

論文 遠心成形した高強度コンクリートの耐硫酸性に関する実験

菅原高志*1・榊田佳寛*2・中村成春*3・齊藤直*4

要旨：本研究は、遠心成形した高強度コンクリートの耐硫酸性を実験的に検討したものである。実験は、水セメント比、硫酸濃度、硫酸浸漬日数等を種々変化させた。硫酸浸漬の結果、石膏皮膜が表面部に形成し、一時的に質量と体積が増加するが、その後減少し、低pHほどその傾向が強く現れた。また、遠心試験体は円筒外側よりも内側が劣化した。さらに、圧縮強度はpH1.0にて、浸漬日数91日から182日にかけて、約10%低下した。

キーワード：遠心成形、高強度コンクリート、耐硫酸性、長期材齢、硫酸濃度

1. はじめに

遠心成形した高強度コンクリートは、PC杭として構造物の基礎によく用いられている。この時、腐食性物質が混在する可能性のある埋立地や温泉地などの酸性土壌では、コンクリートが酸の影響を受けて劣化すると考えられる。このため、酸による劣化状況を把握することが重要であるが、その評価は十分とは言い難い。また、遠心成形すると円筒状になるため、円筒の内側

と外側の劣化の違いを検討することも重要である。本研究は、調合を変化させて遠心成形した高強度コンクリートを作製し、異なる濃度の硫酸に浸漬し、質量、体積、圧縮強度、ヤング係数、動弾性係数、中性化の長期経時変化を試験し、調合と耐久性との関係、円筒の内側と外側の劣化の違いを考察・評価したものである。

2. 実験概要

2.1 実験条件および試験体概要

表-1に実験の要因と水準を、表-2に使用材

表-1 要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	25, 30, 35
浸漬試験体 (cm)	遠心体 (φ20×30, 肉厚4) 円柱体 (φ10×20)
浸漬試薬	硫酸、水道水
硫酸濃度 (pH)	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
濃度調整浸漬日数	0, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 91 105, 119, 133, 147, 161, 182
測定浸漬日数	0, 3, 7, 14, 28, 56, 91, 119, 147, 182
浸漬中の測定項目	質量、体積、浸漬試薬pH 音速(動弾性係数)、中性化深さ
浸漬後の測定項目	圧縮強度、ヤング係数

表-2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	鬼怒川産川砂 表乾密度2.54(g/cm ³) 吸水率2.63(%) 粗粒率3.07
粗骨材	鬼怒川産川砂利 表乾密度2.57(g/cm ³) 吸水率1.86(%) 粗粒率7.04
混和材	エトリンサイト系高強度用混和材
混和剤	ナフタリン系高性能減水剤

表-3 調合条件とフレッシュ性状

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤添加率 (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G	混和材			
25	37.2	138	540	597	1100	54	2.0	3.2±0.3	2.1±1.0
30	38.0	146	483	622	1100	48	1.1	2.9±1.0	1.7±1.0
35	38.1	157	446	628	1100	45	0.7	4.4±1.3	1.5±0.4

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学教授 工学部建設学科 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科 工博 (正会員)

*4 類設計室(株) (当時 宇都宮大学大学院生) 工修

料を、表-3 に調合条件とフレッシュ性状を示す。使用したコンクリートの水セメント比は25%, 30%, 35%の3種類とし、スランプは5 cmを目標とした。浸漬試薬は5種類の異なる濃度の硫酸と、比較のために水道水も設定した。

図-1 に試験体の概要を示す。試験体は遠心成形したもの(20φ×30cm, 中空円筒, 肉厚 4cm)と、比較のための円柱試験体(10φ×20cm)の2種類とした。なお、遠心試験体は、1/4 と 1/8 に切断したものも用いた。劣化状況は、側面からの影響のみを考えるため、すべての試験体の上・下面及び切断面にエポキシ樹脂を塗布した。また、1/8 に切断した遠心試験体Bは、外側にエポキシ樹脂を塗布した“内側暴露試験体”と内側を塗布した“外側暴露試験体”に分け、内側と外側の硫酸による劣化の違いを検討した。

遠心成形方法は、遠心力成形機で行った。遠心成形時に中空円筒の中心に生じるスラッジは、成形直後に容器に取り、硬化させて水セメント比の分析に供した。

2.2 浸漬方法及び測定概要

表-4 に試験項目を示す。浸漬試験は試験体を材齢 28 日間の標準養生後、20℃の養生室にて行った。硫酸濃度は、濃度調整日に硫酸の pH をガラス電極 pH 計より測定し調整した。また、1ヶ月毎に新しい硫酸に交換した。

質量及び体積の測定は、試験体を浸漬溶液から取り出し水道水で洗浄した後、表面水を拭き取り、電子天秤により空气中質量及び水中質量を求めた。この時、試験体の硫酸に接触している面には白色の石膏の層が付着しているが、実際の土壌や水中では、これらの石膏の層を除去することはないので今回の実験でも取り除かなかった。体積は、空气中質量から水中質量を差し引いて求めた。

動弾性係数は、試験体中を伝播する音速 V (= 距離/伝播時間) を求め、密度 ρ と重力加速度 g より、 $\rho V^2/g$ の関係から計算した。

圧縮強度は、遠心試験体Cについては浸漬日数 91 日に、円柱試験体については浸漬日数 91

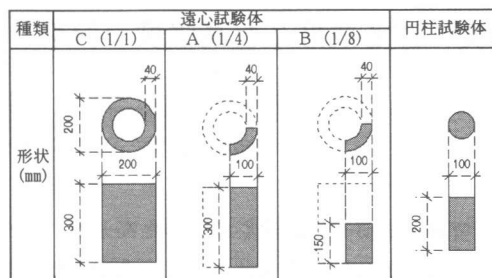


図-1 試験体の形状

表-4 試験項目

pH	遠心体			円柱体
	A (1/4)	B (1/8)	C (1/1)	
1.0	質体中動	質体	質体圧ヤ	質体圧ヤ動
1.5	-	質体	-	-
2.0	質体中動	質体	質体圧ヤ	質体圧ヤ動
2.5	-	質体	-	-
3.0	-	質体	-	-
水道水	質体中動	質体	質体圧ヤ	質体圧ヤ動

質:質量変化 圧:圧縮強度 中:中性化深さ
体:体積変化 ヤ:ヤング係数 動:動弾性係数

表-5 スラッジの水セメント比の分析結果

調合時の水セメント比 (%)	試料数	スラッジ分析結果の平均値 (%)
25	15	24.62
30	5	29.85
35	13	34.66

日と 182 日に試験した。また同時に、1/3 割線法のヤング係数も求めた。円柱体はコンプレッソメーターで、遠心体はパイゲージを用いて軸歪を測定した。

中性化深さは、遠心試験体Aを浸漬日数 28, 91, 182 日に切断し、切断面に 1%フェノールフタレインアルコール溶液を噴霧し、赤紫色に変色しなかった部分の表面からの深さとした。

スラッジの水セメント比は、セメント協会の F-18 の方法により、スラッジ中のセメント結合水を測定して求めた。

3. 実験結果及び考察

3.1 遠心試験体の遠心断面状況

表-5 にスラッジの水セメント比の分析結果を示す。結果は、調合時の水セメント比とほとんど一致し、水だけ搾りだされることはなかつ

た。また、遠心試験体の断面を見ると、外周部は粗骨材がやや偏在し、内周部はセメントペーストがやや偏在していた。このことから、遠心断面内の水セメント比は均一であるが、外側より内側にセメントペーストが多い状況となった。

3.2 試験体表面の外観変化

表-6 に円柱体及び遠心体外側暴露の外観変化概要を示す。pH1.0 では、浸漬日数3日目から表面に白色の石膏が一面に付着した。その後

表-6 円柱体及び遠心体外側暴露の外観変化

pH	浸漬日数	粗骨材の露出状況
1.0	28	所々表面露出
	56	広範囲表面露出
	91	外観部の約50%表面露出
	119	外観部の約80%表面露出
	182	凸凹に浮きぼり露出
1.5	182	pH1.0の147日目程度
2.0	182	pH1.0の56日目程度
2.5, 3.0	182	変化なし

の劣化状況は長期になるほど激しい劣化が現れた。一方、浸漬初期では水セメント比が高いほど侵食が大であったが、浸漬日数119日目以降、ほとんど差が見られなくなった。pH2.0 では、浸漬日数の経過とともに表面が茶褐色に変色し、その後劣化しはじめた。pH2.5 以上では変化が見られなかった。また、遠心体内側暴露は、最も厳しいpH1.0で182日浸漬しても変化が見られなかった。

3.3 質量変化・体積変化・動弾性係数変化

図-2 に遠心試験体A及びBの表面積当たりの質量変化結果例を示す。質量は浸漬後増加していくが、pH1.0, pH1.5 では、浸漬日数28日から減少に転じ、182日目では約200mg/cm²減少した。pH2.5 以上では、初期値よりも緩やかに増加した。高水セメント比になると若干変化量が多くなるが、pHによる影響の方が大きい。内

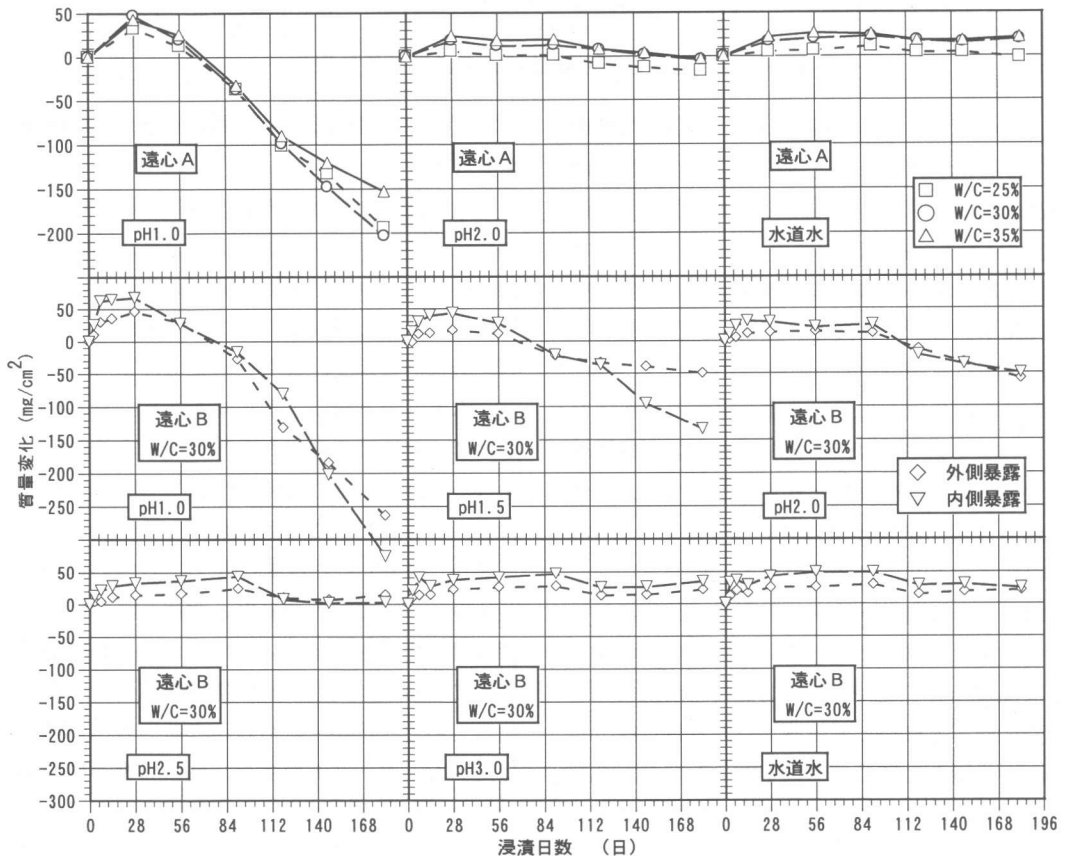


図-2 浸漬日数と遠心試験体A及びBの表面積当たりの質量変化

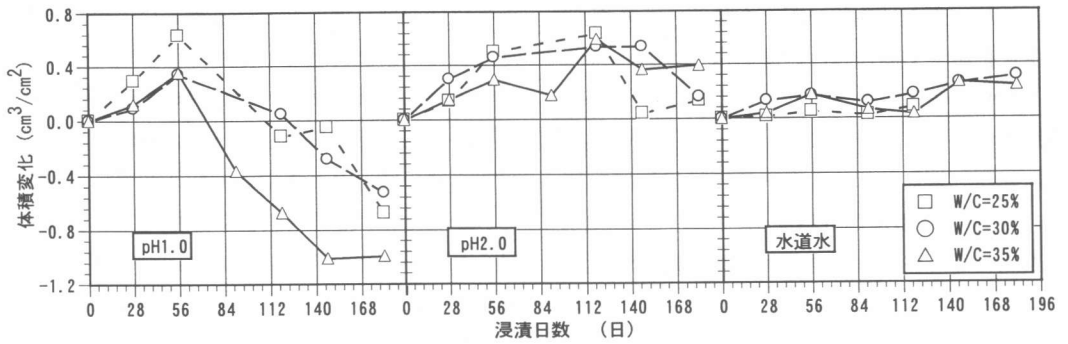


図-3 浸漬日数と遠心試験体Aの表面積当たりの体積変化

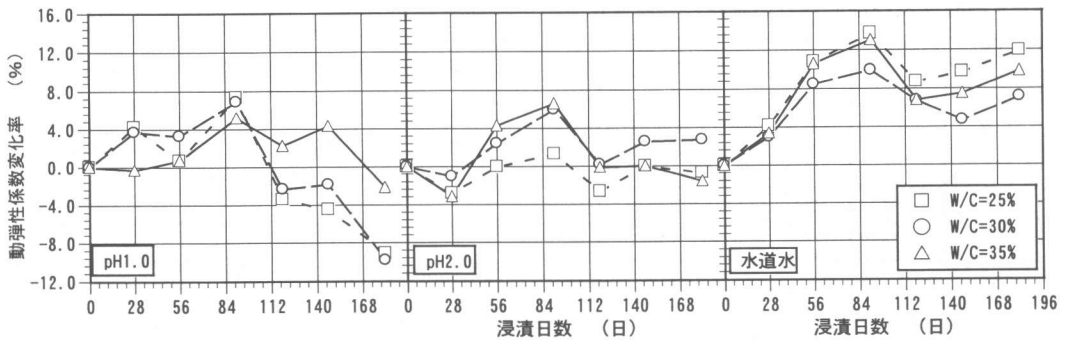


図-4 浸漬日数と遠心試験体Aの動弾性係数変化

外表面の違いでは、外観変化が少なかった内側の方が劣化が大となった。なお、円柱試験体は浸漬日数 182 日で、低 pH での劣化が遠心劣化の約 75%程度であった。

図-3 に遠心試験体Aの表面積当たりの体積変化結果例を示す。pH1.0 では、質量劣化より遅い浸漬日数 56 日から減少しはじめた。また、水セメント比による差はあまり見られなかった。図は省略するが、内側暴露試験体の方が外側暴露試験体より減少量が大きかった。なお、円柱試験体は遠心試験体より変化量が小さく、182 日目では約 1/2 の体積減少であった。

図-4 に遠心試験体Aの動弾性係数初期値に対する変化率結果例を示す。動弾性係数の変化率は浸漬日数 91 日までは、おおむね浸漬日数の経過に伴って増加している。119 日目以降では pH1.0 で減少に転じ、劣化している状況が把握された。pH2.0、水道水では、劣化状況はあまり見られなかった。

3.4 相対質量変化・相対体積変化・相対動弾性係数変化

各 pH 濃度における質量・体積・動弾性係数の変化値について、水道水に浸漬した場合の変化値を差し引いた値を相対変化値と定義する。

図-5 に遠心試験体Aの相対質量変化の代表的な結果例を示す。質量変化値は、相対化すると、水セメント比による差異があまり見られなくなり、硫酸による劣化進行状況がより明確になった。pH1.0 及び pH2.0 では、浸漬日数 28 日あたりをピークに劣化が顕著に現れた。

また、表-7 に、浸漬日数 182 日目の遠心試験体Bについて、外側暴露と内側暴露による相対質量変化結果を示す。水セメント比及び硫酸濃度によらず、おおむね内側暴露結果の方が劣化している状況が現れた。遠心断面の内側組織はセメントペーストが多く、外観目視では判断できなかったが、セメントペースト分が多分に浸食されていたことが明らかとなった。

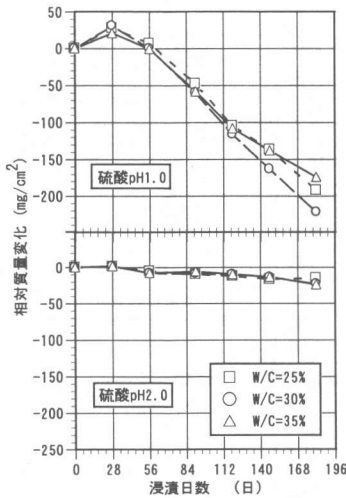


図-5 浸漬日数と遠心試験体Aの表面積当たりの相対質量変化

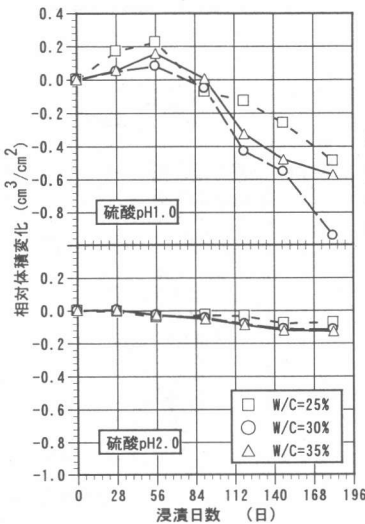


図-6 浸漬日数と円柱試験体の表面積当たりの相対体積変化

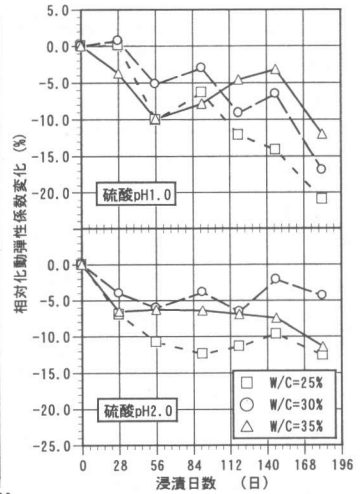


図-7 浸漬日数と遠心試験体Aの相対化動弾性係数変化

表-7 浸漬日数 182 日目の遠心試験体Bの表面積当たりの相対質量変化

W/C (%)	pH	外側暴露 (mg/cm ²)	内側暴露 (mg/cm ²)	劣化具合 大きい方
25	1.0	-285.8	-237.9	外側
	1.5	-83.4	-160.4	内側
	2.0	-54.8	-68.4	内側
	2.5	-2.3	-5.3	内側
	3.0	-1.9	3.9	外側
30	1.0	-284.3	-350.5	内側
	1.5	-70.3	-158.5	内側
	2.0	-79.0	-74.2	外側
	2.5	-6.4	-21.4	内側
	3.0	1.1	10.2	外側
35	1.0	-232.1	-	-
	1.5	-107.0	-188.7	内側
	2.0	-47.3	-121.5	内側
	2.5	-6.6	-38.6	内側
	3.0	8.7	-18.6	内側

図-6 に円柱試験体の相対体積変化の代表的な結果例を示す。硫酸濃度が高まると、相対体積変化も増加し、浸漬日数 56 日程度まで、劣化によるやせ細りよりも石膏分の析出が大きいことがわかる。また、石膏分の析出については、水セメント比による違いが現れている。一方、浸漬日数 56 日以降の劣化状況について、相対質量変化の劣化状況と比較すると、おおむね劣化速度がゆるやかになっており、浸漬日数がある程度経過すると、石膏の析出が頭打ちになっていることが推察できる。

図-7 に遠心試験体Aの相対化した動弾性係数変化の結果を示す。浸漬日数初期から相対化動弾性係数の変化は負の値が得られており、硫酸浸漬開始時から劣化が始まっていることがわかる。また、劣化速度は pH が低い方が早い。

3.5 圧縮強度・ヤング係数・中性化の検討

図-8 に浸漬試薬濃度と圧縮強度との関係を示す。遠心試験体の圧縮強度は、水セメント比条件によらず円柱試験体よりも、約 15N/mm² の差で小さくなった。また、浸漬日数 91 日では、pH による強度の違いは見られず、おおむね同一強度であり、浸漬日数 91 日と 182 日の pH2.0 の円柱試験体の強度はほとんど同じであった。しかしながら、浸漬日数が 182 日になると、pH 1.0 で約 8N/mm² 程度の強度低下が見られた。

図-9 にヤング係数と圧縮強度の測定結果を示す。pH による差はあまり見られず、既往の結果⁵⁾と同様に、遠心体の方が円柱体よりも低い圧縮強度で大きな値を示し、ヤング係数よりも動弾性係数の方が大きな値を示した。

中性化については、浸漬日数 28, 91, 182 日に測定したが、中性化傾向は見られなかった。これは、中性化した部分が、硫酸によって溶出し、失われたためだと考えられる。

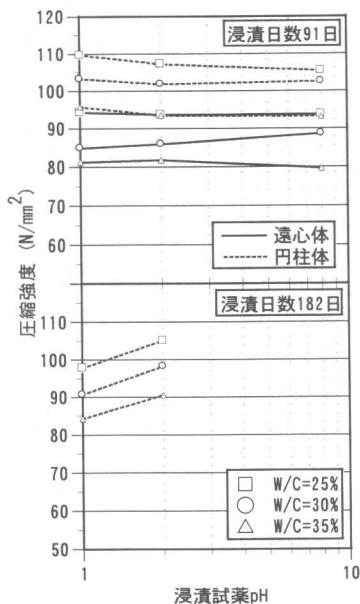


図-8 pHと圧縮強度の関係

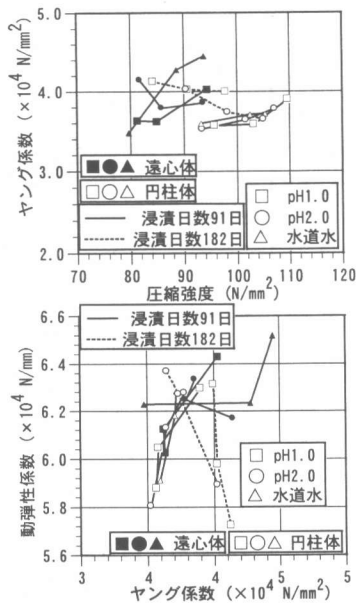


図-9 ヤング係数測定結果

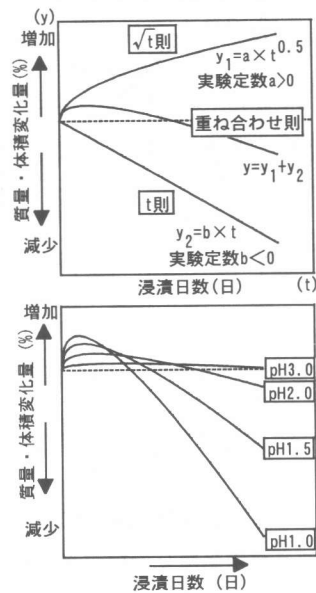


図-10 質量・体積変化の評価

図-10 に硫酸に浸漬した場合の質量及び体積変化の評価概念を示す。硫酸に浸漬するとセメント硬化体中の水酸化カルシウムとの反応によって不溶性の石膏が析出するとともに、酸による石膏やセメント硬化体の溶解が生じる。石膏の析出量は、水酸化カルシウムの拡散によるため \sqrt{t} 則に従い、酸による溶解は t 則に従うと考えられる。これらを重ね合わせると、浸漬初期は、石膏の析出が早いので質量及び体積は増加するが、浸漬日数の経過とともに酸による溶解が大きくなり、質量及び体積が減少する。低pHほど、この傾向が強く見られた。

4. まとめ

- (1) 硫酸に浸漬した場合、試験体表面に石膏皮膜が形成され、一時的に見かけ質量と体積が増加するが、その後減少傾向となり、低pHほどその傾向が強くみられた。
- (2) 硫酸の濃度がpH2.0未満の場合は劣化が著しく、円柱試験体より遠心試験体の方が、硫酸の浸食が大きい。また、遠心試験体では円筒外側よりも内側の方が浸食が大きくなった。
- (3) 硫酸浸漬した試験体の圧縮強度は、浸漬日数

91日では、pHに関わらず同じであったが、182日では、pH1.0で浸漬日数91日の約10%の強度低下が見られた。

参考文献

- 1) 上田洋, 高田潤, 立松英信: 酸の影響を受けたセメントペーストの劣化メカニズム, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.18, No.1, pp.879-885, 1996
- 2) 原田志津男, 松藤泰典, 小山智幸, 田中恭一: 硫酸酸性地盤に接する高品質コンクリートの物理性状, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.18, No.1, pp.885-891, 1996
- 3) 上田洋, 来海豊, 工藤輝大: 酸性雨などの弱酸に対するセメントペースト・モルタル表層部の抵抗性評価, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.636-641, 1997. 12
- 4) 水上国男: コンクリート構造物の耐久性シリーズ, 化学的腐食, 技報堂, 1986. 12
- 5) 齊藤直, 梶田佳寛, 中村成春: 遠心成形した高強度コンクリートの耐久性評価, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp.920-927, 1999. 12