

V—10

曲げとねじりの組合せ荷重下の鉄筋コンクリート部材の耐力

北海道大学工学部	学生員	白 川 富 規
北海道大学工学部	正 員	佐 伯 昇
北海道大学工学部	正 員	藤 田 嘉 夫
北海道大学工学部	正 員	志 村 和 紀

1. はじめに

中実矩形断面をもつ鉄筋コンクリート桁に曲げとねじりを同時載荷させた時、ひびわれ発生後の部材を仮想の有効厚 (t_e) をもつ、中空箱型断面のトラスと考え、これにBredtのねじり理論を適用した立体トラス理論に基づいて解析を行なう。

斜材として、圧縮力を受け持つコンクリート、弦材として引張力を受け持つ軸方向鉄筋、垂直材として引張力を受け持つスターラップが、せん断流とそれぞれ釣合いを持つとする。

破壊の形式として、スターラップの降伏、軸方向鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊の3通りが考えられ、ひびわれ方向によってそれぞれの破壊パターンが決定される。ねじり耐力は下式のようにこれを各破壊パターンによるねじり耐力とした。

a) スターラップによる破壊ねじりモーメント

$\tan^2 \alpha \geq \beta_1$ かつ $\cot^2 \alpha \leq \beta_2 - 1$ のとき

$$T_{es} = \frac{2 A_g A_u f_{vy}}{k_r s}$$

b) 軸方向鉄筋による破壊ねじりモーメント

$\tan^2 \alpha \leq \beta_1$ かつ $\tan^2 \alpha \leq \beta_1 \beta_2 - 1$ のとき

$$T_{el} = \frac{2 A_g k_r A_l f_{lv}}{a_g}$$

c) コンクリートの圧壊による破壊ねじりモーメント

$\tan^2 \alpha \geq \beta_1 \beta_2$ かつ $\cot^2 \alpha \geq \beta_2 - 1$ のとき

$$T_{ec} = \frac{2 A_g k_r t_e f_{cb}}{k_r^2 + 1}$$

$$k_r = \tan \alpha = \sqrt{\left(\frac{a_g}{A_l} + \frac{n}{t_e} \right) / \left(\frac{s}{A_u} + \frac{n}{t_e} \right)}$$

a_g : 中面の周長

A_g : 中面の断面積

A_l : 全軸方向鉄筋断面積

A_u : スターラップ断面積

s : スターラップ間隔

$n = E_s / E_c = 7$

t_e : 仮想厚さ

f_{vy} : スターラップの降伏応力

f_{lv} : 軸方向鉄筋の降伏応力

f_{cb} : コンクリートの圧縮強度

$$\beta_1 = \frac{a_g}{s} \cdot \frac{A_u}{A_l} \cdot \frac{f_{vy}}{f_{lv}}, \quad \beta_2 = \frac{s t_e}{A_u} \cdot \frac{f_{cb}}{f_{vy}}$$

本研究では、ねじりと曲げを同時に載荷する実験を行い、その破壊について立体トラスモデルを用いたねじり理論と通常の曲げ理論の重ね合わせによって検討したものである。

2. 供試体寸法と配筋

図-1と表-1に示す通りで、鉄筋は異形棒鋼のSD35を用い、それぞれ同一供試体である。

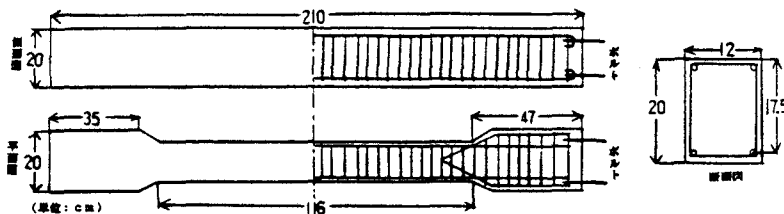


図-1 供試体寸法及び配筋

Ultimate Strength of Reinforced Concrete Member under Combined Bending and Torsion
by Tominori SHIRAKAWA, Noboru SAEKI, Yoshio FUJITA, Kazunori SHIMURA

表-1

供試体 NO.	軸方向鉄筋 上側 下側	スターラップ (間隔cm)	f_{cb} kgf/cm ²	P (%)	P' (%)
Ta1-Ta7	D10 D13	D10 7.5	327	1.21	0.68
Ta8-Ta10	D10 D10	D10 7.5	327	0.67	0.67
Ta11-Ta13	D10 D13	D10 7.5	784	1.21	0.68
Tb1-Tb3	D10 D10	D10 7.5	286	0.68	0.68
Tb4-Tb9	D10 D13	D10 7.5	292	1.21	0.68
Tc1-Tc4	D10 D13	D 6 10.0	367	1.21	0.68
Tc5-Tc8	D10 D10	D10 7.5	550	0.68	0.68

P: 引張鉄筋比 P': 圧縮鉄筋比
 f_{cb} : コンクリートの圧縮強度

3. 実験装置と方法

実験装置は、図-2に示す通りで一端を油圧ジャッキで支承条件（ねじりに対しては固定させ、曲げに対してはローラーによる単純支承）を満足させ、他端に軸方向の変形による拘束を除去するためのエキスパンションジョイントを用い、角度に対する拘束を除くためユニバーサルジョイントを用いた。ねじりの載荷は一端を固定し、他端をねじり用ドラムを介してワイヤーロープによりねじり荷重を載荷し、ワイヤー先端に取り付けた荷重検出用棒鋼によりその値をxyレコーダーで測定した。曲げ荷重は、バネによりつり上げた鋼桁の中央を油圧ジャッキで加圧することにより2点載荷した。ジャッキ加圧下にロードセルを配してxyレコーダーで載荷し曲げ荷重を測定した。曲げ荷重を載荷するための鋼桁と供試体との接点は、ベアリングを介して、ねじり角が拘束されないようにした。ねじり角の測定はねじり角測定用の半円形版を供試体に固定し、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。荷重はねじりと同時に一定の割合でかかるようにした。ねじり荷重は自動的にかけ曲げ荷重はxyレコーダーで図-3に示すような直線上に乗るように、油圧ジャッキを用いて手動で載荷し、その傾きを変えることにより、破壊の挙動を検討した。

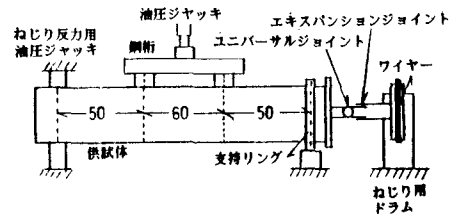


図-2 実験装置

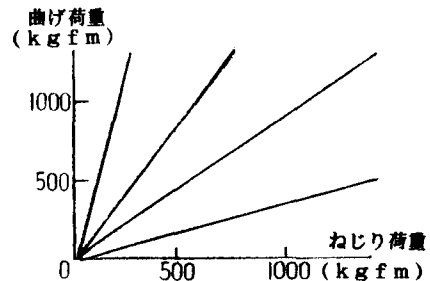


図-3 載荷割合

4. 解析

(1) 鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ関係

供試体が破壊荷重に達した時、上縁のコンクリートが圧壊すると仮定し、その時の応力の関係式は図-4のようにねじりによる斜め圧縮応力(σ_{tc})と曲げによる応力(σ_{nc})の合力が、圧縮強度(f_{cb})に達しているとし、条件式は次式ようになる。

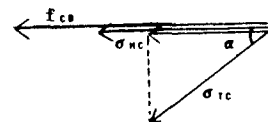


図-4 上縁での応力の重ね合わせ

$$\sigma_{nc} + \sigma_{tc} \cos \alpha = f_{cb} \quad \text{-----(1)}$$

$x = \sigma_{nc} / f_{cb}$, $1 - x = \sigma_{tc} \cos \alpha / f_{cb}$ とおく。

コンクリートの応力-ひずみ曲線を次式のようにする。

$$f = \frac{4}{7} \varepsilon E_c \left(1 - \frac{\varepsilon E_c}{7 f_{CB}} \right) \quad \text{-----}(2)$$

x は、図-5に示すようにコンクリートの曲げによる圧縮応力がコンクリートの圧縮応力に占める割合を表わし、これらの関係式より次式が成り立つ。

$$1 - x = \frac{4}{7} \frac{\varepsilon_c E_c}{f_{CB}} \left(1 - \frac{\varepsilon_c E_c}{7 f_{CB}} \right) \quad \text{-----}(3)$$

$$\text{これを } \varepsilon_c \text{ について解くと } \varepsilon_c = \frac{7 f_{CB}}{2 E_c} (1 - x) \quad \text{-----}(4)$$

ε_c は、ねじり荷重がコンクリートに与えるひずみであり、主鉄筋に及ぼすひずみ ε_s は、主鉄筋の降伏応力の合計値を鉄筋全断面積で割った値 $\sigma_{LY} * T$ で表せられる。ただし T は、ねじり破壊荷重の実験値 T_0 の T_{BL} に対する割合を示し、0から1まで変化するが、破壊パターンが T_{BC} 、 T_{BS} のときは、 T_{BC}/T_{BL} 、 T_{BS}/T_{BL} のうち小さい方が限界値となる。

鉄筋の応力-ひずみ曲線は図-5に示すとおりで、ヤング係数 $E_s=2100000 \text{ kgf/cm}^2$ とし、 $b-c$ 間は直線で近似し、その傾きを $E_{s1}=20000 \text{ kgf/cm}^2$ とした。ここで σ_{SY} は降伏応力を表わし、圧縮による降伏応力 σ'_{SY} は、これと同値とした。主鉄筋にはD10,D13を用い、 σ_{SY} はそれぞれの実験値の平均値を用い、降伏ひずみ $\varepsilon'_{SY}=2000*10^{-6}$ 、 $\varepsilon_{SY}=20000*10^{-6}$ とし、これを共通の値とした。

状態 a 、 b における中立軸 k_a 、 k_b の値は平面保持の仮定よりそれぞれ次のようになる。

$$k_a = \frac{\varepsilon_{CB} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{CB} + \varepsilon'_{SY} - \varepsilon_c - \varepsilon_s}, \quad k_b = \frac{\varepsilon_{CB} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{CB} + \varepsilon_{SY} - \varepsilon_c - \varepsilon_s}$$

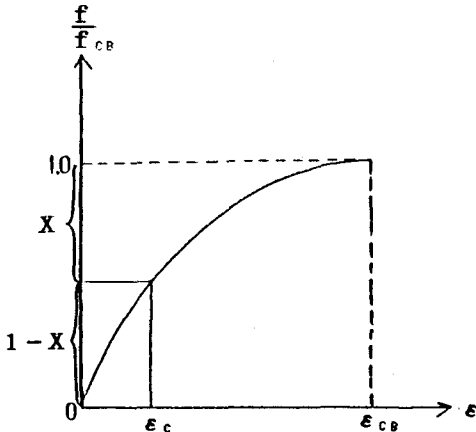


図-5 コンクリートの応力-ひずみ曲線

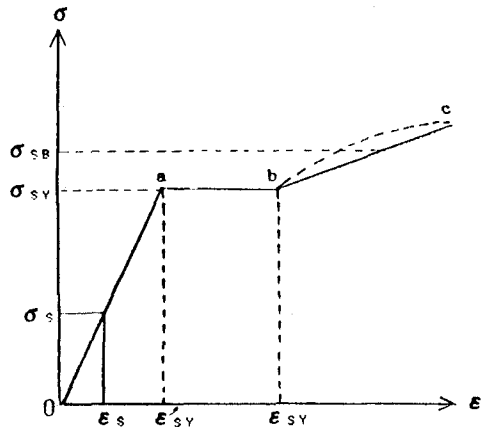


図-6 鉄筋の応力-ひずみ曲線

(2) 終局耐力の算定

1 a) 下側軸方向鉄筋がひずみ硬化(図-5上で $b-c$ 間上)し、上側軸方向鉄筋が降伏していない時

この時の状態を条件式で表わすと、

$$(\sigma_{SB} - \sigma_s) p \leq \alpha x f_{CB} k_b + p' (E_s (k_b - a') / k_b (\varepsilon_{CB} - \varepsilon_c))$$

終局強度の計算は、平面保持の仮定より断面内のひずみおよび応力度の分布を考え、コンクリートの全圧縮力 C_c 、圧縮鉄筋の圧縮力 C_s 、鉄筋の引張力 T のつりあい式 $T = C_c + C_s$ より、

$$(\sigma_{sB} - \sigma_s)p = \alpha x f_{cB} k + p' (E_s(k - a')/k(\epsilon_{cB} - \epsilon_c)) \quad \text{-----}(5)$$

α はコンクリートの断面形状係数、 ϵ_{cB} は各供試体のテストピースの降伏ひずみの平均値、 a' は圧縮鉄筋の位置で、この式を k について解くことにより終局曲げ耐力(M_1)が計算でき、 T に対応する M ($=M_1/M_B$)を求めることができる。ただし M_B は純曲げによる終局曲げ耐力を表わす。

1b) 下側軸方向鉄筋がひずみ硬化(図-5上で $b-c$ 間上)し、上側軸方向鉄筋が圧縮で降伏している時この状態を条件式で表わすと、

$$1a) \text{ の条件式かつ } (\epsilon_{cB} - \epsilon_c)(k - a')/k > \epsilon'_{sy}$$

この時のつりあいの式は、

$$(\sigma_{sB} - \sigma_s)p = \alpha x f_{cB} k + p'(\sigma'_{sy} + \sigma_s) \quad \text{-----}(6)$$

2a) 下側軸方向鉄筋が降伏(図-5上で $a-b$ 間上)し、上側軸方向鉄筋が降伏していない時この状態を条件式で表わすと、

$$(\sigma_{sy} - \sigma_s)p > \alpha x f_{cB} k_b + p' (E_s(k_b - a')/k_b(\epsilon_{cB} - \epsilon_c)) \text{ かつ}$$

$$(\sigma_{sy} - \sigma_s)p \leq \alpha x f_{cB} k_a + p' (E_s(k_a - a')/k_a(\epsilon_{cB} - \epsilon_c))$$

この時のつりあいの式は、

$$(\sigma_{sy} - \sigma_s)p = \alpha x f_{cB} k + p' (E_s(k - a')/k(\epsilon_{cB} - \epsilon_c)) \quad \text{-----}(7)$$

2b) 下側軸方向鉄筋が降伏(図-5上で $a-b$ 間上)し、上側軸方向鉄筋が降伏している時この状態を条件式で表わすと、

$$2a) \text{ の条件式かつ } (\epsilon_{cB} - \epsilon_c)(k - a')/k > \epsilon'_{sy}$$

この時のつりあいの式は、

$$(\sigma_{sy} - \sigma_s)p = \alpha x f_{cB} k + p'(\sigma'_{sy} + \sigma_s) \quad \text{-----}(8)$$

3) 下側軸方向鉄筋が降伏(図-5上で $o-a$ 間上)していない時この時の状態を条件式で表わすと、

$$(\sigma_{sy} - \sigma_s)p > \alpha x f_{cB} k_a + p' (E_s(k_a - a')/k_a(\epsilon_{cB} - \epsilon_c))$$

この時のつりあいの式は、

$$p E_s(1 - k)/k(\epsilon_{cB} - \epsilon_c) = \alpha x f_{cB} k + p' (E_s(k - a')/k(\epsilon_{cB} - \epsilon_c)) \quad \text{-----}(9)$$

5. 実験結果

ねじりと曲げの荷重の割合を一定に保って同時に載荷し、どちらかの荷重がかからなくなった時の荷重を破壊荷重(M_a 、 T_a)とした。

表-2 実験結果

(kgf $\cdot$ m)

供試体	ねじり荷重	曲げ荷重	供試体	ねじり荷重	曲げ荷重	供試体	ねじり荷重	曲げ荷重
Ta1	575	0	Ta11	700	1025	Tb8	492	712
Ta2	565	263	Ta12	800	1000	Tb9	555	1495
Ta3	570	538	Ta13	440	1650	Tc1	390	150
Ta4	525	1000	Tb1	480	338	Tc2	410	430
Ta5	380	1440	Tb2	465	695	Tc3	200	1142
Ta6	375	1375	Tb3	385	650	Tc4	450	1010
Ta7	200	1500	Tb4	175	700	Tc5	240	760
Ta8	460	213	Tb5	510	510	Tc6	590	525
Ta9	475	450	Tb6	467	195	Tc7	455	330
Ta10	360	700	Tb7	535	400	Tc8	680	230

6. 考察

4. 解析による計算結果と5. 実験結果の比較を図-7に示す。純ねじりを受けた時スターラップが降伏するねじり耐力の値を T_{BS} 、軸方向鉄筋の降伏及びコンクリートが圧壊する時のねじり耐力を、それぞれ T_{BL} 、 T_{BC} とし、各破壊パターンをそれぞれスターラップ軸方向鉄筋、コンクリートと表わした。計算結果は縦軸を T 、横軸を M として表わし、実験結果(M_B , T_B)を $(M_B/M_B, T_B/T_{BL})$ として図上に記した。縦軸は軸方向鉄筋の降伏ねじり耐力(T_{BL})を基準にしているため破壊パターンがスターラップ、コンクリートの時はそれぞれ T_{BS}/T_{BL} 、 T_{BC}/T_{BL} が T の限界値となる。写真1~4は、Tc1(写真1)、Tc4(写真2)、Tc5(写真3)、Tc8(写真4)の降伏時の写真で、ひび割れ角度が載荷割合によって差があることが確認できた。

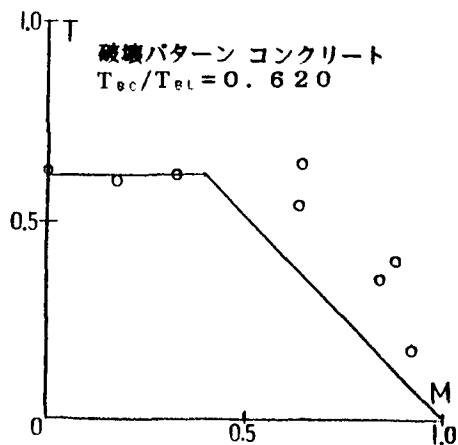


図-7 (a) No. Ta1-Ta7

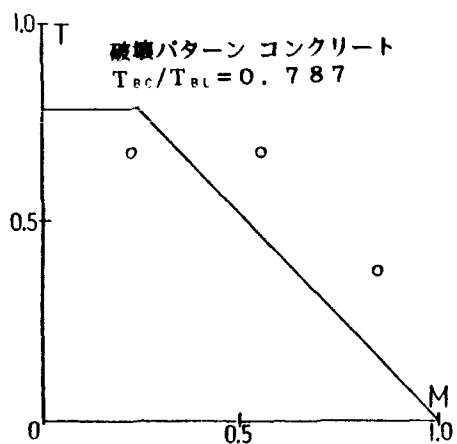


図-7 (b) No. Ta8-Ta10

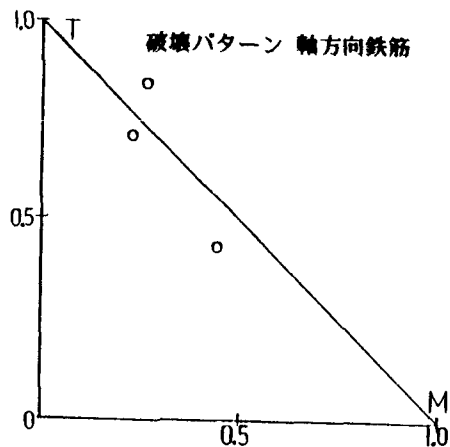


図-7 (c) No. Ta11-Ta13

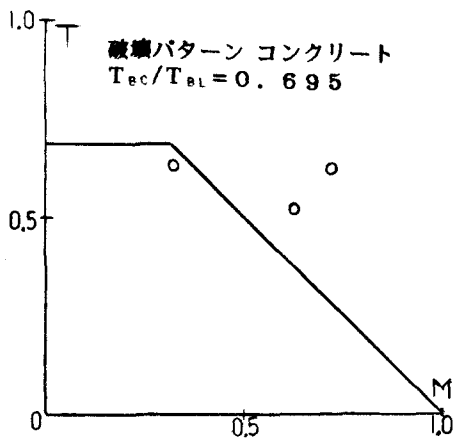


図-7 (d) No. Tb1-Tb3

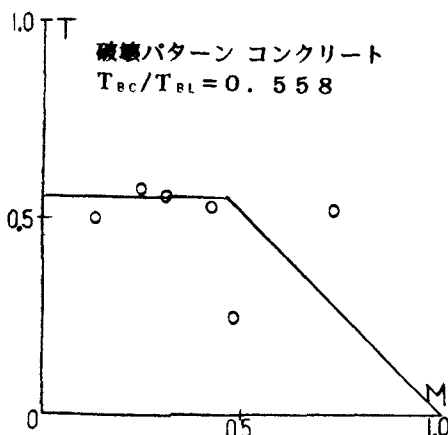


図-7 (e) No. Tb4-Tb9

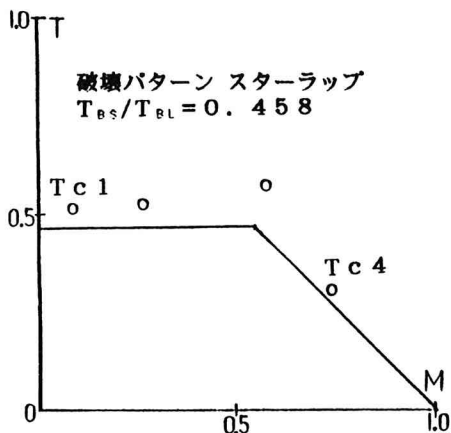


図-7 (f) No. Tc1-Tc4

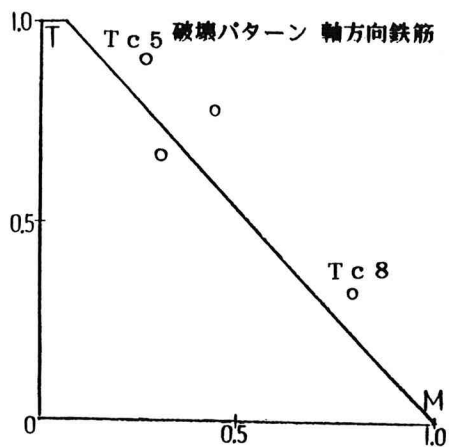


図-7 (g) No. Tc5-Tc8



写真 1



写真 2

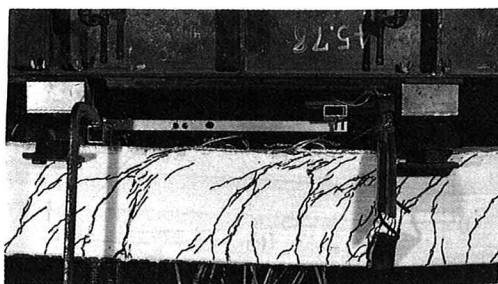


写真 3



写真 4

7. まとめ

(1) Bredtのねじり理論を適用した立体トラス理論の解析によると純ねじりの破壊は、スターラップの降伏 (T_{BS})、軸方向鉄筋の降伏 (T_{BL}) およびコンクリートの圧壊 (T_{BC}) の3つの破壊が存在するが曲げとねじりの組合せ荷重下においても純ねじりの耐力を基本として破壊パターンが形成されることがわかった。

(2) 曲げとねじりの組合せ荷重下の破壊パターンは軸方向鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊、スターラップの降伏の3つに分類され、実験結果とよい対応を示していることが分かった。

参考文献

- 1) C.D.GOODE and M.A.HELMY: Ultimate strength of Reinforced Concrete Beams in Combined Bending and Torsion
- 2) 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
- 3) 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