組合せ応力を受けるボルト締めストップホール補修部の疲労強度評価方法

三井造船㈱　正会員　○内田　大介
法政大学　　正会員　　森　猛
法政大学（現在 ㈱竹中土木）池谷　岳史

１．目的

ボルト締めストップホール法はガセット溶接継手部等に生じた疲労亀裂の補修方法の一つであり，疲労亀裂の先端にストップホールと呼ばれる円孔をあけ，その円孔を高力ボルトで締め付けることにより亀裂先端の応力集中を緩和して疲労損傷部の延命化を図る方法である．筆者らはボルト締めストップホール法で補修したガセット溶接継手部の疲労寿命が円孔壁の応力範囲で整理できることを明らかにし，直応力下にある場合の疲労強度評価式を提案している．さらに，実橋梁へ適用することも考え，提案式をせん断力の影響も考慮出来る式へ拡張した．しかし，拡張した評価式は，軸方向力とせん断力の割合によって変化する円孔壁における最大主応力点，すなわち亀裂発生点が予測できないこと，式を構築するために行ったパラメータ解析のモデル数が少なく，式の適用範囲が限られている等の問題が挙げられる．

本研究では，軸方向力とせん断力を受ける面外ガセット溶接継手部に生じた疲労亀裂に適用したボルト締めストップホール法による補修部の疲労強度評価式を再構築することを目的とする．そのために FEM 解析を用いたパラメータ解析を実施し，すでに提案している評価式中のボルト締め前の円孔壁の応力集中の算定式とボルト締めによる応力緩和効果を表す応力緩和係数の算定式を新たに構築した．

２．軸方向力を受ける場合の疲労強度評価方法

軸方向力とせん断力を受ける場合の組合せ応力場を考慮するにあたり，著者ら[1)]がすでに提案している，次式に示すボルト締めストップホール法で補修した面外ガセット溶接継手を有する有限幅の板が直応力下にある場合の疲労強度評価式を基準とする．

$\Delta\sigma_n^{\,m} \cdot N = C/\{\gamma(\alpha_S+1)+1\}^m$　　・・・ ①

$\Delta\sigma_n$:公称応力範囲(N/mm^2)，N:疲労寿命，C,m:材料定数（C=1.51×10^{20},m=5.39）

α_s:ボルト締め前の円孔壁板厚中心での応力集中係数$=\beta\times\left\{0.166(c/M)+1.64\sqrt{c/M}+1.19\right\}$　・・・ ②

$\beta=\sqrt{\sec\{(\pi\cdot c/2)/w\}}$:有限幅の影響，c:切欠き長さ(mm)，w:板幅(mm)，M:円孔径(mm)

γ:応力緩和係数$=(\alpha_B-1)/(\alpha_s-1)=1.0-0.297(M/t)$　・・・ ③

α_B:ボルト締めした場合の円孔壁板厚中心での応力集中係数，t:板厚(mm)

３．ボルト締め前の応力集中係数の算定式

FEM 解析対象を図１に示す．板厚がボルト締め前の円孔壁の応力集中に対して与える影響は小さいため，解析は 2 次元平面ひずみ条件下で行うこととした．解析ソフトは CAFEM VER6.0 である．解析モデルは円孔径 M=18,21,25mm と，切欠き長さ c=85,100,120,150mm を組合せた 12 種類である．これらのモデルに一定の直応力 σ を与え，それに対するせん断応力 τ を変化させることにより τ／σ を 0～2 まで変化させた．また，着目する円孔近傍の要素分割は最大主応力点を明確にするために円孔壁に沿って 360 分割とした．鋼材のヤング率は 2.06×10^{5}N/mm^2，ポアソン比は 0.3 である．

各モデルの円孔壁における最大主応力の発生位置を τ／σ で整理した結果を図２に示す．全ての解析結果はほぼ一つの曲線上にのっており，最大主応力の発生位置の角度は円孔径や切欠き長さの影響を大きく受けず，図中の実線に示した次式で算出できる．

最大主応力発生位置$\theta=0.109(\tau/\sigma)^3-0.577(\tau/\sigma)^2+1.124(\tau/\sigma)$　但し，0≦θ≦1. 2rad　　・・・ ④

キーワード　ボルト締めストップホール法，せん断力，疲労強度評価

連絡先　〒104-8439 東京都中央区築地 5-6-4 三井造船㈱ 技術本部 CAE センター　TEL03-3544-3246

最大主応力の大きさについては，ストップホールの円周に沿った任意の位置では主応力方向が組合せ応力の状態にはよらず，常に接線方向となることに着目した．そして，④式より算出した最大主応力発生位置で個々に算出した軸方向力による主応力とせん断力による主応力を足し合わせ，組合せ応力場の最大主応力を求めることとした．⑤式に②式とパラメータ解析結果を用いて構築した組合せ応力場の応力集中係数の算定式を示す．なお，ここでいう応力集中係数とは最大主応力値を公称の主応力値で除した値である図３は⑤式を用いて算出した応力集中係数値と解析より求めた応力集中係数値を比較したものである．両者はよく一致しており，この算定式は妥当であると言える．

$$\alpha_s = \frac{\alpha_\sigma \cdot \sigma + \alpha_\tau \cdot \tau}{\sigma/2 + \sqrt{(\sigma/2)^2 + \tau^2}} \quad \cdots \ ⑤$$

σ:公称軸方向応力 (N/mm^2)，τ:公称せん断応力 (N/mm^2)

α_σ:軸方向力に対する応力集中係数

$$= \left(0.402\theta^3 - 1.152\theta^2 + 0.309\theta + 1.000\right) \cdot \left\{0.166(c/M) + 1.64\sqrt{c/M} + 1.19\right\} \quad \cdots \ ⑥$$

α_τ:せん断力に対する応力集中係数

$$= 1.19 \times \left(-0.257\theta^3 - 0.536\theta^2 + 1.799\theta + 0.007\right) \cdot \left\{0.166(c/M) + 1.64\sqrt{c/M} + 1.19\right\} \quad \cdots \ ⑦$$

４．応力緩和係数の算定式

応力緩和係数の検討では 8 節点固体要素を用いた 3 次元 FEM によるパラメータ解析を行った．着目する円孔近傍の要素寸法は約 1mm である．解析パラメータは円孔径（M=18,25mm），切欠き長さ（c=85,100,120,150mm），板厚（t=6,9,12,18,25,36mm），応力比(τ／σ=0,1,2)とした．なお，高力ボルトは円孔径 18mm では F10T-M16，円孔径 25mm では F10T-M22 を標準軸力で締め付けることを想定した．ボルト締付けに関する解析上の仮定は文献 3 と同じである．

図４にボルト締め前後の解析結果を③式中の第 1 式に代入して算出した応力緩和係数を，円孔径 M と板厚 t の比で整理した結果を示す．解析結果はほぼ一つの曲線上にあり，⑧式を用いて応力緩和係数を算出できることがわかる．

$$\gamma = 0.038(M/t)^2 - 0.358(M/t) + 1.000 \quad \cdots \ ⑧$$

５．疲労強度評価式

以上の検討結果より，疲労損傷ウェブガセット上に適用したボルト締めストップホール部が軸方向とせん断力を同時に受ける場合の疲労強度は，①式中の応力集中係数 α_s に⑤式，応力緩和係数γに⑧式を代入して評価することを提案する．

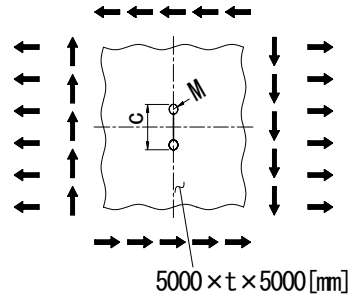

図 1．解析対象

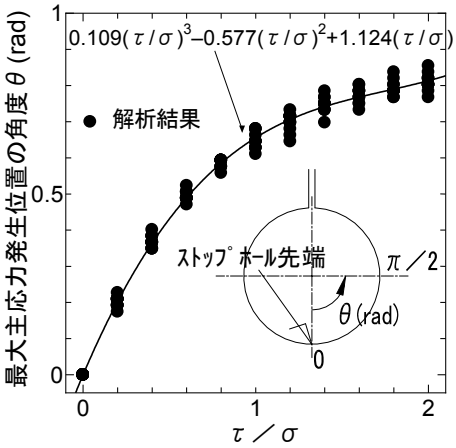

図 2．最大主応力発生位置の角度

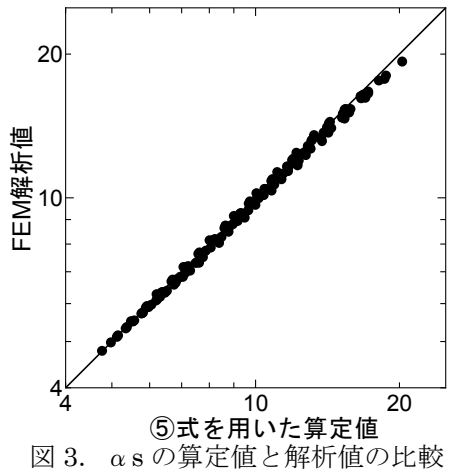

図 3．αs の算定値と解析値の比較

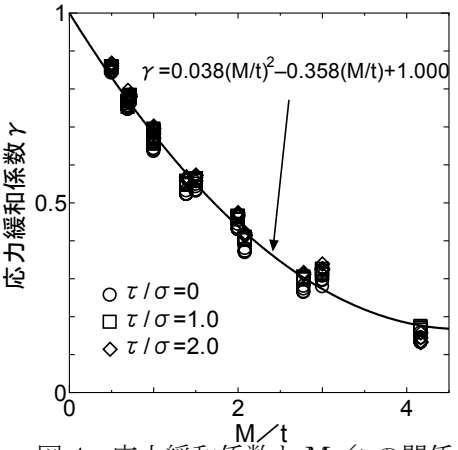

図 4．応力緩和係数と M／t の関係

参考文献

1) 内田大介，森猛，杉山則子：直応力とせん断力を受けるボルト締めストップホール補修部の疲労強度評価方法，土木学会第 60 回年次学術講演会，Ⅰ-416，pp.829-830，2005.9.
2) 内田大介：ボルト締めストップホール法により補修したガセット溶接継手部の疲労強度評価方法に関する研究，法政大学学位論文，2006.3.
3) 森猛：ボルト締めした円孔の応力集中と疲労強度，土木学会論文集，No.543／I-36，pp.123-132，1996.7.