

川 田 建 設 正 員 梶 川 靖 治
近畿大学理工学部 正 員 前 田 幸 雄

1. まえがき 主として負の繰返し曲げモーメントを受ける鋼・コンクリート合成桁のスタッドの溶接されたフランジ鋼板を対象として、これまでに3種の鋼材 (SS41, SM50A, SM58Q) のスタッド付き鋼板について一連の疲労試験を行い、スタッドせん断力によって疲労強度が大幅に低下することを指摘した¹⁾。また、その低下原因を明らかにするために、スタッド根元部について有限要素法による3次元弾性応力解析を実施し、引張りのみあるいはせん断のみの場合についてスタッド付き鋼板の疲労亀裂発生位置に大きな応力集中の生じることを示し、余盛部付け根の幾何学的形状の不連続が疲労強度の低下にとって支配的な影響因子であることを指摘した^{2,3)}。本文ではその後実施した引張りとせん断の組み合わせ荷重のもとでの応力解析結果ならびにせん断力の影響を考慮に入れた疲労強度の一評価方法について報告する。

2. スタッド根元部の応力解析 3次元有限要素解析の概要は既報^{2,3)}のとおりであり、疲労試験片をもとに平板と円柱とから成るモデル化を行い、1節点3自由度の三角柱、四角柱および直方体の各1次要素を用いて、図-1に示すように対称性を利用して全体の2分の1について要素分割を行った。また、鋼とコンクリートとの相対ずれあるいは離間を考慮するために、鋼部とコンクリートとが接触するスタッド周面および鋼板面ではすべてダブル節点としてリンク要素により結合した。図中、 A_p 点とは後述するように応力集中の大きくなる点であり、スタッド余盛止端部の $z-x$ 平面との交点を指す。コンクリート片側端面 ($x=-8.0$ の $y-z$ 平面) 全部を固定し、鋼板の両側に引張力を作用させ、左右の力の差がせん断力となってスタッドを介してコンクリートブロックで支えられるように組み合わせ荷重を与えた。なお、平均引張応力は100MPa、せん断力は10kNとした。

対称断面および鋼板とコンクリートとの接触面における節点の変位状況を図-2に示す。同図 (a) のスタッド根元付近において、せん断力の載荷側ではコンクリートが鋼部にくい込むことなく支圧され、また非載荷側ではコンクリートと鋼部との間に離間が生じ、鋼板も局部変形している。また、同図 (b) において、鋼・コンクリート間に相対ずれの生じているのがわかる。 A_p 点を通る x , y , z の3方向における鋼板内の σ_x の分布を図-3に示す。 σ_x の x 方向分布は中心軸に関し非対称で、せん断力の載荷側 (A_p 点) で極めて大きな応力集中を生じている。これは幾何学的形状変化と力学的不連続による重複応力集中状態となるためと考えられる。また、分布形状および応力値は引張りまたはせん断がそれぞれ単独に作用する場合のほぼ重ね合わせとなっている。

3. 疲労強度の評価方法 スタッド根元部は、引張り、せん

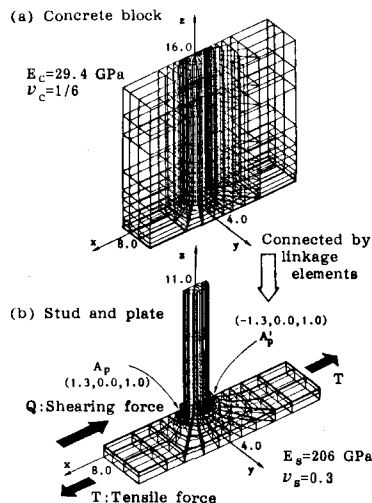


図-1 有限要素分割

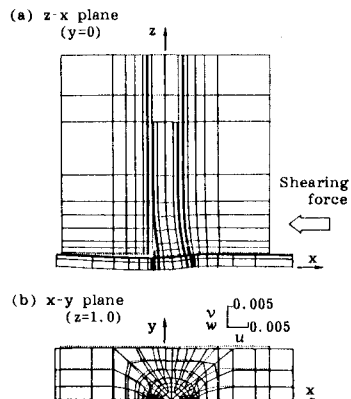


図-2 節点変位状況

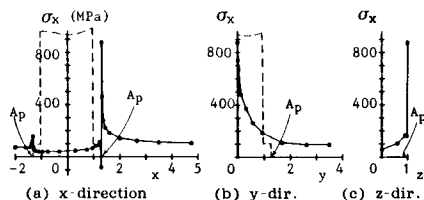


図-3 応力分布

断あるいは両者の組み合わせのいずれの荷重状態のもとでも、荷重方向の垂直応力度成分 σ_x が著しく卓越しているものの、かなり複雑な3次元の組み合わせ応力状態であることがわかった。そこで、疲労強度の評価に際し、一般的に次式で表わされる相当応力度 σ_e に着目することにした。

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + \frac{1}{6} (\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2) \}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: 垂直応力度、 $\tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$: せん断応力度。
 ところで、引張りとせん断とが同時に作用する場合の応力状態は両者がそれぞれ単独に作用する場合のほぼ重ね合わせとなることがわかったので、相当応力についてもそれぞれの場合の基準応力および応力集中係数を用いて、次式により算出することができる。

$$\sigma_e = \sqrt{\alpha^2 \cdot \sigma_0^2 + \beta^2 \cdot \tau_0^2 + \gamma \cdot \sigma_0 \cdot \tau_0} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\alpha^2 = \frac{1}{2} \{ (\alpha_x - \alpha_y)^2 + (\alpha_y - \alpha_z)^2 + (\alpha_z - \alpha_x)^2 + \frac{1}{6} (\alpha_{yz}^2 + \alpha_{zx}^2 + \alpha_{xy}^2) \}$
 $\beta^2 = \frac{1}{2} \{ (\beta_x - \beta_y)^2 + (\beta_y - \beta_z)^2 + (\beta_z - \beta_x)^2 + \frac{1}{6} (\beta_{yz}^2 + \beta_{zx}^2 + \beta_{xy}^2) \}$
 $\gamma = (\alpha_x - \alpha_y)(\beta_x - \beta_y) + (\alpha_y - \alpha_z)(\beta_y - \beta_z) + (\alpha_z - \alpha_x)(\beta_z - \beta_x)$
 $+ 6(\alpha_{yz} \cdot \beta_{yz} + \alpha_{zx} \cdot \beta_{zx} + \alpha_{xy} \cdot \beta_{xy})$

ただし、 σ_0 : 引張りのみの場合の基準応力、すなわち鋼板断面に作用する公称平均引張応力、 $\alpha_x, \alpha_y, \dots, \alpha_{xy}$: 引張りのみの場合の各応力成分の応力集中率、 τ_0 : せん断のみの場合の基準応力、すなわちスタッド軸部断面における公称平均せん断応力、 $\beta_x, \beta_y, \dots, \beta_{xy}$: せん断のみの場合の各応力成分の応力集中率。

次に、この相当応力度を求める着目点であるが、疲労亀裂の発生位置から、当然、応力集中が最大となるA_p点が考えられる。しかし、この点ならびにこの点を含む有限要素の各応力成分はその大きさによって敏感に左右され、また実際の余盛形状（高さ、直径および余盛側面と平板とのなす角度 θ ）は極めてばらつきが大きく、局部的な欠陥により応力集中点と亀裂発生点とは必ずしも一致しない場合もあると考えられる。そこで、この点を含むある程度平均的な応力に注目するのが適当ではないかと考え、ここではA_p点近傍の4つの要素について各応力成分の体積平均値を求めることにした。具体的な例として、疲労試験片の近似モデルについて有限要素解析を行い、次式を得た。

$$\sigma_e = \sqrt{2.174\sigma_0^2 + 5.834\tau_0^2 + 6.521\sigma_0 \cdot \tau_0} \dots\dots\dots (3)$$

図-4は鋼板の疲労試験結果の一例（SM58Q）であり、A系列は黒皮付き母材、B系列はスタッド溶接後除去材、CとD-1～D-3系列はスタッド付き材であり、それぞれ図中のように作用せん断応力範囲 τ_r が異なる。SS41およびSM50Aについてもこれと同様な結果が得られており、これらのC～D-3系列の全データに式（3）を適用して相当応力範囲で整理したものが図-5である。各鋼材の作用せん断力の異なる4つの系列に対するデータは100万回以上の部分で若干ばらつきが大きくなるものの、ほぼ分布帯域（標準偏差の±1倍）の中に入っており、ひじょうにまとまりが良い一つのS-N関係を形成することから、相当応力範囲による疲労データの評価はいわゆる reasonable な結果を与えることがわかる。

参考文献 1) 梶川・前田：スタッド付鋼板の疲労強度，土木学会第31回年講，I-184，1976.，
 2) 梶川・前田：スタッド付き鋼板の3次元応力解析（その1，一軸引張りを受ける場合），土木学会第34回年講，I-54，1979.， 3) 川畑・梶川・前田：スタッド付き鋼板の3次元応力解析（その2，せん断力を受ける場合），土木学会昭和57年度関西支部年講，I-81，1982.

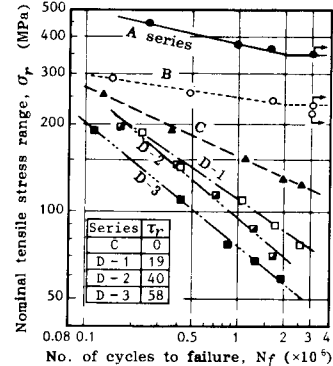


図-4 SM58Qの疲労試験結果

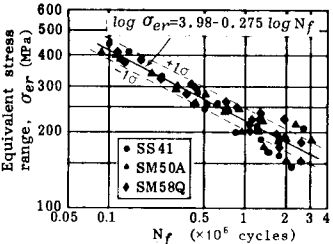


図-5 相当応力度によるS-N関係