

論文 曲げねじり相関を考慮したファイバーモデルによる RC 柱の 3 次元解析

山本 佳士^{*1}・中村 光^{*2}・伊藤 睦^{*3}・田邊 忠顕^{*4}

要旨： RC 断面に非対称な断面抵抗機構が形成されると、せん断中心が移動し、図心軸に荷重が作用する場合でもねじりモーメントが発生する。本研究では、この現象の影響度評価を行うことを目的としている。まず、著者らが提案した、せん断中心の移動による付加ねじりモーメントを導入したファイバーモデルに、曲げとねじりの相関を考慮する手法の提案を行った。提案手法を用いて RC 柱の解析を行うことによりせん断中心の移動が構造全体挙動に及ぼす影響を評価した。解析結果から、せん断中心の移動現象は構造物の最大荷重や変形性能に影響を与えることを明らかにした。

キーワード： せん断中心、付加ねじりモーメント、ファイバーモデル、曲げねじり相関

1. はじめに

著者らは、RC 柱部材に、図心軸に水平荷重が作用し、荷重としてねじりモーメントが作用していない場合でも、せん断中心移動により付加ねじりモーメントが発生する現象を見出した。そして、せん断中心移動解析を導入したファイバーモデルを開発し、せん断中心の移動は、RC 断面にひび割れの発生や、鉄筋の降伏による非対称な断面抵抗機構が形成されることで生じることを明らかにしている¹⁾。ただし、開発したファイバーモデルは、曲げとねじりを独立と仮定していたため、発生する付加ねじりモーメントの大きさや、それがねじり変形に及ぼす影響は評価できたが、曲げとねじりが相関する 3 次元挙動を評価することはできなかった。構造物の大型化に伴い、曲げ、曲げせん断、ねじりせん断作用の組み合わせを考慮した変形・耐力を体系的に算定することが要求されており、せん断中心の移動に伴うねじりの影響についても明らかにす

る必要がある。

そこで本研究では、ファイバーモデルにおいて、曲げによる軸ひずみと、ねじりによるせん断ひずみを局所レベルで相関させる手法の提案を行った。提案モデルと、名古屋大学で開発された、構成モデルに格子等価連続体モデル (LECOM) を適用したシェル要素解析プログラム²⁾を用いて RC 中空断面長柱の純ねじりおよび曲げねじり解析を行い、解析結果を比較することにより提案モデルの妥当性の検討を行った。そして、提案モデルに、著者らが提案した手法でせん断中心の移動による付加ねじりモーメントを導入し、発生ねじりが構造全体挙動に与える影響度の評価を行った。

2. ファイバーモデルによるねじり解析

一般の 3 次元ファイバーモデルでは、ねじり挙動は線形もしくは非線形でも、曲げと独立してモデル化されている。本研究では、各ファイ

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 助教授 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 助手 博(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 工博 (正会員)

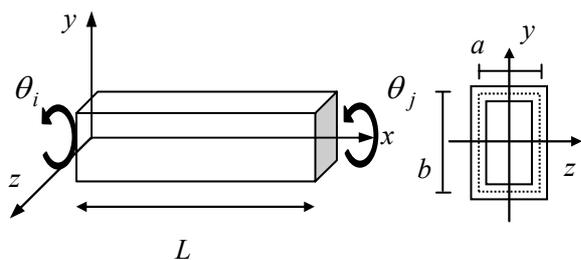


図-1 要素座標系

バーに3次元場の状態を仮定し、局所レベルからねじり挙動の非線形性と曲げとの相関をモデル化した。

2.1 はり要素におけるねじり場

図-1 に示すように中空断面を有するはり部材の要素座標系を定義する。はり要素において、ねじり変形を支配する変位場は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= \omega(y, z) \theta'(x) \\ v(x, y, z) &= -z \theta(x) \\ w(x, y, z) &= y \theta(x) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 u は部材軸 x 方向の、 v は y 方向の w は z 方向の変位、 θ は部材軸周りのねじり角である。また、 $\omega(y, z)$ は反り関数である。本研究では一様ねじり (Saint-Venant のねじり) を仮定し、 $\theta'(x)$ は一定とした。したがって、ねじり要素内のひずみはせん断ひずみ γ_{xy}, γ_{zx} のみ存在し次式のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} -\frac{1}{L} \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - z \right) & \frac{1}{L} \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - z \right) \\ -\frac{1}{L} \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} + y \right) & \frac{1}{L} \left(\frac{\partial \omega}{\partial z} + y \right) \end{Bmatrix} \{\theta\} = [B] \{\theta\} \\ \{\theta\}^T &= \{\theta_i \quad \theta_j\} \end{aligned} \quad (2b)$$

ここで、図-1 に示すはり要素の左端を節点 i

右端を節点 j とすると θ_i および θ_j は、各節点における部材軸周りのねじり角である。

一般に円形状以外の断面では反り関数 $\omega(y, z)$ の影響は無視できない。本研究では中空断面部材を対象とするため、反り関数は薄肉はり理論により、図-1 に示すようなパラメータ a および b を用いて次式で算定した³⁾。

$$\omega(y, z) = \frac{a-b}{a+b} yz \quad (b > a) \quad (3)$$

2.2.3 次元挙動のモデル化

一般のファイバーモデルでは、要素断面内の各ファイバーに対して軸方向ひずみのみを算定し、コンクリートファイバー、鉄筋ファイバーそれぞれに一軸応力ひずみ関係を規定することにより応力を算定している。

一方、本研究では、まず各コンクリートファイバーに対して、従来の軸方向ひずみに加え、ねじりによるせん断ひずみを式(2)より算定する。次に上述のひずみ成分から各ファイバーの主ひずみ方向を求め、その方向に一軸の応力ひずみ関係を規定し応力計算を行う。ひび割れ発生後は、ひび割れ発生時の主ひずみ方向に主応力方向を固定し、固定ひび割れモデルに基づき、応力算定を行う。せん断応力の算定には次式を用いた。

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_t & 0 \\ 0 & G_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$G_t = \frac{\alpha}{\epsilon_t} \quad (5)$$

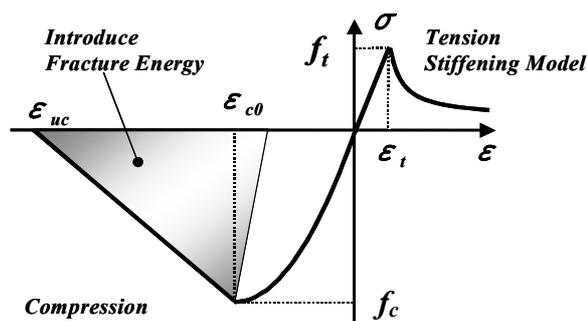


図-2 コンクリートモデル

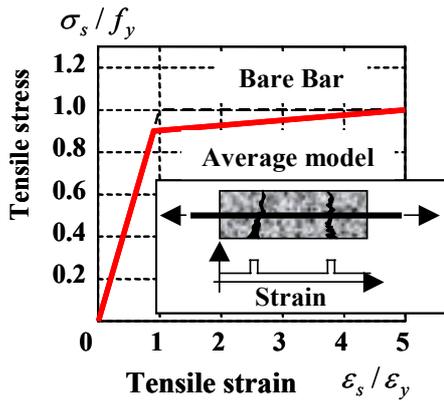


図-3 鉄筋モデル

ここで ε_t はひび割れ面直交方向の平均ひずみ、 α は定数である。なお、ひび割れ発生はコンクリートファイバーの主応力が引張強度に達した時とした。鉄筋ファイバーは従来どおり軸方向のみを受け持つものとした。

2.3 材料モデル

コンクリートの応力-ひずみ関係は図-2に示すようにモデル化した。圧縮応力下では、応力は圧縮強度に到達するまで2次放物線で増加するものとし、それ以降のひずみ軟化領域には圧縮破壊エネルギーを考慮するモデル⁴⁾を用いた。引張応力下では、Tension Stiffening modelを仮定した。

軸方向鉄筋の平均応力-ひずみ関係は、図-3に示すように Abdeldjelil Belarbi と Thomas T.C.Hsu らの平均引張応力-ひずみ関係⁵⁾を用いた。

3 提案モデルの検証

2章で示した提案手法とシェル要素解析を用いてRC中空断面柱の純ねじり解析および曲げねじり載荷解析を行った。解析結果の比較により提案手法の妥当性の検証と式(5)のせん断剛性に対するパラメーターの同定を行う。

3.1 解析モデル

解析モデルは図-4に示すような、長さ2000(mm)、断面150×100(mm)、板厚20(mm)の中空長方形断面を有する無筋コンクリート柱とRC柱の2種類を用いた。RC柱の軸方向鉄筋は、

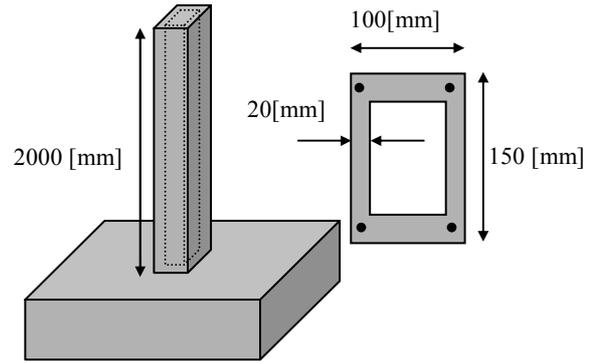


図-4 解析モデル

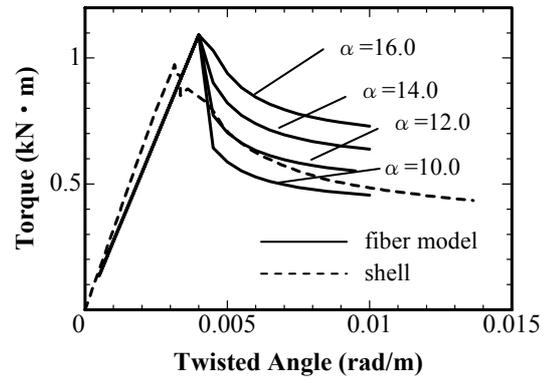


図-5 シェル要素による解

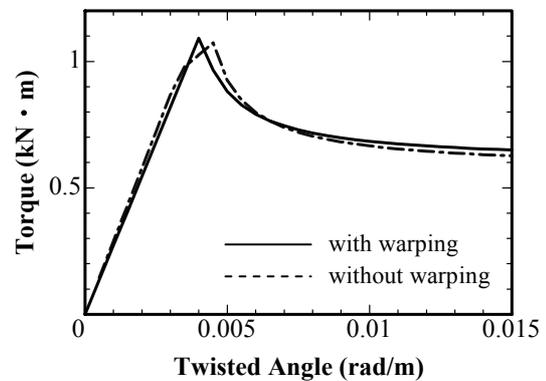


図-6 反りの影響

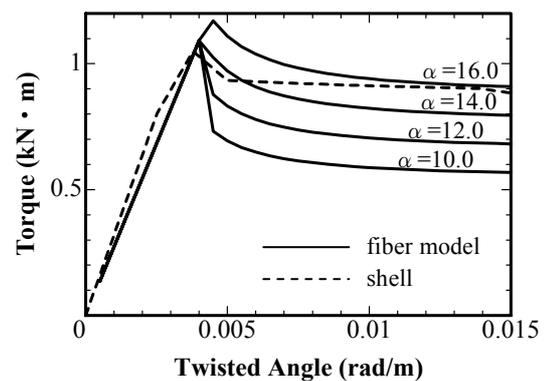


図-7 シェル要素解析結果との比較(RC柱)

直径 10mm, 降伏応力 338MPa のものを 4 本断面コーナー部にかぶり 10mm で配筋した。コンクリートの圧縮強度は 35MPa とした。拘束条件は、柱下端部を全自由度固定、柱上端を自由端とした。純ねじり解析では柱上端にねじりモーメントを載荷し、曲げねじり同時載荷解析では、柱下端部に作用する曲げモーメント M およびねじりモーメント T の比 M/T が 2, 8 の一定になるように、柱上端に強軸方向水平荷重とねじりモーメントを載荷した。ファイバーモデルでは、定式化上、板厚方向には分割せず、板厚中心線方向に 42 分割し、軸方向に 10 分割した。シェル要素は板厚方向に 2 層、板厚中心線方向に 20 要素、部材軸方向に 10 要素分割した。

3.2 純ねじり解析

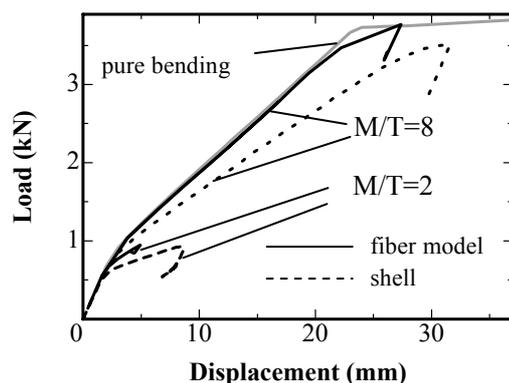
無筋コンクリート柱に対して純ねじり解析を行った場合の提案手法とシェル要素解析より得られたねじりモーメント-ねじり回転率関係の比較を図-5 に示す。ねじりひび割れ発生まではほぼ弾性的挙動をとり、ひび割れ発生後は、徐々に荷重低下する挙動を示した。ひび割れ前の挙動およびひび割れ発生荷重が概ね一致しており提案手法の妥当性が示された。ひび割れ後の挙動については、式(5)のせん断剛性を算定する際に使用する係数 α に依存するため、この係数を変化させて解析を行った。解析結果を図-5 に示す。 α が 10.0~14.0 の時、シェル要素解析結果に近い挙動を示した。

図-6 に提案手法において、反りを考慮した解析結果と非考慮の解析結果を示す。中実コンクリート断面の純ねじり挙動は反りの影響がかなり生じることが報告されているが⁶⁾、今回対象とした中空コンクリート断面では、反りを考慮することによって初期剛性が若干下がっているが、顕著な影響は見られなかった。RC 柱に対する、提案手法とシェル要素解析との比較を図-7 に示す。シェル要素において、ひび割れ後の挙動は無筋コンクリートの挙動に比べ荷重の低下が緩やかになるが、この挙動が提案手法においても同様に再現されている。RC 柱にお

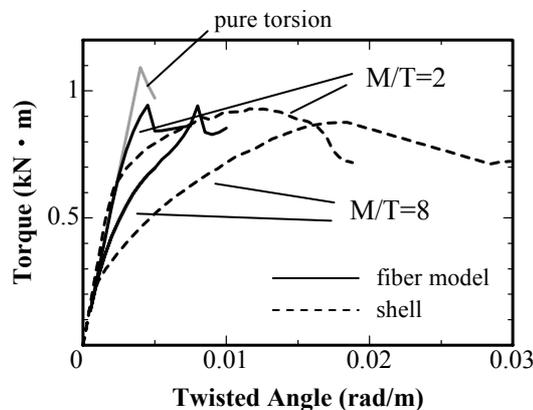
いても式(5)における係数 α を変化させて解析を行った。解析結果を図-7 に示す。ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生後の挙動に着目すると、 α が 14.0 の時、シェル要素解析の結果に最も近い挙動を示していることが確認できる。したがって本手法に適切なせん断剛性モデルを与えることで、ファイバーモデルによっても、純ねじり挙動を概ね妥当に評価できることが明らかになった。

3.3 曲げねじり解析

柱下端部に作用するねじりモーメントと曲げモーメントの比 M/T を 2, 8 とした時の強軸方向の荷重変位関係ならびに、ねじりモーメント-ねじり回転率関係を図-8 に示す。なお図中にはファイバーモデルによる純曲げならびに純ねじりの解析結果も併せて示している。提案手法



(a) 水平荷重-変位関係



(b) ねじりモーメント-回転率関係

図-8 曲げねじり解析結果

において、せん断剛性を算定する際の定数 α は前節の検証結果に基づき 14.0 とした。提案手法およびシェル要素による解析結果を比較すると、提案手法は曲げ、ねじりともに剛性をシェル要素解析より大きく算定する結果となっているが、耐力は概ね一致している。剛性を過大評価する理由としてシェル要素はせん断変形を考慮できるのに対して、提案手法では考慮できないことが考えられる。曲げねじり相関を考慮したファイバーモデルでは、ねじりモーメントねじり変形角の関係において、曲げモーメントとの相関の影響で純ねじりの結果に比べ、最大トルクが低下していることが分かる。また、その剛性も曲げモーメントの影響により低下する結果となっている。水平荷重-変位関係においても、ねじりモーメントの影響が大きくなると剛性が低下することが示されている。したがって提案した手法により曲げとねじりの相関による影響を概ね再現することが可能と思われる。

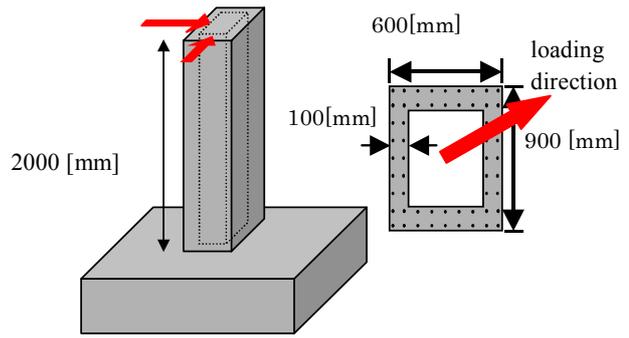


図-9 解析モデル

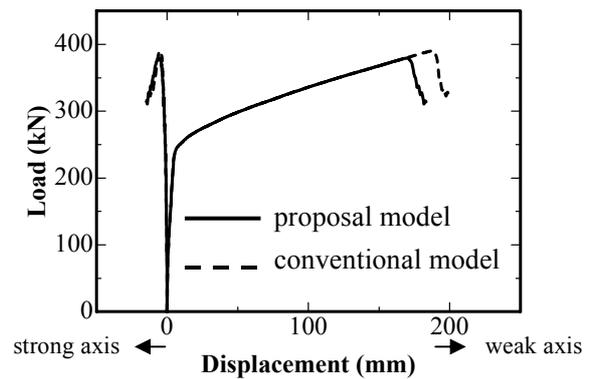


図-10 せん断中心移動による全体挙動への影響

4. せん断中心移動による部材挙動への影響度評価

せん断中心の移動による付加ねじりモーメントが部材の全体挙動に及ぼす影響は、現状では明らかになっていない。そこで著者らが開発したせん断中心移動解析を導入したファイバーモデルに、本研究で提案した曲げとねじりを相関させる手法を適用して、せん断中心の移動により発生する付加ねじりモーメントが構造全体挙動に及ぼす影響を検証する。

4.1 解析モデル

解析モデルは図-9 に示すような、長さ 2000(mm)、断面 900×600(mm)、板厚 100(mm) の中空長方形断面を有する RC 柱を用いた。軸方向に鉄筋比を 2% で配置した。コンクリートの圧縮強度は 35MPa とし、鉄筋は降伏強度 307MPa、弾性係数 204kN/mm² とした。拘束条件は、柱下端部を全自由度固定、柱上端を自由端とした。水平荷重は、柱上端を断面弱軸から 30° 方向に載荷した。ファイバーモデルは板厚

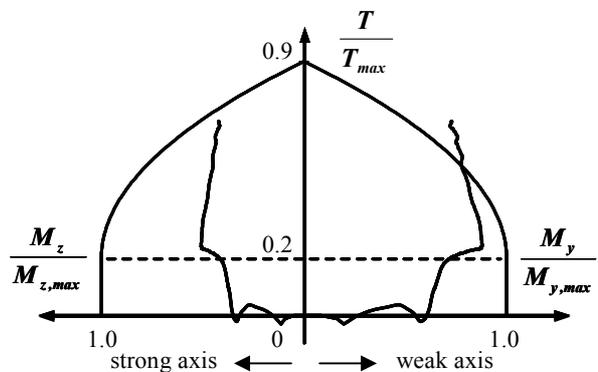


図-11 曲げねじり相関図

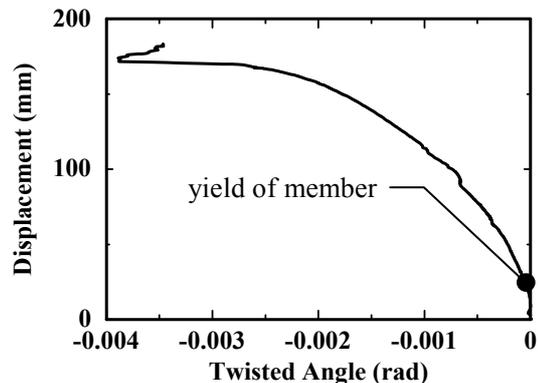


図-12 水平変位-ねじり回転角関係

中心線方向に 114 分割，軸方向に 10 分割した。

4.2 解析結果

なおシェル要素による 2 軸水平荷重下の解析を行えば，図心軸に水平荷重を作用させても自動的にねじり変形挙動が解析される¹⁾。しかしながら，シェル要素解析ではマクロな変形挙動は再現できるがせん断中心の移動現象を直接取り上げて扱うことができない。それに対し，ファイバーモデルでは，せん断中心の移動とそれに伴う付加ねじりモーメントを直接求めることができるため，その影響を明確に評価する上で有用なものとなる。図-10 に水平荷重-変位関係を示す。従来の曲げとねじり変形を独立と仮定した，ファイバーモデルによる解析結果と比較すると，曲げ降伏が起こり荷重が増加していく挙動はほぼ一致しているが，せん断中心移動を考慮することにより最大荷重，変形性能が低下する挙動が見られた。図-11 に強軸方向，弱軸方向それぞれの一軸曲げ耐力とねじり耐力で正規化した曲げモーメントねじりモーメント相関図を示す。図中の相関関係曲線は，土木学会コンクリート標準示方書で規定されているものである。付加ねじりモーメントは，曲げ降伏後，徐々に大きくなり，ポストピークに至ると急激に増大する挙動が見られる。これは，圧縮側コンクリートが圧壊して断面剛性の非対称化が急激に進行し，それに伴いせん断中心が移動したため起こったと考えられる。このようにせん断中心移動により生じた付加的なねじりモーメントが，曲げねじり相関挙動を生じ，曲げ変形に影響を及ぼしたと言える。図-12 に水平変位とねじり回転角の関係を示す。部材降伏後，水平変位に比例してねじり回転角の進展度合が徐々に増えていることが分かる。このことは，終局時には，付加ねじりモーメントの影響で水平荷重のみが作用した場合もねじり変形を伴った破壊過程が発生することを示唆するものである。

5. 結論

以下に本研究で得られた結論を述べる。

- 1) ファイバーモデルにおいて，各ファイバーに 3 次元挙動をモデル化することにより曲げとねじりを相関させる手法の提案を行った。RC 部材の純ねじりおよび曲げねじり解析を行い，提案手法の妥当性が確認された。
- 2) 提案モデルにせん断中心移動解析を導入し，せん断中心の移動により発生する付加ねじりモーメントが，RC 部材の全体挙動に及ぼす影響について評価した。その結果，付加ねじりモーメントは構造物の最大荷重，および変形性能に影響を及ぼす可能性があることが示された。

参考文献

- 1) 山本佳士・N.Bongochgetsakul・中村光・田邊忠顕：ファイバーモデルにおけるせん断中心の移動とねじりモーメント発生メカニズムに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.1075-1080，2003
- 2) N.Bongochgetsakul, T.Tanabe: Analysis of Box Type Shell Structures under Cyclic Loading by Lattice Equivalent Continuum Model, Proc. of JCI, Vol.24, No.2, 2002, pp.949-954.
- 3) 藤谷義信：薄肉はり構造解析，培風館，pp.28-54，1990
- 4) H.Nakamura, and T.Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Load, ASCE, 2001
- 5) Belarbi Abdeldjelil, T.C.Hsu Thomas: Constitutive Laws of concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete, ACI Structural Journal, pp.465-474, 1994
- 6) G.Casaux, F.Ragueneau, J.Mazars: Multifiber Beam Element in Dynamic : Torsional Response Properties, International Conference on Computational Plasticity, 2003