土木学会論文報告集
第328号・1982年12月
【論　　文】

ねじりを受けるプレキャストコンクリート接合部材の挙動

BEHAVIOR OF PRECAST CONCRETE CONNECTED MEMBERS UNDER TORSION

松　島　　博*
By Hiroshi MATSUSHIMA

1. 序　　論

この研究はプレキャストした長方形断面の鉄筋コンクリートはりを PC 鋼より線に緊張力を与えて接合した部材が純ねじりおよび曲げ-ねじりを受けるとき，接合部が部材の強度，変形と剛度およびひびわれ性状に及ぼす影響を検討して，プレキャストブロック工法における設計のための資料を得ることを目的とした．

プレキャストブロック工法は多くの利点をもっているが問題点の一つにその接合方法がある．本研究ではブロック間の接合面にセメントペーストを塗布し PC 鋼より線を用いて接合した部材が，一体部材と等しいかまたはそれに近い強度と剛性をもつことを基準にしたいわゆる剛接合の場合を検討の対象とした．接合面に接着剤を用いる場合や，変形エネルギーを接合部に吸収して構造物としてのダクティリティーの向上を図る柔接合の場合についてもさらに検討を進める必要がある．

従来の研究は柱とはりの接合に関するものが多く，たとえば Libby, J.R.[1] は接合部分の強度をその他の部分よりも大きくすることを基本的な考え方として，柱の張り出し部分に接合したはりの曲げによる端部回転に対する設計方法を示している．しかし，プレキャストした複数のはりをプレストレスを与えて一体化したものがねじりおよび曲げ-ねじりを受ける場合の挙動に関する研究は今のところ皆無に近い．

* 正会員　工博　国士館大学教授

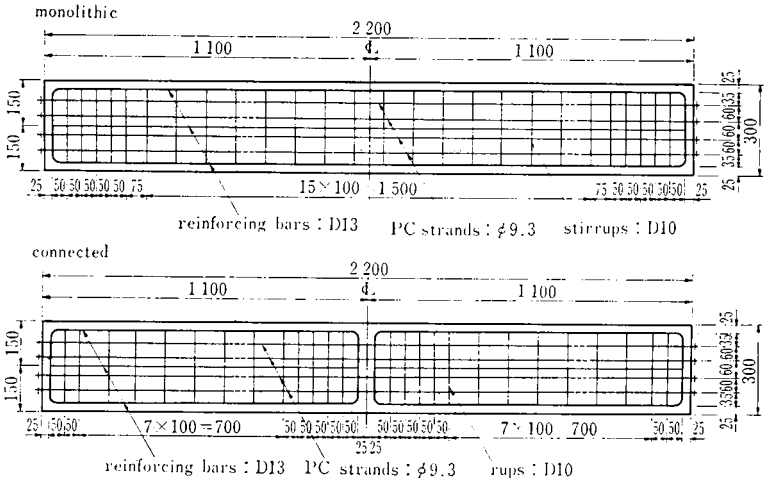
2. 実験の方法

A，B およびCの3つのタイプのそれぞれについて接合部材とまた比較のために一体部材を製作し，これらに純ねじりおよび曲げ-ねじりを加えて各種の強度，接合面のずれ，部材のねじれ角およびたわみ等を測定しひびわれの発生と発達について観測した．

(1) 試　験　体

試験体の種類と数を **表—1～3** に，それぞれの形状と断面寸法を **図—1～4** に示す．表中の区分で1は一体部材で2は接合部材である．実験データのばらつきを考えて同一条件での試験体数を 2～4 本とした．

コンクリートは普通ポルトランドセメントを用い，細骨材に荒目砂（比重 2.62，粗粒率 3.01）を粗骨材に砕石（比重 2.71，粗粒率 7.04）を用いた．すべての試験体について $\sigma_{ck}=500\ \mathrm{kg/cm^2}$ (49 MPa) で W/C は 40% とした．標準供試体は圧縮強度に ϕ 10 cm×20 cm，引張



図—1　試験体の形状寸法（A）

表—1 試験体および実験結果（A）

λ	試験体				初期ずれ		初期ひびわれ		M_t-θ 第1変曲点		破壊		concrete	
	σ_p'	σ_p	区分	数	M_t	θ	M_t	θ	M_t	θ	M_t	θ	σ_{cu}	σ_{tu}
0.0	0.0	0.0	1	2			104.9	2.70	138.7	4.60	185.9	32.70	41.2	3.8
			2	2	25.5	1.48	107.4	2.48	96.1	2.60	132.4	64.70		
	2.9	2.9	1	3			131.4	3.43	166.4	5.62	220.6	22.70	48.1	3.7
			2	3	58.5	1.33	140.0	3.07	130.4	3.27	209.2	19.60		
	5.9	5.9	1	2			170.6	3.98	183.3	4.73	223.8	25.10	45.8	3.8
			2	2	78.8	2.20	152.5	3.80	170.0	4.30	224.1	18.90		
	8.8	8.8	1	3			166.4	3.90	204.6	5.80	246.8	15.50	45.8	3.8
			2	3	103.2	2.37	176.8	4.33	198.7	4.75	257.3	16.90		
1.0	0.0	0.0	1	2			88.6	1.00	102.5	1.90	177.8	24.25	41.2	3.8
			2	2	26.8	0.78	79.5	6.35	50.5	1.60	144.2	90.75		
	2.9	2.9	1	2			119.3	3.60	128.0	4.20	175.8	29.70	48.1	3.6
			2	2	53.9	1.00	105.8	2.10	108.4	3.35	180.0	17.90		
	5.9	5.9	1	2			139.2	2.70	158.4	3.60	203.5	20.50	53.7	4.0
			2	2	83.4	2.05	145.2	3.65	145.6	4.50	205.9	16.55		
	8.8	8.8	1	2			161.3	2.80	173.1	3.20	222.8	20.70	45.8	3.8
			2	2	104.9	1.95	163.8	3.90	165.2	4.00	204.0	27.40		
2.0	0.0	0.0	1	2			62.5	1.20	83.4	2.25	148.3	23.10	54.2	5.1
			2	2	23.5	0.65	55.6	1.73	65.2	2.30	126.0	47.05		
	2.9	2.9	1	2			83.1	1.75	91.7	2.25	170.6	47.85	54.2	5.1
			2	2	50.0	0.68	72.8	1.30	89.7	1.25	158.6	47.20		
	5.9	5.9	1	2			101.0	3.10	104.4	3.30	172.3	24.10	47.4	4.7
			2	2	84.3	1.65	107.1	2.45	114.2	3.60	173.0	24.20		
	8.8	8.8	1	2			117.4	2.35	123.1	4.25	179.2	21.35	53.7	4.8
			2	2	99.0	2.70	117.4	2.40	125.0	2.83	190.2	21.70		

M_t : hN. m, θ : 10^{-5}rad/cm, σ : MPa

表—2 試験体および実験結果（B）

λ	試験体				初期ずれ		初期ひびわれ		M_t-θ 第1変曲点		破壊		concrete	
	σ_p'	σ_p	区分	数	M_t	θ	M_t	θ	M_t	θ	M_t	θ	σ_{cu}	σ_{tu}
0.0	0.0	0.0	1	3			111.6	2.16	132.4	2.63	182.3	30.88	53.9	4.1
			2	4	22.6	1.87	63.7	2.33	69.9	3.80	114.1	49.58		
	0.6	5.9	1	4			141.2	4.66	140.1	3.34	208.1	34.62	58.7	4.5
			2	4	59.4	1.79	141.2	5.43	142.4	5.36	179.7	33.67		
	1.2	11.8	1	4			170.4	4.50	176.0	5.00	224.6	26.17	58.9	4.9
			2	4	87.3	2.09	173.9	4.23	174.1	4.30	214.2	19.88		
	1.6	15.7	1	4			187.5	4.80	186.4	5.60	224.2	23.62	63.3	4.4
			2	4	122.6	4.30	185.1	7.52	192.1	6.48	238.7	27.56		

M_t : hN. m, θ : 10^{-5}rad/cm, σ : MPa

強度に φ15 cm×15 cm の円柱形のものを，曲げ強度に 10 cm×10 cm×40 cm のものを用いた．

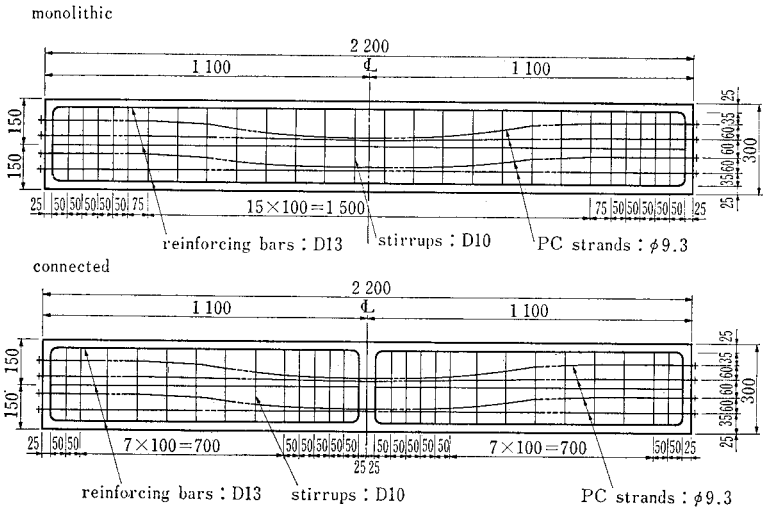
軸方向鉄筋として D13 を横方向鉄筋は D10 を用い，いずれも σ_{sy}≒3 500 kg/cm² (343 MPa) であった．PC 鋼材は 9.3 mm 7本よりのストランドを用い，端部はS社製くさび型定着具で定着した．

接合部材は型枠の長手方向中央部分に厚さ 2 mm の鉄板を部材軸と直交するように設けてコンクリートを打設する．脱型後，σ_c≧400 kg/cm² (39.2 MPa) になったときに接合面を金ブラシで十分に清掃してペースト (W/C=32%，フロー値 175)を塗布する．あらかじめ設けておいたシースに PC 鋼材を通してこれを緊張定着

表—3 試験体および実験結果（C）

λ	試験体 σ′	試験体 σ	試験体 区分	試験体 数	初期ずれ M_t	初期ずれ θ	初期ひびわれ M_t	初期ひびわれ θ	M_t-θ 第1変曲点 M_t	M_t-θ 第1変曲点 θ	破壊 M_t	破壊 θ	concrete σ_{cu}	concrete σ_{tu}
0.0	0.0	0.0	1	3	—	—	141.3	2.18	147.8	2.43	350.5	48.87	57.1	4.6
			2	2	29.42	0.85	113.1	1.45	129.3	1.80	184.2	26.25		
	2.9	2.9	1	2	—	—	155.7	2.75	179.0	3.16	349.8	42.00	52.6	4.2
			2	2	66.9	0.90	155.4	2.75	200.5	3.35	316.5	36.50		
	5.9	5.9	1	2	—	—	209.6	3.55	227.0	3.90	387.6	33.90	53.0	4.0
			2	2	116.6	1.51	198.4	2.80	250.1	3.20	398.9	28.00		
	8.8	8.8	1	2	—	—	239.7	4.65	253.5	5.10	402.5	28.50	52.6	4.2
			2	1	163.3	2.20	225.6	3.80	213.8	4.20	401.1	29.00		
1.0	0.0	0.0	1	2	—	—	159.4	2.15	165.7	2.35	296.3	43.05	57.1	4.8
			2	2	37.3	0.88	117.4	2.85	148.6	4.30	252.5	58.85		
	2.9	2.9	1	2	—	—	205.9	3.45	212.3	3.22	314.2	39.50	53.4	4.1
			2	1	90.2	1.55	164.0	2.80	171.6	3.30	275.8	109.60		
	5.9	5.9	1	2	—	—	248.0	3.90	262.8	3.82	400.8	31.25	54.9	4.7
			2	2	125.5	2.25	257.1	4.30	277.0	5.25	392.3	48.10		
	8.8	8.8	1	2	—	—	303.7	4.50	332.4	8.45	444.6	92.95	54.9	4.7
			2	2	150.0	1.58	308.4	4.40	317.7	10.00	426.8	21.80		
2.0	5.9	5.9	1	2	—	—	217.1	4.33	241.7	4.70	324.7	46.25	57.9	4.8
			2	2	122.6	1.97	222.3	3.80	237.3	4.33	337.1	43.20		
	8.8	8.8	1	2	—	—	225.5	3.80	230.9	3.95	347.4	53.95	56.1	4.9
			2	2	155.4	2.70	219.8	4.45	259.9	5.55	364.5	32.75		

M_t : hN. m, θ : 10^{-5}rad/cm, σ : MPa



図—2 試験体の形状寸法（B）

し，その1週後にグラウトを行った．

（2） 載荷および測定

図—5-1 に示すような形式の油圧式ねじり試験機を用い $\lambda=M_b/M_t$ 比を常に一定に保ちながら荷重を加えた．図に示した l_1/l_2 の値によって λ を任意に設定できる．試験体の両端にはその軸まわりに回転自由な固定具を用い，さらに曲げによるたわみを拘束しないようにそこに球座を設けた．**図—5-2** に示すように，ねじれ角の測定のために試験体のスパン中央からそれぞれ 550 mm 離れた位置に設けた傾斜計（最大測定可能 2° と 30° のものを併用）を用い，たわみはダイヤルゲージでまた接合面のずれは **図—6** に示すA～D点に部材側面に垂直に設けたダイヤルゲージによって測定した．これらの値は荷重として示されるジャッキの油圧とともに一定の荷重段階ごとに測定し自動記録した．

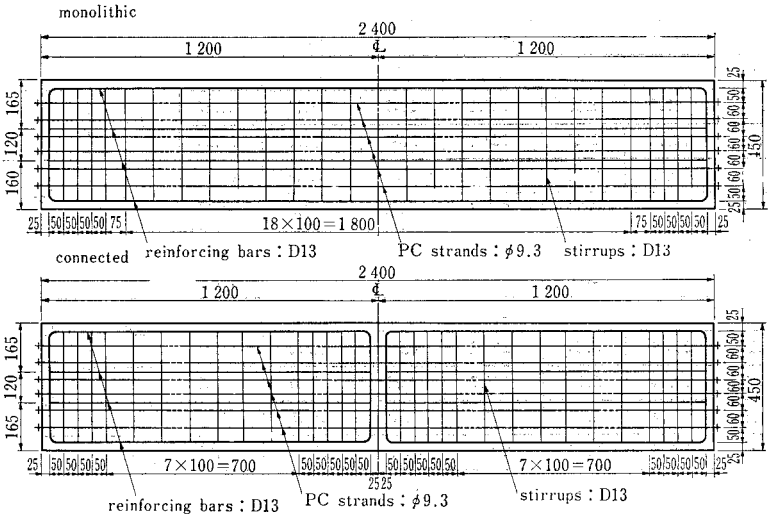
3. 実験結果および考察

実験結果を要約して **表—1～3** に示す．

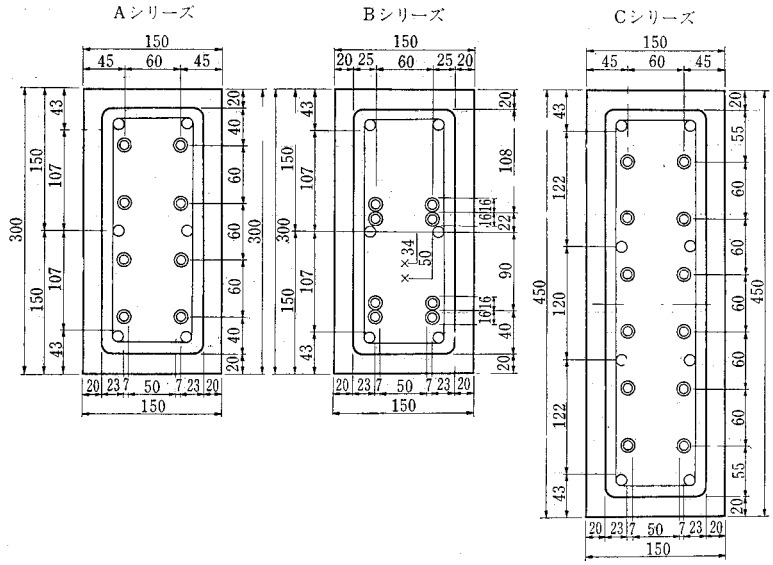
（1） 強　　度

a） 初期ずれねじりモーメント

一体部分の単位長さ当たりのねじれ角を θ(rad/cm)



図—3 試験体の形状寸法（C）



図—4 試験体の断面寸法（A, B, C）

とすれば，接合面のずれ回転測定のためのダイヤルゲージは接合面の両側それぞれ 5 cm の位置に設けたので，その間のねじれ角が θ(rad/cm)×10(cm) を超えるときに接合面にずれが発生したものと判定した．

ねじりモーメントによって接合面は平面を保ったまま回転し，そのときのずれ回転に対する抵抗はその面における軸方向圧縮応力度に比例する摩擦力とペースト処理によるせん断強度によって行われるものとする．ずれ開始を考えるときは比較的に低荷重レベルであるので，接合面が平面のまま回転するものと考えまたその面における PC 鋼より線の dowel action は無視した．

$\sigma_p - M_b/Z \geqq 0$ の場合：接合面における各種応力分布状況を図—7 に示す．次式で示すような接合面に作用する全せん断力の 1/2 ずつがそれぞれ点AとBに集中して作用するものと考える．

$$\frac{1}{2}\left\{\gamma\left(\sigma_p' + \frac{M_b}{Z} + \sigma_p - \frac{M_b}{Z}\right) + 2\tau_u\right\} \times bh \times \frac{1}{2}$$

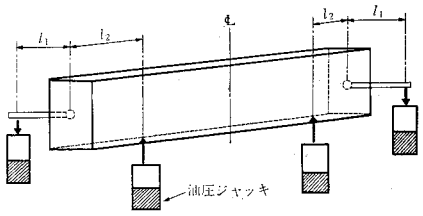
このとき初期ずれねじりモーメントは次式で示される．

$$M_{ts} = \frac{b^2 h}{8}\{\gamma(\sigma_p' + \sigma_p) + 2\tau_u\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

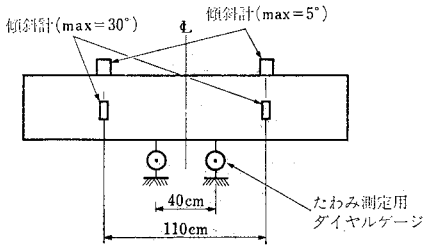
このとき接合面でのずれ回転中心は長方形断面の図心であるが，ここではせん断応力分布の図心まわりに回転するものと考え，両者の差による偏心ねじりの影響は無視した．

式 (1) で求めた M_{ts} に対する M_b をそのときの λ から求め，$\sigma_p - M_b/Z < 0$ のときは次の方法による．

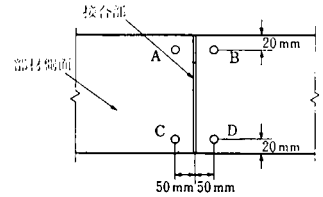
$\sigma_p - M_b/Z < 0$ の場合：図—7 に示す応力分布の状態に基づいて，



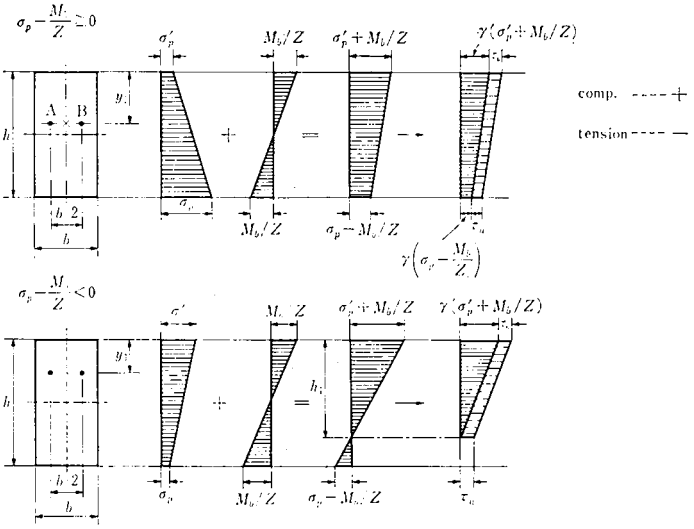
図—5-1 載荷方法



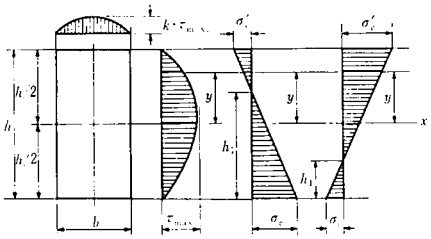
図—5-2 測定方法



図—6 ずれ測定用ダイヤルゲージの配置



図—7 接合面におけるせん断応力分布



図—8 ねじりせん断応力と垂直応力の分布

$$h_1=\frac{\sigma_p'+M_b/Z}{\sigma_p'-\sigma_p+(M_b/Z)\times 2}\times h$$

$$M_{ts}=\frac{b^2h}{8}\left\{\left(\sigma_p'+\frac{M_b}{Z}\right)r+2\tau_u\right\}\times\frac{\sigma_p'+M_b/Z}{\sigma_p'-\sigma_p+(M_b/Z)\times 2}$$

上式に $M_b/Z=\lambda(M_t/Z)$ を代入して整理すれば，

$$AM_{ts}^2+2BM_{ts}+C=0$$

$$\therefore\ M_{ts}=\frac{1}{A}(-B-\sqrt{B^2-AC})\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

ここで，

$$A=rb^2h(\lambda/Z)^2-16\lambda/Z$$

$$B=rb^2h\sigma_p(\lambda/Z)+b^2h(\lambda/Z)\tau_u-4(\sigma_p'-\sigma_p)$$

$$C=b^2h(r\sigma_p'^2+2\sigma_p'\tau_u)$$

Aは $r=0.5$ と仮定すれば次の場合，すなわち曲げモーメントが著しく卓越するとき以外は負の値をとる．

$$\lambda=M_b/M_t<(h/b)\times 5.3$$

ここで M_{ts} に対応する M_b の値を求めて $\sigma_p-M_b/Z<0$ であることを確かめる．

これらの式において $r=0.5$ で $\tau_u=15\,\mathrm{kg/cm^2}$(1.47 MPa) と仮定したときの計算値と実験値の比較を **表—4** に示す．

b) 初期ひびわれねじりモーメント[2)]

比較の対象となる一体部材が純ねじりまたは曲げ-ねじりを受けるときの計算式を求める．**図—8** において任意点のねじりせん断応力度はそれが放物線分布をするものとし，yは断面図心を通るx軸からの距離でx軸上方を正に下方を負にとる．任意点のねじりせん断応力度は，

$$\tau=(1-4y^2/h^2)\cdot\tau_{\max}$$

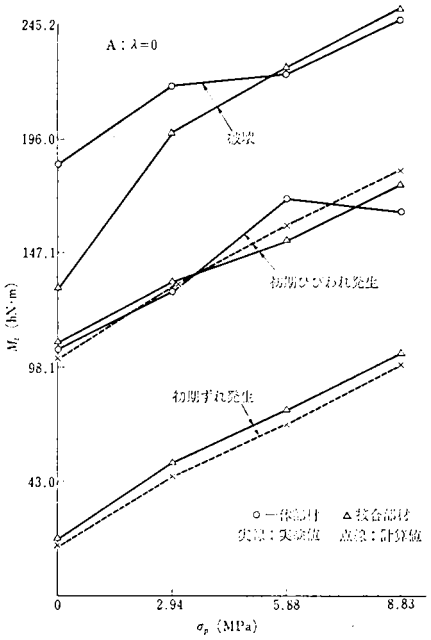
また，プレストレスと曲げによる任意点の垂直応力度は，圧縮を正とし引張りを負とすれば次のとおりである．

$$\sigma=-\frac{\frac{h}{2}-h_1+y}{h_1}\times\sigma_c$$

これらの主引張応力度がコンクリートの引張強度に等しいという条件から，

$$\frac{M_t}{\alpha bA_e\sigma_{tu}}=\frac{h^2}{h^2-4y^2}\times\sqrt{1-\frac{h/2-h_1+y}{h_1}\times\frac{\sigma_c}{\sigma_{tu}}}$$

右辺をyについて微分して零とおき最小値を求めれば，



図—9 諸強度（A：$\lambda=0$）

表—4 M_{ts} の実験値と計算値の比較

λ	シリーズ	断面寸法 (cm) b	断面寸法 (cm) h	プレストレス (MPa) σ'	プレストレス (MPa) σ	M_{ts} test (hN.m)	M_{ts} calc. (hN.m)	M_{ts} test/calc.
0.0	A	15	30	0.00	0.00	25.5	24.8	1.03
				2.94	2.94	58.5	49.6	1.18
				5.88	5.88	78.8	74.4	1.06
				8.83	8.83	103.2	99.3	1.04
	B	15	30	0.00	0.00	22.6	24.8	0.91
				0.59	5.88	59.4	52.2	1.14
				1.18	11.77	87.3	79.4	1.10
				1.57	15.69	122.6	97.7	1.26
	C	15	45	0.00	0.00	29.4	37.2	0.79
				2.94	2.94	66.9	74.5	0.90
				5.88	5.88	116.6	111.7	1.04
				8.83	8.83	163.3	149.0	1.10
1.0	A	15	30	0.00	0.00	26.8	19.1	1.40
				2.94	2.94	53.9	49.6	1.09
				5.88	5.88	83.4	74.4	1.12
				8.83	8.83	104.9	99.3	1.06
	C	15	45	0.00	0.00	37.3	21.3	1.75
				2.94	2.94	90.2	74.4	1.21
				5.88	5.88	125.5	117.7	1.12
				8.83	8.83	150.0	149.0	1.01
2.0	A	15	30	0.00	0.00	23.5	15.3	1.54
				2.94	2.94	50.0	46.8	1.07
				5.88	5.88	84.3	73.4	1.15
				8.83	8.83	99.0	99.3	1.00
	C	15	45	0.00	0.00	?	19.8	?
				2.94	2.94	?	74.4	?
				5.88	5.88	122.6	111.7	1.10
				8.83	8.83	155.4	149.0	1.04

$$\frac{M_{tc}}{\alpha b A_e \sigma_{tu}}=\frac{\sqrt{AC+B}}{C(2-C)} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$A=-(h/2h_1)\times\sigma_c/\sigma_{tu},\quad B=1+\sigma_c/\sigma_{tu}$$

$$C=\{(A-2B)+\sqrt{(A-2B^2)+2AB}\}\times(1/3A)$$

$$y=(C-1)\times h/2$$

$h_1=\infty$ は垂直応力度が均等分布の状態で，

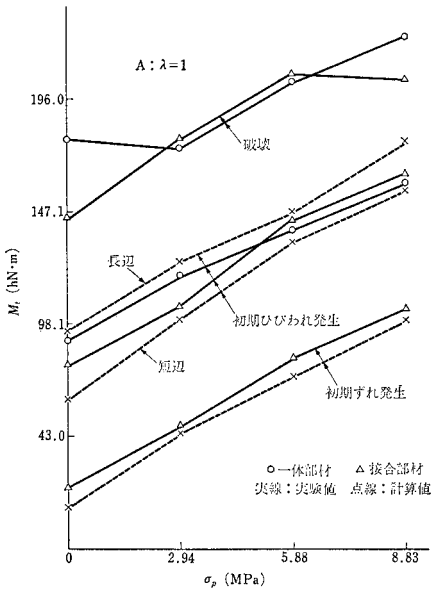
$$\frac{M_{tc}}{\alpha b A_e \sigma_{tu}}=1+\sqrt{\frac{\sigma_c}{\sigma_{tu}}} \quad \cdots\cdots(4)$$

また短辺側については

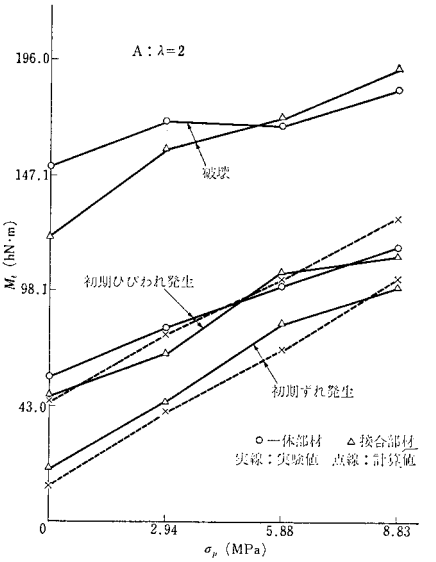
$$\frac{M_{tc}}{\alpha b A_e \sigma_{tu}}=\frac{1}{k}\times\sqrt{1+\frac{\sigma_c}{\sigma_{tu}}} \quad \cdots\cdots(5)$$

式(3)～(5)から求められる値の中での最小値が M_{tc} である．

接合部材の初期ひびわれ発生の機構は接合のためのプレストレスの大きさによって変化するはずである．一般に $\sigma_p \geqq \sigma_b$ 程度であればひびわれの発生と発達状況は一体部材のものとほぼ等しいが，$\sigma_p < \sigma_b$ のときはまず接合面がずれ回転を起こし PC 鋼材の dowel 作用と有効プレストレスの増加が起こった後に，写真に示すように接合部で不連続な斜めひびわれが発生する．ここでは一体部材に対する接合部材のひびわれ強度を比較するにとどめた．



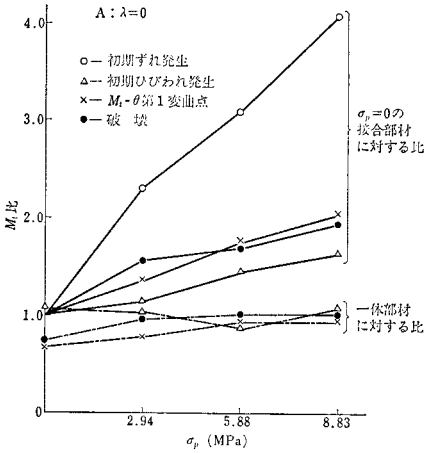
図—10 諸強度（A：λ=1）



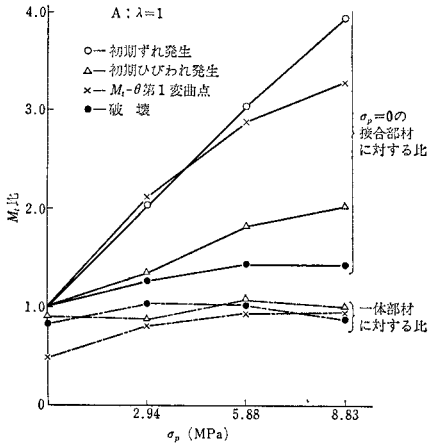
図—11 諸強度（A：λ=2）

曲げが卓越して短辺の引張側に初期ひびわれが発生しても引張鉄筋に拘束されてそれが発達しないうちに，長辺側に斜めひびわれが発生して急速に発達することが多い．

式(1)～(2)によって M_{ts} を式(3)～(5)によって M_{tc} をそれぞれ計算して実験値とともに **図—9～11** に示す．これによればこれらの式で M_{ts} と M_{tc} をほぼ正しく評価することができるが，$\sigma_p=0\,\mathrm{kg/cm^2}$ のときは M_{ts} を著しく小さく評価する傾向がある．また **表—1～3** と **図—12～14** における M_t-θ 曲線の第1変曲点は長辺側の斜めひびわれがその面上にほぼ延びたときに起こり，



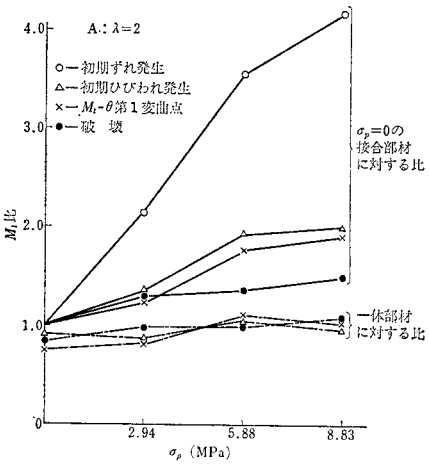
図—12 接合部材の諸強度比（A：λ=0）



図—13 接合部材の諸強度比（A：λ=1）

内部のつり合いが全断面有効状態から立体トラス型つり合い状態に移行する点である．

図—12～14 に接合部材と一体部材の強度比および接合部材における σ_p の値ごとの強度比を示した．いずれの場合も $\sigma_p \geqq 30$ kg/cm²(2.94 MPa) であれば接合部材のひびわれ発生，M_t-θ 第1変曲点強度および破壊強度のいずれも一体部材のものに対して 90～100% を確保できることがわかる．ただし接合面でのずれ回転をほぼ完全に零にするためには計算上では $\sigma_p \fallingdotseq 200$ kg/cm² (19.61 MPa) 程度が必要であり，これは現実的ではない．すなわちごく微少なずれの発生は避けられないということになり静的ねじりのときは問題がないとしてもねじりモーメントが繰り返し作用するときはずれ回転量がしだいに大きくなり無視できない場合もあろう．これらの点は接合面に接着剤を用いれば違った結果が得られるものと思われる．



図—14 接合部材の諸強度比（A：λ=2）

（2） 変　　形

接合部材が一体部材と同等の強度を確保できた場合でも，使用状態での変形量が大きいときは問題がある．

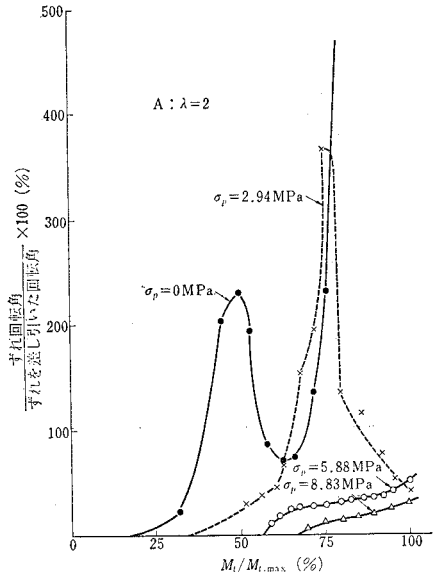
a） ずれ回転

荷重増加に伴うずれ回転の発達状況はプレストレスの大きさによって著しく変化するが，一例としてAシリーズの接合部材で λ=2.0 の場合について示せば **図—15** のとおりである．図における縦軸は一体部材のねじれ角に対する接合部のずれ回転角の比ということになる．これによれば σ_p=0 kg/cm² のときは当然ながら荷重増大に伴ってずれ回転量が著しく大きくなる．増大の途中で比の値が一度減少に転じるのは，基準にとった一体部材のねじれ角がひびわれ発生によって急速に増加することと，接合面のずれが PC 鋼より線で拘束されるためであろう．

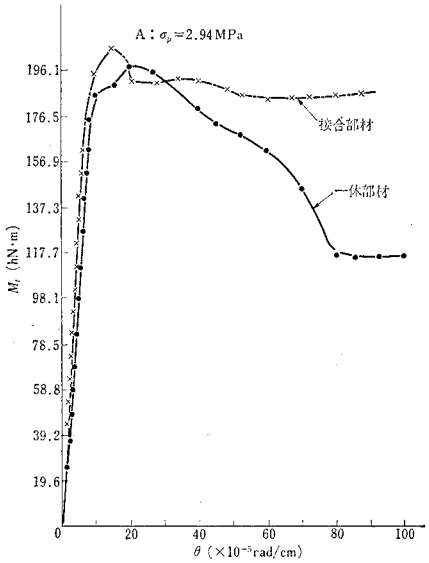
σ_p=30 kg/cm²(2.94 MPa) のときは強度上は一体部材とほぼ同等のものを確保できたが，たとえばAシリーズで設計荷重程度[M_{tc}=847 kg·m(83.1 hN·m)，M_t-θ 第1変曲点強度=935 kg·m(91.7 hN·m)] において，一体部材のねじれ角に対して接合面は約3.7倍のずれ回転を起こしていることに注意すべきである．$\sigma_p \geqq 60$ kg/cm²(5.88 MPa) のときはねじりモーメントが繰り返し作用する場合を除けば，ずれ回転は無視してよいものと思われる．

b） ねじれ角

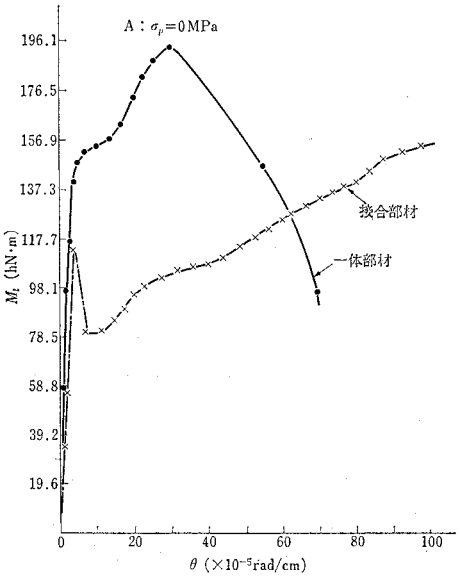
接合部材の M_t-θ 曲線（θ は接合面でのずれ回転を含む）の一例をAシリーズについて，一体部材のものと比較して σ_p の大きさごとに **図—16～19** に示す．θ の値は傾斜計の設置間隔 110 cm の間の平均値をとったものであるが，接合部材は $\sigma_p \geqq 30$ kg/cm²(2.94 MPa) のとき一体部材とほぼ同じ挙動を示す．ただし最大荷重以



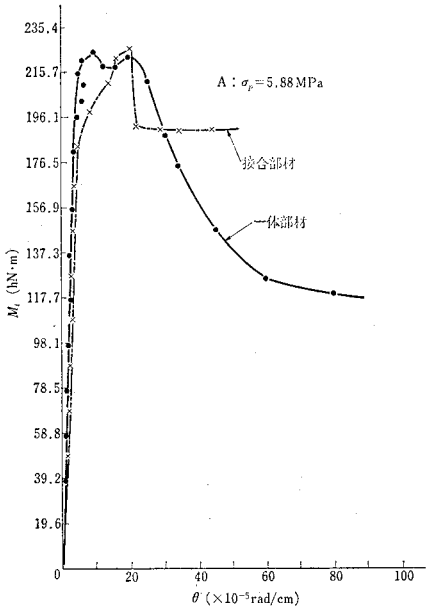
図—15 接合面ずれ回転角の変化



図—17 M_t-θ 曲線（A：σ_p=2.94 MPa）



図—16 M_t-θ 曲線（A：σ_p=0 MPa）



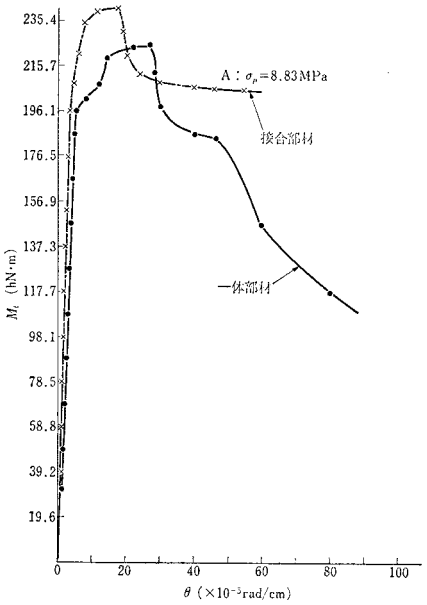
図—18 M_t-θ 曲線（A：σ_p=5.88 MPa）

後の変形を比較すれば接合部材の方が一体部材よりもダクティリティの点で優れている．これは変形エネルギーを接合部で吸収しひびわれの発達を遅らせるためであって，設計の条件によってはこの目的のために接合面のあり方を変形エネルギーを吸収する方向で検討することも意義があろう．

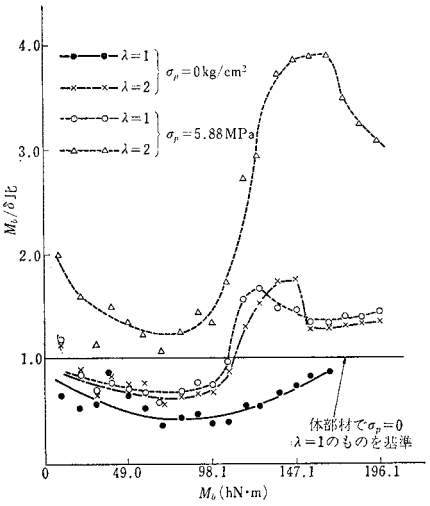
c) た わ み

曲げ-ねじりの場合のたわみをAシリーズで $\lambda=1$ と2の場合について検討する．たわみにくさを M_b/δ で表わし，$\sigma_p=0$ kg/cm² で $\lambda=1$ のときの一体部材の M_b/δ を1.0とし σ_p と λ の値の変化に対応する接合部材の M_b/δ の変化を図—20, 21 に示す．いずれの場合もひびわれ発生後に曲線が上向きに転ずるがこれはプレストレスの影響とともに，基準部材の M_b/δ がひびわれ発生とともに低下するためであろう．λ の値が大きくしたがって同時に作用するねじりモーメントが小さいときはたわみにくいが，これはねじりによるひびわれが部材のたわみと大きい関連性をもつことを示している．

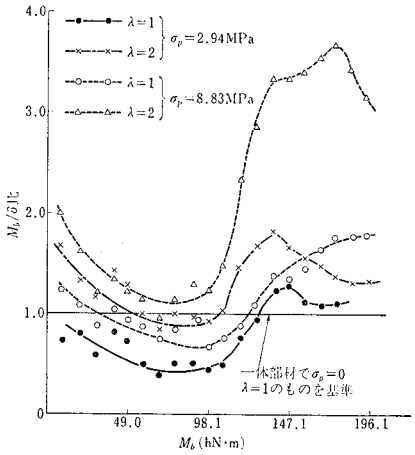
また強度の点からはほぼ許容できた $\sigma_p \geqq 30$ kg/cm² (2.94 MPa) の場合でも，特に $\lambda=1$ のときはたわみ剛



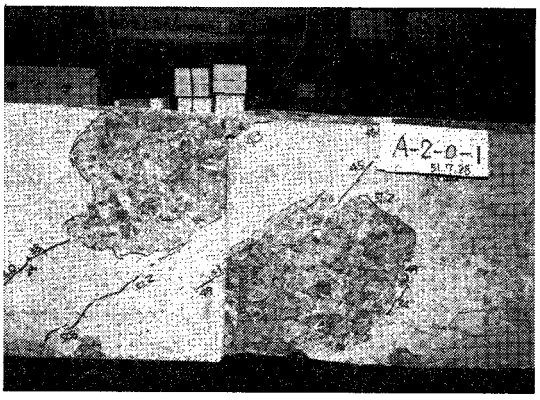
図—19 M_t-θ 曲線（A：σ_p=8.83 MPa）



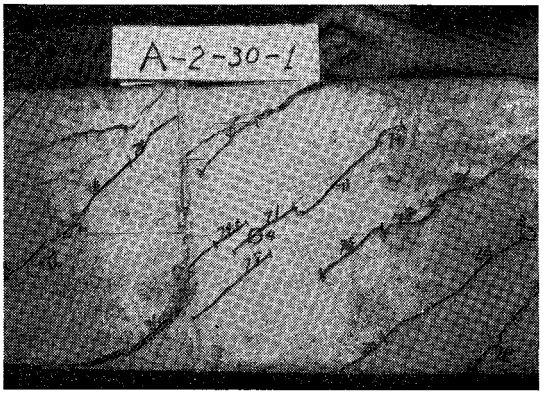
図—20 M_b-M_b/δ 曲線



図—21 M_b-M_b/δ 曲線



σ_p=0 kg/cm² のとき



σ_p=60 kg/cm²(5.88 MPa) のとき

写真—1 接合部材のひびわれ状況

度が一体部材で σ_p=0 kg/cm² のものの約 40% まで低下したことに注目する必要がある．

（3） ひびわれ

ひびわれの発生と発達は σ_p の値が小さいときは一体部材に比較して遅れる傾向がある．これは前述のように変形エネルギーを接合部で吸収するためである．接合部近くでのひびわれ発達状況は **写真—1** に示すように σ_p の大きさによって差異があるが，$\sigma_p \geqq 60$ kg/cm²(5.88 MPa) のときはひびわれの間隔や傾きについては一般のプレストレストコンクリート部材について明らかにされているところと大きな差異はない．接合部近くに付加鉄筋が配置されているが，最終的な破壊は $\sigma_p < \sigma_{tu}$ のときは接合部から起こったが，それ以外の場合はほぼ一体部材と同様に破壊箇所を特定できなかった．

4. まとめ

複数のプレキャストコンクリートはりを緊張したPC鋼より線で接合した部材がねじりおよび曲げ-ねじりを受ける場合について実験的に検討し，ここで採用した接合方法について次の結論が得られた．

（1） 荷重増大に伴って接合面にずれ回転が生じ，ひびわれの発生と発達によって比較的安定した立体トラス型つり合い状態が続き，破壊直前には $\lambda=2$ のとき斜め曲げの現象がみられ破壊に至る．

（2） 初期ずれねじりモーメントは式(1)～(2)を用いて求められるが，$\sigma_p=0\,\mathrm{kg/cm^2}$ のときは過小評価する傾向がある．接合面におけるずれ回転の発生は過大なプレストレスを与えなければ厳密には防止できないが，静的ねじりに対しては $\sigma_p \geqq \sigma_b$ のときはきわめて微小なずれで許容できよう．ただし，繰り返しねじりを受けるときはずれがしだいに増大して接合面での破壊に至ることも考えられ，別に検討する必要がある．

（3） 一体部材の初期ひびわれねじりモーメントは式(3)～(5)で計算できるが，接合部材では $\sigma_p \geqq \sigma_{tu}$ 程度でひびわれ強度とねじれ変形について一体部材に近いものが得られる．破壊強度についてもほぼ同様である．

（4） 曲げ-ねじりの場合の部材のたわみはねじりの割合が大きくなるに従って同じ大きさの曲げモーメントに対して増加する．接合部材に対して強度上は許容された $\sigma_p \geqq \sigma_{tu}$ の場合でも，たわみは一体部材のものの2倍以上に達することがある．

（5） 最大荷重以後のねじれ変形性状は接合および一体部材の両者間で明らかに差異があり，$\sigma_p \fallingdotseq 1.5\,\sigma_b$ の場合でも前者の方が荷重の低下は緩やかに進行する．

終わりに，本研究を行うにあたってご指導をいただいた故神山一博士，試験体製作にご協力をいただいた小沢コンクリート工業KKおよび同研究所主任研究員頴原正美氏にお礼を申し上げます．また120体にも及ぶ試験体について実験を直接担当された国士館大学技手久家秀龍君および卒論学生諸君に心から感謝致します．

付録—記号

M_t：ねじりモーメント
M_{tc}：初期ひびわれねじりモーメント
M_{ts}：接合面における初期ずれねじりモーメント
M_b：曲げモーメント
$\lambda=M_b/M_t$：曲げ-ねじり比
A_e：換算断面積
Z：コンクリート断面の断面係数
α：長方形断面の断面の縦横比によるねじり定数
γ：接合面における両端面間の摩擦係数
δ：たわみ（$\times 10^{-2}$mm）
θ：ねじれ角（$\times 10^{-5}$rad/cm）
σ_{tu}：コンクリートの引張強度
σ_b：コンクリートの曲げ強度
σ_p：プレストレス
τ_u：接合面におけるペースト処理によるせん断強度
τ_{max}：長辺側における最大ねじりせん断応力度
k：長方形断面の短辺側と長辺側における最大ねじりせん断応力度の比

参考文献

1) Libby, J.R.: Modern Prestressed Concrete, second edition, pp. 457～479, Van Nostrand Reinhold Company, 1977.
2) 松島 博ほか：ねじりを受けるプレストレストコンクリート部材のひびわれ，国士館大学工学部紀要，No. 11, pp. 91～104, 1978 年3月.
3) 松島 博・頴原正美：ねじりを受けるプレキャストコンクリート接合部材の挙動，土木学会第32回年次学術講演会，1977 年 10 月.
4) 松島 博・頴原正美：プレキャストコンクリート部材の接合法に関する一考察，第17回プレストレストコンクリート技術協会研究発表会，1977 年 11 月.

（1982.3.23・受付）