

[134] ねじりと曲げせん断を受ける部材の破壊性状に及ぼす荷重履歴の影響について

正会員 狩野 芳一 (明治大学工学部)
 正会員 岩崎 真志保 (明治大学大学院)
 正会員 〇早瀬 元明 (明治大学大学院)

1. はじめに

部材が曲げせん断ねじりの組合せ応力を受ける場合には、釣合ねじれの場合の様に、曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントの応力の比が一定に保たれる状態、及び、変形適合ねじれの場合の様に、不静定構造物の中でねじり変形が束縛されている状態が考えられる。変形適合ねじれの場合、亀裂発生等によるねじれ剛性低下により、作用ねじりモーメントの占める割合が減少し、応力比一定の場合とは異なった荷重履歴を受ける。従って、部材はねじれ破壊を免れ、よりじん性に富む挙動を示すことが期待される。本論は、この様な場合の例として、ねじれ振動を起こす建物の柱の様に、ねじり角と部材角の比がほぼ一定に保たれる場合を想定して、荷重履歴の相違が、部材の耐力及びじん性に及ぼす影響について、実験的検討を行なったものである。

2. 実験計画

式(1)(2)に中山・狩野による提案式を示す。提案式はねじりせん断耐力を算定する式(1)と曲げ耐力を算定する式(2)とからなる。まず、式(2)によって曲げ補強筋を求め、次いで式(1)で曲げ降伏時せん断耐力を上回るねじりせん断耐力を得るようにあばら筋量を定めれば、任意の組合せ応力比に対して曲げ破壊型の部材が設計できる。試験体はすべ

$$(K_s \tau_{su})^2 + (K_t \tau_{tu})^2 = (10.1 K_u K_p \sqrt{F_c} + \frac{6.85 a v \sigma_{vy}}{S \cdot B})^2 \dots (1) \quad (M_u / M_o)^2 + (T_u / T_o)^2 = 1 \dots (2)$$

$$\tau_{su} = Q_u / B j, \quad \tau_{tu} = 2 T_u / B^2 (D - B/3)$$

$$M_o = 0.9 a t \sigma_{ey} \cdot d \text{ (純曲げ耐力)}$$

$$T_o = 2 A' A \sigma_{ey} / \phi' \text{ (軸筋支配ねじり耐力 Raush)}$$

[適用範囲] $1 \leq M/Qd \leq 4, 1.5 \leq K_s \leq 3.6, 0.7 \leq K_u \leq 0.9, P_w \leq 0.6\%$

$$[記号] K_s = \frac{M}{Qd} + 0.368$$

$$a: \text{ねじれスパン長さ} \quad d e = d / \{W - (W-1) / (\rho_u - 1)\}$$

$$K_t = 2.8 \frac{a}{2b(1+W)} + 0.8$$

$$s: \text{あばら筋間隔} \quad W = d / b, \quad \rho_u = \tau_{tu} / \tau_{su}$$

$$K_u = \sqrt{8/d e}$$

$$A', \phi': \text{あばら筋中心で囲まれた核の面積, 周長}$$

$$K_p = P_t^{0.25} \text{ (} P_t \text{は\%単位)}$$

$$b: \text{I側面から反対側軸筋中心までの距離}$$

a, t, B, D, d, j, σ_{ey} , σ_{vy} : 説明省略

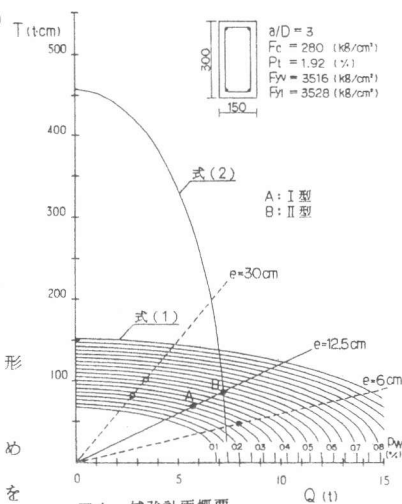


図1. 補強計画概要

てこの提案式に基づき計画した。コンクリート強度は280 kg/cm²、試験体の形状、計画は図1及び図2に示すとおりで、あばら筋量を2種とした。偏心率12.5 cmで、曲げ耐力の80%のねじりせん断耐力を持つ様あばら筋量を決めたものをI型、曲げ耐力の100%のねじりせん断耐力を持つ様あばら筋量を決めたものをII型とする。図1には、式(1)と式(2)の相関曲線上に試験体の補強計画を示した。実験で採用した変形比はI型、II型とも弾性時でほぼ偏心率が12.5 cmとなるものを基準とし、弾性時の偏心率を約30 cmとしねじりの影響を増したものを各1体、I型については弾性時の偏心率を約6 cmとし、その偏心率の下では曲げ破壊をする

と予想されるものを1体の3種とした。

また、その具体的な値は、I型の1体を応力比一定で実験を行ない、その結果をもとに決定した。表1には試験体種別を使用材料強度、変形比を含めて示した。試験体は、中央スタブを境に試験側とダミー側に別れており、ダミ

表1. 試験体種別 (鉄筋の降伏点強度の計算には公称断面積を用いた)

試験体	B×D b×d cm	コンクリート強度		I Q cm	I M	D R	軸方向筋				あばら筋				m
		F _c kg/cm ²	F _t kg/cm ²				配筋	F _y kg/cm ²	P _t %	P _l %	配筋	F _v kg/cm ²	P _w %	P _v %	
3BST-12-I	15×30 12×27	279	25.9	12.5	0.134	—	4-D22	3528	1.91	3.44	D6 13.8 ^φ	3516	0.31	0.40	8.63
3BST-12-I-0.65		273	20.4	—	—	0.65									
3BST-12-I-1.44		286	26.5	—	—	1.44									
3BST-12-I-3.85		282	24.2	—	—	3.85									
3BST-12-II-1.44		285	24.8	—	—	1.44									
3BST-12-II-3.85		280	21.1	—	—	3.85									

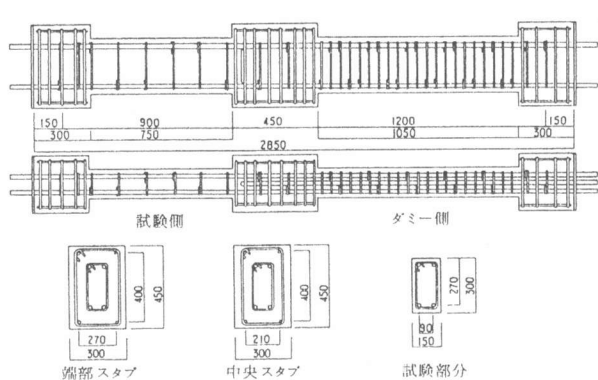


図2. 試験体形状及び配筋計画

一側ではその破壊が先行することのない様に、試験側に比べ十分剛強となる様、補強した。

3. 実験方法

加力は、図3に示す様に中央スタブに集中荷重を加え、曲げモーメント、せん断力を与え、中央スタブに固定した鉄骨ウイングに加力してねじりモーメントを与えた。曲げせん断加力の荷重は、試験機から電気的に取り出し、ねじり加力の荷重は、端部スタブに固定した鉄骨ウイングで反力を取り、ロードセルで測定した。また、ダミー側ではねじりの反力をとらず、ねじりモーメントは入らない様にした。本実験は、本来ねじれ振動を起こす建物の柱を想定しているため、軸力、2軸曲げ等を考慮しなければならないが、現段階ではそのようなシステムを作成するに至っていないため、たわみとしては一方向、軸力0で単純ばりの形式を採用している。測定は図4に示す測定装置に取り付けた電気式変位計の測定

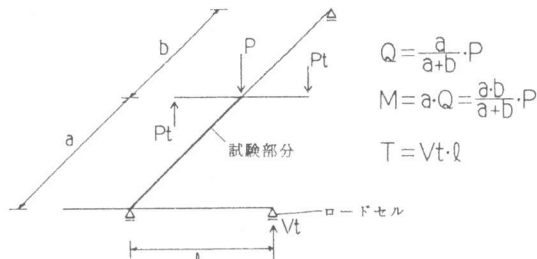


図3. 載加装置

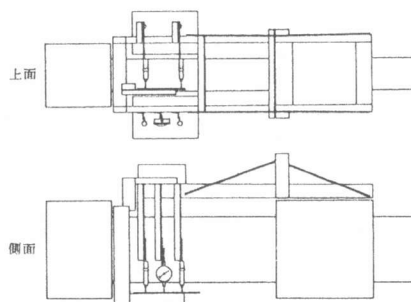


図4. 測定装置

値をマイコンにより制御し、単位ねじり角、相対たわみ、材端回転角の形で記録した。また、前述のものとは別のシステムを設け、変形の比のみを逐次ディスプレイに表示させ、実験を制御した。鉄筋のひずみ度の測定は、軸方向筋では中央スタブ面及びせん断スパンの4等分点、あばら筋では短辺中央及び長辺の3等分点に貼ったストレインゲージを用いて測定した。

4. 実験結果及び検討

各試験体の実験結果を表2に示す。また、荷重Qとたわみδの関係、ねじりモーメントTと単位ねじり角φの関係を図5から図8に、また単位ねじり角φ-たわみδ-材端回転角θの関係を図9と図10に、それぞれ補強レベル別に示した。

1) 破壊性状について

図12には、式(1)と式(2)の相関曲線に対する荷重履歴の動きを示し、また、図11には、曲げ降伏時の亀裂展開図及び補強筋のひずみ分布を、I型の4体を例にとり示した。まず、応力比一定加力を行った3BST12-Iは、部材降伏と同時に最大耐力に至り、その後急激な荷重低下を起こしている。図11に示す様に、単位ねじり角の大きな進展がみられ、また主筋の降伏は伴わなかったことから、ねじれ型の破壊であったといえる。次に、変形比一定の試験体について、I型の3体を例にとると、3BST-12-I-0.69は、図12に示す様に、応力比は荷重の増加と共にねじりモーメントの割合を減しながら、まず式(2)の相関曲線に達し、主筋の降伏を伴う曲げ降伏が生じた。その後もねじりモーメントの上昇がみられたが、やがてねじり降伏が認められた。3BST-12-I-1.44は、応力比

表2. 実験結果一覧

試験体	曲げ亀裂発生時			斜め亀裂発生時			ねじり降伏時			曲げ降伏時			最大耐力時		
	M	Q	T	M	Q	T	M	Q	T	M	Q	T	M	Q	T
	t-m	t	t-cm	t-m	t	t-cm	t-m	t	t-cm	t-m	t	t-cm	t-m	t	t-cm
3BST-12I	1.26	1.40	17.3	1.49	1.66	20.8	5.00	5.56	67.7	5.00	5.56	67.7	5.00	5.56	69.0
3BST-12I-0.65	0.90	1.00	5.5	2.50	2.78	13.8	6.97	7.74	36.8	6.67	7.41	24.2	7.49	8.32	22.0
3BST-12I-1.44	1.21	1.34	26.0	1.44	1.60	29.3	6.22	6.91	53.3	6.22	6.91	53.3	6.92	7.69	34.0
3BST-12I-3.85	1.25	1.39	38.2	0.71	0.79	29.8	5.01	5.57	63.2	6.25	6.94	59.0	6.56	7.29	40.2
3BST-12II-1.44	1.49	1.66	19.3	1.18	1.31	17.8	6.79	7.54	68.0	6.74	7.49	54.7	8.16	9.07	44.5
3BST-12II-3.85	1.76	1.95	51.7	0.91	1.01	30.5	4.91	5.45	71.3	6.61	7.35	64.5	6.61	7.35	64.5

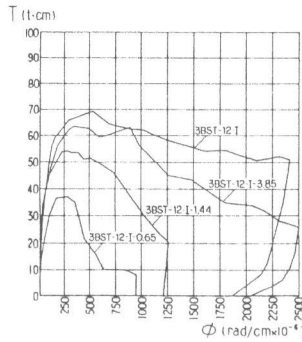


図 5.

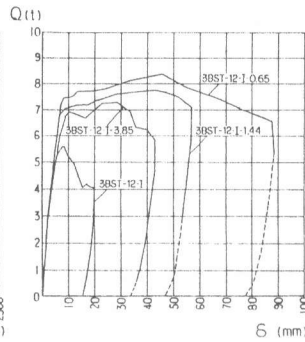


図 7. Q-δ

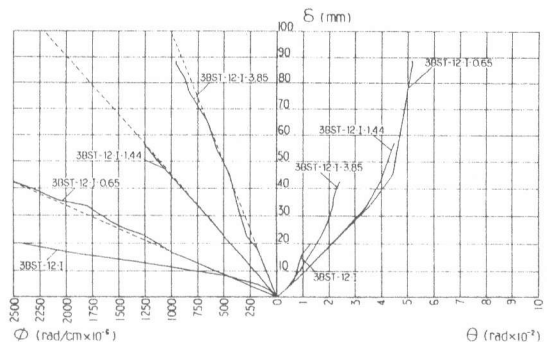


図 9. φ-δ-θ

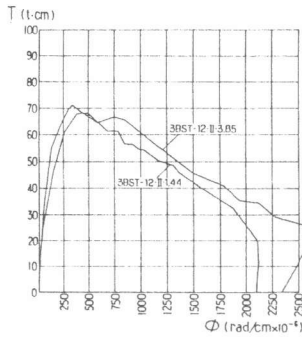


図 6. T-φ

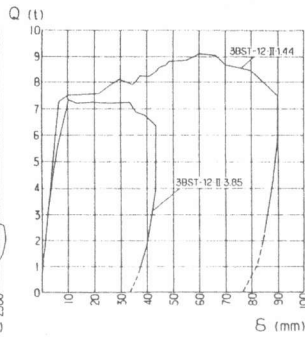


図 8. Q-δ

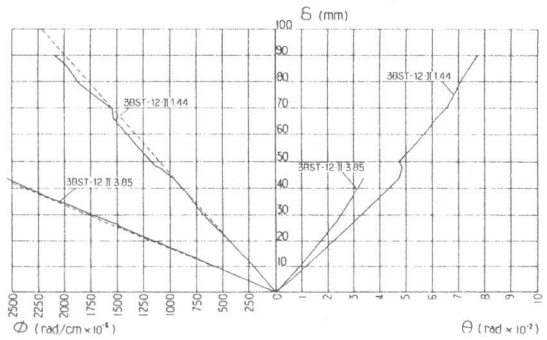


図 10. φ-δ-θ

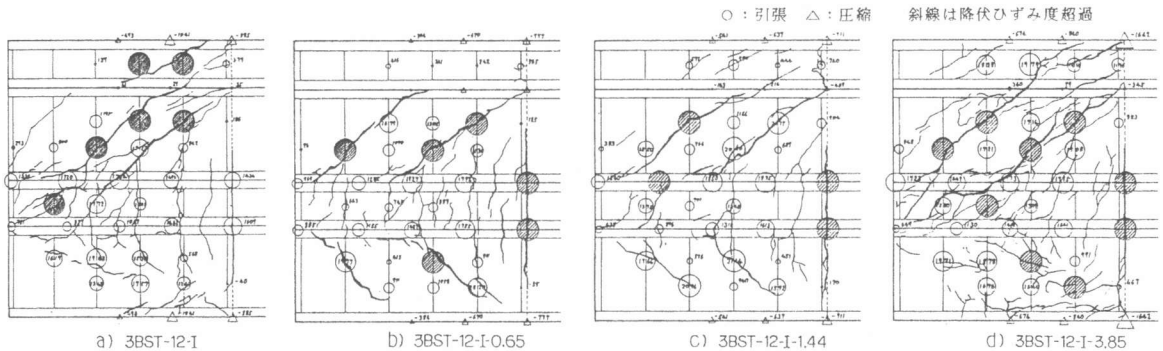


図 11. 曲げ降伏時亀裂展開図及びひずみ分布図

が式(1)と式(2)とのほぼ交点に達し、曲げ降伏とねじり降伏が同時に生じた。3BST-12-II-3.85は、応力比の低下はみられたものの、先に式(1)の曲線上に達し、あばら筋の降伏を伴うねじり降伏が認められた。その後もせん断力の上昇がみられたが、やがて主筋が降伏し、曲げ降伏が認められた。II型については、3BST-12-II-1.44が3BST-12-I-0.69と、3BST-12-II-3.85が3BST-12-I-3.85と、ほぼ同様な破壊性状を示した。この様に、変形比一定加力での破壊パターンは、ねじり降伏先行型、曲げ降伏先行型、同時降伏型の3種に大別できる。また、何れの試験体も図11に示す様に、破壊パターンによらず主筋降伏を伴う曲げ降伏に至り、Q-δ曲線は安定した塑性域を持っている。ねじり降伏は、内面のあばら筋の降伏を伴い、以後直ちにねじりモーメントは低下している。終局的な耐力低下は、外面・上面の圧潰及び剝離によって生じ、図9と図10に示す様に、材端回転角に比べたわみの進展が大きくなっ

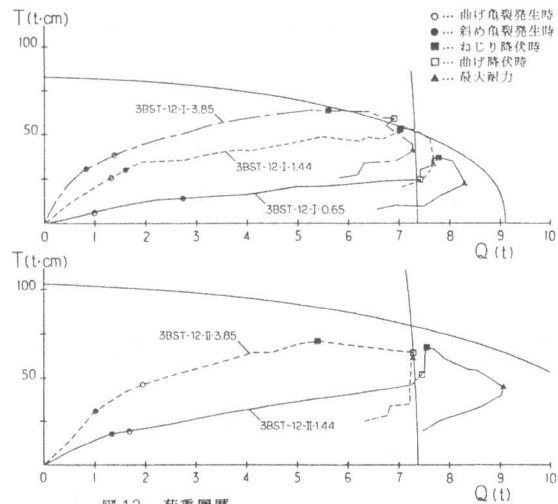


図 12. 荷重履歴

てあり、ねじれの影響を伴うせん断破壊、もしくは、せん断の影響を伴うねじれ破壊の傾向を示した。

II) じん性について

表3には、たわみ変形、ねじり変形の塑性率を示した。今回は、曲げ降伏時、ねじり降伏時の変形量 δ_y 、 ϕ_y に対し、それぞれ5%以上耐力低下を示した時点での変形量 δ_p 、 ϕ_p を限界変形として塑性率を定義した。まず、変形比をパラメータ

表3. じん性

試験体	ねじり変形			曲げせん断たわみ変形			T- ϕ ENERGY t-cm	Q-S ENERGY t-cm	total ENERGY t-cm
	降伏時 ϕ_{yo}/ϕ_{lo}	塑性限界 ϕ_{po}/ϕ_{lo}	塑性率 ϕ_p/ϕ_y	降伏時 δ_y (mm)	塑性限界 δ_p (mm)	塑性率 δ_p/δ_y			
3BST-12I	444.2	687.1	1.53	7.51	9.51	1.27	3.36	3.97	7.33
3BST-12I0.65	284.4	359.2	1.26	8.00	76.43	9.55	1.34	56.44	57.76
3BST-12I-1.44	222.7	444.8	1.99	10.34	56.61	5.48	3.39	39.74	43.13
3BST-12I-3.85	364.2	984.9	2.72	9.87	35.37	3.58	7.29	21.84	29.13
3BST-12II-1.44	381.8	387.8	1.02	9.64	89.62	9.30	7.30	71.50	78.80
3BST-12II-3.85	340.6	581.2	1.71	10.06	35.89	3.57	8.19	22.98	31.17

としてみると、ねじり変形の塑性率は変形比が大きい程、大きく、逆にたわみ変形の塑性率は変形比が小さい程、大きくなった。あばら筋量をパラメータとしてみると、ねじり変形の塑性率はあばら筋量が少ない程、大きく、たわみ変形の塑性率はあばら筋量が多い程、大きい。この様に塑性率は、ねじり変形とたわみ変形では全く逆の傾向にある。次に、部材としての終局的破壊を示したと考えられる限界たわみ、 δ_p に達するまでに試験体が吸収した、T- ϕ 、Q-Sそれぞれのエネルギー量と、全エネルギー量を表3にあわせて示したが、これを見ると、T- ϕ に比べQ-Sでのエネルギー吸収量が圧倒的に多い。従って、部材全体のじん性は、たわみ変形に対するじん性に支配され、あばら筋量が多い程、また変形比が小さい程向上するものと考えられる。

III) 耐力について

表4には、中山・狩野式及びe関数法と実験値の比較を示す。ねじり降伏は内面あばら筋の降伏を伴う破壊であったので、式(1)と、曲げ降伏は主筋の降伏を伴う破壊であったので、式(2)と、また最大耐力は1)で述べた様にすべて曲げ降伏によるものと考えられるので、式(2)及びe関数法と、そ

表4. 耐力

試験体	ねじり降伏				曲げ降伏				最大耐力					
	実験値		式(1)		実験値		式(2)		実験値		式(2)		e関数法	
	e (cm)	Tty (t cm)	tsTty (t cm)	Tty tsTty	e (cm)	Qmy (t)	mQmy (t)	Qmy mQmy	e (cm)	Qu (t)	mQu (t)	Qu mQu	eQu (t)	Qu eQu
3BST-12I	12.2	67.7	67.0	1.01	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
3BST-12I-0.65	(4.8)	(36.8)	(39.2)	(0.94)	3.3	7.41	7.36	1.01	2.6	8.32	7.37	1.13	7.22	1.15
3BST-12I-1.44	7.7	53.3	54.5	0.98	7.7	6.91	7.32	0.94	4.4	7.69	7.35	1.05	7.23	1.06
3BST-12I-3.85	11.3	63.2	65.0	0.97	(8.5)	(6.94)	(7.30)	(0.95)	5.5	7.29	7.34	0.99	7.22	1.01
3BST-12II-1.44	(9.0)	(68.0)	(74.0)	(0.92)	7.3	7.49	7.32	1.02	4.9	9.07	7.35	1.23	7.21	1.26
3BST-12II-3.85	13.1	71.3	85.9	0.83	(8.8)	(7.35)	(7.30)	(1.01)	8.8	7.35	7.30	1.01	7.24	1.02

※ ()は第二降伏となったものを示す

れぞれ比較した。ねじり降伏荷重と式(1)の比をみると、ねじり降伏が先行した試験体は、3BST-12-II-3.85を除き±5%以内で適合している。しかし、曲げ降伏が先行した試験体は、計算値の方が高くなっている。従って、曲げ降伏がねじり耐力に影響を及ぼし、その値が低下するものと考えられる。それに対し、曲げ降伏荷重と式(2)との比をみると、破壊パターンにかかわらず、±6%の範囲内で適合している。同様に、最大耐力と式(2)及びe関数法との比をみても、若干危険側の値はみられるものの、適合性はかなり良くなっている。従って、曲げ降伏荷重及び最大耐力は、破壊パターンにかかわらず、中山・狩野式、e関数法によりほぼ適確に推定できると考えられる。しかし、それらは変形比が大きくなると危険側の値に近づく傾向がみられるので、注意する必要がある。

5. まとめ

検討結果より、変形比一定の条件の下で曲げせん断ねじりの組合せ応力を加えた場合、荷重の増加と共に偏心率が低下する。その荷重履歴をあらかじめ予想することは困難であるが、弾性時の偏心率の下ではねじれ破壊が予想される場合であっても、偏心率の低下によって、最終的には曲げ降伏を生じることが確認された。また、その場合、曲げ降伏耐力にねじり角の大小が及ぼす影響は、ほぼ無視することができるが、降伏後のじん性は、たわみに対するねじり角の比が大きいとき、かなり大幅に低下する。また、じん性は、あばら筋量が多い程向上するが、十分なじん性を与えるための補強量については、今後なお検討を要する。

〔謝 辞〕本研究は、1984年度文部省科学研究費補助金のもとに行なわれたもので、本研究の遂行に関し御協力を頂いた、明治大学助手高木仁之氏、並びに本年度卒論生諸氏、また、材料の入手にあたり御協力を頂いた榊戸製鋼所、試験体作成に関し御協力頂いたフジ工業KKに、心から感謝いたします。

〔参考文献〕1) 中山達雄 "ねじりを受ける鉄筋コンクリートに関する研究" 明治大学学位請求論文 昭和56年

2) 竹村寿一、狩野芳一、中山達雄 "ねじりと曲げせん断を受ける部材のじん性制御の可能性について" JCI 昭和59年