K5-32

スポット溶接構造の公称構造応力算出法による感度解析
−板厚に関する感度解析−
Sensitivity Analysis using Method of Calculating Nominal Structural Stress of spot welded Structure
-The sensitivity analysis of thickness-

○半田武弘[1], 岡部顕史[2], 冨岡昇[2]
*Takehiro Handa[1], Akifumi Okabe[2], Noboru Tomioka[2]

Abstract: The nominal structural stress (NSS) is one of the key parameters of the fatigue life prediction of spot weld. This NSS means the maximum principal stress. In the sensitivity analysis of NSS for the thickness, it was understood that it is necessary to consider the differential value of the displacement around the nugget deformed by the thickness. The sensitivity analysis method of NSS for the thickness was proposed in this study, it was shown that the sensitivity of NSS for the thickness could be accurately obtained.

1.　緒言

近年の自動車生産では，グローバル化により現地資材などの活用をともなうため，安定した品質の確保が重要である．スポット溶接は車体の大部分で用いられる締結要素であり，不具合の発生が多いことから，スポット溶接部の安定した耐久性を確保することは重要である．このためには，スポット溶接部の疲労強度を支配する因子のばらつきによる影響を把握することが求められる．

公称構造応力の感度解析については，固定円板の板理論による解析の報告があるが，これでは，スポット溶接構造の感度が必ずしも正しく得られないことが分かった．これは円板の外周の変位を完全に固定していることに起因している．

本研究では，スポット溶接部の疲労強度の感度因子である板厚を対象とし，公称構造応力の感度解析手法を提案する．本手法は板厚の変化によって発生する円板外周の変位(境界変位)の変化量(微分値)を円板の板理論から算出し，境界変位微分項として感度解析を行う手法である．

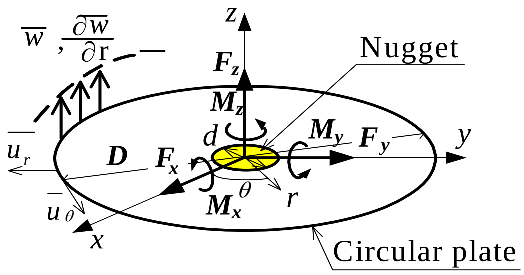
2.　公称構造応力算出法

公称構造応力算出法はナゲットを中心として描いた任意直径 D の円形部を，これと同じ寸法・材質の円板に置き換えて，弾性学の板理論を用いて応力解析し，高精度な応力解を得ようとするものである．実用的な FE モデルを作成し，解析の結果から得られたナゲット中心に位置する節点の節点力 6 成分（これを分担荷重と呼ぶ）とその周辺の変位を荷重条件と変位境界条件として用いる（図 1）．

$$\sigma_m = \sum_{i=1}^{3} A_{mi}^{in}(r,\theta,d)\frac{P_i^{in}}{t} + \sum_{j=1}^{3} A_{mj}^{out}(r,\theta,d)\frac{P_j^{out}}{t^2} + \sum_{k=1}^{2} B_{mk}^{in}(r,\theta,d)\overline{u_k^{in}} + \sum_{l=1}^{2} B_{ml}^{out}(r,\theta,d)\overline{u_l^{out}} \quad (m=1,2,3) \tag{1}$$

$$u_k^{in} = \sum_{i=1}^{3} C_{ki}^{in}(r,\theta,d)\frac{P_i^{in}}{t} + \sum_{j=1}^{2} D_{kj}^{in}(r,\theta,d)\overline{u_j^{in}} \quad (k=1,2) \tag{2}$$

$$u_k^{out} = \sum_{i=1}^{3} C_{ki}^{out}(r,\theta,d)\frac{P_i^{out}}{t^3} + \sum_{j=1}^{2} D_{kj}^{out}(r,\theta,d)\overline{u_j^{out}} \quad (k=1,2) \tag{3}$$



In-plane loads　P_i^{in} : F_x , F_y , M_z
Out-of-plane loads　P_i^{out} : F_z , M_x , M_y
In-plane displacements　$\overline{u_i^{in}}$: $\overline{u_r}$, $\overline{u_\theta}$
Out-of-plane displacements　$\overline{u_i^{out}}$: $\overline{w}$, $\overline{\partial w / \partial r}$

Fig.1 Circular plate under given general loads and displacement boundary conditions

3.　公称構造応力算出法による板厚の感度解析

σ_{ns} の板厚 t が微小量 dt だけ変化したときの変化量を基準値に対する割合で表し，

$$\frac{d\sigma_{ns}}{\sigma_{ns}} = \left(\frac{\partial \sigma_{ns}}{\partial t}\Big/\sigma_{ns}\right)dt = \frac{\partial \sigma_{ns}}{\partial t}\frac{t}{\sigma_{ns}}\frac{dt}{t} = S_t\frac{dt}{t} \tag{4}$$

S_t を板厚 t の感度とする．

$$S_t = \frac{\partial \sigma_{ns}}{\partial t}\frac{t}{\sigma_{ns}} \tag{5}$$

主応力 p_1, p_2 は,

$$p_1, p_2 = \frac{1}{2}\left[(\sigma_r + \sigma_\theta) \pm \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{r\theta}^2}\right] \tag{6}$$

で与えられる．この主応力の最大値が公称構造応力 σ_{ns} であるので，公称構造応力 σ_{ns} の板厚 t による微分値は,

$$\frac{\partial \sigma_{ns}}{\partial t} = \frac{\partial p_i}{\partial t} = \frac{\partial p_i}{\partial \sigma_r}\frac{\partial \sigma_r}{\partial t} + \frac{\partial p_i}{\partial \sigma_\theta}\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial t} + \frac{\partial p_i}{\partial \tau_{r\theta}}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial t} \quad (i=1,2) \tag{7}$$

となる．

1：日大理工・院（前）・機械　2：日本理工・教員・機械

いま, 変位式(2)と(3)において, 境界変位$\overline{u_j^{in}}=\overline{u_j^{out}}=0$とし，板厚 t で微分すると

$$\frac{\partial u_k^{in}}{\partial t}=\left(-\frac{1}{t}\right)\sum_{i=1}^{3}C_{ki}^{in}(r,\theta,d)\frac{P_i^{in}}{t}=\left(-\frac{1}{t}\right)u_k^{in}\quad (k=1,2) \tag{8}$$

$$\frac{\partial u_k^{out}}{\partial t}=\left(-\frac{3}{t}\right)\sum_{i=1}^{3}C_{ki}^{out}(r,\theta,d)\frac{P_i^{out}}{t^3}=\left(-\frac{3}{t}\right)u_k^{out}\quad (k=1,2) \tag{9}$$

となる．式(8)(9)に $r=D/2$ を代入すると，これらは境界変位の微分値を与える．すなわち，境界変位の微分値は,

$$\frac{\partial\overline{u_j^{in}}}{\partial t}=\left(-\frac{1}{t}\right)\overline{u_j^{in}},\quad \frac{\partial\overline{u_j^{out}}}{\partial t}=\left(-\frac{3}{t}\right)\overline{u_j^{out}}\quad (k=1,2) \tag{10}$$

となり, 境界変位に－1/ t または－3/ t を乗ずることで得られる．このことは変位式(2)と(3)の境界変位$\overline{u_j^{in}}=\overline{u_j^{out}}\neq 0$ のときにも成り立つ.

式(1)を t で微分したものに式(10)を代入すると

$$\begin{aligned}\frac{\partial\sigma_m}{\partial t}=&\sum_{i=1}^{3}\left[A_{mi}^{in}(r,\theta,d)\left\{\left(-\frac{1}{t}\right)\frac{P_i^{in}}{t}\right\}\right]\\&+\sum_{j=1}^{3}\left[A_{mj}^{out}(r,\theta,d)\left\{\left(-\frac{2}{t}\right)\frac{P_j^{out}}{t^2}+\frac{1}{t^2}\frac{\partial P_j^{out}}{\partial t}\right\}\right]\\&+\sum_{k=1}^{2}\left[\frac{\partial B_{mk}^{in}(r,\theta,d)}{\partial t}+B_{mk}^{in}(r,\theta,d)\left(-\frac{1}{t}\right)\right]\overline{u_k^{in}}\\&+\sum_{l=1}^{2}\left[\frac{\partial B_{ml}^{out}(r,\theta,d)}{\partial t}+B_{ml}^{out}(r,\theta,d)\left(-\frac{3}{t}\right)\right]\overline{u_l^{out}}\\&(m=1,2,3)\end{aligned} \tag{11}$$

となる．FE 解析で得られた分担荷重とナゲット周辺の変位を荷重条件と境界条件として用いると，円板の板理論による応力解析から，応力成分の板厚 t による微分値は応力成分とともに得られる．

式(6)(7)(11)を式(5)に代入することで、板厚の感度が得られる.

4.　解析例

本手法は，板理論により境界変位の微分値を求め，感度を算出する手法である．本手法の解の精度を検討するために，以下のよう，FE 解析より感度を求めた．

1) 板厚を微小に変化させた FE モデルを複数作成し, FE 解析を行い, 公称構造応力算出法から公称構造応力(NSS)値を求める．
2) 1)で得られた板厚の変化に対する NSS 値から近似曲線を求め, この近似曲線を微分することにより, 感度 St を求める．

図 2 に TS 継手を示す. TS 継手については板厚を 0.6～1.6 ㎜まで 0.2 ㎜おき変化させて感度を求めた．表 1 は TS 継手の感度を示す．本手法で求めた感度は，どの板厚においても FE 解析から得られた感度とよい一致を示した．

図 3 に LP モデルを示す．LP モデルについては剥離荷重，せん断荷重をそれぞれ作用させ，板厚が 0.8，1.0 ㎜のときの感度を求めた. 表 2 は LP モデルの感度を示す．本手法で求めた感度は，TS 継ぎ手同様に，FE 解析から得られた感度とよい一致を示した．

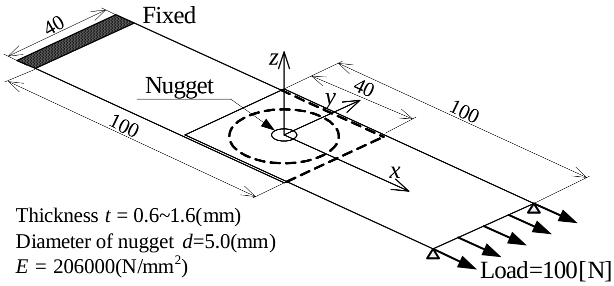


Fig. 2 TS model

Table 1 Sensitivity of TS model

t [mm]	NSS [MPa]	St [-]	
		Proposed method	FEM
0.6	65.0	-1.07	-0.92
0.8	48.8	-1.07	-1.01
1.0	39.0	-1.07	-1.00
1.2	32.5	-1.07	-1.00
1.4	27.9	-1.07	-1.00
1.6	24.4	-1.07	-1.02

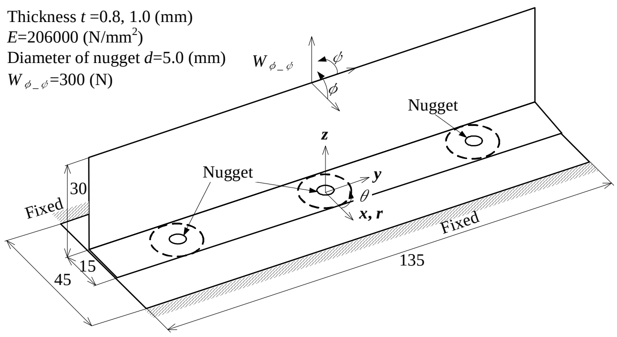


Fig. 3 LP model

Table 2 Sensitivity of LP model

Load $W_{\phi\text{-}\psi}$	t [mm]	NSS [MPa]	St [-]	
			Proposed method	FEM
$W_{90\text{-}90}$	0.8	637.7	-2.01	-2.04
	1.0	405.4	-2.01	-2.03
$W_{90\text{-}0}$	0.8	32.8	-0.91	-1.11
	1.0	25.5	-0.89	-1.06

5.　結言

公称構造応力算出法を用いて板厚の感度を求める手法を提案し，本方法により十分な精度で感度を得ることができる可能性を示した．

参考文献省略