

繰り返し荷重を受ける鋼管ブレース材の延性き裂発生・進展・破壊の数値シミュレーション

名城大学 稲垣 雄己
名城大学 賈 良玖

名城大学 正会員 康 瀾
名城大学 フェロー会員 葛 漢彬

1. まえがき

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弾塑性モデル（Cyclic Ductile Damage Model, 以下 CDDM モデルと称する）を開発し、その妥当性を鋼製橋脚について検証している¹⁾。本研究では、CDDM モデルを鋼管ブレース材に適用し、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・破壊の現象を解析的に解明しようとしている。

主として部材中央の変形特性に注目する。そこでは、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的に明らかにされている²⁾。

2. 解析モデル

解析の対象は、図-1 に示すような鋼管ブレース材である。ブレースの長さ、外径および厚さはそれぞれ 3010mm, 141mm および 6.55mm となっている。径厚比と径厚比パラメータを表-1 に、解析で用いられた混合硬化則のパラメータなどを表-2 に、解析モデルを図-2 に示す。総要素数は、17160 要素であり、延性き裂が発生する可能性が高い部分である中心から両端に向かって、それぞれ 300mm のところまでを 5mm×5mm メッシュとし、非常に細かく分割している。

載荷パターンについては、実験の際の載荷履歴（後述の図-5 と図-7）と同一で、解析においては、両端から強制変位を与えている。

CDDM モデルでは、次式に示すような延性き裂発生条件式を用いている。

$$\varepsilon_{eq}(\eta) = \alpha \exp(-1.5\eta) \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad (2)$$

式(1)での ε_{eq} と η はそれぞれ相当塑性ひずみと応力 3 軸度である。式中の α は材料に依存するパラメータであり、本研究では文献 2) を参考に $\alpha=2.59$ としている。式(2)は応力 3 軸度 η の定義式であるが、 σ_m は平均応力 ($=(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$)、 σ_{eq} は Mises の相当応力である。

延性き裂発生後、変形が進むにつれ、き裂が進展し、最終的には破断に至る。これを模擬するために、損傷度 D を導入している。 D の定義式は、式(3)に示すようである。

$$dD = \frac{d\varepsilon_{eq}}{\varepsilon_{eq}(\eta)} \quad (3)$$

ここで、 $D=1$ になったとき、部材が破断したことを意味する。

表-1 解析モデルの概要

モデル名	載荷パターン	径厚比 (D/t)	径厚比パラメータ (R_t)
P1-2	FF (図5)	21.5	0.0313
P1-4	NF-T (図7)		

表-2 混合硬化則パラメータ

	σ_y (MPa)	C (MPa)	γ	Q_∞ (MPa)	b
パイプ	352	3372	26	89.6	7
プレート	345	3448	38	117	5

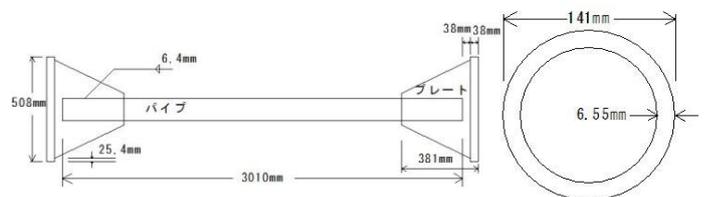


図-1 モデルの寸法と断面図

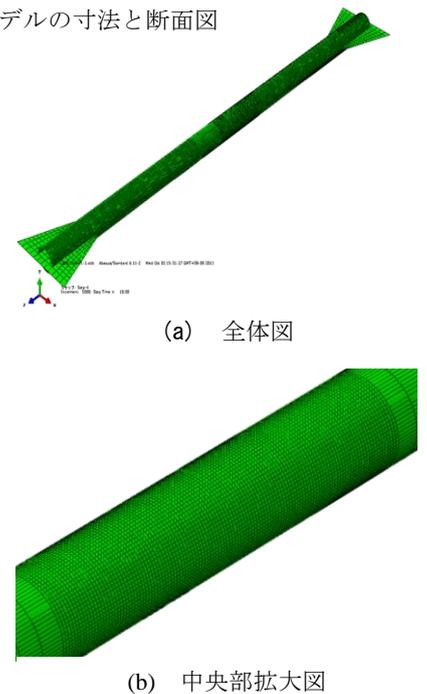


図-2 解析モデル

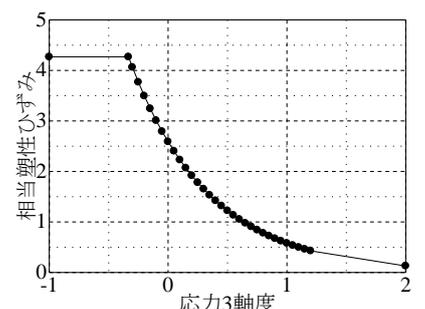


図-3 応力 3 軸度と相当塑性ひずみの関係式（延性き裂発生条件式）

3. 解析結果

3.1 P1-2 モデル

解析による本モデルの各段階(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-4に示す。

破断までのサイクル数と変位について実験値と解析値をそれぞれ図-5で比較した。延性き裂発生点においては, 実験の方が早く見られたが, 破断は, 解析の方が早く生じた。荷重-変位の関係について実験値と解析値をそれぞれ図-6で比較した。ほぼ同じ関係になったが, 最大荷重において, 実験では圧縮側で177kNとなったのに対し, 解析では, 220kNであり, 大きめに評価する結果となった。

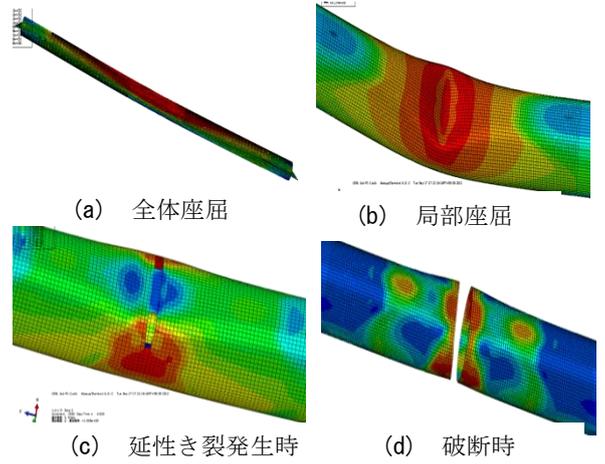


図-4 破断までの変形モード

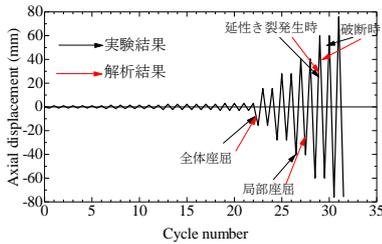
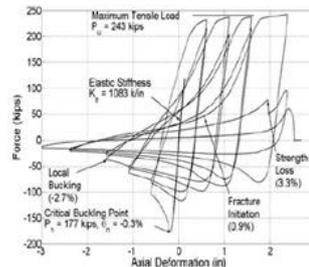
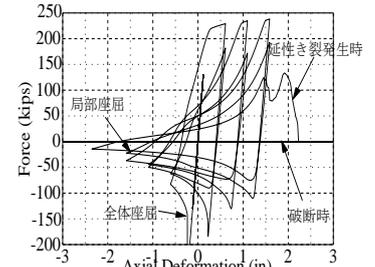


図-5 P1-2の破壊までのサイクル数と変位の関係



(a) 実験結果²⁾



(b) 解析結果

図-6 P1-2の荷重と変位の関係

3.2 P1-4 モデル

解析による本モデルの各段階の変形モードは, P1-2 とほぼ同様になったが, 破断までは至らなかった。サイクル数と変位について実験値と解析値をそれぞれ図-7で比較した。実験では, パイプとフレームの接合部で延性き裂が発生し, 実験は終了しているが, 解析では中央部で延性き裂の発生が見られる結果となった。この理由として, 解析ではパイプとプレートの溶接などの影響を考慮していないためと考えられる。P1-4の荷重と変位の関係については, 実験値と解析値をそれぞれ図-8で比較した。上記の理由より比較してみると引張側の最大荷重から圧縮荷重までの勾配が異なる結果となった。これは, 実験では引張側の最大荷重時に延性き裂が発生しているが, 解析ではまだ発生していないことに起因すると考えられる。

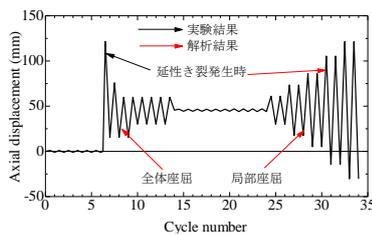
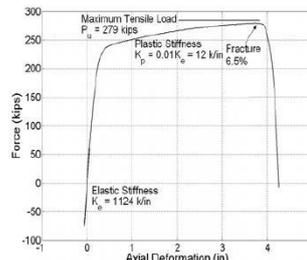
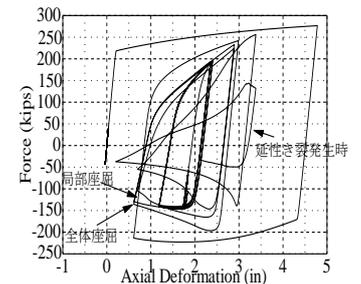


図-7 P1-4の延性き裂までのサイクル数と変位の関係



(a) 実験結果²⁾



(b) 解析結果

図-8 P1-4の荷重と変位の関係

4. あとがき

CDDM モデルを適用した本解析は, P1-2 では延性き裂発生時は実験の方が早く発生したが破断は解析の方が早く生じ, P1-4 では破断までは至らなかったが, 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) 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. 2) 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.