

武蔵工業大学大学院 学生員 小林 保之
 武蔵工業大学土木工学科 正会員 吉川 弘道
 武蔵工業大学土木工学科 正会員 小玉 克巳

1. まえがき

鉄筋コンクリート部材の変形挙動は、ひびわれ発生後、鉄筋とコンクリートとの付着作用によりコンクリートがなおも引張力を負担し、特有の非線形挙動を呈する。これは、引張硬化(tension stiffening)作用と呼ばれ、変形解析を行うに当たって重要な要因となる。さらに、繰り返し荷重下において、その変形挙動は、鉄筋とコンクリートの付着作用により、除荷と再載荷で異なる複雑な非線形挙動を呈し、これもまた引張硬化作用によるところが大きいと考えられる。

そこで、本研究は付着を考慮した単調載荷引張場における基本モデル[1]を増分型の構成則に展開するとともに、繰り返し荷重を受ける場合に拡張し、その変形挙動を合理的・解析的に取り扱おうとするものである。

2. 増分型構成則への展開

単軸引張場における作用応力 σ と、全ひずみ ϵ の関係は、次のように表される[1]。

$$\epsilon = \frac{np + \lambda_c}{np + 1} \frac{\sigma}{pE_s} \quad (1)$$

ここで、 n :弾性係数比、 p :鉄筋比、 E_s :鉄筋の弾性係数、 σ :作用応力、 μ_c :正規化したひびわれ間隔、 f_t :コンクリートの引張強度、を表す。 λ_c は引張硬化係数と呼ばれ引張硬化作用を支配する重要なパラメータである。式(1)を増分形式にするため、作用応力 σ で微分し、通常の剛性表示 $d\sigma/d\epsilon$ で表すと次式を得る。

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{(1+np)pE_s}{(np + \lambda_c) + \frac{0.75 S_2 \sigma}{\sqrt{S_1^2 - 1}} \left(\frac{\operatorname{sech}^2(\mu_c)}{\mu_c} - \frac{\tanh(\mu_c)}{\mu_c^2} \right)} \quad (2)$$

ただし、 $S_1 = \sigma / (\sigma - (1+np)f_t)$ 、 $S_2 = dS_1/d\sigma$ である。

3. 繰り返し荷重下における解析モデルの提案

ひびわれ発生後の繰り返し挙動は、ひびわれの開閉・閉合挙動とコンクリートの非ひびわれ域における弾塑性領域が伴うとともに、これらが非可逆的な様相を呈する。既往の実験結果などを概観すると、除荷曲線と再負荷曲線は同じ軌跡をたどらずループを形成することが特徴的である。これらの挙動を定性的にまとめると次のようになる。引張領域における除荷曲線と再負荷曲線は、除荷点付近で交わり閉じたループを形成する。荷重が反転する直前と直後で接線剛性が急変する。引張力を完全に除いてもひびわれ位置で抜け出した鉄筋は元に戻らず、残留ひずみ(残留ひびわれ)が生じ、鉄筋には引張応力がコンクリートには圧縮応力が残存する。引張力の除荷点応力の増加により、この領域における除荷・再負荷曲線の接線剛性が低下する。作用応力が圧縮側になると残留ひびわれの閉合により、鉄筋とコンクリートが一体となって、作用応力に抵抗するため急激に状態 I ($E_c + pE_s$) の剛性に漸近する。さらに圧縮力の増大により、ひずみが負になると完全にひびわれが閉合し、この領域における除荷、再負荷は、ほぼ弾性体としての変形挙動を示していると観察される。

これらの挙動は、鉄筋とコンクリートの付着作用に起因するものであると考えられる。従って単調載荷時に非線形挙動を一義的に支配していた λ_c を新たに提案し、除荷曲線、再載荷曲線を表すことにする。

ここで、除荷時、再負荷時においてひびわれ間隔は変化しないと考えると、 $\mu_c = \text{constant}$ とみなすことができ、よって、 $S_2 = 0$ となるから式(2)の右辺分母の第二項は、ゼロとなる。

・除荷時及び再負荷時の引張硬化係数の拡張：引張域での除荷、再負荷時の引張硬化係数を λ_{cu} 、 λ_{cr} 、また、圧縮域での載荷時、除荷時においては λ_c' 、 λ_{cu}' とし、前述した定性的性質を考慮し、図1のように提案する。ただし、 σ_{max} 、 σ_{min} はそれぞれ引張力および圧縮力の除荷点を表す。

引張力の除荷時には、 σ が $\sigma_{max} \rightarrow 0$ と変化する時 λ_{cu} は $\lambda_{u0} \rightarrow \nu u + \lambda_{u0}$ となり、 λ_{cu} と σ を線形関係で表したものである。ここで、 λ_{u0} は引張力の除荷直後の接線剛性を、 $\nu u + \lambda_{u0}$ は圧縮力載荷直前のそれを支配して

いることがわかる。圧縮力の荷荷については、残留ひびわれの閉合による引張硬化作用と、ひびわれが完全に閉合し、コンクリートと鉄筋が一体となつている場合の変形挙動が混在しているため、これを β で表すことにした。圧縮力の除荷については鉄筋コンクリートを弾性体として評価し、引張硬化係数はゼロとした。引張力の再負荷においては、 λr_0 が再負荷直後の接線剛性を、 $\nu r + \lambda r_0$ が単調荷重直前のそれを支配していることがわかる。これらは、繰り返し荷荷を受けときの付着応力~すべり関係を引張硬化係数に反映させたものであるといえる。

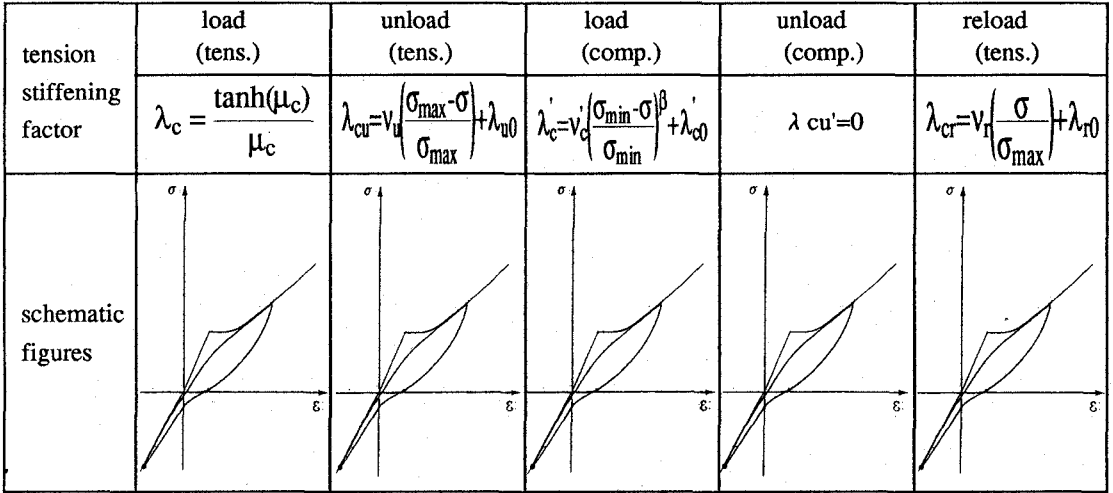


図1 引張硬化係数の提案

4. 数値シミュレーション

上記の提案モデルを用いた数値計算の結果を図2に示す。計算方法は、式(2)により示された増分型構成方程式、および提案した引張硬化係数により、Euler法を用いて計算した。計算に用いた材料特性値および、提案モデルのパラメータは表1のように設定した。

表1 材料特性値および提案モデルのパラメータ

材料特性値	1回目の繰り返し	2回目の繰り返し
$n=7.2$	$\nu u=0.8(\text{tens.})$	$\nu u=0.6(\text{tens.})$
$p=0.0114$	$\lambda u0=0.1(\text{tens.})$	$\lambda u0=0.3(\text{tens.})$
$E_s=2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	$\nu r=0.8(\text{tens.})$	$\nu r=0.6(\text{tens.})$
$E_c=2.9 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	$\lambda r0=0.15(\text{tens.})$	$\lambda r0=0.4(\text{tens.})$
$f_t=16.0 \text{ kgf/cm}^2$	$\nu c'=0.8(\text{comp.}) \beta=15$	$\nu c'=0.6(\text{comp.}) \beta=15$
	$\lambda c'0=0(\text{comp.})$	$\lambda c'0=0(\text{comp.})$

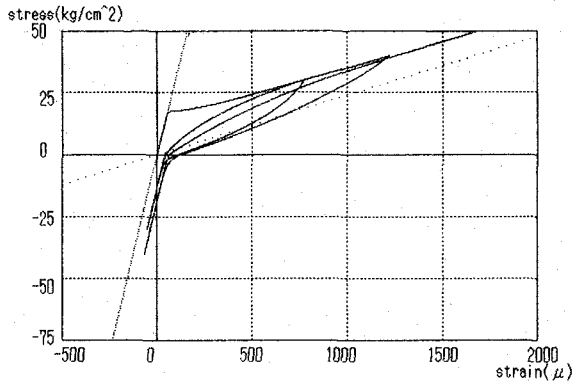


図2 数値シミュレーション

5. まとめ

本文は、単調引張荷荷時の基本モデルにおける引張硬化係数を新たに提案することにより、繰り返し荷荷時の(正負交番荷荷)ループをほぼ再現することができた。しかし、引張から圧縮、圧縮から引張へ移行する領域においては、未解明の部分が多いため、この部分の詳細な検討については、今後の課題とする。

<参考文献>

[1] 吉川弘道、田辺忠顕：鉄筋コンクリート部材の引張剛性に関する解析的研究、土木学会論文集、第366号/v-4、1986年2月、pp.93~102。
 [2] 六車照、森田司郎、角徹三：「異形鉄筋によるひびわれ分散について」第2回異形鉄筋シンポジウム、コンクリートライブラリー、no.14,1965,pp.115~120。
 [3] 白井伸明：有限要素法による鉄筋コンクリート壁板等の弾塑性数値解析に関する研究、昭和61年、pp.161~174