

論文 フライアッシュの品質が PC 用モルタルの性状に及ぼす影響

北野 勇一*1・塩井 健太*2・堀池 一男*3・矢島 典明*4

要旨: 本研究では、蒸気養生を行い製作されるプレキャスト PC 部材へのフライアッシュの適用を目的とし、水セメント比 38.4%を変化させずにフライアッシュの添加率を 20%とした PC 用モルタルの諸性状について実験的に検討した。検討にあたっては同一の火力発電所より産出されるフライアッシュの種類 (JIS II 種, 原粉) や採取時期を変えるとともに、水セメント比 50%の RC 用モルタルと対比した。その結果、フライアッシュの品質が PC 用モルタルのフレッシュ性状や強度発現性状及び塩分浸透性状に及ぼす影響は小さいこと、モルタルの製造方法によってはフライアッシュ混入による空気連行性への影響を低減できることが確認された。

キーワード: プレストレストコンクリート, フライアッシュ, 蒸気養生, モルタル

1. はじめに

近年、塩害環境下での耐久性向上や環境負荷の軽減といった新たな社会的要請から、プレストレストコンクリート (以下、PC という) 構造物への高炉スラグ微粉末の適用が広まりつつある^{1), 2)}。フライアッシュについては、高炉スラグ微粉末と同様に産業副産物を適切に活用することによりコンクリートの高性能化が図れるものであり、今後、PC 構造物への利用拡大が期待される。

しかし、現在のところ、フライアッシュを PC 構造物に適用した事例は少ない。これは、PC に用いるフライアッシュの品質や供給・受入体制、PC 構造物としての性能照査手法に課題が残されているためである。特に、石炭火力発電における多品種の海外炭使用、燃焼方法、石炭灰の回収・処理方法の違いにより、フライアッシュの品質が大きく変動することが懸念される。また、石炭灰の有効利用の観点から、JIS A6201 に規定されるフライアッシュ II 種 (以下、JIS II 種という) のみでなく、品質によってはフライアッシュ原粉等の活用も望まれる。

そこで本研究では、蒸気養生を行い製作される設計基準強度 50N/mm²のプレキャスト PC 部材を対象とし、水セメント比 38.4%を変化させずにフライアッシュの添加率を 20%としたモルタル (以下、PC 用モルタルという) を用い、フライアッシュの品質が PC 用モルタルの諸性状に及ぼす影響について実験的に検討した。ここで、コンクリートではなくモルタルを用いたのは、粗骨材の影響を排除することにより、フライアッシュの品質が各種性状に与える影響を厳密に評価できるものと考えたためである。また、検討にあたっては、フライアッシュの種類や採取時期を変えるとともに、水セメント比 50%、フライアッシュの添加率を 20%としたモルタル (以下、RC 用モルタルという) と対比した。フライアッシュの種類

は JIS II 種と原粉 (フライアッシュ IV 種 (以下、JIS IV 種という) に相当するもの) とし、強熱減量の値に対して ±1.0% 程度の変動を持たせるために採取時期を変化させた。これは、フライアッシュの品質が上記の範囲内であっても、PC 用コンクリートの配合を変更する必要性が生じないかを検証するためである。

なお、本来であれば、ある程度の長期間にわたって採取したフライアッシュを用いて検討するべきであるが、本研究ではフライアッシュ以外の材料を同一の品質とすることを優先させたいがため、フライアッシュの採取時期は 2012 年 6 月の 1 ヶ月間に限った。

2. 実験方法

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。本実験では PC 用モルタルに早強ポルトランドセメント、RC 用モルタルに普通ポ

表-1 使用材料

材料名	記号	種類・産出時期	密度 (g/cm ³)
セメント (C)	H	早強ポルトランドセメント	3.13
	N	普通ポルトランドセメント	3.16
フライアッシュ (F)	F1	JIS II 種	2.24
	F2	原粉混合品	2.19
	F3	原粉 6/8 採取品	2.21
	F4	原粉 6/26 採取品	2.15
細骨材	S	砕砂	2.64
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤*	—
	AE	AE 剤	—

*PC 用モルタルはプレキャスト製品向け、RC 用モルタルはレディミクストコンクリート向けのものを用いた。

*1 川田建設 (株) 技術部技術課 (正会員)

*2 川田建設 (株) 技術部技術課

*3 川田建設 (株) 東日本統括支店北関東事業所那須工場

*4 (株) ジェイベック 資源リサイクル事業部石炭灰利用推進室

表-2 フライアッシュの品質

試料名	二酸化 けい素 (%)	湿分 (%)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm ³)	45μm ぶ るい残分 (%)	プレー ン値 (cm ² /g)	フロー 値比 (%)	活性度指数(%)	
								28 日	91 日
F1	60.7	0.1	3.0	2.24	4	4460	106	84	103
F2	60.8	0.0	3.8	2.19	30	3820	99	81	93
F3	62.7	0.0	3.4	2.21	32	3960	93	79	90
F4	63.2	0.0	4.8	2.15	30	4030	92	80	91
JIS II 種	45.0 以上	1.0 以下	5.0 以下	1.95 以上	40 以下	2500 以上	95 以上	80 以上	90 以上
JIS IV 種					70 以下	1500 以上	75 以上	60 以上	70 以上

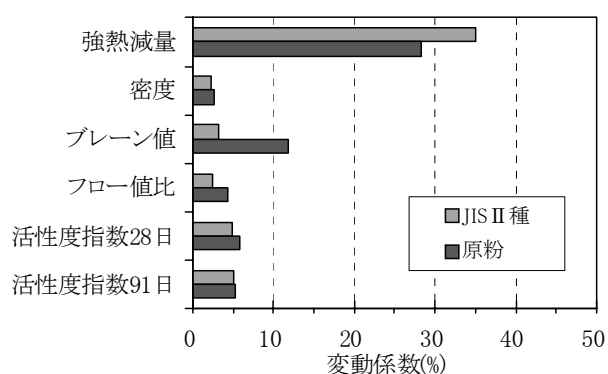
ルトランドセメントを用いた。フライアッシュは、実際のコンクリートの製造を考えると特定の火力発電所からの供給となるため、同一の火力発電所より採取した JIS II 種に適合する試料 F1 と、原粉（試料 F2・F3・F4）の 2 種 4 品を用いることにした。原粉のみ 3 品としたのは、回収時の選別や分級処理が特になされてなく、JIS II 種と比べ、品質の変動が大きくなるためである。混和剤は、高性能 AE 減水剤と AE 剤（通常のコンクリート製造にも配慮し、フライアッシュ用ではないもの）を用いた。

フライアッシュの品質を表-2 に示す。JIS II 種である試料 F1 に比べ、原粉（試料 F2・F3・F4）はいずれも強熱減量と 45μm ふるい残分が大きく、密度・プレーン値・フロー値比・活性度指数が小さい。ただし、今回用いた原粉の品質は比較的良く、いずれも JIS IV 種に適合するものであった。また、試料 F2 は炭種が変わるごとに 3 回採取した原粉を混合したもの（強熱減量 3.8%）であり、これに対し、試料 F3 は強熱減量が最小のもの（3.4%）、試料 F4 は強熱減量が最大のもの（4.8%）とした。強熱減量を指標としたのは、同じ火力発電所から産出するフライアッシュの場合、品質の変動が最も大きいことによる（図-1 参照）。

2.2 モルタルの配合

モルタルの配合例を表-3 に示す。この内、フライアッシュ無混入の配合である PC 用モルタル“H のみ”は材齢 1 日で 35N/mm² と材齢 7 日で 50N/mm²、RC 用モルタル N のみは材齢 28 日で 30N/mm² を確保することを実際に確認したコンクリート配合（スランプ 12cm、空気量 4.5%、粗骨材の最大寸法 20mm）から、粗骨材を除いたものである。また、フライアッシュを混入した配合は、無混入の配合と同一の水量および水セメント比とし、フライアッシュの添加率（F/C×100）を 20%としたものである。フライアッシュをセメント置換でなく、いわゆる外割とした理由は、フライアッシュの混入が早期の強度発現にほとんど寄与しないことが蒸気養生を行う PC 用のコンクリートにおいて確認されていることによる^{4) 5)}。

混和剤の使用量は、モルタルフロー250±10mm、モル



注釈：文献 3 を基に JIS II 種、原粉とも 50 試料の変動係数を算出し、図を作成した。本実験で対象とした火力発電所においても、ほぼ同様の傾向を示すことを確認している。

図-1 フライアッシュ品質変動の調査例

表-3 モルタルの配合例（対セメント重量%）

種別	配合名	水	フライ アッシュ	細骨材
PC 用 モルタル	H のみ	38.4	0	181
	H+F1		20	158
RC 用 モルタル	N のみ	50	0	257
	N+F1		20	234

タル空気量 8±1% が得られるように調整した。

2.3 モルタルの性状に関する試験

試験項目は、フレッシュ性状、強度発現性状、塩分浸透性状とした。各試験とも、蒸気養生を除き、20℃の室内にて実施した。また、フライアッシュ混入により懸念される中性化抵抗性は、フライアッシュを外割で混和した場合にはセメント量が減少しないこと等の理由により、内割で混和した場合と比較して中性化の進行速度が小さく、フライアッシュを混和しない場合と同等程度以下になるという報告⁶⁾があり、今回は検討を省略した。

(1) フレッシュ性状に関する試験

本実験では、コンクリートの流動性との相関性を保つため、文献 7 を参考にモルタルの製造を行い、フレッシュ性状試験を実施することにした。

表-4 供試体の保管方法

名称	保管方法	水分蒸発率*
水中	養生室水中 (20℃)	——
湿空	養生室気中 (20℃, 80%程度)	1.5~2ml/24h
気中	試験室気中 (20℃, 60%程度)	5~8 ml/24h

*ISO1920-8を参考に直径78mm,高さ110mmのピーカーに375gの水を入れ,24時間の水分蒸発率を測定した。

モルタルはJIS A5201に規定されるミキサを用い,粉体と細骨材を低速で30秒間空練りし,水および混和剤を投入し低速30秒間,高速180秒間の合計4分間で練り混ぜた(以下,練混ぜ方法「標準」という)。練り上がったモルタルを排出した後,モルタルフロー試験(JIS A1171に規定される上端内径50mm,下端内径100mm,高さ150mmのミニスランプコーンを用い,引抜きフローを測定する)と空気量試験(JIS A1128の空気室圧力方法に準じたモルタル用エアメーターを用いる)を実施した。

また,フライアッシュとして原粉を用いると,空気連行性が低下することが想定される。そこで,モルタルの製造方法を変更することにより空気連行性を改善できるかどうかについて別途検討することにした。詳細は,3.1節(2)項に示す。

(2) 強度発現性状に関する試験

φ5×10cmの円柱供試体を探取し,PC用モルタルでは蒸気養生(最高温度45℃を6時間保持)を行い翌日に脱枠し,RC用モルタルでは材齢1日で脱枠後から20℃の水中にて材齢7日まで養生した。その後,PC用モルタルは材齢1日,RC用モルタルは材齢7日より,表-4に示す方法にて供試体を保管し,所定の材齢にて圧縮強度試験(JSCE-G505に準じる)を実施した。

(3) 塩分浸透性状に関する試験

φ5×10cmの円柱供試体を前項に示した方法にて養生・保管を行い,図-2に示す2通りの方法にて供試体を処理した後,濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に2ヶ月間浸せきした。これらの供試体を割裂し,0.1N硝酸銀溶液を噴霧して変色した部分の塩分浸透面からの距離をノギスで測定した。測定は1mm単位で,2体の平均を塩分浸透深さとした。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

(1) フライアッシュの品質による影響

フレッシュ性状試験の結果を表-5に示す。表より,フライアッシュを混入することでAE使用量が明らかに増大することがわかる。また,フライアッシュの品質がPC用モルタルの流動性や空気量に与える影響を確認するため,混和剤使用量をフロー値比および強熱減量との

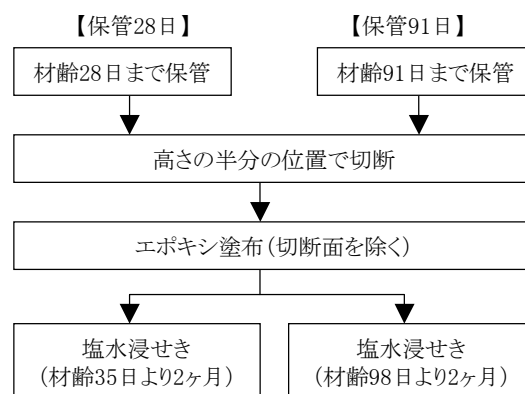


図-2 塩水浸せき用供試体の処理

表-5 フレッシュ性状試験結果

種別	配合名	混和剤量 ((C+F)×%)		モルタルフロー (mm)	モルタル空気量 (%)
		SP	AE		
PC用モルタル	Hのみ	0.70	0.0015	245	8.2
	H+F1	0.80	0.0080	245	7.9
	H+F2	0.85	0.0100	250	7.4
	H+F3	0.85	0.0100	255	7.7
	H+F4	0.85	0.0100	260	7.2
RC用モルタル	Nのみ	0.65	0.0010	245	7.9
	N+F1	0.60	0.0070	240	7.2
	N+F2	0.75	0.0080	255	8.3
	N+F3	0.75	0.0080	240	8.3
	N+F4	0.75	0.0080	260	7.9

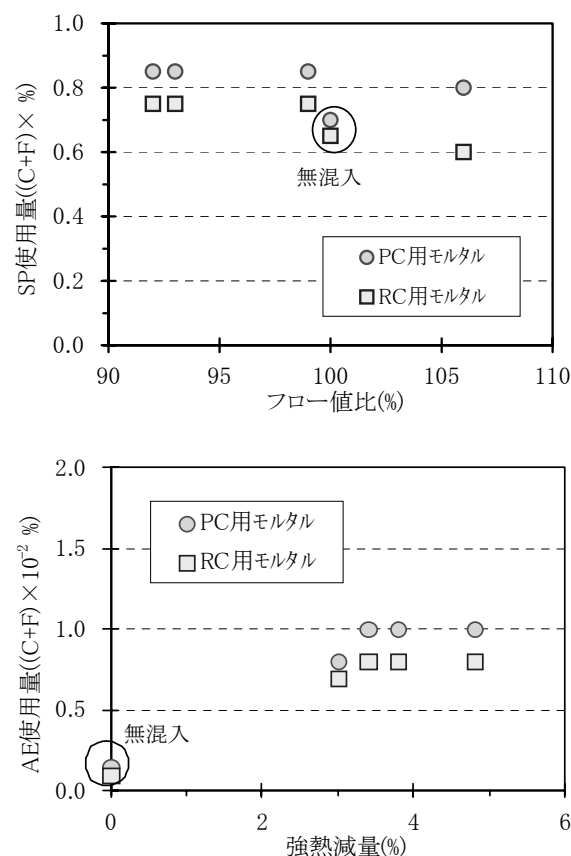


図-3 フライアッシュの品質と混和材使用量の関係

関係として整理した結果を図-3に示す。図より、SP使用量はフロー値比に、AE使用量は強熱減量に関連する傾向にあるものの、今回用いたフライアッシュの品質の差が混和剤の使用量に及ぼす影響は、PC用・RC用モルタルとも小さいことがわかる。

(2) モルタルの製造方法による影響

ここでは、PC用モルタル“H+F2”に着目し、コンシステンシーを高めた場合（SP使用量を増すことによる）と分割練りを行う場合（図-4に示すように水と混和剤を分割投入することによる）について検討した。後者は、分割アで全粉体を、分割イでフライアッシュを先行して練り混ぜるために必要な水と混和剤を分割投入し、残りの材料を含めAE剤を後から投入した。

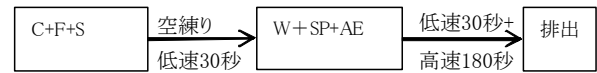
上記の方法により製造したモルタルのフレッシュ性試験結果を表-6に示す。これより、コンシステンシーを高めることや分割練りを行うことでAE使用量が半減することが確認された。一方、分割アおよび分割イとも標準練りと同じモルタルフローを得るためのSP使用量は同量が必要であり、分割練りの効果が表れなかった。これらの結果は、吉野らの研究⁹⁾に一致する所もあるが、「フライアッシュとセメントを混和剤を除く水量であらかじめ練り混ぜた場合に連行空気が増加する」との知見と対比すると、フライアッシュとセメントを分割した場合でも同様の結果が得られること（分割アと分割イ）、AE剤を同時に添加した場合でもモルタルフローを大きくすることで同様の効果が得られることが新たに確認された。つまり、フライアッシュに十分な流動性を付与することで空気連行性を高めることができたのは、フライアッシュを混入したモルタルの製造方法として分割練りを行うことよりも、むしろ、フライアッシュ粒子表面を吸着水で覆うばかりでなく、多孔質粒子である未燃炭素に水を吸着させる必要があるためと推察される。

3.2 強度発現性状

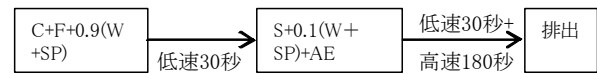
(1) 初期強度

図-5は材齢1・7日強度を活性度指数との関係として整理したものであり、直線回帰の結果も併せて示した。ここで、フライアッシュ無混入のものは、フライアッシュ混入のものよりも粉体量として添加率20%分だけ少ないため、標準モルタルの活性度指数100%から便宜上83.3%（=100%÷1.2）に低減して表示することにした。図より、PC用モルタルは蒸気養生を行ったものの、フライアッシュ混入による初期強度の向上は認められないことがわかる。ただし、フライアッシュ混入モルタルはいずれも無混入のモルタルと同等の強度が得られており、本実験のようにフライアッシュを外割で用いれば初期強度を損なうことがないといえる。

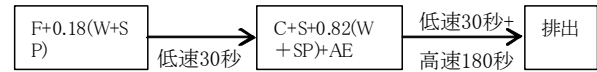
標準：水と混和剤を一括投入



分割ア：全粉体の練混ぜに必要な水と混和剤を分割投入



分割イ：フライアッシュの練混ぜに必要な水と混和剤を分割投入



注釈：分割水量は、練混ぜ性状から判断したものであり、拘束水比（ペーストが変形し始めるときの水粉体容積比であり、粉体に拘束される水量の程度を表す）を目安に定めたものではない。これは、文献8に示される早強ポルトランドセメントの拘束水比を1.24とした場合より算出される水セメント比が39.6%であり、PC用モルタルではペーストを練り混ぜるための水量がすでに不足していることによる。

図-4 モルタルの練混ぜ方法

表-6 フレッシュ性状に及ぼす製造方法の影響

配合名	練混ぜ方法	混和剤量 ((C+F)×%)		モルタル フロー (mm)	モルタル 空気量 (%)
		SP	AE		
H+F2	標準	0.85	0.0100	245	7.4
		1.00	0.0050	310	8.6
	分割ア	0.85	0.0050	245	7.1
	分割イ	0.85	0.0050	240	8.4

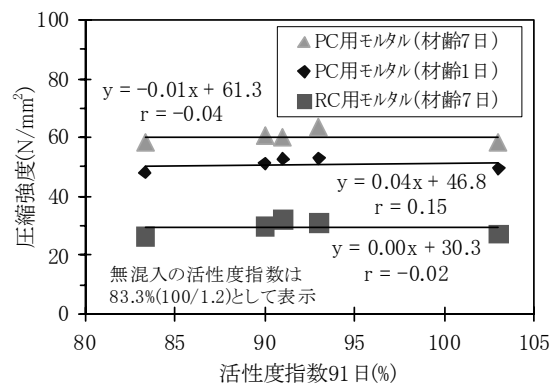


図-5 活性度指数と初期強度の関係

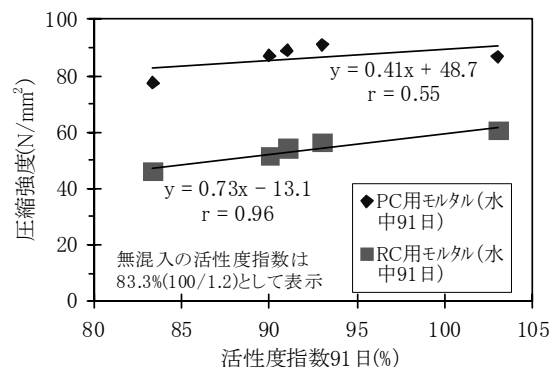


図-6 活性度指数と長期強度の関係

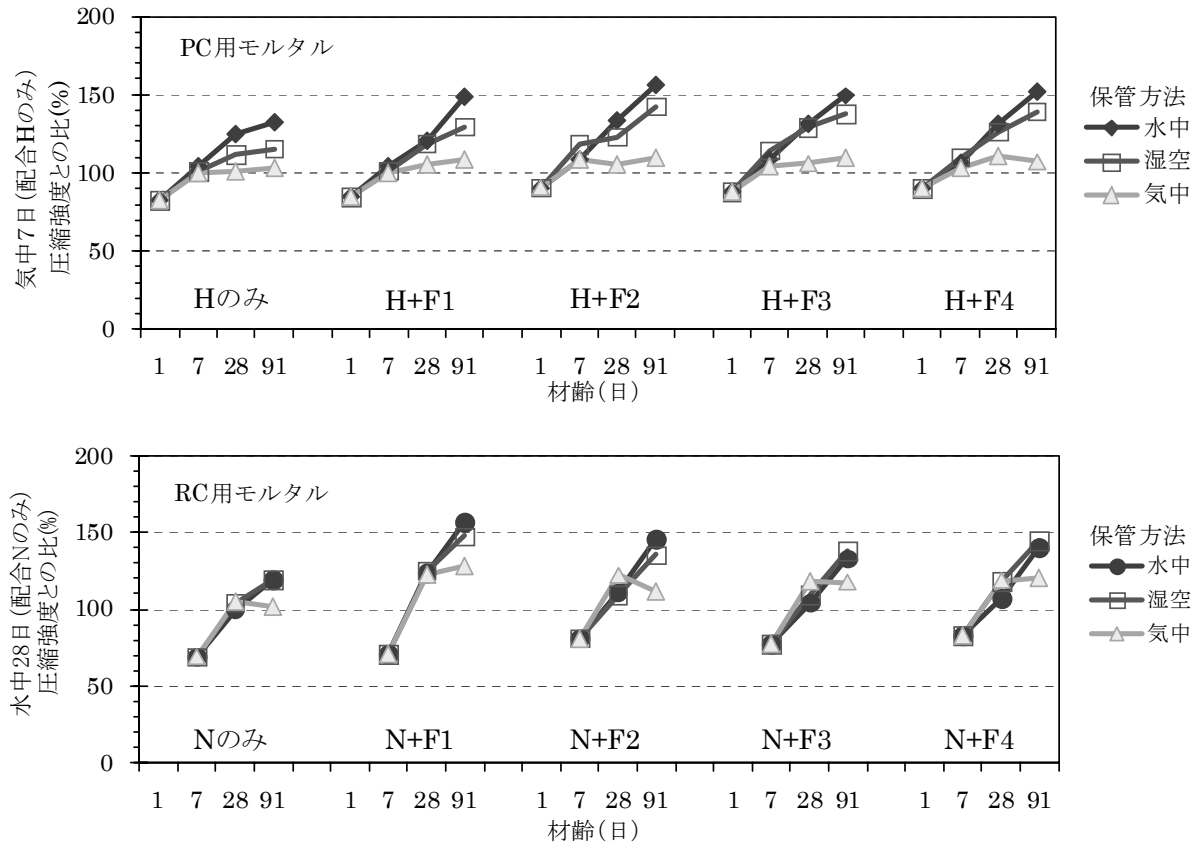


図-7 強度発現性状に及ぼす保管方法の影響

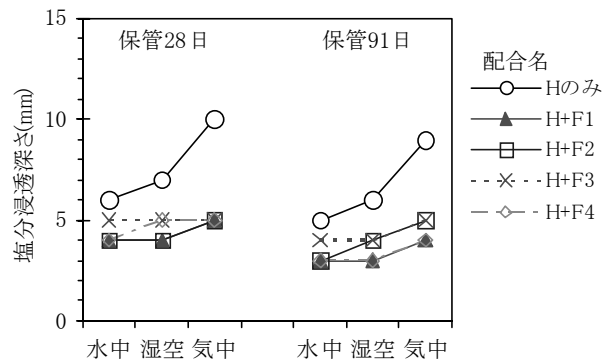
(2) 長期強度

図-6は材齢91日まで水中養生を行った供試体の圧縮強度を活性度指数との関係として整理したものであり、直線回帰の結果も併せて示した。図より、PC用・RC用モルタルとも、フライアッシュ混入による強度の増進が認められ、かつ、活性度指数が大きいものほど圧縮強度も増大する傾向にあることが確認された。

(3) 蒸気養生後の保管方法による影響

図-7は、設計基準強度確認供試体(PC用モルタルは配合“Hのみ”の気中7日58.4N/mm²、RC用モルタルは配合“Nのみ”の水中28日38.7N/mm²)に対する強度発現率を示したものである。図より、フライアッシュを混入したモルタルは、無混入のものとは比べ、保管方法の影響を大きく受けることがわかる。特に、PC用モルタルは顕著で、水中保管では材齢91日強度が高まるのに対し、蒸気養生後に気中保管したものでは、強度の増進がほとんど認められない。一方、湿空に保管した供試体では、PC用・RC用モルタルとも長期強度の増進が確認された。つまり、部材寸法にもよるが、フライアッシュを混入することにより長期強度を増進させるためには、湿潤な環境に保管するなどして、水の逸散を長期的に抑制する必要があるといえる。

PC用モルタル



RC用モルタル

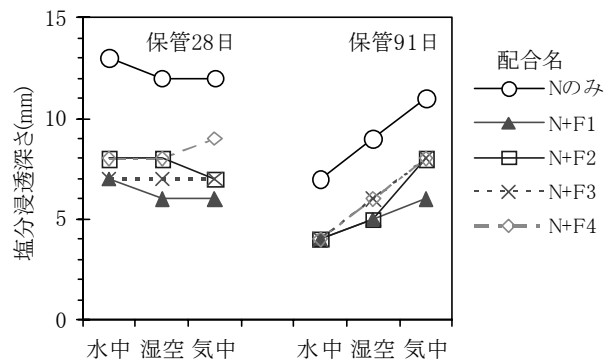


図-8 塩分浸透性試験結果

3.3 塩分浸透性状

塩分浸透性状試験の結果を図-8に示す。これより、フライアッシュを混入したモルタルは、無混入のモルタルよりも塩分浸透深さが総じて小さくなり、フライアッシュの品質による差も小さいことがわかる。また、フライアッシュを混入したPC用モルタルでは保管方法や保管期間を変えても塩分浸透深さがあまり変化しないのに対し、RCモルタルでは保管91日において塩分浸透深さが水中<湿空<気中の順に大きくなり保管方法の影響が顕著に表れることがわかる。これは、鏡らの研究¹⁰⁾において「蒸気養生を行うとフライアッシュの反応率が材齢1日から高い」ことに対し、常温20℃で材齢28日までの保管ではポゾラン反応があまり進行しない（あるいは、多少進行した場合でも、塩水浸せき中にポゾラン反応が引き続き進行することで材齢28日までの保管方法の差異がなくなる）ことが理由として挙げられる。つまり、本研究で対象としたPC用モルタルのように、早強ポルトランドセメントを用い水セメント比も低め、なおかつ、蒸気養生を行った場合には、セメントの水和反応ばかりでなく、フライアッシュのポゾラン反応も促進されるので、塩分浸透性に及ぼす保管方法の影響が小さくなったものと推察される。

なお、フライアッシュのポゾラン反応が早期に促進されることと、3.2節で述べたフライアッシュ混入による初期強度の向上が認められないことは整合性がとれていないとも捉えられるが、例えば、形成される組織構造によっては強度と耐久性への寄与度が異なることも考えられる。この点については、今後の課題とする。

4. まとめ

同一の火力発電所より産出されたフライアッシュⅡ種1品と原粉3品（Ⅳ種相当で、強熱減量±1.0%程度の変動持たせたもの）を用い、水セメント比38.4%を変化させずにフライアッシュの添加率を20%としたPC用モルタルの諸性状について実験的に検討した結果、次のことが確認された。

- (1) フライアッシュを混入することで空気連行性が低下するものの、フライアッシュの品質がPC用モルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響は小さい。この結果は、水セメント比50%のRC用モルタルと同様の傾向を示すものである。また、モルタルの製造方法によってはフライアッシュ混入による空気連行性への影響を低減できる。
- (2) フライアッシュ混入のPC用モルタルは、フライアッシュの品質にかかわらず、無混入のモルタルと同等の初期強度が得られる。また、蒸気養生後に一定の湿空下に保管することで長期強度の増進が図れる。

これらの結果は、蒸気養生を行わない水セメント比50%のRC用モルタルと同様の傾向を示すものである。

- (3) フライアッシュの混入によりPC用モルタルの塩分浸透抵抗性が増す。この結果は、水セメント比50%のRC用モルタルと同様の傾向を示すものである。また、フライアッシュの品質や蒸気養生後の保管方法がPC用モルタルの塩分浸透性状に及ぼす影響はRC用モルタルと比べて同程度か小さくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 国土交通省新技術情報提供システム：高炉スラグ微粉末6000cm²/gを用いた高耐久性PC構造物, NETIS登録No.QS-980177-V
- 2) 国土交通省新技術情報提供システム：環境に優しい高品質・高流動コンクリートを使用したプレキャストPC製品, NETIS登録No.CB-030101-A
- 3) 江藤弘之, 赤塚剛, 山本晃：フライアッシュの品質変動がコンクリートに及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.1, pp.111-116, 2002
- 4) 俵道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦：プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.1, pp.197-202, 2011
- 5) 山村智, 鈴木雅博, 坂坂匠, Irfan Prasetia, 鳥居和之：フライアッシュを混入したコンクリートの湿潤養生日数に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, V-470, 2012.9
- 6) 例えば, 上田隆雄, 和田良太, 横田優, 七澤章：フライアッシュによる置換方法がコンクリート中の鉄筋腐食挙動に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.115-120, 2001
- 7) 小津博, 山田一夫, 矢野真弓, 鳥居南康一：セメントの違いによるペースト・モルタル・コンクリートの流動性の相関関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.283-288, 2001
- 8) 北野勇一, 津浦敏春, 野田行衛：高流動コンクリートの利用開発, 川田技報 Vol.16, pp.70-75, 1997
- 9) 吉野公, 井上正一, 黒田保, 村山真一：フライアッシュの性質が混和剤の添加量に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.175-180, 2005
- 10) 鏡健太, 佐藤正己, 梅村靖弘：フライアッシュのポゾラン反応に及ぼす蒸気養生履歴の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.173-178, 2011