

論文 ファイバーモデルにおけるせん断中心移動解析とねじりモーメント発生メカニズムに関する研究

山本 佳士^{*1}・Nattakorn.B^{*1}・中村 光^{*2}・田邊 忠顕^{*3}

要旨：本研究では、RC3次元ファイバーモデルに、薄肉構造部材の曲げ理論を適用し、せん断中心の移動および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を導入する手法の提案を行った。提案手法およびシェル要素を用いて、中空断面を有するRC長柱の2軸曲げ解析を行った。解析結果について比較検討し提案手法の妥当性を確認するとともに2軸曲げを受けるRC部材のせん断中心移動とねじりモーメント発生メカニズムを明らかにした。

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、シェル要素

1. はじめに

非対称断面はり(例えばL字型断面)が曲げを受けるとき、一般的には、曲げと共にねじりモーメントが生じる。これは、断面のせん断中心と図心が一致していないことに起因する。一方、2軸対称断面では、図心とせん断中心が一致しているため、図心に荷重を作用させれば曲げのみが生じ、ねじりは生じないと考えられている。しかし、平澤らが行った2軸偏心圧縮を受けるRC長柱の実験においては、最終的にねじり変形を伴った破壊が生じたことが報告されている¹⁾。これは、2軸対称断面であっても、ひび割れの発生や、鉄筋降伏などにより非対称な断面抵抗機構が形成され、せん断中心が移動し、断面に付加ねじりモーメントが発生することを示唆するものである。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いるが、せん断中心の移動およびそれに伴うねじりの影響については未だ解明されていない問題である。

そこで本研究では、まず薄肉はりの曲げ理論をファイバーモデルに適用し、せん断中心の移

動とそれに伴う発生ねじりモーメントを導入する手法の提案を行った。提案手法と名古屋大学で開発されたLECMをシェル要素に適用したプログラム²⁾を用いて2方向水平力を受けるRC中空断面長柱の解析を行い、提案手法の妥当性の検討を行った。さらに、提案手法を用いてパラメトリック解析を行うことにより、せん断中心の移動現象およびねじりの発生メカニズムについて検討を行った。

2 シェル要素解析によるせん断中心移動と発生ねじりモーメントの検討

2軸曲げを受けるRC部材にねじりが発生することは、平澤らの実験¹⁾で確認されているが、必ずしも一般的な知見となっていない。そこで、シェル要素解析²⁾を用いて、数値解析によりせん断中心の移動によるねじりモーメント発生現象の確認を試みた。なお、解析はせん断中心の移動現象を確認する事を目的とするため、微小変形理論に基づくモデルを用いた。

(1) 解析モデル

解析モデルは図-1に示すような、長さ

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

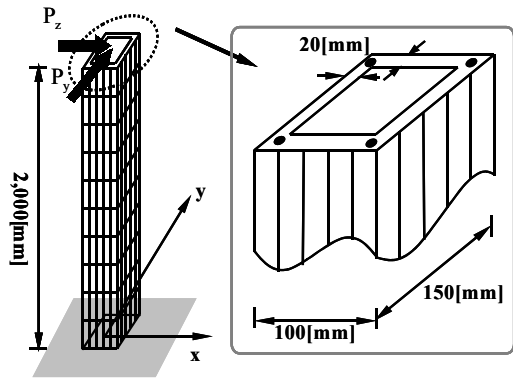


図-1 解析モデル

2000(mm), 断面 150×100(mm), 板厚 20(mm) の中空長方形断面を有する RC 長柱とした。軸方向鉄筋は、直径 10mm, 降伏応力 338MPa のものを 4 本, かぶり 10mm で配筋した。コンクリートの圧縮強度は 35MPa である。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, 柱上端の 45° 方向に, 断面の重心を通過するように 2 方向水平力を载荷した。

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。

(2) 解析結果および考察

図-2 に, 水平荷重—柱上端 z 方向変位関係, 水平荷重—固定端反力ねじりモーメント関係, 水平荷重—柱上端ねじり回転角関係を示す。ひび割れ発生時付近からねじりモーメントが発生し, 徐々にその大きさおよび方向は変化し, 部材降伏後には, ねじりモーメントが増加し続ける様子が見られる。数値解析により, 2 軸曲げを受ける部材において, 確かにねじりが発生することが確認された。

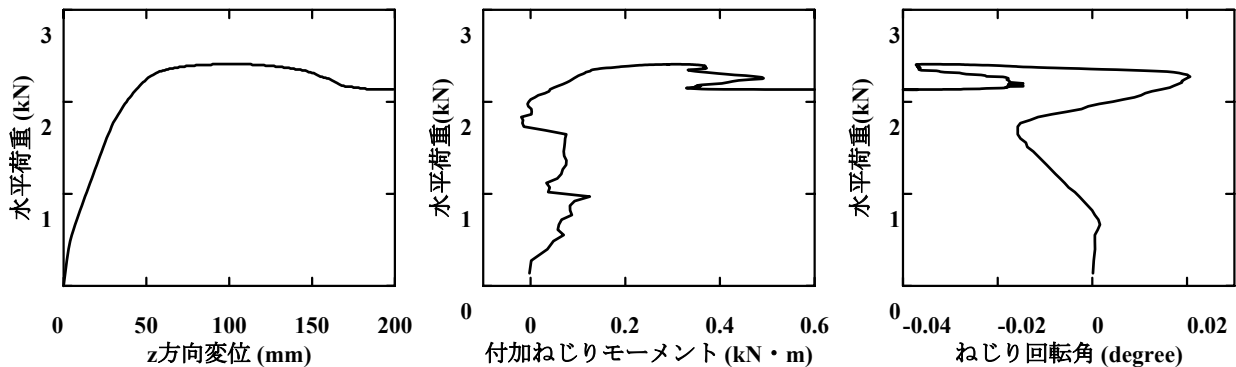


図-2 シェル要素解析によるねじり現象の観察

3 薄肉はりの曲げ理論に基づくせん断中心解析

本研究では RC ファイバーモデルに薄肉はりの曲げ理論を適用し, 断面内のせん断流ならびにせん断中心の算定, それに伴う発生ねじりモーメントを求める手法を提案する。

(1) せん断流

図-3 に示すような曲げを受ける薄肉部材の微小要素 $dx \times ds \times dt$ を取り出し, 部材軸方向 (x 方向) の応力の釣り合いを考えると

$$\frac{\partial(\sigma t)}{\partial x} + \frac{\partial(\tau t)}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

ここで, t は板厚である。左辺第 1 項を移項し, これを板厚中心線座標 s について積分することで, 軸方向応力勾配に対し, 微小要素に発生するせん断流 q が式(2)に示すように与えられる。

$$q = \tau t = -\int_0^s \frac{\partial(\sigma t)}{\partial x} ds + q|_{s=0} \quad (2)$$

開断面では, 自由縁において $q|_{s=0} = 0$ となり静定的にせん断流が求まる。閉断面では, 仮想の切断部を設け開断面として静定せん断流 q_0 を次式のように導出する。

$$q_0 = -\int_0^s \frac{\partial(\sigma t)}{\partial x} ds \quad (3)$$

ここで $\partial\sigma/\partial x$ はファイバーモデルにより得られる隣接する要素の断面の軸応力勾配となる。切断面に作用する不静定せん断流 X を用いると, 閉断面における実際のせん断流は $q_0 + X$ となる。仮想の切断部があるため, せん断応力が作用する断面では, ずれ u が生じる。

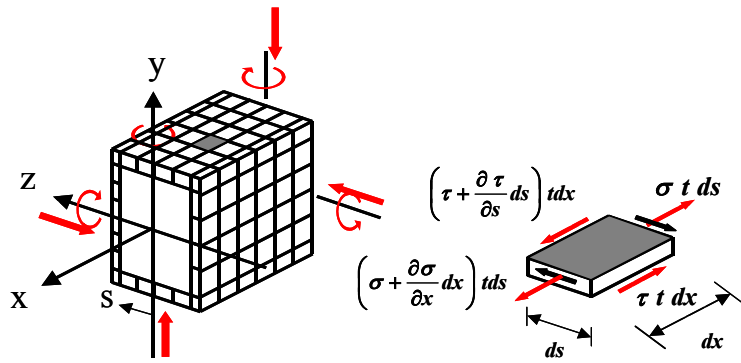


図-3 微小要素の応力の釣り合い

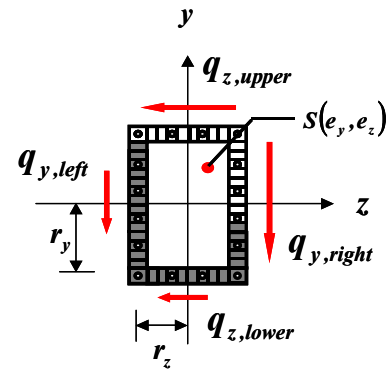


図-4 断面内のせん断流の釣り合い

$$u = \oint \gamma ds = \oint \frac{q}{Gt} ds = -\oint \frac{q_0 + X}{Gt} ds \quad (4)$$

ここで、 G はせん断剛性である。実際には、閉断面であり $u = 0$ であるから、式(4)より X は次式となる。

$$X = -\oint \frac{q_0}{Gt} ds / \oint \frac{ds}{Gt} \quad (5)$$

最終的に、静定せん断流 q_0 と不静定せん断流 X との和としてせん断流が求まる。

(2) せん断中心

曲げによって生じるせん断流のせん断中心周りのモーメントは 0 であるから次式が成り立つ。

$$\oint q_b r_s ds = 0 \quad (6)$$

ここで、 q_b は曲げによるせん断流、 r_s はせん断中心を原点とするせん断流の動径である。図-4 に示すように、今回用いた中空長方形断面のせん断中心 $S(e_y, e_z)$ はファイバーモデルにより得られたせん断流を用いて、次式で求まる。

$$e_y = \frac{q_{z,upper} - q_{z,lower}}{q_{z,upper} + q_{z,lower}} r_y \quad (7)$$

$$e_z = \frac{q_{y,right} - q_{y,left}}{q_{y,right} + q_{y,left}} r_z \quad (8)$$

求めたせん断中心位置と部材に作用するせん断力から、発生ねじりモーメントが次式で与えられる。

$$T = Q_y e_z - Q_z e_y \quad (9)$$

4 ファイバーモデルによるせん断中心解析

4.1 高次要素を用いたファイバーモデル

軸変位に 1 次関数、曲げ変位に 3 次関数を用いたファイバーモデルでは、塑性化の進展とともに各要素のひずみが不連続に変化する。本研究では、隣接する要素断面の軸応力差をせん断中心解析に用いるため、連続的にひずみが増加することが解析上望ましい。そこで軸変位に対して 3 次関数となる高次要素³⁾を用いることで、はり要素の各節点に軸変位勾配を自由度として持たせ、軸ひずみに対する適合条件を付加した。

4.2 材料モデル

コンクリートの応力-ひずみ関係は図-5 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 model⁵⁾を仮定した。

また、式(5)に示したように不静定せん断流の算定には各ファイバーのせん断剛性 G の評価が必要となる。本研究では、引張側におけるせん断剛性は、山田・青柳モデル⁶⁾を用いた。圧

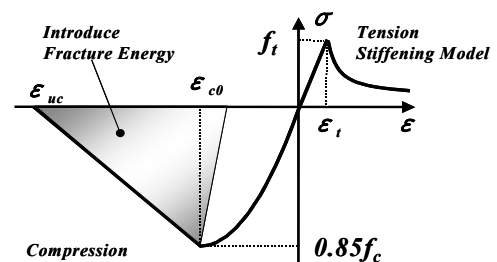


図-5 コンクリートモデル

縮軟化領域においてもせん断剛性は著しく低下することが予想されるので、弾性せん断剛性の1/1000を仮定した⁷⁾。

鉄筋の応力ひずみ関係はバイリニア型とした。

5 せん断中心の移動とねじりモーメント発生メカニズムの評価

2章で示した解析モデルにより、せん断中心移動解析を導入したファイバーモデルの解析を行い、シェル要素との比較による提案手法の妥当性の確認とせん断中心移動現象およびねじりモーメント発生メカニズムの検討を行った。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174分割した。

5.1 提案モデルの検証とねじりの影響度の検討

図-6に、柱上端点における弱軸方向(z方向)、強軸方向(y方向)それぞれの水平荷重-変位曲線、および水平荷重と固定端に作用する反力ねじりモーメントの関係を示す。荷重-変位曲線では、ポストピークの挙動に差が見られる。これは、シェル要素とファイバーモデルのモデル化の違いであると考えられる。水平荷重-固定端反力ねじりモーメント関係に着目すると、ねじりモーメント発生挙動、およびその大きさがおおむね一致し、提案するファイバーモデルが妥当であることが分かる。ねじりモーメント発生メカニズムは次節以降で考察をし、ここでは、せん断中心の移動に伴う付加ねじりモーメントの影響について考察する。

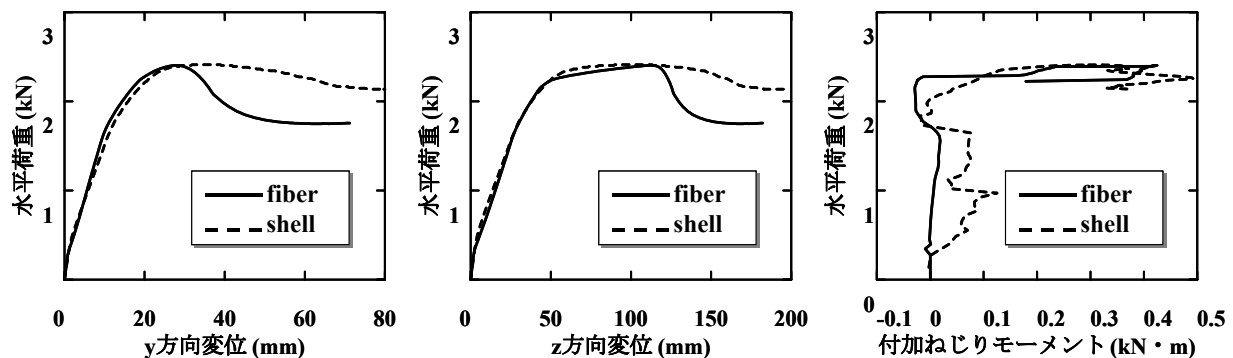


図-6 ファイバーモデルとシェル要素解析の比較

土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕では、ねじりモーメントが補強鉄筋のない場合のねじり耐力の20%以下の場合には、ねじりに対する安全性の検討を省略してよいとしている。今回の解析例においては、ねじり耐力は1.2(kN·m)であり、せん断中心の移動による付加ねじりモーメントはねじり耐力の約35%程度生じている。このことは、ねじりモーメントが作用しない場合でも、2軸曲げの場合せん断中心の移動により安全性の検討を無視できないレベルのねじりが発生することを意味し、本研究で明らかにしたメカニズムの重要性を示唆するものである。

図-7に水平荷重-柱上端ねじり回転角関係を示す。ここでねじり剛性は、断面内の各ファイバーのせん断剛性を用い、各ファイバーの総和として算定した値を用いている。図-7によれば部材降伏後、ねじり回転角が急激に生じることが分かる。図-8に弱軸方向の部材角とねじり回転角の関係を示す。ねじり回転角が急増する部材降伏後は、曲げによる部材角よりもねじりによる回転角の変形が卓越していることが分かり、ねじり変形の影響は無視できないと推測される。

5.2 ねじり発生メカニズム

図-9に柱下端から50(mm)に位置する断面における、せん断中心の移動の軌跡と、水平荷重とせん断中心の移動によりその断面に生じる付加ねじりモーメントとの関係を示す。ひび割れ発生時まではせん断中心は移動しないが、①においてひび割れが発生すると、荷重作用線とは異

なる方向の①'まで、せん断中心の急激な移動が起こり、一時的に、負方向のねじりモーメントが発生する。その後、正の方向のねじりモーメントが徐々に発生するが、②で鉄筋 A が引張降伏すると荷重作用線を横切る移動が生じ、負方向のねじりモーメントが発生する。鉄筋 B の引張降伏後ねじりモーメントが減少し、③でコンクリートが圧縮軟化すると、せん断中心が荷重作用線から垂直に大きく移動したために、非常に大きなねじりモーメントが最大荷重時に発生する。

このように、せん断中心は、ひび割れ発生や、鉄筋降伏、せん断剛性の変化など、断面内に非対称な抵抗機構が形成される度に、不連続に大きく変化した。その結果付加ねじりモーメントが発生することが明らかになった。

5.3 せん断剛性の影響

ねじりモーメントならびにせん断中心は、せん断剛性の関数として算定されるので、せん断剛性の評価が発生ねじりモーメントに与える影響について検討する。弾性せん断剛性に対する、ひび割れ発生後のせん断剛性低下率 α を 1/10, 1/1000 に、圧縮軟化後のせん断剛性低下率 β を 1/10, 1/100, 1/1000 に変化させ、計 6 ケースの解析を行った。図-10(a)の $\alpha=1/10$ の場合、圧縮軟化後のせん断剛性低下率 β が小さいほど大きなねじりが発生する。一方図-10(b)の $\alpha=1/1000$ の場合には、 $\beta=1/10$ と 1/100 では同じ結果を示し、ねじりモーメントはほとんど生じなかった。また、図-10(a)の $\alpha=1/10$, $\beta=1/10$ と図-10(b)の $\alpha=1/1000$, $\beta=1/1000$ の場合はせん断剛性の大きさが相違するにもかかわらずほぼ同様の結果を示した。このことは圧縮軟化後のせん断剛性の影響はその大きさではなく、ひび割れ発生後のせん断剛性との比率に大きく影響していることを意味する。すなわち、圧縮軟化後のせん断剛性が、ひび割れ発生後のせん断剛性より小さくなればなるほど、断面内の引張側と圧縮側のせん断抵抗機構の相違が生じ、その不平衡度がせん断中心を大きく移動させ、大きなねじりモーメントが発生すると推測される。

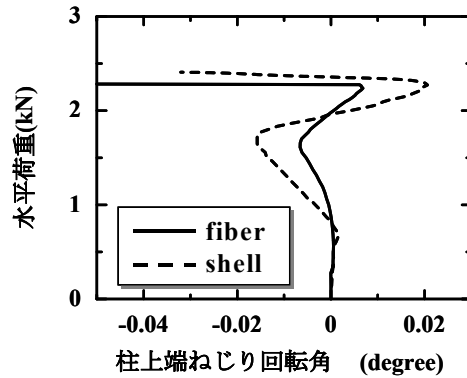


図-7 付加ねじりによるねじり変形

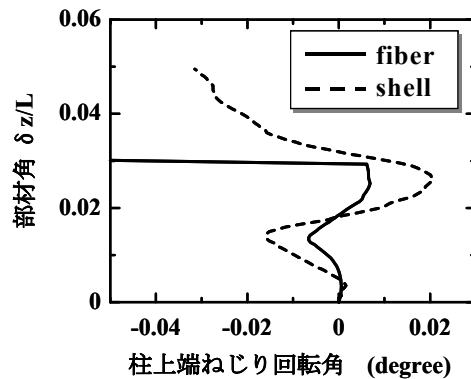


図-8 部材角—ねじり回転角関係

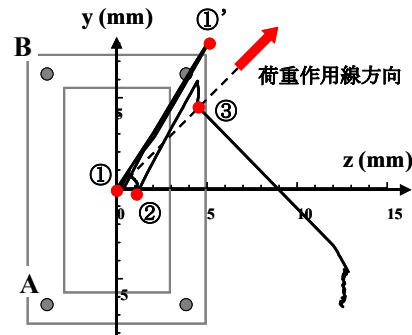


図-9 せん断中心移動の軌跡

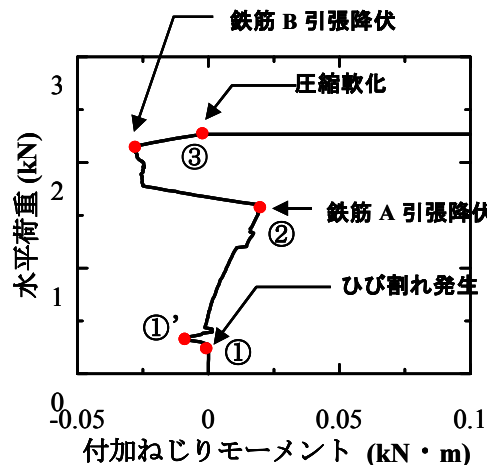


図-10 付加ねじりモーメントの発生状況

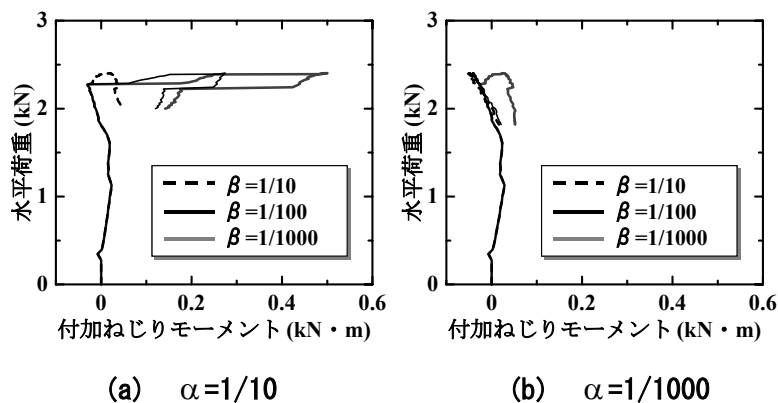


図-10 せん断剛性の影響

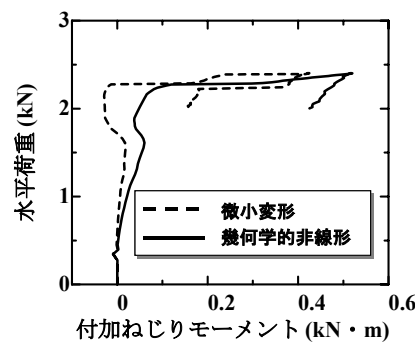


図-11 幾何学的非線形性の影響

5.4 幾何学的非線形性によるねじりの影響

2軸曲げによるねじりは、幾何学的非線形性による図心軸の移動によっても発生する。そこで、せん断中心の移動と幾何学的非線形性の両方を考慮した解析を行い、両者のねじりに及ぼす影響について検討した。図-11に水平荷重-ねじりモーメント関係を示す。幾何学的非線形性を考慮すると、変形の進行に伴う図心軸の移動により、微小変形の場合より大きなねじりモーメントが発生する。微小変形解析でせん断中心の移動のみを考慮した場合のねじりモーメントは、幾何学的非線形性も同時に考慮した解析に対し、鉄筋降伏時で約55%の大きさとなる。また今回の解析では最大荷重時でのせん断中心の移動の影響は大きく約80%の大きさが生じている。したがって、対象としたモデルでは、せん断中心の移動は幾何学的非線形性による図心軸の移動と同程度以上の影響を表すものであり、無視できないことが分かる。

6. 結論

以下に本研究で得られた結論を述べる。

- 1) せん断中心の移動を考慮したファイバーモデルを提案した。シェル要素解析との比較により提案手法の妥当性が確認された。
- 2) せん断中心の移動現象ならびにねじりの発生メカニズムを解析的に明らかにした。
- 3) せん断中心の移動は無視し得ない大きな影響を及ぼす可能性があるため、今後さら

なる現象の解明と影響度の定量的評価が必要である。

参考文献

- 1) 平澤征夫：2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱部材の力学挙動に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1974
- 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, pp949-954.
- 3) 鷲津久一郎ら：有限要素法の基礎と応用，培風館, pp119-125, 1979
- 4) H. Nakamura and T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structure under Seismic Loads, ASCE, 2001
- 5) 中村光，檜貝勇：拡張した修正圧縮場理論によるRCはり断面のせん断耐荷力評価，土木学会論文集，No.490V23, pp.157-166, 1994.5
- 6) 山田一字，青柳征夫：ひび割れ面におけるせん断伝達，RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム，コンクリート工学協会，pp19-28, 1983
- 7) 田所敏弥・佐藤靖彦・上田多門：鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に及ぼす圧縮軟化の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23, No.3, pp.61-66, 2001