

論文 実構造物の鉄筋腐食に影響を及ぼすひび割れ, 中性化および含水率に関する実地調査

木野瀬 透*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: 本研究は既存 RC 造建築物の調査を通して, RC 造建築物の耐久性を評価するうえで要諦を成す鉄筋の腐食の発生状況に及ぼす各種要因に着目して検討を行った。その結果, 既存 RC 造建築物におけるコンクリートの含水状態と中性化の進行および圧縮強度は調査対象や仕上材の有無によらず, 一定の相関が確認された。ひび割れの生じている箇所では, ひび割れ幅と腐食程度は相関が得られず, かぶり厚さが小さくなるほど腐食が顕著になる傾向が確認された。かぶり厚さが小さいことで, ひび割れ直下だけでなく, その周囲へ劣化因子が拡散することが定性的に示唆された。

キーワード: 鉄筋腐食, かぶり厚さ, ひび割れ, 含水率, 中性化, 圧縮強度

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート造(以下, RC 造)において, 中性化およびひび割れによる鉄筋腐食は建築物の耐久性を評価するうえで考慮すべき重要な劣化因子であり, 数多く研究がされている^{1),2)}。中性化が進行していないながらも, RC 造建築物は乾燥収縮, 温度応力, 曲げ, 打ち継ぎ不良等によるひび割れおよび豆板等の変状のある箇所(以下, 変状部)から, コンクリート内部に鉄筋の主たる腐食要因である水分が供給される。この現象について実験的検討は行われているが, 実構造物を対象として, ひび割れが鉄筋腐食に与える影響を検討した研究は少ない。本研究の目的は, 既存 RC 造建築物における中性化後の鉄筋腐食条件の解明と, ひび割れによる鉄筋腐食状況の把握である。そこで, 本研究では実構造物においてひび割れの生じていない健全部および変状部で鉄筋腐食状況の調査を行い, ひび割れが鉄筋腐食に与える影響を検討するとともに, 健全部において腐食要因となりうるコンクリートの含水状態について中性化および鉄筋腐食の双方との関係性を検討する。

2. 調査概要

2.1 調査対象

本研究では, 建築物内部に打放し箇所を含む(例外有り)7棟の既存 RC 造建築物を対象とした。各調査対象の竣工年, 所在地, 用途および主な使用仕上材種別を表-1に, 調査対象の外観写真および測定位置平面図を図-1に示す。なお, Yについて, 細骨材および粗骨材にそれぞれ海砂, 軽量骨材を使用している。測定位置において, 中性化深さ, 乾式コアの採取によるコンクリートの含水

表-1 調査対象の概要

記号	所在地	竣工年 (調査時築年数)	用途	階	構造	主な仕上材 種別
T1	東京都	1965 (49)	住宅	5	RC	C, Pe+M
T2		1965 (49)	住宅	4	RC	C, M, S+M
T3		1971 (43)	住宅	13	RC	M
T4		1929 (84)	住宅	4	RC	S+M
A1	愛知県	1972 (43)	学校	6	RC	C, Pe+M
A2		1930 (84)	事務所	2	RC	M, Pe+M
Y	山口県	1987 (27)	住宅	14	RC (SRC 含)	C, Ft+M

仕上材種別 (C:打放し, Pe:ペイント, M:モルタル, S:しっくい
Mc:複層塗材, T:テラゾー, L:リシン, Ft:吹付タイル)

状態の深さ方向分布等の測定を行った。

2.2 調査項目

(1) 含水率測定

乾式でφ75mm程度のコアを採取し, 仕上材を取り除いた後, 乾式カッターにより約20mmごとに切断し, 105°C乾燥により絶乾質量, 吸水により飽水質量を求め, 各試験片の相対質量含水率を式(1)により算定した。一般的に, 建築材料の含水率を評価する際, JIS A 1476に示される式(2)に基づいて評価されるが, ここでは各調査対象で異なる物性を持つコンクリートを相対的に評価するため, 式(1)を採用することとした。なお, 採取時や乾式カッターによる切断時の熱の発生が測定質量に与える影響は考慮すべきであるが, 本研究においては概ね相対的な評価が可能であると判断した。

*1 (一財)日本建築総合試験所(元 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士(工学))(正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託補手 博士(工学) (正会員)

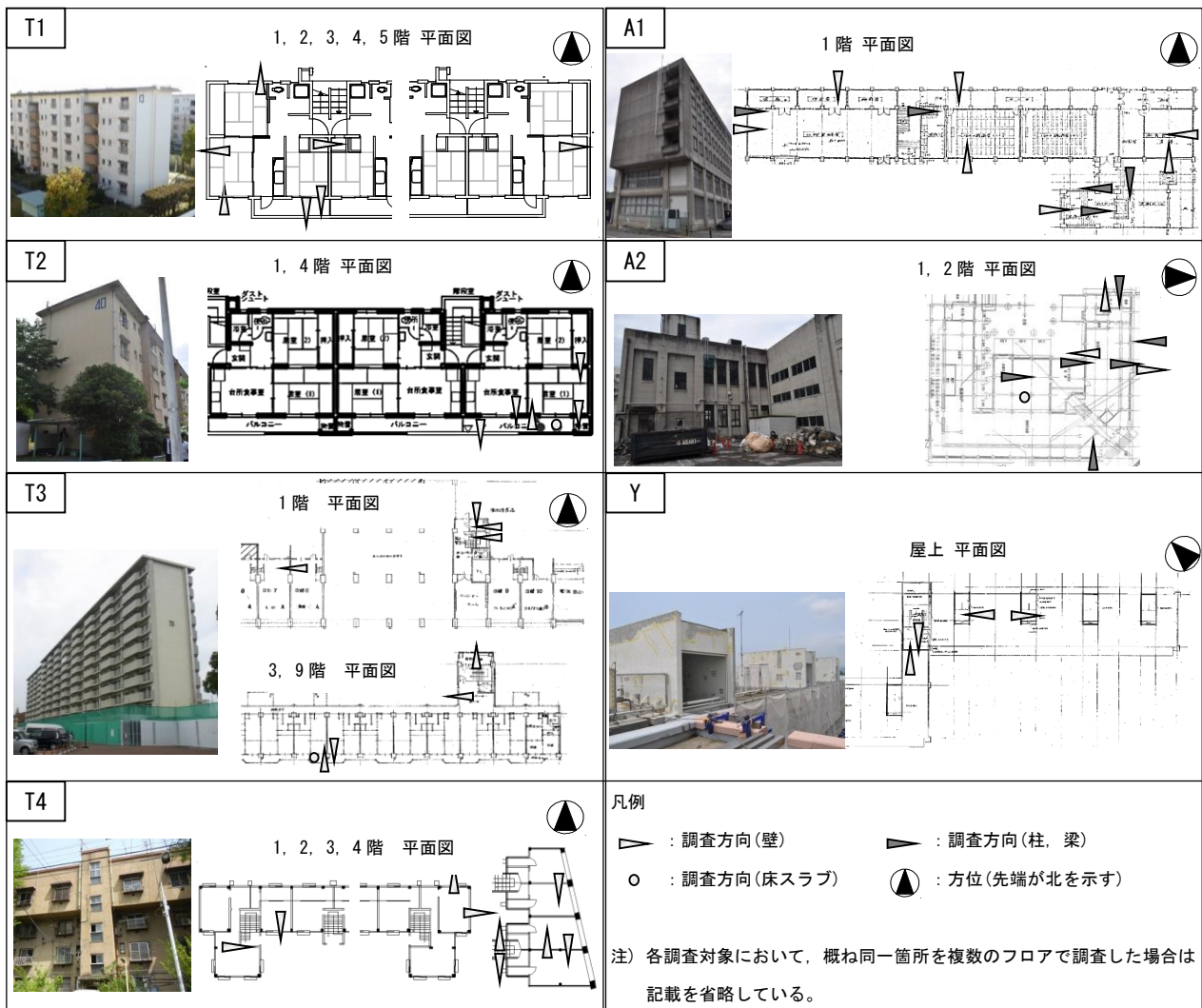


図-1 調査対象の調査箇所平面図および外観写真

$$m = (M - M_{dry}) / (M_{wet} - M_{dry}) \times 100 \quad (1)$$

$$m_G = (M - M_{dry}) / M_{dry} \times 100 \quad (2)$$

ここに、
 m : 相対質量含水率(%)
 m_G : 質量基準質量含水率(%)
 M : 調査時質量(g)
 M_{dry} : 105°C絶乾質量(g)
 M_{wet} : 吸水後の飽水質量(g)

(2) 中性化深さ測定

測定箇所において、 $\phi 75\text{mm}$ 程度のコア採取を行い、コアの側面において仕上材を除いたコンクリート部の中性化深さを JIS A 1152 に準拠し、測定した。なお、一部は調査時の測定値や別試験体の割裂面を用いた。この際、本来ならば測定面の違いによる影響を考慮すべきであるが、本研究では同一として扱うこととした。なお、中性化速度係数は式(3)により算定した。

$$C = A\sqrt{t} \quad (3)$$

ここに、 C : 中性化深さ(mm)

A : 中性化速度係数(mm/year^{1/2})

t : 調査時築年数(years)

(3) 圧縮強度試験

JIS A 1107 に準拠し、測定箇所において湿式によりコアの採取後、圧縮強度試験を行った。

(4) 鉄筋かぶり厚さ、腐食グレード

鉄筋のかぶり厚さはコンクリート表面をはつき、ノギスにより計測した値を用いた。その際、表-2 に示すように日本コンクリート工学協会：海洋コンクリート構造物の防食指針(案)³⁾に基づき鉄筋の腐食グレードを 0 から 4 の 5 段階で付すこととした。調査箇所はコンクリートに損傷が見られない健全部と、ひび割れや剥離等が生じている変状部を選定し、変状部についてはその劣化状況を記録した。また、ひび割れと鉄筋の交差する箇所とひび割れと少し離れた箇所のそれぞれに対して評価を行

い、ひび割れによる影響を検討することとした。

表-2 鉄筋の腐食グレード³⁾

グレード	腐食状況
0	施工時の状態を保ち、以降の腐食が認められない
1	部分的に腐食が認められる、軽微な腐食
2	表面の大部分が腐食している、部分的に断面欠損がある
3	鉄筋の全周にわたり、断面に欠損がある
4	鉄筋の断面が当初の2/3~1/2くらい欠損している

3. 結果・考察

3.1 相対質量含水率

全調査対象の測定箇所におけるコンクリート表層および比較的含水状態が安定していた表層から40mm程度の深さにおける相対質量含水率の分布を図-2に示す。表層は10%から50%に多く分布し、内部は表層より10%程度高く分布する傾向が確認されたが、これは降雨による水分の供給によると思われる。また、表層の相対質量含水率の屋内外別分布を図-3に示す。屋内は20%から30%に多く分布することが確認された。屋外は屋内に比べ20%程度大きくなることを確認された。

3.2 相対質量含水率と中性化速度係数の関係

それぞれの調査対象および全調査対象における相対質量含水率と中性化速度係数の関係を図-4から図-8に示す。ここで、表層より中性化が進行することから、相対質量含水率は最も影響が大きいと考えられる表層の位置における値を使用している。それぞれの調査対象により、相対質量含水率が分布する範囲が異なり、多少のばらつきはあるが、相対質量含水率の増加に伴い、中性化速度係数が小さくなる傾向が確認された。調査対象T3の打放し箇所は仕上材付きコンクリートと比較して、相対質量含水率が小さいように見えるが、打放しの箇所が屋内の比較的乾燥した状態で安定した箇所が多く調査を行ったことによると思われる。A1については、屋内外の様々な環境条件に打放しを有する建築物であったため、打放しの箇所においても相対質量含水率が高い位置に分布することが考えられる。また、図-8より、仕上材付きコンクリートの場合、相対質量含水率が小さい場合においても、打放しコンクリートと比較して、中性化が抑制される傾向が見られた。仕上材付きコンクリートにおいても、中性化速度係数が $6\text{mm/year}^{1/2}$ 以上と大きくなる箇所が計3点確認されたが、T3についてはモルタル仕上げを施された箇所と他のモルタル仕上げを施された箇所と比較して仕上厚が6mmと小さくなっている箇所およびリシン仕上げが施された箇所であり、Yについては吹付タイルのみの仕上材を施された箇所であった。これらの箇所では、仕上材の中性化抑制効果が小さいことが考

えられ、打放しコンクリートと概ね同様の傾向が確認された。また、仕上材付きコンクリートでは、相対質量含水率が40%以上になると中性化は $2\text{mm/year}^{1/2}$ 以下となる傾向が確認された。したがって、コンクリート内部の含水状態を把握することで、中性化の進行が概ね予測可能であると考えられる。コンクリート中の含水状態については、コンクリート内部の相対湿度と関係が確認されている一方で、実験的検討においてコンクリート表層の湿度は外部湿度より予測することが可能である⁴⁾。これらを活用することで、近い将来非破壊的な中性化予測が可能になると考えられる。

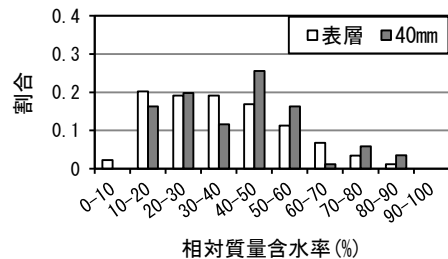


図-2 相対質量含水率の深さ分布

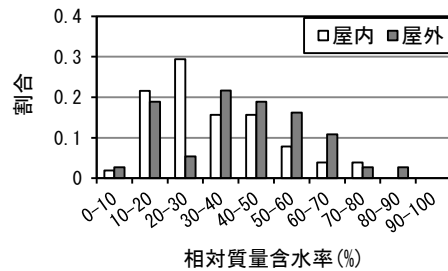


図-3 相対質量含水率の屋内外別分布

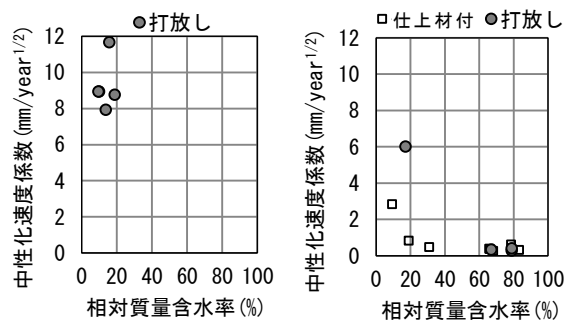


図-4 相対質量含水率と中性化速度係数の関係 (左: T1, 右: T2)

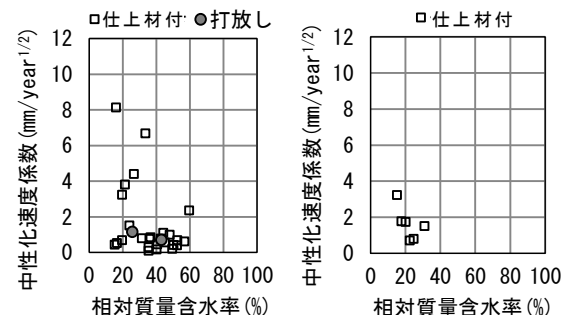


図-5 相対質量含水率と中性化速度係数の関係 (左: T3, 右: T4)

3.3 相対質量含水率と圧縮強度

図-9 から図-11 に各調査対象における相対質量含水率と圧縮強度の関係を示す。この際、コンクリートの表層から 40mm 程度の深さにおける相対質量含水率を評価に用いた。T3 では相対質量含水率が大きくなるに伴い、圧縮強度が大きくなる傾向が確認されたが、そのほかの調査対象においては、相対質量含水率および圧縮強度の変動が小さいため、傾向が認められなかった。

また、図-12 に調査対象 6 棟の打放しおよび仕上材付コンクリートにおける相対質量含水率と圧縮強度の関係を示す。調査対象の結果を個々に見ると、相対質量含水率の幅が大きいいため、圧縮強度との相関が明確には認められないが、全体としては使用されたコンクリートの調合が異なるにも関わらず、相対質量含水率が大きくなるに伴い、圧縮強度が大きくなる傾向が確認された。これは後藤ら⁵⁾による水セメント比による含水状態と乾燥期間の関係から、水分を保持するする量が多いほどセメ

ントの水和に寄与したと考えられる。

3.4 鉄筋の腐食状況

細骨材に海砂を用いた Y を除いた全調査箇所、健全部における中性化残りの有無および変状部における鉄筋の腐食グレードの個数分布を図-13 に示す。健全部はグレードが高くなるにつれ、個数が減少するが、変状部ではグレード 2 以上に多く分布することが確認された。健全

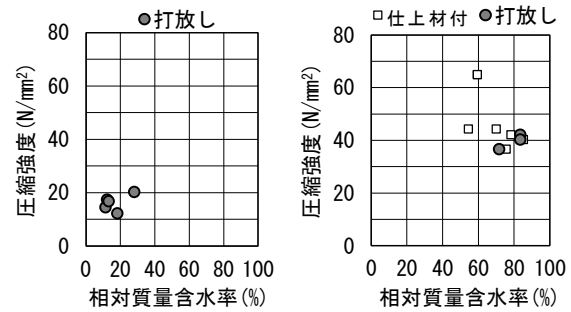


図-9 相対質量含水率と圧縮強度の関係
(左: T1, 右: T2)

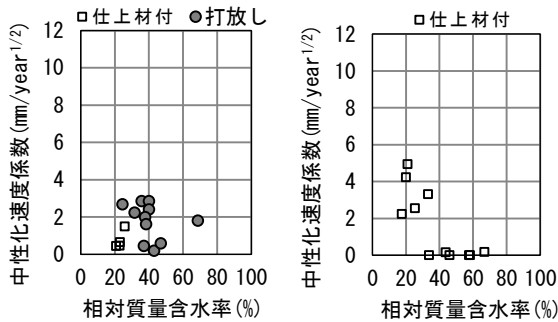


図-6 相対質量含水率と中性化速度係数の関係
(左: A1, 右: A2)

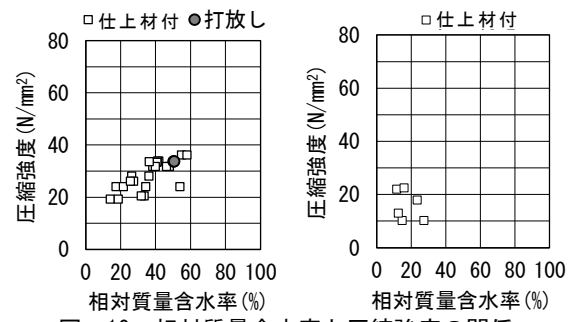


図-10 相対質量含水率と圧縮強度の関係
(左: T3, 右: T4)

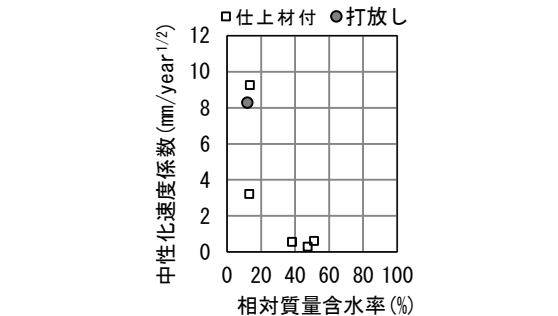


図-7 相対質量含水率と中性化速度係数の関係 (Y)

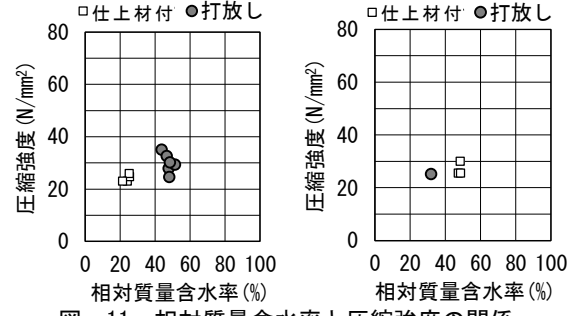


図-11 相対質量含水率と圧縮強度の関係
(左: A1, 右: Y)

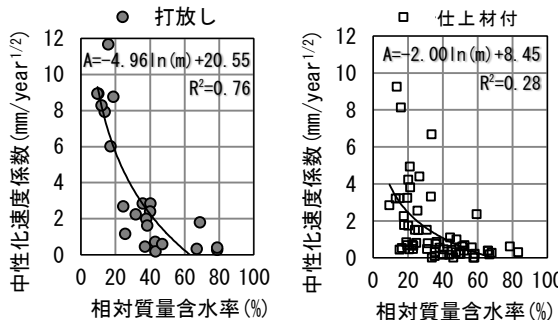


図-8 全調査対象における相対質量含水率と中性化速度係数の関係 (左: 打放し, 右: 仕上付き)

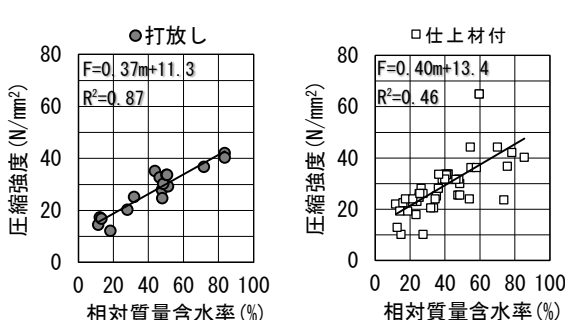


図-12 全調査対象における相対質量含水率と圧縮強度の関係 (左: 打放し, 右: 仕上付き)

部では、断面欠損を生じる鉄筋腐食は極めて少なく、中性化が鉄筋まで到達した箇所でのみグレード3以上を確認した。この結果を踏まえ、鉄筋の腐食因子として主に雨掛かりの有無、変状状況、鉄筋のかぶり厚さ、中性化およびコンクリートの含水状態を考慮して検討した。

(1) 健全部

図-14 および図-15 に雨掛かりの有無による中性化残りとかぶり厚さの関係を鉄筋の腐食グレード別に示す。雨掛かりのない環境において、中性化残りが0未満の箇所は多いにもかかわらず、鉄筋の腐食グレードが2以上になる箇所が確認されなかった。これは、鉄筋の腐食には水分が必要であることが大きく影響していると考えられる。雨掛かりのある環境ではかぶり厚さに関わらず、中性化がかぶり厚さに到達すると以後の鉄筋腐食の進行にはほとんど関係ないと言われており⁹⁾、本来中性化が鉄筋に到達した以降の年数を考慮すべきであるが、調査時築年数が40年程度の本研究においてはかぶり厚さが30mm未満の箇所でのみ全周にわたる断面欠損が確認された。また、雨掛かりのある環境では相対質量含水率が大きくなり、中性化の進行が遅くなることから、鉄筋まで中性化している箇所が少ない。写真-1 にグレード4が観測されたバルコニースラブの下端筋の腐食状況を示す。この箇所ではかぶり厚さが9mmと極端に小さくなっており、かぶり不足が腐食の主たる要因であると考えられる。このことから、本調査で扱った圧縮強度20N/mm²から40N/mm²程度、調査時築年数40年程度の建物においてはJASS5に規定される標準・長期供用期間の屋外環境における最小かぶり厚さである30mmを満たしていれば、健全部においては中性化による鉄筋腐食の進行は抑制されると考える。

(2) 変状部

鉄筋まで到達したひび割れおよび剥落等による変状を受けたコンクリート中の鉄筋の腐食状況を表-3に示す。この際、ひび割れの直下を変状部、ひび割れと10cm程度離れた箇所を健全部としている。ひび割れの直下において鉄筋の腐食が顕著となった箇所の一例として、写真-2に開口隅角部におけるひび割れとその腐食状況を示す。写真に示すように、ひび割れと離れた箇所において鉄筋は極めて健全な状態であるが、ひび割れの直下において断面欠損を生じるグレード3および4となる箇所が多数確認された。また、写真のようにひび割れの直下から徐々に腐食が進行していることが観測された。ひび割れの直下において、ひび割れ幅が大きくなると、水分の供給が盛んになり、鉄筋の腐食が顕著になることが考えられるが、本研究においてその相関性は確認されなかった。対して、T1のかぶり厚さ9.5mmの箇所において、ひび割れ直下およびその周囲でともに腐食グレードが3

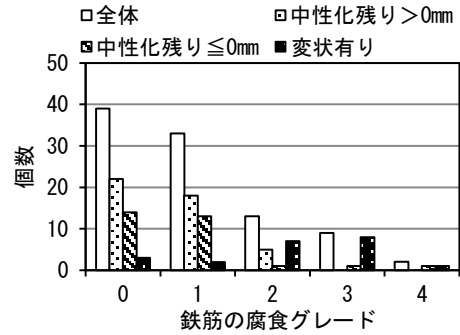
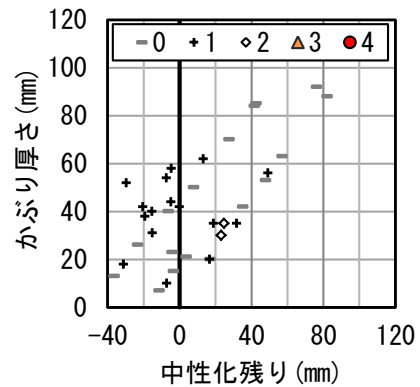
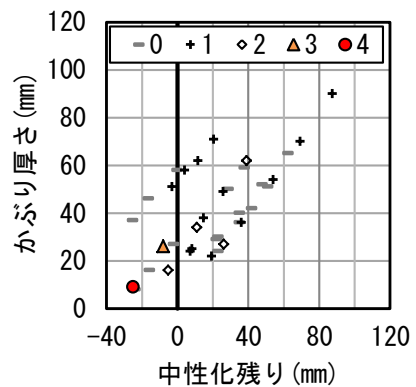


図-13 調査箇所の劣化状況による鉄筋の腐食グレード個数分布



(凡例は腐食グレードを示す)

図-14 雨掛かりのない環境における中性化残りとかぶり厚さの関係



(凡例は腐食グレードを示す)

図-15 雨掛かりのある環境における中性化残りとかぶり厚さの関係



写真-1 バルコニースラブ下端筋の腐食状況

となっていることや、腐食グレード3以上となる箇所ではかぶり厚さが30mmを下回る箇所が多いことより、ひび割れによる鉄筋の腐食進行速度はひび割れ幅よりもかぶり厚さに大きく影響することが考えられる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートの表層における相対質量含水率は、中性化速度係数と高い相関を持つ。また、それは打放し、仕上材付きコンクリートのどちらにおいても成立し、建物によらず概ね同様の傾向が確認された。したがって、コンクリートの含水状態を把握することは、コンクリートの中性化の進行を評価するうえで、重要な要因と考えられる。
- (2) 既存 RC 造建築物において、本調査で扱った20N/mm² から40N/mm² 程度の打放しコンクリートの相対質量含水率と圧縮強度には高い相関があり、水分の保持量とセメントの水和に関係があると考えられる。
- (3) 雨掛かりのない環境において、中性化がかぶり厚さを超えた箇所が多く確認されたが、鉄筋は断面欠損を生じる腐食は確認されなかった。これは、降雨による水分供給の影響が大きいと考える。
- (4) 雨掛かりのある環境における健全部では、中性化が鉄筋まで到達している箇所は少なかった。これは、コンクリート中の相対質量含水率が高く、中性化の進行が遅くなることによると考えられる。また、今回の調査対象の条件では30mm未満の箇所でのみ腐食が顕著になったことから、JASS5に規定される最小かぶり厚さを満足していれば、顕著な腐食は生じないことが考えられる。
- (5) コンクリートにひび割れが生じていると、鉄筋の腐食は顕著となる。また、ひび割れ幅よりもかぶり厚さに影響し、ひび割れの直下だけでなく周囲へ腐食が広がる速度も増加することが考えられる。

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(主査:野口貴文(東京大学))の活動の一環として行われたものである。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 唐沢智之, 榊田佳寛, 河野政典, 竹内博幸: ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響, コンクリート工学年次大会論文集, Vol.26, No.1, pp.873-878, 2004
- 2) 米澤敏男, 岡本文雄, 本間大輔, 池内俊之, 岡本博史, 中尾正純: 中性化後の鉄筋腐食を考慮した RC



写真-2 開口隅角部における変状部の鉄筋の腐食状況

表-3 ひび割れ等変状箇所における鉄筋の腐食グレードと各種腐食要因

対象 No.	内/外	方位	降雨	ひび幅 (mm)	中性化深さ (mm)	かぶり厚さ (mm)	中性化残り (mm)	腐食グレード		m _g (%)
								健全部	変状部	
A1	外	S	有	0.1	25	30	5	0	0	4.0
T1	外	S	有	CJ	35	31	-4	0	0	-
T1	外	N	有	0.2	10	40	30	0	0	-
A1	外	S	有	0.45	25	42	17	1	1	4.0
T1	外	S	有	0.1	23	5	-18	1	1	-
A1	外	E	有	1.5	13	45	32	1	2	5.6
A1	外	W	有	0.45	1	35	34	0	2	-
T1	外	S	有	0.1	23	0	-23	-	2	-
T1	外	S	有	CJ	35	20	-15	2	2	-
T1	内	内	無	0.1	5	45	40	0	2	-
T3	外	S	有	0.2	4	43	39	0	2	2.5
T4	内	N	無	0.2	全面	85	0	2	2	1.2
A1	外	S	有	0.45	25	33	8	0	3	4.0
T1	外	S	有	0.1	23	14	-9	-	3	-
T1	外	S	有	0.3	22	9.5	-12	3	3	-
T3	外	E	有	0.15	75	39	-36	1	3	3.7
T3	内	W	有	0.2	3	12	9	0	3	4.9
T3	外	E	有	0.15	75	30	-45	1	3	3.7
T4	内	N	無	0.1	全面	23	0	1	3	1.0
T4	内	N	無	0.2	16	55	40	1	3	1.0
T4	内	S	無	剥落	全面	29	0	-	4	-

CJ: コールドジョイント

構造物の供用期間評価法の研究その2 中性化後の鉄筋腐食速度の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp.793-794, 2013.8

- 3) 公益社団法人日本コンクリート工学会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 2013
- 4) 柳東佑, 高正遠, 兼松学, 野口貴文: 外部温・湿度がコンクリート内部の含水状態に及ぼす影響に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.1185-1186, 2015.9
- 5) 後藤幸正, 藤原忠司, 飯泉章: 乾燥過程におけるコンクリート内部の含水状態について, セメント技術年報, Vol. 29, pp.175-178, 1975
- 6) 和泉意登志, 嵩英雄, 池田美和, 浅井達也, 押田文雄, 川畑茂男: 既存 RC 構造物におけるコンクリートの中性化後の鉄筋腐食について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.205-206, 1983