

幾何学非線形性が単柱式鋼製橋脚の耐震解析に与える影響

名古屋市 正会員 鈴木昌哉, トピー工業 正会員 宮下敏, 名古屋工業大学 正会員 後藤芳顯

1. はじめに

レベル2の地震動に対する鋼製橋脚の終局挙動を解析する場合、通常、材料非線形性ととも幾何学非線形性を考慮することが重要と考えられている。しかしながらその実態については必ずしも十分に明らかにされていない。ここでは、材料非線形性と幾何学非線形性を考慮した鋼製橋脚の静的および動的複合非線形解析における幾何学非線形性が、単柱式橋脚の耐震解析に与える影響について検討する。まず、幾何非線形性の影響を支配するパラメータを求める。つぎに、幾何学非線形性が最大応答変位や残留変位等の設計上重要な物理量に与える影響を明らかにする。さらに、幾何学非線形性の影響を無視した微小変位解析の適用限界についても議論する。ここで用いる幾何学非線形解析は、剛体変位除去の手法による有限ひずみ・有限変位解析¹⁾であり、材料非線形性はファイバーモデルを用いた塑性領域理論により考慮されている。要素としてはせん断変形を無視したBernoulli-Eulerはり要素を用いている。鋼材の構成則は繰り返し塑性を正確に考慮した、3曲面モデル²⁾を用いる。

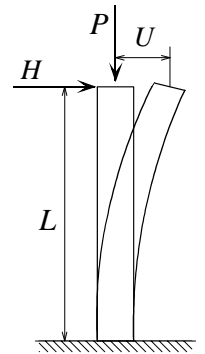


図1 橋脚モデル

2. 静的解析における支配パラメータと幾何学非線形性の影響

まず静的解析における有限変位理論および微小変位理論により得られる解析結果の差異を整理する。解析モデルとして図1に示されるような上部工による一定鉛直荷重と地震力に相当する水平荷重が載荷される単柱式鋼製橋脚を用いる。有限変位理論と微小変位理論による解析結果の比較は、橋脚の終局状態すなわち柱基部のひずみが限界ひずみ³⁾に到達する点でおこない。相対誤差は水平荷重と水平変位を考慮した次式(1)により評価する。

$$e = \left(1/\sqrt{2}\right) \sqrt{\left(\left(U_l - U_s\right)/U_s\right)^2 + \left(\left(H_l - H_s\right)/H_s\right)^2} \quad (1)$$

ここに、下添字 l, s はそれぞれ有限変位解析および微小変位解析を意味する。水平力 H_l と水平変位 U_l を、線形化有限変位理論(線形化はり・柱の式)による弾性域の解析解として評価すると、式(1)で定義される相対誤差 e は、鋼製橋脚の構造パラメータを用いて次のように表される。

$$e = \left(1/\sqrt{2}\right) \sqrt{\left\{ \left[\frac{3 \tan(\alpha L) - \alpha L}{(\alpha L)^3} \right] \cdot \left[\frac{\alpha L}{\tan(\alpha L)} - 1 \right] \right\}^2 + \left\{ \frac{\alpha L}{\tan(\alpha L)} - 1 \right\}^2} \quad (2)$$

式(2)より相対誤差 e の支配パラメータが αL であることがわかる。ここで αL を構造パラメータで表すと

$$\alpha L = \sqrt{P/EI} \cdot L = \sqrt{P/A\sigma_y} \cdot \left(A\sigma_y/EI \right)^{1/4} \cdot L = (\pi/2)\lambda \sqrt{P/A\sigma_y} \quad (3)$$

となり、 αL は軸力比の平方根と細長比パラメータの積に比例することがわかる。図2には式(2)であらわされる相対誤差 e と αL の関係を実線で示している。また、実際の単柱式鋼製橋脚に対する数値解析の結果として弾性解析により算出された結果を Δ で、弾塑性解析による結果を \circ で示している。さらに、弾塑性数値解析により得られた相対誤差 e を αL の関数として最小自乗法で近似した次式(式(4))を破線で示している。

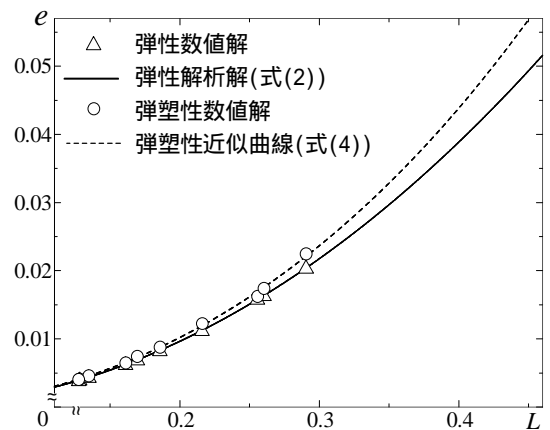


図2 静的解析における相対誤差

キーワード：幾何学非線形性，耐震解析，動的応答解析，鋼製橋脚

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

$$e = (1/\sqrt{2}) \sqrt{557.6 \times \left\{ \left[3(\tan(\alpha L) - \alpha L) / (\alpha L)^3 \right] \cdot \left[\alpha L / \tan(\alpha L) - 1 \right]^2 - 22.0 \times \left[\alpha L / \tan(\alpha L) - 1 \right]^2 \right\}} \quad (4)$$

図2から幾何学非線形性の影響は αL を支配パラメータとして考えればほぼ十分であることがわかる。また、弾塑性解析における幾何学非線形性の影響は弾性解析より若干大きい。これは塑性化による変位の増加のためと考えられる。図中の「弾性解析解」と「弾塑性近似曲線」を用いると任意の αL に対する有限変位解析と微小変位解析の相対誤差が予測できる。ここで、解析の相対誤差の限界を5%とすると、静的弾塑性解析における αL の限界値は0.42となり、静的弾性解析の場合の限界値0.45より若干小さくなる。

3. 動的応答解析における幾何学非線形性の影響

単柱式鋼製橋脚に地震波が作用した場合の弾塑性動的応答を有限変位理論と微小変位理論を用いて計算し、その差を αL を用いて整理する。道路橋示方書VのTYPEに分類される標準地震波9波を作用させた各鋼製橋脚の最大応答変位、残留変位を計算した。解析結果として図3に各橋脚に対して有限変位解析と微小変位解析で得られた最大応答変位の比と αL の関係および各 αL ごとに平均化した最大応答変位の比の平均値曲線を示す。この図から αL が大きい場合は有限変位解析と微小変位解析の差が、概して、大きくなるようであるが、静的解析時のような一定の傾向は見られない。破線は誤差5%の境界線である。すべての地震波に対して誤差が5%以上になるモデルはないが、逆に誤差がすべて5%以内に収まるモデルもなく、最も小さな αL においても最大14%の誤差が生じている。

つぎに橋脚頂部の残留水平変位について検討する。 αL に対するばらつきを表す指標として、有限変位解析と微小変位解析それぞれの場合の残留変位を橋脚高さで無次元化した値に対する標準偏差 σ_l 、 σ_s を求めた。結果として σ_l/σ_s と αL との関係を図4に示す。これにより全ての αL に対して有限変位解析のばらつきが大きいこと、また αL が大きくなるとばらつきも大きくなる傾向にあることがわかる。

動的応答解析に幾何非線形性が及ぼす影響としては、鋼製橋脚の剛性の低下とこれによる長周期化が挙げられる。動的解析では、入力地震動の影響が大きく、静的解析のように最大応答変位、残留変位が微小変位解析に比べ必ずしも増加するわけではない。しかしながら、動的解析では幾何学非線形性に起因する橋脚剛性の低下と振動特性の変化の相乗作用により、地震波によっては幾何学的非線形性の影響が非常に大きく現れる潜在的な可能性を持っている。これは、図3のようにすべての αL の値に対し、微小変位解析と有限変位解析の最大応答変位の差が5%に収まらないケースが存在し、最も小さな αL においても最大14%程度の誤差が生じている事実が示している。これより、動的解析により得られた最大変位、残留変位を耐震設計の指標として用いる場合、幾何非線形性の影響を無視することは難しいものと考えられる。【参考文献】1)後藤, 吉光, 小畑, 西野: 平面骨組の有限ひずみ・有限変位理論の解に収束する2種類の数値解法と精度特性, 土木学会論文集, No.428, 1-15, pp.67-76, 1991, 2)後藤, 王, 高橋, 小畑: 繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則, 土木学会論文集, No.591/1-43, pp189-206, 1998.4, 3)鋼構造新技術小委員会: 最終報告書(耐震設計に関する研究), 1996.

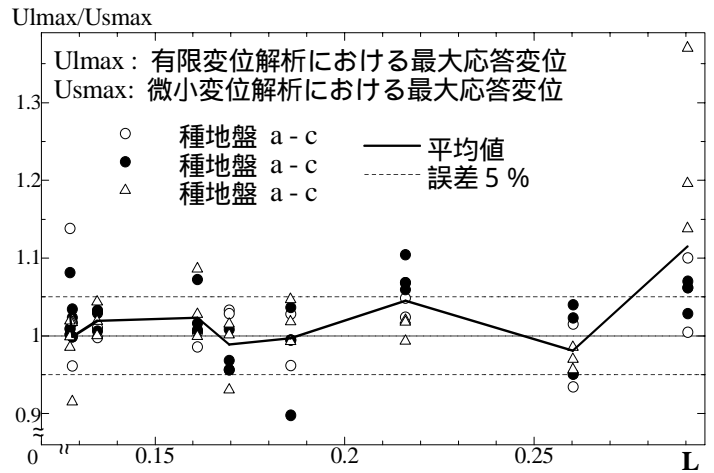


図3 最大応答変位での誤差

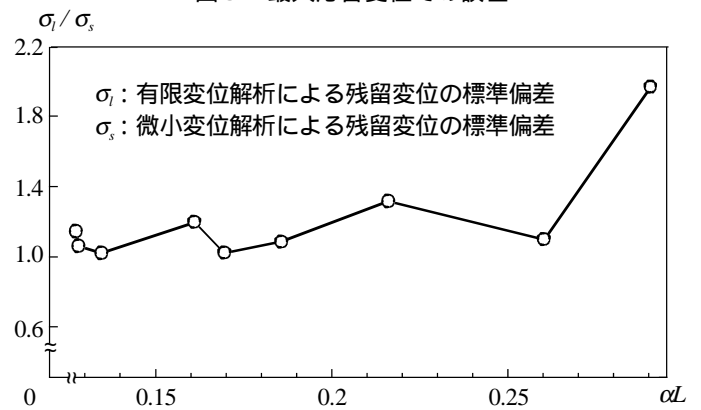


図4 残留変位の標準偏差の比