

座屈拘束ブレースの低サイクル疲労特性

(株)長大 正会員 佐藤 崇 ○名城大学 フェロー 宇佐美 勉

1. 緒言

BRB などの制震ダンパーは主に地震時の振動に対して設計されるため、低サイクル疲労による損傷を考慮しなければならぬ。低サイクル疲労の研究は 1954 年のジェット旅客機コメットの墜落事故以来、これまで航空機の機体はもちろんのこと、機械分野や造船分野、プラント分野や貯水槽などで数多く行われている。また橋梁の分野では、阪神・淡路大震災において鋼構造物の低サイクル疲労による損傷事例が多数報告され、近年、地震による低サイクル疲労、さらには外力の繰り返し回数が数回程度で破壊する、極低サイクル疲労強度の検討が報告されている。しかしこれらの多くは素材レベルでの検討であり、実際の **BRB** を使用した疲労特性の研究はほとんど行われていない。本論文では同一寸法の供試体を 4 体製作し、異なる一定ひずみ振幅の下で疲労実験を行い、ひずみ-低サイクル疲労寿命関係を明らかにし、その結果を基に **BRB** の低サイクル疲労照査法を検討する。

2. 疲労実験概要

疲労実験で使用した供試体は、ブレース材は図-1に示す幅100mm、板厚10mm、変形部の長さ $L=1,375\text{mm}$ の平鋼 (SM400Aで、 $\sigma_y=291\text{MPa}$) を、拘束材には幅200mm、板厚15mmの平鋼 (SM400Aで、 $\sigma_y=260\text{MPa}$) を使用した。平鋼を使用して製作したBRBの断面構成図を図-2に示す。本疲労実験のBRBは全体座屈を生じないように設計されており、同一寸法の供試体を4体製作した。載荷装置には図-3に示す名城大学高度制震実験・解析研究センター (ARCSEC) の大型構造実験フレームを用いた。載荷パターンは $\pm 1\delta_y$ の定振幅載荷を2ループ行った後、FE-1.0はブレース材平行部の長さ L の片側1%ひずみが生じる変位で両振り定振幅載荷を行い、供試体のピーク荷重の10%低下した時点まで繰り返す。同様にFE-2.0は片側2%、FE-3.0は片側3%、FE-4.0は片側4%の両振り定振幅載荷を行った。

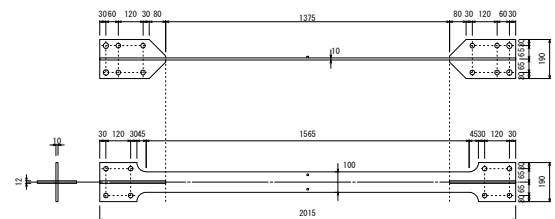


図-1 ブレース材全体図

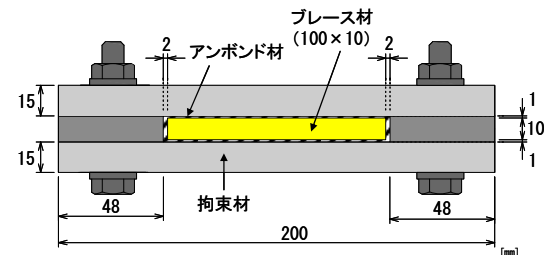


図-2 BRB の断面構成図

3. 疲労実験結果

図-4 に疲労実験の応力-ひずみ関係を示す。引張側を正とし、縦軸には、軸方向荷重 P をブレース材の断面積 A で割った σ [MPa]、横軸は軸方向変位 δ をブレース材の平行部の長さ L で割った ε [%] である。まず FE-1.0 の履歴曲線を見ると 112 回目のループの引張側で荷重が急激に低下し、ピーク荷重の 10% 荷重が低下したため実験を終了した。同様に FE-2.0 は 29 回目のループ、FE-3.0 は 14 回目のループ、FE-4.0 は 7 回目のループで荷重が低下した。また実験終了後のブレース材の変形状況を図-5 に示す。4 体とも亀裂が生じており、異なる箇所から亀裂が発生している。

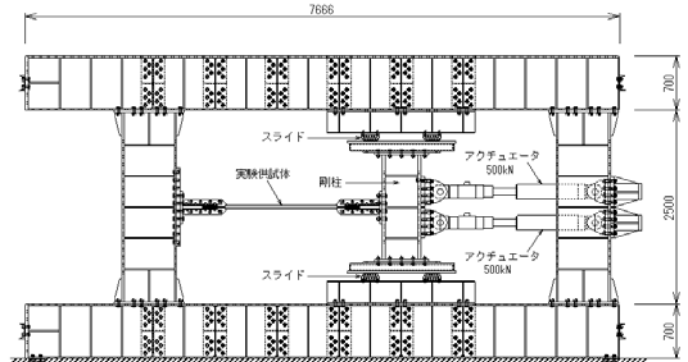


図-3 実験装置

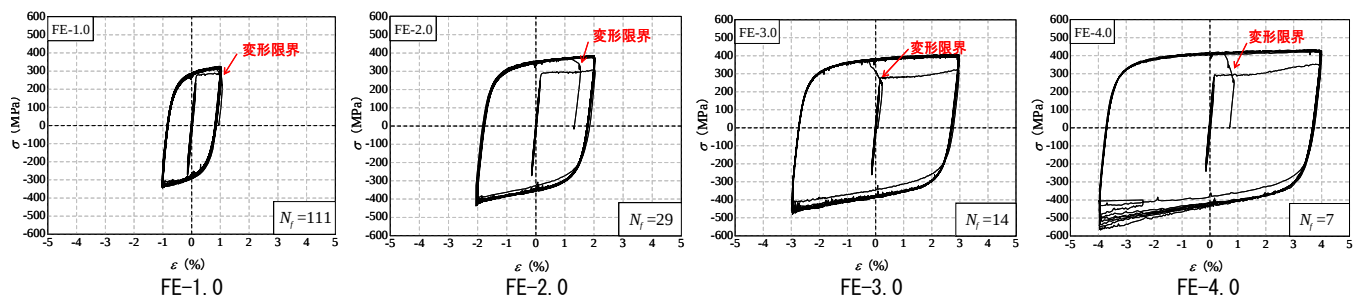


図-4 応力—ひずみ関係

キーワード：制震ダンパー，座屈拘束ブレース，低サイクル疲労

連絡先：〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学研究科建設システム専攻 TEL:052-838-2363

4. 疲労特性

多くの材料について低サイクル疲労における寿命 N_f は、一定塑性ひずみの範囲 ε_p に支配されており、次式の Manson-Coffin 則が成り立つとされている。なお一定全ひずみ範囲は一定塑性ひずみ範囲とほぼ等しく、実用性を考え全ひずみ範囲として考える。

$$N_f = C^{-1}(\Delta\varepsilon)^{-m} \quad (1)$$

ここで N_f : 破断繰返し数, C , m : 材料定数, ε : 一定全ひずみ範囲 (今後はひずみ範囲とする) である。本疲労実験で得られた結果も式 (1) に適用できるとすると、表-1 に示す疲労実験結果から材料定数 C , m を非線形最小二乗法を使用して求めると、次式が得られる。

$$C=18.5, m=1.95 \quad (2)$$

図-6 は縦軸にひずみ範囲 ε と、横軸に破断までの繰返し数 N_f を両対数グラフにプロットし、求めた式 (1) を表したものである。一方、Manson-Coffin 則を使用した低サイクル疲労強度予測手法の 1 つとして Miner 則があげられる。Miner 則は、ある一定ひずみ範囲 ε_i での破断までの繰返し数を N_{fi} とすると、一回の繰返しによる損傷は $1/N_{fi}$ となり、その一定ひずみ範囲を実際に与えた回数を n_i とすると、Miner 則は次式で表すことができる。

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_{fi}} = C \sum_{i=1}^n (\Delta\varepsilon_i)^m \quad (3)$$

上式の D は累積疲労損傷度 (以下損傷度と省略する) であり、1.0 に達すれば理論上破壊することとなる。実際に計測されるひずみデータは一定ひずみ範囲では無いため、レインフロー法などのカウント法で正しい変動ひずみ範囲を計算する必要がある。続いて式 (3) に、式 (2) の材料定数 C と m を代入すると次式となる。

$$D = 18.5 \sum_{i=1}^n (\Delta\varepsilon_i)^{1.95} \quad (4)$$

この式 (4) を用い、文献 1) で行った性能実験で、全体座屈を生じなかった供試体の損傷度 D を算出した結果を表-2 に示す。全ての供試体は破断していないため $D < 1$ であることが分かる。全体座屈を生じなかった供試体は、目標性能である累積塑性ひずみ 70%、最大軸ひずみ 3% を満たしている供試体であるため、文献 1) で提案した限界値は、低サイクル疲労に対しては十分安全側であることがわかる。なお Manson-Coffin 則の材料係数 C と m は様々な文献で提案されている。図-6 は本論文で使用した BRB の低サイクル疲労寿命関係、前田らが行ったモルタル充填型の BRB の低サイクル疲労寿命関係、西村らが構造用鋼材に対して行った素材実験での低サイクル疲労寿命関係を比較したものである。BRB の実構造物で疲労実験を行った結果と、素材実験とは大きな違いがあるが、BRB の形状によるひずみ-疲労寿命関係には大きな差はない。そのため、Miner 則で損傷度 D を算出する際も、ブレース材の材質さえ同様であれば BRB の形状による D の値には大きな違いはないと考えられる。

5. 結言

一定ひずみ振幅の下で疲労実験を行い、本研究で使用した BRB のひずみ-低サイクル疲労寿命関係を明らかにし、BRB の低サイクル疲労強度予測手法の 1 つとして式 (4) を提案した。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, 佐藤崇, 葛西昭: 高機能座屈拘束ブレースの研究開発, 土木学会構造工学論文集 Vol.55A に掲載予定, 2009.3.
- 2) 西村俊夫, 三木千壽: 構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性, 土木学会論文報告集, 第 279 号, pp.29-44, 1978.
- 3) 中村博志, 前田泰史, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 実大アンボンドブレースの疲労特性 (その 2: 実験結果), 1999 年日本建築学会学術講演梗概集 C-1, pp.815-816, 1999.9.

表-1 疲労実験結果

供試体	$\Delta\varepsilon$ [%]	N_f
FE-1.0	2.0	111
FE-2.0	4.0	29
FE-3.0	6.0	14
FE-4.0	8.0	7

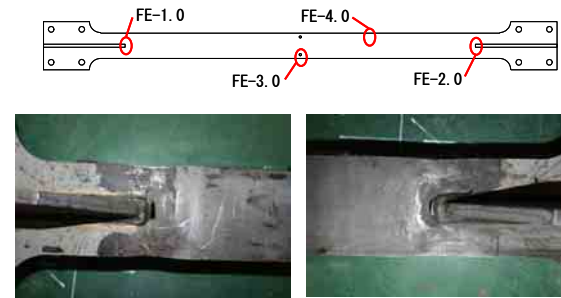


図-5 ブレース材の変形状況

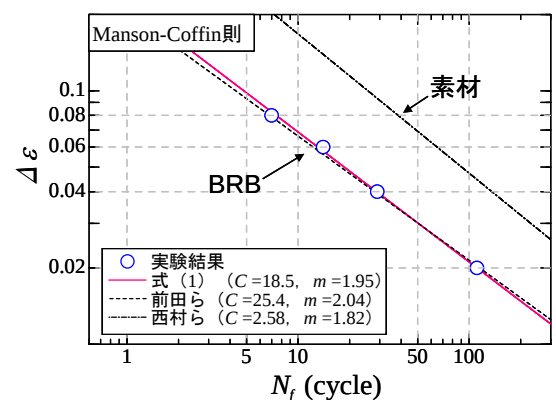


図-6 ブレース材の変形状況

表-2 文献 1) で行った性能実験での損傷度 D

供試体	累積塑性軸ひずみ CID [%]	最大軸ひずみ ε_{max} [%]	D
W30-d1-1A	>3.08	>81	0.520
W40-d1-4	>3.07	>74	0.395
W40-d1-6	>3.06	>73	0.378