

論文 早強セメントをベースセメントとした養生条件が異なるフライアッシュコンクリートの物性

今岡知武*1・石川嘉崇*2・鷲尾朝昭*3・中村英佑*4

要旨：フライアッシュコンクリートの初期強度改善を目的として、早強セメントをベースセメントとしたフライアッシュコンクリートを作製し、基礎物性を評価した。フライアッシュ置換率を 0, 20, 30%, 養生方法を水中養生、封かん養生とし、養生温度を 5, 10, 20℃として、各種要素が強度、耐久性に与える影響を評価した。フライアッシュコンクリートを早強セメントベースとすることにより、脱型強度に達する材齢を短縮することが可能であること、中性化抵抗性の改善が可能であること、普通セメントベースのフライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性と同程度であることが確認できた。

キーワード：フライアッシュ、早強セメント、初期強度、圧縮強度、中性化、塩化物イオン濃度、養生温度

1. はじめに

国内のセメント産業は、日本の温室効果ガス総排出量の約 4%に相当する CO₂を排出していることから、積極的な CO₂排出量削減の取り組みを推進、実践している¹⁾。ここで、セメント産業における CO₂の排出量は、クリンカの製造に起因するところが大きく、更なる CO₂排出量削減のためには、クリンカ製造量の低減が必須となることから、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材の利用が有効な手法であると認識されている²⁾。また、これらの混和材を使用したコンクリートは、塩化物イオン浸透抵抗性が向上、アルカリシリカ反応が抑制され、コンクリートをより耐久性のある材料とすることも可能となると言われている³⁾。

しかしながら、フライアッシュセメントの使用率に着目すると、国内のセメント使用量のわずか 0.005%程度に留まっている。経済産業省が実施した調査⁴⁾によると、フライアッシュセメントを使用しない主な理由として、初期強度の発現が遅れること、必要養生日数が長いことなどが挙げられている。

そのため、フライアッシュの利用促進のためには、一般的な材料でフライアッシュコンクリートの初期強度を改善させることが望ましく、早強ポルトランドセメント（以下、早強セメント）と併用する手法が考えられる。一方で、フライアッシュをセメント代替で使用する場合は、中庸熟ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメント（以下、普通セメント）をベースセメントとして用いる場合が多く、早強セメントをベースとしたフライアッシュコンクリートの物性を評価した研究は少ない^{5), 6)}。

そこで、筆者らは、早強セメントをベースセメントとしたフライアッシュコンクリートの基礎物性の取得を目的として、強度、耐久性の評価を行っている⁷⁾。本論文では、養生温度・養生方法を変化させた早強セメントベースのフライアッシュコンクリートの強度、耐久性に関して実施した試験結果について報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料・配合

コンクリートの使用材料を表-1、配合表を表-2に示す。コンクリートの練混ぜは 60 リットル水平二軸強制型ミキサーを使用し、JIS A 1138 に準じて実施した。脱型は材齢 1 日で実施した。水結合材比は 50%一定とし、目標空気量を 4.5±1.5%として AE 剤を使用した。

結合材のフライアッシュ置換率はフライアッシュセメント B 種、C 種を想定し 20, 30%とし、比較のためフライアッシュ置換率 0%の普通セメント、早強セメント単味の供試体も作製した。

2.2 養生条件

養生条件がコンクリートの物性に与える影響を評価するため、養生温度と養生方法を変化させた。養生温度は低温環境における強度発現性を評価するため、5, 10, 20℃で実施した。養生方法は、10℃、20℃養生の場合は水中養生または脱型後にラップを巻きつけることによる封かん養生とし、5℃養生の場合は水中養生のみとした。

供試体の温度を、練混ぜの時点から養生温度に近づけるために、コンクリート材料をそれぞれの養生温度と同じ温度で恒温槽内に保管し、練混ぜ室も養生温度と同程度の温度に保った状態で実施した。また、温度測定用に

*1 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 工修 （正会員）

*2 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 上席研究員 工博 （正会員）

*3 電源開発株式会社 茅ヶ崎研究所 土木技術研究室 サブリーダー 工修 （正会員）

*4 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員 工修 （正会員）

製作したφ100mm×200mmの供試体に温度計を埋め込み、供試体温度の測定を行った。一例としてNF0の温度の計測結果を図-1に示す。養生温度20℃の場合、水和発熱により、初期に24℃程度にまで達しているが、いずれの養生温度についても、練混ぜから24時間経過した後は、概ね所定の養生温度に達している。なお、他の配合においても同様の測定結果となっている。

2.3 試験内容

(1) 強度試験

圧縮強度をJIS A 1108に準じて測定し、同時に静弾性係数をJIS A 1149に準じて測定した。供試体の養生は、養生条件に示す通り、養生温度20、10℃の場合は水中養生と封かん養生を実施し、養生温度5℃の場合は水中養生のみとした。試験材齢は1、3、7、14、28、56、91日とし、材齢初期における圧縮強度を評価した。

割裂引張強度をJIS A 1113に準じて測定した。割裂引張強度試験に用いる供試体の養生温度は20℃に限定し、養生方法は水中養生と封かん養生とした。試験材齢は材齢3、7、14、28日とした。

供試体の寸法は圧縮強度試験、割裂引張強度試験ともにφ10×20cmとした。

(2) 中性化抵抗性

中性化抵抗性をJIS A 1153に準じた促進中性化試験により評価した。供試体を材齢28日まで各種条件で養生した後、材齢56日まで温度20℃、湿度60%の室内において保管し、促進中性化試験を開始した。中性化促進条件は20±2℃、湿度60±5%、CO₂濃度5±0.2%としており、中性化促進試験中は温度の変化を与えていない。供試体の寸法は10×10×40cmとし、側面の2面を除いた他の4面をアルミテープにより被覆した。測定は供試体の軸方向端部から7cmの箇所を割裂し、10点の計測値の平均値を中性化深さとした。

(3) 塩化物イオン浸透抵抗性

塩化物イオン浸透抵抗性をJSCE-G572に準じた塩水浸せき試験により評価した。供試体を材齢28日まで各種条件で養生した後、試験を開始した。塩水は20℃に保っており、塩水浸せき期間中は試験温度の変化を与えていない。浸せき期間は91、182日とし、塩化物イオン濃度の測定深度は0-1、1.4-2.4、2.8-3.8、4.2-5.2、5.6-6.6cmの5深度とした。供試体の寸法はφ10×20cmとし、曝露面である打設面下端以外はエポキシ樹脂により被覆した。

3. 強度試験結果

3.1 圧縮強度と養生方法・配合の関係

圧縮強度試験結果を図-2に示す。強度発現性から評価すると、20℃水中養生が最も優れ、10℃封かん養生が最も劣る養生条件である傾向が示された。水中養生と封かん養生の圧縮強度を比較すると、全体的に水中養生の強度発現が優れることが確認された。NF20の養生温度20℃の材齢28日時点の水中養生と封かん養生の圧縮強度を比較すると、封かん養生の方が約4N/mm²低下する結果となり、水分の逸散を抑制した場合においても、水分の供給の有無が強度発現性に影響を与えることが確認された。

表-1 使用材料

材料名	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント： 密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3340cm ² /g 早強ポルトランドセメント： 密度 3.14g/cm ³ ，比表面積 4580cm ² /g
フライアッシュ (FA)	JIS II 種品：密度 2.08g/cm ³ ，比表面積：3810cm ² /g 活性度指数材齢 28 日：82，91 日：100
細骨材 (S)	川砂：密度：2.59g/cm ³ ，吸水率：1.72%
粗骨材 (G)	・5号砕石：密度：2.67g/cm ³ ，吸水率：0.43% ・6号砕石：密度：2.67g/cm ³ ，吸水率：0.46% 5号砕石と6号砕石を1:1の混合比率で使用した。
混和剤	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 AE 助剤： FA 有の配合：高アルキルカルボン酸陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体 FA 無の配合：変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 配合・フレッシュ性状

名称	W/B (%)	FA/B (%)	空気量 (%)	スランプ [*] (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	FA	S	G
NF0	50	0	5.0	9.5	165	330	0	827	968
NF20		20	4.7	10.0	159	254	64	814	988
NF30		30	4.5	8.0	156	218	94	806	1000
HF0		0	4.5	9.0	170	340	0	830	954
HF20		20	4.1	8.0	164	262	66	803	976
HF30		30	4.9	8.0	161	225	97	796	986

名称 N：普通セメントシリーズ，H：早強セメントシリーズ，F～：FA置換率

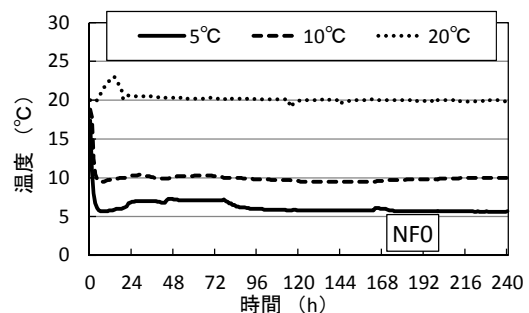


図-1 供試体温度計測結果

ん養生の圧縮強度を比較すると、全体的に水中養生の強度発現が優れることが確認された。NF20の養生温度20℃の材齢28日時点の水中養生と封かん養生の圧縮強度を比較すると、封かん養生の方が約4N/mm²低下する結果となり、水分の逸散を抑制した場合においても、水分の供給の有無が強度発現性に影響を与えることが確認された。

NF0、HF0のセメント単味の配合においては、10℃水中養生、5℃水中養生は20℃水中養生と比較して、初期強度が低下するものの、材齢の経過とともに圧縮強度の差が縮まった。HF0の5℃水中養生においては、材齢14日時点で20℃水中養生の圧縮強度を上回る状況が確認

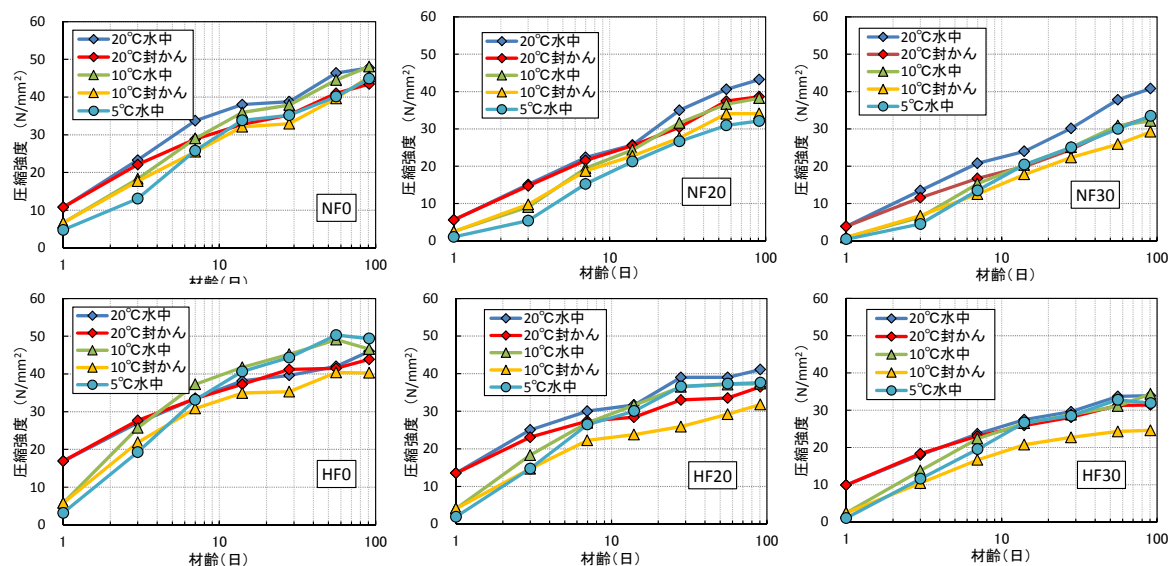


図-2 配合ごとの圧縮強度

された。

NF20, NF30 においては、20℃水中養生の場合、他の養生条件と比較して、初期強度だけでなく 28 日・91 日強度も高くなる傾向が確認された。フライアッシュの反応性には養生温度が与える影響が大きいことが知られており⁸⁾、養生温度が 10℃以下となると、フライアッシュに起因するポズラン反応及び強度発現が進行しづらくなるため⁹⁾、91 日強度においても、養生温度ごとの圧縮強度の差が縮まらなかったものと考えられる。また、材齢と強度の関係からは、

HF20, HF30 においては、材齢 28 日から 91 日にかけて圧縮強度の増加傾向が小さくなる傾向にあり、養生温度が高いほど圧縮強度が高くなるという傾向は確認されなかった。これは、NF20, NF30 の強度発現性と大きく異なる傾向であり、早強セメントベースとすることによって、フライアッシュに起因する強度発現性が変化することを示すものであると考えられる。強度発現のメカニズムについては、今後詳細な検討を実施することとする。

3.2 初期強度と各種配合・養生条件の関係

コンクリート標準示方書の脱型・支保工の取り外しが可能となる圧縮強度¹⁰⁾を参考にして、14N/mm²を初期強度発現の基準とし、配合・養生条件ごとの 14N/mm²を上回る材齢を整理した。測定材齢間の強度は、1, 3, 7, 14 日の強度試験結果を線形補間することにより算定した。結果を図-3 に示す。

フライアッシュ置換率が同じであれば、早強セメントベースとすることにより、脱型強度に達する材齢が短くなっていることが確認された。NF30 では 20℃水中の場合に材齢 4 日で、5℃水中養生の場合、材齢 8 日で脱型が可能となっており、NF0 と比較して、脱型時期が 2~4 日遅くなっている。一方、HF20 は 20℃水中養生の場合に材齢 2 日で、5℃水中養生の場合、材齢 3 日で脱型が可能

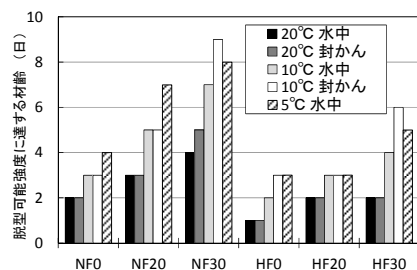


図-3 脱型可能強度 (14N/mm²) に達する材齢

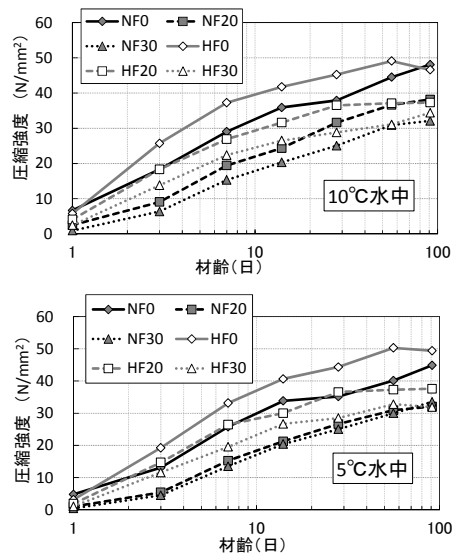


図-4 低温養生時の圧縮強度発現性

な強度に達しており、NF0 の脱型可能となる材齢とほぼ同等となっている。これらのことから、強度発現性の観点からは、フライアッシュを使用した場合においても、早強セメントベースとすることにより、普通セメントベースのフライアッシュコンクリートと比べ脱型時期を短縮することが可能であり、フライアッシュ置換率によっては、脱型時期を NF0 と同等に扱うことが可能であることが示された。

低温環境下での強度発現性を評価するため、10℃水中養生、5℃水中養生の各配合の材齢に伴う圧縮強度試験結果を整理した。結果を図-4に示す。

早強セメントベースとすることで初期強度の発現性が改善され、同一のフライアッシュ置換率で比較すると、材齢 91 日までは早強セメントベースの強度が高い結果となった。また、HF20 は材齢 7 日まで概ね NF0 と同等の強度発現性を示した。これらの結果から、早強セメントベースとすることで、低温養生の場合でも、初期材齢の圧縮強度の低下を抑えることが可能であり、フライアッシュ置換率によっては、初期強度を普通セメント単味の配合と同様に扱うことが可能であることが示された。

3.3 圧縮強度と積算温度の関係

養生温度を変化させた水中養生の圧縮強度と積算温度の関係を図-5に示す。積算温度は式(1)により求めた。

$$M = \sum (\theta + 10) \cdot \Delta t \quad (1)$$

M : 積算温度 θ : 養生温度 Δt : 時間

NF20, NF30 は養生温度が異なる場合でも、積算温度約 1000℃・日以下の水中養生であれば、概ね同一の関係性で整理できることが示された。約 1000℃・日以上では養生温度が高いほど圧縮強度が大きくなる傾向が確認された。これは、ポゾラン反応が、養生温度 20℃では材齢 28 日以降から進行することが要因¹¹⁾と考えられる。

HF20, HF30 は養生温度が異なる場合でも、水中養生であれば、圧縮強度と積算温度の関係は概ね一致した。これらのことから、早強セメントベースのフライアッシュコンクリートの圧縮強度は、養生方法を考慮すれば積算温度を用いて管理することが可能であることが示された。

3.4 圧縮強度と静弾性係数・割裂引張強度の関係

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に、圧縮強度と引張強度の関係を図-7に示す。図中には、コンクリート標準示方書の推定式¹²⁾を示している。

圧縮強度と静弾性係数には良好な相関関係が見られた。本試験結果から得られた圧縮強度と静弾性係数の関係と既往の推定式を比較すると、圧縮強度が約 15N/mm²以下の場合、推定式よりも静弾性係数が小さくなる傾向が確認されたが、概ね標準示方書の式と同等の値を示した。これらの結果から、早強セメントベースのフライアッシュコンクリートの静弾性係数は、既往の推定式を用いて求めることが可能であることが示された。

圧縮強度と割裂引張強度には良好な相関関係が見られた。本試験結果から得られた圧縮強度と割裂引張強度の関と既往の推定式を比較すると、ほぼ同様の値を示した。これらの結果から、早強セメントベースのフライアッシュ

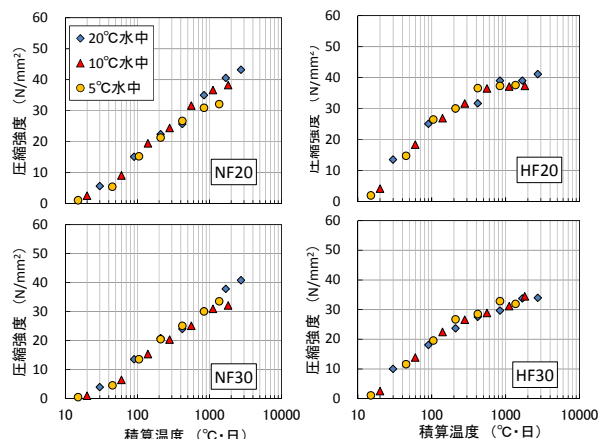


図-5 圧縮強度と積算温度の関係

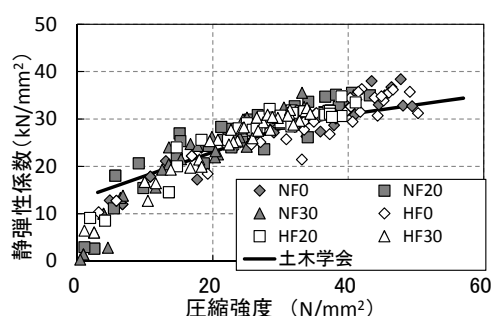


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

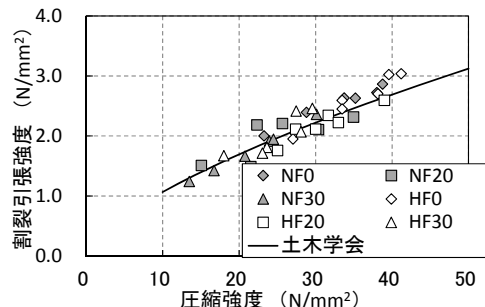


図-7 圧縮強度と割裂引張強度の関係

コンクリートの引張強度は、既往の推定式を用いて求めることが可能であることが示された。

4. 中性化抵抗性

4.1 中性化抵抗性と圧縮強度の関係

材齢 28 日の圧縮強度と、中性化促進試験期間 182 日の中性化深さの関係を図-8に示す。圧縮強度、中性化深さともに、各種養生条件の結果を示している。

早強セメントベースの配合の方が、中性化深さが小さくなり、中性化抵抗性が改善される傾向が確認された。また、フライアッシュ置換率が増加するほど、中性化深さが大きくなった。

材齢 28 日の圧縮強度と中性化深さの関係では、普通セメントベースよりも早強セメントベースの方が、圧縮

強度が大きく、中性化深さも小さい。また、養生温度と養生方法が異なる場合においても、圧縮強度と中性化深さには概ね比例関係が確認され、材齢 28 日強度で中性化深さを整理すると、早強セメントを利用したことによる中性化抵抗性の改善は、初期強度増加に伴う緻密性の向上であると評価される。

一方で、中性化抵抗性は強度だけでなく、コンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量の違い¹³⁾も要因であると考えられるため、今後ベースセメント種の違いに起因する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有量の差が中性化抵抗性に与える影響についても検討する。

4.2 中性化抵抗性と養生条件の関係

標準養生（20℃水中）に対する各種養生条件の中性化促進期間 182 日の中性化速度係数の比率を図-9 に示す。

普通セメントベースの配合では、養生温度が低くなるに従い、また封かん養生である方が、中性化速度係数が増加している。NF20、NF30 の配合は NF0 と比較して、中性化速度係数の比率が大きくなる傾向が確認された。

HF20 の中性化速度係数は、養生温度が 10℃、5℃の場合、養生方法が水中養生、封かん養生の場合でも、ほぼ変化しない結果となった。また、HF0 の場合、標準養生と比較して中性化速度係数は低下するものの、HF20 と同様に、養生温度が 10℃、5℃の場合でも、中性化速度係数はほぼ変化しない結果となった。これらのことから、早強セメントベースとすることにより、養生温度や養生方法が中性化抵抗性に与える影響を低減させることが可能であると推定される。一方、HF30 においては、いずれの養生条件においても、20℃水中の中性化速度係数を上回った。これは、フライアッシュ置換率の増加に伴う早強セメントの量の低減により、相対的に早強セメントを使用したことによる中性化抵抗性の改善効果が低減したものと考えられる。

5. 塩化物イオン浸透抵抗性

5.1 塩化物イオン浸透抵抗性と配合の関係

浸漬期間 182 日の 20℃養生の塩化物イオン拡散係数を図-10 に示す。

NF0・HF0 と NF20・HF20 を比較すると、普通セメントベース、早強セメントベースのどちらの場合においても、フライアッシュを混和することにより、塩化物イオン拡散係数が大きく減少しており、早強セメントベースとした場合においても、フライアッシュを使用したことによる塩化物イオン浸透抵抗性の向上が妨げられることはなかった。

NF20 と HF20 の塩化物イオン拡散係数を比較すると、同程度あるいは HF20 の方が低くなる傾向が確認され、早強セメントベースのフライアッシュコンクリートの塩

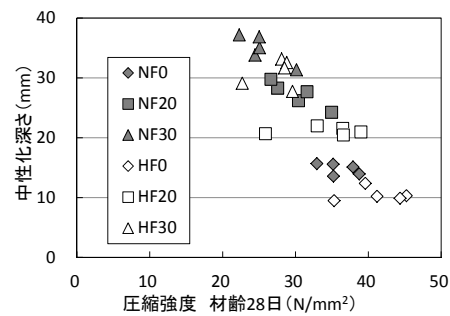


図-8 圧縮強度と中性化深さの関係

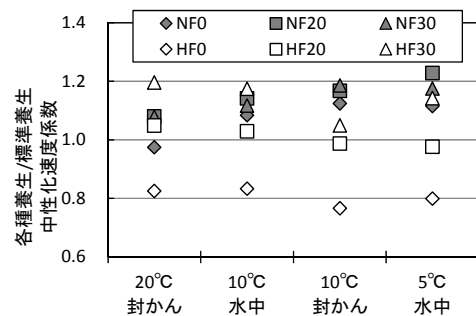


図-9 標準養生に対する各種養生条件の中性化速度係数比率

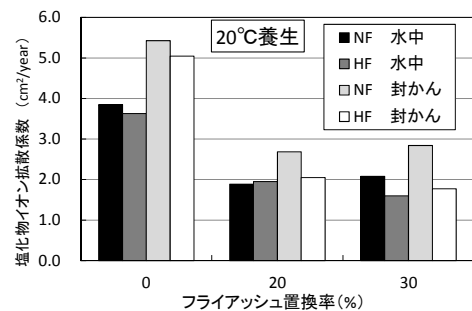


図-10 塩化物イオン拡散係数

化物イオン浸透抵抗性は、普通セメントベースと同様に取り扱うことが可能であることが示された。

NF20・HF20 と NF30・HF30 を比較すると、フライアッシュ置換率が増加した場合における、明瞭な塩化物イオン拡散係数の低下傾向は確認されず、本試験の結果からはフライアッシュ置換率の増加が塩化物イオン拡散係数に与える影響は軽微であった。

5.2 塩化物イオン拡散係数と養生条件の関係

フライアッシュ置換率 20%の各種養生条件の塩化物イオン濃度分布を図-11 に示す。図中の表面深さは、測定深度である 0-1, 1.4-2.4, 2.8-3.8, 4.2-5.2, 5.6-6.6cm の中央の値を記している。

NF20、HF20 のいずれの養生条件においても、2.8-3.8cm の領域には、塩化物イオン浸透が確認されなかった。また、養生条件が劣るほど表層の塩化物イオン濃度が上昇する傾向は確認されなかった。初期強度発現性と中性化

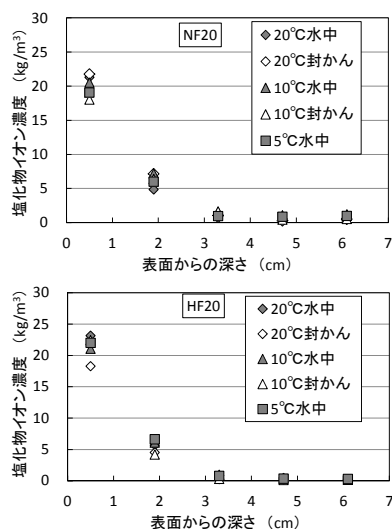


図-11 塩化物イオン濃度分布

抵抗性は、養生温度が低いほど、封かん養生である方が劣る傾向にあった。一方で、塩化物イオン濃度の測定結果からは、養生温度が低く、封かん養生とした場合においても、塩化物イオン浸透抵抗性が劣る傾向は確認されなかった。これは、試料を塩水に浸せきすることにより水分が供給され、塩水の温度が20℃に保たれているため、182日の浸せき期間中に水和反応、ポズラン反応が進行し、塩化物イオン浸透抵抗性が向上し、塩水浸せき期間中に初期養生条件の影響が緩和されたものであると考えられる。

6. まとめ

早強セメントをベースセメントとし、養生温度・養生方法を変化させたフライアッシュコンクリートの強度、耐久性を評価・比較した。本試験から得られた主要な結果は以下の通りである。

- (1) 早強セメントベースとすることにより、脱型強度(14N/mm²)に達する材齢が短縮された。
- (2) 早強セメントベースとすることにより、初期強度が改善され、養生温度10℃、5℃の場合、HF20の初期圧縮強度は、材齢7日までNF0と同程度となった。
- (3) 早強セメントベースのフライアッシュコンクリートの静弾性係数と割裂引張強度は、既往の推定式を用いて圧縮強度から推定が可能であった。
- (4) 早強セメントベースとすることにより、フライアッシュコンクリートの中性化抵抗性が改善された。
- (5) 普通セメントベースと早強セメントベースのフライアッシュコンクリートの塩化物イオン拡散係数は、ほぼ同程度の値となった。

謝辞

本検討は、独立行政法人土木研究所が主催する共同研

究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の一環として実施したものであり、実施にあたり同所のご指導ご協力を頂きましたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) セメント協会：セメント産業における地球温暖化対策の取り組み、セメント協会ホームページ <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jg1.html>
- 2) 日本コンクリート工学会：混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会 報告書、2013.8
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'11、2011
- 4) 経済産業省：セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書、2009
- 5) 盛岡実、樋口隆行、坂井悦郎、大門正機：早強セメントとフライアッシュから調整したフライアッシュセメントの物性とエコロジカル評価、コンクリート工学論文集、Vol.13, No.2, pp.33-39, 2002.5
- 6) 吉田行、名和豊春、田口史雄、渡辺宏：各種混和材を用いたコンクリートのP C構造物への適用性と耐久性向上効果について、コンクリート工学年次論文集、No.30, Vol.1, pp.123-128, 2008
- 7) 佐藤道生、今岡知武、安田幸弘、中村英佑：フライアッシュを混和したコンクリートの初期強度改善に関する基礎検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.35, No.1, pp.169-174, 2013
- 8) 上野敦、國府勝郎、宇治公隆、小野聖久：養生温度および置換率がフライアッシュの反応性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.28, No.1, pp.215-220, 2006
- 9) 斎藤伸明、山本泰彦：各種フライアッシュの活性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.24, No.1, pp.159-164, 2002.
- 10) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕、pp.151-152, 2013
- 11) 小早川真、黄光律、羽原俊祐、友澤史紀：水比、混合率及び養生温度がフライアッシュのポズラン反応に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.21, No.2, pp.121-125, 1999
- 12) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕、pp.34-39, 2013
- 13) 中村英佑、石井豪、渡辺博志：暴露試験と促進試験による混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性の評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.36, No.1, pp.202-207, 2014