

# V-16 曲げとねじり荷重を受けるRC桁の破壊挙動

北海道大学工学部 学生員 田納 順一  
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

## 1. まえがき

中実矩形のRC桁にねじり荷重を作用させたとき、ひびわれ発生後において仮想の有効厚さを持つ中空箱型の断面と仮定し、Bredtのねじり理論を適用する立体トラス理論により、軸方向鉄筋およびスターラップが受け持つ引張力および斜材としてコンクリートが受け持つ圧縮力の3つのつり合式が導かれる。純ねじりでは、その3つのつり合式において、鉄筋の降伏、あるいはコンクリートの圧壊が最初にかかる条件から、軸方向鉄筋の降伏、スターラップの降伏、コンクリートの圧壊の3つの破壊形式が生ずる。

本研究では、ねじりと曲げを同時に載荷する実験を行ない、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曲げ理論の重ね合わせによって検討したものである。

## 2. 実験装置と方法

実験装置は、図-1に示す通りで左端を油圧ジャッキで支承条件を満足させ、右端に角度および軸方向の伸びに対する拘束を除去するためのジョイントを介して、図-2に示すような円盤にかけたワイヤーを引張り、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X-Y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X-Yレコーダーで載荷曲げ荷重を測定した。曲げ荷重の供試体との接点は、図-3に示すようにし、ねじり角が拘束されないようにした。支点は図-4、図-5に示す通りで、左端の油圧ジャッキ加圧部分(図-4)の支点は、右端にねじり荷重を載荷すると生じるねじり角に対して、逆のねじり角を与えられるようにし、曲げの載荷点でねじり角による桁の傾きを少なくなるようにした。また、ねじり載荷側の支点(図-5)はリングにのせて自由に回転できるようにした。

荷重はねじりと曲げが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X-Yレコーダーで図-6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た。その直線を変えることによりねじりと曲げの割合による破壊の挙動を検討した。

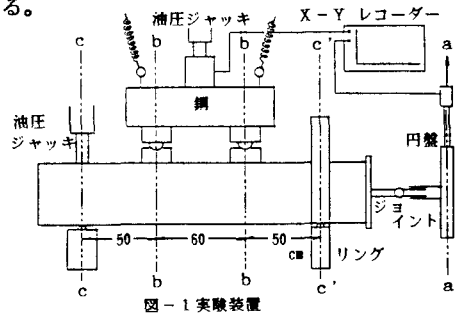


図-1 実験装置

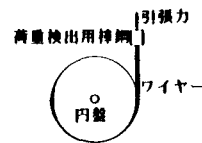


図-2 a-a断面  
ねじり載荷方法

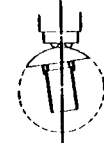


図-3 b-b断面  
曲げ載荷の接点

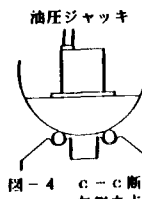


図-4 c-c断面  
左側支点

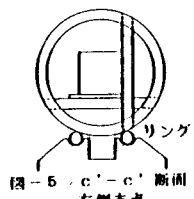


図-5 c'-c'断面  
右側支点

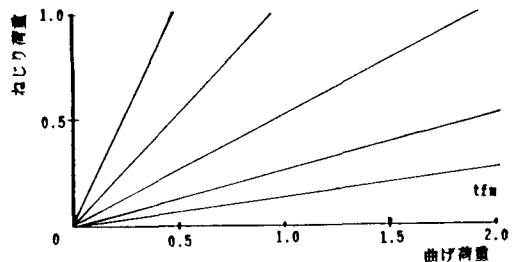


図-6 載荷割合

### 3. 供試体寸法と配筋

図-7に示す通りで、鉄筋は異形棒鋼のSD35を用いコンクリートの圧縮強度は320kgf/cm<sup>2</sup> を目標とした。NO.T1~7およびT8~10 はそれぞれ同一供試体で表-1に示す通りである。

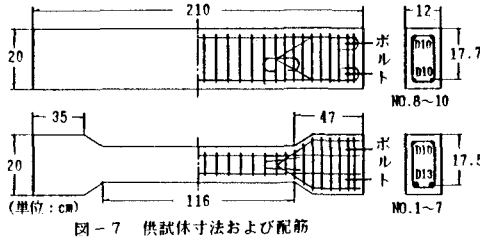


表-1 供試体

| 供試体NO. | 軸方向鉄筋<br>上側 下側 | スターラップ<br>間隔cm | 有効高さ<br>cm | P<br>% | P'<br>% |
|--------|----------------|----------------|------------|--------|---------|
| T1~T7  | D10 D13        | D10 7.5        | 17.5       | 1.21   | 0.68    |
| T8~T10 | D10 D10        | D10 7.5        | 17.7       | 0.67   | 0.67    |

$$p = \frac{A_l}{b d} \quad p' = \frac{A_l'}{b d} \quad d: \text{有効高さ}$$

$A_l$ : 下側の軸方向鉄筋断面積  
 $A_l'$ : 上側の軸方向鉄筋断面積

### 4. 実験結果

図-6に示した直線にそって、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、どちらかの荷重が下がったときを破壊とした。結果は図-8および表-2に示す通りである。

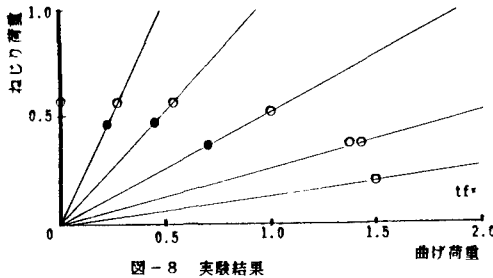


表-2 実験結果 kgf·m

| 供試体 | ねじり荷重 | 曲げ荷重 |
|-----|-------|------|
| T 1 | 575   | 0    |
| T 2 | 565   | 263  |
| T 3 | 570   | 538  |
| T 4 | 525   | 1000 |
| T 5 | 380   | 1440 |
| T 6 | 375   | 1375 |
| T 7 | 200   | 1500 |
| T 8 | 460   | 213  |
| T 9 | 475   | 450  |
| T10 | 360   | 700  |

### 5. ねじりと曲げの重ね合わせによる破壊形式

純ねじりの場合、中実矩形の断面を仮定の有効厚さを持つ中空箱型断面と仮定し、立体トラス理論を適用すると、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通りが考えられる。それぞれ破壊耐力は次式のようになる。

$$T_{ss} = \frac{2A_s A_v \sigma_{vy}}{k_r s} \quad \dots (1)$$

$$T_{sl} = \frac{2A_s k_r A_l \sigma_{ly}}{a_s} \quad \dots (2)$$

$$T_{sc} = \frac{2A_s k_r}{k_r^2 - 1} t_s \sigma_{cs} \quad \dots (3)$$

$$k_r = \tan \alpha = \sqrt{\left(\frac{a_s + n}{A_l + t_s}\right) / \left(\frac{s}{A_v + t_s}\right)}$$

$a_s$ : 中面の周長  
 $A_s$ : 中面の断面積  
 $A_l$ : 全軸方向鉄筋断面積  
 $A_v$ : スターラップ断面積  
 $s$ : スターラップ間隔

$$n = \frac{E_s}{E_c} (= 7)$$

$t_s$ : 有効高さ  
 $\sigma_{vy}$ : スターラップの降伏応力  
 $\sigma_{ly}$ : 軸方向鉄筋の降伏応力

以上に述べたような立体トラス理論による状態と曲げによる状態とを重ね合わせることで、破壊の挙動について検討する。鉄筋のヤング係数は $E_s = 2100000 \text{ kgf/cm}^2$ とし降伏によって破壊が起こるとした。またコンクリートの応力-ひずみ曲線は放物線とした。

#### (1) スターラップの降伏が起こる場合

曲げ荷重による影響を受けない。

(2) 軸方向鉄筋の降伏が起こる場合

a) 上側の軸方向鉄筋の降伏が起こる場合

ねじり荷重によって生じる引張応力 ( $\sigma_{T1}$ ) の降伏応力 ( $\sigma_{1y}$ ) を越えた分だけ曲げ荷重による圧縮応力 ( $\sigma'_n$ ) が受け持つときで、上側の軸方向鉄筋が降伏する条件は(4)式となる。

$$\sigma_n' = \sigma_{T1} - \sigma_{1y} \quad \dots(4)$$

純ねじり耐力 ( $T_B$ ) とねじり荷重 ( $T$ )、純曲げ耐力 ( $M_B$ ) と曲げ荷重 ( $M$ ) の関係式は次式のようになる。

$$\frac{T}{T_B} - \frac{\alpha_2'}{\alpha_1'} \frac{M}{M_B} = 1 \quad \dots(5)$$
$$\alpha_1' = j A_1 \frac{1}{\alpha_3} + (1 - j - a') A_1'$$
$$\alpha_2' = \bar{j} A_1 \frac{1}{\alpha_4} + (1 - \bar{j} - a') A_1'$$
$$\alpha_3 = \frac{k - a'}{1 - k} \quad \alpha_4 = \frac{\bar{k} - a'}{1 - \bar{k}}$$

(5)式における曲げの中立軸は、(4)式でねじりの比 ( $T/T_B$ ) より曲げ荷重の分担分の圧縮応力 ( $\sigma'_n$ ) を決定し、軸方向の力のつり合いと平面保持の仮定より導かれる3次方程式 (表-3) を解いて求めた。

b) 下側の軸方向鉄筋の降伏が起こる場合

ねじり荷重による引張応力 ( $\sigma_{T1}$ ) と曲げ荷重による引張応力 ( $\sigma_n$ ) を加えた応力が降伏応力 ( $\sigma_{1y}$ ) に達したときが、下側の軸方向鉄筋が降伏する条件で(6)式となる。

$$\sigma_{T1} + \sigma_n = \sigma_{1y} \quad \dots(6)$$

ねじり荷重の比 ( $T/T_B$ ) と曲げ荷重の比 ( $M/M_B$ ) の関係式は(7)式となる。

$$\alpha_5 \frac{T}{T_B} + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \frac{M}{M_B} = 1 \quad \dots(7)$$
$$\alpha_1 = j A_1 + (1 - j - a') A_1' \alpha_3$$
$$\alpha_2 = \bar{j} A_1 + (1 - \bar{j} - a') A_1' \alpha_4$$
$$\alpha_5 = \frac{A_1'}{A_1}$$

表-3 3次方程式

|           | 上側軸方向鉄筋<br>の降伏のとき                                                                  | 下側軸方向鉄筋<br>の降伏のとき                                                                  |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| $k^3$ の係数 | $\frac{\alpha}{n} \left( 1 - \frac{1}{n} \frac{\sigma_{1y}}{4\sigma_{cy}} \right)$ | $\frac{\alpha}{n} \left( 1 + \frac{1}{n} \frac{\sigma_{1y}}{4\sigma_{cy}} \right)$ |
| $k^2$ の係数 | $p + p' - \frac{\alpha}{n} a'$                                                     | $p + p' - \frac{\alpha}{n}$                                                        |
| $k^1$ の係数 | $-2a'p' - (1+a')p$                                                                 | $-2p - (1+a')p'$                                                                   |
| $k^0$ の係数 | $a'^2p' + a'p$                                                                     | $p + a'p'$                                                                         |

(7)式における曲げの中立軸は(6)でねじり荷重の比 ( $T/T_B$ ) より曲げ荷重分担分の引張応力 ( $\sigma_n$ ) を決定し a)と同様にして求めた (表-3)。

c) コンクリートが圧壊する場合

上縁でねじり荷重によって生じる斜め圧縮応力 ( $\sigma_{Tc}$ ) と曲げによって生じる圧縮応力 ( $\sigma_{nc}$ ) との合応力がコンクリートの圧縮強度 ( $\sigma_{cb}$ ) に達したときに、コンクリートの圧壊によって耐力を失うと仮定した (図-10)。よって圧壊の条件は次式のようになる。

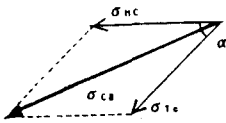


図-9 上縁での応力の重ね合わせ

$$\sigma_{nc}^2 + \sigma_{Tc}^2 - 2\sigma_{nc}\sigma_{Tc}\cos(180-\alpha) = \sigma_{cb}^2 \quad \dots(8)$$

$$\left( \frac{\sigma_{nc}}{\sigma_{cb}} \right)^2 + \left( \frac{T}{T_{Bc}} \right)^2 + 2 \frac{\sigma_{nc}}{\sigma_{cb}} \frac{T}{T_{Bc}} \cos \alpha = 1 \quad \dots(9)$$

コンクリートの応力-ひずみモデルは(10)式とした。

$$\sigma_{nc} = \varepsilon_c E_c \left( 1 - \frac{\varepsilon_c E_c}{4 \sigma_{cb}} \right) \quad \dots(10) \quad X = \frac{\varepsilon_c E_c}{\sigma_{cb}} \quad \text{とおくと}$$

$$\sigma_{nc} = X \left( 1 - \frac{X}{4} \right) \sigma_{cb} \quad \dots(11)$$

(9)、(11)式より

$$X = 2 - \sqrt{4 - A} \quad A = -4 \frac{T}{T_{bc}} \cos \alpha + 4 \sqrt{\left( \frac{T}{T_{bc}} \cos \alpha \right)^2 - \left( \frac{T}{T_{bc}} \right)^2 + 1} \quad \dots(12)$$

となり、(11)、(12)式よりねじり荷重の比 ( $T/T_{bc}$ ) を決めることにより曲げ分担分のコンクリートの圧縮応力 ( $\sigma_{nc}$ ) を求めた。

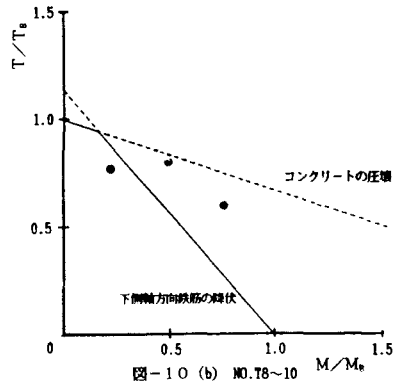
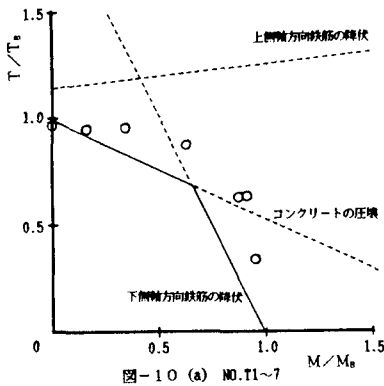
曲げの中立軸は、軸方向の力のつり合いと平面保持の仮定より次式となる。

$$\alpha \frac{1}{n} \left( 1 - \frac{X}{4} \right) k^2 + (p + p') k - p - p' a' = 0 \quad \dots(13)$$

(1)(2)(3)に示した破壊形式の組合せにより実際の破壊が決定できる。

## 6. 考察

本研究における実験結果(表-2)と 5. ねじりと曲げの重ね合わせによる破壊挙動との比較を図-10に示す。



実験に用いた供試体は、純ねじりではコンクリートの圧壊によって破壊するもので、曲げ荷重が大きくなるにつれてコンクリートの圧壊が起きやすくなるためねじり荷重が小さくなり、ある点から下側の軸方向鉄筋の降伏に破壊形式が変化すると考えられる。実験結果もほぼその傾向を示す。

## 7. まとめ

(1) 立体トラスモデルを用いたねじり荷重による応力と、曲げ荷重による応力を重ね合わせ、鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊という条件を用いて破壊形式を検討した結果、ねじり荷重と曲げ荷重の組合せから、コンクリートの圧壊、上側の軸方向鉄筋の降伏、下側の軸方向鉄筋の降伏、スターラップの降伏の4つの破壊形式があり、その最小値によって組合せ荷重の破壊曲線が得られた。

(2) 実験では、曲げ荷重の割合が低いときには上縁コンクリートの圧壊が起こり、曲げ荷重の割合が高くなるにつれて下側の軸方向鉄筋の降伏に破壊形式が変化するという一部の破壊形式の場合について確認できた。