

# 超速硬フライアッシュコンクリートの開発

北野 勇一\*1・寺崎 聖一\*2・永田 達也\*3・吉村 崇志\*4

橋梁の修繕や更新工事における場所打ちコンクリート床版を対象に、急速施工性、高耐久性およびひび割れ抵抗性を兼ね備え設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> に相当する超速硬フライアッシュコンクリートを開発した。室内実験により、超速硬フライアッシュコンクリートの3時間強度は 24 N/mm<sup>2</sup> 以上、塩化物イオン拡散係数は膨張コンクリートの 1/4 以下、拘束応力は膨張コンクリートに生じる引張応力以下であることが確認された。また、超速硬フライアッシュコンクリートを実工事に適用し、汎用の超速硬コンクリートと同等の急速施工性を有し、かつ耐久性及びひび割れ抵抗性が向上することが認められた。

キーワード：超速硬コンクリート、フライアッシュ、急速施工性、高耐久性、ひび割れ抵抗性

## 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、高耐久性を有しかつ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。一方、プレキャスト PC 床版の間詰め部には、普通セメントと膨張材を使用し、JIS A 6202 に規定される膨張率が材齢 7 日において  $150 \times 10^{-6}$  以上、 $250 \times 10^{-6}$  以下となる膨張コンクリートが一般に用いられてきた。今後、場所打ちコンクリートである床版間詰め部についても急速施工性と高耐久性が要請されるケースがあると考えられる。

そこで、橋梁の修繕や更新工事における場所打ちコンクリート床版を対象に、急速施工性、高耐久性およびひび割れ抵抗性を兼ね備える超速硬フライアッシュコンクリートを開発した。ここで、超速硬フライアッシュコンクリートとはフライアッシュを混入した超速硬コンクリートのことである。フライアッシュを混和材として選定したのは急速施工性と高耐久性を確保する代わりに自己収縮ひずみが増大するのを最小限に留めるためである。また、超速硬セメントには、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 (C<sub>11</sub>A<sub>7</sub>・CaF<sub>2</sub>) あるいは非晶質カルシウムアルミネート (C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>) を利用しているものがあり、ここでは膨張性を有する後者を用いることにした。

前報<sup>1)</sup>では、超速硬フライアッシュコンクリートの性能を室内実験により確認し、膨張コンクリート (1 種類) および汎用の超速硬コンクリート (1 種類) と比較した結果について報告した。本報では、汎用の超速硬コンクリート 2 種類と比較するとともに、鉄筋拘束試験を前報の材齢 91 日から 180 日まで延長した結果および試験終了後に実施した曲げ強度試験について 2 章にて詳述する。また、室内実験で得られた超速硬フライアッシュコンクリートの性能は試作品を用いかつ特定の試験条件下で確認されたもの

である。超速硬フライアッシュコンクリートの実用時にも同様の効果が得られるかについて検証するため、実施工で用いるプレミックス品 (1 袋あたり 25 kg) を製造し、実工事への適用に際し各種調査を実施することにした。その内容を 3 章で述べる。

## 2. 超速硬フライアッシュコンクリートの性能

### 2.1 目標性能

超速硬フライアッシュコンクリートは、プレキャスト PC 床版間詰め部への適用を想定し、設計基準強度を 50 N/mm<sup>2</sup> に設定するとともに、以下に示す性能をすべて満たすことを目標にした。

- 1) 急速施工性：3 時間強度が 24 N/mm<sup>2</sup> 以上
- 2) 高耐久性：塩化物イオン拡散係数が膨張コンクリート ( $\sigma_{ck}=50$  N/mm<sup>2</sup>) の 1/4 以下
- 3) ひび割れ抵抗性：鉄筋拘束による発生応力が膨張コンクリート ( $\sigma_{ck}=50$  N/mm<sup>2</sup>) に生じる引張応力以下

ここで塩化物イオン拡散係数は、既往研究<sup>2)</sup>を参考に、セメント重量の 50% を高炉スラグ微粉末 6 000 で置換したコンクリート ( $\sigma_{ck}=50$  N/mm<sup>2</sup>) と同程度になるように設定した。

### 2.2 実験方法

コンクリート配合を表 - 1 に示す。配合 N は普通セメントを用いた膨張コンクリートで、材齢 28 日で設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> を確保するように水結合材比  $W/(C+E) = 33.9\%$  とし、スランブ  $12 \pm 2.5$  cm、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  が得られるように混和剤を調整した。配合 J および配合 JE は市販の超速硬コンクリートであり、メーカー推奨配合の範囲内とした。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、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>3)</sup>を用い、セメント重量の 12% に相当する

\*1 Yuichi KITANO：川田建設(株) 技術部技術開発課

\*2 Seiichi TERASAKI：デンカ(株) 青海工場セメント・特混研究部

\*3 Tatsuya NAGATA：(株) YKイノアス 建設資材特混部

\*4 Takashi YOSHIMURA：首都高速道路(株) 東京西局第一保全工事事務所

表 - 1 コンクリート配合

配合	水結合材比 W/(C+E)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									
		水 W	セメント C			膨張材 E	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
			普通 N	超速硬 J	超速硬 JE					SP	AE
N	33.9	157	443	-	-	20	-	838	899	4.63	1.48
J	35.8	143	-	400	-	-	-	728	1 089	-	-
JE	31.0	146	-	-	471	-	-	691	1 115	-	-
JEF	31.0	146	-	-	471	-	57	634	1 115	-	0.74

普通 N：普通ポルトランドセメント，超速硬 J：カルシウムフルオロアルミネート系超速硬セメント，超速硬 JE：非晶質カルシウムアルミネート系超速硬セメントで粉末減水剤を含む，E：エトリンガイト・石灰複合系膨張材（標準使用量 20 kg/m<sup>3</sup>），F：フライアッシュⅡ種，SP：高性能 AE 減水剤（標準形 1 種），AE：AE 剤。

表 - 2 実験項目

項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108（養生は 20℃封緘）
割裂引張強度	JIS A 1113（養生は 20℃封緘）
静弾性係数	JIS A 1149（養生は 20℃封緘）
塩分浸透	JSCE-G572（養生は 20℃封緘）
鉄筋拘束	□ 10×40 cm のコンクリート角柱試験体の中心に D32 の鉄筋を配置し，20℃封緘後，材齢 7 日より 20℃，60% RH で乾燥させる（材齢 6 ヶ月まで）。

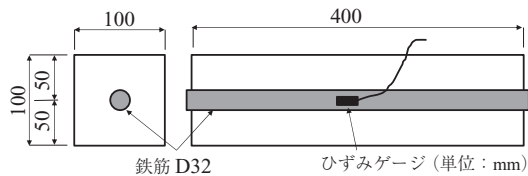


図 - 1 鉄筋拘束試験体

フライアッシュを外割置換えさせ，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。フライアッシュの使用量については塩分浸透抵抗性を確保しつつ，自己収縮が増大しないよう，既往研究<sup>4)</sup>を参考に定めた。また，配合 J，配合 JE および配合 JEF は凝結遅延剤を適宜添加した。

実験項目を表 - 2，鉄筋拘束試験体の模式を図 - 1 に示す。超速硬コンクリートは湿潤養生期間を十分に確保できないため，試験体は封緘養生（20℃）にて作製し，材齢 3 時間，1 日，7 日，28 日および 91 日に圧縮強度試験，材齢 28 日に割裂引張試験および静弾性試験を実施した。また，塩分浸透試験は材齢 28 日より 10% NaCl 水溶液に 6 ヶ月間浸漬し，0.1 規定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。鉄筋拘束試験は，目視によるひび割れ観察を定期的に行うとともに，鉄筋に取り付けたひずみゲージ（4 ゲージ法）によりひずみの測定を行った。この測定データに基づき式(1)によりコンクリートに生じる拘束応力を算出した。

$$\sigma_c = (E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad (1)$$

ここで， $E_s$ ：鋼材の弾性係数（200 kN/mm<sup>2</sup>）， $\varepsilon_s$ ：鋼材

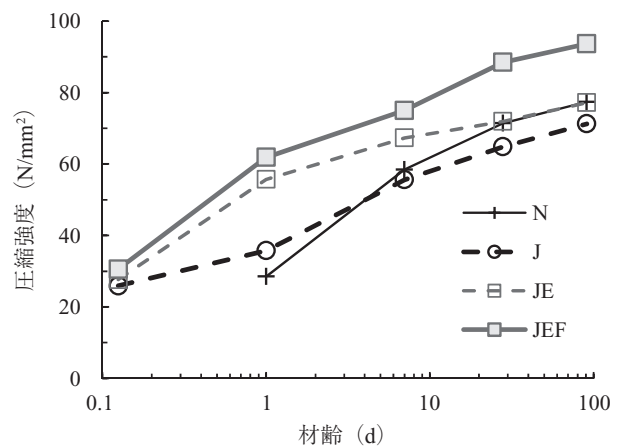


図 - 2 圧縮強度発現

表 - 3 割裂引張強度および静弾性係数（材齢 28 日）

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
N	71.4	4.70	35.5
J	64.8	3.79	35.1
JE	71.9	4.92	41.8
JEF	88.5	5.25	42.6

のひずみ， $A_s$ ：鋼材の断面積（794.2 mm<sup>2</sup>）， $A_c$ ：コンクリートの純断面積（9 205.8 mm<sup>2</sup>）。

別途，無筋試験体を作製し，鉄筋拘束試験体を含めて材齢 6 ヶ月まで乾燥させたあと，JIS A 1106 による 3 点曲げ試験（スパン 300 mm）を実施した。

### 2.3 実験結果

#### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図 - 2 に示す。配合 J，配合 JE および配合 JEF とも 3 時間で 24 N/mm<sup>2</sup> を確保し，材齢 28 日までの間に設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> を上回った。また，配合 J および配合 JE の圧縮強度は材齢 28 日以降に配合 N と同程度であるのに対し，配合 JEF は材齢 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。

なお，割裂引張強度および静弾性係数は，配合 JE および配合 JEF とも設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> の膨張コンクリート（配合 N）を上回る結果が得られた（表 - 3）。

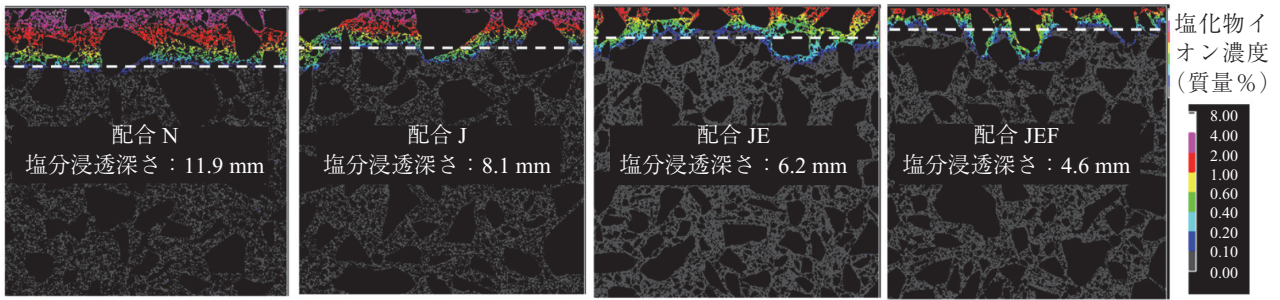


図 - 3 EPMA 面分析結果

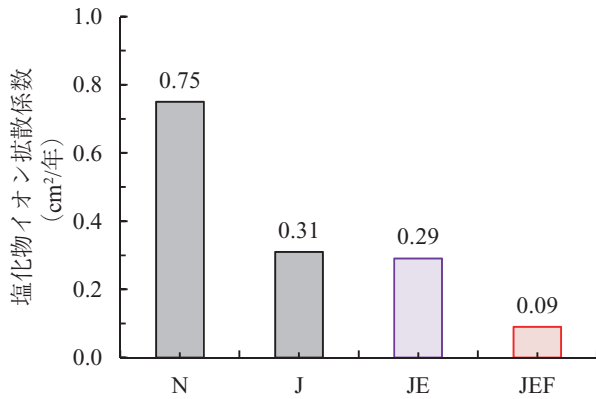


図 - 4 塩化物イオン拡散係数

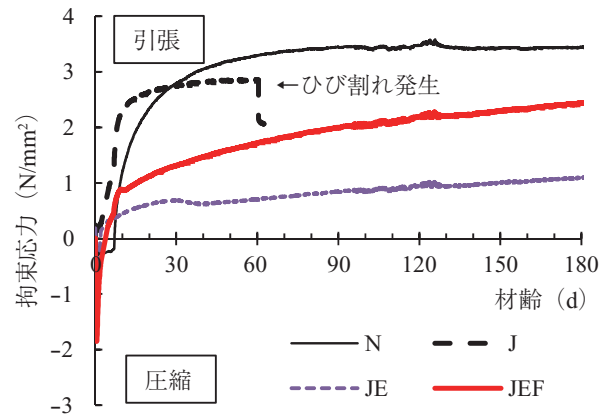


図 - 5 コンクリート拘束応力の推移

(2) 塩分浸透試験

塩水浸漬を終えた試験体について EPMA 面分析（骨材を除くペースト部分を表示）を行った結果を図 - 3 に示す。塩分浸透深さは配合 N (11.9 mm) > 配合 J (8.1 mm) > 配合 JE (6.2 mm) > 配合 JEF (4.6 mm) の順に小さくなった。また、EPMA 面分析データを塩分浸透面より 0.5 mm 間隔で平均し、塩化物イオン濃度のプロファイルを作成し、フィックの第二法則をフィッティングさせることにより塩化物イオン拡散係数を算出した結果を図 - 4 に示す。これによると、配合 N (0.75 cm<sup>2</sup>/年) に対する比率は配合 J (0.31 cm<sup>2</sup>/年) で 41%、配合 JE (0.29 cm<sup>2</sup>/年) で 39%、配合 JEF (0.09 cm<sup>2</sup>/年) で 12% となり、超速硬フライアッシュコンクリートである配合 JEF のみ塩化物イオン拡散係数が膨張コンクリート（配合 N）の 1/4 以下になることが確認された。

(3) 鉄筋拘束試験

鉄筋拘束試験中のコンクリートに生じる拘束応力の推移を図 - 5 に示す。初期応力の最小値は配合 N で -0.3 N/mm<sup>2</sup>、配合 JE と配合 JEF で -1.9 N/mm<sup>2</sup>（いずれも圧縮）となり、ケミカルプレストレスが導入されることが確認された。また、このケミカルプレストレスは自己収縮や乾燥収縮の進行に伴い解消されるものの、材齢 180 日までは配合 N および配合 JEF ともひび割れの発生は認められなかった。とくに、配合 JE と配合 JEF は材齢 180 日の引張応力が 1.1 N/mm<sup>2</sup> および 2.4 N/mm<sup>2</sup> と配合 N (3.4 N/mm<sup>2</sup>) よりも拘束応力が低減されることが確認された。一方、配合 J は初期の段階より引張応力が生じ、材齢 59 日でひび割れ発生（写真 - 1）により拘束応力が解放される結果にな

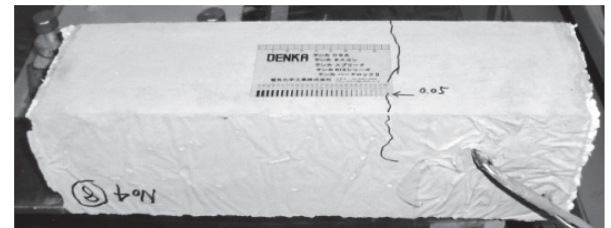


写真 - 1 配合 J のひび割れ状況

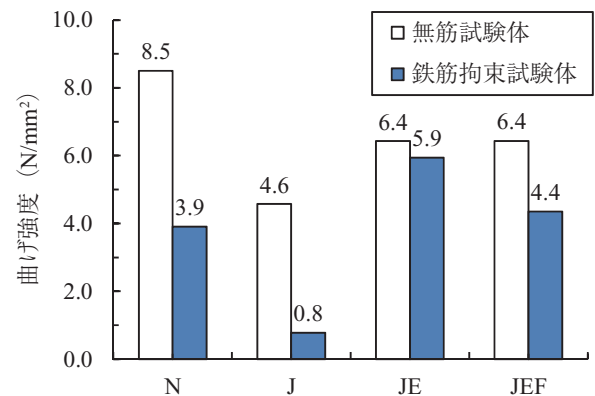


図 - 6 鉄筋拘束の有無が曲げ強度に与える影響

った。

鉄筋拘束試験終了後に実施した曲げ強度試験の結果を図 - 6 に示す。鉄筋拘束試験体の結果に着目すると、配合 JE および配合 JEF とも設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> の膨張コンクリート（配合 N）を上回る曲げ強度を有することが確認

された。また、図に併記した無筋試験体の曲げ強度と鉄筋拘束試験体の曲げ強度の差を算出すると、ひび割れが生じた配合 J を除き、配合 N ( $4.6 \text{ N/mm}^2$ ) > 配合 JEF ( $2.0 \text{ N/mm}^2$ ) > 配合 JE ( $0.5 \text{ N/mm}^2$ ) の順に小さくなり、材齢 180 日時点のコンクリート拘束応力の傾向に一致した。

### 3. 超速硬フライアッシュコンクリートの実工事への適用

#### 3.1 工事概要

1963 年に建設された首都高速 1 号羽田線勝島地区の PC ゲルバー箱桁橋について、ゲルバー部の恒久的な改良を目的に PC 桁の連続化工事が実施されている (図 - 7)<sup>5)</sup>。連続化を行うゲルバー部の施工概要を図 - 8 に示す。ゲルバー部間詰め施工は、あらかじめ床版を除く箱桁部に無収縮モルタルを桁側面から充填したあと、夜間片側交通規制

を行って床版部に前出表 - 1 中の配合 J の超速硬コンクリートと配合 JEF の超速硬フライアッシュコンクリートを橋面より打設した。この際、測温付きの鉄筋ひずみ計を間詰め部橋軸方向に設置し、打込み時点から 1 時間ごとにひずみを測定した。また、実際に施工したコンクリートを採用して試験体を作製し、圧縮強度試験および塩分浸透試験 (10% NaCl 水溶液に 3 ヶ月間浸漬) を実施した。

なお、配合 JEF の超速硬フライアッシュコンクリートは、試作品では空気量の調整に AE 剤を用いたが、現場での空気量管理を省略するため、文献 (6) を参考に、塩化ビニル・アクリルニトリル系樹脂の中空微小球 (平均粒径  $80 \mu\text{m}$ ) を 2.5% Vol. 混入したプレミックス品を用いることにした。

#### 3.2 施工性の確認

超速硬フライアッシュコンクリートの施工状況を写真 - 2 ~ 5 に示す。コンクリートは表 - 4 に示すように水以

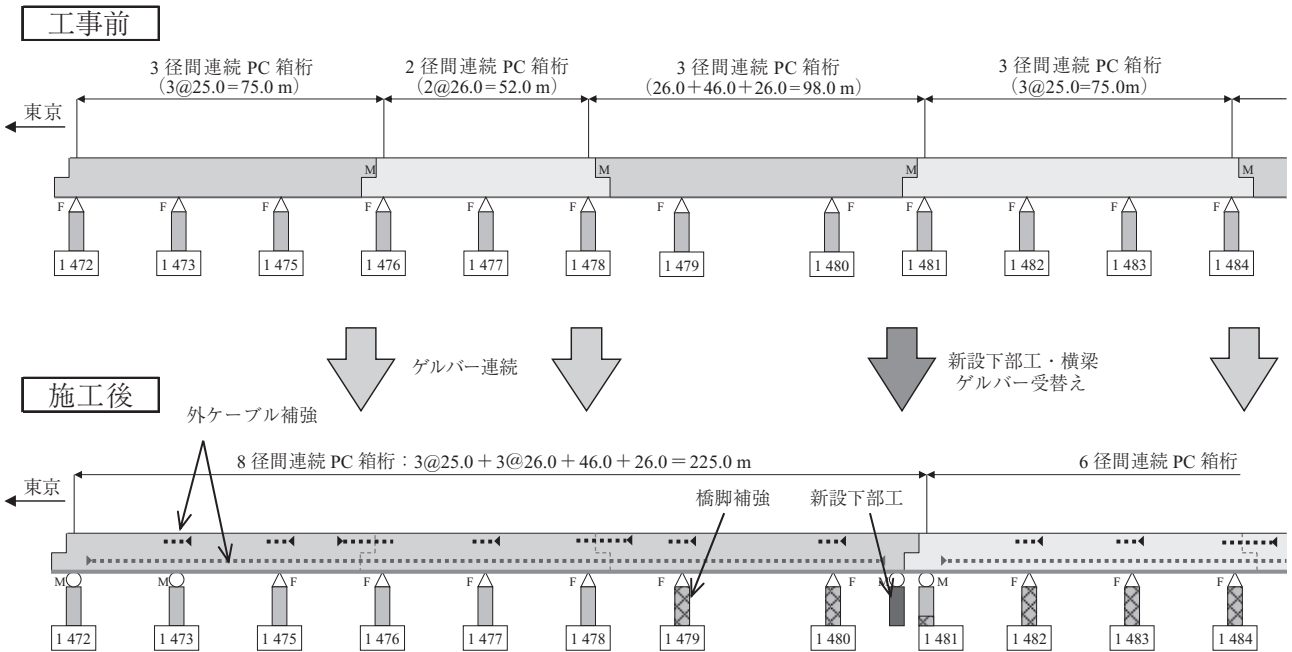


図 - 7 PC ゲルバー橋の連続化工事概要 ((改) 支・連結装置耐震性向上工事 1-108 の一部を掲載)

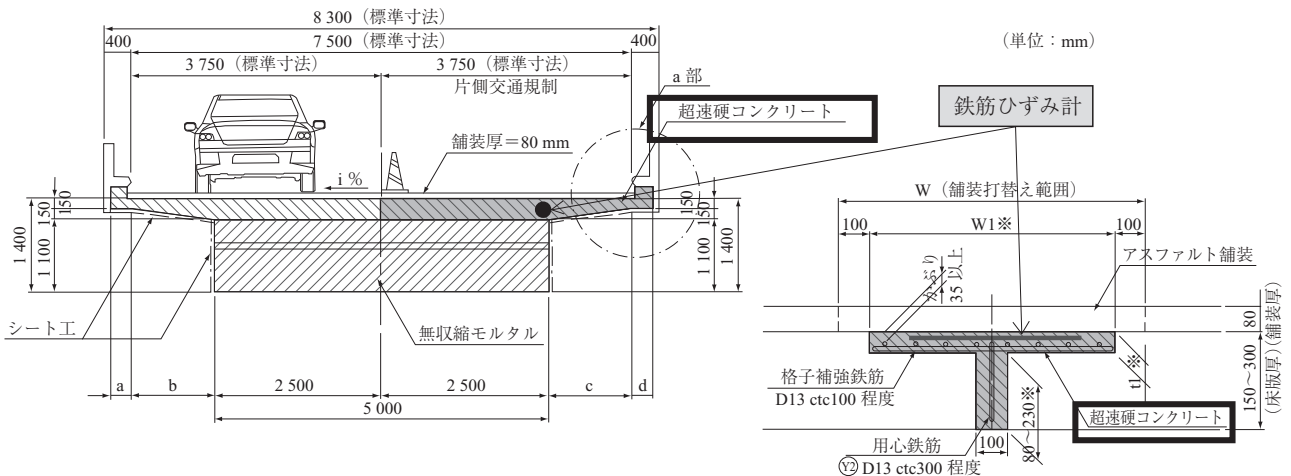


図 - 8 高耐久超速硬コンクリート適用箇所



写真 - 2 練 混 ぜ

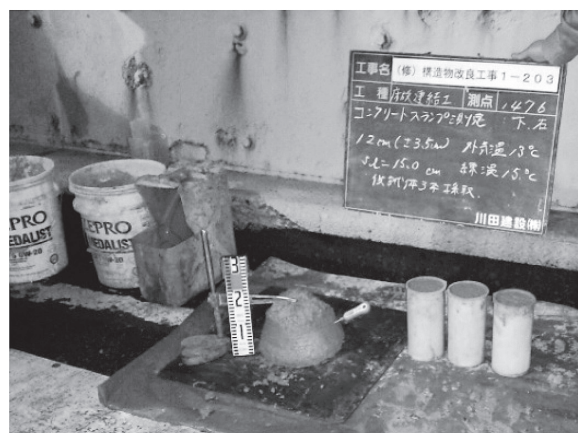


写真 - 3 スランプ試験



写真 - 4 打 込 み



写真 - 5 仕 上 り

表 - 4 実工事におけるコンクリート配合

配合	水	プレミックス材	粗骨材	凝結遅延剤
JEF	10.5 kg	75 kg (3 袋)	72 kg (3 袋)	0.15 kg (12 袋)

プレミックス材：非晶質カルシウムアルミネート系超速硬セメント，粉末減水剤，フライアッシュⅡ種，細骨材，塩化ビニル・アクリルニトリル系樹脂の中空微小球（平均粒径 80 μm）を 2.5% Vol. 含む。

外はあらかじめ計量された材料を用い，100 L のパン型ミキサーを使用しプレミックス材 3 袋分（65 L）を 1 バッチとして練混ぜを行った。スランプが所定の範囲（12 ± 3.5 cm，首都高速道路株式会社「土木材料共通仕様書」の超速硬セメントコンクリートの品質に準じるものとした）であることを確認した後，コンクリートを人力車で運搬し，深夜 12 時過ぎより打込みを行った。外気温が 13℃であり，事前に行った試験練り（外気温約 20℃）よりも低く，コンクリートの硬化開始に 70 分程度を要し（配合 J は 40 分程度，指触による），最終仕上げは深夜 2 時半までには完了した。舗装復旧を含めすべての作業を朝 6 時の交通規制解除に間に合わせた。

### 3.3 適用効果の検証

超速硬コンクリートの品質管理結果を表 - 5 に示す。配

表 - 5 超速硬コンクリートの品質管理結果

配合	気温 (℃)	コンクリート 温度 (℃)	スランプ (cm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
				3 時間	91 日
J	12	18	10.5	28.8	57.4
JEF	13	15	15.0	36.7	70.2

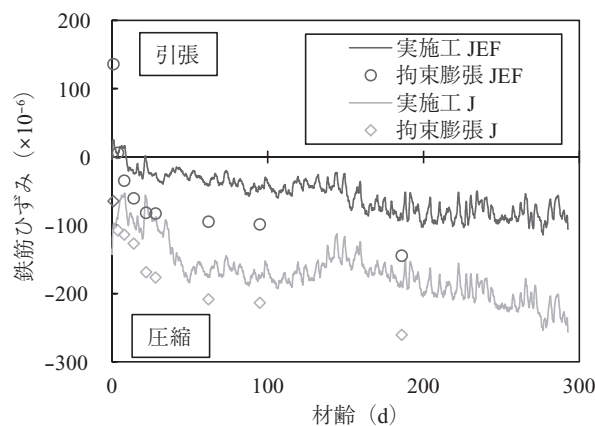


図 - 9 鉄筋ひずみ測定結果

合 JEF の強度は 3 時間で 36.7 N/mm<sup>2</sup>，91 日が 70.2 N/mm<sup>2</sup> となり，配合 J の 2 割増しとなった。

コンクリート打込み後 293 日目までの鉄筋ひずみ測定結果を図 - 9 に示す。図中の実線は実施工部の鉄筋ひずみ（1 時間ごとの測定値を 24 時間分の移動平均として表示した）であり、プロットは一軸拘束膨張試験（JIS A 6206 附属書 2 の B 法を参考に封緘状態とした試験体を用い 182 日まで測定した）の結果である。図より、配合 JEF の実測ひずみは配合 J よりも総じて  $100 \times 10^{-6}$  程度大きい（収縮ひずみを  $100 \times 10^{-6}$  程度低減する）ことが確認された。また、実施工の鉄筋ひずみは、拘束膨張ひずみの経時変化に近い挙動を示していることから、実施工部の環境は封緘状態に近いものと推察される。

塩分浸透深さの測定結果を図 - 10 に示す。配合 JEF の塩分浸透深さは配合 J の約 1/7 であった。

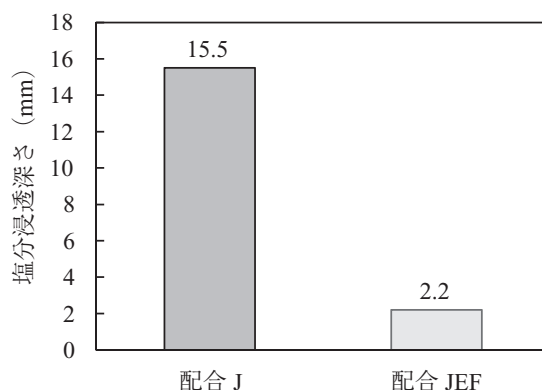


図 - 10 塩分浸透深さ測定結果

#### 4. おわりに

本研究を通じ、以下の知見が得られた。

- (1) 室内実験により、超速硬フライアッシュコンクリートの 3 時間強度は  $24 \text{ N/mm}^2$  以上、塩化物イオン拡散係数は膨張コンクリート ( $\sigma_{ck}=50 \text{ N/mm}^2$ ) の 1/4 以下、拘束応力は膨張コンクリート ( $\sigma_{ck}=50 \text{ N/mm}^2$ ) に生じる引張応力以下であることが確認された。
- (2) 超速硬フライアッシュコンクリートを実工事に適用した際に各種調査を実施した結果、汎用の超速硬コンクリートと同様の急速施工性を有し、かつ、耐久性とひび割れ抵抗性が向上することが認められた。

#### 参考文献

- 1) 北野勇一, 水戸健介, 相澤一裕, 寺崎聖一: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1609-1614, 2017.7

- 2) 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
- 3) 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
- 4) 北野勇一, 水戸健介: フライアッシュの品質と使用量が PC 用コンクリートの諸性状に与える影響, 第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.415-418, 2016.10
- 5) 小島直之, 花房禎三郎, 北野勇一: PC ゲルバー橋の連続化に関する設計検討 (首都高速 1 号羽田線勝島地区 PC 橋), 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.17-20, 2012.10
- 6) 林 大介, 高木英知, 橋本 学, 樋口隆行, 寺崎聖一, 五十嵐数馬: 中空微小球を用いたコンクリートのフレッシュ性状および凍結融解抵抗性に関する一考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会, V-265, pp.529-530, 2016.9

[2017 年 10 月 23 日受付]



刊行物案内

## 第 45 回 PC 技術講習会テキスト

### 生産性向上と維持管理・更新の時代に求められる PC 技術

平成 29 年 6 月

定 価 6,000 円 / 送料 300 円

会員特価 5,000 円 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会