

V-18

海水による鉄筋コンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験室的研究

室蘭工業大学大学院 学生員 吉田 行
 室蘭工業大学工学部 正 員 尾崎 詔
 室蘭工業大学工学部 正 員 菅田 紀之

1. はじめに

鉄筋コンクリートは土木構造物の主要材料として海洋環境下においても大量に用いられてきたが、塩害による早期劣化が重要な問題として注視されている。この塩害に関する研究は各地で盛んに行われてきたが、まだ不明確な点も多く、また実際の環境下での調査・研究では長期間にわたる測定を必要とするため、データ収集が大掛かりとなる。そこで本研究では実験室内における鉄筋コンクリート供試体の劣化促進試験として、海水による浸漬と温風による乾燥の繰り返しによる方法を採用し、コンクリート中への塩分浸透及び鉄筋腐食の検討を行うとともに、浸漬試験による結果と合わせて、コンクリートの各種配合およびかぶりについて比較した。また鉄筋コンクリートの非破壊試験として用いられる自然電位測定を併せて行い、鉄筋腐食判定への有効性について検討し、さらに製鉄所で鉄鋼製造過程において発生する副成生物であるスチールダストの有効利用の可能性も検討している。

表-1 供試体配合表および諸性状

Type 1

F/C (%)	S/a (%)	D (mm)	単位量 (kg/m³)				A/E 割 (g/m²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材料値 (kg/cm²)
			W	C	S	G				
OP	40	41	159	398	731	1055	76.0	9.0	4.4	5.23
	50	42	160	320	776	1071	55.0	15.0	4.6	3.33
	60	45	155	258	858	1055	45.0	7.5	5.0	2.72
BF	40	43	177	443	708	967	80.0	14.0	4.3	4.99
	50	41	165	330	739	1052	80.0	15.0	3.9	4.18
	60	44	162	270	824	1052	45.0	8.5	4.1	3.59
SB	40	43	170	425	729	970	78.0	11.0	4.3	4.67
	50	44	172	344	781	997	50.0	8.5	5.4	3.97
	60	46	176	293	828	973	30.0	15.0	5.4	2.63

(※ 全配合にコンクリート重量比0.2%でNaCl混入)

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体性状

本実験に用いた供試体は表-1に示すように、Type 1とType 2の2種類に大別される。Type 1の供試体は平成2年10～11月に作成したもので、セメント3種類（普通ポルトランドセメント：OP、高炉B種セメント：BF、低発熱型特殊高炉セメント：SB、以下記号）、水セメント比3種類（40、50、60%）を各種組み合わせ計9種類、また促進効果を上げるため練り混ぜ時に塩化物（NaCl）を混入し打設した。Type 2の供試体は平成3年11～12月に作成したもので、セメントの種類を2種類（BF、SB）とし、水セメント比3種類（Type 1と同様）、また細骨材の容積をスチールダストで置き換えて、その置換率3種類（A：0%、B：15%、C：30%）を各種組み合わせ、計18種類の配合により打設した。

供試体はいずれも角柱供試体で、各供試体は4種類のかぶりを持つように4本の鉄筋が配置されており、その寸法およびかぶりは図-1の通りである。また供試体から出ている鉄筋部分については、Type 1はゴム系接着剤のハマタイトでコーティングし、Type 2はセメントペーストでキャッピングすることで鉄筋端部が腐食しないように保護した。

高炉B種セメント (BF) Type 2

F/C (%)	S/a (%)	D (mm)	単位量 (kg/m³)				A/E 割 (g/m²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材料値 (kg/cm²)	
			W	C	D	S					
40	43	0	204	510	0	660	88.4	124.5	12.5	4.7	5.52
	42	15	208	320	197	543	88.8	88.3	12.0	4.3	5.48
	41	30	210	325	382	434	89.6	114.4	10.0	4.4	5.47
50	45	0	178	357	0	781	96.2	92.0	11.0	4.9	4.25
	47	15	182	364	270	724	91.7	85.5	11.0	5.0	4.94
	45	30	206	412	483	533	89.4	110.0	13.5	4.5	4.91
60	46	0	168	281	0	849	98.7	96.2	14.5	4.5	3.09
	46	15	180	300	271	728	96.8	79.0	11.5	4.5	4.13
	45	30	184	306	527	582	97.7	100.0	9.5	3.7	4.26

低発熱型特殊高炉セメント (SB)

F/C (%)	S/a (%)	D (mm)	単位量 (kg/m³)					A/E 割 (g/m²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材料値 (kg/cm²)
			W	C	D	S	G				
40	43	0	210	527	0	646	87.3	87.5	12.0	4.6	4.11
	44	15	214	536	201	554	83.4	85.3	12.5	5.0	4.52
	44	30	214	536	401	456	83.4	107.0	12.0	4.6	4.68
50	45	0	193	386	0	743	91.1	32.1	10.5	4.5	3.66
	44	15	188	376	247	633	95.0	85.0	11.0	4.9	3.80
	43	30	207	414	457	483	91.8	110.0	12.5	3.9	4.02
60	47	0	169	282	0	858	97.1	24.4	10.5	4.7	2.82
	46	15	183	305	269	690	95.7	67.0	12.5	4.4	2.41
	45	30	188	313	520	550	96.4	107.0	9.5	4.6	3.13

A Laboratory Study on the Chloride Penetration and Corrosion of the Reinforced Concrete Exposed to Sea Water. by Susumu Yoshida, Shinobu Ozaki and Noriyuki Sugata

2.2 実験装置

2.2.1 促進試験装置

本研究で使用した促進試験装置は図-2のように、海水貯水槽、供試体設置水槽、ポンプ、ヒーターとそれらを制御する制御盤からなり、湿潤行程時はポンプにより海水貯水槽から供試体設置水槽に海水が注水され、自然落下により絶えず循環する。乾燥行程時は温度センサーで設定した温度を保つ様にヒーターから温風が送られる。乾燥・湿潤のサイクルは1 sec~60 hourに設定でき、乾燥温度は室温から50℃まで設定できる。また、平成4年7月から海水用ヒーターが取り付けられ、海水温度の設定が可能となった。本研究では乾燥・湿潤のサイクルを実環境における干満帯の状況および促進効果を考慮し、湿潤行程12時間、乾燥行程12時間として合わせて1サイクルとし、乾燥温度および海水温度は、Type 1の供試体設置時は乾燥40℃、海水20℃に設定、Type 2設置時は温度変化によるひび割れを考慮し、乾燥・海水共に20℃に設定、その後海水用ヒーターを取り付け、乾燥・海水共に40℃に設定した。

2.2.2 海水浸漬装置

本研究で使用した海水浸漬装置は、水槽に海水を満たしただけの簡便なものであるが、海水の温度が20℃になるように温度センサーで制御した。

なお、促進試験・海水浸漬試験に用いた海水は室蘭市イタンキ漁港で採取したもので塩化物イオン濃度(Cl⁻)2.3%程度のものを使用した。

2.3 実験概要

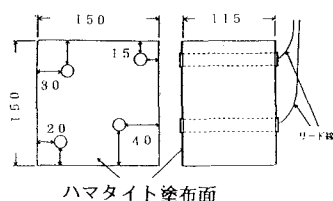
実験は28日間標準養生した後に各試験装置に供試体を設置し、その後サイクル数が経過しある程度腐食が進行したと思われる時期に供試体を破壊して鉄筋を取り出し目視観察を行い、腐食面積および腐食重量を測定した。また、コンクリートは供試体表面から1cm毎の深さの層に切断し塩分解析を行った。一方、腐食の進行状況を推定するために、自然電位を7サイクル毎に定期的に測定した。図-3に自然電位測定方法の概略を示すが、比較電極には飽和塩化銀電極を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 供試体・Type 1

供試体は同配合のものを4本作成しており、約70、330、700サイクルに到達した時点で供試体を破壊し鉄

Type 1



Type 2

(mm)

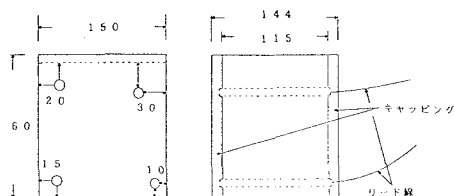


図-1 供試体形状・寸法

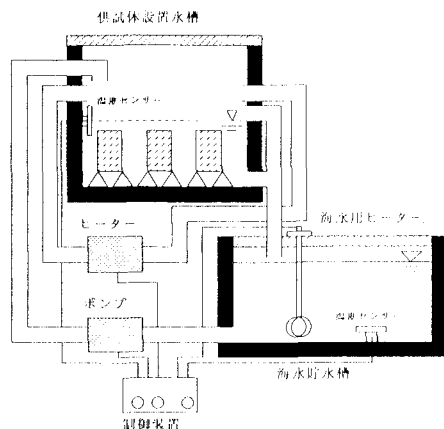


図-2 促進試験装置

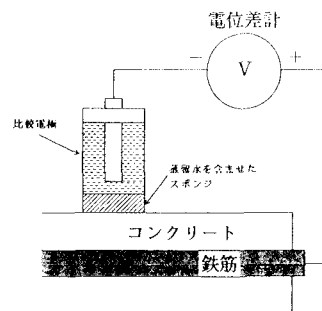


図-3 自然電位測定方法

筋の腐食状況を観察した。そこで各サイクルにおける促進試験の鉄筋腐食重量率を図-4に示す。腐食重量率とは、コンクリート打設直前に測定した鉄筋初期重量に対する鉄筋腐食重量の割合である。

まず促進試験の結果では、70サイクルの時点では目視観察できるような錆びは見られず重量率も0.5%以下であるのに対し、330サイクルでは重量率1.0%前後、また700サイクル時点では3.0%を超えるものも出ており、サイクルの増加に伴う段階的な腐食重量の増加傾向が顕著に見られる。また、腐食が最も進行している700サイクルの腐食重量率に着目すると、かぶりの大きさによる腐食重量率の違いがわかり、かぶりの薄いもの程鉄筋は腐食しており、その傾向は水セメント比の大きいもの程大きく、それと同時に水セメント比の大きいもの程全体の腐食重量率が大きくなっているのが伺える。さらに図-5は700サイクルにおける鉄筋の腐食面積率とかぶりの関係を表したものであるが、この図からもかぶりが薄いもの程腐食面積率は大きくなり、水セメント比が大きいもの程腐食面積率も大きくなる傾向がわかる。

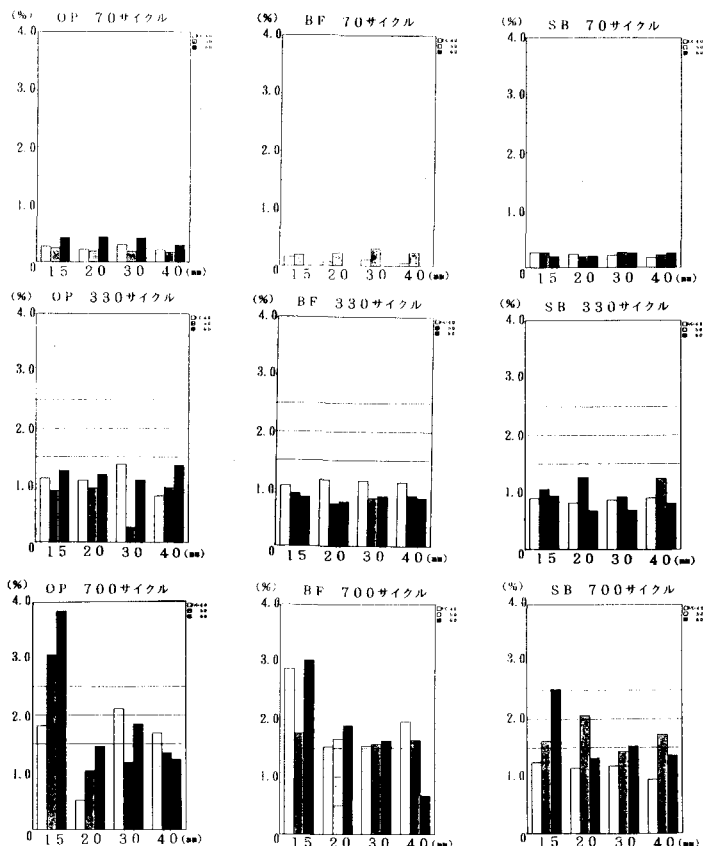


図-4 鉄筋の腐食重量率

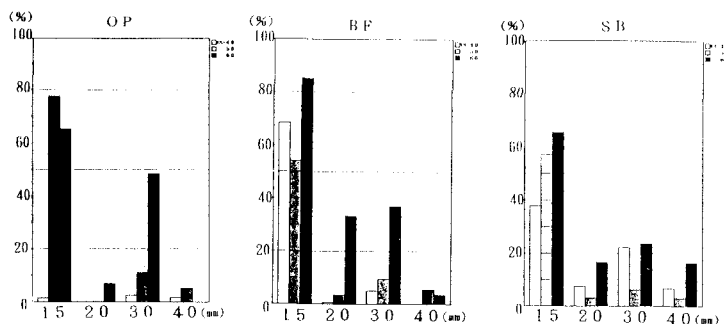


図-5 鉄筋の腐食面積率

次に図は省略したが浸漬試験の結果では、700サイクルに到達した供試体でも腐食重量率では0.5%以下、腐食面積率でも1.0%未満のものが大半であり、1.0%を超えるものでも水セメント比の大きい供試体の一部にわずかに見られる程度で、この値は促進試験の70サイクルにおける値と同程度であった。このことから、促進試験の有効性が確認され、塩分のみではなく酸素が鉄筋腐食に大きく関与することがわかる。

また、図-6は自然電位の経時変化を7サイクル毎にプロットしたものであるが、本研究の自然電位測定は供試体の表面水を拭き取ってから行い、促進試験では供試体が最も湿潤した状態で測定したものである。この図から自然電位の挙動が促進試験と浸漬試験とで異なるのがわかり、促進試験は測定初期の頃から変動が激しいが、浸漬試験は7サイクルの時点で既に促進試験より大きな値(絶対値)を取りその後は比較的安定し

ている。この事から自然電位では乾湿の影響が大きいことがわかる。そこで促進試験と浸漬試験各々で考察すると、促進試験では変動は激しいが徐々に値が卑(−)の方向に向かっているのがわかる。サイクル毎に追うと70サイクルでは大きな変動は見られないがその時点の鉄筋にも腐食は殆ど見られず、330サイクルでは値が大きく卑に移行しており鉄筋にも腐食が見られた。さらに700サイクルの時点では330サイクル時より貴(+)へ移行しており、鉄筋は大きく腐食している。一方、浸漬試験では200サイクル程度までは大きな変化はないが、330サイクルで大きく貴に移行している。こまでは鉄筋に腐食は殆ど見られない。しかし、700サイクル時点では自然電位が卑に移行しており鉄筋にもわずかではあるが腐食が見られた。以上の結果から、腐食進行中はある程度安定した値を取り腐食が起こると電位は卑へ移行し、また腐食がある程度進行してしまうとある値で安定すると思われる。さらに浸漬試験のように初期から大きく卑な値を取るものは、腐食が始まる時点で一度貴に移行しその後は促進試験と同様の挙動を示すと思われる。

3.2 供試体・Type 2

Type 2の供試体については、70サイクル時点では鉄筋の腐食が見られず、また塩分も深く浸透しておらず配合および促進・浸漬による差はほとんど無かった。また図-7は約330サイクル到達した供試体の塩分浸透量を測定したものである。この図からスラグ混入率が大きいSBの優れた塩分遮蔽性がわかる。また図は省略したが、浸漬試験の結果も同様の傾向を示した。しかしながら、水セメント比、ダスト混入率および促進・浸漬による比較では明確な傾向が現れていない。

4. 結論

本研究により、鉄筋コンクリート中の鋼材腐食に対し、セメントの種類、水セメント比、かぶりの大きさ等の評価が比較的短期間で可能になること、また低発熱型特殊高炉セメントを使用したものの塩分遮蔽性が優れているのが確認できた。しかし自然電位測定は鉄筋の腐食判定にある程度有効であるが、腐食の程度を判定するにはさらなる研究を要するに思われ、またスチールダストの利用効果と併せて今後継続する。

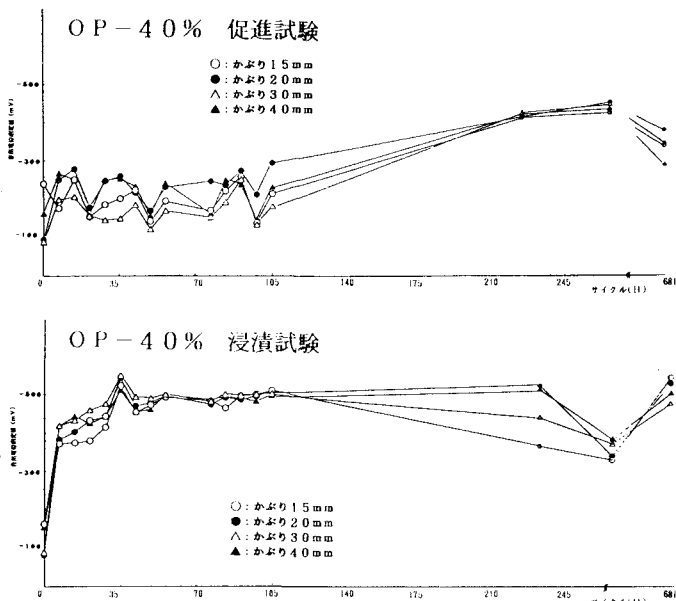


図-6 自然電位

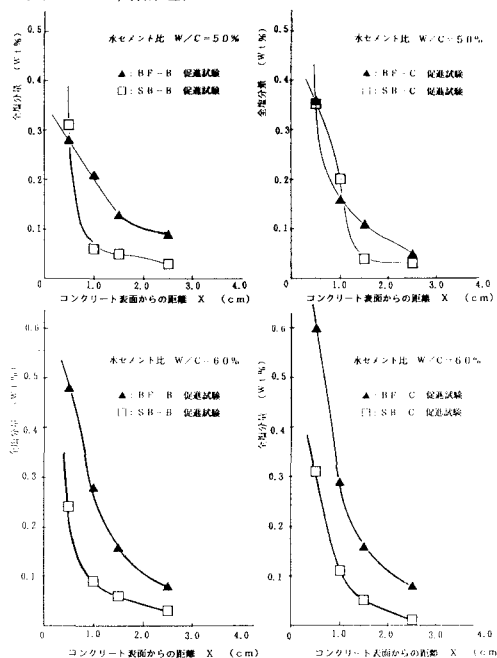


図-7 塩分浸透量