

[94] せん断及びねじりを受けるRC部材の強度

正会員 ○松 井 雅 志 (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

鉄筋コンクリート部材の設計では、ねじりが生じないような構造型式を極力選定するという設計思想が従来とられてきており、ねじりが支配的であるような部材は非常にまれである。しかし、地震の被害例の中に、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部材がねじりの影響を受けて破損している例がある事、都市部の構造物などにみられる立地上の制約条件から、ねじりが重要な外力となる構造型式をとらざるを得ない場合が生じる事など、設計上ねじりに対する検討をおろそかにできない場合が生じてきている。さらに、他の外力に対する設計法が次第に洗練されつつある現在、設計体系を調和のとれた合理的かつ経済的なものとするためには、ねじりを含む組合せ荷重下での部材の挙動の解明が必要である。

ねじりを含む組合せ荷重下での部材の挙動の中で最も重要なものの1つが曲げせん断とねじりを受ける場合であろう。この分野における研究は近年活発に行なわれているが、いまだ十分に解明されているとは言えない状況にある。既往の研究はねじりがせん断に対し卓越する領域に注目して行なわれている場合が多いため、実験データもこの領域のものも多く、せん断が卓越する領域でのデータは比較的少ない。このような状況から本稿では、曲げせん断に比較的小さなねじりが作用するようなせん断が卓越する領域に注目し、スターラップを有する10本の矩形梁の実験を行なった。そのうち5本の梁のスターラップの形状をねじりが作用する場合に従来必要とされてきた閉合スターラップとし、他の5本の梁ではねじりの作用しない場合のせん断補強に用いられるU型スターラップとした。その実験結果をもとに、鉄筋のひずみ、終局強度、閉合スターラップを用いた梁とU型スターラップを用いた梁の比較などに注目し、考察を行なった。

2. 実験の概要

本実験は矩形梁にせん断及び小さなねじりモーメントが作用する場合に注目し、その挙動を明らかにするために行なわれたものである。10本の供試体は図-1に示すような断面を有し、全長は270cmである。スターラップにはD6を用い、その間隔は10cmと15cmである。スターラップの形状は、ねじりが作用する場合に従来必要とされてきた閉合スターラップと、ねじりが作用しない梁のせん断補強に用いられるU型スターラップの2種類である。軸方向には曲げ破壊を防ぐためにD19を曲げ引張側に4本、D16を曲げ圧縮側に2本配筋した。コンクリート強度は 350 Kg/cm^2 のシリーズと高強度のシリーズの2種である。載荷方法を図-2に示す。曲げとせん断をスパン中央において油圧ジャッキにより1点載荷した。せん断スパンは100cmであり a/d は3.8である。また、供試体本体に $10 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ のモルタル製アームをPC鋼棒を用いて接合し、アーム先端部にワイヤーを鉛直下方に向けて結合し、滑車を介して水平方向にチェインブロックで張力を加える事によりねじりを加力した。せん断とねじりの比を表わす $T/(Vb)$ の値は0.1及び0.36の2種類である。ねじり載荷における荷重の検出はアーム部とワイヤーの間に張力計を介する事により行なった。用いた支承はねじりと曲げをとるための球面、及び軸方向変位をとるためのスライディング・プレートより成り、各々の接触面には固体潤滑材(P T F C)がつけられている。ねじりモーメントの値は、終局時に支承部に作用する面圧から求めた摩擦係数

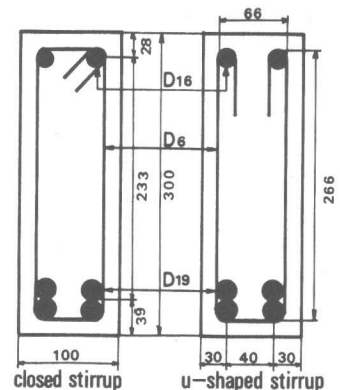


図-1 供試体の断面図

を用いて支承部の摩擦力による損失分を算出し、補正を行なったものである。供試体の諸元を表-1に、用いた鉄筋の諸元を表-2に示す。

3. 実験結果及び考察

主要な実験結果を表-3に示す。以下の記述において供試体の側面を考える時、曲げせん断によるせん断応力とねじりによるせん断応力が同符号の面をS面、異符号の面をNS面とする。図-3は供試体の破壊状況を示したものであるが、この図から

明らかのように本実験における斜めひびわれは、いずれの供試体においてもねじりが加わらないせん断を受けた場合の斜めひびわれと同じ方向を持っており、ねじりが卓越する場合のようなせん断状の斜めひびわれは発生しない。また、他の特徴として、S面の斜めひびわれ先端の位置はNS面の斜めひびわれ先端の位置よりもすべての荷重レベルにおいて高いという点があげられる。上面に発生する斜めひびわれは、どの供試体においてもS面の斜めひびわれが上面にのびたものであり、ねじりモーメントとせん断力の大きさの比を示す $T / (Vb)$ の値が0.1であるC1, C4, U2, U4においては終局時に至るまで上面にひびわれの発生は無く、 $T / (Vb)$ が0.36である他の供試体においても上面に斜めひびわれが発生したのは終局時近くであった。

図-4はスターラップのひずみを示したものである。図中のプロットされている点は、いくつかの測定点における平均値であり、白丸はS面のひずみを、黒丸はNS面のひずみを表わしている。また、図中の $Vc + Vs$ の線はせん断のみを受ける梁のせん断力-ひずみ関係を示している。 Vc は岡村(1)の式であり、 Vs は支点及び載荷点付近でのせん断力-ひずみ関係が古典的トラスアナロジーとは異なっている事を考慮して補正したトラスアナロジーを用いている(5)。また、 $V^1c + Vs$ は、HS

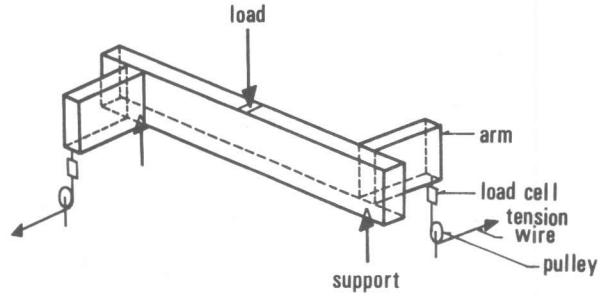


図-2 載荷方法

表-1 供試体の諸元

specimen	Pw	Pt	γ	fc'	$\frac{T}{Vb}$	$\frac{T}{Mmax}$	$\frac{M}{Vd}$	stirrup
C1	4.4	5.14	0.42	368	0.10	0.010	3.83	closed
C2	4.4	5.14	0.42	351	0.36	0.036	3.83	closed
C3	4.4	5.14	0.63	334	0.36	0.036	3.83	closed
C4	4.4	5.14	0.63	380	0.10	0.010	3.83	closed
HC	4.4	5.14	0.42	700	0.36	0.036	3.83	closed
U1	4.4	5.14	0.42	352	0.36	0.036	3.83	U-shaped
U2	4.4	5.14	0.42	338	0.10	0.010	3.83	U-shaped
U3	4.4	5.14	0.63	386	0.36	0.036	3.83	U-shaped
U4	4.4	5.14	0.63	351	0.10	0.010	3.83	U-shaped
HU	4.4	5.14	0.42	800	0.36	0.036	3.83	U-shaped

Pw:percentage of longitudinal bars (tension) Pt:total percentage of longitudinal bars γ:percentage of stirrups
fc':cylinder compressive strength of concrete (kg/cm²)
T:torque V:shear force M:bending moment b:over-all width d:effective depth

表-2 鉄筋の諸元

bar	cross-sectional area (cm ²)	yield strength (kg/cm ²)	yield strain (× 10 ⁻⁶)
D6	0.3167	3250	1730
D16	1.986	3550	1870
D19	2.865	3892	2050

表-3 実験結果

specimen	diagonal cracking			stirrup yield (mean)		Vu (kg)	$\frac{V_{yval}}{V_{cal}}$		Vu/Vucal ²⁾	Tu (kg·cm)	$\frac{T_u}{T_{ucal}}$ ³⁾
	S	NS	top	S	NS		S	NS			
C1	30	40	100	70	--	8950	0.86	--	1.0	9200	0.21
C2	33	55	66	78	100	8050	0.87	1.12	0.92	28700	0.66
C3	30	40	90	90	95	8950	0.93	0.98	0.98	31900	0.61
C4	33	50	100	75	83	10750	0.92	1.01	1.11	11100	0.20
HC	36	55	82	73	91	9850	0.87	1.08	--	35100	0.65
U1	44	56	90	90	100	8000	1.0	1.11	0.91	28500	0.66
U2	30	50	100	80	90	8950	1.0	1.13	1.04	9200	0.21
U3	30	48	67	76	100	9400	0.81	1.06	0.96	33500	0.61
U4	33	41	100	90	100	10900	1.13	1.25	1.18	11200	0.21
HU	40	58	98	70	100	9125	0.76	1.08	--	32500	0.57

Each value indicates a percentage of load to ultimate load.
1) $V_{cal} = Vc + Vs$ Vc: reference 1 Vs is based on Truss Analogy.
2) reference 6
3) reference 3

U(2)による T_c を用いて、 $V_c / V_c + T / T_c = 1$ で求められる V_c を V_c のかわりに用いたせん断力-ひずみ関係を示している。さらに、 $V_s + V_t$ 、 $V_s - V_t$ の線は(4)に示される計算でねじりモーメントを等価なせん断力におきかえた場合のS面とNS面のせん断力-ひずみ関係を各々示している。S面におけるひずみの実測値の傾きはどの供試体においても、ひずみが1000 μ 程度までは V_s の傾きと大差なく、その後終局時に近づくと $V_s + V_t$ の傾きに近づいていく傾向が見られる。これは、せん断が卓越した応力状態によって、S、NS両面に斜めひびわれが入った後も、終局時にある程度近づくまではねじりに対して曲げ圧縮域などの抵抗成分が大きく、梁全体のねじりに対する剛性は大きいため、ねじりモーメントがひずみに与える影響は小さく、ひずみの傾きは

V_s に近いが、終局時に近づきS面の斜めひびわれが上面に達するようになると、ねじりに対する剛性が低下し、ねじりの影響が現われ、ひずみの傾きは $V_s + V_t$ に近づくと考えられる。

本実験における破壊状況を図-3に示す。すべての供試体で図に示した供試体とほぼ同様な傾向を示した。 $T / (V_b)$ が0.1である4本の供試体ではS面の斜めひびわれは終局時に上面に達し、NS面の載荷点付近のコンクリートの圧壊がみられ、載荷点付近の上面ではかぶりのはく落が生じた。 $T / (V_b)$ が0.36の供試体では終局時以前にS面の斜めひびわれが上面に達し、その後 $T / (V_b)$ が0.1の供試体と同様にNS面の圧壊、上面のかぶりのはく落がみられた。スターラップは終局時までC1のNS面を除きすべての供試体で降伏した。軸方向鉄筋はすべての供試体で降伏しなかった。スターラップの降伏荷重の実験値と $V = V_c + V_s$ で求められるスターラップの降伏荷重の計算値の比較を表-3に示す。ねじりの影響により、S面ではU4を除いていずれの供試体においても実測値が計算値より小さく、NS面ではいずれの供試体においても実測値が計算値よりも大きい、 $T / (V_b)$ の値の違いがS面、NS面のスターラップの降伏荷重に与える影響は明確には現われていない。

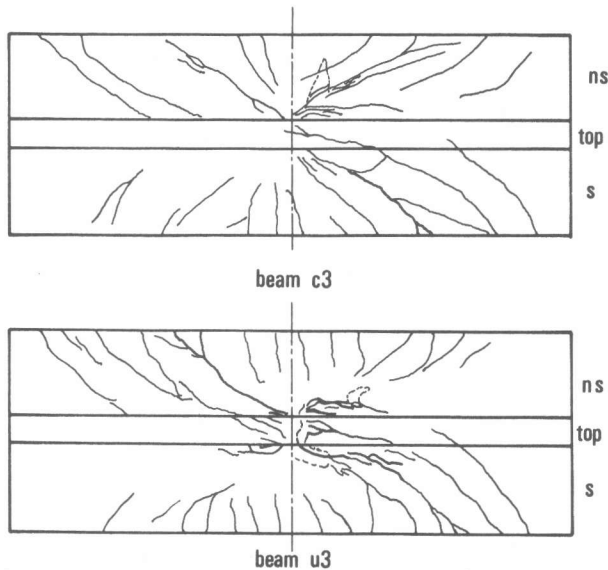


図-3 破壊状況

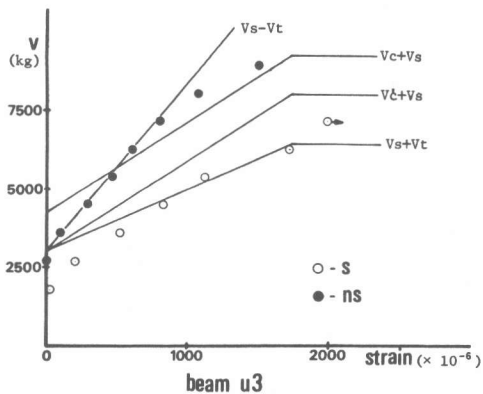
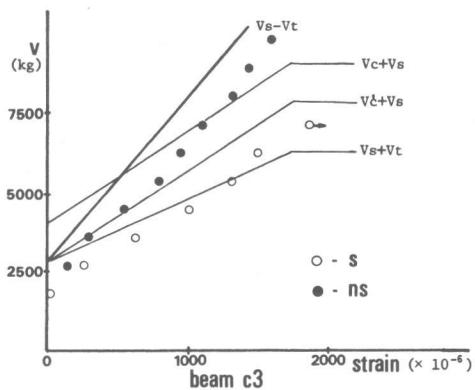


図-4 スターラップのひずみ

また、NS面のスターラップ降伏後の耐力の上昇はほとんどみられない事から、NS面のスターラップ降伏とコンクリートの破壊が本実験の断面形状では $T/(Vb)$ が0.36程度でほぼ同じ荷重で生じていると考えられ、 $T/(Vb)$ がさらに大きくなると、NS面のスターラップが降伏する前にコンクリートが破壊すると推測される。終局耐力の実験値と計算値の比較を表-3に示す。せん断耐力の比較より、 $T/(Vb)$ が0.1の供試体では実験値が計算値より大きく、 $T/(Vb)$ が0.36の供試体ではねじりの終局耐力の60%程度のねじりモーメントが作用しているにもかかわらずせん断耐力の低下は10%以下である事がわかる。この事より、ねじりがスターラップのひずみの勾配に与える影響と同様に、本実験で扱ったような $T/(Vb)$ が0.36程度のねじりが小さい領域ではねじりモーメントの作用によるせん断耐力の低下は非常に小さいといえよう。

閉合スターラップを用いた供試体とU型スターラップを用いた供試体はスターラップ量と $T/(Vb)$ をパラメータとしてC1とU2、C2とU1、C3とU3、C4とU4、HCとHUが各々対応している。その強度比は順に、1.00、1.01、0.95、0.98、1.08であり、U型スターラップを用いた事による強度の低下はほとんどみられない。また、図-3に示す破壊状況、図-4に示すスターラップのひずみも両者による違いはほとんど無い。ただし、上面のひびわれに対してU型スターラップではひびわれ幅の増大や、ひびわれの伸展を拘束できないため、図-3のC3とU3では上面のひびわれの状況が明らかに異なっている。しかし本実験では上面に斜めひびわれが発生するのは終局近くであるため、この現象はほとんど強度に影響を与えていない。従って本実験の範囲内では、閉合スターラップを用いた梁とU型スターラップを用いた梁の挙動はほぼ同じであると考えられる。すなわち、本実験のように上面の斜めひびわれが終局近くに生ずるような梁に対しては、ねじりが作用する場合に従来必要とされてきた閉合スターラップのかわりにU型スターラップを用いた補強ができる可能性が示されたといえよう。しかし、その適用限界を定量的に把握する事は $T/(Vb)$ 、断面形状、軸方向配筋の仕方など影響要因が多く、また複雑であるため、現段階では困難であり、今後の一層の研究が必要である。

4. むすび

せん断とねじりを受ける鉄筋コンクリート矩形梁のせん断が卓越する領域での挙動を明らかにするため、せん断とねじりの比 $T/(Vb)$ 、スターラップの形状と量をパラメータとして10本の供試体の実験を行なった。その結果、せん断に小さいねじりモーメントが加わった場合、斜めひびわれ荷重は低下するが、鉄筋のひずみや終局耐力に及ぼすねじりの影響は非常に小さい事がわかった。また、ねじりが加わる場合に従来必要とされてきた閉合スターラップのかわりにU型スターラップを用いても、本実験の範囲内では上面の斜めひびわれの伸展や幅の増大に対する拘束がU型スターラップではできない点を除いて、破壊に至る挙動や終局耐力などにおいて、ほぼ同様の結果が得られ、U型スターラップを用いた補強の可能性が示された。しかし、せん断が卓越する領域でのねじりの影響の定量的評価、U型スターラップの適用範囲の定量的評価については今後の実験及び理論両面にわたる一層の研究が必要であろう。

[参考文献]

- 1.H.Okamura,T.Higai : "Proposed Design Equation For Shear Strength Of Reinforced Concrete Beams Without Web Reinforcement" Proc. of JSCE No.300 August 1980
- 2.T.T.C.Hsu : "Torsion Of Structural Concrete -- Plain Concrete Rectangular Sections" ACI SP18
- 3.M.Chakraborty : "Ultimate Torque Of Reinforced Rectangular Beams" ASCE Journal Of The Structural Division March 1979
- 4.B.Thürlimann : "Torsional Strength Of Reinforced And Prestressed Concrete Beams -- CEB Approach" CEB Bulletin D'Information No.113
- 5.H.Okamura,S.Farghaly : "Shear Design Of Reinforced Concrete Beams For Static And Moving Loads" Proc. Of JSCE No.287 July 1979
6. 荒川 卓 : 「鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究」

北海道大学工学部研究報告 第25号 1960