

I-40

鉄筋の腐食膨張による コンクリートのひび割れ進展解析

○東北大学工学部 学生員 石幡雅弘
東北大学大学院 学生員 車谷麻緒
東北大学大学院 正員 寺田賢二郎
東北大学大学院 正員 石井建樹

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の維持管理を行う上で、塩害は莫大な事故につながるため、その劣化程度の予測手法の構築が望まれている。塩害によるひび割れモードには図-1に示すように大きく分けて3種類ある。既往の研究¹⁾では、この鉄筋軸ひび割れと表面剥離ひび割れのモードが鉄筋径 ϕ とコンクリートのかぶり C を用いた無次元量 C/ϕ が1.5以下であれば表面剥離ひび割れが生じ、それ以上であれば鉄筋軸ひび割れが生じることを、電食実験と有限要素解析によって示している。しかし、この現象が起こる発生機構については未だ不明な点が多い。本研究では、この3種類のひび割れモードのうち、鉄筋軸ひび割れと表面剥離ひび割れの2つに着目して、不連続面が新たに発生、進展していく現象を有限被覆法を用いて解析し、そのメカニズムの解明を試る。さらに、実構造物において死荷重が加わった状態での腐食ひび割れの解析を行い、実際の使用環境下におけるひび割れ挙動について考察する。

2. 有限被覆法によるひび割れ進展解析

2.1 有限被覆法の概要

本研究では有限被覆法(FCM)を用いてひび割れ進展解析を行う。FCMの特徴は、近似関数の定義される数学的な部分領域(数学領域)」と「支配方程式を満足すべき物理的な部分領域(物理被覆)」とを分離した点にあり、要素分割形状とは無関係に不連続面を発生させることができる。なお、変位に加えて材料界面に配した、Lagrange未定乗数を含む2変数の支配方程式(2.1)はALM(Augmented Lagrange Method)法によって解くことにする。

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \nabla \delta u : \sigma d\Omega + \int_{\Gamma_u} \delta u \cdot \lambda d\Gamma + \int_{\Gamma_B} (\delta u^{[1]} - \delta u^{[2]}) \cdot \lambda d\Gamma \\ = \int_{\Omega} \delta u \cdot b d\Omega + \int_{\Gamma_s} \delta u \cdot \hat{t} d\Gamma \\ \int_{\Gamma_B} \delta \lambda \cdot g d\Gamma + \int_{\Gamma_u} \delta \lambda \cdot (u - \hat{u}) d\Gamma = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 Ω は解析対象領域、 Γ は境界であり、 $\sigma^{[i]}$ 、 $u^{[i]}$ 、 $b^{[i]}$ はそれぞれ物理領域 $\Omega^{[i]}$ ($i=1,2$)におけるCauchy応力、変位ベクトル、物体力を示し、 $\hat{t}$ は表面力、添え字[1]と[2]は材料種別である。

2.2 塩害による腐食生成物膨張のモデル化

塩害による腐食生成物の膨張を再現する上で、腐食生成物がコンクリートと鉄筋の間で実際にどのような力学挙動を示すのかをモデル化しておく必要がある。本研究では次のように腐食生成物の挙動を個別に設定し、比較、検討



図-1 ひび割れモード

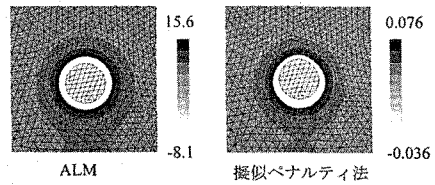


図-2 ALM法とペナルティ法(最大主応力分布 MPa)

する。

- [a] 発生した分の体積量がそのまま界面間の変位になる
- [b] 弾性が非常に小さい材料で、体積変形が大きい
- [c] 法線方向には剛で、接線方向にはすべりが生じる

2.3 ALM法とペナルティ法の比較

本研究ではALM法において未定乗数 λ に用いる界面間の相対変位に初期ギャップ g_0 を与え、これが腐食生成物の膨張変位($u^{[1]} - u^{[2]}$)であるとして、解析に際しては増分的に与えることによって腐食生成物の体積膨張を表現する。ここで、腐食生成物は鋼材表面に均一の厚さに生成されるとする。ALM法は上述したような変位を与えると、与えた変位がそのまま反映されるという特徴があり、これは上記モデル[a]に相当する。一方、ALM法の反復を行わず、ペナルティ係数の大きさを、通常はヤング率の 10^5 倍程度であるのに対して、それよりも小さく設定することによって拘束の違いによる表面力 λ の大きさの差を表現できるようにする。本研究ではこの手法を擬似ペナルティ法と呼び、上記[b]、[c]のモデルを数値解析で再現する。

まず腐食生成物のモデル化の妥当性を検証するために、ALM法と擬似ペナルティ法で引張強度を無限大にしてひび割れが発生しない条件で解析を行った。結果を図-2に示す。両者とも等方的に変位を与えたが、ALM法では場所によらずに与えた変位分だけ等方に膨張するのにに対して、擬似ペナルティ法では拘束の小さいコンクリート表面側が大きく膨らみ、拘束の違いによる表面力の違いを表現できていることが分かる。以上より以下では後者の手法によるモデル[b]あるいは[c]を採用し、前節で挙げた腐食生成物の力学的挙動を調べることにする。

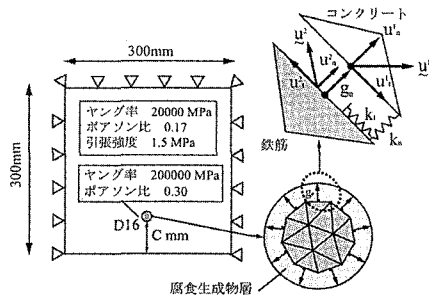


図-3 解析対象

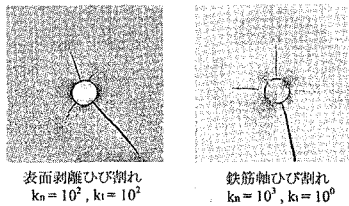


図-4 表面剥離ひび割れと軸ひび割れ (C=40mm)

3. 数値解析例

3.1 供試体を模擬した解析

鉄筋とその周囲のコンクリートを抽出し、図-3に示すような境界条件と材料定数のもと平面ひずみ条件下で、数種類のペナルティ係数とかぶり C を用いた解析を行う。結果は表のようになる。まず、既往の研究によって示されたかぶりの大きさによるひび割れモードの違いは見られない。次にペナルティ係数の変化による違いであるが、法線方向と接線方向が同じ場合にはすべて表面剥離ひび割れが発生する。これに対して、接線方向が法線方向に比べて小さい場合には鉄筋のコンクリート表面に一番近い部分に応力が集中し、結果として軸ひび割れとなる。ひび割れの図を図-4図に示す。

以上の結果より、かぶりが深いときは [b] のモデル、かぶりが浅いときは [c] の力学的挙動が既往の研究報告の結果を再現できることから、腐食生成物はかぶりが深いほど接線方向にすべりやすい性質を示し軸ひび割れとなり、逆にかぶりが浅いと両方向に剛であり、表面剥離ひび割れになると考えることができる。

3.2 実構造物を模擬した解析

より実際に近い構造物に死荷重が加わる状態で前節と同じ解析を行う。構造物は図-5に示すラーメン橋脚を用い、まず2次元有限要素解析を行う。次に応力状態が特徴的な3箇所 (A, B, C 点) に有限要素解析で得られた変位を初期状態として与えた上で有限被覆法によるひび割れ進展解析を行う。ここでは $C=40\text{mm}$, $k_n = k_t = 10^2$ の条件のみを選ぶ。解析結果としては図-5に示すようなひび割れ進展状況が得られた。すなわち、フランジの曲げによる大きな

表-1 解析条件と解析結果

	ペナルティ係数		かぶり C mm (C/ϕ)		
	法線 k_n	接線 k_t	20(1.25)	40(2.50)	60(3.75)
b	10^2	10^2	剥離	剥離	剥離
	10^3	10^3	剥離	剥離	剥離
	10^4	10^4	剥離	剥離	剥離
c	10^2	10^0	剥離	剥離	剥離
	10^3	10^0	軸	軸	軸
	10^4	10^0	軸	軸	軸

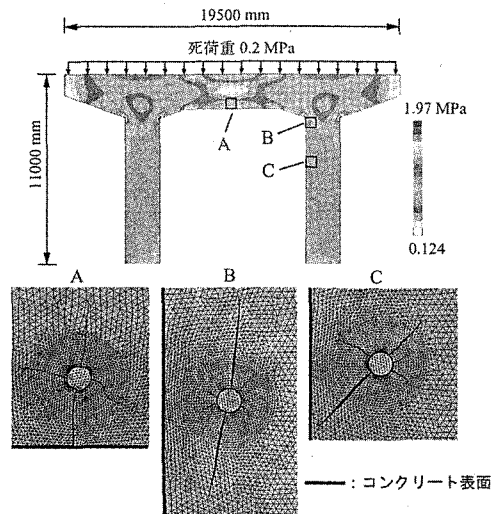


図-5 解析結果

引張力がかかる A 点では鉄筋軸ひび割れ、橋脚の軸方向に大きな圧縮力がかかる B 点では水平剥離ひび割れ、比較的小さな圧縮力がかかる C 点では、前節の解析結果と同じ表面剥離ひび割れが発生している。この結果は構造物の置かれる使用環境の違いによってもひび割れモードに変化があり、供試体で生じたひび割れモードが必ずしも実構造物において生じるとは限らないことを示唆している。

4. おわりに

本研究では、鉄筋コンクリートの塩害にみられる種々のコンクリートひび割れモードについて、その発生機構の解明を意図して有限被覆法を用いた数値解析を行った。その結果、コンクリートのかぶりに応じて、腐食生成物の力学挙動が変化しうること、また、実際の使用環境に応じてひび割れモードが異なりうることを示した。

参考文献

- 1) 松島学, 関博, 横田優: 塩害を受けるコンクリート構造物の劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1507-1512, 2002.
- 2) 石井建樹, 寺田賢二郎, 京谷孝史, 岸野佑次: 界面要素を用いた有限被覆法に基づく破壊進展解析法の開発, 土木学会論文集, No794/I-72, pp.213-225, 2005.7