

# 早強性と温度ひび割れの抑制を両立させたフライアッシュコンクリート

## New Fly Ash Concrete Combining High Early-Age Strength and Prevention of Temperature Cracking

川崎 文義 横関 康祐 曾我部 直樹 取違 剛  
関 健吾 小田部 裕一<sup>1)</sup> 宮 蘭 雅裕<sup>1)</sup> 亀島 博之<sup>1)</sup>

### 要 約

フライアッシュを混和材として使用したコンクリートは、長期的な強度増進や耐久性の向上などの利点を有する一方で、材齢初期の強度発現が小さいという課題がある。そこで、フライアッシュに早強ポルトランドセメント及びアルカリ金属塩を主成分とする早強剤を組み合わせることで、コンクリートの品質を確保しつつ初期強度を改善できるコンクリートを開発した。当コンクリートの強度発現メカニズムを検討した結果、早強ポルトランドセメントと早強剤の組合せによってフライアッシュ及びセメント主要鉱物の反応が材齢1～3日程度の初期に促進されることで、材齢初期に高い強度発現性を示すことが分かった。また、当コンクリートの収縮特性及び耐久性は、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートより優れることを確認した。さらに、低温環境で実構造物に適用し、初期強度改善及び温度ひび割れ抑制に効果があることが実証された。当コンクリートを大断面のボックスカルバートに適用した場合の工程を試算した結果、実工事の施工実績と比較して約20%の工程短縮効果が得られた。

### 目 次

- I. はじめに
- II. 初期強度発現性とそのメカニズム
- III. コンクリートの基礎的性状
- IV. 実構造物への適用
- V. 工程短縮効果の試算
- VI. まとめ

#### I. はじめに

環境負荷低減の観点から、産業副産物であるフライアッシュをコンクリート用混和材として有効利用することが求められている<sup>1)</sup>。フライアッシュを使用したコンクリートは、長期的な強度増進や遮塩性、アルカリシリカ反応の抑制など様々な面で利点を有する一方で、初期の強度発現が小さいという課題があり、特に冬季など外気温が低い条件でその影響が顕著となる。実際の工事では、コンクリート打ち込み後、型枠脱型に必要とされる強度が確認されるまで型枠を存置しなければならない、初期強度発現が小さいと後工程に影響を与え、工事全体の工程が遅延するリスクがある。

そこで本研究では、フライアッシュに早強ポルトランドセメント及びアルカリ金属塩を主成分とする早強剤を組み合わせることで、フライアッシュを使用したコンクリートの利点である品質、耐久性の向上及び温度ひび割れ抑制効果を確保しつつ、低温環境における初期強度改善を可能とするコンクリートを検討している<sup>2)3)4)5)</sup>。

本論文では、このコンクリートの初期強度発現性とそのメカニズムの考察並びに各種の基本的な硬化物性について示す。また、低温環境下で実構造物に適用し、初期強度の改善効果、温度ひび割れの抑制効果及び耐久性の評価を行った結果を示す。さらに、大断面のボックスカルバートへの適用を想定した工程短縮効果について示す。

#### II. 初期強度発現性とそのメカニズム

##### 1. 試験概要

試験要因は、フライアッシュセメントB種(FB)を用いたケースを基本に、ベースセメントを早強ポルトランドセメントに変更したケース(HC+FA)、早強ポルトランドセメントと早強剤を併用したケース(HC+FA+AC)の3水準とした。使用材料をTable 1に示す。

Table 1 使用材料  
(Using Materials)

名称	記号	概要
練混ぜ水	W	上水道水
セメント	FB	フライアッシュセメントB種 密度: 2.96g/cm <sup>3</sup>
	HC	早強ポルトランドセメント 密度: 3.13g/cm <sup>3</sup>
混和材	FA	フライアッシュII種 密度: 2.20g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂 表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup>
	S2	砂 表乾密度: 2.61g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G1	石灰砕石 表乾密度: 2.70g/cm <sup>3</sup>
	G2	砕石 表乾密度: 2.61g/cm <sup>3</sup>
混和剤	Ad	AE減水剤(標準型I種) リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AC	早強剤(アルカリ金属塩)

1) 住友大阪セメント(株) Sumitomo Osaka Cement Co., Ltd.

**キーワード:** フライアッシュ, 早強剤, 初期強度改善, 断熱温度上昇量, 自己収縮

**Keywords:** fly ash, early strength agent, initial strength improvement, adiabatic temperature rise, autogenous shrinkage

Table 2 コンクリート配合  
(Mix Proportions)

配合名	スラブ <sup>°</sup> (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
					W	B		S1	S2	G1	G2	Ad	AC (B×2.0%)
						C	FA						
FB	8.0±2.5	4.5±1.5	55.0	42.0	164	298	-	668	98	586	477	0.745	-
HC+FA	8.0±2.5	4.5±1.5			164	253	45	668	98	585	477	0.745	-
HC+FA+AC	8.0±2.5	4.5±1.5			164	253	45	668	98	585	477	0.745	5.96

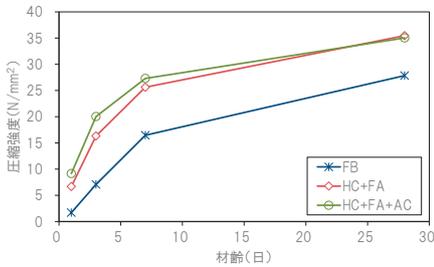


Fig.1 圧縮強度  
(Compressive Strength)

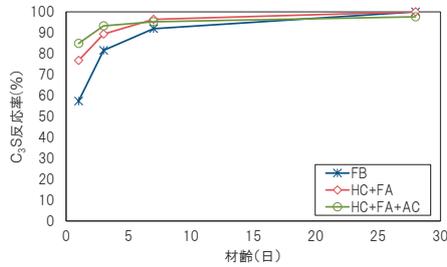


Fig.2 C<sub>3</sub>Sの反応率  
(Reaction Rate of C<sub>3</sub>S)

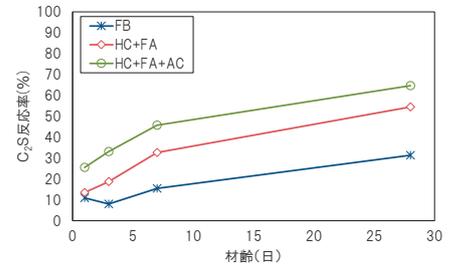


Fig.3 C<sub>2</sub>Sの反応率  
(Reaction Rate of C<sub>2</sub>S)

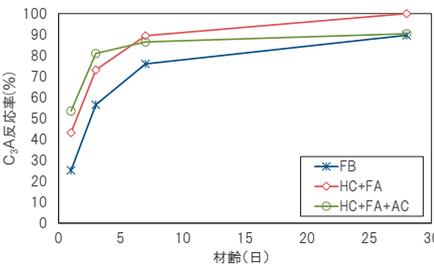


Fig.4 C<sub>3</sub>Aの反応率  
(Reaction Rate of C<sub>3</sub>A)

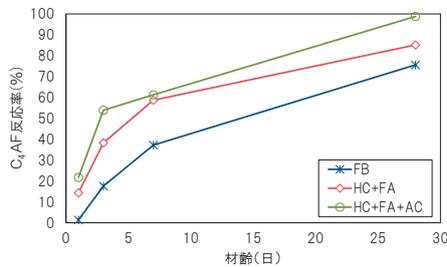


Fig.5 C<sub>4</sub>AFの反応率  
(Reaction Rate of C<sub>4</sub>AF)

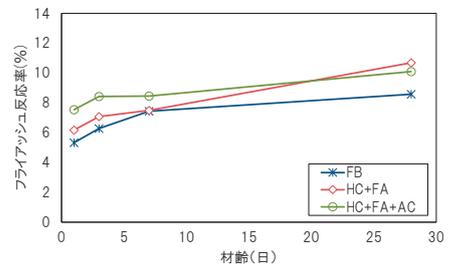


Fig.6 フライアッシュの反応率  
(Reaction Rate of Fly ash)

初期強度発現性の検討は、コンクリート供試体 (φ100 mm×200 mm) を用いて行った。コンクリートの配合を Table 2 に示す。水結合材比を 55% で一定とし、フライアッシュの置換率を 15% (内割)、早強剤の添加量を単位粉体量×2.0% とした。冬季施工の低温環境を想定し、コンクリートの練混ぜ及び供試体の作製は、室温 10℃ の試験室で実施した。同室内に翌日まで静置し、脱型後に水温 10℃ の条件で水中養生を行い、材齢 1, 3, 7 及び 28 日で圧縮強度試験に供した。

一方、早強剤が強度発現性に与える影響について化学組成の観点から検討することとした。試料は、水粉体比 50% のセメントペースト供試体とし、室温 20℃ の条件で封緘養生を行った。その後、材齢 0 (未水和状態)、1, 3, 7 及び 28 日でフライアッシュ及びセメント主要鉱物の反応率を算出した<sup>2)</sup>。フライアッシュの反応率は、JIS R 5202 に記される強熱減量の定量方法及び塩酸-炭酸ナトリウム方法による不溶残分の定量方法に準拠し、結合水量及び未反応フライアッシュを定量し、計算によって求めた。セメントの主要鉱物の反応率は、XRD 内部標準法により回折 X 線強度を取得し、リートベルト解析によって C<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>A 及び C<sub>4</sub>AF を定量した。

## 2. 試験結果

### (1) 初期強度発現性

コンクリートの圧縮強度を Fig.1 に示す。フライアッシュセメント B 種を用いた FB に比べ、ベースセメントを早強ポルトランドセメントとした HC+FA、HC+FA+AC の方が、いずれの材齢においても高い強度を示した。また、早強ポルトランドセメントと早強剤を

併用した HC+FA+AC は、早強剤を添加しない HC+FA と比べ、材齢 1~3 日程度の初期における強度が増進しており、材齢 1 日で比較すると、HC+FA+AC は HC+FA に対して 1.4 倍の強度を示した。一方で、材齢 28 日では同程度となった。これらのことから、早強剤は、材齢初期の強度増進に効果があるとと言える。

### (2) フライアッシュ及びセメント主要鉱物の反応率

セメントの主要鉱物の反応率を Fig.2~5 に示す。いずれの主要鉱物も、HC+FA の反応率は FB に比べて促進しており、その傾向は、C<sub>2</sub>S を除いて材齢初期に顕著となっている。これは、早強ポルトランドセメントの使用に起因するものと考えられる。また、早強剤を添加した HC+FA+AC と、添加していない HC+FA を比較すると、いずれの主要鉱物も材齢 1~3 日の初期において HC+FA+AC の反応率が高くなっている。これは、早強剤に含まれるアルカリの影響によるものと考えられる。

次に、フライアッシュの反応率を Fig.6 に示す。早強剤を添加した HC+FA+AC のフライアッシュの反応は、HC+FA と比べて材齢初期に促進されており、材齢 28 日でほぼ同等の反応率となっている。これは、早強剤がアルカリ刺激材として作用し、材齢初期にフライアッシュのポズラン反応を促進したものと推察される。

フライアッシュ及びセメントの主要鉱物の反応率測定結果から総合的に考察すると、早強ポルトランドセメント及び早強剤の組合せによる材齢初期の強度増進は、フライアッシュとセメント主要鉱物双方の反応促進に起因しているものと考えられる。

Table 3 コンクリート配合 (Mix Proportions)

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					W	C	FA	S	G	Ad	AC(B×2.0%)
NC	15.0±2.5	4.5±1.5	50.0	45	170	340	-	792	983	3.4	-
NC+FA	15.0±2.5	4.5±1.5			170	289	51	784	973	3.4	-
HC+FA+AC	15.0±2.5	4.5±1.5			170	289	51	783	972	3.4	6.8

Table 4 使用材料 (Using Materials)

名称	記号	概要
練混ぜ水	W	上水道水
セメント	NC	普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm <sup>3</sup>
	HC	早強ポルトランドセメント 密度:3.13g/cm <sup>3</sup>
混和材	FA	フライアッシュII種 密度:2.20g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	山砂 表乾密度:2.60g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石 表乾密度:2.64g/cm <sup>3</sup>
混和剤	Ad	AE減水剤(標準型I種)リグニンスルホン酸化合物
	AC	早強剤(アルカリ金属塩)

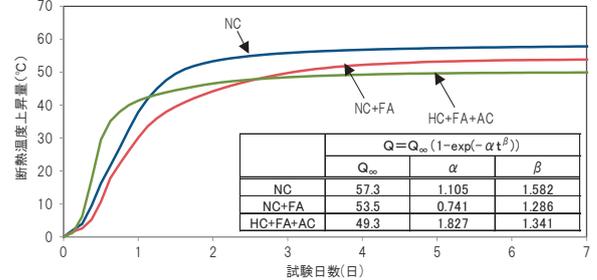


Fig.7 断熱温度上昇量 (Adiabatic Temperature Rise)

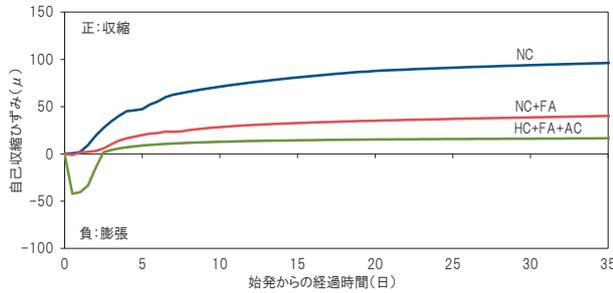


Fig.8 自己収縮 (Autogenous Shrinkage)

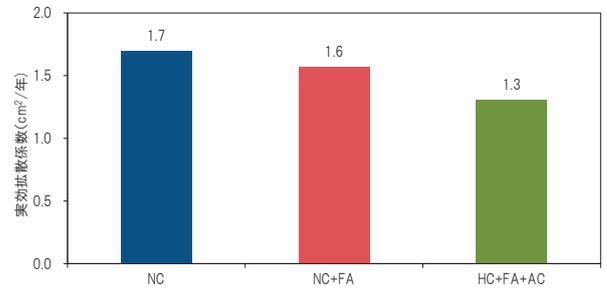


Fig.9 実効拡散係数 (Effective Diffusion Coefficient)

Ⅲ. コンクリートの基礎的性状

1. 試験要因と試験項目

前述のとおり、早強ポルトランドセメントと早強剤を併用することでフライアッシュコンクリートに早強性を付与できることがわかった。一方、セメント主要鉱物の反応が促進されていることから、発生する水和熱も高くなる可能性がある。そこで、当コンクリートの熱特性、収縮特性及び耐久性について基礎的性状を評価した。

試験要因は、普通ポルトランドセメントを用いたケース (NC)、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを置換したケース (NC+FA)、NC+FA に対してベースセメントを早強ポルトランドセメントとして早強剤を添加したケース (HC+FA+AC) の計 3 水準とした。コンクリートの配合を Table 3 に、使用材料を Table 4 にそれぞれ示す。コンクリートの配合は、単位粉体量 340kg/m<sup>3</sup> で一定とし、水結合材比 50%、フライアッシュの置換率 15% (内割)、早強剤の添加量は単位粉体量×2.0%とした。コンクリートの練混ぜは 20℃の試験室内で実施し、各試験用の供試体を作製した。

熱特性は、コンクリートの断熱温度上昇量を測定し、得られた温度データを式 (1) にフィッティングすることで終局断熱温度上昇量 Q<sub>∞</sub>、断熱温度上昇速度に関する係数 α、β を算出した。

$$Q = Q_{\infty} \cdot (1 - \exp(-\alpha t^{\beta})) \dots \dots \dots (1)$$

収縮特性は、自己収縮ひずみ (高流動コンクリートの自己収縮試験方法) を測定した。

耐久性は、塩化物イオン浸透に対する抵抗性 (JSCE-G571)、凍結融解抵抗性 (JIS A 1148 (A 法)) を評価した。また、アルカリシリカ反応に対する安全性 (JCI AAR-3) を評価するために、反応性骨

材である安山岩砕石を用いてアルカリシリカ反応性試験を行った。

2. 試験結果

(1) 熱特性

コンクリートの断熱温度上昇量を Fig.7 に示す。図中に終局断熱温度上昇量及び断熱温度上昇速度に関する係数を示す。HC+FA+AC は、セメント主要鉱物及びフライアッシュの反応促進によって材齢 1 日程度までのごく初期における温度上昇量が NC 及び NC+FA に比べて大きいものの、終局断熱温度上昇量 Q<sub>∞</sub> は、ほかのケースより小さくなった。

(2) 収縮特性

自己収縮の測定結果を Fig.8 に示す。NC+FA の自己収縮ひずみは NC よりも小さく、既往の研究<sup>9)</sup>と同様にフライアッシュ使用による自己収縮ひずみの低減効果が認められた。HC+FA+AC については、材齢初期に 40 μ 程度の膨張ひずみが確認された。これは、アルカリ金属塩を主成分とする早強剤の添加による膨張性の水和生成物の影響と考えられる。また、最終的な自己収縮ひずみは NC 及び NC+FA よりも小さくなった。

(3) 耐久性

電気泳動試験による実効拡散係数測定結果を Fig.9 に示す。NC+FA 及び HC+FA+AC の実効拡散係数は NC よりも小さく、フライアッシュの使用による塩分浸透抵抗性の向上が認められた。凍結融解試験の結果は、いずれのケースも 300 サイクル経過後の相対動弾性係数が 95% 以上であり、高い凍結融解抵抗性を示した。アルカリシリカ反応性については、いずれのケースも材齢 24 か月時点において膨張率が 0.1% 以下であり、アルカリシリカ反応は確認されなかった。

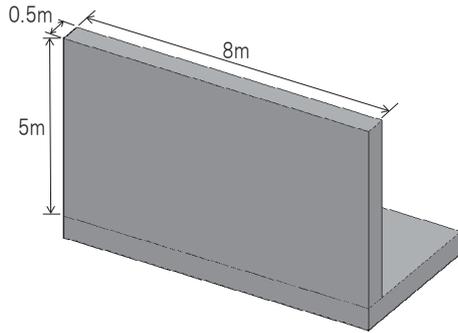


Fig.10 構造物概要  
(Outline of Structure)

Table 5 使用材料  
(Using Materials)

名称	記号	概要
練混ぜ水	W	上水道水
セメント	BB	普通ポルトランドセメント 密度:3.04g/cm <sup>3</sup>
	HC	早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm <sup>3</sup>
混和材	FA	フライアッシュII種 密度:2.22g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	山砂 表乾密度:2.56g/cm <sup>3</sup>
	S2	砕砂 表乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G2	砕石 表乾密度:2.70g/cm <sup>3</sup>
混和剤	Ad1	AE減水剤 リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸
	AC	早強剤(アルカリ金属塩)

Table 6 コンクリート配合  
(Mix Proportions)

配合名	スラブ <sup>a</sup> (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
					W	C	FA	S1	S2	G	Ad	AC
BB	8±2.5	4.5±1.5	52.5	43.1	161	307	0	466	310	1064	2.46	0
HC+FA+AC1.0%	8±2.5	4.5±1.5	55.0	43.8	163	252	45	471	316	1051	2.97	2.97
HC+FA+AC1.4%	8±2.5	4.5±1.5	55.0	43.8	163	252	45	471	316	1051	2.97	5.05

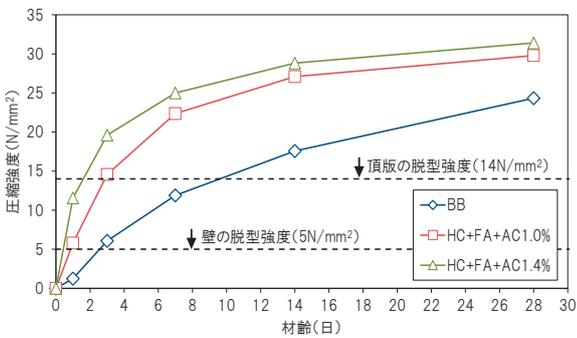


Fig.11 圧縮強度  
(Compressive Strength)

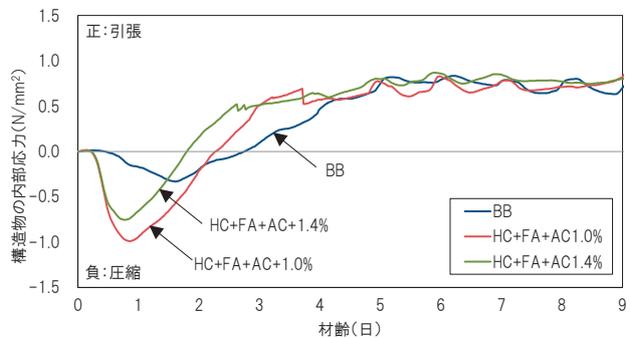


Fig.12 構造物内部の応力履歴  
(Time history of Inside Stress)

IV. 実構造物への適用

1. 構造物及び試験概要

室内試験で得られた初期強度発現性及びひび割れ抑制効果を実構造物で検証するために、冬季施工の場所打ちL型擁壁(壁部)に実適用を行った。構造物の概要を Fig.10 に示す。コンクリートの使用材料を Table 5 に、配合を Table 6 にそれぞれ示す。配合は、早強ポルトランドセメントにフライアッシュ及び早強剤を組み合わせたもの(HC+FA+AC)と、比較用として高炉セメントB種を使用したもの(BB)とした。HC+FA+ACについては、早強剤の添加量を単位粉体量に対して1.0%と1.4%の2ケース設定した。コンクリート打込み時の外気温は日平均7℃であったが、最低気温が-1℃となることから、コンクリートの打込み完了後に、構造物全体をシートで覆ってジェットヒーターによる給熱養生を施した。

強度発現性確認のための供試体(φ100mm×200mm)は、試料採取後、構造物と同じ給熱養生環境下で封緘養生した後、材齢1, 3, 7, 14及び28日で圧縮強度試験に供した。また、構造物内部(壁の長さ及び厚さ方向の中心位置)に有効応力計を設置し、コンクリートに生じる応力を計測した。また、材齢120日が経過した時点で、推定圧縮強度(JSCE G 504に準拠)及び表層透気係数(ダブルチャンパー方式のトレント試験機を使用)の測定を行い、コンクリートの耐久性を評価した。

2. 初期強度発現性

コンクリートの圧縮強度を Fig.11 に示す。HC+FA+ACは、BBと

比較して高い強度発現性を示した。BBとの強度比は、材齢1日で最も大きく、早強剤1.0%のケースで4.6倍、1.4%のケースで9.3倍となった。一方、HC+FA+ACにおける早強剤1.4%の圧縮強度は、1.0%のケースと比較して材齢1日で2倍となったものの、材齢14日ではほぼ同等となった。

2012年制定コンクリート標準示方書[施工編]では、型枠及び支保工の取外しに必要なコンクリートの圧縮強度として、柱・壁・はりの側面であれば5.0N/mm<sup>2</sup>、スラブ・はりの底面及びアーチの内面であれば14.0N/mm<sup>2</sup>が示されている。Fig.11によると、圧縮強度が5.0N/mm<sup>2</sup>を超える材齢は、BBで3日、最も強度発現の大きいHC+FA+AC1.4%で1日であり、壁の型枠脱型までの期間を2日短縮できることになる。さらに、圧縮強度が14.0N/mm<sup>2</sup>を超える材齢はBBで10日、HC+FA+AC1.4%で2日であり、対象部材がスラブ・はりの底面であれば型枠脱型までの期間を8日短縮できる。本試験の範囲において、低温環境下においてフライアッシュに早強ポルトランドセメント及び早強剤を併用したコンクリートを適用した結果、BBの配合に比べ工程短縮が可能であることが実証できた。

3. 温度ひび割れ抑制効果

有効応力計で計測した構造物内部の応力履歴を Fig.12 に示す。いずれのケースも材齢初期に圧縮側の応力が生じている。HC+FA+ACのケースはBBより大きな圧縮応力を示しており、これは前述の Fig.9 で示したとおり、早強剤によってコンクリートが膨張したことによるものと考えられる。材齢5日以降は、HC+FA+ACとBBは同

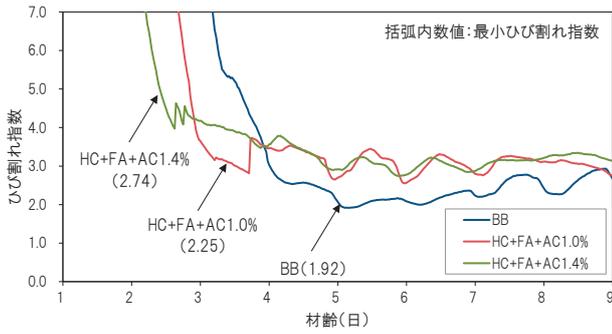


Fig.13 ひび割れ指数 (Thermal Cracking Index)

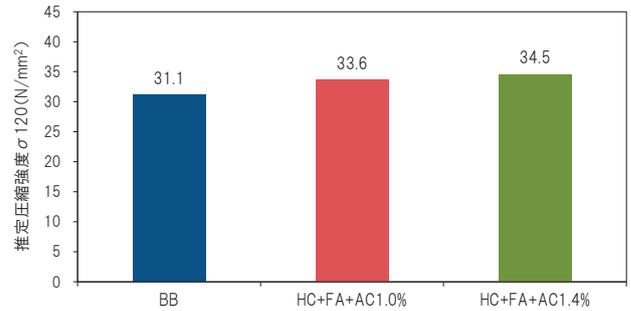


Fig.14 推定圧縮強度 (Estimated Compressive Strength)

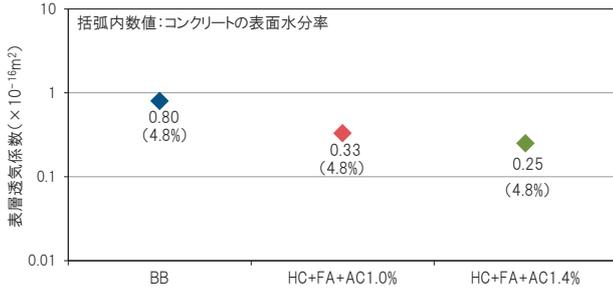


Fig.15 表層透気係数 (Air Permeability Coefficient)

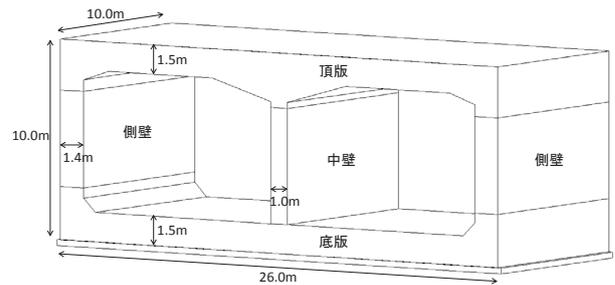


Fig.16 構造物概要 (Outline of Structure)

程度の値となった。

計測された引張応力及び積算温度から求まる構造物内部の引張強度の比からひび割れ指数を算出し、その履歴を Fig.13 に示す。いずれのケースも最小ひび割れ指数が 1.85 以上であり、本検討の範囲では温度ひび割れ発生リスクはほとんどなく、実際の構造物にもひび割れは発生していない。一方、HC+FA+AC のケースと BB を比較すると、HC+FA+AC1.0% のひび割れ指数は、BB の 1.2 倍、HC+FA+AC1.4% では 1.4 倍となった。

実構造物から得られたデータに基づき、温度ひび割れのリスクを検証した結果、フライアッシュに早強ポルトランドセメント及び早強剤を併用したコンクリートの温度ひび割れ抑制効果を確認することができた。

4. 耐久性評価

材齢 120 日における推定圧縮強度の測定結果を Fig.14 に示す。HC+FA+AC の推定圧縮強度は、BB に比べて若干高いものの、ほぼ同程度の値となった。また、HC+FA+AC1.0% のケースと 1.4% のケースについてもほぼ同じ値であり、早強剤の添加量の差が強度発現に影響を与えるのは材齢初期のみであり、長期強度に影響は無いものと考えられる。

トレント法による表層透気係数の測定結果を Fig.15 に示す。図中には、表面水分率の測定結果を併記した。HC+FA+AC の表層透気係数は、早強剤の添加量が 1.0% のケースで 0.33×10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup>、1.4% のケースで 0.25×10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup> となり、BB の 0.80×10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup> と比較して同等以上の値となった。

V. 工程短縮効果の試算

1. 試算概要

低温環境下における実構造物への適用によって、初期強度改善及

Table 7 試算結果 (Review case)

検討ケース	部材	作業日数													
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
標準 (高炉セメントB種)	底板	鉄筋・型枠 → コン打, 脱型待ち													
	側壁・中壁	足場・鉄筋・型枠 → コン打, 脱型待ち													
	頂版	足場支保工・鉄筋・型枠 → コン打, 脱型待ち													
HC+FA+AC (早強セメント+フライアッシュ+早強剤)	底板	鉄筋・型枠 → コン打, 脱型待ち (2日短縮)													
	側壁・中壁	足場・鉄筋・型枠 → コン打, 脱型待ち (2日短縮)													
	頂版	足場支保工・鉄筋・型枠 → コン打, 脱型待ち (8日短縮) ← 計12日短縮													

び温度ひび割れ抑制効果が実証された。ここで、大規模な RC 構造物を対象として、初期強度改善による工程短縮効果を試算することとした。対象構造物は、底板、側壁・中壁、頂版で構成される大断面のボックスカルバートとした。構造物概要を Fig.16 に示す。検討ケースは、高炉セメント B 種を用いたコンクリートを使用する標準ケースと、フライアッシュに早強ポルトランドセメント及び早強剤を組み合わせたコンクリートを使用するケース (HA+FA+AC) の 2 ケースとし、両ケースの構築完了までの日数を比較した。試算条件として、標準ケースの型枠支保工の取外しに要する日数は、本検討と同寸法のボックスカルバート構築工事の施工実績を参考に、底板及び側壁・中壁で 3 日、頂版で 10 日とした。HA+FA+AC のケースは、前述の Fig.11 の値を採用し、底板及び側壁・中壁で 1 日、頂版で 2 日とした。なお、工程算出に用いた各作業の歩掛は、上記の実工事の実績を用いており両ケースとも同一とした。

2. 試算結果

試算結果を Table 7 に示す。構築完了までの作業日数は、標準ケースで 68 日、HC+FA+AC のケースで 56 日となり、フライアッシュに早強ポルトランドセメント及び早強剤を併用したコンクリートを用

いることで 12 日間の工程短縮効果が得られた。これは全工程の約 20%に相当する。本試算は、1 ブロックのボックスカルバートを対象に検討を行ったが、複数ブロックが連続する延長の長い工事では、型枠・支保工の取外しまでの日数短縮によって、仮設材の転用回数を増やすことが可能となり、コスト削減効果も期待できる。

## VI. まとめ

本研究では、フライアッシュに早強ポルトランドセメント及びアルカリ金属塩を主成分とする早強剤を併用したコンクリートの強度発現性及びそのメカニズムについて検討した。また、試験室にて基本的な硬化物性を検討した後、実構造物にて初期強度の改善効果、温度ひび割れ抑制効果及び耐久性を評価し、以下の知見を得た。

- ① 早強ポルトランドセメント及び早強剤の効果により、フライアッシュ及びセメント主要鉱物の反応が材齢初期に促進されることで、材齢 1~3 日の初期強度が改善する。
- ② 熱特性を計測した結果、同じ単位粉体量で普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートより終局断熱温度上昇量が抑制された。
- ③ 自己収縮ひび割れ及び塩分浸透抵抗性は同じ水結合材比の普通ポルトランドセメント及びフライアッシュセメント B 種を使用したコンクリートに比べて改善した。
- ④ 低温環境で実構造物に適用した結果、高炉セメント B 種を使用したコンクリートより高い強度発現性を示し、早強剤の添加量が多いケースほど、初期強度が増進した。
- ⑤ 最少ひび割れ指数は、高炉セメント B 種を使用したコンクリートに比べて 1.2 倍以上となり、温度ひび割れ抑制効果が実証

された。また、材齢 120 日の耐久性は、高炉セメント B 種を使用したコンクリートと同等以上であった。

- ⑥ 大断面のボックスカルバート工事への適用効果を検討した結果、高炉セメント B 種を使用した実工事の実績より、約 20%の工程短縮が可能であるとの試算が得られた。

## 参考文献

- 1) (社)日本コンクリート工学会; 混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効活用に関する研究会 報告書, (社)コンクリート工学会, 2015, pp.80-87
- 2) 宮菌雅裕, 小田部裕一, 横関康祐, 曾我部直樹; フライアッシュコンクリートの初期強度改善に関する基礎的検討, 第 70 回セメント技術大会講演要旨, 2016, pp.266-267
- 3) 関健吾, 高木英知, 小田部裕一, 宮菌雅裕; 早強性・低収縮性を両立したコンクリートの品質に関する一考察, 第 70 回セメント技術大会講演要旨, 2016, pp.268-269
- 4) 宮菌雅裕, 亀島博之, 横関康祐, 曾我部直樹, 関健吾; 早強性・低収縮性を両立したコンクリートの基礎的性状, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016, pp.271-272
- 5) 関健吾, 取違剛, 横関康祐, 小田部裕一; 早期脱型と温度ひび割れの抑制を両立させたコンクリート, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017, pp.1381-1386
- 6) 石川嘉崇, 安田幸弘; コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関するフライアッシュ混和の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011, pp.191-196

## New Fly Ash Concrete Combining High Early-Age Strength and Prevention of Temperature Cracking

*Fumiyoshi Kawasaki, Kosuke Yokozeki, Naoki Sogabe, Takeshi Torichigai, Kengo Seki, Yuichi Otabe, Masahiro Miyazono and Hiroyuki Kameshima*

Although concrete using fly ash as an admixture has advantages such as long-term strength enhancement and durability improvement, it has the disadvantage of low strength development at early age. To solve this problem, the authors have developed a concrete of good quality and with high early-age strength by combining fly ash with early-strength Portland cement and an accelerator composed mainly of alkali metal salts. An investigation of the strength development mechanism of this concrete showed that the combination of early-strength Portland cement and the accelerator promotes the reaction between the fly ash and the main minerals of the cement at the early stage of between 1 and 3 days, and it was found that the concrete possesses high strength-developing properties. It was confirmed that the shrinkage strain and durability of this concrete are superior to those of concrete using ordinary Portland cement. Furthermore, when the newly developed concrete was applied at low temperature in a structure, it was shown that its early-age strength was greater and that temperature cracking was suppressed. It was estimated that if this concrete were applied to a large box culvert, the process would require about 20% less time than current construction methods.