

# 論文 非晶質カルシウムアルミネートを利用した超速硬フライアッシュコンクリートの性能

北野 勇一\*1・水戸 健介\*2・相澤 一裕\*3・寺崎 聖一\*3

**要旨:** 道路橋床版更新工事における PC 床版間詰め施工への適用を目指し開発した超速硬フライアッシュコンクリートの性能について各種検討を行った。検討にあたっては、普通セメントと低添加型の膨張材を使用して材齢 28 日で設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  を確保する PC 用膨張コンクリートおよび通常の超速硬コンクリートと性能の比較を行った。その結果、非晶質カルシウムアルミネートを利用した超速硬フライアッシュコンクリートは、急速施工性と高耐久性を兼ね備え、しかも PC 用膨張コンクリートに要求される強度特性とひび割れ抵抗性を確保することが確認された。

**キーワード:** 超速硬コンクリート, フライアッシュ, 床版更新工事, 急速施工性, 高耐久性

## 1. はじめに

道路橋では RC 床版の経年供用による劣化が顕在化しているものもあり、材料と構造の両面から高耐久性を有し急速施工に対応が可能なプレキャスト PC 床版への更新工事が実施され始めてきた<sup>1)</sup>。また、床版厚の低減、現場施工の省力化、塩害に対する更なる高耐久化を目指したプレキャスト PC 床版が開発され、実工事に適用され始めてきた<sup>2)</sup>。一方、PC 床版間詰め部(図-1 参照)には、一般に普通セメントと低添加型 ( $20\text{kg/m}^3$ ) の膨張材を使用し、材齢 28 日で設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  を確保する膨張コンクリート(以下、PC 用膨張コンクリートという)を用いた施工がなされてきた。しかし、PC 床版間詰め部についても急速施工性と高耐久性の要請があると考える。

そこで、筆者らは PC 床版間詰め部への適用を念頭に、フライアッシュを混入した超速硬コンクリート(以下、超速硬フライアッシュコンクリートという)を開発した。フライアッシュを混和材として選定した理由は、急速施工性と高耐久性を確保するために、自己収縮ひずみが増大しない材料であることを考えた。

本論では、超速硬フライアッシュコンクリートの基礎性状を実験的に明らかにするとともに、ひび割れ抵抗性の実験データをもとに拘束応力評価手法を解析的に検討した結果について報告する。

なお、超速硬コンクリートに用いるセメントには、超速硬性を付与させる成分としてカルシウムフルオロアルミネート ( $\text{C}_{11}\text{A}_7 \cdot \text{CaF}_2$ ) あるいは非晶質カルシウムアルミネート ( $\text{C}_{12}\text{A}$ ) を利用しているものがあるが、ここでは膨張性を有する後者を対象に検討を進めた。

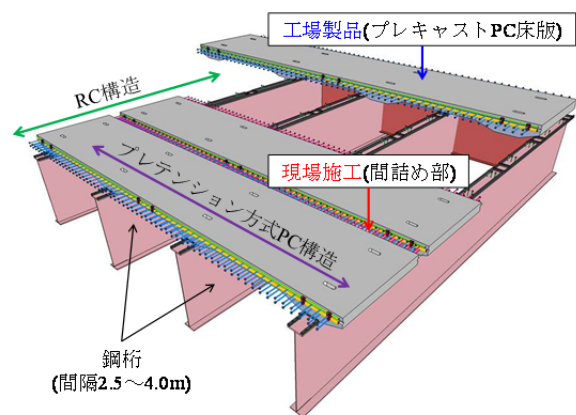


図-1 道路橋床版更新工事の概略図

## 2. 目標性能について

超速硬フライアッシュコンクリートの目標性能は、少なくとも PC 用膨張コンクリートの性能を確保することを目的に、次の通りとする。

- (1) 急速施工性：3 時間強度が  $24\text{N/mm}^2$  以上
- (2) 高耐久性：塩化物イオン拡散係数が PC 用膨張コンクリートの 1/4 (25%) 以下、かつ、凍結融解に関する耐久性指数 85 以上
- (3) 強度特性：圧縮強度、静弾性係数、引張強度、鉄筋付着応力が PC 用膨張コンクリートと同等以上
- (4) ひび割れ抵抗性：鉄筋拘束による発生応力が PC 用膨張コンクリートに生じる引張応力以下、かつ、ひび割れが生じないこと

塩化物イオン拡散係数は、既往研究<sup>3)</sup>を参考に、早強セメントの質量の 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリートと同程度になるように設定した。

\*1 川田建設(株) 技術部技術開発課 (正会員)

\*2 川田建設(株) 技術部技術開発課

\*3 デンカ(株) 青海工場 セメント・特混研究部

### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。超速硬セメントはその成分のみで十分な膨張挙動を示す非晶質カルシウムアルミネートを利用しているもの<sup>4)</sup>を選定し、小規模の急速施工への対応も念頭に細骨材と粉末の減水剤をプレミックスしたものを使用した。また、フライアッシュはスランプおよび空気量の変動をできるだけ抑制する観点より、JIS A 6201 に規定される II 種に該当し、かつ、強熱減量 1.0% 以下に品質管理される改質フライアッシュ<sup>5)</sup>を用いた。

#### 3.2 コンクリート配合

表-2 にコンクリート配合を示す。配合 N は材齢 28 日で設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup> を確保する PC 用膨張コンクリートであり、スランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5% が得られるように混和剤を調整した。配合 JE は超速硬セメントを用い材齢 3 時間で設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup> を確保する超速硬コンクリートであり、スランプ 12±2.5cm が得られるように水量を調節した。

配合 JEF は今回開発した超速硬フライアッシュコンクリートであり、フライアッシュセメント比が 12% となるように配合 JE の細骨材の一部をフライアッシュに置換させ、スランプ 12±2.5cm、空気量 4.5±1.5% が得られるように水量と AE 剤を調整した。ここで、フライアッシュを細骨材置換（外割り）としたのは、超速硬セメントの 30% をフライアッシュで置換（内割り）した配合において、無混和の場合に比べ材齢 3 時間における強度発現が小さく、かつ、塩化物イオン浸透抵抗性が低下したとの報告<sup>6)</sup>があることによる。

また、配合 JE と配合 JEF に関しては可使時間（コンクリート温度 2℃上昇に要する時間<sup>4)</sup>が 40 分程度になるように凝結遅延剤を添加した。

#### 3.3 試験項目

表-3 に試験項目を示す。供試体は 20℃の室内にて練り混ぜたコンクリートを鋼製型枠に打込み、膨張反応が十分進行すると考えられる材齢 2 日まで型枠拘束し、脱枠を行った。その後、試験 1~6 の供試体は 20℃の室内にて封かん養生を行い（超速硬コンクリートの施工では湿潤養生期間を十分に確保できないことから水を供給しないものとした）、試験 7~9 の供試体は材齢 7 日まで封かん状態とし（理由は試験 1~6 と同様）、その後 20℃ 60%RH の乾燥状態に曝した（実構造物では封かん状態に近いと想定されるが、ひび割れがより発生しやすい状態にて試験を実施した）。

圧縮強度試験は材齢 3 時間、1 日、7 日、28 日、91 日、静弾性係数、引張強度および鉄筋付着応力の各試験は材齢 28 日で実施した。ここで、鉄筋付着応力度の算出は式 (1) より求めた。

表-1 使用材料

記号	名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	物性ほか
C	普通セメント	3.15	比表面積 3360cm <sup>2</sup> /g
JE	超速硬セメント プレミックス	2.74	非晶質カルシウムアルミネート系
E	膨張材	3.05	エトリンガイト・石灰複合系
F	フライアッシュ	2.29	II 種、比表面積 3790cm <sup>2</sup> /g、 強熱減量 0.5%
S	細骨材	2.64	新潟県姫川産川砂
G1	粗骨材	2.68	新潟県姫川産川砂利
G2	粗骨材	2.72	埼玉県秩父産
Ad	高性能 AE 減水剤	-	標準形 I 種、ポリカルボン酸系
AE	AE 剤	-	-
D	凝結遅延剤	-	オキシカルボン酸系化合物

表-2 コンクリート配合

記号	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	B			F	S	G
			C	JE	E			
N	33.9	157	443	-	20	-	838	899
JE	31.0	146	-	(471)	-	-	(691)	1115
JEF	31.0	146	-	(471)	-	57	(634)	1115

※()内の数値はプレミックスを粉体と細骨材に分けて表示した。また、配合 N は G1、配合 JE と配合 JEF は G2 を使用。

表-3 試験項目

試験項目	試験方法	備考
1 圧縮強度	JIS A 1108 (φ10cm)	材齢 2 日で脱枠
2 静弾性係数	JIS A 1149 (φ10cm)	し、試験材齢まで
3 割裂引張強度	JIS A 1113 (φ10cm)	20℃封かん。ただし、
4 鉄筋付着応力	JSCE-G503 (D19)	試験 6 は材齢
5 塩分浸透抵抗性	JSCE-G572	21~28 日まで水中
6 凍結融解抵抗性	JIS A 1148 (A 法)	浸漬した。
7 一軸拘束膨張量	JIS A 6202 附属書 2 (B 法)	材齢 2 日で脱枠し、
8 ひび割れ抵抗性	JCI 法 <sup>7)</sup> 参照*	材齢 7 日まで封かん後、
9 自由ひずみ	□10×40cm (無筋)	20℃ 60%RH で乾燥

\*鉄筋 D32 は節を落とさず、全区間で付着するものとした。

$$\tau = \frac{P}{4\pi D^2} \times \alpha \quad (1)$$

$\tau$  : 付着応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、P : すべり量が 0.002D (=0.038mm) に達した時点の荷重(N)、D : 鉄筋の直径 (=19mm)、 $\alpha$  : コンクリートの圧縮強度( $f_c$ )に対する補正係数で  $\alpha=30/f_c$  (=0.6、ここでは設計基準強度を指標に算出した)。

塩分浸透試験は材齢 28 日より 10%NaCl 水溶液に 6 ヶ月浸漬し、0.1mol/L の硝酸銀水溶液を噴霧し発色境界を塩分浸透深さとして測定するとともに、別途 JSCE-G574 に従い EPMA 面分析を行い、得られた塩化物イオン濃度分布より拡散係数を求めた。

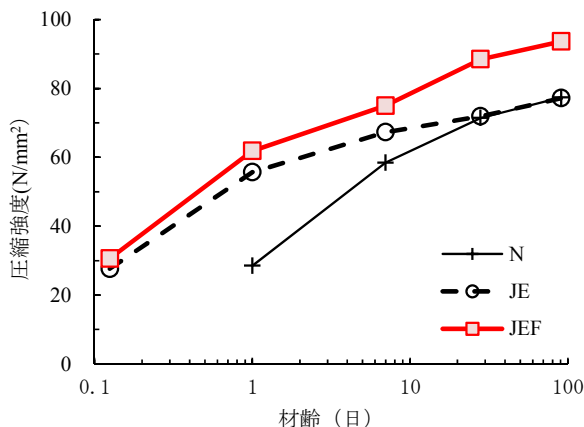


図-2 圧縮強度

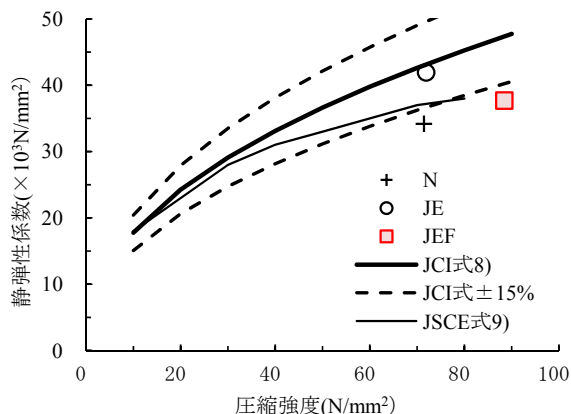


図-3 静弾性係数

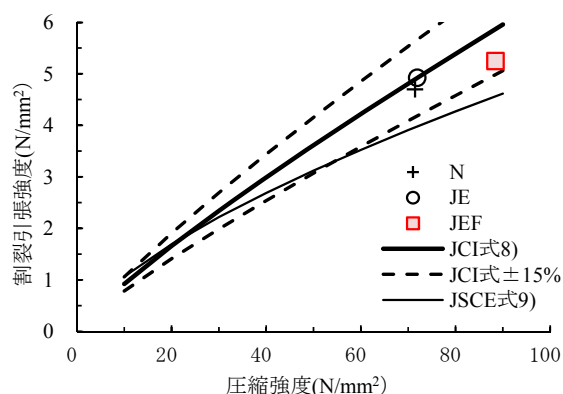


図-4 引張強度

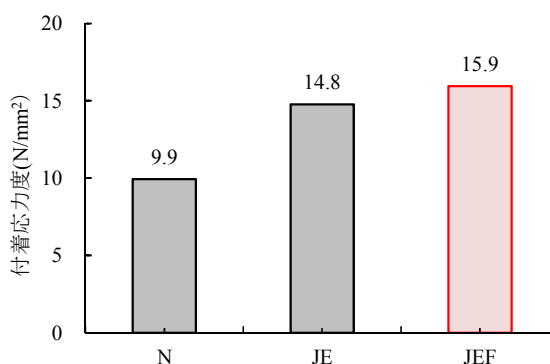


図-5 鉄筋付着応力

ひび割れ抵抗性試験は、鉄筋に取り付けたひずみゲージ(4ゲージ法)の計測データに基づき(2)によりコンクリートに生じる拘束応力を算出した。

$$\sigma_c = (E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (2)$$

ここで、 $E_s$ ：鋼材の弾性係数(200000N/mm<sup>2</sup>)、 $\varepsilon_s$ ：鋼材のひずみ、 $A_s$ ：鋼材の断面積(794.2mm<sup>2</sup>)、 $A_c$ ：コンクリートの純断面積(9205.8mm<sup>2</sup>)。

自由ひずみは埋込型ひずみ計(低弾性タイプ)をコンクリート中心部に設置して測定を行った。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 圧縮強度

図-2は材齢の自然対数を取り、圧縮強度との関係をコンクリート配合毎に整理した結果である。配合JEおよび配合JEFとも3時間強度が24N/mm<sup>2</sup>を十分に上回り、材齢28日までの間に設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>を確保することが確認された。また、配合JEの圧縮強度は材齢28日以降に配合Nと同程度となるのに対し、配合JEFは材齢28日以降も強度が増進し、材齢91日に至るまで配合Nの1.2倍以上の圧縮強度を発現することがわかった。

### 4.2 静弾性係数

図-3に静弾性係数の試験結果を示す。図より、配合

によってはJCI式<sup>8)</sup>の±15%の範囲を逸脱し、JSCE式<sup>9)</sup>より小さくなるものがあった。

### 4.3 引張強度

図-4に引張強度の試験結果を示す。これによると、配合によらずJCI式<sup>8)</sup>に比べ±15%の範囲、JSCE式<sup>9)</sup>に比べ同等以上になった。

### 4.4 鉄筋付着応力

図-5に鉄筋付着応力の算出結果を示す。図より、配合JEおよび配合JEFとも配合Nを上回る鉄筋付着応力を有することが確認された。これは、非晶質カルシウムアルミネートを利用した超速硬セメントについては、打継ぎコンクリートから水和成長したエトリンガイド結晶による下地コンクリートに対するアンカー効果が発揮されるという樺山らの研究<sup>10)</sup>と同様な効果が本実験でも発揮されたものと考えられる。

### 4.5 塩分浸透抵抗性

図-6にEPMA面分析結果を示す。塩分浸透深さは、配合N(11.9mm) > 配合JE(6.2mm) > 配合JEF(4.6mm)の順に小さくなった。このEPMAデータを深さ0.5mm毎に平均した塩化物イオン濃度分布(図-7)から、塩化物イオン拡散係数を求めた結果を図-8に示す。塩化物イオン拡散係数は、配合N(0.75cm<sup>2</sup>/年)に対する比

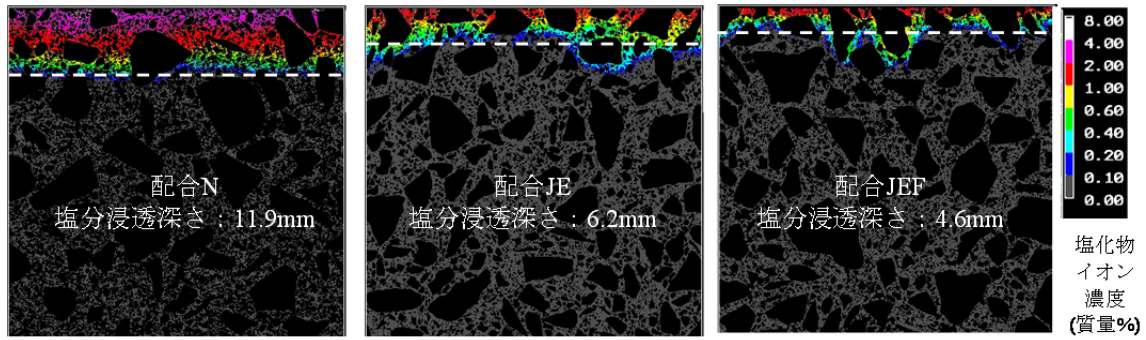


図-6 EPMA 面分析結果

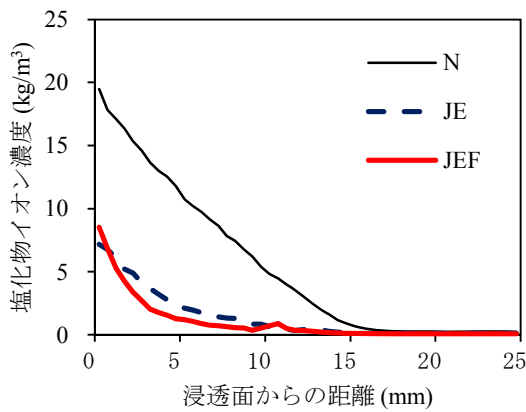


図-7 塩化物イオン濃度分布

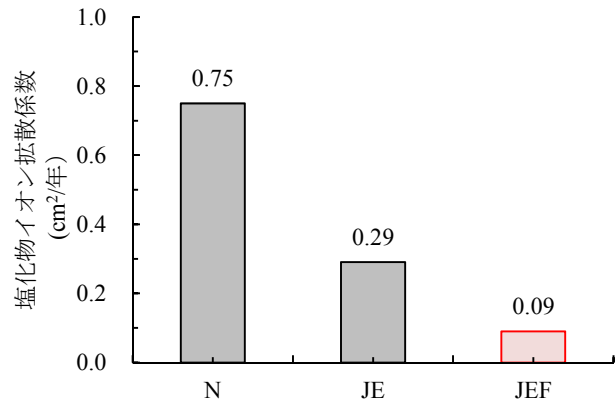


図-8 塩化物イオン拡散係数

率として、配合 JE (0.29 cm<sup>2</sup>/年) で 39%，配合 JEF (0.09 cm<sup>2</sup>/年) で 12% となった。

#### 4.6 凍結融解抵抗性

図-9 に凍結融解試験結果を示す。水中凍結融解 300 サイクル終了後の相対動弾性係数は、配合 JE で 95，配合 JEF で 98 となり、いずれも耐久性指数 85 を上回ることが確認された。

#### 4.7 一軸拘束膨張量

図-10 に一軸拘束状態における長さ変化率を示す。配合 JE および配合 JEF の長さ変化率は材齢 7 日までにケミカルプレストレス (200~700×10<sup>-6</sup>) に相当する膨張ひずみが得られ、材齢 91 日まで収縮ひずみに転じることはなかった。なお、配合 N は材齢 7 日で 57×10<sup>-6</sup> であり、収縮補償 (200±50×10<sup>-6</sup>) に相当する膨張ひずみが得られなかった。これは、水セメント比が低く自己収縮が生じたこと、JIS 規格では水中に 7 日間養生する所、今回の実験では実施工を考慮して封かん養生に変更したことが影響したと考える。

#### 4.8 ひび割れ抵抗性

材齢 91 日に供試体表面を目視確認した結果、いずれの配合もひび割れの発生は認められなかった。

図-11 に鉄筋ひずみの経時変化を示す。配合 JE および配合 JEF の鉄筋ひずみは材齢初期に約 100×10<sup>-6</sup> の膨張ひずみとなるものの、材齢 7 日までに収縮ひずみに転

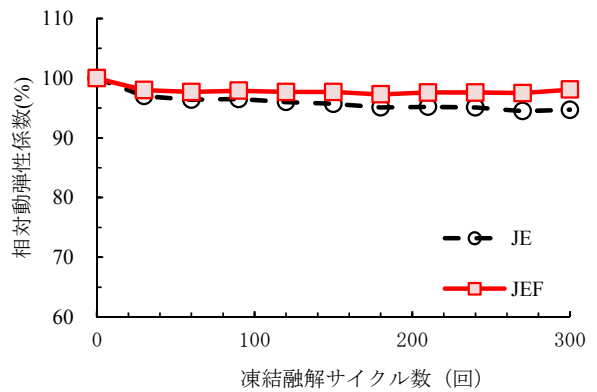


図-9 相対動弾性係数

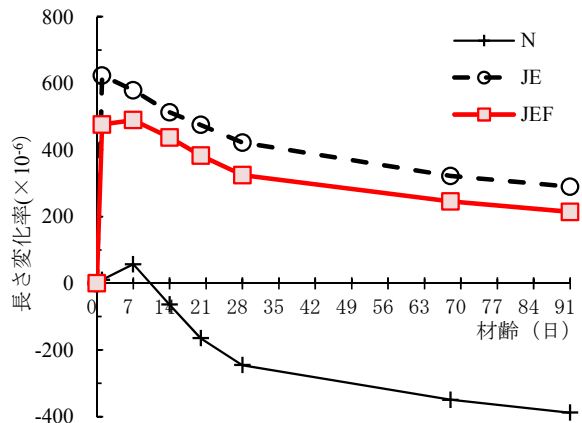


図-10 一軸拘束膨張量 (PC 鋼棒φ11mm)

じた。このようにケミカルプレストレインが早期に消失した理由としては、鋼材比の違い（一軸拘束膨張量の鋼材比 0.95%，鉄筋拘束応力の鋼材比 8.6%）が影響した可能性がある。詳細については 5 章にて述べる。

図-12 にコンクリートに生じる拘束応力を示す。初期応力の最小値は配合 N で  $-0.3\text{N/mm}^2$ ，配合 JE と配合 JEF で  $-1.9\text{N/mm}^2$ （いずれも圧縮）であった。また，材齢 91 日目の拘束応力はいずれも引張応力となり，配合 N ( $3.4\text{N/mm}^2$ ) > 配合 JEF ( $2.0\text{N/mm}^2$ ) > 配合 JE ( $0.8\text{N/mm}^2$ ) の順に小さくなった。配合 JEF が配合 JE よりも拘束応力が増加したのは，フライアッシュを外割置換したことで粉体量が増えたため，自己収縮応力が増加したと推察される。

なお，既往の研究<sup>11)</sup>において PC 用膨張コンクリートの一軸拘束膨張量（簡易断熱+封かん）が約  $200 \times 10^{-6}$  得られているケースでは，鉄筋 D32 を配置した PC 用膨張コンクリート拘束試験体（簡易断熱+封かん）の初期応力が最小  $-0.7\text{N/mm}^2$  程度にあり，この結果を今回の実験に当てはめたとすると，配合 N の材齢 91 日目の拘束応力は  $3.0\text{N/mm}^2$  程度であり，配合 JEF で生じるコンクリートの引張応力はこれ以下となっている。

## 5. 拘束応力評価手法の検討

### 5.1 検討概要

PC 床版間詰め部は既設の鋼桁およびプレキャスト PC 床版による拘束が大きく，間詰めコンクリートのひび割れを制御するためには拘束応力を適切に評価する必要がある。PC 用膨張コンクリートに関しては式(3)として表される有効ヤング係数法<sup>8)</sup>が広く利用されている。

$$E_e(t_e) = \varphi(t_e) \times E_c(t_e) \quad (3)$$

ここで， $E_e(t_e)$ ：有効材齢  $t_e$  における有効ヤング係数， $\varphi(t_e)$ ：コンクリートのクリープの影響を考慮するためのヤング係数の補正係数， $E_c(t_e)$ ：有効材齢  $t_e$  におけるコンクリートのヤング係数。

そこで，超速硬フライアッシュコンクリートについても有効ヤング係数法を用いて拘束応力を評価する。具体的には，文献 11 を参照し，市販の温度応力解析プログラムを用い，鋼材の断面積を一致させた 3 次元解析モデルを作成した。解析条件として，強度特性と体積ひずみは実測値あるいは実測値の回帰式を用い，温度は  $20^\circ\text{C}$  一定，ポアソン比はコンクリート 0.2 と鉄筋 0.3 とし，材齢 1 日までの  $\varphi(t_e)$  を変化させ（材齢 2 日以降は 0.42），材齢初期から 91 日まで応力解析を行った。

### 5.2 検討結果および考察

図-13 に無筋コンクリート供試体で測定された無拘束状態における自由ひずみの測定結果を示す。前出の一軸拘束膨張量（図-10）に比べ，配合 JE および配合 JEF の最大膨張ひずみは 1.4～1.5 倍に達した。

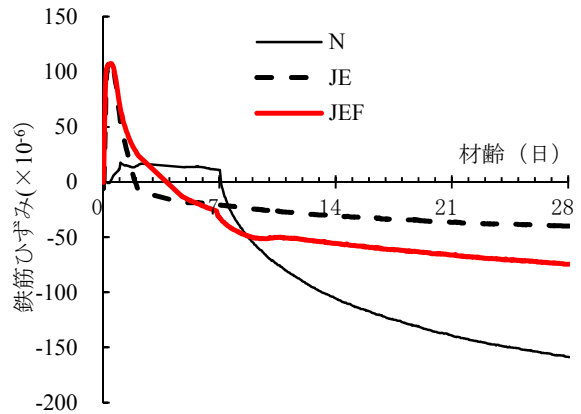


図-11 鉄筋ひずみ（鉄筋 D32）

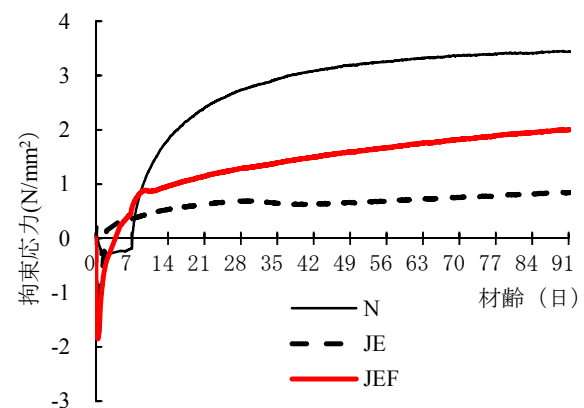


図-12 コンクリートに生じる拘束応力（鉄筋 D32）

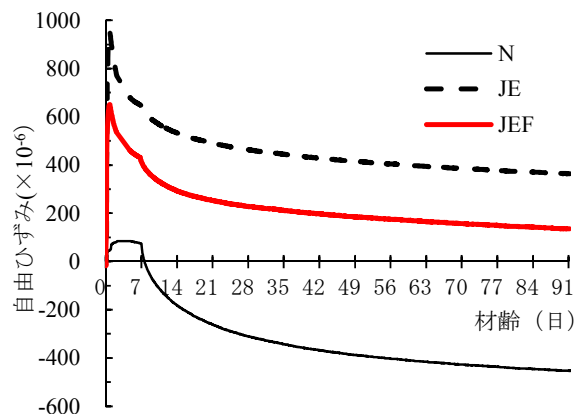


図-13 自由ひずみ（無筋）

図-14 に自由ひずみと前出の拘束応力（図-12）の同材齢における関係を示す。図には  $\varphi(t_e)=0.42$  ( $E_c(t_e)=33000\text{N/mm}^2$  一定) とした場合の解析値を併記した。これによると，配合 N では自由ひずみと拘束応力の関係が概ね解析値と一致するのに対し，配合 JE および配合 JEF では特に膨張ひずみ増加過程の後半における拘束応力が解析値よりも大幅に低下することがわかる。

材齢 1 日までのヤング係数の補正係数を推定すると，

自由ひずみに対し約 0.12, 一軸拘束膨張量に対し約 0.18 となった。その一例を図-15 に示す。今回用いた超速硬コンクリート系の配合で有効ヤング係数が小さくなる原因は追求できなかったが、普通セメントおよび低熱セメントと膨張材を組合せた場合に若材齢時のクリープ係数が増大したとする研究<sup>12)</sup>に指摘される膨張作用の要因が考えられる。

なお、今回の結果から実施工を行うにあたり、本材料のひび割れ抵抗性を適切に評価するには、拘束状態に応じて有効ヤング係数を変化させる必要がある。

## 6. まとめ

以上の検討結果、非晶質カルシウムアルミネートを利用した超速硬フライアッシュコンクリート（配合 JEF）の性能をまとめると次のようになる。

- (1) 3 時間強度は  $24\text{N/mm}^2$  を十分に上回る。
- (2) 塩化物イオン拡散係数は PC 用膨張コンクリートの 1/4 以下 (12%), 耐久性指数は 85 以上 (98)。
- (3) 圧縮強度, 静弾性係数, 引張強度, 鉄筋付着応力は PC 用膨張コンクリートと同等以上。
- (4) ひび割れ抵抗性試験における拘束応力は材齢 91 日時点で  $2.0\text{N/mm}^2$  の引張となるものの, PC 用膨張コンクリートの  $3.4\text{N/mm}^2$  以下であり, ひび割れが生じることもなかった。

## 参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：更新用プレキャスト PC 床版技術指針, 2016.3
- 2) たとえば, 福田健作, 村田耕二, 堀口和広, 野上朋和, 賤川智一, 吉松秀和：合理化継手を使用したプレキャスト PC 床版の取替工事について～沖縄自動車道明治山第二橋(下り線)他 1 橋床版改良工事～, 川田技報, Vol.35, pp.32-37, 2016.1
- 3) 北野勇一, 川口千大, 安藤功：プレストレストコンクリート部材への高炉スラグ微粉末の適用性検討 (塩分浸透抵抗性), 土木学会第 67 回学術講演会, V-121, pp.121-122, 2012.9
- 4) 原啓史, 森泰一郎, 樋口隆行, 盛岡実：急硬性成分が異なる超速硬セメントを用いたモルタルの基礎性状, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.154-160, 2015.3
- 5) たとえば, 李相培, 佐藤嘉昭, 山田高慶, 大谷俊浩：改質石炭灰 (CfFA) を用いたコンクリートの特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 30 巻, 第 1 号, p.213-218, 2008.7
- 6) 大即信明, 長滝重義, 久田真, 番場孝二：超速硬性セメントモルタルの耐海水性に及ぼすシリカフェ

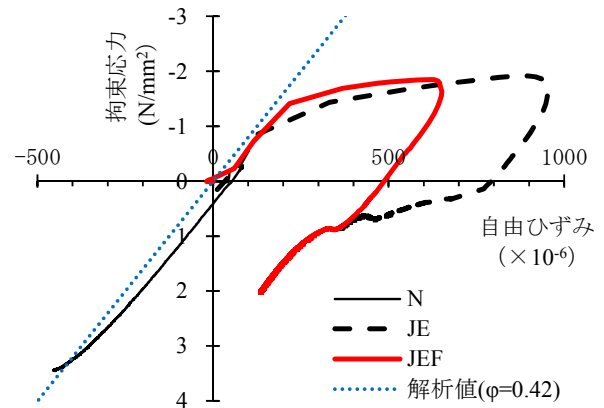


図-14 自由ひずみと拘束応力の関係

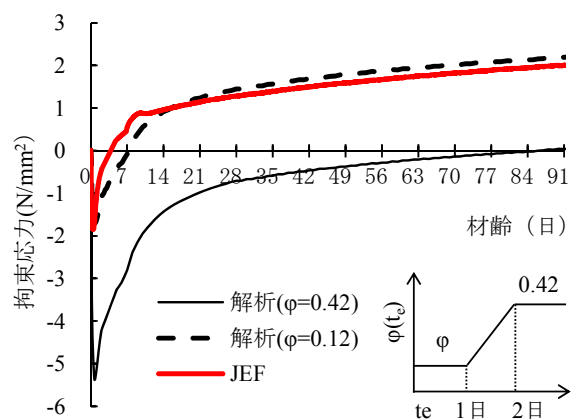


図-15 拘束応力の実験値と解析値の比較  
(配合 JEF の自由ひずみに基づく解析値)

ームの影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.395-400, 1994

- 7) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書, pp.199-201, 1996.11
- 8) 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, 2008.11
- 9) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書設計編, 2013.3
- 10) 樺山好幸, 大友弘志, 半田実, 五味秀明：床版上面増厚工法に関する超速硬 SF コンクリート付着強度発現機構に関する研究, 土木学会論文集, No.540, pp.241-250, 1996.6
- 11) 河金甲, 中村英佑, 鈴木雅博, 石井豪：混和材を用いたコンクリートの初期応力推定に関する検討, プレストレストコンクリート工学会第 24 回シンポジウム論文集, pp.521-526, 2015.10
- 12) 神谷武智, 古谷学, 溝渕利明, 閑田徹志, 百瀬春基：膨張コンクリートの若材齢時でのクリープに関する実験的検討, 土木学会第 58 回年次学術講演会, V-433, 2003.