

補強正方形孔を有する正方形板の弾性せん断座屈に 対する孔縁の補強効果

上野谷 実*・中村 雅樹*

Effect of Reinforcement for Elastic Shear Buckling of Square Plates with Reinforced Square Holes

Minoru Uenoya and Masaki Nakamura

ABSTRACT

Elastic shear buckling of square plates containing reinforced square holes is investigated analytically. The perforated plates are subjected to uniform shear stress or uniform shear deformation, and are simply supported or clamped on all four edges. Ratios of the hole length a to the plate width, a/ℓ , are 0.15, 0.3, 0.5, 0.7 and 0.85. The influence of area and shape of reinforcement around the square hole and loading condition on buckling strength is considered. Relationships are presented between the buckling strength of plates, the size of the hole, width and depth of the reinforcing ring.

The stresses at the hole edge decrease remarkably by the reinforcement, but the shape of reinforcement makes little difference. The reinforcement is more effective to the uniform shear stress than the uniform shear deformation in decreasing the stress concentration. For the elastic buckling, increasing the depth of the reinforcement is much more effective than the width. The reinforcement is slightly effective in uniform shear stress compared to the uniform shear deformation at the simply supported plates and it is reverse in the clamped plates. In order to increase the elastic buckling strength of the perforated plates more than the unperforated plates, it is the most effective that the width and the depth of reinforcement are one and four times of the plate thickness respectively. In order to decrease the stress concentration, increasing the width of the reinforcement for the circular hole is more effective than increasing the depth and it is reverse for the square hole. For the buckling strength, the reinforcement for the square hole is much more effective than the circular hole to the same area of the reinforcement.

Key words: elastic buckling, shear load, perforated plates, reinforced square holes

キーワード: 弾性座屈, せん断荷重, 有孔板, 補強正方形孔

1. まえがき

土木、建築、船舶などの分野において、板は構造物を構成する部材として重要である。この構造部材の板に配管、配線、維持管理用マンホール、重量軽減などの目的で孔を設ける場合がある。このような孔を有する板要素を有孔板という。土木構造物ではプレートガーダーのウェブや箱桁のダイヤフラムなどに有孔板が用いられている。従って種々の条件における有孔板の応力状態、耐荷力などについての検討が必要である。

有孔板は孔によって断面積が減少するため座屈強度や終局強度が低下する。孔による強度の低下を抑えるために孔のまわりを補強することがある。補強方法としてはリング、ダブリング、スチフナーによる補強が考えられる。有孔板の円孔縁における補強リングの効果について、1976年に Grosskruth¹⁾は正方形板の辺長 l に対する円孔の直径 d の比 $d/l = 0.4$ の円孔板が一樣せん断変形荷重を受けるときの弾性座屈強度に及ぼす補強方法の効果について実験的研究を行なった。その結果リング補強が最も補強効率がいよことを明らかにした。1979年に Rocky²⁾は $d/l = 0.25, 0.333, 0.5$ について理論および実験的研究を、同年に日本造船学会船体構造委員会、横強度小委員会 WG (ワーキング・グループ)³⁾は $d/l = 0.1, 0.3, 0.5$ について理論的研究を行なった。両者とも Fig.1 に示すようにせん断荷重を受ける有孔板が

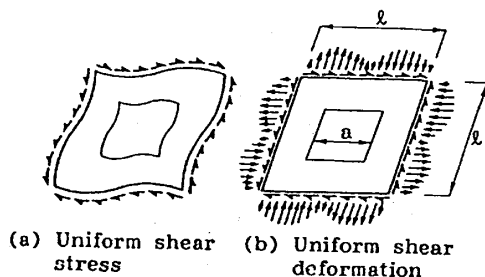


Fig.1 Perforated plate subjected to shear

周辺で面内変位拘束の自由な場合、すなわち、Fig.1(a)に示すような一樣せん断応力荷重(uniform shear stress)の解析を行なっている。ところが両者の解析結果には円孔板の弾性座屈強度の補強効果の定量的評価にかなり差異がある。1986年に Chow⁴⁾は単純支持された正方形鋼板内に補強された正方形孔を有する板の座屈係数と孔の大きさおよび補強量の関係について研究を行っている。

著者はすでに補強円孔を有する正方形板がせん断を受ける場合、孔縁補強を補強幅方向と補強厚方向に変化させた場合の弾性座屈解析を行ない、リング補強は有孔板の応力集中と弾性座屈強度の低下防止に対して非常に効果のあることを明らかにしている⁵⁾。

本報告では Fig.1 に示すような補強正方形孔を有する正方形板がせん断を受ける場合、孔縁補強を補強幅方向

と補強厚方向に変化させた場合の応力荷重(uniform shear stress)と変形荷重(uniform shear deformation)について弾性座屈解析を Rayleigh-Ritz 法で行なう。

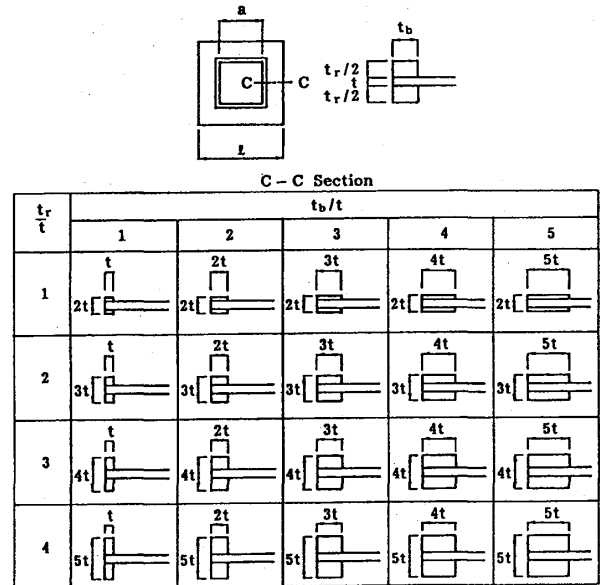


Fig.2 Variation of reinforcement

Fig.2に示すように補強幅 t_b を板厚 t の $t_b/t = 1 \sim 5$ とし、補強厚 t_r を $t_r/t = 1 \sim 4$ に変化させた場合、補強方法の違いが弾性座屈強度や応力状態に及ぼす影響を $a/l = 0.15 \sim 0.85$ の広い範囲で明らかにする。また、本報告の正方形孔と既報告の円孔に対する孔縁の補強効果を比較検討し、孔の形状と補強効果の関係について考察する。

2. エネルギー法による板の座屈解析

解析法はすでに円孔を有する正方形板の弾塑性せん断座屈解析で示した座屈解析法⁶⁾を孔縁補強を有する正方形板の弾性せん断座屈解析に適用する。本解析は次の条件で行う。

- (1) 荷重条件は一樣せん断応力荷重および一樣せん断変形荷重である。
- (2) 板の形状は正方形板で、周辺の面外支持条件は4辺単純支持あるいは4辺固定である。
- (3) 正方形孔は板の中央に位置し、大きさは板の辺長 l に対する孔長 a の比が $a/l = 0.15, 0.3, 0.5, 0.7, 0.85$ である。
- (4) 孔縁補強は Fig.2 に示すように板の辺長 l 、正方形孔の孔長 a 、板厚 t に対し補強幅 t_b は板厚 t の1から5倍とし、補強厚 t_r は板厚 t の1から4倍とする。
なお、孔縁の補強部分の補強断面積は補強量と呼ぶことにする。
- (6) 残留応力や初期たわみなどの初期不整は考慮しない。

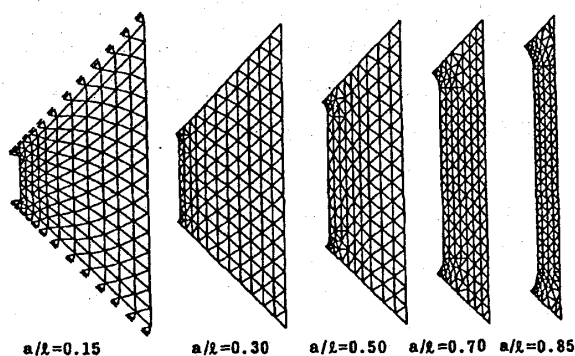


Fig.3 Finite element mesh

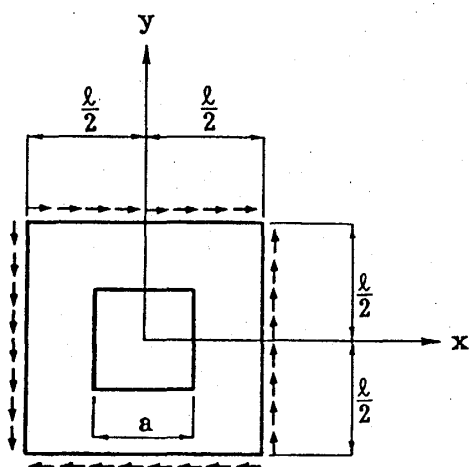


Fig.4 Coordinate of perforated plate

正方形孔を有する正方形板の平面応力解析は有限要素法で行なった。用いた要素は要素内応力一定の三角形要素である。一様せん断変形は境界辺の長さが一定のまま直線を保ちながら回転するような変位を節点に与えた。応力計算はFig.3に示すような要素分割で対称性を利用して正方形板の1/4について行なった。

Rayleigh-Ritz法による座屈解析で用いる正方形板の対角線に対して対称座屈するたわみ関数はFig.4に示す座標系において既報告⁶⁾と同じ8項のフーリエ級数を適用した。

周辺において単純支持の場合

$$\begin{aligned}
 w(x, y) &= A_1 \cos \frac{\pi x}{l} \cos \frac{\pi y}{l} + A_2 \sin \frac{2\pi x}{l} \sin \frac{2\pi y}{l} \\
 &+ A_3 \cos \frac{\pi x}{l} \cos \frac{3\pi y}{l} + A_4 \cos \frac{3\pi x}{l} \cos \frac{\pi y}{l} \\
 &+ A_5 \cos \frac{3\pi x}{l} \cos \frac{3\pi y}{l} + A_6 \sin \frac{2\pi x}{l} \sin \frac{4\pi y}{l} \\
 &+ A_7 \sin \frac{4\pi x}{l} \sin \frac{2\pi y}{l} + A_8 \sin \frac{4\pi x}{l} \sin \frac{4\pi y}{l} \\
 &\dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

周辺において固定の場合

$$\begin{aligned}
 w(x, y) &= \left(\cos \frac{\pi x}{l} \right) \left(\cos \frac{\pi y}{l} \right) (A_1 + A_2 \sin \frac{\pi x}{l} \sin \frac{\pi y}{l} \\
 &+ A_3 \cos \frac{2\pi x}{l} \cos \frac{2\pi y}{l} + A_4 \sin \frac{2\pi x}{l} \sin \frac{2\pi y}{l} \\
 &+ A_5 \sin \frac{3\pi x}{l} \sin \frac{3\pi y}{l} + A_6 \cos \frac{\pi x}{l} \cos \frac{\pi y}{l} \\
 &+ A_7 \cos \frac{3\pi x}{l} \cos \frac{3\pi y}{l} + A_8 \sin \frac{4\pi x}{l} \sin \frac{4\pi y}{l}) \\
 &\dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

3. 孔縁の応力分布および応力集中

孔縁は応力集中によって最大応力が生じる部分である。その孔縁に施すリング補強は応力分布にどのような影響を与えるか、また孔縁に生じる応力集中は補強によってどのように低減するかについて考察する。

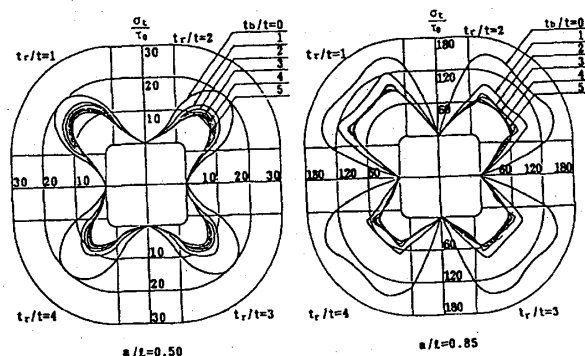


Fig.5 Circumferential stresses at hole edge under uniform shear stress

Fig.5に $a/l = 0.5, 0.85$ の孔縁の応力分布を応力荷重および変形荷重について示す。それぞれの図の応力分布は孔縁に生じる応力の対称性を利用して4種類の補強厚 t_r/t を各象限ごとに示している。補強厚 $t_r/t = 1, 2, 3, 4$ の場合それぞれ第二象限, 第一象限, 第四象限及び第三象限に示している。また各象限ごとの6本の曲線は補強幅の変化による応力分布を示している。外側から無補強および補強幅 $t_b/t = 1, 2, 3, 4, 5$ の4種類の応力分布を示す。解析値は孔縁の接線方向の応力 σ_t を式(3)で定義する平均せん断応力 τ_0 で除したものの絶対値で示している。

$$\tau_0 = \frac{Q}{t l} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 Q :せん断力

t :板厚

l :板の一辺長

孔縁の応力分布は $a/l = 0.15 \sim 0.85$ において、ほとんど

$a/l = 0.5$ に示しているように対角線上の孔縁で最大となる。ただし、応力載荷における $a/l = 0.85$ は孔縁の対角線上以外で最大となる。このように応力の最大値の生ずる位置が対角線上からはずれ8箇所となるのは応力載荷の場合、円孔が大きいと面内で曲げを受けるような変形となるためと考えられる。

Fig.6に孔縁の最大応力と正方形孔の関係について示す。これらの図は補強厚 t_r/t および補強幅 t_b/t をパラメータとする応力載荷および変形載荷について示している。パラメータにおいて無補強板とは補強厚 $t_r/t = 0$ あるいは補強幅 $t_b/t = 0$ であり数字はその補強量に相当する。これらの図から、Fig.6(a)の応力集中は無補強に対する補強の比において正方形孔が $a/l = 0.15 \sim 0.85$ と大きくなると $t_r/t = 4$ の場合0.65~0.48倍、またFig.6(b)の $t_b/t = 4$ の場合0.65~0.61倍とかなり低減している。Fig.6(c)およびFig.6(d)についてもそれぞれ $t_r/t = 4$ の場合0.67~0.65倍、 $t_b/t = 4$ の場合0.66~0.69倍とかなり低減している。このことは補強幅 t_b/t を大きくする場合は補強厚 t_r/t を大きくする場合より応力集中の低下が大きいことも示している。また変形載荷に比べて応力載荷の応力集中は孔が大きくなるにつれ著しく大きくなる。

これは応力載荷の変形は正方形孔が大きくなると面内で曲げを受けるような変形を起こすためと考えられる。載荷方法の違いによる応力集中の低減は変形載荷より応力載荷の場合に大きい。これは孔縁の補強が応力載荷の変形に対して有効に働いていることを表している。

これらのことから応力集中の低減効果は補強幅 t_b/t を大きくする場合が補強厚 t_r/t を大きくする場合よりわずかながら大きいことがわかる。

4. 弾性座屈強度および座屈モード

一様せん断応力を受ける板の座屈応力は座屈係数 k を用いて次式で表す。

無孔板の古典解による座屈係数 k は単純支持および固定

$$\tau_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \frac{t^2}{l^2} \quad (4)$$

支持に対してそれぞれ $k_s = 9.34$ と $k_c = 14.71$ である。

Fig.7に補強した正方形孔板の弾性座屈強度を示す。同図は縦軸に弾性座屈係数 k をとり横軸に補強幅 t_r/t の変数をとっている。補強厚 $t_r/t = 4$ および補強幅 $t_b/t = 4$ の座屈強度において無補強に対する補強の比を載荷条件

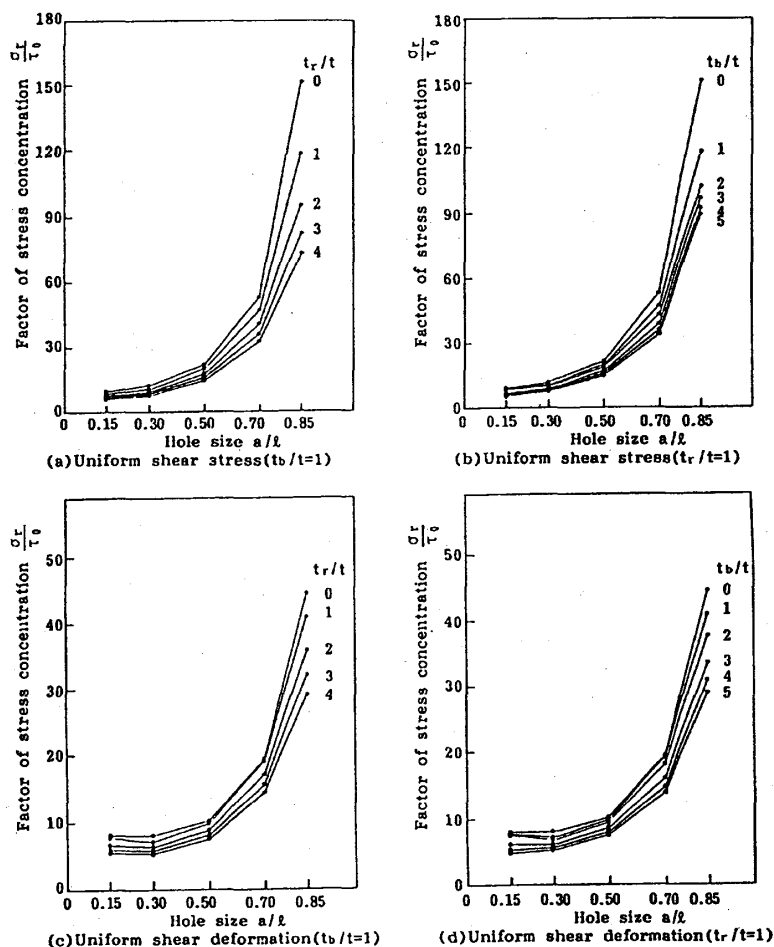


Fig.6 Factor of stress concentratin with reinforcement

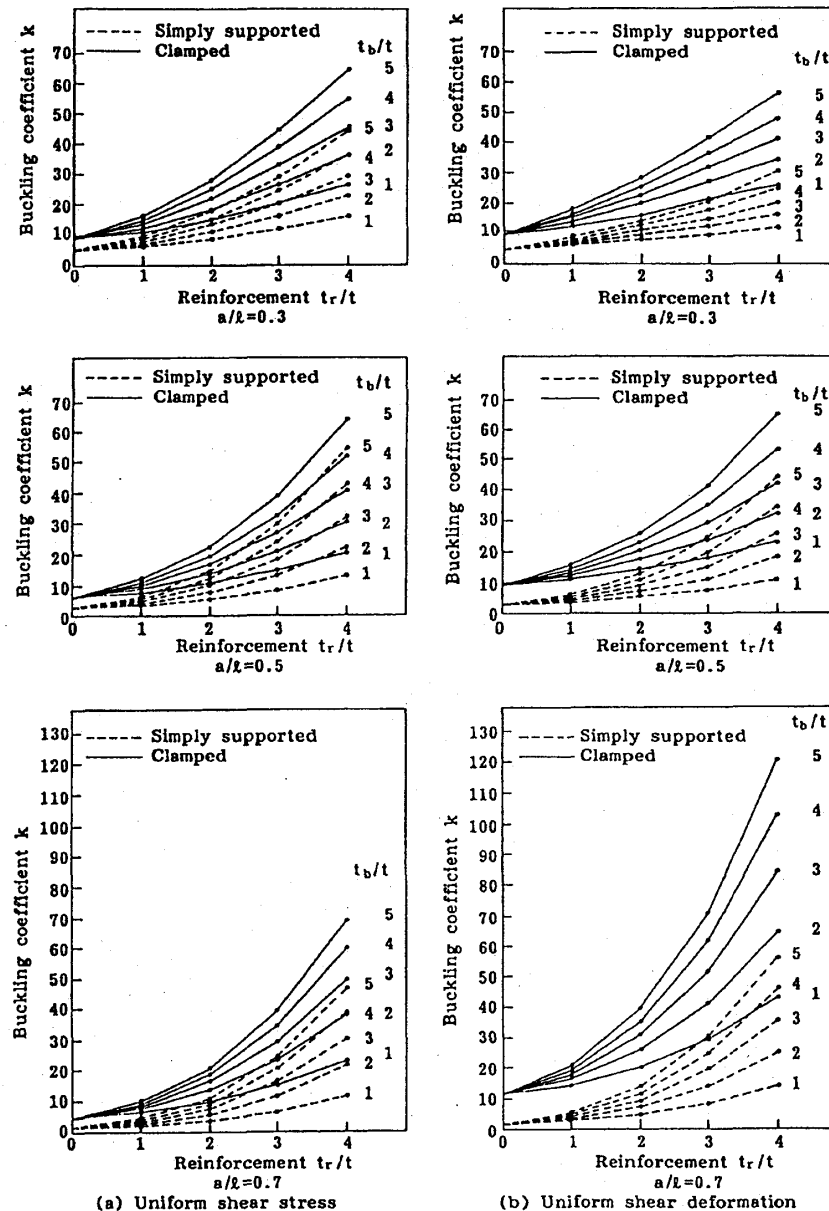


Fig.7 Buckling coefficient with area of reinforcement

および支持条件別に考察する。応力載荷において弾性座屈強度は孔が大きくなると単純支持で6.87~26.84倍に、固定支持で6.30~12.99倍になる。また変形載荷において孔が大きくなると単純支持で4.73~22.44倍に、固定支持で1.55~8.93倍になり著しい補強効果がみられる。載荷条件に関して比較すると応力載荷の場合に著しい補強効果がみられ、支持条件に関して比較すると単純支持の場合に著しい補強効果がみられる。

Fig.8に弾性座屈係数 k と孔の大きさの関係を示す。これらの図は補強量を補強幅 $t_b/t=1$ または補強厚 $t_r/t=1$ と一定にし、それぞれに対応するパラメータの補強厚 t_r/t および補強幅 t_b/t を変化させたものである。これより補強幅 t_b 、補強厚 t_r の変化による補強効果が明確になる。すなわち座屈に対する補強は載荷条件および支持条件に関係なく全ての場合で補強厚 t_r を大きくする

場合が補強幅 t_b を大きくする場合より効果的である。また載荷条件に対する補強効果は応力載荷の場合が変形載荷の場合より大きい。これは補強によって応力載荷の応力集中の低減率が大きいためと考えられる。

次に補強幅 $t_b/t=1$ の時の有孔板の座屈強度を無孔板と同じ弾性座屈強度にするために必要な補強方法として補強幅 $t_b/t=1$ に対する補強厚 t_r/t の値または補強厚 $t_r/t=1$ に対する補強幅 t_b/t の値の比較をする。つまり無孔板の座屈係数は単純支持の場合9.34であることより、各有孔板の座屈係数が無孔板の座屈係数9.34と等しくさせるためにはパラメータとしての補強量を幾らにしたらいかがということの意味する。このことは固定支持についても同様である。この図によって補強幅 $t_b/t=1$ の時、無孔板と同じ弾性座屈強度にする補強量は単純支持の変形載荷で $t_r/t=1.26\sim3.50$ 、応力載荷で $t_r/t=1.11\sim$

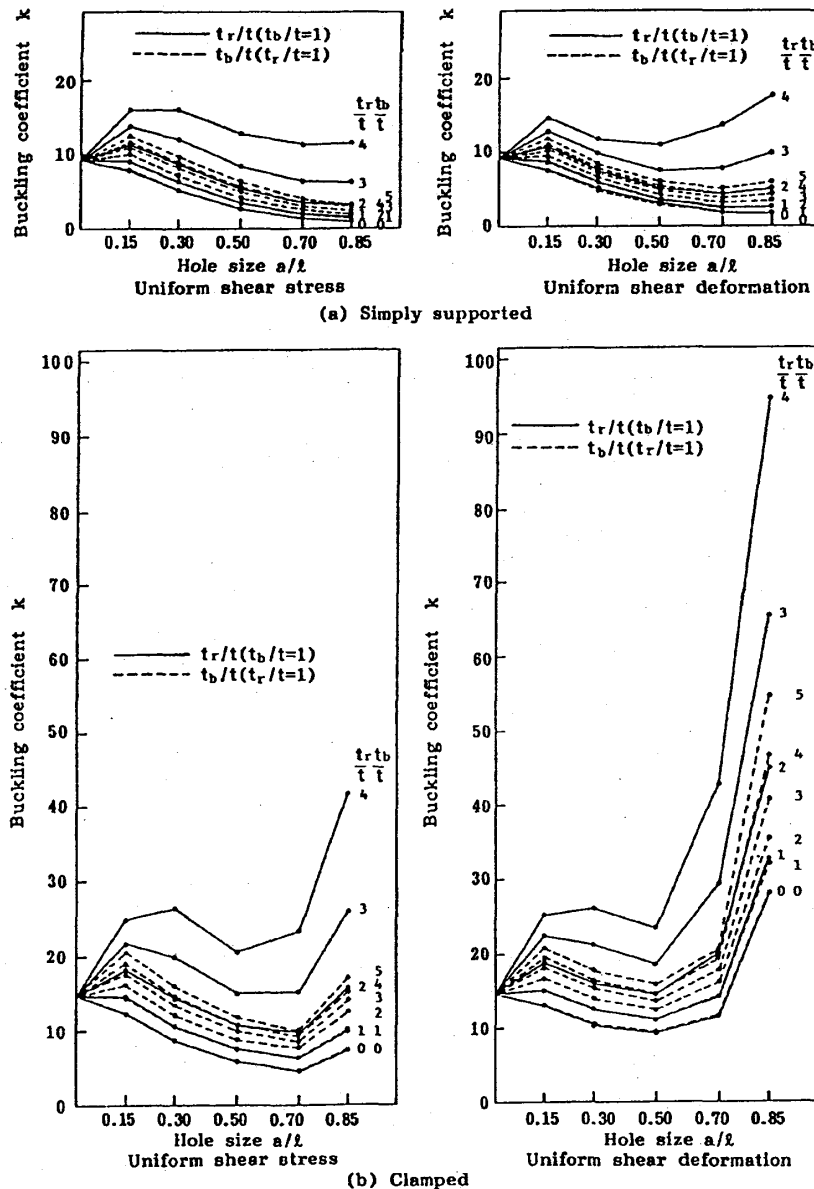


Fig.8 Buckling Coefficient with shape of reinforcement

3.58を必要とし、固定支持の変形載荷で $t_r/t=0\sim 2.03$ 、応力載荷で $t_r/t=1.03\sim 2.90$ の補強量を必要とする。このことより無孔板と同じ弾性座屈強度にする補強量は載荷方法によっても異なることがわかる。補強厚 $t_r/t=4$ にすることにより全ての場合は無孔板の座屈強度以上になる。ところが補強厚 $t_r/t=1$ で補強幅 $t_b/t=4$ の時、すべての場合無孔板の座屈強度以上にならない。つまりこのことから同じ補強量で考えた場合、補強厚 t_r 方向に補強した方が補強効果が著しいことがわかる。

Fig.9に応力載荷の弾性座屈モードを示す。この図において無補強板と補強板の座屈モードの違いについて比較すると、補強によって孔縁のまわりが平らなたわみ形状となっている。特に、固定支持は補強することによって孔縁のまわりで平らなたわみ形状に移行している。平らなたわみ形状は補強により板の曲げ剛度が増加するた

め孔縁のまわりでたわみにくくなるためと考えられる。 $a/l=0.3, 0.5$ の単純支持では補強により主たわみに沿って負のたわみが生じている。 $a/l=0.15$ の固定支持では補強により負のたわみが増加している。単純支持と固定支持を比較すると面外への境界条件の違いにより固定支持の場合は負の方向へたわむ領域が広い。変形載荷の座屈モードは応力載荷の場合とほとんど同じであるので省略する。

5. 円孔と正方形孔に対する補強効果の比較

前回報告⁵⁾した円孔に対する孔縁の補強効果と今回報告する正方形孔に対する孔縁の補強効果について比較検討し、両者の孔縁補強が応力集中及び座屈強度に与える影響について考察する。

Table 1に孔縁の最大応力と円孔および正方形孔の関

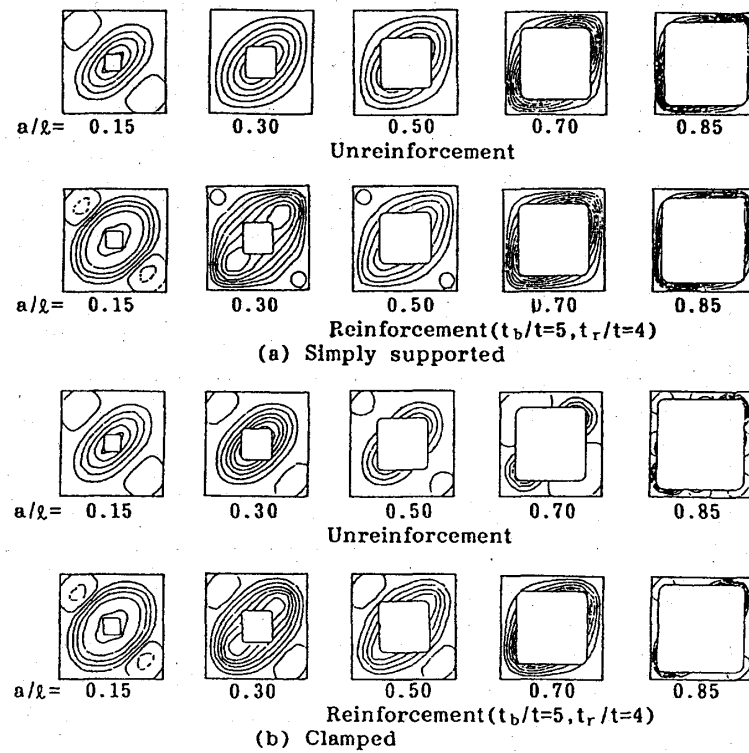


Fig.9 Elastic buckling mode

Table.1 Maximum circumferential stresses at hole edge

hole size $d/l, a/l$		circular holes				square holes			
		uniform shear stress		uniform shear deformation		uniform shear stress		uniform shear deformation	
		$t_r/t=1$	$t_r/t=3$	$t_r/t=1$	$t_r/t=3$	$t_r/t=1$	$t_r/t=3$	$t_r/t=1$	$t_r/t=3$
		$t_b/t=3$	$t_b/t=1$	$t_b/t=3$	$t_b/t=1$	$t_b/t=3$	$t_b/t=1$	$t_b/t=3$	$t_b/t=1$
0.15	unreinforced	4.24		3.96		8.84		7.98	
	reinforced	3.03	2.96	2.90	2.82	6.58	6.36	6.07	5.86
	rein./unrein.	0.715	0.698	0.732	0.712	0.744	0.719	0.761	0.734
0.30	unreinforced	5.75		4.49		11.55		7.93	
	reinforced	4.12	4.46	3.35	3.64	8.40	7.87	6.04	5.70
	rein./unrein.	0.716	0.776	0.746	0.811	0.727	0.681	0.761	0.719
0.50	unreinforced	8.87		5.01		21.17		10.17	
	reinforced	6.44	6.90	3.85	4.19	16.65	15.21	8.57	8.02
	rein./unrein.	0.725	0.778	0.768	0.837	0.786	0.719	0.843	0.788
0.70	unreinforced	16.84		7.02		52.71		19.33	
	reinforced	11.68	12.59	5.28	5.77	38.65	35.80	15.88	15.56
	rein./unrein.	0.693	0.748	0.751	0.822	0.733	0.679	0.822	0.805
0.85	unreinforced	32.51		10.62		44.61		151.12	
	reinforced	19.72	20.65	7.79	8.72	96.52	81.67	33.63	32.12
	rein./unrein.	0.607	0.635	0.734	0.821	0.639	0.540	0.754	0.720

Table.2 Buckling coefficient with shape of reinforcement

hole size $d/\ell, a/\ell$			circular holes				square holes			
			uniform shear stress		uniform shear deformation		uniform shear stress		uniform shear deformation	
			$tr/t=1$	$tr/t=3$	$tr/t=1$	$tr/t=3$	$tr/t=1$	$tr/t=3$	$tr/t=1$	$tr/t=3$
			$tb/t=3$	$tb/t=1$	$tb/t=3$	$tb/t=1$	$tb/t=3$	$tb/t=1$	$tb/t=3$	$tb/t=1$
0.15	unreinforced	S	8.34		8.21		7.99		7.83	
		C	13.00		13.37		12.45		13.02	
	reinforced	S	11.03	13.71	10.79	13.16	10.97	13.95	10.52	12.97
		C	17.72	20.88	17.99	21.16	17.76	21.91	18.22	22.32
	rein./unrein.	S	1.323	1.644	1.314	1.603	1.373	1.746	1.344	1.656
		C	1.363	1.606	1.346	1.583	1.427	1.760	1.399	1.714
0.30	unreinforced	S	6.10		5.94		5.29		5.19	
		C	9.74		10.97		8.80		10.59	
	reinforced	S	9.00	12.97	8.38	11.16	8.19	12.11	7.43	9.86
		C	14.23	20.88	15.37	21.77	13.51	19.95	15.28	21.23
	rein./unrein.	S	1.476	2.128	1.410	1.878	1.548	2.290	1.429	1.899
		C	1.460	2.143	1.401	1.985	1.535	2.287	1.443	2.095
0.50	unreinforced	S	3.59		3.76		2.76		3.07	
		C	6.63		9.22		6.02		9.51	
	reinforced	S	5.81	8.88	5.49	7.68	5.02	8.51	4.95	7.62
		C	10.73	15.28	13.40	17.72	10.03	15.15	13.80	18.70
	rein./unrein.	S	1.619	2.475	1.458	2.040	1.818	3.081	1.613	2.482
		C	1.619	2.304	1.453	1.921	1.666	2.517	1.451	1.955
0.70	unreinforced	S	1.85		2.38		1.46		2.04	
		C	4.31		8.00		4.63		11.52	
	reinforced	S	3.69	6.95	4.15	6.93	3.13	6.81	4.00	8.04
		C	8.03	13.00	12.71	18.20	8.57	15.28	17.82	29.36
	rein./unrein.	S	1.989	3.750	1.741	2.905	2.148	4.536	1.964	3.946
		C	1.863	3.014	1.588	2.274	1.851	3.299	1.547	2.549
0.85	unreinforced	S	1.21		1.73		0.88		1.77	
		C	3.87		8.10		7.41		28.17	
	reinforced	S	2.55	5.25	3.37	6.70	2.55	6.27	4.42	9.96
		C	7.51	13.51	13.84	23.67	14.00	26.15	41.01	65.45
	rein./unrein.	S	2.107	4.339	1.948	3.873	2.898	7.125	2.497	5.627
		C	1.941	3.491	1.709	2.922	1.889	3.529	1.456	2.323

S:Simple supported C:Clamped

係を示す。この表において円孔と正方形孔の無補強に対する補強の比を比較する。表中において円孔と正方形孔を比較したとき応力集中の低下が大きい値に網掛けをしている。最初に応力載荷の補強厚 $t_r/t=1$,補強幅 $t_b/t=3$ について比較する。円孔の場合0.607~0.725倍とかなり低減している。また、正方形孔の場合0.639~0.786倍と低減しているものの低減効果としては円孔が大きい。しかし、応力載荷の補強厚 $t_r/t=3$,補強幅 $t_b/t=1$ について比較すると低減効果が大きいのは円孔の $d/\ell=0.15$ の0.698倍の場合だけでありそれ以外はすべて正方形孔が0.540~0.719倍と大きく、ほぼ逆の傾向を示す。次に変形載荷について円孔と正方形孔を比較すると応力載荷と全く同一の傾向を示している。これらの傾向の要因は円孔の場合効率よく応力を低減させるためには孔縁での補強厚 t_r/t を厚くするより孔縁のまわりの補強幅 t_b/t を広くとる補強が面内方向の応力をまわりに分散させることになり、正方形孔の場合は孔の隅角部に応力が集中するので補強幅 t_b/t を広くとるより局所的な補強に近い補強厚 t_r/t を厚くする補強が効率よく応力を低減させること

ができると思われる。これらのことから孔の形状による応力集中の低減効果は円孔の場合補強幅 t_b/t 方向に補強する場合に大きく、正方形孔の場合補強厚 t_r/t 方向に補強する場合に大きいことがわかる。

Table 2に弾性座屈係数 k と円孔および正方形孔の大きさの関係を示す。この表より円孔と正方形孔の座屈強度の無補強に対する補強の比を比較する。表中において円孔と正方形孔を比較したとき座屈強度の増加が大きい値に網掛けをしている。最初に固定支持について考察する。応力載荷の補強厚 $t_r/t=1$,補強幅 $t_b/t=3$ において孔の大きさが $d/\ell=0.7, 0.85$ の時円孔の座屈強度が大きくなっているだけでそれ以外は全て正方形孔の座屈強度が大きくなっている。応力載荷の補強厚 $t_r/t=3$,補強幅 $t_b/t=1$ において全てにおいて正方形孔の座屈強度が大きくなっている。変形載荷の補強厚 $t_r/t=1$,補強幅 $t_b/t=3$ において孔の大きさが $d/\ell=0.5, 0.7, 0.85$ の時円孔の座屈強度が大きくなりそれ以外は正方形孔の座屈強度が大きくなっている。変形載荷の補強厚 $t_r/t=3$,補強幅 $t_b/t=1$ において $d/\ell=0.85$ において円孔の座屈強

度が大きくなっているだけでそれ以外は全て正方形孔の座屈強度が大きくなっている。次に単純支持について比較すると補強形状に関係なく全てにおいて正方形孔の座屈強度が大きくなっている。これは円孔より正方形孔の周長が長いので補強が多く施されるためである。このことは孔が小さくなるほど顕著である。つまりFig.9の座屈モードからもわかるように孔が小さいと補強孔はすべて座屈による面外たわみの中に入るためである。孔が大きくなると座屈による面外たわみが補強孔の隅角部付近に生じるようになるため正方形孔より円孔の座屈強度が大きくなる場合もある。これらのことから同断面積量の補強を円孔および正方形孔に施した場合補強効果は円孔より正方形孔の場合に著しく大きいことがわかる。

6. まとめ

補強した正方形孔を有する正方形板がせん断力を受けるときの弾性座屈解析を行い、一様せん断応力载荷と一様せん断変形载荷の载荷条件のもとで、孔縁の補強が孔縁の応力集中や弾性座屈強度に与える影響を検討した結果、次のことが明らかになった。

- (1) 孔縁の応力集中に対する補強効果は補強量によって大きく変化するが、補強形状による差異はわずかである。また载荷条件の違いによる補強効果は応力载荷の場合が変形载荷の場合より著しく大きい。
- (2) 有孔板の弾性座屈に対する補強効果は補強厚 t_r を大きくする場合は補強幅 t_b を大きくする場合より著しく大きい。
- (3) 载荷条件の違いによる補強効果は単純支持の場合、応力载荷が変形载荷よりやや大きく、固定支持の場合変形载荷が応力载荷よりやや大きい。
- (4) 有孔板の弾性座屈強度を無孔板の弾性座屈強度以上にする最も効果的な補強方法は補強幅 $t_b/t=1$ 、補強厚 $t_r/t=4$ の場合である。
- (5) 補強による応力集中の低減効果は円孔の場合補強幅 t_b/t 方向に補強する場合は大きく、正方形孔の場合補強厚 t_r/t 方向に補強する場合は大きい。
- (6) 同断面積量の補強を円孔および正方形孔に施した場合補強効果は円孔より正方形孔の場合に著しく大きい。

参考文献

- 1) Grosskurth, Jr, J.F., White, R.N. and Gallagher, R.H.: Shear buckling of square perforated plates, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.102, No.EM6, pp.1025-1040, Dec., 1976.
- 2) Rokey, K.C.: The buckling and post-buckling behaviour of shear panels which have a central circular cutout, International Conference on Thin-Walled Structures, Institution of Structural Engineers, University of Strathclyde, pp.658-672, 1979.
- 3) 日本造船学会船体構造委員会: 開孔板の座屈と補強効果について, 日本造船学会誌, No.605, pp.550-560, 1979.
- 4) Chow, F.Y.: Buckling strength of plates containing reinforced openings, The first east asian conference on structural engineering and construction, Bangkok, pp.1029-1040, 1986.
- 5) 上野谷 実, 中村雅樹: 補強円孔を有する正方形板の弾塑性せん断座屈強度に関する研究, 福山大学工学部紀要, Vol.14, Mar.1992.
- 6) 上野谷 実, 大村 裕: 一様せん断変形を受ける円孔を有する正方形板の弾塑性座屈強度, 土木学会論文集, 第386号/I-8, 1987.