

## 頭付きスタッドの強度評価式の誘導 — 静的強度評価式 —

### DERIVATION OF STRENGTH EQUATIONS OF HEADED STUD SHEAR CONNECTORS - STATIC STRENGTHS -

平城 弘一・松井 繁之・福本 嘯士

By Hirokazu HIRAGI, Shigeyuki MATSUI and Yuhshi FUKUMOTO

In the near future for highway bridges in Japan, the current allowable stress design method will be transferred to a limit state design method. In this method, both static and fatigue strengths should be checked as design criteria at limit states. In the composite structures, stud shear connectors are the key element to secure appropriate composite action. The authors carried out this investigation to define static and fatigue strengths of studs. This paper describes the results on static strength. Through a multi-variable linear regression analysis on 179 push-out test data, a refined equation for static strength could be derived. The influence parameters have been found to be the diameter and height of studs and concrete strength. Verifications for the equation are deduced from the scattering of test data around the developed equation.

#### 1. まえがき

1950年初頭、アメリカ合衆国イリノイ大学の L.M.Viestらの研究に端を発した頭付きスタッド（以下、スタッドと略記）の研究は、スタッドがもつ施工性、経済性の利点から、世界各国で積極的に実施されてきた。それらの研究成果によって、スタッドのずれ止めとしての信頼性が確認され、今日では、鋼とコンクリートの合成構造のずれ止めとして、スタッドがほぼ独占的に使用されている<sup>1)</sup>。この傾向は今後も変わらないと考えられる。

さて、わが国の道路橋示方書におけるスタッドの設計強度は、建設省土木研究所の押抜き試験結果に基づき、ある限界ずれ量（0.075mm の残留ずれ）に達するときの荷重を安全率で割った値、すなわち許容せん断力で与えられており<sup>2)</sup>、許容応力度設計法で設計するようになっている。一方、現在、わが国を除いて、主要各国の構造物の設計方法は、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している<sup>3)~5)</sup>。

わが国においても、構造物の設計方法を限界状態設計法に全面改訂の機運にある。このような現状を考え併せると、早急に合理的なスタッドの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る。そこで、著者らは既往の試験データの収集を行い、これらと各国の設計基準との適合性について調査を行ったが、いずれの基準のものも実験値との適合性は低いことが明らかになった。

\*：工修 摂南大学講師 工学部土木工学科（〒572 大阪府寝屋川市池田中町17-8）

\*\*：工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科（〒565 大阪府吹田市山田丘2-1）

\*\*\*：Ph.D.、工博 大阪大学教授 工学部土木工学科（同 上）

そこで、著者らは、国の内外で実施された既往の試験データを収集・整理し、重回帰分析によってスタッドの静的強度に及ぼす諸因子の影響度を明らかにし、スタッドの合理的な設計法強度式の誘導に努めた。

本文はこの内の静的強度式について述べるものである。まず、既往の各国の研究者および設計規準のスタッドの静的強度式を分類し、それらの強度式と既往の試験データとの適合性について議論する。次いで、既往の表現法を参考にスタッドの終局耐力に対する影響因子を選定し、対数型の重回帰分析からそれらの影響度を明らかにし、合理的な静的強度式を導き出した。さらに、設計用強度式についても若干の考察を加えた。

## 2. 諸外国の設計方法とその問題点

### (1) 既往の終局静的強度式と押し抜き試験データ

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明らかなように、終局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つと考えられているが、これらの因子の影響度は違って評価されていることが最初に指摘できる。

次に、世界中で公表された代表的な押し抜き試験データ<sup>6)~23)</sup>の基本統計量を Table 2 に示す。ただし、本研究で活用するデータは普通コンクリートを用い、かつ、床版中には補強筋を有する供試体によるものに限定している。さらに、スタッドの破壊形式はスタッドの引抜き破壊を除外したもの、すなわちスタッドのせん断およびコンクリートの割裂によって生じた試験データについてのみ着目している。影響パラメーターの変動状況を明確にするため度数分布で Fig. 1~5 に示す。各因子の平均値 ( $\mu$ ) と変動係数 ( $\delta$ ) も併記している。

これらの図より明らかなように、スタッドの引張強さ ( $f_{su}$ )、コンクリート強度 ( $f_{cu}$ )、および、終局せん断応力 ( $Q_u/A_s$ ) の度数分布が正規分布に近い分布形を示していることがわかる (ここで、 $A_s$  はスタッド軸部の断面積である)。ただし、コンクリートの強度については、立方体強度の場合にはすべて0.85倍して円柱体強度に換算した。

以下において、上記の代表的なスタッドの終局強度と既往の実験結果との相関を考察し、既往の終局強度式の不合理性を指摘し、主要各国の設計方法の問題点を明確にする。

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. |                   |                                                                         |

Table 2 Basic statistics of all push-out test data,

| Test   | No.of data | Data                             | Mean   | C.O.V. (%) | Min. | Max. |
|--------|------------|----------------------------------|--------|------------|------|------|
| Static | 179        | $d_s$ (cm)                       | 1.8777 | 13.58      | 1.3  | 3.2  |
|        |            | $h_s$ (cm)                       | 8.9944 | 20.51      | 5.1  | 21.4 |
|        |            | $f_{su}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )  | 5008.6 | 11.97      | 3560 | 6327 |
|        |            | $f_{cu}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )  | 318.93 | 26.08      | 139  | 632  |
|        |            | $Q_u/A_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 4288.4 | 20.18      | 1794 | 6260 |

Where,  $d_s$ :Diameter of stud,  $h_s$ :Height of stud,  $f_{su}$ :Tensile strength of stud material,  $f_{cu}$ :Concrete cylinder strength,  $Q_u$ :Ultimate strength of a stud,  $A_s$ :Cross-sectional area of shank of stud, C.O.V.:Coefficient of Variation.

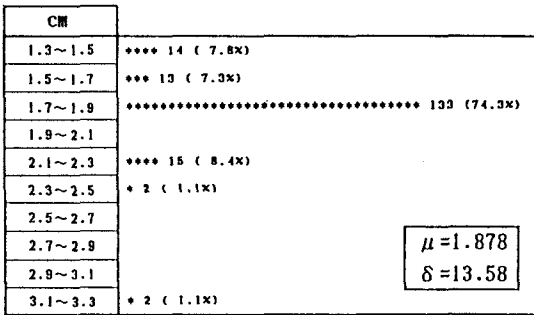


Fig.1 Histogram of  $d_s$ .

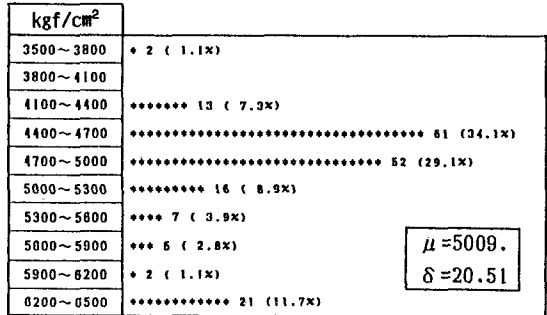


Fig.3 Histogram of  $f_{su}$ .

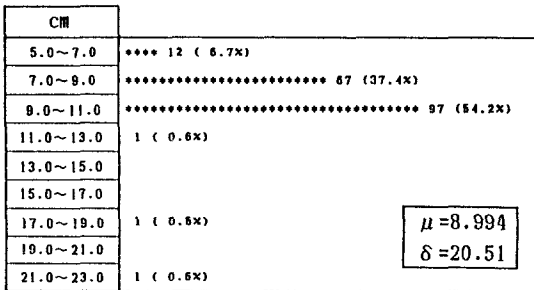


Fig.2 Histogram of  $h_s$ .

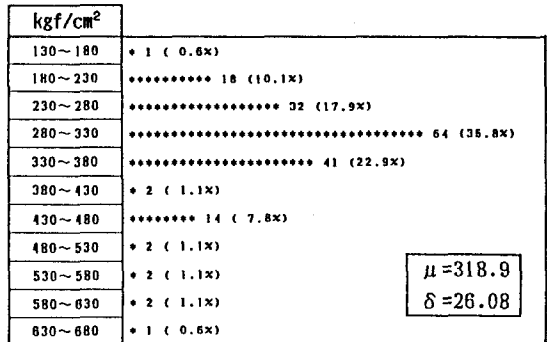


Fig.4 Histogram of  $f_{cu}$ .

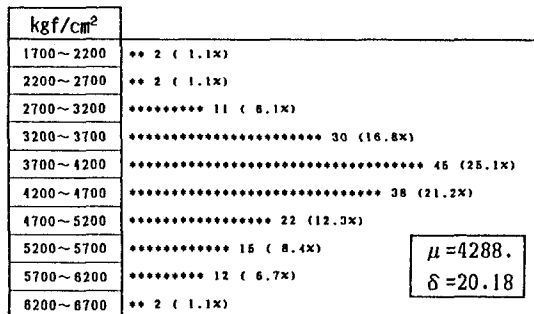


Fig.5 Histogram of  $Q_u/A_s$ .

## (2) 既往の研究あるいは設計法の問題点

### a) Slutter および Driscoll の研究 (1965)

Table 1 に示した Slutter らの2種類の表現式と全試験データとの相関を Fig. 6、7 に示した。Fig. 6 は  $h_s/d_s \geq 4.2$  の範囲の試験データについて、 $Q_u - d_s^2 \cdot \sqrt{f_{cu}}$  関係でもって再整理した結果である。一方、 $h_s/d_s \leq 4.2$  の範囲について、 $Q_u - d_s \cdot h_s \cdot \sqrt{f_{cu}}$  関係でもって再整理した結果が Fig. 7 である。これらの図の中には、Slutter らが提案している実験式も併記している。Fig. 6 に示された実験式は、1969～1973 年版の AASHTO(10～11th) の示方書に採用されたものである。なお、これらの式は Viest が提案した実験式の係数を修正したものである<sup>6)</sup>。

さて、これらの図より明らかなように、Slutter らの表現法は試験データとかなり相関性が高いことがわかる。相関係数は、それぞれ 0.873、0.889 であった。しかし、Fig. 6 および Fig. 7 より明らかなように、Slutter らの実験式そのものは押抜き試験データの上限值を示している。このことは、Slutter らは、多くの研究者が行った押抜き試験結果と自らのはり試験結果とを比較した結果、はり試験の場合、コンクリート床版と鋼げたとの間に摩擦力が発生し、さらにはり破壊に至るまでにスタッドに作用する水平せん断力が再配分を起こすため、押抜き試験から得られるスタッドの強度は、はり試験から得られるものより低い目であるとの経験を考慮したためである。

その後、Slutter らの実験式は、普通コンクリートを使用したはりの試験と対応させると、280 kgf/cm<sup>2</sup> 以下のコンクリート強度のものについてのみ適用可能であると、Fisher らによって指摘された。また、軽量コンクリートを使用した Fisher らの押抜き試験結果と対応させると、スタッドの強度を過大に評価することになると認められた。このことより、Slutter らが提案した実験式は、それ以後の AASHTO の示方書には採用されなかった。

その他の問題として、Slutter らの実験式を設計時に用いる場合、 $h_s/d_s$  の値によって2つの式を使い分けなければならない煩雑さが挙げられる。

### b) Menzies の研究 (1971)

Menzies は自らの試験結果とアメリカ合衆国 (イリノイ大学、リーハ

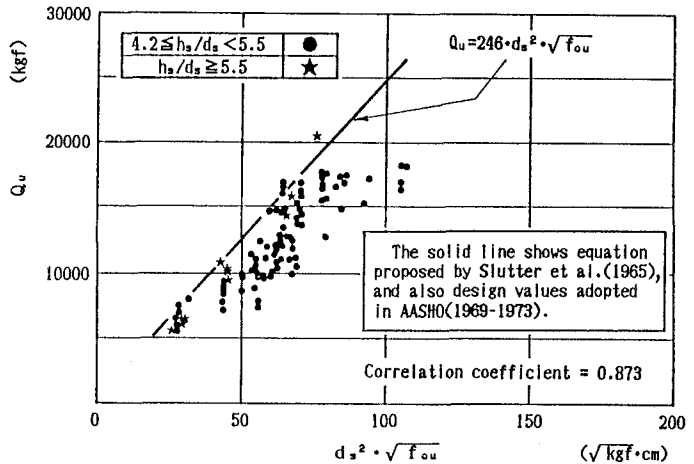


Fig.6  $Q_u - d_s^2 \sqrt{f_{cu}}$  relation by Slutter et al. ( $h_s/d_s \geq 4.2$ ).

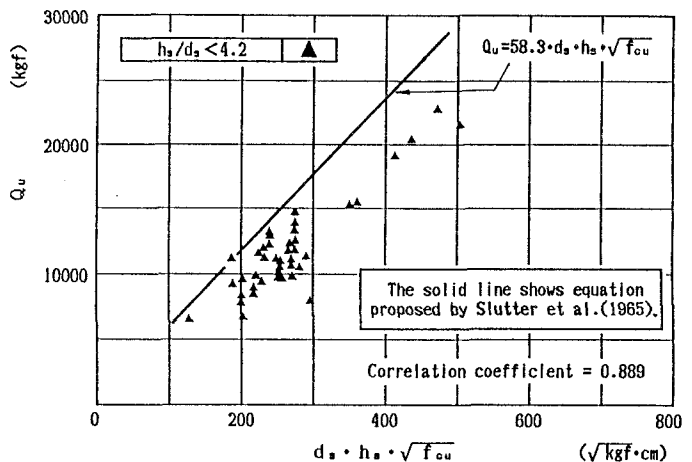


Fig.7  $Q_u - d_s h_s \sqrt{f_{cu}}$  relation by Slutter et al. ( $h_s/d_s \leq 4.2$ ).

イ大学)の試験結果とを比較検討した結果、従来の BSI の設計指針 (CP 117: Parts 1 and 2) の設計値は過大に評価していると結論づけ、試験結果がもつばらつきを考慮して、スタッドの設計値はそのばらつきの下限値で与えるようにした。その結果、スタッドの静的強度をコンクリートの立方体強度との関係を Fig. 8 のような直線で与えた。ただし、スタッドの寸法をパラメーターにしている。これらの直線は BS5400, Part 5 で公称静的強度の設計値として採用されている。

さて、試験データとの比較から次のような点が指摘される。すなわち、これらの設計値と試験データとの相関係数が 0.524 となり、相関性が非常に悪い。このことから、スタッドの押抜き強度はコンクリートの強度と  $d_s/h_s$  とでは表現が困難であると考えられる。

一方、BS5400, Part 5 の設計方法は複雑で、かつ、設計値は非常に不経済である。また、この設計指針で規定しているコンクリート強度の範囲は狭いと思われる。450 kgf/cm<sup>2</sup> 以上の高強度のコンクリートに対しては規定がない。さらに、スタッドの高さが 100mm を超える場合のスタッドの公称静的強度は、同指針で推奨された標準押抜き供試体を用いた試験より決定しなければならない。

### c) Ollgaard, Slutter および Fisher の研究 (1971)

Ollgaard らは、スタッドに作用するせん断応力に注目して、スタッドの静的強度に及ぼす影響因子の一つとして、コンクリートの弾性係数を取り入れた。研究成果は 1977~1983 年版の AASHTO (12th~13th) に採

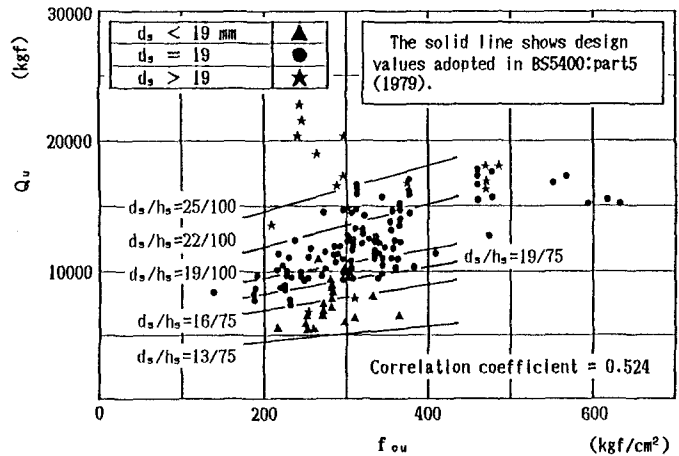


Fig. 8  $Q_u$ - $f_{cu}$  relation by Menzies.

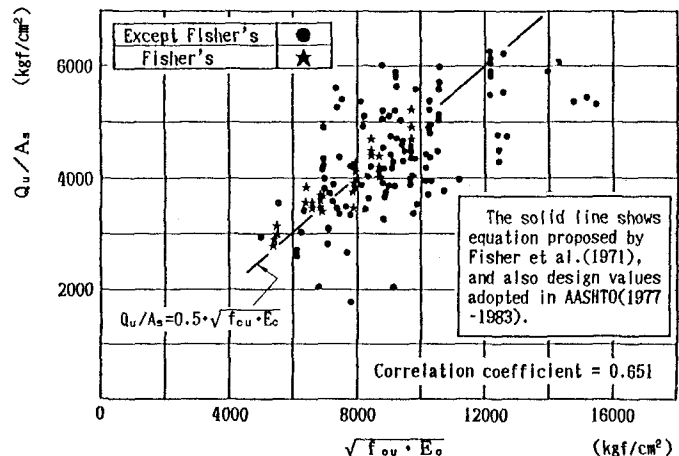


Fig. 9  $Q_u/A_s$ - $\sqrt{f_{cu} \cdot E_c}$  relation by Fisher et al.

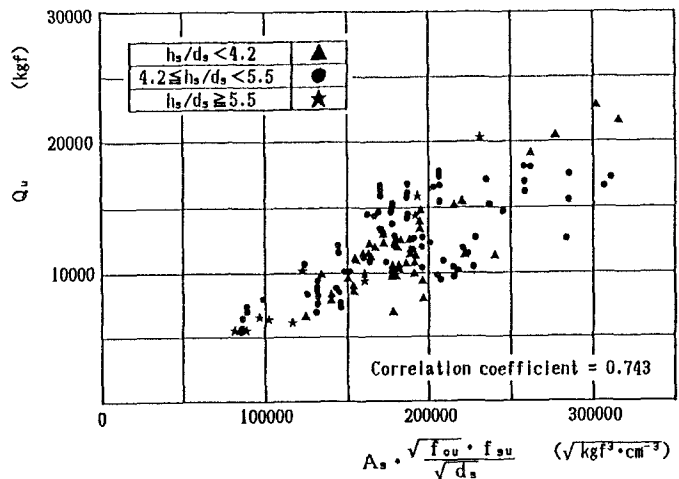


Fig. 10  $Q_u$ - $A_s \sqrt{f_{cu} f_{qu}} / \sqrt{d_s}$  relation by Hawkins.

用されている。

Ollgaard らの提案する表現式で試験データを整理すると Fig. 9 のようになる。ただし、この関係図を作成する際、既往の試験データのほとんどにおいて、コンクリートの弾性係数が明記されていなかったため、ACI 式<sup>24)</sup>によりコンクリートの弾性係数を算出した。また、同図には現行のアメリカ合衆国の AASHTO の示方書である設計値も併記してある。

現行の AASHTO の示方書は、Fisher らが提案した実験式、つまり彼らの研究で得られた試験データを重回帰分析して、その中央値（破壊確率：50%）をねらった式（1）が設計値になっている。ここで、式（1）は Fisher らが提案した表現（ $Q_u/A_s$ ）を変形したものに過ぎない。スタッドの終局強度（ $Q_u$ ）はスタッド直径（ $d$ ）の2乗に比例し、かつコンクリートの圧縮強度（ $f'_c$ ）と弾性係数（ $E_c$ ）の積の平方根に比例するものと規定されている。適用範囲は  $H/d \geq 4$  となっている。ここで、 $H$  はスタッドの高さである。

$$Q_u = 0.4 \cdot d^2 \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c} \quad (1)$$

さて、Fig. 9 より明らかなように、Ollgaard らの表現法は、自らの実験値（Fisher' data）だけを対象にした場合には相関性が高いように思われるが、全試験データに対しては相関係数が 0.651 となり、それほど相関性がないように思われる。その結果、AASHTO の設計値もデータとの相関性は低いと考えられる。

#### d) Hawkins の研究 (1973)

Hawkins が提案したスタッドの強度式は、Table 1 に示されているようになかなか複雑な形をしている。なお、Hawkins が提案した設計式は、ずれ量も考慮することができるようになっている。

$Q_u = A_s \cdot \sqrt{f_{cu} \cdot f_{su}} / \sqrt{d_s}$   
関係を Fig. 10 に示す。

このスタッドの静的耐力に関する表現法では、相関係数が 0.743 となり、Slutter らの表現法より若干相関性が良くなっている。

#### e) Roik の研究 (1982)

Roik は、Table 1 に示されているような2種類の表現法を提案している。 $Q_u/d_s^2 - f_{cu}$  の関係については現行の DIN に採用されているものである。 $Q_u/d_s^2 - f_{cu}$  関係でもって、試験データを整理した結果を Fig. 11 に示す。同図には西ドイツの DIN の設計値も示してある。現行の DIN では、スタッドの破壊形式はコンクリートの強度に左右さ

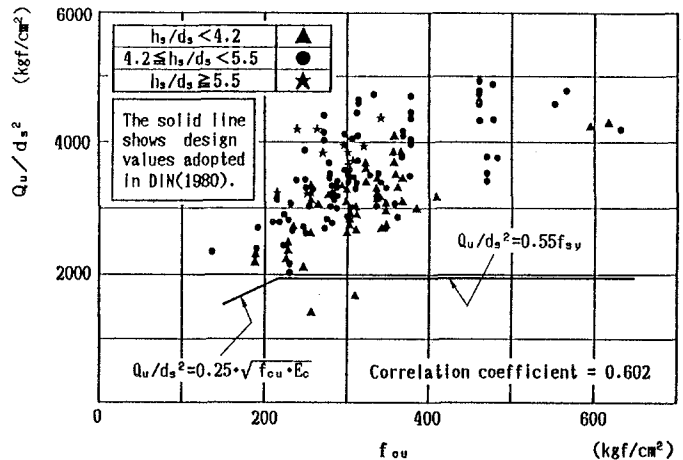


Fig.11  $Q_u/d_s^2 - f_{cu}$  relation by Roik (Ordinary) .

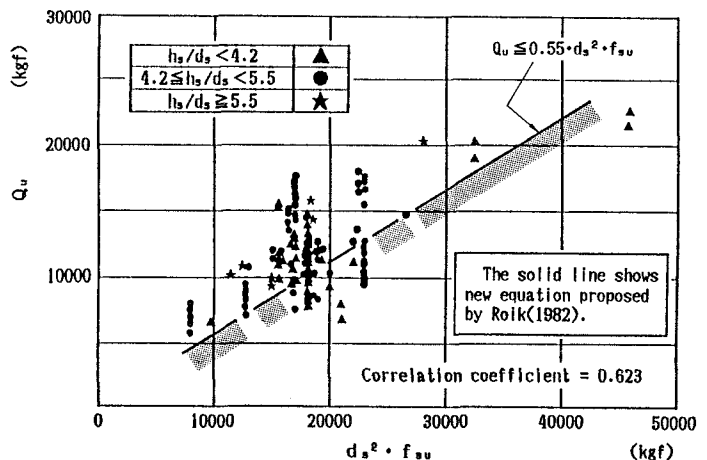


Fig.12  $Q_u - d_s^2 f_{su}$  relation by Roik (New) .

れるものとして、支圧およびせん断のモデルに分けている。つまり、コンクリート強度が低い場合、スタッドの破壊は、スタッド前面のコンクリートの支圧応力が超過することより生じる。一方、コンクリート強度が高い場合、スタッドの破壊はスタッドのせん断が支配的となる。ただし、スタッドの高さと直径との比が4.2 以上の場合、スタッドの高さが大きくなっても耐荷力は増加しないとし、スタッドの高さと直径との比が3.0 以下では引き抜きの危険があるので使用を認めていない。この図より明らかなように、この設計値は試験データに比較して、かなり低い値を示しており、安全側過ぎると思われる。

一方、 $Q_u = d_s^2 \cdot f_{su}$  関係（破壊形式としてスタッドのせん断破壊が支配的である場合）を Fig. 1 2 に示す。同図には  $R_{iok}$  が、とくにコンクリート強度が高い場合に試験結果とよく一致するとして、最近の研究において提案した式から求められた直線も併記してある<sup>25)</sup>。Fig. 1 2 より明らかなように、新しい  $R_{iok}$  の式は全試験データのほぼ中央値を示していることがわかる。しかし、この表現法でも試験データとの相関性が低いことがわかる。Fig. 1 1 と Fig. 1 2 の相関係数は、それぞれ 0.602 と 0.623 であった。

### 3. スタッドの静的強度に関する合理的な評価法の提案

以上から、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必要性が認識できた。そこで、先に示したわが国も含めた世界中の代表的な試験データ（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、既往の強度式および著者らの経験から判断して、静的強度は次のような指数型の重回帰モデルによって表されるものと仮定した。

$$Q_u = \alpha \cdot d_s^a \cdot h_s^b \cdot f_{su}^c \cdot f_{cu}^d \quad (2)$$

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/cm<sup>2</sup>)

$f_{cu}$ ：コンクリートの圧縮強さ (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\alpha$ ：係数

重回帰分析結果より次式を得た。

$$Q_u = 465.59 \cdot d_s^{1.273} \cdot h_s^{0.469} \cdot f_{su}^{-0.190} \cdot f_{cu}^{0.525} \quad (3)$$

$$T \text{ 値: } \quad 16.61 \quad 8.316 \quad 2.142 \quad 13.12$$

ここで、T 値は回帰式の指数の有意性を検定するためのものである。T 値が 2.0 以下の場合、有意性が無い、2.0～3.0 の場合はその因子の有意性が疑わしい、4.0 以上の場合には特に有意性があると判断される。

この結果、 $d_s$ 、 $h_s$ 、 $f_{cu}$  は重要なパラメーターであり、 $f_{su}$  は定数化してよいと考えられる。そして、式の単純化を考えて各指数を式 (4) のように丸めることができると判断した。

$$Q_u = \alpha' \cdot d_s^{1.5} \cdot h_s^{0.5} \cdot f_{cu}^{0.5} \quad (4)$$

式 (4) の係数  $\alpha'$  は、全変数 ( $d_s$ 、 $h_s$ 、 $f_{su}$ 、 $f_{cu}$ ) の平均値において、式 (4) と式 (3) との指数差で与えられる。すなわち、次式で計算できる。

$$\alpha' = \alpha \cdot d_{sm}^{-0.227} \cdot h_{sm}^{-0.031} \cdot f_{sum}^{-0.190} \cdot f_{cum}^{0.025} \quad (5)$$

式 (5) に各変数の平均値を代入すると、

$$\alpha' = 86.30 \quad (6)$$

となる。さらに、式 (4) は次式のように変換できる。

$$\begin{aligned}
 Q_u &= 86.3 \cdot d_s^2 \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} \\
 &= 109.9 \cdot (\pi \cdot d_s^2 / 4) \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} \\
 &= 110 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} \quad (7)
 \end{aligned}$$

ここで、 $A_s$ ：スタッド軸部の断面積 ( $\text{cm}^2$ )

この式(7)の妥当性について考察してみる。全試験データについての実験値 ( $Q_u$ ) と式(7)による計算値 ( $Q_u'$ ) とを比較した結果を Fig. 13 に示す。この相関関係から、次式を得た。この場合の相関係数は 0.894 であった。

$$Q_u = 0.918 \cdot Q_u' + 964 \quad (8)$$

式(8)の係数および相関係数より判断して、式(7)をスタッドの終局耐荷力に関する評価式として提案しても既往のものより適合性は高い。しかし、Fig. 13 で明かなように、 $Q_u$  の低い範囲では実験値との誤差が大きくなり、まだ試験の全領域での適合性は統一されていない。それゆえ、本研究で整理した全データについて、式(9)でもって再度回帰分析した。その結果、式(10)が得られた。

$$Q_u = \beta \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} \quad (9)$$

$$Q_u = 100.9 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} + 964 \quad (10)$$

最終的に、式(10)の係数および切片の数値を丸め、適用範囲内において1つ式で表すことが可能であるとするならば、スタッドの終局耐荷力に関する評価式として、次式が導かれる。

$$Q_u = 100 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} + 1000 \quad (11)$$

この式(11)によって求めた計算値 ( $Q_u'$ ) と実験値 ( $Q_u$ ) とを比較した結果を Fig 14 に示す。この図より明かなように、 $Q_u'$  は全領域において  $Q_u$  の中央値を与えていることがわかる。

全データについての実験値 ( $Q_u$ ) と式(11)による計算値 ( $Q_u'$ ) との相関関係は、次式で与えられる。

$$Q_u = 1.009 \cdot Q_u' - 45.84 \quad (12)$$

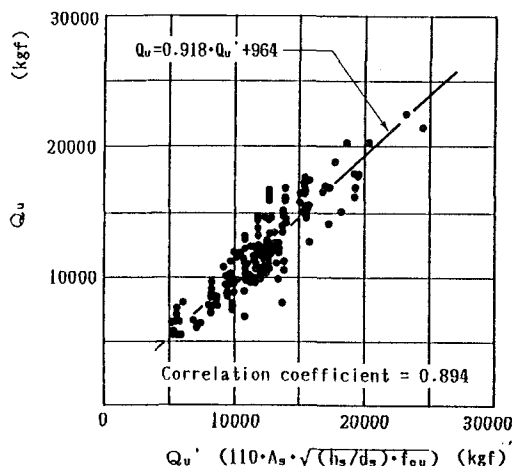


Fig.13 Fitness of Equation (7) .

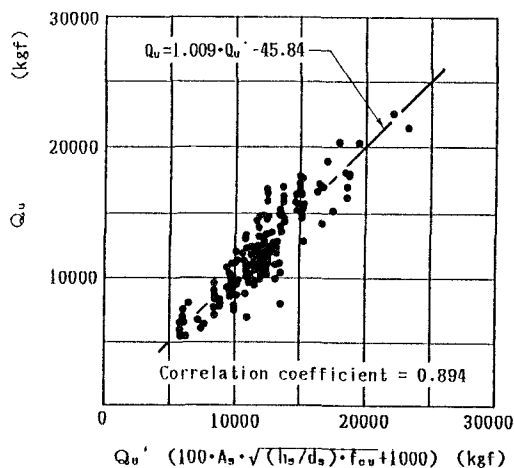


Fig.14 Fitness of Equation (11) .

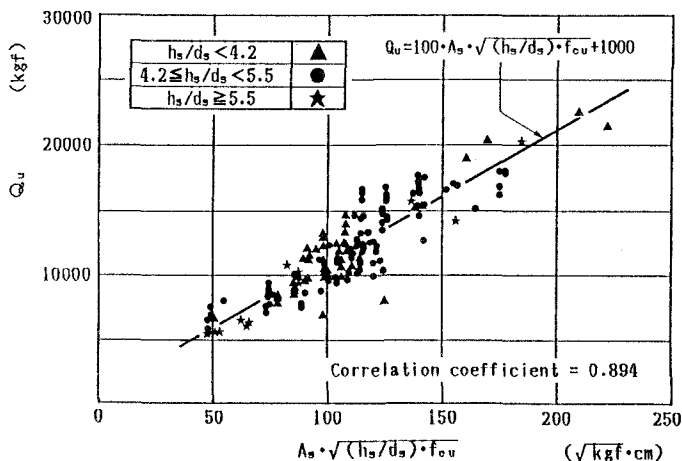


Fig.15 Verification of the new expression (Parameter:  $h_s/d_s$ ) .

この相関係数は 0.894 である。

次に、 $Q_u - A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}}$   
 $\cdot f_{cu}$  関係において全試験データを  
 各種パラメーターごとに分解して式  
 (11) との対応を調べてみた。そ  
 れらの結果を Fig. 15～19 に示す。

Fig. 15 は  $h_s/d_s$ 、Fig. 16 は  
 $f_{cu}$ 、Fig. 17 は  $d_s$ 、Fig. 18 は  
 スタッドの縦配列を、それぞれ変化  
 させた場合の結果であり、Fig. 19  
 にはわが国<sup>(18)・23)</sup>と諸外国<sup>(6)・17)</sup>の  
 結果を比較したものを示す。これら  
 の結果、いずれのパラメーターでデ  
 ータを分離しても、各試験データの  
 グループは式(11)を境にしてば  
 らついていることがわかる。

以上のようなことから、これまで  
 世界各国で実施された押抜き試験結  
 果のばらつきはかなり大きいと指摘  
 されていたが<sup>(26)</sup>、これは試験結果の  
 整理・表現法に適正を欠いていたた  
 めであると考えられる。本研究で示  
 した評価法を用いて試験データを整  
 理すると、バラツキは非常に小さく  
 なった。

最終的に、式(11)をスタッド  
 の静的強度を算定するための合理的  
 な評価式と考えられる。ここで、ス  
 タッドの静的強度とは、ずれ量に関  
 係がなく、最大の抵抗力と定義する。  
 式(11)は、スタッドのせん断お  
 よびコンクリートの割裂のいずれの  
 破壊形式においても使用できるもの  
 と考えられる。

#### 4. 設計のためのスタッドの静的 強度式の提案

諸外国のスタッドの設計値は、現  
 行の AASHTO の示方書のみが試験結  
 果の中央値をねらったものを規定し  
 ており、イギリスおよび西ドイツで  
 は試験結果のばらつきを考慮し、そ

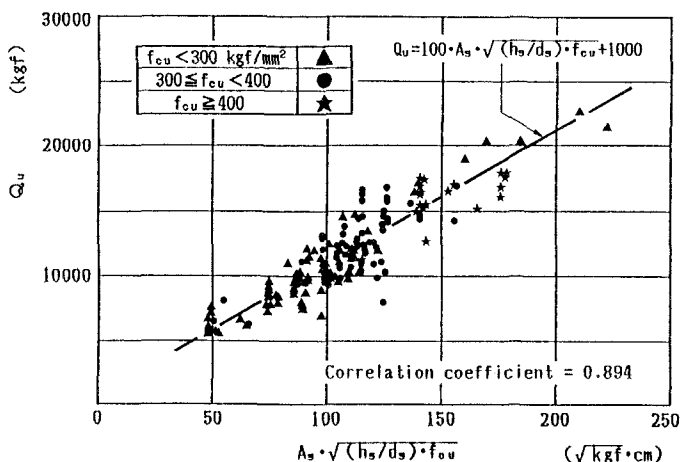


Fig.16 Verification of the new expression (Parameter: $f_{cu}$ ).

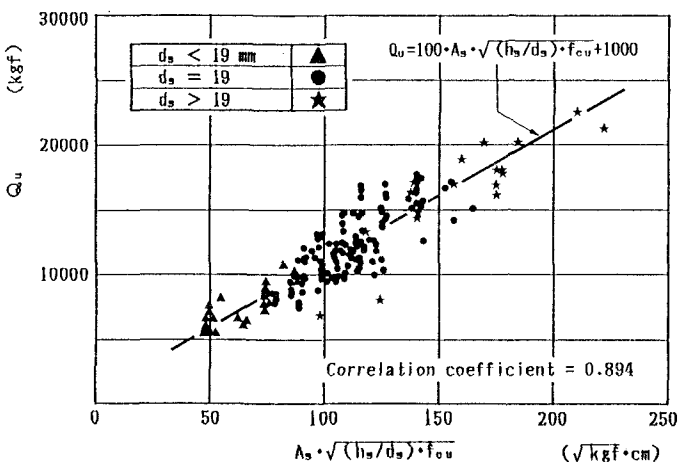


Fig.17 Verification of the new expression (Parameter: $d_s$ ).

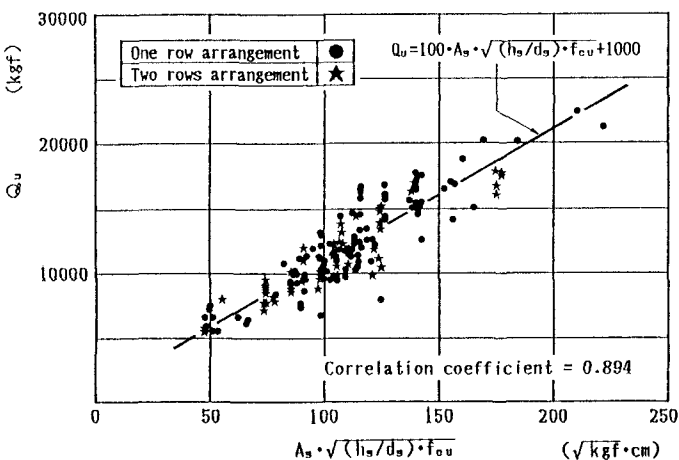


Fig.18 Verification of the new expression (Parameter:arrangement).

これらのばらつきの下限値を包含する形で規定するか、あるいは信頼性を考慮して規定するかのいずれかの決め方によっているのが現状である。よって、参考のため、ヨーロッパ流の考え方を導入して、式(11)から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と、次式を得る (Fig. 19 参照)。

$$Q_{Du} = 100 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{cu}} - 2200 \quad (13)$$

式(13)をコンクリートの圧縮強度に基づいたスタッドの設計強度式として提案する。

ところで、一般に、コンクリートの配合設計においては、コンクリート構造物の安全を確保するために、設計基準強度 ( $f_{ck}$ ) に割増し係数 ( $\alpha$ ) を乗じて得られる配合強度 ( $f_r$ ) を用いることになっている。そして、近年、わが国のコンクリートの施工には、特別な場合を除いて、レデーミクストコンクリートが使用されるのが一般的である。このレデーミクストコンクリートの配合設計においては、品質の変動を考慮して、JIS A 5308 の規定『1回の試験結果は、購入者が指定した呼び強度の値の 85% 以上でなければならない』に従い、変動係数 ( $\delta$ ) を 10% として、 $\alpha=1.2$  が採用されている。

したがって、本研究で誘導したスタッドの終局耐荷力 {式(11)} を今後の設計に反映させるには、式にあるコンクリートの実測圧縮強度を、コンクリートの設計基準強度に置換しておかねばならない。

それゆえ、本研究で整理した既往の全試験データについて、コンクリートの実測圧縮強度は配合強度に等価であると仮定し、実測圧縮強度をすべてについて  $1/\alpha$  だけ低減させて、設計基準強度による再整理を行った ( $f_r = \alpha \cdot f_{ck}$ )。その結果は Fig. 20 となり、この図に基づいて回帰分析すると式(14)を得る。

$$Q_u = 110 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{ck}} + 1000 \quad (14)$$

式(14)は式(11)に比べ切片が同じで、傾きが若干急になった。

この式に対して、ヨーロッパ流の安全性を導入して設計式にしなければならない。やはり、中央値からその標準偏差の2倍分だけをシフトダウンした形で与えるのが妥当と考えた。それを Fig. 20 より計算すると次式となる。

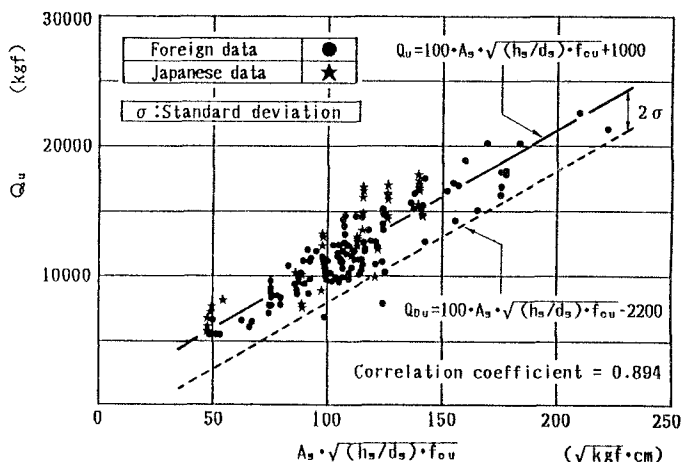


Fig.19 Median equation and 2.3%-Fractile equation arranged by the actual concrete strength.

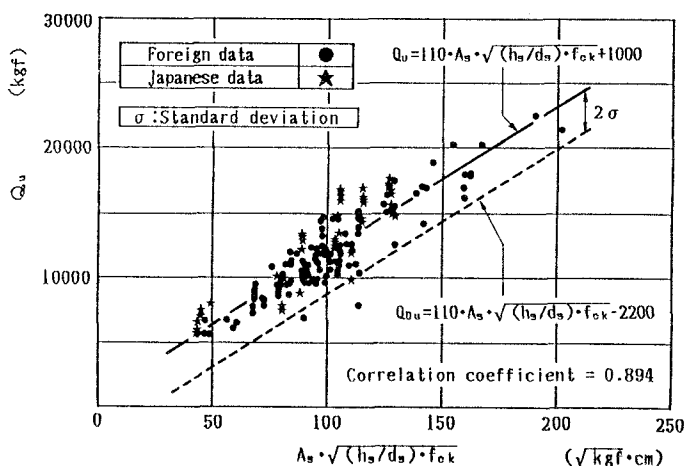


Fig.20 Median equation and 2.3%-Fractile equation arranged by the design concrete strength.

$$Q_{Du} = 110 \cdot A_s \cdot \sqrt{(h_s/d_s) \cdot f_{ck}} - 2200 \quad (15)$$

この最終の式(15)をコンクリートの設計基準強度に基づいたスタッドの設計強度式として提案する。もし、レディーミックスコンクリートを用いる場合でも、十分な施工管理を行い、確かな配合強度が得られることがわかり、割増し係数を1.0にとることができるならば、式(13)を設計式としてよい。

なお、これら設計式の適用範囲はTable 2に示された数値を参照し、スタッドの直径( $d_s$ )を13~32mm、高さ( $h_s$ )を50~210mm、引張強さ( $f_{su}$ )を4100~5600kgf/cm<sup>2</sup>(JIS B 1198-1982を準用した<sup>27)</sup>)、および、コンクリートの圧縮強さ( $f_{cu}$ )を140~630kgf/cm<sup>2</sup>としておきたい。さらに、スタッドの引抜きによる静的破壊を防ぐため、 $h_s/d_s \geq 3.0$ としたい。

ただし、コンクリートの打込み方向によって、スタッドの終局強度および荷重-ずれ関係に無視できない影響を与えるので<sup>22), 28)</sup>、柱部材やけたの下フランジに溶植されたスタッドに対しては、コンクリートの打込み方向の違いによる強度補正をしなければならないことを付記しておきたい。

## 5. 結 論

スタッドの静的強度式に関して、既往の研究および諸外国の主要示方書の評価式を紹介し、既往の試験データとの対応性から問題点を指摘し、合理的な評価式を提示する必要性を述べた。そして、既往の試験データについて重回帰分析を行い、その結果からスタッドの静的強度に関する合理的な評価法を導き出すことができた。本研究を要約すると次のような結論を述べるができる。

(1) 重回帰分析の結果に基づいて、スタッドの静的強度式として式(11)を提案した。本論文で誘導したこの式は、既往の研究から見いだされていたスタッドの静的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いる。さらに、式(11)は、Fig. 15~19より明らかなように、 $h_s/d_s$ 、 $f_{cu}$ 、 $d_s$ および縦配列などをパラメーターとして試験結果を分解して比較しても、ほぼ中央値を示し、実験値( $Q_u$ )との良好な整合性が確認され、合理的な評価式であると考えられる。

(2) 設計のためのスタッドの静的強度式は、諸外国の設計指針類を参考にし、試験データのばらつきの標準偏差の2倍だけ下側にシフトした式(13)で与えるのが合理的である。Fig. 19に示すようにばらつきの下限値を包含する。

(3) わが国のコンクリート施工には、特別な場合と除いてレディーミックスコンクリートが用いられるものと思われる。レディーミックスコンクリートを利用すると仮定し、設計基準強度に対する配合強度の割増し率を考慮し、コンクリートの設計基準強度で推定できる設計強度式は式(15)となる。この式(15)も、Fig. 20から明らかなように、試験データに対して(3)と同様な安全性が確保されている。

謝 辞：本研究を行うにあたり、日本スタッドウェルディング(株)大阪支社技術部長の三好栄二氏から試験データに関する資料の一部を提供していただきました。ここに記して厚く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 日本鋼構造協会：複合構造－複合構造システム小委員会報告－、JSSCレポート、No.4、1987。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書、1980。
- 3) AASHTO:Standard Specification for Highway Bridges, 13th, 1983。
- 4) BSI:BS5400;Part5-Codes of Practice for Design of Composite Bridges, 1979。
- 5) DIN:Richtlinien für Stahlverbundträger, 1980。
- 6) Viest,I.M.:Tests of Stud Shear Connectors, Part I~IV, Nelson Engineering Test Data, 1954-1957。
- 7) Thürlimann,B.:Fatigue and Static Strength of Stud Shear Connectors, Journal of ACI, Vol.30。

No.12, pp.1287-1302, 1959.

- 8) Sattler, K.: Betrachtungen über neuere Verdübelungen im Verbundbau, Bauingenieur, Vol.37, No. 1, pp.1-8, 1962.
- 9) Chapman, J.C. and Balakrishnan, S.: Experiments on Composite Beams, Structural Engineer, Vol. 42, No.11, pp.369-383, 1964.
- 10) Slutter, R.G. and Driscoll, G.C.: Flexural Strength of Steel-Concrete Composite Beams, Proceeding of ASCE, Vol.91, No.ST2, pp.71-99, 1965.
- 11) Mainstone, R.I. and Menzies, J.B.: Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beams for Bridges : Part1, Static and Fatigue Tests on Push-out Specimens, Concrete, Vol.1, No.9, pp. 291-302, 1967.
- 12) Hawkins, N.M.: The Strength of Stud Shear Connectors, University of Sydney, Research Report No.R141, 1970.
- 13) Menzies, J.B.: CP117 and Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beams made with Normal-density or Lightweight Concrete, Structural Engineer, Vol.49, No.3, pp.137-154, 1971.
- 14) Ollgaard, J.G., Slutter, B.G. and Fisher, J.W.: Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, AISC, Engineering Journal, Vol.8, No.2, pp.55-64, 1971.
- 15) Hallam, M.W.: The Behaviour of Stud Shear Connectors under Repeated Loading, University of Sydney, Research Report No.R281, 1976.
- 16) Oehlers, D.J.: Results of Tests on 101 Push-out Specimens and 4 Composite T-Beams, University of Warwick, Research Report No.CE8, 1981.
- 17) Roik, K. und Hanswille, G.: Beitrag zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln, Stahlbau, Vol.52, No.10, S.301-308, 1983.
- 18) 山本 稔・中村正平: Stud Shear Connector の試験報告、建設省土木研究所報告、109, pp.1-24, 1961.
- 19) 安宅 勝・赤尾親助: スタッヂベル押抜試験報告、八幡製鉄研究、第267-268号、pp.1-5, 1964.
- 20) 沢野・浜田・若林・成岡: 直径19mm スタッヂベルの押し抜き疲労強度に関する研究、土木学会論文報告集、第174号、pp.1-9, 1970.
- 21) 平野・穂積・吉川・友永: 床鋼板つきコンクリートスラブに埋込まれたスタッヂコネクタの押抜試験、日本建築学会、第281号、pp.57-69, 1979.
- 22) 赤尾・栗田・平城: 頭付きスタッヂ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.
- 23) 平城・栗田・赤尾: スタッヂの押抜き挙動に及ぼす影響因子に関する基礎的研究、土木学会合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp.81-89, 1986.
- 24) ACI 318-83: Building Code Requirements for Reinforced Concrete, 1983.
- 25) Roik, K.: Stahlbau Handbuch - Für Studium und Praxis, Band 1: Verbundkonstruktionen, Stahlbau-Verlags-GmbH, 1982.
- 26) 阿部英彦: 鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究、国鉄、鉄道技術研究所、No.961, 1975.
- 27) 日本規格協会: 頭付きスタッヂ、JIS B 1198-1982, 1982.
- 28) Maeda, Y., Matsui, S. and Hiragi, H.: Effects of Concrete-Placing Direction on Static and Fatigue Strengths of Stud Shear Connectors, Tech. Reports Osaka U. Vol.33, No.1733, pp.397-406, 1983.

(1988年10月12日受付)