

論文

[1113] 濃度の異なる Na_2SO_4 溶液に浸漬したモルタル試験体の物理的特性

広永道彦*1・遠藤孝夫*2・佐々木肇*3・谷口公一*4

1. はじめに

従来、酸・塩類による化学的劣化を受け、その耐久性が問題となるのは、主に温泉場および薬品工場付近という、割りと特殊な環境に曝されたコンクリート構造物であった。

ところが、近年、コンクリート構造物は海洋・地下等、幅広い分野で利用されており、特に、地下空間を利用した地下発電所のように、地下水位下に建設されるコンクリート構造物にとっては、地下水に含有される酸・塩類による化学的劣化は長期的に見ると、その構造物の機能および維持・管理に影響を及ぼすことが容易に予想される。そのため、筆者らはコンクリート構造物の長期的な耐久性に影響を及ぼす酸・塩類の中から特に、硫酸ナトリウムに対する耐久性を検討することとした。

コンクリートおよびモルタル試験体を用いた硫酸ナトリウムによる化学的劣化の耐久性評価に対する研究はあまり見受けられず、2,3の研究者によって検討[1], [2], [3] されているのみである。しかも、いずれの研究も、濃度を変えた硫酸ナトリウム溶液静水中に供試体を浸漬し、その長さ変化、重量変化、相対動弾性係数および圧縮強度等を測定し、その劣化性状の検討に止まっている。保守・補修が可能な、あるいは供用期間が50年程度のコンクリート構造物を対象とした検討では、その環境条件の下での劣化性状を把握することで、十分その目的を果たすことができたと考えられる。しかし、筆者らが検討対象として想定したコンクリート構造物は、地下水位下の地中に建設され保守・補修が困難で、しかもその供用期間が約100年～300年と非常に長期に亘って耐久性が要求されるものである。そのため、筆者らは硫酸ナトリウムによるコンクリートの化学的劣化速度を評価できる式を実験に基づき提案する研究の一環として、濃度の異なる硫酸ナトリウム溶液中(0%, 5%, 10%)へモルタル試験体を浸漬し、その長さ変化、重量変化、相対動弾性係数等により物理的な変化を測定・分析することとした。

本報告は、長さ変化、重量変化等の測定データに基づき、硫酸ナトリウム溶液に1年間浸漬したモルタル試験体の劣化性状とその結果に基づいて、モルタル試験体の硫酸ナトリウムの化学的劣化に対する劣化性状とその原因に関しての考察を取りまとめたものである。

2. 試験体の作製

2.1 配合条件

試験に供したモルタルは、建築軟練り用モルタルの示方配合に従い、セメントと砂の比を1:2 W/C を65% とした。その示方配合は、表-1に示す通りである。なお、目標フロー値は180～200mm とした。

*1 (財) 電力中央研究所 原燃サイクル部処分研究室 (正会員)

*2 (財) 電力中央研究所 耐震部材料研究室長 (正会員)

*3 (株) 間組技術研究所第3部第2研究室 (正会員)

*4 (株) 間組技術本部原子力部 (正会員)

2.2 使用材料

試験体の作製に用いた材料は表-2に示す通りである。

2.3 練り混ぜ方法

細骨材、セメントの順に投入し、1分間の空練り後、水を加え2分間練り混ぜた。

2.4 試験体の寸法と養生方法

練り混ぜ後、直ちにフロー試験を行い、所定のフロー値を確認した後、4×4×16cmの型枠に打設した。試験体は打設後2日目に脱型し、28日間の水中養生実施後、硫酸ナトリウム溶液中への浸漬試験に着手した。

3. 試験方法

3.1 試験体の浸漬方法

溶液濃度は0%, 5%, 10%の3種類とし、試験に供した溶液は工業用の無水硫酸ナトリウムを用いた。溶液の管理は、pHと比重により行い、溶液量、溶液交換頻度、試験体の試験水槽中の配列はJMC耐薬品性ワーキンググループの方法[4]に準じて行った。また、試験温度は20±0.5℃とした。

3.2 測定項目と測定浸漬期間

測定した項目は、①重量変化、②長さ変化、③相対動弾性係数（縦振動）、④相対動弾性係数（超音波伝播速度法）、⑤圧縮強度、⑥曲げ強度であり、これらを溶液浸漬後、0日、1ヶ月2ヶ月、3ヶ月、6ヶ月、9ヶ月および12ヶ月の浸漬期間で測定した。なお、長さ変化はコンタクトゲージによって行い、各測定項目のデータは次式に従って整理した。なお、各材令の曲げ強度比および圧縮強度比は浸漬直前の強度を100として算出した。

①重量変化率

$$\Delta W = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100\% \quad \text{-----} \quad (1)$$

ここで、 ΔW :重量変化率(%)

W:測定材令における試験体の重量 (g)

W_0 :試験開始時における試験体の重量 (g)

②相対動弾性係数 (Pc)

$$Pc = \frac{f^2}{f_0^2} \times 100 (\%) \quad \text{-----} \quad (2)$$

ここで、Pc: 測定材令における相対動弾性係数 (%)

f : 測定材令における一次共鳴振動数 (縦振動: サイクル/sec)

f_0 : 試験開始時における一次共鳴振動数 (縦振動: サイクル/sec)

③相対動弾性係数 (Pv)

表-1 モルタル供試体の配合 (kg/m³)

W/C(%)	水	セメント	細骨材
65	205.4	316	632

表-2 使用材料

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	川砂 (大井川産) 粒径 5mm以下

$$P_v = \frac{V_n^2}{V_0^2} \times 100 (\%) \quad (3)$$

ここで、 P_v : 測定材令における相対動弾性係数 (%)

V_n : 測定材令における超音波伝播速度 (m/sec)

V_0 : 測定材令における超音波伝播速度 (m/sec)

4. 試験結果

4.1 重量変化

図-1に浸漬期間12ヶ月までの重量変化率を示す。溶液濃度に係わらず、モルタル試験体の重量変化はほとんど見受けられなかった。

4.2 長さ変化

図-2に浸漬期間12ヶ月までの長さ変化を示す。溶液濃度に係わらず、浸漬直後から膨張の傾向にある。溶液濃度 0%, 5%に浸漬させたモルタル試験体は同じ様な膨張傾向を示し、12ヶ月経過後約400 μ の伸びを示した。一方、溶液濃度10%に浸漬させた試験体は6ヶ月目の試験体の伸びが比較的多く、その後は同じ程度の伸び率を示している。

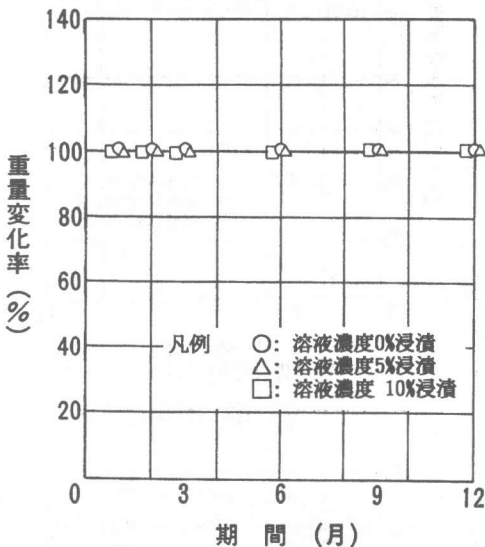


図-1 浸漬期間12ヶ月の重量変化率

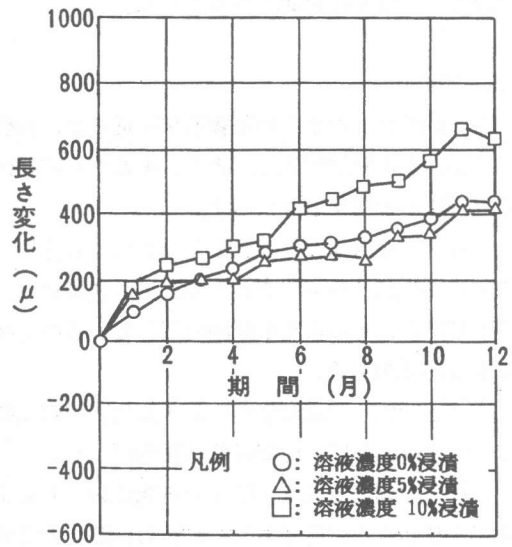


図-2 浸漬期間12ヶ月の長さ変化

4.3 相対動弾性係数 (縦振動による: P_c)

図-3に浸漬期間12ヶ月までの共振法による相対動弾性係数(P_c)の挙動を示す。

溶液濃度に係わらず、浸漬直後から増加の傾向にあり、5, 10% 溶液濃度に漬けた試験体はほとんど同じような挙動を示している。

4.4 相対動弾性係数 (超音波伝播速度法による: P_v)

溶液濃度に係わらず、浸漬直後から徐々に増加しているが、5%, 10%溶液濃度のモルタル試験体は、その程度は異なるが、浸漬開始 9ヶ月目で若干の増加を示しており、その後低下する傾向にある。

4.5 曲げ強度比

溶液濃度に係わらず、浸漬直後は増加しているが、5, 10% 溶液濃度のモルタル試験体は、浸漬 6ヶ月目から低下する挙動を示している。その程度は10% 溶液濃度のモルタル試験体の方が大きく、約17% である。

4.6 圧縮強度比

溶液濃度に係わらず、浸漬直後は増加しているが、5, 10% 溶液濃度のモルタル試験体は、浸漬 6ヶ月目から低下する挙動を示している。その程度は10% 溶液濃度のモルタル試験体の方が大きく、約20% である。

4.7 外観観察

浸漬 3ヶ月間では、ひびわれ等の劣化の兆候は見られないが、浸漬 6ヶ月目に試験体 (10% 溶液浸漬) の隅角部を中心として、微細なひびわれがみられた。ひびわれは軸方向に伸びているが、試験体全面への進展は確認されなかった。その後、9ヶ月以降についてはひびわれの成長は確認されなかった。

5. 考察

浸漬期間12ヶ月までの試験結果に従って、硫酸ナトリウム溶液の化学的劣化により、モルタル試験体に生じた現象の検討を以下に示す。

モルタル試験体の硫酸ナトリウムによる化学的劣化に対する耐久性を議論するためには、各測定項目における挙動が、どのような原因で生じているかを明らかにする必要がある。

本試験では、重量変化率、長さ変化、相対動弾性係数 (P_c, P_v)、曲げ・圧縮強度比を測定した。

これらの測定項目は、既往の研究においても比較的測定されている項目である。しかし、既往の研究は先に示したように、このような測定データから硫酸塩による劣化性状までの検討で止まったものが比較的多く劣化指標として、検討した研究はわずか 2, 3件の研究 [5], [6], [7] しか見受けられない。この中で松下 [6] は、試験体表面から深さ方向1cm における硫酸イオンの濃度を求め、その挙動から長さ変化における膨張と動弾性係数の低下は同一の劣化をとらえており、それらはコンクリート中の硫酸イオン濃度と密接な関係があるとして、長さ変化と動弾性係数が劣化の指標として有望であるとしている。

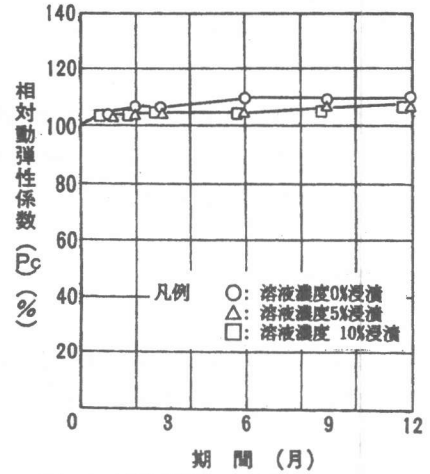


図-3 浸漬期間12ヶ月の相対動弾性係数 (共鳴振法による)

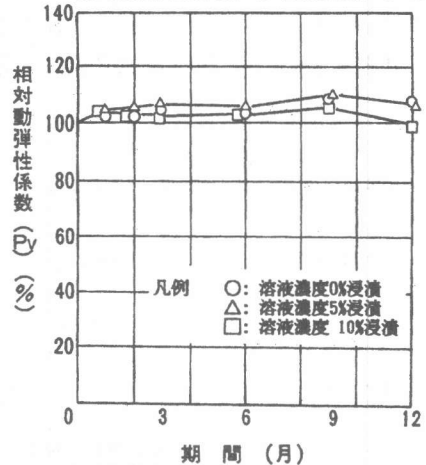


図-4 浸漬期間12ヶ月の相対動弾性係数 (P_v)

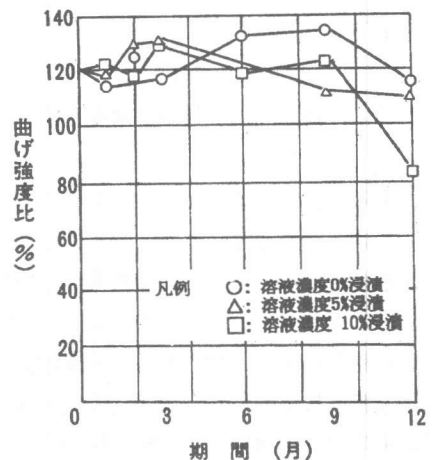


図-5 浸漬期間12ヶ月の曲げ強度比

このような観点から、本試験による各測定項目の挙動をみると、長さ変化、曲げ強度比、圧縮強度比は、モルタル試験体の劣化を比較的敏感に捉えていると考えられる。逆に、重量変化率、相対動弾性係数はほとんど変化が見られず、敏感に反応しているとは言いがたい。重量変化率は表面剥離が生じるような劣化がモルタル試験体に生じていないため、容易に説明できる。しかし、相対動弾性係数、特にPcについては、化学分析の結果と総合的に検討する必要があるが、筆者らは長さ変化等が比較的大きく変化した6ヶ月にエトリングライトが生成され、それが微細なひびわれの隙間を逆に充填したため、相対動弾性係数が敏感に反応しなかったと考えた。そのため、長さ変化には反応したが、Pc, Pvの反応は鋭敏でなかったと考えられる。曲げ強度比および圧縮強度比は、ひびわれがエトリングライトで充填されても、それらの結晶は強度とは何ら関係ないため敏感に反応し、値の低下がみられたと考えられる。

そのため、硫酸ナトリウムによる化学的腐食の劣化を表すのに有効なものは、長さ変化、曲げ強度比と圧縮強度比と考えた。

次に、これら有効と考えられる測定項目の相関をみとめる。これを示したのが図-7, 8である。

これは縦軸にいずれも長さ変化をとり、横軸にそれぞれ曲げ強度比、圧縮強度比をとったものである。

図-7の長さ変化と曲げ強度比との関係は、浸漬直後は長さ変化の増大が著しいが、その後浸漬6ヶ月以降は曲げ強度比の低下率が大きくなっており、また、図-8の長さ変化と圧縮強度比との関係は、浸漬直後から長さ変化の増大と圧縮強度の低下率はほとんど同じ割合である。

これらのことから、本研究のモルタル試験体の耐久性の損失を評価するには、曲げ強度比よりもむしろ、強度比と長さ変化との相関性が良いことが示された圧縮強度比と長さ変化との関係に、今後着目していく必要があることを示しているものと考えられる。

6. まとめ

硫酸ナトリウム溶液の化学的劣化速度を定量的に評価する研究の一環として、濃度の異なる(5%, 10%)硫酸

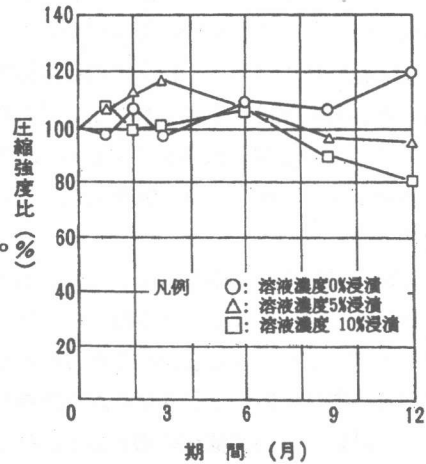


図-6 浸漬期間12ヶ月の圧縮強度比

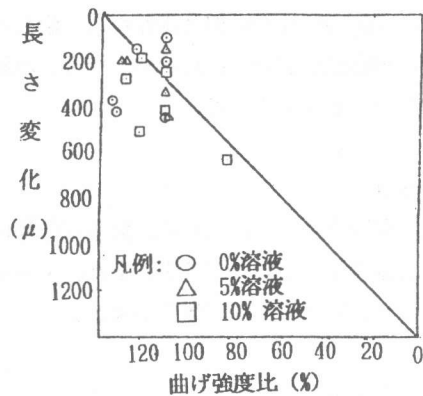


図-7 長さ変化と曲げ強度比の関係

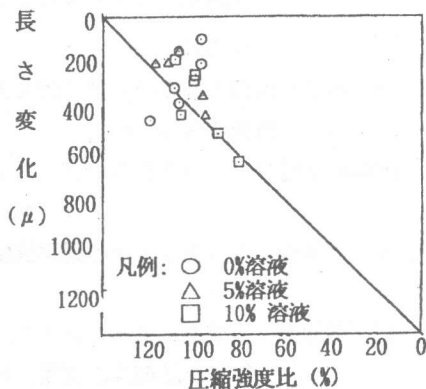


図-8 長さ変化と圧縮強度比の関係

ナトリウム溶液にモルタル試験体を12ヶ月浸漬させ、その劣化性状とその原因に関する検討を実験に基づき行った。その結果を纏めると次の通りである。

①劣化性状について：12ヶ月の浸漬期間を通して、重量変化率および相対動弾性係数（ P_c , P_v ）はほとんど変化はみられなかった。長さ変化に増大、曲げ強度比および圧縮強度比に低下が見られたのは、浸漬材令約6ヶ月目であり、モルタル試験体にも微細なひびわれが確認できた。また試験値が示す挙動は、5%、10%とも同じ傾向であるが、その程度は10%溶液の方が大きいことが確認された。

②測定項目の挙動の原因について：長さ変化、曲げ強度比および圧縮強度比は浸漬材令6ヶ月で低下する傾向が見られたのは、エトリンガイトの生成が原因と思われる。また重量変化率が浸漬期間通じてほとんど変化しなかったのは、表面剥離が見られなかったためと考えられる。相対動弾性係数（ P_c , P_v ）は長さ変化から微細なひびわれの発生があると判断されたにも係わらず長さ変化、曲げ・圧縮強度比に増大および低下が認められた浸漬材令6ヶ月に変化が見られなかったのは、エトリンガイトの結晶がひびわれを充填したためと考えられる。そのため、劣化の指標としては長さ変化、曲げ強度比および圧縮強度比が有効と判断された。

③化学的劣化による劣化の指標について：劣化の指標として選定した長さ変化と曲げ強度比および圧縮強度比との相関関係から、耐久性の損失を判断する上では、長さ変化と圧縮強度比との間に相関性は認められたため、今後この両者の挙動を中心に化学的劣化に対する指標としての適性をつめる予定である。

7. 謝辞

本研究を進めるに当たり、貴重な御鞭撻と御教授を賜った東京工業大学工学部土木工学科長瀧重義教授に深謝いたします。また、実験およびデータ整理等を手伝って頂いた(株)日本ソフトテクニカル工藤裕幸氏に感謝致します。

[参考文献]

- [1] 依田彰彦他：コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究（その3 浸漬溶液の種類及び濃度をかえた場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和58年9月
- [2] 依田彰彦他：コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究（その4 10% Na_2SO_4 溶液中に浸漬したコンクリートの性質）、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和59年10月
- [3] 池永博威：種類と濃度の異なる酸および塩の溶液に浸漬したコンクリートの劣化、セメント技術年報37、1983
- [4] JMC耐薬品性ワーキンググループ：コンクリートの耐薬品性試験方法に関する研究（その2）、セメント・コンクリートNo. 444, Feb. 1984
- [5] 松下博通他：コンクリートの耐硫酸塩性に関する基礎的研究、土木学会第39回年次講演会、1984
- [6] 松下博通他：硫酸塩によるコンクリートの劣化に関する基礎的研究、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、1985
- [7] 松下博通他：硫酸塩を含む土壌におけるコンクリートの劣化、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986