

論文 硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの物理性状

原田志津男^{*1}・松藤泰典^{*2}・小山智幸^{*3}・田中恭一^{*4}

要旨：本研究は高品質コンクリートの硫酸酸性地盤での暴露期間3年目の性状について検討するものである。暴露試験は霧島屋久国立公園霧島温泉郷硫黄谷温泉地帯のpH2.0～4.5の硫酸酸性地盤で実施した。試験体は高炉スラグ微粉末、シリカフューム、フライアッシュフュームおよび高耐久性混和剤を使用した低結合材比のコンクリートである。これらの試験体を用いた3年間の暴露試験結果、高品質コンクリートは重量減少率および中性化深さなどの物理性状に関しては顕著な劣化が認められないことを明らかにした。

キーワード：硫酸酸性地盤、高品質コンクリート、重量減少率、中性化深さ

1. はじめに

温泉地帯でのコンクリート構造物は、一般に温泉水および温泉地盤に含まれる有害成分および地熱の影響により激しく腐食される。その中でも、硫酸は温泉地帯でのコンクリートの腐食に最も影響を及ぼす要因の一つである。硫酸はコンクリート中のセメントの水和主成分であるC-S-Hと水酸化カルシウムと反応し、C-S-Hをシリカゲルおよび石膏に、水酸化カルシウムを石膏にそれぞれ変化させる。C-S-Hから変化したシリカゲルはバインダー機能がなく次第に剥落していく。一方、石膏は難溶性であり、コンクリートの中性化およびエトリンガイト生成による膨張ひびわれの原因になるといわれている〔1〕。高性能AE減水剤などの化学混和剤および高炉スラグ微粉末、シリカフュームなどの鉱物質微粉末を用いて低水結合材比とした高品質コンクリートも基本的には硫酸の劣化作用を受けるものである。しかし、ここに示したこれらの高品質コンクリートに対する硫酸酸性地盤での耐久性については確認されていない。そこで本研究では、各種高品質コンクリートに対して、硫酸酸性地盤での暴露試験を実施し、各種高品質コンクリートの耐硫酸性能について重量減少率、中性化深さ、動弾性係数等の標準的な物理性状による検討を行うことを目的とする。暴露試験は、霧島屋久国立公園霧島温泉郷内の硫酸酸性地盤で3年間に亘って実施した。

2. 実験概要

2. 1 試験体の種類

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は大井川産川砂（表乾比重2.61、吸水率1.64%）、粗骨材は青梅産砕石（表乾比重2.63、吸水率0.80%）を使用した。鉱物質微粉末は、高炉スラグ微粉末（記号：BFS、比表面積8400cm²/g）、シリカフューム（記号：SF、比表面積26万cm²/g、SiO₂含有量97.7%）およびフライアッシュを原料とする活性超微粉末フライアッシュフューム（記号：FF、比表面積50万cm²/g、SiO₂含有量66.6%）を使用した。化学混和剤は標準形高性能AE減水剤、超高強度用高性能AE減水剤およびAE助剤を用いた。

*1 国立都城工業高等専門学校助教授 建築学科（正会員）

*2 九州大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 九州大学講師 工学部建築学科、工修（正会員）

*4 エフ・ピー・ケー株式会社 技術部次長（正会員）

また、グリコールエーテル誘導体およびアミノアルコール誘導体を主成分とし、中性化抑制および乾燥収縮低減等の機能改善効果を有する耐久性向上混和剤（記号：HBG）を使用した。試験体の調合および強度性状として暴露試験開始直前の圧縮強度を表-1に示す。水結合材比は50%と30%の2種類設定した。なお、水結合材比50%のコンクリート（調合No.2）は、日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説JASS5の高耐久性コンクリートの仕様に準じた調合である。試験体は、各調合 $10\phi \times h20\text{cm}$ の円柱試験体、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ および $10 \times 30 \times 30\text{cm}$ の角柱試験体、計3種類の形状の試験体を作製した。各試験体は打設後1年間の標準養生後暴露試験に供した。これは暴露開始後、初期における劣化の程度が水和反応の進行による影響を受けないように配慮したものである。

2.2 暴露条件

暴露試験は霧島屋久国立公園霧島温泉郷硫黄谷温泉（鹿児島県姶良郡牧園町）で実施した。暴露地の土壤分析試験結果を表-2に示す。各地盤のサンプルは、全埋設では、地表からの深さ30cmの位置、半埋設では、地表部でそれぞれ採取したものである。いずれのサンプルも酸性度（pH値）は4.5～2.0の強酸性を示している。また、硫酸イオンは検出されたが、ナトリウムイオンを殆ど検出されないことから、本暴露地盤では、硫酸ナトリウムなどの硫酸塩はほとんど含まれていないようである。したがって、本実験の暴露地の地盤を硫酸酸性地盤と位置づけた。なお、温泉ガスの噴気抜きボーリングのため、温泉ガスが多量に噴出しており、暴露試験場の大気中には硫化水素ガスが多量に含まれている。本実験の暴露方法を表-3に示す。本実験では、地中埋設と気中暴露の境界部における劣化現象に着目して、気中暴露、地中半埋設、地中全埋設およびブランク試験としての気中封緘の4方法による暴露試験を実施した。気中暴露試験体は地上1mの高さに設置した。半埋設暴露は試験体の高さ半分（5cm）を地盤に埋め込んだものであり、地盤のpHはほぼ4.5前後であった。半埋設試験体が設置される地表面の温度は気中の温度とほぼ同程度であり、最大でも40℃以上を示す箇所はなかった。一方、全埋設は、地表からの深さ30cmの位置に試験体を埋設したものである。地盤の酸性度はほぼpH4.0前後であったが、局所的にpH2.0およそ2.9の箇所があった。また、全埋設試験体が設置されている地盤の温度は、ほぼ5.5℃前後であったが、局所的に78.5℃の箇所もあった。気中封緘試験体はビニールで密閉することにより、試験体表

表-1 試験体の調合および圧縮強度

No.	種別	材料	単位水量 (kg/m ³)	水結合材比 (置換率) (%)	細骨材率 (%)	圧縮強度 (MPa)	備考	
1	コンクリート	OPC	289	50	—	59.0		
2		OPC	46		57.8			
3		OPC HBG	48		59.8	HBG外割 10kg/m ³		
4		OPC HBG	160	30	43	99.3	HBG外割 10kg/m ³	
5		OPC BFS		30 (50)		116		
6		OPC SF		30 (10)		106		
7		OPC FF				106		
8		OPC	30			103		

表-2 土質分析結果

暴露条件	サンプル	pH	含水率 (w t %)	硫酸イオン含有量 (w t %)	全硫酸量 (w t %)	水溶性ナトリウム (w t %)
全埋設	A	4.0	30.3	0.63	1.66	0.01
	B	2.0	47.7	2.96	3.12	0.02
	C	2.9	54.3	0.41	0.62	0.01
	D	4.2	33.5	0.28	0.54	0.01
	E	3.9	44.7	0.26	0.45	0.01
	F	3.7	38.7	0.43	0.94	0.02
半埋設		4.5	15.6	0.04	0.10	0.01以下

表-3 暴露条件

暴露条件	気中暴露	半埋設	全埋設	気中封緘
設置条件*				
環境条件	大気中の 硫化水素ガス 濃度 0.19ppm	地盤のpH4.5	地盤のpH 2.0~4.2	-
試験体の 形状	角柱:10×10×40cm 円柱:φ10×h20cm	角柱:10×10×40cm	角柱:10×10×40cm 円柱:φ10×h20cm	角柱:10×10×40cm 円柱:φ10×h20cm

* G. L. はグランドライン、数値の単位はmmを表す

面への有害成分の付着防止を意図したものである。

2. 3 測定項目

表-4に本実験での測定項目の一覧を示す。本実験では既往の研究[1][2]等を参考にし、測定項目を決定した。測定は、暴露開始後1.4年、2.3年および3.0年行った。

(1) 重量減少率

暴露開始直前と暴露開始後の円柱試験体の重量比を測定したものである。測定には上皿電子天秤（最大秤量30kg、最小表示1g）を用いた。

(2) 中性化深さ

角柱試験体（10×10×40cm）を割裂し、割裂面に1%フェノールフタレン溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。各試験体一断面あたり20カ所測定し、その平均値を中性化深さとした。

(3) 長さ変化率

ASTM C 341-67に準拠し、コンタクトストレンジージ法により測定した。

(4) 動弾性係数

JIS A 1127に従い、円柱試験体を縦振動法により動弾性係数を測定した。

表-4 測定項目

測定項目	重量減少率	中性化深さ	長さ変化率	動弾性係数
暴露条件	・気中暴露 ・全埋設 ・気中封緘	・気中暴露 ・半埋設 ・全埋設 ・気中封緘	・気中暴露 ・半埋設 ・全埋設 ・気中封緘	・気中暴露 ・全埋設 ・気中封緘
設置地盤のpH	全埋設:4.0~2.9	半埋設:4.5 全埋設:4.0	半埋設:4.5 全埋設:4.0~2.0	全埋設:4.0~2.9
試験体形状	円柱試験体	角柱試験体	角柱試験体	円柱試験体

3. 実験結果および考察

3.1 重量減少率

図-1に気中暴露試験体の重量減少率を示す。気中暴露のものは、いずれの試験体も表面が変色したものおよびモルタルの剥落したものではなく、重量減少率は3%未満であった。水結合材比が小さく、また、混和材料を使用したもの、すなわち、単位水量が少なく、暴露開始時の圧縮強度が大きいものほど、重量減少率は小さくなる傾向を示した。本実験での気中暴露試験体の重量減少の主な原因是大気中の硫化水素ガスの影響より、むしろ、単位水量の逸散が支配的であったと考えられる。

全埋設試験体の重量減少率の試験結果を図-2に示す。全埋設試験体はいずれの試験体も表面は褐色に変色しており、表層部がやや剥離しているものもあった。全埋設の試験体の重量減少は酸によるセメント硬化体の一部溶出の可能性があると考えられる。しかし、ほとんどの試験体の重量減少率は3~4%程度と僅かである。なお、水結合材比30%シリーズに水セメント比50%のものより、重量減少率がやや大きいものがある。これは全埋設暴露地盤の酸性度はほぼpH

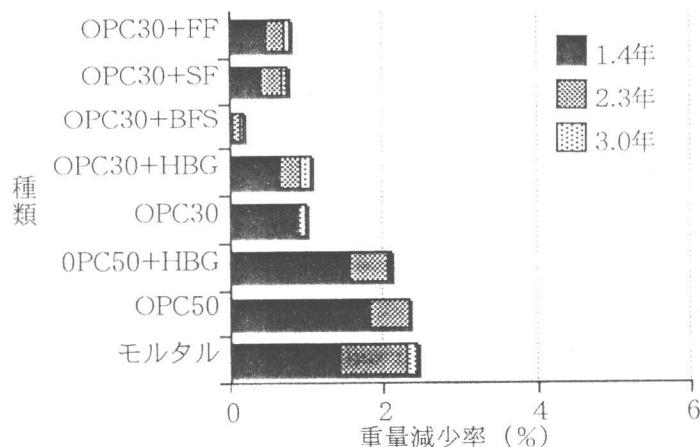


図-1 重量減少率（気中暴露）

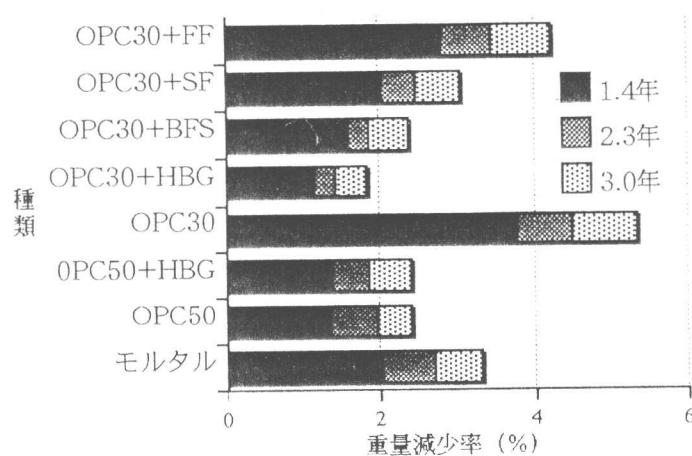


図-2 重量減少率（全埋設）

4. 0程度であったが、水結合材比30%シリーズの試験体の一部はpH2.9の地盤に接していたためである。地盤の酸濃度が腐食速度に及ぼす影響は極めて大であるといえる。したがって、暴露地盤の酸の濃度条件が一様でない、本実験結果より、直ちに材料および調合による耐酸性能を比較検討することは困難である。

全埋設試験体の重量減少は、地盤の酸の作用により、モルタル分が剥離したためであると仮定し、各試験体の平均腐食深さを求める図-3のようになる。pH4.0～2.9の硫酸酸性地盤における3年間の暴露にもかかわらず、平均腐食深さは最大のもので2.3mmである。また、図中の曲線は、地盤の酸が定常状態でのコンクリートおよびモルタル中に拡散することによって、腐食が進行すると仮定し、放物線則を適用し求めたものである。各試験体の腐食深さの計算値と曲線の相関係数は0.990～0.998である。3年間の暴露期間においては、腐食深さは時間の平方根すなわち \sqrt{t} に比例する傾向を示した。

3・2 中性化深さ

暴露開始後3年目の各試験体の中性化深さを表-5に示す。いずれの暴露条件のものも、中性化深さは1mm以下である。特に、気中暴露の水結合材比30%のシリーズはいずれも中性化は全く進行していない。

3・3 長さ変化率

3年間の暴露試験結果、気中暴露、半埋設および全埋設試験体の長さ変化率は、それぞれ $(-4.43 \sim -0.33) \times 10^{-4}$ 、 $(-6.60 \sim +0.63) \times 10^{-4}$ および $(-0.87 \sim +1.97) \times 10^{-4}$ であった。いずれの試験体も異常膨張を呈したものはない。また、気中暴露の試験体はいずれも収縮しているが、JASSS5高耐久性コンクリートの目標値 6×10^{-4} 以下である。

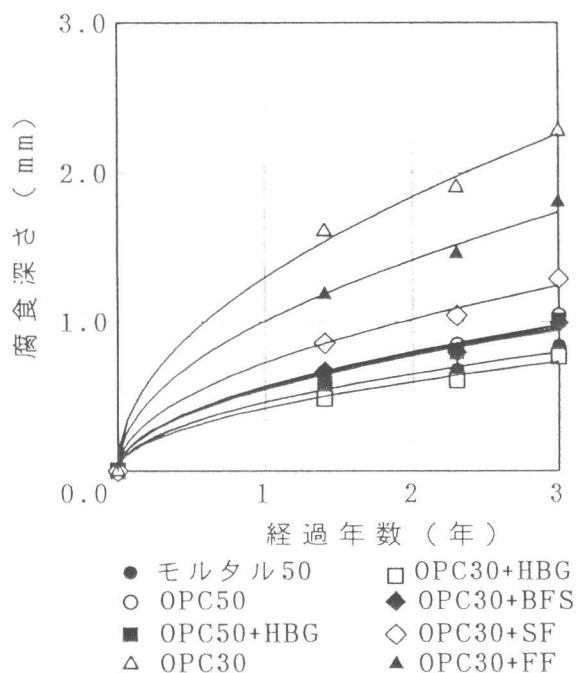


図-3 腐食深さの経年変化

表-5 中性化深さ (mm)

暴露条件	気中暴露	半埋設	全埋設
モルタル	0.6	0.2	0.1
OPC50	0.5	0.4	0.7
OPC50+HBG	0.4	0.4	0.5
OPC30	0.0	0.0	0.5
OPC30+HBG	0.0	0.2	0.5
OPC30+BFS	0.0	0.1	0.7
OPC30+SF	0.0	0.0	0.5
OPC30+FF	0.0	0.4	0.5

3・4 動弾性係数

プランク試験体とした気中封緘試験体の動弾性係数はいずれの調合のものも暴露開始後もしばらく増加傾向を示した。各暴露試験体の動弾性係数の経年変化を $\{(\text{各暴露試験体の初期値に対する変化率}) / (\text{プランク試験体の初期値に対する変化率})\}$ として表し、その結果を図-4に示す。重量減少率から、酸の作用による腐食の進行が若干早いと考えられる全埋設試験体においても、暴露材齡3年での動弾性係数の低下率は5%未満であった。目視による限り試験体内部のコンクリートに異常は認められなかった。

4.まとめ

pH4程度の硫酸酸性地盤での暴露試験結果、本実験で使用した高品質コンクリートは、重量、中性化深さ、長さ変化率および動弾性係数の標準的な物理性状で評価する限り、暴露材齡3年では顕著な劣化は認められないことが明らかになった。

しかし、微細構造に関する分析試験結果では、表層部の硬度およびポロシティーに変化が生じている試験体が確認されている〔3〕。これらの試験体は今後物理性状に急激な変化が生じる可能性がある。これを予測するには本研究で実施したような測定項目からだけでは、暴露材齡3年においては困難である。

＜謝辞＞

本研究の遂行にあたり、株式会社竹中工務店および新日鐵化学株式会社の多大な協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 渡辺 明：各種構造物の耐久性設計事例—道路橋の温泉腐食対策—（九州自動車道の例）
コンクリート工学, vol.26, No.11, pp.57-63, 1988, 11
- [2] 徳光善治, 松下博通, 市原誠夫, 天野澄人, 飯岡 豊, 七沢和男：別府温泉におけるコンクリートの腐食試験、コンクリート工学, vol.16, No.11, pp.10-19, 1978, 11
- [3] 小山智幸, 松藤泰典, 米澤敏男, 長尾之彦：硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの微小構造、コンクリート工学年次論文報告集, vol.18, 1996.6

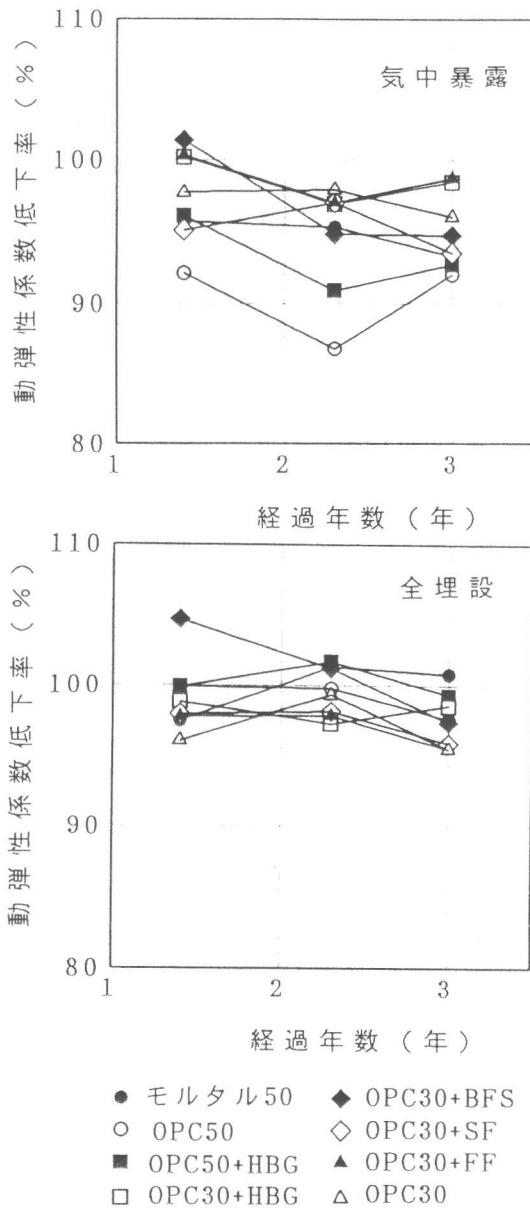


図-4 動弾性係数の経年変化率