

論文 実橋梁の壁高欄部に生じたひび割れの発生原因に関する解析的検討

藁輪 圭祐*1・下村 匠*2

要旨：日本海沿岸部に建設された名立大橋の壁高欄部に発生したひび割れの原因を解明するため、乾燥収縮および ASR に着目し検討を行った。ひび割れ性状の経時変化に関する観察記録の検討、乾燥収縮予測式と曲げひび割れ幅算定式ならびに水分移動モデルと乾燥収縮モデルを用いた数値解析による定量的検討から、建設当初より 15 年間のうちに徐々に発生した軸直交方向のひび割れは乾燥収縮が原因であることが確認された。また使用骨材が産地の地質的要因により反応性鈹物を含有する、環境条件、地域における ASR の発生状況から、遅延して発生した軸方向を含むランダムなひび割れ進展は ASR による可能性があることを考察した。

キーワード：収縮ひび割れ、ひび割れ幅、乾燥収縮、ASR

1. はじめに

名立大橋は飛来塩分による塩害が著しい新潟県の日本海沿岸に 2001 年に新設された橋梁である。新設時から 4 種の電気防食工法が適用されており、詳細な経過観察が行われている。近傍で橋梁と同時に作製した試験体の暴露試験も行われている。壁高欄部におけるひび割れの進展状況は架設時から約 1 年ごとに記録されており、ひび割れ数の経時変化を架設から現在まで正確に知ることができる。その記録によると、壁高欄部において架設当初から橋軸直交方向にひび割れが発生しており、年々増加傾向にあることが確認されている。このひび割れは、塩害によって生じたものではなく、またただちに構造性能の低下を引き起こす恐れもないと思われる。しかし、維持管理を効果的に行うためにひび割れが発生した原因については明らかにしておく必要がある。

構造物に発生するひび割れは、その性状からある程度ひび割れの原因を推定できる。名立大橋の場合、橋軸直交方向に複数本発生するひび割れ性状から、乾燥収縮によるひび割れの可能性が高いと考えられていた。しかし、最近の調査では一部橋軸方向にもひび割れが認められていることから、アルカリシリカ反応（以下 ASR）が関与している可能性も浮上した。

そこで本研究では、本構造物に発生したひび割れに関して、ひび割れ性状の経年変化に関する記録をもとに、乾燥収縮予測式、ひび割れ幅算定式および数値解析を用いて、ひび割れの原因が乾燥収縮であるとして定量的に説明できるかどうかを検討する。また、ASR による可能性についてはひび割れ性状および周辺の構造物や使用骨材などといった地理的条件から考察する。これらを通じて、本構造物に発生したひび割れの原因を特定することが目的である。

2. 対象とする橋梁の概要

2.1 構造諸元

名立大橋は支間中央に橋脚 P1 を有する 2 径間の PC 橋梁であり、橋長は 75.3 m である。上部工は PC 単純パイプ中空床板、下部工は逆 T 式橋台、壁式橋脚である。全幅員は 21.90 m であり、両側に歩道が設けられている。壁高欄部は場所打ち連続 RC であり、2 m ごとにひび割れ誘発目地が設けられている。名立大橋の外観を図-1、壁高欄部の寸法を図-2 に示す。



図-1 名立大橋 外観

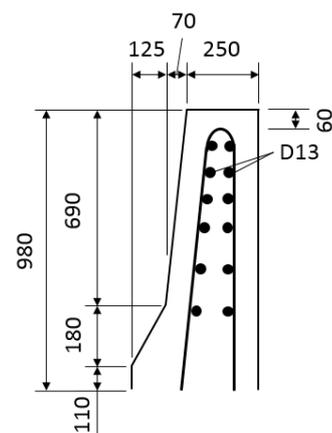


図-2 壁高欄部の寸法（単位：mm）

*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（学生会員）

*2 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学専攻 教授 博士（工学）（正会員）

2.2 コンクリートの使用材料と配合

壁高欄部に使用されたコンクリートの使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。骨材は、新井市下濁川産の山砂、山砂利といった、地元の天然骨材資源を使用している。この骨材はASRによる区分が区分B（無害でない）と判定されたもの及び反応性試験を行っていないものであったため、抑制対策方法として「高炉セメントB種の使用」が採用されている。

3. ひび割れ性状

3.1 ひび割れの外観性状の経時変化

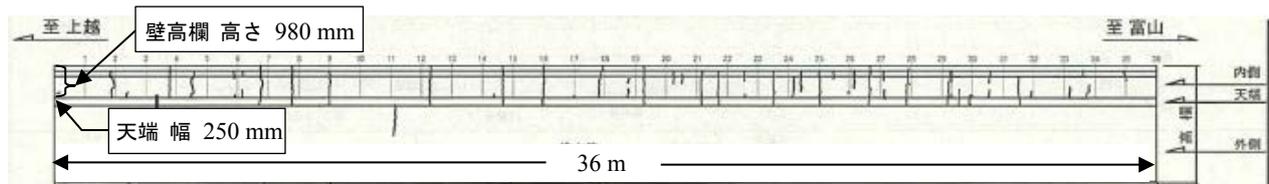
名立大橋では架設した2001年から毎年目視による観測調査が実施されている¹⁾。壁高欄部のひび割れ性状に

表-1 使用材料の物性値

| | |
|------|---|
| セメント | 高炉セメントB種，密度 3.05 g/cm ³ |
| 細骨材 | 粗粒率 2.90，表乾密度 2.57 g/cm ³ 吸水率 2.51%，塩化物量 0.001% |
| 粗骨材 | 実積率 64.0%，表乾密度 2.60 g/cm ³ ， 吸水率 1.57%，最大寸法 20 mm |
| 混和剤 | 標準形1種 AE 減水剤（ポゾリス No. 70） |
| 水 | 上水道水以外の水 |

表-2 壁高欄部のコンクリートの配合

| 粗骨材の最大寸法 (mm) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------------|------------|----------|--------------------------|--------|-------|-------|--------|
| | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 Ad |
| 20 | 46.7 | 39.5 | 157 | 336 | 699 | 1082 | 0.840 |



(a) 架設後1年経過時



(b) 架設後3年経過時



(c) 架設後10年経過時

図-3 名立大橋壁高欄部変状図（陸側A1-P1径間）¹⁾

関しては、「実橋変状図」から経年変化を確認することができる。なお、平成28年1月現在、壁高欄におけるひび割れの大部分が0.2 mm以下のひび割れ幅であることが確認されており、現状では構造物の性能上問題ないと考えられる。

図-3は、海側の橋台（A1およびA2）－橋脚（P1）間（約36 m）の変状図を一部抜粋したものである。この変状図は壁高欄の側面を展開した形であり、図中の「内側」が歩道側の側面である。変状図からは、橋軸方向のひび割れはほぼみられず、橋軸直交方向にひび割れが卓越していること、ひび割れ本数、長さが経時的に増加していることが確認できた。これらの事実は、コンクリートの収縮が軸方向に外部拘束されたことでひび割れが発生したこと、収縮が経時的に進行していることと矛盾せず、ひび割れが乾燥収縮によって発生したことが示唆される。

しかし、2016年8月に現地調査で壁高欄部のひび割れ性状を確認したところ、橋軸方向にもひび割れが発生していることがわかった。そのときに撮影したものが図-4である。当日は雨により微細なひび割れも視認しやすい状況であった。このひび割れ性状からASRの影響が新たに考えられた。

なお、変状図には橋軸方向のひび割れは記載されておらず、いつ発生したのかについては不明である。

3.2 ひび割れ本数の経時変化

橋軸直交方向に関するひび割れ観察の結果をもとにひび割れ性状の指標を抽出して検討を行うこととした。橋台から橋脚まで、海側と陸側の計4径間について1径間におけるひび割れの本数を用いて指標化する。本数の計測箇所は、歩道側から確認ができる天端および内側部分とし、外側のひび割れは計測に含めない。また、側面上端から下端まで貫通していないひび割れも各1本として数えたが、今後ひび割れが進展することでひび割れ同士が結合すると予測できる箇所については、あらかじめ1本として計測した。

ひび割れ数の経時変化の結果を図-5に示す。架設初期から多数の橋軸直交方向のひび割れが発生し、架設か10年が経過したあたりから新たなひび割れがほとんど発生していないことがわかる。ひび割れ本数はいずれの径間でも100本前後に収束し、海側と陸側におけるひび割れ本数に違いはみられなかった。1径間の長さがおおよそ37.7mであるため、ひび割れ間隔の平均値は約380mmに収束したことになる。

4. 乾燥収縮の観点からの検討

4.1 乾燥収縮予測式による収縮の経時変化

名立大橋の壁高欄部に打設されたコンクリートの乾燥収縮試験は行われていないので、2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕²⁾に記載されている乾燥収縮予測式を用いて、壁高欄部と同様の断面をもつ部材の自由収縮ひずみの経時変化の推定を行った。

収縮ひずみの特性値は以下の式(1), (2)を用いて求める。

$$\epsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta\omega \right) \quad (1)$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_S}{100 + \omega_S} S + \frac{\omega_G}{100 + \omega_G} G \quad (2)$$

ここに、 ϵ'_{sh} ：収縮の試験値の推定値 (μ)、 α ：骨材の品質の影響を表す係数、 $\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量、 ω_S および ω_G ：細骨材および粗骨材の吸水率(%)である。

部材の収縮ひずみの経時変化は以下の式(3), (4), (5)により求める。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = \frac{1 - RH/100 \cdot \epsilon'_{sh,inf} \cdot (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)} \quad (3)$$

$$\epsilon'_{sh,inf} = \left(1 + \frac{\beta}{182}\right) \cdot \epsilon'_{sh} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{30}{\rho} \left(W + \frac{120}{-14 + 21 \cdot C/W} - 0.70 \right) \quad (5)$$

ここに、 $\epsilon'_{cs}(t, t_0)$ ：コンクリートの材齢および乾燥開



図-4 2016年8月の現地調査における壁高欄部のひび割れ性状(山側)

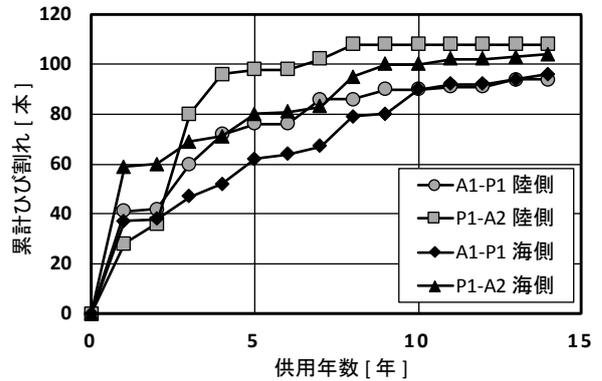


図-5 壁高欄部のひび割れ数の経時変化

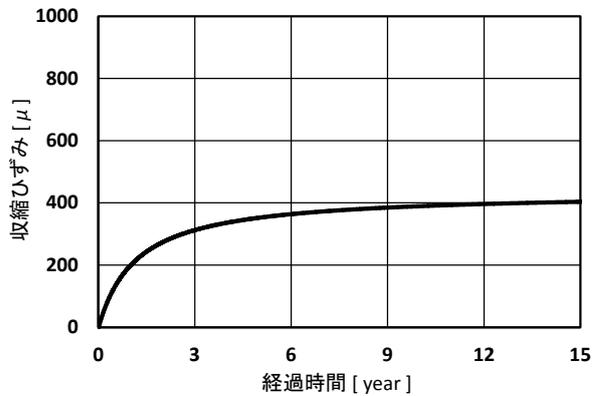


図-6 乾燥収縮予測量の経時変化

始時材齢(day), d ：有効部材厚(mm), $\epsilon'_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値, β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数である。

今回の検討では、 $t_0=3$, $\alpha=4$ (標準的な骨材の場合)、 $RH=79.7\%$ とした。相対湿度は、名立地区から最も近傍に位置する気象観測点である高田の2001年の湿度の平均値を採用した。また、有効部材厚 d に関しては図-2に示した壁高欄の断面図より、高さが同一で面積が等価となるような矩形断面に変換し、 $d=320\text{mm}$ とした。

以上の値を適用して算定した乾燥収縮ひずみの経時変化を図-6に示す。式(3)および式(4)より、乾燥収縮ひずみの特性値および最終値はそれぞれ約700 μ , 約870 μ で

あった。また、図-6より壁高欄部と等価な断面積を有する部材の14年経過時点での自由収縮ひずみは約400 μ であることがわかる。この違いは部材寸法が標準試験の供試体(100 \times 100 \times 400 mm)よりも大きいこと、相対湿度が約80%と室内試験環境より高いことによる。

4.2 曲げひび割れ幅算定式を用いたひび割れ幅の算出

ひび割れ発生後はひび割れ間のコンクリートの弾性およびクリープによる引張変形を無視し自由に収縮すると仮定(3), 4)すると、乾燥収縮がすべてひび割れ幅の生成に費やされることとなり、すべてのひび割れ幅の増加分の合計が収縮量の合計と等しくなる。また、壁高欄部の底部は床版と結合しているため、コンクリートの収縮による壁高欄の変形は拘束され、一軸拘束を受けている状態に近くなる。

以下では、2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕の曲げひび割れ幅算定式を用いてひび割れ幅の算出を行い(5)、実測値と比較検討する。なお、曲率の影響の有無が異なるが、概略の傾向の再現性を確認するここの検討目的を鑑みると、曲げひび割れ幅算定式を一軸引張状態のひび割れに適用しても差し支えないと判断した。

壁高欄部の断面については、前述のとおり矩形断面とみなし、 $b=320$ mm (有効部材厚)、 $h=980$ mm として計算を行った。ひび割れ間隔は式(6)を用いて求める。

$$l = 4c + 0.7(c_s - \varphi) \quad (6)$$

ここに、 l : ひび割れ間隔(mm)、 c : かぶり(mm)、 c_s : 鋼材の中心間隔(mm)、 φ : 鋼材径(mm)である。

図-1より、鋼材はD13、かぶりの最小値は60 mmである。その結果、 $l=370.9$ mmを得た。これは先に示したひび割れ間隔の実測値の最終値に近い値である。

次に、式(7)を用いてひび割れ幅 w を算出した。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \cdot l \cdot \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (7)$$

ここに、 k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数、 k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数でありコンクリートの圧縮強度の関数、 k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数、 ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮する数値である。

コンクリートの圧縮強度は呼び強度(27 N/mm²)を使用した。対象が壁高欄部であるため鉄筋の応力は発生していないものとし($\sigma_{se}=0$ N/mm²)、コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮する数値は乾燥収縮ひずみの経時変化の予測値を参考にし、1年経過ごとに更新した。その結果の一部を表-3に示す。14年経過時のひび割れ幅算定値は0.17 mmであった。

次に、ひび割れ幅の平均値が求めた0.17 mmである

表-3 ひび割れ幅算定値の経時変化

| 経過年数 | 収縮ひずみの 予測値 [μ] | ひび割れ幅の 算定値 [mm] |
|------|----------------------------|-----------------------|
| 1年 | 199.1 | 0.08 |
| 3年 | 312.4 | 0.13 |
| 5年 | 352.2 | 0.15 |
| 10年 | 389.4 | 0.16 |
| 14年 | 401.5 | 0.17 |

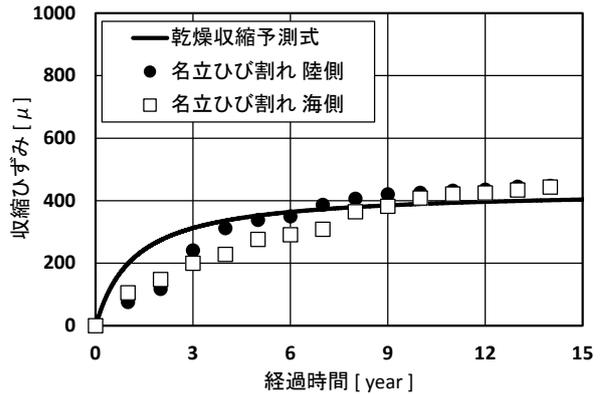


図-7 乾燥収縮予測値とひび割れ数の経時変化の比較

とし、収縮がすべてひび割れ幅に費やされたと仮定すると、現在のひずみは式(8)のようになる。

$$\varepsilon'_{sh,real} = \frac{\text{ひび割れの総数} \times \text{ひび割れ幅}}{\text{橋の全長}} \quad (8)$$

$$= \frac{200 \times 0.17}{75.3 \times 10^3} \approx 445 \mu$$

この計算を架設時から1年ごとに行い、先述の乾燥収縮予測値と重ね合わせたものが図-7である。陸側・海側の壁高欄部ともに、ひび割れ幅と本数から求めた収縮は、収縮が進行している段階では収縮量として過小に評価されてしまうが、収縮が収束した段階においては乾燥収縮予測値により求めた収縮の経時変化曲線に近似していることがわかる。初期に過小評価となる理由の一つは、ひび割れ幅算定時にひび割れ間隔を式(6)により算定していることが考えられる。実際のひび割れ間隔は、ひび割れ本数の少ない初期には大きいからである。

4.3 数値解析による検討

より精密な再現を行うため、著者らがこれまで開発した細孔構造に基づくコンクリート中の水分移動、乾燥収縮モデルを用いて壁高欄部と等価な断面をもつRC部材が外部から拘束されていない条件下で生じる軸方向収縮ひずみの経時変化を求めた^{6),7)}。図-8に解析方法の概要を示す。数値解析は、以下の仮定を用いて行った。

- 1) 試験体内の水分の移動は部材軸直交方向の断面内の2次元移動とする。

- 2) 鋼材による収縮の拘束を考慮する。鋼材断面積は合計値を与えることとし、コンクリートと鋼材は完全付着とする。
- 3) 壁高欄部の断面積は 4.1 および 4.2 節で示した換算矩形断面を使用する。鋼材の位置はかぶりを考慮し底部から 60 mm とする。
- 4) 乾燥条件は 3 面乾燥とし、床版と結合している面に非乾燥条件を与える。
- 5) コンクリートの応力、ひずみは部材軸方向の成分のみを考慮する。
- 6) 部材の変形は平面保持に従うとする。
- 7) 壁高欄は床版によってそりが拘束されているので曲率は生じないとする。軸方向の収縮はここでの比較の主旨から、内部鋼材以外から拘束されないとする。

環境作用は、高田の 2001 年の温度と湿度の平均値を採用し、 $T = 13.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $RH = 79.7 \%$ とした。水分移動解析の計算時間ステップは 1 時間である。なお、降雨、日射の影響、気温、湿度の経時変化は考慮していない。

以上の計算条件の下で行った解析結果と、前述した乾燥収縮予測式により求めた収縮ひずみ、およびひび割れ幅の算定値とひび割れ本数の実測値より推定した収縮ひずみの経時変化との比較を行ったものが図-9 である。数値解析によって求めた収縮ひずみは経時変化の傾向を含めて乾燥収縮予測式による結果と近似し、収縮が収束する段階ではひび割れ幅と本数から求めた収縮量とも近似していることがわかる。

以上の検討結果から、名立大橋壁高欄部におけるひび割れは乾燥収縮で生じた可能性が高いことが確認できた。

5. ASR の観点からの検討

5.1 新潟県における ASR による劣化状況

図-3 に示したように、2016 年 8 月に現地観察を行ったところ橋軸方向にもひび割れが認められ、全体としてランダムな方向にひび割れが進展しているように見受けられた。このような性状のひび割れの原因として一般に考えられるものは、ASR である。ただし、ひび割れ幅はいずれの箇所も小さく 0.2 mm 以下である。

名立大橋に近接して暴露試験が行われている(図-10)。壁高欄部のコンクリートと同一の産地の骨材を使用して作製した試験体桁にも、コンクリート表面に防錆対策をしているものを除き、すべての桁においてひび割れが確認された。壁高欄部にみられるひび割れ性状と同様に、桁に対して直交する方向のひび割れが多く発生していたが、水平方向にもひび割れが認められた。ひび割れが多く認められたのは単位セメント量 (519 kg/m^3) の多い、高流動コンクリートを用いた桁であった。このことから ASR の可能性がうかがえる。

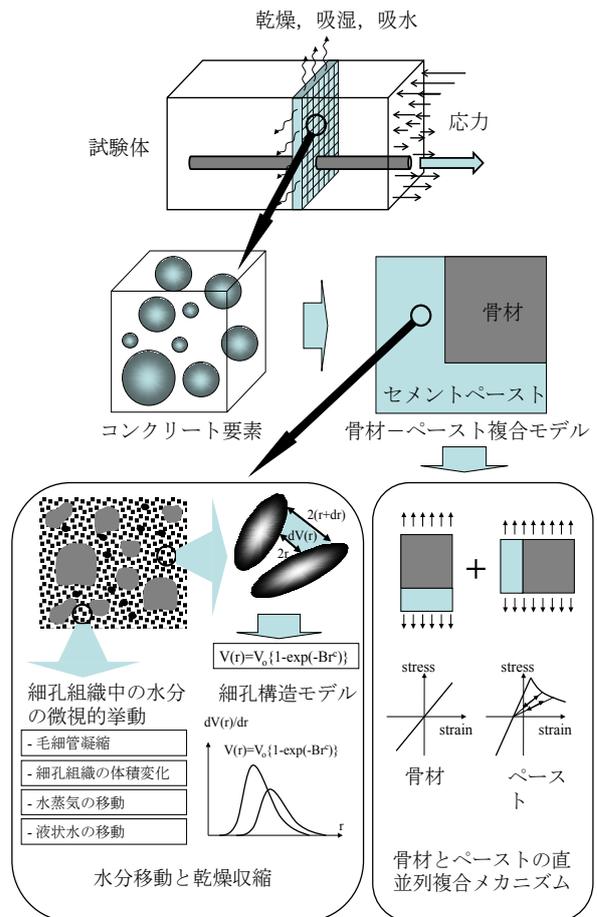


図-8 解析方法の概要

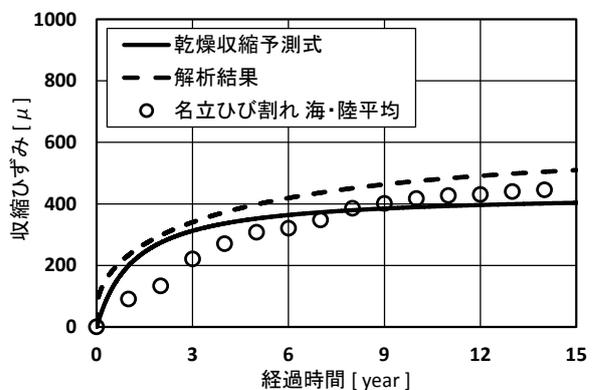


図-9 乾燥収縮予測量と解析結果の比較



図-10 暴露試験桁

5.2 周辺地域における ASR による劣化状況

鳥居らの調査によれば、新潟県では小千谷以南を除くほぼ全域において ASR による構造物の劣化が認められる⁸⁾。したがって、名立大橋においても ASR が発生する可能性は考えられる。

5.3 名立大橋で使用した骨材

名立大橋で使用されている骨材は、新井市下濁川産の山砂、山砂利である。この地域は新第三紀～第四紀火山岩の岩体・地層を通過することから、反応性の高い岩種を含有していると考えられている⁸⁾。濁川地区での反応性岩種は、火山岩類の安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩、堆積岩系のチャートや頁岩が挙げられており、チャートの反応性鉱物として隠微晶質石英、他の火山岩類にはクリストバライトやトリディマイトを含有することが確認されている⁸⁾。

濁川地区産の骨材は溶解シリカ量が多く、深刻な ASR による深刻な構造物劣化が生じた他の地域の反応性骨材とほぼ同様な試験結果であった。これより、反応性のポテンシャルが高い骨材が含まれることが推定される⁸⁾。

5.4 環境条件

名立大橋は日本海近傍に位置しており、海からの飛来塩分 (NaCl) によってアルカリが供給される環境にある。また、冬期には凍結防止剤を散布する。さらに、海岸からの飛沫、冬季の積雪、降雨により構造物が湿潤状態にある期間も長く、ASR が発生する環境条件は整っている。

以上の傍証と考察より、名立大橋壁高欄部において近年ひび割れが橋軸直交方向以外にも進展し始めたのは ASR によるものと考えられる。ただし、ひび割れ幅はいずれの方向にも小さいことから、ASR が生じていてもその程度は軽微であるといえる。

6. まとめ

名立大橋壁高欄部に発生しているひび割れの原因を究明するため、ひび割れ性状より乾燥収縮および ASR の観点から検討を行った。これまでの観察記録、現地調査、解析による検討、いくつかの傍証から、以下のことが明らかとなった。

- 1) 名立大橋壁高欄部のひび割れは当初から橋軸直交方向が卓越しており、初期に多く発生し、徐々に新規のひび割れが発生しなくなっている。これらのことから乾燥収縮が原因であると推察された。
- 2) 名立大橋壁高欄部に発生したひび割れは乾燥収縮によるものと仮定し、曲げひび割れ幅算定式により算定したひび割れ幅とひび割れ本数の実測値から推定した壁高欄部と同程度の断面をもつ部材の軸方向収縮ひずみの経時変化曲線は、乾燥収縮予測式による経時変化曲線、水分移動解析による収縮の経時変化曲線の

いずれともよく一致していた。このことから、壁高欄部のひび割れは乾燥収縮が原因で生じた可能性の高いことが確かめられた。

- 3) 架設から 15 年が経過し、壁高欄部のひび割れが橋軸方向を含めてランダムに進展し始めた。これは ASR が原因である可能性が高いことが、名立大橋で使用された骨材、環境条件、周辺における ASR の発生状況から推察された。

以上を総合すると、名立大橋の壁高欄部に初期より発生し進展していたひび割れの原因は、主に乾燥収縮によるものであり、架設から 15 年が経過した現在、乾燥による収縮の進行が微小であることから、ひび割れの増加、進展も緩慢になっている。また、時間が経過してから橋軸方向にも軽微なひび割れが進展し始めたのは ASR が原因であると考えられる。なお、ASR による影響に関しては定性的な検討にとどまったので、定量的な検討ができるよう今後進めていく必要がある。

謝辞

名立大橋のひび割れの観測記録、構造物の資料は国土交通省北陸地方整備局に提供していただきました。また、ASR に関する考察では、港湾空港技術研究所の川端雄一郎氏のご助力を受けました。深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：平成 27 年度 塩害橋梁現地調査結果，pp.26-29，2016.1
- 2) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 設計編，土木学会，pp.105-106，2013.3
- 3) 石橋忠良ほか：RC 梁の曲げひびわれ性状に及ぼすひびわれ発生材令の影響，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1309-1318，1991
- 4) 関 友則，櫻井哲哉，下村 匠：鉄筋コンクリートのひび割れ幅の経時変化における乾燥収縮の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32，No.2，pp.211-216，2010
- 5) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 設計編，土木学会，pp.223-225，2013.3
- 6) 下村 匠，前川宏一：微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル，土木学会論文集，No.520，pp.35-45，1995.8
- 7) 志賀 暢ほか：屋外暴露された RC・PC 部材の時間依存性変形に及ぼす環境作用の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.483-488，2016.7
- 8) 鳥居和之ほか：金沢大学 SIP 研究成果報告書—北陸地方における ASR 問題の解決を目指して—，金沢大学 SIP-WG2 (ASR 部会)，pp.44-66，2016.9