

論文 酸性雨が初期欠陥を有する超高性能コンクリートに及ぼす影響

原田和樹^{*1}・出頭圭三^{*2}・上田 洋^{*3}・牛島 栄^{*4}

要旨: コンクリート試験体に、初期欠陥として模擬ひび割れおよび両引き試験によるひび割れを導入し、pH3.0の模擬酸性雨を用いた散水と乾燥の繰り返しを与えた。その結果、吸水量や表面粗度の値などから、初期欠陥の存在によって酸性雨がコンクリートに浸透しやすくなり、またその傾向は、超高性能コンクリートに比較し、普通コンクリートの方が顕著であること、酸性雨によるコンクリート表層部の劣化層の厚さや、劣化速度は、普通コンクリートと超高性能コンクリートでは異なることがわかった。

キーワード: 超高性能コンクリート、酸性雨、初期欠陥、ひび割れ幅

1. はじめに

コンクリート構造物の建設に際して、その長寿命化を計ることは、極めて重要なことである。

超高性能コンクリート（以下、S.Q.Cと略記）は、高強度性および自己充填性を有することに加え、高耐久性を保持することが目標とされている¹⁾。著者らの目指す高耐久性とは、特別な補修・補強を行わなくとも100年程度の耐用年数を有し、かつ適正な維持管理下においては500年の耐用年数を確保することである。したがって、S.Q.Cの500年寿命を論じる上で、近年深刻な社会問題となりつつある「酸性雨」²⁾に対する抵抗性など、近未来における環境の変化を見据えた新しい検討が必要となってくる。また、特に欠陥部を有するコンクリート構造物に酸性雨が作用した場合には、その悪影響を受けやすくなると指摘されている³⁾。

そこで、本報では、まず酸性雨の現状を整理した上で、S.Q.Cに初期欠陥を与えた場合の酸性雨の浸透性状などを、模擬酸性雨散水と乾燥の乾湿繰り返し試験を実施することによって、実験的に検討したので報告する。

2. 酸性雨の現状

酸性雨とはpH5.6以下の雨水のことで、硫黄酸化物(SO_x)や窒素化合物(NO_x)などの大気汚染物質が大気中で硫酸や硫酸などに変化し、これが雨水に取込まれることによって生じる²⁾。

国内の雨水のpHは年々徐々に低下し、現在ではpH4.6程度であると報告されている²⁾。我国において、大気汚染物質の放出が法的に規制されているにも拘わらず、雨水のpHが年々低下している理由は、中国の急速な工業化に大きく影響を受けるとされる⁴⁾。すなわち、中国は世界有数の石炭産出国であって、ここで放出される大量のSO_xが偏西風によって我国に運ばれ、雨水に取り込まれているためと考えられている。さらに、今後のアジア諸国との工業化に伴う経済発展も同様に、我国の酸性雨問題に少なからず悪影響を与えると考えられている⁴⁾。

3. 実験概要

3.1 試験体の作製

(1) 使用したコンクリート

SQCの使用材料および配合を表-1および表-2

*1 青木建設 研究所 材料研究室 研究員 工修（正会員）

*2 前田建設工業 技術本部 技術研究所 部長 工博（正会員）

*3 鉄道総合技術研究所 技術開発事業本部 材料技術開発推進部 技師 理修（正会員）

*4 青木建設 研究所 副所長 工博（正会員）

に示す。なお、表-2ではフレッシュおよび硬化コンクリートの性状も併せて示した。ただし、表-2のOPC29は比較用に用いた普通コンクリートである。S.Q.Cは目標とする配合強度を3水準に設定し、それぞれの配合強度に応じた結合材の選定を行った¹⁾。なお、S.Q.Cの強度管理材齢は56日とした。

(2)試験体とその水準

試験体の形状および寸法は図-1に示す通りであり、その水準は表-3の通りである。試験体は、打設後1週間で脱型した後、1週間の湿布養生に加え6週間の気中

養生(20°C, R.H.60%)を行い、後述する散水試験を実施した。なお、材齢5週に達した時点で、この試験体に以下の2種類の方法で初期欠陥としてのひび割れを導入した。

すなわち、図-1の鉄筋部両側を治具で固定し、両引試験によって導入する方法で作製した試験体と、所定の厚さのプレートを型枠に設置した状態でコンクリートを打設し、硬化後、そのブ

表-1 使用材料

| 材料名 | 種類など | 記号 |
|------|---|-----|
| セメント | 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³) | OPC |
| | 低熱ポルトランドセメント(密度3.22g/cm ³) | LC |
| | 高流動・高強度コンクリート用ピーライトセメント(密度3.20g/cm ³) | BL |
| 混和材 | フライアッシュ(密度2.11g/cm ³) | FA |
| | 高炉スラグ微粉末(密度2.89g/cm ³ , 比表面積5,830cm ² /g) | BS |
| | 高炉スラグ超微粉末(密度2.91g/cm ³ , 比表面積15,000cm ² /g) | BSS |
| 細骨材 | シリカフーム(密度2.20g/cm ³ , 比表面積200,000cm ² /g) | SF |
| | 川砂(表乾密度2.54g/cm ³ , 吸水率2.70%, FM2.61) | S |
| | 粗骨材 碎石2005(表乾比重2.65, FM6.52, 実積率60.1%) | G |
| 混和剤 | ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 | SP |

表-2 コンクリートの配合

| 配合名 | 結合材の種類 | 配合強度(N/mm ²) | 目標値 | | 水結合材比(%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | コンクリートの性状 | | | |
|-------|--------|--------------------------|------------------|-------------------|----------|---------|-------------------------|------|-----------|--------------------|-------------------|------------------|
| | | | SF ¹⁾ | Air ²⁾ | | | 水 | セメント | 混和材 | SF | Air ³⁾ | 強度 ³⁾ |
| LC72 | LC | 72 | 60 | 4.0 | 38.6 | 52.9 | 165 | 472 | — | 56.8 | 4.3 | 70.6 |
| | | | | | 34.9 | 50.5 | | 378 | 95 | 58.3 | 4.2 | 67.2 |
| | | | | | 41.5 | 52.9 | | 199 | 199 | 61.8 | 3.7 | 67.2 |
| BL96 | BL | 96 | 65 | 3.5 | 32.6 | 52.3 | 165 | 506 | — | 62.0 | 4.5 | 95.5 |
| | | | | | 25.7 | 49.6 | | 578 | 64 | 62.5 | 3.0 | 122.2 |
| | | | | | 22.0 | 47.2 | | 675 | 75 | 68.8 | 3.1 | 112.6 |
| OPC29 | OPC | 29 | 12 ⁴⁾ | 4.5 | 60.0 | 45.1 | 160 | 267 | — | 11.5 ⁴⁾ | 4.4 | 39.7 |

1)スランプフロー(cm), 2)空気量(%), 3)材齢56日の圧縮強度(N/mm²), 4)スランプ(cm)

表-3 試験体の水準

| 配合名 | かぶり(mm) | ひび割れ幅 | | | | | | |
|-------|---------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | なし(0mm) | 導入ひび割れ | 模擬ひび割れ | 0.2mm | 0.5mm | 0.2mm | 0.5mm |
| LC72 | 30 | ○ | ○ | — | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 50 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| FA72 | 30 | ○ | ○ | — | — | — | — | — |
| | 50 | ○ | ○ | — | ○ | ○ | ○ | ○ |
| BS72 | 30 | ○ | ○ | — | — | ○ | ○ | ○ |
| | 50 | ○ | ○ | — | — | — | — | — |
| BL96 | 30 | ○ | ○ | — | — | — | — | — |
| | 50 | ○ | ○ | — | — | — | — | — |
| SF120 | 30 | ○ | ○ | — | — | — | — | — |
| | 50 | ○ | ○ | — | — | — | — | — |
| BS120 | 30 | ○ | ○ | — | — | ○ | ○ | ○ |
| | 50 | ○ | ○ | — | — | ○ | ○ | ○ |
| OPC29 | 50 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

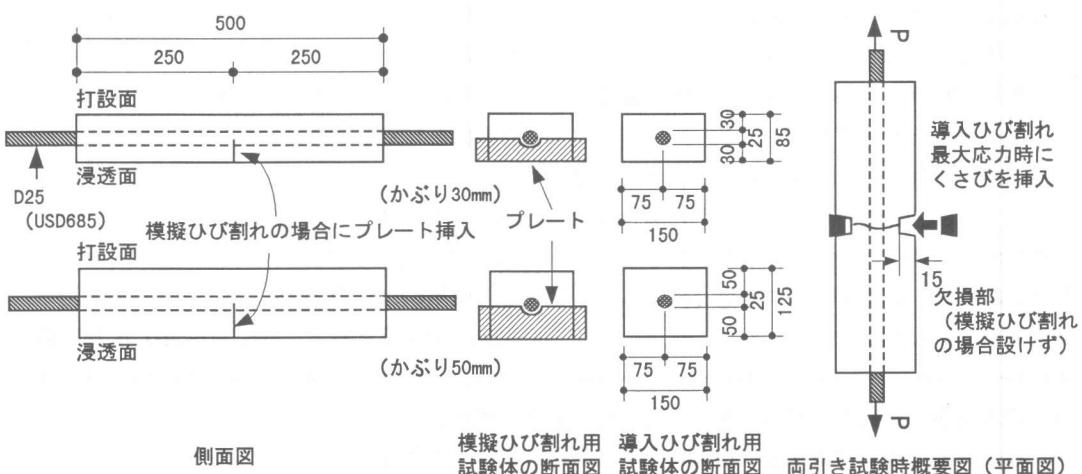


図-1 試験体の形状寸法

レートを抜き取ってひび割れを作製する方法の2種類である。以降では、前者の方法でひび割れを導入した試験体を導入ひび割れ試験体、後者の試験体を模擬ひび割れ試験体と呼ぶ。

なお、図-1において示されている試験体側面の欠損部（ひび割れ誘発目地）は、導入ひび割れ試験体にのみ設けたもので、ひび割れ導入後に応力を解放する前に、この欠損部にステンレス製のくさびを挿入し、応力解放後のひび割れの閉口を防いだ。その結果、除荷後のひび割れ幅は、表-3の水準（目標値）に対して、 $\pm 0.05\text{mm}$ の精度で調整することができた。しかし、特にSF120のような超高強度の試験体にひび割れを導入する際には、鉄筋応力の最大値は約 450N/mm^2 まで増大し、この間に試験体端部と中央部の中間や縦ひび割れなど所定外のひび割れの発生が部分的に認められた。これら所定外のひび割れに対しては、その表面部をひび割れに沿ってエポキシ樹脂を用いて幅 $1\sim 2\text{cm}$ 程度の帯状にシールした後、試験に供した。なお、両引試験時のひび割れ幅の測定はパイゲージを用いて行った。

以上のようにしてひび割れを導入した後、打設時底面以外の全ての面をエポキシ樹脂でシールし、打設時底面を酸性雨浸透面（試験面）とした。また、鉄筋は、端部から 1cm 程度を残して切断し、残った露出部には防水処理を施した。

3.2 模擬酸性雨と散水方法

環境庁のモニタリングでは、国内における酸性雨のおおよその成分組成の平均値として SO_4^{2-} が $2.56\text{ }\mu\text{g}/\text{ml}$ 、 NO_3^- が $1.21\text{ }\mu\text{g}/\text{ml}$ 程度であると報告している⁵⁾。そこで本実験では、模擬酸性雨として、硫酸と硝酸の濃度を2:1とした混合溶液を使用した。この混合溶液はpHを3.0とし、散水中はポンプを用いて溶液を循環させながら試験体に供給した。ただし、散水中にもpHが常に3.0を保つように、薬注ポンプを用いてpH制御を行った。また、4サイクル毎に新しい混合溶液に交換して試験を実施した。

試験サイクルは、1日間（24時間）連続して

散水した後、恒温恒湿室において 20°C 、R.H.60%の条件で6日間乾燥させ、これを1サイクルとした。散水時の散水量は装置の性能から定まり、試験体一本（試験面 750cm^2 ）当たり $3.3\text{ L}/\text{min}$ 程度であった。これに対し、実際の降雨の条件は、降水間隔や降水量などがその都度異なる。このため、酸性雨浸透（吸水）の観点から見た場合の、実環境における降雨の条件と本実験における散水条件との相関を正確に把握することは難しい。これについては、本実験と並行して行っている酸性雨に関する屋外暴露実験の結果が得られた段階で、酸の濃度も含めて、定量的に評価する予定である。

なお、導入ひび割れ試験体と模擬ひび割れ試験体とでは打設日が異なっており、本報では、前者については24サイクルまでの、後者については16サイクルまでの試験結果について報告するが、実験はいずれの試験体の場合も48サイクル（約1年間）まで実施する予定である。

3.3 測定項目

試験期間中は各サイクル毎に模擬酸性雨の消費量の測定を行った。この消費量は、薬液タンク内の混合溶液の水位を散水前後において測定し、その差から求めた。また、1サイクル経過前後および8サイクル毎に、試験体表面の色調、散水前後の質量変化率、表面粗度および鉄筋自然電位の測定を実施した。

試験体の表面粗度の測定では、非接触型レーザー変位計を用いて、散水後の試験体表面の凹凸を調べた。また、自然電位の測定に際しては、散水直後の十分湿潤状態にある試験体に対し、かぶりコンクリート部を長手方向に等間隔で5カ所測定した。なお、試験終了後には、内部鉄筋の腐食状況や中性化深さの測定および生成物の分析などを実施する予定である。

4. 実験結果と考察

4.1 酸性溶液消費量および試験体表面の色調

各サイクル毎の模擬酸性雨消費量（以降、酸消費量と言う）を図-2に示す。酸消費量は5サ

イクル程度までは急激に減少し、その後はほぼ同程度の消費量となっている。

また、表面の色調も1サイクル直後に淡黄色に変化した後、その後大きな変化は認められていない。これらの傾向は既往の文献⁶⁾に示されている傾向とほぼ同様であり、コンクリートが酸の作用を受けた場合、酸との接触当初は表層部において急速に水酸化カルシウムなどの消失が進むが、その後は緩慢になっていくことを示唆している。ただし、初期欠陥の有無やコンクリート品質の相違によって、その程度は幾分異なることが予想される。しかし、本実験では、装置の都合上、各水準毎の試験体について酸消費量を測定することができなかったので、以降では、各試験体の吸水量や質量減少率、あるいは表面粗度などの値を確認することによって、上述の事柄について検討を加える。

4.2 試験体の質量変化

試験体の質量変化率を図-3および図-4に示す。これらの縦軸は、各測定サイクルにおいて散水直前（乾燥時）の質量を測定し、それを初期値（散水開始直前）で除して示した。

まず、図-3のかぶりを30mmとしたS.Q.Cを用いた導入ひび割れ試験体の試験結果に着目すると、初期欠陥の有無による質量変化率の相違が認められる。すなわち、ひび割れなしの試験体では、1サイクル目の乾燥時（2サイクル目の散水直前）から、徐々に質量が減少しているのに対し、初期欠陥を有する導入ひび割れ試験体は、8サイクル目まで質量が一旦増加あるいは同程度となっている。これは、欠陥を有するコンクリート構造物に酸性雨が浸透した場合、乾燥条件にもよるが、その後乾燥を与えてしづらくは酸性雨が内部に滞留することを示唆する結果であると思われる。また、8サイクル以降で質量が減少するのは、酸性雨による表層部の浸食に伴う脆弱層の消失が影響しているものと推察される。

次に、図-4に示したかぶりを50mmとした試験体の試験結果に着目すると、配合の相違によ

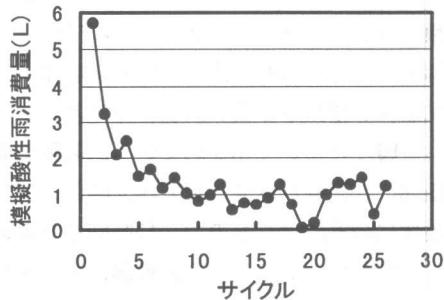


図-2 各サイクル毎の模擬酸性雨消費量

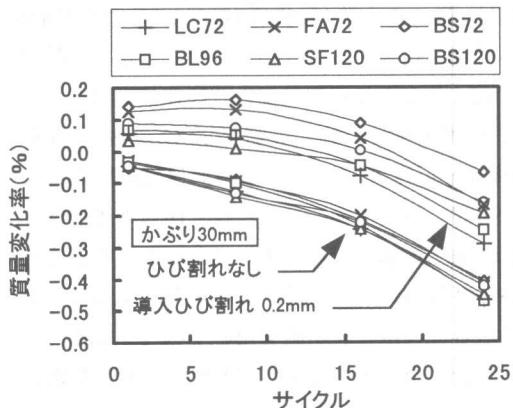


図-3 かぶりを30mmとした導入ひび割れ

試験体の質量変化率の経時変化

凡例：配合名—導入ひび割れ幅(mm)

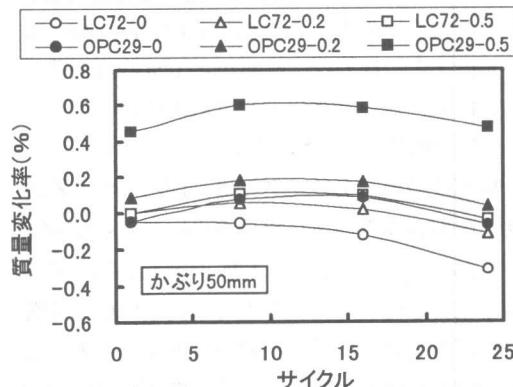


図-4 かぶりを50mmとした導入ひび割れ

試験体の質量変化率の経時変化

る質量変化率の相違が明瞭に現れている。すなわち、S.Q.C（配合 LC72）に比較して、普通コンクリートでは吸水しやすい傾向にあることが

示されている。また、その傾向は、特に導入ひび割れ幅が大きくなるに伴い顕著に現れている。

一方、模擬ひび割れ試験体の試験結果では、若干異なる傾向が得られた。すなわち、初期欠陥の有無により、吸水量の相違は認められるが、ひび割れ幅の相違による吸水量の相違は認められない（図-5参照）。つまり、模擬ひび割れの場合、ひび割れ面の性状が実際のひび割れとは異なり、型枠に接していたようなきれいな状態にあるので、ひび割れ幅の大小が劣化要因としての影響度合いと必ずしも一致しない。なお、図-5の試験結果は、散水1サイクル前後の吸水量を測定したもので、酸の浸食に伴う表層部の消失は、ほとんど生じていないと思われる所以、この吸水量を絶対値として理解しても差し支えないものと考える。

4.3 試験体の表面粗度の測定

ここでは、酸性雨の作用によってコンクリートの表層部がどの程度劣化したのかを、表面の洗い出された層（以下、消失層と言う）の厚さを測定することによって検討する。

図-6にOPC29の、図-7にS.Q.Cの一例としてBS120の試験体の表面粗度を示す。これらの図の縦軸は、各試験体表面の0サイクル時からの下がりを、試験体長手方向に、ある特定の線上で測定したものである。

両者の散水1サイクル直後の消失層の厚さに着目すると、有意な差は認められず、またそれらの厚さも極めて小さい。しかし、8サイクル以降では、OPC29の消失層は、BS120に比較して大きくなっている。また、BS120では、1サイクル直後と8サイクル直後の消失層の厚さに大きな相違がないのに対し、OPC29ではその差が大きくなってしまっており、配合の相違に伴う劣化速度の相違が伺える。

以上の試験結果から、S.Q.Cは普通コンクリートに比較して、酸性雨に対する抵抗性に優れていると言うことができ、また、前章の試験結果も併せて考えると、ひび割れ面からの浸食も生じることから、その差は初期欠陥を有する場

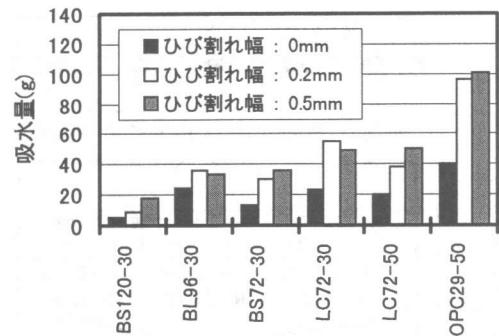


図-5 模擬ひび割れ試験体の1サイクル前後の吸水率

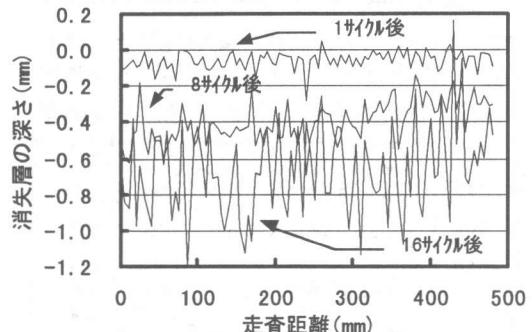


図-6 試験体 OPC29 の表面粗度

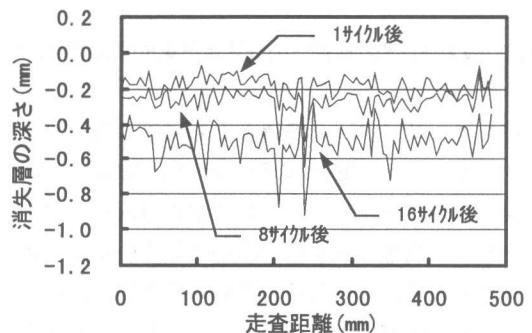


図-7 試験体 BS120 の表面粗度

合ほど顕著になることが予想される。

4.4 鉄筋の自然電位

24サイクル経過時の導入ひび割れ試験体の鉄筋自然電位を図-8に示す。SF120の試験体を除き、配合、かぶりおよびひび割れの幅や導入方法の相違に関わらず、全ての試験体の鉄筋電位は-50~-100mVの範囲にあり、散水直後から24サイクルまで安定した値を示していた。

一方、SF120の試験体は、図-9に示すように、

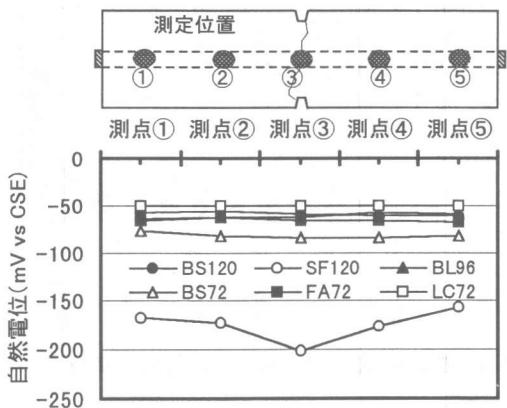


図-8 24サイクル経過時の導入ひび割れ試験体の鉄筋自然電位(かぶり30mm, ひび割れ幅0.2mm)

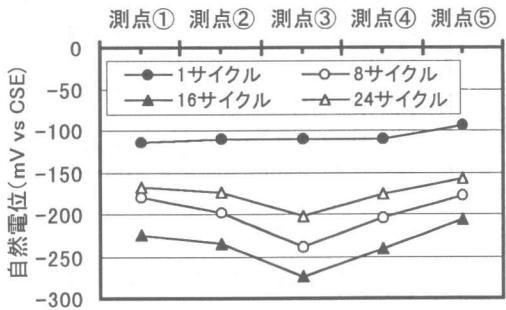


図-9 導入ひび割れ試験体の鉄筋自然電位(配合SF120)

概して、サイクルの経過とともに卑な電位へシフトしている。SF120の導入ひび割れ試験体は、先に述べた理由により、ひび割れ導入時にコンクリート内部に多くの欠陥が生じていることが予想される。このため、それらの欠陥部に酸が浸入し、鉄筋周辺部のコンクリートのpHが変化したことによって、内部鉄筋に変化が生じた可能性も否定できない。しかし、先の質量減少率や吸水量の測定結果からは、酸の浸透を示すような試験値は認められていない。また、かぶり部分のコンクリートのpH勾配に起因する液間電位差⁷⁾も、自然電位測定時の試験体が飽水状態にあったことから生じていないものと思われる⁸⁾。この試験体については、試験終了後に鉄筋を取り出し、腐食状況を目視で観察した後、再度考察したい。

5.まとめ

本実験の結果をまとめると以下のようである。

- (1)ひび割れの存在によって、コンクリートは酸性雨を吸水しやすい状態となる。また、その傾向は、超高性能コンクリートに比べ、普通コンクリートの方が顕著である。
- (2)導入ひび割れの場合は、その幅が大きくなるほど酸性雨の浸入を容易にするが、模擬ひび割れの場合には、ひび割れ幅の相違が酸性雨の浸入に及ぼす影響は小さい。
- (3)模擬酸性雨によるコンクリート表層部の劣化層の厚さや、劣化速度は、普通コンクリートと超高性能コンクリートでは異なる。

【謝辞】

本実験は、超高性能コンクリート構造物開発普及協会耐久性部会各社の共同で実施した。実験の計画・実施に際して東京大学岡村甫教授、前川宏一教授、元東京大学助教授小澤一雅氏、並びに(財)鉄道総合技術研究所のご指導を頂きました。ここに謝意を表します。

【耐久性部会構成会社】(50音順)

青木建設、奥村組、国光製鋼、熊谷組、サンフロー、新日本製鐵、住金鹿島鉱化、住友大阪セメント、太平洋セメント、竹本油脂、鉄建建設、長大、鉄道総合技術研究所、東亜建設工業、戸田建設、飛島建設、間組、フジタ、不動建設、ポリス物産、前田建設工業、三井建設、「(株)、(財)省略」

参考文献

- 1)田中 齊ほか:超高性能コンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.1, pp.227-232, 1998.7
- 2)川名英之:日本の公害—第12巻 地球環境の危機—、緑風出版、1995.11
- 3)小林一輔、宇野祐一:酸性雨によるコンクリート構造物の劣化機構に関する考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13, No.1, pp.615-620, 1991.6
- 4)村野健太郎:地球規模の酸性雨問題、雨水技術資料、第21号, pp.9-18, 1996.6
- 5)環境庁地球環境部監修:酸性雨—地球環境の行方—、中央法規出版、1997
- 6)セメント協会耐久性専門委員会: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)、セメント協会、セメント・コンクリート、No.569, pp.25-35, 1994.6
- 7)小林豊治、米澤敏男、出頭圭三:コンクリート構造物の耐久性シリーズ3 鉄筋腐食の診断、森北出版、pp.86, 1993
- 8)佐々木孝彦、飯島 亨、立松英信:自然電位による鉄筋腐食判定に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.801-806, 1996.6