

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水分逸散性状と緻密性評価

佐々木 謙二^{*1}・岡野 耕大^{*2}・片山 強^{*3}・原田 哲夫^{*4}

要旨：本研究では、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートを対象とし、水分逸散性状に及ぼす養生条件と結合材種類の影響を実験的に検討した。その結果、結合材種類と養生条件の組合せにより水分逸散性状が大きく異なることを明らかにした。また蒸気養生後の水分供給が水分逸散性状の観点からも非常に重要であることが確認された。さらに水分逸散性状から算出した水分拡散係数による緻密性評価の結果より、蒸気養生コンクリートの緻密性は同程度の圧縮強度を有する標準養生コンクリートよりも低く、特に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた場合には蒸気養生条件の影響を顕著に受けることが明らかとなった。

キーワード：蒸気養生、水分逸散、緻密性、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ

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⁾。

本研究では、PCa 製品の高品質化、環境負荷抑制、副産資源の有効活用の観点から、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用が広がりつつある現状を踏まえ、各種結合材を用いた蒸気養生コンクリートの水分逸散性状を系統的に把握することを目的に、蒸気養生コンクリートの水分逸散性状に及ぼす養生条件と結合材種類の影

響を実験的に検討した。コンクリートの強度発現性、収縮やクリープの進行のみならず、中性化、鉄筋の発錆、凍結融解作用による劣化、アルカリ骨材反応の進行などの耐久性にも大きく関係しているコンクリート中での水分保持特性、水分移動特性に及ぼす結合材種類と養生条件の影響を評価するために、水分逸散性状に着目して検討を行った。なお、コンクリート中の水分移動現象は透水、吸水、吸湿、乾燥に大別されるが²⁾、本研究では乾燥による水分逸散について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

実験に用いた結合材は、普通ポルトランドセメント[N]、早強ポルトランドセメント[H]、N と高炉スラグ微粉末6000（JIS A 6206）の混合系(65%：35%)[NB]、N とフライアッシュ（JIS A 6201 II種）の混合系(80%：20%)[NF]の4種類とした。細骨材は海砂、粗骨材は砕石を用いた。

表-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
	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ ，比表面積 4520cm 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
	フライアッシュ	密度 2.26g/cm ³ ，比表面積 3960cm 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	砕石（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

*1 長崎大学 大学院工学研究科システム科学部門助教 博（工）（正会員）

*2 長崎大学 大学院工学研究科総合工学専攻（学生会員）

*3 （株）ヤマウ 技術本部開発・設計部（正会員）

*4 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 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
N40	N	40%	37%	165	413	—	648	1189	0.83 ^{*1}
H40	H				413	—	647	1188	1.03 ^{*1}
NB40	NB				268	145	644	1182	0.83 ^{*1}
NF40	NF				330	83	638	1172	0.62 ^{*1}
N55	N	55%	40%		300	—	711	1171	3.00 ^{*2} /0.06 ^{*3}
H55	H				300	—	711	1171	3.00 ^{*2} /0.06 ^{*3}
NB55	NB				195	105	709	1167	3.00 ^{*2} /0.06 ^{*3}
NF55	NF				240	60	704	1159	3.00 ^{*2} /0.48 ^{*4}

※*1 高性能減水剤 *2 AE 減水剤 *3AE 剤 *4 フライアッシュ用 AE 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 (℃/h)	最高温度 保持時間(h)	降温速度 (℃/h)	後養生方法 (材齡 1 日以降)
【A-D】	蒸気養生	3	20	4	4.5	気中養生 (20℃, R.H.60%)
【B-D】		0.5			急冷	
【C-D】		3				
【D-D】		0.5				
【A-W】		3			4.5	水中養生 (20℃)
【S】	標準養生 (20℃水中養生)					

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、現場打ちコンクリートを想定した AE コンクリートでは AE 減水剤を用いた。表-1 に使用材料を示す。コンクリートの練上り温度が全ての場合において 20°C 一定となるように、各材料を恒温室に保管し、一定の温度とした後に練混ぜを行った。

(2) 配合

表-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 40%、細骨材率 37%、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 55%、細骨材率 40%、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。練り混ぜ後、φ100×200mm のブリキ製軽量型枠に打設を行った。

2.2 養生条件

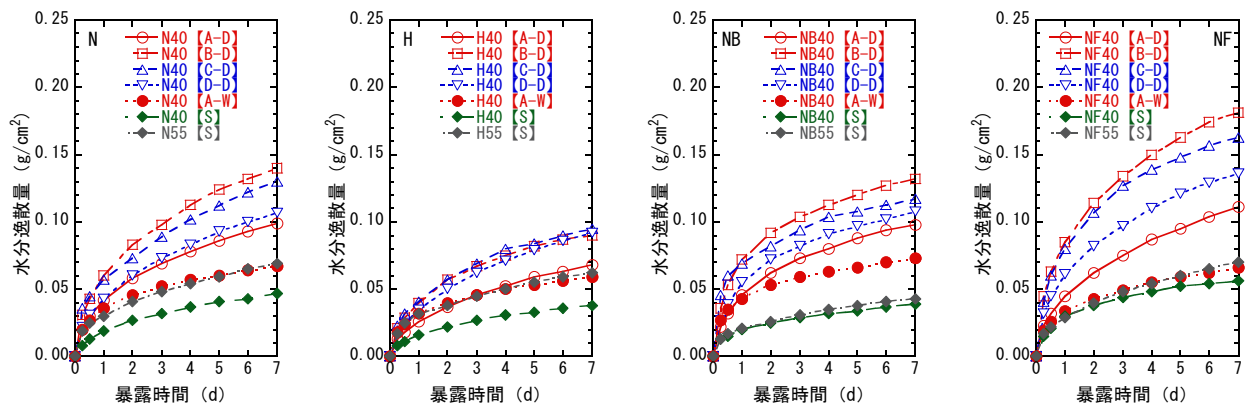
表-3 に養生条件を示す。蒸気養生条件は、前置時間、降温速度、後養生方法を変化させた。前置時間は 3 時間または 30 分、降温速度は 4.5°C/h (徐冷) または急冷、後養生方法は気中養生(気温 20°C, 湿度 60%)または水中養生(20°C) とした。なお本研究では、恒温恒湿槽(湿度

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、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、気中養生と常に水分が供給される水中養生とした。蒸気養生に加えて、標準養生【S】も実施した。

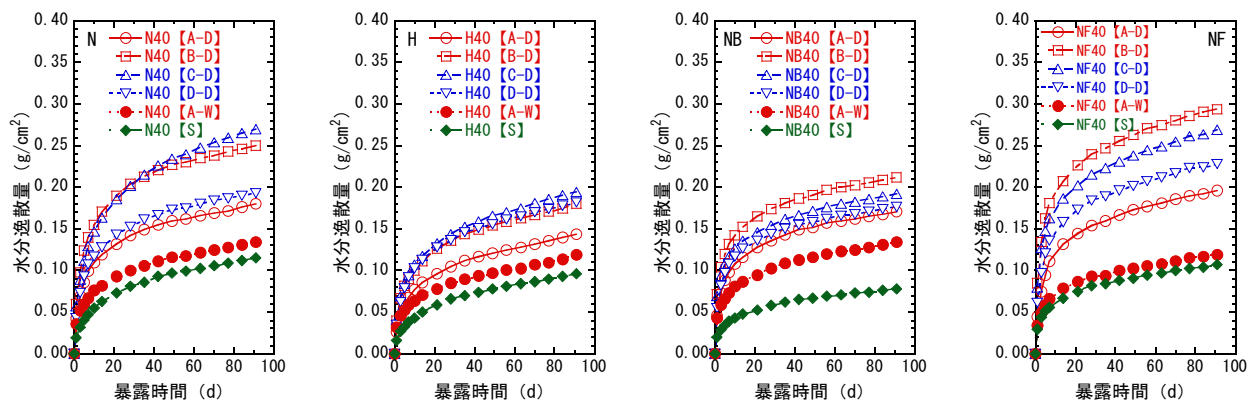
なお、本研究では試験体名を「配合記号【養生条件記号】」で表す。

2.3 水分逸散量測定試験

材齢 28, 365 日に φ100×200mm 円柱の中心部において厚さ 50mm の円盤試験体を切断・採取した。打込み側の円形の 1 面のみを残し、それ以外の部分をエポキシ樹脂によりコーティングした。その後、真空飽和处理を行い、恒温恒湿槽(気温 20°C, 湿度 60%)に暴露し、経時的に水分逸散量を測定した。



図－1 水分逸散量の経時変化（材齢 28 日試験体，暴露期間 7 日）



図－2 水分逸散量の経時変化（材齢 28 日試験体，暴露期間 91 日）

3. 実験結果および考察

3.1 水分逸散性状

図－1 に材齢 28 日の試験体の暴露期間 7 日までの水分逸散量の経時変化を，図－2 に暴露期間 91 日までの水分逸散量の経時変化を結合材別に示す。蒸気養生後に気中養生を行った場合には，いずれの結合材においても後養生を水中養生とした【A-W】に比べて水分逸散量は多く，特に前置時間を 0.5 時間とし徐冷した【B-D】の場合や前置時間を 3 時間とし急冷した【C-D】の場合に水分逸散量が多い。

蒸気養生条件を同一とし，後養生条件を気中養生と水中養生とに変化させた【A-D】の場合と【A-W】の場合とを比較すると，いずれの結合材においても水分供給のある【A-W】の場合に水分逸散量は少なく，水分供給により水分逸散性状を改善できることが分かる。特に NF40 の場合には，標準養生の場合と同程度まで水分逸散量が抑えられており，蒸気養生後の水分供給による品質改善効果が顕著に表れている。

また，蒸気養生後に気中養生を行った試験体と，ほぼ同程度の圧縮強度となる水結合材比 55% で標準養生を行った試験体の水分逸散量を比較すると，いずれの結合材においても蒸気養生を行った場合の水分逸散量が大きくなった。蒸気養生後に水分供給をした場合には，NB40

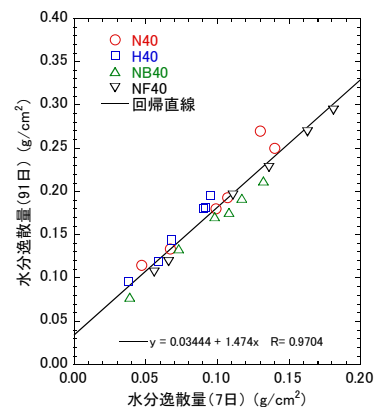
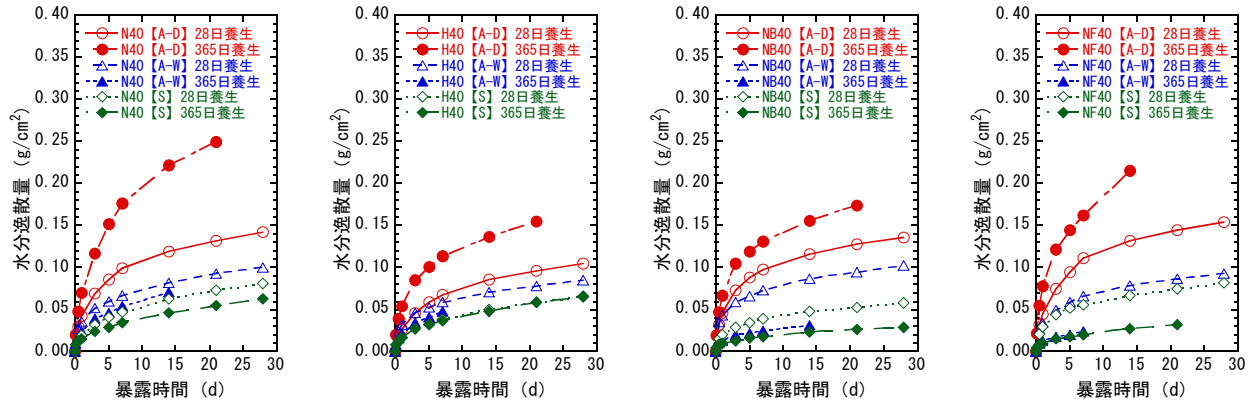


図-3 短期・長期暴露期間の水分逸散量の比較

を除いて水結合材比 55% で標準養生を行った試験体の水分逸散量とほぼ同等となり，蒸気養生コンクリートの品質確保・向上のためには蒸気養生条件とともに後養生における水分の保持・供給が非常に重要であると言える。

図－3 に短期（暴露期間 7 日）と長期（暴露期間 91 日）の水分逸散量の比較結果を示す。図より，同一水結合材比の配合である本研究の範囲内では，結合材種類によらず短期と長期の水分逸散量には高い相関が見られ，短期の水分逸散挙動を把握することにより，長期の水分



図－４ 水分逸散量に及ぼす養生期間の影響

逸散挙動を推定することが可能であると考えられる。

図－４に 28 日養生後の試験体と 365 日養生後の試験体の水分逸散量の経時変化の比較結果を示す。なお、養生条件【A-D】、【A-W】、【S】の 3 条件についてのみ検討を行った。図より、蒸気養生後に気中養生を行った【A-D】の場合には、結合材種類によらず 365 日養生後の試験体の水分逸散量が大きくなった。これは、長期間に及ぶ気中養生中の乾燥による微細なひび割れの進展などの内部損傷の増大が影響していると推察される。一方、蒸気養生後に水中養生を行った【A-W】の場合には、365 日養生の場合の方が水分逸散量が小さくなっており、特に混和材を用いた NB40 や NF40 の水分逸散量の減少が顕著であった。

3.2 水分拡散係数、表面係数の算出

コンクリートからの水分逸散にともなう水分移動は、一次元の移動を考えた場合、以下のような拡散方程式に従うとされている³⁾。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2)$$

ここに、 C ：相対湿度

D ：拡散係数 (cm^2/d)

また、供試体表面における境界条件は以下のように表わせる。

$$D \frac{\partial c}{\partial x} = f(C_e - C_s) \quad (3)$$

ここに、 C_e ：周囲の湿度

C_s ：表面 ($x=0$) における湿度

f ：表面係数 (cm/d)

したがって、コンクリートからの水分逸散を予測するには拡散係数と表面係数を求める必要がある。以下に両係数の算出方法を示す。

供試体を半無限体と考え、 D と f を一定とし、式(3)を境界条件とすると、式(2)の解は以下ようになる。

$$\frac{C - C_0}{C_e - C_0} = \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - e^{hx + h^2 Dt} \text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + h\sqrt{Dt} \right) \quad (4)$$

ここに、 C_0 ：供試体内部の初期湿度

$$h = f/D$$

$$\text{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-\eta^2) d\eta$$

ここで、時間 t における逸散水分量を M_t とすると、

$$M_t = \int_0^t \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0} dt \quad (5)$$

式(3)の関係をを用いて、

$$\frac{dM_t}{dt} = f(C_e - C_s) \quad (6)$$

C_s の任意の時間における値は、式(4)で $x=0$ とおけば得られる。この C_s の値を式(6)に代入して t について積分すると、

$$M_t = \left(\frac{C_e - C_0}{h} \right) \left(e^{h^2 Dt} \text{erfc}(h\sqrt{Dt}) - 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} h\sqrt{Dt} \right) \quad (7)$$

これによって、逸散水分量と拡散係数および表面係数の関係が得られた。しかし、上式において、未知数が D と $h (=f/D)$ の 2 つであるのに対して、方程式が 1 つであるため、 D と f の値を決定することができない。そこで、乾燥収縮について検討を加えた既往の研究⁴⁾を参考にして、 D と f を求めることとした。

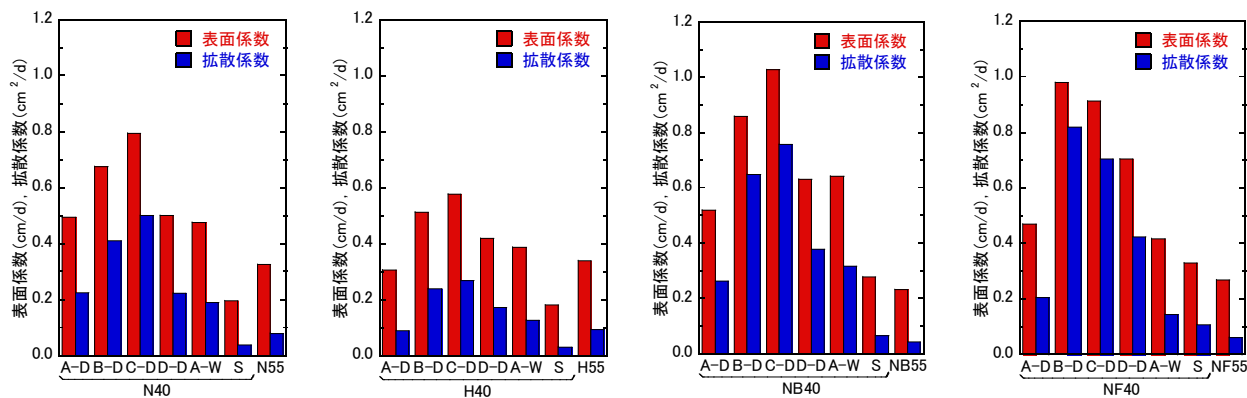
式(7)を変形して Maclaurin 展開すると、

$$\frac{M_t}{C_e - C_0} = ft \left(1 - \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \xi + \frac{1}{2} t \xi^2 - \frac{8}{15\sqrt{\pi}} t \sqrt{t} \xi^3 + \dots \right) \quad (8)$$

$$\text{ここに、} \xi = f/\sqrt{D}$$

式(8)において、 ξ の 4 次以降の項を無視して異なる時間 t_1 、 t_2 に対する連立方程式を導く。

$$M_{t1} = (C_e - C_0) f t_1 \cdot \left(1 - 0.752 \sqrt{t_1} \xi + 0.500 t_1 \xi^2 - 0.301 t_1 \sqrt{t_1} \xi^3 \right) \quad (9)$$



図－5 表面係数，拡散係数の算出結果

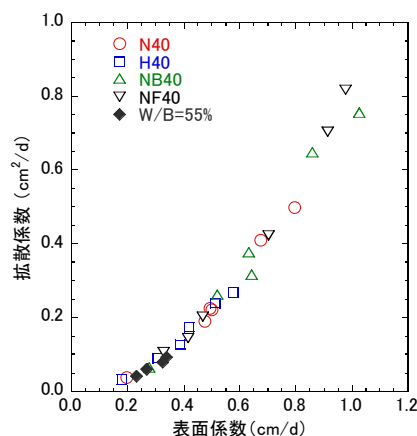
$$M_{t_2} = (C_e - C_0) f t_2 \cdot \left(1 - 0.752 \sqrt{t_2} \xi + 0.500 t_2 \xi^2 - 0.301 t_2 \sqrt{t_2} \xi^3 \right) \quad (10)$$

式(9)，(10)の連立方程式を解いて f ， ξ を求め， ξ と f より D が決定できる。ここで， t_1 ， t_2 の値については，0.5～1 日の範囲ならば精度良く D と f を求められるとの研究⁴⁾があるので，本研究においては， $t_1=0.5$ 日， $t_2=1$ 日とし，それぞれの暴露期間における水分逸散量を用いて， D と f を計算した。そのため，本研究で算出される拡散係数，表面係数は，水分逸散が飽和コンクリートの暴露面付近で生じている高含水率領域における拡散係数，表面係数ということになる。

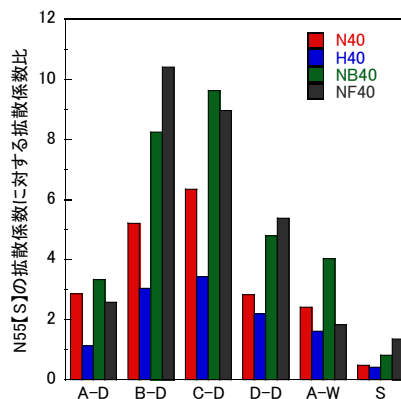
図－5に，結合材別に表面係数と拡散係数の算出結果を示す。水分拡散係数および表面係数は，その値が大きいほど水分が逸散しやすいことを示す。蒸気養生後に気中養生を行った場合には，いずれの結合材においても後養生を水中養生とした【A-W】に比べて拡散係数，表面係数ともに同等もしくは大きくなっており，特に前置時間を0.5時間とし徐冷した【B-D】の場合や前置時間を3時間とし急冷した【C-D】の場合には拡散係数，表面係数ともに大きいことが分かる。蒸気養生条件を同一とし，後養生条件を気中養生と水中養生とに変化させた【A-D】の場合と【A-W】の場合とを比較すると，結合材がNやNFの場合にはほぼ同等の拡散係数，表面係数となった。一方，H，NBの場合には【A-W】の方が材齢1日までの水分逸散量が多い結果であったために，拡散係数，表面係数ともに【A-W】の方がやや大きい結果となった。また，蒸気養生後に気中養生を行った試験体と，ほぼ同程度の圧縮強度となる水結合材比55%で標準養生を行った試験体の拡散係数，表面係数を比較すると，結合材がHの場合を除いて拡散係数，表面係数ともに蒸気養生を行った場合の方が大きくなった。

3.3 水分拡散係数による緻密性評価

本研究では，物質移動特性のひとつである水分逸散性に基づき蒸気養生コンクリートの緻密性評価を行っ



図－6 表面係数と拡散係数の関係



図－7 N55【S】の拡散係数に対する拡散係数比

た。

図－6に，表面係数と拡散係数の関係を示す。図より，表面係数と拡散係数には高い相関があることから，本研究では水分逸散性状による緻密性評価を水分拡散係数により行った。

図－7に，普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比55%のコンクリートを28日標準養生した試験体(N55【S】)の拡散係数に対する各配合・養生条件の拡

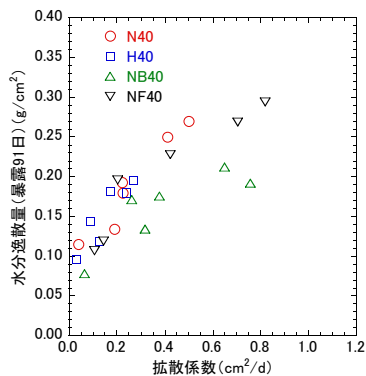


図-8 拡散係数と水分逸散量（暴露 91 日）の関係

散係数の比を示す。拡散係数比が 1 以下の場合には N55【S】よりも緻密性が高く、逆に 1 を超える場合には緻密性が低いということになる。図より、蒸気養生を行った場合にはいずれの結合材においても拡散係数比は 1 を超える結果となり、N55【S】よりも緻密性が低いコンクリートであると推定される。蒸気養生条件の影響について見てみると、いずれの結合材においても前置時間を 0.5 時間とし徐冷した【B-D】の場合や前置時間を 3 時間とし急冷した【C-D】の場合に拡散係数比が大きく、特に NB40 や NF40 の混和材を用いた場合に蒸気養生パターンの相違の影響が顕著であり、水分拡散係数から推定される緻密性の観点から言うと、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を用いた蒸気養生コンクリートは蒸気養生条件の設定に特に注意を要すると言える。

図-8 に、拡散係数と水分逸散量（暴露期間 91 日）の関係を示す。図より、NB40 を除いて結合材によらず拡散係数と水分逸散量には高い相関がある。NB40 のみ傾向が異なったのは、拡散係数の算出においては極初期（暴露期間 1 日）の水分逸散量の結果を用いており、蒸気養生および後養生の気中養生における内部損傷の影響が表れたものと考えられ⁵⁾、一方暴露期間 91 日までの水分逸散量は一旦飽水させてから測定をしているために水分の供給により内部損傷が回復し水分逸散が抑制されたためと推察される。水分拡散係数は含水率（湿度）により大きく変化することが多くの研究により明らかとなっており、本研究で算出した水分拡散係数は飽和状態に近い高含水率領域におけるものであるが、含水率（湿度）と水分拡散係数の関係も考慮することにより、

コンクリート内部における水分分布の予測することが可能であり、今後検討を行っていく予定である。

4. まとめ

本研究では、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリートを対象とし、耐久性に大きく関係する水分逸散性状に及ぼす養生条件と結合材種類の影響を実験的に検討した。その結果、結合材種類と養生条件の組合せにより水分逸散性状が大きく異なることを明らかにした。また、蒸気養生コンクリートの品質向上のためには、蒸気養生後の水分供給が水分逸散性状の観点からも非常に重要であることが確認された。さらに、水分逸散性状から算出した水分拡散係数による緻密性評価の結果より、蒸気養生コンクリートの緻密性は同程度の圧縮強度を有する標準養生コンクリートよりも低く、特に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた場合には蒸気養生条件の影響を顕著に受けることが明らかとなった。

謝辞

本研究は、九州コンクリート製品協会の支援により実施しました。ここに付記し、心から感謝の意を表します。本研究の実施にあたり多大なご協力を頂きました長崎大学工学部構造工学科の楠本慎太郎君、篠原亮雄君、尾崎文美さんに心から感謝の意を表します。

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) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のクリープ及び収縮による時間依存変形に関するシンポジウム論文集，2001.7
- 3) J. Crank: The mathematics of diffusion 2nd edition, Oxford University Press, 1979
- 4) 岡田 清，川村満紀：ソイルセメントの乾燥収縮応力に関する二、三の考察，土木学会論文集，No.142，pp.37-45，1967.6
- 5) 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