

報告

[1155] 中性化の進行に伴うコンクリートの品質変化

正会員○高田良章（藤沢薬品工業筑波コンクリート研究所）

正会員 魚本健人（東京大学生産技術研究所）

1. はじめに

一般に、コンクリート構造物の中性化が進行した場合に最も重要であるのは、コンクリート中の鉄筋が発錆することによりコンクリートにひびわれが生じることであるとされており、コンクリートそのものは、中性化による物理化学的な劣化が進むことはないとされている。しかし、これは炭酸ガス濃度を高めた促進中性化試験での結果であり、屋内および屋外自然環境下におけるコンクリートの品質変化については、炭酸化反応によりコンクリート中の水和物であるC-S-Hが分解している等の研究報告もあり、未だ十分明らかとされていない[1]。そこで本稿では、異なる炭酸ガス濃度で中性化したコンクリートの強度性状、モルタルのポロシチーおよび示差熱重量分析(TG-DTA)を用いてモルタル中の水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの変化等を経時的に調べ、中性化の進行に伴うコンクリートの品質変化について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は秩父両神産砕石（最大寸法；20mm、表乾比重；2.69、PM；6.80）、細骨材は大井川産川砂（表乾比重；2.60、PM；2.86）を使用した。コンクリートは目標スランプ8cm、単位水量一定のプレーンコンクリートとし、水セメント比は70%、60%、50%とした。表

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				初期水中養生期間
		W	C	S	G	
70	49	184	263	908	978	0日及び5日
60	47		307	854	996	
50	45		368	795	1005	

1にコンクリートの配合を示す。なお、ポロシチーの測定および示差熱重量分析に用いたモルタル試験体は、コンクリートを5mmのふるいでウェットスクリーニングしたものを用いた。

2.2 供試体の作製および測定項目

コンクリート試験体は、直径10cm、高さ20cmの円柱供試体で、打設後48時間後に脱型しその後初期水中養生期間を0日および5日とした。初期養生後直ちに中性化試験を実施し、所定の材令にて圧縮強度試験と中性化深さの測定を行った。モルタルは10×10×10cmの角柱供試体で打設後48時間後に脱型しその後初期水中養生期間を28日とした。初期養生後はモルタル内部の試料を厚さ4mm程度にスライスし、真空乾燥により内部の水分を約6wt%逸散させ、中性化開始後の水和反応を停止させ中性化以外の品質変化が生じない状態で中性化試験を実施し、中性化による品質変化の影響を水銀圧入式ポロシメーターと示差熱重量分析を用いて行った。

2.3 中性化試験

中性化試験条件は、相対湿度を55%で一定とした試験室（槽）で、炭酸ガス濃度を0.07%（屋内自然暴露）、1.0%および10%（促進中性化）の環境条件とした。中性化深さの測定は、圧縮強度試験を終了した試験体を10×20cmの破断面が得られるように割裂し、直ちにその破断面にフェノールフタレイン1%溶液を吹き付け、非発色面を中性化部として測定した。なお、中性化深

さは割裂面の一方向に対して5点の計20点をノギスを用いて測定し、その平均値とした。また、モルタル試験体は屋内自然暴露と炭酸ガス濃度10%で促進した場合の2種類とした。

3. 実験結果

3.1 中性化によるコンクリートの強度性状

中性化したコンクリートの強度性状を把握する場合、同一材令で比較した場合には炭酸ガス濃度、水セメント比および初期養生の違い等によって中性化の進行度が異なるため比較することが困難である。そこで、非中性化部分の割合と圧縮強度比との関係を図-1に示す。横軸に試験体全断面積に対する非中性化部分の面積の割合を、縦軸に標準養生時強度に対する中性化したコンクリート強度の割合を示す。図より、促進中性化したコンクリートでは、炭酸ガス濃度1%のものは標準養生時強度とほぼ同等かあるいは若干増大しており、10%のものは中性化の進行と伴に増大している。

一方、屋内暴露したコンクリートの強度比は初期養生の違いにかかわらず明らかに中性化の進行と伴に低下しているのがわかる。この傾向は、水セメント比が50%および70%の場合も同様であった。これは、明らかに同一中性化深さであっても炭酸ガス濃度の違いによってコンクリートの圧縮強度性状が異なることを意味している。

3.2 中性化したモルタルのポロシチー

コンクリートの強度は、炭酸ガス濃度を高めた促進中性化では水和が十分進行している標準養生時強度より高く、明らかに中性化によって強度が増大すると考えられる。しかし、図-1に示したように屋内暴露したコンクリートの強度比が低下した原因が中性化により組織がポーラスになったためか、あるいは中性化した部分が極表層部であるために、初期養生を早期に中断した場合、コンクリート表面から水分の蒸発等が生じ、結果的に中性化したコンクリート表層部の水和が不十分なまま水和反応が停止したため等の理由が考えられる。また、同一の温度、湿度環境下であっても炭酸ガス濃度が異なる場合、中性化の進行速度の違いによりコンクリート内部の水分の蒸発量も異なることが考えられる[2]。したがって、中性化した表層部のポロシチーを測定する場合、内部の非中性化部（健全部）と比較してその影響を調べても正しく評価できないと考えられる。そこで乾燥による水分の蒸発がなく、水和も停止した状態のモルタル試料（厚さ4mm）の中性化した部分の全細孔量の経時変化の結果を図-2に示す。図より、炭酸ガス濃度10%で促進中性化した場合も屋内暴露した場合も中性化進行中の全細孔量には違いがあるが、

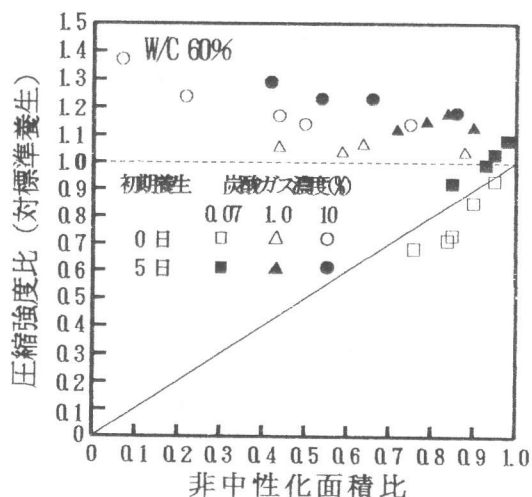


図-1 非中性化面積比と圧縮強度比との関係

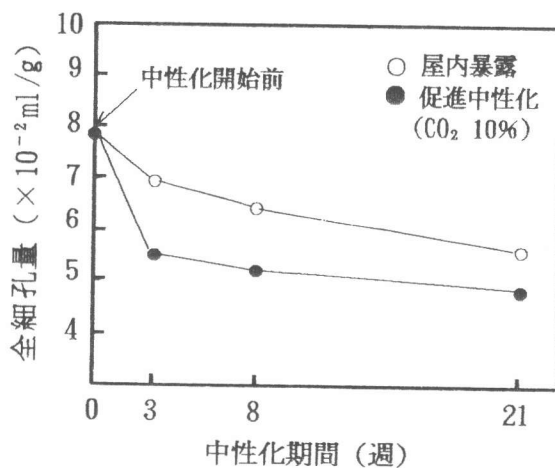


図-2 中性化による全細孔量の経時変化

中性化開始前の全細孔量より、中性化の進行と共に減少した。また、完全に内部まで中性化した場合で比較すると、促進中性化（3週）と屋内暴露（21週）したモルタルの全細孔量は、ほぼ同じ値になっており、促進中性化と屋内暴露とは全細孔量でみた場合、特に大きな差は認められなかった。図-3に各々の細孔径分布の結果を示す。ここで注目されるのは全細孔量はほぼ同じ値にもかかわらず促進中性化と屋内暴露とは細孔径分布

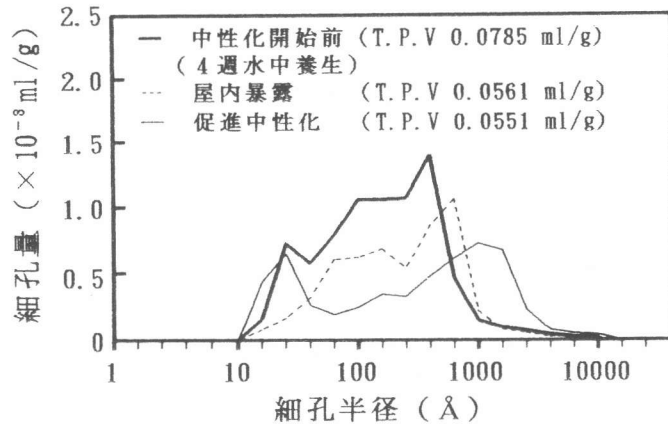


図-3 中性化したモルタルの細孔径分布

が異なることである。特に促進中性化した場合には、中性化開始前には存在しなかった1000Å以上の大きな径がかなりの割合で存在している。これはW/C 60%に限らず同様な傾向であった。

3.3 示差熱重量分析 (TG-DTA)

一般に、無機化合物の昇温過程で生じる分解反応は大きな吸熱効果を示し、それらが極少量試料中に含有されていても示差熱分析（以下DTAと略す）により、検出可能である。コンクリートの分析の場合、セメント水和物の組成は複雑であるが、水酸化カルシウムや炭酸カルシウムの吸熱反応は各々400～500℃、650～900℃付近の温度範囲で分解し、これらの反応が支配的であるため、熱重量分析（以下TGと略す）により定量が可能であるとされている。一般的には、DTAとTGを組み合わせて、DTA曲線より目的とする化合物を同定し、その温度範囲においてTGより定量されている。しかし、中性化したコンクリートの場合、図-4に示すように炭酸ガスの侵入によってTG曲線とDTA曲線とが必ずしも一致せず、TGより定量するのは困難であると考えられる。そこで、本定量法として試料と基準物質との温度差に比例する熱起電力を電位差計で測定したDTAピーク面積と試料量との関係を示す検量線をあらかじめ作成し、DTAピーク面積より水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの定量を行った[3]。検量線の作成は、モルタル試料に試薬の水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムを少量ずつ添加して行った。図-5に水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの定量値の結果を示す。図より促進中性化および屋内暴露した場合の両者とも、中性化の進行に伴って水酸化カルシウムが消費され、炭酸カルシウム量が増大している。また、完全に内部まで中性化した場合で比較すると、促進中性化（3週）と屋内暴露（21週）の両者とも水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの重量はほぼ同じ値を示した。また生成した炭酸カルシウムを水酸化カルシウムに換算してさらに水酸化カルシウムとして定量されたものを加えた総水酸化カルシウム量（T-Ca）も中性化の進行と共に、あまり変化していない結果となった。こ

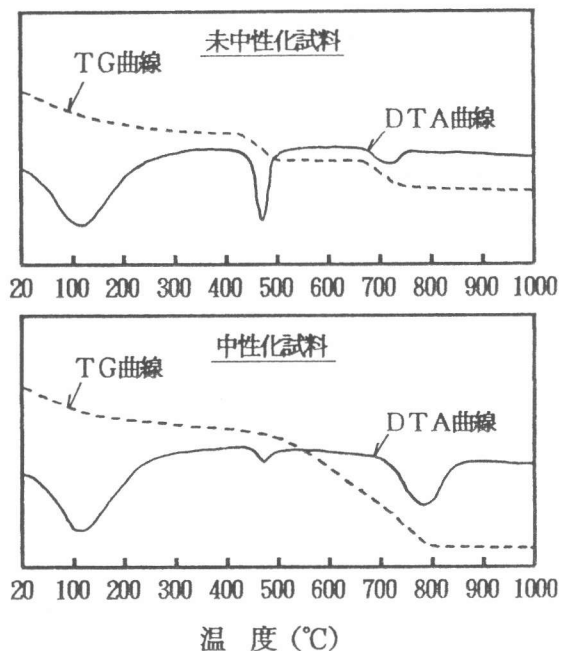


図-4 示差熱重量分析の一例

れより、DTAの測定結果によると促進中性化と屋内暴露したモルタルの品質変化には特に大きな違いが認められなかった。

図-6に参考資料としてTGより求めた図-5の促進中性化の結果を示す。A法は、650℃付近からの吸熱ピーク範囲を炭酸カルシウムとして求めた方法であり、B法は、500℃付近からの重量減少をすべて炭酸カルシウムとして求めた方法である。ここで、消費された水酸化カルシウムがすべて炭酸カルシウムに変化したと仮定した場合、図-6に示す総水酸化カルシウム量は中性化期間に関わらず中性化開始前と同じ値となるが、図より総水酸化カルシウム量が明らかに増大しており、水酸化カルシウムが消費された以上の炭酸カルシウム量となっている。特にB法

で求めた場合にはDTAで求めた炭酸カルシウム量の約3倍の値となる。この場合、生成された炭酸カルシウムは水酸化カルシウム以外のセメント水和物の炭酸化によるものか、あるいはモルタル内部から水酸化カルシウムが移動したこと等の原因が考えられる。しかし、本分析で用いたモルタル試料は、試料全体の測定値であるため、後者の原因は考えられない。

5. まとめ

促進中性化したコンクリートの圧縮強度は、炭酸ガス濃度が高い程、明らかに中性化により増大するが、屋内暴露した場合には標準養生時強度に対する強度比の低下が認められた。しかし、モルタルのポロシティー、DTAによる両者の違いは、細孔径分布以外には特に認められなかった。したがって、屋内暴露した場合の強度比の低下原因は、上記の結果からだけでは説明ができず、コンクリート表層部の影響か、あるいは生成された炭酸カルシウムの結晶形態等の違いが考えられるが、これらは今後の検討課題である。

参考文献

- [1] 小林・白木・星野：アルカリ骨材反応によって早期劣化を生じた大規模集合住宅の調査結果 (VII) -炭酸化による劣化-，生産研究，Vol. 39，pp. 37-40，No. 12，1987
- [2] 高田・魚本：炭酸ガス濃度がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，pp. 673-676，1991
- [3] 神戸博太郎：熱分析，講談社，1984

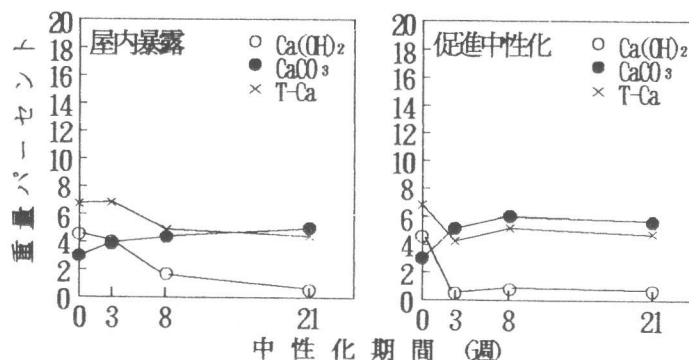


図-5 DTAより求めた定量結果

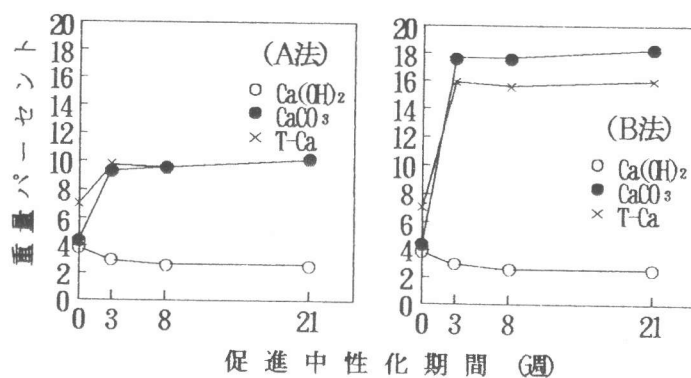


図-6 TGより求めた定量結果