酸性河川内に架設されている RC 橋脚から採取した試料の各種分析と考察

株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北　正会員　○早坂　洋平
東北大学　大学院工学研究科　正会員　久田　真
東北大学　大学院工学研究科　正会員　皆川　浩
東北大学　大学院工学研究科　正会員　宮本　慎太郎
株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北　法人会員　光岡　達之

1. はじめに

我が国では，現在，社会基盤を適切に維持管理することが重要な課題となっており，酸性河川や下水道施設などのように，硫酸などによる化学的侵食作用を直接的に受けるコンクリート構造物では，腐食に伴い十分な性能を発揮することが困難になる場合がある．

そこで，酸性河川環境下に曝された実構造物（RC 橋脚）からのデータ取得を目的として，様々な試験分析を実施した．

2. 対象構造物・試料採取および河川環境

2-1. 対象構造物と試料採取位置

試料採取した構造物は，東北地方の高規格道路の橋梁下部工で，表-1 に架設されている酸性河川名やコンクリート配合などを示す．また，採取位置は，各構造物ともに「大気中：供用期間中の大部分が大気と接している位置」「河川水中：供用期間中の大部分が酸性河川水中に曝される位置」とし，酸性河川水の影響が把握できるような位置とした．コア試料採取位置を図-1 に示す．

表-1　対象構造物

No	架設場所	河川名	供用年数※	W/C
1	山形県寒河江市	須川	20	54.3
2	山形県山形市		7	50.0
3	山形県上山市		7	55.0
4	福島県猪苗代町	長瀬川	18	48.3

※：竣工後～コア採取までの期間

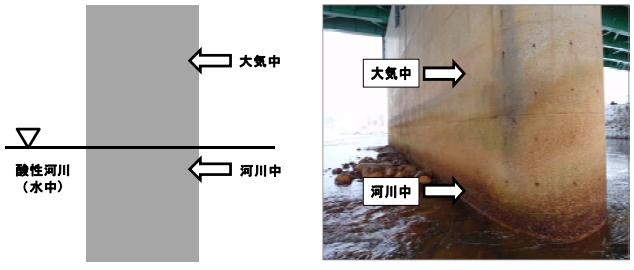

図-1　コア試料採取位置

2-2. 河川環境について

本検討で対象とした構造物が位置する河川に関して，須川は，最上川水系の支流で，その水質は廃坑となった蔵王鉱山から流れる鉱毒水と蔵王温泉の硫酸性温泉水の影響により低い pH であるのが特徴である．長瀬川は，阿賀野川水系の支流で，活火山である安達太良山・磐梯山などからの水を集めていることから，河口付近でも非常に pH が低い河川である．表-2 に，コア試料採取位置で採取した河川水の代表的なイオン成分分析結果を示す．分析方法はイオンクロマトグラフ法により実施した．

須川・長瀬川ともに，塩化物イオン・硫酸イオンが多く含有している状況であった．

表-2　河川水の成分分析結果

河川	水素イオン指数(pH)	陰イオン（mg/L）			
		F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
須川	4.3～4.4	0.4	6.1	4.0	180.4
長瀬川	3.4～3.5	0.7	15.6	5.5	65.9

3. 試験分析概要

本研究では，より精度の高い劣化診断を実施することを目的とし，一般的に行われている中性化深さ測定のほかに，酸性溶液中のイオンのコンクリート中への浸透状況，コンクリートの変質およびそれに伴う空隙構造の変化などを評価した．そこで，これら事象を確認するために，「中性化深さ：酸性溶液の作用による深さ方向へのコンクリートの pH 低下領域の評価」，「EPMA 分析：酸とコンクリートの反応領域や Cl，SO^3 等の陰イオンの浸透領域の評価」，「細孔径分布測定：酸の作用によるコンクリートの変質に伴う細孔分布評価」，「TG－DTA 分析：大気中の炭酸ガスによる中性化と酸性河川中の酸性溶液による中性化に伴う化学生成物質の定量評価」，「ビッカース硬さ：中性化深さ方向へのコンクリート強度分布評価」といった分析を実施することとした．

4. 試験結果

4-1. 中性化深さ

中性化深さ測定において，河川水に曝されている位置より採取したコア試料は，竣工当時よりも表面が侵食されており，抉れている状況であった．そこで，中性化深

キーワード　酸性河川，化学的侵食，中性化深さ
連絡先　〒980-0013　仙台市青葉区花京院 2-1-65　株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北　TEL022-713-7277

さを評価する際，実測の中性化厚さに侵食された厚さを加えた深さを中性化深さとした．

その結果，表-3 のような結果となり，中性化は酸性河川水に曝されている位置よりも，大気中で進行することが判明した．

表-3　中性化深さ測定結果

No	環境	侵食厚さ (mm)	中性化厚さ (mm)	中性化深さ (mm)
1	大気	0.0	10.1	10.1
	河川	2.8	5.9	8.7
2	大気	0.0	14.6	14.6
	河川	3.0	7.1	10.1
3	大気	0.0	10.9	10.9
	河川	3.0	1.9	4.9
4	大気	0.0	21.7	21.7
	河川	7.5	2.4	9.9

4-2. EPMA 分析

コンクリート中のカルシウム水和物濃度分布状況より，酸性河川内に曝されている位置では，コンクリート表面より 20 mm 程度の深さまで，カルシウム水和物の濃度が低い結果であった．したがって，中性化深さの測定結果と比較すると，フェノールフタレイン法により健全と判断された領域でもカルシウム水和物の溶出は生じているものと考えられる．また，酸性河川中の Cl，SO_3 イオン分布では，SO_3 イオンが表面より 20 mm 程度，Cl イオンは表面より 50 mm 程度まで浸透している結果となり，何れの陰イオンも，中性化深さより深い位置まで浸透していることがわかった．

4-3. 細孔径分布

大気中・酸性河川中で，中性化部・境界部および健全部の細孔径分布状況を比較すると，中性化部では大気中・酸性河川中ともに 0.005 μm 以下の細孔が減少しており，酸や炭酸ガスの影響によりカルシウムシリケート水和物(C-S-H)の溶解･分解が生じているものと考えられた．また，境界部に着目すると，大気中の細孔径分布は健全部と同等であったが，酸性河川中では，健全部より 0.01～1 μm の細孔や積算細孔容積が増加しており，大気中の分布状況とは明らかに異なるため，これらの増加は，酸の作用によるものと考えられる．

4-4. TG-DTA 分析

中性化部に関しては，大気中・酸性河川中ともに，水酸化カルシウムが検出されないことから，炭酸ガス・酸の作用によりコンクリートの中性化が生じていると考えられる．境界部に関して，大気中では，健全部と含有物質は同等であったため，コンクリートの変質は生じていないものと考えられるが，酸性河川中では，水酸化カルシウムが含有していないことから，境界部でも水素イオンの作用により水酸化カルシウムが溶解し，これに起因してカルシウムの溶出が生じていることが考えられる．

4-5. ビッカース硬さ

大気中の炭酸ガスが作用する中性化部では，ビッカース硬度の低下が確認できない結果であった．しかし，酸性河川中の場合，中性化部以外に水酸化カルシウムの溶出領域までビッカース硬度が低下する結果となり，中性化深さが表面より 10 mm 程度の場合においても，表面より 30 mm 程度まで硬度が低下しているものもあった．

4-6. 総合評価

図-2 に EPMA にて定量した CaO，SO_3，Cl 量とビッカース硬度の関係を示す．図-2 より，ビッカース硬度の低下は CaO の減少領域よりさらに奥側の SO_3 の濃度が高い領域まで達している．しかしながら，Cl の濃度が高い領域ではビッカース硬度の低下は生じていない．この現象については酸性河川水から浸入した SO_3 が AFm 相と反応することでエトリンガイトを生成したためと考えられる．また，Cl の濃度が高い領域はフリーデル氏塩やクーゼル氏塩の生成が考えられるが，これらの物質はモノサルフェートの保有する SO_3 と Cl の固溶置換により生成されるため，変質に伴う物質の体積変化がそれほど大きくなく，ビッカース硬度の低下が生じなかったと考えられる．

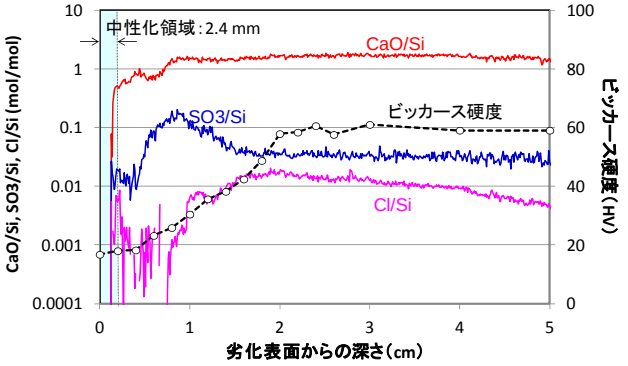

図-2　EPMA 分析とビッカース硬度の関係

5. まとめ

酸性河川中のコンクリート構造物より採取した試料を試験分析結果より，フェノールフタレイン法による中性化深さよりも，深い位置でも酸の作用によりコンクリートの変質が生じており，コンクリート中の水酸化カルシウムの溶出領域では，コンクリート強度の低下が見受けられた．また，河川水による摩耗が作用する場合，かぶりコンクリート厚の減少に伴い著しい劣化・性能低下が生じる恐れがあることが推察される．したがって，酸の浸透・河川水による摩耗を考慮した劣化予測式の構築を図り，より体系的な維持管理手法を確立する必要があると考える．