

報告

コンクリート構造物への酸性雨影響調査(1)  
- コンクリート物性調査結果 -

古明地 哲人 鎌 滝 裕 輝 朝来野 国彦

1 はじめに

近年、酸性雨のコンクリート等建造物への影響に関する関心が高まり、コンクリートの劣化のプロセス、コンクリートつらら等の報告が多くなされるようになった<sup>1),2),3),4)</sup>。当研究所では酸性雨に関する調査研究の一環として石像等に対する酸性雨影響調査を1990年から実施してきたが、1992年にはそのうちのコンクリート建造物に対する酸性雨の影響について、東京都区部の調査を実施した。本調査は2カ年の調査を計画しているが、ここでは、初年度であるので、調査方法を中心に、また調査結果のうち、酸性雨のコンクリート物性への影響を中心に、その概要を報告する。コンクリートからの溶解性イオンの溶出については別報で報告する。

2 調査方法

- (1) 調査期間 1992年10月から1993年2月
- (2) 調査対象建造物 1993年以降、取り壊し予定の都所有コンクリート建造物（東京都区部）10対象。

表1 コンクリートコアサンプル採取対象物一覧

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 板橋区常土見町28-1	H4 11/19~ H5 3/15	3F	昭和11年
	2	旧都庁第二本庁舎 千代田区丸の内3-8	H4 12/ ~ H5	10F	設計、昭和38年
建設局関係	3	上野動物園水族館解体工事 台東区上野公園9-83	H4 11/ ~ H5 3/31	4F	昭和38年6月30日
	4	相生橋 中央区佃2丁目~江越中島	H4 12/ ~ H5	-	大正15年11月
	5	代々木公園トイレ 渋谷区代々木神宮町2-1	H5 2/ ~	1F	昭和39年
教育庁関係	6	都立芝罘高等学校 港区海岸1-8-25	H5 3/ ~	4F	昭和47年2月10日
	7	都立駒場高校 目黒区大橋2-18-1	H5 3/ ~	4F	昭和37年4月
	8	都立西高校 杉並区喜多川4-21-32	H5 3/ ~	3F	昭和33年2月25日
	9	都立竹早高校 文京区小石川4-2-1	H5 3/ ~	5F	昭和43年
	10	都立青山高校 渋谷区神宮前2-1-8	H5 3/ ~	4F	昭和33年5月

調査対象の10コンクリート建造物の所在地、建築年代

等を表1に示す。建築年は1925年から1972年であり、建築後21年から68年を経過した建造物であった。

表2 コンクリート構造物1棟のコアサンプル採取箇所、数量、分析項目

項目	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			
コアサンプル数	1	1	1	1	1	1	6
コアの分析部位	表面	表面	表面	表面	表面	表面	分析数量 ○は分析実施
	深部5~10cm	深部5~10cm	深部5~10cm	深部5~10cm	深部5~10cm	深部5~10cm	
分析項目	圧縮強度						2
	中性化	○	○		○	○	4
	空隙率			○	○		4
	pH	○	○		○	○	4
	走査電子顕微鏡	○	○				2
	X線マイクロ分析	○	○				2
	化学分析 4項目	○	○		○	○	16
合計	8	8	1	1	6	6	34

- (3) 調査項目 コンクリートコアサンプルの採取箇所、測定分析項目、測定分析箇所等の一覧を表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（南面側壁降水暴露有）と受けない箇所（北面側壁降水暴露無）について実施した。圧縮強度以外は表面と深部（内部）の2箇所について分析、測定を行い、酸性雨、屋外大気の影響について検討できるようにした。

(4) 測定分析項目 各項目の方法は以下の通りである。

- ① 圧縮強度：直径10cm、長さ20cmのコンクリートコアサンプルを採取JIS A 1107で測定
- ② 中性化：フェノールフタレン法
- ③ 空隙率：水銀圧入法
- 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

50,000、測定視野 5 × 5 cm、計測元素Ca、S、Al、Si

⑦ 化学分析：温水抽出法（試料5g+水50ml）、希塩酸抽出法（試料1g+希塩酸（1+100）250ml）により抽出、分析はJIS K 0102 によった。分析成分はCl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>

### 3 調査結果

影響調査の結果の概要を以下に示す。

#### (1) 圧縮強度

酸性雨の影響を顕著に受ける南面と受けない北面の差は明確ではなかった。強度からみると調査対象建造物は都立西高校の北面以外は150kgf/cm<sup>2</sup>以上であり、建築年代の割には十分な強度を保っていた。コンクリートの密実性を示す単位容積質量と圧縮強度の関係を図1に示す。2、3のサンプルを除けば両者の相関はかなり高く、単位容積質量（kg/m<sup>3</sup>）もコンクリート強度のよい指標となると考えられる。

#### (2) 中性化

図2、図3に中性化試験結果を示す。図2から、北豊島工業、相生橋は建造物の材令が長いこともあり、南面は中性化深さが約20mmと比較的中性化が進んでおり、北面はそれほどでもなかった。代々木公園、旧都庁第二庁舎、青山高校は予想される結果とは逆に北の中性化深さが南より大きい結果を示した。図3に建造物の材令と本調査で測定された平均中性化深さ（岸谷式<sup>5)</sup>）から推

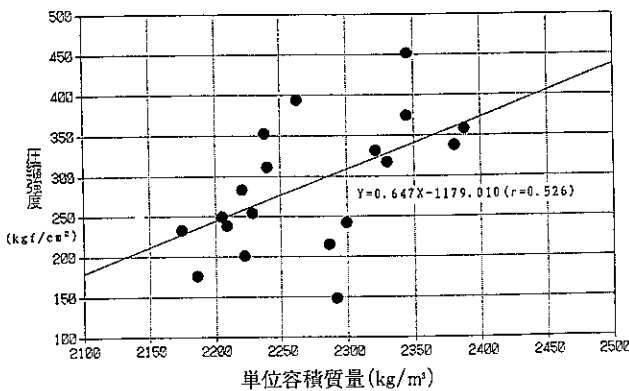


図1 圧縮強度試験結果

定した材令とを比較したものを示す。相生橋は建築後、約70年を経過しているが測定された推定材令は20年未満であり、中性化の速度はかなり遅いことが認められた。逆に、西高校の北面は中性化速度が特に速く、建築後35

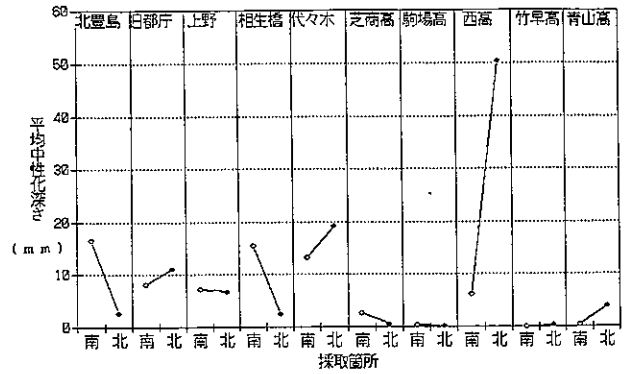


図2 中性化試験結果

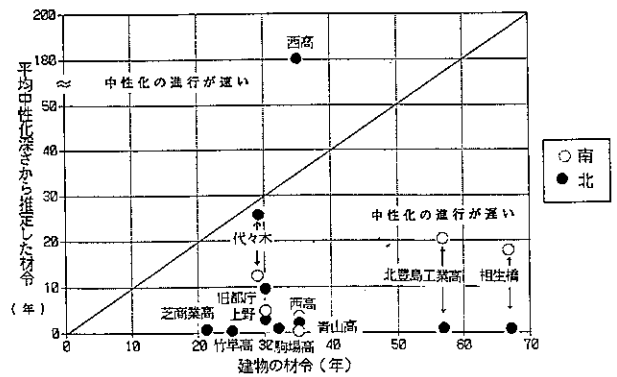


図3 実材令と推定材令との関係

年であるが中性化測定結果からの推定材令は約180年を示した。代々木と西高校とを除けば図3から材令と中性化深さとは正比例する傾向が認められる。

#### (3) 空隙率

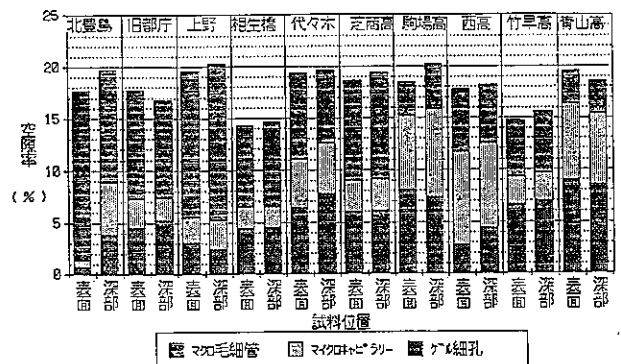


図4 空隙率測定結果(南面)

図4、図5に深さ別の空隙率測定結果を示す。南面、北面とも表面は深部に比較し、空隙率が減少している傾向が認められる。このように空隙率が表面で低くなる傾向は次のように説明される。

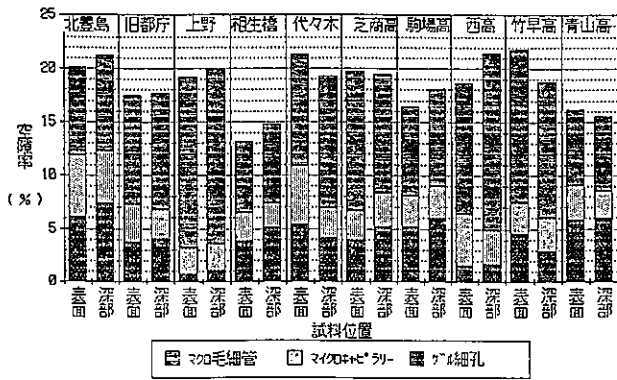
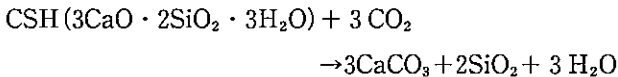
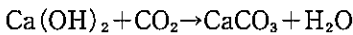


図5 空隙率測定結果(北面)

セメント水和物の大部分を占める水酸化カルシウム及びCSH (カルシウムシリケート水和物: 代表的な組成  $CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ ) ゲルが空気中の炭酸ガスと反応し、炭酸化すると、



のように炭酸カルシウムと非晶質シリカ (シリカゲル) が生成され、空隙を埋め、ち密化することになる。

このことから、表面から内部に向かいさらに測定点を多くとると、中性化深さを空隙率で測定できると考えられる。

(4) pH

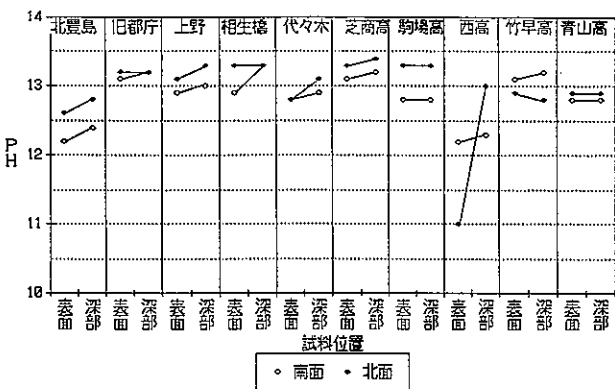


図6 pH測定結果

図6にpH測定結果を示す。西高校の北面の表面がpH11と低い以外は全てpH12以上と十分にアルカリ性を保っていた。また、大部分は表面のpH値が深部より低く、かつ南面が北面より低い傾向であった。pHの低下

は中性化の進行と関係があり、このことは次に示す図7

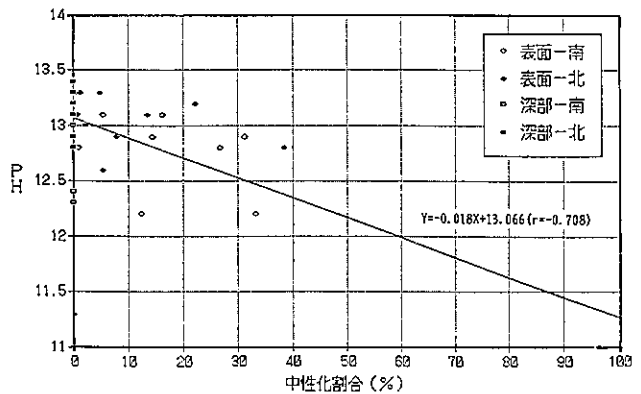


図7 pHと中性化割合の関係

は中性化-pHの関係からもうかがえる。図7より中性化の割合が増加するとコンクリートpHは低下することが分かる。

(5) 電子顕微鏡観察

大部分の建造物で、表面はセメントの水和物が炭酸化して生成した炭酸カルシウム (カルサイト:  $CaCO_3$ ) の結晶が多く観察されており、深部では試料によって様々な形態のCSHゲルが多く確認された。エトリンガイト ( $C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3) \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) は表面と深部で確認された。北豊島工業高校の南面の表面、及び深部の電子顕微鏡写真を写真1、2、3に示す。エトリンガイトは生成した石膏がさらにコンクリート中の $C_3A$ と反応して生成するが、生成する際の膨張圧で、コンクリートに大きな被害を及ぼすことがある<sup>9)</sup>。これらの観察結果から中性化、またコンクリートの劣化に関してのコンクリートと大気環境との反応生成物の情報が得られた。

都立北豊島工業高校

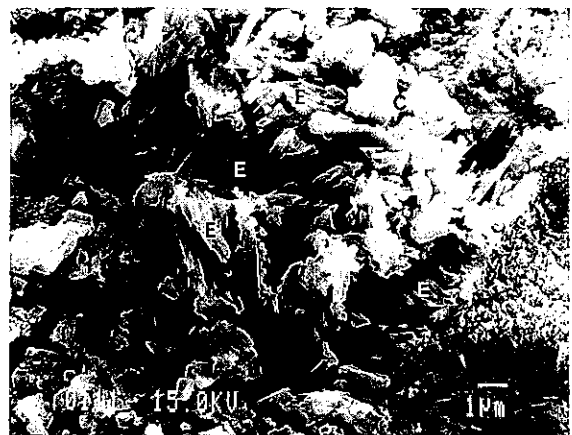


写真1 南面上部

C:カルサイト E:エトリンガイト

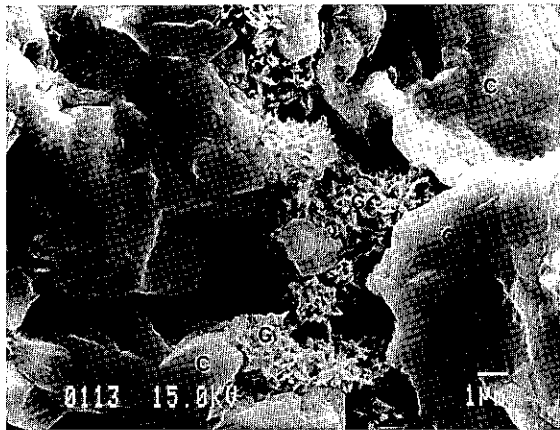


写真2 南面上部  
C:カルサイト G:シリカゲル

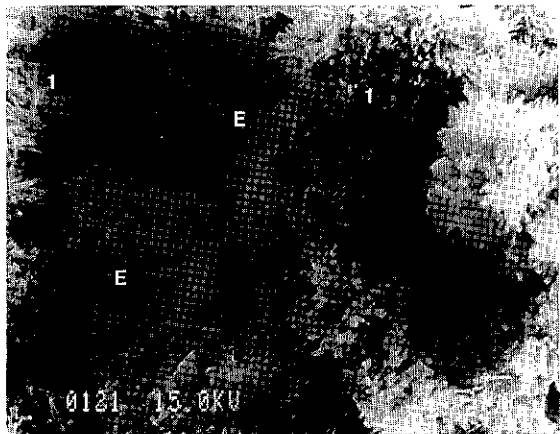


写真3 南面深部  
I: CSH (Type I) E:エトリンガイト

(6) X線マイクロアナライザー (EPMA)

特徴的に認められた現象では南面の表面付近にSO<sub>3</sub>の低濃度域があり、そのさらに深部にSO<sub>3</sub>を濃縮した高濃度域が認められたことである。代表的なEPMAの写真写真4、5、6に示す。写真4は試料を研磨した後の接写写真であり、セメント、骨材の分布を示している。写真5はCaOのEPMA写真であり、CaOの一様な分布を示している。写真6はSO<sub>3</sub>のEPMA写真であるが、前二者と異なり、明確にSO<sub>3</sub>の集積のバンドが認められる。これは表面の中性化領域からSO<sub>3</sub>が高濃度域に移動したことを示唆している。今後、建築年代、酸性雨に対する暴露条件（例えば表面塗装無し、モルタル無しのコンクリート建造物を調査対象とする等）を類型化することにより、環境の、さらに酸性雨の影響を評価するのに有効な調査項目とすることができると考えられる。

代々木公園、南面

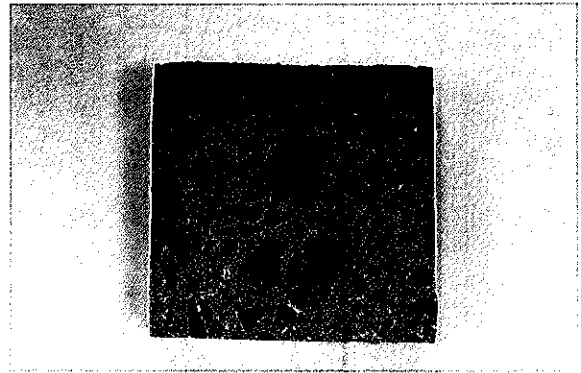


写真4  
上部が表面、下部が深部

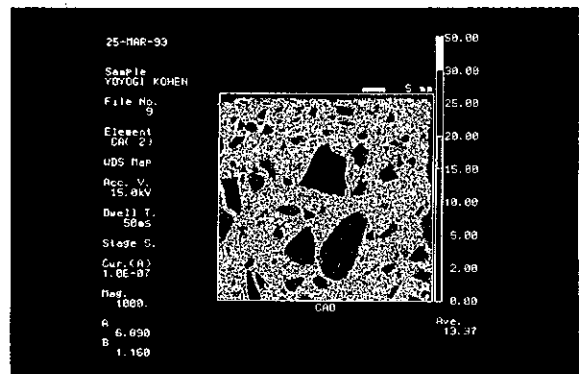


写真5  
赤色ほど濃度が高い

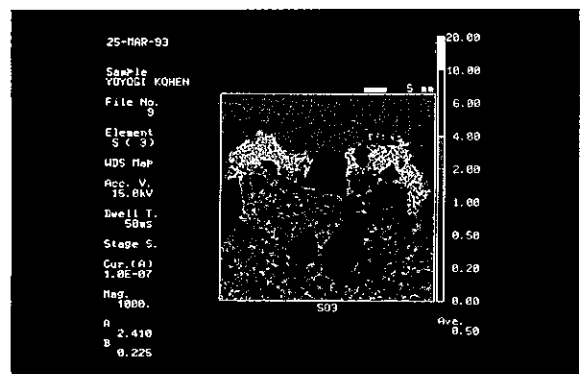


写真6  
上部が表面、下部が深部  
黄色に見える部分がSO<sub>3</sub>を集積した部分

6 おわりに

都区部のコンクリート建造物への酸性雨影響調査のうち、物性に関する結果についてまとめると次のようになる。

- (1) 圧縮強度からみると、ほとんどの調査対象建造物は

強度的に十分なコンクリート強度を有しており、強度低下が問題となる変化は認められなかった。

(2) 酸性雨の中性化への影響は不明確であるが、材令と中性化深さとは概ね正比例の関係がある。

(3) 空隙率の表面と深部との差は比較的明確であり、表面で中性化による空隙率の低下傾向が認められた。

(4) コンクリート建造物南面のpHは北面より低く、かつ表面が深部より低下していたことから酸性雨等の影響を評価する項目として注目できる。

(5) 電子顕微鏡観察から、コンクリート表面は炭酸化が進行し、大気環境の影響を強く受けていること、深部はまだコンクリート本来の鉱物組成を保っていることが観察された。

(6) X線マイクロアナライザーの分析結果から、酸性雨を含む環境の影響を強く受けていると推定される $\text{SO}_3$ の集積域が観察され、今後注目すべき調査項目であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) R.Baboian:Materials degradation caused by acid rain,The American Chemical Society, (1986)p.239-249.
- 2) 小林一輔：酸性雨による器物影響／コンクリート劣化、環境資源対策、28,14 (1992) p.1355-1358.
- 3) 斉藤宏保：酸性雨による外国の被害事例／アメリカにみる建造物の被害事例、同上、29,2 (1993)p.69-73.
- 4) 鎌滝 裕輝ら：石像等への酸性雨影響調査(II) —人工酸性雨による暴露実験—東京都環境科学研究所年報, 1992p.326-333.
- 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) 水上国夫：化学的腐食、技報堂出版 (1986) p.22.