

**投稿論文 (和文)**  
**PAPERS**

# ねじりと純曲げの組合わせ荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力

佐伯 昇\*・高田宣之\*\*・志村和紀\*\*・藤田嘉夫\*

スペーストラス理論を發展させて、ねじり荷重下の破壊パターンを三つに分類し、これを基本としてねじりと純曲げの組合わせ荷重下の耐力の解析を試みたものである。算定にはスペーストラス理論によって求めたねじり応力を曲げによる応力と累加させる方法を用いており、破壊パターンもねじりによる破壊パターンに対応して、コンクリート、軸方向鉄筋、横方向鉄筋の三つの破壊に分れ、解析は実験結果とよい対応を示していた。

**Keywords** : reinforced concrete, torsion and bending, flexural and torsional resistance, space truss model

## 1. まえがき

地上、地下および海洋空間に大規模なコンクリート構造物が用いられるようになるに伴い、立体性、曲線性などによってねじり作用を受ける場合が多くなり、ねじり作用を伴った耐力を精度良く評価することが必要になってきている。また、設計法も許容応力度法から限界状態設計法に移行し、ねじり作用を受けるせん断耐力を、適正な安全率を確保して合理的に設計することが求められている。一方、地震時におけるコンクリート構造物の損傷としてせん断破壊があり、構造物の立体化、大型化に伴い曲げ、曲げせん断、ねじりせん断作用の組合わせを考慮したせん断耐力を、体系的に算定することが要求されてきている。

鉄筋コンクリート部材のねじりの耐力は、1929年、Rausch<sup>1)</sup>によって発表されて以来、数多くの研究がなされてきた。これらには大きく分けて二つの流れがある。一つはSpace Truss理論(立体トラス理論)<sup>2), 3)</sup>でありもう一つはSkew-Bending理論(斜め曲げ理論)<sup>4)-6)</sup>である。立体トラス理論は力の釣合式が簡単であり、また、変形剛性<sup>7), 8)</sup>の誘導にも便利であることから多くの論文に適用されている。さらにねじりと曲げとの組合わせ荷重下の耐力の算定にも適用でき、複合荷重下にも応用できる汎用性を持っている。

一方、斜め曲げ理論は斜めの破壊面に対してモーメントの釣合いを取る曲げ理論であり、算定式が複雑になる傾向がある。

わが国においてもねじりに関する多くの研究があり、立体トラス理論を基本とした鉄筋コンクリート部材の変形、耐力の解析には泉<sup>9)</sup>、岡本<sup>10)</sup>、長瀧<sup>11)</sup>、著者<sup>12)</sup>、

などの研究があり、さらにコンクリートのsofteningを考慮したものに長瀧<sup>13)</sup>、テンションスティフネスを考慮した二羽ら<sup>14)</sup>の研究、立体トラス理論と斜め曲げ理論を考慮したねじりに関する設計法には泉ら<sup>15)</sup>の研究がある。また変形適合ねじりに対する耐力には児島ら<sup>16)</sup>の研究がある。

本研究では立体トラス理論を發展させてねじり荷重下の破壊パターンを三つに分類し、これを基本として曲げ-ねじり荷重下の耐力の解析を試みたものである。算定の方法は立体トラス理論によって求めたねじり応力を曲げによる応力に累加させる方法を用いており、破壊パターンもねじりによる破壊パターンに対応して、コンクリート、軸方向鉄筋および横方向鉄筋の破壊を主体とした三つに分類される。さらにこれらの解析により求めた破壊パターンを実験により照査し、解析についての有効性を確かめている。

## 2. ねじりと純曲げを受ける部材の耐力の解析<sup>17)</sup>

### (1) 解析の条件

#### a) 純ねじりの破壊

先の論文で発表<sup>12)</sup>したように、ねじり荷重のみの破壊パターン(付録)は立体トラス理論を用いて、力の釣合によって三つに分類している。すなわち横方向鉄筋、軸方向鉄筋およびコンクリート圧壊である。鉄筋による破壊には降伏強度を基準としている。またせん断流の仮想厚さ、中心線などについては文献12)に述べている。

#### b) 載荷過程

ねじりと純曲げによる組合わせ荷重下の載荷過程として三つの場合が考えられる。第1にねじり荷重が単独にかかり、その後純曲げがかかる場合、第2には第1の逆で、純曲げがかかり、その後ねじり荷重がかかる場合、第3にはねじり純曲げ荷重がある一定の比率でかかる場合である。ひびわれ発生前においてはこれらの三つの場

\* 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科  
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

\*\* 正会員 北海道大学助手 工学部土木工学科

合は同じ挙動をすると考えられるが、ひびわれ発生以後の荷重下では各々が微妙に違うと考えられる。第2、第3の場合は曲げ圧縮ゾーンが働くためひびわれが生じない部分あるいは生じにくい部分が残っているのに対し、第1の場合は全断面にねじりひびわれが形成され、第2、第3に比較して一般に耐力が小さく現れると考えられる。

ここでは第1の場合を想定して解析を行い、3つの荷重過程を考えた場合に最小と考えられる耐力を求めた。ただし実際の構造物に荷重がかかる場合においては第3の場合と考えられるので実験ではねじりと純曲げ荷重を一定の比率で載荷している。

c) ねじり-純曲げ荷重下

ねじり-純曲げ荷重下では、まずねじり荷重のみによる軸方向鉄筋応力、軸方向鉄筋応力およびコンクリート応力をそれぞれ付録の式 (A1), (A2), (A3) から応力に変換して求め、次にこれを原点として曲げ荷重を載荷し、鉄筋の応力-ひずみ曲線はひずみ硬化を考慮し、またコンクリートの応力-ひずみ曲線は2次放物線として解析を行っている。

(2) 破壊パターン

破壊パターンは軸方向鉄筋の破壊が主体となるもの、コンクリートの圧壊が主体となるものおよびスターラップの破壊が主体となるものである。

a)  $k_0^2 \leq \beta_1$  かつ  $k_0^2 \leq \beta_1 \beta_2 - 1$  ..... (1)

軸方向鉄筋が主体で破壊する場合で、 $\bar{T}$ - $\bar{M}$ 座標で $\bar{T}=1$ で軸方向鉄筋で破壊し、これから出発して $\bar{M}=1$ にほぼ直線で結ばれる相関曲線となる。

b)  $k_0^2 \geq \beta_1$  かつ  $1/k_0^2 \leq \beta_2 - 1$  ..... (2)

スターラップの破壊が主体となる場合で、 $\bar{T}=\beta_0$  ( $\bar{M}=0$ ) でスターラップの破壊が起こり、曲げの影響を受けずに水平な直線となる。曲げが大きくなると曲げ主体の破壊が起こる。

c)  $k_0^2 \geq \beta_1 \beta_2 - 1$  かつ  $1/k_0^2 > \beta_2 - 1$  ..... (3)

コンクリートの圧壊が主体となる場合で、 $\bar{T}=\beta_c$  ( $\bar{M}=0$ ) でコンクリートの圧壊が起こり、曲げが増加しても、ほぼ水平な直線となり、曲げが大きくなるとほぼ直線的にねじり耐力が減少する。

ここで、

$\bar{T} = T/T_{BL}$ ,  $\bar{M} = M/M_{Bcal}$  ..... (4)

$\beta_0 = \beta_1/k_0^2$ ,  $\beta_c = \beta_1 \beta_2 / (k_0^2 + 1)$  ..... (5)

(3) 中立軸の決定

コンクリートの応力-ひずみ曲線は次式を用いる。

$f = 4/7 \times E_c \epsilon_c (1 - E_c \epsilon_c / (7 f_{CB}))$  ..... (6)

$\bar{T}$ のねじり荷重がかかると式 (A3) よりコンクリートに作用する圧縮応力が求まり、これを橋軸方向の成分に直すと $\bar{T} \cos(\alpha) / \beta_c$ となる。すなわち、図-1に示す

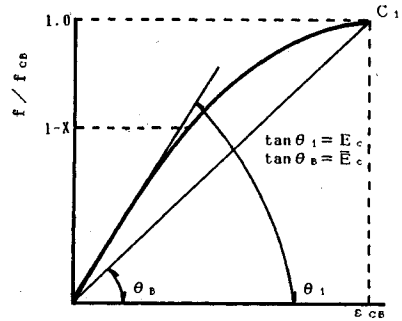


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

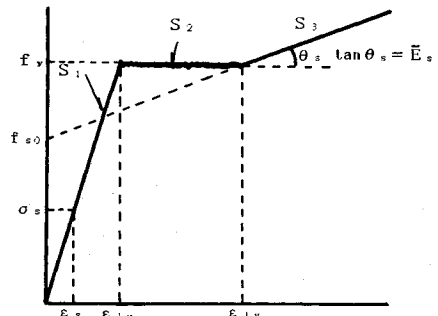


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

ように、ねじり荷重によって $1-X$ まで応力が上昇することになる。

ここで、

$X = 1 - \bar{T} \cos(\alpha) / \beta_c$  ..... (7)

$C_1$ : コンクリートの破壊点

$\epsilon_{CB}$ : 終局ひずみ

$E_c$ : ヤング率

$\bar{E}_s$ : 終局時の割線ヤング率

鉄筋の応力-ひずみ曲線には図-2に示す曲線を用い、ねじりの荷重によって軸方向鉄筋は $(\epsilon_s, \sigma_s)$ の点まで上昇する。 $S_1, S_2, S_3$ は任意点、 $\bar{E}_s$ は硬化領域のヤング率である。

鉄筋比およびねじり成分によって中立軸はa)~c)に分けられる。

a) は引張鉄筋がひずみ硬化域に入る場合でその始点が図-2の $\epsilon_{ly}$ である。コンクリートが破壊する $f_{CB}$ と $\epsilon_{ly}$ とが同時に起こる鉄筋比が力の釣合いから求まる。これが式(8)の等式である。この式に比べて引張鉄筋比 $p$ が少なくなるとひずみ硬化域に移行し、大きくなると降伏領域に入る。またこの始点はコンクリートおよび鉄筋のひずみ $\epsilon_{CB}, \epsilon_{ly}$ が確定していることから中立軸の位置 $k^*$ が決定される。 $S_3$ の直線を用い、力の釣合条件から式(9)が求められる。

a)  $p \eta_1 \leq \eta_2 + p' \eta_3$  のとき ..... (8)

図一1, 図一2のそれぞれ  $C_1, S_3$  の状態で破壊する場合で中立軸は次式で決定される。

$$k = A + \sqrt{A^2 + B} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= m - \bar{m}\bar{T}, \quad \eta_2 = \alpha x k^* \\ \eta_3 &= (k^* - \bar{a})n_s y / k^*, \quad k^* = y / (y + l_n - l_m) \\ l_m &= \bar{m}\bar{T} / n_s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \{p(m_0 - \bar{n}y) - p'n_s y\} / (2\alpha x) \\ B &= \{p\bar{n}y + p'\bar{a}n_s y\} / (\alpha x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} y &= 1 - 3.5n_c(1 - \sqrt{x}) \\ m_0 &= \bar{m}_0 - \bar{m}\bar{T}(1 - \bar{n}/n_s) \\ m &= f_u / f_{CB}, \quad n_c = \bar{E}_c / E_c \\ \bar{m}_0 &= f_{s0} / f_{CB}, \quad n_s = E_s / \bar{E}_c \\ \bar{n} &= \bar{E}_s / \bar{E}_c, \quad \bar{m} = \bar{f}_{u'} / f_{CB} \\ \bar{a} &= a' / d, \quad l_n = \varepsilon_{1u'} / \varepsilon_{CB} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$p$ : 引張鉄筋比

$p'$ : 圧縮鉄筋比

$f_u$ : 引張鉄筋の降伏点

$f_u'$ : 圧縮鉄筋の降伏点

$\bar{f}_{u'}$ : 軸方向鉄筋の降伏点

$f_{CB}$ : コンクリートの圧縮強度

圧縮鉄筋には圧縮力が作用するのが普通であるが、圧縮鉄筋として配筋されている場合でも、ねじり荷重による引張力あるいは中立軸が  $a'$  より上になると、引張力が働くことになる。圧縮鉄筋が弾性挙動範囲内では圧縮力あるいは引張力が作用したとしても式(9)で十分であるが、圧縮降伏が起きたり引張降伏が生ずると、釣合式に降伏点を入れる必要がある。ひずみ分布およびひずみの降伏点により圧縮鉄筋の圧縮および引張降伏条件がきまる。降伏応力を考慮して釣合条件より中立軸が求まる。圧縮降伏の場合は式(13)、引張降伏の場合は、式(14)による。

圧縮鉄筋が圧縮領域で降伏する場合、すなわち  $(k - \bar{a})y / k \geq l_n'$  のときの中立軸は、式(9)の  $A, B$  を次式にする。

$$\left. \begin{aligned} A &= \{p(m_0 - \bar{n}y) - p'(m' + \bar{m}\bar{T})\} / (2\alpha x) \\ B &= \bar{n}y p / (\alpha x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

また、圧縮鉄筋が引張応力で降伏する場合、すなわち  $(\bar{a} - k)y / k \geq l_n'$  のときの中立軸は、式(9)の  $A, B$  を次式にする。

$$\left. \begin{aligned} A &= \{p(m_0 - \bar{n}y) + p'(m' - \bar{m}\bar{T})\} / (2\alpha x) \\ B &= \bar{n}y p / (\alpha x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

$$\left. \begin{aligned} m' &= f_u' / f_{CB} \\ l_n' &= \varepsilon_{1u'} / \varepsilon_{CB} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

b)  $\eta_2 + \eta_3 p' \leq p\eta_1 \leq \eta_4 + \eta_5 p'$  のとき ( $C_1, S_2$  の状態で破壊する場合).....(16)

鉄筋は降伏場であり、a)と同様に  $\varepsilon_{CB}, \varepsilon_{1u}'$  で降伏開始点の中立軸の位置  $k_0^*$  が決まり、この点の力の釣合条件から、式(16)の2項目と3項目の等式が求まる。主鉄筋比  $p$  がこの等式より小さければ降伏場に入り、大きければ鉄筋は弾性域に入り、この後の解析のc)の条件になる。

$k$  は式(9)の  $A, B$  に次式を入れる。

$$\left. \begin{aligned} A &= \{p(m - \bar{m}\bar{T}) - p'n_s y\} / (2\alpha x) \\ B &= \bar{a}n_s y p' / (\alpha x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \eta_4 &= \alpha x k_0^*, \quad \eta_5 = (k_0^* - \bar{a})n_s y / k_0^* \\ k_0^* &= y / (y + l_n' - l_m) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

もし圧縮鉄筋が圧縮領域で降伏する場合、すなわち  $(k - \bar{a})y / k \geq l_n'$  のときは

$$k = \{p(m - \bar{m}\bar{T}) - p'(m' + \bar{m}\bar{T})\} / (\alpha x) \dots\dots\dots (19)$$

もし圧縮鉄筋が引張領域で降伏する場合、すなわち  $(\bar{a} - k)y / k \geq l_n'$  のときは

$$k = \{p(m - \bar{m}\bar{T}) + p'(m' - \bar{m}\bar{T})\} / (\alpha x) \dots\dots\dots (20)$$

とする。

c)  $p\eta_1 \geq \eta_4 + \eta_5 p'$  のとき ( $C_1, S_1$  の状態で破壊する場合).....(21)

$k$  は式(9)の  $A, B$  に次式を入れる。

$$\left. \begin{aligned} A &= -(p + p')n_s y / (2\alpha x) \\ B &= n_s(p + \bar{a}p')y / (\alpha x) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

曲げモーメントは次式のように求まる。

$$M = \alpha k(1 - \beta k)x - (1 - \bar{a})p'n_s y(\bar{a} - k) / k \dots\dots\dots (23)$$

ただし、圧縮鉄筋が降伏する場合は式(23)の右辺の2項目が  $\pm(1 - \bar{a})p'(m' \pm \bar{m}\bar{T})$  となる。土の+は式(13)、(19)の場合、-は式(14)、(20)より中立軸を求めた場合の曲げモーメントである。

ここで  $\alpha, \beta$  はコンクリートの圧縮応力ブロックのそれぞれ面積に対する係数および重心に関する係数を表す。ここでは放物線を過程して  $\alpha = 2/3, \beta = 3/8$  とした。また  $\bar{T} = 0$  のとき曲げのみによる破壊曲げモーメント  $M_{Bcal}$  が求まり、 $\bar{M} = M / M_{Bcal}$  が定まる。

### 3. 実験方法および供試体

実験装置は図一3に示すように曲げ荷重によりねじり変形が拘束を受けないように、荷重桁と供試桁の接点に円弧状受台と球を配置した。桁のねじりによる軸方向の変形による拘束を除くためエキスパンションジョイントを用い、ねじり載荷端の撓角による拘束を除くためユニバーサルジョイントを用いた。ねじり荷重に対する固定端はジャッキでねじり反力を固定し、曲げに対してはヒ

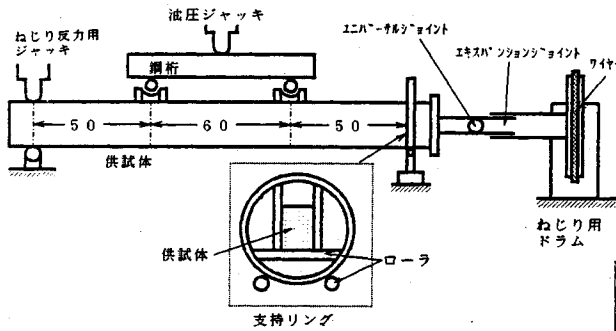


図-3 荷重装置

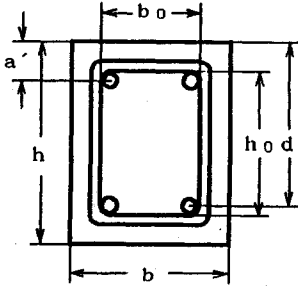


図-4 供試体形状

ンジ支承とした。ねじり荷重端はねじりに対して回転リングによる自由支承であり、回転リング供試体の支持は曲げに対してローラ支承とした。荷重はねじり用ドラムを介してワイヤーロープによりねじりモーメントを作用させ、曲げはオイルジャッキにより2点荷重させた。ねじり角の測定はねじり角測定用の円形板を供試体に固定し、ねじり角に伴う変形を電気抵抗値の変化に置き換え、ねじり角を測定した。ねじり荷重と曲げ荷重をXYレコーダで記録し、ねじり荷重と曲げ荷重の比が一定になるように手で荷重した。また、ひずみゲージによる鉄筋ひずみ、コンクリートひずみを測定した。

実験断面は図-4に示すような、矩形断面で  $b, h, b_0, h_0, d, a'$  はそれぞれ 12, 20, 8.3, 16.3, 17.5, 2.3 cm で一定である。有効厚さ  $t_e$  は先に発表した論文<sup>12)</sup> から 1.31 cm である。鉄筋およびコンクリートの強度、鉄筋量、鉄筋比およびスターラップ間隔を表-1に示す。

C1およびC2シリーズはコンクリート破壊、L1およびL2シリーズは軸方向鉄筋の破壊、Vシリーズはスターラップの破壊が主体のものである。これらの供試体は計算上でそれぞれの破壊パターンを選定したものである。表-2に計算上で用いた諸定数を示す。

#### 4. 実験結果および考察

各シリーズの計算上のねじり耐力および曲げ耐力を表-3に示した。 $\beta_v$  は  $T_{BS}/T_{BL}$  の比であり、 $\beta_c$  は  $T_{BC}/T_{BL}$  の比を示す。式(1)、(2)、(3)を変形すると、 $\beta_c$ 、

表-1 断面諸元 (その1)

供試体 シリーズ	$A_s$ cm <sup>2</sup>	$A_v$ cm <sup>2</sup>	$F_{1y}$ kgf/cm <sup>2</sup>	$F_{1v}$ kgf/cm <sup>2</sup>	$F_{ce}$ kgf/cm <sup>2</sup>	$s$ cm	$p$ %	$p'$ %
C1	3.96	0.71	3704	3757	314	7.5	1.21	0.68
C2	2.85	0.71	3704	3757	304	7.5	0.67	0.67
L1	2.74	0.69	3871	3871	550	7.5	0.68	0.68
L2	3.96	0.71	3704	3757	784	7.5	1.21	0.68
V	3.79	0.30	3752	3750	367	10.0	1.21	0.68

表-2 断面諸元 (その2)

供試体 シリーズ	$m$	$\bar{m}$	$m'$	$\bar{m}_0$	$\bar{n}$	$n_c$	$n_s$	$\beta_n$	$\beta_n'$
C1	11.8	11.9	12.0	8.44	0.411	0.286	27.5	6.86	0.629
C2	12.2	12.3	12.4	8.44	0.411	0.286	25.3	6.86	0.629
L1	7.0	7.0	7.0	6.40	0.080	0.286	8.8	8.70	0.870
L2	4.7	4.8	4.8	8.44	0.411	0.286	11.5	6.86	0.629
V	10.2	10.2	10.2	9.50	0.130	0.286	13.8	8.90	0.870

表-3 耐力の計算値

供試体 シリーズ	$\beta_v$	$\beta_c$	$T_{Bcal}$ kgf・m	$M_{Bcal}$ kgf・m
C1	1.13	0.67	557	1510
C2	1.39	0.84	537	894
L1	1.39	1.32	737	976
L2	1.13	1.67	834	3380
V	0.464	0.871	338	1606

表-4 実験結果

供試体 シリーズ-番号	T		M (=T)		T (=M)		T <sub>max</sub>	
	kgf・m	kgf・m	T <sub>BLcal</sub>	M <sub>Bcal</sub>	M <sub>or T</sub>	T <sub>cal</sub>	M <sub>or T</sub>	T <sub>max</sub>
C1-1	200	1500	0.240	0.994	0.24*	1.15		
C1-2	375	1375	0.450	0.911	0.49*	1.35		
C1-3	380	1440	0.456	0.954	0.48*	1.38		
C1-4	467	195	0.560	0.129	0.23	0.85		
C1-5	492	712	0.590	0.472	0.80	1.06		
C1-6	525	1000	0.629	0.662	0.95*	1.28		
C1-7	535	400	0.641	0.265	0.41	1.00		
C1-8	565	263	0.677	0.174	0.26	1.03		
C1-9	570	538	0.683	0.356	0.52	1.07		
C1-10	590	1025	0.707	0.679	0.96	1.38		
C1-11	575	0	0.689	0	0	1.03		
C2-1	360	700	0.564	0.783	0.72*	1.33		
C2-2	385	650	0.603	0.727	0.83*	1.32		
C2-3	460	213	0.721	0.238	0.33	1.22		
C2-4	475	450	0.745	0.503	0.68	1.13		
C2-5	480	338	0.752	0.378	0.50	0.95		
L1-1	240	760	0.326	0.778	0.42*	1.08		
L1-2	455	330	0.617	0.338	0.55	0.92		
L1-3	590	425	0.801	0.435	0.54	1.21		
L1-4	680	230	0.923	0.236	0.26	1.12		
L2-1	700	1025	0.839	0.303	0.36	0.84		
L2-2	800	1000	0.959	0.296	0.31	0.96		
V-1	200	1142	0.274	0.711	0.39*	1.30		
V-2	390	150	0.534	0.093	0.17	1.15		
V-3	410	430	0.562	0.268	0.48	1.20		
V-4	450	1010	0.616	0.629	0.98*	0.99		

\*印はT/Mの方の比

$\beta_v$  の最小値で純ねじり荷重下の破壊パターンが決まる。ただし  $\beta_c, \beta_v > 1$  の時は軸方向鉄筋の破壊である。

これらを用いて実験結果をまとめると表-4のようになる。

図-5~8に各シリーズの本解析による破壊の相関曲線、RC示方書による相関関係および実験値を示した。

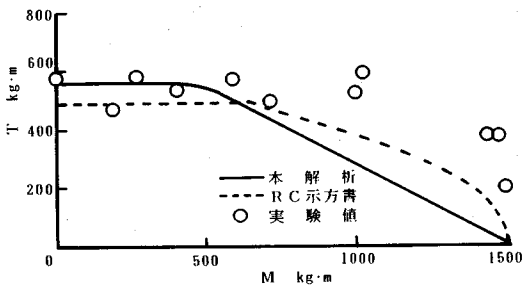


図-5 T-M破壊曲線  
(コンクリート主体の破壊, C1)

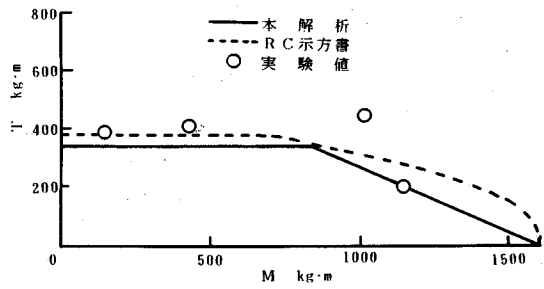


図-8 T-M破壊曲線  
(軸方向鉄筋主体の破壊)

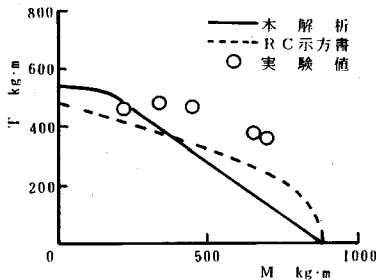


図-6 T-M破壊曲線  
(コンクリート主体の破壊, C2)

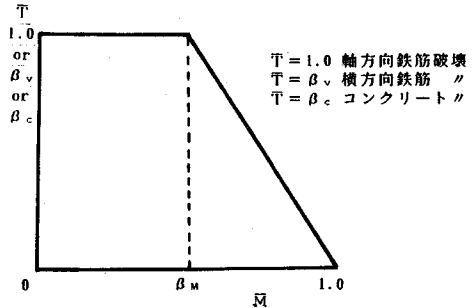


図-9  $\bar{T}$ - $\bar{M}$  相関図のモデル

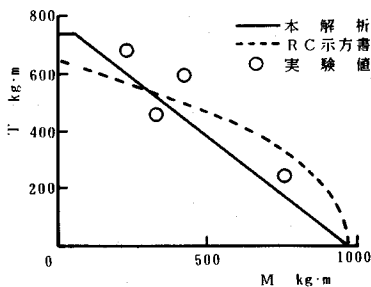


図-7 T-M破壊曲線  
(軸方向鉄筋主体の破壊)

図-5, 6はコンクリートの圧壊が主体を成す場合で本解析とRC示方書による相関破壊曲線はほぼ同じ形状を示し、よく実験値と対応している。ねじり荷重に比較して曲げ荷重が大きい場合に実験値の方が大きな値を示す傾向にある。これはコンクリートの軟化効果<sup>18)</sup>などの影響が考慮されていないためと考えられる。これに比べて図-7の軸方向鉄筋を主体とする破壊曲線では、耐力は曲げの増加に対してほぼ直線的に低下していて、相関曲線は2次曲線に対応するよりはむしろ直線に近い傾向を示している。図-8は横方向鉄筋を主体とした破壊で、ある曲げ荷重まではねじり耐力が一定の水平な直線で表され、それを過ぎて曲げ荷重が大きくなるに従ってほぼ直線的に低下し、相関曲線はほぼ直線で近似できると考えられる。

これらの相関曲線はほぼ図-9に示すような  $\beta_M$  を折

点とする相関のモデル図になる。式(A4)の  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  および  $\alpha$  (ひびわれ角) を用いて  $\beta_M$  を求めれば、相関曲線は決まる。一般的な値として  $m$ ,  $\bar{m}$ ,  $m'$ ,  $\bar{m}_0$  にはそれぞれ 10, 10, 10, 9.0 として  $\bar{n}$ ,  $n_c$ ,  $n_s$ ,  $l_n$ ,  $l_n'$  にはそれぞれ 0.2, 0.3, 15.6, 0.6 を用い、 $a'$  は 0.1 として、 $\beta_M$  を求めた。引張鉄筋比  $p$ , 圧縮鉄筋比  $p'$  はそれぞれ 0.5%~2% まで変化させたが、鉄筋比による  $\beta_M$  の影響は小さかったので、 $\beta_M$  は鉄筋比をこの範囲に変化させた場合の最大と最小値の平均値を用いた。

図-10は  $\beta_1=0.5$  の場合で  $\beta_2$  を変化させると、 $\beta_2$ ,  $\alpha$  によって破壊タイプがコンクリートから横方向鉄筋に変化している。図-11は  $\beta_1=1.0$  の場合である。コンクリート、軸方向鉄筋、横方向鉄筋の3つの破壊タイプが生じている。図-12は  $\beta_1=2$  の場合で、同様にコンクリートと軸方向鉄筋と横方向鉄筋のタイプが現れている。図-13は  $\beta_1=3$  の場合でコンクリートと軸方向鉄筋の破壊タイプが表れている。図-14は  $\beta_1=4\sim 10$ ,  $\beta_2=1\sim 10$  の場合で軸方向鉄筋の破壊タイプのみが表れ、 $\beta_1$ ,  $\beta_2$  の変化に対して  $\beta_M$  はあまり変わらない性状を示していた。

図-15は Kemp<sup>19)</sup>, Collins<sup>20)</sup>, Pandit<sup>21)</sup>, Hsu<sup>22)</sup> (純ねじりの一部)、泉<sup>23)</sup> および著者の実験データと解析結果を比較したものである。 $\bar{T}$ - $\bar{M}$  座標における原点からの距離を基準とした実験データの算定値に対する比 ( $TM_{exp}/TM_{cal}$ ) を用いている。すなわち、ねじりと曲げの荷重比が一定の場合の実験データの算定値に対する

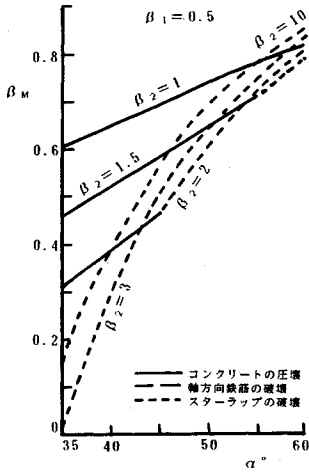


図-10  $\beta_M$  図 ( $\beta_1=0.5$ )

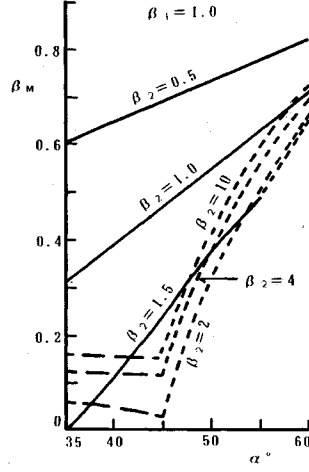


図-11  $\beta_M$  図 ( $\beta_1=1.0$ )

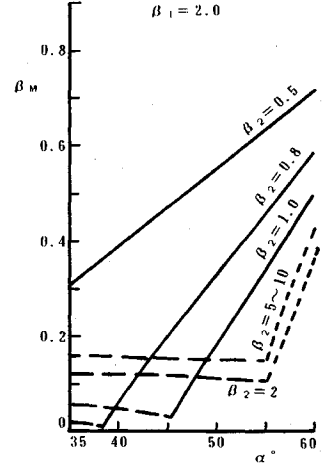


図-12  $\beta_M$  図 ( $\beta_1=2.0$ )

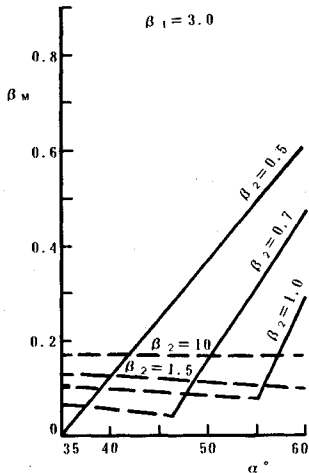


図-13  $\beta_M$  図 ( $\beta_1=3.0$ )

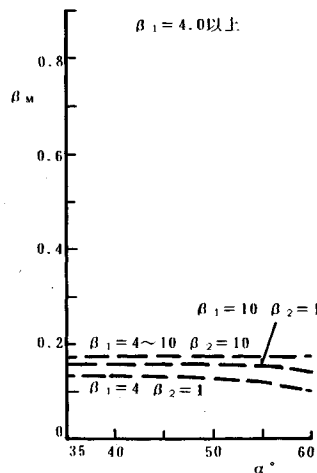


図-14  $\beta_M$  図 ( $\beta_1=4.0$  以上)

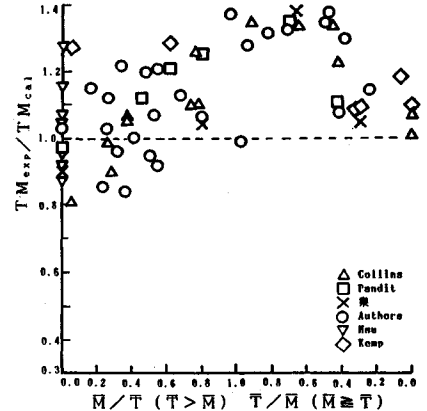


図-15 実験値と計算値の比較

精度を表している。ねじり荷重が比較的大きい  $\bar{M}/\bar{T} < 0.6$  の場合および曲げが大きく  $\bar{T}/\bar{M} < 0.4$  ではほぼ解析値と対応しているが  $\bar{T}/\bar{M}$  が  $0.5 \sim 1.0$  の領域では算定値に比して実験値が大きい傾向を示した。これは曲げ圧縮ゾーンによるひびわれの拘束、それに伴うコンクリートの軟化効果などが影響していることが考えられる。特にコンクリート主体の破壊の場合にこの傾向がみられる。 $TM_{exp}/TM_{cal}$  の値は最大 1.38, 最小 0.84 で平均 1.13 に分布し、ほぼ良い対応を示していることがわかる。

## 5. 結 論

(1) 純曲げとねじり荷重下の破壊パターンは純ねじり荷重下の破壊パターンの影響を受けて、大きく分類してコンクリート、軸方向鉄筋、横方向鉄筋の破壊を主体として3つの破壊パターンがある。

(2) 曲げ-ねじりの破壊相関曲線は解析上では bi-linear の直線にはほぼ近似でき、軸方向鉄筋主体の破壊および横方向鉄筋主体の破壊パターンには実験値とよい対応を示していた。コンクリート主体の破壊の場合、実験値は2次曲線の相関関係にある傾向を示し、曲げ圧縮ゾーンのひびわれの拘束の影響、コンクリートの軟化挙動の影響などを受けている傾向があったが、実験値とは安全側にほぼ良い対応を示していた。RC 示方書の2次放物線による相関関係は軸方向鉄筋、横方向鉄筋主体の破壊パターンの場合には多少難点があるが、実験の範囲ではほぼ対応していることがわかった。

(3) 各国のデータを比較すると  $\bar{M}/\bar{T} \leq 0.6$  および  $\bar{T}/\bar{M} < 0.4$  で実験値と解析値とは良い対応を示していたが、 $0.5 < \bar{T}/\bar{M} < 1.0$  においては算定値に対する実験値の比が 1.3 程度になり、この領域では安全側に算定されていることがわかった。これは特にコンクリート主体の

破壊パターンの場合に起こる。

(4) 立体トラス理論と従来の曲げ理論を累加させることにより、曲げ-ねじり荷重下の耐力を容易に算定でき、これまでの理論を踏まえて、ねじり荷重下の曲げ解析に体系的な解析法へ的一端を開いた。

なお、本研究には文部省科学研究費補助金(分担)が授与されました。

**【付録】 純ねじり荷重の耐力**

先の論文<sup>12)</sup>で発表しているように、ねじり荷重による破壊パターンはスペーストラスの力の釣合いから横方向鉄筋降伏、軸方向鉄筋降伏およびコンクリート圧壊の3つに分類される。本文の式の説明に必要な式のみ挙げる。

- a)  $K_0^2 \geq \beta_1$  かつ  $1/K_0^2 \leq \beta_2 - 1$  のとき  
横方向鉄筋降伏  
 $T_{BS} = 2A_0 A_v f_{vy} / (K_0 s) \dots\dots\dots (A 1)$
- b)  $k_0^2 \geq \beta_1$  かつ  $k_0^2 \leq \beta_1 \beta_2 - 1$  のとき  
軸方向鉄筋降伏  
 $T_{BL} = 2k_0 A_0 A_l A_{lv} / a_0 \dots\dots\dots (A 2)$
- c)  $k_0^2 \geq \beta_1 \beta_2 - 1$  かつ  $1/k_0^2 \geq \beta_2 - 1$  のとき  
コンクリート圧壊  
 $T_{BC} = 2A_0 k_0 t_e f_{cB} / (k_0^2 + 1) \dots\dots\dots (A 3)$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= a_0 A_v f_{vy} / (s A_l f_{lv}), \quad \beta_2 = s t_e f_{cB} / (A_v f_{vy}) \\ k_0^4 &= (a_0 t_e / A_l + n) / (s t_e / A_v + n) = \tan^4 \alpha \end{aligned} \right\} \dots\dots (A 4)$$

- $a_0$ : セン断流の中面の周長
- $A_v$ : スターラップ1本の断面積
- $A_l$ : 軸方向鉄筋の全断面積
- $s$ : スターラップ間隔
- $t_e$ : 有効コンクリート厚さ
- $f_{vy}$ : スターラップの鉄筋降伏応力
- $f_{lv}$ : 軸方向鉄筋降伏応力
- $f_{cB}$ : コンクリートの圧縮強度
- $n$ :  $E_s / E_c$

**参 考 文 献**

- 1) Rausch, E. : Drillung, Schub und Scheren in Stahl-betonbau, 3rd Edition, Deuther Ingenieur-Verlag GmbH, Düseeldorf, p.168, 1952.
- 2) Lampert, P. : Post Cracking Stiffness of Reinforced Concrete Beams in Torsion and Bending, Publication, No.71-20, Feb.1971, Univ. of Toronto, Dept. of Civil Engineering.
- 3) Thurlimann, B. : Torsional Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Beams-CEB Approach, ACI, sp 59-7.
- 4) Gvozdev, A.A., Lessig, N.N. and Rulle, L.K. : Research on Reinforced Concrete Beams under Combined Bending and Torsion in the Soviet Union, ACI, sp 18-11, pp.307~

- 336, 1966.
- 5) Hsu, T.T.C. : Torsion of Structural Concrete-plain Concrete Rectangular Sections, ACI sp-18, pp.203~238, 1966.
- 6) Eifflen, I., Karlsson, I. and Losberg, A. : Torsion-Bending-Shear Interaction for Concrete Beams, J. of the Structural Division, ASCE, vol.100, No.S78, pp.1658~1676.
- 7) Karlsson, I. and Elfgren, L. : Torsional Stiffness of Reinforced Concrete Members Subjected to Pure Torsion, Magazine of Concrete Research, vol.24, No.80, pp.149~156, Sept., 1972.
- 8) Hsu, T.T.C. : Post-Cracking Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Sections, J. of ACI, pp.352~360, May 1973.
- 9) 泉満明: コンクリート部材の終局ねじり強度の算定と設計法に関する研究, 土木学会論文報告集, No. 305, pp.111~124, Jan. 1981.
- 10) 岡本享久・長滝重義: 曲げせん断とねじりを同時に受ける鉄筋コンクリート部材の耐力と変形, 土木学会論文集, Vol. 360/V-3, pp. 81~89, 1985.
- 11) 長滝重義・岡本享久・李承漢・山岡暁: 鉄筋コンクリート部材のねじり特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 372/V-5, pp.157~166, Aug. 1986.
- 12) 佐伯昇・高田宣之・藤田嘉夫: ねじり荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力, 土木学会論文集, No. 390/V-8, Feb. 1988.
- 13) 長滝重義・李承漢・岡本享久・山岡暁: 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, No. 390/V-8, pp.179~188, 1988.
- 14) 二羽淳一郎, 檜貝勇: コンクリートのテンションステイフネスを考慮した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, 2号, pp.91~96, 1987.
- 15) 泉満明: ねじりと曲げを受けるコンクリート部材の終局強度と設計法, 土木学会論文報告集, No. 327, pp.139~150, Nov. 1982.
- 16) 児島孝之・高木章宣・和田教志: 鉄筋コンクリート部材の変形適合ねじりに関する一実験, 日本コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.533~536, 1984.
- 17) 佐伯昇・高田宣之・藤田嘉夫・志村和紀: ねじりと純曲げ荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の終局強度, コンクリート工学年次論文報告集 12-2, pp.269~274, 1990.
- 18) Hsu, T.T.C. and Mo, Y.L. : Softening of Concrete in Torsional Members-Theory and Test, J. of ACI, pp.290~303, May-June 1985.
- 19) Kemp, E.L. : Behaviour of Concrete Members Subject to Torsion and to Combined Torsion, Bending and Shear, ACI sp-18, pp.179~201, 1966.
- 20) Collins, M.P. et al. : Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion and Bending, ACI sp-18, pp.379~402.
- 21) Pandit, G.S. et al. : Reinforced Concrete Beams in Combined Bending and Torsion, ACI sp-18, pp.133~164.
- 22) Hsu, T.C. : Torsion of Structural Concrete, ACI sp-18, pp.261~306.
- 23) 泉満明: ねじりと曲げの組合わせモーメントを受けるコンクリート部材の設計法に関する研究, 学位論文, 1981. (1990.12.17 受付)



## RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE MEMBER SUBJECTED TO TORSION AND PURE BENDING

Noboru SAEKI, Nobuyuki TAKADA, Kazunori SHIMURA and Yoshio FUJITA

Torsion is important to design curvilinear and three-dimensional concrete structures such as curved bridge, spandrel girder, slab cantilever, spiral beams etc. This paper is an attempt to investigate the resistance of reinforced concrete member subject to torsion and bending by the space truss model theory.

The approach of the resistance of torsion and bending is carried out by superposing the bending stress due to conventional method upon the torsional stress. The three patterns of failure are determined by the condition of the torsional resistance.

From the results of the comparison of experimental and analytical resistance, the proposed analysis is found to be available.

---