

## U型鋼製ベローズのS-N曲線とMiner則の適用性

摂南大学 正会員 田中賢太郎

正会員 頭井 洋

京都大学大学院 正会員 松村 政秀 高田機工株式会社

正会員 佐合 大

株式会社川金コアテック 正会員 姫野岳彦

## 1. はじめに

地震時の桁同士の衝突を防止し、上下部構造に生じる地震作用力を低減する制震装置（鋼製ベローズ）を桁間に設置する方法が検討<sup>1)</sup>されている。

本研究では、常時の桁の温度伸縮と強地震時挙動を想定した低サイクル疲労試験及び強地震時を想定した極低サイクル疲労試験を実施（一定変位振幅）する。また、U型鋼製ベローズの耐力低下の状況を調べる。試験ケースのFEM解析を行い、試験結果と比較し、解析の再現性が高いかどうか検討する。試験結果と解析結果をもとに、S-N曲線を作成し、変動変位振幅の疲労試験よりMiner則の適用性を検討する。

2. U型鋼製ベローズの概要<sup>1)</sup>

図-1にU型鋼製ベローズ（片側）の形状と各寸法の記号は、 $R$ ：円筒部半径、 $b$ ：直線部の長さ、 $t$ ：板厚を示す。U型鋼製ベローズは、板厚 $t = 10 \sim 30\text{mm}$ 程度の鋼板をU字型に曲げ加工し、直線部に治具を取り付け2枚1組にして桁端部へ接合する。固定端のひずみを低減させ疲労破断の発生箇所を大円部中央に特定するため、取り付け治具には突出長 $e$ を設けてインナープレートおよびアウタープレートを設置する構造となっている。円筒部半径80mm、直線部長さ100mm、ベローズ板厚16mm、突出長21mm、インナー・アウタープレート板厚8.3mmを用いた。今回実施した曲げ半径と板厚との比 $R/t = 5$ は板曲げ加工が可能な最小比である。

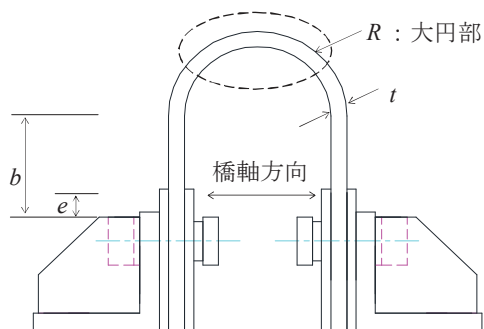


図-1 U型鋼製ベローズの各寸法の記号

## 3. FEM解析の概要および塑性ひずみ振幅

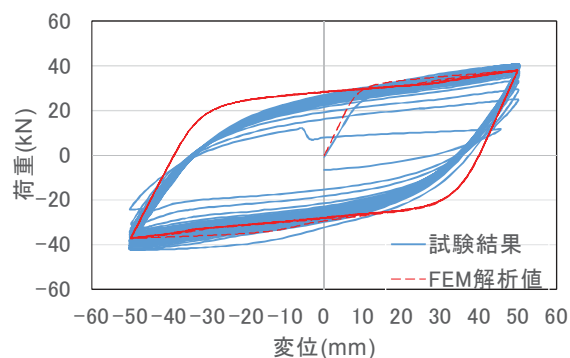
S-N曲線を作成するために塑性ひずみ振幅は、FEM解析より求めることとする。FEM解析では、U型鋼製ベローズ（片側）を、ANSYS16.0を用い2次元平面ひずみを仮定し、四角形4節点平面ひずみ要素を用いる。メッシュ分割状況は、U型鋼製ベローズの板厚方向には10分割、インナープレートおよびアウタープレート

については4分割した。材料特性は、鋼種SN490Cの引張試験の結果より降伏点 $\sigma_y = 360\text{ N/mm}^2$ を、インナー・アウタープレートには、降伏強度が $383\text{ N/mm}^2$ 級の材料を用いて、移動硬化則を設定し、 $E/100$ の2次勾配を有するバイリニア型特性を仮定した。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。インナープレートおよびアウタープレートとベローズ本体間には接触要素を用いる。表-1に、試験ケースの塑性ひずみ振幅の算出結果を示す。塑性ひずみ振幅の算出は、U型鋼製ベローズの引張側変形時に生じた塑性ひずみと圧縮側変形時に生じた塑性ひずみとを足し合わせた値とした。

## 4. U型鋼製ベローズの疲労試験

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る。試験装置上側を固定側とし、下側に引張側から $\pm \delta_y$  ( $\delta_y = 7.2\text{ mm}$ ) 強制変位を3回与えたのち、変位振幅を与え破断に至るまで繰返し与える。図-2にU型鋼製ベローズの試験番号5 ( $\pm 6.94\delta_y$ ) の荷重-変位関係を示しており、FEM計算値と試験値とはよく一致している。

試験ケースの疲労強度回数は、完全破断回数、10%耐力低下時の回数、累積エネルギー吸収量70%時の回数を抽出し、破断箇所の確認する。なお、累積エネルギー吸収量70%時の回数は、破断にいたるまでの総エネルギー吸収量の70%のエネルギー吸収量に達した繰返し数である。破断回数の70%の回数とほぼ等しい。一定変位振幅下の繰返し载荷の試験ケースおよびFEM解析による算出した塑性ひずみ振幅と疲労試験結果は表-1に、変動変位振幅下の繰返し载荷の試験ケースの疲労試験結果は表-2に示す。载荷速度は、計測ひずみ値が $1000\mu\text{ s}$ 以下となるように設定した。

図-2 試験番号5 ( $\pm 6.94\delta_y$ ) の荷重-変位曲線  
(試験結果とFEM解析との比較)

キーワード 制震装置、疲労試験、FEM解析、疲労強度、Miner則

連絡先 〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8 摂南大学理工学部都市環境工学科

TEL072-800-1143 E-mail: tanaka@civ.setsunan.ac.jp

表－1 一定変位振幅下の試験ケースおよび塑性ひずみ振幅値（FEM 解析値）と疲労強度回数

| 試験<br>番号 | 変位振幅                                             | 塑性ひずみ<br>振幅（解析値） | 破断時<br>回数 | 耐力低下率<br>10%時の回数 | 累積エネルギー<br>吸収量 70%時回数 |
|----------|--------------------------------------------------|------------------|-----------|------------------|-----------------------|
| 1        | $\pm 2.0\delta_y$                                | 0.014017         | 1688      | 235              | 1170                  |
| 2        | $\pm 3.0\delta_y$                                | 0.028189         | 531       | 340              | 372                   |
| 3        | $\pm 4.0\delta_y$                                | 0.040343         | 360       | 292              | 196                   |
| 4        | $\pm 6.0\delta_y$                                | 0.062640         | 124       | 105              | 89                    |
| 5        | $\pm 6.94\delta_y$                               | 0.071652         | 78        | 60               | 57                    |
| 6        | 0 $\sim$ +20 $\delta_y$ ( $\pm 10.0\delta_y$ 相当) | 0.089842         | 27        | 25               | 20                    |
| 7        | $\pm 12.0\delta_y$                               | 0.114617         | 18        | 15               | 12                    |

表－2 変動変位振幅下の試験ケース  
および疲労強度回数

| 試験<br>番号 | 変位振幅                                                                                                                                                                       | 累積エネルギー<br>吸収量 70%時回数                                                       |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 変動 1     | $\pm 2.0\delta_y \times 20$ 回<br>$\rightarrow \pm 4.0\delta_y \times 20$ 回<br>$\rightarrow \pm 6.0\delta_y \times 10$ 回を 3<br>サイクル $\rightarrow \pm 6.0\delta_y$ を<br>破断まで | $\pm 2.0\delta_y$ : 60<br>$\pm 4.0\delta_y$ : 60<br>$\pm 6.0\delta_y$ : 66※ |
| 変動 2     | $\pm 2.0\delta_y \times 100$ 回<br>$\rightarrow \pm 6.0\delta_y$ を破断まで                                                                                                      | $\pm 2.0\delta_y$ : 100<br>$\pm 6.0\delta_y$ : 78※                          |

※累積エネルギー吸収量 70%時の回数

5. S-N 曲線の作成および Miner 則の適用性

表－1 に示す FEM 解析により抽出した塑性ひずみ振幅と各ケースの疲労試験結果を用いて、低サイクル疲労領域および極低サイクル疲労領域の S-N 曲線を作成した。図-3 に、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$  の FEM 解析結果から塑性ひずみ振幅、試験結果からエネルギー吸収量 70%時の回数をプロットし、Manson-Coffin 型の関係式  $\epsilon \cdot N^k = C$  により低サイクル領域の定数  $k$  ( $=0.594$ )、 $C$  ( $=0.9348$ ) を求めた。図-4 も同様に、 $\pm 6\delta_y$ 、 $\pm 6.9\delta_y$ 、0 $\sim$ +20 $\delta_y$  ( $\pm 10\delta_y$  相当)、 $\pm 12\delta_y$  の FEM 解析、試験結果をプロットし、極低サイクルの  $k$  ( $=0.284$ )、 $C$  ( $=0.2228$ ) を求めた。また、参考文献[1]の U 型鋼製ペローズ本体に焼き鈍しを加え、変位振幅  $\pm 6\delta_y$  の試験ケースもプロットしたところ、ほぼ S-N 曲線上にあることがわかる。

作成した S-N 曲線を用いて、表－2 に示す変動変位振幅下の繰返し载荷の試験ケースの疲労試験結果を用い、Miner 則が成立しているかを確かめる。Miner 則は損傷度  $D$  として、あるひずみ  $\epsilon$  に対する疲労寿命を  $N_i$ 、そのひずみ  $\epsilon$  を与えた回数を  $n_i$  とし  $D = \sum n_i / N_i$  で表される。変動 1 の試験結果に Miner 則を適用すると、損傷度  $D = 1.12$  と、変動 2 では損傷度  $D = 0.96$  となった。限られた試験ケースではあるが、Miner 則が成立しているといえよう。なお、今回は板曲げ加工が可能な最小比  $R/t = 5$  の U 型鋼製ペローズを用いたが、この値を大きくすれば、疲労強度の上昇が期待できる。

6. まとめ

FEM 解析で得た塑性ひずみ値と試験結果より、Manson-Coffin 則を用いて、低サイクル領域と極低サイクル領域の S-N 曲線を作成した。また、変動変位振幅下における疲労試験結果に Miner 則を適用し、2 ケースの変動変位振幅の試験結果いずれも Miner 則が成立することが確認できた。

橋梁全体系モデルを用いて、動的解析を行い U 型鋼製ペローズの適用性や疲労寿命評価をする予定である。

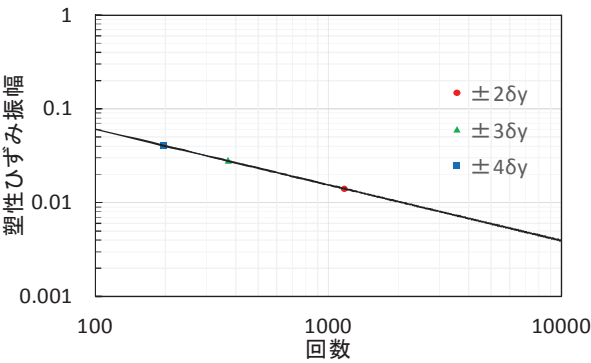


図-3 低サイクル疲労の S-N 曲線

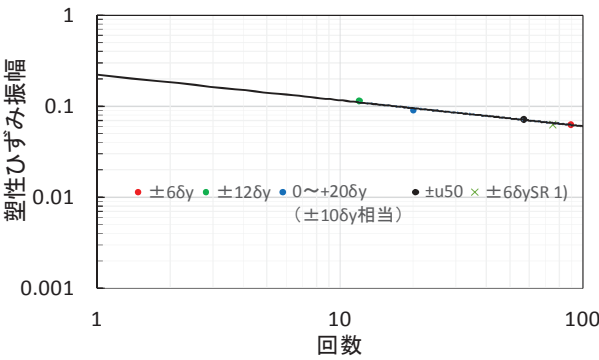


図-4 極低サイクル疲労の S-N 曲線

謝辞：本研究は平成 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) により実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 田中 賢太郎・頭井 洋・松村 政秀・佐合 大・姫野 岳彦：低サイクル疲労試験による U 型鋼製ペローズの疲労強度，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.