

京都大学工学部 学生員 ○鈴木 健太郎 京都大学大学院 正会員 橋本 国太郎
 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征 関東学院大学 正会員 北原 武嗣

1. はじめに

東日本大震災では、港湾構造物の一つである鋼管杭栈橋には大きな被害はなかったと報告されているが、鋼管杭で腐食が進行している栈橋に地震動や津波などの大きな水平力が作用すると、大きな損傷を受ける可能性がある。また、栈橋などの港湾施設は、災害時の物資輸送などで重要な施設になり得るため、地震動による損傷は出来るだけ軽微にする必要がある。そのため今後起こりうる地震や津波に対して、腐食が進行している鋼管杭栈橋の残存耐荷および耐震性能を把握する必要がある。

そこで、本研究では、腐食した鋼管杭栈橋の残存水平耐荷力および耐震性能に着目し、栈橋の鋼管杭だけでなく栈橋全体（平面フレームによる鋼管杭 3 本を有したモデル）における腐食による水平耐荷力の減少程度および耐震性能を満足するか否かを、汎用有限要素解析コード ABAQUS (Ver.6.10) ²⁾ を用いて検討した。

2. 腐食板厚の算定

本研究において腐食を考える際、図 1 に示す海洋鋼構造物の腐食の分布を把握し、腐食によって減肉した板厚を考える必要がある。そこで、過去に行われた実物の鋼管杭の板厚の実測結果を用いた ³⁾。対象鋼管は、約 19 年間曝露された裸鋼管杭であり、公称寸法が外径 406.4mm、板厚 9mm、全長 10.5m である。鋼種は SKK50（現規格では SKK490）のスパイラル鋼管である。計測結果をまとめたものを表 1 に示す。この板厚測定結果の腐食減肉量を利用し、下式を用いて、本研究では板厚が 16mm の鋼管にこの腐食量を適用した。

$$\Delta t = 9^* - t_{mea}$$

$$t_a = 16^{**} - (\Delta t \times \alpha)$$

ここで、 Δt :腐食減肉量 t_{mea} :板厚測定値
 t_a :本研究で用いた板厚 α :腐食倍率であり、*は板厚測定に用いた鋼管杭の板厚、**は本研究でモデル化した鋼管杭の板厚である。

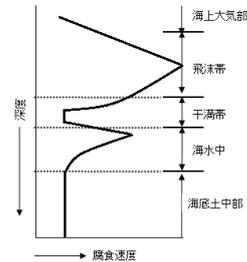


図 1 海洋鋼構造物の海上・海中の腐食分布
 表 1 板厚測定結果

曝露環境	平均板厚 (mm)	最大板厚 (mm)	最小板厚 (mm)	平均腐食量 (mm)	平均腐食速度 (mm/year)	標準偏差 (mm)
飛沫帯	5.3	12.43	0	3.7	0.2	1.85
干満帯	6.79	11.32	2.88	2.21	0.12	1.03
海中(上)	7.63	11.08	2.36	1.37	0.07	0.5
海中(下)	7.76	13.28	0	1.24	0.07	0.53

3. 有限要素法による腐食した鋼管杭栈橋の解析

3.1 解析モデルと概要

本研究では、文献 4) の鋼管杭栈橋を対象とした。作成した解析モデルの概要を図 2 に示す。鋼管杭の外径は 800mm、板厚 16mm、鋼管杭の長さを 10.2m としている。要素は 4 節点低減積分シェル要素を用い、シェル部での周方向分割数を 150 としている。シェル要素の上部の高さ方向の長さは約 3248mm とし、シェル部の端面とビームの要素節点を剛結にしている。使用した鋼材は SKK490 を想定し、密度は 7.85×10^{-9} [ton/mm³]、ヤング率 210 [kN/mm²]、ポアソン比を 0.3、降伏応力を 315 [N/mm²]、引張強さを 490 [N/mm²] としている。またスラブに関しては、1000mm × 3000mm の矩形型で、材料をコンクリートとし、密度を 2.4×10^{-9} [ton/mm³]、弾性係数を 23.1 [kN/m²]、ポアソン比を 0.2 の弾性材料とした。なお、本研究は、表 2 に示した解析ケースを行った。

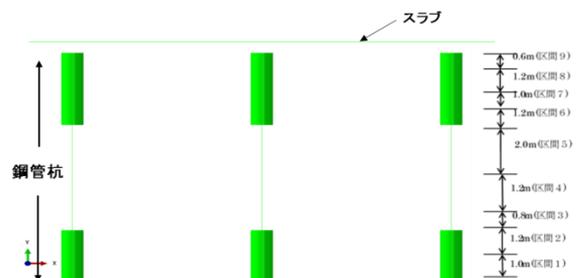


図 3 解析モデルの概要

表2 解析ケースおよび各鋼管杭の腐食量

	左端杭の腐食量	中央杭の腐食量	右端杭の腐食量
健全時	腐食なし	腐食なし	腐食なし
腐食量1倍	1倍	1倍	1倍
腐食量1.2倍	1.2倍	1.2倍	1.2倍
腐食量1.4倍	1.4倍	1.4倍	1.4倍
腐食量1.84倍	1.84倍	1.84倍	1.84倍
左端杭のみ腐食量1.6倍	1.6倍	1倍	1倍

3.2 解析結果および考察

(1) プッシュオーバー解析結果

本解析では、x 軸方向に強制変位 2000mm を鋼管上部に与え、腐食量の変化による最大耐力の違いを比較した。水平荷重-変位曲線を図4(点線)に示す。また水平耐力と腐食量の関係を図5に示す。腐食量が増加するにつれて、耐力は線形的に低下することがわかる。また、腐食量 1.2 倍時と左端だけ腐食量 1.6 倍時の水平耐力にはほとんど差が見られず、水平耐力は総腐食量に依存することが分かった。

(2) 静的繰返し解析結果

降伏時の水平変位を 1dy として -0.5dy, 0.5dy, -1dy, 1dy, -2dy, 2dy... のような载荷パターンで 5 dy まで x 軸に強制変位を与えた。また材料構成則を、移動硬化則とし、プッシュオーバー解析との最大耐力の違いを調べ、エネルギー吸収量の比較を行った。荷重-変位曲線を図4(実線)に腐食量とエネルギー吸収量の関係図を図6に示す。最大耐力および最大荷重時の変位は単調载荷に比べて小さくなった。図6より、どのサイクルの変化量を見ても線形的に減少しており、水平耐力のそれと同様の結果が見られた。

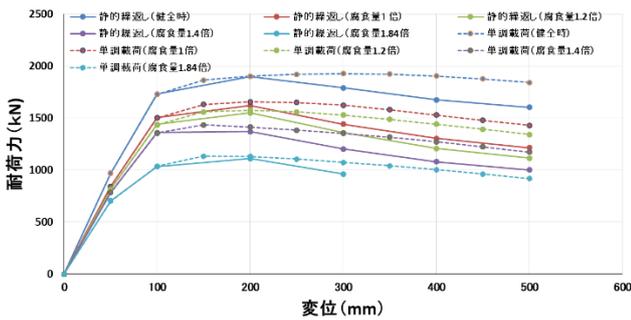


図4 荷重-変位曲線

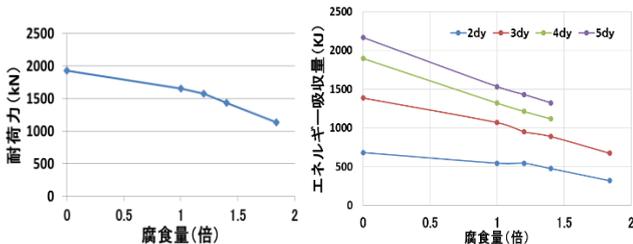
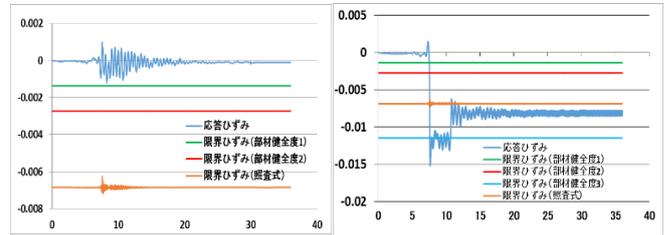


図5 腐食量と耐力の関係 図6 腐食量とエネルギー吸収量の関係

(3) 地震応答解析結果

使用した地震動は、道路橋示方書⁵⁾で示されている、タイプⅡ、Ⅲ種地盤の加速度波形 type231 を使用した。本解析では、健全時および腐食時(腐食量 1 倍)の解析により得られたひずみと設計で考慮されている限界ひずみの比較を行った。解析結果として、ひずみの時刻歴応答結果を図7に示す。健全時は橋脚の基部、腐食時は変形の大きかったスプラッシュゾーンを示した。健全時は、応答ひずみが降伏ひずみにも達しておらず、十分な耐震性能を保持しているといえるが、腐食時は限界ひずみを超え耐震性能は低下しているといえる。また、図8に示すように、腐食が進行しているスプラッシュゾーンでは座屈変形が生じていることがわかる。



(a)健全時(鋼管基部) (b)腐食時(最大変形部)

図-7 ひずみの時刻歴応答

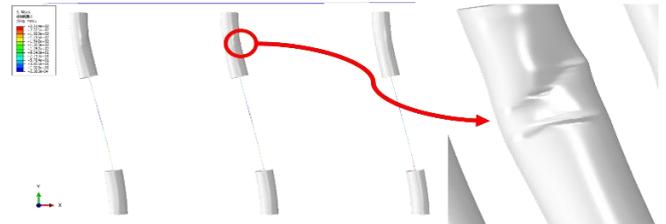


図-8 腐食時の変形状態(変形倍率15倍)

4. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 平面フレームの水平耐力は鋼管杭の総腐食量に依存していることが分かった。
- 2) プッシュオーバー解析および静的繰返し解析より、耐力及びエネルギー吸収量は腐食量により線形的に低下することが分かった。
- 3) 静的繰返し解析により、最大耐力および最大荷重時の変位は単調载荷にくらべて小さくなった。これは、バウシinger効果の影響が表れたためと考えられる。
- 4) 地震応答解析結果より、健全時は十分な耐震性能を保持しているが、腐食時は、一部座屈変形が生じ耐震性能が低下する可能性があり、早急な補修が必要であると考えられる。

【参考文献】1)高橋重雄ほか：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報、港湾空港技術研究所資料、No. 1231、2011。
2) Dassault Systemes Simulia : ABAQUS Analysis User's Manual, Version 6. 10. 3)田村功：腐食環境における鋼部材の腐食形状と力学的性状、京大工学博士論文、2005。2, 4) 鹿島建設土木設計本部：海洋・港湾構造物一新・土木設計の要点⑥、2003, 5)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2012