

立命館大学理工学部 学生員 ○疋田奈緒也

立命館大学大学院理工学研究科 宮永憲一

立命館大学大学院理工学研究科 正会員 鈴木宏信

住友大阪セメント(株) 正会員 小林茂広

立命館大学理工学部 正会員 高木宣章

立命館大学理工学部 正会員 児島孝之

1. はじめに

本研究は、海洋環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食を、配合要因の面から検討したものである。アルカリ骨材反応(ASR)の影響も加味して要因設定を行った。暴露試験は、太平洋に面し、気候が温暖で多量の飛沫塩分の影響を受ける三重県鵜殿で行っている。本報告は、暴露期間 14 年のデータをもとにした検討結果である。

表 1 検討要因

2. 実験概要

(1) 暴露供試体の作製

試験に供した供試体の寸法は $12 \times 12 \times 130 \text{ cm}$ で、D10(SD295)の異形鉄筋を 2 本配置している。供試体の両端部には鉄筋のかぶりを確保するためのモルタルスペーサーを配置している。検討要因は、表 1 に示す 18 種類であり、セメントの種類、水セメント比(W/C)および骨材の ASR 特性を要因としたものである。

(2) 暴露供試体の設置および測定状況

供試体を 1986 年秋に設置し、1~2 年経過毎に下記に示す現地調査項目を実施した。暴露 14 年となる 2000 年 11 月に計 11 回目の現地調査を実施した後、供試体を実験室に持ち帰り、各種室内試験を実施した。

(3) 調査項目

現地調査：①外観観察 ②超音波伝播速度 ③自然電位 ④分極抵抗 ⑤コンクリート抵抗 ⑥鉄筋間電流
室内試験：⑦静的曲げ載荷試験(支点間距離 90cm、載荷点距離 30cm の対称 2 点載荷) ⑧圧縮強度・静弾性係数測定(材齢 4 週強度は標準養生供試体、暴露 14 年後の強度は供試体から採取したコアを用いて実施(JIS A 1107、JIS A 1108、JIS 原案)) ⑨含有塩分量試験(JCI-SC5) ⑩アルカリ量試験(40℃温水抽出した溶液の原子吸光分析) ⑪鉄筋の腐食量測定(クエン酸 2 アンモニウム溶液中に 24 時間浸漬) ⑫鉄筋の引張試験(JIS Z 2241、JIS Z 2202、JIS B 7721)

3. 実験結果及び考察

外観観察結果より、暴露 8 年目以降に $W/C=55\%$ 以上の供試体には配合の種類に関係なく、供試体表面に鉄筋に沿った軸方向ひび割れが発生したのに対し、 $W/C=45\%$ 以下の供試体では発生していない。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ペーサー近傍にてひび割れあるいは欠けが生じ、内部の鉄筋の発錆も認められており、スペーサー部が欠陥部となっている。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認められない。

図 1 に超音波伝播速度を、図 2 に自然電位の測定結果を示す。暴露 3 年目から超音波伝播速度の低下が、また、自然電位においては暴露 2~3 年目頃より卑化が確認された。分極抵抗、コンクリート抵抗および鉄筋間電流の数値は変動が大きく、明確な傾向を得ることができなかった。

静的曲げ載荷試験結果においては、軸方向ひび割れの生じている供試体は、曲げ耐力の低下が確認された。

	供試体名	配合 No.	セメント、混和材	W/C(%)	骨材		混和剤
					粗骨材	細骨材	
低熱セメントシリーズ	HB45N	1	早強高炉(80%) ¹⁾	45	N ⁵⁾	海砂	AE減水剤
	HB45N(SP)	2	早強高炉(80%)	45	N	海砂	AE減水剤+高性能減水剤
	HB55N	3	早強高炉(80%)	55	N	海砂	AE減水剤
	M45N	4	中庸熟	45	N	海砂	AE減水剤
	BB45N	5	高炉B	45	N	海砂	AE減水剤
	MB45N	6	中庸熟高炉(50%) ²⁾	45	N	海砂	AE減水剤
反応性骨材シリーズ	NL40RA	7	普通(低アルカリ型) ³⁾	40	RA ⁶⁾	川砂	AE減水剤
	NL60RA	8	普通(低アルカリ型)	60	RA	川砂	AE減水剤
	NH40RA	9	普通(高アルカリ型) ⁴⁾	40	RA	川砂	AE減水剤
	NH60RA	10	普通(高アルカリ型)	60	RA	川砂	AE減水剤
	BB40RA	11	高炉B	40	RA	川砂	AE減水剤
	BB60RA	12	高炉B	60	RA	川砂	AE減水剤
	HB40RA	13	早強高炉(80%)	40	RA	川砂	AE減水剤
	HB60RA	14	早強高炉(80%)	60	RA	川砂	AE減水剤
	NH40N	15	普通(高アルカリ型)	40	N	川砂	AE減水剤
	NH40RC	16	普通(高アルカリ型)	40	RC ⁷⁾	川砂	AE減水剤
	NL40RC	17	普通(低アルカリ型)	40	RC	川砂	AE減水剤
	BB40RC	18	高炉B	40	RC	川砂	AE減水剤

※1)早強高炉(80%)：早強セメント20%、高炉スラグ80% 2)中庸熟高炉(50%)：中庸熟セメント50%、高炉スラグ50% 3)普通(低アルカリ型)：普通セメント $T.R.O=0.63\%$
 4)普通(高アルカリ型)：普通セメント $T.R.O=1.05\%$ 5)N：非反応性骨材 6)RA：反応性骨材(安山岩系) 7)RC：反応性骨材(チャート系)

これは鉄筋とコンクリートとの付着の低下によるものと推定される。

表 2 に圧縮強度・静弾性係数測定結果を示す。暴露 14 年後の値は、材齢 4 週時と比較して圧縮強度で 86%~144%、静弾性係数で 67%~109%の範囲にあり、静弾性係数が低下の傾向にある配合が多く認められた。

中性化は、スラグ混入量の多い早強高炉(80%)の配合および高炉 B W/C=60%の配合で 4~15mm の値を示した。また普通、高炉 B、中庸熱、中庸熱高炉(50%)の各セメントは W/C=45%以下であれば、中性化は 1~2mm とほとんど進行していない。

コンクリート中の塩分量測定結果を図 3 に示す。各セメントとも 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 W/C=60%の配合では、普通(NL,NH)の塩化物の浸透が高炉 B、早強高炉(80%)と比較して大きくなっている。

コンクリート中の水溶性アルカリ量分析結果を図 4 に示す。普通セメント W/C=60%の表面部分(表面~2cm)を除き、各配合とも 3kg/m³を下回った値を示している。

鉄筋の発錆面積と引張強さとの関係を図 5 に示す。発錆面積率 100%の鉄筋の引張強さは、規格値の下限である 440N/mm²を下回っている。また、腐食の少ない鉄筋は明確な降伏点が認められたが、発錆面積 100%の鉄筋は降伏点が定かでなく、脆性的に破壊した。

4. まとめ

- 1)海洋環境下の鉄筋コンクリートの劣化は配合要因に大きく影響されることが確認できた。
- 2)中性化深さ、含有塩分量等と配合要因の関係を明確にすることができ、性能照査型設計の資料として活用できる。

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・宮川豊章教授)の皆様のご協力により、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。

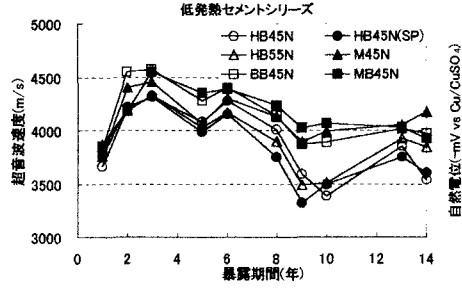


図 1 超音波伝播速度の経時変化

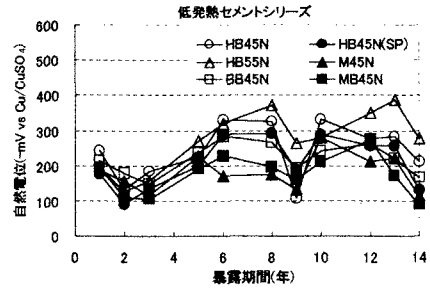


図 2 自然電位の経時変化

表 2 圧縮強度・静弾性係数・中性化深さおよび曲げ載荷試験結果

供試体名	4週測定		暴露14年後測定		暴露後4週測定		中性化深さ		曲げ載荷試験	
	f _c N/mm ²	E _s kN/mm ²	f _c N/mm ²	E _s kN/mm ²	f _c N/mm ²	E _s kN/mm ²	mm	tf-cm	M _u tf-cm	M _l tf-cm
HB45N	40.4	29.3	38.1	26.9	94%	92%	4.2	33.0	77.3	
HB45N(SP)	39.6	31.1	38.7	25.0	98%	80%	5.1	33.0	77.0	
HB55N	34.9	29.4	39.9	26.3	114%	88%	7.0	16.5	72.3	
M45N	42.7	31.8	46.9	29.3	110%	92%	0.4	38.5	77.8	
BB45N	42.1	29.5	45.5	28.3	108%	96%	0.6	27.5	76.7	
MB45N	43.7	30.2	39.8	28.2	91%	93%	1.0	33.0	77.8	
NL40RA	52.3	25.4	50.7	30.7	97%	121%	0.5	33.0	79.5	
NL60RA	27.6	27.5	37.4	28.1	135%	102%	2.3	11.0	60.0	
NH40RA	57.6	32.7	53.4	28.4	93%	87%	0.8	33.0	80.3	
NH60RA	30.7	27.2	37.7	29.1	123%	107%	1.6	16.5	53.6	
BB40RA	43.2	28.5	42.2	25.1	98%	88%	1.0	33.0	78.1	
BB60RA	25.2	24.4	36.2	26.6	144%	109%	3.1	38.5	76.2	
HB40RA	43.7	32.2	37.5	22.6	86%	70%	6.7	27.5	80.0	
HB60RA	26.6	29.6	33.2	19.7	125%	67%	11.1	16.5	58.6	
NH40N	57.9	32.7	52.7	31.8	91%	97%	0.4	27.5	81.1	
NH40RC	46.2	33.3	46.3	29.8	100%	89%	0.9	27.5	77.0	
NL40RC	49.8	32.6	44.6	29.8	90%	91%	1.0	27.5	79.5	
BB40RC	42.9	28.0	39.4	33.4	92%	119%	1.2	44.0	81.7	

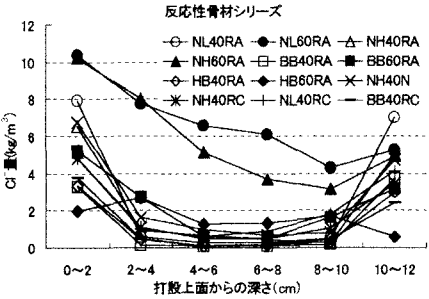


図 3 含有塩分量分析結果

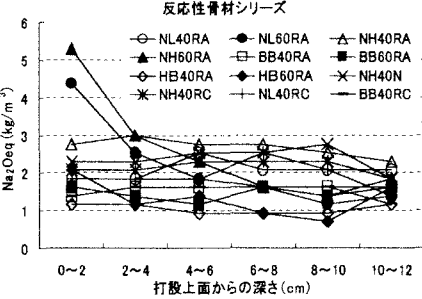


図 4 水溶性アルカリ量分析結果

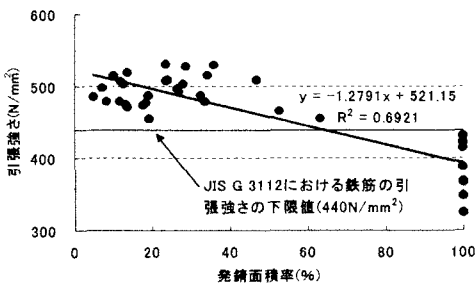


図 5 鉄筋の発錆面積率と引張強さとの関係