

福山大学 工学部	正 員	中 村 雅 樹
福山大学 工学部	正 員	上野谷 実
福山大学 大学院	学生員	小早川 好 包

1. まえがき 孔を有する板の座屈強度は板の形状、荷重条件、周辺境界の支持条件等によって異なる。また理論解析では面外方向変形に対する境界条件を単純支持または固定支持とし板周辺の面内方向変形に対する境界条件を図1(a)に示すように周辺上で等分布せん断応力が作用し面内方向変位が自由の場合(以下『等分布せん断応力変形』と呼ぶ)と、図1(b)に示すように面内方向変位が拘束され、周辺が直線を保つような変形状態(以下『一樣せん断変形』と呼ぶ)の有孔板の弾塑性座屈強度が明らかにされている。^{1,2)}

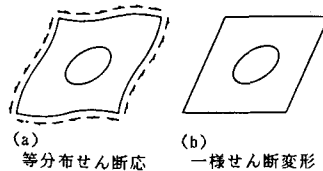


図1 有孔板のせん断変形

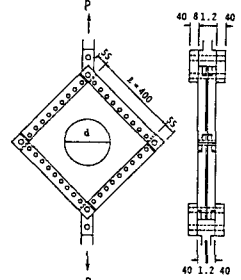


図2 載荷装置 (単位:mm)

Grosskruthら³⁾は一樣せん断変形を受ける有孔板の弾性座屈解析と実験を比較してよい結果を得ている。しかし実験結果は座屈強度と終局強度にとどめ、有孔板の応力状態や後座屈における面外変形挙動などは明らかにされていない。

本報告は、一樣せん断変形を受ける正方形板が板の中央に円孔を有する場合の弾性座屈実験を行ない、孔の大きさと初期座屈強度と終局強度の関係および後座屈挙動や孔縁と周辺の応力状態を実験的に明らかにするとともに、既往の理論解析の結果と比較検討しようとするものである。

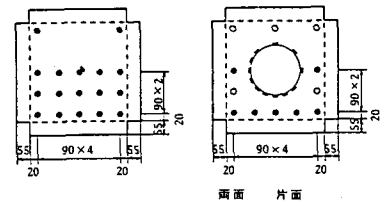


図3 ひずみゲージ接着位置 (単位:mm)

2. 実験方法 実験装置は図2に示すように、試験機の引張荷重Pが連結装置から載荷フレームを経て、板周辺が一樣せん断変形となる方法を用いた。供試体は図3に示すように鋼板の四隅を切り取り正方形板の辺長 l と円孔の直径 d の比で表わすと、無孔板 $d/l = 0$ と有孔板 $d/l = 0.3, 0.5, 0.7$ の4種類である。鋼板は、平均板厚 $t=1.2\text{mm}$ の構造用軟鋼 SS41Pである。引張強度試験の結果は引張降伏応力 $\sigma_Y = 2290 \text{ kgf/cm}^2$ であった。面内応力分布を調べるためにひずみゲージを図3に示す位置に接着した。板の面外方向変位(以下『面外たわみ』と呼ぶ)は最小目盛が $1/100 \text{ mm}$ のダイヤルゲージによって測定した。

3. 実験結果および考察 本研究では円孔を有する正方形板の平面応力解析を有限要素法で行なった。要素内応力一定の三角形要素を用い、図4に示す要素分割で、対称性を利用して $1/4$ について行なった。

図5に無孔板と有孔板の応力分布を示す。解析値および実験値は次式で定義される平均せん断応力 τ_0 によって各応力成分を除し、無次元応力として表示している。

$$\tau_0 = Q/A \cdots \cdots (1) \quad Q = P/\sqrt{2} \cdots \cdots (2)$$

ここに、 Q : 荷重 P の板周辺方向への分力

P : 対角線方向の荷重 A : 正方形板断面積 ($l \cdot t$)

無孔板の理論的な面内応力状態は、 $\tau_{xy}/\tau_0 = 1$ 、 $\sigma_x/\tau_0 = \sigma_y/\tau_0 = 0$ の純せん断応力状態であり、載荷点付近以外では全体的に解析値によく近似している。有孔板は、載荷点および非載荷点付近を除き各有孔板ともに解析値に近似した値を示す。

図6に有孔板の孔縁の接線方向の垂直応力 σ_θ/τ_0 を示す。 $d/l = 0.3, 0.5$ の非載荷軸上やその周辺では解析値より $30\% \sim 50\%$ 大きいのがそれ以外は解析値とよく近似している。

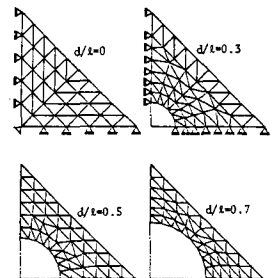


図4 解析に用いた供試体の有限要素分割

図7に初期座屈を生じる近傍の荷重と面外たわみのP-δ曲線を示す。実験による初期座屈荷重はP-δ曲線の変曲点における荷重として矢印で示す。d/ℓ = 0.5では初期の荷重段階から面外たわみが大きくなっており、初期たわみの影響を受けたものと思われる。

図8に後座屈挙動として、P-δ曲線を示す。これによると急に剛性の低下する変化が全ての板に見られる。これは面外たわみおよび応力集中によって板に塑性域が生じたためと思われる。d/ℓ = 0.5や 0.7 のように曲線の変化以後において、孔が大きい場合、ほとんど水平に近い曲線の傾きとなる。これに対して無孔板やd/ℓ = 0.3のように孔が小さくなると、面外剛性が一次的に増加するような挙動を示す。しかし、終局強度に近づくと、塑性域貫通のため急激に傾きが小さくなり塑性崩壊する。

図9に孔の大きさと終局強度および初期座屈強度との関係を示す。無孔板の終局強度は、ひずみ硬化を考えない板全体の塑性崩壊強度として次式によって与えられる。

$$Q_p = \sigma_y \cdot A / \sqrt{3} \dots \dots (3)$$

実験による有孔板の初期座屈強度は、図7から得られる座屈荷重の内小さい荷重を実験値とする。これらから、d/ℓ = 0.7の11%小さい値を除いて解析値と非常によく近似している。終局強度について、無孔板は解析値の塑性崩壊強度に対して6%程度大きい値を示している。また有孔板では解析値の塑性崩壊強度に対して23%～28%大きい値を示している。また終局強度は孔が大きくなると急激に強度が低下している。初期座屈強度と終局強度の比をみると約6.5～7.5倍であり、かなりの後座屈強度が認められる。

4. あとがき 以上から実験による板周辺の弾性応力は、載荷フレームの隅角部付近を除いて解析値によい近似を示す。孔縁の応力は、非載荷軸上の応力が載荷軸上の応力よりも大きくなる傾向を示す。初期座屈強度はd/ℓ = 0.7を除いて解析値に非常によく近似する。有孔板の後座屈挙動には孔縁の応力集中による局部的塑性域の拡がりの影響が面外剛性および面内剛性の変化として現われる。初期座屈強度に対する終局強度は、全体で5.6～7.0倍である。終局強度は、孔が大きくなると著しく低下する。

《参考文献》(1) M.Uenoya and R.G.Redwood, "Buckling of webs with openings", Computers and Structures, Vol.9, No.2F, Feb.1979.
 (2) 大村裕, 他『円孔を有する正方形板の座屈強度について』第31回土木学会中四国支部学術講演概要, 昭和54年。
 (3) J.F.Grosskurth, Jr., et al., "Shear buckling of square perforated plates", ASCE, Vol.102, EM6, Dec.1976.

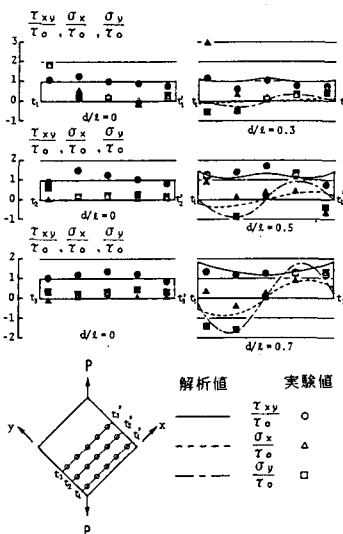


図5 周辺上の中央面における弾性応力分布

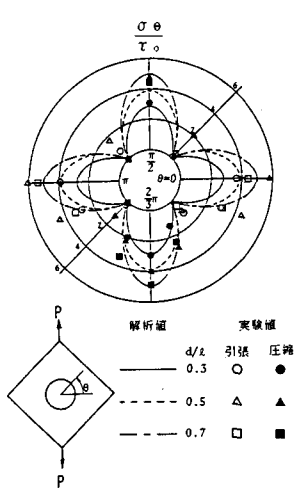


図6 孔縁の弾性応力分布

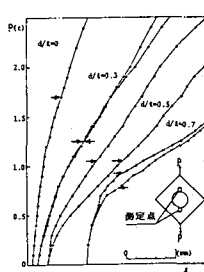


図7 荷重-たわみ曲線

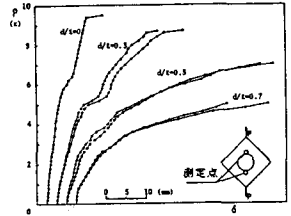


図8 荷重-たわみ曲線

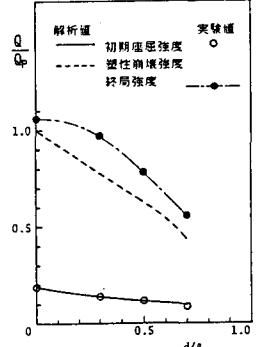


図9 孔の大きさと終局強度および初期座屈強度の関係