厚板有限板スリット溶接継手の有効拘束度*

上田 幸雄**, 福田 敬二**, 金 裕哲**

Effective Restraint Intensities of a Slit in a Thick Finite Plate*

by Yukio Ueda**, Keiji Fukuda** and You Chul Kim**.

In this paper, a series of elastic analysis was conducted on the restraint intensity of a rectangular plate with a slit, changing only the plate thickness (keeping the throat thickness constant) and the distance from the center of plate thickness to that of throat thickness. Two types of loading conditions were used for the above analysis, which were (1) application of uniformly distributed loads along the slit and (2) imposition of uniform displacement, instead.

The main results are as follows.

- 1) If the ratio of the plate thickness to the throat thickness, h/h_w , is approximately smaller than 3.5, it may be considered that the plate thickness is entirely effective regardless of the type of groove. On the other hand, if the ratio is greater than the above (for thicker plate thickness), the restraint intensity is not in a simple proportion to its plate thickness, and converges to a certain limit. An expression of the correction factor η for the effectiveness of plate thickness is proposed.
- 2) If the first weld is laid deviated from the center of the plate thickness, the out-of-plane bending deformation is produced according to the magnitude of the eccentricity and the effective restraint intensity at the center of the plate thickness decreases. However, within the range of eccentricity $e=h'/(h/2)=2h'/h < 0.4$ (h' is the distance from the center of plate thickness to that of throat thickness), the influence of the eccentricity can be neglected. An expression of the correction factor η' for the effect of eccentricity is formulated.
- 3) If the one side angle of the practical groove is within 45 degrees, the influence of the groove form can be disregarded.
- 4) As very accurate correction factors η and η' were obtained, the effective restraint intensity in a slit weld joint of a finite rectangular thick plate can be calculated simply by multiplying these correction factors to the two dimensional restraint intensity on which the thickness of the base plate is entirely effective. Consequently, the effective restraint intensity can be obtained simply without performing three dimensional elastic analysis which requires a huge amount of computing time.

1. 緒 言

力学的観点から冷間割れの防止対策を立てるには、溶接によって生じる応力・ひずみが溶接施工前に予測できることが望ましい。この種の問題に対し、溶接による膨張・収縮が溶接線に沿って変化する2次元拘束状態の代表例として、スリット溶接継手の初層溶接を対象に一連の研究を行ってきている¹⁻⁴⁾。(1次元拘束状態の継手に対するこの種の問題は十分研究されている。)

2次元拘束状態における冷間割れの力学的指標として現在のところ拘束度を用いることが多い。拘束度 R は次のように定義することができる。すなわち、

$$R = p/\delta$$

ここに、

p : 単位溶接長当りの荷重 (kg/mm)

δ : 開先面に生じる変位 (mm)

ところで、上式の p および δ にどのような値を用いるかによって、拘束度の値は異なる。主として用いられているものに次の3つがある。

- 1) 実測の残留応力とこれを解放することによって生じるクイチガイを用いて計算する拘束度: R_a
- 2) 溶接金属に生じる残留応力がスリット縁に沿って一定となる場合を想定して計算する拘束度 (一定荷重に対する拘束度): R_p
- 3) クイチガイ量がスリット縁に沿って一定として計算する拘束度 (一定変位に対する拘束度): R_δ がある。

*原稿受付 昭和57年9月1日 (全国大会論文発表講演)

**正 員 大阪大学溶接工学研究所 Member, Welding Research Institute of Osaka University

これらに対し、溶接金属に生じる拘束応力、拘束ひずみ（弾性拘束ひずみ+塑性拘束ひずみ）を 2 次元拘束状態の厳しさを表す力学的指標と考え、これを基準として拘束度の力学的背景を明らかにするとともに、拘束度を簡明な力学的指標として用いる際の実用性と適用限界を明らかにした^{4,7)}。この結果、2 次元拘束状態に対する拘束度は、限られた条件の下ではあるが力学的指標として有効であることが明らかになった。

ところで近年、産業機械、压力容器等は大型し、同時に使用板厚の増大をもたらしている。厚板の初層溶接では母板の板厚に比べてのど厚は小さく、応力の生じない部分が継手の大部分を占めることになる。この場合、開先の板厚が全て有効に働くとは考え難い。このため、開先の板厚が全て有効であるとして求めた 2 次元拘束度をそのまま厚板の初層溶接における冷間割れの力学的指標として用いることはできず、母板の板厚に比べてのど厚が小さいことによる影響を検討する必要がある⁵⁾。

本論文では、前述の 3 つの拘束度の中で幾何学形状のみの関数として一意的に計算できる一定荷重および一定変位に対する拘束度のみに対象とし、有限要素法を用いて直接 3 次元弾性解析を行い解析結果からのど厚が小さいことの影響を検討する。有限要素法を用いた 3 次元弾性解析では開先を I 型としている。しかし、実施工では種々の開先があり、開先形状が拘束度に及ぼす影響をも検討する。さらに、初層溶接が板厚中心から偏心して置かれる場合を想定し、偏心距離が拘束度に及ぼす影響を検討する。これらの結果を基にして、有効拘束度（のど厚が小さいことの影響を考慮した拘束度）を簡単に計算する一般化した近似計算式を示す。これによって、今後膨大な計算時間と費用を要する 3 次元弾性解析する必要がなくなる。

2. 開先の板厚が全て有効に働く 2 次元拘束度

無限板に対する解析解とこれを有限板に修正するための有限要素解を重ね合わせることから、一定荷重、一定変位に対する拘束度 R_p , R_δ を精度よく求める解析法および高精度の近似計算式は既に示した¹⁾。4 章で結果を必要とするため、ここに再記する。

2.1 一定荷重に対する 2 次元拘束度

板幅: B , 板長: L とスリット長: l との比が $B/l \geq 1.8$, $L/l \geq 1.5$ を満たす寸法であれば、この種の拘束度は次式から簡単に精度よく計算できる。

$$1) R_p = (1 - \beta_p) R_p^\infty : \text{有限板の拘束度} \quad \dots\dots (1)$$

$$2) R_p = 2(1 - \beta_p) \frac{E}{\pi} \frac{h}{l} : \text{有限板の平均拘束度} \quad \dots\dots (2)$$

$$3) R_p^\infty = \frac{E}{2} \frac{h}{l} \frac{1}{\sqrt{1 - X^2}} \quad \dots\dots (3)$$

: 無限板の拘束度 (解析解)

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \beta_p &= 0.6 / (L/l)^n + 0.75 / (B/l)^{1.82} \\ n &= 5.8 / (B/l)^2 + 2.2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (4)$$

: 有限板への修正率

E : 縦弾性係数, h : 板厚, $X = 2x/l$

2.2 一定変位に対する 2 次元拘束度

この種の拘束度も上述と同様 $B/l \geq 1.8$, $L/l \geq 1.5$ を満たせば、次式から簡単に精度よく計算できる。

$$1) R_\delta = [1 - (1 - X^2)\beta_\delta] R_\delta^\infty : \text{有限板の拘束度} \quad \dots\dots (5)$$

2) この種の平均拘束度は、 R_δ をスリット長に沿って積分すると積分値は無限大となり計算できない。

$$3) R_\delta^\infty = \frac{E}{\pi} \frac{h}{l} \frac{1}{1 - X^2} : \text{無限板の拘束度 (解析解)} \quad \dots\dots (6)$$

ここに、

$$\beta_\delta = 2\beta_p : \text{有限板への修正率} \quad \dots\dots (7)$$

2.3 両拘束度の相関関係

有限板への修正率 β_p と β_δ との間には $B/l \geq 1.8$, $L/l \geq 1.5$ を満たす領域で、式 (7) に示すような関係がある。これを利用すると、一定荷重および一定変位に対する両拘束度の間には次式の関係が成立する。

$$\frac{R_p}{R_\delta} = \frac{\pi}{2} \frac{(1 - \beta_p)\sqrt{1 - X^2}}{1 - 2\beta_p(1 - X^2)} \quad \dots\dots (8)$$

上式を利用すると、一方の拘束度がわかれば他方の拘束度に簡単に変換できる。

有限板に対する両拘束度の相関関係 (式 (8)) を見ると、スリット中央ではその比が: $(\pi/2)[(1 - \beta_p)/(1 - 2\beta_p)]$ となるが、スリット縁に沿う分布は複雑である。しかし、式 (8) において有限板への修正率 β_p を零とかけば、無限板に対する両拘束度の相関関係が求まり、

$$\frac{R_p^\infty}{R_\delta^\infty} = \frac{\pi}{2} \sqrt{1 - X^2} \quad \dots\dots (9)$$

スリット中央で大きさ: $(\pi/2)$, スリット縁に沿う分布は: 楕円形となる。一方、一定荷重に対する拘束度 R_p は試験片寸法比: $B/l \geq 4$, $L/l \geq 3.5$, 一定変位に対する拘束度 R_δ は試験片寸法比: $B/l \geq 5$, $L/l \geq 4.5$ を満たせば、近似的に無限板とみなすことができる。このため、 $B/l \geq 5$, $L/l \geq 4.5$ を満たす領域では式 (9) が成立する。

3. 3 次元弾性解析による有効拘束度

有限要素法を用いて直接 3 次元弾性解析し、有効拘束度を求める。解析結果からのど厚の有効性を検討する。

3 次元解析に用いた解析モデルを Fig. 1 に示す。解析は、斜め Y 形溶接割れ試験片 ($B=150$, $L=200$, $l=80$ (mm)) を対象に、のど厚 $h_w=5$ mm 一定として母板の

Fig. 1 Slit weld specimen of thick plate

板厚 $h=30, 50, 100$ (mm) と変化させて行った。

ここでは、初層溶接が板厚中心に置かれているものとする。このため、解析対象は x, y, z 軸に関して 3 軸対称となるので、全体の 1/8 部分に対して解析を行った。

3.1 一定荷重に対する有効拘束度: $(R_p)_\eta$

荷重条件として、のど厚部分のみにスリット縁に沿って一定応力 P_0 (kg/mm²) を負荷した。のど厚部分に生じるクイチガイ量 $\delta_s(z)$ を 3 次元弾性解析から求め、次式から有効拘束度 $(R_p)_\eta$ を計算した。

$$(R_p)_\eta = P_0 h_w \left/ \frac{1}{h_w} \int_{-h_w/2}^{h_w/2} \delta_s(z) dz \right. \quad \dots\dots (10)$$

板厚 h が $h=30$ mm および 50 mm に対する有効拘束度のスリット縁に沿う解析結果を実線で Fig. 2 に示す。また、破線は開先の板厚が全て有効であるとした 2

Fig. 2 Distribution of effective restraint intensities along slit (uniformly distributed loads)

次元拘束度 R_p であり、式 (1) から計算したものである。

3.2 一定変位に対する有効拘束度: $(R_\delta)_\eta$

この場合の荷重条件として、厚板ののど厚部分のみに一定変位 δ_0 を負荷した。従来の定義によれば、有効拘束度 $(R_\delta)_\eta$ はこのような荷重条件によってのど厚部に生じる応力 $\sigma_s(z)$ を 3 次元弾性解析から求め、これを用いて次式から計算することになる。

$$(R_\delta)_\eta = \frac{1}{h_w} \int_{-h_w/2}^{h_w/2} \sigma_s(z) dz \cdot h_w / \delta_0 \quad \dots\dots (11)$$

ところで、この荷重条件によってのど厚部分に生じる応力 σ_s を弾性学における精密な計算をして求めると、のど厚の上下面 ($z = \pm h_w/2$) で無限大 ($\sigma_s(\pm h_w/2) = \infty$) となり⁶⁾、一定変位に対する拘束度は計算できないことがわかる。これに対して、有限要素法を用いた計算ではのど厚部分に生じる反力が節点反力 F_i として計算できるので、のど厚に生じる応力の積分値は有限値として求められることになる。これを 3 次元弾性解析から求め次式から有効拘束度 $(R_\delta)_\eta$ を計算した。

$$(R_\delta)_\eta = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k F_k / \delta_0 \quad \dots\dots (12)$$

板厚 $h=30$ mm および 50 mm に対する有効拘束度のスリット縁に沿う分布を実線で Fig. 3 に示す。また、破線は式 (5) から計算した 2 次元拘束度 R_δ である。いずれの場合もスリット端では無限大となる。

Fig. 3 Distribution of effective restraint intensities along slit (uniform dislocation)

以上のように、母板の板厚に比べてのど厚が小さい場合、開先の板厚が全て有効でなく拘束度はかなり低下する。このため、厚板の初層溶接を対象とする場合にはのど厚の効果に対する修正が必要であり、その方法については次章で述べる。

4. のど厚の効果に対する修正係数の提案

母板の板厚に比べてのど厚が小さい場合、拘束度はかなり低下する。ここでは、文献¹⁾で示した1次元拘束状態の継手 (Fig. 6) に対して解析的に導出したのど厚の効果に対する修正係数 η が、2次元拘束状態の有効拘束度を求める際にも有効であることを示し、その実用性を示す。

上述の修正係数 η と2次元拘束度: R_p (式 (1)), R_δ (式 (5)) とを組み合わせることで次式から有効拘束度: $(R_p)_\eta$, $(R_\delta)_\eta$ を求めることにする。

$$(R_p)_\eta = \eta R_p \quad \dots\dots (13)$$

: 一定荷重に対する有限板の有効拘束度

$$(R_\delta)_\eta = \eta R_\delta \quad \dots\dots (14)$$

: 一定変位に対する有限板の有効拘束度

ここに、

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{h}{B} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8}{m\pi} \left(\frac{\sin m\pi h_w/h}{m\pi h_w/h} \right)^2 \frac{\sinh^2 m\pi B/h}{\sinh 2m\pi B/h}} \quad \dots\dots (15)$$

: のど厚の効果に対する修正係数

式 (13), 式 (14) から計算した有効拘束度の計算結果を一点鎖線で Fig. 2, Fig. 3 に示す。これによれば、式 (13) は一定荷重に対する有効拘束度をよい精度で与える (Fig. 2) が、式 (14) から計算する一定変位に対する有効拘束度はスリット端部側で過大評価することになる (Fig. 3)。しかし、膨大な計算時間と費用を要する3次元解析を実行することを考えるならば式 (14) の実用性は低い。

また、一定応力を負荷したときのスリット縁に沿う平均有効拘束度 $(R_p)_\eta$ は次式から計算する。

$$(R_p)_\eta = 2\eta(1-\beta_p) \frac{E}{\pi} \frac{h}{l} \quad \dots\dots (16)$$

: 一定荷重に対する有限板の平均有効拘束度

式 (16) から計算した平均有効拘束度を実線で、3次元弾性解析結果を「●」印で Fig. 4 に示す。図中の一点鎖線は式 (16) の $\eta=1$ とした場合；すなわち、開先の板厚が全て有効に働くとした場合の2次元平均拘束度 R_p (式 (2)) である。

母板の板厚 h とのど厚 h_w との比: h/h_w の増加に伴い、有効拘束度は単調に増加して一定値に収束する (Fig. 4)。また、 h/h_w が3.5以下 ($h/h_w < 3.5$) であれば、開先の板厚が全て有効に作用すると考えることがで

Fig. 4 Effect of plate thickness on $(R_p)_\eta$

きる。

h/h_w の増加に対し、式 (15) から計算したのど厚の効果に対する修正係数 η を実線で Fig. 5 に示す。図中の「●」印は3次元弾性解析結果である。式 (15) の修正係数 η は2次元拘束状態に対してのど厚の効果をよく表している。

Fig. 5 Correction factor: η for throat thickness

5. 開先形状および板厚中心からの偏心による影響

3次元弾性解析では開先形状をI形とした。しかし、実施工では各種形態の開先が用いられる。ここでは、開先形状が有効拘束度におよぼす影響および初層溶接が板厚中心より偏心している場合を想定し、偏心距離が有効拘束度におよぼす影響を検討する。

5.1 開先形状の影響

開先形状が有効拘束度におよぼす影響を明らかにするため、先に述べたのど厚の効果に対する修正係数 η を

導出した際に用いた1次元拘束状態の継手に生じる応力分布を基に考察する (Fig. 6).

Fig. 6 Model for analysis of correction factor: η

板端部のど厚部分にのみ一定応力 P_0 を負荷した場合 (Fig. 6(b)), 板の任意の位置 (x, y) に応力が生じる。生じる応力をフーリエ級数を用いて解析的に導出し、文献¹⁾の付録に結果を示している。これらの応力を用いて主応力を計算し、結果を Fig. 7 に示す。また、図中の実線は荷重方向 (x 軸) 応力 σ_x の等応力線である。主たる応力はど厚の上下面から45度方向に伝播していることがわかる。したがって、実用開先 θ が片側45度より小さければ ($\theta < 45^\circ$), この領域に生じる応力は小さく、開先のない場合に比べてほとんど有効拘束度を低下させることはないと考えられる。実際この種の継手に対して、開先角度 θ を種々変化させて有限要素法による2次元弾性解析を行うと、開先角 θ が45度以内であれば開先をI形とした場合の有効拘束度を最大3%低下させるにすぎなかった。

これに対し、厚板のスリット溶接ではど厚部は3軸

Fig. 7 Isostress lines and principle stresses

応力状態となっており、上述の2次元応力状態と異なり応力分布は複雑となるが、現象的には大差ないと考えられる。このため、実用開先線が片側45度以内 ($\theta < 45^\circ$) であれば、板厚中心に対する有効拘束度をさらに低下させることはないと考えてよさそうである。

5.2 板厚中心からの偏心の影響

初層溶接が板厚中心から偏心している場合を想定し、偏心距離が有効拘束度におよぼす影響を3次元弾性解析結果から検討する。

解析は、斜めY形溶接割れ試験片の板厚 $h = 50$ mm, のど厚 $h_w = 5$ mm 一定として、母板の板厚中心からのど厚中心までの距離 h' を $h' = 0, 7.5, 15.0, 22.5$ (mm) と変化させて行った。実際の解析では、 x, y に関して2軸対称となっているので試験片全体の1/4に対して行った。荷重条件はど厚 h_w 部分のみに一定応力 P_0 を負荷した。解析結果を Fig. 8 に示す。

Fig. 8 Effects of eccentricity on effective restraint intensity

偏心距離 h' が大きくなるにしたがって面外曲げ変形が大きくなり、有効拘束度は偏心なしの場合に比べてさらに低下する。しかし、スリット縁に沿う分布形状はほとんど変化しない。

上述の計算結果をもとに、母板の板厚中心からのど厚中心までの偏心距離 h' が有効拘束度におよぼす影響、すなわち、板厚中心からの偏心率 $e (= 2h'/h)$ に対する修正係数 η' を Fig. 9 に「●」印で示す。

偏心率 e が0.4以下 ($e < 0.4$) では、初層溶接が板厚中心に置かれた場合の有効拘束度と大差ない。しかし、 $e = 0.9$ (最上部) の場合、板厚中心に対する有効拘束度をさらに50%程度低下させる。

偏心による修正係数 η' の定量的評価を容易にするため次式に示すように定式化した。

Fig. 9 Correction factor: η' for effect of eccentricity

$$\eta' = 1 - 0.61(2h'/h)^{2.1145} \quad \dots\dots (17)$$

6. 一般化した有効拘束度の近似計算式の提案

厚板スリット溶接継手の初層溶接に対する冷間割れの力学的指標として拘束度を用いる際、開先の板厚が全て有効に働くとして計算した 2 次元拘束度をそのまま用いることはできず、

1) 母板の板厚に比べてのど厚が小さいことの影響

2) 母板の板厚中心からの偏心の影響

を 3 次元弾性解析結果から明らかにすると共に、これらに対する修正係数 η および η' の有効性とその実用性を示した。

これらの結果から、厚板有限板スリット溶接継手に対するより一般化した有効拘束度を簡単に求めるための近似計算式を示す。これにより、膨大な計算時間と費用を要する 3 次元弾性解析を行う必要がなくなる。

(1) 一般化した一定荷重に対する有限板の有効拘束度

$$(\bar{R}_p)_\eta = \eta' \eta R_p \quad \dots\dots (18)$$

(2) 一般化した一定変位に対する有限板の有効拘束度

$$(\bar{R}_s)_\eta = \eta' \eta R_s \quad \dots\dots (19)$$

(3). 一般化した一定荷重に対する有限板の平均有効拘束度

$$(\bar{R}_p)_\eta = 2 \eta' \eta (1 - \beta_p) \frac{E}{\pi} \frac{h}{l} \quad \dots\dots (20)$$

7. 結 言

本論文では、厚板の初層溶接における冷間割れの力学

的指標として限られた条件の下ではあるがその簡明さから実用的である拘束度を取りあげ、一連の理論解析を行った。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 3 次元弾性解析結果によれば、母板の板厚に比べてのど厚が小さい場合、拘束度は単純に母板の板厚に比例することなく単調に増加し、一定値に収束する。この傾向の中で、母板の板厚 h に対するのど厚 h_w 比: $h/h_w < 3.5$ であれば、のど厚が小さいことの影響は無視できる。しかし、 h/h_w が 3.5 より大きくなると、母板の板厚が全て有効に働くとして計算した拘束度をのど厚の効果を考慮して修正する必要がある。

(2) のど厚の効果に対する修正係数として、1 次元拘束状態の継手に対して解析的に導出した修正係数 η を適用しても精度が高いことを示した。

(3) 開先形状が有効拘束度におよぼす影響を考察した結果、実用開先線が片側 45 度以内であれば開先形状の影響は無視できる。

(4) 初層溶接が板厚中心から偏心している場合、偏心率 $e(=2h'/h)$ が大きくなるにしたがって面外曲げ変形が大きくなり、板厚中心に対して求めた有効拘束度をさらに低下させる。しかし、板厚中心からの偏心率 $e < 0.4$ であれば偏心なしとして求めた有効拘束度と近似的に等しく、偏心による影響は無視できる。また、偏心率に対する修正係数 η' を定式化した。

(5) 厚板スリット溶接継手に対するより一般的な有限板の有効拘束度を簡単に計算する計算式を示した。これにより、膨大な計算時間と費用を要する 3 次元解析を行うことなく、有効拘束度が簡単に計算できる。一定荷重に対する有効拘束度は特に精度がよい。

最後に、本研究は大阪大学造船学科 妙中隆之氏の卒業研究の一部として行われたことを付記し、同君の労に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 上田, 福田, 金: スリット溶接継手の拘束度, 本誌, 48-10 (1979), 851-858
- 2) 上田, 福田, 劉: スリット溶接による残留応力の発生機構に関する研究, 本誌, 44-7 (1975), 580-587
- 3) 上田, 福田, 金: スリット溶接の拘束応力・拘束ひずみの解析的計算法, 本誌, 50-9 (1981), 930-937
- 4) 上田, 福田, 金, 古木: スリット溶接継手に生じる拘束応力・拘束ひずみの一般特性および拘束度の力学的指標としての意義, 本誌, 51-8 (1982), 636-643
- 5) 堀川他: 大型溶接構造物の溶接割れに関する研究(その 2), JSSC, 11-114 (1975), 24-28
- 6) 例えば Timoshenko and Goodier: Theory of Elasticity, Third Edition, 104-109
- 7) 上田, 福田, 金: 任意板厚の斜め Y 形溶接割れ試験片の力学的特性, 本誌, 51-8 (1982), 644-650