

第 章

# 6

コンクリート構造物への  
影響評価

## 第6章 コンクリート構造物への影響評価 目次

我孫子研究所構造部長 上席研究員 金津 努  
我孫子研究所構造部 主任研究員 山本 武志

6 - 1	コンクリートの劣化要因 .....	73
6 - 2	暴露実験による影響評価 .....	75
コラム5	コンクリートのつらら現象 .....	79



金津 努（1978年入所）  
LNG地下タンク，原子力発電所格納容器の温度応力設計合理化研究に従事。現在は，原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計合理化研究，コンクリート製電力施設の健全度診断，酸性雨影響などの研究に取り組んでいる。



山本 武志（1993年入所）  
フライアッシュの有効利用に関して，品質と混和したコンクリートの性能評価，JIS改正に関する調査研究に従事。現在は，フライアッシュのアルカリ骨材反応抑制効果やボゾラン活性の早期評価の研究に取り組んでいる。

## 6-1 コンクリートの劣化要因

### 6-1-1 はじめに

コンクリートの経年劣化には、塩害、アルカリシリカ反応、炭酸化、硫酸塩による浸食、凍害などのように、十年から数十年で被害が顕在化するような現象<sup>(注1)</sup>と、酸性雨のように劣化進行が非常に緩慢で、通常の構造物の耐用年数内でそれが原因と判断することが難しい現象がある。劣化速度の速い現象については、経年変化の評価方法や対策技術が開発され、耐用年数が数十年のコンクリート構造物では、これらの劣化現象を考慮に入れた設計手法が提案されている<sup>(1)</sup>。しかし、酸性雨については現象が十分に解明されておらず、これに起因する経年劣化の評価は困難な状況にある。

最近では既設施設の共用期間の延伸、耐用期間が100年を超える施設の設計などが行われるようになってきた。また、既設施設の施工方法に起因する劣化の早期顕在化が問題となっている。従来、二次的な要因としての位置づけであった酸性雨の影響も、他の要因との複合劣化要因として考慮すべき事項となってきた。

本節では、降雨に起因するセメント硬化体の化学的変質について、既往の知見をとりまとめた。

### 6-1-2 劣化因子

コンクリートとは、セメントペースト（セメント・水）に骨材（砂・砂利）を混ぜた硬化体であり、主要な水和物はCa-Si-H<sub>2</sub>O系化合物（C-S-H）とCa(OH)<sub>2</sub>である。コンクリート中の空隙に水分が浸透することにより、Ca(OH)<sub>2</sub>がCa<sup>2+</sup>とOH<sup>-</sup>に解離する。また、セメントに微量含まれているNa<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>Oが溶解してNa<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、OH<sup>-</sup>になるため、コンクリート中の空隙のpHは12～13と非常に高い。しかし、空気中の二酸化炭素や水素イオン（H<sup>+</sup>）を含んだ雨水、河川水、霧などに曝されると、H<sup>+</sup>とOH<sup>-</sup>の中和反応が起り、コンクリート

の表面から徐々に空隙のpHが低下し、セメント水和物の変質する。いわゆる中性化と呼ばれる現象である。水和物の変質速度は、コンクリート構造物の状態や環境条件により異なる。特に、ひび割れが生じた場合や、コンクリート打設時に過剰の練混ぜ水が投入されて空隙が多いコンクリートの場合は劣化が促進される。コンクリートに生じるひび割れの原因は、外力荷重、温度応力、乾燥収縮、凍結融解、アルカリシリカ反応、塩害による鉄筋膨張などである。つまり、コンクリート打設時に用いる材料および配合の違いと、構造物を供用する場所の地域特性の違いにより、コンクリートに生じるひび割れの特性が異なる。その結果、H<sup>+</sup>の影響度合いはかなり異なると考えられる。わが国における雨水の年平均pHは4.6～5.2（平均4.8）の範囲にあるが、降水量の分布を考え合わせると、雨水を介して地表面へ負荷されるH<sup>+</sup>量（湿性沈着量）は、南西地域の方が北東地域より多くなる<sup>(2)</sup>。したがって、コンクリートに及ぼす影響も地域により異なるものと考えられる。

### 6-1-3 酸性雨による炭酸化の促進

コンクリート表面とひび割れ面は、空気中の二酸化炭素の影響により、セメント水和物（C-S-H、Ca(OH)<sub>2</sub>）が炭酸化したカルサイト（CaCO<sub>3</sub>）の薄膜で覆われている。その状態のひび割れに酸性雨が浸入した場合の化学反応式をコラム5に示した。浸透水はカルサイトを溶解して高濃度のH<sup>+</sup>とHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>を含む水となるが、ひび割れを出ると脱炭酸が起り、炭酸カルシウム（CaCO<sub>3</sub>）が析出する<sup>(3)</sup>。

### 6-1-4 酸による水和物の化学的変質

中性の水にモルタルを浸漬した場合でも、モルタルからCa<sup>2+</sup>が溶出する。しかし、酸性溶液に浸漬した場合の方が溶出量は著しく多くなる。pH 4.0、pH 3.5、pH 3.0の溶液にモルタルを浸漬した実験<sup>(4)</sup>が行われ、pHの違いによるペースト部のCaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、

注1：これらの要因を考慮した設計を行った場合には、現象は生じないが、顕在化するまでかなりの長期間を要する。

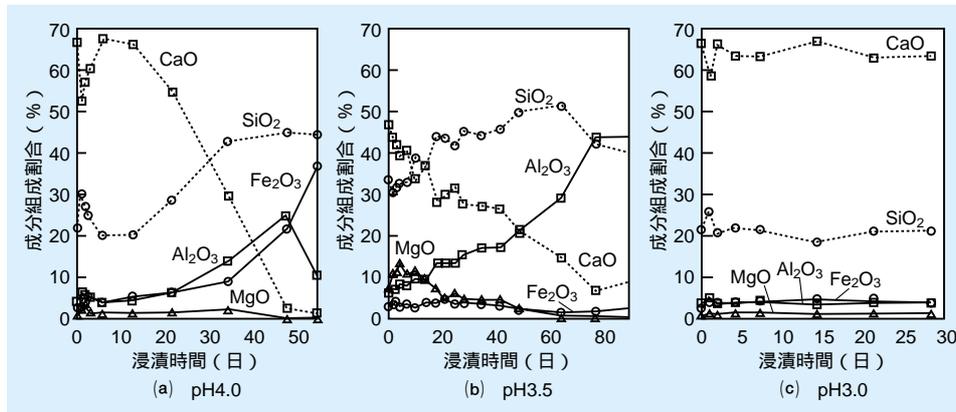


図6-1-1 種々pH条件での組成成分割合の経時変化 (普通ポルトランドセメント、W/C = 50%)<sup>(4)</sup>

MgOの溶出特性の違いが明らかにされた(図6-1-1)。また、各試料とも浸漬時間の経過とともに変色した。pH 4.0では浸漬開始後数日で黒色になり、25日程度で隅角部が白色に変色した。pH 3.0では50日目程度で茶色(赤褐色)に変色した。これらの変色は、ペースト表層部における元素の存在比率と関係があり、特にFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は内部から表層部に向かう濃縮作用があると考えられている。

### 6-1-5 炭酸化による化学的变化

セメント水和物であるC-S-Hを定量分析する手法を用いて、他のセメント水和物(Ca(OH)<sub>2</sub>、モノサルフェート)と合わせて炭酸化速度が評価された<sup>(5)</sup>(図6-1-2)。その結果、①セメント水和物であるC-S-HとCa(OH)<sub>2</sub>の炭酸化は同時期に始まり、その後もほぼ並行して進行する、②C-S-Hに比べてCa(OH)<sub>2</sub>の炭酸化速度の方が大きい、③C-S-Hに比べてモノサルフェートの炭酸化速度の方が大きい、④C-S-Hの炭酸化は、カルシウム含有率が低い低カルシウム型のC-S-Hを経て進行することが明らかにされた。

### 6-1-6 炭酸化による物理的变化

炭酸化によるセメント組織の変質について、実験的に次の知見が得られている。モルタルを炭酸化させ、その炭酸化した部分と炭酸化していない部分の細孔径分布の比較により、炭酸化した領域のほうが1 μm以下の細孔径容積が全般的に低下し、組織が緻密化すると

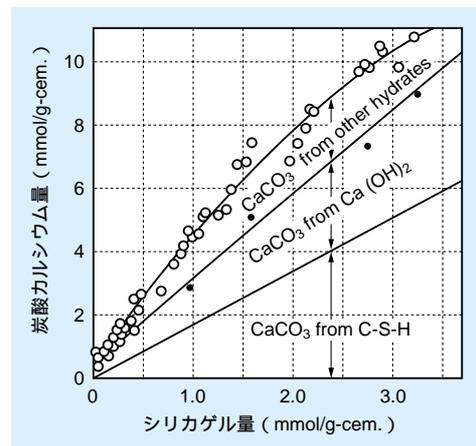


図6-1-2 炭酸カルシウム量とシリカゲル量の関係<sup>(5)</sup>

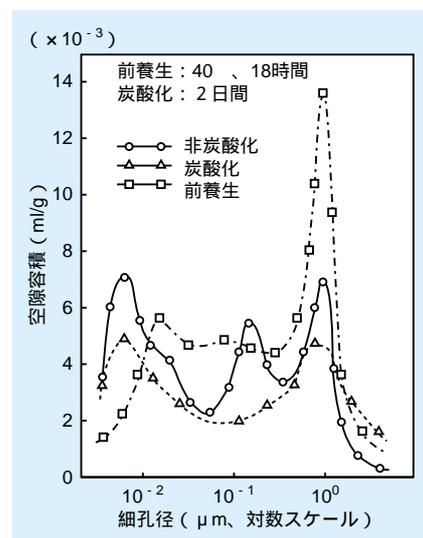


図6-1-3 各試料の細孔径分布<sup>(6)</sup>

いう結果が得られている<sup>(6)</sup>(図6-1-3)。また、空隙量の低下にともない、モルタルの曲げ強度は増加する。一

般に、水酸化カルシウムが炭酸化により炭酸カルシウム（カルサイト、パテライト、アラゴナイト）に変化することで、硬化体内の細孔量は低減する。しかし、

Ca 溶出が容易な組織に変質することも事実であり、ひび割れなどの欠陥ができる場合には、劣化を促進する要件になる。

## 6 - 2 暴露実験による影響評価

### 6-2-1 はじめに

前節で述べたように、酸性雨の影響は長期にわたってゆっくりと進行する性質のものであり、暴露試験により影響を検証するには、長期間の継続実験を必要とする。当研究所では、4か年にわたり酸性雨を模擬した人工雨を用いて暴露試験を実施し（総降雨量は約9000 mm）、以下の4つの観点から酸性雨のコンクリートへの影響を評価した。

- ① pHによって表面浸食量はどのように異なるか
- ② コンクリート内部にどのように影響するか
- ③ コンクリートの強度は影響を受けるのか
- ④ コンクリートの表面状態（色調）にどのように影響するか

### 6-2-2 模擬酸性雨による暴露実験

#### (a) 酸性雨の条件

模擬酸性雨の陰イオン組成は、わが国での実測例を参考にして、純水（pH 5.6：対照）に硫酸、硝酸、塩

酸を5：2：3（当量比）の割合で混合して調製した。pHは2.5，3.0，4.0，5.6の4段階とした。

#### (b) 試験体の条件

##### (1) 形状・寸法

降雨に曝される面の状態が強度に反映され易いように、板状試験体を曲げ強度試験に用いた（図6-2-1）。形状は厚さ1.5 cm、幅4 cm、長さ16 cmである。この大きさの関係から、試験体はモルタル（コンクリートから砂利部分を除いたもの）で作製した。曲げ試験は、降雨に曝される面を引張り側にして実施した。

##### (2) 試験要因

酸性雨の影響は、コンクリート構造物の欠陥部で早期に顕在化することが既往の研究から明らかにされている。本研究では、モルタルの水セメント比（以下W/C）を大きくして品質を低下させ、構造物の欠陥を実験的に再現することにした。

W/Cを60%，80%，100%に変え、単位体積当たりのセメントペースト量が一定となるように配合を決定した。一般の配合ではW/C 65%がほぼ上限なので、W/C 80%，100%は品質をかなり低下させたものと考

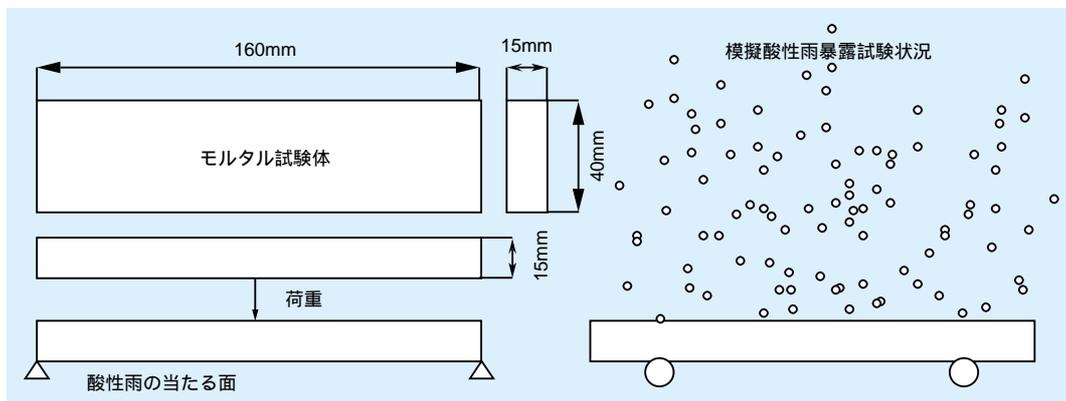


図6-2-1 モルタル試験体と曲げ強度試験方法

えることができる。試験体は1ケース3本である。

### (c) 降雨条件

1降雨イベントを6時間、16 mmとし、これを2日に1回降らせた(雨量は1週間で約50 mm)。これは、乾湿を与えることにより実際の降雨条件に近づけるよう配慮したものである。模擬酸性雨の総雨量は約9000 mmであり、これは単純に年平均(約1700 mm)で換算すると、わが国の降水量の5～6年分に相当する。現実には、pH 4.0を下回る雨が年間1700 mm降っているわけではない。

## 6-2-3 表面の浸食量について

表面浸食量(浸食厚さ)は、所定降雨量を暴露した毎に0.01 mmまで測定した。この測定値は、雨滴が試験体表面に衝突する際の物理的な現象に起因する量と、酸性雨によりセメントペースト硬化体に変質して失われる量を合わせた量である。

降雨量と浸食量とは、模擬酸性雨の種類に関係なく非常に良好な直線関係が認められたことから、単位降雨量当たりの浸食深さ、つまり浸食速度として図6-2-2に示した。この図から、モルタルのW/Cの影響、模擬酸性雨のpHの影響を明確に把握することができる。

模擬酸性雨のpHが4.0以上の場合には、W/Cの大きい(品質不良の)モルタルの方が浸食速度はやや大きいものの、大きな差はなかった。つまり、わが国で通常認められる酸性雨のpH程度では、コンクリートの品質が悪くても(W/C: 80%, 100%), 浸食に与える影響はpH 5.6の降雨の場合と大差がないことを示すもの

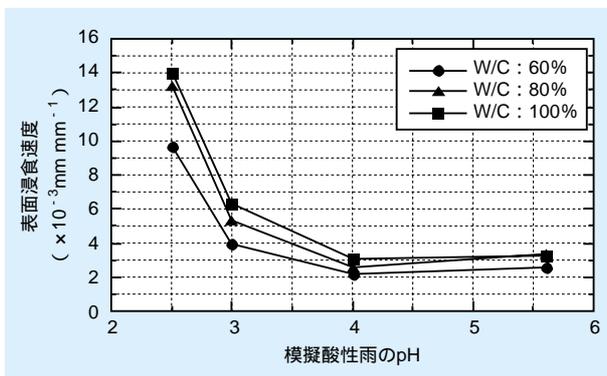


図6-2-2 模擬酸性雨のpHと表面侵食速度の関係

である。

浸食速度はpHが4.0を下回ると増加し始め、pH 3.0を下回ると急激に大きくなった。この領域では、モルタルの品質の影響も大きくなるが、pHの影響はさらに著しい。pH 3.0の場合の浸食速度は、pH 5.6に比較して、品質が通常モルタル(W/C: 60%)で約1.6倍、品質不良モルタル(W/C: 80%, 100%)で約2倍となった。pHが2.5になると、品質が通常モルタルで約3.8倍、品質不良モルタルで約4.3倍となった。降雨量10000 mmのときの浸食量は、pH 5.6の場合で0.3 mm程度、pH 2.5の降雨で1.0～1.4 mmと推定される。

本実験で得られたpHと浸食速度の関係をpHが変動する実際の降雨の場合に適用するとすれば、各pHの降雨量に浸食速度を乗じて、それらを積算することにより、表面浸食量の評価は可能と考えられる。

## 6-2-4 内部への影響について

試験体内部への影響は、組織の密実さ、品質の良さを表す指標として、単位体積当たりの細孔容積と主要な水和物であるCSH(Ca-Si-H<sub>2</sub>O系化合物)を測定して評価した。酸性雨の内部への進入により硬化体が分解して各種イオンが溶出し、組織が多孔質化することが予測された。

実験結果(図6-2-3)は、品質が不良なモルタルほど総細孔容積は大きい値となったが、模擬酸性雨に暴露されても、それらの値は初期値のまま経時的にはほとんど変化しなかった。むしろ、経時的に小さくなる傾向が認められた。別途実施したNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の測定結果から、酸性雨は内部へ浸透しているが、モルタルの微細構造へは悪影響を及ぼしていないことが示唆された。

さらに、セメントペースト硬化体の品質をより的確に評価するため、試験体の表層(5 mm)と内部(中央部5 mm)の2箇所から試料を採取しCSHを測定した(図6-2-4)。模擬酸性雨の影響は、pH 2.5の場合に明確に認められ、表層ほどCSHが多く分解されたが、pH 4.0とpH 5.6では採取場所による差はそれほど大きくなかった。むしろ、モルタルの品質(W/C)の影響が大きい。W/Cが100%と品質がかなり悪い場合は、降雨のみによりCSHの分解が進行した。

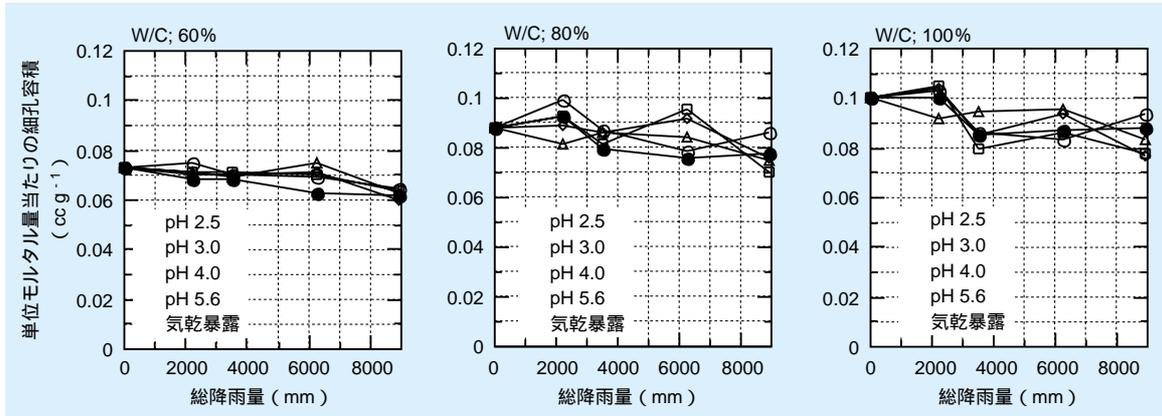


図6-2-3 総降雨量と試験体内部の総細孔容積

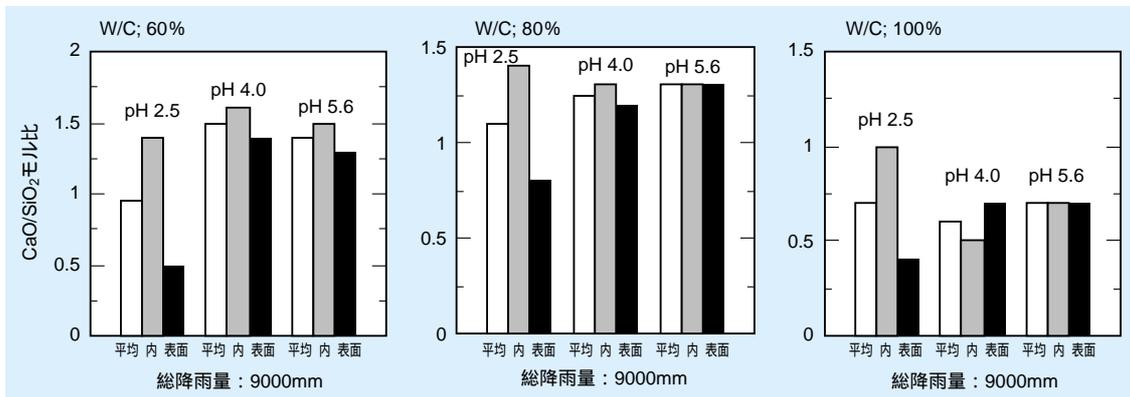


図6-2-4 C-S-Hの分析結果

本暴露実験から、モルタル内部への影響は次のように結論される。酸性雨のpHが3.0を下回る場合や、モルタルの品質が非常に不良の場合は、pH 5.6、W/C 60%の条件に比較して、セメントペースト硬化体の分解が顕著に生じる。しかし、pHが4.0以上、W/Cが80%以下ならば、酸性雨の影響はほとんどない。

### 6-2-5 曲げ強度に与える影響

模擬酸性雨に曝した面を引張り側として、試験体の曲げ試験を行った結果を図6-2-5に示す。ここではpH 5.6の場合を基準として強度変化を整理した。

曲げ強度は、モルタルの品質や模擬酸性雨のpHの違いにより、経時変化にわずかであるが差が生じた。W/Cが60%の場合は、降雨量が約9000 mmとなっても、pHにかかわらず曲げ強度比はほとんど変化しなかった。一方、W/Cが80%の場合は、曲げ強度比は経時

的にやや低下し、その割合はpHが低いほど大きくなった。すなわち、モルタルの品質が悪くpHが低い場合は、降雨量9000 mm程度で曲げ強度に若干の影響がでるものと考えられる。

6-2-4で述べたように、セメント硬化体のCSH分解の程度は内部より表層部で著しく、その傾向はpHが低いほど大きい。ここで述べた曲げ強度に対する影響は、そうしたCSH分解の結果と符合するものである。

### 6-2-6 表面状態（色調）について

降雨に起因するコンクリートの色調の経時変化は、一つの劣化事象と考えられる。色調の変化は、物理的、化学的な影響に比べて短期間で顕在化する現象であるため、他の要因を二次的要因を位置づければ、コンクリート構造物の性能に影響する一次的要因である。

図6-2-6は総雨量約9000 mm、試験日数1430日の時

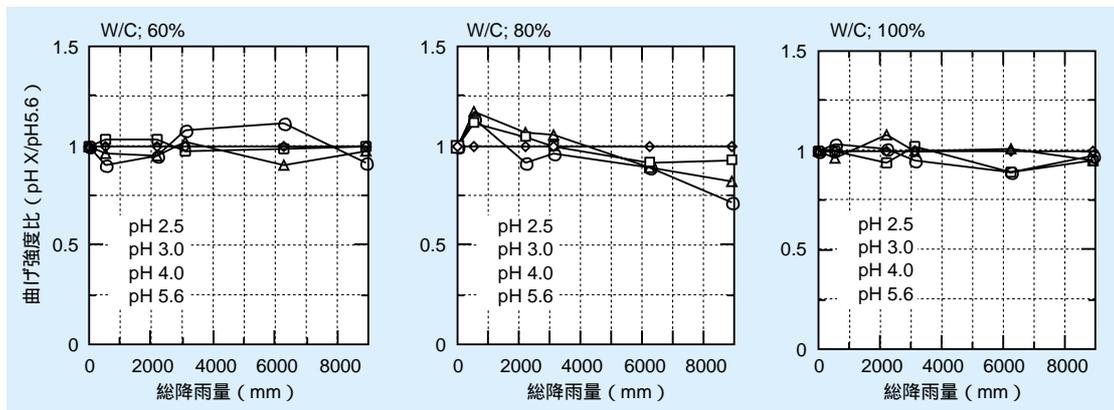


図6-2-5 総降雨量に伴う曲げ強度比の変化

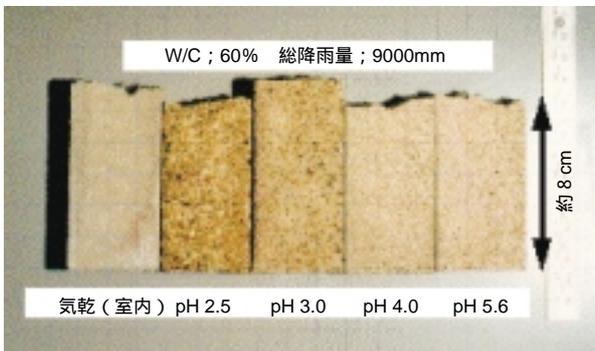


図6-2-6 各pHの条件での試験体表面の色調の相違

点の試験体 (W/C 60%) の外観を示した。室内に放置した試験体 (気乾) は、暴露開始時の外観とほとんど

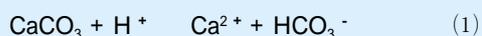
同じであった。一方、模擬酸性雨に暴露した試験体は、pHが5.6から低くなるにしたがい表面が赤茶けてきた。これは、モルタル中の鉄分 (Fe) が酸化されて褐色化したものと考えられる。既往の研究<sup>(7)、(8)</sup>によれば、Feは酸性環境下であっても溶出しにくく、残留と濃縮が顕著になり、酸化とともに赤褐色化することが確認されている。

pHが5.6、4.0では、色調は気乾状態とそれほど大きく相違しなかったが、pHが3.0、2.5ではかなり色濃くなった。このような状態は、降雨量2100 mm時点で現れており、影響の顕在化は早い。しかし、実際の降雨pHのレベル (pH 4.0以上) では、色調変化は緩慢に進行する。

## コラム5 コンクリートのつらら現象

ひび割れの入ったコンクリートの表面に、白色の液ダレ痕のようなものが付着していることがある。それは降雨の作用により生成した炭酸カルシウムの白色沈澱である<sup>(3)</sup>。

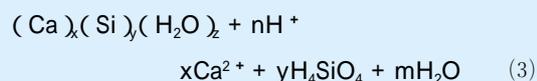
ひび割れ内の表層部は、セメント水和物（Ca(OH)<sub>2</sub>）と空気中の炭酸ガスの反応により生成したカルサイト（CaCO<sub>3</sub>）の膜で覆われている。そこに酸性雨が浸透すると、式(1)の反応が生じる。



雨水がひび割れ内を浸透する間に、雨水はCa<sup>2+</sup>とHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>を含むかなり濃厚な溶液になる。やがて雨水がひび割れのそとに出ると、大気に開放されるため脱炭酸が起り、CaCO<sub>3</sub>が析出する（式(2)）。つまり、ひび割れが発生しているコンクリート部材の下部で、円形状の結晶塊が生成し、徐々に成長することによりストロー状のつららとなる（写真1）。



同時に、コンクリート空隙内のpH低下により、セメント水和物であるCa-Si-H<sub>2</sub>O系化合物の一部が溶解する（式(3)）。ここで生成したH<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>がゲル化し、ひび割れを閉塞することがあり、つららの形成を律速する要因となる。



実構造物に生じるつららの成長は、ひび割れ幅、環境温度、湿度、風、日射などの影響を受けるので、降雨の影響を評価するのは難しい<sup>(9)</sup>。また、純水やアルカリ水によってもつらら現象の起ることが明らかにされており、必ずしも酸性雨に特定される現象ではないが、pHが低い雨水の方が成長を促すことも確認されている<sup>(10)、(11)</sup>。



写真1 コンクリートつらら