

[37] 塩分浸透を受けたコンクリート構造物の実態調査

正会員 ○長内 進 (東京電力建設部)
 正会員 宮本幸始 (東京電力建設部)

1. まえがき

東京湾内のような比較的波浪条件の厳しくないところでも、干満帯、飛沫帯にあるかぶりの少ないコンクリートでは、外部からの浸透塩分により一定年月の経過と共に、いわゆる「塩害」による劣化が見られることがある。コンクリート構造物の塩害のパターンは、海砂の使用などによる塩分あるいは海洋環境下で外部から浸透する塩分の影響によって鉄筋が腐食し、この腐食膨張圧によってコンクリート表面部に鉄筋に沿ったひびわれが発生したり、浮き、はく離を伴った損傷を呈するものと考えられる。塩害で劣化が進行したコンクリートの補修は、以後の劣化進行を防止するため、腐食鉄筋周辺の塩分浸透したコンクリートをはつとり、鉄筋防錆処理、断面修復の後にコンクリート表面に塩分浸透防止の塗装を行うなど、大がかりなものとなることが多い。このため塩害発生の可能性について的確に診断し、早期に対策を講じることが、経済的な設備の維持管理にとって重要なこととなる。塩害に対する耐久性の評価については、外観の変状調査、コンクリート中の塩分量の推定などが有力な手段となる。

本報告は、湾内の塩分環境下に立地するコンクリート構造物の維持管理に関する劣化判定基準確立の一環としてその基礎資料を得ることを目的に、同種環境に30～60年間暴露されていた実構造物の実態調査の結果ならびにその評価について述べたものである。

2. 調査概要

2.1 調査対象構造物

図-1、表-1に調査対象構造物の概略位置と一覧をそれぞれ示す。これらの構造物は、発電機能が老朽化したため休止の後撤去することになった火力発電所の土木施設の一部であり、休止期間が長く、その間特別な補修は実施していない構造物である。場所的には、東京湾内に位置し、海面下、飛沫帯あるいは海面上で護岸に隣接した場所に設置された、いわゆる塩分環境下におけるコンクリート構造物である。

2.2 調査、分析項目とその方法

2.2.1 外観調査

調査対象部材より、調査範囲1.0m×1.0mを選定した後、外観調査を実施した。この調査では、ひびわれ、浮き、はく離、錆汁などを観察してスケッチすると共に、塩害に係わる外観損傷の指標値として表-2に定義するような変状進行度やひびわれ(外力、温度など鉄筋腐食以外に起因していると考えられるものは除く)の長さを求めた。また、このひびわれ長さを全面積で除して算定する「ひびわれ密度」を設定した。

2.2.2 内部調査

(1) 鉄筋の腐食調査; 外観調査に供した同一部材において、かぶりコンクリートをはつとりとった1.0m×1.0mの範囲(比較のために0.5m×0.5mと0.25m×0.25mの2ケースについても実施)で、鉄筋径、かぶり、鉄筋の腐食程度等を測定した。腐食程度については、

(周面赤錆に至っている長さ) + (断面損失に至っている長さ)

$$\text{鉄筋の腐食率 (\%)} = \frac{\text{鉄筋の腐食長さ}}{\text{(調査範囲の全鉄筋の長さ)}} \times 100 \quad \text{--- ①}$$

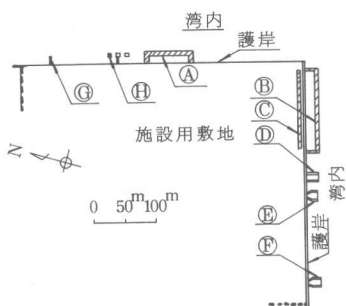


図-1 調査構造物概略平面位置図

表-1 調査対象構造物一覧

構造物種類	暴露期間	部材種類	調査ヶ数	備考
A	58年	スラブ	8	飛沫帯
		柱	2	〃
		梁	3	海面下
		杭	4	〃
B	32年	スラブ	8	飛沫帯
		梁	2	〃
		井筒	2	海面下
C	32年	前壁	10	海岸線
		控え壁	5	〃
D	58年	壁	1	飛沫帯
E	32年	〃	1	〃
F	31年	〃	1	〃
G	23年	スラブ	2	〃
H	8年	ドレン	1	〃
合計			50ヶ所	

以下に定義する腐食率や断面ロス率によって定量的にとりあつた。「腐食率」は、目視により鉄筋周囲が赤錆に至っているものおよび断面損失に至っているものをそれぞれ塩分による腐食と考え、その長さを求めることによって①式（前頁参照）にしたがい算定した。「断面ロス率」は、各部材より10～20cmの長さのサンプルを採取し、1Nのクエン酸アンモニウム溶液中に5日間浸漬して錆を落してからの重量と腐食する前の重量（鉄筋径より推定）に対する百分率として求めた。

(2) 塩分調査；外観調査後、調査範囲の中央部で鉄筋を避けてφ10cmのコンクリートコアと鉄筋位置（断面ロスしている部分）ではつり片とを採取して、塩分分析の試料とし、コンクリートコアについては、表層から5cmまでは1cm厚、11cmまでは2cm厚のスライスにして、計8層の試料を作成した。塩分分析は、JCIの提案している方法¹⁾に準じて、可溶性塩分と全塩分について実施した。なお、可溶性塩分分析については、JCIが提案する以前より継続実施していたので、抽出温度は50℃ではなく20℃で行っている。塩分量は、コンクリート乾燥重量に対する「塩素イオン」の重量wt%として求めた。

2.2.3 調査、分析データによる統計処理

外観の変状より、コンクリート内部の状況を定量的に把握することは、塩害の早期発見に役立つばかりか、設備の維持管理のための具体的な対応策を決める上で非常に有意義である。ここでは、前述の外観ならびに内部の調査、分析データに基づき、変状進行度、ひびわれ密度などの外観の損傷指標と、鉄筋腐食率あるいは塩分量などの内部劣化状況との間の相関を見出すため統計処理を実施した。その基本的な組合せを表-3に示す。

3. 結果および考察

3.1 コンクリート中の塩分量

図-2に調査結果の代表例としてコンクリート中の可溶性塩分の分布を示す。構造物種類ごとに各々の深さにおける平均値mを実線で、 $m \pm \sigma$ (σ ；標準偏差)の範囲を破線でそれぞれ示している。可溶性塩分量はコンクリート表面部に多く、内部になるにつれて減少する。A、B、Cの塩分量を比較すると、暴露期間が58年のAより、32年と短いBの方が大きな値になり、同じく暴露32年のCは、A、Bに比べて著しく小さな値になっている。コンクリートの配合、強度の調査結果ではほとんど差異がなく、これら塩分量の深さ分布データを基に試算した塩分浸透程度の指標値となる拡散係数を比べると、AよりもBの方が5～6倍大きく、CはAとBの中間的な値になっている。また、立地条件はA、Bともに海面から2m内外の飛沫帯で、かつ90°接岸角がづれたところに位置し、Cだけが護岸から10m離れた海岸線に位置している。したがって、Bの塩分量がAのそれよりも大きな理由としては、局部的な塩分環境の相違のほか、配合、強度だけでは評価できないコンクリートの品質の違いを示唆するものであり、Cの塩分量がA、Bのそれよりも極端に小さいのは、護岸より10m離れている

表-2 変状進行度の定義（外観損傷の指標値）

変状進行度	変状の状態
0	異常なし。
I	コンクリートにひびわれはないが、錆汁による変色が見られる。
II	鉄筋に沿ったひびわれが散見される。
III	鉄筋に沿ったひびわれがさらに発達し表面に浮きが見られる。
IV	かぶり部コンクリートにはく離が見られる。
V	鉄筋が破断またはそれに近い状態にある。

* コンクリート表面が浮き上っている状態（はく離の一步前）

表-3 統計処理の基本的な組合せ

被説明変数	説明変数
鉄筋腐食率	変状進行度
断面ロス	ひびわれ密度
塩分量	かぶり

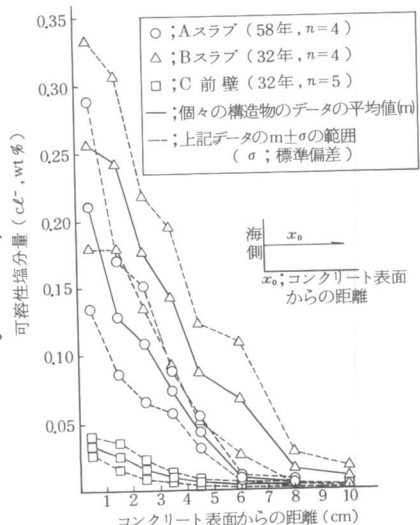


図-2 コンクリート中の可溶性塩分量

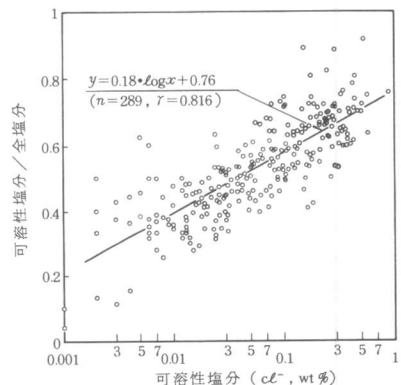


図-3 全塩分と可溶性塩分との関係

というわずかな立地条件の違いが、それぞれ原因しているものと推察される。このことより、湾内のように比較的平穏な塩分環境下においては、立地条件等塩分環境の微妙な差異によってコンクリート中へ浸透する塩分量が大きく変化し、陸域では塩分浸透の程度は相当に小さくなるのがわかる。

次に、図-3に可溶性塩分と全塩分との比の関係を示す。コンクリート中の塩分には、水に可溶性の塩分と複塩として固定される可溶性でない塩分とが存在する。この固定される塩分量は、全塩分量に対して40～80%程度である^{2) 3)}とも言われている。今回の結果では固定される塩分量は、可溶性塩分の少ない領域で約80%、大きい領域で約20%になっており、上述の値にきわめて近く、しかも図示のような比較的相関のよい回帰式が得られ、可溶性塩分から全塩分を推定できることを示唆している。

3.2 外観の変状と内部の劣化状況

表-3に示すような外観の変状と内部の劣化状況との基本的な組合せによって統計処理を行った結果、つぎのものに相関性(有意水準5%)が認められた。

①鉄筋腐食率と変状進行度、②鉄筋腐食率とひびわれ密度、③塩分量とひびわれ密度、
これらの結果の代表例として、図-4、5に鉄筋腐食率と変状進行度、鉄筋腐食率とひびわれ密度との関係をそれぞれ示す。

図-4は、相関が得られたと言っても定性的な損傷の指標値の変状進行度0～Vに対して、単に0～5の数学的な数字を与えているので目安程度にしかかなり得ない。例えば、ランクIIであってもIに近いものからIIIに近いものまでである。図-5は、ひびわれ密度と鉄筋腐食率との相関がよく、ひびわれ密度で鉄筋の腐食程度を推察できることを示唆している。

3.3 鉄筋の腐食

図-6、7にそれぞれ鉄筋腐食率、鉄筋断面ロス率と可溶性塩分量(鉄筋位置での値)との関係を示す。ただし、データは海面下のサンプルを除いたもので、かつ腐食率は測定範囲0.5m×0.5mに狭めたものである。

今回の結果から塩分量に着目すると、鉄筋腐食率が急激に増大するところの可溶性塩分量が腐食の限界値と考えることができる。この値は、図-6より0.02～0.03%とみなすことがで、鉄筋断面ロスについても、同様に図-7より限界可溶性塩分量は0.02～0.03%で上記の値と同じであるとみなすことができる。

3.4 劣化判定への反映

以下、現在策定を試みている塩分環境下におけるコンクリート構造物の劣化判定手法への反映について考察する。

設備の劣化度は、まず定期点検の目視により一次判定を行う。目視による判定では、定性的な変状進行度を

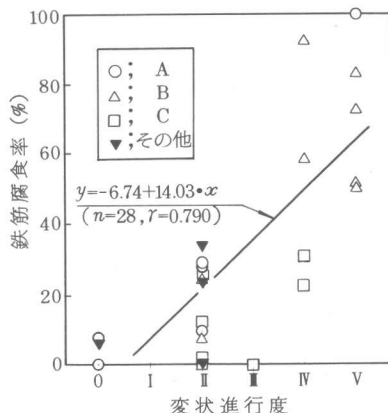


図-4 鉄筋腐食率と変状進行度との関係

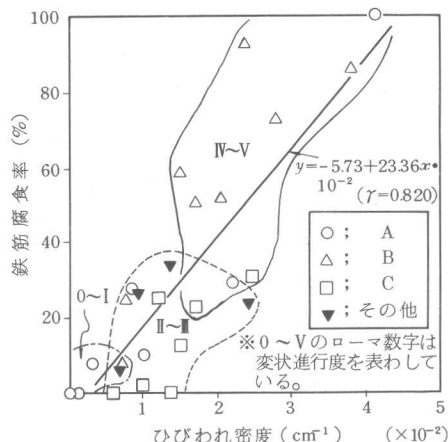


図-5 鉄筋腐食率とひびわれ密度との関係

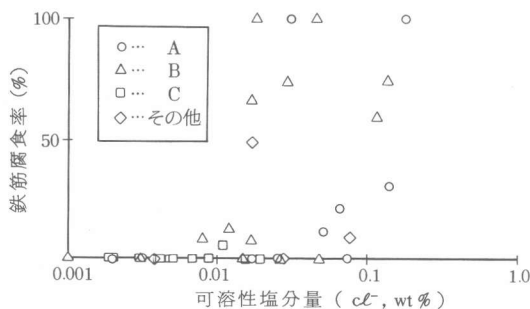


図-6 鉄筋腐食率と可溶性塩分量との関係

表-4に示すような7つの管理項目に細分割して半定量的に構造物を評価する。図-5は、この中の1つの管理項目、ひびわれ密度によって鉄筋の腐食状態に基づく健全度判定基準値を提案できることを示している。例えば、ひびわれ密度が $3 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ 以上の範囲は、鉄筋腐食率が70%以上であるため、構造物としては、直ちになんらかの措置を必要とするか、詳細調査に移行するかのどちらかに判定される。またひびわれ密度が $0.5 \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ 未満においては、鉄筋腐食率が10%以下であり、この程度なら、鉄筋の大部分が損傷を受けていないと推察され、構造物としては、健全であると判断することができる(腐食率の計算の中に錆の軽微な周囲の赤錆まで含めている)。一方ひびわれ密度が $(0.5 \sim 3) \times 10^{-2} \text{cm}^{-1}$ の中間領域は、腐食率が0~70%でありバラツキが大きい。この場合、ひびわれ密度だけから一概に構造物が健全であるか、なんらかの措置が必要であるのか、の判断が難しい。このように、目視結果から直接劣化度を判定できないものについては二次判定として①塩分分析を必要とするもの②さらに塩分分析以上の詳細調査を必要とするものに分けて、それぞれ判定することになる(図-8参照)。

4. まとめ

以上、今回の調査結果によって、ひびわれ密度を主とした外観の変状よりコンクリート内部状況である鉄筋の腐食率を半定量的に求めることができ、これを目視による劣化判定の一部に反映させることが可能であることがわかった。また、鉄筋腐食の限界可溶性塩分は0.02~0.03wt%というデータが得られた。しかし、今回得られたデータは場所、環境、コンクリートの品質など種々の条件において限定されたものである。塩分環境下のコンクリート構造物の劣化判定基準の確立のために、さらに異なった環境、構造物等のデータを蓄積、分析し、その結果を反映させていく予定である。

参考文献

- (1) 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(案)" 1985年12月
- (2) 岡田、宮川、"塩分雰囲気中における鉄筋の腐食" コンクリート工学, Sept.'79
- (3) 関、"コンクリート構造物の劣化機構" 第4回日港連セミナー, 昭和61年

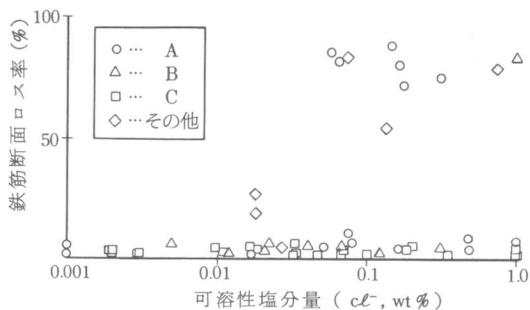


図-7 鉄筋断面ロス率と可溶性塩分量との関係

表-4 管理項目とその評価

管理項目	管理内容(目標値)	評価	管理項目	管理内容(目標値)	評価
ひびわれの状況	局所的でかつ主筋直角方向に沿ったもの。	○	鉄筋腐食状況	腐食が認められない。	○
	比較的本数が多く主筋直角方向に沿ったもの。	△		赤錆程度または露骨表面的な腐食が認められる。	△
	主筋直角方向に沿ったもの。	×		断面欠損を生じている。	×
幅(暫定値)	0.05程度未満のもの。	○	はく離状況	はく離が認められない。	○
	0.10m/m程度のもの。	△		はく離が局部または鉄筋の位置まで達していない。	△
	0.20m/m以上のも。	×		かぶり部コンクリートに剝離または浮き上がりが見られる。	×
	0.005cm ¹ 程度のも。	○		外観上ほとんど異常が認められない。	○
密度(暫定値)	0.005~0.03cm ¹ 程度のも。	△	コンクリートの表面状態	豆板、ジャンカが表面的または部分的に認められる。	△
	0.03cm ¹ 以上のも。	×		ジャンカ、コールドジョイント等が認められ表面劣化程度が著しい。	×
	錆汁の状況	錆汁による変色が目視できる範囲で見られない。		○	ひびわれはないが錆汁による変色が認められる。
鉄筋の状況	ひびわれ部に錆汁が認められる。	×			

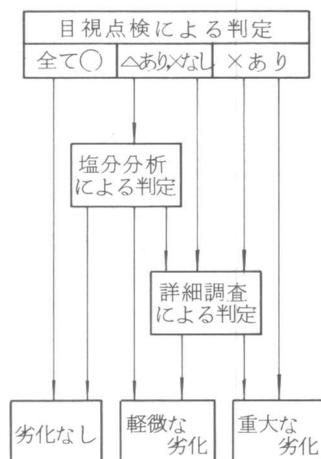


図-8 塩害劣化判定フロー(案)