

# 論文 温泉コンクリートの耐久性向上に関する実験的検討

里 隆幸<sup>\*1</sup>・武若耕司<sup>\*2</sup>・丸田満弘<sup>\*3</sup>

**要旨:** 温泉環境下におけるコンクリートの耐久性向上を目的として、混和材および細骨材に天然ポゾランの一種である“しらす”を用いた場合、およびコンクリート表面に樹脂被覆を施した場合について、それぞれの効果をモルタル供試体を用いた12ヶ月の暴露実験により検討した。その結果、温泉水浸漬環境では、(1)普通モルタルでは、侵食や強度低下が経時に進行するのに対し、しらすを利用したモルタルでは、経時に侵食速度は小さくなり、強度も浸漬途中から増加に転ずるものも見られること、(2)適切な表面被覆材によりコンクリートを保護することが可能であること等が明らかになった。

**キーワード:** 温泉環境、暴露実験、細骨材、混和材、しらす

## 1. はじめに

環太平洋火山地帯に位置する我が国では、各地に温泉が分布し、温泉水や温泉ガスに含まれる有害成分および熱などの影響でコンクリート構造物が侵食を受け、その耐久性が問題となっている。このため、各地の温泉地帯で構造物の被害調査や、現地の温泉水および大気中でのコンクリート供試体の暴露試験が行なわれ、その結果が多数報告されている[1], [2], [3]。しかし、これ等の報告の多くは、温泉水のpH値、泉質、温度等を要因としてコンクリートの外観観察、重量変化および強度試験を実施し、これ等の結果を基に各種セメント間の相対的な耐久性の比較を行なったもので、耐久性向上のための具体的な方策にまで言及したものは少ない。

そこで、本研究では、温泉地帯におけるコンクリート構造物の劣化状況を定量的に評価し、加えてその耐久性改善方法を確立するために、一昨年より国内でも有数の温泉地帯である霧島においてモルタルおよび鉄筋コンクリート供試体を用いた暴露実験を開始した[4]。本文では、このうち、モルタル供試体を用いた1年間の結果を報告する。なお、今回の実験の特徴は、混和材および細骨材に、南九州に特有の未利用資源の一つである“しらす”を使用したモルタルの温泉環境下における耐久性および、樹脂系表面被覆材による劣化防止効果を検討したことである。

## 2. 実験概要

### 2. 1 使用材料

モルタル供試体の作成には、セメントとして普通ポルトランドセメント(比重3.15:

以下、普通P.C.) および高炉セメントB種(比重3.05:以下、高炉B.)、細骨材として富士川産川砂(比重2.62、吸水率1.78%) および垂水産地山しらす(表乾比重1.99、絶乾比重1.73、吸水率14.94%) を5mm以下にふるい分けしたもの、混和材として表-1に示した鉱物組成の異なる3類のしらすの中から、しらすAおよびCの2種類を選定し、アルミナボーラーを粉碎媒体としたバッヂ式振動ミル粉碎機を用いて目標プレーン値5000および7000cm<sup>2</sup>/g(実測値平均4830および6920

表-1 混和材用しらす			
しらすの種類	火山ガラス含有量	結晶質含有量	比重
しらすA	98.74%	1.26%	2.36
しらすB	91.15%	8.85%	2.42
しらすC	85.69%	14.31%	2.41

\*1 鹿児島大学大学院 工学研究科(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 鹿児島県土木部、工修

$\text{cm}^2/\text{g}$ )に粉碎したものを使用した。また、表面被覆材には、表-2に示した3種類のものを選出し $600\mu\text{m}$ の膜厚で塗布した。

## 2.2 供試体

寸法 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ のモルタル供試体を水セメント比50および65%、目標フローアーチ200として「セメントの物理試験方法( JIS R 5201 )」の強さ試験に準じ、表-3に示した要因と水準で12種類作製した。供試体は打設後1日で脱型し、その後27日間 $20^\circ\text{C}$ の水中で養生した後暴露実験に供した。表面被覆供試体は、水中養生後実験室内に1日間放置後表面被覆材を施し、さらに7日間実験室内で養生後暴露を開始した。なお、供試体の名称は、以下、表-3に示す略称で記す。

## 2.3 暴露実験

表-4に暴露環境の概要を示した。暴露環境は、温泉水中への浸漬環境が5箇所、温泉水に直接接しない環境が3箇所の計8箇所とした。なお、暴露環境の名称は、以下、表-4に示した略称で記す。

暴露方法は、各々の供試体が接触しないように、浸漬用のカゴに立てて並べ、全供試体が同一の暴露条件となるように一定期間毎にカゴの中で並べ替えを行なった。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 外観観察

硫黄源Aにおいては供試体表面全面に湯の華の影響であると考えられる黒変が生じていたが、形態的には若干の表面侵食が認められた程度であった。硫黄源Aを除く4箇所の浸漬環境(硫黄源B、硫黄浴槽、明礬浴槽、塩類浴槽)では、供試体表面のセメントペーストが暴露2ヶ月目頃

表-2 表面被覆材の種類と特性値

被覆材 特性	エポキシ樹脂系	ビニルエチル樹脂系	メタクリル樹脂系
略称	EP	VE	MMA
樹脂系	樹脂主剤 エポキシ樹脂	ビニルエチル樹脂	メタクリル樹脂
	硬化剤 触媒 m-XDAのイソブチル酸変性物	MEKPO	BPO
顔料(wt%)	酸化チタン: 5%, 無水シリカ超微粉末: 3%		
膜厚( $\mu\text{m}$ )	600		
硬化物Tg(°C)	57	125	107
架橋間分子量	2137	530	10858

表-3 モルタル供試体の要因と水準

セメント	細骨材	W/C (%)	混和材			表面被覆材	略称
			種類	粉末度 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	置換率 (%)		
普通P.C.	川砂	50	なし	-	-	EP	普+川砂50
		65					普+川砂65
		地山しらす					EP
	高炉C.	川砂					VE
普通P.C.	地山しらす	65	しらすA	5000	15	MMA	MMA
		65		30	-		普+地し65
		65		7000	15		高+川砂65
		65		7000	30		A5-15
		65		7000	30		A5-30
		65		7000	30		A7-15
高炉C.	地山しらす	65	しらすB	7000	30	A7-30	A7-30
		65		7000	30		C7-30
		65		7000	30		-

表-4 暴露環境の概要

暴露環境	略称	温度(°C)	pH	含有成分(ppm)		備考
				$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	
硫黄泉A	硫黄源A	35~50	2.8~3.0	183.2	30.6	槽中の湯の華中に浸漬
源泉槽B	硫黄源B	50~60	2.6~2.9	183.2	30.6	湯の華成分極少
硫黄泉浴槽	硫黄浴槽	40~45	2.8~3.0	183.2	30.6	
明礬泉浴槽	明礬浴槽	40~55	2.9~3.4	176.8	26.7	源泉を水で希釈
塩類泉浴槽	塩類浴槽	40~60	3.0~3.3	152.7	22.8	
浴室上部	浴室上部	10~35	-	-	-	温泉ガス雰囲気
浴室下部	浴室下部	25~35				温泉ガス及び蒸気雰囲気
屋外	屋外	-5~30				温泉ガス及び雨水雰囲気

から溶解し、細骨材も剥落し始めた。その際、細骨材に川砂を用いたものでは、川砂の粒子が比較的荒いこともあり、セメントペーストが溶解した供試体表面は凹凸した状態であったが、地山しらすを用いたものでは、しらすの粒径が細かいこともあり供試体表面は平坦な状態であった。表面被覆材を施したものについては、EPおよびVEは外観観察上変化はなく、MMAにおいてのみ温泉水に浸漬した5個所の環境全てで被膜のふくれ、および割れが発生していた。

温泉水に直接接しない環境（浴室上部、浴室下部、屋外）に暴露したものについては、屋外暴露供試体のうち、しらすを細骨材として用いたもの一部に乾燥収縮の影響によると思われる微細なひび割れが見られたが、その他に外観上大きな変化は認められなかった。

### 3. 2 暴露環境の比較

ここでは、12種類の供試体の中から代表的なものとして、セメントおよび細骨材に各々普通P.C.と川砂を用いた「普+川砂65」、および普通P.C.の30%を粉末度 $7000\text{cm}^2/\text{g}$ のしらすA微粉末で置換し、地山しらすを細骨材として用いた「A7-30」の2種類を対象として、以下に述べる侵食深さおよび強度試験の結果から暴露環境を比較した。

#### (1) 侵食深さ

図-1に普+川砂65およびA7-30の暴露環境別の侵食深さを示した。なお、ここでいう侵食深さとは、セメントペーストあるいは細骨材が消失した深さに、残ったモルタル中の中性化深さ（フェノールフタレン法による）を加えたものである。この結果から、硫黄源Aを除く4箇所の浸漬環境（硫黄源B、硫黄浴槽、明礬浴槽、塩類浴槽）が条件的に厳しく、温泉水には直接接しない3つの環境（浴室上部、浴室下部、屋外）は比較的緩やかであることが判った。硫黄源Aにおいては、自然硫黄を成分とする湯の華が供試体表面に沈着して黒変し、これが劣化に対する抵抗層として作用したため劣化は予想以上に小さかった。その他の4箇所の浸漬環境では、暴露期間によって劣化の程度および順位に変化が見られた。これは、各温泉水の化学組成、pH値、温度等の環境条件が常に変化していることが原因と考えられる。特に明礬泉浴槽および塩類泉浴槽においては、暴露6ヶ月頃より硫黄泉の侵入が顕著となりpHの値も硫黄泉と同程度となっていた。

一方、温泉水に直接接しない環境では、表面の消失はいずれの供試体においても見られず、侵食は中性化のみであった。特に細骨材に地山しらすを用いた供試体を浴室上部および屋外に暴露した場合に、暴露開始後比較的初期の段階で中性化大きかったが、その後大きな増加は見られなかつた。この現象は、地山しらすがポーラスであるため、若材齢の段階ではモルタル中の酸性物質の侵入が顕著であるが、地山しらす自身のポゾラン反応性によってモルタル中の空隙が閉塞し、その後の中性化の進行が抑制されることによると思われる。

#### (2) 曲げおよび圧縮強度

図-2に普+川砂65の、図-3にはA7-30の曲げおよび圧縮強度の経時変化を暴露環境別に示し

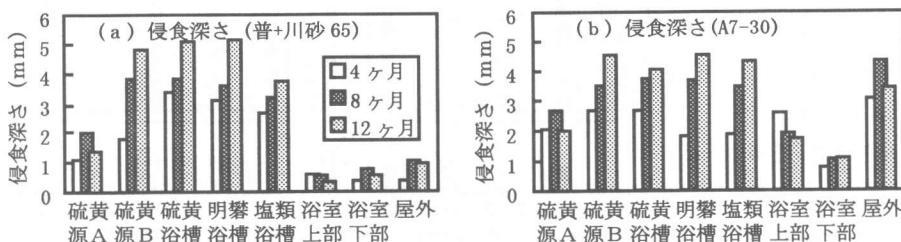


図-1 供試体の侵食深さ（消失深さ+中性化深さ）

た。全体的な傾向として、前述の侵食深さの結果と同様、硫黄源Aを除く4箇所の温泉水中に暴露した場合に強度低下が著しかった。また、供試体の種類で強度の経時変化にかなりの違いが見られ、特に混和材および細骨材にしらすを用いたものでは、温泉水中の浸漬環境においても経時的な強度の増加傾向を示す状況も認められ、興味深い結果が得られた。温泉水に直接接しない環境に暴露した場合では、しらすを使用のもので、浴室下部で曲げ強度が著しく増加する一方、屋外環境では外観観察の結果に見られた微細なひびわれの影響と考えられる曲げ強度の低下傾向も認められた。これらの点に関しては後に詳述する。

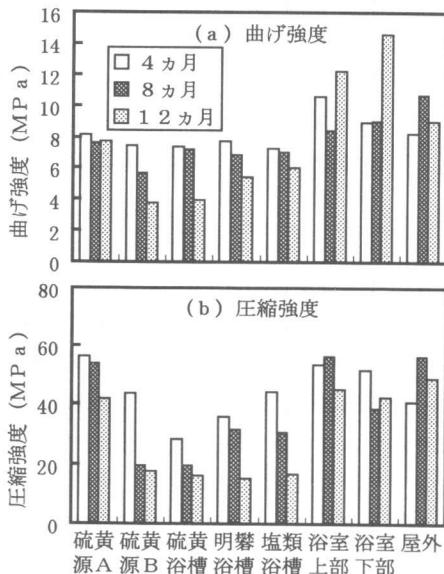


図-2 モルタルの強度 (普十川砂 65)

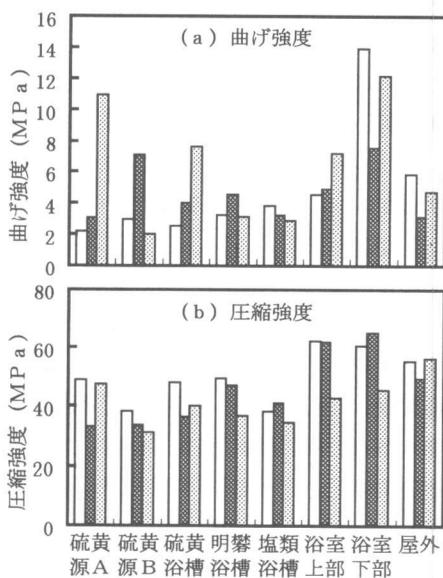


図-3 モルタルの強度 (A7-30)

### 3. 3 供試体別の耐久性の比較

ここでは、8箇所の暴露環境の中から、前述の環境別の比較において厳しい環境に属する硫黄浴槽(浸漬環境)と、温泉ガスと蒸気の影響を常に受ける浴室下部の2環境を選び、供試体別の耐久性の比較を行った。

#### (1) 侵食深さ

図-4に硫黄浴槽および浴室下部暴露の各供試体の侵食深さを、図-5には硫黄浴槽に12ヶ月暴露した供試体の侵食深さの内訳を示し

た。硫黄浴槽に暴露した場合、まず、普通P.C.+川砂を用いた系においてはW/Cの違いで劣化に明らかな差が認められた。また、高炉B.を用いた供試体は劣化が著しく、暴露

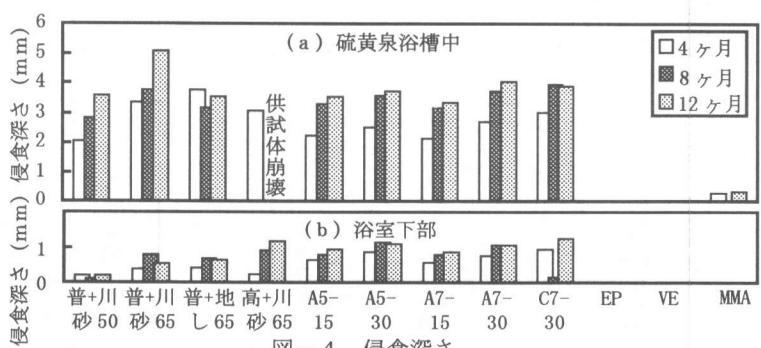


図-4 侵食深さ

6ヶ月で崩壊した。細骨材の種類に着目すると、図-5から、細骨材に地山しらすを用いたものは、川砂を用いたものよりも中性化深さがかなり小さく、しかも、図-4から、特に8ヶ月から12ヶ月目にかけての侵食深さの進行が川砂を用いたものに比べて小さくなる傾向にあった。混和材の影響に関しては、その種類、粉末度および置換率の違いで明確な差は認められなかった。

表面被覆供試体について見ると、E PおよびV Eを施したものでは、重量および侵食深さ共にはほとんど変化が認められなかつたが、MMAでは、被膜のふくれおよび割れ発生箇所からの吸水に伴うわずかな侵食が認められた。MMA自身は酸に対する抵抗性が高いと言われているが、この原因は、表-2に示した架橋間分子量が著しく大きいために樹脂の網目構造が粗となり、酸性物質を溶解した水分が被膜中を透過して保護効果も小さくなつたものと考えられる。

一方、浴室下部に暴露した場合では、いずれの供試体も暴露開始後比較的初期の段階で1mm前後の中性化が認められたが、その後の進行は僅かであった。ただし、混和材および細骨材にしらすを用いた場合には若干中性化深さが増加する傾向が見られた。また、表面被覆供試体においては全く変化は認められなかつた。

## (2) 曲げおよび圧縮強度変化率

図-6に硫黄浴槽暴露の、図-7には浴室下部暴露の材令28日強度に対する曲げおよび圧縮強度変化率の結果を供試体別に示した。まず、硫黄浴槽に暴露した場合の曲げ強度の結果を見ると、細骨材に川砂を用いたものでは経時的な強度低下が認められ、その傾向はW/Cが大きいほど顕著であった。

また、高炉B.+川砂は、暴露6ヶ月目で全供試体が崩壊し、強度測定は不可能であった。これに対し、細骨材および混和材にしらすを用いた供試体では、暴露開始4ヶ月目でかなり大きな強度低下が認められたが、4ヶ月目以降はかえって強度が増加する傾向に転じた。この原因是、3.2.の暴露環境の比較でも述べた

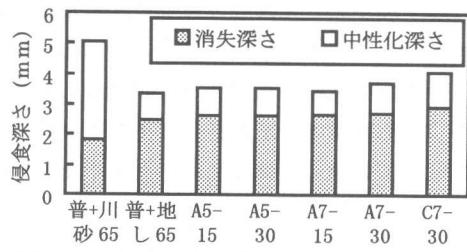


図-5 侵食深さの内訳(硫黄泉浴槽中)

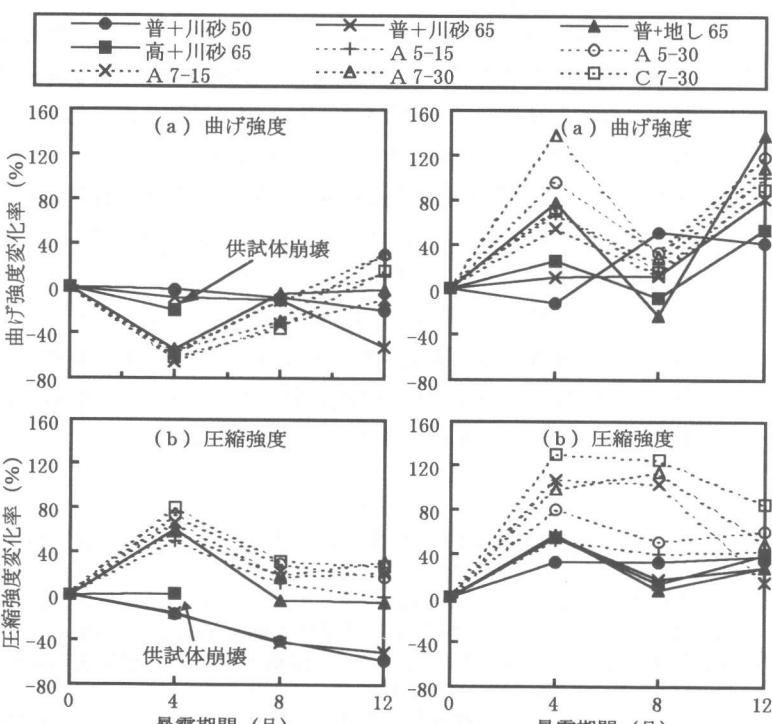


図-6 強度変化率(硫黄泉浴槽中)

図-7 強度変化率(浴室下部)

しらすのポゾラン反応の発現に起因しているものと考えられ、このことから細骨材あるいは混和材としてしらすを用いる場合には、初期養生期間を十分取ることによって温泉環境下のコンクリートの耐久性改善を図れる可能性があることが示唆される。混和材の種類に関しては、しらすC種よりもA種の方が若干強度発現効果が高く、さらに置換率に関しては、0%から30%へと増えるに従って長期的な強度増加が大きくなっていた。

圧縮強度については、曲げ強度の結果と同様、細骨材に川砂を用いた供試体で経時的な強度低下が認められたのに対し、しらすを用いたものでは暴露期間中28日強度を上回る特性を示し、特にしらす混和材の置換率が高いものほどこの効果は大きくなつた。また、混和材の種類および粉末度に着目すると、圧縮強度においてはしらすの種類（A種およびC種）よりもむしろ粉末度の影響の方が強く、粉末度が大きいほど強度増加も大きかつた。

浴室下部に暴露した場合では、曲げおよび圧縮共に強度の変動が著しかつたが、いずれの供試体も概ね暴露後比較的初期の段階で強度の増加傾向を示し、その傾向はしらすを用いたものほど大きかつた。この原因として、浴室下部の環境が高温、多湿であり蒸気養生に似た条件となつたことから、ポゾラン反応の発現が早まつたと考えられる。また、混和材の影響に関しては、硫黄浴槽暴露の結果と同様、曲げ強度には混和材の種類および置換率が、圧縮強度には混和材の粉末度が影響することが明らかとなつた。

なお、表面被覆供試体については、表面被覆材の種類、暴露環境の違いに拘わらず、暴露期間中曲げ、圧縮強度共にほとんど変化は認められなかつた。

#### 4.まとめ

本研究の結果を取りまとめると以下のようである。

- (1) 温度40~50°Cの温泉水中の環境はコンクリートにとって、極めて厳しい環境となる。
- (2) 普通モルタル供試体では、表面劣化および強度特性の低下が経時に進行するのに対し、地山しらすを細骨材に用いたものでは、経時に表面劣化速度は小さくなり、また強度特性においては途中から向上するものも見られた。
- (3) 混和材として、ガラス量が多く粉末度 $7000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度に粉碎したしらすをセメントに対して置換率15~30%で用い、しかも初期養生を十分に行えば、温泉水浸漬あるいは温泉蒸気環境においてコンクリートの強度特性は改善できる。
- (4) ただし、混和材および細骨材にしらすを用いたコンクリートを大気中の構造物に適用する場合には、乾燥収縮の問題が考えられるので、配合や初期養生等に注意する必要がある。
- (5) 温泉水中の環境のような苛酷な環境においても、エポキシ樹脂およびビニルエステル樹脂被覆はコンクリートの表面保護として有効である。

#### 参考文献

- [1]岡田研介、古川柳太郎ほか：温泉水に対するスラグ系セメントの耐久性について、セメント技術年報XXXI, 昭和52年
- [2]依田彰彦、横室隆ほか：コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究（その1 草津温泉に浸漬した場合），足利工業大学研究集録，第11号，1985.3
- [3]東京大学工学部建築学科岸谷研究室：温泉地における建築物の腐食事例とその対策、セメントコンクリートNo.308, Oct. 1972
- [4]丸田満弘、武若耕司、里隆幸：温泉コンクリートの耐久性向上技術に関する実験的検討、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp. 326-327、1996.9