

定常的な凹凸を有する鋼管の座屈耐荷力解析

(独) 海上技術安全研究所 正会員 ○渡辺 尚彦
名古屋大学 正会員 北根 安雄
名古屋大学 フェロー会員 伊藤 義人

1. 緒言

栈橋などの沿岸海洋鋼構造物は激しい腐食環境下におかれており、特に腐食しろ設計が行われていた時期の鋼構造物は腐食による耐荷力劣化が問題となっている。このような劣化鋼構造物の補修・補強にあたっては適切な残存耐荷力評価が必要となる。腐食鋼管の残存耐荷力に関して実験としては参考文献 1), 2) などで行われており、平均板厚と標準偏差によって等価板厚に換算する方法が提案されているが、一般的な議論のためには、多様な径厚比、また標準偏差以外の粗さ指標によるパラメトリックな解析が必要である。本研究では進行した腐食形状をよく模擬するとされる、バリオグラム特性を持つ正規確率場モデル³⁾を使用して、径厚比及びレンジ（自己相間距離）とシル（分散）といった粗さ特性をパラメータにし、鋼管の弾塑性解析を行った。

2. 解析概要

腐食形状がレンジとシルおよび平均板厚によって特徴付けられ、板厚が正規分布に従い本質的自己相関性を有すると仮定し、そのような凹凸性状を乱数的に発生させることにより、腐食形状をモデル化した。ここで、シルと残存板厚の標準偏差とは等価であることから、過去の計測例の標準偏差を参考にシルを 0.5, 1.0, 1.5mm² とした。レンジについては 10, 50, 100mm と変化させた。ランダムに発生させた正規確率場であるため、各々のバリオグラム特性を有する 5 例ずつの解析を行っている。鋼管の寸法は、現在製造されている一般構造用炭素鋼鋼管のうち、各径で径厚比 D/t が大きいサイズのものをモデル化した。これらの鋼管は中心軸圧縮に対して塑性局部座屈により崩壊するので、断面に真円を仮定した場合の軸対称理論座屈波長より長い 300mm 区間を腐食減肉部位として図-1 に示すように設定し、その腐食部と鋼管初期板厚部位とは 200mm 区間のテーパーをつけて板厚を滑らかに接続した。解析モデルでは各節点の板厚中立軸を参照点とした。塑性座屈が支配的となる径厚比の鋼管では、初期たわみの影響よりも表面凹凸の影響のほうが座屈波形に強く影響を及ぼすため、初期たわみ及び残留応力は考慮していない。凹凸部は対称性を有しないため全体モデルとし、境界条件として上下端の節点を半径方向以外すべて拘束とし、上端の節点に軸方向の変位を与えた。応力-ひずみ関係には、鋼管(STK400)から切り出した鋼材の材料引張試験から、最小二乗法によってフィッティングを行い、諸係数を求めたものを使用した。解析には、汎用有限要素解析プログラム ABAQUS を使用し、要素は 4 節点低減積分膜ひずみ要素 S4R を使用した。メッシュのサイズは減肉部で軸方向に 5mm、周方向には径 216.3mm, 406.4mm, 1400mm の各鋼管に対してそれぞれ 72 分割, 144 分割, 576 分割とした。表-1 に解析ケースを示す。

表-1 解析ケース

モデル名	管径 D[mm]	初期板厚 t_0 [mm]	減肉部 平均板厚 t' [mm]	減肉部 径厚比 R'/t'
D216-1	216.3	12.7	10.1	10
D216-2	216.3	12.7	6.7	15
D406-1	406.4	9.0	6.6	30
D406-2	406.4	9.0	4.9	40
D1400-1	1400	9.0	6.9	100

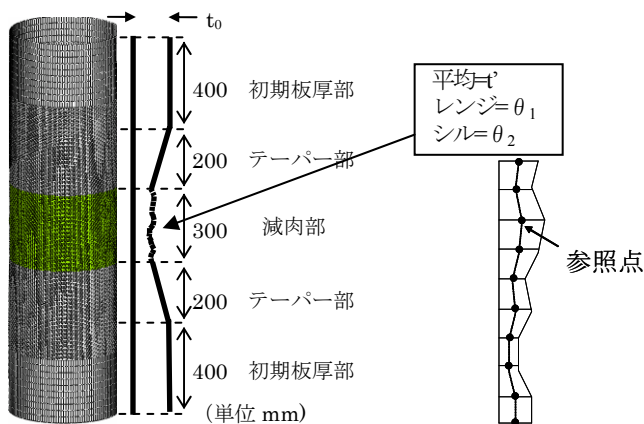


図-1 解析モデル

各径厚比の供試体について
{シル, レンジ} = {(0.5, 1.0, 1.5), (10, 50, 100)}
× 5 ケース (計 45 ケース)

キーワード 腐食, 鋼管, 座屈, 耐荷力, バリオグラム

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町・電話 052-789-2736・FAX 052-789-3734

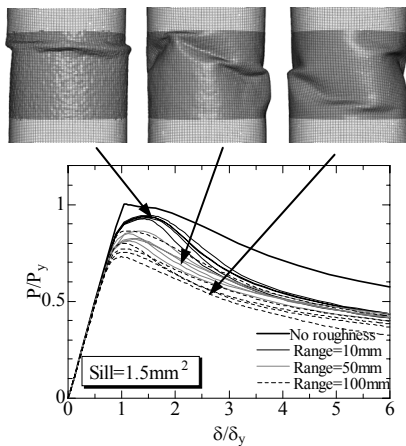
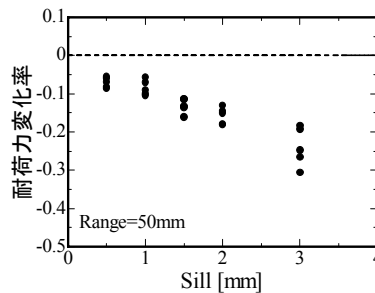
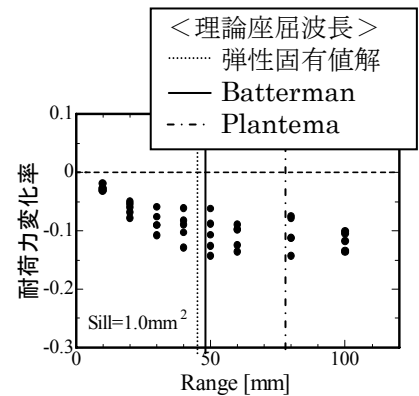


図-2 変形図及び荷重変形曲線の例



(a)シルを変化させた場合



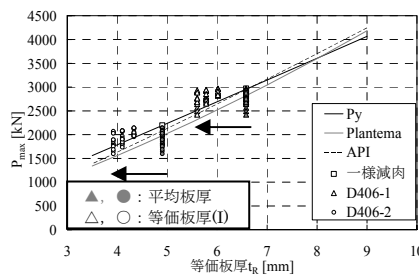
(b)レンジを変化させた場合

図-3 バリオグラム特性に対する耐荷力変化率

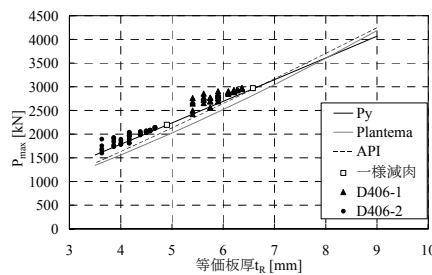
3. 解析結果

D406-2 のモデルでシルを 1.5mm^2 に固定し、レンジを 10, 50, 100mm と変化させたときの荷重変形曲線及び各レンジで最小耐荷力を示した供試体の変形図を図-2に示す. レンジが大きいとき最大耐荷力が小さい供試体が現れる割合が多くなること, また変形形状は非軸対称のものが多くなる傾向が見られる. また, 図-3(a), (b) に D216-2 のモデルにおいて, レンジを 50mm としてシルを $0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0\text{mm}^2$ とした場合, またシルを 1.0mm^2 としてレンジを 10, 50, 100, 200, 300mm と変化させた場合の最大耐荷力減少量を示す. シルの増加に対しては耐荷力の減少が観察されるが, レンジについては座屈波長程度までは線形的に耐荷力減少が見られるものの, それ以降はレンジの増加に関わらず耐荷力減少は見られないことが分かる.

次に等価板厚換算法を検討する. ここでは, D406-1, 2 モデルの解析結果を例として示す.



(a) 平均板厚と換算式(I)



(b) 換算式(II)

図-4 等価板厚による結果整理

<等価板厚換算法>

$$(I) \quad t_R = t_{av} - 0.8S \quad (\text{文献 2})$$

$$(II) \quad t_R = t_{av} - S \left(\frac{\theta_1}{3\sqrt{R'}t_{av}'} \right)^{0.5}$$

t_{av} : 平均板厚, R' : 半径

S : 残存板厚の標準偏差 ($=\sqrt{\theta_2}$)

θ_1 : レンジ, θ_2 : シル

図-4(a)は平均板厚 (▲, ●) と換算式(I)の等価板厚 ($t_R = t_{av} - 0.8S$) (△, ○) で整理したものとを比較したものである. 設計曲線として降伏荷重, Plantema の式, API 曲線を併記している. 平均板厚では危険側に評価される鋼管であっても標準偏差を考慮した等価板厚で換算することによって安全側に評価されることが分かる. さらに理論座屈波長に対するレンジ長を考慮に入れた換算式(II)によってより精度よく耐荷力予測できることが分かる (図-4(b)). 以上の傾向は表-1 に示される他のモデルについても同様であった.

4. 結言

バリオグラム特性を有する正規確率場モデルによって腐食形状を模擬した鋼管の弾塑性座屈耐荷力解析により, 以下の結論が得られた.

- 1) 平均板厚で塑性座屈とされる領域であっても凹凸を有するために弾塑性座屈領域となる場合がある.
- 2) 表面凹凸を持った平均板厚の等しい鋼管の耐荷力特性について, シルの増加に対しては単調に耐荷力が減少するが, レンジの増加に対しては理論座屈波長までは単調に減少するもののそれ以降は減少が見られない.
- 3) 凹凸の自己相間距離も考慮した等価板厚換算式(II)によってより精度よく耐荷力が評価できる.

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター: 港湾鋼構造物防食補修マニュアル, 1997.
- 2) 藤井堅, 近藤恒樹, 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 野上邦栄, 永田和寿: 海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐荷力, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.721-730, 2006.
- 3) 貝沼重信, 細見直史: 鋼構造物材のコンクリート境界部における経時的腐食表面性状の数値シミュレーション, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp.440-453, 2006.