

鉄筋腐食を有する鋼管杭式栈橋の耐震性能評価 と維持管理手法の提案

野村 早奈美¹・千々和 伸浩²・岩波 光保³
三好 俊康⁴・小笠原 哲也⁴・宇野 州彦⁴

¹ 東京工業大学 大学院土木工学専攻 (東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-21)

² 正会員 東京工業大学助教 大学院土木工学専攻 (東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-21)
E-mail: chijiwa@cv.titech.ac.jp

³ 正会員 東京工業大学教授 大学院土木工学専攻 (東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-21)
E-mail: iwanami@cv.titech.ac.jp

⁴ 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

鋼管杭式栈橋の上部工はりにおける局所的な鉄筋腐食が、全体構造系の耐震性能に与える影響を解析的に評価し、その結果に基づいて適切な維持管理手法を提案した。本論文では、まず合理的にコンクリート内部の鉄筋腐食を評価できるモデルを提案し、その妥当性を検証した。その後、提案したモデルを実際の鋼管杭式栈橋の上部工を成す RC はり部材に用いて、構造性能を評価すると同時に、実験により解析の妥当性も検証した。その解析モデルより得られた RC はりの構成則を全体構造系へ適用し、栈橋の時刻歴応答解析を行うことで耐震性能を評価した。最後に、解析結果に基づいて合理的な維持管理手法の考え方を提案した。

Key Words : *pile-supported structure, reinforced concrete beam, steel bar corrosion, seismic performance, maintenance, numerical analysis*

1. はじめに

我が国の高度経済成長の一翼を担った大規模な公共事業により量産されたコンクリート構造物が供用期間50年を超え、深刻な劣化が多く報告されている。一方で、我が国では少子高齢化が進み、公共事業費が削減されている中で、インフラストラクチャーの新設、更新を行うのは経済的に厳しい状況にある。そのような状況から、既設構造物の有効活用が求められ、維持管理に対する重要性が高まり、コンクリート構造物の劣化メカニズムや、適切な維持管理手法について、様々な観点から研究が進められている。

しかし、港湾構造物の一種である栈橋は、塩害に対して特に厳しい環境に置かれているにも関わらず、費用面の問題などから維持管理への取組みが十分とは言えず、劣化した栈橋に関する研究も少ない。適切な維持管理がなされないまま長期間使用されている構造物は、通常時の使用性が確保されていても、異常時の安全性が確保されている保障はない。そのような現状を踏まえた上で、本論文では、栈橋上部工の鉄筋腐食が栈橋の耐震性能にもたらす影響を明らかにすることで、栈橋の維持管理に対する管理者のモチベーションを高めることを目標とする。そのために、塩害が栈橋の耐震性能に与える影響に関して検証を行い、さらにそれに基づいて維持管理手法

を提案する。ただし、本研究では精緻な耐震性能評価を目的としているのではなく、ある程度簡易で汎用性のある手法を用いて、既存構造物の耐震性能評価を行い、それに基づいて合理的な維持管理手法を提案することに着眼することとする。

2. 検討概要

まず、鉄筋腐食を有するRCはり部材の構造性能を評価するにあたり、有限要素解析プログラムCOM3Dを用いて鉄筋腐食を適切に表現できる腐食モデルを提案し、検証した。その後、実在する鋼管杭式栈橋の上部構造物の一部となっているRCはり部材に対して、提案した腐食モデルを使用して構造性能を評価した。ここで、解析値の妥当性を確認するために、実在のはりの縮小モデルによる載荷実験を行った。解析値と実験値の比較により、解析値の妥当性が証明された後、同様のRCはりに対して、COM3Dを用いて正負交番載荷を模擬した解析（以下、正負交番載荷解析と言う。）を行った。ここで、鉄筋の腐食箇所や腐食量をさまざまに変化させたいくつかのRCはり部材について解析を行った。次に、前記の正負交番載荷解析により得られたRCはり部材のM- Φ 関係を、Degrading Tri-linear Modelを使用して簡易な構成則に変換

し、栈橋全体の構造系に適用した。3次元汎用構造解析プログラムT-DAPIIIを使用することで、全体構造系に地震動を入力し、動的応答解析結果から栈橋の耐震性能を評価した。以上を踏まえ、上部工の局所化した鉄筋腐食が全体構造系にどのような影響を与えるのかを考察し、これらの影響に応じた適切な維持管理手法の考え方を提案した。

3. 鉄筋腐食モデルの提案

鉄筋腐食を有する上部工の解析を行う前に、適切かつ簡易にコンクリート内部の鉄筋腐食の影響を表現できる腐食モデルを考案し、既往の実験¹⁾の結果を使用することでモデルの妥当性を検証した。

(1) 腐食モデルの概要

コンクリート内部における鉄筋腐食が引き起こす腐食ひび割れのメカニズムは非常に複雑で、解析において腐食ひび割れの発生・進展を正確に評価するのは困難である。本論文では、鉄筋腐食がはり部材に与える影響をマクロ的に評価し得る腐食モデルを考案した。

考案したモデルは、鉄筋腐食による腐食生成物により鉄筋周辺のコンクリートに生じる引張応力が、ひび割れ発生以前は増加するのに対して、ひび割れ発生以降は腐食生成物がひび割れ面から流れ出るために、引張応力が増加しないことを考慮している(図-1)。ここで、ひび割れ発生とは、鉄筋腐食により発生した腐食ひび割れがコンクリート表面に到達した時点の状態を示す。

(2) 腐食モデルの妥当性の検証

既往の実験では、9機関によって、健全供試体が17体、質量減少率3%程度の供試体が13体、質量減少率10%程

度が16体、質量減少率30%程度が20体の計66体の載荷試験が行われた¹⁾。実験概要の詳細については、参考文献¹⁾を参照されたい。解析モデルは、試験体と同様の材料特性および構造特性とした(図-2)。

表-1に、実験、解析それぞれから求められた最大荷重を示す。ただし、実験値は複数の供試体から得られた最大荷重の平均値である。実験値の平均と解析値の差が最も大きい健全なケースにおいても、その相対誤差は約11%であり、コンクリートの材料のばらつきや実験時の誤差を考慮すると、本解析は精度よく実験を再現できていると言える。さらに、荷重変位図やひび割れ分布図においても、実験と解析での結果に整合性が見られたため、本研究において、図-1に示した鉄筋腐食モデルを使用することとした。

4. RC はりの解析モデルの妥当性の検証

実在する鋼管杭式栈橋の上部構造を構成するRCはり部材について、鉄筋腐食を有する場合の性能を解析的に評価することとした。解析において鉄筋腐食を再現する際には、3.で提案した鉄筋腐食モデルを使用した。解析結果の妥当性を評価するために、実構造物をスケールダウンしたRCはりの載荷実験を行い、実験値と解析値を比較し、解析結果の妥当性について検討した。

(1) 実験概要

実構造物を1/3の大きさに縮小した試験体を2体用意し、1体は健全な試験体、もう1体は鉄筋腐食を有する試験体とした。実構造物では、鋼管杭とRCはり内部の鉄筋は溶接され、実質的にはRCはり部材は両端固定状態に近いと考えられることから、本実験では、両端固定を再現するために図-3のように両端にスタブを取り付けた。各スタブはそれぞれ4本のPC鋼棒を使用して反

表-1 最大荷重(kN)

断面欠損率	0%	3%	10%	30%
実験値	24.6	23.2	21.6	14.9
解析値	21.8	21.4	19.9	16.3

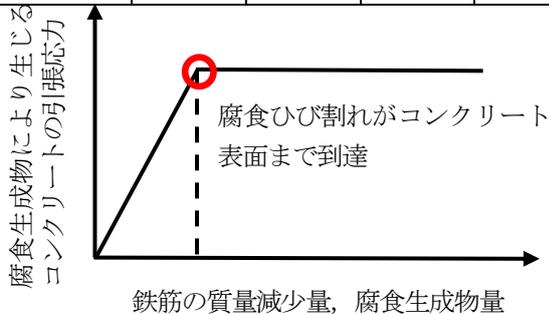


図-1 腐食によるコンクリートの引張応力の増加と腐食量の関係

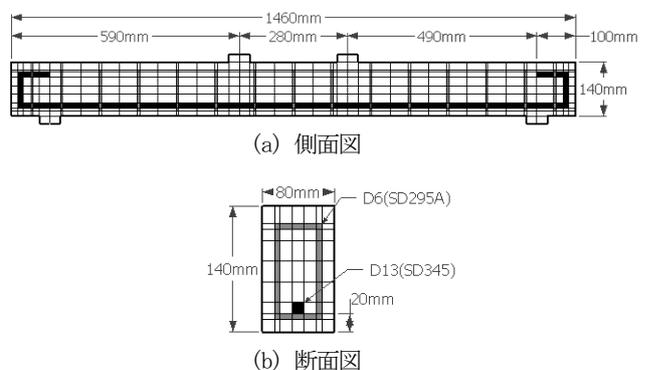


図-2 解析モデル

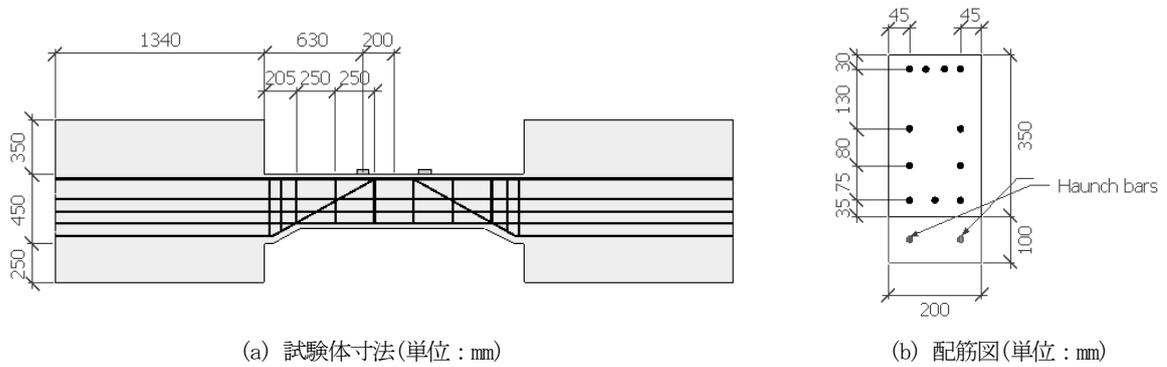


図-3 試験体

表-2 材料特性

鉄筋	鉄筋径 降伏強度	10 (mm) $f_y = 400 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
コンクリート	圧縮強度 引張強度 ヤング率	$\sigma'_c = 39.1 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ $\sigma_t = 2.65 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ $E_c = 21.7 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$

表-3 最大荷重と破壊形態

	最大荷重	破壊形態
試験体 - 健全	854kN	圧壊
解析モデル - 健全	716kN	圧壊
試験体 - 腐食	739kN	せん断破壊
解析モデル - 腐食	684kN	せん断破壊

力床に固定した。使用した鉄筋とコンクリートの材料特性は表-2に示すとおりである。

短期間で鉄筋を腐食させるために、電食により下部主鉄筋3本に強制的に腐食を導入した。載荷試験後に鉄筋をはつり出して確認したところ、腐食により平均19%断面欠損していることがわかった。

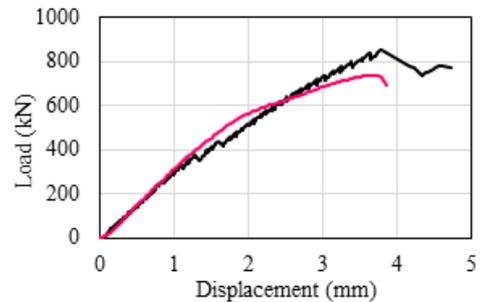
(2) 解析モデル

鉄筋腐食モデルの妥当性検証時と同様、COM3Dを使用して解析を行った。解析では分散ひび割れモデルを用いたが、鉄筋は1要素内に集中的に導入した。解析モデルは、試験体と同様のサイズおよび形状(図-3)とした。ただし、計算機の計算処理能力等の制限から、解析モデルは実際の試験体を軸方向に半分にした1/2モデルを採用した。

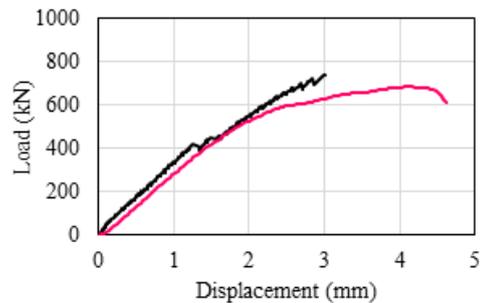
腐食試験体を模擬した解析モデルには、提案した腐食モデルを使用して、下部主鉄筋3本に対して腐食状態をモデル化した。表-2に、材料特性を示す。

(3) 実験結果と解析結果の比較

表-3に、実験と解析からそれぞれ得られた最大荷重とそれぞれの破壊形態を、図-4に荷重変位図(黒線:実験, 赤線:解析)を、図-5及び図-6にひび割れ分布図とひずみ分布図を示す。変位性能については、健全試験体と腐食試験体との間に差が見られたが、最大荷重が出た時点で使用性からして、その部材は破壊に至ったと考えられるため、変位よりも荷重の一致に着目し、本解析モデルは実現象を精度よく再現できることが確認できた。そこで、本解析モデルを使用して、全体構造解析を行うこととした。



(a) 健全な試験体と解析モデル



(b) 腐食した試験体と解析モデル

図-4 荷重変位図

表-4 最大荷重と破壊形態

	最下部	下部2段目	かぶり
健全	-	-	-
腐食	破断	10%	剥落

5. 栈橋の全体構造解析

(1) 正負交番載荷解析

腐食程度と腐食位置を変化させた様々な解析モデルに対して、正負交番載荷解析を行ったが、全体構造解析に使用するものは、表-4に示す2ケースとした。腐食ケースでは、最下部主鉄筋3本が破断、その上部に位置する

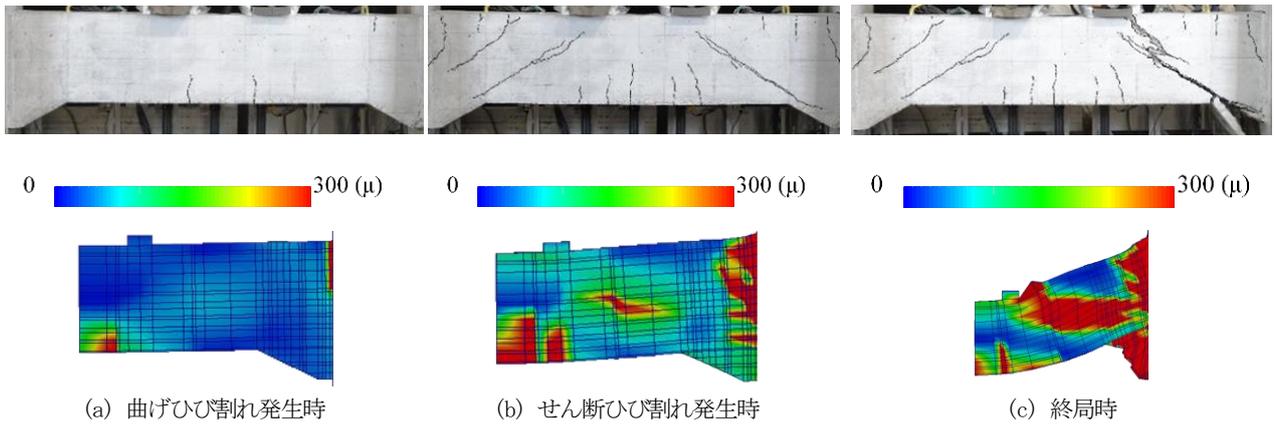


図-5 健全な試験体と解析モデルのひび割れ分布図とひずみ分布図

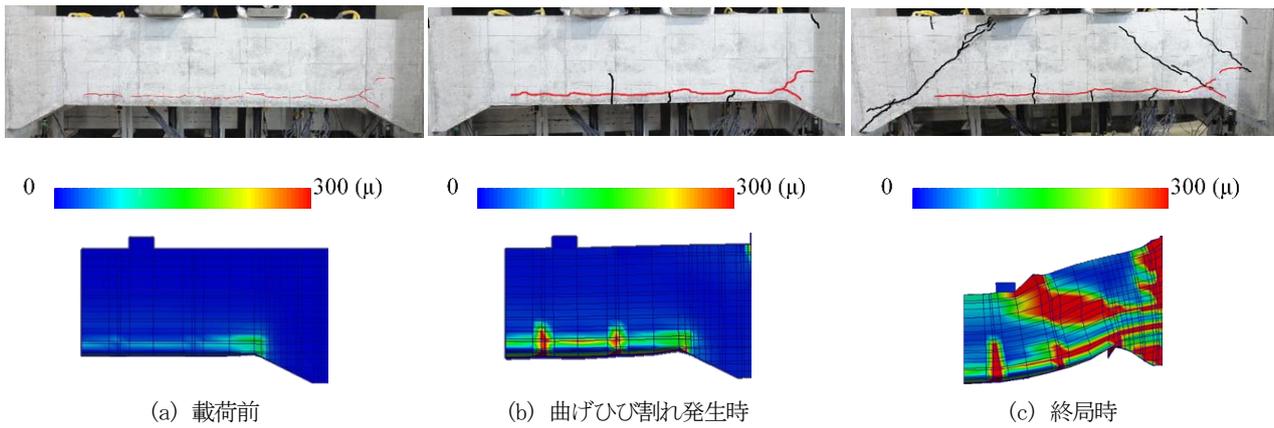


図-6 腐食した試験体と解析モデルのひび割れ分布図とひずみ分布図

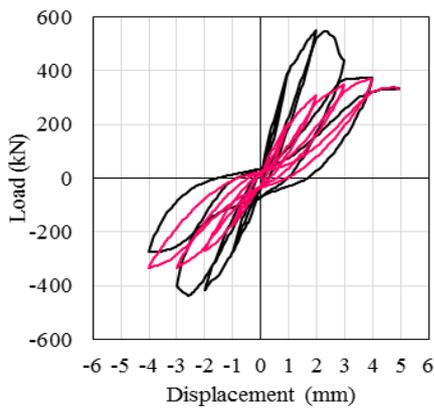


図-7 荷重変位履歴

下部2段目の主鉄筋3本が質量減少率10%とした。解析の結果得られた荷重変位履歴を図-7(黒線:健全, 赤線:腐食)に示す。この荷重変位履歴をRCはり部材の構成則として、全体構造解析に使用した。

RCはり部材の解析の妥当性が確認されたことから、同様の解析モデルを使用して、正負交番荷重によりRCはり部材の構成則を得た。ただし、実際の栈橋に地震動が作用した場合、RCはり部材には鋼管杭を通じてモーメントが作用すると考えられるため、正負交番荷重状態として、荷重はスパン中央に1点荷重とした。

(2) 全体構造解析

解析対象は国内のA港にある鋼管杭式栈橋とした(図-8)。全体構造解析では3次元動的解析プログラムT-DAPIIIを使用して時刻歴応答解析を行った。

全体構造を解析モデルに変換するにあたって、上部工を成すRCはり部材、鋼管杭、地盤の3要素のモデル化が必要である。モデル化にあたりRCはり部材と鋼管杭にははり要素を用い、地盤にバネ要素を用いることで3次元構造解析モデルを作成した。RCはり部材には正負交番荷重によって得られた構成則を使用し、鋼管杭にはバイリニア型の構成則を使用した。地盤のモデル化は、港湾の施設の技術上の基準・同解説を基に地震時受動土圧を計算し、構成則を決定した。解析時の入力地震動には1995年兵庫県南部地震のJR鷹取駅構内地盤上での観測記録を使用し、構造物の法線方向に当該地震動のNS方向、法線直角方向にEW方向を入力した。

(3) 解析パターン

解析対象構造物は2種類のRCはり部材から構成され、それぞれのはり部材は同一の断面図を持つが、スパンが6.25mと4.5mと異なっており、ここでは便宜上それぞれXはり、Yはりと呼ぶことにする(図-9)。それぞれの

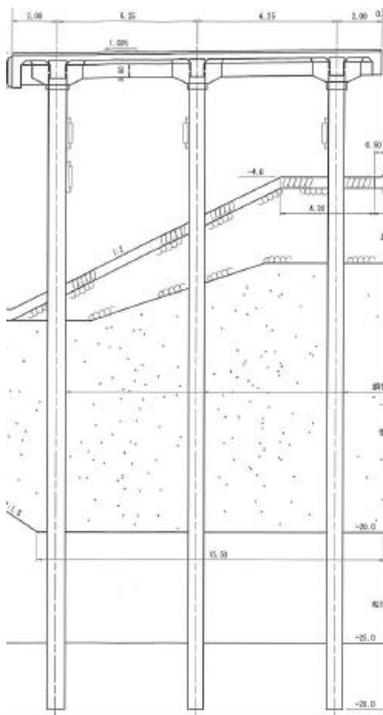
りに表-4の2種類の構成則のうちいずれかを適用した。構成則の入力の組み合わせを変化させることで、全部で89ケースについて栈橋の全体構造解析を行った。

(4) 解析結果

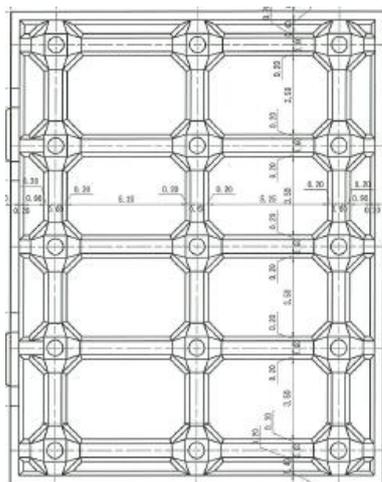
Xはりの構成則を変化させたときに比べて、Yはりの構成則を変化させたときには、その組み合わせと解析結果に有意な結果が得られなかったため、本論文ではXはりの構成則を変化させた場合の解析結果を示す。

解析の結果から次の3つの特徴が得られた。

1. 加震による損傷は健全なはりに集中する。
2. 陸側のはり(XL-1~XL-5)と海側のはり(XS-1~XS-5)のうちいずれか一方に腐食ケースが集中した場合、腐食したはりの本数が同一であれば構造全体の耐震性能も同一となる。ここで、それぞれの部材にかかる反力をして耐震性能とする。
3. 陸側のはりが腐食を有する場合、海側のはりが腐食を有する場合に比べて、構造全体の損傷が大きくなる。



(a) 正面図



(b) 平面図

図-8 解析対象構造物の設計図

6. 維持管理手法の提案

通常、構造物の全ての部材に対して等しく点検が行われるが、これは経済的、時間的観点から考えて合理的な手法とは言えない。そこで、全体構造解析により明らかとなった上部工の局所的な鉄筋腐食と鋼管杭式栈橋の耐震性能の関係に基づいて、合理的な維持管理手法の考え方を提案することとした。

(1) 耐震性能低下指数の提案

現行の栈橋の維持管理手法は、部材の損傷程度のみを考慮している。しかし、栈橋の全体構造解析により、腐食したはりの位置が栈橋の全体構造の耐震性能に大きな影響を与えることが分かった。したがって、より合理的な維持管理手法を取るためには、部材の損傷程度に加えて、損傷位置も考慮しなければならない。そこで、本論

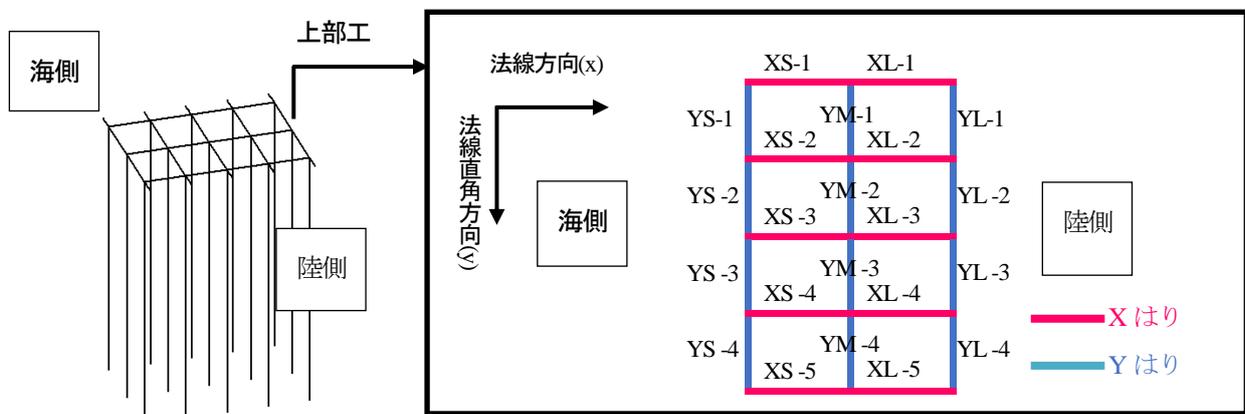


図-9 上部工を成すRCはり部材の呼称

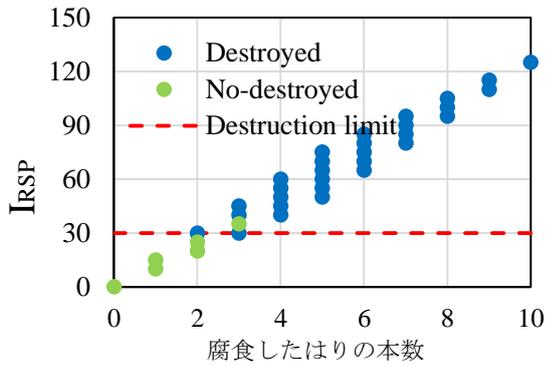


図-10 耐震性能低下指数

文では、式(1)に定義する耐震性能低下指数(I_{RSP})を用いた維持管理手法の考え方を提案する。

$$I_{RSP} = \sum (\text{腐食程度}) \times (\text{腐食位置}) \quad (1)$$

ここで、腐食程度は現行の維持管理手法で採用されているように、例えば錆汁が出ていれば10点、かぶりが剥落していたら50点のように、点検により簡易的に評価する。また、腐食位置は、例えば海側のはりなら10点、陸側のはりなら30点のように、全体構造の耐震性能に与える影響の大きさを評価する。これを全ての部材に対して足し合わせて、得られた点数を耐震性能低下指数とした。

(2) ケーススタディ

耐震性能低下指数を用いて全体構造解析の解析結果を整理することで、耐震性能低下指数の有用性や適用性を確認した。ここで、本解析では健全なはりとは鉄筋腐食を有するはりの2種類のみを使用したため、腐食程度の評価は健全なはりが0点、鉄筋腐食を有するはりが10点とした。さらに、時刻歴応答解析の結果から全体構造の耐震性能に対する寄与度が海側のはりと陸側のはりで2:3の比率であるとわかったため、腐食位置の評価を海側のはりが1点、陸側のはりが1.5点とした。

以上の定義の下、全89ケースに対して耐震性能低下指

EVALUATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF PILE-SUPPORTED STRUCTURE WITH LOCAL STEEL BAR CORROSION AND PROPOSAL OF ITS MAINTENANCE METHOD

Sanami NOMURA, Nobuhiro CHIJIWA, Mitsuyasu IWANAMI, Toshiyasu MIYOSHI, Tetsuya OGASAWARA, and Kunihiko UNO

The objective of this study is to analytically clarify the effect of steel bar corrosion on the seismic performance of the entire pile-supported structure, and to then propose an appropriate maintenance method for pile-supported structures with steel bar corrosion, based on the analytical results.

First, a steel corrosion model using RC beams was proposed and verified. Then, the structural performance of the corroded RC beams was analyzed. Concurrently, loading experiments of the RC beams were conducted to verify the analyses. After confirming the validity of the analysis, the constitutive law of RC beams with various corrosion patterns was calculated by cyclic loading analysis. The seismic performance of the pile-supported structure with several combinations of this constitutive law was analyzed to clarify the relationship between local steel bar corrosion and the seismic performance of the whole structure. Finally, an appropriate maintenance method was proposed based on the analytical results.

数を計算した結果を図-10に示す。ここで、実際の状況を考慮して、時刻歴応答解析の結果、1つのRCはり部材が破壊に至った場合、全体構造系でも破壊に至ったと考え、最初にRCはり部材が破壊に至る時点破壊限界と定義した。計算の結果、破壊限界を境に、破壊したはりと破壊しなかったはりは概ね分かれたが、ただ一点のみ、破壊していないにもかかわらず破壊限界の耐震性能低下指数を超えたケースが存在した。

(3) まとめ

本論文では、解析数が限られていたことから、正確な腐食程度や腐食位置を評価するに至らなかった。しかし、比較的簡易な構成則の適用により耐震性能を評価することができることは、維持管理の現場において迅速な意思決定をサポートし、時間的にも経済的にも合理的な維持管理につながる。今後は、全体構造の構造特性や腐食量・位置を様々に変化させた解析を行うことで、耐震性能低下指数をより正確に求める必要がある。

7. 結論

本研究では、FEMと3次元構造解析モデルによる全体構造解析を用いて、栈橋の上部工を成すRCはり部材の鉄筋腐食が全体構造の耐震性能に及ぼす影響を評価した。その結果、鉄筋腐食の腐食量のみならず、腐食位置も耐震性能に大きく影響を与えることが分かり、その結果を踏まえて合理的な維持管理手法を提案した。今後は、多様な構造、入力地震動等を変化させることで、より実用的な手法を追究していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ、続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能、pp.7-70, 2009.