

論文 硫酸劣化に起因するフライアッシュ混入コンクリートの中性化深さの予測に関する研究

永野 敬喜*¹・佐藤 嘉昭*²・大谷 俊浩*³・松井 弘*⁴

要旨：本研究では、硫酸環境下におけるコンクリートの中性化深さに及ぼすフライアッシュ混入の影響について検討するために、改質フライアッシュを混入したコンクリートに対して硫酸溶液浸漬実験を実施し、フライアッシュの影響を考慮した中性化深さ予測式の再構築を試みた。その結果、硫酸侵食に対する抵抗性が増すフライアッシュ混入量の範囲が存在することが明らかとなった。また、構築した中性化深さ予測式は、フライアッシュを混入したコンクリートに対しても比較的精度良く硫酸劣化に起因した中性化深さを予測することが可能であるが、硫酸溶液の調整方法の違いによる誤差が大きいことが明らかとなった。

キーワード：硫酸劣化、中性化深さ、フライアッシュ、コンクリート、pH、セメント水比

1. はじめに

コンクリートが硫酸や硫酸塩により著しい劣化を生じることは周知の事実である。このような外的要因に曝されるコンクリート構造物の維持保全計画を立てる際、コンクリートの余寿命の予測が大変に重要となる。しかしながら、硫酸や硫酸塩によるコンクリートの劣化は、そのメカニズムは解明されているものの、劣化の予測についてはいまだその予測手法が確立されていない現状にある。そこで、筆者らは、硫酸劣化に起因するコンクリートの余寿命を予測するために、モルタルおよびコンクリートの硫酸溶液浸漬実験を実施し、既往の文献データも含めて、中性化深さの予測式の提案を行った^{1, 2)}。これらの予測式は、普通ポルトランドセメントを使用したモルタルおよびコンクリートに限定されたものであったが、影響因子として硫酸溶液の pH とセメント水比を用いることで、ある程度の予測精度を有するものであった。

一方、硫酸侵食による主な劣化機構として、ポルトランドセメントの水和生成物である水酸化カルシウムと硫酸イオンが反応し、二水石膏の生成もしくは膨張性を有するエトリンガイトの生成が挙げられる。これらの抑制には、反応する水酸化カルシウム量を抑えることが重要であり、フライアッシュやスラグなどの混和材の混入が効果的であると言われている。しかしながら、フライアッシュを混入した場合、硫酸侵食に対する抵抗性が改善されるとする報告³⁾もあればそうでないとする報告⁴⁾もみられ、その効果に対して統一的な見解が得られていない現状にある。

そこで、本論文では、フライアッシュの混入がコンクリートの硫酸侵食に起因する中性化深さに及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、改質フライアッシュ

(Carbon-free Fly Ash, 以下, CffA)⁵⁾を混入したコンクリートの硫酸溶液浸漬実験を実施し、フライアッシュの影響を考慮した中性化深さ予測式の構築を試みた。

2. 硫酸溶液浸漬実験

2.1 実験方法

(1) 供試体作製

実験に使用した材料を表-1に、調合を表-2に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、混和材として改質フライアッシュを使用した。調合は、水結合材比を30, 40, 50 および 60%の4水準、改質フライアッシュ混入率をセメントの内割りで0, 20, 30, 40 および 60%置換した5水準の組合せの表に示す計18種類とした。

混練は、容量100リットルの2軸ミキサを用いて行った。目標のスランプおよび空気量は、それぞれ18±2cm および 4.5±0.5%とし、これらを満足するようにポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤および空気量調整剤もしくは消泡剤で調整を行った。

供試体は、φ100×200mm 円柱供試体とし、材齢1日で脱型後、所定の材齢まで20℃水中養生を行った。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、材齢28日に実施した。

表-1 使用材料

セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm ³
混和材 (CffA)	改質フライアッシュ 密度: 2.30 g/cm ³ , 強熱減量: 0.26 %, 比表面積: 3200 cm ² /g
細骨材 (S)	混合砂 表乾密度: 2.62 g/cm ³ , 吸水率 2.81 %
粗骨材 (G)	硬質砂岩碎石 表乾密度: 2.66 g/cm ³ , 吸水率 0.58 %

*1 大分大学大学院 工学研究科博士後期課程環境工学専攻 (株)永野工業 (正会員)

*2 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博 (正会員)

*3 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 大分大学大学院 工学研究科博士前期課程建設工学専攻 (非会員)

表-2 調合表

No.	略称	W/C (%)	W/B (%)	CfFA/ (C+CfFA) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					混和剤使用量	
						W	C	CfFA	S	G	SP (B×%)	助剤 (B×0.001%)
1	30FA0	30.0	30	0	39.4	175	583	0	614	960	0.75	0.50*
2	30FA20	37.5		20	37.8	175	467	117	575	960	0.65	0.75*
3	30FA40	50.0		40	36.2	175	350	233	536	960	0.65	2.00*
4	40FA0	40.0	40	0	43.7	175	438	0	735	960	0.70	0.50*
5	40FA20	50.0		20	42.7	175	350	88	706	960	0.60	3.00**
6	40FA30	57.1		30	42.2	175	306	131	691	960	0.50	1.00**
7	40FA40	66.7		40	41.7	175	263	175	677	960	0.40	0
8	40FA60	100.0	50	60	40.6	175	175	263	647	960	0.45	0.50*
9	50FA0	50.0		0	46.1	175	350	0	808	960	0.75	0.00*
10	50FA20	62.5		20	45.3	175	280	70	784	960	0.45	0.25*
11	50FA30	71.4		30	45.0	175	245	105	773	960	0.35	0.50*
12	50FA40	83.3		40	44.6	175	210	140	761	960	0.25	1.00*
13	50FA60	125.0	60	60	43.8	175	140	210	737	960	0.15	3.00*
14	60FA0	60.0		0	47.5	175	292	0	856	960	0.80	0.25*
15	60FA20	75.0		20	46.9	175	233	58	837	960	0.50	0.50*
16	60FA30	85.7		30	46.6	175	204	88	827	960	0.40	1.00*
17	60FA40	100.0		40	46.4	175	175	117	817	960	0.30	2.50*
18	60FA60	150.0		60	45.7	175	117	175	797	960	0.15	4.00*

SP: ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤

*: 空気量調整剤使用, **: 消泡剤使用

(3) 硫酸溶液浸漬試験

硫酸溶液浸漬試験は、材齢 33 日に水中から取り出した供試体の両端面をエポキシ樹脂でコーティングし、材齢 35 日から浸漬を開始した。この硫酸溶液濃度は 3% とした。硫酸溶液の濃度調整は、JIS 原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)」⁶⁾ に準拠し、浸漬期間 4 週までは 1 週間に 1 回、その後 12 週までは 2 週間に 1 回、その後は 1 ヶ月に 1 回、全量交換とした。

中性化深さの測定は、硫酸溶液浸漬期間 13 週に行い、供試体の中央部をコンクリートカッターで切断し、ただちにその切断面に 1% フェノールフタレイン溶液を吹き付け、供試体表面から呈色境界までの深さ（中性化厚さ）を測定した。ここで言う中性化深さは、その中性化厚さに、初期表面位置から硫酸侵食により欠損した深さ（侵食深さ）を加えた値である¹⁾。

2.2 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験

表-3 に実験結果一覧を示す。W/B および CfFA 置換率が大きいほど、圧縮強度は小さくなった。

(2) 硫酸溶液浸漬試験

a) 概観

写真-1 に浸漬期間 3 ヶ月における供試体概観の一例を示す。供試体の概観は、W/B および CfFA 置換率が小さいほど、表面が剥落し、粗骨材の露出が多く観察される傾向にあった。

b) 中性化厚さ

浸漬期間 3 ヶ月における中性化厚さは、表-3 に示すように、全体的にみて、W/B および CfFA 置換率が大きいほど、厚い傾向にあった。また、一部、中性化深さより中性化厚さが大きいものがあるが、これは硫酸との反応で生じた膨張性生成物により初期寸法より大きくなって

表-3 実験結果一覧

略称	W/B (%)	圧縮強度 (N/mm²)	中性化厚さ (mm)	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√day)	中性化速度係数比
30FA0	30	70.1	1.8	6.4	0.070	1.000
30FA20		61.3	3.6	6.6	0.072	1.036
30FA40		55.5	2.2	3.3	0.036	0.523
40FA0	40	55.7	2.6	6.2	0.068	1.000
40FA20		48.9	2.9	4.9	0.054	0.802
40FA30		42.6	2.4	4.3	0.047	0.699
40FA40		37.3	3.8	5.3	0.058	0.854
40FA60	50	20.7	4.4	4.7	0.051	0.761
50FA0		45.1	4.2	6.2	0.068	1.000
50FA20		34.4	4.4	3.7	0.040	0.590
50FA30		28.8	4.9	3.4	0.037	0.547
50FA40		24.1	4.2	3.1	0.034	0.500
50FA60	60	13.7	7.8	6.8	0.074	1.094
60FA0		38.3	3.8	5.5	0.061	1.000
60FA20		27.2	4.6	4.0	0.044	0.724
60FA30		20.5	5.2	5.0	0.055	0.907
60FA40		15.2	4.9	4.9	0.053	0.880
60FA60		8.0	7.8	8.4	0.092	1.519

注) 圧縮強度は浸漬開始時、硫酸浸漬試験結果は浸漬期間 3 ヶ月のデータ

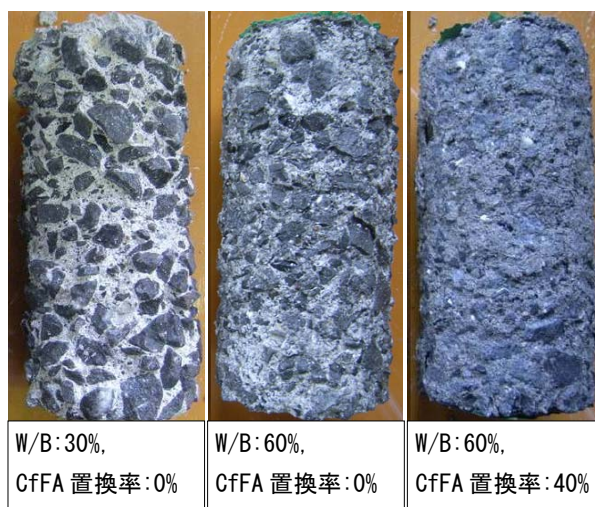


写真-1 供試体の概観の一例（浸漬期間 3 ヶ月）

いるためである。

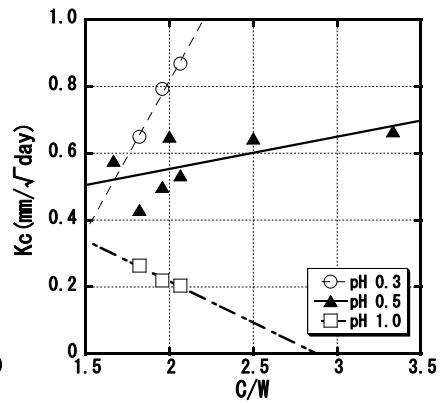
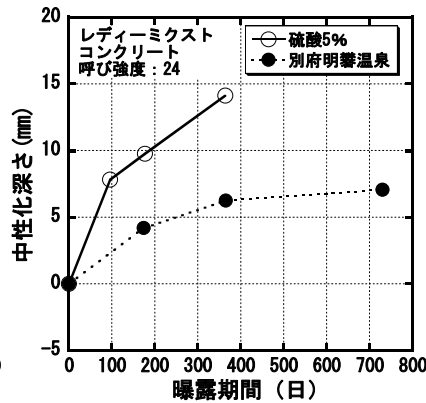
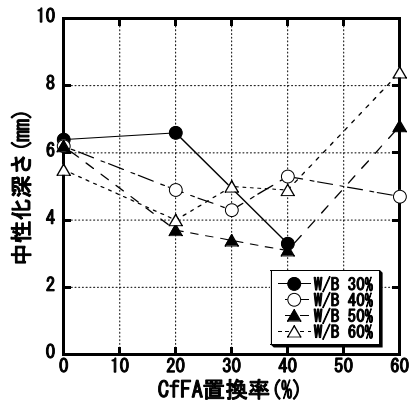


図-1 中性化深さと CfFA 置換率の関係 図-2 中性化深さ長期進行状況の一例⁷⁾ 図-3 C/W と中性化速度係数の関係

c) 中性化深さ

図-1 に中性化深さと CfFA 置換率の関係を示す。図より、W/B が大きいほど、中性化深さは大きくなるのがわかる。しかしながら、W/B により異なるが、CfFA 置換率が 20～40% の範囲では、CfFA 無混入に比べて中性化深さが小さくなる傾向が見られるが、CfFA 置換率 60% では逆に大きくなっていることがわかる。これは、低い CfFA 置換率においては、セメント代替の CfFA の充填効果により、硫酸による侵食を遮蔽するが、CfFA を過大に混入した場合、コンクリートの内部組織構造が粗大化したためと考えられる。また、このことは概観観察の結果と一致しておらず、CfFA 混入コンクリートの硫酸による劣化の進行度を概観観察のみで評価できないことを示唆している。ただし、今回の実験では、一般的なフライアッシュのボゾラン活性の影響が現れる以前に浸漬を開始しているが、ある程度反応が進行した場合には異なった結果が現れることも考えられるため、この点について今後検討する必要があると考えられる。

3. 劣化予測式の構築

3.1 コンクリートの中性化予測式の基本式

既報で提案した予測式は、コンクリートの中性化の進行が経時に比例 (t 則) すると仮定した²⁾。しかしながら、その後得られたコンクリートの硫酸浸漬長期実験データを検討した結果、図-2 に示すように、中性化の進行が経時の平方根に比例 (ルート t 則) している傾向がみられた⁷⁾。そこで、本研究では、中性化深さの進行がルート t 則に則ると仮定した式(1)を基本式とした。また、中性化速度係数はセメント水比、硫酸濃度 (pH で表わす)、CfFA の混入量に影響を受けるものと仮定して、式(2)で表すことにした。

$$C_c = K_c \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

$$K_c = f_1(C/W) \cdot f_2(pH) \cdot f_3(CfFA) \quad (2)$$

ここに、 C_c : コンクリートの中性化深さ (mm)

K_c : 中性化速度係数 (mm/√day)

t : 経過時間 (day)

f_1 : C/W の影響係数

f_2 : pH の影響係数

f_3 : CfFA の混入による影響係数

以降に示す予測式の展開手順として、既報²⁾の実験データを含めて実験データを蓄積することができたことから、これらの実験データのみを用いて、まず CfFA 無混入の基準コンクリートに対して既報とは異なるアプローチで予測式を構築することとした。

3.2 セメント水比の影響

図-3 に基準コンクリートの C/W と中性化速度係数の関係を示す。これ以降に示す pH の値は、既報で示した硫酸濃度と pH の関係の略算式より求めたものである²⁾。図より、pH が小さい場合、C/W が大きいほど、中性化速度係数は大きくなり、逆に pH が大きい場合、C/W が大きいほど、中性化速度係数は小さくなる傾向にある。これは、これまでの報告と傾向が一致している。

pH 0.5 の場合においては、広範囲に C/W が存在していることから、C/W の影響が明確に表わされていると推測される。そこで、pH 0.5 のときの f_2 と f_3 を 1.0 と仮定し、C/W と中性化速度係数の関係を式(3)に示す C/W の影響係数 $f_1(C/W)$ とした。

$$f_1(C/W) = 0.360 + 0.097 \cdot C/W \quad (3)$$

3.3 pH の影響

基準コンクリートの中性化速度係数を式(3)で除して得られる $f_2(pH)$ と pH の関係を図-4 に示す。図より、 $f_2(pH)$ と pH の関係を指数式で近似すると、式(4)が得られた。

$$f_2(pH) = 2.435 \cdot e^{-1.754pH} + 0.027 \quad (4)$$

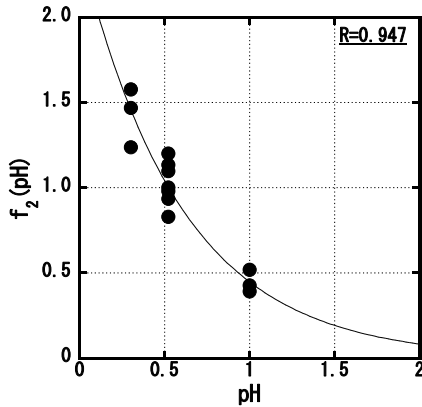


図-4 $f_2(\text{pH})$ と pH の関係

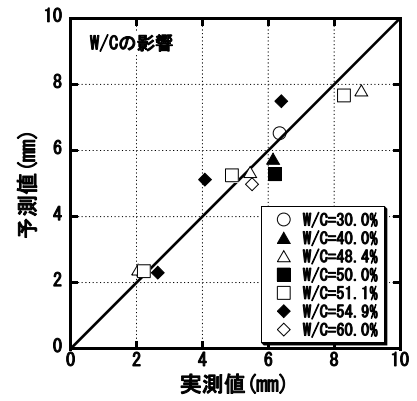
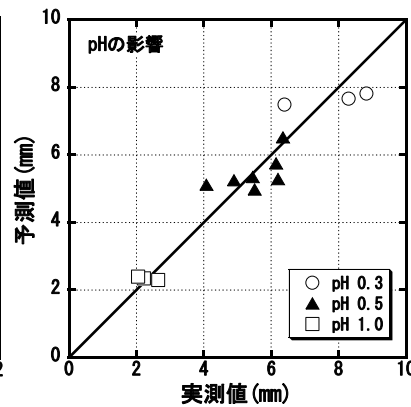


図-5 中性化深さの予測値と実測値の関係（本実験データ）

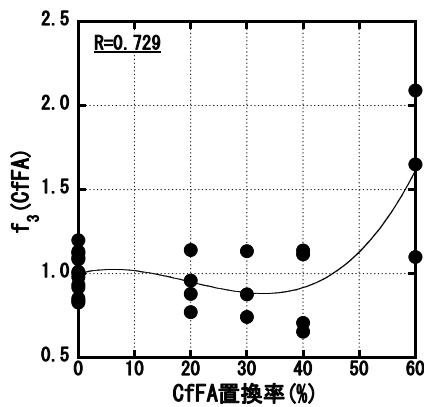


図-6 $f_3(\text{CfFA})$ と CfFA 置換率の関係

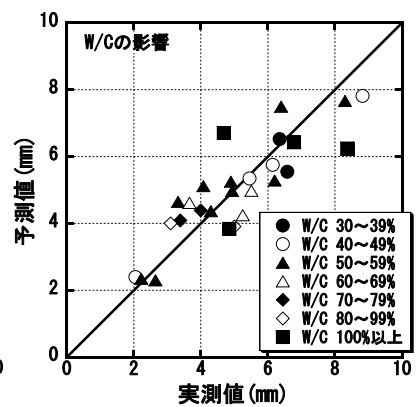
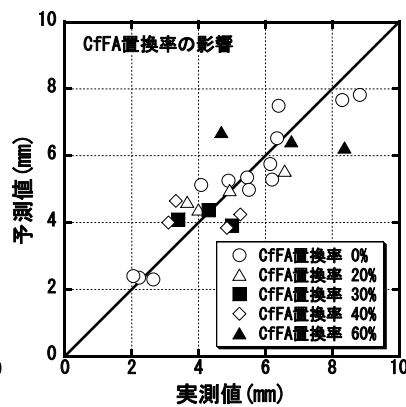


図-7 実験結果の実測値と予測値の関係

以上より、基準コンクリートの中性化深さ予測式は、式(5)のように表すことができる。

$$C_c = \{(0.360 + 0.097 \cdot C/W) \cdot (2.435 \cdot e^{-1.754 \text{pH}} + 0.027)\} \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

基準コンクリートの中性化深さの実測データと式(5)による予測値とを比較して示した図が図-5である。pHおよびW/Cごとに実測値と予測値の関係を示すが、図より、低pHの場合にはばらつきはあるものの精度よく推定できていることが分かる。

3.4 CfFA 混入の影響

図-6にCfFAを混入したデータを含めた全実験データの中性化速度係数を式(3)および式(4)で除して得られる $f_3(\text{CfFA})$ とCfFA置換率の関係を示す。実験データは、かなりのばらつきを示しているが、CfFAの混入率が40%付近で極小値を取ることが分かる。ここでは、両者の関係を式(6)で近似することにした。

$$f_3(\text{CfFA}) = 1.000 + 0.009 \cdot \text{CfFA} - 0.0009 \cdot \text{CfFA}^2 + 0.000015 \cdot \text{CfFA}^3 \quad (6)$$

以上より、CfFAを混入したコンクリートの中性化深さの予測式は、式(7)のように表すことができる。

$$C_c = \{(0.360 + 0.097 \cdot C/W) \cdot (2.435 \cdot e^{-1.754 \text{pH}} + 0.027) \cdot (1.000 + 0.009 \cdot \text{CfFA} - 0.0009 \cdot \text{CfFA}^2 + 0.000015 \cdot \text{CfFA}^3)\} \cdot \sqrt{t} \quad (7)$$

式(7)による本実験における中性化深さの予測結果を図-7に示す。図より、比較的精度の高い予測式を構築できていることがわかる。

4. 予測式の検証

(1) 収集文献データ

予測式の検証のために、日本国内で報告されたフライアッシュを混入した硫酸浸漬実験データを収集した。表-4に収集した文献データの一覧を示す。収集した文献数は9件、測定データ数は37個であった。このうち中性化深さ予測式の検証に用いることのできるコンクリートに関するデータが非常に少なく、既報の検討にてモルタルとコンクリートの中性化の進行に明確な差が認められなかったことから²⁾、表中に○印を付したモルタルのデータも合わせて検討することとした。また、これに本実験

表-4 収集データの概要

著者	セメント 種類	マトリ ックス 種類 ^{*1}	W/B (%)	FA 置換率 (%)	供試体 寸法 (cm)	溶液 種類	pH	濃度 (%)	pH 換算値	温度 (°C)	調整 方法 ^{*2}	浸漬 期間	中性化 深さ	侵食 深さ	使用 データ
田中ら ⁴⁾	FA (B種)	C	40	20	φ10 ×20	硫酸	1.5, 2.2, 3.0	-	1.5, 2.2, 3.0	20	G	69週	○	-	○
蔵重 ⁸⁾	普通	P	30, 40, 55, 77	30, 50	φ5 ×10	硫酸	0.5, 1.0, 1.5, 3.0	-	0.5, 1.0, 1.5, 3.0	20	D, E	77, 91日	-	○	-
山地ら ⁹⁾	普通	C	50	30	4×4 ×16	硫酸	0.1	-	0.1	20	H, I	29週	-	○	-
添田ら ¹⁰⁾	普通	C	47	30	10×10 ×40	硫酸	-	5	0.3	-	F	10週	-	○	-
浅上ら ¹¹⁾	FA (B種)	M	55	20	4×4 ×4	硫酸	-	2, 1	0.7, 1.0	-	C	26週	○	-	○
岩城ら ¹²⁾	普通	C	34.9	20	φ10 ×20	硫酸 2: 硝酸 1	3.0	-	3.0	-	H, E	2年	○	○	-
納口ら ¹³⁾	普通	M	65	20	4×4 ×4	硫酸	-	3, 1.5 , 0.5	0.5, 0.8, 1.3	20	F	3ヶ月	○	-	○
河合ら ¹⁴⁾	普通	P	35	30, 50	4×4 ×16	硫酸	1.0	-	1.0	20	D	116日	○	-	-
上田ら ¹⁵⁾	普通	C	34.9	20	10×10 ×40	硫酸 2: 硝酸 1	3.0	-	3.0	-	D, E	2年	-	○	-
本実験	普通	C	30, 40, 50, 60	20, 30, 40, 60	φ10 ×20	硫酸	-	3	0.5	-	A	3ヶ月	○	○	○

*1: P: ペースト, M: モルタル, C: コンクリート

*2: 【調整方法】A: JIS 原案, B: 随時全量交換, C: 1週に1度全量交換, D: 適宜硫酸を添加し調整, E: 1ヶ月に1度全量交換, F: 2週に1度全量交換, G: 9ヶ月まで毎日, それ以降数日おき, H: 一定期間, I: 流水

データおよび既報で示した基準モルタルおよびコンクリートのデータも合わせた計 222 個のデータを用いて検討した^{1,2)}。

(2) 硫酸溶液調整方法の影響

本実験における硫酸溶液の調整方法は、定期的に溶液を交換する JIS 原案に準拠している。しかしながら、収集した文献データのなかには、上記の溶液交換に加えて硫酸を追加して調整を行っているものや、自動的に随時調整しているものが存在した。硫酸溶液にコンクリートを浸漬すると、コンクリート中のアルカリ分の溶出などにより、図-8 に示すように、溶液の pH はアルカリ側へ移行する。そのため、調整頻度が異なる場合、中性化の進行に影響を与えることが考えられる。

図-9 に提案した予測式を用いたコンクリートのみの予測値と実測値の関係を示す。図より、JIS 原案およびそれに類似した方法で調整したデータは精度よく予測できているが、随時調整した場合は非常に小さく予測しており、溶液の調整方法の違いが中性化の進行に及ぼす影響は大きいことがわかる。現時点では実験データが少ないため、今後この影響について検討する必要がある。

(3) 予測精度の検証

図-10 にフライアッシュ無混入、図-11 にフライアッシュ混入データの予測値と実測値の関係を示す。溶液の調整方法の違いにより大きく外れているものがあるが、JIS 原案と同様に調整したものはおおそプラスマイナス 30% の範囲に収まっており、今回提案した中性化深さの予測式はフライアッシュ混入のコンクリートに対しても、ほぼ実験データを表わすことができていると考えられる。

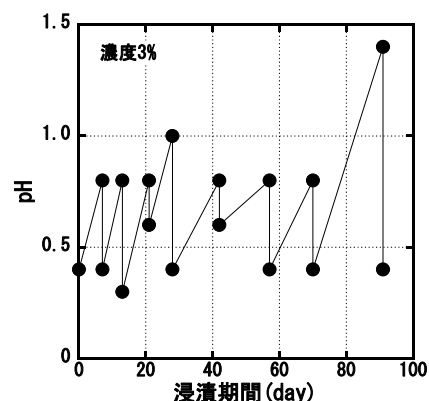


図-8 本実験における硫酸溶液の pH の経時変化
(溶液交換前後に測定)

5. まとめ

本研究では、硫酸浸食によって劣化した C_fFA コンクリートの中性化深さ予測式の構築を目指し、硫酸溶液に浸漬したコンクリートの実験結果を基に、コンクリートの中性化深さ予測式を再構築した。その結果、本研究の範囲内で、以下のような知見を得た。

- 1) 水結合材比および C_fFA 置換率が大きいほど、供試体表面の粗骨材の露出が多く、また中性化厚さが厚い傾向にある。
- 2) 中性化速度係数は、C_fFA 置換率 60% では C_fFA 無混入に比べて大きい傾向を示すが、C_fFA 置換率が 20～40% の範囲では低下し、C_fFA による中性化の抑制効果が認められる。
- 3) 今回提案した硫酸劣化に起因したコンクリートの中性化深さの予測式は、硫酸溶液の調整方法による誤差が生じているものの、フライアッシュを混入したコンクリー

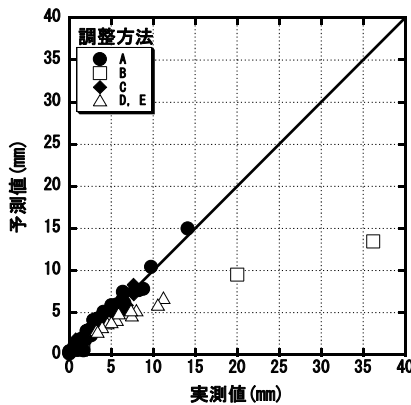


図-9 溶液の調整方法の影響
(コンクリートのみ)

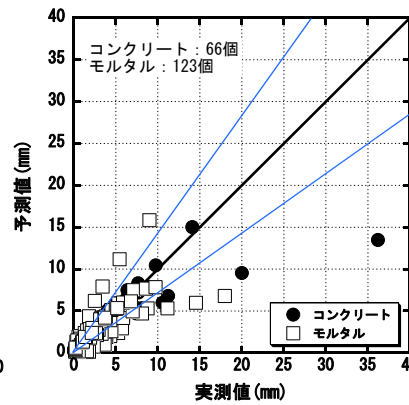


図-10 中性化深さの予測値と実測値の
関係 (フライアッシュ無混入)

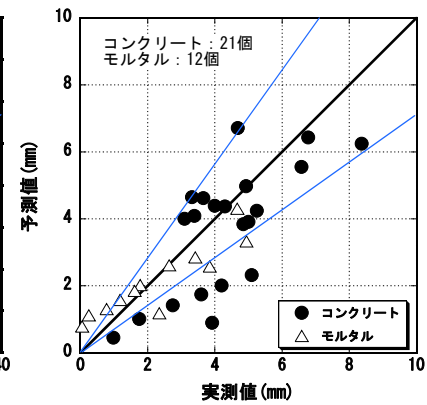


図-11 中性化深さの予測値と実測値の
関係 (フライアッシュ混入)

トの中性化深さをほぼ表わすことができる。

以上のように、普通ポルトランドセメントを用いてフライアッシュを混入したコンクリートにおいても硫酸侵食による中性化深さの予測の可能性を示した。今後、予測の精度を向上させるためには、データの蓄積を行い、フライアッシュの物性の違いによる影響のほか、セメント種類、養生条件および曝露条件の違いなどの検討が必要である。

謝辞

本実験は、大分大学 VBL プロジェクト研究 C「研究課題：硫酸劣化を受けるコンクリートの劣化予測式の構築に関する研究 (H19～H20 年度)、研究代表：大谷俊浩」の支援を受け実施したものである。また、実験の実施にあたり、本学技術職員・遠矢義秋氏、本学卒論生・浅野耕平君のご助力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 永野敬喜ほか：硫酸劣化に起因したモルタルの中性化深さ予測式の構築，セメント・コンクリート論文集，No.62，pp.303-310，2009.2
- 2) 永野敬喜ほか：硫酸劣化に起因するコンクリートの中性化深さ予測に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.979-984，2009.6
- 3) 福留和人ほか：酸性雨による劣化防止対策としてのフライアッシュの有効性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.183-188，2008.6
- 4) 田中斉，榊田佳寛：硫酸および硝酸によるコンクリートの化学的腐食進行に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 73 巻，第 625 号，pp.355-361，2008.3
- 5) 李相培：焼成工程を備えた風力微粉碎処理システム

による石炭灰の改質，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.183-188，2007.6

- 6) JIS 原案「コンクリートの溶液浸せき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.59-63，1988.11
- 7) 秋吉善忠ほか：硫酸塩侵食を受けるコンクリート構造物の補修材料に関する研究，その 3 別府明礬温泉における曝露 2 年結果，日本建築学会九州支部研究報告，第 48 号，pp.141-144，2009.3
- 8) 蔵重勲：硫酸によるコンクリート劣化のメカニズムと予測手法，東京大学博士論文，2002.3
- 9) 山地伸弥ほか：硫酸によるコンクリートの劣化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1125-1130，2004.6
- 10) 添田政司ほか：混和材の併用がコンクリートの化学的耐久性に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.45，pp.228-233，1991.12
- 11) 浅上修ほか：各種セメントの耐硫酸性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，NO.50，pp.152-157，1996.12
- 12) 岩城圭介ほか：微視的断面観察による酸劣化したコンクリートの微細構造の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.999-1004，2004.6
- 13) 納口恭太郎ほか：硫酸侵食が鉄筋の腐食発生条件に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1077-1082，2008.6
- 14) 河合研至ほか：耐酸性セメント系材料の硫酸抵抗メカニズムに関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.61，pp.344-349，2007.2
- 15) 上田洋ほか：酸性水の作用を受けたコンクリートの特性および劣化予測，土木学会論文集 E，Vol.63，No.1，pp.27-41，2007.1