

論文 酸性雨による鉄筋コンクリート構造物の劣化促進に関する 実験的研究

里 隆幸*¹・武若耕司*²・赤木琢也*³

要旨：酸性雨が鉄筋コンクリートの中性化や鉄筋腐食に及ぼす影響および、表面被覆材による防止効果を促進実験により検討した。その結果、酸性雨は特にコンクリートの中性化や鉄筋腐食の初期の進行に影響を及ぼすこと、既に中性化しているコンクリートではさらに中性化の速度が速くなり、鉄筋の腐食傾向も高くなること、ひび割れ等の欠陥がある場合にはひび割れ部分の中性化と鉄筋腐食を促進させること、表面被覆材は酸性雨によるコンクリートの劣化を有効に防止できることなどが明らかとなった。

キーワード：酸性雨、鉄筋コンクリート、中性化、鉄筋腐食、表面被覆材

1. はじめに

地球的規模の環境問題の1つとして酸性雨（pH 5.6以下の雨）の問題がある。この雨は、湖沼や河川の酸性化による無生物化や森林を枯らすなどの環境破壊を引き起こすばかりでなく、最近では、人体への影響も懸念されている。また、ヨーロッパなどでは、石像などの歴史的建造物の劣化の進行もこの酸性雨が大きく関わっていると報告されている。本研究は、上記酸性雨の影響のうち特に建造物への影響に着目し、とりわけ高アルカリ性の材料であるコンクリートを使用した構造物に及ぼす酸性雨の影響について検討を行うものである。

これまでの研究によると、コンクリートは、pH 3～5程度の弱酸では、品質に配慮さえすれば劣化速度は小さいといわれている¹⁾。しかし、酸性雨の問題は、不特定の既存構造物に影響を与える。したがって、酸の影響に対して特別な配慮がなされていない一般の構造物、中でも耐久性が考慮されないまま建設されたことから昨今問題となっている高度成長期のコンクリート構造物では、この酸性雨による劣化問題が無視できない状況も懸念される。また、最近では、景観設計の観点から構造物の美観確保も重要となっており、構造物の汚れの問題と酸性雨の関係も把握しておく必要がある。以上の点に鑑み、著者らは、一昨年より暴露実験および室内実験によるコンクリート構造物への酸性雨の影響について検討を開始した。ここでは、この一連の研究のうち、酸性雨がコンクリートの中性化およびこれに伴う鉄筋腐食に及ぼす影響について、促進実験により検討を試みた結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

コンクリートには、セメントとして普通ポルトランドセメント、細骨材および粗骨材としてそれぞれ富士川産川砂（比重：2.62、吸水率1.78%）、鹿児島谷山産砕石（比重2.68、最大寸法13mm）を使用し、表-1の配合のものをを用いた。供試体は、図-1に示す形状で、寸法φ100×200mmの円柱コンクリート供試体の上下に直径10mmの異形鉄筋(SD35)を同一かぶり厚さで1本ずつ配筋し、

*1 大日本塗料(株) 新規事業部副主事(正会員)

*2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科、工博(正会員)

*3 鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻

これを高さに対して半分
に切断したものである。

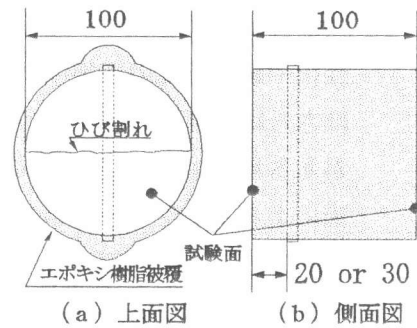
供試体作製の手順を図
一 2 に示した。脱型後、
28日間20℃の水中で養生
を行った後切断を行い、

続いて、後述する初期中性化を容易にするため、実験室内
に30日間放置し乾燥させた。この供試体に割裂試験により
鉄筋に対し垂直方向のひび割れを所定のひび割れ幅になる
よう導入し、試験面となる供試体の上下2面を除く全側面
をエポキシ樹脂でシールした。さらに、一部の供試体につ
いては、ある程度中性化が進行したコンクリートにおける
酸性雨の影響を検討するため炭酸ガス（以下CO₂と略す）濃
度10%の槽内で所定の中性化深さとなるように中性化促進を
行った（以下、この過程を初期中性化と称す）。また、こ
の初期中性化を行った供試体の一部には、既存構造物の補
修を想定して、表一 2 に示す4種類の表面被覆材を図一 1
の試験面にそれぞれ塗布し、実験に供した。

表一 1 供試体のコンクリート配合

粗骨材 最大寸 法(mm)	目標ス ランプ (cm)	目標空 気量 (%)	水セメ ント比 (%)	細 骨 材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				高性能A E減水剤 *
					W	C	S	G	
13	8	4	50	47	360	180	820	903	C×1%
			70	49	257	180	897	912	C×1%

*オキシカルボン酸系高性能AE減水剤



図一 1 供試体の形状・寸法(軸:mm)

表一 2 表面被覆材の種類及び仕様

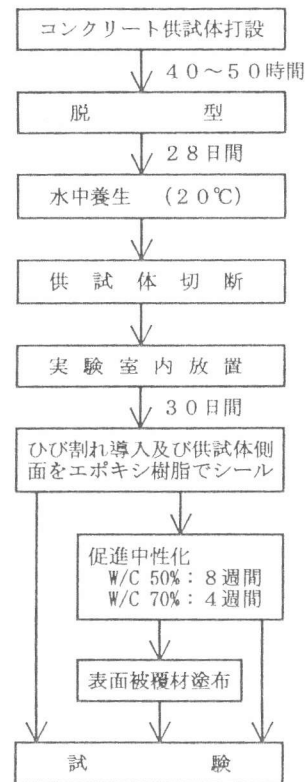
塗装仕様	A種塗装系 [道路橋の塩害対策指針(案)]	B種塗装系	厚膜柔軟型エポ キシ樹脂塗装系	シラン系浸 透型撥水剤
略 称	A 種	B 種	柔軟エポキシ	撥 水 剤
プライマー	エポキシ樹脂プライマー			—
パ テ	エポキシ樹脂パテ			—
中 塗	エポキシ 樹脂塗料	柔軟型ポリウ レタン樹脂塗料	厚膜柔軟型エポ キシ樹脂塗料	シラン系浸 透型撥水剤
上 塗	ポリウレタ ン樹脂塗料	柔軟型ポリ ウレタン樹脂塗料		シラン系浸 透型撥水剤
総合膜厚 (μm)	90	90	530	—

2. 2 実験方法

酸性雨がコンクリートの中性化や鉄筋腐食等におよぼす影響
を促進試験により検討するため、以下の試験方法を考案した。

すなわち、上記の各供試体に対して、実際の酸性雨の化学組成

を考慮したpH3.5の弱酸性溶液（以下酸性雨溶液と称す）中への浸漬1日とその後の乾燥3日を1
サイクルとして繰り返し、しかも、この3日間の乾燥をCO₂濃度5%の槽内で行うことで中性化の促
進を図るものである。この結果を浸漬液として水道水を用いた場合と比較することによって、酸
性雨の影響を検討した。表一 3 に酸性雨溶液の組成を示す。この組成は、活火山である桜島が近
くに在るため火山性酸性雨の影響を頻繁に受ける鹿児島市周辺の降雨のイオン組成を参考にした
ものである。浸漬液は、浸漬を繰り返すごとに交換し、浸漬前後のpH値を測定することで供試体



図一 2 供試体の作製手順

から浸漬液に溶出した水酸イオン量も算出した。実験供試体の要因と水準を表-4に示した。なお、これらの供試体の内、目標ひび割れ幅0.3mmのものについては、8サイクルおよび30サイクルの時点で解体調査を行った。ここではこの結果を中心に報告する。一方、目標ひび割れ幅0.1mmの供試体については、鉄筋の自然電位測定から鉄筋腐食にまで至っていないと判断されたため、供試体の解体調査は行わず引き続き実験を継続中である。

3. 実験結果および考察

3.1 中性化の進行について

コンクリートの中性化の判定はフェノールフタレイン法により行い、試験面の中性化深さ(図-3(a)参照)、ひび割れ面の中性化の進行程度(同図(b)参照)およびひび割れ面からコンクリート内部への中性化程度(同図(c)参照)を調べた。

図-4に試験面の中性化深さの結果を示した。まず、無塗装で初期中性化の無い場合について見ると、8サイクルまでは、水セメント比の如何によ

らず、酸性雨溶液に浸漬した供試体の方が水道水浸漬の場合に比べ若干中性化が深くなっていたが、30サイクル目では浸漬液の違いによる中性化深さの明確な違いは認められなくなっていた。また、無塗装で初期中性化のある場合についても、同様に、8サイクルまではいずれの水セメント比の場合にも中性化速度におよぼす酸性雨の影響が現れていたが、30サイクルの時点ではむしろ水道水の方が中性化が深くなる傾向が見られた。

表面被覆供試体では、A種あるいは撥水剤を塗布したものでは、30サイクルの試験期間中に全体的にわずかながら中性化が進行する傾向が見られたが、B種や柔軟エポキシを塗布したものでは、かえって未中性化領域から中性化領域へのアルカリ分の拡散が原因と考えられる中性化深さの減少傾向が観測される場合もあり、いずれの表面被覆材についても明らかな中性化防止効果が確認された。なお、表面被覆材ごとの比較では、柔軟エポキシが最も中性化防止効果が高く、次いでB種、A種、撥水剤の順であった。また、これまでのところ、いずれの表面被覆材についても酸性雨の影響は現れていなかった。

図-5に、ひび割れ幅0.3mmの初期中性化供試体における促進試験30サイクル後のひび割れ面の中性化深さを示した。水セメント比の違いにかかわらず無塗装供試体では、ひび割れ面は全面にわたって中性化していたが、撥水剤以外の表面被覆供試体では、いずれもひび割れ面の中性化深さはせいぜい20mm程度までであり、ここでも塗装の効果が認められた。なお、この表面被覆供試体のひび割れ面の中性化は、上述した試験面での中性化程度の進行を考慮すると、初期中性化

表-3 酸性雨溶液の組成

pH	混入量 (mg/l)		
	HCl	H ₂ SO ₄	HNO ₃
3.5	1.44	7.76	1.83

表-4 促進実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	50, 70
かぶり (cm)	2, 3
目標ひび割れ幅(mm)	0.1, 0.3
初期中性化深さ(mm)	0, 5
浸漬液	酸性雨溶液, 水道水
表面被覆材	A種, B種 柔軟エポ, 撥水剤

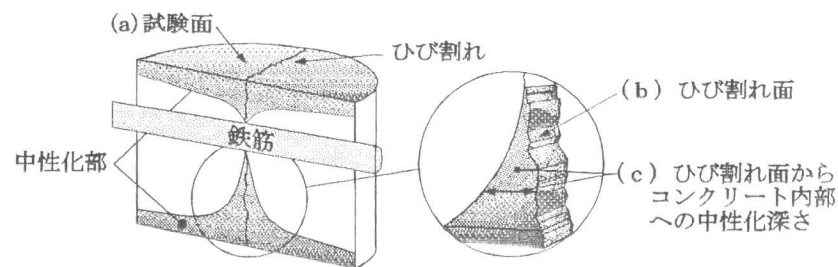


図-3 中性化深さおよび中性化面積の測定箇所

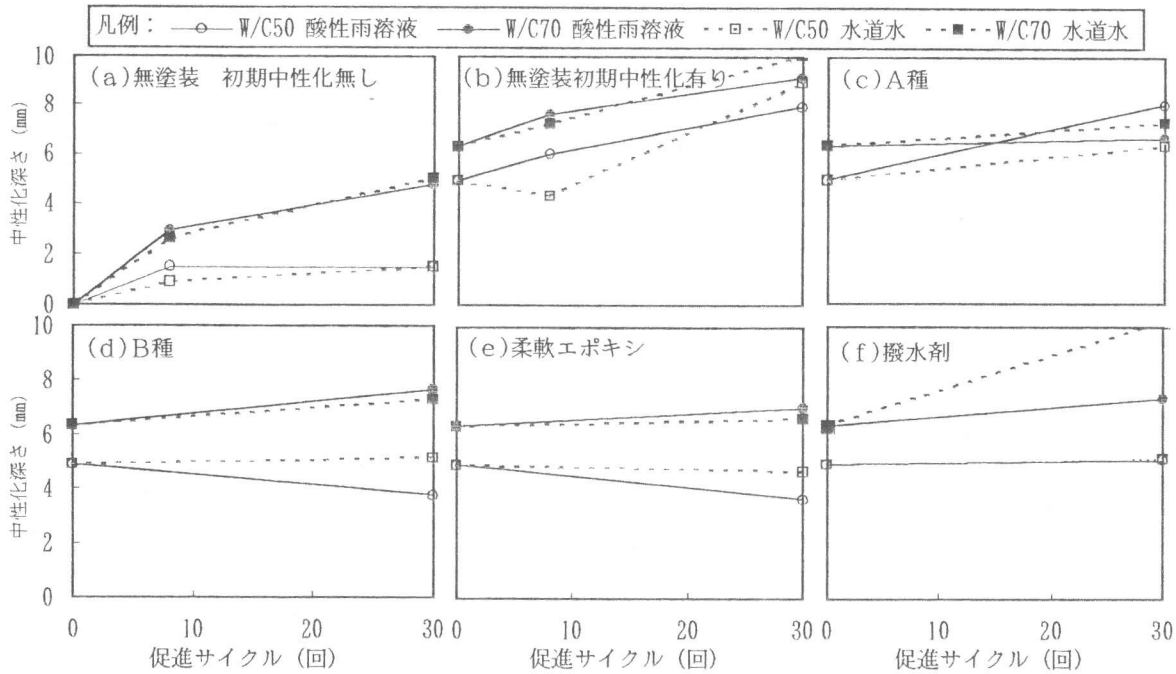


図-4 試験面の中性化深さの結果

の時点で生じたものであり、その後の進行はほとんどなかったものと思われる。一方、撥水剤塗布の供試体では、無塗装供試体同様ひび割れ面は全面にわたって中性化しており、撥水剤はひび割れ部分の中性化防止には効果が無いことが確認された。

図-6、7には、ひび割れ面における中性化の進行が著しい無塗装および撥水剤塗布試体について、ひび割れ面からコンクリート内部への中性化の進行程度に関する検討結果を示した。これらの図から酸性雨の影響を見ると、水セメント比にかかわらず、初期中性化の無い供試体では、水道水浸漬の方が酸性雨溶液浸漬の場合に比べ、かえってひび割れ面から内部への中性化の進行が速くなる傾向にあったが、初期中性化のある供試体では、明らかに酸性雨溶液浸漬の方がその進行度は大きくなっていった。なお、図-8には参考のため、浸漬液の使用前後のpHの測定結果を基に、コンクリートから浸漬液中へ溶出する水酸イオンの溶出速度の算定結果を示した。この結果によると、酸性雨溶液に浸漬した供試体からの水酸イオン溶出量は、水道水中への量の100倍以上であった。

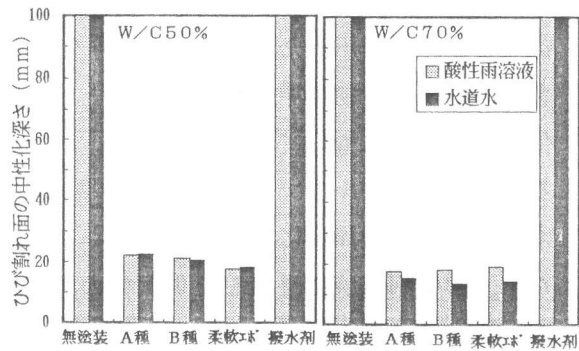


図-5 ひび割れ面の中性化深さの結果

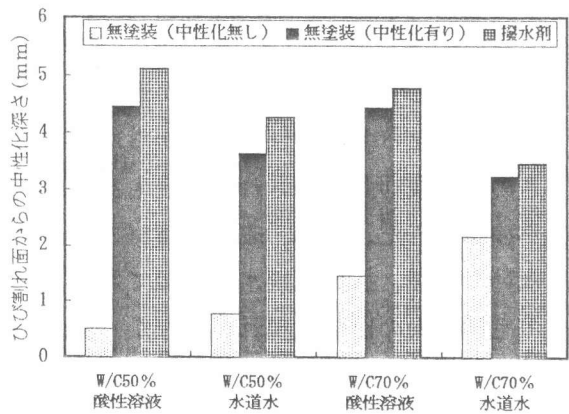


図-6 ひび割れ面からの中性化深さの結果

3. 2 鉄筋の腐食性状について

図-9に、目標ひび割れ幅0.3mmの供試体における試験期間中の鉄筋の自然電位経時変化を示した。この結果、まず初期中性化の無い場合には、酸性雨溶液浸漬と水道水浸漬で、電位の経時変化に大きな差は認められなかった。しかし、初期中性化のある供試体では、酸性雨溶液浸漬の場合の鉄筋電位が、少なくとも20サイクル程度までは水セメント比、かぶりの如何にかかわらず水道水浸漬の場合に比べて卑な値を示した。このことは、ある程度中性化が進行したコンクリート構造物に酸性雨が作用した場合、鉄筋腐食の開始が早まる可能性のあることを示唆している。

一方、図-10には、促進試験8および30サイクルにおいて調査した鉄筋腐食量の測定結果のうち、無塗装供試体の結果を取りまとめて示した。この結果から、浸漬液の違いに着目すると、まず、初期中性化の無い供試体においては、促進試験8サイクルの時点で、幾分酸性雨溶液の影響が見られるものの、30サイクル目では、浸漬液の違いで一定の傾向は見られず、かえって水道水浸漬の方が腐食量が大きくなる状況さえ見られた。これに対し、初期中性化のある供試体では、かぶり3cmの場合は、浸漬液の違いによる腐食量の顕著な差が認められないものの、かぶり2cmの場合には、促進試験30サイクル時点においても酸性雨溶液浸漬の方が水道水浸漬に比べ、明らかに腐食量が大きくなる傾向が認められた。以上の腐食量の結果は、前述の自然電位の経時変化の傾向ともおおむね一致するようである。

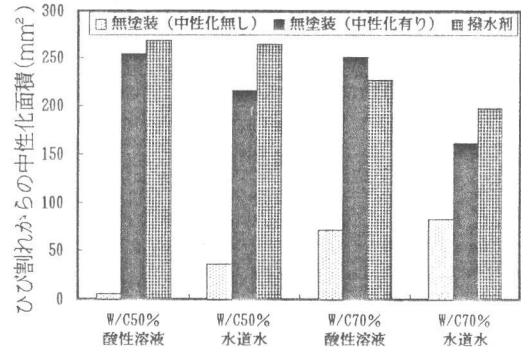


図-7 ひび割れからの中性化面積

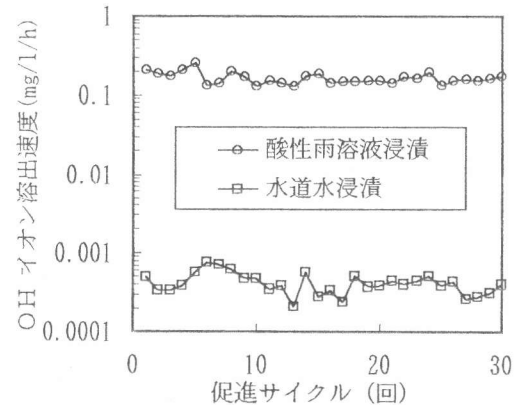


図-8 浸漬液への水酸イオン溶出速度

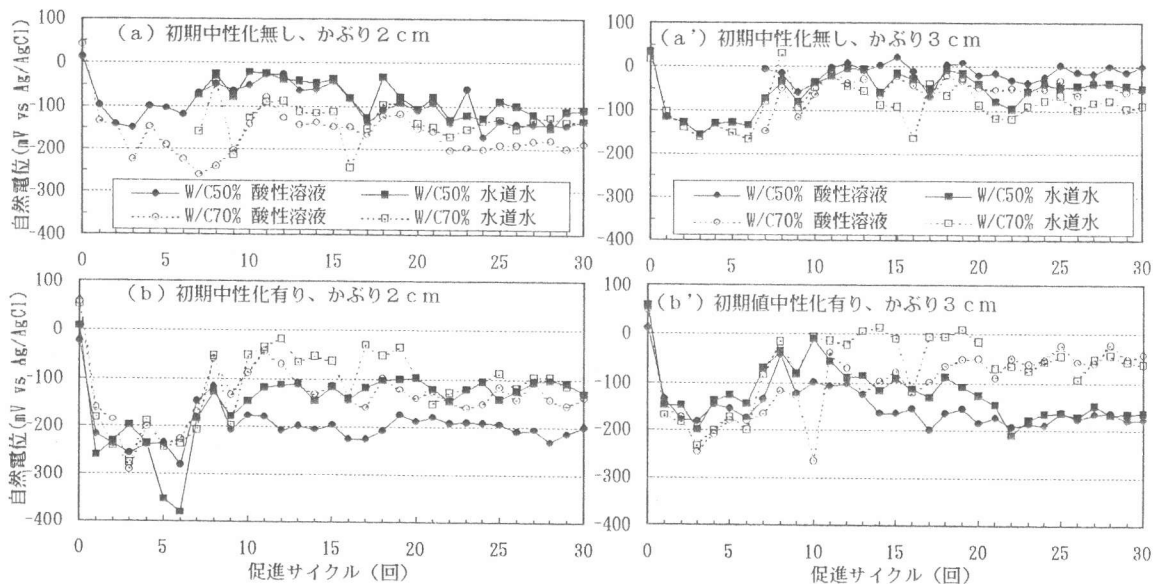


図-9 鉄筋の自然電位の経時変化

凡例 酸：酸性雨溶液浸漬 水：水道水浸漬 Xcm：かぶり厚さ

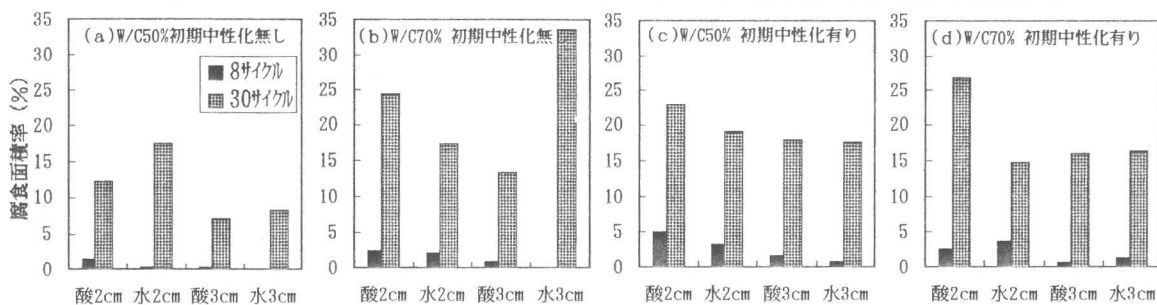


図-10 無塗装供試体の鉄筋腐食量の結果

図-11には、表面被覆供試体における促進試験30サイクル目の鉄筋の腐食面積率の結果について示した。この結果、撥水剤塗布供試体では、3.1でも述べたように、ひび割れ部での中性化抑制効果が乏しいことに起因すると思われる顕著な鉄筋腐食が見られた。しかし、他の表面被覆供試体では、初期中性化後表面被覆を施すまでのあいだに生じたと思われるわずかな腐食を除いては、腐食はほとんど見受けられず、十分な防食性を示していた。

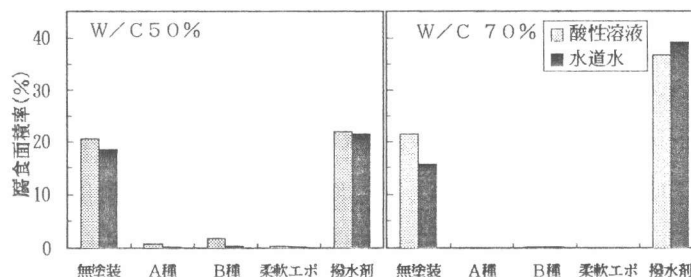


図-11 表面被覆供試体の鉄筋腐食量の結果

4. まとめ

本研究では、酸性雨がコンクリートの中性化や鉄筋腐食に及ぼす影響ならびにこの作用に対するコンクリート表面被覆材の効果について、著者らの考案した促進試験法により検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 酸性雨はコンクリートの中性化や鉄筋腐食の初期の進行に影響をおよぼし、特に、ある程度中性化が進行しているコンクリート構造物ほど、酸性雨の影響を受けやすい。
- (2) 酸性雨は、コンクリートにひび割れなどの欠陥がある場合に、ひび割れ部分の中性化と鉄筋腐食を促進させる可能性が高い。
- (3) 適切な表面被覆材を用いれば、既に中性化が進行していたり、ひび割れ等を有するコンクリートに対しても酸性雨が原因の中性化や鉄筋腐食を有効に防止できる。

参考文献

- 1) 例えば、蒔田 実、坂本浩之：コンクリートの耐酸性について、第27回建設省技術研究会報告、1973
- 2) 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、pp615-620
- 3) 武若耕司、里 隆幸：酸性雨によるコンクリートの中性化および鉄筋腐食の促進に関する基礎的研究、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp480-481、1994.9