鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生時期の予測解析

大成建設（株）土木技術研究所　正会員　○鈴木　三馨　正会員　福浦　尚之
大成建設（株）土木技術研究所　フェロー会員　丸屋　剛

１．はじめに

塩害を受けるコンクリート構造物の劣化進行過程は，潜伏期，進展期，加速期，劣化期の 4 つに区分されている。2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]では潜伏期までが照査対象であり，進展期の具体的な照査方法は示されていない。進展期までを照査対象とするには，鋼材の腐食速度を適切に予測することが重要である。進展期の長さは，鋼材の腐食量が腐食ひび割れ発生限界腐食量を超える時期として算出することができる [1)]。

本論文では，マクロセル腐食ならびにミクロセル腐食を定式化した腐食進展解析手法 [2)]を基本とし，これと非線形構造解析を組み合わせた構造・耐久連成解析システム [3)]により，鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生時期の予測解析を行った。

２．マクロセル腐食ならびにミクロセル腐食の定式化

マクロセル腐食は，ミクロセル腐食による各要素の自然電位および電流密度から求められる。ミクロセル腐食モデルを構成するアノード分極曲線およびカソード分極曲線は，既往の研究 [4)]を参照してそれぞれ式(1)，式(2)とした。カソード分極曲線については，腐食開始時の鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 になるように設定した。また，マクロセル腐食モデルと腐食量は，著者らの方法によりモデル化した [2)]。

酸素の供給量で決まる電流密度は，限界電流密度 i_{lim} となる。乾湿繰返し環境の場合には，酸素の供給が腐食に対して十分であると考えられるため，この電流密度になることはないが，コンクリート中の残存酸素濃度が十分あるとした限界電流密度 i_{lim} は，ミクロセル腐食の最大値と考えられる。

$$E_{pit} = -0.115 - 0.31 \times \log([Cl^-]/[OH^-]) \quad \text{式(1)}$$

$$E_{co} = 0.914 - 0.0591 \times pH \quad \text{式(2)}$$

$$i_{\lim} = \frac{DnF}{\delta}[O_2]_{conc} \times 10^{-3} \quad \text{式(3)}$$

ここで，E_{pit}：孔食電位（V），$[Cl^-]$：塩化物イオン濃度（mol/l），$[OH^-]$：水酸化物イオン濃度（mol/l），E_{co}：カソード反応の平衡電位（V），pH：液相の pH（12.4）

ここで，i_{lim}：限界電流密度（A/cm^2），D:酸素の拡散係数（1×10^{-5}cm^2/s），n:化学当量数(2)，F:ファラデー定数（96500C/mol eq），δ：鉄筋表面の酸素拡散層(0.05cm)，$[O_2]_{conc}$：残存酸素濃度（mol/l）

３．腐食ひび割れ予測解析

３．１　対象実験

図-1 に解析対象の実験概要 [2)]を示す。腐食発生時期は自然電位の低下開始時とすると約 400 日，腐食ひび割れ発生時は目視確認により 609 日であった。

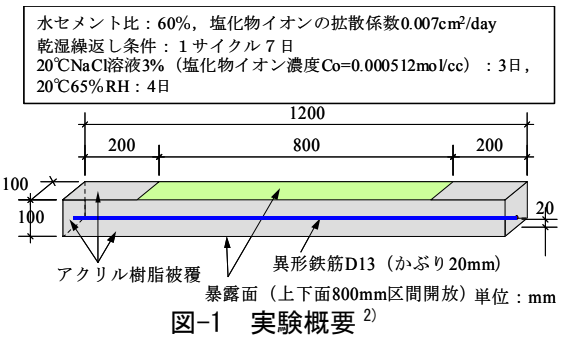

図-1　実験概要 [2)]

３．２　解析パラメータと解析結果

図-2 に解析モデル図と腐食量の算出位置を，**表-1** に解析パラメータを示す。

塩化物イオンの拡散係数が一様な場では，ミクロセル腐食のみとなり，マクロセル腐食が発生しない。ミクロセル腐食のみでは非常に腐食量が小さく，実現象を再現できるものではないと考えられる。まず，基準ケースとして，鋼材腐食発生限界腐食量 C_{lim} を 1.2kg/m^3 とし，腐食発生後，式(3)で示したミクロセル腐食の最大値である限界電流密度 i_{lim} で腐食するモデルを定めた。CASE1～CASE5 は，材料の不均一性により塩化物イオンの拡散係数のばらつきが存在することからこれをパラメータとし，腐食進展を解析したケースである。CASE6 はカソード曲線をパラメータとし，CASE7～CASE8 は CASE6 の条件で構造・連成解析を行ったケースである。

図-3 に腐食量の経時変化を示す。**図-3** 中に円筒モデル [5)]によるひび割れ発生限界腐食量を示す。潜伏期間について，CASE1～CASE5 の解析結果は実験値よりも短い傾向にある。実環境に暴露した試験体では 1.2～2.5kg/m^3 の範囲で鋼材腐食の閾値が存在することから [1)]，本試験体においても鋼材腐食の閾値が 1.2kg/m^3 よりも高かったことが考えられる。基準ケースでは，円筒モデルによるひび割れ発生限界腐食量に達するひび割れ時が実験とほぼ合っているが，実際より腐食発生時期が早く腐食速度は比較的遅いことによるものであり，実現象を反映したものではな

キーワード　進展期，ひび割れ発生限界腐食量，マクロセル，材料の不均一性，ばらつき，鉄筋のあき
連絡先　〒245-0051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1　大成建設（株）技術センター　ＴＥＬ045-814-7230

いと考えられる。アノード想定部の塩化物イオンの拡散係数を健全部の 0%～100%割増すことで（CASE1～CASE5），腐食発生時期と腐食速度は変化する。鋼材腐食の閾値を，実現象として想定される 2.0kg/m^3 とした CASE6 では，腐食開始時期が遅くなり，実験値に近づく傾向にある。また，これを構造・耐久連成することで，ひび割れの発生に伴う塩化物イオンの拡散係数の増加が反映されることから，アノード想定部の塩化物イオン濃度が高くなりカソード部との電位差が大きくなることによってマクロセル腐食が進むことで，ひび割れ発生後の腐食量に変化点が生じる。また，ひび割れ発生の時期は腐食生成物の膨張率が大きいと早くなる（CASE 7 ～CASE8）。実験に基づく腐食速度は 2～130mg/cm^2 年と報告されているが [1)]，CASE1～CASE8 の解析結果は同程度の変動幅を示している。

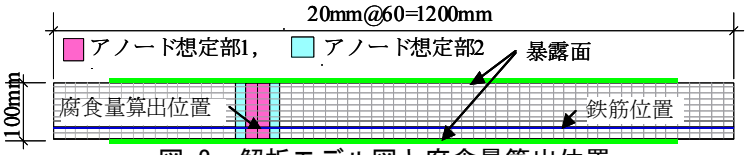

図-2　解析モデル図と腐食量算出位置

表-1　解析パラメータ

解析ケース	塩化物イオンの拡散係数(cm^2/day) アノード想定部1	アノード想定部2	備考
基準ケース	0.007	0.007	基準ケース
CASE1	0.007(0)	0.007	腐食進展解析 ()内，割り増し分 (%)
CASE2	0.00707(1)	0.007035	
CASE3	0.00735(5)	0.0072	
CASE4	0.0084(20)	0.0077	
CASE5	0.014(100)	0.0105	
CASE6	0.00735	0.0072	カソード分極曲線 Epit=-0.062-0.31×log([Cl$^-$]/[OH$^-$])
CASE7*			構造連成解析 CASE7は膨張率1.1, CASE8は膨張率1.5
CASE8*			

*CASE7，8はCASE6と同じカソード分極曲線とした。

4．鉄筋のあきに関するパラメータ解析

かぶりが大きく鉄筋間隔が小さい場合，水平はく離ひび割れが発生する。構造・耐久連成解析システムにより，鉄筋のあきをパラメータ（あき：27mm，87mm）にして解析を行った。芯かぶりは 30mm とした。**図-4** に解析モデルを，**図-5** に最大引張ひずみコンターを，**図-6** に腐食量の経時変化を示す。

腐食ひび割れ発生時期は，あきが小さい方が早い。あきが小さいことで，水平はく離ひび割れが先行し，鉄筋に沿ったひび割れが発生しない。この場合，コンクリート中の塩化物イオン濃度の増加は緩やかであり，ひび割れ後の急激な腐食量の増加は生じていない。連成解析を行うことで，かぶりとあきの構造条件が，ひび割れ発生モード，ひび割れ発生時間に影響を与えることが示された。

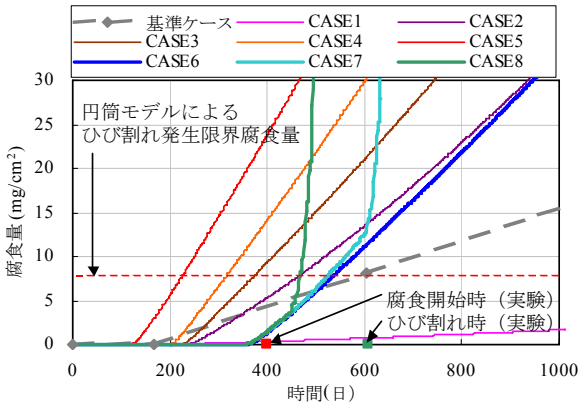

図-3　腐食量の経時変化

5．まとめ

マクロセル腐食を定式化した腐食進展解析手法により，鉄筋コンクリートにひび割れがない状態でも，材料の不均一性による塩化物イオン濃度の拡散係数のばらつきを要因とするマクロセル腐食により腐食が進行することを示した。適切な条件を設定することで，マクロセルを考慮した進展期での照査が可能になると考えられる。また，耐久・構造連成解析システムにより鉄筋のかぶりとあきなどの構造条件をひび割れ発生モード，ひび割れ発生時間に反映でき，ひび割れ発生後の構造性能の予測に有用となると考えられる。

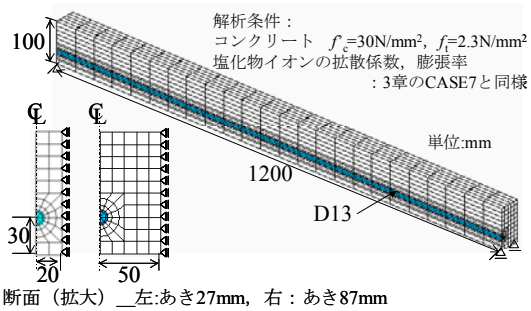

図-4　解析モデル

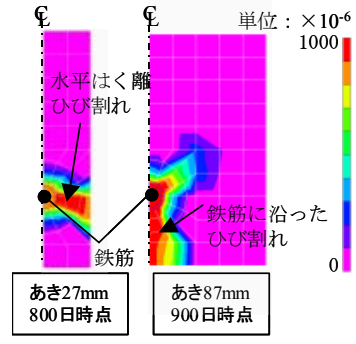

図-5　最大引張ひずみコンター

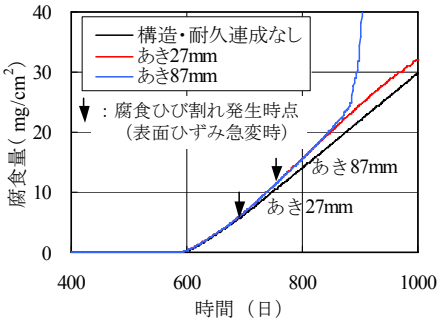

図-6　腐食量の経時変化

参考文献

1) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338 委員会）委員会報告書，コンクリート技術シリーズ 86，2007.
2) 丸屋，武田，堀口，小山，許：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.757-776，2006.11.
3) 福浦尚之，丸屋剛，武田均，小山哲：鉄筋腐食による材料劣化と荷重作用の連成解析システムの構築に関する一検討，土木学会第 62 回年次学術講演会，5-073，pp.145-146，2007.
4) Bird，H.E.H.，Pearson，B.R. and Brook，P.A.：The breakdown of passive films on iron，Corrosion Science，Vol.28，No.1，pp.81-86，1988.
5) 荒木，高谷，服部，宮川：コンクリート中の鉄筋腐食膨張圧のモデル化，土木学会第 59 回年次学術講演会，5-277，pp.551-552，2004.