

交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の力学性状に関する研究

A STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOURS OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS SUBJECTED TO REVERSED CYCLIC TORSION

長瀧重義*・岡本享久*・梅木秀郎***・李承漢****

By Shigeyoshi NAGATAKI, Takahisa OKAMOTO, Hideo UMEKI and Seung-Han LEE

In an effort to predict the load-deformation response of reinforced concrete element subjected to reversed cyclic pure torsion, an analytical model is proposed in this study. In this model, not only compressive stress-strain curve and tensile stress-strain curve of concrete struts between diagonal cracks but also tensile stress-strain curve of the steel bars included the effects of local yielding along bar are considered in equilibrium and kinematic conditions. Experiments are carried out with variations of the amounts of reinforcements, the depth of the concrete cover and the loading patterns. The experimental and analytical values have been found to be in good agreement and is thus capable of predicting the energy dissipation and equivalent viscous damping ratio of the members subjected to reversed cyclic torsion.

Keywords : reinforced concrete, reversed cyclic torsion, load-deformation response, energy dissipation, equivalent viscous damping ratio

1. はじめに

静的な一方向ねじりモーメントを受ける場合の鉄筋コンクリート部材の挙動に関しては古くから研究が行われ、1929年にはRausch¹⁾が立体トラスモデルを発表し、1958年にはソ連のLessig²⁾が斜め曲げモデルを発表している。また、1980年にはCollinsら³⁾が立体トラスモデルにCompression Field Theoryを導入し、1983年には、Hsuら⁴⁾が、斜めひびわれ間のコンクリートが二軸応力状態にあることを考慮した解析方法を発表している。さらに著者らの研究により現在では、コンクリートの引張剛性をも考慮した解析が行われるようになった^{5),6)}。これらの数多くの研究により静的なねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の挙動は、終局耐力だけでなく任意の荷重状態での変形性状まで精度よく推定できるようになった。

一方、地震時などに想定される交番ねじりモーメントおよび疲労破壊に至るような繰り返しのねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の力学挙動については、研究の歴史も浅く、最近になってようやく実験的研究が行われるようになったばかりである。現在、設計法が限界状態設計法に移行し、終局限界状態、使用限界状態のみならず疲労限界状態および耐震に関する検討も規定しており、合理的な設計法確立のためにはこの種の交番ねじりモーメントを受ける部材の挙動について早急に解明する必要がある。交番ねじりモーメントを受ける場合の挙動に関しては、1984年にB. Jakobsenら⁷⁾が風荷重に起因するねじりモーメントをシミュレートして交番ねじり試験を行い、軸力および鉄筋量の増大が剛性の低下の防止に対して有効であると報告している。また、1985年、1986年に児島ら^{8),9)}は、同様に軸力および鉄筋量がこの種部材の挙動に及ぼす影響について、さらに、1986年には狩野らが、曲げ・せん断およびねじりが同時に作用する場合の復元力特性に関して検討を加えている¹⁰⁾。これらの研究は実験的な報告にとどまり、解析的なアプローチについてはほとんど取り扱っていない。しかしながら、この種の荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性を解析的にとらえることは、耐震設計上

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(〒152 目黒区大岡山2-12-1)

** 正会員 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科
(同上)

*** 正会員 工修 日本道路公団広島建設局岡山工事事務所
(〒700 岡山市津島西坂2-4-34)

**** 正会員 工博 啓明大学校助教授 工科大学土木工学科
(大韓民国 大邱市達西区新塘洞1000)

必要不可欠なことである。

そこで、本研究では、交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の力学的性状を明らかにすることを目的として、解析と実験の両面から検討を加えた。すなわち、解析では二軸応力下にある斜めひびわれ間のコンクリートに交番荷重下における応力-ひずみ関係を定義し、これを Compression Field Theory に適用して構成方程式を導き、この種部材の荷重-変形関係を明らかにした。また、実験ではかぶり厚さおよび鉄筋比を変えて製作した供試体について交番ねじり載荷試験を実施し、この種部材の破壊エネルギー、等価粘性減衰係数および変形挙動などに考察を加えた。

2. 解析方法

静的な一方向ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の挙動解析に関しては、前述したようにさまざまな解析方法が提案されている。著者らも引用文献5)に示したように、コンクリートの引張剛性を解析過程において取り込み、ひびわれ発生時、ひびわれ発生後および終局耐力に至るまでの全荷重段階におけるこの種部材の挙動を精度よく評価する方法を提案している。そこで本研究では、交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の挙動解析に関する基礎方程式の誘導にあたっては、この解析手法を基礎とすることとした。なお、従来の立体トラスモデルを用いた解析ではひびわれ面でつり合い条件およびひずみの適合条件を考えているのか、それともひびわれとひびわれの間の平均応力（平均ひずみ）面で考えているのか明瞭でなかった。ひびわれ面で考えるならば、当然のことながら、鉄筋の主引張力分担分のみならず、鉄筋のダボ作用および骨材のかみ合い作用による分担分も考慮しなければならない。本解析ではひびわれ面でなく、ひびわれとひびわれの間の平均応力面においてつり合い条件、ひずみの適合条件を考え、以下に述べる材料特性を用いた。

(1) 处女載荷時の材料モデル

a) コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係

ねじりを受ける鉄筋コンクリート部材の斜めひびわれ間のコンクリート・ストラットにおけるコンクリートの応力-ひずみ関係は、ひびわれ間のコンクリート中の応力分布の不均一性、ひびわれ間を横切る鉄筋などによる多軸効果、さらには寸法効果によって、一軸状態下の応力-ひずみ関係とは異なり、最大応力および最大応力時のひずみの値が低下することが知られている⁴⁾。この中でもねじりの場合に特有な現象である圧縮-引張の二軸応力による影響は無視できないと考えられる。そこで本解析では、二軸効果を考慮したコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係として、図-1に示すVecchio & Collins

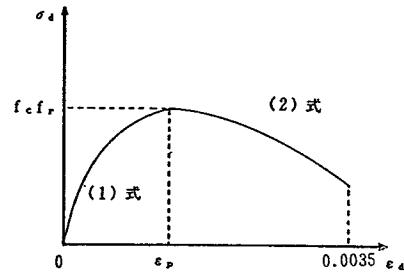


図-1 コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係

が提案した圧縮応力-ひずみ関係を用いることとした¹¹⁾。これらの関係は、式(1)および式(2)で表わされる。
 $\epsilon_d < \epsilon_p$ の場合

$$\sigma_d = f_c f_r \left\{ 2 \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_o} \right) - \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_o} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots \quad (1)$$

$\varepsilon_p \leq \varepsilon_d \leq 0.0035$ の場合

$$\sigma_d = f_c f_r \left\{ 1 - \left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_p}{2\varepsilon_0 - \varepsilon_p} \right)^2 \right\} \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 f_r は $1/\lambda$ であり、 λ は低減係数で次式のように表わされる。

b) コンクリートの引張応力-ひずみ関係

本解析では図-2に示す白井らが提案したモデル¹²⁾を用いた。このモデルは、ひびわれ発生前は式(4)で表わされるように応力-ひずみ関係は線形であり、ひびわれ発生後は式(5)で示されるように、引張ひずみが増加するに従い引張応力が減少し、引張ひずみが鉄筋の付着限界ひずみに達した後は引張応力は0とするモデルである。

$\varepsilon_1 < \varepsilon_{cr}$ の場合

$\varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_1 < \varepsilon_{BU}$ の場合

$\varepsilon_{BU} \leq \varepsilon_1$ の場合

$$\sigma_r = 0$$

$$\text{ここで, } x = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{BU} - \varepsilon_{cr}}$$

c) 鉄筋の応力-ひずみ関係

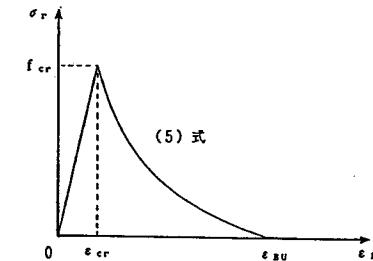


図-2 コンクリートの引張応力-ひずみ関係

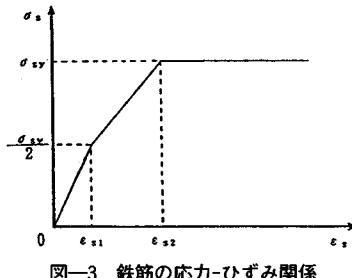


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

軸方向鉄筋およびスターラップの平均応力-平均ひずみ関係は、図-3に示すように tri-linear の形に定義した。

玉井らの報告¹³⁾によると RC 一軸引張部材における鉄筋の平均応力-平均ひずみの降伏点は鉄筋単体の応力-ひずみ曲線の降伏点より低く、特に鉄筋比が低い場合あるいは鉄筋の降伏点が低い場合には、平均応力が鉄筋単体の降伏応力の 1/2 に達する前に降伏が始まることがあると報告している。したがって、ねじりを受ける RC 部材についてもこの現象は考慮する必要がある。そこで本解析では図-3に示すように鉄筋の平均ひずみが ε_{s1} に達するまでは、鉄筋単体の弾性係数と等しく、コンクリートの引張剛性が 0 となるひずみ (ε_{s2}) に達した後は鉄筋の平均応力は鉄筋単体の降伏強度と等しくなると仮定した。また ε_{s2} は、前述したコンクリートの引張応力-ひずみ関係において、コンクリートの引張応力が 0 になる際に、鉄筋の平均応力が鉄筋単体の降伏強度と等しくなるように与えた。したがって、鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は式 (6), 式 (7) および式 (8) のように表わすことができる。

$\varepsilon_s < \varepsilon_{s1}$ の場合

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad (6)$$

$\varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_s < \varepsilon_{s2}$ の場合

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{sy}}{2} \left(\frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{s2} - 2\varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1}} \right) \quad (7)$$

$\varepsilon_{s2} \leq \varepsilon_s$ の場合

$$\sigma_s = \sigma_{sy} \quad (8)$$

ここで、 $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_y/2$, $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{BU}$ である。

(2) 正負交番載荷時の材料モデル

a) コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係

最大圧縮ひずみを生じた状態から除荷した場合、図-4に示すように、残留ひずみ (ε_{dyp}) が残る。この値については、式 (9) で表わされる前川らの提案した式を用いる¹⁴⁾。

$$y = x - (20/7) \cdot (1 - e^{-0.35x}) \quad (9)$$

ここで、 $y = \varepsilon_{dyp}/\varepsilon_p$

$$x = \varepsilon_{dmax}/\varepsilon_p$$

また、最大圧縮ひずみを生じた状態から除荷する際に

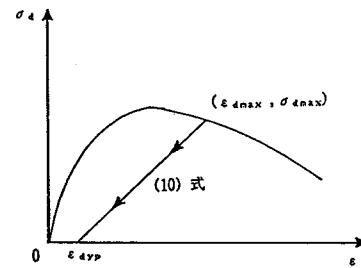


図-4 除荷時の圧縮応力-ひずみ関係

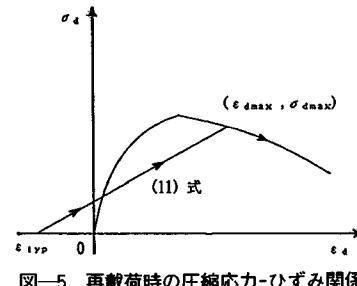


図-5 再載荷時の圧縮応力-ひずみ関係

は、図-4に示すように直線で表わされたとした。この直線は式 (10) で示される。

$$\sigma_d = \sigma_{dmax} \left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_{dyp}}{\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{dyp}} \right) \quad (10)$$

一方、交番ねじりモーメントにより引張を受けた後に再び圧縮される場合、すなわち再載荷時には、図-5に示すように引張を受けた際の残留ひずみを生じた状態から、過去に最大ひずみを生じた点へ向かう直線とし、式 (11) で示した。

$$\sigma_d = \sigma_{dmax} \left(\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_{1yp}}{\varepsilon_{dmax} - \varepsilon_{1yp}} \right) \quad (11)$$

b) コンクリートの引張応力-ひずみ関係

最大引張ひずみを生じた状態から除荷する場合、図-6に示すように、引張による残留ひずみ (ε_{1yp}) が残り、この値はひずみの適合条件により決定される。また、最大引張ひずみ (ε_{1max}) を生じた状態から残留ひずみ (ε_{1yp}) が残った状態とを結ぶ曲線は、図-6のような直線とした。この曲線は、式 (12) で表わされる。

$$\sigma_r = \sigma_{rmax} \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{1yp}}{\varepsilon_{1max} - \varepsilon_{1yp}} \right) \quad (12)$$

また、圧縮を受けた後に再び引張を受ける場合には、図-7に示すように圧縮側の残留ひずみ (ε_{dyp}) を生じた状態から、過去に生じた最大引張ひずみの点へ向かう直線で表わされる。この関係は、式 (13) で示される。

$$\sigma_r = \sigma_{rmax} \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{dyp}}{\varepsilon_{1max} - \varepsilon_{dyp}} \right) \quad (13)$$

c) 鉄筋の応力-ひずみ関係

除荷および再載荷時における、鉄筋の平均応力と平均

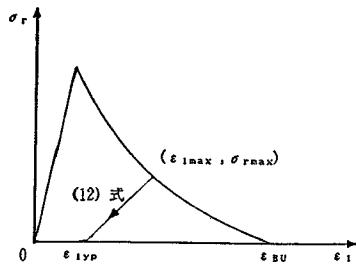


図-6 除荷時の引張応力-ひずみ関係

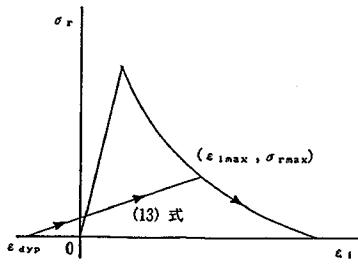


図-7 再載荷時の引張応力-ひずみ関係

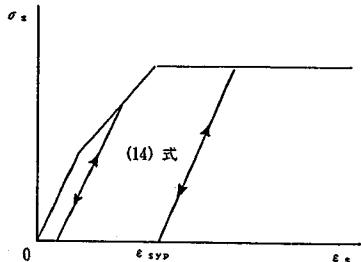


図-8 除荷・再載荷時の鉄筋の応力-ひずみ関係

ひずみの関係は、図-3を基本として図-8に示すように、鉄筋単体の弾性係数と等しい傾きの直線で表わされるものとした。したがって、この関係は式(14)で表わされ、残留ひずみは式(15)で表わされる。

$$\sigma_s = E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_{syp}) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{syp} = \varepsilon_{smax} - \sigma_{smax}/E_s \quad (15)$$

(3) 主圧縮方向に作用する圧縮応力の算定

本解析では、図-9に示すようにせん断流の通路厚内で圧縮ひずみは線形分布すると仮定し、ひずみの分布に伴う応力の分布を等価応力ブロックに換算し、せん断流の通路厚内では応力は均等に分布しているものと仮定した。また引張応力分布も同様に、せん断流の通路厚内に一様に分布するものと考えた。また本解析では、部材から取り出したせん断流の通路厚さと等しい厚さの板要素を解析モデルとし、この板要素に作用する、等価応力ブロックは、以下に述べる方法によって求めた。

a) 処女載荷時

ひずみが線形分布するという仮定より、処女載荷時に

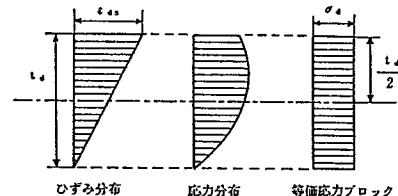


図-9 等価応力ブロック

は図-1に示した応力-ひずみ曲線を $\varepsilon_d=0$ から表面のひずみ ε_{ds} まで積分し、図-9に示すように面積の等しい矩形に置き換えることにより等価応力ブロックにおけるコンクリートの平均圧縮応力 (σ_d) を求めることができる。これは、式(16)および式(17)で示される。

$\varepsilon_{ds} \leq \varepsilon_p$ の場合

$$\sigma_d = f_r f_c \left(\frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_{ds}}{3\varepsilon_p} \right) \quad (16)$$

$\varepsilon_p < \varepsilon_{ds}$ の場合

$$\sigma_d = f_r f_c \left[\left(1 - \frac{1}{(2\lambda-1)^2} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_p}{3\varepsilon_{ds}} \right) + \frac{\varepsilon_{ds}}{(2\lambda-1)^2\varepsilon_p} \left(1 - \frac{\varepsilon_{ds}}{3\varepsilon_p} \right) \right] \quad (17)$$

b) 除荷時

除荷時には、任意の深さにおける応力とひずみの値を次のようにして知ることができる。たとえば、図-10に示すようにせん断流の通路厚 (t_d) の深さから t_d の $x\%$ だけ部材表面方向にある位置の応力 (σ_{dx}) とひずみ (ε_{dx}) の値について、除荷前の最大ねじりモーメント作用時におけるひずみは式(18)で表わされ、このひずみに相当する応力は、図-1のコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係すなわち式(1)および式(2)を参照して式(19)および式(20)のように得られる。一方、除荷したときの残留ひずみ (ε_{dmax}) は、ひずみが $(\varepsilon_{dsmax}, \sigma_{dsmax})$ から ε_{dypx} まで線形分布すると仮定すると、式(21)のように得られる。

$$\varepsilon_{dmax} = x \cdot \varepsilon_{dsmax}/100 \quad (18)$$

$\varepsilon_{dmax} < \varepsilon_p$ の場合

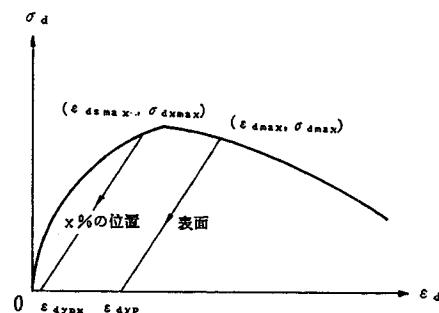


図-10 部材内部での圧縮応力-ひずみ関係

$$\sigma_{dx\max} = f_c f_r \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{dx\max}}{\varepsilon_p} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{dx\max}}{\varepsilon_p} \right)^2 \right] \dots \dots \dots \quad (19)$$

$\varepsilon_p \leq \varepsilon_d \leq 0.0035$ の場合

以上の式により除荷前、除荷後の2点、すなわち $(\varepsilon_{dsmax}, \sigma_{dxmax})$ および $(\varepsilon_{dyxx}, 0)$ が求まれば、除荷時の応力-ひずみ関係は直線と仮定すると、図-4を参考照して、式(22)で示される。

次に、式(22)中の ε_{ax} を ε_{ds} で表示するために、除荷の割合(r_{ul})を式(23)で表わすことにより、ひずみは式(24)で表わされ、これを式(22)に代入することにより、最終的に除荷時における圧縮応力が得られる。

このようにして荷重ステップとともに変化する各深さ位置での除荷時の応力分布を知ることができ、等価応力ブロックに置き換え、平均圧縮応力が求めることができる。

c) 再載荷時

再載荷時には、除荷時と同様に、せん断流の通路厚さ(t_d)の深さの位置から表面方向に $x\%$ にある位置の応力とひずみの状態を把握することにより等価応力プロックを求めることができる。この位置での再載荷前のひずみは式(25)によって表わせる。なお、引張を受けた際の残留ひずみは、平均ひずみで表わされ、その分布は線形分布としている仮定から、表面における残留ひずみは($2\varepsilon_{1yp}$)となる。

再載荷時の圧縮応力-ひずみ関係は、過去に生じた最大圧縮ひずみの点に向かう直線で表わされることより、この位置での再載荷時における応力-ひずみ関係は、次式で表わされる。

再載荷の割合 r_{nl} を式 (27) で表わし, ε_{ax} を ε_{as} で示すと, この位置でのひずみは式 (28) で表わされ, これを式 (26) に代入することにより再載荷時におけるこの位置での圧縮応力が得られる.

このようにして各深さの位置での圧縮応力が得られると、除荷時と同様に再載荷時の平均圧縮応力を求めるこ

とができる

(4) 基礎方程式の誘導

前述したように、基礎方程式の誘導にあたっては、著者らが発表した方法⁵⁾に従った。

(5) 解析の流れ

解析の流れは、まずコンクリート表面の主圧縮ひずみを選定し、せん断流の通路厚さおよび主引張ひずみを仮定し、収束するまで繰り返し計算を行う方法によって解析を行った。すなわち、まずコンクリート主圧縮ひずみより、等価応力ブロックにおけるコンクリートの平均圧縮応力を前述した方法により求める。続いて仮定した主引張ひずみより、コンクリートの引張応力を求める。次に、鉄筋およびコンクリートのひずみから主引張ひずみを求め、仮定した主引張ひずみが許容された範囲で一致するか否か照査する。もし、許容範囲外であれば、再び仮定しなおして、同様な計算を行う。主引張ひずみを求めた後には、せん断流の通路厚さの照査を行う。仮定したせん断流の通路厚さが許容範囲外であれば、もう一度仮定しなおして、最初からやりなおす。せん断流の通路厚さが許容範囲内であれば、ねじり角とねじりモーメントを計算する。こうして、所定のねじり角に達するまで、もしくは除荷が完了するまで主圧縮ひずみを増加あるいは減少させていくことによって、荷重-変形曲線が得られる。

なお、正方向にねじりモーメントを作用させる場合、負方向にねじりモーメントを作用させる場合では主圧縮方向が異なるため、それぞれ別の方向に主圧縮ひずみの座標を考え、主圧縮ひずみの選定を行った。また、本研究においては軸方向鉄筋比および横方向鉄筋比が等しいため、正方向のねじりを加えた際の主圧縮方向と負方向のねじりを加えた際の主引張方向は一致すると仮定した。したがって軸方向に対し土 45° の方向に想定できる2つの座標上で圧縮-引張が繰り返され、圧縮または引張を受けた際の残留ひずみは、そのまま引張または圧縮ひずみに加算されていくとした。さらに、残留ねじり角は塑性変形とみなし、再載荷を行う際には、この残留ねじり角と再載荷によるねじり角を加えたものを、初期の状態からのねじり角とした。

3. 実験概要

交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性を知る目的で、交番ねじり載荷試験を実施した。これに先立ち、同一の部材断面寸法、配筋およびコンクリート強度を有する供試体について、その基礎ともいいうべき静的載荷試験も行った。対象とした断面は、正方形中実断面であり、コンクリート強度、鉄筋かごの寸法を一定とし、コンクリート部分の断面積、すなわち

供試体の断面外形寸法を変えることにより、かぶり厚さを変化させた。さらに、鉄筋間隔を一定にし、鉄筋の直径を変えることによって鉄筋比を変化させた供試体についても実験を行った。軸方向鉄筋および腹鉄筋（閉合スターラップ）には、呼び名 D 10, D 13 および D 16 の熱間圧延異形棒鋼（SD 30）を使用した。なお、同一供試体における軸方向鉄筋とスターラップの鉄筋の呼び名は同一である。これらの鋼材の引張試験結果は、表-1に示すとおりである。また、供試体の配筋および断面寸法については表-2に示した。なお、これらの表において、断面積は実断面積を、かぶりは部材のコンクリート表面から横方向鉄筋までの距離を示す。供試体は、同一のものを 2 体ずつ作成し、それぞれについて、一方ねじりおよび交番ねじり載荷試験を実施した。

交番ねじりモーメントの載荷方法は図-11に示すように、部材両端をねじり載荷用アームボックスの中に納め、上下方向、左右方向から高張力ボルトで固定し、供試体とねじり載荷用アームボックスが一体となって回転するようにした。回転の中心は、供試体の団心と一致するように、ねじり載荷用アームボックスは設計されており、ねじりモーメントは対角の位置にあるアーム上に荷重を加えることにより作用させることができるようになっている。なお、実験に使用した試験機はひずみ制御

表-1 鋼材の引張試験結果

鉄筋の種類	D 10	D 13	D 16
断面積 (cm^2)	0.678	1.198	1.934
降伏点 (kgt/cm^2)	4239	3310	3860
引張強さ (kgt/cm^2)	5682	6043	5793
静弾性係数 (kgt/cm^2)	2030000	1930000	2010000

表-2 供試体仕様

供試体名	断面寸法 (cm)	鉄筋比 (φ)		試験機高さ (cm)	かぶり (cm)	コンクリート強度 (kgt/cm^2)	引張 正規 耐力 (kN)	静弾性係数 (kN)
		ϕ_1	ϕ_2					
RE1000	30×30	0.610	0.610	14.6	14.6	0	34.8	505
RE1300	30×30	1.055	1.055	14.5	14.5	0	34.8	505
RE1600	30×30	1.719	1.719	14.4	14.4	0	34.8	505
RE1025	35×35	0.443	0.443	14.6	14.6	2.5	34.8	505
RE1050	40×40	0.339	0.339	14.6	14.6	5.0	34.8	505

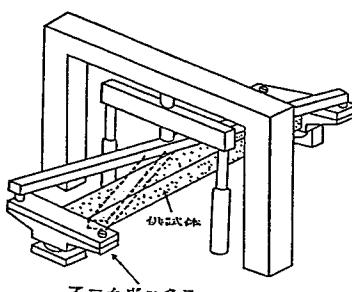


図-11 載荷方法

表-3 載荷パターン

供試体名	Loop 1 (deg/m)	Loop 2 (deg/m)	Loop 3 (deg/m)	Loop 4 (deg/m)
RE1000	± 1.00	± 2.00	± 3.00	—
RE1300	± 0.50	± 1.00	± 2.00	± 3.00
RE1600	± 0.50	± 1.00	± 2.00	± 3.00
RE1025	± 1.00	± 2.00	± 3.00	—
RE1050	± 0.75	± 1.50	± 2.50	—

型であり、同一のひずみ速度で載荷を行った。交番ねじりモーメントの載荷パターンは、ねじり角で制御し、表-3に示した載荷パターンで各変位レベルで各 1 ループずつ交番ねじりモーメントを加え最後は正方向へ大変形させて破壊に至らせた。

4. 実験結果と解析結果の比較検討

(1) ひびわれ耐力

交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材は、格子状のひびわれが部材全表面に生じることで特徴付けられる。交番ねじりを受ける部材では、まず正方向の作用ねじりモーメントによりひびわれが発生する。続いて負方向のねじりモーメントを作用させることにより、すでに存在しているひびわれと直交するように新たなひびわれが発生する。表-4は、正方向のねじりによるひびわれ発生モーメントと負方向のねじりによるひびわれ発生モーメントを比較したものであるが、負方向のねじりによるひびわれ発生モーメントは正方向のひびわれ発生モーメントより低下する傾向がはっきりと認められた。

この表よりかぶりが 0 cm の RE 1000, RE 1300 および RE 1600 の 3 体を比較すると、最初に正方向に生じさせるねじり角を 0.5 deg/m にした RE 1300 および RE 1600 では、負方向のねじりによるひびわれ発生耐力の低下率が 5 % 程度であったのに対し、最初に正方向に生じるねじり角を 1.0 deg/m にした RE 1000 は 24 % の低下を示した。このことより、この低下率は鉄筋比の相違の影響というよりむしろ、正方向に載荷した際の最大ねじり角の相違の影響を受ける。したがって負方向のねじりによるひびわれ耐力は、正方向にねじりを加えた際の最大ねじり角と密接な関係があることが明らかとなった。

表-4 ひびわれ耐力

供試体名	最大ねじり角 (deg/m)	ひびわれ発生モーメント (kN)		低下率 (%)
		正方向	負方向	
RE1000	1.0	2.352	1.791	24
RE1300	0.5	2.348	2.211	6
RE1600	0.5	2.118	2.030	4
RE1025	1.0	3.327	2.739	18
RE1050	0.75	4.560	3.178	30

(2) 最大耐力

表-5は一方向ねじりによる最大耐力と交番ねじりによる最大耐力を示す。交番ねじりモーメントを受ける場合には最大耐力が低下する傾向がはっきりと認められた。RE 1000, RE 1300 および RE 1600 の3体を比較すると、鉄筋比の大きい供試体ほど、一方向載荷時に比べて耐力の低下が著しい。RE 1600 のようにつり合い鉄筋比以上に補強された場合、部材の破壊はコンクリートがどの荷重段階で圧縮破壊を起こすかということに支配される。交番ねじりモーメントを受ける部材のコンクリートは、二軸応力状態下で圧縮-引張の繰り返しを受けるため、一方向載荷時に比べより小さい荷重段階でコンクリートが圧縮破壊に至ることが考えられる。したがって、鉄筋による補強が多ければ多いほど、正負交番載荷時の終局耐力は一方向載荷時に比べて低下する傾向にあることが判明した。

また、RE 1025 および RE 1050 のようにかぶりを有する供試体に関しては、かぶりのない部材と比較してより小さい変位レベルで最大耐力に到達する。これは、従来から指摘されている⁵⁾ように、かぶりの剥離現象と密接な関係があり、本実験では、一方向ねじりを受ける場合に比べ、交番ねじりを受ける場合にはより小さな変形レベルでかぶりコンクリートの剥離が生じたことからもいえる。

(3) 荷重-変形関係

図-12は交番ねじりを作用させた場合の荷重履歴曲線について実験値と解析値を比較したものである。これらの図から本解析は再載荷時の傾向を精度よくとらえることができた。しかし、除荷時では同一作用ねじりモーメントにおける本解析より求めたねじり角は実験によるものより小さく、これは交番時のコンクリートの応力-ひずみ関係を直線関係としたことが主たる原因である。また、これらの影響はかぶりがない供試体の方がかぶりを有する供試体より少なかった。

(4) 鉄筋のひずみ

図-13にRE 1300のねじりモーメントと鉄筋の平均ひずみの関係について、実験値と解析値を比較して示す。荷重-変形と同様、再載荷時では解析と実験値はよく一致しているが、除荷時では同一作用ねじりモーメントに

おいて解析値が実験値より大となり、仮定したコンクリートの応力-ひずみ関係において、解析値の方が実験値より小さく見積り、その分解析では鉄筋に作用する応力が大きくなつたことが原因と思われた。

(5) ひびわれ性状

本実験では、部材表面にコンタクト・チップを貼付し、

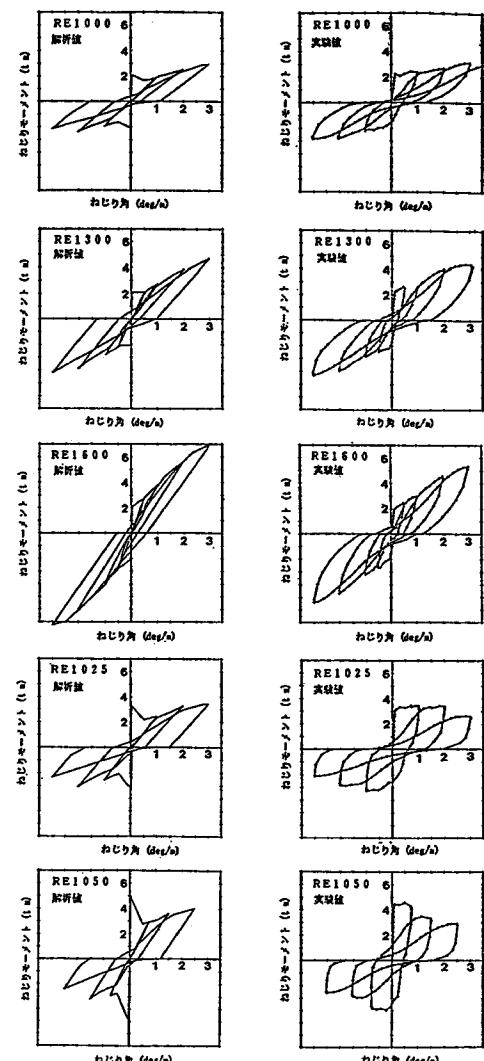


図-12 荷重履歴曲線（解析と実験の比較）

表-5 最大耐力

供試体名	一方向載荷		正負交番載荷		最大耐力の低下率(%)
	最大耐力(t·f)	最大耐力時のねじり角(deg/a)	最大耐力(t·f)	最大耐力時のねじり角(deg/a)	
RE1000	3.21	3.4	3.24	3.0	+1.0
RE1300	4.90	3.5	4.40	3.0	10.2
RE1600	6.09	3.5	5.43	3.0	10.8
RE1025	3.63	2.2	3.45	1.0	6.0
RE1050	4.21	0.11	4.63	0.45	+11.1

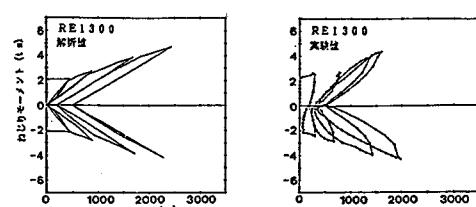


図-13 鉄筋のひずみ（解析と実験の比較）

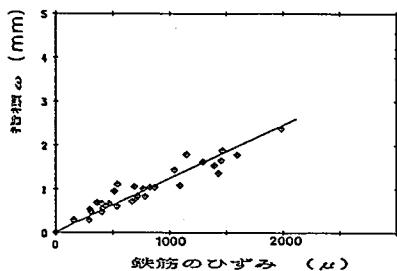


図-14 指標 ω と鉄筋の平均ひずみの関係

部材軸方向およびこれと垂直な方向の長さ変化を測定した。一方向ねじりの場合には、この測定結果よりひびわれ幅およびずれ量は式(29)、式(30)で表わされる。

ところで、この式は正負交番載荷時には、直交する両方向のひびわれのひびわれ幅も加算して見積もるため、着目した一本のひびわれのひびわれ幅を表わしていることにはならない。しかし、両方向のひびわれを見積もるもの、式(29)は交番ねじりモーメントを受ける部材のひびわれ幅を表わす指標として考えることができる。

図-14は、交番ねじり載荷を行ったRE1000において、この指標と鉄筋の平均ひずみの関係を示したものである。この指標と鉄筋のひずみは強い相関性が認められ、交番ねじりを受ける部材のひびわれ幅も鉄筋のひずみで制御できることが確認できた。なお、交番ねじりを受ける部材のひびわれ幅は一方向ねじりの場合より同一モーメントにおいて30~60%ほど大となることも認められた。

5. 復元力特性

(1) エネルギー消費

本研究では、実験によって得られた履歴曲線のそれぞれのループが囲む面積をローラー式プランメーターによって測定し、それぞれのループにおいて消費されたエネルギーを算出した。図-15は、各ループのエネルギー消費量と各ループの最大ねじり角の関係を示したものである。

RE 1600, RE 1300 および RE 1000 の 3 体を比較すると、0.5 から 1.0 deg/m 程度の小さい変位レベルにおいては、鉄筋比の影響はあまりはっきりとしないが、2.0 から 3.0 deg/m 程度の大きな変位レベルでは、鉄筋比の大きい供試体ほどエネルギー消費量が多くなった。

かぶり厚さが及ぼす影響については、かぶり厚さが大きい場合は、小さな変形レベルでのエネルギーの消費が非常に大きい。これは、早期のかぶりコンクリートの剥離現象を裏付ける結果であると考えられる。また、本解

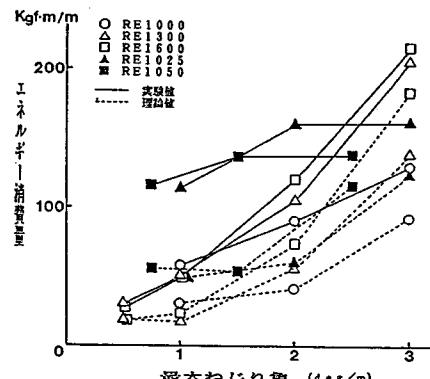


図-15 各ループの最大ねじり角とエネルギー消費量

析によるエネルギー消費量は、実験値より小さな値となつたが、かぶりが0の場合については実験値の傾向をとらえることができた。

(2) 等価粘性減衰係数

本研究では、等価粘性減衰係数を図-16に示したように履歴曲線より式(31)により求めた。

解析および実験より得られた各ループにおける等価粘性減衰係数と各ループの最大ねじり角の関係は図-17に示したとおりである。

鉄筋比の異なる RE 1000, RE 1300 および RE 1600 について各ループの最大ねじり角と等価粘性減衰係数 (h_{eq}) の関係を比較すると、ねじり角が小さい場合には、

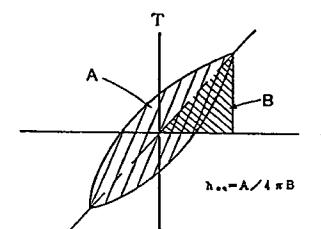


図-16 等価粘性減衰係数の定義

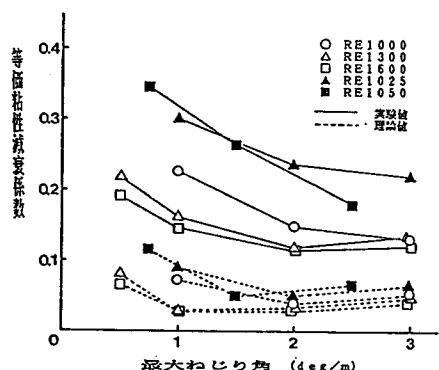


図-17 各ループの最大ねじり角と等価粘性減衰係数

鉄筋比が小さいほど等価粘性減衰係数が大きい傾向が認められた。これは鉄筋比の大きい部材は一般にコンクリートの圧縮破壊による破壊性状を示し、鉄筋の非線形的な変形によるエネルギーの消費が少ないため脆性的な破壊に至るためであると考えられる。また単位長さ当たりのねじり角が3(deg/m)程度になると、鉄筋比の影響は認められなかった。

一方、かぶりの影響は鉄筋比の影響に比べて非常に大きく、特に小さい変形レベルにおいてはかぶりを有する供試体は大きな等価粘性減衰係数を示した。この結果からもかぶりの剥離現象がこの種部材の挙動に大きな影響を及ぼしていることが認められる。

また、本解析によって得られた等価粘性減衰係数は、除荷時のコンクリートの応力-ひずみ関係を線形分布としたことが原因となり実験値より小さい値となったが、一応実験値の傾向をとらえることができた。これは、交番ねじりモーメントに対する鉄筋コンクリート部材の復元力特性は、実験的に求めるだけでなく解析的に求ることの可能性を示唆するもので、この種部材の設計において汎用性の高い手法確立のための一助となり得ると考えられる。

6. 結 論

本研究は、交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性を知る目的で行ったものであり、本研究の範囲内で以下のような結論を得た。

(1) 鉄筋コンクリート部材にまず正方向ねじりモーメントを作用させ、続いて負方向のねじりモーメントを作用させると、負方向のねじりモーメントによる初ひびわれ耐力は、正方向の初ひびわれ耐力に比べて低下することが明らかとなった。また、負方向のひびわれ耐力の低下の割合は、正方向にねじりモーメントを加えた際の最大ねじり角に大きく影響される。

(2) 交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材の終局耐力は、一方向ねじりモーメントを受ける場合の終局耐力に比べて低下し、この傾向は鉄筋比の大きい場合ほど顕著に現われた。

(3) 交番ねじりモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材のひびわれ幅は鉄筋の平均ひずみと線形的な関係となり、従来のように、鉄筋の平均ひずみでこの種部材のひびわれ幅の制御が可能であることが明らかとなった。

(4) 交番ねじりモーメントを作用させた場合の荷重履歴曲線より得られるエネルギー消費量および等価粘性減衰係数は、かぶりコンクリートの剥離現象と密接な関係にあり、このことからも、かぶりの剥離現象がこの種部材の力学挙動に大きな影響を及ぼすことが明らかと

なった。

(5) 従来、実験を中心に論議してきた交番ねじりモーメントに対する鉄筋コンクリート部材の力学挙動を、本解析では交番載荷時の材料モデルを適用することにより、ほぼ定量的な評価を可能とした。今後、この種部材における除荷時、再載荷時のコンクリートおよび鉄筋の材料特性が正確に把握されれば、さらに精度は向上すると思われた。

謝 辞：本研究の実験実施、データ整理にあたり井上毅氏（東京工業大学土木工学科教務職員）および当時卒論生であった奥村一正氏（鹿島建設（株）技術研究所）には昼夜を惜しまぬ協力を得ました。また、本実験の一部は日本スパンクリート協会助成金に依りました。ここに、深く謝意を表します。

記 号 説 明

- f_c : コンクリートの圧縮強度
- f_{cr} : コンクリートの引張強度
- ϵ_{ds} : 部材表面の主圧縮ひずみ
- ϵ_d : 平均主圧縮ひずみ
- ϵ_p : 最大圧縮応力時の圧縮ひずみ
- $\epsilon_0 := 0.002$
- ϵ_1 : 主引張ひずみ
- ϵ_{cr} : ひびわれ発生時の主引張ひずみ
- ϵ_{BU} : 付着限界ひずみ
- ϵ_s : 鉄筋のひずみ
- ϵ_{dsmax} : 部材表面の最大主圧縮ひずみ
- ϵ_{dmax} : 平均主圧縮ひずみの最大値
- ϵ_{1max} : 最大主引張ひずみ
- ϵ_{smax} : 鉄筋の最大ひずみ
- ϵ_{dyr} : 圧縮時の残留ひずみ
- ϵ_{1yr} : 引張時の残留ひずみ
- ϵ_{sys} : 鉄筋の残留ひずみ
- σ_d : 主圧縮応力
- σ_r : 主引張応力
- σ_s : 鉄筋の応力
- σ_{sy} : 鉄筋単体の降伏点応力
- E_{lc} : コンクリートの弾性係数
- E_s : 鉄筋単体の弾性係数

参 考 文 献

- 1) Rausch, E. : Design of Reinforced Concrete in Torsion, Technische Hochschule Berlin, pp. 53, 1929.
- 2) Lessig, N. N. : Determination of Load-Carrying Capacity of Rectangular Reinforced Concrete Elements Subjected to Flexure and Torsion, Trudy No. 5, Institut Betonai Zhelezabotona (Concrete and Reinforced Con-

- crete Institute) Moscow, pp. 5~28 (in Russian), Translated by Portland Cement Association, Foreign Literature Study, No. 371.
- 3) Mitchell, D. and Collins, M. P. : Diagonal Compression Field Theory—A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion, ACI Journal, pp. 396~408, Aug. 1980.
 - 4) Hsu, T. T. C. and Mo, Y. L. : Softening of Concrete in Torsional Members, Univ. of Houston, Civil Eng. Dept., Research Report, pp. 1~107, March 1983.
 - 5) 長瀬重義・李承漢・岡本享久：鉄筋コンクリート部材のねじり耐荷機構に関する一考察, 土木学会論文集, 第390号/V-8, pp. 179~188, 1988年2月。
 - 6) 二羽淳一郎・檜貝 勇：コンクリートのテンションスティフネスを考慮したRC部材の純ねじり解析, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 第2号, pp. 91~96, 1987.
 - 7) Jakobsen, B., Hansen, E. H. and Holand, I. : Cyclic Torsion Tests of Concrete Box Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 803~822, Apr. 1984.
 - 8) 児島孝之・田中玲光：正負交番ねじり・軸力を受ける鉄筋コンクリート部材に関する一実験, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 337~338, 1985.
 - 9) 児島孝之・高木宣章・田中玲光：正負交番ねじりを受ける鉄筋コンクリートT型はりの終局強度に関する一実験, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 793~796, 1986.
 - 10) 狩野芳一・早瀬元明・福田頌治：正負繰返しのねじりと曲げせん断を受けるRC部材の耐力・韌性, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 797~800, 1986.
 - 11) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear, IABSE Colloquium Advanced Mechanics, No. 115, pp. 113~122, June 1981.
 - 12) 佐藤稔雄・白井伸明：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その6, その7), AIJ大会概要集, pp. 1615~1618, 1978.
 - 13) 玉井真一・島 弘・出雲淳一・岡村 甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係, 土木学会論文集, 第378号/V-6, pp. 239~247, 1987年2月。
 - 14) Maekawa, K., Okamura, H. and Izumo, J. : Reinforced Concrete Plate Element Subjected to Cyclic Loading, IABSE Colloquium Delft, August, 575~590, 1987.

(1988. 6. 17・受付)