

鉄筋腐食によるひび割れモードのモデル

香川大学 正会員 ○松島 学

早稲田大学 正会員 関 博

四国総合研究所 正会員 横田 優

1. 目的

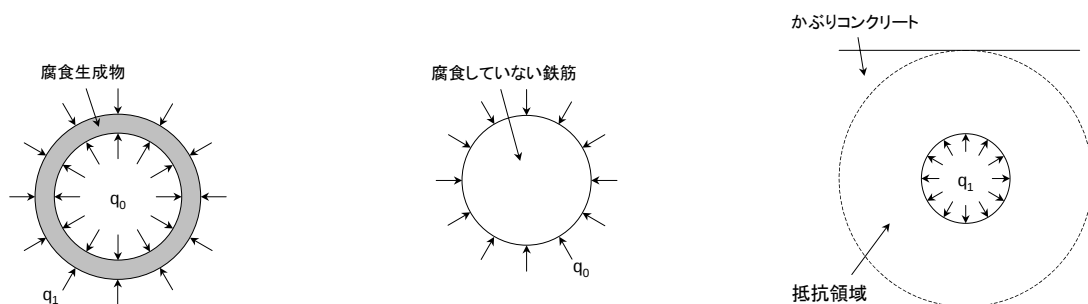
塩害を受けたコンクリート構造物の維持管理業務するため、劣化程度の将来予測が必要である。鉄筋腐食によりコンクリート表面にひび割れやはく離が生じることは、現場の観察などでも明らかである。本研究では、かぶり、鉄筋間隔、鉄筋径の相互関係によりひび割れのモードが異なることを物理的な力学モデルを構築し、説明したものである。

2. ひび割れ発生モデル

十分にかぶりや鉄筋間隔がある場合、鉄筋の腐食膨張によるひび割れは、主鉄筋に沿ったひび割れが生じる。しかし、鉄筋間隔が密に配筋された場合や鉄筋のかぶりが薄い場合は、鉄筋に沿った水平のひび割れ（水平はく離ひび割れ）やはく離ひび割れが発生することが明らかである。

(1)鉄筋に沿ったひび割れのモデル

かぶりや鉄筋間隔が十分にある場合、腐食性生物の膨張により鉄筋に沿った腐食ひび割れが生じる。その力学モデルを図-1 に示す。図に見られるように膨張した腐食生成物により腐食していない鉄筋に生じる膨張圧 q_0 とかぶり部に生じる圧力 q_1 が発生する。圧力 q_1 によりコンクリート表面にひび割れが生じると仮定した。腐食膨張圧によるひび割れ発生モデルとして厚肉円筒モデルを採用し（図-1(c)参照）、コンクリート表面のひび割れ発生条件として、平均応力説に基づいて、かぶり部のコンクリートの平均引張応力 σ_t を計算し、コンクリートの引張強度 f_{tu} を超えると、鉄筋に沿ったひび割れが発生するとした。



(a)鉄筋に作用する圧力

(b)腐食生成物に作用する圧力

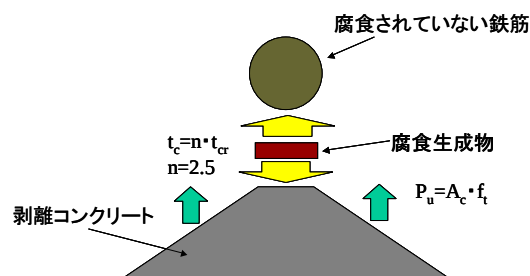
(c) コンクリートに作用する圧力

図-1 鉄筋に沿ったひび割れ発生モデル

(2)表面はく離ひび割れのモデル

かぶりが小さい場合、鉄筋腐食による膨張ひび割れによって表面コンクリートがはく離する。表面コンクリートのはく離ひび割れは、図-2 のように 45° 方向に生じると仮定し、次のように力学モデルを構築した。はく離ひび割れが発生するコンクリート面に働く力 P_c は、式(1)のように表される。

$$P_c = \frac{\phi \cdot E_c}{t_c} u_c$$



(1) 図-2 表面はく離ひび割れの力学モデル

キーワード 劣化モデル, 鉄筋腐食, はく離ひび割れ, 水平ひび割れ, 鉄筋に沿ったひび割れ

連絡先 〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20 香川大学工学部安全システム建設工学科 TEL 087-864-2187

ここで、 ϕ ：鉄筋径(mm)、 E_c ：コンクリートのヤング率(N/mm²)、 t_c ：かぶり(mm)、 u_c ：はく離ひび割れが生じるために必要なコンクリート部の変位である。腐食鉄筋の膨張圧によるコンクリートに生じる引張力 P_{cr} は、式(2)のように表される。

$$P_{cr} = \frac{\phi \cdot E_{cr}}{2n \cdot t_{cr}} u_{cr} \quad (2)$$

ここで、 E_{cr} ：腐食生成物のヤング率(N/mm²)、 n ：腐食生成物の膨張率(=2.5 と仮定した)、 t_{cr} ：腐食した鉄筋の厚さ(mm)で腐食減量 Δ_r (%)と式(3)のような関係がある。

$$t_{cr} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \Delta_r / 100} \right) \quad (3)$$

u_{cr} ：はく離ひび割れが生じるために必要な腐食膨張による鉄筋の変位である。式(1)、式(2)と式(4)に示す変位の適合性と $P_{cr}=P_c$ の釣り合いからはく離ひび割れ発生時の腐食減量厚さ t_{cr} とはく離ひび割れ時の荷重 P_{cr} の関係は式(5)のように表される。

$$u_c + u_{cr} = (n-1)2t_{cr} \quad (4) \quad P_c = \frac{2n \cdot t_c \cdot t_{cr} \cdot E_c \cdot E_{cr}}{n(2n \cdot t_{cr} \cdot E_c + t_c \cdot E_{cr})} \quad (5)$$

引張力 P_c がひび割れ面の引張力 $P_f=2t_c \cdot f_{tu}$ に達した時、はく離ひび割れが発生すると考えた。ここで、 f_{tu} はコンクリートの引張強度(N/mm²)である。

(3)水平はく離ひび割れのモデル

鉄筋が密に配筋された梁などでは、ひび割れは鉄筋に沿ったひび割れよりも主筋同士を結ぶような図-3 のような水平のはく離ひび割れが発生することが多い。腐食した鉄筋は、強制変位によりコンクリートに引張応力を生じさせ、せん断補強筋とコンクリートの引張力により抵抗する。水平はく離ひび割れ面のコンクリート部に生じる引張力 P_c は、式(6)で表される。

$$P_c = K_c \cdot u_c = \frac{\{n\phi - 1\}(\ell_\phi - \phi) + 2t_c\}E_c}{t_c} u_c \quad (6)$$

ここで、 n_ϕ ：鉄筋の本数、 ℓ_ϕ ：鉄筋間隔(mm)、 u_c ：水平はく離ひび割れが生じた時のひび割れ面の変位である。各鉄筋の腐食鉄筋の膨張圧によるコンクリートに生じる引張力 P_{cr} およびせん断補強筋に生じる引張力 P_s は、式(7)および(8)のように表される。

$$P_{cr} = K_{cr} \cdot u_{cr} = \frac{n_\phi \cdot \phi \cdot E_{cr}}{2n \cdot t_{cr}} u_{cr} \quad (7)$$

$$P_s = K_s \cdot u_s = \frac{2a_s \cdot E_s}{\ell_B} u_s \quad (8)$$

ここで、 ℓ_B は定着長さで、ひずみを三角形分布とし、分布長さを 2ϕ と仮定すると、 $\ell_B = \phi$ となる。 a_s はせん断補強筋の断面積(mm²)である。応力と変位の適合条件は、式(9.a)、式(9.b)のとおりである。

$$u_c + u_{cr} = u_s + u_{cr} = (n-1)2t_{cr} \quad (9.a)$$

$$P_s + P_c = P_{cr} \quad (9.b)$$

したがって、コンクリート部に生じる引張力は、式(10)のようになる。

$$P_c = K_c \frac{2(n-1)t_{cr}}{1 + (K_s + K_c)/K_{cr}} \quad (10)$$

式(10)の引張力 P_c が式(11)のひび割れ面の引張力 P_f に達した時、はく離ひび割れが発生すると考える。

$$P_f = 2\alpha \{n_\phi - 1\}(\ell_\phi - \phi) + 2t_c\} \cdot f_{tu} \quad (11)$$

ここで、 α はひび割れ面の応力の分布を考慮する係数で、1/1.5 とする。

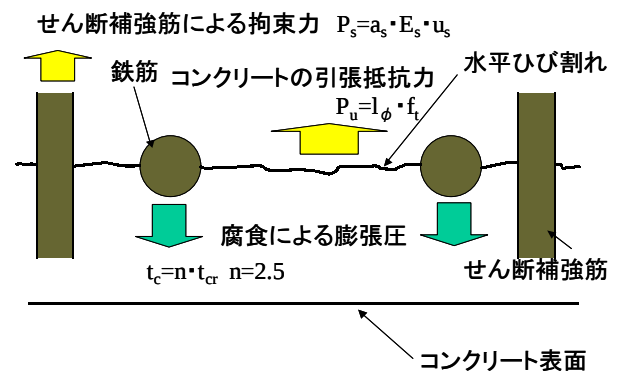


図-3 水平はく離ひび割れの力学モデル