

# 有限要素法による R. C. 部材の弾塑性解析 (その 4)

——コンクリート引張塑性を考慮した場合の 2, 3 の考察——

井元 勝慶  
武田 寿一

## Non-linear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method (Part 4)

——A Few Considerations in Regard to Tension Plasticity of Concrete——

Katsuyoshi Imoto  
Toshikazu Takeda

### Abstract

This report describes a series of studies made to establish a way for non-linear analysis of reinforced concrete (R. C.) by the finite element method. In the studies of the previous reports<sup>1)</sup>, the authors examined three kinds of methods for non-linear analysis of R. C. structures, such as two-, three-dimensional, and axisymmetrical problems, respectively.

These methods have been widely used for the non-linear behavior analysis of R. C. structures in general. However, because of several points to be cleared up, such as failure criteria of concrete under multi-axial stress state, etc., the precisions of computed results for complex R. C. structures were sometimes not very good. In this Part 4, an assumption has been made that two-dimensional concrete would experience some tensile-plastic flow before cracking, and a number of numerical procedures in the analysis has also been improved. Comparing the results obtained by the method based on this assumption with those by the previous analysis procedure based on the tension cut-off criterion, the effects upon behavior due to this tensile-plastic flow have been qualitatively examined.

### 概 要

本報告は、有限要素法を用いて、鉄筋コンクリート (R. C.) 構造物が終局に至るまでの非線形挙動を予測する解析法を確立するための一連の研究について述べるものである。筆者らは、既報告<sup>1)</sup>にて、それぞれ R. C. 構造物の非線形解析方法を検討してきた。その結果、一般の R. C. 構造物の非線形挙動をある程度予測できるようになり、実用化されている。しかしながら、多軸応力下のコンクリートの破壊構成則などが十分に確立されておらず、ある形状の構造物に対しては解析結果の精度があまり良くなかった。それ故、ここでは、二次元コンクリートがひびわれ破壊する直前に塑性域を経験するという仮定を設定し、また、2, 3 の解析手法の改良などの点についても検討を加えている。この仮定に基づいた解析を幾つかの例題に適用した結果と、既往のひびわれ破壊則 (Tension Cut-off Criterion) に依る解析結果を比較し、検討することによって、この引張塑性の仮定が R. C. 構造物に及ぼす影響を定性的に考察したものである。

### 1. 序

Ngo, Scordelis<sup>2)</sup> が1967年3月に有限要素法を鉄筋コンクリートばりの応力解析に適用して以来、あらゆる形状の R. C. 構造物に対して有限要素法が、応力解析やクリープ解析などの問題に、弾性のみならず終局に至るまでの非線形挙動を求めるため、適用され、実用化されて

いる。しかしながら、R. C. 構造物の終局に至るまでの挙動を求める解析には、材料の非線形現象や破壊を数学的なモデルに置換する際に、多くの不明確な問題が残されており、十分な精度の解が得られていない。R. C. 構造物の材料非線形現象の主な不明確な点として、次のものが揚げられる。

(1)多軸応力下におけるコンクリートの破壊則

- (2)コンクリートの応力度—ひずみ関係
- (3)ひびわれ面内の骨材のかみ合い
- (4)鉄筋とコンクリートの付着性状
- (5)ひびわれ面間の鉄筋のダボ効果
- (6)コンクリートの乾燥収縮やクリープ性状
- (7)温度、湿度変化が材質に与える影響

ここでは、これらの問題点のうち、(1)~(3)に対して、二軸応力下のコンクリートの引張側の破壊則と応力—ひずみ関係に幾つかの仮定を設けた。(4)に対しては、いわゆるボンドリンク要素<sup>2)</sup>を解析に考慮し、さらに、各構成要素の降伏、ひびわれや破壊時の応答を近似するための数値解析手法の改良などの点についても検討を加えている。

一般に、コンクリートのひびわれ破壊に関し、巨視的意味に於いてであるが、二軸応力下のコンクリートがぜい性破壊する前に延性域を経験するという仮定を設けることにより、一軸応力下の場合と同様に、ひびわれ発生時にエネルギー吸収をコンクリートに期待できる<sup>3)</sup>。それ故、本報告は、有限要素法による二次元R.C. 構造物の非線形解析手法にこの仮定を用いて行なった解析結果と既往の、最大主応力度が引張強度に達したら直ちにひびわれが発生し、且つひずみエネルギー吸収のない破壊則 (Tension Cut-off Criterion) による解析結果を比較し本仮定が R.C. 構造物の非線形挙動に及ぼす影響を定性的に考察したものである。

## 2. 解析法

通常、R.C.構造物は多種類の破壊形態を経験しながら終局に達する。従って、その非線形挙動を解析的に予測するには、構造物を形成する各構成材料の破壊特性と各材料相互の関係をそれぞれ独立に数学的なモデルに置換し、各種破壊の総和として把握しなければならない。ここでも、コンクリート、鋼材、鋼とコンクリートの付着に対し、それぞれ破壊モデルを仮定することによって解析を進める。

### 2.1. コンクリート

2.1.1. 破壊モデルの仮定 二軸応力下のコンクリートの破壊面として Kupfer ら<sup>4)</sup>の実験結果が現状では最も信頼されており、図-1に示すごとく、ほとんどの解析モデルはこのデータに一致するように仮定されている。

(1)圧縮側 弾塑性理論<sup>5)</sup>に基いた圧縮性材料に対する Prager-Druker の破壊モデルを仮定する。すなわち、

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} = |\sigma_Y| / \sqrt{3} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

f : 応力度 { $\sigma$ } のスカラーポテンシャル

$\alpha$  : 体積変化率 (0. ~ 0.3)

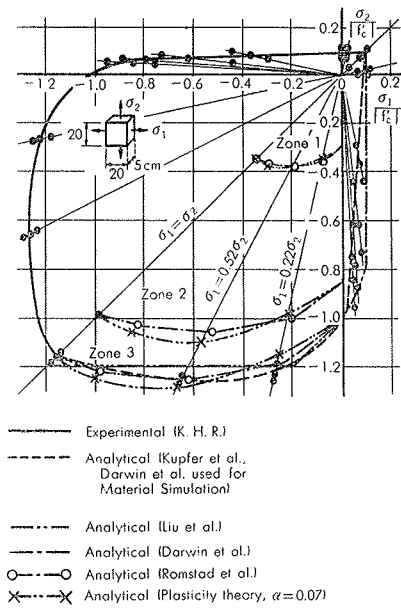


図-1 各種破壊面のモデル<sup>8)</sup>

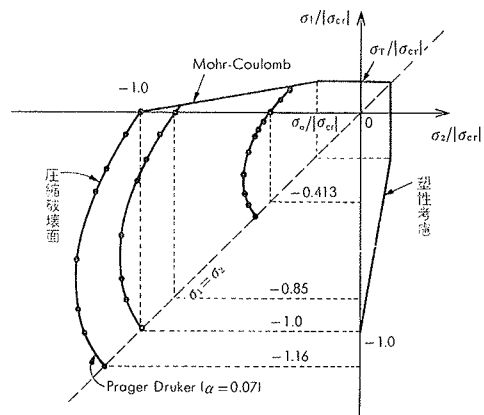


図-2 破壊面のモデル

で二次元問題のとき0.07

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \sigma_x + \sigma_y \\ J_2 &= (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2) / 3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

$\sigma_Y$  : 一軸降伏または圧縮破壊強度

式(1)を用いて主応力平面上の圧縮—圧縮、圧縮—引張領域の破壊判定を行なう (図-2)。

(2)引張側 図-2に於いて、ぜい性破壊する引張—引張圧縮—引張領域の解析モデルとして、いわゆる Tension Cut-off Criterion を採用した解析法がほとんどであるが序にて述べたように、ひびわれ破壊時に塑性的な挙動を示すことが無筋コンクリートの曲げ試験<sup>3)</sup>などによって確かめられている。また、Argyris ら<sup>6)</sup>は、無筋厚肉円筒の内圧試験にて、引張側の破壊モデルを幾つか仮定して解析した結果と実験結果より、コンクリートの引張側に何等かの非線形モデルが必要なことを指摘している。従って、コンクリートの引張側に対し、次のような仮定を設けた。

仮定1. 二軸応力下のコンクリートはひびわれる直前にひずみ硬化域を経験する。このとき、ひびわれ破壊をぜい性、ひずみ硬化を延性破壊と定義し、それぞれの破壊面は Mohr-Coulomb 破壊側に従うものとする (図-2)。この破壊則は式(1)と同様な形で次式のようなになる。

$$f_T = \sigma_1 + b(\sigma_2 - \sigma_a) = \sigma_T \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\sigma_1, \sigma_2$ : 主応力度,  $b = \alpha_0 \sigma_T / (\sigma_{cr} - \sigma_a)$ ,  $\alpha_0, \alpha_a$ : 定数,  $\alpha_2 \geq \sigma_a$  のとき,  $\alpha_0 = 0$ ,  $\alpha_2 < \sigma_a$  のとき  $\alpha_0 = 1.0$  (但し  $\sigma_a \leq 0$ ) とする。

$\sigma_{cr}$ : 一軸圧縮強度,  $\sigma_T$ : 引張降伏強度, ひびわれ強度

仮定2. 延性域での挙動は、圧縮側と同様、弾塑性理論に従うものとする。

仮定3. ぜい性破壊の判定は、相当応力( $f_T$ ) またはその点の相当塑性ひずみ限界 ( $i\bar{\epsilon}_T^P$ ) を用いて行なう。

$i\bar{\epsilon}_T^P$  を次式にて近似する (図-3 参照)。

$$i\bar{\epsilon}_T^P = \rho \cdot \bar{\epsilon}_T^P \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\bar{\epsilon}_T^P$ : 一軸引張時の塑性ひずみ限界,  $\rho$ : パラメータで

$$i\sigma_2 \geq \sigma_a \text{ のとき } \rho = 1.0$$

$$i\sigma_2 < \sigma_a \text{ のとき } \rho = i\sigma_1 / \gamma \sigma_T$$

$i\sigma_1, i\sigma_2$ :  $i$  点が延性域に達した際の主応力度,  $\gamma \sigma_T$ : 一軸引張時の降伏応力度。

仮定4. ひびわれは塑性ひずみが  $i\bar{\epsilon}_T^P$  に達したとき  $\sigma_1$  に直角な方向に発生するものとし、同時に  $\sigma_1$  に相当する不釣合力を系に解除する。以後、直交異方性体としひびわれ面内の応力伝達はないものとする。

仮定5. 引張側の延性挙動は、一度だけ経験し、二軸ひびわれる場合には、この引張塑性を考慮しない。

これ等の仮定を設定して解析を行なうが、図-4を参照して、ひびわれ現象と解析モデルについて検討してみる。実際のひびわれ破壊は図-4の③以降に達したときに視覚的に認められるもので、このときひびわれ破壊によるエネルギー吸収が生じている。一方、既往の解析モデル (図の点Aは割裂強度<sup>1)</sup> を、点Bは曲げ強度<sup>8)</sup> をそれぞれ引張強度として採用している) は、ともにひびわれ

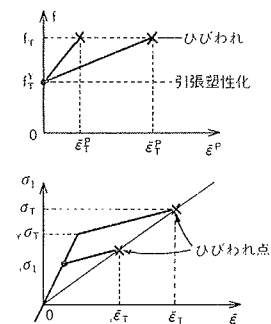


図-3 引張塑性ひずみ

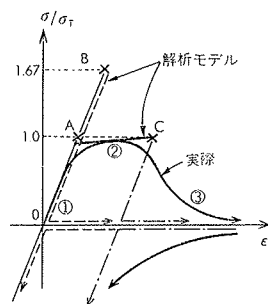


図-4 ひびわれ時のひずみ挙動

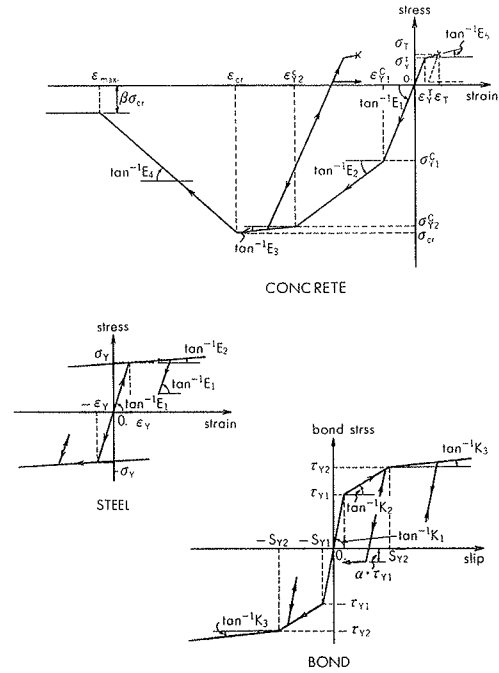


図-5 材料の一軸モデル

時のひずみを過小評価しており、B点ではひびわれ時の応力をも過大評価している。さらに、これらのモデルはひびわれ時にエネルギー吸収が生じない。

それ故、破壊現象として図-4の①-②-③の過程全体をひびわれ現象とすれば、前記の引張延性の仮定 (図の一点鎖線) を設けるのが自然かつ妥当であろう。

2.1.2. 応力-ひずみ関係 図-5にコンクリートの一軸応力-ひずみモデルを示す。この関係は二軸応力下の相当応力-相当塑性ひずみの関係に等しいとする。

平面応力を仮定すると塑性時の応力-ひずみマトリックス ( $D^P$ ) は、弾塑性理論より、次のようになる。

$$D^P = D^e - \frac{D^e \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T D^e}{H' + \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T D^e \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $D^e$  は弾性応力-ひずみマトリックスで、 $H'$  は材料のひずみ硬化係数である。また微係数  $\partial f / \partial \sigma$  は、圧縮側のとき式(1)を、引張側のとき式(3)をそれぞれ応力成分で偏微分することによって求まる。

2.1.3. 圧縮破壊後の解放力と要素内残留応力度 図-6に示す如く、軟化域における増分後の釣合いは、先ず式(5)にて  $H' = 0$  とした剛性より変位増分が求められ、次のようにして達成される (図-6)。

$H' = 0$  に相当する相当塑性ひずみ増分  $d\bar{\epsilon}_{p0}$  は、

$$d\bar{\epsilon}_{p0} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \{d\epsilon\} / \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad \dots\dots\dots(6)$$

このとき、相当応力増分 ( $d\bar{f}$ ) は

$$d\bar{f} = \bar{H}_3 \cdot d\bar{\epsilon}_{p0} \quad \dots\dots\dots(7)$$

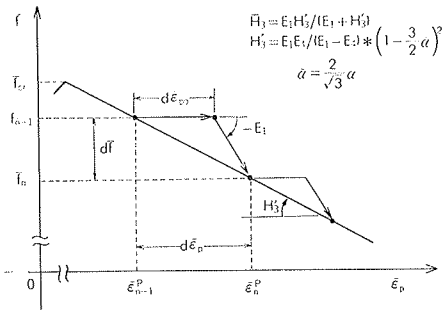


図-6 軟化域での釣合い

それゆえ、解放力  $\{d\sigma_{ex}\}$  は

$$\{d\sigma_{ex}\} = \frac{df}{\bar{\epsilon}_{n-1}} \{\sigma^{n-1}\} \dots\dots\dots(8)$$

このとき、要素内の残留応力度  $\{\sigma_r^n\}$  は

$$\{\sigma_r^n\} = \{\sigma^{n-1}\} - \{d\sigma_{ex}\} \dots\dots\dots(9)$$

として求められる。

2.1.4. ひびわれ面の開閉 一度ひびわれた面が閉じることによって要素に剛性回復が生じる場合がある。

ここでは、ひびわれ面の開閉の判定は、ひびわれ面に直角な方向のひずみによって次のように行なう。

ひびわれ面に直角方向の弾性ひずみは、

$$\epsilon_1^e = -\nu\sigma_2/E_1 \dots\dots\dots(10)$$

ここに、

$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta + \sigma_y \cos^2 \theta - 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$\theta$ : ひびわれ方向

同方向の塑性ひずみ  $\epsilon_1^p$  は

$$\epsilon_1^p = \epsilon_x^p \cos^2 \theta + \epsilon_y^p \sin^2 \theta + \gamma_{xy}^p \sin \theta \cos \theta \dots\dots(11)$$

ここに、 $(\epsilon_x^p, \epsilon_y^p, \gamma_{xy}^p)$ : その点が過去に経験した全塑性ひずみ成分

また、全節点変位  $\{u\}$  に依るみかけのひずみ  $(\epsilon_{10})$  は

$$\epsilon_{10} = [\cos^2 \theta, \sin^2 \theta, \cos \theta \sin \theta] \cdot [N] \cdot \{u\} \dots\dots(12)$$

式(10)~(12)より、 $\epsilon_1^e + \epsilon_1^p > \epsilon_{10}$  のときひびわれ面は閉じるものと仮定する。二軸ひびわれの場合、同様の判定を、 $\theta$  と  $\theta + \pi/2$  について行なう。

## 2.2. 鋼材

鋼材は、その形状と役割により、せん断効果や曲げ効果が無視できない場合に平板要素に、他の場合は線要素に、それぞれモデル化する。鋼材の一軸応力-ひずみモデルを図-5に示す。

## 2.3. 付着

鉄筋とコンクリートの付着特性は、境界上の、①粘着 (Adhesion)、②摩擦 (Friction)、③かみ合い (Wedging action) の三作用によって構成されている。一方、付着の解析モデルは、大別して、①完全付着<sup>1)</sup>、②ボンドリンク<sup>2)</sup>、③ボンドゾーン<sup>7)8)</sup>が考えられている。ここでは完全付着とボンドリンクの二つのモデルを採用した。引

張塑性の仮定が、これらと関連して、R.C.構造物の挙動にどのような影響を及ぼすかも検討するためである。付着応力-相対すべり関係を図-5に示す。

## 2.4. 数値解析法

荷重増分を系に加えたときの破壊判定に荷重倍数係数 ( $\gamma_{min}$ ) を用いる。これは、ある要素のあらゆる可能な破壊パターンに対する  $\gamma$  を求め、その中の最小値を  $\gamma_{min}$  として、 $0 \leq \gamma_{min} \leq 1.0$  のとき今回の増分によって  $\gamma_{min}$  に相当する破壊が生じたものとする。また、その際、その要素の応力修正等を行ない、不釣合力を系に解除させる。この手法をすべての構成要素に対して行なう。

荷重増分形式として修正ニュートンラプソン法を採用した。ひずみ除荷の判定、要素の剛性、不釣合力の解除方法やコードのフローチャートは文献<sup>1)</sup>と同じである。なお、本解析で用いた要素は、四節点四辺形要素、三節点線要素、二節点線要素とボンドリンク要素の5種類である。これ等の組み合わせは、構造的に安定であれば、任意に選択できる。四辺形要素と三節点線要素の体積分法に Gauss の求積法を用いており、積分点数 ( $n$ ) を  $n=2$  としている。

## 3. 解析例

本解析で設けた幾つかの仮定の妥当性を検討するためこれ等をパラメータにして、一軸圧縮試験片を二例、曲げ試験片と R.C.両引試験片の解析を行なった。

以下に、それぞれの解析例ごとに結果を述べる。

### 3.1. 一軸圧縮降伏時と軟化域での挙動の検討

降伏時または軟化域での応答の近似解析方法の検討をするため、コンクリートの純一軸圧縮試験片に対する計算を三例行なった。一つは、図-7に示す如く、軟化域では収束しないものであり、不釣合ひずみエネルギーが圧縮破壊後には蓄積される。この図より、降伏時の解の収束と軟化域での発散の性状がよくわかる。

軟化域での解を収束させるため、弾性バネを系に加えた例で、しかも、式(1)の  $\alpha=0, 0.07$  の場合の相当応力

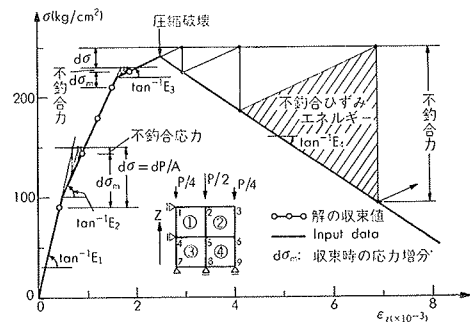


図-7 コンクリートの純一軸圧縮 (バネのない場合の収束性)

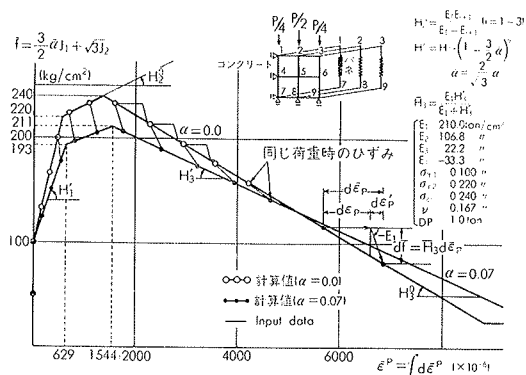


図-8 純一軸圧縮時の相当応力-相当塑性ひずみ関係 (α=0, 0.07)

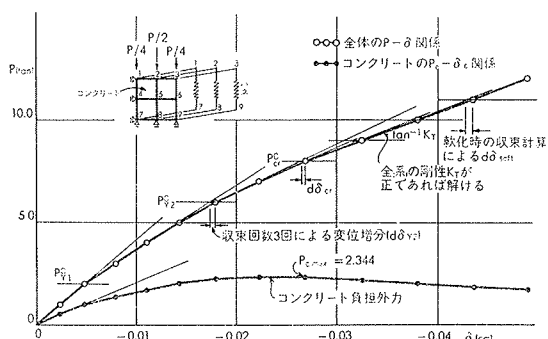


図-9 純一軸圧縮時の荷重-変位関係

一相当塑性ひずみ関係を図-8に示す。当然のことながら同じ荷重時では、α=0.07のものは、α=0のものに比べて相当応力が小さくなり、相当塑性ひずみが大きくなる。図-9にバネを含めた全体の荷重-変位関係とコンクリートの負担力-変位関数を比較して示すが、荷重方向の変形量は、αの値に無関係で、両者同じである。

### 3.2. 曲げ試験片の例題

ここでは、コンクリートの引張塑性の仮定の妥当性を確かめるために、JIS規格の無筋曲げ試験片(図-10)の解析を行なう。なお、以後の解析例は全て、図-5の材料一軸モデルを仮定し、表-1の諸定数を用いる。

一般に、コンクリートの材料試験では、割裂強度と曲げ強度がかなり異なっている。その強度比は、ほぼ1.67<sup>8)</sup>

コンクリート	鋼材
$\sigma_c^T = 0.02$ ton/cm <sup>2</sup>	$\sigma_y = 2.4$ ton/cm <sup>2</sup>
$\sigma_c^T$ (割裂強度) = 0.021 #	$E_1 = 2100$ #
$\sigma_{y1}^C = -0.100$ #	$E_2 = 21$ #
$\sigma_{y2}^C = -0.220$ #	ポアソン比 = 0.3
$\sigma_{c1} = -0.240$ #	付着要素
$\sigma_3 = -0.0$ #	
$E_1 = 210.0$ #	$\tau_{y1}^H = 0.05$ ton/cm <sup>2</sup>
$E_2 = 106.8$ #	$\tau_{y2}^H = 0.07$ #
$E_3 = 22.22$ #	$K_1^H = 45.0$ ton/cm <sup>3</sup>
$E_4 = -33.33$ #	$K_2^H = 10.0$ #
$E_5 = 9.54$ #	$K_3^H = 2.5$ #
ポアソン比 = 0.2	$\alpha^T = 0.1$
$\epsilon_T = 200\mu$	$\tau_{y1}^V = 1.0$ ton/cm <sup>2</sup>
$\alpha$ (体積変化率) = 0.07	$K_1^V = 100.0$ ton/cm <sup>3</sup>
$\beta = 0.1$	但し H: 水平成分 V: 鉛直成分

表-1 材料諸定数

で曲げ強度が大きく、これが引張強度とされている。両者の違いを引張塑性の仮定で説明するため、コンクリートの引張塑性ひずみの大きさを、それぞれ100μ, 150μの場合、TP-100, TP-150(表-2)について解析した。

初めてひびわれが発生するまでの荷重-変位関係を図-11に示す。図は割裂強度で無次元化している。割裂強度以後、塑性挙動を示し、TP-100では割裂強度比(P/P<sub>T</sub>)=1.53, TP-150ではP/P<sub>T</sub>=1.62のとき、それぞれ初ひびわれが発生した。この値は1.67にほぼ一致しており、従って引張塑性ひずみの大きさは割裂強度時の弾性ひずみの1~2倍程度が適当と思われる。図-12に特定断面上の材軸方向ひずみ分布を示す。この図より、ひびわれ発生によりB-B断面上の塑性要素にひずみ除

種類	名称	備考
① 曲げ強度	TP-100	塑性ひずみ長さ100μ
	TP-150	塑性ひずみ長さ150μ
② 一軸圧縮	U・FR	載荷端自由
	U・TC	載荷端固定・引張塑性無
	U・TP	載荷端固定・引張塑性有
③ R・C 両引	TP-B	付着考慮・引張塑性有
	TC-B	付着考慮・引張塑性無
	TP-P	完全付着・引張塑性有
	TC-P	完全付着・引張塑性無

表-2 解析例題

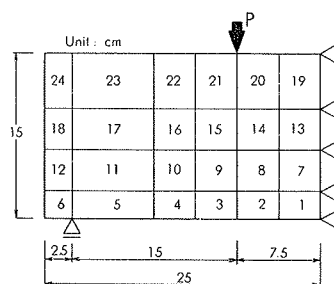


図-10 曲げモデル

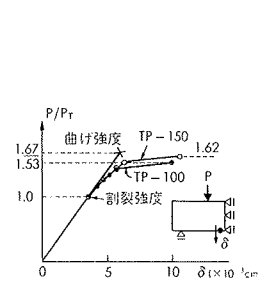


図-11 荷重-変位関係

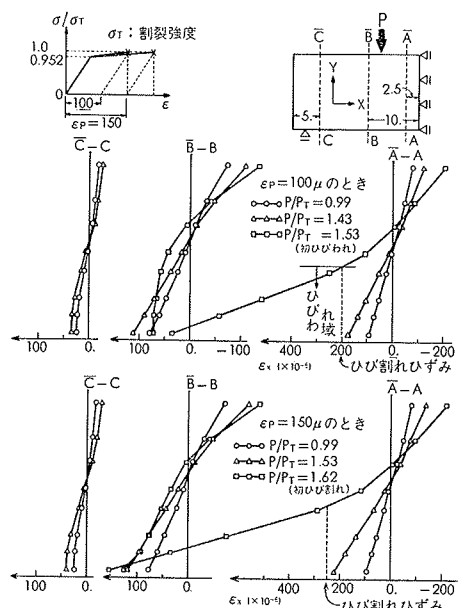


図-12 断面上のひずみ分布

荷現象が生じている。またひずみ分布は直線的なものではないことがわかる。

3.3. 一軸圧縮試験片の例題

コンクリートの圧縮破壊性状を検討するため、境界条件と引張塑性をパラメータにして表-2の例題を解析した。一般に、一軸応力下の圧縮実験では、最大耐力に近づくと載荷方向に縦ひびわれが生ずることが確かめられている。この現象を解析的に予測するため、本仮定1~5に基づく解析法を適用し、これらが現象と矛盾しないことを実証しようとしたものである。

載荷端自由のもの (U・FR)、載荷端固定で引張塑性を考慮したもの (U・TP) としないもの (U・TC) の三例について解析した (図-13, 表-2)。

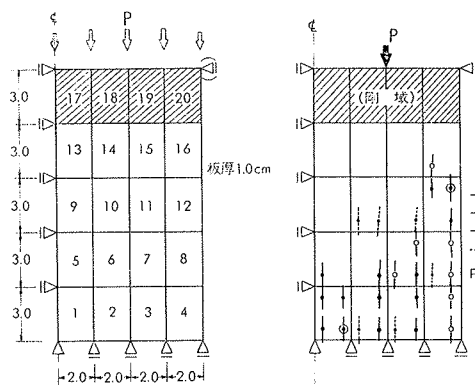


図-13 一軸モデル

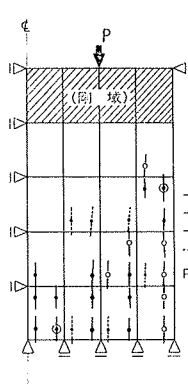


図-14 U・TP のひびわれ破壊

計算の結果、U・FR、U・TCの例題は終始ひびわれ破壊は生じなかった。U・TPのみが図-14のようなひびわれ破壊を生じた。初ひびわれは最大耐力比 (P/P<sub>max</sub>) が0.83のとき、部材中央付近と外表面載荷端近くで生じその方向はほぼ荷重方向であった。荷重が増加するにつれて、部材の横方向中央部広範囲に縦ひびわれが発生した。また、載荷端付近では端部固定の影響によりひびわれが発生しない。この部分が二軸圧縮状態のためであろう。いずれにしても、一軸圧縮状態において、コンクリートの縦割れ現象を U・TP により予測できた。

図-15に、載荷方向の主要断面 (A-Ā, B-B̄) 上における主応力挙動を、それぞれ、U・TP, U・TC について図示する。初ひびわれが発生するまでは両者は一致しているが、圧縮-引張域での破壊面が異なるため、最大耐力近くになると両者の挙動に差が生じている。

図-16に U・TC の軸方向ひずみ (ε<sub>z</sub>) 分布を、それぞれ特定荷重時について図示する。図のごとく、各水平断面上の ε<sub>z</sub> は一様ではなく、部材中央水平位置 (A-Ā) では、外表面に向って小さくなり、B-B̄→D-D̄ 位置になるに従って、分布形態が逆転していることが分った。この傾向は高荷重になるにつれて、顕著になっている。

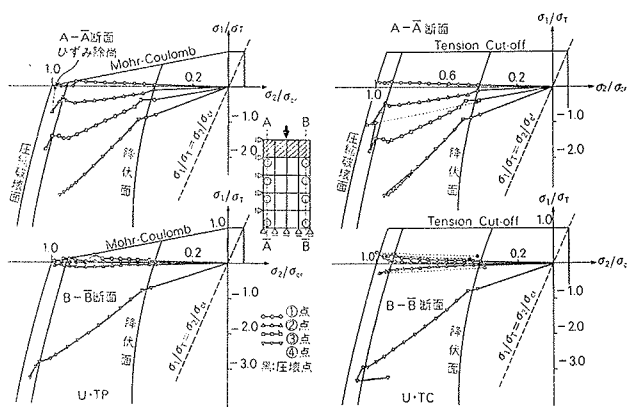


図-15 主応力平面上の挙動 (U・TP, U・TC)

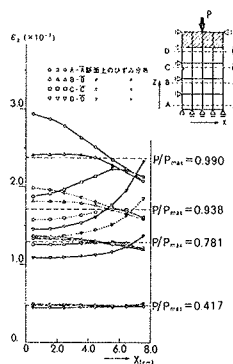


図-16 U・TC の軸ひずみ分布

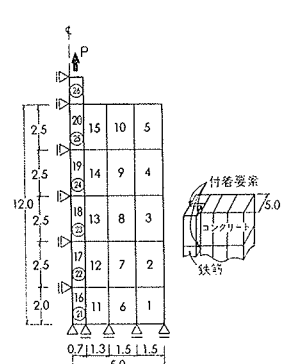


図-17 両引きモデル

3.4. R.C. 両引き試験片の例題 (図-17)

最も簡単な R.C. 部材である両引き試験片に本解析法を適用し、他の構成要素の破壊が組み合わされた場合の影響を検討するために行なった。表-2に示す如く、鉄筋とコンクリートの付着に、極めて普通の付着リンク要素を仮定した場合と、著者らが仮定してきた<sup>1)</sup> 完全付着の場合について、それぞれ、引張塑性を考慮したもの (TP・B, TP・P) と考慮しないもの (TC・B, TC・P) について合計四例について解析した。なお、各材料モデルは図-5のように仮定し、表-1の値を採用する。ここでは、鉄筋は常に弾性挙動であるように定めている。

図-19に TP・B, TC・B の破壊性状を示す。TP・B は、0.7 ton 時では、鉄筋近傍で自由端部分のコンクリ

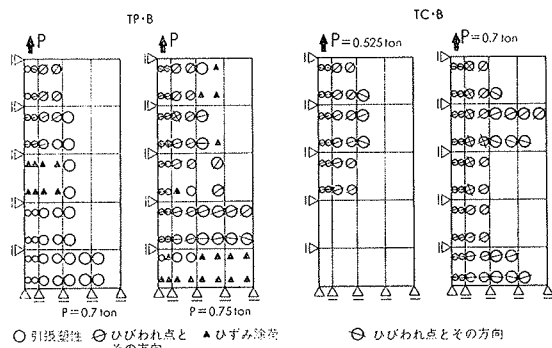


図-18 TP・B, TC・B の破壊性状

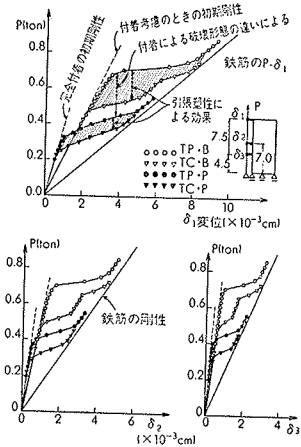


図-19 鉄筋位置における荷重—変位関係

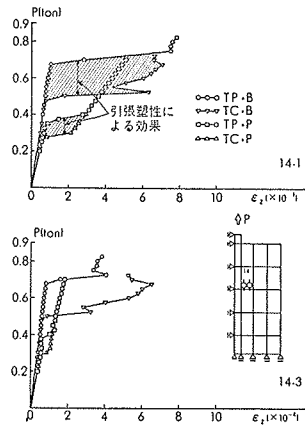


図-20 コンクリートの荷重—軸方向ひずみ関係

ートがひびわれ、それに隣接する部分にひずみ除荷現象が生じ、部材中央部分では引張塑性化が進んでいる。0.75 ton 時では同図の如く、中央より少し離れたところで、ひびわれが横断面を貫通し、その近傍ではひずみ除荷が生じ、また、鉄筋近傍のコンクリートはほとんどひびわれている。一方、TC・B は自由端鉄付近よりひびわれが発生し、0.7 ton 時では、自由端より少し部材中央寄りのところと、部材中央部の2か所で、ひびわれが横断面を貫通している。TP・B、TC・B の破壊性状が著しく異なることがわかる。図-19は、鉄筋位置における荷重—変位関係を、それぞれ4者比較して図示する。

コンクリートの引張塑性を考慮した例題 TP・B (○印)、TP・P (●印) の方が、Tension Cut-off Criterion の例題 TC・B (△印)、TC・P (▼印) より、途中の変形挙動が、それぞれ高くなっている。TP・B と TC・B、TP・P と TC・P の差が、コンクリートの引張塑性の仮定による効果である。また、付着を考慮すると、初期剛性は低くなるが、変形性能が高くなることが認められる (TP・B と TP・P、TC・B と TC・P)。図-20 にコンクリートの荷重—軸方向ひずみ関係を図示する。完全付着を仮定した TP・P と TC・P は、ひびわれ破壊が完了してからは、両者の変形、ひずみともに、ほぼ同じ挙動をすることが確認されている。

#### 4. 結 び

コンクリートのひびわれ破壊現象に、Mohr-Coulomb の破壊則を適用し、ひびわれ直前に引張塑性挙動を仮定した解析方法を提案し、幾つかの簡単な例題を解析することによって、これらの仮定が R. C. 構造物の全体的な非線形挙動にどのような影響を及ぼすかを検討してきた。その結果、次の事柄が言える。

(1) 割裂強度を引張強度とし、引張塑性を仮定することにより、曲げ強度と割裂強度の相違を力学的に説明で

きた。

(2) 引張塑性ひずみの大きさは、弾性割裂ひずみの1~2倍程度と思われるが、その大きさが適確に定められれば、ひびわれ破壊現象をより定量的に評価できよう。今後、引張塑性ひずみの定量的な検討と、この仮定をせん断破壊する R. C. 構造物に適用し、その効果を調べる必要がある。

(3) Mohr-Coulomb の破壊則を仮定すると、一軸圧縮時に縦ひびわれが生じ、実験結果と矛盾しない。一方、既往の Tension Cut-off Criterion による解析と純一軸応力状態の解析では、縦ひびわれは発生しない。

(4) 一軸圧縮時の縦ひびわれ発生荷重は、固定端のとき最大荷重比0.83であった。実際の実験では、載荷端の条件が固定と横方向自由の中間的なものであろうから、図-15、16の応力分布やひずみ分布のそれぞれ断面方向の変化の程度はもっと小さくなり、従って縦ひびわれ発生荷重は1.0に近づくであろう。

(5) 図-15、16より、一軸圧縮試験にて、荷重—軸ひずみ関係は、載荷端間の変位量よりひずみを求める方法が最良であることが分かった。

(6) 数値解析手法の改良を行なうことによって、R. C. 構造物に各種破壊が生じた場合に、得られる解析精度と収束性が向上した。

#### 参考文献

- 井元勝慶, 武田寿一: 有限要素法による R. C. 構造物の弾塑性解析, 一その1, 柱-はり部材-, 大林組技術研究所報, No. 7, (1973), 同題, 一その2 軸対称回転体, その3 柱-はり部材の復元力特性-, 同 No. 8, (1974), 3次元連続体の非線形有限要素解析, 第1報, 同, No. 11, (1975) 他
- Ngo, et al.: Finite Element Study of Reinforced Concrete Beams with Diagonal Tension Cracks, UCSESM Report No. 70-19, Univ. of Calif., Berkeley, (Dec. 1970)
- 近藤, 坂著: コンクリートハンドブック, 朝倉書店, p. 311.
- Kupfer, et al.: Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, (Aug. 1969)
- 山田嘉昭: マトリックス法の応用, 東大出版会
- Argyris, et al.: Recent Developments in the Finite Element Analysis of PCPV, Nuclear Engineering and Design, 28, (1974), pp. 42~75
- 黒正, 山中: 異径鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究, 日本建築学会大会, (昭和49)
- 野口 博: 鉄筋コンクリートの力学的挙動に関する研究, 東京大学学位論文, (昭和50.12)