

塩害により腐食劣化が進行したプレテンション桁の耐荷性能評価

田中 泰司*1・下村 匠*2・武田 健太*3・山口 貴幸*4

本稿では、プレストレストコンクリート（PC）橋において、塩害による腐食劣化が進行した際の耐荷性能の劣化過程を確認するために、実験室内で緊張材の腐食要素実験と、プレテンション桁の模型実験を行い、腐食による部材全体の構造性能の劣化が材料特性の変化からある程度説明可能であることを示した。

また、プレテンション桁で塩害劣化が生じた場合に、耐荷性能がどのように低下するのか、またその性能低下をどのように評価すればよいのかについて、実橋の破壊実験結果にもとづき、検討を行った。外観のひび割れ状況と内部の腐食劣化状況を丁寧に観察し、その情報をもとにFEM解析を用いて現有性能を評価する手法の適用性を確認した。最後に、現有性能の評価に必要な情報を得るための劣化診断方法について検討し、今後の課題を整理した。

キーワード：腐食、プレストレストコンクリート、塩害、有限要素解析

1. はじめに

新潟県を含む日本海側の地域では約30年前から季節風による多量の飛来塩分¹⁾や、寒冷地域で使用される凍結防止剤に起因する塩害の問題に悩まされてきた。高度成長期に建設された橋梁が高齢化する時期を迎え、海岸部にある橋梁の塩害劣化の問題は、ますます深刻化している。

図-1は、新潟県沿岸部にある道路橋の塩害劣化状況を、表-1の目視指標により判定したものである²⁾。沿岸部にある橋梁の約7割で、ひび割れや浮き、はく落などの劣化が顕在化している状況にある。とくに、建設から20年以上経過している橋梁では、劣化している橋梁の割合が多い。

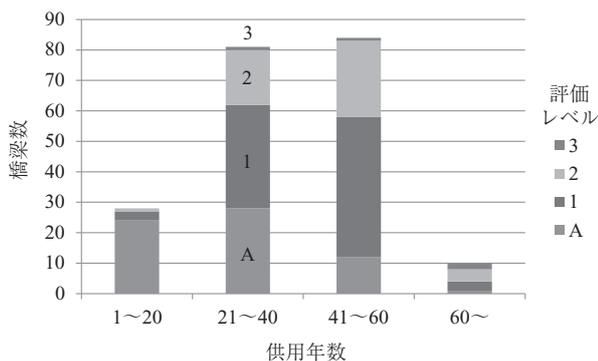


図-1 新潟県沿岸部にある橋梁の供用年数別の橋梁数と塩害劣化レベル（海岸から500m以内にある橋梁）

表-1 目視調査による塩害劣化の評価レベルの指標

評価レベル	外観状態
A (潜伏期～進展期)	健全。 (セパ近傍の軽微な劣化も含む)
1 (加速期前期)	塩害起因のひび割れの発生。 錆汁が認められる。 補修履歴がある。
2 (加速期後期 ～劣化期)	主桁または床版下面から鉄筋が露出し、 腐食している。 補修後、再劣化ひび割れが発生している。
3 (劣化期)	耐荷力の低下が顕著であり、崩落の危険性がある。

図-2に示すように、新潟県沿岸部にある橋梁のうち、プレストレストコンクリート橋（以下、PC橋）は約4割

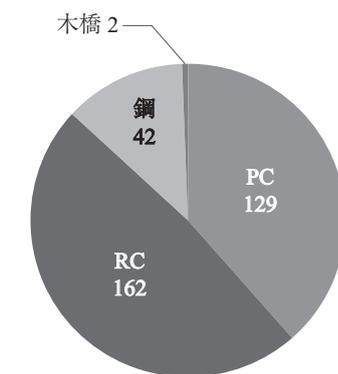


図-2 新潟県沿岸部にある橋梁の構造種別割合（海岸から500m以内にある橋梁）

*1 Yasushi TANAKA：長岡技術科学大学 環境・建設系 助教
 *2 Takumi SHIMOMURA：長岡技術科学大学 環境・建設系 教授
 *3 Kenta TAKEDA：長岡技術科学大学大学院 建設工学専攻
 *4 Takayuki YAMAGUCHI：長岡技術科学大学 技術支援センター

を占める。また、それらの6割で、塩害による劣化が生じている。このように、PC橋の塩害劣化事例は、数多く存在しているのに対し、鋼材の塩害腐食が構造性能に与える影響については、RC部材に対してPC部材では検討例が少ない。そこで筆者らは、プレテンション桁を検討対象として、室内実験と実橋載荷実験を行い、塩害により腐食劣化が進行すると、PC部材の力学性能はどのように低下するのかを、実験的に明らかにした。また、腐食劣化したプレテンション桁の残存性能を解析的に評価する方法について検討を行った。本稿では、それら一連の研究の概要を紹介する。

2. 塩害腐食したPC桁の室内実験

2.1 PC鋼より線の腐食の特徴

PC鋼より線は、細径の素線を束ねたものであるため、異形鉄筋と比較して、比表面積が大きい。鋼材の腐食には外部から供給される酸素や水分が不可欠であるため、比表面積の大きいPC鋼より線は、鉄筋と比較して腐食の進行がはやい。図-3は、新潟県沿岸部に1年間曝露した鋼材の重量減少率を示したものである。D13、D25の異形鉄筋の重量減少率は2%以下であったのに対して、φ2.9のPC2本より線では8%以上の測定結果となった。平均的な錆び厚で整理すると、鋼材の径によらずほぼ同様な値となることから、鋼材の腐食量はおおむね表面積に比例するようである。

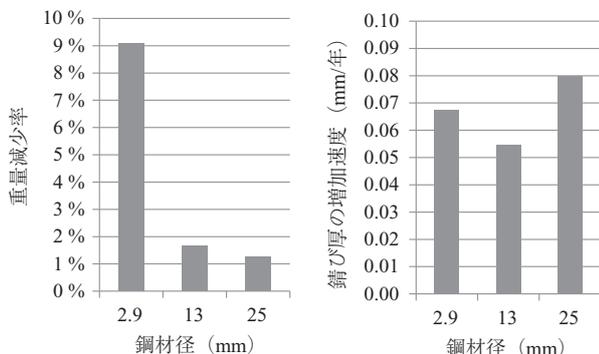


図-3 沿岸部に1年間曝露した鋼材の重量減少率測定結果 (曝露位置:新潟県糸魚川市親不知)

プレストレスを導入するため、PC鋼材には引張力が導入される。そのため、PC部材で塩害劣化が生じた場合、高い引張力を受けた状態で鋼材に腐食が生じることになる。そこで筆者らは、図-4に示すような小型のプレテンション桁を作製し、図-5に示すように中央部分だけ電食を行うことで、内部の鋼材を腐食させて、どのような現象が発生するか観察してみた³⁾。電流密度を0.865 mA/cm²として電食を行ったところ、約2週間が経過したときに、PC鋼より線の破断が生じたことを、電流計測から確認した。電食実験では、コンクリートマイクにより音声の録音も行っており、破断した瞬間に発生した破断音を収録することができた。図-6に、鋼材破断音のフーリエ振幅スペクトルを示す。いくつかの明確な卓越周期が見ら

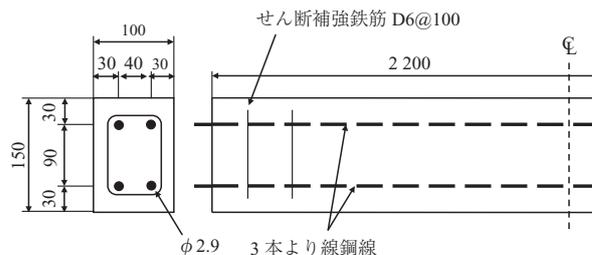


図-4 電食試験体の寸法

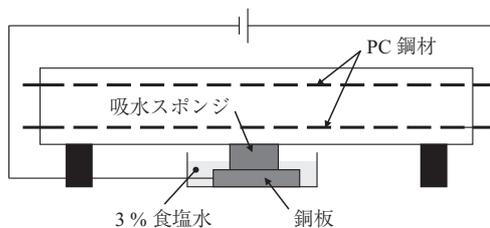


図-5 電食方法

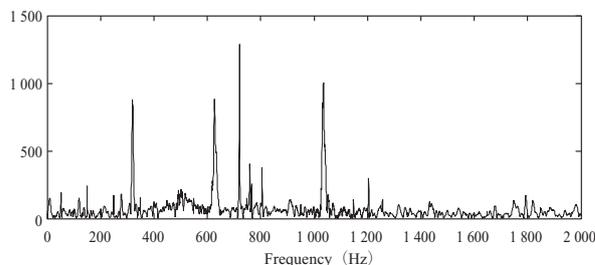


図-6 鋼材破断音のフーリエ振幅スペクトル

れ、そのうちのひとつは鋼材の張力や長さ等から算出される弦の振動数である320Hzと一致した。このように、可聴音のモニタリングと周波数分析によって、鋼材の破断現象が検出できる可能性がある。さらに、複数のマイクを組み合わせることで、破断位置をある程度特定できることも確認している⁴⁾。

2.2 腐食したPC鋼より線の力学性能

コンクリート中で電食により強制腐食させたPC鋼より線の引張実験結果⁵⁾を図-7に示す。PC鋼より線には、φ2.9-3本より線を使用した。このような極細径の鋼材の場合、わずかな腐食量であっても、破断ひずみは急激に減少する。図中には、各試験体の重量減少率を示した。健全なより線は、すべての素線が同時に破断するが、鋼材腐食すると腐食が進んだ素線から順番に破断する。腐食が進んだ素線が存在すると、平均的な腐食量が小さくても破断ひずみは小さくなる傾向にある。また、重量減少率が約5%を超えると、降伏・破断荷重が急激に減少する結果が得られた。

図-8では、最大荷重と破断伸びの実験結果を健全試験体の実験結果との比で表し、重量減少率で整理した。重量減少率が10%に達すると、最大荷重は約6割、破断伸びは約9割低下した。同図には、指数関数による回帰曲線を示したが、実験結果をおおむね近似していることが分か

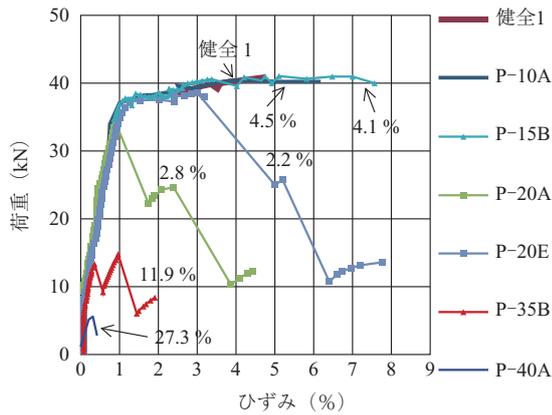
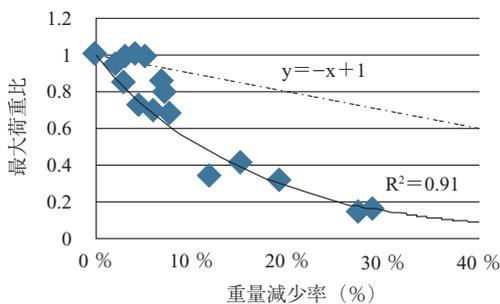
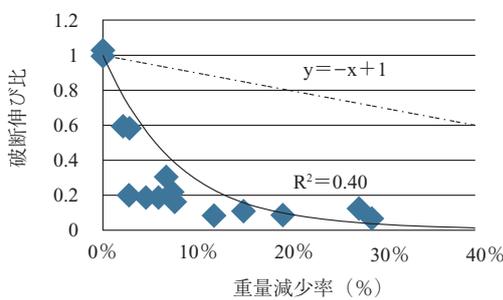


図 - 7 電食させた PC 鋼より線の引張実験結果 (図中の数字は重量減少率を表す)



(a) 最大荷重比と重量減少率の関係



(b) 破断伸び比と重量減少率の関係

図 - 8 電食させた PC 鋼より線の引張実験結果のまとめ

る。このように、細径の PC 鋼材は、腐食の進行とともに指数関数的に力学性能が低下することが、異形鉄筋とは異なる。

PC 鋼より線の力学性能が腐食とともに急激に低下する理由を明らかとするために、腐食した PC 鋼より線の腐食状況を、より精密に測定することにした。図 - 9 に、平均腐食率 7.6 % の PC 鋼より線 (φ 2.9-3 本より線) の断面積を 3 次元スキャナによって素線ごとに測定した結果^{6, 7)}の例を示す。断面減少率は平均的には小さく、重量減少率との相違は見られなかったが、場所によっては、局部的に 20 % を超える断面減少が測定された。素線どうしの付着はほとんどないので、他の素線による荷重分担は、あまり期待できないと考えられる。このように、細径の鋼材は、孔食などの空間的なばらつきの影響を敏感に受けるため

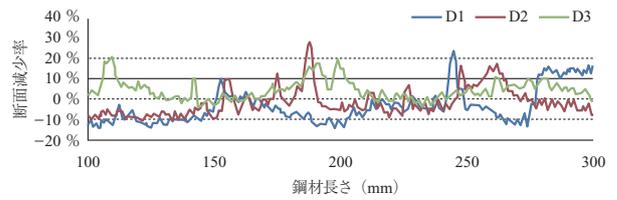


図 - 9 3次元スキャンによる各素線の断面減少率分布 (重量減少率 7.6 %)

に、腐食によって力学性能が急激に減少するのだと考えられる。

2.3 鋼材腐食した PC 桁の耐荷性能

要素実験に引き続き、図 - 10 に示すようなプレテンション桁を作製し、等曲げ区間の PC 鋼より線を電食により腐食させて、その影響を確認した⁵⁾。図 - 11 に、荷重 - 中央変位関係における比較を示す。凡例の数字は鋼材の重量減少率を表している。重量減少率が 5 % 以下では上縁コンクリートの圧壊により終局に至ったが、7 % を超えると、PC 鋼材が破断し、破壊した。また、破壊時の変形量と破壊荷重は大きく減少した。

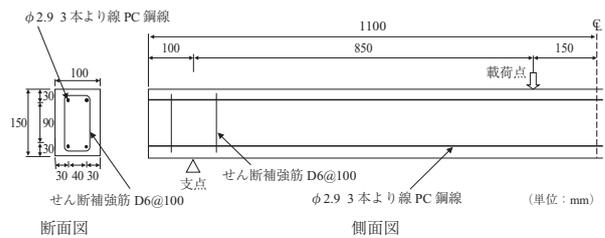


図 - 10 供試体諸元

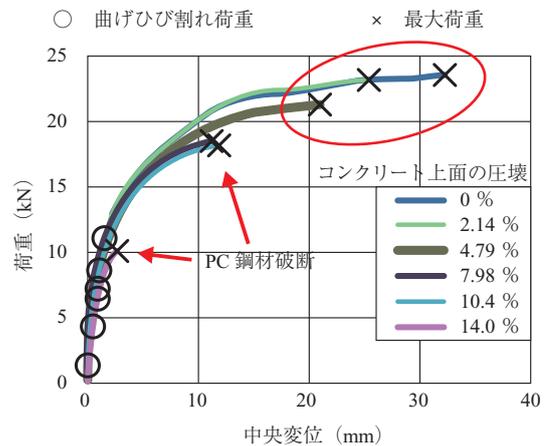


図 - 11 PC 桁の曲げ実験結果 (凡例の数字は鋼材の重量減少率)

このような傾向は、前述した PC 鋼より線の引張実験結果と相違ない。そこで、図 - 8 に示した引張実験結果の回帰式により、腐食した鋼材の力学性能をモデル化し、PC 棒部材の理論式によって最大荷重を求め、実験値との比較を行ったものが、図 - 12 である。計算値は実験値とおおむね整合していることから、配筋が単純な部材では、

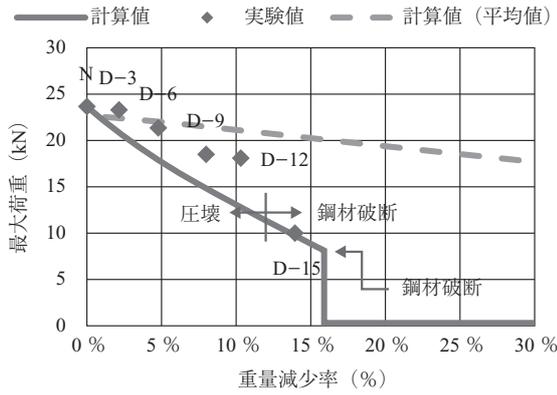


図 - 12 最大荷重と重量減少率の関係

腐食した鋼材の力学性能を適切にモデル化することで、比較的簡易な計算によって、部材の残存性能を評価可能であるといえる。同様に、曲げひび割れ荷重の実験値と計算値の比較を行い、残存プレストレスの推定も、要素実験結果を適切にモデル化することで、おおむね評価可能であることを確認している。なお、腐食量の平均値すなわち重量減少率だけ鋼材の力学性能は低下すると仮定して計算を行ったものを、計算値(平均値)として示した。腐食による鋼材の力学性能の低下を適切に評価しないと、構造性能をかなり過大に評価することが分かる。

3. 塩害劣化した実橋の破壊実験

3.1 調査対象橋梁の概要

PCの腐食劣化問題に限らず、室内実験で得られる情報は、現象の基本的な特性の理解やモデル化に役立つが、実環境では室内実験で想定していないことが起こり得るので、実物との比較は絶えず欠かせない。そこで筆者らは、鋼材が塩害により腐食劣化したPC実橋梁の载荷実験を行った⁸⁾。

研究対象とした実橋梁は、新潟県糸魚川市能生で、自転車道の一部として供用されていた鱗崎橋である。鱗崎橋は1974年に製造された橋長10.4mのプレテンション桁橋であり、海岸から約15mの距離に位置していたため、写真-1に示すように、塩害による鋼材腐食が進行していた。



写真 - 1 鱗崎橋の劣化状況 (右側が海)

図 - 13の断面図に示すように、下フランジには細径のPC鋼より線が32本、単線が2本配置されており、部位によって腐食状況が複雑に異なる劣化状況であった。はり部材全体としての鋼材の重量減少率は10~20%程度であったが、図 - 14に示すように、位置によって腐食量は異なっていた。

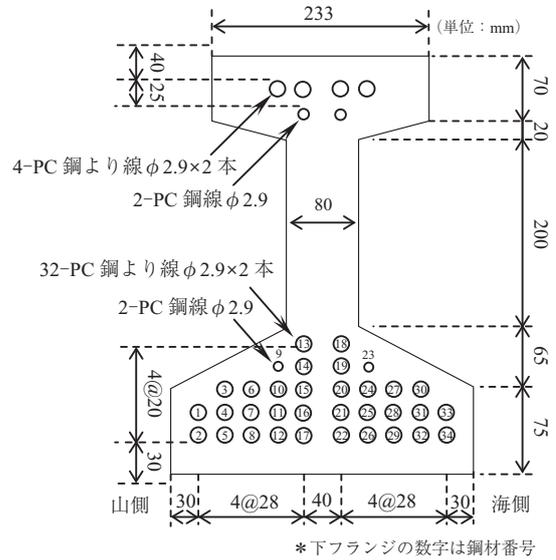


図 - 13 鱗崎橋の主桁の断面図

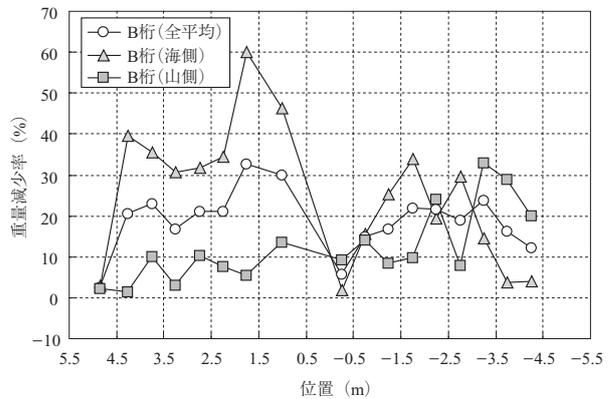


図 - 14 下フランジの鋼材の重量減少率の測定結果の例 (横軸は桁中央からの距離を表す)

3.2 実験の概要

海側の2本の桁を対象にして、図 - 15に示すように、2点集中荷重を加え、破壊に至るまで载荷を行った。図 - 16に破壊後のひび割れ図を、図 - 17に荷重-中央変位関係を示す。健全状態での耐荷挙動は、非線形解析⁹⁾により求めた。もっとも海側の桁(A桁)では、雨水による洗い流し効果のためか、全体的に腐食量が小さく、腐食ひび割れも少なかった。図 - 16(a)に示すように、健全状態の解析結果と同様にせん断破壊によって終局に至った。一方、海側から2番目の桁(B桁)では、鋼材の腐食量が比較的大きく、腐食ひび割れも桁全体にわたって発生していた。図 - 16(b)に示すように、等曲げ区間で鋼材破断が

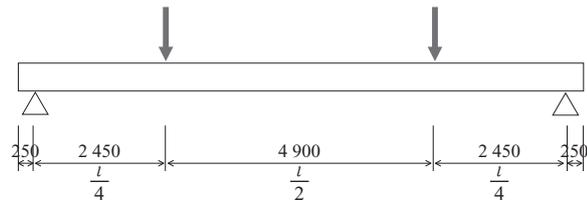


図 - 15 荷重方法

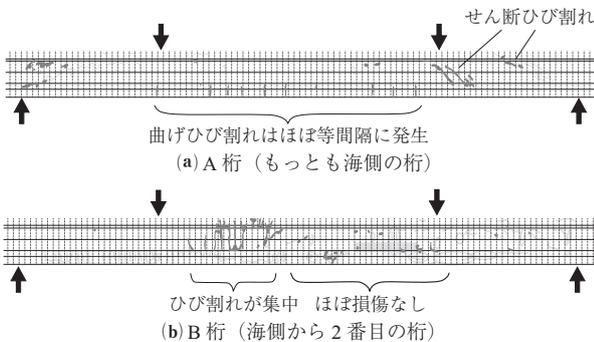


図 - 16 ひび割れ図

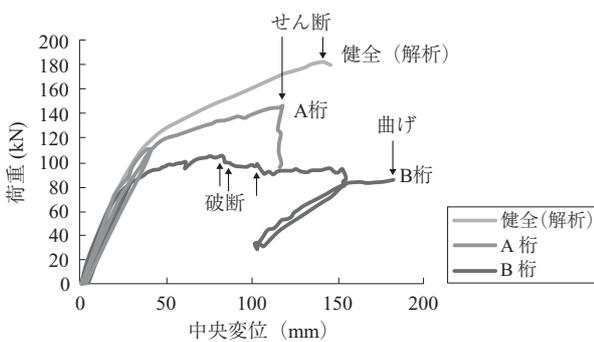


図 - 17 荷重—中央変位関係

発生し、破壊に至った。最大荷重は、健全状態と比較して約6割まで低下していた。実験終了後、内部の鋼材の腐食量を詳細に調査したところ、破壊位置付近での腐食量（図 - 14 の +1.5 m 位置）が他と比べて大きかった。このように、同じ橋梁の隣り合う桁であっても、腐食状況が大きく異なり、耐荷力だけでなく、破壊モードも変わってくる。

図 - 18 は、上記の実験結果から、鱗崎橋の劣化曲線を推定したものである。過去の点検記録が残されていなかったため、劣化開始時期について仮定を設けながら劣化曲線を導いた。いずれの仮定においても、構造性能は急速に低下し、遅くとも10年以内には、自重を支えきれなくなっていたと予想された。図 - 3 にも示したように、細径鋼材を有するプレテンション桁においては、いったん腐食が開始すると、力学性能の低下がはやいので、こまめな点検と早めの対応が必要だといえる。

鱗崎橋では、上記の曲げ実験のほかにも、桁端部を使って、曲げせん断実験を4体行っている¹⁰⁾。その実験結果から、鋼材腐食したプレテンション桁のせん断耐力は、鋼材の腐食率を考慮することで、土木学会コンクリート標準示方書¹¹⁾の棒部材のせん断耐力式によって、安全側に評

假定2：供用10年目までは変状は生じない→10年目の耐力比を1.0とする
 假定1：前回の点検(5年前)では軽微な損傷しか確認されていなかった→耐力比は0.95とする。

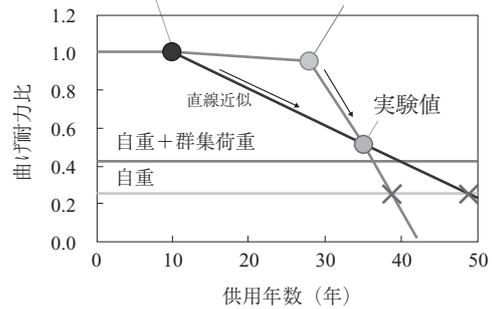


図 - 18 鱗崎橋の推定劣化曲線

価が行えることを確認している。また、曲げ疲労実験¹²⁾も2体実施しており、腐食を考慮して静的曲げ耐力を算出し、土木学会コンクリート標準示方書の疲労強度式により疲労寿命を評価すると、安全側に評価できることを確認している。

4. 有限要素解析による現有性能評価

4.1 解析の方法

鋼材の腐食が生じた部材の残存耐荷性能は、腐食分布が異なる鋼材の相互の影響を考慮する必要があるため、簡単な方法で高精度に計算することは難しい。高精度な評価が求められる場合には、有限要素解析を用いて評価することが考えられるが、そもそも有限要素解析によってどの程度、構造性能を評価できるのかを検証した事例は少ない。そこで、筆者らは、前述の実橋載荷実験を検証対象として、有限要素解析による構造性能評価を試みている¹³⁾。

対象橋梁では、腐食によって鋼材が完全になくなっている箇所が多数あったので、図 - 19 に示すように、離散鉄筋要素によって、幾何的にこれを表現することにした。また、鋼材の力学性能としては、図 - 8 の要素実験結果の回帰式を用いたモデルを使用した。

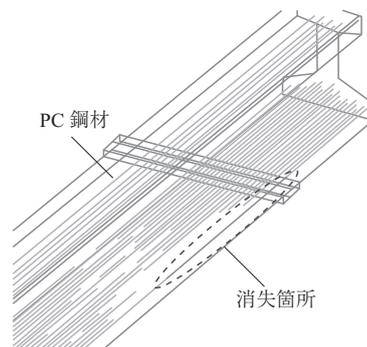


図 - 19 離散鉄筋要素の設定例

4.2 詳細な劣化情報による再現解析結果

図 - 20 に、解析と実験の比較例を示す。この例では、せん断スパン 900 mm の条件で、1点集中荷重により荷重が行われ、実験ではせん断破壊が生じた。解析においても、せん断破壊が発生し、荷重—載荷点変位関係もおおむ

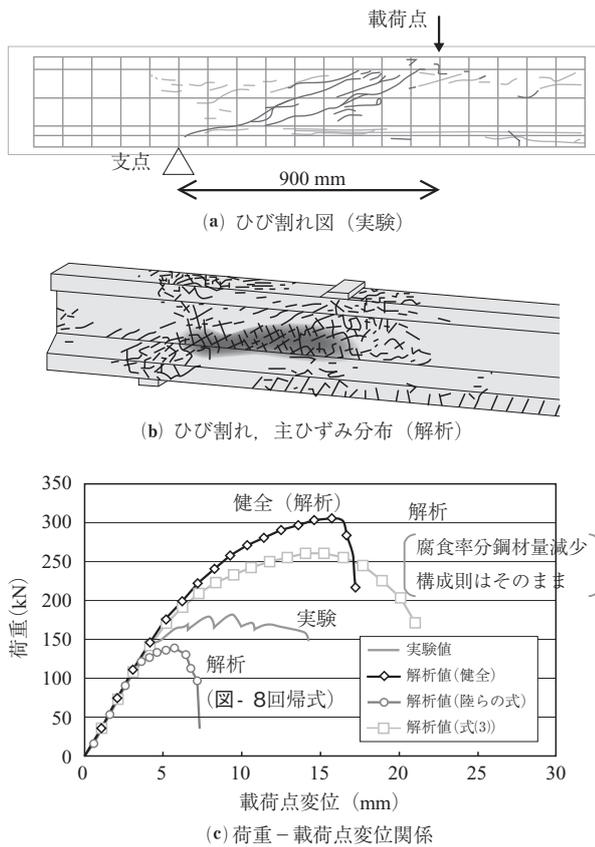


図 - 20 有限要素解析結果と実験結果との比較の例

ね実験を再現している。他の実験ケースにおいても、解析は実験で観察された破壊形式を再現することができ、最大荷重における解析結果と実験結果の差は最大でも約2割の範囲におさまっていた。このことから、PC鋼材の詳細な腐食情報と、腐食した鋼材の適切な力学モデルを用いることで、有限要素解析によって、腐食劣化したプレテンション桁の構造性能は比較的高精度に評価できるといえる。

4.3 有限要素解析の活用に向けた今後の展望と課題

有限要素解析が残存性能評価に役立つためには、鋼材の詳細な腐食状況が必要である。しかし、現在の検査技術では、構造物内部の鋼材の腐食状況を、破壊を伴わずに精緻に計測することは困難である。そのため、図 - 21 に示すように、ひび割れなどの外観の損傷情報から間接的に鋼材の腐食状況を推定するなどの工夫が必要となる。現在のところ、鱗崎橋に対しては、内部ひび割れ分布が詳細に把握できれば、PC鋼材の腐食状況が推定可能であり¹⁴⁾、その結果、残存性能もかなり精度よく評価できることを確認している。

今後は、外観のひび割れ状況や非破壊実験などによって、いかにして内部のひび割れ状況を高精度に推定するかが課題である。

5. おわりに

各種室内実験と実橋の載荷実験により、鋼材腐食が生じたプレテンション桁の力学性能の確認を行い、解析的評価方法の確立と検証を行った。今後は、内部のPC鋼材の腐

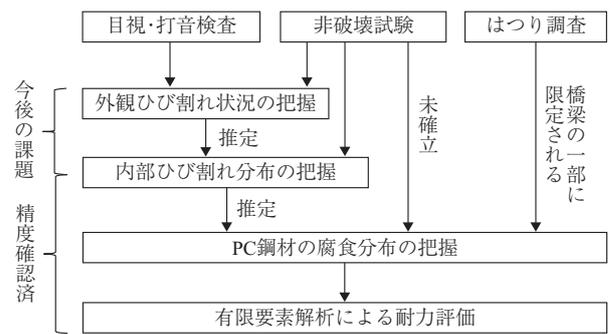


図 - 21 目標とする残存性能評価のフロー図

食状況を高精度に把握可能な、診断技術の確立が必要である。

参考文献

- 1) 加藤文和, 松山公年: 道路橋の塩害対策に関わる電気防食の追跡調査, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, Vol.30, pp.350-353, 2012.11
- 2) 高橋 毅, 田中泰司: 新潟県沿岸部における橋梁の塩害劣化の実態分析, コンクリート工学論文集, Vol.35, No.1, pp.829-834, 2013.7
- 3) 稲葉将吾, 宮下 剛, 田中泰司, 丸山久一, 登石清隆: PC鋼材破断検出に向けた音響モニタリングシステムの開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.67, pp.V-064, 2012.9
- 4) 松本大樹, 宮下 剛, 田中泰司: 音響モニタリングによるPCケーブル破断位置の同定, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集, Vol.68, 1-050, pp.99-100, 2013.9
- 5) 陸 賢, 田中泰司, 山口貴幸, 下村 匠: 腐食したPC鋼より線の機械的性質とプレテンションPC梁の残存耐力の評価, プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集, pp.211-216, 2012.10
- 6) 陸 賢: 鋼材腐食が生じたプレテンション式プレストレストコンクリート部材の耐荷性能の及ぼす影響, 長岡技術科学大学修士論文, 2012.3
- 7) 丸山久一他: 鱗崎橋載荷実験報告書, <http://rcstruc.nagaokaut.ac.jp/pub/refdata/Report110608.pdf>, 2011.6
- 8) 村上祐貴, 内山拓也, 井林 康, 田中泰司: 塩害により損傷を受けた実橋プレテンションPC桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.839-844, 2011
- 9) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 10) 田中泰司, 陸 賢, 山口貴幸, 井林 康: 鋼材腐食が生じたプレテンションPC桁の曲げせん断性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1127-1132, 2011
- 11) 2007年制定コンクリート標準示方書設計編, 土木学会, 2007
- 12) 田中泰司, 陸 賢, 山口貴幸, 下村 匠: 塩害劣化したプレテンションPC桁の疲労破壊性状, プレストレストコンクリート技術協会第20回シンポジウム論文集, pp.277-282, 2011.10
- 13) 武田健太, 田中泰司: 塩害により劣化したプレテンション式橋桁の有限要素解析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第13巻, pp.243-250, 2013.11
- 14) 武田健太, 田中泰司: 内部ひび割れに着目した有限要素解析によるプレテンション式PC橋桁の耐力評価, 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化シンポジウム論文集, 日本コンクリート工学会, pp.281-288, 2013.11

【2014年3月3日受付】