

有孔板の弾塑性せん断座屈強度 に及ぼす周辺支持補剛材の影響

上野谷 実*・岡田 雅博**

Influence on Edge Stiffeners for Elastic-plastic Shear Buckling Strength of Perforated Plates

Minoru UENOYA and Masahiro OKADA

ABSTRACT

Elastic-plastic shear buckling of square steel plates with circular holes is investigated experimentally. The plates are subjected to in-plane shearing deformations, and have edges supported stiffeners and centrally located circular holes. Ratio of hole diameter to the plate length, d/l , are 0.3, 0.5 and 0.7.

Experimental stresses along the plate edges show good agreement with finite element analysis. At hole edges, experimental stresses are greater than the analysis. The edge stiffeners restrain the in-plane deformations and increase the buckling strength. Experimental buckling strength of perforated plates with edge stiffeners is shown between analytical results of uniform shear stress deformations and uniform shear deformations.

1. まえがき

板の座屈強度は板の形状、荷重条件、それに周辺境界の面外変形に対する支持条件によって大きな影響を受ける。この板が孔を有する場合、さらに座屈強度に関する要因が増えることになる。これらの要因のうち円孔を中央に有する正方形板がせん断荷重を受ける場合について著者らは一連の研究を続けてきた。そこで明らかになったのは周辺境界において面外変形に対する支持条件はもちろん面内変形に対する境界条件が座屈強度に大きく影響することである。たとえば周辺上にせん断応力が等分布し、面内方向変形の拘束がない場合図1(a)に示す様な変形となる。以後これを等分布せん断応力変形と呼ぶことにする。また、図1(b)のように周辺が一直線に保たれたまません断変形をするように面内方向変形が完全に拘束される場合は周辺上におけるせん断応力は、もはや等分布ではない。以後、これを一様せん断変形と呼ぶことにする。

等分布せん断応力変形と一様せん断変形は周辺における力学的条件が明確なため解析も行ない易く、既に文献(1)(2)で弾塑性座屈強度を明らかにしてきた。しかしなが

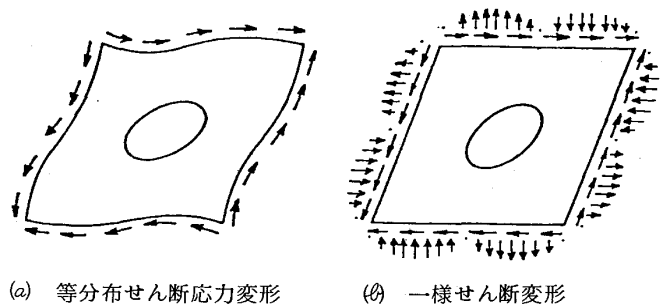


図1 有孔板のせん断変形

ら、実際の構造物は周辺が剛度の異なる補剛材で支持される場合が多い。この場合面外変形条件は単純支持とすればよいが面内方向変形に対する拘束条件は補剛材の剛度によって等分布せん断応力変形と一様せん断変形の間と考えられる。この補剛材の影響を考慮した座屈解析はまだ行なわれていないが実験は行なわれている⁽³⁾。この実験では座屈強度に与える補剛材の影響をある程度明ら

* 土木工学科 ** 大学院工学研究科

かにしているが、まだ不十分な点も多い。

本研究は荷重方法に忠実な応力解析を行なって応力状態を明らかにし補剛材の剛度を3段階に変化させた実験を行ない補剛材が座屈強度に与える影響を明らかにしようとするものである。

2. 実験方法

2.1 荷重方法および供試体

荷重方法は、図2に示す様に試験機の圧縮荷重Pが丸鋼から補剛材を経て板周辺にせん断荷重として作用する方法を用いた。

供試体は、平均板厚 $t=4.5\text{mm}$ の鋼板を一辺 450mm の正方形に切断し、周辺に補剛材をすみ肉溶接したもので、種類は、円孔径 $d=135, 225, 315\text{mm}$ の有孔板と無孔板の4種類で、円孔径 d を板の辺長 l に対する比で表わすと $d/l=0.3, 0.5, 0.7$ となる。また、補剛材は、それぞれの円孔径に対して巾 100mm で厚さ $t_f=12, 19, 25\text{mm}$ の3種類である。円孔の切削は、補剛材溶接後ボール盤で行なった。実験に用いた鋼板は、構造用軟鋼SS-41で、引張強度試験の結果は、引張降伏応力 $\sigma_Y=2830\text{kg/cm}^2$ であった。

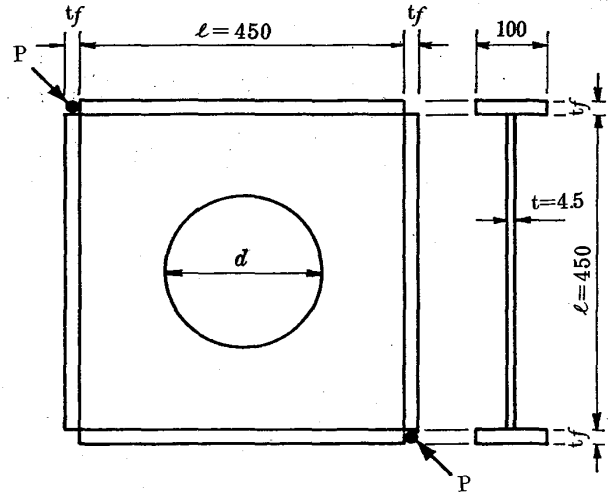


図2 供試体 (単位: mm)

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 (ゲージ長 5mm) 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、また有孔板は荷重軸に垂直な対角線上の孔縁に、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。

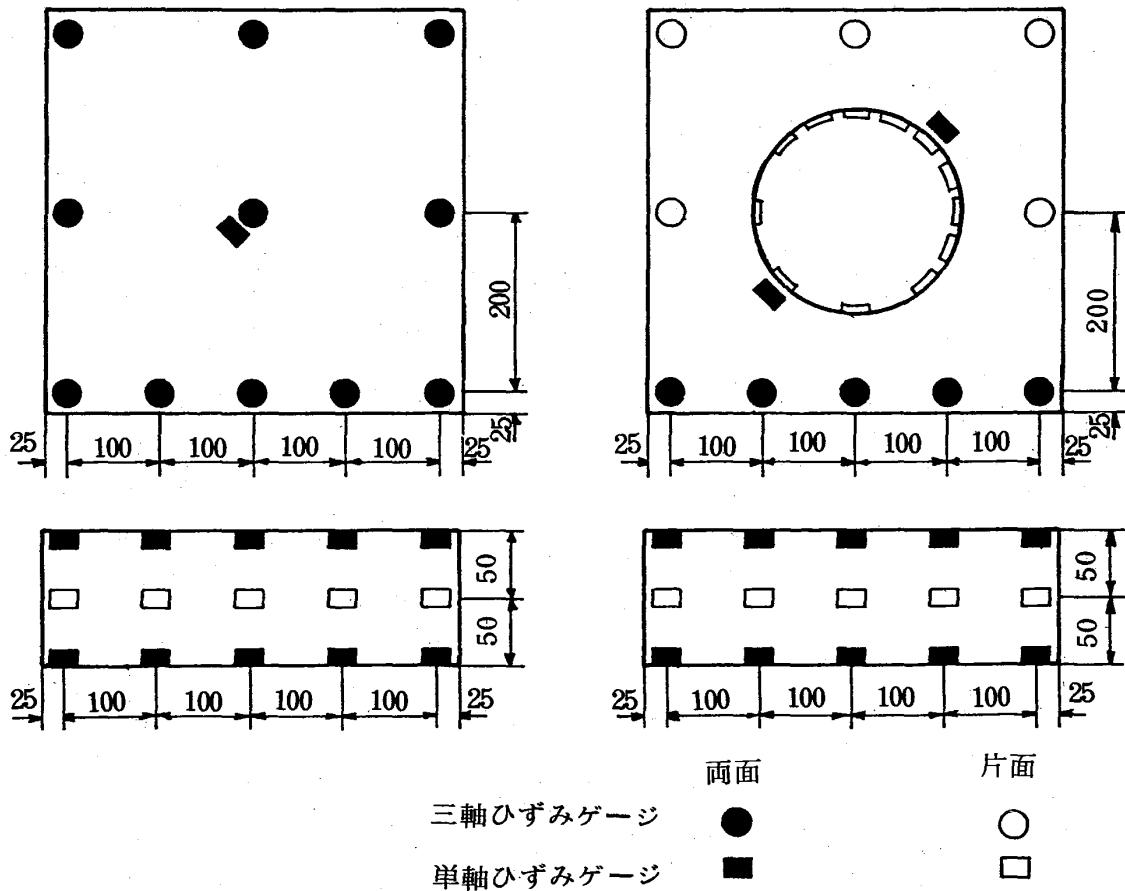


図3 ひずみゲージ貼り付け位置 (単位: mm)

2.3 荷重実験

荷重実験は、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 $1/4 \sim 1/5$ の荷重を載荷した後、本載荷を行なった。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なった後、荷重を一定に保ち面外変位の変化が十分に小さくなってから変位やひずみの

読み取りを行なった。

3. 弾性応力解析

補剛材で支持される有孔板の弾性応力解析は、有限要素法で行なった。用いた要素は要素内応力一定の三角形要素で図4に示す様な要素分割である。対称性を利用して実際の計算は正方形板の $1/4$ について図4のような境界条件と荷重で行なった。

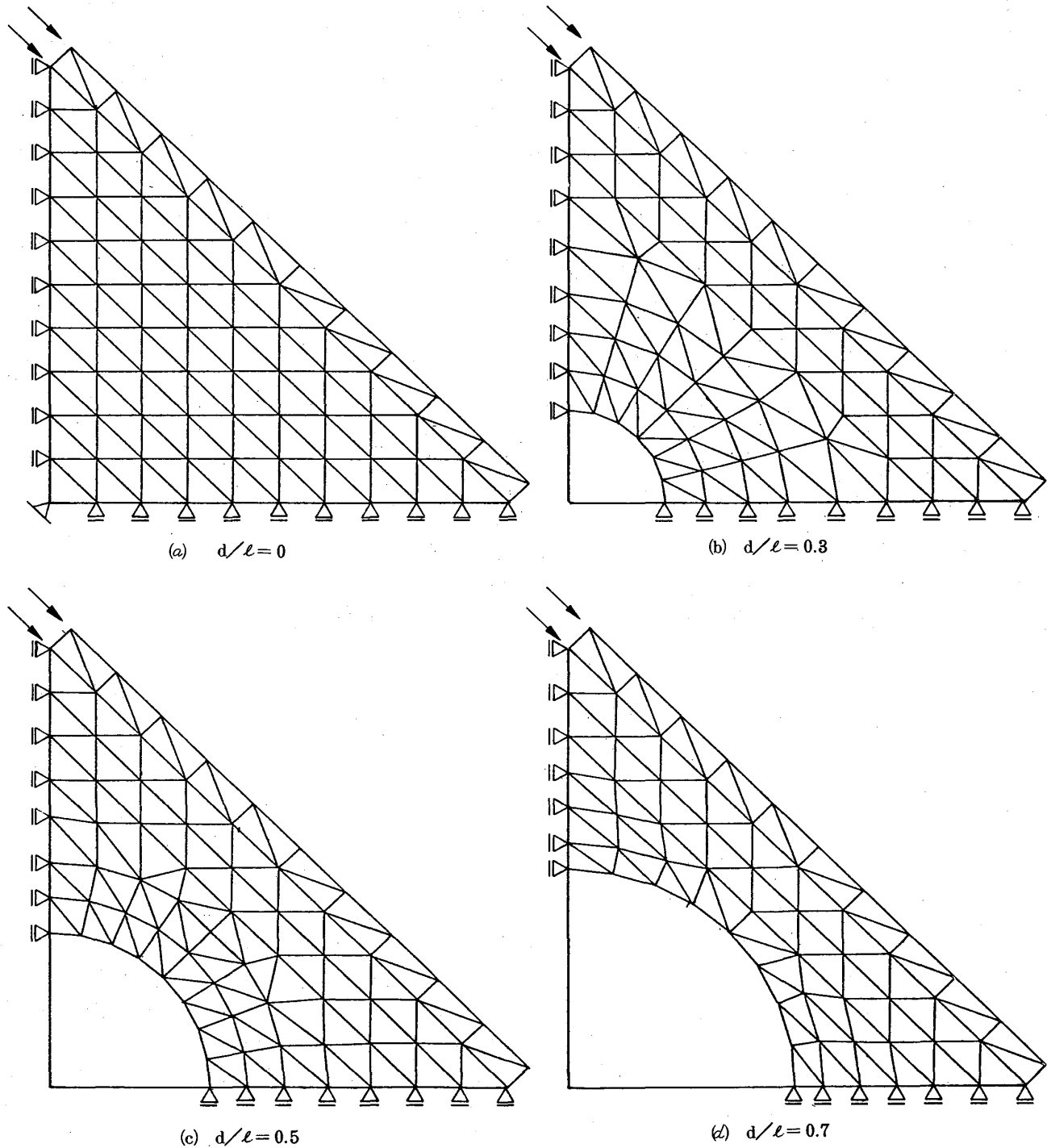


図4 解析に用いた供試体の有限要素分割

4. 解析および実験結果

4.1 周辺の応力

図5～図7に供試体の周辺近傍 a-a' 断面における中央面の弾性応力としてせん断応力 τ_{xy} および垂直応力 σ_x, σ_y の有限要素解析および実験結果を示す。中央面の応力は、板の裏表の表面の各応力成分の平均値である。図中、各応力は次式で定義される平均せん断応力 τ_0 で除し、無次元化している。

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

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

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 (= $t \times \ell$)
P：対角線方向の荷重

無孔板の解析結果をみると、図5(a)のように周辺近傍の断面 a-a' におけるせん断応力 τ_{xy}/τ_0 は等分布ではない純せん断の場合、 $\tau_{xy} = \tau_0, \sigma_x = \sigma_y = 0$ であるが、本実験の荷重法では周辺において a から a' へ漸減するような分布になる。また、板中央では、 $t_f = 12, 19, 25\text{mm}$ に対してそれぞれ $\tau_{xy}/\tau_0 = 1.07, 1.03, 1.00$, $\sigma_x/\tau_0 = -\sigma_y/\tau_0 = -0.317, -0.245, -0.210$ であった。このように無孔板内で垂直応力 σ_x, σ_y がせん断応力 τ_{xy} の 20～30% 生じていることは座屈強度にも影響を与えるものと思われる。

有孔板の場合、垂直応力 σ_x/τ_0 と σ_y/τ_0 は解析結果とよく近似している。孔径が大きくなるとせん断応力 τ_{xy}/τ_0 だけが辺中央や a, a' 点付近において解析値との差異が大きくなる。

図8に $t_f = 19\text{mm}$ の無孔板の周辺上の断面 a-a' における板の表面の各応力の分布を示す。この図によれば、板の裏表、の応力はほとんど差がなく補剛材の回転が少ないことを示している。これは補剛材の回転を防ぐために各補剛材の接点でスポット溶接をしているためである。文献(3)ではこの溶接をしていないので裏表の応力差がかなりあった。

4.2 円孔縁の応力

図9に有孔板の円孔縁における接線応力 σ_θ/τ_0 を示す。図が示すように円孔縁は板内で応力集中がもっとも著しい。解析値および実験値とも補剛材厚が薄くなる程、応力集中の度合が大きくなる。実験値は解析値に比較して 20～50% 大きく、等分布せん断応力変形の解析値に近い値である。このことから孔縁近傍では補剛材による面内方向拘束の影響が周辺よりかなり減少していると考えられる。

4.3 座屈挙動

図10に荷重 P と面外たわみ δ の関係を表わす P- δ 曲線を示す。図中の $\Delta_0 \max/t$ は、荷重載荷前に測定した最大初期たわみ $\Delta_0 \max$ と板厚 t の比である。

無孔板では座屈荷重以前において、たわみの増加がこらず、座屈荷重に達すると急激にたわみが増加し座屈崩壊する典型的な板の座屈挙動を示す。しかし、有孔板は、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に応力集中による局部的塑性域が生じ、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である。

図11～図13に座屈後の面外たわみの等高線を示す。弾塑性座屈であるため除荷後も図のような面外たわみが残る。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、円孔縁の一部にたわみが集中することがわかる。補剛材の厚さによる差異はみられない。

4.4 座屈強度

図14に一樣せん断変形と等分布せん断応力変形の弾塑性せん断座屈曲線(単純支持)と実験値との比較を、図15に円孔径と本実験の座屈強度の関係を示す。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との積であり次式で定義する塑性せん断力である。

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

本実験の供試体は、 $\sqrt{\sigma_y/E} \cdot \ell/t = 3.67$ で弾塑性座屈の範囲にあることが同図よりわかる。

図15において、無孔板の座屈強度は $t_f = 12, 19, 25\text{mm}$ に対してそれぞれ約 14, 10, 8% 小さい。これは解析値では純せん断の応力状態を仮定しているが、本実験の応力状態は弾性応力解析で述べたように純せん断の応力状態ではなく、板中央において $\sigma_x/\tau_0 = -\sigma_y/\tau_0 = -0.210 \sim -0.317$ を生じているために座屈強度が低下するものと思われる。また、補剛材厚が大きい程、垂直応力 σ_x や σ_y が小さくなり純せん断に近い応力分布になるためと考えられる。

有孔板の場合、補剛材の厚さが大きいほど座屈強度が大きくなっている。これは周辺の補剛材によって面内変形が拘束されて補剛材が厚いほど一樣せん断変形に近づくことが座屈強度についても適用できることを示してい

る。また、この傾向は円孔が大きくなるほど著しい。これは円孔が大きくなると面内剛性が低下し、相対的に補

剛材の面内方向変形の拘束が強まるためと思われる。

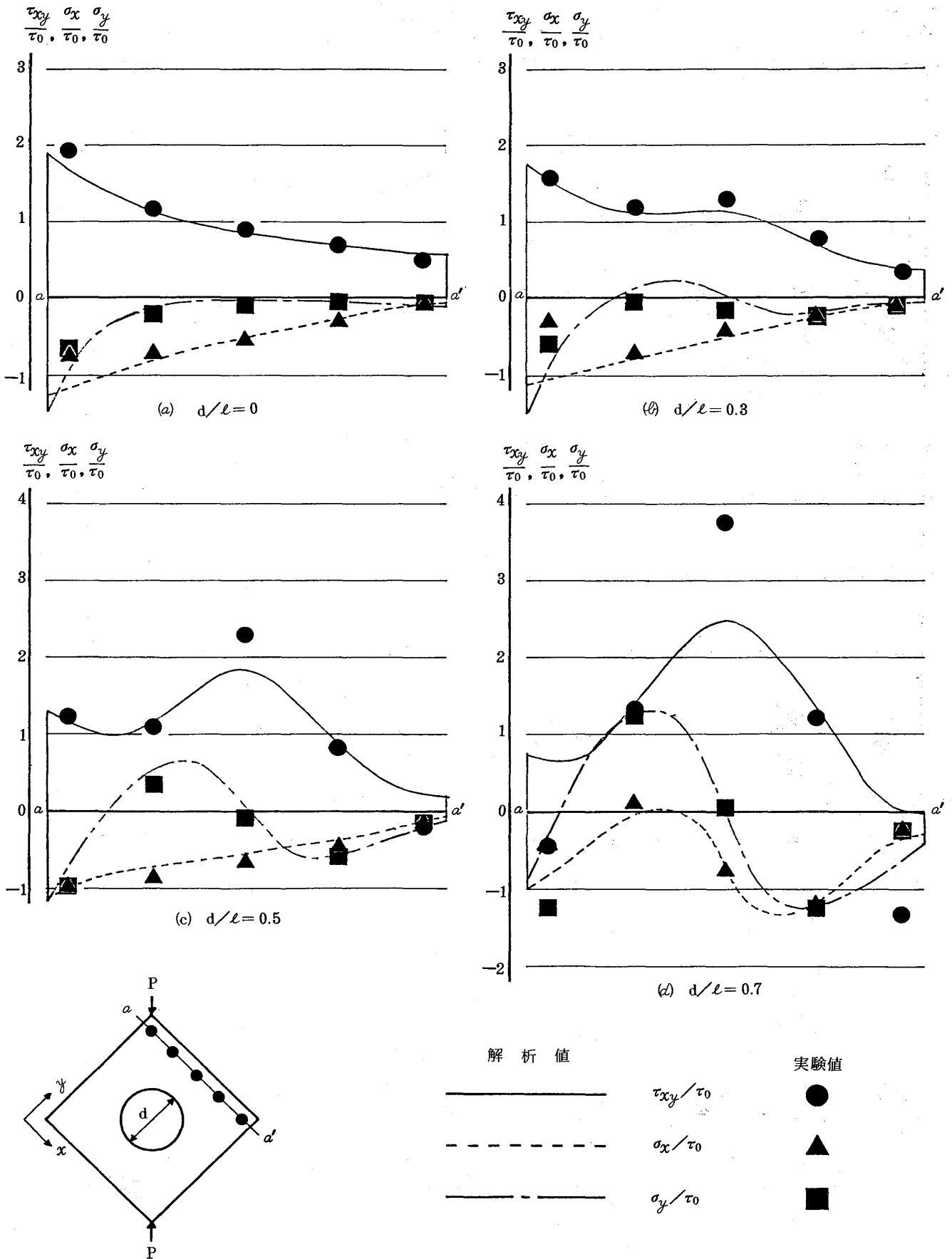
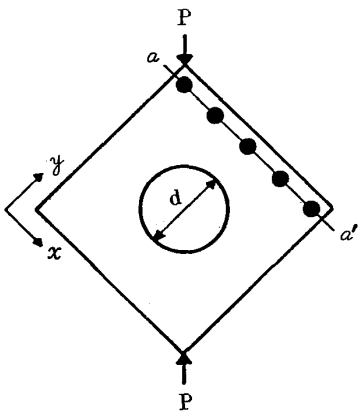
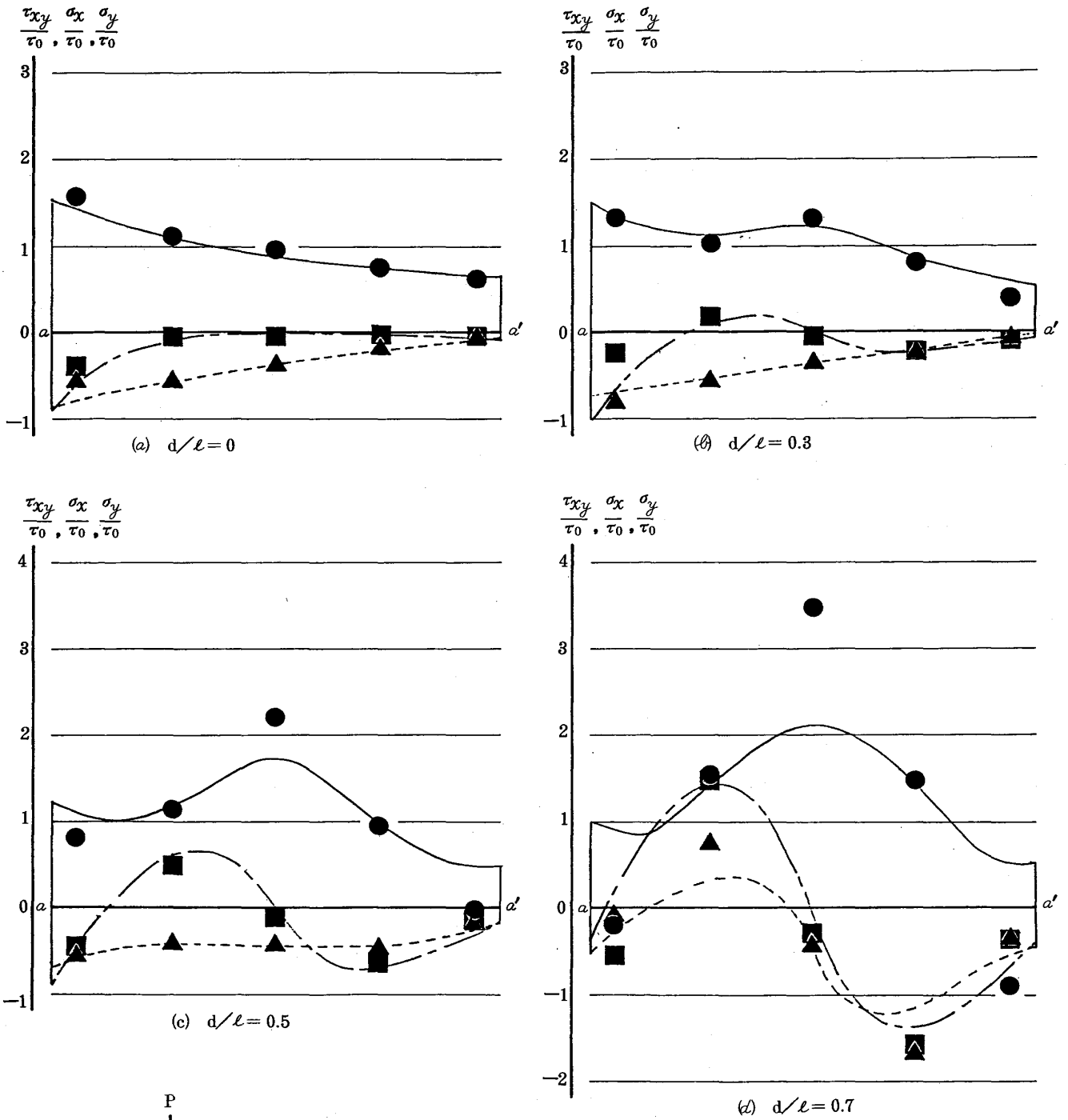


図5 周辺上の中央面における弾性応力分布 ($t_f = 12 \text{ mm}$)



解析値		実験値
———	τ_{xy}/τ_0	●
- - - -	σ_x/τ_0	▲
— · — ·	σ_y/τ_0	■

図6 周辺上の中央面における弾性応力分布 ($t_f = 19\text{ mm}$)

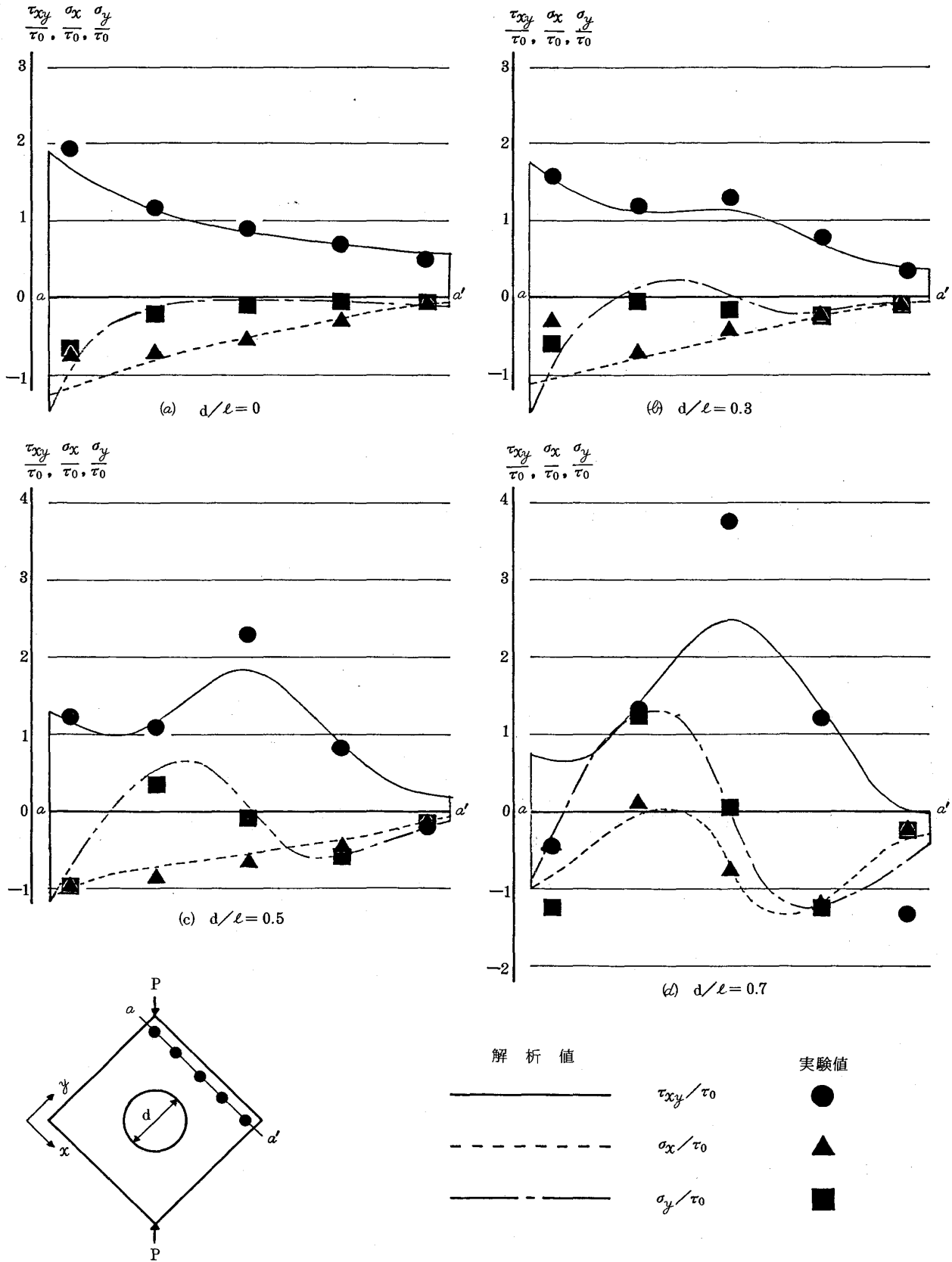


図7 周辺上の中央面における弾性応力分布 ($t_f = 25 \text{ mm}$)

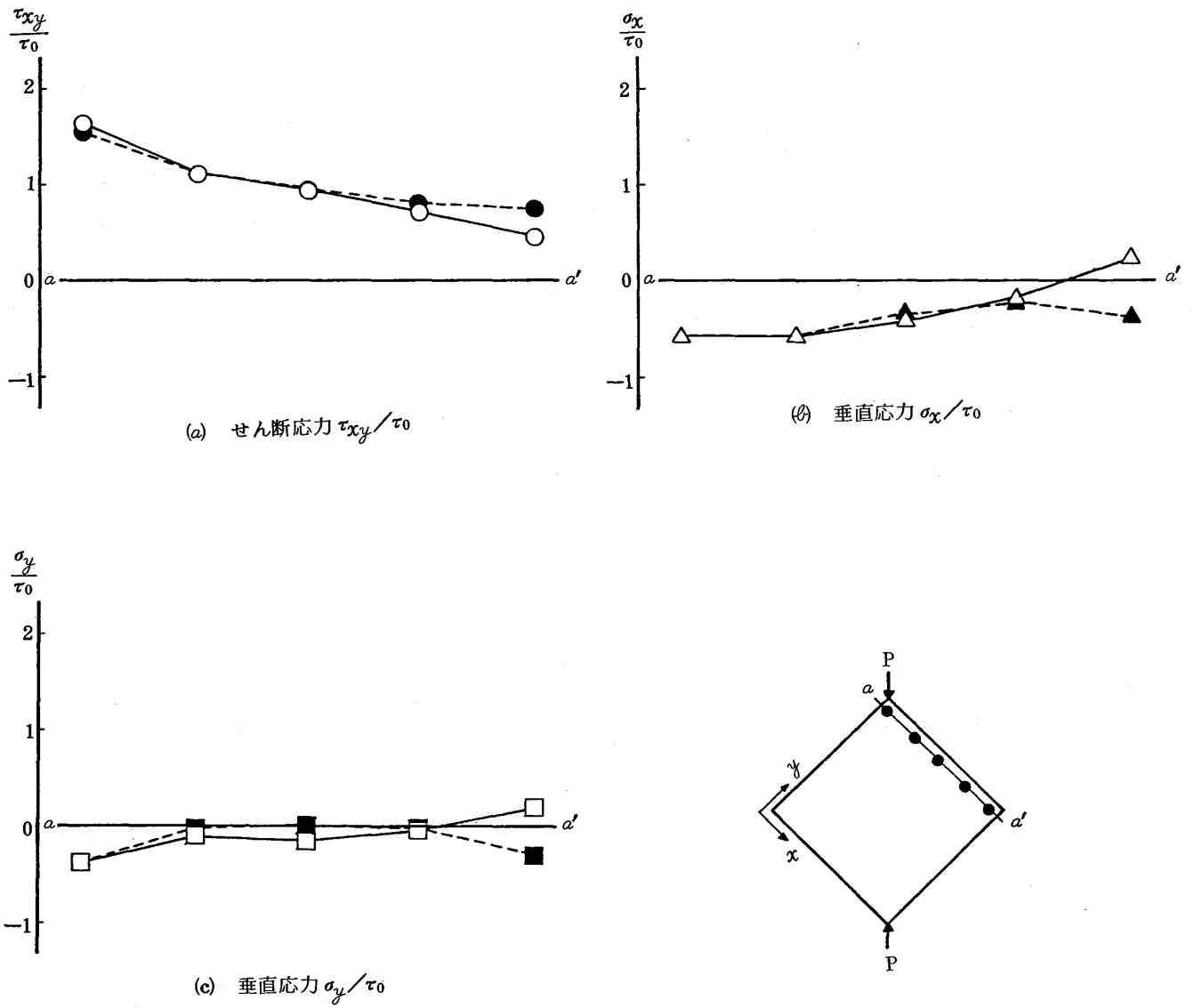


図8 無孔板の表面における弾性応力 ($t_f = 19 \text{ mm}$)

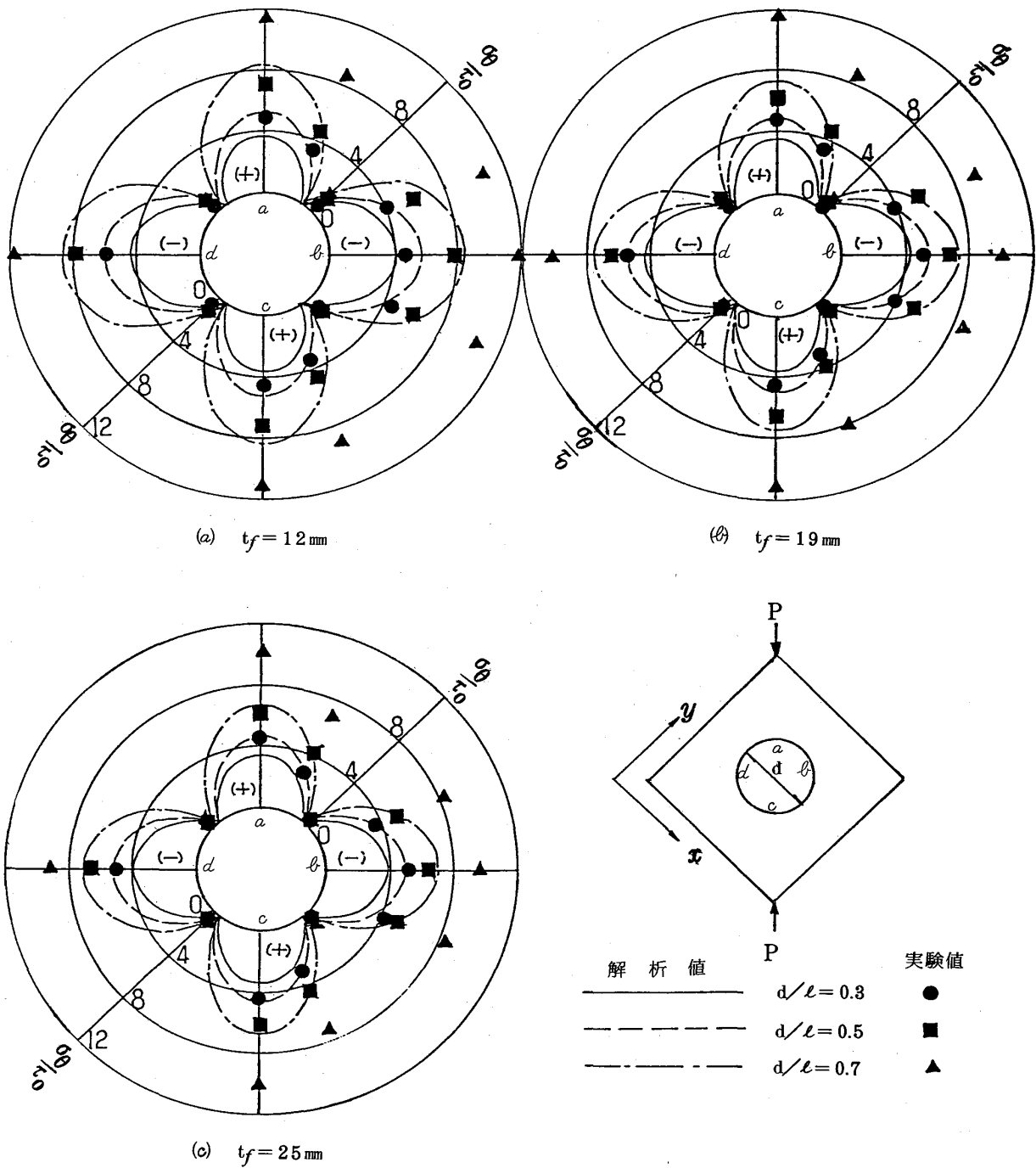


図9 円孔縁の弾性応力分布

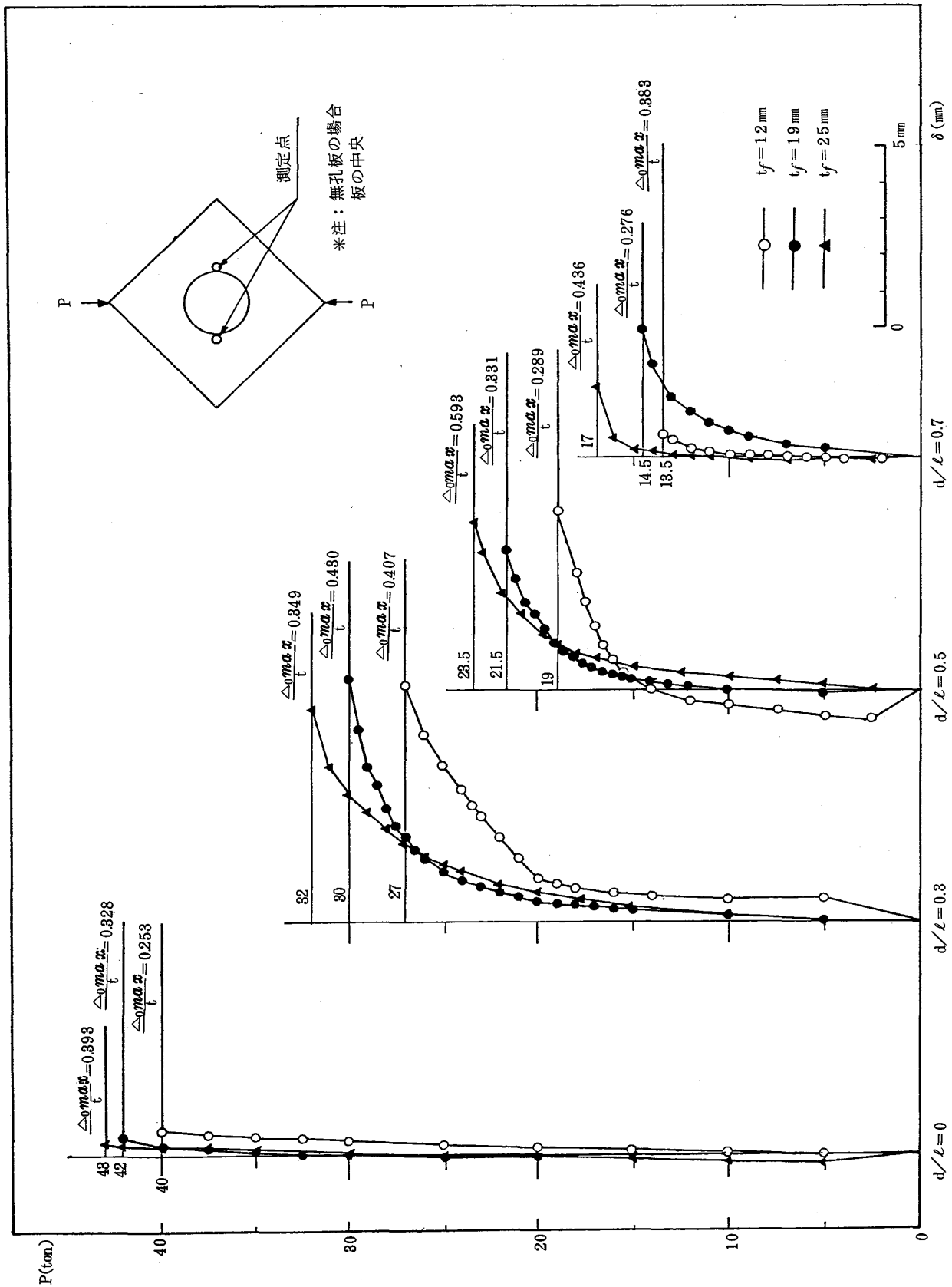


図10 荷重 - たわみ曲線

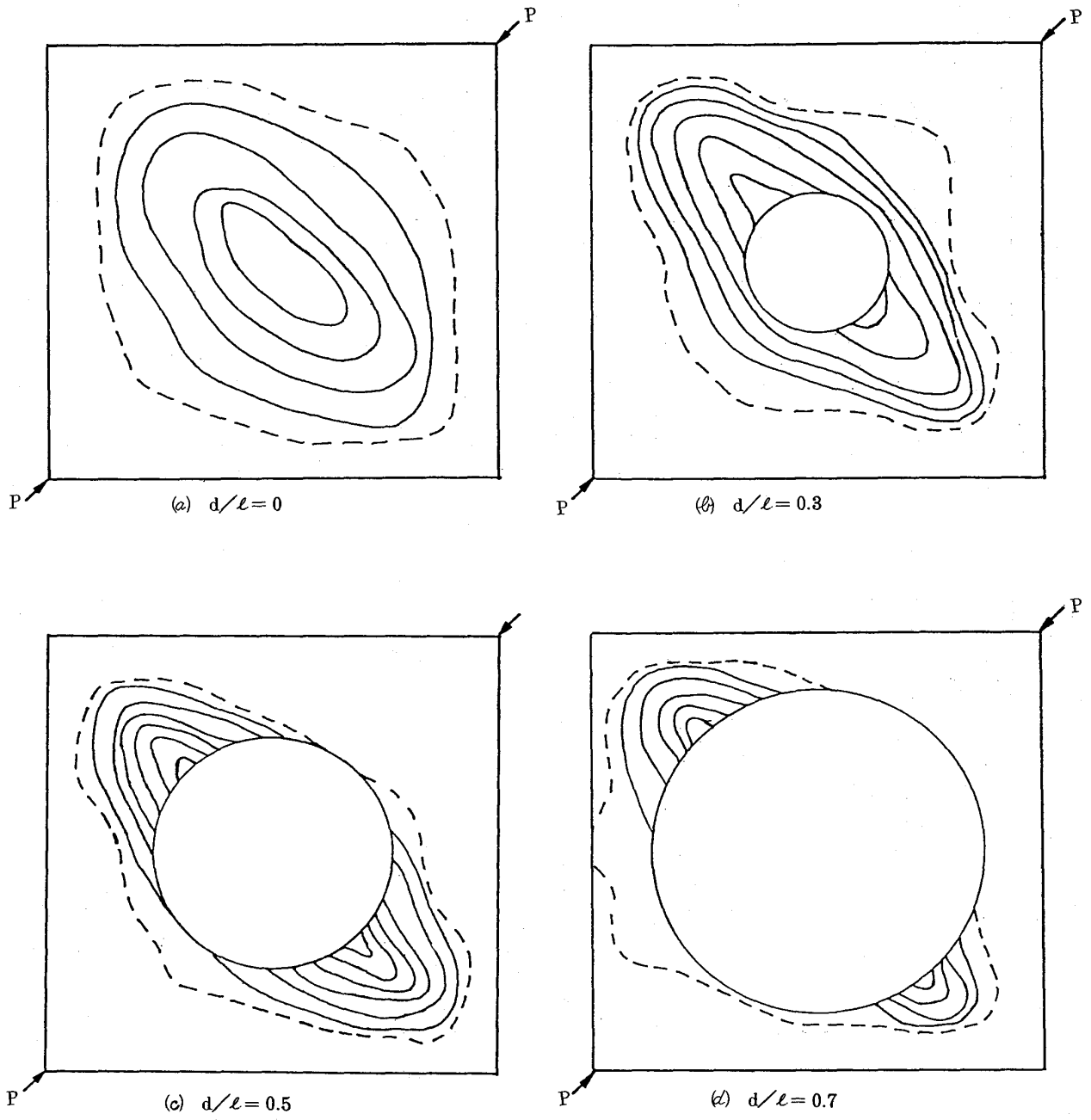


図11 座屈後の面外たわみ ($t_f=12\text{ mm}$)

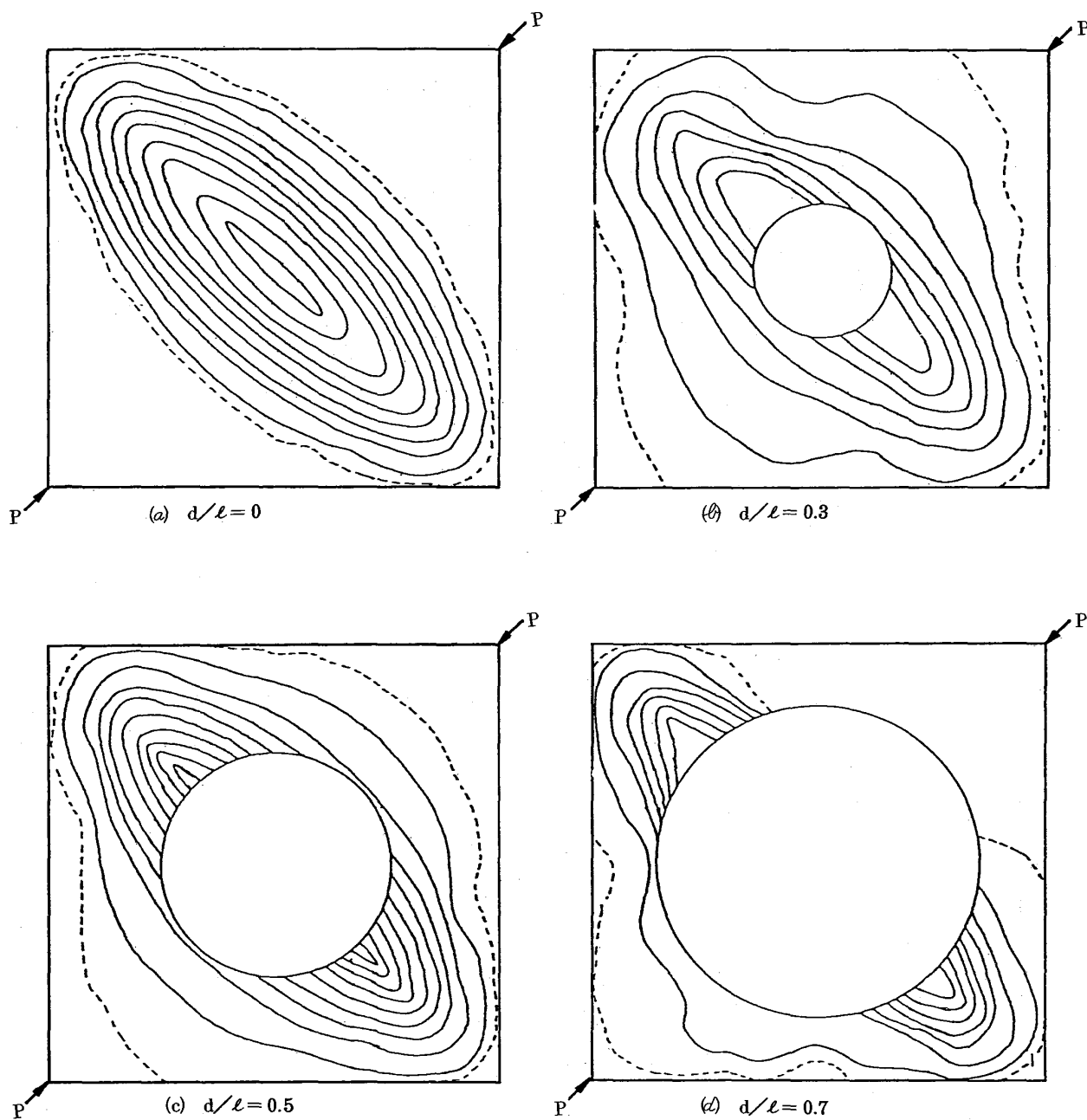


図12 座屈後の面外たわみ ($t_f=19\text{ mm}$)

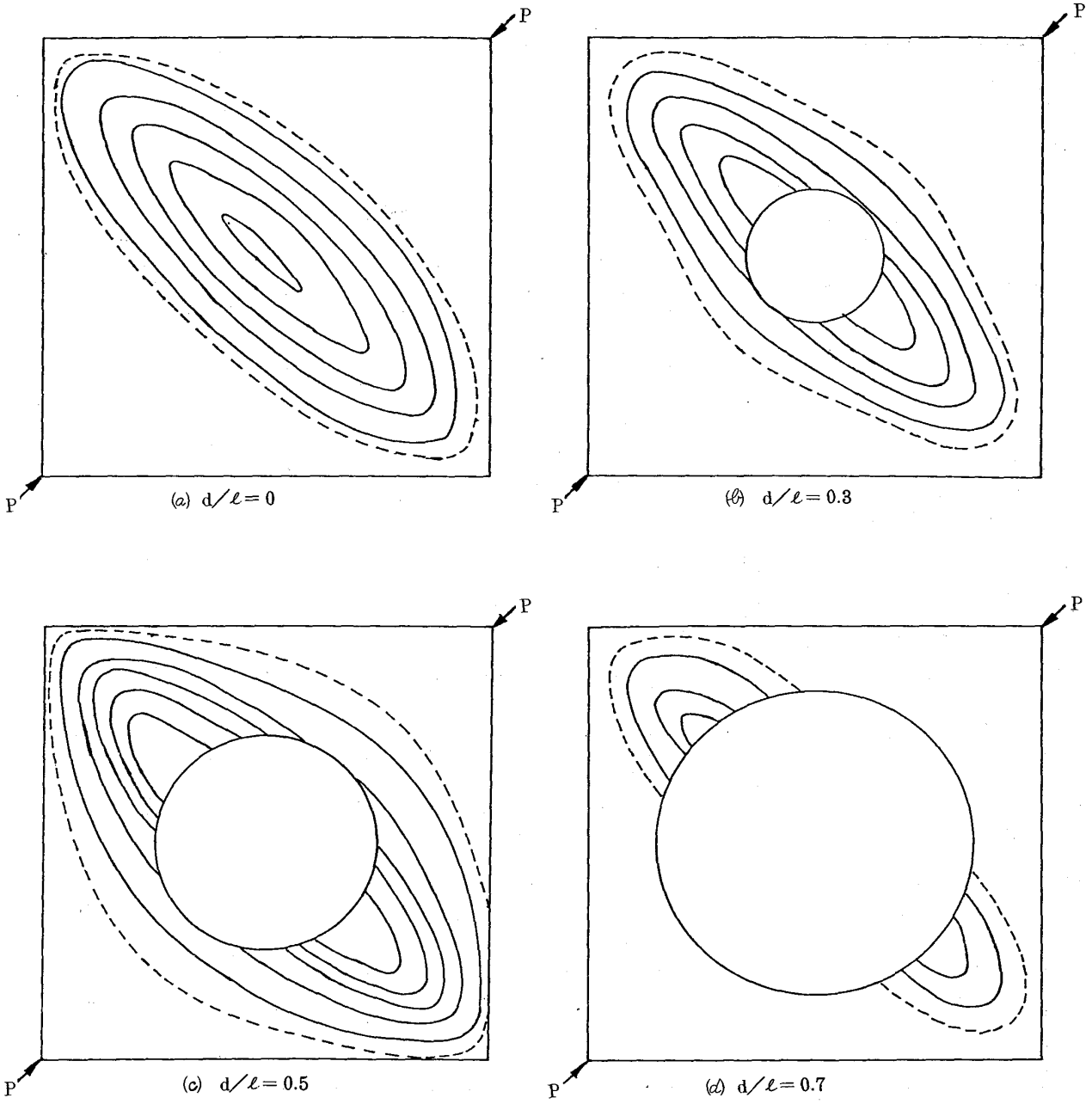


図13 座屈後の面外たわみ ($t_f=25\text{ mm}$)

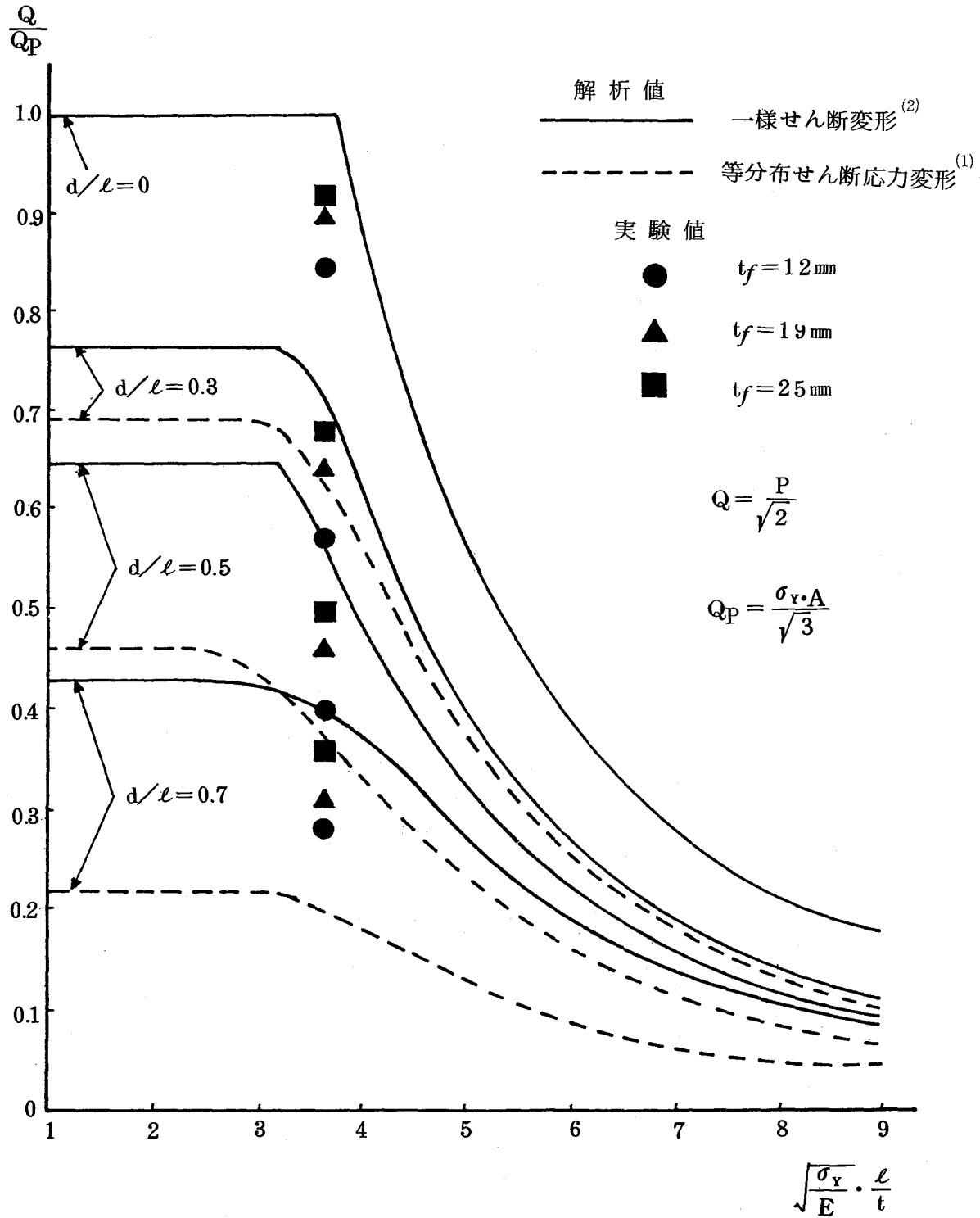


図14 一様せん断変形と等分布せん断応力変形の弾塑性せん断座屈曲線(単純支持)と実験値の比較

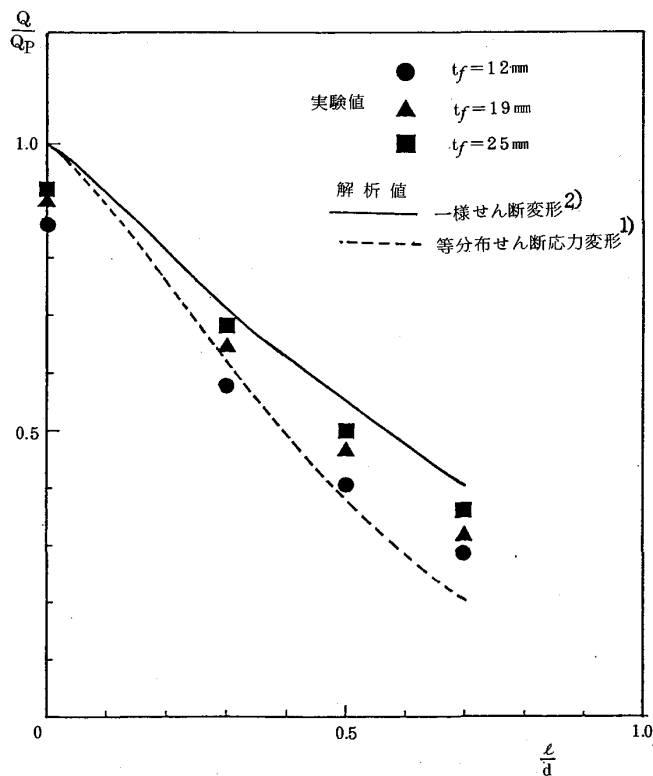


図15 円孔径と座屈強度の関係

5. 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場合の弾塑性座屈実験を行なった。弾性応力分布、座屈挙動および座屈強度を解析結果と比

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になった。

- (1) 本実験の荷重方法は無孔板において純せん断応力状態とは異なり、板中央でせん断応力の20~30%の大きさの垂直応力が生じる。
- (2) 有孔板の補剛材は周辺において面内方向変位を大きく拘束し、一様せん断変形に近い応力分布を示す。
- (3) 有限要素法による応力解析は周辺上で実験値とよい近似を示すが、円孔縁では実験値が20~50%大きい値を示し等分布せん断応力変形の理論値に近づく。
- (4) 実験による無孔板の座屈強度は純せん断の理論座屈値より8~14%小さい値を示す。
- (5) 補剛材の影響によって座屈強度は増大し、有孔板の座屈強度はほぼ等分布せん断応力変形と一様せん断変形の理論座屈値の間となる傾向がある。

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, 原田和秋, 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, 福山大学工学部紀要, 第4号, 1982年3月。