

大成建設 正員 森木 英光

東京大学 正員 堀井 秀之

東京大学 正員 長谷川彰夫

1. まえがき 近年、コンクリート等の材料に対して破壊力学を応用する試みが報告されている。一般の金属材料と異なり、コンクリートでは微小クラックの発生と成長が起こるため、コンクリート特有の破壊性状を示すものと考えられる。このため、金属材料に対して開発された破壊力学の知識をそのままコンクリート等の材料に適用することには問題があり、特に巨視的クラックの進展条件を確立し、現象を支配している材料パラメータを定めることが必要であると考えられる。ここでは、微小クラックの発生・成長が支配的な、引張破壊における歪軟化現象と、巨視的クラック先端に発生する微小クラックより成るプロセスゾーンを取り上げる。微小クラックの成長に基づいた歪軟化モデルを提案し、次に、歪軟化条件を満足するプロセスゾーンモデルを導いた。

2. 歪軟化モデル 図1は引張破壊における応力変化曲線の例(1)であるが、破断開始(ピーク点)後の歪軟化部分においては、破断面に局在化された微小クラックの成長が起こっているものと考えることが出来る。

ここでは、引張破壊における歪軟化現象の力学モデルとして図2に示す二次元問題を考える。破断面には長さ $2a_0$ の初期クラックが単位長さ当り N 個以上あるものとする。初期クラック間の平均間隔は $d = 1/N$ で与えられる。クラックの相互干渉を無視し、微視的には線形破壊力学が適用可能であると仮定すれば、破断開始時の応力、即ち、微小クラックが成長を開始する時の応力 σ_c は

$$\sigma_c = K_c / \sqrt{\pi a_0} \quad K_c: \text{材料の微視的破壊靱性値} \quad (1)$$

で与えられ、破断開始後の応力 σ とクラック長 a との関係は

$$\sigma = K_c / \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

となる。一つのクラックの開口に起因する体積 V あたりの非弾性軸歪 ϵ^p は(2)

$$\epsilon^p = \frac{1}{V} \int_{-a}^a [v] dx = \frac{4\pi a^2 \sigma}{EV} \quad (3)$$

となり、これと式(1)、(2)からクラックの成長・開口に起因する非弾性変位 δ は

$$\frac{\delta}{a_0} = 4\pi \frac{\sigma_c a_0}{E d} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^3 \quad \text{又は、} \quad \frac{\delta}{\delta_c} = \left(\frac{2a_0}{d} \right)^{3/2} \left(\frac{\sigma}{\sigma_c} \right)^3 \quad (4)$$

ここで $\delta_c = a_0 \sqrt{2\pi} (\sigma_c/E) \sqrt{d/a_0}$ は $2a = d$ となる限界変位を表す。式(4)より破断完了時の応力は $\sigma/\sigma_c = \sqrt{2a_0/d}$ で与えられることが分かる。式(1)-(4)より材料の微視的パラメータ K_c, a_0, d を用いて歪軟化曲線が与えられることが示された。得られた歪軟化曲線を図3に示した。また、変形・破壊の局在

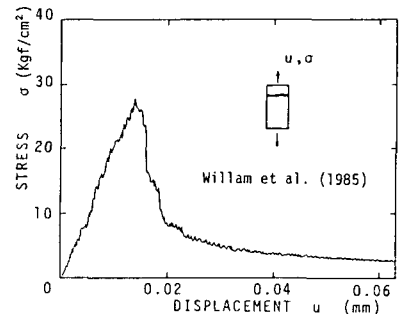
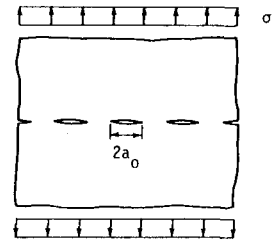
Fig.1 σ vs u in axial tension

Fig.2 Strain-softening model

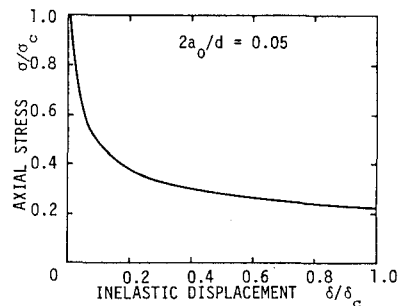


Fig.3 Predicted strain-softening

化の始まる破断開始後の現象を記述する場合弾性部分と非弾性部分を分離し、弾性部分については歪を、非弾性部分については変位を用いなければず法効果が現れるという結果が導かれた。クラックの相互干渉を考慮したモデルによる計算も行い、上述の簡便なモデルが十分な精度を与えるという結果が得られた。

3. プロセスゾーンモデル 巨視的クラック先端に形成される微小クラックから成るプロセスゾーンにおいて、材料は微小クラックの発生・成長に起因する歪軟化状態にあるものと考えられる。図4に示すように半無限クラック先端のプロセスゾーンを直線で置き換え、プロセスゾーンにおいて図5に示す直線で近似した歪軟化条件を満足するように伝達応力が分布するものと仮定すれば、伝達応力 σ に関する積分方程式

$$\delta_c \left(1 - \frac{\sigma(t)}{\sigma_c}\right) = \frac{K_{IA}}{G} \sqrt{\frac{t}{2\pi}} (\kappa+1) + \frac{(\kappa+1)}{2G} \int_0^{\ell_p} p \log \left| \frac{\sqrt{r}-\sqrt{t}}{\sqrt{r}+\sqrt{t}} \right| \sigma(r) dr \quad (5)$$

を得る。ここで K_{IA} はプロセスゾーンがない場合の外力による応力拡大係数である。プロセスゾーン先端で応力が有限という条件のもとで、式(5)を数値的に解くことにより、伝達応力の分布、荷重 K_{IA} とプロセスゾーン長 ℓ_p との関係が得られる。荷重が増加するに従って、プロセスゾーン長は増加し、荷重 K_{IA} が限界荷重 K_p に達すると、一定の限界プロセスゾーン長を保ちつつ巨視的クラックが進展を開始する。コンクリートCLWL-DCB供試体に対する実験結果(3)と本モデルによる結果を図7に示した。実験結果に対して本モデルがほぼ妥当な結果を得ることを示している。

4. 結語 微小クラック進展に基づき微視的材料パラメータ K_c, a_o, d を用いて歪軟化曲線を導いた。次に、引張強度 σ_c と限界開口変位 δ_c をパラメータとするプロセスゾーンモデルを提案し、荷重とプロセスゾーン長の関係を求めた。また巨視的クラック成長の条件として限界応力拡大係数が求められることを示した。このことはコンクリート等の材料に対する破壊力学適用の可能性を示すものと考えられる。プロセスゾーンを直線でモデル化した帰結として巨視的クラック進展時に応力拡大係数一定という結果が得られたが、プロセスゾーンの厚みを考慮することにより巨視的クラック進展に対する抵抗力の増加を評価し得るものと考えられる。

参考文献 (1) K. Willam, P. H. Syuapsis, and S. Sture, "Experimental constitutive computational aspects of concrete failure", Proc. Seminar Finite Element Anal. RC Struct., JCI 149-171 (1985). (2) H. Horii and S. Nemat-Nasser, "Overall moduli of solids with microcracks: load induced anisotropy", J. Mech. Phys. Solids, 31, 155-171 (1983). (3) A. Kobayashi, N. M. Hawkins, D. B. Barker and B. M. Liaw, "Fracture process zone of concrete", Proc. Nato Adv. Res. Workshop on Application of Fracture Medianics to Cementitious Composites, 25-47 (1984).

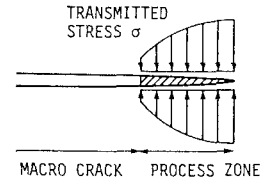


Fig.4 Process zone model

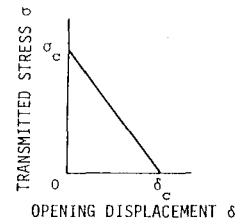


Fig.5 Strain-softening property

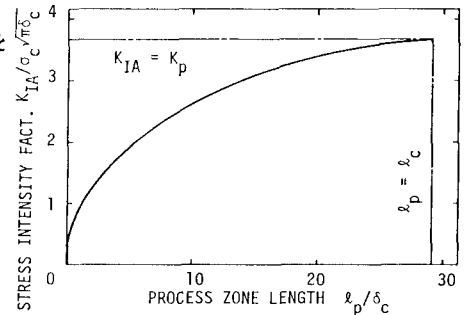


Fig.6 Growth of process zone

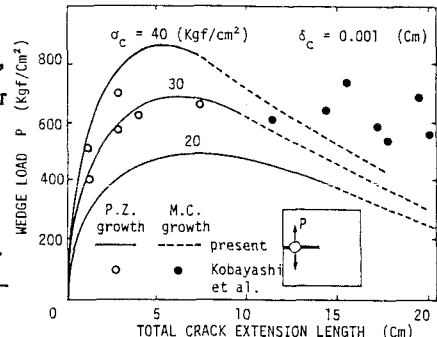


Fig.7 Comparison with experimental data