

公称構造応力算出法を用いたスポット溶接の感度解析

-ナゲット径に関する感度-

The Sensitivity Analysis of Spot Welding using Method for Calculating Nominal Structural

- Sensitivity about the diameter of a nugget -

○高須健史¹, 富岡昇², 岡部顕史²

*Takeshi Takasu¹, Noboru Tomioka², Akifumi Okabe²

In this study, the sensitivity of the nugget diameter to a nominal structural stress in the spot weld was analyzed, and the fatigue testing in the components of the each general loads was executed. The main results were as follow. The sensitivity of the nugget diameter changed by the general load components, and it was the minimum in the peeling. As a result of the fatigue testing, the peeling has decreased than the tensile shear load as for the influence of the nugget diameter on fatigue strength.

1. 緒言

スポット溶接は車体構造の多くの部位で用いられている重要な締結要素であり、車体構造全体の耐久性はスポット溶接部の耐久性に大きく依存している。板厚やナゲット径など幾何学的寸法のばらつきに対してロバストなスポット溶接構造設計が望まれるが、それにはばらつき要因が疲労強度に及ぼす影響を明らかにすることが求められる。

本研究では、スポット溶接部の疲労強度評価パラメータのひとつである公称構造応力に対して、ナゲット径の感度解析法を提案し、各分担荷重成分の感度を明らかにした。次に、各分担荷重成分を実現するスポット溶接継手試験片を製作して疲労試験を実施し、感度解析による知見を検証した。

2. 公称構造応力に対するナゲット径の感度解析

2. 1. 公称構造応力算出法

公称構造応力算出法の概要を図 1 に示す。この手法はナゲットを中心として描いた任意直径 D の円部を、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。

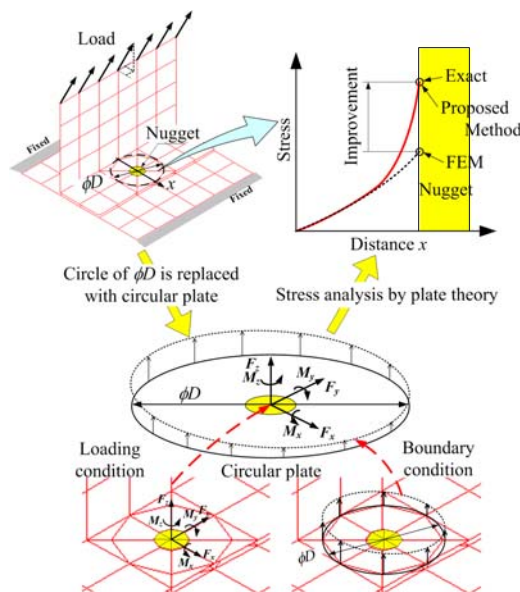


Fig1. Method of calculating nominal structural stress

実用的な FE モデルを作成し、解析の結果得られたナゲット中心に位置する節点の節点力 6 成分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。

応力成分と変位成分は次式のように分担荷重 P_i^{in} , P_i^{out} と境界変位 u_i^{in} , u_i^{out} の関数となる (in : 面内, out : 面外). 板面内の荷重 F_x, F_y, M_z に対しては平面応力問題, 面外荷重 F_z, M_x, M_y に対しては曲げ問題として扱い、応力と変位を求めることができる。

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

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

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

ここで、式 (1) ~ (3) の応力と変位は、

$$\sigma_1 = \sigma_r, \quad \sigma_2 = \sigma_\theta, \quad \sigma_3 = \tau_{r\theta}$$

$$u_1^{in} = u_r, \quad u_2^{in} = u_\theta, \quad u_1^{out} = w, \quad u_2^{out} = \frac{\partial w}{\partial r}$$

を表す。

2. 2. ナゲット径の感度

ナゲット径 d が微小量 dd だけ変化したとき、公称構造応力 σ_{ns} の変化量 $d\sigma_{ns}$ は、

$$d\sigma_{ns} = \frac{\partial \sigma_{ns}}{\partial d} dd$$

で与えられる。 σ_{ns} のナゲット径 d による微分値がナゲット径の感度であるが、ここでは次式のように変化量を基準量に対する割合で表し、

$$\frac{d\sigma_{ns}}{\sigma_{ns}} = \frac{\partial \sigma_{ns}}{\partial d} \frac{d}{\sigma_{ns}} \frac{dd}{d} = S_d \frac{dd}{d}$$

S_d をナゲット径 d の感度とする。

式 (1) の応力成分をナゲット径 d で微分すると,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_m}{\partial d} = & \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial A_m^i(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial A_m^i(r, \theta, d)}{\partial r} \right] \frac{P_i^{in}}{t} \\ & + \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial A_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial A_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial r} \right] \frac{P_j^{out}}{t^2} \\ & + \sum_{k=1}^2 \left[\left\{ \frac{\partial B_m^{in}(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial B_m^{in}(r, \theta, d)}{\partial r} \right\} u_k^{in} + B_m^{in}(r, \theta, d) \frac{\partial u_k^{in}}{\partial d} \right] \\ & + \sum_{l=1}^2 \left[\left\{ \frac{\partial B_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial B_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial r} \right\} u_l^{out} + B_m^{out}(r, \theta, d) \frac{\partial u_l^{out}}{\partial d} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$(m=1,2,3)$

となる.

式 (6) の右辺には境界変位 $\overline{u}_0^{in} = \overline{u}_j^{out}$ の d による微分項が含まれる. FE 計算結果から得られた分担荷重と境界変位が与えられた円板において, 直径 D の円周上の境界変位の値を一定に保持した状態で, ナゲット径を微小量変化させて任意直径 D' ($D' < D$) 上の変位を求め, 微分項の値を近似的に求めることにする. ナゲット径が d のときの直径 D' 上の変位を u_{ϕ} , ナゲット径を Δd と微小量変化させたときの変位を $u_{\phi+\Delta d}$ とし, 微分値を次のように近似的に求める (図 2).

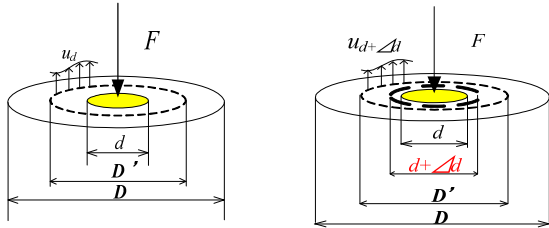


Fig2. Boundary displacements on circle D'

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_{k,r=D'/2}^{in}}{\partial d} &= \frac{(u_{k,r=D'/2}^{in} + \Delta u_{k,r=D'/2}^{in}) - u_{k,r=D'/2}^{in}}{\Delta d} = \frac{\Delta u_{k,r=D'/2}^{in}}{\Delta d} \\ \frac{\partial u_{k,r=D'/2}^{out}}{\partial d} &= \frac{(u_{k,r=D'/2}^{out} + \Delta u_{k,r=D'/2}^{out}) - u_{k,r=D'/2}^{out}}{\Delta d} = \frac{\Delta u_{k,r=D'/2}^{out}}{\Delta d} \end{aligned} \quad (7)$$

これらを式 (6) に代入すると, ナゲット径による応力の微分値は

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_m}{\partial d} = & \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial A_m^i(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial A_m^i(r, \theta, d)}{\partial r} \right] \frac{P_i^{in}}{t} \\ & + \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\partial A_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial A_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial r} \right] \frac{P_j^{out}}{t^2} \\ & + \sum_{k=1}^2 \left[\left\{ \frac{\partial B_m^{in}(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial B_m^{in}(r, \theta, d)}{\partial r} \right\} u_{k,r=D'/2}^{in} + B_m^{in}(r, \theta, d) \frac{\Delta u_{k,r=D'/2}^{in}}{\Delta d} \right] \\ & + \sum_{l=1}^2 \left[\left\{ \frac{\partial B_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial d} + \frac{1}{2} \frac{\partial B_m^{out}(r, \theta, d)}{\partial r} \right\} u_{l,r=D'/2}^{out} + B_m^{out}(r, \theta, d) \frac{\Delta u_{l,r=D'/2}^{out}}{\Delta d} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$(m=1,2,3)$

$r=D'/2$ の変位

$$u_{k,r=D'/2}^{in}, \quad u_{k,r=D'/2}^{out} \quad (9)$$

と式 (7) の変位の微分値を境界変位条件, 分担荷重を荷重条件として与え, 直径 D' の円板について板理論を用いた応力解析を行うことで, ナゲット径の感度が得られる.

3. 実験結果

3. 1. 試験概要

感度解析の結果, ナゲットに作用する分担荷重によってナゲット径の感度が異なることが分かった. そこで, スポット溶接部に曲げモーメント・はく離荷重がそれぞれ主として働く試験片を作成し疲労試験を実施し, せん断と曲げモーメントが支配的となる引張せん断継手と比較した. 供試材料は冷延圧延鋼板 SPCE で, 板厚は 1.0 mm である.

スポット溶接に用いた電極は C 型で, ナゲット径の違いを見るためにその電極先端部の直径 ϕd を 4.6, 8mm

と変えた. スポット溶接条件は軟鋼板 1mm の標準スポット溶接条件を基準とし, 圧痕部に生じる圧縮応力が一定となるように電極先端径に応じ加圧力を調整した. 疲労試験は荷重制御で行い, 完全片振り ($R=0.02$) とした. 疲労寿命は疲労き裂がナゲット端の内部から発生し板外表面に現れ, ナゲット径程度に成長した時とした.

3. 2. 疲労試験

全ての試験においてナゲット径が大きくなるにつれて疲労寿命は長くなり, スポット溶接継手の疲労強度がナゲット径の大きさに強く依存することが分かった.

この疲労試験結果を下に荷重, 破断回数を両対数に取り, 全ての数値の回帰曲線から標準偏差の推定値を算出する. せん断引張試験の場合の標準偏差の推定値を図 4 に, 各荷重成分の感度と標準偏差の推定値を表 2 に示す.

感度と疲労寿命の標準偏差ともに同様の傾向を示した. 引張せん断試験や曲げせん断試験はナゲット径への影響がほぼ同等であるのに対し, はく離試験の場合はナゲット径への影響はそれらに比べより小さくなる.

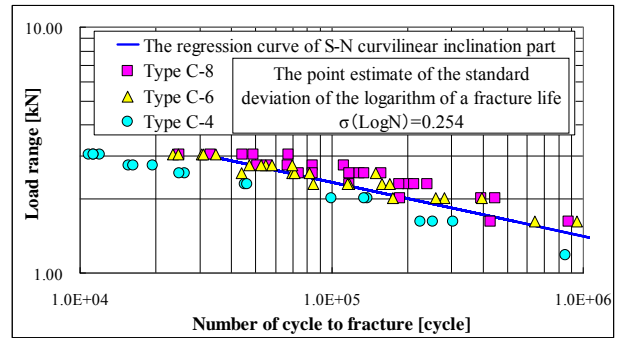


Fig3. Estimator of standard deviation for tensile shear fatigue test

Table1. Sensitivity and standard deviation

Load type	Sensitivity S	Standard deviation σ (LogN)
Peeling	-0.361	0.225
Tensile shear	-0.699	0.254
Bending moment	-0.614	0.258

4. 結論

スポット溶接部の公称構造応力に対するナゲット径の感度解析を行い, 疲労試験を実施してその知見を検証した. その結果, ナゲット径の感度と疲労寿命の標準偏差は分担荷重に対して同様の傾向が見られた.

せん断<曲げ>はく離

参考文献省略