円孔を有する周辺補剛鋼板のせん断座屈実験

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

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．本実験は図１のように板周辺が補剛材によって拘束された供試体に，引張荷重と圧縮荷重を載荷させてせん断座屈実験を行った．これによって，幅厚比２２２の正方形鋼板が板の中央に大きさの異なる円孔を有する場合，孔の大きさと座屈強度および終局強度や孔縁と周辺の応力状態についてフランジが及ぼす影響を理論解析の結果と比較検討する．

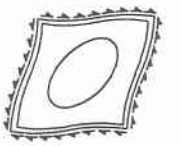

図１板のせん断変形

２．実験方法　供試体は図２より，正方形鋼板(1.8×400×400mm)の周辺に補剛材(12×100×400, 412mm)を溶接し，引張側隅角部には引張用部材を取り付けている．載荷方法は試験機による引張荷重Ｐと油圧ジャッキによる圧縮荷重Ｐを荷重伝達部材から周辺補剛材を経て，板がせん断変形となる方法を用いた．実験供試体は正方形鋼板の辺長 ℓ = 400と円孔の孔径ｄの比で表すと，無孔板 $d/\ell=0$ および有孔板 $d/\ell=0.3, 0.5, 0.7$ の４種類である．鋼板は t=1.8mm の一般構造用軟鋼 SS400である．引張強度試験の結果は引張降伏応力 $\sigma_Y=3741\mathrm{kgf/cm^2}$，引張強さは $\sigma_u=4718\mathrm{kgf/cm^2}$ であった．板の面内変位，面外たわみは最小目盛りを1/1000mm に設定したマルチ変位計によって測定した．初期たわみは $d/\ell=0, 0, 3$ の 1.6mm がすべての鋼板において最大であった．

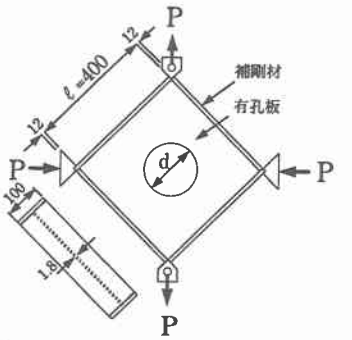

図２　供試体(mm)

３．実験結果および考察　図３に無孔板の周辺断面，中間断面および中央断面の弾性応力分布を示す．解析および実験値は次式で定義される平均せん断応力 τ_0 によって各応力を除し無次元応力として表示している．

$\tau_0 = Q/\ell t$ ……(1)　　$Q=\sqrt{2}P$ ……(2)

ここに，Q:周辺せん断力　P:対角線方向荷重

正方形鋼板の平面弾性応力解析は有限要素法で三角形一次要素を用いて解析している．これより，集中荷重の影響を受けている周辺断面の載荷点以外では解析によく近似する．

図４に有孔板の周辺断面における弾性応力分布を示す．これより，実験値と解析は $d/\ell=0.5$ の垂直応力 σ_x/τ_0，σ_y/τ_0 以外では良く近似している．

図５に荷重－面外たわみ曲線を示す．無孔板は初期座屈後，後座屈強度により耐荷力が増加するが周辺断面および対角断面の塑性貫通の後，塑性域の拡がりにより急激にたわみが増加する．有孔板のたわみは周辺断面の塑性開始後に急激に増加している．

図６に初期座屈を生じる近

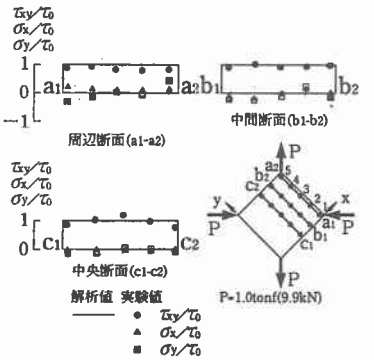

図３　無孔板の応力分布

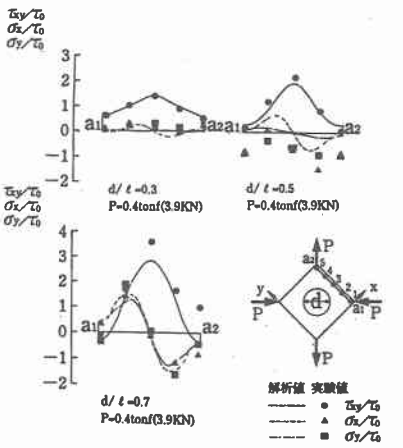

図４　有孔板の応力分布

傍の荷重－面外たわみ曲線を示す．初期座屈荷重は座屈荷重付近までの接線と，座屈荷重後付近の接線の交点とした．有孔板は決定した２つの初期座屈荷重の平均とした．

図７に終局荷重を決定した荷重－平均せん断ひずみ曲線を示す．正方形鋼板の平均せん断ひずみγ_oは次式で定義している．

$$\gamma_o=(\delta_1+\delta_2+\delta_3+\delta_4)/\sqrt{2}\,\ell \quad \cdots\cdots\cdots(3)$$

ここに，δ_1，δ_2，δ_3，δ_4：鋼板隅角部の対角線方向面内変位
（荷重方向変位を正とする）

全ての曲線は塑性域に達すると急激に傾きが小さくなり塑性崩壊する．

図８に座屈強度および終局強度の関係を示す．無孔板の塑性せん断力Q_pは，ひずみ硬化を考えない場合，次式によって定義する．

$$Q_p=\sigma_Y\, t\, \ell/\sqrt{3} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

実験による初期座屈強度は分岐座屈解析と比較してd/ℓ=0, 0.3, 0.5, 0.7で-10, -25, 27, 16%であった．ここで，実験による荷重たわみ曲線から座屈荷重を決定する場合，曲線が分岐座屈のような挙動をするときには決め易いが，今回のように比較的初期たわみが多く曲線の変化が少ないときには決め難くなる．今回の座屈荷重の決め方は曲線の変化が始まるまでの接線と，曲線の変化後付近の接線の交点としている．この方法は，座屈荷重が小さくなる傾向がある．本解析は分岐座屈を仮定しているので，実験値は解析より小さくなると思われる．ところが，本解析で求めた座屈荷重はフランジの剛性を考慮していないので，フランジが受け持つ外力割合だけ実験値が大きくなったものと思われる．これは孔が大きくなるほど顕著である．したがって，孔が大きくなるほど，実験値は解析より大きくなったものと思われる．

全ての鋼板において，実験による終局強度は座屈による面外たわみの影響によって対角線方向に塑性ヒンジ線の貫通が早まるため面外たわみを考慮していない平面応力解析による塑性崩壊強度と解析と比較して51～64%小さくなっている．後座屈強度はd/ℓ=0～0.7において初期座屈強度の4.2, 5.9, 4.2, 4.6倍であった．これらを調べるためには，フランジを含めた後座屈解析を行う必要がある．

４．<u>あとがき</u>　今回の実験で以下のことが明らかになった．

(1)弾性応力は正方形鋼板の隅角部以外で解析によく近似する．

(2)実験の初期座屈強度はd/ℓ=0～0.7の範囲でフランジの剛性を考慮していない解析より-10, -25, 27, 16%差があった．したがって，フランジの剛性を考慮した解析を行って，検証する必要がある．

(3)実験の終局強度は座屈による面外たわみの影響で，面外たわみを考慮していない解析結果より，孔が大きくなるほど51～64%と小さくなる傾向を示すので，初期不整や面外たわみを考慮した後座屈解析を行う必要がある．

参考文献

上野谷ら: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せん断座屈強度，論文集，第386号，Ⅰ-8, 1987.

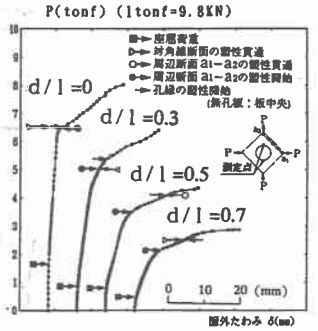

図５　荷重－面外たわみ曲線

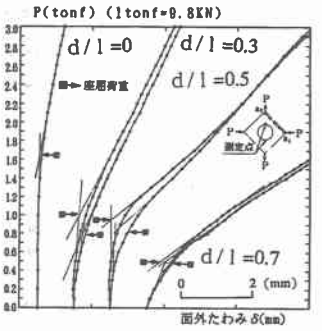

図６　荷重－面外たわみ曲線
（拡大図）

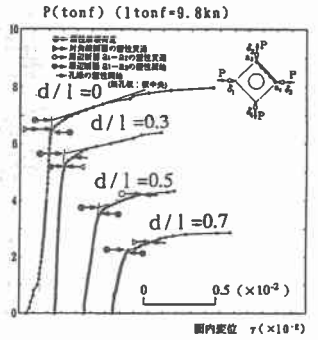

図７荷重－平均せん断ひずみ曲線

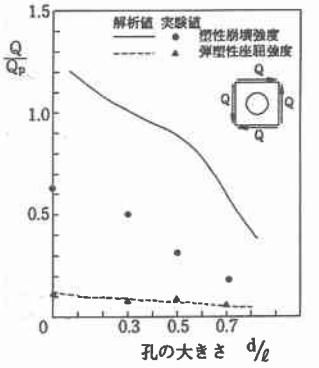

図８座屈強度および塑性崩壊強度