

論文

[2025] 一軸鉄筋コンクリート部材におけるひびわれ発生過程および引張剛性の解析

正会員 ○篠原賢至 (徳島大学大学院)

正会員 島 弘 (徳島大学工学部)

1. はじめに

RC部材が引張力を受けるとき、ひびわれが発生した後におけるRC部材の引張剛性は、鉄筋単体の引張剛性よりも大きくなる。これは、鉄筋とコンクリートとの間に生じる付着応力によって、鉄筋からコンクリートに力が伝達され、鉄筋とコンクリートとが共同して外力に抵抗するためである。RC構造物の変形を精度よく予測するためには、このようなRC部材の引張剛性を評価することが重要となる。

引張剛性を解析的に求めようとした研究には、森田ら¹⁾、吉川ら²⁾、あるいはSomayajiら³⁾などのものがある。しかし、これらの解析では、新しいひびわれは、それまでのひびわれ間の真中に発生するとしている。そのため、引張剛性が上界値・下界値を有して確定値が得られず、それらの平均、あるいは実験値に合うようなパラメーターを用いて引張剛性を評価している。

本研究は、RC部材内におけるひびわれ発生を、ひびわれ発生時および発生場所に関して実際の挙動に基づいて考えるために、引張強度が部材内の各断面においてばらつきのあることを考慮して、一軸RC引張部材におけるひびわれ発生過程および引張剛性を解析的に求めるものである。

2. 解析方法

(1) 引張強度の分布

RC引張部材におけるひびわれ発生過程を解析的に求めるには、ひびわれ発生時および発生場所を決定しなければならない。RC引張部材におけるひびわれ発生は、コンクリートの引張応力が引張強度に達した断面で発生する。しかし、RC部材内におけるコンクリートの引張強度が、部材内の各断面でばらついているため、ひびわれはランダムに発生する。本解析では、一軸RC部材内の各断面におけるコンクリートの引張強度のばらつきを考慮して、ひびわれ発生時および発生場所を決定する。

部材内の各断面における引張強度のばらつきを考慮するために、図-1に示すように、部材を、軸に直角方向に分割した各断面にコンクリートの引張強度をランダムに与えた。部材中の強度分布に関する定量的な情報がないため、各断面における引張強度のばらつきは、最も一般的な確率

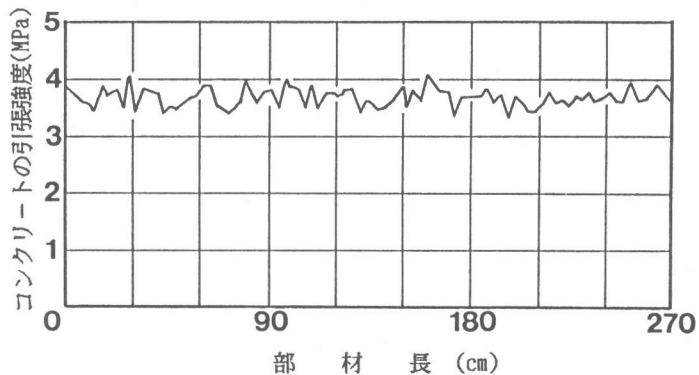


図-1 部材軸方向のコンクリートの引張強度分布

分布である正規分布に従っているものと仮定した。正規分布に従った乱数を与える方法としては、(1)式⁴⁾で表されるボックス・ミュラー法を用いた。

$$f_{tx} = \sigma \sqrt{-2 \log r_1} \sin 2\pi r_2 + f_{t0} \quad (1)$$

ここで、 σ ：標準偏差 (MPa)

r_1, r_2 ：0以上1未満の乱数

f_{tx} ：コンクリートの引張強度 (MPa)

f_{t0} ：コンクリートの平均引張強度 (MPa)

であり、コンクリートの平均引張強度 f_{t0} は、

$$f_{t0} = 0.269 f_c^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 f_c ：コンクリートの圧縮強度 (MPa)

とした。ボックス・ミュラー法は、正規分布に従った乱数を与えるため、極端に大きい値または極端に小さい値を発生する可能性がある。しかし、これでは実際のRC部材の挙動と異なってくる。このため、今回は、各断面における引張強度の値を、図-2のように、平均値から $\pm 2\sigma$ の範囲にあると仮定したが、部材中の強度分布式については、さらに今後検討する必要がある。1ヶの断面幅は、コンクリートの骨材の最大寸法を考慮して3cmとした。

(2) 鉄筋のひずみ分布

RC部材の引張剛性は、鉄筋の剛性にコンクリートの剛性を重ね合わせることによって評価できる。コンクリートの引張剛性は、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を用いて表し、コンクリートの平均ひずみは部材の平均ひずみとする。部材の平均ひずみは鉄筋の平均ひずみと等しいため、鉄筋の平均ひずみを求めることにより、コンクリートの平均ひずみとする。本研究では、鉄筋のひずみ分布は、付着応力の分布形を仮定することにより求める。また、付着の低下による鉄筋の引き抜けは無視している。

付着応力の分布形は、ひびわれ間隔が十分長い場合と短い場合とで異なっている。したがって、この両者を分けて考える。ひびわれ間隔が十分長い場合における付着応力分布、鉄筋のひずみ分布、コンクリートの応力分布を図-3に示す。この場合の付着応力は、ひびわれ断面から引張力伝達長 L_{tt} の区間で発生して、その他の区間ではきわめて小さい値となる。この、ひびわれ断面から L_{tt} の区間での付着

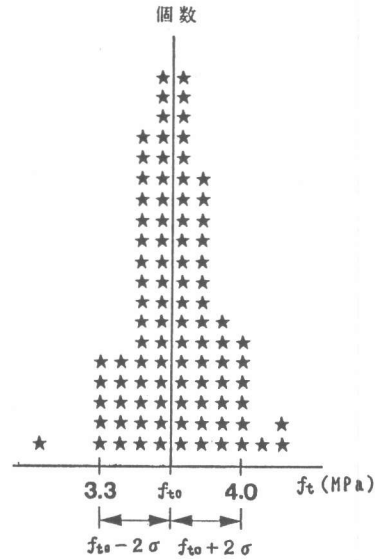


図-2 ボックス・ミュラー法による引張強度の分布

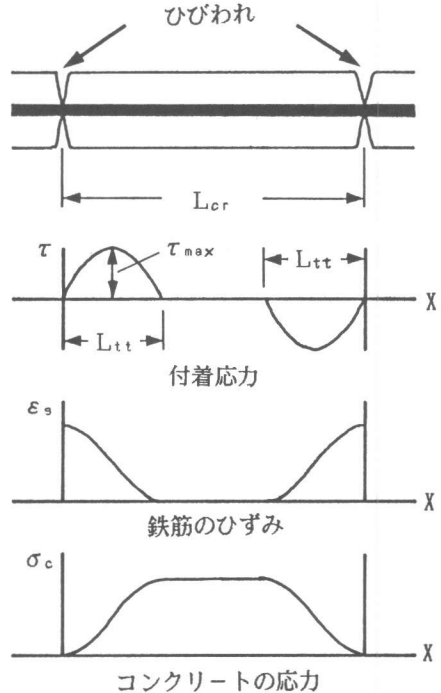


図-3 ひびわれ間隔が十分長い場合の付着応力分布、鉄筋のひずみ分布、コンクリートの応力分布

応力分布を(3)式で仮定する。

$$\tau_x = \tau_{max} \sin(\pi x / L_{tt}) \quad (3)$$

ここで、 τ_x : x位置における付着応力 (MPa)

τ_{max} : 最大付着応力 (MPa)

L_{tt} : 引張力伝達長 (cm)

D : 鉄筋径 (cm)

であり、 L_{tt} は力のつり合いより(4)式のように与えられる。

$$L_{tt} = P / (2D \tau_{max}) \quad (4)$$

ここで、P : 引張荷重(N)

τ_{max} : 最大付着応力(MPa)

である。ひびわれ間隔が十分長い場合の最大付着応力 τ_{max} は、 $f_c^{2/3}$ に比例する⁶⁾として(5)式で与えた。

$$\tau_{max} = 0.6 f_c^{2/3} \quad (5)$$

(3)式と付着の釣合式とにより、ひびわれ間隔が十分長い場合の鉄筋のひずみ分布式(6)式が得られる。

$$\epsilon_x = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{4 L_{tt}}{\pi E_s D} \tau_{max} (1 - \cos \frac{\pi}{L_{tt}} x) \quad (6)$$

ここで、 ϵ_x : x位置における鉄筋のひずみ

E_s : 鉄筋のヤング係数 (MPa)

A_s : 鉄筋の断面積 (cm²)

である。

次に、ひびわれ間隔が短い場合における付着応力分布、鉄筋のひずみ分布、コンクリートの応力分布を図-4に示す。ひびわれ間隔が短い場合とは、ひびわれ間隔が引張力伝達長の2倍よりも短くなり、この間隔内においてはひびわれが入らなくなった場合である。この場合の付着応力分布は、ひびわれ断面とひびわれ間の中央とで付着応力が0となる。この場合の付着応力分布を(7)式で仮定する。

$$\tau_x = \tau_{max} \sin(2\pi x / L_{cr}) \quad (7)$$

ここで、 L_{cr} : ひびわれ間隔 (cm)

である。ひびわれ間隔が短くなった場合、付着応力は、引張力が増加するにしたがって鉄筋のひずみが大きくなるために減少する⁷⁾。付着応力の低下を考えるために、ひびわれ間隔が短くなった場合の τ_{max} を次式で仮定した。

$$\tau_{max} = 0.6 f_c^{2/3} \exp(- (P/P_0 - 1)) \quad (8)$$

ここで、 P_0 : 初期ひびわれ発生荷重 (N)

である。この付着応力の低下については、縦ひびわれおよびひびわれ面からの距離などによっても影響されると思われるので、今後さらに検討が必要である。(7)式と付着の釣合式とにより、ひびわれ間隔が短くなった場合の鉄筋の

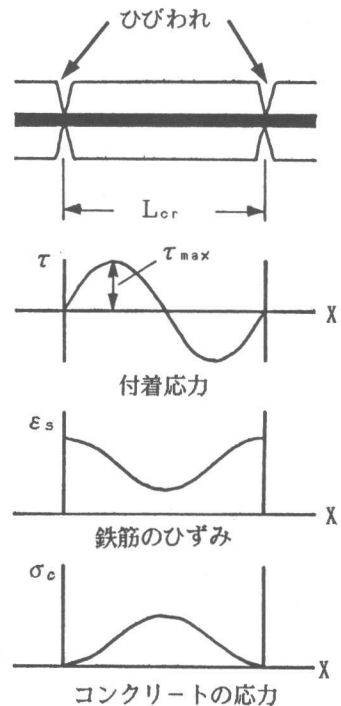


図-4 ひびわれ間隔が短い場合の付着応力分布、鉄筋のひずみ分布、コンクリートの応力分布

ひずみ分布式(9)式が得られる。

$$\varepsilon_x = \frac{P}{E_s A_s} - \frac{2 L_{cr}}{\pi E_s D} \tau_{max} (1 - \cos \frac{2\pi}{L_{cr}} x) \quad (9)$$

ここで、 L_{cr} ：ひびわれ間隔 (cm)

である。

(3) コンクリートの応力分布

コンクリートの応力分布は、引張力から鉄筋が負担している力を差し引いてコンクリート断面積で除したものであり、(10)式を用いて求めることができる。

$$\sigma_{cx} = P / A_c - p E_s \varepsilon_x \quad (10)$$

ここで、 σ_{cx} ：任意断面でのコンクリートの応力(MPa)

A_c ：コンクリートの断面積(cm²)

p ：鉄筋比

E_s ：鉄筋の弾性係数(MPa)

である。

(4) コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係の計算

図-5に、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係の計算方法を示す。(1)式を用い各断面に引張強度を与える。荷重Pを与え引張力伝達長 L_{tr} を決定する。各断面ごとに鉄筋のひずみ、コンクリートの応力を計算するために、ひび割れ間隔が長い区間での断面か、あるいは短い区間での断面かを判定する。もし、ひび割れ間隔が長い区間での断面であれば、(6)式および(10)式を用い、鉄筋のひずみ、コンクリートの応力を求める。一方、ひび割れ間隔が短い区間での断面であれば(9)式および(10)式を用い、鉄筋のひずみ、コンクリートの応力を求める。ここで、コンクリートの応力とその断面のコンクリートの引張強度とを比較する。もし、コンクリートの応力がコンクリートの引張強度よりも大きくなった断面があれば、その断面でひびわれを発生させる。この計算を全断面について行った後、各断面ごとの鉄筋のひずみ分布、コンクリートの応力分布を積分して、部材長で除することにより、コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係を求める。

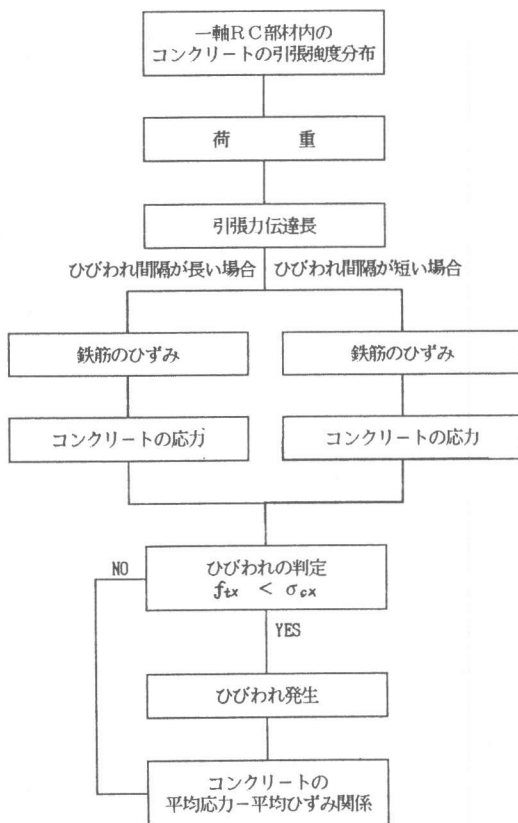


図-5 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係の計算方法

3. 結果および考察

図-6に、コンクリートの応力分布の解析結果と実験結果³⁾との比較を示した。実験結果にお

いて、ひびわれはランダムに1本ずつ発生している。また、ひびわれ間隔も、長い場合と短い場合とがいろいろ存在している。この点において、本解析ではRC部材内における引張強度のばらつきを考慮することにより、実際のRC部材のひびわれ発生過程を解析的にシミュレートできた。しかし、引張強度をランダムに与えているために、ひびわれ発生場所を一致させることはできない。また、解析結果におけるひびわれ発生荷重の増加量は、実験結果に比べて小さくなっている。これは、実際のRC部材中におけるコンクリートの引張強度のばらつきが、解析において与えた引張強度のばらつきよりも大きいためと思われる。したがって、解析精度をよりよくするためには、実際のRC部材中の引張強度の分布を調べて解析に取り入れる必要がある。

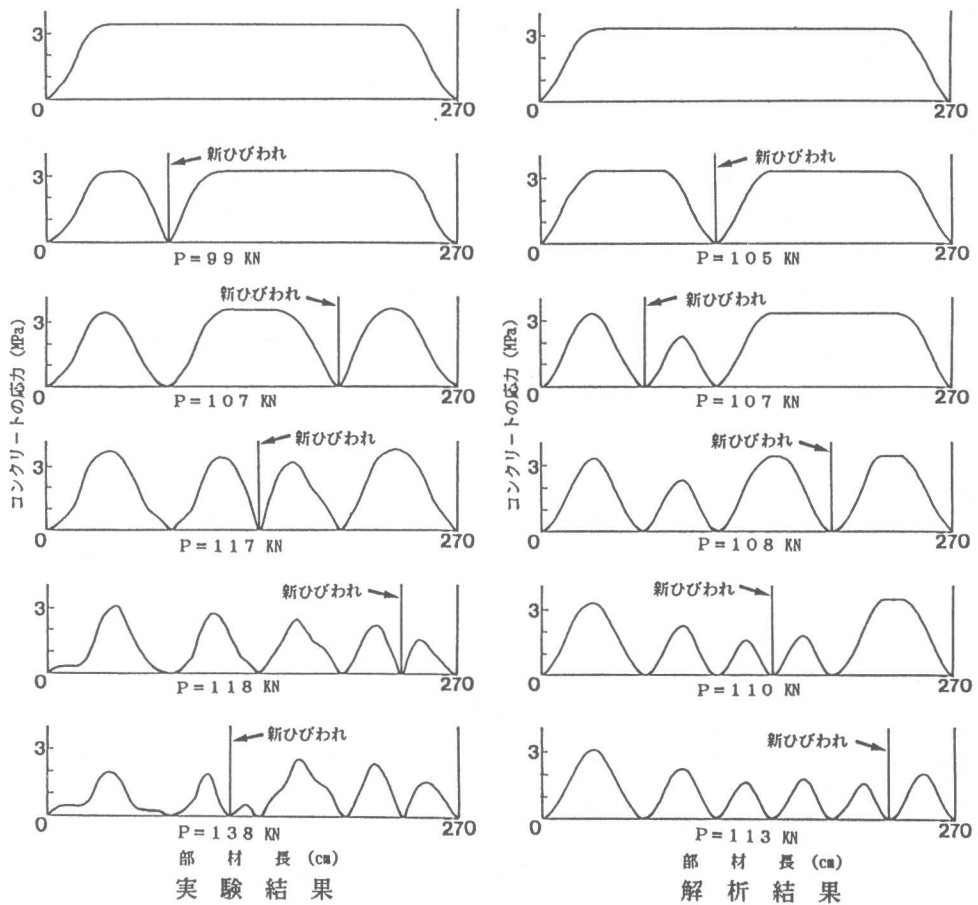


図-6 ひびわれ発生とコンクリートの引張応力分布

図-7にコンクリートの平均応力-平均ひずみ関係の解析結果と実験結果とを示す。図-7の(a), (b)は、島ら³⁾の実験結果と検証したものである。実験供試体は、部材長270cm、鉄筋比がそれぞれ1%および0.6%のものである。また、(c)は森田¹⁰⁾の実験結果、(d)は白井ら¹¹⁾の実験結果と検証したものである。実験供試体は、両者とも鉄筋比0.1%、部材長100cmのものである。この4つの図からわかるように、実験結果と解析結果とがよく一致している。特に、ひびわれ発生域においては、引張強度のばらつきを考慮してひびわれ発生時および発生場所を決定することにより、引張剛性を精度よく評価できている。また、ひびわれが発生しなくなった以後における引

張剛性の低下現象は、付着応力を低下させることにより求めることができる。このことより、鉄筋比および部材長の違いにかかわらず、引張剛性を評価できることがわかる。しかし、本解析における問題点として、鉄筋比が3%、4%と大きくなると、解析における引張剛性が実験結果よりも低下する傾向を示す。これは、付着応力分布を正弦曲線によって仮定しているために、ひびわれ発生時におけるコンクリートの応力の低下が大きくなるためと思われる。

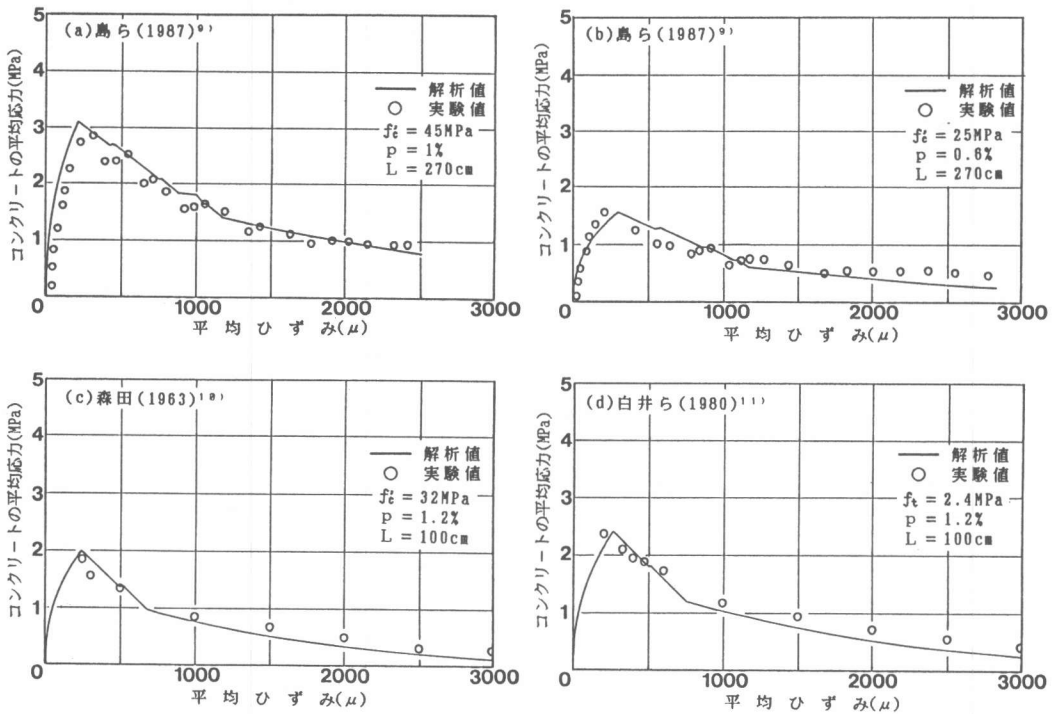


図-7 コンクリートの平均応力-平均ひずみ関係

4. 結論

- (1) 一軸RC部材内の各断面における引張強度のばらつきを考慮して、ひびわれ発生時および発生場所を決定することにより、ひびわれ発生過程を解析的にシミュレートすることができる。
- (2) ひびわれ発生域においては、引張強度のばらつきを考慮してひびわれ発生時および発生場所を決定することにより、引張剛性を精度よく評価できる。
- (3) ひびわれ間隔が短くなり、ひびわれが発生しなくなった以後における引張剛性の低下現象は、付着応力を低下させることにより求めることができる。

[参考文献] 1) 六車・森田：日本建築学会論文報告集，第134号，pp.1~8，1967年4月，2) 吉川・田辺：土木学会論文集，第366号/V-4，pp.93~102，1986年2月．3) Somayaji and S.P. Shah:ACI Journal, pp.217~225, May~June 1981. 4) 河西：構造化BASIC，技術評論社，1985年10月．5) セメント協会：コンクリート専門委員会報告，F-5，1957年5月．6) 山尾・周・二羽：土木学会論文報告集，第343号，pp.219~228，1984年3月．7) 鳥・周・岡村：土木学会論文集，第378号/V-6，pp.165~174，1987年2月．8) 篠原・鳥・玉井：昭和63年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集．9) Shima, Chou, Okamura: Journal of the faculty of engineering, The University of Tokyo (B), Vol. xxxix, No. 2, PP. 133~194, 1987. 10) 森田：セメント技術年報，No. 17，pp. 468~473，1963年．11) 佐藤・白井・加藤：日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp. 1803~1804，1980年