

(22) データベースに基づく頭付きスタッドのせん断耐力式の評価

島田 侑子¹・福元 敏之²・馬場 望³
城戸 将江⁴・田中 照久⁵・鈴木 英之⁶

¹正会員 千葉大学准教授 工学研究院建築学コース (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail:yshimada@faculty.chiba-u.jp

²正会員 鹿島建設 技術研究所 (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1)

E-mail:Fukumoto-to@kajima.com

³正会員 大阪工業大学教授 工学部建築学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

E-mail:nozomu.baba@oit.ac.jp

⁴正会員 北九州市立大学准教授 国際環境工学部 (〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1)

E-mail:kido-m@kitakyu-u.ac.jp

⁵正会員 福岡大学助教 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:sttanaka@fukuoka-u.ac.jp

⁶正会員 安藤ハザマ 技術開発所 (〒305-0822 つくば市荏間515-1)

E-mail:Suzuki.hideyuki@ad-hzm.co.jp

ずれ止めに多く用いられる頭付きスタッドの終局せん断耐力式については、各種合成構造設計指針・同解説に示された設計式が一般的に用いられている。しかしこの設計式で得られた耐力値は、スタッド径がφ25の場合やコンクリート強度が比較的高い場合には特に、実験で得られた終局耐力とはあまり対応関係が良くない。

本研究は、頭付きスタッドの押し抜き試験のデータベースを整理し、影響因子と耐力の関係を重回帰分析することで、設計式に簡易な補正係数をかけることによる終局せん断耐力式の補正とその評価を示した。この方法は非常に簡易な方法ながら汎用性が高く、また既往研究や海外の耐力式と比べてみても、全般的に実験結果と良好に対応しており、信頼性の高い耐力式であることを確認した。

Key Words : Headed Stud, Design Formula, Database, Push-out Test, Multiple regression analysis

1. 序

シアコネクタの大部分を占める頭付きスタッド（以下、スタッド）は、各種合成構造設計指針・同解説¹⁾に示された終局せん断耐力の式（以下、設計式）式(1)によって設計される。

$$q_u = 0.5_{sc} a \sqrt{F_c E_c} \quad (1)$$

$_{sc}a$: スタッド1本の断面積

F_c : コンクリート設計強度

E_c : コンクリートのヤング率

様々な耐力評価式が提案されており、式中に用いられている因子も異なる。しかし、それらの評価式のいずれが妥当であるのか、という点に関して比較検討した研究は少ない。また、これまでに示された評価式より精度良く実験で得られた結果を評価できる式が他にある可能性もあるが、その点に関して包括的に検討した研究はない。そこで本研究では、スタッドの押し抜き試験結果のデータベースを整理し、これまでの評価式と実験結果の対応関係について考察を行う。その上で、設計式を基本とし、簡易な補正係数を乗じることで補正する方法を提案し、その評価式の妥当性について検討する。

一方、欧米の設計基準^{2) 3)}や既往の研究^{4) 5)}をみると、

2. データベースにおける耐力及び諸因子の傾向

本研究では等厚スラブを対象とし、文献6)、及び文献5)のスタッドの押し抜き試験で得られた終局せん断耐力に関するデータベースより国内の研究のみを用いて、補正係数について検討する。ここで、国内の研究に限ったのは、材料強度や施工方法に起因する耐力のばらつきをなるべく排除するためである。等厚スラブの試験体259体 ($\phi 9 \sim \phi 25$) について、設計式による耐力値 (以下、設計値) $calQ_s$ と実際の実験結果による終局せん断耐力 (以下、実験値) $expQ_s$ を比較して図-1に示す。同一の設計値であっても、対応する実験値にはばらつきが大きくなることがわかる。実験値をスタッド断面積で除した $expQ_s/a$ と $\sqrt{E_c F_c}$ との関係を図-2に示すと、図中破線で示した設計値が頭打ちとなる $\sqrt{E_c F_c} \geq 900$ の範囲において、大半の実験値は設計値よりも大きい値を示していた。したがって、 E_c もしくは F_c の少なくともいずれかが大きい値を示す場合に実験値と設計値が大きくずれると考えられる。また、 $650 \leq \sqrt{E_c F_c} \leq 750$ の範囲でばらつきが最も大きく、設計値を下回ることもあることから、この範囲での E_c もしくは F_c の値がどのように分布しているのか、確認する必要がある。

そこで、本研究で整理したデータベースにおける F_c と E_c の分布を図示する。図-3に F_c と、終局せん断耐力の実験値 $expQ_s$ を設計値 $calQ_s$ で除した $expQ_s/calQ_s$ の関係の分布を示す。 $F_c > 50$ の範囲では大多数の $expQ_s/calQ_s$ は1.0以上を示しているが、 $F_c < 50$ の範囲では $expQ_s/calQ_s$ は0.3から2以上にわたってばらついている。本データベースの F_c の平均値は32.1、標準偏差は18.1より、 F_c が正規分布に従うとすると、ばらつきが大きい $F_c < 50$ の範囲は約80%のデータに相当する。よって、一般的にスタッドを用いる合成梁において、コンクリート設計強度は 21N/mm^2 か 24N/mm^2 が多く、実際のコンクリート強度はそれより上回って 30N/mm^2 程度になることを考慮すると、データベースによる F_c の平均値は、最もばらつきの大きい範囲を代表した値であると言える。

また図-4に E_c と $expQ_s/calQ_s$ の関係の分布を示す。 $E_c > 35000$ の範囲では大多数の $expQ_s/calQ_s$ は1.0以上を示す一方、 $E_c < 35000$ の範囲では $expQ_s/calQ_s$ は0.3から2以上にわたってばらついている。本データベースの E_c の平均値は21731、標準偏差は7516より、 E_c が正規分布に従うとすると、ばらつきが大きい $E_c < 35000$ の範囲は約90%以上のデータに相当する。なお、ここで示した E_c のうち約40%は実測値ではなく F_c を式(2)に代入して算出した値である。

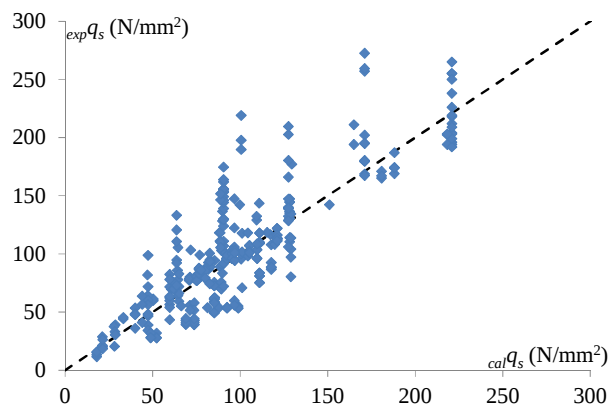


図-1 終局せん断耐力の設計値と実験値の比較

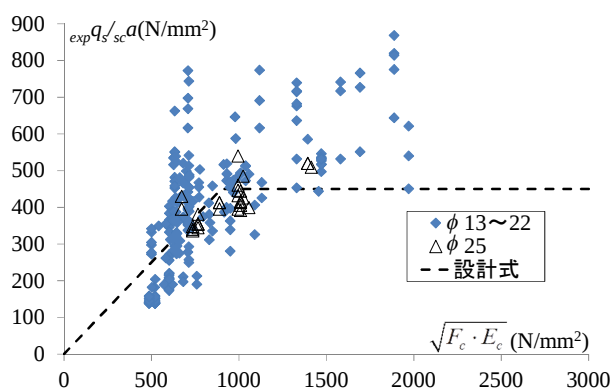


図-2 終局せん断耐力の実験値の分布

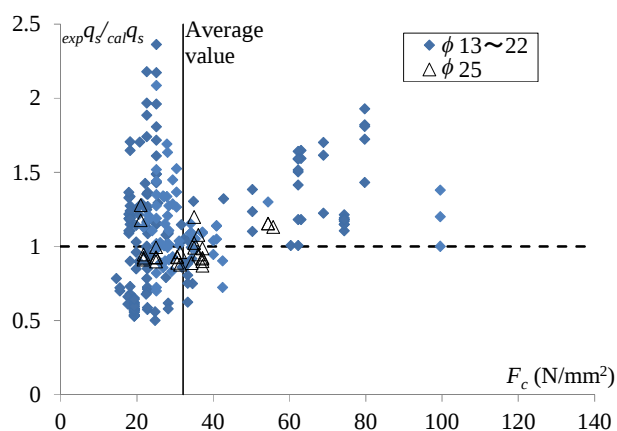


図-3 終局せん断耐力の比とコンクリート設計強度の関係

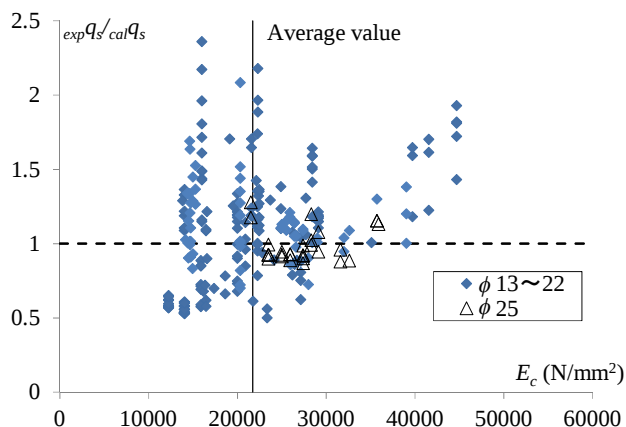


図-4 終局せん断耐力の比とコンクリートのヤング率の関係

$$E_c = 21000 \left(\frac{\gamma}{23} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{F_c}{20}} \quad (2)$$

γ : コンクリート気乾単位体積重量

前述したように、実務ではコンクリート設計強度は 21N/mm^2 か 24N/mm^2 が多いことから、式(2)にこれらの値を代入して計算すると、 E_c はそれぞれ 21516 N/mm^2 、 23004 N/mm^2 となり、上記の本データベースの E_c の平均値はこれらの間に相当している。

以上から、設計値が頭打ちとなる範囲で大半の実験値は設計値よりも大きい値を示していたのは、 E_c および F_c のいずれも比較的大きな値を示した場合であるが、それは全体からみると $10\sim 20\%$ 程度にとどまっていることがわかった。分布の傾向としては、 E_c および F_c のいずれか最もばらつきが大きい範囲で実験値と設計値が大きくずれており、この範囲の実験値を精度良く評価できる耐力式が必要であると考えられる。

3. 欧米の設計指針・既往文献の評価式との比較

序で述べたように、スタッドのせん断耐力式は国によって異なっており、また既往研究でも様々に検討されている。本章では、本研究のデータベースにおける実験値に対して、これらの評価式がどれほどの対応関係を示すのか、またそこから本研究で提案した補正式の妥当性を検討する。

(1) AISC式の場合

米国ではAISCによる式(3)が用いられている。

$$q_s = 0.5_{sc} a \sqrt{F_c \cdot E_c} \leq R_g R_p \cdot_{sc} a \cdot F_u \quad (3)$$

R_g, R_p : 頭付きスタッドの本数と位置に関わる係数 (等厚スラブはどちらも1)
 F_u : 頭付きスタッドの引張強度

本研究のデータベースによる、実験で得られた等厚スラブの終局せん断耐力値 $expq_s$ と、AISC式による終局せん断耐力値 q_{AISC} の比較を図-5に示す。AISC式は設計式に近い形をしているが、 $\sqrt{E_c F_c} \geq 900$ の制限がないため、 $expq_s$ が 100kN のあたりでばらつきが多少見られるが、全体的に q_{AISC} は $expq_s$ と良い対応を示している。 q_{AISC} と $expq_s$ で回帰分析を実施すると、補正 $R^2=0.79$ と設計値よりも高くなった。

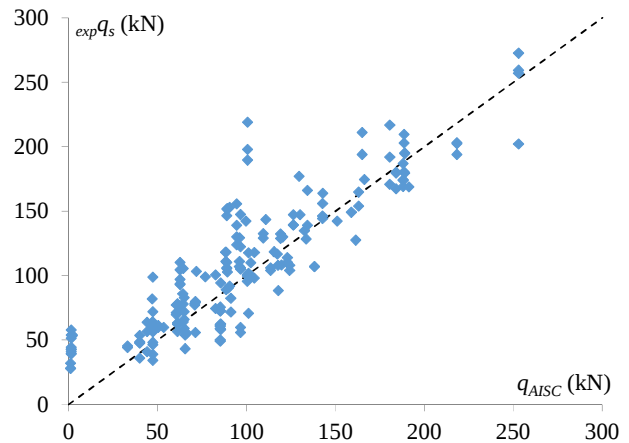


図-5 終局せん断耐力の実験値と q_{AISC} の関係

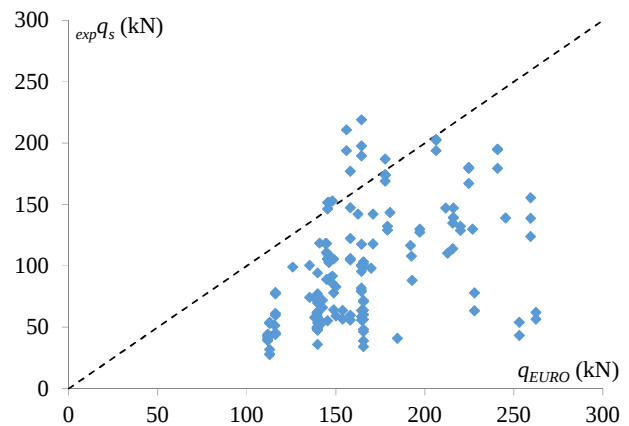


図-6 終局せん断耐力の実験値と q_{EURO} の関係

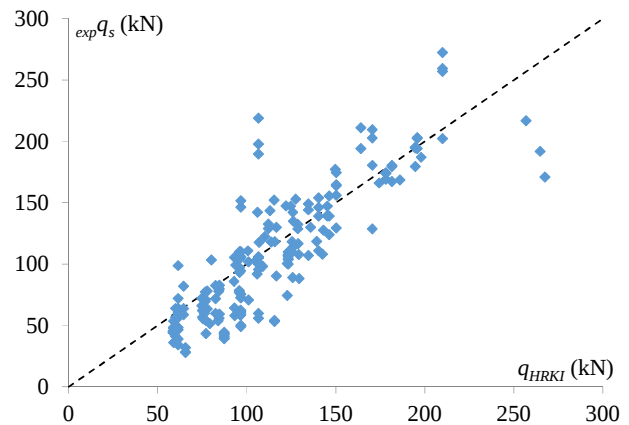


図-7 終局せん断耐力の実験値と q_{HRKI} の関係

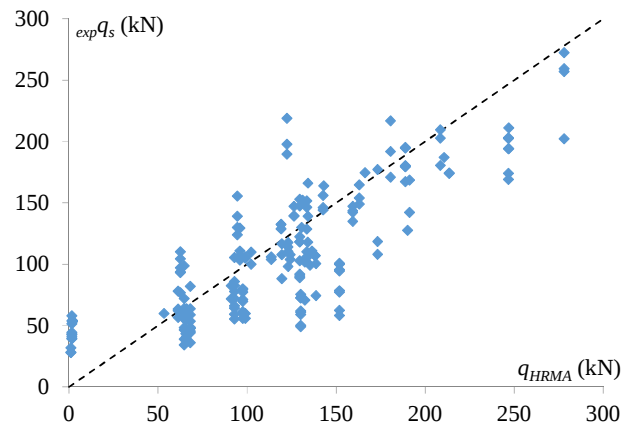


図-8 終局せん断耐力の実験値と q_{HRMA} の関係

(2) Eurocode4式の場合

欧州ではEurocode4による式(4)が用いられている。

$$q_s = \min \left\{ \frac{0.8F_u \pi d^2 / 4}{1.25}, \frac{0.29\alpha \sqrt{F_c \cdot E_c}}{1.25} \right\} \quad (4)$$

d : 頭付きスタッドの径 ($\phi 16 \sim 25$)

L : 頭付きスタッドの突出長さ

α : 径長比 L/d に関する係数

$$\alpha = 0.2(L/d + 1) \quad (3 \leq L/d < 4)$$

$$\alpha = 1 \quad (4 \leq L/d)$$

(1)と同様に、実験で得られた等厚スラブの終局せん断耐力値 $_{exp}q_s$ と、Eurocode4式による終局せん断耐力値 q_{EURO} の比較を図-6に示す。全体的に q_{EURO} は $_{exp}q_s$ の2倍程度の過大評価となっており、ばらつきも大きい。また $q_{EURO}=150\text{kN}$ 付近では、 $_{exp}q_s$ が異なるにもかかわらず、同じ q_{EURO} の値となっている場合がある。 q_{EURO} と $_{exp}q_s$ で回帰分析を実施すると、補正 $R^2=0.15$ と著しく低い値となった。

(3) 平城式の場合

国内においても様々な検討がなされており、例えば平城らは式(5)を提案している。

$$q_s = 31.3 \cdot a \sqrt{\frac{L}{d} \cdot F_c} + 9800 \quad (5)$$

(1)と同様に、実験で得られた等厚スラブの終局せん断耐力値 $_{exp}q_s$ と、平城式による終局せん断耐力値 q_{HRKI} の比較を図-7に示す。 $_{exp}q_s$ が大きい範囲で多少対応が悪くなる部分や、 $_{exp}q_s$ が小さい範囲でやや過大評価気味ではあるものの、全体的には概ね q_{HRKI} は $_{exp}q_s$ と対応していると言える。 q_{HRKI} と $_{exp}q_s$ で回帰分析を実施すると、補正 $R^2=0.72$ となり、設計値よりも高い値となった。

(4) 平間式の場合

最近では、多数の実験データから平間らに基づき、式(6)が提案されている。

$$\begin{aligned} q_s &= F_u \cdot a \quad (\phi < 25) \\ q_s &= F_u \cdot a - 0.00013(F_u \cdot a)^2 \quad (\phi \geq 25) \end{aligned} \quad (6)$$

(1)と同様に、実験で得られた等厚スラブの終局せん断耐力値 $_{exp}q_s$ と、平間式による終局せん断耐力値 q_{HRMA} の比較を図-8に示す。 $_{exp}q_s$ が異なるにもかかわらず、同じ q_{HRMA} の値となっている場合が所々あるものの、全体的には概ね q_{HRMA} は $_{exp}q_s$ と対応している。 q_{HRKI} と $_{exp}q_s$ で回帰分析を実施すると、補正 $R^2=0.67$ となり、設計値よりも高い値となった。

4. 終局せん断耐力を評価するための補正係数

前章より、欧米や既往の研究による評価式は、式によっては設計式よりも良い対応を示すものがあつた。しかし、実験値と良い対応を示したも評価式は、 L/d や F_u といった設計式には含まれていない因子を含んでおり、このような因子が実験値を再現するためにどの程度必要か、検討する必要がある。また、実務レベルで用いることを考えると、一般的には実測値を得ることを少ない F_u を用いる評価式はやや使いにくい。そこで、本章ではスタッドが実際に押し抜き試験で示す終局せん断耐力を評価できるような新たな評価式を考える。ここでは、実務面で適用しやすいように、現行の設計式に簡易な補正係数を乗じた形態の補正式とし、補正係数について検討を行う。補正係数は現行の設計式が作成された経緯より、スタッドの寸法やコンクリート、鋼材の材料強度などの各種の因子による計算式とする。

式(1)に示す現行の設計式に乘じる補正係数と各因子の影響度を検討するため、表-1に示す因子の組み合わせについて、重回帰分析を行った。因子は現行の設計式に用いられている sa 、 E_c 、 F_c 、及び欧米の設計指針で因子として用いられている L/d 、 F_u とした。重回帰分析は、これら5つの因子が全て示されていないと実施できないので、条件に当てはまる等厚スラブの試験体192体を分析対象とした。重回帰分析によって得られた各Caseの補

表-1 等厚スラブの補正係数検討用パラメーターの組み合わせ

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
sa	○	○	○	○							○	○	○	○	○	○					○	○	○	○		○
E_c	○				○	○	○				○	○	○				○	○	○		○	○	○		○	○
F_c		○			○			○	○		○			○	○		○	○		○	○	○		○	○	○
L/d			○			○		○		○		○		○		○		○	○	○	○		○	○	○	○
F_u				○			○		○	○			○		○	○		○	○	○		○	○	○	○	○

正R2を表-2に示す。表-2によると、補正R2が0.5以上のため、有効なCaseと考えられるのは表内で灰色に塗られた14つのCaseであり、これらのCaseで用いた要素には全て a が共通して含まれている。また、分析する要素数が多くなると補正R2が向上してより実験値を良好に表現できる傾向が見られた。全26Caseの中で最も修正R2が高いCase26の回帰分析結果を式で表すと式(7)となる。

$$q_s = e^{-6.7} {}_{sc} a^{1.02} E_c^{0.31} F_c^{0.30} \left(\frac{L}{d} \right)^{0.50} F_u^{0.12} \quad (7)$$

この式を基に、現行の設計式(1)に乗じる等厚スラブの場合の補正係数 β の式を検討する。まず、式(7)の各因子にかかっている指数を簡易にして整理すると、式(8)となる。

$$q_s = 1.22 {}_{sc} a \frac{F_u^{0.12}}{E_c^{0.19} F_c^{0.20}} \sqrt{E_c F_c} \frac{L}{d} \quad (8)$$

現行の設計式と共通する部分を除すると、補正係数 β は式(9)で表される。

$$\beta = \frac{1.22 F_u^{0.12} \sqrt{\frac{L}{d}}}{0.5 E_c^{0.19} F_c^{0.20}} = 2.44 \frac{F_u^{0.12} \sqrt{\frac{L}{d}}}{E_c^{0.19} F_c^{0.20}} \quad (9)$$

次に、 β の計算をより簡易にするため、式(9)中にある E_c や F_c 、 F_u の部分を実数に近似変換する。 L/d については E_c や F_c 、 F_u より指数が大きく、終局せん断耐力に影響することが考えられること、また太径で L の値が破壊性状に影響を与えるという既往研究もふまえ、実数に変換せずにそのまま用いることとする。近似変換は既往文献での重回帰分析での処理、及び2章で示したようにデータベースの平均値で最もばらつきの大きい部分を代表していることから、検討に用いた等厚スラブのデータにおける各因子の平均値に、式(5)中の指数を乗じることで簡易に計算する。 E_c の平均値は23753.95N/mm²、 F_c の平均値は38.06N/mm²、 F_u の平均値は466.02N/mm²より、 β は式(10)のように表される。

$$\beta \Rightarrow 2.44 \frac{466.02^{0.12} \sqrt{\frac{L}{d}}}{23753.95^{0.19} 38.06^{0.20}} = 0.363 \sqrt{\frac{L}{d}} \quad (10)$$

表-2 各検討Caseにおける補正R2

Case	要素数	補正R2	Case	要素数	補正R2	Case	要素数	補正R2
1	2	0.68	11	3	0.68	21	4	0.76
2		0.59	12		0.73	22		0.79
3		0.35	13		0.78	23		0.80
4		0.62	14		0.73	24		0.81
5		0.27	15		0.76	25	0.34	
6		0.27	16		0.62	26	5	0.82
7		0.34	17		0.26			
8		0.19	18		0.34			
9		0.31	19		0.34			
10		0.24	20		0.30			

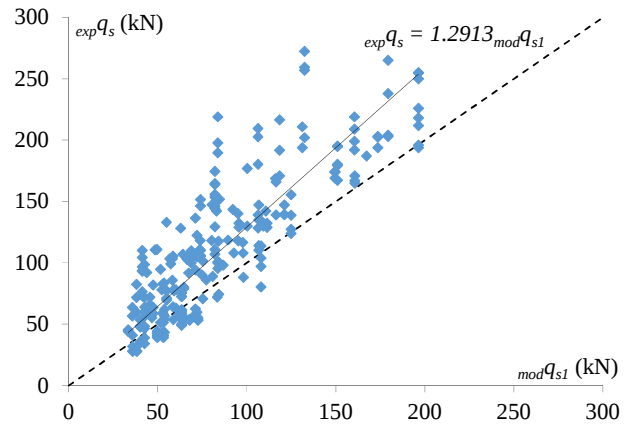


図-9 終局せん断耐力の実験値と $mod q_{sl}$ の関係

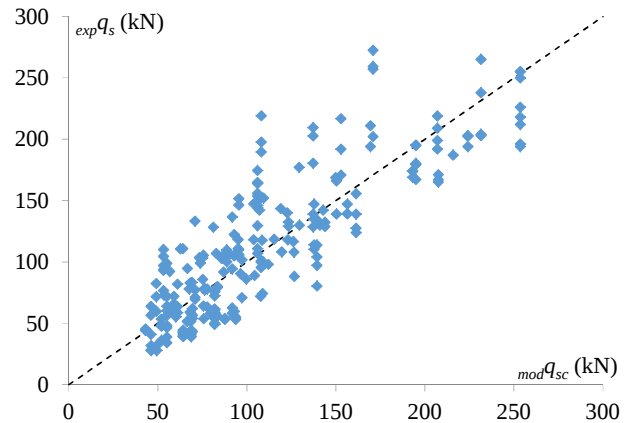


図-10 終局せん断耐力の実験値と $mod q_{sc}$ の関係

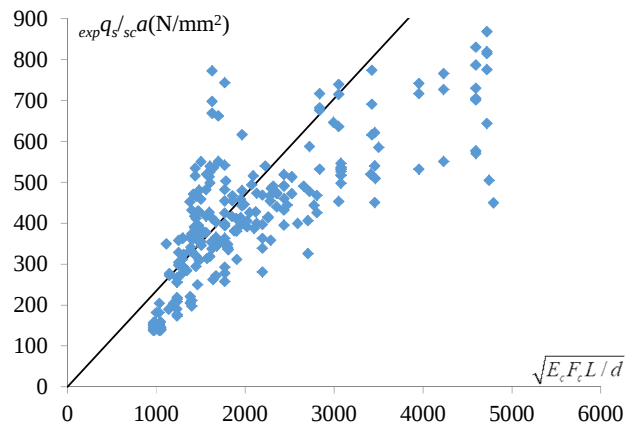


図-11 終局せん断耐力の実験値と $\sqrt{E_c F_c L / d}$ の関係

この β を現行の設計式に乘じて求めた終局せん断耐力を $modQ_{sl}$ とする。データベース内の全ての等厚スラブについて算出した $modQ_{sl}$ と実験で得られた終局せん断耐力 $expQ_s$ との相関関係を図-9に示す。 $modQ_{sl}$ は $expQ_s$ より全体的にやや低めになっている。

$modQ_{sl}$ が $expQ_s$ を過小評価している点を修正するため、 $expQ_s$ と $modQ_{sl}$ との線形近似をとり、図-9に併せて示す。比例定数が1.2913となったことから、 β にこの比例定数を乗じて修正した β' は式(11)のようになる。

$$\begin{aligned}\beta' &= 1.2913\beta \\ \Rightarrow 1.2913 \times 0.363 \sqrt{\frac{L}{d}} &= 0.47 \sqrt{\frac{L}{d}}\end{aligned}\quad (11)$$

式(11)により求めた終局せん断耐力を $modQ_{sc}$ とする。 $modQ_{sc}$ と実験で得られた終局せん断耐力 $expQ_s$ との相関関係を図-10に示す。 $modQ_{sc}$ は概ね $expQ_s$ とよい対応を示すことがわかる。なお、 $expQ_s$ と $modQ_{sc}$ で再度回帰分析を行うと、補正 $R^2=0.64$ となり、補正係数を用いて計算した終局せん断耐力式による値は、設計値を用いた場合（補正 $R^2=0.61$ ）よりやや改善されている。また、 $\sqrt{E_c F_c L/d}$ を横軸に、実験値の応力度を縦軸にした相関関係を図-11に示す。図中黒線は $0.5\beta'$ の線を表しており、 $\sqrt{E_c F_c L/d}$ が大きくなるとやや高めの傾向を示すが、概ねプロットの中央部を通っている。

5. 結

頭付きスタッドの終局せん断耐力に関して、押し抜き試験に関するデータベースを整理し、設計式により算出された耐力値と実験で得られた終局せん断耐力値の対応

関係があまり良好でなく、特に用いられている因子のばらつきが大きいときに対応関係が悪化することがわかった。設計式に用いられている諸因子の傾向をデータベースで確認すると共に、欧米の指針や既往の研究で示された評価式と実験値との対応関係も確認した。その上で、簡単に実験値を精度良く評価するために、設計式に乘じる簡易な補正係数を検討した。補正係数は諸因子の組み合わせについて、全26Caseの重回帰分析から最も対応関係のよい組み合わせとなったCaseを選び、係数部分を実数に変換して算出した。このようにして求めた補正係数を用いた終局せん断耐力の補正式は、設計式よりも実験値を適切に評価していることが確認された。この補正式は、簡易かつ設計式にあった適用条件を考慮せずに用いることができ、また欧米や既往の研究での評価式に用いられているスタッドの引張強度といった、実測値を実務面で取得していないような値を用いずに十分に耐力を評価できることから、研究だけでなく実務面においても、合理的なスタッドの設計に役立つものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説 第2版、2010
- 2) AISI：Specification for Structural Steel Buildings, 2005.3
- 3) Eurocode 4：Design of composite steel and concrete structure, Part 1-1, General rules and rules for building, 2004
- 4) 平城弘一，他2名：頭付きスタッドの強度評価式の誘導—静的強度評価式—，構造工学論文集，Vol.35A，pp.1221-1232，1989
- 5) 平間ちひろ，他3名：頭付きスタッドを用いた押抜き試験のせん断耐力に関する文献研究—スラブ形状・破壊種別とスタッド軸径に着目した包括的かつ俯瞰による分析—，日本建築学会構造系論文集，第82巻 第735号，pp.745-751，2017.5
- 6) 島田侑子，他4名：頭付きスタッドの設計式に関する考察，鋼構造年次論文報告集，第24巻，pp.103-110，2016.11

EVALUATION OF SHEAR STRENGTH FORMULA OF HEADED STUD BASED ON THE DATABASE

Yuko SHIMADA, Toshiyuki FUKUMOTO, Nozomu BABA,
Masae KIDO, Teruhisa TANAKA, and Hideyuki SUZUKI

This study proposed the new method of the ultimate shear strength of headed stud by multiplying simply modified coefficient to the design formula. In the first step, the database of ultimate shear strength and some elements affected the strength are organized. Based on the multiple regression analysis on some main elements in database, the modified coefficient is each created separately by slab detail. The modified formulas both in case of flat slab is improved the accuracy of ultimate shear strength than design formula.