

軸力とねじりを受けるRC棒部材の破壊特性に関する研究

佃 英明*¹ 田村隆弘*²

STUDY ON FRACTURE MECHANISM OF R/C MEMBER SUBJECTED TO AXIAL FORCE AND TORSION

Hideaki TSUKUDA*¹ Takahiro TAMURA*²

Abstract

This paper reports on fracture mechanism of R/C member subjected to torsional force and axial force (tension). As the loading conditions in the analytical study the arm length of moment 0.1m and 0.4m are selected, and the axial tensile force is induced to 10KN,15KN and 20kN(tension) and 50KN,75KN,100KN and 150KN(compression), respectively.

From the results of numerical simulation, it is observed that the torsional loading capacity and the torsional angle are changed by the axial force. However, the axial force effects very slight to the ultimate strength of R/C member, in the results of numerical study.

Key Words : torsion , axial force, torsional moment, FEM

1. 序論

近年、コンクリート構造物は高速道路のインターチェンジなどに見られるようななだらかな曲線構造のようにその形状の複雑化が進んでいる。我が国では、多発する地震などの災害による構造部材の破壊と、それによる被害が急増していることから、複雑な形状をする構造物の耐荷性能や破壊特性について把握することは急務である。構造物が地震などの非常に大きな水平力あるいは鉛直力を受けた時、部材はねじりモーメント・曲げモーメント・せん断力・軸力といった複数の力（断面力）をほぼ同時に受ける。このような複数の力が同時に作用することを「組合せ力」と呼ぶ。R/C構造物が単一の力（断面力）を受けることはまれである。この「組合せ力」を構造物、またはその部材が受けた時、その耐力は、単一の力（断面力）を受けた場合に比較し著しく低下する。本研究では、この「組合せ力」の中で、軸力とねじりが部材に同時に作用した場合について、部材の破壊までの挙動を解析により調査する。ここでは有限要素法を用いた解析用ソフト¹⁾を利用して先に実施した実験と同様の条件で解析を行った。

解析結果はねじりモーメントと部材回転角の関係で確認し、これにより破壊挙動を評価した。

角永らは、「ねじり・曲げ・軸方向引張力を受けるR/C部材の研究」を行っている²⁾。そこでは、複鉄筋長方形断面（高さ200mm、幅100mm、全長1800mm）の梁供試体にWINGと呼ばれる張り出し部を設け（WINGの位置は供試体の両端から600mm）、その部分を載荷点とすることでねじりを作用させた。載荷試験中は、梁が破壊に至るまで鉛直変位を除々に増加させていき、各荷重ステップにおいて荷重、引張鉄筋ひずみ、コンクリート上縁ひずみを測定している。このように供試体にねじり・曲げ・軸方向引張力を加えることにより、複雑な応力下にある部材の破壊性状を、変位やひずみの状態、ひび割れの方向や進展状況から確認した。しかし、ここでは作用している断面力が、モーメント、せん断力、軸力、ねじりモーメントと4種類であったために破壊に対するそれぞれの影響が明確になされていない。たとえば、実験において部材中心部分（載荷点間）では、ねじりによるひび割れが確認されたが、支点と載荷点の領域においてもせん断と思われるひび割

*1 環境建設工学専攻

*2 土木建築工学科

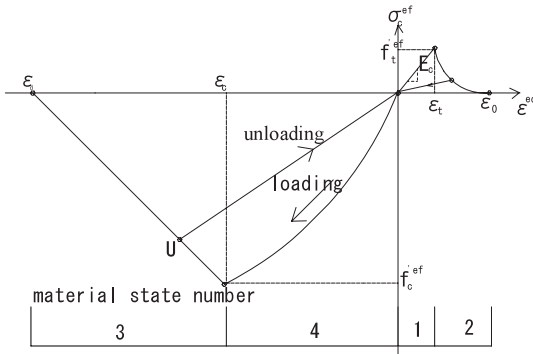


図-1 等価の単軸の応力-ひずみ図

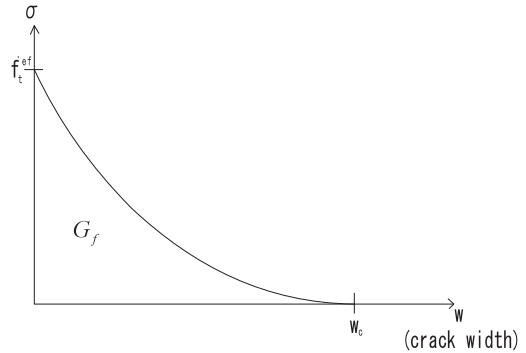


図-2 ひび割れ拡大則

れが発生しており、部材の破壊プロセスや破壊メカニズムを明確に説明することができていない。

2. 解析手順

2.1 解析概要

今回の解析は、ねじりと軸力を受ける R/C 部材に対して 3次元ソリッド要素を用いた 3次元弾塑性解析を行う。主鉄筋は、埋め込み型鉄筋でモデル化し、せん断補強筋（スターラップ）は、分散型鉄筋でモデル化する。コンクリート及び鉄筋の構成則は、実験結果に基づき定義する。また、コンクリート及び鉄筋の自重も考慮する。また、軸力は自重を設定する段階で設定し、各解析ステップで一定の軸力を与える。部材及び鉄筋に定義するメッシュ分割条件は、梁を高さ方向に 4 分割し、6 面体要素とし、主鉄筋を 1 分割とした。解析は変位制御で行い、非線形解法として、修正 Newton-Raphson 法を用いる。

2.2 SBETA (解析ソフト) の概念

SBETA は以下のようなコンクリートの特性を考慮している。線形の圧縮特性は硬化と軟化を含み、引張のコンクリートの破壊は非線形破壊構造に基づいている。また、2 軸の引張強度の基準、ひび割れが入った後の圧縮力の減少、引張軟化の効果、ひび割れ後のせん断強さの減少、2つのひび割れモデル：固定ひび割れ方向と回転ひび割れ方向を考慮し、完全なコンクリートと鉄筋の付着は分散鉄筋の概念によって仮定されている。付着すべりのないマクロレベルでは、引張硬化を含むものは別として直接モデル化される。しかしながら、もしコンクリートがひび割れが生じるか壊れると一定の間隔を超えるコンクリートに対して非常に大きなスリップに関する鉄筋の変位が現れる。

2.3 等価の単軸の法則

2 軸応力状態のコンクリートの非線形特性は有効応力 σ_c^{ef} と表される等価の単軸のひずみ ε^{eq} によって述べられる。有効応力は多くの場合、主応力である。平面の応力状態のポアソン効果を除くために等価の単軸のひずみが導入される。等価の単軸のひずみはひずみとして考えられ、i 方向と結びつけて考える弾性係数 E_{ci} と一軸試験による応力 σ_{ci} によって表される。コンクリートの完全な等価の単軸の応力-ひずみ図を図-1 に示す。

2.4 ひび割れ後の引張り

2つのタイプの式がひび割れが入り始めたら使用される。一つの式は、架空のひび割れのモデルはひび割れの拡大則と破壊エネルギーに基づいている(図-2 参照)。もう一つの式は、応力-ひずみは物質的な点と関係している。この式は通常のひび割れの拡大には適さず、特別な場合でのみ使用されるべきである。SBETA に用いられている代表的な式を以下に示す³⁾。

$$\frac{\sigma}{f_t^{ef}} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_c} \right)^3 \right\} \exp\left(-c_2 \frac{w}{w_c}\right) - \frac{w}{w_c} \left(1 + c_1^3 \right) \exp(-c_2) \tag{1}$$

$$w_c = 5.14 \frac{G_f}{f_t^{ef}}$$

w はひび割れ幅で、w_c は完全な応力の解除の時のひび割れ幅である。σ はひび割れ位置での応力である。c_1 = 3, c_2 = 6.93 は一定値である。G_f は自由応力のひび割れの単位域を作り出すのに必要な破壊エネルギーであり、f_t^{ef} は破壊関数による有効引張力である。

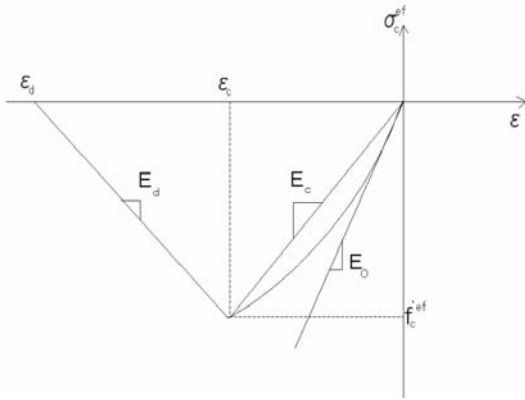


図-3 圧縮の応力—ひずみ図

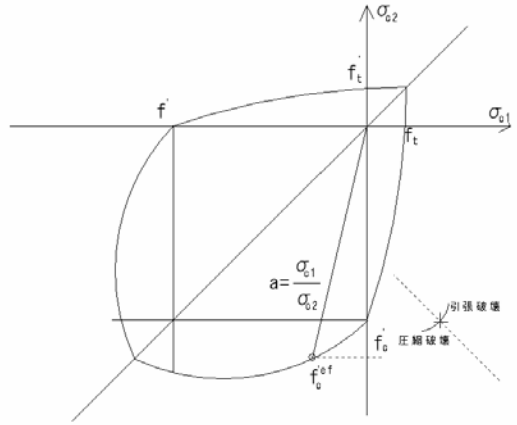


図-4 2軸応力の破壊基準

2.5 最大応力前の圧縮

CEB-FIP Model Code 90⁹⁾によって推奨されている式(2)は図-3の圧縮コンクリートの応力—ひずみの曲線が採用されているもので、高強度コンクリートにも適切である。

$$\sigma_c^{ef} = f_c^{ef} \frac{kx - x^2}{1 + (k-2)x}, \quad x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c}, \quad k = \frac{E_o}{E_c} \quad (2)$$

上式の記号の意味は、

- σ_c^{ef} - コンクリートの圧縮最大応力
- f_c^{ef} - コンクリート有効圧縮力
- x - 規格化したひずみ
- ε - ひずみ
- ε_c - 最大応力 f_c^{ef} のひずみ
- E_o - 初期弾性モデル
- E_c - 最大応力の割線弾性係数

k はすべて正の値をとり、1より大きいか等しい。例えば、k = 1は線形、k = 2は放物線である。上の仮定の結果として、分配される損失が最大応力になる前に考えられている。局所的な破壊に反して最大応力の後に考えられている。

2.6 コンクリートの2軸応力の圧縮破壊基準

KUPFER(1969)による2軸応力の圧縮破壊基準⁵⁾は図-4に見られるようなものが使用されている。圧縮の応力状態の破壊作用は、

$$f_c^{ef} = \frac{1 + 3.65a}{(1 + a)^2} f_c', \quad a = \frac{\sigma_{c1}}{\sigma_{c2}} \quad (3)$$

σ_{c1}, σ_{c2} はコンクリートの主応力で、f_c'は単軸の円柱による圧縮強度である。引張—圧縮の状態での破壊作用は、線形性の力が減少している引張—圧縮の範囲の中の点 σ_{c1} = 0, σ_{c2} = f_c'から線形的に続く。

$$f_c^{ef} = f_c' \gamma_{ec}, \quad \gamma_{ec} = \left(1 + 5.3278 \frac{\sigma_{c1}}{f_c'} \right), \quad (4)$$

$$1.0 \geq \gamma_{ec} \geq 0.9$$

γ_{ec} は引張力の主方向1による圧縮力の主応力2の要素の減少である。

2.7 コンクリートの2軸応力の引張破壊基準

引張—引張の状態での引張力は一定で単軸の引張力 f_t'と等しい。引張—圧縮の状態での引張力は以下の関係によって単純化される。

$$f_t^{ef} = f_t' \gamma_{et} \quad (5)$$

γ_{et} は圧縮力の方向2による引張力の方向1の要素の減少である。減少作用は式(6)、(7)のように表される。

$$\gamma_{et} = 1 - 0.8 \frac{\sigma_{c2}}{f_c'} \quad (6)$$

$$\gamma_{et} = \frac{A + (A-1)B}{AB}, \quad B = Kx + A, \quad x = \frac{\sigma_{c2}}{f_c'} \quad (7)$$

式(7)の関係は引張力の線形性の減少量と双曲の減少量である。2つのあらかじめ定義された双曲線のせん

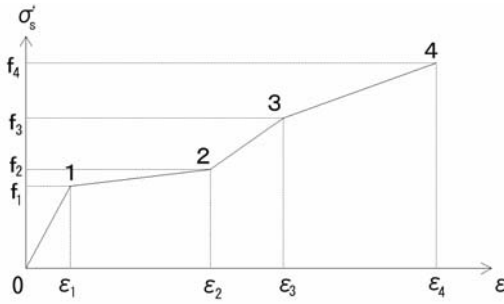


図-5 多線型構成則

断力は γ, x の中間点によって与えられる. 一定の B と A は双曲線のせん断力を定義している.

2.8 多線型法則

鉄筋コンクリートを有限要素解析する場合に, 1本1本の鉄筋を個別に棒要素として離散化する方法と複数の鉄筋をある特徴をもった鉄筋群としてモデル化する分散型鉄筋要素を利用する方法がある.

多線型則は図-5に見られるような4つの線で定義される. この法則は, 弾性状態, 屈した水平域, 硬化と破壊の剛性の性質のすべての段階のモデルを考慮に入れる. 多重線は4つのポイントによって定義され, 入力によって指定される. 上で述べられた応力-ひずみの法則は離散と同様に分散型鉄筋にも使用される. 分散型鉄筋はさらに, 鉄筋比 p と図-6のような角度 β のような2つの要素を求める.

分散鉄筋の間隔 s は非常に小さいと仮定される. 分散鉄筋での応力はひび割れで評価され, 引張軟化による応力 σ_{is} の部分も含まなければならない.

$$\sigma'_{scr} = \sigma'_s + \sigma_{is} \tag{8}$$

σ'_s はひび割れ (分散型鉄筋での鉄筋の応力) の間での鉄筋の応力であり, σ'_{scr} はひび割れの剛性の応力である. もし引張軟化がなければ $\sigma_{is} = 0$, $\sigma'_{scr} = \sigma'_s$ が指定される. 分散型鉄筋の場合, 剛性の応力は常に0である.

2.9 3D立体要素

ATENA の有限要素のライブラリーは図-7~9のような3D立体要素のグループを含む. 図-7は4~9個の節点をもつ四面体要素 CCIsoTetra, 図-8は6~15個の節点をもつくさび型の要素 CCIsoWedge, そして, 図-9は, 8~20個の節点をもつ従来型の要素 CCIsoBrick である.

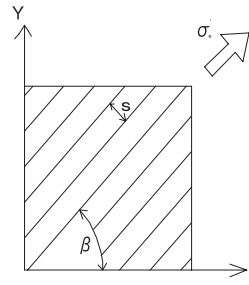


図-6 分散型鉄筋のパラメータ

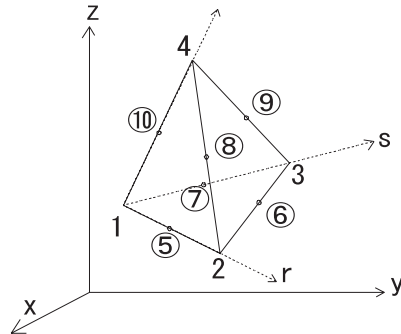


図-7 CCIsoTetra 要素の構成

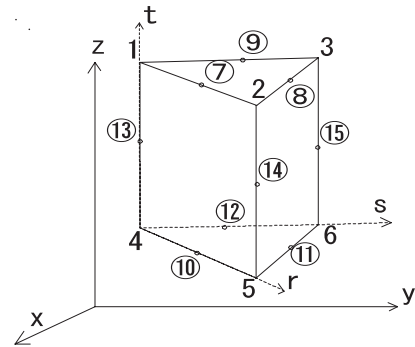


図-8 CCIsoWedge 要素の構成

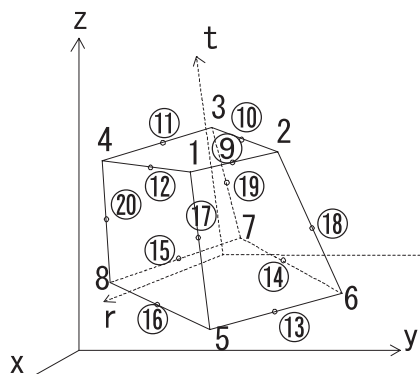


図-9 CCIsoBrick 要素の構成

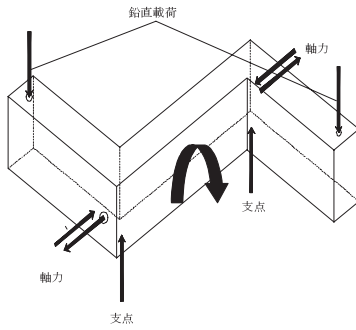


図-10 純ねじりを受ける部材の荷重状況

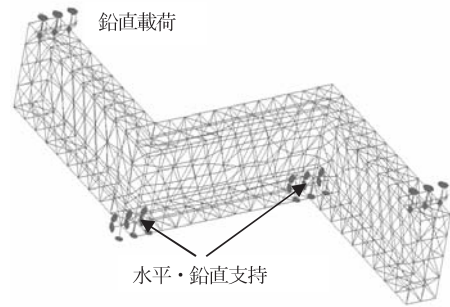


図-11 部材の概略図および支持条件, 境界条件

2. 10 解析条件

図-10 に示すような, 荷重条件下にある R/C 部材を図-11 のようにモデル化した. 解析条件として, 部材に使用した鉄筋は, 主鉄筋・圧縮鉄筋として D10 を各 3 本用い, それぞれかぶり厚は 3cm として配置した. また, ねじり補強筋として, $\phi 6$ の閉合スターラップを試験領域に間隔 10cm で配置した. 解析に用いた材料定数を表-1 に示す. ねじりによる破壊よりも先にせん断破壊が起きないように, 試験領域以外の箇所にもスターラップを配置した. 荷重点による破壊挙動の変化を確認するために, 荷重位置をモーメントアーム長 (MA) で 400, 100(mm) に設定した. また, ねじりと軸力による破壊挙動の変化を確かめるために, 表-2 のように軸方向引張力及び軸方向圧縮力を作用させた状態での解析をそれぞれ行った.

2. 11 解析結果

図 12-a, b, c, d は, 解析によって得られたねじりモーメント (縦軸) と部材の回転角度 (横軸) の関係を示している. 図 12-a, b は, 軸方向圧縮力を受ける場合について, MA=100 と MA=400 について示しているが, 初期の勾配やポストピークの挙動等, 明らかに MA の違いにより破壊性状が異なることが分かる. このことは, 軸方向引張力を受ける場合 (図 12-c, d) についても同様である. 理論上は, モーメントアームが十分に剛であれば, MA の大きさは影響しないが, コンクリートの張り出しであるためにこの部分の材料降伏が発生していることが推測される. また, 解析では軸方向力を加えることによる耐力の変化は圧縮, 引張りのいずれにおいても顕著には表れなかった. しかし, 軸方向圧縮力を加えることにより耐力が大きくなり, 軸方向引張力を加えると耐力が低下する現象は傾向としては示された.

表-1 解析で用いた材料定数

コンクリート圧縮強度 (MPa)	27.0
鉄筋の弾性係数 E_s (GPa)	204
鉄筋の引張強度 f_u (MPa)	451
鉄筋の降伏強度 σ_s (MPa)	334

表-2 純ねじりを受ける部材の解析条件対照表

モーメントアーム MA (mm)	軸方向 圧縮力 (kN)	軸方向 引張力 (kN)
100	0	0
400	0	0
100	50	10
400	50	10
100	75	15
400	75	15
100	100	20
400	100	10
100	150	-
400	150	-

3. 結論

軸力とねじりを受ける鉄筋コンクリート部材について, FEM 解析を行った結果の範囲で結論をまとめる.

- 1) モーメントアーム長を変化させた場合に, 部材のねじり耐力が変化した. このことは, 部材の耐力が, 純ねじり部分のみでなくモーメントアーム部分の状態の影響も受けることを示している.
- 2) ねじりを受ける部材に同時に圧縮応力が発生する場合に耐力が上昇し, 引張応力が発生する場合に耐力が低下することが確認できた. しかし, 圧縮においても引張においても, 部材の最大耐力に対する影響はわずかであった.

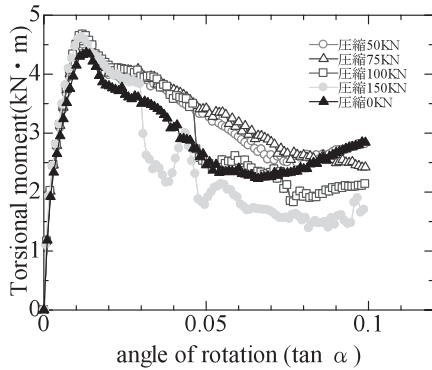


図 12-a ねじりと軸方向圧縮力を受ける梁(MA100)

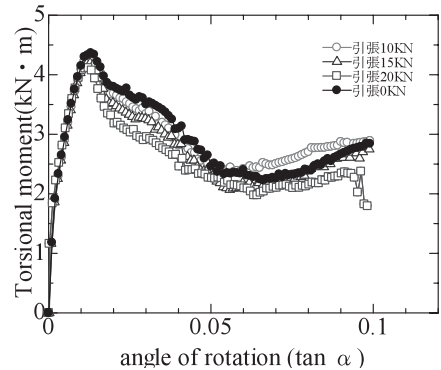


図 12-c ねじりと軸方向引張力を受ける梁(MA100)

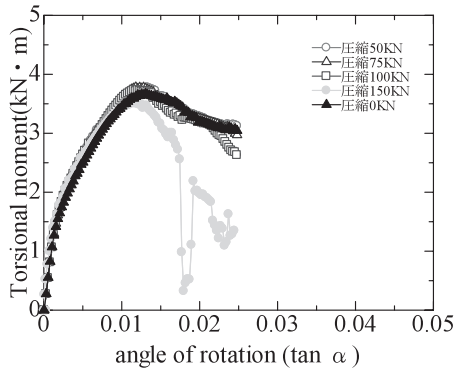


図 12-b ねじりと軸方向圧縮力を受ける梁(MA400)

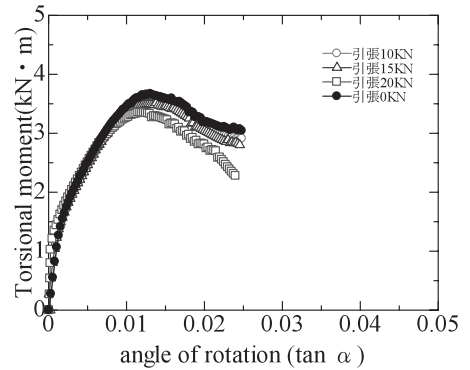


図 12-d ねじりと軸方向引張力を受ける梁(MA400)

文献

- 1) Vladimir Cervenka, Libor Jendele and Jan Cervenka: ATENA Program Documentation (2005. 3)
- 2) Toshiaki Kadonaga, Tsunemi Shigematu, Takahiro Tamura and Takashi Hara, :Study on R/C Member Subjected to Torsion, Bending and Axial Tension, The Third International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seoul.Korea, CDROM (2004. 9)
- 3) Hordjik, D.A., Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctor dissertation, Delft University of Technology, ISBN90/9004519-8, (1991)
- 4) CEB-FIB Model Code 1990, First Draft, Committee Euro-International du Beton, Bulletin information No.195, 196, Mars. (1990)
- 5) Kupfer, H., Hilsdorf, H.K., Rusch, H., Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal ACI, Proc.V.66, No.8, Aug., pp.656-666, (1969)

(2006.9.11 受理)