

# フライアッシュコンクリート施工マニュアル

令和 8 年 4 月

中日本高速道路株式会社

# 目 次

1章 一 般	1
1-1 適 用	1
1-2 対象構造物	2
1-3 用語の定義	3
2章 施工計画	4
2-1 コンクリート施工計画書	4
2-2 施工計画の内容	4
3章 製造設備	5
3-1 一般	5
3-2 フライアッシュの貯蔵設備	5
3-3 フライアッシュの計量	5
3-4 練り混ぜ	5
4章 材料	6
4-1 一般	6
4-2 フライアッシュ	6
4-3 セメント	6
4-4 骨 材	7
4-5 水	7
4-6 混和剤	7
5章 配合	8
5-1 一般	8
5-2 フライアッシュの置換率	8
5-3 配合設計の考え方	8
6章 フライアッシュコンクリートの施工	10
6-1 一般	10
6-2 運搬および打込み	10
6-3 仕上げ	10
6-4 養生	10
6-5 寒中時の施工	11
7章 品質管理および検査	12
8章 工場製品	12
参考文献	12
参考資料 I	13

參考資料 II .....	14
參考資料 III .....	15
參考資料 IV .....	17
參考資料 V .....	23
參考資料 VI .....	30
參考資料 VII .....	33

# 1章 一般

## 1-1 適用

本マニュアルは、中日本高速道路株式会社（以下「会社」という。）が建設するコンクリート構造物に碧南火力発電所産（以下「碧南産」という。）のフライアッシュをコンクリート用混和材として使用する場合に適用する。

### 【解説】

物質移動抵抗性の向上やアルカリシリカ反応（以下「ASR」という。）の抑制によりコンクリート構造物の耐久性向上を図るために、フライアッシュを混和材として使用することが日本各地で実施されており、特に ASR による劣化が多くみられる地域において使用実績が多い。また、学協会等からも指針類が発刊されており、今後、フライアッシュの活用がより普及していくと考えられる。

フライアッシュを混和したコンクリートを使用する場合、日本産業規格（以下「JIS」という。）に規定されているフライアッシュセメントを用いてコンクリートを製造することが一つの方法として考えられる。しかし、レディーミクストコンクリート工場では設備の関係もあり多くの種類のセメントを常に保有しておくことが困難であることから、ほとんどのレディーミクストコンクリート工場ではフライアッシュセメントは扱われておらず、フライアッシュを混和材としてセメントと置換して使用する場合が多い。混和材として使用するフライアッシュは JIS A 6201 に規定されており、その中のⅡ種が使用されるのが一般的である。しかし、フライアッシュ自体が火力発電所等から発生する副次的な材料であり、同じⅡ種でも火力発電所等の施設や使用される石炭の産地等によりその物性は異なるため、碧南産のフライアッシュをコンクリート用混和材として使用する場合のマニュアルを作成した。

フライアッシュを混和材として使用することにより、1. コンクリートの品質・強度向上、2. 塩化物イオン等の劣化因子の侵入に対する抵抗性向上、3. ASR 対策、4. 環境負荷低減効果の4点の効果が期待される。各項目の詳細は以下のとおりである。

### 1. コンクリートの品質・強度向上

フライアッシュは微細な球形をしているため、フライアッシュを混和することでフレッシュコンクリートの流動性が改善され、圧送性、充填性が向上する。また、セメント量を減らすことができるため、水和熱が低減され温度ひび割れの発生を抑制できる。さらにポズラン反応はセメントの水和反応に比べて長期にわたり続くため、コンクリートの細孔空隙の緻密化により長期強度が増進する。

### 2. 塩化物イオン等の劣化因子の侵入に対する抵抗性向上

フライアッシュをコンクリートに混和すると、フライアッシュのポズラン反応により組織が緻密となるため、塩化物イオン等の劣化因子の侵入に対する抵抗性（物質移動抵抗性）が向上することとなる。これにより、コンクリート構造物の耐久性が高くなることから、ライフサイクルコストの低減に寄与できる可能性がある。

### 3. ASR 対策

ASR は、骨材中の反応性物質とセメント中のアルカリが反応を起こす現象であり、ASR の抑制対策としては、反応性骨材の使用の制限、アルカリ総量の制限等の対策が行われてきた。しかし良質な骨材の枯渇や、施工前の試験では合格となる反応性の遅い骨材等の使用により、今後も ASR による劣化が発生する可能性がある。フライアッシュによる ASR の抑制は、セメントの一部をフライアッシュに置換することによる直接的なアルカリ量の低減とともに、ポズラン反応によるアルカリ消費

効果によりなされることが知られている。

#### 4. 環境負荷低減効果

フライアッシュは資源の有効な利用の促進に関する法律（平成3年法律第48号）に規定する指定副産物となっており、国内で産出されるフライアッシュのうち96.0%が有効利用されている。利用分野ではセメント分野が62.8%と最も多く、主にセメント原材料として使用されている一方、コンクリート混和材としての利用は0.89%にとどまる（2023年度実績<sup>1)</sup>）。フライアッシュの特性を生かせる用途での利用を拡大すれば、さらに環境負荷の低減に寄与できる。また、フライアッシュを混和材としてセメントの一部を代替することにより、セメント製造時に発生する二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の削減が期待される。本マニュアルを作成するために実施した試験では、フライアッシュをセメントの内割で20%置換した配合を使用した。この配合を用いてコンクリート製造に係るCO<sub>2</sub>排出量を試算した結果、鉄筋コンクリート構造物への適用を想定した配合では19.5%、プレストレストコンクリート構造物への適用を想定した配合では22.1%の削減となり、平均で20%以上の削減効果が確認された。以上より、セメントの一部をフライアッシュで置換することは、コンクリート製造に伴う二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）排出量の削減に有効であると考えられる。

##### 1-2 対象構造物

本マニュアルの対象とするフライアッシュを混和したコンクリートを使用できる構造物は、**コンクリート施工管理要領の表3-2「コンクリートの品質基準」**において、セメントの種類にBB（高炉セメントB種）の記載があるコンクリートの使用構造物とする。ただし、中流動覆工コンクリート（T1-4、T3-4）の使用構造物は除く。

本マニュアルは、東海地方で産出されるフライアッシュの活用について会社と株式会社JERA（以下「JERA」という。）が実施した共同研究の成果に基づき、会社の構造物に使用するコンクリートへフライアッシュを混和材として混入する場合に適用することを目的として作成したものである。共同研究においては、会社が建設するすべての種類のコンクリート構造物にフライアッシュを混和したコンクリートを使用できることを確認した。しかし、これまでの道路構造物への適用実績を踏まえ、セメントとして高炉セメントB種の使用が認められている構造物に限り、フライアッシュを混和したコンクリートを使用できるものとした。共同研究で実施した試験の内容は、巻末の参考資料IVおよびVに示すので、必要に応じて参照されたい。なお、凍結融解抵抗性の検討のために凍結融解試験を実施した結果、フライアッシュを混和した早強ポルトランドセメントコンクリートにおいて、凍結融解抵抗性が低い傾向が確認された。これは、フライアッシュに含まれる未燃炭素がAE剤を吸着し、空気量や気泡組織に影響を与えることで凍結融解抵抗性が低下する場合があるためと考えられる。したがって、フライアッシュを混和したコンクリートを使用する場合には、構造物の立地条件や部位の環境条件を考慮した上で、所要の凍結融解抵抗性が確保されるよう留意することが望ましい。

トンネルの覆工に使用される中流動コンクリートについては、フライアッシュを混和して流動性を高める配合がある。そのような配合のコンクリートは、**トンネル施工管理要領**に準拠するものとする。

### 1-3 用語の定義

本マニュアルに用いる用語は、**コンクリート施工管理要領**による他、以下のように定義する。

- (1) フライアッシュ (FA) : 火力発電所等において石炭を粉砕した微粉炭を燃焼した灰を電気集塵機により収集したもの。
- (2) フライアッシュコンクリート: フライアッシュをコンクリート混和材としてセメントと一部置換したコンクリート。
- (3) 置換率: 単位セメント量 (C) と単位フライアッシュ量 (FA) の和に対する単位フライアッシュ量の比で、質量百分率で表したもの。
- (4) 普通コンクリート: フライアッシュコンクリートのフライアッシュ置換前のコンクリート。
- (5) 水結合材比 (W/B) : フライアッシュを混和材として使用した場合に、水セメント比のセメントの単位質量を単位結合材量 ( $B=C+FA$ ) に変えたもの。
- (6) 内割 (置換) : セメントの一部をフライアッシュで質量置換することをいう。この場合、フライアッシュはコンクリート混和材として使用するため、フライアッシュも結合材とみなす。
- (7) 外割 (置換) : 細骨材の一部をフライアッシュで容積置換することをいう。この場合、フライアッシュは細骨材補充混和材として用いるもので、結合材としてみなさない。

#### 【解説】

##### (7)について

本マニュアルでは、標準的な配合を示すために内割置換を基本としたが、本マニュアルを作成するために実施した試験では、内割 20%+外割置換 (元となる配合のセメント量の 5%) とした場合についても対象としており、内割のみの場合より強度発現は優れていた。また、本マニュアルを作成するために参考とした他のマニュアル等でも内割+外割の配合を取り入れているものもある<sup>2)</sup>ため、内割のみの配合をさらに改良したい場合は内割+外割についても検討するとよい。

## 2章 施工計画

### 2-1 コンクリート施工計画書

コンクリート施工計画書は、**コンクリート施工管理要領 3-4 コンクリート施工計画書**に基づき提出しなければならない。

#### 【解説】

本マニュアルによるフライアッシュコンクリートは、通常のレディーミクストコンクリート工場で製造されるコンクリートと大きな差はないため、基本的には一般的なコンクリートと同様に扱うことができると考えてよい。そのため、**コンクリート施工管理要領**のコンクリート施工計画書に関する規定に従って施工計画書を作成してよい。ただし、本マニュアルの**3章～7章**に記載しているように、一般的なコンクリートと比べ留意しなければならない事項もあり、特に**3章製造設備**、**6章フライアッシュコンクリートの施工**に記載の内容については対策等も含めて十分な検討が必要となる場合もある。よって、フライアッシュコンクリートの施工計画については、他のコンクリートと区別して施工計画書を作成し、フライアッシュコンクリートが適切に製造および施工できるようにより具体的な手順を検討するとよい。

### 2-2 施工計画の内容

**コンクリート施工管理要領 3-4 コンクリート施工計画書**に、以下に示す内容を追加する。  
(1) フライアッシュの貯蔵設備・保管方法

#### 【解説】

##### (1)について

**3章製造設備 3-2**の解説に記載する留意点について特に検討し、具体的に記載しなければならない。

### 3章 製造設備

#### 3-1 一般

フライアッシュコンクリートの製造設備は、**コンクリート施工管理要領**に適合するものを用いなければならない。

##### 【解説】

フライアッシュコンクリートを製造するための設備は普通コンクリートと同じであるため、**コンクリート施工管理要領**によるものとした。なお、既にフライアッシュコンクリートを製造している工場では、JIS 認証を取得している場合がある。他地域のマニュアル等では JIS 認証を取得していることが望ましいとしている場合もあるため、JIS 認証の取得の有無についても参考とするとよい。

#### 3-2 フライアッシュの貯蔵設備

フライアッシュの貯蔵設備は、専用のものであることとし、貯蔵中の品質の変化や他の物質の混入がない構造のものでなければならない。

##### 【解説】

通常のレディーミクストコンクリート工場では、混和材の貯蔵設備としてのサイロ等の瓶数が限られているため、フライアッシュコンクリートの製造を目的としてフライアッシュを貯蔵するために、別の混和材と入れ替える場合がある。その際、他の物質が混入しないように留意する必要がある。

#### 3-3 フライアッシュの計量

- (1) フライアッシュの計量設備は、所定の計量誤差内で計量できるものでなければならない。
- (2) フライアッシュは、1 バッチ分ずつ質量で計量しなければならない。

##### 【解説】

フライアッシュの計量誤差は、JIS A 5308 によるものとし、1 回の計量に対して 2%以下でなければならない。また、JIS A 5308 の改定（2024）により複数の混和材の計量に累加計量をすることが可能となったが、累加計量を行う場合についても個々の材料の計量値が JIS A 5308 の計量誤差を満足しなければならない。

#### 3-4 練り混ぜ

フライアッシュコンクリートは、コンクリートが均一となるように練り混ぜなければならない。

##### 【解説】

フライアッシュコンクリートの練り混ぜを行う場合は、材料をミキサに投入する順序、練り混ぜ時間等を適切に定め、品質が均質となるようにする必要がある。なお、他地域のマニュアル等では、実機での練り混ぜ試験の結果から、本練り時の練り混ぜ時間は通常の練り混ぜ時間+30 秒を推奨しているものもある<sup>3)</sup>。

## 4章 材料

### 4-1 一般

フライアッシュコンクリートの材料は、4-2～4-6に示す内容以外は、**コンクリート施工管理要領**に適合するものを用いなければならない。

#### 【解説】

フライアッシュコンクリートの品質を確保するためには、構成する材料の品質が適切に確保されていることを確認した上で使用する必要がある。

### 4-2 フライアッシュ

フライアッシュは、JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」で規定される「フライアッシュⅡ種」でなければならない。

#### 【解説】

コンクリート用フライアッシュとしてJISで規定されるJIS A 6201には、フライアッシュⅠ種からⅣ種まで分類されているが、国内で一般的に使用されているコンクリート用フライアッシュはⅡ種であるため、本マニュアルでもフライアッシュⅡ種を用いることとした。

本マニュアルは、JERAの碧南産のフライアッシュを用いて実施した試験結果を基に作成している。フライアッシュは火力発電所等で使用される石炭の品質や産地、火力発電所等の設備、分級方法により品質が大きく異なる。このため、碧南産以外のフライアッシュの使用やⅠ種を用いる場合には、本マニュアルの他、使用するフライアッシュを産出する火力発電所等のフライアッシュを用いて事前に試験を実施し、物性を確認する必要がある。

碧南産のフライアッシュの品質について、巻末の参考資料 Iに示す。

### 4-3 セメント

フライアッシュコンクリートに用いるセメントは、JIS R 5210に適合する普通ポルトランドセメントを用いなければならない。

#### 【解説】

本マニュアルを作成するために実施した試験では、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを用いた。本マニュアルの対象とするセメントは使用できる構造物を踏まえ、普通ポルトランドセメントとした。なお、早強ポルトランドセメントを除き、その他のポルトランドセメントや高炉セメント等の混合セメントをフライアッシュで置換する場合には、本マニュアルを参考に別途試験を実施して物性を確認する必要がある。

#### 4-4 骨 材

フライアッシュコンクリートに使用する細骨材および粗骨材は、**コンクリート施工管理要領**に適合するものを用いなければならない。

##### 【解説】

本マニュアルを作成するために実施した試験では、巻末の参考資料 Ⅲに示すように、数種類の骨材を用いてフライアッシュコンクリートのフレッシュ性状と強度発現性状を確認した。その結果、骨材が異なることでそれらの性状に大きな違いは認められなかったことから、使用する骨材については普通コンクリートと同様に考えてよいこととした。なお、他地域のマニュアル等では砕石を使用する場合と川砂利を使用する場合とで単位水量の低減量が異なる（単位水量を固定した場合にはスランプの変動が異なる）とされている<sup>3)</sup>ため、参考にするとよい。

近年では**コンクリート施工管理要領**に規定されていないスラグ骨材の使用もみられるが、フライアッシュとこれらの骨材の組合せは本マニュアルの対象外とし、フライアッシュコンクリートにおいて使用する場合は別途試験を実施して物性を確認する必要がある。

#### 4-5 水

フライアッシュコンクリートに使用する水は、**コンクリート施工管理要領**に適合するものを用いなければならない。

##### 【解説】

水については本マニュアル作成時に検討していないが、**コンクリート施工管理要領**に規定された水であれば、フライアッシュコンクリートに影響を与えないと考えられる。ただし、**コンクリート施工管理要領**では、スラッジ水は設計基準強度が  $50\text{N/mm}^2$  を超えるコンクリートには使用してはならないとしており、スラッジ水がフライアッシュを混和したコンクリートの物性に及ぼす影響は確認できていない。よって、スラッジ水を使用する場合は別途試験を実施して物性を確認する必要がある。

#### 4-6 混和剤

フライアッシュコンクリートに使用する化学混和剤は、フライアッシュによる影響がない混和剤を用いなければならない。

##### 【解説】

フライアッシュコンクリートでは、レディーミクストコンクリート工場で通常使用している AE 剤を用いた場合に、フライアッシュに含まれる未燃炭素の影響により空気量の調整が困難となることがある。その場合、JSCE-D 107-2023 フライアッシュ用 AE 剤品質規格（案）に適合するフライアッシュ用 AE 剤を用いるとよい。

## 5章 配合

### 5-1 一般

フライアッシュコンクリートの配合は、コンクリートに要求される物性を満足するように定めなければならない。

#### 【解説】

フライアッシュコンクリートは、コンクリートとして要求される物性を満足する必要がある。よって、普通コンクリートに求められる強度や物質移動抵抗性を有している必要がある。ただし、フライアッシュコンクリートの特徴であるポゾラン反応は材齢 91 日以降に活発化するといわれており、材齢初期においては普通コンクリートより強度が低くなる傾向がある。よって、強度の管理材齢を普通コンクリートより長くすることで、必要以上に結合材量が多くなることを防ぐことが可能となる。一方、管理材齢を長くし過ぎると品質管理や検査の期間が延び、工期に影響が及ぶ可能性もある。よって、強度の管理材齢は普通コンクリートと同様に 28 日を標準とするが、配合や工期への影響を考慮した上で、管理材齢を 56 日としてもよい。

コンクリート施工管理要領では、コンクリートの種別毎に最小単位セメント量が定められているが、フライアッシュコンクリートを用いる場合には最小結合材量と読み替えるものとする。

### 5-2 フライアッシュの置換率

フライアッシュの置換率は、セメントの質量置換で 20%を標準とする。

#### 【解説】

本マニュアルを作成するために実施した ASR の抑制効果に関する試験では、置換率を 18%以上とすることでアルカリシリカ反応性が非常に高い安山岩骨材に対しても、抑制効果があることが確認されている（巻末の参考資料 II）。これに一定の余裕を見込み、JIS R 5213 フライアッシュセメントに規定される B 種の置換率の上限である 20%を標準とした。

ただし、材齢初期の強度確保等の施工上の理由により置換率を 20%未満にする場合であっても、使用する骨材の岩種を十分に確認した上で ASR 抑制の観点から置換率を 15%以上とするのがよい。

### 5-3 配合設計の考え方

フライアッシュコンクリートの配合は、所定の物性が得られるように適切に設計しなければならない。

配合設計にあたっては、コンクリート施工管理要領 3-8 配合 (1) 一般 2)に規定される普通コンクリートの計画配合を基に、セメントをフライアッシュにより 20%置換した配合を計画配合としてもよい。

#### 【解説】

高速道路の建設等コンクリートを大量に使用する工事や特殊な配合では、使用するコンクリートの配合について試し練りにより配合設計を行う場合もあるが、一般的にはレディーミクストコンクリート工場で既に設定されている配合で確認のための試し練りを行い、問題なければその配合で決定している場合が多い。

フライアッシュコンクリートは、会社での使用実績は少なく特殊なコンクリートとして位置付けられ、これまでフライアッシュの使用実績がないレディーミクストコンクリート工場では、配合設計のために多くの試し練りを行う必要がある。そのため、使用量が多くない場合でも配合設計に多大な労力を要すると考えられる。

本マニュアルを作成するために数種類の骨材を用いて配合試験やフレッシュ性状の試験を実施したが（巻末の参考資料 Ⅲ）、レディーミクストコンクリート工場で既に配合が設定されている普通コンクリートを基にセメントを 20%置換してフレッシュ性状を試験したところ、混和剤等の調整により所定のフレッシュ性状を確保することが可能であることが確認された。このため、フライアッシュコンクリートの配合設計にあたっては、**コンクリート施工管理要領 3-8 配合 (1) 一般 2)**に規定される普通コンクリートの計画配合を基に、セメントをフライアッシュにより 20%置換した配合を計画配合としてよいとした。

## 6章 フライアッシュコンクリートの施工

### 6-1 一般

フライアッシュコンクリートの施工は、**コンクリート施工管理要領**によらなければならない。

#### 【解説】

本マニュアルを作成するために実施したフレッシュ性状の試験では、フライアッシュコンクリートと普通コンクリートで結果に大きな差異は認められなかったため、普通コンクリートと同様に**コンクリート施工管理要領**によることとした。ただし、留意すべき事項を6-2～6-5に示すので参考にするとよい。

### 6-2 運搬および打込み

フライアッシュコンクリートの運搬やポンプ圧送では、スランプや空気量の低下に留意しなければならない。

#### 【解説】

本マニュアルを作成するために、フレッシュ性状の経時変化について試験を実施した（巻末の参考資料 IV）。その結果、フライアッシュコンクリートと普通コンクリートで大きな差異は認められなかったが、空気量の低下についてはフライアッシュコンクリートの方が若干大きかったため、実際の施工においては留意が必要である。また、ポンプ圧送性の評価として加圧ブリーディング試験を実施したところ、フライアッシュコンクリートと普通コンクリートではほぼ同じ結果となったことから、ポンプ圧送性についても普通コンクリートと同様であると考えてよい。ただし、長距離のポンプ圧送時には、圧送後のスランプ、空気量の変化を確認しておくことよい。

### 6-3 仕上げ

フライアッシュコンクリートの施工時は、仕上げのタイミングに留意しなければならない。

#### 【解説】

本マニュアルを作成するために実施したブリーディング試験の結果（巻末の参考資料 IV）、フライアッシュコンクリートは普通コンクリートと比較してブリーディング量が大きかった。一方、河川骨材を使用した場合には単位水量が低減でき<sup>3)</sup>、ブリーディングは少なくなる場合も考えられる。このため、仕上げのタイミングには留意が必要である。また、外気温が低い場合には、普通コンクリートに比べ凝結が遅延しやすいため、仕上げの時期が遅くなることに留意する必要がある。

### 6-4 養生

フライアッシュコンクリートの施工時は、湿潤養生に留意しなければならない。

#### 【解説】

**コンクリート施工管理要領**では、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの湿潤養生日数は、日平均気温約 15℃の場合は 7 日以上、日平均気温約 10℃以下の場合は 9 日以上とされてお

り、この日数をコンクリート湿潤養生日数の参考値とするのがよいとしている。本マニュアルのフライアッシュ置換率は、フライアッシュセメント B 種の上限の置換率としているため、特に湿潤養生の期間については留意が必要である。

#### 6-5 寒中時の施工

フライアッシュコンクリートを寒中に施工する場合は、運搬時間、スランプ・空気量の変動、養生に留意しなければならない。

##### 【解説】

「フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）」（コンクリートライブラリー94、土木学会）には、フライアッシュコンクリートは、普通コンクリートに比べて低温では水和反応が進行しにくく発熱速度が小さいので、打込み時の温度を普通コンクリートより幾分高くする必要があるとされている。よって、寒中にフライアッシュコンクリートを施工する場合は、普通コンクリート以上に運搬時間や運搬時のスランプや空気量の変動に留意するとともに、養生時の温度や湿潤状態の期間等に留意する必要がある。

## 7章 品質管理および検査

フライアッシュコンクリートの品質管理および検査については、**コンクリート施工管理要領**によらなければならない。

### 【解説】

フライアッシュコンクリートのフレッシュ性状や硬化性状の品質管理および検査については、普通コンクリートと同様に考えてよいため、**コンクリート施工管理要領**によるものとした。

## 8章 工場製品

フライアッシュコンクリートを工場製品に使用する場合は、本マニュアルによらず必要な試験を実施しなければならない。

### 【解説】

工場製品では、一般的に早期脱型のため初期強度が重要となり、場合によっては蒸気養生を行うことがある。本マニュアルを作成するために実施した試験において、置換率を30%とし蒸気養生を施したフライアッシュコンクリートでは、初期強度は大きくなったがその後の強度発現が極端に小さくなる場合があった（巻末の**参考資料 VI**）。また、養生方法についてもプレキャスト工場毎に異なると考えられ、標準的な養生方法を示すことが困難である。よって、本マニュアルでは工場製品については対象外とした。

---

### 参考文献

- 1) 一般財団法人石炭フロンティア機構：石炭灰全国実態調査報告書（2023年度実績）、2025.3
- 2) 沖縄県土木建築部：沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの配合及び施工指針、2019.5
- 3) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会：北陸地方におけるフライアッシュコンクリートの配合・製造および施工マニュアル（案）、2018.12

## 碧南産のフライアッシュの品質

碧南産フライアッシュは、JISA 6201（以下「JIS」という。）の規定でⅡ種に相当する品質を有するものである。参表 1-1 に碧南産フライアッシュの品質を示す。碧南火力発電所ではこれまでの現場での適用で得られた知見を踏まえ、使用性の向上を目的として、湿分、強熱減量および比表面積の品質管理上の基準値を JIS Ⅱ種の規格値より厳しく設定している。また、メチレンブルー吸着量は JIS の規定にはないものの、レディーミクストコンクリート工場における AE 剤の使用量の目安となるため、品質管理項目として設定している。2011～2020 年における毎月の試験値の平均値と変動係数から、Ⅰ種に近い高い品質を保ちつつ変動も小さいフライアッシュであるといえる。

参表 1-1 碧南産フライアッシュの品質

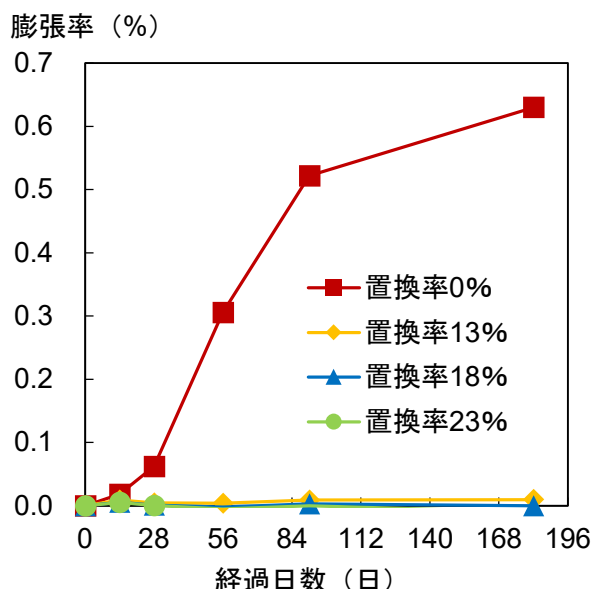
項目		JIS I 種 規格値	JIS II種 規格値	碧南産 基準値	平均値※	変動係数※
二酸化けい素含有量	(%)	45.0 以上	45.0 以上	45.0 以上	58.5	0.04
湿分	(%)	1.0 以下	1.0 以下	0.5 以下	0.1	0.39
強熱減量	(%)	3.0 以下	5.0 以下	3.5 以下	2.1	0.19
密度	(g/cm <sup>3</sup> )	1.95 以上	1.95 以上	1.95 以上	2.29	0.01
粉末度	45μm ふるい残分 (%)	10 以下	40 以下	40 以下	11	0.40
	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	5000 以上	2500 以上	3500±450	3633	0.04
フロー値比		105 以上	95 以上	95 以上	107	0.02
活性度指数 (%)	材齢 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	85	0.03
	材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	101	0.03
メチレンブルー吸着量	(mg/g)	-	-	0.8 以下	0.30	0.19

※2011～2020 年における毎月の試験値の平均値と変動係数

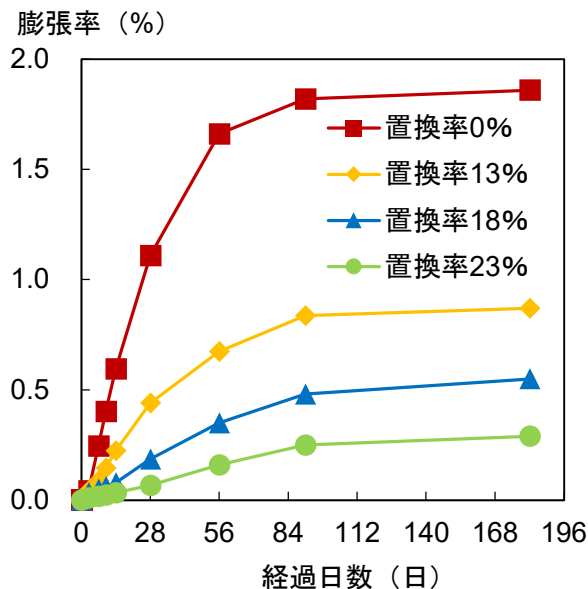
フライアッシュコンクリートの ASR 抑制効果

フライアッシュの置換率の違いが ASR の抑制効果に及ぼす影響を確認するために、フライアッシュの置換率を 0%、13%、18%、23%として、JISA 1146 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）、ASTM C 1260 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)および TI-B 51 Prøvningsmetode Sands alkalikiselreaktivitet（通称デンマーク法）に従って試験を実施した。試験には骨材としては常願寺川産細骨材を用い、セメントはアルカリ（R<sub>2</sub>O）量=0.51%の普通ポルトランドセメントを用いた。促進試験は JISA 1146 および ASTM C 1260 は 26 週まで、デンマーク法は 13 週まで実施した。

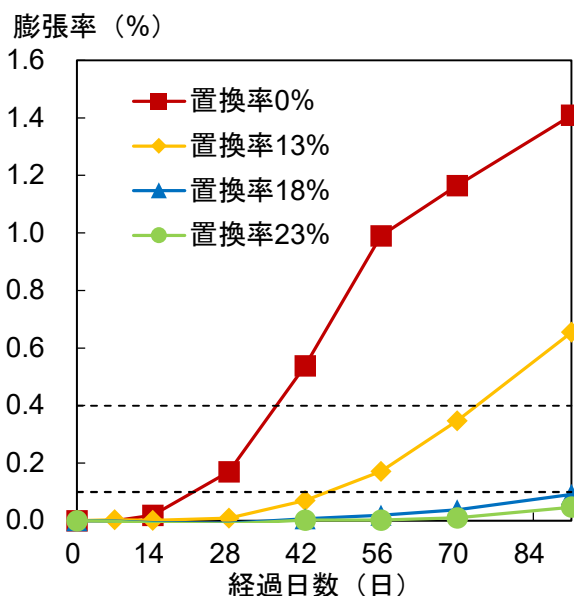
試験の結果を参 図 2-1~2-3 に示す。JISA 1146 では置換率 13%以上では膨張量はほぼ 0%で差は見られなかったが、ASTM C 1260 では置換率が高いほど膨張量が小さい結果であった。デンマーク法では、置換率 18%および 23%で 13 週の膨張率が 0.1%未満で無害と判定された。



参 図 2-1 JISA 1146 試験結果



参 図 2-2 ASTM C 1260 試験結果



参 図 2-3 デンマーク法試験結果

## 骨材の違いがフライアッシュコンクリートのフレッシュ性状、強度に与える影響

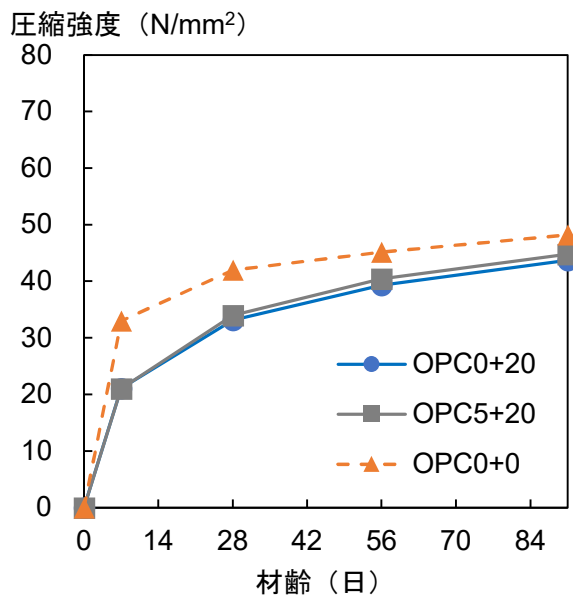
骨材の違いがセメントをフライアッシュで20%置換したコンクリートのフレッシュ性状、強度に与える影響を確認するために、レディーミクストコンクリート工場で使用されている材料、配合を基に、AE剤以外の配合は変えずにセメントのみフライアッシュに置換したコンクリートの性状を確認した。

フライアッシュの置換は、レディーミクストコンクリート工場で使用されている普通ポルトランドセメントを使用した30-12-20(25)(N)をOPC0+0とし、セメントの重量比で20%をフライアッシュで置換した配合をOPC0+20、さらに外割で細骨材をフライアッシュで置換(OPC0+0のセメント量の5%)した配合をOPC5+20とする。なお、フライアッシュの比重はセメントより小さいため、結合材のかさが増加する分は細骨材で調整した。また、空気量はAE剤により所定の範囲に入るように調整した。

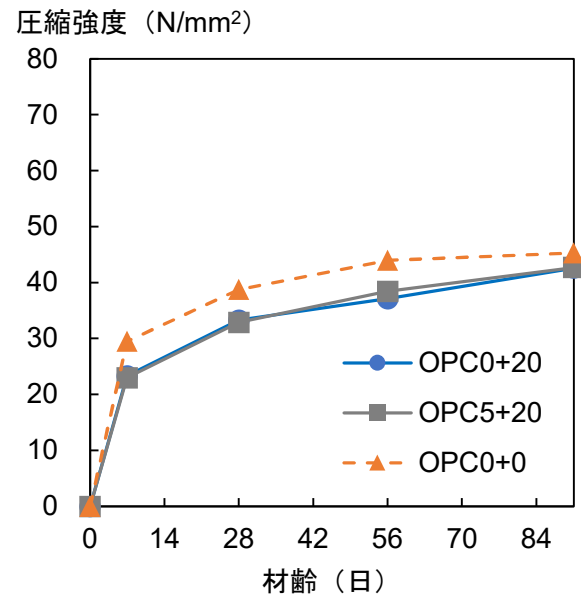
各レディーミクストコンクリート工場で使用した骨材とスランプ・空気量の結果を参表3-1に、強度試験の結果を参図3-1に示す。いずれの骨材についても、フライアッシュの混和によるスランプ、空気量および強度発現の変化の傾向はおおむね類似しており、骨材の違いによるフライアッシュ混和の影響に顕著な差は認められなかった。

参表3-1 レディーミクストコンクリート工場での使用骨材およびスランプ・空気量

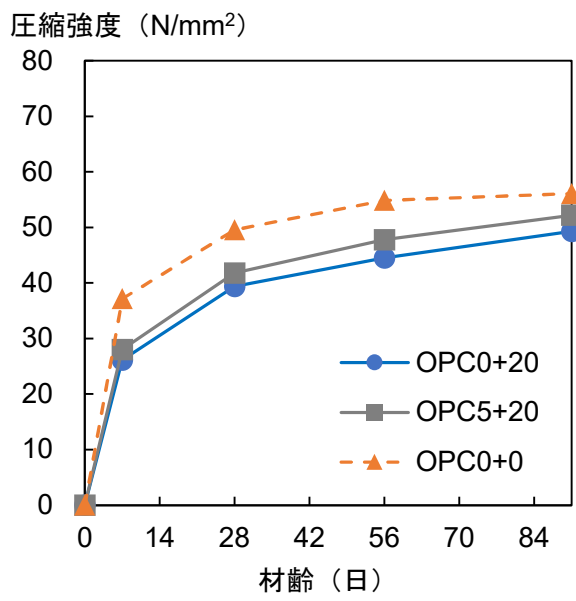
	A工場		B工場		C工場	
	山砂(55%)	砕砂(45%)	山砂		川砂(60%)	砕砂(40%)
細骨材	砕石		砕石		川砂利(60%)	砕石(40%)
粗骨材	砕石		砕石		川砂利(60%)	砕石(40%)
配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
OPC0+0	14.5	4.1	14.0	4.5	14.0	4.7
OPC0+20	18.0	4.8	15.5	4.6	17.5	5.4
OPC5+20	18.0	4.8	16.0	4.5	17.5	4.5



(1) A工場



(2) B工場



(3) C工場

参 図 3-1 強度試験結果

フライアッシュコンクリートのフレッシュ性状

フライアッシュコンクリートのフレッシュ性状を確認するために、フライアッシュコンクリートと普通コンクリートについて、スランプ・空気量の経時変化の検討、ブリーディング試験、凝結試験、加圧ブリーディング試験および断熱温度上昇を実施し比較した。

(1) スランプ・空気量の経時変化

スランプ・空気量の経時変化は、コンクリートの練り混ぜ終了直後、15分後、30分後、45分後、60分後にスランプ・空気量を測定し、確認した。コンクリートは静置状態とし、試験直前に切り返しを行った後、スランプ試験および空気量試験を実施した。A1-4相当の配合を参表4-1に、P3-2相当の配合を参表4-2に示す。それぞれのスランプの経時変化を参図4-1に、空気量の経時変化を参図4-2に示す。

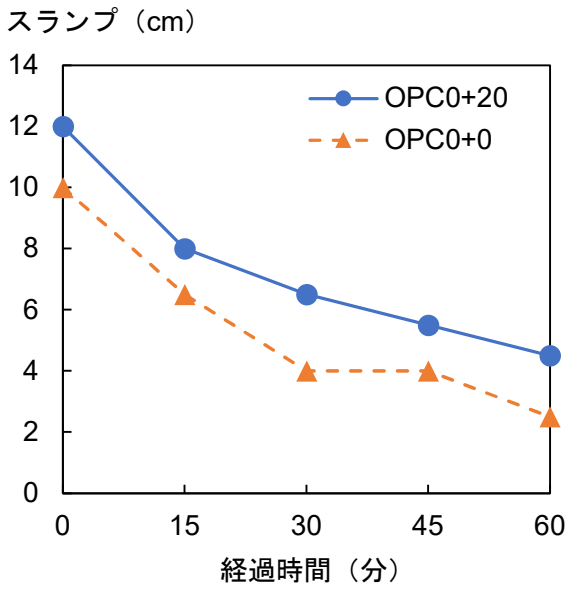
スランプはすべての配合で15分後に基準値下限の9.5cm（基準値12±2.5cm）を下回ったが、スランプ低下の傾向はフライアッシュ混和の有無によらずほぼ同様であった。空気量はA1-4相当およびP3-2相当のいずれの配合についてもフライアッシュを混和した方がやや大きく低下する傾向であったが、基準値下限の3.0%には収まった。

参表4-1 スランプ・空気量の経時変化の測定に供したA1-4相当の配合

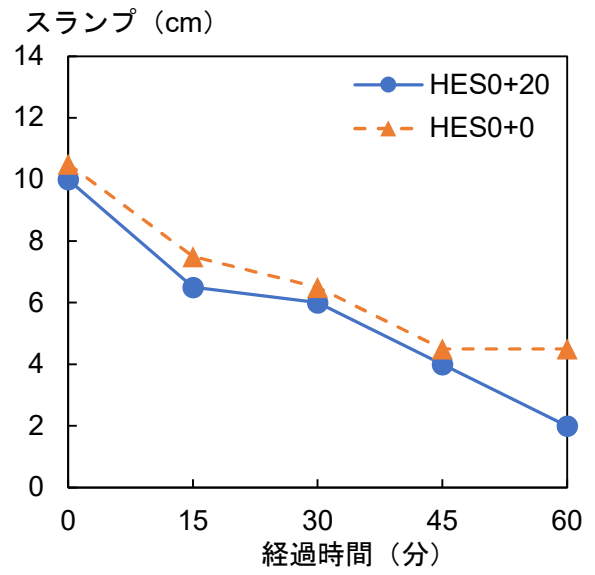
種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
OPC0+20	47.8	45.2	158	265	66	816	1000	B×0.8%	1A
OPC0+0	47.8	45.2	159	333	0	824	1010	B×0.8%	0.5A

参表4-2 スランプ・空気量の経時変化の測定に供したP3-2相当の配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
HES0+20	44	45.7	154	280	70	822	987	B×0.9%	0.5A
HES0+0	44	45.7	160	364	0	819	985	B×0.9%	2A

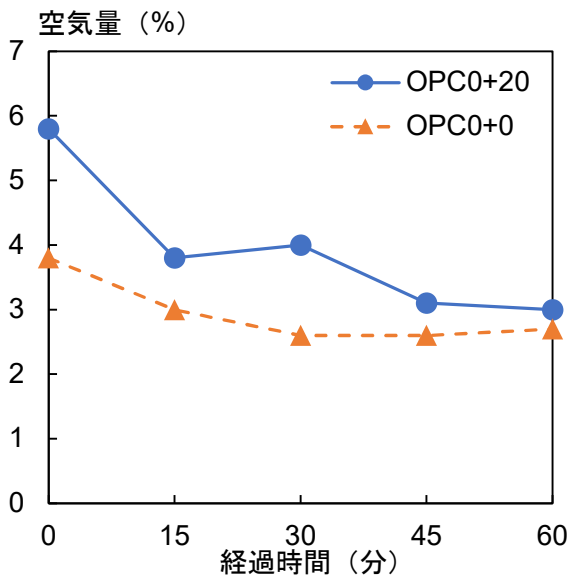


(1) A1-4 相当の配合

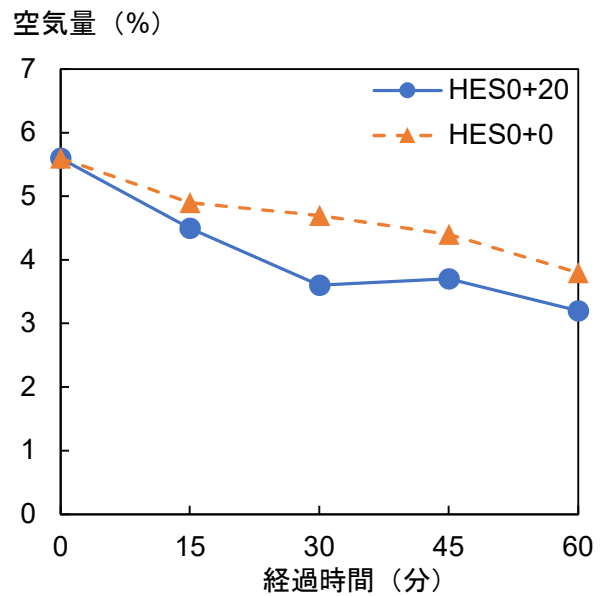


(2) P3-2 相当の配合

参 図 4-1 スランプの経時変化



(1) A1-4 相当の配合



(2) P3-2 相当の配合

参 図 4-2 空気量の経時変化

## (2) ブリーディング試験結果

ブリーディング試験は、JIS A 1123 コンクリートのブリーディング試験方法に従って試験を実施した。試験に用いた A1-4 相当の配合を参 表 4-3 に、P3-2 相当の配合を参 表 4-4 に示す。

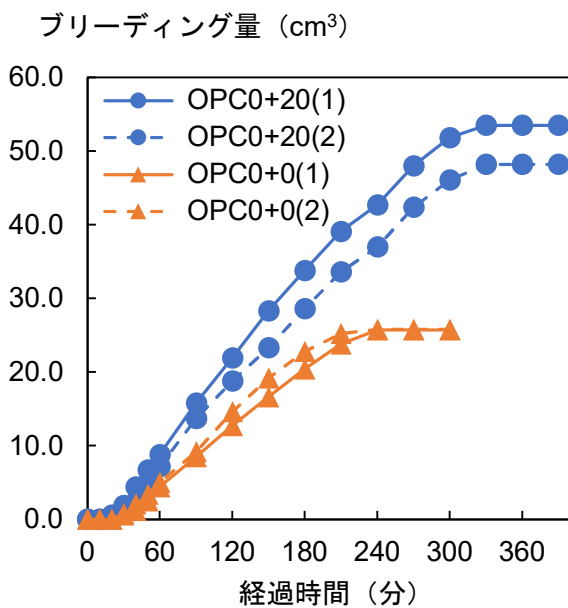
ブリーディング試験結果を参 図 4-3 に示す。セメントをフライアッシュに置換することによりブリーディングは増加する傾向となるといえる。

参 表 4-3 ブリーディング試験に用いた A1-4 相当の配合

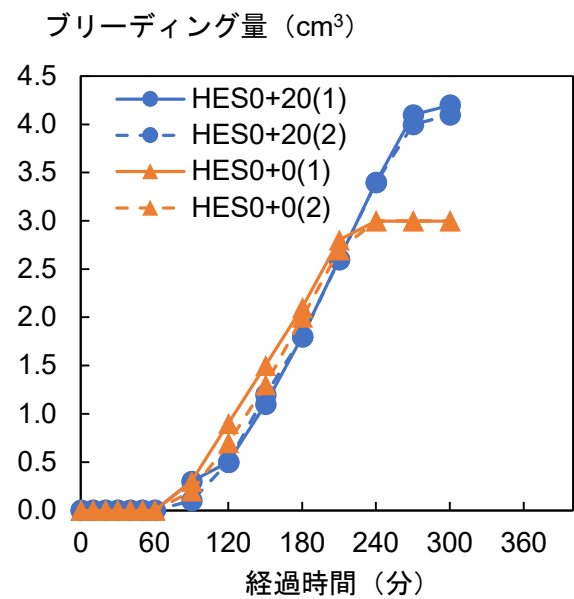
種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
OPC0+20	47.8	45.2	158	265	66	816	1000	B×0.8%	0.2A
OPC0+0	47.8	45.2	159	333	0	824	1010	B×0.8%	0.5A

参 表 4-4 ブリーディング試験に用いた P3-2 相当の配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
HES0+20	44	45.7	154	280	70	822	987	B×0.9%	0.5A
HES0+0	44	45.7	160	364	0	819	985	B×0.9%	2A



(1) A1-4 相当の配合



(2) P3-2 相当の配合

参 図 4-3 ブリーディング試験結果

### (3) 凝結時間試験結果

凝結時間試験は、JIS A 1147 コンクリートの凝結時間試験方法に従って実施した。試験に用いた A1-4 相当の OPC0+20 および OPC0+0 の配合、並びに P3-2 相当の HES0+20 および HES0+0 の配合は参表 4-3、4-4 に示すものと同様である。

凝結時間試験結果を参表 4-5 に示す。結合材の 20%をフライアッシュで置換することにより、凝結時間はわずかに伸びるが、その差は比較的小さいことが確認された。

参表 4-5 凝結試験結果

種別	OPC0+20	OPC0+0	HES0+20	HES0+0
始発 (h:mm)	7:09	6:57	6:15	5:36
終結 (h:mm)	9:35	9:09	7:50	7:05

### (4) 加圧ブリーディング試験結果

ポンプ圧送性を検討するために、JSCE-F 502 に従って加圧ブリーディング試験を実施した。試験に用いた A1-4 相当の配合を参表 4-6 に、P3-2 相当の配合を参表 4-7 に示す。

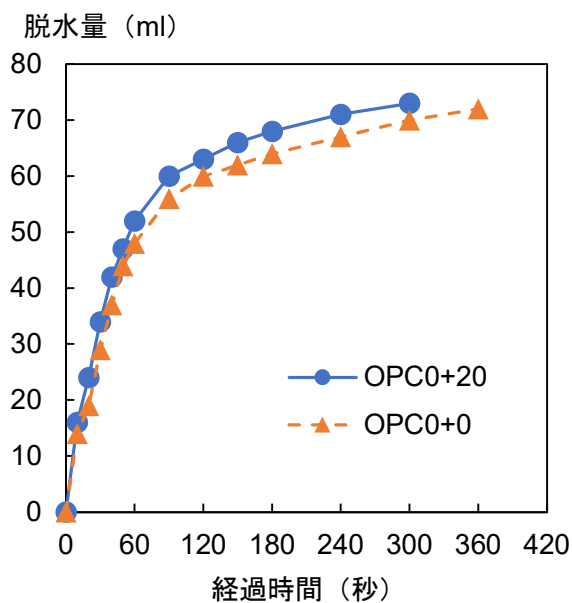
加圧ブリーディング試験結果を参図 4-4 に示す。いずれの配合についてもフライアッシュ混和の有無によらず、土木学会「コンクリートのポンプ施工指針」に示される標準曲線の範囲に収まったことから、ポンプ圧送性は良好であるといえる。

参表 4-6 加圧ブリーディング試験に用いた A1-4 相当の配合

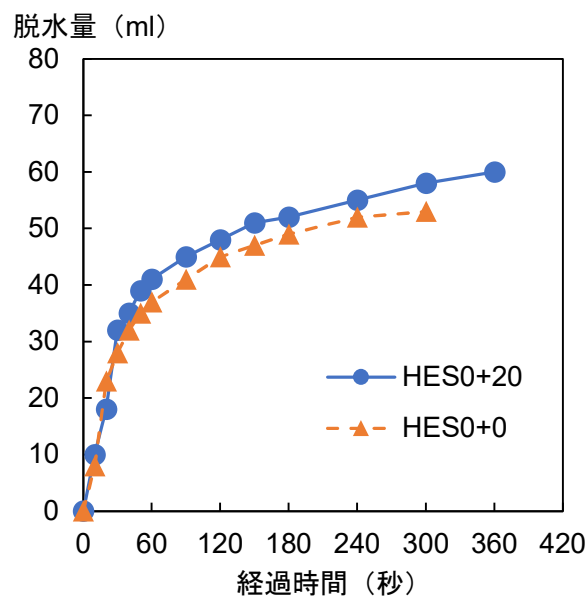
種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
OPC0+20	47.8	45.2	158	265	66	816	1000	B×0.8%	0.15A
OPC0+0	47.8	45.2	159	333	0	824	1010	B×0.8%	0.3A

参表 4-7 加圧ブリーディング試験に用いた P3-2 相当の配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
HES0+20	44.0	45.7	158	265	66	816	1000	B×0.8%	0.15A
HES0+0	44.0	45.7	159	333	0	824	1010	B×0.8%	0.3A



(1) A1-4 相当の配合



(2) P3-2 相当の配合

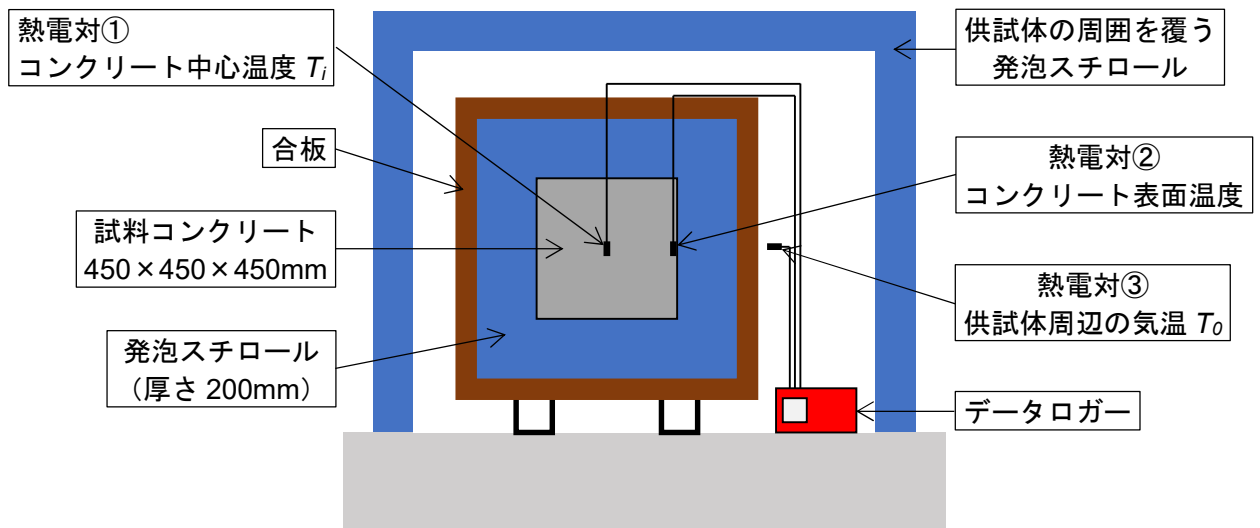
参 図 4-4 加圧ブリーディング試験結果

### (5) 断熱温度上昇

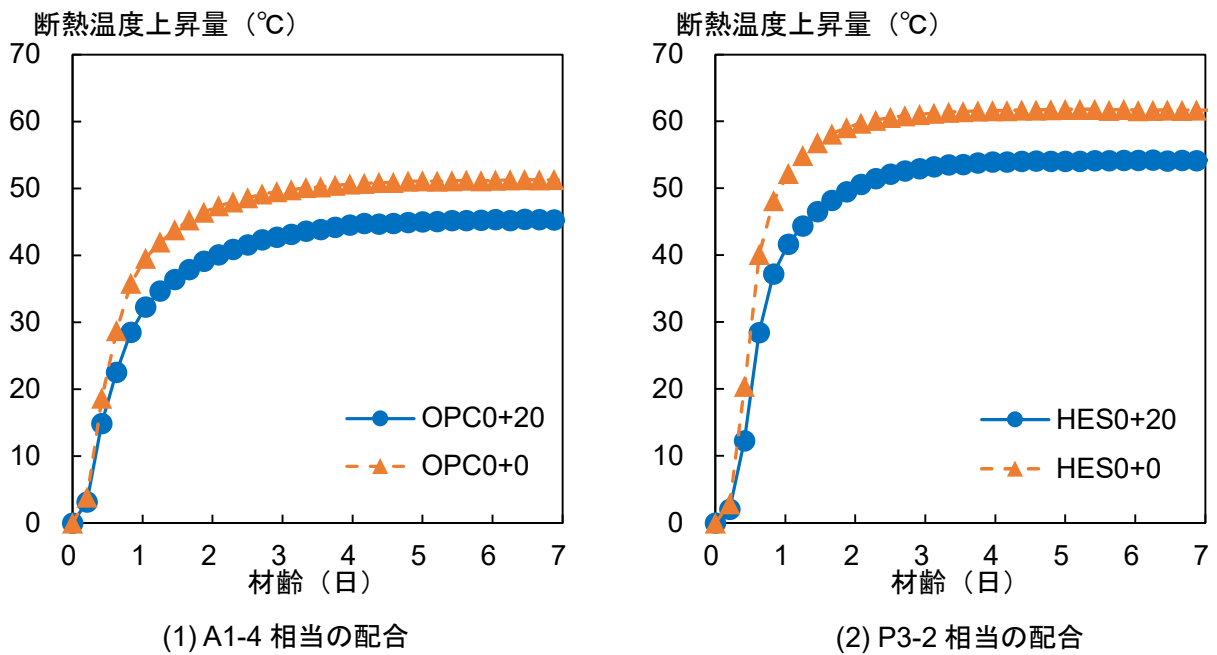
既往の研究<sup>1)</sup>で提案された簡易断熱試験方法と推定方法により、断熱温度上昇を検討した。試験は、住宅建材の断熱材として市販されている発泡スチロールを用いて厚さ 200mm の立方体保温型枠を製作し(内径寸法 450×450×450mm)、保温型枠外面を合板で補強・断熱した上でコンクリートを打込み、コンクリートの中心および表面の温度履歴を熱電対で測定することにより実施した。試験装置を参 図 4-5 に示す。試験に用いた A1-4 相当の OPC0+20 および OPC0+0 の配合、並びに P3-2 相当の HES0+20 および HES0+0 の配合は参 表 4-3、4-4 に示すものと同様で、試験は 20°C の恒温室内で実施した。

断熱温度上昇量は、コンクリートの中心温度  $T_i$  と環境温度(供試体周辺の気温)  $T_0$  との温度差に応じた降下温度を、コンクリートの中心温度に随時加算して推定した。

推定した断熱温度上昇量を参 図 4-6 に示す。いずれの配合についてもフライアッシュを混和した方が断熱温度上昇量は小さくなった。また、フライアッシュ混和なしの A1-4 相当の配合とフライアッシュ混和ありの P3-2 相当の配合の断熱温度上昇量が同程度となった。現在、支保工を用いて架設する PC 橋では、温度応力によるひび割れ発生防止の観点から、**コンクリート施工管理要領**に規定される早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートではなく、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを使用するのが一般的である。しかし、上述の試験結果から、早強ポルトランドセメントを使用した場合でも、フライアッシュを混和することで温度応力によるひび割れリスクは普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同等まで低減されることが確認された。したがって、支保工架設の PC 橋においても、フライアッシュを混和する場合は早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートを使用して問題ないと考えられる。



参 図 4-5 簡易断熱試験装置



参 図 4-6 断熱温度上昇量

参考文献

- 1) 吉武勇・中村秀明・谷本俊夫・浜田純夫：現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案、土木学会論文集、No.606、pp.103-110、1998.11

フライアッシュコンクリートの硬化後の性状

フライアッシュコンクリートの硬化後の性状を確認するために、フライアッシュコンクリートと普通コンクリートについて、強度発現、中性化抵抗性、水分浸透抵抗性、塩化物イオン浸入抵抗性、凍結融解抵抗性、収縮、クリープおよびコンクリートのアルカリシリカ反応性の試験を実施し比較した。

(1) 強度発現

A1-4 相当の配合として普通ポルトランドセメントをフライアッシュと置換しない OPC0+0、セメントをフライアッシュで 20%置換した OPC0+20、セメントをフライアッシュで 20%置換し更に 5%を細骨材と置換した OPC5+20、P3-2 相当の配合として早強ポルトランドセメントをフライアッシュと置換しない HES0+0、セメントをフライアッシュで 20%置換した HES0+20、セメントをフライアッシュで 25%置換した HES0+25 について強度発現試験を行った。試験に用いた配合を表 5-1、5-2 に示す。試験の結果を参 図 5-1 に示す。

A1-4 相当と P3-2 相当のいずれの配合についてもフライアッシュを混和した方が強度発現は遅かったが、材齢 28 日で設計基準強度 (A1-4 相当の配合 : 30N/mm<sup>2</sup>、P3-2 相当の配合 : 36N/mm<sup>2</sup>) を上回る圧縮強度が発現した。A1-4 相当の配合では材齢 28 日以降の OPC0+20・OPC5+20 の強度増加が OPC0+0 よりやや速くなったが、P3-2 相当の配合では試験期間を通して HES0+20・HES0+25 と HES0+0 でほぼ同様な強度増加の傾向であった。

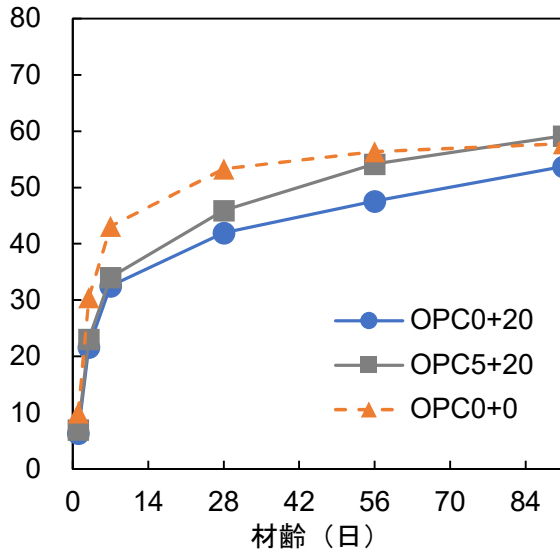
参 表 5-1 強度発現試験に用いた A1-4 相当の配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
OPC0+20	47.8	45.2	158	265	66	816	1000	B×0.8%	1A
OPC5+20	47.8	45.2	158	265	82	797	1000	B×0.8%	1A
OPC0+0	47.8	45.2	165	345	0	812	995	B×0.8%	1A

参 表 5-2 強度発現試験に用いた P3-2 相当の配合

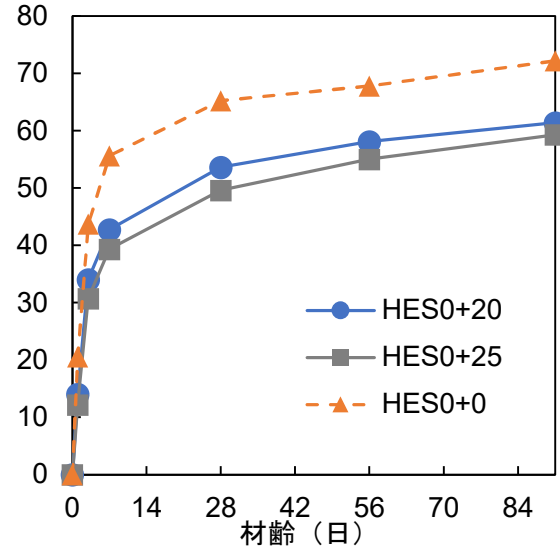
種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
HES0+20	44.0	45.7	154	280	70	822	987	B×0.9%	0.5A
HES0+25	44.0	45.7	150	256	85	828	995	B×0.9%	0.5A
HES0+0	44.0	45.7	160	364	0	819	985	B×0.9%	3A

圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)



(1) A1-4 相当の配合

圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)



(2) P3-2 相当の配合

参 図 5-1 強度発現試験結果

## (2) 中性化抵抗性

中性化抵抗性は、JIS A 1153 に従って促進中性化試験を行うことにより検討した。A1-4 相当の配合として普通ポルトランドセメントをフライアッシュと置換しない OPC0+0 とセメントをフライアッシュで 20%置換した OPC0+20、P3-2 相当の配合としては早強セメントをフライアッシュと置換しない HES0+0 とセメントをフライアッシュで 20%置換した HES0+20 で試験を行った。供試体は、打設した翌日に脱型し、材齢 91 日まで水中養生、その後、28 日間乾燥状態 (20±3°C、60±5%RH) で保管したものをを用いた。試験に用いた配合を参 表 5-3、5-4 に示す。

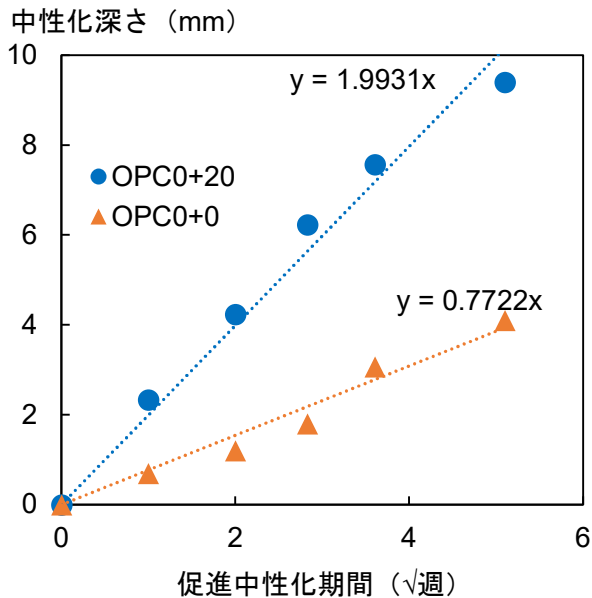
試験の結果を参 図 5-2 に示す。フライアッシュで置換した配合は、置換しない配合より中性化速度係数が大きくなり中性化抵抗性は低くなった。しかし、促進中性化試験から得られた中性化速度係数を、既往の研究<sup>1)</sup>で提案されている式を用いて大気中の二酸化炭素濃度 0.04%における中性化速度係数に換算し、100 年間の中性化深さを求めたところ、すべての配合で適用が想定される構造物の鋼材腐食発生限界深さを下回る結果となった。参 表 5-5 にその結果を示す。なお、適用が想定される構造物として、A1-4 相当の配合は壁高欄(かぶり 70mm)、P3-2 相当の配合は PC 桁(かぶり 45mm)を設定した。

参 表 5-3 促進中性化試験に用いた A1-4 相当の配合

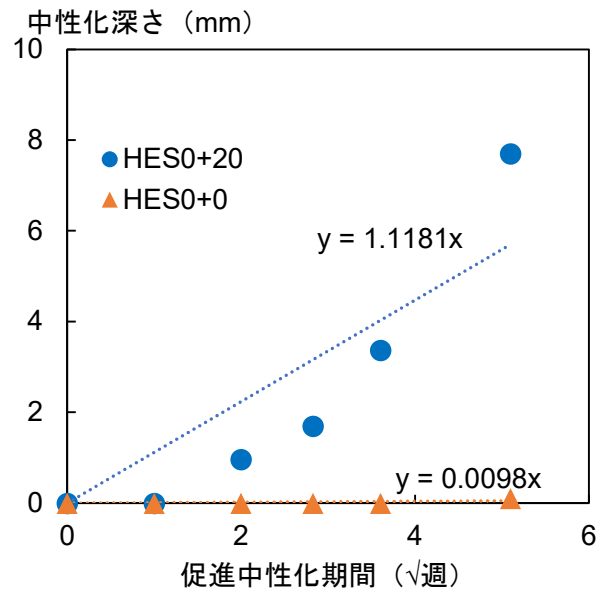
種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
OPC0+20	47.8	45.2	158	265	66	816	1000	B×0.85%	1.5A
OPC0+0	47.8	45.2	165	345	0	812	995	B×0.85%	1.0A

参 表 5-4 促進中性化試験に用いた P3-2 相当の配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
HES0+20	44.0	45.7	154	280	70	822	987	B×0.9%	0.2A
HES0+0	44.0	45.7	160	364	0	819	985	B×0.9%	2A



(1) A1-4 相当の配合



(2) P3-2 相当の配合

参 図 5-2 促進中性化試験結果

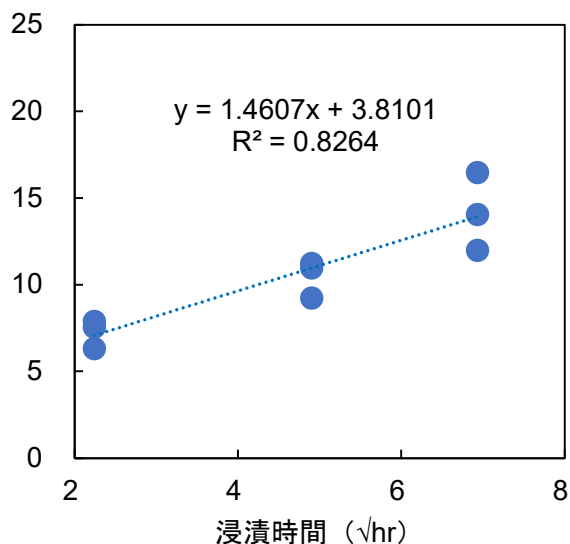
参 表 5-5 中性化に伴う鋼材腐食に対する照査の結果

配合	中性化速度係数 (mm/√年)		中性化深さ (mm)	鋼材腐食発生限界深さ (mm)	判定
	実験値	換算値			
OPC0+20	14.4	1.29	26.7	50	OK
OPC0+0	5.56	0.50	10.3	50	OK
HES0+20	8.06	0.72	15.0	25	OK
HES0+0	0.07	0.01	0.13	25	OK

### (3) 水分浸透抵抗性

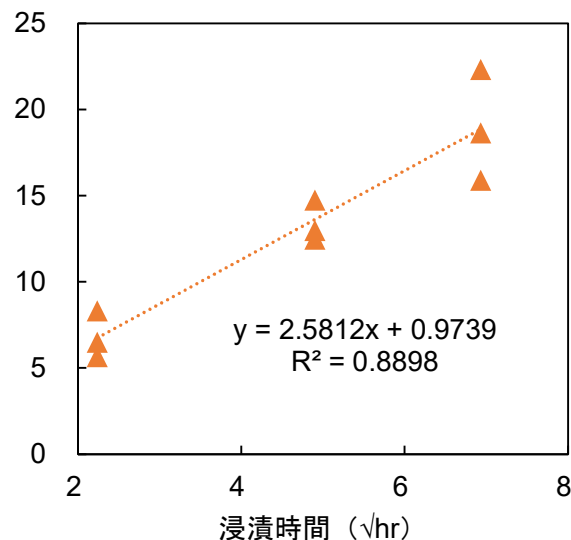
水分浸透抵抗性は、JSCE-G 582 短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法に従って試験を行うことにより検討した。試験に用いた A1-4 相当の OPC0+20 および OPC0+0 の配合、並びに P3-2 相当の HES0+20 および HES0+0 の配合は参 表 5-3、5-4 に示すものと同様で、供試体は 13 週間水中養生した後に、切断して温度 20°C で湿度 60%の恒温恒湿室で 13 週間乾燥させたものを用いた。試験の結果を参 図 5-3 に示す。フライアッシュの混和により、A1-4 相当の配合では水分浸透速度係数は低下し、水分浸透深さも浸せき時間が長いほど低下した。また、P3-2 相当の配合では水分浸透速度係数はほぼ変化しなかったが、水分浸透深さは浸せき時間によらず若干低下した。

水分浸透深さ (mm)



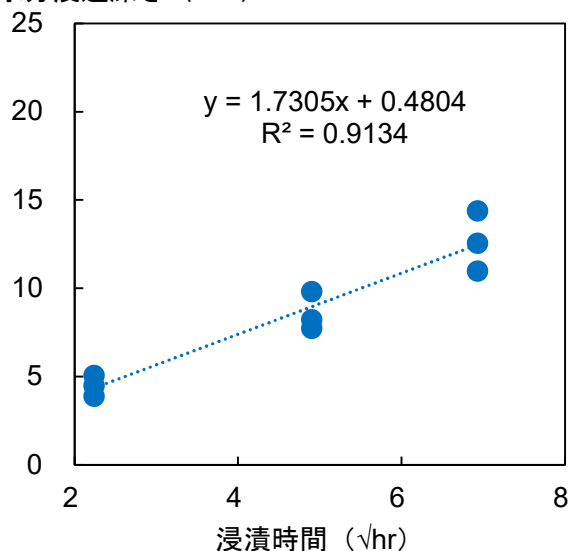
(1) A1-4 相当の配合 (OPC0+20)

水分浸透深さ (mm)



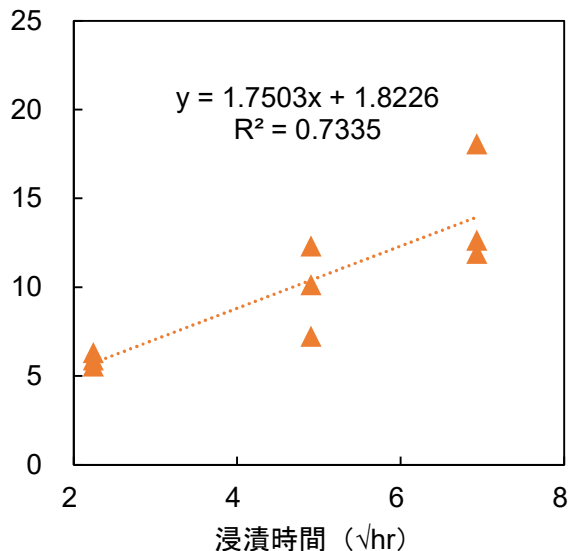
(2) A1-4 相当の配合 (OPC0+0)

水分浸透深さ (mm)



(3) P3-2 相当の配合 (HES0+20)

水分浸透深さ (mm)



(4) P3-2 相当の配合 (HES0+0)

参 図 5-3 水分浸透速度係数試験結果

#### (4) 塩化物イオン侵入抵抗性

塩化物イオン侵入抵抗性は、JSCE-G 571 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法に従って試験を行うことにより検討した。試験に用いた A1-4 相当の OPC0+20 および OPC0+0 の配合、並びに P3-2 相当の HES0+20 および HES0+0 の配合は参 表 5-3、5-4 に示すものと同様で、供試体は 13 週間水中養生した後に、真空飽和処理を行ったものを用いた。試験結果から得られた実効拡散係数を表 5-6 に示す。A1-4 相当の配合、P3-2 相当の配合ともに、フライアッシュで 20%置換した配合の方が実効拡散係数は小さいことが確認された。

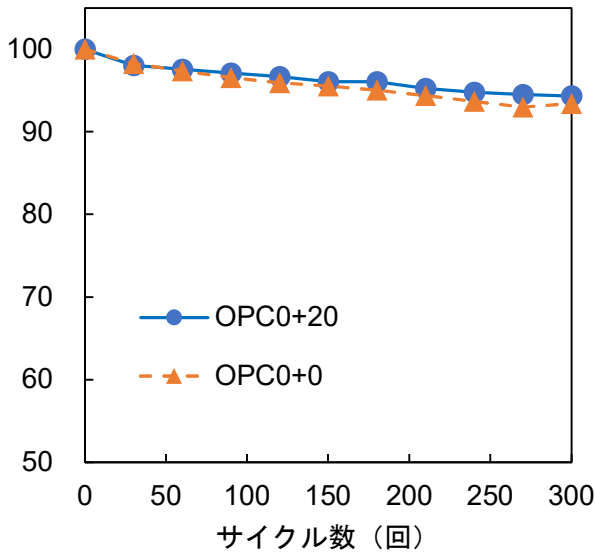
参 表 5-6 実効拡散係数

	A1-4 相当の配合		P3-2 相当の配合	
	OPC0+20	OPC0+0	HES0+20	HES0+0
実効拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	1.34	2.24	1.32	2.01

(5) 凍結融解抵抗性

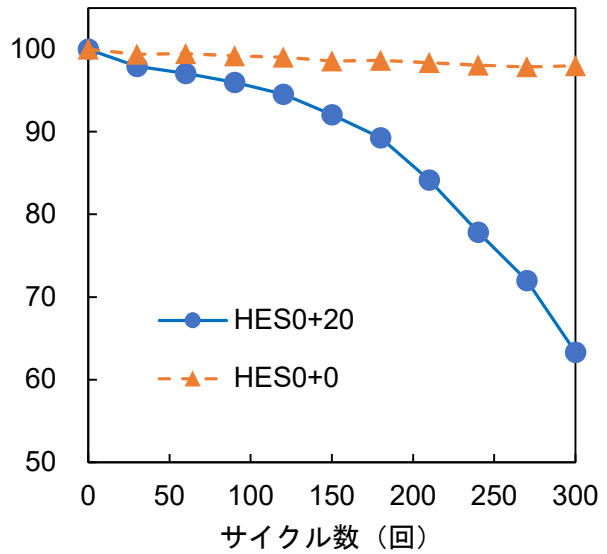
凍結融解抵抗性は、JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法の A 法（水中凍結融解試験方法）に従って試験を行った。試験に用いた A1-4 相当の OPC0+20 および OPC0+0 の配合、並びに P3-2 相当の HES0+20 および HES0+0 の配合は参 表 5-3、5-4 に示すものと同様で、供試体は 13 週間水中養生したものを用いた。試験結果を参 図 5-4 に示す。A1-4 相当の配合では 300 サイクルまで動弾性係数は大きく低減しなかったが、P3-2 相当の配合ではフライアッシュを混和した配合において 300 サイクル終了時点で動弾性係数が初期値の 63%まで低減した。この結果より、フライアッシュコンクリートを適用する場合には、構造物の立地条件や部位の環境条件を勘案して空気量を調整する等の措置を講じ、所要の凍結融解抵抗性が確保されるよう留意する必要があると考えられる。

相対動弾性係数 (%)



(1) A1-4 相当の配合

相対動弾性係数 (%)

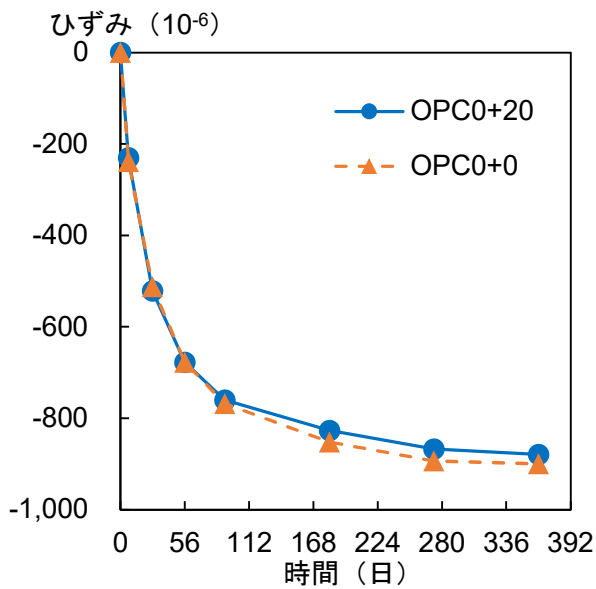


(2) P3-2 相当の配合

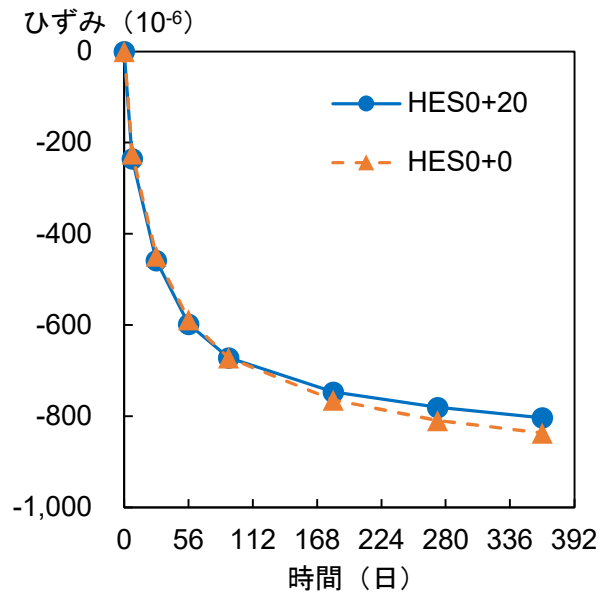
参 図 5-4 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

(6) 収縮

JIS A 1129-3 に従って乾燥による自由収縮ひずみ試験を実施した。試験に用いた A1-4 相当の OPC0+20 および OPC0+0 の配合、並びに P3-2 相当の HES0+20 および HES0+0 の配合は参 表 5-3、5-4 に示すものと同様で、供試体は 1 週間水中養生したものを用いた。試験結果を参 図 5-5 に示す。A1-4 相当の配合、P3-2 相当の配合ともに、フライアッシュで 20%置換した配合の方が乾燥収縮ひずみはわずかではあるが小さくなった。



(1) A1-4 相当の配合

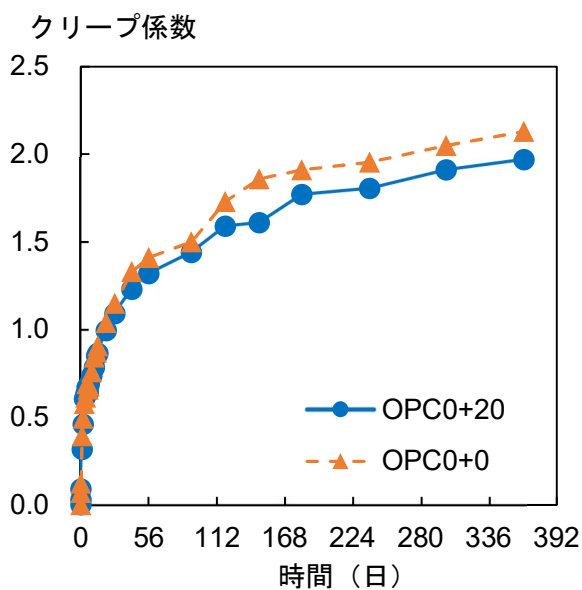


(2) P3-2 相当の配合

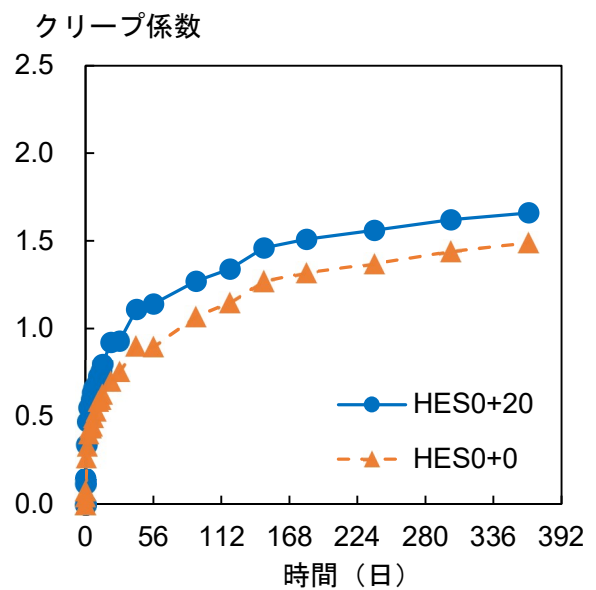
参 図 5-5 乾燥収縮試験結果

### (7) クリープ

JIS A 1157 に従って圧縮クリープ試験を実施した。試験に用いた A1-4 相当の OPC0+20 および OPC0+0 の配合、並びに P3-2 相当の HES0+20 および HES0+0 の配合は表 5-3、5-4 に示すものと同様で、A1-4 相当の配合の供試体は 4 週間水中養生した後に 1 週間気中養生したものを用い、P3-2 相当の配合の供試体は 1 週間水中養生した後に 1 週間気中養生したものを用いた。試験結果を参 図 5-6 に示す。A1-4 相当の配合では、フライアッシュ混和ありの方がクリープ係数は小さかった。一方、P3-2 相当の配合ではフライアッシュ混和ありの方がクリープ係数は大きかったが、試験終了時点で道路橋示方書の規定値（早強ポルトランドセメント使用、載荷材齢 14 日で 2.3）を下回っており、クリープは収束傾向を示していることから、道路橋示方書に規定されるクリープ係数を用いることで安全側の評価が可能である。



(1) A1-4 相当の配合



(2) P3-2 相当の配合

参 図 5-6 圧縮クリープ試験結果

### (8) コンクリートのアルカリシリカ反応性

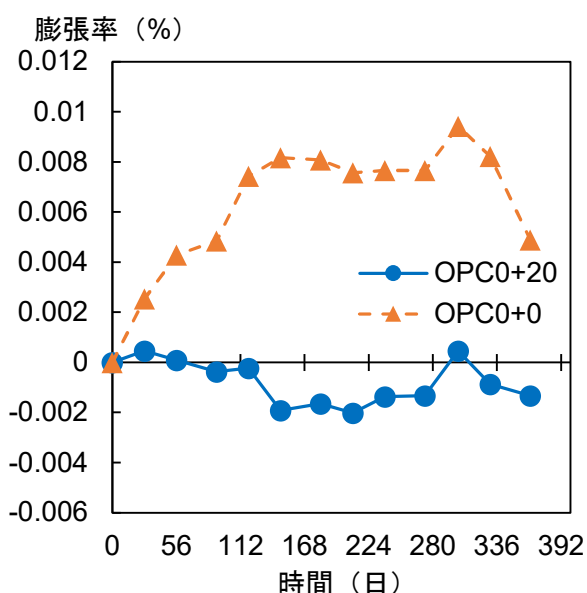
JCI-S-010 に従ってコンクリートのアルカリシリカ反応性試験を実施した。試験に用いた A1-4 相当の配合を参 表 5-7 に、P3-2 相当の配合を参 表 5-8 に示す。供試体の寸法は 100×100×400mm で、1 週間水中養生したものをを用いた。試験結果を参 図 5-7 に示す。JCI-S-010 では、混和材を用いたコンクリートのアルカリシリカ反応による膨張の抑制効果を確認する場合は試験期間を 2 年とすると定められているが、試験期間が 150 日を過ぎた辺りから膨張率がほぼ一定となり変化が見られなくなったため、1 年で試験を終了した。フライアッシュを混和した配合はほぼ膨張しなかったが、混和しない配合は約 0.01% 膨張した。実際に構造物に使用されるコンクリートにおいても、セメントの 20% をフライアッシュで置換することでアルカリシリカ反応を抑制する効果があることが確認された。

参 表 5-7 コンクリートのアルカリシリカ反応性試験に用いた A1-4 相当の配合

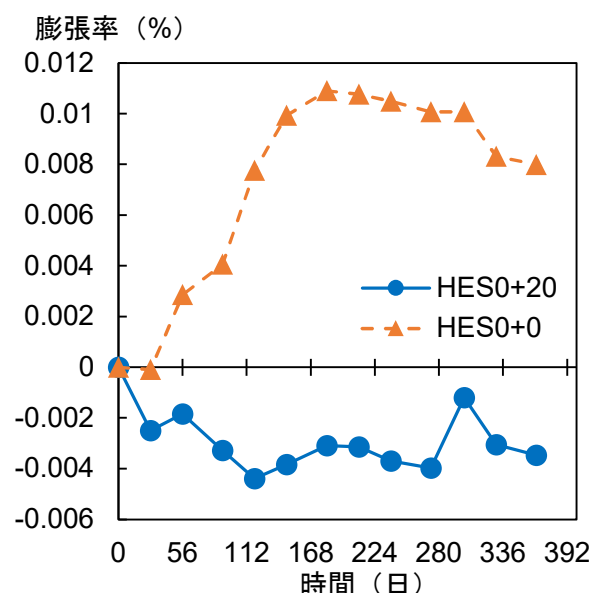
種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
OPC0+20	47.8	45.2	158	265	66	807	997	B×0.85%	1.5A
OPC0+0	47.8	45.2	165	345	0	803	992	B×0.85%	1.0A

参 表 5-8 コンクリートのアルカリシリカ反応性試験に用いた P3-2 相当の配合

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	FA	細骨材	粗骨材		
HES0+20	44.0	45.7	154	280	70	812	984	B×0.9%	0.5A
HES0+0	44.0	45.7	160	364	0	810	981	B×0.9%	1A



(1) A1-4 相当の配合



(2) P3-2 相当の配合

参 図 5-7 コンクリートのアルカリシリカ反応性試験結果

### 参考文献

- 1) 中村英佑・栗原 勇樹・古賀 裕久：暴露 40 ヶ月後の混和材を多量に用いたコンクリートの中性化抵抗性、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.1、pp. 171～176、2016.7

フライアッシュコンクリートの蒸気養生の影響

フライアッシュコンクリートを工場製品として使用する場合、フライアッシュコンクリートの初期強度発現は普通コンクリートに比べ小さいため、蒸気養生等により強度発現を促進する方法をとることが考えられる。そこで、蒸気養生がフライアッシュコンクリートの強度発現に及ぼす影響について確認するために、養生条件を変化させ強度を比較した。

養生条件は、養生槽の湿度を 95%とした上で、最高温度を 50°C、70°Cの 2 ケース、蒸気養生時間（最高温度）を 5 時間、29 時間、53 時間の 3 ケースで変化させた。

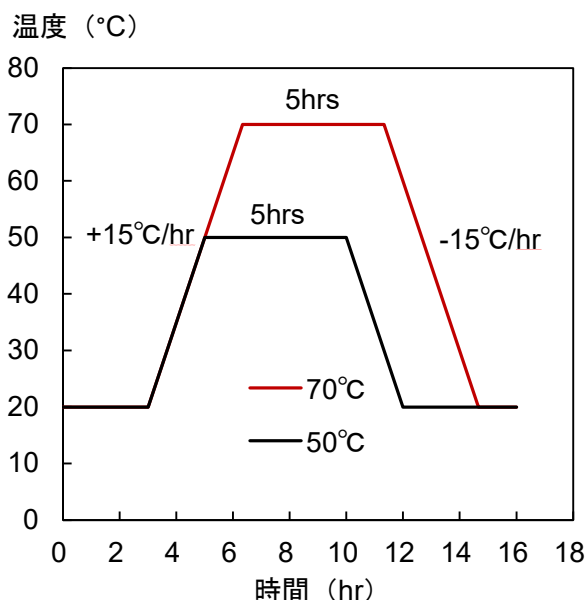
(1) 蒸気養生温度の影響

蒸気養生温度の影響を確認するために用いた配合を参 表 6-1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントとし、フライアッシュで置換しない配合 (HC)、フライアッシュでセメントと細骨材をそれぞれ 30%と 10%で置換 (内割と外割) した配合 (FA①)、FA①の外割の置換率を 20%に高めた配合 (FA②) の 3 配合について、蒸気養生を模した養生装置で初期養生を行った。蒸気養生の条件としては、プレキャスト工場での一般的な製造サイクルである夕方までに打設し翌朝に脱型する (16 時間) ものとし、養生温度は一般的な温度として 50°Cと、硬化促進を期待しつつエトリンガイトの遅延生成の抑制も考慮した限界の温度と考えられる 70°Cとした。蒸気養生の条件を参 図 6-1 に示す。最高温度での保持時間は 5 時間とし、16 時間後以降は水中養生とした。

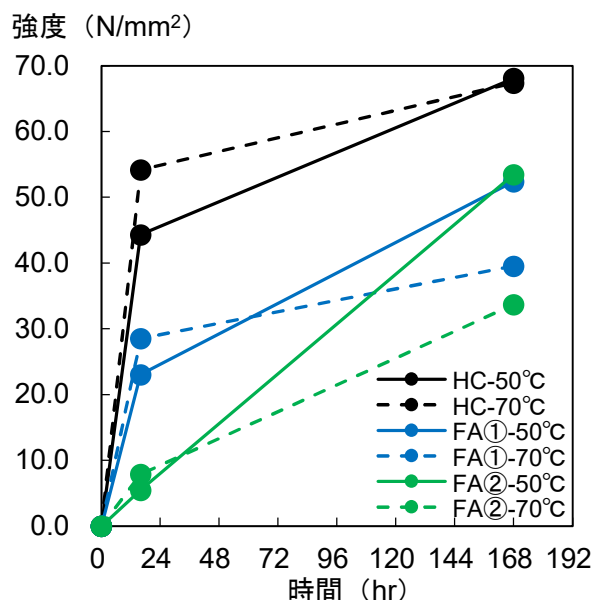
蒸気養生の最高温度を変化させた場合の強度発現を参 図 6-2 に示す。フライアッシュの有無にかかわらず蒸気養生直後の強度は養生温度が 70°Cの方が高いが、その後の強度発現はフライアッシュの無い配合が材齢 7 日でほぼ同等となったのに対し、フライアッシュで置換した配合では材齢 7 日では 50°Cの方が 70°Cを上回った。

参 表 6-1 配合 (最高温度の違い)

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	内割 FA	細骨材	粗骨材	外割 FA		
HC	34.4	45.0	155	450	0	780	964	0	B×1.2%	4A
FA①	29.5	50.0	155	315	135	802	811	75	B×2.0%	6A
FA②	24.6	48.0	155	315	135	711	779	180	B×2.0%	12A



参 図 6-1 蒸気養生条件（最高温度の違い）



参 図 6-2 強度発現（最高温度の違い）

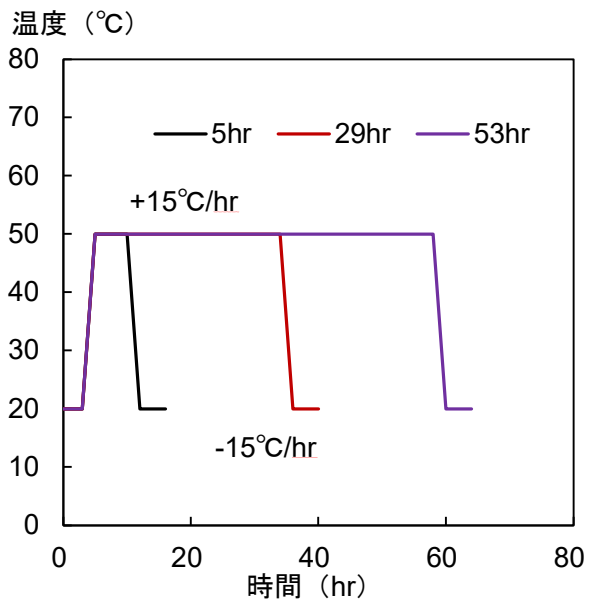
## (2) 蒸気養生時間の影響

蒸気養生時間の影響を確認するために用いた配合を参 表 6-2 に示す。セメントは早強ポルトランドセメントとし、フライアッシュを内割で 30%置換した配合（FA③）と、内割の置換率を 30%で外割の置換率を 10%とした配合（FA④）について、蒸気養生を模した養生装置で初期養生を行った。蒸気養生の条件としては、最高温度は 50°Cとして、プレキャスト工場での一般的な製造サイクルである夕方までに打設し翌朝に脱型（16 時間、うち最高温度時間 5 時間）、最高温度時間を 24 時間延長した 29 時間、48 時間延長した 53 時間の 3 条件とした。蒸気養生の条件を参 図 6-3 に示す。蒸気養生後は水中養生とした。

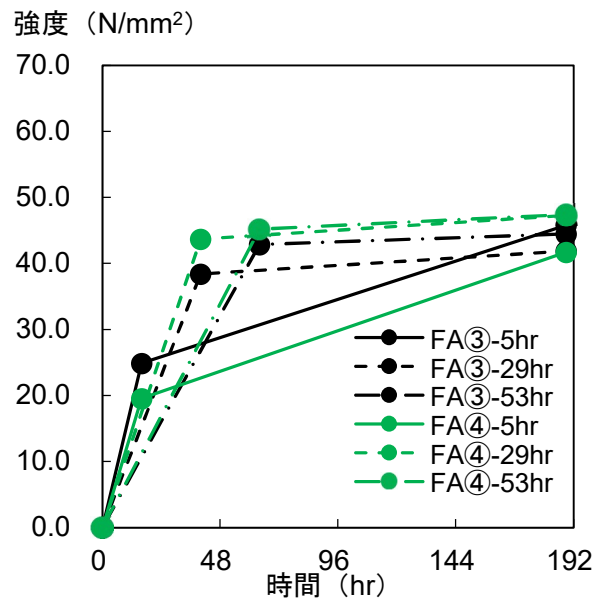
蒸気養生時間を変化させた場合の強度発現を参 図 6-4 に示す。蒸気養生時間を延長することで初期の強度発現は大きくなるが、24 時間延長から 48 時間延長の強度増加は小さく、またその後の水中養生による材齢 7 日はほぼ同等であった。

参 表 6-2 配合（蒸気養生時間の違い）

種別	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						AE 減水剤	AE 剤
			水	セメント	内割 FA	細骨材	粗骨材	外割 FA		
FA③	34.4	45.0	155	315	135	761	940	0	B×0.8%	4A
FA④	29.5	45.0	155	315	135	673	940	75	B×1.4%	10A



参 図 6-3 蒸気養生条件 (蒸気養生時間の違い)



参 図 6-4 強度発現 (蒸気養生時間の違い)

## 橋梁壁高欄へのフライアッシュコンクリートの適用

橋梁壁高欄は、冬期に路面へ散布された凍結防止剤が通行車両により巻き上げられることで、継続的に塩分環境に曝される部材である。このため、鉄筋腐食に対する耐久性確保が重要となる。フライアッシュコンクリートは、ポズラン反応により組織が緻密化し、塩化物イオンの侵入に対する物質移動抵抗性が向上することが知られている。そのため、橋梁壁高欄に適用した場合、鉄筋腐食対策として有効となる可能性がある。

本資料では、橋梁壁高欄の鉄筋腐食対策としてフライアッシュコンクリートを適用した場合について、

- (1) エポキシ樹脂塗装鉄筋を全面的に使用する場合との材料費の比較
- (2) 凍結防止剤散布量を考慮した耐久性照査による適用限界条件

の2点について検討した結果を整理する。

## (1) 材料費の比較

SB種の橋梁壁高欄を対象として、以下の2ケースについて1m当たりの材料費を算出し比較した。

ケースA：普通コンクリートを使用し、鉄筋をすべてエポキシ樹脂塗装鉄筋とする場合

ケースB：セメント内割置換率20%のフライアッシュコンクリートを使用し、ひび割れ誘発目地部（1箇所/4m）のみエポキシ樹脂塗装鉄筋とする場合

算出にあたり、コンクリートおよび鉄筋等の単価は2025（令和7）年10月時点のものを用いた。また、フライアッシュをセメント内割20%で置換した場合、コンクリート単価が500円/m<sup>3</sup>増加するものと仮定した。

その結果、ケースB（フライアッシュコンクリートを使用した場合）は、ケースAと比較して材料費が約13%低減する結果となり、経済的に優位となった。

ただし、凍結防止剤の散布量が多い環境条件下では、フライアッシュコンクリートを適用した場合であっても鉄筋腐食を十分に抑制できない可能性がある。そこで、次節では凍結防止剤散布量の上限值について検討した。

## (2) 鉄筋腐食対策としてのフライアッシュコンクリートの有効性

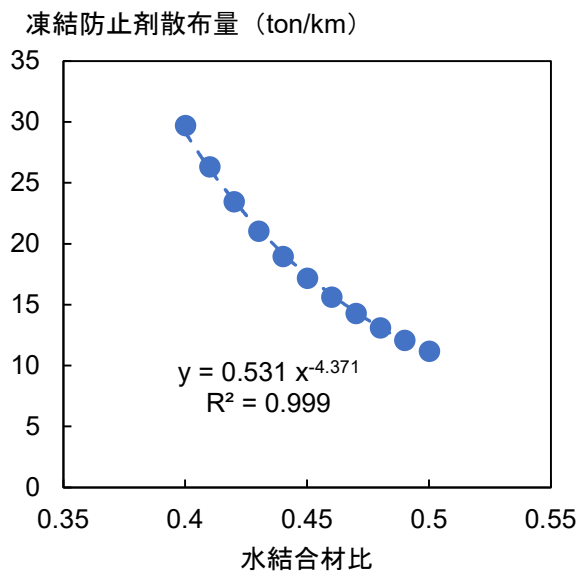
橋梁壁高欄を対象とした凍結防止剤散布に伴う塩害に対する耐久性照査は、2017（平成29）年4月26日付け中高環第44号通達に示される照査方法（案）（以下「通達照査方法」という。）に準拠して実施した。通達照査方法では、フライアッシュセメントやフライアッシュ混和コンクリートを適用した場合の具体的な取扱いは示されていない。しかし、その照査体系は（公社）土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕に規定される塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査に基づいている。このため、本検討では、セメント内割置換率20%のフライアッシュコンクリートをフライアッシュセメントB種相当とみなし、2022年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕に準拠して照査を実施した。

照査における主要なパラメータは、水結合材比とコンクリート表面における塩化物イオン濃度（以下「表面塩化物イオン濃度」という。）である。これらの値は現場条件により大きく変動するため、設計耐用年数100年において鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度を超過しない条

件を求めることとした。

通達照査方法では、表面塩化物イオン濃度を年間当たりの凍結防止剤散布量から定めることとしている。このため、本検討では水結合材比と年間凍結防止剤散布量の関係を整理した。

橋梁壁高欄に使用されるコンクリートの一般的な水結合材比は 0.40～0.50 程度と想定されることから、この範囲における関係を求めた。その結果を参 図 7-1 に示す。また、鉄筋腐食対策としてフライアッシュコンクリートを適用することが、エポキシ樹脂塗装鉄筋を全面使用する場合より経済的に優位となる年間凍結防止剤散布量の上限値を参 表 7-1 に示す。



参 図 7-1 鉄筋が腐食しない上限の年間凍結防止剤散布量とフライアッシュコンクリートの水結合材比との関係

参 表 7-1 鉄筋腐食対策としてフライアッシュコンクリートが有効となる年間凍結防止剤散布量の上限値

水結合材比	年間凍結防止剤散布量 (ton/km)
0.4	29.7
0.41	26.3
0.42	23.4
0.43	21.0
0.44	18.9
0.45	17.1
0.46	15.6
0.47	14.3
0.48	13.1
0.49	12.1
0.5	11.1

### (3) 本参考資料の位置づけ

本参考資料は、橋梁壁高欄におけるフライアッシュコンクリート適用の可否を検討する際の参考情報を整理したものであり、実際の適用にあたっては、現場条件、凍結防止剤散布実績、維持管理計画等を踏まえ、個別に耐久性照査および経済性評価を行う必要があることに留意されたい。