

V-32 曲げとねじりをうける偏心アレストレストコンクリートはりの 力学的挙動について

京都大学 正員 ○ 岡田 清
日本国有鉄道 正員 白井 幸彦

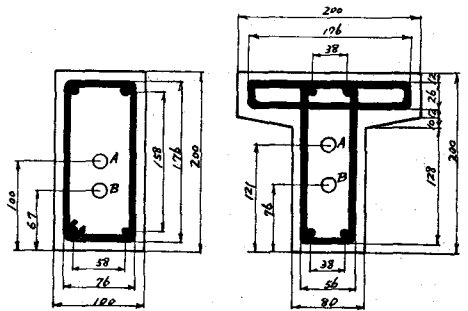
1 まえがき

曲げおよびねじりをうける偏心PCはりでは、断面におけるアレストレス勾配のために、その力学的挙動、破壊様式は複雑である。またねじり補強筋の影響についても不明な点が多い。

本文は、無筋およびねじり補強筋をもつ矩形断面偏心PCはりとし、ねじり補強筋を有するT形断面偏心PCはり、計38本を用い、曲げモーメント(M)とねじりモーメント(T)との比を $M/T = 0, 1/2, 1, 2, 4, \infty$ の6段階に変化させた静的載荷試験を行なった結果について報告する。

2. 供試体および実験方法

供試体の断面寸法を図-1に示す。長さはいずれも160cmで、軸方向筋およびねじり補強の閉合スターラップとしては、 $\phi 6\text{mm}$ ($\sigma_{sy} = 3750\text{kg/cm}^2$, 伸び8.1%)を用い、ねじり補強はりにおけるスターラップの間隔は7cmである。コンクリートは、骨材最大寸法15mm, 単位セメント量 $C = 450\text{kg/cm}^3$, $w/c = 36\%$, スランプ5cm, 空気量4.5%の配合のものである。供試体製作時の相異のため、試験時の品質はややばらついているが、圧縮強度 $51.4 \sim 59.9\text{kg/cm}^2$, 曲げ強度 $41.1 \sim 46.3\text{kg/cm}^2$, 引張強度 $35.7 \sim 39.8\text{kg/cm}^2$, 静弾性係数 $3.34 \sim 3.91 \times 10^5\text{kg/cm}^2$, ポアソン比 $0.167 \sim 0.188$ であった。



* 鋼棒位置Aは一様アレストレス, Bは偏心アレストレスの場合である。

図-1 はり断面の寸法

供試体へのアレストレスの導入は、高周波焼入PC鋼棒(公称 $\phi 16\text{mm}$, 降伏負荷重22.4t, 伸び7.6%)を用い、杖令28日に行ない、鋼棒に貼付した電気抵抗線ひずみ計、およびはり上下縁におけるコンクリートひずみをフーゲンバルカーひずみ計で測定して導入応力をチェックした。アレストレスは上縁で0となるよう偏心位置がきめてある。アレストレス導入後ただちにセメントミルクでクラウトを行なった。フーゲンバルカーひずみ計による測定結果から、試験時(杖令56日)までに生ずるアレストレスの減少を求め、有効アレストレスを確認したが、この値は上縁で $96.7 \sim 98.7\text{kg/cm}^2$ で、下縁で0であった。載荷装置は、供試体の中央部70cmをはさんで2本の鋼製の腕木を取付け、腕木の外端にそれぞれ荷重を載荷させることにより、はり中央部(70cmの間)には一定の曲げモーメントおよびねじりモーメントを作用させた。測定は、部材のねじり回転角(ミラーヒトランシットによる光学的測定とダイヤルゲージによる機械的測定とを併用)、抵抗線ひずみ計によりコンクリートひずみ(はりの4面, 3軸方向), PC鋼棒および鉄筋のひずみを測定した。同一条件に対し、各2本ずつの供試体を試験した。



図-2

3. 実験結果とその考察

3.1 はりの弾性係数(G) ねじりモーメントと回転角との実測値について、初期の弾性範囲におけるせん断弾性係数を理論値と対比検討すると、矩形断面ではSt. Venantの弾性理論式において実

割弾性係数 E とポアソン比 ν とを用いた $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ときわめてよく一致し、丁形はりにおいては有限要素法による計算結果と腹部高さの中央部と比較したが、これとの一致も同様良好であった。この場合、これら弾性定数には M/T の変化による影響、および矩形と丁形との断面形状の相違による影響は認められなかった。

3.2 はりのねじり回転能 図-2 に示すように、はりが完全弾性体と仮定した場合の T_u に対する弾性回転角 θ_e と、はりの実際の最終回転角 θ_u との比 θ_e/θ_u ははりのねじり塑性回転能を示す一つのパラメータと考えられる。矩形断面および丁形断面について、それぞれ S_t Venant, 有限要素法による弾性解から実測 T_u に対する θ_e を計算し、実測 θ_u との比を示すと右表のようである。右表には参考までに無筋コンクリート、および 60 ㎫ σ_{cp} の一様プレストレスを与えた場合の実験値も併記してある。プレストレスを導入すると θ_u の絶対値は大きくなるが、ねじり補強の腹鉄筋のないときは、塑性回転能は無筋のはりの純ねじりをうけるとときとほとんど変わらない。これに反し、腹鉄筋を用いると θ_u の絶対値、 θ_u/θ_e の値はいずれも著しく増大する。なお、本実験では塑性回転能は M/T の変化によって大きな影響を受けていない。

3.3 ひびわれ荷重

3.3.1 純ねじりをうけるととき 偏心プレストレスが導入されているので、必ずしもせん断応力が最大となる点でひびわれが発生するとは限らない。はりの4側面(上下面および側面のそれぞれ中央)に貼布した3軸ひずみゲージの測定値を用い、各荷重段階における主応力を求め、ひびわれ発生状況を検討したが、ひずみ計の読みが急変する荷重(ここでは一応、粘弾性限界と称する)における、矩形断面では上縁、丁形断面ではフランジ中央での主引張応力はほぼコンクリートの引張強度に等しかった。なお、腹鉄筋のないときは肉眼によるひびわれの発見は困難で、ひびわれ発生と同等に破壊した。上縁のひびわれははり軸と約45°の角度で発生し、側面に移り、側面では下縁に近づくに従ってその傾斜角は小となっている(矩形のとき約20°程度)。

3.3.2 曲げおよびねじりをうけるととき 腹鉄筋のない矩形はりでは、 $M/T=4$ および ∞ (純曲げ)を除き、ひびわれ発見と同時に破壊した。腹鉄筋を有する矩形はりのひびわれ荷重も、発生場所も腹鉄筋のない場合とほとんど同じであるが、いったん発生したらそれ以後ひびわれは、やはりらせん状に伝播し、ねじり区間内に一様に分布し、破壊もきわめて穏やかであった。このとき T_u/T_{cr} の値は $M/T=0\sim4.0$ に対し、矩形はりで 1.1~1.4、丁形はりで 1.1~1.7 で、 M/T の比とともにやや大きくなっている。

3.4 破壊強度 腹鉄筋を有する場合について、破壊時における曲げモーメントとねじりモーメントとの相関曲線を図-3(a), (b) に示す。矩形はりでは、若干曲げが加わって上縁に圧縮応力が作用した $M/T=1/2$ のときねじり抵抗は最大で、純ねじり強度を上回り、 $M/T=1.0, 2.0$ ではほぼ純ね

表-1 θ_u/θ_e の値

矩形断面はり				丁形断面はり			
無筋, プレストレスなし	θ_u	θ_{ye}		無筋, プレストレスなし	θ_u	θ_{ye}	
腹鉄筋なし, $M=0$	34.6	1.11		腹鉄筋なし, $M=0$	59.2	1.55	
無筋, プレストレスなし	309	7.84		—	—	—	—
腹鉄筋あり, $M=0$				—	—	—	—
一様プレストレス(60 ㎫ σ_{cp})	76.9	1.34		一様プレストレス(60 ㎫ σ_{cp})	98.4	1.74	
腹鉄筋なし, $M=0$				腹鉄筋なし, $M=0$			
偏心, 腹鉄筋なし	$M/T=0$	65.0	1.28	偏心, プレストレスなし			
	$1/2$	66.2	1.16	腹鉄筋なし			
	1	60.4	1.28	$M=0$	77.5	1.47	
	2	62.8	1.27				
	4	102	2.40				
偏心, 腹鉄筋あり	$M/T=0$	242	3.67	偏心, 腹鉄筋あり	$M/T=0$	423	5.95
	$1/2$	424	6.37		$1/2$	451	6.23
	1	408	6.03		1	412	5.51
	2	332	5.22		2	442	5.88
	4	291	5.62		4	356	5.30

じり強度に等しく、以後曲げの増大とともにねじり抵抗は減少する。本実験では $M/T = 4 \sim \infty$ の間の実験がないので明白なことはいえませんが、 $\frac{M_u}{M_{ou}} = 0.8$ ぐらいまではあまり顕著なねじり強度の低下はないという報告もある。

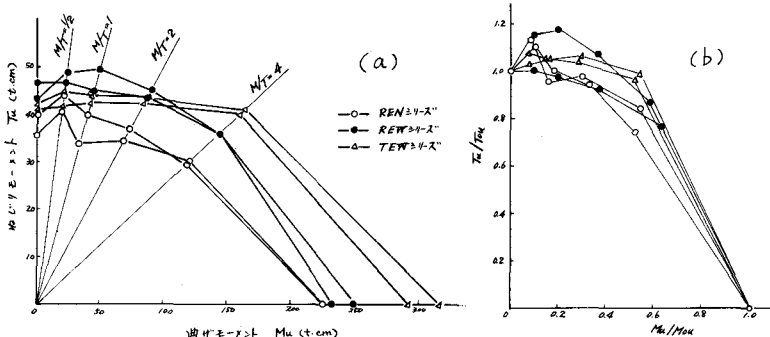


図-3 相関曲線 (破壊時)

破壊時におけるコンクリー

トの最大圧縮ひずみ ϵ_{cu} 、腹鉄筋の最大ひずみ ϵ_{su} を検討すると、ひずみ測定位置が必ずしも critical 断面ではないのであるが、 ϵ_{cu} は矩形、T 形はりととも $0.010 \sim 0.027$ であり圧壊状態に近く、 ϵ_{su} は主ひびわれ位置に近い所では $870 \sim 2000 \times 10^{-6}$ となり (鉄筋の降伏ひずみは $\epsilon_{sy} \cong 1800 \times 10^{-6}$ である)、必ずしも鉄筋の降伏が生じたとは断言できなかった。

また、ねじり補強筋による強度増加率を矩形はりについて示すと、図-4 のようで、 $M/T = 1 \sim 2$ までの効果は最良であるが、本実験の場合この範囲内でのひびわれ角度が緩慢 (約 30°) で、7cm ピッチに配置された腹鉄筋の抵抗力をもっともよく発揮できたからであろう。

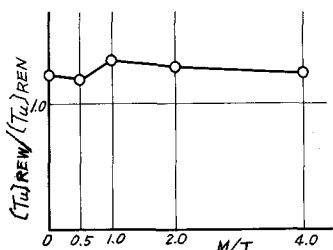


図-4 ねじり補強筋による強度増加率 (矩形・偏心 PC はり)

3.5 曲げ～ねじり強度の算定 ACI では最近鉄筋コンクリートに対しては、 $M/M_u \sim T/T_u$ 相関関係を円と仮定して、新しい設計方法を提案したり。PC 部材に対しては各々の実験値に対し、Reeves²⁾

や Bishara³⁾ は、一般的に 2 次式や 3 次式の提案を行なっているが、これらは供試体の寸法や断面形、導入プロレストレスの大きさ、腹鉄筋量等により異なるものである。Goode²⁾ らは鉄筋コンクリートについては、曲げモーメントの影響の大きさに応じ、四つの Mode の破壊の可能性を示している。

3.5.1 初期ひびわれ (粘弾性限界) 供試はりのひびわれ特性の観察から、ひびわれ荷重を次の仮定の下に求めたものを式 (1)～(3) に示す。(i) ねじりの作用が卓越しているときは、はり上縁において初期ひびわれが生じるので、この点での最大主引張応力の条件でできる。なおこのときは Zia⁴⁾ による修正 Cowan 式⁴⁾ $\frac{\sigma}{\sigma_o} = \sqrt{1 + \frac{\sigma}{\sigma_o}}$ … (A) を用いる。(ii) 曲げとねじりの作用が同程度のときは、はり側面、ほぼはり高中央でひびわれが生じるので、この点の見掛けのせん断抵抗 (平均プロレストレスの影響を加味する) を用いる。(iii) 曲げの作用が卓越するときは、はり下面よりひびわれが発生し、この点での最大主応力条件でできる。

$$(i) \text{ の場合 } \left(\frac{T}{T_{oc}} \right)^2 - \phi_1 \left(\frac{M}{M_{oc}} \right) = 1 \quad (1)$$

$$(ii) \text{ の場合 } \left(\frac{T_c}{T_{oc}} \right) = \phi_2 \quad (2)$$

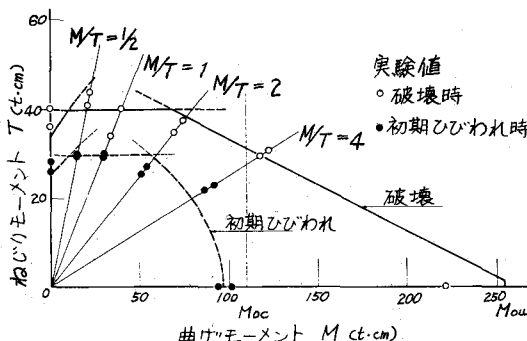


図-5 破壊包絡線

$$(iii) \text{の場合} \quad k_3 \left(\frac{T_c}{T_{oc}} \right)^2 + \left(\frac{M_c}{M_{oc}} \right) = 1 \quad (3)$$

$$\text{ここに, } k_1 = \frac{\sigma_{ps} + \sigma_{tu}}{\sigma_{tu}}, \quad k_2 = \frac{\alpha}{\alpha'} \frac{a}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_{ps}}{2\sigma_{tu}}}, \quad k_3 = \frac{\sigma_{tu}}{\sigma_{tu} + \sigma_{ps}}$$

σ_{ps} : 下縁におけるプレストレス, σ_{tu} : 曲げ引張強度, σ_{tu} : 引張強度

α, α' : St. Venant 式で与えられる常数で, それぞれ上縁, 側面中央点の応力に関するもの

a, b : 矩形断面の短辺, 長辺

実験値との比較を図-5 に示す。

3.5.2 破壊強度 初期ひびわれに対する前述の(i), (ii), (iii)の場合に対し, ねじり補強筋をもちいないの破壊の場合には, (i) のときはねじり応力に対しては完全塑性式を仮定する, (ii) に対しては同様仮定, (iii) に対しては曲げモーメントによる下縁からのひびわれ発生のため断面の減少が生じることを考慮し, かつ未だひびわれの入っていない断面 ($\alpha \times \overline{b - \Delta b}$) は完全塑性としてねじり抵抗を示すと仮定する。ただし断面の減少は曲げモーメントに比例すると考えられる。上記仮定による破壊包絡線と実験値との比較を図-5 に示す。

ねじり補強筋をもちいないでは, (i) ねじりが卓越するときは, ねじり強度はコンクリートはりのそれと, 補強筋のねじり抵抗との和で示されるとし, 後者に対しては Cowan 式 $\frac{2\alpha b' \sigma_{su}}{\Delta} \dots (B)$ (α', b' : コアの断面, σ_{su} : 腹鉄筋断面積, Δ : 腹鉄筋のピッチ) を用いる方法が多く用いられる。本実験でも, Hsu⁵⁾, 岡田⁶⁾らの方法を検討したが, (B) 式における σ_s に対して σ_{sy} を用いる修正 Cowan 方法では, 計算値は過大となった。(ii) 曲げが卓越するときは, 破壊基準として Cowan の内部摩擦説を用い, かつ曲げひびわれによる断面の減少を考慮して算式を導いた矩形はりにおける実験と比較したが, かなりのよい一致を見た。

4. むすび

矩形および丁形断面はりに上縁ではほぼ 0, 下縁で約 100 kg/cm^2 の偏心プレストレスを与え, これが曲げおよびねじりの複合作用下における弾性挙動, ひびわれ特性, 破壊荷重, ねじり補強筋の影響について考察した。ねじり補強筋の影響についても若干の解析を行なったが, なお不明の点が多い。

本研究では一つの解釈を試みたが, 今後さらに考究を進める予定である。

〔参考文献〕

- 1) ACI Committee 318, Jour. of ACI, Feb. 1970, pp 77~107
- 2) ACI Publication SP-18, Torsion of Structural Concrete, 1968, p.124, p.365
- 3) A. Bishara; "Prestressed Concrete Beams Under Combined Torsion, Bending and Shear", Jour. ACI, July 1969, p 525~538
- 4) P. Zia; "Torsional Strength of Prestressed Concrete Members", Jour. ACI, Apr. 1961, pp 1337~1359
- 5) T. T. C. Hsu; "Ultimate torque of reinforced rectangular beams", Proc. ASCE, Feb. 1968, pp 485~510
- 6) K. Okada et al; "Experimental studies on the strength of rectangular reinforced and prestressed concrete beams under combined flexure and torsion", Trans. JSCE, No. 131, July 1966