

# 論文 フライアッシュコンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響

鈴木 浩明\*1・上田 洋\*2

**要旨:** 雨水や漏水等によるコンクリート構造物への水分浸透は、コンクリート構造物の劣化に大きな影響を及ぼすため、その浸透性状を知ることが重要である。本論文では、副産物として利用が期待されるフライアッシュを混和し、配合を変えたコンクリートを作製して水分浸透深さの時間依存性について検討を行った。供試体の一面を水に浸漬させ、質量変化や目視による割裂面の水分浸透深さおよび内部含水率の測定を行い、水セメント比や養生の違いが水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響を明らかにするとともに、普通セメントを用いたコンクリートとの比較を行った。さらに、圧縮強度と水分浸透深さとの関係についても示した。

**キーワード:** コンクリート, フライアッシュ, 水分浸透深さ, 内部含水率, 水セメント比, 養生, 圧縮強度

## 1. はじめに

中性化や塩害による鋼材腐食、あるいは凍害やアルカリシリカ反応など、コンクリート構造物の劣化の主要かつ共通の原因としてコンクリートへの水分の供給が挙げられる<sup>1)</sup>。例えば、中性化が鋼材近傍に達した構造物において、コンクリートが乾燥していれば鋼材腐食がほとんど進まないのに対し、雨水等が鋼材位置にまで浸透する場合には鋼材腐食が進みやすい。これらの違いは、コンクリート構造物に対する対策の要否や対策方法の違いにも繋がる。したがって、コンクリート構造物を適切に維持管理するためには、コンクリート表層における水分浸透深さを知ることが求められる。

また近年、石炭火力発電所から副産物として発生するフライアッシュ（以下 FA）の発生量は増加傾向にある。FA はコンクリートに混和することで、長期強度の増進、水和熱・温度ひび割れの低減、アルカリシリカ反応の抑制、単位水量の低減および流動性の改善などの効果が期待できる一方で、初期強度の低下などが懸念される。しかし、FA を混和材として用いたコンクリートの強度発現におよぼす養生変化の影響についての検討<sup>2)</sup>は行われているものの、水分浸透深さに着目し検討された例は少ない。

そこで本研究では、FA を混和材として用いたコンクリートへの水分浸透深さを、水セメント比や養生方法に着目し、前報<sup>3,4)</sup>の普通ポルトランドセメント（以下 OPC）のみを用いた結果と比較し検討を行った。さらに、圧縮強度と水分浸透深さとの関係についても検討を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体作製

作製した供試体は、OPC のみを用いたコンクリートお

よび OPC を FA II 種で 15wt% 置換したコンクリートの 2 種類である。寸法は、200×200×150mm, 100×100×100mm, およびφ100×200mm の 3 種類である。使用材料を表—1, 配合と養生を表—2 に示す。作製数量として、200×200×150mm は各配合と養生ごとに 1 体であり、内部含水率センサー（電気抵抗式水分計用、長さ：150mm）を埋設した。埋設深さはセンサーの先端が側面から 10, 30, 50, 70mm となるようにした。センサー先端のブラシ部には同配合のコンクリートをウェットスクリーニングして得たモルタルを塗り込ませた。100×100×100mm およびφ100×200mm は浸漬試験と圧縮強度試験に合わせて各配合と養生ごとに 8 体および 3 体作製した。

表—1 使用材料

材料(記号)	名称等	物性等
セメント(C)	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm <sup>3</sup>
フライアッシュ(FA)	フライアッシュ JIS II 種品	強熱減量:1.6% 密度:2.32g/cm <sup>3</sup> 比表面積:3430cm <sup>2</sup> /g
細骨材 (S)	細骨材①	千葉県君津産山砂 表乾密度:2.63g/m <sup>3</sup> , 吸水率:1.88%
	細骨材②	静岡県大井川水系 表乾密度:2.59g/m <sup>3</sup> 吸水率:1.92%
粗骨材 (G)	粗骨材①	埼玉県両神産碎石 1505 表乾密度:2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.57% 最大寸法:15mm
	粗骨材②	埼玉県両神産碎石 2015 表乾密度:2.72g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.64% 最大寸法:20mm
	粗骨材③	東京都青梅産2005 表乾密度:2.66g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.50% 最大寸法:20mm
混和剤	混和剤①	AE減水剤 リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	混和剤②	AE剤 アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
練混ぜ水(W)	上水道水	—

\*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 修士 (工学) (正会員)

\*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 研究室長 博士 (工学) (正会員)

表—2 配合と養生および作製数

(a)OPC コンクリート

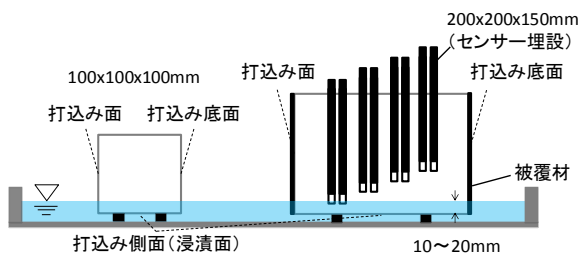
W/C (%)	養生	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤添加量 Cx%	
			W	C	S①	G①, ②		AE 減水剤	AE剤
						1505	2015		
60	気中封緘 水中	47	155	259	886	623	415	0.25	0.00050
50	気中封緘 水中	45	155	310	831	631	420	0.25	0.00075
40	気中封緘 水中	43	155	388	765	631	420	0.25	0.00200

スランプ8±2.5(cm), 空気量4.5±0.5(%)とした

(b)FA コンクリート

W/ (C+FA) (%)	養生	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤添加量 Cx%	
			W	C	FA	S②	G③	AE 減水剤	AE剤
							2005		
60	気中封緘 水中	47	150	213	37	878	1019	0.25	0.006
50	気中封緘 水中	45	150	255	45	821	1032	0.25	0.006
40	気中封緘 水中	43	150	319	56	756	1032	0.25	0.008

スランプ8±2.5(cm), 空気量4.5±0.5(%)とした



図—1 一面浸漬試験の概念図

## 2.2 養生

供試体は、打込み後1日で脱型し、20℃、60%R.H.環境下で静置する気中養生、コンクリートから水分が逸散しないようにその表面を被覆し20℃環境下に静置した封緘養生、および20℃の水中に浸漬して静置した水中養生の3種類の養生を行った。各養生を材齢28日まで行い、その後は共通して20℃、60%R.H.環境下で材齢83日まで静置した。なお、寸法200×200×150mmの供試体については乾燥養生中の材齢76日に、浸漬面とその反対側の面は開放し残り4面をビニールテープで被覆した。

## 2.3 浸漬試験および圧縮強度試験

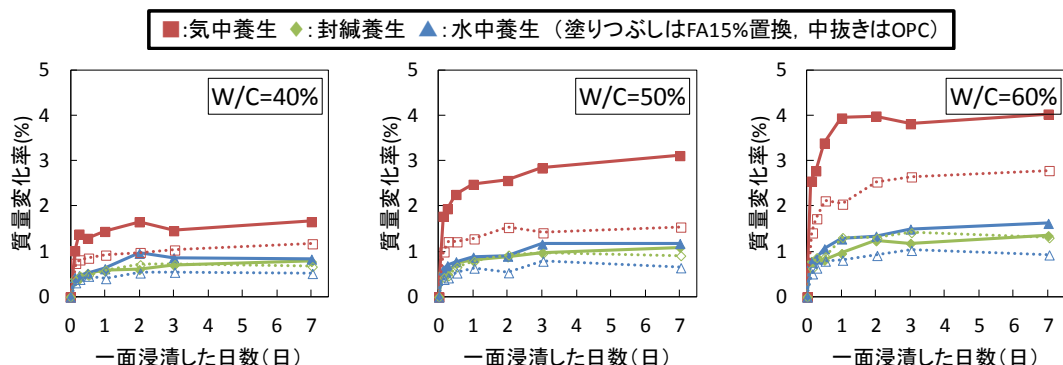
養生後に図—1に示すように供試体の打込み側面が10～20mm程度浸漬するようにした一面浸漬試験を7日間行った。一面浸漬試験は、雨がかりや漏水などがコンクリート表面から毛管浸透により作用する場合の水分の浸透深さを検討する試験である。測定項目としては、寸法100×100×100mmの供試体では0, 3, 6, 12時間および1, 2, 3, 7日間それぞれ浸漬した後に、供試体の質量を測定し質量変化を調べるとともに、割裂を行い水分に触れると赤色に発色する市販の水漏れ検査剤を用いて発色域を調べることで水分の浸透深さを測定した。また、寸法200×200×150mmの供試体では内部含水率を測定した。なお、内部含水率の測定には市販の電気抵抗式水分計を用いた。測定は各一点とした。また、圧縮強度は28日間の各養生後に測定している。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 質量変化率

100×100×100mm 供試体の一面浸漬試験における質量変化率の測定結果を図—2に示す。なお、質量変化率は一面浸漬試験直前の質量を基準とし、各試験時間後に測定した質量差を%で表した。はじめに、FA15%置換の経時変化に着目すると、質量変化率は12時間までに高くなり、1日から7日間までは伸びが小さくなる、または変化しなくなる傾向がある。また、水セメント比が低くなるほど質量変化率が低くなり、養生方法の違いでは水中養生で低く、気中養生で高くなる傾向がある。これは、水セメント比が低いとセメントペースト中の空隙が少なくなり、養生方法として水分供給が十分であるほどコンクリート表層付近のセメント粒子の水和が十分となり空隙が少なくなるためと考えられる。

また、OPCと比較すると、FA15%置換の質量変化率は、気中養生とした場合に高い傾向にある。これは、気中養生では水分供給が十分でないためセメントの水和反応が十分に進行せず、水酸化カルシウムの生成量が少なくなり、その結果フライアッシュのポズラン反応が十分に進



図—2 質量変化率の経時変化

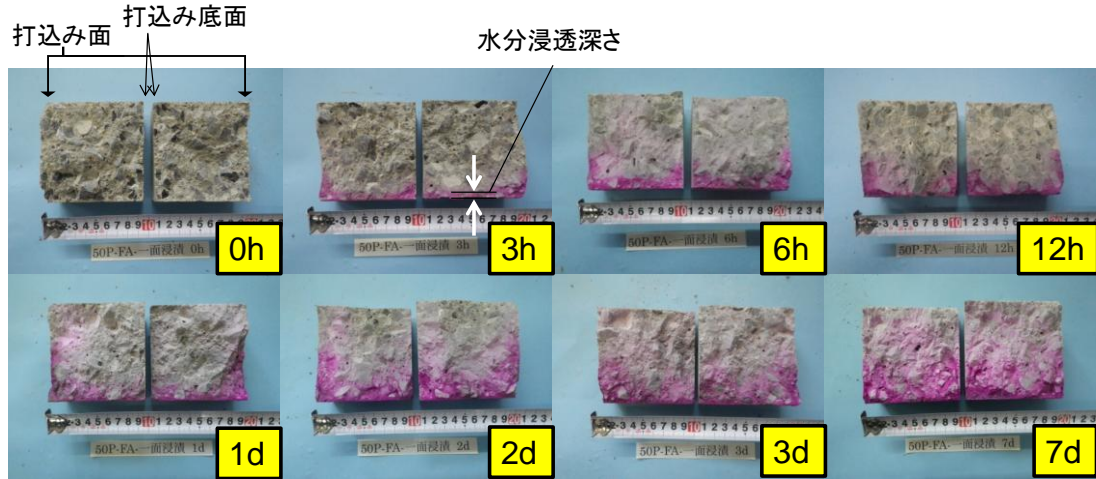


図-3 供試体の割裂面における水分浸透状況

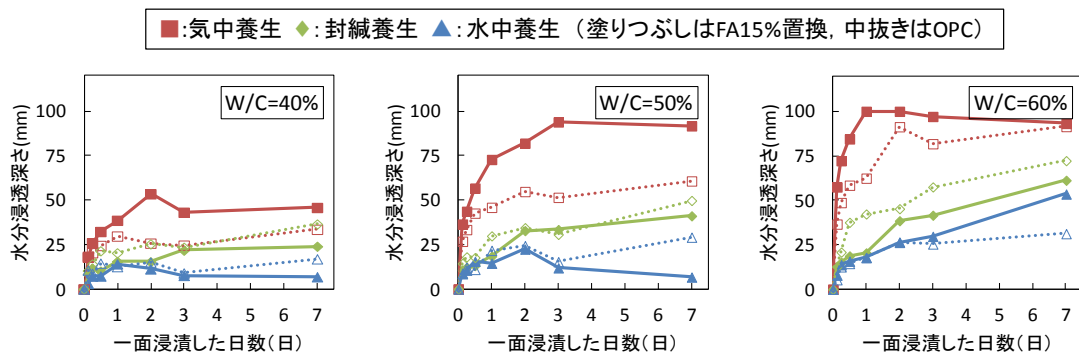


図-4 水分浸透深さの経時変化

行せず組織の緻密化が OPC と比べて進行していないことが原因と考えられる。一方、封緘養生とした場合は OPC と比べほぼ同様の値となっており、水和反応に加えポズラン反応がある程度進行し組織が緻密化し、水分の浸透が抑えられたと考えられる。ここで、水中養生では本来、気中養生や封緘養生に比べ、各反応が進行し、その結果質量変化率が低くなると考えられるが、封緘養生に比べ水中養生の質量変化率が高くなった。水中養生および封緘養生とした供試体の割裂面の水分浸透の様子を観察し比較したところ、水中養生とした供試体の打ち込み面付近への水分浸透深さが大きくなっており、その分浸透した水分が多いため、水中養生とした供試体において重量変化率が高くなったと考えられる。

### 3.2 水分浸透深さ

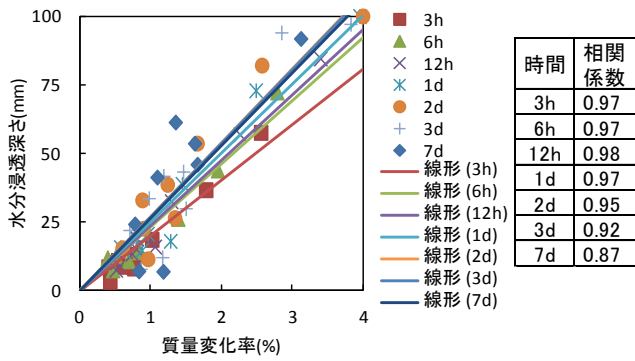
水セメント比 50%、封緘養生とした供試体を一面浸漬試験後に割裂し、水漏れ検査剤を噴霧した後の発色域の状況を図-3 に示す。打ち込み側面からの浸漬領域に比べ、打ち込み面付近の発色域が深くなる傾向が全体的にみられる。これは、ブリーディング等の影響を受け、打ち込み面付近に粗な層が形成されているためと考えられる。また、打ち込み底面でもコンクリート表面を伝わった水の影響等がみられることから、ここではこれらの影響を受けにく

い供試体中央の発色域深さを水分浸透深さとした。

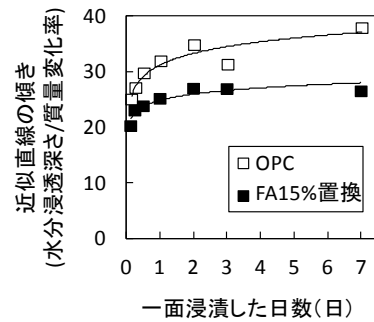
次に、供試体中央の水分浸透深さの測定結果を図-4 に示す。供試体の大きさが 100mm であるので、水分浸透深さが 100mm の場合、測定した供試体の中央部が全て発色していたことを表す。はじめに、FA15%置換の結果について、経時変化に着目すると、水分浸透深さは全体として一面浸漬時間とともに大きくなる傾向があるが、7 日の時点で伸びが少ないもしくは止まっているものと伸び続けているものとに分かれる傾向がある。また、水セメント比が高いほど水分浸透深さは大きくなり、養生方法の違いでは気中養生で大きく、水中養生で小さくなる傾向がある。

ここで、OPC と FA15%置換を比較すると、気中養生では OPC に比べ FA15%置換としたコンクリートへの水分浸透深さは大きい傾向にあり、封緘養生および水中養生では一部を除き小さい傾向にある。この理由は、質量変化率と同様に、養生方法の違いにより水分供給状況が異なることでセメントおよびフライアッシュの反応の進行程度に差があり、組織の緻密化の程度が異なるためと考えられる。

図-2 における質量変化率と図-4 における水分浸透深さを比較し整理した図-5(a)を見ると、それぞれの浸漬時間における水分浸透深さと質量変化率とは比例関係



(a)FA15%置換の質量変化率と水分浸透深さの関係



(b)近似直線の傾きの時間依存性

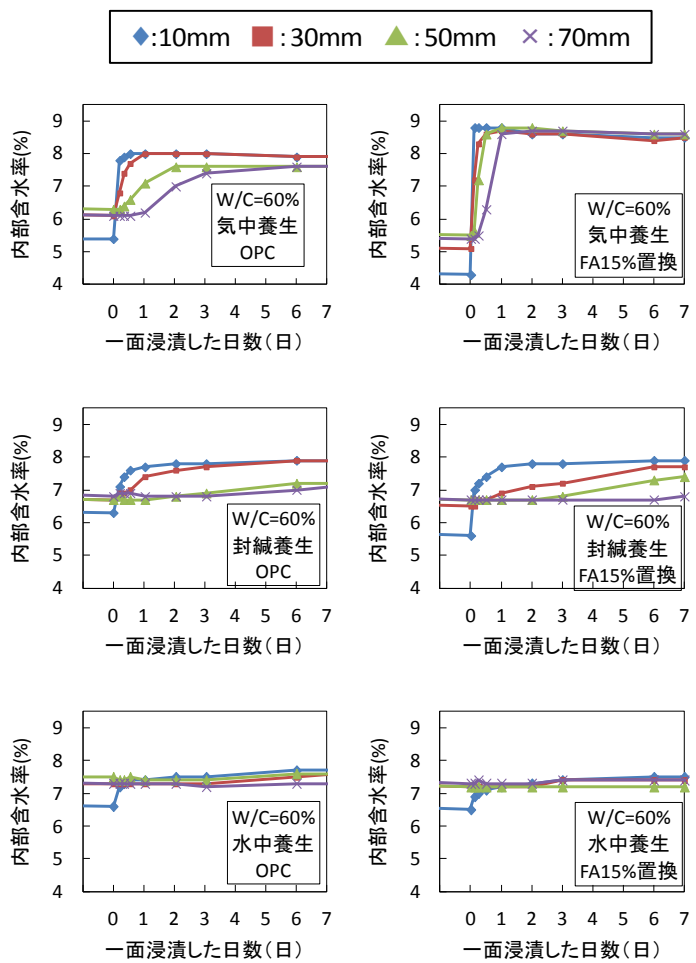
図-5 質量変化率と水分浸透深さとの関係

にあり、これらの相関係数は0.87~0.98と高い。その一方で、図-5(b)に示すように、これらの近似直線の傾きは時間依存性があり、同じ質量変化率でも浸漬時間の経過とともに水分浸透深さが大きくなるのが分かる。さらに、OPCに比べFA15%置換とした供試体では、その傾きはいずれの時間においても小さい傾向にある。このことから、コンクリートに一定量の水分が浸透した場合は、FA15%置換の水分浸透深さが小さくなると思われる。

### 3.3 内部含水率

200×200×150mm 供試体の一面浸漬試験における内部含水率測定結果をW/Cごとに整理し、OPCとFA15%とを比較したものを図-6に示す。なお、内部含水率は、2本のセンサー間の電気抵抗から算出した値であり、センサー近傍に液状水が到達した際の値の変化が顕著であるため、値の変化は基本的には液状水の到達を示していると考えられる。

はじめに、FA15%置換の結果について、浸漬開始時点では深さ10mmの内部含水率が低いが、これは各養生後の乾燥期間中にコンクリートの表面側で乾燥が進行したためである。また、いずれの供試体も深さ10mmでは浸漬から3時間で内部含水率が高くなっており、水分が到達していると考えられる。水中養生では、いずれの水セメント比でも深さ30mm以深では内部含水率はほとんど変化せず、7日間の浸漬でも水分が深さ30mmに到達していないと考えられる。一方、W/C=60%の気中養生および封緘養生、W/C=50%の気中養生では7日間の浸漬中に水分が深さ50mmに達していると考えられ、特にW/C=60%の気中養生では浸漬から12時間程度で深さ70mmに達したと考えられる。なお、



(a)W/C=60% 内部含水率の経時変化

図-6 内部含水率測定結果 (その1)

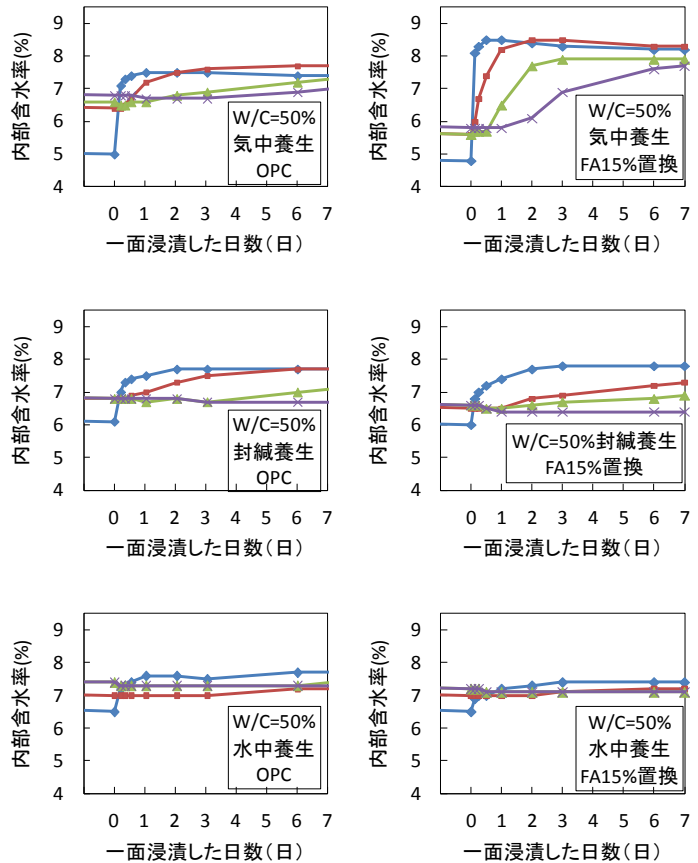
これらの傾向は3.2節で述べた割裂による目視観察結果とおおむね一致している。また、水セメント比が異なるか養生方法の違いによって内部含水率の変動が異なり、その傾向は質量変化率および水分浸透深さの傾向と同様である。

次に、OPC と FA15%置換の結果について比較する。W/C=60%の気中養生では、図-6(a)に示すように、FA15%置換の内部含水率はOPCに比べ浸漬前の乾燥期間において低くなっており、浸漬開始とともに大きく上昇している。また、その上昇は比較的早期に起きており、特に、深さ50mmおよび70mmに水分が到達するのに要する時間が短くなっている。W/C=60%の封緘養生では、深さ10mmでの内部含水率の上昇は似た傾向を示す一方、深さ30mm以深の上昇がやや抑制される傾向にある。W/C=60%の水中養生ではOPCとFA15%置換共に深さ10mmでの内部含水率の上昇のみ確認され、大きな違いはみられなかった。

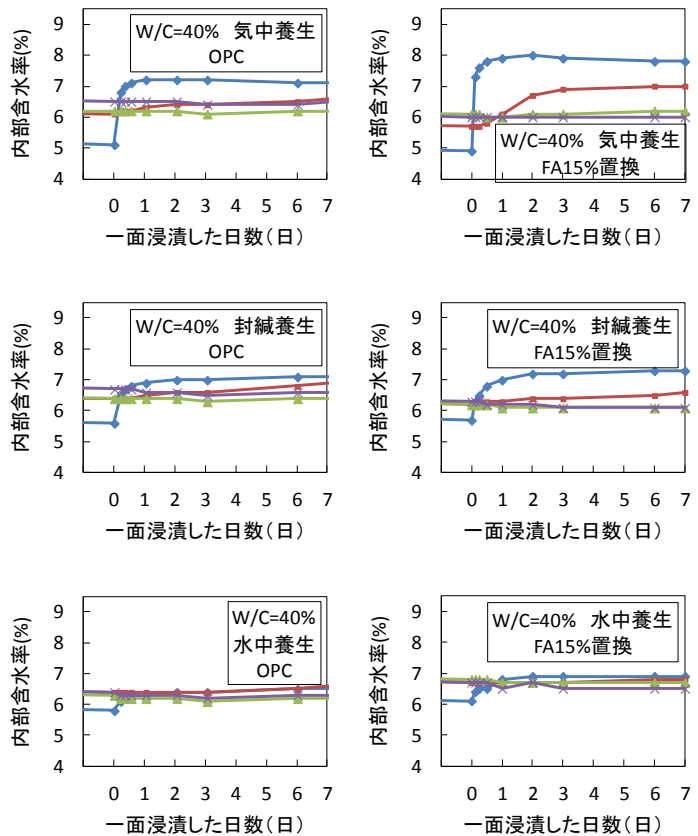
W/C=50%の気中養生では、図-6(b)に示すように、W/C=60%の気中養生と同様に浸漬前の乾燥において内部含水率が低くなっており、浸漬開始とともに大きく上昇している。ここで、OPCでは抑制されていた深さ50mmおよび70mmでの内部含水率の上昇が顕著となった。W/C=50%の封緘養生では、W/C=60%の封緘養生と同様に深さ30mm以深の内部含水率の上昇がやや抑制される傾向にある。W/C=50%の水中養生はW/C=60%の水中養生と同様にOPCとFA15%置換共に深さ10mmでの内部含水率の上昇のみ確認され、大きな違いはみられなかった。

W/C=40%の気中養生では、図-6(c)に示すように、OPCではみられなかった深さ30mmでの内部含水率の上昇が顕著となった。W/C=40%の封緘養生ではOPCとFA15%置換共に深さ10mmでの内部含水率の上昇のみ確認され大きな違いはみられなかった。W/C=40%の水中養生はW/C=60%および50%の水中養生と同様にOPCとFA15%置換共に深さ10mmでの内部含水率の上昇のみ確認された。これはW/C=40%の封緘養生と同様の傾向だが、封緘養生に比べ水中養生の上昇程度は小さい。

以上より、気中養生とした場合、いずれの水セメント比においてもOPCに比べFA15%置換としたコンクリートでは、同一の浸漬時間での水分浸透深さは大きいと考えられる。一方、封緘養生では、OPCに比べFA15%置換としたコンクリートでは水分浸透が抑制されていると考えられる。また、水中養生ではOPCとFA15%置換共に深さ30mm以深での内部含水率の上昇はほとんどなく、有意な差はみられなかった。これらの原因として、養生方法の違いにより水分



(b)W/C=50% 内部含水率の経時変化



(c)W/C=40% 内部含水率の経時変化

図-6 内部含水率測定結果 (その2)

供給状況が異なることでセメントと FA の反応の進行程度に差があり、組織の緻密化の程度が異なることが考えられる。このことから、FA を混和したコンクリートは、乾燥傾向となる養生を避け、湿潤な養生を行うことで普通コンクリートより水分浸透抵抗性に優れたコンクリートになると考えられる。

### 3.4 圧縮強度と水分浸透深さの関係

図-7 に、材齢 28 日までの各養生後に測定した圧縮強度と、浸漬試験における水分浸透深さとの関係を示す。全体的には、圧縮強度が高いほど水分浸透深さが小さくなる傾向にある。また、圧縮強度が高いほど浸漬時間の差による水分浸透深さの伸びが小さい傾向にある。しかし、W/C=60%の封緘養生および水中養生と W/C=40%の気中養生とでは同程度の圧縮強度であるにもかかわらず W/C=60%の封緘養生の方が水中養生と比べて水分浸透深さが大きく、また、W/C=40%の気中養生も W/C=60%の封緘養生および水中養生と比べて大きい傾向にある。このため、圧縮強度のみで水分浸透深さを推定するには課題があると考えられる。

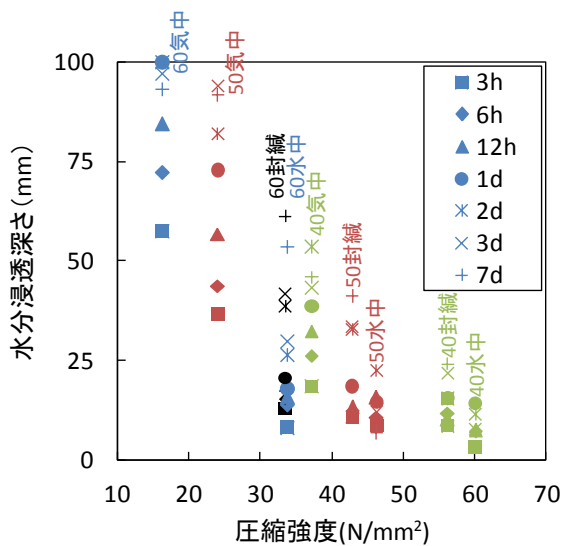


図-7 FA15%置換の圧縮強度と水分浸透深さとの関係

## 4. まとめ

本研究において得られた知見を以下に示す。

(1) 水分浸透による質量変化率は、気中養生とした場合

は普通コンクリートに比べフライアッシュコンクリートの変化率が高いが、封緘養生とした場合は同程度となった。

- (2) 水分浸透深さは、気中養生とした場合は普通コンクリートに比べフライアッシュコンクリートの深さが大きくなったが、封緘養生および水中養生とした場合は小さい傾向にある。
- (3) 質量変化率と水分浸透深さは比例関係にあり、その近似直線の傾き（水分浸透深さ/質量変化率）は浸漬時間とともに変化する。普通コンクリートの傾きに対し、フライアッシュコンクリートの傾きはいずれの浸漬時間においても小さい傾向にあり、フライアッシュコンクリートへの水分浸透の抵抗性の高さが示唆された。
- (4) フライアッシュを混和したコンクリートは、乾燥傾向となる養生を避け、湿潤な養生を行うことで普通コンクリートより水分浸透抵抗性に優れたコンクリートになると考えられる
- (5) 圧縮強度が高いほど水分浸透深さが小さくなる傾向にあるが、同程度の圧縮強度であるにもかかわらず水分浸透深さに大きな差がみられる供試体もあり、圧縮強度のみで水分浸透深さを推定するには課題がある。

### 参考文献

- 1) 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
- 2) 呉富栄, 榊田佳寛, 中村成春, 新沼大史：フライアッシュを使用したコンクリートの強度発現に及ぼす養生変化の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.569-574, 2003
- 3) 鈴木浩明, 上田洋：コンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.676-681, 2014
- 4) 鈴木浩明, 玉井謙, 上田洋：コンクリート表層における水分浸透深さの時間依存性及び水セメント比と養生の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.751-756, 2013