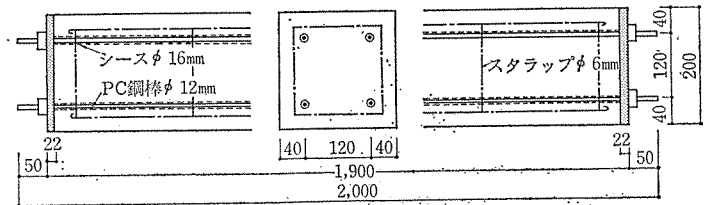


PC 部材の曲げ—ねじり強度

神 山 一*
 穎 原 正 美**

図—1 供 試 体



1. まえがき

曲げとねじりを同時に受けるコンクリート部材の研究には Henry Cowan, Swamy Narayan, 岡田 清教授ほか, その他の研究がある。H. Cowan は RC はりの研究で, 曲げが破壊モーメントの約 80% 以下であればねじり抵抗は低下しないことを指摘している。N. Swamy はねじり破壊と曲げ破壊との間の移行破壊域においては, 曲げが増加するとねじり抵抗も増大するとのべている。岡田 清教授ほか等は曲げモーメントとねじりモーメントの比を関数とした実験式を導いている。これらの実験研究の荷重装置は, 試験はりの支点近くに鋼製ブラケットを取付け, その先端に荷重する方法で, 曲げとねじりの増加割合を一定とする方法によっている。

本研究の実験は, 曲げとねじりを独立した荷重装置によって与え得る装置を用いて行なった。したがって, 曲げとねじりとの比の選定も容易で, 両者の荷重順序も自由にできる。この報告は曲げを一定に保った状態でねじりモーメントを作用させてねじれ変形, 回転角, ひずみ

分布, ひびわれ特性, 破壊強度および破壊状況を求め, 破壊機構その他を検討したものである。

2. 試験体および材料

試験体は 200×200×2,000 の正方形断面はりで, その概要は 図—1 のとおりである。4本の PC 鋼材はシース内に納めたのみでグラウトは施していない。スタラップ状に配置した鉄筋は 2 次的ひびわれを防止するためのものであって, スタラップとしての効果を期待して入れたものではない。

セメントは小野田普通ポルトランドセメント, 細粗骨材ともに荒川産 (細骨材 F.M.=2.65, 比重=2.59, 粗骨材は最大寸法 25 mm, F.M.=6.98, 比重=2.60) の

表—1 コンクリートの配合

粗骨材の最大粒径 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	単位水量 W (kg)	単位セメント量 C (kg)	水セメント比 W/C (%)	絶対細骨材率 (%)	単位細骨材量 S (kg)	単位粗骨材量 G (kg)	単位 AE 剤量 (cc)
25	7.5	1.5	173	346	50	40	748	1 124	—

表—2 コンクリート強度 (材令 28 日)

	圧縮 (kg/cm ²)	曲げ引張 (kg/cm ²)	引張強さ係数 (kg/cm ²)	ヤング係数 E (×10 ⁵) (kg/cm ²)	せん断弾性係数 G (×10 ⁵) (kg/cm ²)	ポアソン比
I	344	49.6	35.9	3.76	1.59	0.183
II	381	51.0	34.1	3.62	1.56	0.162
III	382	57.5	31.1	—	—	—
IV	431	55.5	37.5	3.72	1.56	0.194
V	357	42.2	33.3	3.64	1.49	0.226
VI	342	46.9	33.5	3.78	1.60	0.183
平均	373	50.4	34.3	3.70	1.56	0.190

ものを用い, 表—1 の配合のコンクリートを使用した。材令 28 日のコンクリートの強度は 表—2 のとおりである。

PC 鋼棒は第 4 種 φ 12 で, その性質は降伏点応力度 $\sigma_{py} = 118 \text{ kg/cm}^2$, 引張強度 $\sigma_{pu} = 136 \text{ kg/cm}^2$, 伸び $\delta = 12.4\%$, ヤング係数 $E_p = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ である。

プレストレスはポストテンション方式によって導入した。プレストレスは均等分布とし有効プレストレス $\sigma_{ce} = 40 \text{ kg/cm}^2$ を目標として, 試験の 2~3 日前に導入し

* 工博 早稲田大学理工学部教授 ** 小沢コンクリート株式会社 技術課長

た。

3. 試験装置および載荷方法

ねじりモーメントは 図-2 に示した $\max M_t = 5.0 \text{ t}\cdot\text{m}$ の油圧式ねじり試験機で与えた。曲げモーメントはねじり試験機側面にフレームを取付け、はりとフレームとの間にジャッキを装置して与えた。支点および載荷点に球座を取付け、ねじり抵抗の減少を計った。

ひずみの測定には電気抵抗線ひずみ計を、ねじり回転角の測定には光学的方法を、たわみの測定にはダイヤルゲージを使用した。破壊近傍のひずみ分布測定には自動記録計を使用した。

載荷条件およびゲージその他の取付け位置を 図-3 に示す。はりの両側面および上下面にゲージを貼り、ひずみを測定した。ねじりによる回転角の測定は光学的方法を用い、図-4 の位置にミラーを付けて行なった。すなわち、図-5 のスケール d を読み l を測定して回転角 $\theta = d/2l$ を求めた。二つのミラー間の回転角差がその間のねじれ角を表わす。

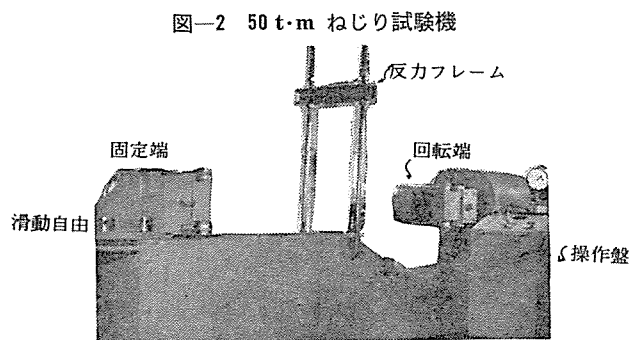


図-2 50 t·m ねじり試験機

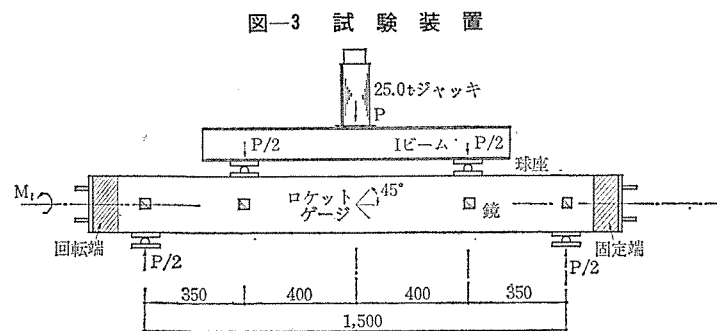


図-3 試験装置

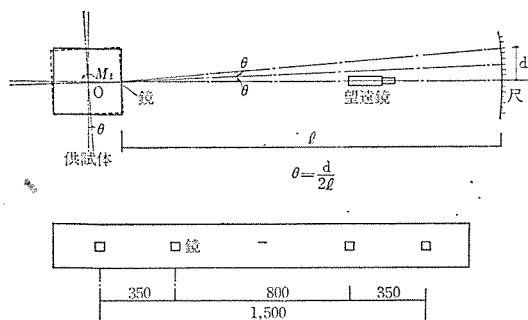


図-4 回転角の測定法

4. 実験結果とその検討

ひずみ測定結果の一例を 図-5 と 図-6 に示した。図-5 は曲げ破壊荷重の 70% の荷重を作用させ、これを一定に保ちながらねじりモーメントを加えた場合のはりの上下面のひずみの変化を示したものである。ねじりモーメントが作用するときはすでに曲げひびわれを発生しているが、ねじりによってはり下面のひずみも変化しており、ねじり抵抗をもつことを示している。図-6 は曲げ破壊荷重の 85% の荷重を作用させ、これを一定に

図-5 曲げモーメントおよび、ねじりモーメントとひずみの関係

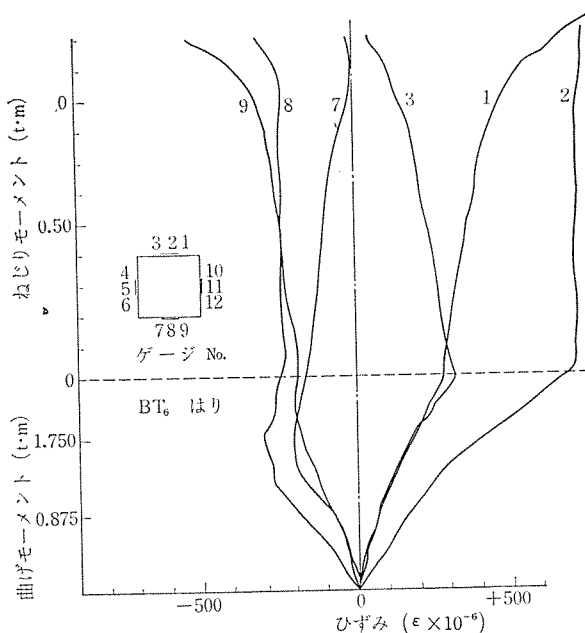


図-6 曲げモーメントおよび、ねじりモーメントとひずみの関係

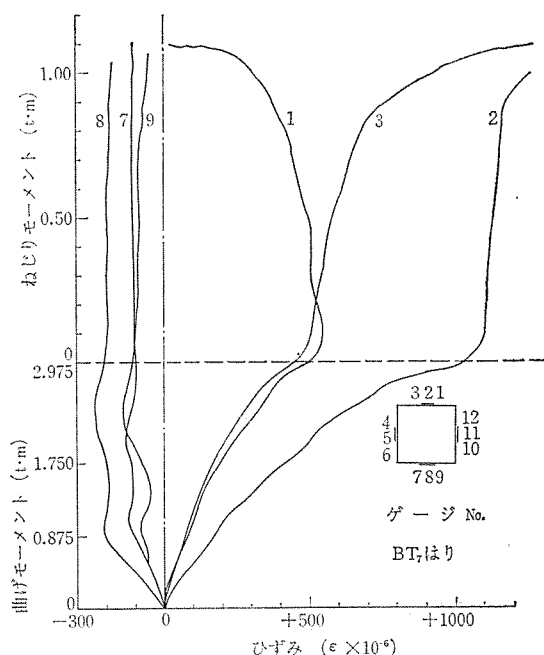
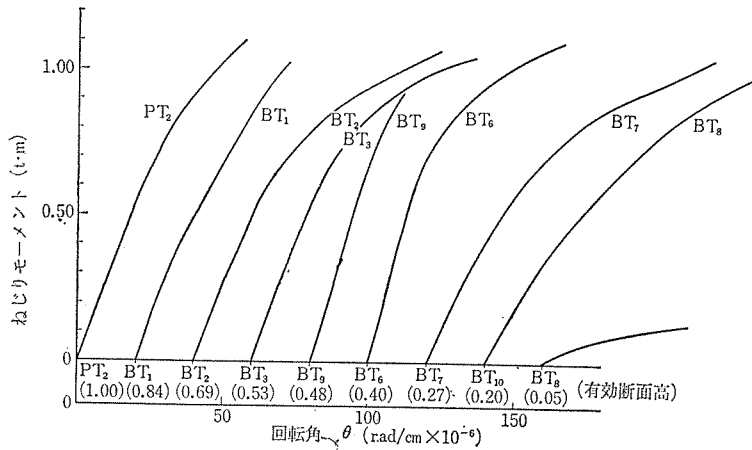


図-7 ねじりモーメントと回転角との関係

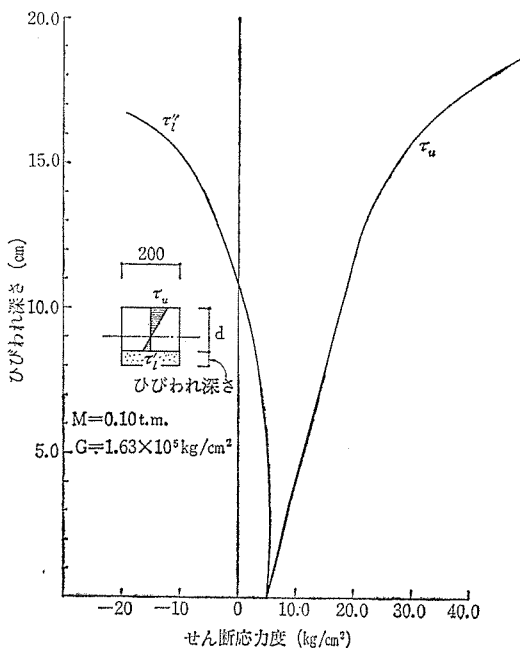


保ちつつねじりモーメントを加えた場合のひずみの変化を示したものである。このはりでは、ねじりによる下面のひずみ変化がほとんどないが、これはすでにねじり抵抗が失われたことを示唆している。破壊近傍ではひずみの変化がいちじるしく、ねじりによる破壊は急激に起るぜい性破壊であることが推察される。

ねじりによる回転角は図-4に示した光学的方法で測定した。その結果を図-7に示した。曲げひびわれ発生前の回転角は純ねじりのときの回転角と一致する。曲げひびわれ発生後の回転角はひびわれ深さの影響を受けるが、ねじり破壊モーメントの約50%までは、ほぼ同一割合で増大し、それ以後の変化はいちじるしい。

図-8はねじり破壊モーメントの約50%のねじりを与えたときのひびわれ深さと、回転角との関係を示したものである。図中の実線は計算値である。BT₁₀はりを除いて測定値は計算

図-8 ひびわれ深さと回転角の関係



値より小さい。これは鋼棒の Dowel Action やひびわれ面の骨材のかみ合いなどの影響と思われる。なお回転角の計算には次式を用いた。

$$\theta = \frac{M_t}{(kb^3d - bdr^2)G} \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- θ : 単位長さあたりの回転角 rad/cm
- M_t : ねじりモーメント kg-cm
- b : 断面幅 cm
- d : 断面の高さ cm
- k : 断面形状係数
- r : ひびわれ深さの 1/2 cm
- G : せん断弾性係数 kg/cm²

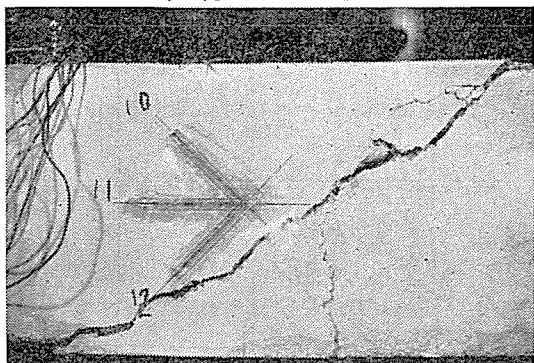
破壊の状況によって破壊の型をねじれ型破壊、曲げ圧縮型破壊および両者の中間にある中間型破壊の3種に大別できる。中間型破壊には曲げ引張りひびわれが発達して破壊する場合と、独立したねじりひびわれが発達して破壊する場合とがある。破壊状況の代表例を図-9に示した。(a)は純ねじり破壊の状況を、(b)は純曲げ破壊の状況を示したものである。(c), (d), (e)および(f)はねじり-曲げ破壊、すなわち中間型の破壊状況である。(f)はその極部の拡大図である。ねじり-曲げ破壊の特徴は軸方向に傾斜角の小さい連続したひびわれを形成することである。

表-3 曲げモーメントとねじり破壊モーメント

Beam No.		破 壊 強 度				実 測 値	
		実 測 値		計 算 値		計 算 値	
		曲げモーメント (t·m)	ねじりモーメント (t·m)	曲げモーメント (t·m)	ねじりモーメント (t·m)	曲げモーメント	ねじりモーメント
PT ₁	純ねじり	—	1.20	—	1.36	—	0.88
PT ₂		—	1.15	—	1.36	—	0.85
BT ₁	曲げねじり	0.44	1.18	0.42	1.15	1.05	1.03
BT ₂		0.63	1.15	0.57	1.05	1.11	1.09
BT ₃		0.88	1.10	0.77	0.96	1.14	1.15
BT ₄		1.26	1.10	1.05	0.91	1.15	1.21
BT ₅		1.49	1.05	1.28	0.89	1.16	1.18
BT ₆		1.75	1.00	1.55	0.88	1.13	1.14
BT ₇		1.90	1.08	1.55	0.88	1.22	1.23
BT ₈		2.45	1.14	1.95	0.91	1.25	1.25
BT ₉		2.52	1.15	1.98	0.92	1.27	1.25
BT ₁₀		2.80	1.15	2.58	1.10	1.08	1.05
BT ₁₁		3.00	1.04	3.08	1.07	0.97	0.97
BT ₁₂		3.15	1.15	2.97	1.08	1.06	1.06
BT ₁₃		3.50	0.90	3.57	0.91	0.98	0.99
BT ₁₄		3.60	0.60	3.63	0.60	0.99	1.00
BT ₁₅		3.30	0.18	3.69	0.20	0.90	0.90
PB ₁	純曲げ	3.39	—	3.70	—	1.08	—
PB ₂		4.11	—	3.70	—	1.11	—

図-9 破 壊 の 状 況

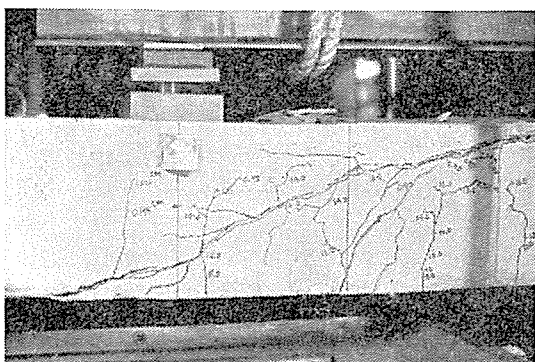
(a) 純ねじり破壊



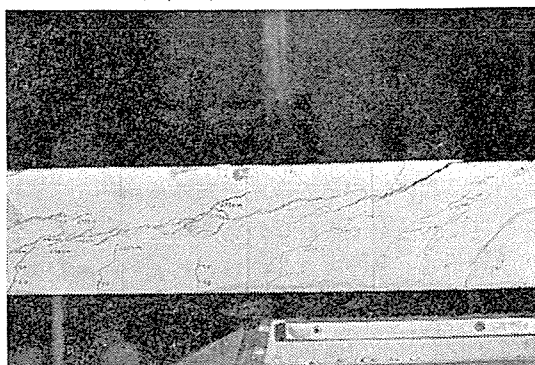
(b) 純曲げ破壊



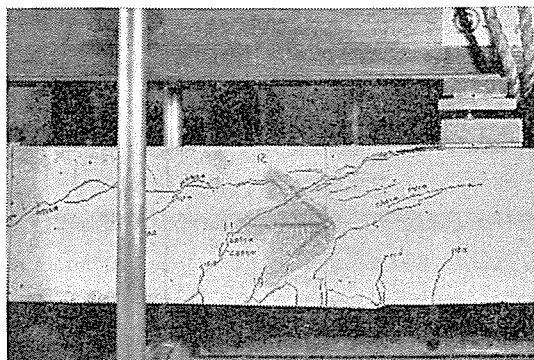
(c) 中間型破壊



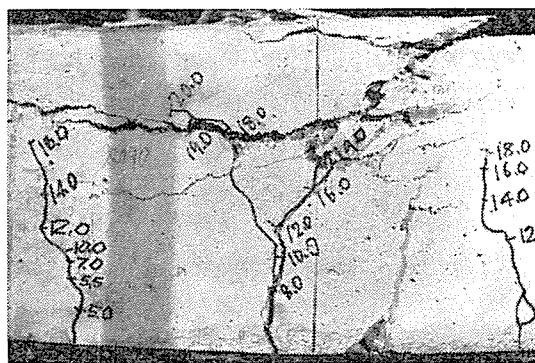
(d) 中間型破壊



(e) 中間型破壊



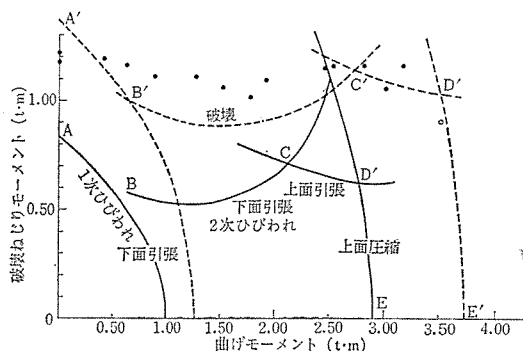
(f) 中間型破壊



先に与えた曲げモーメントと、それに加えたねじり破壊モーメントとの関係は 表-3 のとおりになった。これを図示したのが 図-10 である。本実験は、まず所定の曲げモーメントを加えたのちにねじりモーメントを作用するので、ねじりモーメントが作用するときの曲げひびわれの程度は、先に作用した曲げモーメントの大きさによって異なる。そこで曲げモーメントの大きさに応じ曲げひびわれ発生後を便宜上1次ひびわれ領域、2次ひびわれ領域および破壊域の三段階に分けて考える。1次ひびわれ領域では、曲げによるひびわれは発生しないので、全断面有効な状態でねじりモーメントが作用する。2次ひびわれ領域では、曲げによるひびわれを生じており、断面が欠損した状態でねじりモーメントが作用するが、ねじりモーメントが作用すると新しい型のひびわれが発生する。曲げモーメントとねじりモーメントとの組

合せによる応力度が引張強さ係数または圧縮強度に等しくなることを基準として計算したのが、 図-10 の実線ABCDEである。純ねじり破壊モーメントがひびわれモーメントの 1.60 倍、純曲げ破壊モーメントがひびわれ発生モーメントの 1.29 倍であることを考慮して求め

図-10 曲げを受けた部材の破壊ねじりモーメント



た破壊線が破線 A'B'C'D'E' である。

また 図-10 は、曲げひびわれ発生前および発生直後の状態ではねじり強度は多少低下するが、曲げひびわれがある程度進行した状態では、ねじり強度が多少増大する傾向のあることを示している。このような現象が起る理由は偏心ねじりの状態を考えれば説明できる。偏心ねじりを考えるためにつぎの仮定を設ける。

1) 曲げモーメントとひびわれ深さとの間には、直線関係が成立する(曲げによるひびわれとモーメントとの関係は独立したひびわれの場合は、二つの折線で表わせる。曲げひびわれ発生直後はひびわれ深さの増加割合が大きく、ひびわれ幅の拡大率は小さい。しかし第二の領域では、ひびわれ深さの増加割合は減少し、ひびわれ幅の拡大率は増大する。したがって、この仮定は曲げひびわれ発生後の全域にわたって成立しないが、二つの領域に分ければそれぞれの領域で成立する)。

2) 曲げひびわれ先端部は、普通の顕微鏡で測定できないひびわれ幅とし、ひびわれ面の“かみ合い”によるねじり抵抗は無視する。

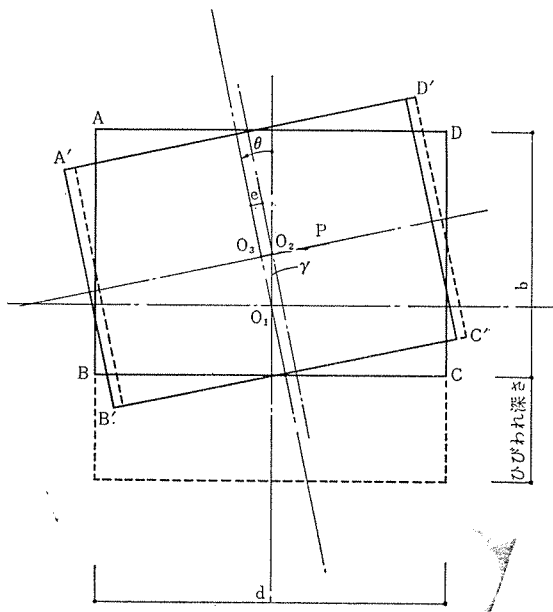
3) PC鋼棒の Dowel Action を無視する。

以上の仮定によって 図-11 の状態を考える。すなわち曲げひびわれを生じた断面のねじり中心と曲げひびわれ発生前の断面のねじり中心との“ずれ”に注目する。

もとの断面中心、図-11 の O_1 に M_t が作用し、曲げひびわれが入った断面 ABCD が O_1 を軸として θ だけ回転したとする。断面 ABCD が A'B'C'D' に移動するにはひびわれ断面の中心 O_2 を軸として θ だけ回転し、さらに θ_2 から θ_3 に e だけ移動しなければならない。このように考えるとつぎの関係が成立する。

$$M_t = M_1 + M_2 = \beta \cdot b^3 \cdot d \cdot G \cdot \theta + P_H \cdot r \dots\dots\dots (2)$$

図-11 偏 心 ね じ り



ここに

M_t : ねじりモーメント

M_1 : O_1 を軸として断面が θ だけ回転するのに必要なねじりモーメント

M_2 : 断面が $\overline{O_2O_3} = e$ だけ移動するのに必要なモーメント

β : 断面寸法 b/d によってきまる形状係数

G : せん断弾性係数

θ : ねじりによる単位長さあたりの回転角

P_H : ひびわれ断面に誘起される見かけの水平力

r : $\overline{O_1O_2} = r$

ひびわれ断面の見かけの水平力 P_H によって生ずる平均せん断応力度を τ_2 とすれば

$$P_H = \tau_2 \cdot b \cdot d \dots\dots\dots (2)$$

一方 τ_2 はせん断弾性係数 G に移動量 e を乗じたものに等しいから

$$\tau_2 = G \cdot e, \quad e = r \cdot \theta$$

$$\therefore P_H = b \cdot d \cdot r \cdot G \theta \dots\dots\dots (3)$$

式(1)と式(3)から

$$\theta = \frac{M_t}{G(\beta b^3 d + b d r^2)} \dots\dots\dots (4)$$

$$M_1 = M_t - M_2 = M_t - b d r^2 G \theta \dots\dots\dots (5)$$

$$M_2 = b d r^2 G \theta \dots\dots\dots (6)$$

M_1, M_2 によって生ずるせん断応力をそれぞれ τ_1, τ_2 とすれば

$$\tau_1 = \frac{M_1}{a b^2 d} \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_2 = \frac{P_H}{b d} = G \cdot \theta \cdot r \dots\dots\dots (8)$$

ここに $\alpha \doteq \frac{1}{(3 + 1.8 c/b)}, \quad c = d - \frac{r}{2}$

せん断応力の分布から断面幅中央部のせん断応力は、平均応力の1.5倍であるから、上縁および下縁のせん断応力は次のように表わせる。

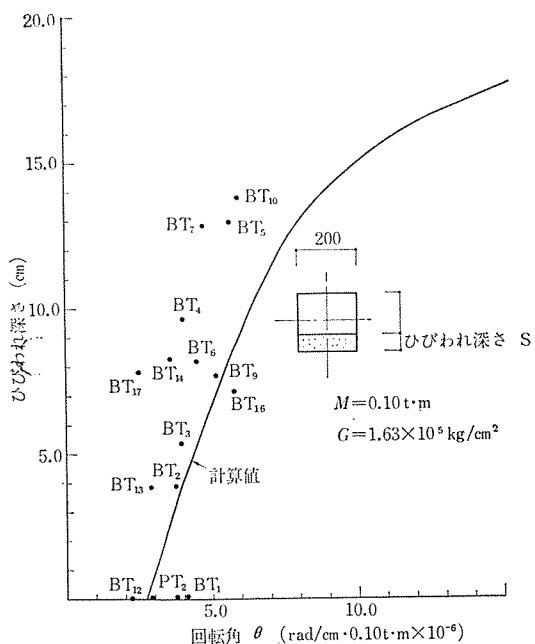
$$\text{上縁} \quad \tau_u = \frac{M_1}{b^2 d \alpha} + 1.5 G \cdot \theta \cdot r \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{下縁} \quad \tau_l = \frac{M_1}{b^2 d \alpha} - 1.5 G \cdot \theta \cdot r \dots\dots\dots (10)$$

図-12 は、ひびわれ深さと欠損断面に生ずるせん断応力度 τ_u, τ_l の関係を示したものである。ひびわれ深さの進展とともに欠損断面下面、すなわち、ひびわれ先端のねじりによるせん断力 τ_l は減少し、上面圧縮縁のせん断応力度 τ_u は増大する傾向を示している。この理由でひびわれ先端部分の主引張応力度が引張強度に到達するまでねじりモーメントは増大する。この方法で求めたのが 図-10 の曲線 BC である。

せん断応力度 τ_u を生ずる上縁では曲げによる圧縮応力度が作用しており、あたかもプレストレスが増加したのと同じ状態になる。この合成応力度を用いて求めた主

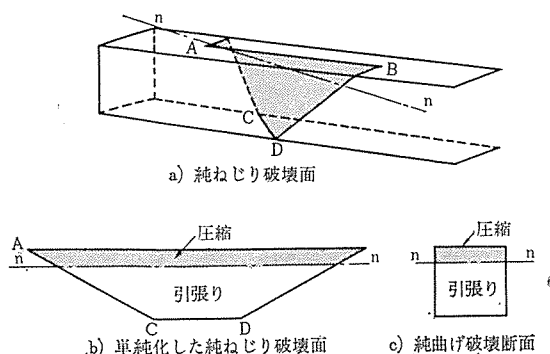
図-12 ひびわれ深さと、ねじりによる上下縁に生ずるせん断力の関係



引張応力度が引張強度に等しくとる条件から求めたのが図-10の曲線 CD である。また上縁ではねじりモーメントが増大すると主圧縮応力度がコンクリートの圧縮強度に到達することがある。この条件から求めたのが図-10の曲線 DE である。以上の考え方で求めた図-10の曲線は多少複雑ではあるが、曲げねじりを受ける部材の特性、特に偏心ねじりの特徴をよく表現していると考えられる。

ねじりによる破壊面は複雑な曲面となるが、これから破壊機構を推察することが大切であろう。図-13の a) はねじり破壊面である。これを単純化すると逆台形の断面 b) と見なせる。また曲げ破壊面は断面と同形 c) である。したがって曲げねじりを受ける部材の破壊面は両者の中間の形状であろうと推察でき、事実この推察に近い破壊面となる。破壊面の形状が明確になれば、ひびわれ面で切断したフリーボディのつり合いから、破壊強度を求めることができるが、実際はねじり曲げの条件によって破壊面の形状が異なるので、ここではつぎの方法

図-13 ねじり破壊面



によって破壊を検討した。

例えば完全塑性式で求めたねじり強度は、弾性理論による値の約 1.6 倍で実際の強度に近いこと、および曲げ強度は引張強さ係数の (1.3~2.0) 倍であることに注目して、弾性理論による値の、ねじりは 1.6 倍、曲げは約 1.3 倍をとってねじり破壊モーメントを求めた。計算値と測定値の比較を表-3 に示した。

5. む す び

この報告に述べた曲げねじりの荷重方法は、破壊機構を解明する手がかりを得ることに重点をおいたものであるから、実際の構造物に曲げねじりが作用する場合の状態とは差異がある。したがって実験結果の検討ではこれを考慮して考察を試みた。しかし破壊の様相には曲げねじり同時荷重の場合と同一の傾向が多々見られる。

ねじり破壊モーメントは先に作用した曲げモーメントが曲げ破壊モーメントの約 80% 以下であれば顕著な低下は見られない。このような傾向は、メルボルン大学の Henry Cowan 教授が RC はりの曲げねじり試験で確認した傾向と一致する傾向である。すなわち曲げねじり破壊強度についてはこの点で同じ傾向が見られる。

ねじりひびわれ発生モーメントと、ねじり破壊モーメントとの比は、本実験の場合約 1.6 程度である。もしねじりひびわれ発生に対する安全度を 1.5 とすれば、ねじり破壊に対する安全度は 2.46 となる。しかしプレストレスを大きくすると、ひびわれ発生から破壊までの余裕が小さくなり、脆性破壊を起すことは曲げに対する場合同様に注意しなければならない。したがって安全度の確保には多少断面を増大することが望ましい。

破壊にはねじれ型破壊、曲げ圧縮型破壊および両者の中間にある中間型破壊がある。ねじれ型破壊、曲げ圧縮型破壊ともに曲げの増大にともなって、ねじり破壊モーメントは低下する。中間型破壊では逆の傾向が認められるので、中間型破壊を起すような断面選定およびプレストレスの与え方が望ましい。また弾性領域ではつぎの傾向が認められる。すなわち、ひびわれ発生前のねじり角、ひずみ分布およびたわみは弾性理論式の値と一致する。ひびわれを生じて、その深さが高さの約 1/4 以下であれば、ねじり抵抗をもつことがひずみ分布から推定され、ねじれ角も弾性理論値と一致する。しかしひびわれ深さが、高さの約 1/4 を超過するとひびわれ面のねじり抵抗は低下し偏心ねじりの影響が顕著になる。

付 記 実験に協力された宮下俊幸、宮内一彦両氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Henry J. Cowan : Journal of the ACI, Jan. 1960, Discussion, Journal of the ACI, Dec. 1960, Vol. 32, No. 6, Proceedings Vol. 56 他
- 2) 岡田 清, 西林新蔵, 阿部泰三 : 土木学会論文集第 131 号 1967.5.26・受付