

論文 電気的手法による劣化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

齊藤裕司*1・中根淳*2・藤原愛*3

要旨：水和物が水に徐々に溶解していく変質挙動を促進させるこの試験法では、水に接した試験体に電位勾配を与えて経時的なCaの溶解量を測定した後、変質した範囲を測定する。本報では、変質範囲の予測法の確立を意図し、今までに行った各種の試験結果を用いて両者の関係を明確にするための検討を行った。変質状態から一次の関係式を導き、それを試験で得られた測定値で検証した。

キーワード：変質範囲、溶解、電位勾配

1. まえがき

長期間水と接するコンクリートでは、水和物が徐々に溶解して水和組織が変質していくと考えられる。筆者等は、試験体に電位勾配を与えてその変質挙動を促進させる試験法として電気的手法の有効性を明らかにするための一連の実験検討を行ってきた[1]～[4]。この試験法では、経時的なCaの溶解量を測定した後、変質した範囲を測定する。このCa量から変質範囲の推定ができると試験時に好都合であるとともに、両者の関係が明確になれば変質範囲の予測法を作る上でも役立つと考えられる。本報では、今までに行ってきた各種の試験結果を利用して、溶出したCa量と変質範囲の関係を明らかにした結果を報告する。

2. 変質状態から導けるCa溶出量と変質範囲の関係

本手法による促進試験は、モルタル試験体の両側に水槽を設置して、2～10 V/cmの直流の電位勾配を与えて陰極側の溶液へのCaイオンの移動を速めることによって水和物の溶解を促進させるもので、溶解状況のモニタリングのため溶解してくるCa量の経時変化を測定するとともに、2～12か月後に試験体を取り出し、水和組織の変質状態を調査する。

既に報告[2]したように、変質範囲における主な水和物の変質状態は次のようにまとめられる。

①Ca(OH)₂はすべて溶解している。②C-S-Hの一部も溶解している。③AFmも溶解している。上記の変質状態から、Ca溶出量と変質範囲との間には下記の関係式が導ける。

$$T C a = (D L \times S) \times V c \times \rho c \times E C a \quad (1)$$

ここで T C a : 溶出したCaの含量

D L : 変質範囲

S : 試験体の断面積

V c : セメントの含有割合 (vol %)

*1 (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)

*2 (株)大林組 技術研究所 建築第二研究室、室長 工修(正会員)

*3 (財)原子力環境整備センター 第二研究部、課長

ρ_c : セメントの比重

ECa : 変質範囲に含まれる各水和物ごとのCa溶出量

式(1)中のECaを水和鉱物の構成によって決まる定数と仮定すると、下式が導ける。

$$DL = k_1 \times k_2 \times TCa / S \quad (2)$$

ここで k_1 : 配合 (セメントの含有割合) から決まる定数 ($= 1 / V_c \times \rho_c$)

k_2 : 水和鉱物の構成によって決まる定数

3. 促進試験結果による検証

3.1 検証に用いた試験の内容

検証に用いた試験内容の一覧を表-1に示す。

いずれも本手法の有効性を検討するためモルタル試験体を用いて行った一連の試験の一部である。試験AはCa溶出量が電位勾配に比例することを明らかにした試験[1]で、配合は水セメント比が0.65、砂セメント比が2、形状は直径が5cm、長さが3cm、電位勾配は5と10 V/cmである。試験Bは試験後の劣化状態を詳細に調査し、内部は未変質のままであるが、表面に向かうほど変質が進んでいることを示した試験[2]で、直径が2cm、

表-1 検証に用いた試験の内容

試験名	試験体の形状[cm]		配合比		電位勾配 [V/cm]
	直径	長さ	W/C	S/C	
A	5	3	0.65	2	5,10
B	2	10	0.65	2	5,10
C	5	1	0.35	0.7	5
			0.40	1.0	
			0.50	1.8	
D	2.5	10	0.65	2	10

注) セメント; 普通ポルトランドセメント

長さが10cmの細長い形状の試験体を用い、配合と電位勾配は試験Aと同じである。試験Cは配合の違いが試験結果に反映されることを示した試験[3]で、水セメント比を0.35、0.4、0.5の3水準とし、砂セメント比は水セメント比に応じて0.7、1.0、1.8とした。形状は直径が5cm、長さは1cm、電位勾配は5 V/cmである。試験Dはセメントの種類の差が試験結果に反映されることを示した試験[4]で、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、および高炉セメントB種の三種類のセメントを使用し、配合は試験Aと、形状は直径が2.5cm、長さは10cm、電位勾配は10 V/cmである。

3.2 検証結果

試験A～Dによって得られたCa溶出量(TCa)と変質範囲(DL)の一覧を表-2に示す。同表には、水和物の構成を示唆すると考えられる各試験体中の水酸化カルシウム含有量(CH)も併記した。本検討に用いた試験におけるCHは普通、中庸熱ポルトランドセメントを使用した場合は17.1～21.3%の範囲であり、高炉セメントB種の場合が7.0%であった。

(1) 配合が同一の場合

使用したセメントが普通ポルトランドセメントと共通で、同一の配合を用いた試験(A, B)で得られた試験体断面積当たりのCa溶出量(TCa/S)と変質範囲(DL)との関係を図-1に示す。両試験におけるDLとTCa/Sの関係式は、原点を通り、勾配($k_1 \times k_2$)が0.07となる直線で近似でき、試験体の形状には無関係に式(2)が成立することがわかる。この試験では、配合から決まる定数 k_1 は1.72となるので、水和鉱物の構成によって決まる定数 k_2 は0.041となる。

(2) 水セメント比、砂セメント比が異なる場合

表-2 測定結果

試験名	TCa [mg]	DL [mm]	CH [%]	備考
A	1,466	5.3	17.7	電位勾配 5 [V/cm]
	3,122	13		
	6,106	23		
	2,663	8		
	5,551	20		
B	805	18	17.4	電位勾配 5 [V/cm]
	1,141	26		
	658	14.5		
	1,621	35		
C	1,357	2.5	18.0	W/C:0.35
	2,092	4		
	3,682	7		
	1,329	3	18.7	W/C:0.4
	2,062	5		
	1,350	4.2	21.3	W/C:0.5
	2,038	6.7		
D	1,163	17.3	19.1	普通
	1,755	26.3		
	1,282	21.3	17.1	中庸熱
	1,887	29.8		
	843	19	7.0	高炉B種
	1,188	26		

試験Cで得られた TCa/SとDLの関係を
図-2 に示す。TCa/SとDLの関係は各配合
ごとに、それぞれの一次式で整理できる。
配合ごとに異なる理由は配合に起因する定
数 (k1) が異なるためである。そこで、各
測点と原点とを結ぶ直線の勾配 ($k1 \times$
 $k2$)、及びこれらを用いて算出した定数
(k2) を表-3 に示す。各試験結果のk2 は
0.04~0.043と類似しており、(1)で得られ
た0.041に比べて、 $\pm 5\%$ の範囲に入ってい
る。この結果から式(2)で表わせる関係式が
配合とは無関係に成立していると判断でき
る。なお、この試験では CH が18~21.3%
と変動しており、それが k2 の算出結果に
反映されることが、式(2)の仮定から推察さ
れる。しかし、今回の検討結果ではこの影響が明確に認められず、この程度の差は試験の精度の
制約から検出できないものと判断される。

(3) セメントの種類が異なる場合

三種類のセメント (普通、中庸熱、高炉B種) を使用した試験結果を図-3 に示す。CHの含有

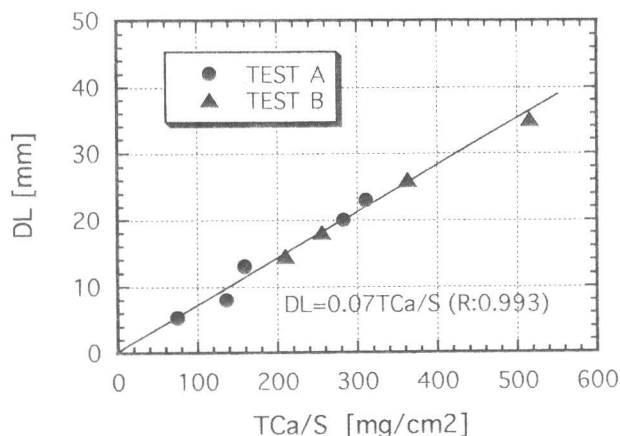


図-1 TCa/SとDLの関係 (TEST A,B)

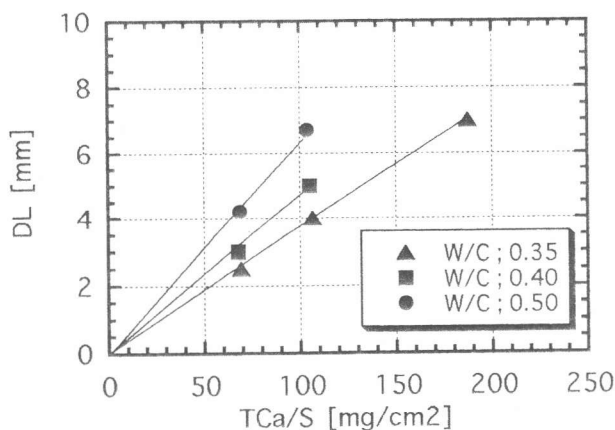


図-2 TCa/SとDLの関係 (TEST C)

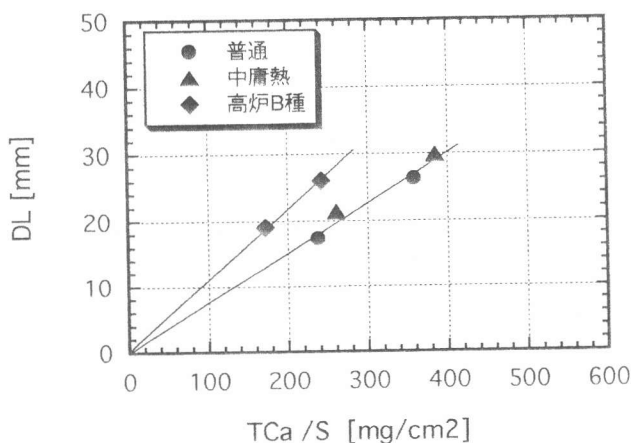


図-3 TCa/SとDLの関係 (TEST D)

量が類似している普通セメントと中庸熱セメントでは、TCa/SとDLの関係は同一の直線とみなすことができ、その傾きから算出されたk2は0.044と、(1)の結果と類似している。一方、CH含有量が7.0%と前者に比べて半分以下と少なかった高炉セメントB種場合は、前者とは明らかに異なる別の直線で近似でき、その傾きから求める

表-3 試験で得られた各定数

試験名	Vc	k1	k1*k2	k2	備考
A, B	0.183	1.72	0.070	0.041 (1.00)	
C	0.339	0.93	0.037	0.040 (0.97)	W/C;0.35
	0.289	1.09	0.047	0.043 (1.05)	W/C;0.40
	0.211	1.49	0.063	0.042 (1.03)	W/C;0.50
D	0.183	1.72	0.076	0.044 (1.08)	普通 中庸熱
			0.108	0.063 (1.54)	高炉B種

k2は0.063と約50%おおきく、明確な違いが認められる。このように、セメントの種類によって水和鉱物の構成が著しく異なる場合は、式(2)の定数をそれぞれ決める必要がある。

(1)~(3)に述べたように、TCa/SとDLとの間には式(2)で示される関係式が成立することが、促進試験のデータで確認できた。

4. まとめ

モルタル試験体に電位勾配を与えて水和物の溶解劣化現象を促進させるこの試験法では、陰極側の溶液中に溶出するCa量の経時変化を測定した後、変質範囲を測定する。ここでは、本手法の有効性を検討するために行ってきた一連の劣化促進試験結果に基づいて、両者の関係を検討した結果、試験体断面積当たりのCa溶出量(TCa/S)と変質範囲(DL)との間には、電位勾配や試験体寸法とは無関係に下記の関係式が成立することが明らかとなった。

$$DL = k1 \times k2 \times TCa / S$$

ここで、

k1：配合（セメントの含有割合）によって決まる定数（ $= 1 / Vc \times \rho c$ ）

k2：水和鉱物の構成によって決まる定数

[参考文献]

- 1) 斉藤裕司ほか、：電気的手法による劣化促進試験法におけるセメント水和物の溶解と変質に及ぼす電位勾配の影響、コンクリート工学論文集、Vol.4、No.2 pp.69-78、1993.7
- 2) 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
- 3) 斉藤裕司ほか、：電気的手法を用いたコンクリートの劣化促進試験における調合と変質との関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 197-198、1994.9
- 4) 田島ほか、：電気的手法によるコンクリートの劣化促進試験、その1. 各種セメントの劣化特性について、土木学会第49回年次学術講演会、第V部門、pp 486-487、1994.9