

し、その値を腐食率と定義した。ただし、直交配筋のケースでは、かぶりの小さい表面側の鉄筋を対象とした。このように定義した腐食率は半定量的な性格を有し、平面的に比較的広範囲に腐食状態を評価することができると考えられる。

3. 2 腐食率の算定範囲の大きさ

腐食率の算定範囲を大きくすると、中心部と周辺部との間でかぶりのばらつき等のため鉄筋位置における塩分量の差が大きくなり、中心部と周辺部との腐食の状態が異なるようになる。一方、算定範囲を小さくすると、周辺部との差が小さくなり、腐食の状態は一様になるが、鉄筋の配筋間隔に影響されるようになる。図-4, 5, 6は腐食率の算定範囲としてそれぞれ $1.00 \times 1.00\text{m}$ 、 $0.50 \times 0.50\text{m}$ 、 $0.25 \times 0.25\text{m}$ で検討したものであるが、 $1.00 \times 1.00\text{m}$ の範囲内では、腐食率と塩分量との関係に明確な境界線がないので、算定範囲としては大きすぎるようである。一方、 $0.50 \times 0.50\text{m}$ と $0.25 \times 0.25\text{m}$ との範囲では両方とも明確な境界線が認められる。しかしながら、算定範囲を極端に狭めた後者では、鉄筋の配筋間隔が大きい場合などにデータとして残らなかったりして有効なデータ数が減少する懸念がある。周辺部の影響を除くためには腐食率の算定範囲を小さくする必要があるが、その適用には限界があると考えられるので、本報では以下算定範囲を $0.50 \times 0.50\text{m}$ で検討することとした。

3. 3 不均一データの棄却

算定範囲内で塩分分布が一様ならば、その中では鉄筋の腐食の程度はほぼ同じ状態であると考えられ、鉄筋が腐食に至っている段階であれば、腐食率として比較的大きな数値が得られる筈である。しかし、図-4, 5, 6に見られる通り、腐食率としてまだ比較的小さい数値が得られており、算定範囲を小さくするだけでは、一様な腐食の状態として考慮できない。そこで、本報では腐食率が比較的小さい値の場合（今回の試算では10%未満）は、不均一な偏ったデータと考え、鉄筋腐食の限界塩分量を検討するデータから棄却するようにした。このケースに該当するものに塩分量の高い隅角部を周辺に含んでいた例（図-2）、別の原因で先行するひびわれが腐食の原因となっていた例（図-3）等があげられる。

4 限界塩分量

4. 1 腐食要因の取扱

コンクリート中の鉄筋の腐食に対して、水分・酸素および塩分が主要な役割を果たす。コンクリート中の練り混ぜ水の大半は、コンクリート硬化後も細孔空隙中に満たしている水分として存続し、その一部は乾燥により消失するが、表面張力の作用により大気中からも水分が補給される。したがって乾燥している環境下においても水分は腐食に対して十分に供給されるものと考えられる。水分の供給に比較して、塩分と酸素の供給は環境により大きく影響される。塩分は鉄の不動態皮膜を破壊し、腐食を促進させる触媒の役割を果たすといわれており、高いアルカリ環境下のコンクリート中の鉄筋に対しても同様な働きをする。塩分環境下のように、外部から浸透してくる塩分量ならびにその分布状態は、かぶり、コンクリートの品質、暴露期間および塩分環境の程度の影響を受け、大きく変動する。本報では鉄筋位置まで到達してきた塩分量に着目しているので、鉄筋腐食との関係を合理的に把握できると考えられる。これに対して、鉄筋位置での酸素量は、塩分と同様にかぶり・コンクリートの品質に左右されるとともに、構造物の置かれている湿潤程度にも強く影響される¹⁾が、酸素量については塩分量に比較して定量

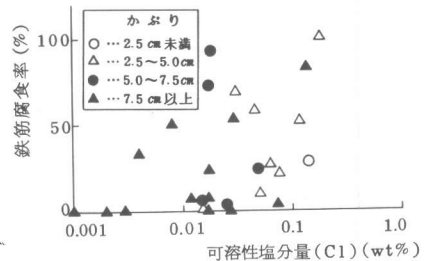


図-4 塩分量と腐食率（その1）
（算定範囲： $1.00 \times 1.00\text{m}$ ）

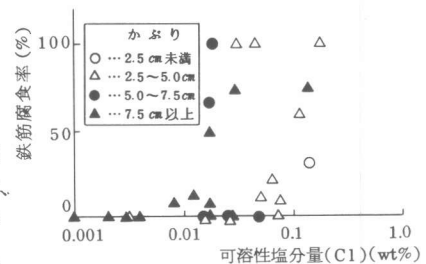


図-5 塩分量と腐食率（その2）
（算定範囲： $0.50 \times 0.50\text{m}$ ）

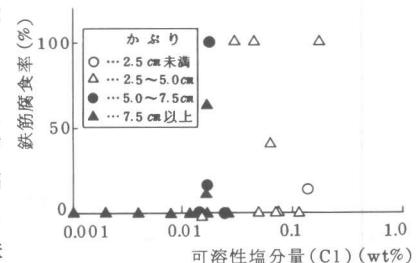


図-6 塩分量と腐食率（その3）
（算定範囲： $0.25 \times 0.25\text{m}$ ）

的な評価が難しい。図-5に示すように鉄筋の発錆に対する限界塩分量はある幅（腐食過渡域と呼ぶ）を有して存在しているものと考えられ、これは定量化の難しい酸素量の供給程度のばらつきに起因しているものと推察される。そこで、塩分量に対する腐食率の関係を考察するうえで、この定量的な取扱いの難しい酸素量に対しては、酸素供給程度が確率変数としてばらついているものと仮定し、統計的に処理することにした。

4. 2 腐食過渡域の仮定と限界塩分量の推定

3. 3で述べた処理を施して腐食状態が均一でない偏ったケースを棄却した。さらに2. 1で述べたように、浮き上がりまたは剝離が広い範囲で発生している塩害末期の状態を調査の対象からはずした。これら2つの処理を通したデータは、図-7のように健全または完全な腐食状態である両端の状態を除いた腐食の過渡域を示すものと考えられる。本報では、この腐食の過渡域は酸素の供給程度のばらつきに起因されるものと考え、図-7に示すように酸素の供給程度が正規分布しているものと仮定して、腐食に対する塩分量の上・下限界を推定することにした。推定に用いた塩分分析データは、可溶性塩分に対して図-5、全塩分に対して図-8（ただし、それぞれの図中には腐食率10%未満のデータも含んでいる）に示したものであり、試算の結果は表-2に示している。図-5、8によると、推定に使用されたデータは上・下限界側に片寄っておりその中間領域のデータが少ない傾向が見られる。この理由としては、2. 1で述べたように著しく劣化したものを調査対象の部位から棄却したことに起因すると推察される。すなわち、腐食過渡域の中間領域では塩分と酸素が相乗的に作用するため腐食の進行が速く、短期間にかぶりコンクリートの劣化にまで達するものと考えられる。

5 考察

5. 1 結果の考察

表-2の下限界は今回の調査データの範囲の中で、酸素が豊富に存在する環境下にある塩分主導型の腐食状態を示し、また上限界は腐食に必要な酸素の供給が限定される腐食しにくい酸素主導型の腐食状態であるとみなすことができる。塩分主導型の腐食は、いわゆる塩害による早期劣化に関係し、コンクリート中の鉄筋の発錆限界値を与えるものと考えることができる。塩分が浸透しやすい橋梁、栈橋の裏面の乾燥している部位が典型的な例である。酸素主導型の腐食は、海中の部位がその典型的な例であり、その例を図-9に示す。この場合の限界値は、図-8の飛沫帯におけるデータに基づく4. 2で推定した上限界（全塩分）とよく対応しているようである。また、酸素の供給が限定される類似な例は、最近塩害対策に使用されている有機系塗膜材でコンクリート表面を被覆処理したものでも生じ、塩分を遮断する効果に加えて、酸素の侵入も防止するので、腐食に対する限界塩分量の下限界を増大させる効果も期待できると考えられる。

5. 2 コンクリートの湿潤環境

本報は、湾内の一般的な飛沫帯に位置するコンクリート構造物を対象としているが、同一構造物内においても海面からの相対位

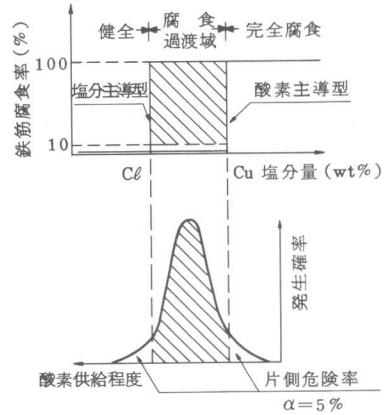


図-7 腐食過渡域確率モデル
表-2 限界塩分量の推定

(単位 wt %)		
	可溶性塩分(20℃)	全塩分
危険率 α	5%	
データ数 n	13	
平均値 $\bar{c}$	0.065	0.124
分散 V_c	0.003	0.013
t 値 $t(n-1, 2\alpha)$	1.782	
$t(n-1, 2\alpha)\sqrt{\frac{V_c}{n}}$	0.028	0.056
上 限 値 C_u	0.093	0.180
下 限 値 C_l	0.037	0.068

注) 下限界 $C_u = \bar{c} + t(n-1, 2\alpha)\sqrt{\frac{V_c}{n}}$
上限界 $C_l = \bar{c} - t(n-1, 2\alpha)\sqrt{\frac{V_c}{n}}$

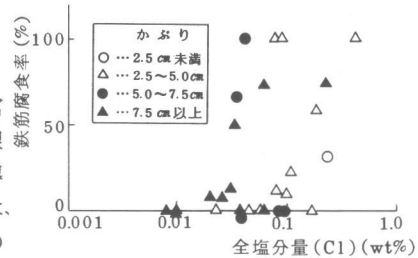


図-8 塩分量と腐食率（その4）
（算定範囲：0.50×0.50 m）

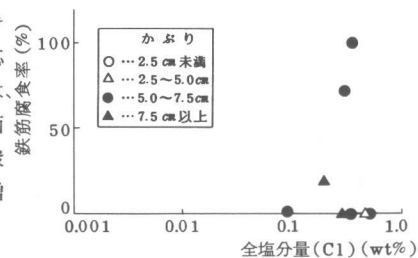


図-9 海水中部材における塩分量と腐食率（その5）（算定範囲：0.50×0.50 m）

置によりコンクリートが局部的に湿潤状態から乾燥状態へと連続的に変化し、種々の状態がある状態を中心にばらついて共存しているものと考えることができる。

松下²⁾らは、湿潤環境下にある海底トンネルの床版コンクリートの鉄筋腐食について報告している。本報と塩分分析および鉄筋腐食の評価方法は異なるが、腐食過渡域が狭く、本報で得られた図-9と同様に、腐食限界塩分量は上限側に収束している。この構造物は海底下にあるため海水の漏洩により常に濡れている湿潤状態にあり、酸素の供給程度が限定され、そのばらつきが小さい状態にあるものと考えられる。またRasheeduzzafar³⁾らは、乾燥気候地帯に属する中東の建築構造物の鉄筋腐食について報告している。全塩分を対象とした塩分分析を実施し、鉄筋の腐食程度の評価については本報と異なる方法を採用しているが、腐食限界塩分量は下限側に位置している。これは図-8の条件に比較してコンクリートは乾燥しており、酸素の供給程度が大きいからであると推察される。この2つの報告例を腐食過渡域確率モデルにあてはめると、酸素の供給程度の差に対応して、腐食過渡域がそれぞれ上限または下限側に移行したのと考えられる。これを概念的に示せば、図-10のようになる。

5. 3 許容塩分量の提案

5. 2で述べたように、酸素の供給程度は主としてコンクリートの湿潤程度に左右され、コンクリート中の鉄筋の腐食に対する限界塩分量は大きく変化する。しかし、湾内の一般的な飛沫帯に位置する乾湿を繰り返す部位に限定すれば、本報で算出した下限値は、鉄筋の発錆の可能性を安全側に判定する1つの指標になると考えられる。したがって、適用に限界があるものの、湾内の飛沫帯にあるコンクリートについて腐食を防止するための塩分量の許容値を設定するとすれば、表-2で求めた限界塩分量の下限値（少数第3位切捨）である可溶性塩分に対して約0.03wt%、全塩分に対して約0.06wt%と定めることができる。

6 まとめ

塩分環境下に位置する実構造物の鉄筋腐食調査データ（腐食率算定範囲0.50×0.50^m、腐食率10%未満のデータ棄却）を考察した結果、次の知見を得た。

- ① 酸素の供給程度のばらつきによる「腐食過渡域」を考慮して、湾内の飛沫帯に位置するコンクリート構造物のデータから、鉄筋の腐食に対する限界塩分量を試算した結果、許容値としては可溶性塩分で0.03wt%、全塩分で0.06wt%となる。
- ② 酸素の供給が限定される海中部位、または塩害対策のために表面被覆を施している部位の場合は、上記の許容値は相当大きくなることが予測される。

本報で用いたデータは、暴露期間が30年から60年経過した比較的古い構造物から得たものである。これに対して、現在使用されている多くのコンクリートは、混和剤を添加したレディミクストコンクリートであり、今後この種のコンクリートを使用した新しい構造物に対しても同様な調査を実施して今回提案した塩分量の許容値を検証したい。また本報では、鉄筋腐食の程度を目視により判断したデータに基づいて検討したが、鉄筋の断面ロスを定量的に求めたデータに対しても同様な考え方で検討しており、別の機会に報告したいと考えている。

参考文献

- (1) 小林，出頭他：各種セメント系材料の酸素及び塩素イオンの拡散性状：第7回コンクリート工学年次講演会論文集 1985年，pp89～92
- (2) 松下他：海水の侵食による鉄筋の腐食（関門トンネル車道床版の調査）：セメント技術年報32 1978年，pp17～20
- (3) Rasheeduzzafar et al：Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures in the Middle East：Concrete International 9, 1985 pp48～55

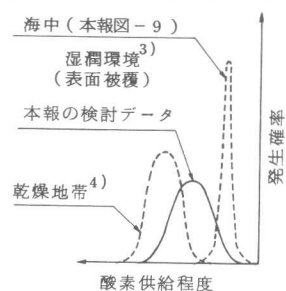


図 10 湿潤環境に対応した酸素供給程度の分布