

論文 マルチスケール統合解析による栈橋上部工の塩害劣化と耐荷力評価

金廣 琴乃*1・高橋 智彦*2・高坂 理紗*3・米津 薫*4

要旨: 供用開始から 30 年が経過した栈橋上部工を対象に、マルチスケール統合解析を適用して塩害劣化進行評価を実施した。劣化実態調査結果を参照した予備検証を通して環境条件を設定することで、塩害劣化評価では、材齢 30 年後に鉄筋腐食によるひび割れが確認され、実構造物で確認された損傷状態と概ね再現することができた。その上で耐荷力評価の一例として、材齢 30 年時に床版中央を静的に押抜き、塩害による材料劣化後の残存耐荷力評価を実施した結果、塩害劣化により剛性低下が生じるものの、最大耐荷力に及ぼす影響は小さいことが分かった。また、腐食の影響により靱性が低下する傾向が確認された。

キーワード: 栈橋上部工, マルチスケール統合解析, 塩害劣化, 耐荷力評価

1. はじめに

既存設備の効率的な維持管理によりライフサイクルコストを低減することは、設備を保有する事業者にとって重要な課題である。真に効率的な維持管理を実現するには、外観上の変状や塩化物イオンなど劣化要因の評価に留まらず、構造物の劣化がどのように進行し、また、機能・性能がどのように低下していくかを評価することが肝要である。

本研究で対象とした鉄筋コンクリート（以下、RC）製栈橋では、船舶からの目視調査による定期点検を実施していたが、コンクリートに錆汁等の変状が見られなかったため詳細調査は実施していなかった。しかし、供用開始から 30 年頃よりひび割れが生じ、かぶりの剥落といった塩害劣化現象が急速に顕在化してきたため、ひび割れ幅、鉄筋腐食状況、剥離等の確認、塩化物イオン濃度の測定といった詳細点検が実施された。このように、劣化変状が目に見えないとしても、コンクリート内部で損傷は徐々に進展しており、ある時期に突如重大な損傷となって現れる可能性が懸念される。このような現象を解析的に評価することができれば、点検の困難な箇所においても補修・補強の適切な手法や時期についての判断材料にすることができると考えられる。

本研究では、供用開始から 30 年以上が経過した栈橋上部工を対象として、構造材料の強度発現や劣化の進行をミクロな物理学現象に基づいてモデル化し予測することが可能な 3 次元マルチスケール統合解析¹⁾を用いて、塩害劣化評価および耐荷力評価、対象構造物の劣化程度に応じた適切な補修・補強方法の提案、補修・補強後の評価までを実施する。マルチスケール統合解析を適用した RC 構造物の塩害劣化解析の事例²⁾として、腐食進展後の地震応答解析が実施されているが、実構造物を対象

とした例は少ないのが現状である。

本論文は、マルチスケール統合解析を用いることで栈橋上部工の建設過程を含む長期材齢までの劣化挙動および補修・補強後の劣化進行を一元的に評価し、構造物のライフサイクルシミュレーションを実施することを最終目的に見据えており、その第一報として、現状の塩害劣化進行の評価および劣化後の耐荷力評価を実施したものである。

2. 対象構造物と劣化状況

2.1 対象構造物

本検討で対象とする栈橋は、外航 LNG 船の受入設備であり、ローディングアーム等の荷役設備（重量約 1,120 t）が設置されている。栈橋上部工の平面図およびその下面状況を図-1 に示す。幅 35m×延長 45m の梁部、杭頭巻立て部および床版からなる RC 構造物であり、61 本の鋼管杭で支持される栈橋構造にて陸上から約 60m 離れた海上に建設されている。海面との距離は、満潮時に約 3m、干潮時に約 5m あり、基本的に直接海水に浸ることはなく、飛沫もほぼかからない。ただし、恒常的に海風が吹いており、多くの塩分が飛来していることから、対象構造物は厳しい腐食性環境下におかれている。

2.2 劣化状況

対象構造物の梁と杭頭巻立て部におけるコンクリートの詳細劣化調査結果を図-2、表-1 に示す。部位によって劣化度合いに差はあるが、下面全体に塩害劣化が生じている。さらに、全体的にひび割れが生じているにも関わらず、いずれの場所においても錆汁の発生を伴わない劣化となっている。ただし、床版部では、ひび割れが殆ど見られず、梁・杭頭巻立て部に比べて損傷が軽微であった。

*1 JERA パワー姉崎合同会社 建設部 土木建築課 (正会員)

*2 東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット 土木・建築統括室 土木・建築エンジニアリングセンター (正会員)

*3 東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット 土木・建築統括室 土木・建築エンジニアリングセンター

*4 株式会社コムスエンジニアリング (正会員)

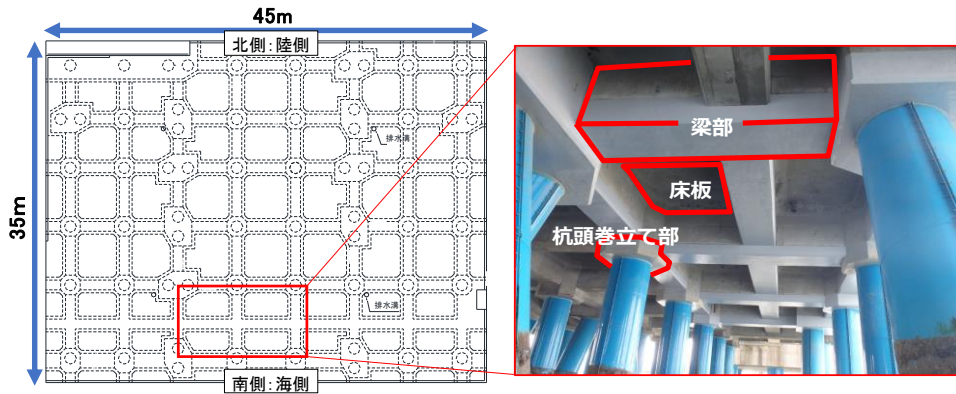


図-1 対象構造物の概要

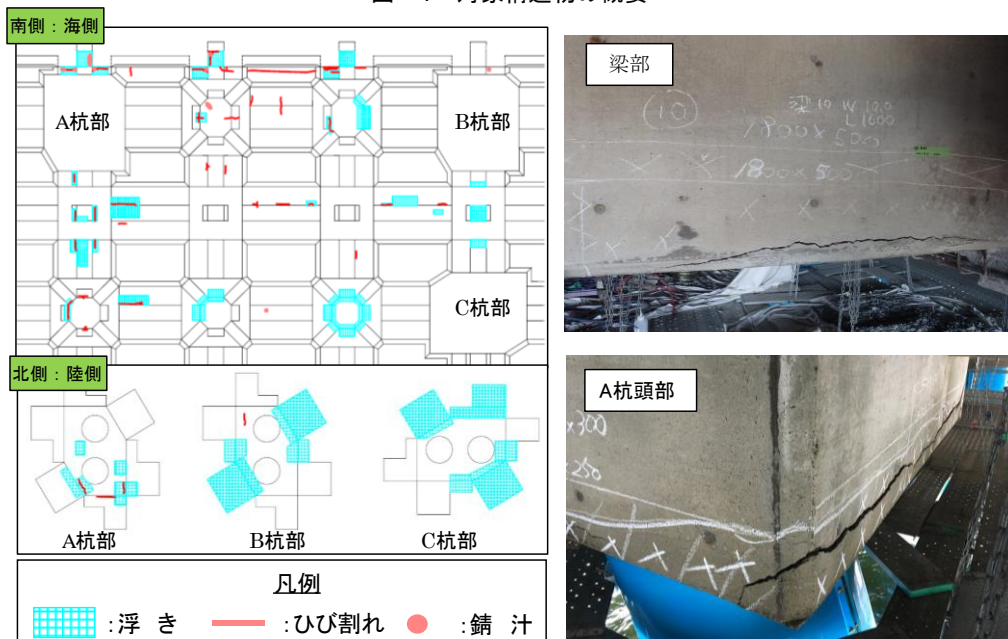


図-2 コンクリートの劣化状況（上：平面展開図，下：杭頭巻立て部展開図）と主な劣化状況写真

表-1 劣化状況のまとめ

| | 梁 (17 箇所) | | 杭頭巻立て部 (8 箇所) | |
|-------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|---|
| | 側面 | 底面 | 側面 | 底面 |
| ひび割れ | ・水平ひび割れ ・水平および鉛直ひび割れ | ・梁短辺方向に短いひび割れ | ・水平ひび割れ ・杭頭に向かう鉛直ひび割れ | ・杭水平および杭直角方向にひび割れ ・側面の水平ひび割れから杭頭に向かう鉛直ひび割れ |
| ひび割れ幅 | 0.2~10 mm | 記録なし | 0.2~1.5 mm | 0.3~1.5 mm |
| 剥離 | ・剥離の大きさは大小ばらつく | ・剥離はほぼ底面全体に広がる | ・すべての箇所において底面から側面に連なった剥離が生じており、一部剥落 | |
| 錆汁 | ・海側で発生 | ・ひび割れ・剥離等がない場所で1箇所のみ発生 | ・発生なし | ・ひび割れ・剥離等がない場所で1箇所のみ発生 |

梁部において、側面には水平方向のひび割れおよび剥離が栈橋下面全体に生じている。しかしながら、底面にはひび割れの発生は殆どなく、剥離に関しても側面と比較するとかなり少なくなっている。

杭頭巻立て部では、側面では梁同様、水平方向にひび

割れが生じており、一部水平ひび割れから派生して杭頭に向かって鉛直ひび割れが生じている。コンクリートの剥離に関しては、全箇所において底面から側面に連なった劣化が発生しており、一部でコンクリートの剥離・剥落が生じている。

3. 解析条件の概要

3.1 解析手法

熱力学連成解析システムと材料非線形構造解析システムを統合したマルチスケール統合解析システム^{リ2)}を適用する。本解析手法における塩化物イオンの移送については、コンクリート表面から水蒸気とともに浸透・拡散するモデルを用いる。

3.2 対象構造物のモデル化

モデル化対象範囲および解析モデルを図-3に示す。モデル化範囲は、鉄筋腐食を考慮した栈橋上部工の耐荷性能を評価可能な最小限の範囲として、格子状に設置された梁に囲まれるスラブを1ブロックとし、最も作用荷重が大きいブロックとする。解析モデルは、床版、梁、杭頭部をソリッド要素でモデル化し、配筋等を勘案し、要素アスペクト比に留意して分割を行った。

3.3 材料物性

対象構造物のコンクリート配合を表-2に示す。セメント種別は普通ポルトランドセメントである。適用する解析手法では、コンクリートの強度や剛性は、時々刻々部位ごとに算定される。鉄筋の仕様は、降伏強度は295 N/mm²、ヤング係数は200 kN/mm²とする。

3.4 環境条件

打設から養生期間中は封緘状態とし、脱型以降に周辺環境に曝されるものとした。本解析では、コンクリート表面の温度、相対湿度および水蒸気中の塩化物イオン濃度、酸素濃度を考慮する。温度および相対湿度は、梁打設から3ヶ月間の初期材齢時には、対象地域近傍で計測

された日平均値を入力値とする。材齢3ヶ月以降は、気象庁データを用いて、乾湿繰返しを考慮した月平均値を入力する(図-4)。塩化物イオン濃度は、対象構造物の詳細調査結果を基に、傾向分析で得られたコンクリート表面の塩化物イオン濃度を考慮して設定する。これについては4.にて後述する。酸素は、一般的な溶存酸素濃度を入力値とした。環境条件のまとめを表-3に示す。

3.5 荷重条件と解析プロセス

本検討では、図-5に示す実施工過程を考慮した解析を行う。梁打設から1ヶ月後、床版部を構築する2段階施工を再現する。想定する荷重として、自重および荷役設備の架台反力を考慮する。自重の作用時期は躯体脱型時とし架台反力は梁・床版の脱型から1年後とした。

4. 飛来塩分量と相対湿度の作用モデルの同定

本検討では、環境条件としてコンクリート表面の塩化物イオン濃度を入力する。環境条件の入力値は、本解析モデルのおよそ1/4範囲の少数要素モデル(図-3)を用いてコンクリート表面の塩化物イオン濃度および相対湿度をパラメータとした予備検証解析を行い、実構造物の計測結果と整合するように環境条件の入力値を同定した。

表-2 コンクリート配合

| W/C (%) | air (%) | 単用量 (kg/m ³) | | | |
|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|
| | | セメント | 水 | 細骨材 | 粗骨材 |
| 55 | 4.0 | 277 | 152 | 828 | 1078 |

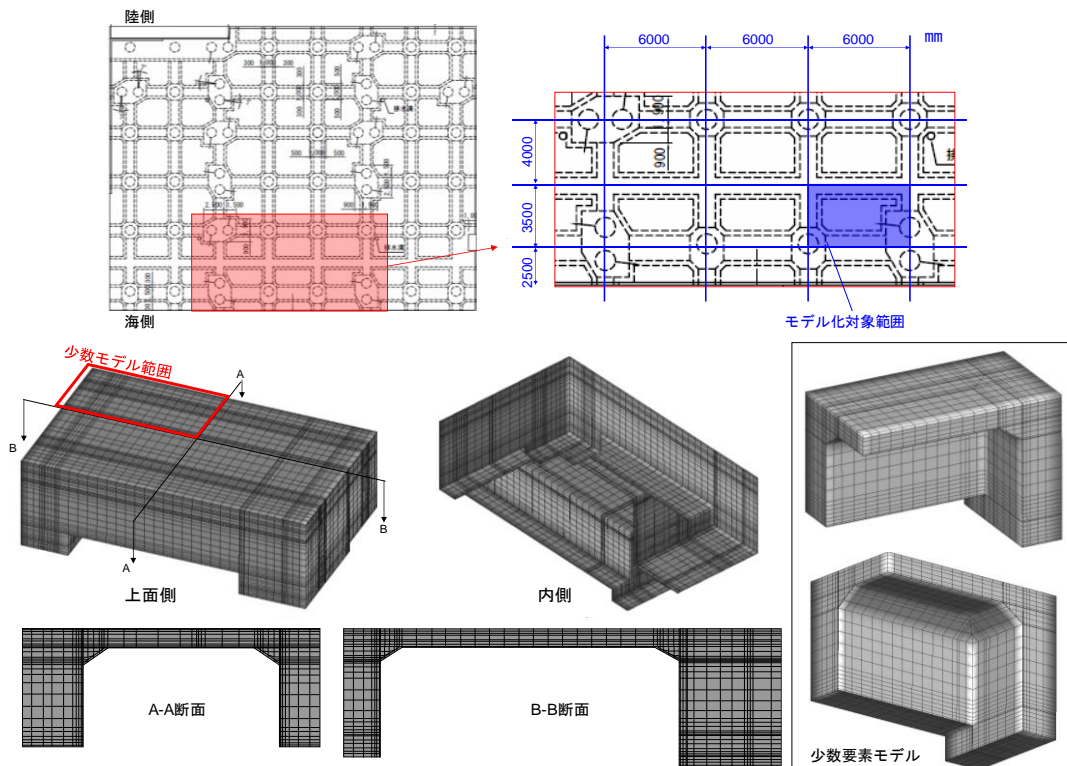


図-3 モデル化範囲と解析モデル

表-3 環境因子の設定

| 環境因子 | 入力値 | 設定根拠 |
|----------|-------------------------------------|--------------------------|
| 温度 | 構造物周辺の気象データより月平均値として設定 | 気象データより設定 |
| 相対湿度 | 相対湿度は気象データに対して割増して設定 | 相対湿度は現地の湿度環境、乾湿繰返しの影響を考慮 |
| 塩化物イオン濃度 | 0.513 mol/L (海水と同等) | 4. で計測結果と予備検証解析より同定 |
| 溶存酸素濃度 | $9.3 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ | 一般値 |

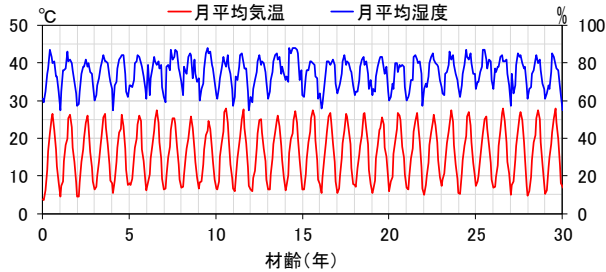


図-4 周辺気象データ

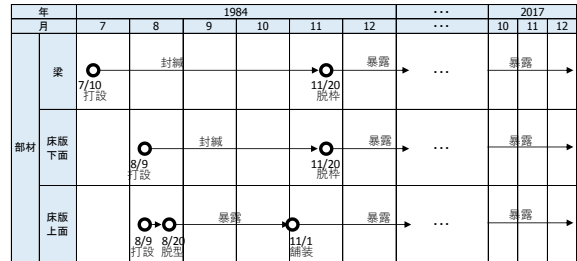


図-5 解析プロセス

予備検証により、塩化物イオン濃度が海水の塩化物イオン濃度より低い場合、コンクリート内部への塩分浸透量が実測値と比べて非常に小さくなるのが分かったため、設定する塩化物イオン濃度は海水と同程度の 0.5 mol/L で一定と仮定した。ただし、既往の手法³⁾を踏襲した薄板モルタル(縦 4cm×横 4cm×厚さ 0.5mm)を用いた飛来塩分量を測定しており、塩化物イオン濃度を 0.5mol/L とした再現解析と比較したところ、計測 1 年後の塩分量は概ね一致していることを確認している。

環境作用を気象データに基づいて設定した時の解析結果を図-6 に示す。供用開始から 30 年後の解析結果と同図に示した詳細点検時に得られた塩分量分布を比較すると、内部への浸透量は乖離が大きくなった。実測値との差異が生じた原因として、栈橋下面の水分状態が実環境と異なっていたことや乾湿繰返しの影響が考えられる。

水分状態の把握を目的に、対象構造物の梁内部の湿度を新たに計測し傾向分析を行った結果、気象データの相対湿度に比べて、梁内側では+10%、栈橋の風通りのよい場所で+7%程度平均的に高い傾向にあることが確認された。梁内側は四方を梁で囲まれた閉鎖空間であり、湿度が相対的に高くなっていったものと考えられる。

また、乾湿繰返しの影響を検証するため入力値を日平均とした解析を温度・相対湿度の入力のみ変更し、塩化物イオン・酸素の入力値は同様として別途検討した。結果の一例として相対湿度を+10%とした時の鉄筋位置での 30 年後塩化物イオン量は日平均で 1.97kg/m³、月平均で 1.48 kg/m³ となり、日平均では月平均に比べてコンクリート内に浸透する塩化物イオン量が約 30%増加する傾向であることが確認できた。そこで、乾湿繰返しによる影響を勘案して、月平均の入力で日平均と同等の塩分浸透量が得られるように相対湿度の感度解析を実施した結果、栈橋下面の気象データ月平均相対湿度に対して、

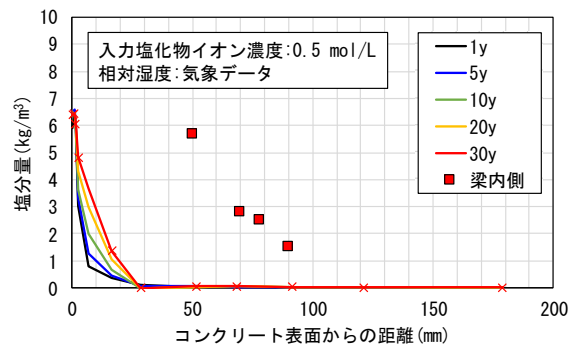


図-6 相対湿度を気象データとした塩分量分布

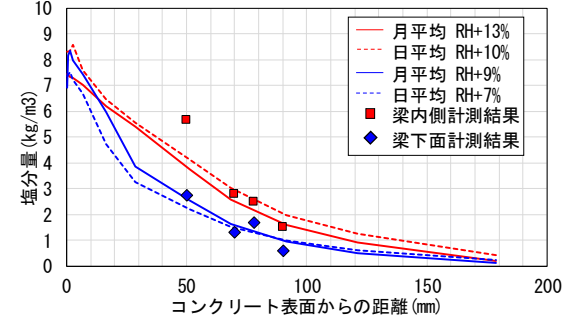


図-7 乾湿繰返しの影響

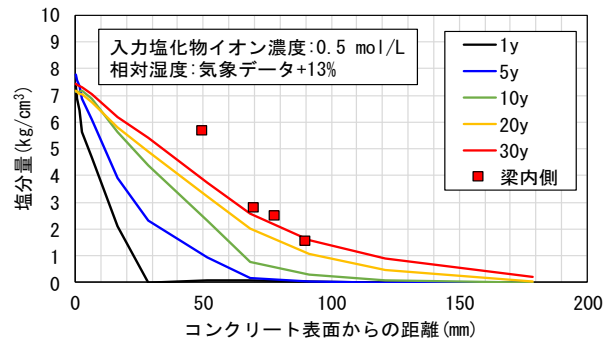


図-8 相対湿度を気象データ+13%とした塩分量分布

梁内側は+13%、風通りのよい場所は+9%として設定することとした(図-7)。

条件修正後の解析結果を図-8 に示す。梁内側の計測

データと30年後の解析結果が概ね一致する結果となり、実現に近い挙動を確認できた。本解析で設定する塩化物イオン濃度および相対湿度の概要を図-9に示す。

5. 塩害劣化と残存耐力評価

5.1 塩化物イオン濃度分布と腐食量推移

梁断面(図-2中断面B-Bの左側)におけるコンクリート表面からの塩分量分布を図-10に示す。鉄筋位置(コンクリート表面から88mm)付近では、解析結果と計測結果は同等の値となっており、概ね一致していると言える。相対湿度が高い梁内側の方が塩化物イオンの浸透量が多い傾向である。

同断面の鉄筋腐食量推移を図-11に示す。近傍の梁部で計測された鉄筋腐食量-ひび割れ幅関係を図-12に示す。ただし、鉄筋腐食量は、ノギスを用いて鉄筋径を計測し、鉄筋の断面減少率から算出している。材齢10年頃より、梁内側、下面ともに腐食量が増加し始めることが分かる。材齢30年におけるモデル化範囲近傍の梁での計測結果では、鉄筋腐食量は1.0~5.0 mg/cm²であり、解析結果は概ね一致している。一般的に、実験に基づくひび割れが発生する腐食量は20~30 mg/cm²程度⁴⁾であるが、腐食生成物の組成は環境条件によって異なるため、本検討のように実現に近い気象条件下では幾分小さい腐食量であってもひび割れが生じるものと思われる。

材齢30年時における最大主ひずみと腐食量分布を図-13に示す。最大主ひずみが大きくなっているのは躯体表層部分と鉄筋位置である。腐食量分布図と比較すると、鉄筋配置要素で腐食量が相対的に大きくなり、腐食による影響で鉄筋位置にひび割れが生じているものと推察される。躯体表層では、乾燥収縮によるひび割れの他に、梁水平方向に沿ったひび割れも生じており、腐食に起因したひび割れであると判断される。図-2で示した実構造物のひび割れ写真においても、梁水平方向にひび割れが見られる。定性的ではあるが、現状の劣化状態を再現することができた。

5.2 耐力評価

材齢30年後に床版中央部の強制変位による静的押抜き解析を実施した(図-14)。床版下面の荷重-変位関係を図-15に示す。同図に、腐食の影響を考慮しない場合(以下、健全モデル)の解析結果も併せて示す。なお、材齢30年時の圧縮強度の平均値は、床版部で約31.5 N/mm²、梁部で約35.6 N/mm²あった。参考までに、各部材の材齢7日時では、床版部で約23.9 N/mm²、梁部で24.5 N/mm²あり、設計基準強度の23.5 N/mm²と概ね一致している。

塩害により劣化した場合、荷重-変位関係では健全モデルに比べて剛性の低下が確認できるが、両ケースの最

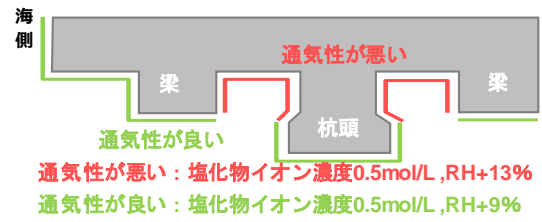
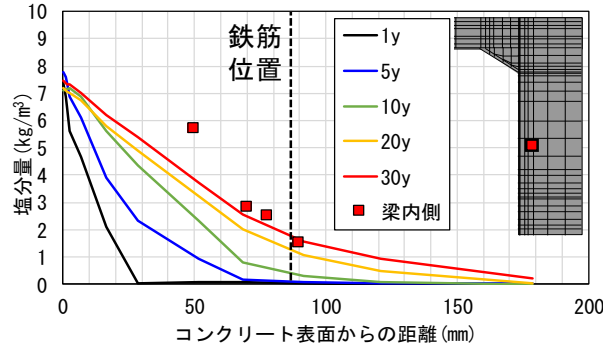
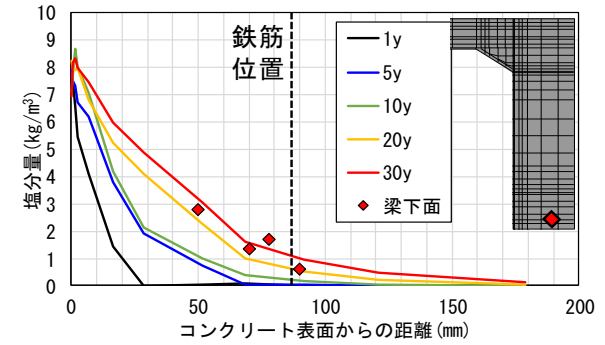


図-9 設定する環境条件



(a) 梁内側



(b) 梁下面

図-10 梁部の塩分量分布

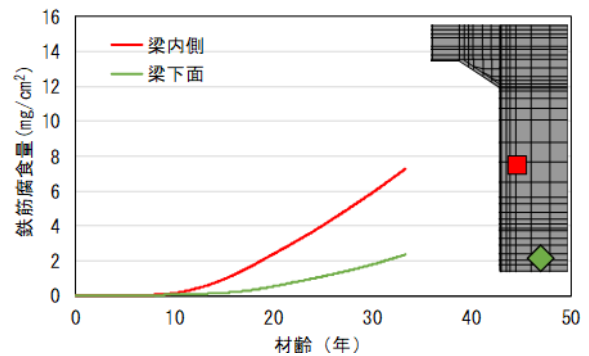


図-11 梁部鉄筋位置の腐食量推移

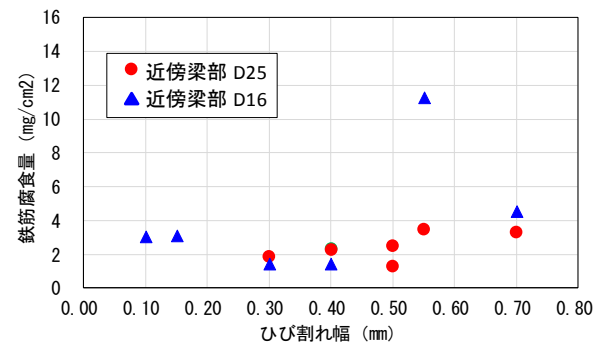


図-12 近傍梁部の腐食量計測値

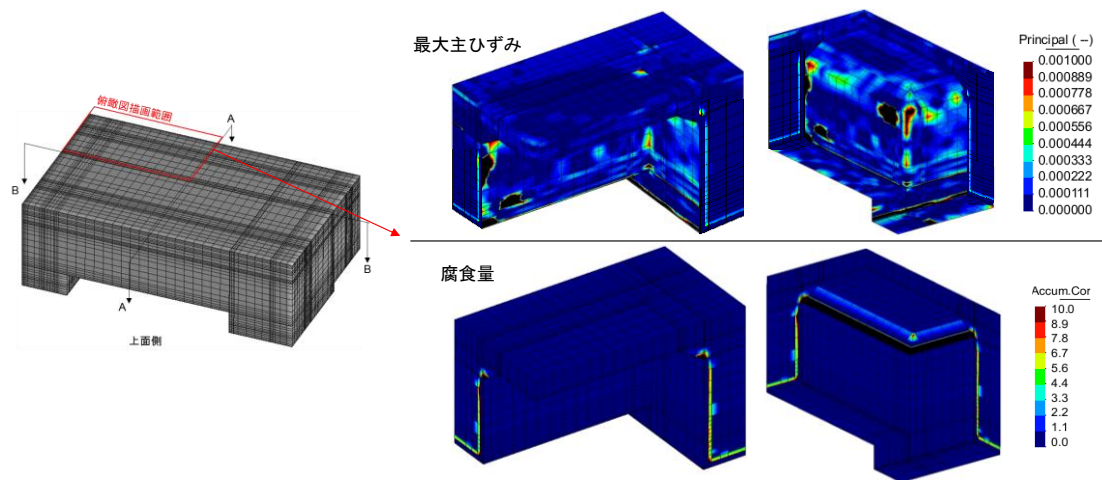


図-13 材齢 30 年後の最大主ひずみ主ひずみと腐食量コンター図

大耐力は、340 kN（腐食を考慮）と 346 kN（健全モデル）となり、大きな差異は生じていない。一方で、腐食を考慮した場合、腐食ひび割れの影響により健全モデルに比べて靱性が低下する結果となった。したがって、本検討で対象とした条件下においては、供用開始から 30 年での劣化状態において、塩害劣化による損傷が顕在化し始めているものの、耐力に及ぼす影響は小さいといえる。時間経過により劣化が進行した場合や、補修・補強を施した場合の残存耐力評価については今後の課題としたい。

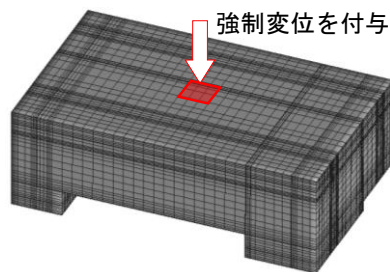


図-14 押抜き荷重作用位置

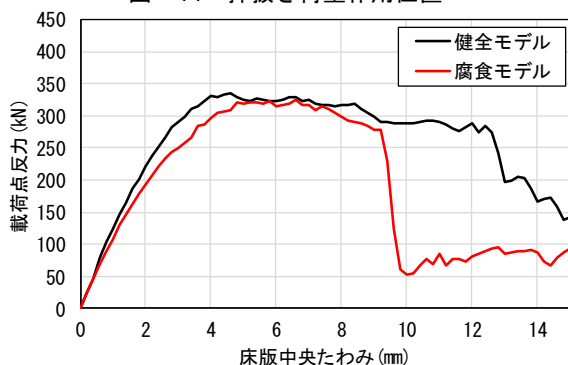


図-15 床版中央の荷重-変位関係

6. まとめ

塩害環境下の栈橋上部工を対象として、3次元マルチスケール統合解析を用いて塩害劣化進行および劣化後の耐力について解析的に評価した。

本研究で設定した条件下では、コンクリート内部で

鉄筋の腐食が進行し、供用開始からおよそ 30 年後にひび割れが生じる可能性が解析的に示された。劣化後の床版押抜き解析による耐力評価を実施した結果、塩害劣化により剛性低下が生じるものの、最大耐力に及ぼす影響は小さいことが分かった。また、腐食の影響により靱性が低下する傾向が確認された。

以上の結果より、実構造物の劣化性状、さらに将来的な劣化進展程度までを解析的に評価することで、適切な時期に詳細点検、場合に応じて補修・補強を行う判断材料として、マルチスケール統合解析が適用可能である見込みが得られた。劣化現象の将来予測や補修・補強による効果の検証などをより詳細に評価することが、本研究の今後の課題である。

謝辞

本研究で使用した解析ツールは石田哲也教授（東京大学大学院）の御厚意により使用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale modeling of concrete performance-integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, pp.91-126, 2003.
- 2) Chjiwa, N., Maekawa, K.: Thermo-Hygral Case-Study on Full Scale RC Building under Corrosive Environment and Seismic Actions, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.13, pp.465-478, 2015.
- 3) 佐伯竜彦, 能勢陽祐, 菊地道生: 薄板モルタル供試体を用いたマイクロ塩害環境評価手法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, 2011.
- 4) 戸田勝哉, 上野敦, 宇治公隆: ひび割れ発生時におけるコンクリート中の鉄筋腐食量に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 21, No.3, 2010.