

実施工におけるフライアッシュコンクリートの品質について

砂川勇二

(財)沖縄県建設技術センター 試験研究部試験研究班 (〒902-0064 沖縄県那覇市寄宮 1-7-13)

フライアッシュ (FA) は、コンクリートに混和することで塩害抑制やアルカリ骨材反応の抑制など、コンクリート構造物の耐久性を向上させることが知られている。しかし、これまで県内で生産される FA は石炭産地の違い等により品質が安定していないことが課題となっていた。

近年、県内でも JIS に規定される FA が生産され、伊良部大橋では、配合試験等により品質を確認したうえで下部工にフライアッシュコンクリート (FAC) を採用し、耐久性の向上を図っている。

本稿では、実際に現場で使用された FA や FAC のデータ分析により、FAC が普通コンクリートと同様な品質であることを確認したことを報告する。

キーワード：フライアッシュ、フライアッシュコンクリート、耐久性、品質管理

1. はじめに

フライアッシュ (以下「FA」) は、石炭火力発電所で微粉炭を燃焼した際の燃焼ガスから集塵機で採取される球状微粒子の石炭灰である (図-1 参照)。

FA は、コンクリートに混和することで、①流動性の改善及び単位水量の減少、②水和熱による温度上昇の抑制、③長期強度の増進、④乾燥収縮の減少、⑤水密性及び耐久性の向上、⑥アルカリ骨材反応 (以下「ASR」) の抑制等の効果があることが知られているが、FA は石炭産地の違い等によりその品質が変動し、FA を混和したフライアッシュコンクリート (以下「FAC」) は、FA の品質により性状が大きく変動することから、高炉セメントと同等の耐久性向上効果を有するにも関わらず、これまであまり使用されてこなかった。

しかし、現在は、JIS に規定されるⅡ種の FA が生産されていることから、亜熱帯海洋性気候の海上という過酷

な環境に建設される伊良部大橋では、室内・実機配合試験、打設試験等を実施してその品質を確認した上で、塩化物イオン浸透抑制、ASR 抑制、温度ひび割れ抑制の目的で下部工に FAC を採用し、100 年耐用を目指した耐久性の向上を図っている。

伊良部大橋下部工で使用している呼び強度 27N/mm² の FAC (以下「27FAC」) は、沖縄県で初めて使用する、もちろん生コンプラントも初めてのコンクリートであったが、2007 (平成 19) 年 9 月の A1 橋台フーチングの打設をスタートに、およそ 3 年が経過して打設回数も増えてきた。

今回、実際に現場で使用された 27FAC について、FA の品質も含めてその品質を検証し、普通コンクリートと同等の品質を有していることを確認したので、その結果を報告する。

2. フライアッシュの品質

県産 FA の品質は、2005 (平成 17) 年 12 月度から 2009 (平成 21) 年 4 月度までの試験成績により確認した。

JIS A 6201 での FA の品質規格と県産Ⅱ種 FA の平均値を表-1 に示す。表に示すように、県産 FA は JIS のⅡ種規格を十分満足した FA である。

表-2 には、JIS に規定される品質項目の概要を示す。表に示すように、FA の品質項目の変動は FAC の品質・施工性に大きな影響を与えることから、県産の FA に対

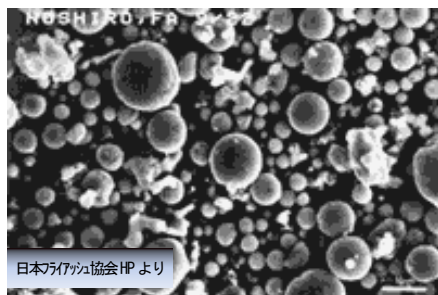


図-1 フライアッシュ電子顕微鏡写真

し、ポゾラン反応により強度や水密性等の耐久性向上に影響を与える「二酸化けい素含有量」、施工性や強度に影響を与える「強熱減量」、フロー値比や活性度指数等、施工性や強度、耐久性向上に影響を与える「ブレーン比表面積」の重要な品質項目について、その変動の状況を確認する。

(1) 二酸化けい素含有量の変動

図-2 に二酸化けい素含有量の経時変化を、図-3 に同期間における頻度分布を示す。

図より、時期によって多少の変動はあるものの、JISの規定値を大きく上回り、標準偏差が 3.59、変動係数（＝標準偏差／平均値×100：ばらつきが平均値に対してどの程度かという数値。平均値が大きくなると標準偏差が大きくなる傾向があるが、そのような平均値の影響を除いたばらつきの尺度）も 6.18 と、ばらつきも小さく安定した品質が確保できていることが分かる。

表-1 FA 品質規格(JIS A 6201) と県産FA の試験平均値

種 類		Ⅰ 種		Ⅱ 種		Ⅲ種		Ⅳ種		県産FA 平均値	
項 目											
二酸化けい素(%)				45.0≦						58.2	
湿分(%)				1.0≧						0.0	
強熱減量(%)		3.0≧		5.0≧		8.0≧		5.0≧		2.5	
密度(g/cm ³)				1.95≦						2.37	
粉末度	45 μm ふるい残分(%)	10≧		40≧		40≧		70≧		12.5	
	ブレーン 比表面積 (cm ² /g)	5 000≦		2 500≦		2 500≦		1 500≦		4 438	
フロー値比(%)		105≦		95≦		85≦		75≦		106	
活性度指数(%)	材 齢28日	90≦		80≦		80≦		60≦		86	
	材 齢91日	100≦		90≦		90≦		70≦		99	

(2) 強熱減量の変動

図-4 に強熱減量の経時変化を、図-5 に同期間の頻度分布を示す。

強熱減量も時期により変動があり、標準偏差は 0.46 と

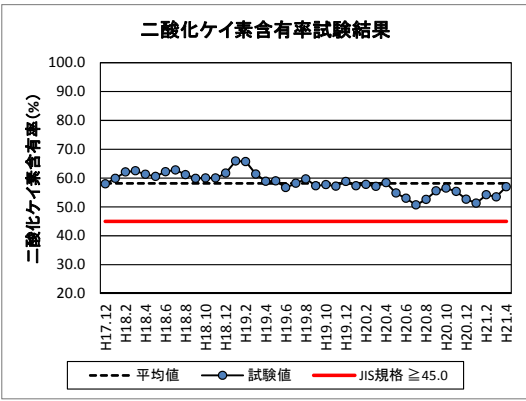


図-2 二酸化けい素含有量の経時変化

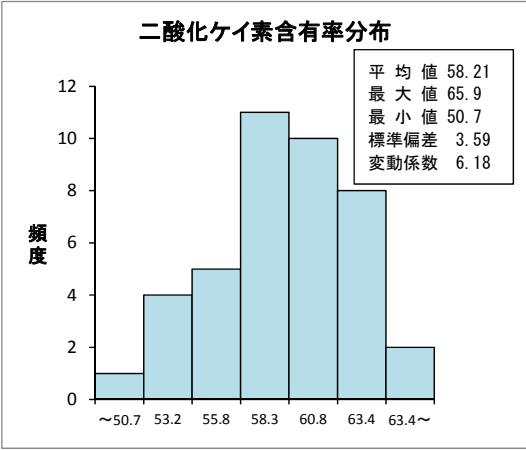


図-3 二酸化けい素含有量分布

表-2 JISに規定されるフライアッシュ品質項目の概要

品質項目	概 要
二酸化けい素	FAの主成分は、二酸化けい素(SiO ₂)やアルミナ(Al ₂ O ₃)が全体の7割以上を占め、その他の成分は微量のFe ₂ O ₃ やCaO等の酸化物である。 シリカ自身は水硬性を持たないが、微粒子の状態かつ水分の存在下ではセメントの水和反応で生成される水酸化カルシウム(Ca(OH) ₂)と常温で徐々に化合し、不溶性の安定なケイ酸カルシウム水和物等をつくる性質、いわゆるポゾラン活性を有している。 FAの粒子を取り囲む様にできるポゾラン反応相が時間と共に成長し、セメントの硬化時にできる数十～数百μmの空隙を充填することで水和反応生成物間の距離が縮まって接着力が高まり、強度の増進や劣化因子の浸入抑制に寄与することから、二酸化けい素の量はFAのポゾラン活性を判断する重要な指標である。
湿 分	FAの保管時の固結を防止するなどの取扱いの便を考慮し、1.0%以下と規定されている。
強熱減量	強熱減量の大部分は未燃炭素であり、恒量となるまで熱した試料の質量減少率によって求める。FA中の未燃炭素はAE剤を吸着する性質があり、強熱減量が大きく変動した場合は、空気量の変動によってコンクリートのワーカビリティや強度等が変動し、品質の安定したFACの製造が困難となることがあるため、特に注意を払う必要がある。
密 度	FAの密度は、構成鉱物、比較的大きなFA粒子中に多く存在する空隙を有する粒子や、未燃炭素によって影響を受け、1.95以上と規定されている。
粉末度	FAの比表面積が大きいほど流動性が良くなり反応性も高くなって強度発現も大きく、ASRIに対する抑制効果も高い傾向を示す等、FA品質の重要な指標である。一般に比表面積が大きいほどフロー値比及び活性度指数は大きい。
フロー値比	普通ポルトランドセメントの25%をFAで質量置換した水結合材比50%のモルタルのフロー値と、置換しないモルタルとのフロー値との比率であり、FACの流動性を示す指標である。フロー値比が大きいほど所用の流動性を得る単位水量は少なくなり、FACのスランプ比率と相関性がある。
活性度指数	フロー値比と同じ置換モルタルと非置換モルタルの圧縮強度の比で示される。FAのポゾラン反応はセメントの水和反応と比べて遅いが、活性度指数が大きいほど強度発現が大きくなり、同様の試験をコンクリートで行った場合の圧縮強度と相関性がある。

小さいものの変動係数が 18.44 と若干ばらつきが見られる。しかし、分布の形状も良く、最大値でも 3.9%と JIS 規格の 5%以下を十分満足していることから、品質的には問題はないことが分かる。

(3) ブレーン比表面積の変動

図-6 にブレーン比表面積の経時変化を、図-7 に同期間の頻度分布を示す。

ブレーン比表面積も時期による変動があるものの、最小値でも $4,070\text{cm}^2/\text{g}$ と JIS 規格の $2,500\text{cm}^2/\text{g}$ を大きく上回り、標準偏差が 205.3、変動係数も 4.63 とばらつきも少なく良好な品質が確保されている。

(4) フライアッシュの品質に関する考察

石炭火力発電所では、中国産や豪州産等の産地の異なる複数の石炭を時期により使い分けている。FA の品質は産地の違いにより大きく異なることが知られているが、混和材として採取する FA は、JIS の規定を満足する灰のみを採取し、その他の灰は埋立てやセメントの材料として利用されている。

このことを考慮すると、出荷されている県産 FA は、十分な品質管理が行われ、良好な品質が確保されていることが分かった。

特に、ブレーン比表面積はⅡ種の規定と比べて大きく、強度や流動性、耐久性向上といった FAC の品質に対して好影響を与えるものである。

今回は、2年5ヶ月分の試験結果により統計値を算出したが、標本数が 41 と少なく、さらにデータを蓄積して標本数を多くすることで分布形状もさらに良好な分布形状となることが想定される。

3. フライアッシュコンクリートの品質

FAC は、FA の品質によりフレッシュ性状や強度等が大きな影響を受けるが、県産の FA を使用して実際に伊良部大橋の下部工で打設された 27FAC に対し、最も重要な圧縮強度、施工性等に影響を与えるスランプ、空気量等の品質を確認した。なお、今回の検討は 2010 (平成 22) 年 8 月中に圧縮強度試験が完了したものについて行っている。

(1) 圧縮強度

図-8 に 27FAC 圧縮強度の推移を示す。伊良部大橋では、通常の管理と同様に 28 日強度で圧縮強度を管理しているが、FAC の長期強度の確認のため、通常の 28 日強度のほかに 91 日強度も確認しており、図では両方の圧縮強度を示している。

図より、28 日強度で 27FAC の目標配合強度である $32\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の強度が発現し、長期的に強度が増進していることが確認できる。



図-4 強熱減量の経時変化

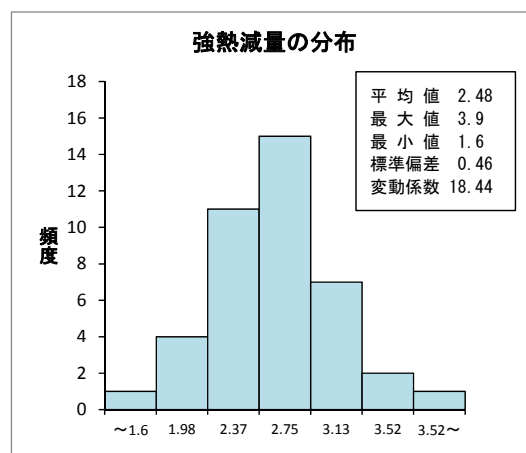


図-5 強熱減量分布

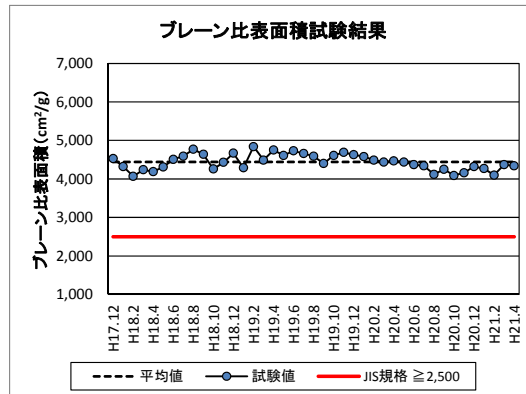


図-6 ブレーン比表面積の経時変化

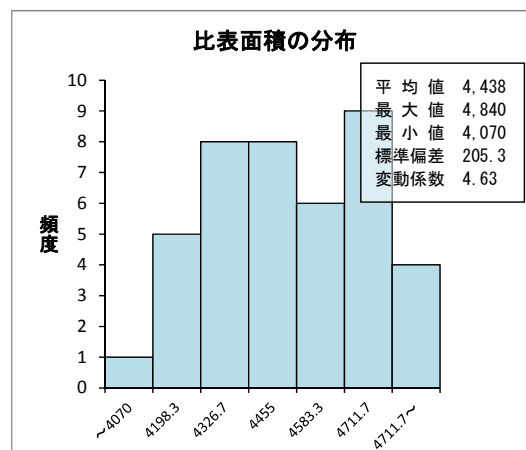


図-7 ブレーン比表面積分布

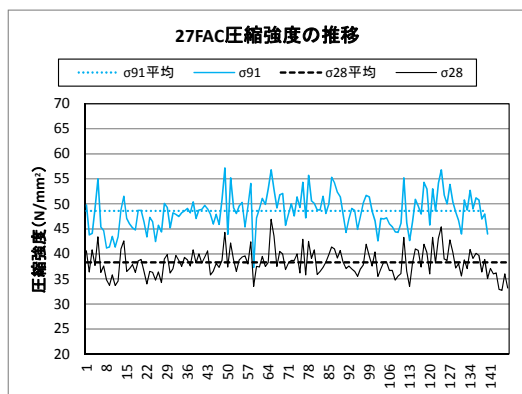


図-8 27FAC 圧縮強度の推移

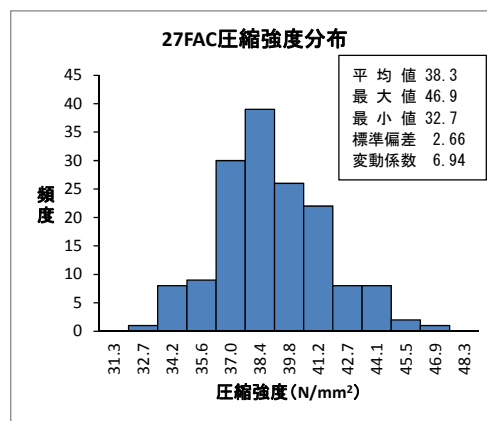


図-10 27FAC 圧縮強度分布

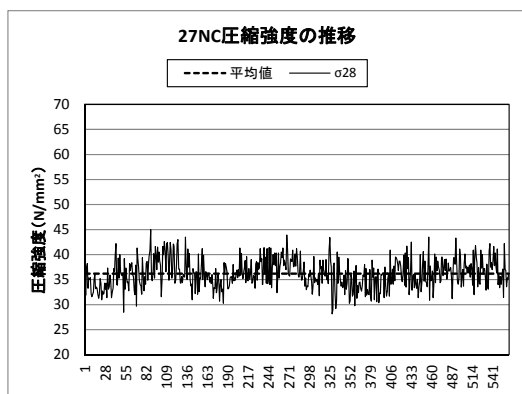


図-9 27NC 圧縮強度の推移

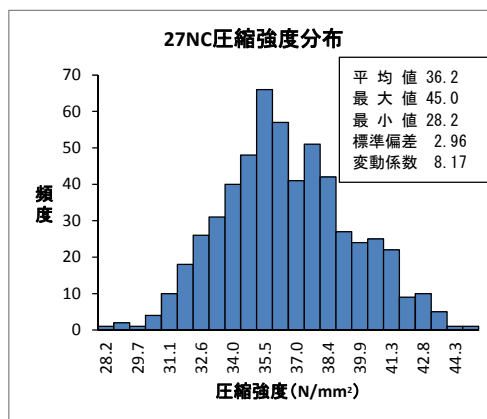


図-11 27NC 圧縮強度分布

県内で同時期に打設された呼び強度 27N/mm² の普通コンクリート（以下「27NC」）の圧縮強度の推移を図-9に示す。これらの図より、サンプル数の違いはあるものの、平均値からのばらつきは同程度であり、27FAC と 27NC に大きな差は見られないことが分かる。

27FAC 及び県内で同時期に打設された 27NC の 28 日強度についての頻度分布を図-10、図-11 に示す。

27FAC の標準偏差は 2.66、27NC は 2.96 であり、変動係数がそれぞれ 6.94、8.17、範囲もそれぞれ 14.2、16.8 と、27FAC は 27NC と比較しても通常使用されている普通コンクリートと同等で安定した品質が確保されていることが分かる。

表-3 に宮古島で 27FAC を出荷している 3 生コン工場の統計値を示すが、各工場とも品質の変動も少なく、安定した品質が確保されている。

先に述べたとおり、FA を配合したコンクリートは、FA のポズラン効果により普通コンクリートに比べて長期強度が増大することが分かっていることから、実際に現場で打設された 27FAC 等の圧縮強度により、長期強度がどの程度発現しているのかについても確認した。

図-12 に、27FAC 及び 27NC の平均圧縮強度の伸びを示す。27FAC は全体の平均と各生コン工場毎の平均を、27NC は同時期に宮古島で打設されたコンクリートの平均を示している。また、27FAC の配合を決定するために、2006（平成 18）年度に実施した配合試験で得られた、同配合の試験値もあわせて示している。

表-3 生コン工場毎のσ28 圧縮強度統計値

	全体	A工場	B工場	C工場
平均値	38.3	38.1	38	39.2
最大値	46.9	46.9	43.8	45.4
最小値	32.7	32.7	34	33.5
標準偏差	2.66	2.91	2.01	2.95
変動係数	6.94	7.63	5.28	7.54

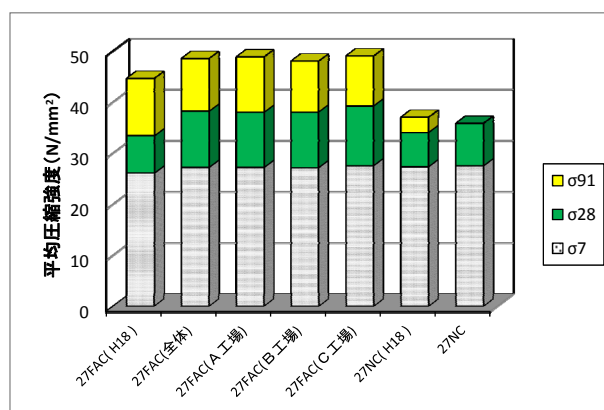


図-12 材令による圧縮強度の増進

配合試験時の試験結果では、28 日から 91 日までの圧縮強度の伸びが 27NC で 3N/mm² 程度であったのに対し、27FAC では 10N/mm² 程度で FA のポズラン効果による長期強度の増進が確認された。現場で打設された 27FAC についても配合試験時と同様

に 10N/mm² 程度の強度の増進が見られ、各生コン工場毎でも同様の強度増進が見られることから、表-3 とあわせて見ても、生コン工場の違いによる品質の変動も少なく、ポゾラン効果による安定した長期強度の増進が得られている。

27NC については、現場で使用された 27NC で 91 日強度が実施されていないことから直接比較は出来ないが、28 日強度までの結果を見ると、平成 18 年度の結果と同程度の強度の伸びであろうことが推察される。

(2) スランプ

27FAC 及び県内で同時期に打設された 27NC のスランプについての頻度分布を図-13、図-14 に示す。

27FAC の目標スランプは 12cm であるが、27NC はスランプ 12cm の使用が極端に少ないことから、目標スランプ 8cm の生コンでの結果を示している。

27FAC の標準偏差は 0.89、27NC は 0.88 であり、変動係数がそれぞれ 7.44、10.48、範囲もそれぞれ 4.5、5.0 と、27FAC は FA の品質変動によるばらつきも少なく、通常使用されている 27NC と比較しても安定した品質が確保されていることが分かる。

スランプは、施工性に直接影響を与える指標であることから、このことは、27FAC が安定した施工性能を有していることを示している。

(3) 空気量

空気量は、AE 剤や AE 減水剤により微細空気泡をコンクリート中に連行することで、凍結融解作用による凍害の抑制や、微細空気泡によるベアリング効果による流動性の確保を目的として規定されている。

FA は AE 剤を吸着することから、空気量確保のためには高価な FA 用 AE 剤を使用する必要があるが、伊良部大橋では、沖縄では凍害の恐れが無いこと、FA の混和により必要な施工性が確保できること等から、空気量は規定しないこととしている。

しかし、FA の品質変動による空気量の大幅な変動は、施工性や強度等の品質変動の原因にもなることが考えられることから、27FAC の空気量についても確認した。

27FAC 及び県内で同時期に打設された 27NC の空気量についての頻度分布を図-15、図-16 に示す。27NC の空気量の規定は、通常の $4.5 \pm 1.5\%$ である。

27FAC の標準偏差は 0.28、27NC は 0.48 であり、変動係数がそれぞれ 17.89、11.03、範囲がそれぞれ 1.5、2.7 となっている。変動係数が若干大きいものの、分布の範囲等を考慮すると、27FAC は FA の品質変動によるばらつきも少なく、安定した品質が確保されている。また、この 27FAC の空気量分布を見ると、現在は空気量を規定していないものの、例えば $2.0 \pm 1.0\%$ 等といった管理の可能性も考えられる。

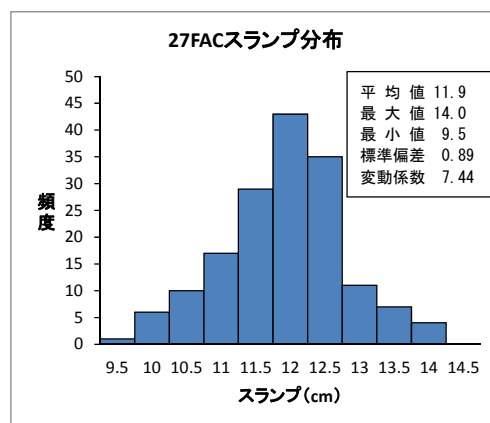


図-13 27FAC スランプ分布

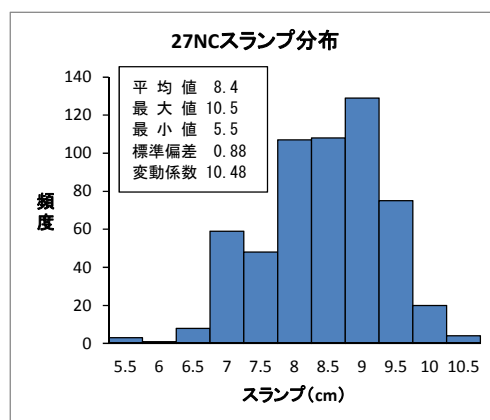


図-14 27NC スランプ分布

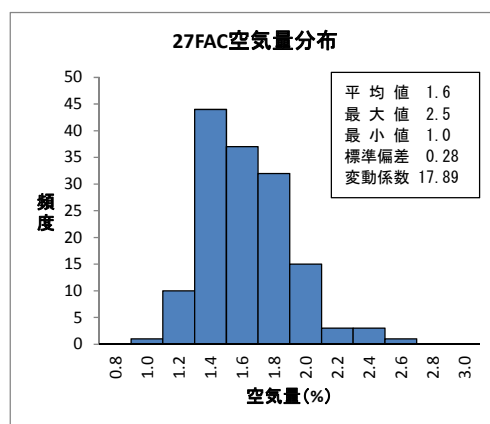


図-15 27FAC 空気量分布

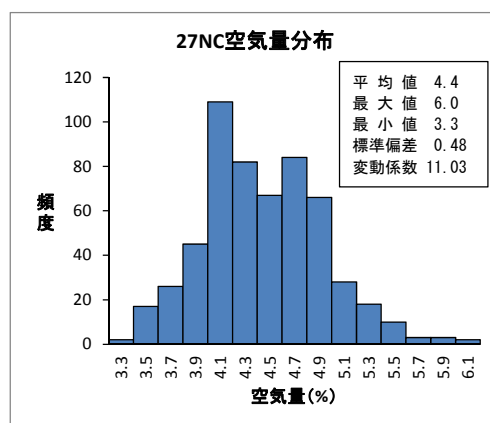


図-16 27NC 空気量分布

4. おわりに

今回、実際に伊良部大橋の現場で使用されている 27FAC について、FA の品質も含めてその品質を検証したところ、県内で生産されている JISⅡ種の FA は、石炭産地の違いによる品質の変動も少なく安定した品質が確保されており、それを用いて実際に施工された FAC は、強度やスランプ等のばらつきも少なく安定した品質や施工性が確保されていることが確認できた。

FAC は、塩害や ASR の抑制効果が高く、コンクリート構造物の耐久性が飛躍的に向上することから、県内の特に海岸沿いにおける鉄筋コンクリート構造物に用いることで、LCC を低減し耐久性の高い構造物を建設することができる。また、副産物である FA の積極的な利用により、天然資源利用の抑制やセメント製造時における CO₂ 排出量削減、最終処分施設の延命化等、環境負荷低減にも大きく寄与することが可能である。

このような優れた特性を有し、県内で生産も可能で普通コンクリートと同様な施工が可能な FAC であるが、現在は伊良部大橋以外にはまだほとんど使用されていない状況である（直轄事業で使用実績有）。

構造物の長寿命化や維持管理が課題となっている中、FAC の使用によりコンクリート構造物の高耐久化、長寿

命化を図り、後世に誇れる耐久性の高い構造物を建設することが、将来、県の維持管理の負担軽減に大きく貢献すると考えられる。今回の検討を契機に、今後 FAC の使用が促進され、孫の代まで残るような耐久性の高い構造物が建設されることを期待する。

謝辞：本検討にあたり、琉球セメント株式会社、電源開発株式会社石川石炭火力発電所からフライアッシュの試験成績書を提供していただいた。また、コンクリートの品質管理データの整理にあたり、沖縄県土木建築部宮古土木事務所伊良部大橋建設現場事務所のご協力をいただいた。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会フライアッシュ調査研究小委員会編：コンクリートライブラリー94，フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），土木学会，1999.
- 2) 土木学会四国支部，四国における石炭灰のコンクリートへの適用性に関する調査研究委員会編：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案），土木学会四国支部，2003.
- 3) 本郷靖：コンクリート技術者のための統計的方法手引，財団法人日本規格協会，1998.