

[1086] 海洋環境下における各種コンクリートの塩分浸透と鉄筋の腐食の進行状況

正会員 迫田 恵三 (東海大学海洋学部)
 正会員 ○ 竹田 宣典 (大林組技術研究所)
 正会員 十河 茂幸 (大林組技術研究所)

1. まえがき

海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久性を判定するためには、鉄筋の腐食の進行状況を把握することが重要である。鉄筋の腐食の進行状況は、外部より侵入する塩分量に大きく影響される。海洋においては、種々の環境条件が存在するが、各々の環境条件がコンクリート構造物におよぼす影響は異なるとされている。また、打継目やひびわれが鉄筋コンクリートの耐久性におよぼす影響は、明らかにされてないのが現状である。本研究は、鉄筋コンクリート供試体を条件の異なるいくつかの海洋環境下に3年間暴露し、コンクリート中への塩分の浸透および鉄筋の腐食の進行状況を調査したものである。

2. 試験方法

2.1 供試体の種類

供試体の種類を表-1に示す。供試体は、かぶり2cmの位置にD19異形棒鋼(SD30,横ふし型)を配置した鉄筋コンクリートはりとした。塩分が表-1に示す→の方向からのみ浸透する様に、周囲を厚膜型のエポキシ樹脂で塗装を行なった。打継目は供試体中央部にもうけ、旧コンクリート面を打設1週間後にワイヤーブラシでけずり同配合のコンクリートを打継いた。ひびわれ供試体は、あらかじめ曲げひびわれを導入した面が外側を向く様にボルトで閉め上げ、引張縁のひびわれ幅を0.05mm程度とした。

表-2にコンクリートの配合を示す。

セメントは、普通ポルトランドセメント(NP)、B種高炉セメント(BB)、耐硫酸塩ポルトランドセメント(SR)の3種を使用した。表-3にセメントの化学組成を示す。供試体は材令14日まで湿布養生とし、その後塗装を行ない、材令42~50日で暴露を開始した。

2.2 暴露環境条件

暴露試験場は、清水港沖約500mにある防波堤において、飛沫帯(A)、海中(B)、海上大気中(C)(Ca:潮風・波しぶきが強い面,Cb:潮風・波しぶきが弱い面)の3環境条件と東京都清瀬市(海岸線より約30km内陸,D)とした。

写真-1に海洋暴露状況を示す。表-4に各暴露試験場の環境条件を示す。

表-1 供試体の種類

供試体名	普通供試体	打継目供試体	ひびわれ供試体
形状・寸法 (mm)	180 × 900 × 20	180 × 900 × 20	180 × 900 × 20
塩分浸透方向	→	→	→
セメントの種類	NP, BB, SR	NP	NP
暴露場所	飛沫帯(A), 海中(B), 海上大気中(C), 内陸(D) BB, SR は海中, 海上大気中のみ		

表-2 コンクリートの配合

配合名	M/S (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				AE減水剤 (g/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G			
普通	15	50.0	48.0	188	332	847	935	0.83	12.0	5.0
B種高炉	15	50.0	48.0	182	324	851	940	0.81	10.5	4.4
耐硫酸塩	15	50.0	48.0	188	332	849	937	0.83	13.0	4.1

表-3 セメントの化学組成

	比重	比表面積 (ブレン) cm ² /g	化 学 成 分 (%)							
			igloss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	HgO	SO ₂
普通	3.15	3300	0.6	0.3	21.7	5.3	3.0	64.7	1.3	2.2
B種高炉	3.04	3440	0.9	0.5	25.2	7.3	2.2	57.5	2.8	1.7
耐硫酸塩	3.18	3370	0.8	0.1	22.1	4.1	4.6	64.3	1.0	1.9

2.3 測定項目

測定は暴露後1年、2年、3年において実施した。表-5に測定項目および測定方法を示す。暴露後1年および3年では、供試体の解体を行ない鉄筋の発錆状況を調査した。塩分量分

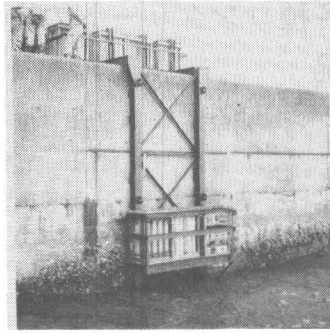


写真-1 海洋暴露状況

析は、供試体表面から2cmおきにコンクリートドリルを用いて採取した試料により行なった。

3. 試験結果および考察

3.1 塩分浸透の進行状況

(1) 環境条件の影響

図-1に各種のセメントを用いたコンクリートの塩分浸透量の測定結果を示す。

普通セメントを用いた場合、塩分の浸透範囲は暴露後1年では、飛沫帯で約7cm、海中部で約5cm、海上大気中で約3cm までであるが、暴露後2年では、飛沫帯および海中部において10cmまで、暴露後3年では、海上大気中においても10cmまでとなる。

暴露後3年における表面部の塩分量（表面から深さ2cm まで）は、暴露後1年の塩分量と比較して、普通セメントの場合、飛沫帯で約4倍、海中部で約5倍、海上大気中で約3倍であり、環境条件によって塩分の浸透速度は異なる。同様な比較をB種高炉セメントについて行なうと、海中部で約4倍、海上大気中で約3倍であり、耐硫酸塩ポルトランドセメントについては、海中部で約5倍、海上大気中で約3倍である。また、海中部における暴露後3年での表面部の塩分量は、海上

表-4 暴露環境条件

区分	環境条件
A	飛沫帯 堤防側面 H.W.L. +1.7Mと L.W.L. +0.0Mの中間位置
B	海 中 水深1.1m 海水温度 18.4℃ pH8.29 Cl ⁻ イオン濃度18.4% 溶存酸素量 7.98ppm
C	海上大気中 堤防上 L.W.L. +5.0M位置、一方 は強風時、波しぶきを受る
D	内 陸 海岸より約30km内陸 平均気温15.3℃ 降水量1460mm

表-5 試験項目・試験方法

測定項目	試験方法
鉄筋の自然電位	ASTM C 876 照合電極には飽和硫酸銅電極を使用
鉄筋の発錆状況	展開図に腐食状況を写しとり腐食面積率で評価
塩分量分析	塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法による全塩分定量
コンクリートの品質変化	圧縮強度、弾塑性係数、動弾性係数、超音波縦波速度(P波)、中性化深さ

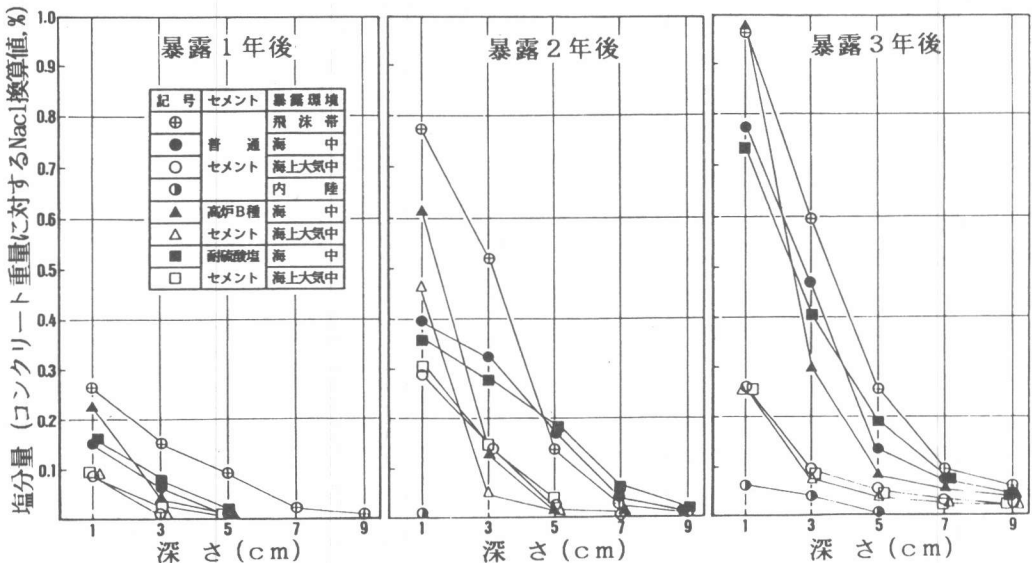


図-1 塩分浸透状況

大気中の同位置における塩分量と比較して、3.0～3.5倍である。

以上のことより、コンクリート中の塩分含有量は、セメントの種類にかかわらず暴露の初期より、飛沫帯、海中、海上大気中、内陸の順に大きいことが認められた。

(2) セメントの種類による差異

図-2に各種セメントを用いたコンクリートの塩分浸透量の経年変化を示す。

B種高炉セメントを用いたものの海中中部での塩分浸透量は、普通セメントを用いたものに比べて、表面部で1.6～1.2倍と高いが、深さ2～4cmの部分では、0.5～0.6倍と逆に低くなる。この傾向は、海上大気中においても同様である。

すなわち、B種高炉セメントは表面部に塩素イオンは浸透しやすいが、内部での塩分量は少なく、深くまで浸透しない傾向がある。耐硫酸塩ポルトランドセメントは、海中および海上大気中のいずれにおいても、普通ポルトランドセメントとはほぼ同様の塩分浸透の傾向を示す。

(3) 塩分の年間蓄積量の変化

図-3に、各種セメントを用いたコンクリートの塩素イオンの年間蓄積量の変化を示す。

飛沫帯では、表面部の年間蓄積量は年によって大きな差があり、深さ10cmの位置においては、暴露後2年までは塩分の蓄積はないが、3年目の1年間には、 $600\text{g}/\text{m}^3/\text{年}$ 程度の塩素イオンが浸透している。海中中部では、表面部の年間蓄積量は経過年数とともにしだいに多くなり、3年目ではいずれのセメントについても約 $5000\text{g}/\text{m}^3/\text{年}$ となる。これは、暴露後1年目の年間蓄積量に比べると、普通ポルトランドセメントおよび耐硫酸塩ポルトランドセメントでは約2.5倍、B種高炉セメントでは約1.6倍である。海中部の深さ5cmの位置では、普通ポルトランドセメントおよび耐硫酸塩ポルトランドセメントは2年目に約 $2000\text{g}/\text{m}^3/\text{年}$ の塩素イオンが浸透しているが、B種高炉セメントは、3年目に初めて塩素イオンが浸入している。海上大気中の表面部では、塩分量は減少することもある。これは、降雨等の影響により表面部の塩分が抜けおちるためであると思われる。また、深さ10cmの位置においては、

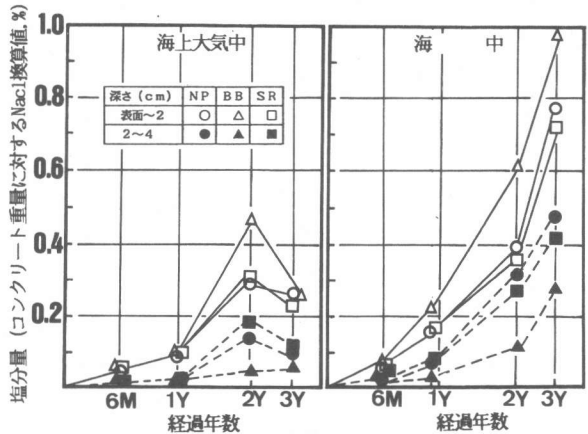


図-2 塩分浸透量の経年変化

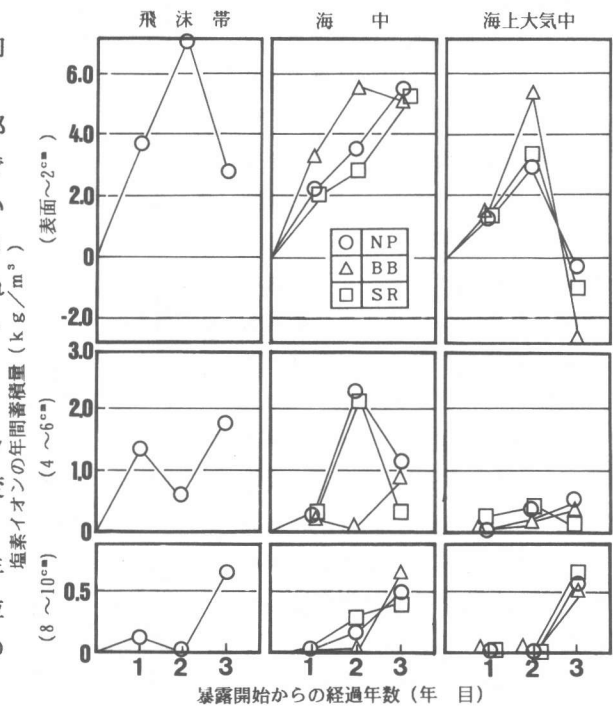


図-3 塩素イオンの年間蓄積量の変化

いずれのセメントを用いたものも
 暴露後2年までは塩分の蓄積はないが、3年目の1年間には500g/m³
 の塩素イオンが浸透している。

以上のことより、塩素イオンの
 年間蓄積量は表面部においては、
 環境条件によって大きく異なる。
 また、深さ10cm程度の位置までに
 塩素イオンが浸透するのは暴露後
 2年目以降である。

3.2 コンクリートの品質変化

表-6に、圧縮強度、静弾性係
 数の材令28日の測定値に対する増
 加率を示す。

いずれの海洋環境条件において
 も、圧縮強度の増加率は標準養生
 と同程度以上である。

圧縮強度の増加率は、普通ポル
 トランドセメントおよびB種高炉
 セメントの飛沫帯、海中部では、
 標準養生に比べて高いが、アルミ
 ン酸3石灰(C₃A)の少ない耐硫酸
 塩ポルトランドセメントでは、標
 準養生と同程度である。

海水中の硫酸塩とセメント中の
 アルミン酸3石灰(C₃A)との反応
 により、エトリンガイトが生成
 し、内部の空隙が充填され組織が
 緻密になったことが強度増加の要
 因として上げられる。

また、静弾性係数の増加率は、
 標準養生に比べて若干小さいが、
 材令28日の値より低下しているも
 のはない。暴露後3年における、
 海上大気中の中性化深さは1mm程
 度であり、内陸暴露のものと同程
 度である。

以上より、海洋環境条件による
 コンクリート自体の品質の劣化は
 ないものと考えられる。

表-6 圧縮強度・静弾性係数の増加率

	A 飛沫帯				C 海上大気中				B 海中			D 内陸		E 標準養生	
	NP	NP	BB	SR	NP	BB	SR	NP	NP	BB	SR	NP	BB	SR	
圧縮強度比	1ヶ月	99	103	103	104	95	101	97	113	117	127	114	127	114	
	6ヶ月	133	123	135	122	131	143	119	133	127	142	124	142	124	
	1ヶ年	153	133	144	132	143	152	133	130	135	150	130	150	130	
静弾性係数	1ヶ月	116	104	105	95	117	116	115	105	112	109	112	109	112	
	6ヶ月	114	107	101	104	114	109	115	103	117	115	115	115	115	
	1ヶ年	115	101	101	105	116	114	116	101	115	114	114	114	114	
	3ヶ年	121	104	104	105	118	122	119	97	124	123	125	123	125	

材令28日の圧縮強度 (kg/cm²) NP=359, BB=356, SR=377
 材令28日の静弾性係数 (10⁶ X kg/cm²) NP=2.99, BB=3.11, SR=3.08

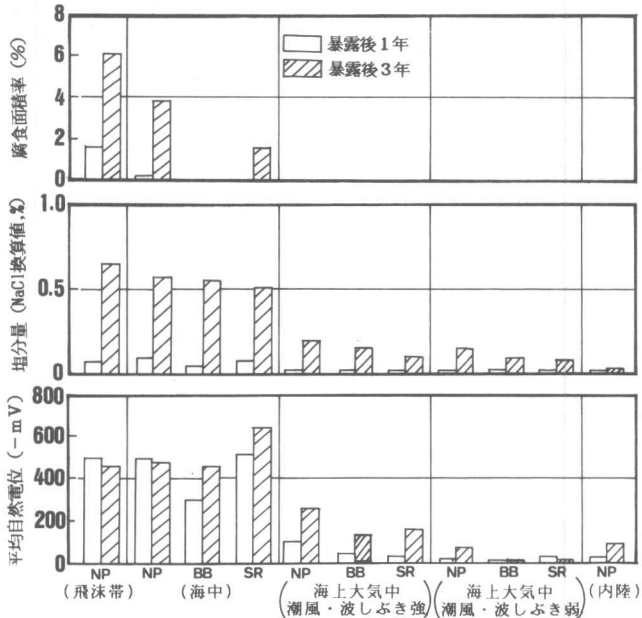


図-4 打継目・ひびわれのない供試体の鉄筋の腐食状況

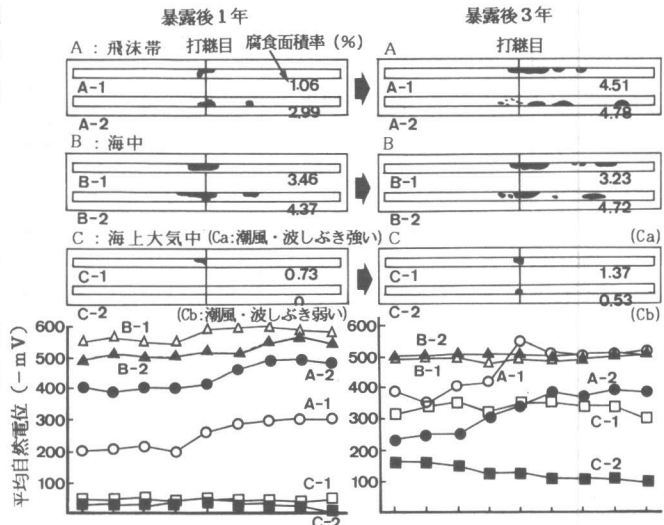


図-5 打継目がある供試体の鉄筋の腐食状況

3.3 鉄筋の腐食状況

(1) 環境条件による影響

図-4に鉄筋コンクリート供試体中の鉄筋の腐食面積率、自然電位の平均値、鉄筋位置（かぶり2 cm）における塩分量の測定結果を示す。

暴露後3年における鉄筋の腐食は普通セメントを用いたものでは飛沫帯、海中部で進行しており、塩分量に大きな差はないが腐食の進行は飛沫帯のほうが海中に比べて速い。海中部においては、普通セメントおよび耐硫酸塩セメントを用いたものは発錆しているが、B種高炉セメントを用いたものは発錆しておらず、高炉セメントの防食効果が認められた。

また、海上大気中においては、暴露後3年で0.1% NaCl ($1400\text{g}/\text{m}^3\text{c}1^{-1}$)以上の塩分が鉄筋位置まで浸透しているが、いずれのセメントを用いたものも発錆していない。

一般的には、鉄筋の腐食に対する環境条件としては、海上大気中のほうが海中部に比べて、厳しいと言われているが、本実験の環境条件の様に海中部約10mの位置と海洋上の大気中を比べた場合、海中部のほうが腐食の進行が早い場合もある。

腐食が進行している鉄筋の自然電位は、卑となる傾向がみられる。海中部の耐硫酸塩セメントの1年目での自然電位は-460 mvであり、この時点での腐食は認められなかったが、暴露後3年で発錆した。目視による腐食が認められる段階以前に自然電位は卑の値となるため、腐食の非破壊的判定に有効であると考えられる。海中部のB種高炉セメントは暴露3年時で、腐食は目視できないが、自然電位が-440mvであることから腐食が進行していると判断すべきであろう。

(2) 打継目の影響

図-5に打継目がある供試体の腐食状況を示す。

腐食は飛沫帯、海中、海上大気中のいずれにおいても進行しており、腐食箇所は暴露後1年では打継目部分のみであるが、暴露後3年では打継目部分のみではなく、その他の部分にも及んでいる。

いずれの環境条件においても、1年目の早期より、打継目部分で腐食が開始することから、海洋環境下における打継目は防食上の弱点となると考えられる。

(3) ひびわれの影響

図-6にひびわれがある供試体の腐食状況を示す。

暴露後3年では、飛沫帯、海中、海上大気中においてひびわれ部分を中心に発錆しており、その進行は、飛沫帯で最も著しく、海中、海上大気中の順に速い。

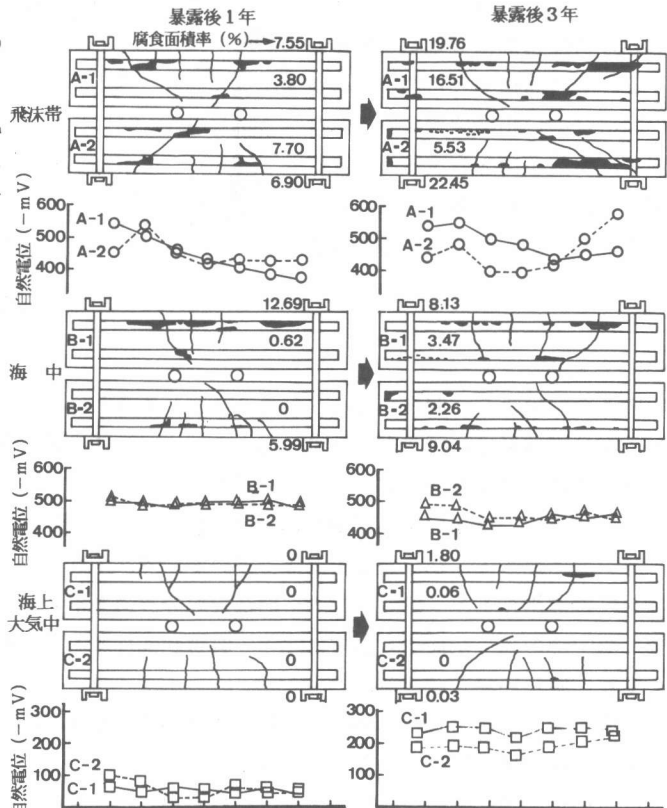


図-6 ひびわれがある供試体の鉄筋の腐食状況

海中部では、コンクリート表面側だけの発錆にとどまっているのに比べ、飛沫帯では、鉄筋の全周にわたり発錆している。

ひびわれ幅が0.05mm程度であっても、コンクリートと鉄筋の付着が十分でないため、その部分を通じて直接海水が鉄筋に接触し、腐食の進行を促進させるものと考えられる。

(4) 腐食面積と塩分量および自然電位の関係

図-7に塩分量と腐食面積率の関係を示す。

鉄筋位置の塩分量が0.05% NaCl以下のものはひびわれ・打継目がある場合でも発錆していないが、0.05% NaCl以上となると腐食が始まる。よって、鉄筋の腐食が発生し始める塩分量は、0.05% NaCl(約700g/m³c1)程度であると考えられる。

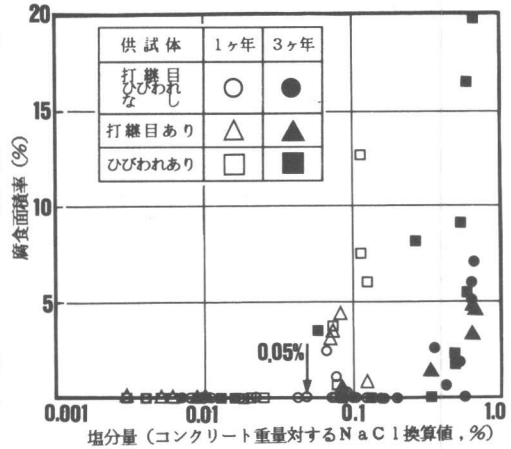


図-7 塩分量と腐食面積率の関係

図-8に腐食面積率と自然電位の関係を示す。自然電位が-200mvより貴であれば、ほとんど発錆していないが、腐食面積率の大きいものの自然電位は-300mvより卑となる。腐食面積率と自然電位の値の間には強い相関関係はみられないが、自然電位を測定することにより腐食の有無をある程度、推定することが可能であると考えられる。

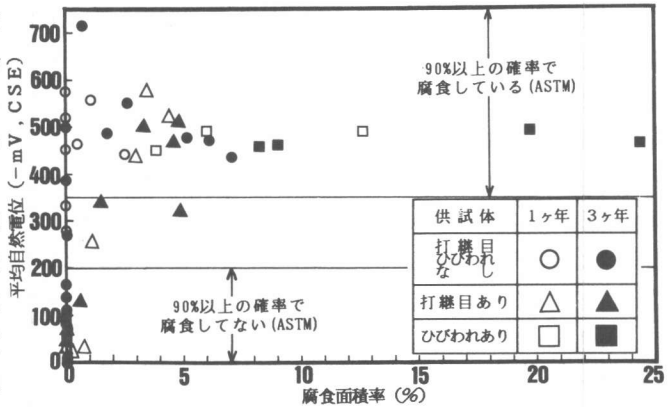


図-8 腐食面積率と平均自然電位の関係

4. まとめ

以上の結果より、明らかになったことをまとめると次のようになる。

- (1) 塩分浸透量は、飛沫帯、海中、海上大気中、内陸の順に高く、塩素イオンの表面部での年間蓄積量は、環境条件によって大きく異なる。
- (2) セメントの種類によって塩分の浸透状況が異なり、B種高炉セメントは普通ポルトランドセメントに比べて、塩分量は表面部で多いが、内部ではすくない。耐硫酸塩ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントと同様な塩分浸透を示す。
- (3) 海中部のほうが海上大気中に比べて腐食が進行することもあり、腐食に対する環境条件としては、厳しい場合がある。
- (4) 腐食の開始前には、自然電位が卑の値となることが認められた。ただし、その値により腐食の程度は明確に推定することはできない。
- (5) 海洋環境下において打継目やひびわれがあると、健全なコンクリートに比べて少ない塩分量で腐食が始まり防食上の弱点となるため、施工上、十分な注意が必要である。