

[27] 酸性湧出水によるコンクリートの劣化

服部九二雄 (鳥取大学農林総合科学科)
森井 俊広 (鳥取大学農林総合科学科)

1. まえがき

良質の河川産骨材の大量使用の規制から低品質骨材及び砕石の使用量が多くなり、鉄筋の発錆とかアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化が問題となってきた。

筆者等は、昭和48年より図-1に示す鳥取市近傍の旧銅山廃鉱から湧出する酸性水によるコンクリートの侵食問題に取組み、その実験結果を報告してきている[1]-[4]。湧出水が流下する谷川の水質を表-1に示す。水質の内、最も重要な因子であるpHは、流量によって変動し平均的に3~5である。試験地近傍の標高は100m余りで、冬期には積雪もあるが流水の凍結はない。この谷川には、大小3つの砂防ダムがある。試験場所は狭小で、一度に多数の供試体を投入できない難点はあるが、表-2に示す現地耐酸性実験を継続して行っている。

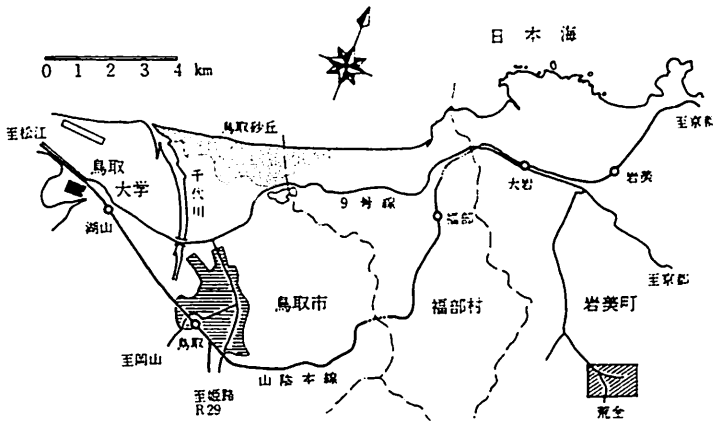


表-1 流水の水質 (ppm)

種類	昭和47年	昭和60年
Pb	0.018	-----
Cu	8.08	0.9
Cd	0.008	0.007
Zn	-----	0.2
SO ₄ ²⁻	-----	524
pH	3.20	3.50

昭和47年：県衛生試験場
昭和60年：鳥大土壌学研究室

図-1 鳥取市近郊と現地 (岩美町荒金)

表-2 現地耐酸性実験の内容

実験名	期間	年数	使用セメント	セメント量	浸漬本数	形状	備考
シリーズ 1	S. 48. 1~ 51. 7	3.5	NPC	250, 300	21×2=42	角柱形	完了
シリーズ 2	S. 51. 11~ 56. 11	5.0	NPC	200, 400	30×2=60	角柱形	完了
シリーズ 3	S. 55. 11~ 60. 11	5.0	BFSC	350, 400	27×2=54	角柱形	完了
シリーズ 4	S. 56. 11~ 61. 11	5.0	NPC (AE)	288	15×2=30	角柱形	完了
シリーズ 5	H. 1. 11~ 6. 11	5.0	SRC, FAC	298, 300	15×2=30	円柱形	進行中

(注) NPC : 普通ポルトランドセメント、BFSC : 高炉セメントB種
SRC : 耐硫酸塩セメント、FAC : フライアッシュセメント
NPC (AE) : AE剤混入普通ポルトランドセメント
形状 (供試体寸法) : 角柱形 (10×10×40cm), 円柱形 (φ10×20cm)
セメント量 : (kg/m³)

2. 実験方法及び測定項目

シリーズ1・2では、単位セメント量の影響を、シリーズ3では混合セメント系としての高炉セメントの耐酸性を、シリーズ4ではAE剤の効果と酸性水浸漬前の乾燥の効果、シリーズ5では耐硫酸塩及びフライアッシュセメントの耐酸性を検討してきている。表-3には、現地耐酸性実験に使用した示方配合を示す。

表-3 実験に使用した示方配合

実験名	配合名	M.S. (mm)	slump (cm)	air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
							水	セメント	F.A.	C.A.	AE剤
シリーズ1	NC250	25	5±1	1.0	68.0	50.0	170	250	950	968	--
	NC300	25	5±1	1.0	57.0	48.0	170	300	904	976	--
シリーズ2	NC200	25	5±1	1.5	85.0	50.0	169	200	959	989	--
	NC400	25	5±1	1.5	42.2	45.1	169	400	792	995	--
シリーズ3	BC350	25	5±1	1.5	47.4	43.1	166	350	778	1035	--
	BC400	25	5±1	1.5	41.5	43.1	166	400	760	1011	--
シリーズ4	NAE	20	7±2	6.0	55.0	43.7	158	288	770	1003	86
シリーズ5	FAC	20	7±2	2.0	55.0	45.0	165	300	829	1019	--
	SRC	20	7±2	2.0	55.0	45.0	164	298	842	1035	--

(注) M.S. : 最大骨材寸法, F.A. : 細骨材, C.A. : 粗骨材
AE剤 (単位g) : ヴィンソル70 (山宗化学)

シリーズ1～4では10×10×40cmの角柱形供試体、シリーズ5ではφ10×20cmの円柱形供試体を使用した。供試体の作製は、シリーズ1～3は手練りで、シリーズ4・5は強制練りミキサで行った。供試体は、クレモナロープで3本づつ結束して現地に浸漬した。以下の説明の便宜上、各シリーズのコンクリート供試体の名称と現地浸漬までの養生方法の違いを表-4に示す。

表-4 耐酸性実験に使用したコンクリート供試体の名称とその内容

実験名	供試体名称	使用・単位セメント量	現地浸漬までの養生条件
シリーズ1	NC250	普通PC、250 kg/m ³	14日間標準養生後48日間室内養生
	NC300	普通PC、300 kg/m ³	14日間標準養生後48日間室内養生
シリーズ2	NC200	普通PC、200 kg/m ³	28日間標準養生
	NC400	普通PC、400 kg/m ³	28日間標準養生
シリーズ3	BC350	高炉B種、350 kg/m ³	28日間標準養生
	BC400	高炉B種、400 kg/m ³	28日間標準養生
シリーズ4	水中供試体	普通PC、AE剤	28日間標準養生
	風乾供試体	普通PC、AE剤	14日間標準養生後14日間室内養生
シリーズ5	FAC	フライアッシュセメント	28日間標準養生 (φ10×20cmの)
	SRC	耐硫酸塩セメント	28日間標準養生 (円柱形供試体)

(注) PC : ポルトランドセメント

本実験では、コンクリートの耐酸性を評価するのに次のような測定因子及び観察項目を設定してきている。

- ① ワイヤブラシ洗い前・後の劣化状態の写真撮影
- ② ワイヤブラシ洗い後の供試体の空中及び水中重量（密度の計算）
- ③ 動弾性係数（たわみ及び縦振動法）
- ④ 超音波伝播速度（ウルトラソニックテスター：シリーズ5より）
- ⑤ 曲げ強度（シリーズ1～4：三等分点載荷法）
- ⑥ 曲げ強度試験後の破断面の写真撮影
- ⑦ 圧縮強度（キャッピングなし）

3. 耐酸性の評価方法

コンクリートの耐酸性を定量的に評価する方法は確立されていない。特に、酸性水で侵食を受け、供試体とかコンクリート躯体が変形したり劣化する（体積減少して瘦細っていく形）場合には適切な方法がない。著者らは、次のような評価方法を試みてきている。

- ① 重量及び体積減少率、密度及び密度比の経年変化
- ② 曲げ及び圧縮強度、動弾性係数及び超音波伝播速度の経年変化
- ③ 供試体表面の劣化状態（クラック、湾曲などの発生状況）の経年変化

例えば、①については、現地浸漬直前の供試体個々の重量、体積及び密度を測定し、それらを初期値として比較する。②については、標準養生供試体の材令28日の測定値（基準値または初期値とする）に対する比較を行う。③の表面の劣化状態は、現地より引揚げてきた供試体を写真撮影し、これらと対となる標準養生供試体と比較したり、肉眼で観察するようにしている。

4. 結果及び考察

以下の考察はシリーズ2、3、4を中心に行う。シリーズ2と4は普通ポルトランドセメントを、シリーズ3は高炉セメントを使用しているため、シリーズ2・4は一つの図にまとめて示す。なお、紙面の都合上、密度及び強度関係は、初期値に対する割合（密度比又は強度割合）の図のみで説明をする。

4.1 体積及び重量減少率の経年変化

図-2には、シリーズ2・4及び3の重量と体積減少率の経年変化を示す。これらの図から分かることをまとめれば次のようになる。

- ① 単位セメント量が増加すれば重量・体積減少量は小さくなる。
- ② 混合セメントの方が重量・体積減少率は小さい。
- ③ AE剤の添加により重量・体

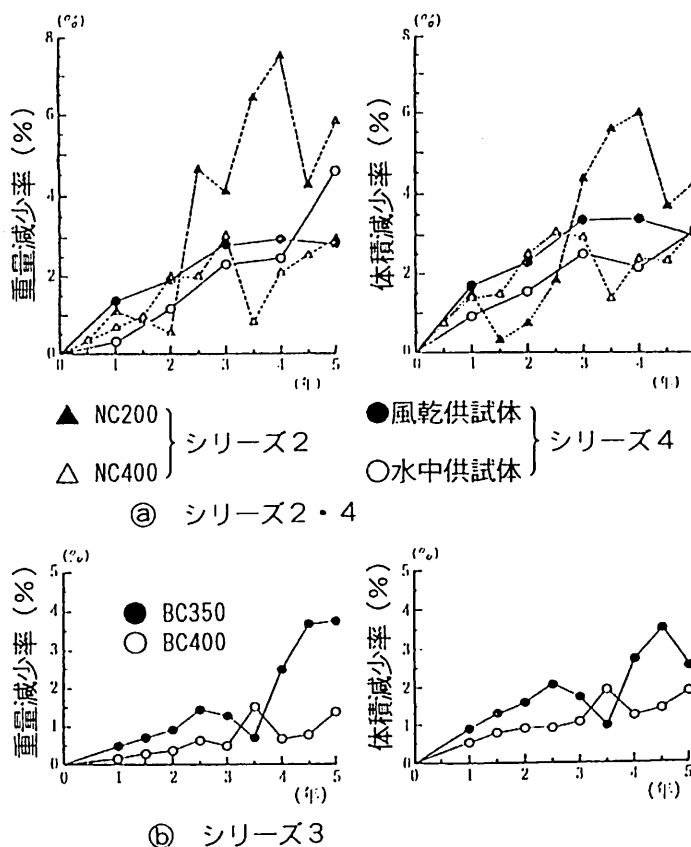


図-2 重量および体積減少率の経年変化

積減少率は小さくなる。

4. 2 密度比の経年変化

図-3には、シリーズ2・4及び3の密度比の経年変化を示す。単位セメント量が少なくなるとより早く初期密度以下になることが分かる。AE剤の効果もあるが、ここでは酸性水浸漬前に2週間の乾燥期間のある風乾供試体の挙動を注目しておきたい。

密度比も耐酸性を評価する因子であるが、密度の管理が難しいことと供試体が小さくなると誤差が入り易い欠点がある。

4. 3 曲げ及び圧縮強度と

動弾性係数の経年変化

図-4には、シリーズ2・4及び3の曲げ・圧縮強度と動弾性係数の基準値に対する割合の経年変化を示す。強度面からみた耐酸性をまとめると次のようになる。

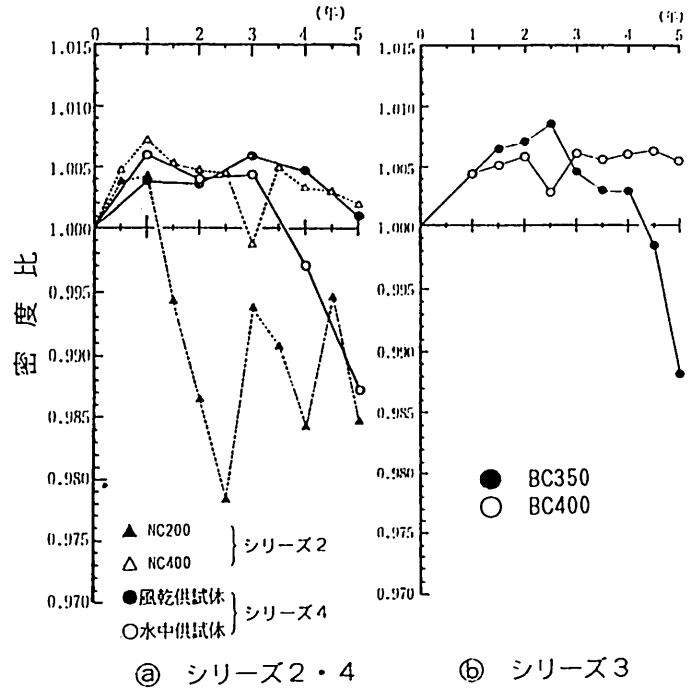


図-3 密度比の経年変化

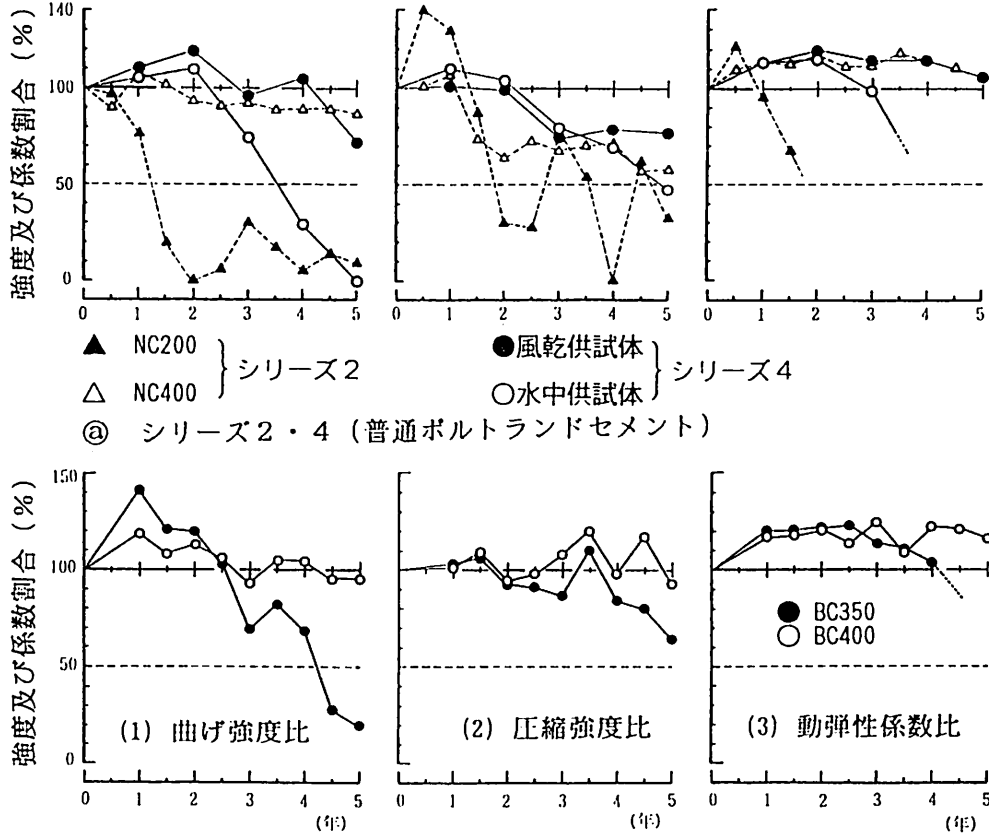


図-4 曲げ強度比、圧縮強度比および動弾性係数比の経年変化

- ① 単位セメント量が多くなれば耐酸性は高くなる。
- ② 高炉セメントの方が普通ポルトランドセメントより耐酸性が高い。
- ③ AE剤の添加により耐酸性は向上するが期待する程のものではない。
- ④ 酸性水浸漬前に供試体を乾燥させると耐酸性は向上する。これは、炭酸化により炭酸カルシウムの膜が生成され、コンクリートの気孔が閉ざされ表面層の透水性が低下したためと考えられる[5]。但し、シリーズ1のように48日間の室内乾燥養生の場合、供試体の乾燥が優先してしまい逆に酸性水を吸水し易くなり、より速く劣化してしまう。従って、どの程度の乾燥（炭酸化）期間が適切か明確でないが、ほぼ2週間程度といえる。
- ⑥ 動弾性係数が測定不可能となる時期は、図-3で密度が初期値以下になったときと一致する。但し、動弾性係数が測定不可能と判断する基準は、両端部の原形が崩れて丸くなり、ピックアップの密着が困難となった状態としている。

5. 外観からの劣化程度の評価

コンクリートの劣化の進行は、肉眼で観察したり、写真に記録された劣化状態の外観からも評価することができる[6]。但し、客観的に評価するには、観察者を二人以上にすることや基準となる劣化状態の項目とか写真を過去のデータから十分蓄積しておく必要がある。

ここでは、一つの試みとして表-5に示す

表-5 劣化程度の判断基準

ランク	劣化状態（主にワイヤーブラシ洗浄後）
0	無傷
1	細骨材の露出、稜・隅角部の損耗・欠落
2	細骨材の露出、端部の劣化・損傷の進行 端部に沿った細かいクラックの発生
3	端部のクラックの拡大進行と膨張（コンクリート片の剥落） 稜に沿った長くて細かいクラックの発生 動弾性係数測定用ピックアップの密着が困難になる
4	端部の膨張と剥落の進行 端部の原形が崩れ丸くなり動弾性係数の測定が不可能となる 稜に沿ったクラックの拡大と進行 曲げ強度試験後の破断面の色の変色（灰色⇒灰白色）
5	縦横に大きくて深いクラック（湾曲・破断・分離） 小さい力で容易に破断し、供試体全体の原形なし 曲げ強度試験の測定不可能

劣化状態のランクを設定し、一組3本の供試体にそれぞれランクを付け、その平均値で各経過年数後の劣化状態を定量化してみた。その結果を表-6に示す。

客観的な評価の難しさから表-5のようなランクでは表わしにくい要素もあるが、このような方法で劣化状態を定量的に評価することができる。

6. 砂防ダムコンクリートの調査結果

現地にある3つの砂防ダムのうち下流の2つを選び、堤体部とエプロン部より2本ずつφ10cmのコアを採取し、実構造物と供試体との劣化状態の違いを比較した。これらコアは全て常時酸性水に曝されている部分から採取したもので、その圧縮強度試験の結果を表-7に示す。

堤体部のコアは表面が一部劣化してはいるが全く問題はなかった。しかし、エプロン部は、底面に浸透した酸性水と、上面を流下する酸性水により侵食劣化を受け易いことから、エプロン部のような薄いスラブ状コンクリートは、配合及び施工面から注意を要するといえる。

表-6 コンクリート供試体の劣化の進行状態

経過 年数	シリーズ1		シリーズ2		シリーズ3		シリーズ4	
	C250	C300	C200	C400	C350	C400	水中	風乾
0.5	1	1	1	0	--	--	--	--
1.0	*	*	2.7	1	0.7	0	1.3	1
1.5	2	1.7	3.3	1	1	1	--	--
2.0	3	2	4	1.7	1	1	2.7	1.3
2.5	4.7	2.3	4.3	2	2	1	--	--
3.0	4	4.3	4	2	3	1.7	3.3	2
3.5	5	4.8	4.3	2	3.7	1.7	--	--
4.0	--	--	5	2	3.7	1.7	3.7	2
4.5	--	--	4.7	2	3.7	2	--	--
5.0	--	--	4.7	2	3.7	2	5	3

(注) * : 写真記録なし、 -- : 対象供試体なし

7. まとめ

3年経過したシリーズ5の現在までに得られた結果を含め、全シリーズの実験結果をまとめると次のようになる。

- ① 単位セメント量を増加させれば耐酸性は向上する。その場合、最適単位セメント量は 400 kg/m³が一つの目安となる。
- ② AE剤の添加は耐酸性を向上させるが、期待する程のものではない。
- ③ 酸性水浸漬前に乾燥期間を設けると耐酸性の向上に好影響を与える。但し、最適乾燥期間は2週間程度といえる。
- ④ 高炉セメントは普通ポルトランドセメントより耐酸性は高いが、その場合十分な耐酸性を持たせるにはやはり単位セメント量 400 kg/m³が一つの目安となる。
- ⑤ 密度と動弾性係数の挙動には密接な関係がある。従って、コンクリートの機能喪失という判断基準は、密度と動弾性係数が初期値以下になったときが重要なポイントとなる。
- ⑥ 酸性水による劣化は、単位体積当りの表面積が大きい部分ほど速い。つまり、供試体で言えば、稜、隅角部、両端部より劣化が始まり、円柱形供試体と角柱形供試体を比べた場合、後者の方が侵食・劣化は速く進行する。

《引用文献》

- [1] 服部九二雄・柘植巳一：コンクリートの耐久性に関する研究 -- 酸性水中におけるコンクリートの劣化について（I）--、農業土木学会論文集、No. 84、pp. 68-74、1979. 12
- [2] 服部九二雄・柘植巳一：コンクリートの耐久性に関する研究 -- 酸性水中におけるコンクリートの劣化について（II）--、農業土木学会論文集、No. 99、pp. 62-70、1982. 6
- [3] 服部九二雄・柘植巳一：高炉セメントB種コンクリートの耐酸性 -- 酸性水中におけるコンクリートの劣化について（III）--、農業土木学会論文集、No. 131、pp. 87-94、1987. 10
- [4] 服部九二雄・柘植巳一：AEコンクリートの耐酸性 -- 酸性水中におけるコンクリートの劣化について（IV）--、農業土木学会論文集、No. 134、pp. 101-108、1988. 4
- [5] ネヴィル、A. M.、後藤幸正・尾坂芳夫訳：コンクリートの特性、技報堂（1979）pp. 343-344
- [6] Dahl, L. A. : Cement Performance in Concrete Exposed to Sulfate Soils, ACI Journal, vol. 21, No. 4, pp. 257-272, Dec. 1949

表-7 砂防ダムコンクリートの圧縮強度 (MPa)

ダム名	堤体	エブロン
No. 1	----	10.5
No. 2	37.2, 15.0*	22.4

(注) 各値はコア2本の平均値
* 堤体下流側斜面下部