

# 論文 環境区分ごとのコンクリートの中性化速度予測に関する研究

井出 朋孝\*1・濱崎 仁\*2・尾上 稀一\*3・松沢 晃一\*4

**要旨:** 本研究は、環境区分およびセメント種類ごとの中性化速度について、促進環境と実環境の関係、水セメント比との関係、材齢 28 日圧縮強度との関係を実験的に明らかにし、既往の中性化予測式と比較・検証したものである。その結果から屋外の雨掛かりの有無による中性化速度の違いや促進試験結果との関係、環境区分ごとの水セメント比と中性化の関係式を提案した。また、環境区分ごとに材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係を示した。

**キーワード:** 中性化, 環境区分, 暴露試験, 促進中性化試験, 水セメント比, 圧縮強度

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリートの中性化は、鉄筋腐食に大きな影響を与える劣化現象の一つである。現在、中性化と圧縮強度の関係が明らかになっており、日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS 5<sup>1)</sup>においては、中性化抵抗性を耐久性の指標として計画供用期間の級に応じた耐久設計基準強度が決定されている。また、岸谷らの研究<sup>2)</sup>や和泉らの研究<sup>3)</sup>による中性化予測式や長谷川らによる屋外暴露試験に基づく強度と中性化速度係数の関係式<sup>4)</sup>などが参考にされている。

しかしながら、中性化速度は、屋内外の環境の違いだけでなく雨掛かりの有無、さらに、セメント種類など様々な条件によって異なる。そこで本研究では、促進中性化試験と 10 年間の暴露試験の結果により、環境区分に応じたセメント種類ごとの中性化速度、圧縮強度との関係等について明らかにする。

## 2. 実験概要

表-1 に実験の要因と水準、表-2 に使用材料を示す。セメント種類の違いによる中性化速度の差を検討するため、普通ポルトランドセメント（以下、N）、高炉セメント（以下、B）を用い、混和材としてフライアッシュ（以下、F）を使用した。なお、本研究では、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュのセメント用混和材もあわせて W/C（水セメント比）として表記する。水セメント比（以下、W/C）の水準は、N のみ 5 水準とし、そのほかは 50、65% の 2 水準とした。屋外暴露試験は、写真-1 に示す茨城県つくば市の建築研究所屋外暴露試験場（N36° 7' 38" ・ E140° 4' 39" 海拔 +29m）で実施し、屋根がなく直接の雨掛かりのある場所（以下、屋外雨あり）と屋根があり、直接の雨掛かりがない場所（以下、屋外雨なし）を区別した。また、屋内環境は 20℃、60%RH の恒

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
セメント種類	N, B, F
W/C(%)	(45), 50, (55), (60), 65 ( )は N のみ
暴露環境	屋外雨あり, 屋外雨なし, 屋内, 促進
期間	暴露: 10 年, 促進: 52 週

表-2 使用材料

材料	仕様	
セメント	N	T 社製(密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
	B	T 社製, 高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm <sup>3</sup> )
混和材	F	J 社製, フライアッシュ II 種品 (密度 2.07g/cm <sup>3</sup> )
骨材	細骨材 (S)	静岡県大井川水系産川砂(表乾密度 2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 2.00%, 粗粒率 2.76)
	粗骨材 (G)	茨城県岩瀬産硬質砂岩碎石 (表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.12%, 粗粒率 6.25, 実積率 68.9%)
混和剤	AE 減水剤	B 社製, AE 減水剤標準形 (I 種)
	AE 剤	B 社製, AE 剤 (I 種)
水	イオン交換水	



写真-1 屋外暴露試験の様子  
(左: 屋外雨あり, 右: 屋外雨なし)

\*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

\*2 芝浦工業大学 建築学部建築学科・教授 博士(工学) (正会員)

\*3 芝浦工業大学 工学部建築学科

\*4 建築研究所 材料研究グループ 博士(工学) (正会員)

表-3 調合表および材齢 28 日圧縮強度・静弾性係数試験結果

区分	調合記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位粗骨材かさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
						W	C	F	S	G	標準	封緘	標準	封緘	
N	45%	N45	18 ±1.0	4.5 ±0.5	45	0.60	178	396	-	720	984	40.7	41.8	29.8	29.2
	50%	N50			50	0.60	178	356	-	751	984	36.5	36.7	28.7	28.2
	55%	N55			55	0.60	178	324	-	777	984	32.5	32.8	28.0	26.5
	60%	N60			60	0.60	178	297	-	800	984	29.2	29.4	27.7	25.9
	65%	N65			65	0.59	178	274	-	834	968	25.8	26.6	26.9	26.1
B	50%	B50			50	0.60	175	350	-	754	984	31.7	32.3	26.6	25.0
	65%	B65			65	0.59	175	269	-	839	968	21.4	21.8	23.9	24.4
F	50%	F50			50	0.60	173	287	59	751	984	30.0	32.2	26.5	25.8
	65%	F65			65	0.59	173	221	45	837	968	18.1	20.3	24.2	23.7

温恒湿環境下とした。

表-3に調合表および材齢28日強度試験用供試体の圧縮強度および静弾性係数を示す。強度用供試体は、JIS A 1132により作製し、養生方法は標準養生および封緘養生の2種類とした。また、暴露試験体(10×10×40cm)も同様の手順で作製し、脱型後は材齢28日まで20℃±2℃の水中養生とした。静弾性係数試験はJIS A 1149により行った。

図-1にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。NとBでは標準養生と封緘養生による強度差はほとんどないが、Fは標準養生試験体の方が封緘養生より若干強度が低かった。本実験ではこのデータを基に、圧縮強度と各環境区分における中性化速度の関係を明らかにする。

また、中性化深さの測定は、暴露試験はJIS A 1152、促進中性化試験はJIS A 1153により実施し、期間は52週とした。その結果求められた中性化深さから(1)式により中性化速度係数を算出した。

$$A = C/\sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、A：中性化速度係数（暴露試験：mm/year<sup>0.5</sup>，  
促進試験：mm/week<sup>0.5</sup>）

C：中性化深さ（mm）

t：試験期間（暴露試験：year，促進試験：week）

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各環境における中性化速度係数

図-2～図-5にそれぞれ屋外雨あり、屋外雨なし、屋内、促進環境における中性化速度係数を示す。全体的な傾向を見ると、一般に言われるとおり、すべての環境およびセメント種類でW/Cが大きいほど中性化速度係数が大きく、屋外雨なしの環境を除き、同一水セメント比ではN、B、Fの順で中性化速度は大きくなった。また、促進環境においても同様の傾向を示している。

環境要因による違いは、屋外雨あり環境が最も中性化速度は小さく、屋外の雨なしと屋内暴露では概ね同等であり、セメント種類や調合によって異なる傾向を示している。屋外の雨ありの環境では、他と比べて雨水によって水和が進行し、コンクリートが緻密化したこと、降雨後には湿潤状態になることによって二酸化炭素の侵入・拡散が抑制されたことなどがその要因である。これらのことを定量的に評価するため、促進試験における環境条件との比較を行った。

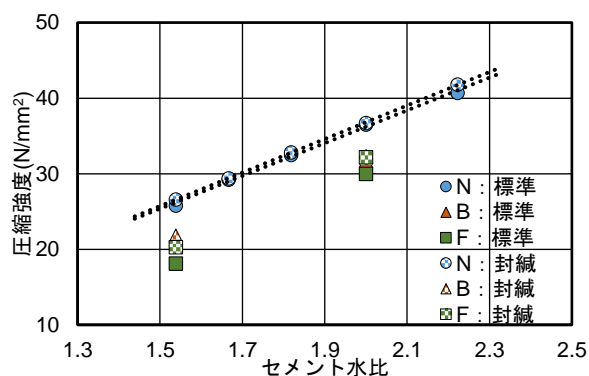


図-1 セメント水比と圧縮強度の関係

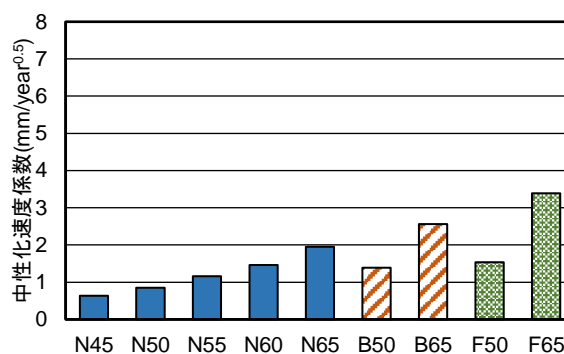


図-2 屋外雨あり環境における中性化速度係数

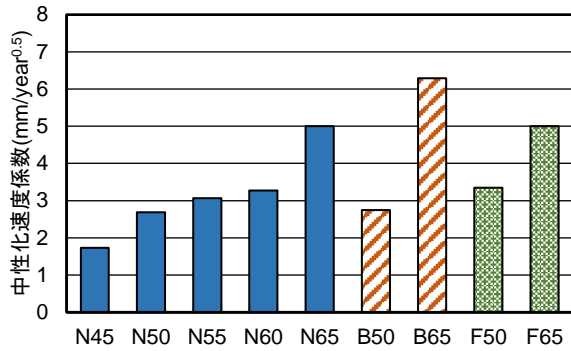


図-3 屋外雨なし環境における中性化速度係数

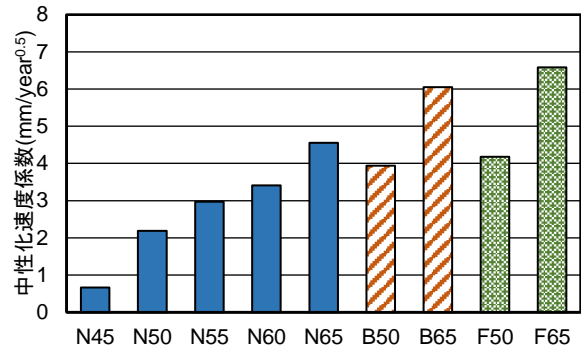


図-4 屋内環境における中性化速度係数

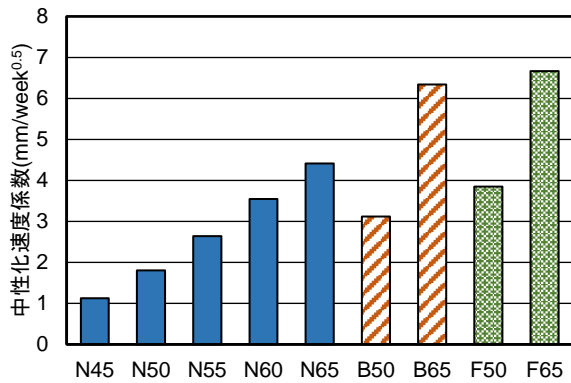


図-5 促進試験における中性化速度係数

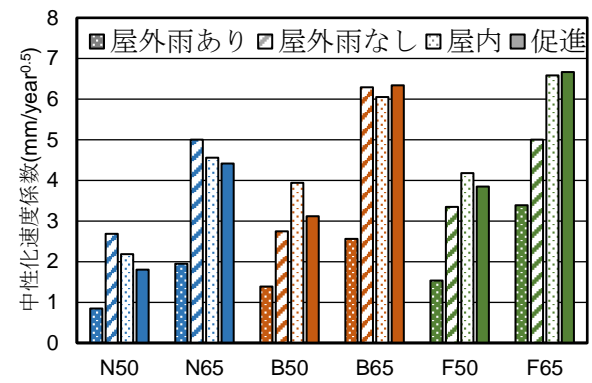


図-6 中性化速度係数のセメント種類別比較

### 3.2 実環境と促進環境における中性化速度係数の比較

実環境と促進環境における中性化速度の比較により、両者の関係性を明らかにすることで、環境条件の違いやセメントの種類による違いを評価することが可能となる。また、促進試験から実環境における中性化速度を予測することもできる。

図-6 に各環境における中性化速度係数のセメント種類別の比較を示す。促進試験における中性化速度係数（単位：mm/week<sup>0.5</sup>）から実環境での中性化速度係数（単位：mm/year<sup>0.5</sup>）への換算は、魚本らの研究<sup>5)</sup>を参考にし、屋内外の二酸化炭素濃度を 400ppm（0.04%）として、(2)式および(3)式により換算した。

$$K^*_c = (2.804 - 0.847 \log C) \sqrt{C} \quad (2)$$

$$A_t = A_a \cdot \frac{K^*_c}{K^*_{0.04}} \cdot \sqrt{\frac{7}{365}} = 0.859 \cdot A_a \quad (3)$$

ここで、

$K^*_c$  : CO<sub>2</sub>濃度  $C$  のときの係数

$C$  : CO<sub>2</sub>濃度(%)

$A_t$  : 換算後の中性化速度係数(mm/year<sup>0.5</sup>)

$A_a$  : 促進試験による中性化速度係数(mm/week<sup>0.5</sup>)

実環境（屋外雨あり、屋外雨なし、屋内）と促進環境の中性化速度係数を比較すると、セメントの種類に関わらず、屋外雨あり環境では促進環境の半分以下の中性化速度係数となっていることが分かる。一方で屋外雨なし、

屋内では促進環境とおおむね同程度か若干小さい値となっている。

図-7～図-9 にそれぞれ N, B, F の実環境と促進環境における中性化速度係数の比較を示す。図中において「屋外雨あり・屋外雨なし」は、「雨あり・雨なし」と表記し、各環境におけるこれらの関係を、原点を通る一次式で回帰した場合の直線を示す。したがって、この回帰直線の傾きが中性化速度の比を表している。なお、黒の実線は、実環境と促進環境における中性化速度係数が一致すると仮定した場合を表した直線である。また、実環境の促進環境に対する比をまとめたものを表-4 に示す。

雨水などによる水分の影響を受けることで中性化の進行が抑制される屋外雨あり環境では、セメント種類に関わらず促進環境に対しておよそ 4～5 割程度まで抑えられている。Nセメントと比較して B や Fセメントの方が屋外環境でより中性化の進行が抑制されるような傾向は確認されない。

また、屋外雨なし環境では雨水の影響がなくなることによって N では促進環境の 1.1 倍程度の中性化速度となる。他のセメントでは B で 1.0 倍と同程度、F では 0.8 倍程度に小さくなる。暴露試験を行った茨城県つくば市の 10 年間の平均気温は 14.6℃、平均湿度は 73.7%RH であり、これらから判断すると、20℃・60%RH の恒温恒湿環境である促進試験と比較して中性化速度は小さくなることが予

想される。しかし、Nセメントにおいてはその傾向は確認されず、雨水の有無が中性化の進行に対して大きく影響することが分かる。また、実環境と促進試験の換算が必ずしも一致していない可能性も考えられる。さらに、BやFについて、屋外雨なし環境においてNよりも比率が小さくなっているのは、促進試験では水和水が十分に進んでいない材齢56日の段階で試験を開始することによって、長期の実環境の試験と比較して促進試験の結果が大きくなってしまふことがその理由の一つとして考えられる。なお、湿度変動によるコンクリートへの水分（湿気）の供給でも水和水も進行することが推察される。

屋内環境ではセメントの種類に関わらず、促進試験との比は1.0倍程度となっているが、NとB、Fとで屋外雨なし環境との相対的な大小関係が異なっている。このことから、BおよびFでは屋外雨なし環境でも緩やかながら水和水が進行することが示唆される。また、屋内環境では、促進環境と温湿度の条件は同一であるが、水和水の進行による緻密化と長期の乾燥による含水率低下の要因が作用し、結果的に同程度の中性化の進行になったものと考えられる。

### 3.3 水セメント比と中性化速度係数の関係

図-10、図-11に各環境におけるW/Cと中性化速度係数の関係を示す。図-10はNのみの図であり、また、図中には各環境においてこれらの関係を、一次式で回帰した場合の直線を示す。したがって、回帰直線の傾きがW/Cに対する感度を表している。さらに、図-11には図-10で示したNの直線に対してBやFがどのような関係にあるかを示した。

図-10よりW/Cと中性化速度係数の関係は各環境において概ね比例関係で表されることが分かる。これは、後述する岸谷式などの既往の中性化速度式と同様である。しかしながら、その傾きは環境ごとに異なり、特に、屋外雨あり環境で6.5と非常に小さい。一方で、屋外雨なしは14.2、屋内では18.0、促進環境では16.6と屋外雨ありより大きい傾きとなっていることが分かる。このことは、屋内や雨掛かりのない環境のように乾燥した環境の方が水セメント比の影響をより強く受けることを示している。

図-11を見ると、BやFはNに比べて全体的に中性化速度係数が大きい結果となった。W/Cが2水準であったため、ここでは関係式は示さなかったが、概ねNと同様に比例関係にあると考えられる。

図-12、図-13はそれぞれNとB、FのW/Cと中性化速度係数の関係を既往の関係式と比較したものである。図中に実線および二重線で示した直線が(4)式および(5)式に示す岸谷式<sup>2)</sup>、破線および点線で示した直線が(6)式に示す和泉式<sup>3)</sup>による中性化速度係数である。

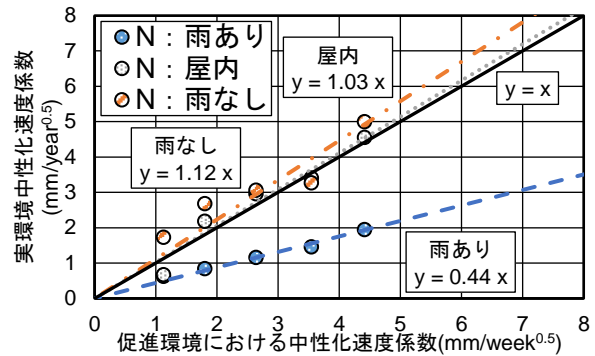


図-7 実環境と促進環境の比較 (N)

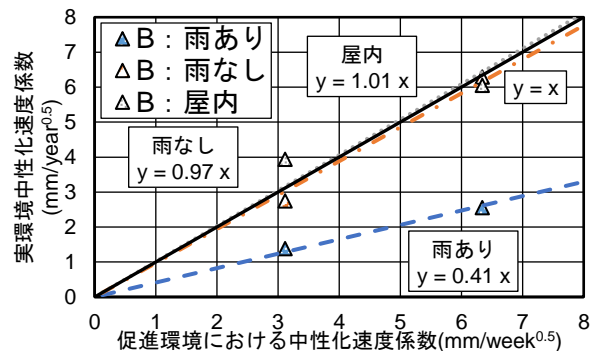


図-8 実環境と促進環境の比較 (B)

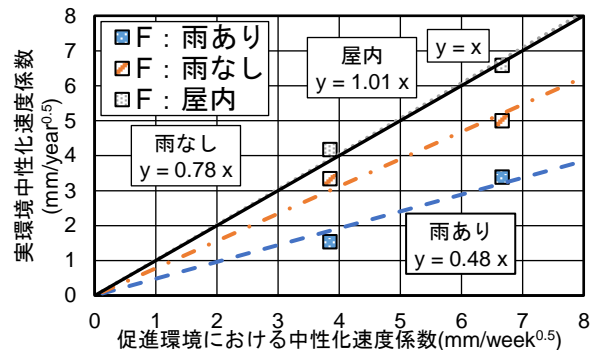


図-9 実環境と促進環境の比較 (F)

表-4 促進環境に対する実環境の中性化速度係数比

セメント種類	屋外雨あり	屋外雨なし	屋内
N	0.44	1.12	1.03
B	0.41	0.97	1.01
F	0.48	0.78	1.01

$$A = \frac{10 \cdot R(4.6 \cdot W/C - 1.76)}{\sqrt{7.2}} \quad (W/C \leq 0.60) \quad (4)$$

$$A = \frac{10 \cdot R(W/C - 0.25)}{\sqrt{0.3(1.15 + 3 \cdot W/C)}} \quad (W/C \geq 0.60) \quad (5)$$

$$A = 35.4 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot R_6 \quad (6)$$

ここで、

$A$  : 中性化速度係数 (mm/year<sup>0.5</sup>)

$R$  : 中性化比率 (N : 1.0, B : 2.2, F : 1.9)

$R_l$  : セメント種類および W/C の影響係数

$$(N : e^{3.34 \frac{W}{C} - 2.004}, B : 1.586e^{2.69 \frac{W}{C} - 2.004})$$

$R_2$  : セメント種類および湿潤養生の影響係数

$$(N : 2.60 \cdot M^{-0.175}, B : 2.90 \cdot M^{-0.115})$$

$M$  は湿潤養生期間の積算温度で  $20 \times 28D \cdot D$

$R_3$  : CO<sub>2</sub> 濃度の影響係数 (屋内外ともに 0.1)

$R_4$  : 温度の影響係数 ( $R_4 = 0.017 \cdot T + 0.48$ )

屋内 :  $T=20.0$ , 屋外 :  $T=14.6$ )

$R_5$  : 湿度の影響係数

$$(R_5 = H(100 - H)(140 - H)/192000)$$

屋内 :  $H=60.0$ , 屋外 :  $H=73.7$ )

$R_6$  : 仕上げの影響係数 ( $R_6=1.0$ )

図-12 を見ると、N において屋外雨なし、屋内の結果が岸谷式と非常に近い結果となった。また、屋外雨ありの結果は和泉式(屋外)と近い結果となった。図-13 における B および F の場合は、どちらの式に対しても相関は低く、特に W/C が大きい試験体で大きな差が生じていた。以上の結果から、N においては屋外雨あり環境では和泉式(屋外)が、屋外雨なし、屋内環境では岸谷式が W/C と中性化速度係数の関係性を非常によく表していると言える。和泉式は、実構造物の実態調査の結果から得られた式であり、より実環境を再現したものとして、また岸谷式は安全側の評価を得るための式として捉えることができる。

### 3.4 材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係

長谷川らの研究<sup>4)</sup>では、材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係を(7)式として提案している。

$$A = a \left( \frac{1}{\sqrt{f}} - b \right) \quad (7)$$

ここで、

$A$  : 中性化速度係数 (mm/year<sup>0.5</sup>)

$f$  : 標準養生供試体の 28 日圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$a, b$  : 定数 (屋外 :  $a=23.8, b=0.13$ )

本研究では基本的な式の次数は長谷川式に従い、実験結果から最小二乗法を用いて、環境区分ごとに定数  $a, b$  を求めた。その結果を表-5 にまとめ、図-14、図-15 にそれぞれ N の標準養生および封緘養生における材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係式を示した。また、図-16 には図-14 に示した N の関係式に対して B や F がどのような関係にあるかを示した。さらに表-5 に N 各環境における  $a, b$  の値をまとめた。

これらを長谷川式と比較すると、標準養生と封緘養生どちらの場合においても屋外あり環境において非常に近

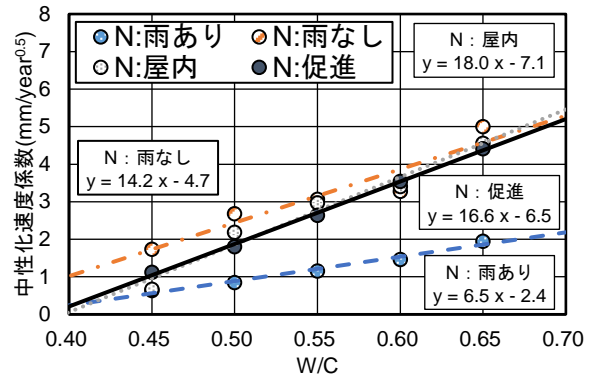


図-10 W/C と中性化速度係数の関係 (N)

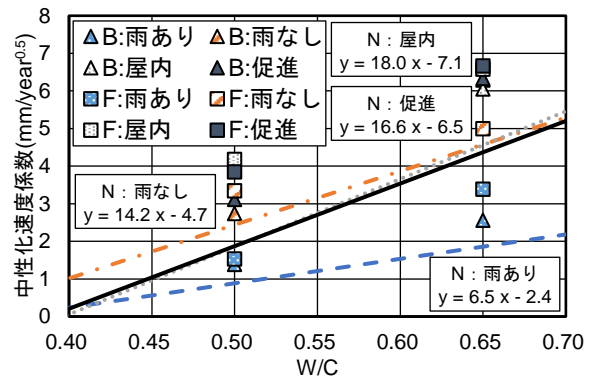


図-11 W/C と中性化速度係数の関係 (B, F の N 直線との比較)

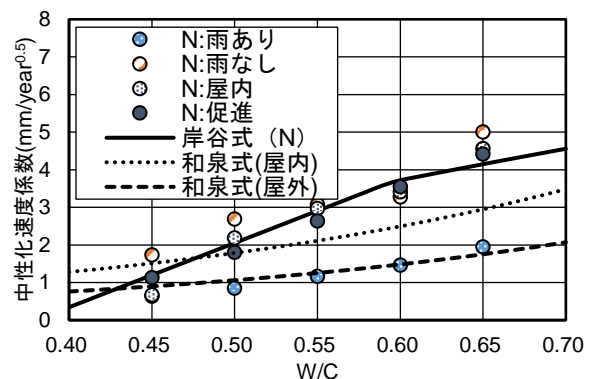


図-12 既往式との比較 (N)

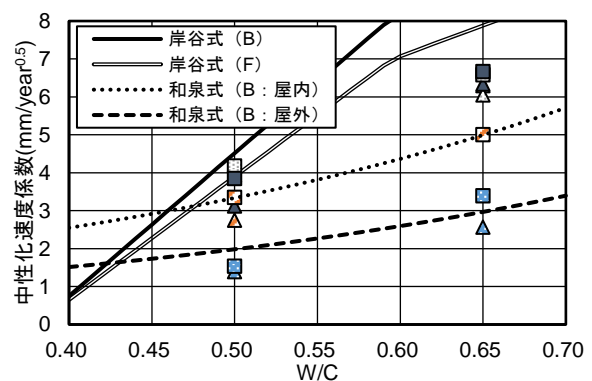


図-13 既往式との比較 (B, F)

い関係となっている。したがって、長谷川式は屋外雨あり環境における中性化速度係数を再現していると言える。屋外雨なし、屋内環境はともに非常に近い関係となっており、特に強度が小さくなるにつれて屋外雨あり環境と比較して中性化速度が大きくなるのが分かる。Nにおいて環境要因を区分して圧縮強度と中性化抵抗性の関係を考える場合には、特に屋内や雨掛りのない屋外における低強度側に対する配慮が必要であると言える。

また、B および F と N で得られた結果の関係を見ると、圧縮強度 20N/mm<sup>2</sup> 付近では B は N 曲線とほぼ同程度の関係にあり、F も N より低い中性化速度係数となっている。一方で 30N/mm<sup>2</sup> 付近では、屋外環境では N と同等であるものの、屋内環境においてどちらも N よりも大きくなる。したがって、強度との関係から考えた場合には、屋内における B や F は、30N/mm<sup>2</sup> 程度の一般的な強度範囲において N よりも中性化速度が大きくなるのが推測される。

表-5 各環境における定数 a, b の値 (N)

養生方法	屋外雨あり		屋外雨なし		屋内	
	a	b	a	b	a	b
標準	32.69	-0.14	72.06	-0.13	89.69	-0.15
封緘	33.12	-0.14	72.74	-0.13	92.2	-0.14

#### 4. 結論

- (1) 環境区分およびセメント種類ごとの中性化速度係数を示した。また、促進環境に対する実環境の換算値は各環境によって異なり、屋外雨あり環境で 0.4~0.5 倍、屋外雨なしおよび屋内環境で 0.9~1.1 倍程度であり、その比は N, B, F の順で小さくなった。B および F の方が促進試験結果に対して実環境における中性化速度が小さい。
- (2) N について、環境区分ごとに W/C と中性化速度係数の関係を示した。また、B および F についても相対的な関係を示した。既往の中性化予測式との関係については、屋外雨なし、屋内環境が岸谷式と、屋外雨あり環境が和泉式と近い結果となった。
- (3) 長谷川式に則り、環境区分ごとに材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係を示した。屋外雨あり環境では長谷川式とほぼ同程度の定数となったが、屋外雨なし、屋内環境では比較的大きい定数であった。

#### 謝辞

本研究を実施するにあたり、芝浦工業大学大学院生曾我裕希さんの協力を得た。記してここに謝意を表します。

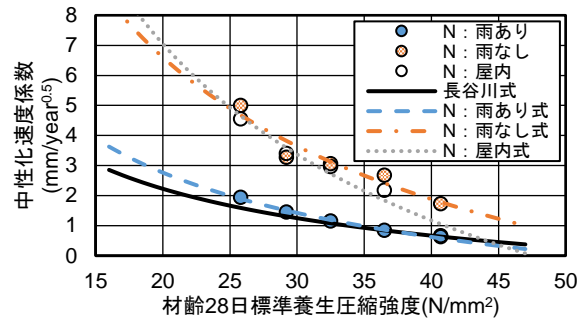


図-14 材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数 (N, 標準)

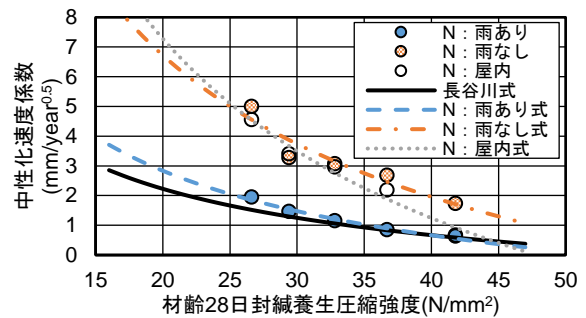


図-15 材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数 (N, 封緘)

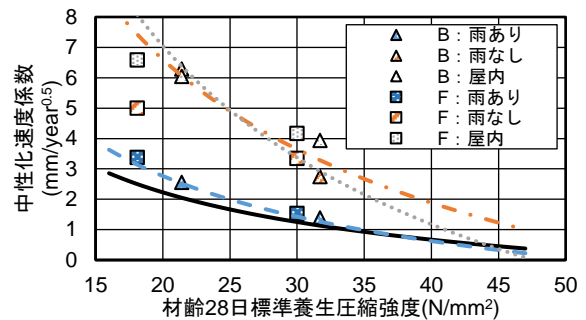


図-16 材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数 (B, F の N 曲線との比較・標準)

#### 参考文献

- 1) 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，2018.7
- 2) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島出版社，1963.2
- 3) 和泉意登志：コンクリートの中性化速度に基づく鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計手法に関する研究，大阪大学学位論文，1991.12
- 4) 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，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.665-670, 2006.7
- 5) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす影響，土木学会論文集，No.451, V-17, pp. 119-128, 1992.8