

立命館大学理工学部 正員 児島 孝之

はじめに

純ねじりを受けるコンクリート部材については古くから多くの研究がなされているが、ねじりによる応力の解析がかなり困難であり、またプレストレストコンクリートはりでは、コンクリートの破壊条件に関連するため、その変形特性・強度についての理論解析についてはほとんど報告されていない。本研究ではねじりのように主に引張主応力によって破壊するコンクリートの応力～ひずみ曲線として2種類の曲線を用いて矩形断面のねじりの弾塑性解析を有限要素法を用いて行なった。また矩形断面のたて横比 h/b ・有効プレストレスを変化させた場合のねじりの載荷試験を行ない、理論解との比較、破壊条件の検討を行なった。

理論解析

ねじりを受ける無筋あるいはプレストレストコンクリートはりにおいて、応力状態は一般に平面応力状態となる。したがってはりの強度・変形解析においては、コンクリートの破壊条件と任意の応力状態における応力～ひずみ曲線がもっとも重要な要素となる。本研究では以下に述べるような2種類の応力～ひずみ曲線について解析を行なった。まず純引張を受ける場合のコンクリートの応力～ひずみ曲線として図-1に示したような a , b を選んだ。曲線 a 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 σ_{tu} に等しいとしたものである。曲線 b は、応力が σ_{tu} に達するまでは直線であり、その後は破壊に至るまで σ_{tu} に等しいとしたものである。 a , b 両曲線において破壊時の極限ひずみ ϵ_u は、弾性ひずみ

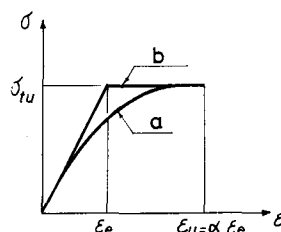
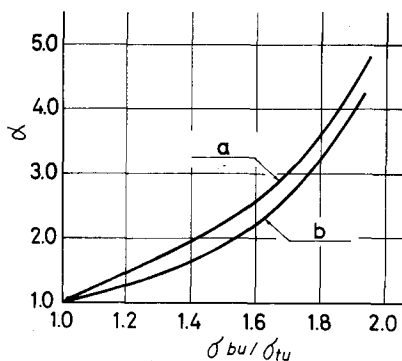


図-1 応力～ひずみ曲線

図-2 α と σ_{bu}/σ_{tu} の関係

$\epsilon_e = \sigma_{tu}/E$ (E : ヤング係数) との比 $\alpha = \epsilon_u/\epsilon_e$ とし、 α の値は次のように定めた。すなわちコンクリートの曲げ試験において破壊直前の引張部分の応力分布が図-1と同形であり、左端部分は弾性状態であると仮定すると、 α の値は曲げ強度 σ_{bu} と引張強度 σ_{tu} との比で表わすことができる。図-2にこの関係を示した。ねじりのように平面応力状態に対する応力～ひずみ曲線は、上記の純引張状態とは当然異なり、破壊条件とも関連して非常に複雑であるが、本解析においては、主応力と主ひずみの関係は図-1の曲線と相似形であるとし、図-1の引張強度 σ_{tu} に対しては破壊条件に達する主応力とし、 α の値は純引張状態と同一であるものとした。コンクリートの破壊条件については種々の理論があり、ねじりを受けるコンクリートに対しても Cowan, Paul & Zia 等による破壊条件が提案されているが、本研究では破壊条件については実験

によって検討を加えた。本解析のようなコンクリートの応力～ひずみ曲線を用いる場合、一様プレストレスはりのねじり強度の無筋コンクリートはりに対する増加率は有効プレストレス σ_{pe} が作用している場合のみかけのせん断強度 τ_u' のせん断強度 τ_u に対する増加率に等しくなる。

本解析では以上の応力～ひずみ曲線を用いて、無筋コンクリート矩形はりの断面のたて横比 h/b を種々変化させた場合について有限要素法による弾塑性解析を行なった。この応力～ひずみ曲線を用いた場合の解析法はねじり角 θ を漸増させる方法によった。ちなわち

- (1) ねじり角の増分 $\Delta\theta$ に対する応力計算
- (2) ねじり角 $\theta = \theta + \Delta\theta$ に対する各要素の応力を計算し、各要素の接線係数を図-1に従って変化させる。
- (3) (1), (2) を繰返す。

b の応力～ひずみ曲線を用いる場合の解析は以下のようにした。

- (1) ねじり角の増分 $\Delta\theta$ に対する応力計算
- (2) まだ破壊条件に達していない要素に対して、ねじり角 $\theta = \theta + M\Delta\theta$ で要素の応力が丁度破壊条件に達するような M の最小値 M_{min} を求める。
- (3) ねじり角 $\theta = \theta + M_{min}\Delta\theta$ とし、破壊条件に達した要素の弾性係数を $1/1000$ として(1)以下の計算を行う。

図-3に矩形断面の要素分割の一例を示した。ねじりを受ける場合断面の境界付近の応力分配が大きいので境界付近の分割は図のように細くした。

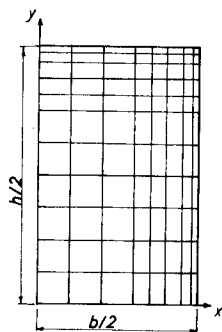


図-3 要素分割の一例

図-4は無筋コンクリート矩形はりのねじり強度 $T_u = k b h \tau_u$ における k の値と断面のたて横比 h/b の関係を示したもので、(a)図は α をパラメータとしたものであり、(b)図はコンクリートの曲げ強度と引張強度との比 σ_{bu}/σ_{tu} をパラメータとしたものである。図-4(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、これを α で比較すると、両者はかなり異なり、同じ α の値に対しては

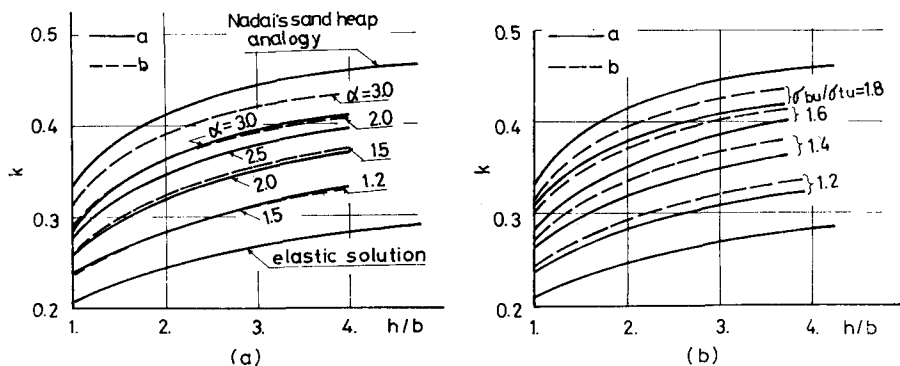


図-4 ねじり強度 $T_u = k b h \tau_u$ における k の値

b の理論値が大きくなる。(しかし図-4(b)のように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、同じ σ_{bu}/σ_{tu} に対する両理論値は b の方が a よりも大きいがあまり差はなく、その

差はkの値で約5%以下である。

プレストレストコンクリート矩形はりのねじりの載荷試験:

上記の理論解析およびプレストレスの効果を検討

するために、矩形断面のたて横比 h/b および有効プレストレス σ_{pe} を数種えらび表-1に示したような実験を行った。はりには各Caseにつきそれぞれ二本で統計24本である。はりはいずれも一様プレストレストはりで全長120cm(無筋はりは60cm)とし、付着せしのポスターンション方式とした。PC鋼棒は $\phi 17^{mm}$ (B種1号)を用いた。はりの断面および鋼棒の配置を図-5に示した。コンクリートは川砂利、川砂を用いた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た。示オ配合を表-2に示す。プレストレスの導入およびねじりの載荷試験は毎月14~16日に行った。試験時のコンクリートの諸強度・弾性定数を表-3に示す。ねじりの載荷は図-6に示した装置を用いた。ねじり区間長は100cm(無筋はりでは50cm)で、ねじりを加えるための偏心距離は10cmとした。載荷試験中には供試体の両側面および上下面に貼付したひずみゲージによりコンクリートのひずみを測定し、供試体中央に取付けた棒のダイヤルゲージ(1/1000^{mm})によってねじり角の測定を行った。

表-1 実験計画

series	断面寸法			effective prestress σ_{pe}			
	b	h	b/h				
A	15 ^{cm}	15 ^{cm}	1.0	0	30 ^{Kg/cm²}	60 ^{Kg/cm²}	90 ^{Kg/cm²}
B	10	15	1.5	0	30	60	90
C	10	20	2.0	0	30	60	90

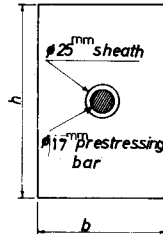


図-5 はり断面

表-2 示オ配合

層材料品	スラブ	単位	単位	W/C	S/A	単位	単位
寸法	寸法	長さ	長さ			長さ	長さ
20 ^{mm}	5 ^{cm}	190 ^{mm}	456 ^{mm}	42 [%]	41 [%]	695 ^{mm}	336 ^{mm} 673 ^{mm}

表-3 コンクリートの力学的特性

シリ-ス ² %	A	B	C
圧縮強度 σ_{cu} ^{Kg/cm²}	374	335	407
曲げ強度 σ_{bu} ^{Kg/cm²}	46.2	40.6	45.6
引張強度 σ_{td} ^{Kg/cm²}	32.0	29.0	32.8
ヤング係数 $E \times 10^4$ ^{Kg/cm²}	0.331	0.303	0.333
ねず弾性係数 $G \times 10^4$ ^{Kg/cm²}	0.140	0.128	0.132

表-4 ねじり強度

シリ-ス	σ_{pe}	実験値			理論値*	
		1	2	平均	a	b
A	0	31.0	31.4	31.2	28.7 (0.92)	30.7 (0.98)
	30	42.3	44.9	43.6	40.0 (0.92)	42.7 (0.98)
	60	52.5	57.1	54.8	48.7 (0.89)	52.0 (0.95)
	90	54.5	62.5	58.5	56.1 (0.96)	59.9 (1.02)
B	0	12.4	13.6	13.0	12.9 (0.99)	13.5 (1.04)
	30	18.9	18.9	18.9	18.4 (0.97)	19.3 (1.02)
	60	24.0	24.0	24.0	22.6 (0.94)	23.7 (0.99)
	90	25.8	26.8	26.3	26.1 (0.99)	27.4 (1.04)
C	0	22.8	25.0	23.9	20.9 (0.87)	22.1 (0.92)
	30	30.0	30.9	30.5	28.8 (0.94)	30.6 (1.00)
	60	35.0	37.9	36.5	35.1 (0.96)	37.2 (1.02)
	90	38.0	37.2	37.6	40.3 (1.07)	42.8 (1.14)

* Cowan の破壊理論による。()内は理論値/実験値
** このはりはプリストレス導入時、定着部にひびわれを生じた。

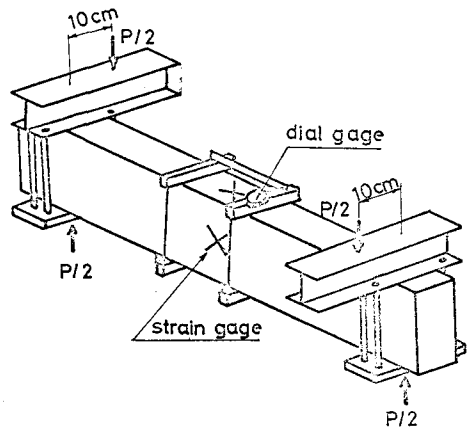


図-6 ねじりの載荷装置

実験結果と考察:

表-2に各シリーズの強度の実験結果を示した。まず無筋コンクリートはり ($\sigma_{pe}=0$) であるが、図-7は図-2と同様に K の値について実験値と理論値とを比較したものである(実験値の K は $\tau_u = \sigma_{tu}$ として計算した)。図-7によると従来知られているように弾性解・塑性解とも実験値とはかなり異なっている。a, bの両理論値は、実験値に多少のばらつきはあるが、実験値に近い傾向を示している。

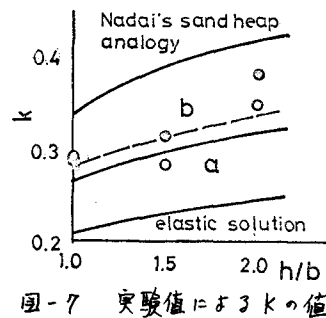
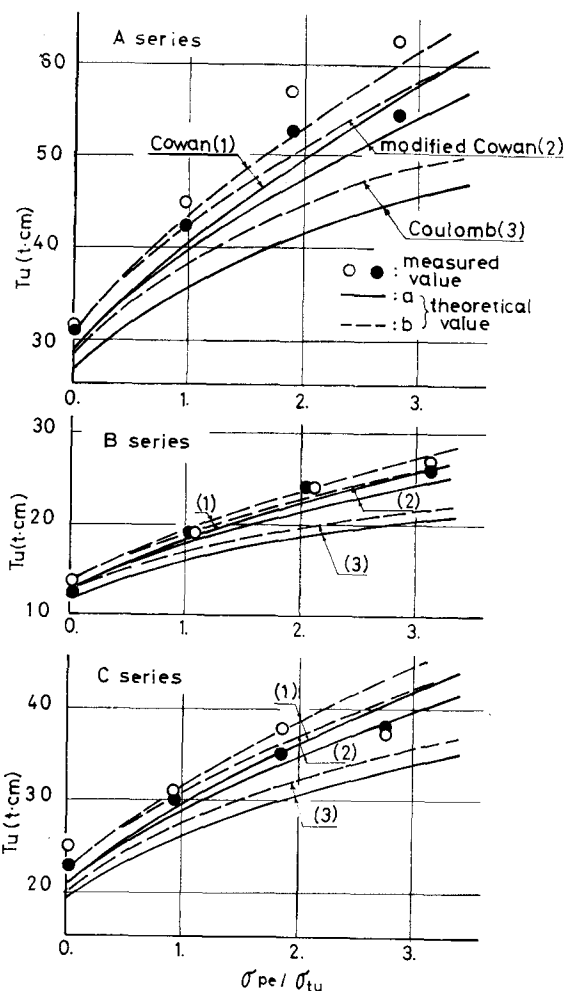


図-8はプレストレストコンクリートはりのねじり強度と有効プレストレスとの関係を示したものである。図によるとA, B, Cの各シリーズともねじり強度に及ぼすプレストレスの効果はほぼ同様の傾向を示している。また図-8は各種破壊理論による理論解を、無筋コンクリートはりの理論解a, bより計算したものを示した。実験値とこれらの理論値とを比較すると、いずれのシリーズにおいてもCowan(1)の場合では最大主応力説に同じであるいはModified Cowanによるものが実験値と良く一致している。またa, bの両理論解は、無筋はりと同様あまり差はないが、本実験に関する限りでは、強度は理論解bに近い傾向を示している。

Coulombの破壊理論による値はいずれの場合も実験値をかなり下回っている。Cowan, Modified Cowanによる値は本実験のようなプレストレスの範囲ではあまり差がなく、実験値からいずれの破壊理論に近いかが判定できないが、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が必要であろう。



むすび:

本研究で提案した解析手法によれば無筋コンクリートはり、あるいは、Cowanの破壊理論を用いるならば、一樣プレストレスはりのねじり強度を算定する場合、かなり有効な手段となるものと考えられる。

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なったものである。なお本解析では京都大学大型計算機センターのFACOM 230-60を利用した。