

汎用プログラムによる円形鋼製橋脚の局部座屈解析

井浦雅司*, 小牧 理**

* 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

** 東京電機大学大学院理工学研究科 (350-03 埼玉県比企郡鳩山町)

円形鋼製橋脚の局部座屈解析を、汎用プログラム ABAQUS を用いて行った。既往の実験結果と、幾何学的かつ材料の非線形を考慮した本数値結果との比較を通して、数値結果の精度について調べている。硬化則としては等方硬化あるいは移動硬化のどちらかを選択することが可能である。局部座屈発生付近の応力状態を調べ、既往の実験で観察されている象の脚座屈とダイヤモンド座屈の発生メカニズムについて考察している。また、円筒シェルと基部とを接合する溶接により発生する残留応力を考慮した数値解析を行い、座屈発生地点の変化について調べる。最後に、数値解析結果を用いて、既往の論文で提案されている鋼製円筒シェルの最高強度を推定するパラメータの有効性を調べている。

Key Words: Cylindrical shell, Local buckling, Numerical analysis

1. はじめに

地震時における円形鋼製橋脚を対象とし、ここでは片持ち円筒シェルの頂部に一定の軸力と繰り返し横力を作用させたモデルを考える。本モデルの終局耐力は固定端周辺における局部座屈が進展することにより決定される。そこで本報告では、汎用プログラム ABAQUS におけるシェル要素を用いて、上記モデルの有限変位弾塑性解析を行う。

円形鋼製橋脚の局部座屈を考慮した数値解析は数多く行われている(例えば文献[1]-[6])。解析に用いられている手法の多くは有限要素法であり、特に強調されているのは構成則の重要性である。これまでも、汎用プログラムに独自の構成則を組み込んだ解析も報告されている([1],[2])。しかしながら、独自の構成則を開発することはそれ程容易なことではない。本報告では、既存の汎用プログラムを用いて円形鋼製橋脚の局部座屈を考慮した数値解析を行い、その有効性を確認すると共に、実験において観察された現象の解明を行うことを目的としている。

まず、既往の実験結果と数値結果との比較を通して、数値結果の精度について調べることにする。特に、硬化則が数値結果に大きな影響を与えることから、等方硬化と移動硬化を用いた時の数値結果の比較を行う。

既往の実験では、固定端近傍に象の脚座屈あるいはダイヤモンド座屈が観察されている。その発生条件については文献[7]において議論されているが、その発生メカニズムについては検討されていない。ここでは、各々の座屈モードが発生する際の座屈部周辺の応力状態について調べ、その発生メカニズムについて言及する。

次に、座屈発生位置に注目する。既往の実験によれば、座屈モードは象の脚モードかダイヤモンドモードのいずれかが観察

されているが、いずれのモードも固定端より若干高い位置に発生している。初期不整を考慮しない計算結果と実験結果とを比較すると、座屈発生地点は数値結果の方がより固定端に近いことが確認されている。これは円筒シェルと基部とを溶接していることから生じる残留応力の影響と考えられる。現実の残留応力分布を測定した研究は少ないため、ここでは残留応力分布を仮定して、その座屈発生地点に与える影響について調べる。

最後に、繰り返し荷重を受ける鋼製円筒シェルの最高強度について調べる。井浦・熊谷・小牧ら[7]により、鋼製円筒シェルの最高強度を推定するパラメータが提案されており、既往の実験結果を基にその妥当性が確認されている。ここでは、数値結果を用いてそのパラメータの有効性を調べることにする。

2. 実験結果と数値結果との比較

汎用プログラム ABAQUS には硬化則として等方硬化則と移動硬化則の2つが用意されている。文献[5]においては、移動硬化則を用いた数値解析結果が実験結果と比較的良好一致を見ることが報告されている。ここでは、文献[7]における実験結果を基に、硬化則の影響について調べる。

図-1 は等方硬化則を用いた時の計算結果と実験結果(板厚 $t=4.5\text{mm}$)を、荷重変位履歴曲線について比較したものである。構成則としては、材料試験より得られている応力・歪曲線なるべく忠実に再現すべく折れ線近似をしている。

移動硬化則を用いた時、ABAQUS では歪に応じて硬化係数を変化させることはできない。そこで、本報告では硬化係数をヤング係数 E の $1/100$ と $1/50$ とした2ケースについて解析を行った。図-2 は硬化係数が $E/100$ の場合、図-3 は硬化係数が $E/50$ の場合における荷重変位履歴曲線を示している。

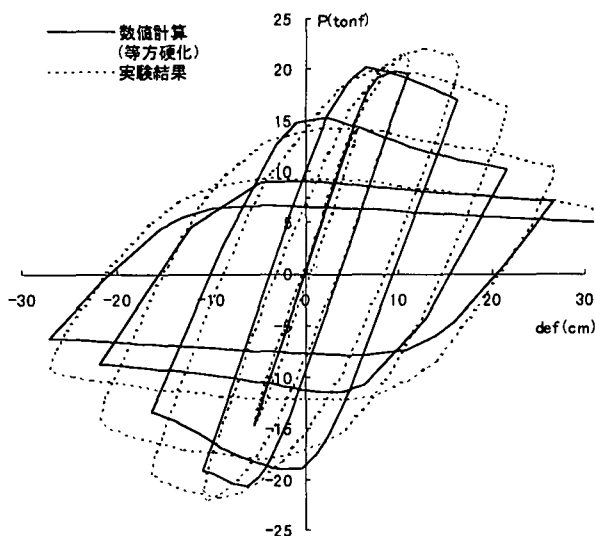


図-1 等方便化 (公称板厚 4.5mm)

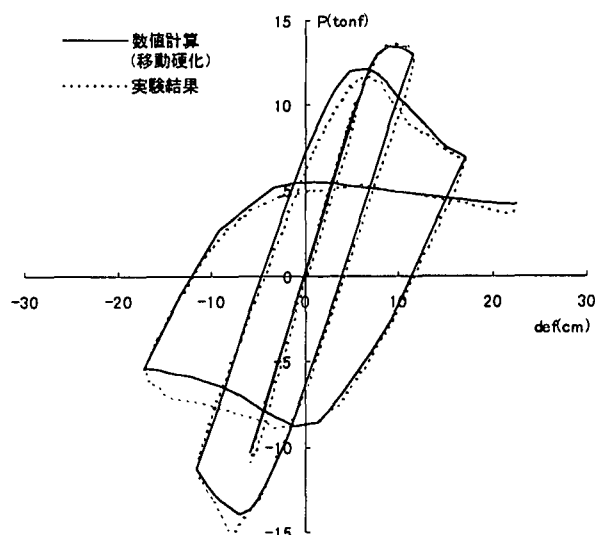


図-4 移動硬化 (公称板厚 3.2mm, $E_H/E=1/100$)

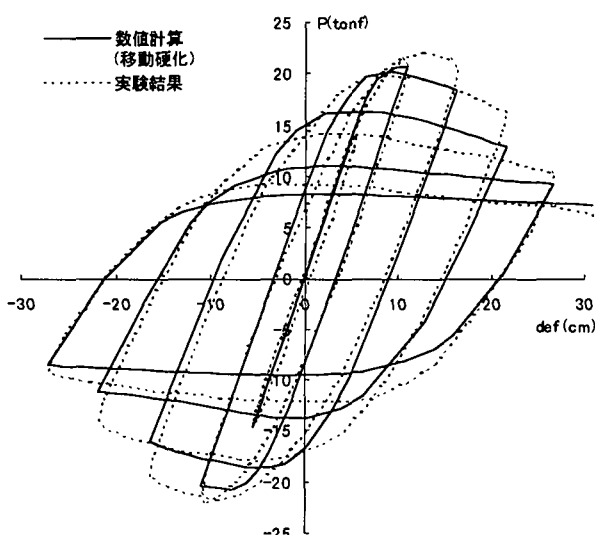


図-2 移動硬化 (公称板厚 4.5mm, $E_H/E=1/100$)

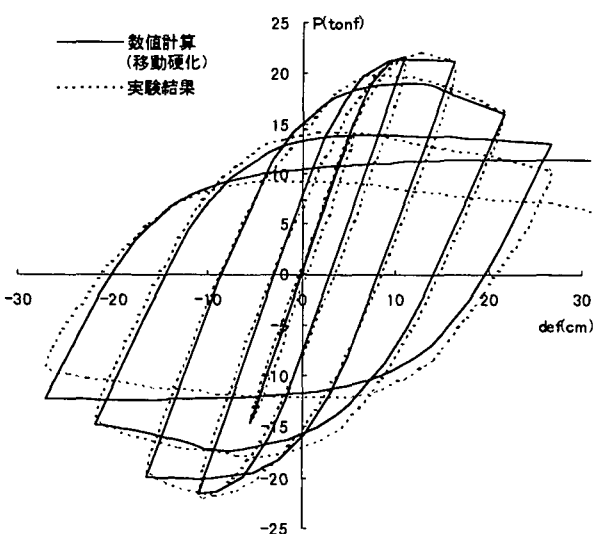


図-3 移動硬化 (公称板厚 4.5mm, $E_H/E=1/50$)

以上の結果より、実験結果(板厚 $t=4.5\text{mm}$)と良い一致を見ているのは、硬化則として移動硬化則を用いた場合で、硬化係数を $E/50$ と設定した時であることがわかる。次に、文献[7]における板厚が 3.2mm の実験結果と、移動硬化則を用いて、硬化係数として $E/100$ とした時の数値解析結果との比較を図-4 に示す。これより、数値解析結果と実験結果とは比較的良い一致を見ていることがわかる。板厚 4.5mm と 3.2mm の材料定数は異なることから、それぞれの硬化係数には差異が存在していることは明かであるものの、1つの硬化係数の値を材料試験より決定することは難しい問題であり、硬化係数の決定はこのような汎用プログラムを用いる時の課題と思われる。

3. 座屈モード

文献[7]における実験では、象の脚座屈とダイヤモンド座屈の双方が観察された。それぞれの実験を ABAQUS により解析したところ、座屈モードに関しては、実験ではダイヤモンド座屈が生じた板厚でも、数値解析では象の脚座屈が生じており、必ずしも良好な結果が得られなかった。そこで、板厚を下げたところ、 $t=2.8\text{mm}$ 以下においてダイヤモンド座屈が発生した。実験においては $t=3.09\text{mm}$ においてダイヤモンド座屈が観察されており、実験結果と数値結果との間に若干の差異が見られる。文献[7]では象の脚座屈とダイヤモンド座屈が発生する条件について考察しているが、ここでは実験において計測できなかった応力状態を、数値計算結果を参考にして調べることにし、両者の座屈発生メカニズムについて検討する。図-5.a は象の脚座屈が生じる際の変形状態を示しており、その変形状態に対応する円周方向応力と軸応力の分布をそれぞれ図-5.b と図-5.c に示す。次に、ダイヤモンド座屈が生じる場合の変形状態を図-6.a に示し、それに対応すると円周方向応力と軸応力の分布をそれぞれ図-6.b と図-6.c に示す。図-6.b より、ダイヤモンド座屈で内側へ変形している部分の円周方向応力は圧縮力となっていることがわかる。一方、象の脚座屈で外側へ変形している部分の円周方向応力は引張力となっている。

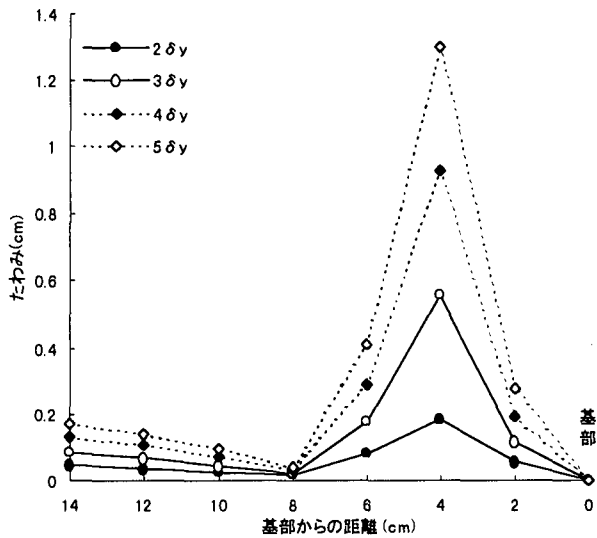


図-5.a 面外変位 (象の脚座屈)

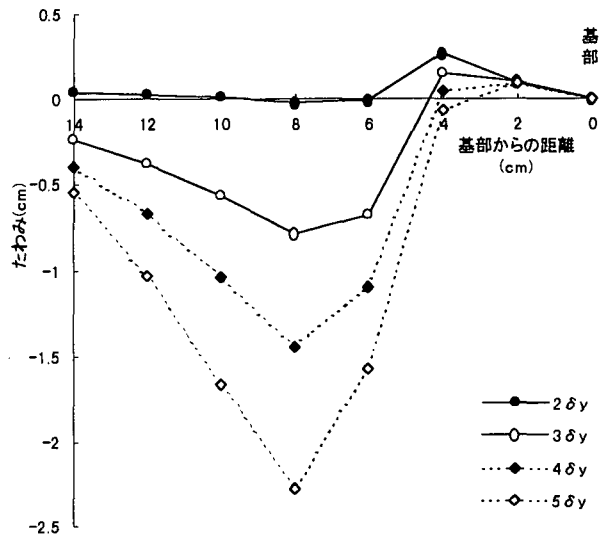


図-6.a 面外変位 (ダイヤモンド座屈)

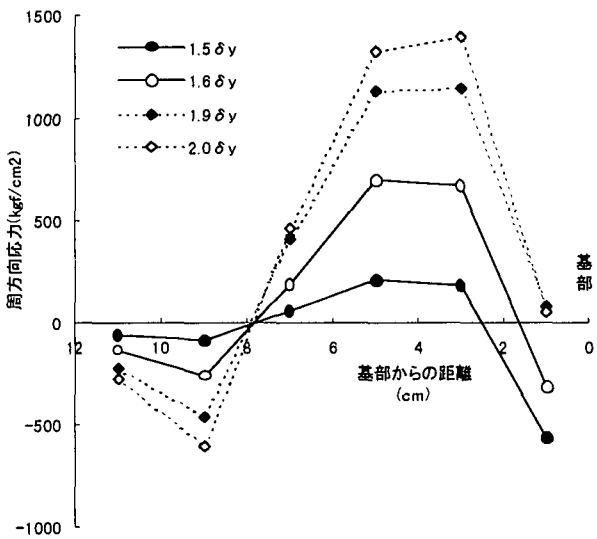


図-5.b 周方向応力 (象の脚座屈)

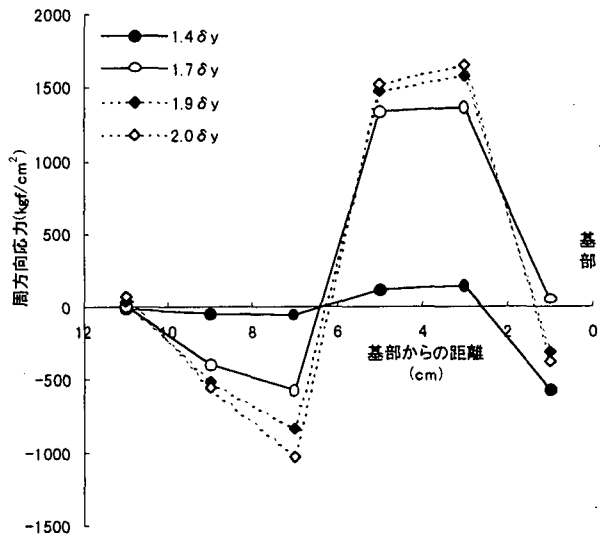


図-6.b 周方向応力 (ダイヤモンド座屈)

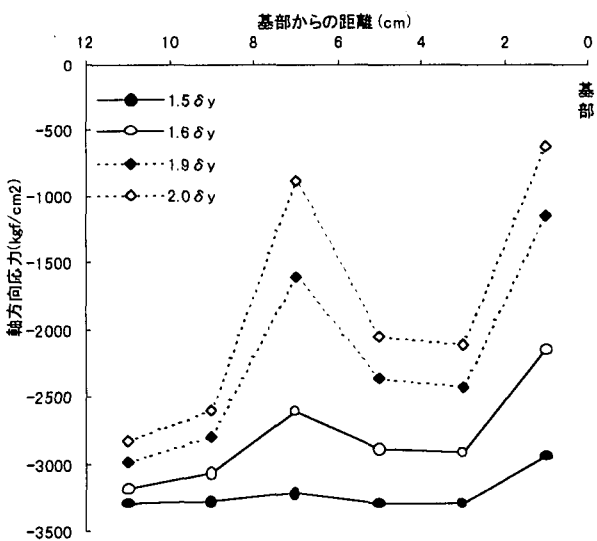


図-5.c 軸方向応力 (象の脚座屈)

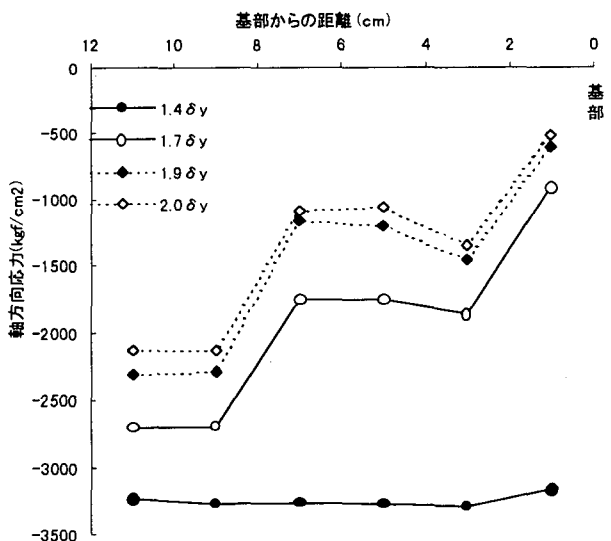


図-6.c 軸方向応力 (ダイヤモンド座屈)

図5と図6を参考にして、象の脚座屈とダイヤモンド座屈が生じる時の応力状態を概略的に示すとそれぞれ図7と図8のようになる。すなわち、象の脚座屈が生じる場合は円周方向応力が引張りとなっているのに対し、ダイヤモンド座屈が生じる場合は円周方向応力が圧縮となっている。この結果は、生じた現象を説明しているだけで、定量的な評価は今後の課題としたい。

象の脚座屈

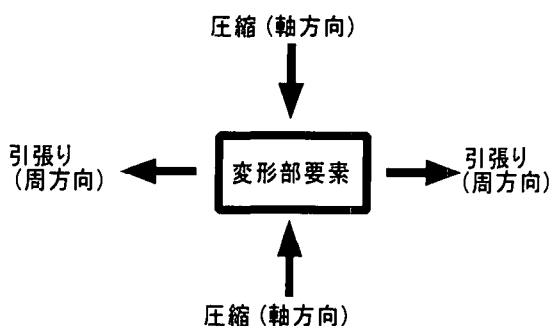


図-7 座屈モードと応力状態 (象の脚座屈)

ダイヤモンド座屈

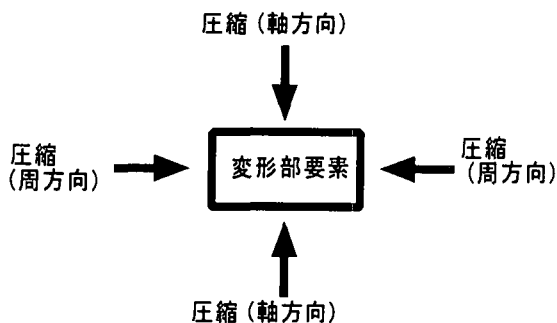


図-8 座屈モードと応力状態 (ダイヤモンド座屈)

4. 残留応力と局部座屈発生地点の関係

阪神・淡路大震災においては、多くの場合、鋼製橋脚の断面変化部やコンクリート中詰め先端部の近辺において局部座屈が発生していた。既往の研究においては、文献[8]で変断面の鋼製橋脚を対象とし、文献[7], [9], [10], [11]では等断面の鋼製橋脚を対象とした繰り返し実験が行われており、ほぼ予想した場所に局部座屈が発生している。そして、これら実験を計算により再現し、座屈発生位置を詳細に検討すると、実験は計算よりやや端部から離れた位置に局部座屈が発生していることがわかる。この原因としては、変断面付近や固定端付近における溶接残留応力の影響が考えられる([12])。本報告では、鋼製橋脚の残留応力分布が明らかにされていないため、正しい残留応力分布を用いることはできないものの、残留応力と局部座屈発生地点の関係を調べることにする。

ここでは、図-9に示すような円周方向に関する残留応力分布

を仮定する。分布は圧縮力と引張力が等しくなるよう決定しており、円筒シェルに生じるモーメントは基部に生じるであろうモーメントと打ち消し合うものと仮定している。図-10は $t=3.0\text{mm}$ における数値結果を示しており、象の脚座屈が発生する地点が残留応力を考慮することにより基部より離れていくことが観察される。図-11はダイヤモンド座屈が発生する $t=2.2\text{mm}$ における数値結果を示しており、先の例と同様に、残留応力を考慮することにより座屈発生地点が基部より離れていくのがわかる。本報告では正しい残留応力分布を用いてはいないものの、本計算例より、局部座屈発生地点と残留応力との間には何らかの関係があるものと思われる。

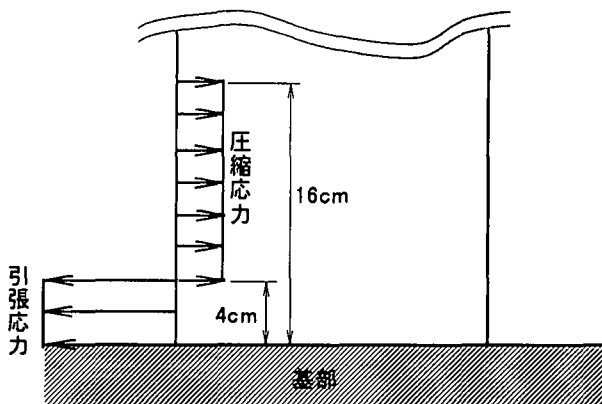


図-9 残留応力分布

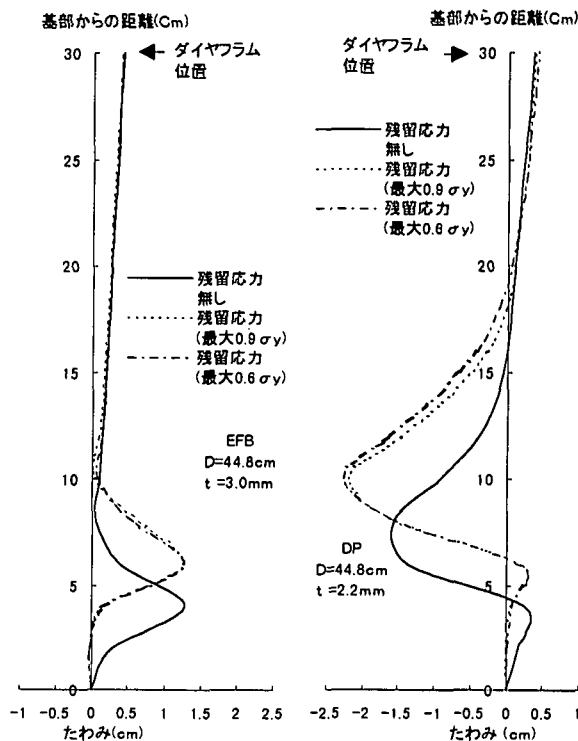


図-10 面外変位(象の脚座屈)

図-11 面外変位(ダイヤモンド座屈)

次に、円筒シェル先端部における荷重と変位の関係に与える残留応力の影響について調べる。図-12と図-13は、先の例題と同様に $t=3.0\text{mm}$ と $t=2.2\text{mm}$ の場合の円筒シェル先端部における荷重変位履歴曲線を示している。これらの図より、円筒シェル先端部における荷重と変位の関係に与える残留応力の影響は少ないことがわかる。

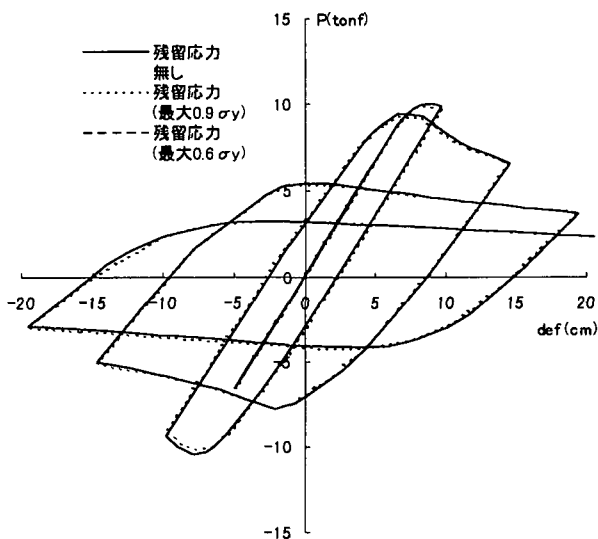


図-12 履歴曲線 ($t=3.0\text{mm}$)

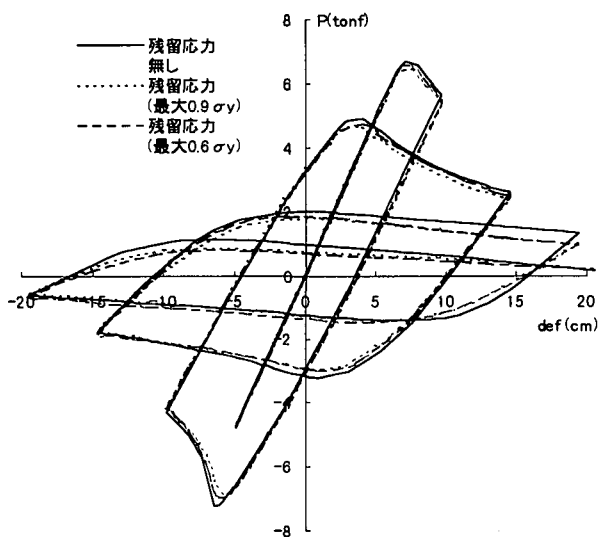


図-13 履歴曲線 ($t=2.2\text{mm}$)

5. 最高荷重の評価

文献[7]において片持ち円筒シェルの最高強度を推定するパラメータが提案されている。ここでは、数値結果を用いてそのパラメータの有効性を確認する。図-14は既往の実験結果と数値結果の比較を示したものであり、本報告における数値結果は

様々な条件下において得られたものであり、図には文献[4]の数値結果も示してある。なお、本報告で用いた硬化則は何れも移動硬化則であり、硬化係数は $E/100$ を採用している。文献[7]において提案されている最高荷重を推定するパラメータの有効性が、図-14より確認されたものと思われる。

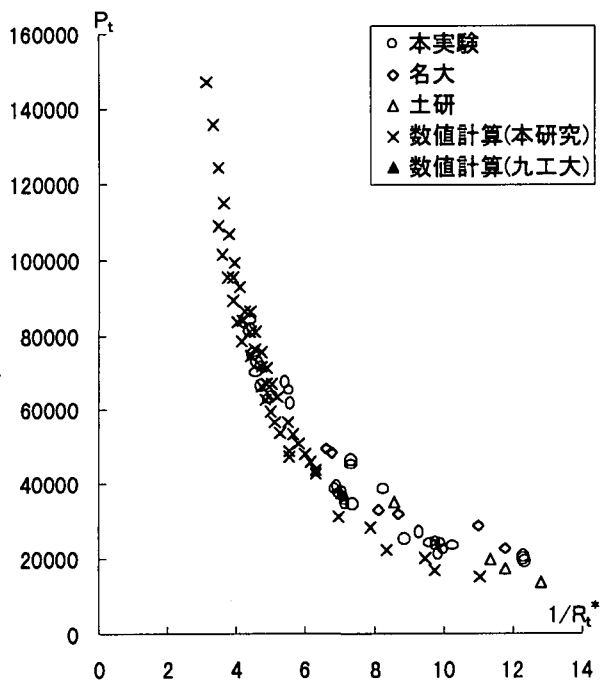


図-14 最高荷重

6. おわりに

本報告では、まず汎用プログラムの有効性について調べた。既往の研究においては、構成則を独自に開発し、これを既存のプログラムに挿入することにより、耐荷力が劣化する領域までも実験結果と良い一致を得ているものもある。本報告のように、既存のプログラムに備えられている範囲で解析を行う場合、多くの問題が存在するものの、最大荷重が発生する領域までならばかなり有効に使用できるものと思われる。ここでは、実験より得ることが難しい局所的な応力に注目して局部座屈モードの発生メカニズムや、残留応力による局部座屈発生地点の変化等について調べた。数値計算による結果が正しいという保証はないものの、これらの現象は定性的には明確になったものと思われる。

7. 参考文献

- 1) 松浦寿男, 宇佐美勉, 水野英二: 繰り返し荷重を受ける薄肉構造物の弾塑性挙動に関する解析的研究, 土木学会第51回年次学術講演会, 平成8年9月.
- 2) 後藤芳顕: 鋼製橋脚の解析に与える構成則の影響, 土木学会

構造工学委員会構造工学震災調査特別小委員会資料(WG2-37).
3) 沈 赤, 他: 鋼製橋脚の耐震性に関する弾塑性有限要素解析, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 平成 8 年 9 月.
4) 阿部圭吾, 他: 梁要素を用いた鋼製円筒橋脚の解析法に関する一考察, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 平成 8 年 9 月.
5) 高久達将, 他: 地震時の鋼製橋脚の弾塑性解析とベンチマークテスト, 橋梁と基礎, pp.138-141, 1996, 8 月.
6) 中沢正利, 他: 鋼製橋脚モデルの交番繰り返し耐荷力に関する数値解析, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 平成 8 年 9 月.
7) 井浦雅司, 熊谷洋司, 小牧理: 横力と一定軸力を受ける円筒シェルの終局状態に関する研究, 土木学会論文集, No.556/I-38, pp.107-118, 1997.
8) 本間宏二, 三木千壽, 館石和雄, 穴見健吾, 佐々木哲也: 断面変化のある鋼管柱の繰り返し水平載荷実験, 阪神・淡路大震災

に関する学術講演会論文集, pp.355-358, 1996.
9) 西川和廣, 山本悟司, 上仙 靖, 安波博道, 名取 暢: 鋼製橋脚の耐震補強に関する実験, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.583-590, 1996.
10) 太田雅夫, 渡辺英一, 古田 均, 杉浦邦征, 宇都宮智昭, 南 荘 淳, 山口 岳: 円形断面橋脚柱の強度・変形性能に関する実験的研究, 土木学会第 48 回年次学術講演会, 第 I 部門, pp.196-197, 1993.
11) 水谷慎吾, 宇佐美勉, 青木徹彦, 伊藤義人, 岡本隆: パイプ断面鋼圧縮部材の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.105-114, 1996.
12) 三木千壽: Private Communication

(1997 年 3 月 31 日受付)

LOCAL BUCKLING ANALYSIS OF STEEL CYLINDRICAL SHELLS BY COMMERCIAL PROGRAM

Masashi IURA and Osamu KOMAKI

Local buckling of steel cylindrical shell is analyzed by using the nonlinear finite element program, ABAQUS. Comparison of hysteretic curves obtained by the experimental and the numerical work is made to investigate the applicability of the numerical results. As a hardening rule, isotropic hardening or kinematic hardening is employed in the ABAQUS. The mechanism of occurrence of local buckling is studied for the elephant foot buckling and the diamond buckling. The effect of residual stresses on the location of local buckling is also studied. The numerical results are used to investigate the applicability of the existing parameters which predict the ultimate strength of cantilever shells subjected to constant axial load and cyclic lateral load