

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

参考資料
(第2回改訂版)

令和 6年 3月

沖縄県土木建築部

改訂履歴（参考資料）

改訂年月日	改訂箇所・追加資料	改訂理由等
2017年12月	初版発行	—
2019年3月 (第1回改訂)	参資-41	LCCについて追記
2023年10月	参資-1 参資-4~22 参資-24 参資-25~26 参資-28~29 参資-32~33 参資-33~36 参資-38~39 参資-41~42 参資-42~43 参資-44~46 参資-49 参資-50~52 参資-53~55 参資-58~60 参資-61~62 参資-62~64 参資-65 参資-77~78 参資-79~80 参資-81 参資-90 参資-100~101 参資-102~103	1. 一部追記 2.3 データを新しくし、文章も書き換え 3.1.1(2) HrFAを用いた内・外FACの流動性について追記 3.1.2(2) HrFAを用いた外割りFACの流動性について追記 3.2.2 HrFAの水和熱抑制効果について追記 3.4.2 HrFAの力学的特性について追記 3.4.3 辺土名暴露試験についてデータを新しくし、文章を書き換え 3.5.2 HrFAのASR抑制効果について追記 3.6.1 伊良部大橋暴露試験についてJPFE遮塩効果データを新しくし、文章を書き換え 3.6.2 電気泳動試験によるHrFAの遮塩効果について追記 3.6.3 辺土名暴露試験についてデータを新しくし、文章を書き換え 3.7.2 JPFACの中性化暴露試験について追記 3.7.3 HrFACの中性化促進試験について追記 4. JPFAの出荷量についてデータを新しくし、文章を書き換え 6.1 施工費用の上昇についてデータを新しくし、文章を書き換え 6.2 補修費用の検討についてデータを新しくし、文章を書き換え 6.3 LCCについてデータを新しくし、文章を書き換え 7. 一部追記 7.1.4 21-12-40内割り+外割りフライアッシュコンクリート(FAC)の配合設計例を追記 7.1.5 30-18-20内割り+外割りフライアッシュコンクリート(FAC)の配合設計例を追記 7.2 内割り配合タイプの特性について追記 7.3 外割り配合タイプの特性について追記 7.3.4 36-12-20外割りフライアッシュコンクリート(FAC)の配合設計例を追記 7.3.5 45-18-20外割りフライアッシュコンクリート(FAC)の配合設計例を追記

	<p>参資-104~105</p> <p>参資-106~107</p> <p>参資-109</p> <p>参資-120~125</p> <p>参資-126~132</p> <p>参資-133~138</p> <p>参資-139~143</p> <p>参資-144~147</p> <p>参資-148~152</p> <p>参資-153~159</p> <p>参資-160~163</p> <p>参資-164~186</p> <p>参資-187~194</p>	<p>7.3.6 50-20-20 外割りフライアッシュコンクリート (FAC) の配合設計例を追記</p> <p>7.3.7 50-60-20 外割りフライアッシュコンクリート (FAC) の配合設計例を追記</p> <p>8. 施工事例 一部追記</p> <p>【施工事例 4】 文章・表の書き換え一部追記および写真・図の一部追加</p> <p>【施工事例 5】 文章・表の書き換え一部追記および写真・図の一部追加</p> <p>【施工事例 6】 写真・図の一部追加</p> <p>【施工事例 7】 文章・表の書き換え一部追記および写真・図の一部追加</p> <p>【施工事例 8】 文章の書き換え</p> <p>【施工事例 9】 新たに追加</p> <p>【施工事例 10】 新たに追加</p> <p>【施工事例 11】 新たに追加</p> <p>9. FAC 製造工場および建設会社へのヒアリング結果更新</p> <p>10. コンクリートの打ち込み・締固めテクニック 追加</p>
--	---	---

目 次

1.	はじめに	参資- 1
2.	フライアッシュ (FA) の性質	参資- 3
2. 1	物理的性質	参資- 3
2. 2	化学的性質	参資- 3
2. 3	沖縄県内で産出するフライアッシュの成分成績	参資- 4
3.	フライアッシュコンクリート (FAC) の特性	参資- 23
3. 1	流動性の改善	参資- 23
3. 2	水和熱の抑制	参資- 27
3. 3	乾燥収縮及び自己収縮の低減	参資- 30
3. 4	力学的特性 (長期強度の増進)	参資- 32
3. 5	アルカリシリカ反応 (ASR) の抑制	参資- 37
3. 6	遮塩性の向上	参資- 41
3. 7	中性化に対する抵抗性	参資- 47
4.	フライアッシュ (FA) の供給能力	参資- 53
5.	環境負荷低減効果 (CO ₂ 削減効果)	参資- 56
6.	経済性	参資- 58
6. 1	施工費用の上昇について	参資- 58
6. 2	補修費用の検討	参資- 61
6. 3	ライフサイクルコスト (LCC)	参資- 62
7.	配合設計例	参資- 65
7. 1	内割り+外割り配合タイプ	参資- 66
7. 2	内割り配合タイプ	参資- 81
7. 3	外割り配合タイプ	参資- 90
8.	施工事例	参資- 108
9.	コンクリート製造工場および施工会社へのヒアリング結果	参資-158
9. 1	ヒアリングの概要	参資-158
9. 2	ヒアリング結果	参資-159
9. 3	ヒアリングで得られた主な情報および意見	参資-180
10.	コンクリート打ち込み・締固めのテクニック	参資-181
	【参考文献】	参資-190

1. はじめに

沖縄県土木建築部では、2014年1月に「フライアッシュコンクリートの利用促進について」と題した事務連絡（次頁）が発出されている。ここでは、沖縄県の高湿多湿の島嶼環境は、構造物に対し過酷であり、塩害やアルカリシリカ反応対策としてFACを用いることは、ライフサイクルコスト（LCC）の観点から考えても重要であるとされている。そのため、重要構造物のコンクリートの耐久性を確保するためにFACの利用促進を促すよう関連部署に出されたものである。

この事務連絡を更に推し進めるために「沖縄県におけるフライアッシュコンクリート（FAC）の配合及び施工指針」は作成されており、本参考資料は、同指針の本文を補うための資料集である。

本参考資料は、**第2章**においてフライアッシュ（FA）の一般的な性質を述べ、**第3章**では、伊良部大橋建設時の各種検討結果からFACの物理的性質および耐久性向上効果を示している。また、FACの弱点と言われた中性化抵抗性については、一般財団法人沖縄県建設技術センターの研究結果から、内陸部におけるFACの利用可能性を述べた。**第4章**では、県内のFAメーカーから収集したFAの供給能力や使用実績などを示し、**第5章**では既存資料からセメントを一部FAに置き換えることによるCO₂排出量削減効果について述べた。**第6章**では、南部東道路建設計画時に検討した施工費の算定結果とFACを使用しなかった場合の耐久性劣化補修工事費との経済比較を示している。**第7章、第8章、第9章**では県内のFACの施工工事に用いた実配合の例と施工事例、それらに携わったコンクリート製造工場と施工会社に対するヒアリング結果を示している。

今回の第2回改定では、本文に新たに加えられた加熱改質フライアッシュ（HrFA）に関する各種品質試験結果や耐久性試験結果などを示し、第1回改訂後に実施されたFACによる施工事例を加えている。

これらの参考資料は、本指針の本文を補うだけでなく、今後FACを製造・施工しようとする方々に対し、少しでも役に立つ資料となる事を望むものである。

なお、本指針本文および参考資料で用いた各種書籍や論文等を巻末【**参考文献**】に示している。必要に応じてこれらの参照を願いたい。

事務連絡
平成26年1月14日

土木建築部
各土木事務所長 殿
都市・農村建設現場事務所副参事 殿

土木建築部
道路街路課長
道路管理課長

フライアッシュコンクリートの利用促進について

沖縄県は高温多湿で塩害など構造物の劣化に厳しい環境にあり、従来より道路構造物の耐久性が懸念されていることは共に認識しているところであります。

沖縄県のコンクリート構造物の劣化損傷は、塩害のほか、海砂に含まれる反応性鉱物による遅延膨張性のアルカリ骨材反応（ASR）や石灰岩に混入した安山岩によるASRの発生も確認されていることから、伊良部大橋や本部大橋などの重要な構造物においては、予防的措置として、これらの劣化抑制に有効であるフライアッシュコンクリートを使用し、耐久性向上を図っているところであります。

別添資料に示すとおり、高い耐久性向上効果と、品質や施工性も良好で問題ないことが確認されていることから、今後の重要な道路構造物の建設にあたっては、同コンクリートをライフサイクルコスト（LCC）の検討に加えるなど、積極的な利用に取り組まれるよう提案いたします。

2. フライアッシュ（FA）の性質

2. 1 物理的性質

フライアッシュ（FA）は微細粒子であり、これを電子顕微鏡で見ると**写真2.1.1**に示すような球形をしている。

このため、FA を混和材として用いると、コンクリートやモルタルの施工時の流動性が增大する事がわかっている。

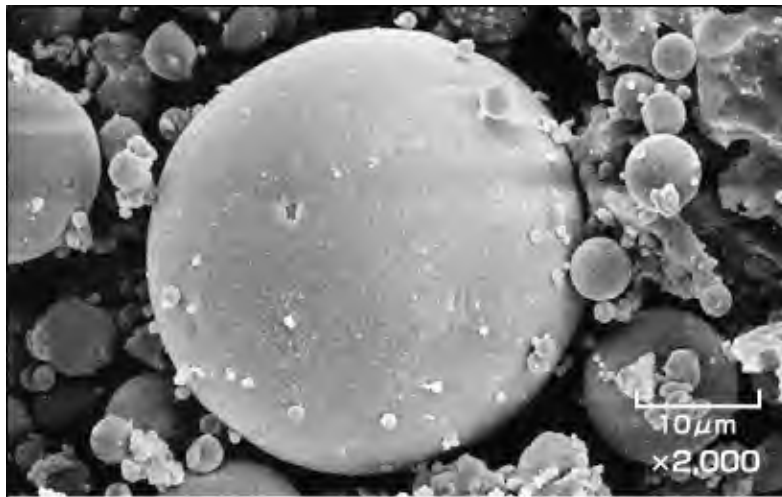


写真 2.1.1 フライアッシュ電子顕微鏡写真（2,000 倍）

出典：日本フライアッシュ協会 HP (<http://www.japan-flyash.com/index.html>)（参考文献 23）

2. 2 化学的性質

フライアッシュ（FA）の主成分は、シリカ（ SiO_2 ）とアルミナ（ Al_2O_3 ）であり、セメントと混合するとセメントの水和の際に生成される水酸化カルシウム [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] と徐々に反応して、カルシウムシリケート水和生成物等を生成する。これをポゾラン反応と呼び、生成された水和物は、セメントの水和生成物と類似した化合物なる。

このカルシウムシリケート水和生成物は、セメント結晶粒界を徐々に埋めていくため、長期の強度増進や水密性が向上し、結果的にコンクリートの耐久性が向上するものである。こうした一連の反応は、**図 2.2.1** のように表される（日本フライアッシュ協会 HP）。

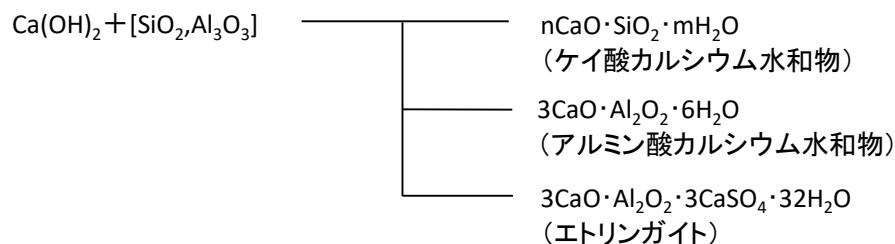


図 2.2.1 ポゾラン反応の化学式

2. 3 沖縄県内で産出するフライアッシュ（FA）の成分成績

沖縄県内で産出するフライアッシュ（FA）は、電源開発株式会社石川火力発電所から出る分級 JIS II 種灰（JPFA）と、株式会社リュウクスが沖縄電力株式会社の非 JIS 灰を再燃焼して JIS II 種灰に加熱改質したフライアッシュ（HrFA）の 2 種類がある。これら 2 種の FA について、FAC 指針の初版以降に出荷された FA の成績証明書のデータを追加して整理し、FA の品質について確認した。整理期間は、以下の通りである。

- ① 電源開発株式会社石川火力発電所の分級フライアッシュ（JPFA）
 - 平成 24 年 4 月～令和 6 年 7 月（12 年 3 ヶ月）

- ② 沖縄電力排出・株式会社リュウクスの改質フライアッシュ（HrFA）
 - 平成 28 年 6 月～令和 2 年 4 月（3 年 10 ヶ月）
※リュウクスは、令和 2 年 5 月以降 HrFA を製造していない。

次頁以降には、2 種類の FA の成績証明書に記された以下の 9 項目について示す。

- (1) 二酸化ケイ素
- (2) 湿分
- (3) 強熱減量
- (4) 密度
- (5) 45 μm ふるい残分
- (6) 比表面積
- (7) フロー値比
- (8) 活性度指数 28 日
- (9) 活性度指数 91 日

(1) 二酸化ケイ素

フライアッシュの化学組成は一般に、二酸化けい素 (SiO_2) と酸化アルミニウム (Al_2O_3) が主成分である。その他は、酸化鉄 (Fe_2O_3)、酸化マグネシウム (MgO)、酸化カルシウム (CaO) 等の酸化物が含まれる。JIS A 6201 では二酸化けい素が 45.0%以上と規定されている。

電源開発 JPFA の二酸化ケイ素含有率は、最大 59.6%、最小 48.1%と HrFA に比べ全般的に低い値であるが、基準値 45.0%は上回っている。JPFA の出現頻度分布を見ると、平均値 53.3%付近からやや大きい値が最も頻度が大きく、標準偏差は 2.37 と低かった。

これに対し、沖縄電力 HrFA の二酸化ケイ素含有率は、最大 74.3%、最小 60.8%であり、全データを通して基準値の 45.0%を上回っている。HrFA の出現頻度分布を見ると、平均値 67.2%付近の頻度が最大であり、標準偏差は 3.10 と JPFA 同様低い値であった。

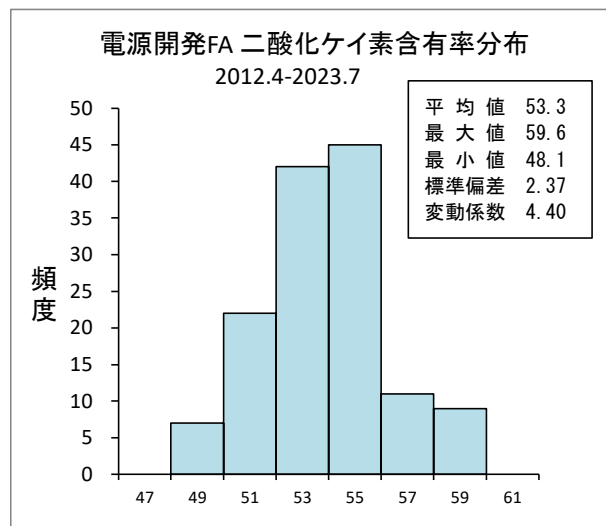
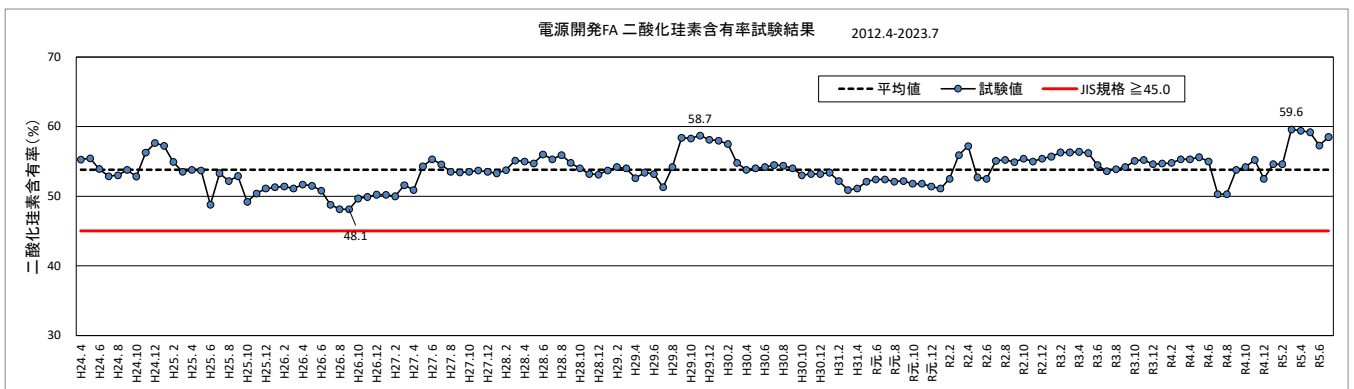


図 2.3.1(1) 電源開発 JPFA 二酸化ケイ素含有率経時変化と出現頻度分布

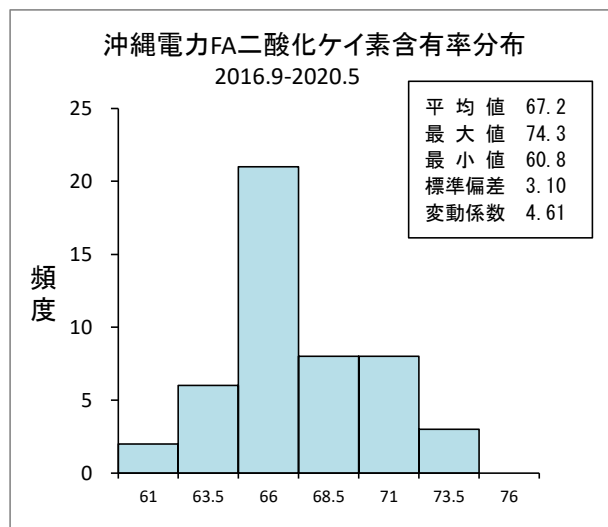
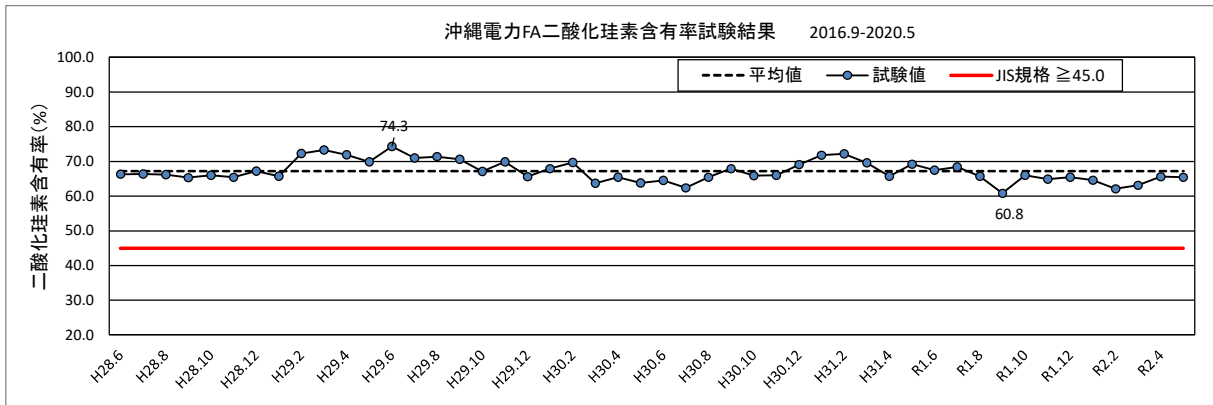


図 2.3.1 (2) 沖縄電力 HrFA 二酸化ケイ素含有率経時変化と出現頻度分布

(2) 湿分

JIS A 6201 では湿分について規定されており、フライアッシュはそれ自身が水分ゼロの乾燥状態であるが、機械的に付着する水分について1.0%以下でなければならないとされている。

JPFA の湿分を見ると、最大でも0.5%、最小は0.0%で、ほぼ全期間を通じて0.4%以下であった。JPFA の出現頻度分布を見ると、平均値0.16%付近が最大頻度であり、標準偏差は0.087と著しく低い値であった。

これに対し、HrFA の湿分は、最大が基準値に近い0.9%、最小0.0%と全期間を通じてJISで定められた規制値を下回っていた。ただし、測定開始から1年間は0.4%以上の高い値であったため品質の安定性を欠いていたが、H29年6月以降は安定した湿分%となっている。この出現頻度分布を見ると、当初安定していなかった期間の値が平均値0.2%をやや大きくし、最大頻度も品質が安定したH26年6月以降の値0.1%辺りとなっていた。なお、標準偏差も0.271とJPFAに比べ大きかった。

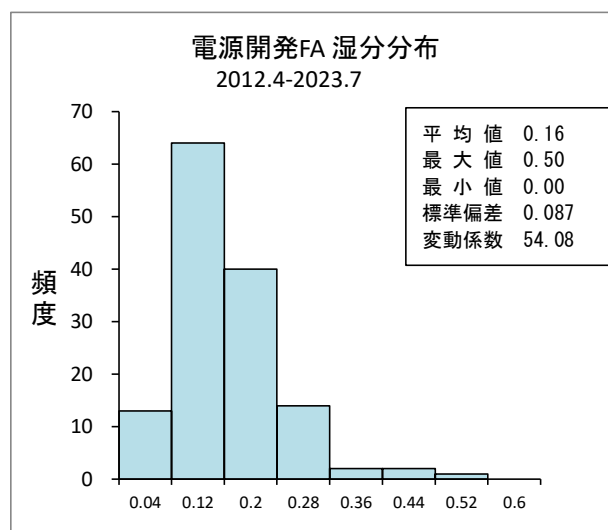
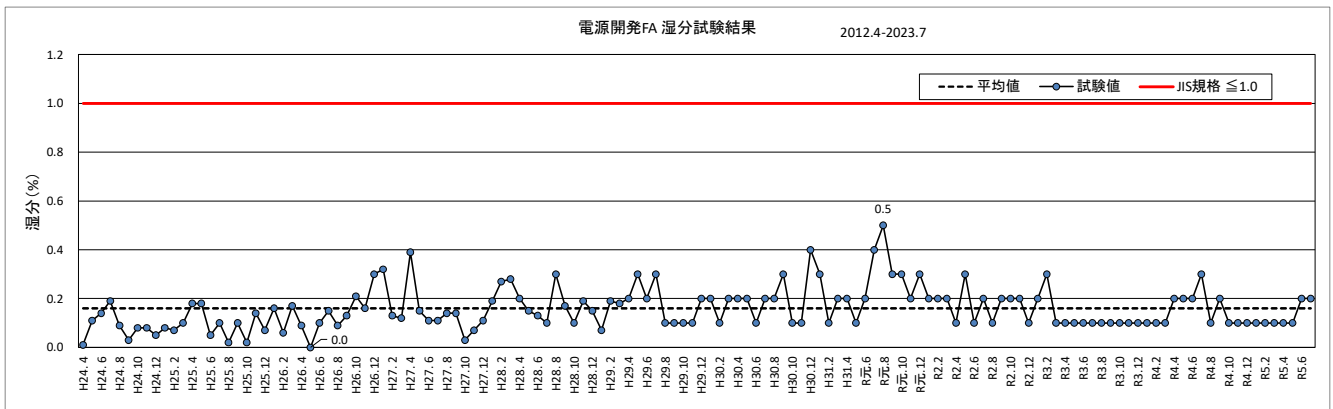


図 2.3.2(1) 電源開発 JPFA 湿分試験結果の時系列変化と出現頻度分布

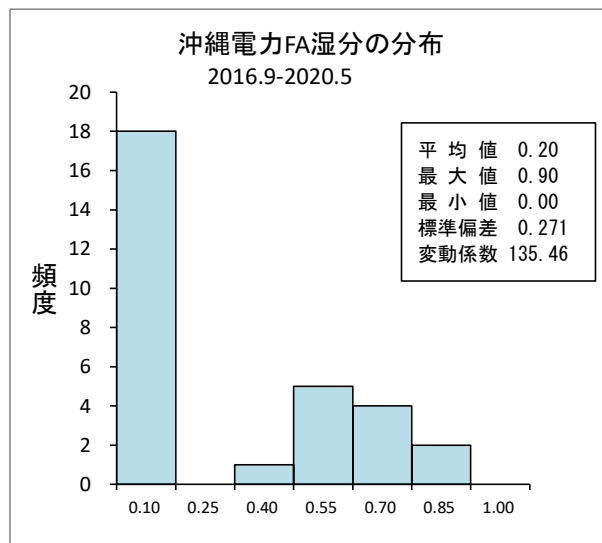
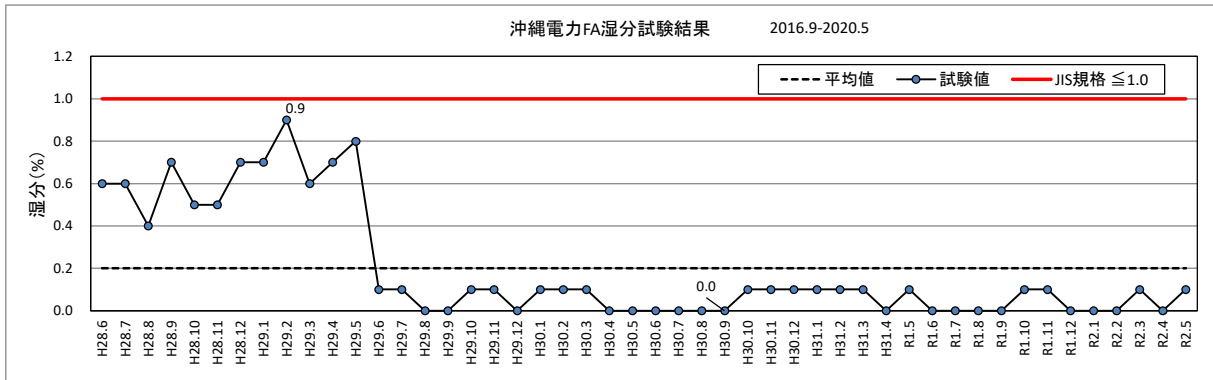


図 2. 3. 2 (2) 沖縄電力 HrFA 湿分試験結果の時系列変化と出現頻度分布

(3) 強熱減量

強熱減量は、フロー値比に影響を与える指標であり、強熱減量が小さく粉末度が高いほどフロー値比が大きくなる傾向にある。JIS A 6201 ではⅡ種灰について 5.0%以下と規定されている。

JPFA の強熱減量は、最大で 3.9%、最小で 0.9%と HrFA に比べ全般的に大きく変動していた。また、JPFA の最小値は HrFA の最大値と同程度で、標準偏差が 0.59 と小さく、平均値 2.63% 辺りの頻度が最も高かった。

HrFA の強熱減量は、最大で 1.0%、最小は 0.1%であり、全期間を通して安定していた。これは、HrFA が再燃焼して製造されているため強熱減量の低く、安定していると考えられる。HrFA の出現頻度分布を見ると、平均値 0.71%程度が最大頻度であり、標準偏差は 0.184 と JPFA より小かった。

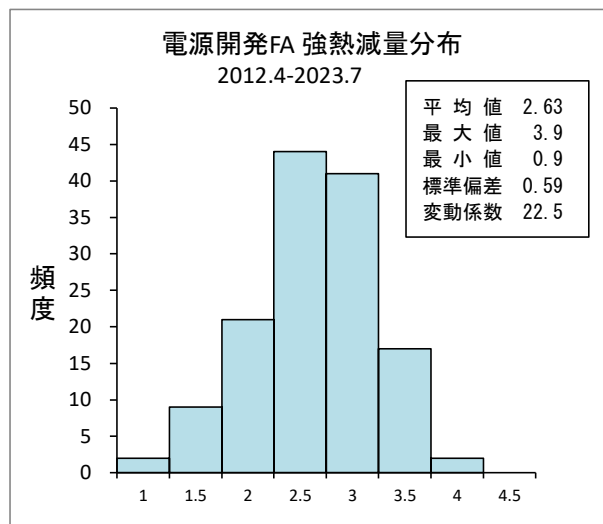


図 2.3.3(1) 電源開発 JPFA 強熱減量試験結果の時系列変化と出現頻度分布

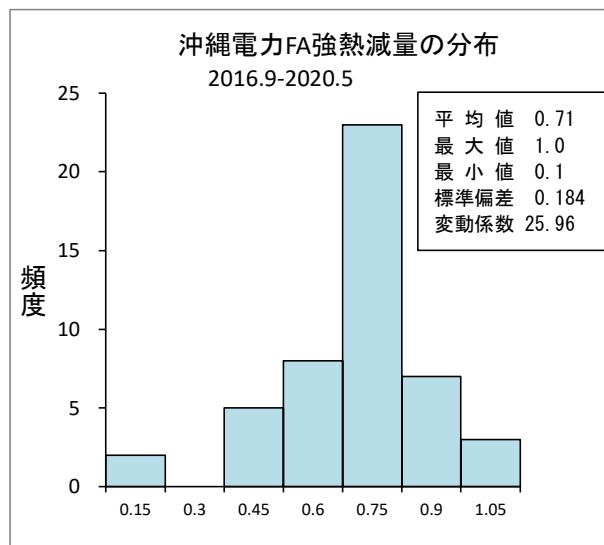
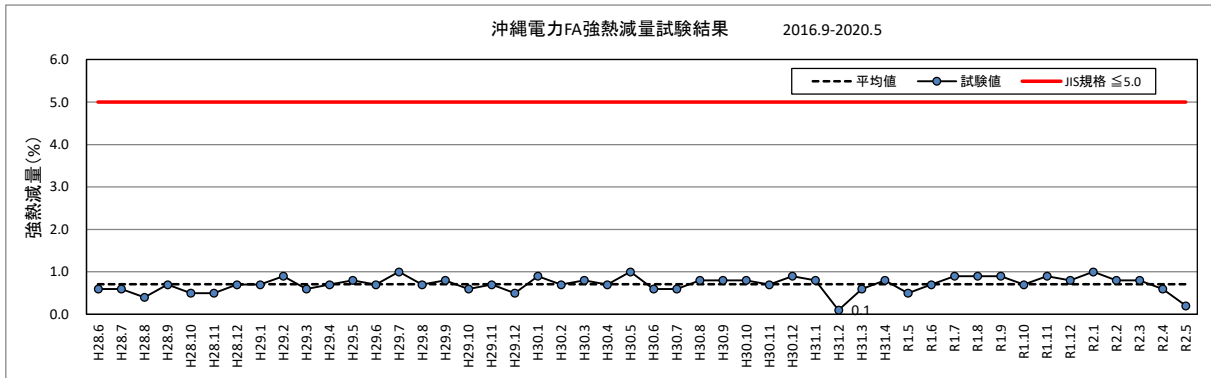


図 2.3.3(2) 沖縄電力 HrFA 強熱減量試験結果の時系列変化と出現頻度分布

(4) 密度

フライアッシュの密度は、JIS A 6201 では 1.95g/cm^3 以上と規定されており、細かい粒子ほど密度が大きくなる傾向がある。

JPFA の密度は、最大で 2.54g/cm^3 、最小で 2.13g/cm^3 と全体的に HrFA に比べ高い値であった。JPFA の頻度分布は、平均値 2.40g/cm^3 より 1 ランク上が最大頻度であったが、標準偏差は 0.08 とほぼ正規分布であった。

加熱改質 HrFA の密度は、最大値は 2.30g/cm^3 、最小値は 2.23g/cm^3 であり、全期間を通してほぼ平均値 2.27g/cm^3 程度であった。これらの出現頻度分布は、平均値よりやや大きい 2.29g/cm^3 が最大頻度であり、標準偏差は 0.015 と小さいが、JPFA に比べ 1 区分にだけデータが集まる偏った分布を示していた。

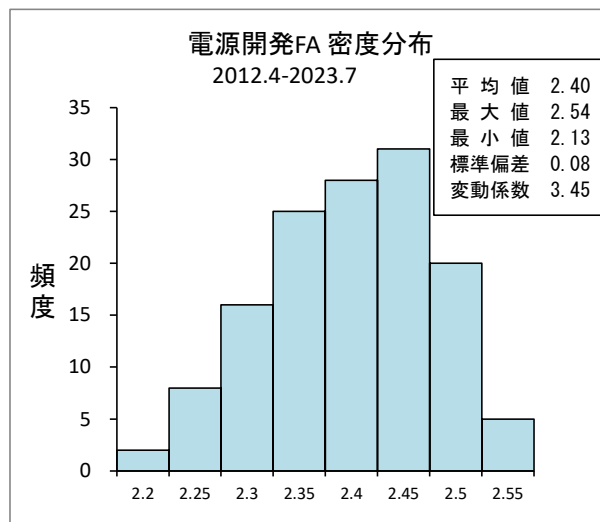


図 2.3.4(1) 電源開発 JPFA 密度試験結果の時系列変化と出現頻度分布

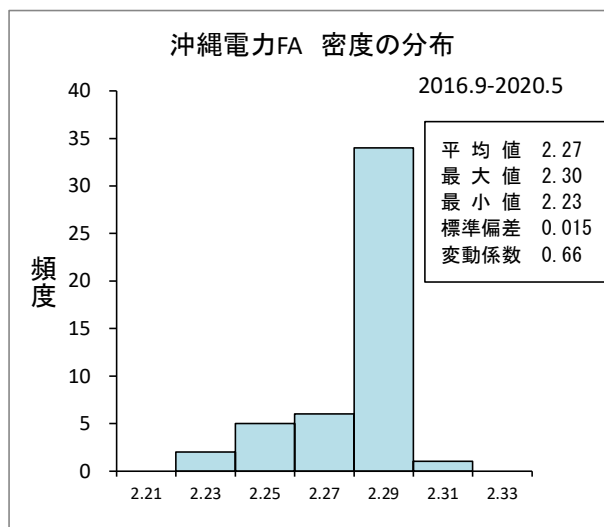
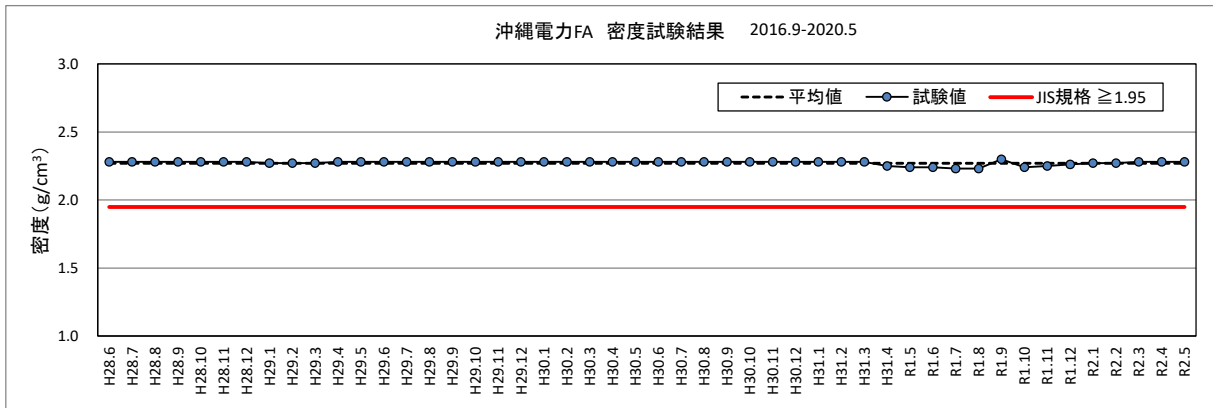


図 2.3.4(2) 沖縄電力 HrFA 密度試験結果の時系列変化と出現頻度分布

(5) 45 μ m ふるい残分

フライアッシュの粉末度は、指標として網ふるい方法で確認する 45 μ m ふるい残分とブレーン方法で確認する比表面積があり、フライアッシュII種では「網ふるい方法」の場合は40%以下と規定されており、「ブレーン方法」の場合は2,500cm²/g以上と規定されている。この45 μ m ふるい残分は、値が小さい方が粉末度は高い（細かい）事を示している。

JPFA の45 μ m ふるい残分は、最大28.0%、最小8.0%、平均では16.0%であり、変動幅が大きかった。JPFA の頻度分布を見ると、平均値よりやや低い11~14%程度が最大頻度であり、標準偏差も4.94と偏った分布を示していた。

HrFA の45 μ m ふるい残分は、基準値の40%に対して小さく、最大で18.0%、最低では2.0%であり、平均は10.92%であった。これらの出現頻度分布を見ると、平均値10.92%辺りの頻度が最大であり、標準偏差は3.09と概ね正規分布であった。

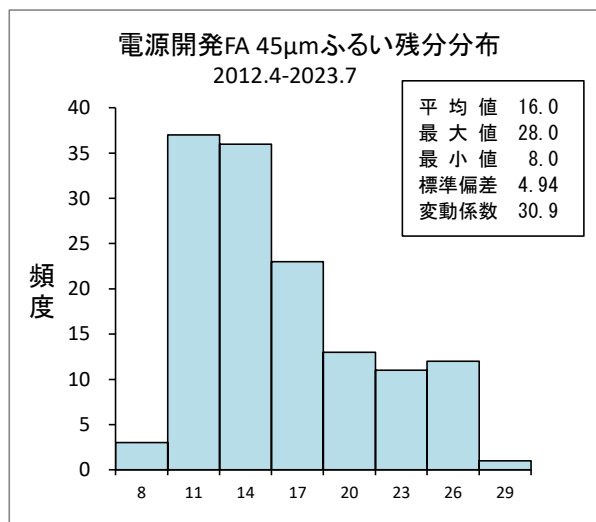
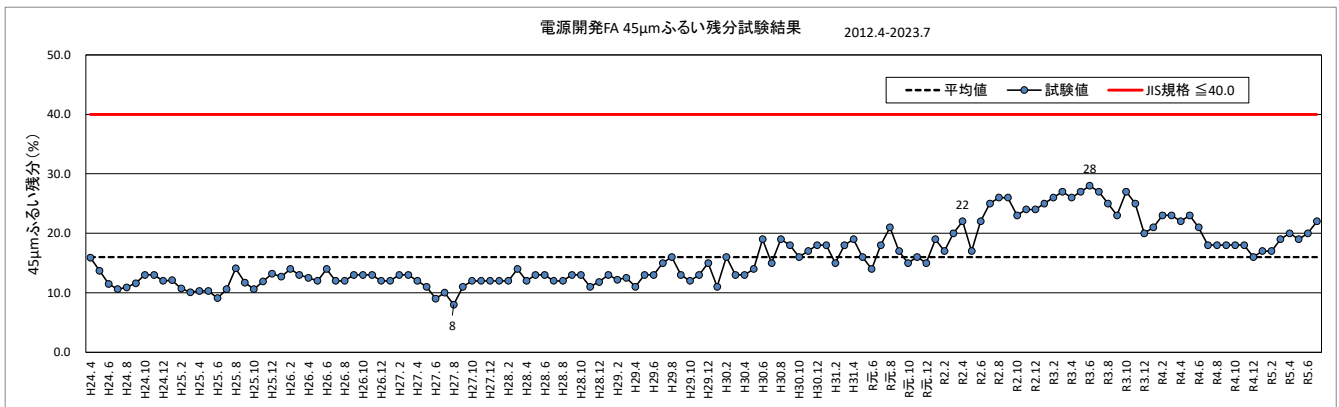


図 2.3.5(1) 電源開発 JPFA 45 μ m ふるい残分試験結果の時系列変化と出現頻度分布

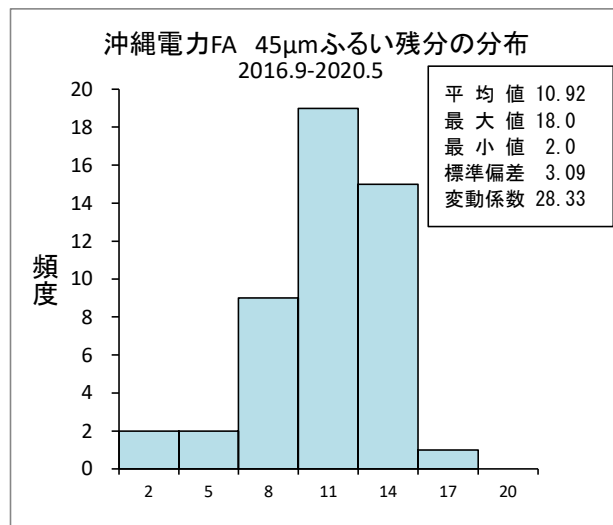
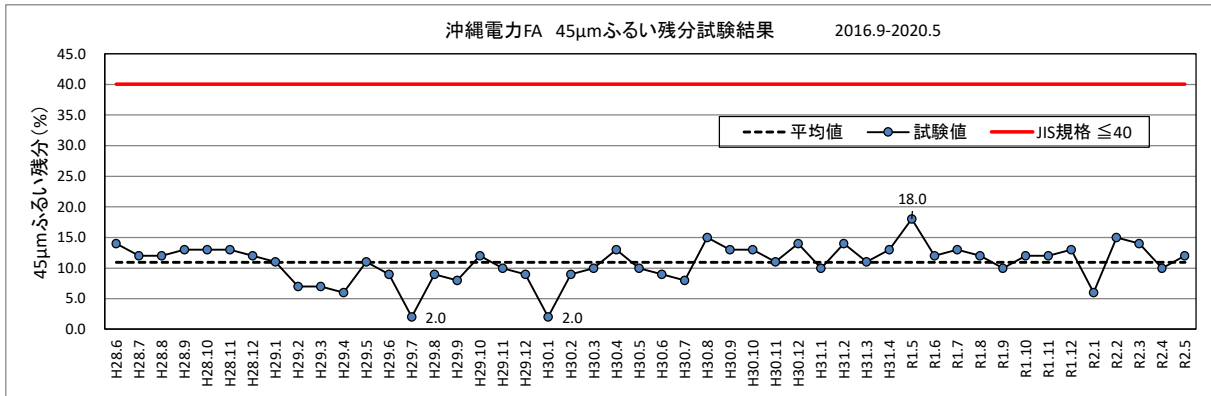


図 2.3.5(2) 沖縄電力 HrFA 45 μ mふるい残分試験結果の時系列変化と出現頻度分布

(6) 比表面積

フライアッシュの粉末度は、指標として網ふるい方法で確認する 45 μ m ふるい残分とブレーン方法で確認する比表面積があり、フライアッシュII種では「網ふるい方法」の場合 40%以下、「ブレーン方法」の場合 2,500cm²/g 以上と規定されており、比表面積は大きい方が粉末度が高い（細かい）事を示している。

JPFA の比表面積の平均は 4250cm²/g、最大で 4830 cm²/g、最小は 3500cm²/g と HrFA よりやや低く、全体の変動幅も狭かった。JPFA の頻度分布は、平均値辺りの 4250 cm²/g 程度が最大頻度であり、標準偏差は 245 と正規分布を示していた。

HrFA の比表面積は、平均で 4575 cm²/g と規制値の 2500cm²/g に対して高く、最大で 5200 cm²/g、最小では 3630cm²/g であった。これらの出現頻度分布を見ると、平均値より 1 ランク上 が最大頻度で標準偏差は 321.9 と偏った分布を示していた。

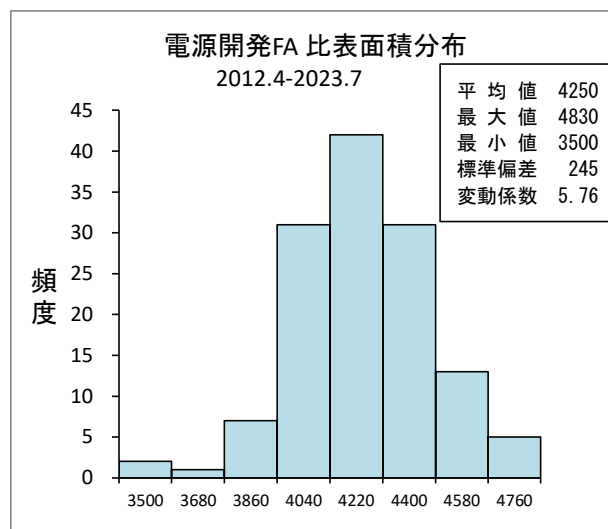
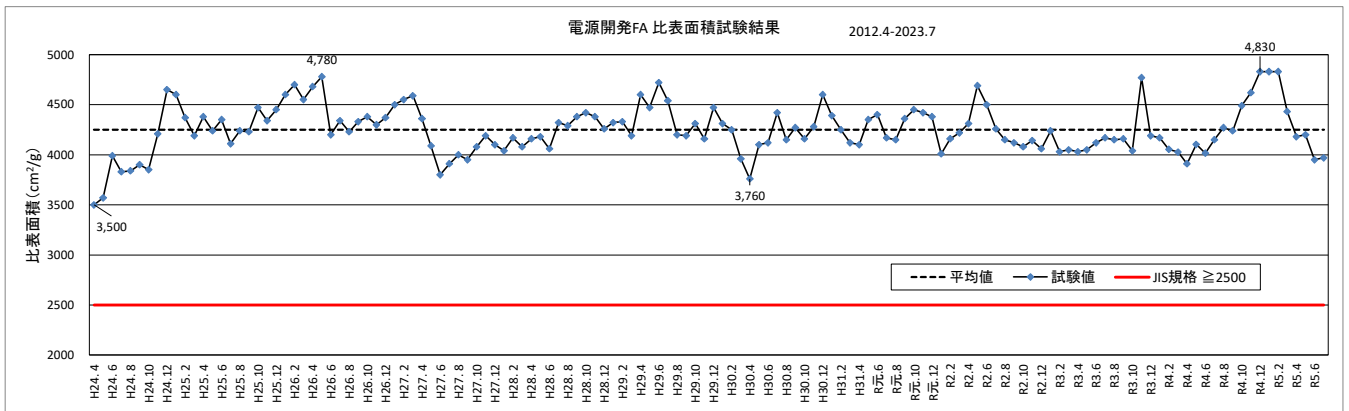


図 2.3.6(1) 電源開発 JPFA 比表面積試験結果の時系列変化と出現頻度分布

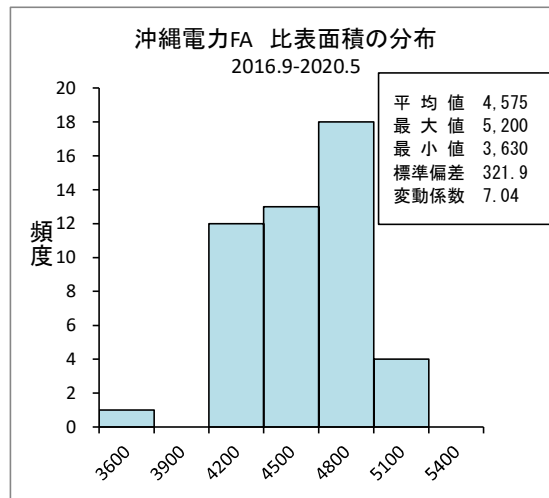
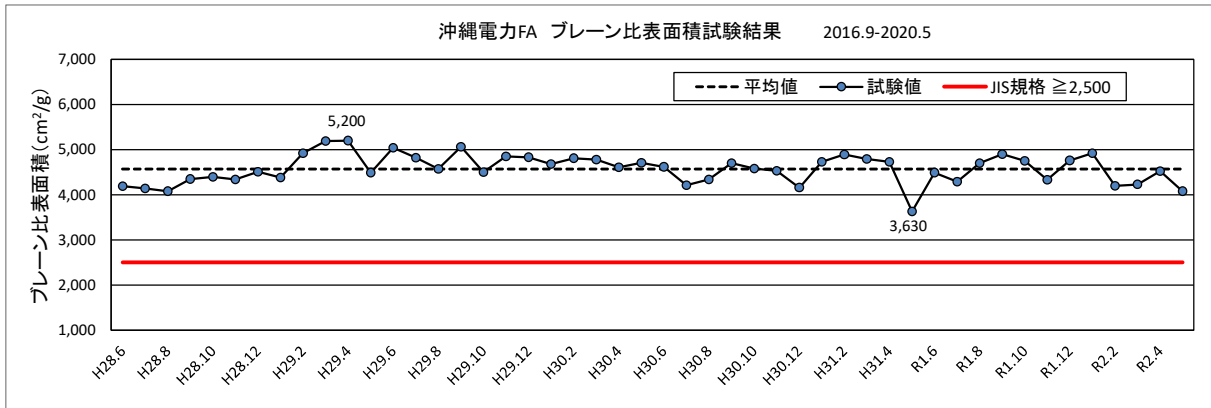


図 2.3.6(2) 沖縄電力 HrFA 比表面積試験結果の時系列変化と出現頻度分布

(7) フロー値比

フロー値比は、フライアッシュの流動性付与効果を示す指標で、基準モルタルのフロー値に対する試験モルタルのフロー値の割合によって得られる。フロー値比は粉末度と強熱減量の影響を強く受けるとされ、強熱減量が小さく粉末度が高いほどフロー値比が大きくなる傾向にあり、JIS A 6201 ではⅡ種灰については95%以上と規定されている。

JPFA のフロー値比は、最大で 114%、最小は 101%であり、平均は 108%であった。JPFA の出現頻度は、平均値付近が最大頻度であり、標準偏差も 3.03 と変動幅が小さい正規分布を示していた。

HrFA のフロー値比は、最大で 109 %、最小は 100% であり、平均は 103% であった。これらの出現頻度分布を見ると、平均値よりやや低い 102%が最大頻度で、標準偏差は 1.99 と全体的にやや低い値に偏っている分布であった。

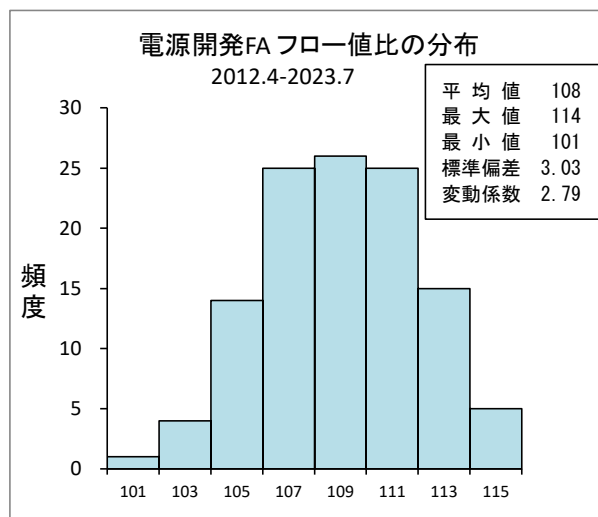
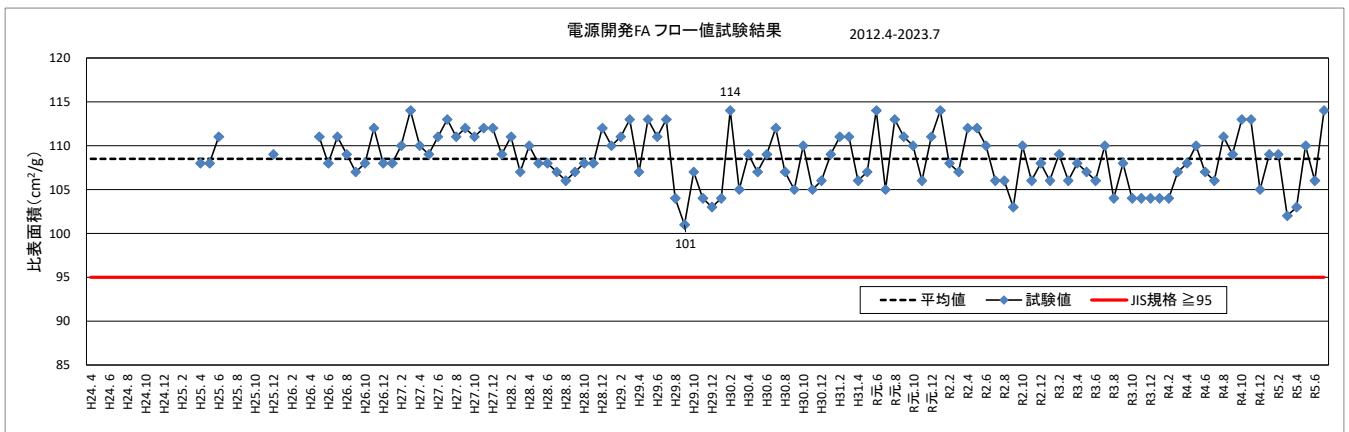


図 2.3.7(1) 電源開発 JPFA フロー値試験結果の時系列変化と出現頻度分布

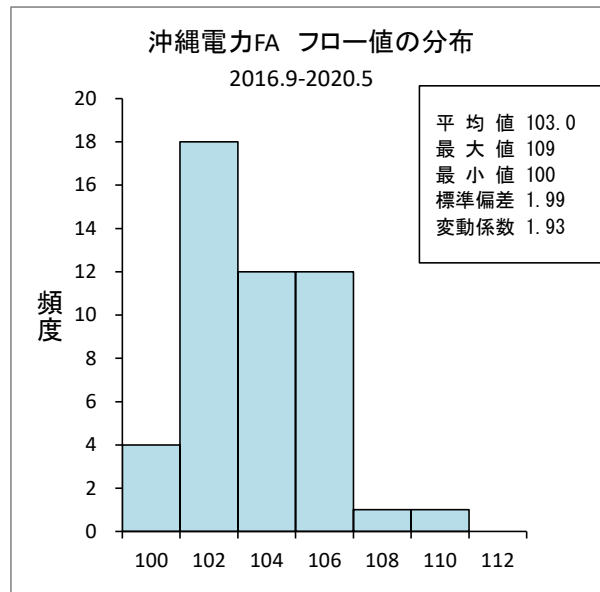
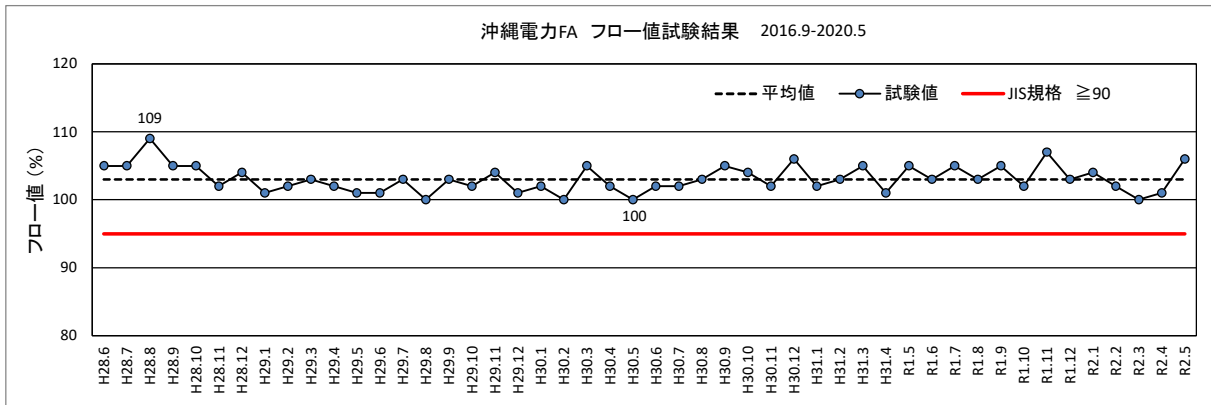


図 2.3.7(2) 沖縄電力 HrFA フロー値試験結果の時系列変化と出現頻度分布

(8) 活性度指数 28 日

活性度指数は、フライアッシュのポズラン反応を評価する指標として JIS A 6201 に規定されており、基準モルタルの圧縮強度に対する試験モルタルの圧縮強度の割合によって得られる。また、活性度指数は粉末度の影響を強く受けるとされ、粉末度が高いほど活性度指数が大きくなる傾向にあり、JIS A 6201 では種類毎に、材齢 28 日、91 日において規定されている。

JPFA の活性度指数 28d は、平均が 86.2% と HrFA より高く、最大は 95% であったが、最小は 80% と規制値であった。出現頻度分布を見ると、平均値辺りが最大頻度であり、標準偏差は 2.74 と正規分布を示していた。

HrFA の活性度指数 28d は、平均 82%、最大は 90% であったが、最小は JPFA と同様 80% と JIS II 種の規制値を示していた。出現頻度分布を見ると、平均値の 82% が最大頻度であり、標準偏差は 1.92 であったが、全体的に低い値に偏った分布を示していた。

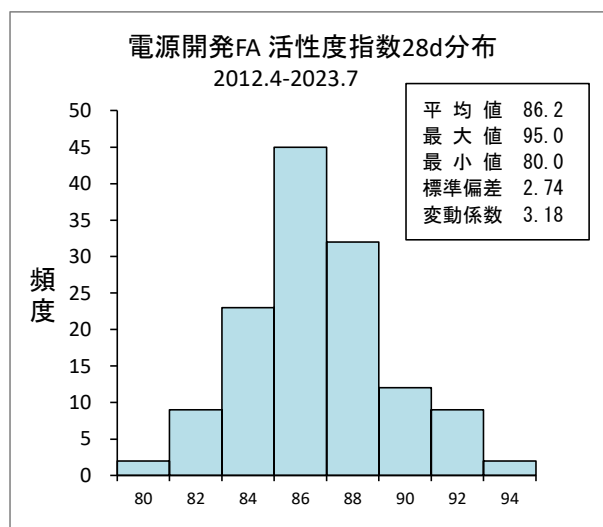
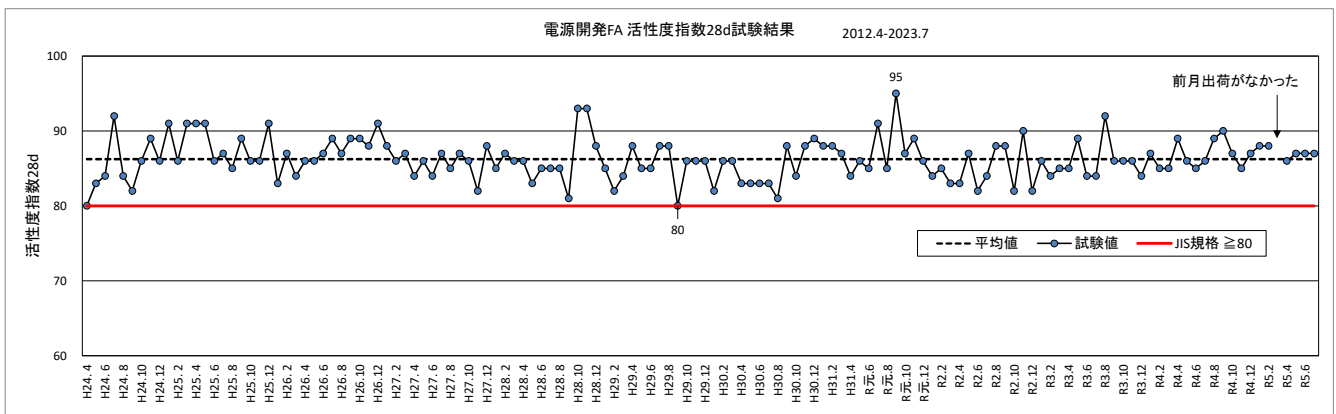


図 2.3.8(1) 電源開発 JPFA 活性度指数 28d の時系列変化と出現頻度分布

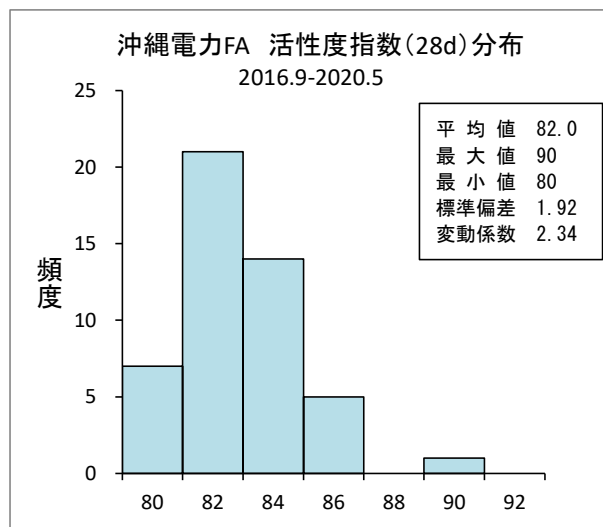
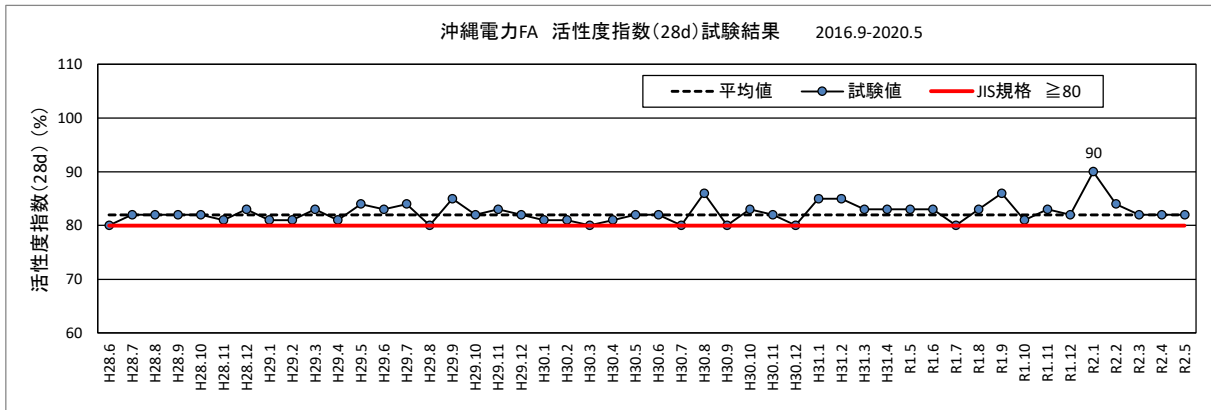


図 2.3.8(2) 沖縄電力 HrFA 活性度指数 28d の時系列変化と出現頻度分布

(9) 活性度指数 91 日

活性度指数 91d も(8)活性度指数 28d に示したとおり、フライアッシュのポズラン反応を評価する指標として JIS A 6201 に規定されている。

JPFA の活性度指数 91d は、平均が 100.2%、最大値で 109%であり、最小値は規制値の 90%であった。JPFA の出現頻度分布は、平均値辺りの程度が最大で、標準偏差も 3.67 とほぼ正規分布を示していた。

HrFA の活性度指数 91d は平均 96%と JPFA より低かったが、最大で 100%、最小値は 92%と規制値の 90%を全て上回る値を示しており、活性度指数 28d に比べると余裕のある値であった。これらの出現頻度分布を見ると、HrFA も平均値辺りが最大頻度で、標準偏差は 2.20 と正規分布を示していた。

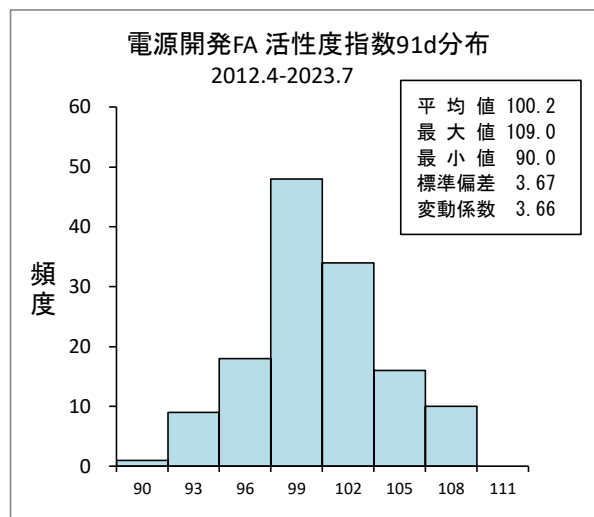
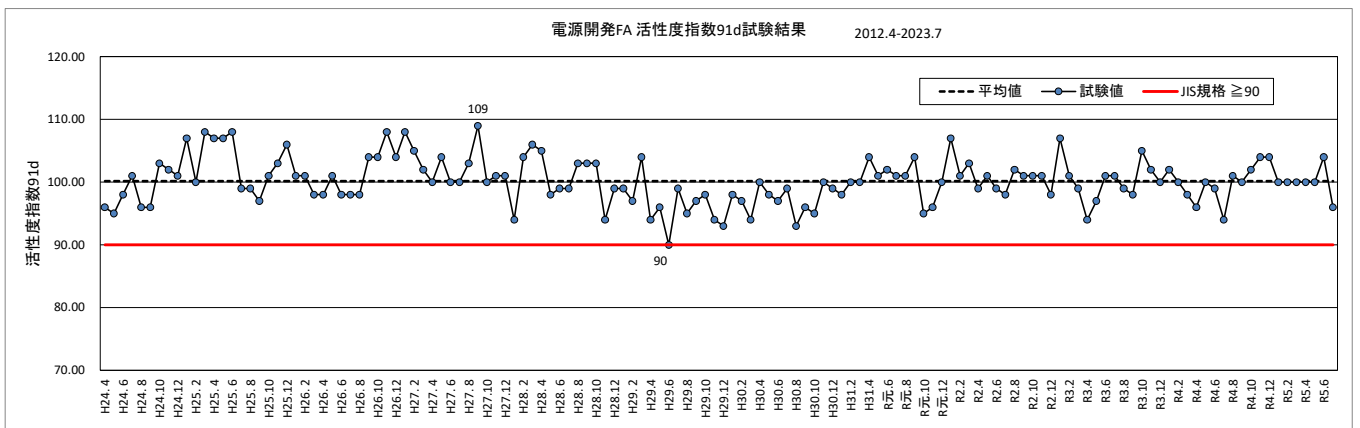


図 2.3.9(1) 電源開発 JPFA 活性度指数 91d の時系列変化と出現頻度分布

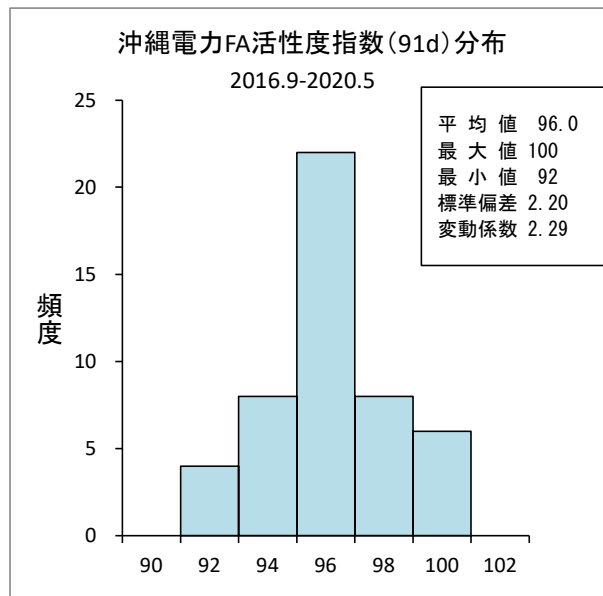
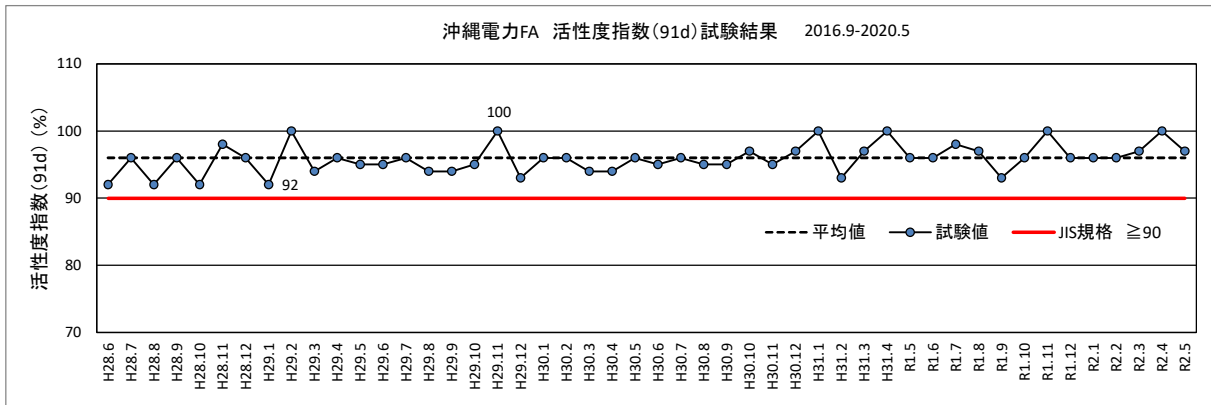


図 2.3.9(2) 沖縄電力 HrFA 活性度指数 91d の時系列変化と出現頻度分布

3. フライアッシュコンクリート（FAC）の特性

以下のフライアッシュコンクリートの特性について述べる。

- 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 遮塩性の向上
- ⑦ 中性化に対する抵抗性

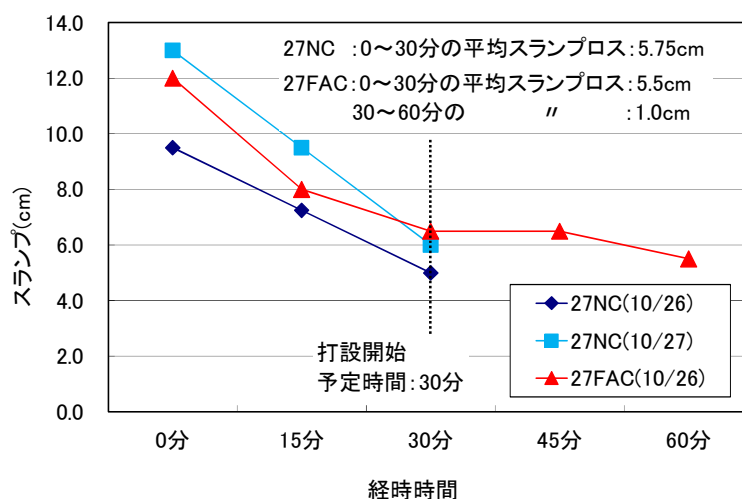
3. 1 流動性の改善

3. 1. 1 内割り+外割り配合タイプ FAC の流動性

(1) JPFA を用いた伊良部大橋下部工 27N/mm²内割り+外割り配合タイプの FAC

図 3.1.1 は、伊良部大橋下部工 27N/mm²FAC の配合試験におけるスランプロスの経時変化データである（目標スランプ 8±2.5 cm）。この FAC は、内割り+外割り配合タイプで、セメント置換の内割り 20%（65 kg/m³）、細骨材置換の外割り 25 kg/m³でフライアッシュ（FA）を配合している。同図において、普通コンクリート（NC）の 45 分と 60 分のスランプが測定されていないのは、45 分で大きくスランプロスし、目標スランプを外れたためである。

NC と FAC の平均スランプロスを比較すると、0～30 分では 5.75cm と 5.5cm とほぼ同程度であったが、30～60 分では、NC が大きくスランプロスしたのに対し、FAC は 1.0cm と緩やかなロスであった。これらの結果から、内割り+外割り配合タイプの FAC は、NC に比べ 30 分以降のスランプロスが少なく、流動性が向上していることがわかり、この配合を用いると現場でのトラブルに対処できると考えられた（参考文献 3）。



※) 27NC : 27N/mm²普通コンクリート、平成 18 年 10 月 26 日測定と 27 日再測定の結果
 27FAC : 27N/mm²フライアッシュコンクリート、平成 18 年 10 月 26 日測定の結果

図 3.1.1 伊良部大橋下部工 27N/mm² コンクリート配合のスランプ経時変化

(2) HrFA を用いた県道 20 号線泡瀬工区橋梁下部工 30N/mm² 内割り+外割り配合タイプの FAC

県道 20 号線泡瀬工区橋梁（以下、泡瀬連絡橋と称す）の下部工は、JPFA を用いた 30N/mm²FAC を基本としており、本指針で示す内割り+外割り配合タイプである。この JPFA を用いた配合と、JPFA を HrFA に置換した配合のスランプ経時変化を比較すると図 3.1.2 のようになる（目標スランプ 12±2.5 cm）。なお、同図には、FA を配合していないベース配合のスランプ経時変化も合わせて載せている。

同図から、ベース配合は最もスランプロスが大きかったが、JPFAC 配合は打設を行う可能性が高い練り直後 30～60 分で目標スランプ内にあり、スランプロスも少なかった。

これに対し、HrFAC 配合は、30N-U71F91 (2)、30N-U71F91 (3) のように高機能型 AE 減水剤の添加量を増やすことにより 60 分は目標スランプ内に入るが 30 分はスランプが大きくなりすぎ、逆に 30N-U71F91 (4) のように高機能型 AE 減水剤を僅かに減らすとスランプロスが激しく 30 分では目標スランプ内に入るが 60 分では外れることがわかった。

このことから、HrFA を内割り+外割り配合タイプで用いる場合は、打設時間の制限が大きくなることを念頭に置く必要があると考えられる（参考文献 13）。

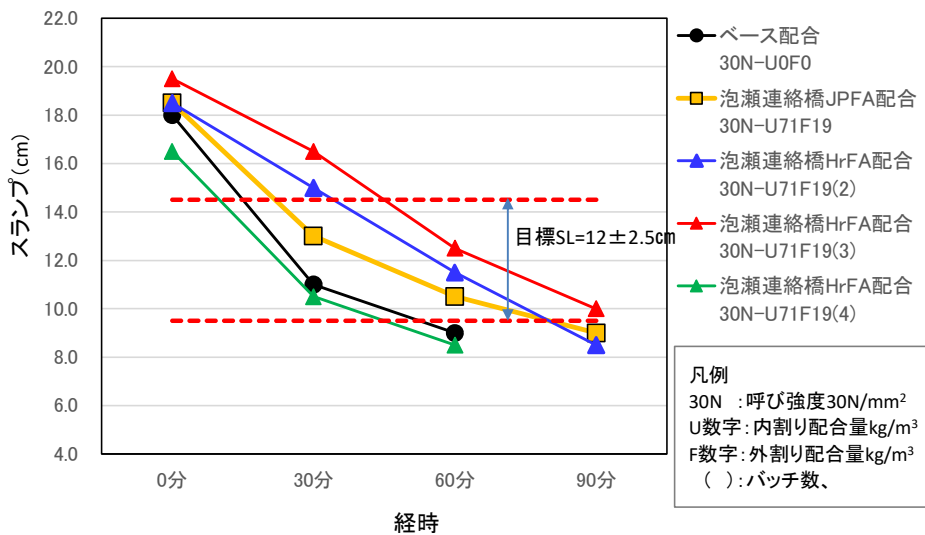


図 3.1.2 泡瀬連絡橋下部工 30N/mm² コンクリート配合を用いた HrFAC のスランプ経時変化

3. 1. 2 外割り配合タイプ FAC の流動性

(1) JPFA を用いた橋梁上部工 50N/mm² 外割り配合タイプの FAC

図 3.1.3 は、伊良部大橋上部工 50N/mm² 外割り FAC とその元になった NC（普通コンクリート）のスランプ経時変化である（目標スランプ 18±2.5 cm）。ここで、これらの配合は新川沖産海砂によるアルカリシリカ反応（ASR）の発生を懸念して細骨材を砕砂 100%としており、FAC はその砕砂の 3%（22 kg/m³）を JPFA で質量置換した配合である。

同図に見られるように、NC は砕砂 100%のためスランプロスが大きいのが、外割り 3%配合の FAC は JPFA のボールベアリング効果でスランプロスが改善し施工性が向上していることがわかる（参考文献 8）。

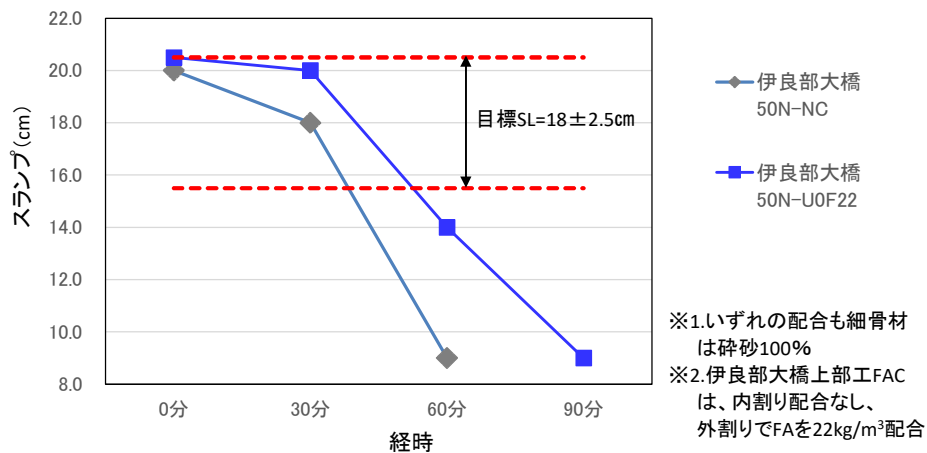


図 3.1.3 伊良部大橋上部工 50N/mm² コンクリートのスランプ経時変化

(2) HrFA を用いた橋梁上部工 50N/mm² 外割り配合タイプの FAC

ここでは、泡瀬連絡橋上部工で用いられた呼び強度 50N/mm² の JPFA を外割りで 25kg/m³ 配合した FAC と、その元の配合である NC（ベース配合）とを用いて試験を行った。図 3.1.4 は、泡瀬連絡橋で実際に用いている JPFAC 配合の室内配合試験時のスランプ経時変化と、同配合の JPFA を HrFA に置換して配合し直した HrFAC のスランプ経時変化である（目標スランプ 18±2.5 cm）。なお、これらの配合も伊良部大橋と同様、新川沖産海砂によるアルカリシリカ反応（ASR）の発生を懸念して細骨材を砕砂 100%としており、FAC は砕砂の 3%（25 kg/m³）を FA で質量置換している。

ここで、同図に示す NC は、60 分のデータがない。これは、砕砂 100%のためスランプロスが大きく、60 分経時のデータが目標スランプ下限値 15.5 cm を大きく下回ったため測定していないためである。しかし、外割りで JPFA を 3% 配合した FAC は、JPFA のボールベアリング効果でスランプロスが改善し、60 分までほとんどスランプロスがなかった。

これに対し、JPFA を HrFA に置換した配合は、同じ JIS II 種灰であるにもかかわらず、スランプロスは大きくなり、打設の可能性のある練り直後 60 分経時では目標スランプ下限値 15.5 cm

を大きく外れている。この結果は、前述の内割り+外割り配合タイプの HrFAC と似ており、HrFA を用いた場合、外割り配合タイプでも打設可能時間は短く制限されることを念頭に置く必要があると考えられる（参考文献 13）。

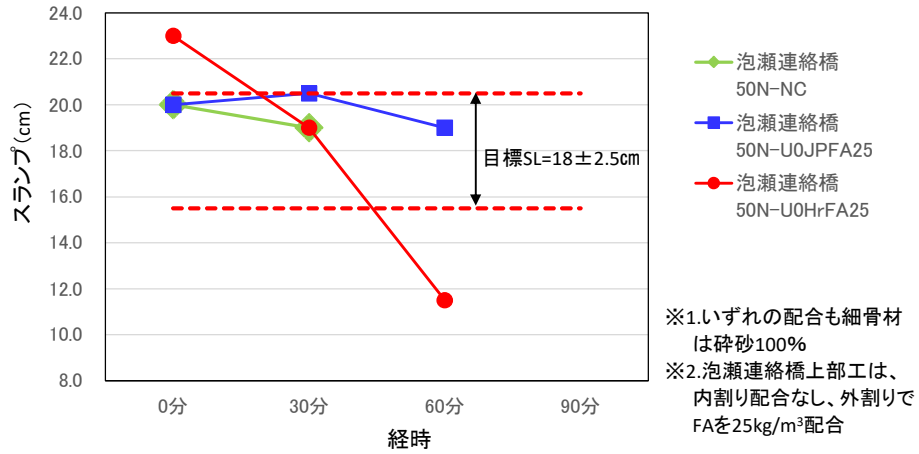


図 3. 1. 4 泡瀬連絡橋上部工 50N/mm² コンクリートのスランプ経時変化

3. 2 水和熱の抑制

3. 2. 1 JPFA の水和熱抑制効果

JPFA の水和熱抑制効果の確認は、伊良部大橋 P6 橋脚柱部の 1 ロット目と深江橋 A2 橋台堅壁部のコンクリート打込み時から 21 日間のコンクリート温度の実測で行った。両者はほぼ同時期の打設で、伊良部大橋下部工は、本指針（案）の内割り＋外割り配合タイプの 27N/mm²フライアッシュコンクリート（FAC）であり、深江橋の橋台は、27N/mm²の JIS 普通コンクリート（NC）の配合である。

図 3.2.1 は、両躯体の中心温度の測定初期値を日時 0.0 に合わせて図化したものである。この結果から、断熱温度上昇量を算定すると表 3.2.1 のようになった。

これらの図表から、コンクリート温度の測定結果は、FAC のピーク温度が 74.8℃、NC のピーク温度が 72.5℃と FAC の方が高かったが、コンクリートの膨張に寄与する温度上昇量（コンクリート打込み時とピーク時の温度差）は、FAC が 43.8℃、NC が 46.5℃と、FAC の方が 2.7℃低かった。この結果から断熱温度上昇量を算定すると、FAC が 45.7、NC が 47.3 で、FAC の方が水和熱による応力が抑制がされる結果となった。

次に、温度上昇と温度降下について見ると、FAC がピーク温度に達するまで 2.3 日かかったのに比べ、NC はピーク温度まで 1.7 日と短かった。この温度上昇が早いと言うことは、強度が十分発現していない弱材齢時の部材表面に大きな温度応力（内部拘束）が発生する事を意味し、温度応力がコンクリートの引張強度を上回る場合は躯体表層にひび割れが発生しやすくなると言える。また、温度降下状況を見ると、NC は最高温度から温度降下速度が早く、温度降下量も大きいいため、温度降下に伴い発生する温度応力（外部拘束）が部材中心に発生し、これがコンクリートの引張応力を上回る場合、内部から外部に向けて貫通するひび割れが発生しやすくなると考えられる。

以上から、FAC の方が NC より膨張・収縮が緩やかに起こっていることから、FAC の方が温度応力の抑制効果が高いことがわかった（参考文献 7）。

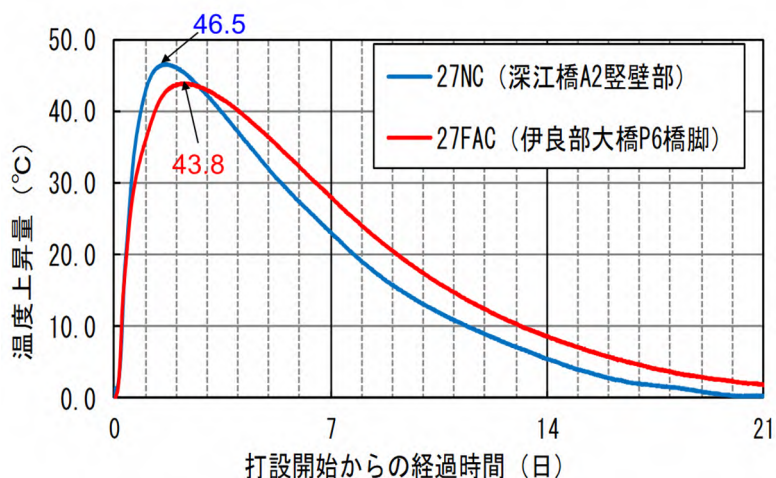


図 3.2.1 伊良部大橋 P6 橋脚と深江橋 A2 橋台のコンクリート温度重ね合わせ図

表 3. 2. 1 伊良部大橋 P6 橋脚と深江橋 A2 橋台のコンクリート温度測定結果比較

コンクリートの種類	打込み温度 (°C)	単位セメント量 (kg/m ³)	内割りFA量 (kg/m ³)	断熱温度上昇量 $Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-\gamma t})$	
				Q_{∞}	γ
27FAC (伊良部大橋P6橋脚)	31	250	65	45.7	1.004
27NC (深江橋A2橋台)	26	317	0	47.3	1.424

3. 2. 2 HrFA の水和熱抑制効果

(1) 擬似断熱温度上昇試験方法

HrFA の水和熱抑制効果を確認するために擬似断熱温度上昇試験を行った。試験は、泡瀬連絡橋の下部工配合を用い、FA を HrFA としたコンクリートと、比較のための FA を JPFAC にしたもの、FA を用いていない普通コンクリート NC の 3 配合を 1 辺が 1m の立方体供試体状に打設し、中心部の終局温度上昇量を測定することにより、マスコンクリートにおける HrFAC の温度上昇抑制量を把握した。なお、打設供試体の全 6 面には、厚さ 20 cm の断熱材（発泡スチロール）を配置し、疑似断熱温度状態とした。

(2) 擬似断熱温度上昇試験結果

疑似断熱コンクリートの温度測定は、供試体の中心部で 28 日間行った。測定温度の初期値を日時 0.0 に合わせて図化するると **図 3. 2. 2** のようになる。次に、同図の打設後 2 日間の温度履歴を拡大表示すると **図 3. 2. 3** のようになる。これらの結果から、コンクリート中心部の断熱温度上昇量等を算定すると、**表 3. 2. 2** の通りであった。

これらの結果から HrFAC の温度上昇量は 77.3°C で、NC の 80.2°C に対し約 96% であり、JPFAC の温度上昇量は 77.7°C で、NC の 80.2°C に対し約 97% であった。また、両 FAC の温度履歴は、NC に比べて最高温度に達する時間が遅く、また FAC は NC に比べて温度降下速度も遅いという特徴が確認された。

この結果から断熱温度上昇量を算定すると、HrFAC と JPFAC が 55.0、NC が 56.7 で、FAC の方が水和熱による応力が抑制がされる結果となった。また、HrFAC と JPFAC を比較すると、最高温度は 0.4°C の差でほぼ同等と言え、最高温度の持続時間も短い。また、温度降下量の差も小さく、両者には温度応力抑制効果に著しい違いがないと考えられた。

なお、NC と JPFAC の試験結果は、前述の伊良部大橋 P6 橋脚と深江橋 A2 橋台の実構造物調査でも確認されており、本試験で用いた 1m 角の断熱温度上昇試験供試体は、実構造物と同様の温度上昇特性を有していると考えられた（参考文献 14）。

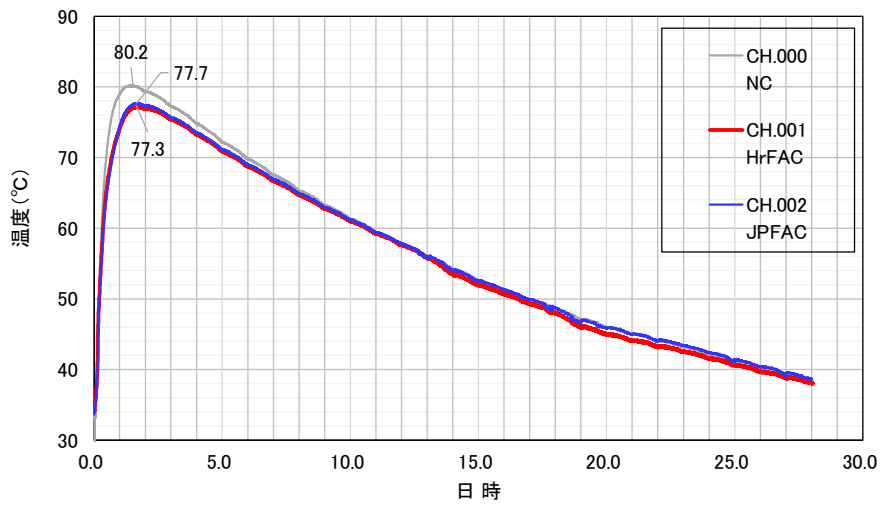


図 3.2.2 28 日間のコンクリート中心温度の測定結果

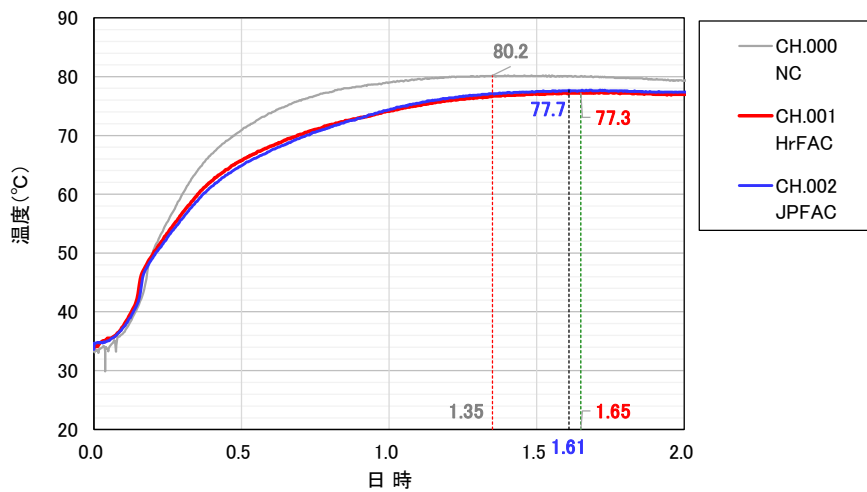


図 3.2.3 最高温度に達するまでの打設後 2 日間のコンクリート温度履歴

表 3.2.2 コンクリート中心部の最高温度と到達時間

コンクリートの種類	打込み温度 (°C)	単位セメント量 (kg/m ³)	内割りFA量 (kg/m ³)	断熱温度上昇量 $Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-\gamma t})$	
				Q_{∞}	γ
HrFAC	34.5	283	71	55.0	2.04
JPFAC	33.6	283	71	55.0	1.99
NC	33.7	358	0	56.7	2.13

3. 3 乾燥収縮及び自己収縮の低減

一般に、フライアッシュ（FA）は、自己収縮・乾燥収縮低減効果を有するといわれている。沖縄県土木建築部では、フライアッシュコンクリート（FAC）の乾燥収縮および自己収縮に関する試験をJPFAとHrFAいずれに対しても行っていないが、石川嘉崇・安田幸弘はコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に関するフライアッシュ混和の影響としてFACの自己収縮に関する研究を行っている。以下にその抜粋を示す（参考文献28）。なお、詳細については、引用文献を参照願いたい。

自己収縮・乾燥収縮低減効果を有するフライアッシュ（FA）を内割置換したコンクリートは、普通コンクリート（NC）と同程度以上の収縮ひび割れ抵抗性を有していると報告されている。そこで、石川らはFACの収縮ひび割れ抵抗性について、FA置換率および置換方法の影響等について検討している。

ここで、試験に用いたコンクリートは普通コンクリート（NC）、フライアッシュコンクリート（FAC）、高炉スラグコンクリート（BBFC）であり、使用したFAはJIS II種灰である。**表3.3.1**に試験に用いたコンクリートの配合を示す。

表 3.3.1 試験に用いたコンクリートの配合

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位質量（上段：kg/m ³ 、下段：l/m ³ ）								高性能AE減水剤（対結合材質量比%）	スレンプ ^o (cm)	空気量 (%)
			W	OPC	BB	FA	FA	S	G1	G2			
N	50	46.7	175	350	-	-	-	822	474	473	0.75	19.5	4.1
			175	111	-	-	-	313	178	178			
FA10	50	46.7	175	315	-	35	-	817	471	470	0.50	19.5	4.7
			175	100	-	16	-	311	177	177			
FA20	50	46.7	175	280	-	70	-	811	468	467	0.50	19.5	5.0
			175	89	-	31	-	308	176	176			
FA30	50	46.7	175	245	-	105	-	806	465	463	0.50	20.0	4.8
			175	78	-	47	-	306	175	175			
BBF20	50	46.7	175	168	112	70	-	807	466	464	0.50	19.5	4.8
			175	53	39	31	-	307	175	175			
FA10(外)	50	46.7	175	350	-	-	70	740	474	473	0.50	20.5	4.7
			175	111	-	-	31	281	178	178			

著者らは、まとめにおいて以下のように述べており、関連する図を**図3.3.1**～**図3.3.3**に示す。本実験では、水粉体比が一定で強度発現性状はそれぞれ異なるので、今後詳細な検討が必要ではあるが、本実験結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 自己収縮ひずみは、NCとFAC（内割り使用）を比較した場合、FA置換率が高いコンクリートでは自己収縮ひずみは小さく、FA置換による自己収縮ひずみ抑制効果が認められた。
- (2) 自由収縮ひずみは、NCとFAC（内割り使用）を比較した場合、FACでは自由収縮ひずみはNCに比較して小さく、FA置換率によるひずみ量の差はあまりなかった。
- (3) FAC（内割り使用）は、FA置換率20%までは収縮ひび割れの抑制効果が認められた。本実験結果からは、FAを外割り置換したFACは、NCと比べひび割れ発生日数が若干早かった。同様に、高炉セメントB種にフライアッシュを20%置換したBBFCについても、ひび割れ発生日数が早かった。

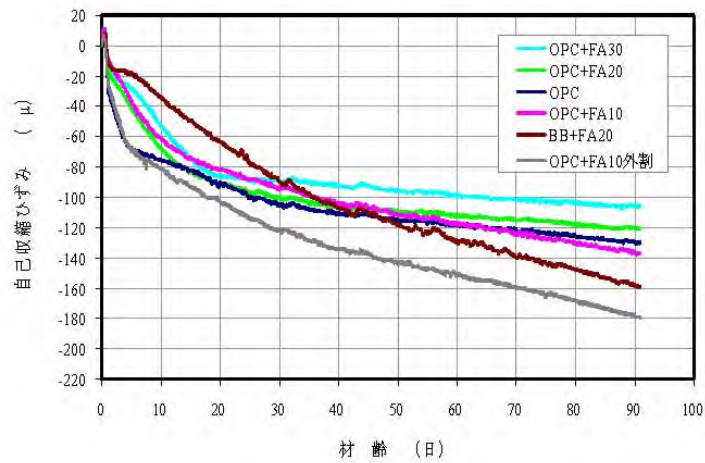


図 3.3.1 自己収縮試験結果

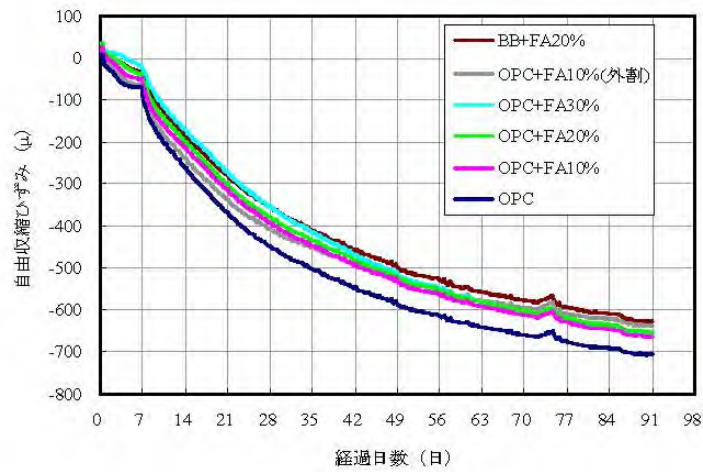


図 3.3.2 自由収縮試験結果

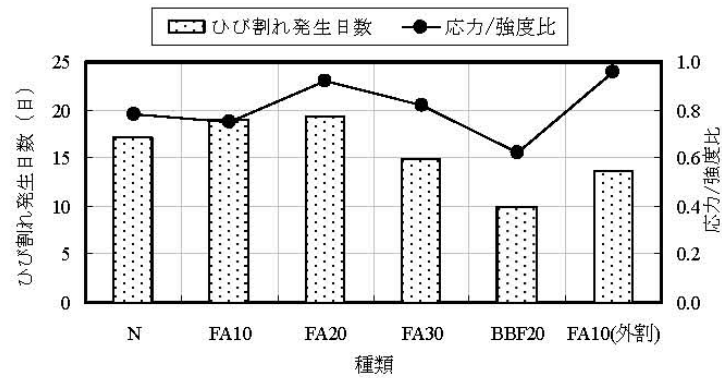


図 3.3.3 ひび割れ発生日数とひび割れ発生応力・ひび割れ発生時引張強度との関係

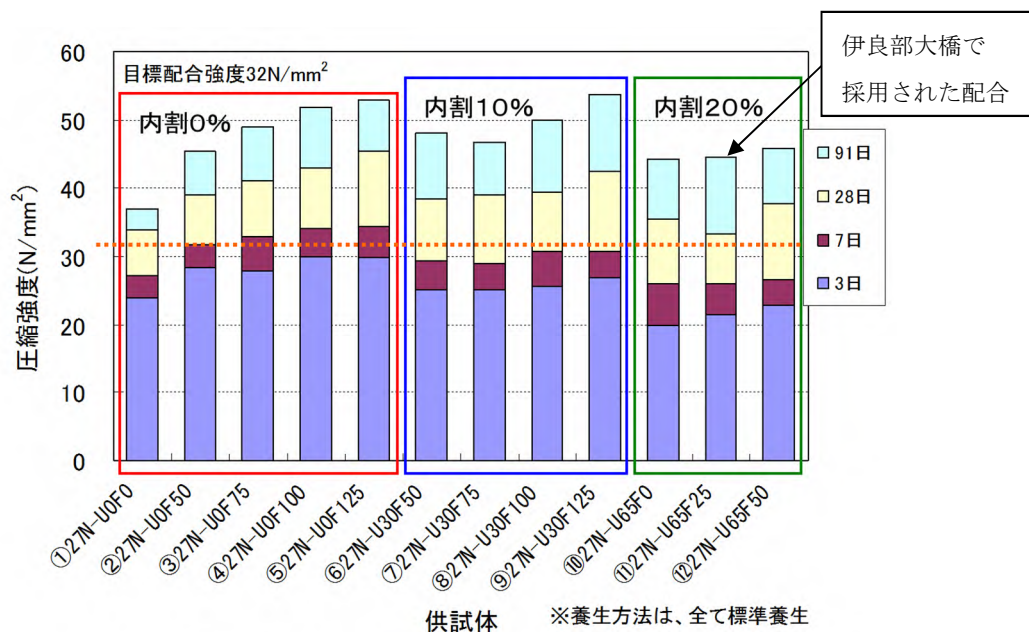
3. 4 力学的特性（長期強度の増進）

3. 4. 1 伊良部下部工配合試験における FAC の力学的特性

図 3. 4. 1 は、伊良部大橋下部工 27N/mm² コンクリートの配合試験における長期強度増進状況である。同図の①～⑤は内割り配合 0%、⑥～⑨は内割り配合 10%、⑩～⑫は内割り配合 20%であり、各々外割り配合量 (kg/m³) を配合名の末尾に示している。

この図から、FAC は 28 日から 91 日でも強度増進が認められ、内割り配合量に関係なく外割り配合量が多いほど強度は大きくなることがわかった。

逆に内割り配合量が多いほど、初期強度は低かったが、内割り 20% 配合でも 28 日強度は目標配合強度 32N/mm² を上回っていた（参考文献 3）。



供試体名の読み方

● N : 強度 (N/mm²)、U ▲ : 内割り配合量 (kg/m³)、F ■ : 外割り配合量 (kg/m³)

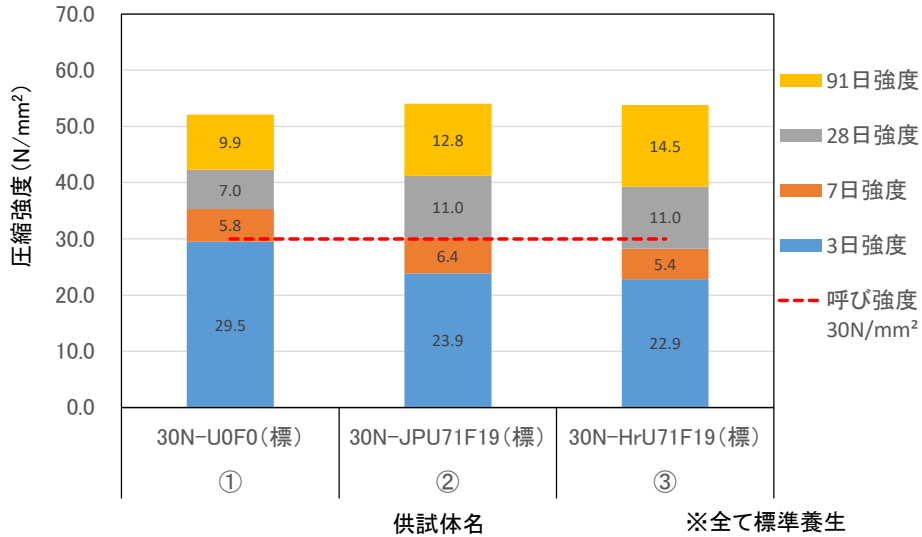
図 3. 4. 1 伊良部大橋下部工 27N/mm² コンクリートの強度増進経時変化

3. 4. 2 HrFA の力学的特性

図 3. 4. 2 は、泡瀬連絡橋下部工工事に出荷している JPFA を内割り+外割り配合タイプで配合した 30N/mm² フライアッシュコンクリート (JPFA : 配合②)、JPFA を HrFA に置換した 30N/mm² フライアッシュコンクリート (HrFA : 配合③)、それらのベースとなった生コン工場の 30N/mm² 普通コンクリート (NC : 配合①) の長期強度増進状況である。FA の配合量は、②と③が内割り配合 20% (71kg/m³) で外割り配合量は 19kg/m³ であり、これらの配合は沖縄県 FAC 指針から決定している。

同図から、NC・JPFA・HrFA に関わらず 28 日から 91 日でも強度増進が認められ、管理強度である 28 日強度においては呼び強度 30N/mm² を十分に満足し、28 日から長期 91 日まで強度

増進が認められた。また、JPFA と HrFA の終局強度の差はほとんどないことがわかった（参考文献 13）。



供試体名の読み方

● N : 強度 (N/mm²)、U ▲ : 内割り配合量 (kg/m³)、F ■ : 外割り配合量 (kg/m³)

図 3.4.2 圧縮強度試験結果

3.4.3 辺土名暴露試験場における暴露 20 年の FAC 供試体の力学的特性

一般にコンクリートの長期力学的特性は 91 日強度を指すが、沖縄県内では FAC の長期暴露試験を行っており、暴露 11 年の強度試験結果を風間洋・富山潤・砂川勇二・比嘉正也・小籾俊介により「沖縄県の海岸線に 11 年間暴露したフライアッシュコンクリートの耐久性に関する研究」（土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）、No. 3、pp. 251-270、2017）が論文として発表されている（参考文献 9）。また、この暴露試験はその後令和 3 年度に暴露 20 年 10 ヶ月の追跡調査が沖縄県により行われており、参考文献 27「沖縄県道路構造物耐久性調査業務委託（R3）報告書」に暴露 20 年 10 カ月の長期強度発言結果が示されている。ここでは、これらの結果について述べる。

表 3.4.1 は、辺土名暴露試験場に暴露した沖縄電力株式会社具志川火力発電所排出の FA を用いた FAC の供試体の配合である。同表に見られるように、これらの配合は外割り配合である。また、最上段には伊良部大橋の下部工コンクリート配合も併記しており、この配合と 60-F75 と 60-F100 供試体の各単位量が近似していることがわかる。よって、この暴露試験結果から伊良部大橋に用いた FAC の将来予測が出来るものと考え、追跡調査を続けている。

ここで、具志川火力発電所排出の FA は、二酸化珪素の値が 44.7%であったため、JIS 灰規定値の 45%以上を満足しておらず非 JIS 灰と判定されている。しかし、他の JIS 灰品質項目は全て規定値を満足しているため、JIS 灰並みとして配合を行い暴露試験を行っている（**表 3.4.2**）。

図 3.4.3(1)には暴露試験当初に作成した円柱供試体の圧縮強度試験結果を暴露初期値、暴露10年11ヶ月、暴露20年10ヶ月の3期で示している。また、図 3.4.3(2)には15×15×53 cmの暴露供試体から採取したコアの圧縮強度試験結果を同様の3期で示している。これらの図から、普通コンクリート（NC：図表中ではB（ベースコンクリート）と記載）の強度発現は、初期値から暴露10年11ヶ月で強度が増進しているか同等であり、暴露20年10ヶ月の圧縮強度は10年11ヶ月とほぼ同等であった。また、具志川火力発電所の非JIS灰FAを外割りで用いたFACも同様の強度経時変化を示した。この理由は、これらの配合が外割配合であり、セメント量が同じであるためである。ただし、FAはポゾラン反応による強度増進があるため、NCに比べて初期値から暴露10年11ヶ月の強度増進は大きかった。この結果から、FACのポゾラン反応による強度増進は、打設後10年以内で完了していると考えられた。

図 3.4.4には、暴露20年10ヶ月のコア供試体を用いて測定した圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。同図から、全ての供試体で圧縮強度に対する静弾性係数は、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]に示された圧縮強度と静弾性係数の関係を上回る値であることがわかった。

表 3.4.1 辺土名暴露試験場の供試体配合

箇所名	配合名	W/C (%)	W/(C+F1) (%)	W/(C+F) (%)	F/C (%)	F/(C+F) (%)	s/a (%)	sF2/a (%)	単位量(kg/m ³)							
									W	C	F		細骨材		粗骨材	
											F1	F2	海砂	砕砂	4020	2005
伊良部大橋	27N-U65F25	62	49.5	45.9	36	26.5	37.6	38.6	156	250	90	25	793	273	945	687
	36N-U80F20	48.5	39	37.1	31	23.6	34.6	35.4	157	323	65	100	399	597	458	1155
暴露供試体	60-B	60	-	-	-	-	49.1	-	170	283	-	-	452	542	-	956
	60-F50		-	51.1	17.7	15.0	46.6	-			50	415	415	-	969	
	60-F75		-	47.5	26.5	20.9	42.7	-			75	374	374	-	1023	
	60-F100		-	44.4	35.3	26.1	41.6	-			100	358	358	-	1023	
	55-B	55	-	-	-	-	48.0	-	170	309	-	-	437	437	-	964
	55-F50		-	47.4	16.2	13.9	45.6	-			50	401	401	-	975	
	55-F75		-	44.3	34.3	19.5	41.0	-			75	355	355	-	1040	
	55-F100		-	41.6	32.4	24.4	40.1	-			100	341	341	-	1040	
	45-B	45	-	-	-	-	45.5	-	171	380	-	-	400	400	-	977
	65-B	65	-	-	-	-	50.5	-	179	275	-	-	461	461	-	921
	65-F50		-	55.1	18.2	15.4	48.4	-			50	427	427	-	929	
	65-F75		-	51.1	27.3	21.4	44.2	-			75	384	384	-	986	
	65-F100		-	47.7	36.4	26.7	43.2	-			100	368	368	-	988	

暴露供試体の配合名の読み方

※1) 頭の数字45、55、60、65：水セメント比の意

※2) B：ベースコンクリート(PLと同様)の意

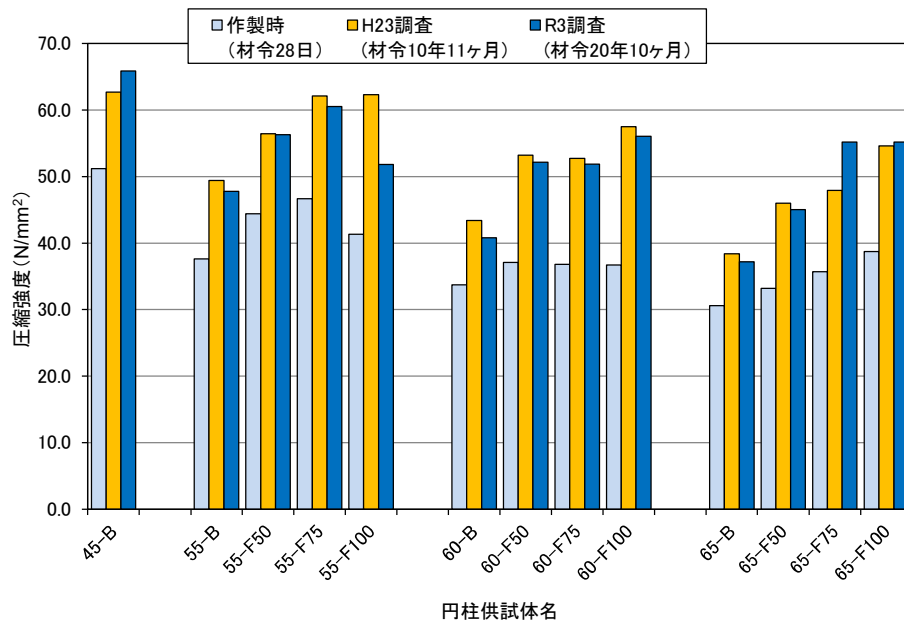
※3) Fの後の50、75、100：FA量でそれぞれ50、75、100kg/m³の意

表 3.4.2 暴露供試体で使用したFAの品質

項目		種類	具志川火力発電所石炭灰 平成12年9月26日
二酸化けい素		%	44.7(≥45)
湿分		%	0.0(≤1.0)
強熱減量		%	2.1(≤5.0)
密度		g/cm ³	2.21(≥1.95)
粉末度	45μmふるい残分 (網ふるい方法)	%	15.0(40以下)
	比表面積 (ブレン方法)	cm ² /g	4030(≥2500)
フロー値比		%	98(≥95)
活性度指数	材齢28日	%	81(≥80)
	材齢91日	%	—(≥90)
石炭銘柄			南屯炭

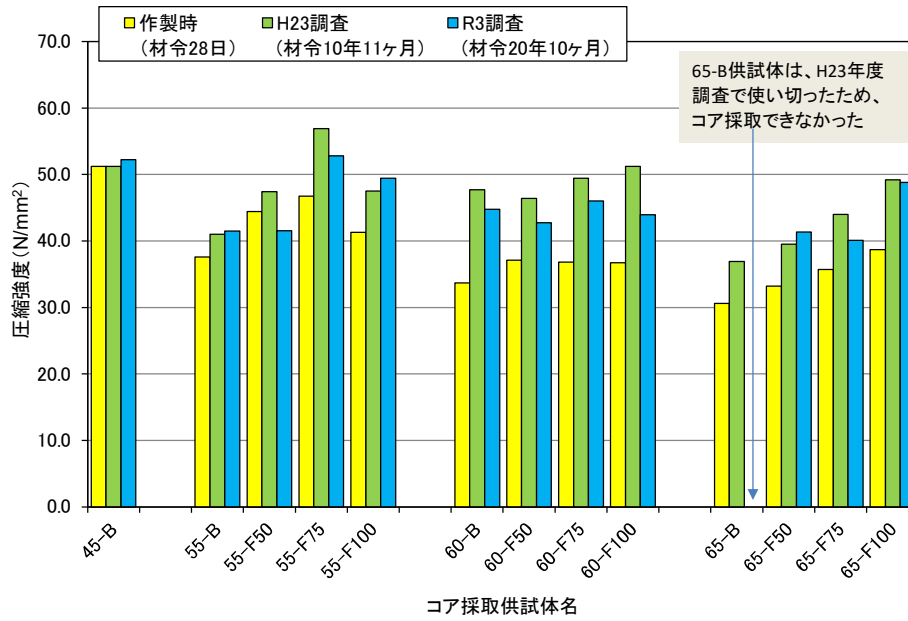
※1: ()内はJIS A 6201(1999) II種灰の品質規格

※2: 黄色表示はJIS規格から外れている二酸化けい素の値



【供試体名の読み方】45, 55, 60, 65: 水セメント比 W/C (%)、B: ベースコンクリート、
 FOO: フライアッシュ・外割り配合量 (kg/m³)

図 3.4.3(1) 辺土名暴露試験場に設置したコンクリート円柱供試体の強度増進経時変化



【供試体名の読み方】45, 55, 60, 65 : 水セメント比 W/C (%)、B : ベースコンクリート、
 F〇〇 : フライアッシュ・外割り配合量 (kg/m³)

図 3.4.3(2) 辺土名暴露試験場に設置したコンクリートコア供試体の強度増進経時変化

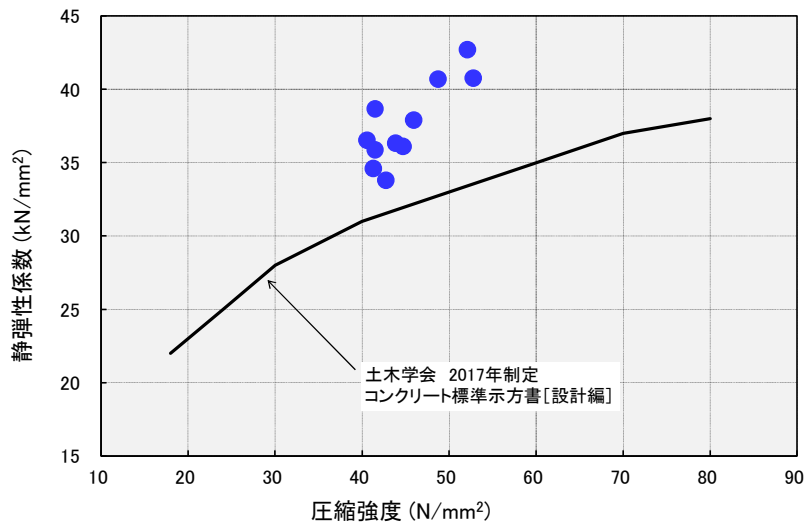


図 3.4.4 暴露材齢 20 年 10 ヶ月の供試体から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数の関係

3. 5 アルカリシリカ反応（ASR）の抑制

3. 5. 1 JPFA の ASR 抑制効果

沖縄県内で現在使用されているコンクリート用骨材のうち、ASR 発生の可能性があるものは、新川沖産海砂のみである。しかし、この骨材は ASR がゆっくり進む遅延膨張性タイプの骨材であり、この骨材を用いた構造物全てに ASR による劣化が発生するものではない。

表 3.5.1 は、伊良部大橋のコンクリート配合検討に用いた各種コンクリートである。同表中のコンクリート配合の概要は以下の通りであり、何れも粗骨材は沖縄本島石灰岩砕石、細骨材は沖縄本島新川沖産海砂と石灰岩砕砂を用いている。

- 上部工 50NC : 宮古島の JIS 生コン工場における呼び強度 50N/mm² の普通コンクリート配合で、伊良部大橋上部工の当初予定配合。
- 下部工 27NC : 宮古島の JIS 生コン工場における呼び強度 27N/mm² の普通コンクリート配合で、伊良部大橋下部工の当初予定配合。
- 下部工 27FAC : 下部工 27NC のセメントの 20%を電源開発石川火力さんのフライアッシュ（JPFA）に内割り置換し、細骨材の 25 kg/m³ を JPFA に外割り置換した配合。遮塩性の向上、温度応力の低減、海砂のアルカリシリカ反応（ASR）抑制の効果を狙っている。

これらの配合を用いて、ASR の促進膨張試験を行い、海砂による ASR の発生可能性の確認、および JPFA の ASR 抑制効果を確認する。なお、新川沖産海砂のような ASR 遅延膨張性の骨材を促進膨張試験で確認するには、通称カナダ法と呼ばれる温度 80℃、1mol/l の NaOH 溶液にコンクリート供試体を浸漬するのが最良とされており、ここでも同試験方法を用いた。

図 3.5.1 はこのカナダ法を用いて、上記 3 配合のコンクリート供試体を促進膨張試験したものである。この結果、FA を用いた 27FAC のみが膨張せず、FA に新川沖産海砂の ASR 抑制効果がある事がわかった（参考文献 3）。

表 3.5.1 伊良部大橋コンクリート配合検討時に促進膨張試験に用いた配合

配合	単位量 (kg/m ³)									
	水	セメント	内割り FA	外割り FA	細骨材 (S1)	細骨材 (S2)	粗骨材 (4020)	粗骨材 (2005)	高機能形 AE減水剤	高性能 AE減水剤
27FAC	156	250	65	25	405	275	689	459	1.575	—
27NC	158	319	—	—	448	304	664	443	1.276	—
50NC	156	436	—	—	292	447	—	1004	—	3.728

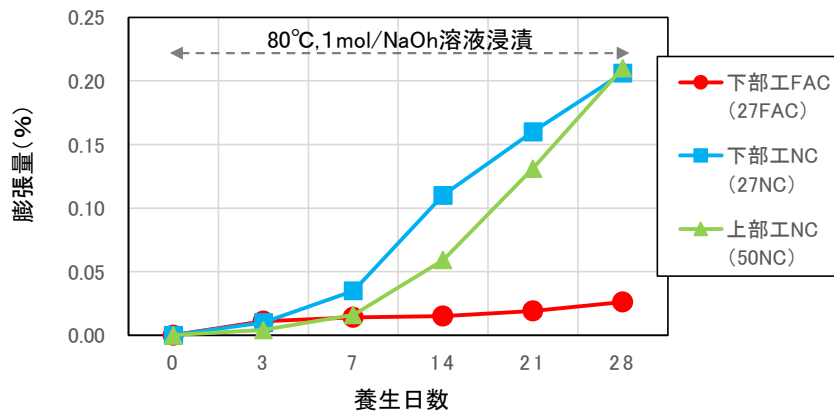


図 3.5.1 伊良部大橋下部工 27N/mm² と上部工 50N/mm² コンクリートの促進膨張試験結果

3.5.2 HrFA の ASR 抑制効果

前項で述べた JPFA の ASR 抑制効果を HrFA でも確認するため、同様にカナダ法と呼ばれる温度 80°C、1mol/l の NaOH 溶液にコンクリート供試体を浸漬する促進膨張試験を行った。試験に用いた配合を以下に示す。

- ①30N-U0F0 : 沖縄本島中部の JIS 生コン工場における呼び強度 30N/mm² の普通コンクリート配合であり、県道 20 号線泡瀬工区橋梁（泡瀬連絡橋）の下部工 FAC の元になった配合。
- ②30N-HrU71F19 : 泡瀬連絡橋の下部工示方配合である③30N-JPU71F19 の JPFA を HrFA に置き換えた配合で、HrFA の ASR 抑制効果を確認するための配合。
- ③30N-JPU71F19 : 泡瀬連絡橋の下部工示方配合であり、①30N-U0F0 配合のセメントの 20% を JPFA に内割り置換し、細骨材 19 kg/m³ を JPFA に外割り置換した配合。遮塩性の向上、温度応力の低減、海砂のアルカリシリカ反応 (ASR) 抑制の効果を狙っている。

HrFA の ASR 抑制効果確認のための促進膨張試験に用いた配合を表 3.5.2 に示し、促進膨張試験結果を図 3.5.2 に示す。

同図から、FA を配合していない①30N-U0F0 配合 (NC) は材齢 7 日以降から材齢 28 日まで膨張が継続する傾向を示しており、ASTM C 1260 の判定基準 0.2% を上回る 0.288% まで達していたことから、構造物にとって有害な膨張を示す可能性が高い試験結果となった。

これに対し、②30N-HrU71F19 配合 (HrFAC) と③30N-JPU71F19 配合 (JPFAC) は、材齢 28 日まで明らかな膨張性を示さず、膨張率は 0.019% および 0.04% に留まり、構造物にとって有害な膨張を示す可能性は低いと考えられる試験結果となった。

この結果から、HrFA は JPFA と同等の ASR の抑制効果があると確認できた (参考文献 13)。

表 3.5.2 HrFA の ASR 抑制効果確認のための促進膨張試験に用いた配合

配合	W/(C+F1) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 (W)	セメント (C)	内割りFA (F1)	外割りFA (F2)	細骨材 (海砂)	細骨材 (砕砂)	粗骨材 (砕石2005)
①30N-U0F0 (NC)	47.6	47.6	170	358	-	-	684	169	948
②30N-HrU71F19 (HrFAC)	47.5	48.3	168	283	71	19	696	172	964
③30N-JPU71F19 (JPFAC)	47.5	48.2	168	283	71	19	694	172	964

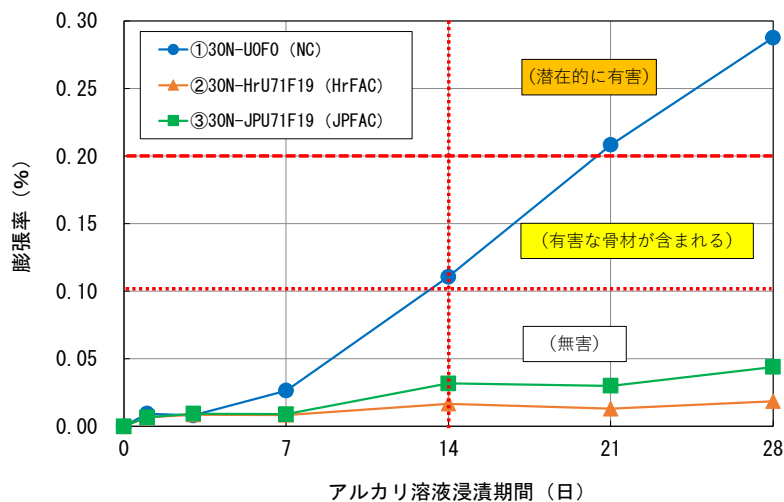


図 3.5.2 アルカリ溶液浸漬試験による各配合コンクリートの膨張率経時変化

3. 5. 3 長期暴露試験における外割り FA 配合の ASR 抑制効果

ここでは、富山潤らの研究（参考文献 19）を参考に、沖縄県新川沖産海砂を用いた長期暴露供試体の外割りフライアッシュ（FA）配合によるアルカリシリカ反応（ASR）抑制効果について述べる。

表 3.5.3 は、暴露供試体に用いたコンクリートの配合である。同表に見られるように、セメント（C）と水（W）が一定で、FA と細骨材（S1：海砂、S2：砕砂）が変化していることから、これらの配合は SL-0 がベース配合の普通コンクリート（NC）で、その他は外割りフライアッシュコンクリート（FAC）である。

なお、本研究で用いられた FA は、沖縄電力株式会社から排出された非 JIS II 種灰であり、海砂は、新川沖産海砂を用い、本論文中で遅延膨張性骨材であると確認されている

これらの配合で作成した暴露供試体を波飛沫のかかる海岸線に 10 年間暴露し、その供試体から採取したコンクリートコアを前述のカナダ法で促進膨張試験した結果を図 3.5.3 に示す。

同図から、NC の SL-0 と最も FA の外割り配合が少なかった SL-4 は促進膨張が認められたが、その他の 3 配合（SL-1、SL-2、SL-3）は ASR の膨張が認められなかった。

このことから、FA は外割り配合でも ASR の抑制効果がある事がわかった。

表 3.5.3 供試体に用いたコンクリートの配合

試験体名	W/C	W/B	W	C	FA	S*		G	AD**
	%					S(1)	S(2)		
			kg/m ³						
SL-0	65	65	185	285	0	544	203	1080	0.3
SL-1		35			244	317	118		0.9
SL-2		40			178	379	142		0.7
SL-3		45			126	427	160		0.6
SL-4		55			51	497	186		0.5

*S (1) : 海砂, (2) : 砕砂

*AD : 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)

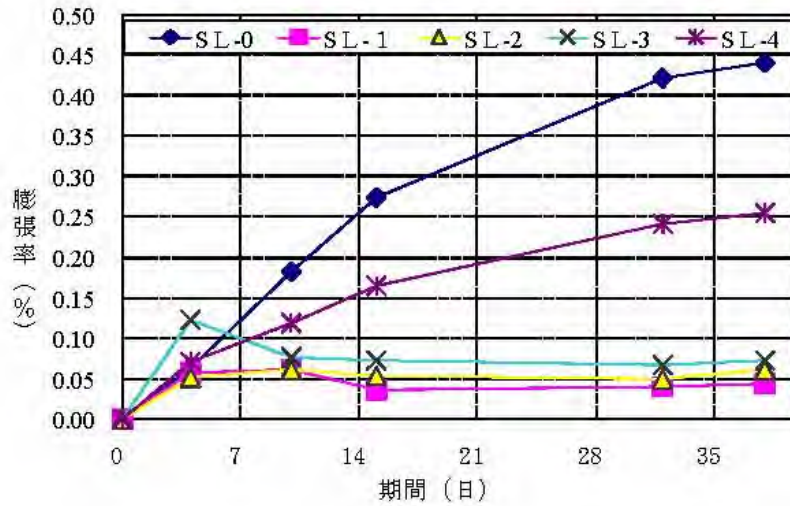


図 3.5.3 FA 外割り配合コンクリートの促進膨張試験結果

3. 6 遮塩性の向上

3. 6. 1 伊良部暴露試験で確認された JPFA の遮塩性効果

JPFA の遮塩性については、表 3. 6. 1 に示す配合の伊良部大橋暴露試験供試体によって評価する。同表のコンクリート配合のうち、27NC と 36NC は宮古島の JIS 工場における 27N/mm² および 36N/mm² の普通コンクリート配合である。これに対し、27FAC は、27NC のセメント内割り置換で JPFA を 65kg/m³ 配合し、細骨材の外割り置換で 25kg/m³ 配合したコンクリートである。また、36FAC は、36NC のセメント内割り置換で JPFA を 80kg/m³ 配合し、細骨材の外割り置換で 20kg/m³ 配合したコンクリートであり、両 FAC とともに実構造物に用いている。

暴露試験は、伊良部大橋 A2 橋台横の海中道路法肩ブロック上に約 11 年間暴露し、飛来塩分の浸透状況をコア採取により確認した（図 3. 6. 1、図 3. 6. 2）。なお、供試体の塩分が浸透する方向は上下面であり、側面には遮塩性塗装を施している。

試験の結果、27NC の上面は 5～6 cm まで、下面は 4～5 cm まで塩分浸透が認められるのに対し、27FAC の上面・下面とも 2～3 cm までしか塩分浸透が認められなかった。また、36NC の上面も 5～6 cm まで、下面は 4～5 cm まで塩分浸透が認められるのに対し、36FAC の上面は 2～3 cm まで、下面は 1～2 cm までしか塩分浸透が認められなかった。

この結果から、JPFA を用いた FAC は NC に比べ遮塩効果が高いことが確認された（参考文献 29, 30）。

表 3. 6. 1 伊良部大橋暴露試験供試体の配合

供試体名	設計基準強度 (N/mm ²)	目標スランプ (cm)	骨材最大寸法 (mm)	水セメント比W/C (%)	細骨材率s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
						セメント		混和材		水 W	細骨材			粗骨材	
						C	膨張剤	内割りFA	海砂		砕砂	外割りFA	G1	G2	
27FAC	27	12	40	49.5	38.7	250	—	65	156	405	275	25	689	459	
27NC	27	12	40	49.5	41.1	319	—	—	158	448	304	—	664	443	
36FAC	36	12	40	39.0	35.4	323	—	80	157	295	302	20	693	462	
36NC	36	12	40	39.0	35.4	403	—	—	157	308	315	—	695	463	

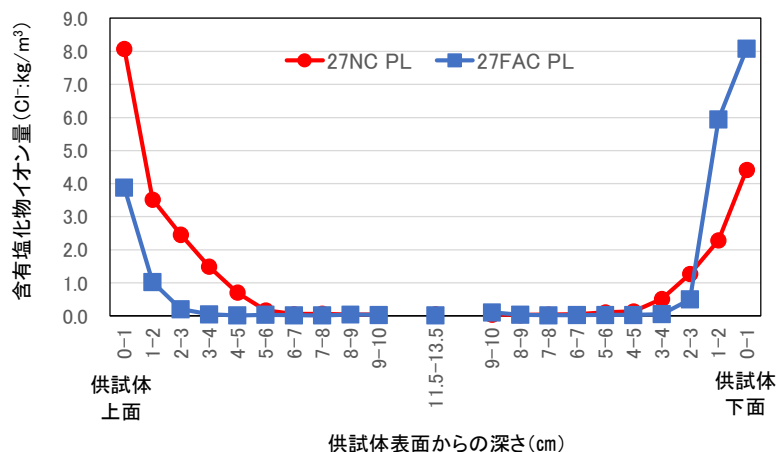


図 3. 6. 1 下部工 27N/mm² コンクリートの 11 年暴露含有塩分量分布

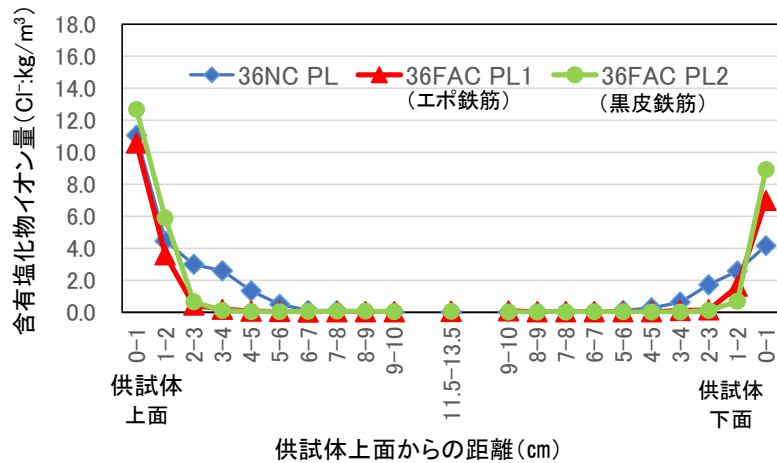


図 3.6.2 下部工 36N/mm² コンクリートの 11 年暴露含有塩分量分布

3. 6. 2 電気泳動試験により確認した HrFA の遮塩効果

HrFA を用いた塩害耐久性試験は、土木学会基準「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験：方法(案)(JSCE-G571-2003)」に制定されている「電気泳動試験」を用いて行った。同手法は、**図 3.6.3** の模式図に示す通り、塩化物イオンを含む溶液と接しているコンクリート供試体の両側に直流の定電圧を印加し、負電荷を持つ陰極側の塩化物イオンがコンクリートの細孔中を通過して陽極側へ電気泳動して行く移動流束を測定する。この結果から、被試験コンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験を求め、塩分の拡散予測を行うものである。

電気泳動試験に用いた供試体は、泡瀬連絡橋下部工の設計基準強度 30N/mm² の JPFAC 配合 (③30N-JPU71F19) を基本に、JPFA を HrFA に置き換えた HrFAC 配合 (②30N-HrU71f19) と FA を配合していない普通コンクリート NC 配合 (①30N-U0F0) を用いて行った (**表 3.6.2**)。

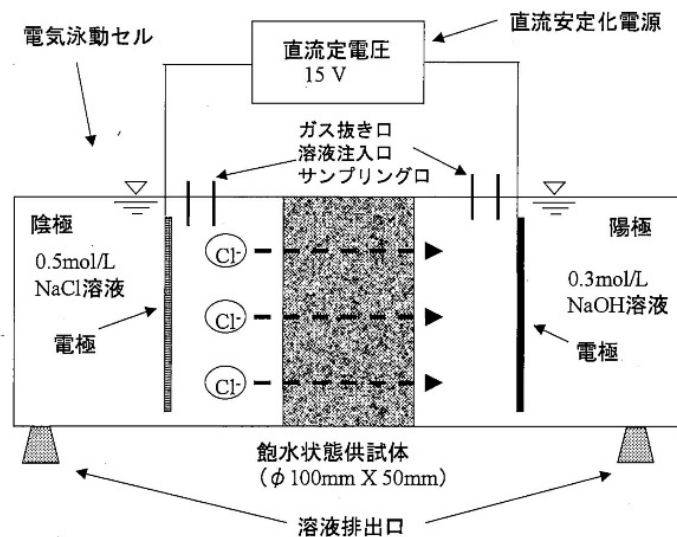


図 3.6.3 電気泳動試験装置模式図

表 3.6.2 電気泳動試験に用いた供試体コンクリートの配合

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
						水 W	セメント C	混和材		細骨材		粗骨材 G	混和剤	
								内割 F1	外割 F2	砕砂 S1	海砂 S2		AE減水剤	AE剤
①30N-U0f0 (NC)	20	12±2.5	2.0±1.5	47.5	47.6	170	358	-	-	684	169	948	0.900	0.00225
②30N-HrU71f19 (HrFAC)	20	12±2.5	2.0±1.5	47.5	48.3	168	283	71	19	696	172	964	1.150	-
③30N-JPU71F19 (JPFAC)	20	12±2.5	2.0±1.5	47.5	48.2	168	283	71	19	694	172	964	1.050	-

※ ②30N-HrU71f19の混和材F1,F2はHrFA、③30N-JPU71F19の混和材F1,F2はJPFA

電気泳動試験結果より算定された各配合の拡散係数を表 3.6.3 に示す。また、この拡散係数を用いてかぶり位置 90mm における塩化物イオン濃度の拡散予測をコンクリート標準示方書【設計編】(2022) および【維持管理編】(2022) に示された方法で予測すると図 3.6.4 のようになる。

この結果から、コンクリート中への塩分浸透はNCは最も多く、次いでHrFACで、JPFACは最も少ないことがわかった。ここで、仮に鉄筋腐食発生限界濃度を 2.0kg/m³ とすると以下のような予測結果となり、HrFACはNCの1.7倍、JPFACは2.2倍塩害耐久性が向上するとわかった(参考文献13)。

- ①30N-U0F0 配合 (NC) : 21年
- ②30N-HrU71f19 配合 (HrFAC) : 36年
- ③30N-JPU71F19 配合 (JPFAC) : 46年

表 3.6.3 拡散係数試験結果

試料名	実効拡散係数D _e (cm ² /年)	k ₁ ・k ₂ [※]	見掛けの拡散係数D _{ae} (cm ² /年)
①30N-U0F0(NC)	1.985	0.494	0.98
②30N-HrU71f19(HrFAC)	0.898	0.624	0.56
③30N-JPU71F19(JPFAC)	0.7	0.624	0.437

※:W/C=0.475

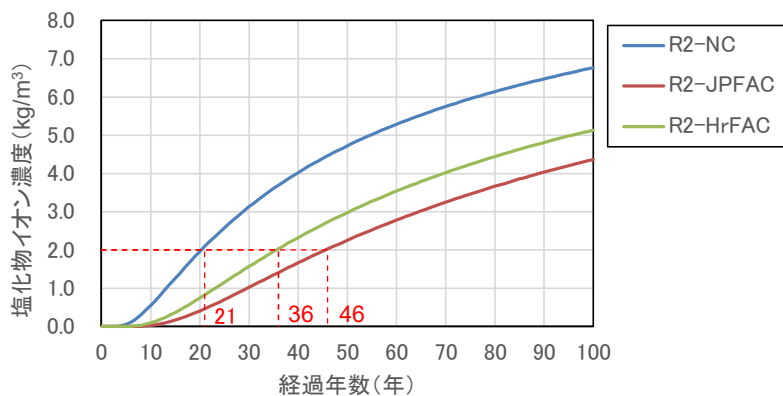


図 3.6.4 かぶり 90mm 位置の塩化物イオン濃度の拡散予測

3. 6. 3 辺土名海岸および伊良部大橋における長期暴露試験の事例

沖縄県土木建築部では、沖縄県国頭村の波飛沫のかかる辺土名海岸の暴露試験場）において FAC の長期暴露試験を行っている。この長期暴露試験については、平成 24 年度の 11 年暴露結果を風間洋らにより「沖縄県の海岸線に 11 年間暴露したフライアッシュコンクリートの耐久性に関する研究」（土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）、No. 3, pp. 251-270、2017）で発表されているが、令和 3 年度には暴露 20 年の追跡試験を行っているため、ここでは 20 年暴露試験結果を用いて FAC 長期暴露の遮塩効果について述べる。

また、沖縄県は、伊良部大橋暴露試験においても FAC に関する長期暴露試験を行っており、平成 30 年度と令和元年度に暴露 11 年の追跡調査を行っており、この結果からも FAC の遮塩効果について述べる。

辺土名暴露試験に用いた供試体は、15×15×53 cmの角柱供試体を横置きにしたもので、供試体の塩分が浸透する方向は上下面であり、側面には遮塩性塗装を施している。**表 3. 6. 4** は、辺土名暴露試験供試体と伊良部大橋下部工 FAC 供試体の配合である。なお、辺土名暴露供試体は外割りタイプ配合であり、伊良部大橋暴露供試体は内割り+外割り配合タイプの配合であるが、同表を見ると、辺土名暴露供試体 W/C=60%の配合は、FA を 75kg/m³ した 60-F75 と 100kg/m³ 配合した 60-F100 が伊良部大橋下部工 27N-FAC (27N/mm²の内割り+外割り配合タイプの FAC) に近似していることがわかる。

また、このコンクリートに用いたフライアッシュ (FA) は、**表 3. 6. 5** に示すように、JIS II 種灰の規格値を二酸化けい素 1 項目のみがわずかに規定値から外れている。よって、ほぼ JIS II 種灰に近い物性と考えられるため、これらの含有塩分量分布を調べることで、伊良部大橋下部工の塩分浸透予測が可能であると考え、コア採取を行い、含有塩分量分布を確認した。辺土名 20 年暴露試験の含有塩分量分布を**図 3. 6. 5** に示す。

同図から、波飛沫のかかる海岸線に 20 年間暴露した NC 供試体には、上面から中央、下面まで塩分浸透が認められたが、FAC 供試体は 3 配合とも上・下面ともに明確な塩分浸透は 30mm 深さまでであり、40mm 深さには僅かに浸透している程度であった。

次に、この辺土名暴露供試体の上面塩分量と伊良部大橋暴露供試体の上面塩分量を比較すると**図 3. 6. 6** のようになる。同図から、辺土名暴露の 2 配合と伊良部暴露の 2 配合は、概ね 20～30mm の位置で塩分浸透は止まっており、30～40mm の位置に僅かな塩分浸透が伺える状態であった。なお、前述のように 60-F75 と 60-F100 は伊良部 27FAC と近似した配合であり、塩分浸透抑制効果も近似していると考えられることから、伊良部暴露供試体の 20 年後も 30～40mm 以深に塩分浸透は少ないと考えられる（参考文献 9, 31）。

表 3.6.4 辺土名暴露試験場の供試体配合

暴露試験箇所	供試体配合名 ^{※1}	W/C (%)	W/(C+F) (%)	F/C (%)	F/(C+F) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
							W	C	F	細骨材		粗骨材	
										海砂	砕砂	2005	4020
辺土名	60-B	60.0	—	—	—	49.1	170	283	—	452	452	956	—
	60-F50		51.1	17.7	15.0	46.6			50	415	415	969	—
	60-F75		47.5	26.5	20.9	42.7			75	374	374	1023	—
	60-F100		44.4	35.3	26.1	41.6			100	358	358	1023	—
伊良部	27N-FAC ^{※2}	62.4	45.9	36.0	26.5	38.7	156	250	90	405	275	689	459
	36N-FAC ^{※3}	48.6	37.1	31.0	23.6	35.4	157	323	100	295	302	693	462

※1) 供試体配合名の読み方：先頭数字 (W/C (%))、B (ベースコンクリート)、50・75・100 (FA配合量 (kg/m³))
 ※2) 伊良部大橋下部工27N/mm²フライアッシュコンクリートの配合、単位量%は外割り配合タイプとして算出
 ※3) 伊良部大橋下部工36N/mm²フライアッシュコンクリートの配合、単位量%は外割り配合タイプとして算出

表 3.6.5 暴露供試体の使用FA品質

項目	種類	規格値	具志川火力発電所石炭灰 (平成12年9月26日採取)
二酸化ケイ素	%	≥45	44.7
湿分	%	≤1.0	0
強熱減量	%	≤5.0	2.1
密度	g/cm ³	≥1.95	2.21
粉末度	45μmふるい残分	%	≤40
	比表面積	cm ² /g	≥2500
フロー値比	%	≥95	98
活性度指数	材齢28日	%	≥80
	材齢91日	%	≥90
石炭銘柄	—	—	南屯炭

※1：規格値は、JIS A 6201(1999)Ⅱ種灰の品質規格
 ※2：黄色表示は、JIS規格から外れている二酸化ケイ素の値

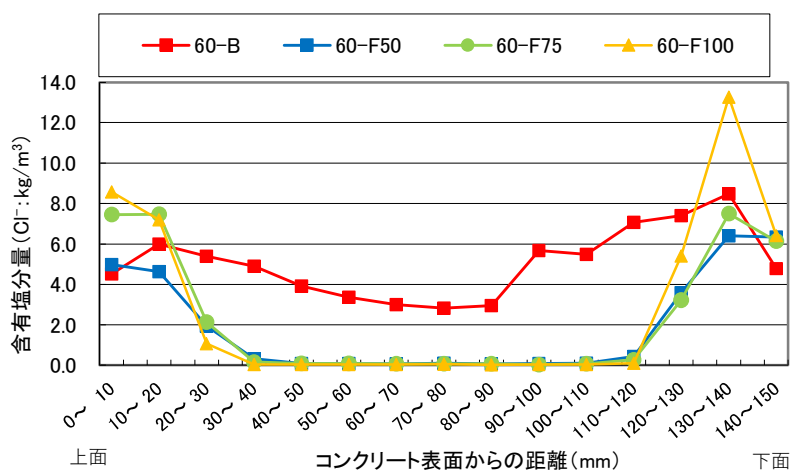


図 3.6.5 辺土名暴露 20 年の供試体の含有塩分量分布

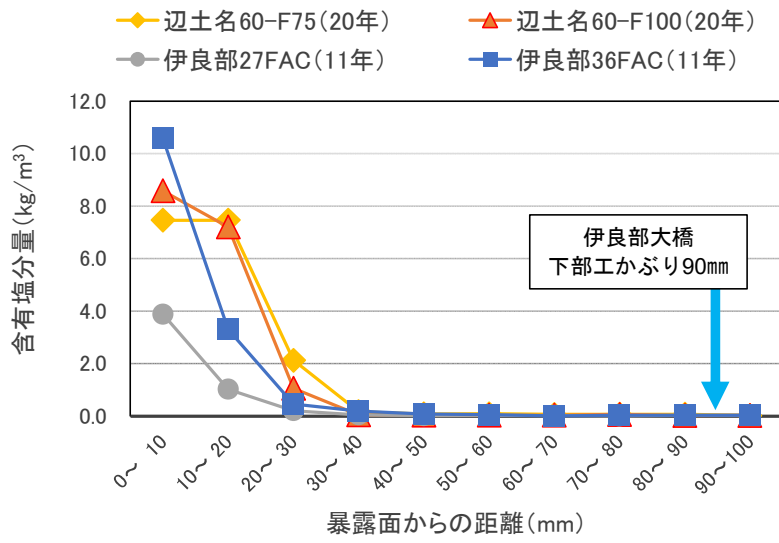


図 3.6.6 辺土名暴露 20 年と伊良部大橋暴露 11 年の含有塩分量分布比較

3. 7 中性化に対する抵抗性

3. 7. 1 JPFAC の中性化促進試験

伊良部大橋の下部工において FAC を採用するにあたり、セメントの一部を JPFA と置換する内割り配合を用いているため、中性化抵抗性に懸念があるとされた。そこで、確認のために中性化促進試験を行い、その安全性を確認した。JPFA の中性化抵抗性について以下に述べる。

表 3. 7. 1 は、伊良部大橋下部工で用いた $27\text{N}/\text{mm}^2$ および $36\text{N}/\text{mm}^2$ フライアッシュコンクリート (FAC) と比較のためのベースとなった普通コンクリート (NC) の配合であり、これらの配合を用いて、JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法により、 CO_2 濃度 5% 環境における各配合の中性化進行状況を確認した。なお、中性化促進試験は、本来 26 週まで行うものであるが、今回は長期中性化進行状況を確認するために、26 週以降 59 週間まで中性化促進試験器の中に供試体を置き、中性化進行状況を確認した。

試験結果は、**図 3. 7. 1** に示すとおりであり、最も中性化が進んだのは 27FAC で 21.5mm、その他は 27NC が 17.9mm、36FAC が 9.8mm、36NC が 8.9mm であった。

これらの中性化進行値から、中性化速度係数を求めると **表 3. 7. 2** のようになり、このうち中性化速度係数の大きかった 26 週の係数を用いて 100 年後の中性化進行深さを予測すると、**図 3. 7. 2** のようになる。同図から、100 年後の中性化進行深さは、27FAC で 26.0mm、その他は 27NC が 18.2mm、36FAC が 13.3mm、36NC が 8.4mm となることがわかった。

ここで、実構造物の鉄筋の最小かぶりについては、道路橋示方書で **表 3. 7. 3** のように規定しており、沖縄県の内陸部においての鉄筋の最小かぶりは一部工場製品以外 50mm とされている。また、コンクリート標準示方書では、鉄筋かぶりから中性化深さを引いた未中性化領域を「中性化残り」と称し、これが一般環境の場合 10mm、塩害環境の場合 15mm を下回ると鋼材腐食が顕著になる構造物が急増すると記載されており、鉄筋かぶりを 50mm から未中性化領域の最小値 15mm を引くと、許容中性化深さは 35mm と仮定できる。この値と、**図 3. 7. 2** の 100 年後の予測中性化深さを比較すると、最大値の 26.0mm でも中性化残りは 24.0mm であり、NC および FAC とも中性化劣化の許容値内にあった。

以上から、促進中性化速度係数による中性化予測では、伊良部大橋下部工に用いられた JPFAC は、内陸部においても中性化抵抗性が 100 年耐久性を満足する可能性が高いとわかった（参考文献 16）。

表 3. 7. 1 供試体打込みを行ったコンクリートの配合

配合記号*	配合条件				単体量(kg/m ³)									
	スラブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/(C+F1) (%)	細骨材率 (s+F2)/a (%)	水 W	結合材		細骨材			粗骨材		混和剤 AD	
						セメント C	フライアッシュ** F1	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ** F2	2005 G1	4020 G2	高性能 AE減水剤 (C×%)	AE助剤 (C×%)
27N-U0F0 (27NC)	12 ±2.5	-	49.5	39.4	156	315	0	434	294	0	687	458	0.45***	0.0015
27N-U65F25 (27FAC)				38.6		250	65	406	274	25	690	460	0.475	0.0015
36N-U0F0 (36NC)			39.0	35.4	157	403	0	312	316	0	701	468	0.75	0.0089
36N-U80F20 (36FAC)				35.4		323	80	296	300	20	693	462	0.90	0.0015

* 配合の読み方：27N-U65F25は、27N/mm²、内割65kg/m³、外割25kg/m³の意味、()内は略称
 ** フライアッシュは、沖縄県石川火力発電所産、JIS II 種灰使用
 *** 27N-U0F0配合のみノーマルタイプのAE減水剤、他は高機能形AE減水剤

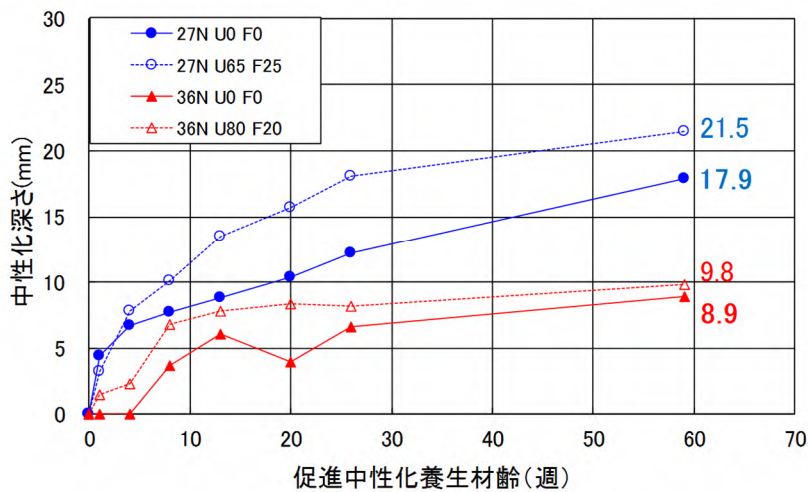


図 3. 7. 1 中性化促進試験結果

表 3. 7. 2 促進試験より得られた中性化速度係数

配合	中性化速度係数 (mm/√年)		備考
	材齢26週	材齢59週	
27N-U0F0	18.1	17.5	27NC
27N-U65F25	25.9	23.4	27FAC
36N-U0F0	8.4	8.4	36NC
36N-U80F20	13.3	11.5	36FAC

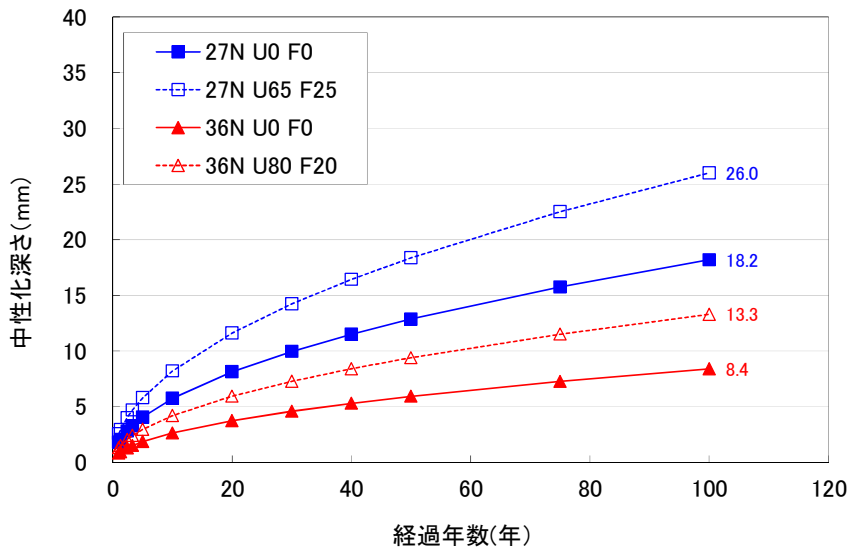


図 3.7.2 促進中性化速度係数から試算した中性化予測

表 3.7.3 道路橋示方書に記載される鉄筋の最小かぶり (mm)

部材の種類		上部構造			下部構造		
		けた			はり	柱	
		1. 工場で製作されるプレキャスト部材	2. 1以外のプレストレストコンクリート構造	3. 1以外の鉄筋コンクリート構造			
塩害の懸念の度合い	影響が激しい	S	70※(50~70)			90※(70)	
	影響を受ける	I	50(35)	70(50)		90(50)	90(50)
		II	35(25)	50(35)	70(40)	70(50)	70(50)
		III	25(25)	35(35)	50(30)	50(35)	50(40)

※: 別途の塩害対策を併用(塗装鉄筋、コンクリート塗装など)
 注: かつこ内は現行の塩害対策指針による規定値

3.7.2 JPFAC の中性化暴露試験

前述の中性化促進試験で求めた 100 年後の中性化進行予測値は、あくまでも促進試験から求めた値であり、現実の環境における中性化進行値から求めたものではない。そのため、(公財) 沖縄県建設技術センターでは、沖縄県内で CO₂ 排出が多い交通渋滞箇所、降雨の影響がなく中性化が進行しやすい箇所として、沖縄都市モノレール安里駅下の中央分離帯を選定し、中性化暴露試験を実施し、実環境におけるフライアッシュコンクリート (FAC) 中性化抵抗性の確認を行っている。暴露試験状況を写真 3.7.1 に示す。

ただし、本暴露試験は、平成 26 年度から開始し、令和 13 年度までの 18 年間で予定しており、最新のデータとしては令和 3 年度に 8.8 年目の追跡調査値が得られている。8.8 年目の中性化進行値は、27FAC が 6.6mm、27NC が 3.9mm、36FAC が 1.1mm、36NC が 0.5mm と僅かであったが、前述の中性化促進試験と同様、FAC の方が NC に比べて中性化の進行が早い結果となった。

この暴露試験については、18 年間のデータが得られ次第取りまとめ、本指針 (案) の改定時に記載するものとする (参考文献 16)。



写真 3.7.1 中性化暴露試験状況

3.7.3 HrFAC の中性化促進試験

HrFAC の中性化抵抗性についても中性化促進試験 JIS A 1153 により確認した。中性化促進試験の供試体に用いた配合は、泡瀬連絡橋下部工事に用いた JPFAC 配合を基本に、JPFAC を HrFAC に置換した配合、FA を用いない 30N/mm² の JIS 配合の 3 配合とした（表 3.7.4）。

HrFAC を含むコンクリートの促進中性化試験の試験結果を表 3.7.5、図 3.7.3 に示す。これらの試験結果から以下の事がわかった。

- 1) 最終材齢 26 週における 3 配合の中性化深さは、以下の関係であり、中性化深さは JPFAC が最も大きく、次いで HrFAC、NC が最も小さくなった。

$$\text{JPFAC} : 12.3\text{mm} > \text{HrFAC} : 10.8\text{mm} > \text{NC} : 8.3\text{mm}$$

- 2) 最終材齢 26 週における 3 配合の中性化速度係数は、以下の関係であった。

$$\text{JPFAC} : 2.59\text{mm}/\sqrt{\text{週}} > \text{HrFAC} : 2.29\text{mm}/\sqrt{\text{週}} > \text{NC} : 1.65\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$$

次に得られた中性化速度係数を用いて中性化進行予測を行った。予測方法は、前述の JPFAC 中性化進行予測と同様、建築学会資料「コンクリートの中性化促進試験方法（案）—高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針—」に記載された予測方法で行った。中性化予測結果を表 3.7.6 および図 3.7.4 に示す。これらの結果から、中性化促進試験による 100 年後の予測中性化深さは以下の通りであった。

$$\blacklozenge \text{JPFAC} : 17.3\text{mm} > \text{HrFAC} : 15.4\text{mm} > \text{NC} : 11.0\text{mm}$$

ここで、実構造物の鉄筋の最小かぶりについては、前出表 3.7.3 のように道路橋示方書では規定しており、沖縄県内陸部の鉄筋の最小かぶりは一部工場製品以外 50mm とされている。また、コンクリート標準示方書では、鉄筋かぶりの未中性化領域を「中性化残り」と称し、これが沖縄県のような塩害環境の場合 15mm を下回ると鋼材腐食が顕著になる構造物が急増すると記載されている。よって、鉄筋かぶりを 50mm とし、未中性化領域の最小値 15mm を引くと、許容中性化深さは 35mm と仮定でき、この値と図 3.7.4 の 100 年後の予測中性化深さを比較すると、最大値である JPFAC の 17.3mm でも中性化残りは 17.7mm であり、試験を行った 3 配合ともに中性化劣化の許容値内にあった。

以上から、促進中性化速度係数による中性化予測では、泡瀬連絡橋に用いた JPFAC も、またそれを HrFAC に換えた場合でも中性化抵抗性が 100 年耐久性を満足する可能性が高いとわかった（参考文献 14）。

表 3.7.4 中性化促進試験を行っている3種類のコンクリート配合

配合名	W/(C+F1) (%)	s/a (%)	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	内割り FA1 (kg/m ³)	外割り FA2 (kg/m ³)	砕砂 S1 (kg/m ³)	海砂 S2 (kg/m ³)	砕石G (2005) (kg/m ³)
HrFAC (30N-HrU71F19)	47.5	48.3	168	283	71	19	694	170	964
NC (30N-U0F0)	47.5	47.8	170	358	—	—	686	168	948
JPFAC (30N-JPU71F19)	47.5	48.4	168	283	71	19	698	171	964

注) 配合記号の読み方 30N : 設計基準強度30N/mm²
 HrU71F19: 加熱改質FAの内割り配合量71kg/m³、外割り配合量19kg/m³
 U0F0 : FAの内割り配合量0kg/m³、外割り配合量0kg/m³
 JPU71F19: 電源開発FAの内割り配合量71kg/m³、外割り配合量19kg/m³

表 3.7.5 中性化促進試験結果と中性化速度係数

コンクリートの配合	供試体 No	測定材齢(週)					中性化 速度係数 (mm/√週)
		1	4	8	13	26	
普通コンクリート (NC)	①	1.3	3.6	5.1	5.6	8.4	1.65
	②	0.8	4.5	4.7	5.6	8.3	
	③	0.8	4.2	5.1	5.6	8.1	
	平均	1.0	4.1	4.9	5.6	8.3	
加熱改質フライアッシュ コンクリート (HrFAC)	①	2.8	6.4	6.6	8.7	10.3	2.29
	②	1.5	5.4	6.8	8.4	9.9	
	③	2.7	6.5	6.5	8.9	12.1	
	平均	2.3	6.1	6.6	8.6	10.8	
分級フライアッシュ コンクリート (JPFAC)	①	3.1	6.3	8.5	9.6	11.9	2.59
	②	3.2	5.7	7.8	9.6	12.8	
	③	2.9	6.2	7.7	9.3	12.1	
	平均	3.0	6.0	8.0	9.5	12.3	

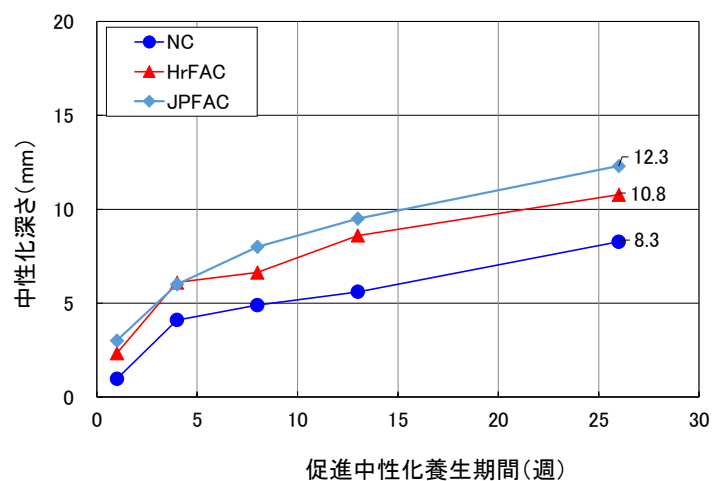


図 3.7.3 促進材齢と平均中性化深さの関係

表 3.7.6 中性化深さ将来予測結果

配合種別	将来予測に必要な補正係数		中性化速度係数 (mm/√年)		暴露試験供試体の中性化深さ 将来予測値(mm)								
	供試体寸法 15×15cm Asize	炭酸ガス濃度 0.0486% Aco ₂	促進試験 実測値	暴露環境 換算値	経過年数(年)								
			CO ₂ :5.0%	CO ₂ :0.0486%	1	5	10	20	30	40	50	75	100
NC	0.94	0.099	11.9	1.10	1.1	2.5	3.5	4.9	6.0	7.0	7.8	9.5	11.0
HrFAC	0.94	0.099	16.6	1.54	1.5	3.4	4.9	6.9	8.4	9.7	10.9	13.3	15.4
JPFAC	0.94	0.099	18.7	1.73	1.7	3.9	5.5	7.7	9.5	10.9	12.2	15.0	17.3

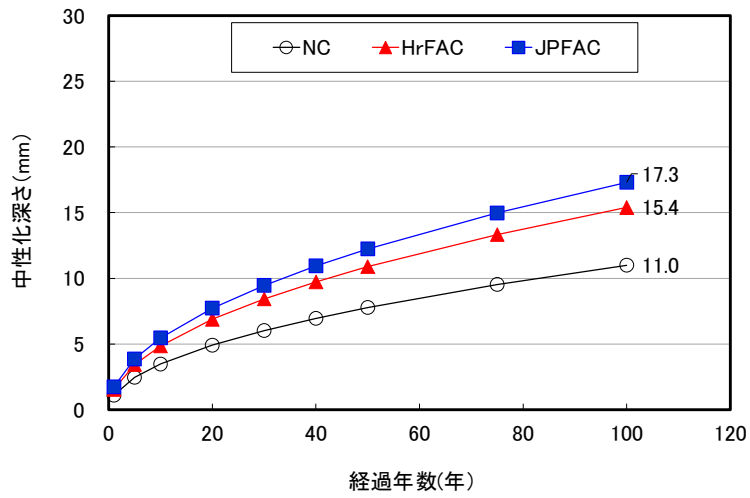


図 3.7.4 中性化深さ将来予測結果

4. フライアッシュ（FA）の供給能力

沖縄県では、3か所の石炭火力発電所が稼働しており、そのうち2発電所は沖縄電力株式会社管理、残り1発電所は電源開発株式会社管理である。

このうち、電源開発株式会社石川石炭火力発電所には分級設備があり、コンクリート材料に使用可能なJIS灰が産出され、コンクリート用材料としては琉球セメント株式会社がこのフライアッシュ（FA）を用いてフライアッシュセメントB種の生産、およびJIS II種灰そのものをコンクリート用混和材としてコンクリート製造工場に販売している。

一方、沖縄電力株式会社の2箇所の火力発電所では、コンクリートの混和材などに使用するための分級設備がなく、JISに定められた灰を採取できない。ここで、沖縄電力株式会社の令和3年度石炭灰排出量は約10.1万トンであり、その処理として、セメント原料やリサイクル資材としての再資源化に8.3万トン、残りは土地造成材として公有水面の埋め立てに利用されており、再資源化率は100%となっている。しかし、将来的には埋め立てが不可能になる可能性もあり、別の再資源化を考える必要がある。そこで、沖縄電力株式会社の非JIS灰は、株式会社リュウクス（元ゼロテクノ沖縄、平成24年1月設立）において未燃カーボンを再燃焼して改質した高品質のJIS II種灰（HrFA）に再生され、コンクリート用混和材として利用されていたが、令和2年度以降製造されていない。

また、沖縄県内のいくつかのコンクリート製造工場においては、フライアッシュコンクリート（FAC）のJIS認証を受けており、今後もJIS認証工場の拡大が予定されている。

このように沖縄県では、FAをコンクリートに使用するための環境が整ってきており、日本コンクリート工学会の特集（2014年5月）でも「沖縄県におけるフライアッシュコンクリートの利用促進について」が取り上げられている。

図4.1.1は、電源開発株式会社石川火力発電所から産出するJIS II種灰産出量の推移である。ただし、この全量を琉球セメント株式会社が購入し販売するため、電源開発株式会社からの出荷量は琉球セメント株式会社のオーダーによるものである。

図4.1.2は、琉球セメント株式会社が出荷（販売）したフライアッシュ（FA）（JIS II種灰）の量と主な工事の関係である。ここで、前述のように石川火力発電所で算出するJIS II種灰は、全量琉球セメントが買い取っているため、図4.1.1と図4.1.2は近似しているはずであるが、H19年度については販売量が出荷量を大きく上回っているのがわかる。これは、大保ダム建設におけるFA使用量が多かったため、九州から購入して出荷していたためであり、その他の年度でもダム建設工事では一部九州からの購入があったと考えられる。図4.1.2に見られるように、沖縄県内におけるFAの販売量は、ダム工事で最も多く、次いで伊良部架橋工事や県道20号泡瀬工区橋梁工事などの橋梁工事であった。

図4.1.3は、琉球セメント株式会社屋部工場における石炭灰（非JIS灰）受入量の推移である。ここで、石炭灰は前述のようにセメントの原料となるため、琉球セメント株式会社はコンクリート混和材以外にセメントの材料として購入して利用している。同図から、最も非JIS灰の受入量が多いのは金武火力発電所で、次いで石川火力発電所、具志川火力発電所の順番であった。

図4.1.4および表4.1.1は、フライアッシュの有効利用状況内訳である。これらから、沖縄県内で算出するFAの70%以上はセメントの粘土代替として用いられ、JISフライアッシュは全体

の13%程度である事がわかる。

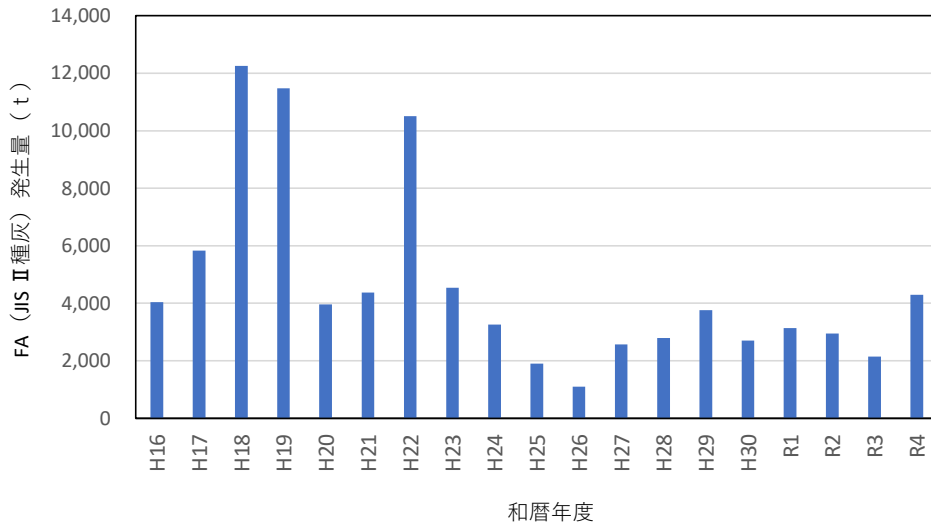


図 4.1.1 電源開発石炭火力発電所のFA (JIS II種灰) 産出量
 (琉球セメント株式会社提供)

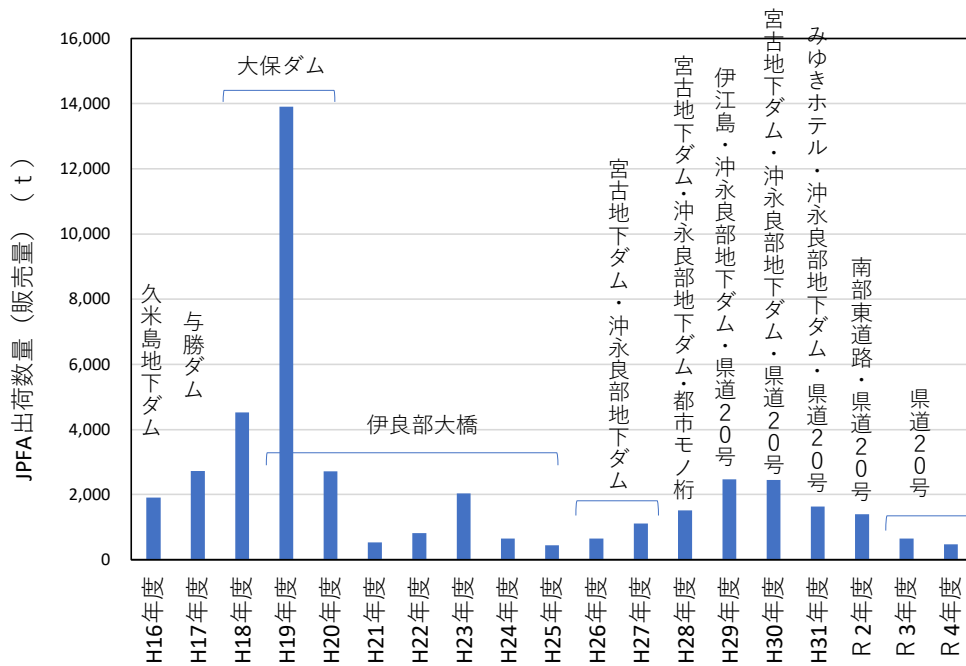


図 4.1.2 琉球セメントのFA (JIS II種灰) 出荷 (販売) 量と主な工事
 (琉球セメント株式会社提供)

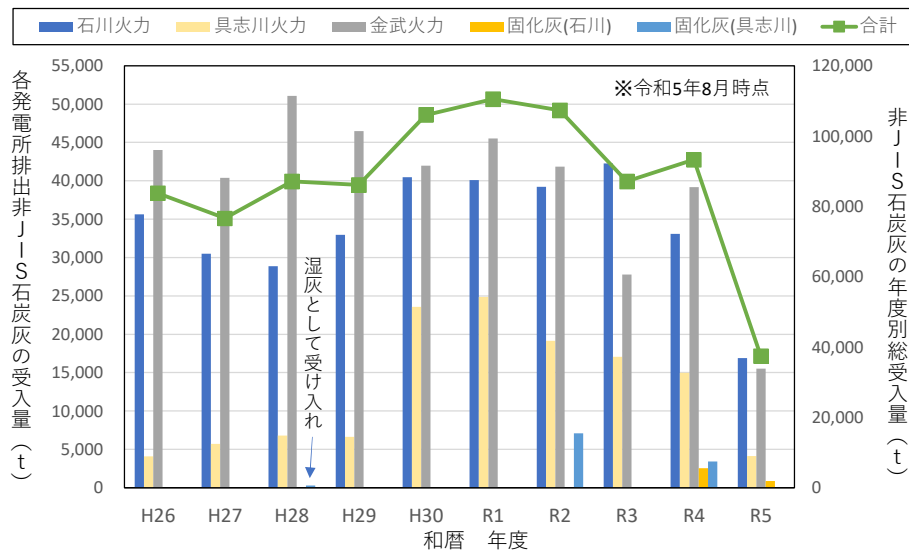


図 4.1.3 琉球セメント屋部工場における石炭灰（非 JIS 灰）受入量の推移
 （琉球セメント株式会社提供）

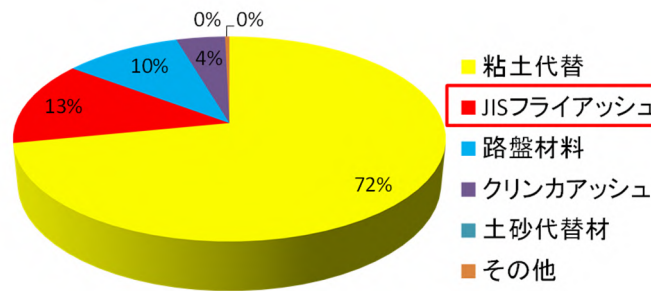


図 4.1.4 フライアッシュの有効利用状況内訳
 （琉球セメント株式会社提供）

表 4.1.1 フライアッシュの有効利用状況内訳

有効利用の内訳（H14 沖縄県）

年度	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	割合 (H14)	合計	割合 (合計)
粘土代替	21,000	27,000	29,000	40,000	50,000	47,000	57,000	51,000	65,000	77%	387,000	72%
JISフライアッシュ	9,500	12,000	11,000	11,000	8,000	7,000	6,000	4,000	3,000	4%	71,500	13%
路盤材料	0	0	0	0	8,000	7,000	17,000	9,000	14,000	17%	55,000	10%
クリンカアッシュ	300	0	2,000	1,500	4,000	6,000	3,000	4,000	2,000	2%	22,800	4%
土砂代替材	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%	0	0%
その他	0	0	0	0	0	0	0	2,000	0	0%	2,000	0%
年度計	30,800	39,000	42,000	52,500	70,000	67,000	83,000	70,000	84,000		538,300	

注)四捨五入の関係で数値が合わない場合がある

※H15 年度以降データなし （琉球セメント株式会社提供）

5. 環境負荷低減効果（CO₂削減効果）

フライアッシュコンクリート（FAC）の環境負荷低減効果（CO₂削減効果）については、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」－利用拡大に向けた設計施工指針試案－（土木学会コンクリート委員会、2009.12）に以下のように述べられている（参考文献4）。

(1) 環境負荷低減効果

上記指針試案では、石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュ（FA）は、アルミノシリケートガラスを主成分として、ムライトやα-石英を結晶として含む。常温では、ムライトやα-石英は反応せず、アルミノシリケートガラスのポゾラン反応により、組織を緻密とし、屈曲度の大きな空隙構造を生成し、低置換率でもアルカリシリカ反応抑制効果があるとしている。

図5.1.1は、指針試案に示された混和材の利用による環境負荷低減効果などをまとめて示したものである。これらを見ると、FAはCO₂、SO_x、NO_xばいじんの排出量低減効果があり、製造エネルギー削減効果もある。この他、耐久性に及ぼす要因の低減としては、アルカリ量や塩化物イオン量の希釈効果があるとしている。

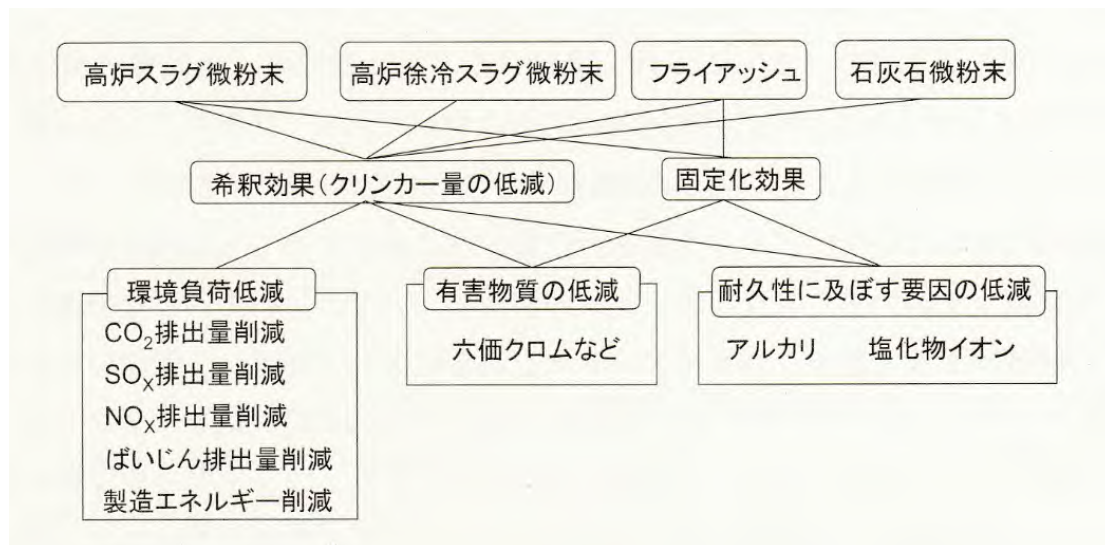


図 5.1.1 各種混合剤の環境負荷低減効果

(2) CO₂ 排出量

図 5.1.2 は、CO₂ 排出量に着目してポルトランドセメント（OPC）と高炉スラグ微粉末（BFS）、フライアッシュ（FA）および石灰石微粉末（LS）を図に示す置換率で置換した場合のCO₂ 排出量比較である。

同図に見られるように、FA・BFS・LSのCO₂ 排出量削減効果はほぼ同じであり、OPCの20%置換ではCO₂ 排出量が20%程度減少することがわかる。

これに加え、前出図 5.1.1 に示すように、FAはアルカリ量や塩化物イオン量の希釈効果があることがわかっているため、厳しい塩害環境の沖縄県ではFAの有効利用が環境的に大変有用であると言える。

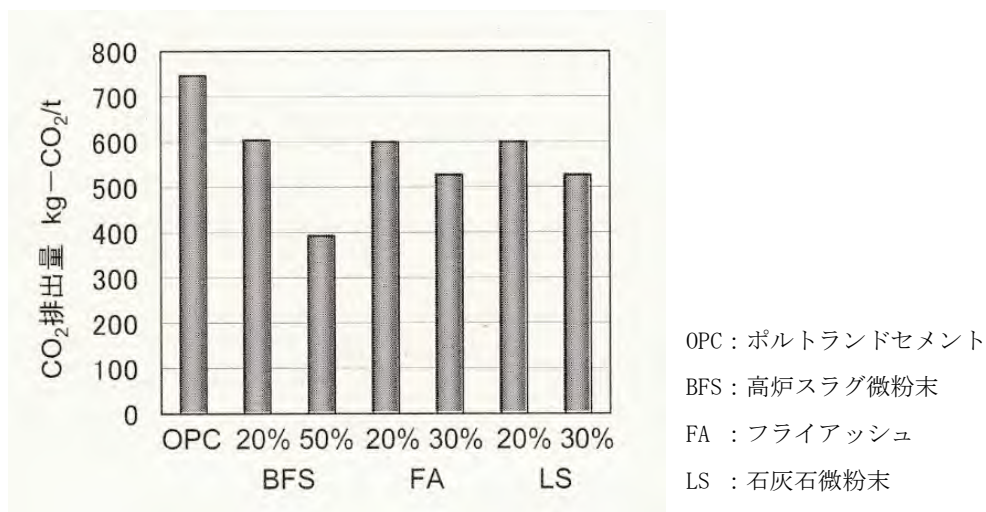


図 5.1.2 フライアッシュのCO₂ 排出量

6. 経済性

フライアッシュコンクリート（FAC）を使用した場合と使用しなかった場合の施工費の試算を以下に行った。

6. 1 施工費用の上昇について

(1) フライアッシュコンクリート（FAC）の単価

表 6.1.1 は、沖縄県生コンクリート協同組合に提供頂いた令和 5 年 4 月時点の沖縄県内の生コンクリート価格表である。このうち、下部工に用いる 30-12-20 配合について JPFA を用いたフライアッシュコンクリート（JPFAC）の単価をヒアリングし、普通コンクリート（NC）と比較すると以下のように 10.3%の価格アップとなる。なお、FAC の配合は内割り+外割り配合タイプとし、内割り FA 量をセメントの 20%以下、外割り FA 量は 1 m³当たりの FA 総量が 90kg/m³になるようなコンクリートとして算定している。

次に、比較のために R4 南部東道路橋梁下部工工事（南城佐敷・玉城 IC 橋 P2, A2）の積算結果を見ると、FAC と NC の単価は下記の通りであり、ここでも FAC の単価アップ率は 10.3%であったことから、近年の両者の FAC の単価は NC の概ね 10.3%アップと考えて良いと言える。

令和 5 年 4 月時点の単価（生コン組合ヒアリング）

a) 30-12-20FAC 単価	:	24,600 円/m ³
b) 30-12-20NC 単価	:	22,300 円/m ³
<hr/>		
c) 差 額	:	2,300 円/m ³ (10.3%up)

R4 南部東道路橋梁下部工工事（南城佐敷・玉城 IC 橋 P2, A2）

a) 30-12-20FAC 単価	:	26,670 円/m ³
b) 30-12-20NC 単価	:	24,180 円/m ³
<hr/>		
c) 差 額	:	2,490 円/m ³ (10.3%up)

表 6.1.1 生コンクリート価格表

令和5年4月1日


生コンクリート価格表

(下記価格には消費税は含まれておりません)

沖縄県生コンクリート協会
 那覇市港町2丁目14番1号
 TEL 868-8001

※印は高性能AE減水剤込みの価格となります。

I 普通コンクリート空気量4.5% 粗骨材最大寸法20mm

呼び強度 スラブ厚	18	21	24	27	30	33	36	40	42	45
8	20,400	20,700	21,200	21,700	22,100	22,750	23,250	23,950		
10	20,450	20,750	21,250	21,750	22,200	22,850	23,350	24,050		
12	20,500	20,800	21,300	21,800	22,300	※23,800	※24,350	※25,400	※26,250	※26,950
15	20,600	20,900	21,400	21,900	22,400	※23,950	※24,500	※25,550	※26,400	※27,100
18	20,700	21,000	21,500	22,000	22,500	※24,100	※24,750	※25,800	※26,600	※27,300
21		21,150	21,650	22,150	22,700	※24,350	※25,000	※26,150	※26,900	※27,600

II 普通コンクリート空気量4.5% 粗骨材最大寸法40mm

呼び強度 スラブ厚	18	21	24	27	30
8	20,700	21,000	21,450	22,000	22,500
10	20,750	21,050	21,500	22,050	22,600
12	20,800	21,100	21,550	22,150	22,700
15	20,850	21,150	21,650	22,250	22,800

III 舗装コンクリート

(1) 20mm		(2) 40mm	
呼び強度 スラブ厚	曲げ4.5	呼び強度 スラブ厚	曲げ4.5
2.5	25,850	2.5	26,250
6.5	26,100	6.5	26,500

IV モルタル(規格外品)

品 種	1:2	1:3	1:4
価 格	28,100	25,700	24,000

※気泡モルタルの場合は上記金額に1,800円(但し、気泡剤価格を除く)加算致します。

V 割り増し加算額

基本料金		1日当り1件につき	88,700円
夜間及び 早朝打設	通常夜間	19:00~22:00	m ³ 当り 1,000円
	深 夜	22:00~06:00	m ³ 当り 2,000円
小 型 車	早 朝	06:00~07:00	m ³ 当り 1,000円
			m ³ 当り 2,500円
拘束料金	久高島	アジテータ車1台当たり (1) 8時間以内は40,000円 (2) 8時間を超えた場合は前項(1) に5,000円/時間を加算	
	津堅島		
	沖打ち		
計量印字記録表 発行料金	アジテータ車1台当り (1枚当り)	400円	

※その他、上記以外に割り増しを必要とする場合は別途協議させて頂きます。

VI 試験代行セット料金(1回当たり)

試験項目: スランプ・空気量・塩化物量・供試体6本採取

普通コンクリート			舗装コンクリート		
昼間 (07:00~ 19:00)	夜間(19:00~ 22:00) 早朝(06:00~ 07:00)	深夜 (22:00~ 06:00)	昼間 (07:00~ 19:00)	夜間(19:00~ 22:00) 早朝(06:00~ 07:00)	深夜 (22:00~ 06:00)
5,000円	10,650円	11,750円	7,700円	18,950円	21,200円

※前項VIの割り増し加算額の内、離島・沖打ち等の拘束料金が発生する現場での試験代行料金は別途協議させて頂きます。
 ※上記の4項目(スランプ・空気量・塩化物量・供試体採取)以外の試験項目については別途協議させて頂きます。

レディーミクストコンクリート指定の条件

- この価格表はJIS A5308の規定に従って製造され、荷卸し地点まで配達されたレディーミクストコンクリートに適用されます。
- 品質の適用範囲は荷卸し地点までJIS A5308-5品質の5.1及び5.2の条件を満足させたものとなります。
- 水セメント比、単位セメント量の御指定の場合は呼び強度に換算して御注文願います。
- 呼び強度に換算できない場合は指定品として組合と購入者が協議の上、別途価格とさせていただきます。
- 価格が表示されていない空欄の配合は規格外品となります。
※本価格表は経済情勢の変動に応じて改定する場合がございます。

(2) FACの単価上昇が施工費に与える影響

FAC指針は、平成29年度に初版を策定され、令和元年度には小規模な第1回改訂を行った。沖縄県では、これらを用いて多くのFACを用いた構造物を建設してきた。以下は、代表的な重要構造物である。これらの多くは、海岸線もしくは海上に架設された橋梁で、多くの飛来塩分があり、それに伴うASRの発生が懸念される構造物である。

これらのうち、南部東道路の雄樋川橋A2橋台と南城佐敷・玉城IC橋P2橋脚、A2橋台、県道20号線（泡瀬工区）橋梁（泡瀬連絡橋）のP3橋脚についてFACとNCの工費比較を行う。

なお、これらの3構造物は当初からFACにより積算されているため、前述のFACの単価アップ率（10.3%）でFAC単価を割ってNC単価とし、その差額からNCからFACの増額費を算出している。

表6.1.2には、3構造物におけるコンクリート打設量、FACとNCの単価、両者の単価差を示し、NCからFACの増額工事費と全工事価格（税抜き）における増額費の割合をまとめた。この結果から、NCをFACに替えても、これらの3構造物の工事価格は、最大でも1.27%の上昇率と軽微であることがわかった。

【FAC指針策定後に建設された代表的なFAC構造物】

- 伊良部大橋（上・下部工）
- 那覇大橋（下部工）
- 桃原橋（上・下部工）
- 沖縄都市モノレール延伸工事（軌道桁）
- 新本部大橋（下部工）
- 南部東道路橋梁（上・下部工）
- 県道20号線（泡瀬工区）橋梁（上・下部工）
- その他

表 6.1.2 NCからFACへ増額した場合の工事費に占める割合

項目	雄樋川橋A2橋台	南城佐敷・玉城IC橋 P2橋脚、A2橋台	泡瀬連絡橋P3橋脚	備考
a) コンクリート打設量 (m ³)	872	389	1360	
b) FAC単価 (円)	20,700	26,670	19,570	工事積算単価
c) NC単価 (円)	18,767	24,180	17,743	生コン組合ヒアリングの FACとNC単価比を工事積算 単価に掛けて算出
d) 生コン単価差額 (円)	1,933	2,490	1,827	
e) NCからFACの増額費 (円)	1,685,577	968,800	2,485,372	
f) 工事価格	198,190,000	140,040,000	195,460,000	各土木事務所提供の値
g) 工事価格に及ぼす増額費の割合	0.85%	0.69%	1.27%	

6. 2 補修費用の検討

(1) 補修費用検討を行う耐久性劣化

沖縄県における主な耐久性劣化は、塩害、アルカリシリカ反応（ASR）および中性化である。

このうち、塩害は使用する海砂を十分除塩し、十分なかぶりを確保する、飛来塩分の多い海岸構造物にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いるなどすれば概ね防げる。また、沖縄県の土木構造物は、塩害対策のためのかぶりが大きいため、中性化の進行が鉄筋に至るには長い時間が必要で、橋梁下部工コンクリートを用いた中性化促進試験およびシミュレーション結果から 100 年耐久性を満足することがわかっている。

これに対し、ASR は、沖縄県内で一般的にコンクリート用細骨材に用いられている新川沖産海砂により発生することがわかっている。しかし、新川沖産海砂はコンクリートのワーカビリティを確保するために有用な骨材であり、その流通は沖縄県内の基幹産業でもあるため、簡単に排除することが出来ない。このため、ASR 抑制対策として FAC を用いることが最も有効であると考えられる。

(2) 補修工法の選定

ASR の補修は、これまでは「ひび割れ注入工+表面被覆工」が良いとされてきた。特に、表面被覆工法には、有機系塗装剤を用いる工法と無機系塗装剤を用いる工法があり、施工箇所や対象構造物により使い分けが行われてきた。これに対し、近年は「シラン系 or けい酸塩系含浸材塗布工法」が多く使われてきている。これは、表面被覆工法を行うとひび割れが見えなくなり、維持管理を行う上で不都合であるという考え方に変わったためである。なお、ASR による劣化が比較的軽微な場合は、含浸材を用いる工法でも十分 ASR の進行抑制が図られることがわかっている。

ここで、新川沖産海砂により発生した ASR は、多くの場合ひび割れ幅が小さく、ひび割れ注入工の必要がない程度の軽微な劣化であることが多い。これは、新川沖産海砂が粒径の小さな細骨材であるため膨張量が少なく、ひび割れ幅が小さくなるのが原因と考えられる。

よって、ここでの補修費用の検討は、断面復旧工やひび割れ注入工を用いず、表面被覆工法による補修と含浸材塗布工法による補修により補修工費を試算するものとする。なお、地中深くに施工された場所打ち杭については、表面被覆工法・含浸材塗布工法ともに施工が実質不可能であるため、ここでは試算を行わないものとする。

(3) 補修費用の検討

表面被覆工法に用いる塗装材は、有機系被覆工法と無機系被覆工法の 2 種類を選出し、これに表面含浸工法を加えた。これらは、土木学会コンクリートライブラリー119「表面保護工法設計施工指針（案）」（平成 17 年 4 月）の工種別資料編 に示された補修工法であり、現在も各種補修工事に用いられているものである（参考文献 20）。表面被覆材料の塗装単価は、2017 年度 FAC 指針策定時の補修業者見積りによるものであり、含浸材塗布工法は積算資料公表価格版 2017 年 3 月号 p. 377 に示された単価である。

補修費用の検討は、雄樋川橋 A2 橋台、南城佐敷・玉城 IC 橋 P2 橋脚、A2 橋台および泡瀬連絡

橋 P3 橋脚に対して行った。結果を表 6.2.1 に示す。

同表に見られるように、雄飛川橋 A2 橋台の ASR 補修費用は、補修単価の最も安い表面含浸工法でも 487 万円/m³ かかり、無機系被覆材を用いた場合は 826 万円/m³、有機系塗装材を用いた場合は 1,251 万円/m³ 必要となる。南城佐敷・玉城 IC 橋 P2 橋脚, A2 橋台では、各々 186 万円/m³、314 万円/m³、476 万円/m³ かかる。この金額は、仮設費を含んでいないため、南部東道路全体で ASR が発生するとさらに総補修費用は膨大となることが考えられる。

また、泡瀬連絡橋 P3 橋脚では、表面含浸工法で 313 万円/m³、無機系被覆材では 530 万円/m³、有機系塗装材を用いた場合は 802 万円/m³ かかり、同橋梁は橋脚が 17 基、橋台が 2 基ある海上の長大橋であるため、ここでも仮設費を加えると補修費用は膨大となることが考えられる。

なお、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。また、表面含浸工法でも塗り替えは必要で、架設環境にもよるが経過年数によりその効果は薄れるとされている。これらの耐用年数については、コンクリート工学会「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 2022」においても同様の記述があり、この耐用年数の考え方を用いて、次節でライフサイクルコスト（LCC）の検討を行う。

表 6.2.1 ASR補修工事の概算費用

(単位：円/m²)

橋名	補修面積 (m ²) ※1	表面被覆工法		含浸材塗布工法	備考
		有機系塗装材	無機系塗装材	シラン系orケイ酸塩系耐塩害用含浸材	
		¥13,599	¥8,982	¥5,300	
雄飛川橋 A2橋台	920	¥12,511,080	¥8,263,440	¥4,876,000	R1南部東道路橋梁下部工事
南城佐敷・玉城IC橋 P2橋脚, A2橋台	350	¥4,759,650	¥3,143,700	¥1,855,000	R1南部東道路橋梁下部工事
P3橋脚	590	¥8,023,410	¥5,299,380	¥3,127,000	県道20号線（泡瀬区）橋梁整備工事

※1：補修面積は型枠面積から算出

※2：補修工法の単価は、補修業者のヒアリングによる

6.3 ライフサイクルコスト（LCC）

図 6.3.1～図 6.3.3 は、雄飛川橋 A2 橋台と南城佐敷・玉城 IC 橋 P2 橋脚, A2 橋台、および泡瀬連絡橋 P3 橋脚の表面被覆工法（2 工法）と表面含浸工法とフライアッシュコンクリート（FAC）初期投資のアルカリシリカ反応（ASR）に対するライフサイクルコスト（LCC）である。ただし、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。

補修工法の効果持続期間は、日本コンクリート工学会「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 2022」（参考資料-6.2.3 補修・補強工法の耐用年数の報告例、p.121）（参考文献 21）において樹脂被覆：15 年等、表面含浸工法：10～20 年等、無機系被覆 12 年との記載があり、紫外線劣化の強さなどを考慮して表面含浸工法の効果持続期間を 10 年として算定していることか

ら、ここでは有機系被覆工法を15年、無機系被覆工法を12年、表面含浸工法を10年の塗り替え期間としてLCCを検討した。

これらの図から、雄飛川橋 A2 橋台と南城佐敷・玉城 IC 橋 P2 橋脚, A2 橋台、および泡瀬連絡橋 P3 橋脚ともに、施工当初に FAC を用いて ASR を抑制した場合の方が、ASR が発生して各種維持補修工事を10～15年毎に行うより、LCCは明らかに有利である事がわかる。

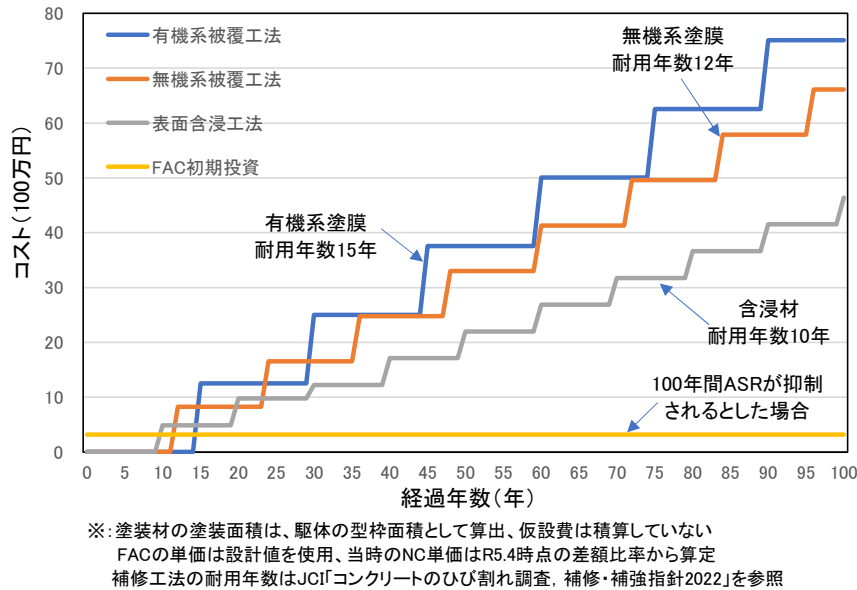


図 6. 3. 1 雄飛川橋 A2 橋台のライフサイクルコスト

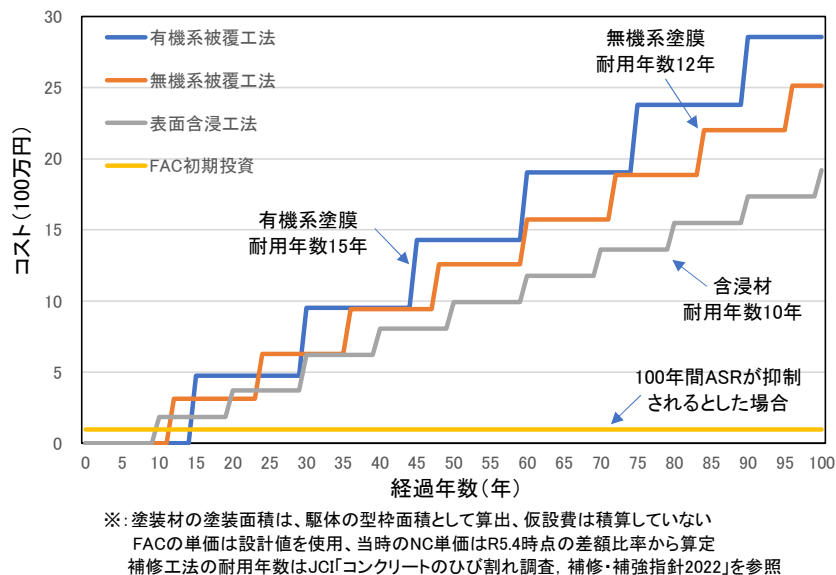
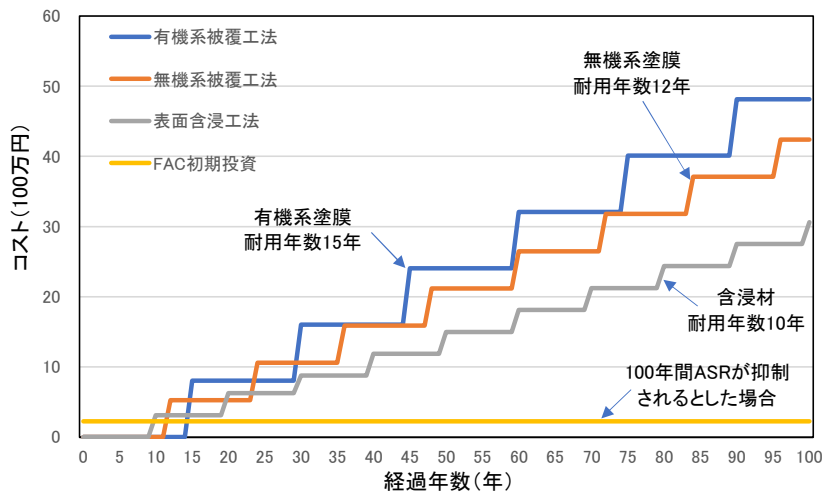


図 6. 3. 2 南城佐敷・玉城 IC 橋 P2 橋脚, A2 橋台のライフサイクルコスト



※: 塗装材の塗装面積は、駆体の型枠面積として算出、仮設費は積算していない
 FACの単価は設計値を使用、当時のNC単価はR5.4時点の差額比率から算定
 補修工法の耐用年数はJCI「コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針2022」を参照

図 6.3.3 泡瀬連絡橋 P3 橋脚のライフサイクルコスト

7. 配合設計例

フライアッシュコンクリート（FAC）には、**図 7.1** に示すように①内割り＋外割り配合タイプ、②内割り配合タイプ、③外割り配合タイプの3配合パターンがある。

ここでは、沖縄県内でこれまでに使用された、または現在使用されている配合の配合設計例を**表 7.1** に示す。ただし、本章に示す配合計算書等は、実際に出荷されたコンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。よって、新規に FAC を製造するに当たっては、配合の条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成する必要がある。

これらの FAC は、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に規定されるフライアッシュⅡ種を混和材として用いた配合と、JIS R 5213「フライアッシュセメント」に規定されるフライアッシュセメント B 種を混合セメントとして用いた配合がある。混合セメントとして使用した場合は、事例の配合表に「フライアッシュセメント」と記載している。

なお、フライアッシュ（FA）以外の材料（セメント、水、骨材等）は、コンクリート製造工場ですべて通常使用している材料が原則使用されている。

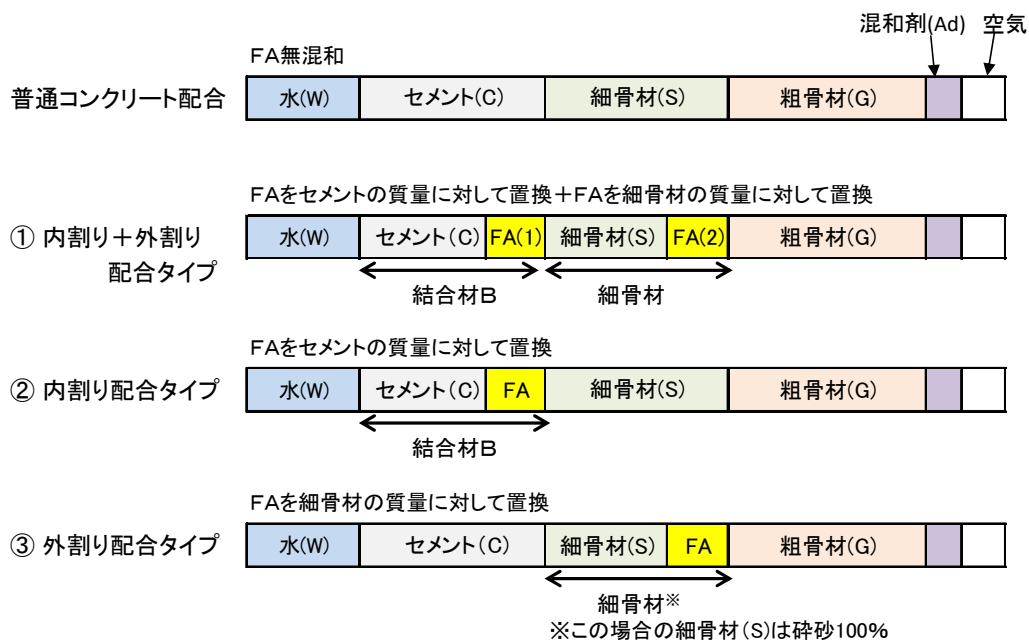


図 7.1 配合パターン

表 7.1 配合設計例

配合タイプ	配合	配合タイプ	配合
内割り配合＋外割り配合タイプ	27-12-40	外割り配合タイプ	36-15-20
	30-12-20		45-18-20
	36-12-20		50-18-20
	21-12-40		36-12-20
	30-18-20		40-18-20
内割り配合タイプ	27-8-20	50-20-20	
	33-8-20	50-60-20	

■は、第2回改訂で追記した配合

7. 1 内割り+外割り配合タイプ

従来の普通コンクリート（NC）と同等の強度管理（管理材齢 28 日）が可能なコンクリートで、沖縄県で最も多く用いられている配合である。特に塩化物イオンの浸透抑制（塩害抑制）、マスコンクリートのセメント水和熱に起因したひび割れ発生の抑制、アルカリシリカ反応（ASR）に対しても高い抑制効果がある。セメントに対する質量置換率は 20% とし（内割り配合）、初期強度発現不足を補う意味で細骨材の一部と質量置換（外割り配合）するものである。外割り配合の置換率は、内割り配合と合わせて $100\text{kg}/\text{m}^3$ 以下となるようにする。

図 7.1.1 に内割り+外割り配合イメージを示し、図 7.1.2 に配合決定に至る検討フローを示す。

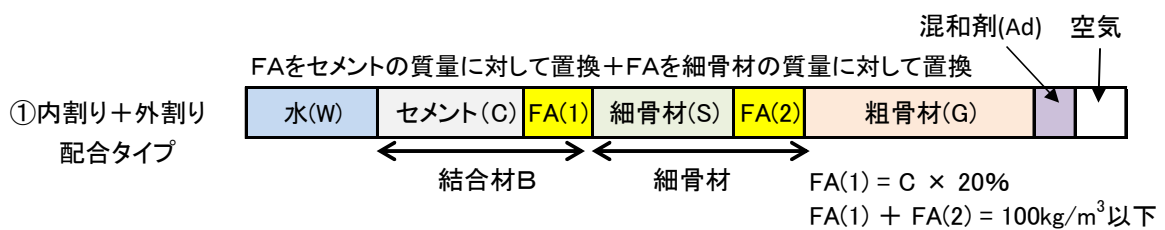


図 7.1.1 内割り+外割り配合タイプのイメージ

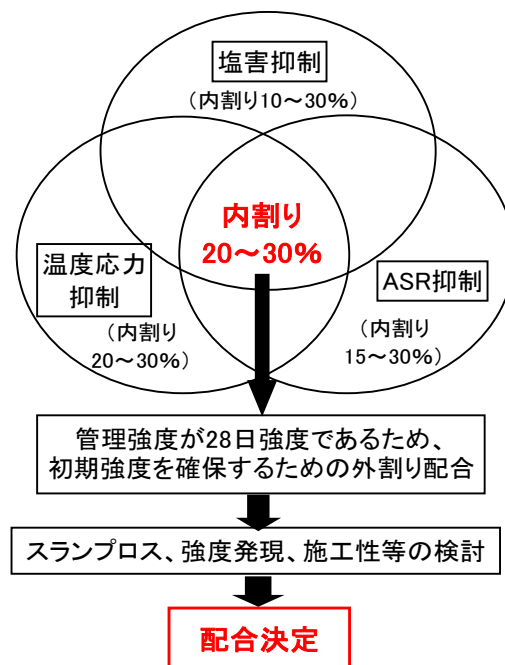


図 7.1.2 内割り+外割り配合決定検討フロー

7. 1. 1 27-12-40 内割り+外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 27N/mm^2 の基本配合（27-8-40）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された 27-12-20 内割り+外割り FAC の配合設計例を以下に示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.1.1 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.1.1 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スランプ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
27	28	8±2.5	4.5±1.5	40	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 27N/mm^2
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ $12\pm 2.5\text{cm}$
- ・ 空気量 指定なし
- ・ FA フライアッシュ II 種（株式会社ジェイペック石川カンパニー）
- ・ FA 量 総量 90kg/m^3
 内割り FA 量：セメントの約 20% 置換
 外割り FA 量：FA 総量 90kg/m^3 - 内割り FA 量
- ・ 混和剤 高機能 AE 減水剤

③ 配合の照査

表 7.1.2 に基本配合表、表 7.1.3 に基本配合表と FA 配合条件の照査結果を示す。

表 7.1.2 基本配合表（27-8-40）

設計基準強度 f_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G_{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)					
					セメント	水	細骨材		粗骨材	混和剤
					C	W	海砂 S1	砕砂 S2	4005 G	Ad
27	8	40	49.5	38.0	315	156	347	356	1173	1.89

表 7.1.3 基本配合表とFA配合条件の照査結果

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	27N/mm ²	基本配合と同じ	—	
単位水量	156kg/m ³	基本配合と同じ	—	
水セメント比 (水結合材比)	49.5%	基本配合と同じ	—	
スランプ	8±2.5cm	12±2.5cm	○	
空気量	4.5±1.5%	規定無し	○	
内割りFA量	—	セメント量の20%	○	セメント置換
外割りFA量	—	FA総量100kg/m ³ —内割りFA量	○	細骨材置換
混和剤	AE減水剤	高機能AE減水剤	○	

④ 使用材料

FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場ですべて通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.1.4 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント（琉球セメント(株)製，密度3.16）
混和材	F1	フライアッシュⅡ種（株）エイベック石川カンパニー，密度2.37）
水		地下水
細骨材	S1	東村新川産 海砂（表乾密度2.61，F.M2.30）
	S2	本部半島産 砕砂（表乾密度2.66，F.M3.00）
	F2	フライアッシュⅡ種（株）エイベック石川カンパニー，密度2.37）
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005（表乾密度2.70，実績率59.0%）
	G2	本部半島産 砕石4020（表乾密度2.70，実績率61.0%）
混和剤	Ad	高機能AE減水剤

⑤ 配合の照査結果に基づく配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.1.5 に示す。

表 7.1.5 27-12-40 内割り+外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2$	2.0 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 32.0$	32.0 N/mm ²
水結合材比	$\sigma_{28} = -7.3 + 19.4 \times B/W$ より $W/B = 19.4 \times 100 \div (32.0 + 7.3) = 49.36$	49.5 %
単位水量	工場実績値より $W = 156$	156 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + E) = (156 \div 49.5) \times 100 = 315.1$	315 kg/m ³
混和材量	$F_1 = 65$	65 kg/m ³
セメント量	$C = 315 - 65 = 250$	250 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 250 \div 3.16 = 79.1$	79 L/m ³
混和材容積	$E_v = 65 \div 2.37 = 27.4$	27 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (156 + 79 + 27 + 45) = 693$	693 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 697 (実績率 = 61.0 %)	697 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 697 \times 61.0 \div 100 = 425$	425 L/m ³
細骨材容積	$S_v = 693 - 425 = 268$	268 L/m ³
細骨材率	$s/a = 268 \div 693 \times 100 = 38.67$	38.7 %
細骨材	$S_1 = 268 \times 60 \div 100 \times 2.61 = 419.6$ $S_2 = 268 \times 40 \div 100 \times 2.66 = 285.2$	420 kg/m ³ 285 kg/m ³
粗骨材	$G_1 = 425 \times 60 \div 100 \times 2.70 = 688.5$ $G_2 = 425 \times 40 \div 100 \times 2.70 = 459.0$	689 kg/m ³ 459 kg/m ³
混和剤	結合材量の 0.85% $Ad = 315 \times 0.85 \div 100 = 2.6784$	2.678 kg/m ³
混和材	使用量指定により $F_2 = 25$	25 kg/m ³
細骨材補正	$S_1 = 420 - 25 \div 2.37 \times 2.61 \times 60 \div 100 = 403$ $S_2 = 285 - 25 \div 2.37 \times 2.66 \times 40 \div 100 = 274$	403 kg/m ³ 274 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

27-12-40 内割り＋外割り FAC 配合表を表 7.1.6 に示す。図 7.1.3 および図 7.1.4 に基本配合（普通コンクリート：NC）と FAC 配合の圧縮強度試験およびスランプの経時変化を示す。

表 7.1.6 27-12-40 内割り＋外割り FAC 配合表

設計基準強度 f'ck (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント	混和材	水	細骨材			粗骨材		混和剤
					C	フライアッシュ F1	W	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1	4020 G2	Ad
27	12	40	49.5	38.7	250	65	156	403	274	25	689	459	2.68

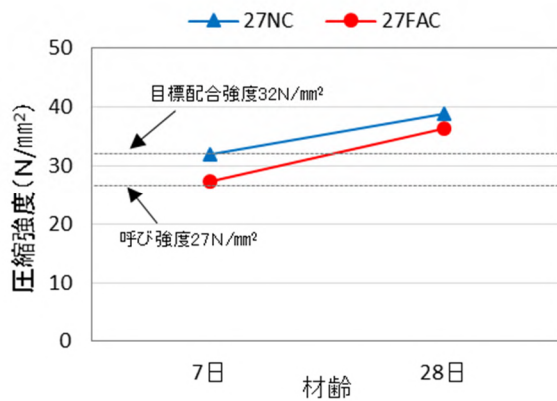


図 7.1.3 圧縮強度試験結果

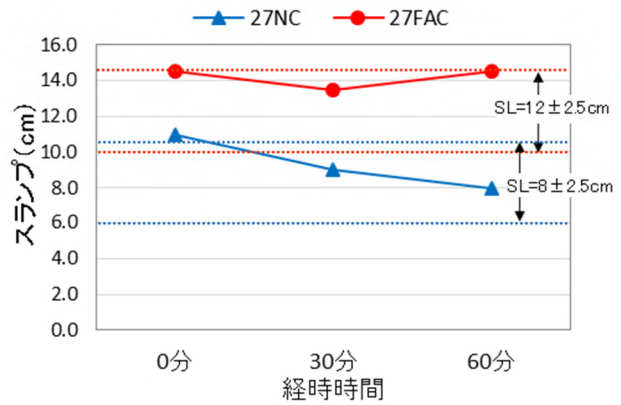


図 7.1.4 スランプ経時変化

7. 1. 2 30-12-20 内割り+外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 30N/mm^2 の基本配合（30-12-20）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された 30-12-20 内割り+外割り FAC の配合設計例を以下に示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.1.7 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.1.7 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スラブ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
30	28	12±2.5	4.5±1.5	20	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 30N/mm^2
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ 空気量 $2.0\% \pm 1.5\%$
- ・ FA フライアッシュ II 種（株式会社ジェイペック石川カンパニー）
- ・ FA 量 総量 90kg/m^3
 内割り FA 量：セメントの約 20% 置換
 外割り FA 量：FA 総量 90kg/m^3 - 内割り FA 量

③ 配合の照査

表 7.1.8 に基本配合表、表 7.1.9 に基本配合表と FA 配合条件の照査結果を示す。

表 7.1.8 基本配合表（30-12-20）

設計基準強度 f_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
					セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤
					C	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
30	12	20	47.5	45.6	356	169	446	364	988	—	4.005

表 7.1.9 基本配合表と FA 配合条件の照査結果

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	30N/mm ²	基本配合と同じ	—	
水セメント比 (水結合材比)	49.0%	基本配合と同じ	—	
空気量	4.5±1.5%	2.0±1.5%	○	
内割りFA量	—	セメント量の約20%	○	セメント置換
外割りFA量	—	FA総量90kg/m ³ －内割りFA量	○	細骨材置換

④ 使用材料

FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場ですべて通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.1.10 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント株製, 密度3.16)
混和材	F1	フライアッシュⅡ種((株)ジェイパック石川カンパニー, 密度2.45)
水		工業用水
細骨材	S1	東村新川産 海砂(表乾密度2.60, F.M2.30)
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.68, F.M3.00)
	F2	フライアッシュⅡ種((株)ジェイパック石川カンパニー, 密度2.45)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005 (表乾密度2.70, 実績率59.0%)
	G2	—
混和剤	Ad	高機能AE減水剤

⑤ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.1.11 に示す。

表 7.1.11 30-12-20 内割り＋外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.45$	2.45 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 36.1$	36.1 N/mm ²
水結合材比	$\sigma_{28} = -0.9 + 17.7 \times C/W$ より $W/C = 17.7 \div (36.1 + 0.9) \times 100 = 47.8$	47.5 %
単位水量	工場実績値より $W = 169$	169 kg/m ³
単位セメント量	$C = W \div (W/C) \times 100 = 169 \div 47.5 \times 100 = 356$	356 kg/m ³
混和材量	$AD1 = C \times \text{添加率} = 356 \times 20\% = 71$ $ADv1 = AD1 \div \text{密度} = 71 \div 2.45 = 29$ $AD2 = 19$ $ADv2 = AD2 \div \text{密度} = 19 \div 2.45 = 8$ $C = 356 - 71 = 285$ $Cv = C \div \text{密度} = 285 \div 3.16 = 90$	71 kg/m ³ 29 L/m ³ 19 kg/m ³ 8 L/m ³ 285 kg/m ³ 90 L/m ³
空気容積	【2.0% (規定値)】 $A = 2.0\% \times 1000 = 20$	20 L/m ³
単位粗骨材容積	当工場の実績値より かさ容積 = 0.620 実績率 = 59.0 % $Gv = 0.620 \times 1000 \times 59.0 \div 100 = 366$ $G = Gv \times \text{表乾密度} = 366 \times 2.70 = 988$	59.0 % 366 L/m ³ 988 kg/m ³
単位細骨材容積	$Sv = 1000 - (W + Cv + Gv + ADv + A) = 1000 - 682$ $S = Sv \times \text{表乾密度} = 318 \times 2.64 = 840$ $S1 = S \times 55.0\% = 462$ $S2 = S \times 45.0\% = 378$	318 L/m ³ 840 kg/m ³ 462 kg/m ³ 378 kg/m ³
細骨材率	$s/a = (Sv + ADv2) \div (Gv + Sv + ADv2) \times 100 = 47.1$	47.1 %
単位混和剤料	$Ad = (C + AD) \times \text{添加率} \times \text{密度} = 375 \times 1.1250\% \times 1 = 4.219$	4.219 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

30-12-20 内割り＋外割り FAC 配合表を表 7.1.12 に示す。

表 7.1.12 30-12-20 内割り＋外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
						セメント C	水 W	細骨材			粗骨材		混和剤 Ad	
								フライアッシュ F1	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1		4020 G2
30	12	20	59.3	47.5	47.1	285	71	169	462	378	19	988	—	4.219

7. 1. 3 36-12-20 内割り+外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 36N/mm^2 の基本配合（36-8-40）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された 36-12-20 内割り+外割り FAC の配合設計例を以下に示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.1.13 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.1.13 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スランプ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
36	28	8±2.5	4.5±1.5	40	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 36N/mm^2
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ $12\pm 2.5\text{cm}$
- ・ 空気量 指定なし
- ・ FA フライアッシュ II 種（株式会社ジェイペック石川カンパニー）
- ・ FA 量 総量 100kg/m^3
 内割り：セメントの約 20% 置換
 外割り：FA 総量 100kg/m^3 - 内割り FA 量
- ・ 混和剤 高機能 AE 減水剤

③ 配合の照査

表 7.1.14 に基本配合表、表 7.1.15 に基本配合表と FAC 配合条件の照査結果を示す。

表 7.1.14 基本配合表（36-8-40）

設計基準強度 f'_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G_{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
					セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤
					C	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
36	8	40	39.0	35.4	403	157	308	315	701	468	1.61

表 7.1.15 基本配合表と FAC 配合条件の照査結果

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	36N/mm ²	基本配合と同じ	—	
単位水量	157kg/m ³	基本配合と同じ	—	
水セメント比 (水結合材比)	49.5%	基本配合と同じ	—	
スランプ	8±2.5cm	12±2.5cm	○	
空気量	4.5±1.5%	指定無し	○	
内割りFA量	—	セメント量の約20%	○	セメント置換
外割りFA量	—	FA総量100kg/m ³ －内割りFA量	○	細骨材置換
混和剤	AE減水剤	高機能AE減水剤	○	

④ 使用材料

FAC 配合条件で指定されているもの以外は、製造プラントで通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.1.16 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	フライアッシュⅡ種(株)ジェイベック石川カンパニー, 密度2.37)
水		地下水
細骨材	S1	東村新川産 海砂(表乾密度2.61, F.M2.30)
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.66, F.M3.00)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイベック石川カンパニー, 密度2.37)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率59.0%)
	G2	本部半島産 砕石4020(表乾密度2.70, 実績率61.0%)
混和剤	Ad	高機能AE減水剤

⑤ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.1.17 に示す。

表 7.1.17 36-12-20 内割り+外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.45$	2.45 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 42.1$	42.1 N/mm ²
水結合材比	$\sigma_{28} = -7.3 + 19.4 \times B/W$ より $W/B = 19.4 \times 100 \div (42.1 + 7.3) = 39.25$	39.0 %
単位水量	工場実績値より $W = 157$	157 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + E) = (157 \div 39.0) \times 100 = 402.5$	403 kg/m ³
混和材量	$F_1 = 80$	80 kg/m ³
セメント量	$C = 403 - 80 = 323$	323 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 323 \div 3.16 = 102.2$	102 L/m ³
混和材容積	$E_v = 80 \div 2.37 = 33.8$	34 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (157 + 102 + 34 + 45) = 662$	662 L/m ³
細骨材率	指定細骨材率より $s/a = 35.4$	35.4 %
細骨材容積	$S_v = 662 \times 35.4 \div 100 = 234.3$	234 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 662 - 234 = 428.0$	428 L/m ³
細骨材	$S_1 = 234 \times 50 \div 100 \times 2.61 = 305.3$	305 kg/m ³
	$S_2 = 234 \times 50 \div 100 \times 2.66 = 311.2$	311 kg/m ³
粗骨材	$G_1 = 428 \times 60 \div 100 \times 2.70 = 693.3$	693 kg/m ³
	$G_2 = 428 \times 40 \div 100 \times 2.70 = 462.2$	462 kg/m ³
混和剤	結合材量の 1.05% $Ad = 403 \times 1.05 \div 100 = 4.2315$	4.232 kg/m ³
混和材	使用量指定により $F_2 = 20$	20 kg/m ³
細骨材補正	$S_1 = 305 - 20 \div 2.37 \times 2.61 \times 50 \div 100 = 294$	294 kg/m ³
	$S_2 = 311 - 20 \div 2.37 \times 2.66 \times 50 \div 100 = 300$	300 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

表 7.1.18 に 36-12-20 内割り+外割り FAC 配合表を示す。

表 7.1.18 36-12-20 内割り+外割り FAC 配合表

設計基準強度 f'ck (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水結合材比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント C	混和材 フライ アッシュ F1	水 W	細骨材			粗骨材		混和剤 Ad
								海砂 S1	砕砂 S2	フライ アッシュ F2	2005 G1	4020 G2	
36	12	40	39.0	35.4	323	80	157	294	300	20	693	462	4.23

7. 1. 4 21-12-40 内割り+外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

21-12-40 の内割り+外割り FAC の配合設計例を以下に示す。

① FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 21 N/mm²
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ 12±2.5cm
- ・ 空気量 指定なし
- ・ FA フライアッシュⅡ種（株式会社ジェイペック石川カンパニー）
- ・ FA 量 総量 100kg/m³
内割り：セメントの約 20%置換

② 使用材料

使用材料を、表 7.3.19 に示す。FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.1.19 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	フライアッシュⅡ種(株)ジェイペック石川カンパニー, 密度2.35)
水		地下水・上澄水
細骨材	S1	東村新川産 海砂(表乾密度2.60, F.M2.00)
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.66, F.M2.95)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイペック石川カンパニー, 密度2.35)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率59.0%)
	G2	本部半島産 砕石4020(表乾密度2.69)
混和剤	Ad	AE減水剤

③ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.1.20 に示す。

表 7.1.20 21-12-40 内割り+外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2$	2.00 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 26.0$	26.0 N/mm ²
水結合材比	$\sigma_{28} = -9.6 + 20.6 \times B/W$ より $W/B = 20.6 \times 100 \div (26.0 + 9.6) = 58.0$	58.0 %
単位水量	工場実績値より $W = 153$	153 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + E) = (153 \div 58.0) \times 100 = 264$	264 kg/m ³
単位混和材量	$F_1 = (C + B) \times \text{添加率} = 264 \times 21\% = 55$ $55 \div 2.35 = 23$	55 kg/m ³ 23 L/m ³
	$F_2 = (C + B) \times \text{添加率} = 264 \times 5\% = 13$ $13 \div 2.35 = 6$	13 kg/m ³ 6 L/m ³
セメント量	$C = 264 - 55 = 209$	209 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 209 \div 3.16 = 66.1$	66 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
粗骨材容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 642 (実績率= 61.0 %)	
	$G_v = 642 \times 61 \div 100.0 = 392$	392 L/m ³
単位粗骨材量	$G_1 = 392 \times 60 \div 100 \times 2.70 = 635$	635 kg/m ³
	$G_2 = 392 \times 40 \div 100 \times 2.70 = 423$	423 kg/m ³
単位細骨材量	$S_v = 1000 - (153 + 66 + 392 + 45 + 29) = 315$	315 L/m ³
	$S_1 = 315 \times 40 \div 100 \times 2.60 = 327.6$	328 kg/m ³
	$S_2 = 315 \times 60 \div 100 \times 2.66 = 502.7$	503 kg/m ³
細骨材率	指定細骨材率より $s/a = 44.6$	44.6 %
混和剤	結合材量の 0.75% $Ad = 264 \times 0.75 \div 100 = 1.9800$	1.980 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

④ 配合表

表 7.1.21 に 21-12-40 内割り+外割り FAC 配合表を示す。

表 7.1.21 21-12-40 内割り+外割り FAC 配合表

設計基準強度 f'ck (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水結合材比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント	混和材	水	細骨材			粗骨材		混和剤
					C	フライアッシュ F1	W	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1	4020 G2	Ad
36	12	40	58.0	44.6	209	55	153	328	503	13	635	423	1.98

7. 1. 5 30-18-20 内割り+外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

30-18-20 内割り+外割り FAC の配合設計例を以下に示す。

① FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 30 N/mm²
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ 18±2.5cm
- ・ 空気量 指定なし
- ・ FA フライアッシュⅡ種（株式会社ジェイペック石川カンパニー）
- ・ FA 量 総量 100kg/m³
 内割り：セメントの約 20%置換
 外割り：FA 総量 90kg/m³ - 内割り FA 量

② 使用材料

使用材料を、表 7.3.22 に示す。FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.1.22 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	フライアッシュⅡ種(株)ジェイペック石川カンパニー, 密度2.40)
水		工業用水
細骨材	S1	東村新川産 海砂(表乾密度2.59, F.M2.30)
	S2	名護市安和産 砕砂(表乾密度2.67, F.M2.80)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイペック石川カンパニー, 密度2.40)
粗骨材	G1	名護市安和産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率59.3%)
	G2	—
混和剤	Ad	AE減水剤

③ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.1.23 に示す。

表 7.1.23 30-18-20 内割り+外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.36$	2.36 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 35.9$	35.9 N/mm ²
水結合材比	$\sigma_{28} = 0.02 + 17.66 \times B/W$ より $W/B = 17.66 \times 100 \div (35.9 + -0.02) = 49.0$	49.0 %
単位水量	工場実績値より $W = 180$	180 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + E) = (180 \div 49.0) \times 100 = 367$	367 kg/m ³
単位混和材量	$F_1 = (C + B) \times \text{添加率} = 367 \times 20\% = 73$	73 kg/m ³
	$73 \div 2.40 = 30$	30 L/m ³
	$F_2 = \text{指定により } 17 \text{ kg/m}^3$	17 kg/m ³
	$17 \div 2.40 = 7$	7 L/m ³
セメント量	$C = 367 - 73 = 294$	294 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 294 \div 3.16 = 93.1$	93 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 2 \div 100 = 20$	20 L/m ³
粗骨材容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 585 (実績率= 59.3 %) $G_v = 585 \times 59 \div 100.0 = 347$	347 L/m ³
単位粗骨材量	$G_1 = 347 \times 100 \div 100 \times 2.70 = 937$	937 kg/m ³
単位細骨材量	$S_v = 1000 - (180 + 93 + 347 + 20 + 37) = 323$	323 L/m ³
	$S = 323 \times 2.61 = 843$	843 kg/m ³
	$S_1 = 843 \times 70 \div 100 = 590$	590 kg/m ³
	$S_2 = 843 \times 30 \div 100 = 253$	253 kg/m ³
細骨材率	$s/a = 323 \div (323 + 347) = 48.2$	48.2 %
混和剤	結合材量の 0.60% $Ad = 367 \times 0.60 \div 100 = 2.20$	2.20 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

④ 配合表

表 7.1.21 に 30-18-20 内割り+外割り FAC 配合表を示す。

表 7.1.21 30-18-20 内割り+外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水結合材比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント	混和材	水	細骨材			粗骨材		混和剤
					C	フライ アッシュ F1	W	海砂 S1	砕砂 S2	フライ アッシュ F2	2005 G1	4020 G2	Ad
30	18	20	49.0	48.2	294	73	180	590	253	17	937	—	2.20

7. 2 内割り配合タイプ

従来の普通コンクリート（NC）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り、主に塩化物イオンの浸透抑制（塩害抑制）やマスコンクリートのセメント水和熱に起因したひび割れ発生の抑制効果、また収縮ひび割れ等の改善に寄与する配合である。セメントに対する質量置換率は、10～20%の範囲（フライアッシュセメント B 種相当）とする。ただし、ASR の抑制効果も望む場合は、前出図 7.1.2 に示すように質量置換率は 15%以上とする必要がある。

なお、内割り配合では、NC のセメントの一部を FA と置換するポストミックス配合とフライアッシュセメントとして使用するプレミックス配合がある。

JIS における FA セメント（JIS R 5213）における規格を表 7.2.1 および表 7.2.2 に示し、図 7.2.1 に内割り配合のイメージを示す。

表 7.2.1 FA の分量

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 7.2.2 FA セメントの品質

品質		A種	B種	C種
密度	g/cm ³	—	—	—
比表面積	cm ² /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 ²	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	—	—

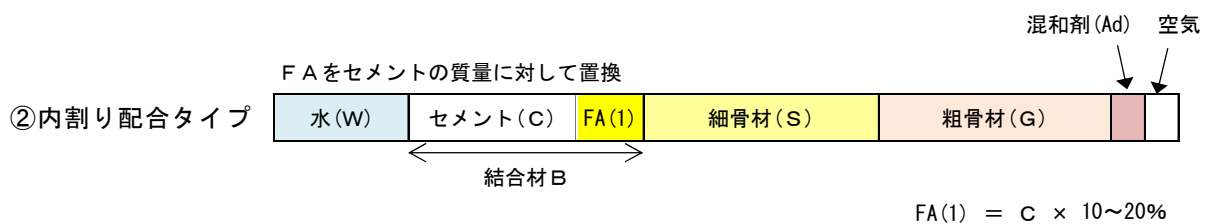


図 7.2.1 内割り配合イメージ

7. 2. 1 27-8-20 内割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 27N/mm^2 の基本配合（27-8-20）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された 27-8-20 内割り FAC の配合設計例を以下に示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.2.3 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.2.3 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スランプ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
27	28	8 ± 2.5	4.5 ± 1.5	20	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 27N/mm^2
- ・ セメント フライアッシュセメント B 種 (FA 分量 18%)
- ・ 単位水量 166kg/m^3 以下
- ・ 水セメント比 50.0%以下
- ・ スランプ $8 \pm 2.5\text{cm}$
- ・ 空気量 指定なし

③ 配合の照査

表 7.2.4 に基本配合表、表 7.2.5 に基本配合表と FAC 配合条件の照査結果を示す。

表 7.2.4 基本配合表 (27-8-20)

設計基準強度 f'_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
					セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤
					ホルト ラント セメント C	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
27	8	20	53.0	47.8	314	166	560	303	965	-	3.988

表 7.2.5 基本配合表と FAC 配合条件の照査

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	27N/mm ²	基本配合と同じ	—	
セメント	普通ポルトランドセメント	フライアッシュセメントB種	○	
単位水量	166kg/m ³	166kg/m ³ 以下	—	
水セメント比 (水結合材比)	53.0%	50.0%以下	○	
スランプ	8±2.5cm	8±2.5cm	—	
空気量	4.5±1.5%	指定無し	○	

④ 使用材料

配合条件で材料指定されているセメント以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.2.6 使用材料

セメント		フライアッシュセメントB種（琉球セメント株製，密度2.98）
混和材	F1	—
水		地下水・上澄水
細骨材	S1	東村新川産 海砂（表乾密度2.61，F.M2.30）
	S2	国頭村半地産 砕砂（表乾密度2.62，F.M3.30）
	F2	—
粗骨材	G1	国頭村半地産 砕石2005（表乾密度2.68，実績率59.0%）
	G2	—
混和剤	Ad	AE減水剤標準形

⑤ 配合の照査結果に基づく配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.2.7 に示す。

表 7.2.7 27-8-20 内割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 1.96$	1.96 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 31.9$	31.9 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = -9.4 + 20.2 \times C/W$ より $W/C = 20.2 \times 100 \div (31.9 + 9.4) = 48.9$	48.5 %
単位水量	$W = 156$	156 kg/m ³
単位セメント量	$C = (156 \div 48.5) \times 100 = 321.6$	322 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 322 \div 2.98 = 108.1$	108 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (156 + 108 + 45) = 691$	691 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 615 (実績率= 59.0 %)	615 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 615 \times 59.0 \div 100 = 362.9$	363 L/m ³
細骨材容積	$S_v = 691 - 363 = 328$	328 L/m ³
細骨材率	$s/a = 328 \div 691 \times 100 = 47.46$	47.5 %
細骨材	$S_1 = 328 \times 65 \div 100 \times 2.61 = 556.4$	556 kg/m ³
	$S_2 = 328 \times 35 \div 100 \times 2.62 = 300.7$	301 kg/m ³
粗骨材容積	$G_1 = 363 \times 2.68 = 972.8$	973 kg/m ³
混和剤	セメント量の 1.0% $Ad = 322 \times 1\% \div 100 = 3.220$	3.220 kg/m ³

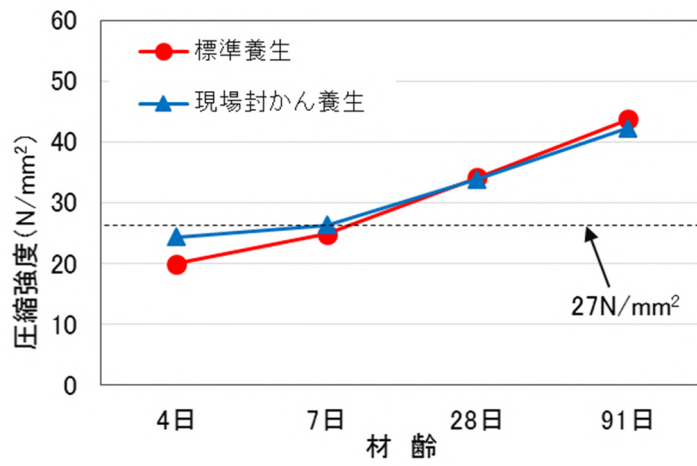
※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

27-8-20 内割り FAC 配合表を表 7.2.8 に示し、この配合による圧縮強度試験結果を図 7.2.2 に示す。セメントの 18%を FA に置換しても管理材齢 28 日強度で設計基準強度を十分満足していることが確認できる。

表 7.2.8 27-8-20 内割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
						セメント	混和材	水	細骨材			粗骨材		混和剤
						フライ アッシュ セメント C	フライ アッシュ F1	W	海砂 S1	砕砂 S2	フライ アッシュ F2	2005 G1	4020 G2	Ad
27	8	20	48.5	-	47.5	322	-	156	556	301	-	973	-	3.22



養生方法	4日	7日	28日	91日
標準養生	20.0	24.9	34.2	43.7
現場封かん養生	24.4	26.3	33.9	42.3

図 7.2.2 27N/mm²内割り FAC 圧縮強度試験結果

7. 2. 2 33-8-20 内割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 33N/mm^2 の基本配合（33-8-20）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された 33-8-20 内割り FAC の配合設計例を以下に示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.2.9 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.2.9 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スランプ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
33	28	8 ± 2.5	4.5 ± 1.5	20	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 33N/mm^2
- ・ セメント フライアッシュセメント B 種 (FA 分量 18%)
- ・ 単位水量 167kg/m^3 以下
- ・ 水セメント比 43.0% 以下
- ・ スランプ $8 \pm 2.5\text{cm}$
- ・ 空気量 指定なし

③ 配合の照査

表 7.2.10 に基本配合表、表 7.2.11 に基本配合表と FAC 配合条件の照査結果を示す。

表 7.2.10 基本配合表（33-8-20）

設計基準強度 f_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
					セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤
					ポルトランドセメント C	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
33	8	20	45.0	45.6	376	169	516	279	973	-	5.264

表 7.2.11 基本配合表と FAC 配合条件の照査結果

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	33N/mm ²	基本配合と同じ	—	
セメント	普通ポルトランドセメント	フライアッシュセメントB種	○	
単位水量	169kg/m ³	167kg/m ³ 以下	○	
水セメント比 (水結合材比)	45.0%	43.0%以下	○	
スランプ	8±2.5cm	8±2.5cm	—	
空気量	4.5±1.5%	指定無し	○	

④ 使用材料

配合条件で指定されているセメント以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.2.12 使用材料

セメント		フライアッシュセメントB種（琉球セメント株製，密度2.98）
混和材	F1	—
水		地下水・上澄水
細骨材	S1	東村新川産 海砂（表乾密度2.61，F.M2.30）
	S2	国頭村半地産 砕砂（表乾密度2.62，F.M3.30）
	F2	—
粗骨材	G1	国頭村半地産 砕石2005（表乾密度2.68，実績率59.0%）
	G2	—
混和剤	Ad	AE減水剤標準形

⑤ 配合の照査結果に基づく配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.2.13 に示す。

表 7.2.13 33-8-20 内割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.45$	2.45 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 39.1$	39.1 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = -9.4 + 20.2 \times C/W$ より $W/C = 20.2 \times 100 \div (39.1 + 9.4) = 41.6$	41.5 %
単位水量	工場実績値より $W = 161$	161 kg/m ³
単位セメント量	$C = (161 \div 41.5) \times 100 = 388$	388 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 388 \div 2.98 = 130.2$	130 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (161 + 130 + 45) = 664$	664 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 622 (実績率= 59.0 %)	622 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 622 \times 59.0 \div 100 = 367$	367 L/m ³
細骨材容積	$S_v = 664 - 367 = 297$	297 L/m ³
細骨材率	$s/a = 297 \div 664 \times 100 = 44.71$	44.7 %
細骨材	$S_1 = 297 \times 65 \div 100 \times 2.61 = 503.5$	504 kg/m ³
	$S_2 = 297 \times 35 \div 100 \times 2.62 = 272.2$	272 kg/m ³
粗骨材容積	$G_1 = 367 \times 2.68 = 983.6$	984 kg/m ³
混和剤	セメント量の 1.1% $Ad = 388 \times 1.1\% \div 100 = 4.268$	4.268 kg/m ³

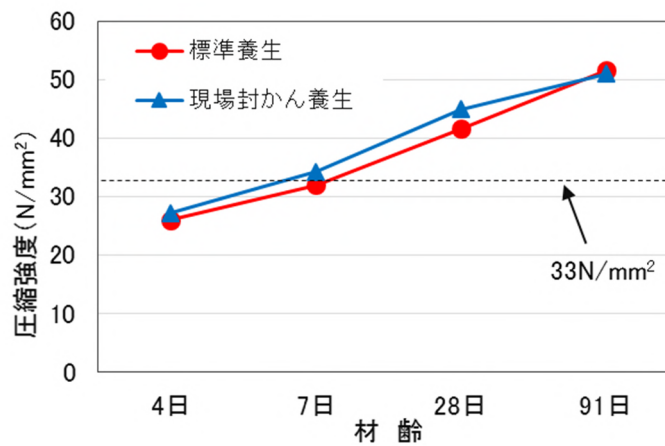
※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

33-8-20 内割り FAC 配合表を表 7.2.14 に示し、この配合による圧縮強度試験結果を図 7.2.3 に示す。フライアッシュセメント B 種（FA 分量 18%）を使用しても、管理材齢 28 日強度で設計基準強度を十分満足している事が確認できる。

表 7.2.14 33-8-20 内割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最 大寸法 G _{max} (mm)	水セメ ント比 W/C (%)	水結合 材比 W/B (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤
						フライ アッシュ セメント C	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
33	8	20	41.5	—	44.7	388	161	504	272	984	—	4.268



養生方法	4日	7日	28日	91日
標準養生	26.0	32.0	41.6	51.6
現場封かん養生	27.2	34.2	44.9	51.0

図 7.2.3 33N/mm²内割り FAC 圧縮強度試験結果

7. 3 外割り配合タイプ

橋梁上部工のような高強度コンクリートでは、セメント量が多さから総アルカリ量も多くなることから、遅延膨張性のアルカリシリカ反応（ASR）の可能性のある沖縄県産海砂を使用する場合、ASRの発生が懸念される。そこで、ASRを抑制するためフライアッシュ（FA）の内割り配合が選択肢として挙げられるが、FA内割り配合の場合、初期強度発現が確保できないことから、桁製作やセグメント製作の工程的な問題に対応できない場合がある。

このため、高強度コンクリートではASRのリスク回避として細骨材に海砂を使用せず、砕砂のみとすることが望ましい。しかし、砕砂は歪な形状をしているため、砕砂のみでは流動性が著しく低下することから、ワーカビリティの確保が困難となる。

よって、高強度コンクリートでは、砕砂の一部をフライアッシュに置換し、FAのボールベリング効果により流動性改善、ワーカビリティの確保を図るものである。なお、コンクリート工場毎に用いる砕砂の粗粒率（FM）や粒度分布が異なることから、各工場では配合試験を行い、使用砕砂に合わせた最適置換率を決定する必要がある。

外割り配合イメージを図7.3.1に示す。

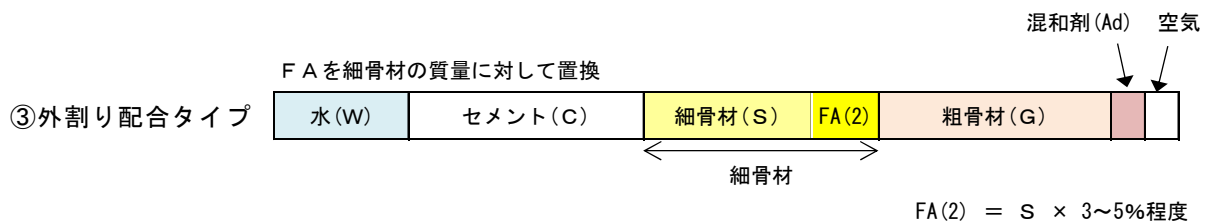


図 7.3.1 外割り配合イメージ

7. 3. 1 36-15-20 外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 36N/mm^2 の基本配合（36-12-20）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された 36-15-20 外割り FAC の配合設計例を示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.3.1 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.3.1 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スランプ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
36	28	12±2.5	4.5±1.5	20	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 36N/mm^2
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水セメント比 基本配合と同じ
- ・ スランプ $15\pm 2.5\text{cm}$
- ・ 空気量 $4.5\pm 1.5\%$
- ・ FA 量 細骨材量の 3% 置換
- ・ 細骨材 砕砂のみ

③ 配合の照査

表 7.3.2 に基本配合表、表 7.3.3 に基本配合表と FAC 配合条件の照査結果を示す。

表 7.3.2 基本配合表（36-12-20）

設計基準強度 f_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
					セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤
					C	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
36	12	20	42.5	46.0	374	159	—	838	980	—	2.06

表 7.3.3 基本配合表と FAC 配合条件の照査結果

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	36N/mm ²	基本配合と同じ	—	
単位水量	159kg/m ³	基本配合と同じ	—	
水セメント比 (水結合材比)	42.5%	基本配合と同じ	—	
スランプ	12±2.5cm	15±2.5cm	○	
空気量	4.5±1.5%	4.5±1.5%	—	
外割りFA量	—	細骨材量の3%	○	細骨材置換
細骨材	砕砂のみ	砕砂のみ	—	
混和剤	AE減水剤	高性能型AE減水剤	○	

④ 使用材料

FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場ですべて通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.3.4 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	—
水		地下水
細骨材	S1	—
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.65, F.M3.10)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイバック石川カンパニー, 密度2.41)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.71, 実績率59.0%)
	G2	—
混和剤	Ad	高性能AE減水剤

⑤ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.3.5 に示す。

表 7.3.5 36-15-20 外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 3$	3.0 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 43.5$	43.5 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = +1.5 + 18.8 \times C/W$ より $W/C = 18.8 \times 100 \div (43.5 - 1.5) = 44.76$	44.5 %
W/C比較	指定W/C 42.5 < 44.5	42.5 %
単位水量	工場実績値より $W = 159$	159 kg/m ³
単位水量比較	指定水量 159 \geq 159	159 kg/m ³
単位セメント量	$C = (159 \div 42.5) \times 100 = 374.1$	374 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 374 \div 3.16 = 118.3$	118 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (159 + 118 + 45) = 678$	678 L/m ³
細骨材率	指定細骨材率より $s/a = 46.0$	46.0 %
細骨材容積	$S_v = 678 \times 46.0 \div 100 = 311.8$	312 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 678 - 312 = 366$	366 L/m ³
細骨材	$S_1 = 312 \times 2.65 = 826.8$	827 kg/m ³
粗骨材	$G_2 = 366 \times 2.71 = 991.8$	992 kg/m ³
混和剤	セメント量の 0.50% $A_d = 374 \times 0.50 \div 100 = 1.8700$	1.870 kg/m ³
混和材	使用量指定により $F_2 = 25$	25 kg/m ³
細骨材補正	$S = 827 - 25 = 802$	802 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

表 7.3.6 に 36-15-20 外割り FAC 配合表を示す。

表 7.3.6 36-15-20 外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント C	水 W	細骨材			粗骨材		混和剤 Ad	
							海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1	4020 G2		
36	15	20	42.5	46.0	374	—	159	—	802	25	992	—	1.87

7. 3. 2 45-18-20 外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 45N/mm^2 の基本配合（45-12-20）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された 45-18-20 外割り FAC の配合設計例を示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.3.7 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.3.7 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スランプ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
45	28	12±2.5	4.5±1.5	20	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 45N/mm^2
 ※材齢 7 日で緊張強度（約 32.5N/mm^2 ）を確保すること
- ・ 水セメント比 基本配合と同じ
- ・ スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$
- ・ 空気量 $4.5\pm 1.5\%$
- ・ FA 量 細骨材量の 5% 置換
- ・ 細骨材 砕砂のみ
- ・ 混和剤 高性能 AE 減水剤

③ 配合の照査

表 7.3.8 に基本配合表、表 7.3.9 に基本配合表と FAC 配合条件の照査結果を示す。

表 7.3.8 基本配合表（45-12-20）

設計基準強度 f'_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
					セメント	水	細骨材		粗骨材		混和剤
					C	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
45	12	20	37.0	41.9	433	160	431	295	1031	-	0.40

表 7.3.9 基本配合表と FAC 配合条件の照査結果

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	45N/mm ²	基本配合と同じ	—	
水セメント比	37.0%	基本配合と同じ	—	
スランプ	12±2.5cm	18±2.5cm	○	
空気量	4.5±1.5%	4.5±1.5%	—	
外割りFA量	—	細骨材量の5%	○	細骨材置換
細骨材	海砂+砕砂	砕砂のみ	○	
混和剤	高性能AE減水剤	高性能AE減水剤	—	

④ 使用材料

FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場ですべて通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.3.10 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(太平洋セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	—
水		地下水
細骨材	S1	—
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.67, F.M2.90)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイベック石川カンパニー, 密度2.44)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率60.2%)
	G2	—
混和剤		高性能AE減水剤

⑤ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.3.11 に示す。

表 7.3.11 45-18-20 外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.55$	2.55 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 51.4$	51.4 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = -11.7 + 23.58 \times C/W$ より $W/C = 23.58 \times 100 \div (51.4 + 11.7) = 37.36$	37.0 %
W/C比較	指定W/C 55.0 \geq 37.0	37.0 %
単位水量	工場実績値より $W = 165$	165 kg/m ³
単位セメント量	$B = (165 \div 37.0) \times 100 = 446$	446 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 446 \div 3.16 = 141.1$	141 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (165 + 141 + 45) = 649$	649 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 612 (実績率= 60.2 %)	612 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 612 \times 60.2 \div 100 = 368$	368 L/m ³
細骨材容積	$S_v = 649 - 368 = 281$	281 L/m ³
細骨材率	$s/a = 281 \div 649 \times 100 = 43.3$	43.3 %
細骨材	$S_1 = 281 \times 2.67 = 750.2$	750 kg/m ³
粗骨材	$G_1 = 368 \times 2.70 = 993.6$	994 kg/m ³
混和剤	セメント量の 0.70% $A_d = 446 \times 0.70 \div 100 = 3.1220$	3.122 kg/m ³
混和材	使用量指定により $F_2 = 38$	38 kg/m ³
細骨材補正	$S_1 = 750 - 38 = 712$	712 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

表 7.3.12 に 45-18-20 外割り FAC 配合表を示す。

表 7.3.12 45-18-20 外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント C	水 W	細骨材			粗骨材		混和剤 Ad	
							フライアッシュ F1	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1		4020 G2
45	18	20	37	43.3	446	—	165	—	712	38	994	—	3.12

7. 3. 3 50-18-20 外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

設計基準強度 50N/mm^2 の基本配合（50-15-20）をもとに、指定された FAC 配合条件を満足するよう配合設計された外割り 50-18-20 外割り FAC の配合設計例を示す。

① 基本配合の配合条件

表 7.3.13 に基本配合の配合条件を示す。

表 7.3.13 基本配合の配合条件

設計基準強度 (N/mm^2)	設計材齢 (日)	スランプ (cm)	空気量 (%)	骨材最大寸法 (mm)	セメント の種類
50	28	15±2.5	4.5±1.5	20	N

② FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 50N/mm^2
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$
- ・ 空気量 $4.5\pm 1.5\%$
- ・ FA 量 細骨材量の 3% 置換
- ・ 膨張材 早強性膨張材から普通膨張材へ変更

③ 配合の照査

表 7.3.14 に基本配合表、表 7.3.15 に基本配合表と FAC 配合条件の照査結果を示す。

表 7.3.14 基本配合表（50-15-20）

設計基準強度 f'_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G_{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)							
					セメント	混和材	水	細骨材		粗骨材		混和剤
					C	膨張材 E	W	海砂 S1	砕砂 S2	2005 G1	4020 G2	Ad
50	15	20	33.5	42.9	436	30	156	-	745	1004	-	4.15

表 7.3.15 基本配合表と FAC 配合条件の照査結果

項目	基本配合	FAC配合条件	変更の有無	備考
設計基準強度	50N/mm ²	基本配合と同じ	—	
単位水量	156kg/m ³	基本配合と同じ	—	
水セメント比 (水結合材比)	33.5%	基本配合と同じ	—	
スランプ	15±2.5cm	18±2.5cm	○	
空気量	4.5±1.5%	4.5±1.5%	—	
外割りFA量	—	細骨材量の3%	○	細骨材置換
細骨材	砕砂のみ	砕砂のみ	—	
混和剤	高性能AE減水剤	高性能AE減水剤	—	

④ 使用材料

FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場ですべて通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.3.16 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	—
水		地下水
細骨材	S1	—
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.66, F.M2.90)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイバック石川カンパニー, 密度2.37)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率60.0%)
	G2	—
混和剤	Ad	高性能AE減水剤

⑤ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.3.17 に示す。

表 7.3.17 50-18-20 外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 3$	3.0 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 57.5$	57.5 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = -9 + 22.3 \times C/W$ より $W/C = 22.3 \times 100 \div (57.5 + 9.0) = 33.53$	33.5 %
W/C比較	指定 W/C = 33.5	33.5 %
単位水量	示方配合で規定 $W = 156$	156 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + E) = (156 \div 33.5) \times 100 = 465.6$	466 kg/m ³
混和材量	$E = 20$	20 kg/m ³
セメント量	$C = 466 - 20 = 446$	446 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 446 \div 3.16 = 141$	141 L/m ³
混和材容積	$F_{2v} = 20 \div 3.16 = 6.3$	6 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (156 + 141 + 6 + 45) = 652$	652 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 620 (実績率= 60.0 %)	620 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 620 \times 60.0 \div 100 = 372$	372 L/m ³
細骨材容積	$S_v = 652 - 372 = 280$	280 L/m ³
細骨材率	$s/a = 280 \div 652 \times 100 = 42.94$	42.9 %
細骨材	$S_1 = 280 \times 2.66 = 744.8$	745 kg/m ³
粗骨材	$G_1 = 372 \times 2.70 = 1004.4$	1004 kg/m ³
混和剤	セメント量の 0.70% $Ad = 446 \times 0.70 \div 100 = 3.260$	3.26 kg/m ³
混和材	使用量指定により $F_2 = 22$	22 kg/m ³
細骨材補正	$S_1 = 745 - 22 = 723$	723 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑥ 配合表

表 7.3.18 に 50-18-20 外割り FAC 配合表を示す。

表 7.3.18 50-18-20 外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
					セメント C	混和材		水 W	細骨材			粗骨材		混和剤 Ad
						膨張材 E	フライアッシュ F1		海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1	4020 G2	
50	18	20	33.5	42.9	446	20	—	156	—	723	22	1004	—	3.26

7. 3. 4 36-12-20 外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

36-12-20 外割り FAC の配合設計例を示す。

① FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 36N/mm²
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ 12±2.5cm
- ・ 空気量 4.5±1.5%
- ・ 細骨材 砕砂のみ
- ・ FA 量 細骨材量の4%置換

② 使用材料

使用材料を、表 7.3.19 に示す。FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.3.19 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	—
水		工業用水
細骨材	S1	—
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.66, F.M2.90)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイバック石川カンパニー, 密度2.31)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率59.0%)
	G2	—
混和剤	Ad	高性能AE減水剤

③ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.3.20 に示す。

表 7.3.20 36-12-20 外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.45$	2.45 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 42.1$	42.1 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = -8.4 + 21.9 \times C/W$ より $W/C = 21.9 \times 100 \div (42.1 + 8.4) \approx 43.0$	43.0 %
単位水量	示方配合で規定 $W = 159$	159 kg/m ³
混和材量	(内割り) AD1 = 0 (外割り) AD2 = 30	0 kg/m ³ 30 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + AD1) = (159 \div 43.0) \times 100 = 370.0$	370 kg/m ³
混和材容積	(内割り) $AD = 0 \div 2.37 = 0.0$ (外割り) $AD = 30 \div 2.37 = 13.0$	0 L/m ³ 13 L/m ³
セメント量	$C = 370 - 0 = 370$	370 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 370 \div 3.16 = 117.1$	117 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (159 + 117 + 45) = 679$	679 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 622 (実績率= 59.0 %)	622 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 622 \times 59.0 \div 100 = 367$	367 L/m ³
単位粗骨材量	$G_1 = 367 \times 2.70 = 990.9$	991 kg/m ³
細骨材容積	$S_v = 1000 - (159 + 117 + 367 + 13 + 45) = 299$	299 L/m ³
細骨材率	$s/a = 299 \div 666 \times 100 = 44.89$	44.9 %
単位細骨材量	$S_1 = 299 \times 2.66 = 795$	795 kg/m ³
混和剤	セメント量の 0.65% $Ad = 370 \times 0.65 \div 100 = 2.405$	2.41 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

④ 配合表

表 7.3.21 に 36-12-20 外割り FAC 配合表を示す。

表 7.3.21 36-12-20 外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント C	水 W	細骨材			粗骨材		混和剤 Ad	
							フライアッシュ F1	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1		4020 G2
36	12	20	43.0	44.9	370	—	159	—	795	30	991	—	2.41

7. 3. 5 45-18-20 外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

橋梁上部工ポストテンションT桁で採用された45-18-20外割りFACの配合設計例を示す。

① FAC 配合条件

FAC発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 45 N/mm²
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ 18±2.5cm
- ・ 空気量 4.5±1.5%
- ・ 細骨材 砕砂のみ
- ・ FA量 細骨材量の4%置換

② 使用材料

使用材料を、表7.3.22に示す。FAC配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7.3.22 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	—
水		工業用水
細骨材	S1	—
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.66, F.M2.90)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイバック石川カンパニー, 密度2.31)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率59.0%)
	G2	—
混和剤	Ad	高性能AE減水剤

③ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.3.23 に示す。

表 7.3.23 45-18-20 外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.45$	2.45 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 46.1$	46.1 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = -8.4 + 21.9 \times C/W$ より $W/C = 21.9 \times 100 \div (46.1 + 8.4) \approx 40.0$	40.0 %
単位水量	示方配合で規定 $W = 165$	165 kg/m ³
混和材量	(内割り) AD1 = 0 (外割り) AD2 = 30	0 kg/m ³ 30 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + AD1) = (165 \div 40.0) \times 100 = 412.0$	412 kg/m ³
混和材容積	(内割り) $AD = 0 \div 2.37 = 0.0$ (外割り) $AD = 30 \div 2.37 = 13.0$	0 L/m ³ 13 L/m ³
セメント量	$C = 412 - 0 = 412$	412 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 412 \div 3.16 = 130.4$	130 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 4.5 \div 100 = 45$	45 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (165 + 130 + 45) = 660$	660 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 585 (実績率= 59.0 %)	585 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 585 \times 59.0 \div 100 = 345.15$	345 L/m ³
単位粗骨材量	$G_1 = 345.2 \times 2.70 = 931.9$	932 kg/m ³
細骨材容積	$S_v = 1000 - (165 + 130 + 345 + 13 + 45) = 302$	302 L/m ³
細骨材率	$s/a = 302 \div 647 \times 100 = 46.7$	46.7 %
単位細骨材量	$S_1 = 302 \times 2.66 = 802.2$	802 kg/m ³
混和剤	セメント量の 0.65% $Ad = 412 \times 0.65 \div 100 = 2.678$	2.68 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

④ 配合表

表 7.3.24 に 45-18-20 外割り FAC 配合表を示す。

表 7.3.24 45-18-20 外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント	水	細骨材			粗骨材		混和剤	
					C	W	海砂 S1	砕砂 S2	フライ アッシュ F2	2005 G1	4020 G2	Ad	
40	18	20	40.0	46.7	412	—	165	—	932	30	932	—	2.68

7. 3. 6 50-20-20 外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

橋梁上部工箱桁セグメントで採用された 50-20-20 外割り FAC の配合設計例を示す。

① FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 50 N/mm²
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプ 20 cm
- ・ 空気量 3.0±1.5%
- ・ 細骨材 砕砂のみ
- ・ FA 量 細骨材量の 3%置換

② 使用材料

使用材料を、表 7. 3. 25 に示す。FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7. 3. 25 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	—
水		地下水
細骨材	S1	—
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.65, F.M2.95)
	F2	フライアッシュ II 種(株)ジェイベック石川カンパニー, 密度2.52)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率59.0%)
	G2	—
混和剤	Ad	高性能AE減水剤(標準形)

③ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.3.26 に示す。

表 7.3.26 50-20-20 外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
水セメント比	指定 $W/C = 33.5$	33.5 %
単位水量	指定 $W = 165$	165 kg/m^3
単位セメント量	$C = (165 \div 33.5) \times 100 = 492.5$	493 kg/m^3
セメント容積	$C_v = 493 \div 3.16 = 156$	156 L/m^3
空気容積	$V_A = 1000 \times 3.0 \div 100 = 30$	30 L/m^3
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (165 + 156 + 30) = 649$	649 L/m^3
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM 工場実績値より 565 (実績率= 59.0 %)	565 L/m^3
粗骨材容積	$G_v = 565 \times 59.0 \div 100 = 333$	333 L/m^3
細骨材容積	$S_v = 649 - 333 = 316$	316 L/m^3
細骨材率	$s/a = 316 \div 649 \times 100 = 48.7$	48.7 %
細骨材量	$S_1 = 316 \times 2.65 = 837.4$	838 kg/m^3
粗骨材量	$G_1 = 333 \times 2.70 = 899.1$	899 kg/m^3
混和材量	使用料指定により $E = 25$	25 kg/m^3
細骨材補正	$S_1 = 838 - 25 \div 2.52 \times 2.65 = 811.7$	812 kg/m^3
混和剤	セメント量の 0.63% $\{ (C+FA) \times 0.600\} Ad = 3.107$	3.11 kg/m^3

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

④ 配合表

表 7.3.27 に 50-20-20 外割り FAC 配合表を示す。

表 7.3.27 50-20-20 外割り FAC 配合表

設計基準強度 f_{ck} (N/mm^2)	目標 SL (cm)	骨材最大寸法 G_{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)								
					セメント		水	細骨材			粗骨材		混和剤
					C	フライアッシュ F1	W	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1	4020 G2	Ad
50	20	20	33.5	48.7	493	—	165	812	—	25	900	—	3.11

7. 3. 7 50-60-20 外割りフライアッシュコンクリート（FAC）の配合設計例

橋梁上部工プレテンション桁で採用された 50-60-20 外割り FAC の配合設計例を示す。

⑤ FAC 配合条件

FAC 発注時における指示または特記事項を以下に示す。

- ・ 設計基準強度 50 N/mm²
- ・ 単位水量 基本配合と同じ
- ・ 水結合材比 基本配合の水セメント比と同じ
- ・ スランプフロー 60 cm
- ・ 空気量 2.0±1.5%
- ・ 細骨材 砕砂のみ
- ・ FA 量 細骨材量の 4%置換

⑥ 使用材料

使用材料を、表 7. 3. 28 に示す。FAC 配合条件で指定されているもの以外は、コンクリート製造工場で通常使用している材料をそのまま使用している。

表 7. 3. 28 使用材料

セメント		普通ポルトランドセメント(琉球セメント(株)製, 密度3.16)
混和材	F1	—
水		工業用水
細骨材	S1	—
	S2	本部半島産 砕砂(表乾密度2.66, F.M2.90)
	F2	フライアッシュⅡ種(株)ジェイバック石川カンパニー, 密度2.31)
粗骨材	G1	本部半島産 砕石2005(表乾密度2.70, 実績率59.0%)
	G2	—
混和剤	Ad	高性能AE減水剤

⑦ 配合計算

コンクリート製造工場の実績値や使用材料の物性値を基に行われた配合計算を表 7.3.29 に示す。

表 7.3.29 50-60-20 外割り FAC 配合計算書

項目	計算式	結果
標準偏差	工場実績値より $\sigma = 2.45$	2.45 N/mm ²
配合強度	$m = SL + 2.5 \times \sigma = 56.2$	56.2 N/mm ²
水セメント比	$\sigma_{28} = -16.6 + 24 \times C/W$ より $W/C = 24 \times 100 \div (56.2 + 16.6) \approx 32.500$	32.5 %
単位水量	示方配合で規定 $W = 170$	170 kg/m ³
混和材量	(内割り) AD1 = 0 (外割り) AD2 = 33	0 kg/m ³ 33 kg/m ³
単位結合材量	$B = (C + AD1) = (170 \div 32.5) \times 100 = 523.0$	523 kg/m ³
混和材容積	(内割り) $AD = 0 \div 2.31 = 0.0$ (外割り) $AD = 33 \div 2.31 = 14.0$	0 L/m ³ 14 L/m ³
セメント量	$C = 523 - 0 = 523$	523 kg/m ³
セメント容積	$C_v = 523 \div 3.16 = 165.5$	166 L/m ³
空気容積	$V_A = 1000 \times 2.0 \div 100 = 20$	20 L/m ³
全骨材容積	骨材容積 = $1000 - (170 + 166 + 20) = 645$	645 L/m ³
かさ容積	粗骨材のかさ容積 GM = 工場実績値より 560 (実績率= 59.0 %)	560 L/m ³
粗骨材容積	$G_v = 560 \times 59.0 \div 100 = 330$	330 L/m ³
単位粗骨材量	$G_1 = 330 \times 2.70 = 891$	891 kg/m ³
細骨材容積	$S_v = 1000 - (170 + 166 + 330 + 14 + 20) = 300$	300 L/m ³
細骨材率	$s/a = 300 \div 630 \times 100 = 47.6$	47.6 %
単位細骨材量	$S_1 = 300 \times 2.66 = 798$	798 kg/m ³
混和剤	セメント量の 1.00% $Ad = 523 \times 1.00 \div 100 = 5.230$	5.23 kg/m ³

※ 配合計算書は、コンクリート製造工場から提供されたもので、あくまで参考事例である。配合実施に当たっては、各条件・数値を確認したうえで、独自の配合計算書を作成すること。

⑧ 配合表

表 7.3.30 に 50-60-20 外割り FAC 配合表を示す。

表 7.3.30 50-60-20 外割り FAC 配合表

設計基準強度 f _{ck} (N/mm ²)	目標 SL7ロー (cm)	骨材最大寸法 G _{max} (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント C	水 W	細骨材			粗骨材		混和剤 Ad	
							フライアッシュ F1	海砂 S1	砕砂 S2	フライアッシュ F2	2005 G1		4020 G2
50	60	20	32.5	47.6	523	—	170	—	798	33	891	—	5.23

8. 施工事例

沖縄県内において、フライアッシュコンクリート（FAC）が採用された施工事例を表8.1に示す。

表 8.1 施工事例

No.	構造物名	部位	設計基準強度	配合	配合タイプ	発注機関
1	佐手橋	上部工	33	33-8-20	内割り配合タイプ ※内割18%プレミックス フライアッシュセメント使用	沖縄総合事務局
		下部工	27	27-8-20		
2	伊良部大橋	上部工	50	50-18-20	外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 宮古土木事務所
			36	36-15-20		
		下部工	36	36-12-40	内割り+外割り配合タイプ	
			27	27-12-40		
3	那覇大橋	下部工	30	30-12-20	内割り+外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 南部土木事務所
4	南部東道路	下部工・他	30	30-12-20	内割り+外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 南部土木事務所
				30-18-20		
		上部工	30	30-18-20	外割り配合タイプ	
			36	36-12-20		
40	40-18-20					
5	新本部大橋 (国道449号本部北道路)	下部工	27	27-12-40	内割り+外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 北部土木事務所
		重力式擁壁	21	21-12-40		
		ボックスカルバート・地覆	30	30-12-20		
6	桃原橋	上部工	60	60-50-20	内割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 中部土木事務所
		下部工	30	30-12-20		
7	県道20号線泡瀬工区橋梁 (仮称：泡瀬連絡橋)	下部工・他	30	30-12-20	内割り+外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 中部土木事務所
		上部工	50	50-20-20	外割り配合タイプ	
8	沖縄都市モノレール	上部工	45	45-12-20	外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 都市モノレール建設現場事務所
9	大保大橋	下部工	30	30-12-20	内割り+外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 北部土木事務所
10	ヘンサ橋 (国道507号(八重瀬道路))	上部工	50	50-60-20	外割り配合タイプ	沖縄県土木建築部 南部土木事務所
		踏掛版・他	36	36-12-20	内割り+外割り配合タイプ	
		下部工	30	30-12-20		
		場所打杭	30	30-18-20		
11	沖縄都市モノレール新車両基地	上部工	60	60-50-20	内割り配合タイプ	沖縄都市モノレール(株)

※ 赤字は、第2回改訂時に追加した施工事例

【施工事例1】 佐手橋

佐手橋は、県内で初めてフライアッシュセメントを用いて施工された橋梁である。使用されたフライアッシュセメントは、JISフライアッシュセメントB種（FA分量18%）で、下部工および上部工床板、横組工などで用いられている。

表 8.2 工事概要

路線名	国道58号
適用部位	下部工（橋脚、橋台） 上部工（床板、横組工、地覆）
使用配合	27-8-20FB（橋脚、橋台、地覆） 33-8-20FB（床板、横組工）
FA使用目的	塩害・ASR抑制対策
打設方法	ポンプ圧送
その他	空気量規定無し



図 8.1 位置図（国頭村）



写真提供：琉球大学 大城武名誉教授

写真 8.1 橋梁全景

表 8.3 配合表

設計基準 強度 f'ck (N/mm ²)	目標 SL (cm)	骨材最 大寸法 Gmax (mm)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					セメント	混和材	水	細骨材			粗骨材		混和剤
					フライアッシュ セメント C	フライ アッシュ F1	W	海砂 S1	砕砂 S2	フライ アッシュ F2	2005 G1	4020 G2	Ad
27	8	20	48.5	47.5	322	-	156	556	301	-	973	-	3.22
33	8	20	41.5	44.7	388	-	161	504	272	-	984	-	4.268

表 8.4 使用材料

セメント	フライアッシュセメントB種（琉球セメント(株)製，密度2.98)	
混和材	F1	-
水	地下水・上澄水	
細骨材	S1	東村新川産 海砂（表乾密度2.61，F.M2.30）
	S2	国頭村半地産（奥間鉱山） 砕砂（表乾密度2.62，F.M3.30）
	F2	-
粗骨材	G1	国頭村半地産（奥間鉱山） 碎石2005（表乾密度2.68，実績率59.0%）
	G2	-
混和剤	AE減水剤標準形(Ⅰ種)マスターポ [®] リヒト [®] 15S（全アルカリ0.7%）	

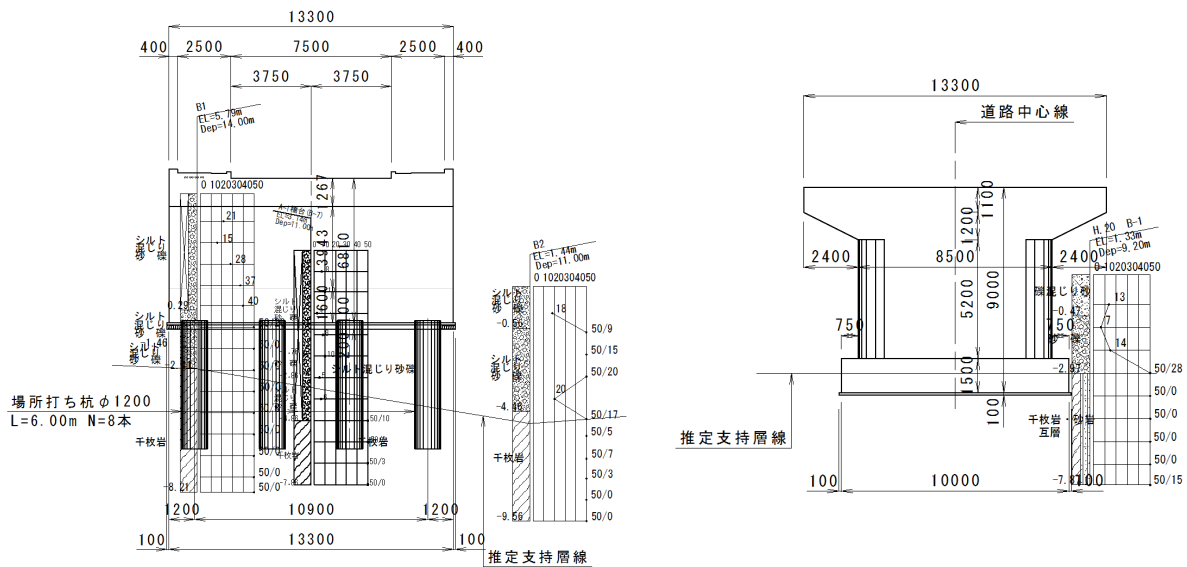


図 8.2 下部工 正面図（左：A1 橋台、右：P1 橋脚）



写真 8.2 施工状況

■ FACの特徴や注意点について

《製造者コメント》

① 生コン性状

- ・ 普通 AE 剤使用では空気量の調整が難しく、現場着では 1~2%程度であったが流動性はあると感じた

② 圧縮強度

- ・ 基本配合 NC と FAC の圧縮強度の比較を行ったところ、材齢 7 日から材齢 28 日までの強度の伸びでは FAC のほうが大きかった