論文　1年を超える硫酸浸漬を行ったPFBC灰硬化体の耐硫酸性

堀口　至[*1]・南條　英夫[*2]・加藤　拓一郎[*3]・市坪　誠[*4]

要旨：本研究では，加圧流動床複合発電方式の発電プラントから発生するPFBC灰を主結合材として用いたPFBC灰硬化体を，硫酸濃度0.1%の試験液に57週間(約400日間)浸漬する硫酸浸漬試験を行った。硫酸浸漬後の供試体外観観察および剥離厚さ，質量減少率，硫酸浸透深さ，圧縮強度の測定より，PFBC灰硬化体の方が普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートよりも硫酸劣化の進行が明らかに遅いことが分かった。PFBC灰硬化体は普通コンクリートよりも硫酸浸食を抑制することで硫酸浸透，圧縮強度の低下といった劣化現象を抑えることが出来るため，その耐硫酸性は高いと結論付けられる。

キーワード：PFBC灰，硫酸浸漬試験，剥離厚さ，質量減少率，硫酸浸透深さ，圧縮強度

1. はじめに

加圧流動床複合発電(PFBC: Pressurized Fluidized Bed Combustion)は，石炭の高効率利用を目指した火力発電方式の一つである。PFBC方式[1)]は，脱硫のために石炭と石灰石を混合して比較的低温(約860℃)，高圧(約1MPa)で燃焼させ，蒸気タービンとガスタービン発電を組み合わせて発電を行っている。このPFBC方式の発電プラントから発生する石炭灰(PFBC灰)は従来のフライアッシュとは異なり，CaO，SO_3成分量が多くSiO_2成分量が少なく，不定形な粒子形状を示しており，自硬性を有するという特徴を持つ。

著者らはPFBC灰の自硬性に着目し，セメントを全く使用せずにPFBC灰を主結合材として用いた硬化体(以下，PFBC灰硬化体)について研究を行っている。PFBC灰硬化体はセメントを使用しないことから優れた耐硫酸性を持つことが期待されたため，これまでにいくつかの硫酸浸漬試験[2)~4)]を行ってきた。セメントコンクリートの硫酸劣化は，硫酸によるセメント水和物の分解や膨張性の劣化生成物の生成により，コンクリートにひび割れや表層の剥落などを発生させる現象である。コンクリートの耐硫酸性を高めるためには組織の緻密化がまず挙げられるが，高炉スラグ，フライアッシュなどを用いて硫酸と反応する水酸化カルシウムを消費させるという方法もある。微細構造観察より，PFBC灰硬化体には水和生成物として水酸化カルシウムが確認されなかったため，硫酸劣化を抑制できると考えられたが，硫酸浸漬試験の硫酸濃度や浸漬期間といった試験条件が原因で，未だPFBC灰硬化体の耐硫酸性が優れているという結論は得られていない[4)]。

一般的に行われている硫酸浸漬試験は，短い試験期間で硫酸劣化が起きるように硫酸濃度5%以上の高濃度の試験液に浸漬することが多い。例えば，コンクリートの耐薬品性について規定されたJIS原案[5)]では，硫酸の標準試験液は濃度5%と規定されており，東京都下水道局がまとめたコンクリート改修技術マニュアル[6)]では，試験により硫酸濃度5%または10%の試験液を使用することとしている。しかし，蔵重ら[7)]は高濃度の硫酸溶液に浸漬したセメント硬化体は，水セメント比が低い密実なものほど劣化生成物の膨張圧を受容できずに早期に浸食が激しくなるため，促進試験については議論が必要であると述べている。また，一般的に硫酸による劣化現象が認められるコンクリート表面のpHは，脆弱化や剥落などの激しい劣化が見られる部位では概ねpH=4以下，細骨材が露出して微細なひび割れなどの比較的軽微な劣化が見られる部位では概ねpH=4～6を示す事例が多いと報告されている[6)]。硫酸濃度が5%以上ではpH=1以下となるため，実環境と比較すると硫酸濃度5%以上はかなり厳しい試験条件であると言える。

以上のことより，本研究ではPFBC灰硬化体の耐硫酸性を明らかにするために，比較的濃度の低い硫酸濃度0.1%の試験液を用いた硫酸浸漬試験を行った。ただし，低濃度の硫酸ではPFBC灰硬化体の硫酸劣化が進まないため，硫酸浸漬期間は1年を超える長期間の57週間(約400日間)とした。試験では，供試体外観の観察および剥離厚さ，質量減少率，硫酸浸透深さ，圧縮強度の測定を行い，硫酸浸漬日数の経過に伴う各項目の経時変化について調べた。比較のために，普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートについても同様の試験を行い，PFBC灰硬化体の耐硫酸性について評価を行った。

*1　呉工業高等専門学校　環境都市工学科准教授　工博　(正会員)
*2　中国電力(株)　エネルギア総合研究所土木担当
*3　中国電力(株)　エネルギア総合研究所土木担当副長
*4　国立高等専門学校機構　本部事務局教授　工博　(正会員)

表-1　使用材料

記号	材料	物理的性質
PFBC	PFBC 灰	密度=2.61g/cm^3，比表面積=4580cm^2/g
BF	高炉スラグ微粉末	密度=2.91g/cm^3，比表面積=6230cm^2/g
OPC	普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm^3，比表面積=3340cm^2/g
S	川砂	密度=2.60g/cm^3，吸水率=1.28%，粗粒率=2.62
G	砕石	密度=2.66g/cm^3，吸水率=0.98%，粗粒率=6.58，最大骨材寸法=20mm
SP	高性能減水剤	超高強度コンクリート用，ポリカルボン酸系
AEWR	AE 減水剤	一般コンクリート用，リグニンスルホン酸塩，オキシカルボン酸塩
AE	AE 剤	一般コンクリート用

表-2　結合材の化学成分

材料	化学成分 (%)									
	ig. loss	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
PFBC	3.10	44.60	10.00	4.15	—	26.36	2.42	5.88	0.60	0.76
BF	0.05	33.76	15.00	—	0.27	43.05	5.63	—	0.28	0.31
OPC	1.89	20.83	5.03	2.98	—	64.11	1.38	2.15	0.27	0.45

表-3　配合表

	W/B (%)	BF/B (%)	単位量 (kg/m^3)					混和剤 (B×%)
			W	PFBC	BF	S	G	
30-BF30	30	30	175	408	175	698	854	1.8 (SP)
PC	50	—	170	340 (OPC)		763	1026	1.0 (AEWR) 0.005 (AE)

＊W/B：水結合材比，BF/B：結合材に対する高炉スラグ微粉末の置換率

2. 試験概要

2.1 供試体作製方法

表-1 に試験で使用した材料を示し，**表-2** に結合材である PFBC 灰(PFBC)，高炉スラグ微粉末(BF)，普通ポルトランドセメント(OPC)の化学成分の一例を示す。本研究では，同程度の強度(目標強度 40N/mm^2)を持つ PFBC 灰硬化体(30-BF30)と普通コンクリート(PC)の 2 種類の供試体を作製した。**表-3** に各供試体の配合を示す。

30-BF30 の練混ぜには容量 10*l* のオムニミキサを使用した。最低練混ぜ量が約 95*l* (φ100×200mm，60 本)であったため，容量 50*l* のパン型ミキサの使用も検討したが，30-BF30 は粘性が高く均一に試料を練り混ぜることが困難であった。そのため，容量は小さいが練混ぜ効率の高いオムニミキサを用いて，1 バッチの練混ぜ量を 10*l* として 10 バッチの練混ぜを行った。なお，型枠への打込みは各バッチ練混ぜ終了毎に行った。これは試料の練混ぜから時間が経過すると，試料の流動性が低下して供試体作製に悪影響を及ぼすことを考慮したためである。一方，PC についてはパン型ミキサを用いて 1 バッチの練混ぜ量を 37*l* として 3 バッチの練混ぜを行い，練り板上で 3 バッチ分の試料を練り混ぜて一体化させてから型枠に打ち込んだ。

表-4 に作製した 30-BF30 と PC のフレッシュ性状を示す。30-BF30 は高流動化させているため 1，5，10 バッチ目にスランプフロー試験を行い，PC は練り板上で一体化させてからスランプ試験と空気量試験を行った。30-BF30 はランク 2 の自己充てん性 (500mm フロー到達時間：3～15sec，スランプフロー：600～700mm)[8] を目標とし，PC はスランプおよび空気量の目標値をそれぞれ 8±2.5 cm，4.5±1.5%とした。なお，PFBC 灰硬化体では AE 剤による空気量調整が困難であるため[3]，本研究では空気量の目標値を定めていない。**表-4** より，30-BF30 は 5 バッチ目のスランプフローと全バッチの 500mm フロー到達時間，PC はスランプについて目標値を満足できなかったことが分かる。しかし，30-BF30，PC 共に，供試体作製時には棒形振動機による振動締固めを行い，養生終了後の強度試験結果では目標強度 40N/mm^2 を概ね満足していることから，本研究の供試体作製方法については問題ないと判断した。なお，供試体の養生は試料打込み後 24 時間の前養生を行ってから，30-BF30 は水温 60℃の高

表-4　フレッシュ性状

種類	バッチ	500mm フロー (sec)	スランプフロー (mm)	養生終了後強度 (N/mm^2)
30-BF30	1	34.8	650	44.2
	5	55.7	595	
	10	58.2	610	
PC	1+2+3	スランプ 0.5cm 空気量 4.0%		37.9

温水中養生を 6 日間，PC は水温 20℃の標準水中養生を 27 日間行った。ただし，供試体の前養生は実験室内で濡れた麻布とビニルシートで覆った容器内で行い，30-BF30 の高温水中養生は**図-1** に示す養生水槽内で行った。高温水中養生水槽は市販のポリペールにヒータを取り付けたものであり，温度分布が均一になるように鑑賞魚用のエアーポンプで水を循環させている。

2.2 硫酸浸漬試験

本研究の硫酸浸漬試験では，硫酸浸漬後の供試体外観の観察および剥離厚さ，質量減少率，硫酸浸透深さ，圧縮強度の測定を行った。**表-5** に作製した円柱供試体(φ100×200mm)の供試体数と試験項目を示す。

硫酸浸漬試験は，東京都下水道局がまとめたコンクリート改修技術マニュアル[6]を参考にして行った。質量濃度 0.1%(pH=1.88)の硫酸試験液に養生終了後の 30-BF30, PC を浸漬し，浸漬期間は 1 年を超える長期間の 57 週間(約 400 日間)とした。なお，硫酸浸漬後の供試体圧縮強度(硫酸浸漬強度)を測定する C，C_p シリーズは，載荷面の保護のためにポリエチレン製の円筒容器から切り取って作製したキャップと粘着テープ，防食形のエポキシ樹脂塗料で被覆した。載荷面被覆の結果，供試体が硫酸に曝される試験面は供試体高さ 200mm のうち，約 70mm となった。試験には容量 45l のポリプロピレン製容器を用い，1 つの容器に 3 体の供試体を適当な間隔を開けて約 27l の試験液に浸漬した。なお，供試体を浸漬した容器は温度 20℃，相対湿度 60%の養生室内に静置している。試験液は原則として，D，D_p シリーズは 2 週間毎，C，C_p シリーズは 4 週間毎に交換した。これは D，D_p シリーズの試験液に接する面積が C，C_p シリーズより大きく，硫酸濃度の低下が早いためである。一方，水中浸漬強度を測定する W シリーズは 6 日間の高温水中養生終了後，W_p シリーズは 27 日間の標準水中養生終了後，温度 20℃の水中へ所定の期間浸漬した。

原則として，供試体の外観観察および剥離厚さ，質量減少率の測定は硫酸浸漬期間中 4 週間毎，硫酸浸透深さ，圧縮強度の測定は 0(I，I_p シリーズ)，8，20，33，45，57 週目に行った。剥離厚さ，質量減少率，硫酸浸透深さは以下に示す式(1)～(3)を用いて算出した。供試体の直径や質量を測定する際には，事前に高圧水で供試体を 1 分間洗浄して硫酸劣化による脆弱部分を取り除いた。また，硫酸浸透深さは，供試体をダイヤモンドカッターにより中央部で切断し，切断面にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧して赤く呈色した部分の直径を測定して求めた。そして，硫酸浸漬後の供試体圧縮強度は，硫酸浸漬前の供試体直径より求めた断面積を用いて計算を行った[5]。

$$T_e = (d_{ini} - d_t)/2 \tag{1}$$

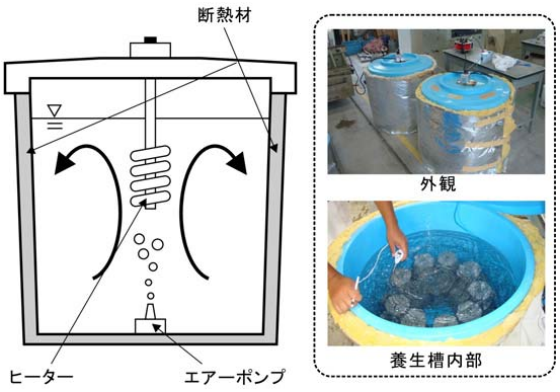

図-1　高温水中養生槽

表-5　作製供試体

シリーズ	目的	供試体数	試験項目				
			外観観察	剥離厚さ	質量減少率	浸透深さ	圧縮強度
I, I_p	初期値	×6	—	—	—	○	○
D, D_p	硫酸浸透深さ	×18	○	○	○	○	—
C, C_p	硫酸浸漬強度	×18	○	○	—	—	○
W, W_p	水中浸漬強度	×18	—	—	—	—	○

＊30-BF30：I，D，C，W シリーズ
PC：I_p，D_p，C_p，W_p シリーズ

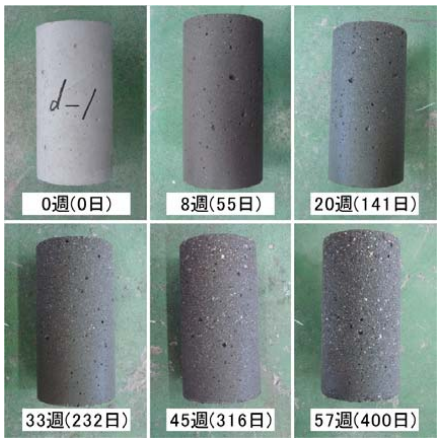

写真-1a　供試体外観の経時変化(30-BF30)

$$P_w = (w_{ini} - w_t)/w_{ini} \times 100 \tag{2}$$

$$D_s = (d_{ini} - d_{red})/2 \tag{3}$$

ここで，T_eは剥離厚さ(mm)，P_wは質量減少率(%)，D_sは硫酸浸透深さ(mm)，d_{ini}とw_{ini}は硫酸浸漬前の供試体直径(mm)と質量(g)，d_tとw_tは硫酸浸漬 t 日後の供試体直径(mm)と質量(g)，d_{red}は呈色部分の供試体直径を示す。

3. 試験結果および考察

3.1 供試体外観，剥離厚さ，質量減少率の経時変化

写真-1a, 1b にそれぞれ 57 週間まで硫酸に浸漬した 30-

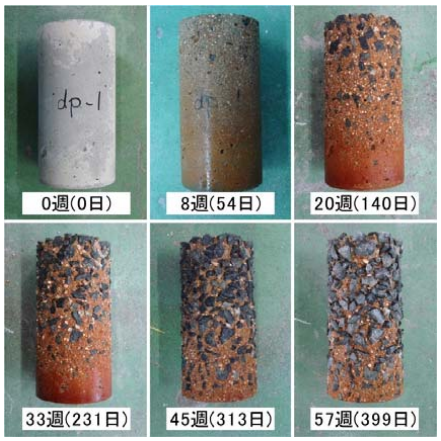

写真-1b　供試体外観の経時変化(PC)

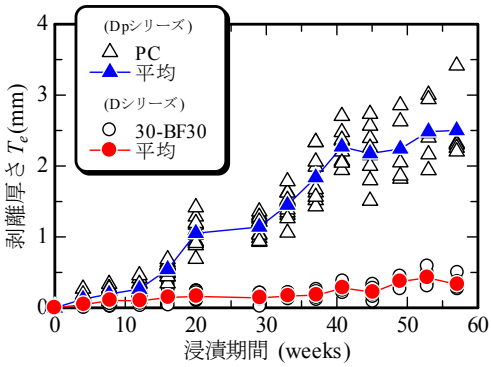

図-1　剥離厚さの経時変化

BF30 と PC の外観の経時変化を示す。ただし，写真は D，D_p シリーズの同一供試体の経時変化を示している。写真より，硫酸浸漬日数の経過に伴い両者とも硫酸による浸食が進んでいくが，その浸食状況は全く異なることが分かる。PC は硫酸浸漬 4 週間で打設面周囲から褐色に変色していき，8 週間で全体が変色した。その後，表層部分のモルタルが剥がれ落ちて粗骨材が露出した状態になり，57 週間では小粒径の粗骨材は剥落するまでになった。一方，30-BF30 も PC と同様に打設面周囲から表層部分が剥がれていったが，硫酸浸漬 57 週間でも細骨材が露出した状態に止まり，粗骨材露出までには至らなかった。また，C，C_p シリーズの硫酸浸食の進行は D，D_p シリーズよりも幾分早かったが，供試体外観の経時変化は D，D_p シリーズと同様の傾向を示した。

図-1 に 57 週間硫酸に浸漬した 30-BF30(D シリーズ)と PC(D_p シリーズ)の剥離厚さの経時変化を，**図-2** に質量減少率の経時変化を示す。図より，供試体の外観と同様に，硫酸浸漬日数の経過に伴い 30-BF30，PC 共に剥離厚さ，質量減少率が増加し，その増加割合は PC の方が明らかに大きいことが分かる。最終的な PC の剥離厚さは 30-BF30 の約 7.5 倍，質量減少率は約 5 倍となった。C，C_p シリーズの剥離厚さの経時変化でも D，D_p シリーズと同様の傾向を示し，最終的な PC の剥離厚さは 30-BF30 の約 5.5 倍となった。

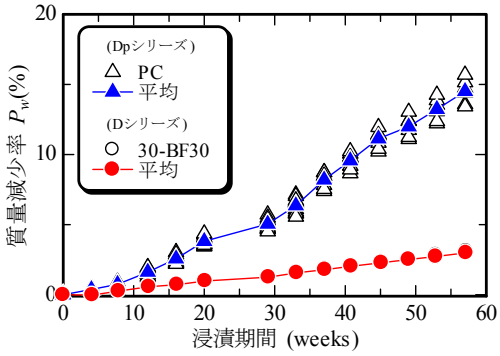

図-2　質量減少率の経時変化

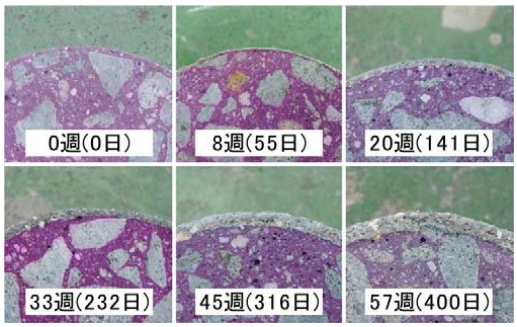

写真-2a　フェノールフタレイン呈色状況(30-BF30)

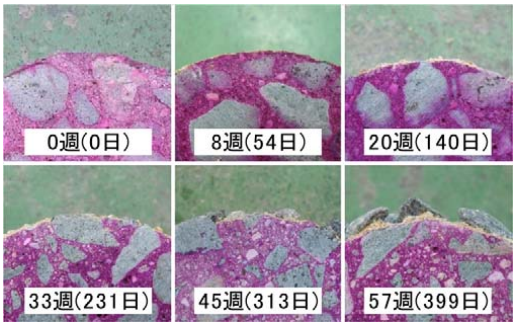

写真-2b　フェノールフタレイン呈色状況(PC)

3.2 硫酸浸透深さの経時変化

写真-2a，2b にそれぞれ 57 週間まで硫酸に浸漬した 30-BF30(D シリーズ)と PC(D_p シリーズ)のフェノールフタレイン溶液による呈色状況を示す。写真より，30-BF30 ではフェノールフタレイン溶液による呈色の境界線が硫酸により浸食された面よりも供試体の内側にあり，その傾向は硫酸浸漬日数の経過に伴い顕著になることが分かる。一方，PC は 30-BF30 とは異なり，硫酸浸漬日数が経過しても硫酸による浸食面と呈色の境界線は同一であった。フェノールフタレイン溶液による呈色の境界線は，供試体に浸透する硫酸の浸透フロントを表す。このことから，30-BF30 では供試体の浸食状況により硫酸がほとんど浸透してないように思えるが，実際は供試体内部にまで硫酸が浸透していることが分かる。

図-3 に 57 週間硫酸に浸漬した 30-BF30(D シリーズ)

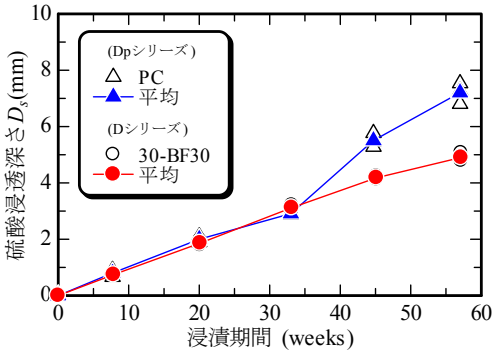

図-3　硫酸浸透深さの経時変化

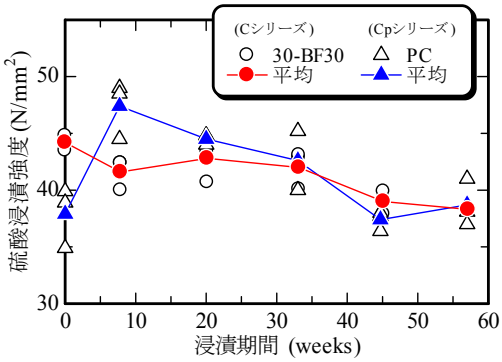

図-5　硫酸浸漬強度の経時変化

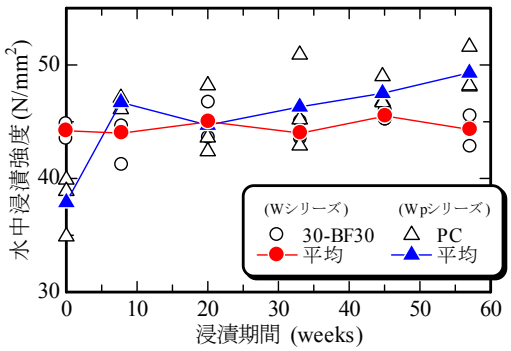

図-4　水中浸漬強度の経時変化

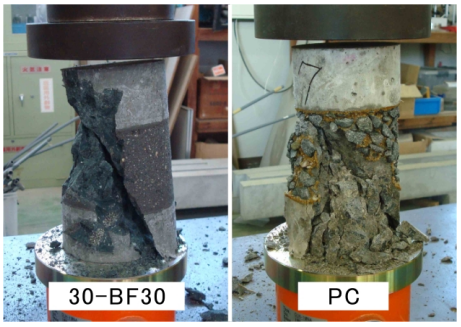

写真-3　供試体破壊状況(硫酸浸漬 45 週)

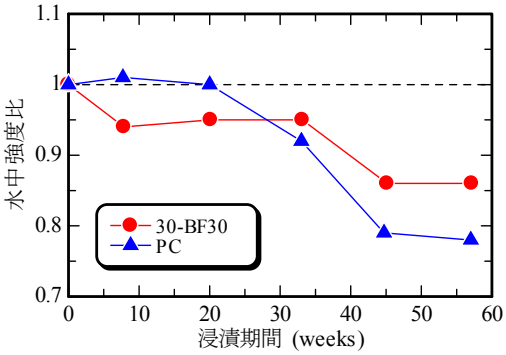

図-6　水中強度比の経時変化

と PC(D_p シリーズ)の硫酸浸透深さの経時変化を示す。図より，硫酸浸漬 33 週間までは 30-BF30，PC 共に硫酸浸透深さに違いは見られないが，33 週間を超えると PC の硫酸浸透深さが 30-BF30 よりも大きくなっていき，最終的には約 2.5mm の差が表れた。これは硫酸浸食により PC の粗骨材が露出した状態が激しくなり，供試体内部へ硫酸が浸透しやすくなったためと考えられる。

3.3 圧縮強度の経時変化

まず，**図-4** に 57 週間温度 20℃の水中に浸漬した 30-BF30(W シリーズ)と PC(W_p シリーズ)の圧縮強度の経時変化を示す。図より，PC は水中浸漬期間中，セメントの水和に伴う強度増進が見られ，水中浸漬 57 週間後には浸漬前の 1.3 倍の圧縮強度となった。一方，30-BF30 の圧縮強度は水中浸漬期間中，圧縮強度に変化が見られずほぼ同一の値を示した。PFBC 灰硬化体の長期的な強度発現の要因として，結合材である PFBC 灰の自硬性およびポゾラン反応，高炉スラグ微粉末の潜在水硬性が挙げられる。しかし，これまでの研究より，養生終了後の PFBC 灰硬化体からは水和物として水酸化カルシウムは確認されておらず[4)]，水酸化カルシウムを利用するポゾラン反応や潜在水硬性といった反応は期待できない。そのため，長期的な強度発現は PFBC 灰の自硬性に限定されるが，試験結果からは PFBC 灰の水和反応は長期的に継続されるものでなく，養生効果はほとんど無いと言える。

次に，**図-5** に 57 週間硫酸に浸漬した 30-BF30(C シリーズ)と PC(C_p シリーズ)の圧縮強度の経時変化を示す。図より，PC は硫酸浸漬 8 週間で一旦圧縮強度が増進するが，その後は低下する傾向を示すことが分かる。これは，硫酸浸漬中でも PC に養生による強度増進効果が現れたことを示し，初期の浸漬期間では硫酸劣化による圧縮強度の低下よりも養生効果の方が大きいと言える。しかし，長期の硫酸浸漬期間では PC は粗骨材が露出するほど断面積が減少するため，浸漬期間の経過に伴い圧縮強度は次第に低下していく。一方，30-BF30 は養生効果が表れないため，硫酸浸漬期間の経過に伴い圧縮強度は漸減していくが，その減少割合は PC よりも幾分緩やかであった。圧縮試験終了後の供試体を観察すると，30-BF30 は硫酸浸漬全期間において，せん断型の斜めひび割れが発生する一般的な破壊状況を示した。PC も初期の硫酸浸漬期間ではせん断型のひび割れが発生して破壊したが，硫

酸浸漬 33 週間以降になると，供試体上下面の被覆部分の片方が健全なまま壊れる，すなわち硫酸に曝されている試験面から壊れるという破壊状況が多く見られた。**写真-3** に硫酸浸漬 45 週間の 30-BF30 と PC の供試体破壊状況の一例を示す。なお，写真の供試体の圧縮強度は，30-BF30 は 39.9N/mm^2，PC は 37.7N/mm^2 であった。

前述したように，PC の硫酸浸漬強度は 30-BF30 と異なり養生効果の影響を無視できない。そこで，**図-6** に硫酸浸漬強度を水中浸漬強度で除して正規化した水中強度比を示す。図より，30-BF30 は硫酸浸漬日数の経過に伴い水中強度比は徐々に減少していくことが分かる。一方，PC の水中強度比は硫酸浸漬 20 週間まではほぼ 1 の値を示すが，20 週間を超えると 30-BF30 を上回る割合で水中強度比は低下していき，最終的な水中強度比は 30-BF30 が 0.86，PC が 0.78 となった。以上より，硫酸浸漬後の圧縮強度の低下割合は，硫酸浸食により粗骨材が露出するほど断面積が減少する PC の方が 30-BF30 よりも大きいと言える。

3.4 PFBC 灰硬化体の耐硫酸性

PFBC 灰硬化体，普通コンクリートの硫酸劣化は，両者とも結合材の水和物と硫酸との反応により劣化が進行していく。普通コンクリートでは，セメント水和物の水酸化カルシウムから二水石膏が，カルシウムシリケート水和物から二水石膏とシリカゲルが生成されるが，二水石膏生成に伴い固体体積が増加するため膨張圧が発生し，硫酸浸透部分は崩壊する [7]。しかし，PFBC 灰硬化体では水酸化カルシウムが確認されておらず，PFBC 灰水和物のカルシウムシリケート水和物と硫酸との反応が硫酸劣化の主な反応となるため [4]，普通コンクリートよりも硫酸浸食を抑制できると考えられる。硫酸浸食が進行した普通コンクリートは小粒径の粗骨材が剥落するまでになり，その剥落部分からコンクリート内部へさらに硫酸が浸透することから，硫酸劣化速度は加速していく。一方，PFBC 灰硬化体の硫酸浸食状況は細骨材が露出した状態に止まるため，硫酸の浸透，圧縮強度の低下は普通コンクリートと比較して緩やかに進行する。

以上を踏まえると，PFBC 灰硬化体は普通コンクリートよりも硫酸浸食を抑制することで硫酸浸透，圧縮強度の低下といった劣化現象を抑えることが出来るため，その耐硫酸性は高いと結論付けられる。

4. まとめ

本研究では，PFBC 灰硬化体(30-BF30)と普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート(PC)を，硫酸濃度 0.1%の試験液に 57 週間(約 400 日間)浸漬する硫酸浸漬試験を行った。以下に本研究により得られた知見を示す。

(1) 供試体外観の観察より，PC は表層部分のモルタルが剥がれ落ちて粗骨材が露出した状態になったが，30-BF30 の硫酸浸食状況は非常に穏やかであり，硫酸浸漬 57 週間でも細骨材が露出した状態に止まった。

(2) 硫酸浸漬日数の経過に伴い 30-BF30，PC 共に剥離厚さ，質量減少率が増加したが，その増加割合は PC の方が明らかに大きかった。

(3) 硫酸浸漬 33 週間までは，30-BF30，PC 共に硫酸浸透深さに違いは見られないが，粗骨材の露出が激しくなると PC の硫酸浸透深さが大きくなっていった。

(4) 硫酸浸漬後の圧縮強度の低下割合は，硫酸浸食により粗骨材が露出するほど断面積が減少する PC の方が 30-BF30 よりも大きい。

(5) PFBC 灰硬化体は普通コンクリートよりも硫酸浸食を抑制することで硫酸浸透，圧縮強度の低下といった劣化現象を抑えることが出来るため，その耐硫酸性は高いと結論付けられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり，株式会社フローリックから混和剤を提供して頂きました。また，研究を進める際には，中国電力株式会社の岩田数典様，呉高専環境都市工学科の沖田薫君，岡辻晋矢君，柏原康平君，数実浩佑君，森重茜さん，内田拓未君，目片雄土君から多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

1) 山田宏彰，三沢信博，高井真琴：石炭燃焼発電技術，日本エネルギー学会誌，Vol.82，No.11，pp.822-829，2003
2) 堀口至，市坪誠，田中雅章：PFBC 灰を結合材として用いた硬化体の圧縮強度および耐硫酸性，セメントコンクリート論文集，No.61，pp.572-578，2007
3) 堀口至，市坪誠，田中雅章，福本直：耐硫酸性を有する PFBC 灰硬化体の圧縮強度，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.529-534，2008
4) 堀口至，福本直，岩田数典，市坪誠：PFBC 灰硬化体の耐硫酸性に対する微細構造の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1855-1860，2009
5) 日本コンクリート工学協会：JIS 原案 コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法(案)，コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.59-62，1985
6) 東京都下水道局：コンクリート改修技術マニュアル(処理施設編)，2005
7) 蔵重勲，魚本健人：コンクリート中の水和物および微細構造が耐硫酸性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.469-474，2001
8) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，土木学会，pp.39-68，1998