

論文 電気化学的促進手法によるコンクリートのCa溶出に伴う劣化予測

田島 孝敏^{*1}・斉藤 裕司^{*2}・中根 淳^{*3}・藤原 愛^{*4}

要旨：標記手法は、試験体に電位勾配を与えてCaの溶出を促進することにより、セメント水和物からのCa溶出に伴う変質挙動を再現する試験法で、これまでモルタル試験体を用いてその適用性を検討してきた。試験の容易なモルタルの試験結果からコンクリートでの変質予測が可能かどうかを検討するため、まず粗骨材を石材で模擬した試験体を用いて粗骨材量とCa溶出量の関係を調査し、この結果からコンクリート試験体についての変質予測方法を検討した。次にコンクリートを用いた変質促進試験を行い、その妥当性を確認した。

キーワード：溶出, 変質促進試験, モルタル, コンクリート, 粗骨材

1. はじめに

長期間、水と接するコンクリートを変質させる要因の1つと考えられるセメント水和物の水への溶解を再現する手法として、試験体に電位勾配を与えてセメント水和物からのCa溶出を促進する方法を提案し、モルタル試験体を用いてその適用性を検討してきた[1]。

コンクリート構造物の変質予測を行う場合、コンクリートを用いた変質促進試験が求められるが、モルタル試験体に比べて試験体を大型化する必要があるため試験を行いにくい。そこで、コンクリートから粗骨材を分離したモルタルの試験結果からコンクリートの変質予測ができれば試験の簡便化を図る上で好都合である。そのためには、コンクリートとモルタルとの違いである粗骨材の存在に着目した2つの課題、すなわち①粗骨材界面に形成される遷移帯の変質状態、②コンクリート試験体でのCa溶出量と変質範囲の予測について検討する必要がある。

①については、ポーラスで水酸化カルシウムが偏析している遷移帯の変質がバルク部の変質とほぼ同様に進行することが確認された[2]。本論文では、粗骨材量の相違に伴うモルタルの断面積（溶出面積）の相違とCa溶出量との関係を定量的に把握することを意図して、模擬コンクリート試験体の石材の断面寸法を変えた場合のCa溶出量と変質状態を調査し、モルタルでの試験結果に基づいたコンクリート試験体の変質予測の方法を検討した。また、その妥当性を実際のコンクリートを用いて確認した。

2. 模擬コンクリートを用いた試験

2. 1 試験概要

(1) 試験体

使用した試験体は、模擬コンクリート試験体とモルタル試験体である。模擬コンクリート試験体は、図-1に示すように粗骨材を模擬した石材をモルタル中に埋設したもので、形状寸法は、断面25mm角、長さ50mmの直方体である。石材の断面形状は正方形であり、断面寸法は粗骨材量

*1 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室 研究員、工修(正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室 主任研究員、工修(正会員)

*3 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室 室長、工修(正会員)

*4 (財)原子力環境整備センター 研究第二部 次長、工修

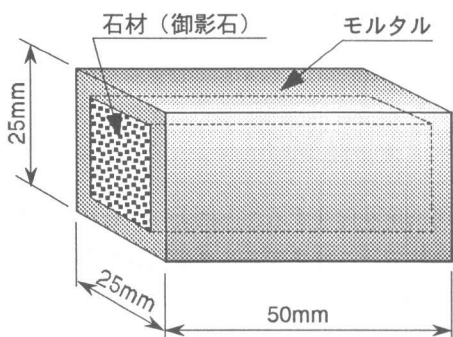


図-1 模擬コンクリート試験体

とCa溶出量の関係を把握するため10, 15, 20mm角の3種類とし、長さはいずれも50mmとした。作製に当っては、石材を横置きにした状態で表-1に示すモルタルをテーブルバイブレータを用いて入念に充填、成型した。なお、砂セメント比を0.55

と小さくした理由は、ブリーディングの影響をできるだけ少なくするためである。また、モルタルの目標フロー値を 200 ± 50 mmに設定した。モルタル試験体の寸法は、模擬コンクリート試験体と同サイズ(25×25×50mm)の試験体を基準とし、石材の断面寸法を変えた模擬コンクリート試験体のモルタル部の断面積と等しい断面積になるように、断面の縦方向を25mmに揃え、横方向を21, 16, 9mmの3種類に設定した。これらの試験体を各々3体作製して、20℃の標準水中養生を4週間行った。各試験体の断面寸法をまとめて表-2に示す。

(2) 変質促進試験方法

試験装置の概要を図-2に示す。試験体を埋め込んだアクリル板の両側に約1リットルのイオン交換水を入れた容器を固定し、その中に設置した電極を介して試験体に10V/cmの電位勾配(電圧/電極間距離)を与えた。試験期間は約3か月とし、その間のCaの溶出量を調査するため、1週間に1回の割合で水を全量交換し、陰極側から回収した溶液中の Ca^{2+} イオンを原子吸光光度法により定量分析した。試験後に装置から試験体を取り出し、ダイヤモンドカッターで二分割した後、切断面および外表面の変質状態を目視により観察した。Caの溶出に伴って水和組織が変質した部分の陰極側表面からの距離を変質範囲として測定した。

2.2 Ca溶出量

模擬コンクリート試験体とモルタル試験体のCa溶出量の経時変化を図-3に示す。いずれの

表-1 材料と配合

材料	セメント	普通ポルトランドセメント
	細骨材	標準砂(豊浦産)
	粗骨材	石材(御影石)
	混和剤	高性能AE減水剤
配合		水セメント比: 0.4 砂セメント比: 0.55

表-2 試験体の断面寸法

	断面寸法[mm]		断面積[cm ²]	
	外形	石材	モルタル	石材
模擬コンクリート	25×25	10×10	5.25	1.00
		15×15	4.00	2.25
		20×20	2.25	4.00
モルタル	25×25	6.25	—	—
	21×25	5.25		
	16×25	4.00		
	9×25	2.25		

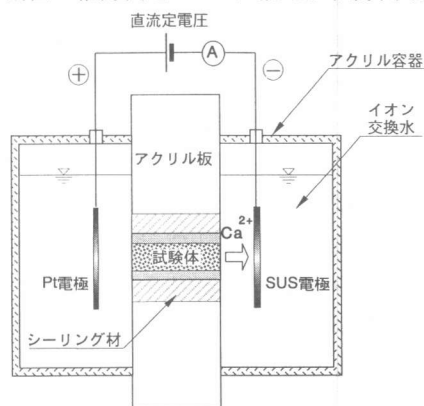


図-2 変質促進試験装置

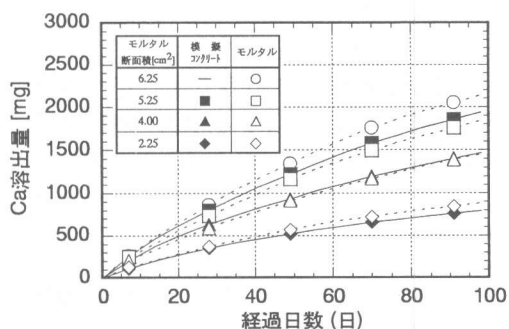


図-3 Ca溶出量の経時変化

試験体も、モルタル断面積の減少に伴いCa溶出量が減少している。また、モルタル断面積が等しい模擬コンクリート試験体とモルタル試験体のCa溶出量を比較すると、各々類似しているものの、試験体によっては多少の差異が認められる。

次にモルタル断面積とCa溶出量の関係を図-4に示す。ここで、試験体の製作誤差による影響を除くため、モルタル断面積は実測値とした。試験体の種類に関わらず、モルタル断面積の増加に伴ってCa溶出量は直線的に増加しており、単位モルタル断面積当たりのCa溶出量は一定であると判断できる。これより、モルタル断面積が等しい模擬コンクリート試験体とモルタル試験体のCa溶出量に多少の差異が生じた原因は、試験体の製作精度によるものと解釈される。以上の結果から、コンクリート試験体のモルタル断面積がわかれば、モルタル試験体のCa溶出量からコンクリート試験体のCa溶出量が推定可能と判断できる。

2. 3 試験体の変質状態

模擬コンクリート試験体の変質状態を写真-1に示す。左側には外表面、右側には石材位置で二分割した切断面を掲載した。いずれの試験体においても水和組織が変質した部分と未変質の部分が明確に識別できる。外表面の変質状態を見ると、試験体の上部ほど変質範囲が大きくなる傾向が認められる。この事象は、石材断面が20mm角の場合を除いて、切断面においても同様に認められ、石材上部では上面ほど、石材下部においても石材界面に近くなるほど変質が進行していることがわかる。これは、ブリーディングによって、モルタルの上下方向で水和組織の緻密さに差異が生じたためと考えられる。

図-5に各試験体の変質範囲を示す。各試験体とも部位によって変質範囲が多少異なるため、変質部の容積をモルタルの断面積で除することにより平均化した変質範囲を求めた。模擬コンクリート試験体の変質範囲は12～13mmであり、石材の断面寸法、もしくはモルタル断面積に関わらず類似していた。一方、モルタル試験体の変質範囲は、断面寸法に関わらず11～12mmと類似していた。

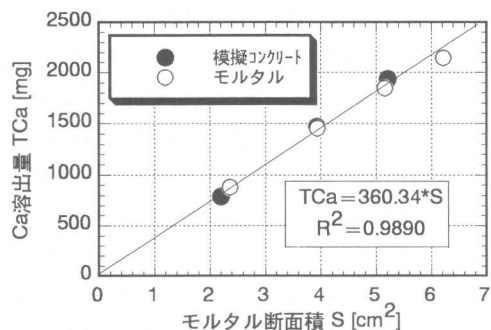


図-4 モルタル断面積とCa溶出量の関係

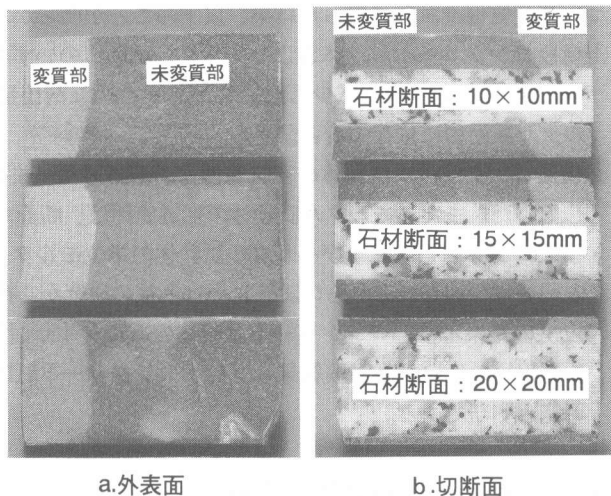


写真-1 模擬コンクリート試験体の変質状態

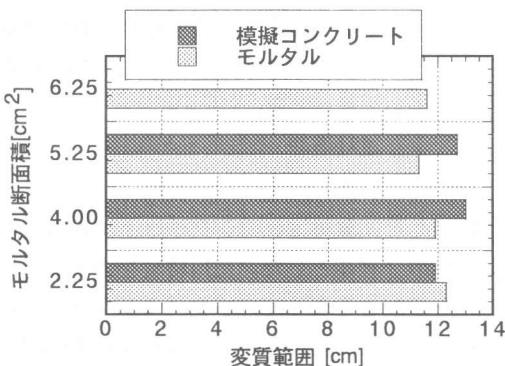


図-5 変質範囲

2. 4 Ca溶出量と変質範囲との関係

モルタル試験体については、単位モルタル断面積当たりのCa溶出量と変質範囲の間には比例関係が成り立つことが既往の研究で明らかにされている [3]。本試験で得られた両者の関係を既往の研究から推定される直線と併せて図-6に示す。試験結果は推定直線の近傍に分布していることがわかる。したがって、コンクリート試験体での変質範囲を予測する場合、同配合のモルタルを用いた試験であらかじめ単位モルタル断面積当たりのCa溶出量と変質範囲の関係を求め、この関係を基にコンクリート試験体での変質範囲を推定できるものと考えられる。

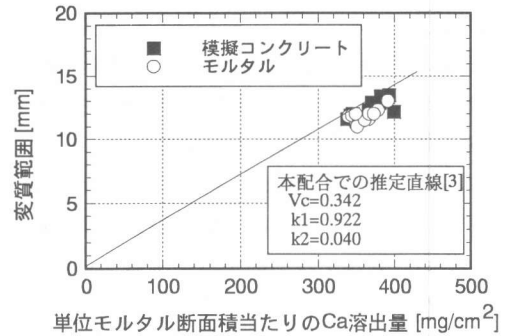


図-6 Ca溶出量と変質範囲の関係

2. 5 まとめ

断面寸法が異なる3種類の石材をモルタル中に埋め込むことによって、モルタルの断面積を変化させた模擬コンクリート試験体と、そのモルタル断面積と等しい断面を有するモルタル試験体について変質促進試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ①模擬コンクリート試験体およびモルタル試験体のいずれも、Ca溶出量はモルタル断面積の減少に伴って比例的に減少した。したがって、Ca溶出量は石材の有無に関わらず、溶出面のモルタル断面積に依存すると言える。
- ②模擬コンクリート試験体の変質範囲は、石材寸法（またはモルタル断面積）に関わらず類似していた。また、モルタル試験体の変質範囲は、断面寸法に関わらず類似していた。
- ③模擬コンクリートおよびモルタル試験体の単位モルタル断面積当たりのCa溶出量と変質範囲の関係は類似し、これらの試験結果は既往の研究から推定される直線関係とほぼ一致する。
- ④以上の結果より、コンクリート試験体のモルタル断面積がわかれば、同配合のモルタル試験体を用いた変質促進試験結果を基に、コンクリート試験体でのCa溶出量と変質範囲の予測が可能と判断できる。

3. コンクリートを用いた確認試験

粗骨材を一定寸法の石材で模擬したコンクリート試験体では、モルタルが試験体の断面に占める割合は断面位置に関わらず一定である。一方、実際のコンクリートでは粗骨材がランダムに配置されるため、モルタル部の断面積は断面位置によって異なる。そこで、コンクリート試験体でのCa溶出量と変質範囲を調査し、前章の検討結果が実際のコンクリートについても適合するかどうかについて検討した。

3. 1 試験概要

(1) 試験体

使用した試験体は、コンクリート試験体とモルタル試験体の2種類とした。使用材料を表-3に、コンクリートの配合を表-4に示す。コンクリート試験体の寸法形状は、直径100mm、長さ50mmの円柱体とした。モルタル試験体の形状寸法は、断面70mm角、長さ50mmの直方体とした。モルタル試験体の断面

表-3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	山砂（比重2.59）
粗骨材	砕石（比重2.66） Gmax=25mm
混和剤	AE減水剤、空気量調整剤

寸法は、まずコンクリートの単位容積に占めるモルタル分の単位容積の比を配合から求め、次にこれをコンクリート試験体の断面積に乗じて平均モルタル断面積を算定し、この面積と等しくなるように決めた。

表-4 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂
8±1.5	4±1	40	44	165	420	757	1004	1.47	0.0252

コンクリート試験体の作製に当たっては、直径100mm、長さ200mmの円柱型枠を横置きにした状態でコンクリートを充填し、20℃の標準水中養生を4週間行った後、所定の長さに切断した。モルタル試験体については、ウェットスクリーニングによってフレッシュコンクリートから粗骨材を除いたモルタルを直方体の型枠に充填、成型し、コンクリート試験体と同様の養生を行った。これらの試験体を3体ずつ作製し、変質促進試験に供した。

(2) 変質促進試験方法

変質促進試験を2.1と同様の手順で行った。電位勾配(電圧/電極間距離)は10V/cm、試験期間中は、変質範囲が粗骨材の最大寸法(25mm)程度となるように約8か月に設定した。試験期間中、1週間に2回の割合で水を交換し、陰極側の溶液中のCa²⁺イオン濃度を原子吸光度法により定量分析した。試験後、ダイヤモンドカッターで試験体を二分割し、切断面の変質範囲を目視観察した。

3. 2 Ca溶出量

コンクリート試験体とモルタル試験体のCa溶出量の経時変化を図-7に示す。試験開始から130日までのCa溶出量はほぼ一致し、それ以降コンクリート試験体からのCa溶出量が若干多くなる傾向を示したものの、両者は類似している。この結果は、材料と配合が決まれば、試験体から溶出するCa量はモルタル断面積から推定できることを示している。なお、コンクリート試験体におけるモルタル断面積として、コンクリートから粗骨材を除いた平均モルタル断面積を用いてよいと考えられる。

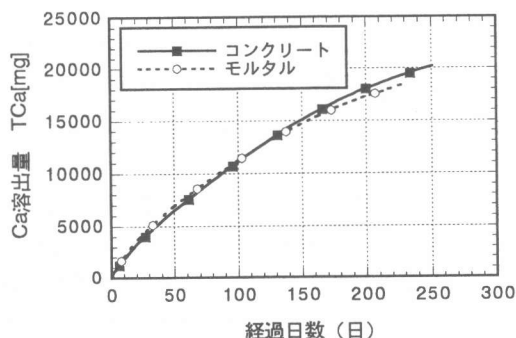


図-7 Ca溶出量の経時変化

3. 3 試験体の変質状態

コンクリートおよびモルタル試験体の変質状態を写真-2に示す。いずれも2.3で述べた変質状態と同様に、変質範囲は目視によって明確に識別される。変質境界の形状は、コンクリートとモルタルとで若干異なり、モルタルの変質境界は滑らかで

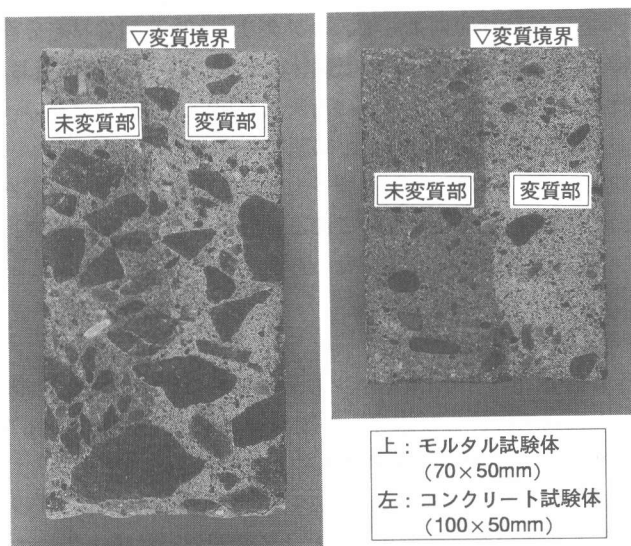


写真-2 試験体の変質状態

あるのに対し、コンクリートでの変質境界は、粗骨材の存在の影響を受けて多少凹凸している。また、遷移帯の形成の可能性のある粗骨材下面での変質については、周囲のモルタル部と同様に進んでいることが認められ、この変質状況は既報告 [2] の結果とも一致している。

3. 4 Ca溶出量と変質範囲との関係

切断面において平均化した変質範囲を測定した結果、コンクリート試験体では27～28mm、モルタル試験体では23～24mmであった。この差異は、3.2で述べたCa溶出量の相違によるものと考えられる。そこで、単位モルタル断面積当たりのCa溶出量と変質範囲との関係を調べた結果を2.4の結果およびそれぞれの推定直線と併せて図-8に示す。各測定値はそれぞれの推定直線の近傍に位置していることから、モルタル試験体で成立した関係がコンクリート試験体についても成立すると判断される。

3. 5 まとめ

コンクリート試験体を用いた変質促進試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ①コンクリート試験体のモルタル断面積が分かれば、コンクリートから粗骨材を除いたモルタル試験体で得られたCa溶出量を基に、コンクリート試験体でのCa溶出量が予測できる。
- ②コンクリート試験体のモルタル断面積として、コンクリートの単位容積に占めるモルタル分の単位容積の比をコンクリート断面積に乗じて求めた平均モルタル断面積を用いてよい。
- ③コンクリート試験体での変質境界は、粗骨材の影響で凹凸があったものの、変質領域は明確に識別できた。また、コンクリート試験体での単位モルタル断面積当たりのCa溶出量と変質範囲は、モルタル試験体と同様にほぼ比例する。

4. おわりに

今回の試験検討によって、コンクリートから粗骨材を分離した小型のモルタル試験体を用いた試験結果からコンクリート試験体の変質挙動（Ca溶出量および変質範囲）の予測が可能であると判断できた。なお、粗骨材に石灰岩を用いた場合は、その一部が溶解すること考えられるが、その影響度合の検討は今後の課題である。

本論文の一部は、（財）原子力環境整備センターに設置された「コンクリート構造物検討委員会」の成果を引用したものである。委員会においてご指導頂いた辻主査（群馬大学）をはじめとする委員各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 斉藤裕司ほか：Caイオンの溶脱に伴うセメント水和物の変質促進試験法としての電気的手法の適用性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp. 901-906、1994
- [2] 斉藤裕司ほか：電気的手法による変質促進試験法における水和組織の変質状態、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.1、pp. 969-974、1996
- [3] 斉藤裕司ほか：電気的手法による変質促進試験法における水和組織の変質範囲と溶出したCa量との関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp. 1003-1006、1995

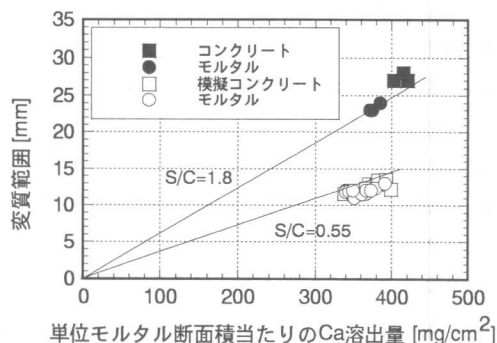


図-8 Ca溶出量と変質範囲の関係