

下水道用コンクリートの耐硫酸性に及ぼす混和材の影響

広島工業大学大学院 学生会員 ○高野 修壮
広島工業大学 フェロー会員 米倉 亜州夫
広島工業大学 正会員 伊藤秀敏
大広エンジニアリング(株) 山本修照

1. はじめに

近年、下水道コンクリートにおいて、硫酸による劣化が社会的に大きな問題となっている。今までの既往の研究によりセメントの量を減らし、混和材とセメントの一部を置換することによって耐硫酸性が得られることが明らかとなっている¹⁾。

本研究では、硫酸による劣化を抑制するため、硫酸劣化の主原因となるコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量の抑制をセメント量の低減と混和材のポズラン反応や潜在水硬性による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費を検討すると共に混和材種別による耐硫酸性の相違を検討した。そのため、セメント量、セメント種別、混和材種別、標準養生日数を変化させて作製したモルタルを用いて、希硫酸中の質量減少率試験、硫酸浸透深さ試験および標準養生による圧縮強度試験より判定した。同時に、材齢 3 日の供試体に鉄筋を挿入し希硫酸浸漬した場合、モルタル内部への硫酸浸透深さと鉄筋腐食の関係も検討した。また、各々の混和材を単独で用いたモルタルの耐硫酸性に及ぼす影響を検討するため、硫酸による影響が小さいと考えられる石灰石微粉末を併用し、普通ポルトランドセメントの一部と置換したモルタルで上記と同様の試験より判定を行った。

2. 実験概要

1) 使用材料及び配合

使用材料を表-1 に示す。モルタルの配合は表-2-1,2 に示す。

2) 実験方法

ホバート型モルタルミキサを使用し、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の供試体の作製を行った。質量減少率及びフェノールフタレイン液による硫酸劣化深さ試験は、供試体をセメント種別、および材齢 3 日で脱型し浸漬したものと

表-1 使用材料

記号	種類	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)
C (OP)	普通 P C	3.15	3350
C(高 B)	高炉セメント B 種	3.04	3870
SF	シリカフューム	2.23	200000
BFS	高炉スラグ微粉末	2.85	7800
FA	フライアッシュ	2.10	3300
MP	砥石粉	2.65	3000
BFF	高炉フューム	2.05	20000
LP	石灰石微粉末	2.75	2500

表-2-1 モルタルの配合 (普通ポルトランドセメント使用)

No	C	SF	BFS	FA	MP	BFF	LP	day
1	100	—	—	—	—	—	—	3,28
2	50	25	25	—	—	—	—	3
3	50	10	40	—	—	—	—	3
4	50	10	20	20	—	—	—	3,28
5	50	12.5	25	—	12.5	—	—	3,28
6	50	10	—	30	10	—	—	3,28
7	50	20	—	30	—	—	—	3,28
8	30	—	—	40	—	30	—	3,28
9	20	20	30	30	—	—	—	3,28
10	50	25	—	—	—	—	25	3
11	50	—	25	—	—	—	25	3
12	50	—	—	25	—	—	25	3
13	50	—	—	—	25	—	25	3
14	50	25	25	—	—	—	—	3
15	50	25	—	25	—	—	—	3
16	50	25	—	—	25	—	—	3
17	50	—	—	—	50	—	—	3

キーワード 耐酸性 混和材 コンクリート

連絡先〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻 TEL 0829-21-5495

脱型してから標準養生 28 日間後に浸漬したもの 2 種とし、質量減少率は濃度 5% の希硫酸溶液に上記の 2 種の材齢で浸漬し、浸漬日数 84 日まで測定した。フェノールフタレイン液による硫酸劣化深さ試験は 28、56、91 日に測定し、測定部分は二水石膏化し剥離した部分、硫酸が浸透し酸性化している部分の合計部分とし、供試体高さの上、中、下の平均値を算出した。また、同時に鉄筋腐食度検査を 63 日、91 日、119 日に行った。なお、7 日毎に希硫酸を入れ替えた。標準養生した供試体の圧縮強度試験は、材齢 3 日で標準養生を開始し、材齢 3、7、28 日に 300 k N 万能試験機で行った。

3. 試験結果及び考察

3.1 水酸化カルシウム量が耐硫酸化に及ぼす影響

(1) セメント量別による検討

図-1 は、普通ポルトランドセメントを使用したモルタル供試体を材齢 3 日で希硫酸浸漬し、浸漬 84 日時点での質量減少率をセメント量別に表した図である。この図より、C20SF20BFS30FA30 (No.9) の配合と C50SF20FA30(No.7) の配合を比較した場合、セメントの量が多い No.7 の質量減少率が大きい。これは水とセメントとの水和反応によって生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の量が増加したため、その $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と硫酸が反応し、二水石膏を生じ、劣化したと考えられる。なお、セメント量 50% の配合においては混和材種類による影響が見られ、浸漬長期において No.3 の場合、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性によって長期にわたって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を消費することが耐硫酸性の向上に繋がったと考えられる。

(2) セメント種別による検討

セメント種別と質量減少率の関係 (浸漬 84 日)

図-2 は、セメント種別におけるセメント量と浸漬 84 日後の質量減少率の関係を表した図である。この図より、高炉セメントを 100% 使用した配合では、普通ポルトランドセメントを 100% 使用した配合に比べ、耐硫酸性が向上しているのが認められる。これは、高炉セメント B 種の場合、普通ポルトランドセメント 100% の場合に比べセメントの含有率が 40~70% 以下と小さく、水和反応に伴う水酸化カルシウムの生成量が少ないためと考えられる。

(3) 標準養生日数別

図-3,4 は標準養生日数別に各供試体の希硫酸浸漬 56 日、84 日時点による質量減少率との関係を表した図で

表-2-2 モルタルの配合 (高炉セメント B 種使用)

No	C	SF	BFS	MP	day
18	100	—	—	—	3
19	50	25	25	—	3
20	50	12.5	25	12.5	3

※表 2-1,2 の数字は共に重量比率である。なお、day=材齢日数 (3=3 日,28=28 日) である。

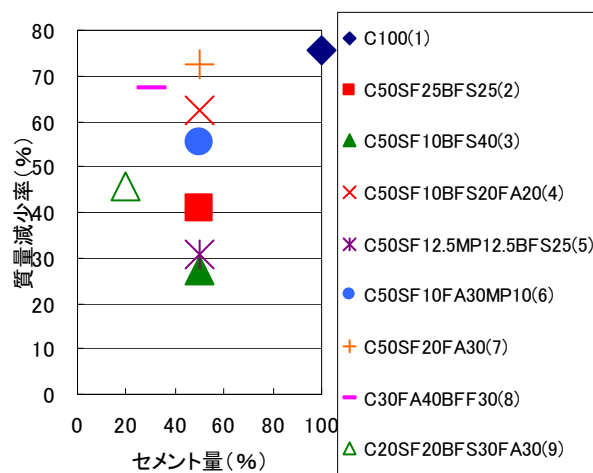


図-1 セメント量と質量減少率の関係 (浸漬 84 日)

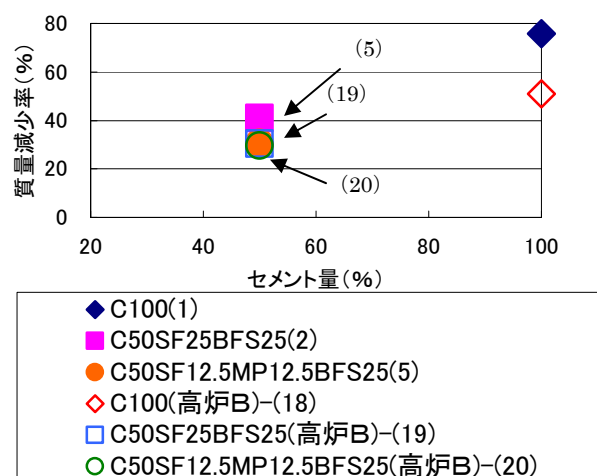


図-2 セメント種別と質量減少率の関係 (浸漬 84 日)

ある。図 3 と図 4 より、希硫酸浸漬 56 日においては全ての配合において標準養生日数が増すほど、質量減少率が増加している。一方、希硫酸浸漬 84 日時点では質量減少率は 56 日浸漬の場合より全体としては増大しているが、養生日数による差が小さくなっている。これは、標準養生日数 3 日で、希硫酸浸漬 56 日の場合、水和反応量が小さく、水酸化カルシウムの生成量が少な

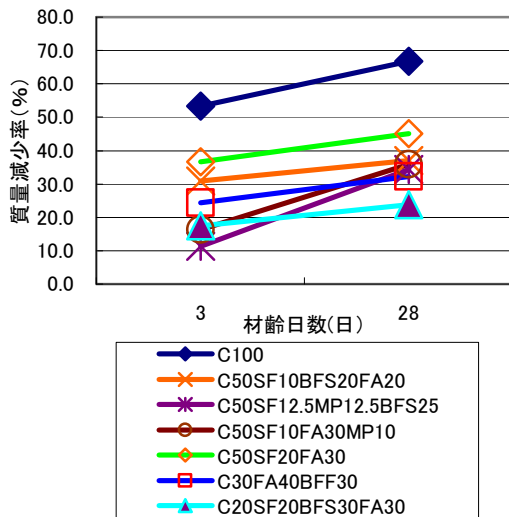


図-3 材齢別における各供試体の質量減少率変化
(浸漬 56 日)

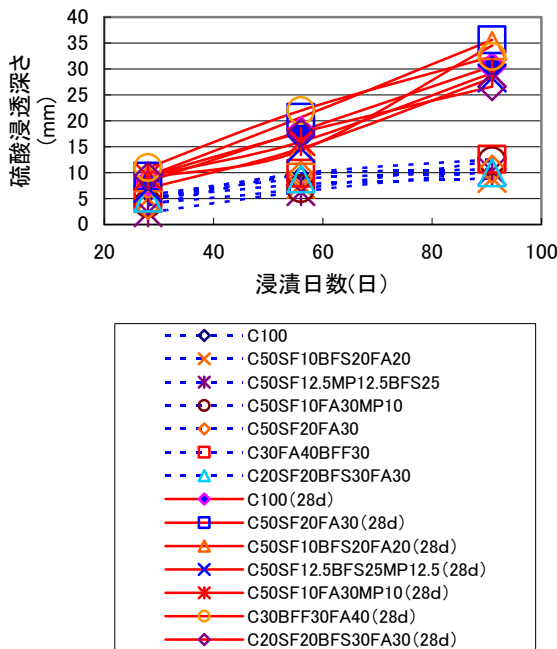


図-5 浸漬日数毎の硫酸浸透深さ(細線＝材齢 28 日、
点線＝材齢 3 日)

いため、質量減少率が 28 日標準養生の場合より小さくなったこととセメント量が 50%と同一で、水酸化カルシウムの生成量が同一でも、ポズラン反応又は潜在水硬性による反応で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量が混和材によって異なるため、混和材種別によって質量減少率が異なっている。標準養生期間が 28 日と大きい供試体の場合、砥石粉を用いた場合 (No.5) 初期強度発現は小さいが材齢 28 日までには強度が発現するため、質量減少率が増大している。浸漬 84 日目での質量減少率が養生日数

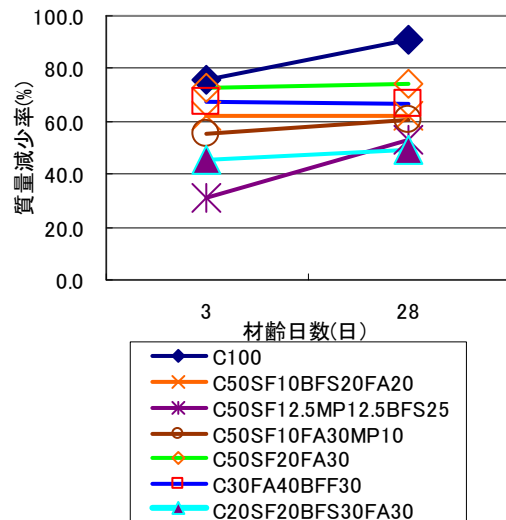


図-4 材齢別における各供試体の質量減少率変化
(浸漬 84 日)

が相違しても差が小さくなっているのは、濃度 5%の希硫酸中でも水和反応は持続されるので、標準養生期間が 3 日の場合でも $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量が増大し、標準養生期間 28 日の場合と大差なくなったと考えられる。また、材齢 28 日の供試体は長期 84 日間浸漬した場合、供試体の大きさは、表面剥離によって小さくなってきているので、浸漬 56 日の場合より質量減少率としては少なくなっていることが考えられる。

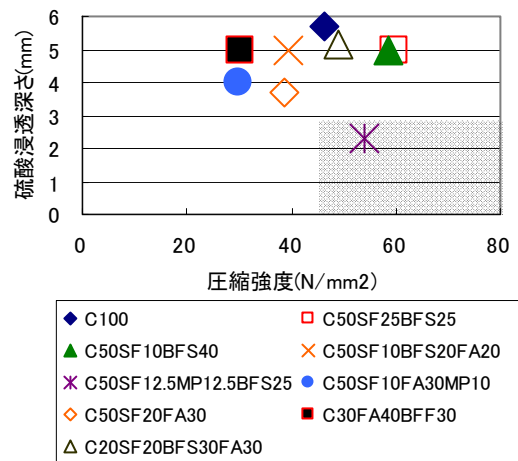


図-6 材齢 28 日の圧縮強度と浸漬 28 日目の硫酸浸透深さとの関係

図-5 において、標準養生 28 日 (細実線) の場合の硫酸浸透深さが材齢 3 日 (点線) の供試体の場合より大きいことから、硫酸が内部まで浸透しているのが分かる。これまで、中性化や塩害からコンクリートの劣化を防ぐために、標準養生期間を大きくし、コンクリー

トを緻密化することが、コンクリートの耐久性を向上するのに不可欠であったが、希硫酸溶液中においてはこれに反し、標準養生期間が大きくなると、よりモルタルの劣化が増大した。これは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が増大するためである。

図 6 は、希硫酸浸漬 28 日目での硫酸浸透深さと材齢 28 日での圧縮強度の関係を表している。圧縮強度が増大するほど緻密になっているはずであるが、硫酸浸透深さは圧縮強度に関係なくほぼ同じとなっている。これは、生成された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と硫酸が反応するため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が存在するところには急速に二水石膏化して、軟化して硫酸が浸透するためと思われる。なお、影の部分は、東京都下水道局被覆材規定値の範囲を示している。

3.2 混和材種別が耐硫酸化に及ぼす影響

図-7 は、硫酸に対する影響が小さいと考えられる石灰石微粉末を用いて、セメント量の重量比率 25%と置換し、各種混和材を 25%ずつ混入した供試体およびシリカフュームと各種混和材の相対的な関係を希硫酸浸漬 28 日、56 日での硫酸浸透深さを表した図である。

C50FA25LP25 のモルタルの硫酸浸透深さが最も小さく、次に C50MP25LP25 のモルタルとなった。これは、フライアッシュおよび砥石粉混入の場合、強度発現が遅く、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量が少ないことが考えられる。そのため、強度が小さくて緻密でないにもかかわらず硫酸浸透深さが小さいと思われる。一方、高炉スラグ微粉末を混入している C50BFS25LP 25 の場合は、三番目に耐硫酸性を有しており、潜在水硬性による長期の強度発現性を有している。しかし、普通ポルトランドセメントと混和材 1 種のための配合の 2 成分系モルタルでは強度と耐酸性の両者を得ることは難しい。図 1. 3, 4, 6 から C20SF20BFS30FA30 (No.9) のモルタルの場合が質量減少率も硫酸浸透率も小さく耐酸性が得られている。このことから、3 成分系以上のモルタルとすることが必要である。

3.3 混和材混入による鉄筋腐食への影響

表-3 は、鉄筋腐食への影響を、希硫酸浸漬日数別に鉄筋腐食の有無を調査した結果を表したものである。この図より、浸漬 63 日目では、どの場合も腐食は見られず、浸漬 119 日目においても腐食が見られなかったのは、C50SF12.5MPBFS25 だけであった。

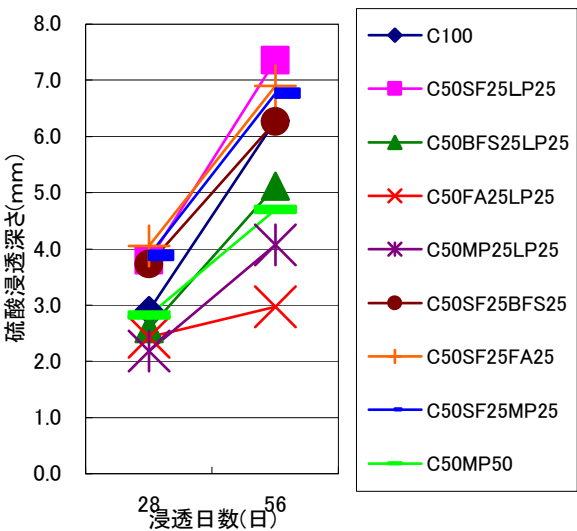


図-7 混和材種別と硫酸浸透深さの関係

表-3 混和材混入による鉄筋腐食への影響

配合	項目	浸漬日数別での鉄筋腐食の有無		
		63 日目	91 日目	119 日目
C100		無	有	有
C50SF20FA30		無	無	有
C50SF10BFS20FA20		無	無	無
C50SF12.5MP12.5BFS25		無	無	有
C50SF10FA30MP10		無	有	有
C30FA40BFF30		無	有	有
C20SF20BFS30FA30		無	有	有

4. 結論

1. 耐硫酸性は水酸化カルシウムの生成量と混和材のポゾラン反応等によるその消費量に支配される。
2. 水和反応が進むほど、セメントペースは緻密化され硫酸が浸透しにくくなる。しかし、同時に水酸化カルシウムの生成量も増大するので、この面からは硫酸が浸透し易くなる。従って、硫酸浸透性は上記の相反する二つの事象の兼ね合いによって支配されることになる。
3. 三成分系以上のモルタルとすることにより、耐硫酸性が得られた。

参考文献

1) 米倉亜州夫、伊藤秀敏、山本修照：化学的侵食環境下のコンクリート構造物の長寿命化に関する研究、(社)中国建設弘済会、建設事業の技術開発に関する助成事業成果報告書、pp.105-123, 2009.2