

フライアッシュコンクリート利用に関するガイドライン (案)

令和 7年 3月

国土交通省 四国地方整備局

はじめに

石炭火力発電所からは、石炭燃焼に伴う石炭灰(フライアッシュ、クリンカ)が産出されます。石炭灰の発生量は、先の東日本大震災による原子力発電停止の影響で、2000年代に増加し、その後高止まりしている状況にあります。地球環境保全、資源リサイクルの観点から1991年に「再生資源の利用の促進に関する法律」(通称リサイクル法)が制定され、2001年には循環型社会の構築に向けての抜本的な法改正により「資源の有効な利用の促進に関する法律」が施行されています。これらの法律の中で石炭灰が電気業に係る「指定副産物」に指定されたこともあり、有効利用の促進を図るための技術開発が行われ、普及拡大が進められてきています。

フライアッシュの有効利用は、セメント混合材、コンクリート混和材、建材など多岐に亘っています。中でもコンクリートへの利用は、フライアッシュの特長(ポゾラン活性、ボールベアリング効果など)を最も有効に活かせる用途です。フライアッシュを用いたコンクリートは流動性の改善による施工性能の向上、単位水量低減による温度ひび割れの抑制、組織の緻密化による耐久性の向上、長期強度の増進、アルカリシリカ反応の抑制など、コンクリートの性能向上に係わる利点のみならず、セメント代替によるCO₂削減、また、近年の骨材事情の悪化に伴う細骨材の代替材料としての利用など、地球環境保全の観点からのメリットも兼ね備えています。

北陸地方ではアルカリシリカ反応抑制対策として、九州・沖縄地方ではコンクリート構造物の長寿命化や塩害対策としてフライアッシュコンクリートの設計・施工指針を発刊して利用促進が図られています。

四国においては、「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)」(土木学会四国支部2003年3月)、「四国版フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針」(土木学会四国支部2016年3月)がそれぞれ発刊され、フライアッシュコンクリートの普及に向けた整備が進んでいる状況です。しかし、貯蔵設備の投資を行って供給体制を整えている生コンクリート製造会社は3割程度であり、現状ではまだまだ、普及しているとは言い難い状況です。

四国地方整備局においては、生コンクリート製造者、施工業者などを対象にアンケート調査を実施し、現状の課題整理を行い、ここに「フライアッシュコンクリート利用に関するガイドライン(案)」をとりまとめました。

本ガイドライン(案)がフライアッシュコンクリートの有効利用の一助になることを願うものであります。

本ガイドラインの構成について

本ガイドラインの構成を目次項目別に、記載内容の概要を示し、併せて対象者をまとめてみました。

本ガイドラインの構成

項 目	記 載 内 容	対象者※
I. 共通事項	①フライアッシュとは何か、②その品質基準は、③フライアッシュコンクリートの使用目的や使用方法等についてまとめています。	発、設、製、施
II. 特 性	フライアッシュコンクリートの特性として、通常コンクリートと比較した①長所と短所、②耐塩害性等の耐久性についてまとめています。	発、設、製、施
III. 四国のフライアッシュコンクリートに係る現状について	四国のフライアッシュコンクリートの現状について、生コンクリート工場、施工業者およびフライアッシュ販売会社を対象にフライアッシュコンクリートの実態や普及に向けた意見についてのアンケート調査を行い、その結果概要をまとめています。	発、設、製、施
IV. 設 計	①フライアッシュコンクリートを使用した構造物を設計する際のポイント、②フライアッシュコンクリートの適用事例等についてまとめています。	発、設
V. 製 造	①フライアッシュコンクリートの配合設計の流れ、②製造する際の留意点、③製造に関する品質管理についてまとめています。	発、製
VI. 施 工	①フライアッシュコンクリートと通常コンクリートを比較した施工性、②施工に関する留意点、③施工に関する検査および品質管理についてまとめています。	発、施
VII. 維持管理	フライアッシュコンクリートの維持管理についてまとめています。	発

※対象者は以下のとおり

発：発注者

設：設計者（主に設計コンサルタント）

製：生コンクリート製造者

施：施工業者

本ガイドラインの対象物

一般的な土木構造物の鉄筋コンクリートと無筋コンクリートを対象としています。

目 次

はじめに

I. 共通事項	1
I-1. フライアッシュとは	1
I-2. コンクリート用フライアッシュの品質基準	2
I-3. フライアッシュコンクリートとは	3
II. 特 性	4
II-1. フライアッシュコンクリートの優れている点と劣っている点	4
II-2. フライアッシュコンクリートの耐久性	5
III. 四国のフライアッシュコンクリートに係る現状について	8
IV. 設 計	10
IV-1. フライアッシュコンクリートの設計の流れ	10
IV-2. フライアッシュコンクリートの適用事例	11
V. 製 造	12
V-1. フライアッシュコンクリートの配合設計	12
V-2. フライアッシュコンクリートの製造に関する留意点	13
V-3. フライアッシュコンクリートの製造に関する品質管理	15
VI. 施 工	16
VI-1. フライアッシュコンクリートの施工性	16
VI-2. フライアッシュコンクリートの施工に関する留意点	16
VI-3. フライアッシュコンクリートの施工に関する検査・品質管理	16
VII. 維持管理	17
参考資料	18
1. 石炭灰は様々な分野で有効利用されています	19
2. フライアッシュの品質項目はフライアッシュコンクリートの何に影響しますか	20
3. フライアッシュコンクリートの耐久性はどのような傾向がみられますか	22
4. 四国のフライアッシュコンクリートに係る現状の補足	28
5. フライアッシュコンクリートの配合設計例	31
6. 参考文献一覧	33

I. 共通事項（発、設、製、施）

I-1. フライアッシュとは

石炭火力発電所は、石炭を燃料として発電を行っています。

石炭灰は微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガス中に浮遊している微粒子を、電気集じん機により回収したフライアッシュと、ボイラ内部で固化したクリンカアッシュに分けられます。

石炭灰のうち、約 90%がフライアッシュであり、約 10%がクリンカアッシュとなります。

四国で電気業に関わる石炭火力発電所のうち、石炭灰を有効利用していることが確認される5箇所の発電所においては、令和5年度には年間約 36 万 t の石炭灰が発生しており、そのうちの 35 万 t がセメントやコンクリート分野などに幅広く利用され、残り 1 万 t は有効利用が困難なクリンカアッシュで埋立等に最終処分されています。

フライアッシュの粒径は概ね 0.1mm 以下で、顕微鏡写真に示すように球形の微粒子です。

また、密度は $1.9\sim 2.3\text{g/cm}^3$ の範囲にあります。

粒子形状などの特性によって、コンクリート品質向上に寄与することができます。

■ フライアッシュの特徴

- 滑らかな球形の微粒子で、コンクリート性質の改善が可能
 - ・粒度：数 μ ～0.1mm程度
 - ・密度： $1.9\sim 2.3\text{g/cm}^3$
- 主な改善項目
 - ・単位水量の低減、流動性の改善
 - ・水和熱の低減
 - ・コンクリートの緻密化（耐久性の向上） など

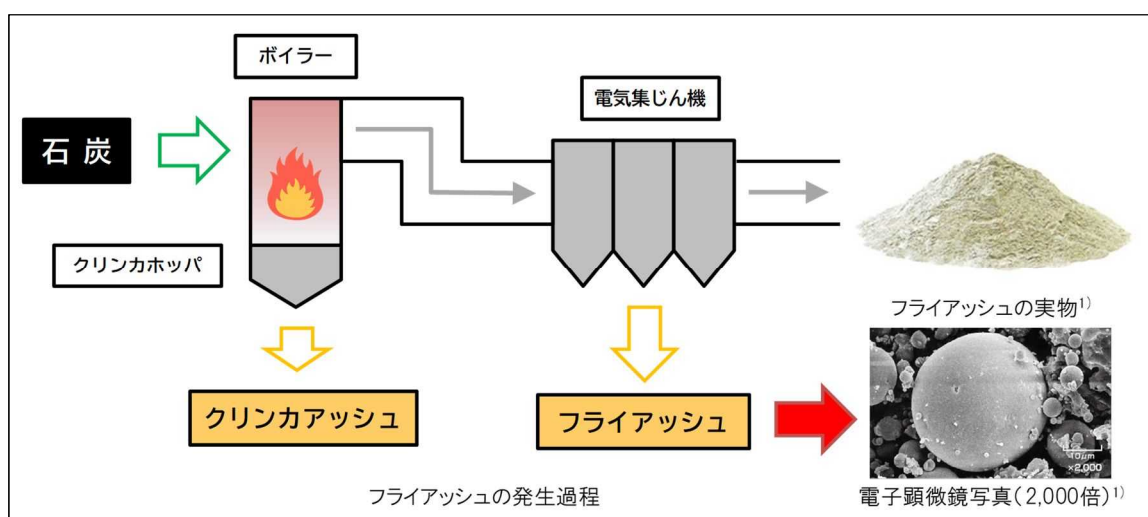


図-1 フライアッシュの製造過程

表-1 石炭灰の発生箇所による分類

呼 称	発 生 箇 所
フライアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから集じん機で採取された石炭灰
クリンカアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの炉底に落下採取された石炭灰

参考文献

1) 日本フライアッシュ協会 HP

I-2. コンクリート用フライアッシュの品質基準

フライアッシュの品質規格は、コンクリート混和材として、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」でⅠ～Ⅳ種の4種類が規定されており、強熱減量※¹と粉末度の組合せにより区分されています。

■ フライアッシュの品質について

- Ⅰ種に近づくほど不純物が少なく、微粒分が多いため高品質
- 四国内で流通しているのは、Ⅱ種のみ
- 品質項目のうち、コンクリートに影響するのは強熱減量
- 強熱減量のばらつきは少なく、品質は安定しています
品質の規定範囲(Ⅱ種: ±1.0%)¹⁾

表-2 コンクリート用フライアッシュの品質 (JIS A 6201 : 2015)

種 類 項 目		フライアッシュJIS A 6201			
		I 種	II 種	III種	IV種
二酸化けい素		%	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 ³	1.95以上		
粉末度	45μm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 ² /g	5,000以上	2,500以上	2,500以上 1,500以上
フロー値比		%	105以上	95以上	85以上 75以上
活性度指数 材齢28日		%	90以上	80以上	80以上 60以上
活性度指数 材齢91日		%	100以上	90以上	90以上 70以上
性能・用途等 ²⁾		【効果】 ・コンクリートの高強度 ・流動性付与 ・アルカリシリカ反応抑制 等	【効果】 特に優れている ・水和熱抑制 ・長期強度の改善	【効果】 II種と同等の効果 ・水和熱抑制 ・アルカリシリカ反応抑制 ・長期強度の改善	【効果】 II種と同等の効果 ・水和熱抑制
		【無混入コンクリートと比較】 同等な点 ・初期強度発現性	【無混入コンクリートと比較】 優れている点 ・流動性付与 ・アルカリシリカ反応抑制	【配慮する点】 練り混ぜ時 ・流動性 ・空気連行性	効果が期待できる ・アルカリシリカ反応抑制
		四国では流通なし		四国では流通なし	四国では流通なし

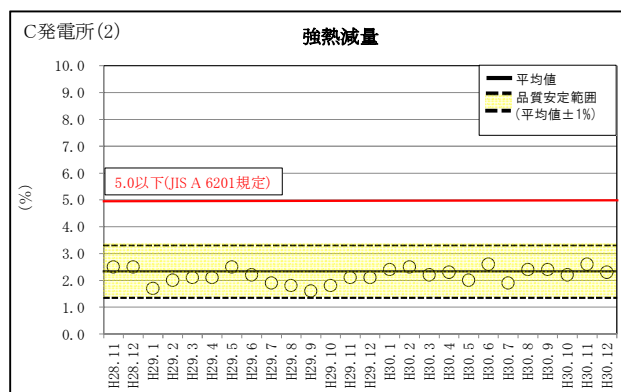


図-2 四国のフライアッシュの品質実績(Ⅱ種)(H28年11月～H30年12月)

安定範囲にあるため、品質は安定しているといえます。

【補足】

※1 強熱減量

試料を恒量となるまで 975 ± 25℃ で強熱した後の質量減少率から湿分を差し引くことにより求めます。フライアッシュの強熱減量は主に未燃カーボン※2 です。

※2 未燃カーボン

微粉炭の発電燃焼時の燃え残りの炭素です。

参考文献

- 1) (公社)土木学会コンクリートライブラリー94, フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)
- 2) 日本フライアッシュ協会 HP(一部準用)

I-3. フライアッシュコンクリートとは

「フライアッシュをコンクリート用混和材として使用したコンクリート」をフライアッシュコンクリート(以下、「FAコン」と称す)と呼ばれています。¹⁾

FAコンの一般的な使用目的を以下に示します。¹⁾

■ FAコンの使用目的

- 施工性能の改善(流動性、材料分離抵抗性 など)
- 水和熱による温度上昇の抑制
- アルカリシリカ反応の抑制
- 耐塩害性、水密性、化学抵抗性の向上

また、FAコンの一般的な使用方法を以下に示します。

■ フライアッシュのコンクリートへの使用方法

- 内割配合(うちわり) → セメントの一部をフライアッシュに置き換えて使用する方法
- 外割配合(そとわり) → 細骨材の一部をフライアッシュに置き換えて使用する方法

(注) 内割配合と外割配合を併用する場合があります。

なお、セメントの一部に置き換えて使用する(フライアッシュを結合材として使用する)場合には、水セメント比(W/C)^{※1}の代わりに水結合材比(W/B)^{※2}で読替えてもよいとします。

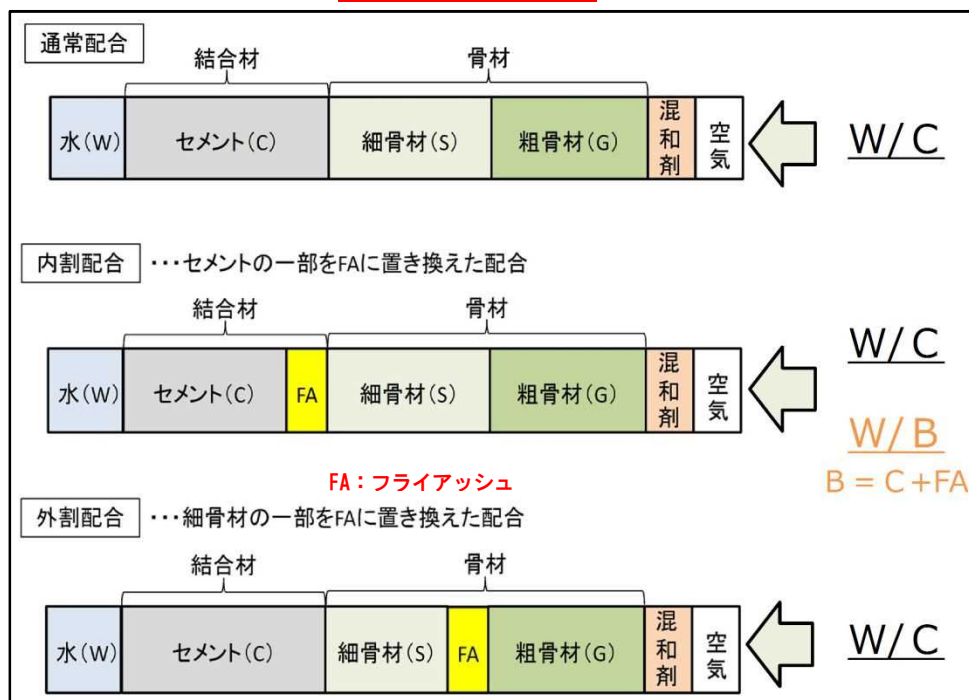


図-3 フライアッシュのコンクリートへの使用方法

【補足】

※1 水セメント比：単位水量(W)を単位セメント量(C)で除した値を百分率で示したもの

※2 水結合材比：単位水量(W)を単位結合材量($B=C+FA$)で除した値を百分率で示したもの

Ⅱ. 特 性（発、設、製、施）

Ⅱ-1. フライアッシュコンクリートの優れている点と劣っている点

FAコンは同じ水結合材比（水セメント比）の通常コンクリート（フライアッシュ未混入、以下、「通常コン」と称す）と比べて、次のような特徴があります。

【 優れている点 】

- **ワーカビリティ^{※1}の向上**

フライアッシュは微細な球形をしており、ボールベアリング効果により流動性が改善され、単位水量が低減されます。

- **長期的な強度の増進**

FAコンはフライアッシュのポゾラン反応^{※2}が長期間継続するため、同じ水セメント比の通常コンよりも長期的な強度が増進します。

- **乾燥収縮の低減**

FAコンの乾燥収縮は、フライアッシュの減水効果により単位水量を減少させることができることや、ポゾラン反応によって水和組織が緻密になるため、乾燥収縮が低減されます。つまり、ひび割れが生じにくくなります。

- **アルカリシリカ反応の抑制**

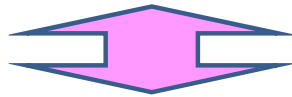
FAコンはセメントの水和により生成する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が少なく、ポゾラン反応によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費されるため、アルカリシリカ反応を抑制します。

- **水和発熱の低減**

セメントの一部をフライアッシュに置き換えて使用するFAコンは、セメント量が低減されているため、セメントの水和に伴う熱の発生を低減することができます。

- **水密性、化学抵抗性の向上**

FAコンの水密性および化学抵抗性は、フライアッシュのポゾラン反応によりコンクリート組織が緻密になるため、通常コンよりも優れています。



【 劣っている点 】

- **初期強度発現の遅延**

FAコンは初期強度の水和反応が緩慢なため、通常コンと比べて初期強度は小さくなります。しかし、平成30年度のアンケート結果により、脱枠に遅延が発生するような遅れは発生していないことが確認されています。

- **空気連行性の低下**

フライアッシュの未燃カーボンがAE剤^{※3}を吸着するため、空気連行性が低下し、AE剤使用量が多くなる場合があります。しかし、平成30年度のアンケート結果により、生コンクリート製造時に問題となるほどの空気連行性の低下は発生していないことが確認されています。

- **中性化抵抗性の低下**

FAコンはポゾラン反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が減少するため、中性化の進行が早くなります。しかし、耐久性の検討を行い、構造物の耐久性上大きな問題ではないことが確認されています。

【補足】

※1 ワーカビリティ

材料分離を生じることなく、運搬、打込み、締固め、仕上げ等の作業のしやすさをいいます。

※2 ポゾラン反応

フライアッシュが持つ性質で、セメントの水和により生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とフライアッシュ中の SiO_2 、 Al_2O_3 がゆっくりと反応し安定な水和物を生成する反応のことです。

※3 AE 剤

Air entraining agent で和訳すると空気連行剤です。モルタルやコンクリート中に微細な独立気泡（1～100 μm ）を連行する化学混和剤です。

II-2. フライアッシュコンクリートの耐久性

セメント量がほとんど減少しない外割配合に対し、セメント量が減少する内割配合は耐久性の検討が必要となります。本ガイドラインでは、コンクリート構造物の劣化に影響を与えると考えられる塩害・中性化・凍害に対する抵抗性について検討を行い、その安全性を確認しました。

● 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

フライアッシュによるポゾラン反応の進行に伴い、組織が緻密化し塩化物イオン浸透に対する抵抗性は向上します。

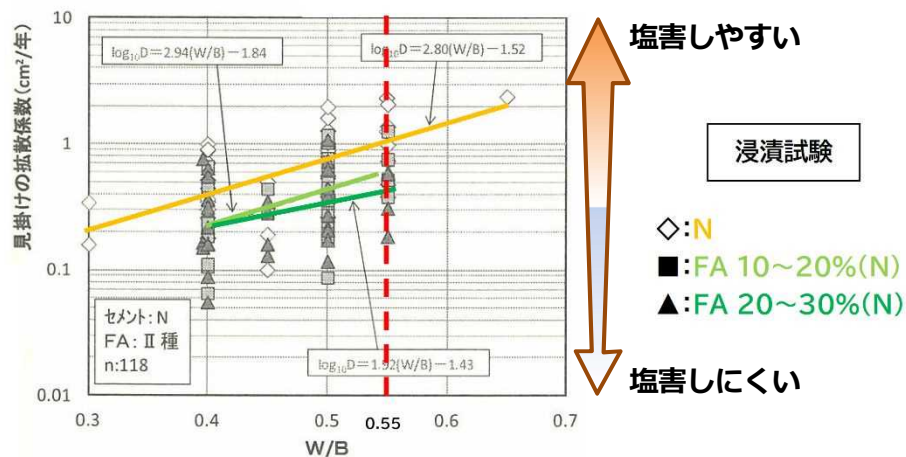


図-4 塩害のしやすさと W/B の関係 (N) ¹⁾ (一部加筆)

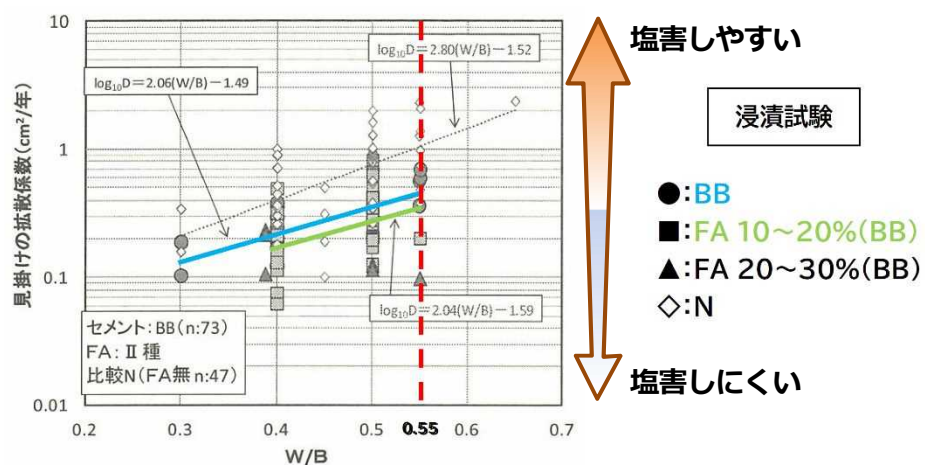


図-5 塩害のしやすさと W/B の関係 (BB) ¹⁾ (一部加筆)

参考文献

1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

● 中性化に対する抵抗性

セメント量の減少による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量の減少、ポゾラン反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費により、**中性化は促進**されますが、 $\sqrt{t}$ 則を用いて 100 年後の中性化深さを算出した結果、鋼材腐食発生限界深さに達していないため、**耐久性に大きな問題はない**ことが分かりました。

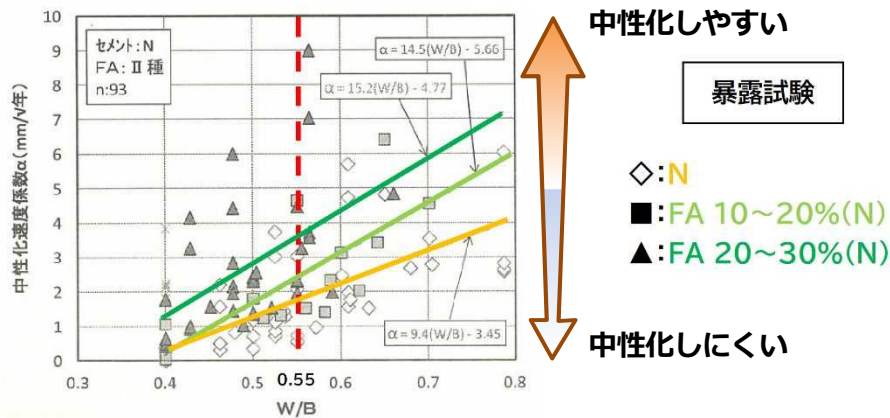


図-6 中性化のしやすさと W/B の関係 (N) ¹⁾ (一部加筆)

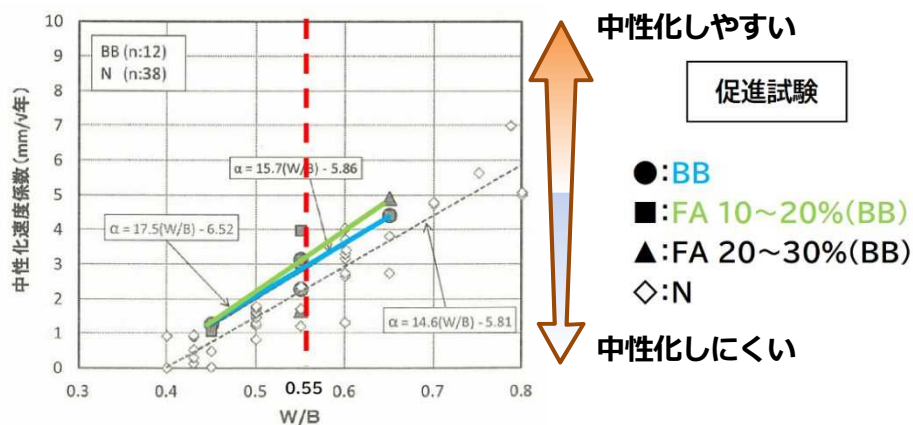


図-7 中性化のしやすさと W/B の関係 (BB) ¹⁾ (一部加筆)

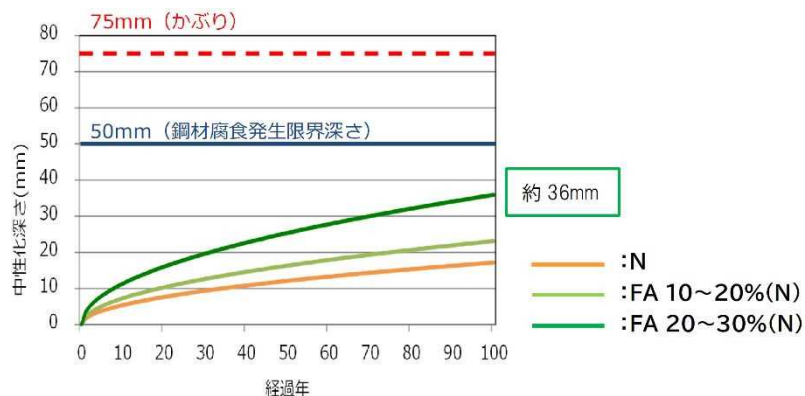


図-8 100 年経過時の中性化深さ (N)

参考文献

1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

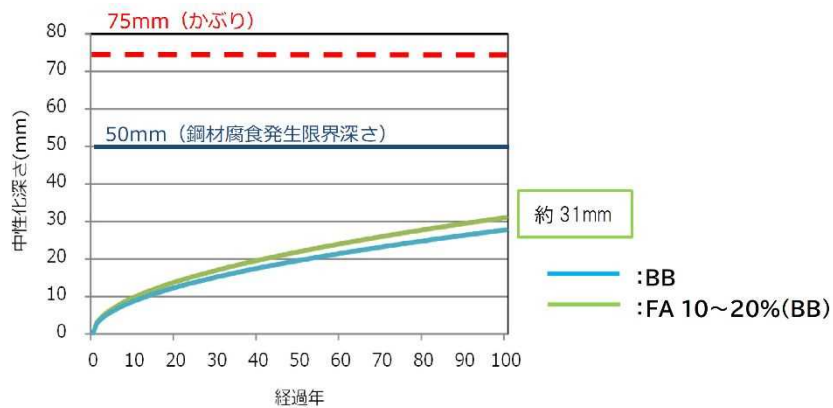


図-9 100年経過時の中性化深さ (BB)

● 凍結融解抵抗性

フライアッシュによるポゾラン反応の進行に伴い、組織が緻密化し耐凍害性は向上します。

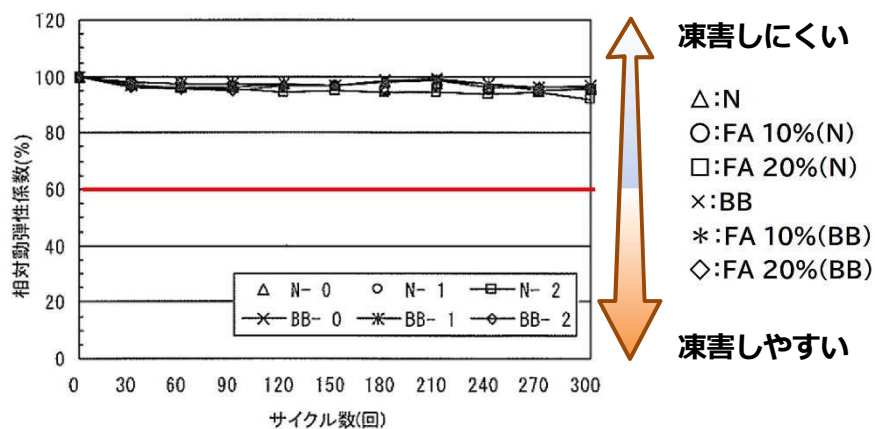


図-10 FA コン (N, BB) の凍結融解抵抗性試験結果²⁾ (一部加筆)

相対動弾性係数が60%以上であれば凍結融解抵抗性が確保されています。

参考文献

- 1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針
- 2) (公社)日本コンクリート工学協会四国支部, フライアッシュの有効利用と混和コンクリート構造物の耐久性に関する研究委員会 報告書

Ⅲ. 四国のフライアッシュコンクリートに係る現状について（発、設、製、施）

四国のFAコンを取り巻く現在の状況について、生コンクリート工場、施工業者およびフライアッシュ販売会社を対象に、FAコンの実態やFAコンの普及に向けた意見についてアンケート調査を行いました。アンケート調査(※)から得られた情報の概要を以下に示します。

■ アンケート対象者

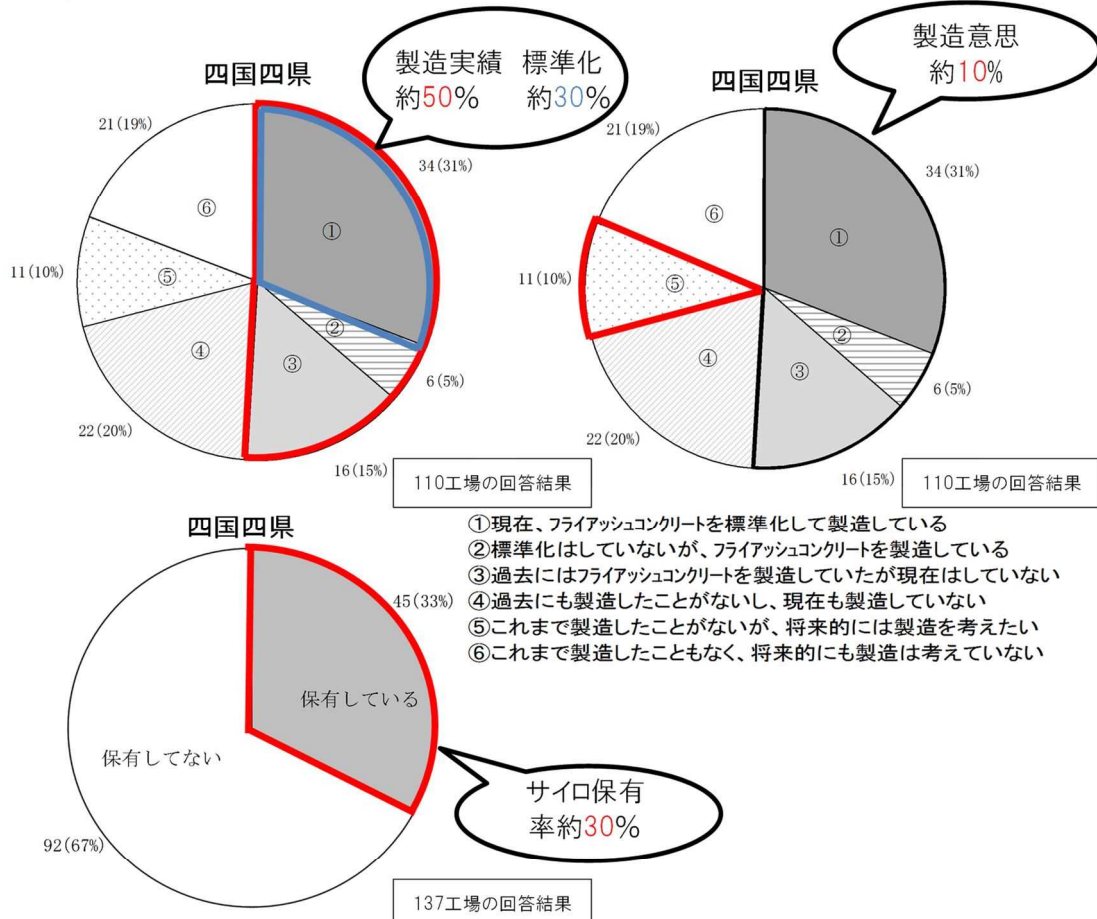
- 生コンクリート工場 ● 施工業者 ● フライアッシュ販売会社

■ アンケート結果1

● 生コンクリート工場

◆ 貯蔵設備・製造実績・配合情報の実態

- ① FAコンの**製造実績は約50%**、うち**30%は標準化**して製造出荷
- ② フライアッシュ専用サイロは**約30%の工場が保有**
- ③ 約10%の工場は今後FAコンの製造意思あり
- ④ 使用法は**内割配合約40%、外割配合約50%、内割外割併用約10%**(四国全体)
- ⑤ 使用フライアッシュは、Ⅰ種11%、Ⅱ種35%、Ⅳ種5%(四国全体)



◆ 普及しない理由への意見

- ① 貯蔵サイロ等の設備がない
- ② 普通ポルトや高炉セメントが普及
- ③ フライアッシュの使用実績が少なく発注者の認知度が低い

◆ 普及拡大方策への意見

- ① 製造設備への投資支援
- ② コストメリットを見出すフライアッシュの低価格化
- ③ フライアッシュ品質のさらなる安定化・高性能化

(※) アンケート結果は平成30年度の調査結果

■ アンケート対象者

● 生コンクリート工場

● 施工業者

● フライアッシュ販売会社



■ アンケート結果2

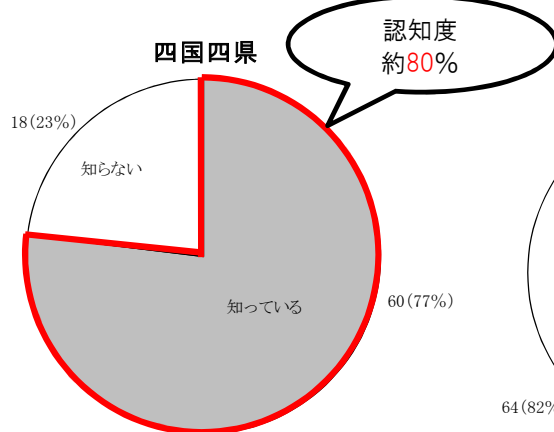
● 施工業者

◆ 施工実績、施工性への意見

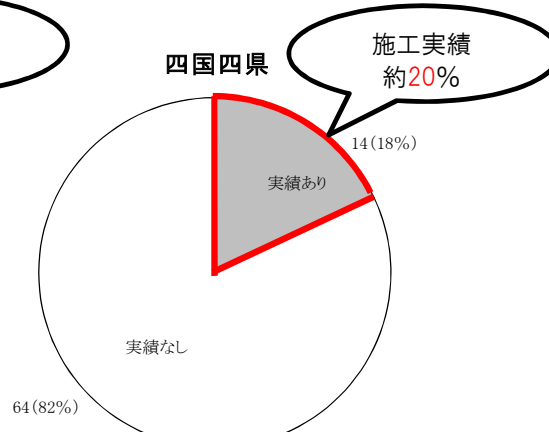
- ① FAコンの認知度は約80% ② FAコンの施工実績は約20%
③ 通常コンと同等もしくは改善効果あり

◆ 普及拡大方策への意見

- ① 使用実績が少ない ② 仕様書への記載なし ③ 現状指針類ではFAコンの情報不足



78社の回答結果



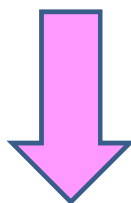
78社の回答結果

● フライアッシュ販売会社

◆ 普及拡大方策への意見

- ① 諸官庁等への認識や理解度を高める活動強化
② フライアッシュ品質の技術的情報支援 ③ 試験練り・配合設計等への技術支援
④ FAコン使用の実績づくり

(※) アンケート結果は
平成30年度の調査結果



・フライアッシュに対する理解度の深化
・仕様書への記載(水結合材比の読替え)
による使用実績向上

■ FAコン普及拡大の優先方策

● FAコン利用者の理解度向上

● 水結合材比への読替え

IV. 設 計（発、設）

IV-1. フライアッシュコンクリートの設計の流れ

FAコンを用いた構造物の設計は通常コンと同様に、コンクリート標準示方書[設計編]を参考に行います。

その中で、フライアッシュの利用が必ずしも有利とまらない中性化については、以下のように照査を行っておくのがよいと考えます。

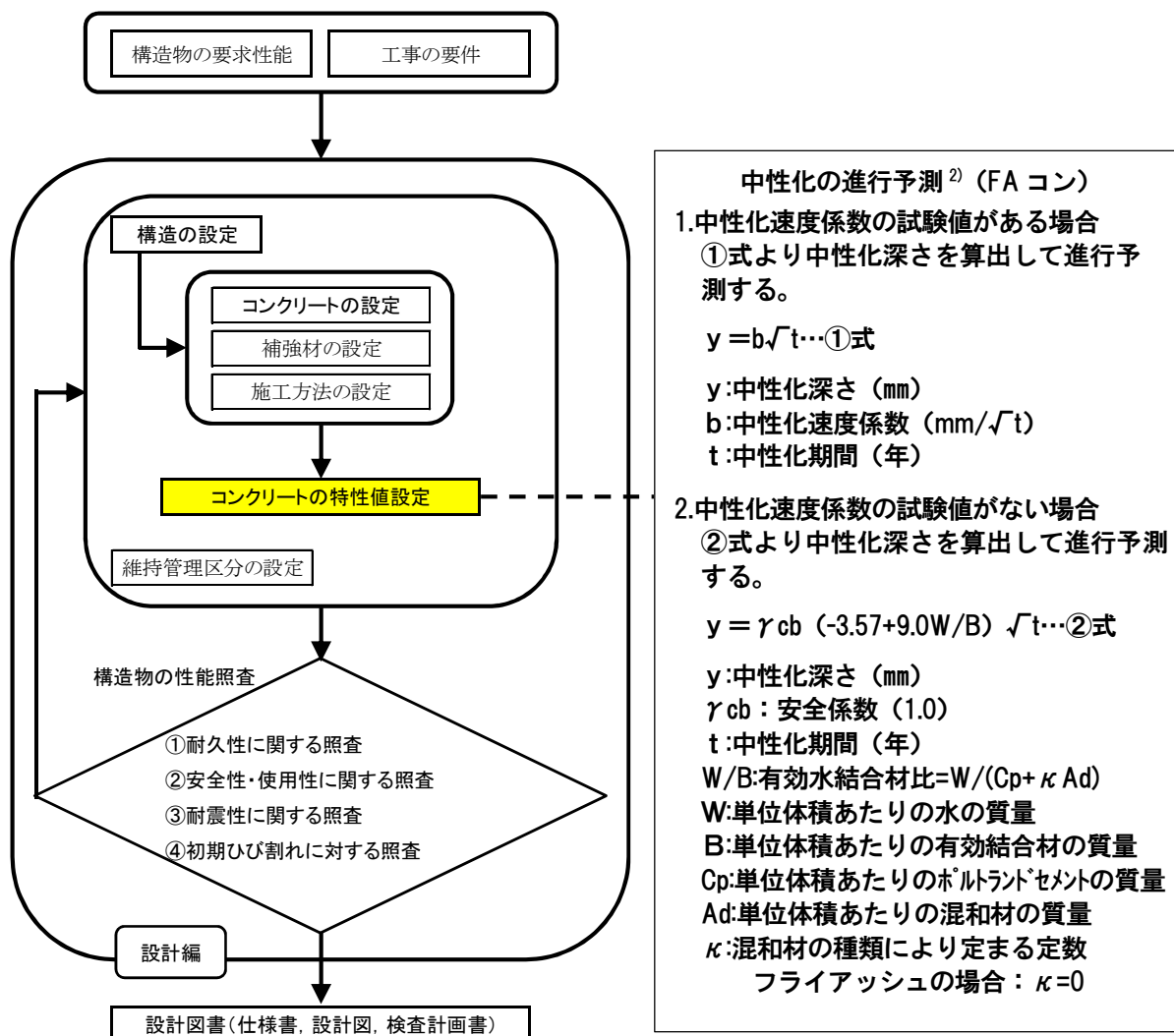


図-11 設計の流れ¹⁾（一部加筆）

※ 図は参考文献 1)、中性化の説明は参考文献 2) による。

参考文献

- 1) (公社)土木学会, 2017 年制定 コンクリート標準示方書[施工編]
- 2) (公社)土木学会, 2022 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]

IV-2. フライアッシュコンクリートの適用事例

表-3 にはフライアッシュの特性を活かすことができる適用例をまとめています。フライアッシュの各種効果に対して有効な構造物が挙げられています。表-4 にはフライアッシュの指針・マニュアルを作成している地域のFAコンの使用目的をまとめています。

表-5 にはFAコンを用いた施工事例のうち、代表的なものを挙げています。FAコンの使用目的としては、ひび割れ抑制や施工性、耐久性の向上が多いことが分かります。

四国におけるFAコン利用は、構造物の品質向上および塩害対策に有効であると考えます。

表-3 FAコンの適用例¹⁾

フライアッシュ使用の効果	構造物の種類や環境
温度ひび割れの抑制	マスコンクリート
水密性の向上	地下構造物、水理構造物、貯水槽、上下水道施設、トンネル等
遮塩性の向上	塩害環境下にある構造物(例:ケーソン、擁壁、橋脚、栈橋) 飛来塩分量の多い地域、山間部など凍結防止剤散布地域
アルカリシリカ反応の抑制	アルカリシリカ反応により劣化が懸念される地域(予防保全)
充填性の向上	過密配筋など充填性が求められる構造物、部位 (例:橋脚の配筋補強工事)

表-4 地域政策の事例

他地整等	FAコンの使用目的
九州地方整備局	構造物の品質向上
北陸地方整備局	アルカリシリカ反応の抑制
長崎県	構造物の品質向上
沖縄県	塩害対策

表-5 FAコンを用いた施工事例²⁾ (代表的事例の抜粋)

発注者	構造物(使用部位)	FA使用方法、種類	使用目的
国交省 大田川河川事務所	砂防堰堤(水叩き部)	内割(置換率20%) Ⅱ種	ひび割れ抑制(発熱抑制)
島根県 浜田水産事務所	防波堤(上部工)	内割外割併用 内割5%、外割7% Ⅳ種	耐塩害性能向上 ひび割れ抑制(発熱抑制) 施工性向上
島根県 浜田水産事務所	根固めブロック、 消波ブロックなど	内割外割併用 内割5%、外割7%、Ⅳ種	耐塩害性能向上 施工性向上
国交省 中国地方整備局	ボックスカルバート	外割(置換率7%) Ⅱ種	流動性改善 ひび割れ抑制 長期強度増進
沖縄県	橋梁下部工	内割(置換率20%) Ⅱ種	発熱量低減 耐久性向上(塩害、ASR他)
西日本高速道路	道路トンネル (覆工コンクリート)	外割(置換率6%) Ⅳ種	流動性改善 充填性向上 骨材分離抵抗性向上
国交省 中国地方整備局他	道路トンネル (吹付けコンクリート(NATM))	内割外割併用 内割25%、外割5% JIS外品	粉塵量低減 リバウンド低減 長期強度増進
国交省 四国地方整備局	道路トンネル (吹付けコンクリート(NATM))	外割(置換率10%) Ⅰ種	粉塵量低減 リバウンド低減 フレッシュ性状改善
北海道電力	取水路、取水ピット	内割(置換率30%) Ⅱ種	ひび割れ抑制
中国電力	導水路	内割外割併用 内割10%、外割25kg/m ³ Ⅳ種	水密性向上 長期強度増進 ひび割れ抑制(乾燥収縮抑制)
四国電力	火力発電所 (放水ピット)	内割(置換率25%) Ⅱ種	長期強度増進 ひび割れ抑制
東北電力	船積サイロ基礎他	内割(置換率15%) Ⅱ種	長期強度増進
中国電力	鉄塔基礎	内割外割併用 内割5%、外割7% Ⅱ種	材料分離抵抗性向上 施工性向上 耐久性向上
民間	建屋基礎、地下躯体など	内割(置換率20%) Ⅱ種	施工性向上 ひび割れ抑制(収縮、発熱)

参考文献

- 1)(公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針
- 2)(公社)土木学会コンクリートライブラリー132, 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術

V. 製 造（発、製）

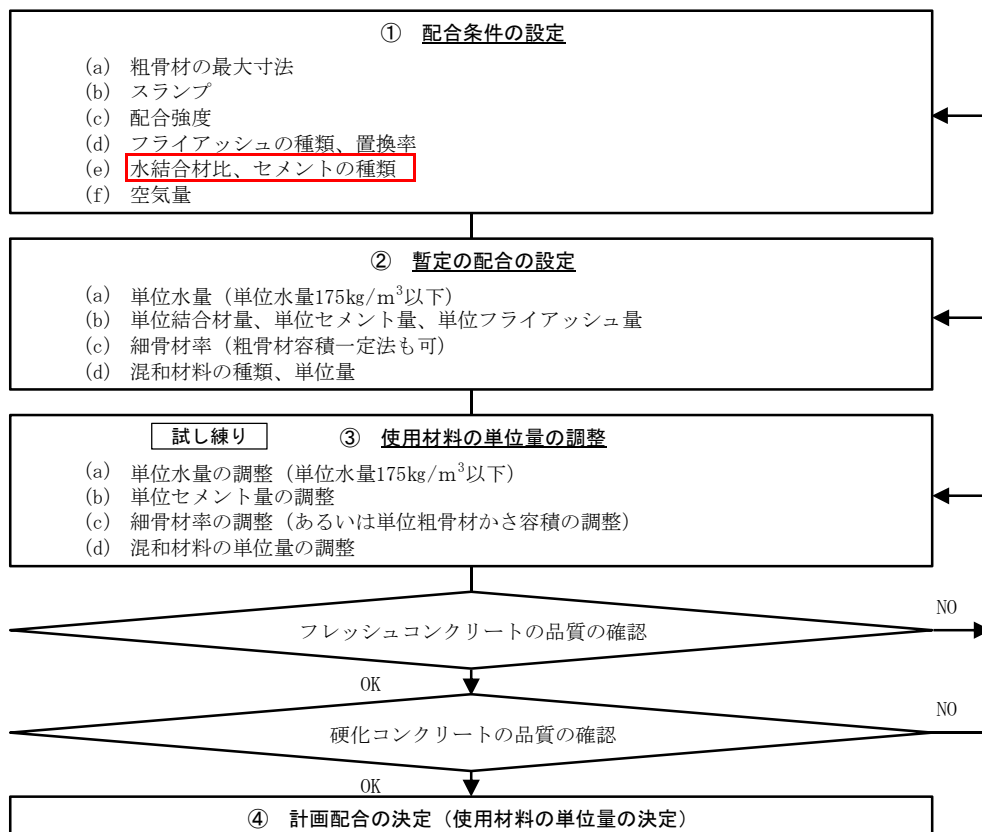
V-1. フライアッシュコンクリートの配合設計

FAコンの配合は、通常コンと同様に、要求される性能を満足する範囲で、単位水量をできるだけ少なくするように定めます。

図-9 にフライアッシュを内割配合として用いるコンクリートの配合設計の流れを示しています。

概ね通常コンと同様ですが、水セメント比を水結合材比としています。

なお、**内割配合は、水結合材比で読替えてもよいとし、置換率は 20%まで**とします。



注) 水セメント比は水結合材比と読替える $W/C \Rightarrow W/(C+F)$

図-12 FAコンの配合設計フロー¹⁾

配合設計、製造等についての詳細な内容については、以下の資料が参考となります。

【内割配合】 「四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針」

2016 年 3 月 （公社）土木学会四国支部

【外割配合】 「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 （公社）土木学会四国支部

参考文献

1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

V-2. フライアッシュコンクリートの製造に関する留意点

FAコンを製造する際の留意点について以下に示します。

1. 混和剤の使用量について¹⁾

フライアッシュ中に含まれる未燃カーボンが AE 剤を吸着する影響により、空気連行性が低下する傾向があります。このため所定の空気量が得られるよう、AE 剤などの混和剤の使用量を試験により確認して決定することが重要です。

なお、空気量の管理が難しい場合には、フライアッシュ用 AE 剤を使用することが推奨されます。

2. 水結合材比について¹⁾

国土交通省では、耐久性を確保するため、コンクリートの水セメント比の最大値を無筋構造物の場合に 60%、鉄筋構造物の場合に 55%と定めています。

「四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針」では、フライアッシュが耐久性に寄与していることを考慮して、フライアッシュを混和材として用いる場合には、この水セメント比の代わりに水結合材比に読替えて用いてよいとしています。

配合設計にあたっては、発注仕様書に水結合材比での運用が認められているか確認したうえで、前述指針を用いて配合設計を検討するとしています。

本ガイドラインでも、**内割配合は、水結合材比で読替えてもよいとし、置換率は 20%まで**とします。

3. 四国内生コンクリート工場の所有配合について

表-6 および表-7 に、四国内生コンクリート工場におけるFAコンの製造実績がある工場のフライアッシュ置換率および種類の配合情報を示しています。

その結果、内割配合の置換率は主に **10～20%**で **I 種およびII 種**が使用され、外割配合の置換率は **10%以下**で主に **II 種およびIV 種**が使用されています。

参考文献

1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

表-6 内割配合

県名	工場番号	セメント種類	FA種類	FA置換率(%)	JIS配合可否	備 考
徳島県	T1	N・BB	Ⅱ種	5 (内割) 10以下(外割)	×	外割併用
香川県	K1	N・BB	Ⅱ種	9 (内割) 10以下(外割)	○	外割併用
愛媛県	E1	N・BB	Ⅱ種	10	○	
	E2	N	Ⅱ種	15	×	
	E3	N・BB	Ⅱ種	15	×	
高知県	ko1	N・BB	Ⅱ種	10	○	
	ko2	N・BB	Ⅱ種	10	○	
	ko3	N・BB	Ⅱ種	10	○	
	ko4	N・BB	Ⅱ種	10	○	
	ko5	N・BB	Ⅱ種	10	○	
	ko6	BB	Ⅰ種	10	○	
	ko7	N・BB	Ⅰ種	10	不明	
	ko8	N・BB	Ⅱ種	20	○	
	ko9	N・BB	Ⅰ種	15	○	

表-7 外割配合

県名	工場番号	セメント種類	FA種類	FA置換率(%)	JIS配合可否	備 考
徳島県	T1	N・BB・H	Ⅱ種	質量比10以下	×	内割併用
	T2	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	○	
	T3	N・BB	Ⅱ種	容積比10以下	○	
	T4	N・BB	Ⅱ種	容積比10以下	○	
	T5	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	○	
	T6	N・BB	Ⅱ種	容積比10以下	不明	
	T7	N・BB	Ⅱ、Ⅳ種	容積比10以下	○	
	T8	N・BB	Ⅱ種	容積比10以下	不明	
	T9	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	○	
	T10	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	○	
香川県	K1	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	○	内割併用
	K2	BB	Ⅱ種	質量比10以下	×	
	K3	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	不明	
愛媛県	E4	N・BB	Ⅱ種	容積比10以下	○	
	E5	N・BB	Ⅱ種	容積比10以下	○	
	E6	N・BB	Ⅳ種	質量比10以下	○	
	E7	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	○	
	E8	N・BB	Ⅱ種	質量比10以下	○	
	E9	N・BB	Ⅳ種	質量比10以下	○	
高知県	Ko10	N	Ⅱ種	容積比10以下	○	
	Ko11	H	Ⅱ種	容積比10以下	○	

注 1)セメント種類 N: 普通ポルトランドセメント、BB: 高炉セメント B 種、H: 早強ポルトランドセメント

注 2)FA: フライアッシュ

注 3)両表とも前項「Ⅲ. 四国のフライアッシュコンクリートに係る現状について」で示したアンケート調査結果(H30 年度)による

V-3. フライアッシュコンクリートの製造に関する品質管理

FAコンの製造時の品質管理は「四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針」により、貯蔵、計量、練混ぜについて、以下に示すことが挙げられています。

● 貯蔵¹⁾

フライアッシュの貯蔵設備は、セメントと同様に湿気や通気を避けられる専用の設備を使用することが必要です。貯蔵設備の容量は、一般には、日平均使用量の3倍以上が適当です。また、長期間の貯蔵は、フライアッシュの固結の原因となりますので、できる限り避けることが望ましいとしています。

● 計量¹⁾

フライアッシュの計量設備は原則として専用のものを使用し、計量誤差は1回計量に対して2%以下でなければならない。(JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に示す混和材の計量誤差より)なお、計量誤差を所定値以下にするために、原則的に累加計量は行わないものとするとしています。

● 練混ぜ¹⁾

練混ぜ時間は、原則として試験によって定めることとします。練混ぜ時間の試験を行わない場合は、設備が十分整備されたプラントであることを条件に、練混ぜの最小時間は重力式ミキサで1分半、強制練りミキサでは1分を標準とするとしています。

● 臭い¹⁾

フライアッシュにアンモニアが残存している場合があり、コンクリートの練混ぜ時に稀にアンモニア臭が発生する場合があります。試験練りを行う場合には、換気などに配慮する必要があります。

● 空気量の経時低下¹⁾

フライアッシュコンクリートの空気量の経時低下は、通常コンに比べて同等か、やや大きくなるので、運搬時間も考慮し打込み時に所要の空気量が得られるように、練上がり時の空気量を定めることが重要となります。

参考文献

1)(公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

VI. 施 工（発、施）

VI-1. フライアッシュコンクリートの施工性

FAコンは通常コンと比べて、次のような特徴があります。

- **流動性**

フライアッシュは微細な球形をしているため、ボールベアリング効果により流動性が向上します。しかし、多量に混和すると粘性が向上し、流動性が低下します。

- **材料分離抵抗性**

フライアッシュは微細粒子のため、粉体量が増加すると粘性が向上します。それに伴い、材料分離抵抗性は向上します。

- **ポンプ圧送性**

FAコンは粘性が向上するため、圧力損失が大きくなり、圧送性が若干劣ることになります。しかし、材料分離抵抗性に優れているため、管内閉塞に対する抑制効果は、通常コンよりも大きくなります。

- **仕上げ性**

FAコンの仕上げ性は、内割配合の場合、フライアッシュ置換率の増加に伴い困難となり、外割配合の場合、フライアッシュ置換率が10%を超えると困難になります。これは、ブリーディング水の減少と粘性の向上が理由として挙げられます。

- **養生期間**

FAコンの養生期間は、内割配合の場合は高炉セメントコンクリートと同様の期間が、外割配合の場合は通常コンと同様の期間が必要となります。

VI-2. フライアッシュコンクリートの施工に関する留意点

FAコンの施工に関する留意点は「四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針」より、以下に示すことが挙げられています。

なお、平成 30 年度に施工業者に対して、「FA コンクリートと FA 未混入コンクリートの施工性について」という項目でアンケートを行っており、FAコンと通常コンの施工性は同等程度という結果が多く見られました。

- **ポンプ圧送性¹⁾**

FAコンは、粉体量の増加により粘性が向上するため、圧送試験の実施や関係指針類を参考にすると、ポンプ機種や吐出量の検討が必要となります。

- **仕上げ性¹⁾**

FAコンは、粘性が向上しブリーディング量が減少傾向にあるため、特に夏季においては、仕上げ時期を逸しないよう注意が必要となります。

また、プラスチックひび割れを避けるために、表面乾燥の防止が必要です。

- **養生期間¹⁾**

内割配合はセメント置換のため、通常コンクリートと比較すると凝結時間は長くなる（高炉セメントB種と同等：日平均気温15℃で7日間）と考えられ、外割配合はセメント量に変化がないため、通常コンクリートと同様の凝結時間であると考えられます。よって養生期間は各配合に適した期間が必要です。

VI-3. フライアッシュコンクリートの施工に関する検査・品質管理

FAコンの検査・品質管理は、通常コンと同様、コンクリート標準示方書[施工編]²⁾を参考に行います。

参考文献

- 1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針
- 2) (公社)土木学会, 2023 年制定 コンクリート標準示方書[施工編]

VII. 維持管理（発）

FAコンの維持管理は、通常コンと同様、コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁾を参考に行います。

参考文献

1)(公社)土木学会, 2022 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]

参 考 資 料

1. 石炭灰は様々な分野で有効利用されています
2. フライアッシュの品質項目はフライアッシュコンクリートの何に影響しますか
3. フライアッシュコンクリートの耐久性はどのような傾向がみられますか
4. 四国のフライアッシュコンクリートに係る現状の補足
5. フライアッシュコンクリートの配合設計例
6. 参考文献一覧

1. 石炭灰は様々な分野で有効利用されています

石炭灰のうち約 90%がフライアッシュになり、約 10%がクリンカアッシュになります。

フライアッシュは球形粒子の微粉末でポゾラン活性があること、クリンカアッシュは、砂礫状で普通の土砂より軽く、多孔質であることなどの特長を有しています。

これらの特長を生かして、セメント・コンクリート分野、土木・建築分野、農林水産分野などの様々な分野に有効利用されています。

【 有効利用分類 】

■セメント分野

- ・セメント原料…粘土代替
- ・セメント混合材…フライアッシュセメント

■土木分野

- ・コンクリート混和材…生コンクリート、吹付けコンクリートなど
- ・道路材料…路盤、路床材
- ・地盤安定材…地盤改良材、盛土材など

■建築分野

- ・人工骨材…軽量骨材
- ・建築材…内外壁材など

■農林水産分野

- ・農業用資材…肥料、土壌改良材など
- ・海洋構造物…人工漁礁など

■その他の分野

- ・脱硫剤…乾式脱硫剤
- ・その他…水処理剤など

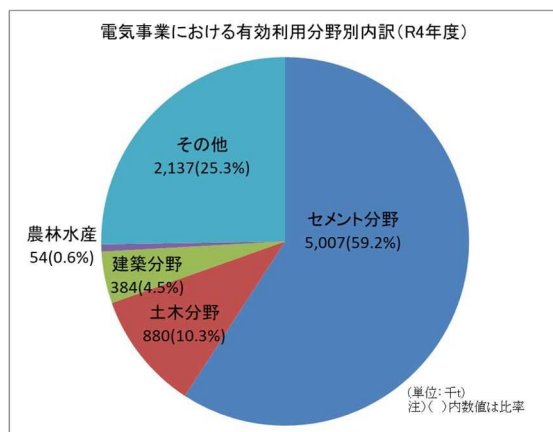


図-資 1 石炭灰の有効利用分野別内訳¹⁾

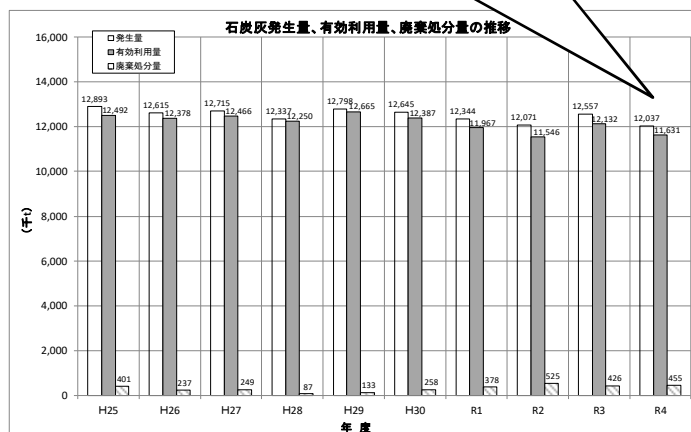


図-資 2 石炭灰発生量、有効利用量、廃棄物処分量の推移¹⁾

参考文献

- 1) (一財)カーボンフロンティア機構, 石炭灰全国実態調査報告書(2022 年度実績)

2. フライアッシュの品質項目はフライアッシュコンクリートの何に影響しますか

フライアッシュの品質に影響を与える項目は、以下の5項目です。

- **二酸化けい素**：二酸化けい素はフライアッシュの約6割を占める主成分であり、水酸化カルシウムと化合する（ポゾラン反応）ことで、長期強度や耐久性の向上に影響を与える成分です。「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」において、二酸化けい素は45%以上必要とされています。

ポゾラン反応

ポゾラン反応とは、フライアッシュ中の二酸化けい素(SiO_2)およびアルミナ成分(Al_2O_3)が、水酸化アルカリ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ など)の作用により、フライアッシュ粒子周囲に安定な水和生成物がゆっくりと生成する反応です。ポゾラン反応のメカニズムを図-資3に示します。ポゾラン反応により、FAコンの特徴である長期強度と組織の緻密化が得られます。

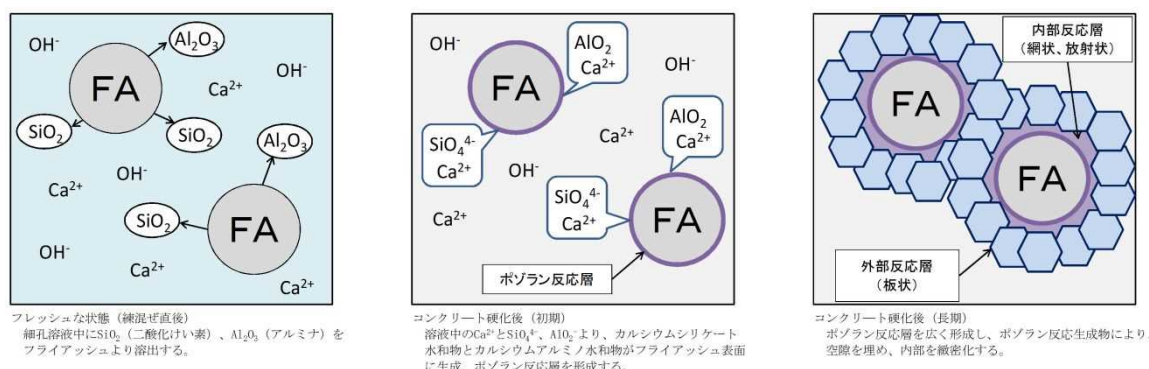


図-資3 ポゾラン反応のメカニズム

- **湿 分**：フライアッシュ保管時の固結を防止するなど、保管時の利便性を考慮した指標です。「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」において、湿度は1.0%以下とされています。
- **強熱減量**：強熱減量の大部分は未燃カーボンです。フライアッシュ中の未燃カーボンは AE 剤を吸着する性質があり、強熱減量が大きく変動した場合は、空気量の変動によってコンクリートのワーカビリティや強度等が変動し、品質の安定したFAコンの製造が困難となることがあるため、特に注意を払う必要がある指標となっています。「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」において、強熱減量はⅠ種：3.0%以下、Ⅱ種：5.0%以下とされています。
- **密 度**：フライアッシュの密度は、構成鉱物、比較的大きなフライアッシュ粒子中に多く存在する空隙を有する粒子や、未燃カーボンによって影響を受ける指標であり、配合時のフライアッシュの重量に関係する指標です。「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」において、密度は1.95%以上とされています。
- **粉 末 度**：フライアッシュの比表面積が大きいほど流動性、反応性が良くなるため、強度発現や ASR 抑制効果等に影響を与える指標です。一般に比表面積が大きいほどフロー値および活性度指数は大きくなります。「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」において、粉末度はⅠ種：5,000 cm^2/g 以上、Ⅱ種：2,500 cm^2/g 以上とされています。

四国の石炭火力発電所製造のフライアッシュⅡ種の品質実績を表-資1および図-資4に示しています。

表および図より JIS 規格値を満足し、バラツキも小さいので、品質は安定しているといえます。

表-資1 四国のフライアッシュの品質実績(Ⅱ種)(H28年11月～H30年12月)

項目	規格値	最大値	平均値	最小値	備考
二酸化けい素(%)	45.0 以上	68.3	63.1	58.1	
湿分(%)	1.0 以下	0.16	0.07	0.01	
強熱減量(%)	5.0 以下	2.6	2.3	1.9	規定範囲：平均値±1.0% (3.3～1.3の範囲)
密度(g/cm ³)	1.95 以上	2.30	2.25	2.20	
粉末度(cm ² /g)	2,500 以上	3,890	3,466	3,040	

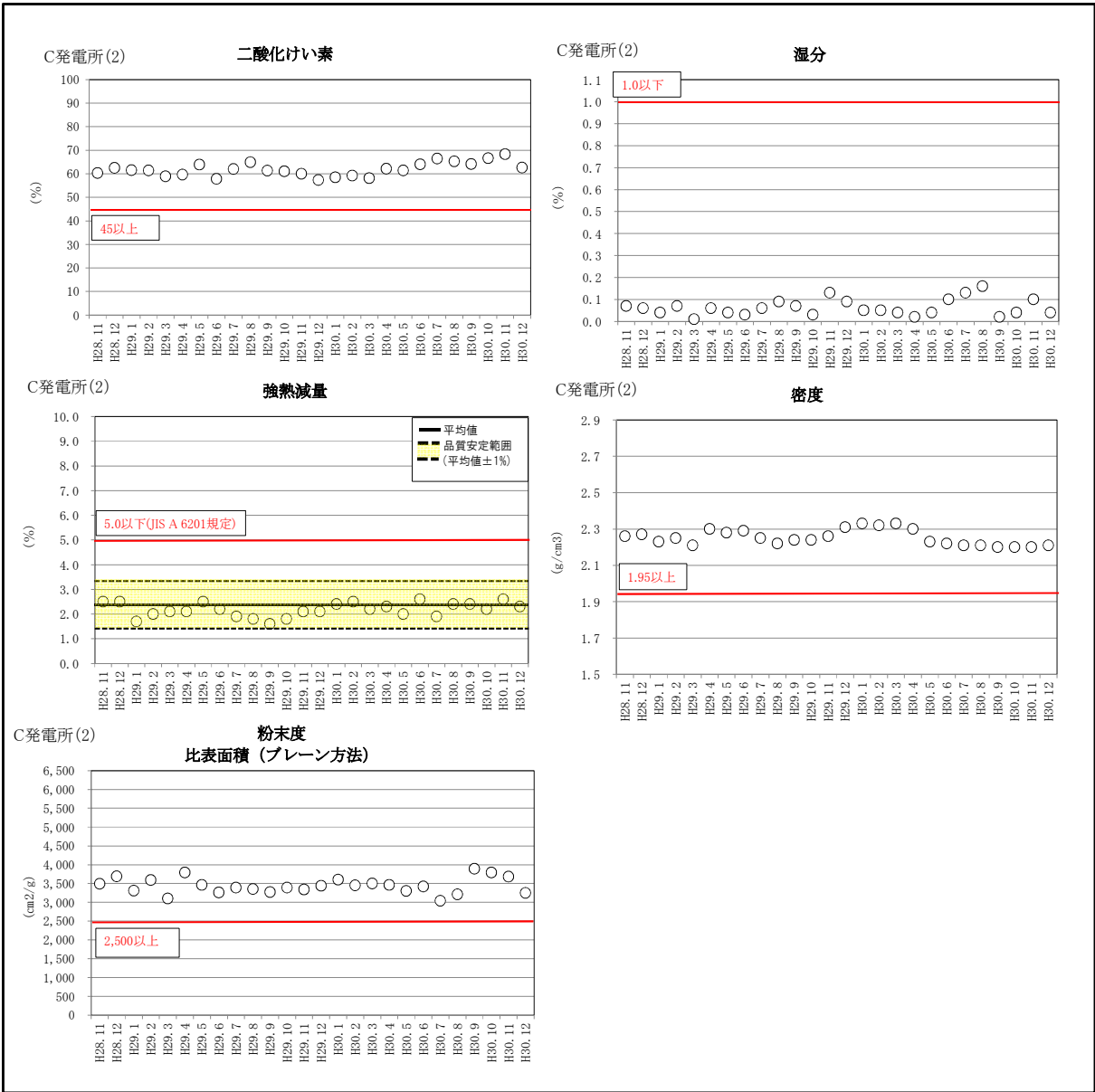


図-資4 四国のフライアッシュの品質実績(Ⅱ種)(H28年11月～H30年12月)

3. フライアッシュコンクリートの耐久性はどのような傾向がみられますか

コンクリート構造物の劣化に影響を与えると考えられる塩害・中性化・凍害に対する抵抗性について通常コンクリート（以降通常コンという）と比較して、フライアッシュコンクリート（以降FAコンという）の耐久性はどのような傾向がみられるかまとめてみました。

●塩化物イオン浸透に対する抵抗性

塩化物イオン浸透に対する抵抗性は塩害に対する抵抗性を示しています。塩害とは、塩化物イオンが鉄筋コンクリートに浸透することで、コンクリート中の鋼材の腐食が進行する現象です。

塩害を受けた構造物では、鋼材の腐食生成物による体積膨張に伴い、コンクリートのひび割れや剥離・剥落、あるいは鋼材の断面減少が生じ、構造物の性能低下が起こります。

四国は海に囲まれており、塩化物イオン浸透による鉄筋コンクリート構造物の劣化を受けやすい環境であるといえます。

図-資5および図-資6は、FAコンおよび通常コンの実環境での浸漬試験における塩化物イオンの見掛けの拡散係数と水結合材比（W/B）の関係を示したものです。図中の直線は、通常コン（N：橙色、BB：水色）、FAコン（フライアッシュ置換率10%～20%：緑、20%～30%：黄緑）の回帰線を示しています。また、塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、鉄筋腐食に関係する項目であるため、水結合材比（W/B）＝55%（鉄筋コンクリートの上限値）を赤い破線で示しています。

図より、FAコンの見掛けの拡散係数は、通常コンのものより小さくなっており、FAコンの方が、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が高いといえます。

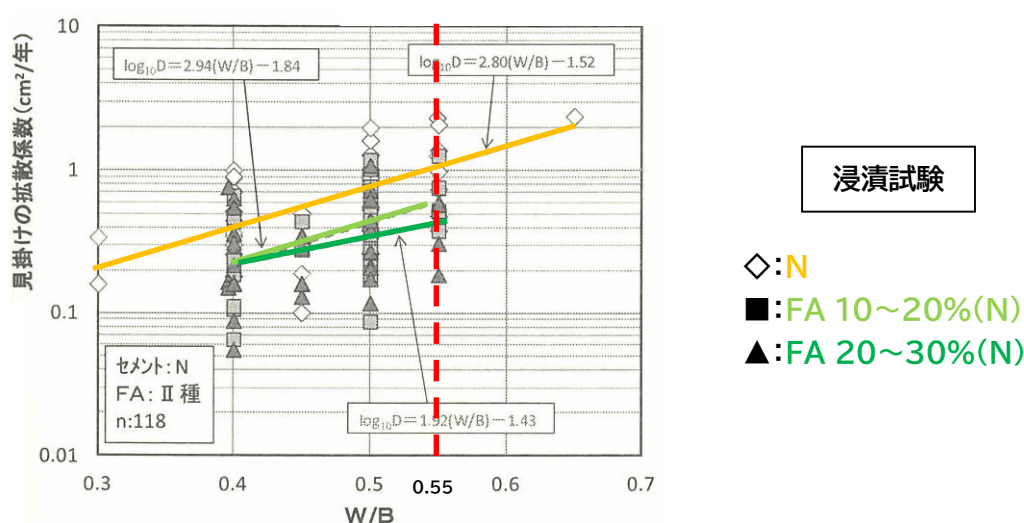


図-資5 見掛けの拡散係数と W/B の関係(N)¹⁾(一部加筆)

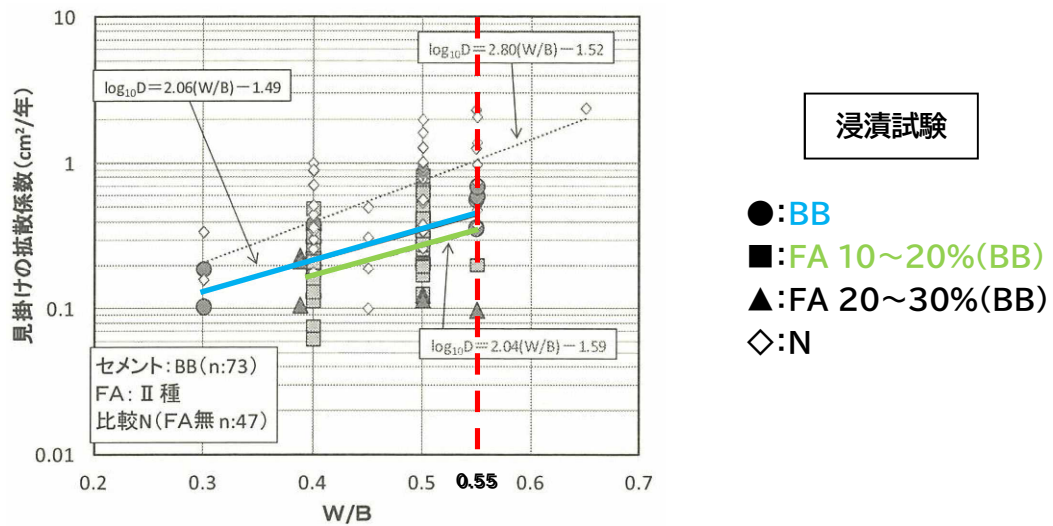


図-資 6 見掛けの拡散係数と W/B の関係(BB)¹⁾(一部加筆)

参考文献

- 1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

●中性化に対する抵抗性

中性化とは、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、水酸化カルシウムなどのセメント水和物と炭酸化反応を起こすことにより、コンクリート空隙中の水分の pH を低下させる現象です。これにより、内部の鋼材表面の不動態被膜が失われ、酸素と水分の供給により鋼材腐食が進行してゆきます。

図-資 7 および図-資 8 は、F A コンおよび通常コンの暴露試験や促進試験における中性化に対する抵抗性速度係数と水結合材比(W/B)の関係を示したものです。図中の直線は、通常コン(N: 橙色、BB: 水色)、F A コン(フライアッシュ置換率 10%~20%: 緑、20%~30%: 黄緑)の回帰線を示しています。

また、中性化に対する抵抗性は鋼材腐食に関係する項目であるため、水結合材比(W/B)=55%を赤い破線で示しています。

図より、F A コンの中性化に対する抵抗性速度係数は、通常コンより大きくなっており、フライアッシュ置換率が大きいほどその影響は顕著です。したがって、F A コンの方が、中性化に対する抵抗性が低いこととなります。

しかし、中性化に対する抵抗性は鋼材腐食に関係する項目であり、中性化速度が通常コンより早くても、中性化深さの進行予測値が鋼材腐食発生限界深さより小さければ鋼材腐食しないと考えられます。

以下に、中性化予測を用いた 100 年後の中性化深さについて述べます。

中性化深さ進行予測値は、2022 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]「3.3.3.2 中性化の進行予測」の式から算出します。F A コン(N)の場合、中性化期間を 100 年、水結合材比=55%と仮定した結果、100 年後の中性化深さは約 36 mmとなりました。経過年による中性化深さを図-資 9 に示しています。

$$\begin{aligned}\text{中性化深さの進行予測値 (mm)} &= \text{中性化速度係数} \sqrt{\text{中性化期間 (100 年と仮定)}} \\ &= 3.59 \sqrt{100} \text{ (F A 20~30\%の場合)} \\ &= 35.9\end{aligned}$$

$$\text{中性化深さの進行予測値} = 35.9 \text{ mm}$$

中性化速度係数(水結合材比=55%と仮定し算出)

$$N = 1.72$$

$$F A 10 \sim 20\% = 2.32$$

$$F A 20 \sim 30\% = 3.59$$

また、F A コン(BB)の場合についても、F A コン(N)の場合と同様に算出した結果、100 年後の中性化深さは約 31 mmとなりました。経過年による中性化深さを図-資 10 に示しています。

鋼材腐食発生限界深さは、2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編]「3.1.3.4 中性化に伴う鋼材腐食に対する照査」の式から算出します。かぶりは 2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編]「2.1 かぶり」において、腐食性環境である地中打設の場合では 75 mmと示されています。その結果、鋼材腐食発生限界深さは 50 mmとなります。

$$\begin{aligned}
 \text{鋼材腐食発生限界深さ (mm)} &= \text{かぶり} - \text{施工誤差} - \text{中性化残り} \\
 &= 75 - 15 - 10 \\
 &= 50
 \end{aligned}$$

施工誤差: 15 mm (柱および橋脚)
 中性化残り: 10 mm

鋼材腐食発生限界深さ = 50 mm

以上より、中性化深さの進行予測値 $\leq$ 鋼材腐食発生限界深さとなり、100 年経過してもコンクリート中の鋼材は腐食しないと考えられます。よって、FA コンを用いた土木構造物の中性化における耐久性に大きな問題はないと考えられます。

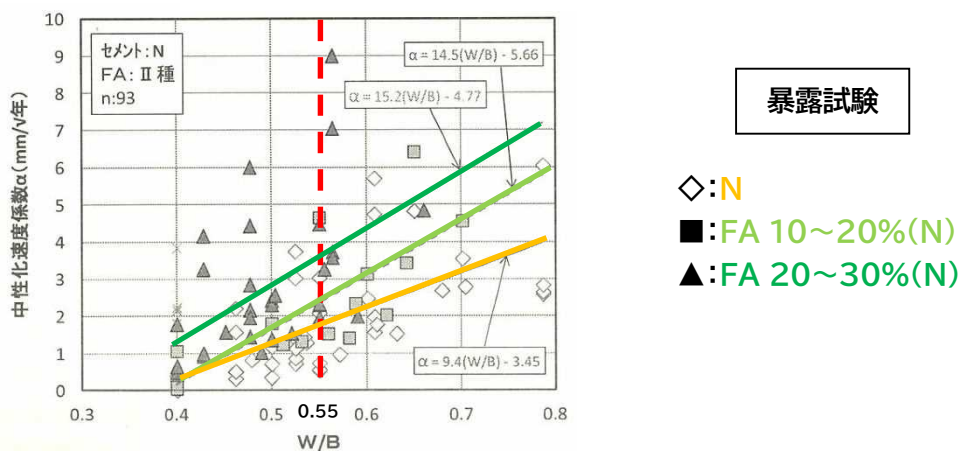


図-資 7 中性化に対する抵抗性速度係数と W/B の関係(N)¹⁾(一部加筆)

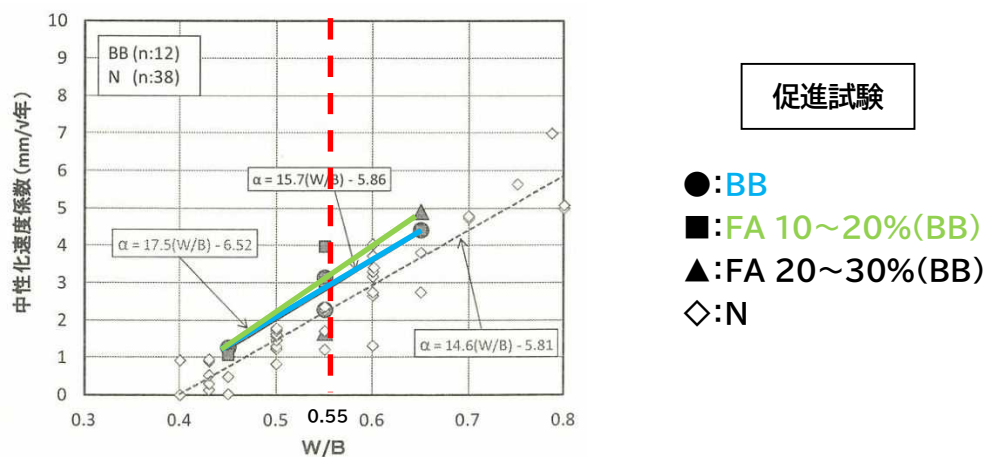


図-資 8 中性化に対する抵抗性速度係数と W/B の関係(BB)¹⁾(一部加筆)

参考文献

- 1) (公社)土木学会四国支部, 四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

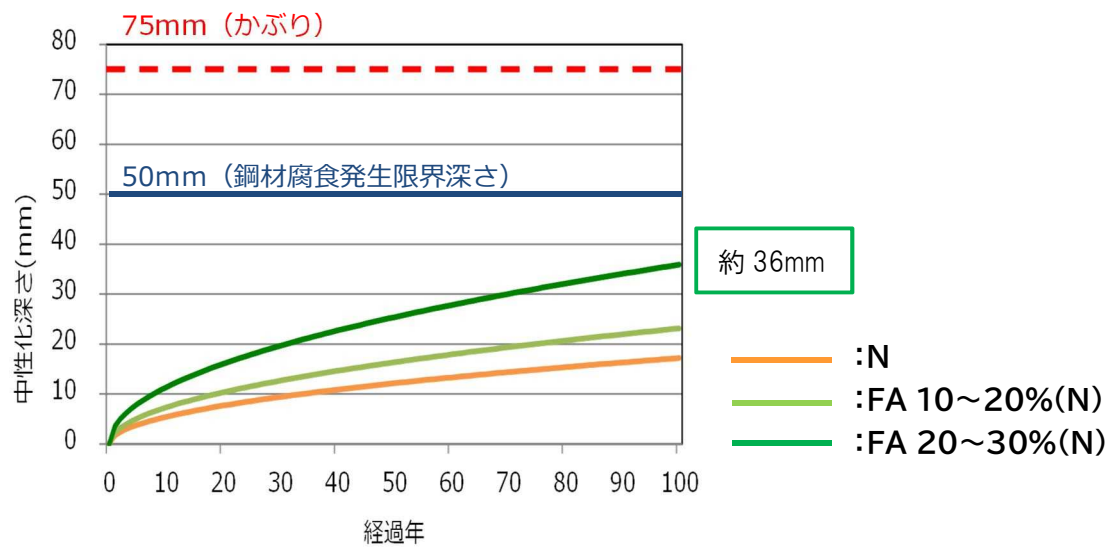


図-資 9 100 年経過後の中酸化に対する抵抗性深さ(N)

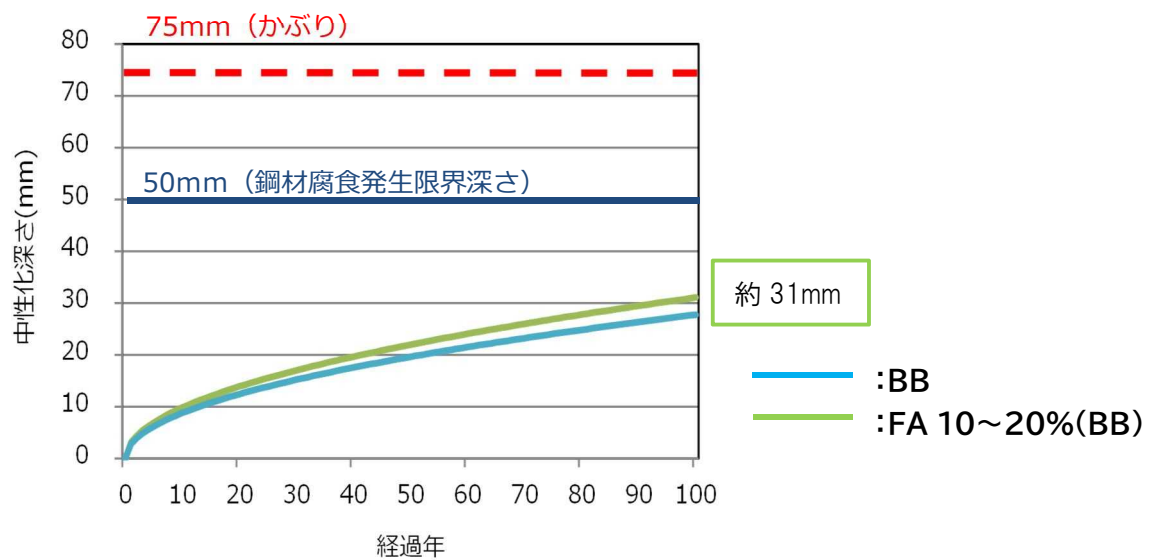


図-資 10 100 年経過後の中酸化に対する抵抗性深さ(BB)

●凍結融解抵抗性

凍結融解抵抗性は凍害に対する抵抗力を示しています。凍害とは、コンクリート中の水分が凍結する際の体積膨張と、融解の際の水分供給という凍結融解作用を繰り返すことにより、コンクリートが徐々に劣化する現象です。凍害を受けた構造物では、コンクリート表面にスケーリング、微細ひび割れ、ポップアウト等が顕在化します。また、コンクリートの物質移動抵抗性を低下させ、塩化物イオン浸透や中性化等の劣化進行が早まる可能性があります。

四国の山間部は、凍害によるコンクリートの劣化を受ける場合がある環境といえます。

凍害への抵抗性は相対動弾性係数という指標で評価しますが、2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編]「3.2.1 凍害に対する照査」では、凍害に関してコンクリート構造物の性能を満足するための相対動弾性係数の最小限界値は、気象条件に関わらず 60%と規定されています。(この数値以上であれば凍結融解抵抗性が確保されていることとなります。)

表-資 2 凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための
凍結融解試験における相対動弾性係数の最小限界値¹⁾

気象条件 断面	凍結融解がしばしば繰り返される場合		氷点下の気温となることがまれな場合	
	薄い場合 ²⁾		薄い場合 ²⁾	
	薄い場合 ²⁾	一般の場合	薄い場合 ²⁾	一般の場合
構造物の露出状態				
(1) 連続してあるいはしばしば水で飽和される場合 ¹⁾	85	70	85	60
(2) 普通の露出状態にあり(1)に属さない場合	70	60	70	60

- 1) 水路、水槽、橋台、橋脚、擁壁、トンネル覆工等で水面に近く水で飽和される部分、およびこれらの構造物のほか、桁、床版等で水面から離れてはいるが融雪、流水、水しぶき等のため、水で飽和される部分等。
2) 断面の厚さが 20cm 程度以下の部分等。

図-資 11 は、F A コンの凍結融解抵抗性試験結果を示したものです。凍害への抵抗性を表す指標である相対動弾性係数は、N および BB とともに 90%以上の値を示しており、最小限界値である 60%を大幅に上回っているため凍結融解抵抗性が高いといえます。

なお、凍害に対しては、A E 剤等を使用してコンクリート中に微細な独立気泡を連行し、適切な空気量を確保するのが最も有効な手段です。

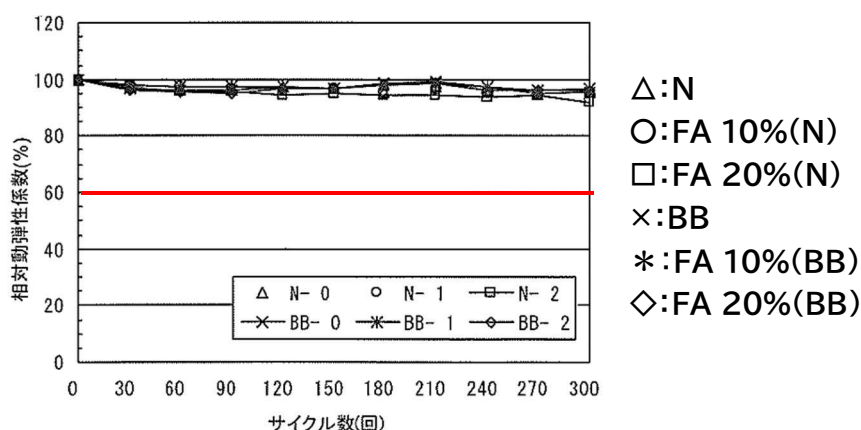


図-資 11 FA コン(N, BB)の凍結融解抵抗性試験結果(一部加筆)²⁾

参考文献

- (公社) 土木学会, 2022 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]
- (公社) 日本コンクリート工学協会四国支部, フライアッシュの有効利用と混和コンクリート構造物の耐久性に関する研究委員会 報告書

4. 四国のフライアッシュコンクリートに係る現状の補足

本編で記載したアンケート調査結果（H30 年度実施）について補足します。

●生コンクリート工場

・フライアッシュの使用方法

フライアッシュを使用する際の配合計算上の考え方については、四国全体では細骨材補充（外割）が最も多く（47%）、次いでセメント置換（内割）（39%）、両者併用（9%）の順となっています。（図-資 9 参照）

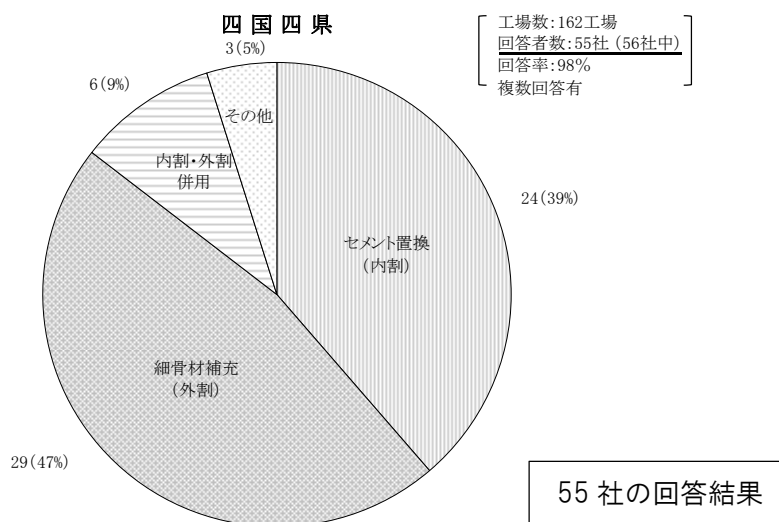


図-資 12 フライアッシュの配合設計上の考え方

・使用フライアッシュの種類

使用フライアッシュの種類については、JIS II 種(39 工場)が最も多く、次いで JIS I 種(12 工場)、JIS IV 種(6 工場)、JIS 規格外(3 工場)、JIS III 種(1 工場)の順となっています。（図-資 10 参照）

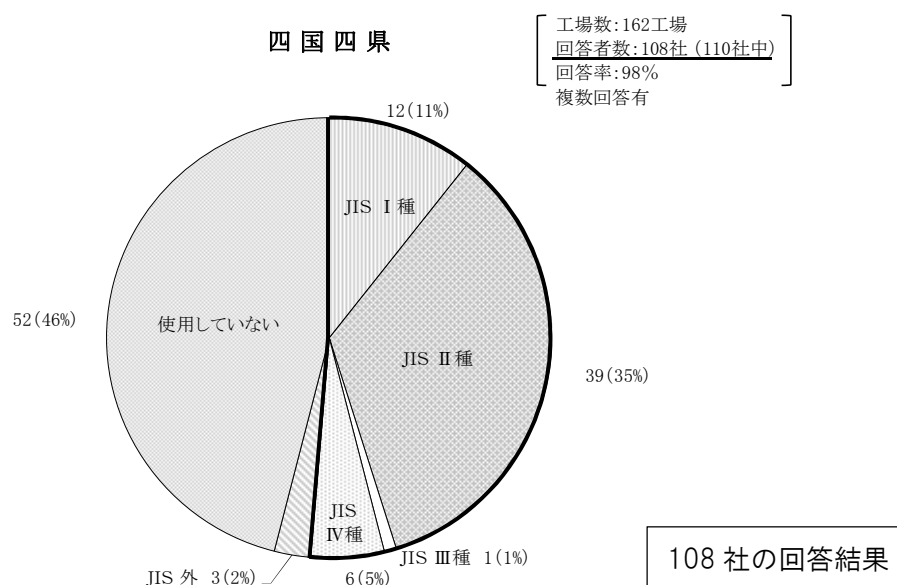


図-資 13 使用フライアッシュの種類

・ F Aコンが普及しない理由

F Aコンがあまり利用されていないか普及していない理由については、フライアッシュ貯蔵サイロが必要であるからが最も多く、次いで普通ポルトランドセメントや高炉セメントを使用したコンクリートが定着しているから、F Aコンの使用実績が少なく発注者等の認識が低いから、コストメリットがないから、空気量の管理がしづらいから、の順となっています。（図-資 11 参照）

昨今の経済状況から必要最低限の投資しかできないこと、生コン工場という受注者としての立場があること、などが背景にあると考えられます。

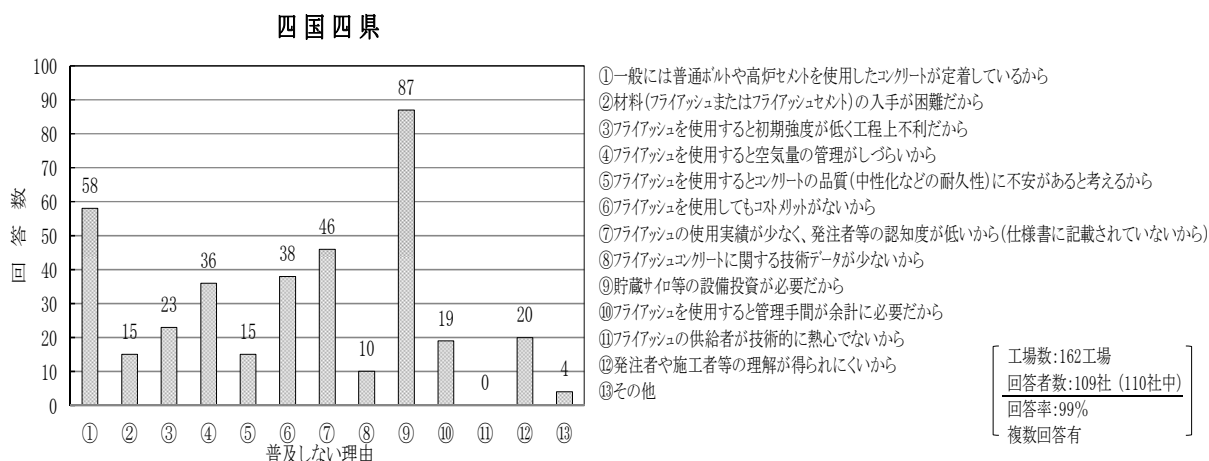


図-資 14 F Aコンが普及しない理由

・ F Aコンの普及拡大方策

フライアッシュをコンクリート分野で普及させるための有効な方策については、製造設備（フライアッシュ貯蔵設備）への投資支援が最も多く、コストメリットが生じるようなフライアッシュの低価格化、フライアッシュ品質のさらなる安定化・高性能化、フライアッシュの品質などに関する技術的情報の提供、フライアッシュの理解度を高めるための活動強化などが続いています。（図-資 12 参照）

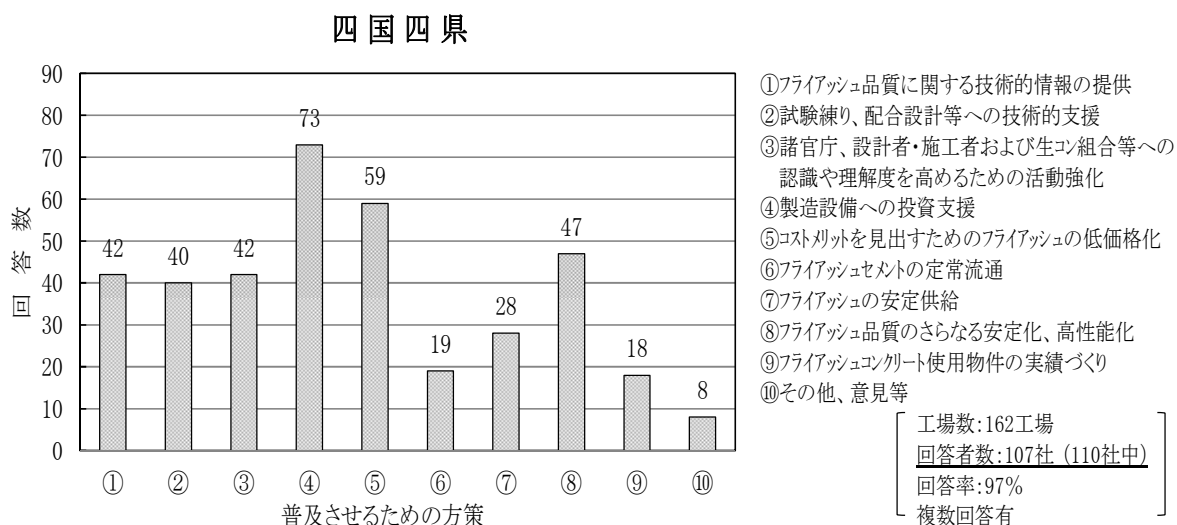


図-資 15 F Aコンの普及拡大方策(生コンクリート工場)

●施工業者

・F A コンの普及拡大方策

F A コンの普及拡大方策については、使用実績が少ないことが圧倒的に多く、次いで、発注者が仕様書へ記載していないことが続き、さらに現状の指針・基準類にフライアッシュやF A コンに関する情報が不足していること、市販生コンの品目表示がないことなどが挙げられています。その他の課題としては、①設備費用が必要であること、②地域で取り扱っている生コン製造会社がないこと、③内割りで使用した場合、耐中性化に不安があること、④夏場の施工に対して相対的に不利となる気がするなどが挙げられています。F A コンの実績や生産工場の少なさ、F A コンクリートの性能に対する不安を挙げているのが特徴です。(図-資 13 参照)

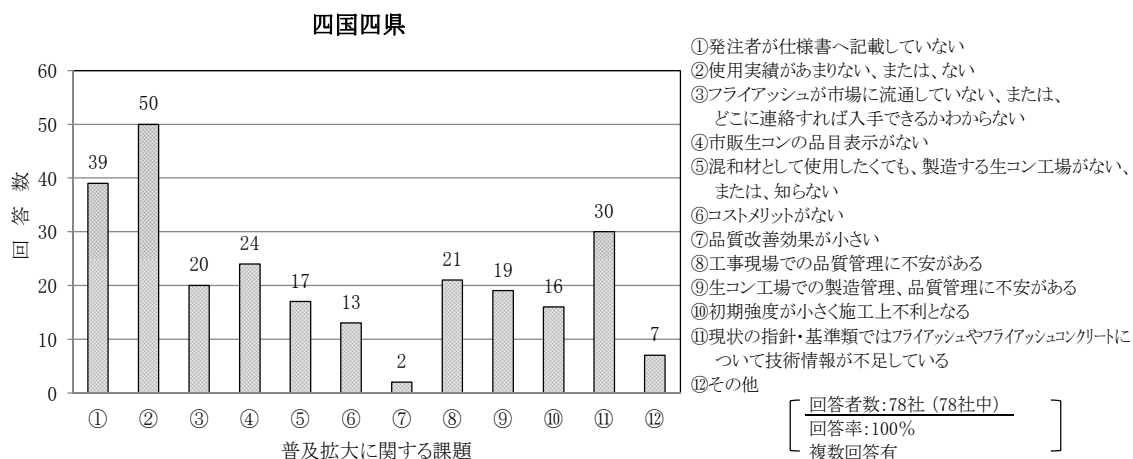


図-資 16 F A コンの普及拡大方策(施工業者)

●フライアッシュ販売会社

・F A コンの普及拡大方策

F A コンの普及拡大方策については、諸官庁、設計者・施工者および生コン組合等への認識や理解度を高めるための活動強化やフライアッシュに関する技術・情報、設備資金の支援などが多かったです。対して、フライアッシュの低価格化については、比較的重要視されていません。その他の方策としては①公共工事における水セメント比の上限規定について、水結合材比への読替えなどを行う。②グリーン購入法の特選調達品目にコンクリート混和材としての「フライアッシュ」を追加する。③フライアッシュ使用時に産地限定をしない(1つの発電所産に限定しない)。④国土交通省の工事においてフライアッシュのセメント代替(結合材)使用を積極的に推進する。などが挙げられています。(図-資 14 参照)

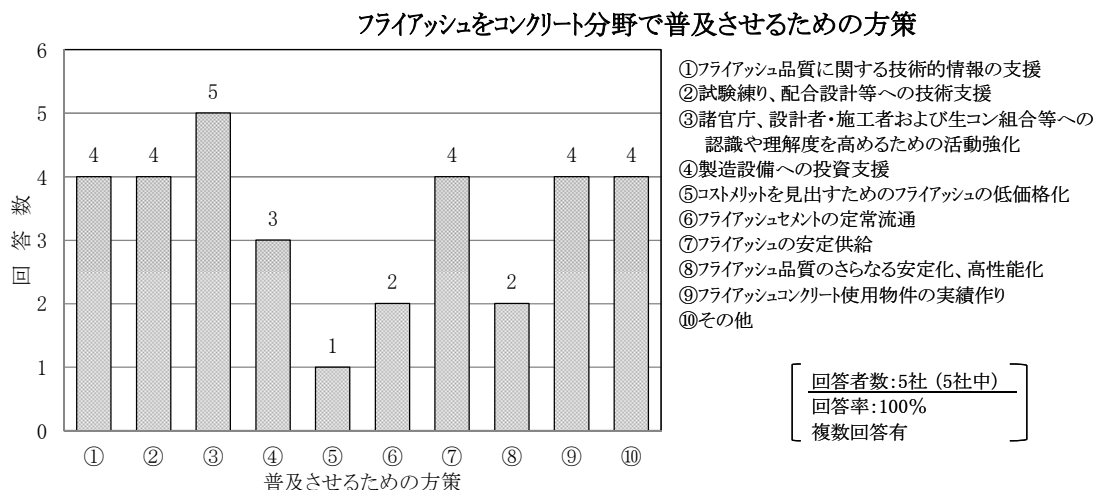


図-資 17 F A コンの普及拡大方策(フライアッシュ販売会社)

5. フライアッシュコンクリートの配合設計例

F A コンの配合設計例を内割配合、外割配合別に示します。

なお、配合設計例は試験練りを行う際の最初の練混ぜの示方配合です。

【内割配合】

フライアッシュコンクリートの配合条件

粗骨材最大寸法(G_{max})	20mm
スランブ	12cm
セメントの種類	普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm ³)
フライアッシュの種類	Ⅱ種(密度=2.25g/cm ³)
フライアッシュの置換率	10%
空気量	4.5%
単位水量の上限値	175kg/m ³
細骨材	密度=2.6g/cm ³ 粗粒率=2.80
粗骨材	密度=2.6g/cm ³ 実積率=60%

配 合 設 計 例

項 目	計 算 内 容	設定値or計算値
水結合材比(W/B) (B=C+FA)	コンクリート強度、耐久性、施工性より55%とする	55%
単位水量(W)	G_{max} 20mm、AE減水剤使用により、表-資2に基づき	158kg/m ³
単位水量の補正	設定スランブ12cmより、表-資2に基づき $158 \times [1 + 1.2\% \times (12 - 8)] = 166$	166kg/m ³
単位結合材量(C+FA)	$(C+FA) = W \div (W/B) \times 100 = 166 \div 55.0 \times 100 = 302$	302kg/m ³
単位フライアッシュ量(FA)	$FA = (C+FA) \times \text{置換率} = 302 \times 10\% = 30$	30kg/m ³
単位セメント量(C)	$C = (C+FA) - FA = 302 - 30 = 272$	272kg/m ³
骨材絶対容積(A)	$A = 1,000 - (\text{単位水量} + \text{セメント容積} + \text{FA容積} + \text{空気量})$ $= 1,000 - [166 + (272/3.16) + (30/2.25) + 45] = 690$	690ℓ/m ³
細骨材率(s/a)	G_{max} 20mm、AE減水剤使用により、表-資2に基づき	44%
細骨材絶対容積(V_s)	$V_s = \text{骨材絶対容積} \times \text{細骨材率} = 690 \times 44\% = 304$	304ℓ/m ³
単位細骨材量(S)	$S = \text{細骨材絶対容積} \times \text{密度} = 304 \times 2.6 = 790$	790kg/m ³
粗骨材絶対容積(V_g)	$V_g = \text{骨材絶対容積} - \text{細骨材絶対容積} = 690 - 304 = 386$	386ℓ/m ³
単位粗骨材量(G)	$G = \text{粗骨材絶対容積} \times \text{密度} = 386 \times 2.6 = 1,004$	1,004kg/m ³
単位化学混和剤量(AD)	$AD = \text{単位結合材量} \times \text{使用量} = 302 \times 0.25 / 100 = 0.76$	0.76kg/m ³

表-資3 内割配合の細骨材率、単位水量の概略値、各補正方法¹⁾

粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位 粗骨材容積 (%)	空気量 (%)	AE コンクリート			
			AE 剤を用いる場合		AE減水剤を用いる場合	
			細骨材率 s/a (%)	単位水量 (kg)	細骨材率 s/a (%)	単位水量 (kg)
15	59	7.0	46	173	47	163
20	63	6.0	43	168	44	158
25	68	5.0	41	163	42	153
40	73	4.5	38	153	39	148

(1) この表に示す値は、骨材は普通の粒度の砂(粗粒率2.80程度)および砕石、フライアッシュⅡ種を置換率20%でそれぞれ用い、水結合材比0.55程度、スランブ約8cmのコンクリートに対するものである。

(2) 使用材料またはコンクリートの品質が(1)の条件と相違する場合には、上記の表の値を下記により補正する。

区 分	s/a (%) の補正	W (kg) の補正
フライアッシュの置換率が 10%だけ大きい(小さい)ごとに	種 Ⅰ種 類 Ⅱ種	種 Ⅰ種 類 Ⅱ種
細骨材の粗粒率が0.1だけ大きい(小さい)ごとに	0.5~1.0だけ小さく(大きく)する	3~5kgだけ小さく(大きく)する
スランブが1cmだけ大きい(小さい)ごとに	0.5だけ小さく(大きく)する	2~4kgだけ小さく(大きく)する
細骨材の粗粒率が0.1だけ大きい(小さい)ごとに	0.5だけ大きく(小さく)する	補正しない
スランブが1cmだけ大きい(小さい)ごとに	補正しない	1.2%だけ大きく(小さく)する
空気量が1%だけ大きい(小さい)ごとに	0.6~1.0だけ小さく(大きく)する	3%だけ小さく(大きく)する
水結合材比が0.05だけ大きい(小さい)ごとに	1だけ大きく(小さく)する	補正しない
s/aが1%だけ大きい(小さい)ごとに	—	1.5kgだけ大きく(小さく)する
川砂利を用いる場合	3~5だけ小さくする	9~15kgだけ小さくする
砕砂を用いる場合	2~3だけ大きくする	6~9だけ大きくする

なお、単位粗骨材容積による場合は、砂の粗粒率が0.1だけ大きい(小さい)ごとに単位粗骨材容積を1%だけ小さく(大きく)する。

参考文献

1) (公社)土木学会四国支部、四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針

【外割配合】

フライアッシュコンクリートの配合条件

粗骨材最大寸法(G_{max})	20mm
スランブ	12cm
セメントの種類	普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm ³)
フライアッシュの種類	Ⅱ種(密度=2.25g/cm ³)
フライアッシュの置換率	10%(容積比)
空気量	4.5%
細骨材(砕砂)	密度=2.6g/cm ³ 粗粒率=2.80
粗骨材	密度=2.6g/cm ³ 実積率=60%

配合設計例

項 目	計 算 内 容	設定値or計算値
水セメント比(W/C)	コンクリート強度、耐久性、施工性より55%とする	55%
単位水量(W)	G_{max} 20mm、砕砂、AE減水剤使用により、表-資3に基づき	173kg/m ³
単位水量の補正	設定スランブ12cmより、表-資3に基づき $173 \times \{1 + 1.2\% \times (12 - 8)\} = 181$	181kg/m ³
単位セメント量(C+FA)	$C = W \div (W/C) \times 100 = 181 \div 55.0 \times 100 = 329$	329kg/m ³
骨材絶対容積(A)	$A = 1000 - (\text{単位水量} + \text{セメント容積} + \text{空気量})$ $= 1000 - \{181 + (329/3.16) + 45\} = 670$	670ℓ/m ³
細骨材率(s/a)	G_{max} 20mm、砕砂、置換率、AE減水剤使用により、表-資3に基づき	43%
細骨材絶対容積(V_s)	$V_s = \text{骨材絶対容積} \times \text{細骨材率} = 670 \times 43\% = 288$	288ℓ/m ³
フライアッシュ絶対容積(V_{FA})	$V_{FA} = \text{細骨材絶対容積} \times \text{置換率} = 288 \times 10\% = 29$	29ℓ/m ³
単位フライアッシュ量(FA)	$FA = V_{FA} \times \text{密度} = 29 \times 2.25 = 65$	65kg/m ³
単位細骨材量(S)	$S = (\text{細骨材絶対容積} - \text{フライアッシュ絶対容積}) \times \text{密度}$ $= (288 - 29) \times 2.6 = 673$	673kg/m ³
粗骨材絶対容積(V_G)	$V_G = \text{骨材絶対容積} - \text{細骨材絶対容積} = 670 - 288 = 382$	382ℓ/m ³
単位粗骨材量(G)	$G = \text{粗骨材絶対容積} \times \text{密度} = 382 \times 2.6 = 993$	993kg/m ³
単位化学混和剤量(AD)	$AD = \text{単位セメント量} \times \text{使用量} = 329 \times 0.25/100 = 0.82$	0.82kg/m ³

表-資4 外割配合の細骨材率、単位水量の概略値、各補正方法¹⁾

粗骨材の最大寸法(mm)	細骨材の種類	フライアッシュ(Ⅳ種)の容積置換率(vol. %)	空気量(%)	AE減水剤を用いる場合	
				単位水量 W (kg)	細骨材率 s/a (%)
20	砕砂、海砂併用	0	4.5	156	47
		10		149	42
		20		157	38
	砕砂	0		173	46
		10		173	43
		20		173	38
40	砕砂	0		157	40
		10		156	36
		20		160	33

(1) 粗粒率 2.80 程度の細骨材、粗骨材として砕石、細骨材補充混和材としてフライアッシュⅣ種を用いた、水セメント比 55% 程度(細骨材の種類として砕砂、海砂併用の場合(砕砂:海砂=7:3(容積比))は 60%程度)、スランブ約 8cm のコンクリートに対するものである。

(2) 砕砂、海砂併用の場合の砕砂と海砂との混合比は砕砂:海砂=7:3(容積比)としたものである。

(3) 使用材料またはコンクリートの品質が(1)の条件と相違する場合には、上記の表の値を下記により補正する。

区 分	s/a (%) の補正	W (kg) の補正
フライアッシュのⅡ種を用いる場合	補正しない	3kg だけ小さくする
細骨材の粗粒率が 0.1 だけ大きい(小さい)ごとに	0.5 だけ大きく(小さく)する	補正しない
スランブが 1cm だけ大きい(小さい)ごとに	補正しない	1.2% だけ大きく(小さく)する
空気量が 1% だけ大きい(小さい)ごとに	0~1 だけ小さく(大きく)する	0~3% だけ小さく(大きく)する
水結合比が 0.05 だけ大きい(小さい)ごとに	1 だけ大きく(小さく)する	0~4kg だけ小さく(大きく)する
川砂利(最大寸法 25mm)を用いる場合	3~5 だけ小さくする	9~15kg だけ小さくする

表-資5 FAコンの示方配合表(内割、外割)

種別	FA種類	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					W	C	FA	S	G	混和剤
内割配合	Ⅱ種	55.0	—	44.0	166	272	30	790	1,004	0.76
外割配合	Ⅱ種	—	55.0	43.0	181	329	65	673	993	0.82

参考文献

- (公社)土木学会四国支部、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)

6. 参考文献一覧

表-資 6 参考文献一覧

資料名	発行元	発行年
2017年制定 コンクリート標準示方書【施工編】	公益社団法人 土木学会	平成30年3月 (2018年3月)
2022年制定 コンクリート標準示方書【設計編】	公益社団法人 土木学会	令和5年3月 (2023年3月)
2022年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】	公益社団法人 土木学会	令和5年3月 (2023年3月)
2023年制定 コンクリート標準示方書【施工編】	公益社団法人 土木学会	令和5年9月 (2023年9月)
コンクリートライブラリー94 フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)	公益社団法人 土木学会	平成11年4月 (1999年4月)
コンクリートライブラリー132 循環型社会に適合したフライアッシュ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―	公益社団法人 土木学会	平成21年12月 (2009年12月)
四国版 フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合 設計・施工指針	公益社団法人 土木学会四国支部	平成28年3月 (2016年3月)
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)	公益社団法人 土木学会四国支部	平成15年3月 (2003年3月)
石炭灰全国実態調査報告書(2022年度実績)	一般財団法人 カーボンフロンティア機構	令和6年3月 (2024年3月)