

Gurson モデルを用いた鋼製橋脚の延性き裂発生ひずみに関する検討

名古屋大学 学生会員 ○田島 僚
名古屋大学 正会員 葛 漢彬

1. 緒言

先の兵庫県南部地震では、数回程度の極低サイクル疲労により生じたと思われる脆性破壊が発見され、構造物の耐震設計においても脆性破壊を照査できる耐震設計指針の確立が叫ばれるようになった。そこで、本研究では、脆性破壊の第一段階である延性き裂の発生を脆性破壊のクリティカルな状態ととらえ、Void 理論を用いた数値解析を行い、その破壊メカニズムの解明、および延性き裂照査法の確立を目指した基礎的な検討を行う。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

厚肉断面を有する箱形断面鋼製橋脚を解析対象とし、ソリッド要素にてモデル化した。一般に、延性き裂の発生箇所はひずみ集中部であるため、これをより忠実に再現できるよう、構造ディテールを考慮し、フランジのはみ出し部分、および橋脚基部の溶接部もモデル化した。各モデルの構造諸元を表-1 に、全体図および断面図を図-1 に示す。ここで、 R_f 、 λ 、 h 、 B 、 D 、 t はそれぞれ柱としての幅厚比パラメータ、細長比パラメータ、高さ、フランジ幅、ウェブ幅、板厚である。また、材料定数を表-2 に示す。

2.2 Void 損傷理論

ここでいう Void とは、延性破壊の起因となる微小な空孔のことである。Gurson モデルでは、この Void を体積分率 f として定義し¹⁾、これを Mises の降伏条件に導入することで、この体積分率 f から延性破壊の判定を可能とした。Void は、現在ある Void の成長と、新たな Void の発生との和で表され、それぞれが相当引張応力によって定義される。既往の成果²⁾により、Void の体積分率 f が 0.10 に達したときを延性破壊とみなした。

3. 解析結果および考察

3.1 解析結果

解析では、頂部に水平変位を与え、これを漸増させる Pushover 解析を行った。図-2 に、Model-1 でメッシュサイズを 0.05mm ~ 2.0mm まで変化させたときの、頂部の変位と着目箇所の Void の体積分率 f の関係を示す。メッシュサイズが小さいほど、見かけ上 Void の進展が早く、早期に延性破壊を生じている。これは、全体で発生する Void の体積分率に変化はな

表-1 構造諸元

供試体名	鋼種	R_f	λ	h [mm]	B [mm]	D [mm]	t [mm]
Model-1	SM400	0.268	0.235	557	126	126	9.0
Model-2		0.369	0.235	776	175	175	9.0
Model-3		0.268	0.328	776	126	126	9.0

表-2 材料諸元(SM400)

E [GPa]	σ_y [MPa]	ε_y [%]	E_{st} [MPa]	ε_{st} [%]	σ_u [MPa]	ε_u [%]	V
202	241	0.12	30.0	1.27	387	19.8	0.287

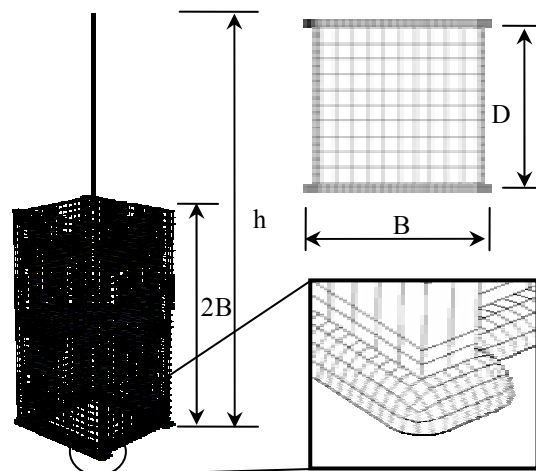


図-1 解析モデル

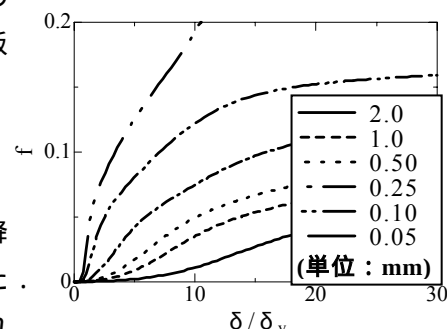


図-2 メッシュサイズが Void の体積分率と柱頂部変位関係に及ぼす影響

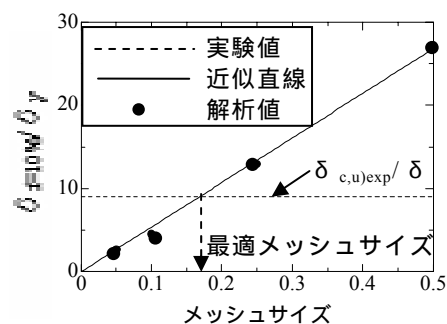


図-3 最適メッシュサイズの決定法

キーワード：延性破壊，Void 損傷理論，構造ディテール，ひずみ集中
連絡先（名古屋市千種区不老町・電話 052-789-4485・FAX 052-789-5461）

いが、ひずみ集中部に近いほど Void の体積に占める割合が大きいため、解析着目箇所におけるメッシュサイズを小さくするほど、1 要素に含まれる Void の体積分率が大きくなるからである。このような傾向は、Model-2、Model-3 でも同様である。したがって、解析結果のみから延性破壊を判定するのは、困難である。

3.2 最適メッシュサイズの推定

同モデルと同じ諸元を有する実験供試体において 1 サイクルごとの繰り返し載荷試験を行ったところ、

延性破壊が確認されたのは、表-3 に示す変位に達してからであった。そこで、その変位を延性破壊時の変位として、解析結果と照合したものが図-3 である。図-3 は、横軸にメッシュサイズ、縦軸に $f=0.1$ に達したときの変位を降伏変位で割ったものである。図の破線は、実験における延性破壊時の頂部の変位を示している。この解析結果より、Void の体積分率が 0.1 に達したときの頂部の変位とそのときのメッシュサイズには直線的な関係が見られる。そこで、その近似直線と実験で得られた終局変位 $\delta_{c,u} \text{exp} / \delta_y$ との交点により、実験結果を最も模擬するメッシュサイズ(最適メッシュサイズ)を求めた。各モデルの結果を表-4 に示す。そして最適メッシュサイズを用いた解析を行い、それによって得られる延性破壊が生じたときの頂部の変位は、実験時における変位とほぼ一致した(表-3)。

3.3 ファイバーモデルへの適用

3 次元モデルでの延性破壊判定の多くは、応力三軸度や相当塑性ひずみ等を用いるが²⁾、これらのパラメータは実務レベルの耐震解析での適用が難しい。そこで、本研究において定められた最適メッシュサイズによる解析が、延性破壊の判定を頂部の変位によって判定することが可能である点を利用して、ファイバーモデルへ拡張する一考察を試みた。最適メッシュサイズによる 3 次元解析結果から、頂部の変位と Void の体積分率の関係を抽出したものが図-5(a)である。さらに、3 次元モデルと同寸法を持つ beam 要素を用いたファイバーモデルを構築し、解析を行い、基部のひずみと頂部の変位の関係を抽出したものが図-5(b)である。両モデルにおける頂部の変位の対応関係から、3 次元モデルより得られる延性破壊の発生点 (Void の体積分率が 0.10 となるとき) に対応するファイバーモデルの基部のひずみ、すなわち、き裂発生予測ひずみを得ることができる。要素分割にある程度左右されるが、本手法によって得られたき裂発生ひずみは 2.8% ~ 3.3% であることが分かった(表-5)。

4. 結言

Gurson モデルを用いた解析と実験結果を比較し、実験結果を模擬するような最適メッシュサイズが概ね 0.15mm であることを示した。また、最適メッシュサイズの特徴から、ファイバーモデルへ適用し、延性破壊の判定を行ったところ、基部に発生するひずみが 3% 程度で延性破壊を生じる結果となった。ただし、より多くの実験および解析を行い、最適メッシュサイズと構造パラメータとの関係性を解明する必要がある。

参考文献

1) 菊池正紀(2002): 延性破壊解析研究の最近の動向—Gurson の構成式を用いた数値解析—, 材料, 51(8), pp.859-866.
2) 葛ら(2005): 構造用鋼材の延性き裂発生の限界ひずみ, 第 8 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp231-238, 2005.

表-3 実験結果との比較(延性破壊時の変位)

モデル名	Model-1	Model-2	Model-3
解析結果	10.5 δ_y	9.8 δ_y	6.5 δ_y
実験結果	9 δ_y	10 δ_y	7 δ_y

表-4 最適メッシュサイズ(mm)

モデル名	Model-1	Model-2	Model-3
最適メッシュサイズ	0.153	0.166	0.070

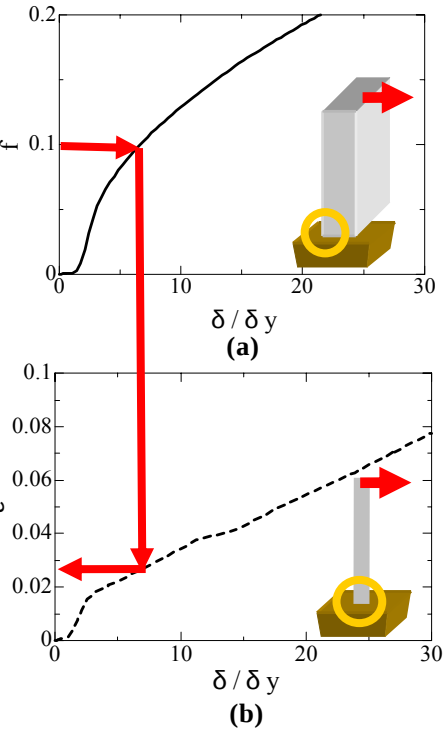


図-5 延性き裂発生ひずみの推定方法

表-5 ファイバーモデルの延性き裂発生ひずみ

モデル名	Model-1	Model-2	Model-3
き裂発生予想ひずみ	0.0326	0.0330	0.0285