

# 論文 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の構造物への適用と耐久性評価

川崎 文義\*1・関 健吾\*2・取違 剛\*3・横関 康祐\*4

**要旨：**フライアッシュを混和材として用いたコンクリートの初期強度改善を目的として、フライアッシュに早強ポルトランドセメントおよび早強剤を組み合わせたコンクリートの検討を進めている。本論文では、当該コンクリートを冬季に施工される構造物に適用し、実環境における初期強度改善効果を検証するとともに、構造物の温度・ひずみ・応力の計測結果と温度応力解析から、温度ひび割れ抵抗性を評価した。さらに、非破壊試験による耐久性評価を実施した。その結果、当該コンクリートは、高い初期強度発現性と、高炉セメント B 種を使用したコンクリートと同等以上の温度ひび割れ抵抗性および耐久性を有することを実証した。

**キーワード：**フライアッシュ、早強ポルトランドセメント、早強剤、初期強度改善、温度ひび割れ

## 1. はじめに

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利用することは、環境負荷低減の観点から有効である<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、コンクリート打込み後、型枠の取外し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ず、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、筆者らは、フライアッシュに早強ポルトランドセメントおよ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、耐久性の向上およ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（以下、早強 FA コンクリート）の研究を行っている<sup>2)3)4)5)</sup>。早強 FA コンクリートは、フライアッシュおよびセメント主要鉱物の反応が、材齢初期に促進することで、同一 W/C の普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートより高い初期強度発現性を示すことを確認している<sup>4)</sup>。また、収縮特性および耐久性についても、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと同等以上となり、特に、自己収縮試験において、初期に膨張すること、およびその後の自己収縮が小さくなることを確認しており、早強 FA コンクリートが初期強度だけでなく収縮ひび割れにも有効となる可能性を示した<sup>4)</sup>。しかし、低温環境における実構

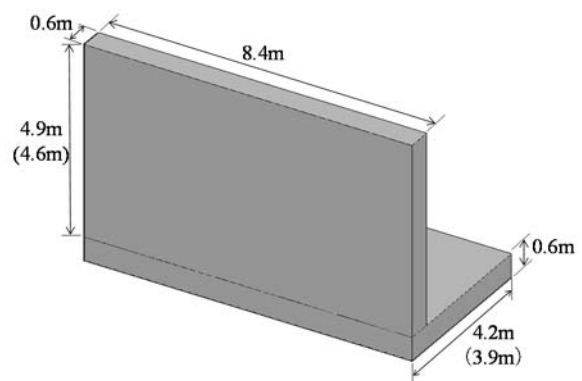
造物の施工において、当該コンクリートの初期強度改善効果、収縮抑制効果および耐久性について検討した実績がないのが現状である。

そこで、本研究では、早強 FA コンクリートを最低気温が 0℃を下回る低温環境で実構造物に適用し、実環境における初期強度の改善効果を検証するとともに、構造物に埋設した各種計測機器の計測結果と温度応力解析から、温度ひび割れの抵抗性に関する定量評価を行った。さらに、非破壊試験による耐久性評価を実施した。

## 2. 実構造物への適用

### 2.1 構造物概要

構造物の形状および寸法を図-1 に示す。構造物は、最低気温が 0℃以下となる冬季に施工される場所打ち L 形擁壁であり、壁部材を検討の対象とした。



( ) 内数値：普通コンクリートのケースの部材寸法

図-1 適用構造物の形状および寸法

\*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造グループ 研究員 修士 (工学) (正会員)

\*2 鹿島建設 (株) 東北支店 修士 (工学) (正会員)

\*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造グループ 主任研究員 修士 (工学) (正会員)

\*4 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木構造グループ グループ長 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリート配合

配合名	Gmax (mm)	SL (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
						W	C(BB)	C(H)	FA	S1	S2	G	Ad	AC
普通コンクリート	20	8.0±2.5	4.5±1.5	52.5	43.1	161	307	-	-	466	310	1064	2.46	-
早強 FA コンクリート	20	8.0±2.5	4.5±1.5	55.0	43.8	163	-	252	45	471	316	1051	2.97	2.97

2.2 配合および使用材料

コンクリートの配合を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。配合は、早強ポルトランドセメントにフライアッシュおよび早強剤を組み合わせたものとし、早強剤の添加量は、単位粉体量×1.0wt%とした。早強 FA コンクリート適用箇所以外の L 形擁壁は、高炉セメント B 種を用いた普通コンクリートを使用した。

表-2 使用材料

名称	記号	概要
練混ぜ水	W	上水道水
セメント	C(BB)	高炉セメント B 種 密度：3.04g/cm <sup>3</sup>
	C(H)	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	G	砕石 表乾密度：2.70g/cm <sup>3</sup>
混和剤	Ad	AE 減水剤リグニンスルホン酸とオキシカルボン酸
	AC	早強剤 (アルカリ金属塩)

2.3 計測項目

実構造物内部に計測器を設置し、コンクリートの温度、実ひずみ、自由ひずみおよび有効応力の計測を行った。温度計測は熱電対、実ひずみは埋込み型ひずみ計、自由ひずみは無応力容器内に設置した埋込み型ひずみ計、有効応力は有効応力計により計測した。計測器の設置位置を図-2 に示す。各ひずみおよび有効応力の計測方向は、温度応力の卓越が予想される壁の長手方向とした。なお、各計測データの初期値は、ひずみ計測データの安定と有効応力の発生状況から判断して、早強 FA コンクリートで打込みから 5 時間後、普通コンクリートで 8 時間後とした。

2.4 施工方法

壁のコンクリート打込みは、底版のコンクリート打込みから 2 週間後に行った。コンクリートの製造は、レディーミクストコンクリート工場にて行い、早強剤は工場でもキサ内部に手投入した。コンクリート打込み時の外気温は日平均で 7℃程度であったが、最低気温が 0℃以下となることが予想されたことから、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い、コンクリート表面の温度低下を防いだ。さらに、初期凍害防止を目的として打込み完了から約 12 時間は、シートの内側でジェットヒーターを稼働させ、給熱養生を施した。

2.5 強度試験用の供試体

強度発現確認のための供試体 (φ100×200mm) は、現場で試料を採取し、構造物と同じ養生環境下で封緘養生した後、材齢 1, 3, 7, 14 および 28 日で JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を実施した。

2.6 計測結果および考察

(1) 強度発現性

コンクリートの圧縮強度を図-3 に示す。早強 FA コンクリートは、普通コンクリートに比べて高い強度発現性を示した。その傾向は材齢が若い程大きく、普通コンクリートに対する早強 FA コンクリートの強度比は、材齢 1 日で最も大きく 4.6 倍であった。

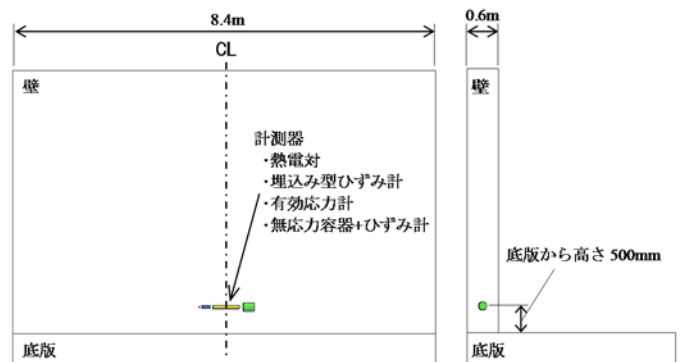


図-2 計測器の設置位置

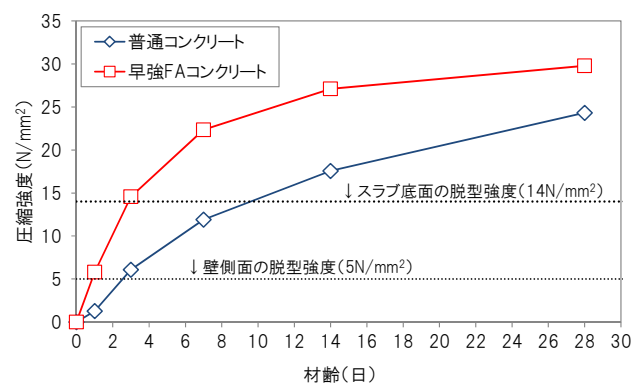


図-3 圧縮強度試験結果

2012 年制定の土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] では、型枠およ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・はりの底面およびアーチの内面であれば 14.0N/mm<sup>2</sup> が示されている。図-3 によると、圧縮強度が 5.0N/mm<sup>2</sup> を超える材齢は、普通コンクリートで 3 日、早強 FA コンクリートで 1 日であり、壁の型枠取外しまでの期間を 2 日短縮できることになる。さらに、圧

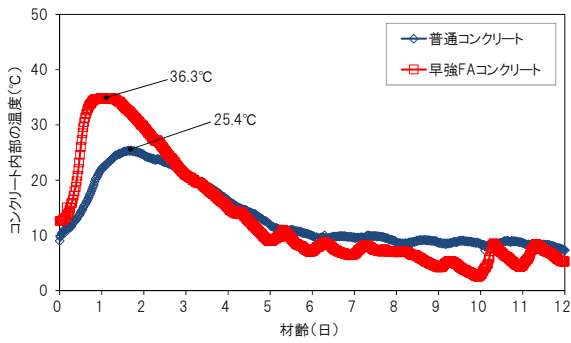


図-4 コンクリート温度測定結果

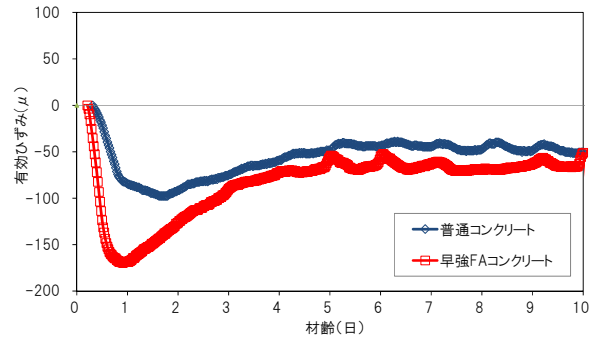


図-6 有効ひずみの計測結果

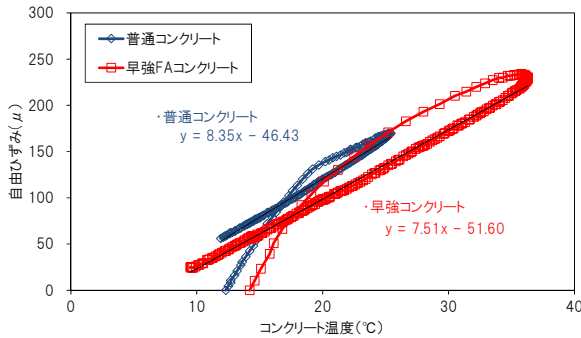


図-5 自由ひずみとコンクリート温度の関係

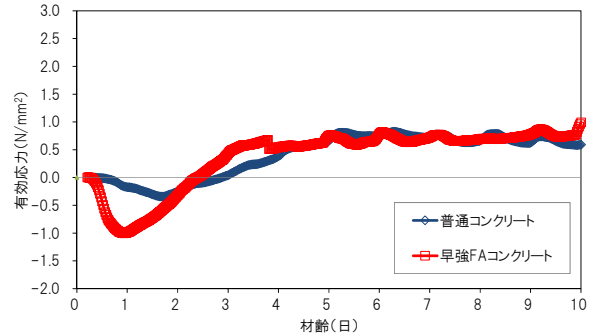


図-7 有効応力計の計測結果

縮強度が  $14.0\text{N/mm}^2$  を超える材齢は普通コンクリートで 10 日、早強 FA コンクリートで 3 日であり、対象部材がスラブ・はりの底面であれば型枠の取外しまでの期間を 7 日短縮できることになる。本検討の範囲において、低温環境下で早強 FA コンクリートを適用することにより、高炉セメント B 種を使用した普通コンクリートに比べて工事の工程短縮が可能となることが実証できた。

## (2) コンクリート温度計測結果

コンクリートの温度計測結果を図-4 に示す。打込み時のコンクリートの温度は、普通コンクリートで  $9.0^\circ\text{C}$ 、早強 FA コンクリートで  $11.0^\circ\text{C}$  であった。両ケースとも打込み直後から温度が上昇し、早強 FA コンクリートは材齢 1.1 日、普通コンクリートは材齢 1.7 日で最高温度に達した。その後、緩やかに温度降下し、材齢 6 日で外気温に追従した。最高温度は、早強 FA コンクリートで  $36.3^\circ\text{C}$ 、普通コンクリートで  $25.4^\circ\text{C}$  となり、早強 FA コンクリートの方が約  $11^\circ\text{C}$  高い結果となった。なお、材齢 6 日以降の温度履歴が両ケースで異なるのは、打込み日の違いにより各材齢の外気温が異なることによるものである。

前述の圧縮強度の試験結果と併せ、早強 FA コンクリートは、早強ポルトランドセメントとアルカリ金属塩を主成分とする早強剤の組合せによって、材齢 1 日程度のごく初期におけるフライアッシュとセメント主要鉱物の反応性が高まったものと考えられる。

## (3) 熱膨張係数

図-5 に無応力容器に設置した埋込み型ひずみ計から

得られた自由ひずみとコンクリート温度の関係を示す。早強 FA コンクリートの温度降下時の熱膨張係数は  $7.51\mu/\text{C}$ 、普通コンクリートでは  $8.35\mu/\text{C}$  となり、早強 FA コンクリートの方が 10%程度小さくなった。

## (4) 有効ひずみの計測結果

有効ひずみの計測結果を図-6 に示す。有効ひずみは、実ひずみから自由ひずみを差し引いた値とした<sup>7)</sup>。図より、いずれのケースも材齢初期に圧縮ひずみが増加し、前述のコンクリート温度が最大となった材齢付近で圧縮ひずみも最大となり、その後、引張側に転じた。これは、材齢初期における内部拘束による圧縮ひずみの増加と、その後の外部拘束による引張ひずみの増加の複合作用による温度応力の履歴の一般的な傾向である。

早強 FA コンクリートの圧縮ひずみの最大値は、普通コンクリートより  $70\mu$  程度大きくなった。これは、図-4 に示すコンクリートの最高温度の差による影響が支配的と考えられる。一方で、両コンクリートの温度がほぼ同じとなった材齢 5 日以降においても、早強 FA コンクリートの圧縮ひずみは普通コンクリートより大きい値を示した。早強 FA コンクリートは、早強剤の添加によって材齢初期にエトリングایت生成による膨張が生じることを既報にて明らかにしており<sup>5)</sup>、本計測結果はこれに起因する膨張ひずみと、フライアッシュによる自己収縮ひずみの低減効果が作用したものと推察される。

## (5) 有効応力計測結果

有効応力の計測結果を図-7 に示す。有効ひずみと同様に、いずれのケースも材齢初期に圧縮応力が増加し、コ

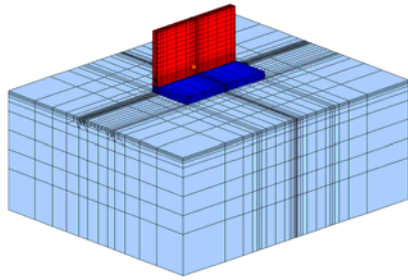


図-8 解析モデル

ンクリート温度が最大となる材齢付近で有効応力も最大となり、その後、引張側に転じた。引張応力は、両ケースとも材齢5日程度まで増加した後、それ以降はほぼ一定となり、引張応力の最大値は、両ケースとも同じ1.0N/mm<sup>2</sup>程度であった。なお、材齢3.8日で早強FAコンクリートの応力値が不連続となっている点があるが、ひずみの計測値に同様の挙動は確認できず、構造物にもひび割れは生じていない。

両ケースの外部拘束の条件は同じであり、早強FAコンクリートの最高温度は普通コンクリートより約11℃高いにもかかわらず、早強FAコンクリートの引張応力の最大値が普通コンクリートと同程度となった。この理由として、早強FAコンクリートは、図-3に示したとおり、材齢1日で普通コンクリートに比べて高い強度を示しており、これに伴いヤング係数も増加していると考えられる。また、前述の早強剤の添加に起因する初期膨張が材齢1日程度で最大となることから<sup>5)</sup>、早強FAコンクリートは、材齢初期において、膨張による圧縮応力が効果的に部材全体に作用し、これがケミカルプレストレスとなって外部拘束による引張応力が低減されたものと推察される。併せて、フライアッシュによる自己収縮ひずみの低減効果も引張応力低減に寄与したものと推察される。なお、いずれの構造物においても材齢120日時点においてひび割れは生じていない。

### 3. 解析による温度ひび割れ抑制効果の検討

#### 3.1 解析モデルおよび解析条件

実構造物の計測データに基づき、3次元FEMによる温度応力解析を行い、早強FAコンクリートと普通コンクリートの温度ひび割れ抵抗性の評価を行った。

解析モデルは、底版および壁を実構造物と同寸法でモデル化した。解析モデルを図-8に示す。解析条件の一覧を表-3に示す。断熱温度上昇に関する定数は、別途実施した早強FAコンクリートの断熱温度上昇量試験の結果を基に、実測したコンクリート温度(図-4)と整合するように設定した。早強FAコンクリートと普通コンクリートの計測値と解析値の温度履歴の比較を図-9および図-10に示す。圧縮強度は、実構造物と同じ材料を使用した同配合のコンクリートを試験室において10℃環境

表-3 解析条件一覧

項目	普通コンクリート	早強FAコンクリート	
コンクリートの熱特性	熱伝導率	2.7 [W/m°C]	
	密度	2400 [kg/m <sup>3</sup> ]	
	比熱	1.15 [kJ/kg°C]	
表面の熱伝達係数	マスコン指針 <sup>※</sup> に準拠		
断熱温度上昇特性値 $Q_{(t)}=Q_{\infty}(1-\exp(-\alpha \times t^{\beta}))$	$Q_{\infty}$	51.24	48.80
	$\alpha$	0.86	1.93
	$\beta$	1.00	0.65
熱膨張係数	実測値：8.35μ/°C		
圧縮強度推定式	10℃環境の試験室データと積算温度の関係より算出		
引張強度推定式	マスコン指針 <sup>※</sup> に準拠		
ヤング係数推定式	マスコン指針 <sup>※</sup> に準拠		
クリープの影響を考慮したヤング係数の低減係数	圧縮応力増加	0.81	0.94
	圧縮応力減少	1.07	0.66
自己収縮	引張応力増加	0.69	0.50
	自己収縮	マスコン指針 <sup>※</sup> に準拠	既報の試験結果 <sup>5)</sup>

※日本コンクリート工学会マスコンクリートのひび割れ制御指針2016<sup>6)</sup>

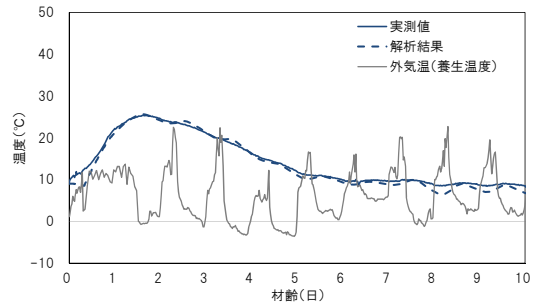


図-9 普通コンクリートの温度解析結果

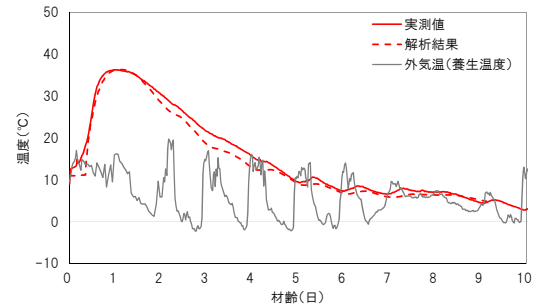


図-10 早強FAコンクリートの温度解析結果

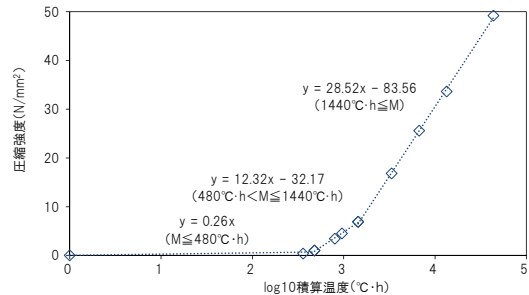


図-11 普通コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

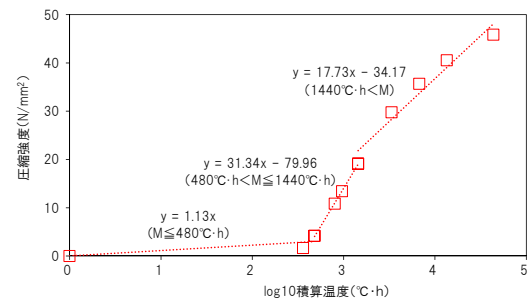


図-12 早強FAコンクリートの積算温度と圧縮強度の関係

で練り混ぜ、10℃で水中養生を行った供試体 (φ100 mm ×200 mm) の圧縮強度試験結果と積算温度の関係から得られた図-11 および図-12 のデータを用いた。引張強度およびヤング係数は、日本コンクリート工学会マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016<sup>6)</sup> (以下、マスコン指針) の式に準拠し、ヤング係数のクリープの影響を考慮した低減係数は、既往の文献<sup>7)</sup>を参考に、計測データに基づき算出した。熱膨張係数は、図-5 の値を用いた。早強 FA コンクリートの自己収縮ひずみは、水セメント比 50%、早強剤添加量を単位粉体量×2.0wt%とした配合で実施された既往の試験結果<sup>5)</sup>を用いた。普通コンクリートの自己収縮ひずみは、マスコン指針から算出した。

### 3.2 解析結果

図-13 に構造物の断面中心 (壁部材の下端から 500 mm) に発生した応力の計測値と解析値の比較を示す。図より、応力の解析値は、計測値と概ね一致した。なお、解析値が材齢 1 日で不連続となっているが、これはクリープの影響を考慮したヤング係数の低減係数を応力状態の変化に応じて設定したことによるものである。

図-14 にひび割れ指数の経時変化を示す。図より、早強 FA コンクリートと普通コンクリートの最小ひび割れ指数は、それぞれ 2.14、1.49 であり、早強 FA コンクリートは普通コンクリートに比べて約 1.4 倍の値となった。

実構造物の計測結果に基づき、温度ひび割れ抵抗性について解析を行った結果、早強 FA コンクリートは、高炉セメントを用いた普通コンクリートより高い温度ひび割れ抵抗性を有することが分かった。

## 4. 実構造物調査に基づく耐久性評価

### 4.1 試験概要

材齢 30 日および 120 日において実構造物の非破壊試験を行い、早強 FA コンクリートの圧縮強度と耐久性に関する物質移動抵抗性を評価した。試験項目は、推定圧縮強度、透気係数<sup>8)</sup>および表面吸水速度<sup>9)</sup>とした。各試験の計測方法を表-4 に示す。

### 4.2 調査結果

#### (1) 推定圧縮強度

推定圧縮強度の測定結果を図-15 に示す。図より、各材齢において、早強 FA コンクリートの推定圧縮強度は、普通コンクリートより若干高いものの、ほぼ同程度となった。図-3 に示した供試体の圧縮強度試験結果と併せ、早強 FA コンクリートの高い強度発現は材齢初期のみに生じ、長期的な強度の増進は高炉セメント B 種を使用した普通コンクリートと同等となることが分かった。

#### (2) 透気係数

透気係数の測定結果を図-16 に示す。なお、図中には表面水分率の測定結果を併記した。図より、早強 FA コ

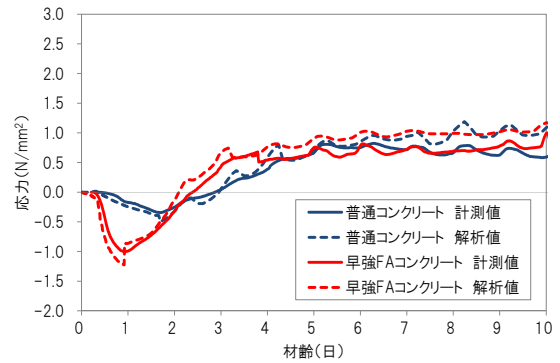


図-13 応力の計測値および解析値

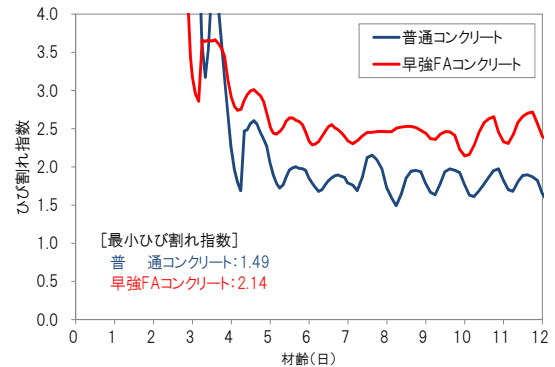


図-14 ひび割れ指数の比較

表-4 非破壊試験の試験項目と計測方法

試験項目	計測方法
推定圧縮強度	JSCE G504に準拠し、測定した反発度から圧縮強度を推定
透気係数	Torrent法 <sup>8)</sup>
表面吸水速度	SWAT法 <sup>9)</sup>

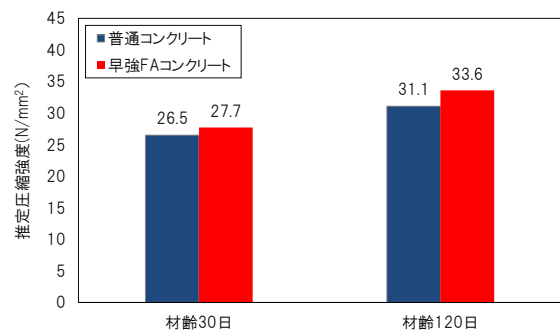


図-15 推定圧縮強度の測定結果

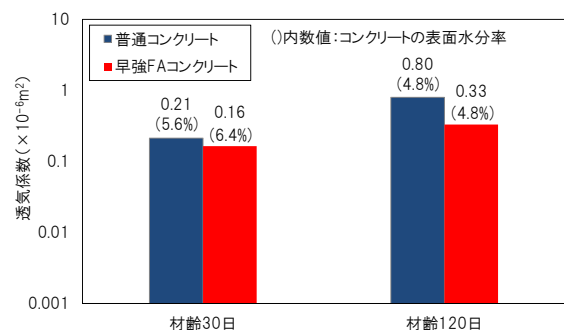


図-16 透気係数の測定結果



ンクリートと普通コンクリートの透気係数は、材齢 30 日でそれぞれ  $0.21 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ ,  $0.16 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ , 材齢 120 日で  $0.80 \times 10^{-16}/\text{m}^2$ ,  $0.33 \times 10^{-16}/\text{m}^2$  となった。いずれの材齢においても早強 FA コンクリートは、普通コンクリートと同等以上の品質であった。

### (3) 表面透水速度

表面吸水速度の測定結果を図-17 に示す。図中には、表面水分率の測定結果を併記した。図より、早強 FA コンクリートと普通コンクリートの吸水速度は、材齢 30 日でそれぞれ  $0.21 \text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ,  $0.14 \text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ , 材齢 120 日で  $0.50 \text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ,  $0.17 \text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$  となった。いずれの材齢においても、早強コンクリートの品質は、普通コンクリートより高く、材齢 120 日の表面吸水速度は、普通コンクリートに比べて約 70%小さい結果となった。

## 5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 早強 FA コンクリートを最低気温が  $0^\circ\text{C}$  以下となる低温環境で施工される実構造物に適用した結果、同時期に施工した高炉セメント B 種を使用したコンクリートに比べ、高い初期強度発現性を示した。早強 FA コンクリートの使用により、型枠の取外しに必要な強度に達するまでの日数は、普通コンクリートに比べ、壁側面およびスラブ底面でそれぞれ 2 日および 7 日短縮できる。
- (2) 構造物内部の計測結果から、早強 FA コンクリートの引張応力の最大値は、高炉セメント B 種を使用したコンクリートと同程度となった。また、実測データに基づき 3 次元 FEM による温度応力解析を実施した結果、早強 FA コンクリートの最小ひび割れ指数は、高炉セメント B 種を用いた普通コンクリートの約 1.4 倍となり、温度ひび割れ抑制効果が確認された。
- (3) 材齢 30 日および 120 日で実構造物の非破壊試験を行い、圧縮強度と耐久性に関する物質移動抵抗性を評価した結果、早強 FA コンクリートは、高炉セメント B 種を使用したコンクリートに比べ同等以上であった。

## 謝辞

本研究は住友大阪セメント（株）と共同で実施したものであり、多くの貴重な助言を頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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, pp.80-87, 2015

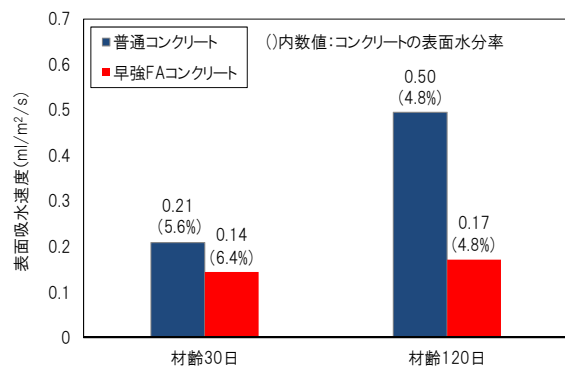


図-17 表面吸水速度の測定結果

- 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, pp.266-267, 2016
- 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, pp.268-269, 2016
- 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, pp.271-272, 2016
- 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, pp.1381-1386, 2017
- 6) 日本コンクリート工学会；マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016.11
- 7) 芦澤良一, 横関康祐, 藤岡彩永佳, 溝渕利明；実構造物の計測結果に基づくクリープの影響を考慮したヤング係数の補正值に関する評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1509-1514, 2016
- 8) R.J.TORRENT；A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, vol.25, pp.358-365, 1992.
- 9) 林和彦, 細田暁；表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質に評価方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集E2, Vol.69, No.1, pp82-97, 2013