

論文 蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの中性化抵抗性に関する研究

中山 大誠*1・佐々木 謙二*2・原田 哲夫*3

要旨: 本研究では蒸気養生コンクリートを屋内乾燥環境下および屋外環境下に暴露した試験体を用いて、材齢 4.5~7 年経過後の中性化に及ぼす結合材種類や水結合材比の影響について検討した。その結果、材齢初期には蒸気養生条件による圧縮強度への影響は見られるが、長期的には蒸気養生条件の影響はさほど見られず、材齢 14 日以降は強度増進があまりないことが確認された。また、屋外暴露試験体においては水結合材比によらず、中性化速度係数は小さくなるが、屋内暴露試験体は、水結合材比が 40%程度より大きくなると、中性化速度係数は著しく大きくなることが確認された。

キーワード: 蒸気養生, 中性化, 実環境暴露, 高炉スラグ微粉末

1. はじめに

コンクリートの各種性能は、材料や配合のみならず、施工の良し悪し、養生条件、暴露条件などの影響を大きく受ける。その点を考慮すると、現場打ちのコンクリートよりも工場で製造されるプレキャストコンクリート (PCa) 製品の方が品質が安定しており、施工の面においても工期短縮や省力化が可能である。それにもかかわらず、PCa 製品の利用は拡大されていない。現在の社会状況 (構造物の長期利用のための高耐久・高品質化、環境負荷抑制、副産資源の活用、熟練労働者の不足) を考慮すると、今後 PCa 製品が社会状況を改善する方法として利用される機会は多いと考えられる¹⁾。

著者らは、PCa 製品の高品質化、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産資源の有効利用が広がりつつある現状を踏まえ、各種結合材と養生条件の組合せがコンクリートの材料特性に及ぼす影響について検討を行っている。これまで、蒸気養生コンクリートの材齢 1 年程度までの力学的特性²⁾、収縮特性³⁾、物質移動抵抗性⁴⁾についての検討を行ってきたが、長期材齢における中性化については検討を行ってこなかった。また蒸気養生コン

クリートの中性化に関する既往の検討は、促進中性化試験による検討^{5) 6)}がほとんどで、実環境下における蒸気養生コンクリートの中性化に関する検討を行ったものはほとんど見当たらない。

そこで本研究では蒸気養生コンクリートを屋内乾燥環境下および屋外環境下に暴露した試験体を用いて、材齢 4.5~7 年経過後の中性化に及ぼす結合材種類や水結合材比の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。実験に用いた結合材は、普通ポルトランドセメント[N], N と高炉スラグ微粉末 6000 の混合系(65% : 35%)[NB]の 2 種類とした。細骨材は海砂、粗骨材は砕石を用いた。なお、高炉スラグ微粉末 6000 の化学成分は、SiO₂ : 33.07%, Al₂O₃ : 13.90%, FeO : 0.32%, CaO : 43.35%, MgO : 5.12%, SO₃ : 2.99%, Na₂O : 0.26%, K₂O : 0.37%である。混和剤として PCa 製品を想定した Non-AE コンクリートでは高性能減水剤を、現場打ちコン

表-1 使用材料

項目	種類	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (N)	密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3240cm ² /g
混和材 (SCM)	高炉スラグ微粉末 (BFS)	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 5920cm ² /g
細骨材 (S)	海砂	密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.87%, 粗粒率 2.47
粗骨材 (G)	砕石 (安山岩)	密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 0.69%, 粗粒率 6.66
混和剤 (AD)	高性能減水剤	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	AE 減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体
	AE 剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

*1 長崎大学 大学院工学研究科総合工学専攻 (学生会員)

*2 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門准教授 博(工) (正会員)

*3 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門教授 工博 (正会員)

表-2 配合

配合記号	結合材種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
				水 W	セメント C	混和材 SCM	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD
N30	N	30	40	165	550	—	738	972	2.75 ^{*1}
N35		35	37		471	—	613	1175	1.41 ^{*1}
N40		40			413	—	648	1189	0.83 ^{*1}
N45		45			367	—	680	1195	0.37 ^{*1}
NB3035	30	40			358	193	732	964	2.75 ^{*1}
NB3535	N+BFS	35	37		306	165	609	1168	1.41 ^{*1}
NB4035		40			268	145	644	1183	0.83 ^{*1}
NB4535		45			239	128	676	1190	0.37 ^{*1}
N55		N			55	40	300	—	711
NB55	N+BFS	195	105				709	1167	3.00 ^{*2} /0.06 ^{*3}

※*1 高性能減水剤 *2 AE減水剤 *3AE剤

表-3 養生条件

養生条件記号	養生方法	前置時間(h)	昇温速度(°C/h)	最高温度(°C)	最高温度保持時間(h)	降温速度(°C/h)	後養生方法(材齢1日以降)
【A-D】	蒸気養生	3	20	65	4	4.5	気中養生 (20°C, R.H.60%)
【C-D】						急冷	
【E-D】						4.5	水中養生 (20°C, 材齢7日まで) →気中養生 (20°C, R.H.60%)
【A-W7】				65			
【S3】	封緘養生 (20°C, 24h)						水中養生 (20°C, 材齢3日まで) →気中養生 (20°C, R.H.60%)
【S7】	封緘養生 (20°C, 24h)						水中養生 (20°C, 材齢7日まで) →気中養生 (20°C, R.H.60%)
【S28】	封緘養生 (20°C, 24h)						水中養生 (20°C)

クリートを想定したAEコンクリートではAE減水剤およびAE剤を用いた。

(2) 配合

表-2にコンクリートの配合を示す。PCa製品を想定したNon-AEコンクリートでは水結合材比を30, 35, 40, 45%と変化させ、目標空気量2.0%とした。現場打ちコンクリートを想定したAEコンクリートでは水結合材比を55%とし、目標空気量4.5%とした。いずれにおいても単体水量は165kg/m³一定とし、目標スランプ8cmとなるよう適宜混和剤の添加量を調整した。

2.2 養生条件

表-3に養生条件を示す。蒸気養生条件は、最高温度、降温速度、後養生方法を変化させた。前置時間は3時間、昇温速度は20°C/h、最高温度は65°Cまたは40°C、降温速

度は4.5°C/h(徐冷)または急冷、後養生方法は気中養生(気温20°C、湿度60%)または水中養生(20°C)とした。なお本研究では、恒温恒湿槽(湿度90~95%)において所定の温度履歴を与えることにより蒸気養生を模擬した。また供試体からの水分逸散を防ぐために、供試体をビニールで密封した状態で温度履歴を与えた。急冷は、最高温度保持時間終了後に供試体を20°Cの恒温室に移動させることにより行った。

すべての養生条件において、練混ぜから22~24時間後に脱型を行い、所定の後養生を行った。後養生方法は気中養生、蒸気養生後の降雨などによる水分供給の影響を検討するために常に水分が供給される水中養生とした。

なお、本研究では試験体名を「配合記号【養生条件記号】」で表す。

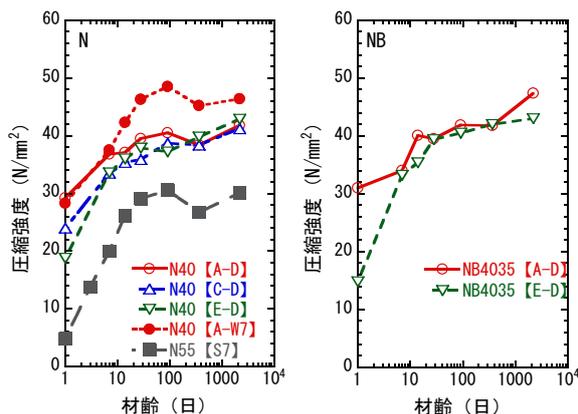


図-1 圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件の影響

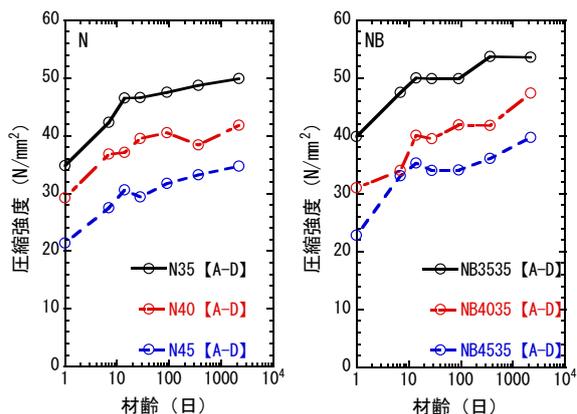


図-2 圧縮強度の経時変化

2.3 実験項目

(1) 圧縮強度

圧縮強度は、JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従い測定した。供試体の寸法は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ とした。材齢 1, 7, 14, 28, 91, 1 年, 5.8~7.1 年において試験を実施した。

(2) 屋内環境下暴露試験体の中性化深さ

$\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体で温度 20°C 、湿度 $60\% \pm 20\%$ の気中養生を継続実施した試験体を対象とした。5.8~7.1 年経過後、端面から 50mm で切断し、フェノールフタレイン溶液を噴霧後、中性化深さを測定した。

(3) 屋外暴露試験体の中性化深さ

$100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の供試体を材齢 28 日において 4 面をエポキシ樹脂でコーティングし、長崎大学構内の降雨を受ける環境(アメダス長崎⁷⁾2013~2017 年(暴露期間)の平均値：平均気温 17.4°C 、平均湿度 72.8%、積算降水量 2056.1mm)に暴露した。4 年または 4.5 年経過後、端面から 50mm で割裂し、中性化深さを測定した。結合材 N, NB のみを対象として検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-1 に屋内に暴露した供試体の圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件の影響を示す。【A-D】、【C-D】および【E-D】の圧縮強度はいずれの結合材においても材齢初期には蒸気養生条件により強度に差が見られたが、材齢 14 日からほぼ同程度となっており、長期材齢でも同程度であることが確認された。【A-W7】と【A-D】の圧縮強度を比較すると、材齢 7 日までは同程度であるが、材齢 14 日からは【A-W7】の方が大きくなっている。材齢 91 日からは、強度増進は見られなかったものの、材齢 5.8~6.0 年時の圧縮強度は、蒸気養生後に気中養生を行ったものよりも大きくなった。いずれの養生条件においても、長期的な

強度増進は見られなかったものの、蒸気養生後に水分供給を行えば長期材齢における最も圧縮強度が大きくなることが分かった。

図-2 に養生条件【A-D】の試験体の材齢 5.8 年までの圧縮強度の経時変化を示す。いずれの結合材種類、水結合材比においても材齢 14 日以降の強度増進は小さく、材齢 14 日以降の強度増加率は 10% 程度であった。N と NB において、同水結合材比で比較すると、いずれの水結合材比、材齢においても、NB の方が強度は大きくなっている。これは高炉スラグ微粉末 6000 の反応性が良く、初期強度も長期強度も大きくなったと考えられる。

3.2 中性化

(1) 屋内環境下

図-3 に屋内で材齢 5.8 年~7.1 年暴露した試験体の水結合材比と中性化速度係数の関係を示す。いずれの結合材においても、水結合材比が 35% から 40% にかけての傾きよりも 40% から 45% にかけての傾きの方が著しく大きくなっている。また、N と NB を比較すると、傾きは N よりも NB の方が大きくなっている。結合材に NB を用いて、水結合材比が 40% 程度を超える場合には、中性化が著しく進む恐れがあるので、注意を要すると言える。

図-4 に屋内で材齢 5.8 年~7.1 年暴露した試験体の中性化速度係数と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係を示す。圧縮強度は材齢 14 日の強度を用いた。なお、材齢 7, 28, 91, 365 日の圧縮強度と中性化速度係数の関係も図-4 の材齢 14 日強度とほぼ同様の傾向となったので、ここでは PCa 製品の一般的な圧縮強度管理材齢である 14 日強度の結果を示す。圧縮強度が 40N/mm^2 よりも大きくなると、中性化速度係数は小さくなっている。一方で、圧縮強度が 40N/mm^2 よりも小さくなると、中性化速度係数は急激に大きくなっている。圧縮強度 40N/mm^2 を境に中性化速度係数の挙動が変化することがわかる。また、圧縮強度の平方根の逆数とは直線的な関

係になっており、いずれにおいても促進環境下におかれた暴露された試験体⁵⁾と同様の傾向となった。

図-5に材齢28日の試験体の暴露期間91日までの水分逸散量⁴⁾と材齢5.8~7.1年時の中性化速度係数の関係を示す。なお、水分逸散量は材齢28日において、1面解放の試験体を飽水状態とし、気温20℃、R.H.60%の環境に暴露し、経時的に質量減少量を測定することにより求めた。いずれの結合材においても、35【A-D】と40【A-D】を比較すると、水分逸散量は40【A-D】の方が大きくなっているものの、中性化速度係数はほぼ同程度となっている。一方で、45【A-D】は40【A-D】と比較して、水分逸散量も中性化速度係数も大きくなった。このことにより、45【A-D】の場合には、水結合材比が大きく、水分が逸散しやすいことにより、CO₂の内部への侵入がしやすかったからと考えられる。また、NとNBを比較して、NBの方が水分逸散量は小さいものの、中性化速度係数は同程度または大きくなった。これは、NBの方は混和材の水和反応により緻密化したことで水分逸散量は小さくなったものの、アルカリを消費したため、中性化速度係数は大きくなってしまったと考えられる。

(2) 屋外環境下

図-6に屋外で4.0年または4.5年暴露した試験体の水結合材比と中性化速度係数の関係を示す。水結合材比が30%、35%、40%の場合、いずれの結合材においても中性化速度係数はほぼ0となった。水結合材比が45%の場合には、いずれの結合材においても水結合材比が40%の場合と比較して、中性化速度係数が著しく大きくなった。Nは増加の程度は小さい一方で、NBの方は、増加の程度は大きくなった。水結合材比が40%程度以下の場合には、結合材種類に関わらず、中性化がほぼ進まず、逆に水結合材比が40%程度を超える場合には、使用するコンクリートの結合材種類、水結合材比に応じた中性化速度係数により中性化に関する照査を行う必要がある。

図-7に屋外で4.0年または4.5年暴露した試験体の中性化速度係数と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係を示す。中性化速度係数は圧縮強度が小さくなるにつれて、少し大きくなっているものの、先述の通り、屋内、促進環境下⁵⁾に暴露された試験体と比べて、増加は著しく小さくなった。また、中性化速度係数は圧縮強度の平方根の逆数が大きくなれば、大きくなるが、促進環境下と比較して、増加は小さくなった。

図-8に材齢28日の試験体の暴露期間91日までの水分逸散量と材齢4.0、4.5年時の中性化速度係数の関係を示す。いずれの結合材においても、35【A-D】と40【A-D】の水分逸散量は40【A-D】の方が大きくなっているものの、中性化速度係数は零または零程度となった。45【A-D】においては、Nの方が水分逸散量は大きくなっている

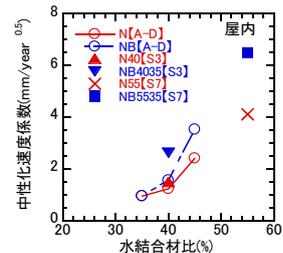


図-3 水結合材比と中性化速度係数（屋内）の関係

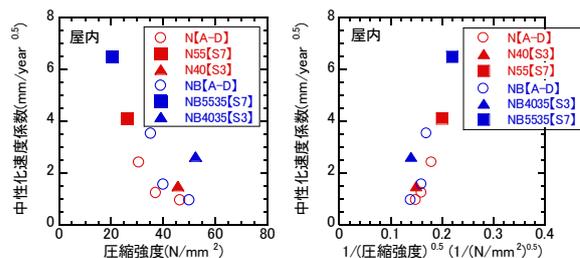


図-4 中性化速度係数（屋内）と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係

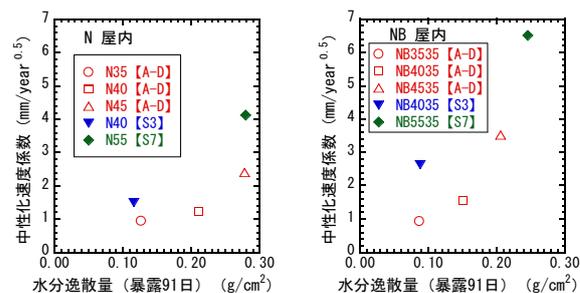


図-5 水分逸散量（暴露期間91日）と中性化速度係数（屋内、材齢5.8~7.1年）の関係

ものの、中性化速度係数の増加は小さく、NBの方は著しく大きくなった。これは、先述の屋内環境下における水分逸散量と中性化速度係数の関係と同様の傾向にある。

(3) 中性化速度係数予測式の提案

日本建築学会“鉄筋コンクリート造建築物の耐久性設計施工指針・同解説”では、二酸化炭素濃度5%の促進中性化試験(JISA 1153:2012)の期間は、屋外の二酸化炭素濃度を0.05%とした場合、100倍に相当するものとしている⁸⁾。このことから、促進中性化試験における中性化速度係数を、屋外実環境における中性化速度係数に換算する場合は、式(1)のようになる。

$$A = A' / \sqrt{100} = A' / 10 \quad (1)$$

ここに、 A ：屋外実環境の中性化速度係数(mm/year^{0.5})

A' ：促進中性化試験の中性化速度係数(mm/year^{0.5})

過去の著者らの文献⁵⁾における促進中性化試験結果を式(1)により換算した（以下、促進換算と呼ぶ）中性化速度係数、屋内で5.8年暴露した試験体の中性化速度係数と水結合材比の関係を図-9a)に示す。促進試験を換算し

た場合には、水結合材比が 30% の中性化速度係数は、N で $0\text{mm/year}^{0.5}$ 、NB で $0.09\text{mm/year}^{0.5}$ であったため、線形評価が可能な範囲外と判断し、回帰式からは除外して直線回帰を行った。屋内暴露試験体の中性化速度係数は、水結合材比が 40% を境に傾向が異なっているため、水結合材比が 40% 以下の場合には (35% と 40%) と 40% 以上の場合 (40% と 45%) とに分けて 2 点を直線で結んだ。また、図-9b) には、先述の屋内暴露試験体に加え、屋外に 4 年または 4.5 年暴露した試験体の中性化速度係数と水結合材比の関係を示す。屋外暴露試験体の水結合材比が 30%、35% の中性化速度係数は、いずれの結合材においても $0\text{mm/year}^{0.5}$ であったため、回帰式から除外し、40% と 45% の 2 点を直線で結んだ。また、図-9 には、土木学会示方書に示される中性化速度係数の予測式⁹⁾も示したが、高炉スラグ微粉末混合系は普通セメント:高炉スラグ微粉末=65:35 として計算を行っている。図-9 の直線回帰式から、促進換算、屋内暴露、屋外暴露における蒸気養生コンクリートの中性化速度係数の α_k の予測式を、以下の式(2)、(3)、(4)、(5)、(6)、(7)、(8)、(9)のように提案する。

促進換算

(a)N の場合

$$\alpha_k = -3.60 + 11.3(W/B) \quad (0.35 \leq W/B \leq 0.45) \quad (2)$$

(b)NB の場合

$$\alpha_k = -6.31 + 18.8(W/B) \quad (0.35 \leq W/B \leq 0.45) \quad (3)$$

屋内暴露

(a)N の場合

$$\alpha_k = -1.02 + 5.60(W/B) \quad (0.35 \leq W/B \leq 0.40) \quad (4)$$

$$\alpha_k = -8.22 + 23.6(W/B) \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.45) \quad (5)$$

(b)NB の場合

$$\alpha_k = -3.48 + 12.6(W/B) \quad (0.35 \leq W/B \leq 0.40) \quad (6)$$

$$\alpha_k = -14.0 + 39.0(W/B) \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.45) \quad (7)$$

屋外暴露

(a)N の場合

$$\alpha_k = -2.70 + 6.80(W/B) \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.45) \quad (8)$$

(b)NB の場合

$$\alpha_k = -7.19 + 18.4(W/B) \quad (0.40 \leq W/B \leq 0.45) \quad (9)$$

a)の図において、促進換算式(2)、(3)と屋内の式(4)、(5)、(6)、(7)を比較すると、いずれの結合材においても、水結合材比が 40% より大きくなると、屋内の式の方が傾きが著しく大きくなっている。一方で、水結合材比が 40% より小さくなると、屋内の式の方が傾きが小さくなっている。気温が 20℃、湿度 60% の厳しい乾燥環境に暴露されていても、水結合材比が 40% 程度より小さくすれば、中性化を抑えられると言える。一方で、水結合材比が 40% 程度を超える場合には、中性化が著しく進むので、注意を払う必要があると言える。

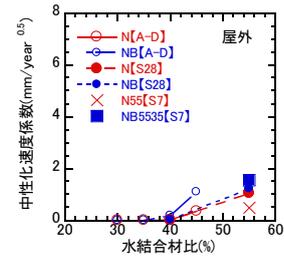


図-6 水結合材比と中性化速度係数 (屋外) の関係

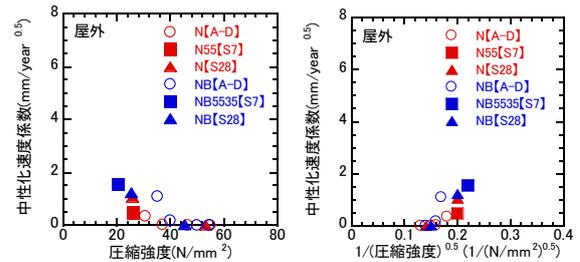


図-7 中性化速度係数 (屋外) と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係

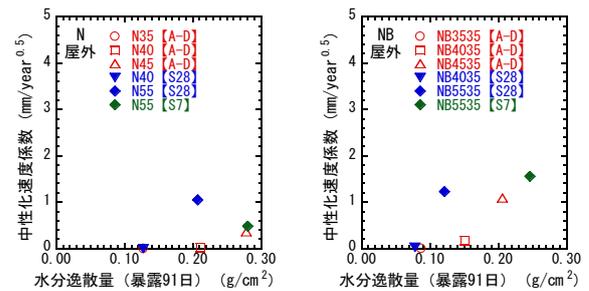


図-8 水分逸散量 (暴露期間 91 日) と中性化速度係数 (屋外、材齢 4.0、4.5 年) の関係

b)の図において、屋内の式(4)、(5)、(6)、(7)と屋外の式(8)、(9)を比較すると、水結合材比が 40% を超えると、いずれの結合材においても、屋外の式の傾きの方が小さくなっており、水結合材比が 40% より小さくなると、中性化速度係数は $0\text{mm/year}^{0.5}$ となった。本研究範囲内の屋外で雨掛かりがある場所では、水結合材比が 40% 程度より小さくすれば、中性化に対する抵抗性が大きいと言える。

屋外環境下の中性化速度係数は、水結合材比が 40% 程度を下回れば、結合材種類によらずほとんど中性化しないという既往の報告^{10)、11)}(標準養生)と概ね同様であった。一方で、屋内環境下では低水結合材比領域の 35% でも中性化しており、前述の既往の報告^{10)、11)}とは異なる結果となった。水結合材比と中性化速度係数の関係の傾きが 40% 程度で変わっており、これまでほとんど報告されていない挙動である。これは、蒸気養生直後に、早期から厳しい乾燥環境下に暴露していたことが影響したと考えられる。今回、提案した予測式は、限られたデータから導き出されたものであり、今後、材料、配合、養生条

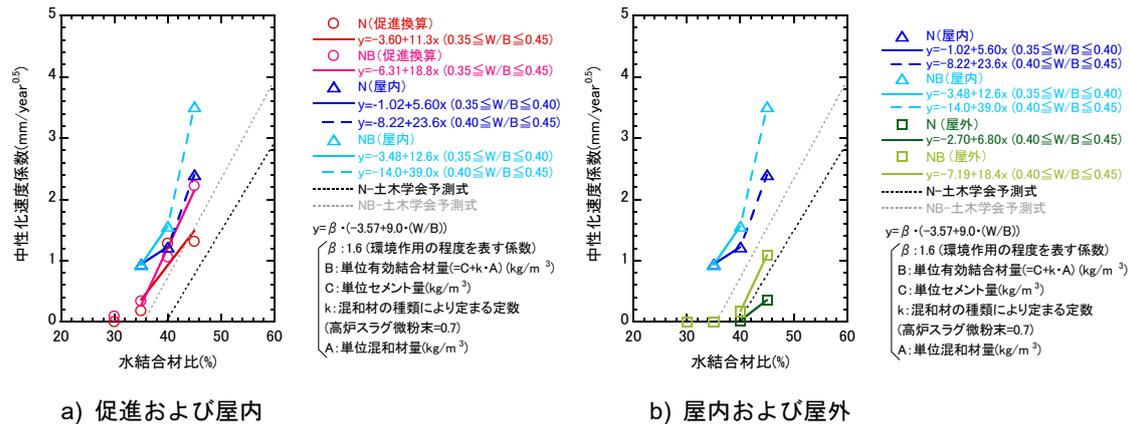


図-9 中性化速度係数予測式

件(蒸気養生パターン、後養生方法)、暴露環境の異なる暴露試験体や実構造物によるデータ蓄積とそれに基づく中性化速度係数予測式の精度向上が望まれる。

(4) かぶりの推定

プレキャスト製品のかぶりを 30mm として、中性化残りを 10mm、設計耐用期間 100 年として設計した場合は、中性化速度係数が $2.0\text{mm}/\text{year}^{0.5}$ より小さくしなければ中性化に対する照査を満足しない。本研究範囲内においては、屋外暴露試験体は、いずれの結合材種類及び水結合材比においても、かぶりを小さくしても問題ないと言える。しかし、屋内暴露試験体は、水結合材比が 40% 程度より小さくなれば、かぶりを小さくしても問題ないが、45% 程度となった時には、設計耐用年数 100 年を満足させることができないため、かぶりを大きく設定する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究により、以下のことが明らかとなった。

- 1) 材齢初期には蒸気養生条件による圧縮強度への影響は見られるが、長期的には蒸気養生条件の影響はさほど見られず、材齢 14 日以降は強度増進があまりないことが確認された。
- 2) 屋外暴露試験体においては水結合材比によらず、中性化速度係数は小さくなるが、屋内暴露試験体は、水結合材比が 40% 程度より大きくなると、中性化速度係数は著しく大きくなることが確認された。
- 3) 蒸気養生コンクリートの促進換算、屋内、屋外環境下における中性化速度係数予測式を提案した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書，2009.8
- 2) 佐々木謙二，片山強，原田哲夫，永藤政敏：蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの力学

的性質に及ぼす養生条件と結合材種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.359-364，2011.7

- 3) 佐々木謙二，岡野耕大，片山強，原田哲夫：PCa 製品を想定した温度履歴を与えたコンクリートの収縮性状に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.517-522，2013.7
- 4) 佐々木謙二，岡野耕大，片山強，原田哲夫：蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの水分逸散性状と緻密性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1540-1545，2012.7
- 5) 片山強，佐々木謙二，柏尾和麻，原田哲夫：蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートの促進中性化深さに関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.862-867，2014.7
- 6) 祝井健志，松下博通，近田孝夫，前田悦孝：高炉スラグ微粉末の混和が高強度コンクリートの中性化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.771-776，2004.7
- 7) 気象庁ホームページ：気象統計情報，<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 8) 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・同解説，pp.53-59，pp.99-126，2016.7
- 9) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，pp.153-156，2018.3
- 10) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会) No.2 報告書，pp.191-234，2010.5
- 11) 陣内浩，並木哲，黒岩秀介，渡邊悟士：高強度コンクリートの長期的な長さ変化と中性化に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.594，pp.9-15，2005.8