実建築物におけるコンクリートの中性化進行の分析およびその予測手法の提案

ANALYSIS ON NATURAL CONCRETE CARBONATION OF ACTUAL BUILDINGS AND
SUGGESTION FOR ITS PREDICTION METHOD

田沼毅彦*, 杉山 央**

Takehiko TANUMA and Hisashi SUGIYAMA

In this paper, we propose a method for estimating the carbonation rate of concrete that will be used in actual buildings and subjected to natural environments. This method is established on the basis of results of an accelerated carbonation test and by taking the following three steps:

- (1) Collection and analysis of past accelerated carbonation test data.
- (2) Understanding of the actual progress of concrete carbonation in existing buildings subjected to natural environments.
- (3) Proposal of a carbonation rate coefficient ratio (R) that correlates results of an accelerated carbonation test to results of a carbonation test in existing buildings.

Keywords : Concrete, Accelerated carbonation test, Actual buildings, Carbonation rate coefficient, Prediction method, Durability

コンクリート, 促進中性化試験, 実建築物, 中性化速度係数, 予測手法, 耐久性

1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート造建築物の物理的な耐用年数は、コンクリート中の鉄筋が耐力上問題となる形態にまで腐食した時点と考えられる^{例え、1)}。この鉄筋腐食を招く劣化要因の代表としては、CO₂によるコンクリートの中性化があげられる。中性化深さを的確に評価することが鉄筋コンクリート造建築物の物理的な耐用年数を定めるための一つの指標になることから^{例え、2)}、中性化の進行の予測精度を向上させることがより合理的な耐用年数評価につながる。

中性化の進行を調べるにあたっては、比較的短い期間で結果が得られる促進中性化試験がこれまで多く行われてきており、各種試験条件が中性化深さに及ぼす影響などが研究されてきた³⁾。試験方法としては、1991年の日本建築学会の指針案⁴⁾における「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」を経て、2003年にJIS化され、これ以降は統一された試験条件のもと、材料や調合の違いなどが中性化抵抗に及ぼす影響を確認するために試験が行われてきている。

また、昨今、社会的要請が高い環境配慮や長寿命化対応の高耐久のコンクリートを新たに開発し、建築物に使用するような場合には、促進中性化試験によって中性化抵抗性を確認し、限られた期間における暴露試験の結果とあわせて中性化の進行が予測されている。

しかし、促進中性化試験における中性化の進行が自然環境での長期にわたる中性化の進行の何倍の状態に相当するかに関して検討した研究^{例え、5)}は少なく、促進中性化試験による中性化抵抗性の評価の多くは相対的なものに留まっている。また、自然環境下にある実建築物の中性化の進行の実態を把握するには、比較的長い期間が経

過した構造体からコンクリートコアを採取し、中性化深さを測定しなければならないが、その結果については一部の報告例^{例え、6)~9)}を除き、まとまったデータとして十分な公表がなされていないのが実状である。

そこで、本研究では、促進中性化試験の結果から自然環境下における実建築物の中性化の進行を予測するために必要となるデータの整理・分析と予測手法の提案を行うことを目的とした。

研究内容としては三部構成になっており、まず、促進中性化試験に関して、これまでは限定された個々の研究成果の報告に留まっていることから、本研究において既往の促進中性化試験のデータを収集・整理し、総括的な傾向を検討した。

次に、自然環境下における実建築物のコンクリートの中性化の進行に関して定量的な評価を行うために、実建築物の仕上がりがないコンクリート基礎梁の地表面から概ね高さ 300~500mm の大気に接している位置から採取したコア供試体を用いて、中性化の進行の実態を把握した。

最後に、上記の二つの成果をもとに、促進中性化試験による中性化と自然環境下における実建築物の中性化の対応に関する検討を行った。すなわち、普通ポルトランドセメントを用いた圧縮強度 20~50N/mm² の範囲にあるコンクリートにより構築された実建築物の大気に接している基礎梁および上部構造を対象として、自然環境下におけるコンクリートの中性化の進行を促進中性化試験の結果から予測する上での目安となる数値を提示した。

* 宇都宮大学大学院工学研究科 大学院生・工修
国立研究開発法人建築研究所 主任研究員
** 宇都宮大学大学院工学研究科 教授・工博

Grad. Stud., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., M.Eng.
Senior Research Engineer, Building Research Institute
Prof., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., Dr.Eng.

2. 促進中性化試験データの統計分析

2.1 データ収集および分析方法

データ収集の対象は、1993～2013年の過去20年間に日本建築学会構造系論文集、日本建築学会大会梗概集、コンクリート工学年次大会論文集等で発表された研究報告とした。この中から、文献⁴⁾に示された試験方法もしくはJIS A 1153に準拠して行われた促進中性化試験による中性化深さ（以下、促進中性化深さと呼ぶ。）のデータが示された文献15編^{10)~24)}を取り上げ、計68のデータを収集した。収集したデータはいずれも普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートで水セメント比W/Cは0.40～0.80、使用混和剤はAE減水剤または高性能AE減水剤である。その中でも、W/Cについては0.50～0.65が多く56データを占めた。また、材齢28日圧縮強度 σ_{c28} については21.7～71.1N/mm²の範囲のデータが収集できたが、25～45N/mm²の範囲のものが多かった。表1に引用した促進中性化試験データの範囲と試験条件を、表2に引用した促進中性化試験データを示す。これらのデータに基づいて、促進中性化試験による中性化速度係数（以下、促進中性化速度係数と呼ぶ。）についてW/Cおよび圧縮強度との関係を中心に整理し、その傾向を把握する。

2.2 分析結果および考察

2.2.1 水セメント比と促進中性化速度係数の関係

一般に、促進中性化深さ d_A (mm)は、促進期間 t_A (週)の平方根に比例する($\sqrt{t}$ 則)とされており、次式で表される。

$$d_A = A_A \sqrt{t_A} \quad (1)$$

ここで、 A_A ：促進中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{週}}$)とする。

図1に、表2のデータのW/Cと A_A の関係を示す。また、表3に、同一W/Cでデータ数が5以上あるものについて、 A_A の平均値、標準偏差などを示す。W/Cと A_A の関係については、直線とする提案²⁵⁾や指数関数とする提案²⁶⁾ ($A_A = m e^{n \cdot W/C}$ 、ここで、 e は自然対数の底、 m, n は定数とする。)などがある。本分析データにおいては、ほぼ直線的な関係を示しており、実験値を用いた最小二乗法により求めた回帰式の式(2)で表すことができる。一方、指数関数による回帰式も図1に破線で示す。指数関数の式はW/Cが小さくなるに従って A_A の勾配も小さくなるという試験結果²⁶⁾に基づき提案されているが、そこでの試験条件と本論文で収集を行ったデータにおける試験条件を比較すると、養生期間が9週、促進試験温度が30℃である点に相違がある。この指数関数の式を本データに適用すると、W/Cが0.50より小さい範囲で、曲線の勾配が緩くなっていくことに伴い、次第に実験値と乖離が生じていく傾向を示している。

$$A_A = 16.2(W/C - 0.356) \quad (2)$$

式(2)は、決定係数 R^2 が0.825と高い相関性を示している。およそW/Cが0.40以下の範囲では中性化はあまり進行しないことが見て取れる。図2に、 t_A と d_A の関係について、式(2)の A_A を用いた式(1)をW/C別にグラフ化し、表2の実験値をプロットしたものを示す。ある t_A の時点における個々の d_A の実験値には試験体ごとにばらつきが見られるが、 t_A の進行とともにW/Cが大きいほど d_A が大きく増加する傾向を概ねよく捉えることができている。

なお、同一W/Cの条件においても、 A_A に違いが出る要因として、骨材や混和剤などの使用材料の違い、空気量、単位水量や単位セ

表1 引用した促進中性化試験データの範囲

項目	水準
セメントの種類	普通ポルトランドセメント
水セメント比W/C	0.40～0.80
スランブ (cm)	2.5～20.5
空気量 (%)	3.7～6.0
使用混和剤	AE減水剤, 高性能AE減水剤
20℃水中養生期間 (週)	4
促進中性化期間 (週)	1～26
温度 (℃)	20±2
相対湿度 (%)	60±5
二酸化炭素濃度 (%)	5±0.2
収集したデータ数	68 (文献15編)
材齢28日圧縮強度のあるデータ数	56

表3 W/Cごとの促進中性化速度係数の実験値

W/C	0.40	0.50	0.55	0.60	0.65
データ数	5	14	14	11	13
文献数	4	8	4	7	4
最小値	0.00	1.54	2.15	3.47	4.15
最大値	0.68	3.52	4.11	5.95	5.66
平均値	0.38	2.35	3.05	4.31	4.91
標準偏差	0.24	0.54	0.51	0.75	0.43
変動係数	0.65	0.23	0.17	0.17	0.09

(中性化速度係数の単位はmm/ $\sqrt{\text{週}}$ で、表にはデータ数が5以上のW/Cのみ示した。)

図1 W/Cと促進中性化速度係数の関係

図2 W/C比別の促進期間と促進中性化深さの関係

図3 空気量と促進中性化速度係数の関係

図4 単位水量と促進中性化速度係数の関係

表2 引用した促進中性化試験データ

番号	W/C	単位量 [kg/m ³]		混 和 剤 *1	フレッシュ試験		圧縮強度 (N/mm ²) *2				促進中性化深さ (mm) *3												促進中性 化速度係 数 *4 (mm/√週)	引用 文献 *5
		SL値 (cm)	Air (%)		材 齢 (日)				材 齢 (週)															
					28	56	91	182	1	2	4	5	8	9	13	16	25	26						
1	0.40	138	345	S	2.5	4.6	—	—	—	—	—	—	1.1	—	0.5	—	3.0	—	—	3.2	0.61	14)		
2	0.40	165	412	S	17.0	4.7	55.7	63.0	—	—	0.0	—	0.0	—	—	0.0	—	0.0	0.0	—	0.00	15)		
3	0.40	138	345	S	2.5	4.6	71.1	—	—	—	—	—	1.4	—	0.7	—	2.9	—	—	3.5	0.68	16)		
4	0.40	170	425	S	18.2	5.5	61.6	—	69.9	—	0.0	—	0.6	—	1.5	—	2.3	—	—	5.2	0.77	17)		
5	0.40	170	425	S	16.4	5.5	55.5	—	65.6	—	0.3	—	0.7	—	2.7	—	3.2	—	—	5.6	0.95	17)		
6	0.43	178	414	A	17.5	4.6	49.2	54.8	56.6	58.1	—	—	0.6	—	1.2	—	1.5	—	—	1.9	0.39	25)		
7	0.45	145	322	S	3.0	4.7	53.2	—	—	—	—	—	2.9	—	3.5	—	6.1	—	—	7.1	1.48	16)		
8	0.46	205	450	S	—	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—	2.5	—	1.9	—	—	—	0.56	23)		
9	0.50	160	320	A	5.0	4.2	—	—	—	—	—	—	5.6	—	6.3	—	7.7	—	—	10.1	2.13	14)		
10	0.50	168	336	A	12.5	5.0	42.7	52.9	—	—	0.0	—	2.1	—	—	5.8	—	7.6	7.5	—	1.58	15)		
11	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	4.4	—	7.7	—	9.5	—	10.1	—	—	13.8	2.95	10)		
12	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	4.5	—	6.0	—	7.8	—	8.8	—	—	12.2	2.55	10)		
13	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	6.1	—	8.3	—	10.4	—	12.7	—	—	16.7	3.52	10)		
14	0.50	180	360	S	—	—	43.5	—	—	—	4.2	—	7.2	—	8.4	—	10.7	—	—	13.2	2.85	10)		
15	0.50	160	320	A	5.0	4.2	42.1	—	—	—	—	—	5.7	—	6.1	—	8.1	—	—	10.2	2.09	16)		
16	0.50	178	356	A	20.0	4.6	—	—	—	—	4.3	—	6.1	—	8.6	—	9.0	—	—	—	2.83	18)		
17	0.50	161	322	A	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—	6.0	—	7.6	—	—	—	—	2.27	21)		
18	0.50	161	322	A	—	—	—	—	—	—	—	0.0	—	3.8	—	5.4	—	—	—	—	1.54	21)		
19	0.50	185	370	A	—	—	45.4	—	—	—	2.8	3.2	4.7	—	5.2	—	—	—	—	—	2.02	22)		
20	0.50	175	350	A	—	—	42.7	—	—	—	3.0	3.9	5.7	—	6.0	—	—	—	—	—	2.39	22)		
21	0.50	165	330	A	—	—	39.7	—	—	—	2.3	3.5	5.2	—	6.3	—	—	—	—	—	2.40	22)		
22	0.50	174	348	A	18.5	4.9	41.8	47.1	48.9	49.8	—	—	4.2	—	5.0	—	6.5	—	—	8.2	1.73	25)		
23	0.55	182	331	A	19.9	4.1	42.9	—	47.9	—	—	—	—	—	7.7	—	10.4	—	—	—	2.59	13)		
24	0.55	182	331	A	19.9	4.1	42.9	—	47.9	—	—	—	—	—	7.7	—	—	12.0	—	—	2.44	13)		
25	0.55	182	331	A	20.5	4.2	40.4	—	45.3	—	—	—	—	—	8.1	—	10.7	—	—	—	2.68	13)		
26	0.55	182	331	A	20.5	4.2	40.4	—	45.3	—	—	—	—	—	8.1	—	—	13.0	—	—	2.63	13)		
27	0.55	181	329	A	18.7	3.7	42.6	—	—	—	—	—	8.3	—	10.6	—	12.7	—	—	16.5	3.46	11)		
28	0.55	170	309	S	17.6	5.2	42.0	—	49.2	—	3.9	—	7.6	—	9.3	—	12.5	—	—	16.7	3.38	17)		
29	0.55	170	309	S	18.2	5.8	39.7	—	47.5	—	4.9	—	8.1	—	9.8	—	12.2	—	—	15.0	3.25	17)		
30	0.55	170	309	S	18.0	5.0	38.8	—	47.2	—	4.2	—	8.2	—	9.9	—	11.9	—	—	14.6	3.20	17)		
31	0.55	170	309	S	18.5	4.4	37.7	—	44.9	—	4.7	—	7.5	—	9.1	—	11.9	—	—	13.9	3.06	17)		
32	0.55	170	309	S	16.6	4.9	40.9	—	50.1	—	3.8	—	7.5	—	9.1	—	10.8	—	—	13.5	2.93	17)		
33	0.55	170	309	S	18.6	5.9	41.4	—	50.4	—	4.7	—	7.6	—	10.4	—	12.8	—	—	17.8	3.58	17)		
34	0.55	170	309	S	19.3	6.0	38.8	—	47.5	—	4.5	—	8.7	—	9.8	—	11.2	—	—	14.7	3.17	17)		
35	0.55	180	327	A	19.5	4.9	30.5	—	37.3	—	5.9	—	10.8	—	11.8	—	16.1	—	—	18.5	4.11	24)		
36	0.55	180	327	A	18.5	4.7	30.6	—	35.4	—	4.5	—	8.2	—	11.0	—	14.2	—	—	16.2	3.58	24)		
37	0.56	185	330	A	—	—	40.9	—	—	—	3.8	4.3	6.0	—	7.7	—	—	—	—	—	2.83	22)		
38	0.56	175	313	A	—	—	36.9	—	—	—	3.8	4.9	6.6	—	8.3	—	—	—	—	—	3.08	22)		
39	0.56	165	295	A	—	—	35.5	—	—	—	4.1	4.8	5.7	—	8.6	—	—	—	—	—	3.19	22)		
40	0.57	205	360	S	—	—	—	—	—	—	—	—	7.4	—	10.0	—	10.9	—	—	—	3.25	23)		
41	0.60	164	273	A	5.5	5.0	—	—	—	—	—	—	8.6	—	10.7	—	13.6	—	—	18.4	3.73	14)		
42	0.60	168	280	A	13.0	4.5	33.9	41.3	—	—	4.7	—	8.5	—	—	12.8	—	15.3	18.4	—	3.72	15)		
43	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	6.7	—	11.5	—	14.8	—	17.4	—	—	24.5	4.99	10)		
44	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	6.4	—	9.9	—	14.1	—	16.1	—	—	23.1	4.65	10)		
45	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	7.9	—	13.2	—	16.6	—	22.0	—	—	29.2	5.95	10)		
46	0.60	180	300	S	—	—	33.8	—	—	—	6.3	—	10.0	—	14.0	—	16.5	—	—	22.5	4.62	10)		
47	0.60	164	273	A	5.5	5.0	27.9	—	—	—	—	—	8.3	—	10.2	—	13.5	—	—	18.0	3.64	16)		
48	0.60	180	300	A	18.5	4.7	—	—	—	—	4.5	—	10.9	—	16.1	—	16.4	—	—	—	4.96	18)		
49	0.60	173	288	A	—	—	—	—	—	—	—	—	10.5	—	12.8	—	15.0	—	—	20.7	4.25	20)		
50	0.60	157	262	A	—	—	—	—	—	—	—	—	8.7	—	10.2	—	13.3	—	—	16.2	3.47	20)		
51	0.60	170	283	A	17.5	5.0	30.5	35.6	38.4	38.5	(当該試験については、中性化速度係数のみ明記がある)										3.50	25)		
52	0.65	182	280	A	20.5	4.3	29.4	—	34.9	—	—	—	—	—	12.9	—	—	20.5	—	—	4.15	13)		
53	0.65	182	280	A	20.2	4.3	29.3	—	34.9	—	—	—	—	—	14.0	—	—	22.2	—	—	4.50	13)		
54	0.65	181	278	A	18.7	3.8	33.5	—	—	—	—	—	12.4	—	16.2	—	19.9	—	—	26.7	5.46	11)		
55	0.65	183	282	A	19.0	4.3	30.8	35.3	36.8	—	—	—	11.7	—	—	16.4	—	21.7	28.4	—	5.15	12)		
56	0.65	183	282	A	18.4	4.2	31.9	37.4	39.1	—	—	—	10.0	—	—	15.4	—	19.5	24.1	—	4.53	12)		
57	0.65	183	282	A	18.1	4.3	31.5	37.4	39.0	—	—	—	12.2	—	—	16.9	—	22.5	27.2	—	5.12	12)		
58	0.65	183	282	A	20.0	3.7	31.1	34.1	36.2	—	—	—	11.7	—	—	16.3	—	21.3	27.4	—	5.02	12)		
59	0.65	183	282	A	19.5	4.0	33.6	35.9	38.7	—	—	—	11.7	—	—	16.6	—	21.4	26.4	—	4.95	12)		
60	0.65	183	282	A	19.0	4.1	30.4	35.7	36.4	—	—	—	11.0	—	—	16.1	—	20.8	25.7	—	4			

ント量などの調合の違い、締固めの差などコンクリート供試体の製作上の要因などが考えられる。ここに、表 2 のデータのうち同一 W/C の条件で比較検証が可能である水準として、 A_A と、フレッシュ試験の空気量および単位水量がある。空気量はデータ数で 10 以上あり、比較的広い範囲のデータがある W/C が 0.55 に限定して図 3 に示す。空気量が 3.7% から 6.0% に増加するにつれて A_A も大きくなる傾向が見られる。単位水量はデータ数で 10 以上ある W/C が 0.50, 0.55, 0.60 および 0.65 について図 4 に示す。単位水量の増加に伴い A_A も大きくなる傾向が見られるが、W/C が 0.55 および 0.65 では負の相関を示しており、 A_A と単位水量の関係について本分析データからは統一的な傾向を確認することはできなかった。文献 15 編からデータを引用し、 A_A に若干のばらつきが見られるが、本分析データの促進環境条件は一定の範囲にあり、また養生条件は同一であることから、式 (2) は試験水準の範囲内における促進中性化の平均的な傾向を示すものとして妥当であると考えられる。

2.2.2 圧縮強度と促進中性化速度係数の関係

中性化速度係数 A は、コンクリートの圧縮強度 σ_c と相関性が高いことがこれまでに多く報告されている。 A と σ_c の関係については、式 (3) に示すような σ_c に反比例するという提案²⁷⁾や式 (4) に示すような σ_c の平方根に反比例するという提案²⁸⁾などがある。

$$A=a(1/\sigma_c-b) \quad (3)$$

$$A=a(1/\sqrt{\sigma_c}-b) \quad (4)$$

ここで、 a , b : 定数とする。

図 5 に、表 2 のデータの材齢 28 日圧縮強度 σ_{c28} (N/mm²) と A_A の関係を示す。また、表 4 に、25~45N/mm² まで 5N/mm² ごとに σ_{c28} を区分した範囲における A_A の平均値、標準偏差などを示す。ここでは、式 (3) に比べて、式 (4) の関係に基づいて実験値を用いた最小二乗法により回帰式を求めた式 (5) の方が、50N/mm² 付近から A_A の実験値が 0 に近くなる傾向と乖離が少なく、比較的高い相関を示している。なお、式 (5) で A_A が 0 になるのは計算上、77N/mm² 付近である。

$$A_A=67.2(1/\sqrt{\sigma_{c28}}-0.114) \quad (5)$$

図 6 に、 t_A と d_A の関係について式 (5) を σ_{c28} 別にグラフ化し、表 2 の実験値をプロットしたものを示す。傾向としては、W/C との関係を示した図 2 とほぼ同様の傾向で、 t_A の進行とともに σ_{c28} が小さいほど d_A が大きく増加する傾向にあることを概ね良く捉えることができています。ただし、表 4 で示すように、25~30N/mm² と 30~35N/mm² の両区間における A_A の平均値がほぼ同じであるように、W/C の場合に比べて、 σ_{c28} の実験値とその回帰式との関係にはばらつきが見られる。また、50N/mm² 付近から A_A の実験値がほぼ 0 のデータが見られるが、45~60 N/mm² にかけてのデータ数は十分ではない。 A_A と σ_c の関係を総括的に把握するうえで、式 (5) の適用性と精度の向上には、この範囲におけるデータの補完が必要である。

図 7 に、W/C、 σ_{c28} および A_A の関係を示す。 A_A は値に応じて、図中の点を分類して示している。W/C が大きく、 σ_{c28} が小さい範囲に A_A の値が大きな点がプロットされている傾向がわかる。

一般的に σ_c と A_A の関係を表す際には、標準養生供試体の材齢 28 日の圧縮強度 σ_{c28} を用いることが多いが、材齢 91 日の圧縮強度 σ_{c91} と A_A の関係も検討した。図 8 に、 σ_{c91} と A_A の関係を示す。ここでは、 σ_{c91} が示されている実験データだけを用いている。 σ_{c91} についても式 (4) の関係に基づいて回帰式を求めた。また、 σ_{c28} による式 (5) を破線であわせて示す。 σ_{c91} の平均値 (データ数 28) が 44.1 N/mm² であるのに対して、 σ_{c28} の平均値 (データ数 56) は 38.2 N/mm²、このうち σ_{c91} の結果もある σ_{c28} の平均値 (データ数 28) は 37.4 N/mm² であるから平均して 18% 程度、強度が上昇している。これにより回帰式は全体的に図の右側に移動するとともに、曲線の勾配も若干高くなっている。 σ_{c28} が大きい供試体ほど σ_{c91} の強度上昇率は比較的小さくなることを示しているがその差は極めてわずかなである。

以上、既往の促進中性化試験のデータを整理し、 A_A と W/C および σ_c の関係を中心に総括的な傾向を検討した。

図 5 材齢 28 日圧縮強度と促進中性化速度係数の関係

表 4 材齢 28 日圧縮強度における強度区分ごとの促進中性化速度係数の実験値

σ_{c28} (N/mm ²)	25 ~ 30	30 ~ 35	35 ~ 40	40 ~ 45
データ数	6	17	7	17
最小値	3.77	3.50	2.40	1.58
最大値	5.14	5.95	3.25	3.58
平均値	4.56	4.67	3.05	2.64
標準偏差	0.49	0.65	0.27	0.55
変動係数	0.11	0.14	0.09	0.21

(中性化速度係数の単位は mm/√週で、表にはデータ数が 5 以上の強度区分のみ示した。)

図 6 材齢 28 日圧縮強度別の促進期間と促進中性化深さの関係

図 7 W/C、材齢 28 日圧縮強度および促進中性化速度係数の関係

図 8 材齢 91 日圧縮強度と促進中性化速度係数の関係

3. 実建築物における中性化データの統計分析

3.1 分析対象および分析方法

3.1.1 分析対象建築物の概要

本研究で分析対象とした実建築物およびコンクリートコア供試体の概要を表5に示す。建築物は、関東・近畿・東海地域にある2～5階建ての鉄筋コンクリート造集合住宅である。その多くが整形な平面・立面形状で、南面にバルコニー、北面に階段室があり、建築物の長さに相違があるがほぼ類似の形状である。当該建築物の大規模修繕工事を行う際の2003～2010年にかけて、コンクリート躯体の健全性を確認することを目的にコア供試体を採取し、圧縮強度や中性化深さが測定されている。その中から、屋外に露出している基礎梁上端部分でコンクリート表面に仕上げ材が施されていない、打放し部分で採取したコア供試体のデータを抽出した。ここで、打放しの基礎梁に限定したのは、本分析の目的が促進中性化試験と自然環境におけるコンクリートの中性化の進行を対比するための基礎データの収集であり、まずは仕上げ材や補修材の塗重ねの違いによる中性化抑制効果の違いや屋内での人間活動状況の違いによるCO₂濃度の違いなどの不確定要素を取り除いた条件で検討するためである。

これらを踏まえて抽出した分析対象建築物は1210棟あり、基礎梁から採取したコア供試体は各棟1本であったため、分析対象コア供試体本数は1210本である。竣工年は図9に示す1964～1994年、中性化深さ測定時の竣工からの経過年数は図10に示す15～44年で、この経過年数の15年目と34年目前後にピークが見られるのは、1回目および2回目の大規模修繕工事の多くがこの周期で行われたことによる。

3.1.2 コア供試体の採取位置および採取方法の状況

コア供試体の採取位置は、図11に示すように概ね地表面より高さ500mm程度屋外に露出している基礎梁からコアドリルで採取する作業空間を考慮すると低くても地表面から高さ300mm程度になる。採取位置の上部に底がある場合でも2m以上は離れるため、直接の雨がかりになる位置である。また、地表面から高さ300mm程度の部位には、地表面での雨の跳ね返りがかかる可能性は低い²⁹⁾。

コア採取は、原則、屋外側から作業して部材を貫通するコアを採取しているが、部材断面内で鉄筋と干渉した場合などは、強度試験に必要とするコア供試体長さが確保できているのであれば、途中で折り取って、中性化の測定は片面のみで行われている。

貫通コアにおける採取側先端は、そのほとんどが床下に該当する。床下地表面は、土、敷砂利およびコンクリートなど建築物ごとに様々である。床下の環境条件は、基礎梁にある換気口から外気の流入があるため、CO₂濃度は屋外と同じとみなせるが、雨がかりと日射はない。また、屋外に比べて床下は、相対湿度が6～12%高く、月平均で90%近くになる場合もあり結露も生ずるという報告例^{30), 31)}がある。日射もないので、湿潤環境は保たれ易い条件にあると言える。

方位別のコア供試体本数は、表5に示すように西面が中心で、南面および北面は少ない。これは、一般的に中性化は南面>西面>東面>北面の順に進行が速い⁹⁾とされており、本研究で分析対象としたコア供試体の本来の採取目的が建築物個別に行った健全性調査であったため、比較的中性化の進行が速いとされる西面を中心に採取方位が選定されていたことによる。また、南面の本数が少ない理由は、通常、集合住宅の南面にはバルコニーがあることが多く、バル

コニーが取付く基礎梁でのコア採取作業が困難なためである。なお、対象建築物のほとんどが、離棟間隔を確保して配置される団地内の建築物であるため、東面・西面・南面の屋外に露出している基礎梁のコア採取表面は基本的に日射面と見なすことができる。

3.1.3 調査方法

コンクリートの圧縮強度試験方法は、JIS A 1107に準拠されている。中性化深さの測定は、JIS A 1152に準拠されているが、コア供試体は圧縮強度試験用と兼用しているため、コア採取後にコンクリ

表5 分析対象とした建築物およびコンクリートコア供試体

項目	水準
構造種別・用途	鉄筋コンクリート造集合住宅
階数	地上2～5階
棟数	1210棟
地域	関東（東京、千葉、埼玉、神奈川、茨城）、 近畿（大阪、京都、奈良、兵庫）、 東海（愛知、三重）
竣工年	1964～1994年
試験時の経過年数	15～44年
設計基準強度	16.5, 18, 21 (N/mm ²) ^{*1}
コンクリートの種類	普通コンクリート
セメントの種類	普通ポルトランドセメント
コア採取部位	屋外に露出している基礎梁上端部分
仕上げ材	基礎梁両側面ともなし（打放し）
コア供試体本数	1210本
方位	東面（140本）、西面（813本）、南面（7本）、 北面（21本）、不明（229本）
環境条件	屋外（東・西・南：雨がかりあり・日射あり、 北：雨がかりあり・日射なし）、 床下（雨がかりなし・日射なし・多湿）
分析データ数n	屋外（1210データ）、床下（673データ）

(*1 建設時はkg/cm²であるが、変換係数10でSI単位表記にした。)

図9 竣工年の分布

図10 試験時の経過年数の分布

図11 コア採取位置の模式図

ート表面からの距離をマーキングしてから圧縮強度試験が行われ、コア供試体を割裂させた後に、フェノールフタレイン 1%溶液を割裂面に噴霧して測定されている。コア 1 本あたりの中性化深さのデータは、貫通コアの場合で屋外側と床下側の 2 データ、折り取りコアの場合で屋外側の 1 データである。なお、分析対象とした建築物の建設時におけるコンクリートの調査計画書や標準養生供試体の圧縮強度試験結果などは残されていなかったため、W/C や σ_{C28} は不明であるが、使用したセメントの種類は設計図書において普通ポルトランドセメントであることを確認している。

3. 1. 4 分析方法

1) 環境条件、方位および地域別の中性化速度係数

一般に、自然環境におけるコンクリートの中性化深さ d_N (mm) は期間 t_N (年) の平方根に比例するとされており、次式で表される。

$$d_N = A_N \sqrt{t_N} \quad (6)$$

ここで、 A_N ：自然環境下の中性化速度係数 (mm/√年) とする。

測定した d_N と竣工から中性化深さ測定時までの t_N を用いてコアごとに求めた各 A_N を、環境条件 (屋外・床下)、方位 (東・西・南・北) および地域 (関東・近畿・東海) の各組合せで区分し、最小二乗法による回帰式の定数としてそれぞれ A_N を算出した。

2) 圧縮強度と中性化速度係数の関係

コアごとに求めた A_N と当該コアにおける圧縮強度 σ_{CN} (N/mm²) を用いて、式 (3) および式 (4) の定数 a , b を最小二乗法による回帰式でそれぞれ算出した。また、屋外暴露試験の結果に基づく既往式との比較を行った。

3. 2 分析結果および考察

3. 2. 1 環境条件、方位および地域別の中性化速度係数

表 6 に、環境条件 (屋外・床下)、方位 (東・西・南・北) および地域 (関東・近畿・東海) の各組合せによる区分の A_N とそのデータ数 n を示す。また、西面・全地域 の A_N を 1 として基準化した場合のそれぞれの A_N に対する倍率を β として示す。ここで、地域と方位を区分しないで取り扱った場合は、それぞれ全地域、全方位と表記した。図 12 に、環境条件および方位の各組合せによる区分の t_N と d_N のデータをプロットし、それぞれ回帰式により求めた A_N を示す。全方位のデータには、方位が不明なデータも含まれている。また、南面のデータ数は屋外・全地域で 7、床下・全地域で 3 と少ないが、参考として取り上げた。

図 12 に示すように、各区分とも全体的に t_N の進行に伴い、 d_N が大きくなる傾向が現れている。 t_N は 15 年目と 34 年目前後のデータ数が多いが、 d_N のばらつきの幅は 34 年目前後の方が大きい。 A_N は、1.35～5.53 の幅がある。環境条件の違いによる影響は明瞭に表われており、表 6 に示すように、近畿の東面における屋外と床下の A_N がほぼ同じであることを除けば、残りは全ての地域・方位において、屋外に比べて床下の A_N の方が小さい。データ数が十分にある西面・全地域で見ると、床下の A_N は屋外に対して 0.71 (=3.00/4.25) 倍、東面・全地域では 0.79 (=3.08/3.91) 倍である。また、貫通コア 673 本における、同一コアでの屋外と床下の A_N の関係を図 14 に、屋外に対する床下の A_N の比率の度数分布を図 15 に示す。広い範囲でのばらつきは見られるが、床下の A_N が屋外の A_N を下回っているコア本数の割合は 80%程度になり、屋外に対する床下の A_N の比率は平

均で 0.67 倍程度である。床下の環境条件は、3. 1. 2 で述べたとおり、直接の雨がかりにはならないが、外気に比べて湿度は高くなる。このコンクリート表面における雰囲気湿度の差が中性化の進行に影響を与えていると考えられる。

湿度の影響に関しては、阿部らは促進中性化試験法の評価において次式を提案³⁾している。

$$A_{Hu} = H_u(100 - H_u)(140 - H_u)/192000 \quad (7)$$

ここで、 A_{Hu} ：湿度の影響係数で相対湿度 60% の場合に対する中性化速度係数の比、 H_u ：相対湿度 (%R.H.) とする。

日本建築学会の耐久設計施工指針²⁾においても、建築物の耐久設計を行う際の中性化速度係数を算出するうえで、上記影響係数の考えが採用されている。ここで、式(7)を適用して、表 6 の分析において最もデータ数が多い関東・西面における、屋外に対する床下の A_N の比率 0.65 (=2.84/4.34) 倍に相当する湿度条件を検討する。屋外の H_u を東京の年平均相対湿度である 63%²⁾ とすると A_{Hu} は 0.93 になり、この数値に本データでの床下との比率である 0.65 を乗じて求めた 0.60 が床下の A_{Hu} に相当する。床下の H_u をこの A_{Hu} を用いて式(7)から逆算的に求めると 76%程度になり、屋外に比べて 13%程度高い環境ということになる。この H_u の差は、屋外と床下における H_u の実測報告例^{30), 31)}の 6～12%とも概ね対応しており、本分析における屋外と床下の A_N の違いから、主に湿度環境の違いが A_N に与えている影響を推定することができる。

方位に関しては、表 6 に示すように、屋外・全地域において、南面>西面>東面>北面の順に A_N が大きくなり、全地域で見れば A_N の範囲は 5.53～3.31 で 1.67 倍の幅がある。データ数が十分にある西面と東面における A_N の比率は 1.09 (=4.25/3.91) 倍で、既往文献の報告例⁹⁾における 1.22 倍より小さかった。この理由として、本分析に用いたコア供試体の採取位置が地表面から概ね高さ 300～500mm の範囲にあるため、採取位置が上階のデータがある場合に比べると、日射による方位別のコンクリートの乾燥状態の違いの差が小さい可能性が考えられる。一方、床下では、南面≒西面≒東面>北面であるため、日射量の違いが屋外の方位別の A_N に影響を及ぼしていることが伺える。なお、北面のみ A_N が小さいのは、床下では相対的に北面の湿潤環境が高いが、東面・南面・西面の間では比較的その差が小さいからと考えられる。

地域に関しては、表 6 に示すように、屋外・西面と屋外・東面では、関東>近畿>東海の順に A_N が大きくなっている。 A_N の範囲は、屋外・西面において 4.34～4.00 で 1.09 倍、屋外・東面において 4.07～3.60 で 1.13 倍の幅がある。一方で、床下・西面と床下・東面では、近畿>東海>関東の順に A_N が大きくなっており、関東では床下に比べると屋外の中性化の進行が相対的に速い傾向である。

3. 2. 2 圧縮強度と中性化速度係数の関係

表 7 に、表 6 の区分に対応した σ_{CN} の平均値、標準偏差およびコア本数 n を示す。なお、床下の中性化深さの測定はコア全数ではないが、屋外は全数で測定しているため、屋外の欄に記載している圧縮強度の数値がコア全数を代表する値である。図 13 に、コアごとに求めた A_N と当該コアにおける圧縮強度 σ_{CN} (N/mm²) を環境条件別および方位別の図にプロットし、 A_N と σ_{CN} の関係式として、式 (3) および式 (4) の定数 a , b を最小二乗法の回帰式でそれぞ

表6 環境条件, 方位および地域の各組合せによる区分の各中性化速度係数 A_N (mm/√週)

		全方位 ^{*1}			東 面			西 面			南 面			北 面		
		A_N	β ^{*2}	n	A_N	β ^{*2}	n	A_N	β ^{*2}	n	A_N	β ^{*2}	n	A_N	β ^{*2}	n
屋 外	全地域	4.16	0.98	1210	3.91	0.92	140	4.25	1	813	5.53	1.30	7	3.31	0.78	21
	関東	4.44	1.04	600	4.07	0.96	74	4.34	1.02	419	5.40	1.27	5	4.72	1.11	5
	近畿	3.86	0.91	511	3.75	0.88	55	4.20	0.99	307	4.29	—	1	2.61	0.61	16
	東海	3.99	0.94	99	3.60	0.85	11	4.00	0.94	87	6.79	—	1	—	—	0
床 下	全地域	2.89	0.68	673	3.08	0.72	119	3.00	0.71	363	3.00	0.71	3	1.35	0.32	19
	関東	2.80	0.66	220	2.47	0.58	55	2.84	0.67	83	2.25	—	1	0.34	0.08	3
	近畿	2.93	0.69	367	3.76	0.88	54	3.10	0.73	205	1.34	—	1	1.65	0.39	16
	東海	2.97	0.70	86	3.24	0.76	10	2.91	0.68	75	4.67	—	1	—	—	0

(^{*1} 全方位には, 方位が不明なデータも含まれている。 ^{*2} 表中の β は西面・全地域の A_N を 1 として基準化した場合の倍率を示す。)

表7 環境条件, 方位および地域の各組合せによる区分の各圧縮強度 σ_{CN} (N/mm²)

		全方位 ^{*1}			東 面			西 面			南 面			北 面		
		σ_{CN} 平均値	標準偏差	n	σ_{CN} 平均値	標準偏差	n	σ_{CN} 平均値	標準偏差	n	σ_{CN} 平均値	標準偏差	n	σ_{CN} 平均値	標準偏差	n
屋 外	全地域	31.2	6.96	1210	31.6	6.90	140	31.2	7.00	813	29.6	5.50	7	34.5	5.60	21
	関東	30.8	6.72	600	31.8	7.00	74	31.3	6.80	419	29.5	2.30	5	27.6	4.90	5
	近畿	32.1	6.90	511	32.1	6.90	55	31.6	7.00	307	39.3	—	1	36.7	3.80	16
	東海	29.3	7.90	99	27.5	3.30	11	29.6	8.30	87	20.0	—	1	—	—	0
床 下	全地域	31.3	7.03	673	31.3	6.58	119	31.1	7.30	363	28.1	8.14	3	35.3	5.19	19
	関東	29.7	6.24	220	30.5	6.37	55	29.6	6.36	83	25.2	—	1	27.8	5.27	3
	近畿	32.7	6.86	367	32.4	6.89	54	32.1	6.97	205	39.3	—	1	36.7	3.80	16
	東海	29.7	8.23	86	27.4	3.48	10	30.0	8.60	75	20.0	—	1	—	—	0

(^{*1} 全方位には, 方位が不明なデータも含まれている。)

図12 経過年数と中性化深さの関係

図中の回帰曲線の凡例: 式(3)破線-----, 式(4)実線——, 式(8)点線-----

図13 圧縮強度と中性化速度係数 A_N の関係

図 14 貫通コアにおける屋外と床下の中性化速度係数 A_N の関係

図 15 屋外に対する床下の中性化速度係数 A_N の比率と度数分布

$$A_N = 23.8 \left(\frac{1}{\sqrt{\sigma_{C28}}} - 0.11 \right) \quad (8)$$

求めた結果を破線および実線であわせて示す。また、図中には、長谷川らの提案³²⁾による σ_{C28} と屋外暴露試験結果の A_N に基づいた関係式である式 (8) についても点線で示した。

建設時の設計基準強度は $16.5 \sim 21 \text{ N/mm}^2$ の範囲にあるのに対して、 σ_{CN} は表 7 に示すように全体の平均値で 31.2 N/mm^2 あり、設計基準強度を大きく上回っている。 A_N では方位別の違いが明確に表れたが、 σ_{CN} はデータ数の多い東面と西面を比べるとほぼ同じである。地域間の違いに着目すると、平均値が最も大きい近畿が 32.1 N/mm^2 、最も小さい東海が 29.3 N/mm^2 とその差は 3 N/mm^2 未満である。標準偏差は、東海が一番大きく 7.90 N/mm^2 である。

図 13 に示す A_N と σ_{CN} の関係は図 5 と同様に、ばらつきが見られるものの全体的には σ_{CN} が大きくなるほど A_N が小さくなる傾向が認められる。図 13 (a) ~ (e) の屋外に比べて、図 13 (f) ~ (j) の床下のデータは全体的に縦軸 A_N の小さい位置にプロットされ、 30 N/mm^2 付近から A_N がほぼ 0 に近いデータもある。自然環境では、 A_N は強度に依存するだけではなく、湿度などの他の要因が強度との関係以上に中性化の進行に影響を与えている場合があることがわかる。例えば、図 13 (j) の床下・北面のように、 $20 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ の範囲において A_N がほとんど 2 以下となるように中性化の進行が抑制されている環境では、強度との相関性は表れにくい。

式 (3) および式 (4) の回帰式の適用について比較すると、図 13 で示す 10 ケースの図のうち、(a) ~ (c), (f), (h) ~ (j) の 7 ケースにおいて、式 (3) の方が極めて若干の差であるが高い相関性を示し、全体的に、実建築物の A_N は σ_{CN} に反比例するとした考え方を適用する方が良い結果を示した。データ数が増加すると、特に 20 N/mm^2 付近において A_N の値が大きい側にばらつくデータが多くなり、この傾向に対する適合が式 (3) の方が相対的に良いことが関係していると思われる。なお、 50 N/mm^2 以上については、データ数が少ないため、その範囲における適用の精度には課題が残る。

また、実建築物における σ_{CN} と A_N との各関係式と屋外暴露試験による式 (8) の比較では、図 13 に示すように、いずれの環境条件・方位においても実建築物の A_N の方が大きい傾向にあり、同一強度で見ると 2~3 倍程度大きいことは春畑らの報告⁹⁾と同様である。また、同一の A_N で見た場合で比較すると、例えば、図 13 (a) や (f) における $A_N=4$ において、 $15 \sim 30 \text{ N/mm}^2$ 以上の開きがある。この A_N の違いは、実建築物の構造体と暴露試験供試体における施工条件や養生条件の違いに起因するほか、本分析に用いた σ_{CN} は築 15 年以

上経過した建築物の構造体から採取したコア圧縮強度であるのに対して、式 (8) の算出では標準養生供試体による材齢 28 日圧縮強度 σ_{C28} を用いていることから、評価するコンクリート強度の材齢に違いがあることも影響していると思われる。

以上、3. では、主に環境条件や方位の違いが A_N に与える影響について多くのデータに基づき示した。しかし、採取データの条件に偏りがあること、 50 N/mm^2 以上のデータ数が少ないことなどが課題である。今後、様々な環境条件において、その条件を客観的に示す指標をあわせて記録した上で多くの中性化データを収集し、総合的に検討する必要があると考えられる。

4. 促進中性化の進行と自然環境における実建築物の中性化の進行の関係

4.1 中性化速度係数比 R の算出

2. で分析した促進中性化試験の結果から、3. で分析した自然環境における実建築物の中性化の進行を予測する手法について検討する。促進中性化試験に対する自然環境の中性化速度係数比 R は次式で表される。

$$R = A_N / A_A' \quad (9)$$

ここで、 A_A' は A_A を $\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ に変換したものとす。

自然環境では $0.03 \sim 0.05\%$ の低 CO_2 濃度条件であるのに対し、促進試験では 5.0% の高 CO_2 濃度条件である。従来の方法では、式 (10)、式 (11) に示すように両環境における CO_2 濃度と中性化期間の積である CO_2 積算量 (%年) が同一になった時、両環境の中性化深さが同じ ($d_N = d_A$) になるという考え方に基づいて評価している。

$$C_A t_A' = C_N t_N \quad (10)$$

$$t_A' / t_N = C_N / C_A \quad (11)$$

ここで、 C_A : 促進試験の CO_2 濃度 (5.0%)、 C_N : 自然環境の CO_2 濃度、 t_A' : 促進期間 (年)、 t_N : 自然環境の中性化期間 (年) とする。

従って、これまで R は式 (12)、式 (13) で表されていた^{例え、2)}。よって、R は C_N を屋外 0.05% と仮定した場合に 0.1 となる。また、 t_N / t_A' は CO_2 濃度比 $5.0 / 0.05 = 100$ になり、促進中性化試験によって自然環境の中性化期間を 100 倍短縮していることになる。

$$A_N / A_A' = \sqrt{t_A' / t_N} \quad (12)$$

$$R = \sqrt{C_N / C_A} \quad (13)$$

一方、本研究で得られた促進中性化試験と自然環境の実建築物の中性化の関係を図 16 に示す。図中の A_A' は式 (5) の単位を $\sqrt{\text{年}}$ (1 年 = 52 週) に変換した式 (14)、また、 A_N は自然環境の中性化速度係数である。ここで A_N は環境条件別の平均的な傾向を把握するために、図 13 の (a) に示す全地域・全方位の屋外のデータに基づいて式 (3) を適用した式 (15) および図 13 の (f) に示す全地域・全方位の床下のデータに基づいて式 (3) を適用した式 (16) を一例として用いることとし図中にグラフ化した。R は、式 (14) と式 (15) および式 (14) と式 (16) をそれぞれ式 (9) に代入した結果を図中でグラフ化した。また、図 17 に、式 (14) と式 (15) および式

表 8 促進中性化と自然環境の中性化の関係

(a) 屋外					
圧縮強度 (N/mm ²)	A_N (mm/√年)	A_A' (mm/√年)	R ($=A_N/A_A'$)	t_N/t_A' ($d_N=d_A$)	d_N/d_A ($C_N t_N = C_A t_A'$)
20~25	6.7 ~ 5.2	53.1 ~ 41.7	0.13 ~ 0.12	63.1 ~ 65.0	1.26 ~ 1.24
25~30	5.2 ~ 4.2	41.7 ~ 33.2	0.12 ~ 0.13	65.0 ~ 64.0	1.24 ~ 1.25
30~35	4.2 ~ 3.4	33.2 ~ 26.7	0.13 ~ 0.13	64.0 ~ 60.4	1.25 ~ 1.29
35~40	3.4 ~ 2.9	26.7 ~ 21.4	0.13 ~ 0.14	60.4 ~ 54.8	1.29 ~ 1.35
40~45	2.9 ~ 2.5	21.4 ~ 17.0	0.14 ~ 0.15	54.8 ~ 47.5	1.35 ~ 1.45
45~50	2.5 ~ 2.1	17.0 ~ 13.4	0.15 ~ 0.16	47.5 ~ 39.0	1.45 ~ 1.60
20~50	6.7 ~ 2.1	53.1 ~ 13.4	0.12 ~ 0.16	65.0 ~ 39.0	1.24 ~ 1.60

(b) 床下					
圧縮強度 (N/mm ²)	A_N (mm/√年)	A_A' (mm/√年)	R ($=A_N/A_A'$)	t_N/t_A' ($d_N=d_A$)	d_N/d_A ($C_N t_N = C_A t_A'$)
20~25	5.1 ~ 3.7	53.1 ~ 41.7	0.10 ~ 0.09	108.2 ~ 125.1	0.96 ~ 0.89
25~30	3.7 ~ 2.8	41.7 ~ 33.2	0.09 ~ 0.08	125.1 ~ 140.2	0.89 ~ 0.84
30~35	2.8 ~ 2.1	33.2 ~ 26.7	0.08 ~ 0.08	140.2 ~ 154.0	0.84 ~ 0.81
35~40	2.1 ~ 1.7	26.7 ~ 21.4	0.08 ~ 0.08	154.0 ~ 166.6	0.81 ~ 0.77
40~45	1.7 ~ 1.3	21.4 ~ 17.0	0.08 ~ 0.07	166.6 ~ 178.3	0.77 ~ 0.75
45~50	1.3 ~ 1.0	17.0 ~ 13.4	0.07 ~ 0.07	178.3 ~ 189.0	0.75 ~ 0.73
20~50	5.1 ~ 1.0	53.1 ~ 13.4	0.10 ~ 0.07	108.2 ~ 189.0	0.96 ~ 0.73

(14) と式 (16) の各中性化速度係数を用いて、式 (1) と式 (6) の中性化深さが等しくなる時 ($d_A = d_N$) の t_N/t_A' および C_N を屋外 0.05% と仮定した場合に式 (10) が成立するときの d_N/d_A を求めて圧縮強度との関係をそれぞれグラフ化した。ただし、ここで適用の対象とする圧縮強度の範囲は、3. の検討において実建築物でのデータが多くあった 20~50N/mm² とした。表 8 に、図 16 および図 17 の縦軸の各数値を 5N/mm² ごとに区分して示す。なお、圧縮強度について、促進中性化試験では材齢 28 日圧縮強度を用いている

のに対して、実建築物では 15 年以上経過してから採取したコア供試体の圧縮強度を用いている。コア供試体の圧縮強度は、材齢 28 日圧縮強度と異なるが、ここでは同じと見なして検討を行った。

$$A_A' = \sqrt{52} \times 67.2 (1/\sqrt{\sigma_c} - 0.114) \quad (14)$$

$$A_N = 152 (1/\sigma_c - 0.006) \quad (15)$$

$$A_N = 138 (1/\sigma_c - 0.013) \quad (16)$$

4.2 中性化速度係数比 R の比較および考察

屋外と床下では、 A_N と圧縮強度の関係に違いがあるため、中性化速度係数比 R の傾向についても違いが見られた。促進中性化試験により CO₂ の拡散は促進されるが、 A_A' および屋外での A_N がほぼ 0 になる圧縮強度の値に大きな差はないため、R は圧縮強度が大きくなるに伴い 0.12 から 0.16 程度に漸増していく傾向にある。一方、湿潤環境である床下では、屋外と比較して中性化の進行が抑制され、 A_N がほぼ 0 になる圧縮強度の値が A_A' の場合に比べて小さくなることによる影響を受けて、圧縮強度が大きくなるに伴い逆に R は 0.10 から 0.07 程度に漸減していく傾向にある。これは従来の計算で用いられている R=0.1 に対し、自然環境における実建築物の R は一律ではなく強度や環境条件によって違いが表れることにおいて、一致しない結果となった。

なお、7 年間の屋外暴露試験を行った押田らの研究³³⁾では、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートにおける R の関係式 ($R = 0.227/(W/B) - 0.342$, W/B : 水結合材比) が示されており、W/B 0.4~0.6 (材齢 28 日圧縮強度で約 31~54N/mm²) の範囲での R は 0.04~0.23 であった。本研究では、20~50N/mm² の範囲における R は屋外では 0.12~0.16、床下では 0.10~0.07 であるので、押田らの研究と比較すると、30N/mm² 付近では 2~3 倍程度大きい結果であったが、圧縮強度が大きい範囲では逆に小さくなっている。

また、本検討における t_N/t_A' は、屋外では 39~65、床下では 108~189 で、従来の計算による 100 と一致しないため、 t_N/t_A' は CO₂ 濃度に単純に比例すると言えない結果である。さらに、両環境が同じ CO₂ 積算量になった時、本検討における d_N/d_A は屋外では 1.2 以上、床下では 1 未満であり、 $d_N = d_A$ とはならなかった。

本研究において、CO₂ 濃度 5.0% で t_A' 年の促進試験を行った時の中性化深さが d_A のコンクリートについて、自然環境 (屋外 CO₂ 濃度 0.05%) における実建築物として t_N 年経過した屋外側での平均的な中性化深さ d_N を予測すると次式で計算できる。

$$d_N = R A_A' \sqrt{t_N} \quad (17)$$

$$d_N = R d_A \sqrt{t_N/t_A'} \quad (18)$$

ただし、R の値は表 8 による。

なお、実建築物の中性化の進行は、図 13 に示すように湿度や日射などの環境条件や施工条件・養生条件の違いによる影響を受けることから、ここで示す R は促進中性化試験と自然環境との CO₂ 濃度以外の要因が包含された係数になっている。表 8 の数値は屋外と床下環境における本研究データに基づいた平均的な数値としての提示

であり、今後、様々な環境条件における中性化データを収集・整理し、条件に応じた **R** を提示する必要があると考える。

5. まとめ

本研究で得られた成果および知見を以下にまとめる。

- (1) 文献調査を行い、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの促進中性化試験 68 データによる促進中性化の総括的傾向を検討し、促進中性化速度係数と水セメント比および促進中性化速度係数と圧縮強度の関係式を示した。
- (2) 自然環境における竣工後 15 年以上経過した実建築物の打放しコンクリートの部位から採取したコア 1210 本について、環境条件、方位および地域別に分類して中性化速度係数を算出し、その違いが及ぼす影響の度合いについて定量的に把握した。湿度が高い床下環境では、屋外に比べて中性化速度係数は 0.7 倍程度に抑制されている。屋外の方位別では、南面＞西面＞東面＞北面の順に中性化速度係数が大きく、その幅は 1.67 倍程度である。屋外の地域別では、近畿と東海に比べると関東の中性化速度係数が比較的大きい。また、中性化速度係数と圧縮強度の関係式を示した。
- (3) (1)および(2)の結果を用いて、圧縮強度 20～50N/mm²の範囲で促進中性化試験に対する自然環境の中性化速度係数比 **R** の算出事例を示した。自然環境における実建築物の屋外側の平均的な中性化に関して、**R** は 0.12～0.16 を示し、圧縮強度が大きくなるほど **R** は大きくなる傾向にあった。一方、湿潤環境である床下側では、**R** は 0.10～0.07 を示し、圧縮強度が大きくなるほど **R** は逆に小さくなる傾向にあった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、既往の促進中性化試験データの収集および整理には、宇都宮大学大学院（当時）の SUSAN 氏の協力を得た。また、実建築物のコンクリートコアデータについては、建築物所有者の承諾のもと（一社）建築研究振興協会八王子試験所から提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設大臣官房技術調査室：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術，p. 196，技報堂出版，1986
- 2) 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，pp. 92-108，2004
- 3) 阿部道彦ほか 5 名：コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 409 号，pp. 1-10，1990. 3
- 4) 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. 7
- 5) 依田彰彦：40 年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上材の効果，セメント・コンクリート論文集，No. 56，pp. 449-454，2002. 12
- 6) 和泉意登志ほか 1 名：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，日本建築学会構造系論文報告集，第 406 号，pp. 1-12，1989. 12
- 7) 川西泰一郎ほか 2 名：実建物調査に基づくコンクリートの中性化進行に関する分析，日本建築学会構造系論文集，第 608 号，pp. 9-14，2006. 10
- 8) 玉井孝幸ほか 4 名：1953 年から 1985 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，vol. 13，No. 25，pp. 1-6，2007. 6
- 9) 春畑仁一ほか 2 名：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計，その 1，その 2，日本建築

- 学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 549-552，2011. 8
- 10) 黒島毅ほか 1 名：砕石粉を用いた高流動コンクリートに関する研究，その 5，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 239-240，1995. 8
- 11) 中村則清ほか 3 名：コンクリートの促進中性化試験結果のばらつきに関する実験的検討，2008 年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 109-112，2009. 3
- 12) 中村則清ほか 4 名：コンクリートの促進中性化に及ぼす試験方法上の要因の影響，その 4，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 1149-1150，2005. 9
- 13) 中村則清ほか 3 名：コンクリートの促進中性化に及ぼす試験方法上の要因の影響，コンクリート工学年次論文集，vol. 25，No. 1，pp. 761-766，2003
- 14) 大和功一郎ほか 3 名：PCa コンクリートの促進中性化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 31，No. 1，pp. 943-948，2009
- 15) 和田利之ほか 2 名：低発熱型セメントを用いたコンクリートの中性化特性，コンクリート工学年次論文集，vol. 23，No. 2，pp. 451-456，2001
- 16) 大和功一郎ほか 3 名：各種 PCa コンクリートの促進中性化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol. 32，No. 1，pp. 647-652，2010
- 17) 黒岩秀介ほか 5 名：保水性を有する新収縮低減剤を混和したコンクリートの実用化，その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 455-456，2011. 8
- 18) 山下修平ほか 3 名：各種セメントを用いたコンクリートの促進中性化試験方法の検討，2010 年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 45-48，2011. 3
- 19) 久保田浩ほか 3 名：中性化抑制効果に優れた水素ふっ素樹脂クリヤ塗装仕様の開発，促進中性化試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 463-464，2008. 9
- 20) 守屋健一ほか 5 名：フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究，その 1，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 389-390，2007. 8
- 21) 松本幸太郎ほか 5 名：降雨の影響を受ける構造体コンクリートの中性化速度に関する研究，日本建築学会中国支部研究報告集，第 36 巻，pp. 33-36，2013. 3
- 22) 松浦誠司ほか 3 名：使用材料が吹付けコンクリートの耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol. 22，No. 2，pp. 1375-1380，2000
- 23) 石川嘉崇ほか 2 名：各種スラグ細骨材との性状比較による IGCC 石炭熔融スラグのコンクリート用細骨材としての有用性の検討，日本建築学会構造系論文集，第 676 号，pp. 799-805，2012. 6
- 24) 全洪珠ほか 1 名：コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 602 号，pp. 1-7，2006. 4
- 25) 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説，p. 84，1976
- 26) 和泉意登志：コンクリートの中性化速度に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 394 号，pp. 17-26，1988. 12
- 27) 和泉意登志：コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類，調査および養生条件の影響について，第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 117-120，1985
- 28) H. G. Smolczyk：Written discussion on Carbonation of Concrete by M. Hamada，Proc. of 5th International Symposium on the Chemistry of Cement，Vol. 3 Tokyo，pp. 369-384，1968
- 29) 橋本佳大ほか 1 名：地表面の跳ね返り雨水による外壁面足下部の濡れに関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp. 279-280，2002. 8
- 30) 畑中稔臣ほか 4 名：戸建住宅の床下温湿度性状に関する研究，平成 10 年度日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 237-240，1998. 5
- 31) 岩前篤ほか 3 名：戸建て住宅の床下温湿度性状に関する研究（その 2），平成 11 年度日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 93-96，1999. 5
- 32) 長谷川拓哉ほか 1 名：文献調査に基づく屋外の中性化進行予測，コンクリート工学年次論文集，vol. 28，No. 1，pp. 665-670，2006
- 33) 押田文雄ほか 5 名：中庸熟フライアッシュセメントを使用したコンクリートの中性化速度係数，日本建築学会技術報告集，Vol. 20，No. 45，pp. 451-456，2014. 6

ANALYSIS ON NATURAL CONCRETE CARBONATION OF ACTUAL BUILDINGS AND SUGGESTION FOR ITS PREDICTION METHOD

Takehiko TANUMA^{*} and *Hisashi SUGIYAMA*^{**}

^{*} Grad. Stud., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., M.Eng.

Senior Research Engineer, Building Research Institute

^{**} Prof., Dept. of Architecture, Utsunomiya Univ., Dr.Eng.

Before using newly developed concrete in actual buildings, it is a common practice to confirm the carbonation rate and durability of the new concrete using an accelerated carbonation test.

However, an accelerated carbonation test can only provide a relative indication of the concrete carbonation rate and cannot clearly indicate how fast the test accelerates the carbonation rate of concrete in natural environments. Furthermore, no study exists in which the results of an accelerated carbonation test have been compared with results of a carbonation test on concrete used in existing buildings subjected to natural environments.

In this study, we propose a method for estimating the carbonation rate of concrete that will be used in actual buildings and subjected to natural environments. This method is established on the basis of results of an accelerated carbonation test and by taking the following three steps:

- (1) Collection and analysis of past accelerated carbonation test data.
- (2) Understanding of the actual progress of concrete carbonation in existing buildings subjected to natural environments.
- (3) Proposal of a carbonation rate coefficient ratio (R) that correlates results of an accelerated carbonation test to results of a carbonation test in existing buildings.

The results for each step are:

- (1) Data of 68 accelerated carbonation tests were collected. From these data, an equation relating the accelerated carbonation rate coefficient and water–cement ratio as well as an equation relating the accelerated carbonation rate coefficient and concrete compressive strength was derived.
- (2) A total of 1210 core samples were taken from the structural concrete of existing buildings and they were sorted into groups according to the environmental conditions, orientations, and regions in which the concrete had been used. The carbonation rate coefficient for each group was calculated, and an equation relating the carbonation rate coefficient and concrete compressive strength was derived.
- (3) The ratio (R), which is a ratio of the carbonation rate coefficient obtained in an accelerated carbonation test to that obtained from carbonation testing of the existing buildings, was approximately calculated to be in the range of 0.07–0.16.

(2015 年 6 月 10 日原稿受理, 2015 年 10 月 28 日採用決定)