

## 円孔を有する固定正方形板のせん断弾性座屈

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、孔の形状と大きさ、周辺の境界条件、荷重条件などの諸条件によって異なる。ここでは板の中央に円孔を有し、周辺境界を剛体の外枠により固定される正方形板が、せん断荷重を受ける場合の弾性座屈強度について検討する。



図-1 有孔板の一例せん断変形

理論解析は、面外変形に対する境界条件を固定支持とし、周辺の面内方向変位に対する境界条件を図-1に示すように、周辺が直線を保つような変形をする場合（以下「一樣せん断変形」と呼ぶ）の有孔板の弾性座屈強度が明らかになっている。本研究は、周辺を剛体の外枠によって固定され、円孔を有する正方形板が一樣せん断変形を受ける場合、円孔の大きさが弾性座屈域に及ぼす影響について実験結果と理論解析の比較を行う。

2. 実験方法 載荷は、図-2に示すように試験機からの引張荷重  $P$  が連結装置から外枠を経て、板周辺にせん断荷重として作用する方法で行った。本実験の供試体は、図-3に示すように正方形鋼板の四隅を切り取り、実験した板は、円孔の直径  $d$  の板の辺長  $l$  に対する比が、 $d/l = 0.3, 0.5, 0.7$  の有孔板及び無孔板の4種類である。鋼板は、板厚  $t = 1.2 \text{ mm}$  の構造用軟鋼SS41で、引張強度試験の結果は引張降伏応力  $\sigma_y = 228.9 \text{ kgf/cm}^2$  であった。面内応力は、図-3に示す位置に接着した電気抵抗線ひずみゲージにより、ひずみの変化を測定した。また、面外たわみは、最小目盛が  $0.01 \text{ mm}$  のダイヤルゲージによって測定した。

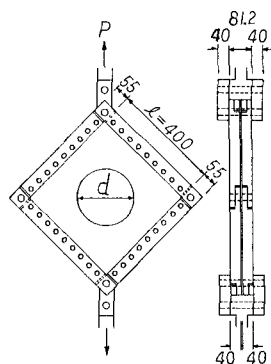
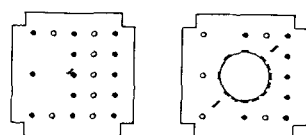


図-2 供試体 (単位: mm)



● 直角ロゼットひずみゲージ面内  
○ 直角ロゼットひずみゲージ片面  
■ 孔縁の単軸ひずみゲージ

図-3 ゲージの接着位置

3. 実験結果および考察 本研究は、円孔板の平面弾性応力解析を有限要素法で行った。要素は、図-4に示す要素内応力一定の三角形要素を用い、一樣せん断変位を境界辺に与え、対称性を利用して正方形板の  $1/4$  について計算した。

解析結果及び実験結果における全ての応力成分は、次式で定義する平均せん断応力で除し、無次元応力として表示している。

$$\tau_0 = Q/A \quad (1) \quad \text{ここに } Q = P/\sqrt{2}, A = t \cdot l$$

図-5に無孔板と有孔板の周辺近傍の断面  $t_1-t_1'$  及び中央断面  $t_2-t_2'$  の応力分布を示す。理論的な純せん断応力状態は、 $\tau_{xy}/\tau_0 = 1$ ,  $\sigma_x/\tau_0 = \sigma_y/\tau_0 = 0$  である。無孔板、有孔板共に、隅角部近傍を除いて実験値と解析値はよく近似する。

図-6に有孔板の孔縁における接線方向の垂直応力  $\sigma_\theta/\tau_0$  を示す。 $d/l = 0.3$  では解析値よりやや大きい方が、 $d/l = 0.5, 0.7$  の場合、載荷軸方向では小さく、非載荷軸方向では大きくなる傾向を示す。

図-7に初期座屈の生じる近傍の荷重と面外たわみの関係（以下「 $P-\delta$  曲線」）を示す。実験による初期座屈荷重は、 $P-\delta$  曲線の変曲点の荷重とし、矢印で示す。 $d/l = 0.5$  の場合、一方の曲線は他の曲線と比較し

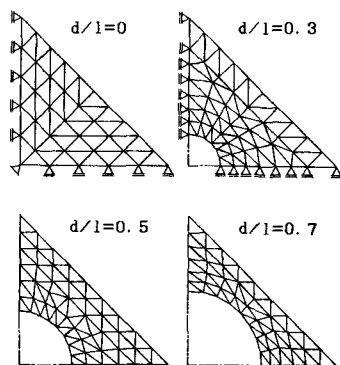


図-4 有限要素分割

たわみの増加が小さいのは、逆対称の座屈を生じたためと考えられる。

表-1に初期座屈荷重を示す。解析値の座屈荷重  $P_t$  は、次式によって求めた。

$$P_t = \tau_{cr} \cdot A \quad (2) \quad \text{ここに} \quad \tau_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{l} \right)^2 \quad \begin{array}{l} k: \text{座屈係数} \text{--- 参考文献 (2)} \\ E: \text{弾性係数}, \nu: \text{ポアソン比} \end{array}$$

実験による有孔板の座屈強度は、図-7から得られる座屈荷重の内小さい荷重を実験値とした。無孔板の実験座屈荷重は、解析値と比較して7%大きい。有孔板では解析値より小さく、孔の直径が大きくなると解析値との差が大きくなる傾向を示すが、 $d/l=0.5$ は逆対称座屈のための座屈荷重が増加したものと考えられる。

図-8に後座屈挙動として  $P-\delta$  曲線を示す。有孔板において  $P-\delta$  曲線の傾きに大きな変化が見られるが、これは孔縁付近の応力集中によって生じる局部的降伏によるものと思われる。また、極限強度は、 $d/l=0.5, 0.7$ では本実験における最終荷重を極限強度とすることができるとはできない。

4. あとがき 弾性応力は、隅角部近傍を除くと、実験値と解析値はよく近似する。初期座屈強度は、有孔板の逆対称座屈を生じた  $d/l=0.5$ を除くと、 $d/l=0.3, 0.7$ でそれぞれ3.5%, 11%低下し、孔の直径が大きくなると解析値との差が大きくなる傾向を示す。後座屈挙動は、 $d/l=0.3$ のたわみの増加傾向は  $d/l=0.5, 0.7$ の傾向とよく似ているが、無孔板は有孔板と異なり、塑性域が広がっても  $P-\delta$  曲線にはあまり変化を生じない。極限強度は、 $P-\delta$  曲線だけでは決定できないので、荷重-一面内変位曲線も含めて検討する必要がある。

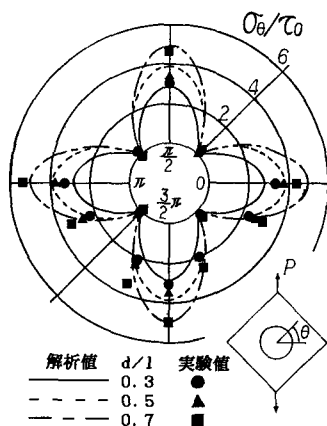


図-6 孔縁の接線応力

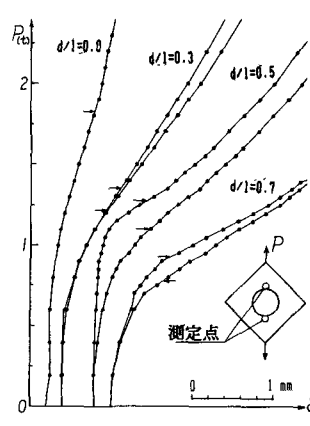


図-7 荷重-たわみ曲線 (\* 無孔板は板中央)

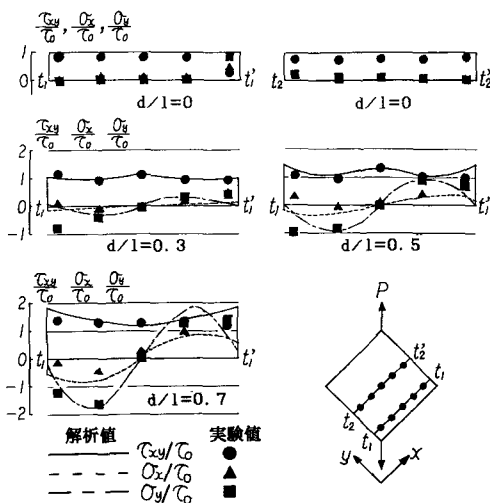


図-5 板の中立面における応力分布

表-1 初期座屈荷重

|     | $d/l$    | 0     | 0.3   | 0.5  | 0.7  |
|-----|----------|-------|-------|------|------|
| 解析値 | k        | 14.71 | 10.87 | 8.99 | 7.52 |
|     | Pt (kg)  | 1704  | 1259  | 1041 | 871  |
|     | Pt/Pto   | 1.00  | 0.74  | 0.61 | 0.51 |
| 実験値 | Pex (kg) | 1825  | 1215  | 1100 | 775  |
| 荷重比 | Pex/Pt   | 1.07  | 0.97  | 1.06 | 0.89 |

\* Pt/Pto: 無孔板に対する有孔板の座屈荷重の比

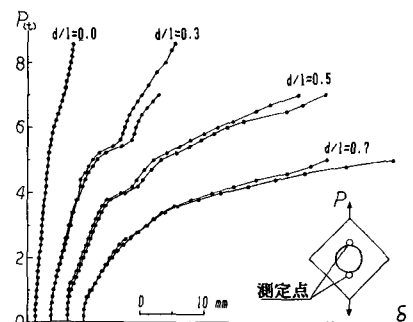


図-8 荷重-たわみ曲線 (\* 無孔板は板中央)

参考文献 1. Grosskurth, J. F., et al. 'Shear Buckling of Square Perforated Plates' ASCE, Vol. 102,

NO. EM6, PP. 1025-1040, December, 1976

2. 大村(昭) '円孔を有する正方形板のせん断座屈について' 第31回中国支部学術講演概要、昭和54年