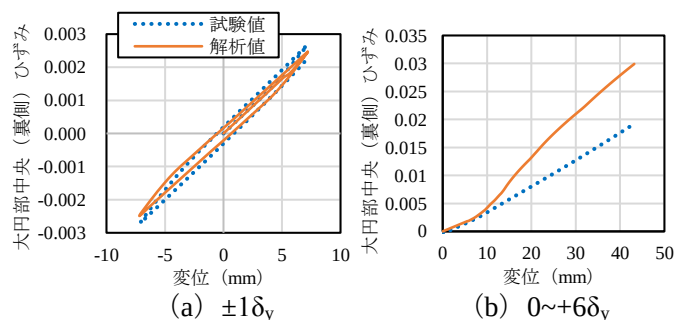


図-5 ベローズの変位と円筒部中央のひずみ関係