

[67] RC曲げ部材の変形・ひびわれにおよぼす付着の影響に関する解析的研究

正会員 佐藤良一 (防衛大学校 土木教室)

1. まえがき

RC部材の変形・ひびわれ特性が付着特性に大きく影響されることはいうまでもないことである。RC部材が荷重を受けその荷重が増加すれば、RC部材中において、一般に、付着応力の軟化領域や場合によっては付着破壊領域が現われることが知られているが、それらを解析的に明らかにした例はないように思われる。それは、解析の基礎となる付着応力-すべり量($\tau_x - \delta_x$)曲線において最大付着応力 τ_{max} から破壊にいたるまでの曲線がかなり明らかにされてきたが、必ずしも未だ確立された段階にはいたっていないことやその軟化領域を解析上取り扱うのが難しいことなどのためと思われる。

著者らは、これまでRC曲げ部材の変形・ひびわれ解析法の確立を目的として、部材中の付着応力が作用する区間で $\tau_x - \delta_x$ 曲線に基づいて定式化した基礎方程式を数値解析し、それにより得られた結果を実験結果と比較してその妥当性などを検討してきたが^{1),2)}、付着の軟化領域の検討は今後の問題点とした。

本報告は、以上のことに基づいて、 $\tau_x - \delta_x$ 曲線における軟化領域の特性や付着強度などの相異がRC曲げ部材の変形・ひびわれにおよぼす影響を解析的に検討したものである。

2. 基礎方程式²⁾

RC部材の内部機構は完全付着領域(全断面有効領域)と付着破壊領域の有無により4状態に分類される。図1はそのうちの1状態を示したものである。完全付着領域と付着破壊領域の応力・ひずみ状態はモーメントが与えられれば通常の方法により求めることができる。したがって、部材の変形・ひびわれは付着応力の作用する領域における任意断面の応力・ひずみ状態がわかれば求められる。

図2は付着応力が作用する領域の座標 x と $x + dx$ (図1参照)における断面の応力とひずみの分布をそれぞれ示したものである。ここで、 $\epsilon_{c,\Delta T}$ と $\epsilon_{s,\Delta T}$ はそれぞれコンクリートと鉄筋の温度低下による自由収縮ひずみであって、温度低下がない場合は0とすればよい。これら2つの断面において変形の適合条件および軸方向力と曲げ

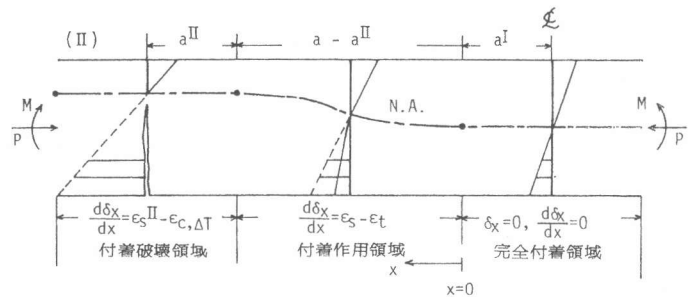


図1 RC部材の内部機構

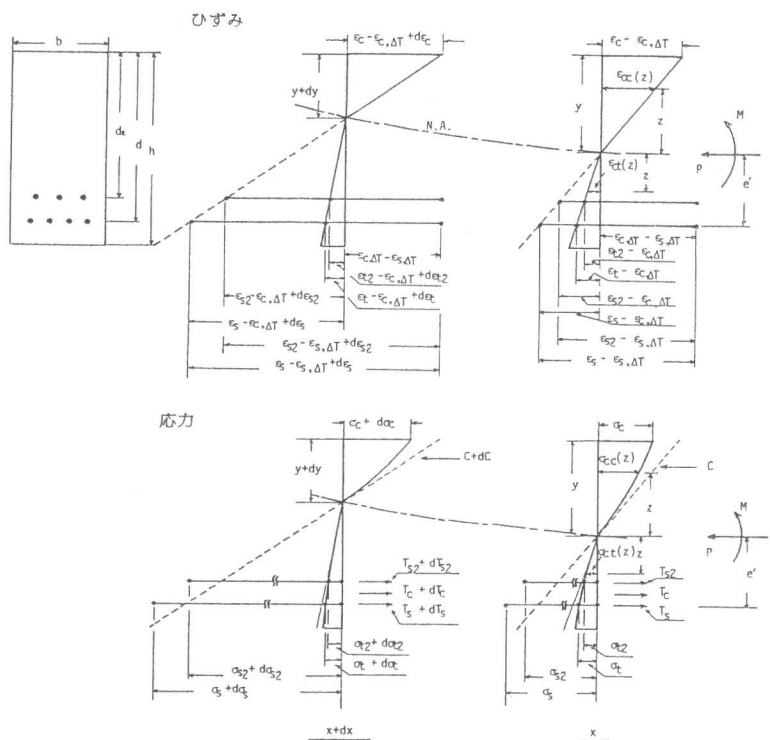


図2 応力・ひずみ分布と合力の微小距離 dx に対する変化

モーメントに関する釣り合い条件を適用し、さらにすべり量とひずみの関係および鉄筋ひずみと付着応力の関係を用いることにより最終的に次の基礎方程式が導かれる。

$$\frac{d^2 \delta_x}{dx^2} = \frac{U_s}{A_s E_s} \{1 - G(y)\} \tau_x, \quad \frac{d \delta_x}{dx} = f(y)$$

U_s : 鉄筋の周長 E_s : 鉄筋の弾性係数
 A_s : 鉄筋の断面積

ここで、 $G(y)$ 、 $f(y)$ は中立軸高さ y のみの関数であることを意味し、部材の断面諸元や材料物性値を表わす定数も含まれている。上式は τ_x と δ_x の関係を与えれば、2階の微分方程式として完全付着領域と付着破壊領域の有無に応じた境界条件（図1参照）を用いて解くことができる。

3. 付着応力—すべり量曲線（記号は図3参照）

付着特性の変形・ひびわれにおよぼす影響を調べるため軟化領域が段階的に異なる次の4種類の τ_x - δ_x 曲線を用いた。

1) $\frac{\tau_x}{\tau_{max}} = c \frac{\ln\{(e-1)\delta_x/\delta_{max} + 1\}}{(e-1)\delta_x/\delta_{max} + 1}$ 六車・森田・富田の提案式 (M, ML型)

2) $\frac{\tau_x}{\tau_{max}} = 6.75 \{e^{-0.812(\delta_x/\delta_{max})} - e^{-1.218(\delta_x/\delta_{max})}\}$ 梅村型 (U, UL型)

3) $\frac{\tau_x}{\tau_{max}} = \frac{1}{4} \frac{\delta_x}{\delta_{max}} \left(\frac{\delta_x - \delta_u}{\delta_{max}}\right)^2$ 3次曲線 (C, CL型)

4) $\frac{\tau_x}{\tau_{max}} = \frac{\delta_x}{\delta_{max}} \left(2 - \frac{\delta_x}{\delta_{max}}\right)$ 2次曲線 (P, PL型)

ここで、梅村型というのは梅村が提案したコンクリートの応力—ひずみ曲線を M, ML 型と C, CL 型の中間値を表わす式として τ_x - δ_x 曲線に採用したものである。以上の各曲線を実測値と比較して図3, 4に示す。

4. 解析結果と実験結果³⁾の比較

4.1 軟化領域の影響

図5と図6は常温および-60℃下におけるRC部材のモーメント—平均曲率 ($M-\phi_{av}$) 関係に、図7と図8は平均ひびわれ幅—鉄筋応力度 ($w_{av}-\sigma_s$) 関係 それぞれにおよぼす軟化領域の特性の影響を示したものである。

常温下の場合、解析により求められた $M-\phi_{av}$ 曲線は、軟化領域の特性に拘らずいずれも実験値より大きな剛性を示すが、軟化現象が著しく付着破壊もはやく生じるほど実験値に近くなる傾向を示す。これに対し、 $w_{av}-\sigma_s$ 関係では、軟化現象が鈍い M, U 型を用いた場合の方が軟化現象が著しい C, P 型を用いた場合より定性的にも定量的にも実験値に近い。このことは、変形解析に際して鉄筋のせん断領域からの抜け出しすなわち定着の影響を考慮することの重要性とここで対象とした RC 部材では極端な軟化現象や付着破壊は生じていないと考えられることなどを意味していると思われる。事実、前者については、実験による曲げ剛性が引張部コンクリートを無視して求めた計算値よりモーメントの高い段階で小さくなるという結果もこれを裏付けている。

実験値 (常温)

D (mm)	(kg/cm ²)	
●	16	2470
○	16	720
▲	32	2670
△	32	990

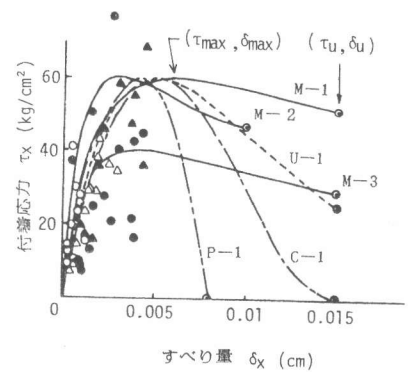


図3 付着応力—すべり曲線 (常温)

実験値 (T = -60°C)

D (mm)	(kg/cm ²)	
●	16	2830
○	16	2100
▲	32	2940
△	32	1990

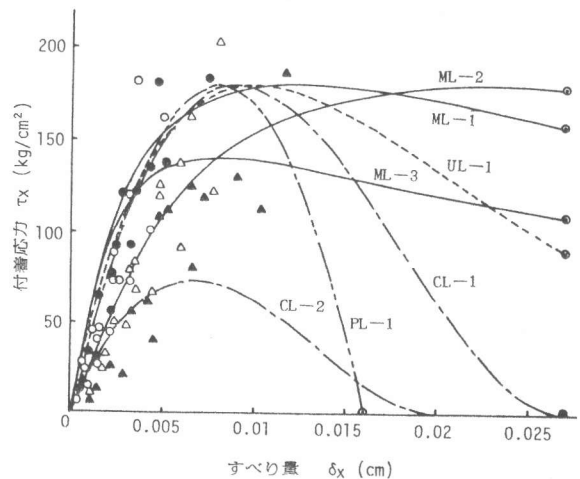


図4 付着応力—すべり曲線 (T = -60°C)

低温度下の場合には、軟化現象のもっとも鈍いML型をもっとも著しいPL型を用いた結果を比較しているが、 $M-\phi_{av}$ 関係および $\phi_{av}-\sigma_s$ 関係いずれにおいてもほとんど差はみられず、実験値ともかなり良く一致している。これは、 τ_{max} が極めて高く δ_{max} も常温下の場合より大きいため降伏直前においても軟化領域がほとんど現われなかったためである(図11参照)。したがって、このような場合には、 $\tau_x-\delta_x$ 関係を線形として計算しても妥当な解が得られると思われる。

なお、図9は、RC部材の内部機構の解析結果として、図5に示した常温下のRC部材の鉄筋応力度が 3000 kg/cm^2 の時のひびわれ間中央断面からひびわれ断面までの領域における付着応力、鉄筋ひずみおよび鉄筋と同レベルの位置のコンクリートのひずみ分布を示したものである。この図から、同じ付着強度でかつほぼ等しい付着剛性を有していても、軟化現象が著しいほどひびわれ間隔が広くなること、鉄筋の平均ひずみが大きくなることおよびコンクリートの平均ひずみが小さくなることなど、平均ひびわれ幅が大きくなることの根拠が理解できる。

4.2 付着剛性の影響

付着剛性の影響は互いに剛性が1:2の関係にある曲線、すなわち常温下の場合M-1とM-2の場合を、低温度下の場合ML-2とML-1の場合をそれぞれ比較することにより調べた。

図5~図8にはそれらの結果を示してあるが、これによれば、付着剛性が高くなれば $M-\phi_{av}$ 関係では、ひびわれ分散が小さな荷重段階で終了する傾向があるが、全体的な傾向ではそれほどの差はない。しかし、付着剛性の差が端的に表われる初期の荷重段階では、付着剛性が2倍高くなれば平均ひびわれ幅は常温下の場合で約15%、低温度下の場合で約30%小さくなる。もっとも評価の精度という意味では、とくに低温度下の場合どちらの曲線が適切であるかはこれだけの資料ではいえず、今後種々の実験結果と比較して検討する必要がある。図10は上述の解析結果に対応する内部機構を示したものであるが、付着剛性が高くなれば鉄筋およびコンクリートのひずみ変化率が大きくなりひびわれ幅の小さくなることわかる。

4.3 付着強度の影響

付着強度の相異がおよぼす影響は常温下の場合図3におけるM-1とM-3を、低温度下の場合図4におけるML-1, ML-3およびCL-2をそれぞれ用いた場合の結果を

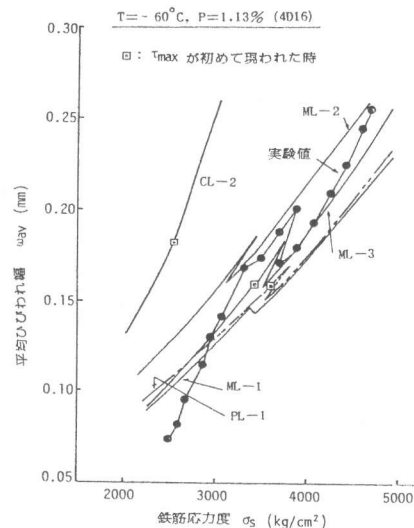


図8 平均ひびわれ幅-鉄筋応力度の関係 (-60°C)

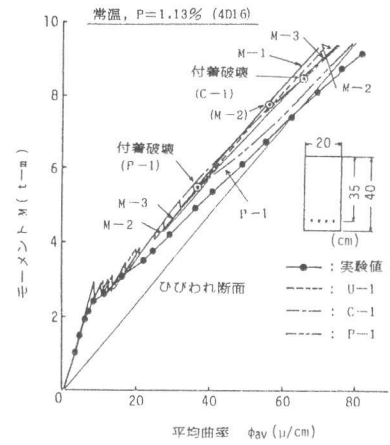


図5 モーメント-平均曲率関係 (常温)

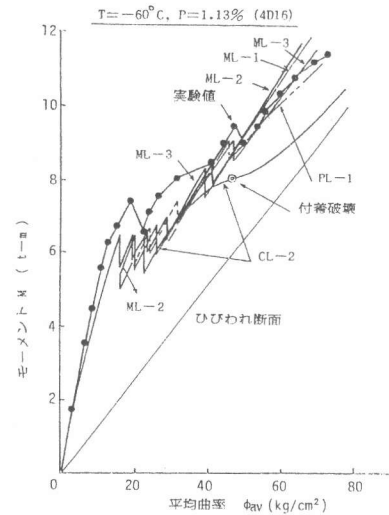


図6 モーメント-平均曲率関係 (-60°C)

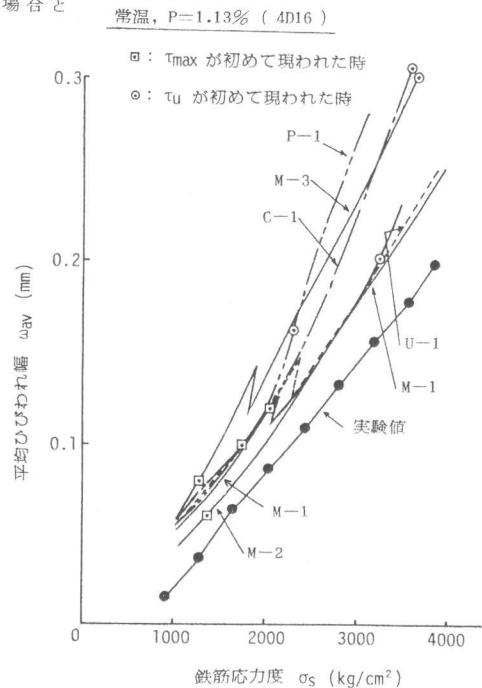


図7 平均ひびわれ幅-鉄筋応力度の関係 (常温)

比較することにより調べた(図5~図8)。

この場合も、付着強度が小さくなれば剛性が小さくなるが、その程度は小さく $M-\delta_{av}$ 関係の全体的な傾向にほとんど差はない。ただし、低温度下の CL-2 のように付着剛性が極端に小さくかつ付着破壊も起こすような場合には剛性を相当過小評価する。これに対しひびわれ幅の場合には、付着強度が小さければ初期の荷重段階から鉄筋応力度に対する平均ひびわれ幅の増加率が高い傾向にあり、とくに常温下の場合には顕著である。ただ、実験値との比較という点では、低温度下の場合付着強度の低い方が実験値とよく一致する傾向を示している。なお、図11には上述の結果に対応する内部機構を示している。

5. まとめ

本研究の範囲内で以下のことがいえる。

- 1) RC 曲げ部材の変形、ひびわれ評価に用いる $\tau_x-\delta_x$ 曲線の形としては M, ML 型および U, UL 型が適当である。
- 2) 鉄筋に沿ったひびわれが生じるような場合およびひびわれ断面近傍の局部付着破壊を除き、通常の RC 部材では変形、ひびわれに大きな影響をおよぼすような付着破壊は生じないと考えられる。
- 3) 付着剛性および付着強度は、極端な値の場合を除き、変形の全体的な評価に対してはそれほどの影響をおよぼさないが、ひびわれ幅の評価にはかなり影響をおよぼす。

6. あとがき

本研究の以上の結論はごく限られた数の実験結果との比較から得られたものであり、今後多くのパラメータを含む実験結果と比較して結論の一般化を計りたい。

参考文献

- 1) 佐藤・青柳・金津：RC 部材の温度勾配による変形拘束モーメントの解析法に関する研究，土講 34 回，1979.
- 2) Sato・Aoyagi: Analytical Studies on Deformation and Crack of Reinforced Concrete Flexural Members under Low Temp., Proc. of JSCE (投稿中).
- 3) 青柳・佐藤：極低温下における RC 部材の力学的特性，セメント・コンクリート，No 394，1979.

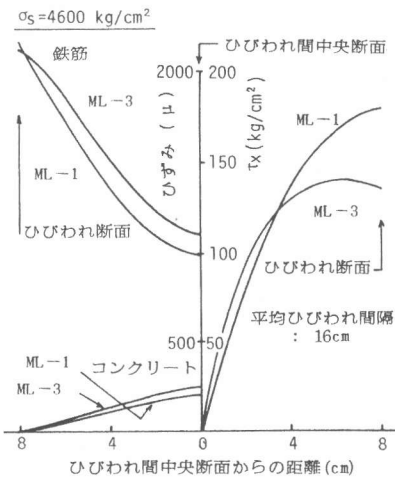


図11 付着強度がおよぼす影響

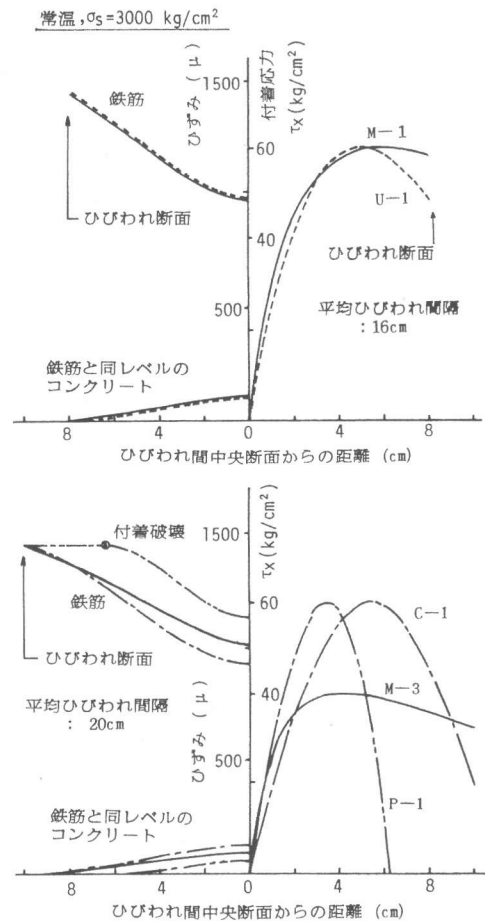


図9 軟化領域の特性がおよぼす影響

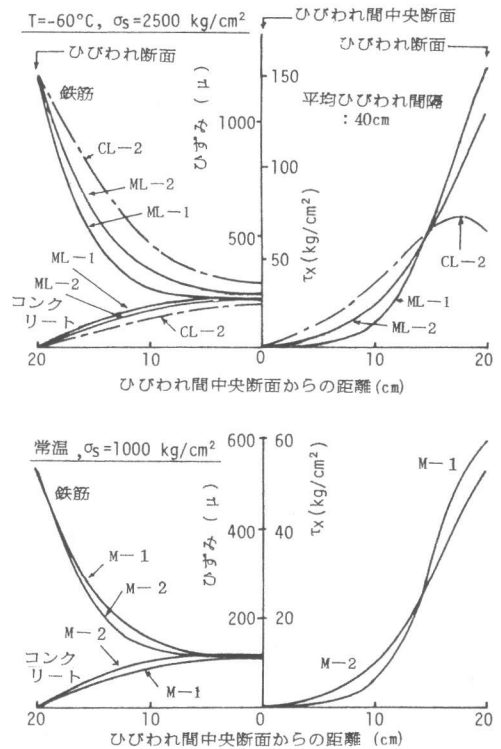


図10 付着剛性の影響