

既往研究結果を基にした温泉コンクリートの劣化要因分析

鹿児島大学工学部 学生会員 ○北川啓一
鹿児島大学工学部 正会員 武若耕司
大日本塗料株式会社 正会員 里 隆幸
鹿児島大学工学部 学生会員 佐村有人

1. まえがき

全国各地の温泉地では、温泉の酸や熱によりコンクリート構造物が侵食をうけ、その耐久性が問題になっている。これらの腐食機構は極めて複雑で、腐食に影響を及ぼす環境因子を的確に把握することは難しい。しかし、このような環境下で耐久性の高いコンクリート構造物を建設するためには、劣化因子とその影響度の定量化を行っておく必要があることもまた事実である。そこで、本報告では我が国各所の温泉環境で実施されたコンクリート供試体の暴露実験結果を整理することによって、温泉水中のコンクリートの侵食度に及ぼす、泉温度、p h、硫酸イオン濃度およびコンクリートの水セメント比の影響について分析を試みた結果を報告する。

2. 各地の温泉地帯におけるコンクリート供試体暴露実験報告

表－1に今回の分析に使用した温泉暴露実験結果を示す。温泉水に対するコンクリートの侵食は酸性の温泉水（p h＜約4）での報告が大部分を占め、徳光氏ら⁽¹⁾により別府温泉、依田氏ら⁽²⁾⁽³⁾により草津温泉、そして著者らにより霧島温泉などで調査されている。使用したセメントの種類は普通ポルトランドセメントとC₃A含有量の少ない耐硫酸塩ポルトランドセメントが多い。しかし、耐硫酸塩ポルトランドセメントについては温泉地における侵食度のデータは比較的少ない。そこで、これについては、データ数を増すことにより分析の精度を上げるために、喜多氏ら⁽⁴⁾による実験室での溶液浸漬の侵食度データも分析に取り入れた。尚、表－1では、コンクリートの暴露実験結果より得られた消失部分と中性化深さ部分の和を侵食深さと考えた。また、坂元氏⁽⁴⁾によるとその侵食深さ（ χ ）は材令（日数t）の平方根に比例し、その反応速度式は $\chi = K \sqrt{t}$ で示されることが明らかにされている。

ここで、Kは侵食速度定数である。本検討では、まず暴露実験結果をこの式で最小二乗近似してKを求め、これを侵食度の評価指標として用いることにした。

3. 各要因における有意性の検定

温泉水に対するコンクリートの劣化要因として、泉温、p h、硫酸イオン濃度、水セメント比を取り上げ、これらの

表－1 侵食深さ経時変化と侵食速度定数

温泉の種類	Temp	PH	SO ₄ ²⁻ (ppm)	W/C	侵食深さ (mm)												侵食速度定数
					暴露期間 (ヶ月)												
					0	1	3	6	10	12	24	36	48	60			
普通ポルトランドセメント	中ノ湯温泉	60	6.6	0	55	0					1.9	2.8	4.2	6.0	8.2	0.8365	
	平湯温泉	60	7.4	12	56	0					1.0	2.5	4.0		4.0	0.5355	
	草津温泉	63	1.1	1439	45	0	2.0		7.5							2.9097	
	草津温泉	63	1.1	1439	55	0	1.5	3.2								1.7621	
	草津温泉	93	1.0	1463	55	0	2.3	4.8								2.6557	
	塚原温泉	62	1.75	3700	31	0			4.0		7.0					1.8927	
	塚原温泉	62	1.75	3700	40	0			4.0		7.0					1.8927	
	塚原温泉	62	1.75	3700	52.3	0			3.0		7.0					1.7564	
	塚原温泉	62	1.75	3700	79	0			5.0		9.0					2.414	
	明礬温泉 (別府)	82	2.25	550	31	0			3.0		6.0					1.5639	
	明礬温泉 (別府)	82	2.25	550	40	0			3.0		6.0					1.5639	
	明礬温泉 (別府)	82	2.25	550	52.3	0			3.0		6.0					1.5639	
耐硫酸塩セメント	明礬温泉 (別府)	82	2.25	550	79	0			4.0		7.0					1.8927	
	堀田温泉	54	6.60	63	79	0			1.0		1.0					0.3288	
	硫黄泉浴槽 (霧島)	41.9	2.4	301	50	0			3.5	4.3	4.6					1.3624	
	草津温泉	63	1.1	1439	45	0	2.0		8.0							3.0851	
	草津温泉	63	1.1	1439	55	0	2.2		8.5							3.2887	
耐硫酸塩セメント	塚原温泉 (別府)	62	1.75	3700	46.4	0			3.0		7.0					1.7554	
	明礬温泉 (別府)	82	2.25	550	46.4	0			3.0		6.0					1.5629	
	堀田温泉 (別府)	54	6.6	63	46.4	0			0.0		0.3					0.0577	
	H ₂ SO ₄ 溶液	20	3.0	48	50	0		0.3			2.4	4.8				0.8312	
	H ₂ SO ₄ 溶液	20	3.0	48	55	0		0.3			2.8	5.6				0.9655	
耐硫酸塩セメント	H ₂ SO ₄ 溶液	20	3.0	48	60	0		0.1			3.0	6.4				1.0766	

侵食速度定数に対する重回帰分析を行うにあたり、事前に説明変量の取捨選択を相関係数と有意性の検定から行った。尚、その有意水準は5%とした。図-1には、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートについて、各要因ごとの侵食度に対する相関性について検討を行った結果を示した。この結果、コンクリートの水セメント比と侵食度との間には、少なくとも今回の検討からは、あまりよい相関が期待できないようであり、このことは有意性に関する検定結果においても同様に表れた。表-2は、耐硫酸塩ポルトランドセメントを使用したコンクリートの侵食度に対する各劣化因子の有意性の検定結果である。これによると、普通ポルトランドセメントと同様に、水セメント比の侵食度に及ぼす影響には有意性が期待できない結果となった。以上のことから普通ポルトランドセメントおよび耐硫酸塩ポルトランドセメントをそれぞれ使用したコンクリートの劣化要因重回帰分析の説明変量は、いずれも泉温、p h、硫酸イオン濃度の3つとした。

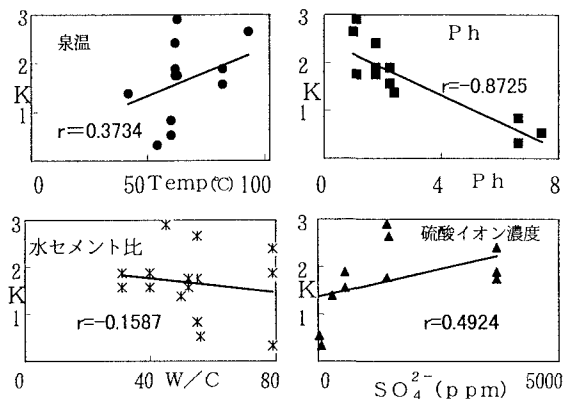


図-1 劣化要因の相関係数

表-2 有意性の検定 (耐硫酸塩セメント)

		自由度	変動	分散	分散比	有意F (0.05)
泉温	回帰	1	1119.2	1119.23	2.1869	> 0.1896740
	残差	6	3070.8	511.79		
	合計	7	4190			
Ph	回帰	1	12.7	12.66	8.3968	> 0.0274160
	残差	6	9.0	1.51		
	合計	7	21.7			
SO ₄ ²⁻	回帰	1	2468349.5	2468349.55	1.6545	> 0.2457445
	残差	6	8951195.3	1491865.89		
	合計	7	11419544.9			
W/C	回帰	1	2.2	2.21	0.0633	< 0.8097339
	残差	6	209.5	34.91		
	合計	7	211.7			

4. 重回帰分析

温泉水によるコンクリート構造物の劣化のような場合は、現象の構造式を仮定し、多項目にわたる属性因子についての効果を明らかにする重回帰分析が最も適している。普通ポルトランドセメントと耐硫酸塩ポルトランドセメントを用いたコンクリートの温泉水による劣化構造の重回帰分析を行った。結果を次式に示す。

・普通ポルトランドセメントの侵食速度定数(K₁)

$$K_1 = 9.2 \times 10^{-3} T - 0.22 p h + 1.04 \times 10^{-4} (SO_4^{2-}) + 1.508 \dots\dots(1)$$

・耐硫酸塩ポルトランドセメントの侵食速度定数(K₂)

$$K_2 = 14.3 \times 10^{-3} T - 0.517 p h - 6.57 \times 10^{-5} (SO_4^{2-}) + 2.348 \dots\dots(2)$$

ここでTの単位は℃、SO₄²⁻の単位はppmである。

重回帰式(1),(2)の比較から、耐硫酸塩ポルトランドセメントは硫酸イオンに対して強い抵抗力をもつが、温度に対する抵抗力は普通ポルトランドセメントに比べて低いことが伺える。また、図-2は表-1の各環境において(1),(2)から算出した侵食速度定数と実測から得られた値を比較して示したものである。この結果から、重回帰式から求めた侵食速度定数と実測から求めたものの従属性はある程度強いことが確認できる。尚、水セメント比の影響については、今後さらに検討する必要があるものと考えられる。

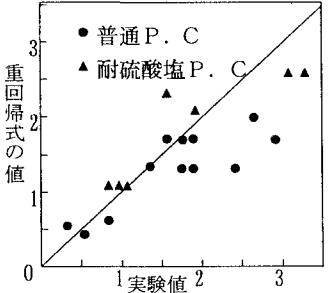


図-2 侵食速度定数の共分散

- (1) 徳光善治、松下博通他：「別府温泉におけるコンクリートの腐食試験」コンクリ工学 Vol.16N010pp10-19 1978
- (2) 衣田彰彦、横室隆：「草津温泉及び塩酸、硫酸、硫酸ナトリウム溶液中に浸漬したコンクリート」セメ技年 NO.37 1983
- (3) 衣田彰彦、横室隆：「温泉の作用を受けたコンクリートの劣化-草津温泉白旗に浸漬した場合」セメ技年 NO.38 1984
- (4) 坂元浩行：「セメントモルタルの耐酸性に関する実験」、土木技術資料 14-8 pp38-44
- (5) 喜多達夫、竹内恒夫：「酸性水によるコンクリートの侵食に関する研究(第2報)」、間組研究年報 1983