

実構造物における雨掛がある環境下の鉄筋腐食環境の評価方法に関する検討

実構造物 鉄筋腐食 中性化
かぶり厚さ 相対湿度 耐久性評価

正会員 ○山田 宗範* 正会員 今本 啓一**
同 野口 貴文*** 同 濱崎 仁****
同 兼松 学** 同 清原 千鶴**

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート(以下、RC とする)構造物の寿命は中性化が鉄筋に到達した時期として定義されている¹⁾。一方で既存 RC 構造物を対象とした鉄筋腐食調査²⁾の結果、中性化が鉄筋位置まで到達している場合において、雨掛がない乾燥した環境下では鉄筋の腐食は顕在化しないが、雨掛の環境下ではかぶり厚さが 30mm 以下かつ平均相対湿度が 80~90% の領域で耐久性に影響を及ぼす重度の鉄筋腐食が生じることを確認している。本研究では、鉄筋の腐食環境の定量評価を目的とし、実構造物の鉄筋腐食状況および中性化深さを調査した箇所の近傍に温湿度センサを埋設し相対湿度の測定を行った。得られたデータから相対湿度および仕上げ材が鉄筋腐食に及ぼす影響を検討し、回帰分析により雨掛がある環境下の鉄筋腐食グレードの推定式を作成した。

2. 調査概要

2.1 対象構造物

本研究の対象である 9 棟の調査構造物の所在地、築年数および主な仕上げ材を表-1 に示す。

2.2 測定項目

実施した中性化深さ、コンクリート内部の相対湿度、鉄筋のかぶり厚さおよび腐食度の測定の概要を表-2 に示す。また、中性化深さ測定における誤差⁴⁾に関する既往研究の知見を踏まえ中性化残りが 10mm 以下の場合を中性化が鉄筋に到達していると判断してデータ整理を行った。

3. 回帰分析による鉄筋腐食グレード推定式の作成

3.1 分析対象の調査結果

回帰分析に用いたデータの一覧を表-3 に示す。雨掛がある箇所で中性化が鉄筋まで到達していることが確認されたデータのみを検討に用いた。

3.2 鉄筋腐食グレード推定式の提案

鉄筋腐食グレード推定式を作成する上で、目視区分である鉄筋腐食グレードを鉄筋腐食の定量的な評価指標である鉄筋の腐食減少率と関連付けて検討を行うためにいくつかの条件を仮定した。鉄筋腐食グレードと質量減少率の対応を表-4 に示す。鉄筋腐食グレード 3 までの腐食面積率は指針³⁾の腐食状況および調査結果との対応を考慮し表の値を仮定した。その時の質量減少率は、既往の暴露実験における鉄筋腐食状況に関する研究⁶⁾を参考とした。なお既往の研究⁶⁾は塩害環境下にあるが、塩害による鉄筋腐食は加速期において著しくまた、鉄筋腐食の起点は水であると仮定し、断面欠損を伴わない

表-1 対象構造物の概要

記号	所在地	調査時築年数 (竣工年)	主な仕上げ材
A1	愛知県	47(1968)	U.P.M
C1	千葉県	49(1968)	U.P.M.T
F1	福岡県	75(1943)	U.M
S1	静岡県	47(1970)	P.F.M
T1	東京都	27(1987)	U.L.M
T2	東京都	43(1971)	U.P.L.M
T3	東京都	44(1965)	U.L.M
T4	東京都	97(1918)	U.M
T5	東京都	80(1937)	P.F.M

表-2 測定項目

測定項目	概要
中性化深さ	JIS A 1152 に準拠し、 φ80mm 程度の湿式コアを用いて測定した
コンクリート内部の 相対湿度	振動ドリルにより穿孔し 鉄筋位置に温湿度センサを埋設し測定した
鉄筋のかぶり厚さ	鉄筋が露出するまで削り出し、 ノギスを用いて測定した
鉄筋の腐食度	削り出した鉄筋を指針 ³⁾ に準拠し 5段階で目視評価を行った

表-3 分析対象の調査結果

記号	部材	平均 相対湿度 (%)	鉄筋腐食 グレード	仕上 種類	かぶり 厚さ (mm)	中性化 残り (mm)
A1	壁	78.87	2	P+M	30	5
C1	柱	77.23	3	U	21	1
C1	柱	87.05	5	U	12	-3
F1	柱	96.04	3	U	55	7
S1	軒	96.5	4	M	10	-12
T1	壁	91.93	3	L+M	27	9
T2	床	87.59	5	P+M	9	-25
T3	壁	71.02	3	L+M	16	-5
T4	壁	71.25	2	M	41	0
T5	壁	73.66	2	F+M	16	4
T5	壁	81.41	2	F+M	39	7
T5	壁	92.83	2	F+M	32	-35
T5	壁	72.54	3	F+M	23	-5

表-4 鉄筋腐食グレードと質量減少率の対応

鉄筋腐食 グレード	腐食面積率 (%)	質量減少率 (%)	腐食状況
-	0	0.00	
1	10	0.15	施工時の状態
2	30	0.44	部分的な腐食
-	51	0.75	暴露試験体データ
3	80	1.18	大部分の腐食
-	100	1.47	全体的な腐食
4	100	5.0	全体的な断面欠損
5	100	15.0	断面の 15%が欠損

鉄筋腐食のデータを使用した。

また、鉄筋腐食グレード 4 および 5 の腐食状況に対応する鉄筋の質量減少率について表-4 の評価区分を仮定した。ここでは、文献¹⁾において鉄筋の約 4~5%程度の断面積が腐食するまでは部材の耐力に大きな変化は認められないとあることや、文献³⁾に示されている発錆面積率と質量減少率の関係において腐食グレード 4 と判断されたものの質量減少率が 3%以

表-5 実構造物調査時と電食させた鉄筋の腐食状況比較

実構造物調査時に判定した鉄筋の腐食状況		電食させた鉄筋の腐食状況	
グレード 4		質量減少率 5%	
グレード 5		質量減少率 15%	

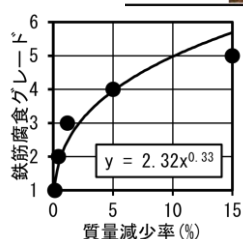


図-2 質量減少率と鉄筋腐食グレード

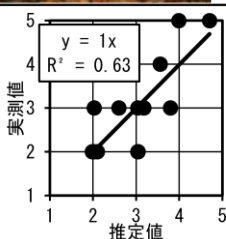


図-3 推定値と実測値の関係

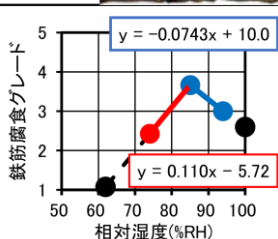


図-4 平均相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係

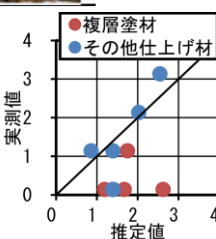


図-5 仕上げ材の影響

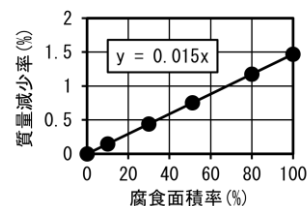


図-1 腐食面積率と質量減少率の関係

表-6 比率の平均と分散 (仕上げ影響係数 k_f)

比率	打放し	複層塗材	その他仕上げ材
平均	1.0	0.08	0.8
分散	0.06	0.06	0.25

上であることが示されていること、さらに質量減少率が 5%および 15%程度となるまで電食させた鉄筋と比較し確認した結果(表-5)、本調査における鉄筋腐食グレード 4 および 5 と判断した鉄筋と同程度であることを鑑み腐食グレード 4 の質量減少率を 5%、腐食グレード 5 の質量減少率を 15%と仮定した。

図-1 に示す腐食面積率と質量減少率の関係の検量線を作成し、図中の式により鉄筋腐食グレード 3 以下のときの質量減少率を算出した。また、鉄筋の腐食速度は常に一定で質量減少率は時間と比例関係であると仮定し、推定鉄筋腐食グレードと経過時間の関係は図-2 に示す質量減少率と鉄筋腐食グレードの関係と等しくなるものとした。このときの推定鉄筋腐食グレードを、中性化が鉄筋まで到達した後の年数の 3 乗根、湿度環境および仕上げ材の影響の積で推定する式の作成を試みた。その結果を式(1)に示す。時間および状態が腐食速度に及ぼす影響については今後さらに検討をおこなう必要がある。

$$G_{pre} = 0.20 \times \sqrt[3]{\frac{t - \left(\frac{D_c}{A}\right)^2}{t_1} \times k_{R.H.} \times k_f + 1.86} \quad (1)$$

ここに G_{pre} : 推定鉄筋腐食グレード (-)
 t : 調査時築年数 (year)
 t_1 : 1 (year)
 D_c : かぶり厚さ (mm)
 A : 中性化速度係数 (mm/year)
 k_{RH} : 湿度影響係数 (-)
 RH_{ave} : 平均相対湿度 (%)
 k_f : 仕上げ影響係数 (-)

なお、本式の適用範囲は中性化が鉄筋まで到達した以降(中性化残りが 10mm 以下)および相対湿度 62%以上の雨掛がある環境とする。中性化残りが 0 となった場合鉄筋腐食グレードは数値上 1.86 となるが、本論においてはこのグレードは問題とならないと考えている。作成した式より推定した鉄筋腐食グレードと実測値の関係を図-3 に示す。両者に相関性が確認され、かぶり厚さ、平均相対湿度および仕上げ材の種類による鉄筋腐食グレード推定の可能性が示唆された。

3.3 相対湿度が鉄筋腐食に及ぼす影響

式(1)の湿度鉄筋腐食係数 $k_{R.H.}$ は図-4 に示す本調査結果における平均相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係より求まる値

とし、適用範囲は $62 \leq Ave_{R.H.} < 100$ とし、式(2)および式(3)から算出した。

(i) $62 \leq RH_{ave} < 85$ のとき

$$k_{R.H.} = 11.0 \times \frac{RH_{ave}}{100} - 5.72 \quad (2)$$

(ii) $85 \leq RH_{ave} < 100$ のとき

$$k_{R.H.} = -7.43 \times \frac{RH_{ave}}{100} + 10.0 \quad (3)$$

3.4 仕上げ材が鉄筋腐食に及ぼす影響

式(1)による予測値(切片を除いた部分の計算値)と実測値(実測した鉄筋腐食グレードから式(1)の切片 1.86 を除いた値)の関係を図-5 に示す。仕上げ材が施された箇所では予測値が実測値より大きくなる傾向を示した。そこで、仕上げ材影響係数 k_f を予測値に対する実測値の比率をとし、打放しのとき 1、複層塗材のとき 0.08、その他の仕上げ材料は 0.8 として補正を行った。表-6 に仕上げ材影響係数 k_f (実測値/予測値)の平均と分散を示す。

4. まとめ

- 1) 雨掛ありの環境で中性化が鉄筋まで到達している場合の鉄筋腐食グレードを鉄筋のかぶり厚さ、鉄筋位置の平均相対湿度および仕上げ材の種類から推定する式を作成した。
- 2) 仕上げ材を施した場合、鉄筋腐食の進行が抑制される可能性が示唆された。

謝辞

本研究は、日本建築学会「既存鉄筋コンクリート造建築物の構造・材料調査 WG」および「既存鉄筋コンクリート造建築物の解体情報整備 WG」の活動の一環として行われたものである。また、住宅市場整備推進等事業費補助金技術開発「高経年施設の維持保全最適化を目的とする耐久性(健全性)診断および点検・調査診断技術の開発」の助成を受けた。ここに記し、関係者各位に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築工事指図書・解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2018
- 2) 山田宗範, 今本啓一, 清原千鶴, 野口貴文: 実構造物におけるコンクリート内部の水分が鉄筋腐食に与える影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.40, No.1, pp.621-626, 2018
- 3) 公益社団法人日本コンクリート工学会: 既存コンクリート構造物の性能評価指標 2014, p.210, 2014
- 4) 佐藤周之, 内田健一朗, 横井克則, 野中資博: フェノールフタレイン法によるコンクリート中性化の詳細評価技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.2023-2028, 2009
- 5) 岸谷孝一, 櫻野紀元: コンクリート中の鉄筋の腐食に関する研究その 1 コンクリートの中性化深さが鉄筋腐食に及ぼす影響について, 日本建築学会論文報告集, Vol.283, pp.11-16, 1979.5
- 6) 平田真佑子ら: 端島の RC 造建築物に対する表面含浸材工法の適用性に関する研究 その 2 曝露実験における鉄筋の腐食状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.305-306, 2018

*一般財団法人ベターリビング (元東京理科大学)

**東京理科大学

***東京大学

****芝浦工業大学

* Center for Better Living(Former Tokyo University of Science)

** Tokyo University of Science

*** The University of Tokyo

**** Shibaura Institute of Technology