

鹿島技術研究所 正会員 横関 康祐
 鹿島技術研究所 正会員 MISRA, Sudhir
 鹿島技術研究所 正会員 本橋 賢一

1. はじめに

塩害劣化を対象とした耐久性設計では、腐食ひび割れの発生が構造物の性能の観点から極めて重要な限界状態で、腐食ひび割れ発生までの期間を構造物の寿命とみなす考え方が有力であり、筆者らはこの期間 T を合理的に算出する検討を進めている¹⁾。

本報告は、腐食開始からかぶり表面にひび割れが発生するまでの期間 T_1 に関するもので、対象複鉄筋コンクリートはり部材に関して、コンクリートの圧縮強度、かぶりが T_1 にどのように影響するかを鉄筋腐食現象を合理的にモデル化した弾塑性 FEM 解析により検討したものである。

2. 解析方法

①鉄筋腐食のモデル化

鉄が酸素と水に反応して腐食生成物となる過程では、体積膨張と物理的性質の変化が起こる。ここでは、その変化を図-1に示すとおりモデル化した。すなわち、腐食開始前の腐食の程度(Rust Conc.)を0、鉄筋が全て腐食生成物に変化した時点(t)のRust Conc.を1とする。 t は鉄筋半径を腐食速度で除して求める。その材齢 t までの間に体積を3.2倍²⁾に膨張させるとともに、弾性係数及びポアソン比を図中に示す腐食生成物の物性値³⁾に変化させた。

②コンクリートのモデル化

コンクリートの物理的性質(強度、弾性係数等)は、CEB-FIP MODEL CODE 1990に準拠した。コンクリートの破壊条件は、引張応力が引張強度に達した時点でひび割れが発生するとし、ひび割れ発生以後の引張軟化の挙動として、図-2に示す応力 σ とひずみ ϵ の関係を用いた。

③解析プログラム及び解析ケース

要素分割を図-3に示す。8節点アイソパラメトリック要素の分布ひび割れモデルであり、事前の試解析で解の安定が得られることを確認した。このモデルで二次元平面ひずみ問題としてひび割れ解析を行い、限界腐食量 W_{cr} 及び T_1 を推定した。ここで、 T_1 はひび割れがかぶり表面に達するか、あるいは内部鉄筋間でひび割れがつながるまでの期間と定義した。

解析条件及び解析ケースを表-1に示す。解析対象は、近年実施工されたいくつかの海岸構造物のはりの配筋・形状を参考に、直径19mmの鉄筋を200mmピッチで4本配筋した断面の1/4切り出しモデルを用いた。かぶり厚さ50mm以上の一般的な構造物は、腐食開始までの期間がおよそ5年以上である¹⁾ことを考慮して、クリープ係数 $\phi = 0.4$ とした。酸素拡散支配の腐食⁴⁾では、腐食速度はかぶりに反比例し、酸素拡散係数に比例する

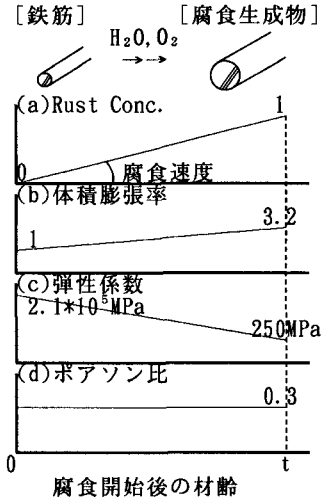


図-1 鉄筋腐食のモデル化

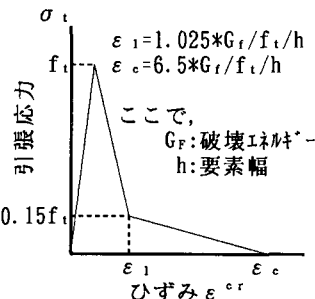


図-2 引張軟化曲線

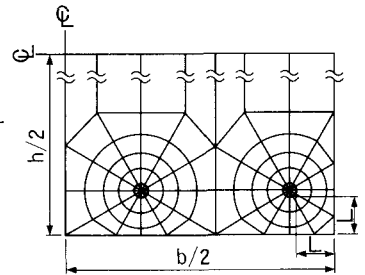


図-3 要素分割

表-1 解析条件及び解析ケース

ケース	f'_c (MPa)	f'_t (MPa)	E_c	腐食速度 ($\mu\text{m}/\text{cm}^2/\text{y}$)	かぶり L (mm)	断面寸法 $b \times h$ (mm)
1	30	2.934000		10	50	719*1275
2	30	2.934000		10, 6.67	75	769*1300
3	30	2.934000		10, 5.0	100	819*1325
4	60	4.641000		10, 5.56	50	719*1275

ことから、腐食速度はかぶり50mm・圧縮強度30MPaで $10\mu\text{m}/\text{cm}^2/\text{y}$ 、かぶりが2倍の場合は腐食速度を1/2倍、また、圧縮強度が60MPaでは既往の文献⁵⁾の酸素拡散係数を参考に腐食速度を圧縮強度30MPaの場合の1/1.8倍と補正し、この補正を行わない場合と行った場合の両者について検討した。

3. 解析結果及び考察

①ひび割れの進展

ケース1の貫通ひび割れ発生直後のひび割れ状況を図-4(a)に、また、最初に貫通したひび割れに着目し、そのひずみ分布の経時変化を図-4(b)に示す。今回の解析では全面腐食を仮定しており、腐食の初期段階では鉄筋周辺に放射線状のひび割れがほぼ均等に発生した。さらに腐食が進むとコンクリートの表面方向にひび割れが進展し、かぶり表面に貫通した時点で急激なひずみの増加が認められた。それらは、実際のひび割れ挙動をよく模擬していると考えられる。

また、鉄筋間隔・鉄筋径を一定とし、かぶりを変化させて解析を行った結果(ケース1~3)、かぶりによってひび割れの進展モードが変化した。すなわち、かぶりが鉄筋間隔の1/2より小さい場合はひび割れがかぶり表面方向に進展するのに対して、鉄筋間隔の1/2を超えるとひび割れは隣り合う鉄筋をつなぐ方向に発生した。

②かぶりの影響

図-5にかぶり及びコンクリート強度と T_1 、限界腐食量 W_{cr} の関係を示す。

腐食速度はかぶりの増大に伴って減少するのが妥当であるが、これを補正しない場合、 T_1 はかぶりの変化によりそれ程大きく変化しない。しかし、補正を行うと、かぶり50mmで2.0年、75mmで4.2年、100mmで6.5年となり、 T_1 はそれぞれ1.0、2.1、3.2倍とほぼ直線的に増大した。すなわち、かぶりの増加によって T_1 は増大するが、その多くはかぶりの増加に伴う酸素供給量の減少、つまり腐食速度の減少に起因することが確認された。

③コンクリート強度の影響

腐食速度はかぶりと同様にコンクリート強度によって変化するが、これを補正しない場合、圧縮強度が30MPaから60MPaに倍増しても T_1 は約1.2倍でそれ程大きな改善効果は見られない。しかし、圧縮強度の増大に伴って酸素拡散が抑制されることを考慮して腐食速度を補正すると、 T_1 は圧縮強度60MPaでは圧縮強度30MPaの場合の2.1倍になり、圧縮強度30MPaでかぶりを50mmから75mmに増大した場合と同程度の改善効果が得られた。

4. おわりに

かぶりやコンクリート強度が腐食ひび割れ発生期間 T_1 に及ぼす影響を定量化する目安が得られたと考えるものである。今回の検討は、鉄筋が全周均等に腐食すると仮定したが、実構造物ではブリーディングの影響により鉄筋の下半分のみ腐食する現象がよく観察され、この部分腐食についても検討を進める予定である。

【参考文献】1)本橋、ミサ、須田、山本、横関：配合及び水と和度がコンクリートの塩素イオン浸透性に及ぼす影響、鹿島技術研究所年報第40号、1992、2)須田、MISRA、本橋：腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する解析的検討、JCI年講1992、3)吉岡、米澤：鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討、土木学会年講1982、4)横関、MISRA、須田、本橋：かぶり厚さが腐食ひび割れ発生期間に及ぼす影響、土木学会年講1991、5)関、金子：コンクリート部材の寿命予測、コンクリート工学Vol.29, No.8, 1991

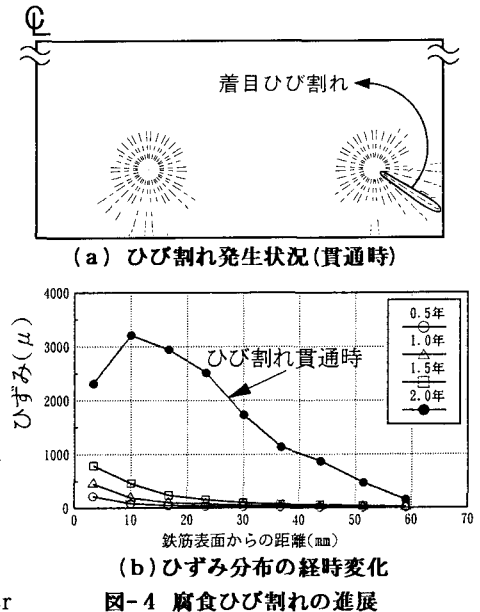


図-4 腐食ひび割れの進展

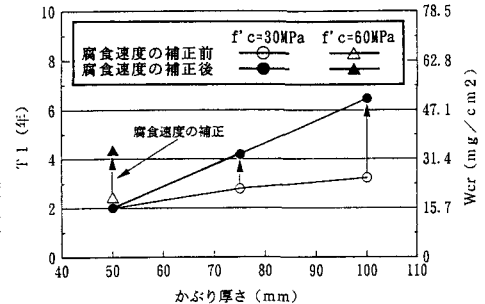


図-5 T_1 , W_{cr} 解析結果