

## 種々の非比例多軸繰返し負荷を受ける鋼製橋脚の接線塑性構成式による弾塑性座屈解析

大阪大学 接合科学研究所 正会員 堤 成一郎  
 (株)エステック ○ 靱井 秀斗  
 大阪大学 接合科学研究所 Riccardo Fincato

## 1. 目的

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、高速道路などに用いられていた鋼製橋脚は座屈を伴い大変形を生じるという甚大な被害を受けた。通常、橋脚はその軸方向に道路や橋梁の自重による死荷重を受けており、地震が発生した場合、その死荷重に加え、橋脚軸直交方向の水平繰返し荷重を受けることとなる。従って、橋脚下端部は複雑な繰返し非比例・多軸応力を経験する。つまり、橋脚の耐震性能を検討するには、多軸応力場における材料の繰返し変形特性を高精度に予測できることが望まれる。

一方、構造物の変形予測精度は用いられる構成モデルに大きく依存するためその選択が重要となる。従来の流れ則に基づいた弾塑性構成モデルにおける塑性ひずみ速度は、いかなる方向の応力速度に対しても塑性ポテンシャル面の垂直方向にのみ生じるという仮定に基づいているため、応力速度方向の急変を伴う非比例載荷時の非弾性ひずみを再現できない、つまり非弾性変形を過小評価するという欠点を持つ。従って、非比例・多軸・繰返し応力に対する構造物の変形特性予測の高度化のためには、塑性ポテンシャル面に沿う接線方向の応力経路に対する非弾性ひずみを再現可能な弾塑性構成式が必要となる。なお本論ではこの影響による塑性ひずみを接線塑性と呼ぶ。

そこで本研究では、負荷経路が比例負荷から逸脱する非比例負荷時の弾塑性変形挙動の高精度予測を目的として提案された接線塑性繰返し弾塑性構成モデル<sup>1)-3)</sup>を用いて、種々の非比例・多軸・繰返し負荷を受ける鋼製橋脚の弾塑性有限要素解析を行い、接線塑性が解析結果に与える影響に関して考察を行った。

## 2. 有限要素モデルの概要および境界条件

Fig. 1に本研究で対象とした鋼製橋脚<sup>4)</sup>の模式図とそれに対応した有限要素モデルを示す。有限要素モデルは6面体1次要素、供試体板厚方向6分割、計算高速化のために供試体の上半分はビーム要素を用いて作成した。なおFig. 1ではzx面に対して供試体半分の有限要素モデルを示しているが、実際の解析にはフルサイズのモデルを用いている。解析に用いた材料定数をTable 1に示す。境界条件として、モデル下端板厚中央全周の節点をピン拘束し、モデル上端にFig. 2に示す種々の強制変位を与えた。この強制変位は、先の実験的研究<sup>4)</sup>を参考に、基本変位をおよそ8mmとし、それに繰返し数を乗じ漸次振幅を増大させながら9回負荷した。

有限要素解析に用いたソルバーは陰解法非線形有限要素ソルバーAbaqus/Standard ver. 6.13であり、ユーザーサブルーチンUMAT機能を用いて前述の接線塑性繰返し弾塑性モデル<sup>1)-3)</sup>を実装した。

## 3. 考察

変位負荷点であるモデル上端における水平荷重—水平変位関係(ヒステリシスループ)をFig. 3に示す。Fig. 3の上段はx方向、下段はy方向の応答を示し、各図中の赤実線は接線塑性を考慮しない従来の弾塑性モデルによる応答、青破線は接線塑性を考慮した弾塑性モデルによる応答である。いずれの荷重条件においても、接線塑性を考慮しない場合の方が、考慮した場合に比べピーク荷重が高く見積もられていることが分かる。また、ピーク荷重が発生するのは、接線塑性を考慮した場合負荷回数4回目であるのに対し、考慮しない場合は負荷5回目と、より遅い段階でピーク荷重が発生していることが分かる。このことは、従来型の弾塑性モデルを用いた場合、複雑な実稼働荷重を受ける構造物の強度を危険側に予測している可能性があることを示唆している。今後は、種々の荷重径路を受ける実験結果と比較し解析結果の妥当性を確認する必要がある。

キーワード 非比例負荷, 繰返し負荷, 弾塑性有限要素解析, 接線塑性構成式, 座屈, 多軸応力  
 連絡先 〒567-0005 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1 大阪大学 接合科学研究所 TEL06-6879-4887

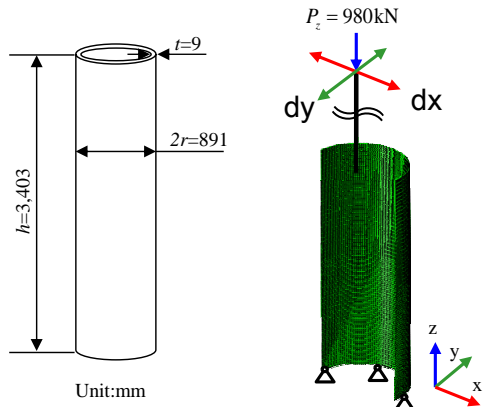


Fig. 1 Schematic representation of experimental system and its finite element model.

Table 1 Material constants for SS400

Elastic moduli	$E = 210$ [GPa], $\nu = 0.3$
Initial value of yield surface	$F_0 = 294.1$ [MPa]
Isotropic hardening	$h_1 = 0.567, h_2 = 30.0$
Stress plateau threshold	$H_p = 0.01$
Kinematic hardening	$a_\alpha = 34.0, r_\alpha = 0.233$
Evolution of normal yield ratio	$Re = 0.0, u = 500.0, u_s = 1.67$
Translation of similarity center	$c = 200.0, \chi = 0.9$
Tangential plasticity	$\xi = 0.9, b = 2.0$

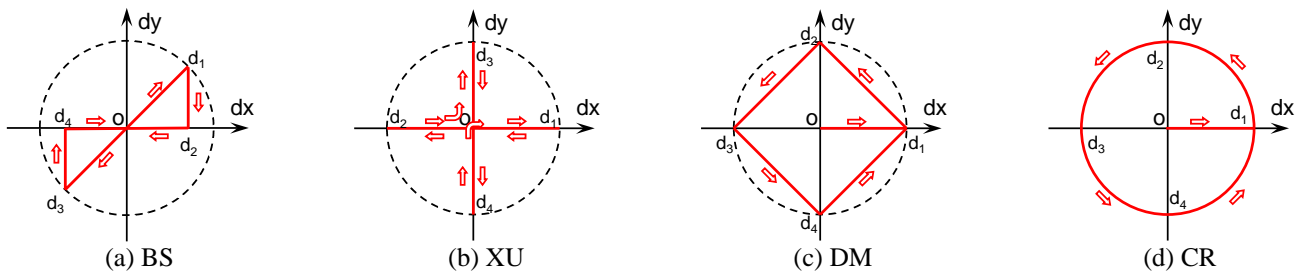


Fig. 2 Schematic representation of the loading conditions

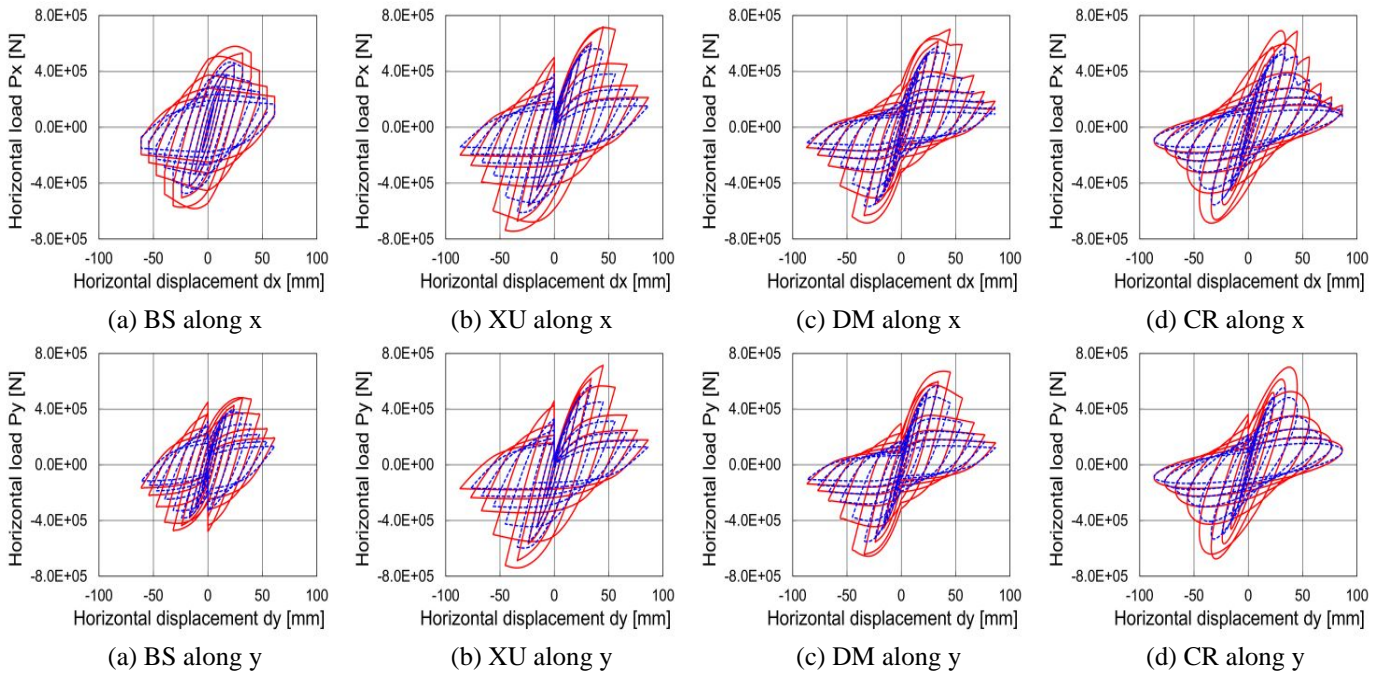


Fig. 3 Comparisons of the hysteresis loops under different loading conditions. Upper figures show the responses in the x-direction, lower figures show the responses along the y-direction. Red solid lines are “without tangential plasticity”, blue dashed lines are “with tangential plasticity”.

参考文献

- 1) Hashiguchi, K., and Tsutsumi, S., “Elastoplastic constitutive equation with tangential stress rate effect,” Int. J. Plasticity, vol. 17, page 117-145, 2001.
- 2) Tsutsumi, S. and Hashiguchi, K., “General non-proportional loading behaviour of soils,” Int. J. Plasticity, Vol. 21, pp. 1941-1969, 2005.
- 3) Hashiguchi, K., Pfeiffer, F., Wriggers, P., “Elastoplasticity theory,” Lecture notes in applied and computational mechanics, Springer, Berlin, 2009.
- 4) Nishikawa, K., Yamamoto, S., Natori, T., Terao, K., Yasunami, H., and Terada, M., “Retrofitting for seismic upgrading of steel bridge columns,” Eng. Struct., vol. 20, page 540-551, 1998.