

論文 14 年間海洋環境下に暴露した鉄筋コンクリート供試体の耐久性

鈴木 宏信^{*1}・疋田 奈緒也^{*2}・高木 宣章^{*3}・児島 孝之^{*3}

要旨：セメント，骨材（アルカリシリカ反応性の有無），水セメント比（W/C）を変化させて作製した鉄筋コンクリート供試体を，海洋環境下に 14 年間暴露した。暴露期間中，暴露フィールドにおいて供試体の経年変化を調査するとともに，暴露試験終了後，供試体を試験室に持ち帰り各種室内試験を実施した。その結果，海洋環境下における鉄筋コンクリートの劣化は，コンクリートの配合要因の相違により影響を受け，特に，塩害，中性化に対しては W/C および高炉スラグ微粉末混入量が，また，アルカリシリカ反応に対しては水溶性アルカリ量の影響が大きいことが明らかとなった。

キーワード：塩害，ASR，中性化，暴露試験，鉄筋コンクリート，低発熱セメント

1.はじめに

四方を海で囲まれた我が国では，海洋上や臨海部において大型工事が行われることが多く，マスコンクリートにおけるセメントの水和熱による温度応力ひび割れの抑制対策として低発熱型のセメントが使用されている。

また，骨材事情の悪化に伴い，碎石，海砂の使用が多くなり，アルカリシリカ反応や塩害によるコンクリートの早期劣化も認められる。

コンクリート構造物の維持管理を行うにあたり，竣工時や供用期間中の異常発見時，補修・補強の対策検討時などの節目となる時点において，コンクリート構造物の健全度の把握を正確に行う必要がある。また，対象となる構造物の状態が，今後どのように変化していくかを精度良く予測することが重要となる。しかし，鉄筋コンクリートの劣化性状は，解明されていないことが多く，維持管理を実施するにあたって重要な課題となっている。

このような状況のもと，

- a.低発熱型セメントを用いた鉄筋コンクリート(以下，低発熱セメントシリーズと称す)
- b.反応性骨材を用いた鉄筋コンクリート(以下，

反応性骨材シリーズと称す)

の2種類のシリーズを設定し，セメント，骨材(アルカリシリカ反応性の有無)，水セメント比を変化させて鉄筋コンクリート供試体を作製した。この供試体を海洋環境下に14年間暴露し，その間，各種調査を行った¹⁾。

本研究は，14年間の暴露期間中に得られた調査結果から，海洋環境下での鉄筋コンクリートの塩害，中性化およびアルカリ骨材反応による劣化性状を検討することを目的として実施したものである。

2.実験概要

2.1 供試体の作製

(1)供試体寸法

試験に使用した供試体寸法は 12×12×130cm で，D10(SD295)の異形鉄筋を 2 本配置した。供試体の両端部には鉄筋のかぶり(25mm)を確保するためのモルタルスペーサを配置した。詳細を図-1に示す。

(2)使用材料

供試体の配合要因の一覧を表-1に示す。

低発熱セメントシリーズに使用したセメント

*1 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻 工修 (正会員)

*2 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻(正会員)

*3 立命館大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

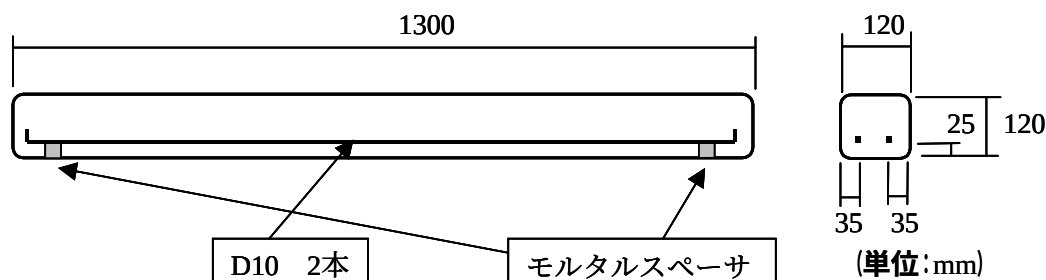


図-1 暴露供試体

表-1 供試体の種類

種類	配合 No	セメント (記号)	W/C (%)	単位体積量 (kg/m ³)	粗骨材	供試体名※8
低 発 熱 セ メ ン ト シ リ ー ズ	1	早強高炉(80%)※1 (HB)	45	369	N※5	HB45N
	2	早強高炉(80%)※1 (HB)	55	306		HB55N
	3	中庸熱 (M)	45	367		M45N
	4	高炉セメント B 種 (BB)	45	364		BB45N
	5	中庸熱高炉(45%)※2 (MB)	45	367		MB45N
反 応 性 骨 材 シ リ ー ズ	6	普通(低アルカリ含有)※3 (NL)	40	408	RA※6	NL40RA
	7	普通(低アルカリ含有)※3 (NL)	60	265		NL60RA
	8	普通(高アルカリ含有)※4 (NH)	40	408		NH40RA
	9	普通(高アルカリ含有)※4 (NH)	60	265		NH60RA
	10	高炉セメント B 種 (BB)	40	408		BB40RA
	11	高炉セメント B 種 (BB)	60	265		BB60RA
	12	普通(高アルカリ含有) (NH)	40	408	N※5	NH40N
	13	普通(高アルカリ含有) (NH)	40	408	RC※7	NH40RC
	14	普通(低アルカリ含有) (NL)	40	408		NL40RC
	15	高炉セメント B 種 (BB)	40	408		BB40RC

※1)早強高炉(80%)：早強セメント 20%，高炉スラグ微粉末 80% 2)中庸熱高炉(45%)：中庸熱セメント 55%，高炉スラグ微粉末 45% 3)普通（低アルカリ含有）：普通セメント $\text{Na}_2\text{Oeq}=0.63\%$ 4)普通(高アルカリ含有)：普通セメント $\text{Na}_2\text{Oeq}=1.05\%$ 5)N：非反応性骨材(硬質砂岩) 6)RA：反応性骨材(古銅輝石安山岩) 7) RC：反応性骨材(チャート) 8)供試体名：供試体名は下記の様にセメントの種類，W/C，粗骨材の種類の順で記述した。

セメントの種類 $\xrightarrow{\text{HB } 45 \text{ N}}$ W/C $\xrightarrow{\text{N}}$ 粗骨材の種類

は，早強高炉セメント(以下，早強高炉と称す)，中庸熱ポルトランドセメント（以下，中庸熱と称す），高炉セメントB種(以下，高炉Bと称す)，中庸熱高炉セメント(以下，中庸熱高炉と称す)の4種類である。なお，早強高炉は，質量比で早強ポルトランドセメント20%，高炉スラグ微粉末80%，セメント中の SO_3 量が2.5%となるように調整するために弗酸石膏を混入したものである。また，中庸熱高炉は，質量比で中庸熱ポルトランドセメント55%に高炉スラグ微粉末を45%混入したものである。セメントの水和熱および水和熱比強度¹⁾を表-2に示す。

また，反応性骨材シリーズに使用したセメントは，普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種である。普通セメントについては，当時市販されていた比較的全アルカリ量の少ないもの($\text{Na}_2\text{Oeq}=0.63\%$)(以下，低アルカリ含有普通セメントと称す)と，比較的全アルカリ量の多いもの($\text{Na}_2\text{Oeq}=1.05\%$)(以下，高アルカリ含有普通セメントと称す)の2種類を用いた。粗骨材は，低発熱セメントシリーズおよび反応性骨材シリーズの非反応性骨材として碎石(硬質砂岩， $\text{Sc}=43\text{mmol/l}$ $\text{RC}=152\text{mmol/l}$)を用いた。また，反応性骨材シリーズでは，反応性骨

表－２ セメントの水和熱および水和熱比強度¹⁾

セメント の種類	水和熱 (J/g)			水和熱比強度					
				曲げ強度 $\left[\frac{\text{N/mm}^2}{\text{J/g}} \right]$			圧縮強度 $\left[\frac{\text{N/mm}^2}{\text{J/g}} \right]$		
	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日
早強高炉	221	230	246	0.028	0.028	0.028	0.115	0.164	0.201
高炉 B	301	339	-	0.014	0.021	-	0.063	0.119	-
中庸熱	265	321	355	0.014	0.021	0.021	0.056	0.110	0.119
中庸熱高炉	237	301	-	0.014	0.019	-	0.054	0.122	-
普通	342	374	388	0.014	0.021	0.021	0.066	0.108	0.115

材として碎石(古銅輝石安山岩, Sc=770mmol/l, Rc=152mmol/l)および山砂利(チャート系, Sc=77.0mmol/l, Rc=36.2mmol/l)の2種類を用いた。

細骨材は低発熱セメントシリーズでは海砂を, 反応性骨材シリーズでは川砂を用いた。

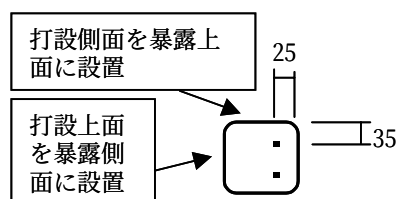


写真－１ 暴露フィールドの状況

2.2 供試体の設置および調査項目

(1) 暴露供試体の設置および測定

1986年9月に試験室にて供試体打設, 脱型後, 屋外で1ヶ月間湿布養生した。その後, 10月に太平洋に面し, 海象条件は厳しいが温暖な海洋環境下(三重県鵜殿港防波堤)に設置し, 暴露試験を開始した。暴露状況を**写真－１**に示す。供試体は, **図－２**に示すように打設時の上面および底面を暴露フィールドへの設置時の側面となるように設置した。その後, 暴露14年目となる2000年11月に供試体を試験室に持ち帰り, 各種室内試験を実施した。



図－２ 供試体設置の状況

(2) 調査項目および方法

調査は, 暴露フィールドおよび試験室において下記の項目の測定を行った。

1) 暴露フィールドでの調査

外観調査(コンクリート供試体表面に発生したひび割れ, 錆汁, 浮き等の損傷の有無を, 目視および検査ハンマーを用いて検査した。ひび割れ幅はクラックスケールを用いて測定した)

2) 室内試験

試験室に持ち帰った供試体からコンクリートコアを採取し, 以下に示す a～d の各試験を実施した。

- a. 圧縮強度・静弾性係数試験(材齢 4 週強度は 20℃水中養生した標準供試体(φ10×20cm)により, また, 暴露 14 年後の強度は供試体から採取したコア(φ6.8×12cm)を用いて実施した。(JIS A 1107, JIS A 1108, JIS A 1149))
- b. 中性化試験(フェノールフタレイン法) c. 含有塩分量試験(JCI-SC5) d. アルカリ量試験(40℃温水抽出した溶液の原子吸光分析)

さらに, コンクリートコアの採取後, コンクリート中の鉄筋をはつり出し, 以下に示す e～g の各試験を行った。

- e. 発錆面積の測定(鉄筋の発錆状態をスケッチし, 発錆面積を測定した) f. 鉄筋の錆の質量測定(鉄筋を 35℃クエン酸 2 アンモニウム溶液中に 24 時間浸漬し, 浸漬前と浸漬後の質量の差から錆の質量を測定した) g. 鉄筋の引張強

表-4 圧縮強度，静弾性係数および中性化深さ測定結果

供試体名	圧縮強度(N/mm ²)			静弾性係数(kN/mm ²)			中性化深さ(mm)	中性化速度係数b(mm/√年)
	材齢 4 週 (A)	暴露 14 年後 (B)	(B)/(A)	材齢 4 週 (C)	暴露 14 年後 (D)	(D)/(C)		
HB45N	40.4	38.1	0.94	29.3	26.9	0.92	4.1	1.1
HB55N	34.9	39.9	1.14	29.4	26.3	0.89	7.1	1.8
M45N	42.7	46.9	1.10	31.8	29.3	0.92	0.7	0.04
BB45N	42.1	45.5	1.08	29.5	28.3	0.96	0.6	0.2
MB45N	43.7	39.8	0.91	30.2	28.2	0.93	1.1	0.2
NL40RA	52.3	50.7	0.97	25.4	30.7	1.21	0.5	0.1
NL60RA	27.6	37.4	1.35	27.5	28.1	1.02	2.3	0.6
NH40RA	57.6	53.4	0.93	32.7	28.4	0.87	0.8	0.2
NH60RA	30.7	37.7	1.23	27.2	29.1	1.07	1.6	0.4
BB40RA	43.2	42.2	0.98	28.5	25.1	0.88	1.1	0.3
BB60RA	25.2	36.2	1.44	24.4	26.6	1.09	4.1	1.0
NH40N	57.9	52.7	0.91	32.7	31.8	0.97	0.8	0.1
NH40RC	46.2	46.3	1.00	33.3	29.8	0.89	0.7	0.2
NL40RC	49.8	44.6	0.90	32.6	29.8	0.91	1.1	0.2
BB40RC	42.9	39.4	0.92	28.0	33.4	1.19	1.5	0.4

3.結果および考察

3.1 暴露フィールドでの外観観察結果

軸方向ひび割れ発生時の暴露年数と暴露 14 年経過時の最大ひび割れ幅を表-3 に示す。暴露 8 年目以降に低発熱セメントシリーズの W/C=55% および反応性骨材シリーズの W/C=60%の供試体に、写真-2 に示すような供試体表面に鉄筋に沿った腐食に起因すると考えられる軸方向ひび割れ

が発生した。一方、W/C=45%以下の供試体では暴露 14 年経過後においても、軸方向ひび割れは発生していない。ただし、W/C=45%以下の供試体においても、供試体端部のモルタルスパーサ近傍にひび割れあるいは欠けが生じ、内部の鉄筋の発錆も確認された。これは、スパーサとコンクリート部分の付着切れによるものと

考えられる。また、反応性骨材を使用した供試体からの亀甲状ひび割れや反応ゲルの滲出は確認されなかった。

3.2 室内試験結果

(1)圧縮強度試験，静弾性係数および中性化深さ測定結果

圧縮強度，静弾性係数および中性化深さの測定結果を表-4 に示す。暴露 14 年後の圧縮強度および静弾性係数は、材齢 4 週時に対して各々90%～144%，87%～121%の範囲にあった。一般に、アルカリシリカ反応が進行したコンクリートから採取したコアの圧縮強度および静弾性係数は低下する傾向にあり、特に静弾性係数の低下が大きい²⁾。しかし、今回の試験結果では、反応性骨材シリーズの各供試体から採取したコアの圧縮強度および静弾性係数とも、大幅な低下は認められなかった。

中性化深さは、スラグ混入量の多い早強高炉の配合(HB45N，HB55N)および高炉 B W/C=60%の配合(BB60RA)で 4～7mm の値を示し、中性化速度係数は 1.0～1.8(mm/√年)であった。しかし、普通，高炉 B，中庸熱，中庸熱高炉の各セメントは W/C=45%以下であれ

表-3 軸方向ひび割れ発生までの経過年数および最大ひび割れ幅

供試体名	暴露年数	最大ひび割れ幅(14 年経過時)(mm)
HB55N	9 年	0.7
NL60RA	9 年	2.0
NH60RA	8 年	3.5
BB60RA	12 年	1.5



(配合 NL60RA)

写真-2 軸方向に発生したひび割れ

ば、中性化深さは 1～2mm とほとんど進行していない。これは、W/C が小さい上に、暴露供試体が防波堤上に設置されているため、消波ブロックによる碎波のスプラッシュにより、コンクリートが湿潤状態にあることが多いためと考えられる。

(2)含有塩化物量および水溶性アルカリ量分析結果

図-3に示すように、暴露設置水平方向に直径 6.8cm のコアを採取し、採取コアを 2cm ごとにダイヤモンドカッタを用いてカットし、コンクリート表面からの塩化物(Cl^-)およびアルカリ金属(Na^+ , K^+)の浸透量を測定した。

コンクリート中の塩化物量測定結果を図-4に示す。低発熱セメントシリーズの各配合および反応性骨材シリーズの W/C=40% の供試体では、表面 2cm 程度まで塩化物の浸透が認められた。また、反応性骨材シリーズの W/C=60% の配合では、普通セメントを用いた供試体(NL60RA, NH60RA)の塩化物の浸透が高炉 B を用いたコンクリート(BB60RA)に比較して大きな値(3kg/m^3 以上)を示した。

コンクリート中の水溶性アルカリ量分析結果を図-5に示す。反応性骨材シリーズの普通セメント W/C=60%(NL60RA, NH60RA)の表面部分(表面～2cm)でアルカリ金属の浸入が認められた。これは、普通セメントを使用した W/C=40% の供試体に比較して、コンクリート中の空隙が多く、アルカリ金属が浸透しやすいことによるものと考えられる。その他の供試体については、各配合とも水溶性アルカリ量は

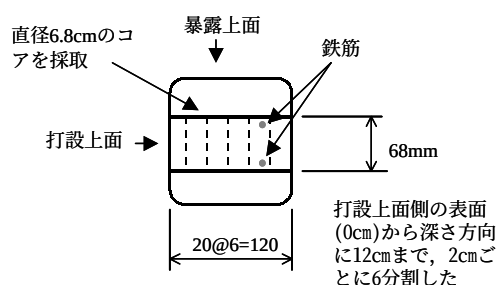


図-3 分析試料採取位置

3kg/m^3 を下回った。反応性骨材シリーズの W/C=40% の供試体については、軸方向ひび割れや亀甲状のひび割れの発生は認められない。これは、コンクリート中の水溶性アルカリ量が少ないことにより、ASR によるひび割れが発生するには至っていないものと推定される。

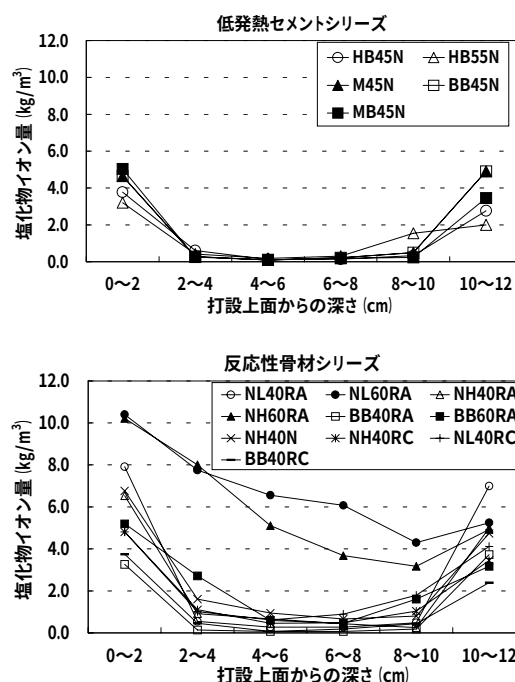


図-4 含有塩化物量

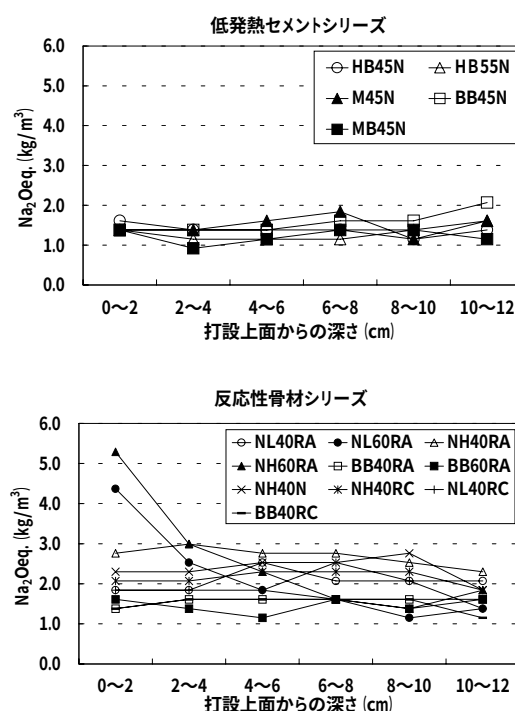


図-5 水溶性アルカリ量

(3)鉄筋の腐食量測定および引張強さ試験結果

鉄筋の発錆面積と引張強さとの関係を図-6に示す。発錆面積率 100%の鉄筋の引張強さは、全て規格値の下限である 440N/mm² を下回った。また、発錆面積 100%の鉄筋は降伏点が不明で、脆性的に破壊するものも認められた。

鉄筋の発錆面積率と質量減少率との関係を図-7に示す。質量減少率は、クエン酸 2 アンモニウム溶液により錆を除去する前後の鉄筋の質量比である。発錆面積率が 100%の鉄筋では質量減少率にばらつきが認められた。しかし、発錆面積率 60%（腐食グレードIV）までの鉄筋は、質量減少率と発錆面積率の間に比較的良好な相関関係が認められた。

4. 結論

- (1)W/C=45%以下であればセメントの種類にかかわらず暴露14年経過後も、鉄筋腐食による軸方向ひび割れは確認されなかった。
- (2)中性化深さは、スラグ混入量の多い早強高炉の各配合および高炉B W/C=60%の配合で4～7mmの値を示した。また、普通、高炉B、中庸熱、中庸熱高炉の各セメントはW/C=45%以下であれば、中性化深さは1～2mmとほとんど進行していなかった。
- (3)反応性骨材シリーズのW/C=40%の供試体では、軸方向ひび割れ、亀甲状のひび割れとも発生していない。また、ASRによる圧縮強度および静弾性係数の大幅な低下は認められない。これは、外部から浸透する水溶性アルカリ量が少なく、ASRによるひび割れが発生するに至っていないものと推定される。
- (4)反応性骨材シリーズの普通セメントを使用したW/C=60%の供試体の塩化物量は、各断面とも3kg/m³以上の大きな値であった。
- (5)低発熱セメントシリーズの各配合および反応性骨材シリーズのW/C=40%の供試体では、表面2cm程度まで塩化物の浸透が認められた。
- (6)発錆面積率 100%の鉄筋の引張強さは、全て規格値を下回った。降伏点が不明で、脆性的

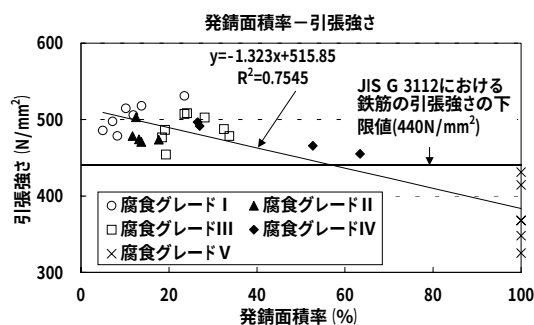


図-6 発錆面積率と引張強さとの関係

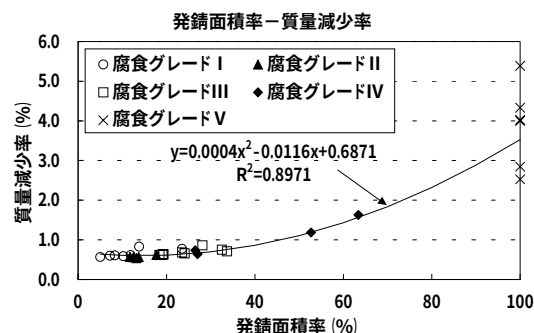


図-7 質量減少率と発錆面積との関係

腐食グレード

- I：腐食が無く黒皮の状態
- II：鉄筋表面にわずかな点錆が生じている状態
- III：鉄筋表面に薄い浮き錆が広がって生じており、コンクリートに錆が付着している状態
- IV：やや厚みがある膨張性の錆が生じているが、断面欠損は比較的小さい状態
- V：鉄筋全体にわたって著しい膨張性の錆が生じており、断面欠損がある状態

に破壊するものも認められた。

(7)発錆面積率60%（腐食グレードIV）までの鉄筋では、質量減少率と発生面積率の間に比較的良好な相関関係が認められた。

謝辞：本研究は、若手コンクリート研究会・海洋コンクリートWG（代表：宮川豊章京都大学教授）のご協力により、調査・測定を遂行することができました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 若手コンクリート研究会，海洋コンクリート構造物WG編：関西地区における海洋コンクリート構造物実験フィールドの開設について，1988
- 2)例えば小野紘一，川村満紀，田村博，中野錦一：コンクリート構造物の耐久性シリーズ アルカリ骨材反応，技報堂出版，1986