

(8) 太径 $\phi 25$ 頭付きスタッドの押し抜きせん断実験と強度評価

大谷 恭弘¹・栄 真堂²・仲地 健二郎³・
佐々木 一明³・尾籠 秀樹³・内海 祥人³

¹正会員 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・准教授 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: ohtani@kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻・大学院学生 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)
E-mail: 159t029t@kobe-u.ac.jp

³非会員 (一社) スタッド協会

2011年に軸径25mmの頭付きスタッド(以下、 $\phi 25$ スタッド)がJISに採用された。しかし、既往のせん断強度評価式は $\phi 22$ 以下のスタッドを対象とした実験データに基づいており、 $\phi 25$ スタッドへの適応性は明確でない。本研究は、既往の設計強度評価式の $\phi 25$ スタッドに対する適用性を検討するのが目的である。そこで、コンクリート強度、およびスタッドの埋め込み長さを実験パラメータとして変化させ、押し抜き試験を行った。そして、降伏強度および最大耐力と既往の設計強度評価式との比較を行うとともに、強度性状の検討を行った。それらの結果より現行の設計式では実験値と比較して危険側の評価を与える場合があることがわかった。

Key Words : shear connector, joint material, shear strength, design strength, design formulas

1. はじめに

鋼コンクリート合成構造におけるずれ止めとして広く用いられている頭付きスタッド(以下、スタッド)はJIS B 1198¹⁾において規定されているが、2011年に改正が行われ、従来のものに加えて軸径25mmのスタッドが追加された。しかし、わが国におけるスタッドに対する現行の設計せん断強度評価式は軸径22mmまでを対象としたものであり、軸径25mmの太径スタッドに対してのそれら設計式の適用性については十分な確認がされていない。そこで、本研究では $\phi 25$ スタッドに対して既存の設計強度評価式の適応性について実験的に検証を行うとともに、強度、性能の評価法について検討を行った。

2. 実験方法

(1) 試験体シリーズ

押し抜き試験は、日本鋼構造協会「頭付きスタッドの押し抜き試験方法(案)²⁾」に基づいて行った。しかし、軸径が25mmと当該試験方法(案)で対象としたスタッドより太いスタッドを用いるため、試験案による寸法では適切にせん断耐力が得られない可

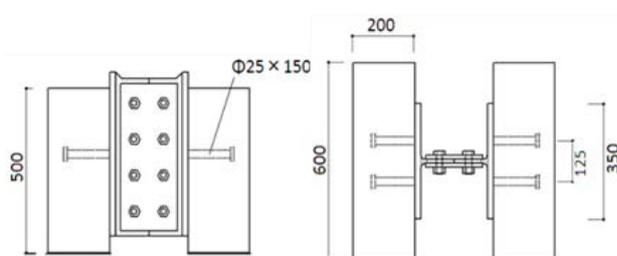


図-1 押し抜き試験体(L=150, 幅200)

能性がある。そこで不十分な寸法によるスタッドの静的せん断耐力の不適切な評価を防ぐために、 $\phi 25$ スタッドを用いた試験体はそれぞれの寸法を試験案に記載されている最小寸法(400mm×400mm×200mm)より大きくした。図-1はJIS B 1198(2011)を満足する $\phi 25$ スタッド(呼び長さ150mm)を使用した押し抜き試験体を示す。T127.5×350×12×19(SS400)鋼材のフランジ中央部にゲージ長125mm(=5D)でスタッド2本を専用溶接ガンにより下向き溶接し、スタッドが鉛直正置の状態でもコンクリートブロック600mm×500mm×200mm(300mm)を下向き打

表-1 試験体シリーズおよび実験結果

軸径	目標強度	試験体名	高さ (mm)	H/d	ブロック幅 mm	Fc	Ec	引張強度	最大強度	スタッド耐力	破壊モード
						(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	kN	(kN/本)	
φ25	fc18	φ25-f18-L150-1	150	6.0	200	21.7	25.0	2.09	659	165	コンクリート破壊
		φ25-f18-L150-2				21.7	25.0	2.09	683	171	
		φ25-f18-L150-3				21.7	25.0	2.09	670	167	
		φ25-f30-L150-1				34.3	32.6	2.86	783	196	
		φ25-f30-L150-2				31.3	31.6	2.86	775	194	
		φ25-f30-L150-3				31.3	31.6	2.86	850	212	
	fc30	φ25-f30-L150-4	150	6.0	200	37.2	27.4	2.82	870	218	コンクリート破壊
		φ25-f30-L125-1				37.2	27.4	2.82	817	204	
		φ25-f30-L125-2				37.2	27.4	2.82	811	203	
		φ25-f30-L100-1				37.2	27.4	2.82	767	192	
		φ25-f30-L100-2				37.2	27.4	2.82	796	199	
		φ25-f42-L150-1				150	6.0	200	54.4	35.7	
	φ25-f42-L150-2	54.4	35.7	3.47	1020				255		
	φ25-f42-L150-3	55.7	35.9	3.47	999				250		
	φ25-f42-L150-4	35.0	28.3	3.17	903				226		
	φ25-f42-L150-5	43.7	31.3	3.67	805				201		
	φ25-f42-L150-6	43.7	31.3	3.67	860				215		
	fc42	φ25-f42-L150-7	150	6.0	300	43.7	31.3	3.67	970	243	コンクリート破壊
		φ25-f42-L125-1				35.0	28.3	3.17	1058	265	
		φ25-f42-L125-2				36.1	29.1	3.17	951	238	
		φ25-f42-L125-3				43.7	31.3	3.67	780	195	
		φ25-f42-L100-1				35.0	28.3	3.17	877	219	
		φ25-f42-L100-2				36.1	29.1	3.17	836	209	
	φ19	fc18	φ19-f18-L120	120	6.3	200	21.6	25.0	2.09	472	118
φ19-f30-L120			31.3				32.6	2.86	557	139	
φ19-f30-L100			37.2				27.4	2.82	556	139	
fc30		φ19-f30-L80	80	4.2	200	37.2	27.4	2.82	558	140	コンクリート破壊
		φ19-f42-L120				55.7	35.6	3.47	664	166	
		φ19-f42-L120				55.7	35.6	3.47	664	166	

設した。スタッド軸中心から載荷側コンクリート縁までの距離は200mm(250mm)である。鉄筋配筋図を図-2に示す。コンクリートブロックとの界面となる鋼材フランジには付着を切るためにグリースを塗布している。コンクリート硬化後にそれら2つを組合せて高力ボルトで接合することにより、押抜き試験体1体を制作した。準備した試験体シリーズを表-1に示す。表中に示したFcとEcはシリンダー圧縮試験で得られた試験時におけるコンクリート強度及びヤング係数である。スタッドは3回に分けて打設し、各ロッドのスタッドに対して引張試験を行ったが、降伏強度および引張強度における差は5%以下であったため平均値を用いることとした。スタッドの平均降伏応力度(0.2%耐力) σ_y 、平均最大応力度 f_u 、降伏せん断応力度 τ_y を表-2に示す。ここで、降伏せん断応力度 τ_y は降伏応力度 σ_y を $\sqrt{3}$ で除した値とする。また、代表的なスタッドの応力-ひずみ関係を図-3に示す。

(2) 実験パラメータ

実験パラメータとしてコンクリート強度、スタッドの全高/軸径比(H/d)、コンクリートブロック寸法を選んだ。コンクリート強度は3種類とし、目標強度を18N/mm²、30N/mm²、42N/mm²とした。また、H/dを4、5、6の3種類で変化させている。コンクリートブロックの幅は200mm、300mmの二種類である。なお、比較のため、φ19スタッド(呼び長さ120mm、100mm、80mm)2本をT125×250×9×14(SS400)鋼材にゲー

ジ長100mm(≒5D)で溶接し、コンクリートブロック(400mm×400mm×200mm)に埋め込んだ押し抜き試験体も準備した。

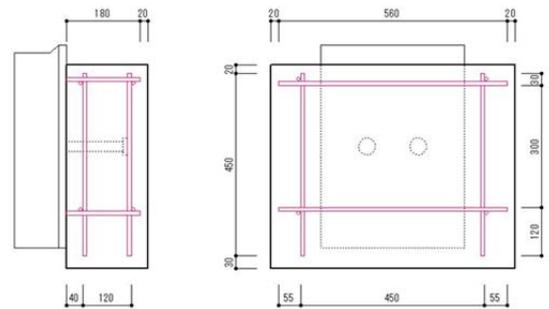


図-2 鉄筋配筋図

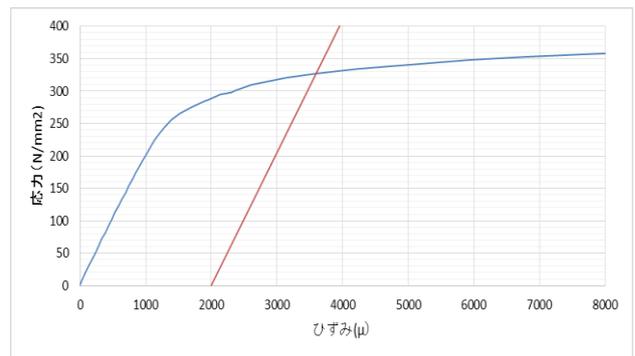


図-3 スタッドの応力-ひずみ関係

表-2 スタッド引張試験結果

平均降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	平均最大応力 f_u (N/mm ²)	降伏せん断応力度 τ_y (N/mm ²)
331.5	454.4	191.4

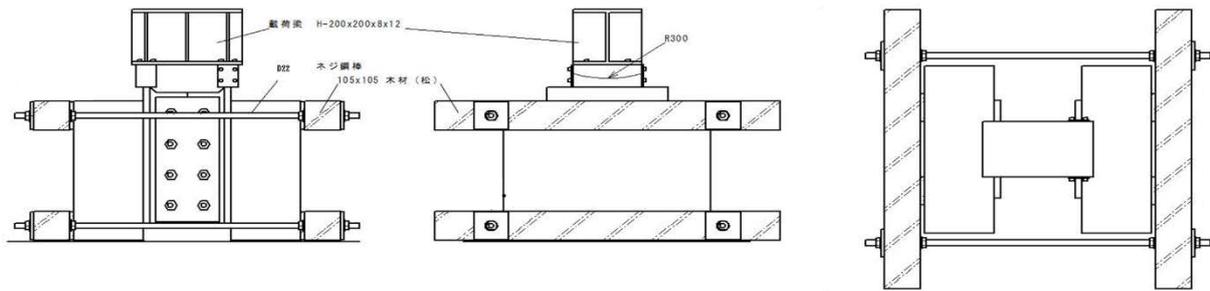


図-4 押し抜き試験図

(3) 載荷方法と計測方法

載荷方法は文献2)に則り、押し抜き試験体の載荷面が水平となるよう石膏を試験体底部に敷き、2つの載荷側フランジ断面に均等に荷重が作用するよう球座を介して載荷梁を設置し、荷重を作用させた。また、コンクリートブロックの開きに対処するため、図-4のように開き止めを設置した。各コンクリート強度に対して軸径25mm試験体の内、1体を弾性挙動確認の為の若干の低荷重域での除荷・再載荷を含む準単調載荷で、残りの試験体を荷重と残留ずれ量の関係を求めるために片振り繰返し載荷で行い、いずれも最大荷重が得られるまで載荷を行った。繰返し載荷については約50kN増加毎に無載荷状態への除荷・再載荷を行い、荷重-ずれ関係において残留ずれ量が0.2mmを十分越えるまで繰返しを行った。計測については、文献2)で求めているスタッド溶接位置での鋼材フランジ端部とコンクリートブロックにおけるスタッド頭部位置の相対変位量を変位計により、図-5のように対称位置4箇所で測定した。

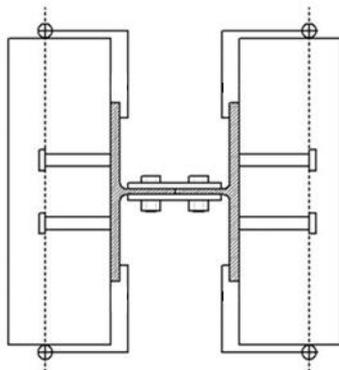


図-5 変位計の位置

3. 押し抜き試験結果

(1) 荷重-相対変位

荷重-相対変位の関係を図-6に示す。いずれの曲線も荷重が上がるほど勾配が緩やかになっていき、原点近くと最大荷重近くでは勾配に違いが出てくる。また、コンクリート強度が大きくなるにつれて終局耐力も大きくなる傾向がある。

(2) 既往のせん断耐力式との比較

a) J. W. Fisher らの強度評価式³⁾との比較

Fisherら³⁾は一本当たりのせん断耐力 Q_u (N)を与えており、文献(3)で記載されているせん断耐力評価式をSI単位系に変換したものが次式である。

$$Q_u = 1.83 \times 10^{-3} \times A_s \times f_c'^{0.3} \times E_c^{0.44} \quad (1)$$

ここで、 A_s はスタッドの軸部断面積 (mm^2)、 f_c' はコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 E_c はコンクリートのヤング係数 (N/mm^2) である。

本実験で得られた最大せん断強度との比較を図-7に示す。スタッドの降伏応力度 σ_y 、最大応力度 f_u 、降伏せん断応力度 τ_y も合わせて点線で示す。

$\phi 19$ スタッドは強度評価式にほぼ一致しているが、 $\phi 25$ スタッドは全体的に下方にばらついている。

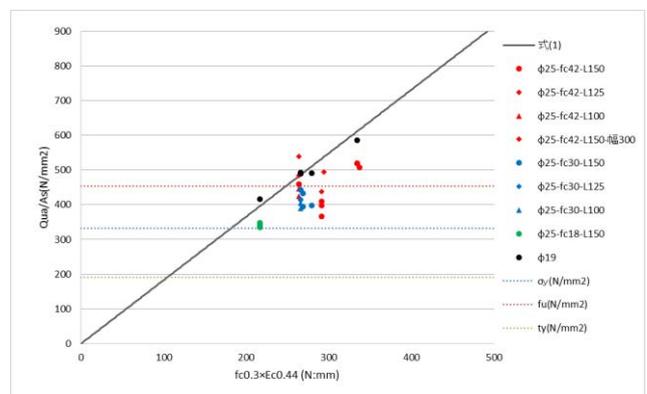


図-7 Fisherの式との比較

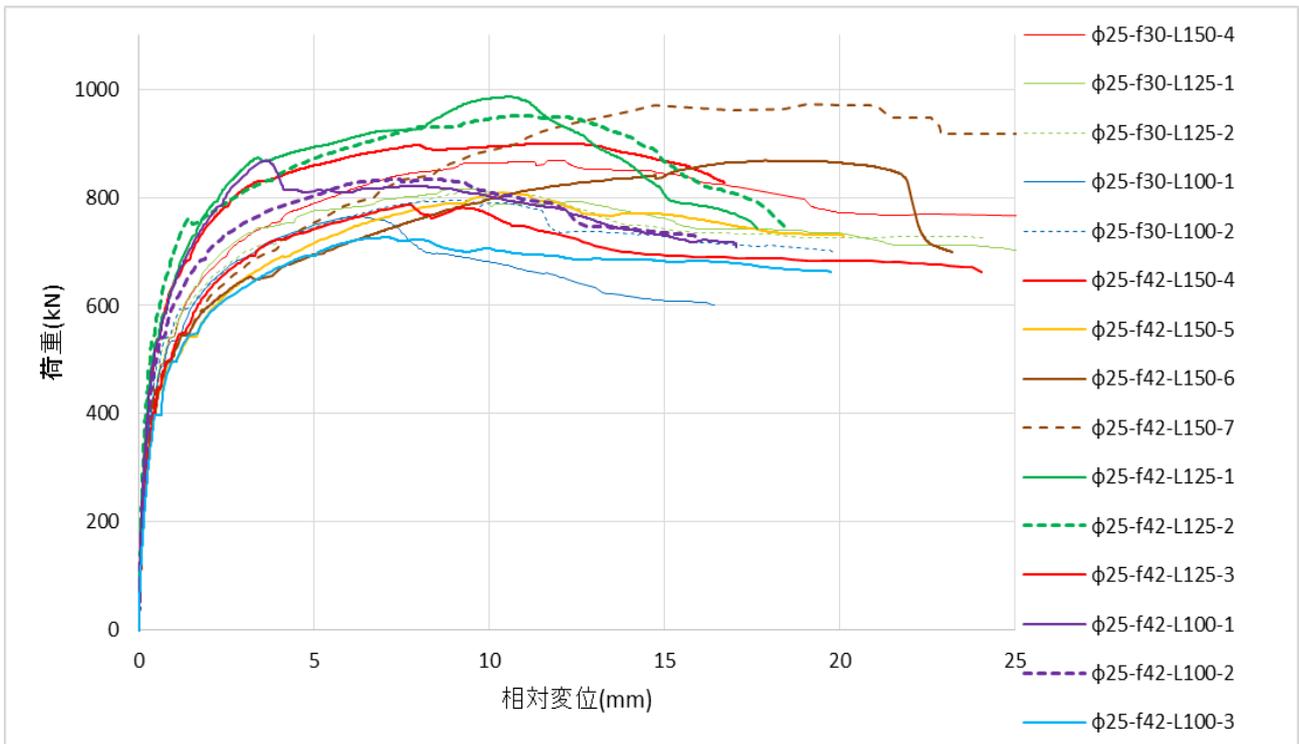


図-6 荷重-相対変位の関係

b) 日本建築学会の設計強度評価式⁴⁾との比較

日本建築学会は1本当たりのせん断耐力 q_s の評価式として、Fisher ら³⁾の簡易式を採用しており、次式で与えられる。

$$q_s = 0.5 \times s_c a \times \sqrt{F_c \times E_c} \quad (2)$$

ここで、 q_s はスタッド一本当たりの静的せん断耐力(N)、 $s_c a$ は頭付きスタッドの軸部断面積、 F_c はコンクリートの設計基準強度、 E_c はコンクリートのヤング係数、なお、 $500 \text{ N/mm}^2 \leq \sqrt{F_c \times E_c} \leq 900 \text{ N/mm}^2$ で、 900 N/mm^2 を超える場合は 900 N/mm^2 とする。本実験で得られた最大せん断強度との比較を図-8に示す。また、 F_c と E_c は表-1に示した材料試験値を用いている。スタッドの降伏応力度 σ_y 、最大応力度 f_u 、降伏せん断応力度 τ_y も合わせて点線で示す。 $\phi 19$ スタッドの場合はすべての実験値を安全側に評価しているが、 $\phi 25$ スタッドにおいては $\sqrt{F_c \times E_c} = 1000$ 付近で実験値が上下に均等にバラつく結果となった。すなわち、日本建築学会の設計せん断強度評価式は $\phi 25$ 頭付きスタッド $L=100 \sim 150 \text{ mm}$ に対してほぼ平均値レベルの耐力評価となっている。

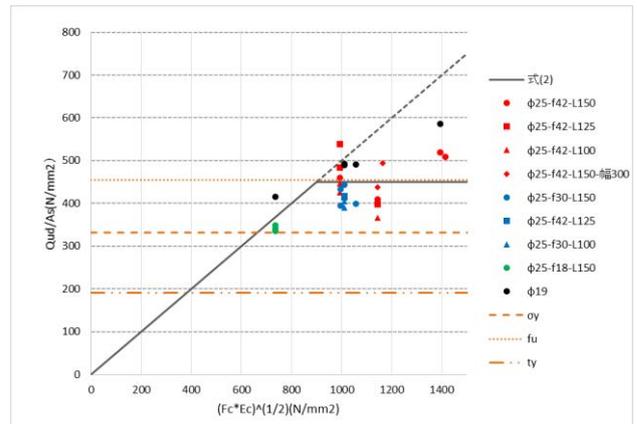


図-8 日本建築学会の式と比較

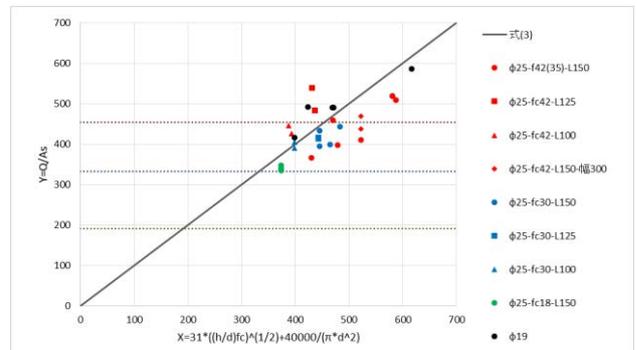


図-9 複合構造標準式方書のせん断耐力式との比較

c) 複合構造標準示方書におけるせん断耐力式⁵⁾との比較

φ25 と φ19 スタッドの実験値と以下の複合構造標準示方書における頭付きスタッドの設計せん断耐力式⁵⁾との比較を図-9 に示す。

設計せん断耐力 V_{sud} (N) (1本あたり) :

$$V_{sud} = 31A_{ss}\sqrt{(h_{ss}/d_{ss})f'_{cd}} + 10000 \quad (3)$$

ここで、スタッドの断面積: A_{ss} (mm^2)、スタッドの軸径: d_{ss} (mm)、スタッドの高さ: h_{ss} (mm)、コンクリートの設計圧縮強度: f'_{cd} (N/mm^2) である。

本式はスタッドの寸法とコンクリート強度の関係となっている。また、せん断耐力が H/d に依存する式となっている。スタッドの降伏応力度 σ_y 、最大応力度 f_u 、降伏せん断応力度 τ_y も合わせて点線で示す。式(3)と比較してみると、φ19スタッドに比べ、φ25スタッドは設計式より下方にばらついてるのがわかる。

(3) 許容せん断耐力式との比較

道路橋示方書⁶⁾では次式でスタッド1本の許容せん断力 Q_a (N) を与えている。

$$Q_a = 9.4 \times d^2 \times \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d \geq 5.5) \quad (4-a)$$

$$Q_a = 1.72 \times d \times H \times \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/d < 5.5) \quad (4-b)$$

ここで、 d はスタッドの軸径 (mm)、 H はスタッドの高さ (mm)、 σ_{ck} はコンクリートの設計基準強度 (N/mm^2) である。上式はスタッドの残留ずれ量に基づいているとされ、降伏に対して約3倍以上の安全率を有するとされている。文献2)では残留ずれ0.2mm オフセット値を降伏せん断力としており、その降伏荷重と上式の3倍の値を比較したものを図-10、図-11 に示す。また、スタッドの降伏応力度 σ_y 、最大応力度 f_u 、降伏せん断応力度 τ_y も合わせて点線で示す。式(4)との比較から、0.2mm オフセット値を降伏荷重と考えると、軸径 25mm スタッドに対しても道路橋示方書の式は降伏荷重に対してほぼ3倍の安全率を確保する許容せん断力を与えることが分かる。

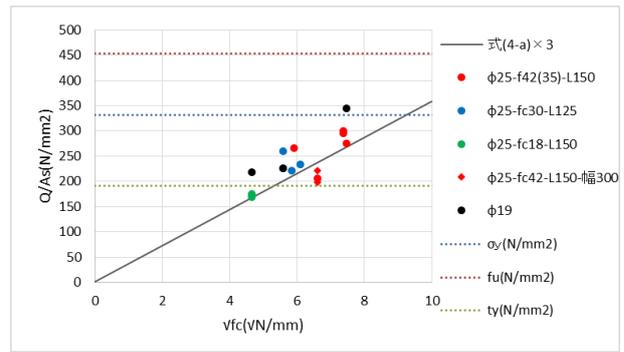


図-10 道路橋示方書の許容せん断耐力式との比較 ($H/d \geq 5.5$)

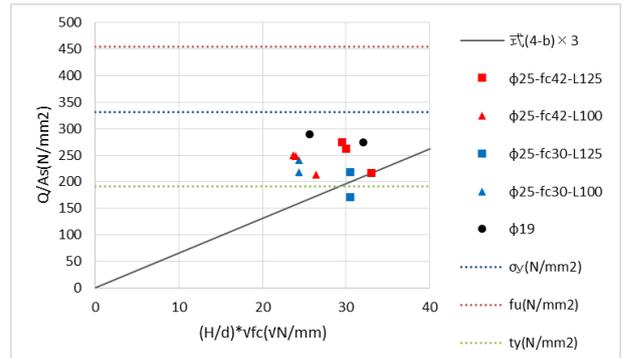


図-11 道路橋示方書の許容せん断耐力式との比較 ($H/d < 5.5$)

4. 考察

(1) 終局せん断耐力式について

現行の終局せん断耐力式が φ22以下のスタッドに対して平均値レベルの耐力評価を与えるとした場合、φ25スタッドに対して、どの程度の修正が必要かを検討する。

a) 日本建築学会の式について

図-8において、 $900\text{N}/\text{mm}^2$ 以下と以上の場合について、それぞれ実験値を最小二乗法を用いて線形回帰すると設計強度評価式に対して、 $900\text{N}/\text{mm}^2$ 以下では93%、 $900\text{N}/\text{mm}^2$ 以上では98%の値をとる結果となった。

上記の結果より安全側を考慮し、日本建築学会の式においてφ25スタッドを用いる場合、設計式(2)に低減係数0.93をかけた次式を用いることが望ましいと考えられる。

$$q_s = 0.465 \times s_c a \times \sqrt{F_c \times E_c} \quad (5)$$

ここで、 q_s はスタッド一本当たりの静的せん断耐力 (N)、 $s_c a$ は頭付きスタッドの軸部断面積、 F_c はコンクリートの設計基準強度、 E_c はコンクリートのヤング係数、なお、 $500 \text{ N}/\text{mm}^2 \leq \sqrt{F_c \times E_c} \leq 900$

N/mm^2 で、 $900 N/mm^2$ を超える場合は $900 N/mm^2$ とする。本実験で得られた最大せん断強度と式(5)との比較を図-12に示す。

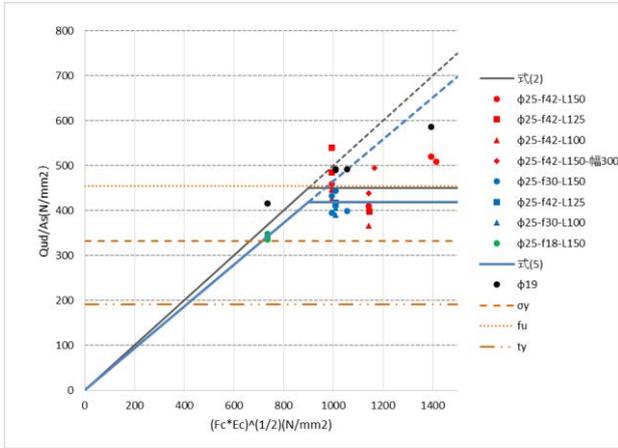


図-12 日本建築学会の式との比較

b) 複合構造標準示方書のせん断耐力式について

図-9で示したφ25スタッドの実験値に対して最小二乗法を用い回帰線の傾きを求めると0.93となり、設計強度評価式(3)に対し93%の値をとることがわかった。上記の結果より、複合構造標準示方書におけるせん断耐力式をφ25スタッドに用いる場合、設計式(3)に低減係数0.93をかけた次式を用いることが望ましいと考えられる。

$$V_{sud} = 28.83A_{ss}\sqrt{(h_{ss}/d_{ss})f'_{cd}} + 9300 \quad (6)$$

ここで、スタッドの断面積： A_{ss} (mm^2)、スタッドの軸径： d_{ss} (mm)、スタッドの高さ： h_{ss} (mm)、コンクリートの設計圧縮強度： f'_{cd} (N/mm^2) である。本実験で得られた最大せん断強度と式(6)との比較を図-13に示す。

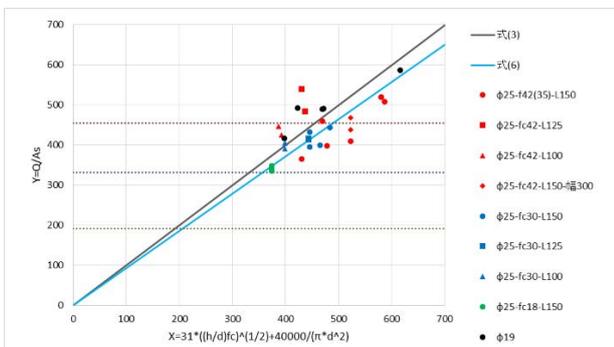


図-13 複合構造標準示方書のせん断耐力式

(2) 軸径比H/dの影響について

a) 複合構造標準示方書における設計せん断耐力式について

H/dの比較においては式(3)を下式に書き直し

$$Y = (V_{sud} - 10000)/(A_{ss}\sqrt{f'_{cd}}) = 31\sqrt{(h_{ss}/d_{ss})}$$

次の図-14のように縦軸にYを横軸にH/dを取っている。また、コンクリートの実強度を用いている。図から軸径25mmスタッドについては、H/dが4~6に対して式(3)は実験結果のほぼ平均値レベルの耐力評価となっていることが分かる。終局耐力に対してはH/dが小さくなるほど、耐力が小さくなる傾向が見られる。

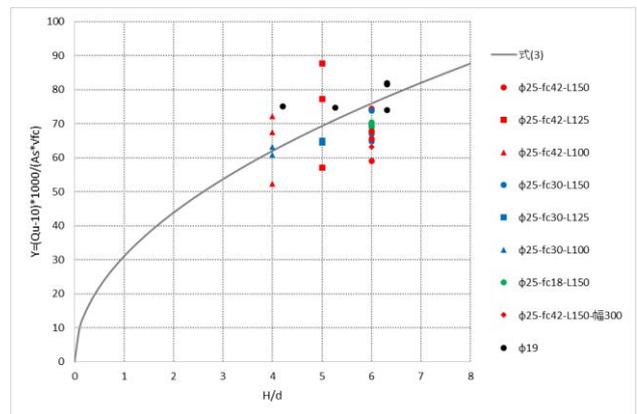


図-14 複合構造標準示方書のせん断耐力式との比較(H/d)

b) 道路橋示方書の許容せん断力式について

H/dで比較するために、式(4-a)と式(4-b)を下式に書き直し、

$$Y = Q_a/(\sqrt{f_c} \times d^2) = 9.4 \quad (H/d \geq 5.5)$$

$$Y = Q_a/(\sqrt{f_c} \times d^2) = 1.72 \times H/d \quad (H/d < 5.5)$$

図-15のように縦軸にY、横軸にH/dを取っている。図から降伏強度に対してはH/dの影響はあまり見られないことがわかる。

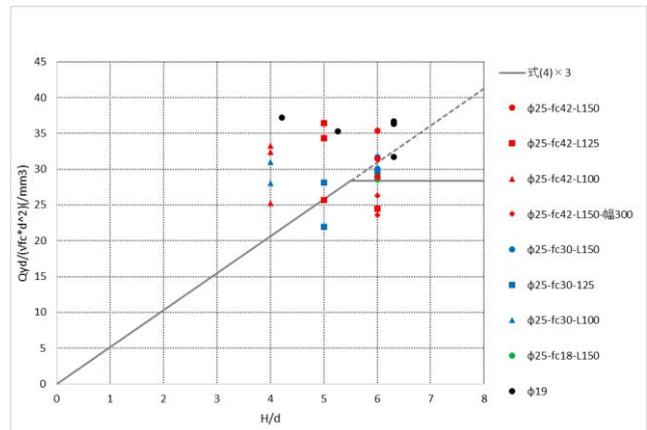


図-15 道路橋示方書の許容せん断力式との比較(H/d)

c) 荷重—相対変位の関係について

同じバッチのコンクリートでfc30およびfc42でまとめたH/d異なる場合の荷重—相対変位関係の比較を図-16、図-17に示す。fc30シリーズはスタッド長さが短いほど最大強度が小さくなる。しかし、fc42シリーズはL=125の試験体が最も大きな強度を示した。このことは、コンクリート強度によってはスタッド頭部からコンクリート表面までのかぶりが強度に影響する可能性を示唆するものと考えられる。

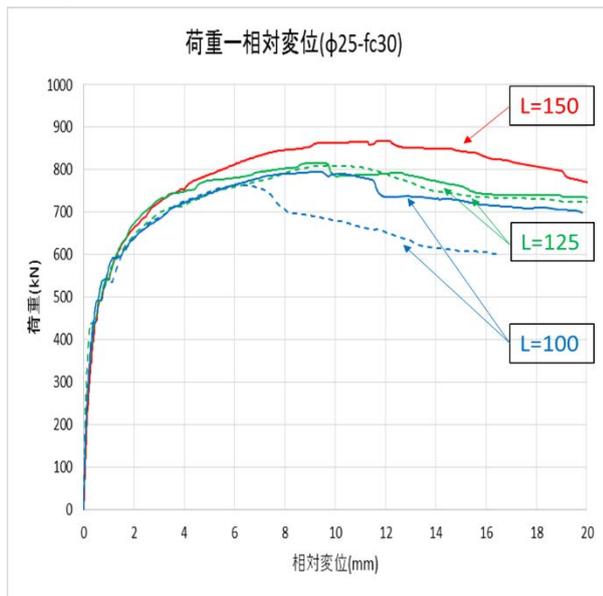


図-16 荷重—相対変位関係の比較 (fc30)

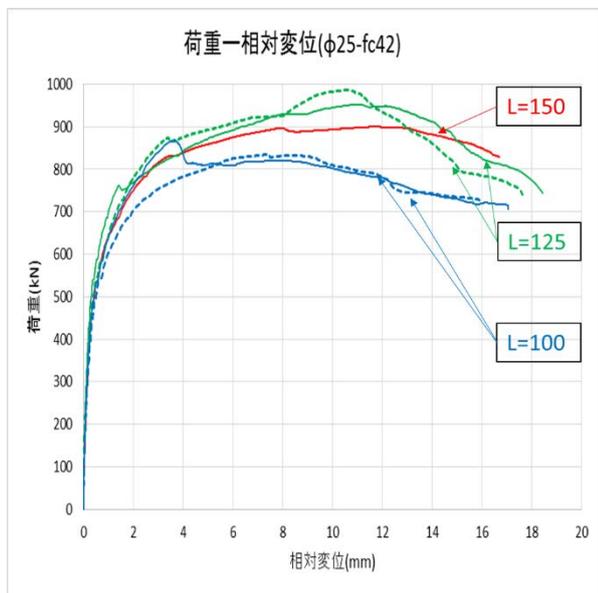


図-17 荷重—相対変位関係の比較 (fc42)

(3) コンクリートブロックの寸法について

今回、コンクリートブロックの厚さ200mmを標準とし、300mmも含め準備した。なお、スタッド軸中心から載荷側コンクリート縁までの距離は厚さ

200mmに対しては200mm、厚さ300mmに対しては250mmである。コンクリートブロック寸法の影響を見るため、厚さ300mmの試験体と同一バッチの試験体5体の荷重—相対変位関係の比較を図-18に示す。終局耐力に着目すると、厚さ300mmのほうが200mmに比べ6~35%の耐力の上昇が見られた。また、前述のスタッド頭部からコンクリート表面までのかぶりの影響を考慮すると、φ25頭付きスタッドにおいて、押し抜き試験のスタッド周辺のコンクリートブロックの寸法が小さいと、終局せん断耐力を小さく評価する可能性があることがわかる。

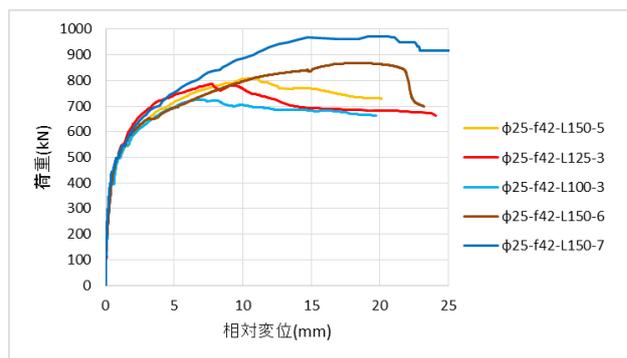


図-18 荷重—相対変位関係の比較 (fc42同バッチ)

5. 結論

軸径25mmの頭付きスタッドに対し以下の知見を得た。

- (1) 現行の終局せん断耐力式を用いる場合、低減係数0.93をかけることが望ましい。
- (2) 道路橋示方書における許容せん断力式で降伏せん断力に対してほぼ3倍の安全率を確保し、当該設計式をそのまま用いても問題ないと思われる。
- (3) スタッドのH/dが押し抜き挙動に及ぼす影響は以下のとおりである。
 - a) 降伏強度に対しては影響があまり見られない。
 - b) 終局耐力に対してはH/dが小さくなるほど、耐力が小さくなる傾向がある。
- (4) 押し抜き試験のスタッド周辺のコンクリートブロックの寸法が小さいと、終局せん断耐力を小さく評価する可能性がある。

謝辞

本研究を進めるに辺り、御指導下さった大谷先生、また多くの助言と技術的協力をしてくださった金尾技官、研究室の先輩、同輩、そのほか試験体材料の提供や実験補助をして下さった方々に、この場を借りて感謝の意を述べさせていただきます。

参考文献

- 1) 日本工業規格：JIS B 1198:2011 頭付きスタッド、2011.
- 2) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押し抜き試験方法（案）とスタッドに関する研究の現状、1996
- 3) Ollgaard, I.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
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説, 2010.
- 5) 土木学会, 複合構造標準示方書 共通編, 2009.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2012

PUSH-OUT TESTS OF HEADED STUD OF 25MM DIAMETER AND SHEAR STRENGTH EVALUATION

OHTANI Yasuhiro, SAKAE Masataka, NAKAJI Kenjiro, SASAKI Kazuaki, OGOMORI Hideki, UTSUMI Yoshito

Headed stud of 25mm diameter was included in JIS in 2011. Since present design formulae for shear strength are based on experimental data for headed studs of diameter under 22mm, Applicability of the formulae to the headed stud of diameter 25mm isn't clear. The purpose of this study is to examine the behavior of headed stud of diameter 25mm and to propose the formulae for shear strength. Series of push-out tests were carried out, where concrete strength, stud length, and dimension of concrete block are chosen as experimental parameters. Through the comparison with the existing formulae for shear strength, evaluation of the strength of headed stud of diameter 25mm will be discussed.