

I - 25 変動板厚を有する矩形板要素の弾性座屈・後座屈解析

高知工業高等専門学校専攻科 学生員 ○田中 豪
高知工業高等専門学校 正員 勇 秀憲

1. はじめに

近年、腐食損傷の激しいプレートガーダーの構成部材の強度特性、あるいは地震荷重を受ける薄肉断面鋼部材の保有耐力を正確に評価することは、重要な課題の一つである。

本研究では、土木構造物特に薄肉鋼構造物を構成する板要素を対象に、汎用有限要素解析ソフトウェア Marc により弾性域における非線形後座屈挙動を求める。そして、一定方向に線形的に板厚が変動する板要素について局部座屈解析を行い、既存の解析結果との比較・検討を行う。

2. 板要素の弾性座屈・後座屈解析

(1) 解析モデル

初めに、解析モデルに対し縦横比 $\alpha = a/b = 1$ の一方向圧縮正方形板要素の弾性座屈および非線形後座屈解析を行い、既往の研究結果と比較し、Marc の基本的な適応性を検証する。また実際の鋼製橋脚モデルとして繰り返し載荷試験¹⁾の縦横比 $\alpha = 600/250 = 2.4$ である矩形板要素の弾性座屈について、本解析結果と ANSYS によるもの²⁾を比較する。

解析モデルを図 1 に示す。この図は載荷軸方向に線形的に変動する場合の解析モデルである。境界条件として次の 4 種類を考えた。①周辺単純支持 (SSSS)、②載荷辺単純 - 非載荷辺固定支持 (SSCC)、③載荷辺固定 - 非載荷辺単純支持 (CCSS)、④周辺固定支持 (CCCC)。

解析モデルは一様圧縮荷重を受け、非載荷辺はいずれの場合でも面内変位は何も拘束されていないものとする。材料特性として弾性係数 $E = 205.8\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 1/3$ 、板厚 $h = 10\text{mm}$ を与えた (正方形板要素の場合)。板厚が変動する場合は、 x - y 平面に関し面外方向に対称的に板厚変動をするものとする。

(2) 弾性座屈解析

一定板厚を有する板要素の弾性座屈解析結果を示す。表 1 は 50×50 分割の正方形板要素、表 2 は 75×30 分割の矩形板要素に対する結果である。

表 1 弾性座屈係数 (正方形板要素)

境界条件	SSSS	SSCC	CCSS	CCCC
自由度数	15096	14943	14943	14739
荷重係数(Fac)	762.0	1463	1284	1919
座屈モード [*] (m,n)	(1,1)	(2,1)	(1,1)	(1,1)
座屈係数	理論値 4.00	7.69	6.74	10.07
解析値	4.0016	7.6829	6.7429	10.0776
誤差 (%)	0.041	0.092	0.043	0.076
Ucr (mm)	0.37026	0.71088	0.62391	0.93246

表 2 弾性座屈係数 (矩形板要素)

境界条件	SSSS	SSCC	CCSS	CCCC
自由度数	13677	13373	13553	13249
荷重係数(Fac)	50.43	86.24	55.53	94.2
座屈モード [*] (m,n)	(2,1)	(4,1)	(2,1)	(3,1)
座屈係数	理論値 4.134	7.10	4.53	7.78
解析値	4.1370	7.0747	4.5554	7.7277
誤差 (%)	0.073	0.357	0.560	0.673
Ucr (mm)	9.1891×10^{-2}	0.15714	0.10118	0.24116

いずれの板要素に関しても、本解析結果は、理論値に対し十分な精度を持っている。また ANSYS による解析結果と比較しても同程度かあるいはそれ以上の精度で座屈荷重を求められることが分かった。ここで、 U_{cr} は座屈荷重を載荷したときの載荷辺上の面内圧縮変位である。

(3) 弾性後座屈解析

正方形板要素に対し面内圧縮変位を各ステップ ($U = 1.00U_{cr} \sim 6.00U_{cr}$) ごとに载荷辺上に与える。周辺単純支持に関する圧縮荷重一面外たわみ曲線 (無次元化圧縮荷重 P/P_{cr} を縦軸に、無次元化最大たわみ w/t を横軸にとる) を図 2 に示す。既往の解析結果として、ANSYS による解²⁾、Rhodes&Harvey による簡易計算式による解、勇による簡易化要素法を用いた解を重ねて表示した。Marc によって求められた非線形挙動はその他の境界条件に対しても既往の解析結果とよく一致しており、Marc による後座屈解析が十分な妥当性と有用性を有することが明らかとなった。

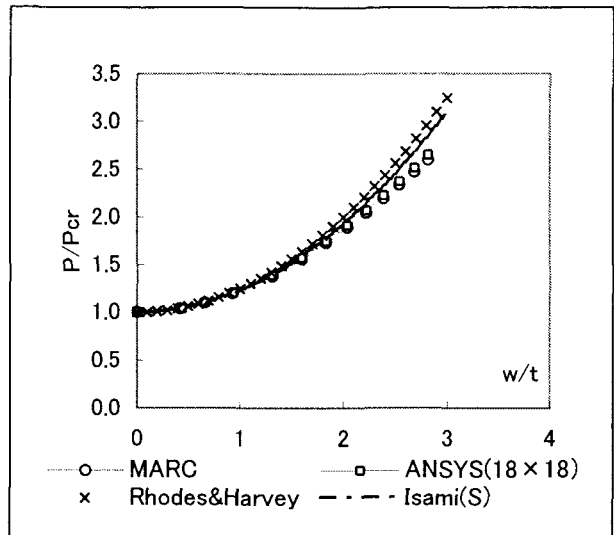


図 2 圧縮荷重一面外たわみ曲線

3. 線形変動板厚を有する板要素の弾性座屈解析

板厚が線形変動する場合の座屈荷重・座屈モードを求める。パラメーターとして境界条件、板厚変動比 h_1/h_0 、境界条件、板厚の変動方向 (载荷方向・非载荷方向) を考えた。板厚変動比を 1.50 に固定した周辺単純支持正方形板要素の解析結果を表 3 に、座屈モード (载荷方向に線形変動) を図 3 に示す。要素分割数は 20×20 とし、座屈係数は板厚 h_0 に関する曲げ剛性を用いて計算した。周辺単純支持について、座屈荷重 (座屈係数) は理論値³⁾に対して十分な精度で求められていることが分かる。境界条件のみを変化させた場合でも十分な結果が得られた。板厚が線形変動する場合の座屈モードは一定板厚の場合の座屈モードとは全く異なる特有の座屈モードを示し、最大たわみの発生位置が板厚の薄い側へ偏向した。次に縦横比を $\alpha = a/b = 1.50$ と変化させた周辺単純支持正方形板要素 (15×10 分割) の解析結果の一例を表 4 に示す。縦横比のみの変化に対する座屈荷重・座屈モードに対しても既往の解析結果とよく一致している。さらによく知られた一定板厚の座屈モード (2, 1) とは全く異なる座屈モード (1, 1) を示し、縦横比のみに依存しない座屈モードを示す。

表 3 周辺単純支持正方形板要素

変動方向	荷重係数	座屈係数	理論座屈係数	誤差(%)
载荷方向	1250	7.1241	7.1183	0.082
非载荷方向	1351	7.6998	7.6394	0.790

表 4 周辺単純支持正方形板要素 (縦横比 $\alpha = a/b = 1.50$)

変動方向	座屈モード	荷重係数	座屈係数	理論座屈係数	誤差(%)
载荷方向	(1,1)	1170	6.6682	6.5268	2.166
非载荷方向	(1,1)	1479	8.4293	8.2344	2.367

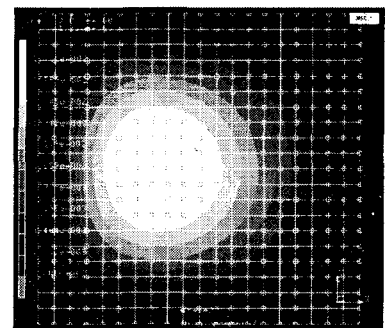


図 3 座屈モード例

4. まとめ

Marc は一定板厚および線形変動板厚を有する圧縮矩形板の弾性座屈および後座屈解析に対し、既往の解析結果に対し十分な精度を持って適用できることが明らかとなった。今後は、材料的非線形性を考慮した弾塑性大変形解析を行い、板要素や板要素から構成される薄肉構造物の保有耐力を評価する必要がある。

参考文献

- 1) 京都大学工学部, 鋼橋脚の耐震性と健全度に関する研究, 阪神高速道路公団 1983.
- 2) 森岡, 局部座屈を伴う鋼製箱型柱の弾塑性大変形解析, 高知高専卒業論文, 2003.
- 3) Eisenberger, M. and Alexandrov, A., Buckling loads of variable thickness thin isotropic plates, *Thin-Walled Structures*, Vol.41, pp.871-889, 2003.