

1. 序論

図1に示すように、火力発電所の重要構造物である揚炭棧橋は上部のRC製デッキが鋼管杭によって支持された構造である。揚炭棧橋は海洋環境に晒されており、厳しい腐食環境下であるため、棧橋構造物等の海洋鋼管構造物の場合、飛沫帯や大気中に対してはライニング防食(被覆防食)、海中部では電気防食を施すことがある。しかし、図2に示すように、ライニング材の剥離損傷やライニング材内で鋼材の腐食が発生している事例が報告されており、鋼材の腐食減肉により棧橋鋼管の耐荷力を低下させる恐れがある。そのため、ライニング材内で、局部減肉した鋼管の耐荷力の診断方法の確立が求められる。

棧橋構造に作用する外力として、石炭船の接岸力や地震力、台風の風荷重等の水平力が考えられる。しかし、地震時や台風時に作用する水平力に対する海洋鋼管構造物の耐荷力評価の研究事例は少なく、棧橋構造物の安全性評価のためには必要である。

そこで本研究では、腐食により撤去された橋脚鋼管を対象に、ライニング材内で、局部減肉した鋼管の残存水平耐力特性について検討することを目的として、実腐食形状を計測し、その計測結果を用いて詳細な有限要素解析モデルを作成し、弾塑性有限要素法による耐荷力解析を行うことで局部減肉した鋼管の残存水平耐力特性について検討した。

2. 水平耐荷力検討のための解析方法の検討

2.1 実棧橋での実測との比較検証

(1) 解析モデル

図3に解析対象箇所及び石炭船接岸箇所を示す。解析は1ブロックをモデル化した。鋼管杭の寸法はφ900、板厚14mmであり、地盤境界部までの長さは16,000mmである。図4に解析モデルを示す。解析モデルは群杭モデル、単杭モデルの2ケースとした。要素は8節点のSolid要素を使用した。鋼管の寸法はφ900、板厚14mmとした。また、鋼材のヤング率、ポアソン比はそれぞれ $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。コンクリートのヤング率、ポアソン比はそれぞれ $E_c = 2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、 $\nu_c = 0.2$ とした。

(2) 解析結果

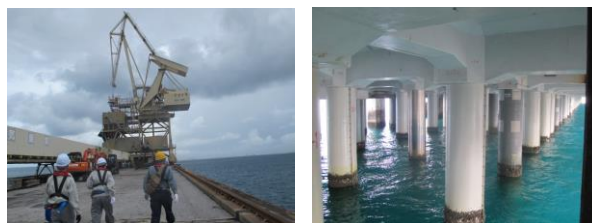
図5に変形特性を示す。図より、両モデルの変形モードは同程度の結果であり、解析モデルとして単杭モデルを採用した。

3. 腐食鋼管の残存水平耐力評価

3.1 人工局部腐食を有する鋼管の残存水平耐力

(1) 解析モデル

既往の棧橋鋼管の水平耐力解析¹⁾と十分良好な一



(a) 外観 (b) 内観

図1 火力発電所内の棧橋構造物



(a) 剥離損傷例 (b) 内部の腐食状況例

図2 ライニング防食鋼管の損傷事例

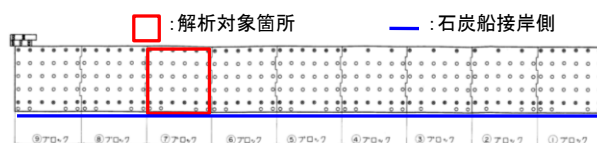
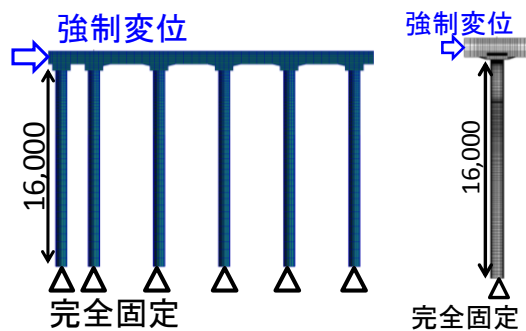
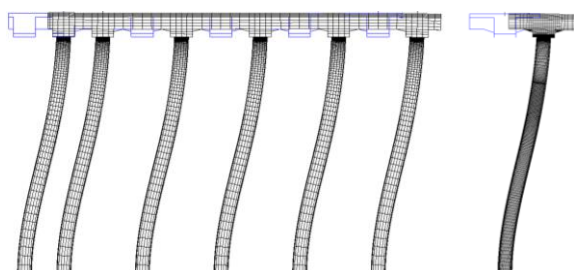


図3 解析対象箇所及び石炭船接岸箇所



(a) 群杭モデル (b) 単杭モデル

図4 解析モデル



(a) 群杭モデル (b) 単杭モデル

図5 変形特性

致がみられる解析モデルを用いて、鋼管杭の残存水平耐力の検討を行った。

図 6 に解析モデルを示す。解析対象の鋼管の寸法は $\phi 1,500\text{mm}$ 、高さは 39.7m である。解析モデルは事前に行った栈橋構造モデルと等価な変形性状を示すことを確認できている鋼管杭 1 本のみのモデル（単杭モデル）とした。使用する要素は飛沫帯と海中中部、海底土中部上端から 1.5m 位置は Shell 要素、その他の海底土中部は Beam 要素とした Beam-Shell 混合モデルとした。また、海底土中部には既往研究¹⁾を参考に地盤ばねを設定した。鋼管の要素分割は周方向に 150 分割、長手方向は上端から 1.5m 位置の範囲を 30mm ピッチ分割とした。解析には、汎用有限要素法解析プログラム MSC. Marc を使用して弾塑性解析を行った。RC 床版-杭結合部は剛と仮定し、杭上端に剛体要素を作成した。拘束条件は杭上端の剛体要素上に回転拘束と水平方向の強制変位、上載荷重を作用させ、鋼管基部は完全拘束とした。また、鋼材の弾性係数、ポアソン比はそれぞれ $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、 $\nu = 0.3$ とした。構成則は降伏応力を $\sigma_y = 235 \text{ MPa}$ とする完全弾塑性体とした。

解析は図 6 に示す境界部、飛沫部、干満部の 3ヶ所を減肉箇所とした。鋼管の外径は $\phi 1,500$ 、 $\phi 900$ 、 $\phi 609$ の 3 パターンとして、鋼管の外径による最大耐力の差異の検証を行った。また、減肉量は 20% 減肉、 40% 減肉、 60% 減肉、 80% 減肉の 4 パターンとした。また、一様減肉は比較参照用とした。

(2) 水平荷重-水平変位関係

図 7 に水平荷重-水平変位関係を示す。図より、最大耐力は境界部減肉、飛沫部減肉、干満部減肉の順に低下しており、減肉位置が RC 床版-杭結合部に近いほど、最大耐力が低下する結果となった。

(3) 最大耐力時変形図及び塑性化の拡がり

図 8 に 60% 減肉時での、最大耐力時の変形図及び塑性域の拡がり特性を示す。図中の点線は減肉箇所を示す。図より、健全部では境界部付近で塑性化が生じ、局部座屈が生じたと同時に最大耐力に達している。部分減肉モデルは健全と比較して塑性域が異なり、変形モードの差異がみられた。

3.2 実腐食鋼管の水平耐力特性

(1) 解析モデル

図 9(a)に解析モデルを示す。実腐食鋼管の寸法は鋼管の寸法は $\phi 609$ 、設計板厚 14mm である。鋼材の弾性係数、ポアソン比はそれぞれ $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ 、 $\nu = 0.3$ とした。構成則は降伏応力を $\sigma_y = 235 \text{ MPa}$ とする完全弾塑性体とした。

図 9(b)にモデル化手法を示す。杭頭部から下方へ 3m までの範囲は 8 節点 Solid 要素、 3m 以下は 4 節点 Shell 要素とした Shell-Solid 混合モデルとした。また、両要素の結合は Shell 要素を Solid 要素の 1 要

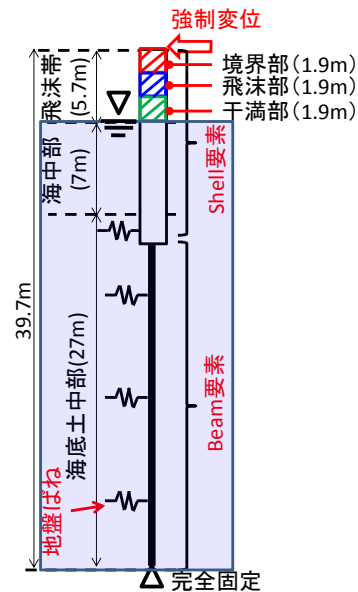


図 6 解析モデル及び人工局部腐食の減肉箇所

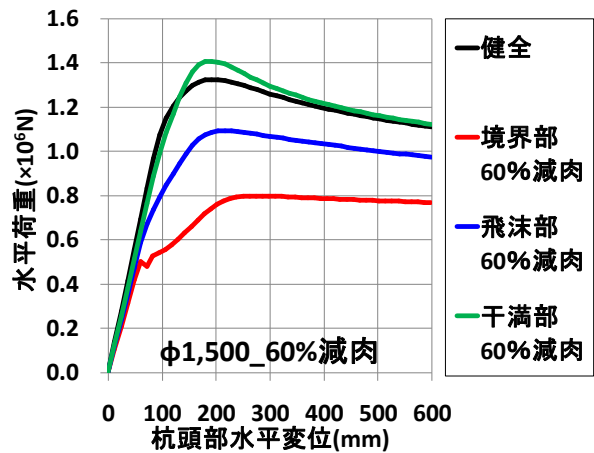
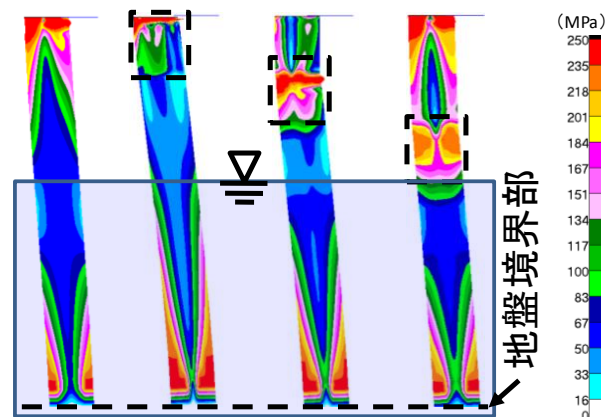


図 7 水平荷重-水平変位関係



(a) 健全 (b) 境界部 (c) 飛沫部 (d) 干満部
図 8 最大耐力時の変形図及び塑性域の拡がり特性 (60%減肉)

素分挿入し、挿入する Shell 要素の板厚は母材と同厚である。図 9(c)に実腐食鋼管のモデル例を示す。腐食減肉はパルス渦流計の計測結果²⁾を反映しており、板厚計測結果をもとに片面減肉を模擬した。

(2) 水平荷重-水平変位関係

図 10 に水平荷重-水平変位関係を示す。縦軸は水平荷重、横軸は杭頭部水平変位を示す。図中の黒線は健全鋼管、その他は実腐食鋼管を示す。図より、実腐食鋼管は健全鋼管と比較して 2 割程度、最大耐力の低下がみられた。また、実腐食鋼管は変位 100mm 時で剛性の変化がみられた。

(3) 最大耐力時変形図及び塑性化の拡がり

図 11 に変形特性・塑性化の拡がり特性を示す。図より、腐食鋼管は健全鋼管と比較して曲げの変局点が上側となっており、変形の差異がみられた。また、塑性域は杭頭部付近に集中しており、局部座屈の変形モードの差異もみられた。

3.3 実腐食鋼管の水平耐力特性

(1) 水平力作用時の鋼管のモデル化

図 12 に水平力作用時の鋼管のモデル化を示す。図より、φ1,500 鋼管の変形図より、杭頭部は水平移動し、地盤境界部で変形が拘束されている。また、応力状態は杭上端の荷側では鋼管長手方向に圧縮応力、杭上端の非荷側では鋼管長手方向に引張応力が作用している。以上のことから、杭上端の支持条件は固定支持の水平可動、地盤境界部の支持条件は固定支持に近似できると考えられる。従って、モデル化した鋼管をもとに残存水平耐力の検討を行った。

横軸を径厚比パラメータ R_t ³⁾、縦軸を最大耐力比 P_u/P_y として、人工局部腐食を有する鋼管の残存水平耐力の検討を行った。

横軸の径厚比パラメータ R_t を以下に示す。

$$R_t = 1.65 \cdot \frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{r}{t} \quad (1)$$

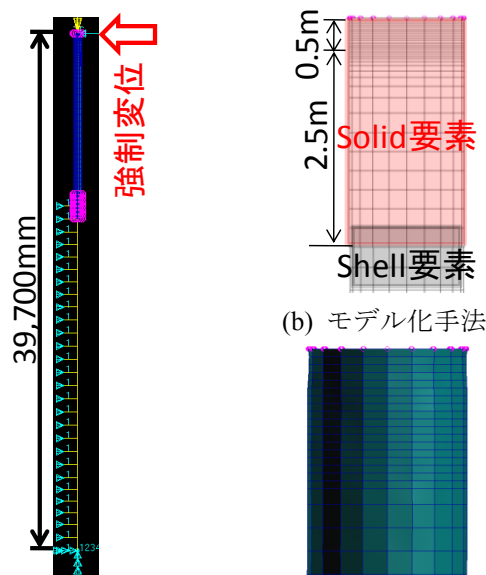
ここで、 σ_y : 降伏応力、 E : ヤング率、 r : 鋼管の半径 (中心から外径までの距離)、 t : 板厚である。

また、縦軸の最大耐力比 P_u/P_y は最大荷重 P_u を健全鋼管の降伏荷重 P_y で除して無次元化した値であり、図 12 より、降伏荷重 P_y は次式で表される。

$$P_y = \frac{2M_y}{h} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{M_y}{I} y \quad (3)$$

ここで、 M_y : 降伏モーメント、 h : 杭頭部から地盤境界部までの距離、 σ_y : 降伏応力、 I : 断面 2 次モーメント、 y : 中立軸からの距離である。



(a) 解析モデル (c) 実腐食減肉モデルの例
図 9 解析モデル

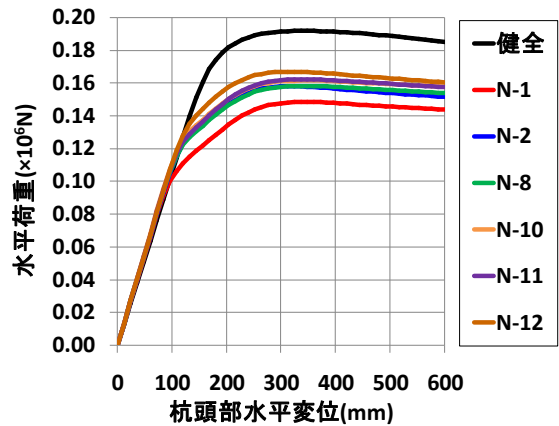


図 10 水平荷重-水平変位関係

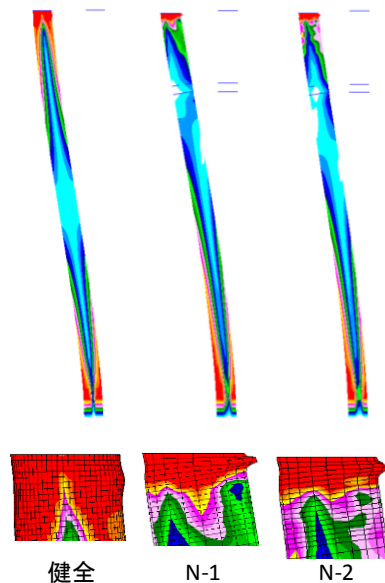


図 11 変形特性・塑性化の拡がり特性

(2) 人工局部腐食を有する鋼管の残存水平耐力の検討

図 13(a)に一樣減肉モデルでの径厚比-最大耐力関係を示す。縦軸は最大耐力比、横軸は径厚比パラメータを示す。横軸の径厚比パラメータ内の板厚は、減肉部の板厚とした。図より、φ1,500 鋼管、φ900 鋼管の径厚比-最大耐力関係は同程度の結果となった。しかし、φ609 では差異がみられる結果となった。

図 13(b)に境界部減肉での径厚比-最大耐力関係を示す。図より、境界部減肉はφの大きさによらず、径厚比-最大耐力関係が同程度の結果となった。また、飛沫部減肉、干満部減肉では径厚比-最大耐力関係に差異がみられる結果となった。

また、一樣減肉、境界部減肉の径厚比-最大耐力関係は非線形の傾向を示し、境界部減肉、干満部減肉の径厚比-最大耐力関係は線形の傾向を示した。

(3) 腐食した海洋鋼管構造物の残存水平耐力の検討

図中の黒抜きのプロットは実腐食鋼管での径厚比-最大耐力関係を示す。実腐食鋼管の最大耐力は 3.2 節で検討した値を用いた。また、実腐食鋼管の径厚比パラメータに用いる板厚は、平均板厚を用いて検討を行った。図より、φ609 の実腐食鋼管を平均板厚で評価した場合、φ609 の一樣減肉モデルの径厚比-最大耐力関係は同程度の結果となった。

4. 結論

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 最大耐力は境界部減肉、飛沫部減肉、干満部減肉の順に低下しており、減肉位置が RC 床版-杭結合部に近いほど、最大耐力が低下する結果となった。
- (2) 径厚比-最大耐力関係より、人工局部減肉を有する鋼管では φ1,500 鋼管、φ900 鋼管の径厚比-最大耐力関係は同程度の結果となった。しかし、φ609 では差異がみられる結果となった。
- (3) 径厚比-最大耐力関係より、φ609 の実腐食鋼管を平均板厚で評価した場合、φ609 の一樣減肉モデルの径厚比-最大耐力関係は同程度の結果となった。

参考文献

- 1) 山根信ほか：海洋鋼管構造物の LCC 評価に関する研究、日本船舶海洋工学会論文集、第 4 号、pp.229-237、2006。
- 2) 下里哲弘ほか：海洋環境下で腐食した鋼管構造物における渦流計測法の適用性に関する研究、土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集、Vol.67、I-619、2014。
- 3) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物、pp.41-43、1987。

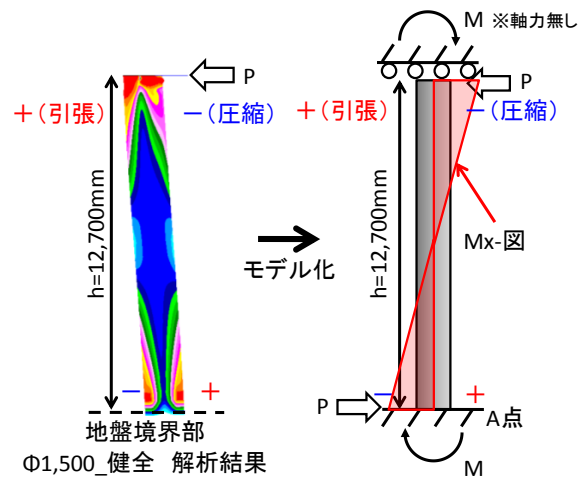
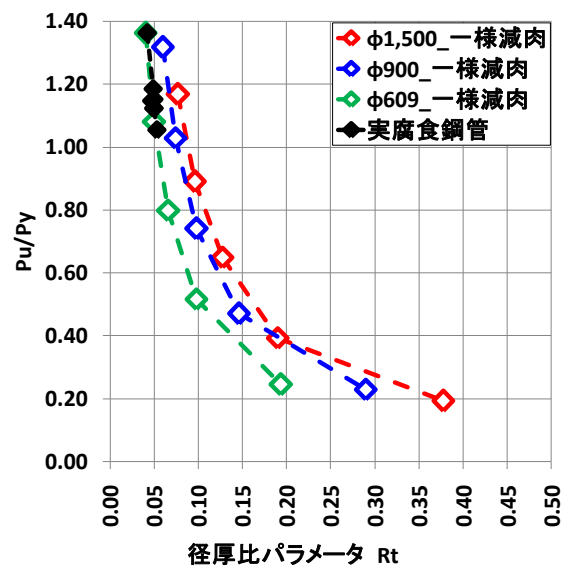
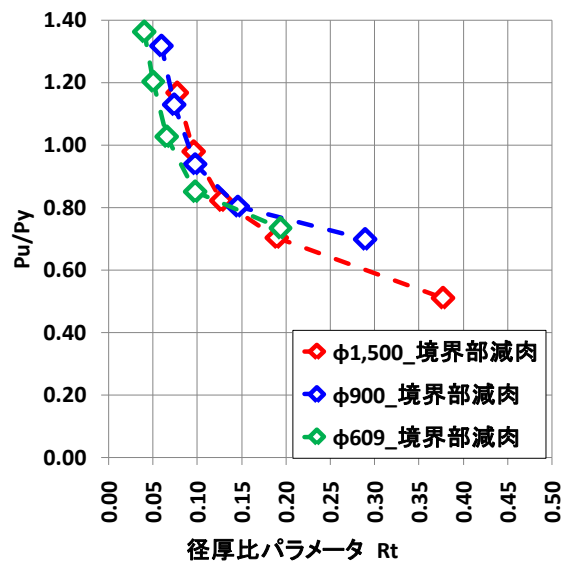


図 12 水平力作用時の鋼管のモデル化



(a) 一樣減肉



(b) 境界部減肉

図 13 径厚比-最大耐力関係