

# 塩害環境下に設置された PC 桁における 外観損傷と内部鋼材腐食分布に関する調査

小川 晴希<sup>1</sup>・中村 文則<sup>2</sup>・山口 貴幸<sup>3</sup>・下村 匠<sup>4</sup>

## 1. はじめに

既設の PC 桁におけるコンクリート表面のひび割れ・剥離の状況から内部鉄筋の腐食欠損量を定量的に予測できれば、実構造物の耐荷性能を効率的に評価する方法の一つとなる。そのような方法を確認するためには、コンクリート内部における鉄筋腐食と表面の腐食ひび割れの関係について明らかにすることが重要である。

既往研究では、鈴木ら<sup>1</sup>、近藤ら<sup>2</sup>、西ら<sup>3</sup>が、コンクリート内部の鉄筋腐食(PC 鋼材)から生じる腐食ひび割れの発生過程に関する模型実験を実施している。これらの成果により、内部鉄筋の腐食過程とそれに伴う腐食ひび割れの発生過程が明らかになっている。その一方で、実構造物において、田中ら<sup>4</sup>、武田ら<sup>5</sup>が RC およびプレテンション桁の表面の腐食ひび割れの分布と内部鉄筋の腐食状況について調査結果を報告している。

しかしながら、既往研究の調査結果だけでは、実構造物における内部鉄筋腐食量と表面ひび割れの関係を明確に把握できていないのが現状である。特に、ポストテンション PC 桁のような構造形式では、コンクリート表面のひび割れ分布や内部鉄筋の腐食欠損量の詳細調査事例は少ない。

本研究では、撤去されたポストテンション PC 桁の一部を利用して、表面のひび割れ、浮き・剥離の外観損傷状況の調査を実施し、その結果の整理を行った。さらに、浸透塩化物イオン量および内部鉄筋腐食分布の調査を実施し、それら結果と外観損傷状況との関係について考察を行った。

## 2. 対象とした橋梁および調査箇所

### 2.1 対象とした橋梁

対象とした橋梁は、1970～2019 年の 49 年間供用された新潟県糸魚川市に位置する図-1 の青海川橋である。構造形式は、橋長 110.0m、4 径間単純ポストテンション方式 PCT 桁である。橋桁は、海岸の汀線付近に設置されており、飛来塩分の作用を受けるとともに、冬季では凍結防止剤の散布も行われている。2007 年、2016 年に全径間断面修復および表面保護が実施されている。



図-1 対象橋梁

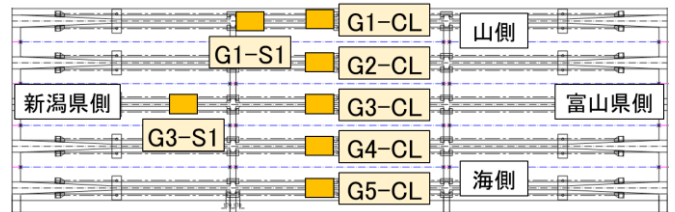


図-2 供試体の摘出位置



図-3 供試体 (G3-S1)

### 2.2 調査箇所および供試体

調査箇所は第 2 径間であり、図-2 に示す径間中央部の G1-CL から G5-CL、径間新潟県側の G1-S1 と G3-S1 の計 7 供試体である。橋桁上部工の外観損傷状況と内部劣化状況を調査するために、図-3 のような幅 1m 程度の供試体を橋桁から摘出し、それらを実験室に運搬することで調査を実施した。

\*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻 学士(工)

\*2 長岡技術科学大学 工学研究科環境社会基盤工学准教授 博士(工) (正会員)

\*3 長岡技術科学大学 技術支援センター 修士(工) (正会員)

\*4 長岡技術科学大学 工学研究科環境社会基盤工学教授 博士(工) (フェロー)

### 3. 供試体の外観損傷調査

#### 3.1 調査項目および調査方法

外観損傷の調査項目は、表面ひび割れ、剥離および浮きの範囲である。ひび割れは、表面のひび割れを目視で確認し、その長さと幅を測定した。ひび割れ幅の測定は、長さ方向に 25mm 間隔で、クラックスケールを利用して計測した。剥離は、目視で範囲を確認し、それを直接測定した。浮きは、打音法によって供試体表面から確認できる範囲を測定した。これらの結果を供試体のフランジ部の展開図にそれぞれ整理した。展開図は、山側面、下向面、海側面に分割した。

#### 3.2 外観損傷の定量化方法

表面ひび割れ、剥離および浮きの範囲の調査結果を定量的に評価できるようにするために、定量化を実施した。表面ひび割れの定量化は、既往研究<sup>6)</sup>を参考にひび割れを密度で評価する B 法で行った。この方法は、単位面積( $m^2$ )あたりのひび割れの面積を密度化し、ひび割れ密度(B 法) ( $m \cdot mm/m^2$ )として整理する方法である。ひび割れの面積は、ひび割れ長さ(m)に、ひび割れ幅(mm)を乗じることで算出した。浮き・剥離の範囲の定量化は、浮き・剥離の範囲の直下に位置する内部鉄筋からひび割れが生じていると仮定して定量化を行った。浮き・剥離に相当するひび割れ幅(以下、換算ひび割れ幅)を設定し、ひび割れの定量化と同様にひび割れ密度(B 法)で行った。また、ひび割れ長さは浮き・剥離箇所の直下部分の内部鉄筋の長さ(m)とした。換算ひび割れ幅は、剥離および浮きの範囲で幅 1mm と仮定した。

以上のように、表面ひび割れ、剥離および浮きをそれぞれ定量化した値を合計し、それを展開図の山側面、下向面、海側面に分けて整理した。

#### 3.3 外観損傷の調査結果および考察

外観損傷調査から得られた表面ひび割れ、剥離および浮きの範囲を整理した展開図を図-4 に示す。図の展開図は、供試体 G3-S1 の結果である。図に示すように、展開図の海側面において、表面ひび割れ、剥離および浮きが分布していることがわかる。その一方で、展開図の山側面および下向面では、ほとんど損傷は見られなかった。下向面の海側に損傷は生じているものの、下向面の山側および山側面には損傷が確認されなかった。

展開図から外観損傷をひび割れ密度として定量化した結果を図-5 に示す。図より、各供試体のひび割れ密度は、海向面で大きく、山向面で小さくなる傾向がみられる。今回の調査では、ひび割れ密度は、橋桁の中央部に位置する供試体 G3-CL で最も大きく、供試体 G4-CL および G5-CL で損傷がほとんど生じていない結果であった。

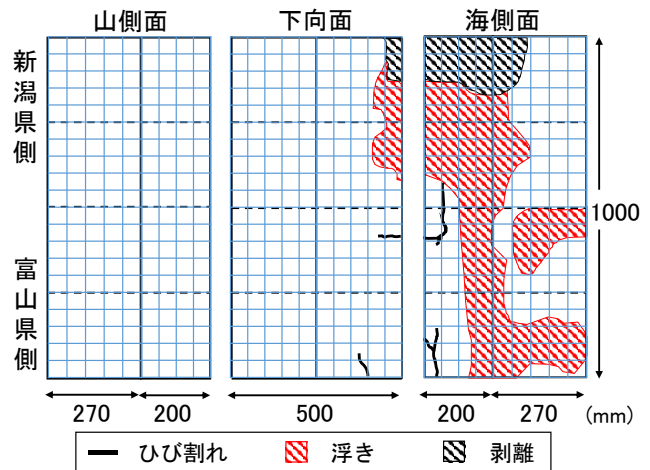


図-4 供試体フランジ部の展開図 (G3-S1)

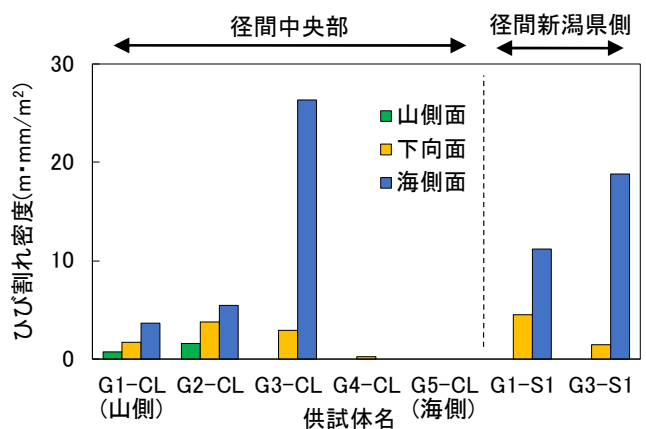


図-5 フランジ部の各面のひび割れ密度

### 4. 供試体の内部調査

#### 4.1 調査項目および調査方法

供試体内部の調査項目は、コンクリート内部の塩化物イオン量および内部鉄筋の腐食分布である。

コンクリート内部の塩化物イオン量の測定は、ドリル法で実施した。ドリル粉は、コンクリート表面から 140mm の深さまで 20mm 毎に削孔する方法で採取した。試料の採取位置は、フランジ部の山側面、下向面(2点)、海側面の計4点である。採取した試料に含まれる浸透塩化物イオン量の分析は、塩化物イオン濃度迅速測定法<sup>7)</sup>で実施した。実際の分析では、次のような手順で分析用の溶液を作製し、塩化物イオン量の測定を行った。溶液の作製は、ドリル削孔で得られた試料 10.0g と溶出助剤 2.0g を瓶に入れ、80℃以上の蒸留水 50.0g を加えて混合した。瓶の中身が 80℃ 以上を保つようにしつつ、蓋をして1分毎に5回程度振り混ぜ、その後、室内温度で約 53 時間静置させた。作製した溶液は、酸試薬をセットし、上澄み液を 0.2mL 入れ、SOLMATE-100 を用いて塩化物イオン量の測定を行った。

コンクリート内部の鉄筋腐食分布は、供試体のフランジ部から鉄筋を取り出し、目視で鉄筋が腐食している範囲の確認を行った。供試体から取り出した鉄筋は、PC鋼材5~9本、帯鉄筋3~4本、補助鉄筋6本である。

#### 4.2 内部調査結果および考察

供試体 G1-CL のコンクリート内部に浸透している塩化物イオン量の調査結果を図-6に示す。図に示すように、コンクリート内部の塩化物イオン量は、表面から20~40mmの部分で最大となり、表面付近では若干小さくなる傾向がみられる。フランジの各面では、海側面で塩化物イオン量が大きくなる結果であった。

図-7は、供試体のフランジ部の各面の総浸透塩化物イオン量を整理した結果である。図の総浸透塩化物イオン量は、表面から深さ140mmまでの塩化物イオン量を合計した値である。図の供試体 G3-S1 は、海側面でコンクリートが剥離しており、ドリル粉を採集できなかったため、海側面のデータが欠損している。図に示すように、供試体の各面では、総浸透塩化物イオン量が海側面で大きく、下向面と山側面で同程度である。橋桁の最も海側に位置する供試体 G5-CL では、海側面の塩化物イオン量がほかの供試体と比較して小さい結果となっている。この位置は、降雨が直接作用する面であり、降雨作用が塩化物イオン量に影響を及ぼしている可能性がある。

図-8は、供試体 G3-S1 のコンクリート内部のPC鋼材の腐食状況とPC鋼材、帯鉄筋および補助鉄筋の腐食分布を示したものである。図より、フランジの山側に配筋されていた鋼材 PC1 と PC2 では、PC鋼材およびシーズに腐食がほとんどないことがわかる。その一方で、海側に配筋されていた鋼材 PC4 と PC5 では、シーズの腐食が広範囲に発生しており、一部で内部のPC鋼材まで腐食している状況であった。

#### 5. 外観損傷と内部調査結果の関係

##### 5.1 ひび割れ密度(外部損傷)と塩化物イオン量

供試体フランジ部の各面におけるひび割れ密度(外部損傷)と総浸透塩化物イオン量(内部調査)の関係性を整理した結果を図-9に示す。図から、ひび割れ密度が大きい位置で、総浸透塩化物イオン量も大きい傾向がみられる。その一方で、ひび割れ密度が5(m・mm/m<sup>2</sup>)以下のフランジ面では、両者にばらつきがあり、明確な関係が示されていない結果であった。

この結果から、ひび割れ密度が大きく、外部損傷が激しい位置では、ひび割れ密度と塩化物イオン量に相関があることがわかった。

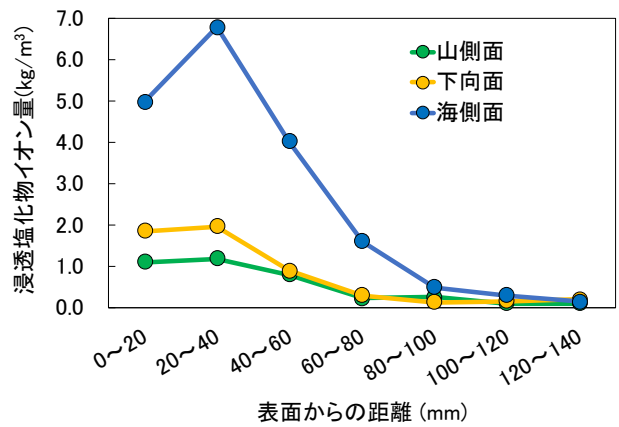


図-6 浸透塩化物イオン量の分布(G1-CL)

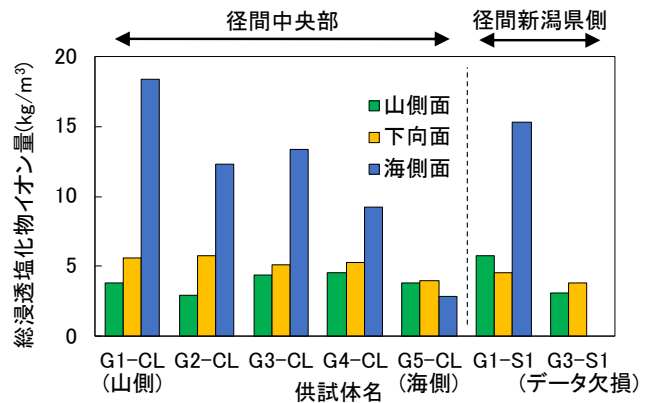


図-7 フランジ部の各面の塩化物イオン量

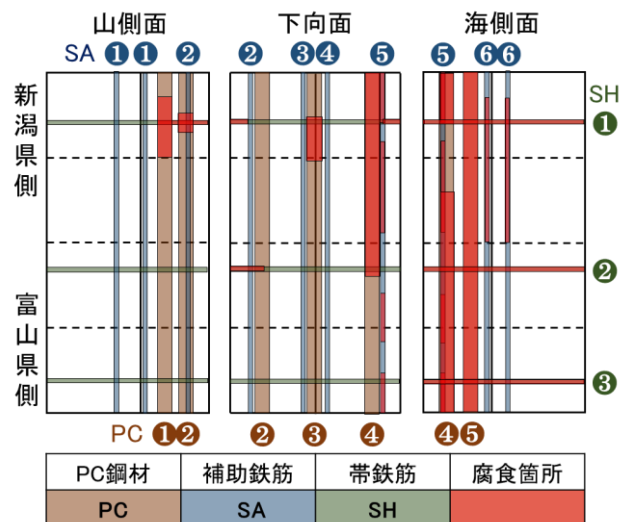
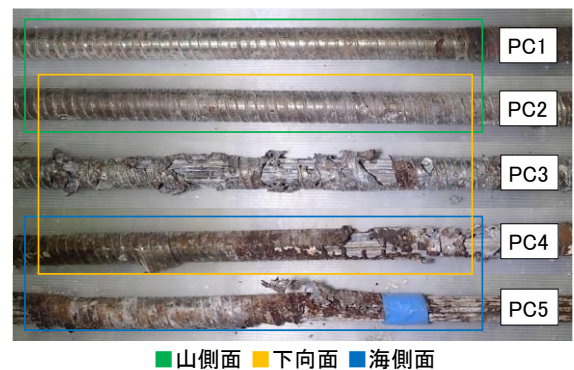


図-8 PC鋼材腐食状況および腐食分布 (G3-S1)

## 5.2 ひび割れ密度(外部損傷)と鋼材腐食状況

供試体 G3-S1 におけるひびわれ密度の展開図を図-10 に示す。図-10 の展開図では、ひび割れ密度が下向面の海側と海側面に分布しており、山側面で  $0(\text{m} \cdot \text{mm}/\text{m}^2)$  となっていることがわかる。図-8 のコンクリート内部の鉄筋の腐食分布でも、ひび割れ密度の分布と同様に、腐食している鉄筋が下向面の海側と海側面に分布している傾向がみられる。この結果より、ひび割れ密度と内部鉄筋の腐食位置の両者の分布は一致する傾向があることがわかった。また、ひび割れ密度の分布は、帯鉄筋および補助鉄筋が腐食している位置に分布しており、コンクリート内部の PC 鋼材だけでなく、これらの鉄筋の腐食が表面ひび割れに関係していることが明らかになった。

## 6. 結論

塩害環境下に設置された PC 橋桁の外観損傷と内部調査を実施した。その結果、外部損傷が大きい位置では、コンクリート内部の塩化物イオン量とひび割れ密度(外部損傷)に関係があることが示された。また、ひび割れ密度の分布は、コンクリート内部の PC 鋼材だけでなく、帯鉄筋および補助鉄筋の腐食に影響を受けていることが明らかになった。

今後は、内部鉄筋の腐食量の測定を実施し、外観損傷度と内部鉄筋腐食量の関係について明らかにしていく予定である。

**謝辞:** 本研究は、日本学術振興会科学研究費(基盤研究 B)「外部環境適用型の実構造物の新規劣化予測技術の開発と総合的検証データの構築」(研究代表者: 中村文則, 課題番号: 22H01563), 大日本コンサルタント(株)との共同研究「塩害 PC 橋の外観と腐食・耐荷性能の調査研究」の一部として行ったものである。国土交通省北陸地方整備局高田河川国道事務所より、撤去した橋桁の一部を提供していただいた。ここに、記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 鈴木佑典, 近藤拓也, 山本貴士, 宮川豊章: PC 部材中のシース腐食とコンクリート表面のひび割れ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.1091-1096, 2011.
- 2) 近藤拓也, 山本貴士, 宮川豊章, 鈴木佑典: 鋼製シースの腐食による PC のひび割れ発生性状に関する一考察, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.73, No.4, pp.348-362, 2017.

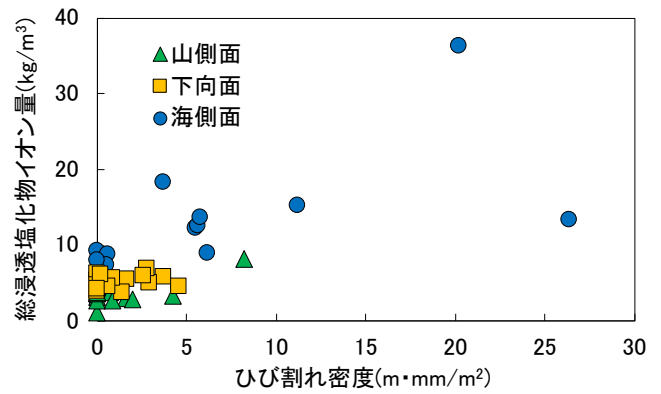


図-9 塩化物イオン量とひび割れ密度の関係

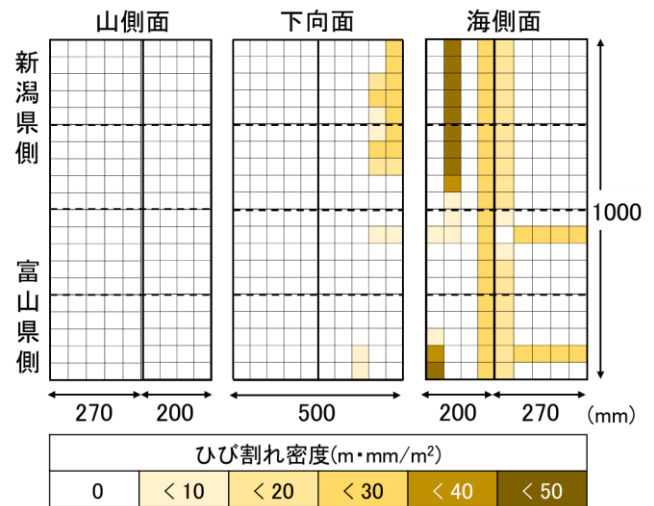


図-10 ひび割れ密度の分布 (G3-S1)

- 3) 西弘, 近藤拓也, 中谷明登, 大西弘志: PC 部材のシースの腐食ひび割れに与えるシース径とかぶりの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1267-1272, 2017.
- 4) 田中泰司, 山口貴幸, 下村 匠: 塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.466-482, 2010.11
- 5) 武田健太, 田中泰司, 下村匠, 山口貴幸, 陸賢, 井林康, 村上祐貴: 塩害劣化したプレテンション式 PC 桁の載荷試験と解析による耐力評価手法の検討, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.71, No.4, pp.303-322, 2015.
- 6) 廣井幸夫, 戸田圭彦, 高木祐介, 山本貴士: ひび割れ密度を考慮した ASR 劣化 PC 梁構造の曲げ耐荷性能評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39, No.1, pp.847-852, 2017
- 7) 後藤年芳, 近藤英彦, 野島昭二: 硬化コンクリート中の全塩化物イオン濃度迅速測定法の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.1, pp.785-790, 2010.