

蒸気養生コンクリートの水分浸透特性および 実環境における中性化に関する基礎的検討

鈴木隆雅*・中山大誠*・佐々木謙二**・原田哲夫**

Study on water permeation characteristics and carbonation in real environment of steam-cured concrete

by

Ryuga SUZUKI*, Taisei NAKAYAMA*, Kenji SASAKI** and Tetsuo HARADA**

In this study, the effects of binder type, water binder ratio, and curing conditions on the water permeation rate coefficient of steam-cured concrete and carbonation in real environment were investigated. As a result, it was confirmed that the water permeation rate coefficient decreased when blast furnace slag fine powder was mixed, and that it decreased when the water binder ratio was small. Though the effect of the steam curing condition on the compressive strength was observed in the early stage of the material age, the effect of the steam curing condition was not observed much in the long term, and it was confirmed that the strength improvement was not so much after 14 days of the material age. It was also confirmed that the carbonation rate coefficient decreased in the outdoor exposure test specimen regardless of the water binder ratio, but it increased remarkably in the indoor exposure test specimen when the water binder ratio exceeded 40%.

Key words : steam curing, water permeation rate coefficient, carbonation, blast furnace slag fine powder

1. 研究背景・目的

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、暴露条件の影響を大きく受ける。そのため、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。現在のコンクリート構造物を取り巻く環境（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 製品の利用される機会が多いと考えられる¹⁾。PCa 製品

の製造においては早期脱型のためにコンクリートに蒸気養生などの初期高温履歴が与えられる。この影響が十分に明らかになっていないこともPCa 製品の利用が拡大しない一因と考えられる。

本研究室では、PCa 製品の品質化、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。これまで本研究室では、蒸気養生コンクリートの材齢1年程度までの物質移動抵抗性についての検討を行ってきたが、長期特性については検討が行われていない。

令和元年7月12日受理

* 総合工学専攻（Graduate student, Department of Advanced Engineering）

** システム科学部門（Division of System Science）

Table 1 使用材料

項目	種類	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3240cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 5920cm ² /g
細骨材	海砂	密度 2.56g/cm ³ , 吸水率 1.87%, 粗粒率 2.47
粗骨材	碎石 (安山岩)	密度 2.76g/cm ³ , 吸水率 0.69%, 粗粒率 6.66
混和剤	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

Table 2 示方配合

配合記号	結合材種類	水結合材比 W/B	細骨材率 s/a	単位量 (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

また、コンクリートの中性化が進むと実際には腐食速度が大きくなることが実験等により確かめられている。しかしながら、実構造物における鋼材腐食に着目した過去の調査研究によると、コンクリートの中性化が進んだとしても、鋼材腐食に必要な水と酸素の供給が乏しい場合には、鋼材腐食の進展が見られない、あるいは相当に進展が遅いことが報告されている²⁾³⁾。このことに関連して示方書は、「中性化による鋼材腐食に対する照査」から、「中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食に対する照査」に改訂され、試験方法が制定された⁴⁾。さらに蒸気養生コンクリートの水分浸透速度係数に関するデータは全くなく、蒸気養生が及ぼす影響は明らかでない。

そこで本研究では蒸気養生コンクリートの水分の浸透速度を表す水分浸透速度係数について検討を行った。また、蒸気養生コンクリートの実環境における中性化試験体により、5~7年経過後の物質移動抵抗性に及ぼす結合材種類や養生条件の影響も明らかにした。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 使用材料・配合

Table 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、粗骨材は碎石を用い、混和剤としては高性能減水剤を使用し、Non-AEコンクリートとした。

Table 2 にコンクリートの示方配合を示す。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位水量は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) 養生条件

Table 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℃/h、最高温度は65℃または40℃、

Table 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%)
E-D				40			
D-D		0.5		65		急冷	
S3	封緘養生 (20°C,24h)						水中養生(20°C,3日間) → 気中養生 (20°C,R.H.60%)
S7							水中養生(20°C,6日間) → 気中養生 (20°C,R.H.60%)
S28							水中養生(20°C)



Photo 1 浸透方法

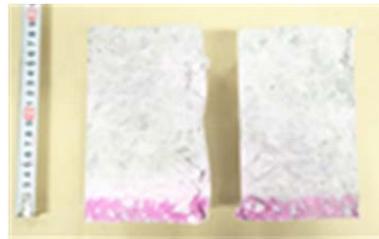


Photo 2 浸透画像

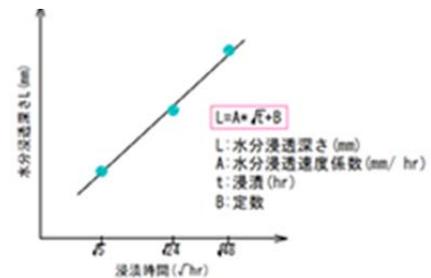


Fig. 1 水分浸透速度係数の算出概要

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 24±0.5 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。

2.2 水分浸透特性

養生が終了した後に, 打込み時の底面側端面から 25mm 部分を切断処理した。その後 40°C の環境で 28 日間乾燥および 20°C の環境で約 5 ヶ月 (試験体により異なり, 実際には 5.2-6 ヶ月) 乾燥させた。その後, Photo 1 のように水に浸漬する面およびその対面以外

の面を防水シールして浸漬した。浸漬開始から 5 時間後, 24 時間後および 48 時間後に Photo 2 のように割裂し, 発像剤を噴霧して発色した部分を水分浸透深さとして求めた。

浸漬期間が 5~48 時間までに得られた水分浸透深さと浸漬時間の平方根を用いて Fig. 1 のような近似直線を求める。この傾き A(水分浸透速度係数)は次式により求める⁴⁾。

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \bar{\sqrt{t}}) \cdot (L_i - \bar{L})}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{t_i} - \bar{\sqrt{t}})^2}$$

A: 水分浸透速度係数 (mm/√hr)

n: データ数

$\sqrt{t_i}$: i 番目のデータの浸漬時間の平方根 (√hr)

$\bar{\sqrt{t}}$: 浸漬時間の平方根の平均値 (√hr)

L_i : i 番目のデータの浸透深さ (mm)

\bar{L} : 浸透深さの平均値 (mm)

2.3 実環境における中性化

(1) 屋内環境下暴露試験体

φ 100×200mm の円柱供試体で温度 20°C, 湿度 60% ±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

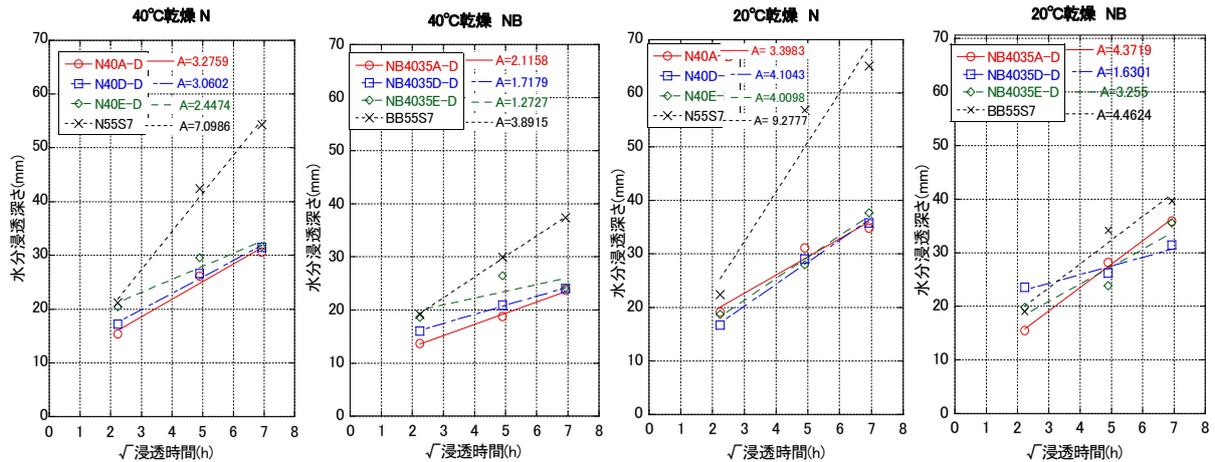


Fig. 2 水分浸透深さと浸透時間の平方根の関係

ルフタレイン噴霧後、中性化深さを測定した。

(2) 屋外環境下暴露試験体

100×100×400mm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、降雨を受ける環境に暴露した。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. 試験結果および考察

3.1 水分浸透特性

Fig. 2に水分浸透深さと浸透時間の平方根の関係よりA=水分浸透速度係数を求めた図を示す。

(1) 40°C28日間乾燥試験体

Fig. 3に水分浸透速度係数の配合条件、蒸気養生条件を比較したグラフを示す。いずれの結合材においても水分浸透速度係数は蒸気養生条件により、異なることが確認された。Fig. 4より、蒸気養生条件の前置き時間と降温速度【A-D】と【D-D】を比較した時は、ほぼ同程度の結果が得られた。これは蒸気養生条件の前置き時間と降温速度は水分浸透速度係数に影響を及ぼさないことが考えられる。これに対し、Fig. 5より、最高温度【A-D】と【E-D】を比較した時は標準的な【A-D】の方が水分浸透速度係数が大きくなることが確認された。これは蒸気養生条件の最高温度を下げることで水分浸透速度係数を抑制したと考えられる。また、配合条件においてNとNBを比較すると、いずれの蒸気養生条件でもNBの方が水分浸透速度係数は小さくなることを確認できる。これはNBの方は混和材の高炉スラグ微粉末により、時間の経過と共に潜在水硬性が進行し、組織が緻密化したことで水分浸透速度係数が小さくなったことが考えられる。また、現場打ちコンクリー

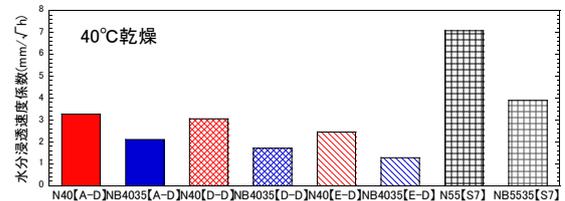


Fig. 3 水分浸透速度係数の配合・蒸気養生条件の比較

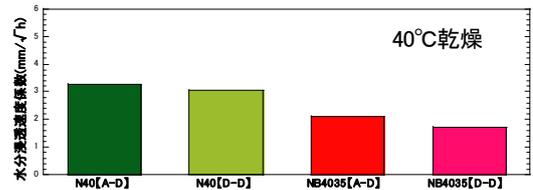


Fig. 4 降温速度の比較

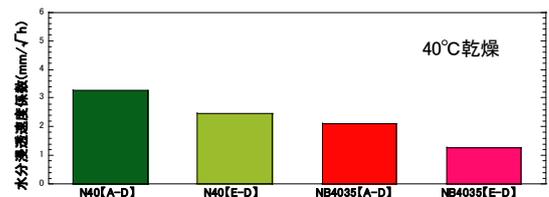


Fig. 5 最高温度の比較

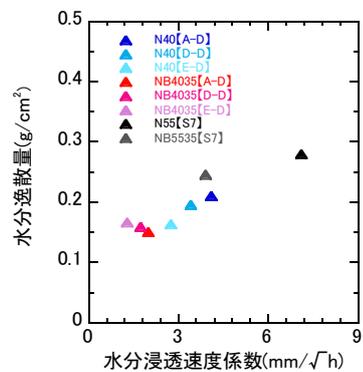


Fig. 6 水分浸透速度係数と水分逸散量の関係

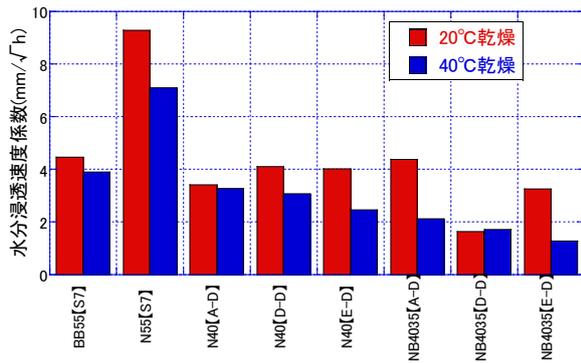


Fig. 7 40°C乾燥と20°C乾燥の水分浸透速度係数の比較

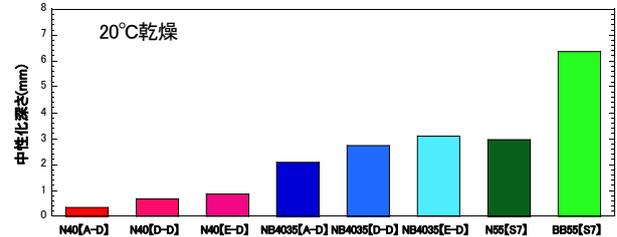


Fig. 8 20°C乾燥試験体の中性化深さ

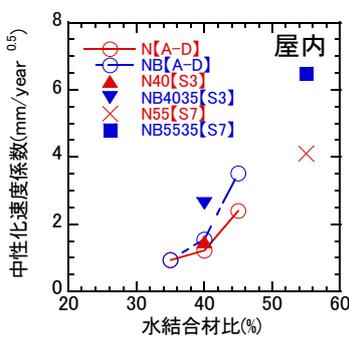


Fig. 9 水結合材比と中性化速度係数の関係

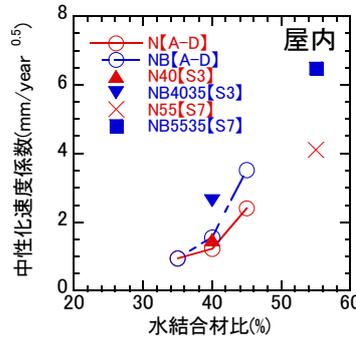


Fig. 10 中性化速度係数と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係

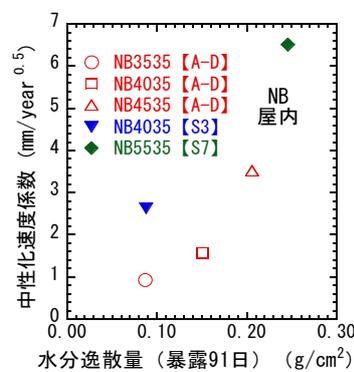
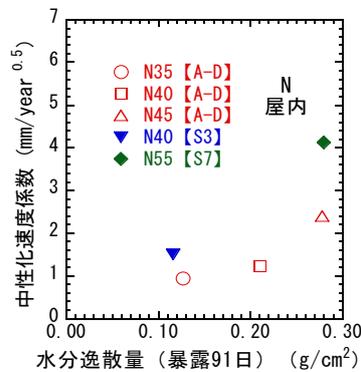
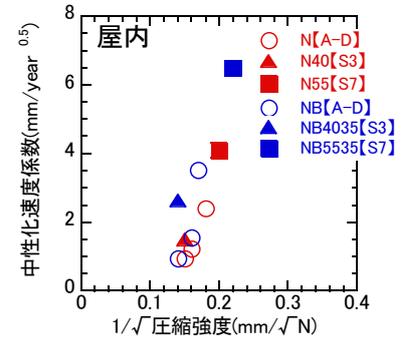


Fig. 11 水分逸散量 (暴露期間 91 日) と中性化速度係数 (材齢 5.8~7.1 年) の関係

トを想定した N55【S7】と BB55【S7】は水結合材比が大きいため水分浸透速度係数が大きくなったと考えられる。

Fig. 6 に水分浸透速度係数と水分逸散量の関係を示す。では水分浸透速度係数が大きくなると水分逸散量も大きくなることを確認できる。これは水分浸透速度係数と水分逸散量は配合条件、蒸気養生条件、水結合材比に関わらず比例関係が成り立つことが考えられる。

(2) 20°C5ヶ月間乾燥試験体

Fig. 7 に 40°C乾燥試験体と 20°C乾燥試験体の水分浸透速度係数を比較したものを示す。NB4035【D-D】を除

いて 20°C乾燥試験体の水分浸透速度係数が大きくなることが確認できる。これは土木学会基準で 40°C28日間乾燥は 20°C3か月間乾燥を想定したものであるため、20°C乾燥の3か月と5-6ヶ月の水分浸透速度係数の比較と同等のものとする。そのため、乾燥期間が大きいが水分浸透速度係数が大きくなったと考えられる。また、NよりNBのほうが水分浸透速度係数の増える割合が大きくなることを確認された。これは5-6ヶ月の乾燥期間に中性化した影響であると考えられる。

Fig. 8 に 20°C乾燥試験体の中性化深さを示す。中性

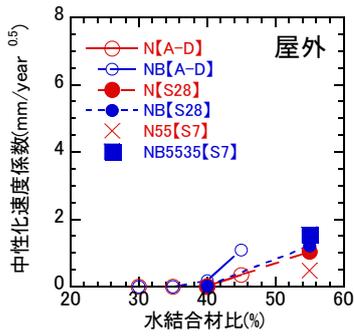


Fig. 12 水結合材比と中性化速度係数の関係

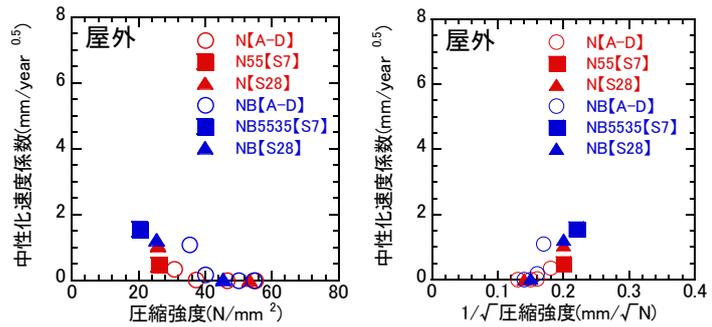


Fig. 13 中性化速度係数と圧縮強度および圧縮強度の平方根の逆数との関係

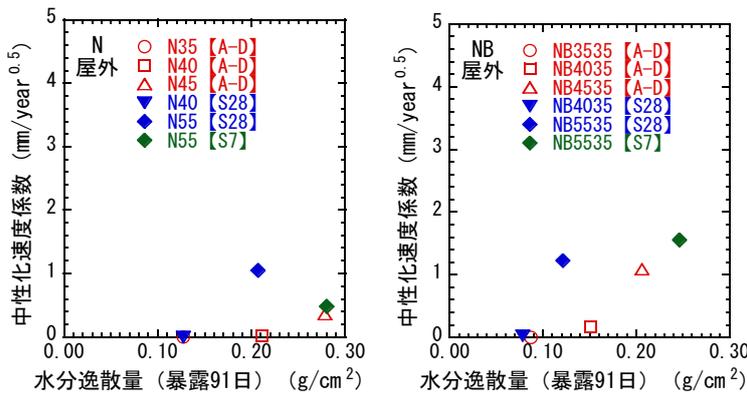


Fig. 14 水分逸散量（暴露期間 91 日）と中性化速度係数（材齢 4.0, 4.5 年）の関係

化すると N は緻密化し、NB は多孔化することから NB の水分浸透速度係数の増える割合が大きくなったと考えられる。

3.2 中性化

(1) 屋内環境下

Fig. 9 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% 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。

Fig. 10 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。なお、圧縮強度は、材齢 14 日の強度を用いた。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と同様の傾向となった。

Fig. 11 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 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°C 、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、 CO_2 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

Fig. 12 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% 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% 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。

Fig. 13 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、前述の通り、屋内、促進環境下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。

Fig. 14 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、前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) 水分浸透と中性化

Fig. 16, 17 に、屋外、屋内中性化速度係数と 40℃ 乾燥の水分浸透速度係数図の関係を示す。屋外、屋内どちらも水結合材比の観点から、相関関係であることが確認された。

4 結論

- (1) 水分浸透速度係数は、結合材種類と蒸気養生条件の両方の影響を受けることが確認された。
- (2) 水分浸透速度係数と水分逸散量の関係には、高い相関があることが確認された。
- (3) 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

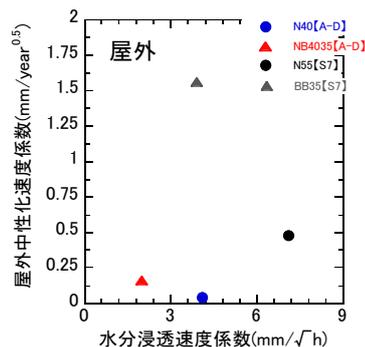


Fig. 15 屋外中性化速度係数と水分浸透速度係数

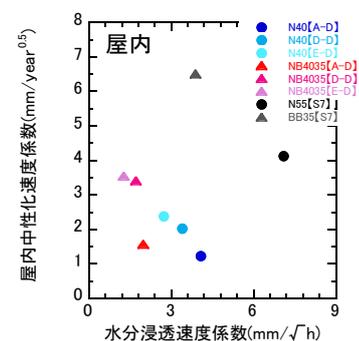


Fig. 16 屋内中性化速度係数と水分浸透速度係数

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。

- (4) 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% 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。
- (5) 水分浸透速度係数と中性化速度係数は、水結合材比に観点から、相関があることが確認された。

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) 上田洋，飯島亨，鈴木浩明：コンクリート構造物への水分浸透の影響を調べる，Railway Research Review, Vol.71, No.6, pp.20-23, 2014.
- 3) 松田芳範：コンクリートの耐久性を定める「水」の制御(1)コンクリート構造物の劣化・損傷に及ぼす水の影響について，コンクリート工学, Vol.51, No.10, pp.814-818, 2013.
- 4) 土木学会：短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案)(JSCE-G 582-2018), 2018