

[135] ねじりを含む組合せ応力を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷力

正会員○大野 浩 (東京大学大学院)
 正会員 二羽 淳一郎 (東京大学工学部)
 正会員 岡村 甫 (東京大学工学部)

1. はじめに

土木学会では、現在、昭和61年度に刊行される「コンクリート標準示方書」の改訂作業が行なわれているが、その中で、ねじりに関する条項が新しく設けられ、その終局および使用限界状態に対する検討を行うこととなっている。これは、通常の作用荷重下ではねじりモーメントが発生しないような構造物が地震時にねじりモーメントの影響を受けて破損している事例や、都市部での立地上の制約から、ねじりモーメントが重要な外力となる構造形式をとらざるを得ないような場合が生じてきていることなどによるものと思われる。しかしながら、鉄筋コンクリート部材にねじりモーメントが作用する場合、その挙動はきわめて複雑となるため、未だ不明な点が多く残されていることも事実である。特に、せん断力との組合せ外力下での挙動は、解明されていない部分も多く、「コンクリート標準示方書」の改訂案の中でも、基本的には弾性論にもとづく安全側の相関関係で終局強度を規定しているにすぎない。

本研究は、このような現状を考慮して、ねじりとせん断が同時に作用した場合の鉄筋コンクリート矩形はりの耐荷力および挙動に関して定量的な評価を行う前提として、実験的な検討を行ったものである。

2. 耐力の相関関係

図-1は、せん断力とねじりモーメントが同時に作用した時の耐荷力に関して、既往の実験データと、等方弾性脆性材料に対して成り立つ耐力の相関を示す直線とを比較したものである。この際、純ねじり耐力 (T_u)、せん断耐力 (V_u) としては、実験値の存在するものについては実験値を、存在しないものについてはそれぞれ Chakrabortyの式⁶⁾、石川の式⁷⁾により求めた値を採用した。この図を見ると、等方弾性脆性材料に対して成り立つ直線よりもはりの耐荷力は、かなり大きくなっていることが認められる。特に、せん断力に比較して小さいねじりモーメントが作用する場合 ($T/V_u < 0.5$)、ねじりモーメントが付加されることによるせん断耐荷力の低下はほとんどみられない。しかし、このように、ねじりモーメントとせん断力の組合せ外力下では、はりの耐荷力がそれほど低下しないという相関関係を説明し得るマクロ的なモデルは、著者の知るかぎりでは存在しない。

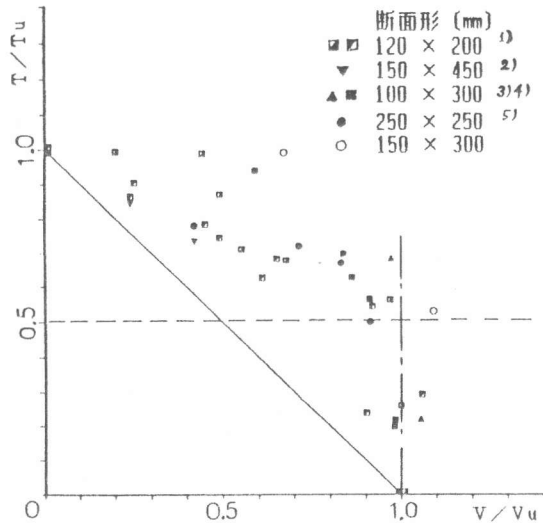


図-1 せん断とねじりの耐力の相関関係

3. 実験の概要

ねじりモーメントとせん断力の組合せ外力下ではりの挙動を明らかにするために、補強筋のひずみについて詳細なデータを得ることを目的として、実験を行った。供試体は、図-2に示すように幅15cm、高さ30cmの矩形断面で、せん断スパン比 a/d を 3.61 としたものを2体製作し、作用するねじりモーメントとせん断力の比率 T/V を 4cmと12cmに変えて実験を行った。配筋に関しては、スターラップの降伏前に軸方向鉄筋が降伏して曲げ破壊を生じないように考慮した。実際には、曲げ引張り側にD25を4本、曲げ圧縮側にD16を2本配置し、D6を閉合型のスターラップに加工し、11cm間隔で配置した(図-2)。なお、鉄筋の材料特性値を表-1に示す。鉄筋のひずみの測定は、片側スパン中のすべてのスターラップの4辺の midpoint に、ストレインゲージを貼付して行った。載荷方法の概略を図-3に示す。この方法は、スパン中央で1点載荷

を行い、はり本体に対称に取り付けたアーム下の支点の位置をずらすことにより、作用するねじりモーメントとせん断力の比率 T/V を実験の間中一定とした载荷経路で加力することができるものである。

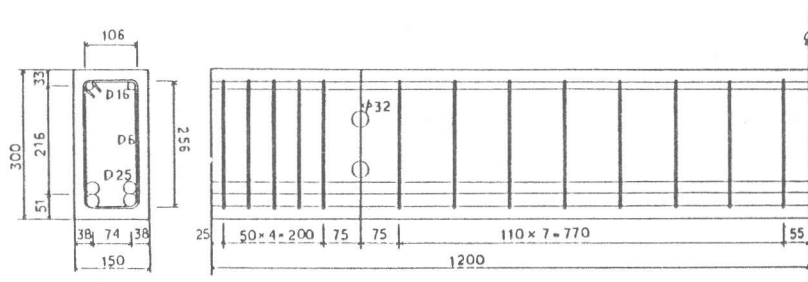


図-2 供試体の概要

4. 実験結果および考察

主な実験結果および計算結果を表-2に示す。以下の記述において、両側面の内、ねじりによる斜め引張り応力と曲げによる斜め引張り応力が同方向の面をP面、逆方向の面をN面と記す。

表-1 鉄筋の材料特性値

鉄筋の種類	断面積 (cm ²)	降伏応力 (kg/cm ²)	降伏ひずみ ($\times 10^{-5}$)
D 6	0.3167	4262	2364
D 16	1.986	3566	2059
D 25	5.067	4560	2300

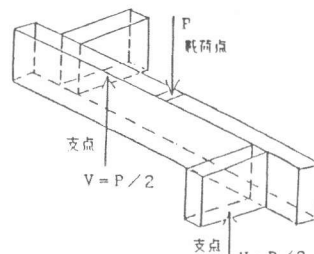


図-3 载荷方法

4-1. 斜めひびわれ性状

図-4に破壊時のひびわれ状況図を示す。 $T/V = 4$ cmの供試体は、せん断型のひびわれパターンを示し、P面に斜めひびわれが発生した後、すぐにN面に斜めひびわれが発生し、上面に向かって進展していった。両側面のひびわれ性状には、

表-2 主な実験結果

供試体	斜めひびわれ発生 (%) ⁽¹⁾				破壊荷重 P max (ton)	M max M _{u(2)}	V max V _{u(3)}	T max T _{u(4)}
	P面	N面	上面	下面				
$T/V = 4$ cm	38	52	95	16	28.8	0.94	1.09	0.53
$T/V = 12$ cm	37	100	73	17	17.8	0.58	0.67	0.99

(1)破壊荷重に対する百分率, (2)曲げ理論, (3)石川の式, (4) Chakrabortyの式

ほとんどねじりモーメントの影響はみられなかった。また、最大荷重の約95%で側面の斜めひびわれが上面に達した。一方、 $T/V = 12$ cmの供試体では、破壊に至らなかった側のスパンのN面には最後まで目視できるような斜めひびわれは発生せず、破壊に至った側のスパンのN面においてもねじりによる斜め引張り応力に基づくひびわれが発生したのは、最大荷重を越えてからであった。

4-2. ねじりモーメント-ねじり角関係

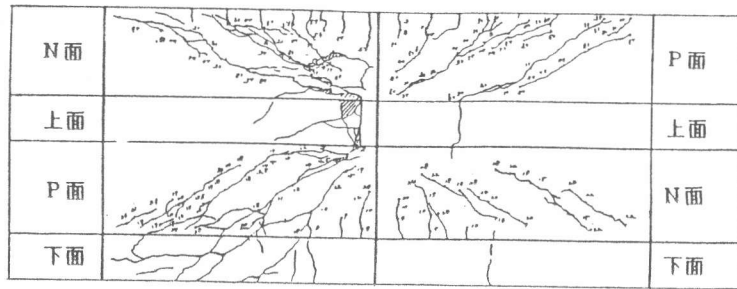
図-5は、ねじりモーメント-ねじり角関係の実験値と、Hsuの式⁽⁹⁾により求めた純ねじりが作用した場合のねじりモーメント-ねじり角関係の計算値を比較したものである。この図を見ると、相対的にせん断力の影響の大きい $T/V = 4$ cmのものは、 $T/V = 12$ cmのものより立ち上がり以降、勾配が常に小さく、せん断力の影響でねじり剛性が低下していることが分かる。これは、ねじりだけが作用した場合には、斜めひびわれが発生しない部分にも、せん断力の影響でひびわれが発生したり、スターラップが降伏しない箇所が、降伏したりするために、部材全体としてのねじり剛性が低下したものと考えられる。

4-3. スターラップの平均ひずみ

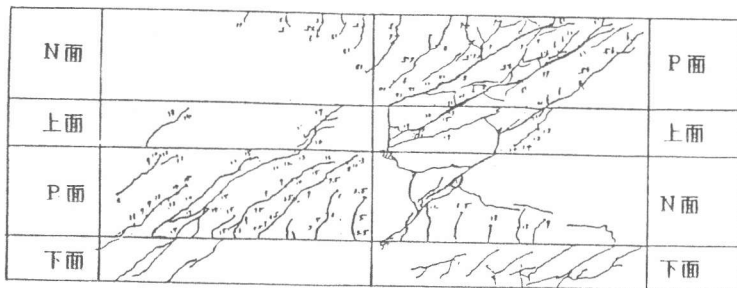
図-6は、P面のスターラップの平均ひずみ（せん断スパン中央部における3本のスターラップ長辺の midpointのひずみの平均）と作用せん断力の関係を示したものである。図中の $V_c + V_s$ は曲げせん断のみが作用した場合のスターラップの平均ひずみと作用せん断力との関係を示している。ただし、 V_c は岡村・檜貝の式⁽⁹⁾、 V_s は45°トラスモデルにより求めた値である。P面において、ねじりモーメントがスターラップの平均ひずみ-せん断力関係に及ぼす影響は、スターラップのひずみ始めるせん断力と其後のスターラップのひずみ勾配に現れると予想される。図-6をみると、スターラップのひずみ始めるせん断力に関しては、 V_c 、 $T/V = 4$ cmのはり、 $T/V = 12$ cmのはりの順に小さくなっており、明らかにねじりモーメントの影

響を示している。しかし、ひずみ勾配に関しては、 $T/V = 4\text{ cm}$ のはり、 $T/V = 12\text{ cm}$ のはりのいずれの場合も曲げせん断のみが作用した場合のひずみ勾配とはほぼ等しく、ねじりモーメントの影響を示していない。もし仮に、P面のスターラップに影響を及ぼすせん断応力が、ねじりモーメントやせん断力に正比例して増加しているとすると、この図において、ねじりモーメントとせん断力の比率 T/V が大きくなるに従って、ひずみ勾配は図中の傾き(S)から(T)へと変化するはずである。しかし、実際のひずみ勾配は、 $T/V = 4\text{ cm}$ のはりと $T/V = 12\text{ cm}$ のはりではほぼ等しくなっている。すなわち、P面のスターラップに影響を及ぼすせん断応力が、ねじりモーメントやせん断力に正比例して増加してはいないということになる。

図-7は、上面における荷点付近の3つのスターラップの平均ひずみとねじりモーメントの関係を $T/V = 4\text{ cm}$ のはりと 12 cm のはりで比較したものである。今、上面だけに着目した場合、そこに作用する応力としては、曲げモーメントによる圧縮応力とねじりモーメントによるせん断応力の2つを考えれば良いと思われる。したがって、これら2つの応力の組合せでスターラップのひずみは決定されると考えられる。また、これら2つの応力のうちせん断応力が等しい場合には、曲げモーメントによる圧縮応力が大きい程、スターラップのひずみは小さくなることになる。しかし、実際のデータを見ると、等しいねじりモーメントが作用した場合、曲げモーメントによる圧縮応力が大きい $T/V = 4\text{ cm}$ の供試体の方が逆



$T/V = 4\text{ cm}$



$T/V = 12\text{ cm}$

図-4 ひびわれ状況

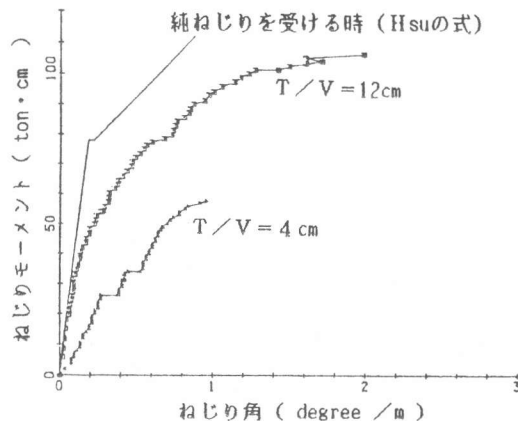


図-5 ねじりモーメント-ねじり角関係

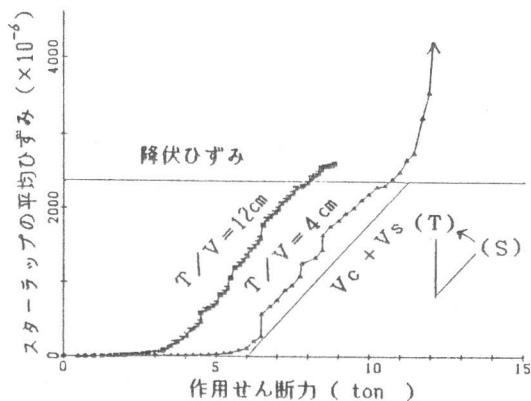


図-6 P面のスターラップの平均ひずみ

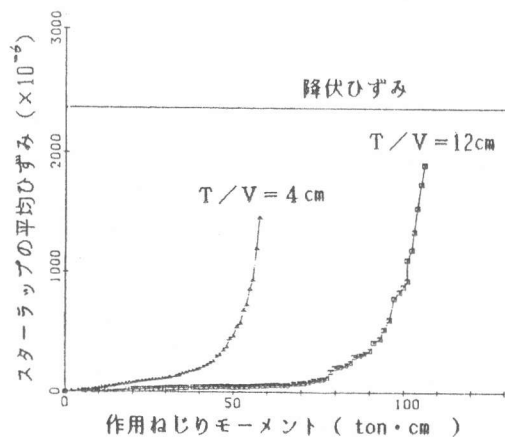


図-7 上面のスターラップの平均ひずみ

にスターラップのひずみは大きくなっている。これは、等しいねじりモーメントが作用する場合でも、上面に生じるせん断応力の値は異なることを示している。つまり、この場合には、等しいねじりモーメントが作用した時、 $T/V = 4 \text{ cm}$ の供試体の方がねじりモーメントによるせん断応力は大きいことになる。

図-6、図-7にみられるようなスターラップのひずみに関する現象は、断面内の各部の性質（主にせん断剛性）が不均一になることが原因で生じているものと考えられる。すなわち、せん断力とねじりモーメントが同時に作用する場合、断面内の性質が不均一になるため、剛性が他の部分に比べて大きいところには、断面内の性質が均一であるとして計算されるせん断応力よりも大きいせん断応力が、逆に、剛性が他の部分よりも小さいところには、小さいせん断応力が実際には作用していると考えられる。たとえば、最も大きいせん断応力が作用しているP面の剛性は常に他の部分の剛性に比べて小さくなるために、P面では、断面内の性質を均一として計算されるせん断応力よりも小さいせん断応力が作用しているものと考えられるのである。さらに、このために、最終的な耐荷力も、等方弾性脆性材料に対して成り立つ直線の耐力の相関関係よりも大きくなっているものと考えられる。この挙動を明らかにするためには、組合せ外力下での断面内の各部分の剛性の低下について評価することが必要となってくる。この剛性の低下の程度を考慮したせん断応力の配分が定量的に評価できれば、せん断力とねじりモーメントが同時に作用する場合の耐力の相関関係が確立されるものと思われる。

5. むすび

本研究は、鉄筋コンクリート矩形はりにせん断力とねじりモーメントが同時に作用した場合の耐荷力および挙動に関して、既往の実験データを調べると共に、スターラップのひずみ等の詳細なデータから、検討を行ったものである。限られた範囲内ではあるが、得られた結果を以下に簡単に記す。

- 1) 矩形断面の鉄筋コンクリートはりにせん断力とねじりモーメントが同時に作用する場合の耐荷力は、弾性論から求まる耐力の相関（直線）よりも、かなり大きくなる。
- 2) このような耐力の上昇は、断面内の各部の性質が異なることにより生じているものと考えられる。すなわち、最もクリティカルなP面には、断面内の性質が均一であるとして計算されるせん断応力よりも小さいせん断応力が実際には作用しているために、その耐荷力も弾性論に基づく耐力の相関関係よりも大きくなるものと考えられる。

〔参考文献〕

- 1) 児島孝之：「ねじり・せん断を受けるコンクリートはりに関する一実験」，第39回年次学術講演会講演概要集第5部，1984年10月
- 2) 辻 幸和：「曲げせん断とねじりを受けるRC部材における補強鉄筋の効果」，第4回コンクリート工学年次講演会論文集，1982年
- 3) 松井雅志：「せん断及びねじりを受けるRC部材の強度」，第3回コンクリート工学年次講演会論文集，1981年
- 4) 白井高志：「ねじりを受ける鉄筋コンクリート部材のせん断耐荷力」，第37回年次学術講演会講演概要集第5部，1982年10月
- 5) 大野 浩：「せん断とねじりを受ける鉄筋コンクリートはりの補強方法」，第38回年次学術講演会講演概要集第5部，1983年9月
- 6) Chakraborty, M : 'Ultimate Torque of Reinforced Rectangular Beams', ASCE ST March 1979
- 7) 石川雄一：「スターラップを有するRCはりのせん断耐荷力のマクロ的推定方法」，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，1984年
- 8) Hsu, T.T.C. : 'Torsion of Structural Concrete — Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members', ACI SP18, 1968
- 9) 岡村 甫：「コンクリート構造の限界状態設計法」，共立出版