

(25) 限界状態設計法のための頭付きスタッドの静的・疲労強度に関する評価式

EVALUATION EQUATIONS FOR THE STATIC AND FATIGUE STRENGTHS
OF HEADED STUD SHEAR CONNECTORS USED FOR LIMIT STATE DESIGN METHOD

松井 繁之^{*)} 平城 弘一^{**)}
Shigeyuki MATSUI、Hirokazu HIRAGI

In a limit state design method, both static and fatigue strengths should be checked as the important limit states. In the composite structures, stud shear connectors are the key elements to secure appropriate composite action. Therefore, their serviceability limit states also has to be checked. For studs, an abrupt increase of residual slip is commonly acceptable serviceability limit state. The paper describes the investigation to define those strengths of studs. Through a multi-variable linear regression analysis on push-out test data, refined strength equations at those three limit states were derived. Especially, the influence of the concrete placing direction were introduced.

1. まえがき

わが国の道路橋示方書における頭付きスタッド（以下、スタッドと略記）の設計法は、建設省土木研究所の試験結果に基づき、0.075mmの残留ずれを発生する限界荷重を安全率で割った値を許容せん断力とする許容応力度設計法である¹⁾。疲労の照査は不要とされている。許容せん断力程度のせん断応力振幅範囲（片振り載荷時）は、200万回時間強度のほぼ下限値となり、疲労に関しても安全側であると評価されてきた²⁾。

ところで、主要各国の構造物の設計方法は、既にわが国を除いて、許容応力度設計法から荷重係数設計法あるいは限界状態設計法に移行されている。わが国においても、構造物の設計方法がこの限界状態設計法へ全面改訂の機運にある。当然、合成構造の要であるスタッドについても、早急に合理的な静的強度および疲労強度の評価式を検討する必要があると考えられた。このため、著者らは既往のスタッドに関する広範囲の研究成果を調べたが、既往のスタッドの静的強度式および疲労強度式は多種多様で、試験データとの適合性において合理的なものが少ないことが判明した。

そこで、国の内外で実施された既往の静的および疲労試験データを再整理し、スタッドの静的および疲労強度に対する影響因子を抽出し、それらをパラメーターとする対数型の重回帰分析からそれらの影響度を明らかにし、スタッドの終局および疲労限界状態における合理的な強度評価式を導き出した³⁻⁴⁾。

ところで、近年、スタッドの利用範囲は橋梁あるいは建築構造の合成桁にとどまらず種々の合成構造に拡大されつつある。また、橋梁でも種々の部位にスタッドが用いられている。したがって、通常の合成桁の場合と異なり、スタッドの取付け方向に対して、コンクリートの打込み方向が種々変化する。コンクリートの

*：工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科

**：工修 摂南大学講師 工学部土木工学科

打込み方向を大きく分類すると、Fig.1 に示すような 4 タイプが一般的である⁵⁾。

さて、上記に述べた新提案の強度評価式は、A タイプに関するものであり、その他のタイプに対する適用性も論じておく必要がある。

本論文は、この観点に立って、主に述べるものである。すなわち、B、C、D タイプの強度評価式を示すものである。

さらに、限界状態設計法の重要な限界状態として使用限界状態があるが、本研究では鋼とコンクリートとの間のずれを 1 つの使用限界に選んで、使用限界状態時の強度についても考察を加えた。

2. 新提案の強度評価式のまとめ

(1) 静的強度評価式

諸外国の代表的なスタッドの終局静的強度 (Q_u) に関する評価式を Table 1 に示す。これらの評価式より、終局静的強度に影響する重要な因子は、スタッドの直径 (d_s)、高さ (h_s)、引張強さ (f_{su}) およびコンクリートの圧縮強さ (f_{cu}) の 4 つと考えられるが、これらの因子の影響度は異なって評価されていることが指摘できる。

さらに、世界で公表された代表的な静的押抜き試験データ (179 個) を整理し、Table 1 に示す代表的なスタッドの終局強度式と本研究で整理した試験データとを比較検討した結果、いずれの表現法でもって試験データを再整理してみても、相関性がよくないことを明らかにした。

そして、スタッドの静的強度に関するより合理的な評価式を模索するため、整理した試験データ (179 個) について対数型重回帰分析によって統計的に解析した。ただし、スタッドの静的強度式は、次のような指数型の重回帰モデルによって表わされるものと仮定した。

$$Q_u = \alpha \cdot d_s^a \cdot h_s^b \cdot f_{su}^c \cdot f_{cu}^d \tag{1}$$

- ここで、 Q_u :スタッドの終局耐荷力 (kgf)、
 d_s :スタッド軸部の直径 (cm)、
 h_s :スタッドの全高 (cm)、
 f_{su} :スタッドの引張強さ (kgf/cm²)、

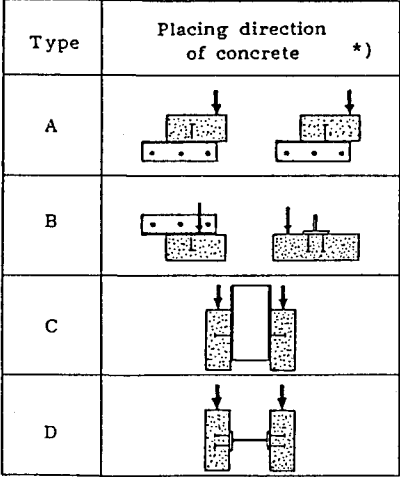


Fig.1 Concrete placing direction.

Table 1 Ordinary expressions for ultimate strengths of studs,

Investigation	Expression method	Relation
Slutter and Driscoll(1965)	Equation	$Q_u = A \cdot d_s^2 \sqrt{f_{cu}}; (h_s/d_s \geq 4.2)$
	"	$Q_u = B \cdot d_s \cdot h_s \sqrt{f_{cu}}; (h_s/d_s \leq 4.2)$
Menzies (1971)	Diagram	$Q_u - f_{cu}$ Relation
Ollgaard, Slutter and Fisher(1971)	Equation	$Q_u/A_s = C \cdot \sqrt{f_{cu} \cdot E_c}$
Hawkins (1973)	Equation	$Q_u = D \cdot A_s \cdot \frac{\sqrt{f_{cu} \cdot f_{su}}}{\sqrt{d_s}}$
Roik (1982)	Diagram	$Q_u/d_s^2 - f_{cu}$ Relation
	Equation	$Q_u \leq E \cdot d_s^2 \cdot f_{su}$

Where, Q_u :Ultimate strength of a stud, d_s :Diameter of stud, h_s :Height of stud, f_{su} :Tensile strength of stud, f_{cu} :Concrete cylinder strength, A_s :Cross-sectional area of shank of stud, E_c :Modulus of elasticity of concrete, A,B,C,D,E:Constant.

f_{cu} : コンクリートの圧縮強さ
(kgf/cm^2)、

α : 係数。

最終的に、スタッドの終局耐荷力に関する評価式として、次式を導いた。

$$Q_u = 100 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s)} \cdot f_{cu} + 1000 \quad (2)$$

ここで、 A_s : スタッド軸部の断面積
(cm^2)。

式(2)によって求めた計算値と試験データとを比較した結果を Fig.2 に示す。この図より明らかなように、計算値は全領域において試験データの中央値を与えていることがわかる。

(2) 疲労強度評価式

既往の押抜き疲労試験は、Fig.3 に示されているような、2種類の押抜き供試体で実施されている。一方は両側スラブの供試体であり、他方は片側スラブの供試体である。前者は多くの研究者らによって用いられている。後者はアメリカ合衆国の Fisher のほか、ごくわずかな研究者らによって用いられている。

世界で公表された代表的な疲労押抜き試験データ(145個)を、縦軸をせん断応力範囲にとった従来の S-N 関係で整理した結果を

Fig.4 に示す。同図には平城・松井が実施した片側スラブの供試体を用いた試験結果⁶⁾および BS5400:Part10 の設計値も併記した。

Fisher らの試験結果は、片側スラブの供試体を用いて行われたため、かなり低いところに位置している。同じ片側スラブの押抜き供試体を用いて行った Fisher らと平城らの疲労試験データに差異が生じたのは、載荷荷重のスタッド根元からの偏心量が違っていたためであると考えられる。したがって、Fisher らの試験結果を除外した試験データについて考察すると、既往の S-N 関係図では、表現があまりにも簡単すぎて、スタッドの疲労強度を合理的に表わし得ないことがわかる。疲労に関しても合理的な表現法を得るため、

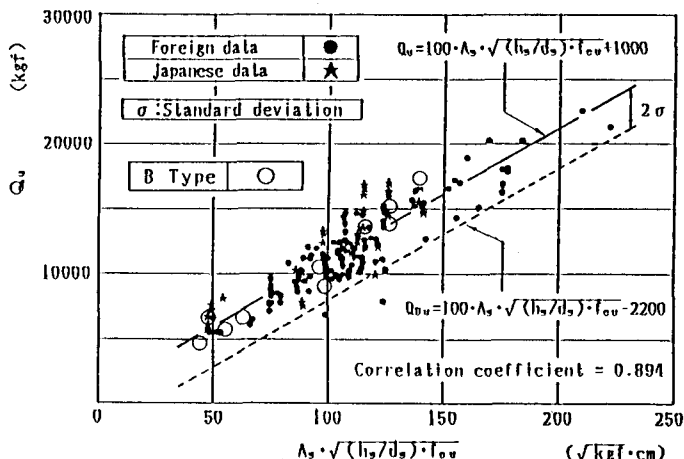


Fig.2 Median equation and 2.3%-Fractile equation arranged by the actual concrete strength.

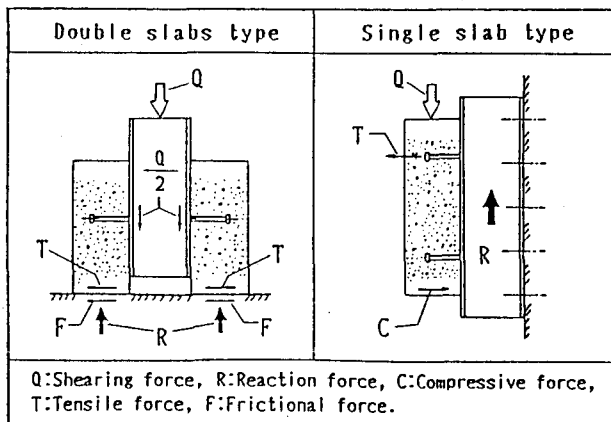


Fig.3 Types of push-out specimens.

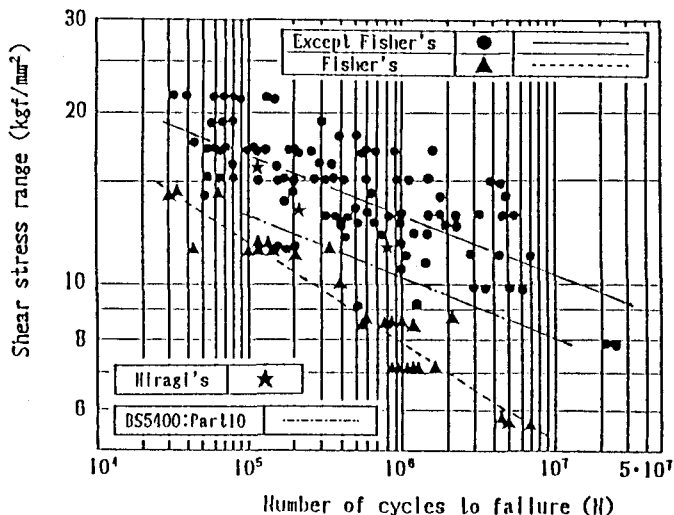


Fig.4 S-N relations arranged by shear stress range.

Fisherらの試験データを除いた試験データ(114個)を対数型重回帰分析によって統計的に解析した。

スタッドの疲労強度に関する強度式も、供試体の構成パラメーターから、静的強度と同様に次式のような指数型の重回帰モデルによって表現できると考えられた。

$$R = \alpha \cdot d_s^a \cdot h_s^b \cdot f_{su}^c \cdot f_{cu}^d \cdot N^e \quad (3)$$

ここで、R：スタッドに作用するせん断力の範囲(kgf)、

N：疲労破壊に至るまでの繰返し回数。

式(3)と式(1)を比較すると、式(3)は概略的には式(1)に繰返し回数(N)の項だけが加わったことに気付く。そこで、式(3)を式(1)で割った形から、最終的に次式を得た。

$$R/Q_u = 1.28 \cdot N^{-0.105} \quad (4)$$

この新しい関係(R/Q_u-N 関係)による表現法を用いて、試験データを再整理して示せば、Fig.5 のようになる。この図の相関係数は 0.795 となり、かなり精度よく試験データがまとめられていることがわかる。

3. スタッドの静的・疲労強度に関する設計式とコンクリートの打込み方向の影響

2. で述べた強度評価式は試験データの中央値を示すものであり、これらを直接設計に用いることはできない。試験データは各種の条件でばらつくことは避けられず、設計に対してはこれらのバラツキを考慮して安全側にシフトしておかねばならない。

(1) 終局限界状態に対するスタッドの強度式

ヨーロッパ流の考え方を導入して、式(1)から試験データのバラツキの標準偏差の2倍だけ低い方にシフトさせて求めることにした。さて、静的押抜き試験では、A~D タイプの違いは、ずれに現われるだけであり、C タイプのずれが載荷初期に非常に大きく現われる。Fig.2 で明らかなように、終局強度に関してはすべてのタイプに大きな相違はないと言え、静的強度式は1つのもので与えてよいと考えられる。よって、全試験データによる標準偏差を用いた結果、スタッドの設計用終局静的強度(Q_{bu})式として次式が導かれる。

$$Q_{bu} = 100 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} - 2200 \quad \{\text{全タイプ}\} \quad (5)$$

(2) 疲労限界状態に対するスタッドの強度式

イギリスの設計規準 BS5400:Part10 と同じ思想を取り入れて、設計のためのスタッドの疲労強度式として、平均値から標準偏差の2

倍を安全側にシフトした式を提案すればよいと考えられる。ただ、疲労データをよく観察すると、B タイプが他のタイプに比べ、若干疲労強度は低下している。よって、A, C, D タイプと B タイプは分離しておく必要がある(Fig.5 参照)。

(a) A, C, D タイプ

Fig.5 の下側破線で示したもので、次式で表現される。

$$R/Q_u = 0.99 \cdot N^{-0.105} \quad (6)$$

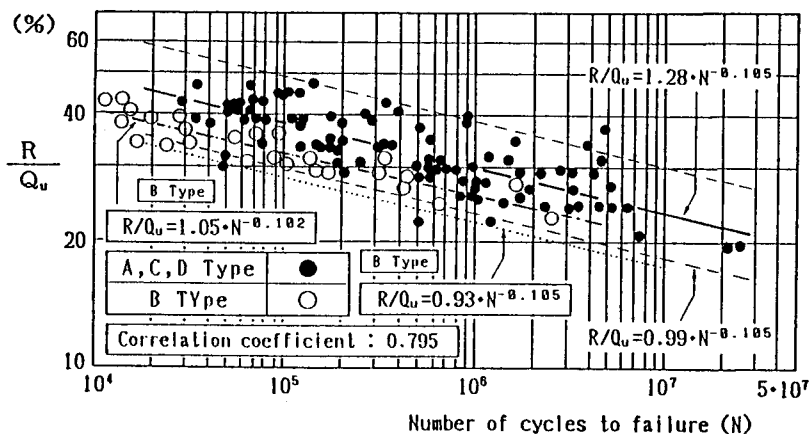


Fig.5 Rearrangement by R/Q_u-N relations.

(b) B タイプ

$$R/Q_u = 0.93 \cdot N^{-0.105} \quad \{ \text{なお、中央値を示す式は、} R/Q_u = 1.05 \cdot N^{-0.102} \text{ であった。} \} \quad (7)$$

(3) 使用限界状態に対する強度式

限界状態設計法では、供用中の構造物の使用性ならびに耐久性を確保するためにも、使用限界状態は重要な限界状態であると言える。BS5400:Part5 では、鋼とコンクリートの間に発生する過大なずれを使用限界状態の1つであると規定している。本研究では、この BS5400 と同様な観点から、鋼とコンクリートの間のずれを使用限界に選んだ。

Fig.6-8 は、コンクリートの打込み方向ごとに分類し、既往の研究で得られた荷重-ずれ関係を、 Q/Q_u (作用荷重と破壊荷重との比) - δ' (残留ずれ) 関係に再整理した結果を示したものである。なお、本研究で使用したスタッド軸部の直径は、実用の範囲を考慮して 13-22mm のものに限定した。C タイプのようなコンクリートの打込み方向の場合、スタッドの支圧面にブリージングが形成されるため、Fig.7 より明らかなように、A,D タイプに比べて、載荷初期から大きなずれが発生することがわかる。一方、B タイプのような場合、スタッドの根元部へのコンクリートの充填が悪くなるため、A,D タイプに比較して、若干低い関係を示し、ずれ性状に悪影響を与えることも明らかになった。これらの図より明らかなように、 Q/Q_u - δ' 関係は2つの直線(折れ線)で近似できることがわかる。そこで、著者らは2つの直線の交点(折れ点)を過大なずれの開始点と定め、スタッドの使用上の限界状態であると考えた。Fig.6-8 の関係から、残留ずれの折れ点が特定できた。この折れ点に相当する荷重を使用限界荷重(Q_c)と定義した。折れ点に相当する荷重比は、次のように決定した。

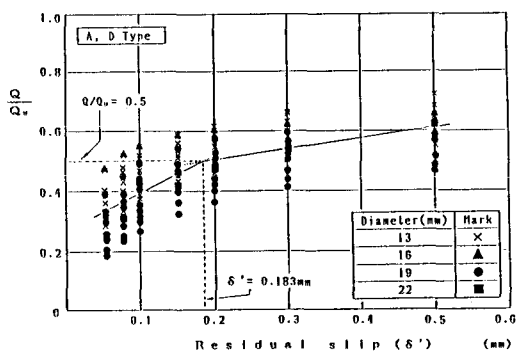


Fig.6 Q/Q_u - δ' relation (A,D Type).

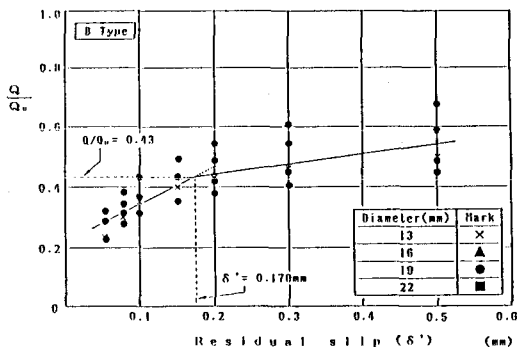


Fig.8 Q/Q_u - δ' relation (B Type).

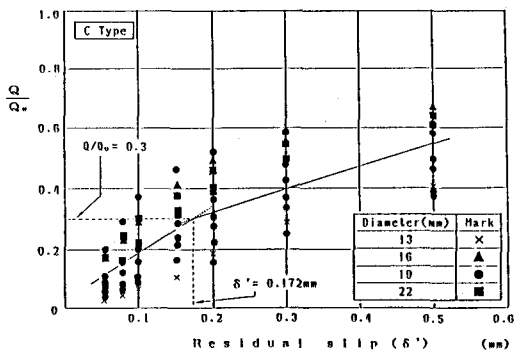


Fig.7 Q/Q_u - δ' relation (C Type).

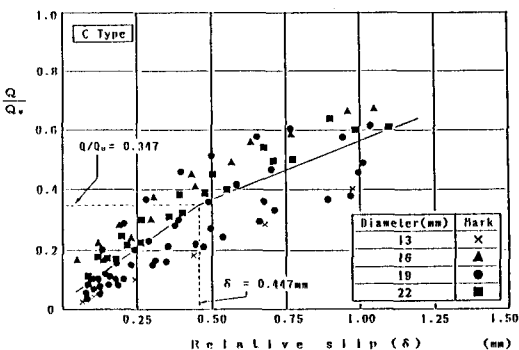


Fig.9 Q/Q_u - δ relation (C Type).

(a) A, D タイプの使用限界状態に対する設計強度式

$$Q_c/Q_u = 0.50 \quad \{ \text{または、} Q_c = 50 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu} + 500} \} \quad (8)$$

(b) C タイプの使用限界状態に対する設計強度式

$$Q_c/Q_u = 0.30 \quad \{ \text{または、} Q_c = 30 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu} + 300} \} \quad (9)$$

(c) B タイプの使用限界状態に対する設計強度式

$$Q_c/Q_u = 0.43 \quad \{ \text{または、} Q_c = 43 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu} + 430} \} \quad (10)$$

なお、Fig.6-8 より明らかなように、荷重比は大きくばらついているが、上式は、参考のため、折れ点の中央値を示すものである。今後、 $Q/Q_u - \delta$ 関係のデータ蓄積を努め、影響因子分析を行って、より合理的な強度式を提示するが必要であると考えられる。しかし、式(8)～式(10)での荷重比に相当する残留ずれ量は、0.170-0.180mm程度、同じく相対ずれ量は、ほぼ 0.5mm程度となり、いずれの場合においても、ずれ量の差異が小さかった。 $Q/Q_u - \delta$ (相対ずれ) 関係の一例として、C タイプの結果を Fig.9 に示しておく。

4. 結 論

本研究を要約すると次のような結論を述べることができる。

(1) 重回帰分析の結果に基づいて、スタッドの静的および疲労強度式を提案した。これらの式は、既往の研究から見いだされていたスタッドの強度に対する主要な影響因子をすべて含めた形となっており、合理的なものと言える。

(2) さらに、試験データのバラツキを考慮して、標準偏差の2倍だけシフトしたものを設計式として誘導した。

(3) 疲労強度式では、コンクリートの打込み方向の違いを考慮に入れた。

(4) 使用限界状態に対するスタッドの強度評価式は、荷重-残留ずれ関係を2つの直線で近似し、それらの直線の交点(折れ点)での強度比に基づいて誘導した。この結果、使用限界ではコンクリートの打込み方向の違いによって、A, D グループ、B グループ、C グループの3種に分離する必要がある。この使用限界状態時の設計強度式も試験データのバラツキを考慮に入れ、 2σ だけシフトしたもので与えることが合理的であると考えた。しかし、強度比のバラツキが非常に大きく、今後さらに検討が必要であろう。

謝 辞：本研究を行うに当たり、大阪大学教授の福本嘸士先生には有益なご助言とご指導を賜りました。ここに記して厚く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書、1980。
- 2) 阿部英彦：鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究、日本国有鉄道、鉄道技術研究所、No.961, 1975。
- 3) 平城・松井・福本：頭付きスタッドの強度評価式の誘導 -静的強度評価式-、土木学会構造工学論文集、Vol.35A, pp.1221-1232, 1989。
- 4) 松井・平城・福本：頭付きスタッドの強度評価式の誘導 -疲労強度評価式-、土木学会構造工学論文集、Vol.35A, pp.1233-1244, 1989。
- 5) 赤尾・栗田・平城：頭付きスタッドの押抜き挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響、土木学会論文集、第380号/1-7, 1987。
- 6) 平城・松井：頭付きスタッドの疲労強度に及ぼすスタッド余盛り形状の影響、土木学会構造工学論文集、Vol.34A, pp.501-512, 1988。