

分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 桁への適用に関する検討

| | | |
|-------|--------|------|
| 技術研究所 | 材料グループ | 山村智 |
| 技術研究所 | | 鈴木雅博 |
| 技術研究所 | 材料グループ | 桜田道博 |
| 名古屋支店 | 金沢営業所 | 小林和弘 |

概要：分級フライアッシュを用いた PC 桁橋を実現するため、強度特性、耐久性、ひび割れ抵抗性の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数を検討した。また、プレテンション PC 桁を製作し、PC 鋼材ひずみの長期計測や曲げ載荷実験を行い、フライアッシュを用いた PC 桁の有効プレストレス、ひび割れ発生モーメントおよび曲げ耐力などの構造特性を併せて検討した。その結果、蒸気養生後の湿潤養生日数は耐久性の観点では3日程度必要であること、有効プレストレス、曲げ耐力などの構造特性は通常の PC 桁と同等であり、フライアッシュを用いた PC 桁の実用化は十分可能であることが確認された。

Key Words：分級フライアッシュ、強度、耐久性、湿潤養生日数、プレストレス損失、構造特性、プレテンション PC 桁

1. はじめに

近年、プレストレスコンクリート(以降、PC と呼ぶ)構造物の品質向上、耐久性向上、長寿命化および環境負荷の低減などが求められている。産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末は、混和材として用いることでコンクリートが緻密化し、塩害やアルカリ骨材反応に対して、耐久性が向上することが知られている^{1),2)}。さらに、コンクリート製造時の CO₂ 排出量の低減や未利用資源の有効活用などによる環境負荷の低減にもつながることから、PC 構造物に積極的に用いることが望まれている。しかし、フライアッシュについては PC 構造物に使用された実績がほとんどないのが現状である。フライアッシュが PC 構造物に使用されない理由として、フライアッシュの品質が安定せず、コンクリートの品質がばらつくことなどが考えられる。近年、高品質化と品質の安定化を図るために分級したフライアッシュ(以降、分級フライアッシュ)が供給されており^{3),4)}、この分級フライアッシュを用いることで、PC 構造物への適用が可能になると考えられる。

そこで本研究では、分級フライアッシュを用いた PC 桁橋を実現するために、フライアッシュを用いたコンクリートの材料特性と PC 部材としての構造特性を検討した。材料特性の検討では、圧縮強度試験や透気係数試験、拘束応力試験などを行い、湿潤養生日数が強度発現、耐久性、ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を確認した。一方、構造特性の検討では、プレテンション方式により実物大の PC 桁を製作し、PC 鋼材ひずみの長期計測によりプレストレスの損失量を把握し、さらに、プレストレスの損失量の確認後、PC 桁供試体の曲げ載荷実験を行い、ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力などの構造特性を確認した。



山村智



鈴木雅博



桜田道博



小林和弘

2. 試験フロー

試験フローを図-1に示す。試験はStep1～Step3の3段階で行った。Step1では良好なワーカビリティとプレストレス導入時の強度をともに満足するよう配合を検討した。Step2では強度発現、耐久性およびひび割れ抵抗性の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数を検討し、Step3ではStep1およびStep2において決定した配合および湿潤養生日数でプレテンションPC桁を製作し、プレストレスの損失量およびPC桁としての構造特性を検討した。

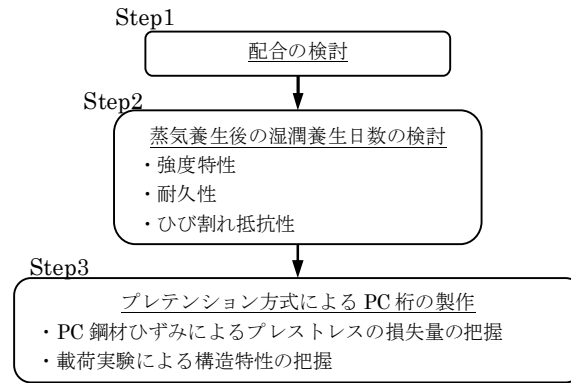


図-1 検討フロー

3. 試験方法

3.1 コンクリートの目標性状

コンクリートの目標性状を表-1に示す。プレテンション方式PC桁への適用を目的としているため、コンクリートの設計基準強度は 50N/mm^2 (材齢14日)、プレストレス導入時の強度は材齢14時間で 35N/mm^2 とした。また、スランプおよび空気量の目標値はそれぞれ、 $12\pm 2.5\text{cm}$ および $4.5\pm 1.5\%$ とした。

表-1 コンクリートの目標性状

| | |
|------------------------|----------------------------------|
| 設計基準強度 | $\sigma_{14}=50.0\text{N/mm}^2$ |
| プレストレス導入時強度 | $\sigma_1=35.0\text{N/mm}^2$ |
| 変動係数 (コンクリート施工管理要領による) | $V=8.0\%$ |
| 目標スランプ | $SL=12.0\text{cm}$ |
| 目標空気量 | $air=4.5\%$ |
| 粗骨材の最大寸法 | $G_{max}=20\text{mm}$ |
| 塩化物含有量の最大値 | 300g/m^3 |
| 割増し係数から算出される配合強度 | |
| 設計基準強度の配合強度 | $\sigma_{14}=58.0\text{N/mm}^2$ |
| プレストレス導入時強度の配合強度 | $\sigma_{14h}=40.6\text{N/mm}^2$ |

3.2 使用材料および配合

使用材料を表-2に、配合を表-3に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを、フライアッシュには北陸電力七尾大田火力発電所で製造される分級フライアッシュを使用した。骨材は七尾工場の常用品とした。表-3のFA-30、FA-33およびFA-36はStep1で検討した配合であり、FAはStep1の検討結果に基づき決定した配合である。また、Hは比較用の早強単味の配合であり、七尾工場で実績のある配合である。なお、FA配合でのフライアッシュの置換率はセメントの20%とした。

表-2 使用材料

| 材料 | 記号 | 仕様 |
|--------|----|---|
| セメント | C | 早強ポルトランドセメント 密度:3.14g/cm ³ |
| 混和材 | FA | フライアッシュ II種(北陸電力七尾大田火力発電所産) 密度:2.37g/cm ³ , 比表面積:4773cm ² /g, 強熱減量:1.8%, フロー値比:107 |
| 細骨材 | S | 川砂(庄川産) 表乾密度:2.64g/cm ³ |
| 粗骨材 | G | 砕石(庄川産) 表乾密度:2.62g/cm ³ |
| 高性能減水剤 | SP | ポリエーテル系高性能減水剤 |
| AE剤 | AE | アニオン系界面活性剤 |

表-3 配合

| 配合名 | W/B (%) | Air (%) | s/a (%) | 単用量(kg/m ³) | | | | | 備考 |
|-------|---------|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|------|-----------|
| | | | | W | B | | S | G | |
| | | | | | C | FA | | | |
| FA-30 | 30 | 4.5 | 42.4 | 150 | 400 | 100 | 698 | 960 | 配合検討 |
| FA-33 | 33 | 4.5 | 43.0 | 150 | 364 | 91 | 725 | 972 | |
| FA-36 | 36 | 4.5 | 43.6 | 150 | 333 | 83 | 750 | 981 | |
| FA | 32 | 4.5 | 42.8 | 150 | 375 | 94 | 730 | 969 | 湿潤養生日数の検討 |
| H | 38.7 | 4.5 | 40.6 | 150 | 388 | - | 729 | 1061 | 構造特性の検討 |

3.3 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法を図-2に示す。室内試験では公称容量55Lの強制練り水平二軸ミキサを使用し、PC桁の製作時は公称容量1.7m³のジクロス式の実機ミキサを使用した。

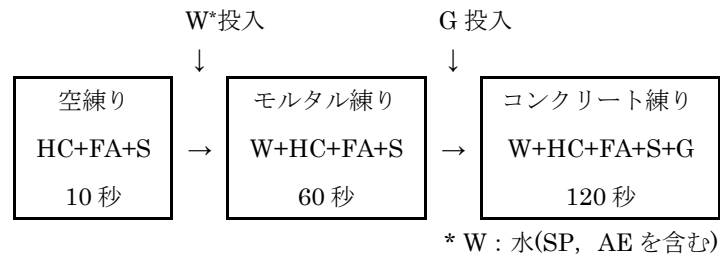


図-2 練混ぜ方法

3.4 養生方法

蒸気養生の設定を図-3に示す。前養生(20℃)を3時間行い、その後、15℃/hで温度を上昇させ、最高温度50℃を4時間保持した後、降温させた。脱枠は蒸気養生開始から14時間後とした。

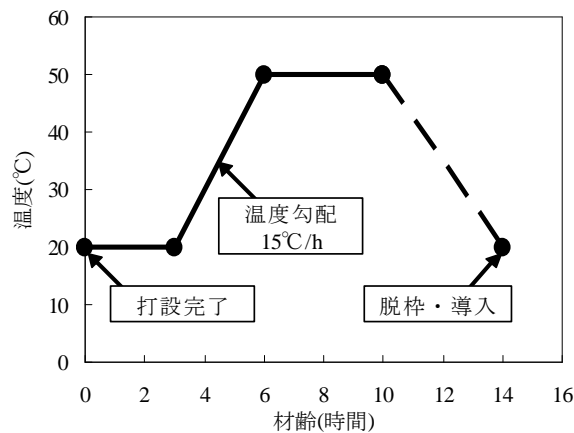


図-3 蒸気養生設定

3.5 配合の検討

本検討で用いた配合は表-3 に示したとおりである。配合の検討では水結合材比(W/B)を 30%, 33%および 36%の 3 水準とし、B/W と圧縮強度の関係から適切な W/B を決定した。

3.6 蒸気養生後の湿潤養生日数の検討

フライアッシュを用いたコンクリートは、養生方法が圧縮強度の発現や耐久性に敏感に影響することが知られている⁵⁾。フライアッシュを用いた現場打ち部材の湿潤養生日数に関しては、土木学会⁵⁾で7日(平均気温15℃以上の場合)とされているが、蒸気養生を実施するプレキャスト部材の湿潤養生日数に関しては定められていないのが現状である。また、土木学会の湿潤養生日数は圧縮強度の発現に基づくものであり、耐久性の観点からは定められていない⁵⁾。

そこで、本検討では、蒸気養生後の湿潤養生日数をパラメータとし、湿潤養生日数が強度発現、耐久性およびひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討した。

3.6.1 試験項目

本検討で行った試験項目、試験方法および試験体寸法を表-4 に示す。強度発現の観点では圧縮強度試験を、耐久性の観点では透気係数試験を、ひび割れ抵抗性の観点では拘束応力試験、乾燥収縮試験および自己収縮試験を実施した。

表-4 試験項目および試験体寸法

| 試験項目 | 試験方法 | 試験体寸法 (mm) | FA | | | | H | | |
|------|------------|---------------|----------|----|----|----|----|----|----|
| | | | 配合 記号 | D | D3 | D5 | D7 | D | D7 |
| | | | 蒸気養生 | 有 | | | | 有 | |
| | | | 湿潤養生日数 | 0日 | 3日 | 5日 | 7日 | 0日 | 7日 |
| 圧縮強度 | JIS A 1108 | φ100×200 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 透気係数 | トレント法 | □100×200×600 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 乾燥収縮 | JIS A 1129 | □100×100×400 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 自己収縮 | JCI 法 | □100×100×400 | ○ | - | - | - | ○ | - | |
| 拘束応力 | JCI 法 | □100×100×800 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |

3.6.2 蒸気養生後の湿潤養生の方法

蒸気養生後の湿潤養生方法を図-4 に示す。蒸気養生後の湿潤養生日数は0日、3日、5日および7日の4水準とした。

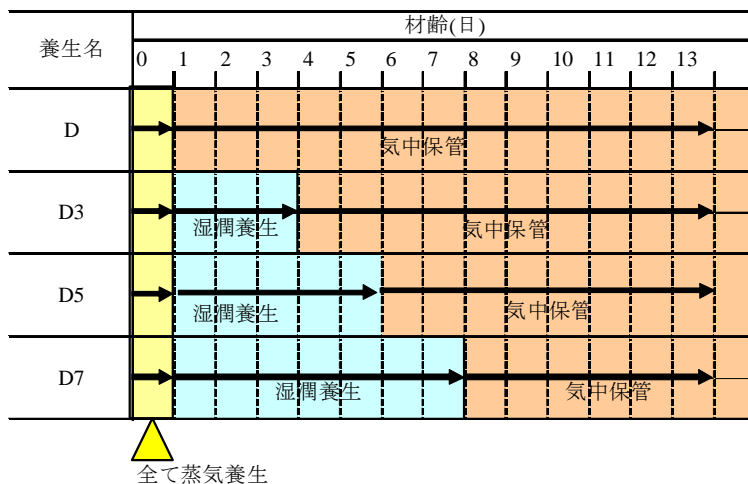


図-4 蒸気養生後の養生方法

3.6.3 圧縮強度試験

圧縮強度試験の試験材齢を表-5 に示す。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠し行った。試験体の寸法は直径100mm、高さ200mmの円柱とした。

表-5 圧縮強度試験の試験材齢

| 配合 | 養生名 | 試験材齢 | | | | | |
|----|-----|---------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | t=14 時間 | t=4 日 | t=6 日 | t=8 日 | t=14 日 | t=28 日 |
| FA | D | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | D3 | — | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | D5 | — | — | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | D7 | — | — | — | ○ | ○ | ○ |
| H | D | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | D7 | — | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

3.6.4 透気試験

透気試験に用いた試験体を図-5に、計測機器を写真-1に、試験体一覧を表-6に示す。透気試験は二重構造を持つチャンバー、真空ポンプ、制御版および測定器で構成される減圧型トレント法により行った⁵⁾。試験体はフライアッシュの有無、養生日数をパラメータとした。試験体の寸法は高さ100mm、幅200mm、長さ600mmとし、測定箇所は試験体打込み面(200×600mmの面)の3箇所とした。FA配合の試験体は養生方法別に4体とし、H配合の試験体は養生方法をDおよびD7の2水準とした。試験材齢は28日とした。

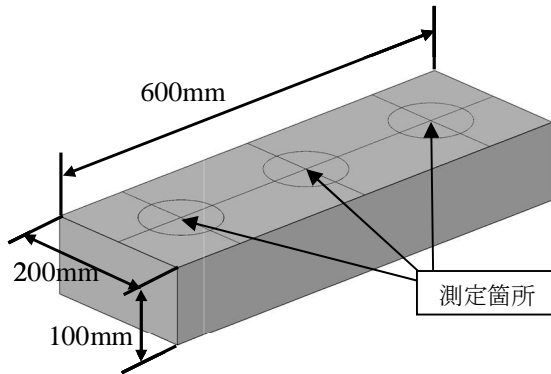


図-5 透気試験体

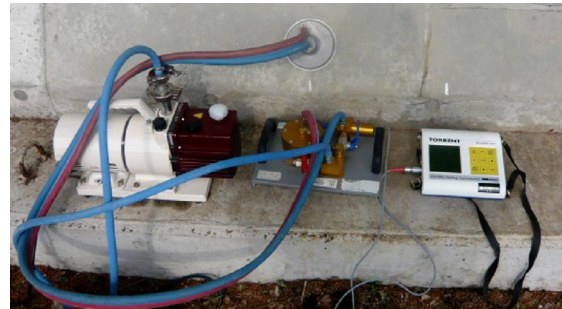


写真-1 試験装置

表-6 試験体一覧

| 配合 | 養生条件 | 試験体の数量 |
|----|------|--------|
| FA | D | 1 |
| | D3 | 1 |
| | D5 | 1 |
| | D7 | 1 |
| H | D | 1 |
| | D7 | 1 |

3.6.5 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の試験体一覧を表-7に、乾燥収縮ひずみの試験状況を写真-2に示す。乾燥収縮試験に用いた試験体は高さ100mm、幅100mm、長さ400mmの角柱とした。FA配合の乾燥収縮試験体の養生条件は、D、D3、D5およびD7とし、早強セメント単味の試験体の養生方法はDおよびD7とした。各試験体の個数は3体とした。乾燥収縮試験では、質量変化率試験もあわせて実施した。乾燥収縮ひずみおよび質量変化率の測定間隔は乾燥材齢で1日から52週まで行った。

表-7 試験体一覧

| 配合 | 養生条件 | 試験体の数量 |
|----|------|--------|
| FA | D | 3 |
| | D3 | 3 |
| | D5 | 3 |
| | D7 | 3 |
| H | D | 3 |
| | D7 | 3 |



写真-2 乾燥収縮試験

3.6.6 自己収縮試験

自己収縮試験の試験体を図-6に、試験体一覧を表-8に示す。試験体は高さ100mm、幅100mm、長さ400mmの角柱とした。試験体中央部に埋め込みひずみ計を設置し、自己収縮ひずみを計測した。FA配合の養生条件はDおよびD3とし、H配合の養生条件はDのみとした。各配合における試験体の個数は3体とした。

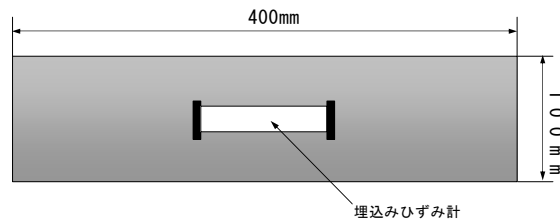


図-6 自己収縮試験体

表-8 試験体一覧

| 配合 | 養生条件 | 試験体の数量 |
|----|------|--------|
| FA | D | 3 |
| | D3 | 3 |
| H | D | 3 |

3.6.7 拘束応力試験

拘束応力試験の試験体を図-13に、試験体一覧を表-9に示す。拘束応力試験の試験体は高さ100mm、幅100mm、長さ800mmの角柱とし、試験体中央部にD16の異形鉄筋を設置した。供試体の寸法は、JCI-SAS2では長さ1500mmと規定されているが、蒸気養生槽に入らないため800mmに短縮した。FA配合の養生条件は、D、D3、D5およびD7とし、H配合の養生条件はDおよびD7とした。各養生方法における試験体は3体とした。ダメージゲージは3体のうち1体に設置した。

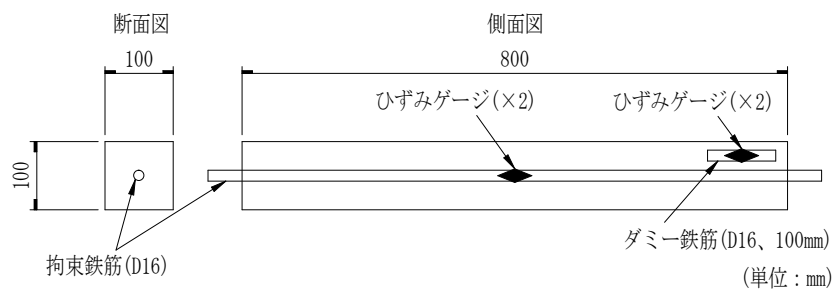


図-7 拘束応力試験状況

表-9 試験体一覧

| 配合 | 養生条件 | 試験体の数量 |
|----|------|--------|
| FA | D | 3 |
| | D3 | 3 |
| | D5 | 3 |
| | D7 | 3 |
| H | D | 3 |
| | D7 | 3 |

3.7 実物大プレテンションPC桁による構造特性の検討(Step3)

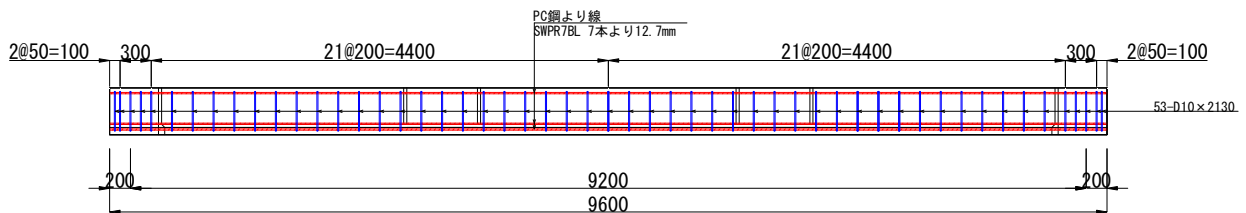
3.7.1 PC桁供試体

本検討で製作したPC桁の一覧を表-10に示す。PC桁の寸法、配筋およびPC鋼材の配置を図-8に示す。供試体はフライアッシュを用いたPC桁(以降、FAPC桁)および早強セメント単味の通常のPC桁(以降、HPC桁)の2種類とし、形状および寸法はJIS規格であるAS09と同様とした。本来であれば横桁部に横締めシース孔があるが、本実験ではシース孔を省略した。

表-10 PC桁一覧

| No. | 供試体名 | 配合 | プレストレスの導入方法 | PC鋼材の配置 | |
|-----|-------|------|-------------|----------|-----------|
| | | | | (圧縮側) | (引張側) |
| 1 | FAPC桁 | FA配合 | プレテンション方式 | 4-1S12.7 | 12-1S12.7 |
| 2 | HPC桁 | H配合 | プレテンション方式 | 4-1S12.7 | 12-1S12.7 |

側面図



断面図

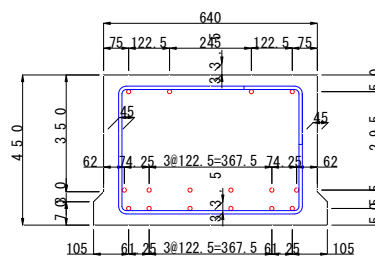


図-8 PC桁供試体

3.7.2 プレストレスの損失量の検討

プレテンションPC桁におけるPC鋼材のひずみの計測位置を図-5に示す。本検討はPC桁支間中央部で最下段のPC鋼材のひずみを約6ヶ月間計測することにより行った。PC鋼材ひずみの計測には温度補償型ひずみゲージを使用した。HPC桁においても同様にPC鋼材ひずみを計測し、FAPC桁と比較することでフライアッシュの有無がプレストレスの損失量に及ぼす影響を検討した。

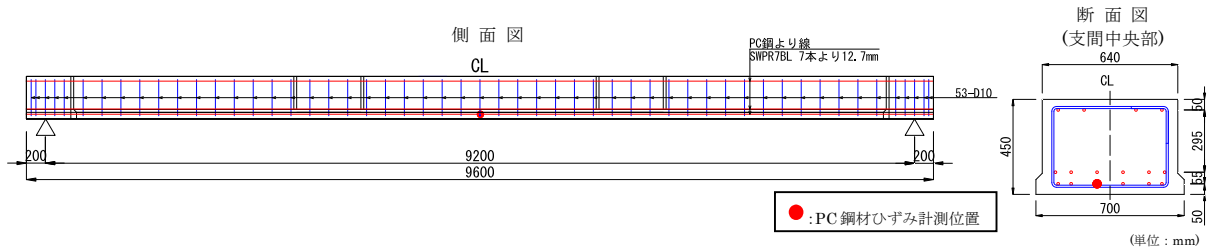


図-9 PC 鋼材ひずみの計測位置

3.7.3 荷重実験による力学的特性の検討

FAPC 桁の力学的特性を把握するため、有効プレストレス計測後のプレテンション PC 桁を用いて曲げ荷重実験を行った。HPC 桁についても荷重実験を行い、FAPC 桁との比較を行った。荷重方法を図-10 に、計測機器の配置を図-11 に、計測項目および検討項目を表-11 に、荷重条件を表-12 に示す。

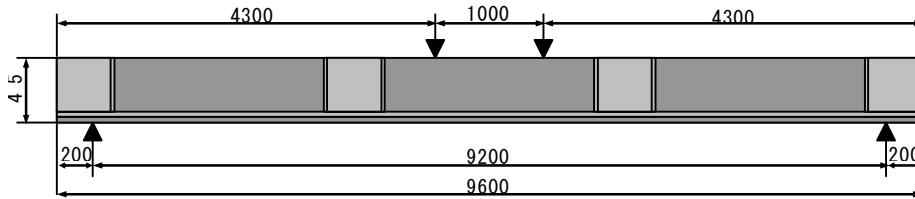


図-10 荷重方法

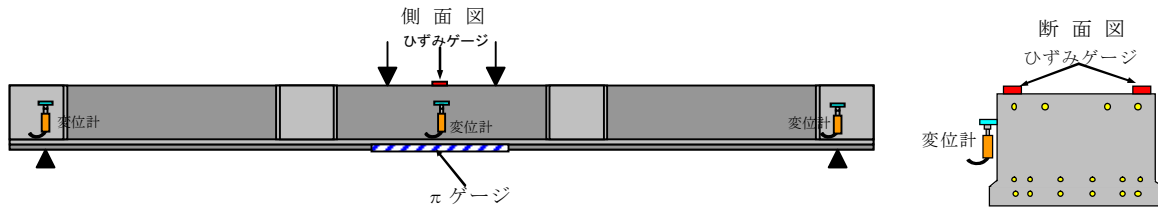


図-11 計測機器の配置

表-11 計測項目および検討項目

| 計測項目 | 検討項目 |
|---------------|--------|
| ひび割れ発生荷重 | ひび割れ耐力 |
| 終局荷重 | 破壊耐力 |
| 変位 | 桁の剛性 |
| PC 桁の表面ひずみ | 終局ひずみ |
| PC 鋼材および鉄筋ひずみ | 平面保持 |
| ひび割れ図 | ひび割れ性状 |

表-12 荷重条件

| | | |
|------------------------|-----------------------|----------|
| 荷重の種類 | 4 点曲げ荷重 | |
| 支持方法 | 単純支持 | |
| 荷重位置 | 支間中央部からそれぞれ 0.50m の位置 | |
| ひび割れ保証荷重 [※] | Pcr=103.8kN | |
| ひび割れ発生荷重 ^{※※} | HPC 桁 | FAPC 桁 |
| | 153.3 | 158.7 |
| 曲げ破壊保証荷重 [※] | Pu=286.8kN | |
| 終局荷重 ^{※※} | HPC 桁 | FAPC 桁 |
| | 323.1 | 331.0 |
| 荷重回数 | 2 回(1 回はひび割れ発生まで) | |
| 荷重ステップ | 0~200kN | 10kN ピッチ |
| | 200~ | 5kN ピッチ |

※JIS 規格であるひび割れ試験曲げモーメントおよび破壊抵抗曲げモーメントより算出。

※※供試体の実強度を基に計算。

4. 試験結果および考察

4.1 配合の検討

4.1.1 B/W と圧縮強度の関係

材齢 14 時間および 14 日における圧縮強度と結合材水比(B/W)の関係を図-12 に示す。導入時強度および設計基準強度に対する配合強度(材齢 14 時間で 40.6N/mm²，材齢 14 日で 58.0 N/mm²)をともに満足する B/W は 3.096 であり，W/B を 32%とすることで所要の強度を満足することが確認された。

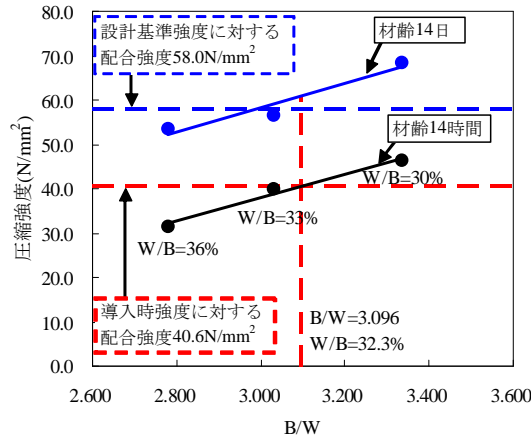


図-12 B/W と圧縮強度の関係

4.1.2 配合の決定

配合検討により決定した配合を表-13 に示す。決定した配合の W/B は 32%となった。

表-13 決定配合

| 配合 | W/B (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | |
|----|---------|-------------------------|-----|----|-----|-----|
| | | W | B | | S | G |
| | | | HC | FA | | |
| FA | 32 | 150 | 375 | 94 | 730 | 969 |

4.2 湿潤養生日数の検討

4.2.1 湿潤養生日数が強度性状に及ぼす影響

FA 配合で蒸気養生後の湿潤養生日数をパラメータとして行った圧縮強度試験の結果を図-13 に示す。図内には比較として H 配合で蒸気養生後，気中保管した試験体(H-D)と湿潤養生を 7 日行った試験体(H-D7)との強度発現もあわせて示した。蒸気養生後，気中保管した試験体(FA-D，H-D)の強度発現は，フライアッシュの有無にかかわらず，同程度となっている。FA 配合の W/B は 32%であり，H 配合(38.7%)に比べ，低いことから(表-2 参照)，強度発現が同程度となるのはフライアッシュが結合材として寄与していないためと考えられる。蒸気養生後の水分供給が十分でない場合にはポズラン反応による強度増進効果はほとんど発揮されないと推察される。一方，湿潤養生を実施した FA-D3，FA-D5 および FA-D7 に関しては FA-D に比べ，強度発現の増加が認められた。なお，早強単味の H 配合(H-D と H-D7 の比較)においても，湿潤養生による強度増加は認められるが，FA 配合の強度増加(FA-D と FA-D7 の比較)に比べ，小さくなっている。H 配合に比べ，FA 配合の強度増加が大きいのは，フライアッシュのポズラン反応によると考えられ，フライアッシュのポズラン反応には，初期の湿潤養生が重要な役割を果たしていると推察される。

材齢 28 日における FA-D 試験体(蒸気養生後，気中保管)の圧縮強度に対する FA-D3，FA-D5 および FA-D7 の圧縮強度の比を図-14 に示す。図-14 より，湿潤養生 3 日では約 15%，湿潤養生 5 日および 7 日では約 25% の圧縮強度の増加が認められた。なお，FA-D5 と FA-D7 とでは，圧縮強度比はほぼ同程度であり，湿潤養

生日数を5日以上としても強度発現はほとんど変わらないことから、湿潤養生日数は5日程度とすることが望ましいと考えられる。

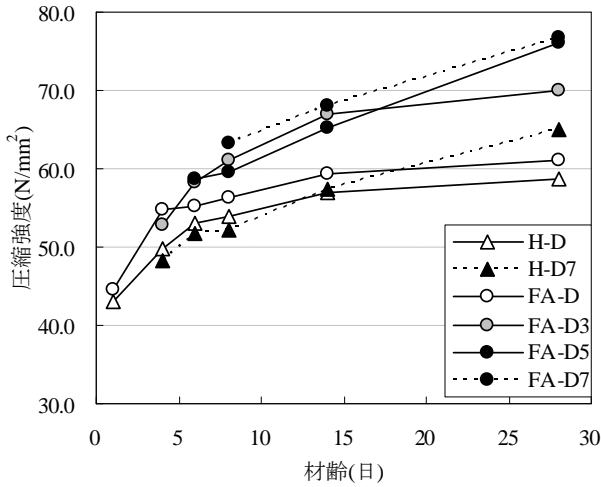


図-13 圧縮強度発現

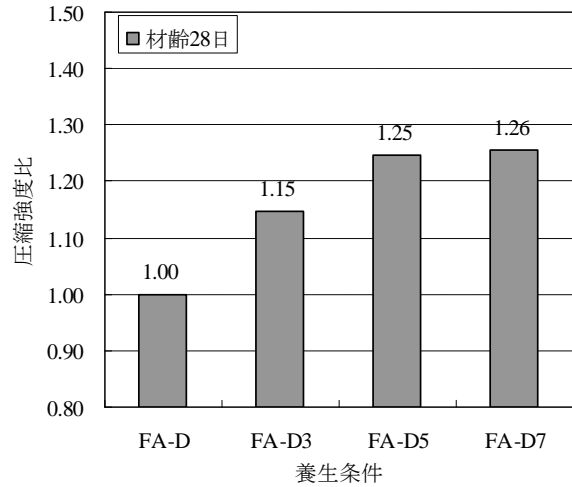


図-14 圧縮強度比(材齢 28 日)

4.2.2 湿潤養生日数が耐久性に及ぼす影響

透気係数試験の試験結果を図-15に示す。全ての試験体において品質評価は「良い」の判定であった。また、蒸気養生後に湿潤養生を行った試験体(FA-D3, FA-D5 および FA-D7)の透気係数は気中保管した試験体(FA-D)の 1/3 程度の値となっており、湿潤養生による表層部の品質の改善が確認された。このことから、透気性の観点から蒸気養生後の湿潤養生日数は3日程度とするのが望ましいと考えられる。

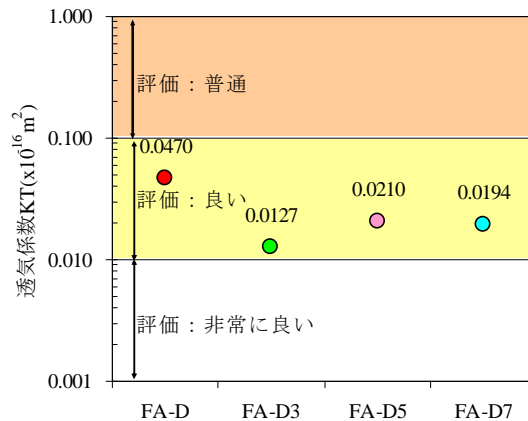


図-15 透気係数

4.2.3 湿潤養生日数がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

(1) 拘束応力試験

FA 配合および H 配合の拘束応力試験の結果を図-16に示す。ここで、拘束応力とは、コンクリートの収縮が鉄筋に拘束されることにより発生するコンクリートの引張応力度である。図-16より、FA 配合では、全ての養生条件の試験体において材齢 290 日時点で拘束応力は 1.1~1.3N/mm²の間で推移しており、拘束応力には湿潤養生日数の違いによる差異はほとんどないことがわかる。この傾向は H 配合においても同様であり、両配合の結果から拘束応力に関しては湿潤養生日数の影響はほとんどないと考えられる。なお、湿潤養生を行った試験体に関しては、材齢初期に圧縮側へ応力が移行しているが、これは、湿潤養生により試験体内部に水分が取り込まれ膨張したためと考えられる。

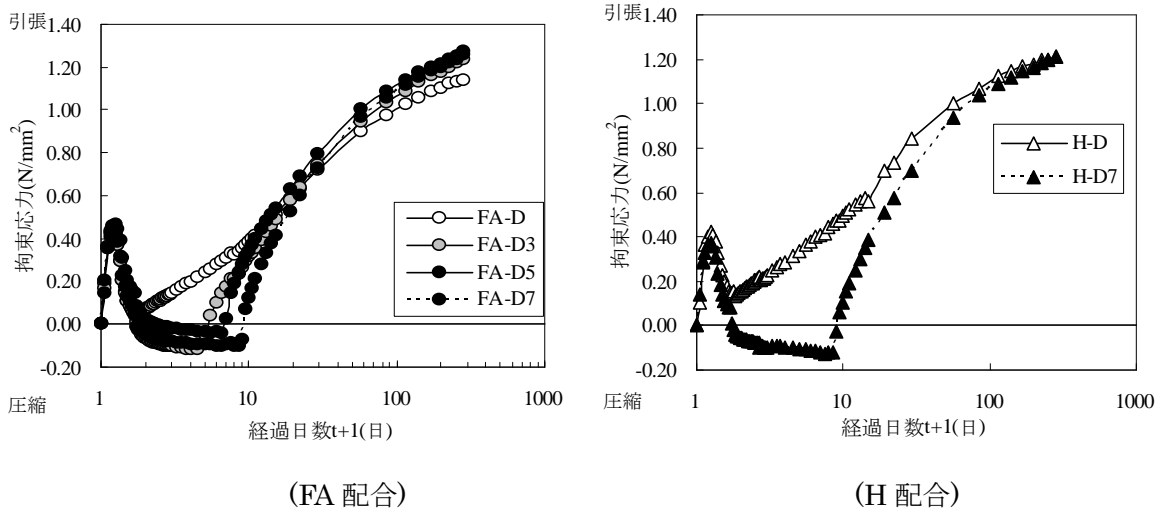


図-16 拘束応力

(2) 自己収縮試験

FA 配合および H 配合の材齢 274 日までの自己収縮ひずみを図-17 に示す。なお、図の時間軸の原点はコンクリートの打込み完了時とした。材齢 274 日における自己収縮ひずみは H-D で-101 μ 、FA-D で-141 μ 、FA-D3 で-113 μ であった。蒸気養生後、気中保管とした場合、FA 配合の自己収縮ひずみは H 配合よりも大きくなった。一方、蒸気養生後、3 日間の湿潤養生を実施した場合、FA 配合の自己収縮ひずみは H 配合とほぼ同程度になった。

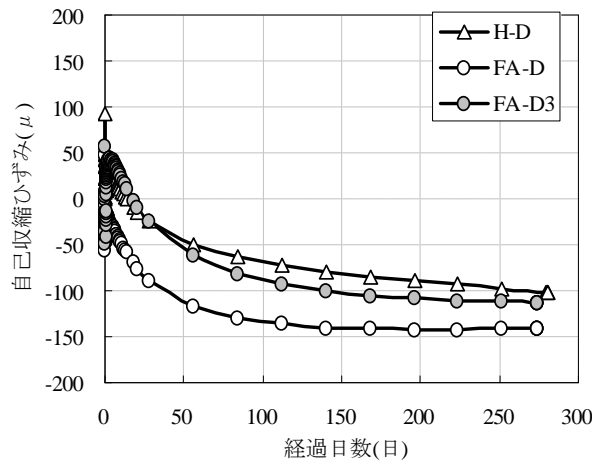


図-17 自己収縮ひずみ

(3) 乾燥収縮試験

FA 配合および H 配合の乾燥収縮ひずみを図-18 に示す。乾燥材齢 364 日における乾燥収縮ひずみは FA-D で-508 μ 、FA-D3 で-556 μ 、FA-D5 で-535 μ 、FA-D7 で-531 μ となっており、H-D で-538 μ 、H-D7 で-533 μ となった。この結果から蒸気養生後の湿潤養生日数の違いが乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は認められなかった。また、FA 配合の乾燥収縮ひずみは H 配合とほぼ同程度であることからフライアッシュの有無が乾燥収縮に及ぼす影響も認められなかった。

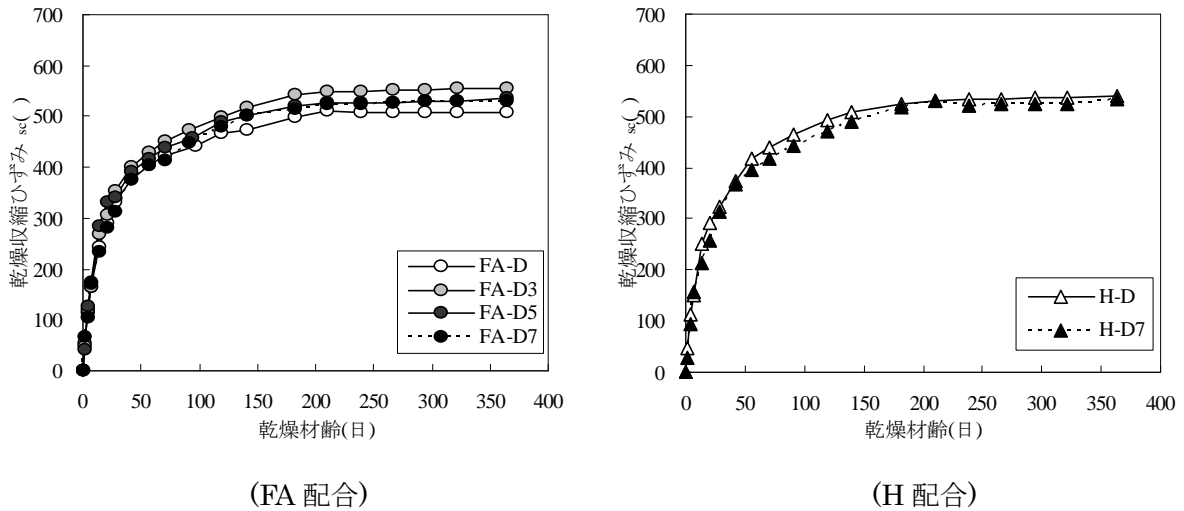


図-18 乾燥収縮ひずみ

4.3 プレストレスの損失量

4.3.1 PC 鋼材ひずみ

FAPC 桁および HPC 桁の PC 鋼材ひずみの経時変化を図-19 に示す. 図の時間軸の原点はコンクリートの打込み完了時とした. PC 鋼材ひずみの導入直後の計算値および有効プレストレスの計算値は道路橋示方書に準拠し, 桁の弾性変形, コンクリートのクリープ, 乾燥収縮などを考慮し求めた. FAPC 桁の PC 鋼材ひずみの経時変化は HPC 桁とほとんど同程度であり, 圧縮強度が同程度であれば, フライアッシュを用いた PC 桁のクリープおよび乾燥収縮によるプレストレスの損失は通常の PC 桁(早強単味)と同程度であることが確認された. また, 6 ヶ月後の PC 鋼材ひずみは有効プレストレスの計算値を上回っており, 道路橋示方書に準拠することでフライアッシュを用いた PC 桁の有効プレストレスを安全側に評価できると考えられる.

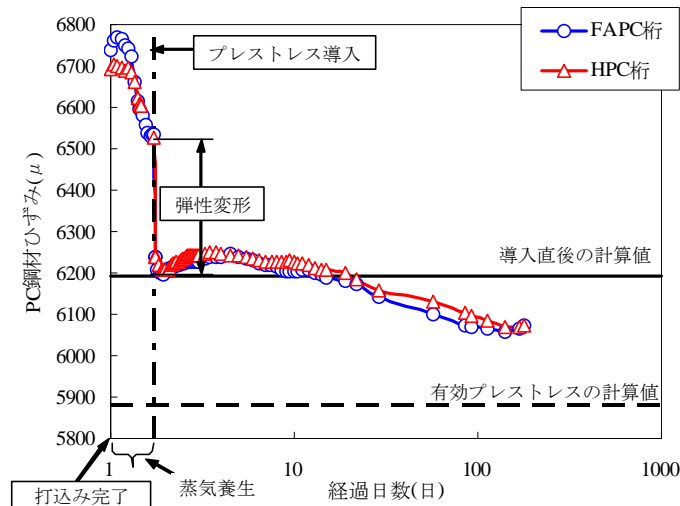


図-19 PC 鋼材ひずみの経時変化

4.4 曲げ載荷試験

4.4.1 載荷実験前の PC 桁の性状

(1) 強度特性および PC 鋼材ひずみ

載荷実験前の FAPC 桁および HPC 桁の強度特性および支間中央部最下段の PC 鋼材ひずみを表-14 に示す. 表-14 に示す圧縮強度, ヤング係数および割裂引張強度の試験を実施した材齢は 232 日である. 圧縮強度は HPC 桁で 59.8N/mm², FAPC 桁で 67.0 N/mm² であり, FAPC 桁が HPC 桁に比べ 10%程度高い結果となっ

た. これは, フライアッシュの特長であるポゾラン反応によって長期的に強度が増進したためと考えられる.

表-14 载荷実験前(材齢 232 日)の PC 桁の強度特性および PC 鋼材ひずみ

| | 単位 | FAPC 桁 | HPC 桁 |
|---------------|--------------------|--------|-------|
| 圧縮強度 | N/mm ² | 67.0 | 59.8 |
| ヤング係数 | kN/mm ² | 32.9 | 32.0 |
| 割裂引張強度 | N/mm ² | 3.49 | 3.06 |
| PC 鋼材ひずみ(最下段) | μ | 6102 | 6099 |

4.4.2 破壊までの過程

FAPC 桁および HPC 桁の荷重と変位の関係を図-20 に, ひび割れ発生荷重および終局荷重の実測値と計算値の比較を表-15 に示す. また, PC 桁の純曲げ区間の破壊状況を写真-3 に示す. ここで, 表-15 に示す規格値は JIS A 5373(AS09)に規定されているひび割れ試験曲げモーメント(294kN・m)および破壊抵抗曲げモーメント(668kN・m)に相当する荷重である. また, ひび割れ発生荷重の計算値は桁下縁の応力度がコンクリートの引張強度に達する荷重であり, 終局荷重の計算値は圧縮側コンクリートの応力ブロックを 2 次曲線と仮定して算出した破壊抵抗曲げモーメントに相当する荷重である. FAPC 桁および HPC 桁のひび割れ発生荷重はそれぞれ 147kN および 152kN であり, とともに計算値である 123kN を上回った. 終局荷重の実験値に関しても FAPC 桁が 372kN, HPC 桁が 349kN であり, 両桁ともに計算値を上回っている. したがって, フライアッシュを用いた PC 桁は早強単味の通常の PC 桁と同等の性能を有しており, 弾性理論や平面保持の仮定に基づく, 通常的设计方法により, ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力を適切に評価できると考えられる.

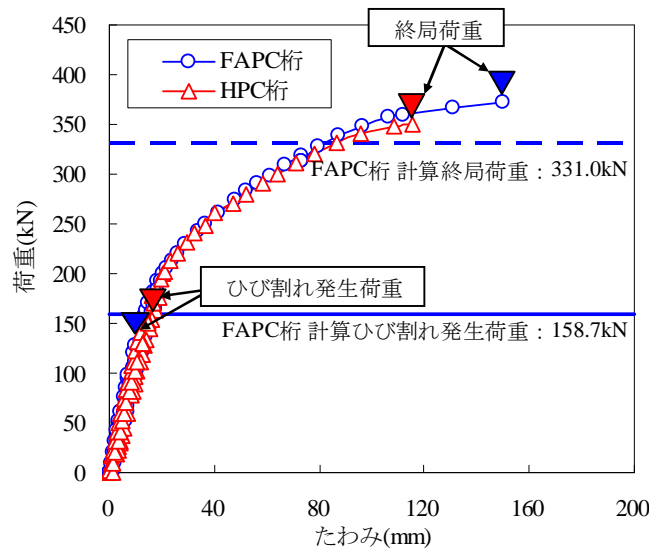
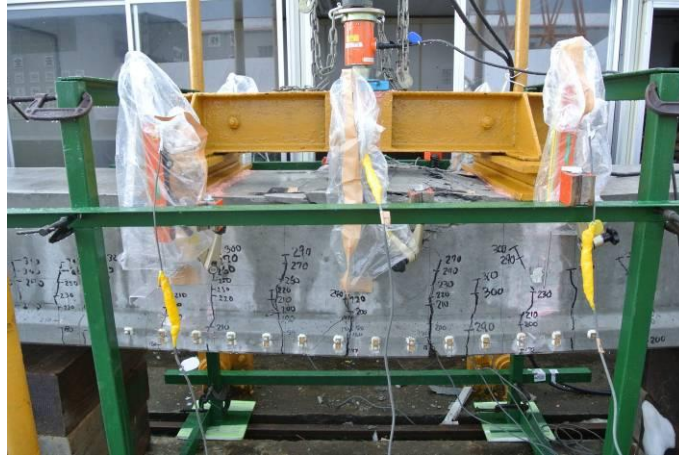


図-20 荷重と変位の関係

表-15 ひび割れ発生荷重および終局荷重の実測値と計算値の比較

| | FAPC 桁 | | HPC 桁 | | JIS A 5373 |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|------------|
| | 計算値 | 実測値 | 計算値 | 実測値 | 規格値 |
| ひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN) | 158.7 | 147.0 | 153.3 | 152.0 | 103.6 |
| 終局荷重 P_u (kN) | 331.0 | 372.0 | 323.1 | 349.0 | 286.8 |



(FAPC 桁)



(HPC 桁)

写真-3 純曲げ区間の破壊状況

4.4.3 ひび割れ性状

ひび割れ発生状況を図-21 に、プレテンション PC 桁の純曲げ区間(支間中央 1000mm 区間)におけるひび割れの分散性を表-16 に示す。表-16 のひび割れ間隔の計算値はコンクリート標準示方書のひび割れ幅の算定式である式(1)の l_{max} より求めた。純曲げ区間の最大ひび割れ幅は HPC 桁が 231mm, FAPC 桁が 226mm であり、それぞれのひび割れ間隔の計算値とほぼ一致した。

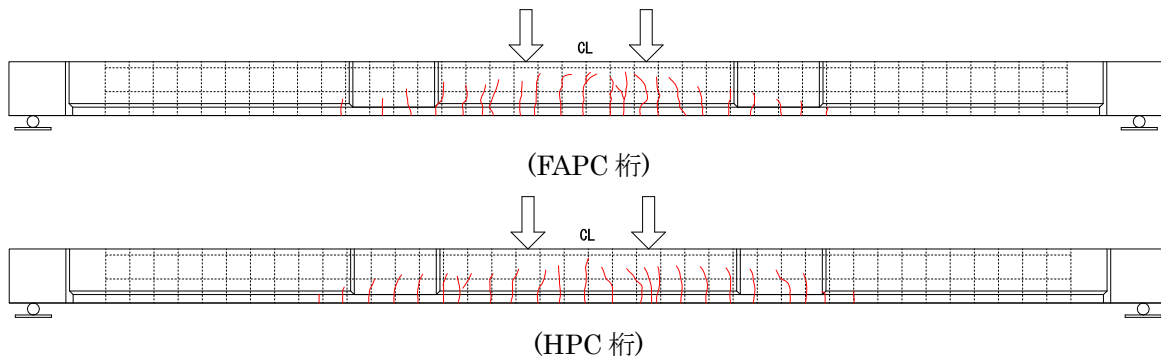


図-21 ひび割れ状況

$$w = l_{\max} \left[\frac{\sigma_{pe}}{E_p} + \varepsilon_{csd} \right] \quad (1)$$

$$l_{\max} = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\}$$

ここに、 w は曲げひび割れ幅、 k_1 は鉄筋の表面形状に関する係数、 k_2 はコンクリートの品質に関する係数、 k_3 は引張鋼材の段数に関する係数、 c はかぶり、 c_s は鋼材中心間隔、 φ は鋼材径、 σ_{pe} は鋼材応力の変化量、 E_p は鋼材の弾性係数、 ε'_{csd} はコンクリートの収縮およびクリープである。

表-16 ひび割れの分散性

| 試験桁 | ひび割れ本数 N | ひび割れ間隔 | | |
|------|-------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | | 実験値(最大) l_{max} (mm) | 実験値(平均) l_{ave} (mm) | 計算値 l_{cal} (mm) |
| FAPC | 22 | 223 | 220 | 226 |
| HPC | 24 | 231 | 212 | 230 |

FAPC 桁および HPC 桁の PC 鋼材ひずみとひび割れ幅の関係を図-22 に示す。図に示す PC 鋼材ひずみはひび割れが発生した時点をもととした増加ひずみの実測値である。曲げひび割れの計算はそれぞれの載荷直前のコンクリート強度を用いて算出した。なお、ひび割れ幅の計算値を算出する際に ε'_{csd} は無視した。FAPC 桁および HPC 桁のひび割れ幅の実測値はほぼ同程度であり、フライアッシュを用いた PC 桁のひび割れ性状は通常の PC 桁と同等であることが確認された。また、曲げひび割れ幅の実測値と計算値はよく一致しており、フライアッシュを用いたプレテンション PC 桁のひび割れ幅はコンクリート標準示方書に示される曲げひび割れ幅算定式により、適切に評価できると考えられる。

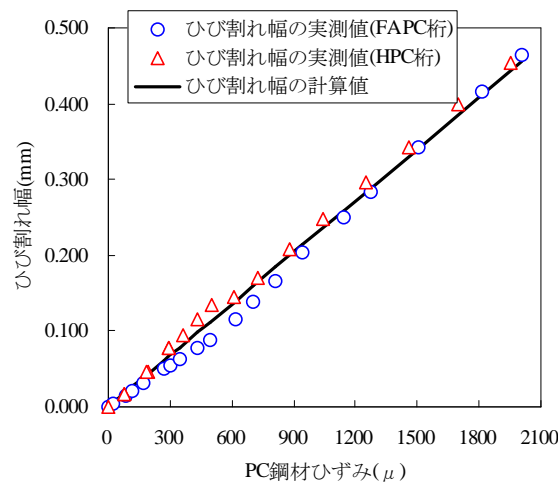


図-22 ひび割れ幅と PC 鋼材ひずみの関係

4.4.4 終局ひずみ

FAPC 桁および HPC 桁の支間中央部における桁上縁の軸方向ひずみを図-23 に示す。FAPC 桁および HPC 桁の終局ひずみはそれぞれ 2965 μ 、3131 μ であった。コンクリート標準示方書に準拠し、式(2)により終局ひずみを算出した結果、FAPC 桁および HPC 桁の終局ひずみはそれぞれ、2933 μ および 3173 μ となり、終局ひずみの実測値は計算値と近い値となった。なお、終局ひずみの算出時のコンクリートの強度は桁の実強度とした(FAPC 桁 67.0N/mm²、HPC 桁 59.8N/mm²)。

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \quad (2)$$

ここに、 ε'_{cu} は終局ひずみ、 f'_{ck} はコンクリート強度の特性値

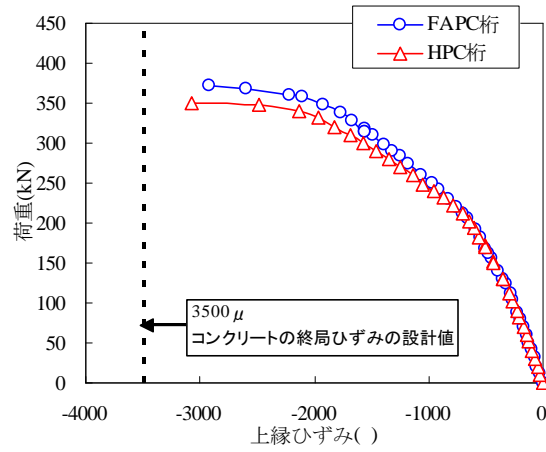


図-23 桁上縁の軸方向ひずみ

4.4.5 PC 鋼材ひずみ

FAPC 桁および HPC 桁の荷重と PC 鋼材ひずみの関係を図-24 に示す。PC 鋼材ひずみは支間中央部の最下段の PC 鋼材のものである。図-24 より、FAPC 桁および HPC 桁の PC 鋼材ひずみは載荷初期から終局までほとんど同程度であり、同様の挙動を示していることが確認された。

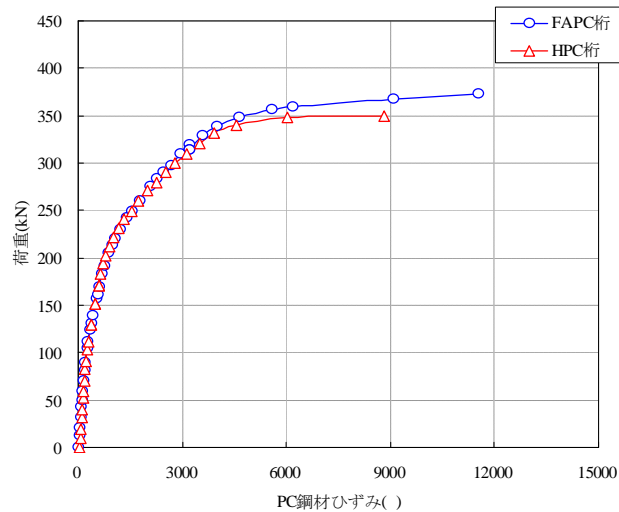


図-24 荷重と PC 鋼材ひずみの関係

5. まとめ

フライアッシュを用いたコンクリートの配合の検討、湿潤養生日数の検討、プレストレスの損失量の検討およびプレテンション PC 桁の構造特性の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) プレストレスの導入時強度(40.6N/mm²)を満足する水結合材比は 32.3%となった。
- (2) 強度発現の観点では蒸気養生後の湿潤養生日数は 5 日程度、耐久性の観点では 3 日程度とすることが望ましい。
- (3) 蒸気養生後の湿潤養生日数がひび割れ抵抗性(拘束応力、乾燥収縮および自己収縮)に及ぼす影響はほとんどなかった。
- (4) フライアッシュを用いた PC 桁のプレストレスの損失量は早強単味の通常の PC 桁と同程度となった。また、道路橋示方書に準拠して算出した有効プレストレスは安全側の評価となった。
- (5) フライアッシュを用いた PC 桁の荷重とたわみの関係は早強単味の PC 桁とほぼ一致した。また、弾性理論や平面保持の仮定に基づく、通常的设计方法により、ひび割れ発生モーメントや曲げ耐力を適切に評価できた。
- (6) フライアッシュを用いた PC 桁のひび割れ分散性は早強単味の PC 桁とほぼ同程度であった。また、コンクリート標準示方書(土木学会)に示されるひび割れ幅の算定式を用いることによりフライアッシュを用いた PC 桁のひび割れ幅を適切に評価できることが確認された。

以上のことからフライアッシュを用いた場合でも通常の PC 桁と同様の設計方法が適用できると考えられ、フライアッシュを用いたプレテンション PC 桁の実用化は十分可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 松村将充, 蓑田理希, 蔡云峰, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末を含有したプレストレスコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.803-808, 2006
- 2) 依道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレスコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp197-202, 2011
- 3) 鳥居和之: フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化—北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信—, 電力土木, No.357, p11-15, 2012
- 4) 橋本徹, 久保哲司, 参納千夏男: 産官学連携による北陸地方におけるコンクリートのフライアッシュ有効利用促進に向けた取組み, 電力土木(別刷), No.361, pp.56-60, 2012
- 5) 土木学会: コンクリートライブラリー94, フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)
- 6) R.J.Torrent, *ôA two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site*, Materials and Structures, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992