

# 論文 硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの暴露5年目の物理性状

原田志津男\*1・松藤泰典\*2・小山智幸\*3・田中恭一\*4

**要旨**：本研究は硫酸酸性地盤に5年間暴露した高品質コンクリートの物理性状に関して検討を行ったものである。暴露試験は霧島温泉郷硫黄谷温泉地帯のpH2.0~4.5の強酸性地盤で実施した。試験体は、高炉スラグ微粉末、シリカフェームなどを用いた低水結合材比コンクリートである。本論文では、5年間の暴露試験結果、高品質コンクリート試験体内部の物理性状は健全であると考えられるが、暴露試験体の表面はCa成分が溶出し粗くなっており、pH3程度の酸性濃度が大きい地盤に接したものは、重量減少率も比較的大きくなることを明らかにしている。

**キーワード**：硫酸酸性地盤、高品質コンクリート、物理性状、表面粗さ、重量減少率

## 1. はじめに

本研究は、高炉スラグ微粉末、シリカフェームなどを用いた高品質コンクリートの硫酸酸性地盤における耐久性能を明らかにすることを目的として行っている。筆者等は、1992年より鹿児島県牧園町霧島温泉郷の硫酸酸性地盤において水結合材比50%および30%の高品質コンクリートの暴露試験を開始し、現在まで測定を継続している。本実験では、試験体の重量減少率、動弾性係数、長さ変化率および中性化深さなどの物理的試験のほか、EPMAや粉末X線回折による分析を定期的に行い各種高品質コンクリートの微細組成の変化についても検討を行っている。その結果、暴露3年では、これらの高品質コンクリートは弾性係数、長さ変化などの物理性状においては顕著な劣化傾向を示すものはなかったものの、試験体表層部でのエトリングタイトの生成および試験体表面の軟化傾向など劣化を示唆する現象が生じていることを明らかにしている<sup>1), 2)</sup>。本論文では、暴露5年間での各試験体の重量減少、表面状態および動弾性係数などの測定結果について報告し、硫酸酸性地

盤における各種高品質コンクリートの物理性状について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

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。混和材は高炉スラグ微粉末(記号BFS, 比表面積8400cm<sup>2</sup>/g), シリカフェーム(記号SF, 比表面積26m<sup>2</sup>/g, SiO<sub>2</sub>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ェーム(記号FF, 比表面積50m<sup>2</sup>/g, SiO<sub>2</sub>含有量66.6%)を用いた。なお一部の調査で耐久性向上混和剤(記号HBG, 成分グリコールエーテル誘導体・アミノアルコール誘導体)を使用した。試験体の調査を表-1に示す。試験体は1991年5月に作製した。同表中に暴露開始(1992年7月22日)直前の圧縮強度を併記している。

\*1 都城高専助教授 建築学科(正会員)

\*2 九州大学大学院教授 人間環境学研究科, 工博(正会員)

\*3 九州大学大学院講師 人間環境学研究科, 工修(正会員)

\*4 エフ・ピー・ケー(株) 筑波コンクリート研究所所長(正会員)

圧縮強度が示すように、本実験に供した試験体はいずれの試験体も高強度高品質試験体である。

## 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(鹿児島県始良郡牧園町)

で実施した。試験体形状は

100φ×200h mm の円柱試験体および 100×100×400mm の角柱試験体とし、以下の暴露条件により設置した。地盤に接した状態としては、試験体の長手方向を水平にした状態で深さ 300mm の土中に埋設した全埋設および試験体の高さ半分 50mm を埋設した半埋設の 2 条件を設定した。半埋設は地中暴露と気中暴露の境界部における劣化現象を検討する目的で行った。また、大気中の温泉ガスが及ぼす影響を検討する目的で地上からの高さ 1m の台の上に試験体を気中暴露した。さらに、本実験のブランク試験体に供する目的で同じ台の上にビニールで密閉した気中封緘状態のものを設置している。実験開始時の暴露地盤の土壌分析結果では、試験体を全埋設した地盤の pH は 2.5~4.2、半埋設した地盤の pH は 4.5 であった。

## 2.3 測定項目

### (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。測定は同一調査、同一暴露条件でそれぞれ 3 本ずつ行った。

### (2) 相対動弾性係数

角柱試験体を用い、JIS A 1127 たわみ振動法により相対動弾性係数を求めた。

### (3) 長さ変化率

ASTM C 341-67 に準じ、角柱試験体の長さ変化率をコンタクトストレンゲージ法により測定した。

### (4) 表面粗さ

表-1 調査表

| No. | 記号        | 材料         | 単位水量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 水結合材比<br>(%) | 細骨材率<br>(%) | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 備考                           |
|-----|-----------|------------|------------------------------|--------------|-------------|------------------------------|------------------------------|
| 1   | モルタル      | OPC        | 289                          |              | —           | 59.0                         |                              |
| 2   | OPC50     | OPC        |                              |              | 46          | 57.8                         |                              |
| 3   | OPC50+HBG | OPC<br>HBG | 175                          | 50           | 48          | 59.9                         | HBG外割<br>10kg/m <sup>3</sup> |
| 4   | OPC30+HBG | OPC<br>HBG |                              |              |             | 99.3                         | HBG外割<br>10kg/m <sup>3</sup> |
| 5   | BFS       | OPC<br>BFS | 160                          | 30           | 43          | 116                          | BFS置換率<br>内割50%              |
| 6   | SF        | OPC<br>SF  |                              |              |             | 106                          | SF置換率<br>内割10%               |
| 7   | FF        | OPC<br>FF  |                              |              |             | 106                          | FF置換率<br>内割10%               |
| 8   | OPC30     | OPC        |                              |              |             | 103                          |                              |

JIS B 0651 に準じた触針式表面粗さ測定器により、角柱試験体から採取した試料表面の算術平均粗さ (R<sub>a</sub>) を求めた。R<sub>a</sub> は、粗さ曲線からその平均線の方向に基準線長さ (l) だけ抜き取り、この抜き取り部分の平均線の方向に X 軸を取り、縦倍率の方向に Y 軸を取り、粗さ曲線を y=f(x) で表したときに(1)式によって求められる値をマイクロメートルで表したものである。本実験では基準線長さを 4mm とし、各試料 5 箇所ずつ測定した。

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

## (5) 蛍光 X 線分析 (XRF)

蛍光 X 線分析装置により、試験体表面に連続 X 線を照射し (照射径 3mm, 管電圧 15kv, 照射時間 200 秒 (真空中)), Ca, Si, Fe, Al および S 元素に関する蛍光 X 線波長分布を検出して、試験体表面の元素組成を分析した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 表面状態

5 年間の暴露試験結果、一時期局部的に高濃度の酸に曝されたと考えられるごく一部の試験体を除き、いずれの試験体もモルタル分が剥落し表面に粗骨材が露出するほどの顕著な劣化を示しているものはなかった。したがって、いずれの試験体も触針式粗さ測定器の計測許容範囲内の表面状態であった。表面粗さ曲線の一例として、暴露 5 年の OPC50 のものを図-1 および図-2 に示す。いずれの調査のものも試験体表面は、気中封緘の

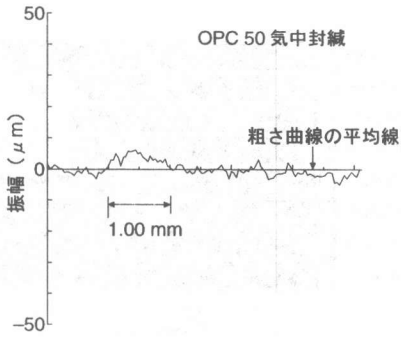


図-1 表面粗さ曲線 (その1)

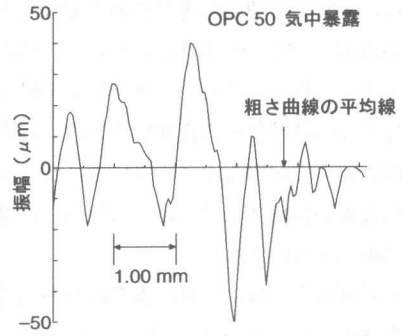


図-2 表面粗さ曲線 (その2)

ものは振幅が小さく、波長が短いものであった。また、図-3に示すように、暴露試験体の表面粗さ曲線は振幅が大きいものほど、すなわち、表面の凹凸が大きいものほど、波長は長くなる傾向を示した。

各試験体の算術平均表面粗さ ( $R_a$ ) の経時変化を図-4~図-6に示す。気中封緘のもの  $R_a$  はいずれの調合のものも  $5 \sim 10 \mu m$  程度であり、経時変化は認められなかった。暴露試験体では、一般的に全埋設試験体の表面粗さが最も大きくなる傾向を示した。しかし、気中暴露のものでも、OPC50およびOPC30の普通ポルトランドセメントのみ使用のものは、暴露年数が経過するとともに表面粗さが大きくなり、暴露5年では全埋設試験体の表面粗さよりむしろ大きくなっている。一方、その他の気中暴露のものは、多少のばらつきはあるものの  $10 \mu m$  前後で暴露5年でも封緘状態のものとは比べ表面粗さは若干大きくなっている程度

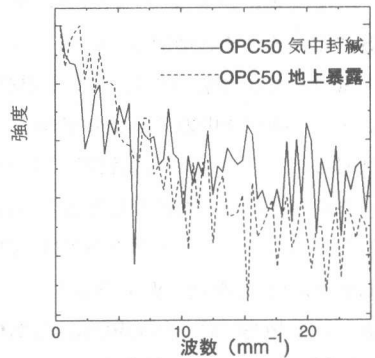


図-3 粗さ曲線のフーリエスペクトル

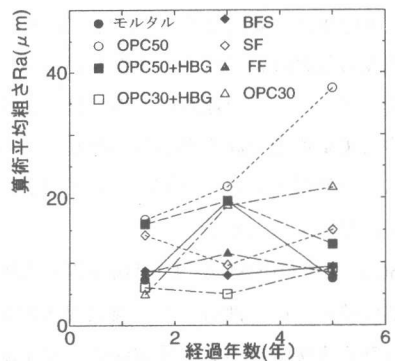


図-4 気中暴露試験体の表面粗さ

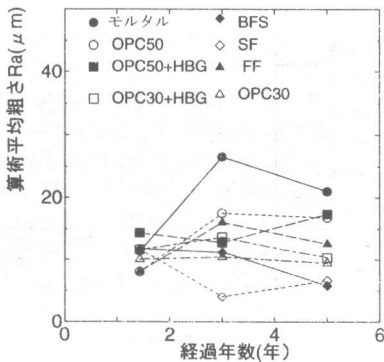


図-5 半埋設試験体の表面粗さ

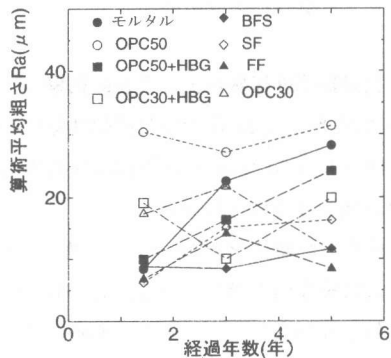


図-6 全埋設試験体の表面粗さ

である。また、半埋設および全埋設ではモルタルを含め水結合材比 50%の系のものが水結合材比 30%のものに比べ表面粗さが大きい。地盤に接した条件下では試験体の表面状態の変化は低水結合材比のものの方が明らかに小さいことが分かる。

暴露 5 年の試験体表面の蛍光 X 線分析結果を図 7～図 10 に示す。

気中封緘のものはいずれの調合のものも Ca が 90%前後を占めていることが分かる。一方、その他の暴露条件のものは、封緘試験体と比べ Ca 濃度が低く、また Ca が少ないものほど、Si, Fe, Al および S 濃度がそれぞれ増加している。このことから、大気中および地盤に曝されている試験体表面ではセメント硬化体中の Ca 成分が溶出していることは明らかである。また、増加した S 成分の一部は、外部から供給され付着したものも含まれていると考えられる。気中暴露の中では、BFS および OPC30+HBG は Ca 濃度の低下が小さい。一方、気中暴露でも OPC50 および OPC30 試験体において Ca 濃度が顕著に減少していることが分かる。これは表面粗さの傾向とよく一致している。

全埋設のものはいずれの調合のものも Ca 減少量が最大であった。半埋設のものでは、いずれの試験体も Ca 濃度の減少が認められるものの、必ずしも気中暴露のものより Ca の減少量が大きくなっていないものもある。

OPC50 および OPC30 では、pH4.5 程度の地表面境界部に接していた部分より、温泉ガスおよび風雨の影響を直接受ける気中暴露面の方が Ca 濃度は低下していることが分かる。

### 3.2 相対動弾性係数および長さ変化率

地盤に埋設した試験体の相対動弾性係数の経時変化を図 11 に示す。いずれの試験体も相対動弾性係数の低下は認められない。

長さ変化の経時変化を図 12 に示す。気中暴露のものは収縮傾向を示している。しかし、いずれの試験体も高品質コンクリートであるため、収縮量は微量である。一方、全埋設試験体では、いずれ

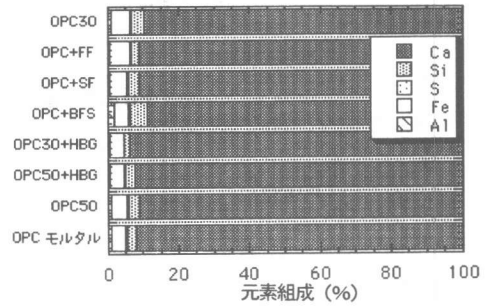


図-7 試験体の元素組成 (封緘)

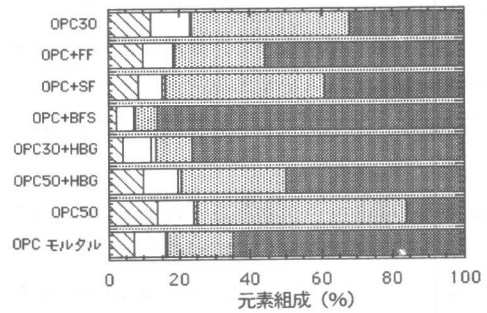


図-8 試験体の元素組成 (気中暴露)

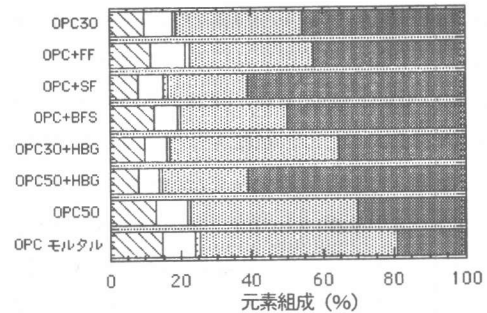


図-9 試験体の元素組成 (半埋設)

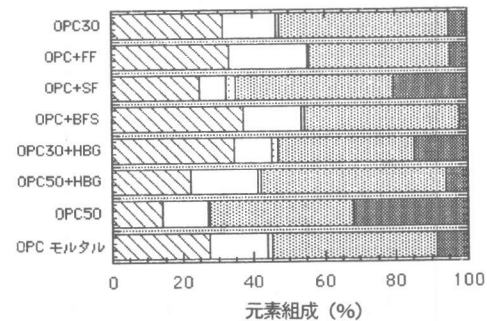


図-10 試験体の元素組成 (全埋設)

の試験体も暴露材齢5年で膨張している。しかし、膨張量はモルタルで 0.035%、コンクリートで最大 0.02% (OPC30) と微小であり、現在のところひびわれを発生するまでの膨張量には達していない。

### 3.3 重量減少率

全埋設試験体の重量減少率は、暴露年数経過とともに重量減少率の増加率は小さくなり、徐々に収束する傾向を示した。本暴露地盤に埋設した試験体表層部は、Ca成分が溶出している一方で、細孔構造は若干緻密化していることを確認している<sup>2)</sup>。腐食劣化部分が剥離せずその層厚が微小な場合、試験体の重量減少率の増加は腐食劣化層の増加によるものとみなすことができる。すなわち、試験体の酸による腐食部分の進行度を重量減少率により評価できるものと考えられる。重量減少速度は、終局重量減少率 ( $w_{\infty}$ ) と現在の重量減少率 ( $w$ ) との差に比例すると仮定すると式 (2) を得る。

$$dw/dt = k(w_{\infty} - w) \quad (2)$$

ここに、 $dw/dt$  : 重量減少率

$k$  : 比例定数。

式 (2) において、 $t=0$  の時  $w=0$ 、 $t=\infty$  の時  $w=w_{\infty}$  を考慮すると、式 (3) を得る。

$$w = w_{\infty} \{1 - \exp(-kt)\} \quad (3)$$

$k$  は試験体形状および試験体内部の酸の拡散係数などに影響を受ける定数であり、 $w_{\infty}$  は、地盤の酸性濃度および試験体の耐酸性能に影響を受ける定数であると考えられる。

全埋設試験体の重量減少率を式(3)に適用した結果を図-13 および図-14 に示す。

定数  $k$  はいずれの試験体も 0.5~0.7 程度であり、かつ同一調査間でのばらつきも小さい。したがって、 $k$  は各調査固有の定数であると考えられる。

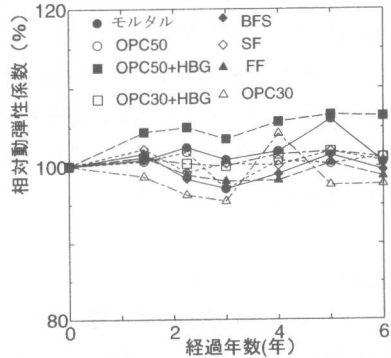


図-11 全埋設試験体の相対動弾性係数

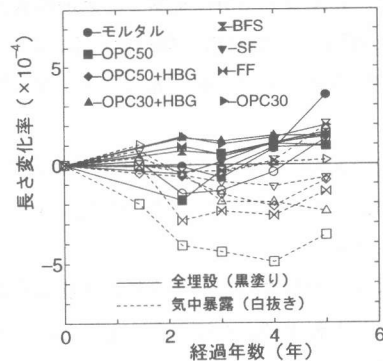


図-12 長さ変化率の経時変化

また、 $k$  は混和材を用いた方が若干大きくなる傾向を示した。一方、 $w_{\infty}$  は各調査間および同一調査の場合でも埋設位置で大きく異なっていた。これは、 $w_{\infty}$  が地盤の酸性濃度の影響を受けるためであると考えられる。水結合材比 50% の系および OPC30+HBG の試験体を設置した地盤は pH4.0~4.2 程度で比較的酸性濃度が低かった。一方、水結合材比 30% の系の試験体を設置した地盤は pH3.0~4.0 と酸性濃度は高く、設置位置によるばらつきも大きくなっていった。したがって、水結合材比 50% の系は重量減少率が小さく、水結合材比 30% の系のは重量減少率が大きくなる傾向を示した。

水結合材比 30% の系の試験体における設置地盤の酸性濃度と定数  $w_{\infty}$  の関係を図-15 に示す。いずれの調査のものも、酸性濃度が大きいものほど、 $w_{\infty}$  は大きくなることは明らかである。しか

し, BFS および SF は OPC 単味のものより同一の酸性濃度環境下では腐食量が小さくなっている。また, FF も低濃度の酸性地盤では, OPC 30 とほぼ同程度の腐食量を示しているが, 高濃度の酸性地盤では腐食量は OPC 30 と比べ低減される可能性を示している。

#### 4. まとめ

高品質コンクリートの硫酸酸性地盤における 5 年間の暴露試験結果, 試験体の物理性状に関して, 以下のことが明らかになった。

- 1) 地盤中および大気中に暴露した試験体表面は Ca 濃度が低下しており粗くなっている。また, 高水結合材比の系のものほど, 表面は粗くなる傾向を示した。
- 2) 動弾性係数測定結果より, いずれの試験体も, 試験体内部での物理性状に大きな変化はないものと考えられる。
- 3) 長さ変化率測定結果では地盤に埋設した試験体はいずれも膨張傾向を示した。しかし, その膨張量は微小であり, 膨張ひびわれを呈するまでには到っていない。
- 4) 地盤に埋設した試験体は, 設置地盤の酸性濃度が大きいものほど重量減少率は大きくなる。水結合材比 30% の系では, 混和材料を混入したものの試験体の重量減少は低減する傾向を示した。

#### <謝辞>

本研究は, ㈱竹中工務店および新日鐵化学㈱の協力を得ている。記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 原田志津男・松藤泰典・小山智幸・田中恭一: 硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの物理性状, コンクリート工学年次論文報告集, 第 18 卷, 第 1 号, pp885-890, 1996.6
- 2) 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, 第

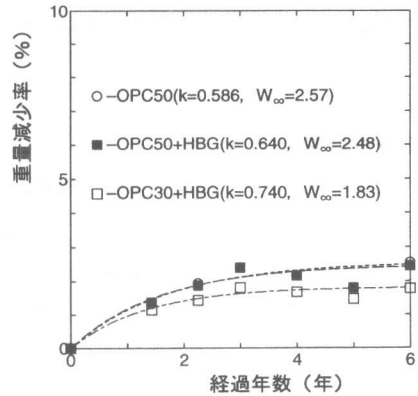


図-13 全埋設試験体の重量減少率 (その 1)

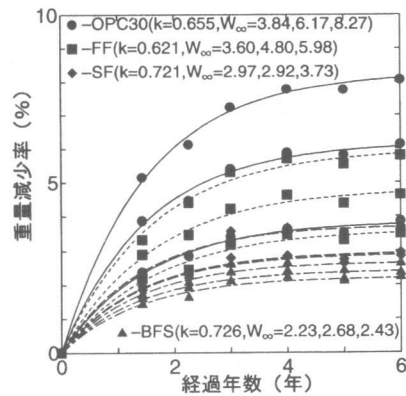


図-14 全埋設試験体の重量減少率 (その 2)

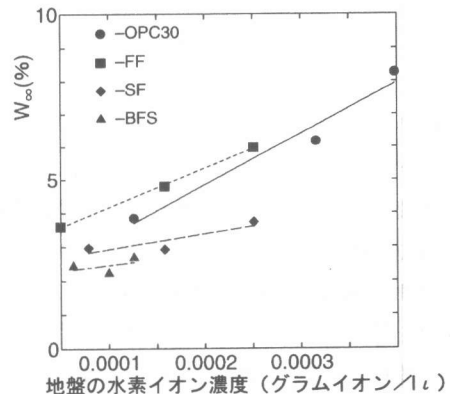


図-15 地盤の酸性濃度と  $W_{\infty}$  の関係