

[70] RC部材引張部の剛性評価の方法に関する研究

正会員○堺 孝司(北海道大学)

正会員 角田与史雄(北海道大学)

能町 純雄(北海道大学)

1. まえがき

1964年、CEBによって鉄筋コンクリート(RC)設計施工国際指針が公表されて以来、その基幹をなす限界状態設計法の概念が世界各国の設計基準に採用されつつあり、我国においてもこの設計思想の導入による示方書改訂のための準備が着々と進められている。限界状態設計法では、終局限界および使用限界のあらゆる限界状態に対して設計構造の安全性の検討を行なう必要がある。この内、RC部材のたわみやひびわれなどの変形挙動は、使用限界状態の観点から検討すべきものであり、使用材料の高強度化に伴って設計上その重要度が増してきた。

RC部材のたわみやひびわれなどの変形挙動を理解するためには、部材の曲げ剛性の評価が重要となり、特に、ひびわれ発生後におけるコンクリートの引張抵抗を如何に見積るかがこの問題の要になると言えよう。RC部材の曲げ抵抗に寄与するこのコンクリート引張抵抗は、荷重レベルの変化に応じて質的にも量的にも変化するものである。即ち、ひびわれ発生前においては引張部コンクリートのすべてが引張抵抗として有効に働くが、ひびわれが十分発達した状態ではそれは鉄筋とコンクリートとの共同作用としての付着作用によるものとなり、またひびわれが十分発達していない段階ではコンクリートの残存引張抵抗と付着作用によるものが共存している。しかし、コンクリートの引張応力分布形状は、ひびわれ位置およびひびわれ間あるいは荷重レベル毎に極めて複雑に変化するもので、それらを厳密に分離評価することは困難である。従って、それらの実際的な評価にあたっては種々の工夫が必要となる。これまで、RC部材引張部における鉄筋とコンクリートとの付着の共同作用に関する基礎的な研究およびそれらの結果に基づいた種々のモデル化によるコンクリートの引張抵抗の評価に関する研究が数多く行なわれてきたが、RC部材引張部コンクリートの実用的な剛性評価の方法論上の分類をすれば、以下に述べる三つに大別することができよう：(方法Ⅰ)—ひびわれ位置およびひびわれ間の場所によって異なるコンクリート引張応力分布の形状および大きさの平均化を図り、それを荷重レベルに応じて変化させる方法；(方法Ⅱ)—ひびわれ位置およびひびわれ間の場所によって異なる引張鉄筋ひずみの平均化を図り、この鉄筋の平均ひずみの導入によってコンクリート引張抵抗を間接的に評価する方法であり、より具体的に言えば、ひびわれ断面における鉄筋応力と平均鉄筋ひずみとの相関関係を与える方法；(方法Ⅲ)—引張部コンクリートの引張抵抗を独立して考慮せず、その他の曲げ抵抗を含めた状態で、曲げ剛性あるいはモーメント・曲率関係を直接与える方法。

上述した三つのコンクリート引張抵抗の評価方法は、それぞれが特徴的な性質を有しており、また分類上同一範疇にあっても影響因子の考え方などの相違により異なった結果を生む場合があるかもしれない。本研究の目的は、これまで提案されてきた種々の方法の主なものをレビューし、それぞれの特性を明確にすると共に、各々の方法の相互関係あるいは実験結果との適合性など、RC部材引張部の剛性評価方法の総合的な検討および評価を試みることである。

2. RC部材引張部の剛性評価の方法

2.1 方法Ⅰ

Grelat(1)は、コンクリート引張抵抗として、引張鉄筋降伏時にその面積が0となるような三角形応力分布を仮定した。即ち、

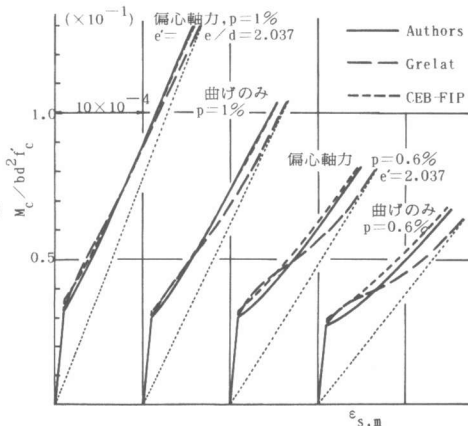


図.1 モーメント-鉄筋ひずみ関係

ひびわれ発生時と引張鉄筋降伏時の間のコンクリート引張下縁応力 σ_{ct} として次式を導入した：

$$\sigma_{ct} = \sigma_{tr} \frac{(\eta_2 - \varepsilon_{ct})^2}{(\eta_2 - \eta_1)^2} \quad (1)$$

ここで、 σ_{tr} はコンクリート引張強度を、 η_1 および η_2 はそれぞれひびわれ発生時および引張鉄筋降伏時の引張縁ひずみを、また ε_{ct} は η_1 と η_2 の間の任意の引張縁ひずみを表わす。

著者ら(2)は、コンクリート引張応力分布の合力に着目し、ひびわれ発生から連続して変化するコンクリート引張合力 T_c の過渡状態を引張鉄筋軸力 T_s の関数として表わすことを試み、種々の検討の結果として次式を得ている：

$$\frac{T_c}{T_{c,cr}} = 1 - 26 \left[1 - \left(\frac{T_{s,cr}}{T_s} \right)^{0.01} \right] \quad (2)$$

ここで、 $T_{c,cr}$ および $T_{s,cr}$ はそれぞれひびわれ発生時におけるコンクリート引張合力および引張鉄筋軸力を表わす。厳密に言えば、コンクリート引張合力の作用位置の過渡状態に関する形式化も必要であるが、ここではその変化の影響を無視し、合力作用位置をひびわれ発生時におけるコンクリート引張合力作用位置に固定して扱った。

図1は、曲げのみおよび偏心軸力を受ける場合のモーメント・鉄筋ひずみ関係について、式(1)および(2)を用いて計算した結果を示すものである。参考のために後述するCEB-FIPによる結果をも示した。Grelatの方法は鉄筋の降伏時に引張部コンクリートの寄与を0としているので、著者らの方法のようにひびわれが十分発達しても引張部コンクリートの一部が有効に働くと考えたものと異なる結果を示しており、両者の差は鉄筋比が小さい程大きくなる。図2は実験結果と式(2)を用いて計算したものとの比較であり、実験値は鉄筋降伏以前に測定できたすべての点をプロットしてある。図中のコンクリート引張部を無視して計算した結果との関係より、コンクリートが鉄筋の降伏近傍まで引張に抵抗していることがわかる。

2.2 方法Ⅱ

Rao(3)は、付着応力分布、コンクリート引張領域の面積、コンクリート平均曲げ引張応力、およびコンクリートの圧縮合力と引張合力の内力間距離を既知物理量に未定係数を乗じた形で表わし、最終的にはそれらの複合したものを単一係数に置き換え、多くの実験結果からこの係数を求め、鉄筋の平均ひずみ $\varepsilon_{s,m}$ を表わす式として次式を提案した：

$$\varepsilon_{s,m} = \varepsilon_s - 0.18 \frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \frac{\beta_{bz}}{E_s p} \quad (3)$$

ここで、 β_{bz} 、 E_s 、 p はそれぞれ、コンクリートの曲げ強度、鉄筋の弾性係数、鉄筋比を表わす(その他の未定義記号については図3を参照)。

ひびわれ制御に関連してLeonhardtによって提案され、CEB-FIPのモデルコードに採用された鉄筋の平均ひずみは次式で表わされている(4)：

$$\varepsilon_{s,m} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \leq 0.4 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4)$$

ここで、 β_1 および β_2 はそれぞれ鉄筋種類および載荷種類によって異なる係数である。また、曲率の計算では式(4)の $\leq 0.4 \sigma_s / E_s$ なる制限は取り除かれる。

著者ら(5)は、コンクリート引張部の曲げ剛性に対する寄与に関して、この影響がほぼ正確に把握されると思われる二つの変形状態、即ち、ひびわれ発生時および鉄筋の比較的高応力レベルの変形状態を境界条件として導入した鉄筋

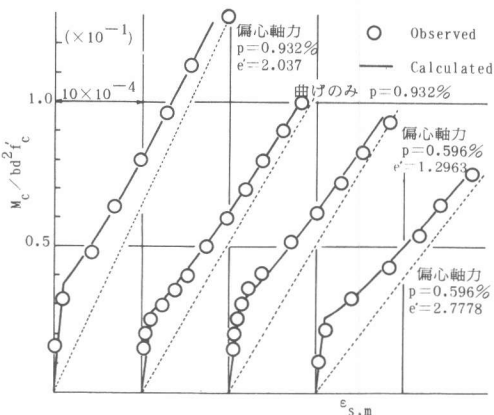


図.2 モーメント-鉄筋ひずみ関係

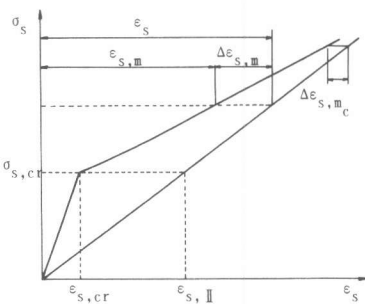


図.3 コンクリートの引張剛性効果

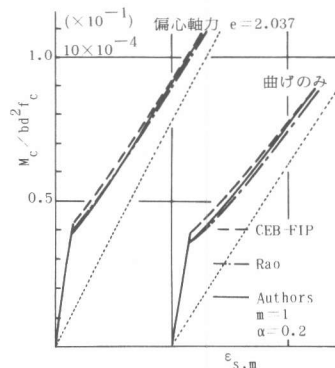


図.4 モーメント-鉄筋ひずみ関係

の平均ひずみとして次式を提案した：

$$\epsilon_{s,m} = \epsilon_s - \left\{ \left[1 - \left(\frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right)^{m'} \right] \Delta \epsilon_{s,mc} + \left(\frac{\sigma_{s,cr}}{\sigma_s} \right)^{m'} (\epsilon_{s,t} - \epsilon_{s,cr}) \right\} \quad \Delta \epsilon_{s,mc} = a \frac{\sigma_{tr}}{P_e E_s} \quad (5)$$

ここで、 m' および a は定数、 P_e は有効引張鉄筋比である（その他の未定義記号については図3を参照）。

Draft British Code(6)では、最大ひびわれ幅の計算に必要な鉄筋の平均ひずみとして次式が与えられた：

$$\epsilon_{s,m} = \epsilon_s - \frac{4 b_t h (a' - x)}{A_s (h - x)} \times 10^{-6} \quad (6)$$

ここで、 A_s 、 b_t 、 h 、 x 、 a' はそれぞれ、引張鉄筋断面積、引張鉄筋の中心における断面幅、断面高さ、引張部コンクリートを無視した状態における中立軸高さ、ひびわれ幅を計算する位置の圧縮縁からの距離を表わす。

British Code-CP 110(7)では、設計表面ひびわれ幅の算定のために、式(6)とは若干異なる次式が規定されている：

$$\epsilon_{s,m} = \epsilon_s - \frac{1.2 b_t h (a' - x)}{A_s (h - x) \sigma_{s,y}} \times 10^{-3} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_{s,y}$ は鉄筋の降伏応力を表わし、その単位は N/mm^2 である。

式(8)および(9)では何れもひびわれ発達の程度について考慮されていないということから、K. Ganesh Babu (8)は式(6)に鉄筋応力 σ_s を導入することによってその影響の評価を行なった：

$$\epsilon_{s,m} = \epsilon_s - \frac{4 b_t h (a' - x)}{A_s (h - x) \sigma_s} \times 10^{-3} \quad (8)$$

図4は、鉄筋の平均ひずみとしてCEB-FIP, Rao, および著者ら($m' = 1$, $a = 0.2$)の式を用いて計算したモーメント鉄筋ひずみ関係の一例を示したものである。図は、各々の式の導出方法あるいは式に採用された変数が異なっているにもかかわらず、結果的にはそれらの間にあまり大きな違いのないことを示している。また、図5は、CEB-FIP, CP110, DraftおよびK. Ganesh Babuの式を用いた場合の、モーメント・鉄筋ひずみ関係の数値計算例を示したものである。図から、CEB-FIPとK. Ganesh Babuによる結果が比較的良く一致していることがわかる。

ここで述べた鉄筋の平均ひずみに関する種々の提案式と実験結果との適合度は、CEB-FIPによる結果を通して図1, 2より類推することができる。即ち、CP110およびDraftを除いて、ここに挙げたどの式を用いても、RC部材の実際の挙動のランダム性を考慮すれば、その差異は問題にならぬ程度のものであると言えるよう。

2.3 方 法Ⅲ

YuとWinter(9)はたわみの算定法として二つの方法を提案したが、ひびわれ間のコンクリートの影響を考慮した方法においてそれを有効断面二次モーメント I_{eff} の形式で表示すれば次式となる：

$$I_{eff} = I_{cr} / (1 - b' \frac{M_1}{M}), \quad M_1 = 0.1 (f'_c)^{2/3} h (h - x) \quad (9)$$

ここで、 I_{cr} 、 b' 、および M はそれぞれ、ひびわれ換算断面二次モーメント、引張側における断面幅(in)，および任意の曲げモーメントを表わす。

Beeby(10)は、モーメント・曲率関係に関する双一次式による形式化を行ない、それが一部修正されてDraft British Code(6)に採用された：

$$\phi = \frac{M - M_{cr}}{0.85 E_c I_{cr}} + \frac{M_{cr}}{E_c I_g} \quad (10)$$

ここで、 M_{cr} はひびわれ発生時の曲げモーメントを、また I_g は全断面有効な二次モーメントを表わす。

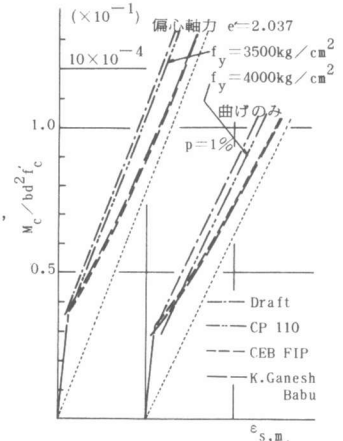


図.5 モーメント・鉄筋ひずみ関係

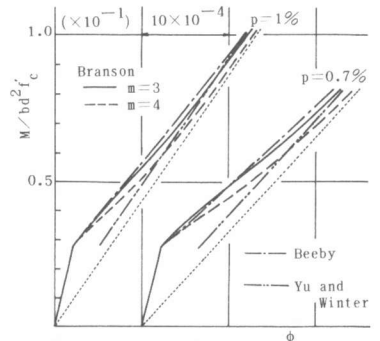


図.6 モーメント・曲率関係

Branson(11) は、有効断面二次モーメントの経験式として次式を提案した：

$$I_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M}\right)^m\right] I_{cr} \quad (11)$$

式(11)の m の値としてBransonは、各々の断面での剛性を考慮する場合には4を、またスパン全長にわたる平均剛性として扱う場合には3を用いることを提案しており、これが現在ACIのBuilding Codeに採用されている。

図6は、Yu and Winter, BeebyおよびBransonの式を用いたモーメント・曲率関係に関する数値計算結果の一

例を示すものである。図から、Branson ($m=3$) とBeebyによるものが比較的近い値を示すこと、また、Yu and Winter によるものもモーメントが比較的大きい状態ではBranson ($m=3$) によるものに近づくことがわかる。なお、後に実験結果との比較で示されるが、Bransonの式における m の値は3が適当であるように思われる。

さて、上述した方法は、曲げのみを受ける場合にその使用が制限されており、曲げと軸力の組み合わせを受ける場合への適用方法が明らかでなかった。これを明確にするために、著者らは軸力を伴う場合に適用できるようにBransonの式を拡張した(12)。即ち、曲げと軸力を受ける場合のモーメント・曲率関係を考慮する際、断面の重心位置に着目する必要があることから、有効断面の重心位置 a_{eff} に関する過渡曲線を導入し、更に一般性のためにモーメント比を鉄筋軸力比に置き換えた：

$$I_{eff} = \left(\frac{T_{s,cr}}{T_s}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{T_{s,cr}}{T_s}\right)^3\right] I_{cr} \quad (12)$$

$$a_{eff} = \left(\frac{T_{s,cr}}{T_s}\right)^3 a_g + \left[1 - \left(\frac{T_{s,cr}}{T_s}\right)^3\right] a_{cr} \quad (13)$$

ここで、 a_{gd} および a_{crd} はそれぞれ全断面およびひびわれ換算断面における重心位置を表わす。

図7は、モーメント・曲率関係に関して、実験結果とそれに対応する著者らの方法による数値計算結果との比較を示したものである。参考のためにCEB-FIPによる結果も載せた。これら三つの結果は比較的良く一致しており、このことはBransonの方法を軸力の伴う場合に拡張した著者らの方法の有効性を示すものである。

3. あとがき

以上、RC部材引張部コンクリートの実用的な剛性評価の方法として大きく三つに分類し、これまで提案されてきた方法の主なものを簡単にレビューし、各々の相互関係を数値計算によって明らかにし、更に実験結果との比較を通してそれぞれの方法の評価を行なった。結論として、一部を除いてそれぞれの方法の間の差異はあまりないこと、著者らによるBranson式の拡張の結果としてすべての方法が曲げた加えて軸力を伴う場合にも適用できるようになったこと、曲率のみの計算であれば曲げ剛性を直接与える方法Ⅲが簡単であること、曲率計算の他にひびわれ幅の算定にも利用しようとすれば方法Ⅱのような鉄筋の平均ひずみを直接与える方法がベターであること、などを挙げることができる。

(参考文献)

- (1) Grelat, A; Annales de l'ITBTP, N°336, Nov. 1978, p. 109
- (2) 角田, 佐伯, 堺; 土木学会北海道支部論文報告集第36号, 昭55
- (3) Srinivasa Rao, P; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, No 177, 1966, 99p
- (4) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 1978, p. 159
- (5) 堺, 能町, 角田; 土木学会北海道支部論文報告集第35号, 昭54, p. 371
- (6) Draft British Standard Code, 1969, p. 111
- (7) British Standard Code of Practice CP110, Part 1, 1972, p. 136
- (8) K. Ganesh Babu; Matériaux et Constructions, Vol. 12 N°69, p. 207
- (9) Yu, W. W. and Winter, G; ACI Journal, Proceedings V. 57, No. 1, July. 1960, pp. 29-50
- (10) Beeby, A. W and Miles, J. R; Concrete (London), Mar. 1969, pp. 101-110
- (11) Branson, Dan E; Alabama Highway Research Report No. 7, Aug. 1963, p. 24
- (12) 堺, 角田, 能町; 土木学会第34回年次講演会, V-156, 昭54, p. 309

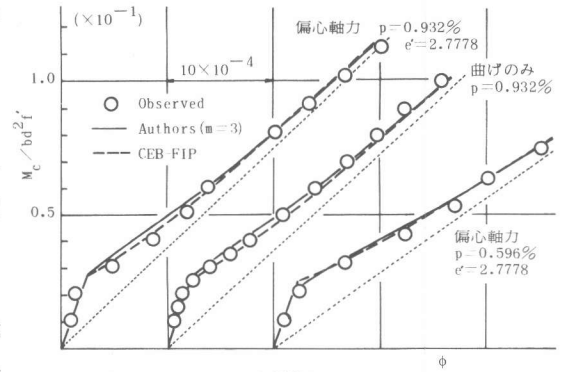


図.7 モーメント・曲率関係