垂直荷重を受ける板の塑性設計について

正員 楠 田 忠 雄*

Plastic Analysis of Plate Structures Subjected to Transverse Load

By Tadao Kusuda, *Member*

Abstract

The paper is concerned with the plastic design of thin plates made of a perfectly plastic material which obeys the stress-strain law of Prandtl and Reuss, under various types of boundary conditions. A rectangular plate with arbitrary boundary condition is subjected to either uniformly distributed or concentrated transverse load. Collapse loads of thin plates obtained by lower bound theory are compared with the results from upper bound theory for each case of boundary conditions.

1. 緒 言

板の塑性設計法に関しては Drucker, Greenberg, Prager¹⁾ によつて基礎理論が導かれ、動的許容速度場による解法の基礎が固められた。また Pell および Prager²⁾ は周辺固定の円板並びに正方形板に等分布荷重が働く場合の解を求め、更にまた Pell³⁾ は安全率に関する議論を行なつている。これら Brown 大学における一連の研究に対し、英国においては Wood⁴⁾ が等分布荷重を受ける周辺単純支持の矩形板に対する解を upper bound および lower bound の両方から求め、コンクリート・スラブを用いた実験結果と比較してよい結果を得ている。一方 Young⁵⁾ は極めて長い鋼板に対して膜応力を含めた 1 次元の解析を行ない、実験結果と比較して荷重一撓み関係に及ぼす膜応力の影響を議論している。Young の実験からも明らかのように、鋼板の場合には塑性変形の進行と共に膜応力状態に移つてゆき、塑性設計で論ずる崩壊状態にはならない。したがつて鋼板の耐え得る最高荷重は材料の破断によつて定まるものと考えられる。

構造物によつてはこの最高荷重に基づいて設計を行なうこともできるであろうが、一般には水密あるいは気密を保つという点から、かなり大きな塑性変形を生じた状態をもつてその構造物の最終状態と考え、この状態に基づいて安全率をとり設計を行なうのが妥当であると考えられる。この考え方は一種の deflection criterion であるが、このような構造物に対しては鋼板の場合にも塑性設計の適用が可能であるものと思われる。この報告においては Prager の動的許容速度場の解法を簡易化し、任意の境界条件すなわち固定、単純支持、自由縁の任意の組合せに対して、等分布荷重、線荷重、集中荷重等を受ける矩形板の解を求めた。

更にまた Wood が周辺単純支持の矩形板に対して求めた静的許容応力場の解法を一般化して、等分布荷重を受ける任意の境界条件の矩形板に対する解を求め、upper bound, lower bound 並びに弾性解の比較を行なつた。

2. Upper Bound による解法

問題の簡略化のためにつぎのごとき仮定を設ける。

- 1) 撓みは板厚の程度と考えて膜応力は無視する。
- 2) 崩壊は曲げによつて起ると考え、剪断力の影響は無視する。
- 3) 理想化したモーメント・曲率関係を考え、且つ塑性モーメント M_p は板のすべての方向に一定であるとす。

なお板の hinge line (塑性関節線) に沿つて単位長さ当りの塑性モーメント M_p は $M_p = \sigma_y \cdot h^2/4$ で与えられる。ただし σ_y は降伏応力、 h は板厚である。

先ず Prager の方法を周辺単純支持の矩形板が等分布荷重を受ける場合に適用してみるとつぎのごとくにな

Fig. 1 Failure Mechanism for a Simply Supported Rectangular Plate

る。第1図に示すとき崩壊機構を考え、線分 EF に沿つての撓みを δ 、角 EAD を α とすれば三角形 AED と台形 AEFB との間の角は $\frac{2\delta}{b} \left(\sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right)$ すなわち $\frac{2\delta}{b} \cdot \frac{1}{\sin \alpha}$ で与えられる。したがつて hinge line に沿つて内力のなす仕事 ($M_p \times$ 角変形量) を求め、板の撓み変形によつて荷重のなす仕事と等しいと置けば、

$$\begin{aligned} & \frac{2\delta}{b} \cdot M_p \left(2a - 2b \tan \alpha + \frac{2b}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} \right) \\ &= p_c \left[(a - b \tan \alpha) b \cdot \frac{\delta}{2} + \frac{1}{3} b^2 \delta \tan \alpha \right] \end{aligned} \quad (1)$$

ただし p_c は等分布荷重の値である。(1)式より直ちに崩壊荷重 p_c は

$$p_c = 24 \cdot \frac{M_p}{b^2} \cdot \frac{\cot \alpha + \beta}{3\beta - \tan \alpha} \quad \text{ただし } \beta = a/b \quad (2)$$

で与えられる。(2) 式を α について微分して最小値を求めると

$$\beta = \frac{2 \tan \alpha}{3 - \tan^2 \alpha} \quad (3)$$

として矩形板の aspect ratio β に対する α の値が求まり、(2) 式および (3) 式より崩壊荷重が定まる。例えば正方形板 ($\beta=1$) に対しては $\alpha=45^\circ$ となり、無限帯板 ($\beta=\infty$) の時は $\alpha=60^\circ$ となる。

つぎに簡易計算法によつて同じ問題を解くこととなる。第1図の長辺 AB に平行な hinge line EF の長さは両側の三角形の高さを ξa とすれば $(1-2\xi)a$ で与えられる。hinge line AE および ED に沿つてのモーメントの総和は $M_p \cdot (\overline{AE} + \overline{ED})$ で与えられ、その辺 AD に平行な成分は $M_p \cdot b$ で与えられる。したがつて三角形 AED において辺 AD の周りのモーメントの釣合をとれば、

$$M_p b = \frac{1}{2} p_c b \cdot \xi a \cdot \frac{1}{3} \xi a$$

$$\text{したがつて} \quad p_c = \frac{6 M_p}{\xi^2 a^2} \quad (4)$$

同様に台形 AEFB について辺 AB の周りのモーメントの釣合より

$$M_p a = 2 \cdot \frac{1}{2} p_c \cdot \xi a \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{b}{6} + p_c (1-2\xi) a \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{b}{4}$$

$$\text{したがつて} \quad p_c = \frac{24 M_p}{(3-4\xi) b^2} \quad (5)$$

(4) 式と (5) 式を等しいとおけば

$$\xi = \frac{\sqrt{1+3\beta^2}-1}{2\beta^2} \quad (6)$$

$$\text{ゆえに} \quad p_c = 24 \cdot \frac{M_p}{b^2} \cdot \frac{1}{3-2\sqrt{1+3\beta^2}-1} \quad (7)$$

あるいは無次元化して

$$\frac{p_c a b}{M_p} = \frac{24 \beta^3}{3\beta^2 - 2\sqrt{1+3\beta^2} + 2} \quad (8)$$

前述の Prager の方法とこの方法を比較してみると、

1) 解法は代数的で微分演算を伴わない。

2) 板の aspect ratio β に対して直接に解が求められ hinge line の角度 α を計算する必要がない。

等、Prager の方法に比して著しく簡易化されていることがわかる。(3) 式に $\tan \alpha = \frac{\xi a}{b/2}$ の関係を代入すれば直ちに (6) 式が得られ、したがつて (2) 式の最小値が (7) 式で与えられることも明らかである。このように問題によつては同じ upper bound method でも、仮想変位の原理を用いず釣合方程式から解く方法が屢々計算を簡易化することがある⁶⁾。つぎに荷重の分布状態の影響を調べるために三辺固定一辺自由の板について等分布荷重、線分布荷重、集中荷重の比較を行うとつぎのごとくである。

2.1 集中荷重を受ける三辺固定一辺自由の板

集中荷重の作用点 O を通る hinge line を第2図のごとくに仮定する。hinge line によつて分けられる板の各部分の受け持つ荷重をそれぞれ $P_1 = k_1 P_c$, $P_2 = k_2 P_c$ および $P_3 = k_3 P_c$ とする。ただし P_c は崩壊時の集中荷重である。したがつて

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1 \quad (9)$$

三角形 AOB において辺 AB の周りのモーメント釣合, 台形 $AOED$ の辺 AD の周りの釣合並びに台形 $BOEC$ の辺 BC の周りの釣合より

$$P_c = \frac{2 M_p a}{k_1 (b - y_0)} = \frac{2 M_p b}{k_2 x_0} = \frac{2 M_p b}{k_3 (a - x_0)}$$

$$\text{ゆえに } k_2 = \frac{b - y_0}{x_0} \cdot \frac{b}{a} \cdot k_1 \quad (10)$$

$$\text{並びに } k_3 = \frac{b - y_0}{a - x_0} \cdot \frac{b}{a} \cdot k_1 \quad (11)$$

(10), (11) 式を (9) 式に代入すれば

$$k_1 = \frac{\beta^2}{\beta^2 + \frac{1-n}{m} + \frac{1-n}{1-m}} \quad (12)$$

ただし

$$\beta = a/b, \quad m = x_0/a, \quad n = y_0/b$$

である。したがつて

$$P_c = 2 M_p \left[\frac{\beta}{1-n} + \frac{1}{\beta m (1-m)} \right] \quad (13)$$

となる。例えば $m = n = 1/3$ とすれば

Fig. 3 Collapse Load for a Plate with Three Built-in Edges and One Free Edge Subjected to Concentrated Transverse Load

く。ただし $k_2 = 1 - k_1$ である。したがつて板の各部分に対する釣合より

$$p_c = \frac{4 M_p a}{(1-\xi)^2 b^2} = \frac{2 M_p b}{k_1 \xi b x_0} = \frac{2 M_p b}{(1-k_1) \xi b (a-x_0)} \quad (14)$$

したがつて $k_1 = 1 - m$ ただし $m = x_0/a$

$$\text{ゆえに } \frac{4 M_p a}{(1-\xi)^2 b^2} = \frac{2 M_p b}{(1-m) \xi b m a}$$

$$\text{あるいは } \xi^2 + 2m(1-m)\beta^2\xi - 1 = 0$$

$$\text{ゆえに } \xi = \sqrt{m^2(1-m)^2\beta^4 + 1} - m(1-m)\beta^2 \quad (15)$$

すなわち

$$\frac{p_c b}{M_p} = \frac{2}{m(1-m)\beta[\sqrt{m^2(1-m)^2\beta^4 + 1} - m(1-m)\beta^2]} \quad (16)$$

Fig. 2 Failure Mechanism for a Plate with Three Built-in Edges and One Free Edge Subjected to Concentrated Transverse Load at Point O.

$$\frac{P_c}{M_p} = 3 \left(\beta + \frac{3}{\beta} \right)$$

となり, $\beta = \sqrt{3}$ の時に最小値 $\frac{P_c}{M_p} = 6\sqrt{3}$ となる。また m, n および β を変えたときの崩壊荷重 P_c の最小値は $m = 1/2, n = 0, \beta = 2$ の場合に生じ, $\frac{P_c}{M_p} = 8$ となる。この $m = n = 1/3$ および $m = 1/2, n = 0$ の場合について β を変えれば第3図のごとくなる。

2.2 線状分布荷重を受ける三辺固定一辺自由の板

単位長さ当りの line load の大きさを p とすれば, 第4図の崩壊機構に対して三角形 ABF には単位長さ当り p の大きさの line load が作用するが, 台形 $AFED$ には $k_1 p$ が, また台形 $BFEC$ には $k_2 p$ が働

Fig. 4 Failure Mechanism for a Plate with Three Built-in Edges and One Free Edge Subjected to Line Load at x_0

ここに p_{cb} は板にかかる全荷重である。また line load の位置を表わす量 m について (16) 式を微分して崩壊荷重の最小値を求めれば、 $m=1/2$ すなわち中央で生じその値は

Fig. 5 Collapse Load for a Plate with Three Built-in Edges and One Free Edge Subjected to Line Load

$$\frac{p_{cb}}{M_p} = \frac{8}{\beta \left[\sqrt{\left(\frac{\beta^2}{4}\right)^2 + 1} - \frac{\beta^2}{4} \right]} \quad (17)$$

となり、更に β について微分すれば、

$$\beta = \frac{2}{4\sqrt{3}} = 1.52$$

のときに荷重は最小となり、その大きさは

$$\frac{p_{cb}}{M_p} = 9.122$$

となる。(17) 式を plot すれば第5図のごとくなる。

2.3 等分布荷重を受ける三辺固定一辺自由の板 第6図のごとき崩壊機構に対して

$$p_c = \frac{12 M_p}{b^2 \xi^2} = \frac{48 M_p}{(3-2\xi)a^2}$$

ゆえに $\xi = \frac{\beta}{4} (\sqrt{13} - \beta)$ ただし $\beta < \sqrt{13}$ (18)

すなわち $\frac{p_c a b}{M_p} = \frac{96}{\beta(\beta^2 - \sqrt{13}\beta + 6)}$ ただし $\beta < \sqrt{13}$ (19)

あるいは $\frac{p_c a b}{M_p} = \frac{16}{\beta}$ ただし $\beta > \sqrt{13}$ (20)

以上の結果をまとめて比較すると、3 辺固定 1 辺自由の板が、中央集中荷重、中央線状分布荷重ならびに等分布荷重を受ける場合の崩壊荷重はそれぞれ第7図に示すごとくなり、板の aspect ratio によつてその優劣が定まってくる。ただし集中荷重および線状分布荷重の場合には荷重点の周りに適当な補強を行ない、局所的な塑性変形の集中は起らないものとする。

Fig. 6 Failure Mechanism for a Plate with Three Built-in Edges and One Free Edge Subjected to Uniformly Distributed Transverse Load

3. Lower Bound による解法

静的許容応力場としての解すなわち lower bound はつぎの3つの条件を満足しなければならない。

- 1) 板の曲げに対する釣合方程式を満足する。すなわち

$$\frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} = -p \quad (21)$$

- 2) 境界条件を満足する。

- i) 単純支持の場合

$$x = \text{一定で } M_{xx} = 0 \quad \text{あるいは} \quad y = \text{一定で } M_{yy} = 0 \quad (22)$$

- ii) 固定の場合

$$x = \text{一定で } M_{xx} = -M_p \quad \text{あるいは} \quad y = \text{一定で } M_{yy} = -M_p \quad (23)$$

- iii) 自由の場合

$$x = \text{一定で } M_{xx} = M_{xy} = \frac{\partial M_{xx}}{\partial x} - 2 \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} = 0 \quad \text{あるいは} \quad y = \text{一定で } M_{yy} = M_{yx} = \frac{\partial M_{yy}}{\partial y} + 2 \frac{\partial M_{yx}}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

- 3) 板の上のいずれの点においても、曲げモーメントは塑性モーメント M_p を越えない。すなわち

$$|M| = \frac{1}{2} \left| (M_{xx} + M_{yy}) \pm \sqrt{(M_{xx} - M_{yy})^2 + 4 M_{xy}^2} \right| \leq M_p \quad (25)$$

以上のごとく釣合方程式、境界条件および塑性条件のいずれもがモーメントの項のみで表わされているのは塑性崩壊を生ずるときに撓みが不定になるためである。(25)式は不等式の形をとるために lower bound solution も upper bound と同じようにいく通りもの解が存在するが、真の崩壊荷重 p_c はそれらのうちの最大のものとして

Fig.7 Comparison of Failure Load for Plates under Various Types of Transverse Load

求められる。この uppermost lower bound を決定する解法は未だ確立されるに至っていないが、Prager²⁾あるいは Wood⁴⁾の解法を一般化することによって任意の境界条件に対する解をつぎのごとくにして求めることができる。

先ず無次元座標 $\xi = x/a$ および $\eta = y/b$ を用いてモーメント M_x, M_y, M_{xy} をつぎのごとく Taylor 展開する。

$$M_x = M_p \sum_{m=0}^{\infty} a_m \xi^m \quad (26)$$

$$M_y = M_p \sum_{n=0}^{\infty} b_n \eta^n \quad (27)$$

$$M_{xy} = M_p \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} c_{mn} \xi^m \eta^n \quad (28)$$

これらのモーメントの式を釣合方程式 (21) に代入すると

$$\frac{M_p}{a^2} \sum_{m=0}^{\infty} (m+2)(m+1) a_{m+2} \xi^{m+2} + 2 \frac{M_p}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (m+1)(n+1) c_{m+1, n+1} \xi^{m+1} \eta^{n+1}$$

$$+ \frac{M_p}{b^2} \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)b_{n+2}\eta^n = -p$$

したがって

$$\left. \begin{aligned} m=n=0 \text{ に対して} & \quad 2\frac{a_2}{\beta} + 2c_{11} + 2\beta b_2 = -\frac{pab}{M_p} \\ m \neq 0, n=0 \text{ に対して} & \quad (m+2)(m+1)\frac{a_{m+2}}{\beta} + 2(m+1)c_{m+1,1} + 2\beta b_2 = 0 \\ m=0, n \neq 0 \text{ に対して} & \quad 2\frac{a_2}{\beta} + 2(n+1)c_{1,n+1} + (n+2)(n+1)\beta b_{n+2} = 0 \\ m \neq 0, n \neq 0 \text{ に対して} & \quad 2(m+1)(n+1)c_{m+1,n+1} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

m, n の各々の値に対して係数を比較すると

$$c_{22} = c_{23} = c_{32} = \dots = 0$$

$$c_{12} = -\frac{1}{2} \left(\frac{a_2}{\beta} + 3\beta b_3 \right) \quad c_{21} = -\frac{1}{2} \left(3\frac{a_3}{\beta} + \beta b_2 \right)$$

$$c_{13} = -\frac{1}{3} \left(\frac{a_2}{\beta} + 6\beta b_4 \right) \quad c_{31} = -\frac{1}{3} \left(6\frac{a_4}{\beta} + \beta b_2 \right)$$

$$c_{14} = -\frac{1}{4} \left(\frac{a_2}{\beta} + 10\beta b_5 \right) \quad c_{41} = -\frac{1}{4} \left(10\frac{a_5}{\beta} + \beta b_2 \right)$$

.....

.....

今、境界条件が x 軸および y 軸に関して対称の場合を例にとれば、モーメント M_x 並びに M_y は原点を板の中央にとつた場合、偶関数で表わすことができる。したがって

$$\left. \begin{aligned} a_{2m+1} &= b_{2n+1} = 0 \\ \text{ゆえに} \quad M_x &= M_p(a_0 + a_2\xi^2 + a_4\xi^4 + \dots) \\ M_y &= M_p(b_0 + b_2\eta^2 + b_4\eta^4 + \dots) \\ M_{xy} &= M_p \left[c_{11}\xi\eta - \frac{1}{2}\beta b_2\xi^2\eta - \frac{1}{3} \left(6\frac{a_4}{\beta} + \beta b_2 \right) \xi^3\eta \dots \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2}\frac{a_2}{\beta}\xi\eta^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{a_2}{\beta} + 6\beta b_4 \right) \xi\eta^3 - \dots \right] \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

で表わせる。

3.1 周辺固定の板

(23) 式の境界条件を (30) 式に代入し、最大主モーメントの位置を求めると

$$\xi = \pm \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta^2 + 1}{\beta^2 - \beta + 2}}$$

となり、この点における塑性条件より

$$\left. \begin{aligned} M_x &= M_p \left(\frac{5}{13} - \frac{288}{13} \xi^4 - \dots \right) \\ M_y &= M_p \left(\frac{5}{13} - \frac{288}{13} \eta^4 - \dots \right) \\ M_{xy} &= M_p \left(-\frac{288}{13} \xi\eta + \frac{576}{13} \xi^3\eta + \frac{576}{13} \xi\eta^3 + \dots \right) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

となる。

正方形板 ($\beta=1$) に対しては

$$\xi = \eta = \pm \frac{1}{\sqrt{6}}$$

となり、(31) 式を (21) 式に代入して結局

$$\frac{p_0 a^2}{M_p} = 44.3$$

とな。 upper bound は $\frac{p_0 a^2}{M_p} = 48$ であるから upper bound と lower bound の比は 1.08 となりかなり近い

値となつている。また $\beta=2$ の矩形板の場合には $\xi=\pm\sqrt{\frac{5}{32}}$ で

$$\frac{p_c ab}{M_p} = 44.9$$

一方この場合の upper bound は

$$\frac{p_c ab}{M_p} = \frac{48\beta^3}{2+3\beta^2-2\sqrt{1+3\beta^2}} \quad (32)$$

で $\beta=2$ とおけば

$$\frac{p_c ab}{M_p} = 56.2$$

したがつて upper bound と lower bound の比は 1.26 となる。

3.2 二辺固定、二辺自由の板

$$\text{upper bound : } \frac{p_c ab}{M_p} = 16\beta$$

$$\text{lower bound : } \frac{p_c ab}{M_p} = 16\beta$$

となり、完全に一致する。またこの解は梁の解とも一致する。

3.3 周辺単純支持の板

$$\text{upper bound : } \frac{p_c ab}{M_p} = \frac{24\beta^3}{3\beta^2-2\sqrt{1+3\beta^2}+2}$$

$$\text{lower bound : } \frac{p_c ab}{M_p} = 8\left(1+\beta+\frac{1}{\beta}\right)$$

となり、正方形板に対しては両者とも 24 となり一致する。対称の境界条件を一般化した任意の境界条件に対する解は級数の項数を増やしないと精度が悪くなるが、正方形板について簡易計算を行なつた結果は第 1 表に示すごとくである。表からわかるように軸対称の境界条件の場合には upper bound と lower bound が一致するかあるいは非常に近い値を示すが、非対称の場合にはややその差が大きくなるのは級数の項数によるものと思われる。なお参考のために弾性解より一点の応力が降伏点に達した場合として得られる最大荷重を比較してみると固定端の效果に著しい差のあることが判る。すなわち弾性解では部材を多く使つて端を固めても単純支持の場合の 20.9 より小さい

TABLE 1 COEFFICIENT "α" FOR SQUARE PLATES UNDER UNIFORM LOAD

Type	Upper Bound	Lower Bound	Elastic Solution	Upper Bound Lower Bound
8	8	8.63	1.00
14.14	10	8.94	1.41
24	24	20.9	1.00
16	16		1.00
28.2	18		1.56
48	44.3	19.49	1.08
17.71	10	8.40	1.77
29.35	21.6	11.9	1.36
35.5	24	14.28	1.48
41.4	27.6		1.50
34.9	21		1.66

Note : $p = \alpha \frac{M_p}{a^2}$ || Simple Support ; | Free ; --- Clamped.

19.49 しか荷重を支えられないという矛盾があるが、塑性設計法では表より判るように境界条件より予想される強度の順番となつている。

4. 結 言

任意の境界条件を有する板に種々の垂直荷重が働く場合の塑性設計について upper bound および lower bound の両方から解を求め、従来の弾性設計と比較した結果塑性設計の合理性が明らかとなった。すなわち弾性設計に比して

- 1) 計算が著しく簡単である。
- 2) 境界条件に対応した最大荷重が得られる。

さらに従来の upper bound method より簡単な計算法を提案すると共に従来得られていなかった lower bound solution の幾つかが求められた。

Young⁵⁾ は両端固定の帯板について膜応力の影響を考慮した1次元解析を行なつて実験結果と比較し、よい結果を得ているが、更に6吋角の板に2本の支持梁を入れ、6吋、2吋すなわち aspect ratio が3の周辺固定の板について同じ解析法を用いて実験結果と比較している。(32) 式を Young の記号と合わせるためにつぎのごとくに変形すると、

$$p_0 = \frac{48\beta^2}{3\beta^2 + 2 - 2\sqrt{1 + 3\beta^2}} \cdot \frac{M_p}{b^2} \quad (33)$$

となり、 $\beta=3$ の場合には $p_0 = 23.5 \frac{M_p}{b^2}$ となる。一方膜応力を無視した場合の長さ b の帯板の崩壊荷重は $q_F = 16 \frac{M_p}{b^2}$ であるので、この両者の比 $p_0/q_F = 1.47$ に対して Young の実験値をよみとると、略々板厚程度の変形を生じていることがわかる。実験はこの p_0 の更に数倍の荷重まで破壊を生ずることなく行なわれており、耐水圧平板構造に対しては塑性設計における崩壊荷重あるいは更にそれより大きな荷重を基準にして安全率をとり板厚を決定することが可能であると思われる。

参 考 文 献

- 1) Drucker, D.C., Greenberg, H.J. and Prager, W. : Extended Limit Design Theorems for Structures and Continuous Media. Q. Appl. Math. Vol. 9, 1952.
- 2) Pell, W.H. and Prager, W. : Limit Design of Plates. Proc. 1st U.S. Congr. Appl. Mech. 1951.
- 3) Pell, W.H. : Limit Design of Plates ; The Upper Bound for the Safety Factor. Brown Univ. Tech. Report No. 66 1952.
- 4) Wood, R.H. : Studies in Composite Construction. Part II. National Building Studies Research Paper No. 22 1955.
- 5) Young, A.G. : Ship Plating Loaded Beyond the Elastic Limit. Trans. I.N.A. p. 143, 1959.
- 6) 楠田忠雄 : Corner Connection with Cutout. Fritz Lab. Report Lehigh Univ. Dec. 1957.
- 7) 楠田忠雄 : Limit Analysis of Plate Structures. C.E. 406 Report Lehigh Univ. July 1957.