

# 論文 ひび割れ面のせん断応力伝達を考慮した鉄筋コンクリート造骨組部材の解析モデル

高瀬 裕也\*1・和田 俊良\*2

**要旨**：コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達機構は、せん断力を受ける鉄筋コンクリート構造部材の荷重変形性能に大きく寄与することが一般に知られている。本論文では、せん断力を受ける骨組部材の荷重変形曲線を再現するため、変位ベクトルを曲げとせん断のそれぞれの機構に分離して算出し、後者の機構にはひび割れ面のせん断応力伝達モデルを用いるマクロモデルを提案する。この解析モデルにより鉄筋コンクリート造単純梁の数値計算を行った結果、せん断ひび割れ幅が小さく計算される場合には曲げ破壊となるが、ひび割れ幅が大きく計算される場合には、せん断応力の伝達が不十分となりせん断破壊する挙動を再現できることが明らかとなった。

**キーワード**：コンクリート、ひび割れ面、せん断応力伝達機構、梁理論、マクロモデル

## 1. はじめに

せん断ひび割れが生じているコンクリートがせん断力を担うと、ひび割れ面の凹凸を介して応力が伝達される。このひび割れ面のせん断応力伝達機構が、鉄筋コンクリート（以下、RC と略記する）構造部材の荷重変形特性を左右する主要なメカニズムの一つであることは周知の事実である<sup>例え1)</sup>。

そのため、せん断力を受ける RC 構造部材の荷重変形曲線を数値解析で再現する場合には、このせん断応力伝達機構を考慮することが重要であると考えられる。既往の研究<sup>2), 3)</sup>には、2次元非線形解析にせん断応力伝達機構をモデル化して導入されたものが幾つかある。その中でも田所<sup>4)</sup>らは、2次元非線形解析において 1)分散ひび割れモデルによる有限要素解析では、実際のひび割れ面での挙動を必ずしも正確に再現できないこと、2)離散ひび割れモデルでは実挙動を再現できるが、ひび割れの配置、角度などの設定の重要性とその煩雑さを指摘している。上記の背景より、ひび割れ面の挙動を実現に即して再現でき、より簡潔に解析因子を設定できる部材解析モデルが望まれているようである。

RC 構造部材の荷重変形曲線について、少ない計算負荷でありながら工学的に良好な精度で実験値を再現できる解析法の一つに梁要素モデルがある。この解析法は、梁理論に基づいて定式化されているため、曲げ変形が卓越する部材には適するが、せん断変形が無視できない場合には、そのままの形で適用することは困難である。

そこで著者らは、この梁要素モデルとひび割れ面のせん断応力伝達機構を組み合わせ、RC 骨組部材の荷重変形曲線を再現する、新たなマクロモデルの構築を試みる。提案するモデルは、1)曲げとせん断による変形を独

立して算出する、2)せん断変形はひび割れ面のせん断応力伝達機構のみで記述すると言う、2つの特徴を持つ。

本論文では、提案モデルの定式化について記述し、次いで数例の数値計算を行って本モデルの特徴について考察を加える。

## 2. 提案するマクロモデルの定式化

本研究で提案する解析モデルの特徴の一つは、部材の変形を曲げとせん断に分けて算出することにある。それぞれの変形を算出する機構を、便宜的に「曲げ機構」と「せん断機構」と呼ぶことにする。以下に、このモデルの定式化について記述する。

### 2.1 本モデルの概要

図-1に RC 部材の変形の、図-2に本モデルでの変形の取扱の概念図をそれぞれ示す。

梁要素モデルをベースとしてせん断変形を考慮した解析手法に、石田<sup>5)</sup>や梅田<sup>6)</sup>らの研究がある。石田の方法では、せん断変形による軸直交方向の変位は評価されるが、曲げによるこの変位は考慮されていない。また梅田らの方法は、剛性を曲げとせん断のそれぞれの剛性比で応分して（例えば、修正 Newton-Raphson 法などを用いて解く場合には変位ベクトルを応分することになる）、

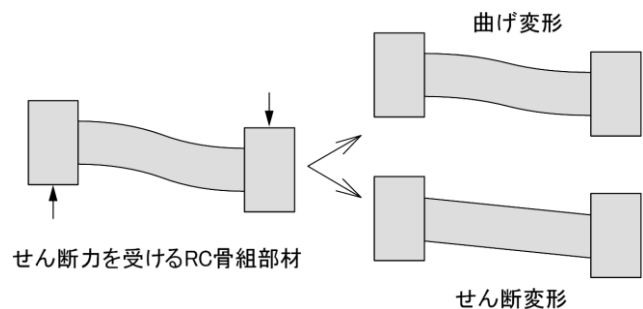


図-1 RC 梁部材の変形

\*1 飛島建設株式会社 技術研究所研究員 工博 (正会員)

\*2 北海道職業能力開発大学校 建築科講師 工博 (正会員)

剛性マトリックスを誘導し節点力ベクトルを求めるものである。しかしこの方法を用いて部材の破壊まで追跡しようとする、破壊が進む大変形領域でも、変位を応分して曲げとせん断による節点力を求め足し合わせるようになるため、適切に剛比を与えなければ過大な荷重が算出される懸念がある。

本モデルでは上述の課題を解決すべく、次の方法により部材のモデル化を行う。まず図-1の通り、せん断荷重を受ける部材の変形が、曲げ変形とせん断変形に分離できると捉える。これを図-2に示しているように個別に評価する。図-2に描いている黒丸点は有限要素法における節点とは異なり、節点力ベクトルのみを受け渡す機能を持つ点である。これを「仮想節点」と呼ぶことにする。曲げとせん断を独立に扱うため、それぞれの要素数は同じである必要はないが、変位ベクトルを合成させるため、最低限材端のみで仮想節点を共有すればよい。

## 2.2 基本仮定

本解析手法で仮定する基本事項は次の通りである。

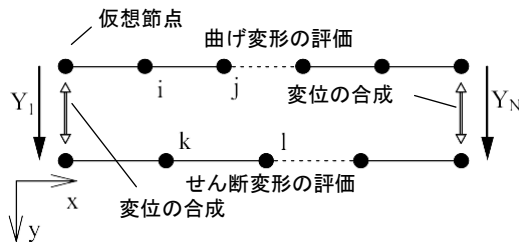
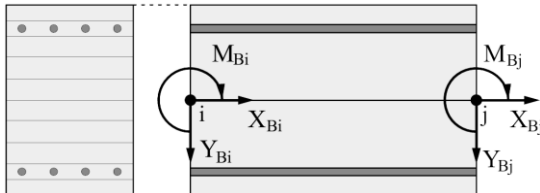
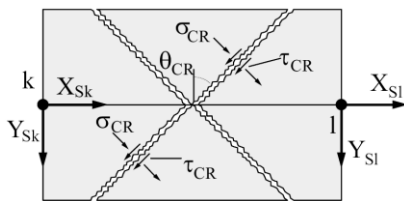


図-2 本モデルの変形の手扱い



(a) 曲げ要素



(b) せん断要素

図-3 本モデルの要素

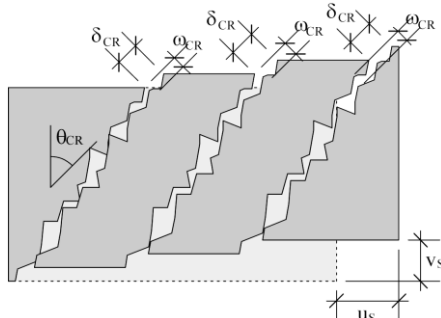


図-4 ひび割れ幅 $\omega$ の算定

- 1) 部材に作用する変形は曲げとせん断に分離され、それぞれ独立に算出することができる。
- 2) 曲げ要素について、平面保持の仮定が成立し m 層に仮想分割した積層要素モデルとして表現できる。
- 3) せん断要素は、ひび割れ面のせん断応力伝達機構のみによって記述できる。
- 4) 鉄筋とコンクリートは完全付着している。

ここで述べた仮定事項に基づき、以下に本解析手法の定式化について記述する。

## 2.3 荷重と変位

図-3の(a)と(b)に、本モデルで用いる曲げ要素とせん断要素をそれぞれ描く。

本モデルでは、曲げ機構とせん断機構のそれぞれの変形を独立して扱うため、どちらかの機構で破壊が生じる(つまり、増分荷重を許容できる)までは、部材の軸鉛直方向(y 方向)に作用する増分外力 $\Delta Y$ は曲げ機構とせん断機構に等しく作用する。

$$\Delta Y = \Delta Y_B = \Delta Y_S \quad (1)$$

増分変位ベクトル $\{\Delta \delta\}$ は曲げ機構とせん断機構の共有する仮想節点において、それぞれの増分変位ベクトル $\{\Delta \delta_B\}$ と $\{\Delta \delta_S\}$ が合成され(2)式で表される。

$$\{\Delta \delta\} = \{\Delta \delta_B\} + \{\Delta \delta_S\} \quad (2)$$

曲げ要素とせん断要素の増分節点力ベクトルは、剛性マトリックスを用いて、次のように記述される。

$$\begin{Bmatrix} \Delta X_B \\ \Delta Y_B \\ \Delta M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{13} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_B \\ \Delta v_B \\ \Delta \theta_B \end{Bmatrix} = [K] \{\Delta \delta_B\} \quad (3)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta X_S \\ \Delta Y_S \\ \Delta M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_S \\ \Delta v_S \\ \Delta \theta_S \end{Bmatrix} = [Q] \{\Delta \delta_S\} \quad (4)$$

ここに $[K]$ と $[Q]$ は、曲げ要素とせん断要素のそれぞれの剛性マトリックスである。

ここで、先の(1)式の意義についてももう少し詳しく記述する。骨組部材を1次元に置換してモデル化すると、実際のひび割れ面の発生位置はある1点になる。この際に、ひび割れ発生位置にせん断の要素を設け、曲げ要素と連続してモデル化すると、ひび割れ面に作用する節点力は隣接する曲げ要素に作用する節点力と等しくなり、従って(1)式が成立する。このようなモデル化も十分に考えられる。しかしながらこの方法を採用すると、ひび割れ発生位置の問題や、複数のひび割れを有する場合の要素分割など、更に多くの影響因子を持つことになる。そこで、このような煩雑さを出来得る限り少なくし、合理的にモデルを構築するため、本モデルではせん断機構を独立させた形を取っている。せん断機構を独立させたとは言え、ひび割れ面に作用する応力は、前記の曲げとせん断の要素が連続するモデルと同じであるため、本モデルにおい

ても(1)式が成立すると著者らは考える。

## 2.4 せん断要素の数式化

本モデルでは、前述してあるようにせん断変形をひび割れ面のせん断応力伝達機構のみで表現する。

せん断要素の増分節点力ベクトルをひび割れ面に生じる増分応力で記述すると、幾何学的に(5)式が得られる。

$$\begin{aligned} \{\Delta P_s\} &= \begin{Bmatrix} \Delta X_s \\ \Delta Y_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_s \\ \Delta v_s \end{Bmatrix} \\ &= A_{CR} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{CR} & \sin \theta_{CR} \\ \sin \theta_{CR} & \cos \theta_{CR} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \sigma_{cr} \\ \Delta \tau_{cr} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\theta_{CR}$  はせん断ひび割れ面の断面方向に対する角度を、 $A_{CR}$  はひび割れ面積を、 $\sigma_{cr}$  と  $\tau_{cr}$  はひび割れ面の垂直方向に作用する応力（以下、垂直応力と呼ぶ）と、せん断すべり方向に作用する応力（以下、せん断応力と呼ぶ）をそれぞれ示している。

これらの増分  $\Delta \sigma_{cr}$  と  $\Delta \tau_{cr}$  は、増分ひび割れ幅  $\Delta \omega$  とひび割れ面の増分せん断変位  $\Delta \delta$  の関数として表される。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_{cr} \\ \Delta \tau_{cr} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial \sigma / \partial \omega & \partial \sigma / \partial \delta \\ \partial \tau / \partial \omega & \partial \tau / \partial \delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{Bmatrix} \quad (6)$$

(6)式で用いられる、増分ひび割れ幅  $\Delta \omega$  と増分せん断変位  $\Delta \delta$  は、増分せん断変位ベクトルの軸方向と軸鉛直方向の成分  $\Delta u_s$  と  $\Delta v_s$  の関数となり、これを数式化すると(7)式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f(\Delta u_s, \Delta v_s) \\ g(\Delta u_s, \Delta v_s) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

## 2.5 せん断要素の変位関数の定義

せん断要素の増分変位ベクトルは、増分ひび割れ幅と増分せん断変位により決定される。したがって、 $\Delta \omega$  と  $\Delta \delta$  を導く関数、 $f(u_s, v_s)$  と  $g(u_s, v_s)$  をどのように設定するのが重要な課題となる。これらの関数は、せん断スパン比、コンクリート強度、鉄筋量などの様々な影響を受けると推察される。さらに加えると部材の非線形挙動の影響を受ける可能性も考えられる。このような問題を緻密に解明しようとする試みは未だ無いようである。そこで本論文では、まずはこれらの関係を簡素化して捉えることにする。

まず、ひび割れ幅  $\omega$  とせん断変位  $\delta$  の関係には、線形関係が成立すると仮定する。

$$\delta = \alpha \cdot \omega \quad (8)$$

ここに  $\alpha$  は比例定数であり、以後  $\delta / \omega$  と記述する。

また増分ひび割れ幅  $\Delta \omega$  と増分せん断変位  $\Delta \delta$  から、図-4 に示しているように、幾何学的にせん断要素の増分変位を与える。これを数式で表わすと下記ようになる。

$$\Delta u_s = n(\Delta \delta \sin \theta_{cr} + \Delta \omega \cos \theta_{cr}) \quad (9)$$

$$\Delta v_s = n(\Delta \delta \cos \theta_{cr} + \Delta \omega \sin \theta_{cr}) \quad (10)$$

ここに、 $n$  は要素内に生じるせん断ひび割れの本数を意味する。

## 2.6 計算アルゴリズム

本モデルの計算を行うには、まず(3)式と(4)式を変換した次の方程式に増分節点力を与えて解く。

$$\{\Delta \delta_B\} = [K]^{-1} \{\Delta X_B \quad \Delta Y_B \quad \Delta M\}^T \quad (11)$$

$$\{\Delta \delta_S\} = [Q]^{-1} \{\Delta X_S \quad \Delta Y_S \quad \Delta M\}^T \quad (12)$$

これによって得られる  $\{\Delta \delta_B\}$  と  $\{\Delta \delta_S\}$  を、(2)式に代入して、 $\{\Delta \delta\}$  を求める。(1)式より、曲げ機構およびせん断機構が破壊する前までは、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Y_B$ 、 $\Delta Y_S$  は等しいので、 $\{\Delta \delta\}$  と合わせて荷重-変形曲線を描くことができる。

どちらかの機構が破壊した後では、もう一方の健全である方の増分変形量が、破壊した方の増分変形量に比べ無視できる程小さいと考えられるため、その直前の計算ステップで得られている変位量に固定する。破壊後の変形進展は、破壊が生じた方の要素のみの増分変形を考慮する。なお、せん断要素で破壊が生じた場合には、荷重が低下するため変位増分法に切り替えて計算する。

## 3. 構成材料の構成則とひび割れ面のせん断伝達モデル

本モデルで使用する材料の構成則、およびひび割れ面のせん断伝達モデルについて、以下に記述する。

### 3.1 鉄筋

図-5(a)に鉄筋の応力-ひずみ曲線を示す。

鉄筋の応力-ひずみ曲線を、圧縮側、引張側ともに bi-linear の弾塑性で記述する。降伏以後の接線剛性は、初期弾性係数  $E_s$  の 1/100 の値とする。

### 3.2 コンクリート

図-5(b)にコンクリートの応力-ひずみ曲線を示す。圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ曲線は saenz<sup>7)</sup> の近似曲線で表現する。この近似曲線は次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{E_{c0} \cdot \varepsilon_c}{1 + \left( \frac{E_{c0}}{E_{cs}} - 2 \right) \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2} \quad (12)$$

圧縮強度以降は、破壊エネルギーの概念を導入して  $\varepsilon_{cf}$  を求め、直線的に漸減する経路を辿るように設定する。コンクリートの引張強度  $\sigma_T$  は次の式<sup>8)</sup>で評価する。

$$\sigma_T = 0.23 \sigma_B^{2/3} \quad (13)$$

引張応力を負担する場合には、引張強度  $\sigma_T$  までは弾性挙動するものとし、それ以降は応力を負担しない。

### 3.3 ひび割れ面のせん断応力伝達

図-6 にひび割れ微小面の応力場の概念図を、図-7 にひび割れ幅を一定とした場合の  $\delta$ - $\tau$  曲線、 $\sigma$ - $\tau$  曲線をそ

れぞれ示す。

ひび割れ面のせん断伝達には、物理接触理論に基づいて著者らが提案する、ひび割れ微小面の応力軟化現象を考慮したモデル<sup>9),10)</sup>を採用する。この詳細については既報<sup>9),10)</sup>に譲り、ここでは概要だけを述べる。

ひび割れ微小面に生じる接触応力と微小面の傾斜角度の密度分布から、下記の応力釣り合い方程式を得る。

$$\sigma_{CR} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} k_{CN} \cdot \sigma_{CN} \cos\theta \cdot \bar{\Omega}(\theta) d\theta$$

$$\tau_{CR} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} k_{CN} \cdot \sigma_{CN} \sin\theta \cdot \bar{\Omega}(\theta) d\theta$$

ここに  $k_{CN}$  は有効接触係数、 $\sigma_{CN}$  はひび割れ微小面に生じる接触応力、 $\theta$  は微小面の傾斜角、 $\bar{\Omega}(\theta)$  は傾斜密度関数をそれぞれ意味している。

さらに接触応力  $\sigma_{CN}$  は次式で表される。

$$\sigma_{CN} = \sqrt{e} \frac{\sigma_{CNC}}{\omega_{\theta C}} \cdot \text{EXP} \left[ -\frac{\omega_{\theta}^2}{2\omega_{\theta C}^2} \right] \cdot \omega_{\theta}$$

ここに  $\sigma_{CNC}$  はひび割れ微小面の最大圧縮強度、 $\omega_{\theta}$  はひび割れ微小面の接触変位、 $\omega_{\theta C}$  は最大接触強度時の接

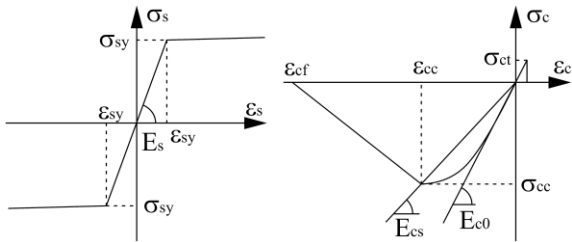


図-5 構成材料の応力-ひずみ曲線

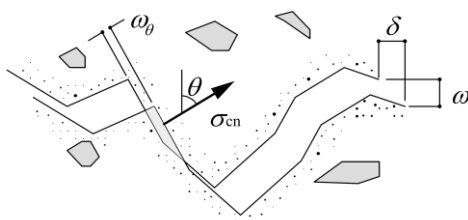


図-6 ひび割れ微小面の接触応力

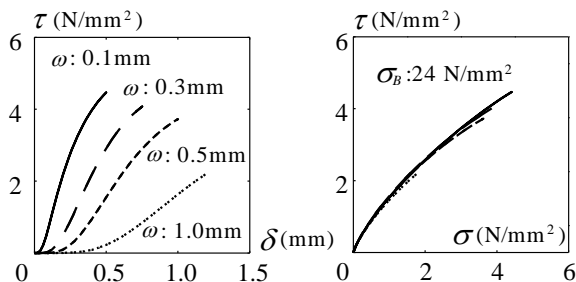


図-7 ひび割れ面のせん断応力伝達モデルによる  $\tau - \delta$  曲線と  $\tau - \sigma$  曲線

触変位を表している。なお、傾斜密度分布は文献<sup>8)</sup>の関数をそのまま用いている。図-7を見ると明らかのように、このモデルは、ひび割れ幅が大きくなるにつれ、応力値が低くなる性状を有している。

#### 4. 数値計算例とその考察

本4節では、提案するマクロモデルを用いて、幾つかの数値計算を行い、本モデルの特徴を検証する。

##### 4.1 解析モデル

図-8に本解析で対象とするRC構造部材の諸元を、図-9に解析モデルを示す。本論文では、スパン1600mm、断面が400mm×400mmのRC造単純梁を例として数値計算を行う。これは建築構造物のRC骨組部材の1/2スケール程度を想定したものである。

構成材料の主な物性として、コンクリート圧縮強度を24N/mm<sup>2</sup>に、主筋の降伏強度を362N/mm<sup>2</sup>と設定する。また主筋を6-D19(引張鉄筋比Pt=1.07%)で配筋する。

解析を行う上では、これを簡略化し図-9のようにモデル化し、せん断ひび割れを載荷前から左右対称に導入する。要素数は曲げ機構で4、せん断機構で1とし、互いに両端部の仮想節点を共有する。曲げ要素の断面は10層に分割する。

##### 4.2 解析パラメータ

表-1に解析パラメータを記す。

既述の通り、本モデルのせん断要素で用いられるパラメータは、ひび割れ数  $n$ 、ひび割れ面積  $A_{CR}$ 、ひび割れ

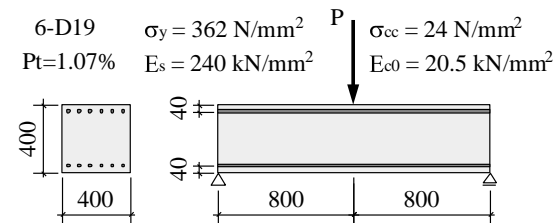


図-8 解析対象とする部材の諸元

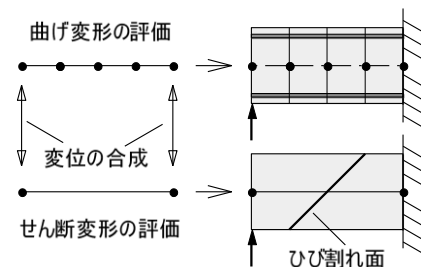


図-9 解析モデル

表-1 解析パラメータの一覧

	$n$	$A_{CR}^*$	$\alpha$
Case 1	1	73,163 (mm <sup>2</sup> )	0.90
Case 2			0.80
Case 3			0.70

\*  $A_{CR} = 339 \times 339 / \cos(\pi/4)$

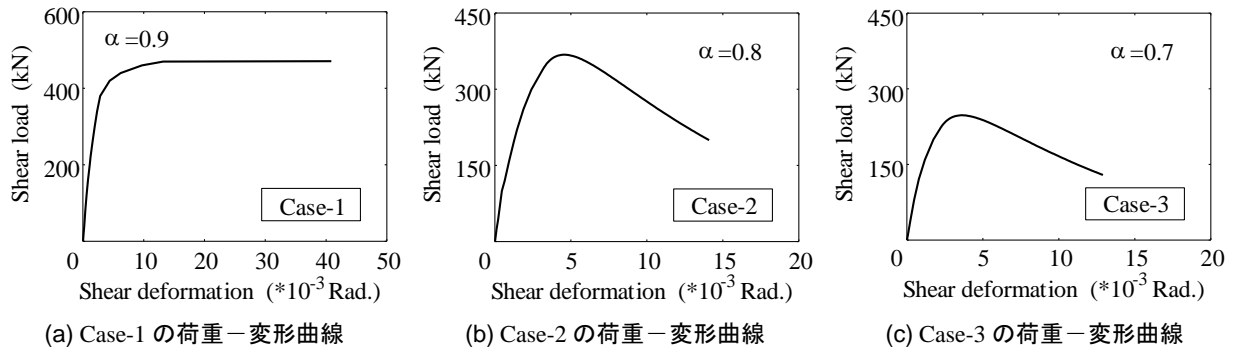


図-10 数値計算の結果

発生角度  $\theta_{CR}$ ，そして  $\delta/\omega$  の 4 者である。

本論文では、これらのうちひび割れ面数  $n$  は主要なせん断ひび割れのみを扱うこととし  $n = 1$  に、また、ひび割れ発生角度は  $\pi/4$  とする。ひび割れ面積は主筋の内側にある部分のみを有効面積として次のように算定する。

$$A_{CR} = B_e \times H_e / \cos\theta_{CR} \quad (16)$$

ここに  $B_e$  は部材奥行方向の有効長さを、 $H_e$  は部材鉛直方向の有効長さをそれぞれ示す。

したがって本論文では、 $\delta/\omega$  のみを変数として取り扱い数値計算を行う。

せん断力を受ける構造部材に生じるせん断ひび割れ面のひび割れ幅とそのせん断変位の関係について検証された研究例は非常に少ない。その数少ない報告の一例として、田所ら<sup>4)</sup>や篠原ら<sup>11)</sup>の研究が挙げられる。田所らの RC 造単純梁の実験では、S1 試験体で概ねひび割れ幅  $\omega$  とせん断変位  $\delta$  が同じ値で推移している。これに対し、せん断補強筋のない T2 試験体ではひび割れ幅の拡幅が顕著となり、せん断変位の値はその 1/2 から 1/4 程度の値で推移している。

また篠原らは RC 柱のせん断実験によりひび割れ面の挙動を検証している。普通強度コンクリートを対象とした No.7 試験体の結果では、部分的にひび割れ幅  $\omega$  とせん断変位  $\delta$  が同じ程度の値を示すが、全体としてはせん断変位の値の方がひび割れ幅よりも小さい値を呈する傾向が確認されている。

これらの知見より一概には言えないが、 $\delta/\omega$  の値は 1 以下となる傾向が多いようである。そこで、本論文では解析パラメータである  $\delta/\omega$  を、0.9, 0.8, 0.7 と 3 段階に設定することとする。

#### 4.3 数値計算結果とその考察

図-10 (a), (b), (c) に、 $\alpha$  を 0.9, 0.8, そして 0.7 と設定した解析で得られる荷重-変形曲線をそれぞれ示す。また図-11 と図-12 に各解析 Case におけるひび割れ幅と、せん断要素の軸方向節点力のそれぞれの推移を示す。

はじめに図-10 (a) の  $\delta/\omega=0.9$  とした Case-1 の計算結果に注目してみる。図-11 に示すように、このケースはひび割れ幅の拡幅が最も小さく、ひび割れ面を介して十

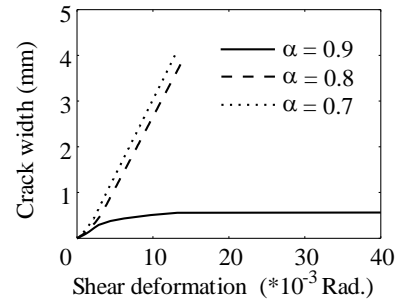


図-11 ひび割れ幅と変形の関係

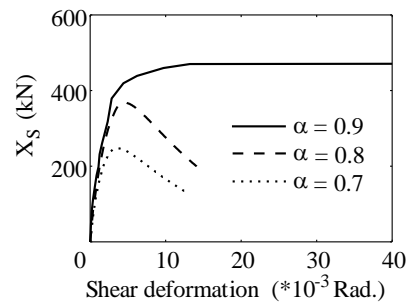


図-12 せん断要素の軸方向節点力の推移

分な応力が伝達される。したがって、せん断破壊する前に主筋が降伏し靱性的な荷重-変形曲線を描く。

続いて、図-10 (b) と (c) の Case-2 と Case-3 の計算結果を観察する。これらの試験体は Case-1 とは異なり、図-11 に描かれている通りひび割れ幅の拡幅が大きく、十分に応力が伝達されないため主筋降伏前にせん断荷重が低下する結果となった。両者とも同じせん断破壊先行型の破壊形式を示しているが、 $\delta/\omega$  がより小さく、僅かながらひび割れ幅の拡幅の大きい Case-3 の方が最大荷重が低く、しかも小さい変形角で荷重低下域に至っている。

本モデルでは、せん断補強筋の影響をモデル化していない。実構造部材におけるせん断補強筋の効果は、ひび割れ幅の拡幅抑制であり、本モデルにおいては  $\delta/\omega$  の設定値によってひび割れ幅を制御することができる。

なお、せん断破壊する RC 梁の既往の実験結果は、本計算結果より急激に荷重が低下する傾向がある。この差異は本解析で  $\delta/\omega$  を一定と仮定していることに起因する。実現象ではせん断破壊以後、 $\delta$  の進行は低下するが、本モデルでは  $\omega$  の増加に伴い  $\delta$  も増加するため、ひび割

れ面上で応力が発生する。したがって、 $\delta/\omega$ を実現現象に合わせて設定すれば、せん断ひび割れの発生により荷重が急激に低下する挙動も再現できる可能性がある。

最後に図-12を観察する。Bazant<sup>12)</sup>らは、ひび割れ面のせん断伝達機構により、ひび割れ面の垂直方向に応力が発生し、これが鉄筋に引張応力を与える可能性を懸念している。

本論文における解析手法では、軸鉛直方向のみの力の釣り合いに基づいて解析を行ってきたが、より精度を高めるのならば、軸方向の力の釣り合いも考慮する必要がある。図-12に示される、せん断要素の軸方向節点力を曲げ要素に与えると、まさしくBazantらが示唆する通り主筋の引張り降伏を想定よりも早め、部材の変形性能を低下させる可能性が考えられる。今後、この軸方向節点力の評価方法についても検討を重ねたい。

上記の課題はさておき、本項で行った数値計算例より、本モデルは $\delta/\omega$ を適切に設定することにより、曲げ変形とせん断変形を同時に考慮でき、さらにせん断破壊以後の荷重低下も再現できることが明らかとなった。

## 5. 結論

本研究では、コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達機構により、RC骨組部材のせん断変形を考慮したマクロモデルを提案した。この解析モデルを用いて、幾つかの数値計算を行った。本論文で得られた知見を列記すると次のようになる。

- 1)本解析手法では、曲げとせん断を独立に扱うと言う、既往の解析手法には殆ど見られない大胆な仮定に基づいて定式化を行ったが、数値計算の結果を見る限り、実際の挙動を再現できる可能性が高い。
- 2) $\delta/\omega$ の値を大き目に設定すると、ひび割れ幅の拡幅が抑制され、せん断応力を十分に伝達できることから部材の破壊形式は曲げ破壊となる。
- 3) $\delta/\omega$ を小さ目に設定すると、ひび割れ幅が拡幅しせん断応力を十分に伝達できなくなるため、部材の破壊形式はせん断破壊となる。
- 4)せん断破壊する場合、 $\delta/\omega$ が小さいほど最大荷重が低く、その際の変形も小さくなる。
- 5)本モデルによりポストピーク領域の荷重低下挙動を再現することができる。

本論文は、著者らが提案する解析手法に発展性を見出せるものか検討するために、試行的にモデルを構築し、このモデルの特徴について検証したものである。上述で得た知見より、本モデルは部材の破壊形式に囚われることなく、RC骨組部材の荷重-変形曲線を再現できる可

能性が高いことが分かった。今後、著者らは、鉄筋とコンクリートの付着すべりや、ヒンジ領域からの鉄筋の抜け出しなどの影響を考慮したり、また $\delta$ と $\omega$ の関係をより実現現象に合うようにモデルを拡張し、その上で既往の実験結果との比較を行って、モデルの再現精度について検討する予定である。

## 参考文献

- 1) Fenwick,R.C., Paulay,T.: Mechanisms of Shear Resistance of Concrete Beams, J. of Structure Div., ASCE, Vol. 94, No.10, PP. 2325-2350, Oct. 1968.
- 2) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, No.536, PP.135-142, 2000.10.
- 3) 福浦尚之, 前川宏一: 非直行する独立4方向ひび割れ群を有する平面RC要素の空間平均化構成則, 土木学会論文集, No.634/V-45, PP.177-195, 1999.11.
- 4) 田所敏弥, 佐藤靖彦, 上田多門: 斜めひび割れ面のせん断伝達機構と鉄筋コンクリート棒部材の斜め引張破壊, 土木学会論文集, No.739/V-60, PP.195-211, 2003.8.
- 5) 石田雅利: 軸応力とせん断応力の相関を考慮したマルチスライスファイバーモデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, PP.727-728, 2007.8.
- 6) 梅田聡史, 松本慎也, 藤谷義信: ファイバーモデルによるRC構造物の弾塑性解析法, 日本建築学会中国支部研究報告集, No.25, PP.173-176, 2002.3.
- 7) Saenz, L. P. : Discussion of Equation for Stress – Strain Curve of Concrete, by Desayi P. and Krishnan S., ACI Journal, V. 61, No. 9, pp. 1227 - 1239, Sep. 1983.
- 8) コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 本編, PP.34-37, 2007.
- 9) 高瀬裕也, 和田俊良, 上田正生: ひび割れ微小面のせん断軟化現象を考慮した2次元せん断伝達モデルの提案とその適合性の検証 コンクリートひび割れ面のせん断伝達機構に関する研究 その2, 日本建築学会構造系論文集, No.630, PP.1323-1330, 2008.8.
- 10) Takase, Y., Ikeda, T., Wada, T.: Development for constitutive model of shear stress transfer on concrete crack surface considering shear stress softening, EURO - C 2010, pp. 225-232, Mar. 2010.
- 11) 篠原保二, 齊藤弘幸, 林静雄: 高強度コンクリート部材の平滑なひび割れ面におけるせん断伝達メカニズム, 日本建築学会構造系論文集, No.618, PP. 183-190, 2007.8.
- 12) Bazant,Z.P., Gambarova,P.: Rough Crack in Reinforced Concrete, J.of Structure Div., ASCE, Vol. 106, No.4, PP.819-842, Apr.1980.