

繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚のき裂発生を考慮した解析

富士通中部システムズ(株) 正会員 村上 尚史 名古屋工業大学 正会員 後藤 芳顕
名古屋工業大学 正会員 小畑 誠 名古屋工業大学 学生会員 桑原 史晃

1.はじめに: 繰り返し荷重を受ける鋼構造物の破壊挙動としては, 一般的には通常状態での高サイクル繰り返し荷重に起因する疲労破壊がよく知られているが, 先の兵庫県南部地震の被害では, わずか数回程度の繰り返し荷重により非常に大きな塑性変形を伴うひび割れ・破断が発生したことが観測され, 構造物の耐震設計におけるこうした破壊形式の考慮の重要性があらたに認識された.

そこで本研究では, 上記のような破壊現象が延性破壊によるき裂を起点として発生するものとの観点から, 材料構成則として延性破壊に関係した空隙の発生と成長を考慮したグルソンのポイド損傷理論を用いる解析法の適用性について円形断面鋼製橋脚の繰り返し荷重実験と比較するとにより検討する.

2.実験概要: 鋼製橋脚をモデル化した供試体の寸法・形状を図1に示す. 供試体はすべて一般構造用炭素鋼管 STK400の基部から50.5mmから550.5mmまでを所定の厚さ t に切削して作成した. 本実験は, 表1に示す鉛直圧縮荷重を橋脚頂部に載荷した状態で, 橋脚基部縁力が増大するときの水平荷重載荷位置の水平変位 δ_y にもとづいた1振幅3サイクルの水平変位振幅漸増繰り返し荷重を行う. また, 繰り返し荷重後, 亀裂の発生を促進させるため軸方向に約30mm引張っている.

3.解析概要: 本解析では汎用プログラム ABAQUS を用い材料構成則は全て USER SUBROUTINE として組み込んだ. 解析モデルは, 鋼管の対称性を仮定し 1/2 モデルで行う. 図1に要素分割を示す. 鋼管基部から板厚変化部までをシェル要素(S4R)で, 亀裂発生が予想される鋼管基部の板厚変化部から82mmの間を3次元固体要素(C3D8I)でモデル化し, そこからふたたび板厚変化部までをシェル要素で分割している. 鋼管上部の板厚が厚い部分ははり要素(B31)でモデル化し, 鋼管頂部から水平荷重載荷点までは同じはり要素で剛性を十分大きく設定し剛体と見なせるようにモデル化している. 境界条件としては, 鋼管の対称面においては自由度の対称条件を設定し, 下端部は全自由度を完全固定としている. 材料構成則としては延性き裂発生が予測される部分を離散化した3次元固体要素には基質材料に図2にの一軸応力-ひずみ関係をもつマルチリニア移動硬化則グルソンモデル¹⁾を用いる. それ以外のシェル要素とはり要素に関しては, 基質材料と同じマルチリニア移動硬化則を用いる. なおグルソンモデルのパラメータ f_n, ϵ_n, s_n については, 表2の著者らの過去の研究での同定値²⁾を用いている.

4.解析結果と考察: 繰り返し水平荷重-水平変位関係に関する解析結果と実験結果を比較して図3に示している. 図の縦軸は無次元水平荷重 H/H_y , 横軸は無次元変位量 δ/δ_y に取り整理している. 各載荷サイクルと亀裂発生の指標となるポイド体積率 f_N と相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$, 静水圧応力の関係を図4に示す. なお参照要素は基部の局部座屈部波形頂部の要素とする. また, 繰り返し荷重終了時の基部の変形状を解析結果と比較して

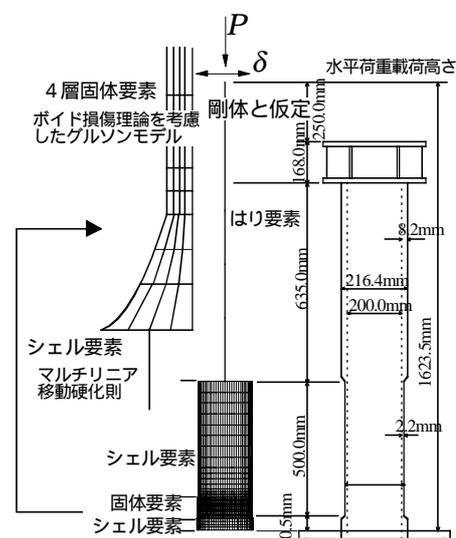


図1 供試体形状と解析モデル
表1 供試体寸法とパラメータ

切削部板厚 t (mm)	2.2
切削部直径 D (mm)	204.4
軸力比 P/P_y	0.09
降伏水平荷重 H_y (kN)	14.198
降伏水平変位 δ_y (mm)	7.912

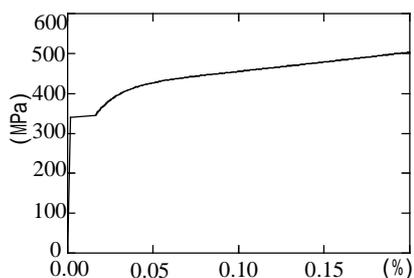


図2 真応力-対数ひずみ関係
表2 グルソンモデルパラメータ

	STK400
E (MPa)	206000
σ_y (MPa)	340.0
ξ	0.1180553
E/E_{st}	40
ϵ_{st}/ϵ_y	10
f_N	0.04
ϵ_N	0.2091
s_N	0.1551

キーワード 円形断面鋼製橋脚, 延性破壊, ポイド損傷理論

連絡先 名古屋工業大学 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 052-735-5486

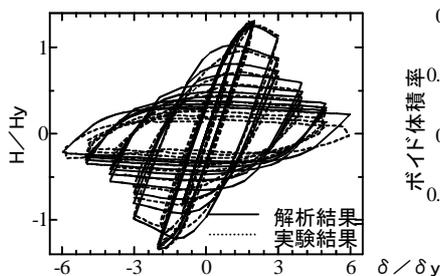


図3 水平荷重－水平変位関係

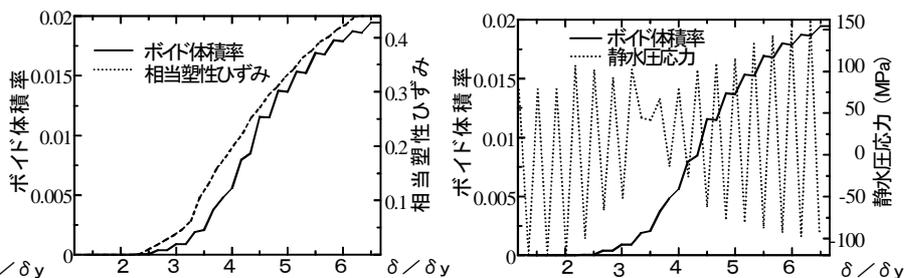
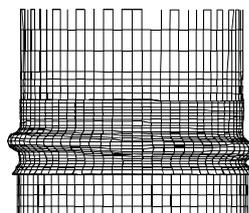


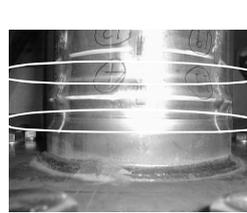
図4 繰り返し载荷時のポイド体積率と相当塑性ひずみ, 静水圧応力



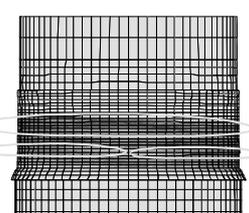
(a) 実験結果



(b) 解析結果



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図5 繰り返し载荷終了時の基部の変形状

図6 引張载荷終了時のき裂発生個所とポイド体積率

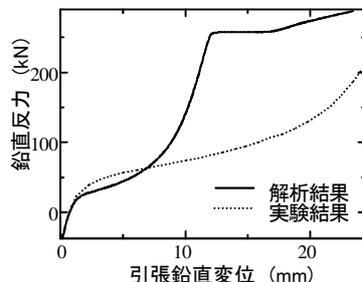


図7 鉛直反力－鉛直変位関係

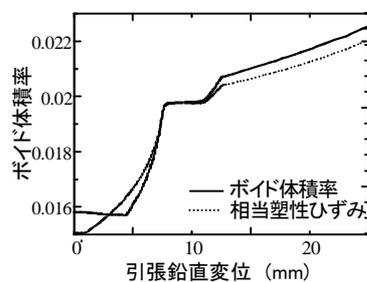


図8 引張载荷時のポイド体積率と相当塑性ひずみ, 静水圧応力

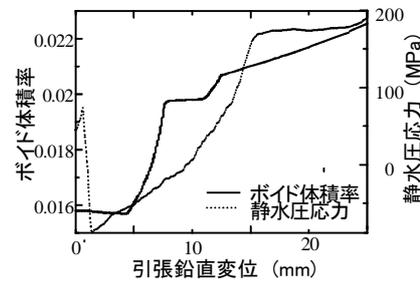


図5に示している．さらに、鉛直方向引張载荷終了時の基部のき裂発生位置と解析結果のポイド体積率の等高図(濃淡)を図6に示している．図7には、繰り返し水平载荷終了後、軸方向引張载荷時の鉛直方向反力 - 鉛直方向変位の関係を示している．また、図8には引張载荷時のポイド体積率 f_N と相当塑性ひずみ ε^p 、静水圧応力の関係を示している．参照要素は実験でき裂が確認された近辺の要素としている．解析による繰り返し水平荷重 - 水平変位曲線における耐力低下は図3のように実験に較べるとやや小さく、図5の局部座屈変形も若干小さいことがわかる．これは、基質材料に用いた応力 - ひずみ関係が単なる移動硬化則であり、材料の繰り返し特性が十分に反映されていないことによると考えられる．ポイド体積率は図4のように $6\delta_y$ 以降は収束傾向にあるが、これは局部座屈の発生で引張り側の静水圧応力が減少したためである．鉛直方向引張载荷では図7のように解析結果と実験結果に大きな差が生じているが、これは、図5に示すように解析での局部座屈変形が実験ほど小さくなく、引張り载荷開始時の頂部沈下量予測に誤差が生じたことによる．これより、解析では引張载荷時、実験より小さい変位で降伏挙動が生じている．一方、延性き裂については、図6のように局部座屈によるはらみ出し部分の上下付近に発生しているが、解析においてもこの付近の要素において、引張り载荷時、図8のごとくポイド体積率が急増している．また、解析で得られたポイド体積率分布についても図6の等高図において、実験でき裂発生が観察された楕円で囲んだ付近で値が大きくなっており、き裂発生箇所については解析で比較的精度良く予測されていることがわかる．

5.まとめ： 構成則にポイド損傷理論に基づく移動硬化型のグルソンモデルを組み込んだ複合非線形解析を用いて、鋼製橋脚の繰り返し载荷による延性き裂発生の予測の可能性について検討した．その結果、き裂発生位置についてはある程度の精度で予測することが可能であるが、き裂発生時の予測については未だ十分な結果が得られないことが判明した．き裂発生時の予測については、き裂発生までの大きな繰り返し荷重下の塑性変形をいかに精度良く予測するかが課題である．

【参考文献】

- 1) 小畑誠：鋼構造の延性破壊の有限要素法解析への導入に関する基礎的検討，土木学会論文集, No.626, pp.185-196, 1999/7
- 2) 田島靖夫 他：ポイド損傷理論による引張り荷重を受けるボルトの延性破壊挙動の予測，第54回年次学術講演会公演概要集, I-A, pp.112-113, 2000/9