

鉄筋コンクリート造建築物の健全性

～長寿命化と老朽化の課題～

材料研究グループ 主任研究員 松沢 晃一

目次

- I はじめに
 - II 鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化に関する検討
 - 1) 仕上材料による中性化抑制対策
 - 2) コンクリート内部の湿度環境評価
 - III 鉄筋コンクリート造建築物の老朽化評価に関する検討
 - 1) コンクリート表面のひび割れと鉄筋腐食の関係
 - 2) 目視による建物の劣化度評価に関する検討
 - IV おわりに
- 参考文献

I はじめに

持続型社会の形成に向けた既存建築物の長期供用のためには、適切な健全性診断や維持管理技術の確立が不可欠である。分譲マンションストックに関しては、令和元年末時点で約665.5万戸¹⁾、そのうち、築30年超（平成2年以前）が約213.5万戸、さらに、築40年超のマンションは約91.8万戸となっており、マンションストック総数の約14%を占めている²⁾。なお、築40年超のマンションは10年後には約2.3倍の213.5万戸、20年後には約4.2倍の384.5万戸²⁾となる見込みである（図1）。これらマンションストックの多くは鉄筋コンクリート造であると考えられ、新築、既存ともに鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化に関わる検討が必要不可欠である。

鉄筋コンクリート造建築物の耐久性判断は、基本的には鉄筋腐食の有無によるが、鉄筋腐食を抑制するためにはコンクリートへの二酸化炭素や塩化物イオンなどの劣化因子の浸透を抑制する必要がある。その鉄筋コンクリート造建築物の表面には、様々な種類の仕上材料が施工されることが多く、それらによっても劣化因子の浸透が抑制されることから、仕上材料と特性を見極めて使用することで、鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化が図れる。

鉄筋腐食には鉄筋近傍の水分が影響するが、鉄筋コンクリートの耐久性評価に、水分の影響を考慮する方向で議論が進められている⁴⁾。これは、実験や建物調査にセンサ類を用いてコンクリート内部の湿度を測定する、また、コンクリートコアを採取して含水率を測定することで、鉄筋腐食とコンクリート内部の水分状態との関係性について明らかになりつつあるためである。今後も、このようなコンクリート内部の水分状態に関するデータの蓄積や、その分析手法を確立することで、鉄筋コンクリート造建築物を長期間にわたり健全に保つことが可能となると考えられる。



図1 築後30、40、50年超の分譲マンション数³⁾

一方、今後も増加することが予想されるマンションストックであるが、その全てが長期供用の対象となるわけではない。老朽化や建築物管理の担い手不足が顕著な高経年マンションの増加、また、適切に維持管理がなされてこられなかったことによって既に老朽化が進行し、外壁の剥落などにより外部に危害を生じるおそれのあるマンションや、維持修繕が困難なマンションが増加することが予想され（図2）、そのようなマンションの再生に向けた取組みの強化も必要である。

このような背景から、建築研究所材料研究グループでは、課題名「建築材料の状態・挙動に基づくRC造建築物の耐久性評価に関する研究」のもと、鉄筋コンクリート造の耐久性評価に関わる検討を行っている。本稿では、現在、材料研究グループで行っている検討とともに、建築基準整備促進事業で実施している鉄筋コンクリート造建築物の健全性に関する検討に関して、事業者と共同で実施している内容について、長寿命化および老朽化の観点から述べることとする。

II 鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化に関する検討

1) 仕上材料による中性化抑制対策

①建築基準整備促進事業M8による取組み

鉄筋コンクリート造の長期優良住宅の劣化対策に関する認定基準に関して、現在、一般的に多く用いられている有機系仕上材料に関する中性化抑制効果などに関する基準が整備されていない。そのため、建築研究所では、令和2年度の建築基準整備促進事業M8で「仕上塗材の性能評価に基づくRC造劣化対策の評価基準等の合理化の検討」として、事業者と共同で仕上材料による中性化抑制対策について検討を行っている。

本検討では、主に、水セメント比65%のコンクリートに表1に示す仕上材料を施工して促進中性化試験を実施し、それぞれの仕上材料に関する中性化抑制効果について検討を行うとともに、仕上材料の二酸化炭素透過性についても検討を行っている。なお、ここでは、仕上材料の施工に関する影響を考慮して、主材基層や施工量の違いによる検討も行っている。

図3に促進中性化試験による中性化深さをそれぞれ仕上材料なし（無し（W/C=65%））とともに示す。無し（W/C=65%）と比較して、同じ仕上材なしでもW/C=50%の方が、また、仕上材料が施工されていることで中性化が抑制されることがわかる。しかし、①薄塗材Eや⑨マスチックA、⑰厚塗材Cは他の仕上材料と比較して中性化が進行しており、仕上材料の種類によって中性化抑制効果が異なることが確認できる。



図2 外壁の剥落などにより危害が生じるおそれがある例³⁾

表1 仕上材料一覧

記号	仕上材種類	備考
①	薄塗材E	
②	防水形薄塗材E	
③	複層塗材E	
④	複層塗材E	主材基層なし
⑤	防水形複層塗材E	
⑥	防水形複層塗材E	主材基層なし
⑦	防水形複層塗材E	主材基層1/2
⑧	防水形複層塗材E	上塗材なし
⑨	マスチックA	
⑩	マスチックAE	マスチックA+上塗り
⑪	厚塗材E	
⑫	GP	
⑬	可とう形改修塗材E	主材 800g/m ²
⑭	可とう形改修塗材E	主材 300g/m ²
⑮	塗膜防水材	
⑯	複層塗材CE	
⑰	厚塗材C	

複層塗材E（③④）、防水形複層塗材E（⑤⑥⑦⑧）、可とう形改修塗材E（⑬⑭）については、主材基層や施工量の違いによる検討を行ったが、本結果ではほとんど差がない。これは、促進試験をもとにしたものであり、実環境では紫外線や熱の影響があるので、それらを考慮すると影響がある可能性がある。

一般に、コンクリートが適切に施工されている場合は、コンクリートの中性化進行は、経過時間の平方根に比例する。そして、仕上材料が施工されていない場合に対し、仕上材料が施工されてコンクリートの中性化深さの比が一定値となると仮定すると、各種仕上材料の中性化抑制効果を表す中性化率 $S(t)$ として、以下の式(1)により示される。

$$S(t) = C_C(t)/C_B(t) \quad (1)$$

ここに、 $S(t)$ ：材齢 t （年）における中性化率、

$C_C(t)$ ：仕上材料を施工したコンクリートの中性化深さ（mm）、

$C_B(t)$ ：仕上材料のないコンクリートの中性化深さ（mm）

促進中性化期間 26 週の結果に基づいて、仕上材料なし（無し（W/C=65%））の中性化深さに対して求めた中性化率を図4に示す。

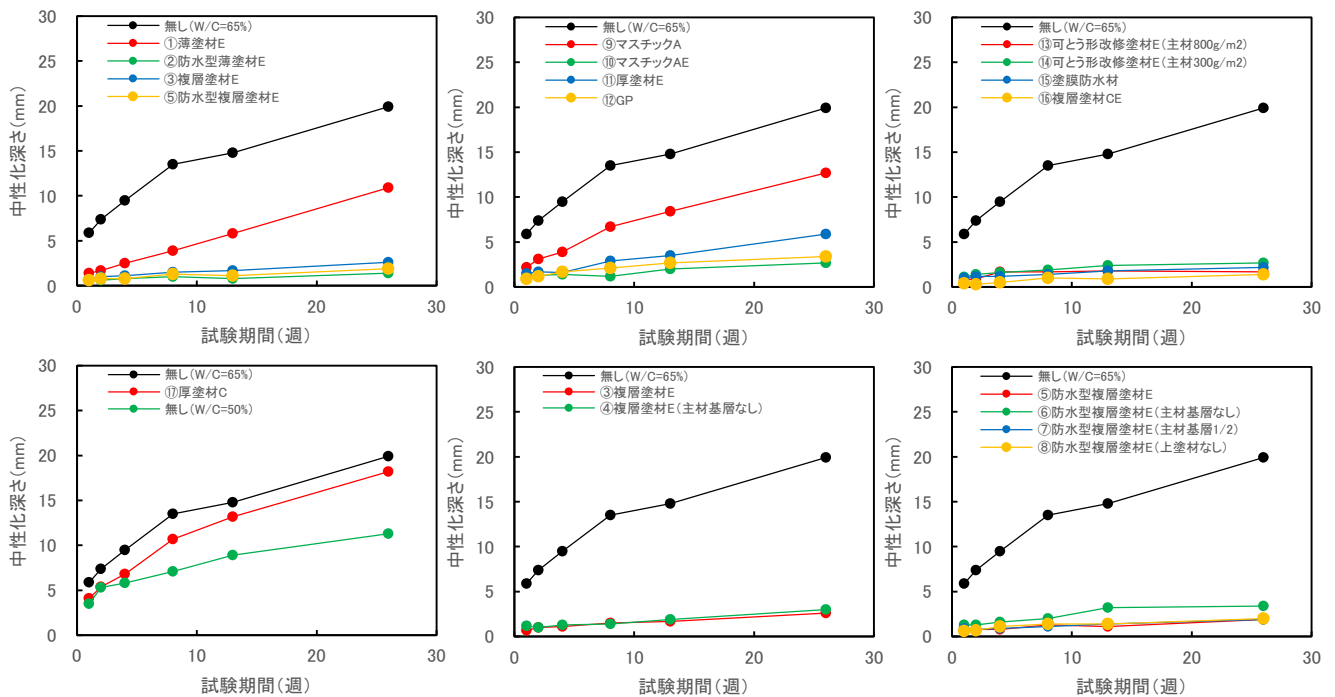


図3 中性化深さ

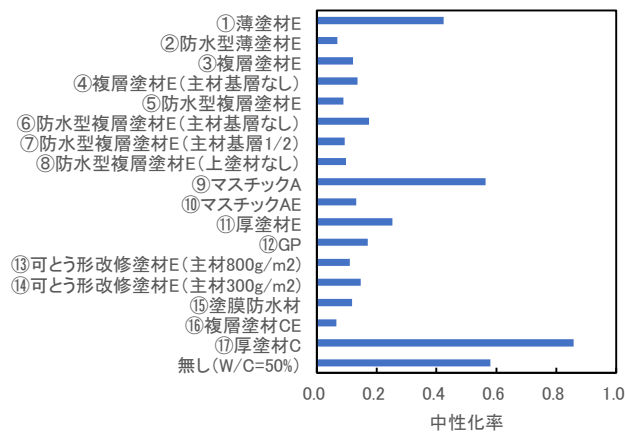


図4 中性化率

ほとんどの仕上材料で中性化率が小さいことが確認できる。また、主材基層や施工量の違いでは、複層塗材E (③④) は主材基層があるもの (③)、防水形複層塗材E (⑤⑥⑦⑧) は主材基層および上塗材があるもの (⑤)、可とう形改修塗材E (⑬⑭) は施工量が多いもの (⑬) と、施工が適正になされていると中性化率が小さい。

なお、建築基準整備促進事業M8では、既往研究の成果⁵⁾を基に、JIS A 6909の改定で建築用仕上塗材の二酸化炭素透過度試験方法の付属書に規定された試験方法により、各仕上材料の二酸化炭素透過度について施工直後、促進対候性試験機により紫外線劣化後の試験を行い、経年を考慮した検討も行っている。

②長期屋外暴露試験に基づく仕上材料の中性化抑制効果の検討

建築研究所では、長期的な屋外暴露に基づく検討が少ない仕上材料に関する30年の屋外暴露試験を行った。本研究では、水セメント比55、70%のコンクリートに仕上材料を施工し、それらを積層して構成したモデル建物の屋外暴露期間11年^{6,7)}、20年⁸⁾、30年時に仕上材料の劣化状況、仕上材料のコンクリートの中性化および鉄筋腐食抑制効果⁹⁾について検討を行った。

コンクリート寸法は100×100×400mmとし、モデル建物での積層を考慮した形状とし(図5)、表2に示す仕上材料を施工した。

図6にモデル建物の概要を示す。モデル建物は各供試体の仕上材施工面が屋外側に位置するように四周に積み上げて構成した。上部には高さ460mmの空間を設けて金属板の箱を北設置した。なお、室内側の温湿度制御は行わなかった。

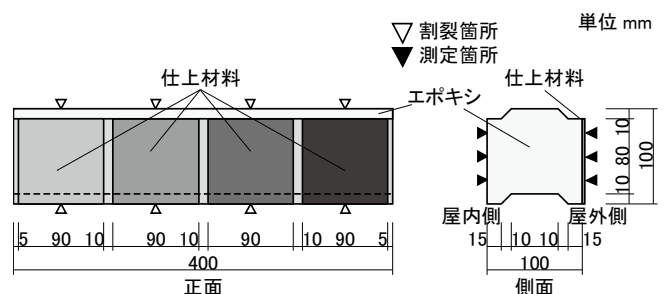


図5 供試体概要

図9に西面(Y)および南面(Y)の中性化深さを暴露11年時(東面)、20年時(北面)の結果とともに、仕上材料なし部分(-)の近似直線を合わせて示す。方位の違いはあるが、暴露期間とともに中性化深さも大きくなっている。また、水セメント比に関係なく屋外側の中性化深さと比較して、複層塗材(No. 1)、防水形E-2(No. 5)、薄塗材(No. 6)、厚塗材(No. 12)が小さく、防水形通気性(No. 11)、シラン系含浸剤(No. 25)が大きい。厚塗材(No. 12)は水セメント比55%では中性化が抑制されているが、水セメント比70%では抑制されないものがある(南面)。暴露期間中に仕上材料とコンクリートに界面剥離が生じ、その界面から炭酸ガスが浸透したと推察される。

式(1)により算出した配置構成(X)の暴露30年時の中性化率を図10に、配置構成(Y)の中性化率の経時変化を図11に示す。なお、 $C_p(t)$ は、各測定年、各方位の仕上材料なし屋外部分の中性化深さである。暴露30年時で複層塗材E(No. 1)、防水形E-1(No. 4)、防水形E-2(No. 5)、可とう形薄塗材E(No. 7)、MR-A(No. 10)、GP(No. 16)、RP(No. 17)、アクリルシリコン樹脂エナメル(No. 21)、ふっ素樹脂エナメル(No. 22)の中性化率が0.5以下となっている。なお、中性化率と経時変化の関係については、図11から明確な傾向はみられない。

本研究では、コンクリート中に鉄粒子を混入した供試体を作製して腐食深さの測定も行った⁹⁾。図12に鉄粒子を混入した供試体に関する腐食深さと中性化深さの関係を示す。なお、本図には、各供試体3点計測したそれぞれの値をプロットしている。この図をみると、腐食深さと中性化深さは同時に進行するのではなく、中性化が先に進行していることが確認できる。また、水セメント比55%と比較して70%で腐食深さが中性化深さに近い値となっており、中性化深さと腐食深さの進行が近い関係にあると考えられる。

上述のとおり、実構造物においては中性化が鉄筋位置に到達した後、直ちに鉄筋が腐食するのではなく、ある程度の時間差の後に鉄筋が腐食するのがわかる。つまり、コンクリートや仕上材料が適切に施工されている場合、中性化によりコンクリート内部のpHが低下しない環境においては、鉄筋が腐食するような環境にはなっていないと判断できる。

2) コンクリート内部の湿度環境評価

①各地での屋外暴露試験による湿度環境の変化

本研究では、仕上材料が施工されたコンクリート供試体について、内部に温湿度ロガーを設置して環境条件とコンクリート内部の温湿度の関係についてデータを取得するとともに、鉄筋を埋設した供試体の鉄筋腐食に関する検討を行っている。

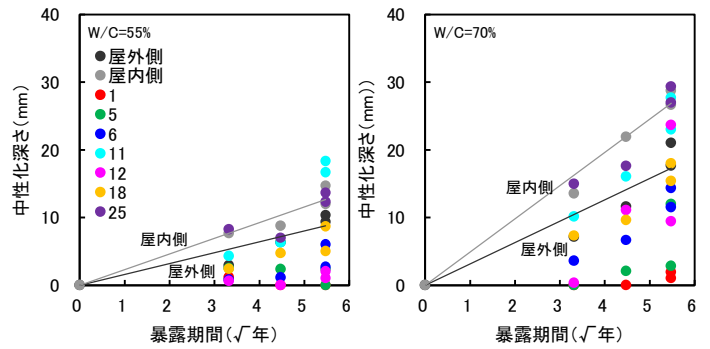


図9 中性化深さ(配置構成(X))

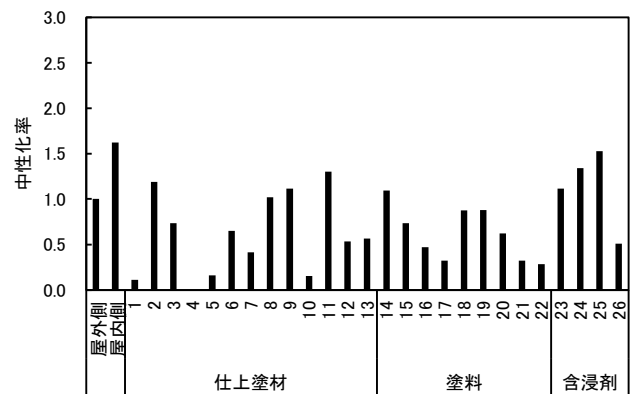


図10 中性化率(西面(X))

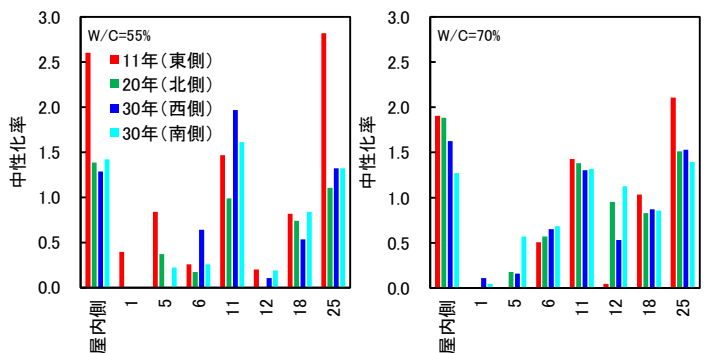


図11 中性化率の経年変化(配置構成(X))

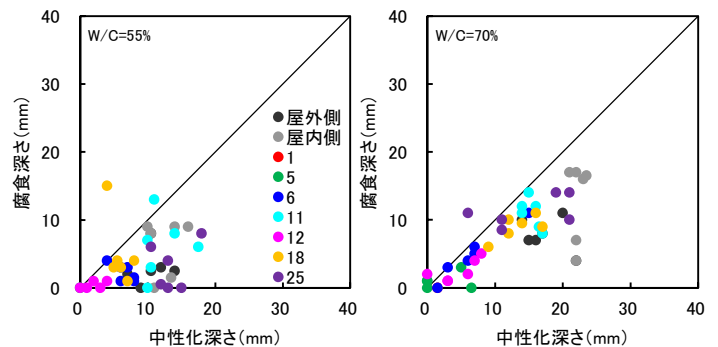
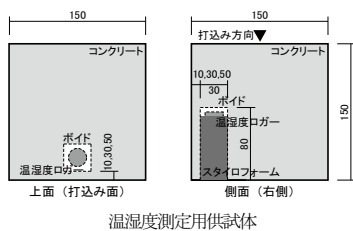
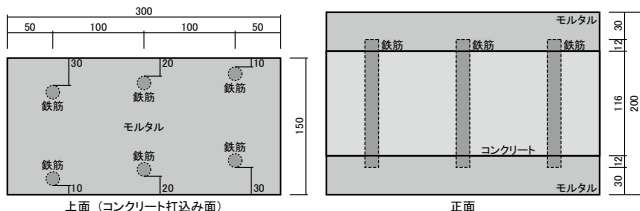


図12 腐食深さと中性化深さの関係



温湿度測定用供試体



鉄筋コンクリート供試体

図 13 供試体概要

図 13 に供試体概要を示す。コンクリートは水セメント比 60%とし、温湿度測定用と鉄筋コンクリートの 2 種類の供試体を作製した。仕上材料は薄塗材 E と防水形複層 E を用い、仕上材料のない供試体とともに北海道 (泊)、沖縄県 (辺野喜)、そして、茨城県 (建築研究所) (図 14) で屋外暴露試験を行っている。なお、北海道および沖縄県は海岸線沿いの飛来塩分の影響がある場所、そして、茨城県においては雨掛かりの有無で異なる環境で屋外暴露試験を行っている。本暴露試験は 2017 年度に開始して 3 年が経過している。

図 15 に茨城県におけるコンクリート表面から深さ 30mm 位置の湿度の日平均変化を示す。雨掛かりありでは、仕上材料なし供試体の湿度の変動が大きい。そして、仕上材料では薄塗材 E の変動が大きくなる傾向にある。温度や降雨の影響で、仕上材料の有無や仕上材料の種類によってコンクリート内部の湿度環境が異なることが確認できる。また、雨掛かりの有無では、雨掛かりがない方の変動が小さい。これは、降雨による吸水の影響がないためである。防水形複層 E に関しては雨掛かりの有無による違いが小さい。これは、防水形複層 E が防水形の仕上材料のため、降雨による吸水の影響が他と比較して小さいと考えられる。

図 16 に茨城県における深さ 10、20、30mm 位置の湿度と降水量の関係を示す。雨掛かりありでは、降雨があると深さ 10mm 位置の湿度が急激に上昇し、追従して 30、50mm 位置が徐々に変化している。また、降雨のない状態が続くと深さ 10mm 位置の湿度が大きく低下している。そして、降雨がない状態でも深さ 10mm 位置では、深さ 30、50mm 位置と比較して大きな湿度の上下がみられる。これは、温度変化によりコンクリート表面から浅い位置では湿度変化が起こりやすくなるためである。なお、深さが大きくなると環境変化による湿度変化が小さくなっている。



雨掛かりあり

雨掛かりなし

図 14 屋外暴露状況 (茨城県: 建築研究所)

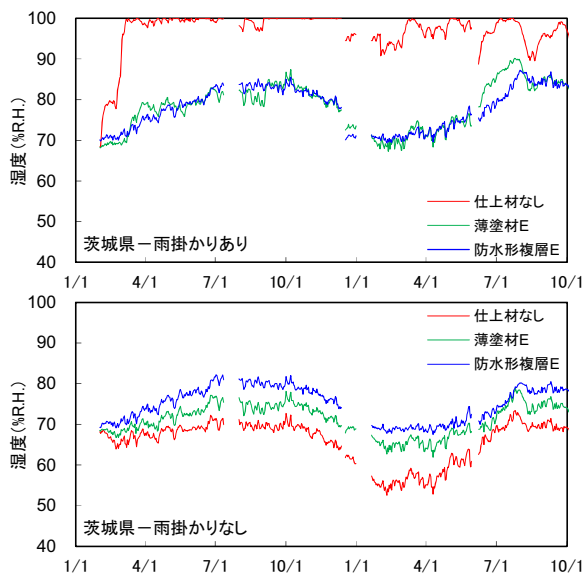


図 15 湿度の日平均変化

(茨城県・深さ 30mm 位置・2018~2019 年)¹⁰⁾

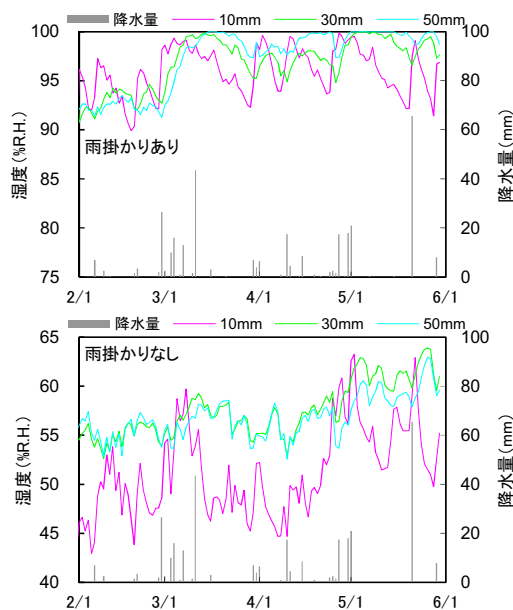


図 16 コンクリート内部の湿度と降水量の関係

(茨城県・仕上材料なし・2019 年)¹⁰⁾

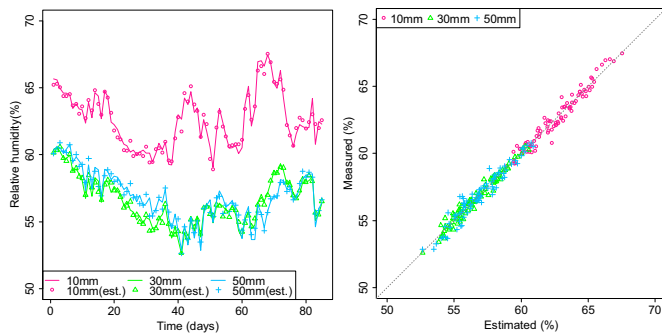


図17 湿度解析結果

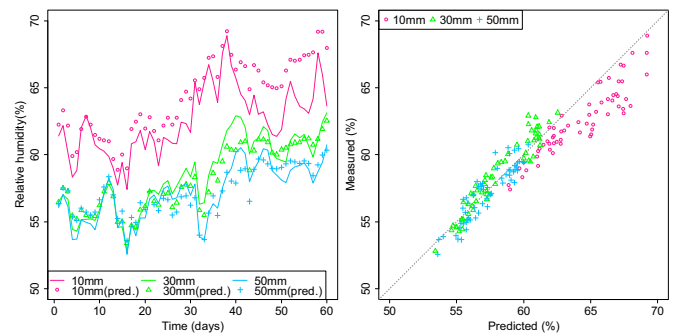


図18 湿度予測結果

②外部環境からコンクリート内部の湿度予測に関する検討

2) ①で得られたコンクリート内部の深さ方向ごとの温湿度データについて時系列分析¹¹⁾を行うことで、将来予測を試みた。なお、分析にあたってはコンクリート内部の温湿度データだけでなく気象データも用いることで、コンクリートが置かれている環境における将来予測について検討を行った。ここでは、測定期間が約150日のデータを用い¹²⁾、前半の90日分のデータを回帰分析して算出したパラメータ、そして、気象データを用いて、その後60日分の予測を行い、実測値との関係を検証した。なお、本検討に用いたデータは、茨城県(雨掛かりなし)で暴露を行っている仕上材なし供試体のデータである。

図17に前半90日分のデータ(実測値)およびその値を時系列分析によりモデル化した結果(計算値)と、その際の実測値と計算値の関係を示す。実測値と計算値がよく一致していることが確認できる。これらの結果から、モデルに明確な誤りはないと判断し、本モデルで算出したパラメータを用いて後半60日の予測を行った。図18に前半90日分の実測値から求めたパラメータと後半60日の気象データから予測した結果、実測値と予測値の関係を示す。予測値は概ね実測値の傾向を表現していると考えられるが、一部で実測値と乖離している箇所もみられる。特に、深さ10mmの予測値は過大評価する傾向があり、30日以降で顕著となった。

Ⅲ 鉄筋コンクリート造建築物の老朽化評価に関する検討

1) コンクリート表面のひび割れと鉄筋腐食の関係

本研究では、仕上材料が施工されていない鉄筋コンクリート造外壁を対象とした模擬試験体を電食することで、鉄筋腐食に伴うひび割れ、浮き、隔離および剥落現象を部材レベルで再現し、一連のプロセスおよび目視評価とコンクリートの剥落危険性の関係に関する検討、また、かぶりコンクリートの剥離、剥落危険性の評価手法について検討を行った。表3、図19に試験体概要を示す。

表3 試験体一覧

試験体No.	W20_1	W20_2	W20_3	W20_5	W21_3	W12_5
鉄筋間隔 (mm)	200				120	
かぶり厚さ (mm)	10	20	30	50	30	50
部材厚さ (mm)	180			120	180	120
高さ、長さ (mm)	875	895	915	955	857	897
鉄筋量	縦5、横5				縦7、横7	
	複筋			単筋	複筋	単筋
観察面鉄筋長さ (mm)	8750	8950	9150	9550	11998	12558

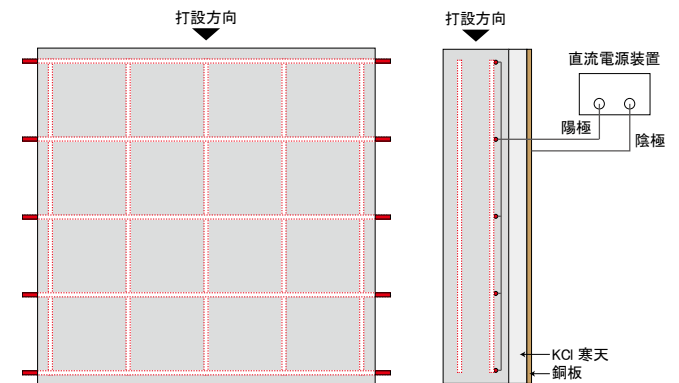


図19 試験体立面および電食方法

図20に電食によりコンクリート表面で確認された変状例を示す。いずれの試験体も電食によってひび割れなどの変状が増加するが、剥離や剥落が生じるのはかぶり厚さ30mm以下の試験体で、これらは、電食28日時点で大部分(8割以上)に浮きや剥離が生じている。特に、剥離が生じているのはかぶり厚さ20mm以下の試験体である。また、各変状の大きさを比較すると、かぶり厚さ10mmのW20_10は面積が比較的小さい変状が散見されるのに対し、かぶり厚さ20、30mmのW20_2やW20_3では変状の面積が大きいことがわかる。これは、かぶり厚さ(および鉄筋径)により腐食ひび割れ性状が異なることに起因していると考えられ、本実験条件ではかぶり厚さ10mmの場合は剥離ひび割れが、20mm以上の場合には鉄筋軸ひび割れが卓越したと考えられる。

ここで、剥離、剥落プロセスを比較するために、観察結果から各変状の発生状況を式(2)および式(3)により観察面側の鉄筋長さ(表3)に対するひび割れの総面積、または、観察面の面積に対する各変状の面積割合とする指標 I_c 、 I_d を算出した。

$$I_c = \frac{\sum(l_i \times W_i)}{L_s} \quad (2)$$

$$I_d = \frac{\sum S_j^d}{S_0} \quad (3)$$

- ここに、 I_c ：平均ひび割れ幅 (mm²/mm)、
 l_i ：各ひび割れの長さ (mm)、
 W_i ：各ひび割れの最大幅 (mm)、
 L_s ：観察面側の鉄筋の総延長 (mm)、
 I_d ：各変状 (浮きまたは剥離または剥落) の面積率 (mm²/mm²)、
 S_0 ：観察面の総面積 (mm²)、
 i, j ：各変状の個数

図21に式(2)および式(3)から求めた平均ひび割れ幅および各変状の面積率推移を示す。ひび割れが増加し、一つのピーク(矢印)を過ぎた付近で浮きや剥離が急激に増加している。これは、まず鉄筋腐食によりひび割れが生じ、腐食がさらに進行することコンクリートの剥離、剥落へと進展するという一連の剥離、剥落プロセスが起こっていることを表していると考えられる。

一方、W12_5やW20_5(かぶり厚さ50mm)では、大部分で浮きや剥離がみられなかったにもかかわらず、平均ひび割れ幅の増加が停滞した(W20_5では1.2~1.5mm²付近、W12_5では0.6mm²/mm付近)。試験体側面の鉄筋に沿ったひび割れが発生していることを合わせて考えると、観察面のひび割れ発生は観察面と平行なひび割れが成長し、鉄筋腐食膨張圧が浮きや剥離の進展に寄与しやすくなったために生じていると推察される。このため、浮きや剥離が観察されなかったのは、かぶりコンクリートが厚く、目視や打診のみでは浮きや剥離を判定できなかったものと考えられる。本研究では、実構造物調査で一般的に実施されている方法として目視や打診を採用したが、かぶり厚さの大きい部材において浮きや剥離の状態を正確に把握するには打診や目視以外の試験方法も併せて検討する必要があると考えられる。

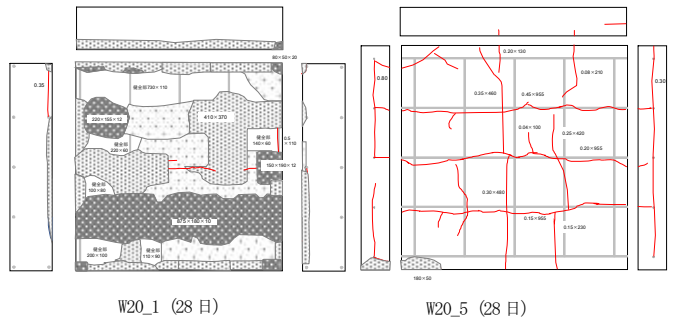


図20 電食による変状例 (□：浮き、▨：剥離、■：剥落)

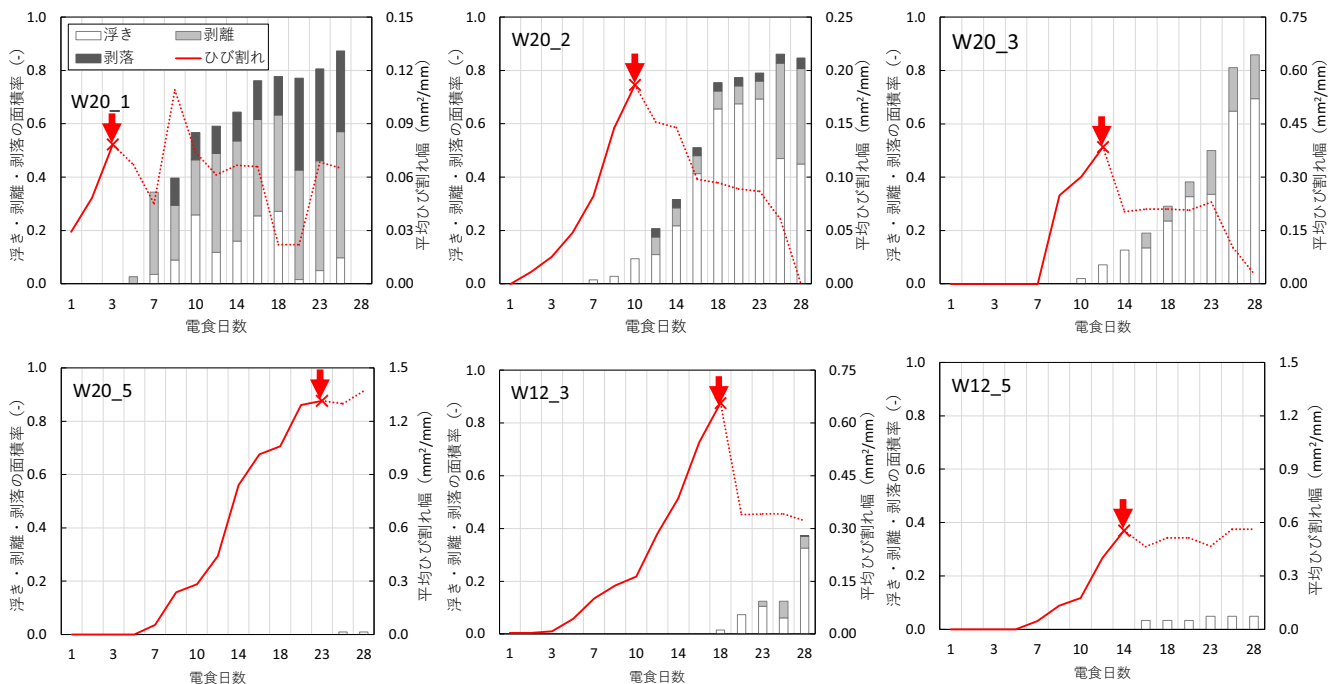


図21 平均ひび割れ幅(右軸)および浮き、剥落、剥離(左軸)の面積率の推移(矢印：見かけ上初めてひび割れ幅が減少する点)

図 21 では電食に伴い、見かけ上ひび割れが減少しているように見えるが（×印以降の点線）、これは、実際にひび割れが消失したわけではなく、ひび割れの記録方法に起因するものである。当初、ひび割れであった部位で鉄筋腐食がさらに進み、浮きや剥離が発生し、その部位が浮き、剥離としてカウントされたためであり、平均ひび割れ幅の見かけ上の減少は、ひび割れが浮き、剥離に進展したことを意味する。したがって、実際の平均ひび割れ幅は矢印以降も増加していくと考えられる。また、実構造物などで鉄筋コンクリート造壁面を調査した際にも平均ひび割れ幅よりも大きい値が測定される可能性がある。しかしながら、本研究の主眼は剥離や剥落が急速に増加する際の平均ひび割れ幅の下限値を推定することであり、この限界点を明示するために本図のように表示した。

ここで、平均ひび割れ幅の増加が見かけ上減少に転じる、あるいは停滞する状態は、壁面内部で浮きや剥離、剥落が急増していく前兆と考えられる。図 21 ではこの点を矢印で示しているが、本研究ではこの点を「剥離・剥落移行点」と定義する。調査対象とする壁面が、この剥離・剥落移行点に達しているかどうかを判定できれば、剥離や剥落の危険性を適切に評価できると考えられる。剥離・剥落移行点における平均ひび割れ幅は、かぶり厚さが大きいほど大きくなる傾向があり、両者には多少のばらつきはあるものの正の相関がある。これは、調査対象とする壁面の平均的なかぶり厚さや鉄筋間隔が既知であれば、剥離・剥落移行点の目安となる平均ひび割れ幅を示せる可能性があり、さらに、これに基づけば実測した平均ひび割れ幅との大小関係を比較し、その部材の剥離、剥落の危険性を判定できる可能性があると考えられる。

そこで、以下に、剥離、剥落の危険性に関する判定式（式(4)）および判定区分（表4）を提案する。

$$I_{0n} = \alpha_n \cdot C + \beta_n \quad (4)$$

ここに、 I_{0n} ：平均ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食を原因とする剥落の危険性の判定基準（ $n=1, 2$ ）、 α_n, β_n ：実験、調査などから求まる係数、 C ：かぶり厚さ

表4は評価区分を3段階とし、 I_C と I_{0n} の大小関係から「ひび割れ進展期」、「移行期」、「剥離・剥落進展期」と判定される。「移行期」を設けた理由は、剥離・剥落移行点における平均ひび割れ幅には、同じかぶり厚さであっても一定のばらつきが生じると考えられ、このばらつきは同一部材内での鉄筋腐食進行の不均一性や鉄筋腐食に対する剥離、剥落現象の不確実性（コンクリート強度や鉄筋径などの影響）に起因するものであり、その大きさを把握するには実験や実部材の調査を通してデータを蓄積する必要がある。

本研究においては、実験因子や実験データが限られていることから、評価手法の枠組みを提案することと、 α_n および β_n の提示については今後の課題とする。

表 4 平均ひび割れ幅実測値 I_C の判定区分

判定基準	判定区分
$I_C < I_{01}$	ひび割れ進展期
$I_{01} \leq I_C < I_{02}$	移行期
$I_{02} \leq I_C$	剥離・剥落進展期

2) 目視による建物の劣化度評価に関する検討

図 1 に示すとおり、現在、築後 30 年を超えるマンションストックは 200 万戸を超え、このようなストックは、今後、さらに増加する。そして、図 2 に示すように外部に対して危害を生じるおそれがある、蓋然性が高い建築物も増加することが予想される。そこで、マンション建替法改正案に基づく老朽化認定基準を提案するため、躯体の老朽化を原因とする外壁等の落下の危害を生じる危険があり、かつ、それがマンションの広範囲にわたっている蓋然性が高い状態の評価方法を検討するため、建築研究所では、令和 2 年度の建築基準整備促進事業 C1 で「マンションの老朽化認定に係る使用安全性評価基準等に関する検討」として、事業者と共同で老朽化の評価方法基準について検討を行っている。

本検討では、除却予定の鉄筋コンクリート造建築物に関する写真などから、健全であると考えられた建物から老朽化が比較的進んでいると考えられた建物のうち 10 棟を選定し（表 5）、調査を行った。まず、除却前に表 6 に示す評価指標にしたがって目視および打診調査を行い、除却こともなつて、かぶり厚さ、中性化深さ鉄筋腐食の程度、含水率の測定を行った。なお、測定箇所は 1 棟につき 10～90 箇所である。

評価方法基準の検討に関しては、調査対象建物のグリッド分け、部材ごとの評価、また、表 6 に示す評価指標を劣化グレードに振り分けして（表 7）、蓋然性の高い状態の基準化を検討している。

表 5 調査建物

建物記号	所在地	構造規模	竣工	備考
A	富山県	RC4 階	昭和 37 年	
B-1	鹿児島県	RC5 階	昭和 48 年	内在塩分の可能性あり
B-2	鹿児島県	RC5 階	昭和 49 年	内在塩分の可能性あり
C-1	福岡県	RC5 階	昭和 46 年	内在塩分の可能性あり
C-2	福岡県	RC5 階	昭和 46 年	内在塩分の可能性あり
D	岐阜県	RC4 階	昭和 26 年	
E	東京都	RC7 階	昭和 46 年	
F-1	宮城県	RC4 階	昭和 47 年	
F-2	宮城県	RC4 階	昭和 47 年	
G	兵庫県	RC4 階	昭和 31 年	

図 22 に検討結果例として、劣化グレード D_{ji} に重みづけを行った場合の鉄筋腐食減量（もとの鉄筋径に対する調査時の鉄筋径の差分）との関係を示す。なお、本図は表 5 に示す全ての建物の調査結果を反映させたものではない。このように、重みづけ係数などの検討を実施し、目視評価による D_{ji} と鉄筋腐食との関係から蓋然性の高い状態の基準化を検討している。

IV おわりに

本稿では、現在、材料研究グループで行っている検討とともに、建築基準整備促進事業で実施している鉄筋コンクリート造建築物の健全性に関する検討に関して、事業者と共同で実施している内容について、長寿命化および老朽化の観点から述べた。

鉄筋コンクリート造建築物の長寿命化については、仕上材料により躯体であるコンクリートへの二酸化炭素や塩化物イオンの浸透が抑制され、その結果、建築物の長寿命化が図れるが、そのためには、コンクリートや仕上材料が適切に施工されていること、仕上材料に関しては、その更新が適宜実施される必要がある。また、コンクリート内部の鉄筋腐食に関しては、現況検査も重要であると同時に、鉄筋腐食予測手法などの確立により、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化に寄与できると考えられる。

鉄筋コンクリート造建築物の老朽化については、建築物の使用安全性評価基準等の整備が必要である。また、それらは、建築物が供用されている状況などを考慮すると、外観の目視調査などを主とした、躯体に手を加えるようなことが少ない調査によって実現できることが望ましいと考えられる。

謝辞

屋外暴露試験は琉球大学 山田義智教授、日本大学 湯浅昇教授、そして、関係各位の協力のもと実施しています。また、本研究で用いたモデル建物を用いた研究は、建設省（当時）の官民連帯共同研究「外装材の補修・改修技術の開発」（昭和 61～63 年度）で作製されたものを持ちて実施しました。そして、建築基準整備促進事業 M8 は芝浦工業大学、建築研究振興協会、日本建築仕上材工業会との共同研究、建築基準整備促進事業 C1 は建築研究振興協会、八洋コンサルタントとの共同研究で実施しています。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) <https://www.mlit.go.jp/common/001351557.pdf>
- 2) <https://www.mlit.go.jp/common/001351558.pdf>

表 6 目視および打診による劣化グレード（案）

目視グレード	症状
1	なし
2	外装の浮き、仕上げの劣化
3	コンクリート表層のひび割れ
4	エフロッセンス・白華
5	錆汁
6	鉄筋腐食によるひび割れ (鉄筋に沿ったひび割れ・錆汁を伴うひび割れ)
7	鉄筋腐食による浮き・剥離（鉄筋方向に 20cm 以内）
8	鉄筋腐食による浮き・剥離（鉄筋方向に 20cm を超える）
9	鉄筋露出
備考欄	補修痕、豆板、構造ひび割れ、たわみ、傾斜などがあれば備考欄に記入

表 7 対象部材 j の i 部の劣化グレード D_{ji}

劣化の状態 D	劣化現象 θ	劣化グレード D_{ji}	目視グレード
D0: 健全	下記の状況がみられない	0	1
D1: 初期の劣化	仕上げおよび表層部コンクリートの劣化	1	2、3、4
D2: 中期の劣化 (今後一気に劣化進行)	鉄筋腐食に関する劣化	2	5、6
D3: 部材の使用安全性としての限界	コンクリートの剥離・露筋	3	7、8、9

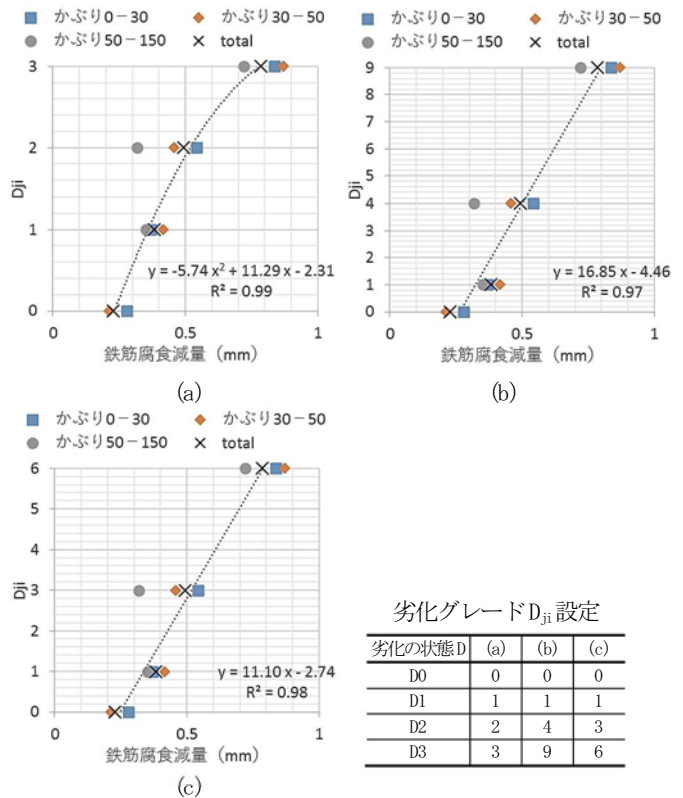


図 22 劣化グレード D_{ji} と鉄筋腐食減量の関係

- 3) <https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/content/001350444.pdf>
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリートの限界状態再考—中性化は寿命か？—、パネルディスカッション(1)、2017
- 5) 川村康晴、本橋健司：迅速な建築用仕上塗材及び塗料の二酸化炭素透過性の評価方法、日本建築学会技術報告集、No. 43、pp. 825-830、2013. 10
- 6) 長谷川拓哉、千歩修、馬場明生、渡部嗣道：モデル建物の11年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上材の中性化に対する保護効果、日本建築学会構造系論文集、No. 555、pp. 37-43、2002. 5
- 7) 長谷川拓哉、千歩修、馬場明生、渡部嗣道：モデル建物の11年屋外暴露試験結果に基づく表面仕上材の鉄筋腐食抑制効果に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No. 56、pp. 27-33、2002. 10
- 8) 長谷川拓哉、千歩修、福山智子、井上照郷：モデル建物の20年屋外暴露試験に基づく仕上材の劣化状況・中性化および鉄筋腐食抑制効果、日本建築学会構造系論文集、No. 733、pp. 337-346、2017. 3
- 9) 千歩修、馬場明生、松島泰幸：コンクリート中の鉄筋腐食抑制効果の評価試験方法の一提案、日本建築学会大会学術講演梗概集、A分冊、pp. 1145-1146、1987. 7
- 10) http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/r01/pdf/PS09_Matsuzawa.pdf
- 11) Ruey S. Tsay： “Multivariate Time Series Analysis with R and Financial Applications.” Wiley、2013
- 12) 中田清史、松沢晃一、宮内博之、鹿毛忠継、棚野博之、南部禎士、田村昌隆、越中谷光太郎：屋外曝露試験によるコンクリート内部の水分状態に及ぼす仕上塗材の影響、日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集、pp. 81-84、2019. 10