

(株)大林組 正会員 ○北山 篤
 神戸大学工学部 正会員 李 騰雁
 山口大学工学部 正会員 宮本 文穂

1. 目的 コンクリート版が衝撃荷重を受けた場合、衝撃荷重載荷の初期段階からひびわれが発生することが考えられ、ひびわれ発生後のコンクリート要素の材料特性の取り扱いが重要な課題である。ひびわれ発生後におけるコンクリート破壊の特徴は、引張ひずみ(あるいは、その領域におけるひびわれ幅の総和)の増大に伴って、伝達される引張応力が減少するいわゆる引張軟化現象が生じる。したがって、引張軟化現象が生じる引張応力下のコンクリートの破壊エネルギーや、引張軟化曲線などの引張特性を取り入れた破壊力学的手法は、ひびわれの進展によるコンクリートの破壊現象についての検討や性能の評価にきわめて有効である。そこで本研究では、異なる3つの引張軟化特性を考慮した破壊力学的解析手法を用いてひびわれ発生後のコンクリート版挙動の改善を試み、コンクリートの破壊挙動に及ぼす影響を解析的に検討することを試みた。

2. 引張軟化曲線の解析への導入 引張軟化曲線を有限要素解析に取り入れる手法として、 x 方向に対して垂直にひびわれが入りひびわれが進行する際、図1(a)のような主応力 $\sim$ 主ひずみ関係を示すものと仮定し、ひびわれ発生後の応力 $\sim$ ひずみ関係(引張軟化域)を、図1(b)のように考えると式(1)の関係から図1(c)のように変形できる。ここで、 E_t を得るためには、 C_f を求めることが必要となるため、まず、ひびわれ形成に必要な破壊エネルギー G_f は図1(b)の斜線部の面積と定義し、式(2)のように求められる。また、Bazant¹⁾による破壊エネルギー推定式(3)を用いて破壊エネルギーを求め、式(2)、(3)より C_f を算出し、式(1)に代入することによって E_t が求められる。

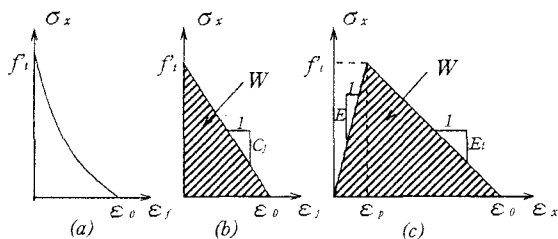


図1 1直線モデル

$$\frac{1}{E_t} = \frac{1}{E} - \frac{1}{C_f} \leq 0 \quad (1)$$

E_t = 引張軟化係数, E = コンクリートのヤング係数, C_f = 図1(b)の直線の傾き

$$G_f = w_c \int_{\sigma_c=f_t}^0 \sigma_c d\varepsilon_c = \frac{1}{2} C_f \varepsilon_c^2 w_c = \frac{f_t^2}{2C_f} w_c \quad (2)$$

f_t : 引張強度(kgf/cm²), $w_c = 3d_c$ (d_c = 粗骨材の最大寸法)

$$G_f = \frac{(0.3044f_t + 2.72)f_t^2 d_c}{E} \quad (3)$$

つぎに、図2に示す1/4モデル²⁾の解析への導入を試みる。異なる形状の引張軟化モデルにおいても、1要素の破壊エネルギーは等しいという観点から、引張軟化曲線の1/4モデルは1直線モデルに対して、図2(a)のように表される。本図より、幾何学的な関係から、ひびわれ発生後の剛性 C_n 、 C_n は式(4)のように求められる。また、引張軟化係数 E_n 、 E_n は C_n 、 C_n から導かれる。

$$C_n = 2C_f, C_n = \frac{2}{17} C_f \quad (4)$$

さらに、図3に示す-3乗モデルの解析への導入を試みる。本モデルはひびわれ発生後の応力～ひずみ関係が $\sigma = 2C_f(1+0.5\varepsilon)^{-3}$ のような関係を持つ。上述した C_f は、ひびわれ発生後の曲線の傾きと考えることができるので、-3乗モデルの C_f は、この応力～ひずみ関係を ε について微分することによって式(5)のように得られ、式(5)に各コンクリート要素のひずみを代入して C_f を計算し、さらに、式(1)に代入することによって引張軟化係数が得られる。

$$C_{\sigma} = 3C_f(1+0.5\varepsilon)^{-4} \tag{5}$$

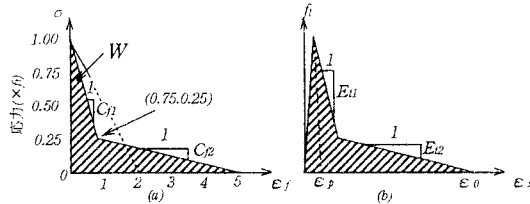


図2 1/4モデル

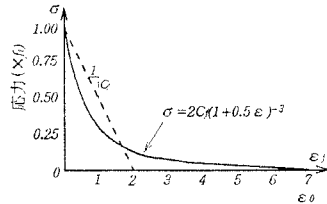


図3 -3乗モデル

3. 解析結果および考察 上述の異なる3種類の引張軟化曲線モデルを用いて3次元有限要素解析を行った。普通コンクリートと鉄筋(SD35)を組み合わせたコンクリート版(RC35版)の衝撃荷重～版中央変位について実験結果と解析結果を比較したものを図4(a)に示す。これより、静的実験において、精度が高いとされる1/4モデルや-3乗モデルが1直線モデルに比べて、実験結果に近い結果が得られており、コンクリートの引張軟化曲線の形状がひびわれ発生後のコンクリート版の挙動に大きく影響していることが知られる。この理由として、1直線モデルと比較して1/4モデル、-3乗モデルの順にひびわれ発生後の剛性低下が大きいため変位量が大きくなったと考えられる。また、引張軟化曲線の形状の近い1/4モデルと-3乗モデルの解析結果は、同程度の値が得られている。つぎに、同じようにこれら1直線モデル、1/4モデル、-3乗モデルを普通コンクリートとFRPを組み合わせたコンクリート版(RCA版)、高強度コンクリートとFRPを組み合わせたコンクリート版(HRCA版)に対して導入し、衝撃荷重を受けることによってひびわれを伴った破壊が進行する場合、コンクリート版の挙動の変化を図4(b), (c)に示す。この図より、上述のRC35版と同様の結果となった。これらのことから、解析によってコンクリート版の衝撃破壊挙動を推測する場合、コンクリートの材料特性の1つである引張軟化特性の選択は重要な課題であることが分かった。

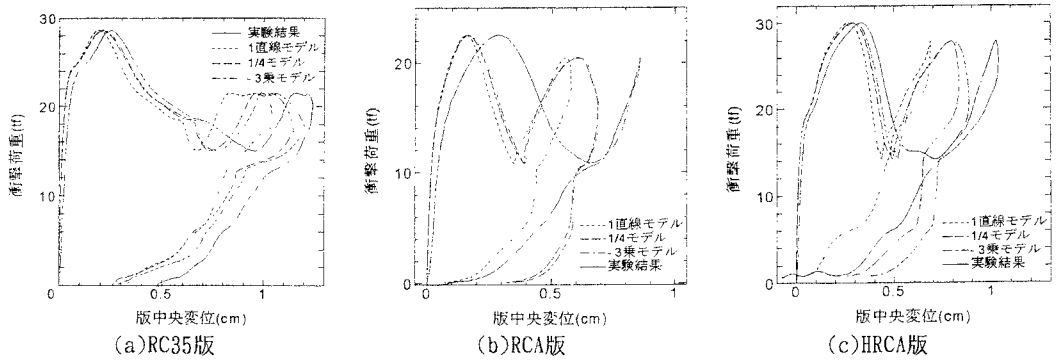


図4 各引張軟化モデルの衝撃荷重～版中央変位の比較

参考文献 1) Zdenek P. Bazant and Oh, B. H: Crack band theory for fracture of concrete, *Materiaux et Constructions*, Vol. 16, No. 93, pp. 155-177, 1983. 2) 六郷恵哲: コンクリートの曲げ破壊性状に関する破壊力学的検討, 平成4年度科学研究費補助金研究成果報告書, pp. 6-15, 1993.