

論文 フライアッシュを添加したコンクリートの物質透過性の検討

伊藤 始*1・大橋真輝*2・蟹谷真生*3・久保哲司*3

要旨: フライアッシュの添加によるコンクリートの耐久性向上効果や ASR 抑制効果は、コンクリート内への劣化因子の浸透抑制効果が一因と考えられる。本研究では、透水試験、透気試験、および湿気移動実験を実施することで、フライアッシュを添加することによるコンクリートの物質透過性の変化を検討した。その結果、フライアッシュを添加したコンクリートの水分浸透抵抗性と透気抵抗性が、同一の呼び強度の普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートや高炉セメントを用いたコンクリートに比べて優れることが確認できた。

キーワード: フライアッシュ, 物質透過性, 透水試験, 透気試験, 湿気移動実験

1. はじめに

石炭火力発電所からの産業副産物である石炭灰の発生量は、石炭の質量の約 1 割であり、全国的にみて増加傾向にある¹⁾。石炭灰はこれまで主にセメントの原材料として使用されてきたが、昨今の経済低迷の影響でセメント需要が落ち込んだことを受けて、使用量が減少してきた。また、石炭灰処分場の残容量も少ない状況にあることから、他の用途に石炭灰を有効利用していくことが持続可能な社会の構築の観点から重要となっている。

石炭灰の使用方法の 1 つに、セメントの代替材としてフライアッシュをコンクリートに混和する方法がある。この方法を用いることで、コンクリートの性能面で施工性能の向上や長期強度の増進、耐久性の向上のメリットがある^{1),2)}。また、セメント代替によりセメント量が減少することで環境面の CO₂ 削減、性能面の水和熱の抑制やアルカリ骨材反応 (以下, ASR) の抑制の効果もある。

フライアッシュ添加によるコンクリートの耐久性向上効果について、塩害では土木学会コンクリート標準示方書³⁾ (以下, 示方書) でフライアッシュを添加したコンクリート (以下, FA) の塩化物イオン濃度の拡散係数が、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート (以下, N) の値に比べて小さく設定されている。また、宮里らは FA の塩化物イオンの実効拡散係数が N に比べて小さく、高炉セメント B 種を用いたコンクリート (以下, BB) と同等に低いことを確認している²⁾。

一方、コンクリート内への劣化因子の浸透性と物質透過性を関係付けることで、施工直後の構造物や既設構造物の品質および塩害や中性化に対する耐久性を評価することが検討されており、透水試験や透気試験が行われている⁴⁾。また、ASR も水分の供給が多い部分や相対湿度が高い部分で反応が進行しやすいため、物質透過性による影響を受けている。前述のフライアッシュ添加による

耐久性向上効果や ASR 抑制効果は、この物質透過への抵抗性の向上が一因であると考えられる。

本研究はフライアッシュを添加することによるコンクリートの物質透過性の変化を検討することを目的とした。研究では河川護岸に用いられる実寸法の六脚ブロックに対して、透水試験および透気試験を実施した。また、コンクリート中の水分移動現象を相対湿度 (水蒸気圧) の変化として捉える湿気移動実験を実施した。湿気移動実験における相対湿度の変化は、湿気拡散係数や蒸発率等に大きな影響を受ける。著者らは試験室レベルでこれらの物性値を求めており⁵⁾、本研究では実構造物での挙動の把握と結合材種類の違いによる影響を検討した。

2. 研究方法

研究の流れを図-1 に示す。はじめに、河川護岸に用いられる六脚ブロックの供試体を 2 種類 5 つ用意した。次に各供試体に図-2 に示す位置で、図-3 のように透水試験、透気試験、および湿気移動実験を実施し、透水

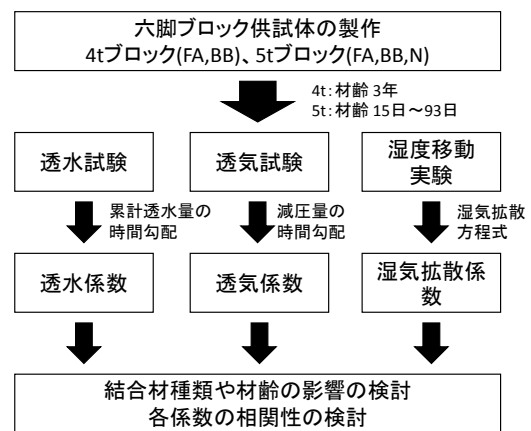


図-1 研究の流れ

*1 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 博 (工) (正会員)

*2 富山県立大学 工学部 環境工学科

*3 北陸電力 (株) 土木部 土木技術チーム 修 (工)

係数(時間当たりの透水量), 透気係数(空気透過度係数), および湿気拡散係数(透湿率)を求めた。それらの係数について結合材種類や材齢の影響に関して比較・検討するとともに, 各係数の相関性を検討した。

六脚ブロックは図-2に示すように, 中心の立方体に平面図の四方と正面図の上下の合計6個の立方体(脚)が取りついた形状である。1種類は重量5t相当のブロックで1辺の長さが700mmであり, 計測時に新しく製作した(5Tシリーズ)。もう1種類は重量4t相当のブロックで1辺の長さが640mmであり, 材齢3年経過後に計測を開始した(4Tシリーズ)。5Tシリーズでは表-1に示すようにコンクリート種類にFAとBB, Nを使用し, 4TシリーズではFAとBBを使用した。

コンクリートの配合を表-2に示す。配合条件は呼び強度21, スランプ8cm, 粗骨材の最大寸法40mmとした。Nでは普通ポルトランドセメントを用い, BBでは高炉セメントB種を用いた。FAでは普通ポルトランドセメントをベースに質量割合15%をフライアッシュで置換した。フライアッシュは七尾大田火力発電所から産出され, 分級されたJIS II種相当のものである。粗骨材と細骨材には常願寺川水系から採取した川砂利と川砂を使用した。

試験はコンクリートの打込みから3日経過後に脱型し, 材齢7日までのシート養生後に実施した。各試験は図-2の位置で行った。透水試験は四方の側部脚のうち3脚の上面で実施し, 湿気移動実験は残りの1脚に湿度センサー5個を埋め込むことで実施した。透気試験は下側の下部脚の3面で実施し, 一部で上側の上部脚の型枠面と四方の側部脚の均し面で実施した。各試験は表-1に示すように, 5Tシリーズで材齢15日~93日の間に行い, 4Tシリーズで材齢3年1ヶ月~3ヶ月に行った。

3. 透水性に関する検討

3.1 透水試験方法

透水試験は表面含浸材に用いられる土木学会規準JSCE-K-571⁶⁾に準じて行った。試験はコンクリート上面の均し面を試験面とし, 均し面表面のモルタル分をグラインダーで除去するとともに, 平滑に成形することで行った。清掃した試験面に対し, 図-3のように先端に漏斗を取り付けたガラス器具をシーリング材で固定した。シーリング材の硬化後に, 器具内に水を満たすことで試験を開始した。試験開始後はコンクリート内部に浸透する水の量を測定した。5Tシリーズでは打込みから1, 2, 3ヶ月時点の3回行い, 4Tシリーズでは試験を材齢3年から1ヶ月の間隔を空けて2回((1), (2)と表示)行った。なお, 供試体の脚部は表面からの水分の蒸発を許容し, 降雨が作用しない条件となるように, 下面を除きシートで覆った。

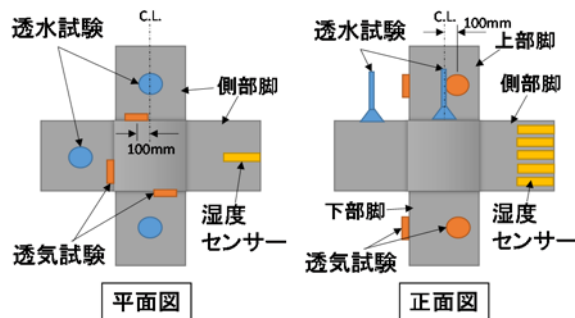


図-2 六脚ブロックの形状と試験・計測位置

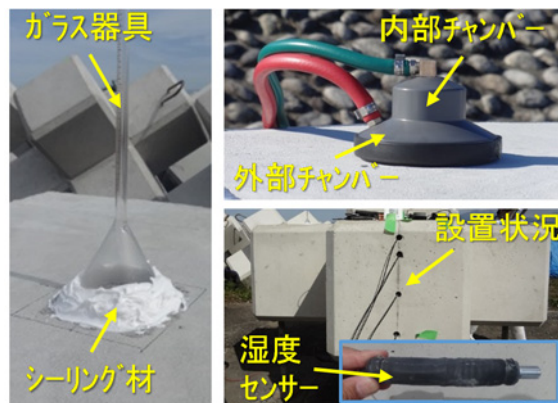


図-3 計測状況(左: 透水試験, 右上: 透気試験, 右下: 湿気移動実験)

表-1 試験ケース

ケース名	コンクリート種類	ブロック重量	試験材齢		
			透水試験	透気試験	湿気移動実験
FA-5T	FA	5t	1, 2, 3ヶ月	3ヶ月	15日~93日
BB-5T	BB		1, 2, 3ヶ月	3ヶ月	15日~93日
N-5T	N		1, 2, 3ヶ月	3ヶ月	15日~93日
FA-4T	FA	4t	3年(2回)	3年	3年(78日間)
BB-4T	BB		3年(2回)	3年	3年(78日間)

表-2 コンクリートの配合

ケース名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			C	FA	W	S	G
FA-5T	56.0	40.6	223	40	147	765	1134
BB-5T	60.0	42.0	245	-	147	799	1118
N-5T	59.0	41.4	256	-	151	783	1124
FA-4T	57.0	41.2	219	39	147	781	1129
BB-4T	57.5	40.0	260	-	149	755	1145

3.2 累計透水量の履歴

図-4にFA-5Tにおける経過時間と累計透水量の関係を示す。試験では連続する少なくとも3回の累計透水量の直線の傾きから透水係数(ml/day)を算出した。注水開始直後の累計透水量は定常状態にないため, 透水係数の算出から除いた。FA-5Tの累計透水量は注水開始から2日までに急激に増加し, 2日から7日におおむね直線となった。この部分の傾きを材齢28日の透水係数とした。その後, 時間の経過とともに傾きがより小さくなった。

3.3 透水係数の比較

図-5に注水開始からの日数と透水係数の関係を示す。

透水係数は3測点の平均値とした。注水開始の材齢は、5Tシリーズで28日、4Tシリーズで3年である。すべてのケースにおいて、注水開始からの日数が0日するとき透水係数が大きく、同日数が28日(5Tシリーズ:材齢56日)のとき値が小さくなり、28日から63日までの変化は小さかった。これはブロック内の空隙が水で満たされることで、水が浸透しにくくなったことを示している。

注水開始からの日数が28日ときの透水係数を比較すると、FA-4TとFA-5Tの値が他の3ケースの値に比べて小さく、FA添加の効果が見られた。また、材齢に着目すると、FA-4Tの透水係数がFA-5Tの値に比べて常に小さく、材齢による水分浸透抵抗性の改善が見られた。しかし、BB-4TとBB-5Tの透水係数の関係は、注水開始からの日数により異なり、明確ではなかった。

図-6にFAに対するBB・Nの透水係数比を示す。FAとBBを比較すると、BB-5Tの材齢28日の透水係数比は1.17であり、同程度であった。その他の4ケースの透水係数比は、2.3を超えており、FAの水分浸透抵抗性が大きいことが確認できた。FAとNを比較すると、すべての材齢において、透水係数比は2.1~2.5にあり、FAの水分浸透抵抗性が大きく、既往の研究²⁾と同様の知見が得られた。

4. 透気性に関する検討

4.1 透気試験方法

透気試験はコンクリートの表層の透気性を測定する試験であり、表層の緻密さや含水状態に影響を受けることが知られている。透気試験は2つのチャンバーを使用するTORRENT法に準じて実施した⁴⁾。試験は図-3のように、内部チャンバーと外部チャンバーの圧力を等しくして、チャンバー内を所定の圧力まで減圧する。その圧力が回復する割合が時間の平方根(\sqrt{t})に比例することを利用して、透気係数を算出する方法である。計測は有効圧力上昇量が20hPaを超えること、計測時間が720secを超えること、測定深さが一定値を超えることで終了した。透気試験は図-2のように脚の面に向かって中心から左側に100mm移動した位置で実施した。

試験ケースは表-3のように5Tシリーズで(a)下部脚(型枠面)と(c)側部脚(均し面)の2ケース、4Tシリーズで(a)下部脚(型枠面)と(b)上部脚(型枠面)、(c)側部脚(均し面)の3ケースを実施した。試験数は5Tシリーズ・側部脚ケースで1ヶ所、他のケースで3ヶ所とした。なお、ここでのケース名は、表-1のケース名の後ろに測定箇所の記号(a~c)を付けたものとした。表-3には併せて試験時に高周波容量式の測定法で測定した含水率を示す。

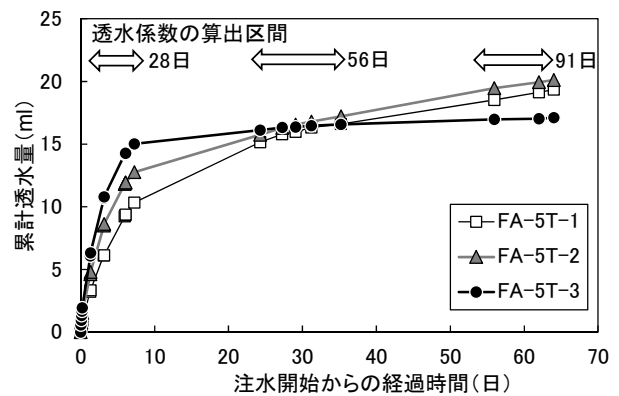


図-4 累計透水量の履歴 (FA-5T)

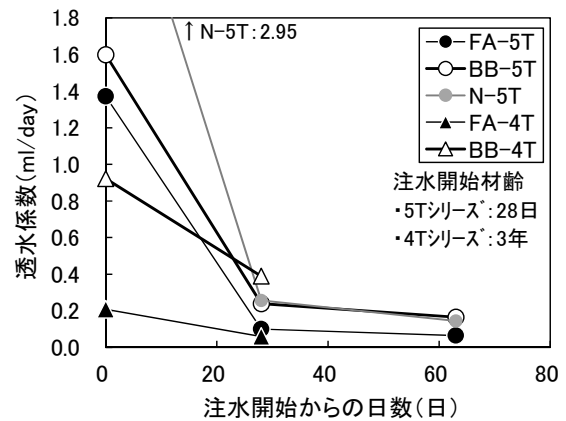


図-5 各ケースの透水係数

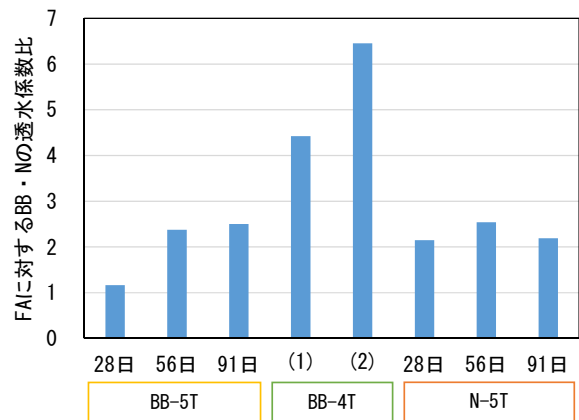


図-6 FAに対するBB・Nの透水係数比

表-3 透気試験の試験数

	(a)下部脚 (型枠面)	(b)上部脚 (型枠面)	(c)側部脚 (均し面)
FA-5T	3 (3.9-4.4)	-	1 (3.7)
BB-5T	3 (3.9-4.0)	-	1 (3.7)
N-5T	3 (4.1-4.3)	-	1 (3.9)
FA-4T	3 (3.7-4.0)	3 (3.0-3.7)	3 (2.9-3.5)
BB-4T	3 (3.8-3.9)	3 (3.4-3.6)	3 (3.0-3.7)

():含水率(%)

4.2 透気係数の比較

図-7に各ケースの透気係数を示す。材齢91日の5Tシリーズの透気係数が材齢3年の4Tシリーズの値に比べて小さくなった。部位による影響について、FAとNにおける均し面の値は型枠面の値に比べ0.08~0.24倍、BBにおいて0.99倍となった。均し面のFA-5Tc、N-5Tc、FA-4Tcがコンクリートの品質が良好とされる $0.01\sim 0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ の範囲に入った。BBの供試体側部脚の均し面では乾燥による微細ひび割れが一部で見られ、これが影響したと考えられた。

図-8に結合材種類による影響として、FAに対するBBとNの透気係数比を示す。型枠面においてNはFAの1.8倍、BBはFAの2.8~7.4倍となり、均し面においてNはFAの1.5倍、BBはFAの14~33倍となった。FAはNに比べて透気抵抗性に優れ、BBに比べて非常に優れることが分かった。

透気抵抗性は空気の透過を表し、前述の水分浸透抵抗性は水の浸透を表す。そのため、透気抵抗性は水分浸透抵抗性に比べて微細なひび割れの影響を受けると考えられる。今回の材齢3年の透気係数が材齢91日の値に比べて大きいことは、材齢とともに乾燥収縮や自己収縮に起因してコンクリート表層に、目視できない微細なひび割れが進展したことが影響したと考えられた。また、BBの透気係数がFAやNの値に比べて大きいことは、BBの収縮が初期の養生状態に敏感であることが影響したと考えられた^{7),8)}。

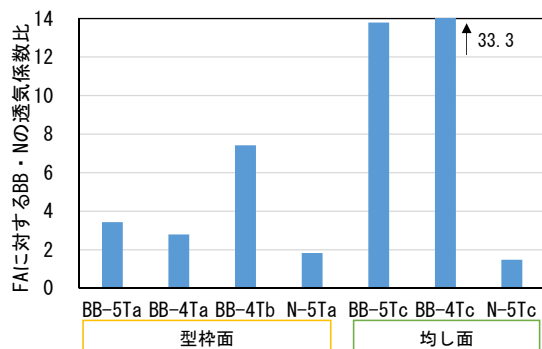
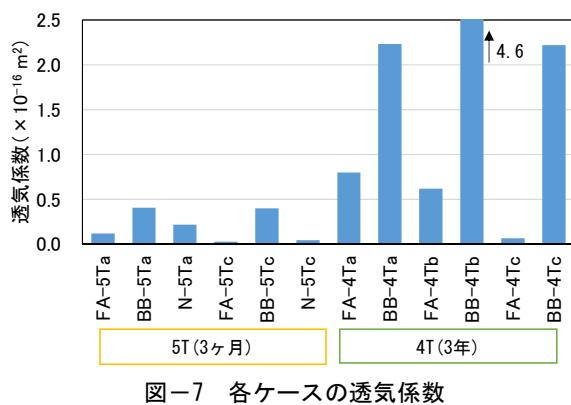


図-8 FAに対するBB・Nの透気係数比

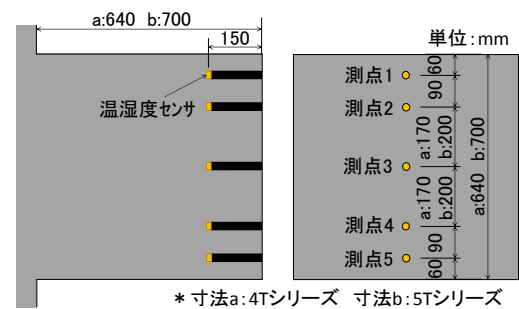
5. 透湿性に関する検討

5.1 湿気移動実験方法

湿気移動実験を実環境において行った。実験ではコンクリート内部の相対湿度の経時変化を測定し、その結果から湿気拡散方程式を用いて湿気拡散係数(透湿率/湿気容量)を導出した。なお、コンクリート内部の相対湿度を単に相対湿度と記述し、ブロックを設置した空間の相対湿度を雰囲気湿度と示すこととした。

実験では六脚ブロック供試体の養生後の材齢15日に、上面と下面の透気面以外をアルミテープでシールし、実環境に静置した。そのため、上面は降雨が作用し、下面は降雨が作用しない状態である。

図-9に温湿度センサの配置図を示す。4Tシリーズの供試体では、上面からの深さ60, 150, 320, 490, 580mmの位置をドリルで削孔し、ドリル孔内に温湿度センサを挿入した⁵⁾。センサ挿入後、ドリル孔内をゴム製シーリング材とアルミテープで密閉した。測定は5Tシリーズの材齢15日から93日の期間で行った。



(a) 側面図 (b) 正面図

図-9 温湿度センサの配置図

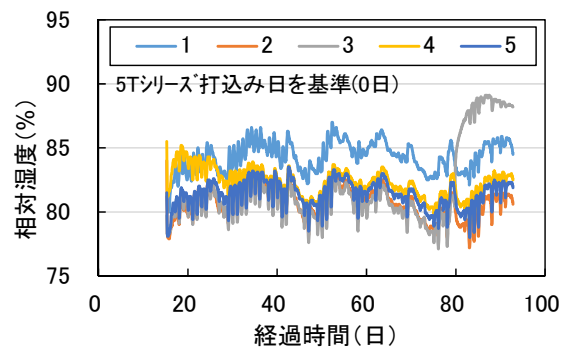


図-10 相対湿度の履歴 (FA-4T)

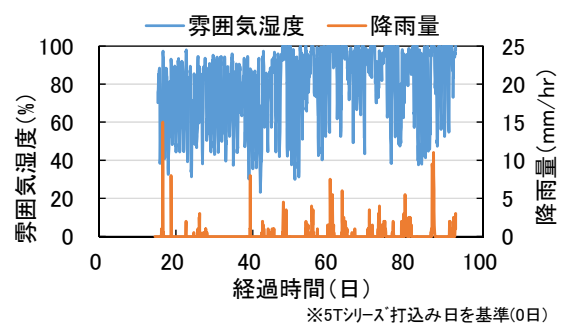


図-11 雰囲気湿度の履歴 (5ケース共通)

5.2 相対湿度の履歴

図-10 に温湿度センサで測定した相対湿度の経時変化の一例 (FA-4T) を示す。加えて、図-11 に雰囲気湿度の履歴と 1 時間当たりの降雨量を示す。雰囲気湿度がおおむね 40% から 100% に日変化しており、内部の相対湿度は 2~3% の振幅で日変化している。これはセンサ部の温度による飽和水蒸気圧の変化が主要因である。表面部の測点 1 の相対湿度が材齢 30 日以降で 85% 前後と高く、増加傾向にある。他の測点では、40 日付近で相対湿度が 80~83% と測点 1 に比べて低い傾向にあった。

湿気移動実験では、水蒸気圧を変数と考える。図-12 に FA-4T の水蒸気圧の履歴を示す。水蒸気圧 P は相対湿度 RH から、温度の関数として与えられる飽和水蒸気圧 P_{sat} を介して計算される。水蒸気圧は日変化しており、振幅が大きい部分では測点 1、測点 2、測点 3 の順にピーク値が大きくなっている。これは天候が晴れのときであり、日射により上面側が暖められたことが影響している。

5.3 湿気拡散係数の比較

実環境における湿気移動実験の結果を用いて、湿気拡散係数を比較した。本検討では、透湿率を湿気容量で除した値を湿気拡散係数と呼ぶこととした。

湿気移動現象は、水蒸気圧 P の非定常拡散方程式を基本とし、 X 軸方向への移動のみを考えると拡散方程式は、湿気容量と透湿率を用いて式(1)となる^{5),7),9)}。

$$C \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、 C : 湿気容量 ($\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{mmHg}$)、 λ_p : 透湿率 ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{hr} \cdot \text{mmHg}$)、 P : 水蒸気圧 (mmHg)

この式の両辺を湿気容量 C で除すことで、右辺の係数を湿気拡散係数 $D_p (= \lambda_p / C)$ (cm^2/hr) と設定できる。

図-13 に FA-4T の水蒸気圧の分布を示す。分布は日射がなく、コンクリート温度が安定する午前 2 時のものである。上下面の開放面に向けて水蒸気圧が小さくなっており、この勾配を使用して湿気拡散係数を算定することとした。また、下面側の測点では、上面側の測点に比べて日射の影響が小さく安定した計測値が得られたため、測点 4 と測点 5 を使用して算定することとした。著者らが恒温恒湿室で行った湿気移動実験の結果⁵⁾を参考に、計測した水蒸気圧の分布を 2 次曲線と仮定することで、測点 4 と測点 5 の水蒸気圧 P_4 と P_5 、2 点間の距離 X を使って式(2)として算定した。

$$D_p = \frac{\lambda_p}{C} = \frac{\Delta P_{ave(4,5)} X^2}{2(P_5 - P_4) \Delta t} \quad (2)$$

図-14 に湿気拡散係数の算定値の経時変化を示す。式(2)では P_4 と P_5 がほぼ同じ値になるとき、湿気拡散係数

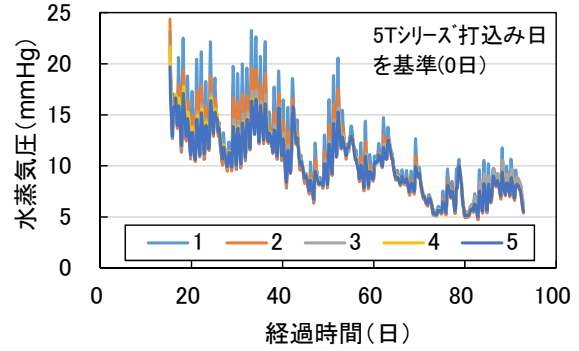


図-12 水蒸気圧の履歴 (FA-4T)

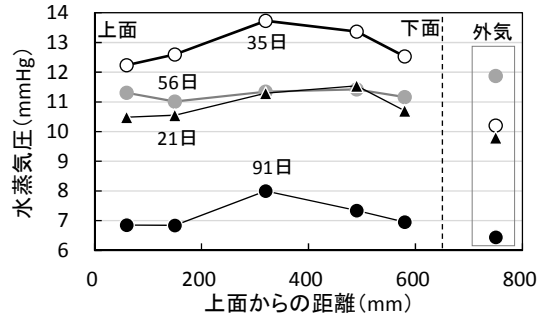


図-13 水蒸気圧分布 (FA-4T)

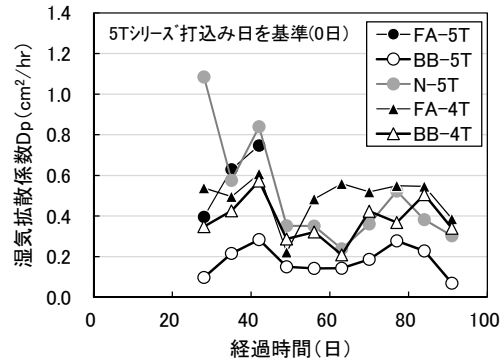


図-14 湿気拡散係数の履歴

が非常に大きな値となり、ばらつきが大きくなるため、図に示す材齢の前後の日を含めて 3 日間の平均値を用いた。また、FA-5T では材齢 45 日以降で測点 4 の計測器に不具合があったため、表示していない。材齢 50 日付近まで湿気拡散係数 D_p のばらつきは比較的大きいものの、その後は安定した値を示した。材齢 70 日以降で BB-5T が最も小さく、 $0.2 \text{ cm}^2/\text{hr}$ 前後であった。その他の 3 ケースは $0.4 \text{ cm}^2/\text{hr}$ 前後であった。

6. 結合材種類の影響および各係数の相関性の検討

図-15 にセメント種類を普通ポルトランドセメントとした N-5T の値に対する各ケースの値の比を示した。透水係数は注水開始からの日数が 5T シリーズでは 63 日、4T シリーズでは 28 日の値を用い、透気係数は下部 (型枠面) の値を用い、湿気拡散係数は 70 日~91 日の平均値を用いた。透水係数の比は 0.46 倍から 2.70 倍となり、FA の両ケースの比が 0.5 倍以下と小さくなった。透気係数の比は BB-4T で最大 10.3 倍であり、他の係数の比に

比べて大きい傾向にあった。湿気拡散係数はBB-5Tが小さいものの、他のケースでは同程度の値であり、係数の差が小さかった。

図-16に透水係数と透気係数の相関図を示す。透水係数が大きいケースで透気係数が大きくなり、試験条件が同一の5Tシリーズと4Tシリーズのそれぞれで右上がりの比例的な傾向が見られ、両者の傾きは同程度であった。4Tシリーズが上側にシフトした要因は、前述のように材齢にともなうコンクリート表層の収縮や微細ひび割れの影響と考えられた。

湿気拡散係数はBB-5Tのみが小さくなり、透水係数および透気係数と異なった傾向であった。試験条件を考えると、透水係数と透気係数はコンクリート表層の浸透を対象とすることに対して、湿気拡散係数はコンクリート内部の浸透を対象としている。今回の養生条件および設置条件は、材齢3日までの型枠存置と材齢7日までのシート養生を行い、それ以降で乾燥作用を許容する条件であった。これらの養生・設置条件のとき、FA添加による浸透抵抗性の向上効果は、コンクリート表層において確認することができた。

7. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。なお、ここでの知見は、同一の呼び強度となる配合条件のコンクリートの比較に基づくものである。

- 1) 透水試験の結果から、FAの水分浸透抵抗性は、BBおよびNに比べて優れることが確認できた。3年の長期材齢でもBBに対して同様の傾向であった。
- 2) 透気試験の結果から、型枠面のFAの透気抵抗性は、BBおよびNに比べて優れることが確認できた。均し面でも同様の傾向であった。
- 3) 湿気移動実験の結果から、材齢初期のBBの透湿抵抗性は、他のケースに比べて優れることが確認できた。
- 4) コンクリート表層を対象とした透水係数と透気係数の間には、試験条件ごとに比例的な傾向が見られた。
- 5) 今回の養生・設置条件のとき、FA添加による浸透抵抗性の向上効果は、コンクリート表層において確認することができた。

謝辞

本研究は、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム、代表:金沢大学・鳥居和之教授)の一環として実施した。また、実施にあたり富山河川国道事務所の吉野氏、桶谷氏、朝日建設株式会社の川上氏、東氏、金沢工業大学の宮里教授、保倉氏にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

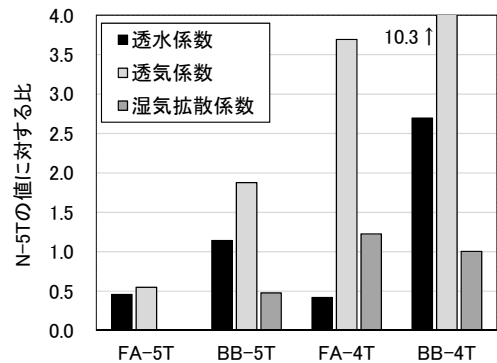


図-15 N-5Tの値に対する比

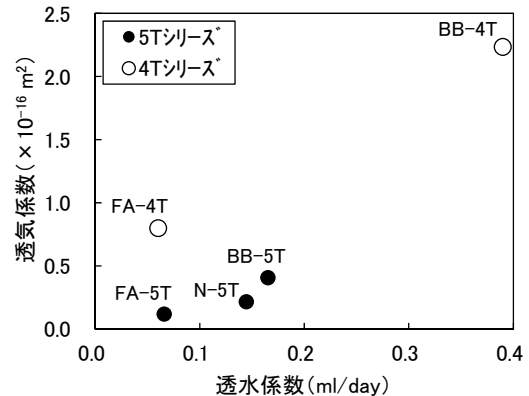


図-16 透水係数と透気係数の相関図

参考文献

- 1) 土木学会:循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2009
- 2) 宮里心一, 鳥居和之, 伊藤始:北陸産分級フライアッシュによるコンクリートの遮塩性向上効果に関する地域特性を踏まえた評価, コンクリート工学論文集, Vol.35, No.1, pp.163-168, 2013
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書・設計編, 2012
- 4) 水上翔太, 早川健司, 加藤佳孝, 勝木太:含水状態を考慮した構造体かぶりコンクリートの透気性評価, コンクリート工学論文集, Vol.33, No.1, pp.1829-1834, 2011
- 5) 木下竜一, 伊藤始, 星野靖幸:湿度一定環境と乾湿繰返し環境におけるコンクリートの湿気移動特性に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.34, No.1, pp.724-729, 2012
- 6) 土木学会:コンクリート標準示方書・規準編, 2013
- 7) 土木学会:コンクリートのクリープおよび乾燥収縮II, コンクリート技術シリーズ, 2000
- 8) 伊与田岳史, 松崎晋一郎, 井ノ口公寛, 歌川紀之:養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響, コンクリート工学論文集, Vol.32, No.1, pp.425-430, 2010
- 9) 矢川元基, 宮崎則幸:有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, 1985