

CS-16

コンクリートの耐候性に関する研究

—特に酸性雨について—

東日本旅客鉄道（株） 正会員 佐藤清光

東洋大学 工学部 正会員 坂本信義

1. 研究の目的

コンクリートはセメント水和物中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ によって内部の鉄筋の腐食を防止する作用を有している。しかし長年月を経過すると大気中の CO_2 と反応してアルカリ性が失われて鉄筋に対する防食性が失われる事が知られている。そこで本研究においては森林をも破壊する酸性雨がコンクリートに及ぼす影響を長期的に予測するために各種の促進試験と解析を実施した。酸性雨は SO_x や NO_x などが原因となって地上に pH 5.6以下の雨が降り注ぐ現象で、コンクリートに対する短期的な影響は軽微であるとされているが降雨時にコンクリートに吸収された酸性雨は蒸発して成分の濃縮化が生じ、この現象が降雨の度に繰り返される。したがって酸性雨が50年・100年の間にはコンクリートにある程度の影響を与えることは十分考えられる。そこで本研究は CO_2 環境での促進試験に適合するとされている中性化深さ $x = K\sqrt{t}$ が酸性雨の総降雨時間に対して適合するかどうか、また浸潤乾燥繰り返し数 N と中性化深さ x がどのような関数関係にあるかなどの解析を実施した。

2. 実験方法

表 2.1・2.2に示すセメント質量一定とした配合のモルタルとコンクリート供試体（供試体寸法モルタルが $40 \times 40 \times 12$ （mm）・コンクリートが $100 \times 100 \times 80$ （mm））を作成した。一次元的に解析するために必要面以外にはエポキシ樹脂コーティングを施した。

環境条件は通常環境を想定した水中と大気中、中性化促進のための CO_2 50%中、人工酸性雨（ $\text{pH} = 5.3, 8.2, 5.1, 0$ に浸漬および $\text{pH} = 2.5$ 浸漬乾燥繰り返し N より間欠降雨をシミュレート）凍結融解環境、塩水噴霧環境を再現し、1、2、3、4、8、12、20週で、表2.3に示す変色域の異なる指示薬、チモールフタレイン・フェノールフタレイン・フェノールレッド・メチルレッドを噴霧する事で変色深さを測定し中性化深さを求めた。その結果を $x = K\sqrt{t}$ 、および $x = K_N \sqrt{N}$ に当てはめて解析し定数 K および K_N を求めた。

3. 実験結果

CO_2 50%環境が実験のケース中もっとも早く中性化が進行した。ほぼ $x = K\sqrt{t}$ 法則が適用できる事

表 2.1 モルタルの配合

配合名	骨材 最大寸法 mm	空気量 %	水セメント比 W/C %	骨材率 s/a %	湿和剤 (kg/m ³)		
					AE剤	高性能 AE減水剤	AE 補助剤
MP	5.0	2±1	55	100			
MA	5.0	4±1	51	100	0.28		
MS	5.0	2±1	52	100		4.63	
MSA	5.0	4±1	45	100		4.63	0.003

表 2.2 コンクリートの配合

配合名	骨材 最大寸法 mm	スラン ア値 cm	空気量 %	水セメント比 W/C %	骨材率 s/a %	湿和剤 (kg/m ³)			圧縮強度 f'_{28} kgf/cm ²
						AE剤	高性能 AE減水剤	AE 補助剤	
CP	20	8±1	2±1	55	45				287
CA	20	8±1	4±1	51	45	0.20			245
CS	20	8±1	2±1	52	45		3.35		331
CSA	20	8±1	4±1	45	45		3.35	0.07	364

表2.3 中性化指示薬

試薬名	酸性	変色域 pH	アルカリ性
チモールフタレイン	無色	9.3~10.5	青色
フェノールフタレイン	無色	8.3~10.0	赤色
フェノールレッド	黄色	6.8~8.4	赤色
メチルレッド	赤色	4.2~6.3	黄色

が確認できた。

pH=1の人工酸性雨浸漬環境では3週間で表面の剥離、ひび割れ、ゲル状物質の生成、細骨材分の沈澱という侵食が始まった。pH=1、20週では粗骨材を残して顕著な表面剥離により断面が減少し、中性化進行も著しかった。pH=2.5の場合表面が荒れ始めた。これらは図3.1に示すようなモルタルコンクリートとも同様な傾向が見られ $x=K\sqrt{t}$ 法則が適用できる事が確認できた。K値は実験供試体の品質によって異なった。溶液の濃度との関係は酸性雨ではある一定の濃度を越えるとKの値が大きくなる傾向があった。

浸漬乾燥繰り返し試験では図3.1のpH=2.5のような結果が得られた。浸漬試験に比較して濃縮の影響が大きくそのために中性化の進行も早くなったと考えられる。また、 $x=K_N\sqrt{N}$ 法則が成立する事が確認できた。

4. 実験値の一般化と長期中性化の予測

モルタルとコンクリートのKおよび K_N の関係を確認しコンクリートのKまたは K_N に補正し、CO₂、酸性雨の濃度に対する関係を推測し、長期間の中性化深さの予測を行った。なお、年間降雨日数は99.2日とした。

その結果表4.1を得た。Kと K_N の予測値では K_N の方が同一条件を想定しても大きな値になる。実際の現象は K_N に近いと考えられる。pH=2.5の酸性雨が頻繁に降るような地域では、かなり中性化が進行する事が予測される。

5. まとめ

以上の結果より以下の事が判明した。

1. 人工酸性雨に継続的に浸した実験では経過日数tに対して $\sqrt{t}$ 法則が適合するが、コンクリートの品質によって速度定数Kは異なる。
2. 同一pHであっても浸漬乾燥繰り返し実験では人工酸性雨との接触時間が短いものにも拘わらず中性化進行度は大きくなった。繰り返し数Nに対しては $\sqrt{N}$ 法則が適合した。

以上のことから良質なコンクリートで構築された構造物は酸性雨に対して相当の耐侯性を有するが、現状より環境が悪化しpH=3以下の強い酸性雨が頻繁に降るようになると、中性化の進行・剥離・ひび割れ・流出・断面減少というような影響を生じるようになるので、鉄筋に対してのみならずコンクリートにも対策を施す必要があると考える。

この実験を実施するに際して御指導を賜った東洋大学工学部岩崎訓明先生に心からお礼申し上げます。

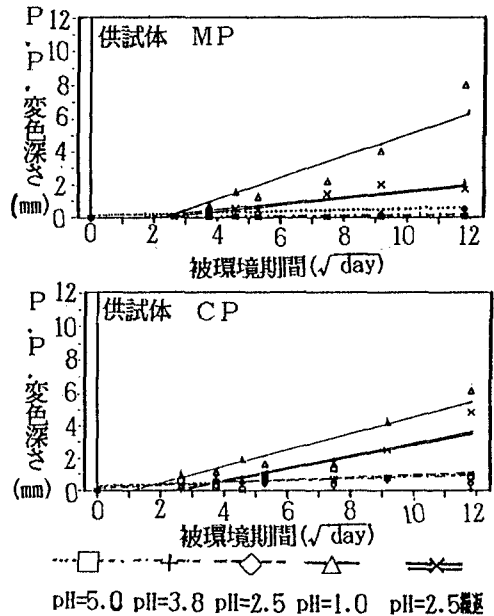


図3.1 被環境期間と変色深さ

表4.1 中性化深さの予測(mm)

条件	品質	pH	材齢(年)				
			10	20	50	100	
K法 CO ₂	P	pH=9.9	1.90	2.68	4.24	6.00	
		pH=9.2	2.05	2.91	4.60	6.50	
		pH=7.6	1.85	2.64	4.17	5.90	
		pH=5.3	2.21	3.13	4.94	7.00	
K法 pH=5.0	P	pH=9.9	0.02	0.03	0.05	0.07	
		pH=9.2	0.01	0.01	0.02	0.03	
		pH=7.6	0.01	0.01	0.02	0.03	
		pH=5.3	0.01	0.01	0.02	0.03	
K_N 法 pH=5.0	P	pH=9.9	0.35	0.50	0.78	1.11	
		pH=9.2	0.35	0.49	0.78	1.10	
		pH=7.6	0.27	0.38	0.61	0.86	
		pH=5.3	0.28	0.40	0.63	0.89	
K法 pH=2.5	P	pH=9.9	0.08	0.12	0.18	0.26	
		pH=9.2	0.09	0.12	0.19	0.27	
		pH=7.6	0.08	0.11	0.17	0.24	
		pH=5.3	0.09	0.12	0.19	0.27	
K_N 法 pH=2.5	P	pH=9.9	3.51	4.96	7.85	11.1	
		pH=9.2	3.48	4.92	7.78	11.0	
		pH=7.6	2.71	3.84	6.08	8.6	
		pH=5.3	2.81	3.98	6.29	8.9	