

縁端距離を考慮した頭付きスタッドの 引抜きおよびせん断強度評価式

平城弘¹・松井繁之²・佐藤 崇³・Abubaker AL-SAKKAF⁴・石崎 茂⁵・石原靖弘⁶

¹ 正会員 工博 摂南大学助教授 工学部土木工学科 (〒572-8508 寝屋川市池田中町17-8)

² フェロー 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

³ 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁴ 学生会員 工修 大阪大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

⁵ 正会員 (株)酒井鉄工所 設計部 (〒590-0831 堺市出島西町3-1)

⁶ 正会員 片山ストラテック(株) 橋梁設計部 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島6-2-21)

異種材料から構成される複合構造形式の接合部には頭付きスタッド(以下、スタッドと称す)が使用されることが多い。その際、スタッドは有限な領域で配置されるため、個々のスタッドはコンクリート縁からの距離が異なり、それら一群のスタッドに同一の変位(ずれ・浮き上がり)を与えても、同一の引抜きおよびせん断耐荷力を示さないことが予想される。そこで本論文では、既往の研究の試験データと引抜きおよびせん断耐力評価式を再評価して、縁端距離を考慮しない場合の強度評価式について定式化した。次いで、縁端距離を考慮すべき試験データに対しても、スタッドの耐力低下に及ぼす影響因子を明らかにし、新しい縁端距離パラメータを導入したスタッドの引抜きおよびせん断強度評価式についても定式化した。

Key Words : stud, shear connector, anchor, ultimate capacity, hybrid structure

1. まえがき

近年、合理化橋梁を目指した新形式の複合構造の開発が活発に行われている。このような新形式の複合構造を実現させるには、接合材および接合構造の要求性能を満足させることが前提条件となっている。さらに、接合材について信頼できる強度評価式ならびに合理的な設計方法を確立させておくことが必須条件と思える。

ここで、複合構造の接合部とは、上下部一体化橋梁の鋼桁とRC橋脚との接合部、混合橋梁の鋼部材とコンクリート部材との接合部、鋼製橋脚のコンクリート基礎への定着部および少数主桁化橋梁の鋼桁とRC床版との接合部(床版の長スパン化が進展し、スタッドには水平せん断力のほかに、アップリフトによる引抜き力が生じる)などを指すが、これらの異種部材間の接合部にはスタッドが採用されることが

多い。狭隘な接合部にスタッドが使用された場合、スタッドの一部は鋼材やコンクリートからの縁端距離が十分にとれず、期待される耐荷性能を発揮しない場合がある。土木分野の従来のスタッドに関する研究は合成桁に使用される場合を前提とし、鋼桁に溶接されたスタッドは、RC床版の十分な縁端距離をもって使用される場合だけを対象としている¹⁾。既往の研究で縁端距離を考慮しようとする研究は建築分野で少し見受けられるぐらいで、極めて少ない。よって、縁端距離が及ぼすスタッドの引抜きおよびせん断耐力への影響を体系化する必要がある²⁾。

そこで本研究では、まず既往の研究で採用された試験方法、ならびに提案されている引抜きおよびせん断耐力評価式を再評価し、筆者らが実施した試験データを含め、国内外の既往の試験データを収集整理した。次いで統計的处理によって、縁端距離が影響しない場合、さらに影響する場合に対して、スタ

ッドに及ぼす影響因子を明らかにし、それぞれについて定式化を図った。そして、縁端距離が影響しない場合と影響する場合に対して、縁端距離パラメータを導入することより、一貫性のあるスタッドの合理的な引抜きおよびせん断に関する強度評価式を導出することを目的とする。なお、本研究の一部である直径 6mm スタッドの引抜きおよびせん断耐力評価式については、文献3)で既に発表している。

2. 既往の強度評価式とその問題点

(1) 縁端距離を考慮しない場合

a) 引抜き試験

表-1 に既往の研究で提案されているスタッドの引抜き強度評価式を示す⁴⁾⁻¹²⁾。これらの強度評価式は、引抜き作用を受けるスタッドの破壊形式がコーン状の破壊を起こす、として導出されたものである。ただし、表中の式は基本的に、コーン状の円錐形表面積、または円錐形が投影する有効水平面積を採用しているかによって、2つに分類できる。一方、コンクリートの強度についても、せん断強度($\sqrt{f'_c}$)と引張強度(f'_c)とが適用されている。元来、円錐形表面積が適用された場合、コンクリートのせん断強度、一方、有効水平面積が適用された場合、コンクリートの引張強さを用いるべきであるが、実状はそのとおりになっていない。

写真-1 はスタッドが引抜き作用を受けてコーン状に破壊した状況を示すものである。通常、スタッドの引抜き強度は、コンクリートのコーン破壊が45°の角度で円錐状に起こると仮定して導き出されたものである。この写真から明らかなように、スタッド頭部直下のコンクリートは、純せん断破壊の様相を呈し、破壊面の傾度がきつい。そして、コンクリート表面に近くなるにつれて、徐々にコンクリ

表-1 既往のスタッドの引抜き強度評価式

文献	静的引張耐力各種評価法 ($\langle A_s \cdot f_{sy} \rangle$)		
	研究者	耐力算定式	F 値
4)	Leigh-University	$F \cdot (h_s + d_h) h_s \sqrt{f'_c}$	1.207
5)	Sattler	$F \cdot h_s d_h f'_c$	0.935
6)	Utescher	$F \cdot h_s^2 f'_c$	0.946
7),8)	CEB-ECCS	$F \cdot 0.927 h^2 \sqrt{f'_c}$	1.384
9)	PCI Dsign data book	$F \cdot (h_s + d_h) h_s \sqrt{f'_c}$	1.207
10)	Roik,Bode,Hanenkamp	$F \cdot (h_s + d_h) \sqrt{h_s} \sqrt{f'_c}$	11.3
11)	McMackin	$F \cdot \sqrt{2\pi} (h_s + d_h) h_s \sqrt{f'_c}$	0.272
12)	Ohtani	$F \cdot (h_s + d_h) \sqrt{h_s} \sqrt{f'_c}$	11.3

F:係数, h:スタッド全高(mm), h_s:首下長さ(mm)
d_h:頭部直径(mm), f'_c:コンクリート圧縮強度(N/mm²)

ートの破壊面の傾度が緩くなっていることが分かる。この写真は、コンクリート内に鉄筋が配置されていない試験体のものであるが、鉄筋が配置されている試験体では破壊面がより複雑な様相を呈することになる。いずれにしても、コンクリート内部の破壊面は、これまで仮定されている傾度45°(コンクリート表面に対する)にはならない。

図-1 は、本研究で収集した294個(後出表-3参照)の内、縁端距離に影響があるデータと、スタッドが破断したデータを除いた93個の試験データについて、Leigh-Universityの研究グループが提案した関係を用いて整理したものである。McMackinの研究はLeigh-Universityの研究グループに属しており、またPCI design handbookはLeigh-Universityの研究を全面的に採用したものである。縦軸に実験値、横軸に強度評価式による算定値を示すものである。この図から明らかなように、コンクリートがコーン破壊する場合のスタッドの引抜き耐力を精度よく表現している様子が理解できる。このときの相関係数は0.9632と高い。しかしながら、この評価式は有効水平投影面積を使いながら、コンクリートのせん断強度が評価しているなど、整合性に欠けた点があると言える。

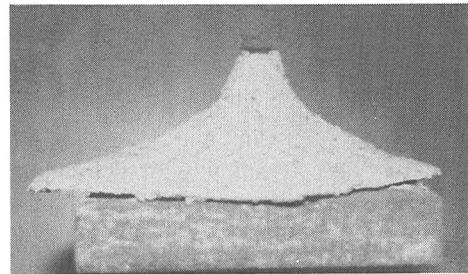


写真-1 引抜き破壊状況(コーン状)

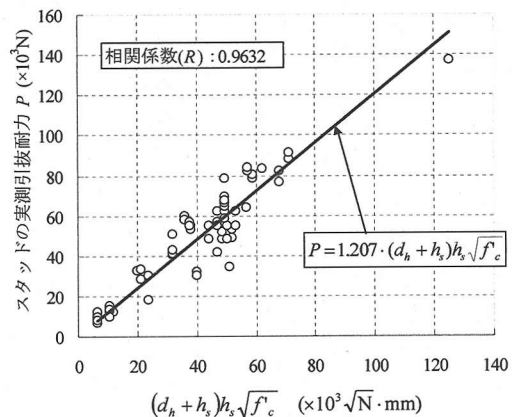


図-1 既往の評価法(Leigh-University)

b) 押抜きおよび一面のせん断試験

これまで、スタッドのせん断強度はほとんど実験的に求めるのが主流であり、その試験方法には、図-2に示すようなものが採用されている。

最も一般的な試験方法は、合成桁を対象とした押抜きによる二面せん断試験(通常、押抜き試験と称する)である。この試験方法は、鋼部材とその両側に配置されたコンクリートブロックとを終局までほぼ純せん断で試験することができ、試験体製作が比較的安価であるメリットを選択理由に挙げられる。この試験方法の場合、押抜き試験時にスタッドのせん断力をコンクリートブロック下面の支圧抵抗で受け持つことから、縁端距離の影響が少ない。また、同図の右に示されているように、スタッド根元部の鋼板は終局まで変形しないことを前提としている。そのため、スタッド支圧前面のコンクリートは3軸応力状態を形成し、スタッド根元部のコンクリートが局部的に圧潰してもまわりのコンクリートの拘束を受けているので急激なせん断耐力の低下が認められない。

引抜きによる二面せん断試験は、沈埋トンネル、

港湾大型ケーソンブロックなどのサンドウィッチ構造のずれ止めの強度を決定するために採用される試験方法である。この試験方法が採用された場合、使用される鋼板が比較的薄いものが使用されるため、スタッド根元部の鋼板は載荷初期から局部的に回転変形を起こす。載荷荷重の増加に伴ってスタッド根元部の鋼板の回転変形が大きくなり、スタッド支圧前面のコンクリートは局部的に圧潰すると、鋼板が大きく変形し、せん断耐力の低下を起こす。

引張力による一面せん断試験方法は、鋼製柱脚とコンクリート基礎との定着部のせん断強度を求めるために、主として建築分野で多用されているものである。この試験方法では、PC鋼棒などでスタッドを溶接する鋼板に引張力を作用させるため、荷重は偏心して載荷することになる。そのため、鋼板は、引張力が作用する鋼板の先端を回転軸としてコンクリート面から離れようとする。その結果、スタッド支圧前面のコンクリートは、スタッド軸方向の拘束解放があり、早期の局部圧潰を引き起こし、スタッドのせん断耐力の低下を起こすと考えられる。

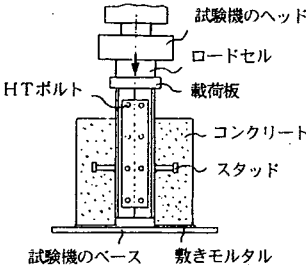
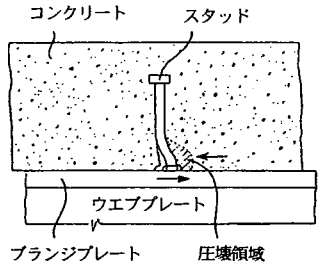
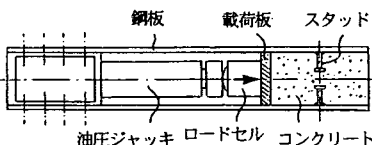
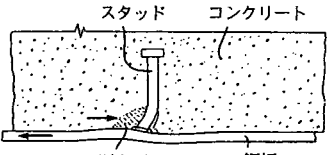
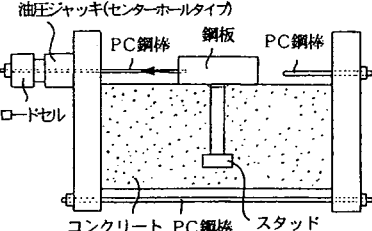
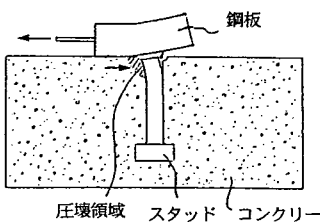
試験方法	試験体形状	スタッド根元部の変形と応力分布図
押抜きによる二面せん断試験		
引抜きによる二面せん断試験		
引張力による一面せん断試験		

図-2 スタッドのせん断試験方法^{1),13),25)}

(2) 縁端距離を考慮する場合

a) 引抜き試験

スタッドの縁端距離(スタッド軸中心からコンクリート側面までの距離) e が埋込み長(頭下長さまたは首下長さとも称す) h_s より小さくなる ($e < h_s$) と、引抜き力により形成するコンクリートコーンが部分的に欠けることになる。このような場合、日本建築学会ではスタッドの引抜き耐力は、その欠損した有効水平投影面積を考慮して低減させている。その概念図を図-3に示す。同図には参考のため、縁端距離を考慮しない場合の概念図も示している。

本研究で収集整理した試験データを用い、実験値と縁端距離の関係を図-4に示す(データ数294個:後出表-3の全データ)。この図より明らかなように、試験データのばらつきは大きいものの、実験値のば

らつきの上限値を囲う包絡線(曲線)を描けば、縁端距離の減少に伴い実験値が低下していることが分かる。このことから、コンクリートの縁端距離がスタッドの引抜き強度に及ぼす影響を明確にするには、より詳細な分析が必要であると思える。

表-2にFisherらの研究、PCI design handbookで提示されたスタッドの引抜き強度評価式を示す。同図には参考のため、日本建築学会が提示している実験値の下限値で表した引抜き強度式も併記している。この表より明らかなように、単に縁端距離を考慮しない強度式に低減係数を乗じるだけで、縁端距離を考慮した場合の強度式としている。この操作はあまりにも簡易すぎて、複雑な縁端距離の影響を的確に配慮されていないのではないと思われる。また、日本建築学会式も、単に安全側であるとして、試験データの整理法も十分に吟味しないで下限値を与えており、合理性に欠けているようである。

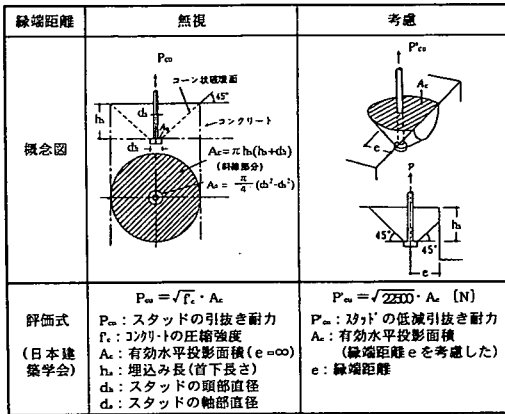


図-3 スタッドの引抜き耐力評価法(建築学会)

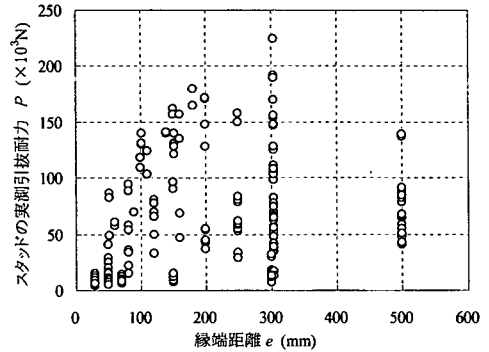
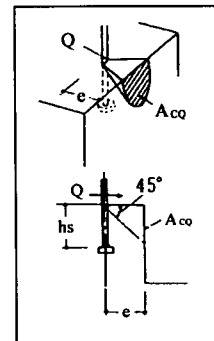


図-4 実測引抜き耐力と縁端距離の関係

表-2 縁端距離を考慮したスタッドの引抜きおよびせん断耐力評価式 (既往の研究)

文献	耐力	引抜き耐力	せん断耐力
Fisher らの研究(1973)		$P'_{u0} = \alpha_\tau \cdot P_{u0}$ $\alpha_\tau = \frac{2e}{9d_s}$ (低減係数)	$Q'_u = \alpha_\phi \cdot Q_{u0}$ $\alpha_\phi = \frac{e-1}{8d_s}$ (低減係数)
PCI design handbook (1978)		$P'_{u0} = C_r \cdot P_{u0}$ $C_r = \frac{e}{h_s} \leq 1$ (低減係数)	$Q'_u = 3250(e-1)\lambda\sqrt{f_c/5000}$ (ポンド・インチ単位)
日本建築学会(1985)		$P_{max} = 0.6\sqrt{225} \cdot A_{cr}$	$Q_{max} = 0.6\sqrt{f_c} \cdot A_{co}$
	P_{u0} : 縁端距離を考慮したスタッドの低減引抜き耐力 P_{u0} : 縁端距離を考慮しない場合のスタッドの引抜き耐力 $(=K \cdot \lambda \cdot h_s \cdot (h_s + d_s) \sqrt{f_c})$ Q'_u : 縁端距離を考慮したスタッドの低減せん断耐力 Q_{u0} : 縁端距離を考慮しない場合のスタッドのせん断耐力 $(=0.5 \cdot A_s \cdot (f_c \cdot E_c)^{0.5})$ λ : 材料係数: 普通コンクリートの場合→1.0, 砂だけ軽量コンクリートの場合→0.85, すべて軽量コンクリートの場合→0.75 A_s : スタッドの軸部断面積, E_c : コンクリートのヤング係数 P_{max} : 縁端距離を考慮したスタッドの引抜き耐力に関する実験値の下限値 A_{cr} : 有効水平投影面積 $(=\pi h_s (h_s + d_s) + e \cdot \sqrt{(h_s + d_s)^2 - e^2} - (h_s + d_s)^2 \cdot \cos^{-1} \{e / (h_s + d_s)\})$ Q_{max} : 縁端距離を考慮したスタッドのせん断耐力に関する実験値の下限値 A_{co} : コンクリート端面に形成する有効投影面積 $(=\pi \cdot e^2 / 2)$ 右図を参照	e : 縁端距離 d_s : スタッド軸径 d_h : スタッドの頭部直径 h_s : スタッドの埋込み長 f_c : コンクリートの圧縮強度 K : 係数	

(参考図)



b) 押抜きおよび一面のせん断試験

押抜きせん断試験は上述のとおり、縁端距離の影響がほとんどないと考えられるので、ここでは議論の対象外とする。

Fisherらの研究、PCI design handbookで提示された一面せん断試験の強度評価式も表-2に併記した。同図には参考のため、日本建築学会による実験値の下限値で表したスタッドのせん断強度式も併記している。この表より明らかなように、Fisherらは引抜き強度式の場合と同様に、単に縁端距離を考慮しない強度式に低減係数を乗じるだけで、縁端距離を考慮した場合の強度式に変換している。また、PCI design handbookも縁端距離を考慮した強度式として表-2中のような評価式を提示しているが、実験式で根拠が明らかでない。日本建築学会は、引抜きの場合と同様に、せん断力を受けるスタッドの支圧前面からコーン状に投影されるコンクリート側面の有効面積をもって、縁端距離を考慮した場合のせん断強度式としている。また、日本建築学会は試験データのバラツキの下限値で与えており、合理的な設計とは言えない。一般に筆者らも含めて、縁端距離の影響を考慮した場合の引張りによる一面せん断試験は、せん断力を受ける側のコンクリート側面を自由縁にした状態で行っている。

引抜き試験の場合と同様に、本研究で収集整理した一面せん断試験データを用い、実験値と縁端距離の関係を図-5に示す(データ数118個:後出表-5の全データ)。この図より明らかなように、試験データのばらつきは大きいものの、実験値のバラツキの上限値を結ぶ包絡線(ほぼ直線)を描けば、縁端距離の減少に伴って実験値が低下していることが分かる。このことから、コンクリートの縁端距離がスタッドのせん断強度に及ぼす影響は極めて明確であるが、バラツキが大きいことから、複雑であることが分かる。

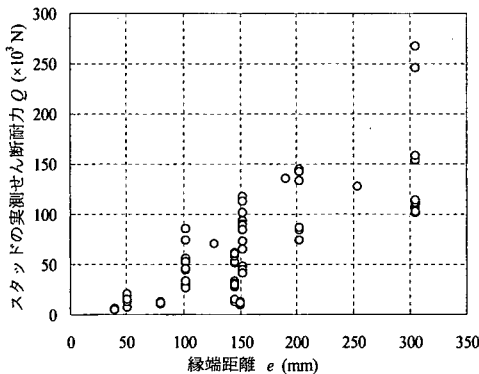


図-5 実測せん断耐力と縁端距離の関係

3. スタッドの引抜きおよびせん断強度に関する合理的な評価式の提案

(1) スタッドの引抜きおよびせん断強度に及ぼす影響因子と既往の両試験データの基本統計量

表-1に示す各研究者らの評価式より明らかなように、スタッドの引抜き強度に影響する重要な因子は、スタッドの軸径(d_s)、頭下長さ(h_s)、頭部直径(d_h)、コンクリートの圧縮強度(f_c)、有効水平投影面積パラメータ($d_s + h_s$)および縁端距離(e)の6つと考えられる。

国の内外で公表された代表的なスタッドの引抜き試験データ(筆者らの試験データも含む)の基本統計量(全試験データ数:294個)を表-3に示す^{5),10)-12),15)-18)}。

一方、スタッドの押抜きせん断強度に影響する重要な因子は、スタッドの軸径(d_s)、全長(h)、引張強度(f_{su})およびコンクリートの圧縮強度(f_c)の4つと考えられる。ただし、押抜きせん断試験ではH形鋼に作用させるせん断力は、スタッド位置より下側のコンクリートブロックの圧縮抵抗で受け持たれるため、縁端距離の影響はほとんどないと考えた。

国の内外で公表された代表的なスタッドの押抜きせん断試験データ(筆者らの試験データも含む)の基本統計量(全データ数:197個)を表-4に示す¹⁹⁾。

さらに、スタッドの一面せん断試験体の場合の重要な因子は、スタッドの軸径(d_s)、全長(h)、頭部直径(d_h)、コンクリートの圧縮強度(f_c)および縁端距離(e)の5つと考えられる。

国の内外で公表された代表的なスタッドの一面せん断試験データ(筆者らの試験データも含む)の基本統計量(全データ数:118個)を表-5に示す^{11),20)-22)}。

表-3 引抜き試験データの基本統計量

全データ(294個)		平均	標準偏差	Min	Max
軸直径	d_s (mm)	11.88	6.18	6.00	22.00
頭下長さ	h_s (mm)	79.98	49.85	29.90	200.00
頭部直径	d_h (mm)	21.44	9.97	12.00	44.50
コンクリート強度	f_c (N/mm ²)	26.58	4.70	11.18	37.66
投影面積パラメータ	$h_s + d_h$ (mm)	101.41	57.99	41.90	232.00
縁端距離	e (mm)	181.02	129.95	30.00	500.00

表-4 押抜きせん断試験データの基本統計

全データ(197個)		平均	標準偏差	Min	Max
軸直径	d_s (mm)	17.90	3.70	6.00	32.00
全長	h (mm)	86.89	20.50	35.00	214.00
スタッド引張強度	f_{su} (N/mm ²)	492.36	59.26	349.12	620.47
コンクリート強度	f_c (N/mm ²)	30.95	7.83	13.63	61.98

表-5 一面せん断試験データの基本統計量

全データ (118個)		平均	標準偏差	Min	Max
軸直径	$d_s(\text{mm})$	14.78	9.77	6.00	51.00
全長	$h(\text{mm})$	131.86	107.16	35.00	508.00
頭部直径	$d_h(\text{mm})$	28.41	22.53	12.00	114.00
コンクリート強度	$f'_c(\text{N/mm}^2)$	28.72	4.70	18.73	36.28
縁端距離	$e(\text{mm})$	151.06	67.18	40.00	305.00

(2) スタッドの引抜き強度に関する強度評価式の誘導

a) 縁端距離を考慮しない場合

先に示した国の内外で公表された代表的な試験データ (231個) を対数型重回帰分析によって統計的に解析した。ただし、試験データは全試験データ (294個) の内、破壊形式に関係なく縁端距離の影響が強いデータを除外している。既往の強度式および筆者らの経験から判断して、スタッドの引抜き強度は、最終的に次のような指数型の重回帰モデルによって表されるものと仮定した。

$$P_u = \alpha \cdot (d_h + h_s)^a \cdot f'_c{}^b \quad (1)$$

ここに、 P_u : スタッドの引抜き強度 (N)
 h_s : スタッドの頭下長さ {埋込み長} (mm)
 d_h : スタッドの頭部直径 (mm)
 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
 α : 係数

重回帰分析より次式を得た。

$$P_u = 1.61 \cdot (d_h + h_s)^{1.967} \cdot f'_c{}^{0.316} \quad (2)$$

t 値: 63.712 3.750

ここで、 t 値は回帰式の指数部の有意性を検定するものである²³⁾。 t 値が大きいかほど有意性が高いと判断される。なお、この場合の重相関係数は0.974であった。

そして、既往の強度評価式と t 値を考慮して、各指数を次式のように丸めることができると判断した。

$$P_u = \alpha \cdot (d_h + h_s)^2 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

式(3)の関係をを用いて、特に相関性の高い93データに関して再整理した結果を図-6に示す。この図より明らかなように、回帰式は試験データが全範囲において、その中央値 (メディアン) を与えることがわ

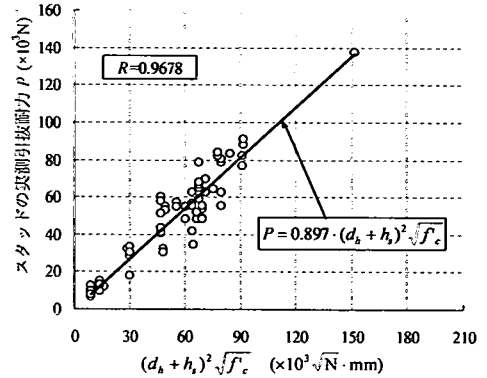


図-6 重回帰分析により導出された関係

かる。

図-6で式(3)の妥当性が確認されたが、これまでのスタッドの引抜き強度評価式との整合性を図るため、ここでは、PCIの設計ハンドブックで提示されている式の形による強度評価式についても検討した。

PCI式は、引抜き力が作用するとき、スタッドが破断する形式と、コンクリートがスタッド軸を中心としてシャーコーン状に引き抜けて破壊する2つの破壊形式を想定している。すなわち、スタッドに対する最大引張強度は、スタッド自身が破断するときの引張強度を上限として、一般に、コンクリートがシャーコーンを形成して破壊する場合の引抜き強度から求めている。以下に、PCI式を示す。

$$P_u = F \cdot A_{cone} \cdot \sqrt{f'_c} \leq A_s \cdot f_{su} \quad (4)$$

$$P_u = F \cdot \sqrt{2\pi} (d_h + h_s) h_s \cdot \sqrt{f'_c} \leq A_s \cdot f_{su}$$

ここに、 F : 係数

A_{cone} : コンクリートのシャーコーンの円錐形表面積

A_s : スタッド軸部の断面積

f_{su} : スタッドの引張強度

本研究では、力の作用方向と抵抗力の方向を合わせて、式(4)のシャーコーンの円錐形表面積 (A_{cone}) をシャーコーンがコンクリート表面に投影する面積 (A) と、コンクリートの引張強度 (f_t) との積の形で与えることとし、次式を基本式と考えた。

$$P_u = F \cdot \pi (d_h + h_s) h_s \cdot f_t \leq A_s \cdot f_{su} \quad (5)$$

ここで、コンクリートの引張強度については、参考文献24)で提示されている強度式を引用すれば、

$$P_u = F \cdot \pi(d_h + h_s)h_s \cdot (0.267 \cdot f'_c)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

$$\leq A_s \cdot f_{su}$$

となる。式(6)の関係を用いて、図-6と同じデータを再整理した結果を図-7に示す。この図より明らかなように、重回帰分析より導出された式(3)で整理した結果と比べても、相関係数は、ほぼ同等の結果であった(0.9678→0.9673)。このことから、コンクリートの引張強度を用いたスタッドの引抜き耐力評価式[式(6)]は適切な表現方法であったと考えられる。

最終的に、図-7による整理から得られた式の係数を丸めて、スタッドの引抜き強度に関する評価式として、次式を提案する。

$$P_u = 0.85 \cdot \pi(d_h + h_s)h_s \cdot (0.267 \cdot f'_c)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

ただし、式(7)の適用範囲は後述で示すとおり、 $\{(e-d_s/2)/h_s \geq 2.0\}$ とする。

b) 縁端距離を考慮する場合

先にも述べたが、スタッドの引抜き強度に及ぼす縁端距離の影響には未解決な点が多い。スタッドの引抜き強度が1面あるいは2面(コーナ部)からの縁端距離の影響を受け、低下することを表現する方法として、縁端距離パラメータが導入されている。ここでは、この縁端距離パラメータについて考えてみる。

PCIでは縁端距離(コンクリート表面からスタッド軸中心までの距離) e をスタッドの頭下長さ(埋込み長) h_s で除した値(e/h_s)を、縁端距離パラメータといている。しかし、スタッドの軸径が大きくなると、縁端距離が同じであっても、純かぶり量(コンクリート表面からスタッド軸表面までの最小距離)が違ってくる。そこで、この矛盾をなくすために、純かぶり量比 $\{(e-d_s/2)/h_s\}$ を縁端距離パラメータにすることにした。

なお、ここで使用する試験データとして、破壊形式がスタッドで破断したものは除き、さらにはスタッド周辺に補強筋が配置されていると、試験データが大きくばらつくことが分かっているので、補強筋が配置されているものも省き、縁端距離を考慮した引抜き強度の定式化について検討した。

横軸に新しい縁端距離パラメータとして純かぶり量比を、縦軸にスタッドの引抜き強度(実験値)を式(7)で除して無次元化した値をとって、試験データをプロットした結果を図-8に示す(データ数138個:

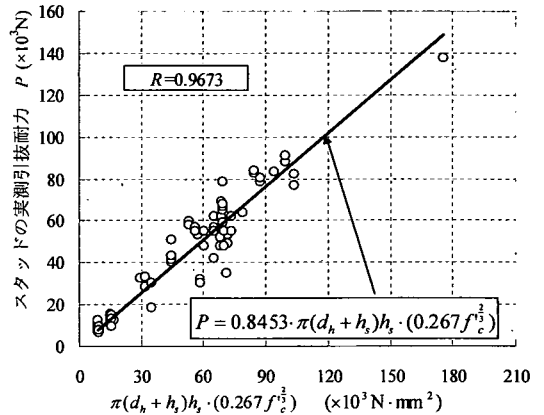


図-7 新提案によるスタッドの引抜き耐力評価法の確認

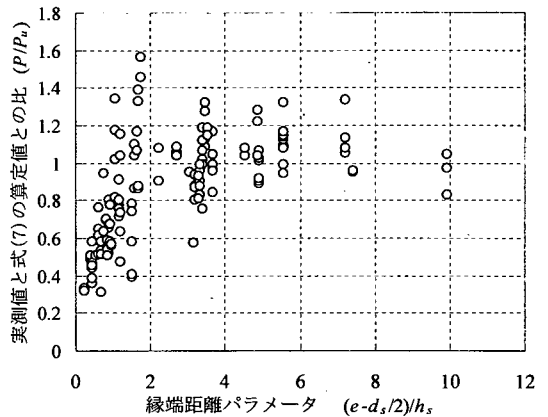


図-8 無次元化された場合の引抜き耐力比と縁端距離パラメータの関係

表-3のうち、スタッド破断、補強筋ありのデータを除く)。この図から明らかなように、試験データは大きくばらついている。しかしながら、概観すれば横軸の縁端距離パラメータ値が2.0を超えると、縦軸の無次元量の値がほぼ1に収束していると判断できる。つまり、影響パラメータが2.0を超えると、スタッドの引抜き強度は縁端距離に影響されないと判断できる。

そこで、図-8の横軸が2.0以下の試験データについて、直線型と指数型による回帰分析を行った。その結果、試験データのばらつきが大きいものの、指数型で回帰分析した結果がより高い相関係数を与えていることが判明した(図-9参照)。このことから、縁端距離に影響を受ける領域 $\{(e-d_s/2)/h_s \leq 2.0\}$ の強度評価式は、指数関数で表すことにした。そして、

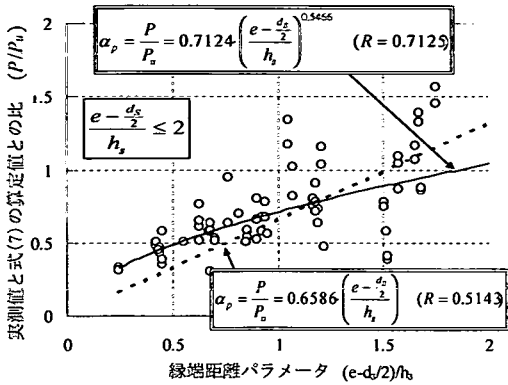


図-9 引抜き耐力比と縁端距離パラメータの関係 $\{(e-d_s/2)/h_s \leq 2\}$

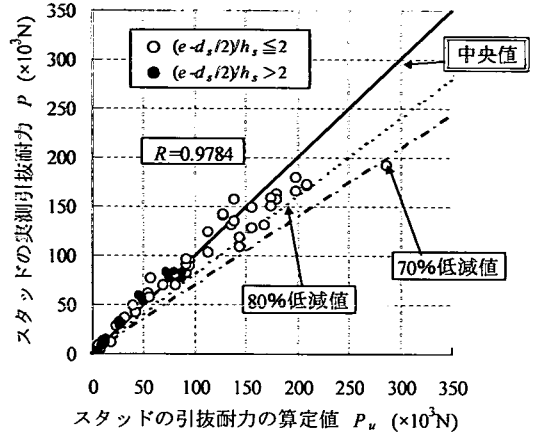


図-11 縁端距離を考慮した引抜き強度の確認

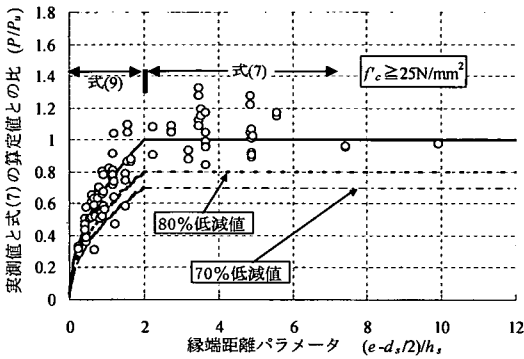


図-10 スタッドの引抜き耐力に関する強度評価法

強度評価式の単純化を考えて、次式のような低減係数 (α_p) を導入してよいことがわかった。

$$\alpha_p = \frac{P}{P_u} = 0.712 \sqrt{\frac{e-d_s/2}{h_s}} \quad (8)$$

$$\cong \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{e-d_s/2}{h_s}}$$

図-10は図-8の場合と同様、横軸に縁端距離パラメータとして純かぶりを、縦軸に荷重比 (P/P_u) をとったグラフ上に試験データをプロットし、式(7)に式(8)の係数を組み込んだ式(9)の適合性を示したものである(コンクリート強度 25N/mm^2 以上の全73データ)。

$$P_u = 0.85 \cdot \pi \cdot (d_h + h_s) \cdot h_s \cdot (0.267 \cdot f_c'^{1/3}) \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \frac{e-d_s/2}{h_s}} \quad (9)$$

ただし、本式の適用範囲は $\{(e-d_s/2)/h_s \leq 2.0\}$ とする。

図-10で明らかなように、式(7)と式(9)は横軸の縁端距離パラメータが2.0において連続している、縦軸の荷重比が縁端距離パラメータ2.0を境に、指数関係から一定値に変化している様子を捉えている。

図-10と同様のデータについて、縁端距離パラメータを考慮して実験値と計算値とを総合比較した結果を図-11に示す。この図より明らかなように、計算値が小さい範囲(100kN以下)は、実験値の中央値を与えているが、計算値がそれ以上大きくなると、実験値の方が若干計算値より小さくなる傾向が見られる。しかし、相関係数 (R) は0.9578と極めて高い値を示しているので、式(7)と式(9)とを併用して、スタッドの引抜き強度を評価することは実用上、問題がないと判断できる。図-11には式(7)と式(9)を0.7倍あるいは0.8倍した結果も併記している。式(7)と式(9)の0.7倍まで低減した値は、試験データのばらつきの下限値をうまく包含していることが分かる。0.7に低減した値は、図-10にも描いたが、試験データのばらつきを考慮した設計値として用いてよい、と判断している。

(3) スタッドのせん断強度に関する強度評価式の誘導

a) 縁端距離を考慮しない場合

① 押抜きせん断試験

押抜きせん断試験は、その試験方法の特性から縁端距離の影響が少ないと考えられる。平城・松井らは既往の試験データを収集整理し、統計的処理してス

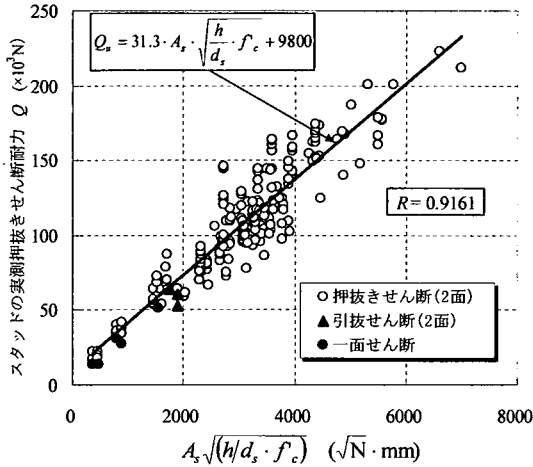


図-12 スタッドの押抜きせん断強度に関する評価法

スタッドのせん断強度に関する評価式を提案している¹⁹⁾。今回、本研究で実施した試験のデータを含めて、その強度評価法に従って全試験データを再整理した。その結果を図-12に示す(データ数197個:表-4の全データ)。この図より明らかなように、試験データは全域においてまとまった形で整理できていて、平城・松井らの強度評価法の妥当性が確認できた。よって、縁端距離を考慮しない場合のスタッドの押抜きせん断強度は、新たに統計的処理を行わないで、平城・松井らの次式で示す既往の強度評価法を採用するものとした。

$$Q_u = 31.3 \cdot A_s \cdot \sqrt{\frac{h}{d_s} \cdot f'_c} + 9800 \quad (10)$$

- ここに、 Q_u : スタッドの押抜きせん断強度 (N)
 A_s : スタッドの軸部断面積 (mm^2)
 h : スタッドの全長 [全高] (mm)
 d_s : スタッドの軸部直径 (mm)
 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

また図-12には、参考のため押抜きせん断試験以外で実施されたスタッドのせん断試験、つまり引抜きによる二面せん断試験¹³⁾と若干の引張力による一面せん断試験²⁵⁾の結果を併記したものである(図-2参照)。この図から明らかなように、押抜きせん断試験結果に比べて、違った試験方法で実施された試験結果は、少し低い値を示していることが分かる。しかし、この図から押抜きせん断試験以外の試験結果も、押抜きせん断試験データとほぼ等しい傾きで

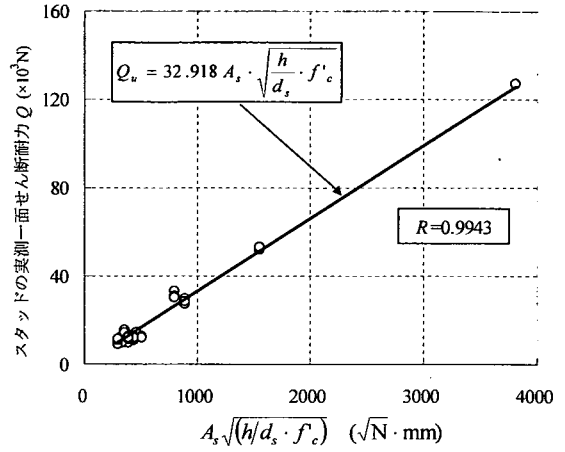


図-13 スタッドの一面せん断強度に関する評価法

プロットされていることが分かる。さらに、押抜きせん断試験結果の回帰直線は、図上で切片を持っているが、引抜きによる二面せん断試験と引張力による一面せん断試験結果は切片なしで表示できるのではないかと考えられる。今後は、実構造でのせん断力の伝達方法に合致したスタッドのせん断試験によるデータ収集が望まれる。

② 引張力による一面せん断試験

数少ないデータであるが、図-13に縁端距離が影響しないスタッドの引張力による一面せん断試験結果(50データ)と回帰直線の結果を示す。この図から明らかなように、回帰式の切片は0となり、相関係数(R)は0.9943と極めて高い値を示している。傾きは押抜きせん断試験のみの値(31.3)に比べて、若干高い値(32.9)を示している。

以上のことから、スタッドの一面せん断強度に関する評価式として、押抜きせん断強度との整合性も考慮して、次式を提案したい。

$$Q_u = 31.3 \cdot A_s \cdot \sqrt{\frac{h}{d_s} \cdot f'_c} \quad (11)$$

式(11)は、引張力による一面せん断試験の場合、作用荷重が偏心載荷となり、せん断方向の鋼板先端が回転軸となり、鋼板がコンクリート表面から浮き上がろうとする傾向をもつスタッドのせん断強度式と言える、押抜きせん断強度式の傾き(係数:31.3)を等しく、切片を0におくという工学的判断を加えたものである。

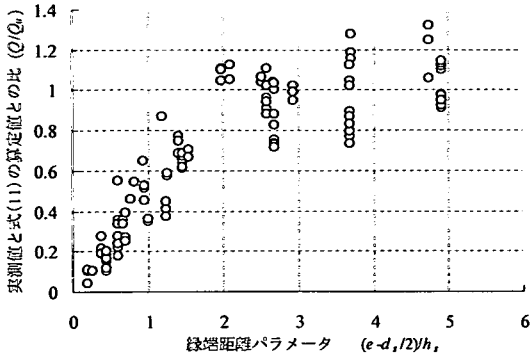


図-14 無次元化された場合の一面せん断耐力比と縁端距離パラメータとの関係

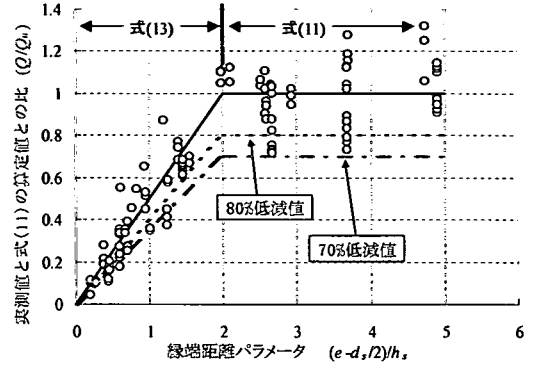


図-16 スタッドの一面せん断耐力に関する強度評価法

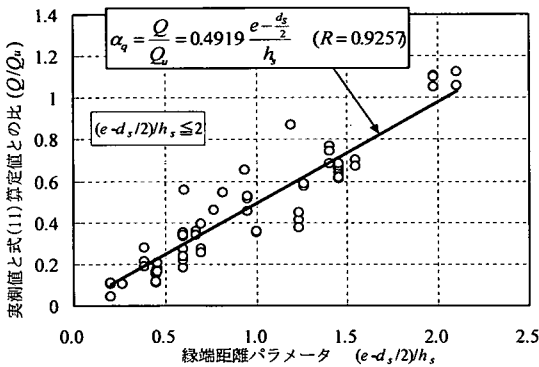


図-15 一面せん断耐力比と縁端距離パラメータの関係 $\{(e-d_s)/2\}/h_s \leq 2\}$

b) 縁端距離を考慮する場合

① 引張力による一面せん断試験

押抜きせん断試験では、前述したように、せん断強度は一般にコンクリートの縁端距離に影響を受けない。しかし一面せん断試験では、縁端距離の影響を考慮する必要がある。縁端距離パラメータは、スタッドの引抜き強度の場合と同様、純かぶりを頭下長さで除した値 $\{(e-d_s)/2\}/h_s$ を影響係数とした。

図-14 は、せん断力比[実験値/式(11)の算出値]と影響パラメータとの関係を示したものである(データ数 118 個:表-5 の全データ)。この図より明らかなように、横軸の影響パラメータが 2 を超えると、縦軸のせん断力比(無次元量)の値がほぼ 1 に収束していることが分かる。このことは、スタッドの引抜き強度の場合と同様に、横軸の影響パラメータが 2.0 を超えると、スタッドのせん断強度は縁端距離に影響されないことを意味している。

そこで、図-14 の横軸 2.0 以下の試験データにつ

いて、詳細にプロットすると直線型による回帰分析をしてよいことが分かる。その結果、相関係数(R)が 0.9257 とする高い値を得ることができる(図-15 参照)。このことから、縁端距離に影響を受ける範囲 $\{(e-d_s)/2\}/h_s \leq 2.0$ は、直線関係によって強度評価式を表すことにし、次式のような低減係数 α_q を導入してよいことがわかった。

$$\alpha_q = \frac{Q}{Q_u} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(e-d_s)}{h_s} \quad (12)$$

図-16 は、横軸に影響パラメータの純かぶりを、縦軸にせん断力比をとったグラフ上に、試験結果をプロットし、式(11)に式(12)の係数を組み込んだ式[式(13)]を併記したものである(図-14 と同データ数)。

$$Q_u = 31.3 \cdot A_s \cdot \sqrt{\frac{h}{d_s}} \cdot f_c' \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{e-d_s}{h_s} \right) \quad (13)$$

ただし、式(13)の適用範囲は、 $\{(e-d_s)/2\}/h_s \leq 2$ とする。

図-16 から明らかなように、式(11)と式(13)は横軸の縁端距離パラメータが 2 において連続していて、せん断力比が縁端距離パラメータ 2 を境にして、両直線で表すことができる。また、図-16 には式(11)と式(13)を 0.7 倍あるいは 0.8 倍した結果も併記している。式(11)と式(13)の 0.7 倍まで低減した値は、試験データのばらつきの下限値をうまく包含していることが分かる。

本研究で収集した試験データ(118 個)について、実験値と計算値[縁端距離パラメータを考慮して式

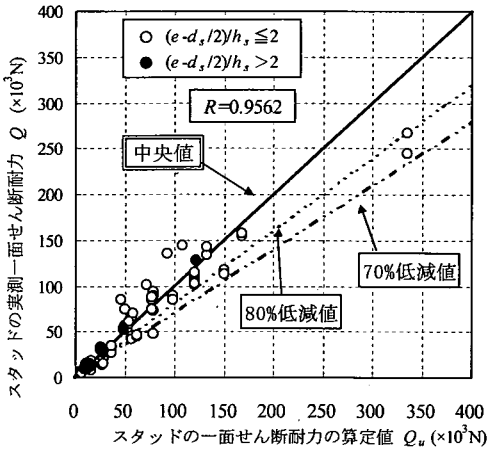


図-17 縁端距離を考慮した一面せん断強度の確認

(11)と式(13)から求めた値]とを比較した結果を図-17に示す。計算値が小さい範囲(200kN以下)は、実験値の中央値を与えているが、計算値がそれ以上大きくなっても、実験値は若干低い値を与えているが、相関係数(R)は0.9562と極めて高い値を示している。式(11)と式(13)とを併用して、スタッドの一面せん断強度を評価することは実用上、問題がないと判断できる。スタッドの引抜き強度評価式の場合と同様に、図-17には式(11)と式(13)を0.7倍した値は、試験データのばらつきの下限値をうまく包含していることが分かる。この70%低減値を試験データのばらつきを考慮した設計値としてよいと考える。

4. 結論

本論文ではまず、スタッドの引抜きおよびせん断強度式に関して、既往の研究および設計ハンドブックで示されている評価式を紹介し、既往の試験データとの対応性から問題提起をして、スタッドの合理的な両強度評価式の提示の必要性を述べた。次いで、著者らが実施した試験データも含めた既往の試験データについて、統計的処理を行い、その結果に基づいてスタッドの引抜きおよびせん断強度に関する合理的な評価法を導き出すことができた。最終的に、引抜きおよびせん断試験データのばらつきを考慮して、設計に必要な低減値も提案した。本研究を要約すると以下のとおりである。

(1) スタッドの引抜き強度評価式を、PCIの強度評価式に修正を加えて導いた。縁端距離が影響しない場合のスタッドの引抜き強度は、シェアコーンの有効水平投影面積とコンクリートの軸引張強

度との積の形で定式化し、式(7)を提案した。

そして、縁端距離が影響する場合のスタッドの引抜き強度式として、新しく縁端距離パラメータとして、純かぶりを頭下長さで除した値 $\{(e-d_s/2)/h_s\}$ を用い、これが2.0以下で、式(9)を提案した。なお式(9)は、 $\{(e-d_s/2)/h_s\}$ が2.0において、縁端距離が影響しない強度評価式[式(7)]に接続している。

(2) スタッドの押抜きせん断強度は、平城・松井が提案している既往評価式をそのまま採用することができた。特に、押抜きせん断強度については、今回の研究で使用した極細スタッド($\phi 6\text{mm}$)のものを含めても、試験データをまとめた形で整理することができた。式(10)に示す平城・松井の評価式の妥当性が確認できた。

(3) 引抜きによる二面せん断試験結果および一面せん断試験結果は、押抜きせん断試験結果に比べて、若干低い値を示す。この場合のスタッドのせん断強度は、縁端距離が影響しない場合、上記の強度評価式の切片を0とした式(11)が提案できる。

さらに、縁端距離が影響する場合のスタッドの一面せん断強度式は、スタッドの引抜き強度と同様に、新しく縁端距離パラメータとして、純かぶりを頭下長さで除した値 $\{(e-d_s/2)/h_s\}$ を用いて、式(13)が提案できる。なお式(13)は、 $\{(e-d_s/2)/h_s\}$ が2.0において、縁端距離が影響しない強度評価式[式(11)]に接続している。

(4) 試験データのバラツキを考慮した設計値として、本研究で提案したスタッドの引抜きおよびせん断強度評価式の0.7倍に低減した値とすることを提案する。

今後は、ここで提案した縁端距離を考慮したスタッドの引抜きおよびせん断強度評価式が、実構造に適用可能であるかどうかを確認するために検証実験を実施したいと考えている。

謝辞：本研究はRCJ (Research of Composite Joints) 研究会で実施された共同研究の成果をまとめたものである。そして、本論文を作成するにあたり、本研究会のメンバーである日本スタッドウェルディング(株)、日本電子計算(株)および松尾橋梁(株)の各委員各位から貴重な意見をいただきました。また実験を遂行するにあたり、大阪大学と摂南大学の学生諸君に協力をいただいたことを記し、各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Maeda, Y., Matsui, S. and Hiragi, H.: Effects of Concrete-Placing Direction on Static and Fatigue Strengths of Stud Shear Connectors, *Technology Reports of the Osaka University*, Vol.33, No.1733, pp.397-406, 1983.
- 2) 松崎育弘：設備機器の耐震据付け法—アンカーの種類とその支持耐力，建築の技術施工 pp. 31-51, 1980.
- 3) Al-sakkaf A., Hiragi H., Takabayashi K., and Matsui S.: Investigaton on Pull-out and Shear Strength of ϕ 6mm Studs, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.23, No.1, pp.757-762, 2001
- 4) TRW, Nelson-Division: *Embedment properties of Head Studs*, TRW-Inc., USA, p.47, 1974.
- 5) Sattler, K.: Betrachtungen über neue Verdubelungen im Verbundbau, *Der Bauingieur*, 37, H1, pp.1-8, 1962.
- 6) Utescher, G.: *Beurteilungsgrundlagen für Fassadenverankerungen*, Berlin, Ernst & Sohn, 1978.
- 7) European Convention for Constructional Steelwork: *Composite Structures*, The Construction Press, 1981.
- 8) Draft European Recommendations on Composite Structures: CEB-ECCS-FIP-IABSE, Joint Committee on Composite Structures 1977.
- 9) PCI Design Handbook: Precast Prestressed Concrete, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1978.
- 10) Bode, H. and Roik, K.: Headed Studs - Embedded in Concrete and Loaded in Tension-, *Paper presented at the ACI Annual Convention*, Los Angels, pp.61-88, 1983.
- 11) McMackin, P.J., Slutter, R.G. and Fisher, J.W.: Headed Steel Anchors under Combined Loading, *AISC Engineering Journal*, pp.43-52, 1973.
- 12) Ohtani, Y. and Fukumoto, Y.: Failure Behavior of Stud Anchor due to Pullout Tension, *Technology Reports of the Osaka University*, Vol.39, No.1981, pp.297-305, 1989.
- 13) 園田恵一郎，鬼頭宏明，中島一男，上中宏二郎：突起付き鋼板のせん断伝達特性に関する系統的研究，土木学会論文集，No. 598/I-44, pp. 183-202, 1998.
- 14) 建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，第4編 各種アンカーボルト設計指針・同解説，1985.
- 15) TRW, Nelson-Division: Nelson Stud Project No.802, Report No.1966-5, 1966.
- 16) TRW, Nelson-Division: Design Data, Nelson Concrete Anchor Studs, Manual, No.21, 1961.
- 17) 白阪靖人，松崎育弘，阿部保彦，宇佐美滋：機器配管用支持構造物(埋込金物)の耐力に関する実験的研究—その1，コンクリートに埋込まれたスタッドボルトの引抜き耐力—日本建築学会大会学術講演梗概 pp. 1375-1376, 1979.
- 18) 白阪靖人，松崎育弘，阿部保彦，宇佐美滋：機器配管用支持構造物(埋込金物)の耐力に関する実験的研究—その2，頭付きスタッド(19mm径)アンカーの疲労耐力(引張及びせん断)—日本建築学会大会学術講演梗概集， pp. 1375-1376, 1979.
- 19) 平城弘一，松井繁之，福本嘸士：頭付きスタッドの強度評価式—静的強度評価式—，土木学会構造工学論文集，Vol. 35A, pp. 1221-1232, 1989.
- 20) Klingner, R.E. and Mendonca, J.A. : Shear Capacity of Short Anchor Bolts and Welded Studs: A Literature Review, *ACI Journal, Proceedings* Vol.79, No.34, 1982.
- 21) Bailey, J.W. and Burdette, E.G.: Edge Effects on Anchorage to Concrete, *Civil Engineering Research Series*, No.31, The University of Tennessee, Knoxville, 1977.
- 22) Swirsky, R.A., et al.: Lateral Resistance of Anchor Bolts Installed in Concrete, Report No.FHWA-CA-ST-4167-12, California, Department of Transportation, Sacramento, 1977.
- 23) 河口至商：多変量解析入門，pp. 3-33, 1973.
- 24) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法，コンクリートセミナー4，共立出版，pp. 17, 1979.
- 25) 高林和生，Abubaker AL-SAKKAF，松井繁之，川崎哲也，平城弘一，石崎 茂：直径6mmスタッドのせん断および引抜き強度に関する研究，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，I-A142, 1999.

(2001. 8. 15 受付)

PULL-OUT AND SHEAR STRENGTH EQUATIONS FOR HEADED STUDS CONSIDERING EDGE DISTANCE

Hirokazu HIRAGI, Shigeyuki MATSUI, Takashi SATO, Abubaker AL-SAKKAF,
Shigeru ISHIZAKI and Yasuhiro ISHIHARA

Studs are often used as shear connectors or anchors between concrete and steel members at various composite structures. Generally as each stud has different edges distance from the edges of structural concrete, it is not expected that they have same pull-out and shearing strength as the studs located enough inside, even if all studs were arranged in a group to be subjected same displacement.

In this paper, the authors evaluated again test data of previous investigation including their new test results and strength equations for pull-out and shearing capacities were revised in the case of free to consider the edge distance. Then in the case of the studs to be considered the edge distance, new influence factors were found and composed into the revised equations as coefficients.