

論文 腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル

濱田 宏^{*1}・丸山 久一^{*2}・下村 匠^{*3}・青山 敏幸^{*4}

要旨：供用中の鉄筋コンクリート構造物の性能の経時変化を定量的に予測することを目的として、既往の研究、および著者らのこれまでの研究成果をもとに、腐食性環境下におかれた構造物の、塩害による耐荷力の劣化過程を予測するシステムを提案した。簡便なモデルを組み合わせるにより、与えられた環境条件、材料条件、構造条件のもとでコンクリート中の腐食物質の移動、蓄積、鉄筋の腐食の進行、腐食ひび割れの発生、成長、曲げ耐力の低下を経時的に予測するシステムを構築し、解析例を示した。

キーワード：塩害、鉄筋腐食、予測システム、経時変化

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋の腐食問題に関して、現在まで多くの研究により、腐食機構や腐食を引き起こす環境条件、防止方法、腐食の非破壊検査法などに対する検討が行われている。その結果、腐食因子の浸透・拡散、鉄筋の腐食速度、腐食ひび割れの発生期間などについて定量的な評価が可能となりつつある[1]。また、近年コンクリート構造物の耐久性設計や維持管理の重要性が認識されており、それにともない現在供用されている鉄筋コンクリート構造物の寿命予測や、構造物の劣化を遅らせるための補修方法・材料の開発が精力的に行われている[2,3]。

本研究では、腐食性環境下におかれた鉄筋コンクリート構造物の力学的性能の経時変化を定量的に把握することを目的とした。その第一段階として、既往の研究および著者らのこれまでの研究成果に基づき、構造物への腐食因子の浸透・拡散から耐荷力の低下までを統一的に予測するシステムを構築した。

2. 解析システム

2.1 塩害における劣化進行過程

従来より、腐食性環境下におけるコンクリート構造物の寿命を説明するものとして、図-1の考え方が示されている[4]。図-1では、塩害が4つのステージに分けて評価されている。ステージⅠは、外部環境から鉄筋腐食を誘発する因子がコンクリート中へ浸透し、その浸透量が鉄筋周辺で許容量を超えるまでの状況を指す。ステージⅡは、鉄筋腐食により生じた腐食生成物が、膨脹圧によりかぶりコンクリートに腐食ひび割れを生じさせるまでの状況、ステージⅢおよびⅣはコンクリート構造物を供用する上で、腐食ひび割れの拡大による明らかな問題が生じるまでの状況である。本研究は、このような劣化進行過程を解析的に予測することを目的としている。

2.2 解析概要

^{*1} 鉄建建設（株）東北支店（正会員）

^{*2} 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系、Ph.D.（正会員）

^{*3} 長岡技術科学大学助教授 工学部 環境・建設系、博士（工学）（正会員）

^{*4} 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻

ステージ I における腐食因子（水分、酸素、塩化物イオン）のコンクリート中への浸透・拡散は一次元方向の現象と仮定した。水分の移動は、コンクリートの細孔構造と細孔組織中における気液二相水分の微視的挙動に基づく著者らの手法[6]を用いて解析した。塩化物イオンの移動は、乾湿繰り返しの影響を考慮した丸屋の手法[7]を用いて解析した。酸素の移動は、既往の報告書[5]に示された方法にしたがい解析した。

ステージ II では、腐食速度は、報告書[5]の自己腐食による腐食電流密度に一致するよう算定した。腐食ひび割れ発生は厚肉円筒理論による弾性解析に基づき予測した。なお、今回の解析においては鉄筋が全面的に均一に腐食するとし、局所的な腐食をとまなうマクロセル腐食は考慮していない。

ステージ III、IV では、対象とするコンクリート構造物が腐食性環境下にあることから、腐食ひび割れ発生後の腐食速度を $10.2 \text{ (mg/cm}^2\text{/y)}$ [8] とした。また、コンクリート内の鉄筋の腐食量は腐食ひび割れ幅と線形関係にある[9]と仮定して解析を行った。これらの詳細は3章において述べる。耐荷力に関しては、曲げ荷重に抵抗する縦方向の主鉄筋が腐食した場合の、鉄筋コンクリート梁における曲げ耐力の減少について論じる。これは4章において述べる。以上の解析のフローを概略的にまとめたものを図-2に示す。

3. 腐食ひび割れの発生と開口

コンクリート内の鉄筋の腐食量および腐食ひび割れの経時的变化を知るために、暴露試験、電食試験を行った。概略を以下に示す。

3.1 配合および供試体形状

暴露、電食試験で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。28日圧縮強度はそれぞれ 28.9N/mm^2 、 30.4N/mm^2 、スランブはそれぞれ 10cm 、 8cm であった。練混ぜ水には鉄筋の腐食を促進するため NaCl 3%水溶液を用いた。両試験の供試体の形状を図-3に示す。かぶりは 2.5cm とし、鉄筋は暴露試験が $\text{D}10$ の異形鉄筋、電食試験は $\phi 9$ のみがき丸鋼を使用した。

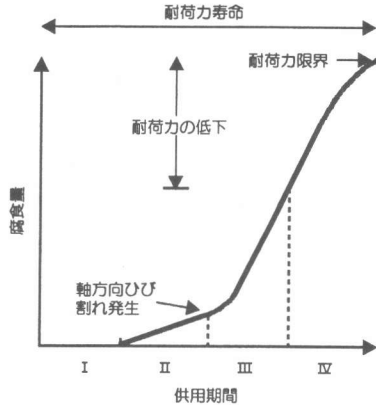


図-1 塩害による構造物の劣化進行過程

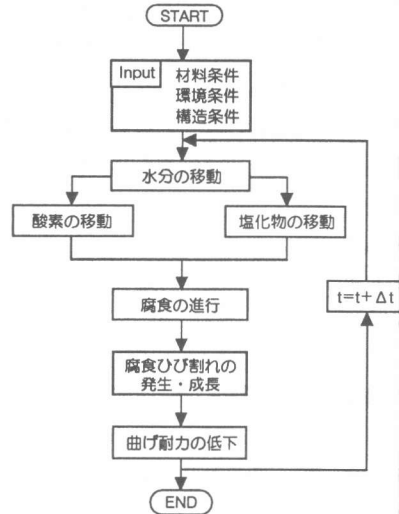


図-2 解析フロー

表-1 配合表

試験方法	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	S	G	混和剤	食塩
暴露	63	50	210	333	830	823	1.17	6.51
電食	63	42	165	260	799	1102	0.65	5.33

3.2 実験方法

暴露試験では、供試体を1989年9月から日本海沿岸付近に設置し、暴露期間2、3、4、6年の供試体について腐食ひび割れ幅と腐食量の計測を行った。鉄筋の腐食区間は図-3に示すように20cmとし、その他の部分は腐食を防止するため、テープ保護を施した。

電食試験では供試体を水槽の中に入れ、側面に配置した銅極板を陰極、主鉄筋を陽極とし、直流安定化電源により通電した。水槽内の電解液は腐食を促進するためNaCl3%水溶液とした。通電にともない、主鉄筋平行方向に発生する腐食ひび割れのひび割れ幅を計測し（5cmごとにクラックスケールで計測）、平均腐食ひび割れ幅を算出した。所定の腐食ひび割れ幅になったところで電食試験を終了した。

暴露、電食試験終了後、供試体より鉄筋を取り出し、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬し錆除去後、重量を測定し、腐食量を求めた。

3.3 試験結果および考察

暴露、電食の試験結果を図-4に示す。図中にはそれぞれの試験結果を一次式で近似した結果、およびひび割れモデル[10]を用いて算出した結果を示した。用いたひび割れモデルは、ひび割れを図-5に示すようにモデル化したものであり、鉄筋の腐食量と腐食ひび割れ幅の関係は次式で表される。なお、本モデルではコンクリートを剛体として扱っている。

$$\delta = (a \cdot \Delta \theta + u \cdot \cos \beta)$$

$$= 2u [\cos \beta + a \cdot (\cos \alpha + \cos \beta) / \{h + u \cdot (\sin \alpha - \sin \beta)\}] \quad (1)$$

ここに、 δ ：ひび割れ幅の増分 (cm)

u ：腐食膨張変位 (cm)

a ：かぶり (cm)

h ：ひび割れ進展長さ (cm)

α ：腐食ひび割れ角度

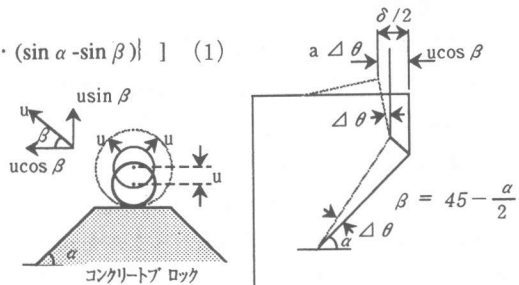


図-5 ひび割れモデル

ひび割れモデルに代入した諸量の値は、腐食膨張率3.2、 $\alpha = 0^\circ$ 、 $h = 6$ cm、 $u = 0.0017$ cmである。

暴露試験と電食試験では腐食生成物が異なるため、ひび割れ幅と腐食量の関係も異なることが予想されたが、図-4に示したように本実験の条件下では同様の結果が得られた。それゆえ、一次式で近似したひび割れ幅と腐食量の関係も、暴露、電食両試験においてほぼ同一となった。また、ひび割れモデルにより計算された結果は、実験結果を概ね適切に再現していることが認められる。

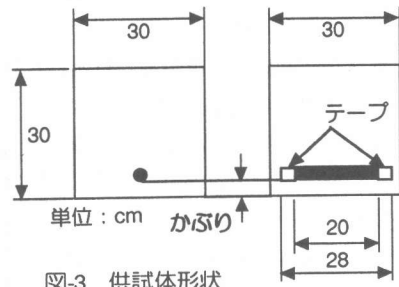


図-3 供試体形状

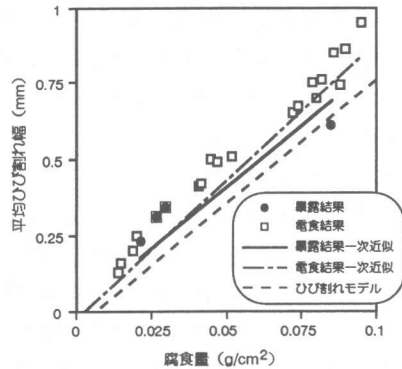


図-4 ひび割れ幅と腐食量の関係

4. 主鉄筋の腐食による曲げ耐力の低下

著者らの既往の研究[11]では、コンクリート内の鉄筋の腐食によって発生するコンクリート表面の腐食ひび割れと、構造物の耐荷力との関係を定量的に検討している。

4.1 供試体、配合、実験方法

既往の研究[11]では、先述した電食試験と同様の配合のコンクリートを用い、供試体の条件を単純化するために1本の曲げ補強筋(D13、 $p=1\%$)を配置した小型供試体(100×150×1200mm)を用いている。供試体を通電し所定のひび割れ幅の腐食ひび割れを発生させた後、2点集中荷重による静的載荷試験が行われた。曲げ破壊を先行させるためせん断スパンは47.2cm ($a/d=4.0$)としている。

4.2 曲げ試験の結果および考察

各供試体の曲げ耐力、また通電を行っていない供試体の曲げ耐力を1とする各供試体の曲げ耐力比を表-2に示す。破壊形式は全て曲げ引張破壊となっている。平均腐食ひび割れ幅と曲げ耐力比の関係を図-6に示す。腐食ひび割れ幅が大きくなるにつれ曲げ耐力が低下する傾向が確認された。これらを考慮して、本研究の解析では図に示したような点線により腐食ひび割れ幅と曲げ耐力比の関係を表現した。

表-2 曲げ試験結果

供試体 No.	1	2	3	4	5
ひび割れ幅 (mm)	なし	0.05	0.30	0.50	1.00
曲げ耐力 (kN・m)	10.20	10.54	10.75	9.55	9.25
曲げ耐力比	1	1.03	1.05	0.94	0.91

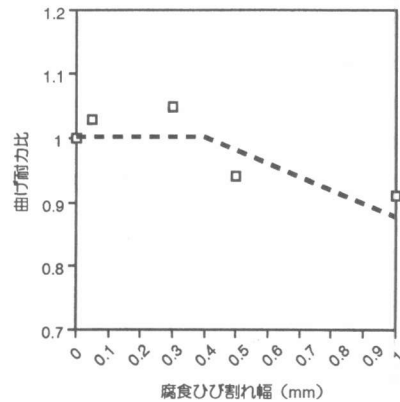


図-6 ひび割れ幅と曲げ耐力比

表-3 解析に用いた材料定数

コンクリート	水分移動	繊維孔容積 (m^3/m^3)	0.140
		パラメータB	8300
		パラメータC	0.5
		水蒸気移動の材料特性値	0.077
		液状水移動の材料特性値	0.0016
	酸素拡散係数	飽和部 (cm^2/day)	8.64×10^{-4}
		不飽和部 (cm^2/day)	8.64×10^{-2}
	塩化物	表面 (cm^2/day)	1.90×10^{-3}
		内部 (cm^2/day)	1.59×10^{-3}
		圧縮強度 (N/mm^2)	30.4
	引張強度 (N/mm^2)	2.61	
	ヤング係数 (N/mm^2)	26550	
	ポアソン比	0.2	
鉄筋	ヤング係数 (N/mm^2)	210000	
	ポアソン比	0.3	
	腐食生成物の体積膨張率 α	3.2	

5. 解析例

5.1 環境条件

環境条件は、報告書[5]を参考に設定した。コンクリート構造物の設置場所は、海塩粒子が常時飛来する海岸線に近い環境とし、外気温を20℃、相対湿度を60%とした。コンクリートの表面は連続10日間乾燥を受けた後、瞬時に飽水状態になり、その後再度10日間の乾燥を受けるサイクルを繰り返すものとした。乾燥から飽水状態に移行する際はコンクリートの乾燥部分が、塩化物イオンを含む海水で瞬時に飽水状態になるものとした。

5.2 材料条件

解析に用いた材料定数を表-3に示す。酸素の拡散係数については報告書[1]を、塩化物の拡散係数については文献[7]を参考に定めた。

5.3 構造条件

かぶり厚さを2.5および5 cm とし、鉄筋径を13 mm とした。

6. 解析結果および考察

以下の3ケースの解析を行った。

ケース①：かぶり2.5 cm、塩分混入練混ぜ水使用

ケース②：かぶり2.5 cm、水道水使用

ケース③：かぶり5.0 cm、水道水使用

表-4に腐食ひび割れ発生時の日数と腐食量を示す。

図-7に時間と腐食量の関係を示す。ケース①では練混ぜ水に海水相当の塩分が含まれていることにより、コンクリート打設直後から鉄筋の腐食が始まっている。そのため、練混ぜ水に水道水を用いたケース②に比べ、早期に腐食ひび割れが発生した。腐食ひび割れの発生はケース①では2年弱、ケース②では約4年となった。ケース③では、かぶりをケース①、②の2倍にしたことにより、腐食ひび割れ発生に9年半の時間を要する結果となった。かぶりの増加が腐食ひび割れの発生を抑制することが明らかとなった。

図-7において、3ケースともに腐食ひび割れ発生後の傾きが同様である理由は、ひび割れ後は、鉄筋が直接外部環境にさらされると仮定したためである。なお、腐食の進行にともない腐食生成物が堆積し、その層によって腐食因子の拡散速度が低下し、腐食速度も低下すると考えられるが、本解析ではその効果は考慮していない。

腐食量と腐食ひび割れ幅の関係を図-8に示す。腐食量の増加にともないひび割れ幅も増大していることが分かる。しかし、ひび割れ発生後の腐食量に対するひび割れ幅増大の傾きは、かぶり2.5 cmのケースよりもかぶり5.0 cmのケースの方が大きくなっている。これは、ひび割れモデルにおいてコンクリートを剛体として扱っているため、かぶりの増加にともない同一腐食量に対するコンクリート表面での変位が大きくなるためである。

時間と耐荷力の関係を図-9に示す。図より、最大耐荷力が1割程度低下するためには、ケース①では約15年、ケース②では約18年、ケース③で約18年を要した。ケース①、②の練混ぜ水への塩化物混入の有無による差は、腐食ひび割れ発生までの期間に現れることが分かった。また、ケース②、③のかぶりが増加した場合において、耐荷力が1割程度低下するためにはほぼ同様な期間を要する結果となった。これは耐荷力の低下を表面のひび割れ幅によって決定したことによる。

表-4 ひび割れ発生日数の解析結果

ケース	ひび割れるまでの日数	発生時腐食量 (mg/cm ²)
①かぶり2.5cm、塩水	721	5.34
②かぶり2.5cm、水道水	1550	5.34
③かぶり5cm、水道水	3497	16.8

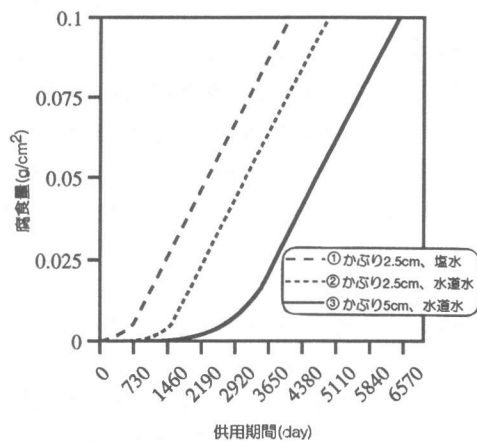


図-7 時間と腐食量の関係

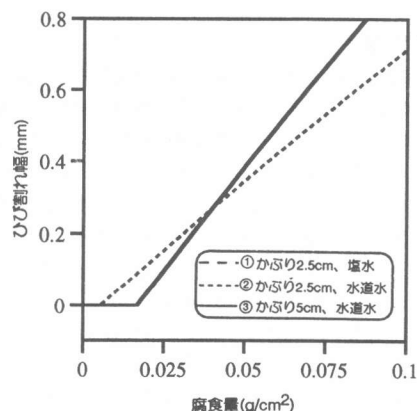


図-8 腐食量とひび割れ幅の関係

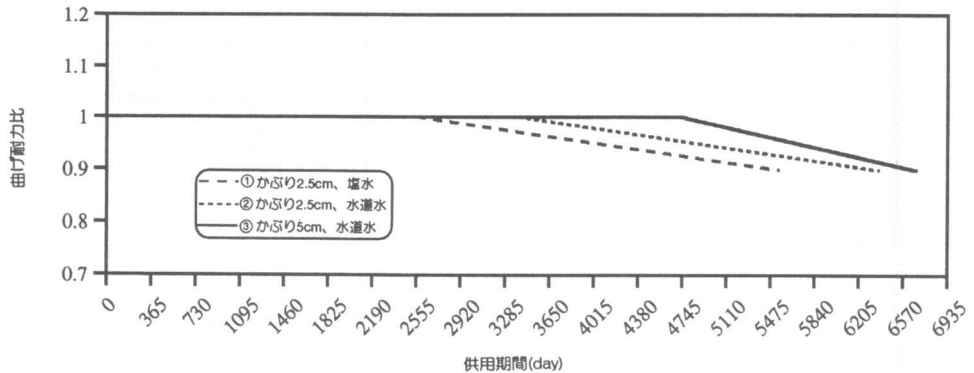


図-9 時間と耐力の関係

本研究において構築した数値解析システムにより、腐食性環境下におけるコンクリート構造物の塩害による力学的性能の劣化過程を定量的に評価する基礎ができたと考えている。今回の解析で対象とした劣化現象は塩害のみであるが中性化や凍結融解を考慮することにより、さらに現実的な予測ができると考えられる。また、環境条件は海水の接触を考慮したが、大気中より構造物に飛来する塩分量を考慮できるようにすることも必要であると考えている。

7. まとめ

本解析の範囲で得られた成果は以下のようにまとめられる。

1. これまでの研究成果を組み合わせることにより、鉄筋コンクリート構造物の塩害による耐荷性状の経時変化を予測するシステムを構築した。
2. かぶりの増大は、腐食ひび割れの発生を遅らせ、構造物の耐久性の向上に有効であることを合理的に示した。しかし、腐食ひび割れ発生後はかぶり増大の効果は小さく、耐力が低下することを確認した。

参考文献

- [1] JCI：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書（Ⅱ）、1994.10
- [2] JCI：鉄筋コンクリート構造物耐久性設計に関する考え方、1991.5
- [3] JCI：コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集、1992.10
- [4] 宮川豊章ほか：塩分雰囲気中におけるコンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計について、コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集,pp.17-24,1988.4
- [5] JCI：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書（Ⅲ）、1996.10
- [6] 下村匠、前川宏一：微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル、土木学会論文集、No.520/V-28,pp.35-45,1995.8
- [7] 丸屋剛：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析手法の構築、東京大学学位論文、1995
- [8] H.H.Uhlig,R.W.Revic：腐食反応とその制御（第三版）、産業図書、1989
- [9] 高岡祐二、丸山久一、清水敬二、中田泰広：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集,Vol.11,No.1,pp.591-596,1989
- [10] 木村哲士、丸山久一、濱田宏：RC部材における鉄筋腐食の定量的評価方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集,Vol.18,No.1,pp.771-776,1996
- [11] 中田泰広、丸山久一、橋本親典、清水敬二：鉄筋腐食によるひび割れが梁供試体の耐荷性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集,Vol.12,No.1,pp.551-556,1990