

補剛材で支持される有孔板の弾塑性せん断座屈強度に関する
実験的研究

上野谷 実* · 原田 和秋**

Experimental Study on Elastic-plastic Shear Buckling of
Perforated Plates with Edge Stiffeners.

Minoru UENOYA and Kazuaki HARADA

ABSTRACT

Elastic-plastic shear buckling of square steel plates with holes is investigated experimentally. The plates are subjected to in-plane shearing deformations, and have edges supported thin or thick stiffeners and centrally located circular holes. Diameters d of the hole are $0.3l, 0.5l$ and $0.7l$ where l is length of the plate edge. Experimental buckling strength of perforated plates with thin edge stiffeners shows fairly good agreement with analytical results of uniform shear stress deformations and the case of thick edge stiffeners shows good agreement with analytical results of uniform shear deformations. It is concluded that the thick edge stiffeners restrain the in-plane deformations and increase the buckling strength.

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異なる。ここでは、中央に円孔を有する正方形鋼板が、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に限定して考える。

現在まで理論解析では、周辺の面内方向変位に対する境界条件として、図1(a)に示すような周辺上で等分布せん断応力を受ける場合（以下「等分布せん断応力変形」と呼ぶ）と、図1(b)に示すように周辺が直線を保つような変形をする場合（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せん断座屈強度を検討し、面外変形より面内方向変形の境界条件が、座屈強度に大きく影響することを明らかにした。⁽¹⁾⁽²⁾ 実験的研究では、一様せん断変形を受ける有孔板の載荷実験を行ない、理論解析の結果は妥当であることを示した。⁽³⁾

しかし、実際の有孔板を含む構造物では、周囲の境界が補剛材などで囲まれることが多い。このような構造形式では、周辺の境界条件のうち面外変形に対して単純支持とすれば比較的よい近似となるが、面内方向変形は補剛材の剛性

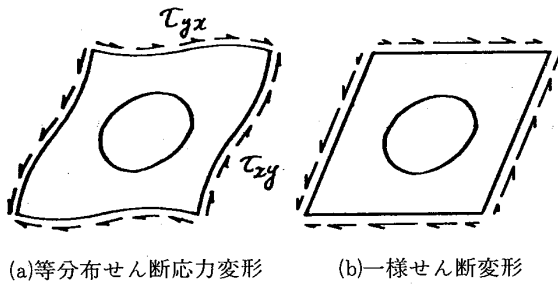


図1 有孔板のせん断変形

によって、等分布せん断応力変形と一様せん断変形の中間的変形および座屈強度になると考えられる。

本報告は補剛材の厚さを変えて載荷実験を行ない、理論解析の結果と比較検討し、座屈強度と補剛材の剛性との関連を、実験的に明らかにしようとするものである。

2. 実験方法

2・1 載荷方法および供試体

載荷方法は、図2に示すように試験機の圧縮荷重Pが、丸鋼から補剛材を経て有孔板にせん断荷重として作用する方法を用いた。本実験の供試体は、板厚 $t=3.1\text{mm}$ で辺長 $l=300\text{mm}$ の正方形鋼板である。正方形板中央の円孔径は、 $d=90, 150, 210\text{mm}$ であり、円孔径 d を正方形板の辺長 l に対する比で表わすと $d/l=0.3, 0.5, 0.7$ の有孔板および無孔板の4種類である。また、補剛材はそれぞれの円孔径に対して2種類あり、巾はどちらも 50mm であるが厚さは $t_f=9\text{mm}$ と $t_f=19\text{mm}$ とし、正方形鋼板にすみ肉溶接した後中央に円孔を切削した。実験に用いた鋼板は構造用軟鋼 SS41で、引張強度試験の結果は引張降伏応力 $\sigma_Y=3268\text{kg/cm}^2$ であった。

2・2 ひずみと変位の測定方法

供試体の板が座屈するまでの面内応力や補剛材の軸力および面外の曲げ挙動を測定するために、電気抵抗線ひずみゲージを図3に示す位置に貼り付けた。座屈時に板のたわみが最大になると予想される位置として、無孔板は板の中央に、また有孔板は載荷軸に垂直な対角線上の孔

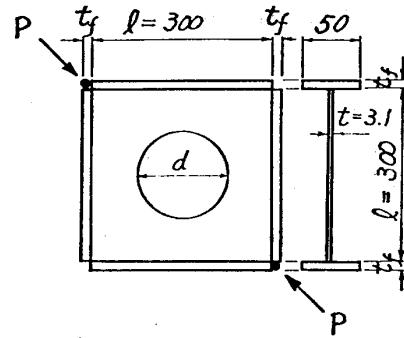
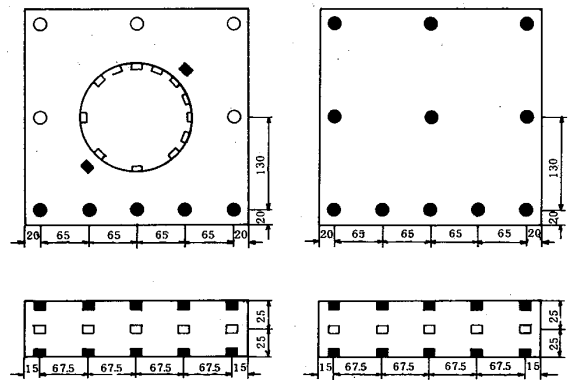


図2 供試体 (単位: mm)



両面 片面
 3軸ひずみゲージ ● ○
 単軸ひずみゲージ ■ □

図3 ひずみゲージ貼り付け位置(単位: mm)

縁に、最小目盛 $1/100\text{mm}$ のダイヤルゲージを設置して面外たわみを測定した。

2・3 載荷実験

載荷実験は、荷重が偏心しないように供試体を設置して、予想座屈荷重の $1/4 \sim 1/5$ のならし荷重を載荷した後本載荷を行った。局部的塑性域の発生、あるいは座屈挙動の兆候があるまでは荷重増分を大きくとり、その後は荷重増分を小さくした。弾塑性域での載荷においては所定の荷重増分を行った後、荷重を一定に保ち面外変位の変化が充分小さくなってから変位やひずみの読み取りを行った。

3. 実験結果と考察

3・1 弾性応力

図4および図5に供試体の周辺近傍における

中立面の弾性応力として、垂直応力 σ_x, σ_y およびせん断応力 τ_{xy} の実験結果を示す。解析値は有限要素法によって、一様せん断変形の弾性応力解析を行った結果であり、解析に用いられた要素は、要素内応力一定の三角形要素である。また、板の裏表の表面における応力の平均値を中立面の応力とした。図中、応力は次式で定義される平均せん断応力で無次元化している。

$$\tau_0 = \frac{Q}{A} \quad \dots (1)$$

$$Q = \frac{P}{\sqrt{2}} \quad \dots (2)$$

ここに、 Q ; 板の周辺に作用するせん断力
 A ; 正方形板の断面積 ($=t \times l$)
 P ; 対角線方向の合力

無孔板の場合、孔の影響が全くないので理論的には純せん断の応力状態であり、板内いたるところで $\tau_{xy}/\tau_0=1$ および $\sigma_x/\tau_0=\sigma_y/\tau_0=0$ である。したがって実験による弾性応力の分布を検討することによって、本実験装置の妥当性が検証できる。図4(a), 図5(a)によれば、せん断応力 τ_{xy}/τ_0 は集中荷重による応力集中の影響を受けて載荷点付近でやや大きい値を示すが、他の測定点ではほぼ $\tau_{xy}/\tau_0=1$ に近い値を示している。また、補剛材軸方向の垂直応力 σ_x/τ_0 は、載荷点でやや大きく非載荷点方向に向って直線的に減少する傾向がみられる。これは、図には示していないが補剛材の軸方向応力の分布と同じ傾向であり、補剛材の軸方向力が板に対してせん断力として完全に伝達していないことを示すものである。補剛材の軸方向に対して垂直な方向の垂直応力 σ_y/τ_0 は、集中荷重による応力集中の影響を受けて載荷点付近で圧縮応力を生じているが、他の測定点では、ほぼ $\sigma_y/\tau_0=0$ に近い値を示す。

図には示していないが板中央における応力は、 $t_f=19\text{mm}$ の供試体が $\tau_{xy}/\tau_0=1.00, \sigma_x/\tau_0=\sigma_y/\tau_0=0.38$ であり、 $t_f=9\text{mm}$ の供試体が $\tau_{xy}/\tau_0=1.16, \sigma_x/\tau_0=0.37, \sigma_y/\tau_0=0.28$ であった。このように本実験の載荷方法は、板の周辺で載荷点における応力集中や補剛材の軸方向力の影響を受け

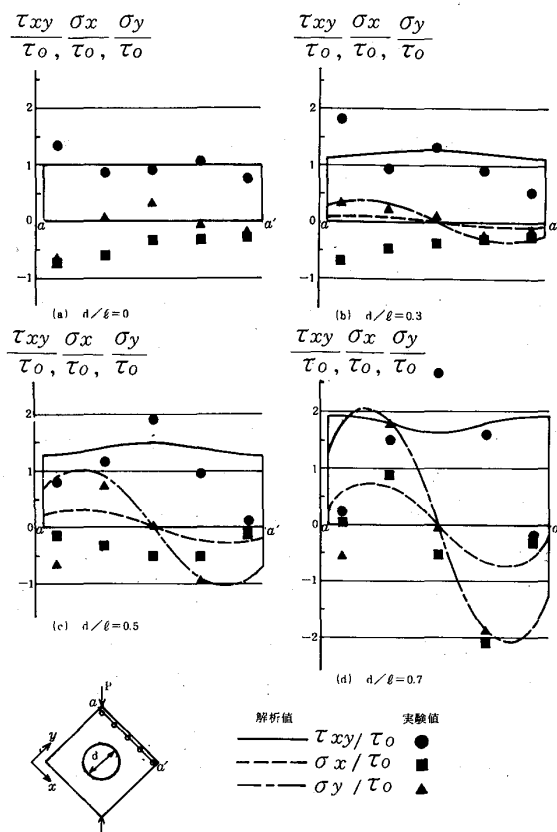


図4 周辺上の中立面における弾性応力分布 ($t_f=9\text{mm}$)

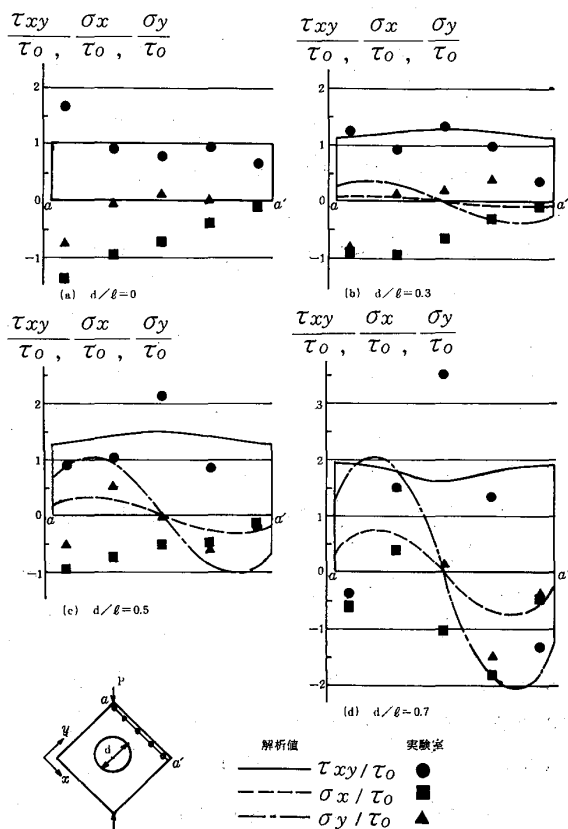


図5 周辺上の中立面における弾性応力分布 ($t_f=19\text{mm}$)

理論値とやや異なる値を示すが、板中央付近は理論値に近い応力状態になることがわかる。

有孔板の場合、せん断応力 τ_{xy}/τ_0 は周辺中央部分で大きい山形となる分布を示し、円孔径が大きくなるとその傾向が著しくなる。また垂直応力は、載荷点の応力集中や補剛材の軸方向力の影響を考慮すれば、一様せん断変形の解析値に近い分布を示すことがわかる。

図4と図5より $t_f=19\text{mm}$ と $t_f=9\text{mm}$ の場合の面内応力の分布を考察すると、分布の傾向は同じであるが、 $t_f=19\text{mm}$ の有孔板が $t_f=9\text{mm}$ の有孔板より、一様せん断変形の解析値に近い分布を示している。

図6に $t_f=19\text{mm}$ の無孔板の周辺上の表面における各応力の分布を示す。この図よりわかるように、鋼板の裏表の表面における応力は異なった値を示している。これは、荷重によって補剛材が曲げやねじりを生じて、それが板に曲げモーメントやねじりモーメントとして作用するためと思われる。

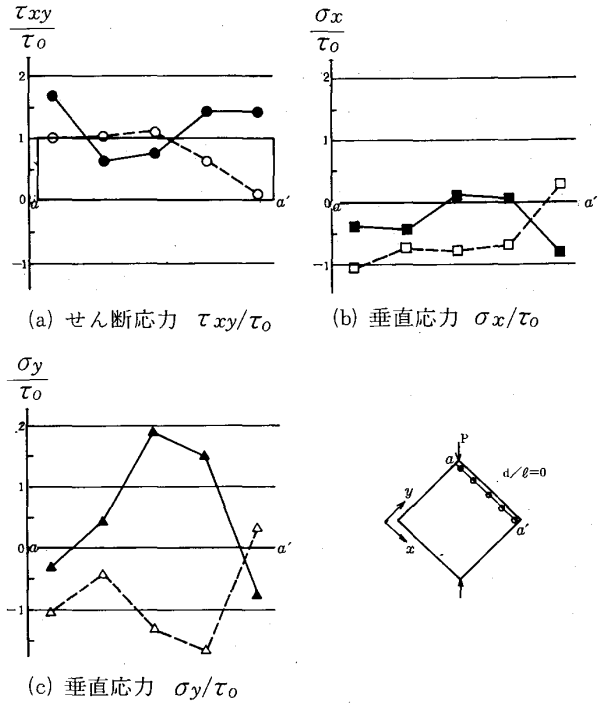


図6 無孔板の表面における弾性応力 ($t_f=19\text{mm}$)

3・2 円孔縁の応力

図7に有孔板の孔縁における接線方向の垂直応力 σ_θ/τ_0 を示す。図に示すように $t_f=9\text{mm}$ の有孔板が $t_f=19\text{mm}$ より大きい応力を生じている。また、円孔の径が小さい時には等分布せん断応力変形の解析値に近い値を、また円孔の径が大きくなると二つの解析値の中間の値を示している。これは、円孔の径が大きくなると、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るものと思われる。

3・3 座屈挙動

図8に荷重 P と面外たわみ δ の関係を表わす $P-\delta$ 曲線を示す。図中の δ_{0max}/t は、載荷前に測定した板の初期たわみ δ_{0max} と板厚 t の比である。図よりわかるように、無孔板では座屈荷重に近づくと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、有孔板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、座屈荷重の近傍に達した時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

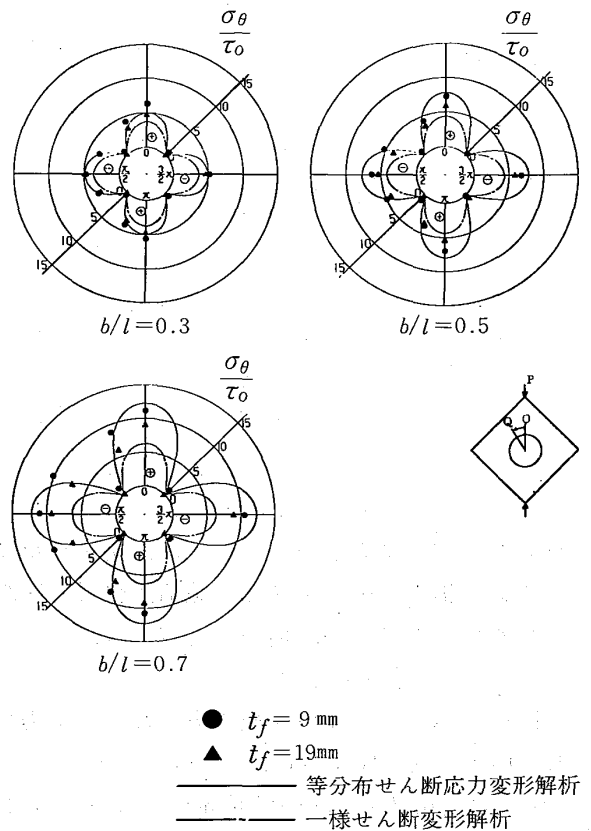


図7 円孔縁の弾性応力

に局部的塑性域が発生し、それが荷重の増加とともに徐々に拡大するため板の面外剛性が低下し、面外たわみが付加的に増加するものと考えられる。このような挙動は弾性座屈にはみられず弾塑性座屈の特性と思われる。

図9、図10に座屈後の面外たわみの等高線を示す。図より円孔の径が小さい場合には、板全域で座屈によるたわみを生じるが、円孔の径が大きくなると、円孔縁の一部分にたわみが集中することがわかる。

3・4 座屈強度

円孔径と本実験の応屈強度の関係を図11に示す。縦軸の Q_p は、ミゼスの降伏条件における塑性せん断応力と、鋼板の周辺の断面積の積であり、次式で定義する塑性せん断力である。

$$Q_p = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} A \dots (3)$$

図11によると、無孔板の座屈荷重は一様せん断変形の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8に示すとおりであり、かなり大きい値を示している。これは溶接により生じたたわみであり、残留応力も大きいと予想される。この残留応力が無孔板の座屈強度に大きく影響を与えたものと思われる。また有孔板は穿孔のとき残留応力が解放されるため、この影響は小さくなると思われる。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、また $t_f = 19\text{mm}$ の有孔板では一様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、面内方向の変形の拘

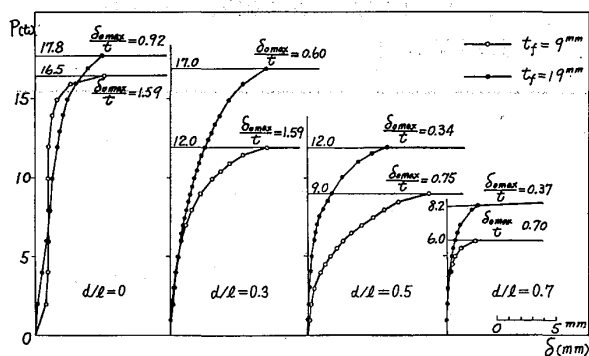


図8 荷重-たわみ曲線

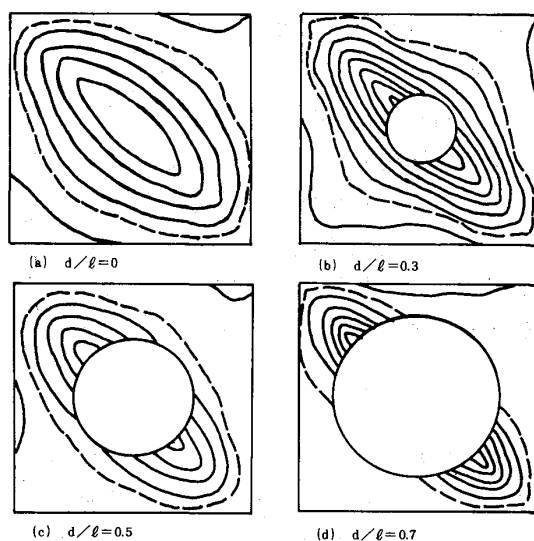


図9 座屈後の面外たわみ ($t_f = 9\text{mm}$)

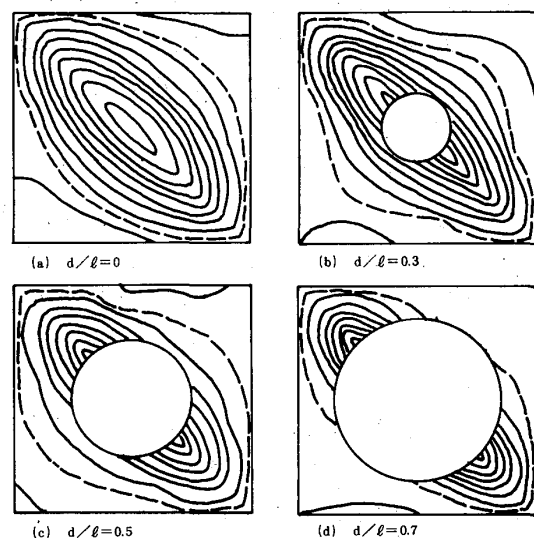


図10 座屈後の面外たわみ ($t_f = 19\text{mm}$)

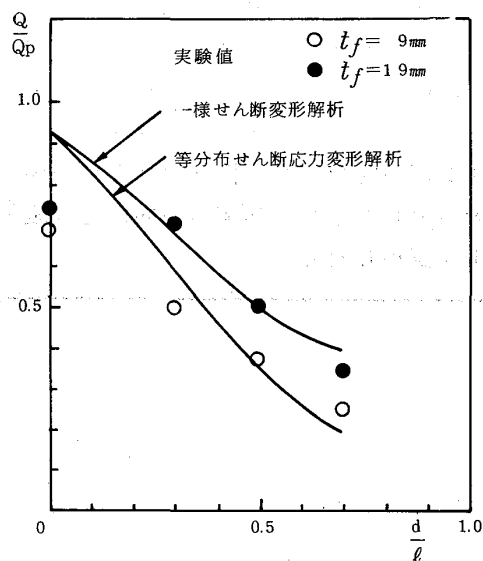


図11 円孔径と座屈強度の関係

束が大きくなり、有孔板の変形が一様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は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、円孔の径が大きくなると板の面外剛性が低下し、相対的に補剛材の影響が大きくなるためと考えられる。

4. まとめ

円孔を有する正方形鋼板が、周辺で補剛材に支持され、せん断荷重を受けるときの弾塑性座屈実験を行った。弾性応力分布、弾塑性せん断座屈挙動および座屈強度を、既存の等分布せん断応力変形あるいは一様せん断変形の解析値と比較検討した結果、本実験の範囲内で次のようなことが明らかとなった。

(1) 弾性応力の分布について

(a) 無孔板のせん断応力は、一様せん断変形の解析値に近い分布を示すが、円孔が存在すると解析値と異なる分布を示し、円孔の径が大きくなると最大値では実験値がかなり大きい値を示す。

(b) 垂直応力の分布は、載荷点における集中荷重の影響や、補剛材の軸方向力の影響を考慮すれば、解析値に近い分布を示す。

(c) 板の表面における各応力の値は、補剛材の曲げやねじりの影響を受け、板の表と裏でかなり異なる値を示す。

(d) 補剛材の板厚が異なる場合には、応力の分布の傾向は変わらないが、補剛材の厚い供試体が薄い場合より一様せん断変形の解析値に近い分布を示し、補剛材の面内方向変形の拘束が認められる。

(2) 弾塑性座屈挙動と座屈強度について

(a) 無孔板の弾塑性せん断座屈挙動は、座屈時に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、有孔板では応力集中による局部的塑性域のため面外剛性が低下して、座屈前にかなりの面外たわみを生じており、無孔板とは異なる特性を示す。

(b) 実験による座屈強度は、補剛材の剛性と密接な関係を示し、補剛材が厚い場合には一様せん断変形に、また薄い場合には等分布せん断応力変形の理論座屈強度に近づくことが、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を、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, Buckling of webs with openings, Computers and Structures, Vol. 9, No. 2-F, Feb. 1979.
- (2) 大村裕, 上野谷実, 向井博之, 円孔を有する正方形板の座屈強度について, 第31回土木学会中国四国支部学術講演概要, 昭和54年5月。
- (3) 上野谷実, 円孔を有する固定正方形板の弾塑性せん断座屈強度に関する実験的研究, 福山大学工学部紀要, 第3号, 1981年3月。