

硫酸によるセメント硬化体の劣化予測モデルに関する基礎的研究

東北大学 学生会員 ○宮本 慎太郎
 東北大学 正会員 皆川 浩
 東北大学 学生会員 納口 恭太郎
 東北大学 正会員 久田 真

1. はじめに

2007年度制定のコンクリート標準示方書では、コンクリート構造物の化学的侵食による侵食深さの進行は、劣化因子の種類や量により時間の平方根に比例する場合と時間に比例する場合¹⁾とがあるとされている。しかしながら、現在まで、化学的侵食における中性化深さの進行の予測モデルに関する研究事例は少なく、予測手法の確立には至っていない。

本研究では、化学的侵食の中でも代表的な、硫酸によるセメント硬化体の中性化深さの進行に着目し、予測モデルを構築することを目的とした。

2. 実験概要

本研究では、セメントペーストおよびモルタル供試体を使用して検討を行った。使用材料の物性と配合を表-1に示す。なお、本研究では材料分離を抑制する目的で高流動コンクリート用増粘剤を用いた。供試体の作製は、まず寸法40×40×160 mmの角柱にモルタルを打設し、打設後約24時間後に脱型を行い、材齢28日まで20℃の水中養生を行った。そして40×40×40 mmに切断・成型し、暴露面となる打設底面以外の5面をエポキシ樹脂で被覆した。

浸せき方法は、一面浸せき試験(以下、IT)、一面浸せき洗い試験(以下、IST)の2水準で、硫酸溶液の濃度は、0.5、1.0、3.0%とした。一面浸せき試験

表-1

W/C (%)	S/C	増粘剤 (kg/m ³)	Air (%)	単位量(kg/m ³)		
				W	C	S
65	1.3	10.0	1.5	435	669	869
55	0.0	11.0	1.5	625	1136	0
55	1.0	6.0	1.5	431	784	784
55	2.0	1.0	1.5	329	599	1197
55	3.0	0.0	1.5	266	484	1452
35	1.5	0.0	1.5	276	787	1181

結合材：普通ポルトランドセメント(密度 3.15 g/cm³、比表面積 3290 cm²/g)、細骨材：宮城県大和町鶴巣産の山砂(密度 2.57 g/cm³、吸水率 1.06%)、混和剤：高流動コンクリート用増粘剤(メチルセルロース系)

では、暴露面が水槽の底面に対して上向きになるように供試体を設置した。また、一面浸せき洗い試験では、常に健全部が硫酸溶液に暴露されるように、2日に1度の頻度でステンレス製ブラシにより暴露面を洗浄し、生成された変質層を完全に除去した。

3. 予測モデルの構築

既往の研究²⁾より、ISTの場合には、中性化深さの経時変化は時間に比例する関係が得られており、硫酸濃度に依存するということが報告されている。このことから、ISTにおける変質層の生成速度、つまり中性化深さの進行速度は一定値であると考えられる。ここで、供試体に作用する硫酸溶液と供試体中のセメントペーストを反応物、変質層を生成物と考える。また、供試体中セメントペーストの濃度を水セメント比(以下、W/C)で、硫酸濃度を質量パーセント濃度で、そして生成物の反応速度を中性化深さの進行速度に工学的に置換可能であるとすると、反応速度論より、式(1)が成立する。

$$\frac{dy}{dt} = k[C_0]^{\alpha}[W/C]^{\beta} \quad (1)$$

ここで、W/C：水セメント比、C₀：硫酸の質量パーセント濃度(%)、y：中性化深さ(mm)、k：反応速度定数、α,β：実験により決定する反応次数、t：浸せき期間(week)。

また、同研究において、ISTでは、同W/Cでも細骨材セメント比(以下、S/C)の増加に伴い、中性化深さの進行は抑制される²⁾ことが報告されている。つまり、ISTにおいて、S/Cは硫酸とセメントペーストの反応を抑制する。ここで、材料が深さ方向に均一であるとする、硫酸と反応する供試体表面のS/Cは一定であるので、S/Cが中性化深さの進行速度を抑制する効果は一定であると考えられる。このため、

キーワード 硫酸劣化、中性化深さ、洗い作用、変質層、浸透抑制効果

連絡先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 TEL 022-795-7430

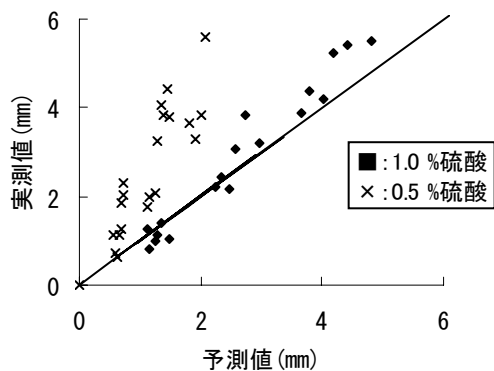


図-1 ISTにおける実測値と予測値の比較

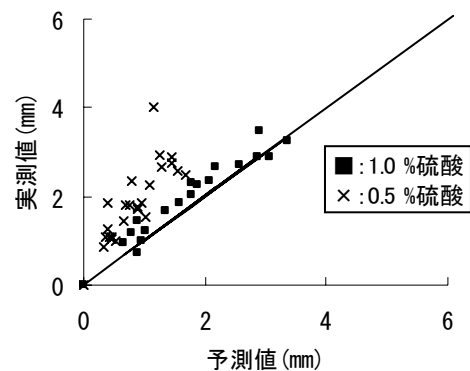


図-2 ITにおける実測値と予測値の比較

S/C が中性化深さの進行を抑制する効果を式(1)に加算することで、式(2)が得られる。

$$\frac{dy}{dt} = k_1 [C_0]^n [W/C]^\beta - k_2 [C_0]^\gamma [S/C]^\delta \quad (2)$$

ここで、3.0 %硫酸溶液による IST の試験結果を重回帰分析することで、式(2)中のパラメータを求めると、 k_1 : W/C に関する反応速度係数 $=4.3 \times 10^{-1}$ 、 k_2 : S/C に関する反応速度係数 $=3.0 \times 10^{-2}$ 、 $\alpha=1$ 、 $\beta=1/4$ 、 $\gamma=1.0$ 、 $\delta=1.0$ となった。

さらに、IT の場合の中性化深さの進行速度を予測するために、本研究では硫酸との反応で生じた変質層が持つ硫酸浸透抑制効果を考慮した。IT において、中性化の進行は、高 S/C、および低 W/C ほど劣化が促進されるという結果が得られた。したがって、変質層の持つ硫酸浸透抑制効果は、低 W/C、そして高 S/C ほど小さいと考えられる。以上の検討を式(3)で表される浸透抑制項 A を式(2)の $[C_0]$ 中に考慮することで、式(4)が得られる。

$$A = k_3 [W/C]^1 + k_4 [S/C] \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dt} = k_1 [A^n \cdot C_0]^n [W/C]^\beta - k_2 [A^n \cdot C_0]^\gamma [S/C]^\delta \quad (4)$$

ここで、A : 浸透抑制項、 k_3 : W/C に関する浸透抑制係数 $=2.5 \times 10^{-1}$ 、 k_4 : S/C に関する浸透抑制係数 $=1.3 \times 10^{-1}$ 、 n : IST の場合、 $n=0$ 、IT の場合、 $n=1$ となった。なお、式(2)と同様の方法を用いて式(3)、(4)のパラメータを求めた。そして、式(4)を積分することで、中性化深さの経時変化を表した。

4. モデル妥当性に関する検討

0.5 %、1.0 %硫酸溶液に常時浸せきさせたときの実測値と予測値を比較した結果を図-1, 2 に示す。なお、実測に用いた供試体の材齢は、4, 8, 13 週である。

図-1, 2 より、1.0 %硫酸において、良好な精度で予測値は実測値と一致することが認められ、本モデルの妥当性が確認された。しかしながら、0.5 %硫酸のような低濃度硫酸に浸せきさせた場合には、予測値よりも実測値の方が大きくなるという結果となった。この理由としては、低濃度硫酸に浸せきさせた場合には、化学反応よりも硫酸溶液の浸透が卓越して中性化を進行させたため、中性化深さの進行が予測値を上回ったからと考えられる。

5. 結論

本研究では、洗い作用の有無を考慮に入れた劣化予測モデルを構築することができた。なお、モデルの精度向上のためには、低濃度硫酸への長期浸せき試験を行い、硫酸溶液の浸透性状をさらに適確にモデル化する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，p.147
- 2) 宮本慎太郎ほか：セメント硬化体の硫酸劣化メカニズムに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，2008(投稿中)

謝辞

本研究は、(財)前田記念工学振興財団平成 20 年度研究助成により行われたことをここに記し、謝意を表します。