

粉体系躯体防水材の混和による コンクリートの水密性向上効果

椎名 貴快*
Takayoshi Shiina

1. はじめに

水路や地下貯水槽などの水利施設では、コンクリート自体の水密性（防水機能）を向上させるため、躯体防水材（剤）を配合することがある。この内、粉体系の躯体防水材は、細骨材の一部として所定量を添加・混合することで、水和・硬化過程でコンクリート中の粗大な空隙を充填して密実なマトリックスを形成し、高い水密性を発揮するとされる。

本稿では、一般的なシリカ系を中心に、物理的性質や化学組成、反応機構の異なる4種類の粉体系躯体防水材を使用し、各材を用いた場合のフレッシュ性状や強度、反応生成物やコンクリート中の空隙構造を確認し、さらに透水試験によりコンクリートの水密性を比較評価した。

2. 粉体系防水材による水密性向上効果実験

2-1 粉体系躯体防水材

写真-1と表-1に本試験で用いた粉体系躯体防水材4種類の外観と顕微鏡画像、材料仕様及び主な化学組成を示す。ポゾラン反応を主要な反応機構としたシリカ系は3種類で、天然ポゾラン系（A、B）と人工ポゾラン系（C）に大別でき、ともにSiO₂含有量が質量全体の約7割と高い。天然ポゾラン（主成分：SiO₂、Al₂O₃）から製造されたAとBは、比表面積が普通ポルトランドセメントと同程度のAと、約2倍を有するBの2種類で、標準使用量はともに20 kg/m³（細骨材置換）である。一方、人工ポゾラン（シリカフェーム等）を用いて成分・粒度調整されたCは、SiO₂の他に刺激材成分となるCaOを約2割含有し、比表面積120,000 cm²/gの超微粒子の凝集体で、標準使用量は8 kg/m³と少量である。エトリンガイト系は、エトリンガイトとCSHゲルの生成による反応で緻密性が向上する機構で、標準使用量は8 kg/m³である。

2-2 コンクリート配合と使用材料

コンクリートは、水密性が要求される水利施設を想定した土木配合27-8-20N（W/C = 54.9%、W = 157 kg/m³、s/a = 44.0%）をベースに、各躯体防水材を細骨材の一部として標準使用量で配合した。セメントは普通ポ

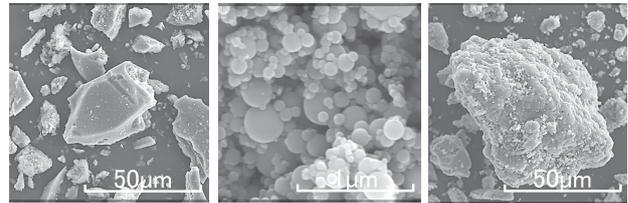
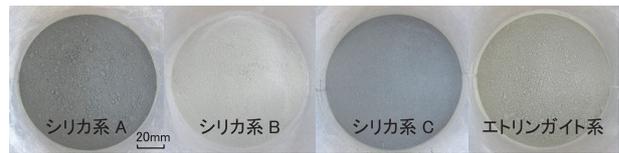


写真-1 粉体系躯体防水材の外観と顕微鏡画像

表-1 防水材の材料仕様と主な化学組成

防水材名 (分類)	物理的性質他				主な化学組成(質量%)					
	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	色彩	標準量 (砂置換) (kg/m ³)	強熱 減量 ig.loss	二酸化 ケイ素 SiO ₂	酸化アル ミニウム Al ₂ O ₃	酸化カル シウム CaO	三酸化 硫黄 SO ₃	
シリカ系	A 天然	2.64	3,500	濃灰色	20	4.2	73.6	10.9	1.2	—
	B ポゾラン	2.27	6,720	白色	20	9.0	68.3	12.5	1.9	<0.1
	C 人工 ポゾラン	2.46	120,000	灰白色	8	2.3	68.2	2.7	20.4	0.8
エトリンガイト系	2.54	5,300	淡灰色	8	1.1	39.6	9.2	27.9	18.4	
普通ポルトランド セメント(比較)	3.16	3,340	淡灰色	—	≤5.0	22.0	5.2	63.9	2.1	

備考) 普通セメントの値はコンクリート材料工法ハンドブックに記載の平均値

ルトランドセメント、骨材は山砂と碎石2005で、化学混和剤にはAE減水剤（標準形）とAE剤を用いた。なお、試験は20℃環境の屋内で実施した。

2-3 実験結果

(1) フレッシュ性状

スランプ8cmの硬練り配合であったが、化学混和剤量の調整により、全ての配合で所要のフレッシュ性状を確保した（表-2）。シリカ系Bは、比表面積が普通セメントの倍あり、配合量が20 kg/m³と多いため、やや化学混和剤の使用量が多かった。ブリーディング量は、防水材を混和していないベース配合に比べて、相対的に粉体量が増加したため減少する傾向であった。

表-2 化学混和剤量とフレッシュ性状

防水材名	使用量 (砂置換) (kg/m ³)	化学混和剤量		フレッシュ性状	
		AE減水剤 (P×%)	AE剤 (P×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
シリカ系A	20	1.0	0.2	9.0	4.3
シリカ系B	20	1.3	0.3	8.0	4.3
シリカ系C	8	1.0	0.2	8.5	4.4
エトリンガイト系	8	1.0	0.2	8.5	4.4

備考) 上記の数値はすべて20℃環境での結果

(2) 硬化体の外観色調

写真-2に材齢1年後の硬化体（φ100×H100mm）の外観状況を示す。防水材を混和した硬化体の色調は、無混和の配合と比べて、顕著な差は確認されなかった。

(3) 圧縮強度

図-1に材齢7、28、56及び91日での圧縮強度試験

* 技術研究所土木技術グループ



写真-2 硬化体の外観色調 (材齢 1年)

結果を示す。防水材を混和していないベース配合と比較して、シリカ系はポゾラン反応により長期強度の発現が大きく、エトリンガイト系は初期強度発現性に優れていた。防水材を混和した4配合はいずれも無混和より強度が1割以上大きくなったが、これは見掛け上、粉体量が多くなり、水粉体比が小さくなったためと考える。

(4) 走査型電子顕微鏡観察 (SEM)

写真-3に、硬化体内の防水材(粉体粒子)周辺部分における反応生成物を観察したSEM画像(倍率5万倍)の結果(材齢15週目)を示す。シリカ系の防水材では、防水材の粉体粒子周辺にポゾラン物質の生成を確認でき、特にシリカ系Cでは極めて緻密なエトリンガイトかモノサルフェートのような細針状物質による細密充填効果を確認できた。またエトリンガイト系では反応生成物らしき物質の発生を確認できた。

(5) 細孔径分布

細孔径分布試験は、水銀圧入式ポロシメーターにより評価し、材齢13週経過後に試料調整し測定した(図-2)。測定の結果、無混和に比べて、全ての材料で粒径の比較的大きな細孔が減り、直径0.01~0.03μm程度の微細粒径の細孔が増えたことで、全細孔容積及び細孔率ともに減少し、細密充填効果を確認できた。特に、シリカ系A及びエトリンガイト系では良好な結果であった。

(6) 透水試験(インプット法)

透水試験は、比較的短期間で評価できるインプット法(DIN 1048)を採用し、試験結果から拡散係数を算出した。なお今回の試験で用いた防水材の中には、ポゾラン反応を期待したシリカ系材料が含まれているため、材料の反応が十分進行してから試験評価するため、材齢13週経過後、2週間乾燥させ、試験は材齢15週目以降に実施した。表-3に透水試験(インプット法)による平均浸透深さと拡散係数の値を示す。シリカ系及びエトリンガイト系ともに、無混和に比べて、拡散係数が半分以下まで小さくなっており、粗大空隙の充填による組織の緻密化が進行し、水密性が大幅に向上したと考える。特に、エトリンガイト系は使用量が少ない割に良好な結果であった。なお、天然シリカ系AとBを比較すると、防水材の比表面積の違いによる差はわずかであった。

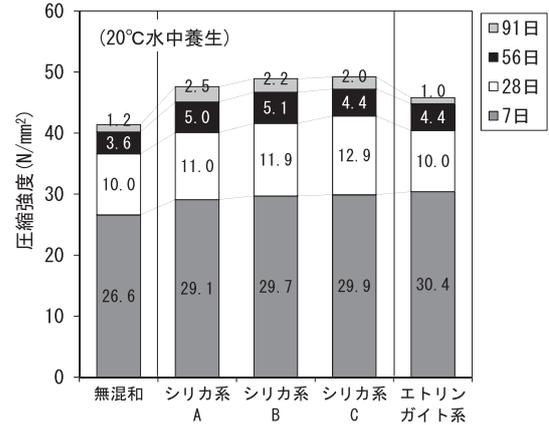


図-1 圧縮強度

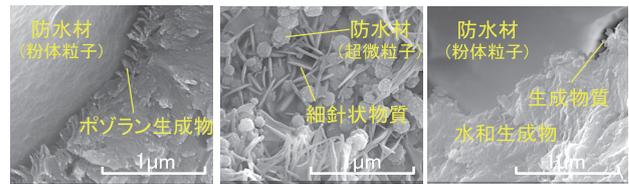
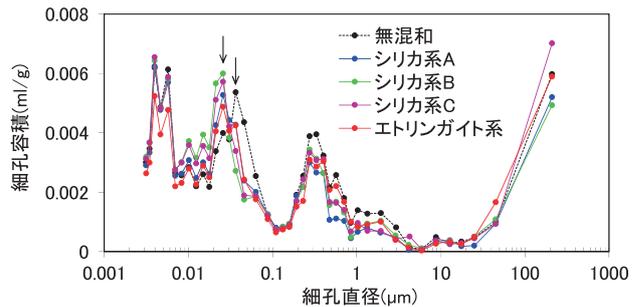


写真-3 SEM分析画像(倍率50,000倍)



項目	無混和	シリカ系 A	シリカ系 B	シリカ系 C	エトリンガイト系
全細孔容積 (ml/g)	0.1024 (1.00)	0.0919 (0.90)	0.0990 (0.97)	0.1007 (0.98)	0.0908 (0.89)
細孔率 (vol%)	20.2 (1.00)	18.3 (0.91)	19.5 (0.97)	19.7 (0.98)	18.2 (0.90)

()内は無混和に対する比率

図-2 細孔径分布

防水材名	水圧を加えた時間	浸透深さ (mm)	拡散係数 $\beta^2 \times 10^4 (\text{cm}^2/\text{s})$
		3体平均	3体平均
無混和	144時間 (6日)	19.3 (1.00)	10.7 (1.00)
シリカ系 A		11.2 (0.58)	3.6 (0.34)
シリカ系 B		10.9 (0.56)	3.4 (0.32)
シリカ系 C		12.4 (0.64)	4.4 (0.41)
エトリンガイト系		9.8 (0.51)	2.8 (0.26)

()内は無混和に対する比率

表-3 透水試験(インプット法)

3. まとめ

粉体系躯体防水材は、コンクリートに混和することで反応生成物が組織を緻密化し、その結果、水密性が向上して防水機能が高まることを実験で確認した。