

論文 蒸気養生中の表層部における乾燥がフライアッシュを混和した高強度 PC 桁の物質透過性に及ぼす影響

和氣 佳純*1・河金 甲*2・氏家 勲*3

要旨: 工場で作成される設計基準強度 70N/mm² のフライアッシュを混和した高強度 PC 桁において、蒸気養生中の表層部における乾燥の有無が物質透過性に及ぼす影響を検討した。その結果、蒸気養生中に乾燥の影響を受けるとフライアッシュを混和した高強度 PC 桁の打込み面には脱枠直後に比較的大きな亀甲状の微細ひび割れが発生し、透気係数は若干大きくなった。一方、塩化物イオン浸透抵抗性には蒸気養生中の表層部の乾燥の影響は認められず、早強ポルトランドセメント単味と比較してフライアッシュ混和により塩化物イオン浸透抵抗性は向上した。

キーワード: フライアッシュ, 高強度 PC 桁, 蒸気養生, 物質透過性

1. はじめに

フライアッシュを混和したコンクリートは、環境負荷低減だけではなく緻密化により耐久性向上につながる事が知られており、近年、工場で作成されるプレテンション方式のプレストレストコンクリート桁(以下、PC 桁)へも実用化されている¹⁾²⁾。このようなプレキャスト PC 桁へのフライアッシュの適用の多くは設計基準強度 50N/mm² の製品を対象に行われている。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)が規定されている³⁾。筆者らはこれまでにフライアッシュの適用範囲拡大のため設計基準強度 70N/mm² の高強度コンクリートを用いた PC 桁(以下、高強度 PC 桁)を対象に実用化検討を行った結果、早強ポルトランドセメント単味(以下、早強単味)の場合と同様の設計値を用いて設計できることや、フライアッシュ混和により ASR 抑制効果や塩化物イオン浸透抵抗性が向上することを確認している⁴⁾⁵⁾。

一方、プレキャスト製品において蒸気養生中にコンクリート表層部温度が養生槽内温度より高くなると蒸気圧勾配が生じ、コンクリート表層部が乾燥することで品質

低下につながる事が指摘されている⁶⁾。高強度 PC 桁に用いるコンクリートはセメント量が多いためコンクリート温度は高くなり、養生槽内温度との温度差拡大に伴い表層部の乾燥が顕著になると推測される。さらに、フライアッシュ混和により強度発現が遅くなるため早期の乾燥による表層部のコンクリート品質への影響が大きくなる可能性がある。そこで、フライアッシュを混和した実大の高強度 PC 桁を製作し、蒸気養生中の表層部における乾燥の有無がコンクリートの物質透過性に与える影響を検討した。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの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。設計基準強度は 70N/mm² とし、早強単味の水結合材比(W/B)が 29%の配合(H29)と、早強ポルトランドセメントの 20%(質量比)をフライアッシュ置換した W/B が 27%の配合(F27)を用いて検討した。W/B は両者の初期強度が同程度となるように決定した。フライアッシュは II 種品を用い、F27 は、W/B が小さくスランブでの管理が困難であったことから、フロ

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 (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 (kg/m ³)		スランブフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート練上り温度 (°C)
			W	C	FA	S	G	AD	AE			
H29	29	0	147	507	0	688	1029	4.06	0.15	8.0 (スランブ)	4.9	15
F27	27	20	152	450	113	635	978	6.47	0.17	62 (フロー)	3.5	15

W:地下水, C:早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³), FA:フライアッシュ II 種(密度=2.17g/cm³, 比表面積=3,120 cm²/g), S:細骨材(混合砂(陸砂, 山砂, 砕石), 表乾密度=2.66 g/cm³), G:粗骨材(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 (正会員)

*2 極東興和(株) 営業本部技術企画部技術企画課 博(工) (正会員)

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

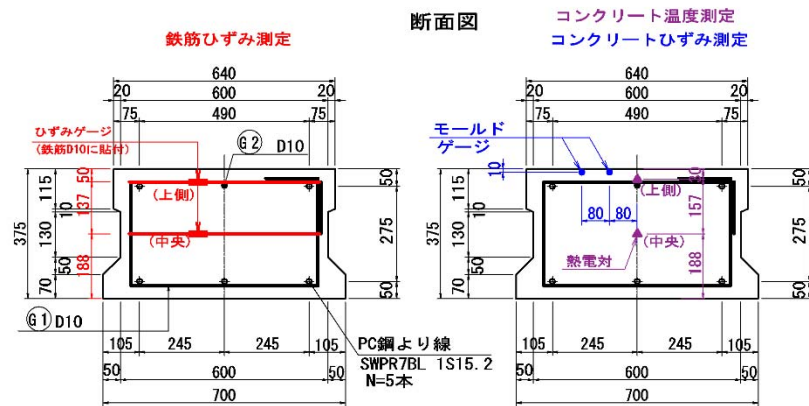
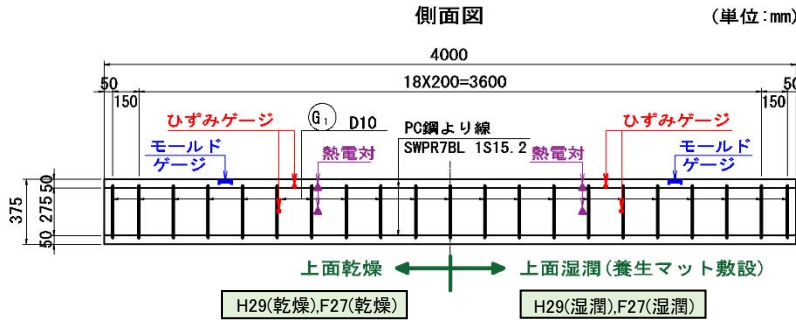


図-1 製作供試体および計測位置

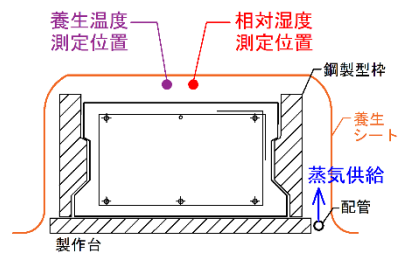


図-2 養生温度および相対湿度測定位置



写真-1 打込み面の養生



写真-2 蒸気養生状況



写真-3 供試体保管状況



写真-4 塩水浸漬状況

で管理する高流動コンクリートとした。H29 の目標スランプは $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、F27 の目標スランプフローは $60 \pm 10\text{cm}$ 、目標空気量はどちらの配合も $4.5 \pm 1.5\%$ として、混和剤量を調整した。

2.2 供試体製作

H29 と F27 の配合を用いて、JIS A 5373 で規定されている設計基準強度 70N/mm^2 の LS 桁の断面形状を参考にした実大供試体（幅 0.7m × 高さ 0.375m × 長さ 4.0m 、図-1）を各 1 体ずつ製作した。蒸気養生中における表層部の乾燥の有無が高強度 PC 桁の物質透過性に与える影響を検討するため、供試体の 1/2 の範囲は十分に吸水させた養生マット（ウレタンフォーム製、厚さ 20mm ）を、打込み面の仕上げ後すぐに敷設することにより湿潤状態を保持させた（写真-1）。F27 のコンクリート打込み完了後から 5 時間の前養生（H29 は F27 の 40 分前にコンクリート打込み完了）を行ってから供試体 2 体を同一の養生シートで覆い蒸気養生を実施した（ 15°C /時間で昇温させ、最高温度 45°C を 3 時間保持、写真-2）。その後、

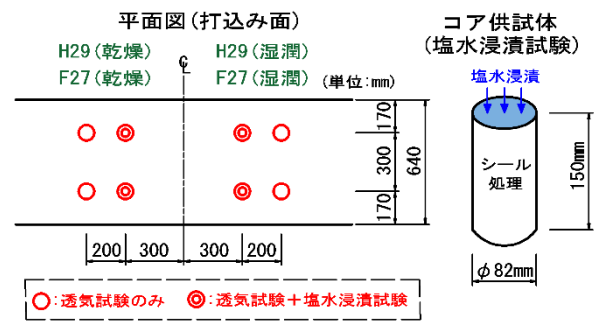


図-3 透気係数測定および塩水浸漬試験用コア供試体採取位置

材齢 17 時間でシート除去・脱枠をしてからプレストレスを導入した。なお、供試体製作は冬季に行い製作時の工場内の気温は 10°C であった。

2.3 計測項目

実大供試体製作時（コンクリート打込み直後から蒸気養生終了時）までの計測項目と計測位置を図-1 に示す。実大供試体内部のコンクリート温度（上縁から 30mm と

断面中央)を熱電対により計測した。収縮特性を把握するため、ひずみゲージ(ゲージ長5mm)を貼付した鉄筋D10を供試体上縁から50mmと高さ中央に設置して鉄筋ひずみを計測するとともに、打込み面近傍(上縁から10mm)にモールドゲージ(標点距離60mm,弾性係数約3000N/mm²)を設置してコンクリートひずみを計測した。モールドゲージは同一断面で2点ずつ計測し、平均値を用いて検討した。なお、ひずみゲージとモールドゲージはどちらも自己温度補償型を用い、熱出力は上縁から30mmのコンクリート温度により補正した。また、養生シート内にも熱電対と湿度計を設置して養生温度と相対湿度を計測した(図-2)。実大供試体製作時には円柱供試体(φ100×200mm)も製作し、脱枠・プレストレス導入時(材齢17時間)と材齢28日の圧縮強度を実大供試体と同一養生を行って測定した。

脱枠・プレストレス導入直後にコンクリート打込み面に水を噴霧してひび割れの有無などの外観状況を目視で確認した。その後屋外で保管し(写真-3)、材齢34日に打込み面の物質透過性を透気試験と塩水浸漬試験を行い検討した。透気試験はダブルチャンバー方式のトレント法⁷⁾を用いて行い、図-3に示すように各ケース4箇所ずつコンクリート打込み面の透気係数を測定した。なお、透気係数測定前の3日間は降雨がみられず測定箇所のコンクリート表面の含水率は4.3~4.7%であり、各ケースにおいて明確な差は認められなかった。

透気試験終了後、再度、水を噴霧して打込み面の外観状況を確認してから、各ケース2箇所ずつコンクリート打込み面からφ82×150mmのコアを採取し(図-3)、塩水浸漬試験を行った。打込み面のみを塩化物イオン浸透面とし、その他の面はエポキシ樹脂系塗料によりシール処理を施した。10%NaCl溶液に6ヵ月浸漬した供試体(写真-4)を割裂し、割裂面に0.1mol/L硝酸銀水溶液を噴霧し、塩化物イオン浸透深さを測定した。各供試体の浸透深さは、3点ずつ計測して平均値を用いた。

3. 試験結果および考察

3.1 養生シート内の温度および相対湿度

F27のコンクリート打込み直後からの養生シート内の温度(以下、養生温度)と相対湿度の推移を図-4に示す。前養生時の温度は10~14℃であった。蒸気供給中(材齢5~11時間)の養生シート内の相対湿度は90%以上を維持しているものの、蒸気の供給を止めると相対湿度は低下し脱枠時には50%程度になった。

3.2 コンクリートの圧縮強度

材齢17時間と材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度の測定結果を表-2に示す。いずれの材齢においてもH29とF27の圧縮強度は同程度であった。

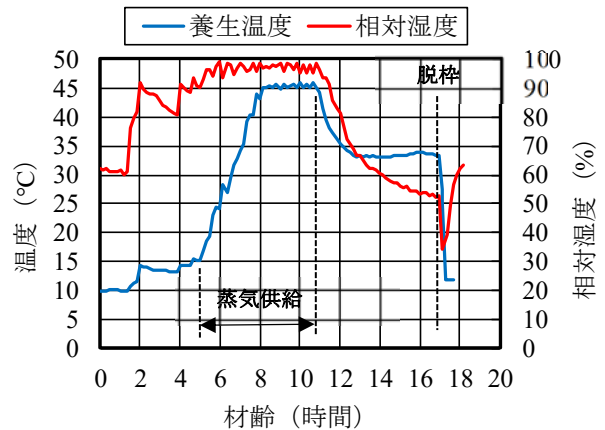


図-4 蒸気養生中の温度および相対湿度

表-2 圧縮強度

	圧縮強度(N/mm ²)	
	17時間(脱枠時)	28日
H29	61.9	80.9
F27	60.3	80.6

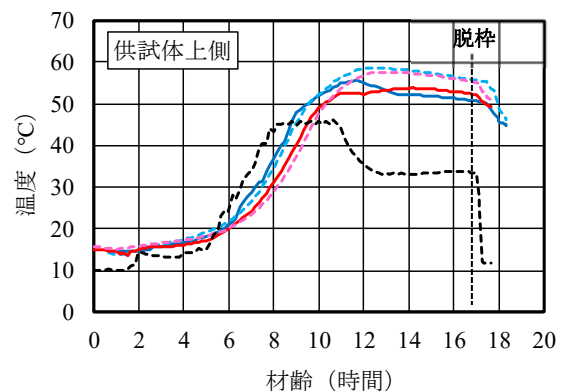
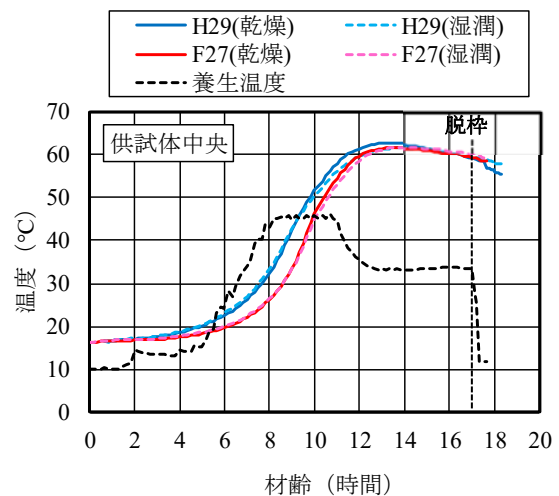


図-5 コンクリート温度の推移

3.3 コンクリート温度

コンクリート温度の推移を図-5に示す。供試体中央の推移をみると、温度上昇速度はH29と比較してF27の方が遅くなるものの、最高温度はH29とF27および打込み面の養生方法の違いによる影響はみられなかった。同様に供試体上側の最高温度もH29とF27の差はほとんどみられなかった。一方で、「湿潤」の場合は「乾燥」と比較して5°C程度高くなっている。これは養生マットによる保温の影響であると考えられる。供試体上側のコンクリート温度と養生温度を比較すると、最高温度維持期間中の材齢9時間程度でH29とF27いずれも供試体上側の温度が養生温度を上回り、両者の差は養生温度低下に伴い拡大し、材齢13時間以降は20°C程度の温度差で推移した。

3.4 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみの推移を図-6に示す。供試体中央の鉄筋ひずみは、すべてのケースにおいてほぼ同様の収縮挙動を示した。供試体中央の鉄筋ひずみの収縮挙動は主に自己収縮に起因していると考えられるが、今回の配合においてフライアッシュ混和の有無や上面の養生方法の違いが自己収縮ひずみに及ぼす影響は認められなかった。一方で、上側（上縁から50mm）の場合、打込み面を湿潤状態にすることにより、H29とF27のケースいずれも収縮ひずみが低減されることがわかる。

3.5 コンクリートひずみ

打込み面近傍（上縁から10mm）のコンクリートひずみの推移を図-7に示す。H29とF27いずれも打込み面を湿潤状態にすることにより、材齢初期での膨張ひずみが増加し、脱枠時での収縮ひずみは小さくなった。また、「F27(乾燥)」のケースのみ、材齢9時間以降のひずみが不規則に推移した。

3.6 コンクリート打込み面の外観状況

材齢1日（脱枠直後）と材齢34日のコンクリート打込み面の外観状況を図-8に示す。脱枠直後において、「F27(乾燥)」のケースのみ亀甲状の微細ひび割れが発生していた。養生マットを敷設した側の「F27(湿潤)」ではこのようなひび割れは発生しておらず、前述の亀甲状の微細ひび割れは蒸気養生中の表層部の乾燥によって発生したと推測される。図-4より材齢11時間までは蒸気供給により養生シート内は高い相対湿度を維持しているものの、「F27(乾燥)」において供試体上側のコンクリート温度が養生温度を上回った材齢9時間程度からコンクリートひずみが不規則になっていることから推測すると（図-5、図-7）、蒸気供給中も養生温度とコンクリート表層部との温度差に起因した蒸気圧勾配によって表層部の乾燥は進行し、表層部のひび割れが発生した可能性がある。なお、養生マットは脱枠と同時に除去しており、「F27(湿潤)」でひび割れが発生していないことから、図-4の脱枠時にみられる急激な温度変化や湿度変化が「F27(乾燥)」における微細ひび割れ発生に与える影響は小さいと思われる。

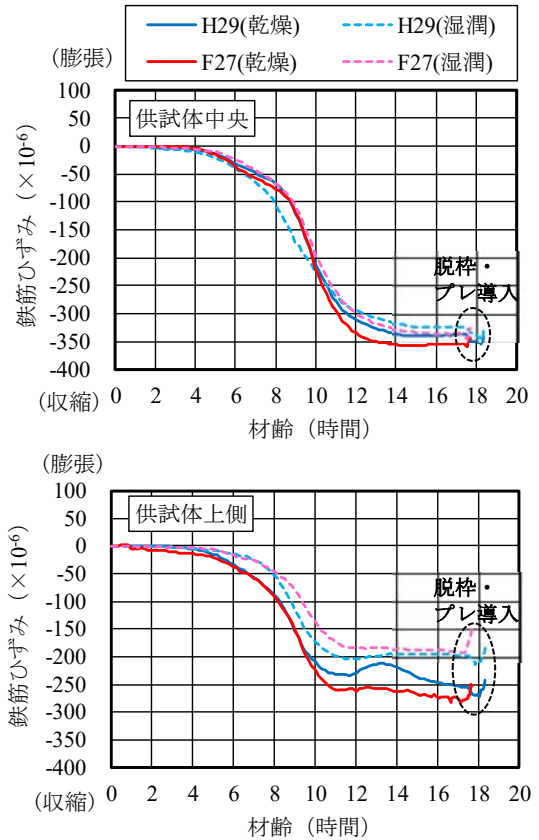


図-6 鉄筋ひずみの推移

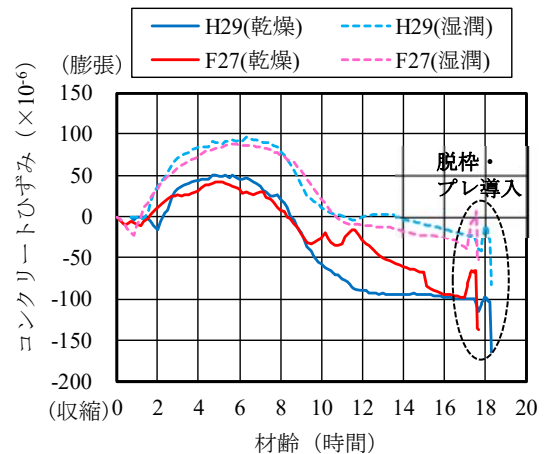


図-7 コンクリートひずみの推移
(上縁から10mm)

一方、図-7では蒸気供給後に相対湿度が低下した材齢11時間以降において上縁から10mmの深さの「H29(乾燥)」の収縮ひずみはほとんど増加していない。「F27(乾燥)」の上縁から10mmの深さの収縮挙動も同様であったとすると、ごく表層部の収縮が内部のコンクリートに拘

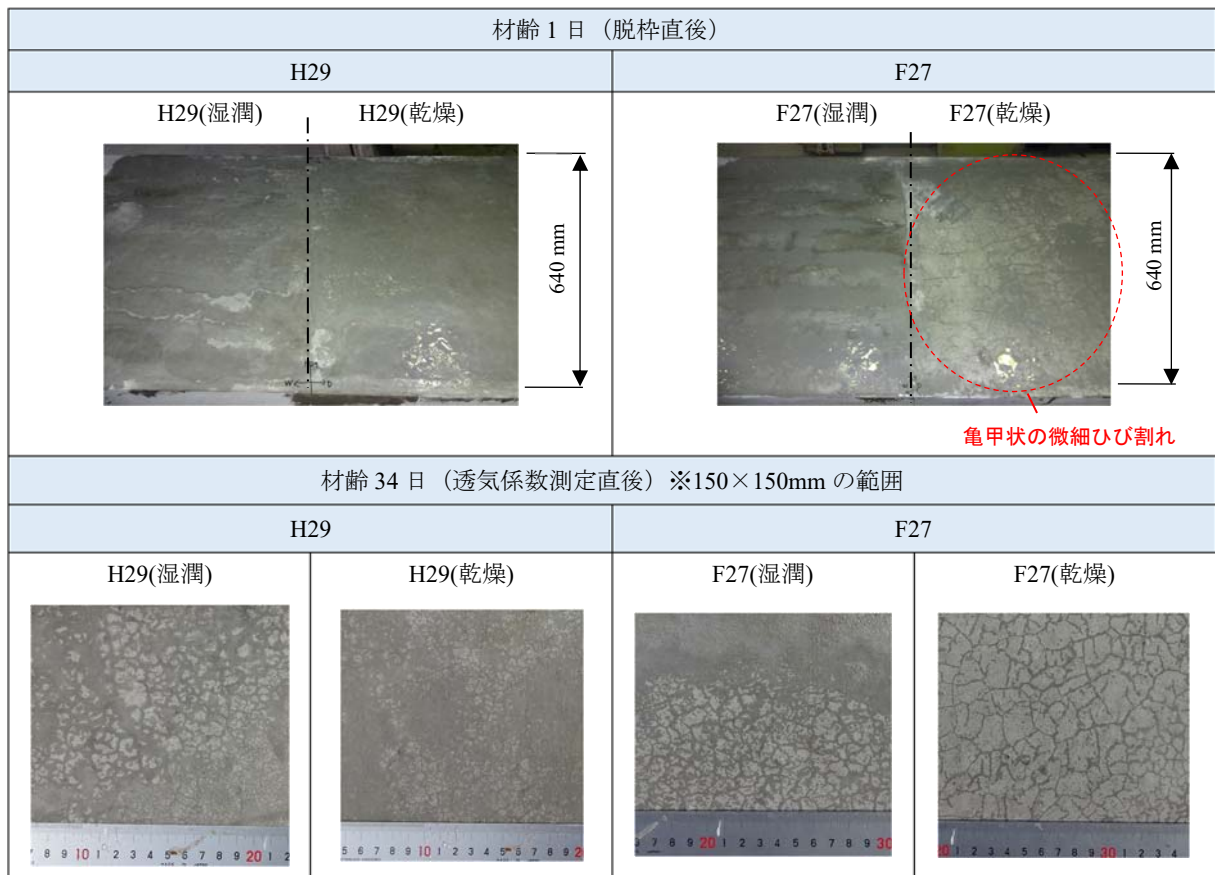


図-8 打込み面の外観状況

束されて打込み面に微細なひび割れが発生したと推測される。また、脱枠時（材齢 17 時間）での H29 と F27 の圧縮強度は同等ではあるものの（表-2）、それ以前の圧縮強度発現はフライアッシュを混和した F27 の方が遅いと考えられる。H29 と F27 の圧縮強度と引張強度の関係は同様であることを確認しており⁴⁾、蒸気養生中の引張強度が H29 と比較して小さかったことが「F27(乾燥)」の微細ひび割れ発生の一因として挙げられる。さらに、高流動化に伴う単位水量の増加等により F27 の表層部の乾燥収縮が H29 と比較して大きかった可能性もひび割れ発生の影響要因として考えられる。

材齢 34 日になると、全てのケースの打込み面に亀甲状の微細ひび割れが発生していたが、脱枠直後の「F27(乾燥)」に発生したひび割れと比較すると、細かな亀甲状の微細ひび割れであった。これらのひび割れは、プレキャスト PC 配合 (W/B=36%) を用いた既往の検討⁸⁾でも確認されているように、供試体を気中環境で保管したため、ごく表層部のみ乾燥収縮の影響を受けて発生したものと推測される。

このように、高強度コンクリートは緻密である反面、水分逸散が表層部のみで卓越するため乾燥収縮による亀甲状の微細ひび割れが打込み面に生じやすくなる。とりわけ、本検討で用いたような設計基準強度 70N/mm² のフライアッシュを混和した PC 桁においては、蒸気養生中

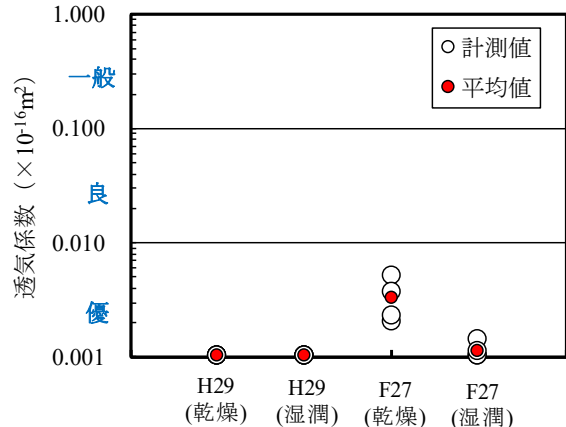


図-9 透気係数

に表層部が乾燥の影響を受けると比較的大きな亀甲状の微細ひび割れが発生する懸念があることがわかった。

3.7 透気係数

打込み面の透気係数測定結果を図-9 に示す。測定限界である $0.001 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 未満の場合の透気係数は $0.001 \times 10^{-16} \text{m}^2$ とした。この図に示すように、脱枠時に微細ひび割れが観察された「F27(乾燥)」の透気係数は他のケースと比較すると大きくなっており、透気係数における微細ひび割れの影響がみられた。一方、その場合を含め、微細ひび割れが発生しても透気係数は一般的に非常に良い品質とされている $0.010 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下⁹⁾であった。

3.8 塩化物イオン浸透深さ

塩水浸漬試験による塩化物イオン浸透深さの測定結果を図-10に示す。配合の違いに着目すると、H29よりF27の方が5mm程度浸透深さは小さく、既往の検討⁹⁾でみられたフライアッシュ混和による塩化物イオン浸透抵抗性向上効果が本研究においても確認できた。蒸気養生中の表層部の乾燥の有無の違いは、脱枠時点で微細ひび割れが確認された「F27(乾燥)」においても湿潤を維持した「F27(湿潤)」と比較して大きな差は認められなかった。

材齢34日で発生したような微細ひび割れが塩化物イオン浸透抵抗性や中性化抵抗性に与える影響は既往の研究⁸⁾でも認められていない。本研究でも同様に、脱枠直後にF27(乾燥)のケースでみられた比較的大きな亀甲状の微細ひび割れが発生しても、若干透気係数は大きくなるものの、塩分浸透抵抗性に及ぼす影響はみられなかった。ただし、塩水浸漬中に微細ひび割れがポゾラン反応生成物で充填され、F27(乾燥)の塩分浸透抵抗性が低下しなかった可能性もある。さらに、前養生時の温度がさらに低い場合や前養生時間が短いことなどにより引張強度が小さい段階で乾燥の影響を受けるとコンクリート表層部の耐久性低下が懸念される。このため、フライアッシュを高強度PC桁に適用する場合、長期耐久性向上効果を十分に発揮させるには、蒸気養生中も十分な乾燥抑制対策を行うことが重要であると思われる。

4. まとめ

設計基準強度70N/mm²のフライアッシュを混和した高強度PC桁において、蒸気養生中の表層部における乾燥の有無がPC桁の温度・収縮特性や外観状況および物質透過性に及ぼす影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) フライアッシュ混和や表層部の乾燥の有無によらず、蒸気養生の最高温度維持期間中に、供試体表層部のコンクリート温度が養生温度を上回った。これらの温度差に起因した蒸気圧勾配によって表層部の乾燥は進行している可能性がある。
- (2) フライアッシュ混和の有無によらず実大供試体中央部の鉄筋ひずみの収縮量に差は認められなかった一方、表層部のコンクリートの収縮ひずみは湿潤状態を維持すると小さくなった。
- (3) フライアッシュを混和した場合、蒸気養生中のコンクリート打込み面の表層部が乾燥の影響を受けると、脱枠直後に比較的大きな亀甲状の微細ひび割れが発生し、透気係数が若干大きくなった。
- (4) 塩化物イオン浸透抵抗性はフライアッシュを混和することにより向上し、脱枠時に生じていた比較的大きな微細ひび割れの影響はみられなかった。

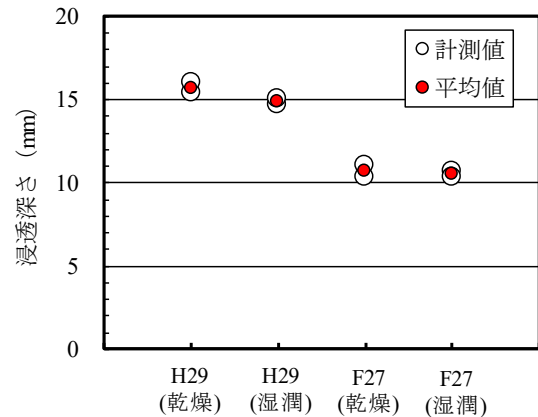


図-10 塩化物イオン浸透深さ

参考文献

- 1) 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
- 2) 山田稔, 山本将, 渡邊輝政, 谷口正輝: 北陸自動車道日野川橋床版更新工事, プレストレストコンクリート, Vol.59, No.6, pp.58-64, 2017.11
- 3) 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
- 4) 河金甲, 下野聖也, 三本竜彦, 中田順憲: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.175-180, 2017.7
- 5) 河金甲, 下野聖也: 高強度コンクリートの物質透過性におよぼすフライアッシュ混和の影響, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, V-232, pp.463-464, 2018.8
- 6) 鳥海秋, 原洋介, 宇治公隆, 上野敦: 蒸気養生中の散水がコンクリート表層部の品質および強度特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.493-498, 2018.7
- 7) 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
- 8) 水戸健介, 中村英佑, 古賀裕之, 鈴木雅博: プレキャストPC部材用コンクリートの微細ひび割れと耐久性に関する一検討, 土木学会第74回年次学術講演会講演概要集, V-201, 2019.9
- 9) 土木学会: 構造物表面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)成果報告書およびシンポジウム講演概要集, 2008.4