

フライアッシュを混和した高強度PC桁の実用化に関する検討

極東興和(株) 正会員 ○河金 甲
 極東興和(株) 下野 聖也
 極東興和(株) 正会員 中田 順憲

キーワード：フライアッシュ，高強度PC桁，PC鋼材応力損失，曲げ耐荷性能

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、環境負荷を低減できるだけでなく耐久性が向上することが知られている。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るようになり、実用化された事例もある¹⁾。一方、これらの検討の多くは設計基準強度50N/mm²のPC桁を対象としており、それ以上の高強度コンクリートを用いたPC桁へのフライアッシュの適用性は十分には解明されていない。そこで、本研究ではフライアッシュの適用拡大を目的に、JIS A 5373で規定されている設計基準強度70N/mm²の軽荷重スラブ橋桁（以下、LS桁）を対象として実用化に向けた検討を行った。

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。設計基準強度は70N/mm²とし、検討には、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、スランプフローで管理する高流動コンクリートとした。

2.2 試験体製作および計測概要

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鋼材ひずみを計測して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。プレストレスは材齢1日で導入し、道路橋用橋げたの設計・製造便覧（以下、設計製造便覧）²⁾に準じてPC鋼材の初期導入応力度は1315N/mm²とした。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り付けて測定した。この場合、素線方向のひずみを計測することになるので、ひずみゲージを貼り付けたPC鋼より線の引張試験から得られた素線方向のひずみと鋼材軸方向ひずみの関係を用いて鋼材軸方向ひずみに変換した。PC鋼材ひずみに変化がほとんどみられなくなった材齢219日に、曲げ耐荷性能を検討するため2点集中載荷による載荷試験を行った（図-1，写真-1）。

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) | | | | | 混和剤使用量 (kg/m ³) | | スランプ 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 (スランプフロー) | 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)

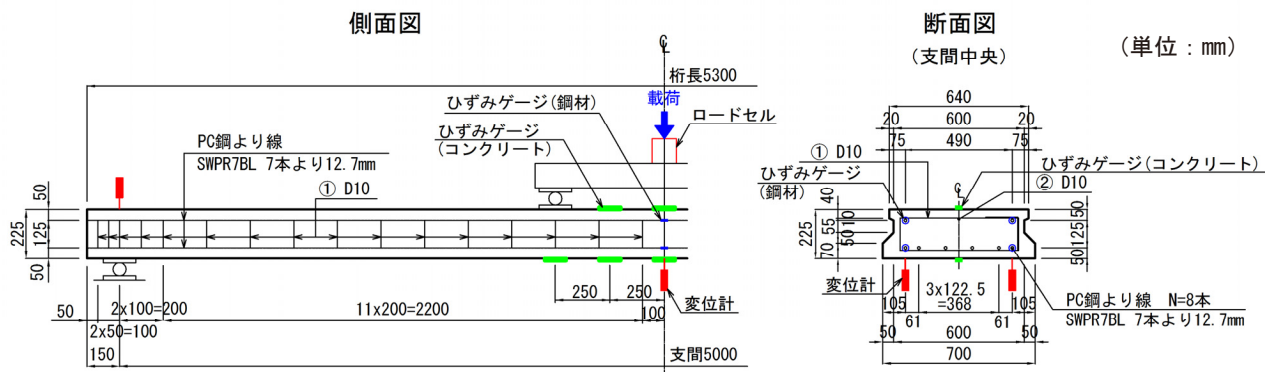


図-1 製作供試体および荷重試験概要

LS桁製作時には円柱供試体 ($\phi 100 \times 200\text{mm}$) も製作し、圧縮強度を材齢1日、7日、14日、28日、91日、219日 (荷重時) で、割裂引張強度とヤング係数を材齢1日、7日、28日、219日で測定した。なお、LS桁と円柱供試体は、3時間の前養生後に蒸気養生を実施した (15°C/時間で昇温、最高温度45°Cを3時間保持した後、10°C/時間程度で降温)。



写真-1 荷重試験状況

3. 試験結果

3.1 コンクリート物性値

圧縮強度発現を図-2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くなるものの、材齢28日からはF27の方が大きくなっており、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。

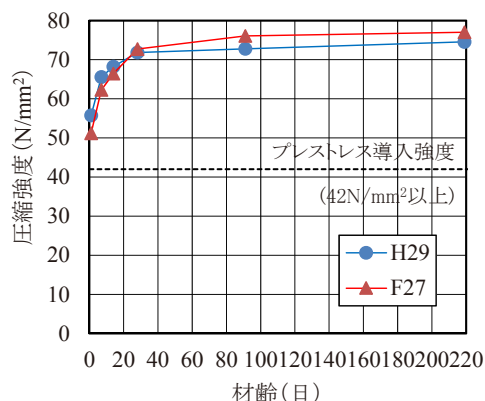


図-2 圧縮強度の推移

引張強度と圧縮強度の関係を図-3に、ヤング係数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³⁾に準拠して算出した計算値も併せて示す。これらの図に示すように、F27の引張強度とヤング係数はいずれも計算値と同程度であった。フライアッシュ混和の有無に着目すると、引張強度にはフライアッシュ混和の明確な影響は認められなかったが、F27のヤング係数はH29と比較すると小さくなる傾向となった。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 (表-1)。

3.2 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-5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鋼材のリラクゼー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。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、円柱供試体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。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、フライアッシュを用いたLS桁において、所定の圧縮応力が導入されていることが分かる。

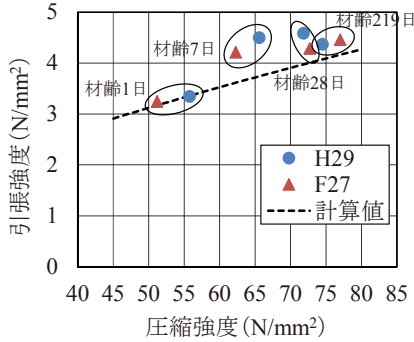


図-3 引張強度と圧縮強度の関係

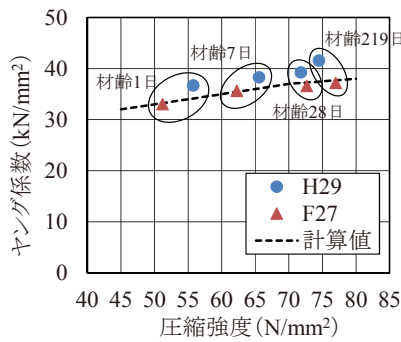


図-4 ヤング係数と圧縮強度の関係

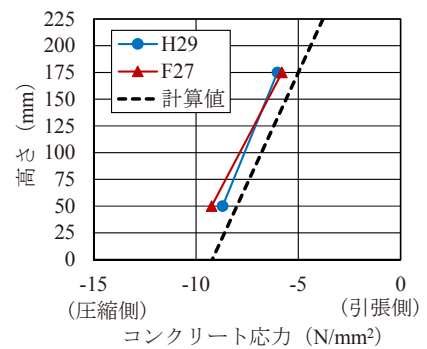


図-5 コンクリート応力 (プレ導入時)

(2) PC鋼材応力損失

プレストレス導入前からのPC鋼材応力損失（「弾性+クリープ+収縮」）とプレストレス導入直後からのPC鋼材応力損失（「クリープ+収縮」）の載荷時（材齢219日、プレストレス導入後218日）までの推移を図-6に示す。PC鋼材応力損失は、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ている。また、設計製造便覧と道路橋示方書⁴⁾に基づき算出した載荷時（材齢219日）の計算値も併せて示す。

プレストレス導入によるLS桁の弾性変形の影響を含んだ結果（「弾性+クリープ+収縮」）をみると、F27のPC鋼材応力損失は、プレストレス導入直後からH29よりも増大していることが分かる。導入時（材齢1日）におけるヤング係数はH29よりF27の方が小さく（図-4）、それに起因して弾性変形が大きくなったものと推測される。一方、弾性変形を含まない結果（「クリープ+収縮」）では、F27のPC鋼材応力損失は、H29と比較して40日程度までは大きくなるものの、その後、両者の差は小さくなり、載荷時では同程度となった。この結果には収縮の影響が含まれているものの、F27の方がヤング係数は小さいにもかかわらず、載荷時のPC鋼材応力損失がH29と同等になっていることから、F27のクリープ係数はH29と比較して小さい可能性がある。

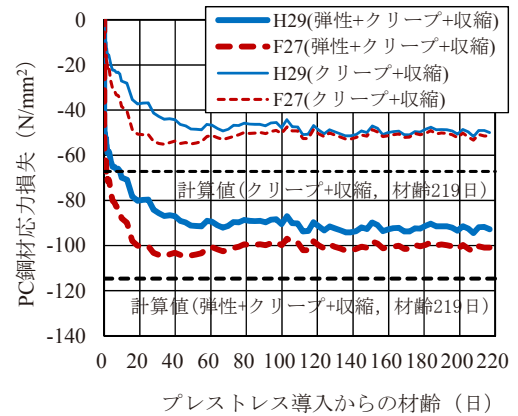


図-6 PC鋼材応力損失

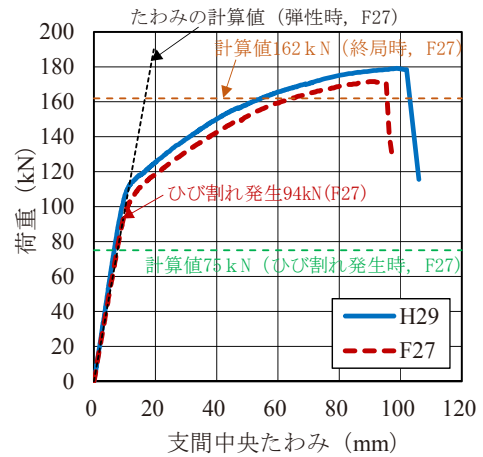


図-7 荷重と支間中央たわみの関係

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、弾性変形、クリープ、乾燥収縮によるPC鋼材応力損失は、早強ポルトランドセメント単味の標準特性に基づいた既存の推定手法により、フライアッシュを混和した場合も安全側に評価できることが分かった。

3.3 曲げ耐荷性能

曲げ載荷試験における荷重と支間中央たわみの関係を図-7に、結果一覧を表-2に示す。ひび割れ発生荷重はコンクリート下縁のひずみが非線形となったときの荷重である。また、図や表に示した計算値は、PC鋼材応力損失、コンクリートとPC鋼材の物性値にそれぞれの実測値を用いて算出した。

表-2 載荷試験結果一覧

| | コンクリート物性 | | | 曲げ載荷試験 | | | | | |
|-----|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|----------|---------|-------|---------|---------|-------|
| | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | ひび割れ発生荷重 | | | 終局荷重 | | |
| | | | | 実測値(kN) | 計算値(kN) | 実測/計算 | 実測値(kN) | 計算値(kN) | 実測/計算 |
| H29 | 74.5 | 40.7 | 4.4 | 85 | 74 | 1.15 | 179 | 161 | 1.11 |
| F27 | 77.0 | 37.2 | 4.5 | 94 | 75 | 1.25 | 172 | 162 | 1.06 |

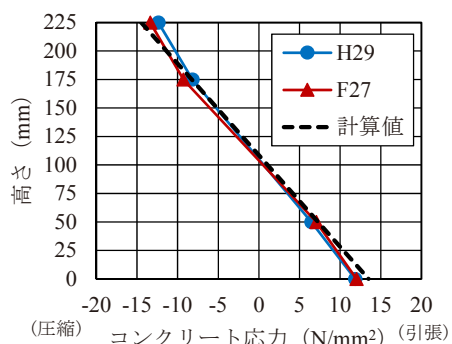


図-8 コンクリート応力(80kN時)

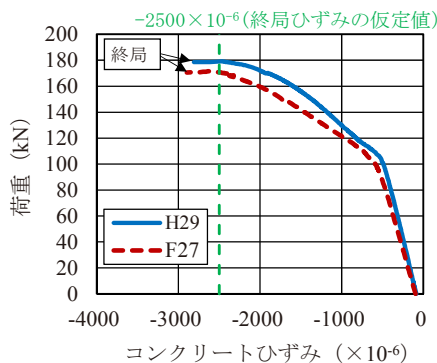


図-9 コンクリート上縁ひずみ

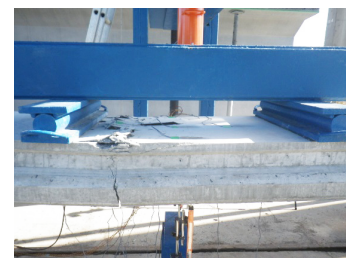


写真-2 破壊状況(F27)

F27の曲げひび割れ発生前のたわみは計算値とほぼ同様の挙動となり(図-7), 図-8に示すように、曲げひび割れ発生直前(荷重80kN時)の支間中央における荷重によるコンクリート応力分布(ひずみの計測値にヤング係数の実測値を乗じて算出)も、平面保持を仮定した計算値とおおむね一致した。さらに、表-2に示すように、H29とF27のひび割れ発生荷重と終局荷重は、いずれも計算値を上回り、両者に大きな差は認められなかった。コンクリート上縁ひずみの終局時までの推移(載荷前のひずみも考慮)を図-9に示す。H29とF27いずれも写真-2に示すようにコンクリート上縁の圧壊により終局に至り、その位置はコンクリート上縁ひずみ計測位置とほぼ一致していた。図-9から、F27の終局時のコンクリートひずみは、計算で仮定している終局ひずみ(2500×10⁻⁶)²⁾より大きくなるとともに、H29の場合と同程度であることが分かる。

以上のことから、フライアッシュを混和した場合も、曲げ耐荷性能は通常のLS桁と同様の設計手法で評価可能であることを確認できた。

4. おわりに

フライアッシュを設計基準強度50N/mm²以上のPC桁へも適用拡大することを目的に、フライアッシュを混和した設計基準強度70N/mm²の実大のLS桁を製作して曲げ載荷試験を実施した。その結果、フライアッシュを混和した場合も、コンクリート物性値、PC鋼材応力損失、曲げ耐荷性能は、早強ポルトランドセメント単味の標準特性に基づいた通常のLS桁と同様の手法で設計できることを確認できた。なお、現在はフライアッシュ混和による耐久性向上効果を検討しているところである。

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) 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
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013. 3
- 4) 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