

[21] 鉄筋コンクリート建物の塩分蓄積に関する一考察

正会員 川上英男 (福井大学工学部)

1. まえがき

塩分環境下にある鉄筋コンクリートでは、コンクリートに外部より浸透した塩分が鋼材の腐食を招き、構造物の耐久性を著しく低下せしめる危険がある。建築物においても、海浜環境より浸透蓄積した塩分が、海砂使用の際の塩分制限量に比べて格段に大きい場合が見られることは既に報告^{たとえ1)}に見られる通りである。

鉄筋コンクリート建築物では仕上げ材を有する場合が多いものの、鉄筋に対するコンクリートかぶり小さいこと、また配筋の関係からコンクリート自体も水セメント比の比較的大きい、軟練りの調合を用いているなど、塩害に対しては元来不利な体質となっており、塩害対策は耐久性確保の上で極めて重要である。

この種の塩害には、コンクリート中の塩分量、空気や水分の浸透、かぶり厚さなどが影響するが、塩分量に対象を限れば、鉄筋周辺の塩分量が問題となる。そして拡散理論によれば、任意点の塩分量は、時間(t)、コンクリートの表面塩分量(C_0)及び塩素イオンの拡散係数(D_c)によって表わされるとされる。

本報告は鉄筋コンクリート建築物のコンクリート壁体内の塩分調査結果に対して、拡散理論にもとづく解を適用して、表面塩分量(C_0)と拡散係数(D_c)を算定し、その大よその範囲を明らかにすると共に、これらの値を用いた塩分分布線の調査結果に対する適合性ならびに、塩分量にもとづく建物耐用期間に対する考察を加えるものである。

2. 塩分の拡散

コンクリート中への塩分の浸透の割合はFickの拡散の法則(1式)でかなりよく表わされるとされ²⁾、その解は誤差関数を用いて(2)式のように与えられている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$C = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここに x : 表面からの距離 (cm) C_0 : 見かけの表面塩分量
 t : 経過時間 (sec) D_c : 見かけの拡散係数 (cm^2/sec)
 C : 時間 t , 距離 x における塩分量 である。

(2)式によれば、 C_0 と D_c が与えられれば、コンクリート中の任意の深さにおける塩分量が求められることを意味する。

見掛けの拡散係数 D_c は、イオンの種類、共存イオンの効果、セメント硬化体中の細孔サイズ分布と全細孔量、水セメント比、養生温度、セメントの種類などによって影響を受けるとされている^{たとえ3)}。コンクリートではさらに骨材境界面の微細クラックなど骨材含有による諸影響や、コンクリートの乾湿をはじめ実構造物の環境条件も加味されることになろう。

セメントペーストの D_c についてはC. L. Page⁴⁾により $1.27 \sim 16.52 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ の値が報告されている。Browne⁵⁾は高強度コンクリートの offshore 構造物と普通の maritime 構造物のコンクリートから求めた代表的な D_c の値としてそれぞれ $0.1 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 及び $5 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ を報告している。大即⁴⁾らは、棧橋上部工(飛沫部)の調査結果から $D_c = 1.3 \sim 3.9 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ を得て、およそ D_c は $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{cm}^2/\text{sec}$ であると結論づけている。海岸からある程度の距離にある建築物に対するこの種の検討報告はまだ見当たらない。以下は建物コンクリートの塩分調査結果に対する拡散理論解のケーススタディである。

3. 鉄筋コンクリート建物調査結果

調査対象は鉄筋コンクリート造体育館（平屋建）で、材齢28年、日本海の海岸から800 mの距離に位置する¹⁾。その平面図と調査箇所を図1に示す。

本報告の検討対象としたコア（10 cm ϕ ）の圧縮強度、中性化深さ、調合分析結果等を表1に掲げる。これらのコアはいずれも外壁より採取したものであって、室内側にまで貫通（厚さ12 cm \sim 17 cm）した。外装は厚さ約1 cm前後のモルタル塗り羽毛引き仕上げであり、室内側は1例（モルタル塗り）を除き、すべて堅羽目板張りである。

これらのコアは圧縮試験の後、輪切りにし、それぞれの試料片の塩分量を試験した。すなわち試料片をハンマーで丹念に破碎し、粗骨材表面のモルタルを研り落して、粗骨材とモルタルに分離する。次にこのモルタルを微粉碎後、絶乾状態とし、蒸留水を加えて振とう、24時間以上室内に置いた後の上澄水又は濾過水に対して、Volhard法によって塩分滴定を行なった。仕上げモルタルについても同様に試験した。これらの結果を一括して示したのが図2である。同図ではコアの長さ（壁厚）に拘わらず屋外側、屋内側それぞれの表面を揃えて表示した。横軸の値は輪切りにしたコアの中央部分のコンクリート表面からの距離で表わしてある。塩分量はNaClの対モルタル重量比である。

4. 拡散係数(D_c)と表面塩分量の算定結果とその考察

コアの塩分分析結果を各コアについて示したのが図3である。同図ではそれぞれ屋外側を左側に示した。各分析結果を示す横線の長さは輪切り試料片の厚さである。これらの結果に対して算定したD_cとC₀の値を表2に掲げる。またそれらの値と(2)式を用いて求めた塩分分布想定線を同図に書き入れた。

塩分量分析値が必ずしも一定の傾向を示さない例も見られるが、コンクリート材質上の不均一が関与しているのではないかと考えられる。また塩分量分析値が、仕上げモルタルに比べてコンクリート躯体表面付近の方が大きい場合がある。両者の材質の差に起因するものと考えられる。

4.1 見掛けの表面塩分量(C₀)について

C₀値はコアの屋外側では0.03 \sim 0.29%、平均は0.15%、屋内側では0.10 \sim 0.28%、平均0.17%であって、特

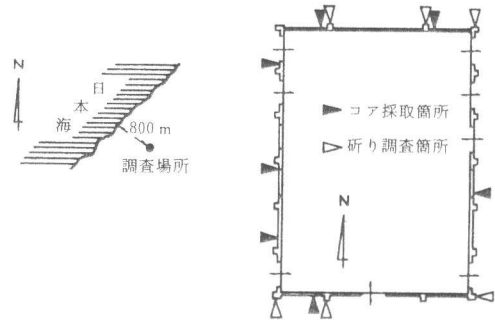


図1 調査建物の位置及び平面

表1 コアの調査結果

コアNo	圧縮強度 (kg/cm ²) ヤング係数(10 ⁵ kg/cm ²)		絶乾重量調合比 セメント：砂：砂利	中性化深 (cm)		
				モルタル	外側	室内側
1	185	3.54	1 : 2.84 : 2.57	0.7	1.3	2.8
2	215	3.26		0.3	1.1	2.4
3	177	—		0.7	0.4	3.3
4	209	3.69		0.8	1.9	3.0
5	160	1.25		0.8	1.9	3.6
6	211	3.26		1.0	1.3	3.1
7	—	—		0.9	1.9	1.8
平均	193	—	—	0.95*	1.2*	2.9*

(* 研り調査を含めた値)

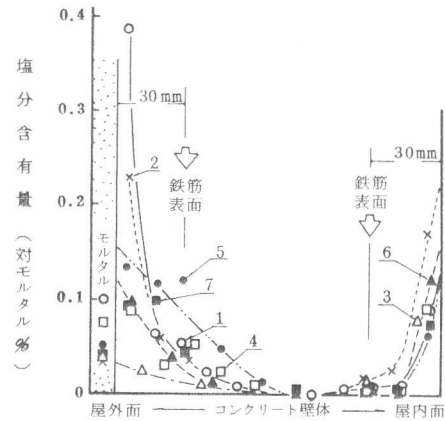


図2 壁体内の塩分量分布

表2 D_c及びC₀の算定値

コアNo	D _c (10 ⁻⁸ cm ² /sec)		C ₀ (%)	
	屋外側	屋内側	屋外側	屋内側
1	0.37	0.12	0.29	0.13
2	0.40	0.14	0.23	0.27
3	1.00	0.39	0.03	0.11
4	(0.58) 0.80	0.05	(0.25) 0.10	0.17
5	1.66	0.10	0.15	0.10
6	0.44	0.03	0.12	0.28
7	0.50	0.06	0.16	0.16
平均	0.74	0.13	0.15	0.17
標準偏差	0.47	0.12	0.085	0.07

に大きい差は見られない。

(2)式によれば、コンクリート内の塩分量 C は C_0 に比例するので、仕上げ材の塩分防止効果はその点で耐久性上重要な要因である。

4.2 見掛けの拡散係数 (D_c)について

D_c の値は屋外側で $0.37 \sim 1.66 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、平均 $0.74 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、屋内側では $0.03 \sim 0.39 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、平均 $0.13 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$ を得た。

D_c の平均値は屋外側に比べて屋内側では約 1/6 の値を示した。屋外側では仕上げモルタルを通して躯体コンクリートにも雨水が浸透することが想定されるのに対し、屋内側では比較的乾燥した状態に保たれるのが一因と考えられる。

また D_c の標準偏差は屋内側では屋外側の約 1/4 である。

屋内側では窓の開閉によって屋内に取り込まれた空気中の塩分が羽目板下のコンクリートに達するのに対し、屋外側では風向、日射などの環境条件の差や、仕上げモルタルの防護効果に局所的な差があるためと考えられる。前掲の図2でも屋外側の塩分分布状況がかなりの範囲にちらばっているのもこうした理由が一因と考えられる。

これら D_c は材質に関与する値とみて、コンクリート材質の代表値としての圧縮強度との関係を示すと図4のようである。圧縮強度が大きい程、 D_c は小さくなる傾向にある。

コンクリートの圧縮強度と D_c との関係についての報告は見当たらないので、セメントペーストの D_c についての C. L. Page の実験結果⁴⁾ (表3) にもとづいて、セメント水比 (C/W) と D_c との関係を図示したのが図5である。

コンクリートの圧縮強度 (F_c) は使用したセメントペーストの (C/W) の他に影響を受ける因

表3 セメントペーストの拡散係数 ($10^{-8} \text{cm}^2/\text{sec}$)

W/C	0.4	0.5	0.6
14.5	1.27	2.36	8.46
25.0	2.60	4.47	12.35
35.0	4.47	9.48	16.52

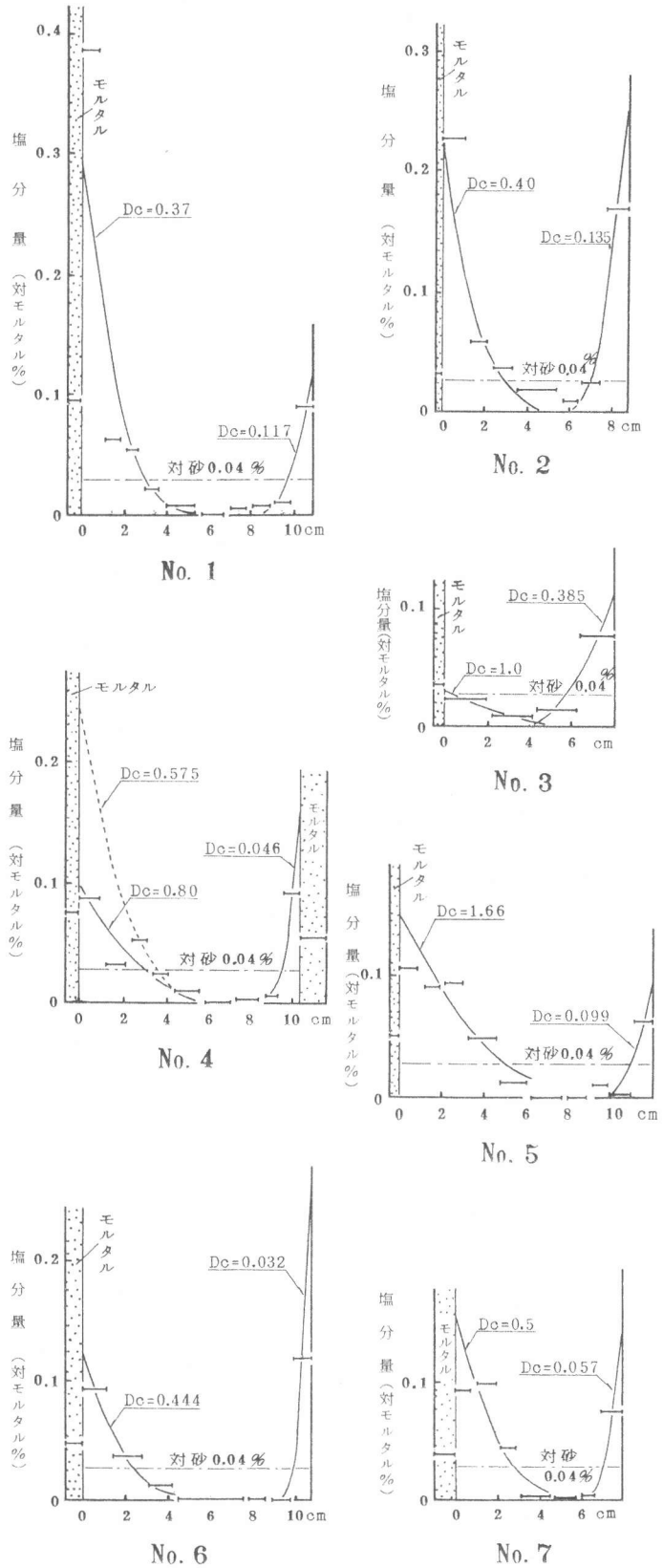


図3 コアの塩分分析結果と塩分分布想定線

子も多いが、実用上 F_c と C/W が直線的関係にあることに注目すれば図4に示される傾向は図5の傾向と類似であると考えられる。ここで図5を $1/D_c$ に対して書き直すと図6に示すように $1/D_c$ と C/W はほぼ直線的関係とみなせる。すなわち同様に書き直した図7においても $1/D_c$ と圧縮強度は直線的関係にあると想定できよう。

ここに $1/D_c$ は(2)式より次のように考えることができる。ある塩分環境 (C_0) のもとで、鉄筋位置の塩分量をある限度 (C_i) に押えれば、 $D_c \cdot t$ は一定値を採ることになる。すなわち $1/D_c$ は t に比例する。いま鉄筋位置での塩分量が C_i に達する期間を許容耐用期間 (t_0) とする場合には、 $1/D_c$ 換言すれば C/W あるいは F_c は t_0 を比較する目安となる可能性を示唆する。

以上の考察は限られた範囲の調査例にもとづいているので、さらに種々の塩分環境、コンクリート調合、経過年数にわたる調査による検討が望まれる。

4.3 塩分量を対象とした所要かぶり厚

JASS 5 の海砂の塩分制限量 0.04% (対モルタル 0.027%) を図3に書き入れた。これより調査時点における所要かぶり厚を求めると屋外側では 1.1 ~ 6.6 cm, 平均 3.6 cm, 屋内側では 1.1 ~ 3.0 cm, 平均 1.7 cm となり、屋内側は屋外側に対し、約 1/2 の値となった。

5. むすび

鉄筋コンクリート建築物 (材齢28年, 海岸より 800 m) の壁体コアの塩分調査結果に対して拡散理論による検討を行なった結果、限られた範囲ではあるが、次の結論が得られた。

1. 建物の壁体コンクリート中の塩分に対しても拡散理論解がおおよそ適用できることが示された。
2. 見掛けの拡散係数 (D_c) は屋外側では $0.37 \sim 1.66 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$, 平均 $0.74 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ と算定された。一方屋内側の D_c は平均 $0.12 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であって屋外側の約 1/5 の値であった。同一コア内でもより乾燥している方が D_c は小さくなるものと考えられる。
3. D_c の値はコンクリートの圧縮強度が大きい程、小さくなり、塩分の拡散に対する抵抗が大きくなる傾向を示した。
4. 鉄筋付近の塩分量をある限度に押える観点から建物の許容耐用期間を検討するときには、コンクリートのセメント水比、あるいは圧縮強度がその期間の比較指標となる可能性が示唆された。

今後広範囲の調査結果の蓄積による検証が望まれる。

参考文献

- 1) 川上英男 "鉄筋コンクリート建物への塩分の浸透と蓄積" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) 昭58, pp.219 ~ 220.
- 2) R. D. Browne "Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of offshore and Coastal Structures" ACI SP 65 - 11, pp. 169 ~ 204.
- 3) 大門, 後藤 "セメント硬化体中のイオンの拡散" セメントコンクリート研究討論会講演要旨集 昭59, 10, 31, pp.1 ~ 4.
- 4) 大即, 森, 下沢 "海洋環境におけるコンクリートの塩素含有量" セメント・コンクリート No. 421, Mar. 1982, pp.30 ~ 37.

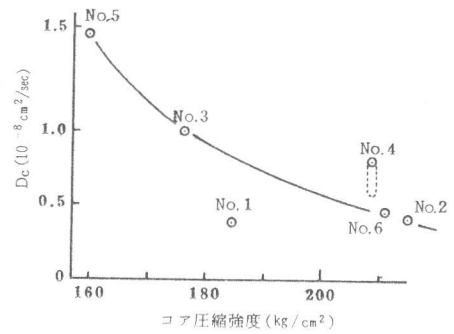


図4 D_c とコンクリート圧縮強度

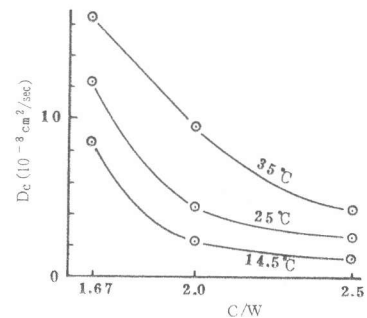


図5 セメントペーストの C/W と D_c

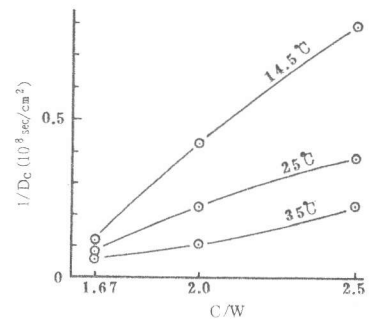


図6 セメントペーストの C/W と $1/D_c$

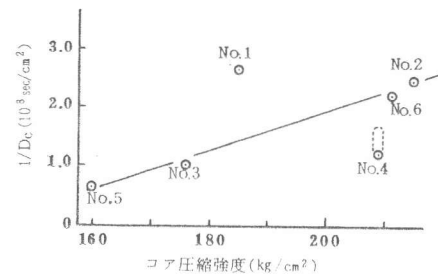


図7 コアの圧縮強度と $1/D_c$