

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 1 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

BRB 疲労損傷評価プログラム ユーザーズ・マニュアル

このプログラムは、竹内徹研究室が提案する手法(またはマイナー則)に基づいて、繰返し変形による座屈拘束ブレース(以下、BRB)の疲労損傷を評価します。このユーザーズ・マニュアルでは、東工大竹内徹研究室式の BRB 疲労損傷評価プログラムの使い方を説明します。

動作環境

マシンスペックに特別な要求はありません。本プログラムは Windows 10 64bit OS 環境下で動作を確認しています。

目次

1.プログラムの実行方法について	pp. 1
2.入力データファイルについて	pp. 2
3.出力データファイルについて	pp. 4
4.BRB の累積疲労損傷(低サイクル疲労破壊)の評価手法について	pp. 5
5.BRB を模擬するトラス要素の設定方法について	pp. 6
6.1 部材 1 トラス要素または 1 部材 1 リンク要素でモデル化する場合の α_{p0} について	pp. 7
7.部材全長の軸ひずみに対する芯材塑性化部のひずみ μ_p の換算方法について	pp. 8
8.その他の慣用的な BRB の疲労破壊評価について	pp. 9
免責事項・更新履歴	pp. 10

1. プログラムの実行方法について

- 1) 任意のソフトウェアを用いて時刻歴応答解析を行う。竹内研では SNAP での実績があります。
- 2) 評価対象の BRB の時刻歴データ(軸塑性率)を記入した CSV ファイル(ファイル名は任意、下図の例では E1~E3.csv)を用意する。
- 3) 評価するデータファイル名や疲労特性を記入した InputFileIndex.csv を用意する。
- 4) データファイルと InputFileIndex.csv と BRB 疲労損傷評価プログラム.exe を同一のフォルダに格納する。
- 5) BRB 疲労損傷評価プログラム.exe をダブルクリックして評価実行する。例題ファイルの場合では、以下の図に示すようなファイルが出力される。

BRB疲労損傷評価プログラム.exe	2020/09/15 15:25	アプリケーション	5,403 KB
E1.csv	2020/05/28 18:05	Microsoft Excel CS...	183 KB
E2.csv	2020/05/28 18:05	Microsoft Excel CS...	183 KB
E3.csv	2020/06/01 14:47	Microsoft Excel CS...	817 KB
InputFileIndex.csv	2020/09/14 13:16	Microsoft Excel CS...	1 KB
Out_DamageEvaluationBRB.csv	2020/09/15 15:31	Microsoft Excel CS...	1 KB
Out_DamageHistory_E2.csv	2020/09/15 15:31	Microsoft Excel CS...	16 KB
Out_DamageHistory_E3.csv	2020/09/15 15:31	Microsoft Excel CS...	107 KB

- 6) Out_DamageEvaluationBRB.csv から評価結果一覧を確認する。
- 7) Out_DamageHistory_XXXX.csv から特定の BRB の疲労損傷データの詳細を確認する。

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 2 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

2. 入力データファイルについて

2 節は入力データファイルについて説明する。本プログラムは以下の 2 種類の入力ファイルが必要である。

- InputFileIndex.csv ※処理するデータのファイル名や評価の諸元を入力する。
- 損傷度を計算する時刻歴データファイル.csv ※1 部材につき 1 ファイル

2.1 InputFileIndex.csv の入力

Microsoft Excel 等で InputFileIndex.csv を開いて以下を設定する。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	塑性率の時刻歴データファイル名 (.csv まで記入する)	0:塑性化部の塑性率を直接与える 1:弾性部断面積を考慮した1部材1要素の結果を評価する 2:塑性化部断面積のみを有する1部材1要素の結果を評価する	BRB 降伏軸歪 (無次元)	BRB 全長に対する塑性化部の長さ比 L_p/L_0	BRB 弾性部に対する塑性化部の断面積比 A_p/A_e	疲労特性係数 m_2	疲労特性係数 C_2	損傷度時刻歴ファイルの出力 (Yes:1, No:0)
2	E1.csv	1	0.001098	0.5	0.5	-0.49	20.48	1

1 列目(図の A 列) : 塑性率の時刻歴データファイル名 (.csv まで記入する)

2 列目(図の B 列) : 評価タイプ

塑性化部の塑性率を直接与える : 0

弾性部断面積を考慮した 1 部材 1 要素の結果を評価する : 1 (5 節参照)

塑性化部断面積のみを有する 1 部材 1 要素の結果を評価する : 2

3 列目(図の C 列) : BRB 降伏軸ひずみ(無次元) ※LY225 のときは $225/205000 = 0.001097561$

4 列目(図の D 列) : BRB 全長に対する塑性化部の長さ比 L_p/L_0 (5 節参照)

5 列目(図の E 列) : BRB 弾性部に対する塑性化部の断面積比 A_p/A_e (5 節参照)

6 列目(図の F 列) : 疲労損傷の材料定数 m_2 ※アンボンドブレースは $m_2 = -0.49$

7 列目(図の G 列) : 疲労特性係数 C_2 ※アンボンドブレースは $C_2 = 20.48$

8 列目(図の H 列) : 損傷度時刻歴ファイルの出力(Yes:1、No:0)

※計算時間が長くなるため、デフォルトは 0 を推奨します。

その他 : 複数の BRB の疲労損傷を評価する場合は 2 行以降も指定してください。

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 3 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

2.2 損傷度を計算する時刻歴データファイル(2.1 節の E1.csv)

Microsoft Excel 等で CSV ファイルを新規作成して以下を入力する。

	A	B	C
1	0	0	
2	0.01	-8.79E-10	
3	0.02	-5.03E-09	
4	0.03	-1.49E-08	

1 列目(図の A 列): 時刻(単位は任意)

2 列目(図の B 列): 軸塑性率

※等価せん断モデルまたは等価曲げせん断モデルの時刻歴応答解析結果を用いて BRB の塑性化部の軸ひずみデータを作成する方法は 7 節をご参照ください。その場合では InputFileIndex.csv の評価タイプは 2 を選択してください。

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 4 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

3.出力データ ファイルについて

3 節は出力データファイルについて説明する。本プログラムは以下の 2 種類のファイルが出力される。

- Out_DamageEvaluationBRB.csv ※疲労損傷の評価結果一覧
- Out_DamageHistory_XXXX.csv ※部材ごとの詳細な評価データ時刻歴

3.1 Out_DamageEvaluationBRB.csv について

Microsoft Excel 等で Out_DamageEvaluationBRB.csv を開くと以下の情報が分かる。

A	B	C	D	E	F	G	H
ファイル名	絶対値最大軸ひずみ(%)	最終(または破断時)の平均塑性ひずみ片振幅(%)	最終の累積塑性ひずみ(%)	最終(または破断時)の疲労破壊が生じる累積塑性ひずみ(%)	最終(または破断時)の骨格比	判定(1:疲労破壊)	マイナー則で評価した時の損傷度D
E1.csv	3	2.4377439	273.1	267.1555016	0.010984987	1	0.8792768

- 1 列目(図の A 列): 処理したデータファイル名
- 2 列目(図の B 列): 絶対値最大軸ひずみ(%) ※弾性歪含む
- 3 列目(図の C 列): 最終(または破断時)の平均塑性ひずみ片振幅(%)
- 4 列目(図の D 列): 最終の累積塑性ひずみ(%)
- 5 列目(図の E 列): 最終(または破断時)の疲労破壊が生じる累積塑性ひずみ(%)
- 6 列目(図の F 列): 最終(または破断時)の骨格比(無次元)
- 7 列目(図の G 列): 竹内研提案法による疲労破壊の判定(1:疲労破壊)
- 8 列目(図の H 列): マイナー則で評価した時の損傷度 D (1.0 以上で疲労破壊判定)

3.2 Out_DamageHistoryXXXX.csv について

Microsoft Excel 等で Out_DamageHistoryXXXX.csv を開くと入力ファイル XXXX.csv について以下の情報が分かる。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Time(s)	軸ひずみ×増幅係数(無次元)	実効の平均塑性ひずみ(%)	実効の累積塑性ひずみ(%)	絶対値最大軸ひずみ(%)	骨格比	疲労破壊が生じる累積塑性ひずみ(%)	判定(1:疲労破壊)	マイナー則で評価した時の損傷度D

- 1 列目(図の A 列): 時刻 ※入力の時刻歴データの極値の時刻に対応している。
- 2 列目(図の B 列): 軸ひずみ×増幅係数(無次元)
- 3 列目(図の C 列): 実効の平均塑性ひずみ片振幅(%)
- 4 列目(図の D 列): 実効の累積塑性ひずみ(%)
- 5 列目(図の E 列): 絶対値経験最大軸ひずみ(%)
- 6 列目(図の F 列): 骨格比
- 7 列目(図の G 列): 疲労破壊が生じる累積塑性ひずみ(%)
- 8 列目(図の H 列): 竹内研提案法による疲労破壊の判定(1:疲労破壊)
- 9 列目(図の I 列): マイナー則で評価した時の損傷度 D (1.0 以上で疲労破壊判定)

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 5 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

4. BRB の累積疲労損傷(低サイクル疲労破壊)の評価手法について

4 節は本プログラムが採用している BRB の疲労損傷の評価手法を解説する。

4.1 BRB の疲労性能

標準的な日鉄エンジニアリング製アンボンドブレースの疲労性能は下式で与えられている。

$$\Delta \varepsilon_t = C_2 N_f^{m_2} = 20.48 N_f^{-0.49} \quad (\%) \quad (1)$$

ここに $\Delta \varepsilon_t$ はひずみ全振幅, N_f は $\Delta \varepsilon_t$ で一定繰り返し载荷したときの破断繰返し回数, C_2 と m_2 は材料やデバイスに対応した疲労特性係数である。

4.2 マイナー則

マイナー則では, BRB の軸ひずみの時刻歴データをレインフロー法によってひずみ度分布(あるひずみ全振幅が何回くりかえされたかという統計)に整理し, 下式により累積疲労損傷を判定する。

$$D = \sum_{i=1}^{2000} \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (\%) \quad (2)$$

ここに単位ひずみ全振幅は 0.0005(%), n_i は i 番目ひずみ全振幅($0.0005 \times i$)の繰返し回数, N_{fi} は i 番目ひずみ全振幅($0.0005 \times i$)の破断繰返し回数, D は損傷度であり 1 以上で疲労破壊を意味する。

4.3 竹内研提案法^{*1}

竹内研提案法では, BRB のランダムな軸ひずみの時刻歴データから, 各時点における平均塑性ひずみ片振幅 $\overline{\Delta \varepsilon_{ph}}$ の時刻歴データを計算し, 各時点までの累積塑性ひずみ振幅 $\Sigma \varepsilon_{ph}$ が $\overline{\Delta \varepsilon_{ph}}$ に対応した疲労寿命 χ_w を超えたときに疲労破壊を判定する。平均塑性ひずみ片振幅 $\overline{\Delta \varepsilon_{ph}}$ はレインフロー法の計数を用いた重み付け平均によって処理する。アンボンドブレースの実験結果との比較から, 同手法はランダム応答に対してマイナー則より精度が良いことが知られている。^{*1}

$$\chi_w = \frac{1}{\frac{\alpha_s}{\chi_{so}} + \frac{1 - \alpha_s}{4} \left(\frac{\overline{\Delta \varepsilon_{ph}}^{(1+m_2)}}{(C_2 / 2)} \right)^{-\frac{1}{m_2}}} \quad (\%) \quad (3)$$

$$\overline{\Delta \varepsilon_{ph}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{2000} n_i (\Delta \varepsilon_{ti} - 2\varepsilon_y)}{\sum_{i=1}^{2000} n_i} \right) / 2 \quad (\%) \quad (4)$$

ここに α_s は骨格比(=その時点までの経験最大軸ひずみ / その時点の累積塑性ひずみ), アンボンドブレースでは(χ_{so} , $C_2/2$, m_2) = (35, 10.24, -0.49)とする。ただし, $\overline{\Delta \varepsilon_{ph}}$ を計算する際に弾性歪と弾性範囲のひずみ度($\Delta \varepsilon_{ti} - 2\varepsilon_y \leq 0.0$)の繰返し回数はレインフロー法の計数から除外する。

^{*1} 竹内徹, 井田茉莉, 山田哲, 鈴木一弁: 変動歪振幅下における座屈拘束ブレースの累積塑性変形性能予測, 日本建築学会構造系論文集, 69 巻, 586 号, pp.203-210, 2004.

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 6 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

5. BRB を模擬するトラス要素またはリンク要素の設定方法について

本節はトラス要素またはリンク要素を用いて座屈拘束ブレースをモデル化する方法を解説する。

5.1 記号一覧

L_0 : 節点間距離で決定される部材長さ ($L_0 = L_e + L_p$)

L_e : BRB の接合部等を含む弾性部長さ ※本節では両端の弾性部を合計した長さとする。

L_p : BRB の芯材の塑性化部長さ

A_e : BRB の芯材の弾性部断面積

A_p : BRB の芯材の塑性化部断面積

N_y : BRB の降伏軸力 (デバイスのカタログ値に等しいです。)

E : 芯材のヤング率

σ_y : 芯材の降伏応力度

k_e : BRB の弾性部長さ L_e と芯材の弾性部断面積 A_e で決定される弾性部軸剛性

k_p : BRB の塑性化部長さ L_p と芯材の塑性化部断面積 A_p で決定される塑性化部軸剛性

K_{eq} : BRB の弾性部と塑性化部を合わせた等価な軸剛性 (k_e と k_p の直列バネとして評価される。)

A_{eq} : BRB の弾性部と塑性化部を合わせた等価断面積

α_p : 軸剛性 K_{eq} を有する要素の軸ひずみ量に対する塑性化部のひずみ換算率

5.2 特にユーザー側が指定する BRB の特性値

L_p/L_0 : 全長に対する塑性化部の長さ比 ($L_e/L_0 + L_p/L_0 = 1.0$)

A_p/A_e : BRB の芯材の弾性部に対する塑性化の断面積比

5.3 トラス要素またはリンク要素の諸元

BRB を 1 部材 1 トラス要素または 1 部材 1 リンク要素でモデル化する場合の要素諸元は以下の通りである。

$$\alpha_{p0} = \frac{K_{eq}}{k_p} \frac{L_0}{L_p} = \frac{1}{(L_p/L_0) + (L_e/L_0)(A_p/A_e)} \quad (5)$$

$$K_{eq} = \frac{1}{(L_p/L_0) + (L_e/L_0)(A_p/A_e)} \frac{EA_p}{L_0} = \alpha_{p0} \frac{EA_p}{L_0} \quad (6)$$

$$A_{eq} = \frac{L_0}{E} K_{eq} = \frac{1}{(L_p/L_0) + (L_e/L_0)(A_p/A_e)} A_p = \alpha_{p0} A_p \quad (7)$$

このとき E, L_0, N_y は変更の必要はない。トラス要素に適用するときは A_{eq} (断面形状は任意) を、リンク要素に適用するときは K_{eq} をそれぞれ要素諸元に設定すれば良い。軸剛性増大率に α_{p0} を適用しても良い。

要素軸方向の復元力特性はユーザーが任意に指定してよい。最も単純な方法は単純バイリニア型であり、その場合では降伏耐力は N_y 、2 次剛性比は 0.02(等方硬化を簡易模擬)を指定する。

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 7 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

6. 1 部材 1 トラス要素または 1 部材 1 リンク要素でモデル化する場合の α_{p0} について
1 部材 1 トラス要素または 1 部材 1 リンク要素でモデル化する場合の α_{p0} は以下のとおりである。

剛性倍率 α_{p0}		弾性部芯材断面積 A_e に対する塑性化部芯材断面積 A_p の比 A_p/A_e				
		0.4	0.425	0.45	0.475	0.5
全長 L_0 に対する 塑性化部長 L_p の比 L_p/L_0	0.2	1.92	1.85	1.79	1.72	1.67
	0.3	1.72	1.67	1.63	1.58	1.54
	0.4	1.56	1.53	1.49	1.46	1.43
	0.5	1.43	1.40	1.38	1.36	1.33
	0.6	1.32	1.30	1.28	1.27	1.25
	0.7	1.22	1.21	1.20	1.19	1.18

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 8 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

7. 部材全長の軸ひずみに対する芯材塑性化部のひずみ μ_p の換算方法について

部材全長の軸ひずみ μ に対する芯材塑性化部のひずみ μ_p の換算について、本プログラムは下式のひずみ増大率 α_p を用いている。なお、5 節 6 節にも示した α_{p0} は BRB が応力弾性状態のときのひずみ増大率に等しく、芯材塑性化部が降伏するとき ($\mu_p = 1.0$) の部材全体の塑性率は $\mu = 1.0 / \alpha_{p0}$ である。 μ の影響を無視したとき ($\mu \rightarrow \infty$) のひずみ増大率 α_p は以下の数表の通りであり、塑性化部の最大ひずみの類推に利用できる。

A) 評価タイプ 0 (塑性化部の塑性率を直接与える場合)

ひずみの換算は行わない。

B) 評価タイプ 1 (弾性部断面積を考慮した 1 部材 1 要素の結果を評価する)

$$\alpha_p = \begin{cases} \alpha_{p0} & (\mu_p \leq 1.0) \\ 1 + \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) (A_p / A_e) \frac{(L_e / L_0)}{(L_p / L_0)} & (\mu_p > 1.0) \end{cases} \quad (12)$$

塑性化部 歪増大率 α_p		弾性部芯材断面積 A_e に対する塑性化部芯材断面積 A_p の比 A_p / A_e				
		0.4	0.425	0.45	0.475	0.5
全長 L_0 に対する 塑性化部長 L_p の比 L_p / L_0	0.2	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00
	0.3	1.93	1.99	2.05	2.11	2.17
	0.4	1.60	1.64	1.68	1.71	1.75
	0.5	1.40	1.43	1.45	1.48	1.50
	0.6	1.27	1.28	1.30	1.32	1.33
	0.7	1.17	1.18	1.19	1.20	1.21

C) 評価タイプ 2 (塑性化部断面積のみを有する 1 部材 1 要素の結果を評価する)

$$\alpha_p = \begin{cases} \alpha_{p0} & (\mu_p \leq 1.0) \\ 1 + \left(1 - \frac{(A_p / A_e)}{\mu}\right) \frac{(L_e / L_0)}{(L_p / L_0)} & (\mu_p > 1.0) \end{cases} \quad (13)$$

塑性化部 歪増大率 α_p	全長 L_0 に対する塑性化部長 L_p の比 L_p / L_0					
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
	5.00	3.33	2.50	2.00	1.67	1.43

※評価タイプ 2 は軸降伏変形が評価タイプ 1 より大きく評価されるため、 α_p は評価タイプ 1 より大きい。軸剛性の増大を考慮すると (α_p を α_{p0} で除す), 評価タイプ 1 と 2 の α_p はおおよそ近似した結果となる。

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet 9 of 10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date 2020/09/18 担当 寺澤

8. その他の慣用的な BRB の疲労破壊評価について

参考として慣用的な BRB の疲労破壊評価の方法を解説する。以下の方法は、静的増分解析結果や、等価せん断モデルまたは等価曲げせん断モデルの時刻歴応答解析結果を基に BRB の疲労損傷を類推する場合に適用できます。

$$\text{層間変形角から類推される最大軸ひずみ } \varepsilon_{0\max} = \gamma(H/L_0)\cos\theta \quad (14)$$

$$\text{塑性化部長さを考慮した塑性化部の最大軸ひずみ } \varepsilon_{p\max1} = (L_0/L_p)\varepsilon_{0\max} \quad (15)$$

ここに γ は層間変形角、 H は階高、 L_0 は部材長さ、 θ は BRB 配置角度であり $\varepsilon_{p\max2}$ の方が正確である。なお、以上の方法を用いて BRB 全長に対する軸ひずみ ε_p の時刻歴データを作成し、本プログラムで簡略的に疲労損傷評価することも可能です。

アンボンドブレースについては、最大塑性軸ひずみ $\varepsilon_{pm}(=\varepsilon_{p\max} - \varepsilon_y)$ が定振幅繰返しする場合の疲労破壊条件式 $\chi_{pm} = 4 \varepsilon_{pm} N_f = 4 \varepsilon_{pm} \{(\varepsilon_y + \varepsilon_{pm})/10.24\}^{-1/0.49}$ を用いて疲労破壊は簡略的に評価できます。BRB の累積塑性ひずみは累積塑性変形倍率 η と材料の降伏歪 ε_y より評価できます。ただし、同疲労破壊条件式は疲労性能の下限であり、入力地震波の継続時間等によって過剰安全側の評価となる場合があります。同様な状況では竹内研手法を含め精算的な疲労損傷評価がおすすめです。

$$2\eta\varepsilon_y \geq 4 \varepsilon_{pm} \{(\varepsilon_y + \varepsilon_{pm})/10.24\}^{-1/0.49} \text{ の時に疲労破壊判定} \quad (16)$$

※2020 年 9 月以前の学会「免震・制振構造の設計」図 4.4.8 および JSSI BRB 教科書 Figure5.1.15 に記載された定振幅載荷時の疲労曲線の式 $\varepsilon_{pm} = 10.24N_f^{-0.48}$ は誤記です。式(11)をご使用ください。

Project: 東工大竹内徹研究室式 BRB 疲労損傷評価プログラム	Sheet	10	of	10
Subject: ユーザーズ・マニュアル	Date	2020/09/18	担当	寺澤

免責事項

- 1) 本プログラムは寺澤友貴(東京工業大学環境・社会理工学院建築学系助教, 2020 年時点)が Python 3.5 環境下にて作成しました。
- 2) 本プログラムは無償でご使用いただけます。
- 3) コンパイル元の Python スクリプトは無償で提供します。スクリプトは各自の都合に合わせてカスタマイズしていただいて構いませんが, 二次配布はご遠慮下さい。
- 4) 本プログラムに関するバグ報告・要望は寺澤友貴までご連絡下さい。いつでも受け付けております。
- 5) 本プログラムの結果を公表する場合は寺澤友貴までご一報いただけますと幸甚です。
- 6) 他社等にご提供していただいて構いません。寺澤友貴までご一報ください。
- 7) 本プログラムを用いた結果生じるいかなる直接的・間接的損害について寺澤友貴は一切その責任を負いません。

更新履歴

2020/9/15 : マニュアル作成