

V-297

実験結果より回帰した Tension Stiffeing モデル

（財）間組技術研究所 正会員 吉川弘道

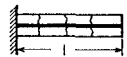
（財）間組技術研究所 正会員 坂田英一

1. まえがき

コンクリートの引張破壊はきわめて脆性的であるが、鉄筋コンクリートでは鉄筋とコンクリートとの付着作用により、ひびわれとひびわれの間ではコンクリートが引張力に対してなお有効に抵抗するため、緩やかな応力降下を呈する。このような力学的現象を引張硬化（Tension Stiffening）と呼び、変形解析では重要な要因であるとともに、有限要素解析における主要な論点となっている。本研究は鉄筋コンクリート単軸部材の実験結果を用い、その荷重～変形関係からコンクリート負担分を抽出し、その応力降下曲線を実験的に回帰するものである。

2. 計算方法

鉄筋コンクリート部材の純引張試験および両引き試験では、通例、載荷引張力Fおよび全体の伸びδもしくは平均ひずみεが測定される。従って、鉄筋の弾性係数Esを知り、鉄筋の平均ひずみεsと全体の平均ひずみεが等しい（εs = ε）と仮定することにより、コンクリートの引張応力を容易に算出することができる。すなわち、表-1 のような手順による。（右表の中で、

条 件 式	荷重 F(kgf), 変位 δ(mm) による表示	応力 σ(kgf/cm ²), ひずみ ε による表示
		
(1) 平 衡 条 件	$F = F_s + F_c$	$\sigma = p\sigma_s + \sigma_c$
(2) 鉄 筋 の 引 張 力	$F_s = A_s \frac{\delta}{l} E_s$	$\sigma_s = \epsilon E_s$
(3) コンクリートの引張力 (式(1), (2)より)	$F_c = F - F_s = F - A_s \frac{\delta}{l} E_s$	$\sigma_c = \sigma - p\sigma_s = \sigma - p\epsilon E_s$

ここで、F、Fs、Fc はそれぞれ全体の引張力、鉄筋の引張力、コンクリートの引張力であり、σ、σs、σc はこれを応力に変換したものである。また、p は鉄筋比、Es は鉄筋の弾性係数、l は部材長さを表わす。

3. Tension Stiffeningモデルと実験的回帰

ひびわれ発生以降の降下曲線は、図-1 a)のように模式的に表現することができ、本文では図-1 b)のように正規化するとともに、Tension Stiffeningモデルの曲線形として、

$$\frac{\sigma_c}{f_t} = a \exp\left\{ b \left(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0} \right) \right\} \quad (4)$$

を用いることを提案する。ここで、ft はコンクリートの引張強度、ε0 はそのときのコンクリートのひずみ、ε はひびわれを含む平均ひずみである。また、a と b は定数でこれを実験的に回帰する。

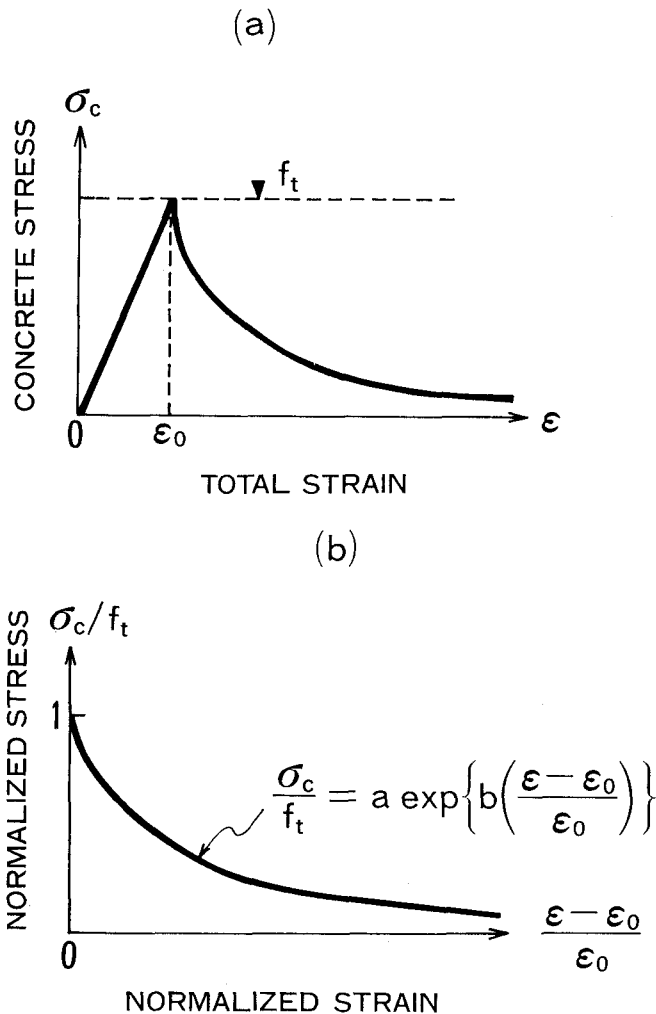
そこで、鉄筋コンクリート単軸部材の両引き試験もしくは純引張試験の試験結果を用い、その実測データ群を式(4)の提案曲線にあてはめ、定数a、bを回帰した（図-2 参照）。採用した実験は、国内外の6例におよぶもので、引用文献に一括して示した。この結果、a = 0.955、b = -0.0631 を得た。すなわち、

$$\frac{\sigma_c}{f_t} = 0.955 \exp\left\{ -0.0631 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_0} \right) \right\} \quad (5)$$

このとき、データ数は197組で、不偏分散は0.043であった。

4.まとめ

- 本研究の成果を次のようにまとめる。
- ①引用した実験例は、コンクリートの力学的性質、鉄筋径や付着特性など著しく異なるものである。これらを正規化して表示するとそのバラツキは比較的少ないが、平均ひずみ ϵ の増大に従って、バラツキは大となる。
 - ②6例の実測結果の傾向を見ると、 $\epsilon \rightarrow \infty$ のとき σ_c が0でなくある有限値に収束している。また本来ひびわれ発生時に $\sigma_c = f_t$ 、すなわち $a = 1$ となるべきであるが、回帰結果は $a < 1$ となることがわかった。
 - ③実測結果の平均ひずみ ϵ は、 $1,500 \sim 2,000 \times 10^{-6}$ を越えるものがあり、この場合鉄筋の降伏強度を越えていると考えられる。しかし、 $\sigma_c \sim \epsilon$ 関係は比較的なめらかな降下曲線を示すものであり、このことはまた著者らの提案曲線が、鉄筋の降伏前後を含めて実用上適用し得ることを示唆するものである。



<引用文献>

1)角田：コンクリート・ジャーナル，V0 1.8, No.9, Sept., 1970
2)Leonhardt, F：IABSE SURVEYS, S-4/77, Aug., 1977.
3)Rizkalla, S.H and Hwang, L.S：ACI Journal, Vol.81, No., Nov. Dec., 1984
4)佐藤、白井：日本建築学会大会学術講演梗概集, Sept., 1987
5)Somayaji, S. and Shah, S.P.: ACI Journal, Vol. 78, No., May-June., 1981
6)山本：大成建設技術研究所報第6号，1973

図-1 (a) ひびわれコンクリートの応力～ひずみ関係
(b) 正規化曲線によるモデル化

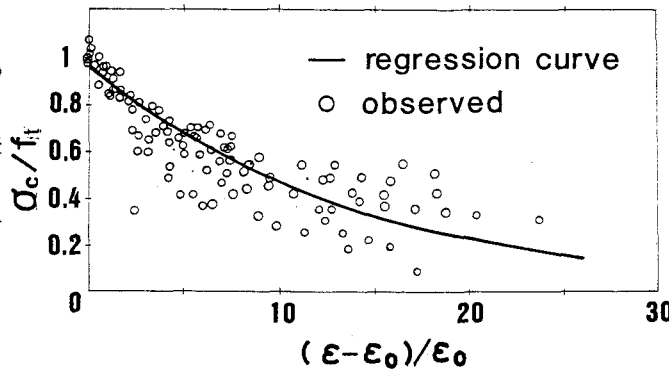


図-2 実験結果からの応力降下回帰曲線