

[46] 経年RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食

正会員 ○嵩英雄 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 和泉意登志 (竹中工務店技術研究所)
 正会員 友沢史紀 (建設省建築研究所)
 正会員 福士勲 (住宅都市整備公団住宅都市研究試験所)

1. まえがき

近年、省資源・省エネルギーが社会的要請となり、建築物においても耐用年数の向上が重要な課題となっている。耐用年数を向上させるためには、既存建築物についての保全技術の開発および新設建物についての耐久性向上のための設計・施工技術の開発が必要であり、建築物の品質保証の面からも重要な課題である。これらの技術を開発するには、まず既存建築物の劣化現象・劣化要因の実態を調査把握する必要がある。

一般のRC構造物の耐久性を評価する上で、コンクリートの中性化と鉄筋の腐食は最も重要な劣化現象とされており、これらに及ぼす要因とその効果については多くの報告がある。要因効果を検討するためには、自然条件下における既存構造物の実態調査を行うことが最も確実な方法であり調査報告も少なくない。しかし、これらの報告は単一構造物によるものがほとんどであるため、得られたデータが特殊解であり、その上調査方法や取り上げた要因がそれぞれ異なっているため、まとめて分析することが困難である場合が多い。

本報告は、過去数年間において統一された調査方法によって実施された、経年RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食に関するデータを基に、各種要因とその効果について統計的に分析したものである。

2. 調査対象構造物

調査の対象とした構造物は、RCまたはSRC造の44件の建築物で、大正14年から昭和48年の間に竣工し、一般環境下にあったものである。調査は昭和52年～58年に実施し、経過年数は9～55年の範囲にある。図-1に調査対象建物の内訳を示す。

3. 調査方法

調査データの分析には、特殊な環境条件の場合や、コンクリート中の塩分量が多い場合（細骨材の0.1%以上）のデータを除外し、通常の環境条件で通常の建築物に使用される普通コンクリート（AE含む）で、ひびわれや豆板等の欠陥部でない個所のデータのみを使用した。測定値の総数は、中性化深さ測定個所2449個、鉄筋の腐食測定個所1541個であった。

3.1 コンクリートの中性化深さ

現場における研り及び実験室における採取コア供試体の割裂または切断によって測定面を製作し、フェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧する方法を用いた。中性化深さは、コンクリート表面から試薬による赤着色部までの距離とした。

3.2 鉄筋の腐食状況

コンクリートの中性化深さを測定した個所において鉄筋を取り出し、鉄筋表面の腐食状況を目視によって観察することにより、表-1に示す腐食程度のグレーディングに分類した。²⁾

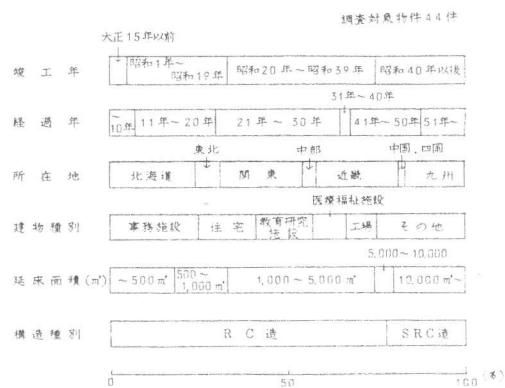


図-1 調査対象建物の内訳

表-1 鉄筋の腐食程度のグレーディングとさび評点

グレーディング	さび評点	鉄筋の状態
I	0	黒皮の状態、またはさびが生じているが全体的に薄いらぬなさびであり、コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	1	部分的に薄さびがあるが、小面積の斑点状である。
III	2	断面欠損は目視觀察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって薄さびが生じている。
IV	3	断面欠損を生じている。

4. 調査結果および考察

調査結果をまとめて表-2に示す。

4.1 コンクリートの中性化深さ

4.1.1 データのばらつき

中性化深さは、同一建物で同一仕上げ材であっても測定箇所によってばらついている。例えば同一建築物で仕上げなしの場合の中性化深さのデータを正規確率紙にプロットするとはほぼ直線となり(図-2)，中性化深さの分布は正規分布に近い。同様に他の建築物においても中性化のばらつきはほぼ正規分布に近く、その変動係数は表-3に示す通りの広い範囲に分布し、これら変動係数の平均値は41%であった。

中性化深さのばらつきの原因は、コンクリートの品質、締固めの程度、部材、環境条件等の相違によるものと考えられる。

4.1.2 各種要因とその効果

中性化深さに影響を及ぼす要因として屋内外の別、雨がかりの有無、仕上げ材の種類をとり上げ、それらの要因効果を図-4、5に示す。

1) 環境条件の影響 仕上げなしの場合について、建物ごとに環境条件の相違による中性化深さを図-4に示す。中性化深さは屋内の場合が屋外の場合より大きく、屋外では雨がかからない場合が大きい。また雨がかかっても日射によって乾き易い南面や西面が大きい傾向にある。これらの主たる原因是、コンクリート中の水分含有量が多いほど炭酸ガスのコンクリート中への拡散量が少ないことによるものと推察される。

2) 仕上げ材の影響 建物ごとに仕上げ材別の中性化深さを図-5に示す。同一建物でも中性化深さは仕上げ材の種類によって大きく異なっており、透気性の大きな仕上げ材ほど中性化深さが大きくなる傾向が定量的に確認できた。

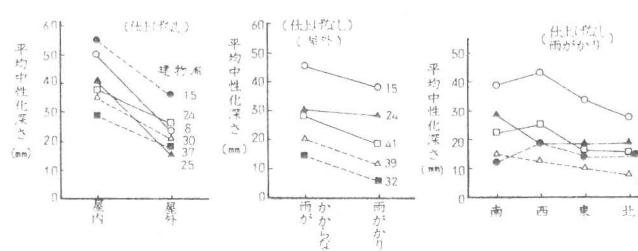


図-4 中性化深さに及ぼす環境条件の影響

表-2 調査結果

建物 番号	年数	仕上げ材別中性化深さ平均値 (mm)						鉄筋の腐蝕グレーディング比(%)	正規係数
		屋内	タフ	プラスチック	モルタル	タイル	モルタル下地	モルタル	
1	5.5							12.1	9.4
2	5.5							—	8.3
3	5.5							—	9.7
4	5.4	49.6	40.2	30.0	30.7	12.3		7.1	2.9
5	5.3							0	10.0
6	5.0							1.7	0.2
7	5.1	33.1	19.3					5.7	4.3
8	4.9	50.1	26.2					4.0	6.0
9	4.9							2.5	7.5
10	4.7	42.0	32.0					12	8.8
11	4.2							—	2.7
12	4.4							3.3	6.7
13	4.2	52.0	44.0	51.0	52.6	15.5		9.3	5.0
14	4.1							7.0	6.2
15	3.4	55.6	51.1					5	9.5
16	3.1	57.0	55.5	50	55	17.4		2.6	7.4
17	3.0	26.6						0	10.0
18	2.7							—	1.7
19	2.9		24.2			16.0		2.0	17.5
20	2.8	19.6						1.1	4.0
21	2.4							—	—
22	2.8	22.8						7.1	2.9
23	2.6	35.8	17.6		7.6	15	2.4	3.2	8.8
24	2.6				10.1			6.0	5.2
25	2.4	41.5	31.4	14.8	16.0	11	16.0	8.4	8.9
26	2.5	25.5	20.7		9.7	18	7.6	8.1	1.7
27	2.5	27.4						3.7	6.5
28	2.5	39.5	32.1		10.5			—	1.4
29	2.5	24.8	21.9		16.2	5.4	6.5	5.9	3.5
30	2.5	35.4	15.8	9.7	5.8	9.7	22.0	14	8.6
31	2.5							0	10.0
32	2.1						24.6	—	—
33	2.0	39.2				4.3	8.3	5.6	4.4
34	2.0							0	10.0
35	1.7						3.0	—	8.6
36	1.9						1.3	—	1.64
37	1.5	28.1	20.0	17	2.5	1.9	18.3	—	2.14
38	1.4						—	0	10.0
39	1.3						14.2	—	—
40	1.3	28.0			17.7	4.5		5.7	4.3
41	1.3						—	2.9	8.0
42	1.2	10.5			10			0	10.0
43	1.2	18.0						—	2.6
44	9							—	0

* 仕上げ材の中性化深さ平均値の記入していない建物は、その他の仕上げ材のためである

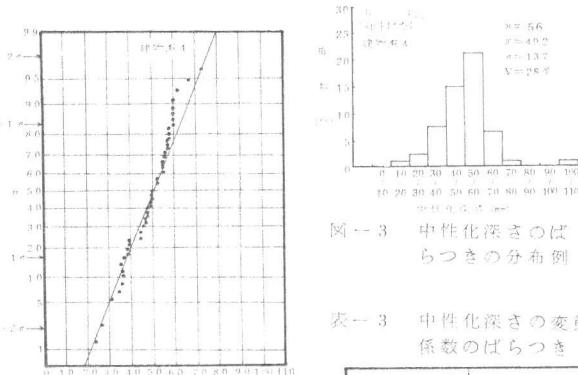


図-2 正規確率紙による中性化深さの分布

表-3 中性化深さの変動係数のばらつき

サンプル数	16例
範 囲	2.2~6.7%
平 均 値	41 %

注) 1つのサンプルは中性化深さのデータが15個以上のものから求めた

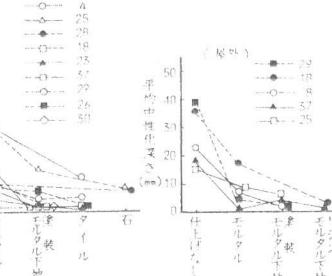


図-3 中性化深さのばらつきの分布例

図-4 中性化深さに及ぼす環境条件の影響

図-5 中性化深さに及ぼす仕上材の影響

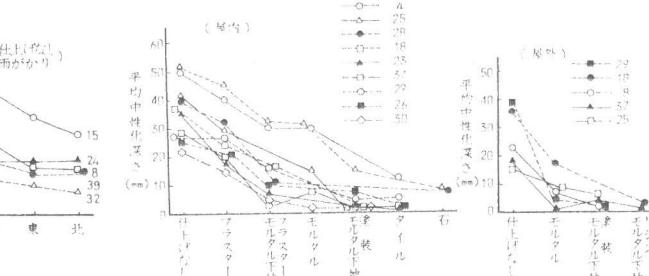


図-4 中性化深さに及ぼす環境条件の影響

4.1.3 既往の中性化速度式との比較

速度式としては、岸谷式⁴⁾が最も一般的で、次式で示される。

$$y = \frac{0.3(1.15+3X)}{R^2(X-0.25)^2} C^2 \quad (X \geq 0.6)$$

y : 経過年数

X : 水セメント比

$$y = \frac{7.2}{R^2(4.6X-1.76)^2} C^2 \quad (X \leq 0.6)$$

C : 中性化深さ(cm)

R : 中性化比率

ここに中性化比率Rは、骨材、表面活性剤及びセメントの種類によって定まる定数であり、Xは強度上の水セメント比（表面活性剤使用の場合は、実際の水セメント比とは異なる。例えは実際の水セメント比が55%の場合には強度上の水セメント比は60%となる〔昭和32年版JASS5〕）である。

本調査結果の仕上げなしの場合について建物ごとに平均中性化深さと経過年数の関係を図-6に示す。中性化深さを測定したコンクリートは、コンクリート中の表面活性剤の種類や有無および水セメント比が明らかでない。このため標準的な式として上述の岸谷式におけるR=1, X=0.6の場合のy=7.22C²の式と比較すると、屋外では0.82~2.18倍、屋内では0.8~2.74倍の中性化速度であった。

4.1.4 中性化比率

中性化速度は大気中の炭酸ガスがコンクリート内部へと進んでいくという固相の拡散式を基に $C = A\sqrt{t}$ (C: 中性化深さ、A: 定数、t: 経過年数) と表わされ、さらに定数Aは $A = \alpha \times \beta \times r$ (α : 環境条件による係数、 β : 仕上げ材による係数、r: コンクリートの内の因子による係数) と分解できる。上述の結果を基に、 α は屋外の場合を $\alpha=1.0$ 、 β は屋内外別にそれぞれ仕上げなしの場合を $\beta=1.0$ として中性化比率 α および β の平均値および標準偏差を求め、JASS5⁵⁾（昭和54年版）解説に示されている値と対比したものを表-4に示す。本調査によって得られた中性化比率 α 、 β はJASS5に示されている値とほぼ同等であった。

4.2 コンクリート中の鉄筋

4.2.1 かぶり厚さのばらつき

柱のフープ、はりのスター・ラップおよび壁筋のように、コンクリートの最外端に存在する鉄筋のかぶり厚さを建物の部位ごとに層別した。鉄筋のかぶり厚さのデータを正規確率紙にプロットするとはほぼ直線となり（図-7）、鉄筋のかぶり厚さの分布は正規分布に近い。同様に他の建築物においても鉄筋のかぶり厚さはほぼ正規分布に近く、それらの標準偏差は表-5に示す通りの範囲に分布していた。これらの標準偏差の平均値は15mmであった。

4.2.2 鉄筋腐食に及ぼす各種要因とその結果

鉄筋の腐食状況を各種要因別に腐食グレーディング比率（各グレーディングに存在する鉄筋の割合を棒グラフでパーセント表示したもの）および以下に示す平均さび評点 $\bar{\alpha}$ を用いて表わし、図-9～11に示す。

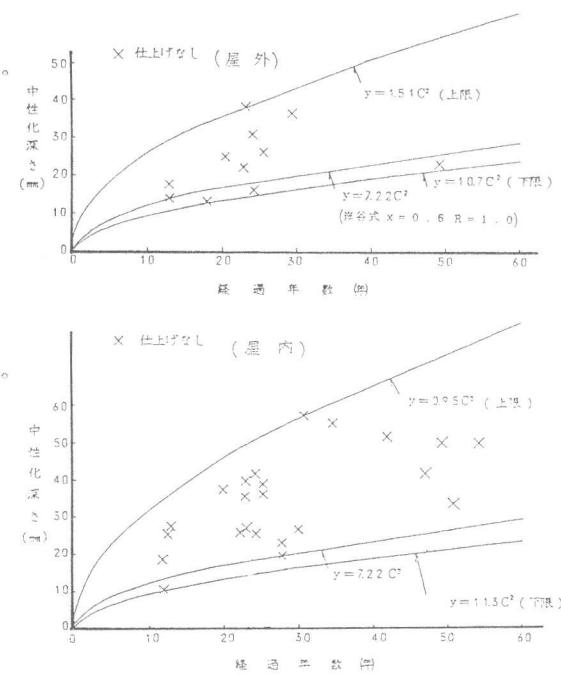


図-6 既往の中性化速度式との比較

表-4 中性化比率 α 、 β

	α		β		α		β	
	屋外	屋内	屋外	屋内	屋外	屋内	屋外	屋内
本調査	47.0-61	1.0	1.0	0.79	0.41	0.29	0.15	0.12
標準偏差	-	-	-	-	0.15	0.24	0.23	0.11
JASS5	15-36	1.0	1.0	-	-	0.63	0.02	0.01

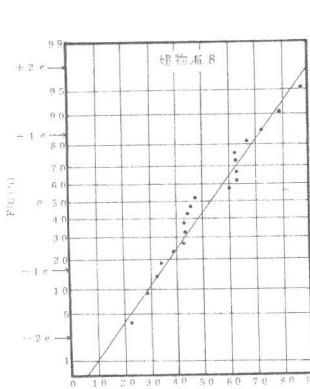


図-7 正規確率紙による鉄筋のかぶり厚さの分布

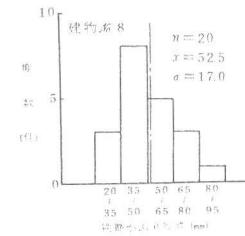


図-8 かぶり厚さのはらつき分布例

表-5 かぶり厚さの標準偏差のはらつき

サンプル数	8例
範 囲	10 ~ 18 mm
平 均 値	1.5 mm

注) 1つのサンプルはかぶり厚さのデータが10個以上のものから求めた

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \times n_i)}{\sum_{i=1}^n n_i}$$

α_i : グレーディング i の評点

n_i : グレーディング i の測定数

1) 仕上げ材の影響

コンクリートの未中性化領域に存在すると、仕上げ材の種類に関係なくいずれの場合にも腐食することはない。中性化領域に存在する鉄筋は腐食し、仕上げ材の種類によってその進行状況が若干異なっていた。しかし中性化領域に存在するかしないかの要因と比較すれば、仕上げ材の影響は無視できる程度のものと考えられる。

2) 鉄筋のかぶり厚さの影響

図-10より、平均さび評点を屋内外別に、中性化領域か未中性化領域かに分けると、いずれの場合もかぶり厚さが小さくなるに従って平均さび評点が大きくなる傾向がみられるが、その差は非常にわずかであった。鉄筋のかぶり厚さの影響は、中性化領域が鉄筋に到達しているか否かの要因効果に比較すれば無視しうる程度であると考えられる。

3) 屋内外の差の影響

図-9, 10より、コンクリート中の鉄筋の腐食状況は、コンクリート面が屋内面か屋外面かによって大きく影響を及ぼされ、屋内より屋外の場合に腐食し易く、その差は鉄筋がコンクリートの中性化領域に存在する場合に著しかった。また屋外ではコンクリートの中性化領域が鉄筋に到達すると急速に腐食し始めるが、屋内では中性化領域が鉄筋に到達しても急速に腐食することなく、かぶり厚さを20~30mm通り過した時点でグレードIIIの状況になっていた。

5.まとめ

本実態調査の範囲内において、以下のことが判明した。

- 1) 仕上げなしの場合、屋内の中性化速度は屋外の約1.7倍であった。
- 2) 中性化速度は、透気性の小さい仕上げ材によって抑制され、その中性化比率はJASS5に示されている値には等しかった。
- 3) 中性化領域が鉄筋に到達すると仕上げ材の種類に関係なく鉄筋が腐食し始め、以後中性化が進行するに従って腐食が進む。
- 4) 鉄筋は屋内より屋外の場合に腐食し易い。屋外では中性化領域が鉄筋に到達すると急速に腐食し始めるが屋内では中性化領域での鉄筋腐食は比較的ゆるやかであった。
- 5) 鉄筋の腐食程度を支配する最大の因子はコンクリートの中性化であり、中性化領域に存在すると水分量が大きな因子となる。

〔謝辞〕 本調査を進めるに当り、御指導をいただきました東京大学岸谷教授、東京工業大学仕入教授に感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 岸谷：コンクリートの中性化試験における自然バクロ試験と炭酸ガス促進試験との対比について、日本建築学会関東支部研究発表会第26、昭和34年6月
- 2) 福士、森永、成田：海砂使用上の技術基準に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、昭和55年9月
- 3) 桃見：信頼性工学入門、丸善株式会社、昭和56年1月、P.47
- 4) 岸谷：鉄筋コンクリートの耐久性、鹿島建設技術研究所出版部、1963.2
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS5鉄筋コンクリート工事、昭和54年11月、P.228
- 6) 瑠、和泉他：既存RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和58年9月
- 7) 和泉、瑠：経年鉄筋コンクリート建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食の実態について、第10回セメント、コンクリート研究討論会、昭和58年11月

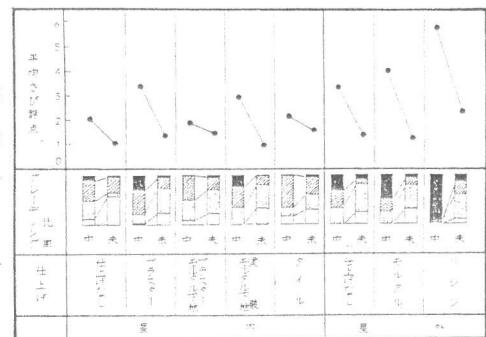


図-9 鉄筋の腐食に及ぼす仕上げ材の影響

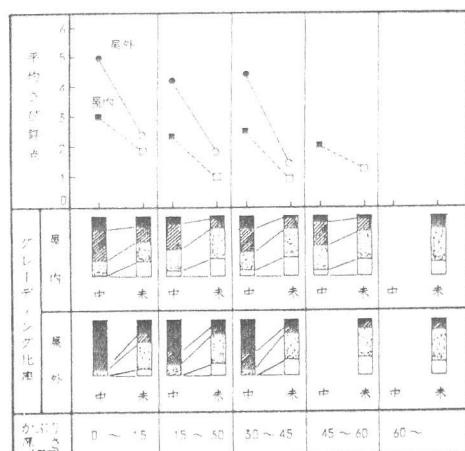


図-10 鉄筋の腐食に及ぼすかぶり厚さの影響

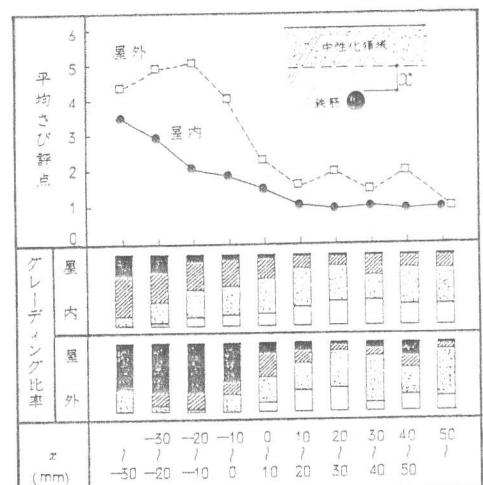


図-11 鉄筋の腐食に及ぼす鉄筋表面から中性化領域までの距離の影響