

長崎県におけるフライアッシュコンクリートの
配合・製造及び施工指針

技術資料

平成27年1月

長崎県 土木部

目 次

1. フライアッシュコンクリートの特性	1
1.1 品質及び環境負荷低減効果	1
1.2 配合時の留意点	8
1.3 施工時留意点	10
2. フライアッシュの供給能力	13
3. 配合設計例	14
3.1 標準型	14
3.2 低熱型	16
4. 施工事例	20
5. 経済性	28
6. 環境負荷低減 (CO ₂ 削減効果)	30

1. フライアッシュコンクリートの特性

フライアッシュは、球状の微粒子粉体であり、セメント代替として利用でき、フライアッシュコンクリートとすることで、良質かつ高耐久なコンクリートの製造が可能である。

また、セメント製造時に大量に発生する CO₂ 排出の削減効果も期待でき、環境負荷低減を図るとともに循環型社会に寄与する。

フライアッシュコンクリートの特性を以下に示す。

- ① 流動性の改善
- ② 水和熱の抑制
- ③ 乾燥収縮及び自己収縮の低減
- ④ 長期強度の増進
- ⑤ アルカリシリカ反応の抑制
- ⑥ 遮塩性、化学抵抗性の向上
- ⑦ 中性化に対する抵抗性
- ⑧ CO₂ 削減効果

1.1 品質及び環境負荷低減効果

(1) 流動性の改善

フライアッシュは微細な球形をしているため、混和するとボールベアリング作用により流動性が改善されるので、コンクリートの打設が効率的に行われ、充填性がよくなる。

図-1.1 に示すように、単位水量一定で AE 剤なしの条件のもとでは、フライアッシュコンクリート (F) は普通コンクリート (PL) に比べてスランプが同等以上となり、流動性が改善している。

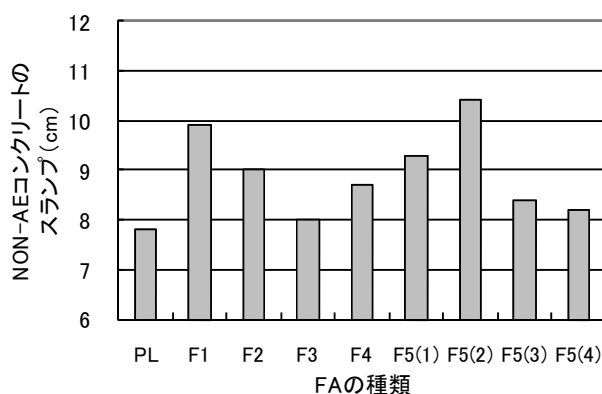
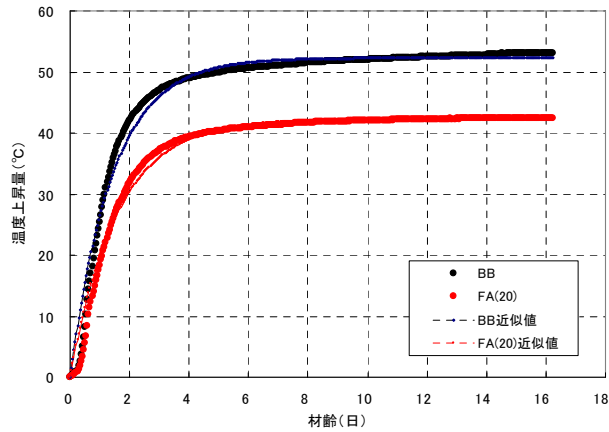


図-1.1 普通コンクリートとフライアッシュコンクリートのスランプの比較

出典：楠貞則・添田政司・大和竹史：フライアッシュコンクリートの簡易品質評価手法に関する研究、土木学会論文集、vol165、No.1、2009

(2) 水和熱の抑制

内割り配合ではコンクリートの水和熱が減少する（図-1.2 参照）。温度上昇は置換率が増加するほど低減する。特に、低熱型は、マスコンクリート工事等の水和熱によるひび割れ対策としては有効であり、実績も多い。



※
BB: 普通配合
FA(20): 内割り配合

図-1.2 実機試験の断熱温度上昇量の測定結果

出典：フライアッシュ利用促進検討委員会（長崎県）資料、平成22年3月

(3) 乾燥収縮及び自己収縮の低減

フライアッシュの混和によるボールベアリング効果のために、ワーカビリティが改善されて、単位水量やセメントを低減でき、硬化後の乾燥収縮が小さくなる。また、フライアッシュの自己収縮は従来のセメントに比べて小さい。

乾燥収縮低減効果に関する既往研究例を図-1.3 に示す。

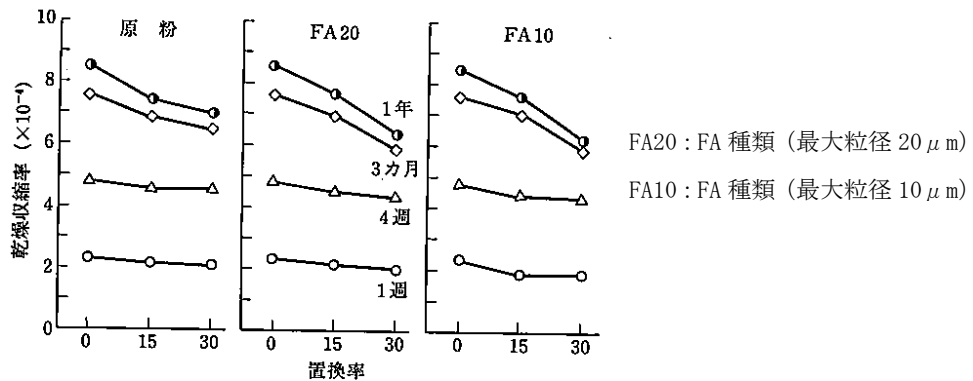
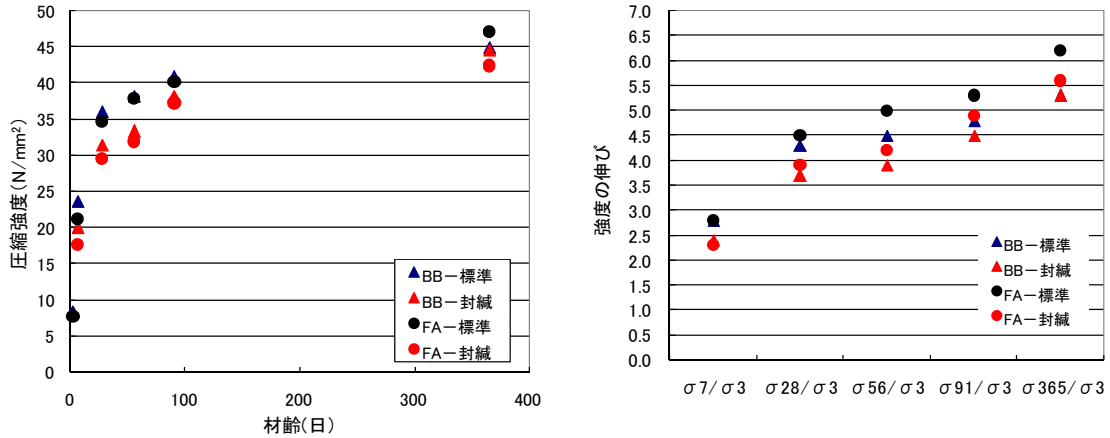


図-1.3 フライアッシュ置換率と乾燥収縮率の関係

出典：浮田和明他：分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、1988

(4) 長期強度の増進

フライアッシュのポズラン反応は、水和反応に比べて長期間継続するため、長期強度が増進する。標準型の場合、初期の強度発現も従来コンクリートと同等となる。低熱型は、材齢 28 日での強度発現が遅れるため、材齢 56 日での管理を考慮する必要がある。(図-1.4、図-1.5 参照)。



BB：普通配合

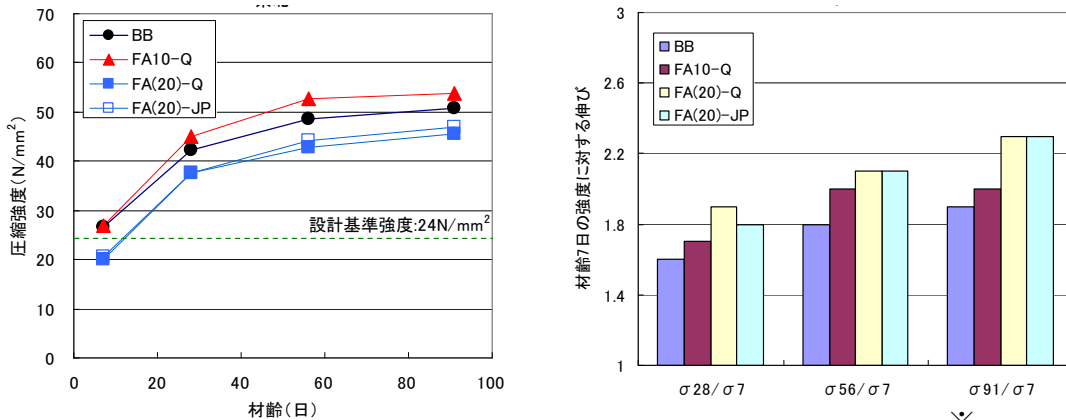
FA：置換率 10% 配合

標準：20℃水中養生

封緘：現場封緘養生

図-1.4 標準型強度比較

出典：長崎県フライアッシュ利用指針（案）作成検討会資料、平成 25 年 3 月



※

BB：普通配合

FA10：外割り配合

FA(20)：内割り配合

Q,JPは品質の異なる

フライアッシュ(JIS II種)

図-1.5 低熱型強度比較

出典：フライアッシュ利用促進検討委員会（長崎県）資料、平成 22 年 3 月

(5) アルカリシリカ反応の抑制

フライアッシュのポズラン反応による水酸化カルシウムの消費や、フライアッシュ中のシリカ成分が、セメント中の Na^+ 、 K^+ イオンを吸着し、イオンと骨材との反応を抑制する効果がある。アルカリシリカ反応抑制効果に関する研究例を図-1.6 に示す。

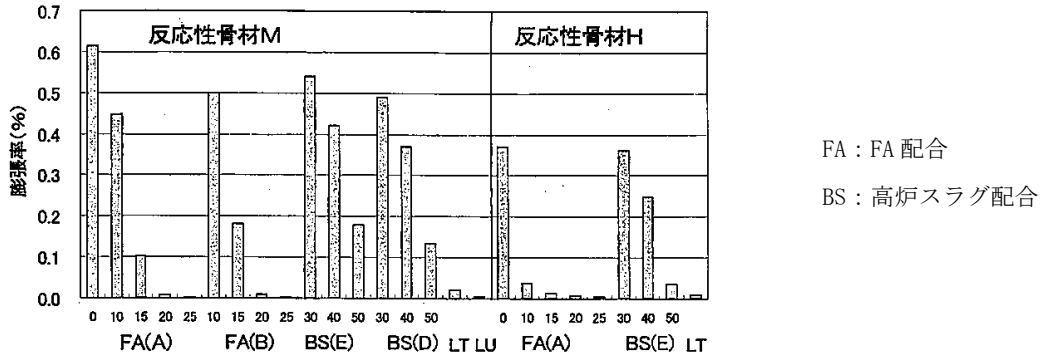


図-1.6 混和材の種類による ASR 抑制効果の比較

出典：建築学会材料施工委員会：フライアッシュの建築用コンクリートへの有効利用、2005 年度大会（近畿）材料施工部門パネルディスカッション資料、2005

(6) 遮塩性、化学抵抗性の向上

セメント中の遊離石灰とフライアッシュ中のシリカやアルミナが結合して組織を緻密化し、耐久性が向上する。

高橋らは、実構造物中のフライアッシュコンクリートの塩分浸透性状について、室内試験も含めて検討している。この室内塩水浸漬試験の結果を図-1.7 に示す。フライアッシュコンクリートは普通コンクリートに比べて塩化物イオンの浸透深さが浅く、高い遮塩性が認められ、実環境の結果と同じであることが確認されている（図中の F1 の 6-8cm に塩分が検出されているが、これは今回の試験によって侵入した塩分ではない）。

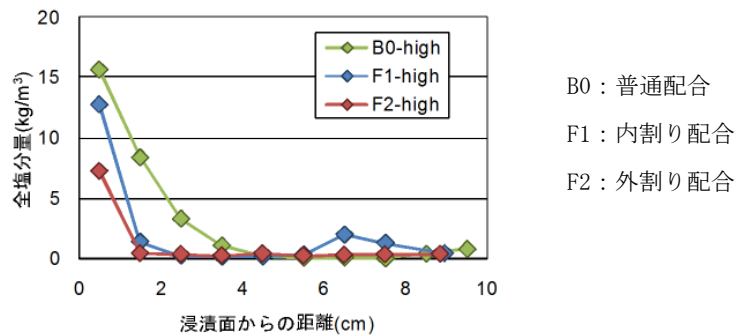


図-1.7 各種微粉末の置換率と浸透深さ比との関係

出典：高橋佑弥他：実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.32，No1，pp.803～808，2010 年

(7) 中性化に対する抵抗性

フライアッシュをセメント代替で利用すると水酸化カルシウムの生成量が少なくなり、また、フライアッシュのポズラン反応自体も水酸化カルシウムを消費するため、フライアッシュ混和は中性化速度が大きいと言われる。しかし、ポズラン反応により組織が緻密化することで密実なコンクリートとなり、炭酸ガスが拡散しにくく、実環境ではその影響は小さい。既往の文献においても、中性化速度は、フライアッシュの置換方法、置換率及び環境条件に関わらず、強度や総細孔径量（組織の緻密さを示す値）の影響が大きいことが確認されている。

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することで、コンクリートのpHを下げる現象である。

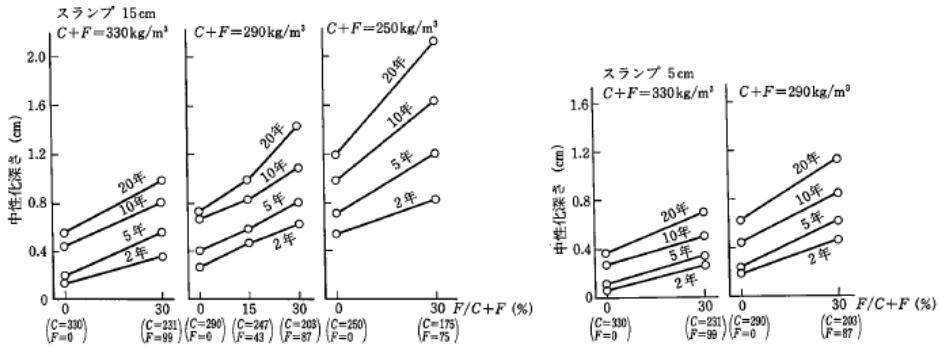
フライアッシュコンクリートの中性化速度については、ポズラン反応によって Ca(OH)_2 が消費される影響もあるが、材齢初期の強度発現の影響が大きいことが指摘されている。

しかし、フライアッシュコンクリートは、流動性の向上で単位水量を減らし、ポズラン反応により密実になるため、長期的には中性化抑制効果をもたらす。

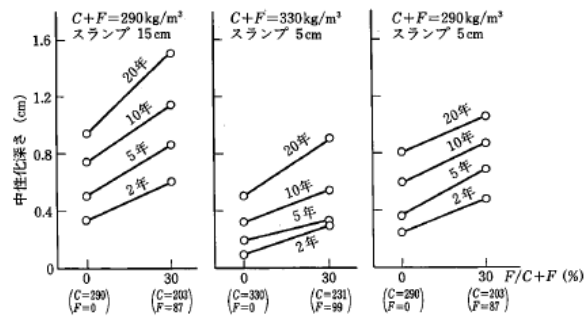
図-1.8 にあるようにフライアッシュの置換率が大きくなると中性化深さは増大する傾向にある。しかし、図-1.9 にあるように材齢 28 日における圧縮強度が同一となる場合に（中性化を評価する促進中性化試験の開始材齢時点の強度を同一にした場合）、フライアッシュ混和の有無が中性化深さに及ぼす影響はほとんどない。

以上のことから、標準型の中性化に関しては、普通コンクリートとの差異はほとんどないと判断される。これに対して、低熱型は、材齢初期の強度発現が遅れるため、影響が大きい可能性がある。

当指針におけるフライアッシュコンクリートを適用する構造物に関しては、標準型は普通コンクリートと同等のかぶりを要していれば特段の検討は要しないが、鉄筋量が多く、配筋が緻密な構造物に低熱型を適用する場合、かぶりについて個別に検証することが必要である。



普通セメントの場合



中庸熱セメントの場合

図-1.8 フライアッシュ置換率と中性化深さの関係

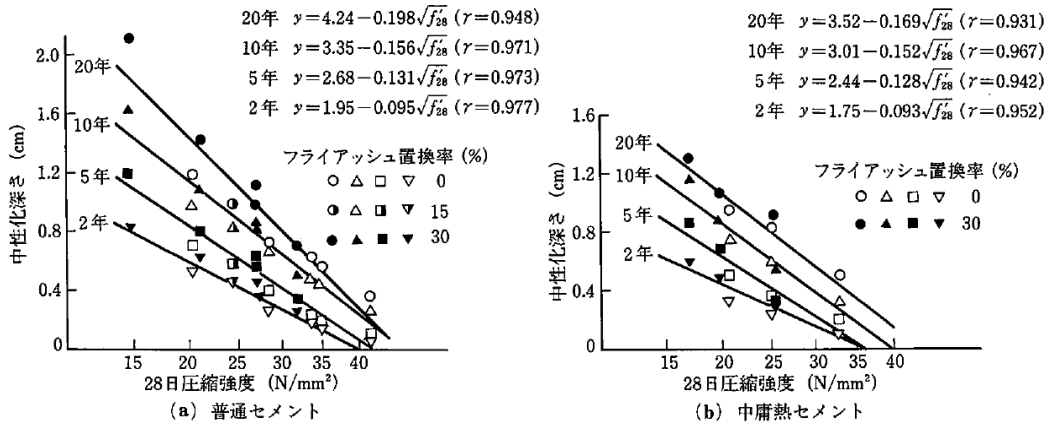


図-1.9 28日圧縮強度と中性化深さの関係

出典：コンクリートライブラリー第64号、フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する研究、土木学会、1988

(8) CO₂削減効果

コンクリートの構成材料の中で最も CO₂ 排出量の多いセメントの一部をフライアッシュと置換することで、環境負荷を低減することができる。

表-1.1 に CO₂ 排出原単位の例を示す。

表-1.1 CO₂ 排出原単位

材料名	CO ₂ 排出原単位
	kg-CO ₂ /t
ポルトランドセメント	767
高炉セメントB種	437
フライアッシュ	0
天然粗骨材	2.9
天然細骨材	5.6
AE減水剤	121

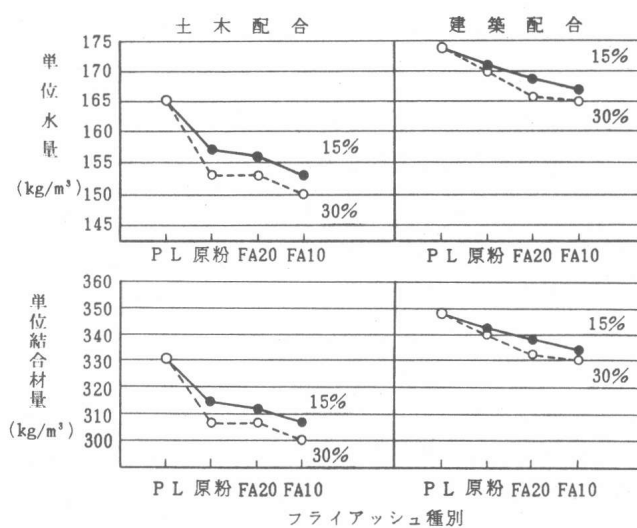
出典：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）、コンクリートライブラリー125、土木学会、2005

1.2 配合時の留意点

配合時に影響が大きい単位水量、AE 剤量は、配合設計手法、フライアッシュの品質及び置換率によって異なるとともに、地域、製造時期（暑中期、通常期）によっても異なるため、事前に確認する必要がある。

(1) 単位水量

内割り配合の場合、フライアッシュの置換率の増加とともに単位水量が低下し、この減水効果によって、同一強度を得るための単位結合材量を低減できる（図-1.10 参照）。



15%、30%置換率

PL:無混和配合

原粉:非 JIS 灰

FA20:FA 種類(最大粒径 20 μm)

FA10:FA 種類(最大粒径 10 μm)

出典:浮田和明, 石井光裕, 重松和男, 野尻

陽一:分級フライアッシュを混入した

コンクリートの基礎物性, コンクリー

ト工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2,

pp. 1~6, 1988 年

図-1.10 フライアッシュ置換率と単位水量及び単位結合材量の関係

(2) AE 剤量

低熱型は、フライアッシュ無混和に比べて、置換率の増加とともに AE 剤の使用量も多くなる傾向がある。このため、フライアッシュコンクリートにおいては、所要の空気量を確保するのに AE 剤の使用量が増加することに留意が必要である（図-1.11 参照）。

なお、標準型の場合、AE 剤の使用量は、従来コンクリートとほぼ同等である。

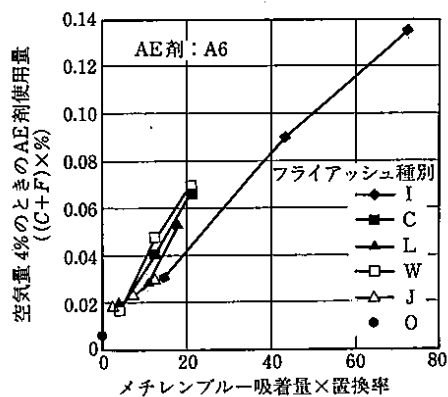


図-1.11 フライアッシュ置換率と AE 剤使用量の関係

出典：三井健郎抄訳、フライアッシュのコンクリートへの利用—AC1226 委員会報告—、
コンクリート工学、vol26、No.4、1998

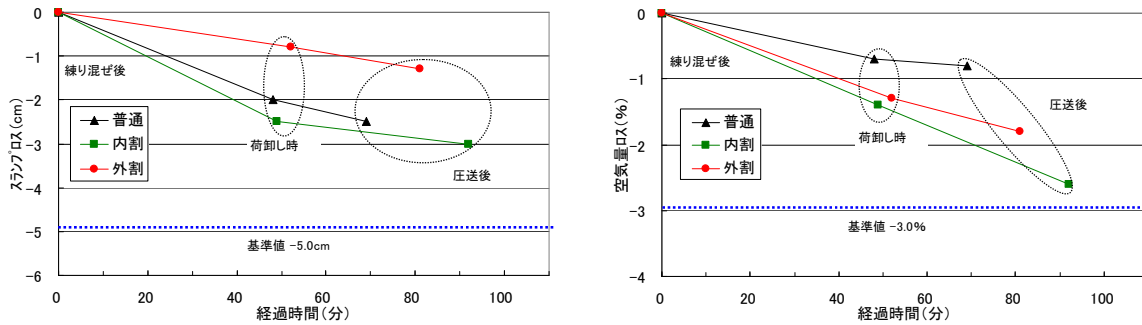
1.3 施工時留意点

(1) ポンプ打設

施工時留意点については、ポンプ打設工事でのフライアッシュコンクリートに関するデータを基に留意点を整理した。

1) フレッシュ性状の経時変化

低熱型は、従来の普通コンクリートに比べてスランプロスで1~2cmの差が生じ、空気量ロスは経時とともに大きくなる傾向を示した(図-1.12 参照)。



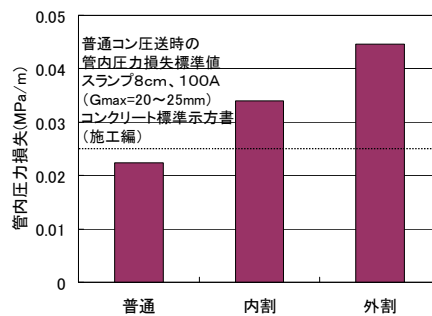
普通：普通配合、内割：低熱方置換率 20%配合 外割：外割り 10%配合

図-1.12 フライアッシュコンクリートの経時変化

出典：山下裕司他、フライアッシュコンクリートの普及拡大への取り組み、コンクリートテクノ、Vol. 27、No. 7、Jul;2008

2) ポンプ圧送性

ポンプ圧送性は、従来の普通コンクリートに比べて、粉体量が増加して粘性が増すため低熱型で約 1.5 倍に増加している(図-1.13 参照)。このことより、材料分離抵抗性は改善するものの閉塞等のリスクが高まる可能性が高い。低熱型の場合、スランプ 8cm ではポンプ打設に支障が生じる可能性もあるため、スランプ設定を 10cm 以上とするような工夫が必要である。



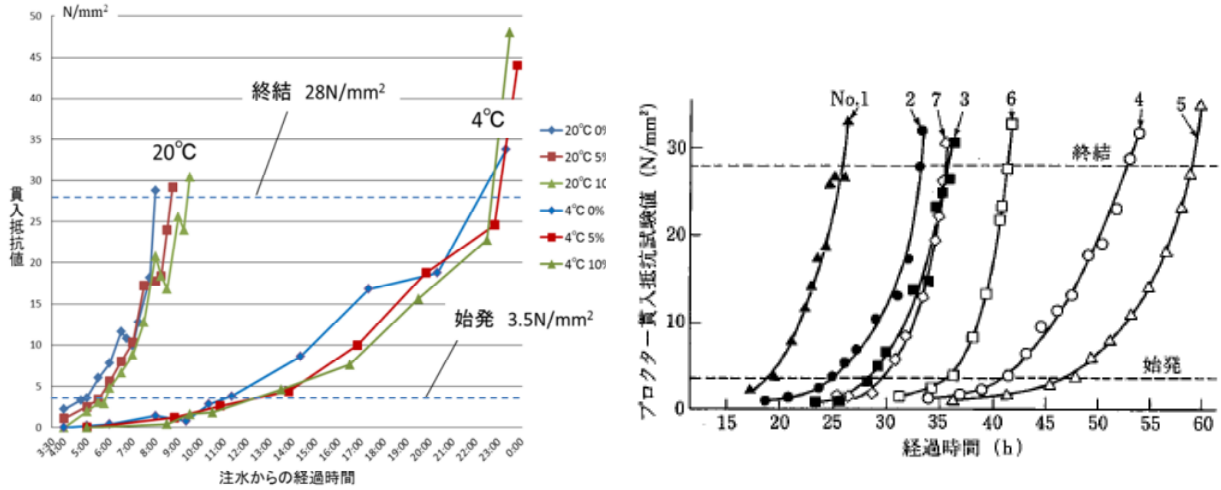
普通：普通配合、内割：低熱型置換率 20%配合 外割：外割り 10%配合

図-1.13 フライアッシュコンクリートのポンプ圧送性

出典：山下裕司他、フライアッシュコンクリートの普及拡大への取り組み、コンクリートテクノ、Vol. 27、No. 7、Jul;2008

(2) 表面仕上げ

凝結性状（貫入抵抗値の変化）について、標準型は、従来の普通コンクリートと同等の性状を示すのに対して、低熱型の場合、貫入抵抗値は置換率の増大とともに遅延する傾向にある（図-1.14 参照）。このため、表面仕上げの時期は、標準型は、従来の普通コンクリートと同等であるのに対して、低熱型は、同等か若干遅くなる場合もあることに留意が必要である。



標準型¹⁾

低熱型²⁾

- 20°C0%：雰囲気環境 20°C時の普通配合
- 20°C5%：雰囲気環境 20°C時の標準型 5%置換
- 20°C10%：雰囲気環境 20°C時の標準型 10%置換
- 4°C0%：雰囲気環境 4°C時の普通配合
- 4°C5%：雰囲気環境 4°C時の標準型 5%置換
- 4°C10%：雰囲気環境 4°C時の標準型 10%置換
- No. 1：フライアッシュ無混和のプレーン配合
- N. 3：フライアッシュ低熱型 20%置換
- N. 4：フライアッシュ低熱型 50%置換
- N. 5：フライアッシュ低熱型 60%置換

図-1.14 凝結特性

出典 1)：衛藤元、FA 混和材利用高炉セメントコンクリートの低温下における強度発現について、土木学会西部支部発表会講演集, Vol. 11, No1, pp. 397～402, 2005 年

出典 2)：十河茂幸、混和剤を大量添加した超低熱特殊水中コンクリートの性質、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No1, pp. 397～402, 1989 年

(3) 強度管理

1) テストハンマーによる強度推定

強度の管理としてのテストハンマーによる強度推定について、標準型は、**図-1.15**に示すように従来の普通コンクリートと大差ないことから、同様な強度推定による管理が可能である。

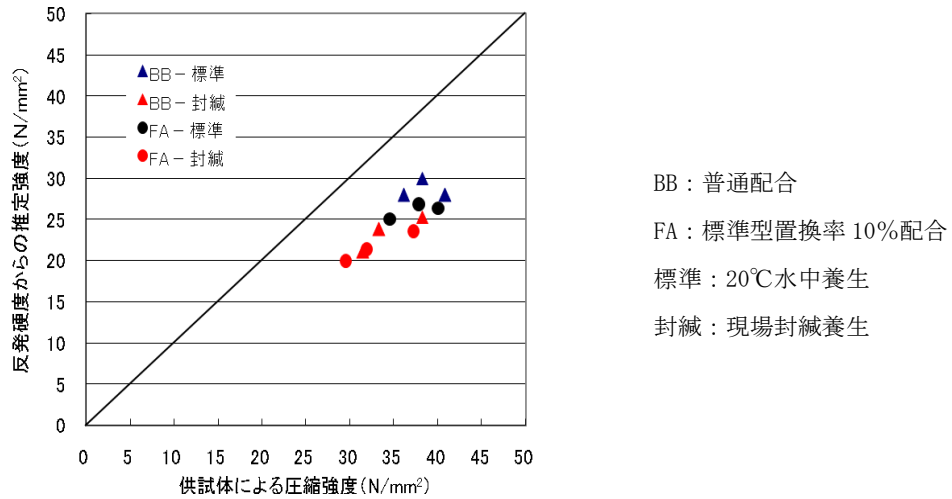


図-1.15 標準型の供試体強度とテストハンマーによる強度推定との関係

出典：長崎県フライアッシュ利用指針（案）作成検討会資料、平成 25 年 3 月

2) 積算温度による強度管理

標準型の積算温度と圧縮強度の関係は、従来の普通コンクリート配合とほとんど差異もなく、概ね積算温度と圧縮強度が近似曲線上にある。このことから、標準型の型枠脱型等の強度管理において、普通コンクリートと同様な強度管理が可能であることがわかる（**図 1-16** 参照）。

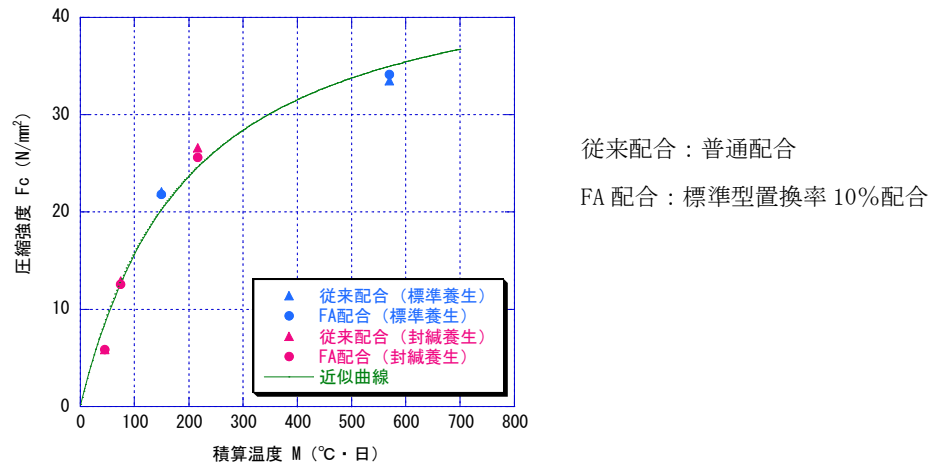


図 1-16 積算温度と圧縮強度の関係

出典：長崎県フライアッシュ利用指針（案）作成検討会資料、平成 25 年 3 月

2. フライアッシュの供給能力

長崎県には、松浦、松島の2箇所に大規模な石炭火力発電所が立地し、電力を供給している。これら松浦、松島2箇所の石炭火力発電所におけるフライアッシュの供給能力は、全体で6万～7万t/年であり、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に適合した良質なフライアッシュが生産されている。

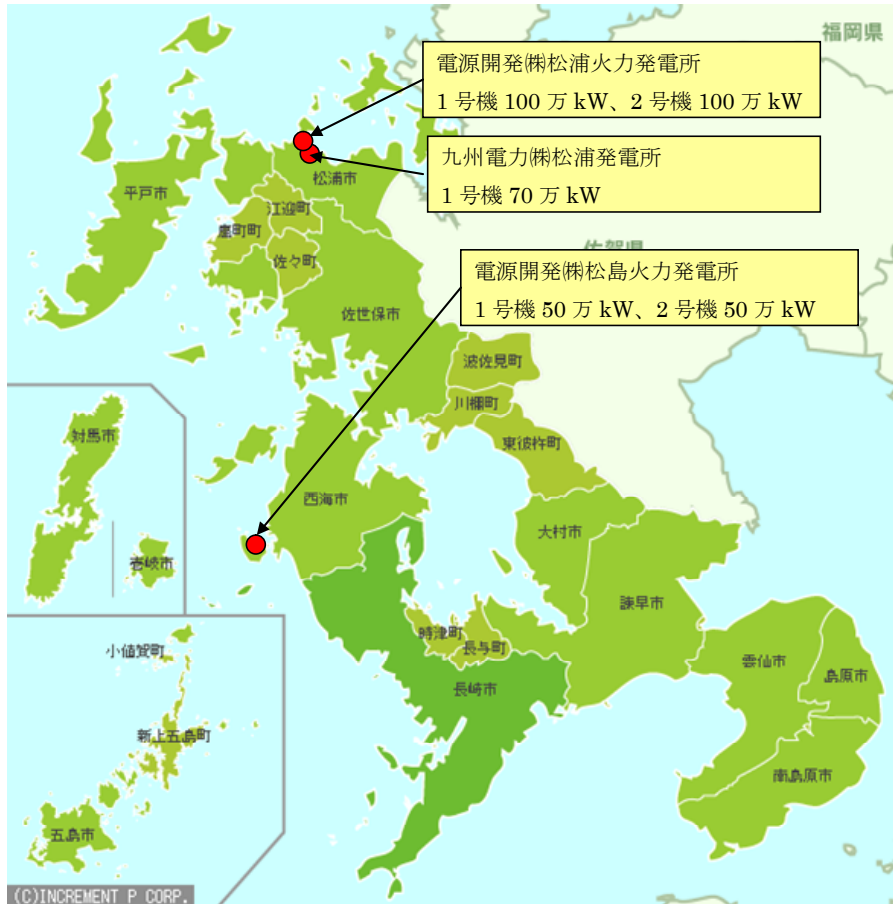


図-2.1 石炭火力発電所の位置図

出典： <http://www.mapfan.com/kankou/42/jmap.html> に加筆

3. 配合設計例

3.1 標準型

標準型は、フライアッシュを混和しない従来の普通コンクリート配合と同等の強度性状を有し、フライアッシュの利用効果も期待するものである。

配合設計は、従来の普通コンクリート配合の水セメント比から 2～3%下げた水結合材比を設定するのみである。細骨材率は同等か 1%以下とする。また、低熱型では、空気連行性を確保するために AE 剤の多量添加やフライアッシュ用 AE 剤への変更が必要な場合があるが、標準型は、普通コンクリートと同一の AE 剤で、通常の空気連行性の調整範囲で設定できる。

なお、新規で標準型の配合設計を行う場合は、基本的に 3.2 項に示す低熱型と同じ方法で実施する。

標準型の基本的事項

- ・フライアッシュ置換率を概ね 10%程度とする。
- ・水結合材比を従来の普通コンクリートに対して 2～3%減とする。
- ・細骨材率は普通コンクリートと同等か 1%程度小さくする。
- ・空気量の調整は従来の AE 剤を用いて、通常の調整範囲で調整する。

配合設計例を次頁に示す。

配合設計例

配合	水結合材比 (%)	フライアッシュ置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE助剤
従来配合	58.5	-	38.2	141	241	0	725	1226	0.603	0.006 (1A)
①	↓									
②		↓								
③			↓							
④									↓	
配合試験	水結合材比 (%)	フライアッシュ置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
内割り配合 (標準型)	55.5	10	38.2	135	219	24	728	1228	0.595	0.01 (1.5A)

図-3.1 配合設計例

① 水結合材比の調整

水結合材比を従来の普通コンクリートに対して2~3%減とする。

② 細骨材率の調整

細骨材率は同等か1%以下とする。

③ 単位水量

フライアッシュを使用すると単位水量の低減が3~10kg/m³程度の範囲で得られる。このため、概ね5 kg/m³程度低減できることを目安とする。

④ AE助剤(空気連行性の調整)

空気量の調整は従来のAE剤の調整範囲で調整する。従来と同じ添加量でも基準値は確保する可能性が高いが(4.5±1.5%)、試験によって確認する事が望ましい。また、フライアッシュを利用することで、空気連行性の確保に一般に懸念があることも事実であり、その場合、従来配合の調整範囲に若干増とすることで(Aタイプ表示で0.5A程度)、従来と同等以上の性状確保することが可能である。

上記の配合例の圧縮強度結果を図-3.2に示す。圧縮強度は、養生条件に関わらず、標準型は、従来配合とほぼ同等の強度となっている。

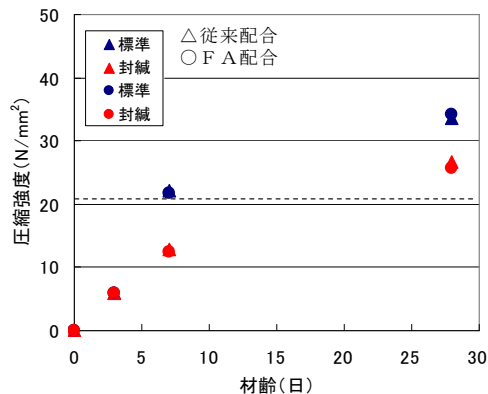


図-3.2 配合別の圧縮強度の結果

3.2 低熱型

低熱型は、管理材齢を 56 日、または 91 日とするため、標準型のように水結合材比を調整する必要がなく、水結合材比一定(従来配合の水セメント比と同一)の条件でフライアッシュ置換率を 15%以上とすることが可能である。これによりフライアッシュの特徴であるセメント代替による水和熱低減効果の向上が期待でき温度ひび割れリスクを軽減できる。

平成 20 年度、21 年度に実施されたフライアッシュ利用促進検討委員会においても、温度ひび割れ対策として、フライアッシュ置換率 20%の低熱型での検討が実施された。この結果、材齢初期の強度低下が確認され、管理材齢を 28 日から 56 日に変更する必要が明らかとなり、また、コンクリートの粘性が増し、空気連行性を確保するための AE 剤等の添加量の増加や、フライアッシュ用の AE 剤の利用が必要であることが確認された。

配合設計手順は、従来の普通コンクリート配合と基本的に同じである。「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)を参考に、以下に配合設計例を示す。

低熱型の基本的事項

- ・フライアッシュ置換率は 20%以下を標準とする。
- ・水結合材比は、基本的に従来の普通コンクリートの水セメント比と同じとする。
- ・細骨材率は普通コンクリートに比べて 1%程度小さくする。
- ・空気量の調整は、従来の AE 剤を用いて調整する場合、添加量が多量になるため、フライアッシュ用 AE 剤を用いて調整する。

(1) 水結合材比の目安

コンクリート標準示方書(土木学会)に記載された水結合材比に関する事項を表-3.1、表-3.2に示す。

① 耐凍害性を基に定める場合

表-3.1 耐凍害性を考慮した場合の最大水セメント比

(単位：%)

気象条件 断面	気象作用が激しい場合、または凍結融解がしばしば繰り返される場合		気象作用が激しくない場合、氷点下の気温となることがまれな場合	
	薄い場合 ²⁾	一般の場合	薄い場合 ²⁾	一般の場合
(1) 連続してあるいはしばしば水で飽和される部分 ¹⁾	55	60	55	65
(2) 普通の露出状態にあり、(1)に属さない場合	60	65	60	65

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。

2) 断面の厚さが、20cm程度以下の部分

② 化学作用などの耐久性を基に定める場合

表-3.2 化学作用などの耐久性を考慮した場合の最大水セメント比

(単位：%)

環境区分	施工条件	一般の現場施工の場合	工場製品、または材料の選定および施工において、 工場製品と同等以上の品質が保証される場合
	(a) 海上大気中		45
(b) 飛沫帯		45	45
(c) 海中		50	50

注) 実績、研究成果等から確かめられたものについては、耐久性から定まる最大の水結合材比を、表の値に5~10程度加えた値としてよい。

(2) 単位粗骨材容積、細骨材率及び単位水量の概略値

「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)に記述されるフライアッシュⅡ種を置換率20%とした場合の単位水量の概略値を表-3.3に示す。

表-3.3 コンクリートの単位粗骨材容積、細骨材率及び単位水量の概略値

粗骨材の最大寸法 (mm)	単位粗骨材容積 (%)	AEコンクリート				
		空気量 (%)	AE剤を用いる場合		AE減水剤を用いる場合	
			細骨材率 <i>sf/a</i> (%)	単位水量 <i>W</i> (kg)	細骨材率 <i>sf/a</i> (%)	単位水量 <i>W</i> (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	158	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、スランプ約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		<i>sf/a</i> (%)の補正	<i>W</i> (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	Ⅰ種	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
	Ⅱ種	0.5だけ小さく(大きく)する	2~4kgだけ小さく(大きく)する
砂の粗粒率が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
スランプが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		0.5~1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
<i>sf/a</i> 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	6~9kg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

(3) フライアッシュの使用目的と置換率

フライアッシュの種類及び置換率について表-3.4の目安が、「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）に示されている。

フライアッシュをコンクリートに用いる場合は、結合材中に占めるフライアッシュの質量割合が10～30%（I種では40%）の範囲で適切に定めることを原則としている。

本指針では、20%以下を標準としている。

表-3.4 フライアッシュの種類と置換率

使用目的 \ 種類	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。

内割り配合の配合設計例

スランプ sl(cm)	空気量 air(%)	水セメント比 W/C(%)	フライアッシュ置換率 内割り(%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (C+FA)×%	AE剤 A
					水(W)	セメント(C)	フライアッシュ(F)	粗骨材(S)		
9	4.5	54.5	20	43.1	154	283	57	625	157	1073
								粗砂S1	157	
								粗砂S2	1073	

上記の配合結果をもとに、配合計算の考え方を以下に示す。

①骨材以外の絶対容積

$$\begin{aligned}
 \text{水} &= 154 / 1.0 = 154 \\
 \text{セメント量} &= 283 \times 0.80 = 226 \\
 \text{内割りFA量} &= 283 \times 0.20 = 57 \\
 \text{空気量} &= 4.5 / (100/1000) = 45
 \end{aligned}$$

単位水量は、ワーカビリティが得られる範囲でできるだけ少なく、なるように試験によって決めなければならない。この調整について、表-3.3のような目安がある。

単位結合材量は、単位水量と水結合材比から算出する。算出方法としては、水結合材比を強度、耐久性、水密性などの関係から求める。

コンクリート標準示方書には、表-3.1、表-3.2のような目安がある。

②骨材の絶対容積

$$1000 - 298 = 702$$

フライアッシュを内割り利用として20%置換する場合、結合材量の全体質量に20%を乗じたものが、単位フライアッシュ量となる。

フライアッシュの置換率については、表-3.4のような目安がある。

③単位細骨材量

$$702 \times (s/a) = 303$$

$$\begin{aligned}
 \text{S1粗砂} &= 303 \times 1.00 \times 0.80 \times 2.58 = 625 \\
 \text{S2粗砂} &= 303 \times 1.00 \times 0.20 \times 2.59 = 157 \\
 \text{外骨材材量} &= 303 \times 0.00 \times 1.00 \times 2.26 = 0
 \end{aligned}$$

骨材には細骨材と粗骨材があり、それぞれどのような割合で求めるのかを決定する必要がある。これを細骨材率と言い「s/a = (細骨材の絶対容積 / 全骨材の絶対容積) × 100%」で表す。細骨材率を減らすと骨材の表面積の総和が少なくなり、単位水量が低減でき、経済的なコンクリートが得られる。この調整について、表-3.3のような目安がある。

④単位粗骨材量

$$702 \times (1 - s/a) = 399$$

$$2005\text{碎石} = 399 \times 1.00 \times 2.69 = 1073$$

内割り配合ではフライアッシュを細骨材の絶対容積に対して置換しないため常に100%となる。

単位粗骨材量の絶対容積に粗骨材の密度を乗じて単位粗骨材量を算出

⑤単位混和剤量

AE減水剤 (No. 8, 4倍液)

$$C+F / 100 \times 0.25 = 283 / 100 \times 0.25 \times 4 = 2.830$$

AE剤 (303A, 100倍液)

$$C+F \times 0.002\% \times 0.0 = 283 \times 0.002 / 100 \times 0.0 \times 100 = 0.000$$

AE剤 (785, 25倍液)

$$C+F \times 0.004\% \times 10.0 = 283 \times 0.004 / 100 \times 10.0 \times 25 = 2.830$$

空気量を0.5~1.0%増減させるのに1Aで表す。その基本使用量が、ここで使用したAE剤の場合0.004%であり、これが1Aになる。この基本使用量もメーカーや混和剤の種類によって異なるため、注意が必要である。メーカーカタログ等を見て確認する必要がある。フライアッシュを使用する場合、空気連行性の確保が難しいため、このAE剤量の調整が重要となる。この例で用いたAE剤はフライアッシュ用である。

メーカーや混和剤の種類によって異なるものの、AEコンクリートにおいて、単位水量を12%程度減水させるのに必要なAE減水剤量は「混和材 (C+FA) × 0.25%」を基本とする使用量が少なくいと管理しにくいので4倍に希釈して使用する。

4. 施工事例

長崎県がこれまでに実施したフライアッシュコンクリートの施工事例を以下に示す。

(1) 重力式擁壁（出典：フライアッシュ利用促進検討委員会（長崎県）資料、平成22年3月）

表-4.1 工事概要

施工場所	長崎市香焼町
適用構造物	重力式擁壁
設計配合	18-8-40BB
使用配合	18-8-40BB 18-8-40BB-FA10 18-8-40BB-FA(20)
FA利用メリット	・内割り配合 水和熱低減(温度ひび割れ低減) ・外割り配合 細骨材低減
打設方法	ポンプ
その他	空気量3.5±1.5%管理

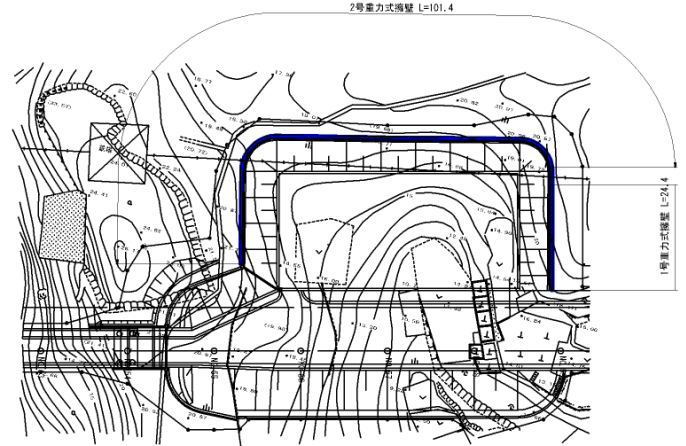


図-4.1 平面図

凡例	配合（空気量）
①	18-8-40BB (4.5%)
②	18-8-40BB (3.5%)
③	18-8-40BB-FA外割 (3.5%)
④	18-8-40BB-FA内割 (3.5%)

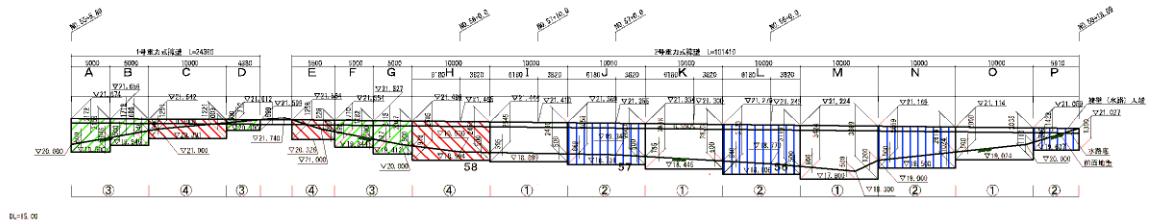


図-4.2 重力式擁壁展開図



写真-4.1 打設状況

表-4.2 使用材料及び配合

使用材料			
使用材料	種類	密度	その他
セメント	高炉セメントB種	3.04	高炉スラグ混入率40~45%
フライアッシュ	JIS II種	2.28	比表面積= cm ² /g、発熱減量=2.3%
細骨材	海砂	2.58	粗粒率=2.58
粗骨材	2005砕石	2.82	実積率=62.0% ※アルカリシリカ反応性：A区分（無害）
AE減水剤	標準型I種	1.00	-
AE剤	一般用	-	-
水	地下水および上澄水	1.00	-

※骨材の密度は表乾密度を示す。

【単位水量】

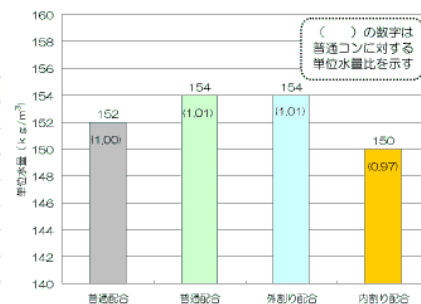


図-4.3 配合別単位水量

コンクリート配合											
■ 配合条件 ■											
配合名	記号	呼び強度 (N/mm ²)	使用材料			配合条件					
			セメントの種類	FAの種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水結合材比 (%)	FAの添加率	細骨材率 (%)	
普通配合	21-8-40BB	21	高炉セメントB種	JIS II種	8 ± 1.5	3.5 ± 1.5	40	58.1	-	-	42.1
普通配合	21-8-40BB								-	-	42.1
外割り配合	21-8-40BB-FA10								砂置換10%	-	42.2
内割り配合	21-8-40BB-FA120								セメント置換20%	-	42.2

■スランプ 8cm■

配合名	コンクリートの配合 (kg/m ³)										
	水	結合材			細骨材			粗骨材	AE減水剤	AE剤 (g/m ³)	
		セメント	FA	計	細骨材	FA	計			一般用	FA用
普通配合	152	261	-	261	776	-	776	1,137	0.653	1,044 (4A)	-
普通配合	154	264	-	264	784	-	784	1,149	0.660	0,528 (2A)	-
外割り配合	154	266	-	266	707	70	777	1,148	0.665	6,720 (20,0A)	-
内割り配合	150	207	52	259	786	-	786	1,148	0.648	1,813 (7A)	-

【AE剤使用量】

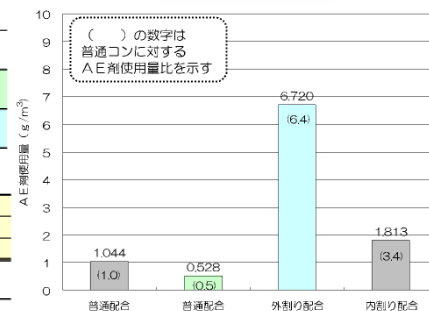


図-4.4 配合別AE剤使用量

表-4.3 評価

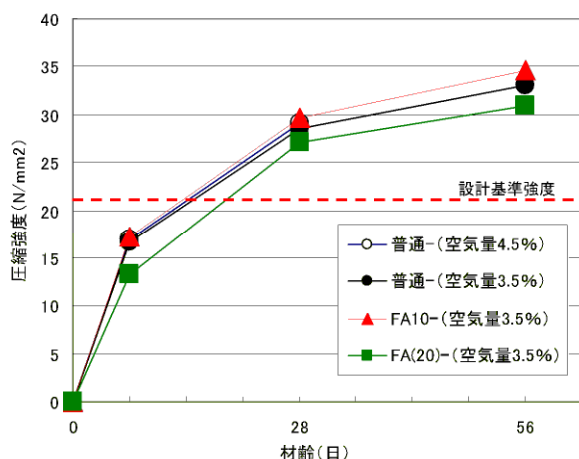


図-4.5 材齢と圧縮強度の関係

施工者コメント
<ul style="list-style-type: none"> ・変わらない。 ・内割りは施工しやすい。 ・外割りは重い。
生産者コメント
<ul style="list-style-type: none"> ・変わらない。 ・外割りは、夏場の左官工事に注意が必要。 ・外割りは重量感がある。 ・空気量の調整が難しい。
委員会(意見)
<ul style="list-style-type: none"> ・外割りの重いという意見について、手引き(案)に沿えば、細骨材率を下げられた可能性がある。 ・空気量3.5%について指摘もなく、ポンプ、バケツ打設において違和感なく施工できている。

(2) L型擁壁 (出典：フライアッシュ利用促進検討委員会 (長崎県) 資料、平成 22 年 3 月)

表-4.4 工事概要

施工場所	諫早市平山町(九州電力 小豆崎変電所内)
適用構造物	L型擁壁
設計配合	18-8-40BB
使用配合	18-8-40BB 18-8-40BB-FA10 18-8-40BB-FA(20)
FA利用メリット	・内割り配合 水和熱低減(温度ひび割れ低減) ・外割り配合 細骨材低減
打設方法	バケット、ポンプ
その他	スランブ8or12±2.5cm 空気量3.5±1.5%管理

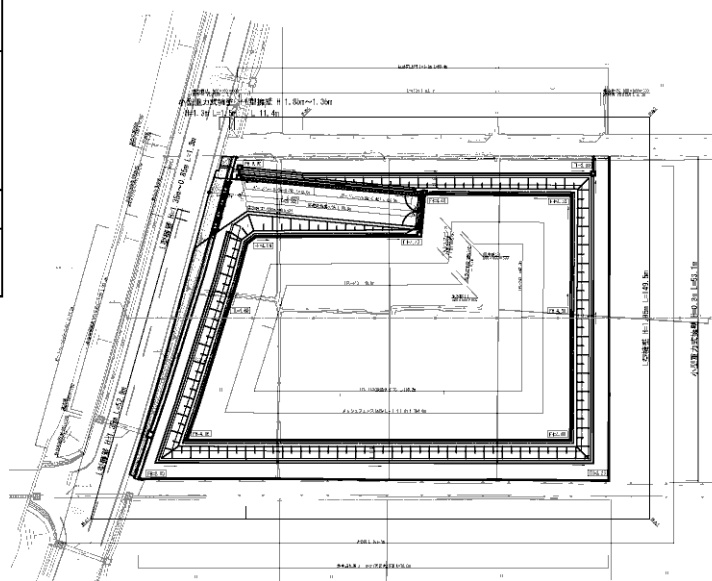
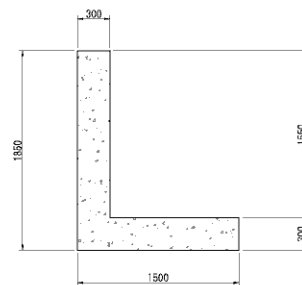


図-4.6 標準断面図及び平面図



写真-4.2 打設状況

表-4.5 使用材料及び配合

使用材料			
使用材料	種類	密度	その他
セメント	高炉セメントB種	3.02	高炉スラグ 混入率40~45%
フライアッシュ	JISⅡ種	2.28	比表面積=3,930cm ² /g、発熱減量=2.3%
細骨材	海砂(粗目)	2.56	粗粒率=3.00
	海砂(細目)	2.56	粗粒率=2.00
粗骨材	2005砕石	2.62	実積率=59.5% ※アルカリシリカ反応性: B区分(反応性骨材)
	4020砕石	2.62	実積率=55.0% ※アルカリシリカ反応性: B区分(反応性骨材)
AE減水剤	標準型Ⅰ種	-	-
AE剤	一般用	-	-
	FA用	-	-
水	地下水および上澄水	1.00	-

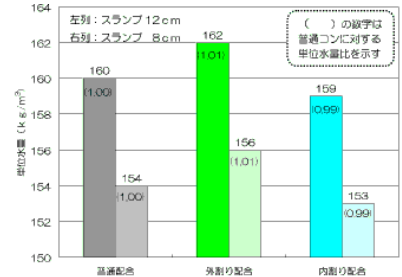


図-4.7 配合別単位水量

※骨材の密度は表乾密度を示す。

■配合条件■ ※ () 内の数字はスラブ8cmの値を示す

配合名	記号	呼び強度 (N/mm²)	使用材料		配合条件					
			セメントの種類	FAの種類	スラブ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水結合材比 (%)	FAの添加率	細骨材率 (%)
普通配合	21-12(8)-40BB	21	高炉セメントB種	JISⅡ種	12(8) ± 1.5	4.5 ± 1.5	40	57.5	-	38.5 (38.6)
外割り配合	21-12(8)-40BB-FA10								砂置換10%	38.0 (38.1)
内割り配合	21-12(8)-40BB-FA(20)								セメント置換20%	38.5 (38.6)

■スラブ12cm■

配合名	コンクリートの配合 (kg/m³)										
	水	結合材			細骨材			粗骨材	AE減水剤	AE剤 (g/m³)	
		セメント	FA	計	細骨材	FA	計			一般用	FA用
普通配合	160	278	-	278	692	-	692	1,132	0.695	28 (10.0A)	-
外割り配合	162	282	-	282	622	61	683	1,076	0.705	28 (10.0A)	155 (5.5A)
内割り配合	159	222	55	277	698	-	698	1,140	0.693	28 (10.0A)	55 (2.0A)

■スラブ8cm■

配合名	コンクリートの配合 (kg/m³)										
	水	結合材			細骨材			粗骨材	AE減水剤	AE剤 (g/m³)	
		セメント	FA	計	細骨材	FA	計			一般用	FA用
普通配合	154	268	-	268	704	-	704	1,146	0.670	27 (10.0A)	-
外割り配合	156	271	-	271	632	62	694	1,076	0.678	27 (10.0A)	149 (5.5A)
内割り配合	153	213	53	266	710	-	710	1,156	0.665	27 (10.0A)	53 (2.0A)

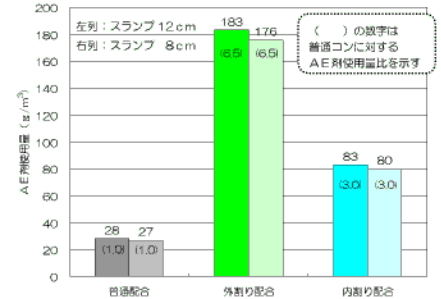


図-4.8 配合別AE剤使用量

表-4.6 評価

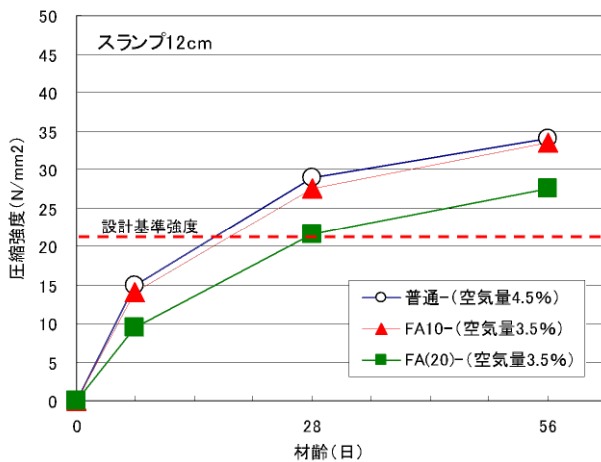


図-4.9 材齢と圧縮強度の関係

施工者コメント
<ul style="list-style-type: none"> 普通コン、FAコンクリート共に作業性は差がない。 気温が上がるとフリージングの引きが早いので、夏場にベースのような広い面積を仕上げる場合は、注意が必要。 ポンプ圧送においてスラブ8cm、12cmで差異は感じない。
生産者コメント
<ul style="list-style-type: none"> 内割りは普通と変わらない。 外割りは重い感じがする。

委員会(意見)
<ul style="list-style-type: none"> 空気量3.5%の施工性に与える影響は特にならない。 内割りは普通と比べて強度発現が遅く、材齢56日程度で普通の28日強度に追いついている。

(3) 砂防ダム (出典：フライアッシュ利用促進検討委員会 (長崎県) 資料、平成 22 年 3 月)

表-4.7 工事概要

施工場所	北松浦郡江迎町
適用構造物	砂防ダム
設計配合	18-5-40BB
適用配合	18-5-40-BB-FA(20) 内割り
FA利用メリット	・内割り 水和熱低減(温度ひび割れ低減)
打設方法	バケット
その他	空気量 $3.5 \pm 1.5\%$ 管理



写真-4.3 打設状況

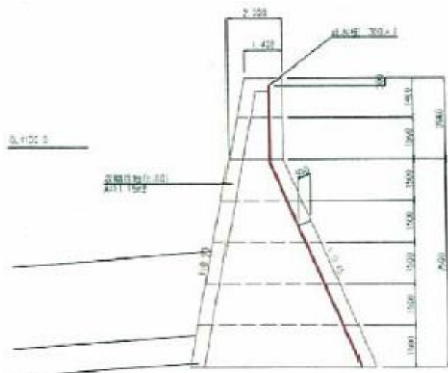


図-4.10 縦断面図

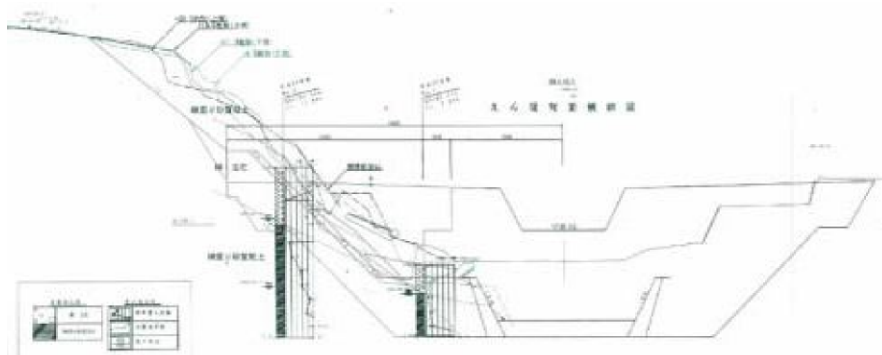


図-4.11 えん堤背面横断面図

表-4.8 使用材料及び配合

使用材料			
使用材料	種類	密度	その他
セメント	高炉セメントB種	3.04	高炉スラグ 混入率40~45%
フライアッシュ	JIS II種	2.31	比表面積=4,220cm ² /g、強熱減量=1.7%
細骨材	海砂	2.59	粗粒率=2.62
粗骨材	2005砕石	2.82	実積率=58.0% ※アルカリシリカ反応性：A区分（無害）
	4020砕石	2.76	実積率=60.0% ※アルカリシリカ反応性：A区分（無害）
AE減水剤	標準型I種	-	-
水	地下水および上澄水	1.00	-

※骨材の密度は表乾密度を示す。

コンクリート配合

■配合条件■

配合名	記号	呼び強度 (N/mm ²)	使用材料		配合条件					
			セメントの種類	FAの種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水結合材比 (%)	FAの添加率	細骨材率 (%)
内割り配合	18-5-40BB-FA(20)	18	高炉セメントB種	JIS II種	5±1.5	3.5±1.5	40	64.1	セメント置換20%	41.8

■スランプ 5cm■

配合名	コンクリートの配合 (kg/m ³)									
	水	結合材			細骨材		粗骨材	AE減水剤	AE剤(g/m ³)	
		セメント	FA	計	細骨材	計			一般用	FA用
内割り配合	149	186	47	233	795	795	1,198	0.594	0 (0A)	-

表-4.9 評価

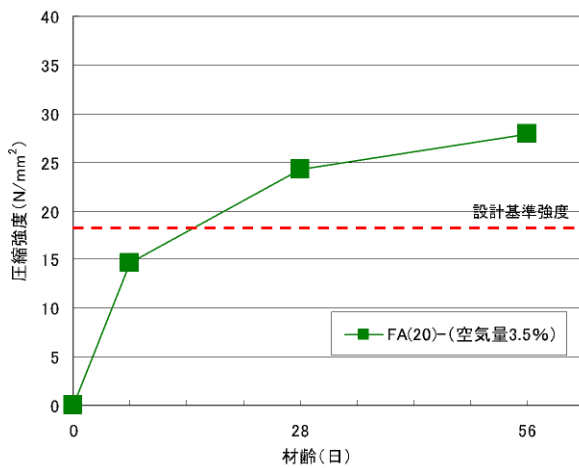


図-4.12 材齢と圧縮強度の関係

施工者コメント
<ul style="list-style-type: none"> ・普通コンクリートと変わらない。 ・コンクリートに直接乗って作業ができる。 ・脱枠が1日延長(2日→3日)。
生産者コメント
<ul style="list-style-type: none"> ・変わらない。 ・内割りは扱い易い。 ・もっと単位水量、単位セメント量を減らせるのではないかと推察できる。

委員会(意見)
<ul style="list-style-type: none"> ・今回の配合は、基本配合(FA0)に対してセメント量の20%を置換している。砂防ダムなどのマスコンクリートの温度ひび割れ対策に効果があるものと推察できる。 ・型枠脱型が1日延長しているが、この工事は冬場打設とのことで、特に内割り配合は強度発現が遅かった可能性がある。強度と養生日数等のデータを集めることが今後重要になる。 ・空気量3.5%に関しても特に問題ないようであり、砂防ダムなどは特に単位容積質量が重要になってくる構造物でも有り、設定空気量低減で他に容積質量も大きくなり、有効に作用するものと考えられる。

(4) 海岸ブロック

表-4.10 工事概要

施工場所	島原市洗切町
設計配合	18-8-40BB
使用配合	21-8-40BB 21-8-40BB-FA10% 内割り配合(標準型)
FAメリット	遮塩性向上(期待) 水和熱低減(期待) 施工性向上
打設方法	バケット
その他	寒中期施工(外気温7℃)



3 対象構造物

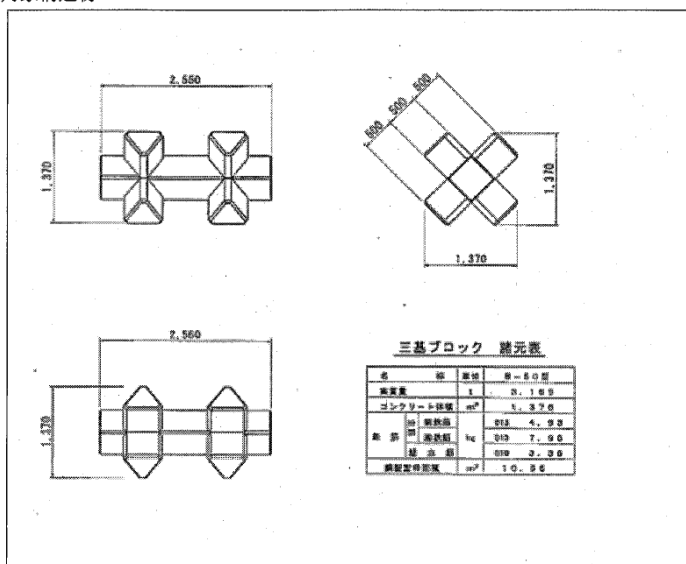


表-4.8 構造物図面



写真-4.4 打設状況



写真-4.5 完成写真

表-4.11 配合表

配合	水結合材比 (%)	フライッシュ置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
				水 W	セメント C	フライッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE助剤
FA※1	55.5	10	38.2	135	219	24	728	1228	0.595	0.01
BB※2	58.5	-	38.2	141	241	0	725	1226	0.603	0.006

※1: 内割り配合(標準型)

※2: 従来配合(21-8-40BB)

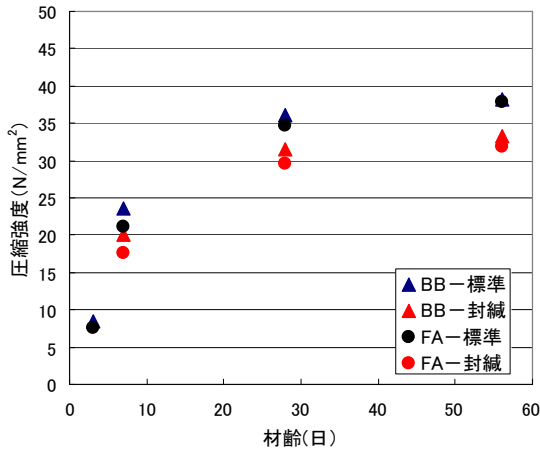


図-4.6 材齢と圧縮強度の関係

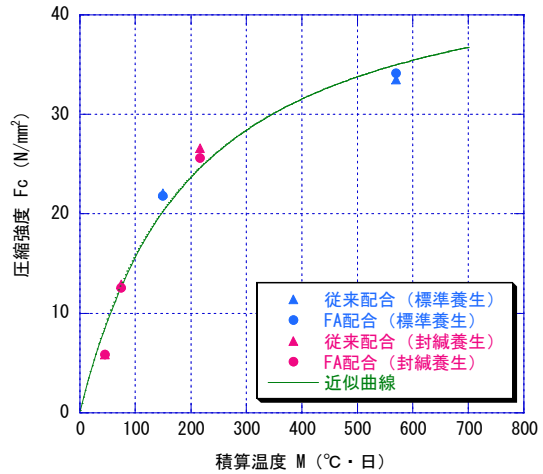


図-4.7 積算温度と圧縮強度の関係

型枠脱型日数の設定に伴う積算温度

$$M = \sum_{Z=1}^n (\theta_Z + 10) \times Z \quad (1)$$

$$F'_c = aM / (M + b) \quad (2)$$

ここに、M: 積算温度 (°C・日)、Z: 材齢 (日)、 θ_Z : 材齢 Z におけるコンクリートの温度 (°C)、 F'_c : 圧縮強度 (N/mm²)、

a、b: 各配合に対して決定される係数

表-4.12 評価

施工者コメント
<ul style="list-style-type: none"> ・従来品と変わらない ・多少固めが良い (材料分離しやすくやりやすい)
生産者コメント
<ul style="list-style-type: none"> ・従来品と変わらない ・普及させるなら内割り配合(標準型)が良いのではないか。

5. 経済性

長崎県フライアッシュ利用指針（案）作成検討会（平成 23 年度）にて、分析したフライアッシュコンクリートの経済性の検討結果について、以下に示す。

(1) 検討配合

既往の配合試験結果等から、高炉セメント B 種を対象とした従来配合①に、フライアッシュ（以下 FA）を置換した配合（②、③）、及び特殊配合として低熱セメントを用いた配合④の配合設計のシミュレーション結果を表-5.1 に示す。

表-5.1 経済検討に用いる配合

単位：kg/m³

番号	配合種類	C	FA	W	S	G	AD	AE
①	従来配合 (18-8-40BB)	247	0	149	792	1102	0.62	0.01
②	標準型	227	25	146	771	1118	0.63	0.015
③	低熱型	192	48	144	774	1123	0.60	0.2
④	特殊配合 (低熱セメント利用)	247	0	144	774	1123	0.56	0.01

※ B=C+FA

- ①：従来配合（普通コンクリート）
- ②：FA 置換率 10%、強度発現を従来配合と同等にした配合（管理材齢 28 日）
- ③：FA 置換率 20%、管理材齢 56 日にした配合
- ④：低熱セメント、管理材齢 56 日にした配合（AE 減水剤調整）

(2) 材料費比較

コンクリート配合別の材料費について建設物価等を基に算出した結果を表-5.2 に示す。

表-5.2 コンクリート配合別材料費の比較

単位：円/m³

番号	配合種類	合計							
		C	FA	W	S	G	AD	AE	
①	従来配合 (18-8-40BB)	6,458	2,297	0	0	1,901	2,094	161	5
②	標準型	6,417	2,111	160	0	1,850	2,124	164	8
③	低熱型	6,333	1,786	307	0	1,858	2,134	156	92
④	特殊配合 (低熱セメント利用)	8,268	4,125	0	0	1,858	2,134	146	5

(円/kg)	
高炉セメントB種	9.3
低熱セメント	16.7
フライアッシュ	6.4
細骨材	2.4
粗骨材	1.9
AE減水剤	260
AE剤	標準用 460
	FA用 510

建設物価参照、低熱セメント、AE剤(FA用)はメーカーおよび生コン関係者聞き取り

(3)分析結果

フライアッシュコンクリートの経済性に関する分析結果の知見を以下に整理する。

- ・標準型は、従来配合と同程度以下となる。
- ・低熱型は、従来配合と比べて材料費は低下するものの、管理材齢が増えるため、総合的には単価として増加することが予想される。
- ・低熱セメントを用いた特殊配合は、一般に 56 日で管理されるため、低熱型と基本的には管理が同じである。このため、温度ひび割れ対策として、低熱型を用いる場合は、特殊配合に比べてコスト低減が図れる。

6. 環境負荷低減 (CO₂削減効果)

長崎県がこれまでに実施した「フライアッシュ利用促進検討委員会」や「長崎県におけるフライアッシュコンクリート指針作成検討会」において、実施工などで得られたコンクリート配合結果を基に、CO₂排出量が算出された結果を表-6.1、図-6.1に示す。

表-は、内割り配合(標準型)の結果であり、セメントに従来の高炉セメントB種を用いた普通コンクリートに比べて、約9%のCO₂排出量の削減効果が認められる。同様に図-は、内割り配合(低熱型)の結果であり、約20%のCO₂排出量の削減効果が認められる。内割り配合は、使用方法に関らずCO₂の排出削減効果が認められる。

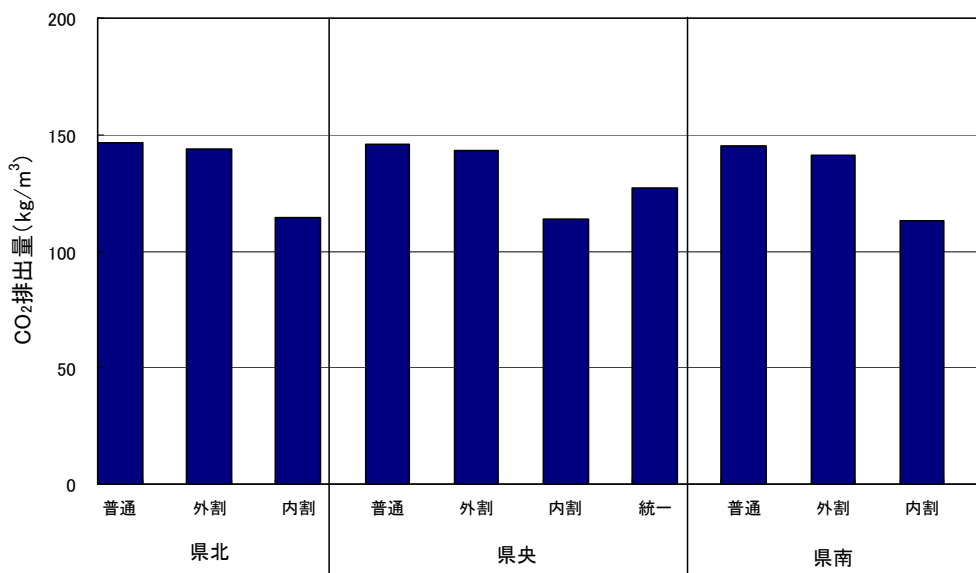
なお、算定に用いられたCO₂排出原単位は、「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」(土木学会、コンクリートライブラリー125, 2005)が用いられている。

表-6.1 表県南地区で使用された消波ブロック工事のコンクリート配合

配合種類	W/B (%)	単体量 (kg/m ³)							CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	材料費試算 (円/m ³)
		C	FA	W	S	G	AE	AD		
FAB配合	55.5	219	24	135	728	1228	1.95	0.010	109.97	6,398
従来配合	58.5	241	—	141	725	1226	1.93	0.006	120.22	6,447

FAB配合：内割り配合(標準型)置換率10%、従来配合：普通配合(標準品)

(出典：長崎県におけるフライアッシュコンクリート指針作成検討会資料、平成24年3月)



普通：普通配合、内割：低熱型置換率20%配合 外割：外割り10%配合 統一：内割り5%、外割り10%

(出典：フライアッシュ利用促進検討委員会(長崎県)資料、平成22年3月)

図-6.1 県内各地で実施された実機試験時のCO₂排出量の比較図