

論文 単位水量低減効果を見込んだ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

石川 学^{*1}・石川 嘉崇^{*2}・中村 英佑^{*3}

要旨：フライアッシュコンクリートについて、初期強度改善策のひとつである早強ポルトランドセメントをベースセメントとした場合の基礎物性評価を行った。単位水量低減効果を見込んだ早強ポルトランドセメントベースのフライアッシュコンクリートは、普通ポルトランドセメントベースのものとは比べて、初期強度が改善されるとともに、ブリーディング量の低下、凝結時間の短縮、乾燥収縮と自己収縮の抑制効果が確認された。本報の基礎物性評価と既往の試験結果から、早強ポルトランドセメントベースのフライアッシュ置換率 20%のコンクリートは、普通セメント単味のコンクリートとほぼ同等の性能であることを確認した。

キーワード：フライアッシュ、初期強度改善、早強ポルトランドセメント、収縮特性、断熱温度上昇特性

1. はじめに

近年、地球温暖化抑制のために低炭素型社会の構築を目指し、各国で温室効果ガス排出量を抑える取り組みが進められている。2015年に開催された COP21 で日本は、2030年までに温室効果ガス排出量を 2013年比の 26%削減することを実現可能な目標として掲げている¹⁾。セメント業界に着目すると、国内の温室効果ガス排出量の約 4%を占めており、積極的な温室効果ガスの削減に努めている²⁾。温室効果ガスの削減策として、二酸化炭素排出量原単位の高い普通ポルトランドセメント（以下、普通セメントという）使用量を減らし、フライアッシュや高炉スラグに代表される産業副産物を混和材として加えた混合セメントを使用することが有効であるといわれている³⁾。フライアッシュコンクリートは、普通セメント単味のコンクリートと比べて、コンクリートの流動性の改善、塩化物イオン浸透抵抗性の向上、アルカリシリカ反応の抑制等の利点が確認されており、今後積極的な利用が望まれている⁴⁾。

一方、経済産業省が実施した混合セメントを使用しない理由に関するアンケート⁵⁾の結果では、フライアッシュを用いたコンクリートが使用されない主な理由として、普通セメントと比べて初期強度が小さく、養生期間を要することが挙げられている。

そのため、フライアッシュコンクリートの利用促進のためには、初期材齢における強度増進が乏しいという欠点を改善することが求められている。初期強度改善策として、普通セメントの代わりに早強ポルトランドセメント（以下、早強セメントという）をベースセメントとする方法が考えられるが、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強度特性や耐久性を体系的に取りまとめた研究は少なく、筆者らは、普通

セメントベースとともに早強セメントベースのフライアッシュコンクリートについても基礎物性に関する試験を実施している。

本報では、既往研究報告^{6), 7)}に引き続き、フライアッシュを混和することによる単位水量低減効果を見込んだ配合設計とし、早強セメントベースのフライアッシュコンクリートを対象としたフレッシュ性状、強度特性、収縮特性、断熱温度上昇特性についての試験結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表-1に示す。セメントは、普通セメント及び早強セメントを用いた。混和材は、フライアッシュの JIS II 種品を使用した。骨材は、細骨材として川砂、粗骨材として 5号砕石と 6号砕石を 1:1の割合で混合したものを用いた。スランプ及び空気量の調整に各種混和剤を使用し、フライアッシュに置換した配合については、フライアッシュ用の混和剤を用いた。

2.2 試験配合

配合表を表-2に示す。配合条件は、フライアッシュ置換率をフライアッシュセメントの B種, C種を想定し、20%, 30%とした。そして、早強セメントをベースセメントとすることによる初期強度の増進を見込んで、早強セメントの場合は 40%についても検討を行うこととした。フライアッシュコンクリートとの比較のため、普通セメント、早強セメント単味の供試体も作製した。

また、水結合材比は 50%一律とした。セメントの一部をフライアッシュに置換することで、単位セメント量の削減及びフライアッシュの流動性改善効果による単位水量低減効果が見込める。配合決定のため試験練りを実施

*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 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 主任研究員 (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

材料名	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (OPC) : 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 (HPC) : 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 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

し、各フライアッシュ置換率に関して、スランプ 12cm 及び空気量 4.5% を目標値として単位水量を選定した。その結果、セメント単味の配合と比べて、フライアッシュ置換率 20%, 30%, 40% の配合はそれぞれ、4%, 5%, 7% 程度の単位水量低減が確認された。

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を使用し、JIS A 1138 に準拠してコンクリート供試体を作製した。

2.3 試験内容

(1) フレッシュコンクリートの性状

フライアッシュコンクリートのフレッシュ性状を評価するため、スランプ試験 (JIS A 1101), 空気量測定 (JIS A 1128), ブリーディング試験 (JIS A 1123), 及び凝結時間試験 (JIS A 1147) を実施した。なお、HF0 については、ブリーディング試験及び凝結時間試験は未実施である。

(2) 強度特性

フライアッシュコンクリートの強度特性を把握するため、JIS A 1108 に準拠した圧縮強度試験を実施した。養生条件は材齢 1 日で脱型後、材齢 28 日までは温度 20°C で噴霧養生とし、その後は温度 20°C, 相対湿度 60% の室内で静置した。圧縮強度試験は供試体寸法を φ10×20cm とした。試験材齢は、3 日、7 日、28 日、91 日の 4 材齢とした。

(3) 収縮特性

フライアッシュコンクリートの収縮特性を把握するため、JIS A 1129-3 に準拠した乾燥収縮試験、及び超流動コンクリート研究委員会「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」⁸⁾ に準拠した自己収縮試験を実施した。いずれの試験も供試体寸法は 10×10×40cm とし、温度 20°C, 相対湿度 60% で保たれた室内で試験を実施した。試験材齢は、7 日、14 日、28 日、56 日、91 日、182 日、273 日及び 1 年の 8 材齢とした。乾燥収縮試験は、ゲージプラグをあらかじめコンクリート打込み時に両端面中央に配置されるよう取り付けておき、試験材齢におけるコンクリート供試体の中心軸の乾燥収縮ひずみを測定した。また、供試体の質量を測定することで、質量変化率を算出した。自己収縮試験は、コンクリート打込み時に埋込み型ひずみ計を埋設し、型枠全体を包装用ラップで包み、ビニール袋に入れて封をした状態で保管した。試験材齢において埋込み型ひずみ計の値を温度補正し、自己収縮ひずみを算出した。なお、HF0 については、乾燥収縮試験及び自己収縮試験は未実施である。

(4) 断熱温度上昇特性

断熱温度試験は、日本コンクリート工学協会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」(以下、マスコン指針 2008 という) の JCI-SQA3「コンクリートの断熱温度上昇試験 (案)」に準拠して実施した⁹⁾。熱媒ジャケットを施した容器にコンクリートを打設し、蓋をして密閉した。その後、事前にコンクリート練上り温度に制御した断熱温度上昇試験器内に設置し、試験材齢 14 日を対象に断熱温度上昇量を測定した。また、「マスコン指針 2008」の断熱温度上昇特性式から得られる終局断熱温度上昇量との比較を行った。なお、HF40 については、断熱温度上昇試験は未実施である。

3. フレッシュコンクリートの性状評価結果

3.1 スランプ試験・空気量測定

スランプ試験結果、空気量測定結果を表-2 に示す。いずれの配合も試験練りの結果同様、スランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5% の範囲に収まっていることが確

表-2 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						AE 減水剤 (kg/m ³)	SL (cm)	AIR (%)
				W	OPC	HPC	FA	S	G			
NF0	50	0	47.2	165	330		0	828	966	0.825	11.5	5.4
NF20		20	46.2	159	254		64	814	988	0.795	11.5	4.8
NF30		30	45.7	156	218		94	806	1000	0.780	11.0	5.0
HF0	50	0	47.2	170		340	0	830	954	0.850	10.5	5.3
HF20		20	46.2	164		262	66	803	976	0.820	13.5	5.3
HF30		30	45.7	161		225	97	796	986	0.805	12.5	4.8
HF40		40	45.2	158		190	126	789	998	0.790	13.5	5.4

B=OPC (HPC) +FA, s/a : 細骨材率, SL : スランプ, AIR : 空気量

認められた。混和剤種類の選定と使用量の調整が適切であったことを示している。

3.2 ブリーディング試験

ブリーディング試験の結果を図-1及び図-2に示す。普通セメントベースの配合では、最終ブリーディング量はフライアッシュ置換率の増加に伴って小さくなっていく。NF20とNF30は、NF0と比べて、それぞれ15%、50%程度ブリーディング量が小さくなる結果となった。これは、フライアッシュの流動性改善効果によって単位水量が低減されていることや、フライアッシュを置換することによって水粉体容積比が小さくなることによるものと考えられる。早強セメントベースの場合では、普通セメントベースの場合と比較して、フライアッシュ置換率の増加によるブリーディング量の低下率は小さくなっており、HF20とHF30では、HF30のブリーディング量が若干小さくなる程度で、HF40の場合は経過時間が150分を過ぎるとブリーディング量が低くなる結果であった。

以上から、セメント種別によらず、フライアッシュ置換率の増加に伴ってブリーディング量は小さくなるが、早強セメントベースの場合は、普通セメントベースの場合と比べて、フライアッシュ置換率の増加によるブリーディング量の低下率は小さくなることが示された。

3.3 凝結時間試験

凝結時間試験の結果を図-3及び図-4、凝結の始発時間及び終結時間を図-5に示す。図-3及び図-4には、凝結始発貫入抵抗値(3.5N/mm²)及び凝結終結貫入抵抗値(28.0N/mm²)を表す直線を併記しており、この直線と試験結果の交点がそれぞれ凝結始発時間、凝結終結時間である。普通セメントベースの場合は、NF20はNF0と比べて、凝結始発時間で1時間45分、凝結終結時間で1時間30分程度遅延した。ただし、NF20とNF30を比較しても、凝結始発時間及び凝結終結時間に大きな変化は確認されなかった。また、早強セメントベースの場合は、フライアッシュ置換率の増加に伴い凝結時間が遅くなる傾向にあった。また、フライアッシュ置換率が同等のNF20とHF20、NF30とHF30を比較すると、早強セメントベースとした場合は普通セメントベースの場合と比べて、凝結始発時間及び凝結終結時間は早まることが確認された。

4. 強度試験結果

圧縮強度試験の結果を図-6、NF0との強度比の経時変化を表-3に示す。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た。NF20とHF20について

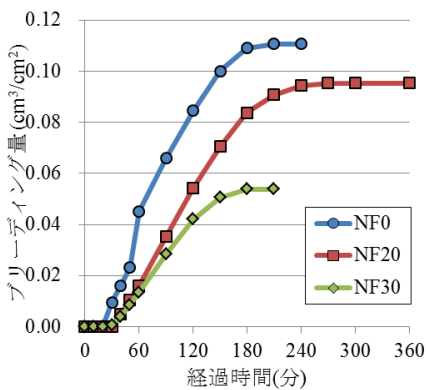


図-1 ブリーディング試験結果
(普通セメントベース)

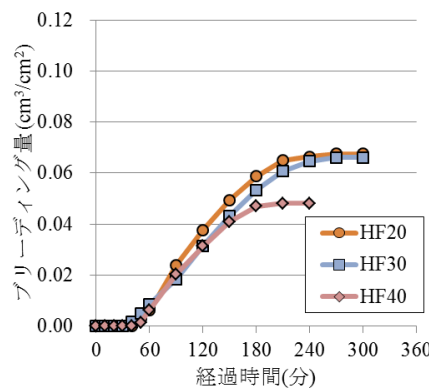


図-2 ブリーディング試験結果
(早強セメントベース)

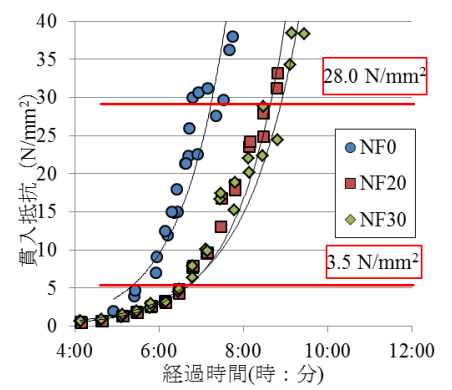


図-3 凝結時間試験結果
(普通セメントベース)

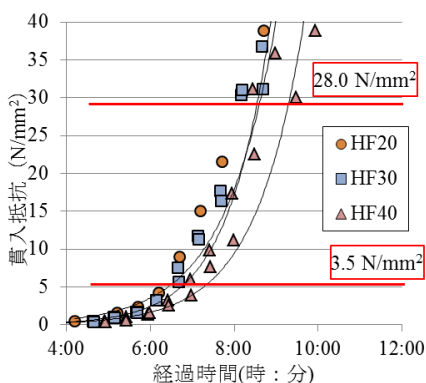


図-4 凝結時間試験結果
(早強セメントベース)

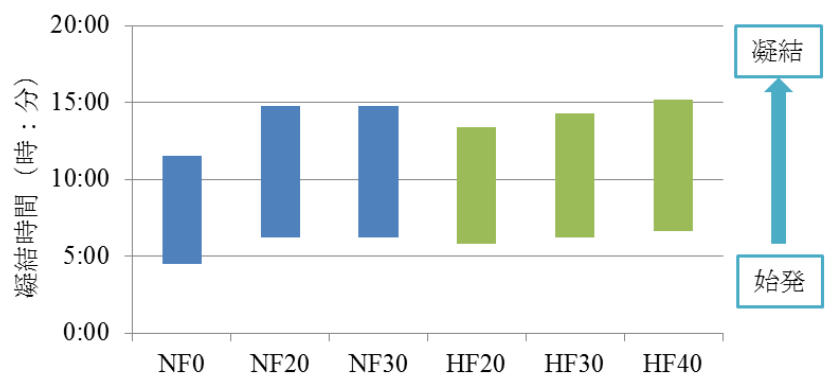


図-5 凝結時間試験結果 (始発時間、終結時間の遅延)

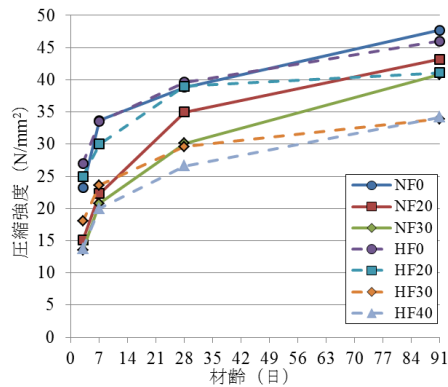


図-6 圧縮強度試験結果

NF0 との強度比を比較すると、材齢 3 日において NF0 は 0.65、HF20 は 1.07 であり、HF20 は NF20 に比べて 0.4 程度大きい。同様に、HF30 は NF30 と比べて 0.2 程度大きい。そして、材齢 7 日以降の強度増進は、早強セメントベースの場合よりも普通セメントベースの場合が大きく、材齢 91 日では、普通セメントベースの配合の方が強度は大きくなること確認された。早強セメントベースとすることによって、確かな初期強度改善が見られ、初期強度が小さいというフライアッシュコンクリートの欠点を克服可能であることが示された。

そして、NF0 と HF20 を比較すると、HF20 と NF0 の強度比は材齢 3 日で 1.07、材齢 7 日で 0.89 となり、同程度の初期強度が得られていることから、同程度の養生期間を確保すれば脱型可能であるといえる。また、材齢 28 日以降は、HF20 は NF0 と同程度の強度を確保できている。よって、NF0 と HF20 は同程度の強度特性を持つと考えられる。

5. 収縮試験結果

5.1 乾燥収縮試験

試験材齢と乾燥収縮ひずみの関係を図-7 に示す。いずれの配合においても、材齢 91 日までに乾燥収縮は大方進行し、その後は乾燥収縮による変化は僅かであった。普通セメントベースの場合は、NF20 と NF30 は NF0 と

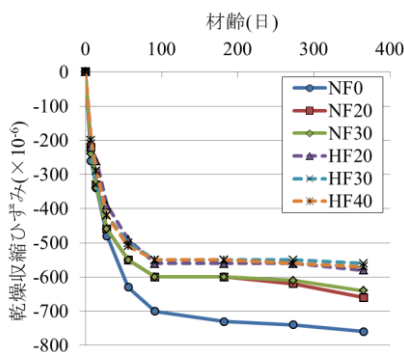


図-7 乾燥収縮試験結果 (乾燥収縮ひずみ)

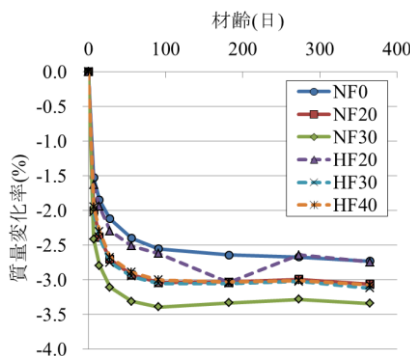


図-8 乾燥収縮試験結果 (質量変化率)

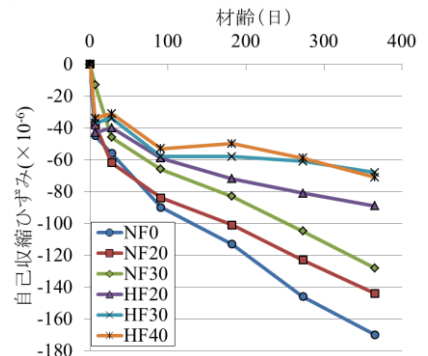


図-9 自己収縮試験結果

表-3 NF0 との強度比の比較

配合名	NF0 との強度比 (配合名/NF0)			
	材齢 3 日	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日
NF20	0.65	0.66	0.90	0.91
NF30	0.58	0.62	0.78	0.86
HF0	1.16	0.99	1.02	0.96
HF20	1.07	0.89	1.01	0.86
HF30	0.77	0.70	0.76	0.71
HF40	0.59	0.59	0.69	0.72

比べて、乾燥収縮ひずみが 15%程度小さくなり、フライアッシュを置換することによる乾燥収縮抑制効果が確認された。また、NF0 と NF20 を比べると乾燥収縮量の差は大きいですが、NF20 と NF30 を比べるとその差はほとんどなかった。一般にコンクリートの乾燥収縮は、内部に存在する余剰水の逸散により体積が収縮するため、単位水量が多いほど乾燥収縮は大きくなるとされており、主な原因はフライアッシュの置換に伴う単位水量の低減によるものであると考えられる¹⁰⁾。早強セメントベースの場合は、普通セメントベースの場合と比べて乾燥収縮ひずみが小さく、乾燥収縮が抑制されていることが確認された。また、フライアッシュ置換率を増加させても、乾燥収縮量の差にほとんど変化はなかった。

次に、材齢と質量変化率の関係を図-8 に示す。普通セメントの場合は、フライアッシュ置換率の増加に伴い質量変化率は大きくなること確認された。早強セメントを用いた場合は、HF20 と HF30 ではフライアッシュ置換率の増加に伴い質量変化率は大きくなるが、HF30 と HF40 では同程度の質量変化率であった。

5.2 自己収縮試験

自己収縮試験の結果を図-9 に示す。セメント種別によらず、フライアッシュ置換率の増加に伴い自己収縮ひずみは小さくなること確認され、フライアッシュを置換することによる自己収縮ひずみ抑制効果が認められた。



写真-1 暴露試験状況

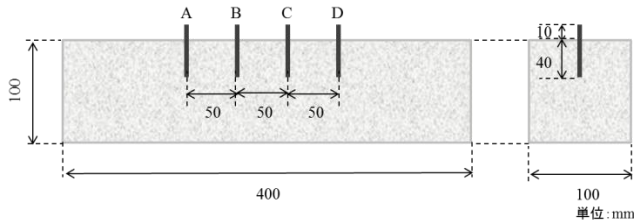


図-10 長さ変化測定方法

早強セメントベースの配合は、普通セメントベースの配合よりも自己収縮ひずみが小さくなる傾向が確認された。また、HF30とHF40を比較すると、自己収縮ひずみに大きな変化がないことから、フライアッシュ置換率が30%より高くなる場合には自己収縮の抑制効果はあまり認められない結果となった。

5.3 暴露試験による長さ変化の測定結果との比較

既往研究報告⁹⁾のように、自然環境下での長期材齢における基礎物性評価を本研究と並行して実施している。本研究と同配合のコンクリート供試体を、つくばと沖縄の2地点で暴露試験を行い、長さ変化を測定している。暴露状況を写真-1に示す。気象庁の観測データ¹¹⁾より得られた各暴露地点の最寄りの気象観測所における暴露期間の平均気温、平均湿度、積算降水量を表-4に示す。供試体寸法は10×10×40cmとし、いずれも材齢1日にて脱型後、約40日まで温度20℃で噴霧養生を実施し、暴露地点まで搬送した。図-10のように、ステンレス鋼のゲージプラグを4本配置し、コンタクトゲージを用いて長さ変化を計測した。図-10のA-C及びB-Dの間隔を2回ずつ計測し、その平均と供試体作製時のA-C及びB-Dの間隔との差を長さ変化とした。

暴露期間4年経過時の試験結果を図-11に示す。つくばと沖縄の両地点ともにフライアッシュの置換による収縮ひずみの低下傾向は明確には確認されなかった。しかし、つくば地点と沖縄地点を比較すると、平均気温の高い沖縄地点の方が長さ変化は大きくなる傾向が確認された。

6. 断熱温度上昇試験結果

断熱温度試験の試験結果を図-12及び図-13に示す。一般に、セメントの一部をフライアッシュに置換したセ

表-4 暴露地点の環境

地点	つくば	沖縄
観測所	館野	名護
平均気温(°C)	13.9	22.4
平均湿度(%)	71.8	74.6
積算降水量(mm)	4,896	7,828

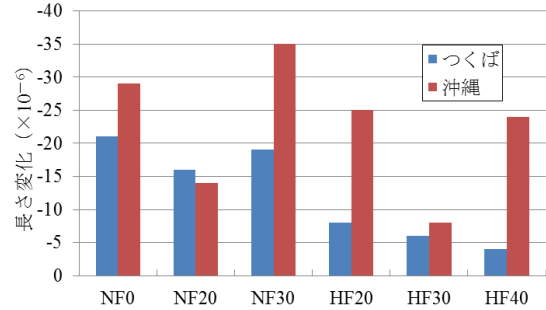


図-11 暴露試験長さ変化測定結果

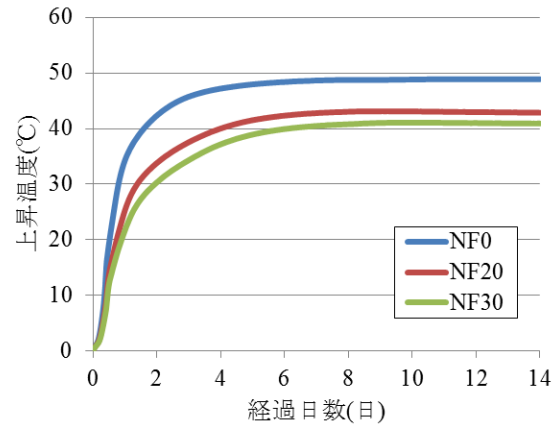


図-12 断熱温度上昇試験結果 (普通セメントベース)

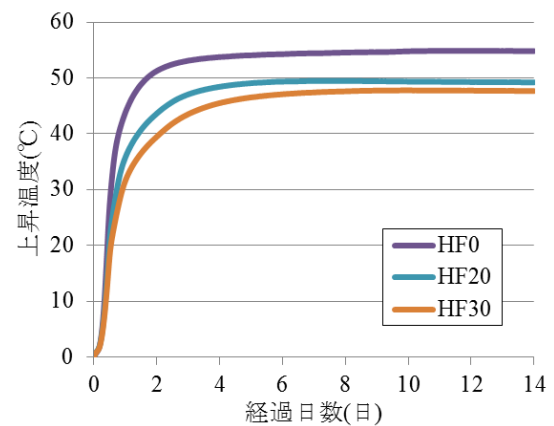


図-13 断熱温度上昇試験結果 (早強セメントベース)

メントは、セメント単味の水和反応と比べて水和発熱量が小さいことが知られている⁹⁾。普通セメントベースの配合、早強セメントベースの配合のどちらも、セメントの一部をフライアッシュに置換することにより、水和発熱量の低下に伴って終局断熱温度上昇量が低下すること確認された。NF0からNF20としたものと比べて、NF20からNF30としたことによる終局断熱温度上昇量の低下

は30%程度となっており、フライアッシュ置換率を増加させるほど終局断熱温度上昇量の低下率が小さくなる傾向が認められた。また、NF0とHF20を比較すると、同程度の断熱温度上昇特性であった。

コンクリートの断熱温度上昇特性予測式のひとつに、「マスコン指針2008」の断熱温度上昇特性式が挙げられる。断熱温度上昇特性式は式(1)のように表される。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-r(t-t_{0,Q})}) \quad (1)$$

ここに、 t : 材齢 (日), $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C), Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C), r : 断熱温度上昇速度に関する係数, $t_{0,Q}$: 発熱開始材齢 (日) とする。

式(1)より、終局断熱温度上昇量は、NF0で53.9°C、NF20で47.4°Cとなった。本試験では、NF0で48.9°C、NF20で42.9°Cとなっており、断熱温度上昇特性式と比較して若干低い値となったものの、概ね一致する結果であった。

7. 二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

本研究の各試験結果及び既往研究報告^{6), 7)}から、フレッシュ性状、強度特性、耐久性、収縮特性、断熱温度上昇特性といった観点からNF0とHF20はほぼ同等の性能を有していると考えられる。表-5に示す各材料の二酸化炭素排出量原単位¹²⁾を用いて、二酸化炭素排出量を算出すると、NF0は258.8kg-CO₂/m³、HF20は207.9kg-CO₂/m³となる。HF20は、NF0と比較して、二酸化炭素排出量が大幅に低減していることが確認された。

表-5 各材料の二酸化炭素排出量原単位

材料	二酸化炭素排出量 (kg-CO ₂ /t)
ポルトランドセメント	766.6
天然粗骨材	2.9
天然細骨材	3.7
フライアッシュ	19.6

8. まとめ

本研究から得られた主要な結果は以下のとおりである。

- (1)セメントの一部をフライアッシュに置換することで単位水量が低減され、ブリーディング量の低下、凝結時間の短縮が確認された。
- (2)早強セメントベースとすることによる初期強度の改善が確認された。
- (3)フライアッシュの置換によって、乾燥収縮及び自己収縮は抑制された。また、早強セメントベースのフライアッシュコンクリートは、普通セメントベースのものとは比べて、乾燥収縮及び自己収縮は抑制されることが

確認された。

- (4)フライアッシュの置換による断熱温度上昇量の低下が確認された。
- (5)早強セメントベースとしたフライアッシュ置換率20%のコンクリートは、本試験結果及び既往研究結果^{6), 7)}より、普通セメント単味のコンクリートとほぼ同等の性能を有しており、二酸化炭素排出量を約20%程度削減できることが示された。

本研究は、国立研究開発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協力を頂きました。

参考文献

- 1) 首相官邸地球温暖化対策推進本部：パリ協定を踏まえた地球温暖化対策の取組方針について、2015
- 2) 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
- 3) 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一報告書、2013
- 4) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'11、2011
- 5) 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一混合セメントの普及拡大方策に関する検討一報告書、2009
- 6) 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
- 7) 今岡知武、石川嘉崇、鷲尾朝昭、中村英佑：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.37, No.1, pp.151-156, 2015
- 8) 日本コンクリート工学協会、超流動コンクリート研究委員会報告書(II)、1994
- 9) 日本コンクリート工学協会、マスコンクリートのひび割れ制御指針2008、2008
- 10) 日本コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会一報告書、2010
- 11) 気象庁ホームページ：気象統計情報
- 12) 土木学会：コンクリートの環境負荷効果(その2)、コンクリート技術シリーズNo.62、2004