

曲げとせん断の連成が弾塑性はり要素による耐震解析に与える影響

○ (株)地震工学研究開発センター 正会員 奥村徹

名古屋工業大学次世代耐震工学研究所 フェロー会員 後藤芳顕

1. はじめに

鋼橋の耐震性能照査において応答値の評価に用いる各種はり要素の精度特性について検証を行った。過去に講演者らは、単柱式鋼製橋脚を対象として、耐震解析に用いるはり要素の幾何学的非線形性および曲げせん断変形の考慮の有無に起因する精度特性について検討を行い、誤差の評価式を提示した¹⁾。その結果、実際の単柱式鋼製橋脚の範囲では曲げせん断変形の影響を無視できない場合が多く、このような場合には曲げせん断変形を考慮した Timoshenko はり要素を用いる必要があることを示した。一方で、材料の弾塑性挙動における軸方向応力とせん断応力の連成の影響は小さいので一般的な解析ソフトウェアで用いられている軸方向応力成分のみに材料非線形性を考慮し、せん断挙動は弾性とした Timoshenko はり要素を用いてもよいと結論した。しかし、最近の検討によれば、例えば、脚柱の有効細長比の小さい門型ラーメン橋脚などの面内挙動など構造諸元によっては上記の軸方向応力とせん断応力の塑性域での連成の影響を無視できない場合があることが判明した(図-1)。本稿では、Timoshenko はり要素の軸方向応力とせん断応力の連成の影響に着目し、精度特性について検討した。

2. 検討方法

図-2、表-1 に示す柱部材を対象とし、幾何学的非線形性ならびに材料非線形性を考慮した Pushover 解析における誤差を検討する。Pushover 解析ではシェル要素による解析結果を精解とし、これに対して以下の各はり要素による解析結果の精度を検討する。

- I) Timoshenko はり要素 (材料非線形挙動において軸方向応力とせん断応力の連成考慮)
- II) Timoshenko はり要素 (材料非線形挙動において軸方向応力とせん断応力の連成無視)
- III) Bernoulli-Euler はり要素 (軸方向応力のみ考慮)

解析には ABAQUS を使用した。I)の Timoshenko はり要素は独自に開発²⁾したものであり User Element として組み込んだ。II), III)は既存のものを用いた。

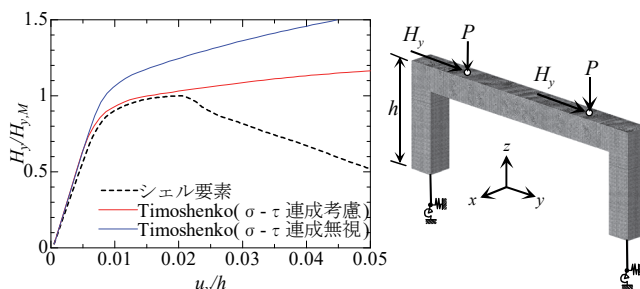


図-1 門形ラーメン橋脚の面内方向の Pushover 解析

ここでは、安全限界すなわち、シェル要素モデルの Pushover 解析における最大耐力点 (H_{yM}, u_{yM}) を対象として各はり要素の精度を検討する。誤差 e_{yi}^E を表す指標として以下の3つを定義する。ひとつは、上記のシェル要素モデルによる限界点到達時におけるひずみエネルギーを $A_{E,M}$ とし、はり要素モデル i ($i=I, II, III$) の Pushover 解析におけるエネルギーが $A_{E,M}$ に等しい点での水平変位 u_{yi} 、水平荷重 H_{yi} を用いて次式で表す。

$$e_i^E = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left\{ (u_{yi} - u_{yM}) / u_{yM} \right\}^2 + \left\{ (H_{yi} - H_{yM}) / H_{yM} \right\}^2} \quad (1)$$

式(1)は文献 1)で用いたものと同一であるが、誤差の比較対象となる限界状態の定義が異なる。2つ目の指標には、式(1)において水平荷重のみに着目した場合の誤差として式(2)を定義する。

$$e_{Hi}^E = (H_{yi} - H_{yM}) / H_{yM} \quad (2)$$

3つ目の指標として、各はり要素モデル i の Pushover 解析における水平荷重がシェル要素モデルで求めた最大耐力点 H_{yM} に到達した点での水平変位 u_{yi}^H を用いて次式を定義する。

$$e_{ui}^H = (u_{yi}^H - u_{yM}) / u_{yM} \quad (3)$$

3. 各種はり要素の精度

一例として Pushover 解析における水平荷重 - 水平変位関係を図-3 に示す。細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ が 0.4 の場合はシェル要素モデルの最大耐力点に至るまで 2 つの Timoshenko はり要素モデル (I, II) による結果はシェル要素モデルの水平荷重 - 水平変位関係とよく一致している。一方、 $\bar{\lambda}=0.1$ においては Timoshenko はり要素 II ($\sigma-\tau$ 連成無視) では水平荷重を高く評価し、精度が

キーワード：耐震解析、弾塑性はり要素、曲げせん断挙動

連絡先 (宮崎県宮崎市大淀3丁目5番13号 TEL 0985-55-0125 FAX 0985-89-2281)

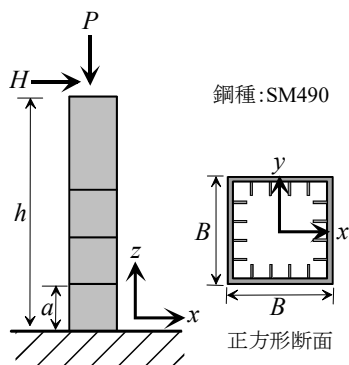


図-2 検討対象とする柱部材

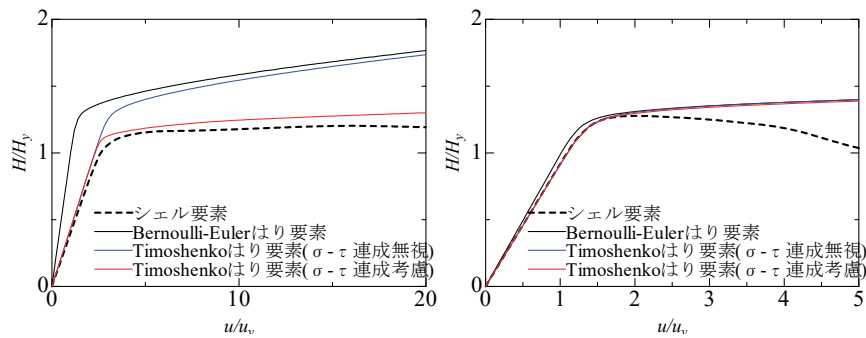
a) $\bar{\lambda}=0.1$ b) $\bar{\lambda}=0.4$ 図-3 水平荷重 - 水平変位関係 (断面 3, $P/P_0=0.1$)

表-1 検討モデルの諸元

断面の種類	R_r	γ/γ^*	R_c	a/B	P/P_v	$\bar{\lambda}$
断面 1	0.3	1.0	0.7	1.0	0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0.1, 0.15, 0.2, 0.4
断面 2		3.0			0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0.4
断面 3	0.5	1.0			0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0.1, 0.15, 0.2, 0.4
断面 4		3.0			0.1, 0.3, 0.5, 0.7	0.1, 0.15, 0.2, 0.4

著しく低下する. このような誤差が生ずる原因は, 柱部材の細長比パラメータが小さくなると柱のせん断挙動が卓越し, ウェブがせん断により降伏するためである. 上記の損傷特性はシェル要素モデルの解析結果において確認された. 式(1)~(3)で定義した誤差を文献 1)で求めた曲げせん断の影響を表す以下のパラメータ βh を用いて整理した結果を図-4 に示す.

$$\beta h = \sqrt{\frac{GA_{ef}}{EI}} \cdot h = \frac{\pi}{2} \bar{\lambda} \sqrt{\frac{A_{ef}}{A} \frac{G}{\sigma_y}} \quad (4)$$

ここに, G :せん断弾性係数, A_{ef} 有効せん断断面積 (=ウェブの断面積)

式(4)から明らかなように, 断面形状が同一であれば $\bar{\lambda}$ が小さいほど, βh は小さな値をとる. 式(1), (2)で定義した誤差 e_i^E , e_{Hi}^E は図-4 a), b) より, Timoshenko はり要素 I (σ - τ 連成考慮) では βh の値に関わらず, シェル要素の解析結果に対して 10%程度の範囲でよく一致しているのに対して, Timoshenko はり要素 II (σ - τ 連成無視) では βh が 2 以下の領域でシェル要素による解析との誤差が大幅に増加する. この要素で地震動入力に対する部材作用力の応答値を計算する場合, ほぼすべての領域で作用力が高く評価されるので耐力を指標とした照査を行う場合には基本的には安全側の評価となるものと考えられるが, βh が 2 以下では作用水平力を過大に評価するため不経済な設計となる恐れがある. なお, 各はり要素の最大耐力 H_{yM} 到達時の変位の誤差を表す e_{ui}^H は e_i^E , e_{Hi}^E と較べて全般的に大きい (図-4 c)). これは履歴特性上, 最大耐力近傍では水平変位が敏感

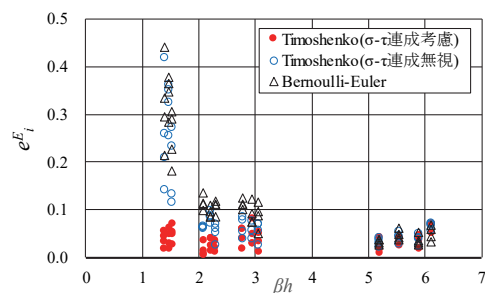
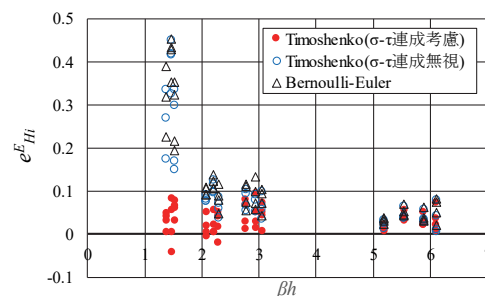
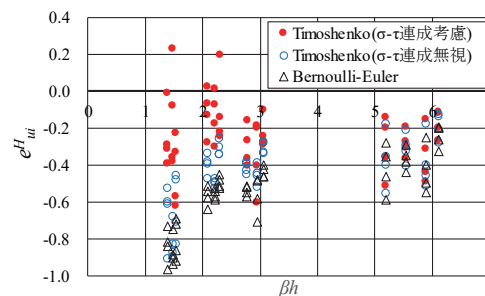
a) e_i^E b) e_{Hi}^E c) e_{ui}^H

図-4 各種はり要素の誤差

であるためである.

参考文献 1) 後藤芳顕, 奥村徹, 鈴木昌哉: 非線形はりモデルを用いた鋼製橋脚の耐震解析における幾何学的非線形性とせん断変形の影響, 土木学会論文集 No.696/ I -58, pp.157-172, 2002. 2) 奥村徹, 後藤芳顕: せん断変形が卓越する鋼製ラーメン橋脚の Pushover 解析への Timoshenko はり要素の適用性, 鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集 Vol.4, pp.135-143, 2002.