

# 論文 ダウエル効果とキンキング効果による力学的因子を用いて検証した スタッドボルトせん断伝達強度

内田 祐介<sup>\*1</sup>・伊藤 嘉則<sup>\*2</sup>

**要旨:** 鉄筋及びボルトなどで緊結された複合構造接合部におけるせん断伝達強度は、コンクリート圧縮強度、鉄筋及びボルトの径と降伏強度によるパラメータに影響を受け、その挙動はダウエル効果及びキンキング効果によるせん断抵抗機構で説明できることは既に知られている。そうした経験則を用いて、本論文ではスタッドボルトのせん断伝達強度をダウエル効果及びキンキング効果による力学的因子で評価した。方法論としては、文献から採取した 200 体の押し抜きせん断データに対して統計分析したが、スタッドボルト高さ比、へりあき比及びはしあき比の影響も考慮した強度式の提案を行った。

**キーワード:** スタッドボルト, せん断伝達強度, ダウエル効果, キンキング効果

## 1. はじめに

既存鉄筋コンクリート造建築物を枠付き鉄骨ブレースで耐震補強する際には<sup>1)</sup>、鉄骨部材と鉄筋コンクリート部材による複合構造接合部が形成される。この接合部では、コンクリート部材に埋め込んだあと施工アンカー鉄筋と鉄骨部材に溶接された頭付きスタッドボルトによって緊結され、両者部材間に無収縮性グラウトモルタルを充填することで一体化が図られている。この接合部に水平力が作用するとグラウトモルタルと鉄骨部材間の接合界面に滑り変形が生じるので<sup>2)</sup>、せん断力の伝達は主に接合界面に直交するアンカー鉄筋及びスタッドボルトによってなされる。したがって、せん断伝達強度に影響を与えるパラメータ因子にはコンクリート圧縮強度、鉄筋・ボルトの径及びその降伏強度などが挙げられる。これらの因子を含めたせん断伝達強度については、プレキャスト鉄筋コンクリート造の接合部を対象に理論的な検証が行われ、ダウエル効果、せん断摩擦効果、キンキング効果などの力学的因子で構成されたせん断伝達強度式が多数提案されている(例えば<sup>3)</sup>)。そうした中、筆者文献<sup>4)</sup>の研究では、複合構造接合部を構成する鉄筋・ボルトのうち異形鉄筋を用いた接着系あと施工アンカーに着目し、そのせん断伝達強度もダウエル効果及びキンキング効果の累加で説明できることを示した。

他方、スタッドボルトのせん断伝達強度式に関しては、Fisher による実験式<sup>5)</sup>が多くの指針で取り入れられている。その後、平城は<sup>6)</sup>、スタッドボルトのせん断伝達強度に影響を与えるパラメータ因子をより詳細に分析した上で、重回帰分析をもとに構築したせん断伝達強度式の提案を行っている。多数のデータを用いて導かれた同算

定式の信頼度は高いが、Fisher 式を含め実験式であるため力学的説明が十分できず、式中のパラメータに乗じられている係数も物理的意味が曖昧となっている。したがって、統計的手法を用いるにしても単なるパラメータ因子の組み合わせで式を構成するのではなく、せん断抵抗機構そのものを表わす力学的因子を直接用いれば統計的手法によって得られた実験式であっても係数も物理的意味を把握しやすくなる。これにより、プレキャスト鉄筋コンクリート造接合部などに対して提案されているせん断伝達強度式との対比も可能となる。

以上において、近年スタッドボルトについても理論にもとづいた検証が進められている中(例えば<sup>7)</sup>)、本論文は鉄筋・ボルトなどのせん断抵抗機構として経験則で知られているダウエル効果及びキンキング効果による力学的因子を取り上げ、スタッドボルトせん断伝達強度(最大強度)との関係を調べた。方法論としては、文献よりスタッドボルトのせん断伝達強度に関する実験データを採取し、回帰分析にもとづく手法を用いて検証を進めた。また、スタッドボルト高さ比、へりあき比及びはしあき比がせん断伝達強度に与える影響も検証し、これらの検証結果を踏まえたせん断伝達強度式の提案を行った。ここで、本論文の一部は文献<sup>8)</sup>で発表した。

## 2. 検証に用いる文献データ

本論文で検証に用いるスタッドボルトのせん断伝達強度に関わる実験データは、鉄骨部材に溶接されたスタッドボルトがコンクリート部材中に埋め込まれた複合構造接合部として構成され、二面せん断による押し抜きせん断実験<sup>9)</sup>が実施された国内の文献資料<sup>10)~28)</sup>を用いた。

\*1 建材試験センター中央試験所 構造グループ 修士(工学) (正会員)

\*2 建材試験センター中央試験所 構造グループ長代理 修士(工学) (正会員)



### 3.2 セン断伝達強度と既往式の関係

図-2に、文献から得られた200体のせん断伝達強度(最大強度  $Q_{\max}$ )と式(1)～式(6)による既往式の関係を示す。ここで、 $Q_{\max}$ は二面せん断実験から得られた最大強度をスタッド本数で除し1本当たりの値に換算した。各図の赤実線は、 $Q_{\max}$ と計算値  $_{cal}Q_s$ の間で得られた回帰直線、Coはその相関係数である。図中の平均値Av、範囲Ra、標準偏差Sdは、 $Q_{\max}$ と  $_{cal}Q_s$ の比( $Q_{\max}/_{cal}Q_s$ )に関する統計値であり、誤差率は式(7)より求めた値である。なお、回帰直線の回帰係数そのものは目的変数と説明変数の共分散により表わされるものであり、 $Q_{\max}/_{cal}Q_s$ の比により得られる平均値とは異なることに注意を要する。

$$E_r = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{\max} - _{cal}Q_s}{Q_{\max}} \right)^2} \quad (7)$$

図において、ダウエル効果のみの因子で評価したTassiosの式(1)は、計6式の中で実験値を最も過小評価する算定式となっていた。同様に、純せん断効果(キンキング効果)による  $A_s \cdot \sigma_s$ の因子で評価した式(4)の改修指針も過小評価の傾向にある。ただし、同じ  $A_s \cdot \sigma_s$ による因子でもMattockのせん断摩擦効果による式(2)は、式(4)の係数0.64に対して係数0.8となっているため見掛け上は式(4)ほど過小評価になっていなかった。他方、ダウエル効果及びせん断摩擦効果による2つの因子を用いて評価した望月の式(3)は、単独因子のみで評価した上記算定式に比べて平均値及び標準偏差などの統計値で見られる推定精度が向上しており、少なくとも2つのせん断抵抗機構の累加でせん断伝達強度を評価する必要性が示唆される。なお、Fisherの式(5)及び平城の式(6)による実験式も推定

精度が良く、平城式においては計6式の中で最も推定精度の高い算定式となっていた。平城式は、ボルトのせん断抵抗を表わす因子のみならずスタッドボルト高さ比  $H_s/D_s$ もパラメータ因子に加えられており、スタッドボルト特有の性状を捉えた算定式という意味からはFisher式より価値は高い。

### 4. セン断伝達強度と力学的因子の関係

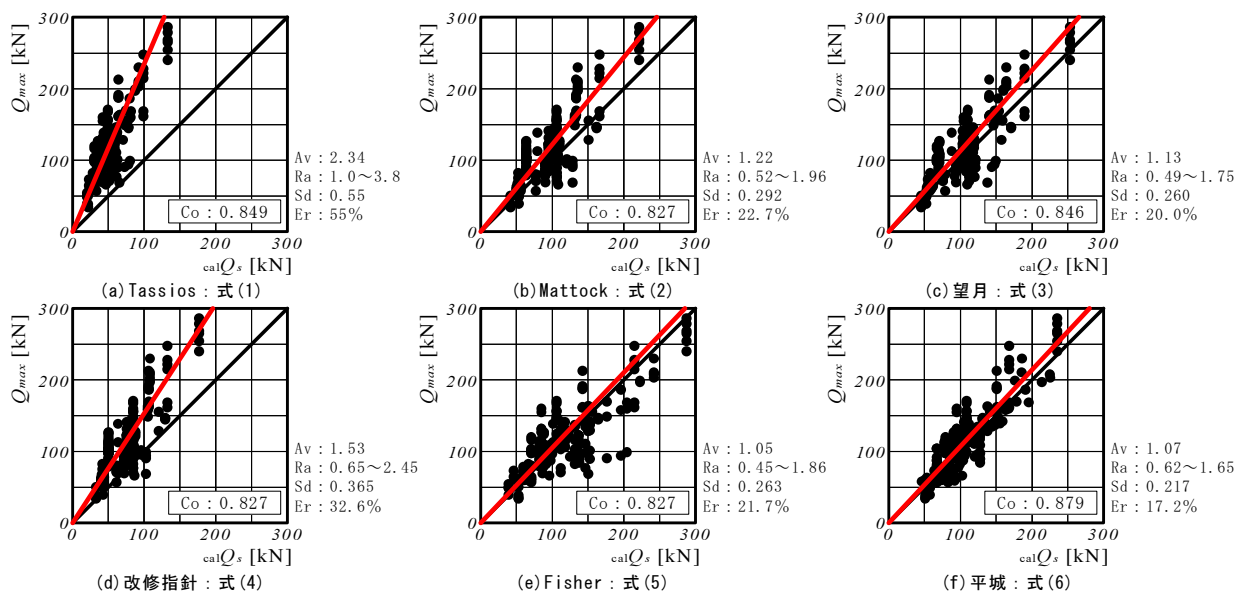
本章では文献データ 200 体のせん断伝達強度  $Q_{\max}$ と  $A_s \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b}$ 及び  $A_s \cdot \sigma_s$ の関係を調べる。その際、式(8)及び式(9)で示す  $\xi_d$ 及び  $\xi_k$ の係数を求める。

$$Q_{\max} = \xi_d \cdot A_s \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b} \quad (8)$$

$$Q_{\max} = \xi_k \cdot A_s \cdot \sigma_s \quad (9)$$

図-3に、 $Q_{\max}$ と  $A_s \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b}$ 及び  $A_s \cdot \sigma_s$ の関係を示す。ここでは、コンクリート支圧破壊とスタッドボルト破壊の遷移点として文献(31)に示されている  $H_s/D_s=5.5$ で分類し、かつ、文献中に記載された破壊モードごとに区別して図示してある。なお、 $H_s/D_s \leq 5.5$ でコンクリート支圧破壊のデータは106体中86体、 $H_s/D_s > 5.5$ でスタッドボルト破壊のデータは94体中75体であり、約8割のデータの破壊性状が上記遷移点と一致していた。

図より、 $H_s/D_s \leq 5.5$ でモードCの  $Q_{\max}$ が他のグループより低い値にあるが、全体的には破壊モードの違いに関わらず  $A_s \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b}$ 及び  $A_s \cdot \sigma_s$ の増加とともに  $Q_{\max}$ は高くなる傾向にある。その際、どちらの因子も相関係数(0.85及び0.83)が比較的高い値にあることから、 $Q_{\max}$ は破壊モードを考慮せず  $A_s \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b}$ 及び  $A_s \cdot \sigma_s$ を用いて一様に評価できると考える。 $A_s \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b}$ 及び  $A_s \cdot \sigma_s$ の間



(注) 図中の赤実線は回帰直線を表わし、Coは相関係数。

(注) Av、Ra、Sdは  $Q_{\max}/_{cal}Q_s$ に関する統計値であり、それぞれ平均値、範囲、標準偏差を表わす。Erは式(7)より得られる誤差率。

図-2 セン断伝達強度 ( $Q_{\max}$ )と既往式計算値 ( $_{cal}Q_s$ )の関係

で得られた回帰係数はそれぞれ $\xi_d = 3.58$ 及び $\xi_k = 0.95$ であり、式(1)及び式(4)の係数より高い値が得られている。ついで、文献3)、4)と同様に $Q_{\max}$ は $A_s\sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b}$ 及び $A_s \cdot \sigma_s$ の累加で与えられると考え、重回帰分析による係数を求めると式(10)が得られた。

$$pro1 Q_s = 0.83 A_s \sqrt{\sigma_s \cdot \sigma_b} + 0.64 A_s \cdot \sigma_s \quad (10)$$

式(10)をみると、キンキング効果の係数が0.64となっており、改修指針で与えられている式(4)の算定式にダウエル効果を考慮することでせん断伝達強度（最大荷重 $Q_{\max}$ ）を適切に把握できることが伺える。しかし、ダウエル効果の係数そのものは0.83となっており、式(3)の係数1.28と比べて小さい。一方、あと施工アンカー鉄筋のせん断伝達を述べた筆者文献32)では、コンクリート支圧応力を評価するための支圧係数 $C_d$ を提案した。これは、実際のコンクリート支圧応力は曲線分布を形成しておりその応力状態も二次元又は三次元と極めて複雑にある中で鉄筋径が大きくなるとコンクリートへの応力集中が小さくなることを考慮した式となっている。

$$C_d = 2.70 - 0.04 D_s \quad (11)$$

図-4(a)は $Q_{\max}$ と式(10)計算値の関係であり、図-4(b)は式(10)中に式(11)を考慮した計算値による場合である。図-2を含めた比較でみると、式(10)の推定精度は望月式よりは高いが平城式よりやや劣る傾向にあった。しかし、式(11)による支圧係数を考慮することで平均値及び範囲などでみられる統計値が式(10)から向上しており、かつ、その推定精度は平城式より高くなっている。式(11)そのものはあと施工アンカー鉄筋を対象に提案したものでありスタッドボルトの支圧係数に関する検証の余地はあるが、少なくとも耐力推定精度が高くなることは事実と捉え、以下、式(11)を考慮した式(12)で評価する。

$$pro2 Q_s = 0.83 A_s \sqrt{C_d \cdot \sigma_s \cdot \sigma_b} + 0.64 A_s \cdot \sigma_s \quad (12)$$

## 5. スタッド高さ比、へりあき比及びはしあき比がせん断伝達強度に及ぼす影響

### 5.1 低減係数について

4章で示した式(12)によるせん断伝達強度式は、スタッドボルトのせん断抵抗をダウエル効果及びキンキング効果による力学的因子で表現したものである。この式は、プレキャスト鉄筋コンクリート造接合部、あと施工アンカー鉄筋など、せん断伝達に関する経験則にもとづいた観点に立っている。しかしながら、スタッドボルトに関しては、平城式でみられるようにスタッドボルト高さ比 $H_s/D_s$ もせん断伝達強度に影響を及ぼすことが知られているが式(12)にはその影響が考慮されていない。また、式(12)はへりあき距離及びはしあき距離の影響を受けな

い実験データがもとになっているが、実際の構造物ではへりあき距離及びはしあき距離の影響を受けることがあり、これらはせん断伝達強度を低下させる要因となる。ただ、これらの抵抗機構を理論的に誘導することは難しいので、ここでは実験的な低減係数を誘導する。

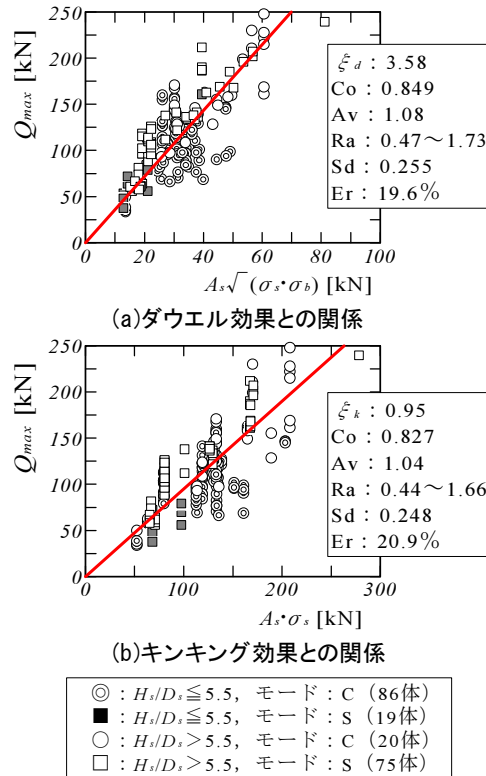
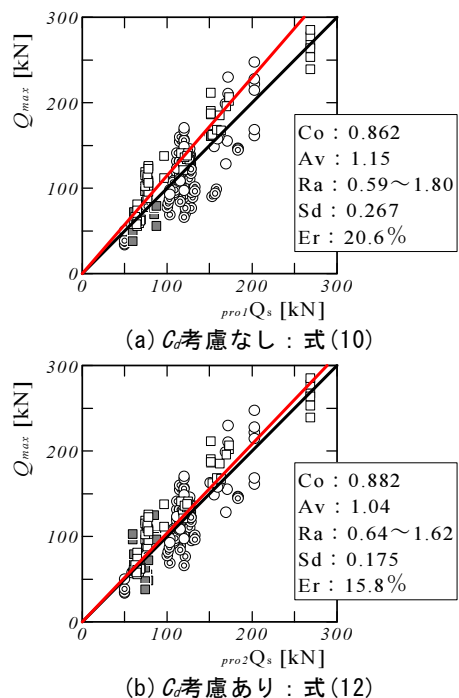


図-3 セン断伝達強度とダウエル効果及びキンキング効果による力学的因子との関係



(注) 凡例 : 図-3に同じ。赤実線 : 回帰直線式。

図-4 セン断伝達強度と式(10)、式(12)計算値の関係

## 5.2 スタッドボルト高さ比

4章の検証で用いた200体のデータに対して、図-5には $Q_{\max}$ と式(12)計算値との比( $Q_{\max}/\text{pro2}Q_s$ )をとり、 $H_s/D_s$ との関係で示した。図より、 $H_s/D_s \leq 5.5$ の領域においても破壊モードSが含まれているが、データの95%を下限とする包絡線を求めると、 $H_s/D_s$ がせん断伝達強度に及ぼす低減係数として式(13)が得られた。

$$\gamma_1 = 0.15(H_s/D_s) + 0.175, \quad \gamma_1 \leq 1 \quad (13)$$

## 5.3 へりあき距離及びはしあき距離

図-1中にあるへりあき距離 $C_x$ 及びはしあき距離 $C_y$ がせん断伝達強度に及ぼす影響を調べた。検討に用いたデータは、 $H_s$ で無次元化した $C_x/H_s$ 及び $C_y/H_s$ が1以下のデータ(前者12体、後者44体)である。なお、 $C_x/H_s < 1$ のデータはスタッド本数が片側コンクリートに1本ずつとなる試験体のみを検討対象とした。試験体の諸元は紙面の都合上、文献8)を参照頂きたい。

図-6は、12体及び44体のデータの $Q_{\max}/\text{pro2}Q_s$ と、 $C_x/H_s$ 及び $C_y/H_s$ の関係である。図より、データ数は少ないもののへりあき距離及びはしあき距離が小さくなるにつれ $Q_{\max}$ が低下している傾向にある。これらのデータ分布において95%を下限とする包絡線を求め、これに $C_x/H_s = 1.0$ 及び $C_y/H_s = 1.0$ のときの低減係数が1.0となることを考慮した次式を定めた。

$$\gamma_2 = 3(C_x/H_s) - 2, \quad \gamma_2 \leq 1 \quad (14)$$

$$\gamma_3 = 1.43(C_y/H_s) - 0.43, \quad \gamma_3 \leq 1 \quad (15)$$

## 5.4 提案式

以上、本章の検証結果を取りまとめると、スタッドボルトのせん断伝達強度式が式(16)で表わされる。

$$\text{pro3}Q_s = \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3 \cdot \left( 0.83A_s \sqrt{C_d \cdot \sigma_s \cdot \sigma_b} + 0.64A_s \cdot \sigma_s \right) \quad \dots (16)$$

$$C_d : (2.70 - 0.04D_s) \geq 1, \quad \gamma_1 : \{0.15(H_s/D_s) + 0.175\} \leq 1$$

$$\gamma_2 : \{3(C_x/H_s) - 2\} \leq 1, \quad \gamma_3 : \{1.43(C_y/H_s) - 0.43\} \leq 1$$

図-7は実験値と式(16)の計算値の関係であり、破壊モードが不明な36体を含めた292体に対して式(16)は最も精度良く評価できる算定式となっていた。式(16)を導くために用いたデータに対する推定精度が他の提案式より高くなることは当然の帰結であるが、実用式に相応しい算定式として提案する。

## 6. まとめ

文献から採取したデータをもとにスタッドボルトのせん断伝達強度に関わる検証を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 200体の実験データとダウエル効果及びキンキング効果による力学的因子の関係を検証し、重回帰分析により式(10)が得られた。その際、物理的根拠に関する再検証の余地は残されているが、式(11)の支圧係数を考慮することで、さらに精度良く評価できることが明らかとなった。
- (2) スタッドボルト高さ比、へりあき比、はしあき比がせん断伝達強度に及ぼす影響について調べた結果、式(13)～式(16)で示す低減係数が得られた。
- (3) 以上を統括して、スタッドボルトのせん断伝達強度式として式(16)を提案する。

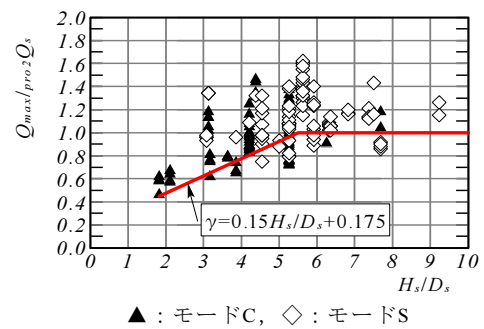


図-5  $Q_{\max}/\text{pro2}Q_s$ と $H_s/D_s$ の関係

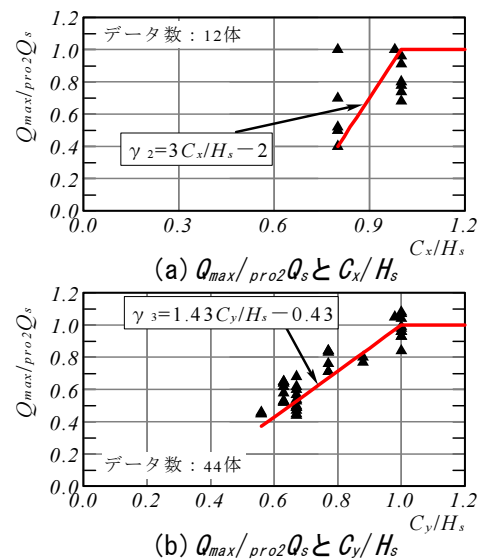


図-6  $Q_{\max}/\text{pro2}Q_s$ と $C_x/D_s$ 及び $C_y/D_s$ の関係

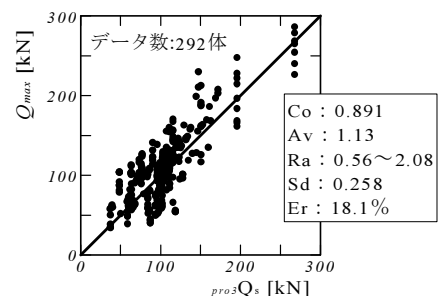


図-7 292体の実験値と式(16)計算値の関係

## 参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001 年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説，pp.259-290，2001
- 2) 伊藤嘉則，榎谷榮次：鉄骨部材と鉄筋コンクリート部材による複合構造接合部のせん断伝達強度に関する実験検証，第 10 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2013.11
- 3) 望月重，榎谷榮次，永坂具也：壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力ーダウエル効果および圧縮拘束力を考慮した場合ー，日本建築学会構造系論文報告集，第 424 号，pp.11-22，1991.6
- 4) 伊藤嘉則，榎谷榮次，中野克彦，他：接着系あと施工アンカーのせん断力とせん断滑り変位関係の実験的評価，構造工学論文集 Vol.59B，pp.1-13，2013.3
- 5) J.G.Ollgaard, R.G.Slutter and J.W.Fisher: Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, AISC Engineering Journal, pp.5-64, 1971.4
- 6) 平城弘一，松井繁之，福本秀士：頭付きスタッドの強度評価式の誘導ー静的強度評価式ー，構造工学論文集 Vol.35A，pp.1221-1232，1989.3
- 7) 多田周平，ロスソティエ，島 弘：頭付きスタッドの垂直力を考慮できるせん断-ずれ関係の計算方法，日本建築学会四国支部研究報告集，pp.11-12，2011
- 8) 伊藤嘉則：ダウエル効果とキンキング効果による力学的因子で評価したスタッドボルトのせん断伝達強度，第 11 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2015.11
- 9) 頭付スタッドの押抜き試験方法（案），JSSC テクニカルレポート，No.35，（社）日本鋼構造協会，pp.1-24，1996.11
- 10) 上野誠：スタッドジベルの実験的研究，日本建築学会論文報告集，第69号，pp.661-664，1961.10
- 11) 平野道勝，他：床鋼板つきコンクリートスラブに埋込まれたスタッドコネクタの押抜き試験，日本建築学会論文報告集，第281号，pp.57-69，1979.7
- 12) 金圭石：スタッドコネクタのせん断耐力と合成ばりの挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第389号，pp.79-87，1988.7
- 13) 山田稔，福田晴男：スタッドジベルの力学性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.479-480，1971
- 14) 平野道勝，友永久雄：合成梁に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，その1：pp.1507-1508，1972，その3：pp.1551-1552，1973，その4：pp.1085-1086，1974
- 15) 平野道勝，穂積秀雄：引張力を受けるスラブに押込まれたスタッドコネクタの押抜き試験 その1，その2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.947-948，1975及びpp.1517～1518，1976
- 16) 川村政美，松崎育弘：鉄骨トラスを用いた合成ばりの実代実験 その3，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1289-1290，1977
- 17) 平野道勝，穂積秀雄，吉川精夫：PCスラブを鋼梁に結合するスタッド・コネクタの押抜き試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1293-1294，1977
- 18) 鈴木豊朗，久恒治郎：鋼柱脚根巻き補強内におけるスタッドジベルのせん断耐力について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1293-1294，1974
- 19) 加藤弁，土方勝一郎：コンクリートスラブが厚い合成ばりの実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1925-1926，1980
- 20) 伊藤学，穂積秀雄，平野道勝：スタッドコネクタのRCスラブ中におけるずれ耐力に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1147-1148，1987
- 21) 加藤典之，太田貞次，他2名：スタッドの高速せん断破壊実験，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1269-1276，1996.3
- 22) 平城弘一，松井繁之，武藤和義好：柔な合成作用に適するスタッドの開発，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1485-1496，1998.3
- 23) 沢野邦彦，他3名：直径19mmスタッドジ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.1-9，1970.2
- 24) 岡田淳，他2名：グループ配列したスタッドのせん断耐荷性能に関する検討，土木学会論文集，第766号/I-68，pp.81-95，2004.7
- 25) 田島二郎，町田篤彦，大友健：スタッドシヤーコネクタによる鋼・コンクリート部材接合部の強度変形性状に関する基礎的研究，合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.137-144，1986.9
- 26) 前田泰秀，石崎茂，平城弘一，池尾良一：合成構造の省力化に適するスタッドの研究，第4回復合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp.139-144，1999.11
- 27) 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，No.109，pp.1-24，1961
- 28) 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
- 29) E. N. Vintzeleou and T. P. Tassios: Behavior of Dowels under Cyclic Deformations, ACI Structural Journal, pp.18-30, Jan-Feb 1987
- 30) A.H.Mattock: Shear Transfer in Concrete Having Reinforcement at an Angle to the Shear Plane, Shear in Reinforced Concrete(Vol.1), pp.17-42, ACI Publication SP-42, 1974
- 31) 土木学会：複合構造レポート10，複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦，2014
- 32) 伊藤嘉則，他：せん断力を受ける接着系あと施工アンカーのダウエル効果とせん断滑り変位2mm時の耐力評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第646号，pp.2307-2316，2009.12