

# RC版の衝撃破壊挙動解析におけるコンクリートの引張軟化特性の影響

## EFFECT OF TENSION SOFTENING CHARACTERISTICS OF CONCRETE ON THE IMPACT FAILURE ANALYSIS FOR REINFORCED CONCRETE SLAB

宮本文穂\* 中村秀明\*\* 北山 篤\*\*\*

Ayaho MIYAMOTO, Hideaki NAKAMURA and Atsushi KITAYAMA

\* 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

\*\* 博士(工学) 山口大学助手 工学部知能情報システム工学科 (〒755 宇部市常盤台 2557)

\*\*\* 修士(工学) (株)大林組 土木技術本部 (〒101 東京都千代田区神田錦町 3-20)

In general, the tensile fracture behavior of concrete beyond the peak stress point is influenced by not only strength characteristic but also tension softening characteristics. In this paper, the 3D nonlinear impact failure analysis with regard to the influence of the modeling of tension softening characteristics of concrete is carried out to make clear the failure mechanics of RC slabs under soft impact load. In here, the tension softening curves are modeled with straight model, 1/4 model and minus cubic model, and each model is incorporated into the 3D nonlinear impact failure analysis. These analytical results are compared with the experimental result.

**Key Words:** tension softening characteristic, soft impact load, reinforced concrete slab, 3-D FEM, impact analysis

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)版が衝撃荷重を受ける場合、変形の局所化によって衝撃荷重載荷の比較的初期段階からひび割れが発生すると考えられる。このことは、3次元有限要素解析などにおける解析結果からも、衝撃荷重載荷の比較的初期段階からコンクリート要素に発生する応力が引張強度に達しており、ひび割れが発生していることが確認されている<sup>1)</sup>。これらのことから、ひび割れ発生後のコンクリート要素の材料特性をどのように取り扱うかは、コンクリート版の衝撃破壊挙動解析において非常に重要な問題となる。

ひび割れ発生後におけるコンクリート破壊の特徴は、ひび割れの進展によって生じる巨視的に完全に開口したひび割れの先端に、微細なひび割れが累積した破壊進行領域とよばれる非線形領域が存在することである。ひび割れの生じていない弾性領域と、完全なひび割れ部分との中間にあるこの破壊進行領域では、引張ひずみ(あるいは、その領域におけるひび割れ幅の総和)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<sup>2)</sup>。

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(単位面積のひび割れ形成に必要なエネルギーであり、引張軟化曲線の面積)や、引張軟化曲線

(ひび割れの成長に伴って減少する引張伝達力と、引張ひずみ、またはひび割れ幅との関係)などの引張特性を取り入れた破壊力学的手法は、ひび割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と考えられる。また近年、コンクリートの破壊に関するより詳細な議論や、破壊についての高精度な予測手法が必要となり、ヤング係数や圧縮破壊強度、引張強度などの強度特性ばかりでなく、より多くの材料特性が数値解析に組み込まれる形で必要とされている。

著者らの以前の解析手法では引張軟化特性を考慮せず、コンクリート要素の主ひずみがひび割れ発生ひずみ(150 $\mu$ )に達すると、その時点でその主ひずみと直角方向にひび割れが発生すると仮定し、主ひずみ方向の剛性を0とする手法を用いていた。そのため、引張軟化特性を考慮しない解析結果は、実験結果と比較すると比較的早い段階で構造的破壊に至っており、ひび割れが多数進展した後の解析が困難であった。また、一般的にコンクリートの引張強度は圧縮強度の0.08~0.10倍とされており、ひび割れ発生ひずみを150 $\mu$ と一定にした場合、引張強度を過大に評価する恐れがあった。そこで本研究では、異なる3種類の引張軟化特性を考慮した破壊力学的手法を用いてひび割れ発生後のRC版の衝撃破壊挙動の解

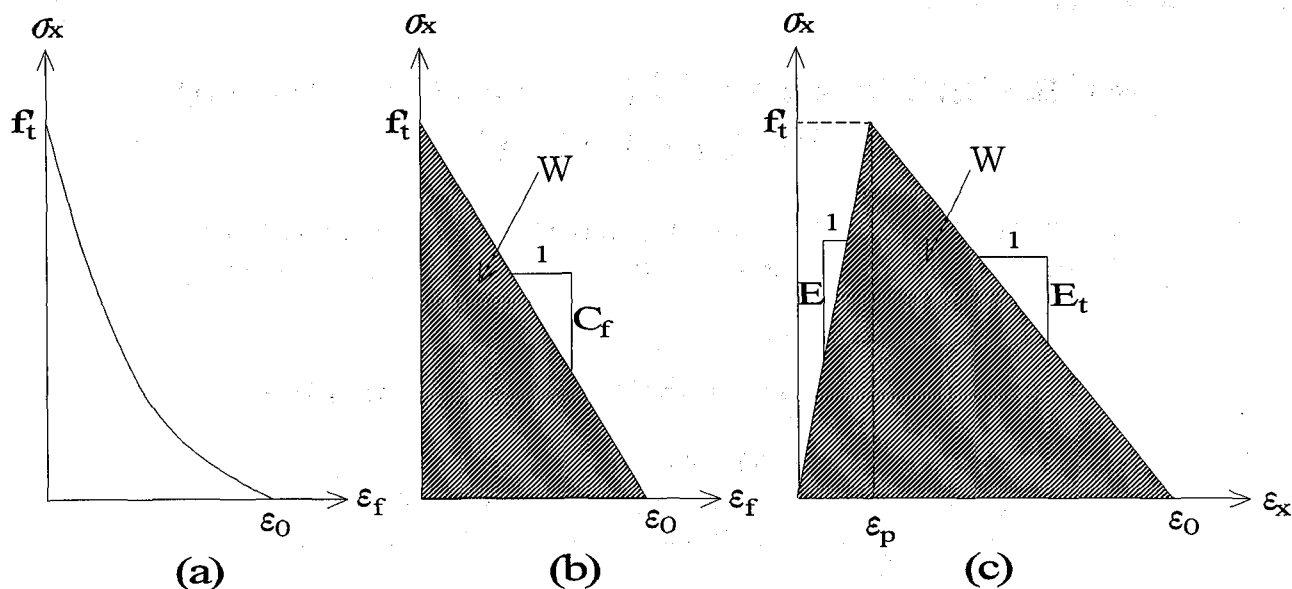


図-1 破壊進行領域の応力～ひずみ関係

析精度の改善を試み、引張軟化特性の違いが、RC版の衝撃破壊挙動にどのような影響を及ぼすのかを解析的に検討することを目的とした。

## 2. 引張軟化特性の有限要素解析への導入

解析に用いるコンクリートの引張軟化曲線は、直接引張試験から求めることが望ましいが、一般にコンクリートの引張試験を完全に制御し、最大耐力点以降の荷重-変位曲線を安定して計測することは容易ではない。一方、Li<sup>3)</sup>らが提案した切り欠き梁曲げ試験から、J 積分を介して引張軟化曲線を求める方法がある。しかしながら著者らはこのような実験を行っていないため、解析においてコンクリート要素に取り入れるコンクリートの引張軟化曲線には、Bazant ら<sup>4)</sup>が提案したコンクリートの材料定数から破壊エネルギーを算出し、それを用いて求めた引張軟化特性を用いるものとした。

従来の3次元有限要素解析<sup>1)</sup>においても、Bazant の引張軟化特性を考慮したものを用いていたが、従来用いていた引張軟化モデルは、ひび割れ発生後の応力伝達が応力あるいはひずみに関係なく一定とする1直線モデルであった。このモデルを採用した理由として、1直線モデルはモデル化が非常に簡単であり、3次元有限要素解析に導入するのに容易であったことが挙げられる。しかしながら、引張軟化モデルにはいろいろなモデルが提案されており、引張軟化特性を解析に導入するとき、どういった引張軟化モデルを用いるかを検討するため、六郷ら<sup>5)</sup>はあらかじめ切り欠きを加工した高強度コンクリート、軽量コンクリート、普通コンクリートを用いた梁の静的載荷試験を行っている。この試験は破壊エネルギーを求めるためにRILEMの試験法<sup>6)</sup>に準じて行われており、修正 J 積分法<sup>7)</sup>による引張軟化曲線の推定が行われてい

る。これによると、各種コンクリートとも引張軟化曲線はいずれも、1/4 モデル<sup>8)</sup>あるいは-3 乗モデル<sup>9)</sup>にほぼ一致することが確かめられている。そこで本研究では、新たに 1/4 モデル、-3 乗モデルを解析に導入し、従来から用いていた1直線モデルと比較することにより、引張軟化曲線のモデル化がRC版の衝撃破壊挙動の解析結果に及ぼす影響を明らかにした。

引張軟化特性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割れが入りひび割れが進行する際、図-1(a)のような主応力～主ひずみ関係を次のように表す。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ & 1 & -\nu \\ sym & & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_f \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 $\varepsilon_f$  : 塑性ひずみ

$E$  : コンクリートのヤング係数

$\nu$  : ポアソン比

である。

ここで、ひび割れ発生後の応力～ひずみ関係(引張軟化域)を、図-1(b)のように簡単な線形関係と考えると、引張軟化時の塑性ひずみ $\varepsilon_f$ は次式で与えられる。

$$\varepsilon_f = f(\sigma_x) = -\frac{1}{C_f} \sigma_x + \varepsilon_0 \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_0$ はコンクリートの剛性が0となる時のひずみである。

式(2)を式(1)に代入することにより以下の関係が導ける。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ \text{sym} & 1 & -\nu \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\frac{1}{C_f} \sigma_x + \varepsilon_0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} E^{-1} - \frac{1}{C_f} & -\nu E^{-1} & -\nu E^{-1} \\ \text{sym} & E^{-1} & -\nu E^{-1} \\ & & E^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、

$$\frac{1}{E_i} = \frac{1}{E} - \frac{1}{C_f} \leq 0 \quad (E_i : \text{引張軟化係数}) \quad (4)$$

とおくと、次のような関係が導ける。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_i^{-1} & -\nu E^{-1} & -\nu E^{-1} \\ & E^{-1} & -\nu E^{-1} \\ \text{sym} & & E^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

また、一般に応力～ひずみ関係は、式(6)のように表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu^{-1} E^{-1} & -\nu E^{-1} & -\nu E^{-1} \\ & E^{-1} & -\nu E^{-1} \\ \text{sym} & & E^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 $\mu$  はひび割れ係数 ( $0 \leq \mu \leq 1$ ) であり、 $\mu = 1$ ,  $\sigma_x = f'_t$  のときひび割れが発生する。また、 $\mu = 1$ ,  $\sigma_x = 0$ ,  $\varepsilon_x = \varepsilon_0$  において完全にひび割れた状態となる。

式(5)と式(6)を比較すると以下のような関係が導ける。

$$\begin{cases} \varepsilon_x = E_i^{-1} \sigma_x + \varepsilon_0 - \nu E^{-1} \sigma_y - \nu E^{-1} \sigma_z \\ \varepsilon_y = \mu^{-1} E^{-1} \sigma_x - \nu E^{-1} \sigma_y - \nu E^{-1} \sigma_z \end{cases} \quad (7)$$

したがって、

$$E_i^{-1} \sigma_x + \varepsilon_0 = \mu^{-1} E^{-1} \sigma_x \quad (8)$$

の関係が導ける。ここで、引張軟化域での応力が  $\sigma_x = -E_i(\varepsilon_0 - \varepsilon_x)$  で表されることから、

$$\frac{1}{\mu} = E \left( E_i^{-1} + \frac{\varepsilon_0}{\sigma_x} \right) = -\frac{E}{E_i} \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0 - \varepsilon_x} \quad (9)$$

が得られる。

式(6)を用い  $x, y, z$  局座標系で利用できるようにするため、以下のようにマトリックスを変更する。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu^{-1} E^{-1} & -\nu E^{-1} & -\nu E^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ & E^{-1} & -\nu E^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ & & E^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mu^{-1} 2(1+\nu) E^{-1} & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & & 2(1+\nu) E^{-1} & 0 \\ & & & & & \mu^{-1} 2(1+\nu) E^{-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

これらの条件から、ひび割れ発生後の弾塑性マトリックスを有限要素解析に適用するために、式(10)の逆マトリックスを計算すると以下ようになる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu^2}{\Delta} & \frac{\nu(1+\nu)}{\Delta} & \frac{\nu(1+\nu)}{\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{\Delta} \left( \frac{1}{\mu} - \nu^2 \right) & \frac{1}{\Delta} \left( \frac{\nu}{\mu} + \nu^2 \right) & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{\Delta} \left( \frac{1}{\mu} - \nu^2 \right) & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{\mu E}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ \text{sym} & & & & \frac{E}{2(1+\nu)} & 0 \\ & & & & & \frac{\mu E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここで、

$$\Delta = \frac{\left\{ \frac{1-\nu^2}{\mu} - 2\nu^2(1+\nu) \right\}}{E} \quad (12)$$

次に、式(9)内の引張軟化係数  $E_i$  を求めるために、以下のような手法を用いる。まず、破壊エネルギー  $G_f$  は構成要素でひび割れ進展によって消費されるエネルギーであり、図-1(b), (c) に示される面積  $W$  で表される。よって、次式の関係が得られる。

$$G_f = w_c \int_{\sigma_c = f'_t}^0 \sigma_x d\varepsilon_f = \frac{1}{2} C_f \varepsilon_0^2 w_c = \frac{f'_t{}^2}{2C_f} w_c$$

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{E_i} \right) f'_t{}^2 w_c \quad (13)$$

ここで  $w_c$  は、微細ひび割れが一様に広げられると仮定される場合のひび割れ進行領域（または、ひび割れ帯）の有効幅であり  $w_c = n d_a$  の関係がある。 $n$  は実験から求められる定数であるが、コンクリートに対してはおおよそ3であるのでここでは  $n = 3$  の関係を用いるものとする。 $d_a$  は粗骨材の最大寸法、 $f'_t$  は引張強度である。

これより、応力～ひずみ関係の基礎パラメータは、以下のように計算される。

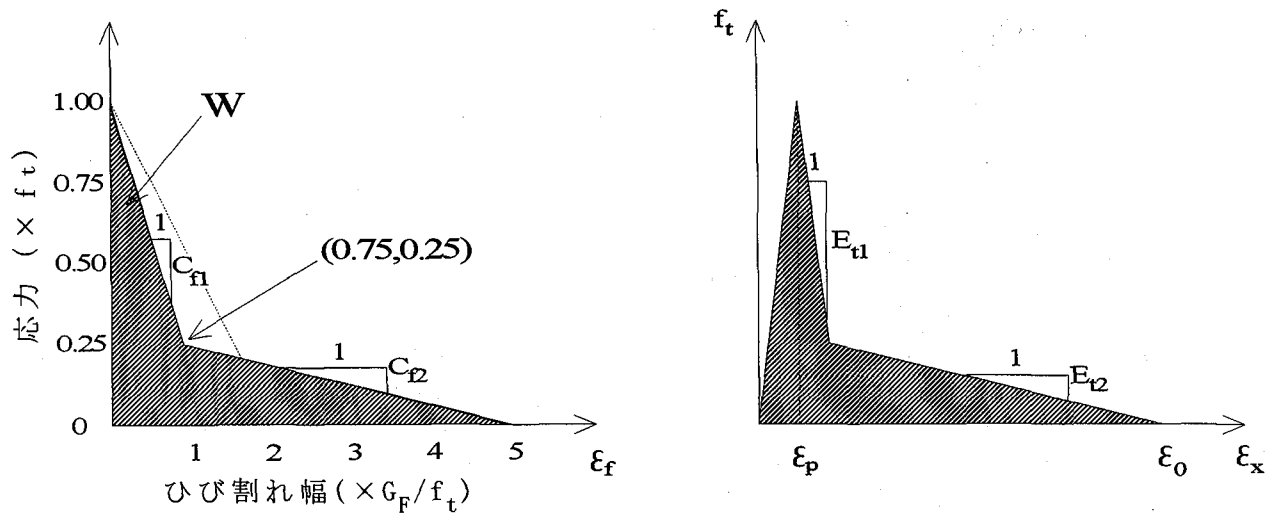


図-2 コンクリートの引張軟化曲線 (1/4 モデル)

$$C_f = \frac{f_t'^2 w_c}{2G_f}, \quad \varepsilon_0 = \frac{f_t'}{C_f} = \frac{2G_f}{f_t' w_c} \quad (14)$$

式(13)より, 1直線モデルの引張軟化係数  $E_t$  は, 以下のよう求めることができる.

$$E_t = \left( \frac{1}{E} - \frac{2G_f}{f_t'^2 w_c} \right)^{-1} \quad (15)$$

ここで, コンクリートの破壊エネルギー  $G_f$  を以下のよう求める.

Bazant ら<sup>4)</sup>は多くの実験からコンクリートの破壊エネルギーを, コンクリートのヤング係数 ( $E_c$ ), 引張強度 ( $f_t$ ), 粗骨材の最大寸法 ( $d_a$ ) を用いて求められる式(16)に示すような推定式を提案している. 本研究では, 実験から破壊エネルギーを求めているため, この推定式を用いてコンクリートの持つ破壊エネルギーを算出する.

$$G_f = \frac{(0.3044 f_t + 2.72) f_t'^2 d_a}{E_c} \quad (16)$$

ここで,  $G_f$ : 破壊エネルギー (kgf/cm)

$E_c$ : ヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$f_t$ : 引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

このようにして1直線モデルの引張軟化曲線は, 破壊エネルギーや図-1(b)の  $C_f$  によって関連づけられる. したがって, 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, 図-2(a)のように考えることがで

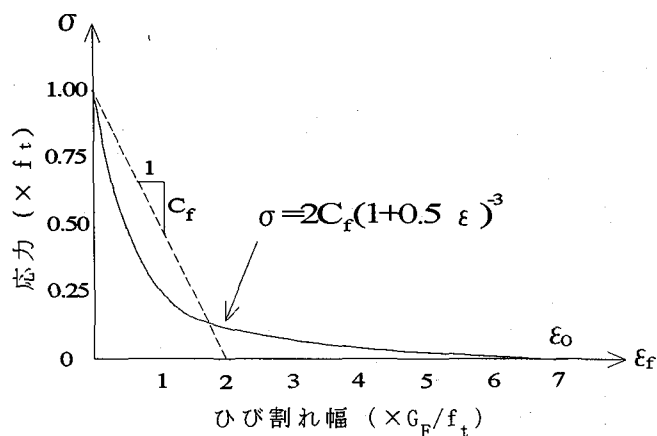


図-3 コンクリートの引張軟化曲線 (-3乗モデル)

きる (図-1の斜線部の面積  $W$  と, 図-2の斜線部の面積  $W$  は等しいものとする). この図より, 幾何学的な関係より, 引張軟化域の  $C_{f1}, C_{f2}$  は,

$$C_{f1} = 2C_f, \quad C_{f2} = \frac{2}{17}C_f \quad (17)$$

のように容易に求めることができる.

式(4)より, 図-2(b)に示す引張軟化係数  $E_{t1}, E_{t2}$  を以下のよう求めることができる.

$$E_{t1} = \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{C_{f1}} \right) = \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{2C_f} \right) \quad (18)$$

$$E_{t2} = \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{C_{f2}} \right) = \left( \frac{1}{E} - \frac{17}{2C_f} \right) \quad (19)$$

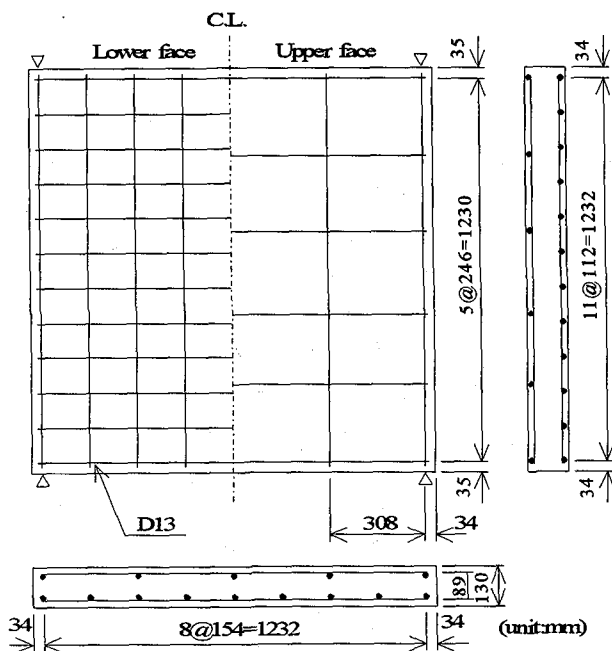


図-4 鉄筋コンクリート版の配筋図

このようにして求められた  $E_n, E_{12}$  を別々に式(11)に代入することによって、1/4 モデルの弾塑性マトリックスが作成され、引張軟化曲線 1/4 モデルを解析プログラムに導入することができる。

次に、図-3 にコンクリートの引張軟化曲線の-3 乗モデルを示す。これはひび割れ発生後の応力が、

$$\sigma = 2C_f(1+0.5\varepsilon)^3 \quad (20)$$

という応力とひずみを直接的に関連づけることができるといった特徴を持つモデルである。上述した  $C_f$  は、言い換えれば各引張軟化曲線の傾き ( $\varepsilon$  に関する微係数) であると考えることができるので、-3 乗モデルの  $C_f$  は、式(20)を  $\varepsilon$  について微分することによって次式のように求めることができる。

$$C_{f3} = 3C_f(1+0.5\varepsilon)^4 \quad (21)$$

式(21)に各コンクリート要素のひずみを代入して  $C_{f3}$  を求め、1/4 モデルと同様に式(4)に代入することによって、次式に示すように引張軟化係数を求めることができる。

$$E_{13} = \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{C_{f3}} \right) = \left( \frac{1}{E} - \frac{1}{3C_f(1+0.5\varepsilon)^4} \right) \quad (22)$$

表-1 実験供試体の種類

| 名称   | コンクリートの種類 | 補強筋の種類         |
|------|-----------|----------------|
| RC35 | 普通コンクリート  | 鉄筋(SD35)       |
| RCA  | 普通コンクリート  | 連続繊維補強筋 Type A |
| RCB  | 普通コンクリート  | 連続繊維補強筋 Type B |
| HRCB | 高強度コンクリート | 連続繊維補強筋 Type A |
| HRCB | 高強度コンクリート | 連続繊維補強筋 Type B |

表-2 コンクリートの一軸材料特性

| コンクリート版    | 圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------|
| RC35       | 331.4                          | 24.3                           | 2.76x10 <sup>5</sup>            | 0.196 |
| RCA, RCB   | 356.6                          | 26.7                           | 3.04x10 <sup>5</sup>            | 0.168 |
| HRCB, HRCB | 1032.6                         | 38.7                           | 3.75x10 <sup>5</sup>            | 0.217 |

表-3 鉄筋FRP筋の一軸材料特性

| 補強筋               | 断面積<br>(cm <sup>2</sup> ) | 破断荷重<br>(tf) | 破断ひずみ<br>( $\mu$ ) | ヤング係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------------|---------------------------|--------------|--------------------|---------------------------------|
| SD35              | 1.267                     | 5.70         | 45000              | 2.1x10 <sup>6</sup>             |
| Type A<br>高弾性炭素繊維 | 1.217                     | 11.07        | 7020               | 1.33x10 <sup>6</sup>            |
| Type B<br>高弾性炭素繊維 | 1.216                     | 21.11        | 17000              | 1.01x10 <sup>6</sup>            |

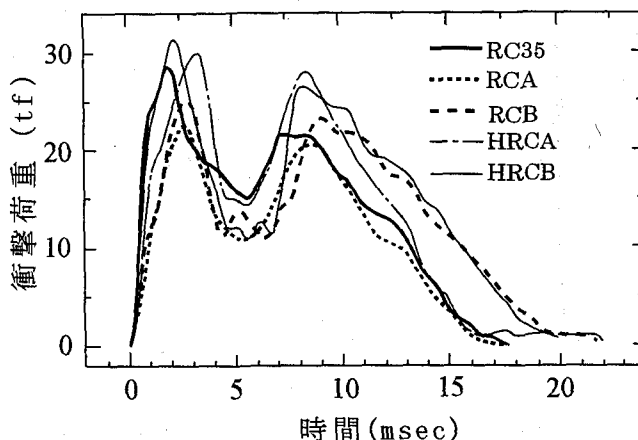


図-5 衝撃荷重～時間関係曲線

このようにして求められた  $E_{13}$  を式(11)に代入することによって、-3 乗モデルの弾塑性マトリックスが作成され、解析プログラムに引張軟化曲線-3 乗モデルを導入することができる。

### 3. 実験結果と解析結果の比較およびその考察

#### 3.1 重錘落下衝撃実験

解析精度の検証を行うため、引張軟化モデルを変えた3種類の解析結果と実験結果との比較を行う。以下には、過去に行った重錘落下実験の概略を示す。実験は、図-4に示されるようなコンクリート版を用い、2辺単純支持で重錘落下衝撃実験を行った。コンクリートは普通コン

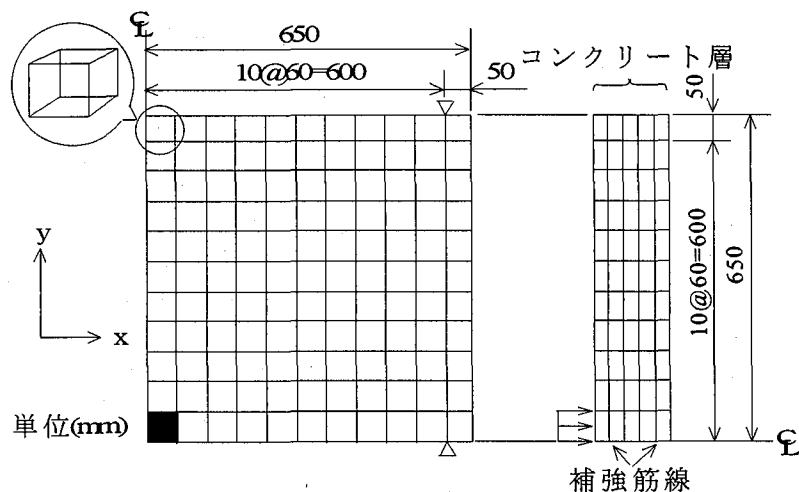


図-6 6面体要素3次元有限要素メッシュ

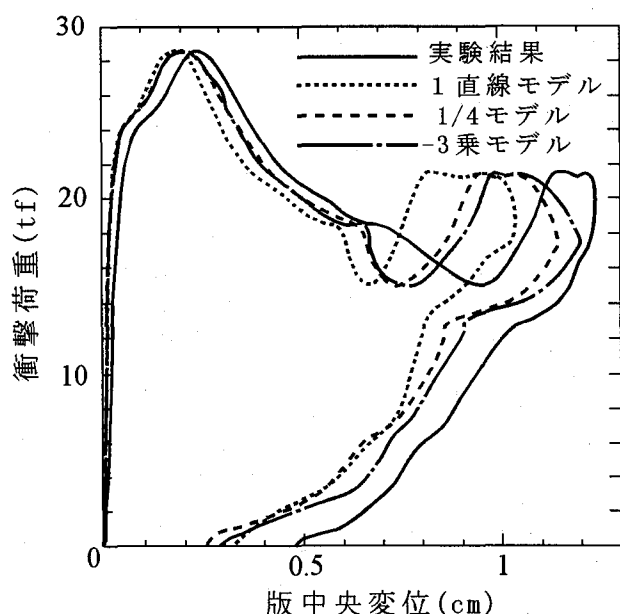


図-7 各引張軟化モデルの衝撃荷重～版中央変位の比較  
(RC35版)

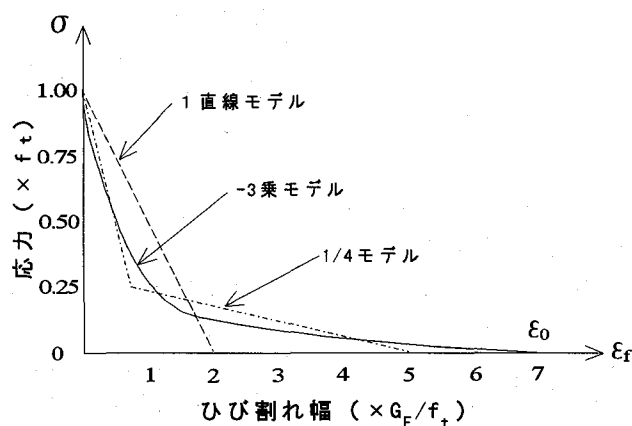


図-8 引張軟化曲線のモデル

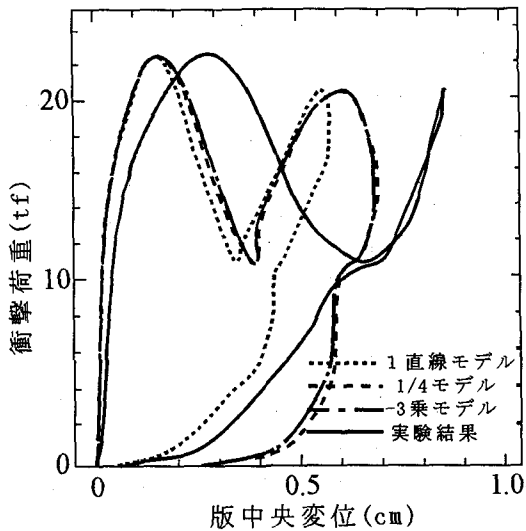
クリート (RC) と高強度コンクリート (HRC) の2種類とし、補強筋としては鉄筋と連続繊維補強筋 (FRP) (2種類) の計3種類の組み合わせで5体の供試体について実験を行った。供試体の種類を表-1に示し、コンクリートおよび補強筋の材料特性を表-2、表-3にそれぞれ示す。また、図-5には、衝撃実験により得られた各種コンクリート版の衝撃荷重～時間関係曲線を示す。

### 3.2 解析結果と実験結果との比較

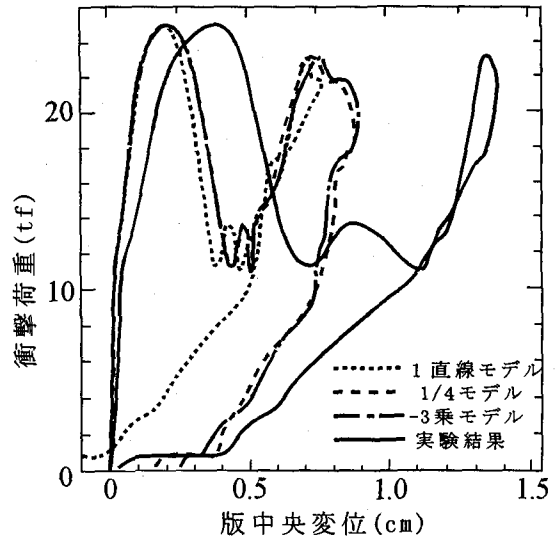
解析は、引張軟化特性が解析結果に及ぼす影響を把握するため、上述した3種類の引張軟化曲線モデルを用いて3次元有限要素法で行った。本研究で用いる有限要素解析<sup>1)</sup>のコンクリート要素は、8節点6面体のアイソパラメ

トリック要素で、要素の積分点はガウスの積分点 (2×2×2) を用いている。また、補強筋は、線材として取り扱っており、コンクリートと鉄筋間の付着特性の導入<sup>1)</sup>を行っている。動的平衡方程式の解法には、Newmark-β法 (β=1/4) を用い、また、コンクリートの破壊条件は、Ottosen<sup>10)</sup>によって提案された4パラメーターモデルを用いている。本解析で用いた解析モデルの有限要素メッシュを図-6に示す。なお、解析にあたり入力する衝撃荷重データは、実験によって得られた荷重～時間関係 (図-5) を用いた。

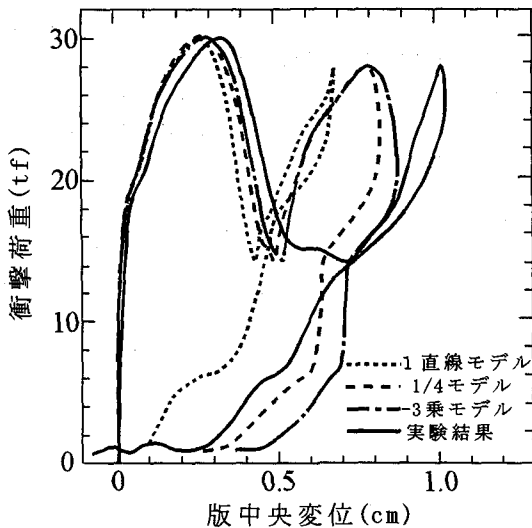
RC35版 (表-1参照) の衝撃荷重～版中央変位について、実験結果と解析結果を比較したものを図-7に示す。これより、静的実験において、精度が高いとされる1/4モデルや-3乗モデルが1直線モデルに比べて、より実験結果に近い結果が得られており、コンクリートの引張軟化曲線の形状がひび割れ発生後の鉄筋コンクリート版の挙動に大きく影響していることが考えられる。この理由として、1直線モデルと比較して1/4モデル、-3乗モデルの順にひび割れ発生後の剛性低下が大きいため最大変位量が大きくなったことが挙げられる (図-8参照)。また、引張軟化曲線の形状が比較的近い1/4モデルと-3乗モデルの解析結果は、同程度の値が得られている。次に、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RCA版、RCB版、HRCA版、HRCB版に対してそれぞれ導入し、衝撃荷重を受けることによってひび割れを伴った破壊が進行する場合、鉄筋コンクリート版の挙動がどのように変化するのかをまとめたものを図-9(a)～(d)に示す。これらの図より、上述のRC35版と同様に1直線モデル、1/4モデル、-3乗モデルの順に最大変位量が大きくなっていることがわかる。また、引張軟化曲線の形状が比較的近い1/4モデルと-3乗モデルは解析結果も近い値を取る結果となった。



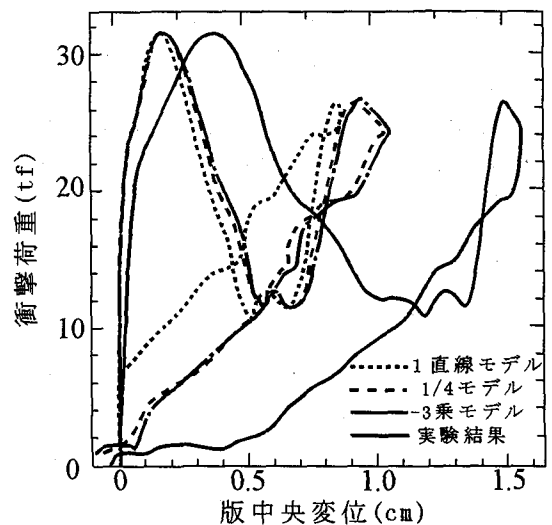
(a) RCA版



(b) RCB版



(c) HRCA版



(d) HRCB版

図-9 各コンクリート版の異なる引張軟化曲線モデルの解析結果  
(衝撃荷重～版中央変位関係) への影響

これらのことから、解析によって鉄筋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に、どの引張軟化モデルを解析に用いるかということは非常に重要な課題であると考えられる。

#### 4. 結論

本研究は、鉄筋コンクリート版に対するソフトな衝撃問題を対象に、コンクリートの引張軟化特性のモデル化が、RC版の衝撃破壊挙動にどのような影響を及ぼすのかを解析的に検討したものである。引張軟化曲線を1直線モデル、1/4モデル、-3乗モデルの3種類でモデル化

し、それぞれのモデルを3次元有限要素解析に組み込み、これらの解析結果と実験値との比較を行った。本研究で得られた主な結果をまとめると以下ようになる。

- ① 引張軟化曲線のモデル化が、ひび割れ発生後のコンクリート版の挙動に大きく影響しており、静的実験においても精度が良いと言われている1/4モデルや-3乗モデルは、1直線モデルに比べてより実験結果に近い結果が得られた。
- ② 1直線モデルは、1/4モデル、-3乗モデルと比べひび割れ発生後の剛性が大きいいため、最大変位量を小さく見積もる傾向がある。
- ③ 3種類のモデルの内、1/4モデルと-3乗モデルは解析

結果にあまり差がなかった。これは、引張軟化曲線をモデル化する際に、1直線モデルに比べ、両モデルとも形状が比較的似た形でモデル化されているためである。形状のモデル化が異なれば解析結果に差がでることから、引張軟化曲線の形状をいかにモデル化するかが重要となる。

謝辞：本研究の遂行にあたり貴重なご助言を頂いた神戸大学工学部高田至郎教授に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 宮本文穂, 北山篤, 五嶋真澄: 3次元有限要素解析によるRC版の衝撃破壊挙動解析と精度の検証, 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 1325-1336, 1996.
- 2) コンクリートの破壊力学研究委員会: コンクリート構造の破壊力学コロキウム委員会報告・論文集, JCI-19, 日本コンクリート工学協会, 1990.
- 3) Li, V.C. and Ward, R.J.: A Novel Testing Technique for Post-Peak Tensile Behavior of Cementitious Materials, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, pp. 183-195, 1989.
- 4) Zdenek P. Bazant, B.H. Oh: Crack band theory for fracture of concrete, *Matériaux et Constructions*, Vol. 16, No. 93, pp. 155-177, 1983.

- 5) 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.
- 6) RILEM Draft Recommendation (50-FMC): Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams, *Materials and Structures*, Vol. 18, No. 93, pp. 285-290, 1983.
- 7) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 洽: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No. 426/V-14, pp. 203-212, 1991.
- 8) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W.: Testing Methods to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, pp. 153-163, 1989.
- 9) Hillerborg, A.: Stability Problems in Fracture Mechanics Testing, *Fracture of Concrete and Rock*, Elsevier Applied Science, pp. 369-378, 1989.
- 10) W.F. Chen, D.J. Han: *Plasticity for Structural Engineers*, Springer-Verlag, New York, 1988.

(1997. 9. 26 受付)