論文 沖縄県内陸部における FAC 利用に関する中性化耐久性検討

風間 洋*1・富山 潤*2・下地 建*3・小籏 俊介*4

要旨:沖縄県は、厳しい塩害環境であるとともに、コンクリート用骨材の海砂が遅延膨張性のアルカリ骨材 反応 (ASR) を示す事が確認されているため、伊良部大橋下部工では、塩害対策、温度応力対策に加え、ASR 対策を考慮してフライアッシュコンクリート (FAC) を用いている。また、沖縄県では、石炭火力発電所産出のフライアッシュ (FA) の有効利用が求められているが、FAC は内陸部における中性化抵抗性が懸念されており、利用促進が阻害されている。以上から、本研究では、FAC の中性化促進試験および交通渋滞路線での CO_2 観測を行い、FAC の内陸部における中性化進行を予測した結果、100 年耐久性を満足することが確認された。 キーワード: FAC、中性化、中性化促進試験、 CO_2 観測,中性化進行予測

1. はじめに

沖縄県では、コンクリート用骨材の海砂が遅延膨張性の ASR を示す事が確認されており 1)、伊良部大橋や本部大橋などの高耐久性構造物に対して FAC が用いられている 2 。しかし、FA を内割配合した FAC は、一般に普通コンクリート(NC)に比べ中性化の進行が早いとされており、その使用は海上架橋のような構造物に限られてきた。ここで、沖縄県内の火力発電所の殆どは石炭火力であり、産出する FA はその殆どが海上埋め立て処理されている。そのため、沖縄県では、FAの有効利用を考えており、FAC の内陸部への適用可能性を検討している 3 。

このため、本研究では伊良部大橋下部工で用いられた FAC を用いた供試体を作製し、中性化促進試験を行い、同時に透気係数試験を行うことにより、FAC における両者の関係を確認した。

さらに、沖縄本島内陸部の交通渋滞路線において CO_2 濃度観測を実施し、その値を用いて内陸部での FAC の中性化耐久性の将来予測を行った。

2. 実験計画

2.1 実験概要

(1) 試験体概要

本試験に用いる供試体のコンクリート配合は、伊良部大橋下部エ 27N/mm² および 36N/mm² の FAC 配合とその比較のための NC 配合である (表-1)。中性化促進試験および透気係数試験に用いた供試体の模式図を図-1に示し、諸元を以下に述べる。

● 供試体寸法:15×15×53 cm

● 供試体個数:4配合×3本=12体

配 筋:無筋

● 供試体塗装:両側面以外の4面を塗装

表-1 供試体打設を行ったコンクリートの配合

配合条件				単位量(kg/m³)											
スランプ 空気量 水結合材比 細骨材率 水		ŕ	合材 細骨材			粗骨材		混和剤 AD							
配合記号*			W/(C+F1)	(s+F2)/a	w	セメント	フライアッシュ**	海砂	砕砂	フライアッシュ**	2005	4020	高性能 AE減水剤	AE助剤	
	(cm)	(%)	(%)	(%)		С	F1	S1	S2	F2	G1	G2	(C×%)	(C×%)	
27N-U0F0 (27NC)	12 ±2.5	12	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)		±2.5	±2.5	39.0	35.4	157	403	0	312	316	0	701	468	0.75	0.0089
36N-U80F20 (36FAC)			39.0	35.4	137	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

^{*** 27}N-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

^{*1} アール・アンド・エー 代表 (正会員)

^{*2} 琉球大学 工学部環境建設工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

^{*3} 財団法人沖縄県建設技術センター 試験研究部

^{*4} 株式会社中研コンサルタント 大阪技術センター

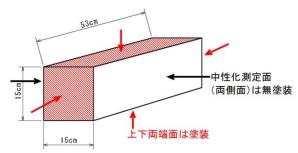


図-1 促進中性化試験供試体模式図

(2) 中性化促進試験

中性化促進試験は、JIS A 1153 に従い行った ⁴⁾ 。 試験項目および打設後材齢は、以下の通りである。

● コンクリート打設: 平成25年1月24日

● 脱 型:3日

● 7日強度測定:7日(1週)

● 標 準 養 生:脱型~4週

● 28 日強度測定:28 日(4週)

● 恒温恒湿養生:5~8週

● 表面樹脂塗装:8週中に実施

● 促 進 期 間:9週目~34週

● 測 定 材 齢:9,12,16,21,28,34週(6回)

(3) 透気係数試験

コンクリートの透気係数試験は、コンクリートの 緻密性を直接的に評価できる指標であり、中性化試 験結果と高い相関性があるとされている⁵⁾。しかし、 これらの相関性はNCにおけるものであり、FACでの 研究は少ない。よって、FACの中性化進行を透気係 数試験により把握できるようにするため、本試験で は中性化促進試験の実施に際し、透気係数を測定す ることによりFACにおける両者の関係を確認する。 透気係数測定方法は、Torrent 法(ダブルチャンバー 法)により行う。

供試体は、中性化促進試験と同じものを各配合 1本作製し、促進試験の測定材齢で透気係数を測定している。表-2には、透気係数の評価区分を示し⁶⁾、式(1)および式(2)には透気係数 k および測定深さ L の推定式を示す。

表-2 透気係数評価方法 6)

透気係数 KT(×10 ⁻¹⁶ m ²)	0.001 ~0.01	0.01~ 0.1	0.1~ 1	1~ 10	10~ 100
透気性 グレード	1	2	3	4	5
透気性評価	優	良	一般	劣	極劣

$$k = 4 \left[\frac{Vc(dP_1/dt)}{A(P_a^2 - P_1^2)} \right]^2 \frac{\mu P_a}{\epsilon} \int_0 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_a} \right)^2 \right] dt$$
 (1)

$$L(t) = \left\{ \frac{kP_a}{\varepsilon\mu} \int_0 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_a} \right)^2 \right] dt \right\}^{1/2}$$
 (2)

ここに k: 透気係数(m²)

μ : 空気の粘性係数(Nsm⁻²)

Vc: 測定空気量(m³)

ε: コンクリートの空隙率 (m³/m-³)

A : チャンバー断面積(m²)

P1:内側チャンバー内の圧力(時間関数)

 (Nm^{-2})

DP₁/dt:時間tの導関数(Nm⁻²sec⁻¹)

Pa: 大気圧(Nm⁻²)

L:試験により影響をうけた概略深さ

(時間 t の関数) (m)

2.2 将来予測手法

(1) CO₂濃度測定

内陸部の中性化進行予測を行う場合の指標となる CO2 濃度を観測した。観測場所は、沖縄地方渋滞対策 推進協議会において「地域の主要渋滞箇所」に選定され⁷⁾、 1km あたりの渋滞損失時間が県内第 4 位 8) の国道 330 号那覇市安里の沖縄都市モノレール安里 駅下の中央分離帯 (P369 橋脚)を選定した(**写真-1**)。また、この場所の値と比較のために CO2 濃度が低いと考えられる琉球大学暴露試験場においても同様の観測を行っている (**写真-2**)。観測に用いた CO2 濃度計 SenseAir の諸元を表-3 に示す。



写真-1 安里駅下の中央分離帯 P369 橋脚



写真-2 琉球大学暴露試験場

CO。濃度計 SenseAir の諸元

機種名	SenseAir			
測定対象	CO₂濃度(ppm)・温度(°C)			
測定範囲	0~6000ppm			
分解能	1ppm			
精度	±20ppm			
測定方法	NDIR(非分散型赤外線吸収法), アルミ蒸着処理光学セル			

(2) 中性化速度係数による評価法

CO。観測を行った内陸部における中性化進行予測 は,促進中性化速度係数を用いた予測式(3)により予 測中性化深さ(A)を求める。同式は、断面 10×10cm の供試体で促進中性化試験を行って求められた中性 化速度係数を用いた予測式である⁹⁾。

これに、本試験で得られた断面 15×15 cm供試体に より求めた中性化速度係数を補正して用いる。また, CO。濃度は、CO。濃度観測を行っている那覇市内交通 渋滞箇所の最高値観測値を用いる。

なお,中性化促進試験条件は,温度 20±2℃,相 対湿度 60±5%, CO。濃度 5±0.2%で行うが, CO。濃 度測定環境の那覇市は、年平均気温 23.1℃、年平均 相対湿度が 74%であり 10), 中性化進行を抑制する相 対湿度が促進試験環境より高い。よって, 促進試験 で求めた中性化速度係数を用いて那覇市安里におけ る中性化進行予測を行う事は, 危険側の予測となる。 しかし, 構造物の維持管理にとっては, 危険側の予 測が良いと考えられるため,これを用いて予測した。

$$A = A_{size} \times A_{mcure} \times A_{tcure} \times A_{tdry}$$

$$\times A_{tem} \times A_{HU} \cdot A_{CO2}$$
 (3)

ここに、A_{size} : 断面 15×15cm の場合, 0.94

A_{mcure}: 封緘養生の場合, 1.08

 A_{tcura} : 0.97 (0.8/ t_{cure} +1)

t_{cure} :養生期間(日)

 $A_{tdry} = (t_{dry} + 157)/185$

t_{dry} : 乾燥期間(日)

 $A_{tem} = (T_{em} + 27.3)/47.3$

T_{em} : 促進試験温度 (℃)

 $A_{HIJ} = Hu(100-Hu)$

×(140-Hu)/192000

: 促進試験湿度(%R.H.)

 $A_{CO2} = (CO_2/5)^{0.5}$

CO₂:炭酸ガス濃度(%)

(3) 水結合材比による評価法

本方法は、コンクリート標準示方書 維持管理編 に記載された方法であり, 水結合材比を用いて中性 化進行状況の将来予測を行うものである11)。

予測に必要な情報は、中性化促進試験に用いたコ ンクリートの示方配合で(表-1),水結合材比を用 いた予測式(4)により予測中性化深さ(v)を求める。

$$y = (-3.57 + 9.0W/B)\sqrt{t}$$
 (4)

ここに, W/B : 有効水結合材比= W/(Cp+k・Ad)

W: 単位体積あたりの水の質量

B: 単位体積あたりの有効結合材の質量

Cp: 単位体積あたりのポルトランド

セメントの質量

Ad: 単位体積あたりの混和材の質量

(内割 F1+内割 F2)

k: 混和材の影響を表す係数

フライアッシュの場合:k=0

高炉スラグ微粉末の場合:k=0.7

実験結果および考察

3.1 実験結果

(1) 中性化促進試験

中性化促進試験結果を図-2 に示し、表-4 には、 促進試験から得られた中性化速度係数を示す。また, 図-3 には、供試体コンクリートの7日および28日 圧縮強度試験結果を示す。

これらの結果から、本試験供試体の中性化は、FA の有無に関わらず強度が高い 36N 供試体の方が進行 が遅く、NCとFACの比較では、FACが強度の高低に 関わらず NC に比べて中性化深さが大きくなる傾向 を示していた。

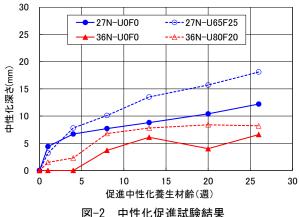


図-2 中性化促進試験結果

表-4 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		
27N-U0F0	18.1	(27NC)		
27N-U65F25	25.9	(27FAC)		
36N-U0F0	8.4	(36NC)		
36N-U80F20	13.3	(36FAC)		

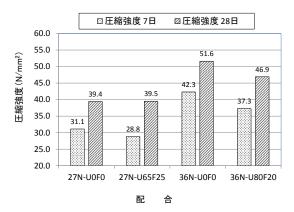


図-3 供試体コンクリートの圧縮強度試験結果

(2) 透気係数試験

透気係数試験結果は、図-4に示すように最終材齢 26週(182日)で以下の順となり、FACがNCに比べて高い値となったが、透気性グレードは 36N-U0F0 が「2:良」、他3配合は「3:一般」であり、中性化のような明確な差は認められなかった。

1) $36N-U80F20 (36FAC) : 0.348 \times 10^{-16} m^2$ 2) $27N-U65F25 (27FAC) : 0.163 \times 10^{-16} m^2$ 3) $27N-U0F0 (27NC) : 0.114 \times 10^{-16} m^2$ 4) $36N-U0F0 (36NC) : 0.056 \times 10^{-16} m^2$

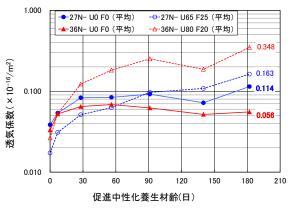


図-4 各配合の平均透気係数の経時変化

(3) 中性化深さと透気係数の関係

中性化は、コンクリート中の水酸化カルシウムと 炭酸ガスが反応することで炭酸カルシウムが生成さ れるために発生するが、炭酸ガスが反応した重量だ け重くなり、コンクリート組織が緻密化するとされ る¹²⁾。一方、中性化深さと透気係数には正の相関が あるとされている⁶⁾。

よって、本試験でも得られた中性化深さと透気係数の関係を図-5 に整理すると、以下が確認された。

- 中性化進行に比べ、透気係数の変化は小さい。
- 27N配合は、NC・FACに関わらず、中性化の進行 に伴って透気係数も直線的に増加する一次相関

の関係が認められる。

- NC について見ると,36N配合は27N配合より中性 化の進行および透気係数ともに半分程度である。
- FAC について見ると,36N配合の中性化進行は27N配合の半分程度であるが,透気係数は27N配合の2倍以上大きい。
- 以上から、これらの測定結果だけでは、FACの中性化進行を透気係数で把握することが難しいと考えられる。

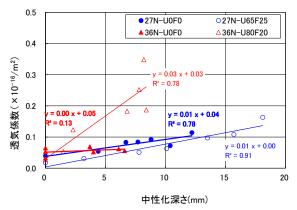


図-5 促進中性化深さと透気係数の関係

3.2 将来予測

(1) CO2濃度測定結果

 CO_2 観測は,表-5 に示すように 10 月と 11 月の 2 回,各々15 分間隔で 24 時間測定することにより, CO_2 濃度の日変化を確認している。観測結果は,2 回ともにほぼ同様の変動であったため,代表として 10 月の観測結果を図-6 および図-7 に示す。

 CO_2 観測の結果,那覇市安里駅下中央分離帯では,通勤・通学の時間帯の午前 $6\sim8$ 時頃に CO_2 濃度が高くなることが確認され,最大値は 10 月 18 日 7 時 22 分の 486ppm であった。また,深夜 24 時~早朝 5 時ごろにかけては, CO_2 濃度が 400ppm 以下に下がっていた。ここで,図-8 は道路交通センサスよりとりまとめられた那覇市着交通量の時間帯別変動である 13 。同図に見られるように,那覇市内の交通量と安里駅下中央分離帯の CO_2 濃度の経時変化はリンクしており,同中央分離帯では交通量にともなう排気ガスの増減が CO_2 濃度に影響していると考えられる。

一方, 琉球大学暴露場における CO_2 濃度は,全測定期間中 400ppm 以下であった。この値と,気象庁 2012 年の沖縄県与那国島における CO_2 濃度の測定結果 $^{14)}$ を比較すると,交通量の少ない与那国島でも年平均値が 397ppm であり,琉球大学暴露試験場は与那国島と同程度の CO_2 濃度環境であることが判った。なお,これら 2 箇所の測定は, 1 台の CO_2 測定機器で

行ったため, 同時観測できなかった。

表-5 CO₂測定時期

測定場所	測定日(平成25年)			
安里駅下 中央分離帯	10月17~18日	11月18~19日		
琉球大学	10月10~11日	11月 7~8日		

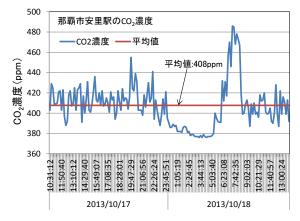


図-6 安里駅下中央分離帯のCO₂観測結果

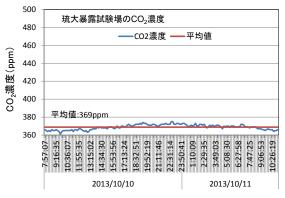


図-7 琉球大学暴露試験場の CO₂観測結果



図-8 那覇市着交通量の時間帯別変動 13)

(2) 中性化速度係数評価法による予測

促進中性化速度係数による 100 年耐久性を考慮した中性化予測結果を図-9 に示す。同図から、安里駅下中央分離帯の CO。濃度を用いて予測した 100 年後

の中性化深さは, 27N-U65F25 (27FAC) が 24.0mm と 最も大きくなった。

ここで、実構造物の鉄筋の最小かぶりについて、 道路橋示方書では、沖縄県は全域が塩害の影響の度 合い「地域区分 A」に指定されており、内陸部でも 鉄筋コンクリート構造の最小かぶりは 70mm として いる ¹⁵⁾。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、一般環境の場合未中性化域が 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 ¹¹⁾、 内陸部でも塩害環境である沖縄県では 15mm を採用 する。

これらの値を 100 年後の中性化予測値と比較する と、中性化の最も進行すると予測された 27FAC でも 中性化残りは 46.0mm (=70mm-24.0mm) であり、許容 中性化残り 15mm を上回る。

以上から,式(3)による中性化進行予測では,伊良部大橋下部工 FAC は沖縄県内陸部の安里駅下中央分離帯において中性化の 100 年耐久性を満足すると考えられる。

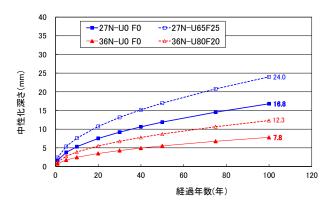


図-9 促進中性化速度係数から試算した中性化予測

(3) 水結合材比評価法による予測

水結合材比による中性化予測結果を**図-10** に示す。 この結果から、水結合材比を用いた 100 年後の中性 化予測深さは 27N-U65F25 (27FAC) が最大で 20.5mm, 36N-U0F0 (36NC) は 0.0mm であった。

この 27FAC の 20.5mm と沖縄県内陸部における最小かぶり 70mm を比較すると 49.5mm (=70mm-20.5mm) であり、この予測手法でも許容中性化残り 15mm を上回る結果となった。

以上から、水結合材比による中性化予測でも伊良部大橋下部工に用いられた FAC は、内陸部における中性化抵抗性が 100 年耐久性を満足すると考えられた。

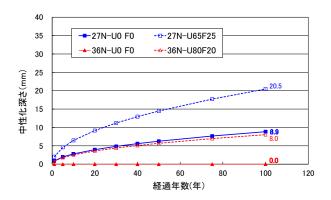


図-10 水結合材比から試算した中性化予測

4. まとめ

FAC の中性化促進試験,透気係数試験,CO₂観測,および各種中性化予測の結果から得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- (1) 中性化促進試験の結果は、FA の有無に関わらず 強度が高い程中性化の進行は遅く、NC と FAC の 比較では、強度の高低に関わらず FAC が NC に比 べて中性化深さが大きくなる傾向を示した。
- (2) 中性化促進試験における透気係数試験結果は、中性化進行に比べ透気係数の変化が小さく、透気係数値は FAC が NC に比べて高かった。また、透気性グレードは明確な差が認められなかった。
- (3) 中性化と透気係数の関係は、27N配合ではNC・FAC ともに一次相関の関係が認められたが、36N配合では、NCとFACで異なった結果が得られ、これらの結果だけではFACの中性化進行を透気係数で把握することが難しいと考えられた。
- (4) 沖縄本島内陸部交通渋滞箇所における CO₂ 濃度観測の結果,同所は通勤・通学の交通量の多い午前 6~8 時前後に CO₂ 濃度が高くなることが確認された。
- (5) CO₂ 濃度観測場所における実測の CO₂ 濃度最高値と,中性化促進試験により得られた中性化速度係数を用いて FAC の中性化進行予測試算した結果,伊良部大橋下部工に用いた FAC は中性化の 100 年耐久性を満足すると考えられた。
- (6) また,同予測を水結合材比による予測手法で試算した場合でも,伊良部大橋下部工に用いた FAC は内陸部において中性化の 100 年耐久性を満足すると考えられた。
- (7) 本研究の CO₂ 濃度観測地点では,現在 5 年間の中性化暴露試験も実施しており, CO₂ 濃度観測も継続調査している。よって,本研究で行った中性化進行予測は,中性化暴露試験結果および CO₂ 濃度観測結果を本試験結果と併せて継続検討する。

謝辞:本研究は、財団法人沖縄県建設技術センターの 自主研究の一環として行った。また、内陸部 CO₂ 濃度 観測については、試験方法や試験場の選定にあたり、 沖縄県土木建築部道路管理課砂川勇二主任技師にご指 導・ご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 富山潤,ほか:遅延膨張性を示す細骨材に起因したアルカリ骨材反応に関する基礎研究と抑制対策, 日本コンクリート工学協会,コンクリート工学年 次論文集,Vol.33,No.1,pp.1049-1054,2011.7
- 2) 風間洋,ほか:伊良部大橋の主要部材に使用する コンクリート材料選定と配合,コンクリート工学 協会,コンクリート工学年次論文集,Vol.32, No.1,pp.893-898,2010.7
- 3) 沖縄県南部土木事務所,財団法人沖縄県建設技術 センター:南部東道路コンクリート構造物耐久性 検討業務報告書,pp.48-58,2012.3
- 4) 日本工業規格: JIS A 1153, 2012
- 5) R. J. TORRENT: 「カバークリート」の透気性係数の 迅速な決定方法, 土木工学における非破壊試験国 際会議シンポジウム (NDT-CE), pp. 26-28, 1995
- 6) 土木学会コンクリート委員会:構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書およびシンポジウム 講演概要集,p.32,2009.3
- 7) 沖縄総合事務局開発建設部:続!!わった一島の 渋滞改善さびら,pp.3-7,2013.2.21
- 8) 沖縄県:沖縄県の道路, p. 5, 2011
- 9) 社団法人日本建築学会:「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」,pp. 179-184, 1991
- 10) 気象庁 HP: 那覇平年値(年・月ごとの値)主な要素 参照, http://www.jma.go.jp/jma/index.html
- 11) 土木学会: 2013 年度制定コンクリート標準示方 書「維持管理編], pp. 141-160, 2013
- 12) 和泉意登志,前田照信,喜多達夫:コンクリート 構造物の耐久性シリーズ 中性化,技報堂出版, pp. 1-2, 1986.8
- 13) 沖縄総合事務局開発建設部:沖縄の道路状況について, p. 7, 2010. 12
- 14) 気象庁 HP:日本の大気中の二酸化炭素濃度について参照, http://www.jma.go.jp/jma/index. html
- 15) 社団法人日本道路協会:道路橋示方書(I共通編・Ⅲコンクリート橋編)・同解説, pp. 174-176, 2012.3