

フライアッシュを用いたコンクリートの  
ポストテンション PC 橋への適用化に関する  
基礎的研究報告書

ポストテンション PC 桁の高耐久化に向けたフライアッシュコンクリートの  
配合および施工マニュアル (案)

2022 年 3 月

国立大学法人琉球大学  
一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会  
琉球セメント株式会社



フライアッシュを用いたコンクリートの  
ポストテンション PC 橋への適用化に関する基礎的研究

国立大学法人琉球大学

教授 富山 潤

准教授 須田 裕哉

一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

委員 鈴木 雅博

委員 俵 道和

委員 村井 弘恭

委員 妹川 寿秀

委員 柴田 和典

委員 倉富 康則

委員 赤嶺 文繁

琉球セメント株式会社

委員 比屋根方新

委員 神谷 和志



## はじめに

フライアッシュは、コンクリート混和材として利用することで塩分浸透や ASR の抑制、温度応力の低減等の効果があることが知られており、平成 27 年 1 月に開通した伊良部大橋では、海上橋における 100 年耐久性を目指して検討を重ね、県内で産出されるフライアッシュを用いたフライアッシュコンクリートを沖縄県土木建築部として初めて採用した。伊良部大橋での検討により得られた知見をもとに、沖縄県土木建築部では、沖縄県内の火力発電所で産出するフライアッシュを混和材として利用したコンクリート構造物の品質・耐久性向上を目的として「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」（以下、沖縄県 FA 指針という）を発刊している。この指針では、普通ポルトランドセメントとフライアッシュの組合せとし、「内割り+外割り配合タイプ」、「内割り配合タイプ」、「外割り配合タイプ」が示されている。この内、「内割り配合タイプ」は、塩化物イオン浸透抵抗性と ASR を抑制する配合として示されているが、ポストテンション PC 桁では、海砂による遅延性膨張 ASR を懸念して砕砂 100%としていることによって生じるワーカビリティの低下を改善する目的から、細骨材(砕砂)の 3~5mass%をフライアッシュで置換する「外割り配合タイプ」に留まっている。

そこで、プレストレストコンクリート橋の高耐久化を目的に、普通ポルトランドセメントの質量の 15~20%をフライアッシュで置換した内割り配合タイプのフライアッシュコンクリートのポストテンション PC 桁への実装化に向けた基礎的研究を行うこととした（以下、本研究という）。本研究では、品質が保証されたフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートに対して室内試験と実機試験を行っている。室内試験では、所定の圧縮強度を満足する配合の検討、圧縮強度発現および耐久性確保の観点からみた湿潤養生日数の検討、ASR 抵抗性の検討を行った。実機試験では、レディーミクストコンクリート工場の実機プラントで製造したコンクリートをアジテータ車で運搬し、ポンプ圧送による実物大試験体(T 桁断面)の製作を行い、コンクリートのフレッシュ性状変化および施工性の確認を行った。また、施工性試験で製作した実物大試験体を長手方向に 2 区画に分け、各区画で異なる養生日数とすることにより養生日数の差が耐久性におよぼす影響をあわせて確認した。

本研究にて確認されたことをもとに、沖縄県 FA 指針を含めて、フライアッシュを内割り配合として使用するコンクリートの適用範囲の拡大を目的として「ポストテンション PC 桁の高耐久化に向けたフライアッシュコンクリートの配合および施工マニュアル(案)」（第 I 部）を取りまとめた。また、「付録資料編」（第 II 部）では、本研究で行った室内試験、施工試験、実構造物での品質の確認試験の結果に加えて、二酸化炭素排出量低減効果の検討、ライフサイクルコストの検討についても取りまとめている。

本マニュアル(案)および付録資料が沖縄県におけるプレストレストコンクリート橋の耐久性向上に寄与することを期待したい。

## 目 次

### 第 I 部 ポストテンション PC 桁の高耐久化に向けたフライアッシュコンクリートの配合および施工マニュアル (案)

1. 総 則	1
1. 1 適用の範囲	1
1. 2 用語の定義	3
2. 配合設計	4
2. 1 一般	4
2. 2 設計値	6
2. 3 フライアッシュのセメント置換率	7
3. 使用材料	9
3. 1 一般	9
3. 2 フライアッシュ	10
3. 3 セメント	11
3. 4 骨材	11
3. 5 練混ぜ水	12
3. 6 化学混和剤	13
4. 製造および施工	14
4. 1 一般	14
4. 2 材料の貯蔵設備	14
4. 3 材料の計量	14
4. 4 練混ぜ	15
4. 5 運搬	16
4. 6 打込み・締固めおよび仕上げ	17
4. 7 養生	19

## 第Ⅱ部 付録資料

付録－1	2019 年度室内試験（配合の検討，強度発現性および塩化物イオン浸透抵抗性による湿潤養生日数の検討，ASR 抵抗性の検討）	21
付録－2	2020 年度施工性試験（実機プラントによる試験練り，フレッシュコンクリートの経時変化，実物大試験体を用いた施工性の確認）	43
付録－3	実物大試験体を用いた品質の確認試験	55
付録－4	電気抵抗率試験および非定常電気泳動試験による耐久性の評価	63
付録－5	フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの二酸化炭素排出削減効果の検討	68
付録－6	フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの LCC の検討	72



第 I 部 ポストテンション PC 桁の高耐久化に向けたフライアッシュコンクリートの配合および施工マニュアル (案)



## 1. 総則

### 1. 1 適用の範囲

- (1) ポストテンション PC 桁の高耐久化に向けたフライアッシュコンクリートの配合および施工マニュアル(案)(以下、本マニュアル(案)という)は、耐久性向上を目的に沖縄県内の石炭火力発電所で産出するフライアッシュを用いたフライアッシュセメント B 種を内割り配合タイプの結合材として使用したフライアッシュコンクリート(以下、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートという)を使用するための配合・製造および施工の基本的な考え方を示したものである。
- (2) 本マニュアル(案)は、ポストテンション PC 桁(場所打ち桁を含む)に適用する。
- (3) 本マニュアル(案)に示されていない事項については、解説に記載する基準類によるものとする。

#### 【解説】

##### (1)および(2)について

プレストレストコンクリート橋の高耐久化と建設時の環境負荷低減を目的として、普通ポルトランドセメントの一部を沖縄県内の石炭火力発電所より産出されるフライアッシュで置換したコンクリートの積極的な活用が望まれている。フライアッシュの使用は、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上やアルカリシリカ反応の抑制等によって耐久性の向上に寄与し、プレストレストコンクリート橋の長寿命化によるライフサイクルコストの低減につながる。また、産業副産物である混和材は普通ポルトランドセメントと比較して製造時の二酸化炭素排出量が非常に小さいため、普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換することによって、プレストレストコンクリート橋の建設に伴って発生する二酸化炭素排出量を削減することができる。

沖縄県 FA 指針では、普通ポルトランドセメントとフライアッシュの組合せとし、「内割り+外割り配合タイプ」、「内割り配合タイプ」、「外割り配合タイプ」が示されている(図 1.1.1)。このうち、「内割り配合タイプ」は、塩化物イオン浸透抵抗性と ASR を抑制する配合として示されているが、ポストテンション PC 桁では、海砂による遅延性膨張 ASR を懸念して砕砂 100%としていることによって生じるワーカビリティの低下を改善する目的から、細骨材(砕砂)の 3~5mass%をフライアッシュで置換する「外割り配合タイプ」に留まっている。そこで、ポストテンション PC 桁に対して「内割り配合タイプ」を適用することで、橋梁全体の高耐久化と環境負荷低減を目指した。

本マニュアル(案)は品質の安定したフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートを用いた基礎的研究を行い、その性能を確認した内容に基づき作成した。なお、本研究はポストテンション T 桁を想定して設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを対象として行ったが、これと異なる設計基準強度(例えば場所打ち桁を想定した設計基準強度)やフライアッシュを混和材としてポストミックスするコンクリートに対しても、各章に示した内容に留意することで本マニュアル(案)を適用することが可能である。

また、ポストテンション PC 桁は、プレストレス導入のために早期の強度発現が必要であることや、プレストレストコンクリート桁の製作場所から架橋場所まで移動を要する可能性があること、さらに、部材が比較的薄いにも関わらず PC 鋼材を挿入するためのダクト(シース)が必要であるなど、一般的なコンクリート構造物と比較して特有の留意点がある。

本マニュアル（案）は、ポストテンション PC 桁特有の留意点を考慮したうえで、ポストテンション PC 桁にフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートを使用するための配合・製造および施工の基本的な考え方を示した。

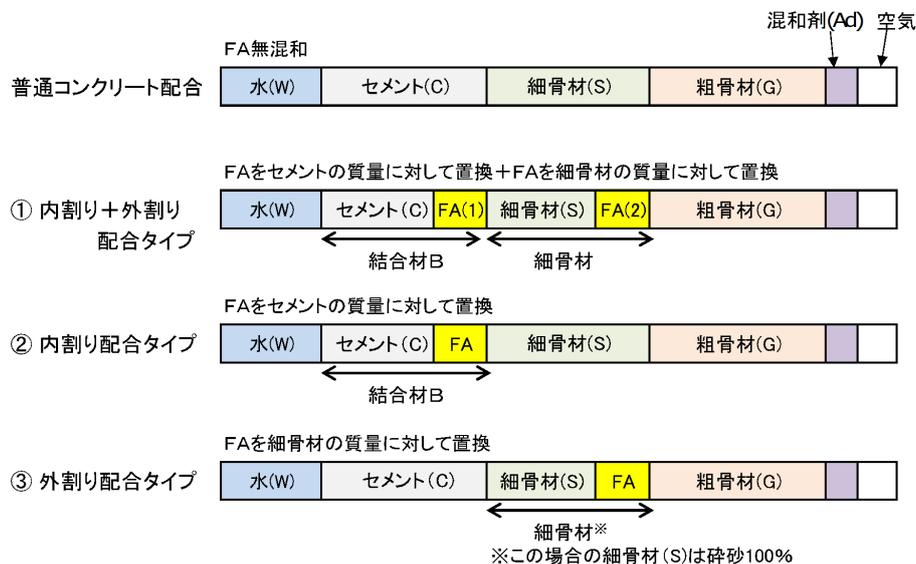


図 1.1.1 配合タイプ毎の概念図（沖縄県 FA 指針より抜粋）

### (3)について

本マニュアル（案）に示されていない事項については、次の既存の基準類を参考にするとうよい。これらの基準類は、本マニュアル（案）制定時（2022 年 3 月）で最新のものであり、今後これらの基準類の改訂があった場合には、改訂による影響を適切に考慮した上で、最新の基準類を参考にしてよい。

- 「道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編）」  
(2017 年 11 月，日本道路協会)  
(以下，道路橋示方書という)
- 「コンクリート標準示方書 [設計編]，[施工編]」(2017 年制定，土木学会)  
(以下，コンクリート標準示方書という)
- 「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 年 5 月，沖縄県土木建築部)
- 「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】」  
(1999 年 4 月，土木学会)
- 「循環型社会に適合したフライアッシュを用いたコンクリートの最新利用技術－利用拡大に向けた設計施工指針試案【コンクリートライブラリー132】」  
(2009 年 12 月，土木学会コンクリート委員会)
- 「フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案）」  
(2003 年 3 月，土木学会四国支部)
- 「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅱ)」  
(2016 年 1 月，(国研)土木研究所，(一社)PC 建協)

## 1. 2 用語の定義

本マニュアル（案）では、次のように用語を定義する。

- **フライアッシュ**：沖縄県内の石炭火力発電所で産出された JIS A 6201 に示されるⅡ種に適合するフライアッシュを言う。
- **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(セメント代替もしくは細骨材代替)として使用したコンクリートである。本マニュアル（案）では空気量を規定しないことを基本としているため、JIS A 5308 に規定されるレディーミクストコンクリートとしては取り扱わない。
- **フライアッシュセメント B 種**：フライアッシュセメント B 種とは、JIS R 5213 に示されたフライアッシュセメントの品質 B 種を指す。同 JIS には、フライアッシュの分量としてフライアッシュセメント質量の 10%を超え 20%以下とされており、この量をプレミックス置換したセメントを言う。
- **内割り配合タイプ**：セメントの一部をフライアッシュで質量置換した配合である。フライアッシュをコンクリート混和材として JIS A 5308 に準じて利用するため、フライアッシュをセメントと同様の結合材としてみなす。
- **普通コンクリート**：本マニュアル（案）中に表記される普通コンクリートとは、県内の土木分野で多く使用される普通セメントを用いたレディーミクストコンクリートを指す。
- **内割り配合における置換率**：単位セメント量と単位フライアッシュ量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を言う。
- **結合材**：一般にセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェームなど水と反応してコンクリートの強度発現に寄与するものを指すが、本マニュアル（案）では、セメントおよび内割り配合のフライアッシュのみが対象となる。
- **水セメント比 (W/C)**：コンクリート、モルタルおよびセメントペーストにおける単位水量 (W) を単位セメント量 (C) の質量で除した値を言う。なお、この場合のセメントには、あらかじめ混和材を混合した混合セメントは含むが、セメントとは別に混合する混和材は含まない。
- **水結合材比 (W/B)**：フライアッシュ (FA) を混和材として内割りで使用した場合に水セメント比に代えて使用するもので、単位水量 (W) を単位結合材量 ( $B=C+FA$ ) の質量で除した値を言う。本マニュアル（案）では、表現の煩雑さを避けるため、フライアッシュをプレミックス置換したフライアッシュセメントの場合も単位結合材量 ( $B=C+FA$ ) として取り扱う。
- **海砂**：コンクリート用骨材として採取された海底の砂で、国有財産であるため、沖縄県知事の砂利採取許可を受けて採取された砂を言う。また、海砂の塩分含有量は、0.04%を下回らなければならない。
- **砕石・砕砂**：コンクリート用骨材として天然の岩石を破砕機・粉砕機等で人工的に小さく砕いて出来た粗骨材および細骨材のことであり、沖縄県では主に本部半島産石灰岩砕砂が使用されている。

## 2. 配合設計

### 2. 1 一般

- (1) 本マニュアル（案）で取り扱うフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、配合設計上、内割り配合タイプとして取り扱う。
- (2) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの配合は、コンクリートに要求される性能を満足するとともに、各規定値を満足するよう適切に設計しなければならない。
- (3) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの配合は、構造物の要求性能を満足するコンクリートの性能を確保することを試験により確認しなければならない。
- (4) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの配合は、スランプを発注者と協議の上適切に選定し、ワーカビリティを確保する必要があるが、空気量については規定しない。

#### 【解説】

##### (1)について

内割り配合は、土木学会や建築学会で一般にフライアッシュコンクリートと言われる配合で、普通コンクリートと同等の製造管理と強度管理（管理材齢 28 日）が可能なコンクリートである。本マニュアル（案）で扱うフライアッシュをプレミックスされたセメント（フライアッシュセメント B 種）を用いる場合もこの配合タイプに入る。

##### (2) について

配合設計を行うにあたっては、コンクリートに要求される性能（使用目的）とその要求性能を満足するセメント置換率とする必要がある。なお、本マニュアル（案）では、表 2.1.1 に示すフライアッシュの使用目的のうち、アルカリシリカ反応（ASR）の抑制、耐海水性（塩害を含む）の向上を主目的としている。

表 2.1.1 フライアッシュの種類と置換率

使用目的	I 種	II 種	III 種	IV 種
流動性の向上	10~40%	10~30%	—	—
水和熱による温度上昇の抑制	—	20~30%	20~30%	20~30%
アルカリシリカ反応の抑制	15~40%	15~30%	15~30%	25~30%
耐硫酸塩性の向上	10~40%	10~30%	10~30%	—
耐海水性（塩害を含む）の向上	10~40%	10~30%	10~30%	—
高流動化	20~40%	20~30%	—	—
高強度化	10~30%	—	—	—

注）普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換する場合について示したものである。

※参考文献：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）：土木学会，コンクリートライブラリー94

配合に関する規定値とは、耐荷性能，耐久性能，施工性を確保するための前提条件として，道路橋示方書や発注者の仕様書および指針等で定められた値のことである。本マニュアル（案）では，沖縄

県 FA 指針を引用し、表 2.1.2 を規定値とする。なお、水結合材比に関しては、沖縄県 FA 指針が参考としている道路橋示方書では、水セメント比 43% を最小かぶり規定時の目安として記載していることを踏まえて、表 2.1.2 に従い難い場合は、発注者と協議のうえ適切にこれを定めてもよい。

表 2.1.2 配合に関する規定値

項目	規定値	適用
水結合材比 (W/B)	43 %以下	ポストテンション PC 桁
単位水量 (W)	175 kg/m <sup>3</sup> 以下	
粗骨材の最大寸法	20mm	

注) W : 水, B : 結合材 (B=C+FA, C : セメント, FA : フライアッシュ)

### (3) について

室内配合試験においては、通常練り混ぜ直後にスランプ、空気量、単位水量、コンクリート温度、外気温度、等を測定するが、スランプと空気量については練り混ぜ後 30 分および 60 分の経時変化も確認する。圧縮強度試験は、コンクリート製造工場から現場到着までの時間を勘案し、0 分、30 分もしくは 60 分のいずれかで最も近い時間のコンクリートを用いて供試体を採取する。圧縮強度試験は、管理強度 28 日材齢を基本とし、施工上確認が必要と考えられる材齢（例えば脱型強度や緊張強度、プレキャストセグメント桁などでは吊り上げ強度など）で試験を行う。また、過去に内割り配合タイプの出荷実績がないコンクリート製造工場では、必ず実機試験を行い、室内配合試験で行った各種経時変化や圧縮強度試験を行うことにより、室内配合試験のフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートと同等の性状が得られることを確認する。

### (4) について

本マニュアル（案）で対象としているフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、従来の普通コンクリートと同様に製造管理が可能なコンクリートである。本配合は、構造物の要求性能を満足するコンクリートの性能を確保するように、スランプを適切に選定し、ワーカビリティを確保する。

ここで、沖縄県 FA 指針では、沖縄県総合事務局開発建設部および沖縄県土木建築部で発注の工事において、一般的な普通コンクリート構造物（コンクリート舗装工、場所打ち杭等の水中コンクリート及びトンネル覆工を除く）のスランプを  $12 \pm 2.5\text{cm}$  としていることを踏まえ、フライアッシュコンクリートのスランプも  $12 \pm 2.5\text{cm}$  を標準とし、受注者からスランプ値の変更について協議がある場合は、コンクリート標準示方書（施工編）の「最小スランプの目安」に基づき、必要があると認められる場合は、スランプ値を適切に設定するものとしている。

しかし、フライアッシュを用いたコンクリートのポンプ圧送によるスランプロスを算出するデータが少ないのが現状であり、データの蓄積が必要である。こうした背景から、本研究では、付録-2 に示す試験を実施し、スランプロスを把握する事ことも目的の一つとしている。なお、付録-1 および付録-2 に示す目標スランプは、打込み時で 12cm を想定し、ポンプ圧送によるスランプロスを水平換算距離 95m の場合に 3.0cm あるという報告<sup>1)</sup>、分級したフライアッシュを用いるため粘性が高くなること、経時変化にともなうスランプロスが大きくなることを想定して本試験では配合設計上の目標スラ

ンプ（荷下ろし時のスランプ）を 18cm として行った。

本配合は、フライアッシュ 配合コンクリートで JIS を取得していないコンクリート製造工場でも製造できるように非 JIS コンクリートを基本としている。また、沖縄県全域が原則として耐凍害性を考慮する必要のないことから、空気量は規定しないが、容積率算定の関係から配合計算において空気量を規定する必要がある場合は、2.0%としてよいこととした。ただし、標準の空気量（ $4.5 \pm 1.5\%$ ）を確保する必要がある場合等、特に別途空気量を定める必要がある場合は、発注者と協議の上で変更可能とする。

#### 参考文献

1)中瀬博一, 鈴木雅博, 椎野碧:フライアッシュコンクリートの PC 床版間詰め施工への適用性検討, 第 29 回 PC シンポジウム, pp441-444, 2020

## 2. 2 設計値

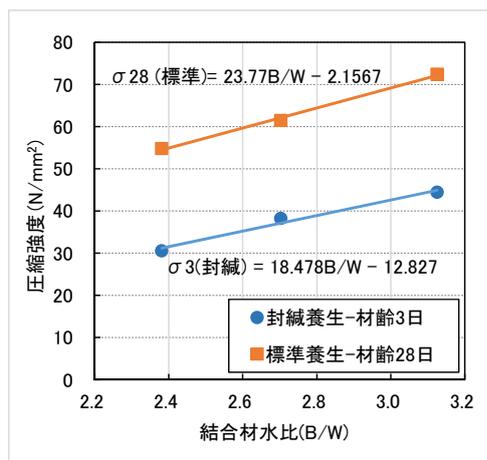
- (1) 水結合材比 (W/B) は、管理材齢で必要な圧縮強度のみでなく、プレストレス導入の計画材齢で必要な圧縮強度についても考慮して適切に設定する。
- (2) 強度の管理材齢は、普通コンクリートと同様に材齢 28 日を基本とする。

#### 【解説】

##### (1) について

沖縄県 FA 指針では、「フライアッシュコンクリートは、各コンクリート製造工場における同じ呼び強度の JIS 普通コンクリート配合を基本とする。よって、水結合材比 (W/B) についても、各コンクリート製造工場の持つ同じ呼び強度の JIS 普通コンクリートの水セメント比 (W/C) を基本とし、水セメント比 (W/C) を水結合材比 (W/B) と読み替えるものとする。ただし、この水結合材比 (W/B) で所要の強度が得られない場合は、発注者と協議の上変更しても良い。これは、フライアッシュセメント B 種を用いた場合でも同様である。」としている。しかし、ポストテンション PC 桁は、製造過程でプレストレス導入のために所定の圧縮強度が必要であるところが、一般のコンクリート構造物と異なる。そのため、管理材齢で必要な圧縮強度のみでなくプレストレス導入の計画材齢における必要圧縮強度についても考慮して、両方を満足するように水結合材比 (W/B) を設定する必要がある。

なお、プレストレス導入時期は一般的に材齢 3 日～5 日で計画され、その時に必要な圧縮強度は、使用する定着具メーカーの基準と道路橋示方書に規定されるプレストレスによる圧縮応力度の 1.7 倍以上の圧縮強度により決定される。本研究では、設計基準強度  $40\text{N/mm}^2$  のポストテンション T 桁を想定して、プレストレス導入の計画材齢を材齢 3 日、その時の必要強度を  $34\text{N/mm}^2$ 、管理材齢 28 日で必要な圧縮強度の目標値（コンクリートの設計基準強度  $40\text{N/mm}^2 \times 1.2$ ）を  $48\text{N/mm}^2$  として配合検討を行っており、プレストレス導入時強度で水結合材比 (W/B) が決定されている結果となっている（図 2.2.1 参照）。



- 封緘養生材齢3日(プレストレス導入時強度)  
(34N/mm<sup>2</sup>) W/B=39.4%
  - 標準養生材齢28日(設計基準強度の配合強度)  
(48N/mm<sup>2</sup>)(設計基準強度 x 1.2) W/B=47.2%
- 封緘養生材齢3日の B/W に圧縮強度の5%を安全側に見て、下式より、W/B=38.0%とする。
- $$\sigma_3(\text{プレストレス導入時}) = 0.95 \times (18.478 \times B/W - 12.827)$$

図 2.2.1 配合検討結果

## (2) について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、ポズラン反応により長期強度発現が望めるが、その強度の管理材齢は普通コンクリートと同じ 28 日とした。なお、やむを得ず強度の管理材齢を変更する必要がある場合は、発注者と協議の上変更して良いものとする。ただし、管理材齢の上限は、91 日とする。

## 2.3 フライアッシュのセメント置換率

内割り配合の結合材として用いるフライアッシュセメント B 種は、フライアッシュの分量を質量置換率で 10~20%の範囲とするが、ASR 抑制効果を求める場合は 15~20%の範囲とする。

### 【解説】

本マニュアル(案)では内割り配合の結合材としてプレミックスのフライアッシュセメント B 種を用いることを基本としており、この場合のフライアッシュの質量置換率は 10~20%の範囲とする。

ただし、本配合の要求性能は塩害および ASR 抑制であるが、海砂を使用した場合で ASR 抑制効果を求める場合は表 2.1.1 に示すように 15%以上の質量置換率が望ましいため、フライアッシュの置換率が 15~20%のフライアッシュセメントを用いる必要がある。フライアッシュの置換率が 15~20%のフライアッシュセメントの入手が困難である場合は、フライアッシュをポストミックスとして用いることを検討するのがよい。なお、フライアッシュセメントの種類別フライアッシュ置換率を表 2.3.1 に、フライアッシュセメントの品質を表 2.3.2 にそれぞれ示す。

表 2.3.1 フライアッシュセメントのフライアッシュ置換率

種類	フライアッシュの分量 (質量%)
A種	5を超え 10以下
B種	10を超え 20以下
C種	20を超え 30以下

表 2.3.2 フライアッシュセメントの品質

品質		A種	B種	C種
密度 g/cm <sup>3</sup>		—	—	—
比表面積 cm <sup>2</sup> /g		2500以上	2500以上	2500以上
凝結	始発 min	60以上	60以上	60以上
	終結 h	10以下	10以下	10以下
安定性	パット法	良	良	良
	ルシャテリエ法 min	10以下	10以下	10以下
圧縮強さ N/mm <sup>2</sup>	3d	12.5以上	10.0以上	7.5以上
	7d	22.5以上	17.5以上	15.0以上
	28d	42.5以上	37.5以上	32.5以上
化学成分 %	酸化マグネシウム	5.0以下	5.0以下	5.0以下
	三酸化硫黄	3.0以下	3.0以下	3.0以下
	強熱減量	5.0以下	—	—

また、水和熱による温度上昇抑制には表 2.1.1 に示すように 20%以上の置換率が必要となることから、本配合を用いて水和熱による温度上昇抑制を求める場合は、その効果を予め確認しておく必要がある。

フライアッシュを混和材として使用する場合の配合の概念図を図 2.3.1 に示す。セメント (C) とフライアッシュ (FA) の総和を結合材 (B) として、水結合材比 (W/B) で管理する。ただし、混和剤 (Ad) は、製造段階で水に累加計量されるため、単位水量に含まれる。

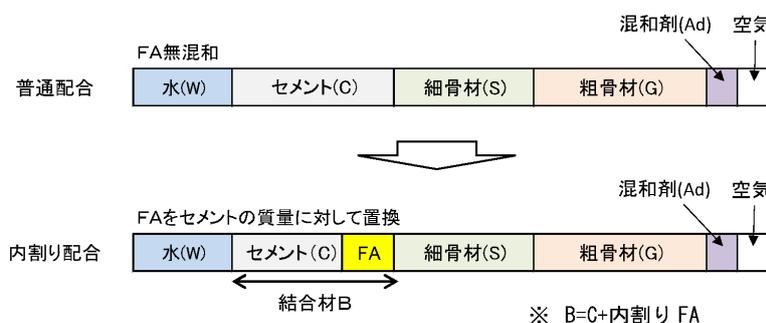


図 2.3.1 内割り配合タイプの概念図 (沖縄県 FA 指針より抜粋)

### 3. 使用材料

#### 3. 1 一般

- (1) 材料は、品質が確かめられたものでなければならない。
- (2) JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料は、品質が確かめられた材料であると判断してよい。ただし、JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料であっても、品質規格の試験条件と異なる条件で用いる場合には、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。
- (3) JIS 及び土木学会規準に品質規格の定められていない材料を用いる場合には、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

#### 【解説】

##### (1)について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートを構成する材料の品質はフレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質に多大な影響を与えるため、所要の性能を有する構造物を構築するためには品質が確かめられた材料を用いる必要がある。

##### (2)について

JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料は品質が確かめられた材料であると判断してよいが、JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料であっても、品質規格の試験条件と異なる条件で用いられる場合がある。このような場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。例えば、JIS A 6202 コンクリート用膨張材の膨張性試験は普通ポルトランドセメントを用いた供試体を製作して行われるため、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートでの膨張材の効果については試験によって別途確認しておくことが望ましい。

##### (3)について

JIS 及び土木学会規準に品質規格の定められていない材料を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

### 3. 2 フライアッシュ

フライアッシュは、沖縄県内の石炭火力発電所で産出された JIS A 6201 に示される II 種に適合するものを標準とする。

#### 【解説】

JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」は、強熱減量や粉末度およびフロー値比などの組み合わせによって、表 3.1 に示すように I 種、II 種、III 種および IV 種の品質が規定されている。なお、本マニュアル（案）においては、沖縄県内で産出する II 種のフライアッシュの使用を標準とする。

表 3.1 JIS A 6201 フライアッシュの品質

		I 種	II 種	III 種	IV 種
二酸化ケイ素 (%)		45.0 以上			
湿分 (%)		1.0 以下			
強熱減量 (%)		3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
密度 (g/cm <sup>3</sup> )		1.95 以上			
粉末度	45 μm ふるい残分 (網ふるい方法)	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積 (ブレン方法) (cm <sup>2</sup> /g)	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上
フロー値比 (%)		105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
活性度指数 (%)	材令 28 日	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	材齢 91 日	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

ここで、県内で産出するフライアッシュは、電源開発株式会社石川発電所産出の分級フライアッシュ (JPFA) と沖縄電力(株)金武火力発電所から産出したフライアッシュを再燃焼した改質フライアッシュ (CfFA) の 2 種類が JIS II 種灰として出荷されている。

このうち、沖縄県土木建築部の JIS II 種灰を用いたフライアッシュコンクリートの第 1 号工事である伊良部大橋では、JPFA を用いており、その配合は沖縄県が独自に実施した配合試験で決定し、コンクリート製造工場へ提供したものであり、すべて非 JIS のレディーミクストコンクリートとして出荷されている。また、本研究において、電源開発株式会社石川発電所産出の JPFA を用いたフライアッシュセメント B 種を使用していることから、本マニュアル（案）ではその品質・性能を確認した JPFA を採用することを標準とする。

一方、近年使用実績が増えている CfFA は、強熱減量が小さく（未燃カーボンが少ない）、JPFA で管理しにくい空気量が普通コンクリートと同様に管理できる特性を持つ。

空気量を管理する必要がある、CfFA を混和材として使用する場合は、最適配合やそのフレッシュ性状・ワーカビリティ等の性質および強度発現、塩害等への耐久性等に関する性能を確認する必要がある。

フライアッシュの品質確認は、出荷元が発行したフライアッシュ（コンポジット）試験成績報告書により行うものとする。

### 3. 3 セメント

セメントは、JIS R 5213 に適合した「フライアッシュセメント B 種」を使用することとし、コンクリートが所要の性能を発揮できるように適切に選定する。

#### 【解説】

本マニュアル（案）では、JIS R 5213 に適合した「フライアッシュセメント B 種」を使用することとした。ただし、JIS R 5213 フライアッシュセメントでは混合セメントに含まれる混和材の分量を規定しているが、市販されている混合セメントには混和材の置換率が明示されていないものもあるため、ヒアリング等によってフライアッシュセメント B 種に含まれるフライアッシュの置換率を把握しておくことが必要である。

フライアッシュセメントを使用せず、フライアッシュを混和材として使用する場合は、セメントは、JIS R 5210 に適合した「普通ポルトランドセメント」を使用することを標準とし、コンクリートが所要の性能を発揮できるように適切に選定する。また、JIS R 5210 に適合するポルトランドセメントには、少量混合成分として、高炉スラグやシリカ質混合材、フライアッシュ、石灰石が 5%以下の割合で含まれるものもあるが、これらの少量混合成分については混和材としては考慮しないこととする。

JIS R 5213 フライアッシュセメントおよび JIS R 5210 に適合するポルトランドセメント以外のセメントを用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

### 3. 4 骨材

- (1) 細骨材は、JIS A 5308 附属書 A または JIS A 5005 に適合したものを、粗骨材は、JIS A 5308 附属書 A または JIS A 5005 に適合したものを標準とする。
- (2) (1)以外の骨材については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

#### 【解説】

##### (1)について

本マニュアル（案）では、細骨材は、JIS A 5308 附属書 A に適合した砂、または JIS A 5005 に適合した砕砂を用いることを、粗骨材は、JIS A 5308 附属書 A に適合した砂利、または JIS A 5005 に適合した碎石を用いることを標準とした。

##### (2)について

(1)以外の骨材を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

### 3. 5 練混ぜ水

- (1) 練混ぜ水は、上水道水、JSCE-B 101 または JIS A 5308 附属書 C に適合したものを標準とする。
- (2) (1)以外の練混ぜ水については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

#### 【解説】

##### (1)について

本マニュアル（案）では、上水道水、JSCE-B 101 または JIS A 5308 附属書 C に適合した練混ぜ水を用いることを標準とした。ただし、回収水を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しておくことが望ましい。

##### (2)について

(1)以外の練混ぜ水を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

### 3. 6 化学混和剤

- (1) 化学混和剤は、JIS A 6204 に適合したものを標準とする。
- (2) (1)以外の化学混和剤については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

#### 【解説】

##### (1)について

本マニュアル（案）では、JIS A 6204 に適合する化学混和剤を用いることを標準とした。

本マニュアル（案）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空気量は規定していないが、発注者との協議のうえで所定の空気量を要求する場合は、フライアッシュの置換率が高いと所定の空気量を確保するための AE 剤の使用量が多くなることもあり、混和材の種類と置換率、水結合材比によっては化学混和剤の効果が異なることもある。このため、化学混和剤の選定と使用量の調整を行う際には、実施工となるべく近い条件で試し練りを行い、フレッシュコンクリートの品質を確認することが望ましい。なお、AE 剤の使用量の多くはフライアッシュの未燃カーボンに AE 剤が吸着されることから生じると考えられる。近年では、フライアッシュ用に未燃カーボンへの吸着を抑制した AE 剤が市販されており、AE 剤の使用量が多くなる場合は選択肢の一つとなる。

##### (2)について

混和材の置換率の高いコンクリートを主な用途とした化学混和剤が開発されつつあるが、JIS A 6204 に適合する化学混和剤以外の化学混和剤を使用する場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

## 4. 製造および施工

### 4. 1 一般

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの製造および施工は、構造物が所要の性能を有するよう、あらかじめ適切な製造計画および施工計画を立案して実施するものとする。

#### 【解説】

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートのワーカビリティや強度発現特性は、フライアッシュの種類及び置換率によって異なる。このため、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートを用いたプレストレストコンクリート橋におけるコンクリートの製造および施工は、構造物が所要の特性を有するよう、事前の試験等に基づき、あらかじめ適切な施工計画を立案して実施する必要がある。

なお、本研究の範囲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フレッシュ時の運搬時におけるスランプの経時変化、ポンプ圧送性、締固めの施工性について普通コンクリートと同様に扱えることを、実物大試験体を用いた施工性の試験にて確認している。ただし、ポンプ圧送におけるスランプロスは普通コンクリートと比較して大きくなる可能性があることに留意が必要である。

### 4. 2 材料の貯蔵設備

フライアッシュセメントの貯蔵設備は、貯蔵中に品質が変化せず、また、他の物質が混入しない構造のものでなければならない。

#### 【解説】

フライアッシュセメントの貯蔵設備は、湿気や通気を避けなければならない。また、他のセメントや混和材などが混入しないようにしなければならない。このため、フライアッシュセメントの貯蔵には、専用の設備を使用することとする。フライアッシュを混和材として使用する場合のフライアッシュについても同様に専用の貯蔵設備を使用することとする。

### 4. 3 材料の計量

- (1) 材料の計量設備は、専用のものであることとし、所定の計量値の許容差内で計量できるものでなければならない。
- (2) フライアッシュセメントは、1 バッチ分ずつ質量で計量する。

#### 【解説】

##### (1) について

材料の計量を正確に行うことは、重要事項の一つである。フライアッシュセメントの計量値の許容

差は、1%以下とする。

フライアッシュを混和材として使用する場合のフライアッシュの計量誤差は、コンクリートの品質に敏感に影響を与えるため、計量値の誤差が大きい場合には、所定の品質のコンクリートが得られな  
いばかりか、支障を来すこともある。このことから、フライアッシュの計量値の許容差は、2%以下と  
し、計量は専用の設備とする。セメント及び混和材が袋詰めで供給される場合で、1袋の質量が記載  
質量に対してあらかじめ決められた計量誤差の範囲内にあることを確認した場合には、袋単位で計量  
を行ってよい。

ただし、専用の計量設備がない場合や少量利用の計量設備がない場合は、累加計量などにより専用  
計量設備と同等の計量が確認できればよいものとし、確認は発注者の計量立ち会いにより行うのがよ  
い。

## (2) について

フライアッシュセメントは、(1)の理由から1バッチ分ずつ、所定の計量値の許容差内となるように  
計量する。

### 4. 4 練混ぜ

- (1) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、各材料が均等に混ざり合ったコンク  
リートが得られるように十分に練り混ぜなければならない。
- (2) 材料をミキサに投入する順序および練り混ぜ時間は、あらかじめ適切に定めておかなければなら  
ない。

#### **【解説】**

### (1) について

フライアッシュはセメントなどの粉体に比べて密度が小さいため、フライアッシュを用いたコンク  
リートは、コンクリート中にフライアッシュが均等に分散するように、十分に練り混ぜなければなら  
ない。

### (2) について

フライアッシュを混和材として使用する場合は、フライアッシュを投入する順序および練り混ぜ時  
間は、使用するコンクリート製造工場における事前配合試験で確認し、適切に定めなければならない。

#### 4. 5 運搬

- (1) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、練り混ぜた後、速やかに運搬し、直ちに打込み、十分に締固めなければならない。コンクリートの練り混ぜを開始してから打込み完了までの時間は、原則として、1.5 時間を越えてはならない。
- (2) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートのフレッシュコンクリートの運搬におけるスランプの経時変化は、普通コンクリートと同等とみなしてよい。
- (3) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートのフレッシュコンクリートの空気量は、規定しないことを基本とするため、空気量の経時変化についても特に問題としなくても良い。

#### 【解説】

##### (1)について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの運搬および打込みに要する時間は、普通コンクリートと同等の範囲で管理できる。ただし、やむを得ない事情で 1.5 時間を超える場合は、遅延剤を用いてよいが、使用に当たっては発注者との協議の上決定するものとする。また、遅延剤の効果については事前試験において確認しておくのがよい。

##### (2)について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの運搬におけるスランプのロス量は、普通コンクリートと差異はないが、ポンプ圧送におけるスランプのロスが普通コンクリートより大きくなる可能性がある。

##### (3)について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの空気量は規定しないことを基本としているため、空気量のロスがあっても問題としなくて良い。

#### 4. 6 打込み・締固めおよび仕上げ

- (1) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの打込み・締固めには、内部振動機（棒状バイブレーター）を用いる事を標準とし、棒状バイブレーターの使用が困難な場合や、かぶり部分のコンクリートが十分締固められないと判断された場合は、型枠振動機（壁バイブレーター）を使用しても良い。
- (2) 打込み・締固めは、予め計画した締固め作業高さを超えることがないように、作業足場の設置や施工方法を検討しなくてはならない。
- (3) 型枠に接するコンクリートは、できるだけ平坦な表面が得られるように打込み、締固めなければならない。
- (4) 2 層目以上のコンクリートの締固めに当たっては、棒状バイブレーターを下層コンクリートに 10cm 程度挿入しなければならない。
- (5) コンクリートを 2 層以上に分けて打ち込む場合、打ち重ね時間間隔は出来るだけ短くするよう注意しなければならない。
- (6) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、ブリージング水が少ない場合があり、仕上げは普通コンクリートと異なることに注意しなければならない。

#### 【解説】

##### (1) について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの打込み・締固めに関しては、普通コンクリートと同様の注意を払う必要がある。ただし、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは粘性が高いため、打込み後直ぐになめらかなコンクリート表面になる場合が多く、既に棒状バイブレーターをかけたと勘違いすることのないように注意を要する。対策としては、型枠に一定間隔で印を付け、必要な場合は水系を張るなどして打込み面に格子点を仮想し、一箇所ずつ格子点を潰すように棒状バイブレーターをかけていくことが望ましい。また、1 箇所当たりの振動時間を適切に設定し（5～15 秒程度）、全箇所同じ時間振動させなければならない。

この他、かぶり部分のコンクリートが十分締固められないと判断された場合は、型枠バイブレーターを使用しても良いが、かけ過ぎはコンクリートの表層の強度低下など品質劣化を引き起こすことがあるので注意を要する。

棒状バイブレーターは JIS A 8610「コンクリート内部振動機」に、型枠バイブレーターは JIS A 8611「コンクリート外部振動機」に規定されている。

##### (2) について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの打込み・締固め作業高さの設定は、普通コンクリートと同じで良い。ただし、普通コンクリートに比べ、フライアッシュの流動性効果により、バイブレーターをかけると流れてレベリングしようとするので、コンクリートポンプ車の筒先を管理する作業員は、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートが流れるのに任せず、一定間隔で打込みしなければならない。

### (3) について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、その粘性からエントラップトエアが入りやすく、伏せ型枠部分で表面気泡やあばたが見られる事があるため、構造物によっては表面気泡に対する対策を取ることが望ましい。

また、アジテータ車は打込み直前に 30 秒の高速攪拌を行うが、その直前にスランプ・空気量等の測定を行うための高速攪拌を行っている場合は、打込み前の高速攪拌は行わない。これは、必要以上に高速攪拌を行うと、エントラップトエアが巻き込まれることがあるため、攪拌速度も必要に応じて中速攪拌に変更しても良い。

### (4) について

2 層目以上のコンクリートの打込み・締固めでは、下層コンクリートとの一体化が重要である。対策としては、棒状バイブレーターに型枠上端面から打込み層の高さ+10cm がわかるようにビニールテープで印を付け、その印を目安に各打込み層でバイブレーターを挿入すると良い。

### (5) について

コンクリートを 2 層以上に分けて打ち込む場合、下層コンクリートが固まり始めている時にそのまま上層コンクリートを打ち込むとコールドジョイントが出来る恐れがあるため、コンクリートの練り混ぜ時間から打込み終了までの時間経過、コンクリートの温度、締固め方法等の影響を考慮して設定し、できる限り短い打重ね時間間隔となるように管理することが大事である。打重ね間隔の上限は、表 4.6.1 に示すが、沖縄県は高温多湿であり、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは硬化がやや早いことから、同表よりも早めに打重ねる事が望ましい。

表 4.6.1 打重ね時間間隔の上限

外気温	許容打重ね時間時間間隔
25℃以下	2.5 時間
25℃を超える	2.0 時間

### (6) について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、ブリージング水が少ない場合があり、ブリージングを待って仕上げようとすると、仕上げが遅れる可能性があるため注意する必要がある。また、床版などの広範囲な仕上げ面や風の強く当たる場所での仕上げは、普通コンクリートよりも早く硬化が始まる可能性があるため、左官の人数を増やすなどして対応する必要がある。

#### 4. 7 養生

- (1) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、打込み後、硬化に必要な温度及び湿度条件を保ち、有害な作用の影響を受けないように、これを十分に湿潤養生しなければならない。
- (2) フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、打込み後の養生が重要であることから、十分な湿潤状態を保ち、コンクリートに要求される性能を満足するように、工程を勘案して適切な期間、湿潤養生を行うものとする。
- (3) 湿潤状態を保持する手段としては、保水養生マットまたは粘着型養生シート等による養生が望ましい。

#### 【解説】

##### (1)について

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの養生は、強度増進および耐久性確保のために、打込み後の一定期間、通常のコンクリート以上にフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートを適切な温度のもとで、湿潤状態を保ち、かつ、有害な作用を受けないようにしなければならない。

##### (2)について

沖縄県 FA 指針では、コンクリート標準示方書【施工編】に示される湿潤養生期間の標準日数、国土交通省東北地方整備局管内におけるフライアッシュコンクリートの養生期間の例を参考に、「内割り配合タイプの湿潤養生期間を、28 日を目標として可能な限り長期間の養生期間を確保するものとし、工程上 28 日を確保できない場合においても示方書に示される 7 日間を確保することが望ましい。」と解説している。

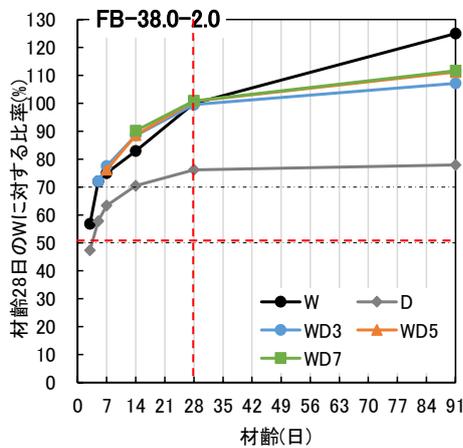
しかし、本マニュアル（案）で想定しているポストテンション T 桁は、材齢 3 日～5 日程度でプレストレスの導入を行うサイクル施工が一般的であること、製作位置から架橋位置への移動があること、次施工において打ち継がれる部分が多いことなど、一般のコンクリート構造物と比較して養生期間が工程に与える影響が大きい。そこで、本研究では、湿潤養生日数の違いが圧縮強度発現性および塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響について実験的に確認を行った。（付録-1 参照）

コンクリート標準示方書【施工編】に示される湿潤養生期間の標準日数は、材齢 28 日まで標準養生した供試体の 50%の強度が発現する湿潤養生日数としていると想定される。図 4.7.1 に示すように、付録-1 に示す配合を用いたフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートにおいて、材齢 3 日での標準養生を行った供試体圧縮強度は、材齢 28 日での標準養生した供試体の圧縮強度の 50%以上となっている。このことから、材齢 3 日まで標準養生を行えば、圧縮強度の観点からはコンクリート標準示方書【施工編】に示される湿潤養生期間の考え方を満足するものと考えられる。

また、図 4.7.2 に示すように、電気泳動試験（非定常）による塩化物イオン拡散係数は、標準養生期間が長くなる程小さい値を示しているが、材齢 7 日まで標準養生した供試体と材齢 4 か月まで標準養生した供試体は同程度の値となっている。また、材齢 3 日以降では塩化物イオン拡散係数の低下の度合いは小さくなっている。このことから、塩化物イオン浸透性の観点からは、材齢 7 日まで標準養生を行うことで、材齢 4 か月まで標準養生した場合と同程度であり、材齢 3 日まで標準養生を行え

ば、材齢 7 日まで標準養生した場合との差は小さいと考えられる。

以上を参考に、適切な期間、湿潤養生を行うものとする。



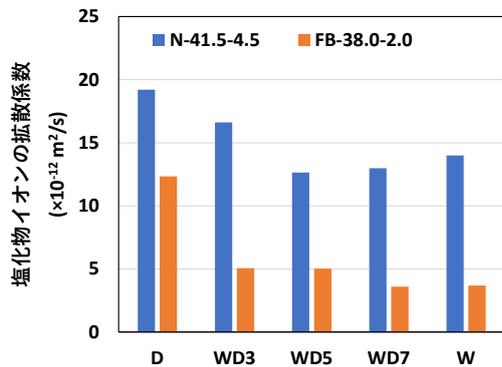
**【配合条件】**  
 結合材：フライアッシュセメント B 種  
 水結合材比：W/B=38.0%  
 空気量：2.0%

**【養生条件】**  
 W：脱型後，試験材齢まで標準養生。  
 D：脱枠後，試験材齢まで気乾養生。  
 WD3, WD5, WD7：脱枠後，材齢 3, 5, 7 日まで標準養生し，その後，試験材齢まで気乾養生。

※脱型は材齢 1 日で行った。標準養生は水温 20℃の水中養生。

**【検討結果】**  
 材齢 28 日における W の圧縮強度：62.8N/mm<sup>2</sup>  
 材齢 3 日における W の圧縮強度：35.4N/mm<sup>2</sup>  
 (28 日の強度に対する比率=56%)

図 4.7.1 材齢 28 日の標準養生供試体の圧縮強度に対する比率



**【配合条件】**  
 結合材：フライアッシュセメント B 種  
 水結合材比：W/B=38.0%  
 空気量：2.0%

**【養生条件】**  
 W：脱型後，試験材齢まで標準養生。  
 D：脱枠後，試験材齢まで気乾養生。  
 WD3, WD5, WD7：脱枠後，材齢 3, 5, 7 日まで標準養生し，その後，試験材齢まで気乾養生。

※脱型は材齢 1 日で行った。標準養生は水温 20℃の水中養生。

図 4.7.2 各養生条件における材齢 4 ヶ月の塩化物イオン拡散係数

(3)について

湿潤状態を保持する手段は、保水養生マットまたは粘着型養生シート等が利用されている。ここで、前述の東北地方整備局での事例にもあるように、鉛直面や下面の長期養生には粘着型養生シートが望ましく、沖縄県でもこの施工事例が増えている。よって、本マニュアル（案）で想定しているフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの養生には粘着型養生シート等の利用が望ましいと考えられる。

以上

## 第Ⅱ部 付録資料

# 目 次

## 第Ⅱ部 付録資料

### 付録-1 2019年度室内試験

(配合の検討, 強度発現性および塩化物イオン浸透抵抗性による  
湿潤養生日数の検討, ASR 抵抗性の検討)

1. 概要	21
2. 研究フロー	22
3. コンクリートの仕様	22
4. 配合検討	23
4.1 実験概要	23
4.1.1 コンクリートの使用材料および配合	23
4.1.2 水結合材比の検討方法	24
4.1.3 練混ぜ方法	24
4.2 実験結果および考察	24
4.2.1 フレッシュ性状	24
4.2.2 圧縮強度	24
4.3 配合検討のまとめ	26
5. 湿潤養生日数の検討	27
5.1 実験概要	27
5.1.1 コンクリートの使用材料および配合	27
5.1.2 養生方法	27
5.1.3 圧縮強度試験一覧	28
5.1.4 塩化物イオン浸透抵抗性	28
5.2 実験結果および考察	30
5.2.1 フレッシュ性状	30
5.2.2 圧縮強度とヤング係数の関係	31
5.2.3 標準養生日数が圧縮強度に及ぼす影響	31
5.2.4 標準養生日数が塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす影響	34
5.3 湿潤養生日数の検討のまとめ	34
6. 空気量が圧縮強度に及ぼす影響	36
6.1 実験概要	36
6.1.1 コンクリートの使用材料および配合	36
6.1.2 養生方法	36
6.2 実験結果および考察	36
6.2.1 フレッシュ性状	36
6.2.2 空気量が圧縮強度に及ぼす影響の検討	37

6.3	空気量が圧縮強度に及ぼす影響の検討のまとめ	37
7.	フライアッシュによる ASR 抵抗性の向上効果の検討	38
7.1	実験概要	38
7.1.1	コンクリートの使用材料および配合	38
7.1.2	ASR 促進膨張試験	38
7.2	実験結果および考察	39
7.3	フライアッシュによる ASR 抵抗性の検討のまとめ	41
8.	まとめ	41

## 付録-2 2020 年度施工性試験

(実機プラントによる試験練り，フレッシュコンクリートの経時変化，実物大試験体を用いた施工性の確認)

1.	概要	43
2.	研究フロー	44
3.	コンクリートの仕様および 2019 年度室内試験による提案配合	44
4.	実機プラントによるフレッシュ性状の経時変化および強度発現性の確認	45
4.1	実験概要	45
4.1.1	コンクリートの使用材料および配合	45
4.1.2	フレッシュ性状の経時変化の確認方法	45
4.1.3	圧縮強度の確認方法	45
4.1.4	練混ぜ方法	46
4.2	実験結果および考察	46
4.2.1	フレッシュ性状の経時変化	46
4.2.2	圧縮強度試験	47
4.3	フレッシュ性状の経時変化および強度発現性の確認のまとめ	47
5.	施工性試験	48
5.1	試験概要	48
5.1.1	試験場所	48
5.1.2	コンクリートの使用材料および配合	48
5.1.3	実物大試験体	49
5.1.4	施工方法	49
5.1.5	実物大試験体の養生方法	50
5.2	実験結果および考察	50
5.2.1	品質管理試験	50
5.2.2	施工性の確認試験	52
5.2.3	外観	53

5.3 施工性試験のまとめ .....	54
6. まとめ .....	54

### 付録-3 実物大試験体を用いた品質の確認試験

1. 概要 .....	55
2. 実物大試験体を用いた表層品質確認試験 .....	55
2.1 試験概要 .....	55
2.2 表層品質の確認結果 .....	56
3. 実物大試験体から採取したコア供試体を用いた品質確認 .....	59
3.1 コア供試体の採取 .....	59
3.2 圧縮強度試験および静弾性係数試験 .....	60
3.3 コンクリートの中酸化深さ試験 .....	61
3.4 含有塩化物イオン量試験 .....	61
4. まとめ .....	62

### 付録-4 電気抵抗率試験および非定常電気泳動試験による耐久性の評価

1. 概要 .....	63
2. 試験に用いた供試体 .....	63
3. 試験方法 .....	63
3.1 非定常電気泳動試験 .....	63
3.2 電気抵抗率試験 .....	63
4. 試験結果 .....	64
4.1 電気抵抗率の経時変化 .....	64
4.2 電気抵抗率と非定常電気泳動試験を用いた塩化物イオン拡散係数 .....	65
4.3 非定常電気泳動法を用いた拡散係数と見掛けの拡散係数の関係 .....	66
5. まとめ .....	67

### 付録-5 フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの二酸化炭素排出削減効果の検討

1. 概要 .....	68
2. 試算対象橋梁の概要 .....	68

2.1 試算対象橋梁の構造形式 .....	68
2.2 試算に用いたコンクリートの配合 .....	68
3. 二酸化炭素排出量の算出方法 .....	68
3.1 試算の範囲 .....	68
3.2 試算に用いた二酸化炭素排出原単位 .....	69
4. 二酸化炭素排出量の試算結果 .....	70
4.1 材料の製造時の二酸化炭素排出量 .....	70
4.2 建設時の二酸化炭素排出量 .....	70
5. まとめ .....	71

#### 付録-6 フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの LCC の検討

1. 概要 .....	72
2. 試算の検討条件 .....	72
2.1 試算対象橋梁の構造形式 .....	72
2.2 補修面積の設定 .....	72
2.3 コンクリートおよび補修費用の単価設定 .....	72
3. ライフサイクルコスト (LCC) の検討結果 .....	73
3.1 初期投資および補修費用 .....	73
3.2 ライフサイクルコスト (LCC) の検討 .....	74
4. まとめ .....	75



付録一 2019 年度室内試験  
(配合の検討, 強度発現性および塩化物イオン浸透抵抗性による  
湿潤養生日数の検討, ASR 抵抗性の検討)

1. 概要

フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの副産物を混和材として活用することによって、コンクリートの耐久性向上と環境負荷低減を同時に実現できることが期待できる。こうした背景から、土木研究所と PC 建協では、現場打ちプレストレストコンクリート橋に適用することを念頭に、「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅱ)―混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル(案)―」を作成した。ここでは、設計値を定めるため、圧縮強度、ヤング係数およびクリープ特性を早強ポルトランドセメント単味としたコンクリートとの実験的比較を行い、道路橋示方書で設計することが可能であることを示した。また、耐久性試験では、塩化物イオン浸透抵抗性に優れていることやプレストレストコンクリートの通常の配合では中性化による鋼材の腐食がないことを促進試験や暴露試験により明らかにしてきた。さらに、湿潤養生日数が圧縮強度や耐久性に及ぼす影響を実験的に確認し、15℃以上の環境下では3日を標準とした。しかし、この指針の適用範囲は早強ポルトランドセメントを用いて置換率をフライアッシュでは20mass%としており、沖縄地区で一般的に使用されている普通ポルトランドセメントとしていないため、湿潤養生日数を別途検討する必要がある。また、同マニュアル(案)では、ポンプ圧送性やフレッシュコンクリートの経時変化などの施工面などの実験的検討を行っていないことから施工面での検討も必要である。

一方で、沖縄県土木建築部では、沖縄県内の火力発電所で算出するフライアッシュを混和材として利用したコンクリート構造物の品質・耐久性向上を目的に「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」を発刊している。ここでは普通ポルトランドセメントとフライアッシュの組合せとしている。しかし、ポストテンション PC 桁では、ワーカビリティの改善を目的とし、細骨材(砕砂)の3~5mass%をフライアッシュで置換する外割り配合としており、塩化物イオン浸透抵抗性などの耐久性向上を主目的としてフライアッシュを適用していないと考えられる。

なお、既往の研究により、フライアッシュを用いたプレキャスト部材の載荷試験が実施されており、ひび割れ発生荷重と終局荷重は早強ポルトランドセメント単味と同等であることが報告<sup>り</sup>されており、フライアッシュを用いたコンクリートの構造特性は普通ポルトランドセメントとした場合でも同等であると考えられるため、本研究では対象としないこととした。

そこで本研究では、PC 橋の高耐久化を目的に、普通ポルトランドセメントの質量の15~20%をフライアッシュで置換したフライアッシュセメント(フライアッシュセメントB種)を用いたコンクリートのポストテンション PC 桁への実装化に向け、所定の圧縮強度を満足する配合の検討、圧縮強度発現および耐久性確保の観点からみた湿潤養生日数の検討および施工性の検討を行う。湿潤養生日数の検討は普通ポルトランドセメント単味のコンクリートとの比較によりおこなった。なお、フライアッシュを混和材として用いる際、品質の安定性が課題のひとつであることから、本研究では品質が保証された市販のフライアッシュセメントB種を採用し、その性能評価(確認)も目的のひとつとした。

「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」によれば、内割り配合タイプの空気量は耐凍害性を考慮する必要がないことから、空気量を規定しないことが述べられており、配合計算上2.0%としている。一方、外割り配合の空気量は4.5%を標準としている。このことから、本研究では、「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」に準拠し、空気量はフライアッシュセメントを用いたコンクリートでは2.0%、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートでは4.5%とし、両者を比較することとした。なお、細骨材は沖縄県内で一般的に流通している

「海砂+砕砂」の混合砂とする。海砂と砕砂の比率はレディミクストコンクリートの実績配合と同じとした。

## 2. 研究フロー

研究フローを図 2.1 に示す。フライアッシュを用いる配合(以降, FB 配合)との比較対象はポルトランドセメント単味配合(以降, N 配合)とした。

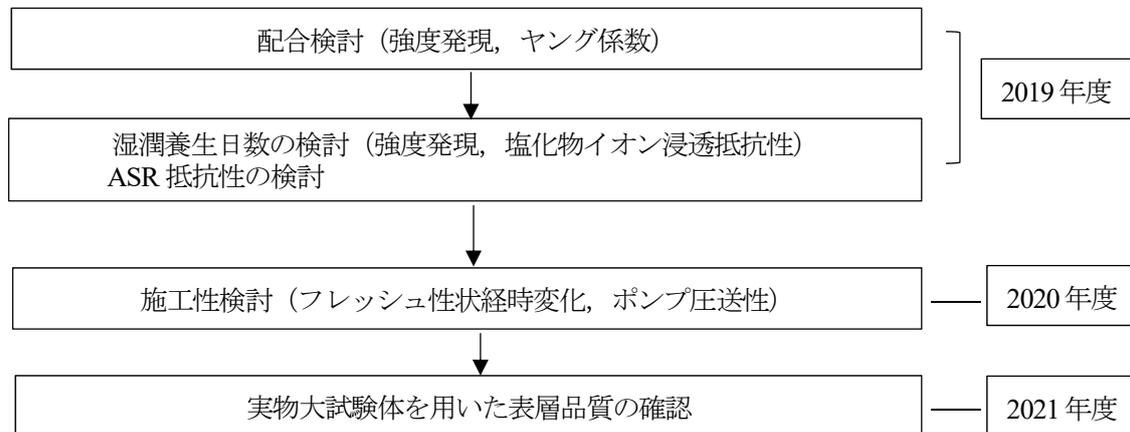


図 2.1 研究フロー

## 3. コンクリートの仕様

コンクリートの仕様を表 3.1 に示す。配合強度を算出する割増し係数は、設計基準強度に関しては実績がない配合であることから 1.2 とし、プレストレス導入時強度に関しては沖縄県のいくつかの N 配合の実施工を参考に割増しをしない 1.0 とした。N 配合における実施工では、材齢 3 日でプレストレス導入時強度を満足しない場合はプレストレス導入時期を所定の強度となる材齢を別途定めていた。このことから、本研究では FB 配合の配合強度の決定方法は N 配合に準拠することとした。

表 3.1 コンクリートの仕様

項目	規格値	備考	
1 設計基準強度(標準養生 20℃水中養生)	$\sigma_{28\text{day}}=40\text{N/mm}^2$		
2 プレストレス導入時強度(現場養生：ここでは封緘養生)	$\sigma_{3\text{day}}=34\text{N/mm}^2$		
3 変動係数	V=10.0%		
4 単位水量の最大値	W=175kg/m <sup>3</sup>		
5 目標スランプ	FB 配合	18±2.5cm	ポストテンション T 桁を想定
	N 配合	12±2.5cm	
6 目標空気量	FB 配合	Air=2.0±1.0%	FA を内割りとした配合 沖縄県 FA 配合及び施工指針(案)準拠 凍害がないため
	N 配合	Air=4.5±1.0%	
7 塩化物含有量の最大値	300g/m <sup>3</sup>		
割増し係数から算出される配合強度			
8 設計基準強度の配合強度	$\sigma_{28\text{day}}=48.0\text{N/mm}^2$	設計基準強度×1.2	
9 プレストレス導入時強度の配合強度	$\sigma_{3\text{day}}=34.0\text{N/mm}^2$	プレストレス導入時強度×1.0	

注) 空気量の範囲は試験室試し練り, かつ, 圧縮強度の比較を実施するため±1.0 とした

#### 4. 配合検討

N 配合は生コン工場の実績とし、ここではFB 配合を検討した(2019/12/17)。

##### 4.1 実験概要

##### 4.1.1 コンクリートの使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表 4.1 に示す。FB 配合の結合材はフライアッシュセメント B 種を使用した。フライアッシュセメントは普通ポルトランドセメントの 15~20mass%をフライアッシュ II 種で置換したプレミックス品である。細骨材は砕砂と海砂との混合砂とする。

表 4.1 コンクリートの使用材料

材 料	記号	仕 様
フライアッシュセメント	FB	琉球セメント社製 置換率 15~20mass%, 密度 2.98 g/cm <sup>3</sup> フライアッシュ: 電源開発石川発電所 分級 FA
水	W	上水道水
細骨材	S1	砕砂 密度 2.65 g/cm <sup>3</sup>
	S2	海砂 密度 2.60g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石 2005 密度 2.70g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤	SP	日本シーカ社製 1100NT
AE 剤	AE	AER50

配合検討のコンクリート配合を表 4.2 に示す。FB 配合は普通ポルトランドセメント配合より 5%小さくした水結合材比を中心配合と仮定した。砕砂と海砂の割合は容積で 5 : 5 とした。

表 4.2 コンクリートの配合 (配合検討)

配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量					高性能 AE 減水 剤 B×%	
				水	結合材(B)	細骨材		粗骨材		
				W	FB	S1 (砕砂)	S2 (海砂)	G		SP
FB-42	2.0	42.0	46.9	kg	165	393	424	416	980	0.675
				リットル	165	132	160	160	363	
FB-37	2.0	37.0	45.4	kg	165	446	400	393	980	0.700
				リットル	165	150	151	151	363	
FB-32	2.0	32.0	43.4	kg	165	516	368	361	980	0.750
				リットル	150	174	139	139	363	

#### 4.1.2 水結合材比の検討方法

圧縮強度試験の試験材齢は以下とした。本試験では、封緘養生はクリアケースに保管した現場養生を想定した(写真 4.1 参照)。

プレストレス導入時強度(現場養生：ここでは封緘養生)：3, 7, 28 日 (管理材齢 3 日)

設計基準強度の配合強度 (標準養生) : 7, 28 日 (管理材齢 28 日)

FB 配合の中心配合の水結合比, 中心配合の水結合材比±5%としたセメント結合材比と圧縮強度の関係からプレストレス導入時強度と設計基準強度を満足する水結合材比を求めた。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して実施した。



写真 4.1 封緘養生の状況

#### 4.1.3 練混ぜ方法

練混ぜは材料を一括で投入した。練混ぜ時間は空練りを 15 秒, その後 165 秒とした。練混ぜは 55 リットル 2 軸ミキサを使用し, 1 バッチあたりの練り量を 30 リットルとした。なお, 湿潤養生日数の検討, 空気量が圧縮強度におよぼす影響の検討および ASR 抵抗性の検討についても同様とした。

### 4.2 実験結果および考察

#### 4.2.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表 4.3 に示す。ここでは, 現着までの時間を 30 分と仮定し, フレッシュ性状の経時変化もあわせて測定した。圧縮強度の供試体は経過時間 30 分後に採取した。経過時間 30 分のフレッシュ性状は目標値を満足した。

表 4.3 フレッシュ性状(配合検討)

配合名	経過時間 (分)	高性能 AE 減水 剤	目標値		試験結果		
		SP B×%	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
FB-42	0	0.675	—	—	21.0	2.4	21.4
	30		18±2.5	2.0±1.0	20.0	1.6	21.5
FB-37	0	0.700	—	—	20.0	1.9	21.3
	30		18±2.5	2.0±1.0	20.0	1.8	20.9
FB-32	0	0.750	—	—	21.0	1.9	22.0
	30		18±2.5	2.0±1.0	19.5	1.4	21.7

#### 4.2.2 圧縮強度

封緘養生した供試体の圧縮強度試験の結果を表 4.4 に, 標準養生した供試体の圧縮強度試験の結果を表 4.5 にそれぞれ示す。

表 4.4 圧縮強度(封緘養生)(配合検討)

配合名	養生条件	材齢 (日)	No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )					
					平均				
FB-42	封緘養生	3	1	30.0	30.5				
			2	30.4					
			3	31.2					
FB-37			封緘養生	3	1	38.1	38.2		
					2	39.0			
					3	37.6			
FB-32					封緘養生	3	1	44.7	44.4
							2	43.9	
							3	44.7	
FB-42	封緘養生	7					1	37.8	37.6
							2	37.1	
							3	37.8	
FB-37			封緘養生	7			1	47.0	46.0
							2	45.7	
							3	45.3	
FB-32					封緘養生	7	1	52.2	53.0
							2	53.6	
							3	53.2	
FB-42	封緘養生	28					1	49.8	50.0
							2	50.2	
							3	50.0	
FB-37			封緘養生	28			1	57.7	57.1
							2	56.9	
							3	56.8	
FB-32					封緘養生	28	1	66.1	66.3
							2	66.1	
							3	66.8	

表 4.5 圧縮強度(標準養生)(配合検討)

配合名	養生条件	材齢 (日)	No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )					
					平均				
FB-42	標準養生	7	1	41.0	41.5				
			2	41.8					
			3	41.8					
FB-37			標準養生	7	1	49.0	49.1		
					2	48.5			
					3	49.7			
FB-32					標準養生	7	1	57.8	57.0
							2	58.3	
							3	55.0	
FB-42	標準養生	28					1	55.4	54.8
							2	54.1	
							3	54.9	
FB-37			標準養生	28			1	61.0	61.5
							2	61.9	
							3	54.9	
FB-32					標準養生	28	1	71.9	72.4
							2	72.7	
							3	72.6	

封緘養生した材齢 3 日の供試体と標準養生した材齢 28 日の供試体の結合材水比と圧縮強度の関係を図 4.1 に示す。図中には近似式をあわせて示す。この近似式を用いて、所定の圧縮強度を満足する水結合材比は以下となり、プレストレス導入時強度で水結合材比を決定した。プレストレス導入強度を満足した水結合材は 39.4% となった。

封緘養生材齢3日(プレストレス導入時強度) (34N/mm<sup>2</sup>)

W/B=39.4%

標準養生材齢28日(設計基準強度の配合強度) (48N/mm<sup>2</sup>)(設計基準強度)

W/B=47.2%

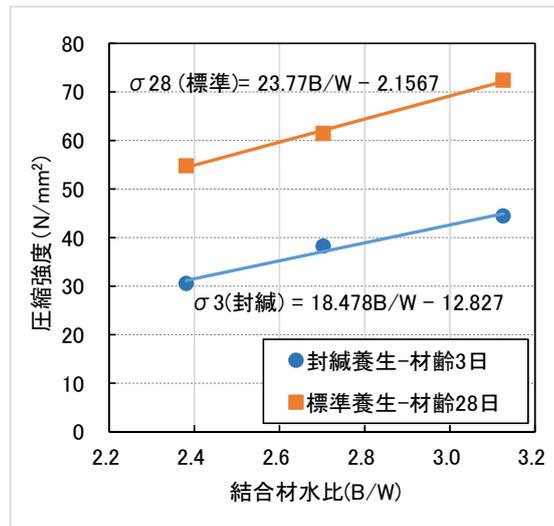


図 4.1 結合材水比と圧縮強度の関係

ここで、湿潤養生日数の検討と ASR 抵抗性を検討する配合を決定するにあたり、圧縮強度の 5%を安全側に見ることとし、式(4.1)を用いることとし、プレストレス導入時強度を満足する水結合材比は 38%とした。

$$\sigma_3(\text{プレストレス導入時}) = 0.95 \times (18.478 \times \frac{B}{W} - 12.827) \quad (4.1)$$

#### 4.3 配合検討のまとめ

配合検討の結果、FB 配合の水結合材比は 38%となった。

## 5. 湿潤養生日数の検討

湿潤養生日数が圧縮強度発現および耐久性に及ぼす影響を実験的に検討した(2020/2/12)。耐久性は塩化物イオン浸透抵抗性を把握することにより行った。

### 5.1 実験概要

#### 5.1.1 コンクリートの使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表 5.1 に示す。FB 配合の結合材はフライアッシュセメントを使用した。フライアッシュセメントは普通ポルトランドセメントの 15~20mass% をフライアッシュ II 種で置換したプレミックス品である。細骨材は砕砂と海砂との混合砂とする。なお、空気量が圧縮強度におよぼす影響の検討および ASR 抵抗性の検討も同じ仕様の材料を使用した。

表 5.1 コンクリートの使用材料

材 料	記号	仕 様
フライアッシュセメント	FB	琉球セメント社製 置換率 15~20mass%, 密度 2.98 g/cm <sup>3</sup> フライアッシュ: 電源開発石川発電所 分級 FA
普通ポルトランドセメント	N	琉球セメント社製 密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>
水	W	上水道水
細骨材	S1	砕砂 密度 2.65 g/cm <sup>3</sup>
	S2	海砂 密度 2.60 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石 2005 密度 2.70 g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤	SP	日本シーカ社製 1100NT
AE 剤	AE	AER50

湿潤養生日数の検討をしたコンクリート配合を表 5.2 に示す。空気量は FB 配合において 2.0%, N 配合において 4.5% とした。N 配合は実績配合を用いることとした。砕砂と海砂の割合は, FA 配合において容積で 5 : 5 とし, N 配合において容積で 4 : 6 とした。

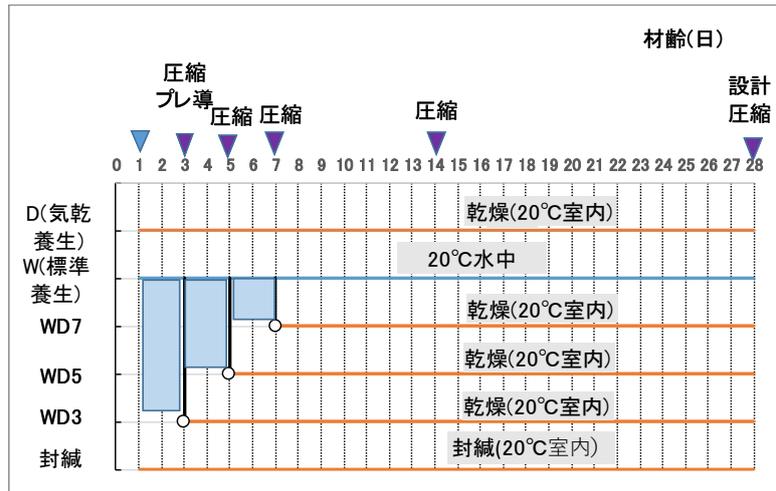
表 5.2 コンクリートの配合(湿潤養生日数の検討)

配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)		単位量						混和剤 B×%		
					水		結合材(B)		細骨材		粗骨材	SP	AE
					W	FA	N	S1 (砕砂)	S2 (海砂)	G			
FB-38.0-2.0	2.0	38.0	45.7	kg	165	435	—	405	398	980	0.70	—	
				リットル	165	146	—	153	153	363			
N-41.5-4.5	4.5	41.5	46.7	kg	160	—	386	333	490	969	0.40	0.0030	
				リットル	160	—	122	125.6	188.4	359			

配合名は「結合材種別—W/B—空気量」で示す。AE 剤は原液

#### 5.1.2 養生方法

養生方法を図 5.1 に示す。脱枠 1 日とし, 湿潤養生日数を検討する。なお, コン示では平均温度 15°C 以上では普通セメント+混和材の湿潤養生日数を 7 日としていることから, 湿潤養生日数は 7 日までとする。脱型は材齢 1 日とし, 所定の材齢まで標準養生(20°C 水中養生)を行い, その後, 20°C 室内で養生した。なお, 以降では試験条件を明確にするため, 湿潤養生日数を標準養生日数と記載する。



注) Wは圧縮強度実施まで、非定常電気泳動試験開始材齢まで標準養生

図 5.1 養生方法

### 5.1.3 圧縮強度試験一覧

圧縮強度試験一覧を表 5.3 に示す。圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して実施した。養生方法の変更時には圧縮強度試験を行い、標準養生と比較することとした。

表 5.3 圧縮強度試験

	脱枠	試験材齢(日)					
		3	5	7	14	28	91
W	1 日	○	○	○	○	○	○
D		○	○	○	○	○	○
WD3		-	○	○	○	○	○
WD5		-	-	○	○	○	○
WD7		-	-	-	○	○	○
封緘		○	-	○	-	○	-
小計			3	3	5	5	6
総計		24					

1 配合あたり 27×3=81 本

- ・実施配合(2 配合) : N 配合および FA 配合 81 本×2 配合=162 本
- ・FA の特徴である長期材齢の水和発現による耐久性を把握ために実施

### 5.1.4 塩化物イオン浸透抵抗性

塩化物イオン浸透抵抗性は、塩水による浸せき試験法や電気泳動法（定常法）では時間がかかり再水和により湿潤養生による影響が明らかにならない可能性があるため、ここでは電気泳動試験（非定常法）<sup>23)</sup>を用いて行うこととし、塩化物イオンの浸透深さを比較することにより湿潤養生日数を検討する。電気泳動試験（非定常法）の概要を図 5.2 に示す。各養生条件で円柱供試体を作製し、材齢 4 ヶ月で試験を行う。養生方法の違いが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に与える影響を検討するため、型枠底面を試験対象面として、この面が脱型後に湿潤状態あるいは乾燥状態となるように養生を行う。養生後、型枠底面から厚さ 50mm で供試体を切断し、真空飽水処理後に印加電圧 30V で通電を行う。通電後に供試体を割裂し、硝酸銀溶液(0.1mol/L)を割裂面に噴霧し、噴霧から 6 時間以上が経過して硝酸銀溶液が十分に乾燥した後に塩化物イオン浸透深さを測定する(写真 5.1 参照)。塩化物イオン浸透深さは両端部 10mm を除いた中央部で等間隔の 9 点を測定結果の平均値とする。供試体数は各養生方法 3 本とした。

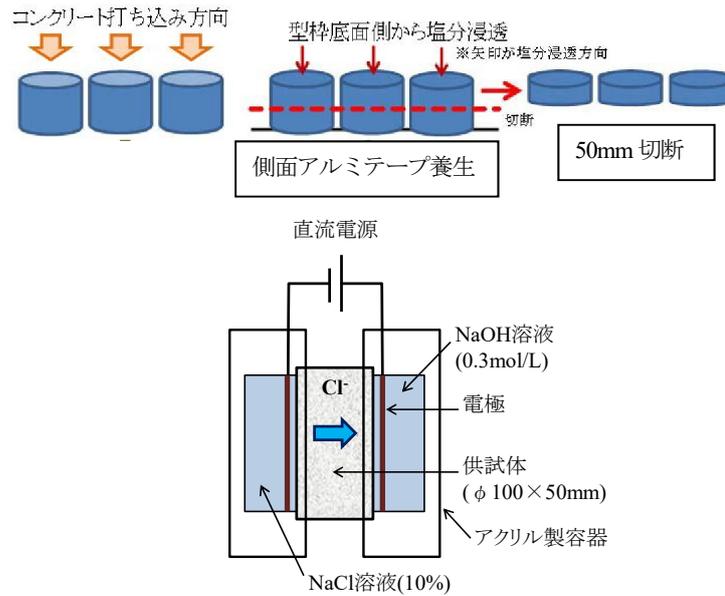


図 5.2 電気泳動試験（非正常法）の概要

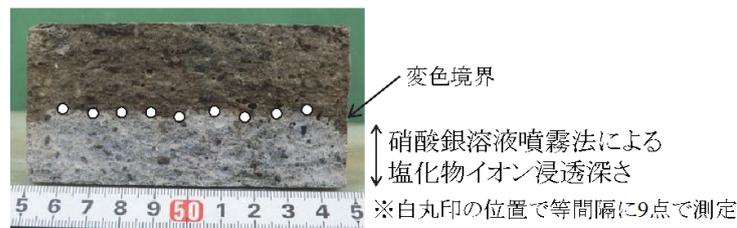


写真 5.1 塩化物イオン浸透深さの測定例

式(5.1)を用いて塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  を算出する。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} K \quad (5.1)$$

ここに、 $D_{nssm}$ : 塩化物イオン拡散係数( $m^2/s$ )、 $R$ : 気体定数( $=8.31 J/(K \cdot mol)$ )、 $T$ : 通電時の陽極側と陰極側の溶液温度の平均値(K)、 $z$ : 塩化物イオンの電荷( $=1$ )、 $F$ : ファラデー定数( $=9.65 \times 10^4 J/(V \cdot mol)$ )、 $E$ : 電位勾配(試験の開始時と終了時における両溶液間の電圧の平均値を供試体厚さ( $=0.05 m$ )で除した値、 $V/m$ )、 $K$ : 塩化物イオン浸透速度係数( $m/s$ )である。塩化物イオン浸透速度( $K$ )は通電時間と塩化物イオン浸透深さが比例関係にあると仮定して算出した(図 5.3 参照)。

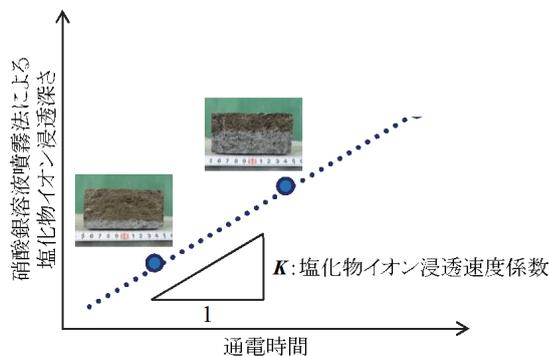


図 5.3 塩化物イオン浸透速度の算出例

塩化物イオン浸透抵抗性試験を実施する養生は「W」、「D」、「W3」、「W5」および「W7」とした。また、結合材種別はFA配合とN配合の2種類とした。

## 5.2 実験結果および考察

### 5.2.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状を表5.4と写真5.2に示す。フレッシュ性状は目標値を満足した。

表5.4 フレッシュ性状(標準養生日数の検討)

配合名	バッチ No.	混和剤		目標値		試験結果		
		SP B×%	AE B×%	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
FB-38.0-2.0	1	0.7	—	18.0±2.5	2.0±1.0	19.5	1.5	20.6
	2					20.5	1.8	20.8
	3					20.0	1.8	21.2
	4					20.0	1.7	20.9
	5					18.5	2.0	21.4
	6					20.0	1.9	21.5
	7					19.0	1.8	21.2
N-41.5-4.5	1	0.4	0.0030	12.0±2.5	4.5±1.0	10.0	5.2	21.0
	2					11.0	5.3	20.9
	3					12.0	5.3	20.9
	4					11.5	5.1	21.0
	5					11.5	5.3	20.7
	6					10.5	5.1	20.9
	7					10.0	5.3	20.9

AE 剤は原液



(FB-38.0-2.0)

(N-41.5-4.5)

写真5.2 フレッシュ性状

## 5.2.2 圧縮強度とヤング係数の関係

圧縮強度およびヤング係数を表 5.5 に示す。圧縮強度とヤング係数の関係を図 5.4 に示す。本試験で使用したコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係は概ね道路橋示方書に示す値となった。

表 5.5 圧縮強度およびヤング係数

配合名	養生条件	材齢 (日)	No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
					平均		平均
FB-38.0-2.0	D	7	1	29.0	29.5	29.5	28.4
			2	28.6		27.5	
			3	30.8		28.2	
N-41.5-4.5			1	27.4	27.3	25.7	25.6
			2	26.6		26.1	
			3	27.9		25.1	
FB-38.0-2.0	W	28	1	62.3	62.2	38.4	37.9
			2	61.4		38.8	
			3	63.0		36.4	
N-41.5-4.5			1	51.7	51.5	34.2	33.9
			2	50.8		33.0	
			3	52.1		34.6	

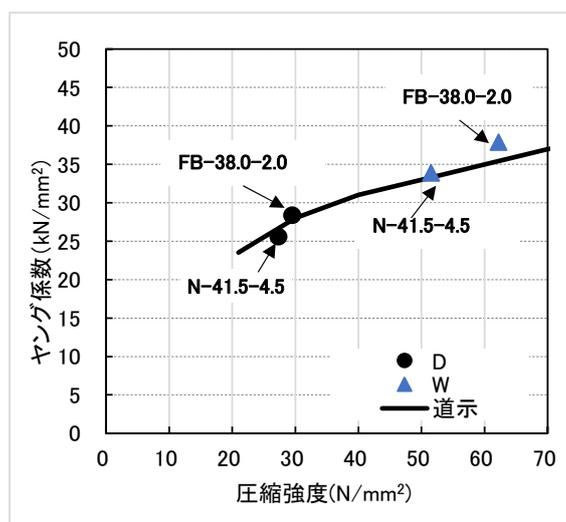


図 5.4 圧縮強度とヤングの関係

## 5.2.3 標準養生日数が圧縮強度に及ぼす影響

各配合と材齢の圧縮強度の3体の平均値を表 5.6 に示す。配合「FB-38.0-2.0」はプレストレス導入時強度(封緘養生材齢 3 日 34N/mm<sup>2</sup>)と設計基準強度の目標強度(標準養生材齢 28 日 48N/mm<sup>2</sup>)を満足した。配合「N-41.5-4.5」は設計基準強度の目標強度(標準養生材齢 28 日 48N/mm<sup>2</sup>)を満足したが、プレストレス導入時強度(封緘養生材齢 3 日 34N/mm<sup>2</sup>)は若干であるが満足しなかった。配合「N-41.5-4.5」の水結合材比を修正しない場合にはプレストレス導入時材齢を遅らせる必要がある。なお、本試験の範囲内では、実績のある N 配合(空気量 4.5%)からプレストレス導入時強度を材齢 3 日で満足する FB 配合(空気量 2.0%)を推定する場合には、N 配合(空気量 4.5%)の水結合材比より約 3.5%小さくする必要がありことが認められた。

表 5.6 平均圧縮強度(標準養生日数の検討)

配合名	養生方法	3日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	5日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	7日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	14日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	28日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	91日強度 (N/mm <sup>2</sup> )
FB-38.0-2.0	W	35.4 (35.7,35.3,35.1)	44.9 (44.6,45.1,44.9)	46.7 (46.7,46.2,47.1)	51.6 (53.7,50.4,50.7)	62.2 (62.3,61.4,63.0)	77.8 (78.2,77.0,78.3)
	D	29.5 (29.0,28.6,30.8)	36.0 (36.4,34.9,36.7)	39.4 (38.3,39.9,40.1)	43.9 (43.8,45.8,42.0)	47.4 (47.5,46.0,48.8)	48.5 (48.0,48.3,49.3)
	WD3	—	44.9 (45.3,44.2,45.2)	48.2 (47.6,48.5,48.6)	55.1 (55.4,54.9,54.9)	61.9 (61.8,62.0,62.0)	66.7 (67.9,66.1,66.2)
	WD5	—	—	47.4 (48.0,48.5,45.8)	55.2 (55.3,54.6,55.6)	62.7 (62.3,63.0,62.9)	69.2 (67.5,71.7,68.4)
	WD7	—	—	—	56.1 (56.1,55.8,56.5)	62.8 (63.0,62.5,62.9)	69.5 (71.3,69.9,67.4)
	封緘	35.1 (36.0,34.1,35.1)	—	42.7 (42.0,43.8,42.4)	—	53.4 (52.6,53.6,54.1)	—
N-41.5-4.5	W	29.0 (26.5,30.4,30.2)	38.9 (38.6,38.6,39.5)	42.3 (41.1,41.1,44.7)	47.2 (47.9,45.7,48.1)	51.5 (51.7,50.8,52.1)	56.2 (56.8,57.2,54.6)
	D	27.0 (27.4,26.6,27.9)	31.5 (31.3,31.3,32.0)	34.8 (34.9,35.9,33.5)	37.5 (37.6,36.7,38.2)	41.0 (40.0,42.1,41.0)	41.9 (41.4,42.4,41.8)
	WD3	—	40.1 (40.5,40.4,39.5)	43.0 (43.8,42.3,42.9)	48.7 (48.0,48.0,50.2)	52.0 (52.6,51.3,52.2)	52.6 (51.4,50.4,56.0)
	WD5	—	—	44.1 (42.7,44.6,44.9)	48.4 (48.9,47.5,48.9)	53.2 (53.9,53.9,51.9)	55.1 (55.0,55.3,54.9)
	WD7	—	—	—	48.0 (47.2,48.6,48.2)	53.5 (52.3,55.5,52.7)	57.0 (59.5,56.7,54.7)
	封緘	32.5 (33.1,32.6,31.7)	—	40.3 (40.4,41.4,39.2)	—	48.0 (46.3,48.1,49.7)	—

注) : ()の数値は個々の試験結果

配合「FB-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」の標準養生、気乾養生および封緘養生の圧縮強度発現を図 5.5 に示す。両配合とも標準養生とした場合に圧縮強度が大きく、気乾養生とした場合に小さくなった。また、FA 配合は N 配合と比較して、標準養生と気乾養生との圧縮強度の差が大きく、養生方法が圧縮強度に与える影響が大きくなることが認められた。

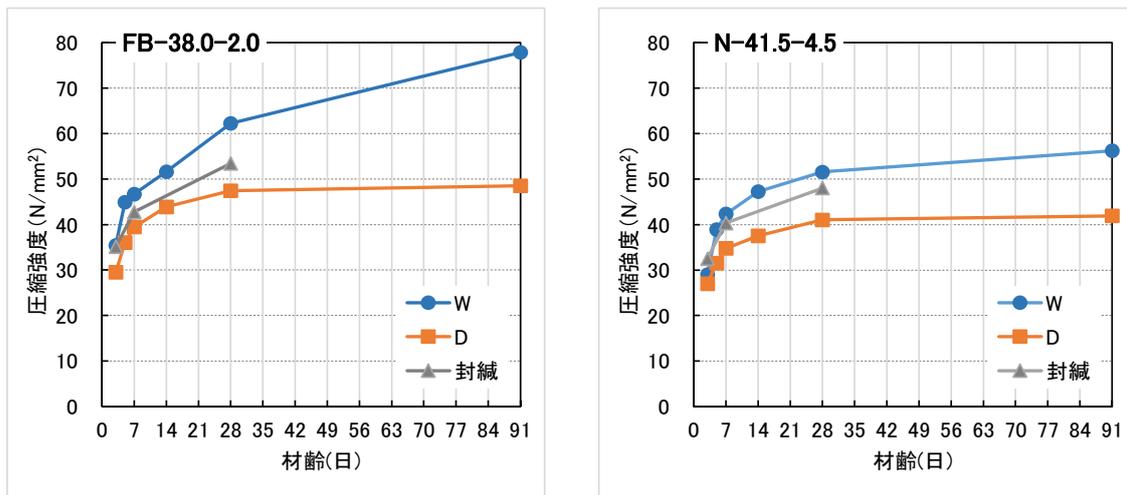
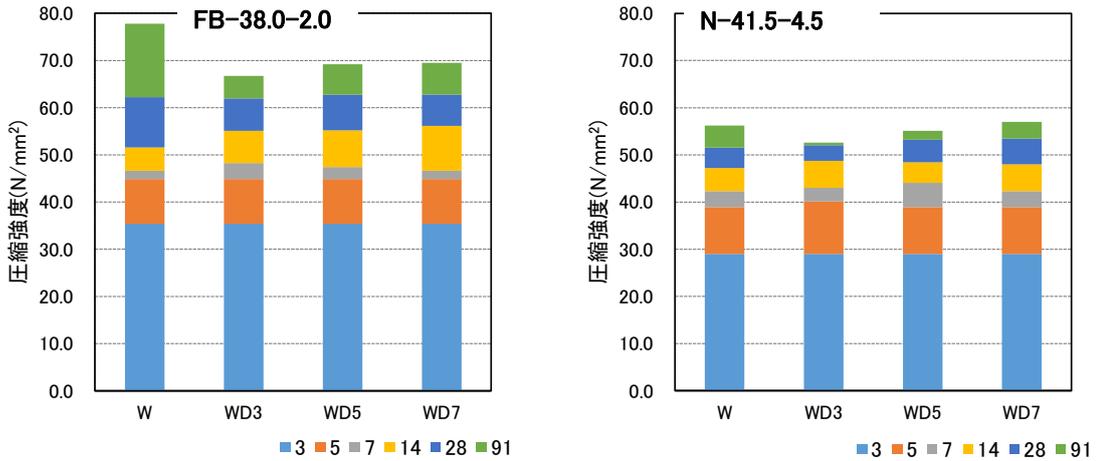


図 5.5 標準養生、気乾養生および封緘養生の圧縮強度発現

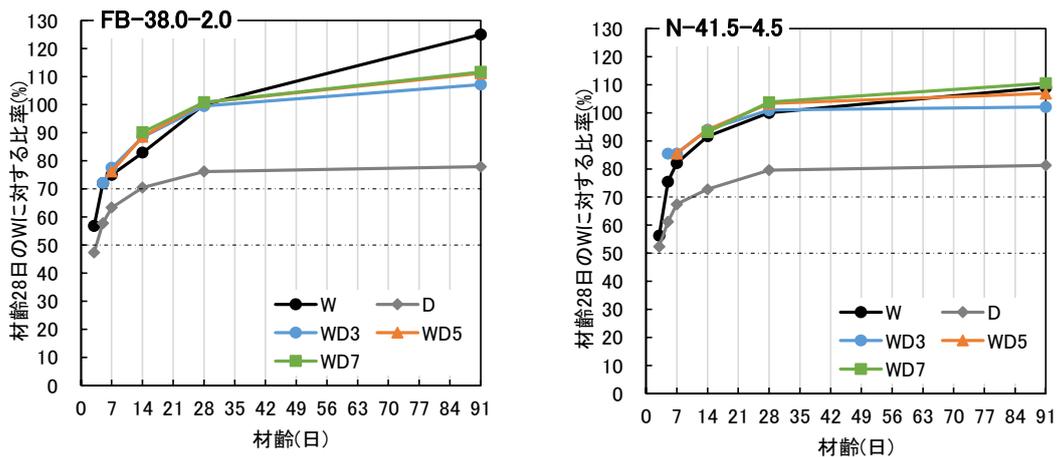
配合「FB-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」の標準養生日数ごとの圧縮強度発現を図 5.6 に示す。両配合とも脱枠後に材齢 5 日まで標準養生を行った供試体の圧縮強度の発現は、材齢 7 日まで標準養生を行った供試体と概ね同等であった。しかし、FA 配合の場合に材齢 91 日まで標準養生を行った供試体の圧縮強度は脱枠後に材齢 7 日まで標準養生を行った供試体より大きくなることが認められた。



注)WD3 の圧縮強度は材齢3日までWと同じ、WD5の圧縮強度は材齢5日までWと同じ  
WD7の圧縮強度は材齢7日までWと同じとして示す

図 5.6 標準養生日数ごとの圧縮強度発現

配合「FB-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」の材齢28日の標準養生供試体の圧縮強度に対する比率を図5.7に示す。2017年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕の「湿潤養生日数」に示されている湿潤養生日数と1986年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕の「マスコンクリート」の圧縮強度の算定式から湿潤養生日数の目安を材齢28日の標準養生した供試体の圧縮強度の50%以上と推察している<sup>4)</sup>。本試験の範囲では、両配合とも脱枠後材齢3日まで標準養生した供試体の圧縮強度は材齢28日の圧縮強度に対して50%以上となっている。しかしながら、材齢28日および材齢91日のWD3の比率はWD5およびWD7より若干小さくなる傾向が確認された。



注)WD3 の圧縮強度は材齢3日までWと同じ、WD5の圧縮強度は材齢5日までWと同じ  
WD7の圧縮強度は材齢7日までWと同じとして示す

図 5.7 材齢28日の標準養生供試体の圧縮強度に対する比率

#### 5.2.4 標準養生日数が塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす影響

各養生条件下で材齢4カ月経過後の供試体の塩化物イオンの拡散係数を図5.8に示す。N配合とFB配合で比較すると、いずれの養生条件でN配合よりもFA配合の拡散係数は低下した。養生条件の違いでは、N配合、FB配合ともにD(気乾養生)の供試体の拡散係数は他の養生条件の供試体よりも大きい値を示した。特に、FB配合では、Dの拡散係数はWよりも3.3倍程度となり、乾燥の影響により十分なポズラン反応が得られなかったものと考えられる。一方で、標準養生日数を長くすることで、N配合、FB配合ともに拡散係数の低下が見られ、N配合ではWD5やWD7の拡散係数がWとほぼ同程度の値を示し、FA配合ではWD7の拡散係数がWと同程度の値を示した。また、FB配合の拡散係数の低下の度合は標準養生を材齢3日より延長しても小さくなった。

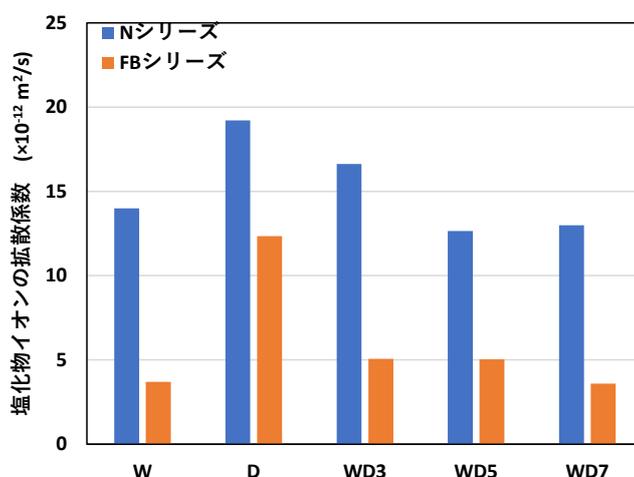


図5.8 各養生条件における材齢4カ月の塩化物イオンの拡散係数

#### 5.3 湿潤養生日数の検討のまとめ

湿潤養生日数の検討結果をまとめると以下となる。

- (1) 脱型後の湿潤養生がコンクリートの品質に影響し、FB配合とN配合のコンクリートは脱型後に適切な標準養生(湿潤養生)を実施することにより圧縮強度の発現の増加量を大きくすることができる。その影響はFB配合で顕著となる。
- (2) 標準養生した供試体の材齢28日の圧縮強度の50%以上となる材齢は3日以上であることが認められた。
- (3) 圧縮強度発現の観点からFB配合とN配合のコンクリートは材齢5日まで標準養生(湿潤養生)を実施することにより、材齢7日まで標準養生を実施した場合との差がほとんどないことが認められた。
- (4) 材齢4カ月の塩化物イオンの拡散係数の結果から、N配合では材齢5日まで標準養生(湿潤養生)を実施し、FB配合では材齢7日まで標準養生(湿潤養生)を実施することで、4カ月間の水中養生を行った供試体とほぼ同程度の拡散係数を示すことが認められた。

今回の試験により得られた結果から、FB配合の湿潤養生日数を提案する。

FB配合の湿潤養生日数(案)

圧縮強度発現の観点から湿潤養生日数を材齢3日以上とした方がいい。また、塩化物イオン浸透抵

抗性の観点からは7日とした場合に4カ月の標準養生と同程度であったが、湿潤養生日数を材齢3日より延長しても塩化物イオン拡散係数の低下量は小さくなった。この結果から、湿潤養生日数は材齢3日以上実施することを標準とする。しかし、養生日数が施工の効率化や経済性に悪影響を及ぼさない場合は、長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から安全側になるように配慮し湿潤養生日数は材齢7日以上が望ましいと考えられる。なお、本試験では、材齢3日でプレストレスを導入することを目標とした配合としていることに留意が必要であり、本試験と同等の配合条件でない場合は、必要な湿潤養生日数について別途検討が必要である。

## 6. 空気量が圧縮強度に及ぼす影響

FB 配合の空気量を 2.0% として試験しているが、施工箇所の環境条件により空気量が 4.5% となる場合も想定される。このことから、FB 配合と N 配合において、材齢 3、7 および 28 日における空気量が圧縮強度に与える影響を検討した(2020/2/12)。

### 6.1 実験概要

#### 6.1.1 コンクリートの使用材料および配合

コンクリートの使用材料は前章の湿潤養生日数の検討で使用した材料と同一である(表 5.1 参照)。空気量が圧縮強度に及ぼす影響を検討したコンクリートの配合を表 6.1 に示す。検討は前章に示した配合の圧縮強度試験の結果と配合「FB-38.0-4.5」と「N-41.5-2.0」のコンクリートの圧縮強度の結果を用いて実施した。

表 6.1 コンクリートの配合(湿潤養生日数の検討)

配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)		単位量						混和剤 B×%		
					水		結合材(B)		細骨材		粗骨材	SP	AE
					W	FA	N	S1 (砕砂)	S2 (海砂)	G			
FB-38.0-2.0	2.0	38.0	45.7	kg	165	435	—	405	398	980	0.70	—	
				リットル	165	146	—	153	153	363			
FB-38.0-4.5	4.5	38.0	43.6	kg	165	435	—	372	365	980	0.50	0.0200	
				リットル	165	146	—	140.5	140.5	363			
N-41.5-2.0	2.0	41.5	48.6	kg	160	—	386	359	529	969	0.60	—	
				リットル	160	—	122	135.6	203.4	359			
N-41.5-4.5	4.5	41.5	46.7	kg	160	—	386	333	490	969	0.40	0.0030	
				リットル	160	—	122	125.6	188.4	359			

配合名は「結合材種別—W/B—空気量」で示す。AE 剤は原液

#### 6.1.2 養生方法

養生は標準養生とした。

### 6.2 実験結果および考察

#### 6.2.1 フレッシュ性状

配合「FB-38.0-4.5」と「N-41.5-2.0」のフレッシュ性状を表 6.2 に示す。フレッシュ性状は目標値を満足した。なお、配合「FB-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」のフレッシュ性状は前章の湿潤養生日数の検討に示した結果である(表 5.4 参照)。

表 6.2 フレッシュ性状(空気量が圧縮強度に及ぼす影響の検討)

配合名	バッチ No.	混和剤		目標値		試験結果		
		SP B×%	AE B×%	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
FB-38.0-4.5	1	0.5	0.0200	18.0±2.5	4.5±1.0	20.5	4.3	20.8
N-41.5-2.0	1	0.4	0.0030	12.0±2.5	2.0±1.0	12.0	2.2	21.1

AE 剤は原液

## 6.2.2 空気量が圧縮強度に及ぼす影響の検討

配合「FB-38.0-4.5」と「N-41.5-2.0」の3体の平均値を表6.3に示す。なお、配合「FB-38.0-2.0」と「N-41.5-4.5」の圧縮強度は前章の湿潤養生日数の検討に示した結果である(表5.5参照)。

表 6.3 平均圧縮強度(空気量が圧縮強度に及ぼす影響の検討)

配合名	養生方法	3日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	7日強度 (N/mm <sup>2</sup> )	28日強度 (N/mm <sup>2</sup> )
FB-38.0-4.5	W	29.8 (29.5,29.9,29.9)	41.3 (41.8,41.8,40.2)	53.9 (53.7,54.1,53.9)
N-41.0-2.0	W	36.0 (35.5,36.2,36.3)	47.1 (48.4,47.7,45.2)	57.5 (57.9,56.9,57.8)

注) : ()の数値は個々の試験結果

空気量の変化に伴う圧縮強度の増減を表6.4に示す。材齢3日の圧縮強度の結果から、FB配合とN配合とも空気量1%増加に対する圧縮強度の低下率は一般的にいわれている4~6%より大きくなることが認められた。また、材齢3日の空気量1%増加に対する圧縮強度の低下率は材齢28日の低下率に対して大きくなる傾向が認められた。このことから、材齢3日の圧縮強度が仕様となる場合には、この点を留意する必要があると考える。材齢7日と28日の空気量1%増加に対する圧縮強度の低下率は一般的にいわれている範囲に入ったが、FB配合の低下率はN配合と比較して大きくなる傾向が認められた。

表 6.4 空気量の変化に伴う圧縮強度の増減

配合	空気量 (%)	材齢3日			材齢7日			材齢28日		
		圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	強度低下率 (%)	空気量1%の 低下率	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	強度低下率 (%)	空気量1%の 低下率	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	強度低下率 (%)	空気量1%の 低下率
FB-38.0-4.5	4.3	29.8	15.8	6.3	41.3	11.6	4.6	53.9	13.4	5.4
FB-38.0-2.0	1.8	35.4			46.7			62.2		
差	2.5	5.6			5.4			8.3		
N-41.5-4.5	5.3	29.0	19.4	6.3	42.3	10.2	3.3	51.5	10.4	3.4
N-41.5-2.0	2.2	36.0			47.1			57.5		
差	3.1	7.0			4.8			6.0		

注) 空気量は平均値

## 6.3 空気量が圧縮強度に及ぼす影響の検討のまとめ

空気量が圧縮強度に及ぼす影響の検討結果をまとめると以下となる。

- (1) FB配合とN配合のコンクリートともに材齢3日の空気量1%増加に対する低下率は材齢28日の低下率と比較して大きくなる傾向が認められ、一般的にいわれている範囲4~6%より若干大きくなる傾向が認められた。
- (2) 材齢7日と28日の空気量1%増加に対する低下率は一般的にいわれている範囲内であったが、FB配合の低下率はN配合と比較して大きくなる傾向が認められた。

## 7. フライアッシュによる ASR 抵抗性の向上効果の検討

フライアッシュによる ASR 抵抗性の向上効果を N 配合との比較により実験的に検討した(2020/2/12)。

### 7.1 実験概要

#### 7.1.1 コンクリートの使用材料および配合

コンクリートの使用材料は第5章の湿潤養生日数の検討で使用した材料と同一である(表5.1参照)。ASR 抵抗性を検討したコンクリートの配合は第 6 章の空気量が圧縮強度に及ぼす影響のコンクリート配合と同一である(表 6.1)。

#### 7.1.2 ASR 促進膨張試験

促進膨張試験の試験方法および判定基準例一覧を表 7.1 に示す。海砂を使用したコンクリートは、遅延膨張性の ASR を生じる可能性があることが指摘されている<sup>5)</sup>。この文献<sup>5)</sup>では、遅延膨張性の ASR は、現行の JIS では検出が難しいが、カナダ法では検出することができるが示されている。本試験のコンクリートの細骨材は海砂と砕砂であることから、ここではカナダ法(1mol/L-NaOH 浸漬法)を用いて検討することとした。

供試体はφ100×200mm の円柱供試体から、φ50×200mm のコアを採取することにより作製した。供試体数は各配合 2 体とした。試験開始材齢は 31 日とした。判定はカナダ法(1mol/L-NaOH 浸漬法)の試験開始後 14 日の基準と文献<sup>6)</sup>に記載がある試験開始材齢 21 日の基準により行った。

写真 7.1 に促進膨張試験の状況、写真 7.2 に測定の様子を示す。

表 7.1 促進膨張試験の試験方法および判定基準例

試験項目	試験方法	判定基準
JCI-DD2 法	コンクリートコアを 40±2℃、相対湿度 95%以上で湿気槽に保存し、膨張率の経時変化を測定する	試験開始後 91 日の膨張率で、 0.05%以上：「有害」
デンマーク法	コンクリートコアを 50℃の飽和 NaCl 水溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する	試験開始後 91 日の膨張率で、 0.1%未満：「膨張性なし」 0.1～0.4%：「不明確」 0.4%以上：「膨張性あり」
カナダ法	コンクリートコアを 80±2℃、1N の NaOH 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する。 (ASTM C 1260 と同様の条件)	試験開始後 14 日の膨張率で、 0.1%以下：「無害」 0.1～0.2%： 「有害と無害な骨材が含まれる」 0.2%以上：「潜在的に有害」
カナダ法 1mol/L-NaOH 浸漬法 <sup>6)</sup>	コンクリートコアを 80±2℃、1N の NaOH 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する。 (ASTM C 1260 と同様の条件)	試験開始後 21 日の膨張率で、 0.1%以下：「無害」 0.1%～：「有害」



(a) 浸漬状況



(b) 養生状況



(c) 恒温恒湿器

写真 7.1 促進膨張試験の状況



(a) 試験体 (左 : N, 右 : FB)



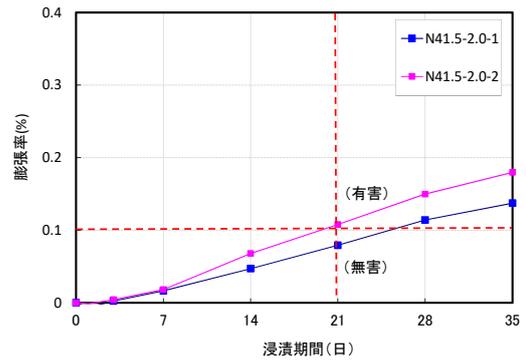
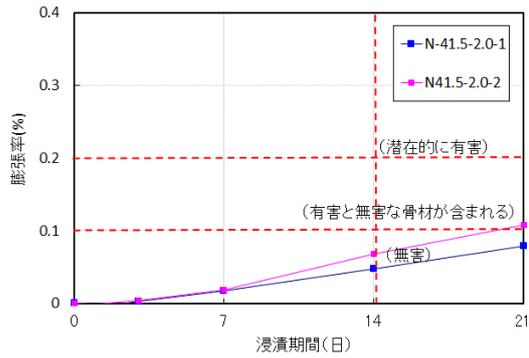
(b) コンタクトゲージによる測定状況

写真 7.2 測定状況

## 7.2 実験結果および考察

促進膨張試験 35 日までの結果を図 7.1~7.4 に示す。いずれのシリーズも 14 日判定では無害と判断されるが、N シリーズに関しては、膨張傾向を示し、21 日目では、判定基準 0.1%を超える供試体 (N-41.5-2.0-2) が確認された。N-41.5-4.5-2 については、21 日目に膨張率が低下しているが、これは、供試体を動かす際に、ゲージプラグを固定しているステンレスバンドに何かしらの衝撃が加わった可能性がある。

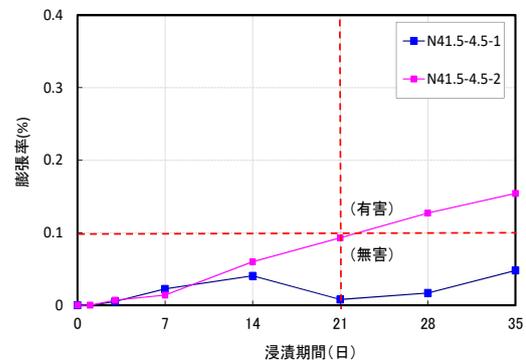
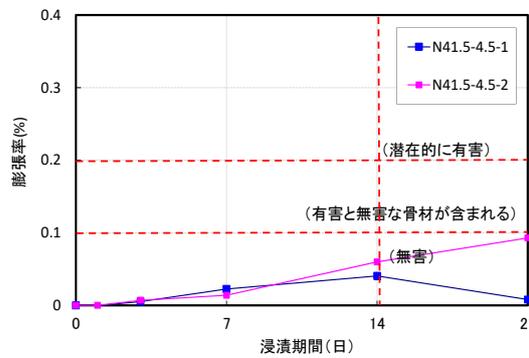
浸漬期間をさらに 35 日まで延長した結果、不具合の生じた N-41.5-2.0-2 以外、0.1%の膨張率を示し、さらに膨張傾向を示している。FB シリーズは N シリーズに比べ 35 日時点においても膨張を抑制していることがわかる。しかし、わずかに膨張傾向を示している試験体 (FA-38.0-2.0-2) も確認されるが、35 日時点で膨張率 0.057%と低いため、実環境においては抑制できるレベルであると考えられる。



(a) 14 日判定

(b) 21 日判定

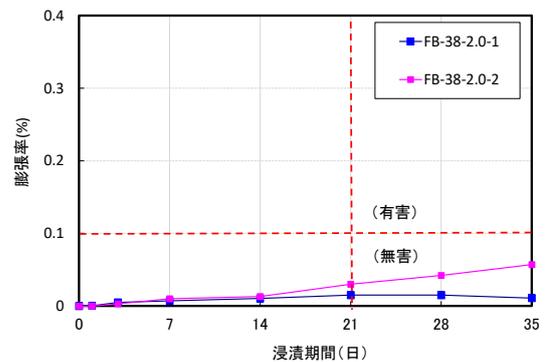
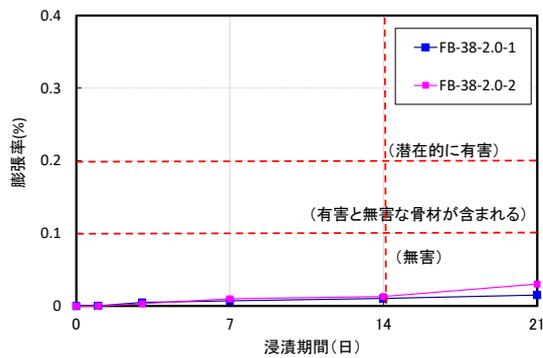
図 7.1 促進膨張試験結果 (N-41.5-2.0)



(a) 14 日判定

(b) 21 日判定

図 7.2 促進膨張試験結果 (N-41.5-4.5)



(a) 14 日判定

(b) 21 日判定

図 7.3 促進膨張試験結果 (FB-38.0-2.0)

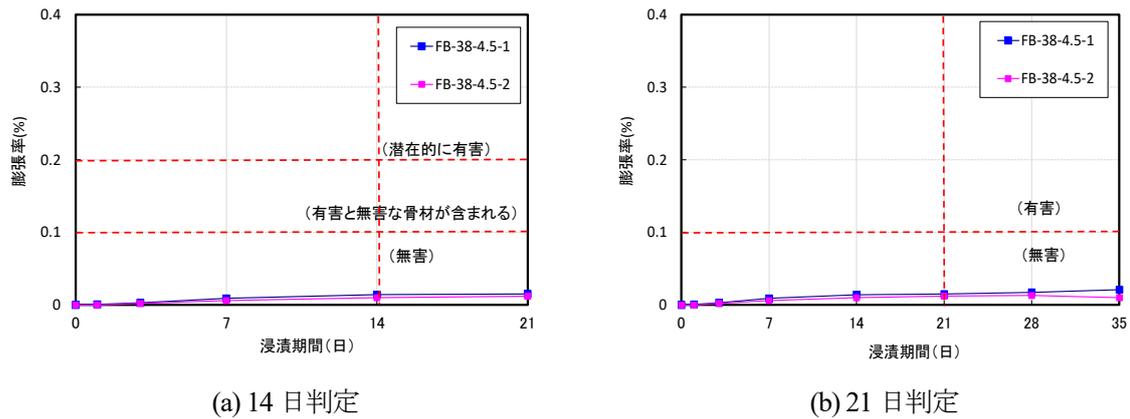


図 7.4 促進膨張試験結果 (FB-38.0-4.5)

### 7.3 フライアッシュによる ASR 抵抗性の検討のまとめ

フライアッシュによる ASR 抵抗性の検討結果から、遅延膨張性を示す海砂に対して、フライアッシュセメントを使用することで ASR 抵抗性の向上効果が認められた。

## 8. まとめ

湿潤養生日数の検討とフライアッシュによる ASR 抵抗性の向上効果の検討を実施した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 脱型後の湿潤養生がコンクリートの品質に影響し、FB 配合と N 配合のコンクリートは脱型後に適切な標準養生(湿潤養生)を実施することにより圧縮強度の発現の増加量を大きくすることができる。
- (2) 標準養生した供試体の材齢 28 日の圧縮強度の 50%以上となる材齢は 3 日以上であることが認められた。
- (3) 圧縮強度発現の観点から FB 配合と N 配合のコンクリートは材齢 5 日まで標準養生(湿潤養生)を実施することにより、材齢 7 日まで標準養生を実施した場合との差がほとんどないことが認められた。
- (4) 材齢 4 カ月の塩化物イオンの拡散係数の結果から、N 配合では材齢 5 日まで標準養生(湿潤養生)を実施し、FB 配合では材齢 7 日まで標準養生(湿潤養生)を実施することで、4 カ月間の水中養生を行った供試体とほぼ同程度の拡散係数を示すことが認められた。
- (5) 遅延膨張性を示す海砂に対して、フライアッシュセメントを使用することで ASR 抵抗性の向上効果が認められた。

今回の試験により得られた結果から、FB 配合の標準養生(湿潤養生)日数を提案する。

#### FB 配合の湿潤養生日数(案)

圧縮強度発現の観点から湿潤養生日数を材齢 3 日以上とした方がいい。また、塩化物イオン浸透抵抗性の観点からは 7 日とした場合に 4 カ月の標準養生と同程度であったが、標準養生日数を材齢 3 日より延長しても塩化物イオン拡散係数の低下量は小さくなった。この結果から、湿潤養生日数は材齢 3 日以上実施することを標準とする。しかし、養生日数が施工の効率化や経済性に悪影響を及ぼさない場合は、長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から安全側になるように配慮し湿潤養生

生日数は材齢 7 日以上が望ましいと考えられる。なお、本試験では、材齢 3 日でプレストレスを導入することを目標とした配合としていることに留意が必要であり、本試験と同等の配合条件でない場合は、必要な湿潤養生日数について別途検討が必要である。

#### 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
- 2) 中村英佑, 水戸健介, 古賀裕久: 高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.219-224, 2018
- 3) 中村英佑, 皆川浩, 宮本慎太郎, 久田真, 古賀裕久, 渡辺博志: 通電後の塩化物イオン浸透深さを用いたコンクリートの遮塩性能の評価, 土木学会論文集 E2, Vol.72, No.3, pp.304-322, 2016
- 4) (国研)土木研究所, (一社)PC 建協: 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (II), pp.141-151, 2016 年 2 月
- 5) 富山潤, 大城武, 新城竜一, 金城和久: 遅延膨張性を示す細骨材に起因したアルカリ骨材に関する基礎研究と抑制対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1049-1054, 2011
- 6) Tetsuya Katayama, Masahiko Tagami, Yoshinori Sarai, Satoshi Izumi, Toshikatsu Hira: Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, Vol. 53, pp. 105-122 (2004)

付録-2 2020 年度施工性試験  
(実機プラントによる試験練り, フレッシュコンクリートの経時変化, 実物大試験体を用いた施工性の確認)

1. 概要

沖縄県土木建築部では、沖縄県内の火力発電所で産出するフライアッシュを混和材として利用したコンクリート構造物の品質・耐久性向上を目的に「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」を発刊している。この指針では、普通ポルトランドセメントとフライアッシュの組合せとし、「内割り+外割り配合タイプ」、「内割り配合タイプ」、「外割り配合タイプ」が示されている。この内、「内割り配合タイプ」は、塩化物イオン浸透抵抗性と ASR を抑制する配合として示されているが、ポストテンション PC 桁では、海砂による遅延性膨張 ASR を懸念して砕砂 100%としているが、それによって生じるワーカビリティの低下を改善する目的から細骨材(砕砂)の 3~5mass%をフライアッシュで置換する「外割り配合タイプ」に留まっている。そこで、これまで、PC 橋の高耐久化を目的に、普通ポルトランドセメント質量の 15~20%をフライアッシュで置換したフライアッシュセメントを用いたコンクリート(「内割り配合タイプ」)のポストテンション PC 橋への実装化に向けた取り組みを行い、2019 年度は室内試験により所定の圧縮強度を満足する配合の検討、圧縮強度発現および耐久性確保の観点からみた湿潤養生日数の検討、ASR 抵抗性の検討を行った。その結果、圧縮強度発現性の観点から湿潤養生日数を材齢 3 日以上とした方がいいこと、塩化物イオン浸透抵抗性の観点からは 7 日とした場合に 4 カ月の標準養生と同程度であり、標準養生日数を材齢 3 日より延長しても塩化物イオン拡散係数の低下量は小さくなることが明らかになった。この結果から、湿潤養生日数は材齢 3 日以上実施することを標準とし、養生日数が施工の効率化や経済性に悪影響をおよぼさない場合は、長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から安全側になるように配慮し湿潤養生日数は材齢 7 日以上が望ましいことを提案した<sup>1)</sup>。さらに、2019 年度の室内試験では、海砂を一定の割合で使用したが、遅延性膨張 ASR に対しても十分抑制効果があることを確認した<sup>1)</sup>。

本研究では、確認したコンクリートの仕様に対して、レディーミクストコンクリート工場の実機プラントで製造したコンクリートをアジテータ車で運搬し、ポンプ圧送による実物大試験体(T 桁断面)の製作を行い、実装に向けたコンクリートのフレッシュ性状変化および施工性の確認を行った。

## 2. 研究フロー

研究フローを図 2.1 に示す。表層品質の確認は、通気係数試験（トレント法）とし、材齢 3 か月程度、材齢 1 年程度で行う。本報告書は 2020 年度に実施した施工性に対する検討についてまとめたものである。表層品質の確認については次年度に報告する。

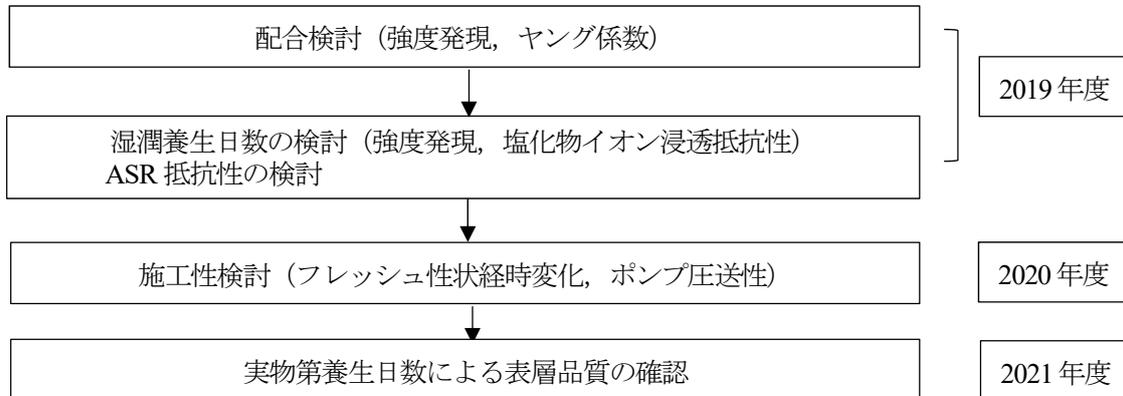


図 2.1 研究フロー

## 3. コンクリートの仕様および 2019 年度室内試験による提案配合

コンクリートの仕様を表 3.1 に、2019 年度室内試験による提案配合を表 3.2 にそれぞれ示す。コンクリートの仕様は現場製作のポストテンション T 桁を想定して  $\sigma_{28\text{day}}=40.0\text{N/mm}^2$  とした。

表 3.1 コンクリートの仕様

項目		規格値	備考
1	設計基準強度(標準養生 20℃水中養生)	$\sigma_{28\text{day}}=40\text{N/mm}^2$	
2	プレストレス導入時強度(現場養生：ここでは封緘養生)	$\sigma_{3\text{day}}=34\text{N/mm}^2$	
3	変動係数	V=10.0%	
4	単位水量の最大値	W=175kg/m <sup>3</sup>	
5	目標スランプ	FA 配合 18±2.5cm	粘性増のため
6	目標空気量	FA 配合 Air=2.0±1.0%	FA を内割りとした配合 沖縄県 FA 配合及び施工指針(案)準拠 凍害がないため
7	塩化物含有量の最大値	300g/m <sup>3</sup>	
割増し係数から算出される配合強度			
8	設計基準強度の配合強度	$\sigma_{28\text{day}}=48.0\text{N/mm}^2$	設計基準強度×1.2
9	プレストレス導入時強度の配合強度	$\sigma_{3\text{day}}=34.0\text{N/mm}^2$	プレストレス導入時強度×1.0

注) 空気量の範囲は試験室試し練り、かつ、圧縮強度の比較を実施するため±1.0 とした

表 3.2 2019 年度室内試験による提案配合

配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)		単位量					高性能 AE 減水剤 B×% SP		
					水		結合材(B)		細骨材		粗骨材	
					W	FB	N	S1 (砕砂)	S2 (海砂)			G
FB-38.0-2.0	2.0	38.0	45.7	kg	165	435	—	405	398	980	0.70	
				リットル	165	146	—	153	153	363		

配合名は「結合材種別—W/B—空気量」,B は普通セメントの 15~20%を FA で置換したプレミックス品

#### 4. 実機プラントによるフレッシュ性状の経時変化および強度発現性の確認

本実験を行った実機プラント（山正物産）の通常出荷しているコンクリートは、細骨材の混合砂の割合が 2019 年度室内試験と異なるため、施工性試験に先立ち、実機プラントによって製造されるコンクリートのフレッシュ性状および強度発現性を確認した（2020/09/11）。

2019 年度室内試験＝砕砂（5）：海砂（5）⇒実機プラント（山正物産）＝砕砂（8）：海砂（2）

また、本実験では、フレッシュ性状の経時変化の確認は、実施工を想定してアジテータ車にて所定の時間を攪拌することとした。

#### 4.1 実験概要

##### 4.1.1 コンクリートの使用材料および配合

コンクリートの使用材料を表 4.1 に示す。FA 配合の結合材は 2019 年度室内試験と同様にフライアッシュセメント B 種（普通ポルトランドセメント質量の 15～20%をフライアッシュ II 種で置換したブレミックス品）を使用した。

表 4.1 コンクリートの使用材料

材 料	記号	仕 様
フライアッシュセメント	FB	琉球セメント社製 置換率 15～20 質量%，密度 2.98 g/cm <sup>3</sup> フライアッシュ：電源開発石川発電所 分級 FA
水	W	上水道水
細骨材	S1	砕砂 密度 2.64 g/cm <sup>3</sup>
	S2	海砂 密度 2.60g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石 2005 密度 2.70g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤	SP	日本シーカ社製 1100NTR 遅延形（I 種）

配合検討のコンクリート配合を表 4.2 に示す。配合の確認は、2019 年度室内試験による提案配合を基本として、細骨材の混合砂の割合のみ変更した。

2019 年度室内試験＝砕砂（5）：海砂（5）⇒実機プラント試験練り＝砕砂（8）：海砂（2）

表 4.2 コンクリートの配合

配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量					高性能 AE 減水剤 B×%	
				水	結合材(B)	細骨材		粗骨材		
				W	FB	S1 (砕砂)	S2 (海砂)	G		
FB-38(美)	2.0	38.0	45.7	kg	165	435	647	160	980	0.750
				kg 1/25	165	146	245	62	363	

##### 4.1.2 フレッシュ性状の経時変化の確認方法

フレッシュ性状の経時変化を確認するため、現着までの時間を 30 分～60 分程度と想定し、以下のタイミングでフレッシュコンクリートの品質管理試験を実施した。

①練混ぜ直後 ⇒（アジテータ車で攪拌）⇒②30 分後⇒（アジテータ車で攪拌）⇒③60 分後  
⇒④90 分後

##### 4.1.3 圧縮強度の確認方法

圧縮強度の供試体は経過時間 30 分後のコンクリートを用いて製作した。

材齢 3 日および材齢 4 日（プレストレス導入強度）の供試体は封緘養生、材齢 28 日の供試体は標準養生とし、圧縮強度の試験は、JIS A 1108 に準拠して実施した。

#### 4.1.4 練混ぜ方法

練混ぜは実機ミキサ(強制二軸ミキサ)を用いて行った。練混ぜ時間はモルタル 60 秒、全投入 60 秒とし、練混ぜ容量を 1.5m<sup>3</sup>とした。

### 4.2 実験結果および考察

#### 4.2.1 フレッシュ性状の経時変化

フレッシュ性状を表 4.3 と写真 4.1 に示す。経過時間が長くなるほど粘性が高くなり、スランプは小さい値となったが、経過時間 30 分、60 分、90 分のすべてにおいて目標値を満足した。スランプの変化量は、一般的な運搬時間である 30 分～60 分の範囲では、練混ぜ直後に対して 1.0cm 程度であった。同工場の普通コンクリート「40-18-20N (空気量 4.5%)」のフレッシュ性状試験結果を参考として表 4.4 に示す。運搬時間 40 分に対して、「40-18-20N (空気量 4.5%)」の練混ぜ直後と現場荷下し時のスランプの差が 1.0cm であることから、今回のフライアッシュを内割配合で用いた配合は、運搬におけるスランプの変化量は一般的な普通コンクリートと同程度と考えられる。

空気量は経過時間による変化がほとんどなく、経過時間 30 分、60 分、90 分のすべてにおいて目標値を満足した。

表 4.3 フレッシュ性状

配合名	経過時間 (分)	高性能 AE 減水剤	目標値		試験結果		
		SP B×%	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
FB-38 (実)	0 (練直)	0.750	—	—	20.0	2.1	33.6
	30		18±2.5	2.0±1.0	19.0	2.0	33.8
	60		18±2.5	2.0±1.0	19.0	2.1	35.3
	90		18±2.5	2.0±1.0	17.5	2.3	35.6



0 分 (練直)



30 分経過後



60 分経過後



90 分経過後

写真 4.1 フレッシュ性状

表 4.4 普通コンクリートのフレッシュ性状試験結果（参考）

出荷日	2021.2.10			
配合	40-18-20N			
W/C	40.5%			
7d 強度	42.4N/mm <sup>2</sup>			
28d 強度	47.7N/mm <sup>2</sup>			
経過時間	スランブ (cm)	空気量 (%)	外気温 (°C)	コンクリート温度 (°C)
0分(工場)	20.5	6.4	21.0	24.4
40分(現場)	19.0	4.7	—	25.0

#### 4.2.2 圧縮強度試験

圧縮強度の試験結果を表 4.5 に示す。品質保証である材齢 28 日の圧縮強度は  $\sigma_{28\text{day}}=56.1\text{N/mm}^2$  であり、設計基準強度 (40.0N/mm<sup>2</sup>) を満足したが、材齢 3 日の圧縮強度は  $\sigma_{3\text{day}}=33.7\text{N/mm}^2$  であり、目標としたプレストレス導入強度 (34.0N/mm<sup>2</sup>) を僅かに満足しない結果となった。これは、表 3.1 に示すように、2019 年室内実験の配合検討において、プレストレス導入強度に対してはばらつきの影響を考慮しなかったためと考えられる。なお、翌日の材齢 4 日にはプレストレス導入に必要な強度を満足した。

施工性試験に使用するコンクリートは、今回の試験練りの結果が 2019 年度室内試験での配合検討の観点から再現性が高い事、設計基準強度を満足する事から、同配合で行うこととした。

表 4.5 試験練り (2020/09/11) の圧縮強度試験結果

配合名	養生条件	材齢 (日)	No.	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
					平均
FB-38 (実)	封緘養生	3	1	33.5	33.7
			2	33.9	
			3	33.7	
	封緘養生	4	1	36.3	36.9
			2	37.2	
			3	37.3	
	標準養生	7	1	45.7	45.0
			2	44.3	
			3	45.1	
	標準養生	28	1	55.4	56.1
			2	56.1	
			3	56.7	

#### 4.3 フレッシュ性状の経時変化および強度発現性の確認のまとめ

スランブは経過時間が長くなるほど小さい値となったが、その変化量は練混ぜ直後に対して、一般的な運搬時間である経過時間 30 分~60 分の範囲では、1.0cm であり、普通コンクリートと同程度である。経過時間 90 分の場合で 2.5cm であった。空気量は経過時間による変化がほとんどなかった。

圧縮強度は材齢 3 日 (封緘養生) で目標としたプレストレス導入強度をわずかに満足しなかったが、材齢 4 日 (封緘養生) ではプレストレス導入強度を満足し、材齢 28 日 (標準養生) では設計基準強度を満足する結果となった。

## 5. 施工性試験

ポンプ圧送による普通ポルトランドセメント質量の15~20%をフライアッシュⅡ種で置換した内割配合したコンクリートを用いたポストテンションT桁を想定した実物大試験体を作製した。このことにより、圧送性能、材料分離の有無、締固めおよび仕上げ性状を確認した。(2020/11/26)

### 5.1 試験概要

#### 5.1.1 試験場所

沖縄県 沖縄市 泡瀬（沖縄県中城港湾建設現場事務所 発注現場ヤード）（図 5.1）

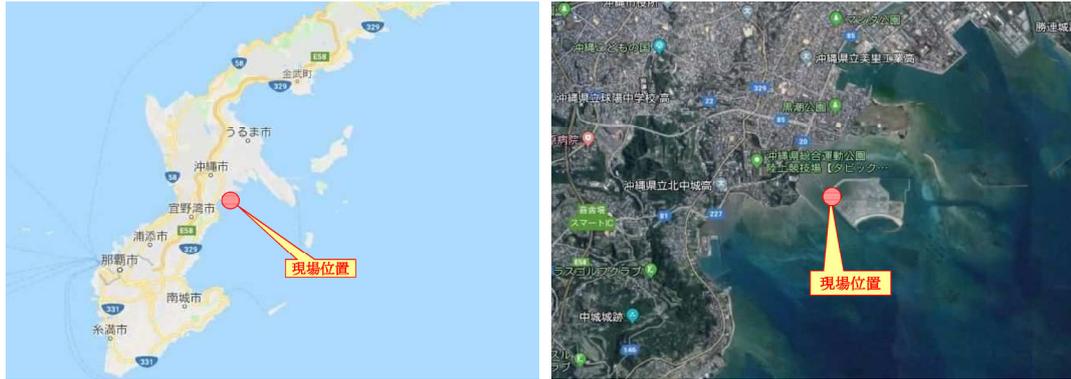


図 5.1 試験位置図

#### 5.1.2 コンクリートの使用材料および配合

施工性試験に用いたコンクリートの使用材料を表 5.1 に、コンクリートの配合を表 5.2 に示す。高性能 AE 減水材は、施工性試験が 11 月下旬であったため、フレッシュコンクリートの経時変化確認時が遅延形（Ⅰ種）であったのに対し、標準形（Ⅰ種）を使用した。その他は、フレッシュコンクリートの経時変化を確認した時と同じ材料、配合である。

表 5.1 コンクリートの使用材料

材 料	記号	仕 様
フライアッシュセメント	FB	琉球セメント社製 置換率 15~20mass%, 密度 2.98 g/cm <sup>3</sup> フライアッシュ: 電源開発石川発電所 分級 FA
水	W	上水道水
細骨材	S1	砕砂 密度 2.64 g/cm <sup>3</sup>
	S2	海砂 密度 2.60g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石 2005 密度 2.70g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤	SP	日本シーカ社製 1100NTR 標準形（Ⅰ種）

表 5.2 コンクリートの配合

配合名	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量					高性能 AE 減水剤 B×%	
				水	結合材(B)	細骨材		粗骨材		
				W	FB	S1 (砕砂)	S2 (海砂)	G		SP
FB-38(実)	2.0	38.0	45.7	kg	165	435	647	160	980	0.750
				リットル	165	146	245	62	363	

### 5.1.3 実物大試験体

実物大試験体の概要図を図 5.2 に示す。実物大試験体は、沖縄県で実績が多いポストテンション T 桁断面（桁高 H=2.0m，長さ L=5.0m）とした。また，打設時の材料分離の有無を確認するために，下フランジ側面は透明型枠を用いた。

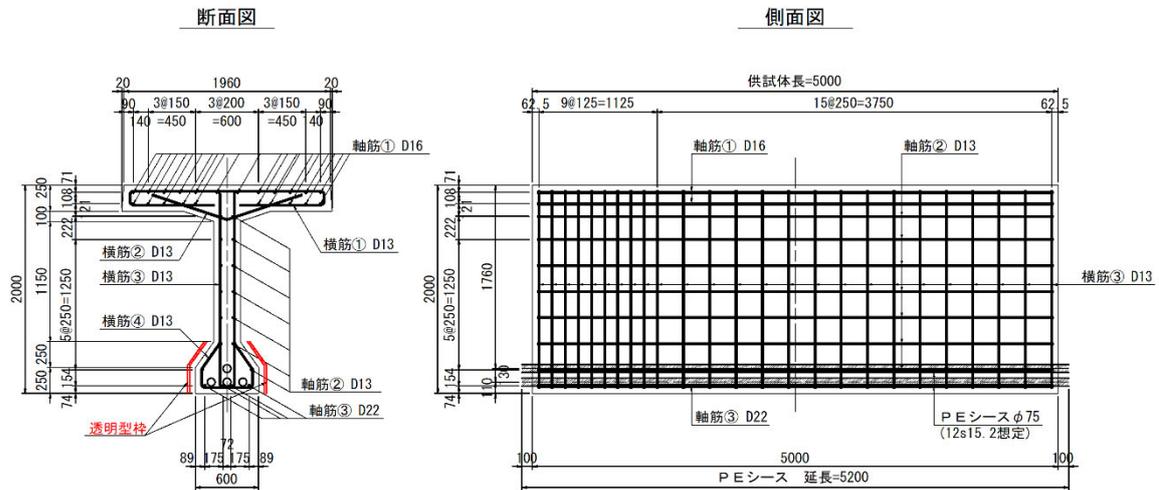


図 5.2 実物大試験体図

### 5.1.4 施工方法

コンクリート打設状況を写真 5.1 に示す。コンクリートの施工は 27m ブームのポンプ車で行った。圧送距離は 20m 程度とし，配管の径は  $\phi 100\text{mm}$  を使用した。コンクリートの打ち込みはコンクリート標準示方書に準じて，コンクリートの打ち落とし高さを 1.500m 以内，1 層の打ち上げ高さを 0.500m 以下，打ち重ね時間は 2.0 時間以内とした。締固めは，高周波バイブレータ  $\phi 50\text{mm} \times 2$  本， $\phi 40\text{mm} \times 2$  本，型枠バイブレータ 2 基および型枠バイブレータで行った。仕上げは金ゴテ仕上げとした。



写真 5.1 コンクリート打設状況

### 5.1.5 実物大試験体の養生方法

散水養生状況を写真5.2に示す。コンクリート打ち込み、表面仕上げ後、速やかに試験体上面を養生マットで覆い、散水養生を開始した。型枠の脱型を打設後4日目でおこなった。

脱型後の養生状況を写真5.3に示す。養生日数の影響を確認するため、①実物大試験体の橋軸方向左半分では養生テープを貼り付けて養生日数を打設後11日まで延長した区間と②実物大試験体の橋軸方向右半分では気中養生とした区間を設けて比較することとした。



写真5.2 散水養生状況



写真5.3 養生テープによる養生日数の延長

## 5.2 実験結果および考察

### 5.2.1 品質管理試験

#### (1) フレッシュコンクリートの品質管理試験

フレッシュコンクリートの品質管理試験結果を表5.3に、フレッシュ性状を写真5.4に示す。フレッシュコンクリートの品質管理試験は全て許容値を満足した。運搬時間は40分程度であったが、実機試験練り(2020/09/11)時に確認されたような運搬時間によるスランプの低下はなかった。本試験では、フレッシュコンクリートの経時変化およびポンプの圧送性を確認するため、ポンプの筒先から採取したコンクリートに対してもスランプおよび空気量を測定した。スランプは約20mの圧送により2.0cm小さくなった。コンクリート標準示方書【施工編】では、圧送距離50m~150mに対してスランプの低下量の目安が0.5cm~1.0cmとなっていることと比較すると、本試験の配合は、ポンプ圧送によるスランプの低下が大きい結果となった。ただ、本試験では、ポンプ筒先でのスランプが17.5cmであり、提案した配合にて施工性に問題ないワーカビリティを有していることが確認された。また、荷下し時のスランプが許容値の下限值15.5cm(18cm-2.5cm)であった場合においても、ポンプ筒先でのスランプは13.5cm程度になると予想され、施工性に問題ないワーカビリティを有すると考えられる。

表5.3 フレッシュコンクリートの品質管理試験結果

配合名	バッチ No.	試験結果					外気温 (°C)
		スランプ (cm)	空気量 (%)	塩分量 (kg/m³)	単位水量 (kg/m³)	コンクリート温度 (°C)	
FB-38.0 (実)	1台目-練混ぜ直後	18.5	2.2	—	156	28	25
	1台目-荷下し時	19.5	1.8	0.06	154	28	23
	1台目-ポンプ筒先	17.5	2.4	—	—	—	—
	2台目-荷下し時	19.0	2.0	—	159	27	21
許容値		18±2.5	2.0±1.5	0.3以下	165±15	35以下	—



(1 台目-荷下し時)



(1 台目-ポンプ筒先時)

写真 5.4 フレッシュ性状

## (2) 圧縮強度試験

本試験での圧縮強度試験の結果を表 5.4 に、2019 年度室内試験の圧縮強度試験の結果（参考）を表 5.5 に、本試験と 2019 年度室内試験の比較を図 5.3 にそれぞれ示す。封緘養生の円柱供試体は施工性試験の現場にて、1 日間、実物大試験体と同条件で養生し、その後、生コンプラントに移動し、材齢 3 日まで型枠を設置したまま気中養生を行った。材齢 3 日（封緘養生）の圧縮強度は、試験練り（2020/09/11）では目標とした  $\sigma_{3\text{day}}=34.0\text{N/mm}^2$  を若干下回る結果であったが、本試験では、目標値以上の値を示す結果となった。また、2019 年度室内試験と比較して 2～10%程度の差で 2019 年度室内試験を再現する結果であった。

表 5.4 本試験の圧縮強度試験結果

配合名	養生条件	材齢 (日)	No.	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	
					平均
FB-38 (実)	封緘養生	3	1	39.2	38.1
			2	36.8	
			3	38.2	
	標準養生	7	1	51.6	51.3
			2	52.8	
			3	49.4	
	標準養生	28	1	62.6	63.8
			2	65.8	
			3	63.0	

表 5.5 2019 年度室内試験の圧縮強度試験結果(参考)

配合名	養生条件	材齢 (日)	No.	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	
					平均
FB-38-2.0	封緘養生	3	1	36.0	35.1
			2	34.1	
			3	35.1	
	標準養生	7	1	46.7	46.7
			2	46.2	
			3	47.1	
	標準養生	28	1	62.3	62.2
			2	61.4	
			3	63.0	

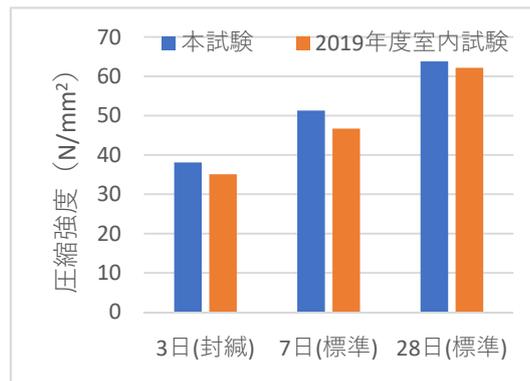


図 5.3 本試験と 2019 年度室内試験の比較

### 5.2.2 施工性の確認試験

施工性試験を実施した結果、確認できたことを以下に列記する。

#### (1) ポンプの圧送性

筒先からの排出状況を写真 5.5 に示す。ポンプ圧送による材料分離は確認されなかった。5.2.1 で述べたように圧送によってスランプは 2.0cm ロスしたが、過度な圧送圧力や閉栓をすることなく、一般的な普通コンクリートと同様なポンプ施工が可能であることが確認できた。

#### (2) 材料分離

コンクリートの充填状況を写真 5.6 に示す。本試験では打ち落とし高さが 1.5m として施工したが、材料分離は確認されなかった。締固めによる材料分離も確認されなかった。

#### (3) 締固めの施工性

締固め状況を写真 5.7 に示す。本試験ではコンクリート標準示方書に準じて、バイブレータにて 50cm 程度の間隔で 10 秒程度締固めを行った。一般的な普通コンクリートと比較して粘性が高いが、バイブレータの挿入跡が残るはなく、適度なペーストの浮きがあり、一般的な普通コンクリートと同様の締固めにて施工が可能であることが確認できた。

#### (4) 仕上げの施工性

仕上げ状況を写真 5.8 に示す。本試験では、打ち込み完了直後に木コテで表面を整え、その後、表面仕上げ養生剤を散布し、金コテで仕上げを行った。粘性が高いため、コンクリートがコテに粘着する傾向があるが、施工性の低下は小さく、一般的な普通コンクリートと同様の仕上げが可能であることが確認できた。



写真 5.5 コンクリート排出状況



写真 5.6 コンクリート充填状況



写真 5.7 コンクリート締固め状況



写真 5.8 コンクリート仕上げ状況

### 5.2.3 外観

脱型直後の実物大試験体の全景を写真 5.9 に示す。外観観察では、コールドジョイント、表面の微細ひび割れ、豆板、砂すじは認められなかった。なお、写真 5.10 に示すように一部表面気泡が集中している箇所が確認できたが、型枠バイブレータを長時間かけすぎたことが原因と推測される。この一つ一つの気泡は微小で耐久性に与える影響は小さいと考えられる。また、このような表面気泡は、一般の普通コンクリートでも不適切なバイブレータにより生じる現象であり、フライアッシュを使用したコンクリート特有の現象ではないと考えられる。



写真 5.9 脱枠後全景（陸側）



写真 5.10 気泡集中部

### 5.3 施工性試験のまとめ

実機プラントで練り混ぜたフライアッシュセメントを内割配合として用いたコンクリートは、フレッシュコンクリートのスランプおよび空気量は許容値を満足し、かつ、圧縮強度は目標値を満足した。

また、ポンプ圧送性、材料分離抵抗性、締固めの施工性、仕上げの施工性について確認した結果、フライアッシュセメントを内割配合として用いたコンクリートは、一般的な普通コンクリートと同様なポンプ施工が可能であることが認められた。ただし、ポンプ圧送によるスランプの低下は一般的な普通コンクリートと同等であると考えられるが、本試験では、これを結論付ける結果が得られなかったため、本試験施工以上の圧送を行う際は、ポンプ圧送によるスランプの低下について検討の余地があると考えられる。

## 6. まとめ

フレッシュ性状の経時変化、圧縮強度の発現性および施工性について実験的に検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (6) 2019年室内試験にて提案したフライアッシュセメントを内割配合として用いた配合のスランプは経過時間時間が長くなるほど小さい値となったが、その変化量は練混ぜ直後に対して30分～60分経過した場合で1.0cm程度であり、一般的な普通コンクリートと同程度であることが認められた。空気量は経過時間による変化がほとんどないことが認められた。
- (7) 2019年室内試験にて提案したフライアッシュセメントを内割配合として用いた配合は、実機プラントによるコンクリートでも、フレッシュコンクリートの品質管理試験は許容値を満足することが認められた。
- (8) 材齢3日（封緘養生）の圧縮強度試験は、プレストレス導入強度を満足しない場合があったが、その場合においても、材齢4日ではプレストレス導入強度を満足することが認められた。材齢28日（標準養生）の圧縮強度試験は目標値を満足することが認められた。
- (9) 実物大試験体を用いて、ポンプ圧送性、材料分離抵抗性、締固めの施工性および仕上げの施工性について確認した結果、2019年室内試験にて提案したフライアッシュセメントを内割配合として用いたコンクリートは一般的な普通コンクリートと同様なポンプ施工が可能であることが認められた。ただし、ポンプ圧送によるスランプの低下については、本試験においてはこれを結論付けることができず、普通コンクリートより大きくなる可能性があり、さらにデータの蓄積が必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 柴田和典, 妹川寿秀, 赤嶺文繁, 富山潤, 須田裕哉, 比屋根方新: 沖縄県におけるフライアッシュを用いたコンクリートのポストテンションPC橋への適用化に関する基礎的研究, 第10回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, pp.26-31, 2021

## 付録—3 実物大試験体を用いた品質の確認試験

### 1. 概要

2019年度室内試験では、湿潤養生期間に対して、圧縮強度発現の観点から湿潤養生日数は材齢3日以上実施することを標準とし、長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から、安全側になるように配慮し湿潤養生日数は材齢7日以上が望ましいと提案した。そこで、2020年度施工性確認で製作した実物大試験体を湿潤養生日数の差が実構造物の品質におよぼす影響を確認する事を目的として写真1.1のように長手方向に2区画に分け、各区画で異なる養生日数とした。実物大試験体は潤養生完了後も施工性試験を行った沖縄市泡瀬の現場(図1.1)にて1年間暴露した。湿潤養生日数は現場条件により、湿潤養生日数11日(写真1.1左側)と湿潤養生日数4日(写真1.1右側)とした。

実構造物の品質は、実物大試験体に対する表層透気係数試験(トレント法)と材齢1年で実物大試験体から採取したコア供試体を用いて圧縮強度試験(JISA1108)、静弾性係数試験(JISA1149)、中性化深さ試験(JISA1152)、含有塩化物イオン量試験(JCI-SC5)により確認した。



写真1.1 実物大試験体の養生状況

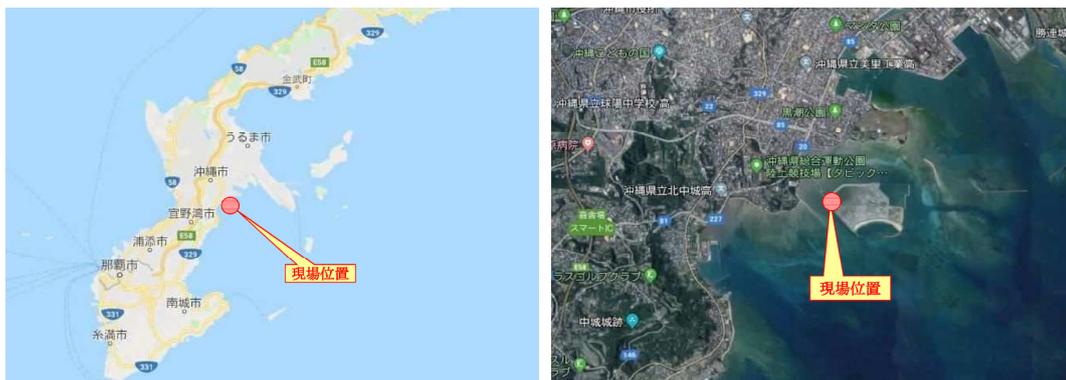


図1.1 暴露試験位置図

### 2. 実物大試験体を用いた表層品質確認試験

#### 2.1 試験概要

表層品質の確認状況を写真2.1に示す。表層品質の確認は表層透気試験(トレント法)により得られる透気係数で評価する事とした。透気係数の測定位置を図2.1に示す。測定は養生4日側9点(No.1~No.9)と養生11日側9点(No.10~No.18)とし、海側と陸側の両面で測定を行った。したがって、養生4日と養生11日それぞれ18点の測定を行った。測定は、表面の含水率が5.5%以下となる

ようにフライアッシュセメントの水和反応が緩慢となる 91 日程度を目安とした材齢（現場状況により、実際の測定は材齢 95 日、96 日で行った。）と実物大試験体解体前の材齢 1 年を目安に行った。

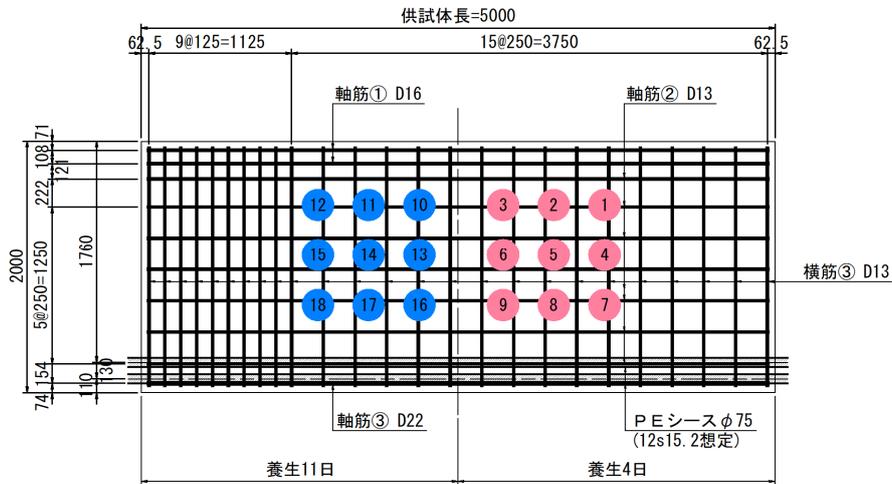


図 2.1 透気係数の測定位置図

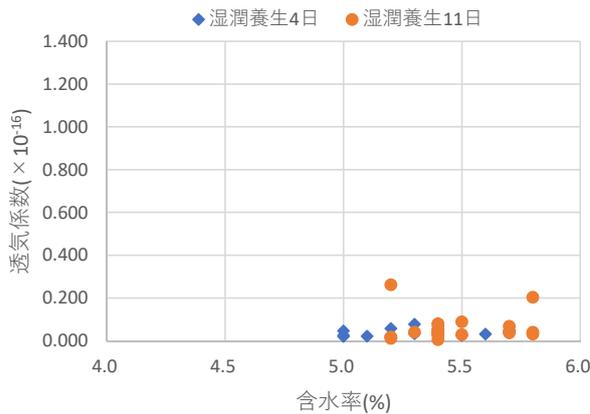


写真 2.1 透気係数の測定状況

## 2.2 表層品質の確認結果

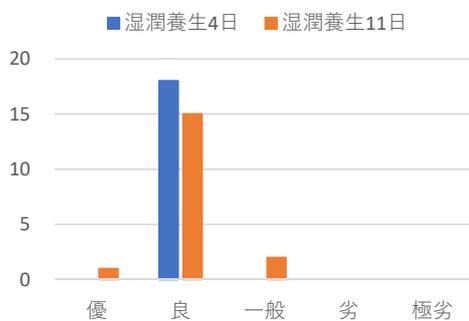
材齢 91 日を目安とした表層透気試験の結果を図 2.2 に、評価基準（スイス規格 SIA262/1-E）を指標としたヒストグラムを図 2.3 にそれぞれ示す。材齢 91 日を目安とした透気係数試験では、一部、表面の含水率が 5.5%を超えている箇所があるが、含水率の超過量は 0.5%未満であるため、本試験では有効なデータとして取りあつかった。

図 2.2 および図 2.3 のように、透気係数試験からは、湿潤養生日数 4 日と湿潤養生日数 11 日では明確な差が認められなかった。また、透気係数は、湿潤養生日数 4 日の平均値（対数平均、18 点）が  $kT=0.036 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、湿潤養生日数 11 日の平均値（対数平均、18 点）は  $kT=0.042 \times 10^{-16} \text{m}^2$  となり、グレーディングはともに「良」となる。このことから、湿潤養生を 4 日行うことで良好な表層品質が得られると考えられる。



	透気係数 kT (対数平均) ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )		判定
	養生 4 日	養生 11 日	
合計(18 点)	0.036	0.042	良
合計(18 点)	0.036	0.042	良

図 2.2 表層透気試験結果 (材齢 91 日目安)



透気係数 kT ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )	判定
< 0.01	優
0.01 ~ 0.1	良
0.1 ~ 1.0	普通
1.0 ~ 10	劣
> 10	極劣

図 2.3 グレーディングによるヒストグラム (材齢 91 日目安)

材齢 1 年を目安とした表層透気試験の結果を表 2.4 に、評価基準 (スイス規格 SIA262/1-E) を指標としたヒストグラムを図 2.5 にそれぞれ示す。図 2.4 では、他と比較して明らかに高い表層透気係数となっている箇所 (図 2.4 における赤枠内の点) が確認される。これらは、表面の不陸や締固めなどの施工品質のバラつきが暴露期間を経て表層品質のバラつきにつながったと考えられる。そこで、本試験は湿潤養生日数の違いによる表層品質を確認することを主目的としていることから、この主目的と異なる理由による異常値を控除した測点数で表層透気係数試験の評価をすることとした。この場合、湿潤養生日数 4 日の透気係数の平均値 (対数平均, 17 点) は  $kT=0.074 \times 10^{-16} \text{m}^2$ , 湿潤養生日数 11 日の透気係数の平均値 (対数平均, 15 点) は  $kT=0.086 \times 10^{-16} \text{m}^2$  となり、両者とも材齢 91 日を目安に行った試験より透気係数は大きくなる傾向が確認された。既往の研究では、材齢の経過によって透気係数が大きくなることが報告されており<sup>1)</sup>、本研究の結果も同様の傾向が見られる結果となった。しかし、両者ともにグレーディングは「良」となり、材齢 1 年を目安とした透気係数試験の結果からも、湿潤養生日数の違いが表層品質に与える影響について明確な差は確認されなかった。なお、材齢 91 日を目安とした表層透気係数試験、材齢 1 年を目安とした表層透気係数試験ともに湿潤養生日数 4 日の方が湿潤養生日数 11 日と比較して若干表層透気係数が小さい結果となっているが、これも締固めの度合いなど施工に起因したものであり、養生日数の違いによるものではないと考えられる。

また、本試験では異常値として扱ったような測点が発生したことは、施工品質が表層品質に与える影響が大きいと判断できるものであり、改めて適切な施工が重要であることが確認された。

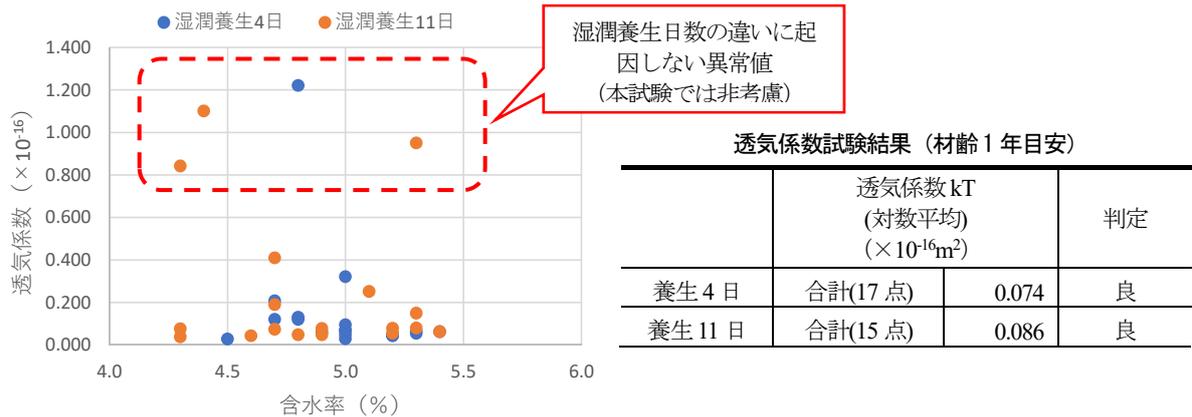


図 2.4 表層透気試験結果 (材齢1年目安)



図 2.5 グレーディングによるヒストグラム (材齢1年目安)

以上より、表層透気試験の結果からは、湿潤養生日数の違いが表層品質について明確な差は確認されなかった。しかし、2019年度室内試験において、湿潤養生を7日以上行うことで、塩化物イオン浸透抵抗性は湿潤養生4か月と同程度となっていることから、湿潤養生日数が施工の効率化や経済性に悪影響を及ぼさない場合は、長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から、安全側になるように配慮し湿潤養生日数は材齢7日以上が望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 野島昭二, 渡辺晋也, 藤原貴央, 谷倉泉: 透気係数を用いたコンクリートの品質評価と測定条件に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 2134-2139, 2014

### 3. 実物大試験体から採取したコア供試体を用いた品質確認

#### 3.1 コア供試体の採取

コア供試体採取位置図を図3.1に示す。コア供試体は、実物大試験体のウェブを湿式工法のコアドリルにて水平方向に採取した。供試体名は湿潤養生4日をWD4シリーズ、湿潤養生11日をWD11シリーズとした。今回の試験に使用しないコア供試体は側面をエポキシ樹脂系塗料にて表面を被覆し辺土名暴露試験場に移動して更に暴露を延長している。

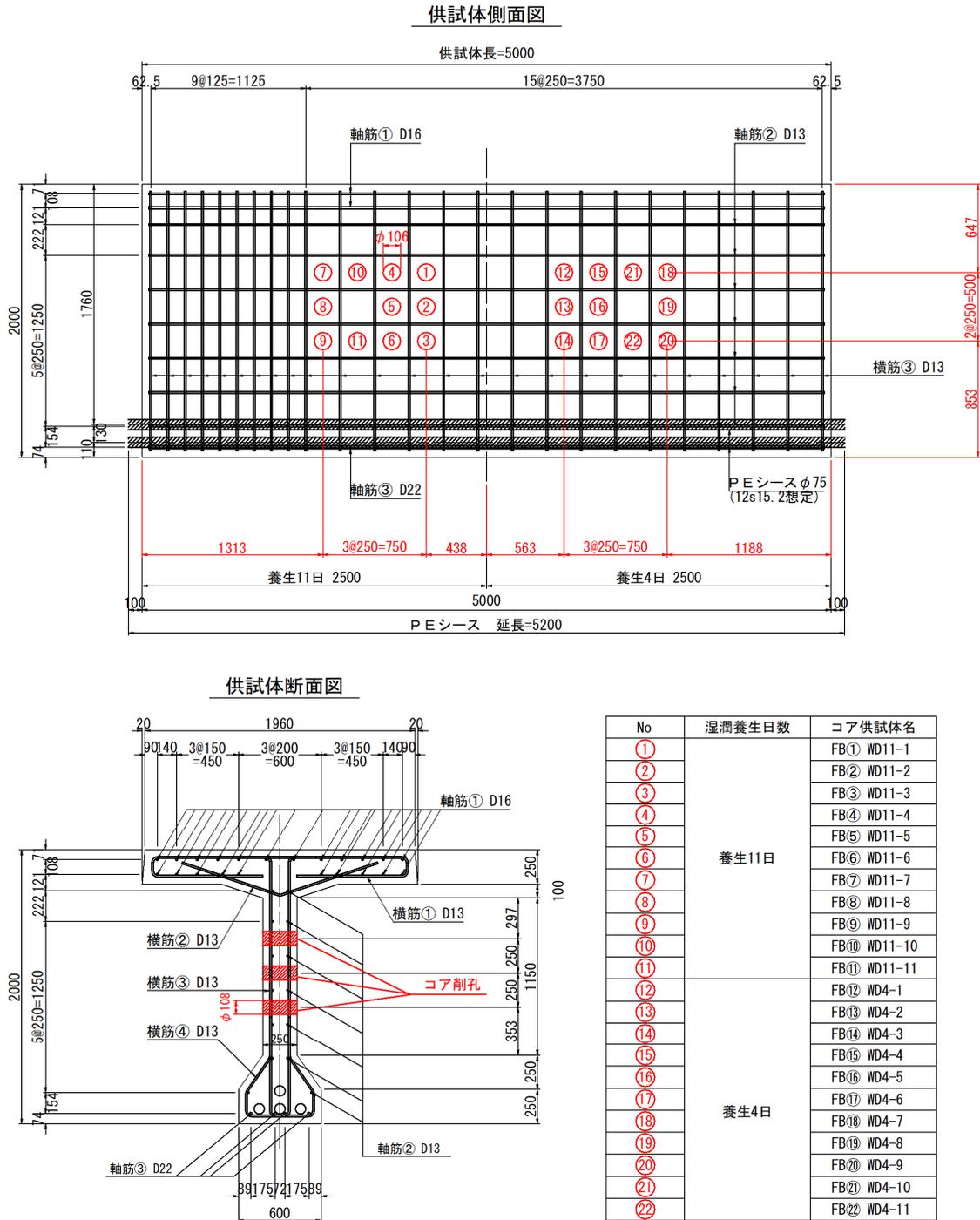


図3.1 コア供試体採取位置図

### 3.2 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果を表 3.1 に、圧縮強度とヤング係数との関係を図 3.2 にそれぞれ示す。圧縮強度は JIS A 1108, 静弾性係数試験は JIS A 1149 に準じて行った。コア供試体は FB①WD11-1～FB②WD11-3, FB⑫WD4-1～FB⑭WD4-3 を使用した。試験材齢は概ね 1 年である。

圧縮強度は材齢 1 年まで増進が見られ、ヤング係数についても強度に応じて増進していることが確認された。圧縮強度とヤング係数の関係は、道路橋示方書に示されている数値と比較すると同等以上の結果となった。室内試験において、材齢 7 日および材齢 28 日の圧縮強度とヤング係数の関係が道路橋示方書と概ね一致したこと（付録-1\_5.2.2 参照）と合わせて、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係は、材齢によらず道路橋示方書から予測することができると思われる。

表 3.1 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

湿潤養生 4 日			湿潤養生 11 日		
供試体番号	圧縮強度	ヤング係数	供試体番号	圧縮強度	ヤング係数
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )		(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
FB⑫WD4-1	83.3	43700	FB①WD11-1	83.7	46100
FB⑬WD4-2	78.6	42100	FB②WD11-2	79.3	45800
FB⑭WD4-3	84.3	43500	FB③WD11-3	79.5	41400
平均値	82.1	43100	平均値	80.8	44433

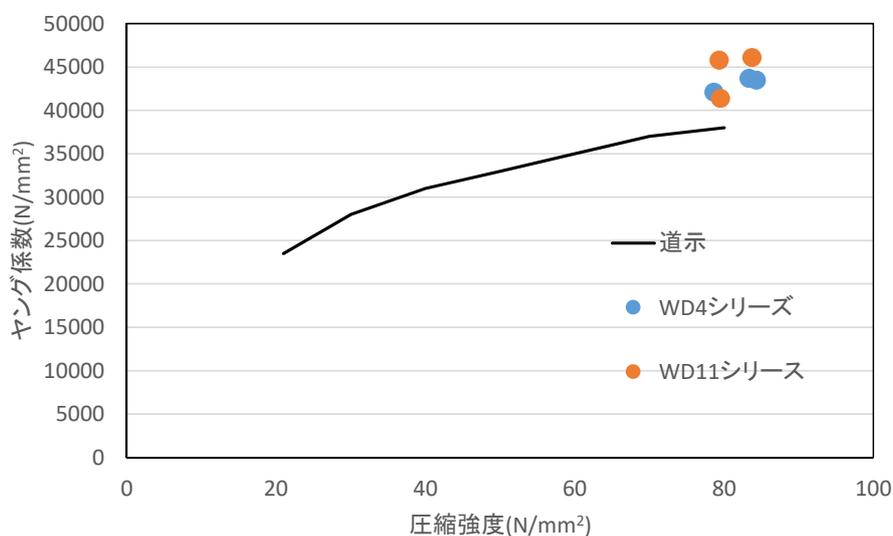


図 3.2 圧縮強度とヤング係数の関係

### 3.3 コンクリートの中性化深さ試験

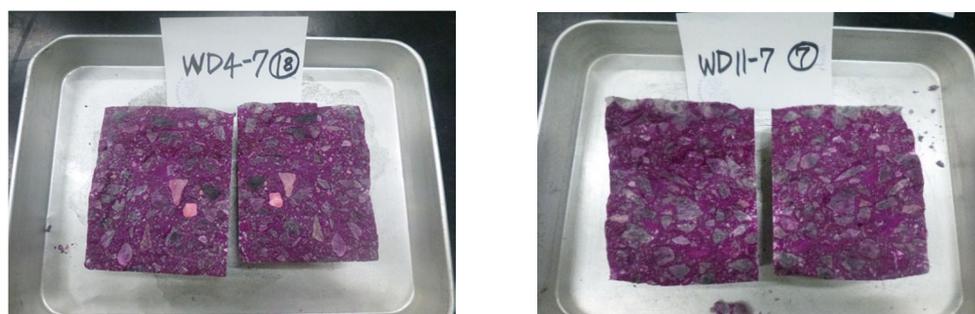
コンクリートの中性化深さ試験の結果を表 3.2 に、測定面を写真 3.1 にそれぞれ示す。コンクリートの中性化深さ試験は JIS A 1152 に準じて行った。コア供試体は FB⑦WD11-7, FB⑧WD4-7 を中央でカットし暴露時に陸側となる方を使用した。試験材齢は概ね 1 年である。

中性化はわずかであり、ほとんど進行は見られなかった。また、湿潤養生日数による差も見られなかった。中性化深さを 1.5mm, 経過年数を 1 年とすると、中性化速度係数は、 $A=1.5$  となる。このことから、中性化深さが鉄筋に達する (35mm となる) 年数は 500 年以上となり、本試験に用いたコンクリートは中性化を考慮しなくてもよいと考えられる。

表 3.2 コンクリートの中性化深さ試験結果

供試体 No.	測定値 (mm)												平均中性化深さ (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
FB⑧WD4-7 (暴露面)	3	0	0	0	4	5	3	0	0	0	3	0	1.5
FB⑧WD4-7 (カット面)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
FB⑦WD11-7 (暴露面)	5	2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	3	1.1
FB⑦WD11-7 (カット面)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0

※試薬：フェノールフタレイン 1%溶液



※上面：暴露面 下面：切断面

写真 3.1 中性化深さ試験の測定面

### 3.4 含有塩化物イオン量試験

含有塩化物イオン量試験の結果を表 3.3 および図 3.3 に示す。含有塩化物イオン量試験は JCI-SC5 に準じて行った。コア供試体はコンクリートの中性化深さ試験でカットした FB⑦WD11-7, FB⑧WD4-7 の暴露時に海側となる方を使用した。試験材齢は概ね 1 年である。

表層部に近い 0~2cm の範囲で最も塩化物含有量が大きく最大値が 0.209 kg/m<sup>3</sup>, それ以外の範囲では 0.070~0.098 kg/m<sup>3</sup> の範囲で近い値であった。2cm より深い位置の塩化物量は、フレッシュコンクリート時の塩化物量と概ね同等の数値であり、このことから、材齢 1 年では 2cm より深い位置には塩分は浸透していないと考えられる。なお、0~2cm の結果はその範囲の平均であるため、実際は表面近傍にだけ塩化物があり、表面から奥への塩分の浸透はほとんどみられていない可能性も考えられる。また、湿潤養生日数の違いによる差も確認されなかった。

今回の試験材齢が 1 年と耐久性を評価するには期間が短く、また、泡瀬の暴露地は沖縄県を代表す

る厳しい塩害環境下とは言えないため、今回の試験で使用しなかったコア供試体は、辺土名の暴露試験場に移動し、暴露を延長することとした。今後も継続的に試験を実施する予定である。

表 3.3 含有塩化物イオン量試験結果

供試体深さ (cm)		0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12
塩化物含有量 (kg/m <sup>3</sup> )	FB⑱WD4-7	0.209	0.084	0.070	0.070	0.084	0.070
	FB⑦WD11-7	0.181	0.070	0.070	0.070	0.070	0.098

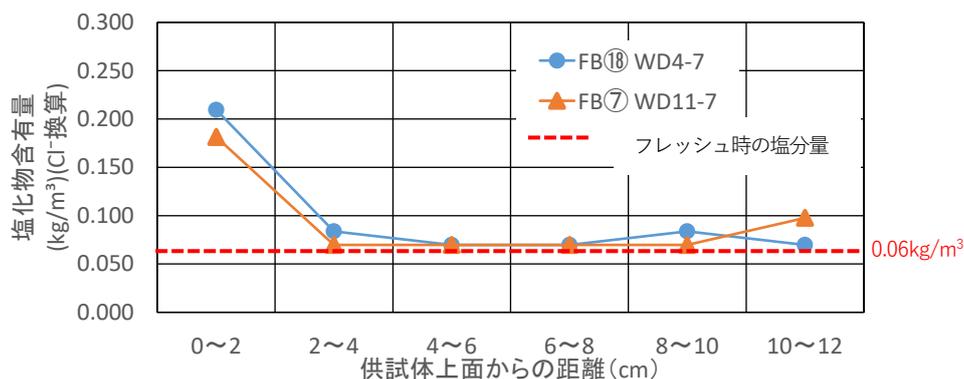


図 3.3 含有塩化物イオン量試験結果

#### 4. まとめ

施工性試験後、現地に暴露した実物大試験体および実物大試験体から採取したコア供試体を用いた各種試験により以下のことが確認された。

- (1) 透気係数試験では、湿潤養生4日と湿潤養生11日で表層品質に明確な差はない。しかし、室内試験の結果を踏まえ、湿潤養生日数が施工の効率化や経済性に悪影響を及ぼさない場合は、長期的な強度増進と塩化物イオン浸透抵抗性の観点から、安全側になるように配慮し湿潤養生日数は材齢7日以上が望ましいと考えられる。
- (2) 材齢1年を目安として行った透気係数試験では、施工品質に起因する異常値が発生しているため、改めて適切な施工が表層品質確保に重要であることが確認された。
- (3) コア供試体を用いた圧縮強度および静弾性試験より、圧縮強度とヤング係数の関係は材齢によらず道路橋示方書から予測できることが確認された。
- (4) コア供試体を用いた中性化深さ試験より、湿潤養生日数によらず、試験に用いたコンクリートは中性化を考慮しなくてもよいことが確認された。
- (5) コア供試体を用いた含有塩化物イオン量試験では、材齢1年では養生日数によらず、表面より2cm以上の位置では塩化物イオンの浸透はほとんどなかった。

## 付録—4 電気抵抗率試験および非定常電気泳動試験による耐久性の評価

### 1. 概要

コンクリート構造物に使用するコンクリートの配合の検討は、圧縮強度ばかりでなく塩化物イオン浸透抵抗性についても行われる。コンクリート構造物の品質を確保するため、試し練り時に設定したコンクリートの品質がコンクリート構造物に使用したコンクリートにおいても確保していることを確認することが望まれる。塩化物イオン浸透抵抗性を品質管理の1つとするためには迅速に評価できることが望まれるが、塩化物イオン抵抗性を評価する方法は浸せき試験および定常電気泳動試験があるが、いずれも試験結果を得るのに時間がかかることが知られている。

近年、塩化物イオン浸透抵抗性の迅速評価方法として電気抵抗率試験が提案されており、既往の研究<sup>1)</sup>では、浸せき試験から得られる見掛けの拡散係数  $D_{ap}$ 、非定常電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$ 、電気抵抗率試験から得られる電気抵抗率  $\rho_t$  には相関関係があることが確認されている(後掲 図 4.2, 図 4.3 参照)。このことから、既往の研究<sup>1)</sup>では、電気抵抗率を塩化物イオン抵抗性の指標とすることを提案している。ここで、既往の研究は早強ポルトランドセメントとフライアッシュあるいは高炉スラグ微粉末を組合せた結合材で実施しており、本研究で提案した普通ポルトランドセメントとフライアッシュの組合せとなるフライアッシュセメントB種については実施していない。

このことから、フライアッシュセメントB種を用いた配合の非定常電気泳動試験と電気抵抗率試験の結果と既往の研究<sup>1)</sup>で提案されている電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との推定した結果を比較した。

### 2. 試験に用いた供試体

供試体は  $\phi 100 \times 200$  の円柱とし、施工性試験当日に1台目のアジテータ車からコンクリートを採取して現地にて製作した。養生は材齢1日まで現地にて封緘養生し、その後、非定常電気泳動試験に用いる円柱供試体、電気抵抗率試験に用いる円柱供試体ともに各試験まで20°Cの水中養生を行った。コンクリートの材料、配合、フレッシュ試験および圧縮強度試験については、付録-2を参照のこと。

### 3. 試験方法

#### 3.1 非定常電気泳動試験

非定常電気泳動試験は材齢91日で行った。非定常電気泳動試験の試験方法は、付録-1(5.1.4 塩化物イオン浸透抵抗性)を参照のこと。

#### 3.2 電気抵抗率試験

電気抵抗率試験は材齢91日および材齢1年で行った。電気抵抗率試験の概要を図3.1に示す。電気抵抗率の測定は、JSCE-G 581 B法に準じて行った。測定装置には、電極間隔50mm、周波数40Hz、測定範囲10~10000  $\Omega m$  のものを用いた。測定は、電極を供試体側面に押しあて、互いに直角をなす4方向から行った。測定は、JSCE-G 581 付属書1に記載されているセル定数を用いて、供試体の形状や寸法、電極の配置間隔に依存しない値に換算した。電計抵抗率の評価には、換算後の平均値を用いた。

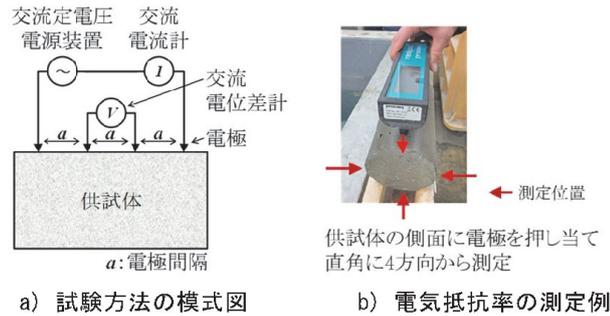


図 3.1 電気抵抗率試験の概要<sup>1)</sup>

#### 4. 試験結果

##### 4.1 電気抵抗率の経時変化

電気抵抗率の経時変化を図 4.1 に示す。同図には既往の文献<sup>1)</sup>に示す塩化物イオン抵抗性の指標区分(表 4.1 参照)もあわせて示す。本試験の電気抵抗率は材齢 91 日においては区分 2(かぶり 70mm 位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度以下)となり、材齢 150 日において区分 3(塩化物イオンの停滞により塩害の影響を受けない)となった。既往の研究<sup>1)</sup>では早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を組合せた配合では材齢 56 日以降の電気抵抗率の経時変化に伴う電気抵抗率の増分量が小さくなる傾向となったが、本試験結果では材齢 365 日まで電気抵抗率が増加しており異なる傾向を示した。この傾向は早強ポルトランドセメントとフライアッシュを組合せた配合においても示されている<sup>1)</sup>。電気抵抗率の材齢経過に伴い増加した理由はフライアッシュの反応が遅いためと考えられる。

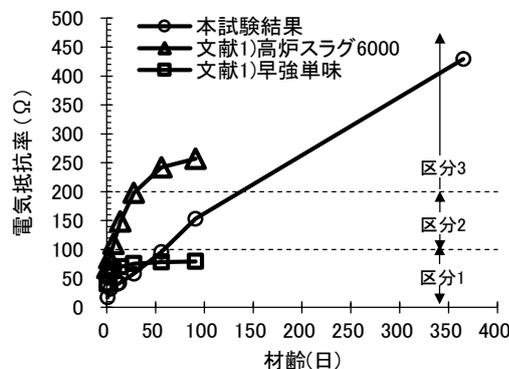


図 4.1 電気抵抗率の経時変化

表 4.1 塩化物イオン浸透抵抗性の区分<sup>1)</sup>

区分	塩化物イオン抵抗性	非定常電気泳動法による拡散係数 ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )	電気抵抗率 ( $\Omega \text{m}$ )
1	塩害の影響度が最も厳しい区分では、かぶりのみでは防食できない	$4 <$	$< 100$
2	塩害の影響度が最も厳しい区分では、かぶり 70mm 位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度以下	$2 \sim 4$	$100 \sim 200$
3	塩化物イオンが停滞するため、塩害の影響を受けない	$< 2$	$200 <$

## 4.2 電気抵抗率と非定常電気泳動試験を用いた塩化物イオン拡散係数

電気抵抗率  $\rho_t$  と非定常電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  の関係を図 4.2 に示す。ここで、図 4.2 に示される曲線は既往の研究<sup>1)</sup> からフライアッシュを用いたコンクリートのみを抽出して本研究で算出した近似曲線で、式-4.1 で表される。

$$D_{nssm} = 771.428 / \rho_t - 1.34 \quad \dots \text{式-4.1}$$

既往の研究<sup>1)</sup> では、早強ポルトランドセメントをフライアッシュ II 種で 20% 内割り置換した水結合材比 W/B=33~36% のコンクリートであるが、本試験の材齢 91 日の電気抵抗率  $\rho_t$  と非定常電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  の関係はこの近似曲線に概ね合致する結果となった。さらにデータの蓄積が必要となるが、本研究で提案したフライアッシュセメント B 種においても既往の研究で示される電気抵抗率と非定常電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  の関係を用いて塩化物イオン浸透性を評価することができると考えられる。

参考として、コンクリートの材齢 1 年の電気抵抗率  $\rho_t = 428.5$  ( $\Omega m$ ) から式-4.1 を用いて非定常電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  は  $0.453$  ( $\times 10^{-12} m^2/s$ ) となる。

表 4.2 電気抵抗率試験および非定常電気泳動試験結果

	単位	材齢 91 日	材齢 1 年
電気抵抗率 $\rho_t$	$\Omega m$	154.1	428.5
塩化物イオン拡散係数 $D_{nssm}$	$\times 10^{-12} m^2/s$	4.67	—

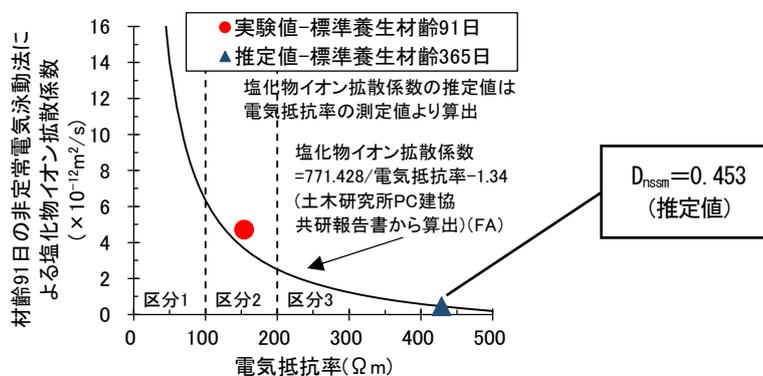


図 4.2 電気抵抗率  $\rho_t$  と塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  の関係

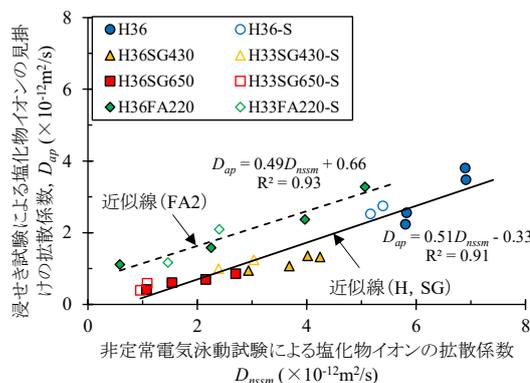
### 4.3 非定常電気泳動法を用いた拡散係数と見掛けの拡散係数の関係

既往の研究<sup>1)</sup>では非定常電気泳動試験により得られる塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  と浸せき試験により得られる見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  についても相関関係があることが確認されている。この関係を用いて、電気抵抗率から実構造物の塩化物イオン抵抗性を推定することができる。

既往の研究<sup>1)</sup>による塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  と見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  の関係を図 4.3 に示す。ここで、図 4.3 に示す直線は既往の研究<sup>1)</sup> からフライアッシュを用いたコンクリートのみを抽出して本研究で算出した近似直線で、式-4.2 で表される。

$$D_{ap} = 0.49 \times D_{nssm} + 0.66 \quad \dots \text{式-4.2}$$

本試験における材齢 91 日の非定常電気泳動試験により得られる塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  の測定値および 4.2 節で算出した材齢 1 年の塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  の推定値と式-4.2 を用いてそれぞれの見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  を算出すると、材齢 91 日の  $D_{ap} = 2.948 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ 、材齢 1 年の  $D_{ap} = 0.882 (\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$  となる。



※供試体の表記は、「H33SG650-S」のように、結合材の種類、水結合材比 (36%, 33%), 混和材の置換率 (20%, 30%, 50%) を組み合わせて表し、蒸気養生シリーズは末尾に「-S」を付記している。

※近似線は本研究にて算出し追加している。

図 4.3 浸漬試験による見掛けの拡散係数  $D_{ap}$  と非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数  $D_{nssm}$  の関係<sup>1)</sup>

次に式-4.3 を用いて耐用年数を推定する。推定は次に示す条件で行った。ここで、暴露した部材の見掛けの拡散係数は、塩水浸せきの見掛けの拡散の 0.2 倍となることが報告<sup>2)</sup>されている。このことから、耐用年数の推定は、塩水浸せきの拡散係数に 0.2 倍した値を用いて行った。推定した耐用年数は材齢 91 日の見掛けの拡散係数を用いた場合においても 100 年を超え、本提案配合は塩分浸透抵抗性があると考えられる。

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} + C_i \quad \dots \text{式-4.3}$$

ここに、 $C(x, t)$ : 距離  $x$  と試験期間  $t$  の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $x$ : コンクリート表面からの距離 ( $\text{m}$ )、 $t$ : 試験期間 ( $\text{s}$ )、 $C_0$ : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $C_i$ : 初期含有塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $D_{ap}$ : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $\operatorname{erf}$ : 誤差関数である。

条件: かぶり 70mm, 鋼材の腐食発生限界濃度  $2.1 \text{kg}/\text{m}^3$ , 波しぶきが直接かからない状態を想定したコンクリート表面の塩化物イオン濃度  $6.3 \text{kg}/\text{m}^3$ , 初期塩分量  $0 \text{kg}/\text{m}^3$   
(鋼材の腐食発生限界濃度はコンクリート標準示方書より算出  $2.1 = -2.6 \times 0.38 + 3.1$ )

$C_0$  は国内の飛来塩分量の測定結果<sup>0)</sup> から得られた式-4.4 を用いて求め、 $6.3 \text{kg}/\text{m}^3$  とした。

$$C_0 = 1.2 \cdot C_{air}^{0.4} = 1.2 \cdot (C_1 \cdot d^{-0.6})^{0.4} \quad \cdot \cdot \cdot \quad \text{式-4.4}$$

ここに、 $C_{air}$ ：飛来塩分量 (mdd=mg/dm<sup>2</sup>/day),  $C_1$ ：1 km 換算飛来塩分量 (=1.0mdd·NaCl, 低区分 A (沖縄) での滞分の頻度が高いことを考慮して設定した値),  $d$ ：海岸線からの距離 (=0.001 km, 海岸線上の場合)

耐用年数：材齢 91 日の見掛けの拡散係数  $0.2 \times 2.948 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  では 140 年  
材齢 1 年の見掛けの拡散係数  $0.2 \times 0.882 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$  では 450 年

## 5. まとめ

フライアッシュセメント B 種を用いた配合の非定常電気泳動試験と電気抵抗率試験の結果と既往の早強ポルトランドセメントとフライアッシュの組み合わせで提案されている電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係と比較した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュセメント B 種を用いた配合の電気抵抗率の増加は材齢 1 年経過時点においも継続している。
- (2) フライアッシュセメント B 種を用いた配合の電気抵抗率と非定常電気泳動法を用いた塩化物イオン拡散の試験結果は、既往の研究で示されている早強ポルトランドセメントとフライアッシュと組合せた配合の近似曲線上にあることが認められた。このことから、電気抵抗率は、フライアッシュセメント B 種を用いた配合の塩化物イオン浸透抵抗性を推定することができる。
- (3) フライアッシュセメント B 種を用いた配合の塩化物イオン抵抗性は高いことが認められた。

## 参考文献

- 1) 櫻庭浩樹, 小田部貴憲, 鈴木雅博, 古賀裕久：混和材を用いて塩化物イオン浸透抵抗性を高めたコンクリートの評価指標の提案, プレストレストコンクリート, Vol.63, No.3, pp.65-72, 2021
- 2) 皆川浩, 中村英佑, 藤井隆史, 綾野克紀：大気環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol41, No.1, pp.767-772, 2019
- 3) 建設省土木研究所, プレストレストコンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書 (II) -コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討-, 共同研究報告書第 258 号, pp.11-16, 2000

## 付録-5 フライアッシュセメントB種を用いたコンクリートの二酸化炭素排出削減効果の検討

### 1. 概要

フライアッシュの使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価するため、「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅱ)」(国研)土木研究所, (一社)PC 建協<sup>1)</sup>を参考に, フライアッシュセメントB種を用いたプレストレストコンクリート橋の二酸化炭素排出量の試算を行い, フライアッシュの使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を検証した。ただし, 本マニュアル(案)ではプレストレストコンクリート橋の上部工を対象としているため, 試算および検証はプレストレストコンクリート橋の上部工のみを対象とした。

### 2. 試算対象橋梁の概要

#### 2.1 試算対象橋梁の構造形式

試算対象橋梁は, 本マニュアル(案)で主な対象とした「ポストテンション方式PCT 桁橋」とした。構造諸元を以下に示す。

#### ■ポストテンション方式3 径間連結PCT 桁橋

橋長: 78.000m 支間: 3@25.000m

幅員: 9.500m 全幅員: 10.700m

製作方法: 現場製作

架設方法: 架設桁架設

#### 2.2 試算に用いたコンクリートの配合

ポストテンション橋の試算に用いたコンクリートの配合を表2.1に示す。ポストテンション橋に用いるコンクリートの配合は, 付録-1の実験で用いたコンクリートと同一とし, 設計基準強度 $40\text{N/mm}^2$ を想定している。普通ポルトランドセメント単味のコンクリート(N41.5)ではW/Bを41.5%とし, フライアッシュセメントB種を用いたコンクリート(FB38)では, W/Bを38%とした。

表 2.1 ポストテンション橋のコンクリートの配合

配合	W/B (%)	単分量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	NPC	FB	S	G
N41.5	41.5	160	386	—	823	969
FB38	38.0	165	—	435	803	980

※W: 水, NPC: 普通ポルトランドセメント, FB: フライアッシュセメントB種, S: 細骨材, G: 粗骨材

### 3. 二酸化炭素排出量の算出方法

#### 3.1 試算の範囲

プレストレストコンクリート橋のライフサイクルにおいて発生する二酸化炭素排出量は, 建設時に発生するものの割合が大きく, この中でも特にコンクリートに用いる材料の製造時に発生するものの占める割合が大きい。このため, ここでは“コンクリートに用いる材料の製造時”と“プレストレス

トコンクリート橋の上部工の建設時”の二酸化炭素排出量について試算を行った。

“コンクリートに用いる材料の製造時”の二酸化炭素排出量は、結合材（セメント、フライアッシュ、今回はそれらをプレミックスしたフライアッシュセメント）、細骨材及び粗骨材の使用量に各材料の二酸化炭素排出原単位を乗じた値の総和で算出される。“プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時”の二酸化炭素排出量は、各工種における仮設資材、使用材料、施工機械の使用量にそれぞれの二酸化炭素排出原単位を乗じた値の総和で算出される。建設時の二酸化炭素排出量の試算にあたって考慮した項目を(1)~(3)に示す。

- (1) 仮設資材（支保工、架設桁等）の運搬に伴うもの
- (2) 使用材料（コンクリート、PC 鋼材、鉄筋等）の製造、運搬に伴うもの
- (3) 施工機械（トラック、クレーン、コンクリートポンプ等）の運転に伴うもの

運搬に伴って生じる二酸化炭素排出量は施工場所等の条件によって異なるため、ここでは次の条件で二酸化炭素排出量を算出した。

- ・ 運搬車両はディーゼルの 10t トラック
- ・ 仮設資材の運搬距離は 100 km
- ・ 使用材料のうち、生コン以外の材料の運搬距離は 100 km
- ・ 使用材料のうち、生コンの運搬距離は 20 km

### 3.2 試算に用いた二酸化炭素排出原単位

試算に用いた二酸化炭素排出原単位の一覧を表 3.1 に示す。二酸化炭素排出原単位は文献 2)に示される数値を用いた。

表 3.1 二酸化炭素排出原単位

材料・使用機器	単位	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO2)
普通ポルトランドセメント	t	766.6
フライアッシュセメント B 種	t	624.0
粗骨材	t	2.9
細骨材	t	3.7
鉄筋	t	767.4
PC 鋼より線	t	1321.8
大型プレーカ	h	24.0
ブルドーザ (15t)	h	25.0

#### 4. 二酸化炭素排出量の試算結果

二酸化炭素排出量の算出結果を表 4.1 に示す。

表 4.1 二酸化炭素排出量の算出結果

配合	橋面積あたりの二酸化炭素排出量 (t-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )			②施工時	①+②建設時	二酸化炭素排出量 (t-CO <sub>2</sub> )	普通ポルトランドセメント単味のコンクリートに対するフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの二酸化炭素排出量の比率 (%)	
	①材料の製造時						材料精製時 (コンクリート)	建設時
	コンクリート	鋼材	計					
N41.5	0.153	0.130	0.283	0.064	0.347	289.6	100.0	100.0
FB38	0.141		0.271					

※鋼材は、鉄筋と PC 鋼材を示す。

※①②③は、橋面積 1m<sup>2</sup> あたりの二酸化炭素排出量を示す。橋面積は 834.6m<sup>2</sup> である。

##### 4.1 材料の製造時の二酸化炭素排出量

表 2.1 に示したように、本研究で提案したフライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、初期材齢の強度発現を確保するために、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも水結合材比を小さく設定しているが、単位セメント量は多くなっている。

しかし、表 4.1 の試算結果によると、フライアッシュセメント B 種を用いることによって、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、約 8% の二酸化炭素排出量削減効果が得られている。これは、表 3.1 に示すフライアッシュセメント B 種の二酸化炭素排出原単位が普通ポルトランドセメントと比較して非常に小さいためである。なお、フライアッシュをポストミックスの混和材として使用するコンクリートでも、セメントの置換率がフライアッシュセメント B 種と同程度であれば、この試算と同様の結果が得られる。

##### 4.2 建設時の二酸化炭素排出量

プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時の二酸化炭素排出量においても、フライアッシュセメント B 種を用いることによって、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも二酸化炭素排出量を削減できることがわかる。ただ、二酸化炭素排出削減効果は約 3% にとどまっている。

また、二酸化炭素排出量の合計に材料の製造時の二酸化炭素排出量が占める割合を比較すると、試算したポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋では約 80% となり、プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時に発生する二酸化炭素量の大部分を占めることがわかる。

## 5. まとめ

プレストレストコンクリート橋の上部工を対象として、コンクリートに用いる材料の製造時及び建設時に発生する二酸化炭素排出量を算出し、フライアッシュセメント B 種の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) プレストレストコンクリート橋の上部工（ポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋）の建設に伴って発生する二酸化炭素排出量のうち、コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出量が占める割合は約 80%と大きいことがわかった。コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出量を算出した結果、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、フライアッシュセメント B 種の使用によって約 8%の二酸化炭素排出削減効果が得られることがわかった。
- (2) プレストレストコンクリート橋の上部工（ポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋）の建設時の二酸化炭素排出量を算出した結果、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、フライアッシュセメント B 種の使用によって約 3%の二酸化炭素排出削減効果が得られることがわかった。

なお、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは、付録-1 に示したように普通ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上するため、プレストレストコンクリート橋の長寿命化にも寄与し、二酸化炭素排出量の削減効果をさらに大きくすることができると期待される。

## 参考文献

- 1) 土木研究所，プレストレストコンクリート建設業協会：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅱ）－混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）－，共同研究報告書第 472 号，pp.152-158
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005

## 付録-6 フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの LCC の検討

### 1. 概要

付録-1 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が遅延膨張性の ASR が懸念される海砂を使用しても ASR 抵抗性が高いことを示した。この付録では、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートにより ASR に対する補修を必要としない場合と普通コンクリートを使用して ASR に対する補修を必要とする場合のライフサイクルコスト (LCC) の検討を行った。

### 2. 試算の検討条件

#### 2.1 試算対象橋梁の構造形式

試算対象橋梁は、付録-5 で用いた「ポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋」とした。構造諸元を以下に示す。コンクリート体積、コンクリート表面積は主桁と横桁の合計である。また、コンクリート表面積は近似値として型枠面積を代用している。

#### ■ポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋

橋長	: 78.000m
支間	: 3@25.000m
幅員	: 9.500m (全幅員: 10.700m)
主桁本数	: 15 本 (5 主桁×3 径間)
コンクリート体積	: 423.72m <sup>3</sup>
コンクリート表面積	: 2190.44m <sup>2</sup>

#### 2.2 補修面積の設定

今回の LCC の検討において、ASR の補修を必要とする場合の補修面積を表 2.1 に示す。補修面積はコンクリート表面積の 15%、5%とした。ここで、補修面積 15%、5%は、それぞれ、海側の 3 主桁に補修が必要となった場合、最小単位として 1 主桁に補修が必要となった場合に相当する面積である。

表 2.1 補修面積

CASE	表面積に対する割合 (%)	表面積 (m <sup>2</sup> )	備考
CASE-15	15	328.6	海側の 3 主桁に補修が必要となった場合を想定
CASE-5	5	109.5	最小単位として 1 主桁に補修が必要となった場合を想定

#### 2.3 コンクリートおよび補修費用の単価設定

コンクリートの単価を表 2.2 に示す。フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートおよび普通コンクリートの単価は沖縄県生コンクリート協同組合による見積もり単価である。比較対象の普通コンクリートは、40-12-20N (高性能 AE 減水剤使用) である。これらの単価は令和 2 年 9 月のものであるため、同様の比較を行う際は現時点の単価を用いる必要があることに注意を要する。

表 2.2 コンクリートの単価

項目	単価 (円/m <sup>3</sup> )
フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの単価	21,150
普通コンクリートの単価	19,400
差 額	17,50

ASR の補修費用の単価を表 2.3 に示す。これらの補修工法および単価は沖縄県 FA 指針を参考にしたものである。

表 2.3 補修工事の単価

項目		単価 (円/m <sup>2</sup> )
表面被覆工法	無機系塗装材	8,982
	有機系塗装材	13,599
含浸材塗布工法	シラン系+けい酸塩系	5,300

### 3. ライフサイクルコスト (LCC) の検討結果

#### 3.1 初期投資および補修費用

フライアッシュセメント B 種を使用することによる初期投資の増額を表 3.1 に、ASR 補修工事の概算費用を表 3.2 にそれぞれ示す。フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートと普通コンクリートの単価の差額は 1,750 円/m<sup>3</sup> であり、これはコンクリートの材料費において 10% 増に相当する費用である。これにより、試算構造物では、フライアッシュセメント B 種を使用することによる初期投資の増額は 741,510 円となる。一方、補修費用の概算では、1 回の補修費用が CASE-5 の含浸材塗布工法以外でフライアッシュセメント B 種を使用することによる初期投資額の増額を上回る結果となっている。また、表面被覆工法は、トップコートが劣化し始めると再塗装を行う必要があり、メーカー側の試算によると、紫外線劣化や塩害などによる劣化環境が厳しい場合は 10~15 年に 1 回行うとのことである。これは含浸材塗布工法でも同様で、架設環境にもよるが経過年数によりその効果が薄れるとされている。

表 3.1 フライアッシュセメント B 種を使用することによる初期投資の増額

項目	コンクリート体積 (m <sup>3</sup> )	差額単価 (円/m <sup>3</sup> )	増額
フライアッシュセメント B 種を用いた コンクリート	423.72	1,750	741,510 円

表 3.2 ASR 補修工事の概算費用

CASE	補修面積 (m <sup>2</sup> )	表面被覆工法		含浸材塗布工法	備 考
		無機系塗装材	有機系塗装材	シラン系+ けい酸塩系	
CASE-15%	328.6	2,951,485 円	4,468,631 円	1,741,580 円	表面積の 15%
CASE-5%	109.5	983,529 円	1,489,091 円	580,350 円	〃 5%

### 3.2 ライフサイクルコスト (LCC) の検討

CASE-15%, CASE-5%において、15年に1回の頻度で再補修を行った場合のライフサイクルコストの比較を図3.1、図3.2にそれぞれ示す。この試算では、CASE-5%においても2回目の再補修でフライアッシュセメントB種を使用することによる初期投資の増額を超過する結果となっている。

これらの補修工法の要求性能は工法毎に異なるため、これらを用いたとしても同等の補修効果が得られるものではなく、実際の補修では要求性能だけでなく、劣化要因や劣化の程度なども総合的に判断し、工法決定されるものである。本検討では、補修工法の効果持続期間を15年と仮定しているが、構造物の設置環境や劣化の程度により15年より短くなる場合がある。また、この補修費には仮設費を含んでいないため、実際の補修ではこれらの図より大きくなると予想される。

以上を鑑みると、フライアッシュセメントB種を使用したコンクリートの利用は、表面被覆工法や含浸材塗布工法による補修よりも安価であり、その効果が半永久的に続くと考えられることから、ポストテンションPC橋におけるコンクリート耐久性向上に有効な工法であると言える。

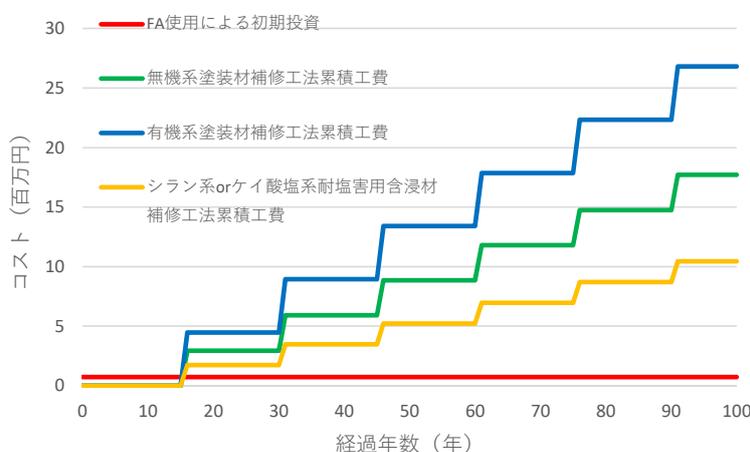


図 3.1 CASE-15%のライフサイクルコスト

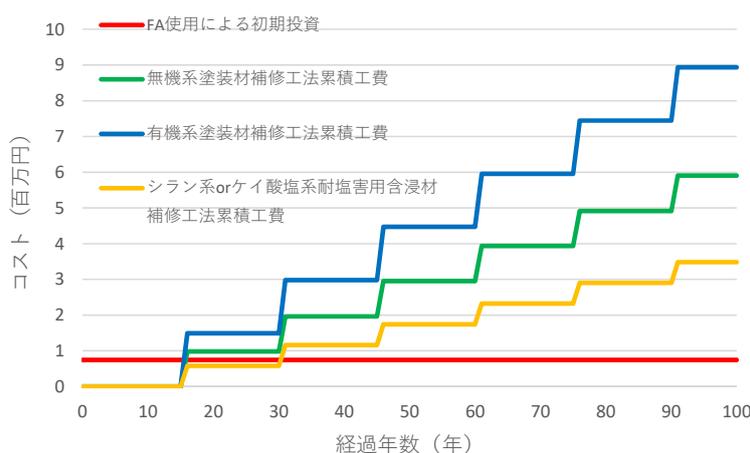


図 3.2 CASE-5%のライフサイクルコスト

#### 4. まとめ

フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートにより ASR に対する補修を必要としない場合と普通コンクリートを使用して ASR に対する補修を必要とする場合のライフサイクルコスト (LCC) の検討を行った結果、ポストテンション PC 橋において、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートの利用は、表面積の 5%を補修する場合においても、表面被覆工法や含浸材塗布工法による ASR 補修工法よりも安価であることが確認された。

また、ASR の促進材として NaCl が用いられるように、ASR の劣化は NaCl により促進されることが知られている。フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートは遮塩性に優れており、この面からも ASR の劣化を抑制すること期待できる。表面被覆工法や含浸材塗布工法の耐用年数が紫外線劣化や塩害などの過酷環境では想定より短くなる可能性がある。

こうしたことから、フライアッシュセメント B 種を用いたコンクリートを利用することにより、さらに LCC を抑制することができると考えられる。



ポストテンションPC 桁の高耐久化に向けたフライアッシュコンクリートの  
配合および施工マニュアル（案）

---

2022年3月 発行

編集著作人 琉球大学 工学部 工学科 社会基盤デザインコース 建設材料学研究室  
一般社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会  
琉球セメント株式会社

---

■本書の内容を無断で複写複製（コピー）することはお断りいたします。