

論文 築40年以上経過した既存鉄筋コンクリート造建築物の構造体コンクリート強度および中性化特性に関する研究

中井 明日香*1・今本 啓一*2・佐藤 幸恵*3・清原 千鶴*4

要旨：既存鉄筋コンクリート造（RC）建築物の維持管理においては、適切な調査および診断によってその建物の健全度を把握することが重要であるが、そのような手法を確立するための既存 RC 造建築物に関する調査事例は必ずしも多くない。そこで築40年以上を経過した鉄筋コンクリート造建築物を対象として、構造部材および非構造部材のコア供試体を用いた強度特性、仕上げ材によるコンクリートの中性化抑制効果および表層透気性との関係について検討を行った。

キーワード：既存構造物, 中性化, 圧縮強度, 透気性能

1. はじめに

昭和40年代以降、多くの鉄筋コンクリート（RC）造建築物が建設された。今後これら建物の維持管理の必要性が高まる事が予想される中、適切な調査および診断によってその建物の劣化状態を把握することが重要といえるが、既存 RC 造建築物に関する調査事例¹⁾は必ずしも多くない。本研究では、築40年以上を経過した鉄筋コンクリート造建築物を対象として、構造部材および非構造部材の強度特性を調査すると共に仕上げ材によるコンクリートの中性化抑制効果について定量的な検討を行った。本論はその結果について述べる。

2. 調査概要

2.1 調査対象

表-1 に調査対象の外観および概要を示す。東京都に位置する建物 A と建物 B を調査対象とした。建物 A は補修履歴などの記録が残されていなかったが、建物 B については補修履歴や劣化診断の報告書等が残されている。表-2 に補修履歴を示す。建物 B は1998年の補修時に表に示した屋内の補修箇所である柱・壁以外の建具等にも修繕が施されていた。また何度かにわたって用途変更があったことや、1998年の補修方法や補修箇所の状態に関する記載から記録以外にも補修・改修が実施されたと考えられる。外壁および屋上防水は10から20年弱の周期で改修がなされており、仕上げ材料の耐用年数を考慮すると概ね適切な改修時期と考えられる。ただし地下1階のモルタルおよびタイル仕上げなどには補修・改修は加えられずオリジナルの仕上げが残されていた。なお7階東西面の屋外壁ではひび割れ補修にそれぞれ異なる方法が採られており、東側外壁はVカット補修、

表-1 調査対象建築物の外観および概要

	建物A	建物B
		
竣工年	1966(昭和41年)	1970(昭和45年)
築年数	46年	42年
主体構造	RC造	SRC・RC造
階数	地下1階, 地上7階	地下1階, 地上8階
建築面積	1200m ²	330m ²
高さ	30.6m	23.7m
設計基準強度	210kgf/cm ² (21N/mm ²)	

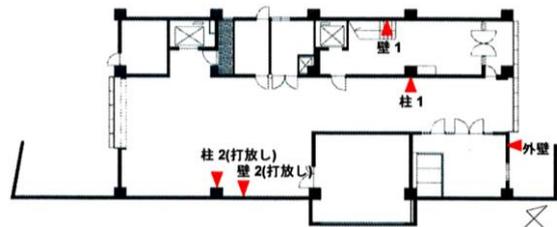


図-1 建物B；地下一階平面図およびコア採取箇所

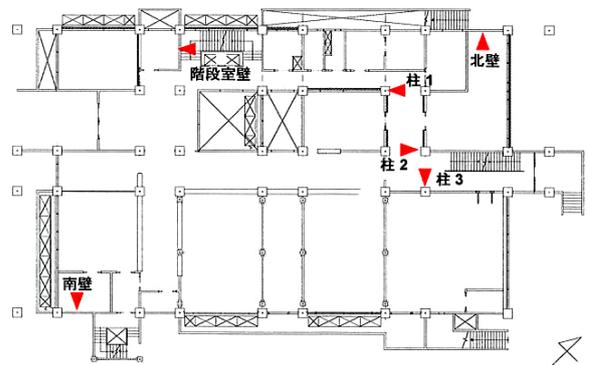


図-2 建物A；一階平面図およびコアサンプル採取箇所

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 修士課程 (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京都市大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託補手 博士(工学) (正会員)

表-2 補修履歴

調査対象	部位	1965	1970	1975	1980	1990	1995	2000~
建物 A	外柱	●打ち放し(1966~)		●(1975頃~)				
	外壁	○不明				●(時期不明)		
	屋内柱・壁	○不明				●(時期不明)		
建物 B	外壁	●白色セメントモルタル		●アクリルラッカー仕上げ(1970)		●アクリルリシン/複層弾性塗材(1989~)		●吹付け塗装など(1998)
	地下1階屋内	●壁/柱:打ち放し, モルタル		●階段床:クリンカータイル(補修なし)				
	屋内(B1階除く)	●モルタル, カラープラスターなど		●用途変更など(時期不明)				
	屋上屋根防水	●樹脂防水		●外壁用複層弾性仕上げ		●ウレタン塗膜防水(時期不明)		●弾性トップ14

西側外壁は塗布防水であった。

2.2 コア採取箇所

図-1 に建物 B, 図-2 に建物 A の平面図およびコア採取箇所を示す。また, 表-3 に主要な採取コア供試体を示す。コアの採取はフロア毎にて同じ箇所で行った。

3. 調査および実験概要

3.1 中性化深さ計測

コンクリート躯体から採取したコア供試体に, フェノールフタレイン液を噴霧し, コンクリート面からの中性化深さを計測した。採取方法については建物 A における柱および7階南北の壁にて貫通採取, 1~6階の南北の壁および階段の壁では折取り採取を行った。また建物 B については折取り採取を行った。建物 A では各フロアで採取した5本のコアから無作為に3本選定し計測を行った。建物 B では各階階段周りや補修が加えられなかった地下1階の柱および壁において計測を行った。併せて仕上げ(仕上げ材+モルタル)の厚さと後述の透気係数についても計測を実施した。

3.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1108 (コンクリート圧縮強度試験方法) および JIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数試験方法) に準拠しコア長さがその直径に満たないものは JIS A 1107 (コンクリートからのコア採取方法および圧縮強度試験方法)などを参考に補正を行った。

3.3 透気試験

透気試験はトレント法および RILEM Cembureau 法を用いた。それぞれの概要を図-3 および図-4 に示す。トレント法はチャンパー内の空気を真空ポンプによって吸引し, 圧力と経過時間の関係から透気係数 K_t を求めるものである。チャンパー内の圧力をバランスさせることで内部チャンパーへの外部からの空気流入が排除され, 透気係数が測定される。コア採取位置にてトレント試験機を用いた表層透気性の測定を行った。

RILEM 法では直径約 73 および 103mm, 厚さ約 20 から 50mm のコア供試体を用い, 試験の前処理として

表-3 主要コアサンプルー一覧

(表中の数値はコア本数を示す。)

	建物A				建物B		
	南面壁	北面壁	階段壁	室内柱	室内壁	階段壁	室内柱
B1F	5	5	-	9	3	-	-
1F	5	5	3	9	-	3	-
2F	5	5	-	9	3	-	3
3F	5	5	-	8	-	-	-
4F	5	5	5	8	-	3	-
5F	5	5	-	7	1	-	3
6F	5	5	-	7	-	-	-
7F	5	5	3	9	-	3	3
RF							

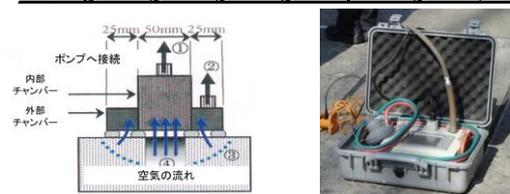


図-3 トレント法

(左; チャンパー概要図, 右; トレント試験機)

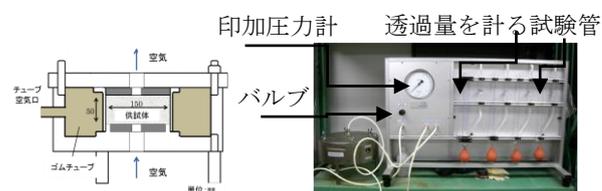


図-4 RILEM-Cembureau 法

(左; コア格納器, 右; RILEM 試験機)

表-4 方位毎の圧縮強度および標準偏差

圧縮強度	建物A		
	南	北	全体
測定数	39	40	79
平均(N/mm ²)	39.8	40.3	40.1
標準偏差	5.9	8.8	7.5

50℃の環境下にて含水率を定常状態とした。試験体を試験セル(図-4-左)に格納, 試験体周囲を気密にした状態で透気量から透気係数 $K[m^2]$ を求める。

4. 調査結果および考察

4.1 圧縮強度

表-4 および図-5 に方位の違いによる圧縮強度への影響について示す。方位に関する検討は建物 A の南北面の壁部材を対象に行った。コアサンプル5本ずつ, 各方位および各階から採取したのものを用いた。

建物 A において北面の標準偏差が南面と比較して大きい値をとったが、全体の変動係数は約 19%であった。建物 A において方位による圧縮強度の差異はないと推測される。表-5 に建物 A および B について建物全体および部材の圧縮強度を図-6 両建築の圧縮強度の分布を示した。図-6 中の破線は設計基準強度の 21[N/mm²]を表している。2 件の建物を比較すると同時期に建設されたコンクリートの設計基準強度が同じであるにもかかわらず、建物 A の平均圧縮強度は 41.5[N/mm²]、建物 B は 20.8[N/mm²]と A と比べ小さいことが確認された。また建物 A は全ての測定箇所において設計基準強度を上回る結果が得られたが、建物 B は基準値を満たさない測定箇所も存在した。建物 A は現場練りコンクリート、建物 B はレディミクストコンクリートが使われていたが、当時の関係者へのヒアリングからポンプ圧送による施工時、コンクリートの流動性を確保するため加水が行われたことが明らかになっており、これも遠因と考えられる。図-7 に両建物の各階ごとの柱（構造部材）・壁（非構造部材）における圧縮強度を、図 8 に両建物の部材ごとの圧縮強度の分布を示す。図中の直線は設計基準強度 21[N/mm²]を表す。下階など圧密の影響によって強度が高くなると予想されたが、建物 A および B において階高による違いはみられなかった。また、方位（南および北）による差も顕著でない（建物 A）。また、両建築物において構造部材と非構造部材における圧縮強度の差異を示す傾向は確認されなかった。乾燥による影響を受けやすい壁部材ほど強度が低いと予想されたがこれは後述するように仕上げ材の中性化に代表される保護効果が高かったためと考えられる。特に建物 A においては両部材の強度をあわせて正規分布していると判断される。全体の強度の標準偏差を取りまとめたものを表-5 に示している。建物 A は壁において標準偏差が柱よりもやや大きい 7.4[N/mm²]であり、標準偏差については建物 B も同様に柱の値が壁に比べて小さい 2.7[N/mm²]であった。当時の JASS5 では調合についてのコンクリート強度の標準偏差は現場練り・レディミクストコンクリート共に 3.5[N/mm²]とされている。しかしながら、既往の研究²⁾によれば実構造における構造体コンクリートの標準偏差は現場練りが 2.4 から 8.4[N/mm²]、レディミクストコンクリートが 3.1 から 4.8[N/mm²]という範囲であることが確認されており、建物 A の圧縮強度の標準偏差は概ね当時の一般構造物と同等と推察される。なお建物 A の変動係数は、約 18%でありこれは建物 B の変動係数と同等である。これらのことから非構造部材からのサンプリングによる試験結果で、構造体コンクリートの強度特性を評価できる可能性があることがわかった。

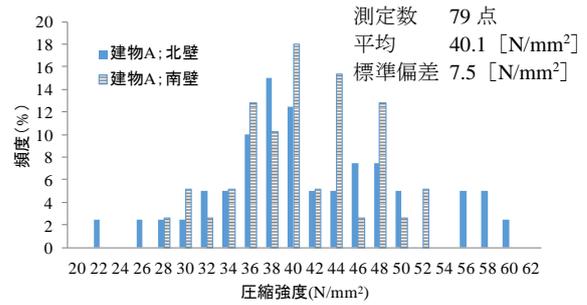


図-5 方位による圧縮強度分布

表-5 圧縮強度および標準偏差

圧縮強度	建物A			建物B		
	壁	柱	全体	壁	柱	全体
測定数	88	55	143	12	6	18
平均(N/mm ²)	40.2	43.7	41.5	21.4	19.7	20.8
標準偏差(N/mm ²)	7.5	6.7	7.4	4.0	2.7	3.7

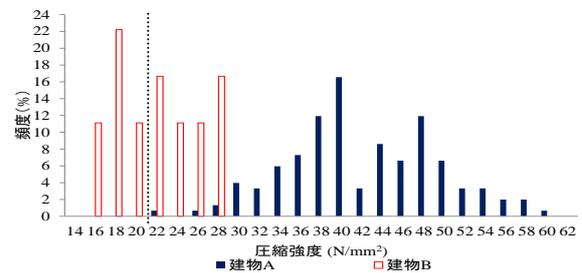


図-6 建物 A および B の圧縮強度分布

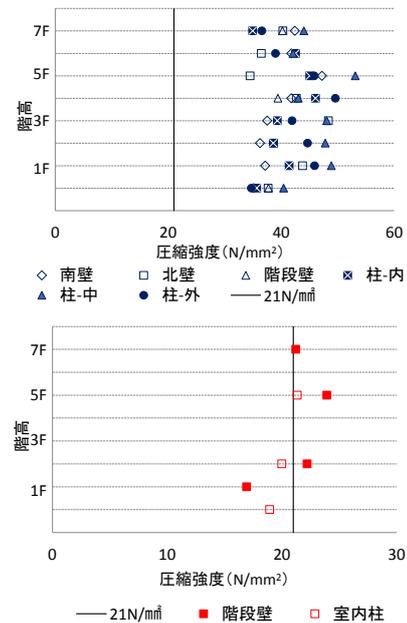


図-7 各階毎の圧縮強度分布（上：建物 A、下：建物 B）

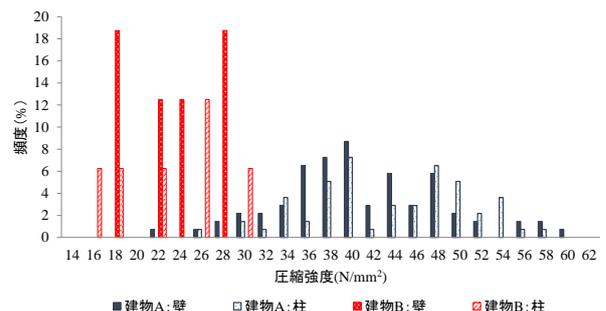


図-8 壁・柱の圧縮強度分布

4.2 ヤング係数

表-6 に建物 A および B の平均ヤング係数および標準偏差を示す。建物 B において柱と壁のヤング係数は同程度であった。また壁の標準偏差は柱よりも若干大きい変動係数は概ね同等で壁は 16%、柱は 11%であった。建物 A は部材による標準偏差の差異は小さくその変動係数は 11 から 13%であった。図-9 にヤング係数の実測値と RC 規準式 (式 (1)) による計算値の関係を示す。図中の破線は計算値に対する実測値のばらつき幅 ±30%を表す。

$$E=2.1 \times 10^4 \times (\gamma/2.3)^{1.5} \times (\sigma/20)^{0.5} \quad (1)$$

E: ヤング係数[kN/mm²]

γ: 単位容積質量[t/m³]

σ: 圧縮強度[N/mm²]

両建物に使用された粗骨材を目視での検討を行った。目視に用いたコンクリートの写真および検討項目を表-7 にまとめた。建物 A および B の粗骨材は共に砂利が使われたと考えられるが、建物 B に用いられた粗骨材は建物 A と比較して粗骨材の形状にばらつきがあり、角ばっている粗骨材が多い測定箇所や丸い粒形状のものが多い箇所などが存在する結果となった。建物 A の実測値と計算値のばらつきは約±40%の範囲に収まった。また建物 B では約±30%となった。本ヤング係数の予測式の精度³⁾がおよそ±30%と示されており、建物 A および B のコンクリートのヤング係数は RC 規準式で評価できると考えられる。

4.3 中性化深さ

考察において比較対象建築物 2 件の竣工年が異なるため以下の式 (2) による中性化速度係数を用いた。

$$C=A\sqrt{t} \quad (2)$$

表-6 建物 A および B のヤング係数と標準偏差

ヤング係数	建物A			建物B		
	壁	柱	全体	壁	柱	全体
測定数	89	63	152	12	6	18
平均 (kN/mm ²)	29.0	27.2	28.2	19.1	17.5	18.5
標準偏差 (kN/mm ²)	3.8	3.0	3.6	3.1	1.9	7.1

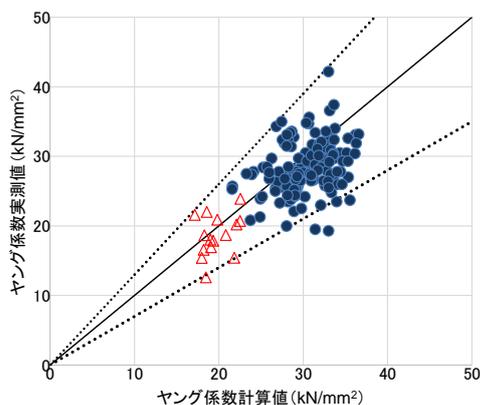


図-9 建物 A および B におけるヤング係数

C: 中性化深さ[mm]

A: 中性化速度係数[mm/√t]

t: 経過年数[year]

(1) 中性化速度係数の分布

建物 A および B における階高ごとの中性化速度係数を図-10 に示す。建物 A および B はともに階高による中性化速度係数の傾向は認められなかった。建物 A 全体の中性化速度係数の分布について図-11 に示す。建物 A の中性化速度係数は主に 0.2 から 0.5 [mm/√t] に多く分布し、建物 B では中性化速度係数が 0 [mm/√t] となる測定点の頻度が最も高かったが、打ち放し部分の中性化速度係数は 5.4 [mm/√t] と大きい値であった。

	建物A	建物B
粗骨材形状	全体的に角の無い粒形	場所によって角張っている粗骨材の分布が異なる。角の無いものも点在する。
粗骨材の色	粗骨材の色が様々ある	
目視による粗骨材の種類	砂利	砂利

表-7 建物 A および B の粗骨材の検討

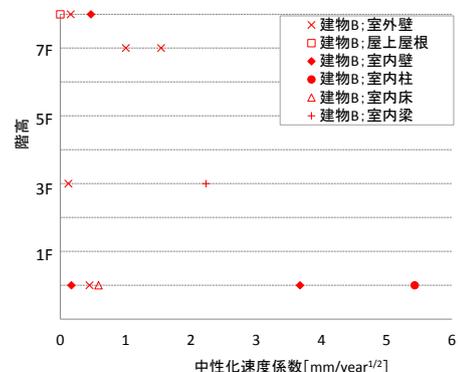
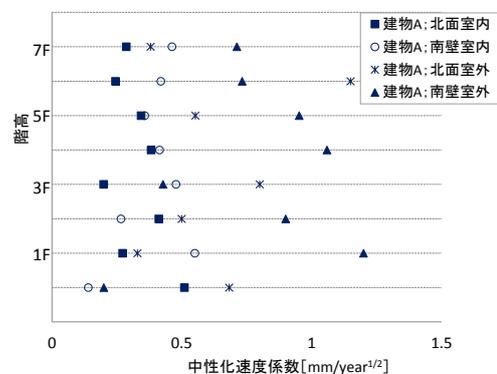


図-10 階高ごとの中性化速度係数 (上; 建物 A, 建物 B)

(2) 圧縮強度と中性化速度係数

建物 A および B における圧縮強度と中性化の関係を図-12 に示す。建物 A は南北の壁を、建物 B では階

段の壁および柱を対象としている。図より、圧縮強度による傾向は認められない。一般にコンクリートの中性化深さはその圧縮強度と相関があるとされるが、本研究にて調査を行った既存構造物 2 件は多くの部位においてモルタルや複層塗材などの塗装およびタイル貼りなどの仕上げが施されており、この影響が大きいと推察される。

(3) 仕上げ材毎の中性化率

前述の検討を踏まえ、コンクリートの中性化に及ぼす仕上げ材の影響を評価することとした。中性化率の算出には以下の式 (3) を用いた。

$$S(t) = Cc(t) / Cb(t) \quad (3)$$

$S(t)$: 材齢 t (年) における中性化率

$Cc(t)$: 仕上げのあるコンクリートの中性化深さ [mm]

$Cb(t)$: 打ち放しコンクリートの中性化深さ [mm]

建物 A および B における各仕上げ材料の中性化率を図-13 に示す。中性化率は既往の研究²⁾によれば、耐久性上有効な仕上げを施す場合、かぶり厚さを 10 mm 減じる事ができることから中性化率が 0.6 以下で中性化抑制効果があると想定できる。なお建物 A は中性化率の基準値とした打ち放しの中性化深さの値が 11.8mm、建物 B は 35.2mm であった。打ち放しの測定箇所は建物 A および建物 B ともに 1 箇所ずつである。建物 A は基準とした打ち放し部分の中性化の進行が小さく中性化率を算出する際の分母が低い値のため、中性化率が約 0.1 から 0.7 まで広く分布したものと考えられる。一方、建物 B は仕上げ材の種類に拠らず中性化率は小さい値となり、仕上げ材がコンクリートの中性化の抑制効果の高いことを実建物調査を通して確認することが出来た。前述の壁の強度が建物 A に比べて著しく低下していることが関連すると考えられるが、この点については更に検討したい。なお中性化率が大きく外れた測定点が存在したが、これは仕上げモルタル厚さが 3.5 mm と極めて薄かったためであり、この点については後述する。特異点を除き、複層塗材・モルタル仕上げ・吹付け塗装は中性化率が小さい傾向にあった。なお建物 A の変動係数は約 62%、建物 B の変動係数は 48% であった。

(4) 非破壊透気試験 (トレント法) による検討

図-14 に中性化速度係数 [mm/year^{1/2}] と透気係数 K_t [10⁻¹⁶m²] の関係を示す。なお図中の閾値は R.Torrent によって提案されたものである³⁾。建物 A の中性化速度係数は室内において最大 1.0 [mm/year^{1/2}] であり中性化の進行は小さかった。一方透気係数 K_t は 0.001 から 1000 [10⁻¹⁶m²] を超えるものまで広い幅をもって分布している傾向がみられる。一方 K_t が 0.1 [10⁻¹⁶m²] 以下において相対的に中性化速度係数が小さい。

(5) RILEM-Cembureau 法による検討

建物 A および B における表層部の透気係数 K [10⁻¹⁸m²]

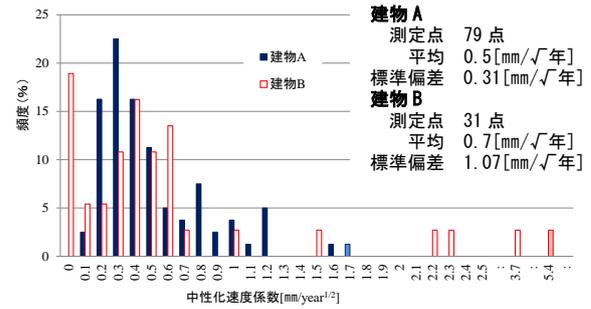


図-11 建物 A および B における中性化速度係数の分布

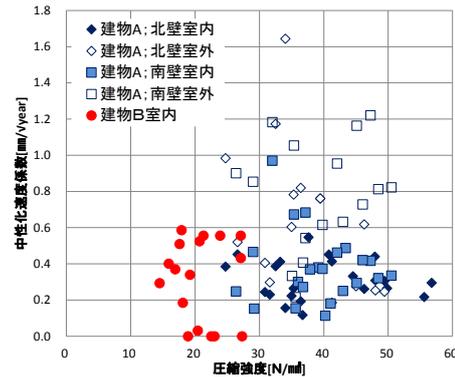


図-12 中性化速度係数と圧縮強度の関係

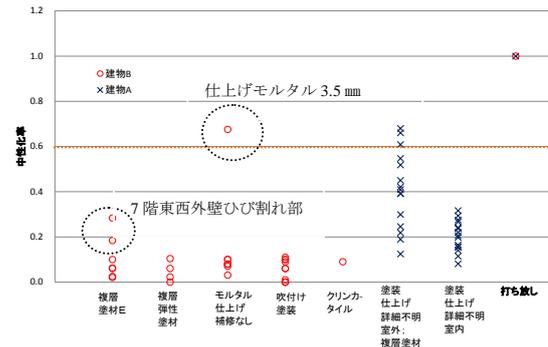


図-13 仕上げ材種類毎の中性化率

の分布を図-15 に示す。本試験による検討は、建物 A は南北壁面の仕上げ (モルタル) を含む表層部 50 mm の部位を対象としているが、一部 20 mm 程の厚さのものが存在する。建物 A に用いられた仕上げモルタルの透気係数 K は約 400 から 2200 [10⁻¹⁸m²] の範囲に分布していた。一方、建物 B において透気係数 K は約 100 から 12500 [10⁻¹⁸m²] まで概ね正規分布する結果となった。図中の破線はコンクリートの RILEM 透気係数の閾値であるが、建物 A および B の透気係数 K は 700 [10⁻¹⁸m²] 以上の範囲に多く分布しており、両建物共に仕上げモルタル (表層部) はコンクリートの緻密度と比較すると概ね粗であると考えられる。

4.4 中性化速度係数と仕上げモルタル厚さの関係

モルタル塗厚さと中性化の関係を図-16 に示す。建物 B の室内のモルタル塗厚さは約 15mm から 60 mm に分布し、室外は約 12mm から 40mm であった。RILEM

透気試験の結果からモルタルは粗であると推察されるが、モルタルの塗り厚さを 20mm 以上確保することは躯体の中性化抑制に効果的であると考えられる。

5. まとめ

同時期に建設された築 40 年以上を経過した 2 つの既存鉄筋コンクリート造建築物について圧縮強度試験、中性化深さの調査を行い、以下の知見を得た。

- 1) 構造部材および非構造部材において圧縮強度およびヤング係数に大きな差異が認められなかったことから、非構造部材からのサンプリングによって構造体コンクリートの強度特性を評価できる可能性があると推測される。
- 2) 両建物におけるヤング係数の実測値は概ね計算値の $\pm 30\sim 40\%$ 程度に収まっており、この範囲内であれば使用する粗骨材の種類に関わらず既存構造物のヤング係数は RC 規準式による評価が可能であると推測される。
- 3) 仕上げモルタルは比較的粗であってもその塗厚によって躯体コンクリートの中性化が抑制されると考えられる。本調査の範囲ではモルタルの塗り厚さとして 20mm 以上の確保が有効であると評価される。
- 4) 建物 B においてトレント法による透気係数 K_t が $0.1[10^{-16} \text{ m}^2]$ 以下であれば概ね中性化は抑制されていることを確認した。また建物 A において測定点によらず中性化は同程度であるが透気係数にばらつきが確認され、仕上げ材の劣化が影響したと考えられることから、構造体コンクリートの中性化状態をトレント法を用いた非破壊透気試験により精度良く評価するためには仕上げ材を含めた表層状態の影響について更なる検討が必要である。

謝辞

本報告をまとめるにあたって株式会社八洋コンサルタント田中章夫氏および東京理科大学庭野究氏、雨宮葉氏のご助力を頂いた。この場を借りて謝意を表す。なお研究の調査の一部は、文部省科学研究補助費若手 B（代表：佐藤幸恵，課題番号：24760460）「余寿命推定を目的とした既存建築物の構造体コンクリート残存強度評価システムの構築」によるものである。

参考文献

- 1) 雨宮葉ほか：築 40 年以上経過した既存鉄筋コンクリート造建築物に関する調査研究その 2 圧縮強度とヤング係数，日本建築学会学術講演梗概集，pp.819～820，2013
- 2) 川西泰一郎，梶田佳寛，濱崎仁：構造体コンクリートの

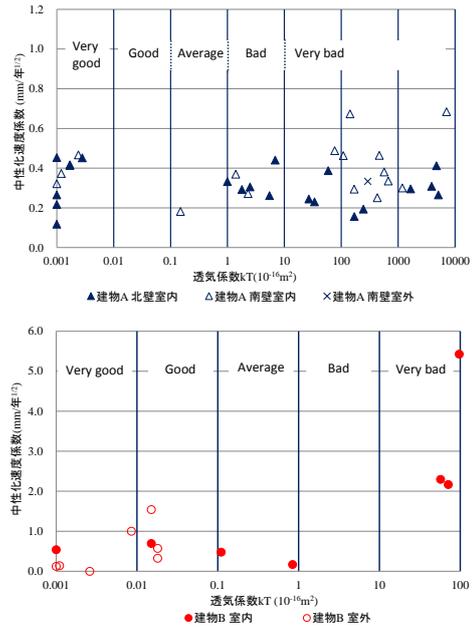


図-14 中性化速度係数と透気係数の関係
(上；建物 A，下；建物 B)

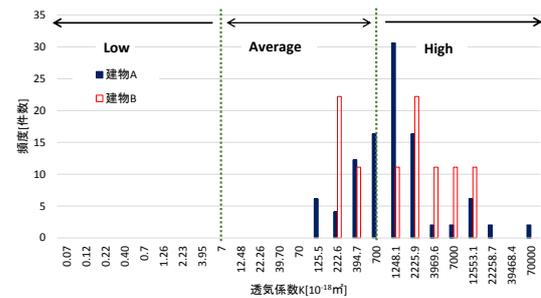


図-15 透気係数 $K[10^{-18} \text{ m}^2]$ の分布

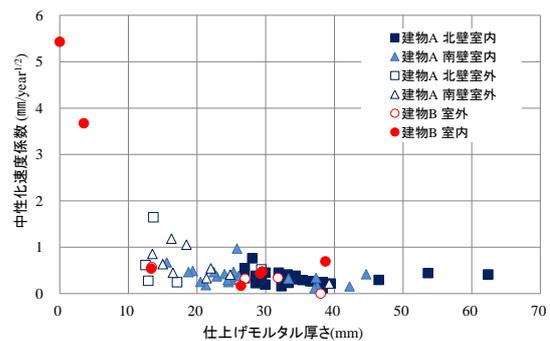


図-16 中性化速度係数と仕上げモルタル厚さ

強度評価におけるコア本数と信頼性，日本建築学会構造系論文集，Vol.75,p469-474，2010.03

- 3) 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，2009
- 4) Torrent, R., Basheer, M. and Gonçalves, A. F.: “Non-destructive Methods to Measure Gas-permeability, Non Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover”, RILEM Report40, pp.45-51, 2007.5