

論文

[2043] 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

正会員○佐伯 昇（北海道大学工学部）
 正会員 高田 宣之（北海道大学工学部）
 正会員 藤田 嘉夫（北海道大学工学部）
 正会員 志村 和紀（北海道大学工学部）

1. まえがき

コンクリート構造物が美的評価を受けるひとつには曲線性、立体性などが挙げられるが、これらの構造物は構造的にねじり作用が働く場合や、荷重点とせん断中心が離れることによってねじり荷重が生ずる場合などがある。曲線部材、スパンドラル部材、片持ち床版と一体となっている桁などの場合がねじり作用が問題となる。一方、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精度良く算定し、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。また、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み合わせを考慮したせん断耐力を、より合理的に算定することが必要となってきた。

本研究では先の純ねじり荷重下の耐力の算定法を踏まえて、純曲げとねじり荷重下の耐力の算定式を導き、実験によって照査したものである。P.LampertやThülimannらのSpace truss理論を基本として、ねじり耐力理論を発展させ、ひびわれ方向によって、ねじり荷重下の破壊パターンを3つに分類し、これに曲げ理論を加えることによって、純曲げとねじり荷重下の耐力の算定式を求めたものである。

2. ねじりと純曲げ荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の耐力の解析

(1) 純ねじり荷重の耐力

純ねじり荷重による耐力は先の論文で発表¹⁾しているように、次の3つに分類される。以後の説明に必要な部分のみを挙げる。

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

$$T_{BS} = 2 A_0 A_v f_{vy} / (k_0 S) \dots \dots \dots (A1)$$

b) $k_0^2 \leq \beta_1$ かつ $k_0^2 \leq \beta_1 \beta_2 - 1$ のとき 軸方向鉄筋降伏

$$T_{BL} = 2 k_0 A_0 A_1 f_{1y} / a_0 \dots \dots \dots (A2)$$

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

$$T_{BC} = 2 A_0 k_0 t_e f_{CB} / (k_0^2 + 1) \dots \dots \dots (A3)$$

ここで $\beta_1 = a_0 A_v f_{vy} / (S A_1 f_{1y})$, $\beta_2 = S t_e f_{CB} / (A_v f_{vy})$ } $\dots \dots (A4)$
 $k_0^4 = (a_0 t_e / A_1 + n) / (S t_e / A_v + n)$

- a_0 : せん断流の中面の周長
- A_1 : 軸方向鉄筋の全断面積
- t_e : 有効コンクリート厚さ
- f_{1y} : 軸方向鉄筋降伏応力
- n : E_s / E_c
- A_v : スターラップ1本の断面積
- S : スターラップ間隔
- f_{vy} : スターラップの鉄筋降伏応力
- f_{CB} : コンクリートの圧縮強度

(2) ねじりと曲げ荷重下の耐力

ねじりと純曲げによる組合せ荷重下の載荷過程として3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にはねじりと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3つの場合は同じ挙動をすると考えられるが、ひびわれ発生以上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動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った。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の場合が多い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。これによって算定値が安全側になっていることに言及している。

(a) 材料の応力-ひずみ曲線およびねじりによるコンクリート応力

コンクリートの応力-ひずみ曲線は次式を用いる。

$$f = 4/7 \times E_c \varepsilon_c \{ 1 - E_c \varepsilon_c / (7 f_{cb}) \} \dots \dots \dots (1)$$

\bar{T} のねじり荷重がかかると(A3)式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に示すように、ねじり荷重によって1-Xまで応力が使われたことになる。

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで、} X &= 1 - \bar{T} \cos(\alpha) / \beta_c \\ \beta_c &= \beta_1 \beta_2 / (k_0^2 + 1) \\ \bar{T} &= T / T_{BL} \end{aligned} \right\} \dots \dots (2)$$

C_1 : コンクリートの破壊点 ε_{CB} : 終局ひずみ
 E_c : ヤング率 \bar{E}_c : 終局時のヤング率

鉄筋の応力-ひずみ曲線には図-2に示す曲線を用い、ねじり荷重によって軸方向鉄筋は $(\varepsilon_s, \sigma_s)$ の点まで上がる。 S_1, S_2, S_3 は任意点、 \bar{E}_s : ひずみ硬化領域のヤング率

(b) 破壊パターン

破壊パターンは軸方向鉄筋の降伏が主体となるもの、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降伏が主体となるものである。この場合はスターラップの降伏→軸方向鉄筋の降伏によるものと、スターラップの降伏→コンクリートの圧壊に移行するものがある。大きく分けて3種が考えられる。

a) $k_0^2 \leq \beta_1, k_0 \leq \beta_1 \beta_2 - 1$ の場合 $\dots (3)$

軸方向鉄筋の降伏により破壊するものである。

b) $k_0^2 > \beta_1$ かつ $1/k_0^2 \leq \beta_2 - 1$ かつ $k_0^2 \leq \beta_1 \beta_2 - 1$ $\dots \dots (4)$

β_v 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b)の3番目の条件により軸方向鉄筋の降伏が起こる。

ここで $\beta_v = \beta_1 / k_0^2$ である。 $\dots \dots \dots (5)$

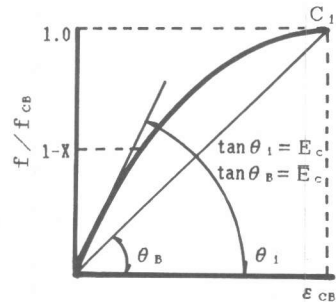


図-1 コンクリートの応力-ひずみ曲線

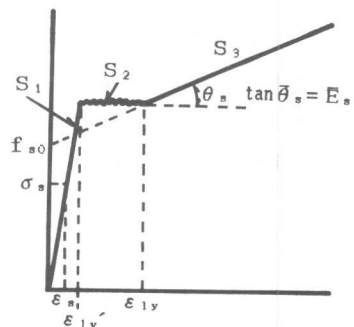


図-2 鉄筋の応力-ひずみ曲線

$$b') k_0^2 > \beta_1 \text{ かつ } 1/k_0^2 \leq \beta_2 - 1 \text{ かつ } k_0^2 \geq \beta_1 \beta_2 - 1 \dots\dots (6)$$

β_v 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が、b')の3番目の条件により、コンクリートの圧壊の曲線に移行する。

$$c) k_0^2 \geq \beta_1 \beta_2 - 1 \text{ かつ } 1/k_0^2 > \beta_2 - 1 \dots\dots (7)$$

コンクリートの圧壊による破壊である。

(c) 中立軸の決定

$$(i) p \eta_1 \leq \eta_2 + p' \eta_3 \text{ のとき } \dots\dots (8)$$

図-1、図-2のそれぞれC₁、S₃の状態破壊する場合で中立軸は次式で決定される。

$$k = A + A^2 + B \dots\dots (9)$$

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

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

$$\left. \begin{aligned} y &= 1 - 3.5 n_c (1 - \sqrt{x}) \\ m_0 &= \bar{m}_0 - \bar{m} \bar{T} (1 - \bar{n} / n_s) \end{aligned} \right\} \dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} n_c &= \bar{E}_c / E_c, \bar{m}_0 = \bar{f}_{s0} / f_{cb} \\ n_s &= E_s / \bar{E}_c, m' = f_{1y}' / f_{cb} \\ \bar{n} &= \bar{E}_s / \bar{E}_c, \bar{m} = \bar{f}_{1y} / f_{cb} \\ \varepsilon_{1y}' / \varepsilon_{cb} &= \bar{l}_n', \bar{a} = a' / d \\ \varepsilon_{1y} / \varepsilon_{cb} &= \bar{l}_n \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

もし圧縮鉄筋が圧縮応力で降伏する場合、すなわち

$(k - \bar{a}) y / k \geq \bar{l}_n'$ のとき、(9)式のA、Bを次式にする。

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

また、圧縮鉄筋が引張応力で降伏する場合、すなわち

$(\bar{a} - k) y / k \geq \bar{l}_n'$ のとき、(9)式のA、Bを次式にする。

$$\left. \begin{aligned} A &= \{ p (m_0 - \bar{n} y) + p' (m' - \bar{m} \bar{T}) \} / (2 \alpha x) \\ B &= \bar{n} y p / (\alpha x) \end{aligned} \right\} \dots\dots (15)$$

$$(ii) \eta_2 + \eta_3 p' \leq p \eta_1 \leq \eta_4 + \eta_5 p' \text{ のとき (C}_1, S_2 \text{の状態破壊する場合)} \dots\dots (16)$$

kは(9)式のA、Bに次式を入れる。

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

$$\left. \begin{aligned} \text{ここで } \eta_4 &= \alpha x k_0^*, \eta_5 = (k_0^* - \bar{a}) n_s y / k_0^* \\ k_0^* &= y / (y + \bar{l}_n' - \bar{m} \bar{T} / n_s) \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

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

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

とする。

また圧縮鉄筋が引張降伏する場合、すなわち $(\bar{a} - k) y / k \geq \bar{l}_n'$ のときは

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

とする。

(iii) $P \gamma_1 \geq \gamma_4 + \gamma_5 P'$ のとき (C_1, S_1 の状態) で破壊する場合) (21)

kは(9)式のA, Bに次式を入れる。

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

(d) ねじりと純曲げの破壊相関図

$\bar{T} = T / T_{BL}$ は(b)のa), b)の場合は0~1.0まで変化することができるが、コンクリートの圧壊が関係する(b)のb'), c)の場合は \bar{T} は0~ β_c までである。(c)により中立軸が決定され、これにより、各 \bar{T} による破壊曲げモーメントMが下式で求められる。

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

ここで $\alpha = 2/3, \beta = 3/8$ 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_B が求まり、 $\bar{M} = M / M_B$ が定まる。

3. 実験方法および供試体

実験装置は図-3に示すように曲げ荷重によるねじり変形が拘束されないように、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去する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去

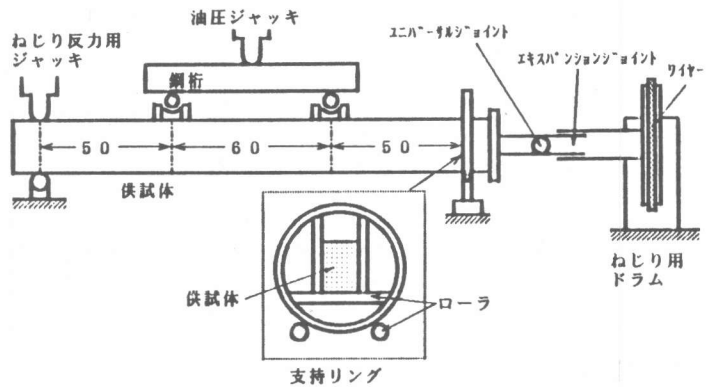


図-3 載荷装置

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オイルジャッキでねじり反力を固定し、曲げに対してはヒンジ支承とした。載荷端はねじりに対して回転リングによる自由支承であり、回転リングと供試体の支持は曲げに対してローラ支承とした。載荷はねじり用ドラムを介してワイヤ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点載荷させた。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動で載荷した。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, b₀, h₀, d, a', t₀はそれぞれ12, 20, 8.3, 16.3, 17.5, 2.3, 1.31cmで一定である。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。C-シリーズはコンクリートの圧壊、L-シリーズは軸方向鉄筋の降伏、V-シリーズはスターラップの降伏が主体で破壊する供試体を計算上で選定したものである。表-2は計算上で用いた諸定数を示した。

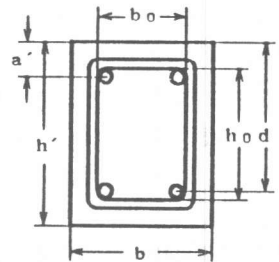


図-4 供試体形状

表-1 供試体諸元

	A_l	A_v	F_{ly}	F_{vy}	F_{cb}	s	p	p'
	cm^2	cm^2	kgf/cm^2	kgf/cm^2	kgf/cm^2	cm	$\%$	$\%$
C	3.96	0.71	3704	3757	314	7.5	1.21	0.68
L	2.74	0.69	3871	3871	550	7.5	0.68	0.68
V	3.79	0.30	3752	3750	367	10.0	1.21	0.68

表-2 算定のための定数

	m	\bar{m}	m'	\bar{m}_0	\bar{n}	n_c	n_s	g_n	g_n'
C	11.8	11.9	12.0	8.44	0.411	0.286	27.5	6.86	0.629
L	7.0	7.0	7.0	6.40	0.080	0.286	8.8	8.70	0.870
V	10.2	10.2	10.2	9.50	0.130	0.286	13.8	8.90	0.870

4. 実験結果および考察

C-シリーズの計算上の曲げ耐力 $M_{Bcal} = 1510$ kgf・mであり、純ねじり耐力はコンクリートの圧壊で決まり $T_{Bcal} = 557$ kgf・mである。

T_{BC} / T_{BL} の比 β_c は0.667である。図-5にコンクリートの圧壊で決まるC-シリーズの破壊曲線を示した。曲げが大きくなると実験値が算定値より大きな傾向を示しているが、ほぼ良い対応を示している。図-6にL-シリーズの場合の破壊曲線を示した。曲げ耐力は $M_{Bcal} = 976$ kgf・m、ねじり耐力は $T_{BLcal} = 737$ kgf・mである。 $T-M$ 曲線はほぼ直線の関係にある。曲げが小さいときの水平直線部は鉄筋のひずみ硬化域の影響である。実験値と算定値はほぼ良い対応を示している。

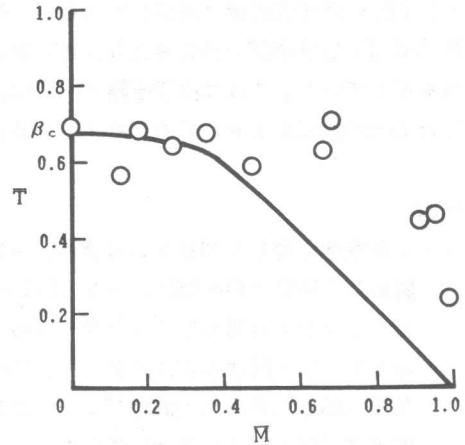


図-5 T-M破壊曲線(コンクリート圧壊)

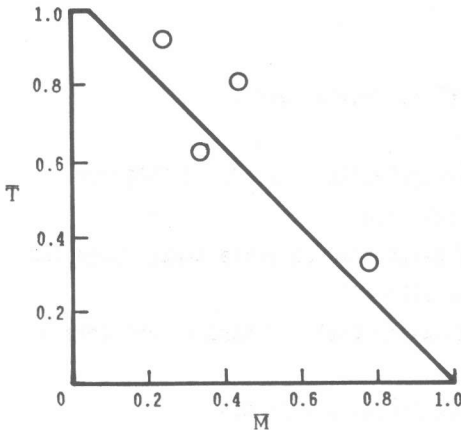


図-6 T-M破壊曲線(軸方向鉄筋降伏)

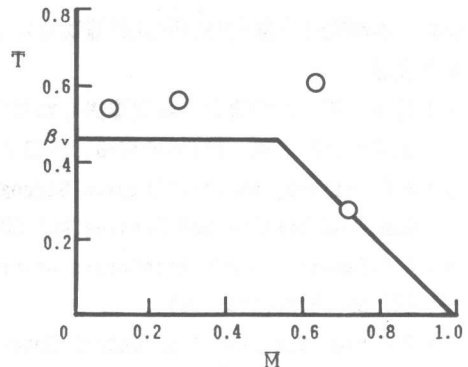


図-7 T-M破壊曲線(スターラップ降伏)

図-7はV-シリーズの場合で $M_{Bcal}=1606\text{kgf}\cdot\text{m}$ 、 $T_{BVcal}=338\text{kgf}\cdot\text{m}$ 、 $\beta_v=0.464$ であり、スターラップ主体の破壊であるため、曲げ荷重に無関係な領域（水平直線部）が生じ、曲げが大きくなるとコンクリートの圧壊を起こしている。分類では(2)(b)、b'の破壊パターンである。水平直線部において、実験結果では曲げが大きくなるとねじり耐力も大きくなる傾向を示すが、全体的にほぼ良い対応を示している。

図-8はCollins²⁾、Pandit³⁾、Hsu⁴⁾（純ねじりの一部）、泉⁵⁾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。T-M座標で実験データの原点からの距離を、算定値から求まる距離で除した比で表している。すなわちねじりと曲げの荷重比が一定の場合の算定値の精度を表している。ねじり荷重が比較的大きい、 $M/T < 0.6$ の場合および曲げが大きいい $T/M < 0.3$ では ほぼ解析値と対応しているが、その他の領域では実験値が算定値より大きくなる傾向を示していた。これは曲げ圧縮ゾーンによるひびわれの拘束が大きいためと考えられる。

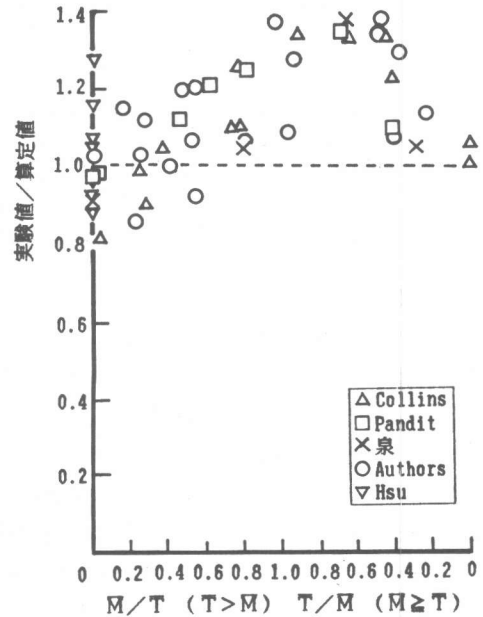


図-8 実験値と算定値の比較

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の圧壊、軸方向鉄筋の降伏およびスターラップの降伏を主体とした3つの破壊パターンとなり、曲げの影響が大きくなるとコンクリートの圧壊、軸方向鉄筋の降伏に移行して行く。
- (2) スペーストラス理論と曲げ理論を重ね合わせた理論により、純曲げ-ねじり荷重下の耐力を算定でき、実験と比較してほぼ良い対応を示し、曲げ荷重が比較的大きい場合安全側に算定する傾向を示すことがわかった。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金によって行われたものである。

参考文献

- 1) 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 第390号/V-8、1988.2、pp.123~130
- 2) M.P.Collins, et al.; Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion and Bending, ACI SP-18, pp.379~402
- 3) G.S.Pandit, et al.; Reinforced Concrete Beams in Combined Bending and Torsion, ACI SP-18, pp.133~164
- 4) T.C.Hsu ; Torsion of Structural Concrete, ACI SP-18, pp.261~306
- 5) 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