

論文 長期間供用した RC 造建築物の含水状態と耐久性に関する考察

酒井 正樹^{*1}・神代 泰道^{*2}・小林 利充^{*2}・植松 俊幸^{*1}

要旨：築 46 年経過した RC 造建築物の躯体コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、中性化深さおよび鉄筋腐食状況を測定し、それぞれに対してコンクリートの含水状態との関係を検討した。その結果、次のことがわかった。圧縮強度は初期材齢の含水状態、静弾性係数は測定時の含水状態と相関がある。仕上がらない場合には、質量含水率が 3～4%を下回ると中性化速度が大きくなる。鉄筋位置まで中性化が進行した場合でも、含水状態が低い場合には腐食グレードは低くなる。ただし、ひび割れ部では、測定時における含水状態が低い場合でも、外部から水分供給を受ける部位で局所的に腐食グレードが高くなる場合がある。

キーワード：含水率、圧縮強度、静弾性係数、中性化、鉄筋腐食、ひび割れ

1. はじめに

近年、高度経済成長期以降に建設された鉄筋コンクリート造（以下、RC 造という）建築物の維持管理および寿命評価の高度化が求められている。構造体コンクリートは、供用期間中に温度や乾燥の影響を受けるため、標準養生した管理供試体とは異なる性状を示す。そのため、コンクリートの含水状態と力学特性および耐久性の関係を検討することにより、実構造物における健全性評価を高度化することができる。

著者らは、コンクリートの含水状態と力学特性の関係について、加熱・乾燥を受けるコンクリートの含水率¹⁾および圧縮強度²⁾の予測手法を提案している。また、古賀ら³⁾は、コンクリートの含水状態と塩化物による鉄筋腐食の関係について、築 38 年経過した壁式 RC 建築物の調査により、鉄筋の腐食限界と言われる 1.2kg/m^3 を超える塩化物イオンを含有しても、コンクリートの質量含水率が 3.5%以下であれば、鉄筋腐食が生じないことを報告している。一方、コンクリートの含水状態と中性化による鉄筋腐食の関係については、日本建築学会の RC 造建築物の耐久設計小委員会の活動をはじめとして、多くの既存建築物の調査^{4)~7)}が行われているが、コンクリートの含水状態が高いほど中性化速度が小さくなる⁸⁾ため、両者の関係が定量的に論じられている報告は少ない。

本報告は、築 46 年経過した RC 造建築物の解体に伴い、躯体コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、中性化深さおよび鉄筋腐食状況を測定し、それぞれに対してコンクリートの含水状態との関係を検討したものである。

2. 調査概要

調査した RC 造建築物の概要を表-1、外観を写真-1 に示す。調査対象の建築物は、築 46 年経過した RC 造建

築物の事務所で、設計図書によるコンクリートの設計基準強度は 180kg/cm^2 である。調査概要を表-2 に示す。主な調査内容は、コンクリートの含水状態、力学特性、中性化進行状況および鉄筋腐食状況である。

調査項目を表-3 に示す。コンクリートの含水状態として、乾式コア供試体による質量含水率、コンクリートの力学特性として、湿式コア供試体による圧縮強度、静弾性係数を測定した。いずれのコアも、床面より 1m 程

表-1 調査した RC 造建築物の概要

項目	内容
所在地	埼玉県川越市
用途	事務所
竣工年	昭和 44 年（調査時点で築 46 年）
主体構造	鉄筋コンクリート造
階数	地上 2 階（建物高さ 6,540mm）
建築面積	1,872 m^2 (6,700mm×15,000mm)
設計基準強度	180 kg/cm^2 (=17.7N/mm ²)



写真-1 調査した RC 造建築物の外観

表-2 調査概要

項目	内容
調査日	平成 27 年 10 月 7 日, 9 日
調査内容	① コンクリートの含水状態（乾式コア） ② コンクリートの力学特性（湿式コア） ③ 中性化進行状況（湿式コア） ④ 鉄筋腐食状況（はつり後の目視確認）

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

度の高さから採取した。コア径はφ73mmとし、供試体数は各2体とした。圧縮強度測定用の供試体は、供試体長さが直径の2倍である146mmとなるように、断面の深さ方向に均等にコアを湿式切断し、両端を研磨した。質量含水率測定用の供試体は、25mm間隔で乾式切断を行い、各試験片にて含水率分布を測定した。中性化進行状況は、圧縮強度用の湿式コア供試体の側面を利用して、フェノールフタレインの呈色反応により測定した。鉄筋腐食状況は、コア採取位置の近傍にてかぶりコンクリートのはつりを行い、目視観察により腐食程度を評価した。

調査箇所を図-1、調査箇所および仕上げ材の一覧を表-4に示す。調査対象は、壁、床、梁および柱の4つの部材とした。壁は各方位に面する外壁および内壁とした。壁の主な仕上げ材は、屋内側ではモルタルおよび合成樹脂エマルジョンペイント塗り(EP)、屋外側ではモルタルおよび薄付け仕上塗材であった。床は2階の床と1階の土間床とした。また、北面と南面の外壁および2階の床については、幅1mmを超えるひび割れ部において中性化深さと鉄筋腐食状況を測定した。梁は片面が地下室の室内側で、裏面が地盤に接する基礎梁とした。柱は建築物の内部柱と外周柱とした。なお、壁W1は浴室のため供用期間中の相対湿度が高く、壁W2、柱C2は喫煙室のためCO₂濃度が高かったものと推察される。

3. 調査結果および考察

3. 1. 含水率および力学特性の実測値

部材断面内の含水率分布の実測値を図-2に示す。壁W1~W6では、屋外側で2~4%と最も高く、屋内側に向かって低くなる含水率分布となった。含水率勾配は、仕上げ材の種類で異なり、屋内側と屋外側の差は最大で3%

表-3 調査項目

項目	試験方法	測定対象
質量含水率	105℃乾燥質量による方法※	乾式コア供試体 (直径φ73mm)
圧縮強度	JIS A 1108	湿式コア供試体 (直径φ73mm)
静弾性係数	JIS A 1149	
単位体積質量	JIS A 1108	
中性化深さ	JIS A 1152	
鉄筋腐食状況	目視観察	コンクリートのはつり

※質量含水率(W)： $W=(W_t-W_{105})/W_{105}$ (%)

W_t ：供試体質量， W_{105} ：105℃絶乾後の供試体質量

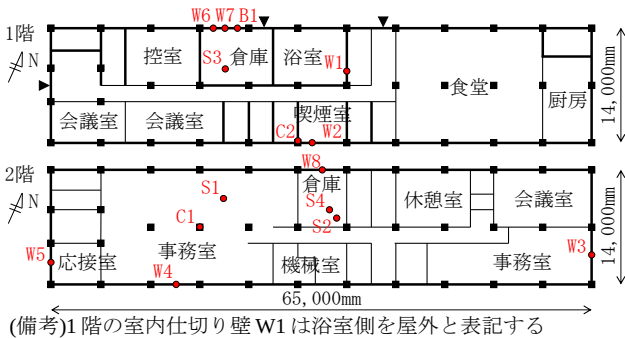


図-1 調査箇所(建物平面図)

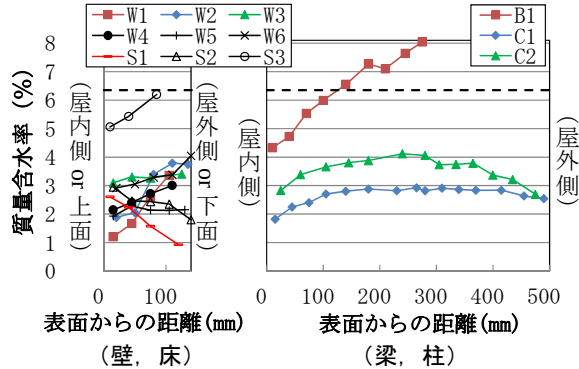


図-2 部材断面内の含水率分布(実測値)

表-4 調査箇所および仕上げ材の一覧

部材	内外	記号	部材厚	配筋	内側居室	内側仕上	外側居室	外側仕上	備考
壁	屋内	W1	120mm	横筋:9φ@200 縦筋:D10@200	脱衣室	なし	浴室	モルタル+タイル	—
	屋外	W2	140mm		喫煙室	モルタル+EP	外部(南)	モルタル+薄付け仕上塗材	—
	屋外	W3	140mm		事務室		外部(東)		—
	屋外	W4	140mm		事務室		外部(南)		—
	屋外	W5	140mm		応接室		外部(西)		—
	屋外	W6	140mm		機械室		外部(北)		—
	屋外	W7	140mm		機械室		外部(北)		ひび割れ部 (幅1mm以上)
	屋外	W8	140mm		倉庫		外部(北)		—
床	屋内	S1	150mm	横筋:9φ@300 縦筋:9φ@300	事務室	Pタイル	天井裏	なし	—
	屋内	S2	150mm		倉庫	なし	天井裏		—
	屋外	S3	100mm		機械室		地盤面		—
	屋内	S4	150mm		倉庫		天井裏		ひび割れ部
梁	屋外	B1	280mm	主筋:10-φ19 帯筋:9φ@250	機械室	モルタル+薄付け仕上塗材	地盤面	なし	—
柱	屋内	C1	500mm	主筋:10-φ19 帯筋:φ9@125	事務室	モルタル	事務室	モルタル	—
	屋外	C2	500mm		喫煙室	+EP	会議室	+EP	—

程度であった。2 階の床 S2 では、上面で 3%程度と最も高く、下面に向かって低くなる含水率分布となった。一方、1 階の土間床 S3 では、土の地盤に接する屋外側で 6%程度と最も高く、上面に向かって低下する含水率分布となった。梁 B1 では、土の地盤に接する屋外側で 8%程度と最も高く、屋内側に向かって低くなる含水率分布となり、その差は 4%程度であった。柱 C1,C2 では、部材の中心部で 3~4%と最も高く、表層に向かって低くなる含水率分布となり、その差は 1%程度であった。

コア供試体の圧縮強度分布を図-3 に示す。表面からの距離はコア供試体の中心を示している。なお、柱 C1 では途中でコアが折れたため、中央部のコア供試体の中心位置が若干表層寄りとなった。設計基準強度 F_c ($180\text{kg/cm}^2=17.7\text{N/mm}^2$) に対して、壁では概ね同等となった。梁では、屋内側では概ね同等となったが、地盤側では 7 割程度高くなった。柱では、中心部では 1 割程度高くなったが、表層では 1 割程度低くなった。

コア供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4 に示す。図中には、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準に示される New-RC 式¹⁾を併せて示した。同一の圧縮強度に対する静弾性係数は、New-RC 式と比較して概ね小さくなった。この理由として、New-RC 式では、構造体内部の乾燥影響が考慮されていないが、本調査では構造体の内部まで乾燥が進行した影響が考えられる。また、本調査ではコア径が $\phi 73\text{mm}$ であるため、一般的な $\phi 100\text{mm}$ の試験結果と比較して、供試体寸法の違いが影響した可能性も考えられる。

質量含水率と静弾性係数の関係を図-5 に示す。部材厚の大きな柱および梁では、測定時の質量含水率と静弾性係数に相関が認められた。一方、部材厚の小さな壁では、明確な相関は認められなかった。

3. 2. 含水率および圧縮強度の解析的検討

次に、著者らの既報¹²⁾に準じて、含水率および圧縮強度分布の経時変化を解析により算定した。

既報¹⁾における含水率分布の解析方法は、拡散解析を

主としており、液状水、水蒸気および熱の三成分に対して、相変化に伴う各成分間のやり取りを考慮した連成解析となっている。詳細については、文献 1)を参照されたい。解析入力値のうち、単位水量は設計時の JASS 5 (1975)⁹⁾の標準調合表を参考として 180kg/m^3 とした。液

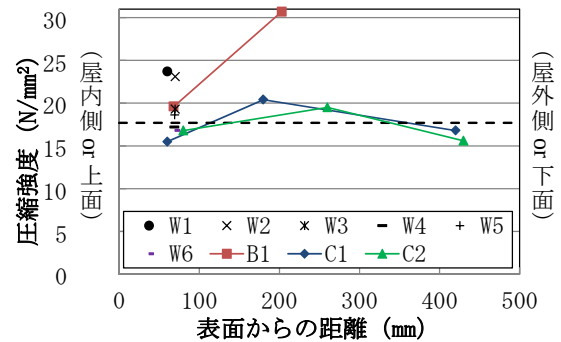


図-3 コア供試体の圧縮強度分布 (実測値)

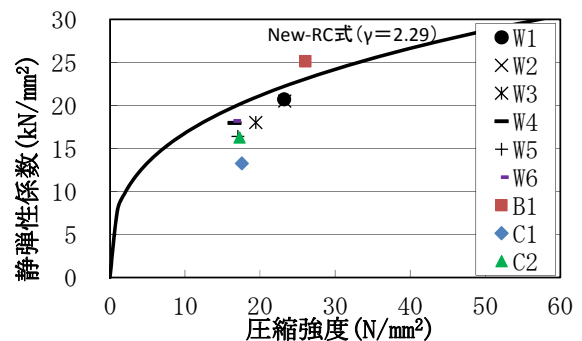


図-4 コア供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係

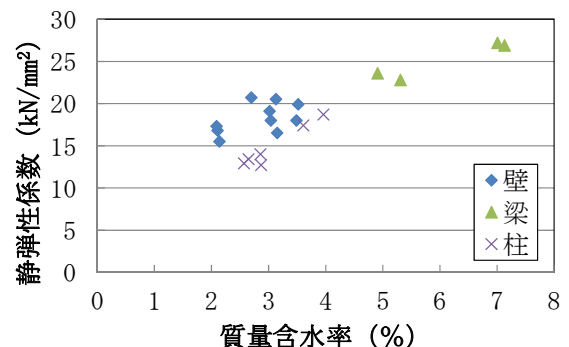


図-5 コア供試体の質量含水率と静弾性係数の関係

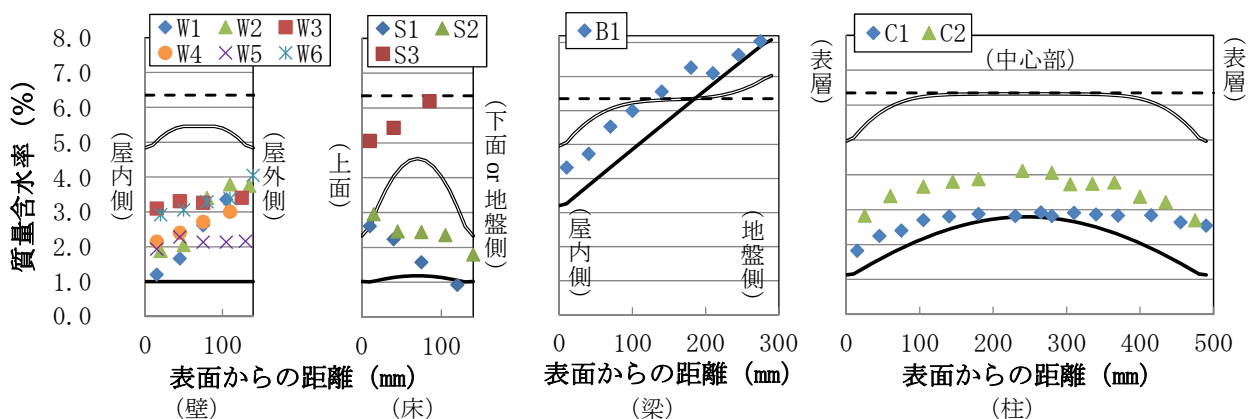


図-6 含水率分布の解析結果 (---- : 初期含水率, — : 材齢 1 年の解析結果, — : 材齢 46 年の解析結果)

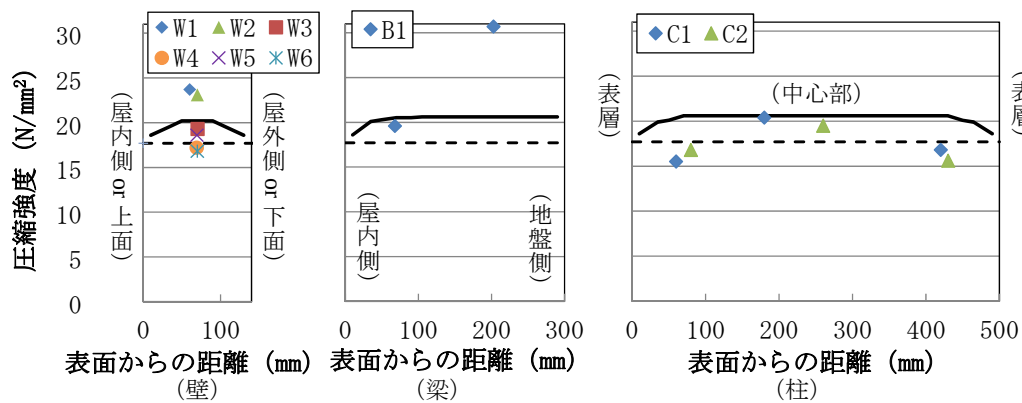


図-7 圧縮強度分布の解析結果 (----: 設計基準強度 $F_c=17.7\text{N/mm}^2$, —: 材齢46年の解析結果)

状水の拡散係数は $3.0 \times 10^{-9}\text{m}^2/\text{s}$, 水蒸気の拡散係数は $3.0 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ と仮定した。境界条件のうち、養生条件は湿潤養生3日と仮定した。乾燥面の水分除去割合は既報値を用いたが、仕上げのある部位ではモルタル+塗装の中性化比率¹⁰⁾を参考として、既報値の0.2倍とした。

含水率分布の解析結果を図-6に示す。図中には、実測値を併せて点で示す。部材厚の小さい壁および床では、材齢1年の時点で中心部の含水率も低下しており、全断面にわたって初期材齢から乾燥を受けていると推察される。とりわけ、仕上げなしの床では、中心部では4%程度、表層では2%程度まで低下している。また、壁および床の材齢46年における解析値は、実測値と比較して小さくなった。この理由として、室内側の相対湿度の設定が小さかったことが考えられる。一方、部材厚の大きい梁および柱では、材齢1年の時点で中心部の含水率は低下せず、表層のみで低下している。材齢46年における解析値は、梁では地盤側からの水分供給を考慮することにより、実測値を概ね再現できた。柱では、実測値と比較して若干小さくなるが、中心部まで含水率が低下する傾向を概ね再現できた。

次に、図-6で求めた含水率分布の経時変化を用いて、圧縮強度分布を解析により算定した。既報²⁾における圧縮強度分布の解析手法は、式(1)に定義される温度と含水率の積を積算した値 (M_w) を入力値として、式(2)に定義されるロジスティック曲線により、強度発現を予測する手法であり、乾燥を受けた場合に強度発現が停滞する現象を考慮できる。詳細については、文献2)を参照されたい。なお、すべての解析入力値は、既報の水セメント比60%、単位水量 180kg/m^3 の値をそのまま用いた。

$$M_w = \sum_{z=1}^n (T_z - T_0)(W_z - W_0) \Delta t \quad (1)$$

$$F = F_\infty / (1 + \exp(a \times \log_e M_t + b)) \quad (2)$$

ここに T_z : コンクリート温度($^{\circ}\text{C}$), T_0 : 基準温度(-10°C)

W_z : コンクリートの体積含水率(vol%)

W_0 : 基準含水率(4.6vol%), Δt : 時間刻み(日)

F : 圧縮強度(N/mm^2), F_∞ : 最終到達強度(N/mm^2)

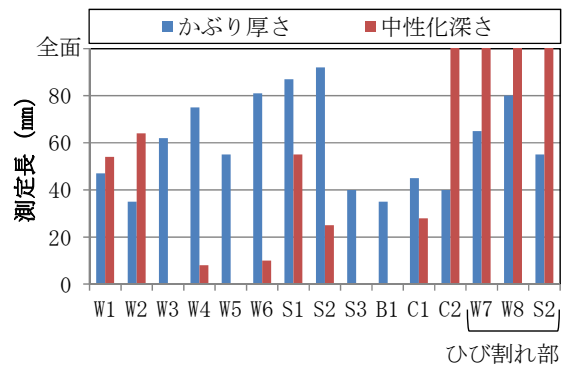


図-8 コア供試体の中性化深さ(屋内側)

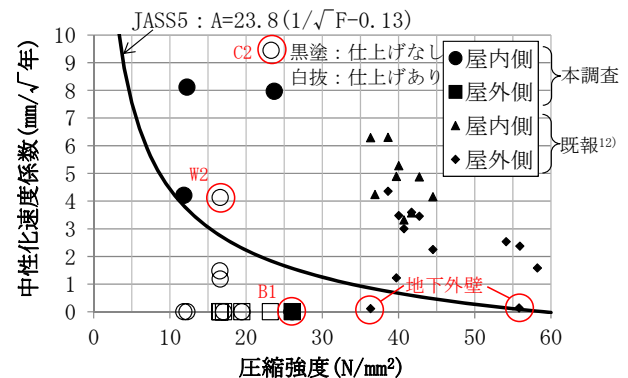


図-9 圧縮強度と中性化速度係数の関係

圧縮強度分布の解析結果を図-7に示す。図中には、実測値を併せて点で示す。壁での解析値は、壁W1, W2では実測値と比較して大きく、壁W4, W6では小さくなった。使用部位ごとに異なる環境条件の影響を受けているものと考えられる。梁での解析値は、屋内側では実測値を概ね再現できたが、地盤側では実測値と比較して大幅に小さくなった。既報の圧縮強度解析では、外部からの水分供給による強度増加を考慮できないため、今後の課題とされた。柱での解析値は、中心部では実測値を概ね再現でき、表層では圧縮強度が低下する傾向は見られたが、その値は実測値と比較して若干大きくなった。

3. 3. 中性化進行状況

コア供試体の中性化深さ(屋内側)を図-8に示す。かぶり厚さまで中性化した箇所は、壁W1, 壁W2, 柱

C2 と壁のひび割れ部 W7, W8, 床のひび割れ部 S2 の合計 6 箇所であった。なお、ひび割れ部では、ひび割れに沿って部材の全断面で中性化が認められた。

圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-9 に示す。図中には、既報¹²⁾の材齢 31 年の打放しコンクリートでの調査結果と JASS 5 (2015)¹³⁾に示される仕上げなしのコンクリートでの両者の関係を併せて示す。仕上げなし（凡例黒塗）では、地中に接する構造物（基礎梁、地下外壁）を除くと、中性化速度係数は JASS 5 の関係式よりも大きくなり、既報の調査結果と同様の傾向が認められた。仕上げあり（凡例白抜）では、喫煙室として使用された壁 W2, 柱 C2 を除くと、中性化速度係数は屋外側でほぼ 0 となり、屋内側でも最大 1.5mm/√年と非常に小さく、仕上げ材による中性化の進行抑制効果を確認できた。

質量含水率と中性化速度係数の関係を図-10 に示す。図中には、図-9 と同様に既報¹²⁾の材齢 31 年の打放しコンクリートでの調査結果を併せて示す。仕上げなし（凡例黒塗）では、質量含水率が 3~4%を下回ると、中性化速度係数が大きくなった。屋内側については、乾燥影響のほか環境中の CO₂ 濃度が高くなることも、中性化速度係数が大きくなる一因と考えられる。一方、質量含水率が 5%以上では中性化はほとんど進行しなかった。既報の調査結果と比較すると、本調査ではコンクリートの圧縮強度が小さかったため、含水率の低下に伴い中性化速度係数が増大する傾きが大きくなったものと考えられる。仕上げあり（凡例白抜）では、喫煙室として使用壁 W2, 柱 C2 を除くと、中性化速度係数は非常に小さく、質量含水率との明確な相関は認められなかった。

3. 4. 鉄筋腐食状況

鉄筋位置まで中性化した箇所の鉄筋腐食状況を表-5 および写真-2 に示す。目視による腐食グレードは、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針¹⁴⁾を参考として、5 段階（1: 鉄筋腐食が認められない、2: 部分的に点錆が認められる、3: 鉄筋表面に錆が連続して認められる、4: 腐食により鉄筋の一部が断面欠損している、5: 腐食により鉄筋の全面が断面欠損している）にグレード分けした。

ひび割れなしでは、喫煙室として使用された柱 C2 で腐食グレード 2 となった。コンクリートの質量含水率は 2.4%と小さく、腐食が生じにくい環境下にあると推察されるが、中性化深さが 121mm と大きいため、鉄筋位置まで中性化した以降の期間が長期となり、部分的な鉄筋腐食が生じたと考えられる。壁 W1 および W2 は腐食グレード 1 となり、鉄筋腐食は認められなかった。

ひび割れありでは、壁 W7 で腐食グレード 3, 壁 W8 で腐食グレード 2, 床 S2 で腐食グレード 1 となった。いずれも、ひび割れは部材を貫通しており、ひび割れに沿

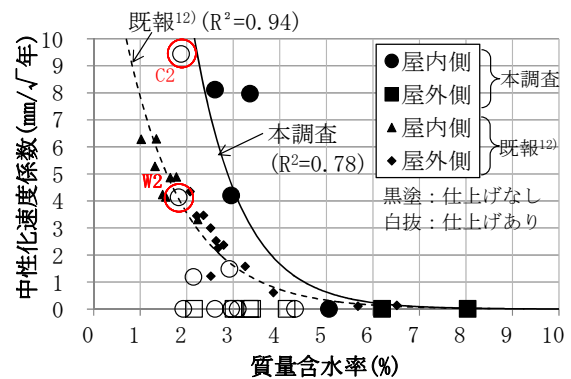
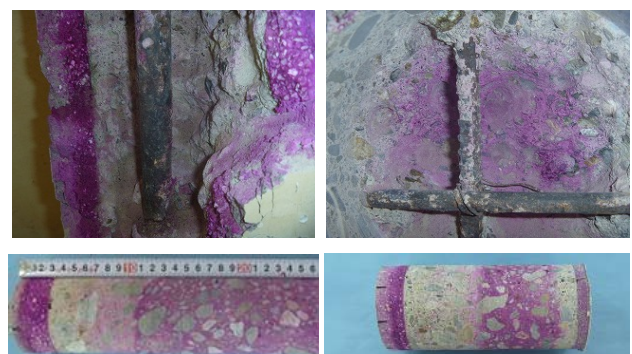


図-10 質量含水率と中性化速度係数の関係

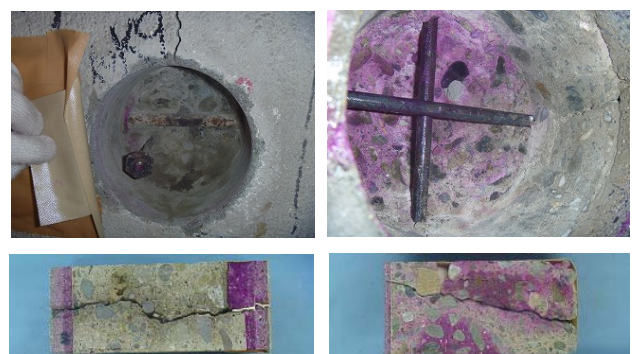
表-5 鉄筋位置まで中性化した箇所の鉄筋腐食状況

記号	かぶり 厚さ	中性化 深さ	鉄筋位置の 質量含水率	目視腐食 グレード	備考
W1	47	54	1.7	1	ひび
W2	35	64	2.4	1	割れ
C2	40	121	2.4	2	なし
W7	65	全面	3.0	3	ひび
W8	80	全面	3.1	2	割れ
S2	55	全面	2.1	1	部



柱 C2 (腐食グレード 2) 壁 W2 (腐食グレード 1)

《ひび割れなしの部位》



壁 W7 (腐食グレード 3) 床 S2 (腐食グレード 1)

《ひび割れありの部位》

写真-2 鉄筋位置まで中性化した部位の鉄筋腐食状況

って部材の全断面が中性化していた。腐食グレード3の壁 W7 では、コンクリートの質量含水率は 3%程度と低く、古賀ら³⁾の報告した鉄筋腐食が生じない質量含水率 3.5%以下であった。含水状態が低い場合でも、ひび割れ部において局所的に腐食グレードが高くなる理由として、外部から水分供給を受ける部位では、ひび割れが鉄筋位置までの水分供給経路となることが考えられる。このことから、ひび割れ部では測定時の含水状態が低い場合でも、腐食グレードが高くなる場合がある。

質量含水率と腐食グレードの関係を図-11 に示す。図中には、野口ら⁴⁾、中井ら⁵⁾、木野瀬ら⁶⁾による中性化したコンクリートでの調査結果を併せて示す。コンクリートの含水状態が高いと中性化の進行自体が遅くなるため、本調査で鉄筋位置まで中性化した箇所の質量含水率は、最大でも 3%程度であった。ひび割れ部を除くと、鉄筋位置まで中性化した箇所の腐食グレードは3以下となった。古賀ら³⁾は、塩化物による鉄筋腐食について、コンクリートの質量含水率が 3.5%以下であれば鉄筋腐食が生じないと報告しているが、中性化による鉄筋腐食についても、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食の関係は、ほとんど同様の傾向となるものと考えられる。

4. まとめ

築46年経過した RC 造建築物の躯体コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、中性化深さおよび鉄筋腐食状況を測定し、それぞれに対してコンクリートの含水状態との関係を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 圧縮強度は、材齢初期の含水状態と相関があり、部材厚の小さい壁や表層では停滞が認められる。
- (2) 静弾性係数は、測定時の質量含水率と相関がある。
- (3) 仕上がりがない場合には、質量含水率が 3~4%を下回ると中性化速度が大きくなる。仕上がりとしてモルタルおよび仕上塗材のある場合には、中性化はほとんど進行しない。
- (4) 鉄筋位置まで中性化が進行した場合でも、質量含水率 3%程度と低い場合には、腐食グレードは低くなる。
- (5) ひび割れ部では、測定時の含水状態が低い場合でも、外部から水分供給を受ける部位で局所的に腐食グレードが高くなる場合がある。

参考文献

- 1) 酒井正樹，人見尚，平田隆祥，一瀬賢一：加熱・乾燥を受けるコンクリート部材の含水率分布の実測と解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.619-624，2013.7
- 2) 酒井正樹，人見尚，神代泰道：温度と乾燥の影響を考慮したコンクリートの強度予測手法に関する研究，

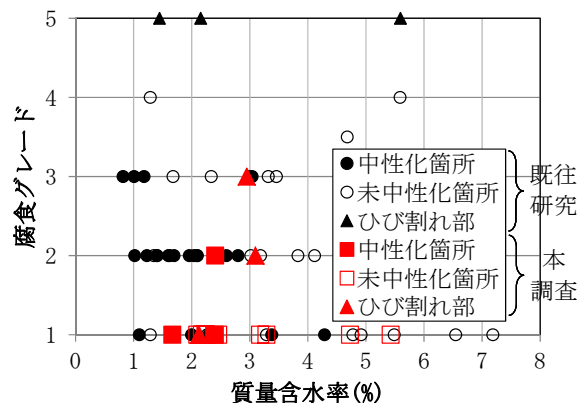


図-11 質量含水率と腐食グレード

コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.313-318，2015.7

- 3) 古賀一八，林典男，平田延明：高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.1，pp.783-788，2008.7
- 4) 野口貴文ほか 7 名：同潤会上野下アパートに関する調査研究（その 1~8），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1127-1142，2014.9
- 5) 中井明日香ほか 6 名：築 49 年を経過した既存鉄筋コンクリート造建築物の材料調査（その 1~3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1121-1126，2014.9
- 6) 木野瀬徹，今本啓一，田沼毅彦，清原千鶴：コンクリート中の水分を考慮した中性化後における鉄筋腐食予測に向けた基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.37，No.1，2015.7
- 7) 野口貴文ほか 7 名：旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査（その 1~12），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.417-440，2015.9
- 8) 近藤連一訳：コンクリートの炭酸化－鉄筋の防食に対する影響と作用－，セメントコンクリート，No.314，pp.33-37，1973.4
- 9) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(1975)，pp.158，1975
- 10) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説(1991)，pp.74，1991.7
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造計算規準・同解説(2010)，pp.50-52，2010.2
- 12) 植松俊幸，神代泰道，一瀬賢一：31 年間供用した躯体コンクリートの品質に関する調査，日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 48 号，pp.409-414，2015.6
- 13) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事(2015)，pp.181，2015.7
- 14) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説，pp.68，1997.1