

[134] 鉄筋コンクリート部材の変形適合ねじりに関する一実験

正会員 児島孝之(立命館大学理工学部)

正会員 高木宣章(立命館大学理工学部)

正会員 和田教志(ドーピー建設工業)

1. はじめに

一般にコンクリート構造部材にねじりモーメントのみが作用することは稀れであり、曲げ・せん断に比べて二次的とみなされる場合には、設計上無視されることが多い。しかし、我が国は地震国であり、最近の構造物の大型化、都市部での制約された立地条件のもとでの非対称構造物の建設等により、構造部材は使用状態・終局状態のいずれにおいてもねじりの影響を無視することができない場合が多くなってきている。

現在、土木学会の鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造部材の設計法は、従来の許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行すべく審議されている。構造物に作用するねじりモーメントは釣り合いねじりと変形適合ねじりに大別されるが土木学会限界状態設計法指針案によれば、終局限界状態時の検討は釣り合いねじりに対してのみ行ない、変形適合ねじりに対しては省略できることになっている。この理由としては、ねじりひびわれ発生後のねじり剛性の低下が大きく、終局限界状態での作用ねじりモーメントが小さくなるためとされている。しかしながら、変形適合ねじりでねじりを無視して設計した場合、終局限界状態では当然発生しているねじりひびわれが、部材の曲げ・せん断性状に影響を与えることが予想される。ねじり・せん断・曲げの複合荷重を受ける部材に関する研究は、最近、比較的活発に行なわれているが、上記のような変形適合ねじりの検討に関する実験はほとんど行なわれておらず、また設計上検討しなければならない問題である。

本研究では、変形適合ねじりの一実験としてねじりを無視し、曲げ・せん断に対して設計された、すなわち、せん断補強筋として、U型スターラップを有する長方形断面はりを用いて、あらかじめ、あるねじりモーメントと曲げモーメントの比率(T/M)のもとで、ねじり・せん断・曲げの複合荷重を行ない、ねじりひびわれが生じた後、あるねじり回転角に至らせた後除荷し、曲げ・せん断下で、あるいは初期荷重と異なったT/Mで再荷重し、曲げ・せん断下における耐力、剛性等諸性状の検討を行なった。

2. 実験概要

実験は軸方向鉄筋比、せん断補強率およびせん断スパン有効高さ比(a/d)を変化させた4シリーズよりなっており、これらを表-1の実験計画に示す。使用鉄筋は表-2に示すように、軸方向鉄筋にはD13およびD10を、U型スターラップにはD6を使用した。使用鉄筋の機械的性質を表-5に示す。コンクリートの示方配合を表-3に、荷重時材令のコンクリートの強度および弾性係数を表-4に示す。いずれのシリーズにおいても供試はりの断面はすべて高さ20cm、幅12cmの長方形とした。供試はりの寸法および配筋図の一例を図-1に示す。各シリーズの供試はりの本数は12本である。

図-2に荷重装置の概略を示す。ねじり荷重は供試はりに取り付けられた偏心荷重用アームより行ない、曲げ・せん断荷重はねじり荷重用ビーム中央に取り付けた油圧ジャッキにより行なった。曲げ・せん断荷重荷重は油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより検出し、ねじり荷重荷重は試験機の指示計の読みと曲げ・せん断荷重荷重の差から求めた。曲げ変形、ねじり変形が互いに各部で他を拘束し合わないよう、支点部および荷重点部にはすべてボールベアリングを使用した。ただし、曲げ・せん断荷重には支点部にローラーベアリングを使用し、荷重条件が純ねじり荷重、ねじり・せん断・曲げの複合

表-1 実験計画

シリーズ	鉄筋比(%)		a/d	スパン(m)
	P1	Pv		
1	1.2 (1.9)	0.44	3.5	1.6
2	2.5 (3.3)	0.44	3.6	1.6
3	2.5 (3.3)	0.44	2.7	1.1
4	2.5 (3.3)	0.66	2.7	1.1

注) P1=A_s/b·d
()内は(A_s+A_s)/b·d
Pv=A_v/b·s

表-2 補強鉄筋の詳細

シリーズ	軸方向鉄筋		スターラップ間隔 S (cm)
	A's	A _s	
1	2D10	2D13	12.0
2	2D10	4D13	12.0
3	2D10	4D13	12.0
4	2D10	4D13	8.0

注) スターラップにはD6を使用

表-3 コンクリートの示方配合

骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
20	7.5±1	4.5±1	60	44	167	278	798	1058

注) 混和剤ポゾリスNO.5LをC×0.25%使用

表-4 コンクリートの強度および弾性係数

圧縮強度	30.2
引張強度	27.2
曲げ強度	50.9
弾性係数	2.76×10 ⁵

(kg/cm²)

表-5 使用鉄筋の機械的性質

種類	降伏点応力 (kg/cm ²)	引張強さ (kg/cm ²)	伸び率 (%)
D6	3231	5260	24.3
D10	3657	5412	17.9
D13	3666	5480	25.8

表-6 実験結果

シ リ ー ズ	No	初期 終局または 最高値 ($\times 10^4$ kg-cm)			破 壊 形 式	二 回 目 以 降 の 載 荷 終 局 ま た は 最 高 値 ($\times 10^4$ kg-cm)			破 壊 形 式	破 壊 箇 所	
		T/M	E-メント	トルク		T/M	E-メント	トルク			
1	1	0.00	16.8	—	M	M	—	—	—	—	—
	2	∞	—	2.99	T	M	0.00	15.9	—	M	M
	3	0.07	16.9	1.18	M+T	M	0.00	16.4	—	M	M
	4	*0.07	15.8	1.11	—	—	0.00	17.0	—	M	M
	5	0.18	13.8	2.49	M	M	0.00	15.9	—	S	S
	6	*0.18	12.3	2.21	—	—	0.00	16.8	—	M	M
	7	*0.18	12.3	2.21	—	—	0.07	16.5	1.15	M	M
	8	*0.18	13.0	2.34	—	—	*0.07	15.8	1.11	—	—
	9	0.43	7.54	3.24	S	S	0.00	15.9	—	M	M
	10	0.43	6.49	2.79	S	S	0.00	16.1	—	M	M
	11	*0.43	6.70	2.88	—	—	0.00	16.2	—	M	M
	12	*0.43	6.70	2.88	—	—	0.18	14.6	2.62	S	S
2	1	0.00	27.6	—	M	M	—	—	—	—	—
	2	∞	—	3.50	T	M	0.00	27.8	—	M	M
	3	0.05	29.4	1.47	M+T	M	0.00	24.3	—	M	M
	4	*0.05	26.5	1.33	—	—	0.00	27.5	—	M	M
	5	0.13	21.5	2.79	M	M	0.00	29.4	—	S	S
	6	0.13	20.2	2.63	S	S	—	—	—	—	—
	7	*0.13	18.5	2.41	—	—	0.00	28.8	—	M	M
	8	*0.13	17.7	2.30	—	—	0.05	28.2	1.41	M	M
	9	0.31	11.5	3.58	T, S	S	0.00	23.1	—	S	S
	10	*0.31	9.97	3.09	—	—	0.00	28.2	—	M	M
	11	*0.31	9.97	3.09	—	—	0.13	20.6	2.68	T, S	S
	12	*0.31	9.44	2.93	—	—	*0.13	17.7	2.30	—	—
						*0.05	27.7	1.39	—	—	
						0.00	27.9	—	M	M	
3	1	0.00	27.7	—	M	M	—	—	—	—	—
	2	∞	—	3.50	T	M	0.00	23.0	—	M	M
	3	0.05	26.8	1.34	S	S	0.00	25.4	—	S	S
	4	*0.05	22.0	1.10	—	—	0.00	28.4	—	M	M
	5	0.13	19.2	2.49	T, S	S	0.00	23.4	—	S	S
	6	*0.13	13.5	1.75	—	—	0.00	28.4	—	M	M
	7	*0.13	17.0	2.21	—	—	0.00	28.4	—	S	S
	8	*0.13	18.5	2.40	—	—	0.05	24.4	1.22	S	S
	9	0.31	11.0	3.42	T	S	0.00	18.8	—	S	S
	10	*0.31	8.69	3.49	—	—	0.00	28.6	—	M	M
	11	*0.31	11.3	3.49	—	—	0.00	27.2	—	M	M
	12	*0.31	11.3	3.50	—	—	0.13	19.9	2.58	S	S
4	1	0.00	27.5	—	M	M	—	—	—	—	—
	2	∞	—	4.13	T	M	0.00	27.0	—	M	M
	3	0.06	28.4	1.70	M	M	0.00	27.9	—	M	M
	4	*0.06	25.7	1.54	—	—	0.00	29.9	—	M	M
	5	0.15	24.9	3.73	T, S	S	0.00	23.0	—	S	S
	6	*0.15	20.8	3.12	—	—	0.00	28.8	—	M	M
	7	*0.15	20.2	3.02	—	—	0.06	27.8	1.67	M	M
	8	0.36	11.5	4.14	T	M	0.00	27.9	—	M	M
	9	0.36	10.8	3.90	T	S	0.00	25.2	—	M	M
	10	*0.36	11.2	4.02	—	—	0.00	27.9	—	M	M
	11	*0.36	10.7	3.87	—	—	0.15	20.7	3.10	T, S	S
	12	*0.36	10.7	3.86	—	—	0.15	22.8	3.43	T	S

注) *:破壊させずに降荷したもの
 破壊形式 M:曲げ破壊 S:せん断破壊 M+T:曲げとねじりの複合破壊 T,S:ねじりとせん断の複合破壊 T:ねじり破壊
 破壊場所 M:曲げスパン S:せん断スパン

載荷と載荷条件が変わらないように偏心載荷用アームを供試はりに取り付けた。

各シリーズにおける載荷実験の手順を以下に述べる。

(1) 先ず、純ねじり載荷および曲げ・せん断載荷を行ない、純ねじり強度 (Tu)、曲げ強度 (Mu) を求める。

(2) 次に無次元化した強度 $M/M_u - T/T_u$ の相関関係図 (図-3) 上で実験値がほぼ4等分されるように、すなわち $(T/M) \times (Mu/Tu)$ の値がほぼ $\tan 22.5^\circ, 1, \tan 67.5^\circ$ となるように3つの T/M を設定し、この T/M が一定となるようにねじり・せん断・曲げの複合載荷を行なった (供試はりを破壊させるまで載荷した。ここで供試はりの破壊荷重は、本実験装置で T/M を一定に保つことができなくなった荷重とした。たとえば T/M の大きい領域では破壊近傍で曲げ・せん断載荷には余裕があっても、ねじり荷重を増加させることができなくなる荷重を破壊荷重とした。)

(3) (1)、(2)で破壊させた供試はり (曲げ・せん断載荷を除く) を曲げ・せん断により再載荷試験を行なった。各シリーズとも原則として各ケースについて供試はりを一本ずつ使用した。

(4) 残った供試はり (表-6の T/M の値に※印の付いたもの) の初期載荷を(2)で設定した3つの T/M の値で、ねじり・せん断・曲げの複合載荷を行ない、ねじりによるひびわれを発生させ、ねじり剛性が十分低下 (単位長さ当りのねじり回転角が $150 \sim 200 \times 10^{-6}$ rad/cm) させた。

(5) (4)の供試はりを曲げ・せん断、または、初期載荷時の T/M より小さい T/M でねじり・せん断・曲げの複合荷重下で再載荷試験を行ない、破壊に至らせた。

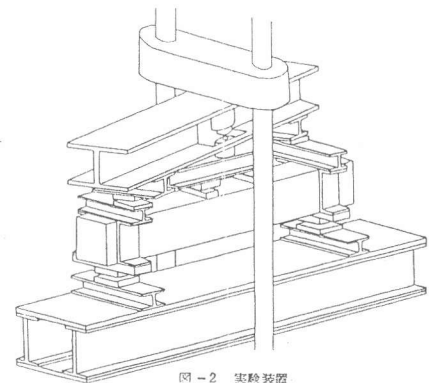
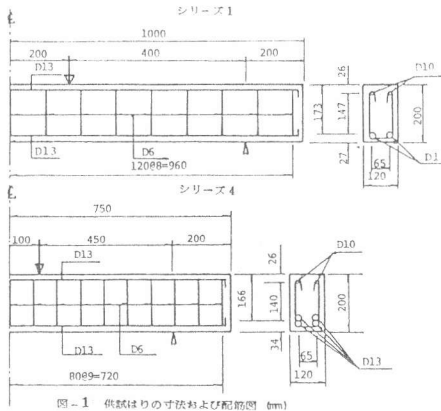
(6) (5)の再載荷をねじり・せん断・曲げの複合荷重下で行なった供試はりは再度曲げ・せん断荷重下で再載荷試験を行なった。

各載荷試験での測定項目は供試はりの回転角、スパン中央のたわみを変位計により、下側鉄筋、上側鉄筋のひずみと上下縁コンクリートひずみを電気抵抗線ひずみ計により測定した。

3. 実験結果および考察

3-1 耐力および破壊性状

初期載荷により破壊させたはりの終局耐力、破壊形式、破壊箇所を表-6 (表中の T/M に※の印を付したものを除く) に示す。また、ねじりと曲げ・せん断耐力の相関関係を図-3に示す。同図によるとU型スターラップを用いた供試はりは閉合スターラップを用いた供試はりと同様、終局値が四分円の内側に入ることにはなかった。しかし、主鉄筋量の差により、 $M/M_u - T/T_u$ の相関図にお



終局値が四分円の内側に入ることにはなかった。しかし、主鉄筋量の差により、 $M/M_u - T/T_u$ の相関図にお

いて明確な差は見られなかった。シリーズ4のようなスターラップで十分なせん断補強がしてありかつ主鉄筋比が高い場合には実験値が $M/M_u - T/T_u$ の相関図の曲げ側で $M/M_u = 1$ 近くにプロットされた。本実験ではU型スターラップを用いているためにねじり補強としては不十分であるが、純ねじり耐力は同断面で閉合スターラップを使用した場合¹⁾と比較するとスターラップ間隔で13cm、12cmと異なるが、シリーズ1で約18%、シリーズ2、3で約7%低下するようである。

再載荷時の終局強度、破壊箇所を初期載荷時と同様に表-6に示す。(表中の T/M の値に※印を付したもの) いずれのシリーズにおいても初期載荷時に破壊まで至らせた供試はりを

曲げ・せん断で再載荷した場合の終局耐力は、初期載荷時曲げ・せん断 ($T/M = 0$) での終局耐力 M_u と比較してほぼ同じか、10~20%ほど低下した。

これは初期載荷時の上縁部コンクリートの圧壊の程度、発生している曲げひびわれおよび斜めひびわれの量および幅、コンクリート中のマトリックスの崩壊の程度が曲げ・せん断耐力に何らかの影響を与えるものと考えられる。一方、初期載荷時にねじりひびわれは発生させたが破壊には至らせなかった供試はりの再載荷時の終局耐力を再載荷時と同一の T/M の初期載荷時の終局耐力と比較するとほぼ同じか、むしろ、少し上回る傾向を示した。

図-4にシリーズ2のNo-5とシリーズ3のNo-10の供試はりの初期載荷および再載荷に生じたひびわれ破壊性状を示す。この図で実線が初期載荷でのひびわれ破壊性状で、破線が再載荷時のひびわれ破壊性状を示す。再載荷時には、初期載荷で生じたねじりひびわれの影響により曲げ・せん断載荷に見られなかった大きな斜めひびわれが終局荷重の約1/2の荷重で発生したが、再載荷でせん断破壊するもの以外はそれが直接の破壊箇所となることはなかった。初期載荷に破壊させた供試はりの再載荷における破壊形式がせん断破壊となるものは $(T/M) \times (M_u/T_u)$ の値が1以上(図-3の相関関係の45°より上側)すなわち、ねじりモーメントの大きく作用した供試はりに多くみられるが、純ねじりで破壊させた供試はりははり全体にねじりひびわれが生じていたにもかかわらず、再載荷時の破壊形式は曲げ破壊となった。一方、初期載荷時に破壊にまで至らせなかった供試はりで再載荷時曲げ・せん断載荷したものの破壊形式は大半が曲げ破壊となった。しかし、シリーズ3では2本の供試はりがせん断で破壊した。

3-2 ねじり剛性および曲げ剛性 図-5に純ねじり強度 (T_u) に対するねじりモーメントの比 (T/T_u) と全断面を有効(鉄筋は無視)としたねじり剛性 (GK) に対するねじり剛性 (GK) の比 ($GK/(GK)$) との関係(シリーズ2)を示す。初期載荷時のねじり剛性は純ねじりから T/M が小さくなるに従って低下する傾向を示した。純ねじり載荷時のねじり剛性はひびわれ発生前には $GK/(GK)$ がほぼ1であるがひびわれが入ると急激に低下した。一方、ねじり・せん断・曲げの複合荷重を受けるものは T/M の増加に伴い徐々に小さくなった。すなわち、ねじり剛性はあるねじりモーメントにおける曲げモーメントの大きいものほど小さくなり、曲げひびわれのねじり剛性に及ぼす影響が非常に大きいことを示している。二回目以降の載荷におけるねじり剛性はねじりモーメントの増加により急激に低下し、その後終局荷重近傍までは初期載荷の最大荷重時

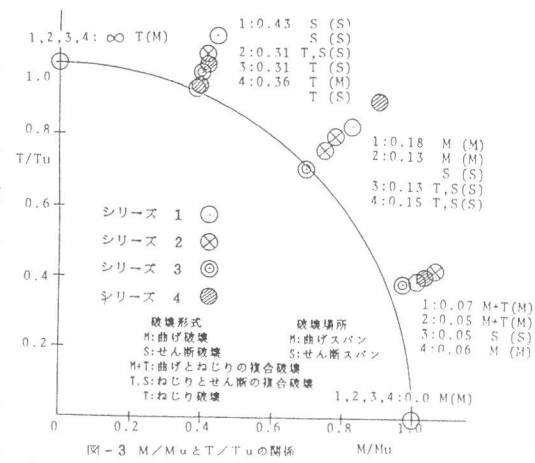


図-3 M/M_u と T/T_u の関係

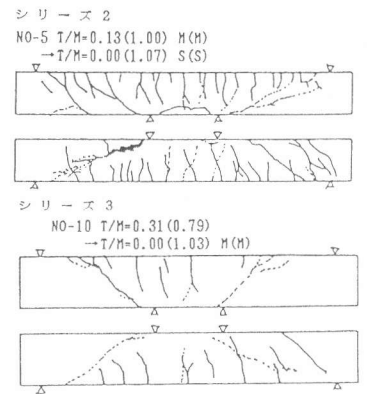


図-4 破壊形式図

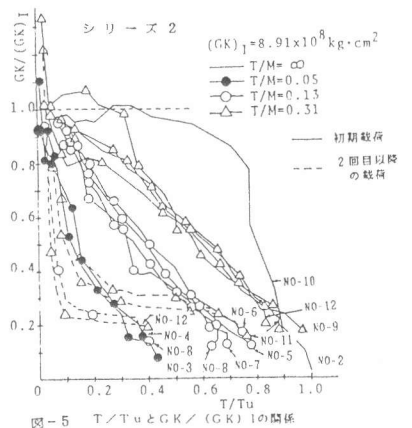


図-5 T/T_u と $GK/(GK)$ の関係

のねじり剛性にほぼ近い値を保った。

図-6, 7にそれぞれ、初期荷重および再荷重時の供試はりの曲げ・せん断荷重による終局曲げモーメント (M_u) に対する曲げモーメント (M) の比 (M/M_u) と供試はりの全断面を有効とした曲げ剛性 ($(EI)_I$) に対する曲げ剛性 (EI) の比 ($EI/(EI)_I$) の関係 (シリーズ2) を示す。図-6より初期荷重時の曲げ剛性は曲げ・せん断荷重の曲げ剛性と比較すると曲げ剛性の値のばらつきのため、明確な傾向はみられないが、ほぼ同程度とみなすことができ、曲げ剛性に及ぼすねじりの影響はほとんどないものと考えられる。再荷重時の曲げ剛性 (図-7) は初期荷重時に破壊に至らせた供試はりとは破壊に至らせなかった供試はりの間には差がなく、図-7と同様にばらつきが大きく、曲げ・せん断荷重 (初期荷重) の剛性と同程度とみなすことができる。しかし、再荷重時には曲げモーメントの増加とともに曲げ剛性が増加する傾向がみられるが、これは初期荷重時に軸方向鉄筋が受けたひずみの影響等によるものと推察される。

4. あとがき

本研究は変形適合ねじりを受ける鉄筋コンクリートはりを想定し、ねじりを無視して設計されたはりについて、ねじり・せん断・曲げの複合荷重を受け、ねじりによるひびわれが発生し、はりのねじり剛性が十分低下した後の曲げ・せん断荷重下での挙動を検討したものである。限られた実験ではあるが得られた結果を要約すると以下のようなものである。

(1) 初期荷重ではりを破壊させる程度の損傷を与えれば、再荷重時の曲げ・せん断耐力は約10~20%低下するが、現実に変形適合ねじりの場合にはこのような状況は考えられない。初期荷重で破壊させずねじり剛性が十分低下させる程度の損傷を与える場合には再荷重時の耐力の低下はほとんど認められなかった。

(2) 今回の実験ではいずれのシリーズにおいても初期荷重時の曲げ・せん断荷重での破壊形式は曲げ破壊であったが、再荷重時にはせん断破壊となるケースがあった。これは初期荷重で破壊させた供試はりでねじりモーメントの比率が大きいものにこの傾向がみられたが、初期荷重で破壊させなかった供試はりにおいてもせん断破壊するものがシリーズ3にみられた。

(3) 再荷重時の曲げ剛性への初期荷重のねじりの影響は少なく、初期荷重 ($T/M=0$) の曲げ剛性とほぼ同じと考えてよい。また、初期荷重時の曲げ剛性に与えるねじりの影響も少ないが、ねじり剛性は曲げの影響により低下した。

最後に本研究結果に関する限り、変形適合ねじりを設計上無視しても、終局耐力、曲げ剛性に影響はあまりないようであるが、せん断破壊を生じる場合が少ないケースではあるが認められること、ねじりひびわれ幅の問題 (使用限界状態の検討) 等、今後検討しなければならない課題も多い。

本研究の実施にあたり楠井良昭氏 (立命館大学)、高橋節哉氏 (愛媛県庁) に多大な援助を受け、また本研究に対して昭和58年度文部省科学研究費の交付を受けました。ここに謝意を表わします。

参考文献 1) 児島孝之、和田教志、荒川真一; 「ねじり・せん断・曲げを受ける鉄筋コンクリートはりに関する一実験」 土木学会第38回年次学術講演会概要集 1983年9月

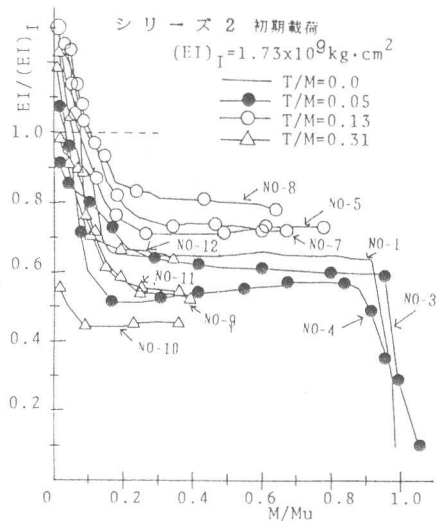


図-6 M/M_u と $EI/(EI)_I$ の関係

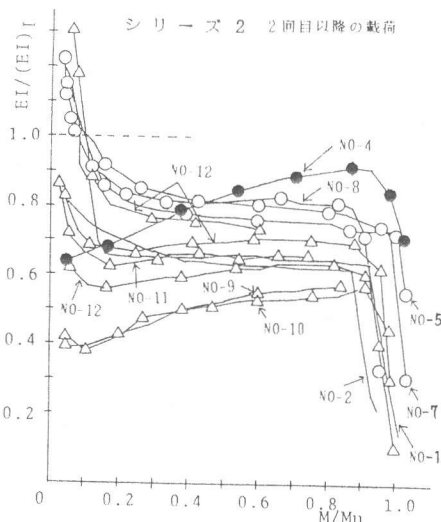


図-7 M/M_u と $EI/(EI)_I$ の関係