

補剛板で支持される有孔板の弾塑性せん断屈服強度について

福山大学 工学部 正員 上野谷 実
福山大学 大学院 学生員 ・原田 和秋

1. まえがき

孔を有する板の座屈強度は、孔の形状と大きさ、境界条件、荷重条件などによって変化する。ここでは、中央に円孔を有する正方形板が、周辺で補剛材によって支持され、せん断荷重を受ける場合の、弾塑性座屈強度を検討する。理論解析では、周辺の面内方向変位に対する境界条件として、図-1に示すような周辺上で等分布せん断応力が作用する場合¹⁾（以下「等分布せん断応力変形」と呼ぶ）と、図-2に示すように周辺が直線を保つような変形とする場合²⁾（以下「一様せん断変形」と呼ぶ）について、面外変形に対する境界条件が、単純支持あるいは固定支持の有孔板の、弾塑性座屈強度が明らかにされている。実際の構造物において有孔板は、フランジや補剛材で囲まれた構造形式が多く、面外変形に対する境界条件は単純支持として扱えばよい。しかし、面内方向変位に対する境界条件は、補剛材の剛性の影響を受ける。本報告は補剛材の剛性が、有孔板の座屈強度に与える影響を実験的に明らかにし、その結果を既に発表されている解析結果と、比較したものである。

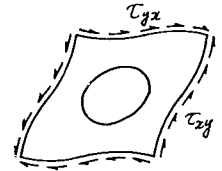


図-1 等分布せん断応力変形

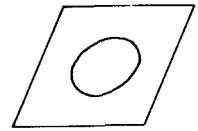


図-2 一様せん断変形

2. 実験方法

載荷方法は図-3に示すように、試験機の圧縮荷重 P を、丸鋼から補剛材を経て有孔板にせん断荷重として作用させた。本実験の供試体は、板厚 $t=3.1\text{mm}$ で、辺長が $l=300\text{mm}$ の正方形板である。円孔径は $d=90, 150, 210\text{mm}$ であり、円孔径 d と辺長 l に対する比を表わすと、 $d/l=0.9, 0.5, 0.7$ の有孔板および無孔板($d/l=0$)の4種類である。また補剛材はそれぞれの d/l に対し2種類あり、巾は同じ 50mm であるが、厚さは $t_1=9\text{mm}$ と $t_2=19\text{mm}$ とし、正方形板にすみ肉溶接した後中央に円孔を切削した。有孔板に使用した材料は構造用軟鋼で、引張降伏応力は $\sigma_s=3268\text{kg/cm}^2$ であった。有孔板の面内応力は電気抵抗線ひずみゲージで、また板の面外たわみは $1/100$ まで測定できるダイヤルゲージで測定した。

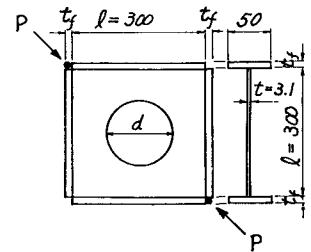


図-3 供試体

3. 実験結果及び考察

本実験の載荷方法による応力状態を検討するために、測定した $t_2=19\text{mm}$ の無孔板の周辺近傍における断面 $a-a'$ の中立面の弾性応力分布を図-4に示す。中立面の応力は、板の裏表に貼付したロゼットひずみゲージによって測定した板表面の各応力成分の平均値として求めた。図中 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ は次式で定義する応力で、平均せん断応力と呼ぶことにする。

$$\tau_0 = \frac{Q}{A} \quad \text{ここに} \quad Q = \frac{P}{\sqrt{2}}, \quad A = l \cdot t$$

純せん断の応力状態の場合 $\frac{\sigma_x}{\tau_0} = 1, \frac{\sigma_y}{\tau_0} = \frac{\sigma_z}{\tau_0} = 0$ であるが、図-4によれば、断面 $a-a'$ の板の中立面におけるせん断応力 τ_0 は、ほぼ $\frac{\tau_0}{\tau_0} = 1$ に近い等分布応力を示している。補剛材の軸方向の垂直応力 σ_z は、載荷点付近で $\frac{\sigma_z}{\tau_0} = -0.75$ で最も大きく、非載荷点に向けて直線的に減少する傾向を示している。また補剛材の軸と垂直な方向の垂直応力 σ_y は、載荷点付近では集中荷重による応力集中の影響を受けて、 $\frac{\sigma_y}{\tau_0} = -0.7$ の圧縮応力を生じているが、他の測定点では、ほぼ零に近い分布をしている。ま

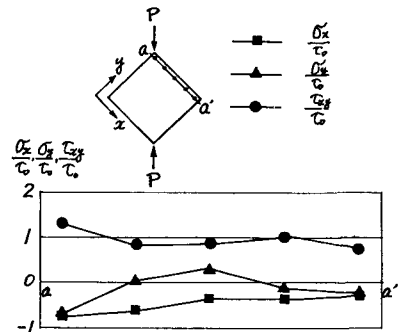


図-4 無孔板($t_2=19\text{mm}$)の断面 $a-a'$ の中立面における弾性応力

た図に示していないが、板中央における応力は、 $\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = 1.00$, $\frac{\sigma_z}{\sigma_y} = 0.38$, $\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_y} = 0.98$ であった。このように本実験の載荷方法によるせん断応力 τ_{xy} は、板全体ではほぼ純せん断の応力に近い分布をする。補剛材 $t_f = 9\text{mm}$ の無孔板でも、 $t_f = 19\text{mm}$ の無孔板と同じような応力分布の傾向である。板の中央に円孔が存在すると、周辺におけるせん断応力分布は、板の面内方向変形が補剛材によって拘束されるため、辺中央で大きく自由端で小さい山形の分布となり、円孔径が大きくなると山形も大きくなる。またフランジ厚が厚い方が、一樣せん断変形の解析値に近い分布をする。図-5に座屈挙動を表わす荷重-面外たわみの関係を示す。たわみの測定点は、無孔板が板の中央であり、有孔板が最大たわみを生ずると予想される対角線上の孔縁である。図中の $\frac{\delta_{pmax}}{t}$ は、載荷前に測定した板の初期たわみの最大値 δ_{pmax} と板厚 t の比である。図-5よりわかるように、無孔板では座屈荷重に近づくとも面外たわみが急激に増加する典型的な板の座屈挙動を示すが、他の供試体では、座屈荷重よりかなり小さい荷重段階から面外たわみの増加が著しく、座屈荷重に達するときには、既に大きな面外たわみを生じている。これは、座屈荷重よりかなり小さい荷重段階で、円孔縁に局部的塑性域が生じ、それが荷重の増加とともに徐々に広がり、面外剛性が低下して面外たわみが増加するものと思われる。図-6に円孔径と本実験の座屈荷重の関係を示す。縦軸の Q_p は次式で定義する塑性せん断力である。

$$Q_p = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} A$$

これによると、無孔板の座屈荷重が解析値よりかなり小さい。無孔板の最大初期たわみの板厚との比は、図-5の中に示すとおりであり、かなり大きい値を示している。溶接により初期たわみが大きくなった場合、残留応力も大きいと予想される。これが座屈強度に影響を与えたものと思われる。また有孔板では、円孔の切削により応力解除が行なわれるため、残留応力の影響が少なくなると考えられる。

全体的な傾向として、 $t_f = 9\text{mm}$ の有孔板の実験座屈荷重は、等分布せん断応力変形の解析値に近い値を示している。また $t_f = 19\text{mm}$ の有孔板は、一樣せん断変形の解析値にほぼ等しい座屈荷重を示している。これは補剛材が厚い場合、面内方向変形の拘束が大きくなり、一樣せん断変形に近づくためと思われる。また $t_f = 9\text{mm}$ の有孔板は、円孔径が小さい場合に等分布せん断応力変形の解析値より小さい値を、また円孔径が大きくなると解析値より大きい値を示している。これは円孔径が大きくなると板の面内剛性が低下するため、相対的に補剛材の拘束の影響が大きくなったためと思われる。

4. あとがき

本実験のように、溶接された補剛材によって支持される有孔板がせん断荷重を受けるときの弾塑性座屈強度は、補剛材の剛性と密着な関係があり、補剛材が厚い場合には一樣せん断変形に、また薄い場合には等分布せん断応力変形に近づくことが、定性的に明らかになった。補剛材の剛性と座屈強度の関係は定量的に明らかにするためには、補剛材の剛性をパラメータとする理論解析や実験による検討が必要である。

参考文献 (1) M. Uenoya and R.G.Redwood, "Elasto-plastic Shear Buckling of Square Plates with Circular Holes", Computers and Structures Vol.8, 1978. (2) 大村裕, 上野谷実, 向井博久, "円孔を有する正方形板のせん断座屈について", 第31回土木学会中国四国支部学術講演要旨, 昭和54年5月

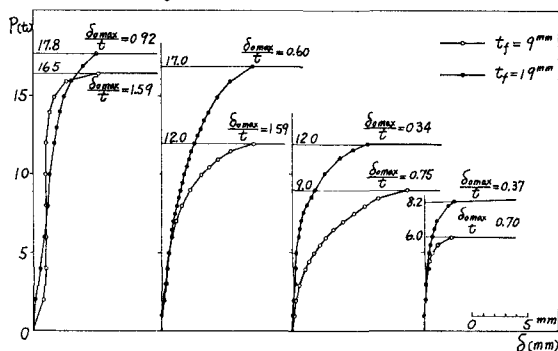


図-5 荷重-面外たわみ

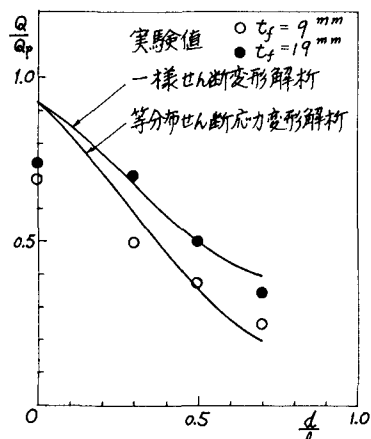


図-6 円孔径と座屈強度の関係