

腐食による鉄筋コンクリート構造物の寿命予測

太田 達見
(技術研究所)

入野 一男
(電力・エネルギー本部)

§1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の寿命は半永久的と言われてきた。しかし、近年海砂の使用あるいはアルカリ骨材反応等によって、さまざまな劣化現象を呈した構造物の事例が、各所から報告されている。

一般に、鉄筋コンクリート構造物に対する劣化要因としては、塩分、中性化、熱、アルカリ骨材反応、凍結融解等が考えられる。また、これらの劣化要因によって引き起こされる劣化現象としては、コンクリートに関してはひび割れや強度低下、鉄筋に関しては腐食が挙げられる。

これらの劣化要因に対する構造物の寿命は、予め構造物に課せられる要求性能を定めておけば、劣化によってその性能が阻害される時点を求めることで予測することができる。しかし、要求性能が阻害される時点を求める手法、すなわち寿命予測手法に関しては、現在のところ十分に確立されているとは言えない。

ただし、中性化に関しては、岸谷¹⁾や依田²⁾がその予測式を提案しており、中性化に起因する寿命を「鉄筋位置に中性化が進行するまでの期間」と定めれば、寿命を予測することができる。また、これらの予測式を実際の構造物に対して適用した例は、各種の研究報告で発表されており、予測結果は概ね実測結果を説明しうるものとなっている。また、塩分による鉄筋腐食の予測に関しては、森永³⁾が、材料・構造・環境条件をパラメータとして行った一連の実験結果に基づき、「鉄筋腐食によりかぶりコンクリートにひび割れが生じるまでの期間」を構造物の寿命とした寿命予測式を導いている。

しかし、劣化構造物に対する既往の調査事例には、寿命予測の観点から行われたものはほとんどない。そこで、本報では、塩分に起因する鉄筋腐食に関して、森永が導いた予測式に基づく寿命予測手法の提

案を行うとともに、絶えず塩分が供給される環境下で、ある程度の年数を経過した鉄筋コンクリート構造物を調査し、その調査結果と寿命予測結果とを比較することにより、寿命予測手法の適用可能性について検討を行った。

§2. 寿命予測手法

2.1 寿命予測の概念

鉄筋腐食に起因する鉄筋コンクリート構造物の寿命は、その構造物への要求性能が阻害されるさまざまな劣化段階で定義することができる。本報では、その要求性能が阻害される時点(寿命)を、鉄筋腐食で構造的機能の低下が懸念され、かつ利用者の安全性が脅かされるようになる時点と考え、森永³⁾が提案したのと同様に「鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが生じるまでの期間」とした。

このように設定した寿命を評価するため、鉄筋コンクリート構造物が寿命に達するまでの劣化の進行を図-1のようにモデル化した。今回の寿命予測は、

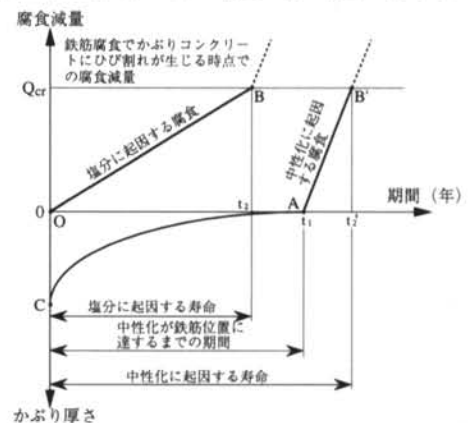


図-1 鉄筋腐食による寿命予測の概念³⁾

塩分に起因する鉄筋腐食を対象としたものであるが、図には他の重要な因子である中性化による劣化の概念も併せて示す。図-1において、横軸はコンクリート打設時点からの期間(年)を、縦軸は0点から上方に鉄筋の腐食減量を、0点から下方にかぶり厚さを示す。

このうち、塩分に起因する腐食に関しては、0点から直ちに腐食が始まり、期間 t_2 でかぶりコンクリートにひび割れが生じる腐食減量 Q_{cr} となり、寿命に達すると考える。

一方、中性化に起因する腐食に関しては、0点から下方にとったかぶり厚さの軸上のC点から中性化が始まり、期間 t_1 に達すると鉄筋が腐食し始め、同じく腐食減量が Q_{cr} になる期間 t_2' を寿命と考える。

本来、コンクリート中に塩分が含まれる場合には、塩分に起因する寿命 t_2 と中性化に起因する寿命 t_2' のうち短い方を寿命とすべきであるが、今回の調査対象のように絶えず塩分が供給される環境下の構造物では、塩分に起因する寿命が支配的であると考えられる。したがって、本報では、 t_2 までの期間、すなわち「塩分による鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが生じるまでの期間」を2.2に示す式を準用して評価する。

2.2 寿命予測式

鉄筋コンクリート構造物(部位)の塩分に起因する寿命(t)は、鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが生じる時点での腐食減量(Q_{cr})を、構造部位の材料・構造・環境条件から定まる腐食速度(q)で除して、求めることができる。すなわち、

$$t = Q_{cr} / q \quad \dots\dots(1)$$

ここで、

t : 塩分に起因する寿命(年)

Q_{cr} : 鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが生じる時点での腐食減量 ($\times 10^{-4}$ gf/cm²)

q : 鉄筋の腐食速度 ($\times 10^{-4}$ gf/cm²/年)

式(1)の Q_{cr} および q は、森永が行った一連の実験結果に基づいて導いた式(3)で表される。 Q_{cr} に関しては、

1) かぶりコンクリートにひび割れを生じさせるのに必要な圧力を求める実験

2) 鉄筋を腐食させ、かぶりコンクリートにひび割れが生じる時点の腐食減量を求める実験を行い、

両実験結果に基づき、かぶり厚さおよび鉄筋径で Q_{cr} を表す式を導いている。すなわち、

$$Q_{cr} = 0.602d \left(1 + \frac{2c}{d} \right)^{0.85} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、

c : かぶり厚さ (mm)

d : 鉄筋径 (mm)

一方、 q に関しては、

1) 水セメント比、塩分量、かぶり厚さ、鉄筋径等を変えた供試体を屋外暴露し、供試体に埋め込んだ鉄筋の腐食減量を経時的に測定する実験

2) 塩分を含んだセメントペーストでコーティングした鉄筋供試体を環境条件を変えて暴露し、鉄筋の腐食減量を経時的に測定する実験を行い、水セメント比、塩分濃度、鉄筋径、かぶり厚さ、温度、湿度、酸素濃度で q を表す式を導いている。すなわち、

$$q = q_1 \times q_2 / q_2' \quad \dots\dots(3)$$

ここで、

$$q_1 = \frac{d}{c^2} [-0.51 - 7.60N + 44.97(W/C)^2 + 67.95N(W/C)^2] \quad \dots\dots(4)$$

q_1 : 塩分を含むコンクリート中での腐食速度 (温度15°C、湿度69%、酸素濃度20%の条件下の打放しコンクリートでの値)

N : 練混ぜ水に対するNaClとしての塩分濃度 (%)

W/C : 水セメント比 (%/100)

$$q_2 = 2.59 - 0.05T - 6.89H - 22.87O - 0.99N + 0.14TH + 0.51TO + 0.01TN + 60.81HO + 3.36HN + 7.32ON \quad \dots\dots(5)$$

q_2 : 寿命予測対象部位の、塩分を含むコンクリート中での腐食速度 ($\times 10^{-4}$ gf/cm²/年)

$$q_2' = 0.56528 + 1.4304N \quad \dots\dots(6)$$

q_2' : 寿命予測対象部位の標準条件 (温度15°C、湿度69%、酸素濃度20%) 下での腐食速度 ($\times 10^{-4}$ gf/cm²/年)

T : 温度 (°C)

H : 湿度に関する項 [$H = (RH - 45) / 100$]

RH : 相対湿度 (%)

O：酸素濃度（%/100）

以上のように、寿命(t)の予測式は、①かぶり厚さ、②鉄筋径、③塩分濃度、④水セメント比、⑤温度、⑥湿度、⑦酸素濃度の7個のパラメータによって構成される。

§ 3. 調査概要

前述の寿命予測手法を実際の構造物に適用することを目的として、現位置調査を行った。調査に際しては、寿命予測に必要なパラメータ（かぶり厚さ、鉄筋径、塩分濃度、水セメント比）を明らかにすることを基本方針とした。また、対象とする構造部位において、存在するひび割れが鉄筋腐食に起因するものであるか否かを特に注意して観察すること

とした。以下に、調査の概要を示す。

3.1 調査対象

調査の対象とした鉄筋コンクリート構造物は、調査の時点で建設後約30年を経過している東京湾内の運河に面した発電所の放水口構造物である。その概要を図-2に示す。

3.2 予備調査

調査を行う前に、放水口構造物の外観予備調査を行った。予備調査では、各開口部の四周の壁を目視観察し、コンクリートの表面状態の概略を記録した。その結果を図-3に示す。

3.3 調査箇所

予備調査結果に基づいて、調査箇所を定めた。調査箇所は、ひび割れと鉄筋腐食との関係を明らかにするため、コンクリート表面にひび割れが認められる箇所と認められない箇所の両方が含まれるようにした。また、コンクリート内部の塩分量が位置により異なると考えられるため、飛沫帯および干満帯、さらには、部材の両側が海水に接する部位、および部材の片側が海水に、片側が土に接する部位から調査箇所を選定した。なお、側壁に関しては、一般部（角落し部以外の部位）に加えて、かぶり厚さが少ないと考えられる角落し部についても調査することとした。

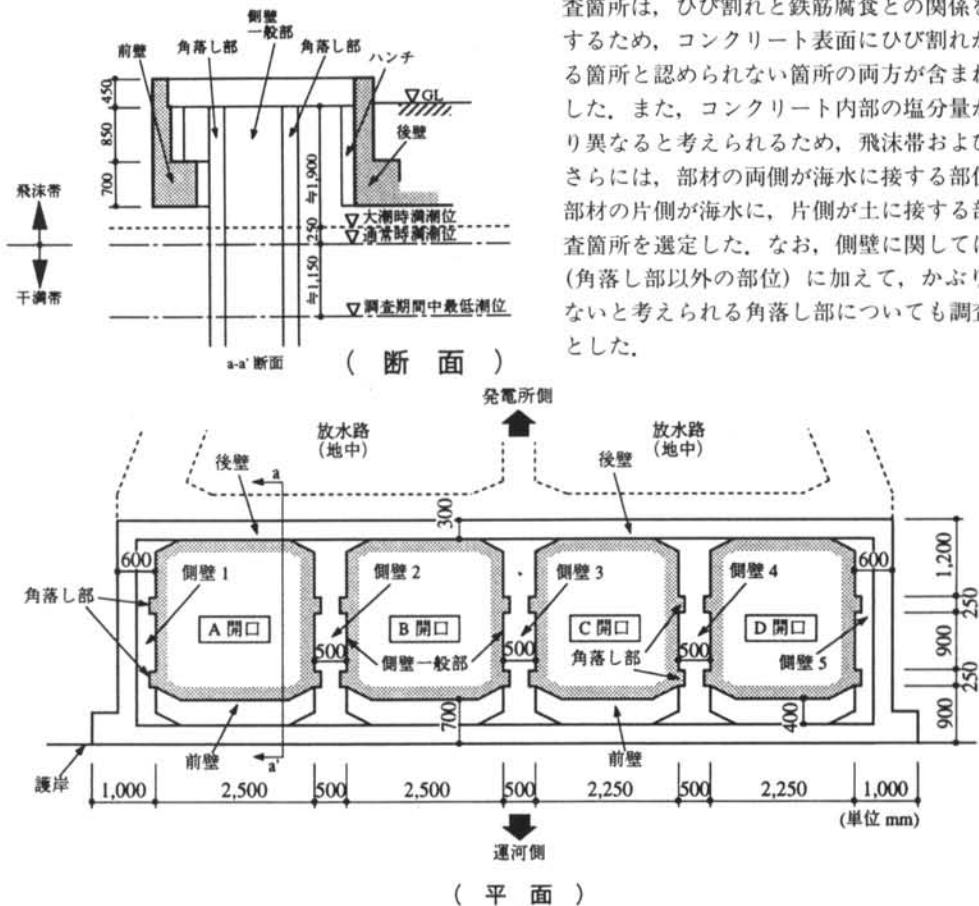


図-2 放水口構造物の概要

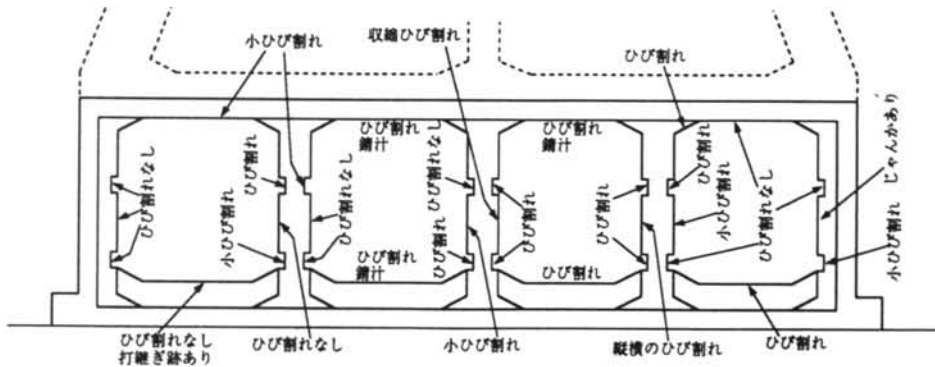


図-3 外観予備調査結果

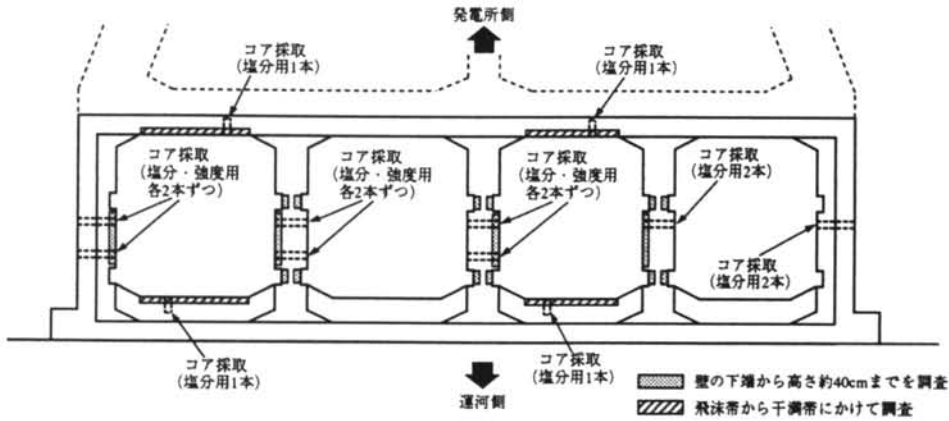


図-4 調査箇所概要

開口	壁名	部位	壁体が接する面		ひび割れ	調査区分	
			海水	土		飛沫帯	干満帯
A	鋼壁1	一般部	○	○	×	○	○
A	鋼壁2	一般部	○	—	×	○	○
A	鋼壁2	角落し部	○	—	×	○	○
A	前壁※	—	—	—	×	○	—
A	後壁※	—	—	○	○	○	—
B	鋼壁2	角落し部	○	—	×	○	○
B	鋼壁3	角落し部	○	—	○	○	○
C	鋼壁3	一般部	○	—	○	○	○
C	鋼壁3	角落し部	○	—	○	○	○
C	鋼壁4	一般部	○	—	○	○	○
C	鋼壁4	角落し部	○	—	○	○	○
C	前壁※	—	—	—	○	○	—
C	後壁※	—	—	○	○	○	—
D	鋼壁4	角落し部	○	—	○	○	○

注) ※はコールドジョイントがあることを示す。
ひび割れの欄で、○はひび割れありを、×はひび割れなしを示す。

表-1 調査箇所一覧

以上のように選定した調査箇所を、図-4および表-1に示す。なお、本報では、干満帯を潮が干満を繰り返す領域とし、飛沫帯を干満帯より上部の領域と定義する。

3.4 調査方法

調査は、以下の項目を実施した。

(1) 現位置調査

(a) コンクリート表面状態とひび割れ状況の観察

調査箇所は、表面に付着していた貝殻等を除去した後、コンクリートの表面状態を目視観察し、その特徴（錆汁、剝離跡、浮き、豆板の有無等）を記録した。

その際、ひび割れが認められる箇所については、ひび割れの位置、長さおよび幅を測定し、ひび割れ図を作成した。また、そのひび割れが鉄筋腐食によるものか否かを確認するため、ひび割れが鉄筋に沿っているか、あるいは鉄筋の直交方向に生じているかを観察した。なお、鉄筋が露出している（かぶり厚さ0mm）場合には、鉄筋に沿うひび割れが生じていたものとして扱った。

なお、全調査箇所について写真撮影を行った。

(b) 各種試験用コンクリートコアの採取

コンクリートコアは、JIS A 1107に準拠して採

取した。コアは直径10cm、長さは可能な限り部材を貫通するものとし、側壁の各調査箇所に関しては、飛沫帯および干満帯で各々1～2本、また、前壁および後壁に関しては、1調査箇所につき1本、計20本採取した。

なお、コアは採取後、直ちに切断面を清水で洗浄し、各種試験に供するまで外部の空気に触れぬよう密封保管した。

(c)かぶりコンクリートのはつり

各調査箇所のかぶりコンクリートは、側壁一般部に関しては縦筋が2本以上露出する程度(幅50～60cm程度)、角落し部に関しては縦筋に沿って、両部位ともに高さ方向は飛沫帯から干満帯にかけてはつった。一方、前壁および後壁に関しては、ハンチを除く全幅に対して壁下端の横筋が2本以上露出する程度(高さ約40cm)にはつった。なお、はつり深さは鉄筋の裏面が観察できるまでとした。

また、鉄筋に沿ったひび割れが認められた箇所については、そのひび割れが鉄筋腐食に起因し、鉄筋位置から始まっているか否かを判断するために、特に注意しながらはつった。

(d)配筋状況の調査

はつり終わった後、直ちに各鉄筋の位置、間隔および径をメジャー等で測定し、配筋状況図を作成し、ひび割れ図との照合を行った。また、かぶり厚さに関しては、コンクリートをはつり、鉄筋が長さ50cm程度露出した時点で露出した鉄筋の両端部にて測定した。

なお、鉄筋の試料は、縦筋と横筋の交点から交点までを1試料とするのを原則としたが、鉄筋間隔に差がある場合には、鉄筋間隔に応じ、その長さが約10cmを1試料とした。また、各鉄筋試料のかぶり厚さは、露出させた鉄筋の両端部で測定したかぶり厚さを、各試料の中央部にて直線補間して求めた。

(e)鉄筋腐食度および腐食ひび割れの判定

鉄筋の腐食状況は目視にて観察し、表-2に従い腐食度を判定した。ただし、腐食度の判定において、鉄筋の上下面あるいは左右面でグレードが異なっていた場合には、各々のグレードを記録した。

腐食度を判定した後、予め観察したコンクリート表面のひび割れ状況と鉄筋腐食との対応を調べ、そのひび割れが腐食ひび割れか否かを判定した。

ここで、腐食ひび割れとは、鉄筋腐食に起因するひび割れに限定し、他の要因によるひび割れは除いた。すなわち、鉄筋がグレードIIIまたはIVまで腐食

腐食グレード	鉄筋の腐食状況
I	黒皮の状態、または錆が生じているが全体的に薄い緻密な錆であり、コンクリート面に錆が付着していることはない
II	部分的に浮き錆があるが、小面積の斑点状である
III	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周、または全長にわたって浮き錆が生じている
IV	断面欠損を生じている

表-2 鉄筋腐食の判定基準⁴⁾

コアNo.	壁名	採取位置		外観目視	可溶性塩分量	中性化深さ	引張強度および弾性係数	配合割合
		飛沫帯	干満帯					
1	側壁1	○	—	○	—	○	○	○
2	側壁1	○	—	○	○	○	—	—
3	側壁1	—	○	○	—	○	—	—
4	側壁1	—	○	○	—	○	—	—
5	A開口前壁	○	—	○	○	○	—	—
6	A開口後壁	○	—	○	○	○	—	—
7	側壁2	○	—	○	—	○	○	—
8	側壁2	○	—	○	○	○	—	—
9	側壁2	—	○	○	—	○	○	○
10	側壁2	—	○	○	—	○	—	—
11	側壁3	○	—	○	—	○	○	—
12	側壁3	○	—	○	○	○	—	—
13	側壁3	—	○	○	—	○	—	—
14	側壁3	—	○	○	—	○	○	○
15	C開口前壁	○	—	○	○	○	—	—
16	C開口後壁	○	—	○	○	○	—	—
17	側壁4	—	○	○	○	○	—	—
18	側壁4	—	○	○	○	○	—	—
19	側壁5	○	—	○	○	○	—	—
20	側壁5	—	○	○	○	○	—	—

注) 側壁：飛沫帯以外はすべて部材を貫通するコア

表-3 コンクリートコアの試験項目

しており、かつひび割れが鉄筋位置から発達して、コンクリート表面に至っているものを腐食ひび割れと定義した。

なお、鉄筋の腐食状況についても写真撮影を行った。

(2)室内試験(コンクリートコアの各種試験)

コンクリートコアの各種試験は、表-3に示す項目を実施した。なお、各々の試験方法は、表-4に示すとおりである。

3.5 調査結果

(1)現位置調査

(a)コンクリート表面状態とひび割れ状況

各調査箇所について、コンクリートの表面状態(剝離跡、浮き、豆板の有無、ひび割れ等)を観察し、ひび割れ図を作成した。その一例を図-5に示す。コンクリートの表面状態の観察結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) 側壁一般部でひび割れが顕著な部位は、C開口側壁3、4で、側壁3では、収縮ひび割れと思われるひび割れが認められた。一方、側壁4では、縦横に多くのひび割れが認められ、その幅は最大で約0.6mmであった。これらはともに飛沫帯に存在し、干満帯ではほとんどひび割れは認められなかった。
- 2) 上記以外の側壁一般部にはひび割れもほとんどなく、コンクリートに欠陥は認められなかった。

項目	方法
塩分量	日本コンクリート工学協会規準案JCI-SC4に示されている硝酸銀滴定法に準拠する。なお、コアは厚さ1cmの試験片にスライスし、粗骨材を除かず試験に供する。
中性化深さ	コアの側面(コアドリルした面)に1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧し、コンクリート表面側から赤色変色域までの距離を各コア4ヶ所に測定する。
圧縮強度(静弾性係数)	JIS A 1108に準拠する。また、圧縮試験の際ひずみの測定を行い、コンクリート強度の1/3の応力度における割線剛性を求める。
配合分析	セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18に示されている分析方法に準拠する。

表-4 コアの試験方法

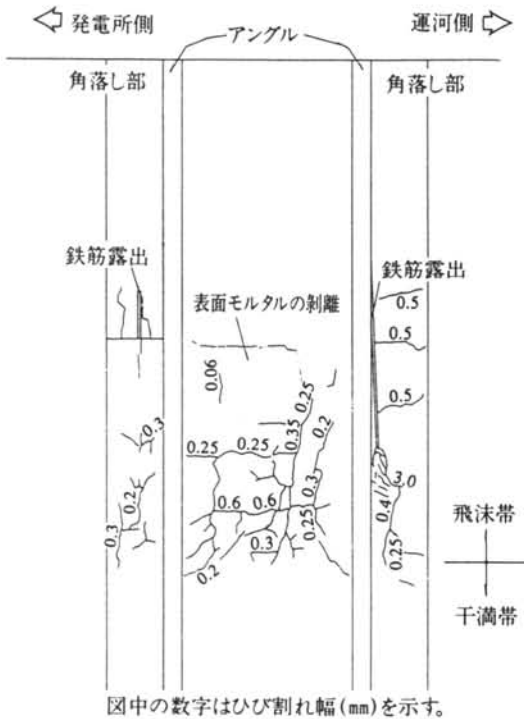


図-5 ひび割れ状況(C開口側壁4)

3) 側壁2、3、4の角落し部は、主に飛沫帯で縦方向のひび割れが多く認められ、その幅は最大で約0.5mmであった。また、表面のコンクリートに浮きや剥落した跡も認められた。

4) 前壁および後壁に関しては、壁下端付近にコールドジョイントによるひび割れが認められ、その幅は最大1.5mm程度であった。

(b)配筋状況

測定結果に基づき、各調査箇所の配筋状況図を作成した。その一例を図-6に示す。

なお、鉄筋はいずれも丸鋼で、径はA開口側壁1の縦筋が19φ、前壁・後壁の横筋が22φ、同じく縦筋(幅止め筋)が9φ、それ以外は13φであった。

(c)かぶり厚さ

かぶり厚さは角落し部と一般部(角落し部以外の部位)とでは、その分布に明らかな差が認められ、角落し部で少なく、平均は23mmであった。一方、一般部では平均で66mmで、A開口側壁1、2、C開口側壁3の縦横筋、ならびに前壁の横筋では80mm以上

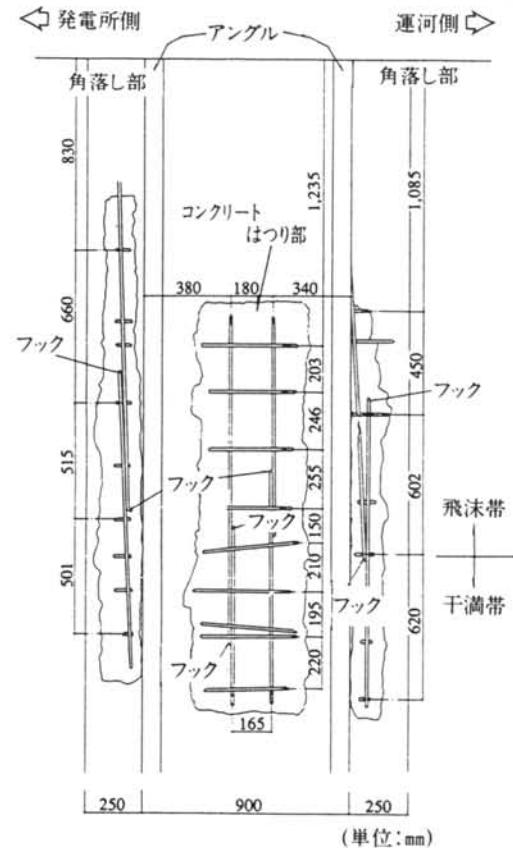


図-6 配筋状況(C開口側壁4)

の箇所も多く見られた。なお、調査した全部位の平均かぶり厚さは49mm、また最大かぶり厚さは113mmであった。

(d)鉄筋の腐食状況

鉄筋腐食状況の目視観察結果をまとめると、次のようになる。

1) かぶり厚さが十分に大きい(約70mm以上)場合(A開口の側壁1, 2の縦横筋, 前壁・後壁の最下端の横筋より一段上の横筋)には、鉄筋は腐食しておらず、健全なものが大多数を占めていた。

2) 飛沫帯でかぶり厚さが少ない(約30mm以下)場合やコールドジョイントが認められた部位(前壁および後壁の最下端の横筋)では、鉄筋は腐食しており、一部断面欠損を起こしていた。

3) 飛沫帯で縦横に多くのひび割れが認められた側壁4では、ほとんどの鉄筋が腐食し断面欠損を起こしていた(写真-1)。このひび割れの多くは腐食ひび割れであると判断した。一方、収縮ひび割れと思われるひび割れが認められた側壁3では、ほとんどの鉄筋が健全であった。

4) 角落し部の縦筋に関しては、飛沫帯と干満帯とで極めて明瞭な差が認められた。すなわち、飛沫帯では鉄筋は腐食し、断面欠損まで至っており、腐食ひび割れを起こしているものが多かったのに対し、干満帯ではほぼ健全であった(写真-2)。

(2)室内試験(コンクリートコアの各種試験)

(a)外観目視

採取したコア全数について、外観目視を行った。その結果、一部のコアに腐食ひび割れが認められたが、いずれのコアにも、反応性骨材による反応リムおよび骨材内部のひび割れ、あるいは豆板等の不良箇所は見当たらなかった。また、骨材は非常に硬く、最大粒径は約40mmであった。

(b)塩分量測定

採取したコアのうち14本について、可溶性塩分量を測定した。その結果をまとめると、次のようになる。

1) 干満帯から採取したコアの塩分量は、一般に表面の塩分量が多く、コア中央に向かって単調減少する傾向が認められ、表面から150~200mm入った位置においては、ほとんど浸透していなかった。

2) 飛沫帯から採取したコアの塩分量は、表層近傍にピーク値が存在し、コア中央および表面に向かって減少しているものが多かった。また、干満帯と同様に、表面から150~200mm入った位置では、塩分

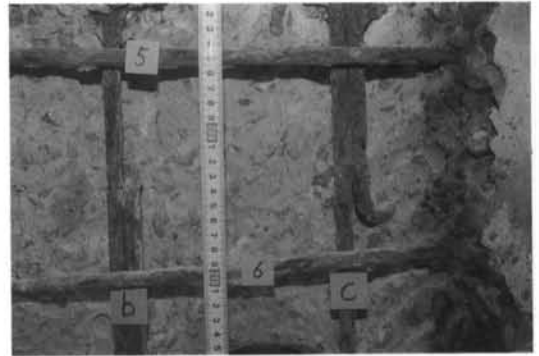


写真-1 鉄筋腐食状況(C開口側壁4)



写真-2 鉄筋腐食状況(B開口側壁2角落し部)

の浸透は見られなかった。

3) 初期塩分量は、コアを採取した箇所によって違いが見られ、コンクリート重量に対するCl⁻量として0.001~0.03%の範囲にあり、その平均値は約0.005%であった。

(c)中性化深さの測定

採取したコア全数について、中性化深さの測定を行った。その結果を表-5に示す。

中性化深さは、飛沫帯では20mm以上の箇所が認められたが、干満帯では2mm程度で、中性化はほとんど進行していなかった。

(d)圧縮強度

採取したコアのうち6本について、圧縮強度試験

コアNo.	壁名	中性化深さ (mm)			
		飛沫帯		干満帯	
1	側壁 1	9.8	—	—	—
2	側壁 1	16.0	—	—	—
3	側壁 1	—	—	2.5	—
4	側壁 1	—	—	3.1	—
5	A開口前壁	7.0	—	—	—
6	A開口後壁	5.7	—	—	—
7	側壁 2	28.6	26.8	—	—
8	側壁 2	21.0	27.1	—	—
9	側壁 2	—	—	1.0	0.0
10	側壁 2	—	—	0.2	0.0
11	側壁 3	19.8	8.2	—	—
12	側壁 3	20.3	11.9	—	—
13	側壁 3	—	—	1.4	3.1
14	側壁 3	—	—	3.3	2.1
15	C開口前壁	8.2	—	—	—
16	C開口後壁	1.6	—	—	—
17	側壁 4	15.6	15.9	—	—
18	側壁 4	—	—	2.6	0.0
19	側壁 5	4.9	—	—	—
20	側壁 5	—	—	5.8	—
平均値		14.6		1.9	

注) 測定結果が2つあるのは、コアの両端部で測定したことを示す。

表-5 中性化深さ測定結果

を行った。その結果を表-6に示すが、圧縮強度は施工記録による設計基準強度(180kgf/cm²)をいずれも上回っていた。

(e)配合分析

圧縮強度試験用に採取した6本のコアのうち、3本のコアについては、1本のコアを二分し、一方を圧縮強度試験に、もう一方を配合分析に供した。その結果、表-7に示すように、推定した水セメント比は各コアで大きく異なっていた。また、圧縮強度と水セメント比との対応も明確ではなかった。

§4. 調査結果の検討

現位置調査結果に基づいて、ひび割れ・鉄筋腐食・かぶり厚さの関係について検討を行った。

図-7および図-8に、飛沫帯および干満帯における表面ひび割れとその位置での鉄筋腐食度との関

コアNo.	1	4	7	9	11	14
コア採取位置	側壁1 飛沫帯	側壁1 干満帯	側壁2 飛沫帯	側壁2 干満帯	側壁3 飛沫帯	側壁3 干満帯
圧縮強度(kgf/cm ²)	411	427	205	417	218	226
静弾性係数(×10 ⁴ kgf/cm ²)	3.23	2.17	2.12	2.58	2.31	1.97
ポアソン比	0.203	0.153	0.172	0.195	0.159	0.221

表-6 コンクリートコアの力学試験結果

コアNo.	表乾時単位 体積重量 (kg/m ³)	セメント量 C [*] (kg/m ³)	骨材量 G [*] (kg/m ³)	水量 W [*] (kg/m ³)	推定水セメント比 W/C [*] (%)
1	2429	236	2069	124	52.5
9	2290	319	1772	199	62.4
14	2435	185	2119	131	70.8

注:セメントおよび骨材の化学分析値は、セメント協会コンクリート専門委員会報告F-18の記載値を採用した。

*:表乾時の値

表-7 配合分析結果

係を、

- i) 腐食ひび割れを起こしている場合、
- ii) 腐食以外の要因でひび割れを起こしている場合、
- iii) ひび割れなしの場合

とに分けて、かぶり厚さ別にそれぞれヒストグラムで示す。

また、それらの調査結果を腐食ひび割れの割合とかぶり厚さの関係にまとめ直したものを、図-9に示す。検討結果は、以下のとおりである。

4.1 飛沫帯

飛沫帯においては、図-7および図-9に示すように、かぶり厚さが60mm以下の場合に腐食ひび割れが生じており、特にかぶり厚さが30mm以下で顕著である。

腐食ひび割れを起こしている場合には、ごく一部の試料を除いて、鉄筋の腐食度はグレードIVであり、断面欠損を生じる程度まで腐食することが窺われる。

また、腐食以外の要因でひび割れを起こしている場合には、コールドジョイント部や収縮ひび割れ部等の試料が含まれている。このうち、コールドジョイント部でかぶり厚さが30~70mmの箇所では、鉄筋の腐食度はグレードIVのものが多くなっている。このように、コンクリートに当初から著しい欠陥が存在する場合には、かぶり厚さが70mm程度あったとしても、鉄筋は腐食し断面欠損を起こす可能性が高いと言える。

これに対して、かぶり厚さが約70mm以上で認めら

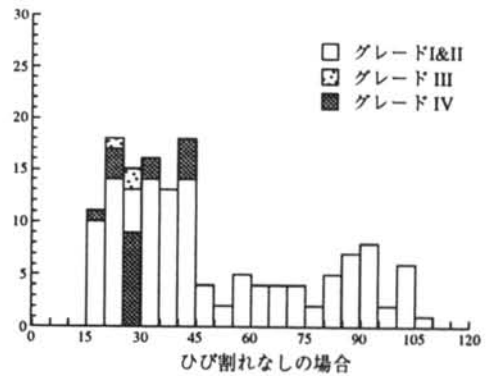
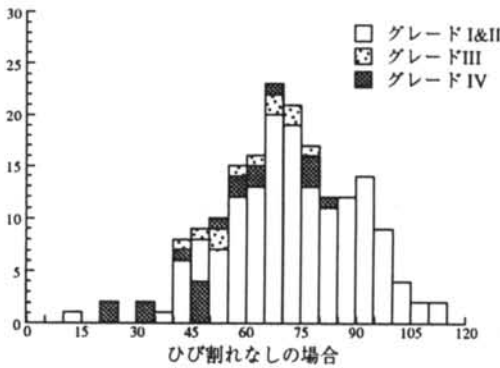
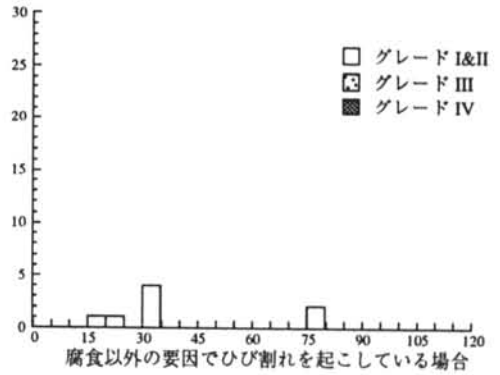
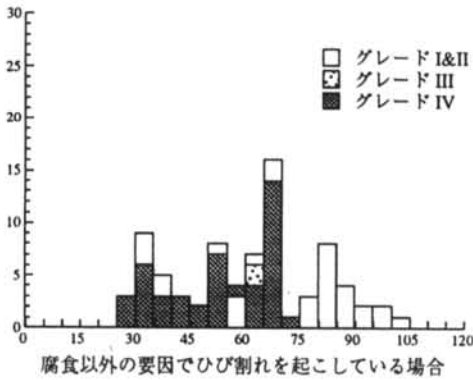
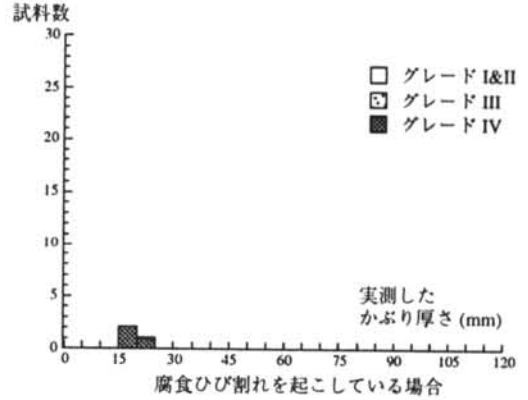
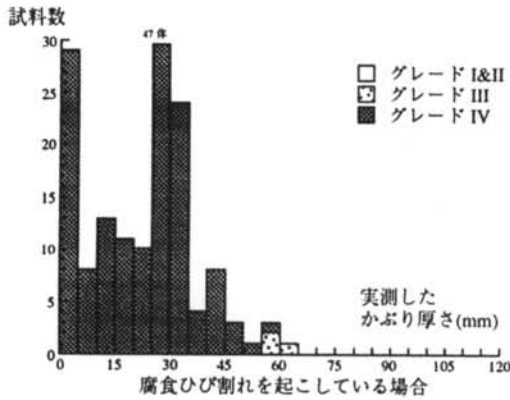


図-7 飛沫帯におけるひび割れと鉄筋腐食度との関係

図-8 干満帯におけるひび割れと鉄筋腐食度との関係

れた収縮ひび割れ部では、鉄筋の腐食度はすべてグレードIとIIであった。したがって、かぶり厚さが十分にあれば、収縮ひび割れ程度のひび割れは、鉄筋腐食には影響しないと考えられる。

また、かぶり厚さが60mm以上の場合にはひび割れなしの場合が多く、しかも試料の多くがグレードIまたはIIとなっている。

以上のことから、飛沫帯においては、コンクリートに欠陥がなく、かぶり厚さが十分に確保されていれば、鉄筋は腐食せず健全であると言える。

4.2 干満帯

干満帯においては、図-8および図-9に示すように、いずれのかぶり厚さにおいても、腐食ひび割

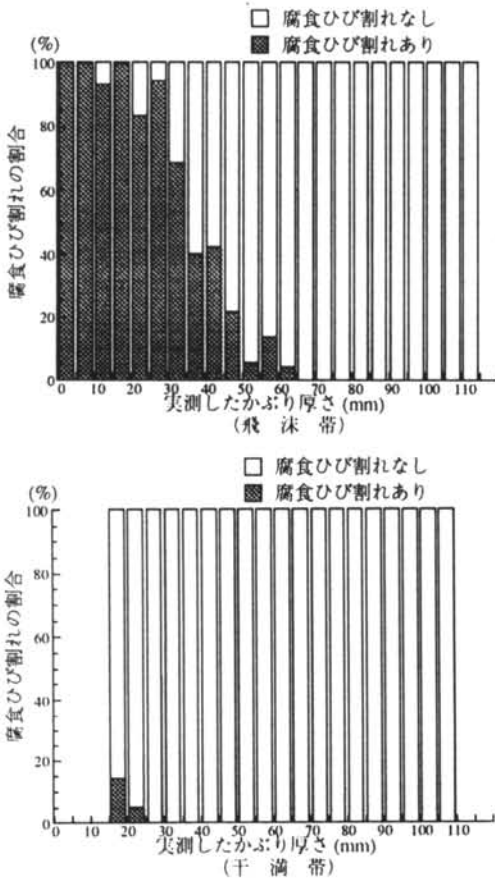


図-9 かぶり厚さと腐食ひび割れとの関係

れはほとんど生じていない。腐食ひび割れを起こしていない鉄筋の腐食度は、大多数がグレードIまたはIIであり、特にかぶり厚さが50mm以上では鉄筋はすべて健全であった。

このような現象は、干満帯のように常時水分が存在する領域においては、鉄筋腐食に必要な酸素が極めて拡散しにくい（酸素の拡散係数が極めて小さい）という既往の研究⁹⁾を裏付けるものである。

§ 5. 寿命予測手法の調査結果への適用

本調査結果に2.2で示した方法を適用し、寿命予測を行った。2.2において紹介した寿命予測式は、塩分量が一定の条件下で寿命を求めるようになっている。したがって、コンクリート中の塩分量が年数の経過に伴い増加するような場合には、年毎の塩分量に応じた腐食速度 q_i を算定し、求めた q_i を時間

で積分する形で年数 n 年までの腐食減量 $Q_{n \text{ year}}$ を求め、 $Q_{n \text{ year}}$ が Q_{cr} を上回るか否かで、寿命の判定を行う。すなわち、

$$Q_{n \text{ year}} = \sum_{i=1}^n (q_i \times t') \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 t' : 1年

5.1 各種パラメータの設定

予測に必要な各種パラメータは、以下のように設定した。

(1)水セメント比

圧縮強度試験および配合分析結果からは、水セメント比を特定することができなかったため、水セメント比を50%、60%、70%の3通りとした。

(2)塩分量

鉄筋試料の塩分履歴は、各コアの可溶性塩分量測定結果に最も適合する「見かけの表面塩分量と拡散係数」を最小2乗法によって求めた後、それらの平均値を用いることにより、飛沫帯および干満帯についてそれぞれ経時的に算出した。

見かけの表面塩分量と拡散係数を求めるに際しては、コアの表面近傍での測定結果が外的要因によってばらつくことを考え、表面から30mm程度入った領域より内部の塩分量測定結果を採用することを原則とした。したがって、飛沫帯における塩分量の分布が表層近傍のピーク値より表面に向かって減少している状況は考慮されておらず、コアによっては、かぶり厚さの極めて少ない領域で、塩分量をやや過大に評価している可能性もある。なお、塩分履歴を求める際の初期塩分量は、各コア中央付近の測定結果における平均値0.005%を用いた。

各コアの最小2乗法によって求めた見かけの表面塩分量と拡散係数の一覧を表-8に、また、これらの値を用いた塩分浸透計算結果の一例を図-10に示す。

以上より、各鉄筋試料の塩分浸透計算に用いる表面塩分量は、飛沫帯では0.2%、干満帯では0.3%（コンクリート重量に対するCl-%）、一方、拡散係数は、飛沫帯、干満帯ともに、 $0.4\text{cm}^2/\text{年}$ とした。

(3)かぶり厚さ

各鉄筋試料に対して測定したかぶり厚さ（mm単位）を用いた。

(4)鉄筋径

実測した鉄筋径に最も近い公称径の値を用いた

コアNo.	壁名	飛沫帯			干満帯		
		表面塩分量	—	拡散係数	表面塩分量	—	拡散係数
2	鋼壁 1	0.04	—	0.62	—	—	—
3	鋼壁 1	—	—	—	0.74	—	0.36
5	A開口前壁	0.11	—	0.34	—	—	—
6	A開口後壁	0.12	—	0.59	—	—	—
8	鋼壁 2	0.38	0.60	0.36	—	—	—
10	鋼壁 2	—	—	—	0.14	0.03	0.16
12	鋼壁 3	0.03	0.19	0.54	—	—	—
13	鋼壁 3	—	—	—	0.35	0.27	0.27
15	C開口前壁	0.22	—	0.35	—	—	—
16	C開口後壁	0.13	—	0.44	—	—	—
17	鋼壁 4	0.27	0.17	0.21	—	—	—
18	鋼壁 4	—	—	—	0.56	0.13	0.35
19	鋼壁 5	0.05	—	0.12	—	—	—
20	鋼壁 5	—	—	—	0.28	—	0.71
平均値		0.19	—	0.40	0.31	—	0.37

表面塩分量は、コンクリート重量に対するC⁻(%)
 拡散係数はcm²/年

表-8 表面塩分量と拡散係数の推定結果

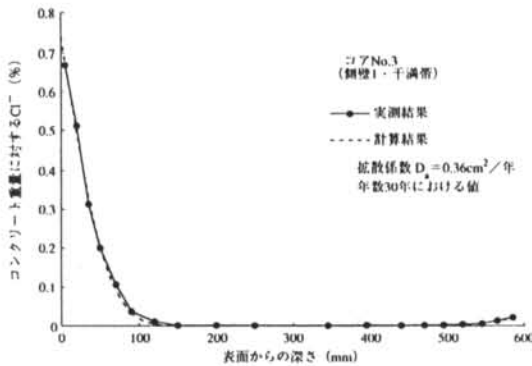


図-10 塩分浸透計算結果

(例えば、実測結果が12.9mmの場合には13φ)。

(5)温度

理科年表から東京の平年値である15.3°Cを用いた。

(6)湿度

飛沫帯に関しては、海面に極めて近くにあることを考慮し、東京での平年値(66%)より高い85%と仮定した。一方、干満帯に関しては、ほぼ終日乾燥することはないと考え、100%とした。

(7)酸素濃度

飛沫帯に関しては、理科年表に基づき通常の大気中の酸素濃度と同じ21%とした。一方、干満帯に関しては、コンクリート表面が海水によりほぼ飽水状態にあると考えられるため、同じく理科年表に示されている日本近海の海中溶存酸素濃度を参考にして、0.6%に設定した。

5.2 予測結果と調査結果との比較

以上のように設定したパラメータを用いて、塩分による鉄筋腐食でかぶりコンクリートにひび割れが生じるか否かの判定を行い、調査結果と比較した。ここで、前壁・後壁下端で認められたコールドジョイント部の鉄筋試料、ならびに鉄筋と直交方向にひび割れが存在し、かつ腐食度がグレードIIIないしはIVの鉄筋試料に対するデータは、鉄筋腐食によってひび割れが生じたものではないと考えられるため、予測式による評価対象外として検討から除外した。

図-11と図-12に、飛沫帯・干満帯双方における予測結果(水セメント比50%、60%、70%)と調査結果とを比較してヒストグラムで示す。

両図において、横軸上に示す値は、各鉄筋試料に対して算定した経過年数30年までににおける腐食減量 $Q_{30\text{year}}$ と、かぶりコンクリートにひび割れが生じる時点での腐食減量 Q_{cr} との比を表したものである。予測結果においては、 $Q_{30\text{year}}/Q_{cr}$ が1以上の場合には、腐食によるひび割れが生じるという判定となる。なお、かぶり厚さが極めて少ない場合には、 $Q_{30\text{year}}/Q_{cr}$ の値が大きくなるため、2.0を越えた位置にまとめて示した。したがって、調査結果と予測結果とが適合しているのは、図-11においては $Q_{30\text{year}}/Q_{cr} \geq 1$ の領域、図-12においては $Q_{30\text{year}}/Q_{cr} \leq 1$ の領域である。

図-11および図-12に示すように、水セメント比に応じて、予測結果と調査結果とに若干の違いが見られるが、水セメント比が大きいほど適合度は高くなり、水セメント比が70%の場合には、予測結果と調査結果とは約90%のデータで一致している。

また、 $Q_{30\text{year}}/Q_{cr}$ が1以上の領域では、かぶり厚さの少ない鉄筋試料が、 $Q_{30\text{year}}/Q_{cr}$ が1以下の領域では、かぶり厚さの大きい鉄筋試料が多い傾向にあった。したがって、腐食ひび割れを防止する観点からは、適切なかぶり厚さの確保が極めて基本的な因子であることを物語っている。

以上のように、提案した方法により塩分に起因する腐食ひび割れを概ね予測することが可能であることが判明した。しかし、飛沫帯における湿度、ならびに干満帯における温度や酸素濃度の設定に関しては、再考の余地が残されていると思われる。この点に関しては、今後の検討課題としたい。

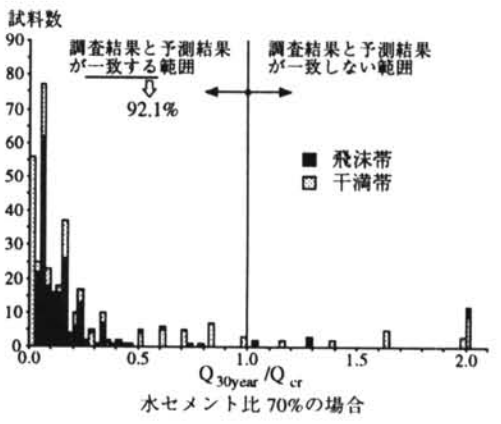
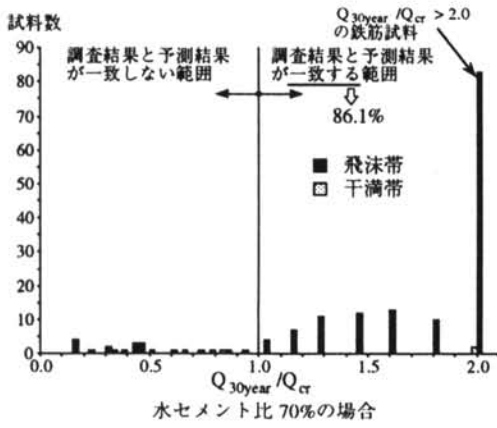
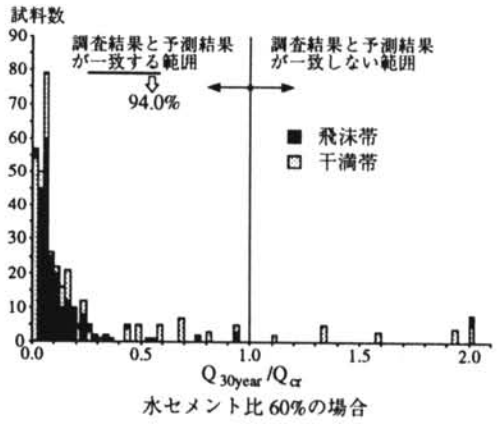
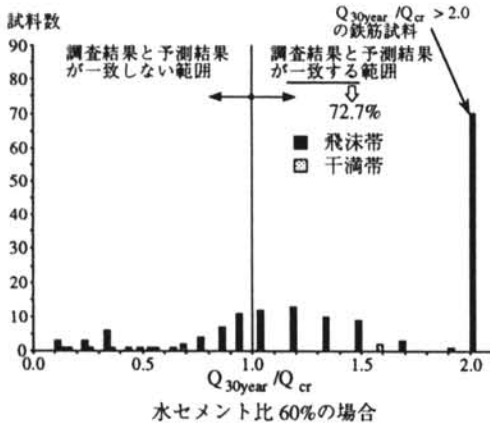
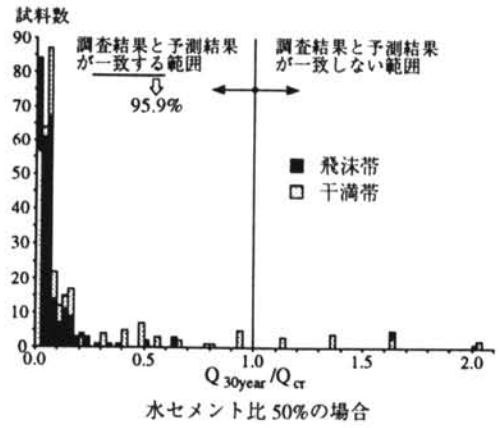
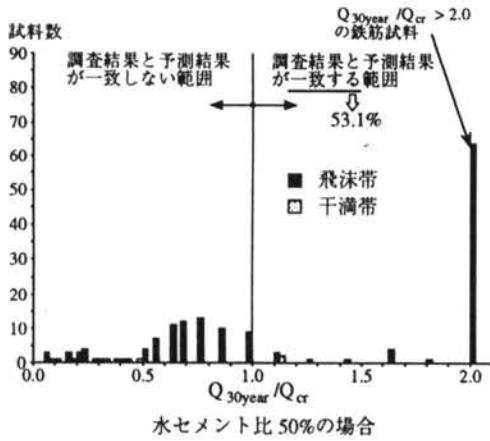


図-11 調査結果と予備結果の比較
——調査で腐食ひび割れと判定した鉄筋試料——

図-12 調査結果と予備結果の比較
——調査で腐食ひび割れなしと判定した鉄筋試料——

§6. まとめ

塩分に起因する鉄筋腐食に関して、既往の予測式に基づき、鉄筋コンクリート構造物の寿命予測手法を提案した。そして、本手法が、実際の構造物の寿命予測への適用可能性を確認することを目的として、海洋環境下で築後30年経過した鉄筋コンクリート構造物の現位置調査を行った。

調査の結果、飛沫帯において、かぶり厚さが約30mm以下の場合には、腐食ひび割れが多く認められた。しかし、かぶり厚さが約70mm以上の場合、ならびに干満帯においては、腐食ひび割れはほとんど認められず、鉄筋は健全であった。

この現位置調査結果と採取したコアに対する室内試験結果に基づいて、水セメント比、コンクリート中の塩分量、かぶり厚さ、鉄筋径、温度、湿度、酸

素濃度を設定し、鉄筋腐食による寿命（腐食によりかぶりコンクリートにひび割れが生じる時点）を判定した。その結果、飛沫帯、干満帯ともに予測結果と調査結果とは概ね一致し、この予測式が実際の構造物に対しても適用可能であると判断された。

今後、さらにこうした現位置調査が実施され、調査結果と予測結果との照合が行われることで、予測精度の向上が期待できるものと確信する。

謝辞 本研究は、通商産業省からの受託研究として、(財)発電設備技術検査協会が実施した「プラント長寿命化技術開発」の成果の一部である。研究を進めるに当たり、始終御指導を賜りました東京大学工学部岡村甫教授、九州東海大学工学部森永繁教授（調査当時・技術研究所主席研究員）ならびに関係各位に謝意を表します。

〈参考文献〉

- 1) 岸谷孝一：“鉄筋コンクリートの耐久性” 鹿島建設技術研究所出版部（1963年）
- 2) 依田彰彦：“高炉セメントコンクリートの中性化” セメントコンクリート，No.429（1982年）pp.26-32
- 3) 森永繁：“鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究” 東京大学学位論文（1986年）
- 4) 森永繁，福士勲，成田一徳：“海砂使用上の技術基準に関する研究” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1980年）pp.31-32
- 5) 例えば、小林一輔，出頭圭三：“各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究” コンクリート工学，Vol.24，No.12（1986年） pp.91-106

