

V-96 開口部を有するコンクリート平板の軸引張試験

電力中央研究所

正会員 青柳 征夫

正会員 ○大沼 博志

川崎 道夫

1. まえがき

原子力発電用の鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート格納容器、圧力容器には直径数cmから数mに達するペネトレーションがあり、内圧、温度勾配等の荷重によってこれら開口部周辺には応力集中が生じる。この応力集中によってひびわれが発生すると構造的に重大な欠陥になることがあるので、開口部周辺の応力分布とひびわれ発生機構を解明し、合理的な補強方法を確立することが必要である。

従来、光弾性実験、有限要素法による解析などによってこの種の研究が行われてきたが、コンクリートによる実験例は少なく、とくに引張荷重を与えたものはほとんどみあたらない。

本研究は、ひびわれ発生時の開口部周辺の応力状態を想定して中心に円形の開口を有するコンクリートの平板を作製し、これに一軸ならびに二軸引張荷重を与えて、開口部周辺における応力分布、ひびわれ発生機構および鉄筋による補強効果について検討を加えるために行った基礎的な実験結果ととりまとめたものである。

2. 実験方法の概要

実験には、小野田普通ポルトランドセメント、相模川産の骨材を使用した。細骨材および粗骨材の比電、粗粒率はそれぞれ2.59、2.75および2.68、6.50である。コンクリートの配合と材令28日の力学的諸性質は表-1に示す通りである。

Table.1 コンクリートの配合と力学的諸性質

供試体は100×100×(厚さ)10cm

の平板とし、中央に直径20cm、

および30cmの円孔を設けたものの2種

類とした。表-2に示す5個の供試体

を材令28日で試験した。

リング鉄筋(D13mm、S.D30)を同心

円状に配置し、補強鉄筋とした。リングの径は孔径20cmの場合、

25、40、60cm、孔径30cmの場合、35、50、70cmである。供試体に

軸引張を与える方法は図-1に示す通りである。センターホー

ルジャッキを用いて、鋼棒から厚さ40mmの鋼側板に引張荷重を与え、

これにボルト止めされ、コンクリートに埋め込まれた長さ18～

24cmの中13mm異形鉄筋20本を介してコンクリートに荷重を伝達さ

せた。一軸試験では、コンクリートと鉄筋のひずみと測定しながら、

約0.8mmずつ破壊に至るまで荷重を増加させた。

セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	ポゾラシ (kg/m ³)	W/C (%)	S/A (%)	最大粒径 (mm)	空気量 (%)	スランプ (cm)
480	170	621	1094	4.80	35.4	37.8	20	25~30	80~100

単位重量 (kg/m ³)	弾性係数(×10 ⁴ kg/cm ²)		強度 (kg/cm ²)				ポアソン比
	静	動	圧縮	軸引張	圧裂	曲げ引張	
2.41	3.18	3.78	468	31.0	35.0	58.7	0.20

Table.2 供試体一覧

供試体番号	孔 径	鉄筋の有無	一軸か二軸か
no.1	20cm	無	一軸
no.2	20cm	有	一軸
no.3	30cm	有	一軸
no.4	20cm	有	二軸
no.5	30cm	有	二軸

二軸試験では、初め一方向（A方向）に一軸試験と同様に荷重を与えて応力集中度が最大となる奥のコンクリートの引張ひずみが弾性限界、すなわち約80 μ に達したときに引張荷重を一定に保持した。次にA方向と直角方向（B方向）に約0.8ずつ荷重を増加させ、破壊とせに。

3. 実験結果とその解析

無限板弾性理論、R.C.J. Howlandの有限板弾性理論⁽¹⁾に加えて、コンクリート平板供試体を約400個の三角形要素に分割した有限要素法で弾性計算を行い実験結果と比較した。図-3-1～3に一軸引張荷重を受けるNo.1, 2, 3供試体の引張荷重方向と直角の半径に沿った断面、即ち臨界断面の応力分布の実験値と有限要素による計算値を示す。ただし、ひずみの測定値から応力を計算するに際しては、直径14～17cm、高さ70cmのつづみ型供試体の単軸引張試験に基づき図-2に示すようにバイリニアの単純化した応力-ひずみ曲線と仮定した。すなわち、引張ひずみが80 μ までを弾性範囲とし伸び能力200 μ を超えたところでは応力がゼロになるものとした。

図-3から弾性範囲では実線の実験値と破線の有限要素法による計算値の差がほとんどないことがわかる。また、臨界断面の円孔表面のコンクリートひずみが単軸引張試験から仮定した応力-ひずみ曲線の最大引張ひずみ、すなわち、伸び能力200 μ に達するときの荷重と初期ひびわれ荷重

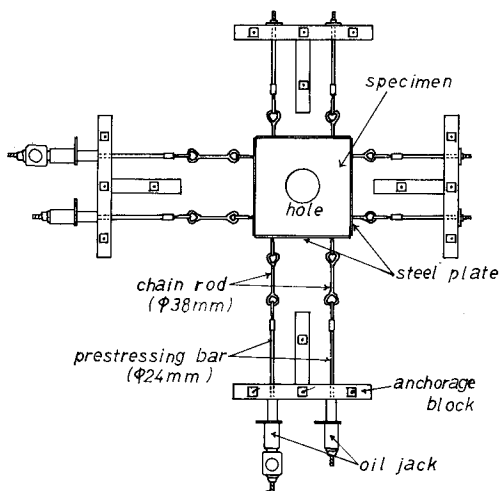


Fig.1 引張試験装置

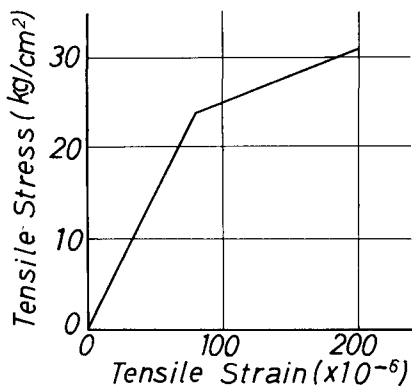
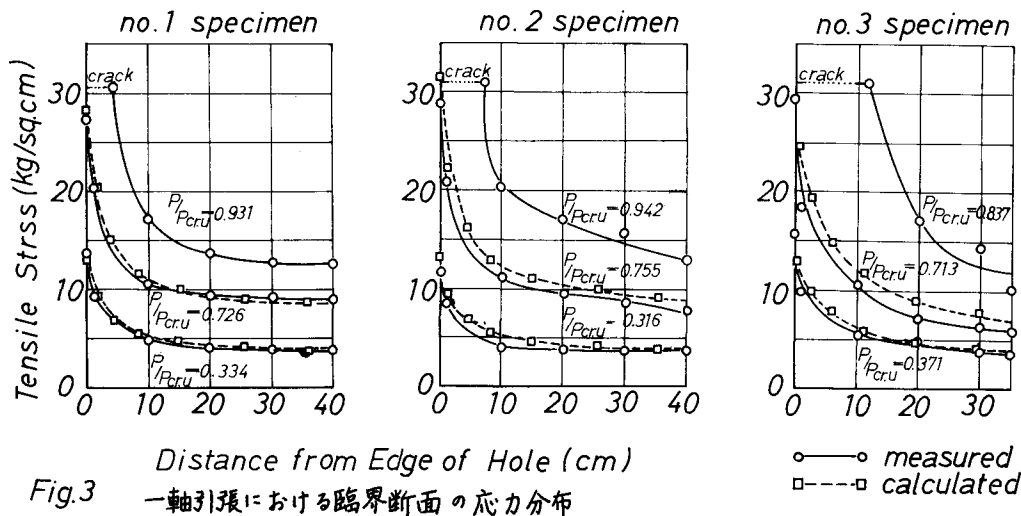


Fig.2 仮定した応力ひずみ曲線



(Pcr.i)とすると、Pcr.iになる前の一軸引張荷重による応力集中の影響範囲は、円孔表面からおよそ円孔半径の距離までであると考えて差支えない。

図-4は局所的な高応力に対する開口部断面を除いた最小断面の平均応力(σ_{net})の比で定義される応力集中係数(S.C.F.)と、先に、A方向に一軸引張を与えた荷重(P_A)とこれと直角方向のB方向に与えた荷重(P_B)の比で表わされる荷重比との関係についてB方向臨界断面の円孔表面における有限要素法の計算値と実験値を比較したものである。一軸引張の有限要素法による計算値と実験値の非常に良い相関性から二軸引張では重ね合せの原理が成り立つものと予想されたが、図-4に示すように二軸

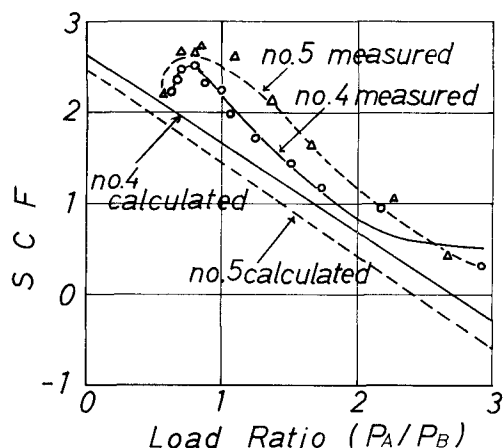


Fig. 4 二軸引張における最大応力集中係数(K_{max})

Table.3 初期ひびわれ荷重(Pcr.i)時の K_{max}

供試体番号	実験値 K_m	有限板理論		無限板理論		有限要素法	
		K_c	K_r	K_c	K_r	K_c	K_r
no.1	2.60	2.55	0.98	2.40	0.92	2.62	1.01
no.2	2.59	2.55	0.98	2.40	0.93	2.62	1.01
no.3	2.49	2.38	0.96	2.10	0.84	2.38	0.96
no.4	2.22	2.07	0.93	1.91	0.81	2.02	0.91
no.5	2.21	2.02	0.91	1.74	0.79	1.90	0.86
Ave.			0.95		0.86		0.95

K_m : measured, K_c : calculated, $K_r = K_c/K_m$

ひびわれ荷重の算定にいかなる理論によるS.C.F.を用いるのが合理的であるかを検討するため、初期ひびわれ発生時のS.C.F.の最大値を諸種の理論値と比較した。その結果は図-5に示すとおりである。有限板理論、有限要素法とも、前述の原因によって見かけ上実験値が大きくなった二軸引張の場合を除き、実験値によく合っているが、Timoshenkoの無限板理論では、孔径20cmの場合を除き理論値がかなり小さいS.C.F.を与えていることがわかる。

初期ひびわれ荷重(Pcr.i)は、コンクリートの伸び能力200 μ に達したときの荷重としたが、円孔付近のひずみ勾配が大きいため、無筋の供試体においても円孔表面で単軸引張の伸び能力に達してもひびわれが全断面を貫通するまでには、なおかなりの荷重増加が認められた。しかし、Evans⁽²⁾が指摘したように終局ひびわれ発生直前に臨界断面で応力が均等になるという現象は認められなかった。

図-5は、相隣る測定点の間でひずみが直線に変化するものと仮定し、伸び能力200 μ に達したところまでひびわれが入るものとして、ひずみの測定結果に基づき推定した円孔表面からのひびわれ長さを荷重との関係で示し

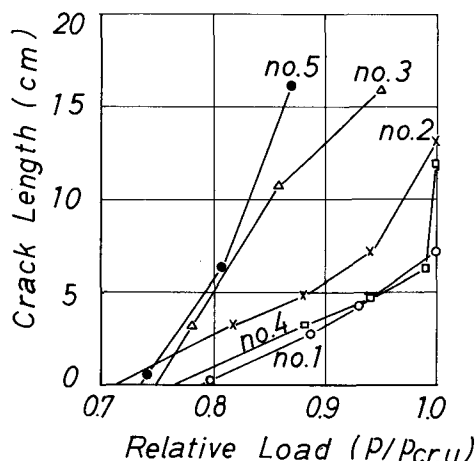


Fig.5 荷重とひびわれ長さの関係

たものである。ただし、荷重は終局ひびわれ荷重（ひびわれが全臨界面を貫通する荷重 $P_{cr,u}$ ）に対する比であらわしてある。この図から、 $P_{cr,i}/P_{cr,u}$ は 70 ~ 80 % の間にあり、 $P_{cr,u}$ の 90 % 程度までひびわれはほぼ荷重増加に比例して伸長していることがわかる。

つぎにひびわれの伸長に関連して、補強鉄筋の効果について検討した。図-6 は鉄筋の荷重分担率（作用させた荷重のうち鉄筋が負担する荷重の割合）を作用荷重 (P) と初期ひびわれ荷重 ($P_{cr,i}$) の比で表わしたものである。弾性範囲の荷重分担率はほぼ一定で、塑性範囲に入るとわずかに増加し、 $P_{cr,i}$ をすぎると分担率は急激に増加する。 $P_{cr,u}$ 直前の分担率は孔径 30 cm および孔径 20 cm の場合、それぞれ、およそ 27 % および 13 % となり、ひびわれの貫通によって 100 % となる。 $P_{cr,i}$ 以後、孔径 20 cm の場合に比べ、孔径 30 cm の鉄筋の荷重分担率が急激に大きくなっているのは、両者のひびわれ性状および補強鉄筋の位置を考慮することによって説明される。

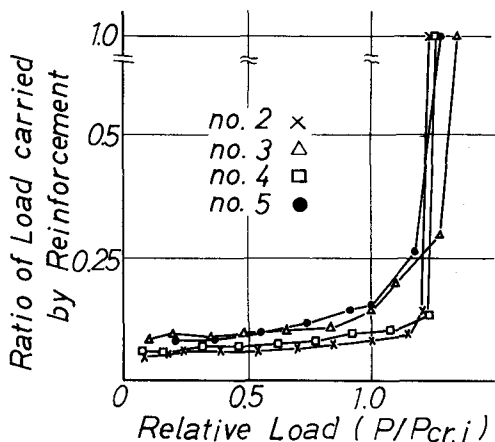


Fig.6 鉄筋の荷重分担率

両者とも円孔表面から 2.5 cm, 10 cm および 20 cm の同一距離の位置にリング鉄筋が配置されており、図-5 に示したように、ひびわれが 10 cm の位置にある才二番目の鉄筋を横切るのは、孔径 30 cm の場合、 $P/P_{cr,u} \approx 0.85$ の荷重段階であるのに対し、孔径 20 cm の場合には、終局ひびわれ荷重になって初めて、ひびわれが才二番目の鉄筋を横切っている。すなわち、孔径 30 cm の場合には二本の鉄筋が有効であったが、孔径 20 cm では円孔表面にひとつも近い鉄筋しか有効でなかったためである。補強鉄筋が有効となる範囲について、本実験の結果のみからは軽々に論ずることはできないが、上述の結果を参照して、円孔表面から円孔直径のほぼ 1/2 程度の距離までであり、しかも円孔表面に近いほど効果の大きいことが推察される。実際の容器構造物では、一般に円孔表面に鋼ライナーがあって、ひびわれの伸長を妨げるのに、かなり寄与すると思われる。

4. むすび

以上の述べたことをまとめれば次のことがいえる。

- (1)、円孔表面に最初のひびわれが発生する荷重までは開口部周辺の応力分布を弾性理論によって計算しても差支えないものと思われる。
- (2)、ひびわれは荷重増加にほぼ比例してその長さが増し、ひびわれが全断面を貫通するまでには最初にひびわれが発生する荷重から 20 ~ 30 % の荷重増加が認められた。
- (3) 補強鉄筋が十分な効果を発揮するのは円孔表面から円孔直径の 1/2 程度の距離までであると考えられる。

参考文献

- (1) 川本脱万 "応用弾性学" 共立出版
- (2) R.H.Evans, M.S.Marathe "Stress Distribution around Holes in Concrete"
Materials and Structures Research and Testing NO.1, vol.1 '68