

論文 硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの暴露7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：本論文では、pH3.5～4.5の硫酸酸性地盤に7年間埋設した低水結合材比高品質コンクリートの物理性状に関し検討し、これらのコンクリートには顕著な劣化は発生していないことを示している。試験体の表面から1mm以内の極表層部では硬化体組織のポーラス化が認められたが、試験体の長さ変化率、動弾性係数には異常が認められなかった。また、劣化予測式を提案し、pH4の酸性地盤では、比較的早期に質量減少は収束し、3～3.5%程度の質量減少率にとどまることなどを明らかにした。

キーワード：硫酸酸性地盤、高品質コンクリート、pH、質量減少率、劣化予測式

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、試験体の質量減少率、動弾性係数、長さ変化率および中性化深さなどの物理試験のほかにEPMAおよび粉末X線回折などによる機器分析を定期的に行い各種高品質コンクリートの微細組織の変化についても検討を行っている。

5年間の暴露試験結果、pH3.5～4.5の硫酸酸性地盤に埋設した高品質コンクリートは表層部の微小構造において、微小硬度の低下など、劣化の進行が認められたものの、動弾性係数、中性化深さ、長さ変化率などの物理性状ではほとんど変化が認められなかった。

本論では、さらに各試験体の7年間の質量減少率、動弾性係数、長さ変化率などの測定結果

をくわえ、高品質コンクリートの物理性状を検討している。

2. 実験概要

2.1 使用材料および試験体の調合

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、細骨材は大井川産川砂（表乾密度 2.61g/cm^3 、吸水率1.64%、f.m.2.88）、粗骨材は青梅産砕石（表乾密度 2.63g/cm^3 、吸水率0.80%、最大粒径20mm）を使用した。混和材は高炉スラグ微粉末（記号BFS、密度 2.90g/cm^3 、比表面積 $8400\text{cm}^2/\text{g}$ ）、シリカフェーム（記号SF、密度 2.20g/cm^3 、比表面積 $26\text{m}^2/\text{g}$ 、 SiO_2 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、密度 2.55g/cm^3 、比表面積 $50\text{m}^2/\text{g}$ 、 SiO_2 含有量66.6%）を用いた。なお一部の調合で耐久性向上混和材（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。試験体の調合を表-1に示す。試験体は1991年5月に作製した。いずれの試験体も、練り混ぜには、100ℓ強制パン型ミキサーを用い、先

* 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 工博 (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)

表-1 試験体の調合と圧縮強度

調査No.	記号	材料	単位水量 (kg/m ³)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	備考
1	モルタル	OPC	289	50	—	59.0	
2	OPC50	OPC	175		46	57.8	
3	OPC50+HBG	OPC HBG		160	48	59.9	HBG外割 10kg/m ³
4	OPC30+HBG	OPC HBG	30		43	99.3	HBG外割 10kg/m ³
5	BFS	OPC BFS		115.7		BFS置換率 内割50%	
6	SF	OPC SF	105.7	SF置換率 内割10%			
7	FF	OPC FF	106.3	FF置換率 内割10%			
8	OPC30	OPC	103.0				

練りモルタルを 60 秒間練った後（空練り 30 秒 + モルタル本練り 30 秒）、直ちに粗骨材をミキサーに投入し、本練りを 90 秒間行って作製した。試験体は一年間の標準養生後、暴露試験に供した。同表中に暴露開始直前の圧縮強度を併記している。暴露開始直前の試験体の圧縮強度は、水セメント比 50% の系で 60N/mm² 程度、水結合材比 30% の系で 100~115N/mm² 程度であった。いずれの試験体も高強度で高品質な試験体であったと考えられる。

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。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 条件で設置した。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。

試験体埋設地盤の温度は、30~50℃程度であった。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、硫酸イオン含有量は 0.3~3.0 (wt%) であった。全埋設地盤では、一部 pH3 以下の高濃度の酸性度を示す地盤が点在していた。また、質量減少率を測定した試験体の設置地盤は、近距離間で酸性濃度に大きなばらつきを示す場所もあった。しかし、全体的には試験体設置地盤の酸性度は約 pH3.5~4.5 の範囲にあったと考えられる。

2. 3 測定項目

(1) 質量減少率

暴露開始直前と暴露開始後の円柱試験体の質量比を測定した。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グージ法により測定した。

(4) 中性化深さ

暴露試験場で角柱試験体を割裂し、直ちに 1% フェノールフタレンエタノール溶液を噴霧

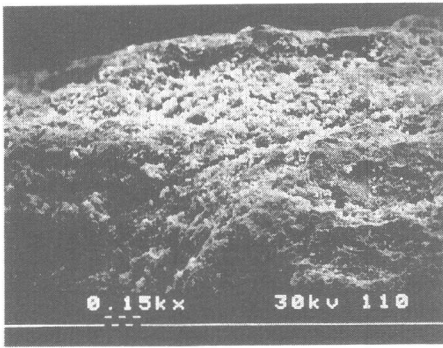


写真-1 OHP50の断面写真
(表面～0.5mmの範囲)

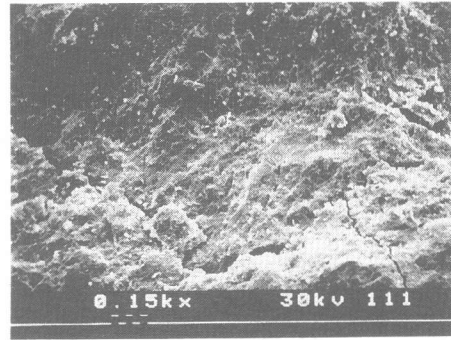


写真-2 OHP50の断面写真
(表面から1mm近傍)

し中性化深さを測定した。試験体一断面に対し、表面からの中性化深さを20箇所測定し、その平均値を中性化深さとした。

以上の物理性状試験のほかに、本暴露試験では試験体内部の微小構造の変化を検討する目的で、EPMAによるイオウ元素の面分析、粉末X線回折分析およびSEMによる断面観察などの機器分析を実施している。

3. 実験結果および考察

3.1 試験体の表面状態

全埋設試験体の表面はペーストの一部が剥離し、表面粗さは大きくなっていた。また、表面の色も茶褐色に変化していた。

写真-1～2にOPC50全埋設試験体の表層部の断面写真を示す。表面から0.2～0.4mm範囲までは硬化体組織がポーラスになっており、組織が脆弱化していることが同写真からも明らかである。しかし、表面から1mm以上の内側部分では外観上の異常は認められなかった。その他の全埋設試験体においても硬化体組織のポーラス化が認められたのは表面から0.4mm程度の部分までであった。

3.2 中性化深さ

いずれの暴露条件、調合のものも7年間の暴露期間では中性化の進行は認められなかった。最も進行が早いと予想された全埋設試験体も平均中性化深さは0.2～0.8mmであった。この深

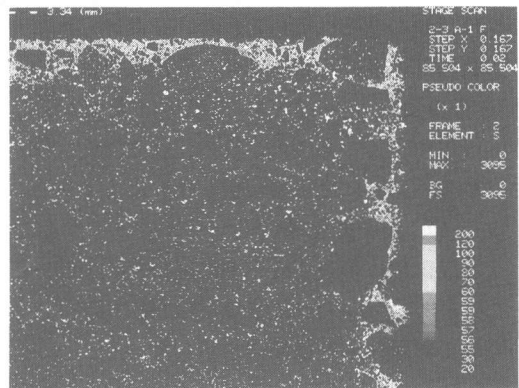


図-1 EPMAによるイオウ元素の面分析結果
(OHP50)

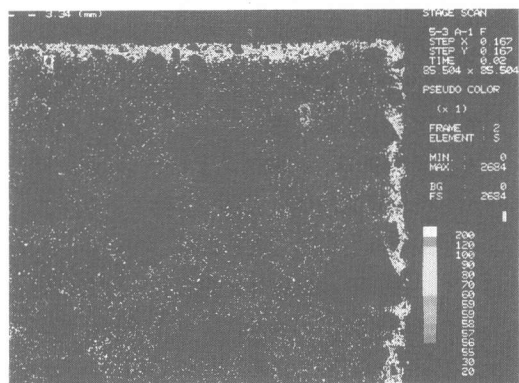


図-2 EPMAによるイオウ元素の面分析結果
(BFS)

さは、顕微鏡観察結果において硬化体組織がポーラス化している部分とほぼ合致している。

しかし、図-1～2に示すようにEPMAによるイオウ元素の面分析結果、全埋設試験体の表面からのイオウ元素の凝集幅は水セメント比

50%の系で12mm程度、水結合材比30%の系で5mm程度になっていた。

既往の暴露試験結果³⁾では、地盤から侵入する硫酸イオンによる影響により、鉄筋が発錆すると報告されている。硫酸酸性地盤に埋設された鉄筋コンクリート構造物では、鉄筋の発錆時期を、フェノールフタレン溶液により推定するのは危険側の判断となる。

3.3 相対動弾性係数

全埋設試験体の相対動弾性係数の経時変化を図-3に示す。いずれの調合のものも5年目までの試験結果同様、7年間の暴露期間では相対動弾性係数の低下は認められない。前述したように表層部の顕微鏡観察結果、外観上では硬化体組織の変化が生じている部分は表面から0.4mm程度までであった。この程度の侵食状態では動弾性係数には影響が生じないようである。

3.4 長さ変化率

全埋設試験体の長さ変化率の経時変化を図-4に示す。7年間の全埋設試験体の長さ変化は、いずれの試験体も膨張傾向を示している。しかし、水セメント比50%のモルタルを除いたいずれの調合のものも、その長さ変化率は5年目の試験結果とほぼ等しい0.03%程度である。一方、モルタル試験体の長さ変化率は、暴露5年目から急激に膨張傾向を示し始め、7年間で0.1%以上の膨張率を示している。

粉末X線回折分析試験結果より²⁾、暴露開始当初から全埋設試験体の表層部ではエトリングaitが生成されていることを確認している。したがって、モルタル試験体にみられる膨張は地盤からの硫酸イオンの供給により生成されたエトリングaitが原因である可能性が高い。しかし、目視で分かるような大きなひびわれは認められなかった。

3.5 質量減少率

気中暴露試験体の質量減少率の経時変化を図-5に示す。気中暴露試験体の質量減少率は水セメント比50%の系で2~3%、水結合材比30%の系で1%前後に留まっている。いずれの系の

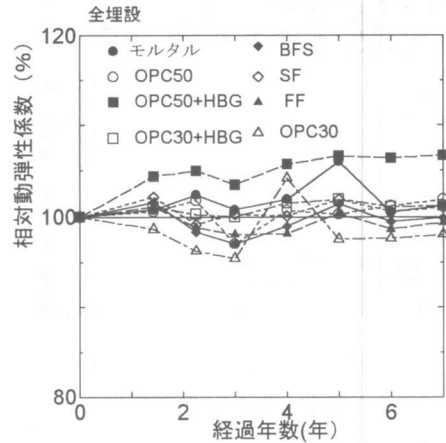


図-3 相対動弾性係数の経時変化(全埋設)

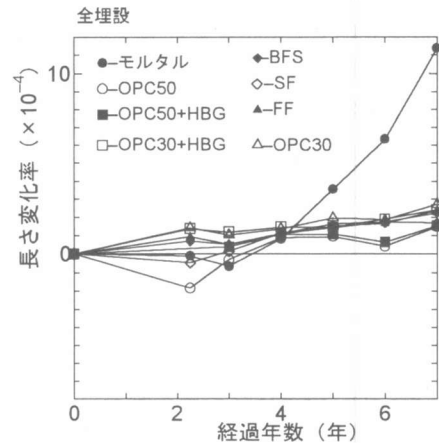


図-4 長さ変化率の経時変化(全埋設)

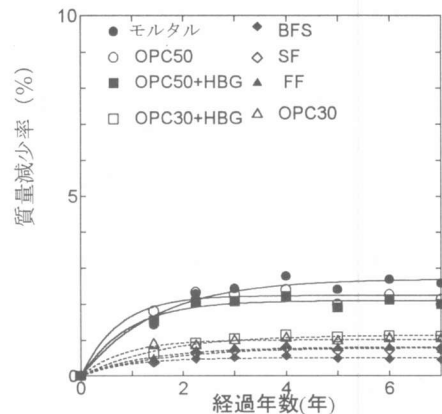


図-5 質量減少率の経時変化(気中暴露)

表-2 各試験体の定数

調合種類	地盤のpH	係数a	係数b/a (×100)	係数b (×100)
OPC30	3.9	0.67	3.8	2.5
	3.5		6.1	4.1
	3.4		8.2	5.5
FF	4.3	0.66	3.5	2.3
	3.8		4.7	3.1
	3.6		5.8	3.8
SF	4.1	0.78	2.9	2.3
	3.8		2.8	2.2
	3.6		3.6	2.8
BFS	4.0	0.80	2.2	1.8
	3.9		2.6	2.1
	4.2		2.3	1.8

ものも暴露3年以降ほとんど変化が生じておらず、今後も急激な変化を示す可能性は少ないと考えられる。

一方、全埋設試験体は、同一調合の試験体の場合でもその質量減少率に大きなばらつきを示すものがあつた。これは、供試体設置地盤の酸性度に大きなばらつきがあつたためである。

しかし、本暴露試験では、いずれの全埋設試験体も暴露材齢の経過とともに質量減少率は収束傾向を示した。一方、EPMAによるカルシウム元素の面分析結果、試験体表面ではカルシウム成分が溶出していることが認められた。したがって、本実験における全埋設試験体の質量減少の主たる原因は試験体内部からのカルシウム成分の地盤への溶出であると考えられる。

そこで、質量減少速度に関し式(1)を仮定し、本実験における全埋設試験体の劣化性状を検討する。すなわち、質量減少速度は現在の試験体自身の質量減少量に比例し低下すると仮定する。

$$\frac{dw}{dt} = b - aw \quad (1)$$

ここに、 w は質量減少率、 t は時間、 a は質量減少速度定数で材料固有の劣化に対する抵抗定数、 b は環境外力、すなわち地盤の酸性濃度および温度などに影響を受ける定数とみなす。

式(1)から、初期条件、 $t=0$ のとき、 $w=0$ を考慮すると、質量減少の経時変化は式(2)のように表すことができる。

$$w = \frac{b}{a}(1 - \exp(-at)) \quad (2)$$

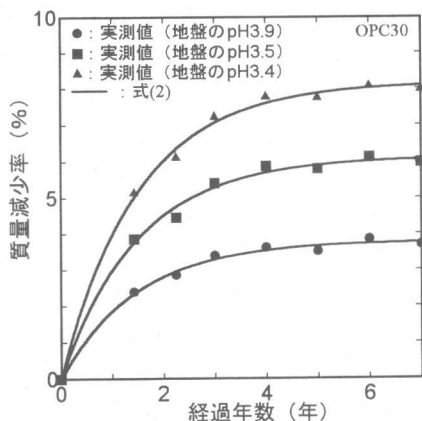


図-6 質量減少率の経時変化 (OPC30 全埋設)

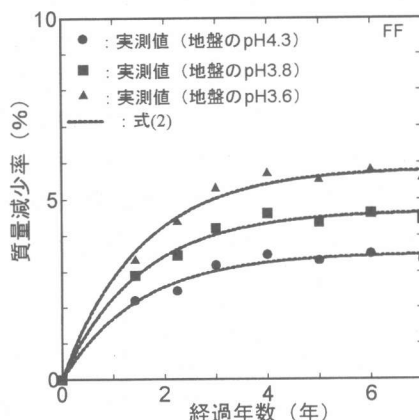


図-7 質量減少率の経時変化 (FF 全埋設)

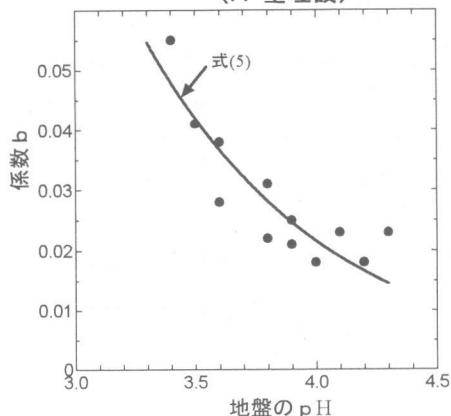


図-8 地盤の pH と b の関係

OPC30, FF, SF, および BFS 試験体の質量減少率測定結果に式(2)を適用し、得られた定数

a, b を表-2 に示す。なお、同表には暴露試験 5 年目に測定した各試験体設置地盤の pH 値も付記する。また、一例として、式 (2) の OPC30 および FF への適用結果を図-6 および図-7 に示す。いずれの調合のものにも式 (2) はよく適合している。

定数 a は、水結合材比 30% の場合、OPC30 および FF はほぼ同程度の値であるが、シリカフェームおよび高炉スラグ微粉末を用いたものは大きくなる。これは、外部環境が同一な条件の場合、すなわち、b が一定の場合、シリカフェームおよび高炉スラグ微粉末を用いたものは、普通ポルトランドセメントのみ使用のものよりも質量減少が低減できること意味している。

一方、地盤の温度がほぼ一定であったと仮定すると、定数 b は地盤の酸性濃度に依存するとみなすことができる。各試験体の設置地盤における pH と定数 b の関係を図-8 に示す。ここで、定数 b は式 (3) に示すように地盤中の水素イオン濃度 $[H^+]$ に比例すると仮定する。

$$b = k[H^+] \quad (3)$$

ここに、k は比例定数。

さらに、水素イオン濃度 $[H^+]$ と pH の関係、すなわち、式 (4) を考慮すると、定数 b と pH の関係は式 (5) のように表すことができる。

$$x = -\log[H^+] \quad (4)$$

$$b = 4.3e^{-1.3x} \quad (5)$$

ここに、x は地盤の pH 値。

以上の結果を用い pH3.5~4.0 の範囲での OPC30 および BFS 試験体の質量減少率推定結果を図-9 に示す。水結合材比を低減した高品質コンクリートは比較的早期に質量減少は収束する。水結合材比 30% のものは、pH4 程度の酸性地盤では、3~3.5% 程度の質量減少率にとどまると考えられる。

4. まとめ

低水結合材比高品質コンクリートに関する 7 年間の暴露試験結果、物理性状において大きな変化は示していない。また、式 (2) に示す劣化

予測式を提案し、pH3.5~4.0 の地盤における高品質コンクリートの質量減少を検討した結果、比較的早期に試験体の質量減少は収束し、pH4 の場合ではその質量減少率は 3% 程度にとどまることを示した。以上の結果より、本暴露試験に供した圧縮強度 $60N/mm^2$ 以上を有する高強度高品質コンクリートは物性面において急激に性能低下を生じる可能性は少ないと考えられる。ただし、鉄筋の発錆時期などに関しては、EPMA などによる微小構造の面からの検討が必要となる。

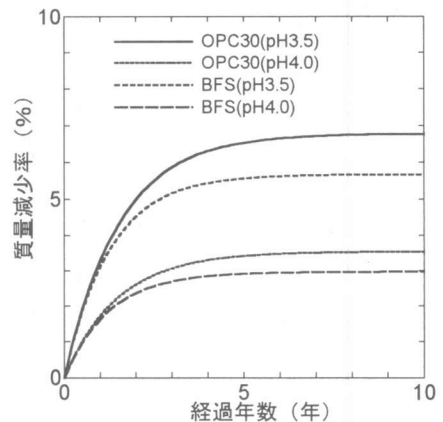


図-9 全埋設試験体の質量減少推定曲線

謝辞

本研究は、(株)竹中工務店および新日鐵高炉セメント(株)の協力を得ている。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 原田志津男他：硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの 5 年目の物理性状，コンクリート工学年次論文報告集，vol.21, No.2, pp.883-888, 1999. 6
- 2) 松藤泰典他：硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの暴露 5 年目の微小構造，コンクリート工学年次論文報告集，vol.21, No.2, pp. 805-810, 1999. 6
- 3) H.MATSUSHITA et al., DEGRADATION AND CORROSION OF REINFORCED CONCRETE IN ACID SULFATE SOIL, Proceedings of Second International Conference on Concrete under Severe Conditions, Vol.1, pp.372-381, 1998