

繰り返し引張・圧縮荷重を受ける鋼管ブレース材の 座屈とき裂の連成に関する弾塑性有限変位解析

加藤友哉¹・康 瀾²・葛 漢彬³

¹学生会員 名城大学大学院 理工学研究建設システム工学専攻（〒468-8502名古屋市天白区塩釜口1-501）

²正会員 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 JSPS研究員（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501）

³フェロー 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科（〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501）

E-mail: gehanbin@meijo-u.ac.jp)

1. 序論

1994年に発生したノースリッジ地震、1995年に発生した兵庫県南部地震において、鋼構造物の被害が多く報告され、座屈による破壊事例だけでなく、脆性的な破壊も見られた。既存の研究により、地震等による鋼部材の脆性的な破壊は、3段階の破壊プロセスから構成されていることが明らかにされている。まず形状的不連続部においてひずみ集中と多軸応力拘束が相互に作用し延性き裂（クラック）が発生し、その後延性き裂が部材の塑性変形の過程で安定的に成長し、最終的に延性き裂の大きさが限界点に到達することによって急激に脆性的な破壊に転化する¹⁾。一方、座屈とクラックの連成現象は、兵庫県南部地震で被災した鋼構造物の被害形態として少なからず報告されている。鋼構造分野では、座屈とクラックがそれぞれ個別に研究されてきており、その連成現象についてはまだ研究が着手されていない。

著者らが、鋼構造物の延性き裂の発生・進展・破壊を予測するための繰り返し弾塑性損傷モデル（Cyclic Ductile Damage Model, 以下CDDMモデルと称する）を提案し、その妥当性を鋼製橋脚について検証した²⁾。一方、Fell³⁾は鋼管ブレースの極低サイクル疲労実験を行い、部材中央の変形特性に注目した結果、繰り返し載荷時の全体座屈および局部座屈が発生し、塑性変形が大きく進展してからき裂が発生し、最終的に破断することが実験より明らかにされている。

本研究では、繰り返し引張・圧縮荷重を受ける鋼管ブレース材を取り上げ、座屈（全体座屈、局部座屈）とき裂の連成挙動、特に最終破壊に至るまでの全過程を、CDDM モデルを用いた弾塑性解析により追跡し、CDDM モデルの妥当性を実験結果との比較により検証する。

2. 解析概要

(1) 解析対象

解析の対象である鋼管ブレース材はFellらが行った実験⁴⁾と同一のものであり、一般鋼構造物に使用される鋼管ブレース材と比べて、約3分の2の大きさである実験供試体であった。解析に用いたパラメータを表-1に示す。また鋼管ブレース材の寸法図を図-1に、解析モデルを図-2に示す。

解析は構造解析用汎用プログラム ABAQUS⁵⁾を用いる。解析モデルは4種類で、解析の載荷パターンは実験の際の載荷パターンと同様である（図-3）。また、先行して行った P1-2 と P1-4 の実験でブレースの接合部にて座屈の発生が確認されており、両端部に補強板を取り付けた実験も行われているため、接合部に補強板を取り付けた解析も行う。

メッシュサイズは全体メッシュ要素数は補強板を有する P1-1, P1-3 は 17160 個、補強板を有しない P1-2, P1-4 は 16840 個であり、クラックの発生が考えられるブレース材の中央位置 600mm の部分を 5mm×5mm で分割した。ブレース材の中央位置の要素数は 10248 個である。

材料特性はヤング率 $E=200\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、ブレース材、補強板の降伏応力はそれぞれ $\sigma_y=352\text{MPa}$ 、 345MPa である。硬化則は塑性域での挙動を弾性域の変化、背応力の変化をもとに表現し、弾性域や背応力の非線形的な変化を考慮する混合硬化則を用いる。表-2 に混合硬化則パラメータ⁶⁾を示す。

境界条件は実験装置がブレース材の片側の端部をボルトで固定し、他方側の端部に、スライド式梁を取り付けており、解析上で模擬するために片側を固定とし、軸方向変位制御による漸増変位繰り返し載荷を行う。

表-1 解析モデルのパラメータ

モデル	载荷パターン	パイプの種類	L_B (mm)	t (mm)	D (mm)	補強板	径厚比 (D/t)	径厚比 パラメータ (R_t)
P1-1	図-3(a)	Pipe127STD	3010	6.55	141	あり	21.5	0.0313
P1-2						なし		
P1-3	図-3(b)					あり		
P1-4						なし		

Note: L_B : プレースの長さ, t : 厚さ, D : 外径

表-2 混合硬化則パラメータ

種別	移動硬化成分		等方硬化成分	
	C (MPa)	γ	Q_∞ (MPa)	b
ブレース	3372	26	89.6	7
補強板	3448	38	117	5

Note: C : 初期の移動硬化係数, γ : 塑性変形に伴う弾性域の中心位置を定めるパラメータ, Q_∞ : 弾性域の最大変化量, b : 塑性変形に伴う弾性域の大きさの変化を定めるパラメータ

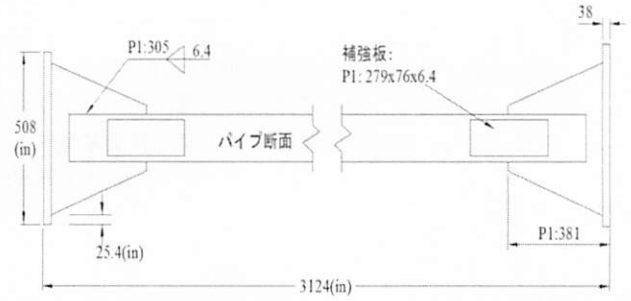


図-1 鋼管ブレース材の寸法図

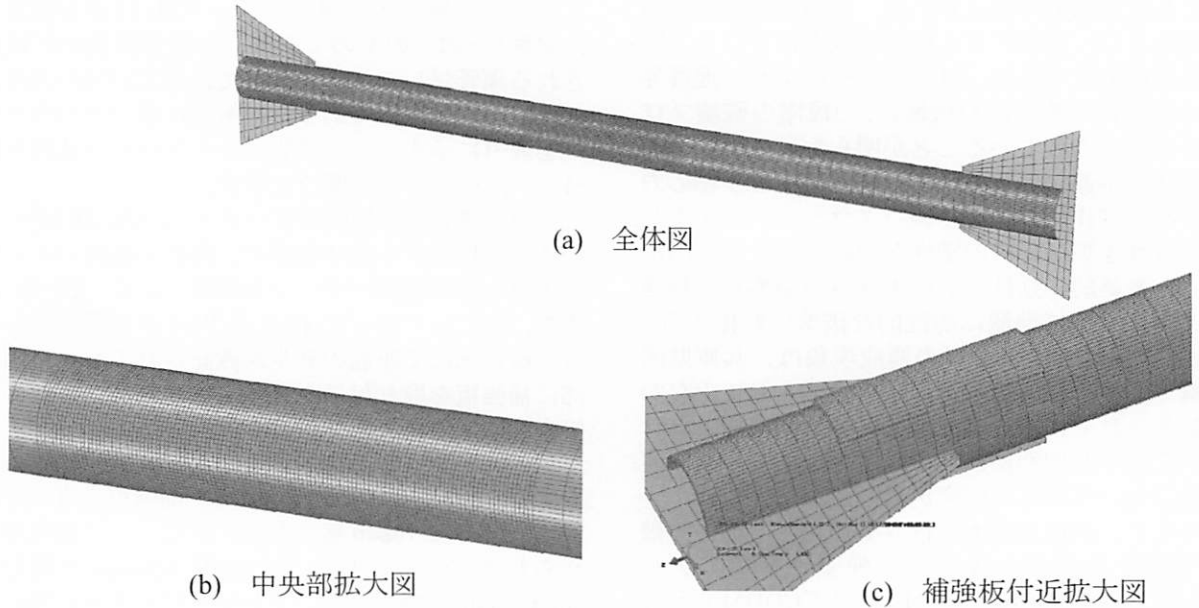


図-2 解析モデル

(2) 繰返し弾塑性損傷モデル

提案した延性き裂の評価を考慮できる繰返し弾塑性損傷モデル (Cyclic Ductile Damage Model, CDDMモデル) の概念図を図-4に示す。同図から分かるように、このモデルが弾性域、塑性域および軟化域の3段階からなっており、材料の塑性変形状況を表すパラメータ DI と材料の損傷状況を表すパラメータ d 、の2つのパラメータが導入されている。A点において相当塑性ひずみが0であるため $DI=0$ となる。すなわち、この点を過ぎると、材料が塑性変形し始める。パラメータ DI が相当塑性ひずみの増大に伴い増大するが、 $DI=1.0$ となったとき、材料が損傷し始まる (B点に対応する)。パラメータ DI は次の式で

定義される。

$$DI = \int \frac{\dot{\epsilon}_{eq}}{F(\eta)} dt \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_{eq}$ は相当塑性ひずみ率、 $F(\eta)$ は応力3軸度 η ($=\sigma_m/\sigma_{eq}$, σ_m は平均応力, σ_{eq} はMisesの相当応力) で表される応力補正係数である。本研究では、応力補正係数 $F(\eta)$ は次のような式⁶⁾を用いた。

$$F(\eta) = \alpha \exp(-1.5\eta) \quad (2)$$

ここで、 α は材料じん性係数で、材種によって異なる。

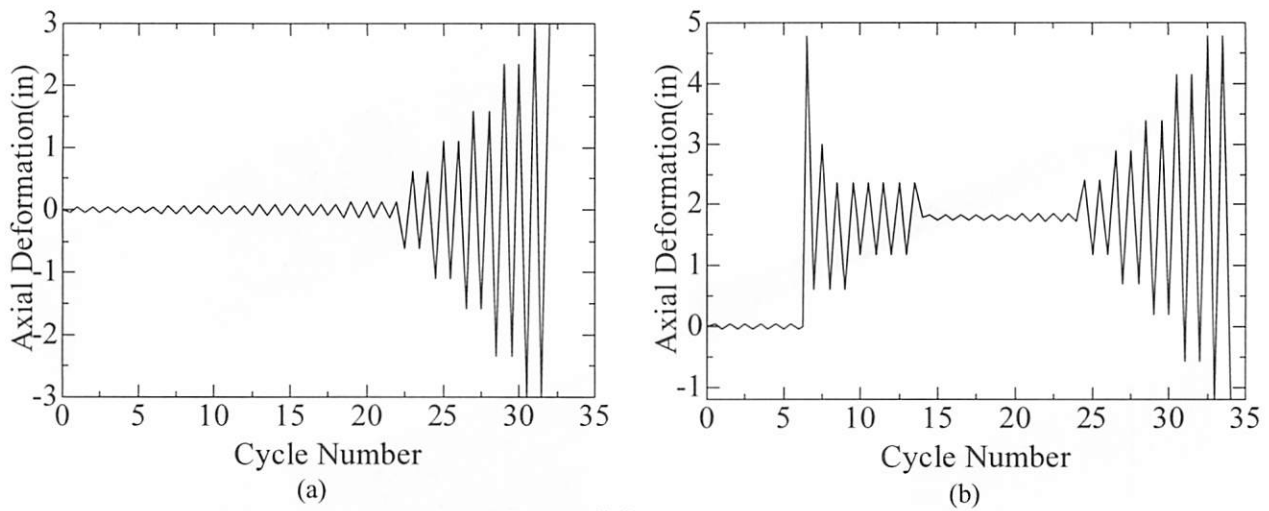


図-3 荷重パターン

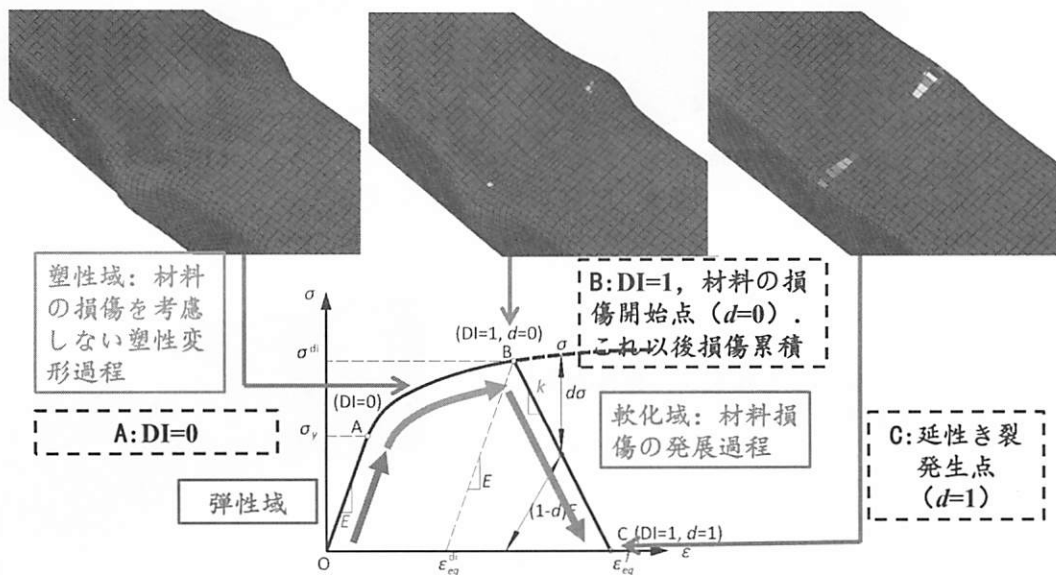


図-4 CDDM モデルの概念図

るが、本研究では文献³⁾を参考して2.8とした。

前述したように、B点を過ぎると、材料の損傷が始まるので、材料の剛性劣化を表すパラメータ d を導入する。

$$d = \frac{u_{eq}}{u_{eq}^f} \quad (3)$$

ここで、 u_{eq} は要素の塑性変位で、 u_{eq}^f は要素が破壊したときの塑性変位である (図-5)。本研究では u_{eq}^f は 0.5mm と仮定した。この領域において、損傷した要素の応力テンソルと除荷剛性はそれぞれ次のように計算される。

$$\sigma = (1-d)\bar{\sigma} \quad (4)$$

$$E' = (1-d)E \quad (5)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は有効応力テンソルで、 E は弾性剛性

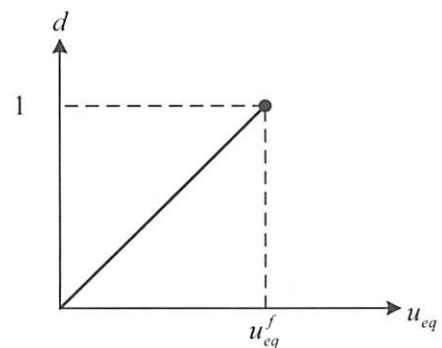


図-5 損傷進展則

(弾性係数) である。図-4のC点で、パラメータ d が1.0になり、材料が破壊した (言い換えれば、クラックが生じた) ことを意味する。解析では、該当要素が自動消去されることになる。

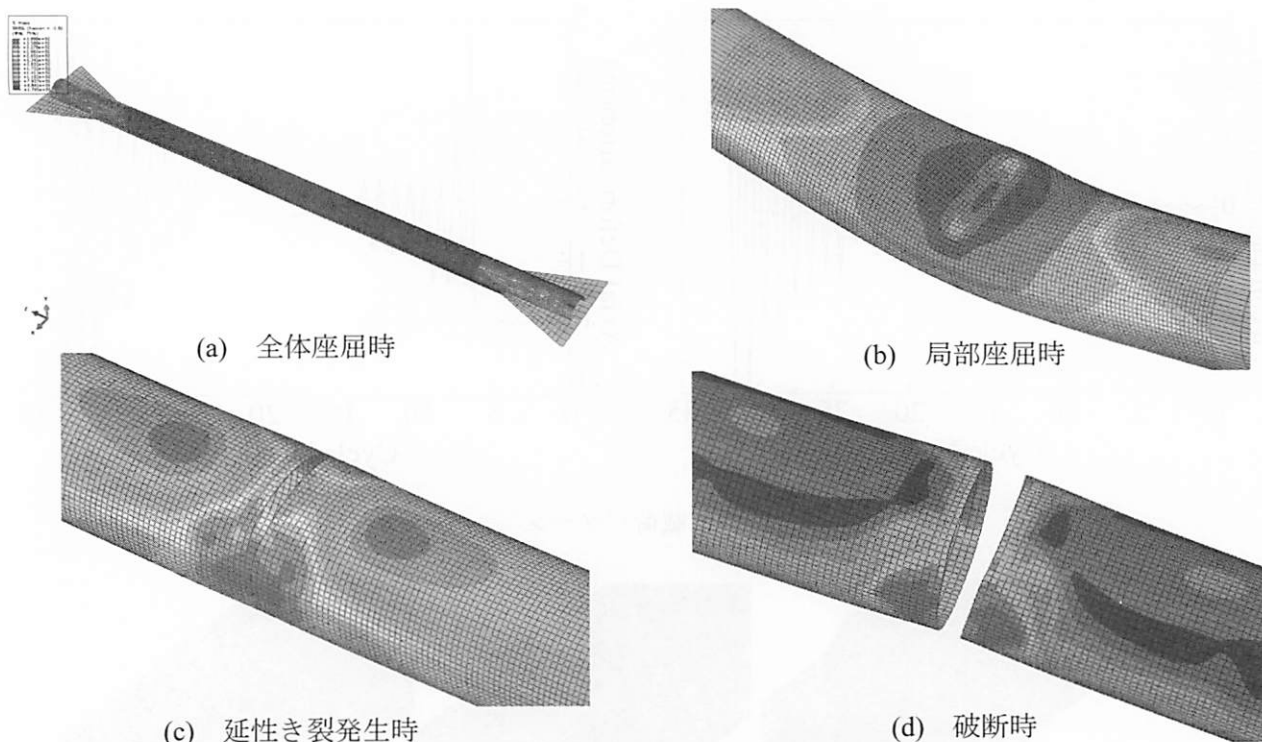


図-6 P1-1 の破断までの変形モード

3. 解析結果

(1) 各段階（全体座屈時，局部座屈時，延性き裂発生時，破断時）の変形モード

例として，P1-1モデルの各段階（全体座屈時，局部座屈時，延性き裂発生時，破断時）の変形モードを図-6に示す。また，P1-3の破断時の変形モードおよびP1-4の端部座屈時の変形モードを図-7，図-8に示す。

P1-1モデルは図-3(a)に示す载荷パターンを用いて解析を行った結果である。補強板を有するP1-1モデルケースは図-6に示す変形モードより全体座屈後，ブレース材の中央にて局部座屈が発生したことが確認できる。また，き裂も局部座屈と同様にブレース材の中央にて発生し，き裂が進展して破断したことも確認できる。補強板を有しないP1-2モデルについてもP1-1モデルと同様の変形モードであった。

P1-3，P1-4モデルは図-3(b)に示す载荷パターンを用いた解析結果である。全体座屈時，局部座屈時，き裂発生時の変形モードはP1-1モデルと同様であり，全体座屈後に局部座屈およびき裂がブレース材の中央で発生した。しかし，補強板を有するP1-3モデルはP1-1，P1-2モデルのような破断ではなく一部の要素が取り除かれなかったため完全な破断までには到らなかった。また，補強板を有しないP1-4モデルも，き裂までは発生したが，き裂が大きく進展せず破断まで到らなかった。破断しなかったため，両端部のフレーム部分にひずみが集中し，座屈が発生した。これは，Fellらが実験の際，载荷中にブレース材とフレームの接合部が破損したことと同様の現象が，

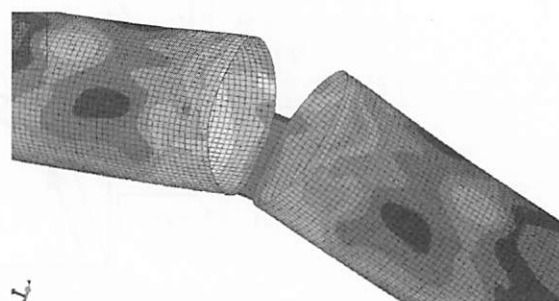


図-7 P1-3 の破断時の変形モード

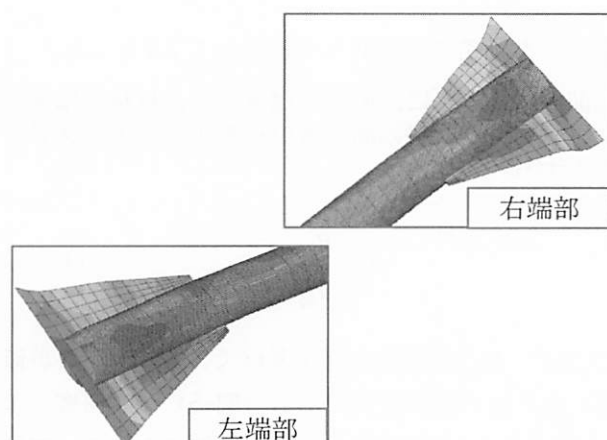
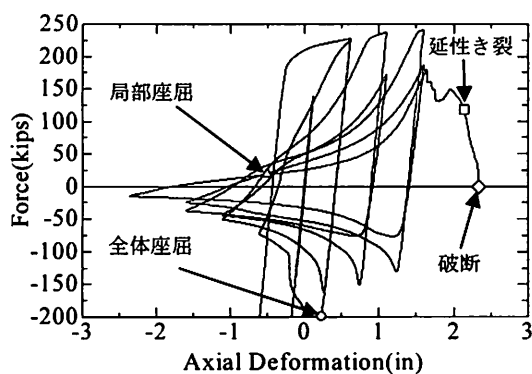
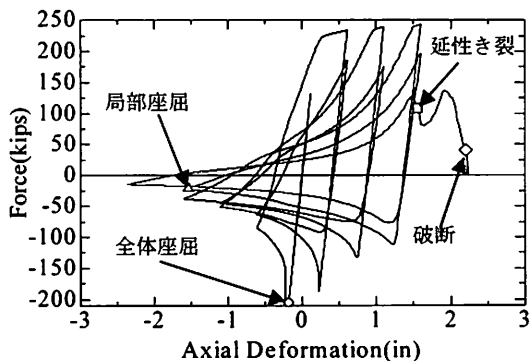


図-8 P1-4 の端部座屈時の変形モード

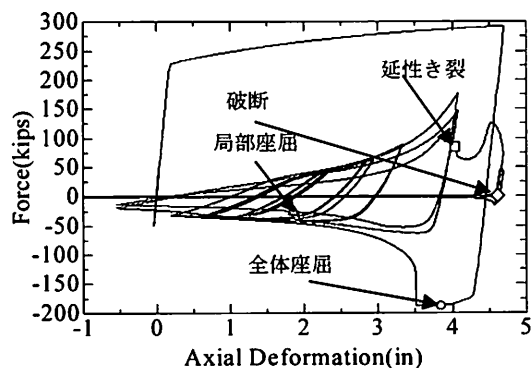
フレーム部分にひずみを集中させる要因となった上に，溶接による影響を考慮していないため，端部が座屈したと考えられる。



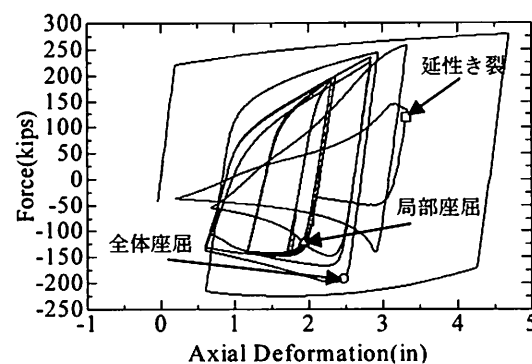
(a) 解析結果 P1-1



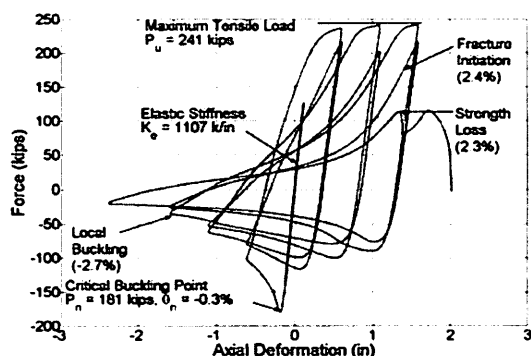
(c) 解析結果 P1-2



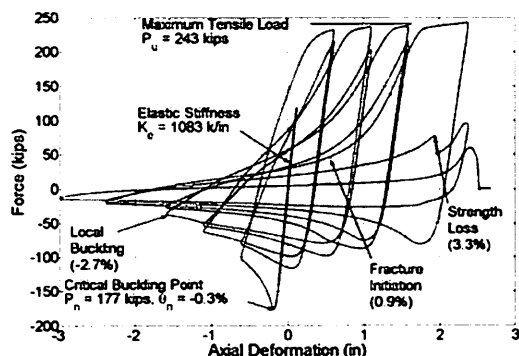
(e) 解析結果 P1-3



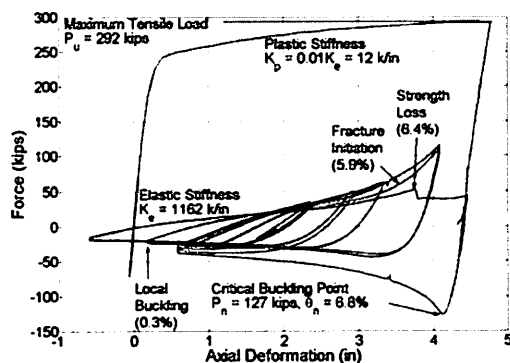
(g) 解析結果 P1-4



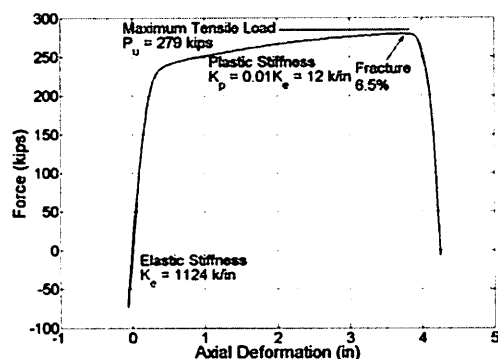
(b) 実験結果 P1-1



(d) 実験結果 P1-2



(f) 実験結果 P1-3



(h) 実験結果 P1-4

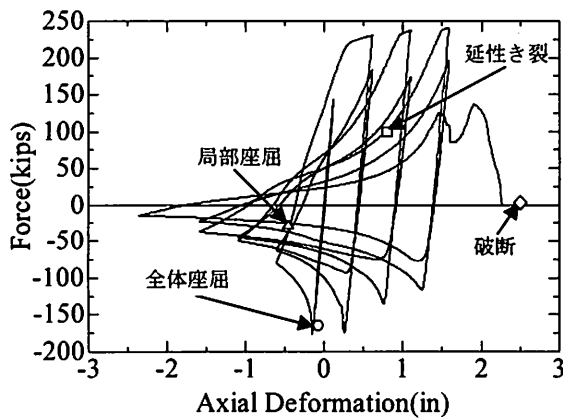
図-9 荷重-変位曲線

(2) 荷重-変位関係

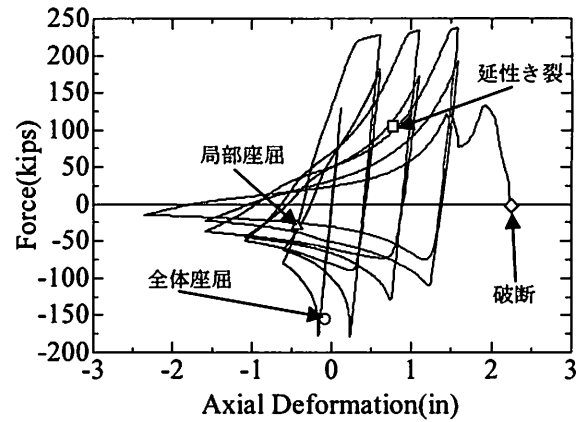
P1-1からP1-4の各モデルの解析結果と実験結果の荷重-変位曲線を図-9に示す。

図-9のP1-1モデルの荷重-変位曲線を本解析結果とFellらの実験結果を比較したところ、全体座屈は

どちらとも荷重が急激な低下を始めた荷重および変位で生じた。その後、最大荷重到達後の圧縮側から引張側へ向かう際に局部座屈が発生した。き裂は解析の方が実験よりも遅くに発生し、破断まで進展している。局部座屈やき裂の発生が異なるのは溶接に

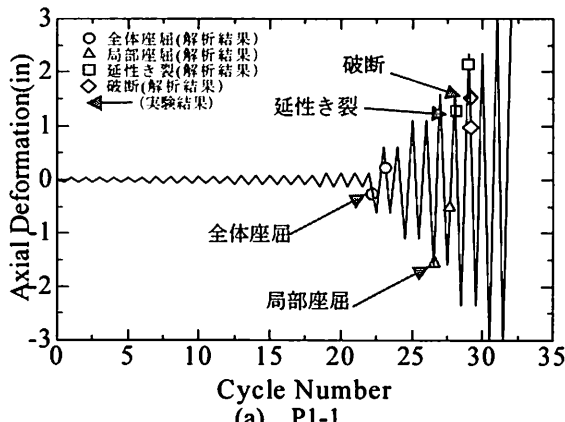


(a) P1-1A

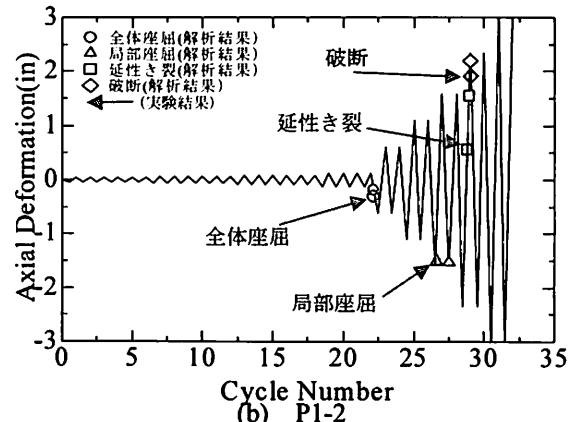


(b) P1-2A

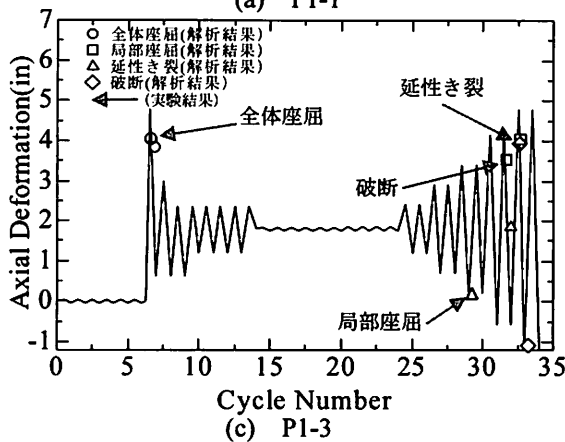
図-10 初期不整を考慮した解析結果の荷重-変位曲線



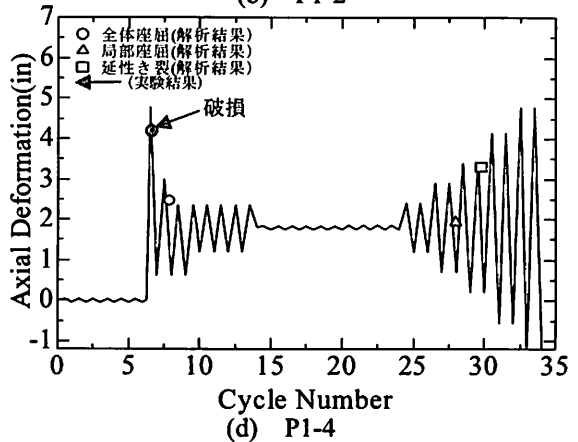
(a) P1-1



(b) P1-2



(c) P1-3



(d) P1-4

図-11 各段階のサイクル数および変位の関係

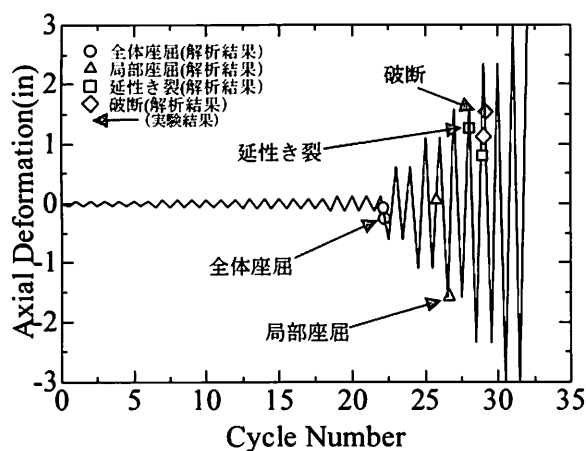
よる影響を考慮していないからであると考えられる。P1-2モデルもP1-1モデルと同様の傾向が見られることが確認できる。

載荷パターンの異なるP1-3モデルは、最大荷重後に荷重が低下してから全体座屈が発生しているが、実験より解析結果の方が最大圧縮荷重が大きくなっている。解析結果のき裂発生は実験の破断付近であり、解析結果は各段階の進展が遅い傾向が見られる。P1-4モデルは実験が端部の溶接部が破損した段階で実験を中止したため、荷重-変位曲線の比較をすることが出来なかった。

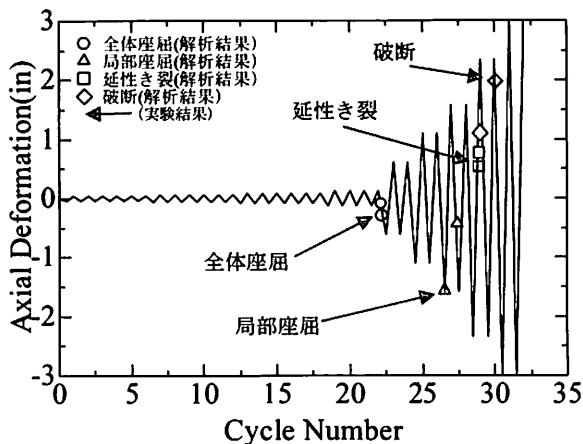
解析結果は補強板を取り付けたことで、破断までには到らなかったが、図-8(g)のような解析結果が得られた。実験では最大荷重到達付近にて、き裂による破損が確認されているが、解析ではまだ発生していない。これは、実験結果と解析結果の引張側の最大荷重から圧縮側の最大荷重までの勾配を比較すると勾配の傾きの大きさが異なることが起因ではないかと考える。

(3) 初期不整

上述したように、実験より解析結果の方が最大圧



(a) P1-1A



(b) P1-2A

図-12 初期不整を考慮した各段階のサイクル数および変位の関係

縮荷重が大きくなっている。この現象を明らかにするために、初期不整による影響を考慮した解析を行い検証した。初期不整は鋼管ブレース長さの1/1000とした。初期不整を考慮したP1-1AおよびP1-2Aモデルの荷重-変位曲線を図-10に示す。同図から分かるように、初期不整を考慮したことで、荷重-変位曲線は実験により近い結果を得ることが出来た。

また、P1-1Aモデルは局部座屈時、P1-2Aモデルはき裂発生時の荷重および変位が初期不整を考慮していない解析モデルよりも実験結果に近づいた。

(4) 各段階のサイクル数と変位関係

各段階のサイクル数および変位の関係を図-11に、初期不整を考慮した各段階のサイクル数および変位の関係を図-12に示す。全体座屈の発生はP1-1モデルは実験段階よりも1サイクル程度遅く、P1-2、P1-3モデルは概ね同じサイクルである。P1-4モデルは最大荷重到達後のサイクルで破損しているが、解析ではその1サイクル程度後に全体座屈が生じる結果となった。局部座屈はP1-1、P1-2モデルは圧縮側で1サイクル程度の発生の差が見られ、P1-3モデルは3サイクル程度の差が生じた。

また、き裂の発生についてはP1-1、P1-3モデルは引張側で1サイクル程度の差を確認した。P1-2モデルは同サイクル内、引張側の変位が異なっているのみであるため、実験の挙動に近い結果が得られた。破断についてはP1-1モデルは同サイクル内、P1-2モデルは1サイクル程度の差で、変位も引張側で実験結果と近い値であることが確認できる。しかし、P1-3モデルは差は1サイクル程度ではあるが、実験結果は引張側、解析結果は圧縮側となり、変形モードも完全な破断まで到達していないため、破断を模擬することは出来なかった。

初期不整を考慮した場合、P1-1AモデルはP1-1モデルよりも局部座屈の発生が早くなったが、破断時のサイクルおよび変位はほぼ同様の位置となった。また、P1-2Aモデルは局部座屈の発生が遅くなり、

破断が早くなった。しかし、き裂の発生するサイクルおよび変位が実験の結果と同様の位置となった。

4. 結論

本研究では、Fellらが行った実験供試体である長さ3010mm、外径および厚さ141mm、6.55mmの鋼管ブレース材を模擬し、著者らが提案したCDDM弾塑性損傷モデルを用いた繰り返し弾塑性有限変位解析による全体座屈、局部座屈、き裂の発生および破断の数値シミュレーションを行うことで、座屈とき裂の連成破壊現象を検証した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 载荷パターンが異なる場合でも局部座屈、き裂はブレース材の中央にて発生し、進展する。
- 2) 補強板を取り付けることによって、端部にて破損が発生することなく、き裂までの実験挙動を模擬することが出来る。
- 3) 初期不整を考慮することで、荷重-変位の関係が実験の結果に近くなる。
- 4) 補強板を有していないP1-2モデルは荷重-変位関係、サイクルおよび変位の関係が実験結果に似た傾向が見られる。
- 5) CDDMモデルを用いることで、繰り返し荷重を受ける鋼管ブレース材の延性き裂の発生・進展・破壊の現象を概ね予測できる。

参考文献

- 1) 桑村仁：繰返し塑性ひずみを受ける構造用鋼材の疲労-延性破壊遷移，日本建築学会構造系論文集，No.461，pp.123-131，1994。
- 2) 桑村仁，伊藤潤：シャルピー衝撃試験片と実大破壊部材の破面相関，日本建築学会構造系論文集，No.508，pp.127-133，1998.6。
- 3) Kang, L., Ge, H.B. and Maruyama, R.: A Prediction Model for Ductile Fracture of Steel Bridge Piers, Proc.

of Computational Engineering Conference, Vol.18, Paper No.F-2-4, Tokyo, Japan, 2013.6

- 4) Fell, B.F.: Large Scale Testing and Simulation of Earthquake-Induced Ultra Low Cycle Fatigue in Bracing Members Subjected to Cyclic Inelastic Buckling, Doctoral Dissertation, University of California at Davis, 2008.
- 5) ABAQUS. ABAQUS/Analysis User's Manual-version 6.13. Inc., Pawtucket: Rhode Island; 2013.
- 6) 葛 漢彬, 川人麻紀夫, 大橋正稔: 鋼材の延性き裂発生の限界ひずみに関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, No.190, 2005.8.