

論文 フライアッシュ混和の高強度コンクリートを用いた PC 桁の実用化に関する検討

河金 甲*1・下野 聖也*2・三本 竜彦*3・中田 順憲*4

要旨: フライアッシュを混和した設計基準強度 70N/mm²クラスの PC 桁の実用化を目的に、軽荷重スラブ橋げたを検討対象として各種試験を行った。その結果、フライアッシュを用いたコンクリートの引張強度やヤング係数ならびに PC 鋼材応力損失は、通常の軽荷重スラブ橋げたと同様の値を用いて設計できること、フライアッシュをセメントの 20%置換すると高い ASR 抑制効果が得られることを確認できた。さらに、フライアッシュを混和した場合の蒸気養生後の追加養生の効果は、水中養生を 3 日以上行った場合に圧縮強度増進と透気係数低減がみられた一方、収縮ひずみと吸水量には追加養生の効果は認められなかった。

キーワード: フライアッシュ, 軽荷重スラブ橋げた, PC 鋼材応力損失, ASR 抑制, 養生効果

1. はじめに

石炭火力発電の副産物であるフライアッシュを混和材としてコンクリートに用いると、環境負荷を低減させるだけではなく耐久性向上につながることはよく知られている。近年では、プレストレストコンクリート桁（以下、PC 桁）へのフライアッシュの適用性も検討されつつある¹⁻³⁾。これらの検討の多くは、設計基準強度 50N/mm²程度の PC 桁を対象に行われ、いずれもフライアッシュの混和に問題ないことが確認され、プレテンション方式の PC 桁へ実用化された事例もある²⁾。

一方、JIS A 5373 附属書 B「プレキャストプレストレストコンクリート製品 橋りょう類」では設計基準強度 70N/mm²の軽荷重スラブ橋げた（以下、LS 桁）も規定されている。このような高強度コンクリートは水セメント比が小さく耐久性は高い反面、アルカリ総量が増加しやすく、ASR によるひび割れ発生が懸念される。フライアッシュに ASR 抑制効果があることは明らかとなっており⁴⁾、ASR を生じさせる危険性がある骨材は全国に広く分布している中⁵⁾、高強度コンクリートを用いた PC 桁の品質向上にフライアッシュの使用は有効な手段となる可能性がある。しかしながら、70N/mm²クラスの高強度

コンクリートを用いた PC 桁を対象にフライアッシュの適用性を検討した研究は少なく、実用化には至っていないのが現状である。

そこで、本検討では、フライアッシュを混和した 70N/mm²クラスの高強度コンクリートを用いた PC 桁の実用化を目的に、LS 桁を検討対象として各種試験を行いその特性を把握した。

2. 試験概要

2.1 配合およびフレッシュ性状

試験に用いたコンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-1 に示す。フライアッシュは中国地方の三隅発電所から排出されるフライアッシュ II 種を用いた。設計基準強度は 70N/mm²とし、早強ポルトランドセメント単味の水結合材比 (W/B) を 29%とした配合 (H29) と、早強ポルトランドセメントの 20%をフライアッシュで置換した配合 (F27) を用いて検討を行った。強度発現が H29 と同等となるよう F27 の W/B は 2%小さくした。F27 は、W/B が小さくスランプでの管理が困難であったことから、フローで管理する高流動コンクリートとした。

2.2 検討項目および検討方法

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

配合名	水結合材比 W/B (%)	混和材置換率 (%)	単位数(kg/m ³)					混和剤使用量 (kg/m ³)		スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
			W	C	FA	S	G	AD	AE			
H29	29	0	147	507	0	688	1029	4.06	0.15	8.0 (スランプ)	3.0	27
F27	27	20	152	450	113	635	978	6.19	0.17	56 (フロー)	5.1	28

W: 地下水, C: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³, 比表面積=4,560cm²/g), FA: フライアッシュ II 種(三隅発電所産, 密度=2.17g/cm³, 比表面積=3,120 cm²/g), S: 細骨材(島根県江津産, 混合砂(陸砂, 山砂, 砕石), 表乾密度=2.66 g/cm³), G: 粗骨材(島根県江津産, 砕石(安山岩), 表乾密度=2.65 g/cm³, 最大寸法:20mm), AD: 高性能減水剤, AE: AE剤 (F27配合はフライアッシュ用)

- *1 極東興和 (株) 営業本部技術企画部技術企画課 博(工) (正会員)
- *2 極東興和 (株) 営業本部技術企画部技術企画課 工修
- *3 極東興和 (株) 営業本部技術企画部技術企画課 (正会員)
- *4 極東興和 (株) 営業本部技術企画部

表-2 検討項目および養生条件

検討項目	養生条件				
	蒸気養生のみ	蒸気+水中1日	蒸気+水中3日	蒸気+水中5日	
	S	S+W1	S+W3	S+W5	
コンクリート物性	圧縮強度発現	○	-	-	-
	引張強度	○	-	-	-
	ヤング係数	○	-	-	-
実大LS桁	プレストレス導入	○	-	-	-
	PC鋼材応力損失	○	-	-	-
ASR抑制効果		○	-	-	-
養生効果(耐久性)	圧縮強度	○	○	○	○
	収縮ひずみ	○	○	○	○
	透気係数	○	○	○	○
	吸水量	○	○	○	○

検討項目一覧を表-2 に示す。圧縮強度を材齢 1, 7, 14, 28, 91 日で、割裂引張強度とヤング係数を材齢 1, 7, 28 日で、円柱供試体(φ100×200mm)を用いて測定した。

実大のLS桁(桁長 5.3m, 桁高 0.225m, 図-1)を製作し、プレストレス導入時から PC 鋼材ひずみを計測することにより、プレストレス導入によるコンクリート応力や PC 鋼材応力損失を検討した。プレストレスは通常の製作工程と同様に材齢 1 日で導入した。PC 鋼材ひずみは、図-1 に示すように、側面に近い上側と下側の PC 鋼より線の素線にひずみゲージを貼付して測定した。この場合、素線方向のひずみを計測することになるので、同様にゲージ貼付した PC 鋼より線の引張試験から得られた素線のひずみと鋼材軸方向ひずみの補正係数 1.12 を用いて鋼材軸方向ひずみに変換した。プレストレス導入によるコンクリート応力は、プレストレス導入前後の PC 鋼材ひずみ変化量に、テストピースによるコンクリートのヤング係数の実測値を乗じて算出した。PC 鋼材応力損失は、PC 鋼材ひずみにヤング係数の実測値を乗じて算出した。なお、道路橋用橋げたの設計・製造便覧(以下、設計製造便覧)⁹⁾に準じて PC 鋼材の初期導入応力度は 1315N/mm²とした。

ASR 抑制効果はアルカリ溶液浸漬法による促進膨張試験⁷⁾により検討した。200×200×200mm の供試体から、材齢 91 日経過後に φ50mm のコアを採取し、80℃の 1.0mol/l の水酸化ナトリウム溶液に浸漬した。浸漬後 1, 3, 7, 14, 21 日の膨張率を測定した。

上記の全ての供試体と LS 桁は、シートで覆って 3 時間の前養生後に蒸気養生を実施した(15℃/時間で昇温、最高温度 45℃を 3 時間保持した後、10℃/時間で降温)。その後、材齢 1 日までにシートを除去して脱枠した。LS 桁の保管状況を写真-1 に示す。

フライアッシュを用いたコンクリートは、蒸気養生後に湿潤養生を追加して行くと圧縮強度増進や耐久性向上を図れることが設計基準強度 50N/mm²の PC 桁を想定とした場合に確認されており²⁾、今回対象としたコンクリ

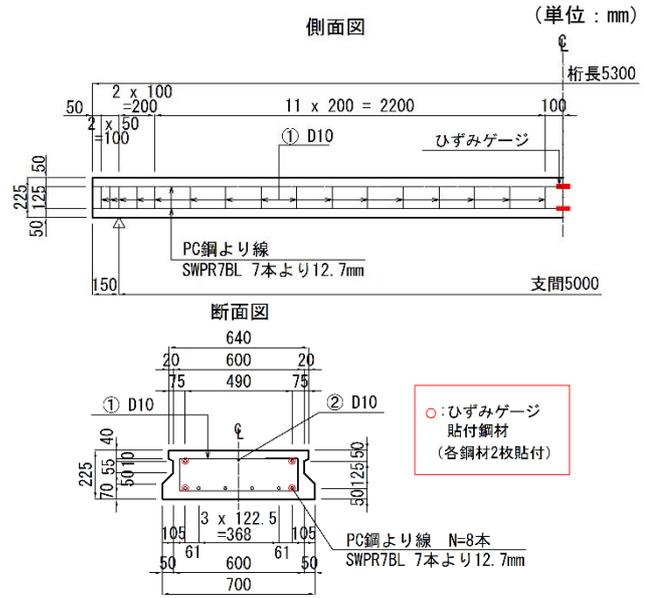


図-1 製作LS桁



写真-1 LS桁保管状況

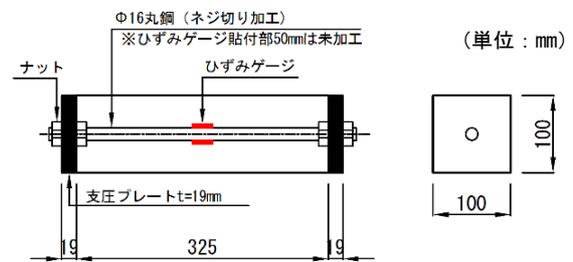


図-2 収縮ひずみ測定用供試体



写真-2 透気試験状況



写真-3 吸水試験状況

ートに対する蒸気養生後の追加養生の効果を検討した。追加養生効果の検討は、圧縮強度、収縮ひずみ、透気係数、吸水量を対象とし、蒸気養生のみ(S)、蒸気養生後に水中養生を1日(S+W1)、3日(S+W3)、5日(S+W5)行った4ケースを比較した(表-2)。

収縮ひずみは、PC 鋼材応力損失や収縮応力に対するフ

ライアッシュ混和の影響を検討するため、図-2 に示すように 100×100×325mm の供試体を用い、ネジ切加工したφ16mm の鋼材による拘束条件下でのひずみを計測した(拘束鋼材比 2.0%)。透気係数は、150×150×250mm の供試体を用い、ダブルチャンバー方式のトレント法⁸⁾により測定した(写真-2)。脱枠後 7、28、91 日(材齢 1 日で脱枠)で測定を行い、側面(150×250mm)を 2 箇所測定した平均値で比較した。トレント法による脱枠後 91 日の測定が終了した供試体を用いて吸水量を測定した。試験は、JSCE-K571「表面含浸材の試験方法(案)」に準じて、コンクリートと接する面の口径を 75mm、試験開始時の水頭高さを 250mm として行った(写真-3)。吸水開始から 7 日後まで測定し、試験結果は透気係数と同様に側面 2 箇所を平均した。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度発現

圧縮強度発現を図-3 に示す。設計製造便覧で規定されている LS 桁のプレストレス導入強度 42N/mm²を F27 も材齢 1 日で満足した。H29 に比べて F27 の材齢初期の強度発現は若干小さい傾向があるものの、材齢 28 日から F27 の方が大きく、フライアッシュを用いた場合の長期強度増進効果を確認できる。

3.2 引張強度

引張強度と圧縮強度の関係を図-4 に示す。図中には、コンクリート標準示方書⁹⁾に準拠して算出した計算値も併せて示す。この図に示すように、H29 と F27 の引張強度は、材齢 1 日ではどちらも計算値程度であり、材齢 7 日と 28 日になると計算値よりほぼ同程度に大きくなった。このように、引張強度にフライアッシュを用いた顕著な影響はみられず、F27 の引張強度はコンクリート標準示方書に準拠して評価できることがわかった。

3.3 ヤング係数

ヤング係数と圧縮強度の関係を図-5 に示す。図中のコンクリート標準示方書の計算値と比較すると、F27 のヤング係数は同程度であり、ヤング係数と圧縮強度の関係は既存の規準に従うことがわかる。一方、フライアッシュ混和の有無に着目すると、全ての材齢で H29 のヤング係数は計算値より大きく、フライアッシュ混和によりヤング係数は小さくなる傾向となっている。この理由として、F27 を高流動コンクリートにするために、単位粗骨材量を減少させたことが一因として挙げられる。

3.4 LS 桁へのプレストレス導入と PC 鋼材応力損失

(1) プレストレス導入

プレストレス導入時の PC 鋼材位置でのコンクリート応力を図-6 に示す。設計製造便覧に従い、プレストレス導入前と高温養生の影響による PC 鋼材のリラクセー

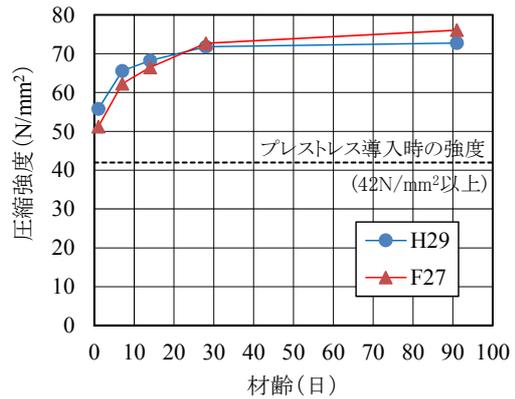


図-3 圧縮強度発現

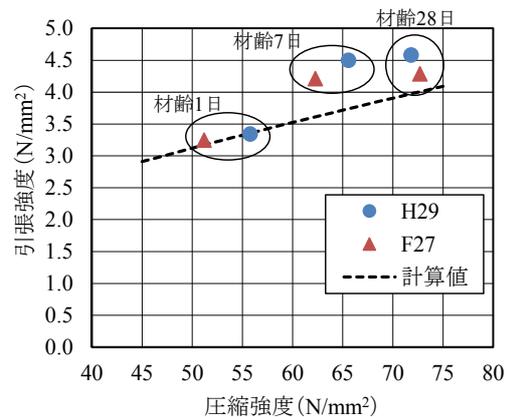


図-4 引張強度と圧縮強度の関係

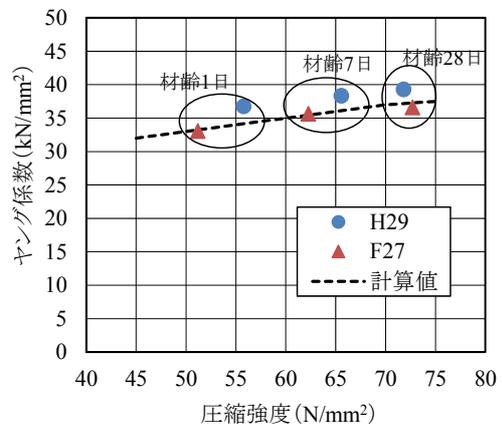


図-5 ヤング係数と圧縮強度の関係

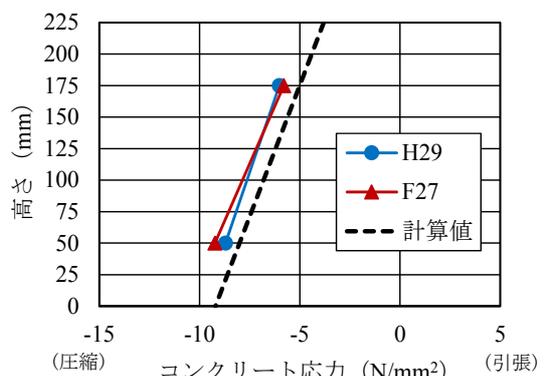


図-6 コンクリート応力(プレ導入時)

ションおよび主桁自重の影響を考慮して算出した計算値も併せて示す。この図に示すように、F27 のコンクリート応力はおおむね計算値と同等であり、その高さ方向の傾きも計算値と同様である。この結果から、フライアッシュを用いた LS 桁において、所定の圧縮応力の導入を確認できる。なお、圧縮応力がフライアッシュ混和の有無にかかわらず計算値より大きくなる傾向にあるのは、本検討ではプレストレス導入前後の PC 鋼材ひずみ変化量にコンクリートのヤング係数を乗じてコンクリート応力に換算しているが、プレストレス導入開始から終了までに 15 分要しており、その間のクリープ変形によるひずみ増加の影響を若干含んでいるためと考えられる。

(2) PC 鋼材応力損失

プレストレス導入から 180 日後までの PC 鋼材応力損失を 図-7 に示す。上側と下側の PC 鋼材位置での測定値を鋼材図心位置での値に線形補間し、弾性係数を含んだ結果（弾性変形とクリープと収縮による応力損失）と含まない結果（クリープと収縮による応力損失）をそれぞれ示している。また、設計製造便覧と道路橋示方書¹⁰に基づき算出した 180 日後の計算値も併せて示す。

弾性変形を含んだ結果をみると、F27 は H29 よりプレストレス導入時の弾性変形による PC 鋼材の応力損失は増大し、そのまま 180 日後においても大きかった。弾性変形増大の要因は、 図-5 に示すように導入時（材齢 1 日）のヤング係数は F27 の方が小さいことが挙げられる。一方、弾性変形を含まない結果をみると、40 日程度までは F27 の PC 鋼材応力損失は H29 のそれより大きくなるものの、その後は両者の差は小さくなり、180 日後ではほとんど差がみられなくなった。40 日程度までの推移は、後述するように 図-2 の供試体を用いて計測した拘束条件下での収縮ひずみにフライアッシュ混和の影響は小さかったことから（ 図-10）、クリープひずみが増大した影響が大きいと推測される。この要因として、F27 は H29 と比較するとヤング係数が小さいことや高流動化によりペースト分が多いことが挙げられる。ただし、F27 の方がヤング係数は小さいにもかかわらず、材齢が経過するにつれて、PC 鋼材応力損失が H29 と同等になっていることから、長期的なクリープ係数はフライアッシュ混和により小さくなる可能性がある。

計算値と実測値の比較では、弾性変形を含んだ場合も含まない場合も、計算値に対して F27 の PC 鋼材応力損失は小さくなった。よって、フライアッシュを混和した場合も既存の設計手法で PC 鋼材応力損失に及ぼす弾性変形、クリープ、乾燥収縮の影響を考慮すれば安全側に評価できることを確認できた。

3.5 ASR 抑制効果

促進膨張試験の結果を 図-8 に示す。アルカリ溶液浸

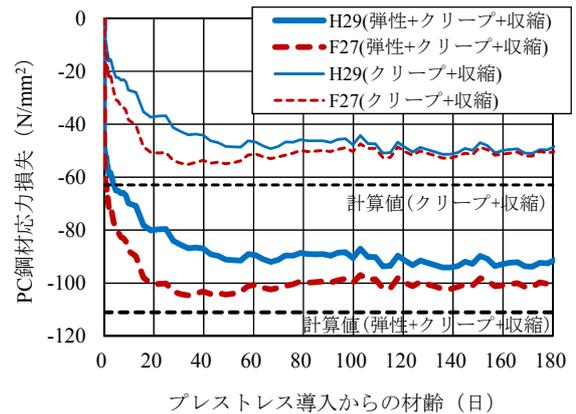


図-7 PC 鋼材応力損失

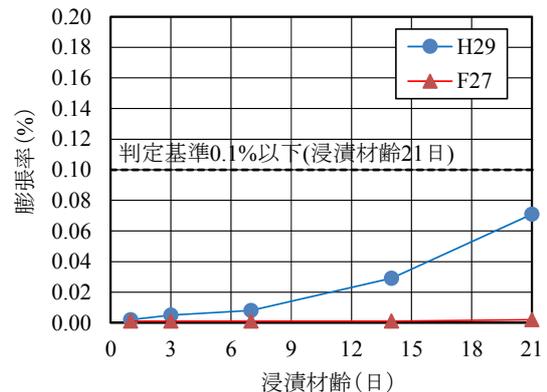


図-8 コンクリートの膨張率

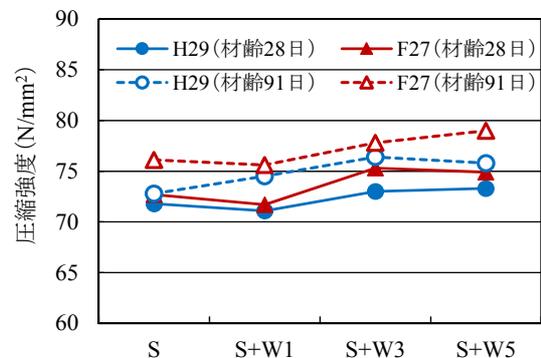


図-9 圧縮強度への養生効果

漬法を用いた場合、コア試料の ASR に対する判定基準として、促進材齢 21 日での膨張率 0.1%を採用することが提案されている⁷⁾。本検討に用いた骨材は、モルタルバー法によるアルカリシリカ反応性試験で無害であることが確認されている。今回の試験でも H29 の促進材齢 21 日の膨張率は判定値以下であり、ASR に対して無害と判定できる反面、促進環境下では膨張することがわかる。これに対し、F27 の場合は試験期間中にほとんど膨張しておらず、フライアッシュの ASR 抑制効果は、今回対象としたコンクリートにおいて明確にみられた。

3.6 蒸気養生後の追加養生の効果

(1) 圧縮強度

各養生条件の材齢 28 日と材齢 91 日における圧縮強度

の比較を図-9に示す。この図より、フライアッシュ混和の有無によらず、蒸気養生後の水中養生は3日以上実施しないと効果がみられない傾向にあることがわかる。しかしながら、蒸気養生のみ(S)に対する比は最大で、H29が1.05(材齢91日, S+W3), F27が1.04(材齢91日, S+W5)となり、設計基準強度50N/mm²の場合の追加養生効果(5日の追加養生で20%以上強度増進)²⁾と比べると、本検討において顕著な強度増進効果は認められなかった。また、フライアッシュ置換率10%のコンクリートを夏期に用いた場合、目標強度70N/mm²の場合の蒸気養生後の水中養生の効果は、目標強度40N/mm²や50N/mm²の場合と比較すると小さいという報告がある³⁾。詳細な検討は今後必要であるが、本検討では打込み時のコンクリート温度は28℃(表-1)と比較的高いことや圧縮強度は70N/mm²以上であることが蒸気養生後の追加養生効果に影響した可能性がある。

(2) 収縮ひずみ

養生条件SとS+W5のケースにおけるコンクリート打込み直後から材齢60日までの収縮ひずみ(拘束鋼材比2.0%)の推移を図-10に、全てのケースの材齢180日の収縮ひずみを図-11に示す。図-10に示すように、フライアッシュ混和の有無によらず、蒸気養生後に水中養生を行った場合の収縮ひずみは、材齢30日までは、蒸気養生後すぐに乾燥開始したSのケースと同等となった。その後はほぼ同様の推移となり、図-11に示すように、収縮ひずみに蒸気養生後の追加養生の明確な影響は認められなかった。

H29とF27の比較では、F27の収縮ひずみが若干大きくなる傾向にあったが(図-10)、材齢180日での収縮ひずみの差は最大でも 10×10^{-6} 程度とほとんど差はみられなかった。

(3) 透気係数

透気係数の測定結果を図-12に示す。H29とF27を比較すると、脱枠してから7日後では同程度、28日後と91日後ではH29の方がF27と比較して小さくなる傾向があった。一方、透気試験を用いた耐久性評価の課題にコンクリートの含水率の影響があることは知られており¹¹⁾、今回の試験でも材齢が進むとコンクリートが緻密になると推測されるにもかかわらず透気係数が大きくなっている。また、フライアッシュの置換率が20%までは、無混和の場合と比べて収縮量は同程度でも、質量減少量は大きくなるとの報告がある^{例えば12)}。本研究でも、次項の吸水試験において、吸水開始から1日目までの吸水量はF27の方がH29と比較して大きく(図-13)、フライアッシュを混和した場合にコンクリート表面の乾燥が進行し、コンクリート中の含水率が低下した影響で透気係数が大きくなった可能性がある。

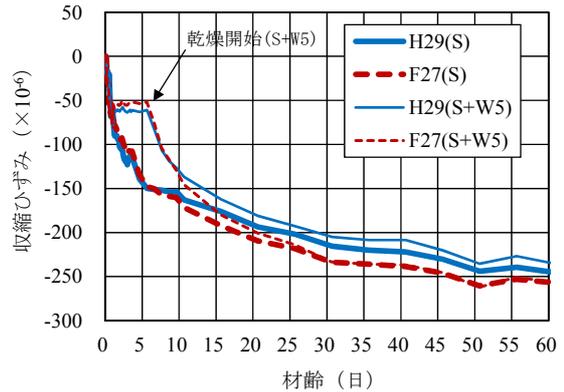


図-10 収縮ひずみの推移(拘束鋼材比2.0%)

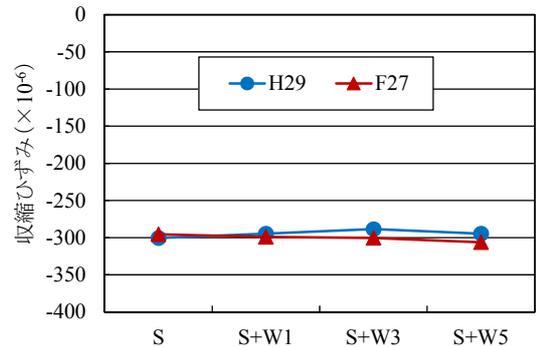


図-11 収縮ひずみへの養生効果(材齢180日)

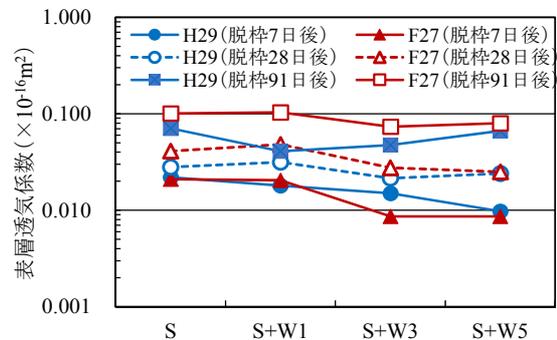


図-12 透気係数への養生効果

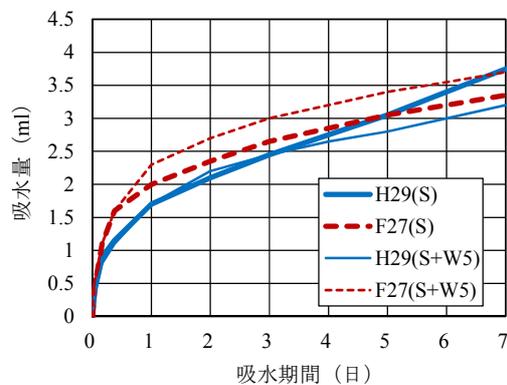


図-13 吸水量の推移

フライアッシュを用いた場合の追加養生の効果に着目すると、圧縮強度の場合と同様に、蒸気養生後の水中養生は3日以上行くと透気係数が小さくなる傾向がみられた。

(4) 吸水量

養生条件 S と S+W5 のケースにおける吸水開始から7日後までの吸水量の推移を図-13 に示す。この図に示すように、吸水期間1日までの吸水量の増加率はその後の増加率と比較すると明らかに大きくなった。今回は試験の簡易さから表面含浸材の施工性評価に用いる試験方法を準用したが、表面の含水状態が試験結果に及ぼす影響が大きいので、吸水期間1~7日までの吸水速度でコンクリートの物質透過性を評価することとした。全てのケースの吸水速度の結果を図-14 に示す。この図に示すように、吸水速度に養生方法の違いの影響は認められなかった一方、F27の吸水速度はH29のそれと比較すると小さくなる傾向となった。

フライアッシュ混和が物質透過性に及ぼす影響について、透気係数は若干大きくなる傾向となったが、吸水期間1日以降の吸水速度は低下した。透気係数にはフライアッシュ混和による表面の乾燥しやすさの影響が含まれている可能性もあり、今後、PC桁の主たる劣化因子である塩分の浸透抵抗性の観点から物質透過性の評価を行う予定である。

4. まとめ

LS桁を検討対象として、フライアッシュ混和の高強度コンクリートを用いたPC桁の実用化に関する検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) フライアッシュを混和した場合でも、引張強度やヤング係数ならびにPC鋼材応力損失は、通常のLS桁と同様の値を用いて設計できる。
- (2) フライアッシュを早強ポルトランドセメントの20%置換することにより、高いASR抑制効果を得ることができる。
- (3) フライアッシュを用いた場合の蒸気養生後の追加養生の効果は、水中養生を3日以上行った場合に圧縮強度増進と透気係数低減がみられた。一方、鋼材による拘束条件下での収縮ひずみと吸水量にその効果は認められなかった。
- (4) 物質透過性について、フライアッシュを混和すると透気係数は若干大きくなる傾向となった一方、吸水期間1日以降の吸水速度は低下した。

参考文献

- 1) 俵道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートのフライアッシュの適用性に関

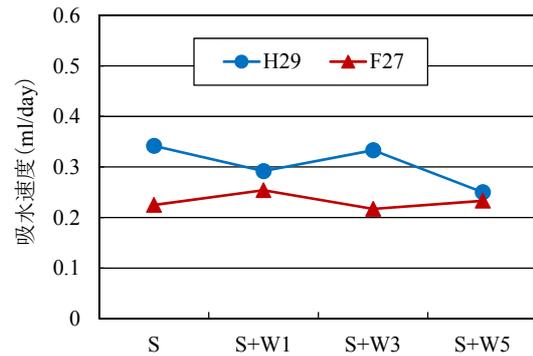


図-14 吸水速度への養生効果

する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.197-202, 2011.7

- 2) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和之: フライアッシュコンクリートのPC橋梁への適用に関する実用化研究, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.5, pp.46-53, 2015.9
- 3) 山田悠二, 橋本紳一郎, 徳光卓, 正木守: フライアッシュを混入したプレストレストコンクリートの諸特性に関する検討, 第24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.303-308, 2015.10
- 4) 土木学会: 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2009.12
- 5) 古賀裕久, 河野広隆: 骨材のアルカリ骨材反応性に関する全国調査結果, 土木学会第59回年次学術講演会, 5-001, pp.1-2, 2004.9
- 6) プレストレストコンクリート建設業協会: JISによる軽荷重PCスラブ橋設計・製造便覧, 2004.6
- 7) 日本コンクリート工学会: ASR診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 2014.7
- 8) R. J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, pp.358-365, 1992.7
- 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) 日本道路協会: 道路橋示方書(I共通編・IIIコンクリート橋編)・同解説, 2012.3
- 11) 土木学会: 構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(335委員会)第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ97, pp.137-146, 2012.7
- 12) 菅田紀之, 相澤義徳: フライアッシュを用いた高強度コンクリートの強度および収縮特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1205-1210, 2006.7