

ねじりを受けるプレストレストコンクリート 長方形断面はりについて

STUDY ON PRESTRESSED CONCRETE BEAM OF RECTANGULAR SECTION SUBJECTED TO TORSION

児島孝之*・岡田清**
By Takayuki Kojima and Kiyoshi Okada

および破壊条件の検討を行った。

1. はじめに

ねじりの問題は弾性学上および塑性学上古典的な問題の一つであり、ねじりを受けるコンクリート部材についても今日まで多くの研究がなされている。しかしながらコンクリート部材のねじりに関する研究では、その大半が、ねじりによる部材の破壊機構あるいはコンクリートの破壊条件に基づく強度理論であり、ねじりを受けた部材の変形・応力解析あるいはこれらに基づく強度解析についてはほとんど報告されていない。これは、一つには、ねじりのようにせん断応力を受ける場合のコンクリートの材料特性（応力～ひずみ曲線、破壊条件等）が複雑であり、このような場合の断面の応力解析が円形断面以外では、かなり困難であることによるものと考えられる。一方、この数年間において、有限要素法のように電子計算機を用いた近似解法が発達し、複雑な断面の応力解析あるいは逐次計算法による非線形解析が可能となってきている。

本報告はねじりを受ける鉄筋あるいはプレストレストコンクリート部材の系統的な解析を行うための基礎的な問題の一つとして、長方形断面を有するプレストレストコンクリートはりにねじりが作用した場合の挙動を考察するため、まず一様プレストレスを受けた場合について、理論および実験の両面から検討を加えたものである。理論的研究においては、はりのねじり解析に有限要素法による非線形解析の適用を試みたものであり、解析においてはコンクリートの応力～ひずみ曲線として2種類の曲線についての解析を行った。実験では長方形断面の縦横比を3種類、有効プレストレスを4種類変化させたはりの静的載荷実験を行い、はりの変形特性および強度特性を検討するとともに、これらの理論解析との比較

2. ねじりを受けるコンクリートはりの変形・強度解析

(1) 解析に用いた平面応力状態におけるコンクリートの応力～ひずみ曲線

ねじりを受けるプレストレストコンクリートはりの変形・強度解析においては、コンクリートの破壊条件と応力～ひずみ曲線が最も重要である。プレストレストコンクリートはりがねじりを受ける場合、あるいは曲げと同時にねじりを受ける場合においては断面内の応力状態は平面応力状態（この場合2主応力が異符号）となる。したがって、本解析においては平面応力状態での破壊条件と応力～ひずみ曲線が必要となる。プレストレストコンクリート部材においては、その有効プレストレスは一般にコンクリートの圧縮強度の1/3程度以下であり、このような部材がねじりを受けて破壊する場合、その破壊形式は引張主応力による引張破壊となることは過去の実験からも明白である。本研究では以上のことから平面応力状態においても主応力と主ひずみとの関係は1軸引張時の応力～ひずみ曲線と同形であると仮定した。この場合の引張強度に対する応力としては破壊条件に達する引張主応力を用いるものとする。コンクリートの巨視的破壊条件に関しては従来から種々の理論があり、ねじりを受けるコンクリートについても Cowan¹⁾、Pawl Zia²⁾ による破壊条件が提案されている。本研究ではこれらの破壊条件を実験結果より検討した。

コンクリートの引張応力～ひずみ曲線は、一軸引張試験がかなり難しいことと、この試験からは引張終局ひずみを求めることが一般に困難であることなどから、一般式として提案されているものは少ない。本研究では図-1に示したように、応力～ひずみ曲線として曲線形が比較的単純な a, b の2種類を仮定³⁾し、これらを用いて

* 正会員 工修 立命館大学助教授 理工学部土木工学科

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

ねじりの変形・強度解析を行った。a の応力～ひずみ曲線は応力が引張強度 σ_{tu} に達するまでは2次放物線であり、その後破壊に至るまで応力が一定であるとしたものである。曲線 b は応力が引張強度に達するまでは直線

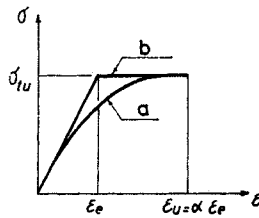


図-1 引張応力-ひずみ曲線

であり、その後破壊に至るまで応力が一定である、いわゆる bilinear 型の応力～ひずみ曲線である。a, b 両曲線において破壊時のひずみ ϵ_u は弾性ひずみ $\epsilon_e (= \sigma_{tu}/E_c, E_c: \text{ヤング係数})$ との比 α により $\epsilon_u = \alpha\epsilon_e$ と表わし、この α は以下のようにして決定した。すなわち、コンクリートの曲げ強度試験において破壊直前のひずみが直線分布するならば、引張部分の応力分布は図-1の曲線 a あるいは b と同形となり、一方圧縮部分においては弾性状態を仮定すると (図-2 参照), α の値は曲げ強度 σ_{bu} と引張強度 σ_{tu} の試験値を用いて、その比 σ_{bu}/σ_{tu} によって表わすことができる。a の応力～ひずみ曲線を用いる場合には、

$1 \leq \alpha \leq 2$ のとき、

$$\frac{\sigma_{bu}}{\sigma_{tu}} = (1-k) \left(\frac{\alpha-1}{6} k + \frac{\alpha+3}{2} \right) \dots\dots(1)$$

ただし、

$$k = \frac{\sqrt{\frac{\alpha^2+2\alpha}{3}}}{\alpha + \sqrt{\frac{\alpha^2+2\alpha}{3}}} \dots\dots(2)$$

$\alpha > 2$ のとき

$$\frac{\sigma_{bu}}{\sigma_{tu}} = (1-k) \frac{\left(\alpha^2 - \frac{8}{3}\alpha + 2 \right) k + 3\alpha^2 - 2}{\alpha^2} \dots\dots(3)$$

ただし、

$$k = \frac{\sqrt{2\alpha - \frac{4}{3}}}{\alpha + \sqrt{2\alpha - \frac{4}{3}}} \dots\dots(4)$$

となる。b の応力～ひずみ曲線を用いる場合は、

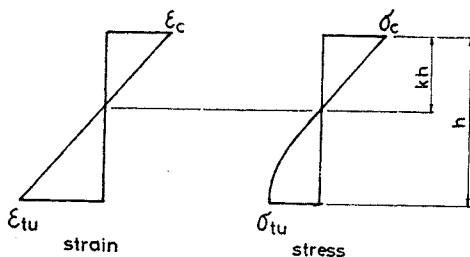


図-2 曲げ試験の破壊直前における断面内のひずみと応力分布

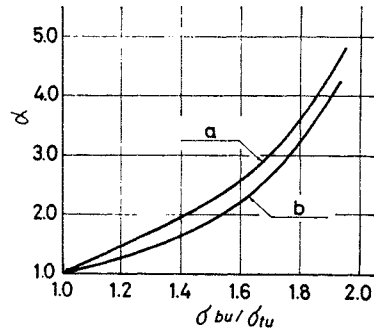


図-3 α と σ_{bu}/σ_{tu} との関係

$$\frac{\sigma_{bu}}{\sigma_{tu}} = (1-k) \frac{(\alpha-1)^2 k + 3\alpha^2 - 1}{\alpha^2} \dots\dots(5)$$

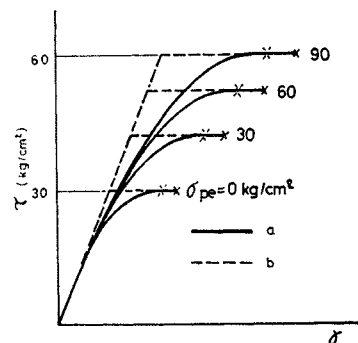
ただし、

$$k = \frac{\sqrt{2\alpha-1}}{\alpha + \sqrt{2\alpha-1}} \dots\dots(6)$$

となる。これらの σ_{bu}/σ_{tu} と α との関係を図-3 に示した。

(2) 有限要素法による長方形断面はりの変形・強度解析法

2.(1) で仮定した応力～ひずみ曲線を用いてプレストレストコンクリートはりの解析を行う場合、みかけのせん断応力～ひずみ曲線は、曲線 a あるいは曲線 b を用いるならば、図-4 のように異なるプレストレスに対して相似な曲線で表わされる。みかけのせん断強度 τ_u は破壊条件によって定まるが、図-4 においてはせん断強度 $\tau_u = 30 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートで、破壊条件として最大引張主応力説を用いた場合のみかけのせん断応力～ひずみ曲線を示した。このことからねじりを受けるプレストレストコンクリートはりの変形は無筋コンクリートの変形と相似となり、その相似比は図-4 の応力～ひずみ曲線の相似比と一致する。したがって、本解析においては無筋コンクリート長方形断面はりについて変形・強度解



($\tau_u = 30 \text{ kg/cm}^2$ とし、破壊が最大引張主応力説に従うものとする)

図-4 せん断応力-ひずみ曲線

析を行った。

解析法は有限要素法による非線形解析であるが、一様ねじりに対する有限要素法の適用については文献⁹⁾に詳しいので省略し、ここでは本解析で用いた非線形解析法⁹⁾について簡単に述べる。

応力～ひずみ曲線として a 曲線を用いる場合の解析はねじり角 θ を漸増させる方法によった。すなわち、

- a) ねじり角の増分 $\Delta\theta$ に対して弾性計算を行い、各要素の応力、ひずみの増分およびねじりモーメントの増分を計算する。
- b) a) で求めた各増分を前回までの計算結果に加算して、ねじり角 $\theta=\theta+\Delta\theta$ における各要素の応力、ひずみおよびねじりモーメントを求めらる。
- c) 各要素について、b) で求めた応力に対するせん断弾性係数 G (接線係数)を図-4の応力～ひずみ曲線より新たに決定する。
- d) a)～c) の計算を繰返す。

応力～ひずみ曲線として b 曲線を用いる場合の解析は以下の手順によった。

- a) あるねじり角の増分 $\Delta\theta$ に対して弾性計算を行い、各要素の応力、ひずみの増分、およびねじりモーメントの増分を計算する。
- b) まだ応力が破壊条件に達していないすべての要素について、a) で求めた応力の増分の k 倍を前回までの計算結果に加えるとちょうど破壊条件に達するような k の値を求める。
- c) k の値の最小値 k_{min} を求め、a) で求めた応力、ひずみの増分およびねじりモーメントの増分の k_{min} 倍を前回までの計算結果に加え、ねじり角 $\theta=\theta+k_{min}\Delta\theta$ における応力、ひずみおよびねじりモーメントを求める。
- d) 新たに破壊条件に達した要素のせん断弾性係数の値を極端に低下させ(本解析では $G'=0.01G$ とした)とし、a) 以下の計算を繰返す。

(3) 解析および解析結果

解析を行った断面は縦横比 $h/b=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ の4caseについてである。いずれの場合も計算条件は断面の幅 $b=10\text{ cm}$ 、初期せん断弾性係数 $G=1.5 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$ 、せん断強度 $\tau_u=30\text{ kg/cm}^2$ とした。

図-5に断面の要素分割を示した。要素には長方形要素を用いた。ねじりを受ける場合には断面の境界付近での応力勾配が大きくなるために境界付近での要素分割は図-5に示すように細くした。

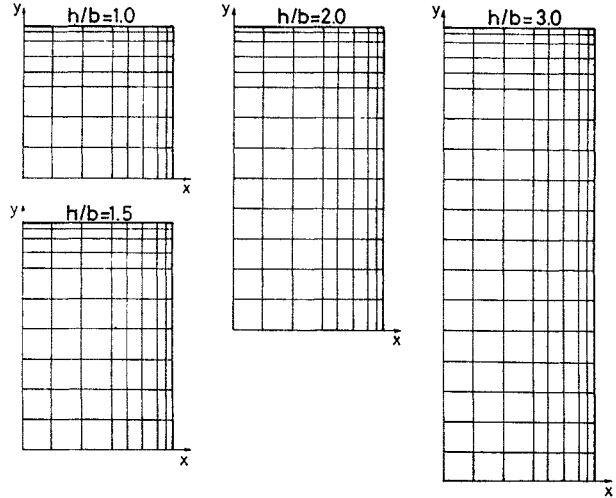


図-5 断面の要素分割

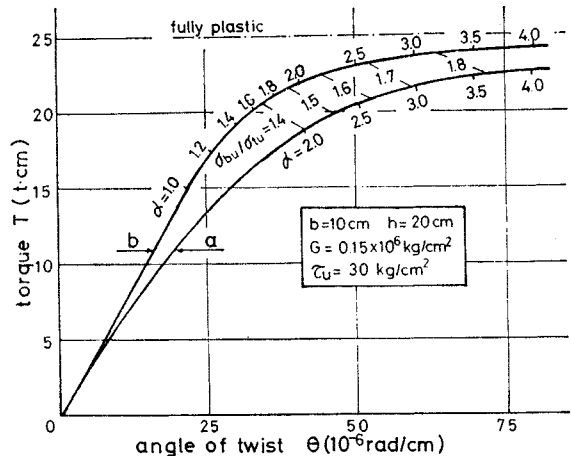


図-6 $h/b=2.0$ の断面に対するねじりモーメント T とねじり角 θ との関係

図-6は解析結果の一例として断面の縦横比 $h/b=2.0$ の場合のねじりモーメント T とねじり角 θ との関係を示したものである。この $T-\theta$ 曲線の傍に記入した α の値は断面内に生じた最大せん断ひずみと弾性ひずみ $r_e=\tau_u/G$ との比を示しており、断面のコンクリートの α の値(図-3参照)がこの値になったときに、断面が破壊することを意味する。たとえば、 $\sigma_{bu}/\sigma_{tu}=1.6$ のコンクリートを用いた場合では、その応力～ひずみ曲線として a 曲線を仮定するならば $\alpha=2.55$ となるから(図-3参照)、図-6から $\alpha=2.55$ に相当する点をみれば、破壊時のねじりモーメント $T_u=20.8\text{ t}\cdot\text{cm}$ 、ねじり角 $\theta_u=52.5 \times 10^{-6}\text{ rad/cm}$ となる。一方、 b 曲線を仮定する場合では $\alpha=2.20$ であるから、 $T_u=22.5\text{ t}\cdot\text{cm}$ 、 $\theta_u=45 \times 10^{-6}\text{ rad/cm}$ となる。他の断面(h/b)についても同様の解析結果が得られるので、これらよりねじり強度 $T_u=$

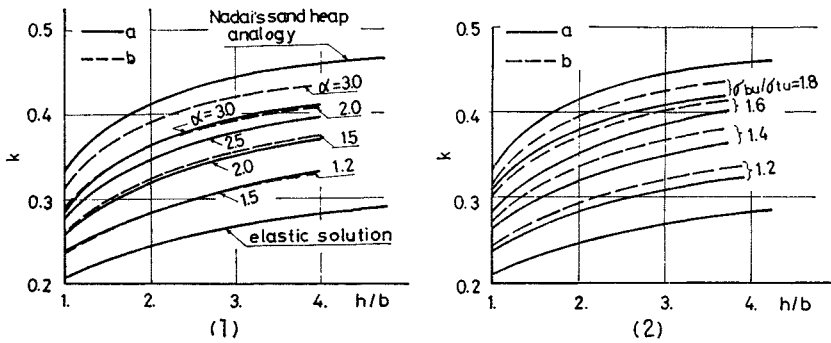


図-7 $T_u = kb^2hr_u$ における k の値と h/b との関係

kb^2hr_u としたときの k の値を求め、 k と h/b との関係を図-7 に示した。なお、図-7 には Nadai の Sand heap analogy⁶⁾ および弾性解⁷⁾ による k の値もあわせて示してある。図-7 (a) は α をパラメータとしたものであり、図-7 (b) は σ_{bu}/σ_{tu} の値をパラメータとしたものである。図-7 (a) において、理論値 a, b はそれぞれ応力~ひずみ曲線 a, b に対応するものであるが、これらを同一 α で比較すると、応力~ひずみ曲線の形状からも予想されるように、両者はかなり異なった k 値を与え、 b の理論 k 値は a の理論 k 値よりも大きくなる。しかし図-7 (b) のようにコンクリートの曲げ強度と引張強度との比 σ_{bu}/σ_{tu} をパラメータとすると、同一 σ_{bu}/σ_{tu} に対する k の理論値は b 曲線を用いたほうが a 曲線を用いた場合よりも大きいあまり差はなく、その差は k の値で約 5% 以下となっている。

図-8 は応力~ひずみ曲線 b を用いた場合、断面内の応力が τ_u に達している領域（塑性領域）を断面の縦横比 $h/b=1.0, 1.5, 2.0$ について示したものである。同図には各塑性領域に達したときのねじりモーメントと α

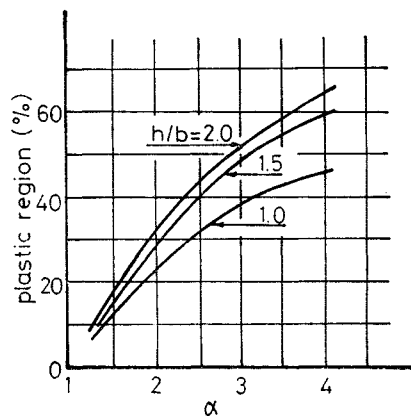


図-9 塑性領域と α との関係

の値を示してある。また、これらの塑性領域と α との関係を図-9 に示した。一般のコンクリートでは曲げ強度と引張強度との比 σ_{bu}/σ_{tu} は 1.4~1.9 程度であり、コンクリートが高強度になるほどこの値は小さくなるといわれているが⁸⁾、この σ_{bu}/σ_{tu} の範囲に対しては、図-3 によれば、 α の値（曲線 b ）は 1.7~4.0 となり、この場合の塑性領域は、図-9 から $h/b=1.0$ で断面積の 17~46%、 $h/b=1.5$ では 19~59%、 $h/b=2.0$ では 23~65% 程度となっている。

3. プレストレストコンクリート長方形断面はりのねじり載荷実験

(1) 実験計画および供試はり

実験計画を表-1 に示す。供試はりの断面は長方形断面

表-1 実験計画

series	断面寸法			effective prestress σ_{pe}			
	b	h	b/h				
A	15	15	1.0	0	kg/cm ² 30	kg/cm ² 60	kg/cm ² 90
B	10	15	1.5	0	30	60	90
C	10	20	2.0	0	30	60	90

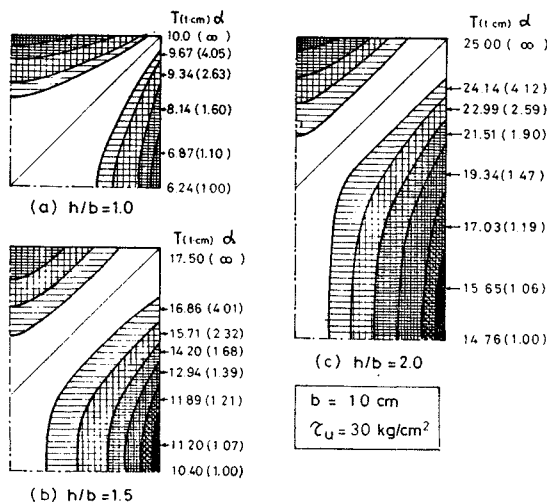


図-8 断面内の塑性領域

表-2 示方配合

骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	単位水量 (kg)	単位セメント量 (kg)	w/c (%)	s/a (%)	単位細骨材量 (kg)	単位粗骨材量	
							5~10 mm (kg)	10~20 mm (kg)
20	5±1	190	456	42	41	695	336	673

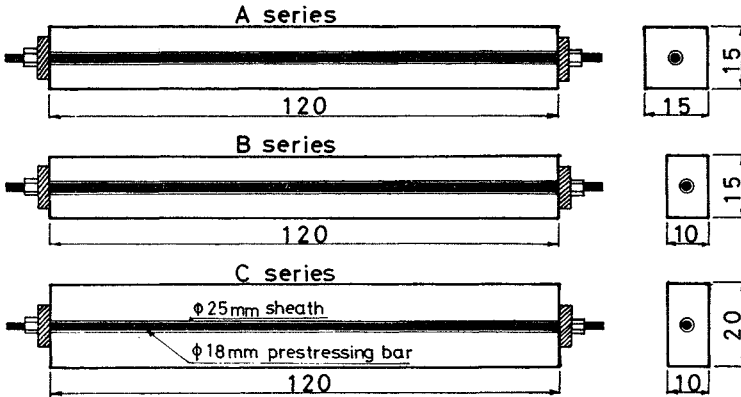


図-10 供試はり (単位: cm)

面の縦横比 h/b を3種類選び、有効プレストレス σ_{pe} は4種類変化させた。供試はりとは同一条件に対してそれぞれ2本実験し、総計24本である。はりはいずれも一様プレストレスはりであり、付着なしのポストテンション方式とした。供試はりおよびP C鋼棒の配置を図-10に示す。

(2) 使用コンクリート

コンクリートは普通コンクリートであり、セメントには早強ポルトランドセメントを用い、細骨材には野洲川産(比重2.59)のもの、粗骨材には安曇川産(比重2.61)のものを用いた。コンクリートの示方配合を表-2に示す。なお、供試はりとは脱型後載荷試験まで20°Cの恒温室で気中養生を行った。

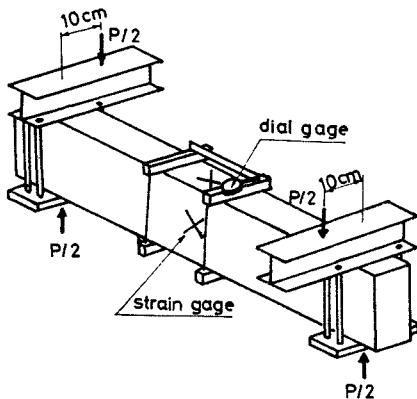


図-11 実験装置

(3) 実験方法

ねじりの載荷実験はコンクリートの材令14~16日に行った。プレストレスの導入は原則として載荷実験の直前に行った。ねじりの載荷方法は図-11に示したように供試はりの両端部に載荷アームを取り付け、これに偏心載荷することにより行った。この場合の偏心距離は10 cmとした。載荷実験中には供試はりの両側面および上下面に貼付した電気抵抗線ひずみゲージ(ゲージ長67 mm)に

よるひずみ測定および供試はり中央部に取り付けられたダイヤルゲージ(精度0.001 mm)によるねじり角の測定を行った(図-11参照)。

(4) 実験結果

載荷実験時材令におけるコンクリートの諸強度および弾性定数を表-3に示した。載荷実験より得られたねじり強度および破壊直前のねじり角(終局ねじり角)をシリーズ別に表-4に示した。各シリーズのねじりモーメントとねじり角との関係を図-15に、ねじりモーメントと断面の長辺中央におけるせん断ひずみとの関係を図-16に示した。このせん断ひずみははり軸に対して45°方向に貼付された2枚の電気抵抗線ひずみゲージによる測定値の絶対値の和として計算したものである。

表-3 コンクリートの力学的特性

シリーズ名	A	B	C
圧縮強度 σ_{cu} (kg/cm ²)	374	335	407
曲げ強度 σ_{bu} (kg/cm ²)	46.2	40.6	45.6
引張強度 σ_{tu} (kg/cm ²)	32.0	29.0	32.8
σ_{bu}/σ_{tu}	1.44	1.40	1.39
ヤング係数 ($E_c \times 10^6$ kg/cm ²)	0.331	0.303	0.333
ポアソン比 ν	0.183	0.181	0.183
せん断弾性係数 ($G \times 10^6$ kg/cm ²)	0.140	0.128	0.141

4. 解析結果および実験結果の考察

(1) ねじり強度

a) 無筋コンクリートはり ($\sigma_{pe}=0$ の場合)

表-4 実験結果

シリーズ	σ_{pe} (kg/cm ²)	ねじり強度 (t-cm)					終局ねじり角 $\times 10^{-4}$ (rad/cm)			
		実験値			理論値*		実験値***		理論値*	
		1	2	平均	a	b	1	2	a	b
A	0	31.0	31.4	31.2	28.7(0.92)	30.7(0.98)	52(30.0)	45(31.0)	63.4	51.0
	30	42.3	44.9	43.6	40.0(0.92)	42.7(0.98)	80(40.0)	65(42.5)	88.2	71.1
	60	52.5	57.1	54.8	48.7(0.89)	52.0(0.95)	81(52.5)	92(55.0)	108.1	87.4
	90	54.5	62.5	58.5	56.1(0.96)	59.9(1.02)	75(52.5)	97(60.0)	125.8	101.2
B	0	12.4	13.6	13.0	12.9(0.99)	13.5(1.04)	43(12.0)	53(13.0)	54.3	40.8
	30	18.9	18.9	18.9	18.4(0.97)	19.3(1.02)	73(18.0)	63(18.0)	77.6	58.2
	60	24.0	24.0	24.0	22.6(0.94)	23.7(0.99)	72(24.0)	83(24.0)	94.7	71.1
	90	25.8	26.8	26.3	26.1(0.99)	27.4(1.04)	85(25.0)	77(25.0)	109.2	81.9
C	0	22.8	25.0	23.9	20.9(0.87)	22.1(0.92)	33(22.0)	43(24.0)	51.9	35.6
	30	30.0	30.9	30.5	28.8(0.94)	30.6(1.00)	47(30.0)	56(30.0)	64.4	49.2
	60	35.0	37.9	36.5	35.1(0.96)	37.2(1.02)	56(34.0)	74(37.0)	79.5	60.7
	90	38.0**	37.2**	37.6	40.3(1.07)	42.8(1.14)	64(37.0)	68(37.0)	92.2	70.4

* 破壊条件として最大引張主応力説を用いて計算した。()内は理論値/実験値。

** これらのりはプレストレス導入時に定着部にひびわれを生じた。

*** 破壊直前のねじり角で、()内はねじり角を測定したねじりモーメントの値 (t-cm) である。

各シリーズにおいて $\sigma_{pe}=0$ の場合のねじり強度 T_u より k の値を求め、図-7 と同様に k と h/b との関係を図-12 に示した。この場合せん断強度 τ_u は引張強度 σ_{tu} に等しいものとした。a, b 両理論値は各シリーズ別に σ_{bu}/σ_{tu} の値より図-7 (b) を用いて求めたものである。図-12 によると実験値は従来から知られているように、弾性解、塑性解のいずれともかなり異なっており、実験値には多少のばらつきがみられるが、a, b 両理論値にかなり近い傾向を示している。

b) プレストレストコンクリートはり

各シリーズ別にねじり強度と有効プレストレスとの関係を図-13 に示した。図-13 には従来から提案されている各種破壊条件を用いて求めた理論解も示してある。検討したのは Cowan, modified Cowan, Coulomb の3つの破壊条件であるが、これらのモールの包絡線を図-14 に示した。Cowan の破壊条件は図-14 に示すように、コンクリートの破壊をせん断型およびへき開型の2つに分け、それぞれ σ 軸と 37° で交わり純圧縮円に接する直線①と最大引張主応力説②で表わされる。ただ

し、本実験の場合には破壊はすべて最大引張主応力説となる。modified Cowan 理論は P. Zia²⁾ が提案したもので、破壊包絡線は直線①および直線①と τ 軸との交点

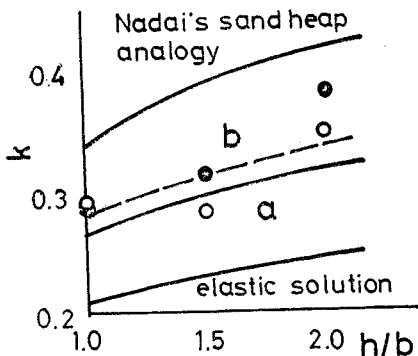


図-12 k と h/b との関係

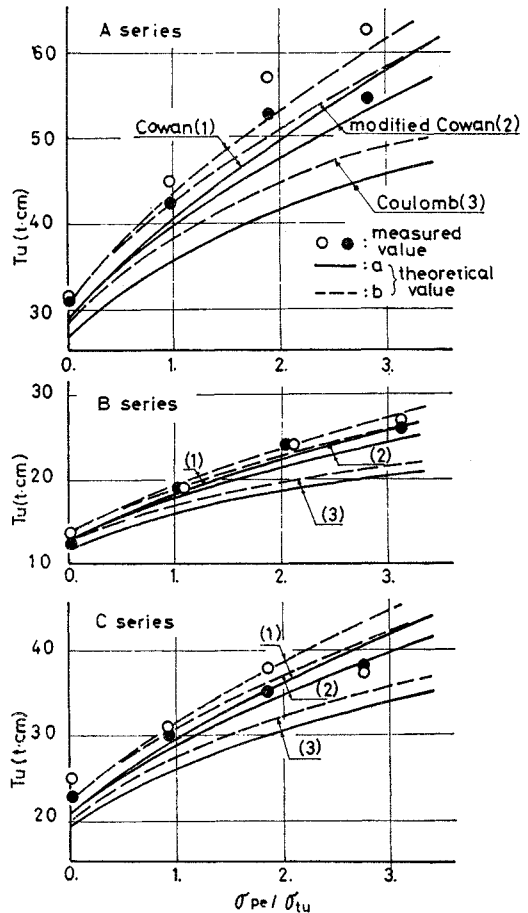


図-13 ねじり強度と有効プレストレスとの関係

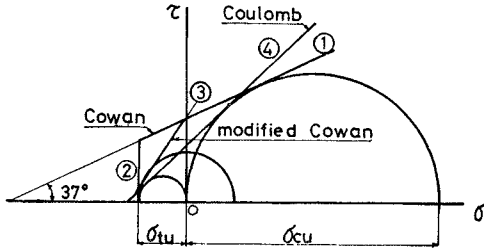


図-14 各種破壊条件

を通り純せん断円に接する直線③で表わされる。Coulomb の条件はいわゆる内部摩擦説であり、純引張円および純圧縮円への共通接線で示される(図-14 参照)。図-13 において実験値と理論値を比較すると、いずれのシリーズにおいても Cowan あるいは Modified Cowan の破壊条件を用いた b のねじり強度の理論値は実験値によく一致した傾向を示している。また、Coulomb の破壊条件を用いて計算したねじり強度の理論値はいずれのシリーズにおいても実験値を大きく下回った値となっている。つぎに a, b 両理論値を比較すると、無筋はりの場合と同様に両者にはあまり差はないが、同一プレストレスに対してねじり強度の b の理論値は a の理論値よりも約 5% 程度大きい値を示している。Cowan, Modified Cowan の破壊条件を用いた理論ねじり強度は本実験のようなプレストレスの範囲ではあまり差はなく実験結果からいずれの破壊条件が適当であるか判定はできないが、この点についてはさらにプレストレスの大きい場合についての実験、あるいはねじりによる応力分布の単純な円形断面の実験³⁾ などによる検討が必要であるものと考えられる。

(2) 変形特性

a) ねじりモーメントとねじり角との関係

各シリーズ別にねじりモーメント T とねじり角 θ との関係を図-15 に示した。図-15 中 a, b 両理論値は応力～ひずみ曲線としてそれぞれ a, b (図-4 参照) を用い、破壊条件として Cowan の条件を用いたものである。この場合せん断弾性係数 G は円柱供試体の圧縮試験より求めたヤング係数とポアソン比を用いて算出した値を用いた(表-3 参照)。これらの $T \sim \theta$ 曲線における初期勾配はいずれのシリーズにおいても、理論値とほぼ一致しており、ねじりのような応力状態に対しても圧縮に対するせん断弾性係数を適用できることを示している。 a, b 両理論曲線を比較すると、同一ねじりモーメントに対するねじり角は a の理論値が b の理論値よりかなり大きくなり、その差はねじりモーメントの大きさ、断面形状によっても異なるが、破壊時近くでは約 40

% 程度となる(表-4 参照)。これらを実験値と比較すると、 $T \sim \theta$ 曲線の形状および終局ねじり角の値は多少のばらつきはあるが、いずれのシリーズにおいてもその大半が b の理論値に近い傾向を示している。

b) ねじりモーメントとせん断ひずみとの関係

各シリーズ別にねじりモーメント T と断面の長辺中央におけるせん断ひずみ r との関係を図-16 に示した。図中の理論値は応力～ひずみ曲線 b を用いたものである。これらの $T \sim r$ 曲線の初期勾配は、 $T \sim \theta$ 曲線の場合と同様に、実験値と理論値とはよく一致している。また、 $T \sim r$ 曲線の全体的な形状についても、実験値には多少のばらつきはみられるが、実験値と理論値とはほぼ一致した傾向を示しているものと考えられる。

5. おわりに

本研究はねじりを受けるプレストレストコンクリート長方形断面はりについて、その変形・強度特性を理論解析および実験によって検討を加えたものである。得られた主な結果を以下に示す。

(1) ねじりと軸力が作用する部材の応力状態は平面応力状態となるが、本研究ではこのような応力状態におけるコンクリートの応力～ひずみ曲線を提案し、これに基づいて長方形断面はりのねじり解析を行ったが、解析結果は変形・強度ともに実験結果とよく一致しており、本解析法はねじりを受けるコンクリート部材の解析法として有力な手段になるものと考えられる。

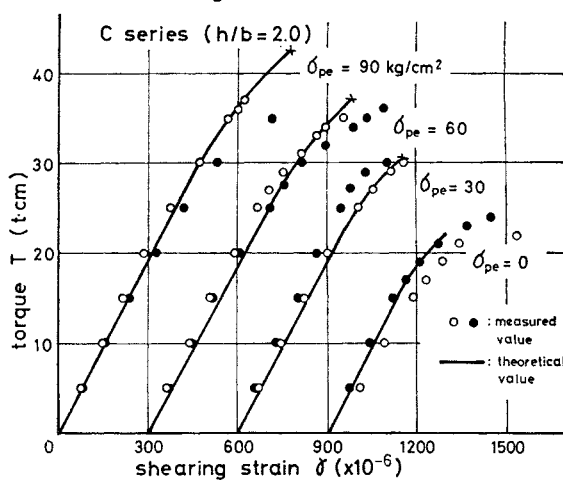
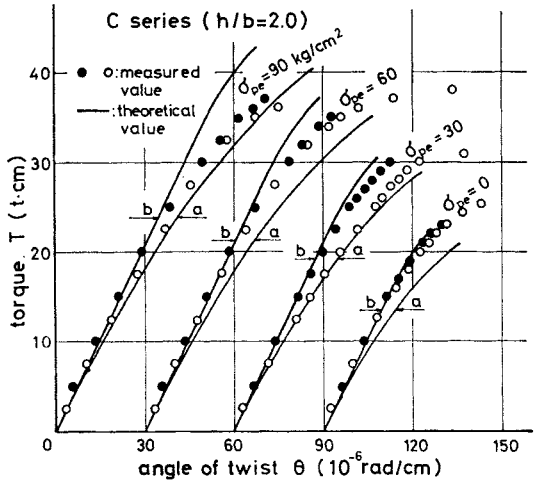
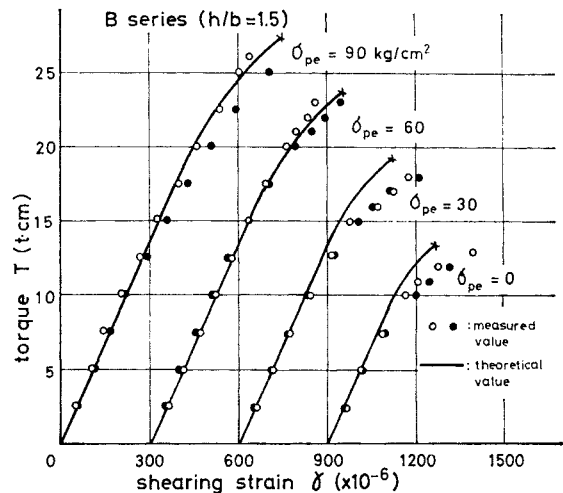
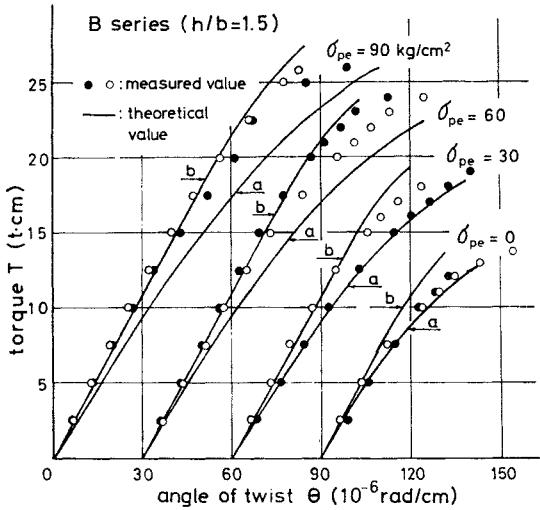
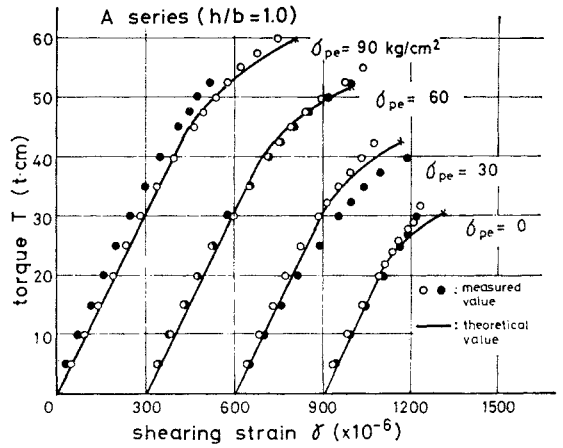
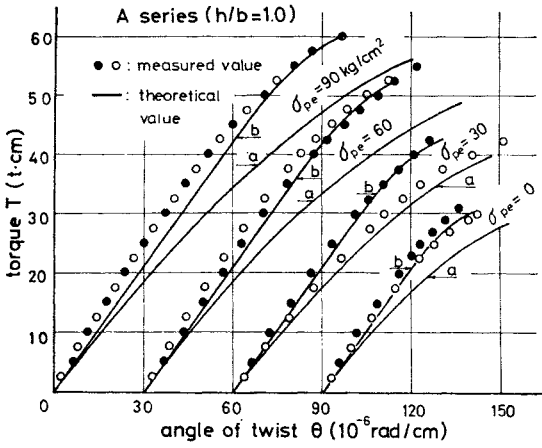
(2) 本解析では 2 種類の応力～ひずみ曲線を提案したが、いわゆる bilinear 型の応力～ひずみ曲線を用い、コンクリートの破壊条件として Cowan の破壊条件(最大引張応力説)あるいは modified Cowan の破壊条件を用いて解析した理論値がすべての実験結果に比較的よく一致した。

なお、本研究ではプレストレストコンクリート長方形断面はりの純ねじりを取扱ったわけであるが、ここで用いた解析法はさらに一般的な断面形状あるいはねじりと同時に曲げが作用する場合等についての解析も可能である。これらについては現在研究中である。

最後に本研究は昭和 46 年度文部省科学研究費補助金によって行ったものである。また、本解析には京都大学大型計算機センターの FACOM 230-60 を利用した。

参考文献

- 1) Cowan, H.J.: The strength of plain, reinforced and prestressed concrete under the action of combined bending and torsion of rectangular section, Magazine of Concrete Research, Vol. 5, No. 14, Dec., 1953, p. 75.
- 2) Zia, P.: Torsional strength of prestressed concrete members, ACI Journal, April, 1961, p. 1337.



図一五 ねじりモーメント T とねじり角 θ との関係

図一六 ねじりモーメント T とせん断ひずみ γ との関係

- 3) 児島孝之 : 円形断面はりのねじり試験, セメント技術年報 Vol. 27, 1973.
- 4) Zienkiewicz, O.C. and Y.K. Cheung : The Finite Element Method, McGraw-Hill, 1967, p. 148.
- 5) 児島孝之 : ねじりを受けるプレストレストコンクリート矩形はりについて, 土木学会第 27 回年次学術講演会講演集 V-76, 1972.
- 6) Nadai, A. : Theory of Flow and Fructure of Solids, McGraw-Hill, 1950.
- 7) Timoshenko, S. and J.N. Goodier : Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 1951.
- 8) Hsu, T.C. : Torsion of structural concrete—plain concrete rectangular sections, ACI publication sp-18, March, 1966, p. 203.

(1974.4.19・受付)
