

I-68

境界積分方程式法によるプロセスゾーン問題の解析

：寸法効果とノッチセンシティビティ

東京大学 学生員 下村 匠

東京大学 正員 堀井 秀之

1. まえがき

コンクリートに対して破壊力学を適用して、その複雑な破壊現象を説明することを目的とした研究が最近行なわれている。クラック先端の微視的現象の生じている領域であるフラクチャープロセスゾーンの存在がコンクリートの破壊現象を複雑にしている要因の一つだと考えられている。コンクリートの破壊現象を予測するためには、このプロセスゾーンを力学モデルとして表し解析することが必要である。例えば、本研究で示すように曲げ引張強度がなぜ軸引張強度の約2倍となるのか、なぜ曲げ引張強度が供試体寸法の $1/4 \sim 1/3$ 乗に反比例するのか、といったことがプロセスゾーンモデルにより説明される。ここでは、Dugdale型モデルによりモデル化したプロセスゾーンを境界積分方程式法の数値解析プログラムに取り入れプロセスゾーンを有する有限供試体の解析を行なった。

2. クラック先端のフラクチャープロセスゾーン

フラクチャープロセスゾーンとはコンクリート・岩石・セラミックス等の脆性材料においてクラック先端に存在する領域であり、図1に示すように、マイクロクラックの発生・成長の起こっているマイクロラッキングゾーンと、骨材境界面での摩擦あるいは繊維補強材などにより応力が伝達されているブリッジングゾーンより成る。このプロセスゾーンを図2に示すDugdale型モデルによりモデル化する。プロセスゾーンにおける材料の挙動は、伝達応力 σ_t と開口変位 δ の関係によって表現されるが、その関係として一軸引張試験より得られた歪軟化曲線をもとに図3に示す直線関係を用いる。

3. 解析結果

初めにクラックを有する有限供試体（CLWL供試体）を解析した。解として得られる荷重 P とプロセスゾーン長 l_p との関係を既存の実験結果¹⁾と対照したものが図4である。解析結果は実験結果とよく一致している。

次に、等曲げ荷重下の、ノッチ（初期クラック）を有するコンクリート梁を解析した。解析モデルを図5に示す。さまざまなノッチの深さの梁に対して荷重 M とプロセスゾーン長 l_p の関係を解析し、得られる荷重の最大値 M^{max} とノッチの深さ a/D の関係をプロットしたのが図6である。ノッチの深さを0に近づけると最大荷重が無限に大きくなるという結果が得られた。本解析結果はノッチ先端にプロセスゾーンが存在し、荷重の増加にしたがいプロセスゾーンが安定に成長を続け、プロセスゾーン始点の開口変位が限界開口変位に達したとき、ノッチ（ストレスフリークラック）の進展が起こる、という仮定の下で求めた結果であり、必ずしも実験事実がこの通りになることを意味するものではない。以下ではこの解析結果と実際の曲げ破壊においてみられる現象との関係を考察する。

図7はノッチの深さ a/D と最大荷重 M^{max} の関係（図6）を模式的に示したものである。解析結果より荷重が最大となるときプロセスゾーン始点の開口変位はほぼ限界開口変位 δ_c に等しくなることがわかっている。図7の $M = M^{max}$ の曲線はプロセスゾーンが成長しきった状態（ $\delta = \delta_c$ ）に対応していると考えてよい。図7において、今、状態Ⅰから荷重 M を徐々に増加させてゆく場合を考える。曲げ破壊に至る一つの経路として考えられるのは、Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳと荷重の増加につれてプロセスゾーンが成長を続け状態Ⅳで限界状態に達し、その後は限界状態を保ったままストレスフリークラックが進展するⅣ→Ⅴ→Ⅵという経路である。ところが、図8に示すように、同じ荷重例えば M_2 に対して、状態Ⅱと状態Ⅵという二つのつりあい状態が存在する。状態Ⅱから状態Ⅵに飛び移ることが可能であれば、Ⅰ→Ⅱ→Ⅵ→Ⅶという経路が考えられる。実際の現象としては、荷重 M を増加させてゆく過程においてプロセスゾーンが限界状態

に達する以前に、例えば、II→VIあるいはIII→Vのような飛び移り、すなわちクラックの不安定進展が起こり、この不安定進展が起こるときの荷重 M_2 や M_3 が最大荷重 $M^{\max}$ として観察されるのであると考えられる。一方、 $M=M^{\max}$ の曲線の傾きが緩やかな部分、例えば状態VIIから荷重 M を増加させてゆく場合は安定進展が可能となり、制御方法によってはVII→VIII→IXと安定して推移することができると考えられる。以上のような解析結果から予測される破壊現象は、実験事実と定性的に一致する。いつこのような飛び移り、すなわちクラックの不安定進展が起こるかは本解析結果からだけでは明らかではなく、材料の性質や実験条件などの影響を受けるであろう。不安定進展の条件を定量的に評価することが今後の課題であり、以上の考察の妥当性を検証するための一つの方法であるといえる。

解析結果では、ノッチの深さ $a/D=0.2$ を境に $M=M^{\max}$ の曲線の傾きは大きく変化している。したがって a/D が0.2より小さくなるとクラックの不安定進展が起こる可能性が急激に増大する。このため、 $a/D=0.2$ に対応した限界荷重はクラックの不安定進展によって引き起こされる曲げ破壊強度に対して一つの指標となり得ると考えられる。 $a/D=0.2$ の場合の $M^{\max}$ より求めた最大公称曲げ引張応力 $\sigma_{\text{net}}^{\max}$ は一軸引張強度の約2倍程度となっており、曲げ引張強度が一軸引張強度の約2倍となるという実験事実と一致している。次に $a/D=0.2$ の梁において供試体寸法 D を変えて解析し得られた $\sigma_{\text{net}}^{\max}$ との関係を両対数で図9にプロットした。供試体寸法 D が小さい範囲では、曲げ引張強度が供試体寸法の $1/4 \sim 1/3$ 乗に反比例する。これは実験事実として知られる寸法効果と合致しており、コンクリートの曲げ引張強度における寸法効果がプロセスゾーンモデルによって説明できることを示している。

参考文献

- 1) F. L. Jeang and N. M. Hawkins: Non-Linear Analysis of Concrete Fracture. Structures and Mechanics Report SM85-2, pp. 80~203, 1985.

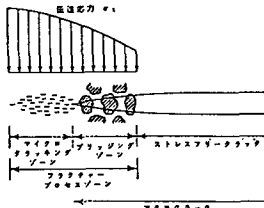


図1 フラクチャー
プロセスゾーン

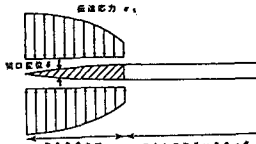


図2 Dugdale型モデル

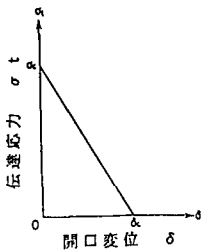


図3 Linear strain
-softening relation

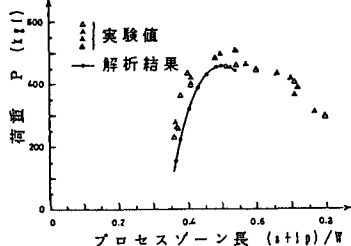


図4 C L W L 供試体解析結果

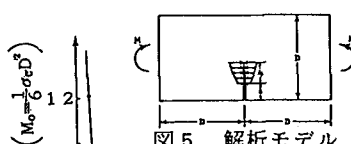


図5 解析モデル

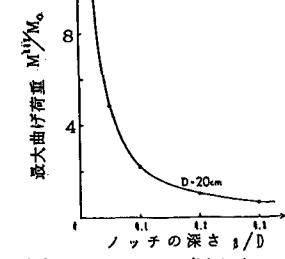


図6 ノッチの深さと
最大曲げ荷重



状態 II



状態 VI

図8 同じ荷重の下での
2つのつりあい状態

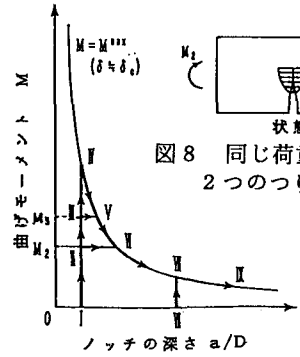


図7 曲げ破壊に至る経路

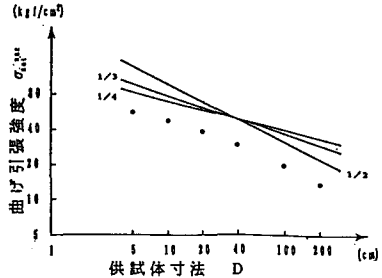


図9 曲げ引張強度における寸法効果