

論文 三次元有限要素解析に基づくねじり作用を受ける RC 部材の変形性能と履歴特性の再評価

瀧口 将志^{*1}・池永 貴史^{*2}・秦 逸平^{*3}・大塚 久哲^{*4}

要旨：近年、部材の載荷実験や FEM 解析結果から、ねじり作用を受ける RC 部材の挙動が明らかにされつつある。しかしながら、従来の研究は部材の破壊に至るメカニズムの解明と耐力力の定式化に重点が置かれており、地震応答解析等の実務レベルに必要な変形性能に関する研究は必ずしも十分ではない。本研究は、既往の載荷実験や非線形 FEM 解析の結果を用いて、ねじり作用を受ける RC 部材の挙動を総合的に検討し、履歴特性を含めた変形性能を再評価したものである。その結果、既往の実験結果や三次元 FEM 解析とよく整合する、シンプルな部材モデルを提案することができた。

キーワード：RC 部材、ねじり、三次元 FEM、変形性能、履歴特性、せん断伝達

1. はじめに

社会基盤施設の大型化、複雑化に伴い、大地震時に曲げやせん断だけでなく、部材がねじれるような作用を受ける RC 構造物が増加している。従来、RC 構造物に作用するねじりは副次的なものとして、曲げやせん断に比べるとあまり重要視されてこなかったが、ある種の構造物に関してはねじりの作用を適切に考慮する必要があることがわかってきた。

たとえば鉄道構造物においては、バチ型ラーメン高架橋のような不整形な形状を有する構造物において、三次元的な挙動によりねじりが作用し、損傷するような事例が報告されている¹⁾。

一方、道路構造物においては、上部構造の自重が RC 橋脚の軸線と偏心した逆 L 字型橋脚において、偏心曲げモーメントが作用する結果、鉛直軸周りのねじりが生じ、複雑な挙動を呈することが明らかになっている²⁾。

このような、地震時にねじり作用を受ける構造物の動的非線形解析において、その挙動を精度よくとらえるためには、ねじりを受ける部材の耐力力についてはもちろんのこと、履歴特性を含めた RC 部材の変形性能に関する情報が不可欠となる。すなわち、部材のねじりモーメント M_t とねじり角 t の関係の骨格曲線および除荷・再載荷の経路を含む履歴特性が既知でなければならない。

現在のところ、ねじり作用を受ける RC 部材の履歴関係が良好に得られているものとして、大塚ら^{3), 4)}、Tirasit・川島ら⁵⁾、松枝・田所ら⁶⁾の研究結果等が挙げられる。

本研究は、上に挙げた一連の研究を参考に三次元 FEM 解析を実施し、各パラメータが解析結果に与える影響を

把握した上で、ねじり作用を受ける RC 部材の骨格曲線を定義し、あわせて履歴特性の検討を行うものである。

2. 既往の研究のレビューおよび本研究の検討方針

2.1 既往の研究について

ねじり作用を受ける RC 部材の破壊機構や耐力に関する実験的研究は古くから行われてきた。たとえば、秦・大塚ら⁷⁾は、RC 部材の純ねじり載荷実験の結果から、帯鉄筋量が比較的多い場合には立体トラスを形成して靱性に富む挙動を呈し、帯鉄筋量が比較的小さい場合には斜め曲げ破壊形式が支配的になるなどの知見を得ている。

ところで、ねじり作用を受ける部材の挙動は三次元的であり、部材レベルで RC 部材のねじり挙動を再現するために、三次元 FEM などの計算力学の手法が用いられる。ねじり作用を受ける RC 部材に対する本格的な解析的検討は、我が国においては 1990 年代から始まり、その後、材料構成則や、コンクリートのひび割れ状態を表現できるモデルが飛躍的な進歩を遂げたことで、FEM 解析は交番ねじり問題にも適用されるようになった。たとえば、Tsuchiya・Maekawa ら⁸⁾は軸力・曲げ・ねじりの複合荷重を受ける RC 柱部材の載荷実験の三次元 FEM 再現解析を行い、良好な結果を得ている。一方、大塚・秦らも純ねじり作用を受ける RC 部材の FEM 解析を実施し⁹⁾、数値計算の精度向上に努めているところである。

2.2 研究の目的と検討方針

本研究の目的は、実験結果や FEM 解析結果に基づいて、ねじり作用を受ける RC 部材の耐力・変形性能・履歴特性を定式化することにある。三次元 FEM 解析は部材のねじり挙動を再現する手法として優れてはいるもの

*1 九鉄工業株式会社 北九州支店 土木課 工修 (正会員)

*2 株式会社大林組 本社 土木本部 工修 (正会員)

*3 株式会社構造計画研究所 耐震技術部 工修 (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 名誉教授 工博 (正会員)

表-1 参考試験体の諸元

試験体	B (mm)	D (mm)	f _c (N/mm ²)	f _{ry} (N/mm ²)	f _{wy} (N/mm ²)	N (kN)	ctc (mm)	pl (%)	pw (%)	η
KYPCT-3	400	400	35.3	340.4	322.0	640	30	1.267	0.471	0.113
KYPCT-6	400	400	45.7	340.4	322.0	640	60	1.267	0.236	0.088
TP-91	400	400	28.3	354.0	328.0	0	50	1.267	0.283	0.000
TP-92	400	400	28.4	354.0	328.0	160	50	1.267	0.283	0.035
RTRI3-2	800	800	30.7	372.0	346.0	2,352	80	2.534	0.792	0.120

ここに、
 B: 断面幅
 D: 断面高さ
 f_c: コンクリートの圧縮強度
 f_{ry}: 軸方向鉄筋の降伏強度
 f_{wy}: 帯鉄筋の降伏強度
 N: 軸力
 ctc: 帯鉄筋間隔
 pl=A_l/(B・D)
 pw=A_w/(B・ctc)
 η=N/(f_c・B・D)

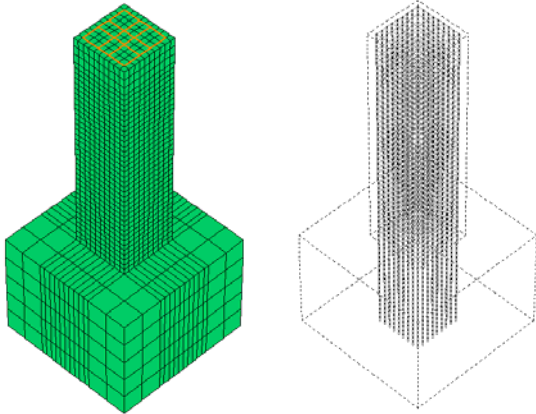


図-1 解析モデルの例

の、実構造物レベルで FEM を適用するには電算機の能力等、種々の制約を現段階においては受ける。このため、骨組解析等における部材モデルの適用を念頭に、ねじりモーメント Mt とねじり角 t の関係の定式化を行う。

まず、三次元 FEM 解析を実施し、既往の純ねじり載荷実験で得られた履歴曲線と解析結果とを比較することで、本研究で用いる解析モデルが履歴特性を含めた実験結果を良好に再現できることを示す。解析精度を確認した上で、パラメトリックスタディーを行い、各パラメータが解析結果に与える影響を把握する。さらに、実験結果と FEM 解析結果とを総合的に評価し、ねじり作用を受ける RC 部材の変形性能算定手法を提案する。

3. 純ねじり作用を受ける RC 部材の三次元 FEM 解析

3.1 解析対象試験体

表-1 に参考とした試験体の諸元を示す。内訳は、九州大学試験体³⁾ (以下、KYPCT シリーズ) 2 体、東京工業大学試験体⁵⁾ (以下、TP シリーズ) 2 体、鉄道総合技術研究所試験体⁶⁾ (以下、RTRI シリーズ) 1 体の計 5 体である。

実験でのパラメータは主として、帯鉄筋比 pw、軸力比である。なお、RTRI シリーズのみ中間帯鉄筋が配置されている。

3.2 解析モデル

図-1 に解析モデルの例を示す。コンクリートを六面

体要素、軸方向鉄筋および帯鉄筋をトラス要素でモデル化した。下スタブ底面の節点変位を固定し、ねじりは頭部近傍の節点に、大きさが同じで方向が逆の強制変位を与え、偶力モーメントを作用させることで表現した。六面体要素と分散鉄筋は節点を共有しており、完全付着を仮定している。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-2 に示す。圧縮側は応力上昇域・軟化域ともに修正 Ahmad モデルを適用した。引張側は出雲ら¹⁰⁾ によるテンションステイニングモデルを採用し、C=0.4 とした。コンクリートの破壊基準は Ottosen の 4 パラメータモデルに従うことにした。鉄筋の応力-ひずみ関係は図-3 に示すように、Bauschinger 効果を考慮できる、修正 Menegotto-Pinto モデルとした。

ところで、ひび割れたコンクリートの界面では、骨材のかみあい作用や鉄筋のダウエル作用により、わずかにせん断応力が伝達されることが知られている。このせん断伝達応力を適切に考慮することが、せん断やねじり問題では重要になると考えられる。せん断伝達のモデルとしては、履歴特性を適切に表現できるモデルの導入が望ましい。せん断伝達モデルの例として、ひび割れ後のコンクリートのせん断剛性をひび割れ直交方向のひずみに応じて低減する比較的単純なモデルから、繰返し載荷解析にも適用可能な高度なモデルなど、種々のものが提案されている。これらのうち、本研究では、ひび割れ面でのせん断ひずみ-せん断応力の関係を、コンクリート強度、ひび割れを横切る鉄筋量および強度、ひび割れ直交方向のひずみの関数で表現する長沼¹¹⁾ のモデルを用いる。なお本解析においては鉄筋をトラス要素で離散化してモデル化しているため、鉄筋量は全断面に平均的に分散するものとして設定した。長沼モデルによるせん断ひずみ-せん断応力の履歴の一例を図-4 に示す。

3.3 解析結果

図-5 に交番載荷実験の結果と FEM 解析の結果を比較したものを示す。FEM 解析結果の再現性は、降伏点近傍までは概ね良好であるが、ねじり変形がさらに大きくなるとやや過大な耐力を与える。これは、先述のテンシヨ

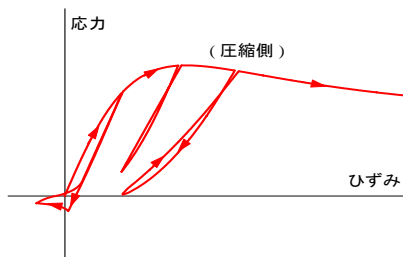


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

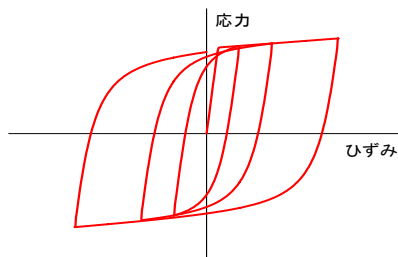


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

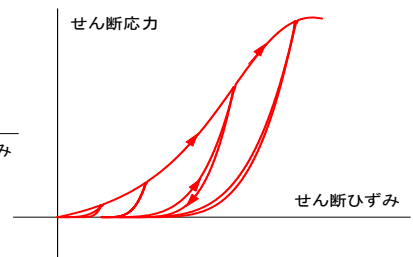


図-4 ひび割れ面のせん断伝達特性

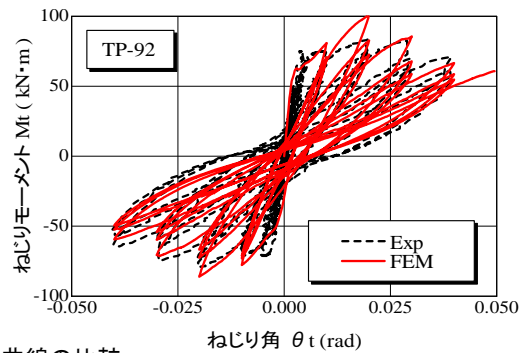
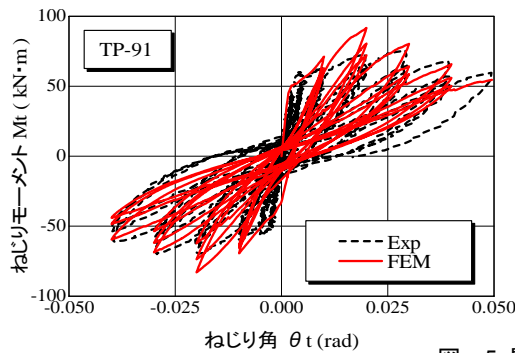


図-5 履歴曲線の比較

ンスティフニングモデルにおいて、標準的な $C=0.4$ を採用しているためである。また、除荷・再載荷時の剛性については実験結果とよく整合することが確認できた。

4. 変形性能の算定

4.1 パラメトリックスタディー

実験結果の不足を補う目的で、FEM 解析を用いたパラメトリックスタディーを実施した。パラメータには帯鉄筋比 p_w および軸力比 を選定した。表-1 に示した試験体のうち、帯鉄筋比の異なる KYPCT-3, KYPCT-6, TP-92, RTRI3-2 を基準の試験体とし、材料強度を実験値に固定したうえで、軸力比を $=0, 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20$ の 6 通りにそれぞれ変化させて、ねじりモーメント M_t とねじり角 t との関係調べた。なお、簡単のために解析では繰返し荷重は行わず、単調荷重としている。

図-6 に M_t-t 関係を示す。解析上のひび割れ発生点 (以下 C 点)、部材降伏点 (以下 Y 点)、帯鉄筋降伏点 (以下 M 点) を図に重ねて示した。ところで、ここでいう「部材降伏点」とはねじり剛性の急変点であり、純ねじりを受ける RC 部材の場合には、軸方向鉄筋の降伏ではなく、ねじり作用により発生したひび割れが断面中心まで進展した時点で生じることが解析結果等から明らかとなっている⁹⁾。

図-6 に示すようにいずれのケースでも明瞭な部材降伏点 (Y 点) を示し、しばらくねじり荷重を維持した後には帯鉄筋が降伏し、計算不安定となり解析を終了した。軸力比が大きいほどねじり荷重も増大する結果となった。Y 点以降のねじり荷重の増加は帯鉄筋量が多いほど大となる傾向が認められた。

4.2 変形性能の算定方法

(1) ひび割れ点 (C 点) の定式化

ねじり作用を受ける RC 部材において、軸方向鉄筋や帯鉄筋のひずみが増大し始めるのは Y 点以降であると考えられることから、C 点の耐力はねじり補強鉄筋のない場合の設計ねじり耐力式で表現される。

$$M_{tc} = \beta_{nt} \cdot K_t \cdot f_t \quad (1)$$

ここに、 M_{tc} : ひび割れ時の純ねじり耐力

β_{nt} : 軸方向圧縮力に関する係数 ($= \sqrt{1 + \sigma'_n / f_t}$)

f_t : コンクリートの引張強度 ($= 0.23 \cdot f_c^{2/3}$)

σ'_n : 作用平均圧縮応力度

K_t : ねじり係数 (正方形断面では、 $K_t = B^3 / 4.8$)

C 点のねじり角は古典弾性理論から、

$$\theta_{tc} = \frac{M_{tc} L}{GJ} \quad (2)$$

ここに、 θ_{tc} : ひび割れ発生時のねじり角

L : ねじりスパン

GJ : St. Venant のねじり剛性

G : せん断弾性係数 ($= E_c / 2(1 + \nu)$)

($\nu = 0.2$ を仮定)

である。

Jについては、以下のように級数解が得られている。

$$J = \frac{a^3 b}{3} \left(1 - \frac{192 a}{\pi^5 b} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh \frac{n\pi b}{2a} \right) \quad (3)$$

上記において $a = b = B$ とおき、第 3 項までとると、

$$J = B^4 / 7.11 \quad (4)$$

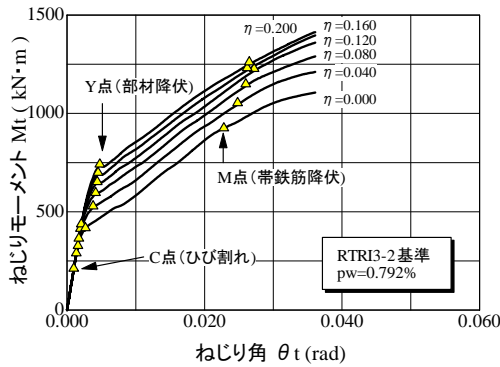


図-6 軸力比を変化させた場合のMt-θt関係の例

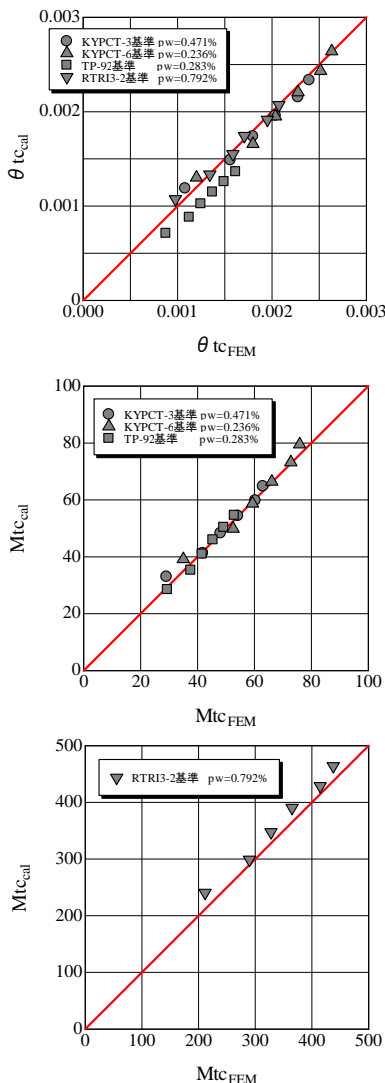


図-7 C点ねじり角、ねじりモーメントの比較

図-7に弾性論とFEM解析でそれぞれ算定されたC点のねじりモーメント M_{tc} とねじり角 θ_{tc} の比較を示す。多少ばらつきはあるものの、ねじり角・ねじりモーメントともにほぼ一致する結果となった。これよりC点に関しては式(1)~(4)を用いて算定可能であることが確認された。

(2) 部材降伏点 (Y点) の算定

図-8に軸力比とY点・C点ねじりモーメントの比 M_{ty}/M_{tc} の関係を示す。図-6に示すように、軸力が大きいほど M_{ty} 、 M_{tc} とも大きくなる傾向にあるが、両者の比 M_{ty}/M_{tc} は軸力比と帯鉄筋比 p_w にかかわらずほぼ一定値をとる。本検討では式(5)が得られた。

$$M_{ty} = 1.8 \cdot M_{tc} \quad (5)$$

図-9に軸力比 $\eta = t_y/t_c$ の関係を示す。軸力が作用しない場合には帯鉄筋量の影響が認められるが、通常の軸力の範囲では、 t_y/t_c の値は軸力比のみの関数で表現できる。軸力が作用しない場合($\eta = 0$)のデータを除いた範囲で回帰すると、 $\eta = t_y/t_c$ は式(6)のように線形関係で表せる。

$$\theta_{ty} = (3.03 - 3.81\eta) \cdot \theta_{tc} \quad (6)$$

(3) 骨格曲線の定義

Y点以降の挙動については、単調ねじりと交番ねじりとで、その耐力曲線の包絡線が大きく異なることがわかっている⁹⁾。すなわち、軸力や帯鉄筋量などのパラメータのほか、同一ねじり角に達するまでの繰返し載荷回数の影響が大きいが、現時点ではM点を一義的に定義することは難しい。このため、今回はY点以降の骨格曲線の勾配のみを与えることとした。

いま、O-Cを結ぶ勾配を K_0 、Y-Mを結ぶ勾配を K_2 とし、両者の比 K_2/K_0 と軸力比の関係を調べると図-10のようになる。ねじり補強鉄筋が十分でない場合、 K_2 が負勾配となり、軸力の増大に伴って耐力低下する傾向にあるが、その他のケースでは軸力比の大小にかかわらずほぼ一定値をとる。さらに帯鉄筋比 p_w と K_2/K_0 の関係は図-11のようになる。KYPCT-6 ($p_w=0.236\%$)を除けば、ほぼ線形関係にあることから、最小二乗法を用いて、式(7)を得る。

$$K_2/K_0 = 0.140 \cdot p_w \quad (7)$$

ねじり作用を受けるRC部材の骨格曲線はO-C-Y-Mを結ぶトリリニアモデルとする。なお、Y-M間については剛性のみを規定するが、これは、実構造物においてRC部材がねじり破壊する可能性は極めて小さいこと¹⁾、構造物の非対称性に起因する三次元的挙動によるねじりの影響が曲げ・せん断等に比較して小さいこと¹²⁾から、ねじり作用で耐力低下する領域まで詳細にモデル化する必要は、現時点ではないと判断したためである。

このようにして算定されたY点のねじりモーメントおよびねじり角を文献3)に示された実験値と比較したのが図-12である。文献中の試験体10体には無軸力のケースが含まれているが、計算値は実験値とよく整合しており、FEMにおいてばらつきが生じた軸力比 $\eta=0$ の場合にも本提案モデルが適用可能であることが確認できた。

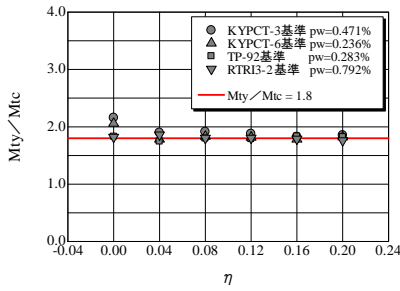


図-8 -Mty/Mtc 関係

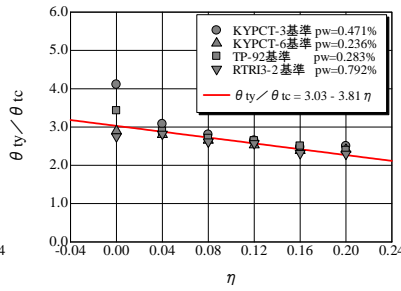


図-9 - ty / tc 関係

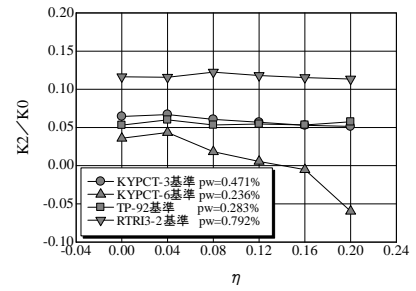


図-10 -K2/K0 関係

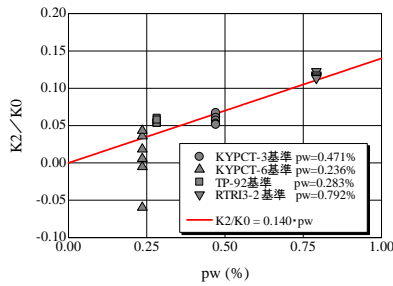


図-11 pw-K2/K0 関係

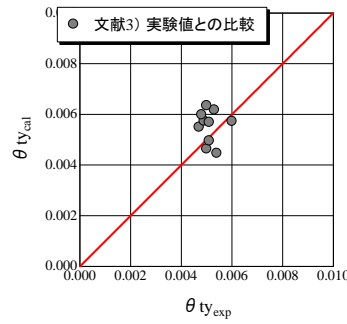
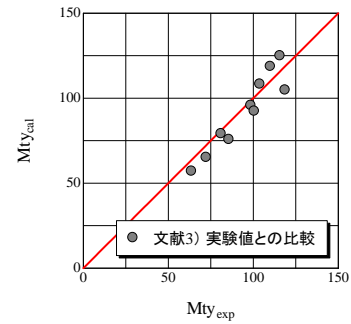


図-12 Y 点算定値の実験値との比較



5. 履歴特性の検討

(1) 交番载荷実験との比較

動的解析等で用いる部材モデルには、骨格曲線だけでなく、除荷・再载荷の経路を含む復元力関係が必要となる。ここでは三次元動的非線形解析等で用いる $M_t - t$ 関係を表現する履歴モデルの提案を行い、既往の交番ねじり载荷実験の履歴曲線との比較を行う。

まず、荷重ピークからの除荷剛性を以下のように定式化する。

$$K_d = \frac{M_{ty}}{\theta_{ty}} \cdot \left| \frac{\theta_{tmax}}{\theta_{ty}} \right|^{-\beta} \quad (8)$$

ここに、 K_d : 除荷剛性

θ_{tmax} : 過去最大経験ねじり角

β : 剛性低下指数 (=0.7)

である。剛性低下指数は実験結果との整合を見て決定した。このモデルは過去経験した最大ねじり塑性率に応じて除荷剛性を低減する剛性低下型のモデルである。除荷後、荷重ゼロに達した後は、反対側の過去最大ねじり角を指向するものとする。図-13に履歴モデルのイメージ図を示す。また、図-14に本提案モデルと既往のねじり载荷実験で得られた履歴曲線の比較を示す。除荷剛性、再载荷経路とも実験結果とよく一致する結果となった。

(2) 任意履歴への拡張

地震荷重等の変動荷重の下では、RC 部材は除荷・再载荷の履歴を繰返し受ける。このような履歴を受ける RC 部材のエネルギー吸収能や残留変形量を精度よく推定するには、任意の载荷経路に対応する履歴モデルが必要である。ここでは、载荷初期に大変形を受け、その後に内

部ループに入る履歴の再現性を検討する。なお、任意のねじり履歴を与えた研究は、著者らが文献調査を実施した範囲では見いだせなかった。このため、RC 部材の挙動を良好に再現できる三次元 FEM 解析の結果と、履歴モデルの比較を行うことにした。

図-15に示すように、正側に大きなねじり角を経験する場合には、除荷が生じるまでは骨格曲線上を移動する。その後、式(8)で定義した剛性で荷重ゼロまで除荷された時点で変曲点が現れる。これは負側でねじり角を経験していない影響であると思われる。そこで、負側で C 点および Y 点を経験していない場合には、荷重ゼロ点から O-C の勾配で $-M_{tc}$ を指向し、 $-M_{tc}$ に達した後は負側の Y 点を指向し、Y 点に達した後は負側の骨格曲線上を移動するように履歴を定義する。内部ループの除荷に関しては外側のループで経験した最大ねじり角を参照し、式(8)で表現される剛性で除荷されるものとした。

このようにして得られたねじり角-ねじりモーメント関係は三次元 FEM 解析の結果とほぼ整合することが確認された。

6. まとめと今後の課題

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 三次元 FEM 解析により、純ねじりを受ける RC 部材の挙動を良好に再現できた。繰返しねじり载荷を受ける場合には、履歴を適切に評価できるせん断伝達モデルの採用が必要となる。
- (2) 純ねじり作用を受ける RC 部材に関するパラメトリックスタディーを行い、骨格曲線の提案を行った。

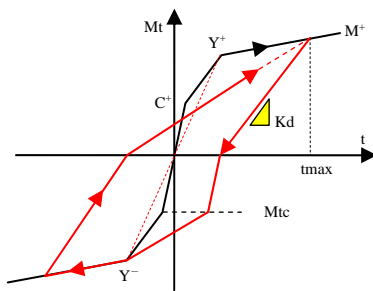


図-13 履歴モデルのイメージ

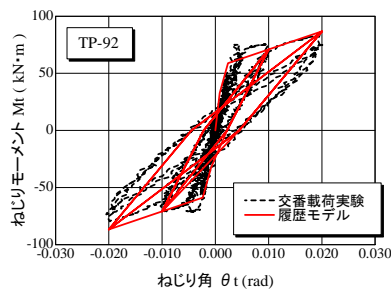


図-14 実験結果と履歴モデルの比較

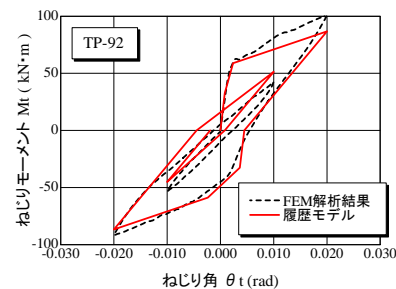


図-15 FEM 解析結果と履歴モデルの比較

- (3) 純ねじり作用を受ける RC 部材に関するシンプルな部材モデルを提案した。提案した履歴モデルは実験結果および三次元 FEM 解析の結果と良好に整合することが確認された。
- (4) 純ねじりが作用する RC 部材の変形性能、履歴特性のモデル化を行ったが、地震動を受ける構造物は、ねじり作用だけでなく、曲げやせん断といった複合荷重を受ける。この場合、純ねじりの作用下に比べ、急激に剛性低下する可能性がある。また、任意の載荷履歴に関しては、実験・解析の両面から検証データが不足している。これらに関しては今後の課題と考える。

7. 謝辞

元東京工業大学教授 川島一彦氏のもとで実施された実験結果、ならびに（公財）鉄道総合技術研究所コンクリート構造研究室で実施された実験結果の一部を使用させていただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 田所 敏弥, 谷村 幸裕, 中田 裕喜: ねじりと曲げを受けるラーメン高架橋柱の変形性能と地震被害, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.3, pp.166-177, 2012
- 2) 川島 一彦, 渡邊 学歩, 畑田 俊輔, 早川 涼二: 逆 L 字型鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.745 / I -65, pp.171-189, 2003.10
- 3) 大塚 久哲, 王 堯, 高田 豊輔, 吉村 徹: 純ねじりを受ける RC 部材の履歴特性に影響を及ぼすパラメータに関する実験的研究, 土木学会論文集, No.739 / V-60, pp.93-104, 2003.08
- 4) 大塚 久哲, 王 堯, 石原 眞一, 吉村 徹: 純ねじりを受ける RC 部材の復元力特性の定式化, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1027-1032, 2003

- 5) Le Anh Ngoc, Paiboon Tirasit, Kazuhiko Kawashima : SEISMIC PERFORMANCE OF A SKEWED BRIDGE CONSIDERING FLEXURE AND TORSION INTERACTION , The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.10
- 6) 松枝 修平, 田所 敏弥, 谷村 幸裕, 進藤 良則: 曲げとねじりを同時に受ける鉄筋コンクリート柱の変形性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.811-816, 2008
- 7) 秦 逸平, 大塚 久哲, 箴島 隆史, 陶 媛媛: コンクリート系部材のねじり破壊メカニズムに関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.745-750, 2009
- 8) Satoshi Tsuchiya , Koichi Maekawa , Kazuhiko Kawashima : Three-Dimensional Cyclic Behavior Simulation of RC Columns under Combined Flexural Moment and Torsion Coupled with Axial and Shear Forces, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.5, No.3, pp.409-421, 2007.10
- 9) 大塚 久哲, 秦 逸平, 宇山 友理: 純ねじり荷重を受ける RC 部材の三次元非線形有限要素解析, 土木学会構造工学論文集, Vol.55A, pp.1048-1057, 2009.03
- 10) 出雲 淳一, 島 弘, 岡村 甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, Vol.25, No.9, pp.107-120, 1987.09
- 11) 長沼 一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その 1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.03
- 12) 檜崎 泰隆, 水谷 司, 藤野 陽三: 東日本大震災における新幹線ラーメン高架橋の損傷メカニズムの動的非線形解析による分析, 土木学会第 68 回年次学術講演会, V-084, pp.167-168, 2013.09