

[1062] 塩分を含んだコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究

正会員 ○森 本 登志也 (五洋建設技術研究所)

正会員 小 堀 光 憲 (五洋建設技術研究所)

正会員 高 木 兼 士 (五洋建設技術研究所)

1. まえがき

近年、海洋環境下に立地するコンクリート構造物の塩害による劣化が多数報告され、このような劣化構造物の維持・補修を行うにあたって、劣化診断技術の確立が急がれている。塩害を受けた構造物の劣化を適確に診断するためには、鉄筋腐食に影響を与えるコンクリート中の塩分の挙動を明確に把握することおよび鉄筋の状況を非破壊的に探査する技術の精度向上が重要な課題とされている。

本研究は、塩害を受けた構造物の劣化診断技術の向上を図ることを目的とし、塩分を含んだコンクリート中の塩分挙動と鉄筋腐食について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 因子と水準

本実験に用いた因子と水準を表-1に示す。混入塩分量は5水準とした。暴露条件は、標準が恒温恒湿状態 (20℃, 60%R.H.一定) で7日間を1サイ

表-1 因子と水準 注)

因 子	水 準
混入塩分量	O, A, B, C, D
暴露条件	標準, 促進

O: 無混入
 A: 0.027 (Cℓ⁻, wt%) (0.6 kg/m³)
 B: 0.072 (") (1.6 ")
 C: 0.144 (") (3.2 ")
 D: 0.216 (") (4.8 ")

クルとした。促進は「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—乾湿繰返し法—(案)」JCI案に準じて行い、湿潤状態3日間 (65℃, 95%R.H.)、乾燥状態4日間 (15℃, 65%R.H.) 計7日間を1サイクルとした。供試体は材令7日 (0サイクル) まで20±3℃でビニール袋にて封かん養生後、各環境に20サイクルまで暴露を行った。

2.2 コンクリートの配合および供試体

実験に使用したコンクリートの示方配合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は鬼怒川産川砂 (表乾比重2.16, 吸水率2.55%)、粗骨材は八王子産碎石 (5~20

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラブの 範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (C×%)
20	8±2.5	5±1	60	45	168	280	824	1024	AE剤 0.03

mm表乾比重2.64, 吸水率0.97%, 10~20mm表乾比重2.68, 吸水率1.15%)を使用した。混入塩分はNaClを使用し、混練水はイオン交換水を使用した。供試体の形状を図-1に示す。供試体はJIS G3108みがき棒鋼用一般鋼材φ10mmを使用し、エポキシコーティングを両端部に施し、両端に100×100×15mmの亚克力板を接着しそれぞれの暴露環境に供した。

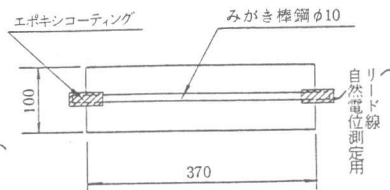


図-1 供試体形状

2.3 分析試験

分析試験項目と測定サイクルを表-3に示す。塩分分析は「硬化コンクリート中に含まれる塩分分析方法」(塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法) JCI案に準じて行い、分析する

試料は、各塩分量の指定したサイクルで同一の供試体から継続的に採取した。自然電位の測定は硫酸銅電極を使用し、全供試体について行い、供試体の同一面を4 cm間隔で9点の電位を測定した。腐食評価は「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法（案）」JCI案に準じて腐食面積率と腐食減量で評価し、次式で求めた。また、腐食評価後、鉄筋はJIS Z2241により引張試験を行い、健全な鉄筋の引張強さとの比較を行った。

$$\text{腐食面積率 (\%)} = \frac{\text{評価対象の腐食部分の面積 (cm}^2\text{)}}{\text{評価対象部分の全面積 (cm}^2\text{)}}$$

$$\text{腐食減量 (\%)} = \frac{\text{試験前の重量 (mg)} - \text{腐食生成物除去後の重量 (mg)}}{\text{試験前の重量 (mg)}}$$

* 評価対象部分は鉄筋の両端部のコーティングを除いた部分

3. 実験結果および考察

3.1 塩分挙動

硬化コンクリート中の塩分は次の2つの形態に分けて考えることにする。

(a) 水分によってイオン化し、コンクリート中の毛細管空隙を自由に移動し鉄筋腐食に直接関与する塩分

(b) セメント中の成分と水和物を形成し、鉄筋腐食に直接関与しにくいと考えられる塩分

本実験において(a), (b)を合わせたものを全塩分、(a)を可溶性塩分（50℃の温水により溶解する塩分）、(b)を固定塩分（全塩分と可溶性塩分との差）と考えることにした。

全塩分量に対する可溶性塩分量の割合と促進サイクルとの関係を図-2に示す。20サイクルにおける塩分量(A), (B)を除いて、その割合はバラツキがあるが約65~85%の範囲にある。サイクル数の増加（材令の経過）に伴う割合の変化は明らかでない。

可溶性塩分量と全塩分量との関係を図-3に示す。両者の関係は $y = 0.75x$ (y : 可溶性塩分量, x : 全塩分量) の一次式で近似することができるため、全塩分量の多少にかかわらず、固定塩分量は約25%になると考えることができる。

以下の考察においては、塩分量の代表値として練りませ時に混入したNaCl量より算出したCl⁻量（以下混入塩分量と呼ぶ）を用いることにする。

固定塩分量と混入塩分量との関係を図-4に示す。混入塩分量が増加するにつれて、固定塩分量

表-3 分析試験項目と測定サイクル

暴露環境		塩分量	供試本体数	測定サイクル		
				塩分分析	腐食評価	非破壊試験
促進	O	3	20 (全塩分のみ)	20	1サイクル毎	
	A	3	5, 10, 20			
	B	3				
	C	7	0.5, 10, 15, 20	5, 10, 15, 20		
	D	3	5, 10, 20	10, 20		
標準	O S D	各1	————	20		
分析試験項目			全塩分 可溶性塩分	腐食面積率 腐食減量 引張強さ	自然電位 (S.P.)	

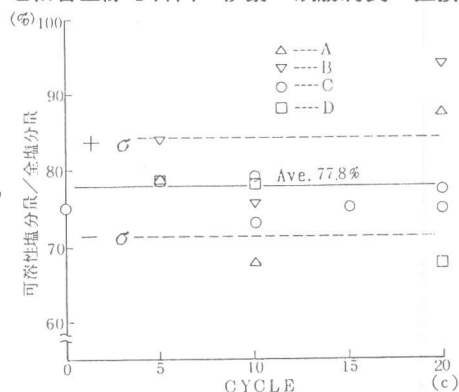


図-2 全塩分量に対する可溶性塩分量の割合と促進サイクルとの関係

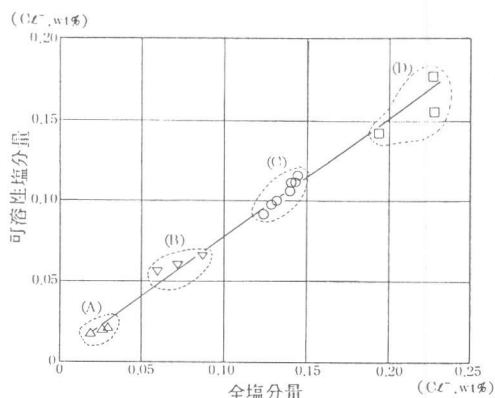


図-3 可溶性塩分量と全塩分量との関係

は増加する傾向にあり、促進環境10サイクルから20サイクルへ経過してもその傾向は変化しない。

既往の文献¹⁾によれば、セメントの水和物として固定される塩分は、Friedl氏塩 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)あるいはエトリンガイトに類似した組成 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCl}_2 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)、さらには C_3S (トリカルシウムシリケート) の複塩として生成されると言われる。また、固定塩分は温度の影響

を大きく受け、塩分分析において抽出温度が20℃に対して50℃では、固定塩分量が半分であるという報告もある。²⁾ このように、固定塩分量はセメント量、温度など種々の要因によって決まると考えられるが、本実験においては、混入塩分量が多くなるにつれて固定塩分量が増加するという結果が得られた。例えば、(A) に対する (D) の固定塩分量を比較すると5～10倍である (混入塩分量は8倍)。

3.2 鉄筋腐食

3.2.1 腐食状況

20サイクルにおける腐食面積率および腐食減量と混入塩分量との関係をそれぞれ図-5(a), (b)に示す。促進環境において混入塩分量が増加するにつれて、腐食面積率は指数関数的に、腐食減量は直線的に増加することが

知れる。腐食が初期の段階では、腐食面積率は、腐食量を鋭敏に把えているが腐食がかなり進行した促進環境の混入塩分量(C)と(D)のような場合、腐食量の差異を腐食面積率では明確に把えにくいことを示している。標準環境においては、混入塩分量が(C)まで腐食がほとんど認められず、(D)において初めて腐食が発生している。標準環境における鉄筋は混入塩分量が(C)と(D)の間(Cl^- で3.2～4.8 kg/m^3)で発錆することが判る。腐食面積率と腐食減量の関係を図-6に示す。両者の間にはほぼ相関がみられるが、腐食面積率約90%以上になるとバラツキが大きくなる傾向にある。

促進環境における腐食面積率および腐食減量のサイクル変

化をそれぞれ図-7(a), (b)に示す。混入塩分量(C), (D)の15サイクルから20サイクルにかけての腐食面積率は95%前後の値を示し、促進サイクル経過に伴う腐食量の増加を明確に表しにくいと考えられる。腐食減量で表した場合、促進環境における混入塩分量(C) (3.2 kg/m^3)を基準に考えると、20サイクル(A) (0.6 kg/m^3)の腐食減量は5サイクル(C)のそれと、20サイクル(B) (1.6 kg/m^3)の腐食減量は10サイクル(C)のそれと、10サイクル(D) (4.8 kg/m^3)の腐食減量

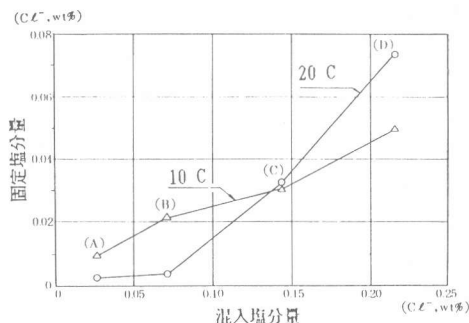


図-4 固定塩分量と混入塩分量との関係

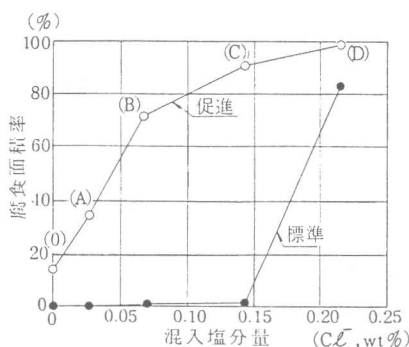


図-5(a) 腐食面積率と混入塩分量との関係

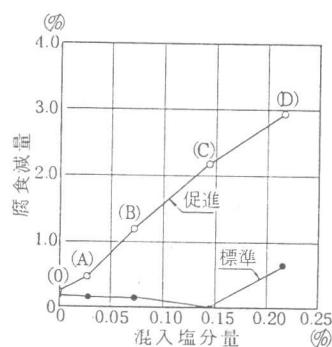


図-5(b) 腐食減量と混入塩分量との関係

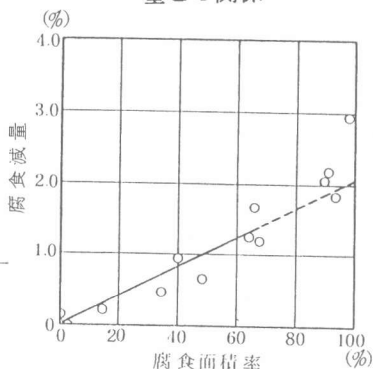


図-6 腐食減量と腐食面積率との関係

は20サイクルの(C)
のそれぞれそれぞれ対
応している。

これらの関係は混
入塩分量が $\frac{1}{2}$ になる
と同一の腐食減量に
到達する時間(サイ
クル数)が約2倍に
なるとことを示して
おり、混入塩分量(0.6
~4.8 kg/m³)の範
囲において腐食減量

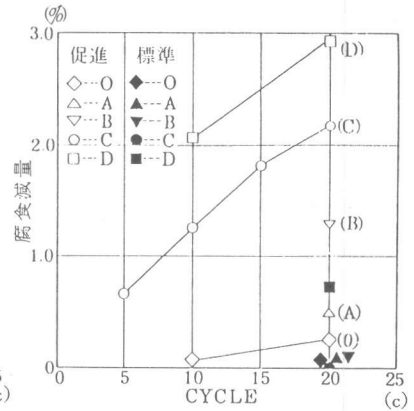
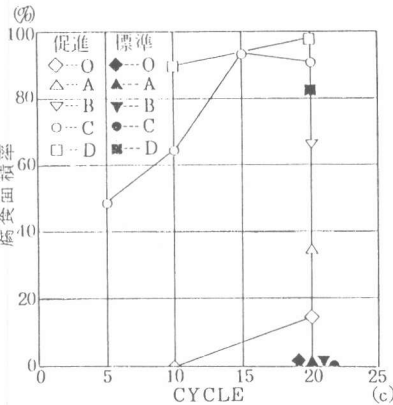


図-7(a) 腐食面積率のサイクル変化

図-7(b) 腐食減量のサイクル変化

と混入塩分量との間に反比例の関係があることがわかる。

腐食減量と引張強さ比との関係を図-8に示す。腐食減量が
1.0%を越えると、急激に引張強さの低下が始まり、このとき
の腐食面積率は図-6から約50%である。このあたりが鉄筋の
断面欠損による耐力の低下を示す限界であると推察される。

3.2.2 腐食診断

(1) 平均電位

各供試体で測定された9点の電位の単純平均を平均電位と定
義する。混入塩分量(C)における平均電位の変化を図-9に示
す。混入塩分量と環境条件が等しい場合、供試体間の電位の変
動は-20mv以内と比較的小さい。

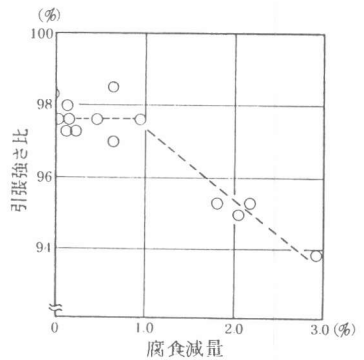


図-8 腐食減量と引張強さ比との関係

混入塩分量別の平均電位の経時変化を図-10(a), (b)に示す。促進環境の塩分無混入(0)につい
ては促進初期の5サイクルまで電位が貴に向う傾向があるが15サイクルから卑に向う傾向にある。
図-5(a)からこの(0)の20サイクルでの腐食状況は腐食面積率で約15%、腐食減量で約0.2%の
腐食が生じていることから、15サイクル以後に腐食が生じたものと推察される。標準環境の混入
塩分量(B)以下では10サイクル以後 -100mv 以上と
なり不動態被膜が形成され腐食しにくい状態にな
っていると考えられる。これは、3.2.1で述べた20サ
イクルの腐食状況と一致する。また、20サイクルに
おいて、促進環境のすべての混入塩分量(0~D)およ
び標準環境の混入塩分量(D)の平均電位の値は-250
mV以下であり腐食状況との対応からこの値以下で腐
食が生じていると判断される。このように、平均電
位は腐食の有無の傾向を推定できる。促進環境の(C)
(D)の平均電位は、サイクル数が経過してもほとん
ど一定の電位を示しており、3.2.1で述べたような
サイクル変化に伴う(C), (D)の腐食減量の差異とい
った定量的な把握はできない。

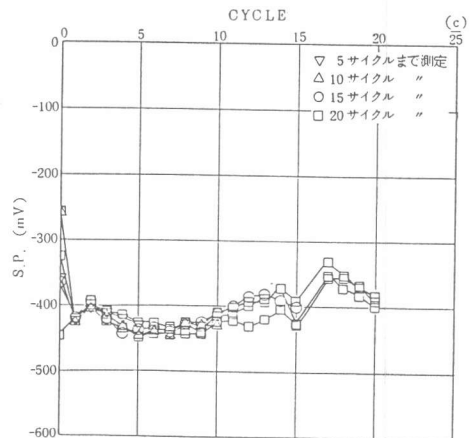


図-9 平均電位の変化(混入塩分量: C)

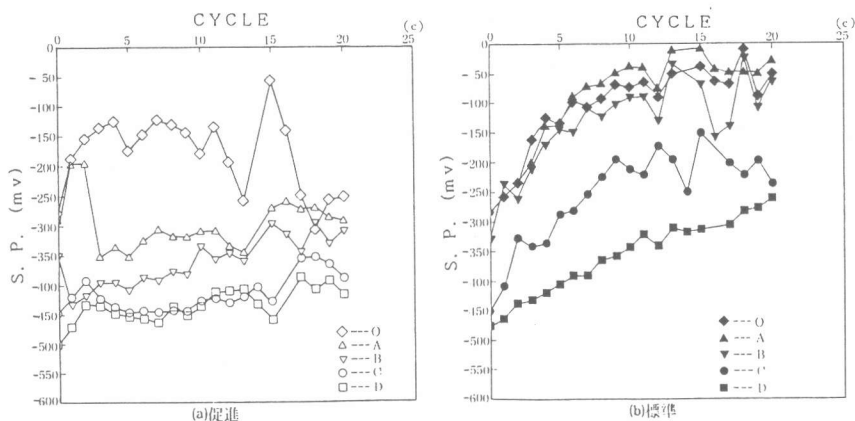


図-10(a), (b) 平均電位の経時変化 (混入塩分量別)

(2) 電位分布

自然電位の分布と鉄筋腐食との関係を図-11に示す。電位分布と腐食状態を対比させると5サイクルと10サイクルにおいては、電位の分布は下に凸の分布を示し、電位の増減する測点の近傍が健全部と腐食部の境界に対応していることがわかる。15サイクルにおいては局部的な孔食の影響などにより、大きな電位差を生じ、20サイクルにおいては全面的な腐食に達し、一時的な電位の平衡状態にあるものと推察される。このように、各サイクルの電位分布を測定することにより、平均電位のみでは困難であった腐食部と健全部の境界の判定および腐食の進行状況の推定ができるものと考えられる。

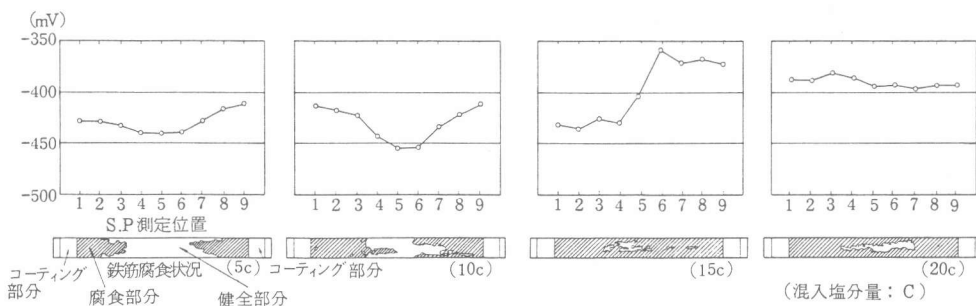


図-11 自然電位の分布と鉄筋腐食との関係 (混入塩分量：C)

(3) 累加S.P.

各供試体について、1サイクル毎の平均電位を加算した値を累加S.P.と定義する。測定された自然電位には、環境条件、コンクリート中の含水量、塩分濃度、表面の中性化の程度など種々の要因による影響が含まれている。³⁾ これらの複合要因をできるだけ包含させ、抱括的な評価尺度あるいは経時的な平均電位 (累加S.P.をサイクル数で除す) を得るための試みとして累加S.P.を用いた。20サイクルにおいて腐食評価を行った代表的な供試体 (環境、混入塩分量の異なるもの各々1本、計10本) の累加S.P.について考察する。累加S.P.と混入塩分量との関係を図-12に示す。累加S.P.は混入塩分量の増加とともに増大し、同一塩分量に対して促進環境の方が標準環境よりも高い値を示している。その差は混入塩分量の増加につれて縮まる傾向にある。

腐食面積率および腐食減量と累加S.P.との関係をそれぞれ図-13(a), (b)に示す。3.2.1で述べた鉄筋の耐力低下の限界と考えた腐食減量が1.0%，腐食面積率が50%では、累加S.P.の値は、

両者とも -7000mV 付近である。また、累加S.P.の値が -5000mV 以下では、腐食面積率が約30%以下、腐食減量が0.5%以下になるため、鉄筋の損傷は軽微であると判断できる。図-13(b)は、累加S.P.を腐食減量と対応させることにより暴露環境および塩分量などの要因を包含してひとつの連続した曲線で表せることを示唆している。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に、要約する。

- (1) 可溶性塩分量と全塩分量とは一次比例の関係にあり、固定塩分量は混入塩分量の増加につれて増大する。
- (2) かなり進行している腐食（腐食面積率90%程度以上）を評価する場合、面的な変化で把える腐食面積率よりも、局所的な孔食などを考慮し、全面腐食後も重量変化で把えることができる腐食減量で腐食量を評価する方が望ましい。
- (3) 腐食減量で1.0%，腐食面積率で50%を越えるあたりで鉄筋の耐力低下が始まる。
- (4) 平均電位の値が -250mV 以下になると腐食が生じている可能性がある。電位分布は、健全部と腐食部の境界および腐食の進行状況の推定ができる。
- (5) 累加S.P.を用いて、自然電位の測定に影響を及ぼす要因を消去することができる。

5. あとがき

今回の結果は、コンクリート中の塩分挙動、鉄筋腐食の評価方法、非破壊試験による腐食診断手法について室内実験により検討を行ったものである。実構造物に適用する場合、自然の暴露環境、鉄筋の配置、コンクリートの品質、形状寸法などによりこれらの結果が変化してくるものと考えられる。

参考文献

- 1) W.Richartz (常山訳)：セメント硬化時の塩化物結合，日本セメント(株)研究所，1970.3
- 2) 日本コンクリート工学協会腐食防食委員会：「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法解説」
- 3) ALAN P.CRANE：CORROSION OF REINFORCEMENT IN CONCRETE CONSTRUCTION, ELLIS HORWOOD PUBLISHERS, P201~210

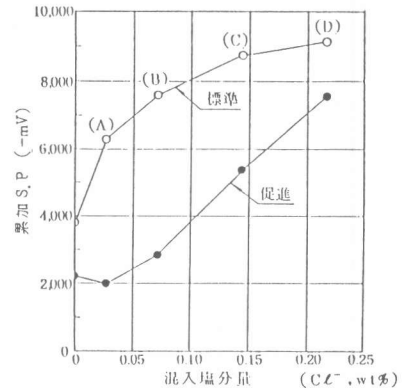


図-12 累加S.P.と混入塩分量との関係

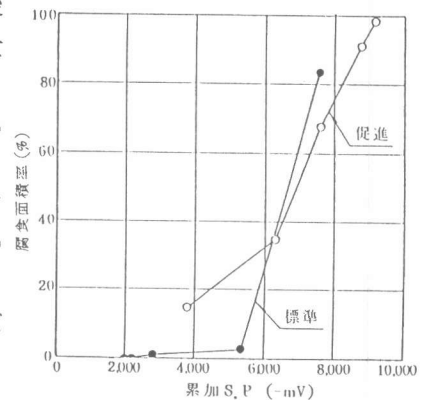


図-13(a) 腐食面積率と累加S.P.との関係

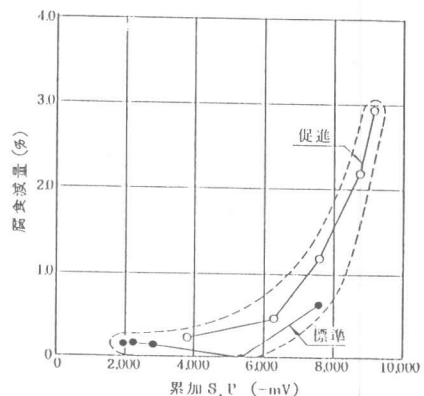


図-13(b) 腐食減量と累加S.P.との関係