

孔あき鋼板ジベルのせん断力—ずれ変位関係の試案

宇都宮大学 学生員

○ 大野将季 正会員 NGUYEN MINH HAI

フェロー会員

中島章典 正会員 藤倉修一

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造では、鋼材とコンクリートの間での確実な応力伝達が重要であり、そのずれ止めの1つとして Leonhardt らによって提案された孔あき鋼板ジベルが用いられている。孔あき鋼板ジベルは、鋼板のジベル孔内に充填されたコンクリートのせん断抵抗で鋼材とコンクリートを一体化させる。

複合構造物を設計する際、一般には平面保持の仮定を用いるためにずれ止めのせん断ずれがないという前提での計算方法が用いられている。しかし、現実にはずれ止めはせん断力で少なからず変形する。また、近年では非線形有限要素解析による設計法の技術が進歩し、例えば、鋼材とコンクリート間の接合要素にせん断力—ずれ変位関係を適用することによって、複合構造物の終局に至るまでの挙動を追跡することも可能になりつつある。したがって、複合構造物の設計において、ずれ止めのせん断力—ずれ変位関係は重要となる。

現在、2014年制定版複合構造標準示方書（以下、複合示方書と呼ぶ）には、貫通鉄筋を配置しない場合として、以下の式（1）～（3）と図-1に示されるような孔あき鋼板ジベルのせん断力—ずれ変位関係が規定されている¹⁾。

$$V_{ps} = V_{psud}(1 - e^{-\alpha\delta_{ps}/d})^\beta \quad (1)$$

$$0 \leq \delta_{ps} \leq \delta_{psu}$$

$$V_{psud} = 1.60d^2 f'_{cd}/\gamma_b \quad (2)$$

$$\delta_{psu} = 0.006 \left(\frac{d}{t} \right) d \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{500}{(d/t)} \quad \beta = 1/3$$

V_{ps} : せん断力 (N) V_{psud} : せん断耐力 (N)

δ_{ps} : ずれ変位 (mm) δ_{psu} : 終局ずれ変位 (mm)

d : ジベル孔径 (mm) t : ジベル鋼板厚 (mm)

f'_{cd} : コンクリート圧縮強度 (N/mm²)

ところで、著者ら²⁾は、図-2に示される孔あき鋼板ジベル押抜き試験体を用いた押抜き試験を行い、1例として図-3中の黒線で示されるようなせん断力—ずれ変位関係を得た。図中の赤線は式（1）～（3）より得られたせん断力—ずれ変位関係で、緑線は式（1）のせん断耐力に、後述する著者らのせん断耐力評価式（4）で得られるせん断耐力を用いて得られたせん断力—ずれ変位関係である。なお、図-3-aと図-3-bは図-2-aに示した、ジベル鋼板の周囲をコンクリートブロックで取り囲んだタイプ（以下、タイプ A

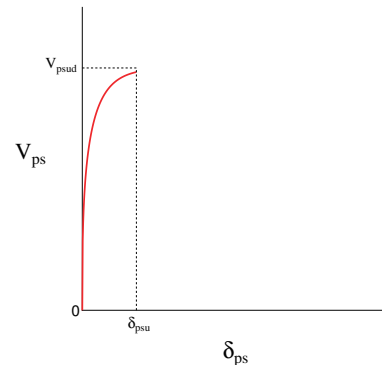


図-1 せん断力—ずれ変位曲線（複合示方書記載）

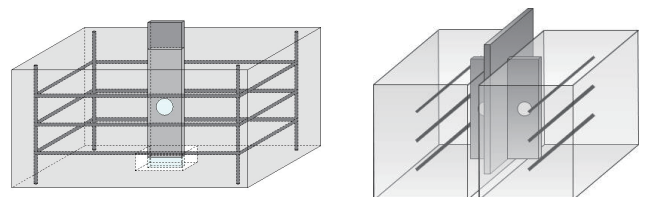


図-2-a タイプ A (89 体)

図-2-b タイプ B (17 体)³⁾

図-2 押抜き試験体図（計 106 体）

押抜き試験体と呼ぶ）の押抜き試験結果の1例である。そして、図-3-cと図-3-dは図-2-bに示した、母材鋼板に溶接されたジベル鋼板の片側のみコンクリートブロックで取り囲んだタイプ（以下、タイプ B 押抜き試験体と呼ぶ）の押抜き試験結果の1例である。図-3中の赤線を見ると、黒線の実験結果に対して初期における傾きが高く、全体的に曲線が上側にあることが分かる。言い換えれば、複合示方書の規定は著者らの押抜き試験結果に対して、ずれ剛性が高く、また、タイプ B の押抜き試験体のせん断耐力も高く見積もる傾向が見られる。せん断耐力やずれ剛性を高く見積もることは、安全性の面から好ましくない。

そこで、本研究では著者らにより行われた計 106 体の貫通鉄筋のない孔あき鋼板ジベル押抜き試験結果を用いて、複合示方書記載のせん断力—ずれ変位関係などを見直すことを目的とする。

2. 孔あき鋼板ジベル押抜き試験結果概要

(1) せん断耐力

著者らは 2008 年から図-2に示されるような孔あき鋼板ジベル押抜き試験体を用いて、せん断耐力やせん断力—ずれ変位関係などを調べてきた。そして、タイプ A 押抜き試験体の押抜き試験結果を用いて、回帰分析を行うことによって下式（4）に示されるようなせん断耐力評価式を提案して

Key Words: 孔あき鋼板ジベル, せん断耐力, せん断力—ずれ変位関係, ずれ剛性, 終局ずれ変位

〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻 Tel.028-689-6208 Fax.028-689-6208

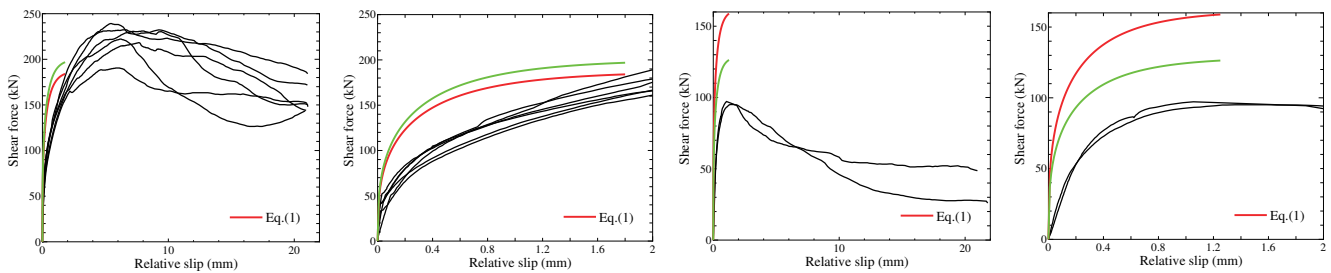


図-3-a 全体図（タイプ A） 図-3-b 図-3-a の初期拡大図 図-3-c 全体図（タイプ B） 図-3-d 図-3-c の初期拡大図

図-3 セン断力-ずれ変位関係 1 例（新設計案適用前）

いる²⁾。

$$Q_u = 0.15A_s^{0.43}f_c^{0.65}AT^{-0.5} \quad (4)$$

Q_u : ジベル孔 1 つ当たりのせん断耐力 (N)

A_s : コンクリートブロック有効側面積 (mm^2)

f_c : コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)

A : ジベル孔面積 (mm^2) T : ジベル鋼板厚 (mm)

この式を提案した際に、式の適用性を確認するために、著者らの実験結果に、他の研究者らの実験結果も加え、せん断耐力の実験値と式 (4) の相関を確認している。図-4-a は著者らが提案した式 (4) と実験値との相関を示し、図-4-b は複合示方書記載のせん断耐力評価式 (2) と実験値との相関を示している。縦軸は、実験値 Q_{uexp} を、横軸はそれぞれの耐力評価式による推定値 Q_{uest} を表し、図中の $y = ax$ はデータの近似直線式、 R は相関係数、 SD は標準偏差である。これらの図から、著者らが提案したせん断耐力評価式 (4) の方が、複合示方書記載のせん断耐力評価式よりも近似直線式が $y = x$ の関係に近く、また、相関係数は大きく、標準偏差も小さくなっていることが分かる。なお、実験データの引用元については割愛する。

(2) セン断力-ずれ変位関係

図-3 を見ると、タイプ A 押抜き試験体を用いた押抜き試験結果では、緑線がずれ剛性の実験値を過大に評価しており、タイプ B 押抜き試験体を用いた押抜き試験結果では、緑線がずれ剛性、せん断耐力の実験値をともに過大評価していることが分かる。なお、本研究ではずれ剛性をせん断力-ずれ変位曲線上におけるせん断耐力の 1/2 の点と原点を結んだ直線の傾きと定義している。まず、著者らが提案したせん断耐力評価式 (4) がタイプ B 押抜き試験体のせん断耐力を過大に評価している理由は、押抜き試験体形状の違いにあると考えられる。前述のように、式 (4) の構築に際して用いた押抜き試験体は、図-2-a に示すタイプ A 押抜き試験体であった。それに対して、図-2-b に示すタイプ B 押抜き試験体は母材鋼板側のコンクリートかぶりが存在しないので、タイプ A 押抜き試験体に比べて押し広げ力に対する拘束力が弱くなり、せん断耐力が低くなったと考えられる。そして、ずれ剛性を過大に評価している理由は、複

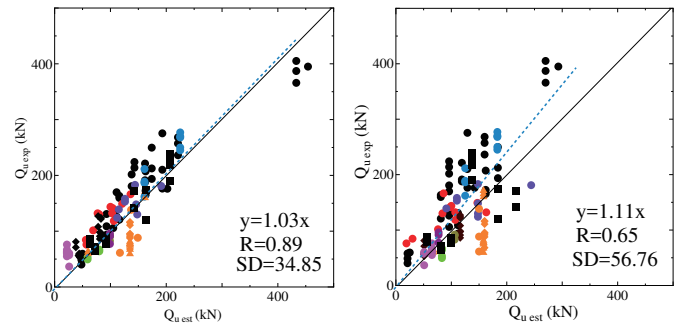


図-4-a 推定値は式 (4)

図-4-b 推定値は式 (2)

図-4 セン断耐力の実験値と推定値の関係

合示方書記載のせん断力-ずれ変位関係式 (1) では、初期における曲線の傾きが実験値に対して高くなるためであると考えられる。

そこで、本研究で新たに提案する孔あき鋼板ジベルのせん断力-ずれ変位関係式として、上記の問題点を改善したものを示すこととする。

3. 孔あき鋼板ジベル設計のための規定案

(1) セン断耐力

せん断耐力評価式 (4) は、タイプ B 押抜き試験体のせん断耐力を過大評価していた。そこで、本研究ではせん断耐力評価式 (4) 中に、新たに拘束度の違いに基づく係数 κ を導入することにする。 κ の考え方としては、まず、孔あき鋼板ジベルがタイプ A 押抜き試験体と同等の拘束力を有する場所に配置された場合、 $\kappa = 1.0$ とする。そして、タイプ B 押抜き試験体と同等の拘束力を有する場所に配置された場合の低減係数を新たに求める。そこで、著者らが行った押抜き試験の中でタイプ B 押抜き試験体³⁾における、せん断耐力評価式 (4) による推定値と実験値の比の平均をとると 0.78 となった。よって、これを拘束度が低い場合のせん断耐力低減係数とする。以下に新たなせん断耐力評価式 (5) を示す。

$$Q_{uo} = 0.15\kappa A_s^{0.43}f_c^{0.65}AT^{-0.5} \quad (5)$$

Q_{uo} : ジベル孔 1 つ当たりのせん断耐力 (N)

κ : 拘束度に基づく係数 (1.0 or 0.78)

(2) セン断力—ずれ変位関係

複合示方書記載のせん断力—ずれ変位関係式 (1) では、ずれ剛性を過大に評価する傾向があった。そこで、せん断力—ずれ変位関係式 (1) 中の係数 α と β を調整することにより、実験値を模擬したせん断力—ずれ変位関係式の構築を試みた。しかし、係数 β を変えた場合、実験値を模擬したせん断力—ずれ変位関係が得られなかったため、係数 α のみを変えることとした。

まず、著者らが行ったタイプ A と B の押抜き試験結果からせん断力—ずれ変位関係上におけるせん断耐力の 1/2 の点に着目する。なお、その点と原点とを結んだ直線の傾きがずれ剛性の実験値となる。そして、ずれ剛性の実験値を目的変数、押抜き試験体のジベル孔面積、ジベル鋼板厚および、コンクリートブロック側面積を説明変数として回帰分析を行うことによって、ずれ剛性評価式を構築する。その結果、式 (6) に示されるようなずれ剛性評価式を構築した。なお、式の形および、説明変数はせん断耐力評価式 (4) を参考にしており、コンクリート圧縮強度の相関性は他のパラメータに比べて低かったため除外した。

$$k_{st} = 8.66A^{-0.67}T^{1.43}A_s^{0.42} \quad (6)$$

k_{st} : ずれ剛性 (kN/mm)

縦軸に著者らにより行われた押抜き試験結果から得られたずれ剛性の実験値、横軸にずれ剛性の推定値の関係を示したものをグラフを図-5 に示す。なお、図-5-a では、複合示方書記載のせん断力—ずれ変位関係上において、せん断耐力の 1/2 の点と原点を結んだ直線の傾きをずれ剛性の推定値としている。そして、図-5-b では、式 (6) から算出した値をずれ剛性の推定値としている。図-5 により、式 (1) から算出したずれ剛性よりも、式 (6) から算出したずれ剛性の方が実験値を適切に評価できていることが分かる。また、図-5-a により、黒点が赤線の右下にあり、式 (1) がずれ剛性を過大に評価していることが分かる。

次に、複合示方書記載のせん断力—ずれ変位関係を用いて、著者らの実験で得られたせん断力—ずれ変位関係を模擬することを試みる。そこで、ずれ剛性を推定した場合と同様の考えから、せん断耐力の 1/2 点のせん断力とその時のずれ変位に着目し、これを k 点とする。そして、せん断耐力評価式 (5) により求められるせん断耐力の 1/2 のせん断力と式 (6) を用いて得られるずれ変位で決まる k 点を複合示方書のせん断力—ずれ変位関係式 (1) が通るように、式中の係数 α を変えることとした。

ここでは、 α に代わる係数 α_o は、 $\alpha_o = \eta\alpha$ と定義し、 η を求める。まず、 $V_{ps} = Q_{uo}(1 - e^{-\eta\alpha\delta_{ps}/d})^\beta$ を η について解くと、式 (7) のようになった。なお、ここでは曲線が k 点を通るので、k 点の定義より $V_{ps}/Q_{uo} = 0.5$ かつ、

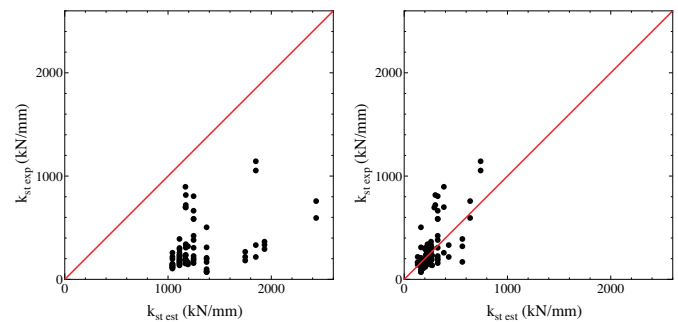


図-5-a 複合示方書曲線式 (1)

図-5-b 評価式 (6)

図-5 ずれ剛性 (実験値) との比較

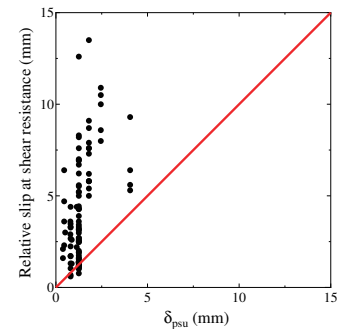


図-6 耐力時ずれ—終局ずれ関係

$$\delta_{ps} = \delta_{psh} = \frac{0.5Q_{uo}}{k_{st}} \text{ である。}$$

$$\eta = 2.67 \times 10^{-4} \left(\frac{d^2}{\delta_{psh} \cdot t} \right) \quad (7)$$

$$\delta_{psh} = \frac{0.5Q_{uo}}{k_{st}}$$

δ_{psh} : k 点におけるずれ変位 (mm)

そして、この係数 η を $\alpha (= \frac{500}{d/t})$ と掛け合わせて新しい α_o としてまとめると式 (8) となる。

$$\alpha_o = 0.13 \left(\frac{d}{\delta_{psh}} \right) \quad (8)$$

$$\alpha_o = \eta\alpha$$

(3) 終局ずれ変位

複合示方書では貫通鉄筋のない孔あき鋼板ジベルの場合、せん断耐力時ずれ変位を終局ずれ変位と定義し、過去の研究者らによる押抜き試験結果を回帰分析することによって、終局ずれ変位式 (3) を構築した。縦軸に押抜き試験によって得たせん断耐力時ずれ変位の実験値、横軸に式 (3) より算出した終局ずれ変位の関係を示したものを図-6 に示す。図-6 を見ると、多くの試験結果で式 (3) の値よりもせん断耐力時ずれ変位の実験値の方が大きいことが分かる。すなわち、複合示方書の規定では初めから終局ずれ変位を安全側に見積もっていることになる。そこで、著者らによる押抜き試験から得られたせん断耐力時ずれ変位の実験値を目的変数として回帰分析することにより、せん断耐力時ずれ変位を評価する式の構築を試みたが、高い相関を有する式が得られなかった。そこで、複合示方書の規定が安全側

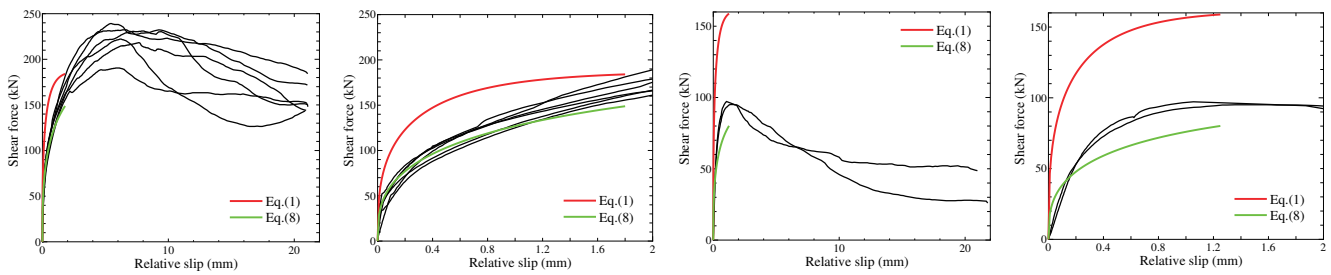


図-7-a 全体図（タイプ A） 図-7-b 図-7-a の初期拡大図 図-7-c 全体図（タイプ B） 図-7-d 図-7-c の初期拡大図

図-7 セン断力—ずれ変位関係 1 例（新設計案適用後）

にあることおよび、設計や照査に用いることを念頭において、本研究では終局ずれ変位式を複合示方書記載の式（3）のままとすることとした。

ここまでの検討で示した、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力および、せん断力—ずれ変位関係などの新たな規定を以下に示す。

$$V_{ps} = Q_{uo}(1 - e^{-\alpha_o \delta_{ps}/d})^\beta \quad (9)$$

$$0 \leq \delta_{ps} \leq \delta_{psu}$$

$$Q_{uo} = 0.15\kappa A_s^{0.43} f_c'^{0.65} AT^{-0.5} \quad (10)$$

$$\delta_{psu} = 0.006 \left(\frac{d}{t} \right) d \quad (11)$$

$$\alpha_o = 0.13 \left(\frac{d}{\delta_{psh}} \right) \quad \beta = 1/3$$

$$\delta_{psh} = \frac{1/2 Q_{uo}}{k_{st}} \quad \kappa = 1.0 \text{ or } 0.78$$

$$k_{st} = 8.66 A^{-0.67} T^{1.43} A_s^{0.42}$$

そして上記の規定によるせん断力—ずれ変位関係を図-7に示す。図-7を見ると、赤線で示した複合示方書記載のせん断力—ずれ変位関係よりも緑線で示した新たなせん断力—ずれ変位関係の方が適切に実験値を評価できていることが分かる。

なお、ここまでの検討で示した新たな規定の適用範囲については、今後検討をしていく必要がある。そして、押し広げ力に対する拘束度の違いと、孔あき鋼板ジベルが配置される構造物の違いの対応性についても別途検討の必要があると考えられる。

(4) 使用性の限界状態

ここまでの考察で提案したせん断耐力や終局ずれ変位は、いわゆる安全性の照査に用いる規定である。実際の設計では、使用性も考慮される。そこで、本研究では使用性の限界状態を残留ずれ変位が急激に増加する点よりも前と定義し、新たな規定を考えることとした。

複合示方書に記載されている孔あき鋼板ジベルの使用性の限界値は、作用せん断力がせん断耐力評価式による推定値の1/3までとなっている。しかし、過度に安全側にとっている可能性があるため、著者らが行った押抜き試験の中で、漸増繰返し载荷を行った実験データを用いて考察した。

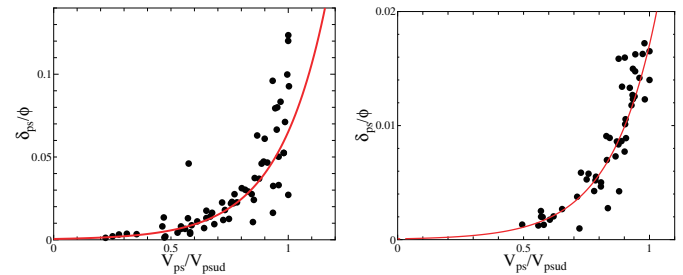


図-8-a タイプ A

図-8-b タイプ B

図-8 残留変位—除荷前せん断力関係

縦軸に除荷後残留ずれ変位/ジベル孔径、横軸にせん断力/せん断耐力をとったグラフを図-8に示す。図-8中の赤線は、簡易的に求めた近似曲線である。この図を見ると、除荷前のせん断力がせん断耐力の半分程度になったあたりから、除荷後の残留ずれ変位量が急激に大きくなっているのが分かる。したがって、本研究では使用性の照査に用いる孔あき鋼板ジベルの限界値を、安全性の照査に用いるせん断耐力の1/2として良いこととした。

4. まとめ

本研究では、著者らが行った孔あき鋼板ジベル押抜き試験から得られたせん断力—ずれ変位関係に着目することによって、現行の複合示方書の規定に代わる新たな規定を提案した。その概要を以下にまとめる。

1. 安全性の照査に用いる孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式として式（10）を提案した。
2. 構造解析などに用いるせん断力—ずれ変位関係として式（9）を提案した。
3. 終局ずれ変位は現行の複合示方書の規定のままとした。
4. 使用性の照査に用いる孔あき鋼板ジベルの限界値を、安全性の照査に用いるせん断耐力評価式で得られるせん断耐力の1/2とした。

参考文献

- 1) 土木学会複合構造委員会：複合構造標準示方書 2014 年制定，pp.74-78，2015.5.
- 2) 中島章典，NGUYEN MINH HAI：孔あき鋼板ジベルの貫通鉄筋のひずみ挙動とせん断耐力評価，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.1，pp.99-112，2015.3.
- 3) 大野将季，高橋直紀，中島章典，NGUYEN MINH HAI：並列配置または長手方向に複数配置した孔あき鋼板ジベルのせん断ずれ性状とせん断耐力に関する実験的研究，土木学会第71 回年次学術講演会，CS3-035，2016.9.