

コンクリート建造物への酸性雨影響調査 (V)

古明地 哲人 鎌 滝 裕 輝 西井戸 敏 夫*
(*前参事研究員)

要 旨

酸性雨のコンクリート建造物への影響についての補足調査を実施した。調査項目のうち、圧縮強度、中性化、電子顕微鏡写真などは酸性雨との関係は不明確であった。その他の項目は酸性雨の影響を示唆するいくつかの結果を示した。すなわち、空隙率は酸性雨の物質移動効果と、 SO_4^{2-} の沈着効果とによって緻密化する傾向を示した。PHは酸性雨によって低下傾向を示した。X線マイクロアナライザーの結果は SO_4^{2-} の内部への移動と濃縮とを示した。化学成分の分析結果は SO_4^{2-} 、 NO_2^- 、 NO_3^- のコンクリート表面への沈着と内部への移動を示唆した。逆に Na^+ は内部から表面へ移動することが示された。また、モルタル等のコンクリート被覆はコンクリートの劣化防止に大きな効果があることも明らかになった。

Effects of Acid Deposition on Concrete Fabrics

Tetsuhito Komeiji, Hiroki Kamataki and
Toshio Nishiido*

*Ex. Executive Researcher

Summary

Additional investigation of effects of acid deposition on five concrete fabrics in Tokyo was carried out last year. The deterioration in the concrete was not significant in parameters such as compressive strength, carbonation and electron microscope. However, the effects of acid deposition were indicated in some other parameters.

Porosity size distribution indicated that the carbonation and SO_4^{2-} transportation took place near the surface. pH values were lowered at the surface in south due to acid deposition. X-ray diffractometer analysis indicated that the high concentration band of SO_4^{2-} was caused by accumulation effect related to acid deposition. Water soluble components, such as SO_4^{2-} , NO_2^- and NO_3^- which were extracted from concrete showed transportation from surface into inner part. On the contrary, Na^+ showed transportation from the inner part to the surface. These phenomena indicate the direction of material flux. Coating by mortar and paint were useful to prevent concrete deterioration.

1 はじめに

酸性雨のコンクリート建造物への影響を調査するため平成4、5年度^{1)~4)}に引き続き、平成6年度に5棟の東京都所有のコンクリート建造物について補足調査を実施

し、酸性雨の影響と推測されるいくつかの知見を確認することが出来た。

特に、平成6年度はモルタル被覆とコンクリート打ち放しの建造物について比較調査を行った。このため、モ

ルタル部の分析も多く実施し、これらの分析結果からモルタルの被覆効果についても検討した。以下に6年度調査の結果について報告する。

2 調査方法

(1) 調査期間

1994年12月から1995年2月

(2) 調査対象建造物

表1に調査対象コンクリート建造物の概要を示す。これらのうち、平山陸橋（以下、「平山」という。）、多摩動物公園象舎（以下、「多摩」という。）はコンクリート打ち放しであった。また、平山以外はいずれも1995年以降、解体が予定されている。

表1 コンクリートコアサンプル採取対象建物一覧

局	No	所在地	解体工期	階数	竣工期
財務局関係	1	都立北豊島工業高校 板橋区富士見町28-1	H7. 2 ~	3F	昭和11年8月7日
	2	都立東高等学校 江東区東砂7-19-24	H7. 2 ~	3F	昭和42年3月
	3	都立雪谷高等学校 大田区久が原1-14-1	H7. 4 ~	3F	昭和49年3月
建設局関係	4	平山陸橋下街集 日野市平山5丁目地内			昭和61年3月
	5	旧アフリカ象舎（多摩動物公園） 日野市程久保7-1-1	H7. 3 ~		昭和45年3月

(3) 調査項目

コンクリートコアサンプルの採取箇所、調査項目等の一覧を表2に示す。コンクリートコアサンプルの採取箇所は酸性雨の影響を受ける箇所（南面側壁酸性雨暴露

表2 コンクリート建造物1棟（モルタル被覆有り）のコアサンプル採取箇所、数量、分析項目

場所等	採取箇所												サンプル合計
	南面側壁上部（雨、日照有り） 3ヶ所						北面側壁上部（雨、日照無し） 3ヶ所						
項目	表面		深部		全体部	モルタル南面	表面		深部		全体部	モルタル北面	分析数量 ○印は分析実施
コアサンプル数	1	1	1	1			1	1	1				
コアの分析部位	表面	深部	表面	深部	全体部	モルタル南面	表面	深部	表面	深部	全体部	モルタル北面	
		5 10 cm		5 10 cm				5 10 cm		5 10 cm			
分析項目	圧縮強度				○						○		2
	中性化	○	○			○	○	○				○	6
	空隙率			○	○		○		○	○		○	6
	pH	○	○				○	○	○			○	6
	走査電子顕微鏡	○	○				○	○	○			○	6
	X線マイクロアナライザ	○					○	○				○	4
	化学分析 5項目	⑤	⑤				⑤	⑤	⑤			⑤	30
合計	9	8	1	1	1	10	9	8	1	1	1	10	60

有)と受けない箇所(北面側壁酸性雨暴露無)について実施した。圧縮強度以外は表面と深部(内部)の2か所について分析、測定を行い、酸性雨や屋外大気のコクリート深部への影響について検討できるように計画した。この方法は、これまでの調査と同様である。

(4) 方法

各項目の方法は以下のとおりである。

- ① 圧縮強度：直径10cm、長さ20cmのコクリートコアサンプルを採取してJIS A 1107で測定
- ② 空隙率：水銀圧入法
- ③ 中性化：フェノールフタレン法
- ④ PH：試料を粉碎後、試料1、水9で懸濁し、攪拌後、JIS Z 8802で測定
- ⑤ 電子顕微鏡観察：5000倍で観察し、写真撮影
- ⑥ X線マイクロアナライザー：試料調製後計測点数50000、測定視野5cm×5cm、計測元素カルシウム(Ca)、イオウ(S)、アルミニウム(Al)、珪素(Si)
- ⑦ 化学分析：水抽出は試料粉碎後試料5、純水50の割合で抽出し、抽出液をイオンクロマトグラフィーで分析。酸抽出はPHと同様の試料を使用し、試料1に希塩酸(1+100)250を加えて抽出。

3 調査結果

(1) 圧縮強度

圧縮強度の測定結果を図1に示す。酸性雨の影響を顕著に受ける南面と受けない北面との比較ではむしろ北面の強度が低く、酸性雨の影響は明確でなかった。これは、①コクリート密度が全体的に南面で高いこと、②圧縮強度の測定が20cmの深さ方向全体のコクリート強度の測定値であるのに対して、酸性雨の影響の到達深さは後述のように中性化深さでみて、概ね数cm以下と小さいためにコクリート強度に影響を及ぼすまでには至っていないこと、の二つの理由によると考えられる。平成4、5、6年度に実施した圧縮強度等の平均値を表3に示す。

3か年とも圧縮強度は南面>北面であり南面の強度が高かった。この理由は上記と同様であると考えられる。これらの強度測定結果から本調査対象のコクリート建造物の強度は取り壊し予定の建造物も含め、現状では十分に実使用に耐える強度を保持していた。

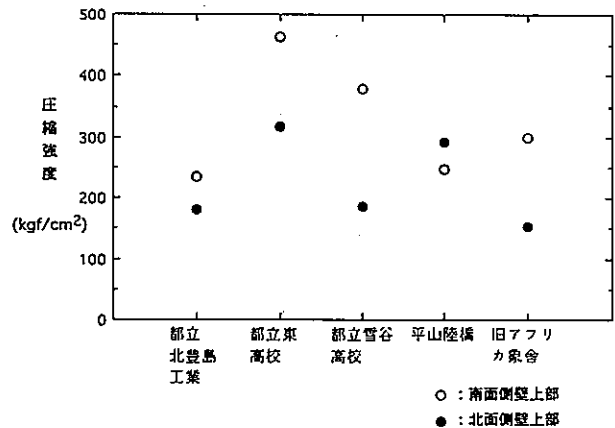


図1 圧縮強度試験結果

(2) 中性化

中性化試験結果を図2に示す。図2から北豊島工業高校(以下、「北豊島」という。なお、他の2都立高校についても高校を以下省略する。)北面の中性化が著しく顕著であったが、これは、モルタル被覆の崩壊等の要因が影響していると考えられる。南面と北面との比較では、全体的にみると、平山以外はすべて北面の中性化深さが南面よりも大きく、酸性雨は中性化にそれほど影響してはいないと考えられる。建築年を考慮した中性化の程度を岸谷式⁹⁾により求め、表4に示す。表4からモルタル被りがほとんど崩壊してしまい、残存モルタルもほとんど中性化してしまった北豊島の北面の中性化深さから推定した材令(年)は、276年と実際の材令59年をはるか

表3 全対象建造物の圧縮強度その他の平均値(平成4、5、6年度)

項目	圧縮強度(kgf/cm²)		中性化(表面)		pH(表面)		pH(深部)	
	南面	北面	南面	北面	南面	北面	南面	北面
4年度	306.6	275.8	7.05	9.51	12.7	12.0	12.8	13.1
5年度	264	253	4.08	4.31	12.2	12.5	12.3	12.6
6年度	325	226	7.36	15.4	12.1	11.8	12.4	12.3

に上回る結果であった。逆にモルタルのしっかりしていた東、雪谷は実材令が築後20年以上を経過しているにもかかわらず、平均中性化深さから推定した材令は約0年であった。また、表4から北豊島を除くとモルタル被りの有無がコンクリートの中性化に大きく影響していると考えられる。すなわち、上記のようにモルタル被りの有効な場合は中性化速度は小さく、モルタル被りのないコンクリート打ち放しの建造物の中性化速度は大きいことが認められた。

以上、中性化については都所有の建築物は現状では比較的良好な状態を保持していた。

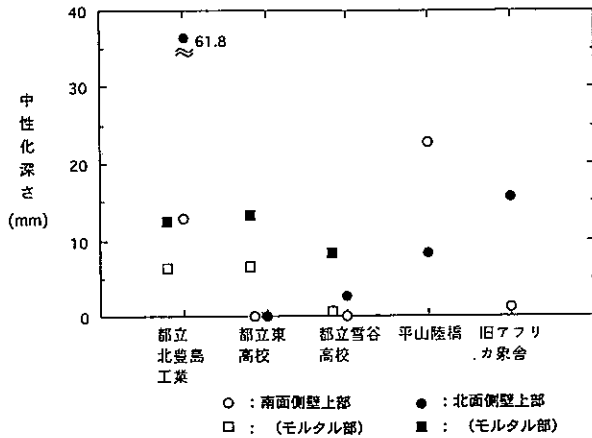


図2 中性化試験結果

表4 建物の材令とコンクリート部の推定材令

所在地	採取箇所	建物の材令 (年)	平均中性化深さから推定した材令* (年)	表面塗装	モルタルの被り厚さ (mm)
都立北豊島工業高校	南面側壁上部	5.9	12.0	無	6.4
	北面側壁上部		27.6	有	12.4
都立東高等学校	南面側壁上部	2.8	0.0	有	23.8
	北面側壁上部		0.0	有	25.1
都立雪谷高等学校	南面側壁上部	2.1	0.0	無	21.1
	北面側壁上部		0.5	無	25.7
平山陸橋下街渠	南面側壁上部	9	37.6	無	—
	北面側壁上部		5.1	無	—
旧アフリカ家舎(多摩動物公園)	南面側壁上部	2.5	0.1	無	—
	北面側壁上部		17.6	無	—

*: 中性化速度式として最も一般的な計算式(岸谷式)を用いて、水セメント比を60%と仮定して求めた。

$$Y = \frac{0.3(1.15+3X)}{R^2(X-0.25)^2} C^2$$

Y: 経過年数(年) X: 水セメント比(=60%) C: 平均中性化深さ(cm) R: 係数(=1)

(3) 空隙率

空隙率をゲル細孔(100オングストローム以下)、マイクロキャピラリー(0.01~0.1μm)、マクロ毛細管(0.1μm以上)に区分して測定した結果を図3に示す。図3から北豊島の北面の空隙率が特に他より大きく、かつ北豊島の南面よりもかなり大きいことが分かる。空隙のサイズでみると、南面の空隙率全体に占めるポアサイズの小さいゲル細孔の比率が北面よりもかなり大きく、特にモルタル被覆のある建造物で顕著であった。逆に、ポアサイズの大きいマクロ毛細管ではモルタル被覆のある建造物において北面の空隙率が南面よりもかなり大きい傾向にあった。

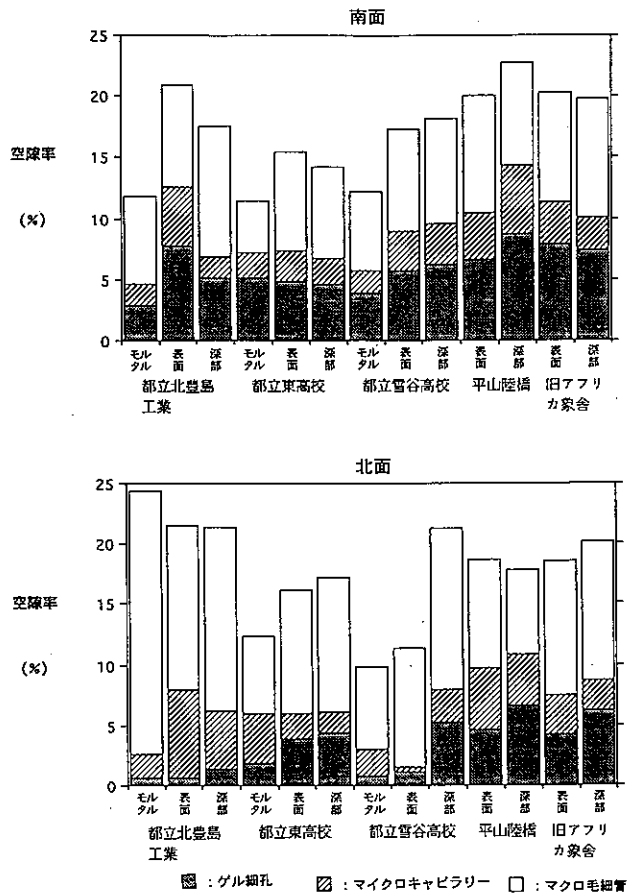
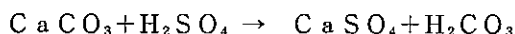


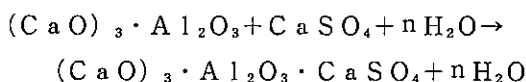
図3 空隙率測定結果

これらの結果から推測できることは、建築時のコンクリートの空隙率が南面と北面とで同一であったと仮定すると、南面と北面とでは空隙率の経時変化がかなり異なると考えられる。すなわち、南面ではポアサイズの小さい空隙が多いが、これはより大きい空隙が時間経過とともに充填されて細孔化したことを示している。このこと

は、前述のように南面においてポアサイズの大きいマクロ毛細管の空隙率が北面よりも小さいことから窺うことができる。この現象の発生理由の一つは酸性雨に暴露される南面では次の反応によって石膏が生成し、水和してさらに内部へと移動濃縮していくためであり、これらの硫酸塩生成物は体積膨張して空隙を充填していき、場合によってはコンクリートにクラックを生じさせることもあると考えられている^{6)~7)}。



硫酸塩は水和時にアルミン酸三酸化カルシウム (C₃A) と反応し、ettringite 又はモノサルフェートを生成する。



したがって酸性雨は水の供給による物質移動、硫酸塩の供給によるコンクリート表面の緻密化等の作用を促進するように作用すると考えられる。

(4) pH

図4にpHの測定結果を示す。pHの範囲は9.2(北豊島、北面、モルタル)~12.8(東、北面、モルタル)であった。通常の普通ポルトランドセメントでは生成する水酸化カルシウム量はセメント量の約1/3であり、pH12~13の強アルカリ性を示す⁸⁾。

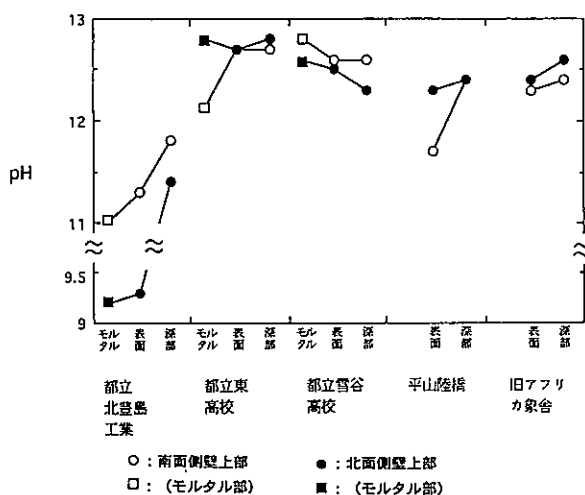


図4 pH測定結果

これからみるとpH12以上のコンクリートサンプルは概ね良好なアルカリ性を示していると言える。一方、北豊島、平山の南面の表面pHは通常のコンクリートより低いことを示している。特に、北豊島の場合は酸性雨の

影響を受けない北面のpHが表面、深部、モルタルとも酸性雨の影響を受ける南面より全て低く、この様な例は、同一の建造物のコンクリート材が南面、北面とも同一であるとの条件では起こりにくい現象であると言える。したがって、北豊島の場合はコンクリート材の材質が建築段階から南面と北面では大きく異なっていたと考える方が結果をよく説明できる。pH12以上でも雪谷の様に南面のpHが北面よりも高い例もみられた。他の3例は概ね南面pH<北面pHであり、かつ、表面pH<深部pHであり、これまでの結果と同様の傾向を示した⁹⁾。この様にみても、調査結果のうちどの対象建造物の結果を酸性雨の影響を解析するために使用するべきか詳細に検討することが重要であると考えられる。ただし、pH測定は中性化測定よりもコンクリートのアルカリの程度を詳細に知ることができる点で、コンクリートの劣化過程を知るためにはより便利であると言える。

(5) 電子顕微鏡

コンクリート表面と深部、モルタルについても電子顕微鏡写真を撮影し、コンクリート構造を結晶学的に観察した。これらの顕微鏡写真からコンクリート構造をみると、各写真ともコンクリートを構成する基本的な構成物を観察できたが酸性雨との関係を明確に示す結果は不明であった。電子顕微鏡写真より観察されたコンクリート及びモルタルの構成物について北豊島の場合を表5に示す。

表5 走査電子顕微鏡観察結果 その1 (コンクリート部)

所在地	表面	深部5~10cm
都立北豊島工業高校	南面: C S H (Type III) が多く、C S H (Type I), (Type II) も確認。 北面: C S H (Type III) が多く、カルサイトも確認。 モルタル部: 水酸化カルシウムも確認。	C S H (Type III) が多く、水酸化カルシウムも確認。 C S H (Type I) も確認。

走査電子顕微鏡観察結果 その2 (モルタル部)

所在地	南面	北面
都立北豊島工業高校	カルサイトが多く、C S H (Type III) も多く確認。 水酸化カルシウムも確認。	カルサイトが多く、C S H (Type III) も多く確認。

参考) C S H (水酸化カルシウム水和物)
Type I 繊維状結晶
Type II 網目状結晶
Type III 三次元等軸状結晶
カルサイト: CaCO₃
エトリングイト: C₃A · 3CaSO₄ · 12H₂O
水酸化カルシウム水和物: C₂AH₃, C₃AH₆

(6) X線マイクロアナライザー

電子顕微鏡観察ではコンクリートサンプルのごく一部

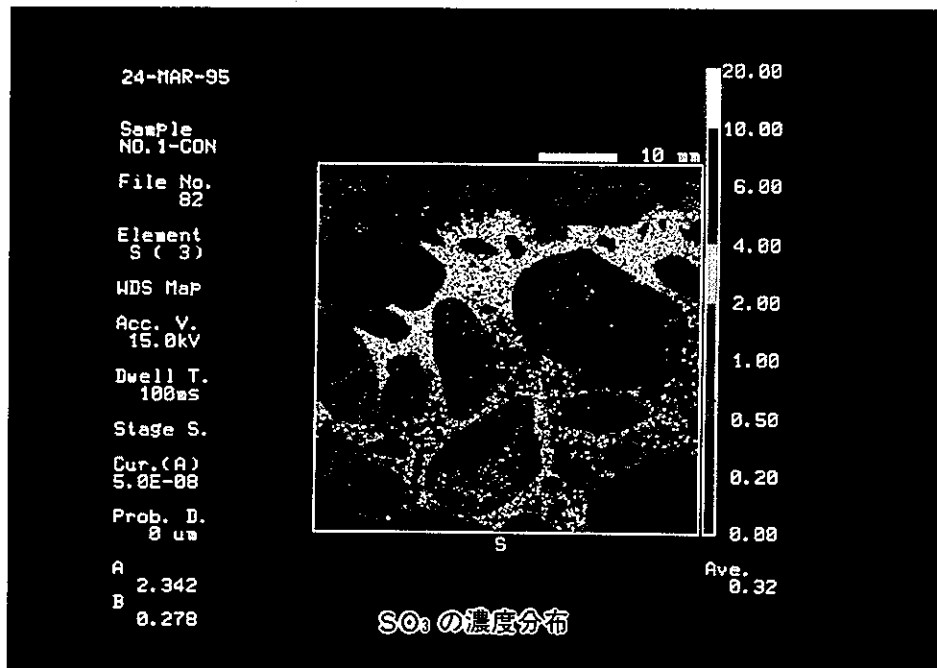


写真1 都立北豊島工業高校
南面側壁上部（表面）（コンクリート部）
のEPMA写真

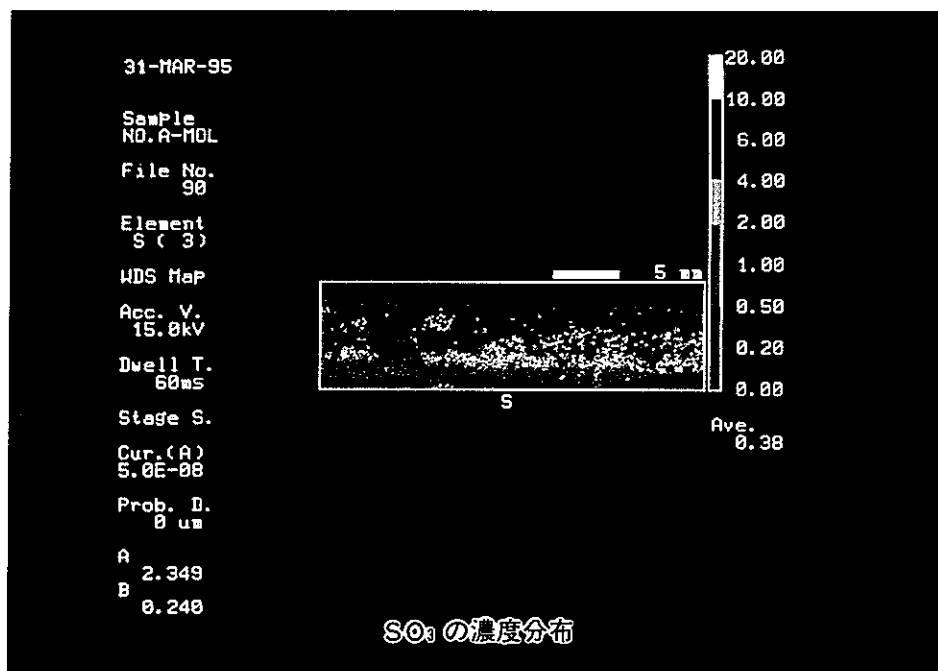


写真2 都立北豊島工業高校
南面側壁上部（モルタル部）
のEPMA写真

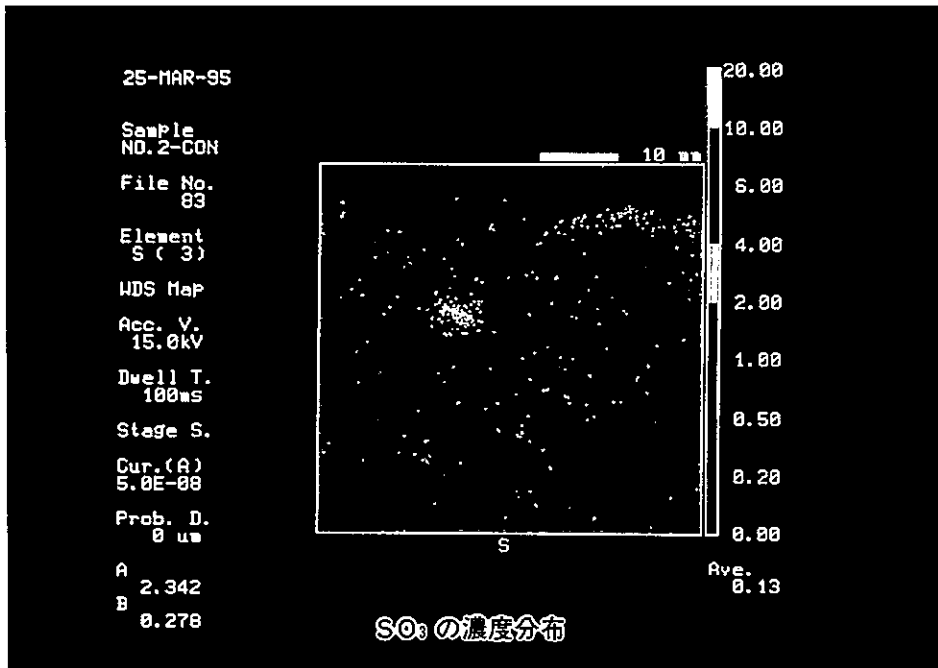


写真 3 都立北豊島工業高校
北面側壁上 部 (表面) (コンクリート部)
の EPMA 写真

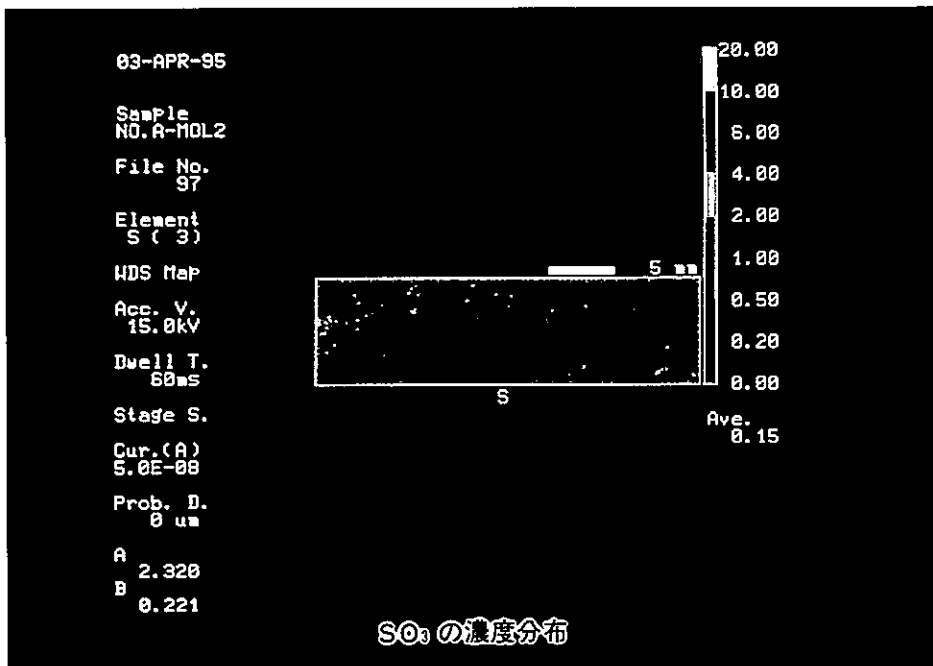


写真 4 都立北豊島工業高校
北面側壁上 部 (モルタル部)
の EPMA 写真

の情報のみが得られたに過ぎなかったが、X線マイクロアナライザーではサンプルの大部分の成分の濃度分布を知ることが出来る。本調査では、特にモルタルについても初めてX線マイクロアナライザーの結果を得たので、北豊島の場合についてコンクリート、モルタルのX線回折写真を写真1～写真4に示す。写真1は、南面側壁のコンクリートで、コンクリート表面から深部へのSO₃の移動が起こり、高濃度域を形成したことがよく観察された。

この傾向はモルタルについても同様であり(写真2)、南面の酸性雨に暴露された面で顕著であった。酸性雨に暴露されなかった北面ではこの傾向はそれほど明確ではなかった(写真3、4)。この現象を酸性雨との関係でみると次のように解釈できる。酸性雨によって供給されるSO₄²⁻は水の存在下でコンクリート内部に移動し、(3)で示した様に石膏やエトリングイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)を生成する。エトリングイトはその膨張圧によってコンクリートに亀裂を生じさせることもある。SO₄²⁻とは逆にCa²⁺はコンクリート表面方向に移動し、カルサイト(CaCO₃)を形成する⁹⁾。これまでの調査でもこの傾向が観察されている¹⁾。このカルサイトが酸性雨によって溶出することになる。

(7) 化学成分

コンクリートの劣化に伴うイオンのコンクリート内部における移動についてはCl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺等はいくつかの研究例をみることが出来るが⁹⁾、その他のイオンについてはほとんど研究されていない。本研究ではコンクリートの他に、モルタルについても温水・酸抽出別にイオン分析を実施した²⁾。

ア Ca²⁺

図5に温水抽出と酸抽出によるCa²⁺の溶出量を示す。

①温水抽出によるCa²⁺の溶出量は主にコンクリート中のCa水和生成物によって支配されると考えられる¹⁰⁾。温水抽出では北豊島の南面、北面と、平山の南面の溶出量が他よりかなり小さいことが認められる。この特徴は前述のpHの場合と良く一致する。北豊島は材令が古く、かつ空隙率でもみたように北面は特に空隙率が高く、緻密性に欠け、コンクリート材としてはあまり良い品質ではないと考えられる。このことを反映して表面部分の炭酸塩がより加速し、カルサイトの生成が増加し、温水抽出の溶出量が減少したと考えられる。表面と深部では深

部の方がCa(OH)₂量が多いと考えられるが¹⁰⁾、この傾向をかなり明確に示しているのはコンクリート打ち放しの多摩と平山であり、モルタル被覆のある他の3か所ではこの傾向は明確ではなかった。南面と北面の比較では南面は酸性雨の影響を受けて易溶性のCa塩(石膏等)を生成するため北面よりもCaの溶出量が多くなると考えられるが、調査結果からはその傾向は認められなかった。これを確認するためには標準試験片による長期のフィールド暴露実験が必要であると考えられる。

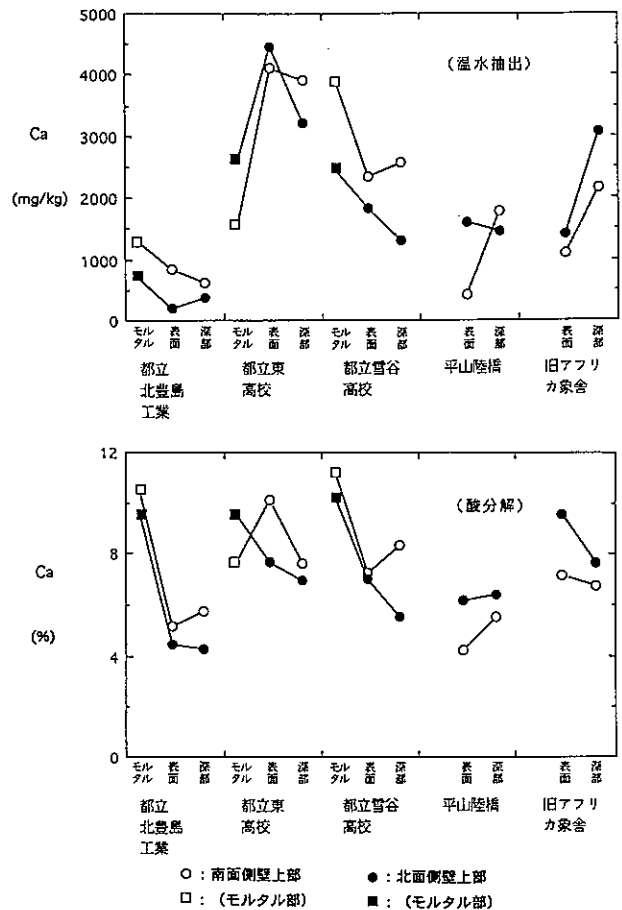


図5 Caイオン量の比較

②酸抽出によるCa²⁺の溶出量はコンクリート材のCa²⁺の総量と考えられる¹⁰⁾。酸抽出によるCa²⁺の溶出量は北豊島の南、北面と平山の南面及び雪谷の北面深部が他より比較的低い値を示した。これらの調査箇所のコンクリートは前述のように比較的低下品質であった。その他の調査箇所のセメント量は図5(酸抽出)のCa²⁺量が約8%以上であり、通常のセメント量を示していた。南面、北面及び表面、深部の比較では一定した傾向

は認められなかった。この理由は中性化、酸性雨の影響は短期の暴露では物質濃度、現象の規模ともに表面付近の微細な現象として留まるため、ここでの調査法である表面(0~5cm)、深部(5~10cm)の区分の比較ではコンクリートの主成分である表面付近のCa²⁺量の変化を明確に区別できないためと考えられる。

イ SO₄²⁻

図6にSO₄²⁻の溶出量について示す。温水抽出SO₄²⁻の溶出量の範囲は約250~1600mg/kg(0.025~0.16%)であり、酸抽出では約0.1~0.8%であった。この両法の差の理由は水抽出の場合は石膏が主に溶解してくるが、酸抽出では石膏+エトリンガイトが溶解してくるためと考えられる。この様にみると水溶性の石膏はコンクリート成分であるエトリンガイトの約1/5であるといえる。コンクリートが酸性化するとエトリンガイトはSO₄²⁻を放出し、水に可溶性となる。

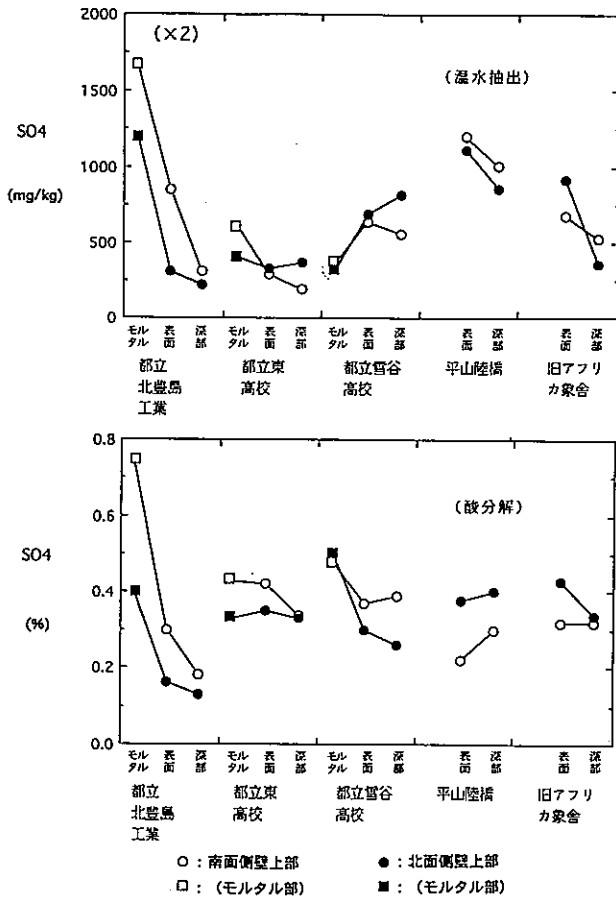


図6 SO₄イオン量の比較

温水抽出における南面の表面と深部の比較では、表面

の濃度が全箇所とも高く、南面では表面よりのフラックスが大きいことを示している。その他、北面、南面-北面の比較等については一定の傾向が認められなかった。ただ、北豊島のように建築年代の比較的古い建造物については、温水、酸抽出とも南面>北面、モルタル>表面>深部の傾向は非常に明確であり、酸性雨を含む大気環境の長期の影響の形を示唆していると考えられる。

ウ NO₂⁻, NO₃⁻

図7に温水・酸抽出のNO₂⁻, NO₃⁻の溶出量について示す。

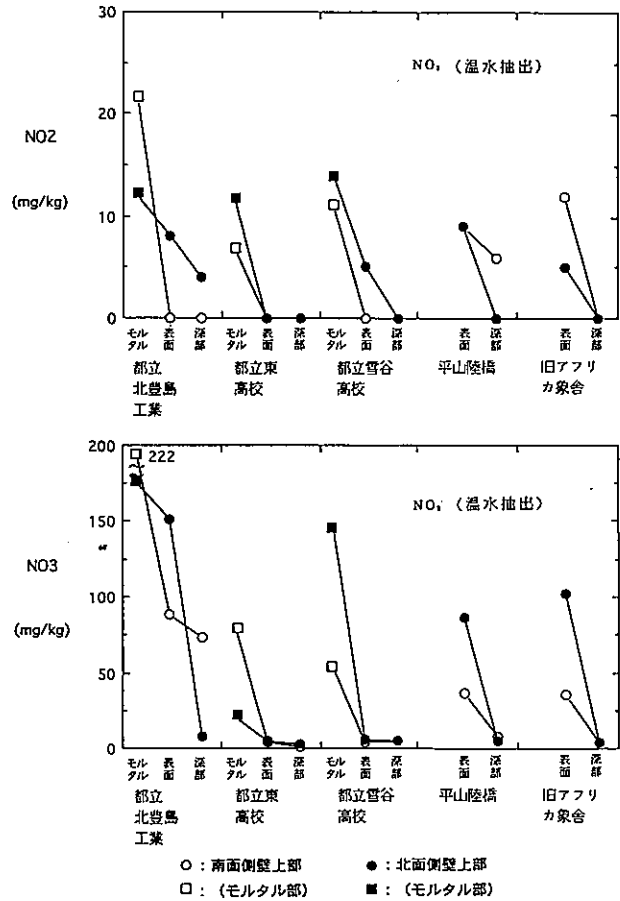


図7 NO₂, NO₃イオン量の比較

①NO₂⁻、をみるとすべての調査箇所溶出量はモルタル>表面>深部であり、かつ北豊島北面、平山南面以外の深部はすべて0であった。この溶出量の濃度分布は、典型的な表面片方向からのフラックスを示している。この場合は、大気環境からコンクリート表面-内部へのフラックスのみであることを示している。南面と北面表面とを比較すると、北面>南面の例が多く、北面の表面に

より多くトラップされる傾向が認められた。これは、 NO_2^- は全て大気中の NO_2 から供給されると仮定すれば、北面は、降水による洗浄効果を受けることがないため除去されることなく蓄積し、南面は、降水によって洗浄されるため蓄積量が小さくなると考えられる。なお、降水による NO_2^- のフラックスは、非常に小さいことがすでに報告されている¹¹⁾。

② NO_3^- についても NO_2^- と類似した傾向を示した。ただ、 NO_3^- の溶出量は NO_2^- の約10倍であり、この大きな差が目される。この差がもたらされる理由の一つは、 NO_2 と HNO_3 の乾性沈着速度の違いである。例えば、樹林に対する両者の沈着速度は、 HNO_3 の方が5～10倍程度大きい^{12),13)}。またコンクリートに対しては、大気中濃度^{14),15)}から比較して100倍程度 HNO_3 の沈着速度の方が大きいと推定される。これらのことから考えると図7の NO_2^- 、 NO_3^- の溶出量の差は大略説明可能である。

エ Na^+

Na^+ の温水抽出による溶出量を図8に示す。 Na^+ は上記 NO_2^- 、 NO_3^- とは逆にコンクリート内部から外表面への片側フラックスが大部分であることを示している。

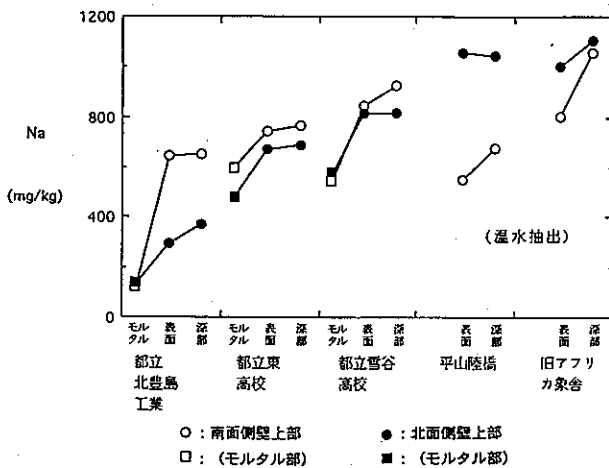


図8 Na イオン量の比較

また、コンクリート打ち放しでは北面よりも南面の表面濃度が低いことから Na^+ のように溶解性の化学成分は降水による水分の供給によってより移動し易くなることを示している。

また、表面にモルタル被覆のある場合は、 Na^+ の表面への移動はモルタルによって相当に抑制されている傾向を示している。このように Na^+ はコンクリート内部

から外への物質の流れを知るのにより指標物質となると考えられる。

オ Cl^-

Cl^- の溶出量は温水、酸抽出ともほぼ同程度であり、非常に水に易溶性の化学成分であった。酸抽出を行った化学成分は Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- だけであるが、前二者の温水抽出による溶出量は酸抽出の1/10程度であった。

4 まとめ

平成6年度に実施したコンクリート建造物調査の結果は以下のとおりであった。

①圧縮強度からみると調査対象建造物は十分使用に耐える強度を有していた。また酸性雨の影響は認められなかった。

②中性化と酸性雨、材令の関係は不明確であったが、モルタル被覆、塗装等のコーティングは中性化速度を低下するのに非常に大きな効果が認められた。

③空隙率はコンクリート、モルタルの中性化過程の生成物であるカルサイトや石膏がマクロキャピラリーを埋めていくという構造的変化を良く表していた。酸性雨はこの変化を促進する可能性がある。

④コンクリートの品質が劣る場合は中性化が顕著に進行し、pHの低下も著しいことが認められた。また、酸性雨のコンクリートpH低下への影響が示唆された。

⑤電顕、X線マイクロアナライザーの結果から、酸性雨の影響を示唆する石膏の生成、また、 SO_3 の濃縮を示すバンドが認められた。

⑥温水、酸抽出による化学成分の溶出量から Ca^{2+} は中性化過程を良くあらわし、 SO_4^{2-} は酸性雨の影響を示唆する分布を示した。また NO_2^- 、 NO_3^- は初めコンクリート中にはほとんど含まれず、大気経由でコンクリート中に蓄積されていくことを示していた。逆に Na^+ は大気中から取り込まれるよりもコンクリート中から外に移行していく部分が多いことが示された。これらの化学成分のコンクリート中の挙動は酸性雨の影響を受けていると考えられる。

参考文献

1) 古明地哲人ら：コンクリート建造物への酸性雨影響調査 (I) —コンクリート物性調査結果、東京都環境科学研究所年報1993, p.261-265(1993).

- 2) 鎌滝裕輝ら：コンクリート建造物への酸性雨影響調査 (II) —コンクリート水溶性成分調査結果、東京都環境科学研究所年報1993, p.266-269(1993).
- 3) 古明地哲人ら：コンクリート建造物への酸性雨影響調査 (III) —コンクリート物性調査結果、東京都環境科学研究所年報1994, p.202-207(1994).
- 4) 鎌滝裕輝ら：コンクリート建造物への酸性雨影響調査 (IV) —コンクリート水溶性成分調査結果、東京都環境科学研究所年報1994, p.208-212(1994).
- 5) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部(1963).
- 6) 小林一輔ら：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物、硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮、コンクリート工学論文集、1、p.69-81(1990).
- 7) Webster, R.P., et al : Effects of acid deposition on portland cement concrete. In : Materials degradation caused by acid rain. Edited by Babian, Academic Press, pp.239-249(1986).
- 8) 岸谷孝一ら：中性化、技法堂出版(1986).
- 9) 耐久性専門委員会報告：コンクリートに及ぼす酸性雨の影響 (模擬酸性雨による促進試験)、日本セメント協会(1992).
- 10) 小林重敏ら：酸性雨のコンクリート構造物に対する影響、土木技術資料、32, 18-19 (1990).
- 11) 古明地哲人ら：雨水のウォッシュアウトに関する検討、第16回大気汚染学会講演要旨集、(1975).
- 12) Sehmel, G.A. : Particle and gas dry deposition : Review, Atmos. Environ., 26A, 775-784(1980).
- 13) 大喜多敏一：森林への乾性沈着、気象研究ノート、182号、119-126, (1994).
- 14) 村野健太郎：硝酸・硝酸塩、気象研究ノート、158号、75-84(1987).
- 15) 栗田恵子、青木一幸：連続濃縮器を用いた大気中ガス状硝酸と塩化水素の測定—野外測定について—、東京都環境科学研究所年報1992, p.308-312(1993).