簡単に言うと、
「腐食性環境」：常に海水中にある場合、塩分を含んだ大気中にある場合。
「特に厳しい腐食性環境」：海水中につかったり乾燥したりする感潮部および飛沫帯にある場合、または海上大気中にあって、ときどき海水のしぶきがかかる場合。

5.3　曲げひび割れ幅の予測

(1)曲げひび割れ幅の予測式

・RCはりに曲げモーメントが作用 → 曲げ応力により、はりの曲げ引張縁から曲げひび割れが発生する。
・曲げモーメントが増加 → ひび割れの本数は増加し、ひび割れ間隔は減少する。
○ひび割れ間のコンクリート ← 鉄筋との付着で、引張に抵抗する（引張応力の発生）。
・ある程度のひび割れ本数 → 付着伝達長さの減少により、新たなひび割れはそれ以上、発生しなくなる。
○RCはりの曲げ引張側　→　安定した状態となる。
○この状態のRCはりの曲げ引張側に着目すると、軸引張を受けるRC棒部材と等価と見なせる。鉄筋がコンクリートの中心に1本配置されていると仮定する（図5.1参照）。

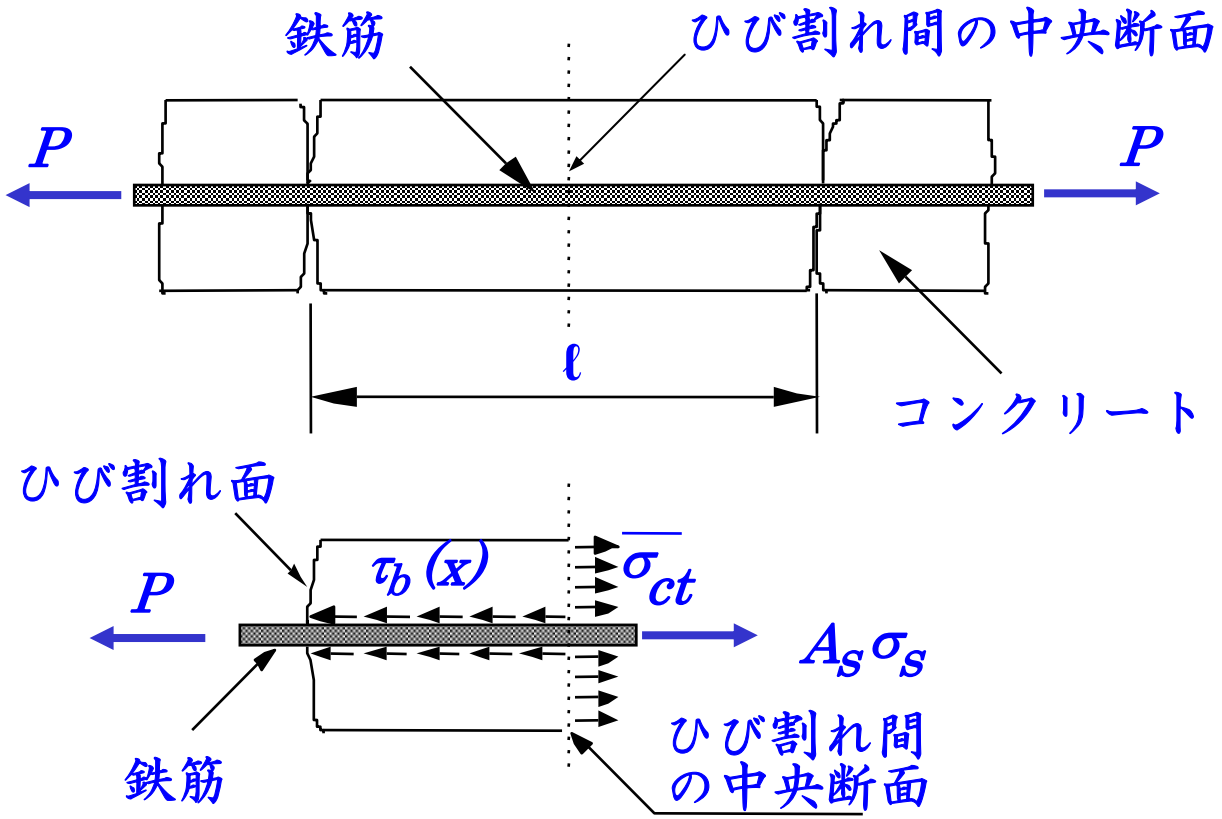

図5.1　鉄筋とコンクリートの付着に関する概念図

○ひび割れ間隔をℓとする。ひび割れ間の中央断面における力の釣合から以下の関係を得る。

$$P = A_s\,\sigma_s + A_e\,\overline{\sigma_{ct}} \quad , \quad P - A_s\,\sigma_s = \int_0^{l/2} \tau_b(x)\,U\,dx$$

$$\int_0^{l/2} \tau_b(x)\,U\,dx = \overline{\tau_b}\,U\,\frac{l}{2} = \overline{\sigma_{ct}}\,A_e \qquad (5.1)$$

ただし、$\overline{\tau_b}$　　：隣接するひび割れ間の平均付着応力

ℓ　　：ひび割れ間隔

U　　：鉄筋の周長

A_e　　：かぶりコンクリートの有効断面積

$\overline{\sigma_{ct}}$　　：ひび割れ間の中央断面におけるコンクリートの平均引張応力

鉄筋の引張力Pと平均付着応力の関係を実験的に調べた結果、$\overline{\tau_b}$ には極大値が存在することがわかった。この $\overline{\tau_b} = \overline{\tau_{b.\,max}}$ の点で、ひび割れ間隔 ℓ は安定となる（図5.2）。

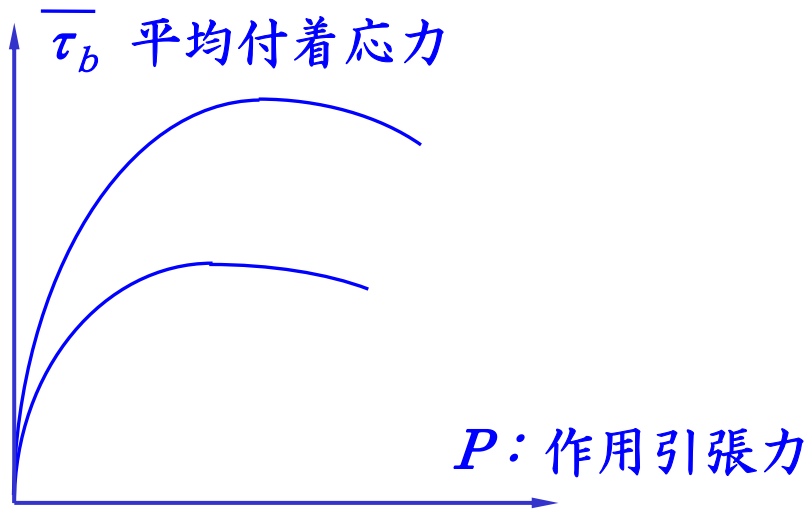

図5.2　作用引張力と平均付着応力の関係

○ $\overline{\sigma_{ct}}$ がある限界値に達したとき、すなわち、k f_t に達したとき、新しいひび割れが発生する。ただし、k ： ひび割れ間中央断面における応力分布に関する係数、f_t ： コンクリートの引張強度。

○したがって、ひび割れの発生が安定するひび割れ間隔をℓ_{st}とすると、式(5.1)より

$$l_{st} = \frac{2\,k\,f_t\,A_e}{\overline{\tau_{b.\,max}}\,U} \qquad (5.2)$$

○なお、2本以上の鉄筋が配置されているとき、
A_eは鋼材全体の図心位置から定める。

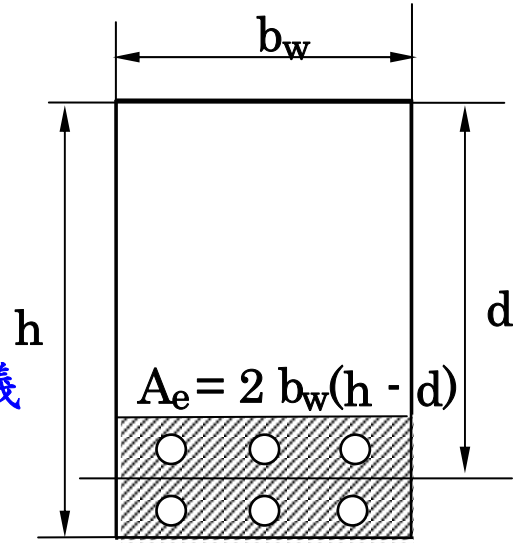

図5.3　コンクリートの有効面積A_eの定義

○簡単のため最大平均付着応力 $\overline{\tau_{b.\,max}}$ がコンクリートの引張強度f_tに比例すると仮定すると

$$\overline{\tau_{b.\,max}} = k_1\,f_t \qquad (5.3)$$

ただし、k_1：付着特性を表す係数

○式(5.3)を式(5.2)に代入し、鉄筋とコンクリートの有効断面積A_eの比p_eを用いると、

$$l_{st} = k_2\,\frac{\phi}{p_e} \qquad (5.4)$$

ただし、k_2：付着特性に関する係数、ϕ：鉄筋径

○式(5.4)は1938年にSaligerにより提案された。しかし、その後の研究で、式(5.4)はRCの曲げ部材に対する適合性に欠けることがわかってきた。

○北大の角田教授は、$\overline{\tau_{b.\,max}}$ はコンクリートの引張強度 f_t だけでなく、鉄筋径φ、コンクリート有効断面積A_e、およびかぶりcにも依存することを見出した。

$$\overline{\tau_{b.\,max}} = k_3\, f_t\, \frac{A_e}{c\,\phi} \qquad (5.5)$$

式(5.5)を式(5.2)に代入すると、 $l_{st} = k_4\, c$ (5.6)

ただし、k_4は付着特性に関する係数。D16~D32に対して、k_4=5.4 程度。

○鉄筋本数が2本以上の場合、鉄筋の純間隔 e_sを考慮し、式(5.6)は修正される。

$$l_{st} = \frac{k_4\, c}{1.45}\left(1 + 0.18\,\frac{e_s}{c}\right) \qquad (5.7)$$

◎ひび割れ幅wを算定するには、以下の関係を用いる（図5.4）。

$$w = (\overline{\varepsilon_s} - \overline{\varepsilon_c})\cdot\, l \qquad (5.8)$$

ただし、$\overline{\varepsilon_s}$ ：ひび割れ間の鉄筋の平均引張ひずみ

$\overline{\varepsilon_c}$ ：ひび割れ間のコンクリートの平均引張ひずみ

ℓ ：ひび割れ間隔

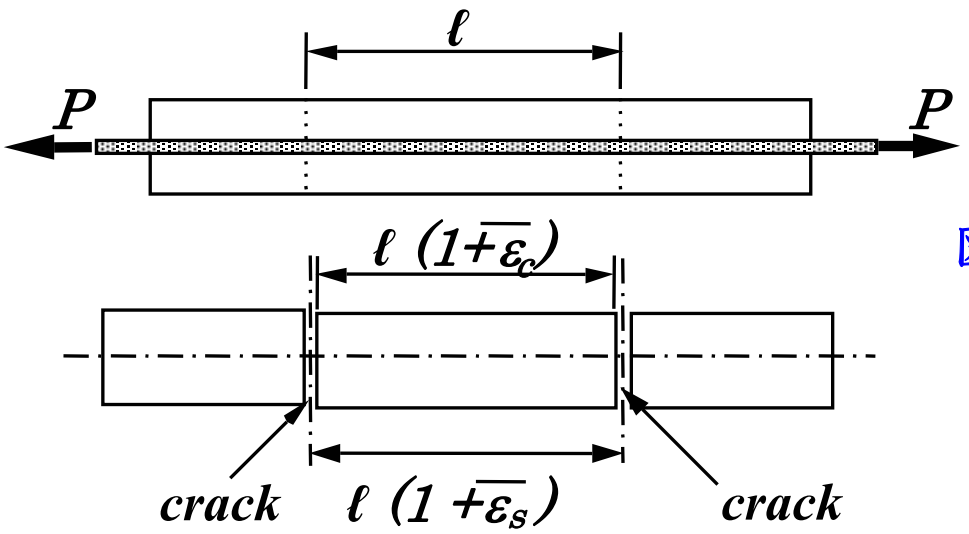

図5.4　ひび割れ幅算定の考え方

○ひび割れ間のコンクリートの平均引張ひずみ $\overline{\varepsilon_c}$ は、二つの成分に分けられる。

$$\overline{\varepsilon_c} = \overline{\varepsilon_{ce}} - \varepsilon'_{cs} \qquad (5.9)$$

ただし、 $\overline{\varepsilon_{ce}}$ ：作用引張力による平均引張ひずみ

ε'_{cs} ：乾燥収縮・クリープによる圧縮ひずみ（縮み）

○ひび割れ間の鉄筋の平均引張ひずみ $\overline{\varepsilon_s}$ は、

$$\overline{\varepsilon_s} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\overline{\sigma_t}}{E_s\, p_e} \qquad (5.10)$$

ただし、 σ_s ：ひび割れ位置での鉄筋応力、　E_s ：鉄筋のヤング係数、

$\overline{\sigma_t}$ ：ひび割れ間のコンクリートの平均引張応力、

$$= \begin{bmatrix} 0.4\ f_t\,(temporary\ load) \\ 0\ (permanent\ load) \\ \pm 0.2\ f_t\,(cyclic\ load) \end{bmatrix}$$

○ $\overline{\sigma_t}$ は付着による tension stiffening 効果と考えてよい。一般に、(5.9)式の $\overline{\varepsilon_{ce}}$ は他の成分に比較して無視しうる。よって、(5.7)～(5.10)式より、

$$w_{max} = \left(\overline{\varepsilon_s} - \overline{\varepsilon_c}\right) \cdot l_{st} = \frac{5.4\,c}{1.45}\left(1 + 0.18\,\frac{e_s}{c}\right)\left(\frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{\overline{\sigma_t}}{E_s\,p_e} + \varepsilon'_{cs}\right) \quad (5.11)$$

(2) 曲げひび割れ算定のための設計式【参考】

○コンクリート標準示方書には、以下の式が規定されている。

$$w = k\,\left\{4\,c + 0.7\,(c_s - \phi)\right\}\left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{cs}\right) \quad (5.12)$$

ただし、k：鋼材の付着特性を考慮する係数。異形鉄筋は1.0、丸鋼・PC鋼材は1.3。

c：かぶり

c_s：鋼材の中心間隔

ϕ：鋼材径

ε_{cs}'：コンクリートの乾燥収縮・クリープによるひび割れ幅の増加を考慮する数値で、一般に150×10^{-6}程度。

σ_{se}：外力による鋼材の引張応力

E_s：鋼材のヤング係数

(3) 曲げひび割れ計算時の基本仮定（復習）

○曲げひび割れの計算時は、コンクリートは圧縮に対して弾性体、鋼材は弾性体とする。平面保持、完全付着を仮定してよい。ただし、コンクリートの引張応力は無視する。