論文　築 89 年を経過した SRC 造建築物におけるコンクリートの中性化進行と環境条件・仕上げ種類・含水状態

中田　清史[*1]・野口　貴文[*2]

要旨：実構造物におけるコンクリートの中性化進行と含水状態との関係性および環境条件，仕上げ種類の影響を明らかにすることを目的として，1928 年竣工の SRC 造建築物において使用材料の物性・劣化度調査を行った。その結果，コンクリートの中性化速度係数は圧縮強度と一定の関係性が見られるものの相関性は低いものと判断される。一方，中性化速度係数と含水率には高い相関があることが確認され，仕上げ種類や外部環境によってその関係性が異なることが確認された。また，今回の調査結果に基づいて躯体健全度把握を目的とした調査位置の選定方法についても検討を行った。

キーワード：耐久性，中性化，環境条件，仕上げ，含水率 ，鉄筋腐食

1. はじめに

コンクリートの中性化は鉄筋腐食を引き起こす最も一般的な劣化現象の一つであり，既存鉄筋コンクリート造（以下，RC 造）建築物の躯体健全度を判断する上で重要な劣化指標である。日本建築学会が刊行する「建築工事標準仕様書・同解説（JASS5）」[1)]では，中性化進行予測手法として√ｔ則が示されており，進行の速さを示す中性化速度係数がコンクリートの内的要因（品質，施工）および外的要因（環境，仕上げ）に応じて定められている。しかし，実際の既存 RC 造建築物における中性化の進行度合いは同じ中性化速度係数に区分される部位であっても大きく異なることが知られている[2)]。また，建物全体としての中性化進行度合いを調査する場合の調査個所の選定方法は必ずしも明確ではない。

本研究では，既往の研究[3)~6)]で報告されている実構造物コンクリートの中性化進行と含水状態との関係性を確認するとともに，この関係性への環境条件／仕上げ種類の影響を明らかにする。また，これに基づいて中性化を対象とした建物劣化調査における調査個所の選定方法について検討することを目的として，築後 80 年以上経過した SRC 造建築物において使用材料の物性・劣化特性の調査を実施した。

表－1　調査建物の概要

建物名称	東京大学総合図書館
竣工年	1928 年（昭和 3 年）
所在地	東京都文京区本郷 7-3-1
構造種別	鉄骨鉄筋コンクリート造
構造形式	ラーメン構造，地下 1 階地上 5 階
延床面積	18824 m^2
仕上げ種類※	屋外：せっ器質タイル ST 屋内：クロス C，陶器質タイル CT，吹付けタイル FT，ペイント P，プラスチックタイル PT，漆喰 S，打放し U

※以下，本論では仕上げ種類の後に記載されているアルファベットを各仕上げの略称として用いる。

2. 調査建物

本研究で調査した建物の概要を**表－1** に示す。調査建物は東京大学本郷キャンパス内の図書館であり現在築 89 年である。外壁仕上げはすべてせっ器質タイルとなっており，外壁の張替えは一部を除き行われていない。室内仕上げはペイント，漆喰，陶器質タイルなど様々であるが居室の用途変更に伴って複数の改修を経ている。

3. 調査方法

3.1 調査計画

調査は**図－1** のようにエリア分けを行ったうえで，**表－2** に示すような時期に実施した。前期調査は耐震診断を目的とした材料調査であり，各エリア・階でそれぞれ 3 か所程度ずつコア採取を行い圧縮強度，中性化深さを測定した。また，調合推定は上記の試験体のうち各エリア・階ごとに 1 か所ずつで行った。なお，コアの採取はすべて屋内の壁部材で行っている。後期調査については西エリアのみで行い，圧縮強度， 中性化深さに加え含水率や鉄筋腐食等の測定を行った。この調査では**表－3** のように環境区分や仕上げの種類を考慮して試料採取位置 7 か所（すべて壁部材）を選定しており，それぞれの箇所で湿式コア 3 本と乾式コア 1 本を貫通で採取した（**図－2**）。乾式コアについては貫通での採取が困難な部位で

表－2　調査計画

調査時期	場所	測定内容	数量
前期調査：2014.12～2015.3	全ｴﾘｱ	圧縮強度, 中性化深さ	各階 3 か所
		調合推定	各階 1 か所
後期調査：2015.8～2015.10	西ｴﾘｱ	圧縮強度, 中性化深さ，含水率	計 7 か所
		かぶり厚さ	各階 1 か所
	全ｴﾘｱ	鉄筋腐食	各ｴﾘｱ 2 か所

*1 東京大学　工学系研究科建築学専攻　(学生会員)
*2 東京大学　工学系研究科建築学専攻教授　工博　(正会員)

表－3　乾式コア採取部位の環境区分・仕上げ種類

No.	屋外側			屋内側		
	環境区分	仕上種類	用途注)	環境区分	仕上種類	用途注)
1	屋外雨有	ST+M	F4 北面	屋内	P+S+M	階段室
2			F4 東面			居室 A
3			F2 西面		C+P+M	居室 B
4			B1DA		CT+M	居室 C
5			B1 中庭		P+S+M	倉庫
6	外雨無		B1PL			
7	－	－	－		U	WC 天井

注）WC:トイレ，DA：ドライエリア，PL：ピロティ

表－4　環境，仕上げ種類ごとのデータ数

環境	部材	仕上げ種類	中性化深さ	含水率
屋内	壁	P+S 等	59	3
		FT+M 等	17	0
		C+M 等	7	1
		U	4	2
		CT+M	3	1
	床	PT+M	3	0
屋外・雨有	壁	ST+M	15	6
屋外・雨無			3	1
合計			111	14

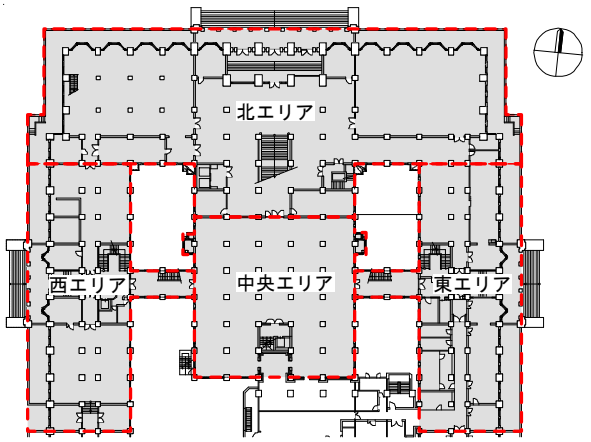
は予め位置を合わせ両側からコア採取を行った。また，No.7 では同一箇所での 4 本のコア採取が困難であったため，湿式 1 本，乾式 1 本ずつを採取し測定値を比較することとした。なお，前期と後期それぞれの調査で取得したデータの数量は**表－4** に示すとおりである。

3.2 測定方法

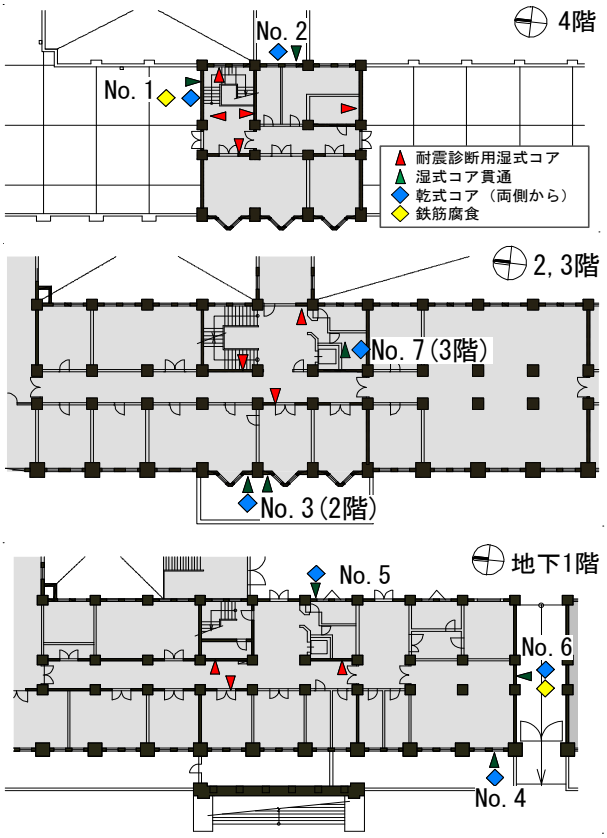
調合推定は，セメント協会コンクリート専門委員会報告 F-18「硬化コンクリートの配合推定に関する共同試報験告」に従って行った。圧縮強度は湿式でφ100 ㎜コアを採取し，JIS A 1107, 1108 に準拠して試験体を作製し測定を行った。また，圧縮強度試験は最大荷重に達した時点で終了とし，圧縮強度試験体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した（JIS A 1152 に準拠）。相対含水率に関しては兼松らの研究 [3]を参考にして， 長さ 60mm 程度の乾式コア（φ50 ㎜）を採取し，厚さ 20 ㎜ごとに乾式でカットし円盤試験体を作製した。それぞれの試験体について気乾，絶乾，表乾の順に質量を測定し式(1)を用いて相対含水率を算定した。

$$S = \frac{w_a - w_d}{w_d - w_s} \times 100 \qquad (1)$$

ここに，S：相対含水率（%），w_a：気乾質量（g），w_d：絶乾質量（g），w_s：表乾質量（g）。



図－1　調査建物の平面図（1 階）とエリア分け



図－2 コア採取位置例（西エリア・B1，2，4 階）

かぶり厚さは，仕上げの上から電磁誘導法により測定し，得られた値からコア採取により測定した仕上げ厚さを引いて算出した。かぶり厚さを測定した箇所はいずれも壁部材である。また，鉄筋腐食は特に中性化が進行している部位を選定し，かぶり部分をはつり目視により判定 [7]した。

4. 結果と考察

4.1 コンクリートの調合・圧縮強度

調合推定の結果を**表－5** に示す。水セメント比については建設当時は標準仕様書等に規定が示されておらず，現場監督の判断にゆだねられていたと考えられるが [6]，

表－5 の結果から概ね 50~60%程度の値であったことが分かる。また，セメント骨材比は 1：6 前後の値であり，市街地建築物法施行規則における調合割合「セメント：砂：砂利＝1：2：4」（許容応力：4.5N/mm^2）[6]が採用されていたものと考えられる。

一方, 圧縮強度については平均で 25.9~30.3N/mm^2 となった。変動係数は 20.4~28.2%と一般的な RC 造と比較するとやや高い値となっているものの，極端に低い値も見られなかったことから（最低値 14.9 N/mm^2），建設当時の法規や現在実施されている耐震診断における要求値（13.5N/mm^2）は充分に満足しているものと考えられる。

4.2 中性化深さ

図－3 に中性化深さの測定結果を示す。地下 1 階，地上 1, 4 階では，いずれのエリアにおいても中性化深さの平均値が 20~30 ㎜程度の値となっている。一方，2 階ではエリアごとに大きくばらつき，3 階では比較的低い値となった。

図－4 に西ブロック調査での中性化深さ・コア強度の結果を示す。まず，コア強度に関しては No.1~6 に関しては同水準であると考えられる。つぎに中性化深さについては No.1~5 の屋外側（雨がかり有り）が 1~3 ㎜程度であるのに対して，対応する屋内側の中性化深さは総じて屋外側よりも大きくなっていることが分かる。一方, No.6 では屋外側と屋内側とで中性化深さはいずれも 20 ㎜程度の値となっており明確な差は見られない。また，屋外側については雨がかりのある No.1~5 の屋外側の値に比べ大きな値となっていることが分かる。実構造物において雨がかりがある部位に比べ雨がかりのない部位での中性化のほうが進行が速いという点は，松田らの報告 [6]と一致するものである。No.7 については室内側で打放し仕上げのコンクリートであるため最も中性化が進行しやすい環境と考えられるが，実際には他の部位の平均値に対して大差のない値であった。なお，**図－4** に示す値は乾式コアとセットで採取した部位であり，その他の打放し部位では 36.2~64.6 ㎜となっている。一方，No.3 でも大きい値となっているが, 本節で設定した区分（コア強度，屋内外，雨がかり有無，仕上げ種類，居室用途）からは原因を明らかにすることはできなかった。

4.3 中性化速度係数

表－6 に仕上種類別の中性化速度係数と打放し仕上げを基準としたその他の仕上げが施されたコンクリートの中性化速度係数の割合を示す。前節でも述べたとおり打放し仕上げの場合の中性化の進行度合いが最も大きく，したがって中性化速度係数は 4.66 ㎜/√年と最も大きな値をとっていることが分かる。一方，せっ器質タイルでは仕上げ自体の中性化抑制効果に加え，測定箇所のほとんどが雨がかりであったため，打放しに対する中性化速度係数の割合が 0.12 倍となっている。さらに，雨がかりの有無で分けて中性化速度係数を算出すると，有と無

表－5　調合推定・コア強度のエリアごとの結果

	中央	北	東	西
水セメント比（%）	54.7	56.8	51.8	56.4
セメント骨材比	1:5.26	1:5.48	1:5.90	1:6.46
コア強度平均（N/mm^2）	25.9	28.7	28.7	30.3
コア強度変動係数（%）	20.4	27.2	28.2	23.1

表－6　仕上げ種類別の中性化速度係数

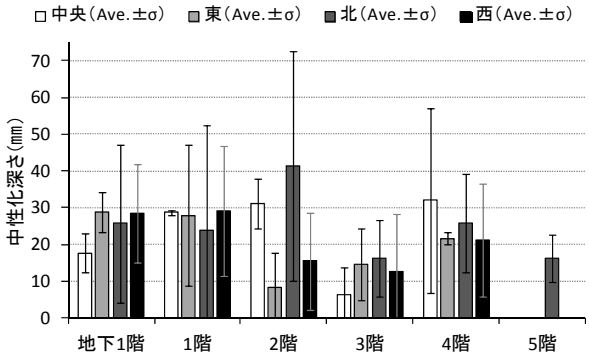
仕上げ種類	中性化速度係数（㎜/√年，%）			U に対する割合
	平均値	変動係数	数量	
U	4.66	45.3	4	1.00
C	3.63	79.6	7	0.78
P	2.63	61.5	57	0.53
FT	2.33	52.4	17	0.50
CT+M	0.88	125.4	3	0.19
PT+M	0.36	80.8	3	0.08
ST+M	0.56	158.6	18	0.12
雨無	2.32	43.9	3	0.50
雨有	0.39	186.1	16	0.08

注）C，P，FT は主にモルタル下地であるが漆喰など複数の下地を持つものに関してもひとまとめに平均値を算出している。

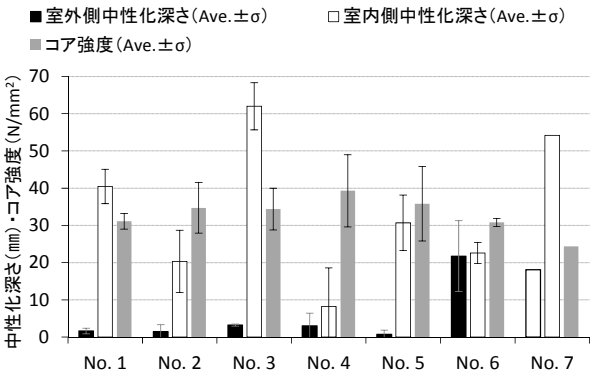
表－7　岸谷式・白山式における中性化速度係数

岸谷式		白山式	
屋外	屋内	屋外	屋内
2.92	5.85	2.40	4.79

注）水セメント比＝55%を仮定して算出。[9]



図－3　エリア・階ごとの中性化深さ平均値・標準偏差



図－4　西エリア調査の中性化深さ・コア強度

でそれぞれ 0.39 ㎜/√年，2.32 ㎜/√年となる。雨がかり有りのみの場合は中性化速度係数がさらに低下し，屋内側のピータイルが施された場合と同程度の値となる。しかし，雨がかり無しの場合は中性化速度係数が大きく上昇し，屋内側ペイント仕上げや吹付けタイル仕上げと同程度の値となり，屋内打ち放しに対する割合は 0.5 程度となる。また，屋内打ち放しに次いで中性化速度係数が大きい仕上げはクロス張りで，その値は 3.63 ㎜/√年となった。しかし，いずれの数値も岸谷，白山式で算出される中性化速度係数（**表－7**）を大きく下回る結果であった。

つぎに中性化速度係数とコア強度を比較する。一般的にコンクリートの圧縮強度と中性化速度係数は反比例の関係にあるとされており JASS 5 には式(2)のような関係が示されている [1)]。

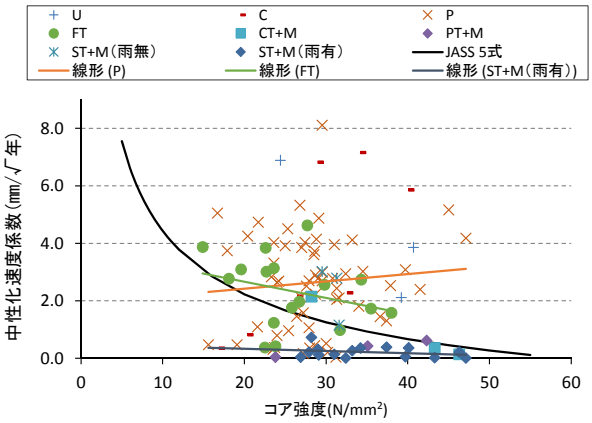
$$A = 23.8 \times \left(\frac{1}{\sqrt{f}} - 0.13\right) \qquad (2)$$

ここに，A：屋外暴露試験に基づく供試体の中性化速度係数(㎜/√年)，f：標準養生供試体 28 日圧縮強度(N/mm^2)。

しかし，式(2)の係数の算出には理想的な暴露試験体データが用いられており [9)]，実際の RC 造建築物における圧縮強度と中性化速度係数の関係は大きくばらつく [2)]。**図－5** は JASS 5 式と本調査で測定した結果を仕上げ種類ごとに示したものである。土屋らが指摘している通り [11)]，コア強度が高いほど中性化速度係数が低下するという傾向は一部で見られるものの，**表－ 8** に示すように同じ仕上げ種類であってもコア強度と中性化速度係数の相関性が極めて低いことが確認できる。

4.4 含水率分布

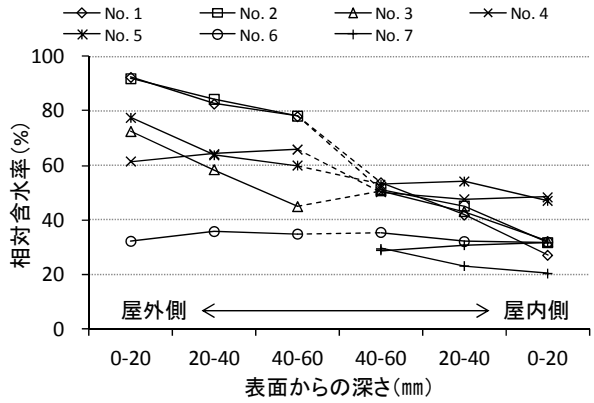
4.2 節後半で中性化深さを比較した No.1~7 のコアの含水率分布について検討する。**図－6** は，それぞれの深さ方向の相対含水率を示している。まず屋外側については雨がかりのない No.6 を除きほぼ全ての深さで 60%以上の値をとっていることが分かる。一方，雨がかりのない No.6 では室内側／打放し仕上げの No.7 と同等の値となっている。このことから屋外側では雨水の供給の有無によりコンクリート内部の含水状態が大きく異なり，雨水の供給がない場合，室内側と同程度に乾燥が進行すると考えられる。また，雨がかりのある部位の中でも No.1, 2 と No.3~5 とで異なる傾向が見られる。すなわち，前者は 80~90%程度の高い値をとり，それぞれの深さで同等の値をとっているのに対し，後者は 40~80%と前者に比べると低い値をとっている。この傾向は雨水の供給頻度が影響していると考えられ，付近に障害物がほとんどない No. 1, 2 に対して（写真－1 左），No.3, 4 では袖壁が，No.5 ではひさし，付近の壁面等が障害物となり（**写真－1** 右）壁面への雨水の供給が妨げられたためと考えられる。



図－5　コア強度と仕上げ種類別の中性化速度係数

表- 8　線形近似の結果（サンプルが多いもののみ表示）

	P	FT	ST+M 雨あり
傾き	0.0256	-0.0564	-0.0078
y 切片	1.9096	3.7934	0.4877
決定係数 R^2	0.0092	0.0839	0.0748



図－6　深さ方向の相対含水率分布

写真－1　4 階外壁面（左）と中庭外壁面（右）

つぎに，室内側の含水率についてはいずれの個所においても 60%以下の値となっている。とくに打放し仕上げである No.7 に関しては，ほぼ全ての深さで最も低い値をとっており仕上げの有無によりコンクリート中の水分逸散の仕方が異なることが伺える。また，室内側の深さ 40

－60 ㎜で屋外側の雨がかりの有無の違いにより含水率の値が大きく異なることから，反対側の壁面の環境も室内側の含水率に影響があるものと考えられる。

4.5 中性化速度係数と各種要因

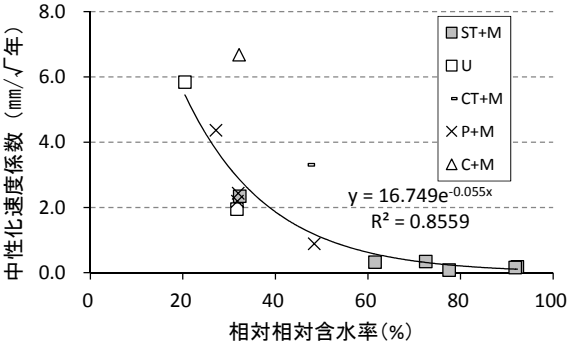
図－7 に表層付近（0-20 ㎜）の相対含水率と中性化速度係数の関係を示す。図から相対含水率が 60%以上に保たれている部位では中性化速度係数が低く抑えられているのに対し 60%以下では急激に高くなっていることが分かる。これは環境／仕上げ種類の影響により乾燥しやすい部位ほど，中性化の進行が速いことを表しているものと考えられ，既往の研究 [3)~5)]と同様の結果であるといえる。

図－8 に本研究の結果と既往研究 [5)]における近似式の比較を示す。ここで，図では比較のため体積含水率を算出して示している。両者は類似した形状の曲線上に分布しているものの，本研究の結果は既往研究に対し下側に分布する傾向を示した。中性化速度係数と含水率の関係を示す曲線は，コンクリート強度が低く，CO_2 濃度が高く，仕上げのない場合の方が中性化速度係数が上昇し，上側に移動するはずである。本研究は既往研究（実験施設，コンクリート強度平均 45.9N/mm^2，打放し仕上げのみのデータ）よりもコンクリート強度は低いものの，仕上げ材があるためにこのような分布になったものと考えられる。ただし，本研究では打放し仕上げの場合に関してもほぼ同一曲線上にあり，この点については原因を明らかにはできなかった。

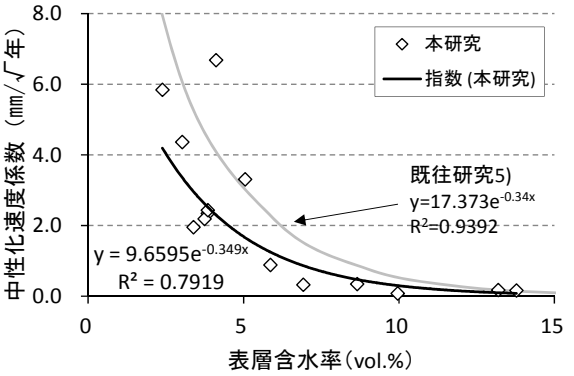
図－9 に**図－7** の関係式による近似値に対する実測値の関係を環境ごとに示す。各環境の分布から屋外側に対して屋内側のほうが実際の中性化速度係数が高いことが分かる。また，比較的人の出入りが少ないと考えられる WC 天井裏や倉庫においても実測値が低くなっていることから，分布の違いは各環境における二酸化炭素濃度に起因している可能性が高いと考えられる。さらに，近似曲線を二酸化炭素濃度 500ppm と仮定して 2000ppm[9)] の場合の近似値－実測値の関係を点線で示す。既往の研究 [4)]から室内側であっても二酸化炭素濃度は 2000ppm を大きく下回ると考えられるが，本研究の居室 B，C の結果は二酸化炭素濃度 2000ppm を仮定した曲線に近い値に分布する結果となった。

4.6 かぶり厚さ・鉄筋腐食

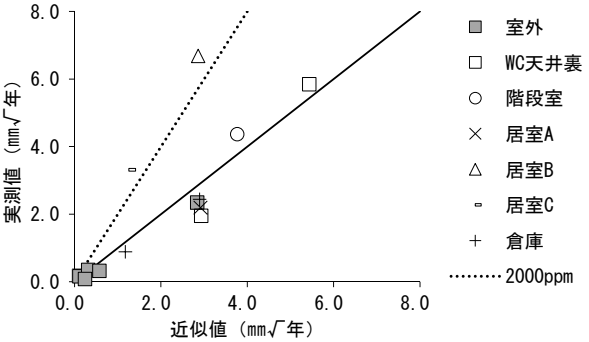
表－9 にエリアごとのかぶり厚さ，中性化深さ，中性化到達率を示す。平均値を見る限り，本研究の調査を行った時点ではいずれのエリアにおいても中性化深さはかぶり厚さよりも小さいことが分かる。しかし，両者ともばらつきが大きく，現時点でも 14.7~45.2%の部位で中性化が鉄筋位置にまで達しているものと考えられる。また，北, 東エリアでは平均値の差が 3.0, 6.2 ㎜となっており，



図－7　表層質量含水率（0-20 ㎜）と中性化速度係数



図－8　表層体積含水率（0-20 ㎜）と中性化速度係数



図－9　環境ごとの中性化速度係数

表－9　かぶり厚さ，中性化深さ，中性化到達率[注)]

		中央	北	東	西
かぶり厚さ (mm)	Ave.	45.6	27.1	25.7	37.3
	σ	16.6	17.0	11.3	17.1
中性化深さ (mm)	Ave.	22.4	24.1	19.5	27.3
	σ	14.7	17.8	12.4	17.7
中性化到達率（%）		14.7	45.2	35.6	34.3

注）中性化の進行が鉄筋位置にまで到達している部位の割合。かぶり厚さ，中性化深さを正規分布と仮定して算出。

今後中性化の進行に伴って鉄筋の腐食部位が急速に増加する可能性があると考えられる。

図－10 に鉄筋腐食グレードと中性化深さ，かぶり厚さの差（中性化残り）の関係を示す。中性化が鉄筋位置ま

で達していない部位では腐食グレードは概ね 1 となったが，中性化が鉄筋位置にまで達している部位では 1~3 となった。また，調査をした部材が雨がかりかどうかで比較を試みた結果，雨がかりのほうがやや腐食グレードが大きくなる傾向が見られた。

4.7 躯体健全度把握を目的とした調査位置の選定方法

以上 4.2～4.6 節の調査結果から健全度調査の際の調査個所について検討する。一般に耐震診断時に測定される中性化深さは室内側環境の場合が多いと考えられ忠誠化の調査としては安全側の調査といえる。一方，鉄筋腐食を併せて調査する場合は，室内側であっても雨掛かりのある部材を選定することで安全側の評価ができると考えられる。

また，透気係数や非抵抗を中性化進行速度の評価に用いる場合は，屋外側と人通りの少ない屋内側であれば同一の関係式で表すことができる可能性があるが，人通りが想定される屋内では二酸化炭素濃度の違いに応じて関係式を補正する必要なあるものと推測される。

5. まとめ

本研究では，実構造物コンクリートの中性化進行と含水状態との関係性を明らかにし，これに基づいて中性化を対象とした建物劣化調査における調査個所の選定方法について検討することを目的として，既存 RC 造建物の調査を実施した。この結果, 得られた知見を以下に示す。

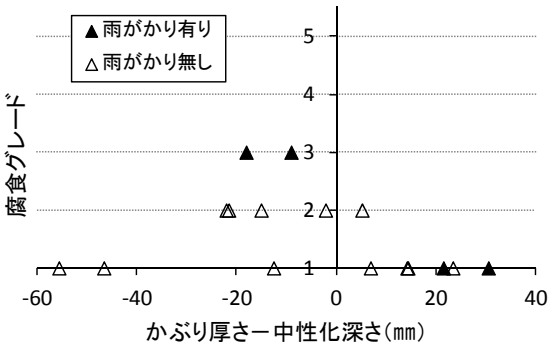
① コンクリートの相対含水率は，雨がかりのある部位では 60%以上に保たれているのに対し，雨がかりのない部位では 60%以下の値となった。また，屋内側であっても反対側が雨がかりの場合，深さ 40~60 ㎜では 50%程度に保たれる。さらに室内側では仕上げがない場合 30%程度まで含水率が低下する。

② 中性化速度係数は屋内／打放しの場合が最も大きな値をとり，屋外雨掛かり有り／せっ器質タイルの場合で最も小さい値であった。また圧縮強度が高いほど中性化速度係数が小さくなる傾向が一部で確認できるが，両者の関係は非常にばらつきが大きく相関性は低いと判断される。

③ 仕上げ種類・環境条件が同一であれば，表層部の含水率が低いほど中性化速度係数は大きくなる傾向が確認された。両者の関係は仕上げ／外部環境に影響を受けるものと考えられる。

④ 鉄筋腐食グレードは中性化が鉄筋位置まで到達している部位で 1~3，到達していない部位で 1 となった。

⑤ 耐震診断調査に併せて行う劣化調査は雨掛かりのある部材を選定し調べることで安全側の評価ができる



図－10　中性化の進行度と鉄筋腐食グレード

と考えられる。また，透気係数等を中性化進行評価に用いる場合は CO_2 濃度を考慮することが望ましい。

謝辞

本研究では，東京大学総合図書館の調査にあたり東京大学生産技術研究所尾原様，沼田様，同大施設部計画課大沼様の協力を得た。記してここに謝意を表す。

参考文献

1) 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，pp. 175-202，2009
2) 玉井孝幸ほか：1953 年から 1985 年に建設された建物の構造体コンクリートの中性化の実態，日本建築学会技術報告集 No.13，vol. 25，pp. 365，2007 年
3) 兼松学ほか：同潤会上野下アパートに関する調査研究 (その 3 中性化および水分状態について), 学術講演梗概集 2014(材料施工)，pp.1131-1132，2014
4) 野口貴文ほか：旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査：その 1~7，学術講演梗概集 2015(材料施工)，pp.417-430，2015
5) 植松俊幸ほか : 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, Vol. 21, No. 48，pp. 409-414，2015
6) 松田芳範ほか：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010
7) 建築物の耐久性向上技術シリーズ／鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術，1989
8) 「市街地建築物法施行規則」官報第 2482 号，1920
9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計・施工指針(案)・同解説，2004
10) 長谷川拓哉，千歩修：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測(耐久性)，コンクリート工学年次論文集 Vol. 28，No.1，pp.665-670，2006
11) 土屋直子ほか：耐震改修調査データによる既存建物の中性化および鉄筋腐食の実態調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No.1，pp.722-717，2016