

エネルギー吸収型桁連結装置の低サイクル疲労寿命予測についての一考察

関東学院大学大学院 学生会員 ○倉持 伸伍

摂南大学 正会員 田中賢太郎

関東学院大学 正会員 北原 武嗣

摂南大学 正会員 頭井 洋

大阪市立大学大学院 正会員 松村 政秀

川金コアテック 正会員 吉田 雅彦

1. はじめに

兵庫県南部地震発生後、ゴム系支承が積極的に採用され下部構造の地震時安全性は向上する一方、上部構造の応答変位が大きくなり、大地震時には隣接する桁間で衝突を生じる可能性が懸念されている。その対策として、桁間衝突の緩和装置が必要となってきた。

都市高架橋に適用可能なエネルギー吸収型桁連結装置として、鋼製ペローズの適用が検討されている¹⁾。桁間を柔に連結する鋼製ペローズには、地震時繰り返し変形に加え、常時の桁の温度伸縮により塑性変形が生じる可能性があり、鋼製ペローズの低サイクル疲労特性を検討する必要がある。

そこで、本研究は、低サイクル疲労試験およびFEM解析により鋼製ペローズの疲労寿命評価し、常時の温度変化に対する鋼製ペローズの耐久性を検討する。

2. 鋼製ペローズについて

図1に鋼製ペローズの断面図を示す。鋼製ペローズは、曲げ加工した半円状の鋼板2枚を1組として桁間に設置し、桁間衝突の緩和およびエネルギー吸収を図る制震装置であり、橋軸方向、橋軸直角方向のエネルギー吸収性能を期待でき、安価で取り換えが容易という特徴を有している。

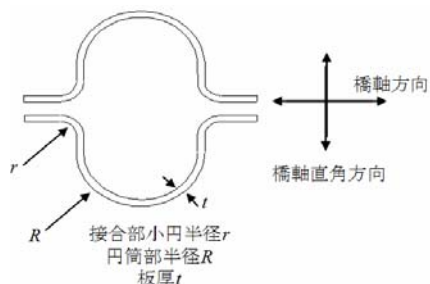


図1 鋼製ペローズ断面図

3. 低サイクル疲労試験

低サイクル疲労試験は、株式会社川金コアテック所有の最大荷重 3000kN の疲労試験機を用い実施した。試験供試体は、鋼材：SM400、円筒部半径 R ：80mm、接合部小円半径 r ：20mm、板厚 t ：9mm、ペローズ高さ：100mm となるように冷間曲げ加工により製作した。

写真1(a)に載荷状況を示す。高力ボルトを用い、2本の M20 高力ボルトを用いて、鋼製ペローズ両端部を実験治具に固定する。試験装置下側を固定点とし、上

側を上下方向に移動させて繰り返し載荷を行う。

荷重、ひずみ、およびペローズの変位量を計測し、ひずみゲージは、ペローズ円筒部の頂点、およびペローズの接合部小円半径の固定部近傍位置に、裏表それぞれ貼付した。

変位振幅 $\pm 10\text{mm}$ 、 $\pm 30\text{mm}$ 、 $\pm 50\text{mm}$ の3ケース設定して、変位制御による完全両振り試験を行い、試験体が破断するまで繰り返し軸方向変位を与えた。

破断回数は、ペローズ変位 $\pm 10\text{mm}$ の場合 1187回、 $\pm 30\text{mm}$ の場合 104回、 $\pm 50\text{mm}$ の場合 32回で完全破断した。破断箇所は、各ケースともボルト固定端側の接合部から接合部小円にさしかかる箇所であった。

写真1(b)に変位振幅 $\pm 50\text{mm}$ の破断状況を示す。繰り返し載荷により、円筒部頂点にやや突き出た形に塑性変形が生じ、接合部小円は内側に押し込まれている。この破断状況から、圧縮側から引張側に移行してすぐに破断したと考えられる。

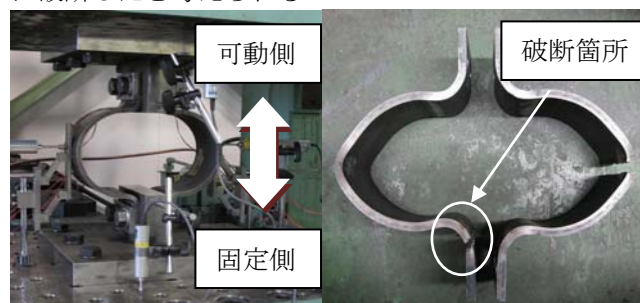


写真1 実験状況

4. FEM 解析

4. 1 解析モデルの概要および解析方法

四角形8節点の平面ひずみ要素でモデル化を行い、板厚方向に8分割して板厚方向1、橋軸方向1.5の割合でメッシュ分割した。汎用有限要素解析ソフト DIANA9.4.2を用いた。

材料特性は引張試験より、ヤング率 $E_1 = 1.99 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、降伏強度 $\sigma_y = 288.3 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比0.3とし、2次剛性は E_1 の1/100のバイリニア型特性の応力-ひずみ関係を設定した。境界条件は、端部を完全固定とし、一方の端部を橋軸方向に強制変位を与えた。

強制変位量は、実験では正確には一定の変位振幅を与えられなかったため、引張側および圧縮側の最大変位を平均し、この範囲を変位振幅範囲として発生ひず

キーワード 鋼製ペローズ、エネルギー吸収型桁連結装置、低サイクル疲労試験

連絡先 〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1 関東学院大学工学部社会環境システム学科

TEL045-786-7857 E-mail : kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

み値が安定する5サイクルまで弾塑性解析をした。

4. 2 実験結果と解析結果との比較

図2に代表例として $\pm 50\text{mm}$ の解析結果と実験結果との1サイクル目の荷重-変位関係を示す。荷重値は、 $+50\text{mm}$ では4%、 -50mm では15%程度実験結果が大きくなった。この要因としてベローズの製作に伴う加工硬化や残留ひずみによる影響が考えられるが、おおむね荷重-変位関係は再現できたとわかる。

表1に円筒部裏側と表側の全ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_f$ の実験結果との比較を示す。全ひずみ範囲は引張側最大ひずみから圧縮側最大ひずみとの範囲と定義する。実験結果と解析結果のひずみ値は、円筒部裏側で、実験結果0.0913に対し解析結果では、0.0910でほぼ同じ値を示している。これらの結果より取り付けの関係で最大ひずみが計測できていないため、解析により最大ひずみ箇所をひずみを算出し、疲労寿命評価を行う。最大ひずみは、ベローズ両端部から接合部小円部に差し掛かる箇所の表側表面に生じている。

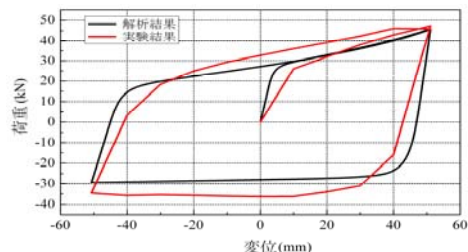


図2 実験結果と解析結果の荷重-変位関係

表1 全ひずみ範囲比較

	全ひずみ範囲	
	円筒部裏側	円筒部表側
実験結果	0.09128	0.08510
解析結果	0.09099	0.07815
誤差(%)	0.3	8.2

5. 桁の温度伸縮による疲労寿命予測

解析結果より、最大ひずみ箇所の塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ は解析ケース $\pm 10\text{mm}$:0.03218, $\pm 30\text{mm}$:0.09870, $\pm 50\text{mm}$:0.14392となった。

各ケースの実験結果から得られた破断回数および解析の最大ひずみ箇所の塑性ひずみ範囲から式(1)に示すManson-Coffin則の材料定数 k_p , C_p を算出する。

$$\Delta\varepsilon_p \times N_f^{k_p} = C_p \quad (1)$$

ここに、 $\Delta\varepsilon_p$:塑性ひずみ範囲, N_f :破断までの繰返し数, k_p , C_p :材料定数。

材料定数 k_p , C_p を最小二乗法より $k_p=0.421$, $C_p=0.651$ とした。鋼製ベローズの繰返し回数 N と塑性ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_p$ の関係を図3に示す。同様に、鋼製ベローズの最大荷重から20%耐力低下したところでの繰返し回数より求めた疲労曲線を示す。

ここで、桁の温度伸縮による鋼製ベローズの疲労寿命評価の設計コンセプトについて簡単に示す。

常時の桁の温度伸縮により、鋼製ベローズに大きな塑性ひずみが生じないように、設計降伏変位を既存の設計式により算出する。なお、ここでの設計降伏変位は、初降伏変位の2倍まで、荷重-変位関係は線形性を保つため、設計式により求めた初降伏変位の2倍とする。

2010年の東京の年間気温のデータをもとに、最高気温と最低気温の温度差の回数を表2に示す。1年間当たりの温度差 $5\sim 10^\circ\text{C}$ の割合が多いこと、逆に $15\sim 20^\circ\text{C}$ の温度差は1回しか生じないことがわかる。このような頻度が少ない温度伸縮に対しては、ある程度の局所的な塑性ひずみを許し、コンパクトな鋼製ベローズを用いる。疲労寿命評価は、温度頻度から考えて $10\sim 15^\circ\text{C}$ の回数が大きく疲労寿命に影響すると考えられるので、たとえば、 $\pm 15^\circ\text{C}$ の桁の温度伸縮を設計降伏変位とする。そして、図3に示す $\Delta\varepsilon_p$ - N 曲線(20%耐力低下)を用いて、鋼製ベローズの耐用年数20~30年程度は性能劣化がないことを、Miner則を用いて確認する。

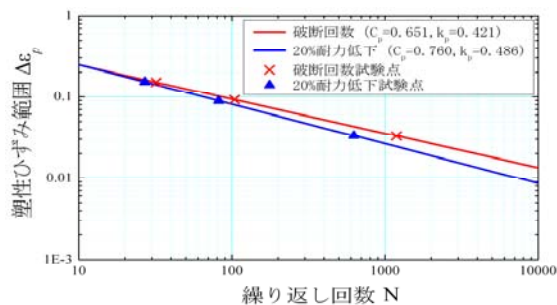


図3 $\Delta\varepsilon_p$ - N 関係

表2 2010年気温変化の回数(東京)

最高気温と最低気温との差	回数
0~5°C	68
5~10°C	254
10~15°C	42
15~20°C	1
20~25°C	0

6. まとめ

- 1) 実験と解析結果に基づいて、鋼製ベローズの疲労寿命曲線を作成した。
- 2) 1日当たりの温度変化量に着目して、桁の温度伸縮による鋼製ベローズの疲労寿命予測に基づく設計法を示した。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金・基盤研究(A)(研究代表者:北田俊行), 課題番号:20246077)の助成を受けた。実験実施には、川金コアテック高橋徹様のご協力を得た。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・北田俊行・村松政秀: 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, 日本鋼構造協会, pp.77-88, 2005。