

頭付きスタッドのせん断力-すべり関係の定式化

社会システム工学科 島研究室4年 渡部 誠二

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造は、鋼とコンクリートの長を生かすように工夫された構造形式である。複合構造が成り立つためには、鋼材とコンクリートとの間で力の伝達がされなければならない。鋼とコンクリート間でのせん断力の伝達は、一般には、頭付きスタッドが多く用いられている。

複合構造物の設計においては、一般にはスタッドのせん断すべりが無いという前提の計算方法が用いられている。しかし、現実にはスタッドはせん断力で変形するものである。また、せん断すべりを許容する設計法にすれば、スタッドの使用量を減すことができ、合理的でコスト削減になると思われる。せん断すべりを許容する設計を行うためには、スタッドに作用するせん断力とすべり量の関係（せん断力-すべり関係）を表す式が必要となる。

そこで、本研究では、頭付きスタッドのせん断力-すべり関係に関して、スタッド径、コンクリート強度、スタッド強度、スタッドの細高比（高さ/直径）をパラメータとして実験を行い、せん断力-すべり関係の定式化を行った。

2. 現状と問題点

(1) せん断耐力

スタッドのせん断耐力に関しては、過去から多くの研究者によって耐力式が提案されている。たとえば、平城ら¹⁾は、過去の実験データを回帰分析して耐力式を提案しており、土木学会複合構造物照査指針（案）²⁾などでは、式(1)および式(2)として解説で提示している。

$$V_{su} = 31A_{ss} \sqrt{\frac{h_{ss}}{d_{ss}} f'_c} + 10000 \quad (\text{kN}) \quad (1)$$

$$V_{su} = A_{ss} f_{sud} \quad (\text{kN}) \quad (2)$$

ここで、 V_{su} は頭付きスタッドのせん断耐力 (N) , A_{ss} はスタッドの軸部の断面積 (mm²) , d_{ss} はスタッドの軸径

(mm) , h_{ss} はスタッドの高さ (mm) , f'_c はコンクリート圧縮強度 (N/mm²) , f_{su} はスタッドの引張り強度 (N/mm²) である。

(2) せん断力-すべり関係

スタッドのせん断力-すべり関係は、各研究者によって1種類のスタッド径について実験が行われており、それぞれの細径のスタッドに関しては、定式化がなされている。例えば、Ollgaardら³⁾は、スタッド径が 3/4 インチ (19mm) のもので異なるコンクリート強度の実験結果から式(3)を提案している。

$$V = V_u (1 - e^{-0.71\delta})^{2/5} \quad (\delta \text{ は mm}) \quad (3)$$

しかし、これは他のスタッド径やスタッド高さには適用できるとは限らない。たとえば、Chuahら⁴⁾は、9.5mmのスタッドの実験結果は、Ollgaardらの式の形を適用すると、式(4)のように、係数が変わると報告している。

$$V = V_u (1 - e^{-2.8\delta})^{2/5} \quad (\delta \text{ は mm}) \quad (4)$$

これらの式の問題点としては、パラメータをせん断耐力 V_u としているため、 V_u が同じであれば曲線も同じになるということである。 V_u は、スタッド強度、コンクリート強度、スタッドの細高比によって異なるものであるが、スタッド径、細高比、コンクリート強度、スタッド強度がせん断力-すべり関係における曲線の形に及ぼす影響を系統的に検討したものはない。

さらに、せん断力-すべり関係は、コンクリートの打ち込み方向によっても大きく影響されることが報告されている⁵⁾。

3. 実験

(1) 実験の要因と水準

実験の要因は、スタッド径 (ϕ) , スタッド強度 (f_{su}) , コンクリート強度 (f'_c) , スタッドの細高比 (h/ϕ) とした。試験体の実験条件を表-1に示す。水準に関しては、スタッド径は 19mmを基準として、入手可能で最大の 25mmの2種類とした。次に、スタッド細高比の目標を6を基準として4および8とし、

表-1 実験条件

試験体番号	試験体名	スタッド径	スタッド高さ	スタッド細高比	スタッド引張強度	コンクリート強度	せん断耐力 式(1)	せん断耐力 式(2)	式(2)/式(1)
		mm	mm		N/mm ²	N/mm ²	kN	kN	
No. 1	19-120-437-31	19	120	6.32	437	31.4	133.8	123.9	0.93
No. 2	19-120-437-53	19	120	6.32	437	52.5	170.0	123.9	0.73
No. 3	25-150-449-31	25	150	6.00	449	30.9	217.2	220.4	1.01
No. 4	19-120-623-28	19	120	6.32	623	27.7	126.3	176.6	1.40
No. 5	19-80-623-29	19	80	4.21	623	28.4	106.1	176.6	1.66
No. 6	19-150-623-29	19	150	7.89	623	28.5	141.8	176.6	1.25
No. 7	19-120-623-52	19	120	6.32	623	52.3	169.7	176.6	1.04
No. 8	19-120-437-16	19	120	6.32	437	15.7	97.5	123.9	1.27
No. 9	19-120-623-15	19	120	6.32	623	15.2	96.1	176.6	1.84

スタッド高さを 80mm, 120mm, 150mmとした。スタッドの引張強度は、JIS B 1198 に適合する $f_{su}=440 \text{ N/mm}^2$ 程度のもので、SM570 相当の $f_{su}=623 \text{ N/mm}^2$ のものとした。コンクリート強度は、設計圧縮強度を $f'_c = 30 \text{ N/mm}^2$ および $f'_c = 50 \text{ N/mm}^2$ の二種類とした。なお、試験体名は、スタッド径-スタッド高さ-スタッド強度-コンクリート強度の順としている。

(2) せん断耐力の計算値

試験体のせん断耐力の計算には、土木学会複合構造物の性能照査指針（案）の解説に示されている式(1)および式(2)を用いた。式(1)および式(2)の計算値および式(2)の値に対する式(1)の値の比を表-1に示す。普通強度のスタッドを用いたものでは比が 0.73~1.27 であり、高強度のスタッドを用いたものでは比が 1.04~1.84 である。

(3) 試験体

a) 形状と寸法

試験体の形状と寸法は、（社）日本鋼構造協会の頭付スタッドの押抜き試験方法（案）⁶⁾ に準じた。試験体の概略を図-1に示す。

コンクリートブロック幅は、試験方法（案）の最小値である 400mm とした。コンクリートブロック厚さは、高さが最も大きいスタッド（高さ 150mm）に対してかぶりが試験方法（案）の最小値である 30mm となるように、180mm とした。スタッドの軸直角方向の間隔は、試験方法（案）のスタッド軸径の 5 倍とした。

H鋼の断面寸法は、H-200×200×8×12 であり、長さは 400mm である。

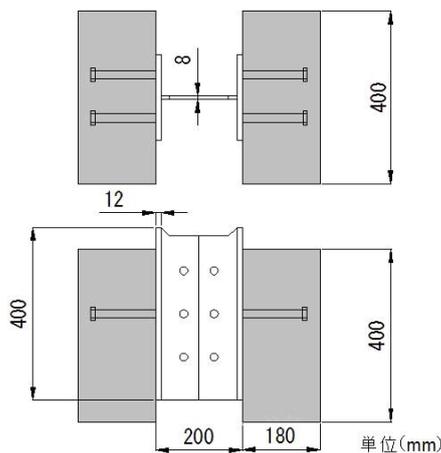


図-1 試験体の概略図

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

設計強度 (N/mm^2)	スランプ (cm)	ブリージ ング率 (%)	水セメン ト比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	減水剤 <i>SP</i>	増粘剤 <i>VA</i>
30	8	0	73	47	171	234	893	1112	1.87	0.86
50	20	0.17	58	41	171	295	748	1112	5.31	0.86

b) スタッド

軸径、頭部径および頭部厚は、普通強度スタッドおよび高強度スタッドともに、JIS B 1198 に適合するものである。スタッドの特性を表-3に示す。

表-3 スタッドの特性

材質	普通強度			高強度		
	軸径 mm	19	25	19	19	19
高さ mm	120	150	80	120	150	
頭部径 mm	32	40	32	32	32	
頭部厚 mm	10	12	10	10	10	
引張強度 N/mm^2	437	449	623	623	623	
降伏強度 N/mm^2	326	333	500	500	500	

c) 試験体の作製

コンクリートの打ち込み方向がせん断力-すべり曲線に大きな影響を及ぼすことが明らかにされている⁹⁾。したがって、ブリージングの影響が最も少ないスタッド上方から軸に平行にコンクリートを打ち込んだ（参考文献5のタイプA）。さらに、スタッド頭部の下面にブリージング水が留まるのを防ぐため、増粘剤を用いブリージングの少ないコンクリートとした。

コンクリートの示方配合、スランプ値およびブリージング試験の結果を表-2に示す。

(4) 載荷

万能試験機を用いて、一方向（押し込みのみ）の漸増繰返し載荷とした。除荷は、荷重が 50kN, 100kN, 150kN, 200kN, 250kN, すべりが 0.3mm, 0.5mm, 0.75mm, 1.0mm, 1.4mm, 2.0mm, 3.0mm, 4.5mm, 6.0mm, 8.0mm, 10mm のときを基準とした。

(5) 測定項目と測定方法

（社）日本鋼構造協会の頭付スタッドの押抜き試験方法（案）に準じた。

a) せん断力

載荷荷重を荷重計で測定し、スタッド1本に対するせん断力は、載荷荷重をスタッド本数（4本）で割ることによって求めた。

b) すべり量

試験方法（案）に準じて、スタッド位置におけるH鋼とコンクリートブロック表面の相対変位を4カ所で高感度変位計を用いて測定した。

4. 結果および考察

(1) 破壊モード

せん断力-すべり曲線の例として、試験体 No.1 と試験体 No.7 のものを図-3 および図-4 に示す。

全ての試験体において、すべりの増加とともにせん断力が増加後、最終段階の除荷再載荷時において、せん断力が過去の最大せん断力に至らずにすべりが増加した。最大せん断力時あたりからコンクリートにひび割れが発生し、すべりの増加とともにひび割れが進展した。スタッドの破断は、試験体 No.7 のすべり量が約 6mm のときのみが発生した。この試験体では、図-4 から分かるように、スタッドの破断前に急激にせん断力が低下した。

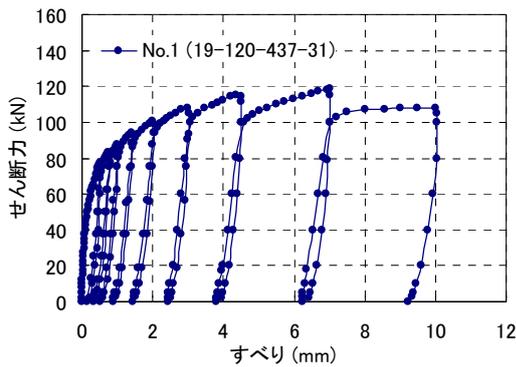


図-3 試験体 No. 1 のせん断力-すべり関係

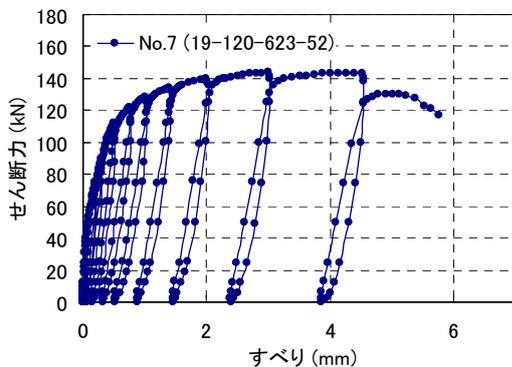


図-4 試験体 No. 7 のせん断力-すべり関係

(2) せん断耐力

せん断耐力の実験値と計算値との比較を表-4 に示す計算値に対する実験値の比は 0.85 から 1.13 の範囲で、平均値は 0.96 であり、式(1)と式(2)の比にかかわらず、実験値は計算値に近い値となっている。

表-4 せん断耐力の結果

試験体番号	試験体名	せん断耐力 (計算値)	せん断耐力 (実験値)	実験値/計算値
		kN	kN	
No. 1	19-120-437-31	123.9	118.5	0.96
No. 2	19-120-437-53	123.9	139.8	1.13
No. 3	25-150-449-31	217.2	188.1	0.87
No. 4	19-120-623-28	126.3	120.5	0.95
No. 5	19-80-623-29	106.1	103.0	0.97
No. 6	19-150-623-29	141.8	138.5	0.98
No. 7	19-120-623-52	169.7	143.8	0.85
No. 8	19-120-437-16	97.5	100.6	1.03
No. 9	19-120-623-15	96.1	97.1	1.01

(3) せん断力-すべり関係

a) 定式化の考え方

スタッドの変形挙動は、スタッドおよびコンクリートのそれぞれの特性が相互に影響を及ぼしあうことや鋼板とコンクリートの摩擦などのために、複雑なものとなることが予想される。したがって、せん断力-すべり関係の式として、変形メカニズムを考えたものを構築するのもよいが、本研究では、設計や照査に用いることを念頭において、簡便な形の式とすることとする。具体的には、式(3)で表される Ollgaard らの指数関数式の形を用いることを試みる。Ollgaard らの式には係数がふたつあるので、コンクリート強度、スタッド強度、スタッドの細高比の影響は、そらの係数の値を変えることによって対応する。すなわち、式(5)の係数 k_1 および k_2 を条件によって変える。

$$V = V_u (1 - e^{-k_1 \delta})^{k_2} \quad (5)$$

b) スタッド径の影響

スタッドの細高比がほぼ同じで、スタッドの径が異なる試験体である No.1 と No.3 のせん断力-すべり関係の包絡線を図-5 に示す。図中の曲線は、後述する提案式を示すものである。当然のことながら、スタッド径が大きい方のせん断力が大きくなっている。

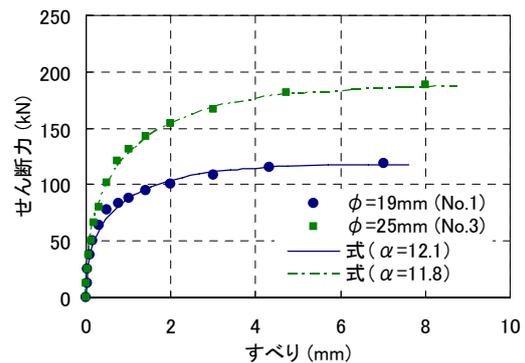


図-5 スタッド径が異なる時のせん断力-すべり曲線

そこで、せん断力-すべり関係を検討するに当たり、Ollgaardらの考えを参考にし、せん断力 V をせん断耐力 V_u で除して正規化する。図-6 は、縦軸をせん断耐力に対するせん断力の比 (V/V_u) としたものである。この図から、せん断耐力に対するせん断力の比とすべり量の関係では、すべり量はスタッド径が大きい方が大となることが分かる。これは、スタッドの寸法が大きくなると、応力やひずみの分布形が同じ時に、スタッドの変形が寸法比だけ大きくなると考えられることと一致する。すなわち、すべり量をスタッド径で除して正規化し、せん断力-すべり関係を検討するのがよい。

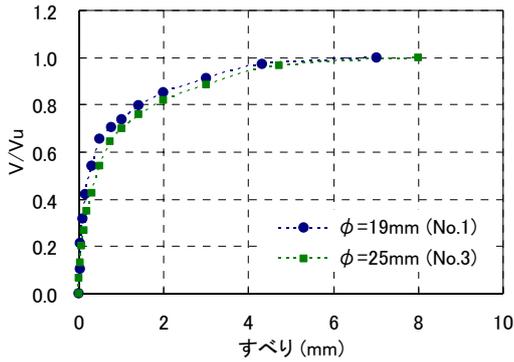


図-6 スタッド径が異なる時のV/Vuとすべりとの関係

せん断力をせん断耐力で、すべり量をスタッド径で正規化したせん断力-すべり関係を図-7に示す。二つの曲線がほぼ重なっていることから、せん断力をせん断耐力で除し、すべり量をスタッド径で除すことで、せん断力-すべり関係は一つの式で表すことができると言える。よって、以降はすべり量 δ をスタッド径 ϕ で除した δ/ϕ で変形を表し、式は式(6)の形とする。

$$V = V_u(1 - e^{-\alpha \delta/\phi})^\beta \quad (6)$$

図-7の線は、式(6)の係数 β として Ollgaard らの提案である2/5を用い、 α を12としたときのものを示している。

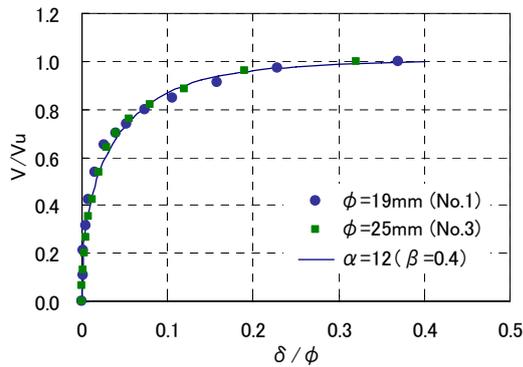


図-7 スタッド径が異なる時のV/Vuと δ/ϕ との関係

c) コンクリート強度の影響

コンクリート強度が異なるときのせん断力-すべり曲線を図-8および図-9に示す。コンクリート強度が大きいほど、最大せん断力が大きくなっている。

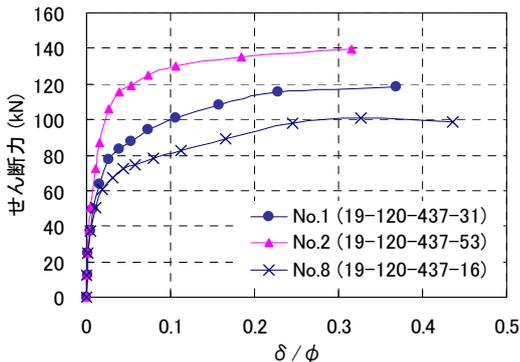


図-8 コンクリート強度が異なる時のせん断力-すべり曲線 (スタッド強度=437N/mm²)

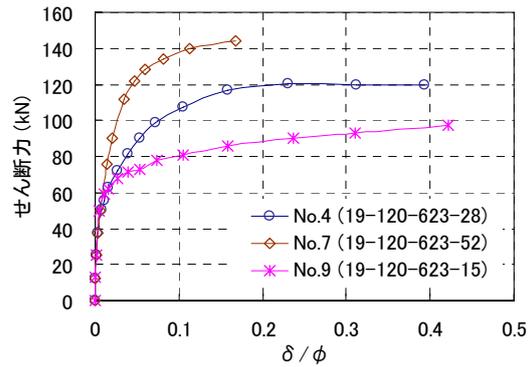


図-9 コンクリート強度が異なる時のせん断力-すべり曲線 (スタッド強度=623N/mm²)

せん断力-すべり曲線の形状に及ぼすコンクリート強度の影響を見るために、縦軸としてせん断力を最大せん断力で除したものを図-10および図-11に示す。

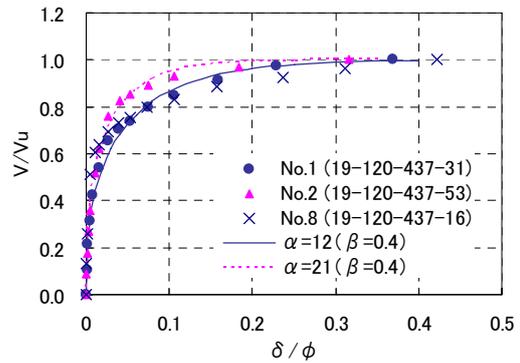


図-10 コンクリート強度が異なる時のV/Vuと δ/ϕ の関係 (スタッド強度=437N/mm²)

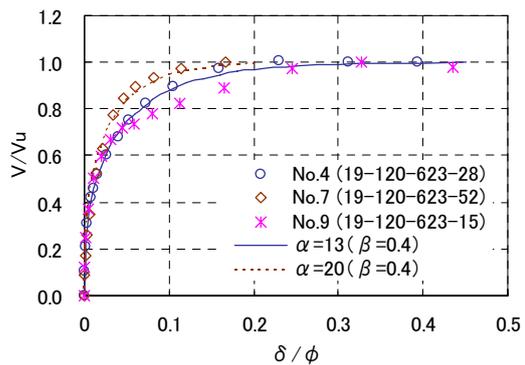


図-11 コンクリート強度が異なる時のV/Vuと δ/ϕ の関係 (スタッド強度=623N/mm²)

最大せん断力の半分程度までの見かけの剛性は、コンクリート強度によらずほぼ同じとなっている。しかし、それ以降は、コンクリート強度によって曲線の形は異なり、強度が大きいほど半径が小さくなっている。コンクリート強度によって曲線形

状が変わるのは、コンクリート強度が大きくなると、終局状態がスタッドの強度で決まる方向となり、あるせん断力から急激な塑性状態となるためだと思われる。すなわち、曲線形状は、式(1)と式(2)の比に関係すると思われる。

図-10の破線は、 β を0.4としたときに、試験体 No.2 の実験結果に合うように、 α を21としたものである。また、図-11の線は、同様に、試験体 No.4 に対して α を13および試験体 No.7 に対して α を20としたものである。前述の試験体 No.1 および No.3 と同様に、試験体 No.2, No.4 および No.7 についても、 β をOllgaardらの値である2/5として、 α を変えることによって実験結果をほぼ表すことができている。

d) スタッドの細高比の影響

スタッド細高比が異なる試験体 No.4, No.5 および No.6 のせん断力-すべり関係を図-12 に示す。既往の研究結果にあるように、細高比が大きいくほど、せん断力は大きくなっている。なお、図中の線は、後述する提案式を表している。

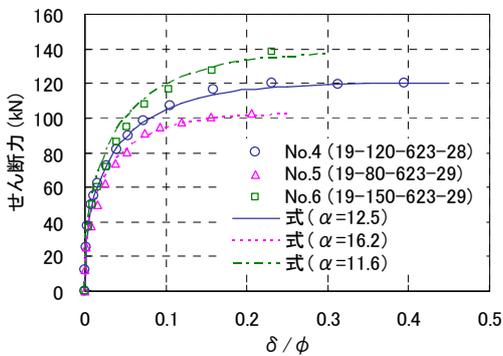


図-12 スタッド細高比が異なる時のせん断力-すべり曲線

せん断力-すべり曲線に及ぼすスタッド細高比の影響を見るために、縦軸としてせん断力を最大せん断力で除したものを図-13 に示す。スタッド細高比の影響としては、コンクリート強度の影響とは逆に、せん断耐力の小さいものがより弾塑性的な挙動を示している。これらの試験体は、式(2)/式(1)の値が1.25 から1.66で、式(2)のスタッドの引張耐力に余裕があるものであるが、式(2)/式(1)の値が大きいくほど、言い換えれば式(1)と式(2)の差が大きいくほど係数 α が大きくなる結果となっている。

図-13の破線および一点鎖線は、 β を0.4としたときに、試験体 No.5 および試験体 No.6 の実験結果に合うように、 α をそれぞれ16と10としたものである。前述のコンクリート強度が極端に小さい試験体を除いた試験体 No.1 から No.4 および試験体 No.7 と同様に、試験体 No.5 および No.6 についても、 β をOllgaardらの値である2/5として、 α を変えることによって実験結果をほぼ表すことができている。

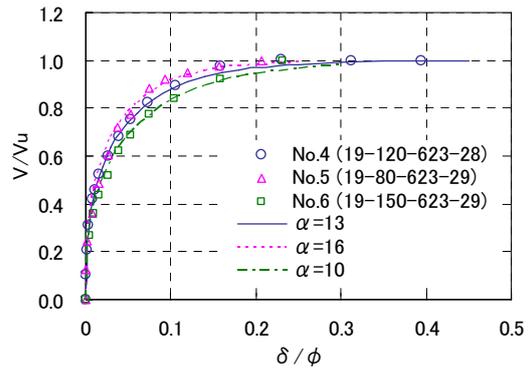


図-13 スタッドの細高比が異なる時の V/V_u と δ/ϕ の関係

e) スタッド強度の影響

スタッドの強度の影響を見るために、コンクリート強度およびスタッド細高比が同じ試験体である No.1 および No.4 のせん断力-すべり曲線を図-14 に示す。

図-14の No.1 および No.4 においては、それぞれ式(2)/式(1)が0.93と1.40であって、最大せん断力はスタッドの強度では決まらずにほぼ同じ値となっている。曲線形については、最大せん断力の約70%までは同じである。これは、スタッドが全体的に降伏するまでは同じ挙動をすると考えられる。しかし、それ以降では、曲線形は異なっており、スタッドの強度が小さい方が、剛性が小さくなっている。

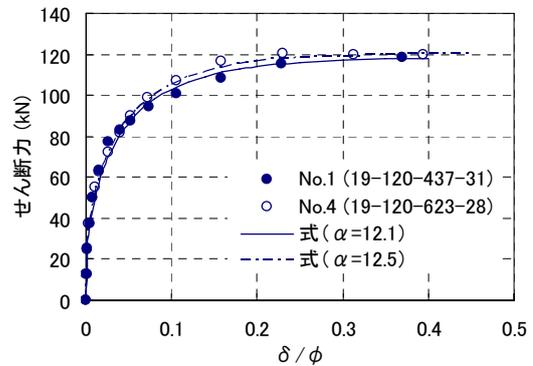


図-14 スタッドの強度が異なる時のせん断力-すべり曲線 (コンクリート強度=30N/mm²)

f) 定式化

以上のように、各試験体の実験結果において、せん断力を最大せん断力で除した V/V_u とすべりをスタッド径で除した δ/ϕ との関係に対して、Ollgaardら式の係数のフィッティングを試みた結果、コンクリート強度が極端に小さい試験体を除いて、Ollgaardらの値である2/5を用い、係数 α だけを変えることで試験体の曲線を表すことができると判明した。各試験体における α 値の実験値を表-5の中央部に示す。

表-5 α 値の実験値と計算値

試験体番号	試験体名	実験値	計算値		
			α_0	k	α
No.1	19-120-437-31	12	12.0	1.01	12.1
No.2	19-120-437-53	21	20.1	1.08	21.8
No.3	25-150-449-31	12	11.8	1.00	11.8
No.4	19-120-623-28	13	10.6	1.18	12.5
No.5	19-80-623-29	16	10.9	1.49	16.2
No.6	19-150-623-29	10	10.9	1.07	11.6
No.7	19-120-623-52	20	20.0	1.00	20.1

表-5から、 α 値の実験結果は、コンクリート強度が大きいものが大となっていることが分かる。 α 値とコンクリート強度との関係を図-15 に示す。他の条件による差はコンクリート強度の影響に比べて小さくなっている。また、せん断力-すべり関係の曲線の形は、式(1)で表されるコンクリート破壊に対して式(2)で表されるスタッドの強度が十分にあれば α 値が大きくなること、逆に式(2)の耐力に対して式(1)の耐力が大きい場合にも α 値は大となることが分かっている。そこで、 α 値の式は、式(7)に示すように、まずコンクリート強度の関数 α_0 とし、その他の条件の影響を表す係数kを導入する。

$$\alpha = k \alpha_0 \quad (7)$$

コンクリート強度の関数とする α_0 は、式(2)/式(1)の値が1のときに最も小さくなることから、式(2)/式(1)の値が1のときの α とする。すなわち、図-15 の下限を表す式となる。ここでは、図-15 に線で示すような式(8)を用いる。

$$\alpha_0 = 11.5 \left(\frac{f_c'}{f_{c0}'} \right) \quad (8)$$

f_c' はコンクリート圧縮強度(N/mm²) f_{c0}' は 30 N/mm²である。

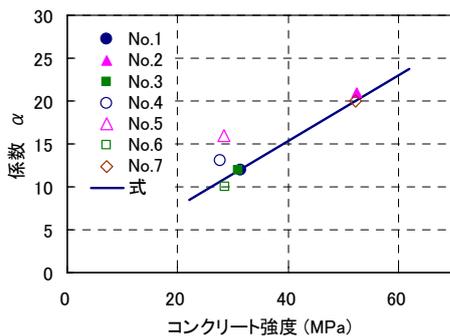


図-15 係数 α とコンクリート強度との関係

式(2)/式(1)の値を耐力比 γ と定義し、横軸に耐力比 γ および縦軸に α の実験値を式(8)の値で除した係数kを取ったものを式に示す。

係数kの定式化に関しては、耐力比 γ の値が1の近傍において係数kの変化率が不連続にならないようにすることおよびひ

とつての式で表すことを考慮して、ここでは座標(1,1)を頂点とする二次関数を用いることとする。

$$k = 1.1(\gamma - 1)^2 + 1 \quad (9)$$

ここで、 γ は耐力比で、式(2)/式(1)の値である。

式(7)~(9)による係数 α_0 , k および α の計算値を表-5の右部分に示す。各試験体におけるせん断力-すべり曲線の実験結果と提案式との比較を No.1 および No.3 に対しては図-5, No.4, No.5 および No.6 に対しては図-12 に示す。それぞれ、式は実験結果を表すことができていると思われる。

5. 結論

本研究の実験結果から以下の結論を得た。

- (1) せん断耐力の計算値に対する実験値の比は 0.85 から 1.13 の範囲で、平均値は 0.96 であり、式(1)と式(2)の比にかかわらず、実験値は計算値に近い値となった。
- (2) スタッド径の影響については、せん断力をせん断耐力で除し、すべりをスタッド径で除すことで、せん断力-すべり関係は一つの式で表すことができる。
- (3) せん断力-すべり関係をせん断力/最大せん断力とすべり/スタッド径との曲線で表すとき、曲線の形はコンクリート強度によって違い、強度が大きいほど曲線の半径が小さくなった。
- (4) スタッド細高比の影響としては、せん断耐力の小さいものがより弾塑性的な挙動を示した。
- (5) スタッドの強度の影響に関しては、スタッドの強度が小さい方が、剛性が小さくなった。
- (6) 以上の各要因の影響を表すことができるせん断力-すべり関係式として、 $V=Vu(1-e^{-\alpha \delta / \Phi})^{2/5}$
 $\alpha=11.5\{1.1(\gamma-1)^2+1\}f_c'/f_{c0}'$ を提案した。

参考文献

- 1) 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, 1989.
- 2) 複合構造物の性能照査指針(案), 構造工学シリーズ 11, 土木学会, pp. 42-43, 2002. 10
- 3) Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete, AISC Engineering Journal, 1971
- 4) Strength and deformational behaviors of studs embedded in high strength prestressed concrete, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 1033-1038, 1991
- 5) 頭付きスタッド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/I-7, pp. 311-320, 1987. 4
- 6) 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