

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

風間 洋¹・富山 潤²・砂川 勇二³・比嘉 正也⁴・小簀 俊介⁵

¹正会員 アール・アンド・エー (〒901-2132 沖縄県浦添市伊祖3丁目2番8号)

E-mail: kaze_kowbow@ybb.ne.jp

²正会員 琉球大学准教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

E-mail: jun-t@tec.u-ryukyu.ac.jp

³沖縄県土木建築部技術・建設業課 (〒900-8570 沖縄県那覇市泉崎1丁目2番2号)

E-mail: sunagwyj@pref.okinawa.lg.jp

⁴一般財団法人 沖縄県建設技術センター 試験研究部 (〒902-0064 沖縄県那覇市寄宮1丁目7番13号)

E-mail: masaya_higa@okinawa-ctc.or.jp

⁵(株)中研コンサルタント大阪技術センター (〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島7丁目1番55号)

E-mail: sobata@ccc.soc.co.jp

近年沖縄県では、石炭火力発電所のフライアッシュ(FA)の有効利用としてコンクリートに配合されており、2015年1月開通の伊良部大橋では、上・下部工でフライアッシュコンクリート(FAC)が用いられている。本論文は、波しぶきのかかる海岸線に非JISFAを細骨材置換した外割りFAC供試体を約11年間暴露し、FACに高い塩分浸透抑制効果があること、FACでも自然電位や分極抵抗などの非破壊試験が、普通コンクリート(BC)と同様の閾値で判定可能であること、高湿度の海岸域暴露ではFAC・BCともに中性化の進行が鉄筋腐食に影響のない程度である等を確認した。また、使用した遅延膨張性骨材の海砂のアルカリ骨材反応(ASR)発生を岩石学的試験により確認したところ、痕跡程度で、ひび割れの主要因ではないと判断した。

Key Words : fly ash concrete, constant cement content, 11 years exposure test, salt damage, the coast of Okinawa, nondestructive test

1. はじめに

近年、高炉スラグやフライアッシュ(以下、FAと称す)を混和したコンクリートは、耐久性や施工性の高度化に有効であることが周知されており、環境負荷低減の観点からも積極的な利用が望まれている¹⁾。特に、橋梁下部工等の重要な構造物で高炉セメントコンクリートが標準的に使用されており、九州地区においても、九州地方整備局の設計要領²⁾やコンクリート構造物設計・施工指針(案)³⁾等において、構造物の品質向上を図るため、高炉セメントやフライアッシュセメントの使用が標準化されている。この他、フライアッシュコンクリート(以下、FACと称す)の利用については、四国⁴⁾、東北⁵⁾、北陸⁶⁾でも施工指針(案)やガイドライン(案)などが作成されている。

しかし、沖縄県には高炉が無いことから高炉セメン

トが標準的に使用されず、また、FAも石炭産地の違いや設備の未整備等により品質の変動が大きく、これまで使用されていない状況であった。

沖縄県の石炭火力発電所から産出するFAは、年間約10万トンあるが、そのほとんどを海岸域の埋め立て投棄に用いていた。しかし、海洋埋め立ては、美しい海を観光の目玉としている沖縄県にとって有効な手段とはいえず、沖縄県および沖縄電力(株)はFAの有効利用を各種検討し、セメント原料やリサイクル資材への利用、海洋埋め立てに用いている非JISFAを用いた各種配合試験や暴露試験、コンクリート魚礁への利用試験⁷⁾などが行われてきた。

しかし、近年JIS A 6201に規定されるII種のFA(以下、JIS II種FAと称す)が県内で1万トン程度産出されるようになり、安定した品質のFAが入手可能となったことから、これまでの調査・研究による知

見を踏まえて JIS II 種 FA で配合・打設等の各種試験が行えるようになった。その結果、2015 年 1 月に開通した伊良部大橋は、海上長大橋で長期耐久性を望まれたことから、上・下部工に FAC を採用するに至った。

本暴露試験は、これらの一環として実施されたものであり、沖縄電力(株)具志川火力発電所産の非 JIS FA を用いて 2001 年 3 月に供試体を作製し、約 11 年間波しぶきの直接かかる海岸線に暴露し、各種耐久性試験を実施したものである。試験内容は、供試体の目視観察、圧縮強度・静弾性係数試験、含有塩化物イオン量試験、含有水溶性アルカリ量試験、中性化試験、電気化学的試験(自然電位測定、分極抵抗測定)とはつり調査による鉄筋腐食調査、透気係数試験、岩石学的試験によるアルカリ骨材反応(以下、ASR と称す)確認試験からなる。

なお、暴露供試体は、沖縄電力(株)牧港火力発電所構内突堤式岸壁上に 2001 年 4 月から暴露されていたが、同場所での暴露継続が困難になったため、2010 年 5 月に現在の辺土名海岸に暴露試験場を設けて移設し、現在に至っている。本研究では、暴露 10 年 11 ヶ月目(以下、暴露 11 年と称す)の追跡調査で確認された結果を述べる。

2. 暴露試験方法

(1) 暴露供試体の使用材料、配合、形状

暴露供試体作製には、普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)を用い、骨材諸元を表-1 に、表-2 には FA の品質⁸⁾を示す。表-2 から、暴露供試体に使用した FA は、南屯炭(瀝青炭)であり、測定されていない 91 日活性度指数を除くと、二酸化けい素が僅かながら JIS 規格から外れている(表中黄色表示)他は JIS II 種 FA の規格内である事がわかる。なお、コンクリートの品質に最も影響があるとされる強熱減量は、上位品種の JIS I 種規格(≤ 3.0)を満足している。

コンクリートの配合は、表-3 に示すように W/C=45, 55, 60% (目標スランプ $12\pm 2.5\text{cm}$) のコンクリート 3 種類、W/C=65% (目標スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$) のコンクリート 1 種類の計 4 種類である。このうち W/C=45% 配合はベースとなる普通コンクリート(以下、BC と称す)のみ、それ以外は FAC および BC の 2 タイプで、FAC は全て細骨材の一部を FA に置換した外割り配合である。また、同表中にこれらの値から算定した各配合のアルカリ総量(R_2O)を示している。算定には、普通ポルトランドセメントの打設当時のアルカリ量 0.61% と、FA は 1998 年 10 月 13 日測定のアルカリ量 0.66% を用いた。この FA のアルカリ量は、打

設当時のデータがなかったため、1998 年の 3 回測定のうち ASR に危険側の最も高い値を使った。

供試体形状は、図-1 に示すように鉄筋腐食に関する試験に供するものは D13 鉄筋を黒皮が付いた状態で配筋している。この D13 鉄筋は、供試体両端に突出させ、電気化学的試験時の端子としているが、暴露中はシーリング材で保護した。また、供試体の打設は、側面からで、コテ均し仕上げ面を含めた側面はアクリルゴム系塗装材で保護塗装し、塩分の浸透を阻止している。圧縮強度・静弾性係数試験や含有塩化物イオン量試験等に用いる供試体は無筋で、同様に保護塗装した。供試体の養生期間は 28 日間とし、養生マットを

表-1 暴露供試体の使用骨材諸元

材料名	粗骨材	細骨材	
	石灰岩碎石(2005)	海砂	石灰岩砕砂
産地・銘柄	本部半島産	新川産	本部半島産
密度(g/cm^3)	2.70	2.63	2.67
吸水率(%)	0.36	2.00	1.16
微粒分量(%)	0.57	3.50	4.50
塩化物量(%)	—	0.008	—
粗粒率	6.84	2.23	3.27

表-2 暴露供試体の使用 FA 品質

項目		種類	具志川火力発電所石炭灰 2000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	45 μm ふるい残分 (網ふるい方法)	%	15.0(40以下)
	比表面積 (ブレーン方法)	cm^2/g	4030(≥ 2500)
フロー値比		修正	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

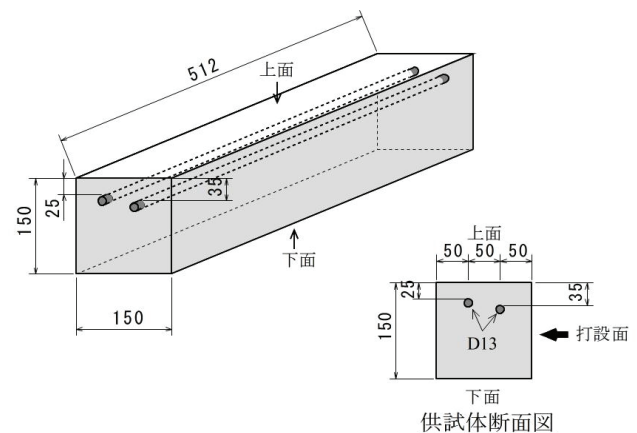


図-1 鉄筋腐食に関する暴露供試体形状

表-3 暴露供試体のコンクリートの配合

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)						混和剤※ ² (C+F) (%)	R ₂ O量※ ³ (kg/m ³)
						W	C	F	細骨材		粗骨材		
									海砂	砕砂	2005		
45-B	45	—	—	—	45.5	171	380	—	400	400	977	0.25	2.32
55-B	55			—	48.0	170	309	—	437	437	964	0.25	1.88
55-F50		47.4	16.2	13.9	45.6			50	401	401	975	0.25	2.22
55-F75		44.3	34.3	19.5	41.0			75	355	355	1040	0.375	2.38
55-F100		41.6	32.4	24.4	40.1			100	341	341	1040	0.35	2.55
60-B	60	—	—	—	49.1	170	283	—	452	542	956	0.25	1.73
60-F50		51.1	17.7	15.0	46.6			50	415	415	969	0.25	2.06
60-F75		47.5	26.5	20.9	42.7			75	374	374	1023	0.375	2.22
60-F100		44.4	35.3	26.1	41.6			100	358	358	1023	0.35	2.39
65-B	65	—	—	—	50.5	179	275	—	461	461	921	0.25	1.68
65-F50		55.1	18.2	15.4	48.4			50	427	427	929	0.25	2.01
65-F75		51.1	27.3	21.4	44.2			75	384	384	986	0.375	2.18
65-F100		47.7	36.4	26.7	43.2			100	368	368	988	0.35	2.34

※1) 先頭の数字はW/Cを表す。Bはベースコンクリート(普通コンクリート)を表す。

Fはフライアッシュ(FA)を表し、続く数字は、1m³当たりのフライアッシュ添加量(kg)を表す。

※2) F100の配合だけ高性能AE減水剤を使用し、そのほかの配合にはAE減水剤標準形を使用した。

※3) Cのアルカリ量(0.61%)とFAのアルカリ量(0.66%)から算定した。ただし、FAは打設当時のアルカリ量のデータが無かったため、データの存在した1998年10月13日のアルカリ量(ASRIに危険側として当該年最高値)を用いた。



写真-1 沖縄電力(株)牧港火力発電所内の暴露場所
(2001.4~2009.8)



写真-3 国頭村辺土名海岸暴露試験場
(2010.5~現在)

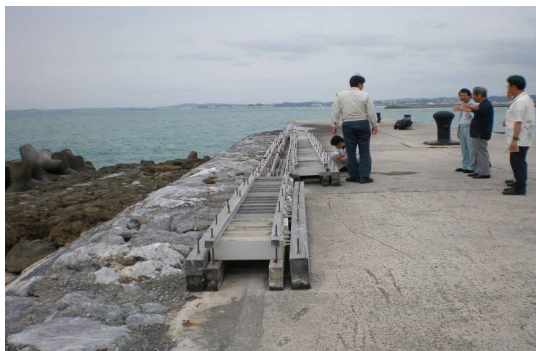


写真-2 沖縄電力(株)港火力発電所内の暴露場所近景



写真-4 国頭村辺土名海岸暴露試験場近景

かぶせ1日2回の散水養生を行った。

(2) 暴露試験場所

本暴露試験は、2001年の試験当初は、沖縄電力(株)

牧港火力発電所内の岸壁上が暴露試験場所であったが(写真-1, 写真-2), 2009年8月に継続暴露が困難となったため、一旦撤去し、2010年5月に国頭村辺土名漁港横に暴露試験場を新設し移設した(写真-3,

写真-4). なお, 両暴露試験場は, 北側に海が開け, 北寄りの冬期季節風により飛来塩分が来襲し, 高波浪時には波しぶきが直接かかる場所であり, ほぼ同程度の塩害環境である.

また, 辺土名暴露試験場では, 塩害環境を評価するため, 薄板モルタルを用いた飛来塩分量試験を冬季の39日間(2014年10月31日~12月8日)に行っており⁹⁾, 得られた飛来塩分量は39.4mddと激的な塩害環境であることがわかった.

(3) 暴露試験項目および内容

a) 供試体の目視観察

目視観察は, 全供試体に対して行い, ひび割れ, 錆汁, 白色析出物等の有無を確認し, 併せてテストハンマーによるたたき調査も行った.

b) 圧縮強度・静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験は, 各配合の無筋供試体からφ68mmのコアを採取し, JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じて実施した.

c) 含有塩化物イオン量および含有水溶性アルカリ量試験

含有塩化物イオン量および含有水溶性アルカリ量試験に用いる試料は, 各配合の無筋供試体からφ68mmのコアを採取し, 図-2に示すように2cm毎にコアスライスし(中央は3cm), それらを微粉碎して作製した. 試験は, この試料を二分して用い, 含有塩化物イオン量はJCISC-5「硬化コンクリート中に含まれる塩分の簡易分析方法」に準じて試験し, 水溶性アルカリ量(Na_2Oeq)は40℃温水抽出法により抽出した溶液を原子吸光分析により試験した.

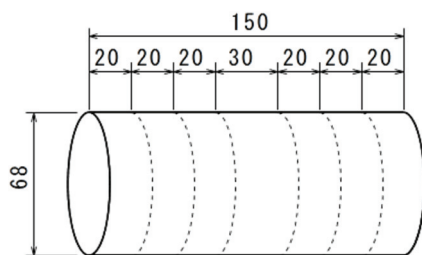


図-2 採取コアのスライス模式図(単位: mm)

表-4 自然電位による鉄筋腐食判定基準

損傷度	自然電位E (mV: CSE)	腐食状態	
I	$-350 \geq E$	大	浅い孔食等断面欠損の軽微な腐食
II	$-250 \geq E > -350$	やや大	全体的に表面的な腐食
III	$-150 \geq E > -250$	軽微	点錆程度の表面的な腐食
IV	$E > -150$	なし	腐食を認めず

d) 中性化試験

中性化試験は, 前述の圧縮強度・静弾性係数試験用コアを用いて実施した. 試験は, JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準じて行い, フェノールフタレイン試薬を用いて採取コア側面の上面側と下面側の中性化深さを測定した.

e) 電気化学的試験

供試体内には, 図-1に示すように黒皮が付いた状態の鉄筋をかぶり25mm, 35mmの位置に配筋しており, これらの腐食状況を確認するため, 自然電位および分極抵抗の電気化学的試験を行った. 自然電位の腐食判定は, 構造物診断技術協会(2003)¹⁰⁾を用い(表-4), 分極抵抗の腐食判定は, CEB(ヨーロッパコンクリート委員会)制定の基準¹¹⁾を用いた(表-5).

f) 鉄筋腐食状況試験

鉄筋腐食状況試験は, 電気化学的試験を実施後, その判定結果を検証するために供試体を解体して鉄筋を直接目視観察するものである.

試験は, 供試体解体後, 鉄筋に付着したコンクリート片を取り除き, 腐食程度を確認し, 表-6に示す判定基準¹²⁾により鉄筋の腐食度を判定した. また, 透明フィルムを鉄筋に巻き付け, 腐食箇所をトレースし, 腐食面積の測定を行った.

g) 透気係数試験

透気係数試験は, 緻密性の違いを確認・評価するものであり, BCとFAC供試体に対して行った.

透気係数試験方法は, ダブルチャンバー法(Torrent法)¹³⁾を用い(写真-5), 表-7に示す5段階の評価基準により区分した. なお, この区分は, 透気係数の値が小さいほど品質が良く物質移動抵抗性が高いコンクリートと評価するものである. 透気係数と測定深さの推定式を(1)および(2)に示す¹³⁾.

表-5 分極抵抗による鉄筋腐食判定基準

分極抵抗 $R_{ct}(\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	腐食速度測定値 $I_{corr}(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$	腐食速度の 判定	浸食度PDY (mm/year)
130~260より大	0.1~0.2未満	不働状態	0.0011~0.0023未満
52以上130以下	0.2以上0.5以下	低から中程度	0.0023以上0.0058未満
26以上52以下	0.5以上1.0以下	中から高程度	0.0058以上0.0116未満
26未満	1.0より大	激しい, 高	0.0116より大

表-6 鉄筋腐食度の判定基準

腐食度	腐食の目視による観察状況
0	施工時の状況を保ち, 以降の腐食が認められない
I	部分的に腐食が認められる
II	表面の大部分が腐食している (a) 部分的に断面が欠損している (b)
III	鉄筋の全周にわたり断面の欠損がある
IV	鉄筋の断面が当初の2/3~1/2位欠損している

$$k_t = 4 \left[\frac{V_c (dP_i / dt)}{A (P_a^2 - P_i^2)} \right]^2 \frac{\mu P_a}{\varepsilon} \int_0^t \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

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

ここで,

k_t : 透気係数(m^2)

u : 空気の粘性係数($N/m^2 \cdot s$)

V_c : 測定空気量(m^3)

ε : コンクリートの空隙率(m^3/m^3)

A : チャンバー断面積(m^2)

P_i : 内側チャンバー内の圧力 (時間関数)

P_a : 大気圧(N/m^2)

t : 時間

L : 測定面から大気圧状態であるところまでの長さ
(t の関数)

h) 岩石学的試験による ASR 発生の確認

本暴露供試体には、沖縄県新川沖産の海砂が使用されており、この海砂は ASR の遅延膨張性骨材であることが明らかとなっている¹⁴⁾。よって、暴露供試体のうち著しいひび割れが発生している供試体について、劣化原因は ASR である可能性があるため、コアを採取して薄片試料を作製し、ASR の岩石学的試験を実施した。

試験は「RILEM AAR-6」¹⁵⁾の手法に沿って採取コアの目視観察、実体顕微鏡観察、偏光顕微鏡観察および SEM-EDX 分析を実施した。観察は Katayama¹⁶⁾による



写真-5 透気係数試験状況

表-7 透気係数評価方法

透気係数 $Kt (\times 10^{-16} m^2)$	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

分類より、骨材およびセメントペーストの劣化状況から ASR 劣化の程度を評価した。図-3 に Katayama の判定法を模式的に図化したものを示す。

3. 結果および考察

(1) 供試体の目視観察

鉄筋を配筋した供試体（各配合 6 体）に対して目視観察を行った結果、FA を配合していない 65-B の全 6 体と 60-B の 1 体に 0.1~0.55mm のひび割れが認められた。これに対し、FAC 供試体にひび割れは認められなかった。

また、ひび割れ発生箇所は、全てかぶり 25mm 鉄筋の直上であり、かぶり 35mm 鉄筋直上にはひび割れは認められなかった。代表的なひび割れ発生供試体の写真を写真-6 および写真-7 に示す。

(2) 圧縮強度

暴露 11 年の圧縮強度試験結果を暴露前の材齢 28 日強度と共に図-4 に示す。ここで、本暴露試験供試体は外割り配合であり、各 W/C のシリーズで単位セメント量は同じである。そのため、各 W/C のシリーズで BC 供試体と FAC 供試体の 28 日強度を比較すると、概ね単位 FA 量が多い程、圧縮強度は大きくなっており、これは FA 配合による粉体効果と考えられる。な

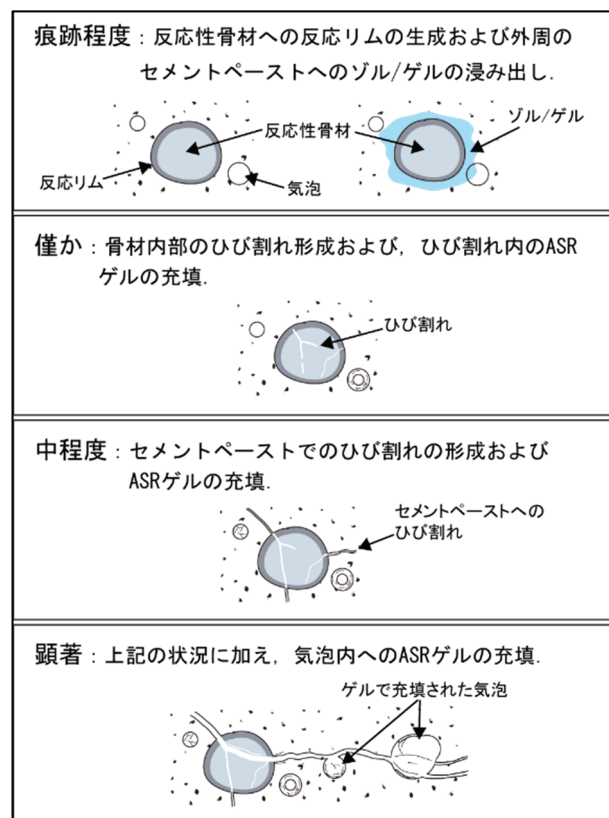


図-3 ASR の判定基準概要²⁸⁾

お、55-F100の28日強度が、同じW/Cシリーズの55-F50や55-F75の28日強度に比べ低くなっているが、打設時のスランプ、空気量、コンクリート温度等の諸元はほぼ同じであり、その原因は不明であった。

材齢28日と材齢11年の強度比較では、すべての配合で強度増進が認められた。このうち、BC供試体は、水和反応による強度増進と考えられるが、FAC供試体は水和反応による強度増進に加え、これらの配合に使用した非JIS FAのポズラン活性による強度増進があったと考えられる。なお、本配合に使用した非JIS FAの主な化学組成(2000年9月26日測定)は、 SiO_2 : 44.7%, Al_2O_3 : 34.4%, Fe_2O_3 : 4.6%, CaO : 7.4%, TiO_2 : 1.41%, MgO : 2.1%であった。

(3) 静弾性係数

図-5には、暴露11年の圧縮強度と静弾性係数の関係を全データで示している。同図に示されるように、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]¹⁷⁾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った。

また、本研究で試験したBCおよびFACは、同様の相関関係にあると言え、これらから外割りFACの

長期的な力学的性質は、普通コンクリートと同等と考えて良いと言える。

(4) 含有塩化物イオン量・含有水溶性アルカリ量

a) 含有塩化物イオン量

各供試体の含有塩化物イオン量分析結果を以下に示す。図-6は、W/Cの異なるBC供試体の含有塩化物イオン量分布である。同図から、W/C=45%供試体が最も遮塩性が高く、多少のばらつきはあるが、W/Cが大きくなるほど遮塩性は低いことがわかる。

図-7～図-9は、W/C=55%, W/C=60%, W/C=65%のBC供試体と各FAC供試体の含有塩化物イオン量分布である。これらの図から、W/Cの大きさに関係なくFACは、単位FA量が多いほど、水結合材比($W/(C+F)$)が小さいほど遮塩性が高く、供試体上面側からの浸透塩分量は、55-F50を除き20～40mm以深には浸透していないことがわかる。また、供試体下面側からの浸透塩分量も $W/(C+F)$ が小さいほど110～130mmより深い位置に浸透していない事がわかる。このことから、外割りFACの遮塩効果が確認できる。遮塩効果の優れているFAC供試体では、表面近傍で塩分量の蓄積が多く、また、暴露下面より上面の方が塩分量は少ない傾向を示している。この原因は、暴露上面は下面に比べて降雨による洗い流し作用を受け



写真-6 ひび割れの発生していた60-B供試体



写真-7 ひび割れの発生していた65-B供試体

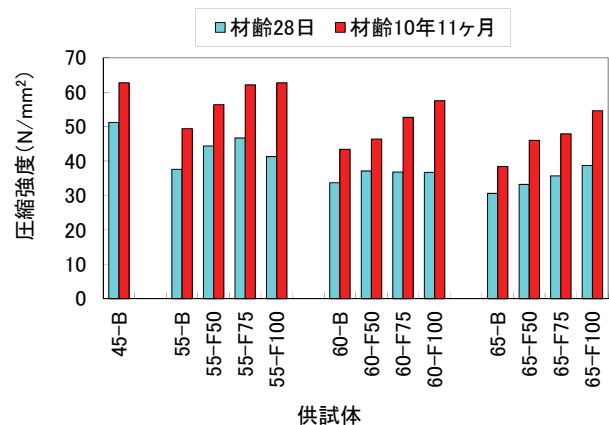


図-4 28日強度と暴露11年強度の比較

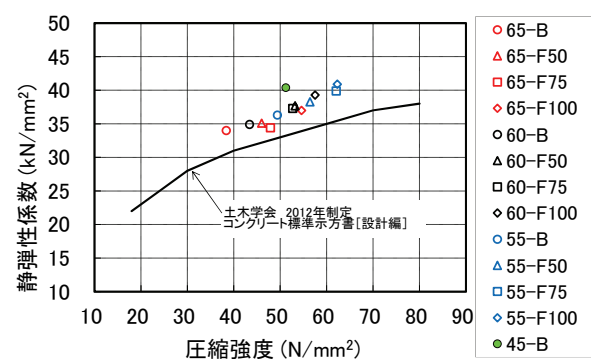


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

やすいためと考えられる。

図-10, 図-11 は, 含有塩化物イオン量試験結果から Fick の拡散方程式を用いて回帰分析を行い, 暴露供試体上下面の表面塩化物イオン濃度 C_0 と拡散係数 D_{ap}

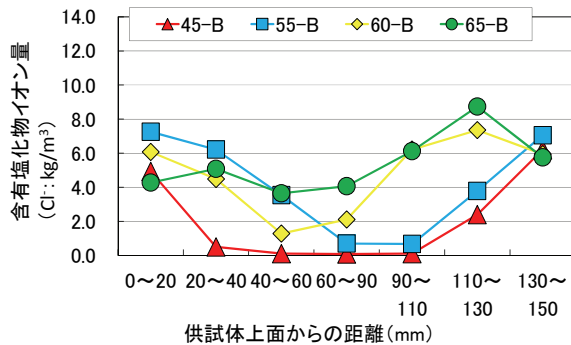


図-6 W/C 別 BC 供試体の塩分浸透状況

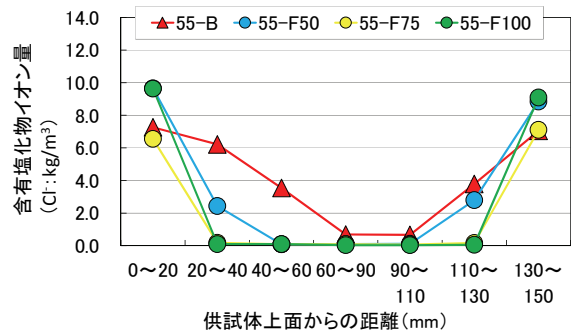


図-7 W/C=55%配合供試体の塩分浸透状況

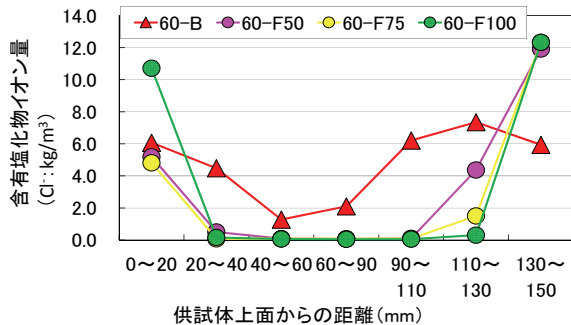


図-8 W/C=60%配合供試体の塩分浸透状況

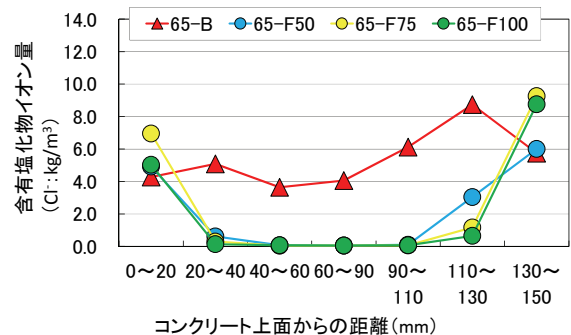


図-9 W/C=65%配合供試体の塩分浸透状況

を算定した結果である。なお, 65-B 上面は全ての供試体のなかで塩分の浸透が最も進行しており, 表層から深さ 80mm にかけた塩分量分布の濃度勾配が不明確な状況のため, C_0 および D_{ap} の算定が行えなかった。これらの図から, FAC は BC に比べて D_{ap} が小さく, また, 単位 FA 量が多いほど C_0 が大きくなることがわかる。この傾向は, 単位 FA 量が多いほど塩分は表層に留まり, 内部への塩分浸透を抑制していることを示しており, FAC は遮塩性が高いことが確認できた。

b) 含有水溶性アルカリ量

本暴露供試体コンクリートには, ASR の遅延膨張性骨材である沖縄本島新川沖産の海砂を使用している。そのため, 飛来塩分とともに供給されるナトリウムイオン (以下, Na イオンと称す) によるアルカリ量の増加を確認し, ASR 発生の可能性を推定するため, 含有水溶性アルカリ量 R_2O 量 (等価 Na_2O 換算) および Na イオン量の分布状況を図-12~図-15 で確認した。なお, これらのアルカリ量は総プロ法により補正していない。

図-12 は BC の R_2O 量の分布であり, 図-13 は BC の Na イオン量の分布である。これらの図から, W/C=45%と W/C=55%の BC は供試体上面から下面に至るまで R_2O 量, Na イオン量に大きな変動はないが, W/C=60%と W/C=65%の BC は横軸左の上面から下面

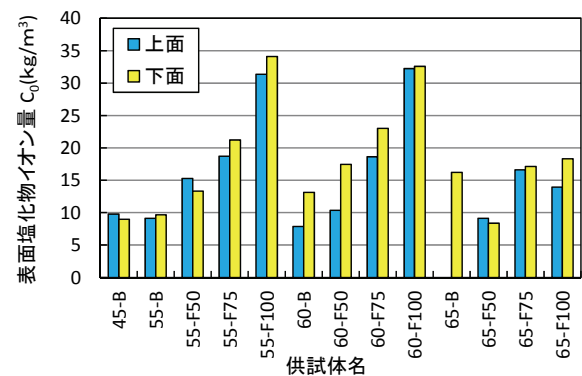


図-10 暴露供試体の表面塩分量 C_0

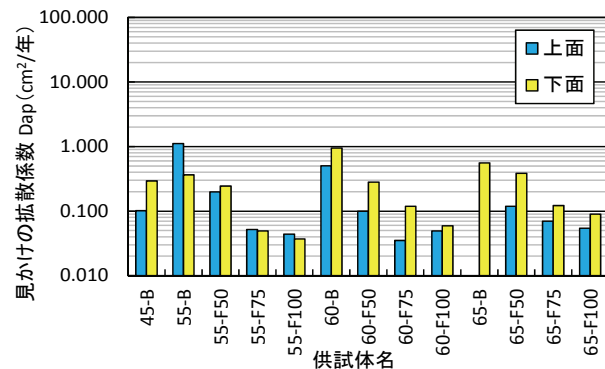


図-11 暴露供試体の Cl⁻ の見かけの拡散係数 D_{ap}

に向かって R_2O 量と Na イオン量が増加し, $W/C=60\%$ と $W/C=65\%$ の BC の上面から 60~150mm の範囲では, R_2O 量が約 3~6 kg/m^3 となっている。

これに対し, 図-14 は, $W/C=55\%$, $W/C=60\%$, $W/C=65\%$ の FA を 100 kg/m^3 配合した供試体の R_2O 量の分布であり, 図-15 は Na イオン量の分布である。これらの図を見ると, R_2O 量と Na イオン量は, W/C の大きさにかかわらず供試体上面から 130mm まではほぼ同程度であるが, 下面側 20mm は $W/C=60\%$ が最も含有アルカリ量が多く, 次いで $W/C=55\%$ であり, $W/C=65\%$ の配合は最も小さくなっており, W/C との相関は認められない。

また, BC と FAC の R_2O 量と Na イオン量は, 下面側の表層では大きくなるが, 上面側ではその傾向が現れておらず, 塩化物イオンの分布状況とは異なる。下面側だけでこの現象が生じた原因は, 飛来塩分として供試体の上下面に付着した NaCl が, 塩化物イオンと Na イオンとしてコンクリート内に浸透する過程で, 暴露上面は降雨による洗い流し作用を受けるが, 下面は受けにくいとためと考えられる。

ここで, 河合・小林¹⁸⁾は, $W/C=55\%$ の普通コンクリートでは Na イオンの拡散係数が塩化物イオンのそれに比べて約 1/15 小さいとしている。これを踏まえ, 前述の塩化物イオン量分布と Na イオン量分布を比較すると, Na イオン量が比較的多かった $W/C=60\%$ と $W/C=65\%$ の BC および FAC 供試体下面は, 塩化物イオンの拡散係数も大きく, 上面から 60~90mm 付近まで塩分が浸透しており, この傾向は Na の分布状況も同様に認められる。また, FAC 供試体下面の塩分の拡散深さは下面側 40~60mm に対し, Na は下面側 20mm であり, 拡散が比較的遅い傾向が認められる。

また, 図-12 および図-14 の水溶性アルカリ量を表-3 に示した算定アルカリ総量と比較すると, 供試体下面ではアルカリ総量を上回っており, 下面側で外来アルカリの影響が大きいことを示していると考えられる。

以上から, 暴露供試体の含有水溶性アルカリ量分布は, 上面より下面が大きいことが判ったが, FAC は BC に比べ W/C に関係なくほぼ一定であった。これは, FA の外割り配合量が増えるに従い $W/(C+F)$ が低下し, コンクリートが緻密になったため, アルカリイオンのコンクリート中の移動が抑制された可能性が考えられる。

(5) 中性化深さ

図-16 に暴露供試体の中性化深さの測定結果を示す。この図から, 各供試体の中性化深さは, 上面が 0~0.5mm (平均 0.1mm) で, 下面が 0~7.1mm (平均 1.3mm)

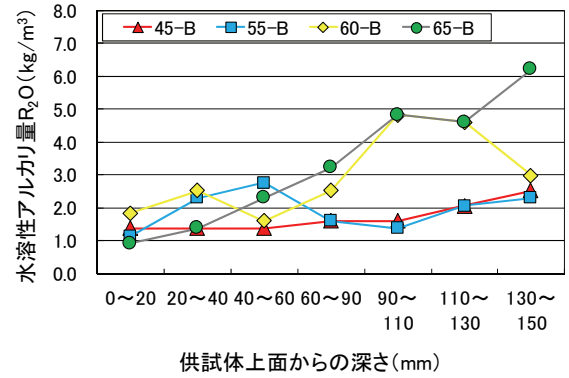


図-12 BC 供試体の水溶性アルカリ量の分布

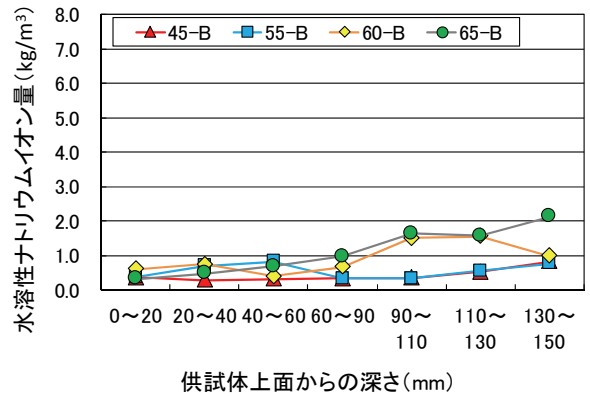


図-13 BC 供試体の水溶性ナトリウムイオン量の分布

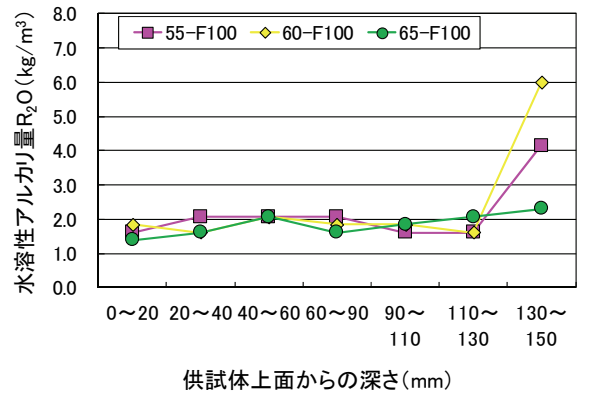


図-14 FAC の構造物中の水溶性アルカリ量 R_2O の分布

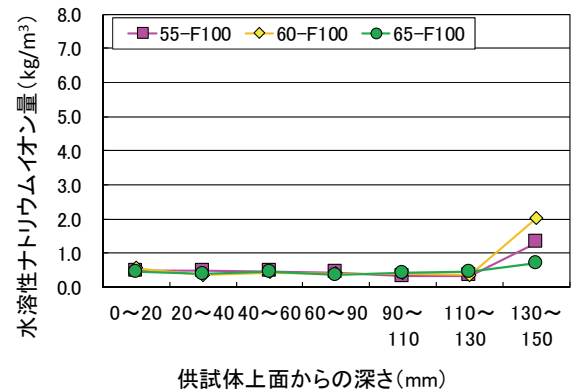


図-15 FAC の水溶性ナトリウムイオン量の分布

であった。ただし、本暴露試験供試体の FAC 配合は、全て外割りであり、セメント量が各 W/C シリーズで同量である事を鑑みると、65-F50 下面が 7.1mm と他の測定値に比べ大きく、その他は上面で 1mm 未満、下面は 2mm 未満であるため、65-F50 下面の値は気泡位置などで測定したイレギュラー的な値であったと考えられる。

ここで、白川ら¹⁹⁾は、中性化深さの経時変化は湿度に大きく影響され、湿度が低いほど中性化速度は速くなったとしている。また、沖縄県の相対湿度は、図-17のクライモグラフに示すように東京や札幌に比べ年間を通して高い。このことと、本供試体の暴露環境が常時湿気を受ける海岸線であったことが、中性化進行を抑制したと考えられる。

また、中性化を供試体上・下面で見ると、上面より下面の方が中性化は進んでいる。これは、供試体下面が上面に比べ降雨や波飛沫がかかりにくく乾燥が進んでいたことが原因と考えられる。

つぎに、中性化進行が大きかった下面の測定結果を用いて式(3)の \sqrt{t} 則による中性化に対する照査を土木学会コンクリート標準示方書[維持管理編]20)で示されている方法で行った。

$$y = b\sqrt{t} \quad (3)$$

ここで、

y : 中性化深さ (mm)

b : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)

t : 中性化期間 (年)

結果を図-18に示す。同図から、最も中性化の進んでいた 65-F50 でも 100 年後の中性化深さは 21.5mm であった。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環境の度合い「地域区分 A」とされており、内陸部でも鉄筋コンクリート構造の最小かぶり 70mm としている²¹⁾。また、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]²²⁾では、鉄筋かぶりから中性化深さを引いた中性化残りが、塩害環境の沖縄県などの場合 10~25mm としており、これらの値と中性化が最も進行すると予測された 65-F50 の 100 年後の予測値を比較すると、未中性化域は 48.5mm (=70mm-21.5mm) であり、安全側の中性化残り 25mm を上回っている。

以上から、本暴露試験供試体の中性化進行は、BC・FAC とともに鉄筋腐食に与える影響はほとんどないと言える。

(6) 電気化学的試験

電気化学的試験は、各配合 2 供試体に対して試験した。結果を以下に示す。

a) 自然電位

図-19に自然電位の測定結果を 2 供試体の平均値で示す。なお、同図は、縦軸に自然電位、横軸に単位 FA 量を取り、W/C 毎に鉄筋かぶり別で整理している。図から、BC 供試体および単位 FA 量が少ない FAC 供試体の自然電位は卑側に大きく、単位 FA 量が増加するに従い貴側に転じていることがわかる。

また、図-20には水結合材比と自然電位の関係を示す。同図は、縦軸に自然電位、横軸に W/C もしくは

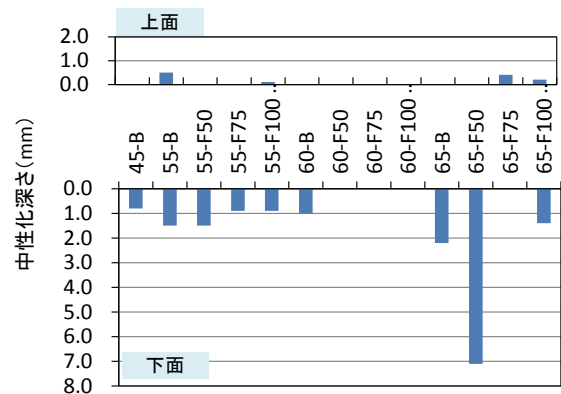


図-16 中性化測定結果

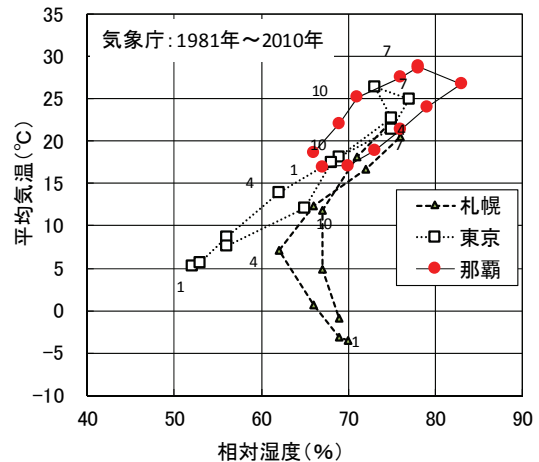


図-17 クライモグラフ

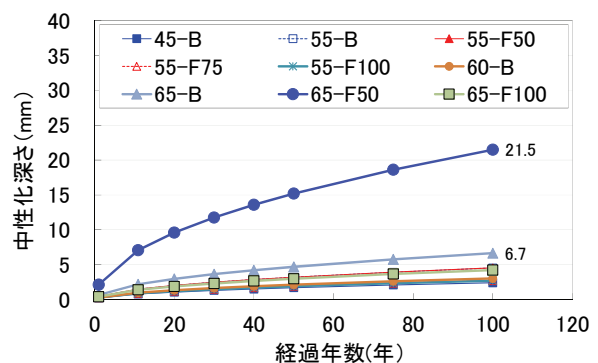


図-18 \sqrt{t} 則による中性化予測結果

W/(C+F)を取り、単位 FA 量毎に鉄筋かぶり別で整理している。同図より、BC の自然電位は、水セメント比が小さくなると貴側の電位となる傾向を示し、FAC 供試体も単位 FA 量が増加すると水結合材比が小さくなるのに合わせて同様の傾向を示している。

以上の結果より、単位 FA 量が増えるにしたがい、コンクリートの緻密性が向上し、それが鉄筋の防食効果に寄与している可能性が示唆されたと考えられる。

b) 分極抵抗

図-21 に分極抵抗測定結果を 2 供試体の平均値で示す。なお、同図は、縦軸に分極抵抗、横軸に単位 FA 量を取り、W/C 毎に鉄筋かぶり別で整理している。

この図から分極抵抗は、自然電位と同様 W/C=45% の BC 供試体以外は単位 FA 量が少ないほど分極抵抗が小さく、単位 FA 量が増加するほど大きくなっていく

ることがわかる。この値を鉄筋腐食判定基準で見ると、W/C=55%と 60%の BC は腐食速度「低から中程度」であり、それ以外は腐食速度「不働状態」であることが予想される。

図-22 に水結合材比と分極抵抗の関係を示す。同図は、縦軸に分極抵抗、横軸に W/C もしくは W/(C+F) を取り、単位 FA 量毎に鉄筋かぶり別で整理している。同図より、鉄筋かぶり 25mm の測定値は、W/C=45% 以外の BC において $100 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下と低い値を示し、FA50 の配合では $800 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下である。これに対し、FA75 と FA100 の配合は、すべて $1000 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度がそれ以上と比較的高い値を示しており、腐食速度が遅く、腐食が不活性状態あることが予想される。

また、鉄筋かぶり 35mm の測定値も傾向はほぼ同じで、W/C=45%以外の BC は $50 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 程度、FA50 配

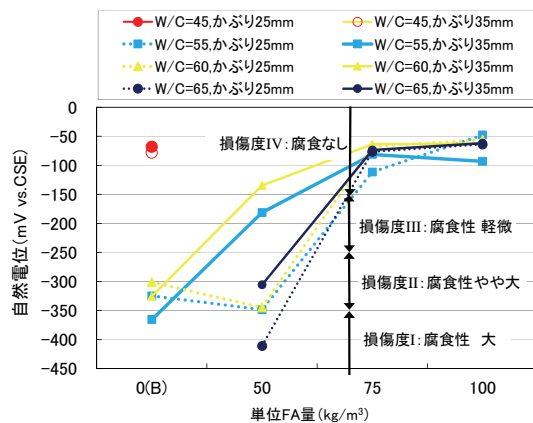


図-19 自然電位測定結果

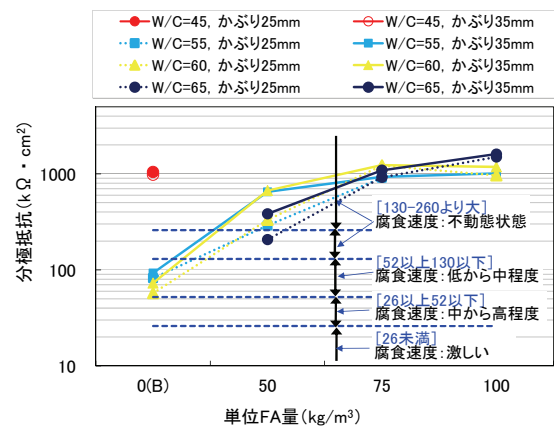
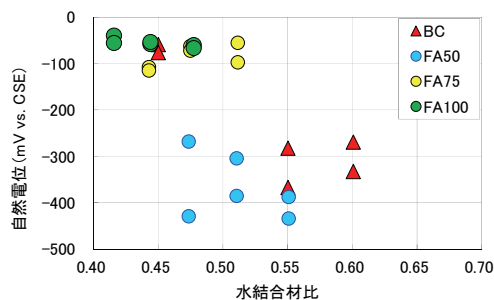
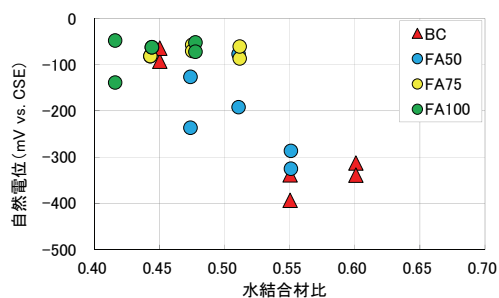


図-21 分極抵抗測定結果

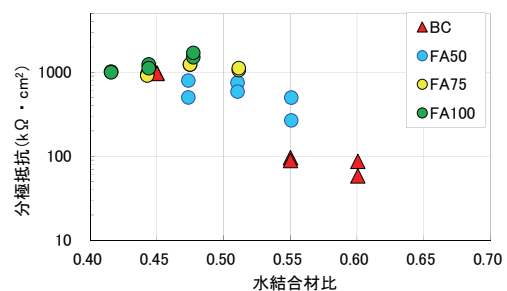


(a) かぶり 25mm

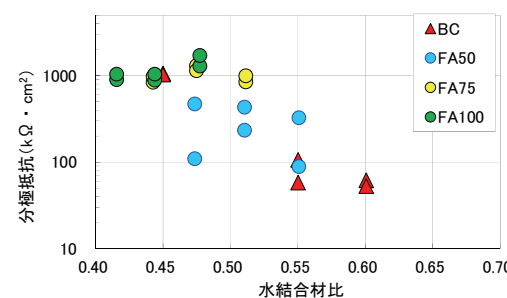


(b) かぶり 35mm

図-20 水結合材比と自然電位の関係



(a) かぶり 25mm



(b) かぶり 35mm

図-22 水結合材比と分極抵抗の関係

合は $500 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下と低い値を示している。これに対し、FA75 と FA100 の配合は、すべて $800 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上と比較的高い値を示しており、こちらも単位 FA 量が多いほど腐食速度が遅く、腐食が不活性状態であることが予想される。

このように、単位 FA 量が増加するほど分極抵抗が高くなる傾向は、コンクリートの緻密性の向上および塩化物イオンの浸透抑制傾向と同じである。よって、鉄筋の防食効果には、これらが総合的に相まって寄与していると考えられる。

(7) 鉄筋腐食状況

a) 鉄筋腐食状況の確認

表-8 に、鉄筋腐食度判定結果と電気化学的試験による鉄筋腐食判定結果の比較を示し、鉄筋腐食が認められた供試体欄を ■ 塗りで示す。また、鋼材腐食の目視判定、自然電位、分極抵抗に用いた基準は前述の通りである。表-8 の目視判定から、鉄筋腐食が著しいのは 45-B を除く BC であり、W/C が大きいほどその傾向は顕著である。この傾向は FAC についても同様で、W/C が大きいほど腐食傾向は強い。また、鉄筋かぶり別に見ると、かぶり 25mm 鉄筋の方が 35mm 鉄筋より腐食面積率が大きいことがわかる。

しかし、55-F50 と 60-F50 のかぶり 35mm 鉄筋および FA を 75kg/m^3 と 100kg/m^3 配合した鉄筋は、腐食が発生しておらず、表-6 に示す内部鉄筋の腐食度は「0」（腐食なし）であり、表-4 に示す自然電位の判定も「なし」、表-5 に示す分極抵抗の判定も「不動態状態」であった。

これに対し、腐食が確認できた BC 供試体と FA を 50kg/m^3 配合した FAC 供試体について見ると、腐食度「III」および「II(b)」の鉄筋はすべて 65-B で、かぶり深さに関係なくひび割れが発生しており、非破壊試験は実施出来なかった。

つぎに、腐食度「II(a)」の鉄筋は、55-B と 65-F50 のかぶり 25mm の鉄筋で認められ、60-B はかぶり深さに関係なく認められた。この腐食度「II(a)」と自然電位判定の腐食状態を比べると、「軽微」が鉄筋 4 本で、「やや大」が鉄筋 2 本で確認され、分極抵抗の判定基準はすべて「低から中程度」であった。なお、ひび割れの発生した鉄筋も 2 本あった。

腐食度「I」の鉄筋は、55-B のかぶり 35mm 鉄筋、55-F50 のかぶり 25mm 鉄筋、60-F50 のかぶり 25mm 鉄筋、65-F50 のかぶり 35mm 鉄筋で、自然電位の腐食状態は「大」が鉄筋 1 本、「やや大」が 2 本、「軽微」が 1 本で確認された。これらの分極抵抗の判定は、「低から中程度」と「不動態状態」が 2 本ずつあった。

つぎに図-23、図-24、図-25 には、55-B、60-B、65-

表-8 鉄筋の腐食状況と自然電位・分極抵抗による判定結果比較

供試体	かぶり (mm)	鉄筋腐食状況			自然電位による判定 ^{※3}	分極抵抗による判定 ^{※4}
		腐食度 ^{※1}	腐食状況の補足 ^{※2}	腐食面積率 (%)		
45-B	25	0		0.0	なし	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態
55-B	25	II(a)		58.0	やや大	低から中程度
	35	I		41.6	やや大	低から中程度
55-F50	25	I	上面から腐食が進行	23.4	大	低から中程度
	35	0		0.0	なし	不動態状態
55-F75	25	0		0.0	なし	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態
55-F100	25	0		0.0	なし	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態
60-B	25	II(a)	上面のみ腐食が激しい		軽微	低から中程度
	35	II(a)			軽微	低から中程度
	25	II(a)	上面のみ腐食が激しい	80.3	軽微	低から中程度
	35	II(a)		39.3	軽微	低から中程度
	25	II(a)	上面のみ腐食が激しい	80.6	ひび割れがあったため測定していない	
	35	II(a)		64.8		
60-F50	25	I	上面から腐食が進行	10.3	やや大	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態
60-F75	25	0		0.0	なし	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態
60-F100	25	0		0.0	なし	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態
65-B	25	III		92.2	ひび割れがあったため測定していない	
	35	II(b)		62.7		
	25	III		98.8		
	35	II(b)		87.2		
	25	II(b)		98.2		
	35	II(b)		92.4		
	25	III		98.6		
	35	III		99.0		
65-F50	25	II(a)	上面のみ腐食が激しい	57.8	やや大	低から中程度
	35	I	上面から腐食が進行	3.0	軽微	不動態状態
65-F75	25	0		0.0	なし	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態
65-F100	25	0		0.0	なし	不動態状態
	35	0		0.0	なし	不動態状態

※1:「表-6 鉄筋腐食度の判定基準」による

※2:鉄筋腐食の比較的低微な目視評価「I」、「IIa」に対する補足説明

※3:「表-4 自然電位による鉄筋腐食判定基準」による

※4:「表-5 分極抵抗による鉄筋腐食判定基準」による

■:着色部分は、鉄筋腐食が認められた供試体

B 供試体の代表的な鉄筋腐食面積トレース図を示す。これらの図から、鉄筋腐食は W/C が大きい程腐食面積率は大きく、また、腐食は鉄筋上面程発生しており、鉄筋下面の中心線付近では腐食していない。これらの結果は、鉄筋腐食が供試体上面からの距離との相関があり、供試体上面から浸透する腐食因子である飛来塩分との関係が深いことを示唆していると考えられる。

図-26 は、腐食度判定 0~II(a)までと、その鉄筋の腐食面積率との関係である。ここで、腐食度判定を II(a)までとしたのは、II(b)以上では断面欠損の指標が含まれるため、平面的な広がりをもつ腐食面積率の考え方と比較できないと考えたからである。この結果、腐食度判定 0~II(a)では、両者に良い相関関係が得られ、腐食度判定 II(a)以下の結果であれば鉄筋腐食面積率が算出できる可能性が示唆された。しかし、既往の文

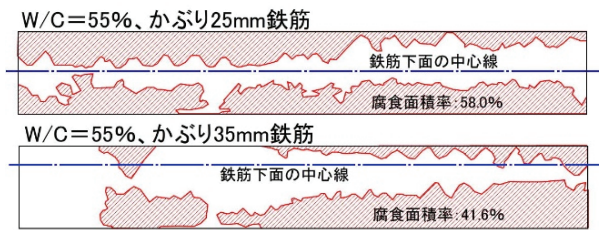


図-23 55-B 供試体の鉄筋腐食面積トレース図

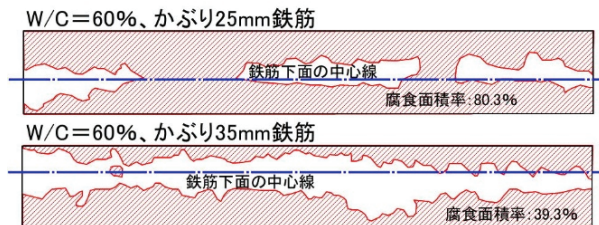


図-24 60-B 供試体の鉄筋腐食面積トレース図

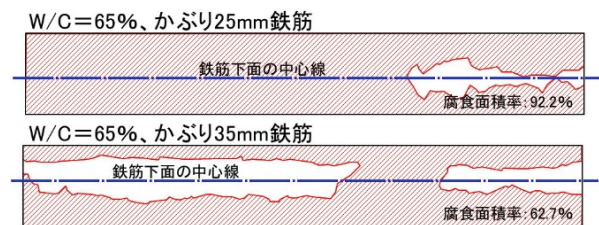


図-25 65-B 供試体の鉄筋腐食面積トレース図

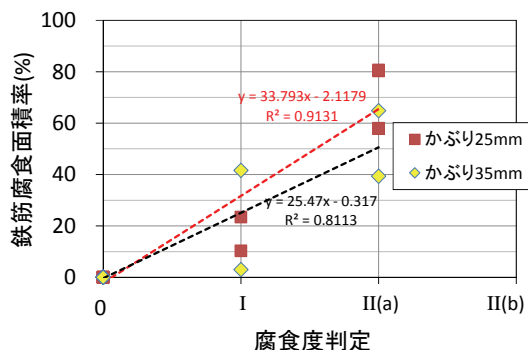


図-26 鉄筋腐食面積率と腐食度判定の関係

献にはこれらの比較した研究は認められないため、本暴露試験を継続調査、もしくは沖縄県内で多く実施している他の暴露試験において検証する予定であり、図-26はその一資料として提案するものである。

b) 鉄筋腐食状況と電気化学的試験の比較

表-8の鉄筋腐食度判定結果と電気化学的試験結果から、BC・FACともに、目視で腐食が認められた鉄筋は、自然電位や分極抵抗で腐食を示す値が得られており、両者には概ね相関があることが確認された。

ただし、一部の供試体では、鉄筋腐食度と電気化学的試験による腐食判定結果に差異が認められた。例えば、図-27に示す自然電位では、FACの55-F50・60-

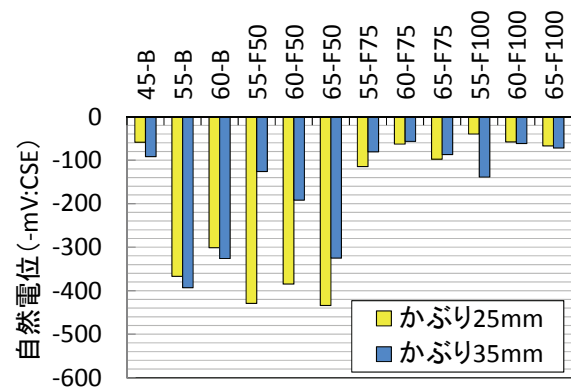


図-27 かぶり深さ別鉄筋の自然電位

表-9 ASTM C 876 および BS7361 規格の鉄筋腐食判定基準

自然電位 (E) (mv vs CSE)	ASTM C 876	BS7361
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし	5%
$-350 < E \leq -200$	不確定	50%
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり	95%

表-10 建設省総合技術開発プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」の鉄筋腐食判定基準

自然電位 (E) (mv vs CSE)	腐食の判定
$-200 < E$	腐食が生じていない
$-350 < E \leq -200$	腐食が生じていない場合と生じている場合がある
$E \leq -350$	腐食が生じている

F50のかぶり25mmでは、鉄筋腐食度が「I」(部分的に腐食が認められる)と軽微な腐食判定に対し、自然電位は「やや大」(全体的に表面的な腐食)や「大」(浅い孔食等断面欠損の軽微な腐食)といった判定を示す場合が認められた。

また、図-28に示すかぶり別の分極抵抗では、60-F50のかぶり25mmや65-F50のかぶり35mmの鉄筋腐食状況と分極抵抗の関係が、鉄筋腐食度「I」の軽微な腐食判定であったのに対し、分極抵抗は $233 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $267 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と「不動態状態 ($130 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上)」と判定される値が得られており、鉄筋腐食状況と閾値による腐食判定結果は完全には一致しなかった。

ここで、文献²³⁾には、自然電位から鉄筋腐食状態を判定する基準として表-9のASTM C 876およびBS 7361と、表-10の建設省総合技術開発プロジェクトによるものがある。これらの閾値と測定された自然電位を比較すると、BC・FACともに鉄筋の腐食状態と腐食判定基準は一致する。また、文献²⁴⁾では、自然電位が卑であるほど鉄筋の腐食面積率は指数関数的に大きくなる傾向があり、鉄筋の腐食面積率0~15%程度のとき、自然電位は-200~-500mV程度と広い範囲に

分布していることが示されている。この他、文献²⁵⁾では、腐食の程度を判定する閾値は鉄筋の腐食状況と腐食判定結果が一致しない場合があることも確認されており、本暴露試験でも同様の状況が確認されたことから、閾値で腐食の程度を判定する方法は、表-9の確率による判定方法に比べると課題が残っていることが確認され、BC・FACともに同じ閾値で評価することが問題となる傾向は認められなかった。

図-29には分極抵抗から求まる鉄筋の腐食速度(I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) = $K \cdot 1/R_p$, K : 定数 0.026 R_p : 分極抵抗 Ωcm^2)を示す。鉄筋の腐食状態と図-28の分極抵抗測定値を比べると、60-F50のかぶり25mmや65-F50のかぶり35mmの鉄筋は分極抵抗が大きい傾向であり、腐食面積率がそれぞれ10.3%, 3.0%の腐食度Iであった。これは、その他の腐食進行が認められた鉄筋に比べると軽微な腐食状況であり、コンクリート上面に配置した2重対極センサー(約40mm)の設置位置が、鉄筋の腐食範囲の真上でなかった可能性が考えられた。また、文献³⁾では、分極抵抗が $130\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上の場合は「不動態状態または極めて遅い腐食速度」と示されており、図-29に示す60-F50のかぶり25mmや65-F50のかぶり35mmの腐食速度は、FA75とFA100の速度に比べると速い傾向と言える。これらを考慮すると、FAC供試体内の鉄筋腐食状況と、分極抵抗値から推定される腐食状況(不動態状態または腐食進行)が一致しなかった原因は、FACが原因ではないと考えられる。

図-30は本試験で測定された自然電位と分極抵抗の関係であり、図中にはそれぞれの閾値を入れ、鉄筋腐食度I以上のものを示した。この図から、自然電位が卑の電位になるほど分極抵抗は小さくなる傾向であることがわかる。しかし、前述のようにBC・FACともに自然電位および分極抵抗の測定結果と鉄筋腐食状態に相違が生じる場合があるため、電気化学的試験により鉄筋腐食判定を行う場合は、両者を用いて腐食状態を推定することが推定結果の信頼性向上に繋がると考えられる。

以上から、FACに対し自然電位および分極抵抗測定を行った場合、BCと同じ閾値を用いることに問題はなかったと言え、電気化学的試験はFAC中の鋼材の腐食速度や腐食度を予想することに適用できることがわかった。

ただし、本暴露試験では、W/C=45%以外のBCは鉄筋の腐食進行が激しく、FACは軽微あるいは腐食していない状態で閾値の適用性を確認しており、同等の腐食状態で閾値の適用性は確認出来ていない。よって、本暴露実験で腐食が認められなかったFAC供試体に対し、今後も継続試験を行い、FAC供試体の鉄筋が本

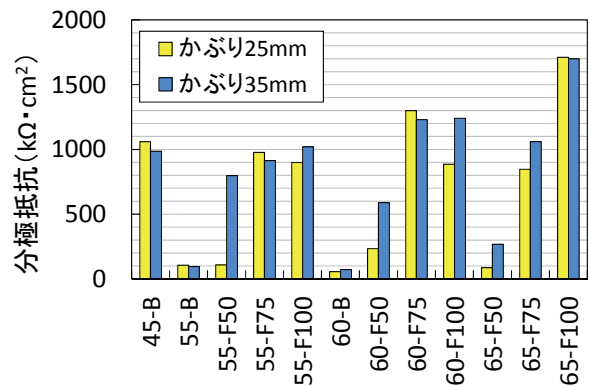


図-28 かぶり深さ別鉄筋の分極抵抗

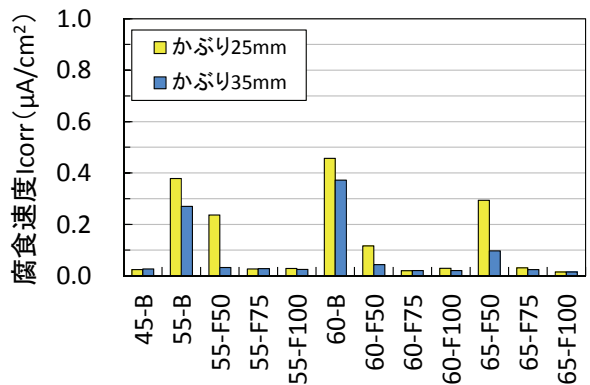


図-29 分極抵抗値から算定される鉄筋の腐食速度

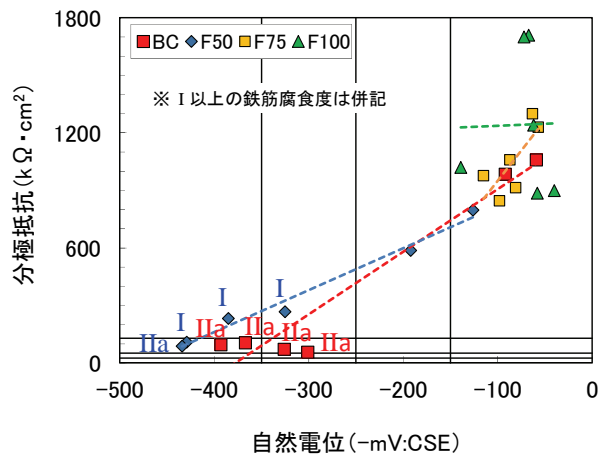


図-30 自然電位と分極抵抗の関係

暴露試験のBC供試体の鉄筋と同等の腐食状態になったとき、両者の閾値の適用性について改めて評価するものとする。

(8) 透気係数

図-31は、単位FA量と2供試体の平均透気係数の関係である。同図から、暴露11年供試体の透気係数は、単位FA量が多くなると小さくなる傾向が示され

ている。ただし、 $W/C=60\%$ および $W/C=65\%$ のFA50供試体は、BC供試体($FA=0\text{kg/m}^3$)に比べて透気係数が大きい傾向を示しており、これは $W/C=60\%$ および $W/C=65\%$ のFA50供試体のコンクリート表層に肌荒れが認められ、測定値が安定しなかったため、チャンバーの接着不良による空気漏れが発生したことが原因と考えられる。

ここで、林らの実験²⁶⁾では、透気係数と塩化物イオンの見かけの拡散係数 D_{ap} には相関があることが確認されており、図-32には単位FA量と D_{ap} の関係を示す。同図から、いずれの W/C シリーズでも単位FA量が多くなると D_{ap} が小さくなる傾向が確認され、FA50供試体も同様の傾向であった。したがって、 $W/C=60\%$ および $W/C=65\%$ のFA50供試体の透気係数は、コンクリート表層の肌荒れの影響を受け、透気係数が大きく評価された可能性が高いと考えられる。

以上から、単位FA量が増加するにしたがって透気係数は低下し、同供試体の D_{ap} も小さくなる傾向が確認されたことは、FAの使用がコンクリートの緻密性を向上させ、鉄筋の防食効果向上に寄与している可能性があることを示唆していると考えられる。なお、今回の暴露試験では、供試体上面のみを測定し、下面については測定していない。

(9) 岩石学的試験

本供試体の細骨材は、本部半島産石灰岩砕砂と遅延膨張性のASRを示す海砂を混合使用している。そのため、供試体のひび割れ発生原因は、塩害以外にASRの可能性も考えられたため、ASR発生の有無やひび割れとの関連性を岩石学的試験により確認した。試験に用いた供試体は、外観調査においてひび割れが確認されたBC供試体(65-B)である。結果を以下に示す。

a) 粗骨材の目視観察

粗骨材の目視観察には拡大鏡を使用し、コンクリートコアの外周に露出する骨材に対し、ASRの徴候の有無を観察し、岩種の判定を行った。ここで、ASRの特徴とは、骨材周囲の反応リム、骨材内部のひび割れおよびセメントペーストへのASRゲル・ゾルの浸み出し、セメントペーストのひび割れ状況などである。

粗骨材の岩種構成比は、コンクリートコアに透明シートを巻き、岩種ごとにトレースし、画像解析ソフト(ブリックドメインソフト「Image J」：<http://seesaawiki.jp/w/imagej>)を用いて粗骨材の岩種ごとの面積を求めて算出した。粗骨材の岩種構成比率を図-33に示す。

同図に見られるように、供試体コンクリートの粗骨材は、結晶質石灰岩でほぼ占められており、僅かに苦灰岩が含まれ、炭酸塩生物遺骸が1粒子見られた。観

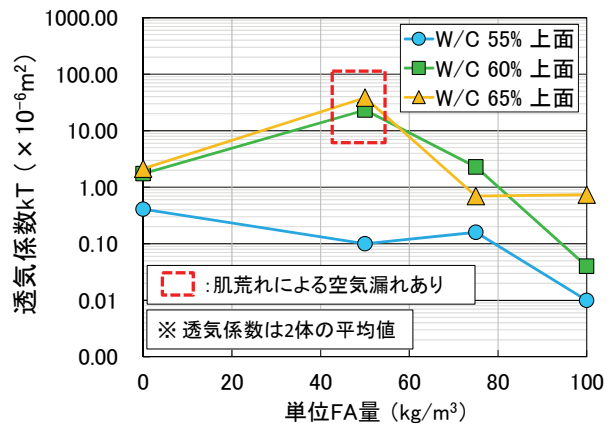


図-31 単位FA量と透気係数の関係

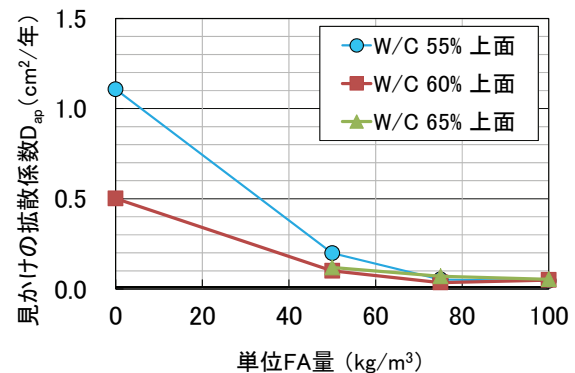


図-32 単位FA量と塩化物イオンの見かけの拡散係数 D_{ap} の関係

察の結果、本供試体コアの外周には、ASRの特徴は認められなかった。ただし、コア外周には現れていないものの、コンクリート薄片を作製する際に、コア内部に反応性骨材の変成チャート(1)を1粒子確認した。

b) 細骨材の実体顕微鏡観察

本観察は、コンクリートコアの図-34に示す位置で薄片5枚を $28\text{mm} \times 48\text{mm}$ の長方形で切り出し、樹脂を含浸させて固め、研磨した後に実体顕微鏡によって細骨材の反応リムの有無、ひび割れ状況などを見た。この結果、実体顕微鏡で認められる反応リムは無く、ひび割れも認められなかった。

c) 細骨材の偏光顕微鏡観察

実体顕微鏡で観察したコンクリート薄片のうち、図-34のH2とH5を用いて偏光顕微鏡観察用の薄片試料を作製し、細骨材を偏光顕微鏡で観察した。また、観察に際しては、偏光顕微鏡にオートマチック・ポイントカウンターを取り付け、岩種ごとに細骨材粒子のポイントを集計し、対象試料の細骨材の岩種構成比率を算出した。なお、ポイント間隔は、一つの粒子において4~6点となるように縦 $=1/5\text{mm}$ 、横 $=1/5\text{mm}$ に設定し、カウント数は薄片1枚につき2,000点、薄片2枚(0.03mm)で計4,000点を集計した。

細骨材の岩種の構成比を図-35 に示す。同図から、細骨材は垂角礫状の結晶質石灰岩砕砂と垂円礫～垂角礫状の珪質片岩、珪質粘板岩、粘板岩、頁岩、泥岩、砂岩、弱変成砂岩、変成チャートなどの岩石のほか、方解石、石英などの結晶片、および炭酸塩生物遺骸の混合物であった。このうち ASR の非反応性岩種は、結晶質石灰岩が 50.8% を占めており、その他の非反応性の粒子としては方解石が 2.6%、石英が 2.3%、炭酸塩生物遺骸が 1.8% であった。これらの非反応性骨材は全体の 57.5% を占めている。

一方、ASR の反応性岩種は、珪質片岩が 12.8%、珪質粘板岩が 7.4%、粘板岩が 6.4%、頁岩が 5.0%、泥岩が 4.6%、砂岩が 3.5%、弱変成砂岩が 2.5%、変成チャートが 0.3% であり、細骨材全体の 42.5% を占めており、ASR の特徴である反応リムやひび割れが、僅かながら認められた。

つぎに、偏光顕微鏡観察により ASR の反応性骨材を中心に反応性鉱物の検出および反応状況、骨材およびセメントペーストのひび割れや ASR ゲルの確認を

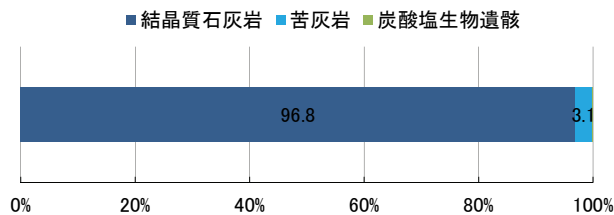


図-33 粗骨材の岩種構成比

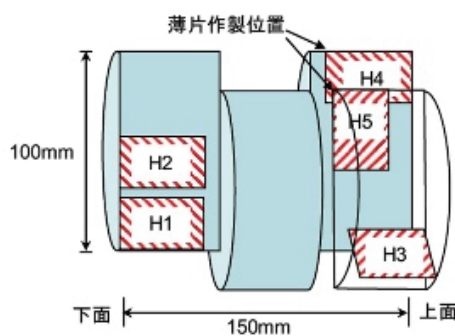


図-34 薄片採取位置

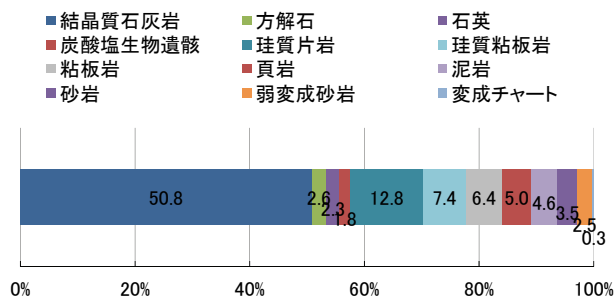


図-35 細骨材の岩種構成比

行い、セメントペーストについては気泡内部の ASR ゲルの確認も行った。結果は、表-11 の通りである。

d) ASR 劣化の進行状況と判定

実体顕微鏡、偏光顕微鏡、SEM 観察を基に ASR を生じた反応性鉱物と反応タイプ²⁷⁾、骨材から生じたセ

表-11 偏光顕微鏡観察による骨材の ASR の徴候

材料	岩種	鉱物	ASR の徴候
粗骨材 細骨材	結晶質石灰岩	Cal: 方解石	ASR の徴候は認められない
	苦灰岩	Dol: 苦灰石 C: 炭質物 Cal vein: 方解石脈	ASR の徴候は認められない
粗骨材	変成チャート	C-Qtz: 隠微晶質石英 Qtz vein: 石英脈 Cal: 方解石 Cal vein: 方解石脈	骨材には反応リムのほか、ASRゲルの貯留が認められる
細骨材	珪質片岩	Qtz: 石英	反応リムが認められ、微細なひび割れのほか、ASRゲルの貯留が認められる
	珪質粘板岩	C-Qtz: 隠微晶質石英 Qtz: 石英 Cal: 方解石	反応リムが認められ、微細なひび割れが生じている
	粘板岩	C-Qtz: 隠微晶質石英 Qtz: 石英 Chl: 緑泥石 Src: 絹雲母	反応リムは不明瞭 骨材内にはASRゲルを伴うひび割れ (ASRゲル脈) が認められる
	頁岩	C-Qtz: 隠微晶質石英 Chl: 緑泥石 Src: 絹雲母 C: 炭質物	ASR の徴候は認められない
	泥岩	C-Qtz: 隠微晶質石英 Src: 絹雲母 Chl: 緑泥石 Qtz: 石英 Fld: 長石	反応リムはやや不明瞭
	砂岩	C-Qtz: 隠微晶質石英 Qtz: 石英 Qtz vein: 石英脈	反応リムが認められる
	弱変成砂岩	Qtz: 石英 Cal: 方解石 OPQ: 不透明鉱物	反応リムは不明瞭 ASRゲル脈が生成されている ※この粒子はSEM観察においてセメントペーストまでひび割れが達していることが確認された
	変成チャート	C-Qtz: 隠微晶質石英 Qtz: 石英	反応リムが認められるほか、骨材中にひび割れが生じている ※この粒子はSEM観察においてセメントペーストまでひび割れが達していることが確認された

表-12 アルカリ骨材反応の反応性鉱物と反応タイプおよびひび割れ状況

	岩石種	反応性鉱物	反応タイプ	ひび割れ幅
粗骨材	変成チャート			-
細骨材	珪質片岩	隠微晶質～微晶質石英	遅延膨張性	-
	珪質粘板岩			-
	粘板岩			<0.01mm
	頁岩			-
	泥岩			-
	砂岩			-
	弱変成砂岩			<0.01mm
	変成チャート			<0.01mm

メントペーストのひび割れ幅を表-12に示す。同表から、粗骨材の反応性岩種は変成チャートのみであり、骨材内部に反応リムやゲルの貯留、微細なひび割れが生じていたものの、セメントペーストに至るひび割れは確認されなかった。つぎに細骨材では、隠微晶～微晶質石英を含む8種類の反応性岩種で僅かにASRの徴候が認められ、ごく稀にセメントペーストに至るひび割れが認められた。

実体顕微鏡、偏光顕微鏡、SEM観察の結果、Katayamaの判定法¹⁶⁾によるASR判定基準を用いると本供試体のASR進行状況は以下になる。なお、ASR判定は、Katayamaの判定法を模式的に図化した図-3²⁸⁾のイメージで行った。

粗骨材は、変成チャート(1粒子のみ)において反応リムやASRゲルの貯留、ひび割れが認められたが、骨材の多くを占める結晶質石灰岩では粗骨材・細骨材ともにASRの徴候は認められない。苦灰岩ではACR(アルカリ炭酸塩反応)に特徴的な炭酸塩ハロが生成されているものの、ASRの徴候は認められない。

細骨材では、頁岩を除く反応性岩種で反応リムが認められた。その内、粘板岩、弱変成砂岩、変成チャートではASRゲルを伴うひび割れが生じており、ひび割れがセメントペーストに達している粒子も存在する。なお、粗骨材・細骨材の変成チャートにはASRの特徴が明確に現れているものの、岩種構成比的には含有比率がごく僅かであるため、全体に与える影響は少ないと考えられる。

分析の具体例として、細骨材の変成チャートの顕微鏡観察結果を写真-8に示す。変成チャートは、主に隠微晶質石英～微晶質石英で構成されており、反応リムが認められるほか、骨材中にひび割れが生じている。なお、この粒子はSEM観察においてセメントペーストまでひび割れが生じていることが確認された。

以上より、本供試体の総合的なASRの判定を行うと「痕跡程度」と判断される。

e) SEM・EDX分析によるASRの進行予測

偏光顕微鏡観察に使用した薄片試料をさらに鏡面研磨した後、炭素蒸着を施してSEM・EDX分析試料とし、表-13の分析条件でASRにより生じたゲル状の物質についてSEM観察およびEDX(EPMA)による組成分析を行った。

ここで、本試験に用いた試料は、セメントペーストのひび割れにASRゲルが見られないことから、分析はASRが生じていた骨材内部のASRゲルを対象に実施した。代表的なゲルの写真を写真-9～12に示す。

なお、写真中の「+」表記は、EDXによる組成分析点である。分析の結果、写真-9は粗骨材で、変成チャート内にロゼット状のASRゲル(結晶)が存在してい

た。写真-10～12は細骨材で、写真-10は点線より内側の珪質粘板岩内部のひび割れにゼリー状とロゼット状のASRゲルが混在していた。写真-11も点線より

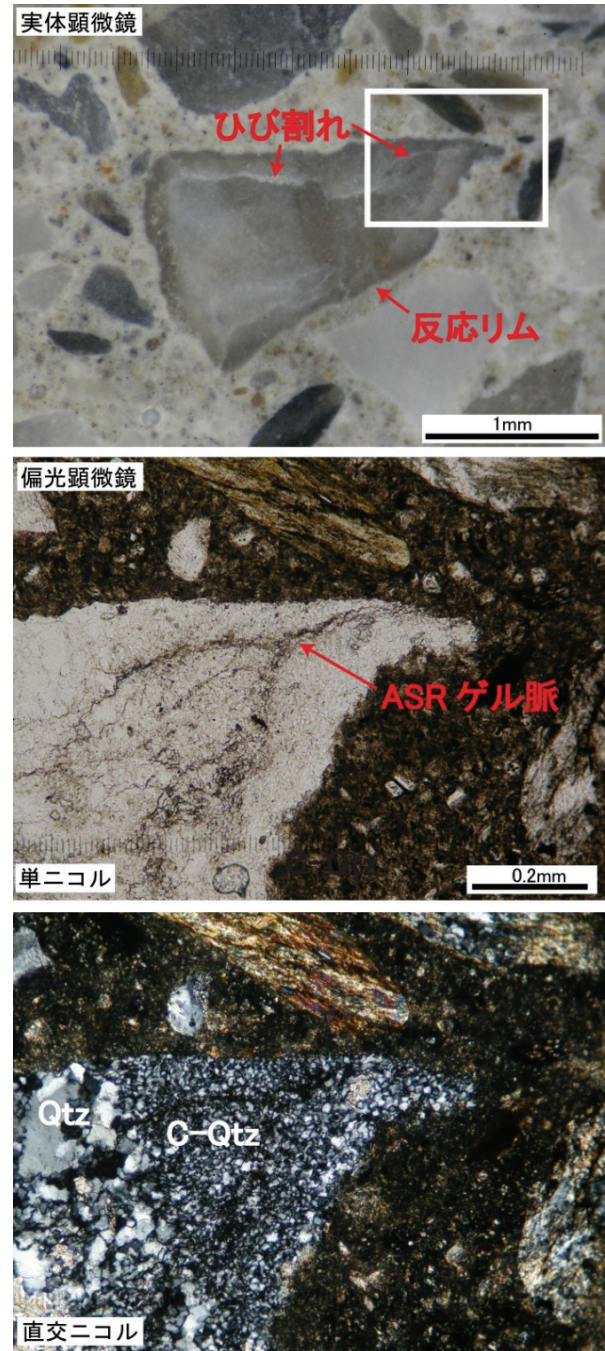


写真-8 変成チャート

表-13 SEM・EDX試験の分析条件

項目	設定
分析方法	点分析
加速電圧	15 kV
照射電流	0.5 nA
カウント数	100秒
Dead Time	25～30%
補正	ZAF法
スタンダード	あり

上側の変成砂岩からのひび割れがセメントペーストに達し、骨材側のひび割れはゼリー状の ASR ゲルで充填されていた。写真-12 は点線より左下側が変成チャートで、骨材からのひび割れがセメントペーストに達しており、骨材側のひび割れ内にはロゼット状の ASR ゲル（結晶）が存在する。

また、本試験ではカルシウムシリケート水和物（CSH ゲル）の分析も行い、ASR ゲルと CSH ゲルの主な組成を「Ca/Si」原子比/「Ca/(Na+K)」原子比として図-36 に示した。同図は ASR ゲルが反応性骨材からセメントペーストに移動する際に、ASR ゲル中のアルカリ成分とセメント水和生成物である CSH ゲル中の Ca との間で行われる化学平衡の程度を見ることに使用され、一般的な CSH ゲルは原子比で $\text{Ca/Si}=1.5$, $\text{Ca/(Na+K)}=100\sim200$ 程度^{16),29)}であるため、ASR ゲルの組成値がこの値に近ければ ASR は収束する傾向にあることを示している³⁰⁾。

ここで、ASR ゲルはゼリー状やロゼット状、またはそれらが混在した中間的な形態をなす。このロゼット状の状態は、ゼリー状の ASR ゲルより進展して結晶化したものと考えられるため¹⁶⁾、本試料中の ASR ゲルも進展の過程にあると推察される。つぎに ASR ゲルを化学組成でみると、本試料の ASR ゲルは骨材内部に存在し、セメントペーストのひび割れを充たす ASR ゲルが存在しないことから、ASR ゲルと CSH ゲルとの化学平衡を検討することができない。しかし、骨材内部の ASR ゲルを「Ca/(Na+K)」原子比でみると、比較的多くのアルカリを含むロゼット状の結晶と、CSH ゲルに近似する傾向にあるゼリー状の ASR ゲルとで相違がみられる。この現象は、骨材内部において ASR ゲルがひび割れを発生するような膨張圧³¹⁾を得ることなく、反応リムにより半閉鎖的な状態に比較的長期間貯留された仮定すると、前者のロゼット状の結晶は初生の ASR ゲル（あるいはゾル）よりアルカリ

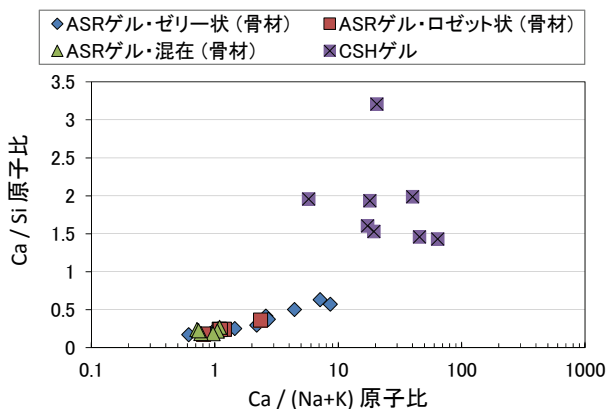


図-36 ASR ゲルと CSH ゲルの主な組成

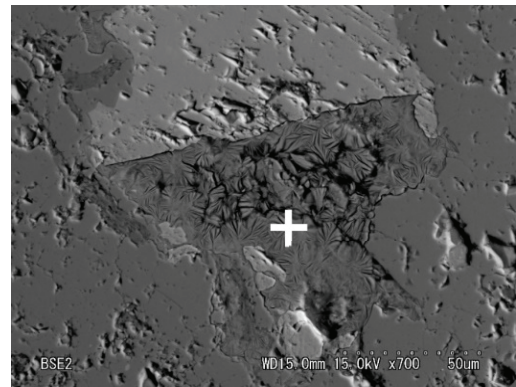


写真-9 変成チャートに生じた ASR ゲル（粗骨材）

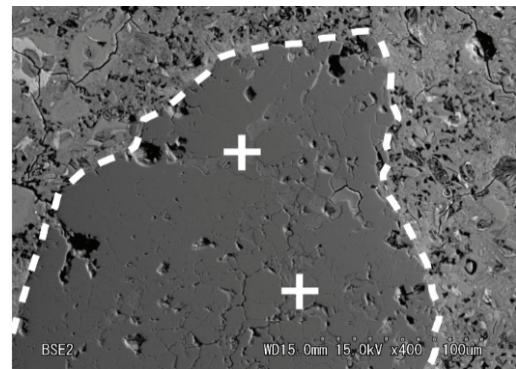


写真-10 珪質粘板岩に生じた ASR ゲル（細骨材）

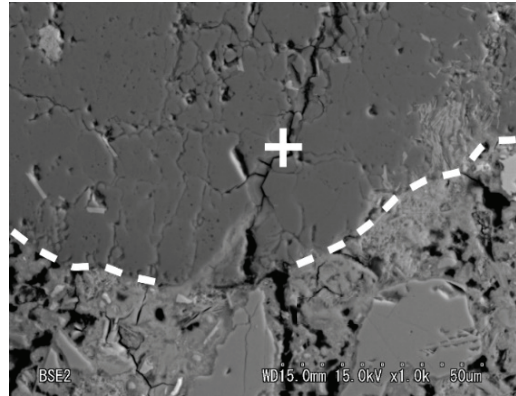


写真-11 変成砂岩に生じた ASR ゲル（細骨材）

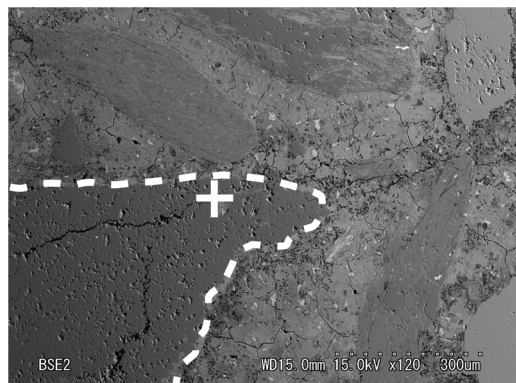


写真-12 変成チャートに生じた ASR ゲル（細骨材）

に富んだ結晶として晶出し、後者は相対的に母液の ASR ゲルよりアルカリが失われたため、CSH ゲルに近似する傾向をなしたと考えられる。

一方、周囲の CSH ゲルは一般的な CSH ゲルと比べて多くのアルカリ分を有している。本試料では ASR の徴候が認められない反応性粒子も多く存在することから、今後これらの未反応な反応性粒子で ASR が発生する可能性があると考えられる。

以上のように ASR は生じてはいるものの、コンクリート表面にまで発展するひび割れに影響しているとは考えにくい。したがって、BC 供試体暴露上面に確認されたひび割れの主要因は、ASR の影響は小さいと考えられる。

4. 結論

本研究では、11 年暴露した非 JIS FA を用いた外割り FAC 供試体の耐久性を各種試験により確認した。以下にその結果をまとめる。

- 1) 目視観察の結果、BC 供試体の W/C=65% 全 6 体と W/C=60% の 1 体で 0.1~0.55mm 程度のひび割れが認められたが、外割り FAC 供試体にひび割れは無かった。また、ひび割れは、全てかぶり 25mm 鉄筋の直上であった。
- 2) 圧縮強度試験の結果から、各 W/C シリーズで BC と外割り FAC の 28 日強度を比較すると、概ね単位 FA 量が多いほど圧縮強度は大きくなっており、FA の粉体効果が考えられた。また、28 日強度と 11 年強度を比較すると強度増進が認められ、非 JIS FA のポズラン活性によるものと考えられた。また、静弾性係数は、全ての供試体で 2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書[設計編]に示されている圧縮強度と静弾性係数の関係を上回っており、BC と外割り FAC の力学的関係は同等であった。
- 3) 含有塩化物イオン量試験の結果、W/C の大きさに関係なく FAC は単位 FA 量が多いほど、W/(C+F) が小さいほど遮塩効果が高いことが確認できた。供試体上面と下面を比較すると、上面の浸透塩分量が少なく、降雨による洗い流し効果が考えられた。また、見かけの拡散係数 D_{ap} も、BC より外割り FAC の方が小さく、単位 FA 量が多いほど C_0 が大きくなり、 D_{ap} が小さくなることがわかった。
- 4) 含有水溶性アルカリ量試験の結果、含有塩化物イオン量との明確な関係性を確認できなかったが、上面より下面が大きいことが判った。また、FAC は BC に比べ W/C に関係なくほぼ一定であった。これは、FA の外割り配合によりコンクリートが緻密になったため、アルカリイオンのコンクリート中

の移動が抑制された可能性が考えられた。

- 5) 中性化試験の結果、セメント量が一定の外割り FAC は、BC とほぼ同等の中性化量であり、 \sqrt{t} 則を用いて中性化進行予測を行った結果、本暴露試験供試体の中性化進行は BC・FAC とともに鉄筋腐食に与える影響はほとんど無いと言えた。
- 6) 電気化学的試験結果から、自然電位・分極抵抗は、内部鉄筋の腐食状態をよく評価しており、腐食判定に使用される閾値は、外割り FAC に対しても有効であることがわかった。ただし、BC と外割り FAC 供試体は、ともに内部鉄筋の腐食状態と判定結果が一致しない場合も認められ、この場合は自然電位と分極抵抗の両者を用いて判定すると、内部鉄筋の腐食状態の推定結果の信頼性が向上すると考えられた。
- 7) 鉄筋腐食状況試験の結果、鉄筋腐食は供試体上面からの距離との相関があり、供試体上面から浸透する腐食因子である飛来塩分との関係が深いことが考えられた。また、腐食面積率と腐食度の判定には、断面欠損が発生するまでは良い相関が認められ、腐食度判定により腐食面積率が算出できる可能性が示唆された。
- 8) 透気係数試験結果から、単位 FA 量が増加するに従って透気係数は低下し、緻密性が向上することが確認できた。
- 9) 鉄筋を配筋した供試体のうち、全ての供試体でひび割れが発生していた 65-B 配合について、岩石学的試験を行い ASR の発生を確認した結果、ASR は痕跡程度であった。また、ASR ゲルと CSH ゲルの主な組成の関係から BC 供試体暴露上面に確認されたひび割れの主要因は、ASR の影響は小さいと考えられた。これらの結果から、供試体に発生していたひび割れは鉄筋腐食によるものであると考えられた。

謝辞：本論文作成に当たっては、沖縄県土木建築部宮古土木事務所の方々にご協力を頂いた。また、一般社団法人しまたて協会の 2014 年度技術開発支援を用いて岩石学的試験を行った。最後に、琉球大学名誉教授大城武先生、琉球大学工学部環境建設工学科教授藍檀オメル先生および琉球大学理学部物質地球学科教授新城竜一先生には、多くのご助言、ご指導を頂いた。また、薄片試料の作製ならびに観察には知念正昭氏の協力を得た。その他、セメントなどの成分分析資料検索では琉球セメント（株）の比屋根方新氏に尽力頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 十河茂幸, 河野広隆, 野口貴文, 宮澤伸吾, 近松竜一: 混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工, コンクリート工学, Vol. 52, No. 3, pp. 236-242, 2014.
- 2) 国土交通省九州地方整備局: 土木工事設計要領, 第1編共通編, p. 共1-73, 2011.7
- 3) 国土交通省九州地方整備局: 九州地区における土木コンクリート構造物設計・施工指針(案), pp. 4-7~4-8, 2013.7
- 4) 土木学会四国支部: フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案), pp. 15-17, 2003.3
- 5) 国土交通省東北地方整備局: 東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン(案), p. 108, 2009.3
- 6) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会: コンクリート構造物の長寿命化と環境負荷低減を目指してー報告書, pp. 1-107, 2011.3
- 7) 風間洋, 鬼頭誠, 大城武: 亜熱帯地域の海洋開発計画に伴う魚礁新技術の開発, JIMSTEF NEWS, Vol. 7, No. 1~2 合併号, pp. 40-48, 2005.1
- 8) 土木学会: コンクリートライブラリー94, フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), pp. 9-10, 2003.3
- 9) 富山潤: コンクリート構造物を対象としたマイクロ・マクロ塩害環境に関する研究, 第15回コンクリート構造物の補修, 補強およびアップグレードシンポジウム, Vol. 15, pp. 405-410, 2015.10
- 10) 独立行政法人土木研究所, 日本構造物診断技術協会: 非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル, pp. 42-44, 2003.
- 11) CEB (ヨーロッパコンクリート委員会): Working Party V/4.1, Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion, *BRI-CSTC-WTCB*, 1997.
- 12) (社)日本コンクリート工学協会: 海洋コンクリート構造物の防食指針(案), p. 103, 1983.2
- 13) Torrent, R. J.: 「カパークリート」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.
- 14) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K. and Yamato, T.: Late -expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, *Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway*, pp. 862-873, 2008.
- 15) Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures, AAR-6.1, Part I: Diagnosis RILEM/TC-ACS/08/14, 2009.
- 16) Katayama, T.: The so-called alkali-carbonate reaction (ACR)—Its mineralogical and geochemical details, with special reference to ASR, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 643-675, 2010.
- 17) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], p. 39, 2013.3
- 18) 河合研至, 小林一輔: コンクリート中のイオンの拡散に関する基礎的研究 (I), 生産研究, 41 巻 9 号, pp. 55-56, 1989.9
- 19) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生実: コンクリートの中性化と湿度の関係に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, pp. 723-728, 1996.
- 20) 土木学会: 2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編], pp. 151-153, 2013.
- 21) 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
- 22) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp. 145-147, 2012.
- 23) 土木学会: 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向, pp. 76-79, pp. 123-125, pp. 130-131, pp. 136-147, pp. 152-155, 1997.12
- 24) 独立行政法人土木研究所, 日本構造物診断技術協会: コンクリート構造物の鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書, p. 48, 2003.11
- 25) 土木学会: コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術小委員会 (338 委員会) 成果報告書 (その 2) およびシンポジウム論文集, pp. 4-10, pp. 138-143, pp. 196-203, pp. 377-384, 2012.10
- 26) 林亮太, 樋原弘貴, 添田政司, 松本涼: 透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 745-750, 2013.
- 27) (社)日本コンクリート工学協会: 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, p. 132, 2008.
- 28) 富山潤, 知念正昭, 大宜見圭太, 山田義智: 長期暴露したフライアッシュコンクリート供試体を用いた遅延膨張型アルカリ骨材反応に関する研究, 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. 32, No. 1, pp. 947-952, 2010.6
- 29) 片山哲也: アルカリシリカ反応入門 3 アルカリシリカ反応の診断法, コンクリート工学, Vol. 52, No. 12, pp. 1083-1090, 2014.12
- 30) (社)日本コンクリート工学協会: 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, p. 7, 2008.
- 31) Ichikawa, T. and Miura, M.: Modified model of alkali silica reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 1291-1297, 2007.

(2016. 4. 12 受付)

STUDY ON THE DURABILITY OF FLY ASH CONCRETE EXPOSED TO THE COASTLINE IN OKINAWA PREF. FOR 11 YEARS

Hiroshi KAZAMA, Jun TOMIYAMA, Yuji SUNAKAWA,
Masaya HIGA and Syunsuke OBATA

Recently, fly ash, which is a byproduct from burning pulverized coal in coal-fired power plants, has been used to improve a durability of concrete structures in Okinawa Prefecture. Especially, the superstructure and substructure of Irabu bridge, which has been in service since January 2015, was constructed by using fly ash concrete in order to achieve the durable more than 100 years.

This paper showed results of durability investigations on fly ash concrete (FAC) which a part of fine aggregate was replaced by non-JIS fly ash exposed to the coastline in northern Okinawa Main Island for about 11 years.

It was found from the results that FAC reduces the chloride permeability of concrete, natural current method and polarization resistance method can diagnose the corrosion levels of reinforcing bar in FAC and normal concrete (BC) specimens using the same criteria, and progress of carbonation does not affect to corrosion of reinforcing bar in FAC and BC specimens under a coastal area with high humidity.

Also, from petrological diagnosis on a concrete core taken from BC specimen, it was revealed that ASR is not the main cause of the cracks observed on the surface of specimens.