

論文 高剛性を目指したスタッドの開発

前田 泰秀*1・石崎 茂*2・平城 弘一*3・池尾 良一*4

要旨：本研究の目的は、高いずれ剛性を有する新しいスタッドを開発することにある。現行の道路橋示方書ではスタッドは柔なずれ止めめに分類されていて、スタッドの許容せん断力は、厳しい「ずれ量」の制限値に対して決められている。そのため、スタッドの設計値は一般的にかなり安全な値であると言われている。そこで、本研究ではスタッドに高いずれ剛性が得られるようにスタッド根元部だけを2回り太くした変断面形状を持つ新形式のスタッドを提案したい。一連の新形式スタッドを用いた静的・疲労の押抜き試験とはりの曲げ試験の結果より、新スタッドは合成構造の結合材に適用可能であるとの認識を得た。
 キーワード：合成構造、ずれ止め、剛なずれ止め、ずれ剛性、プレキャスト床版

1. はじめに

通常、頭付きスタッドは柔なずれ止めとして分類されていて、温度差および乾燥収縮などの2次応力が集中する桁端近くでは極めて密な間隔で配置されている。これは、現行の道路橋示方書で規定されているスタッドの設計値（許容せん断力）が「ずれ」を基準に決められているからである。参考までに、スタッドの許容せん断力は、破壊に対して6以上、降伏に対して3以上の安全率を有していることは周知の通りである¹⁾。

本研究では、通常のスタッドを高いずれ剛性

が得られるように工夫して、改良を加えたならば、設計においてスタッド本数を減らすことが可能となり、合成桁の合理化橋梁への適用に大いに寄与できるのではないかと考えた。筆者の一人はスタッドに関する一連の研究から、コンクリート内のスタッドが水平せん断力を受けた際、応力はスタッド根元部に集中するとの知見を得ている^{2)~3)}。そこで、筆者らはスタッド根元部をスタッド軸部直径の2回りほど太い径にし、高いずれ剛性が期待できる新しいスタッ

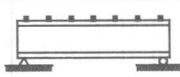


作業行程	説明図
1) メスネジ付きスタッドの溶接 (工場溶接)	
2) プレキャストコンクリート床版の送り出し架設(現場)	
3) プレキャスト床版を敷設したのち、オスネジ付きスタッドボルトを締結し、その後、間詰めコンクリート(無収縮コンクリート)の打設(現場)	

図-1 プレキャスト床版の送り出し工法

通常溶接法

A.C.S 工法



写真-1 新しいスタッド

*1 ㈱酒井鉄工所橋梁設計部橋梁設計課 (正会員)

*2 ㈱酒井鉄工所技術開発部部長 (非会員)

*3 摂南大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*4 日本スタッド・ウエルディング(株)滋賀事業所第2技術グループ課長 (非会員)

ド（剛スタッドあるいは変断面スタッドとも呼ぶ）を開発するに至った。

ここで新しく提案された変断面スタッドは2つの部品（パーツ）で構成されている。つまり、写真-1で示されているように、写真左のメスネジ付きスタッド（「カプラースタッド」とも呼ぶ（φ25mm））と、同右のオスネジ付きスタッドボルト（高力ボルトでも可（φ16mm））とが締結されることによって、ずれ止めとしての働きをする形態となる。

近年、わが国は21世紀の橋梁技術に向けて合理化橋梁の開発に取り組んでいる。その有効な手段の一つとして、高品質・省力化・機械化・経費削減・工期短縮を可能とするプレキャストコンクリート床版の利用が注目されている。本研究で提案した変断面スタッドは、プレキャスト床版が適用された場合の合成桁への適用も視野に入れている。まず、変断面スタッド根元部に相当する「カプラースタッド」が、工場で鋼桁上フランジに溶接される。次いで、現場において変断面スタッドの軸部に相当するスタッドボルトが、カプラースタッドのネジ部に装着・締結される。

このことによって、現場作業での省力化が期待できるプレキャスト床版が、送出し工法によって架設されることを可能にする（図-1参照）。

ここでは、新形式スタッドの強度特性およびずれ性状を確認するため、一連の静的および疲労押抜き試験およびはりの曲げ試験を実施した。

2. 試験体の種類と試験方法

表-1に静的押抜き試験体の種類とコンクリート強度、表-2に疲労押抜き試験体の種類とコンクリート強度をそれぞれ示す。実験パラメータは、スタッド軸部直径と溶接方法である。タイプPC、PEの溶接方法は通常溶接で、タイプPDはA.C.S（Arc Control Submerge-stud）工法で溶接したものである。ここでA.C.S工法とは、サブマージ溶接によるものを言い、主に太径のスタッドに使われる。また、通常溶接に比べ溶接電流が低いなどの利点があり、設備の面で省力化が期待できる。なお、結果比較のために、通常φ13mmスタッド(PB)とφ16mmスタッド(PA)を用いた試験体も同時に製作している。

表-1 押抜き試験体の種類（静的）

タイプ	スタッド形状(mm)	溶接方法	コンクリートの強度特性
PA	φ16	通常	$f'_c = 31.1 \text{ N/mm}^2$
PB	φ13	通常	$f'_c = 2.55 \text{ N/mm}^2$
PC	φ(25+16)	通常	$E_c = 2.793 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
PE	φ(22+13)	通常	

表-2 押抜き試験体の種類（疲労）

タイプ	スタッド形状(mm)	溶接方法	コンクリートの強度特性
PA	φ16	通常	$f'_c = 36.4 \text{ N/mm}^2$
PC	φ(25+16)	通常	$f'_c = 2.63 \text{ N/mm}^2$
PD	φ(25+16)	A.C.S	$E_c = 2.744 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

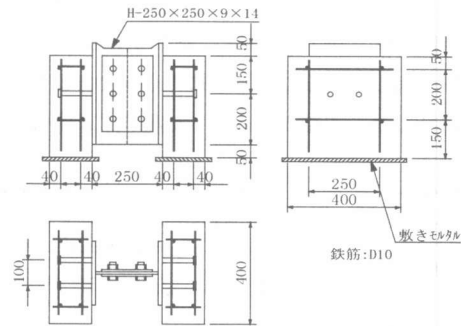


図-2 押抜き試験体の形状寸法

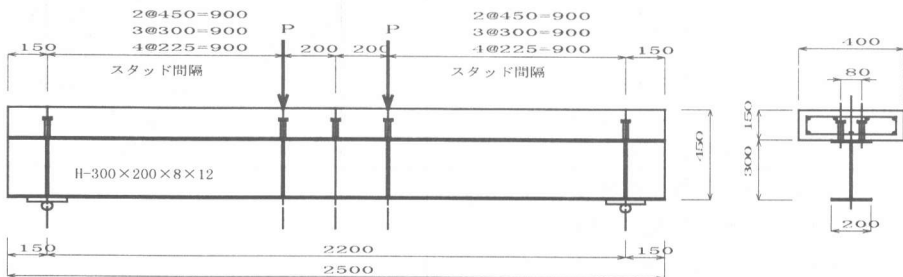


図-3 はりの試験体の形状寸法

表-3 はり試験体の種類

タイプ	スタッド形状(mm)	間隔(mm)	溶接方法	コンクリートの強度特性
BA	φ 16	300	通常	$f'_c=34.6 \text{ N/mm}^2$ $f'_t=2.65 \text{ N/mm}^2$ $E_c=2.793 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
BC	φ (25+16)	225	通常	
	φ (25+16)	300	通常	
	φ (25+16)	450	通常	
BD	φ (25+16)	300	A. C. S	
BE	φ (22+13)	300	通常	

図-2に押抜き試験体の形状寸法を示す。この試験体の製作はJSSCの頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)⁴⁾に従った。はり試験体の種類とコンクリートの強度特性を表-3, その形状寸法を図-3に示す。実験パラメータとしてスタッド軸部直径と溶接方法およびスタッド間隔である。なお, はり試験体については, 比較のため, φ 16mmでスタッド間隔が300mmの通常スタッドを用いた試験体(タイプ BA)も同時に製作している。

3. 試験結果および考察

3.1 押抜き試験結果

(1) 最大せん断耐力およびずれ定数

表-4に静的押抜き試験結果を示す。この表より, Q_{max} では通常スタッドのものに比べ, 変断面スタッドの値が極めて高いことが分かる。スタッド軸部がφ 16mmの場合で約41%, 同じくφ 13mmの場合で約88%も向上していることが確認できた。ずれ定数でも同様にスタッド軸部φ 16mmの変断面スタッド(タイプ PC)は通常スタッド(タイプ PA)の1.06倍, そして同じくφ 13mmの変断面スタッド(タイプ PE)は通常スタッド(タイプ PB)の1.09倍, 高いずれ定数を示す結果となっていた。最大ずれ量では, 平均値でφ 16mmの通常スタッドのものが最も大きな値となっていた。

(2) ずれ性状

図-4~7にスタッド軸部がφ 16mm, φ 13mmの場合の荷重-相対・残留ずれ関係をそれぞれ示す。ここで, 残留ずれとは漸増繰返し載荷法で得られる除荷したときのずれ量で, 関係図の縦軸のせん断力は除荷寸前の作用せん断力を使っている。図-5, -7には残留ずれ0.08mmに相当するせん断力も図示する。また, 図-4, -6にはOllgaard

らの実験に基づくQ-δ曲線も併記した。

$$Q/Q_{max}=3.15\delta/(1+3.15\delta); Q_{max}=0.5A_s \times (f_c \times E_c)^{1/2}$$

ここで, A_s はスタッド軸部断面積

これらの図より, 変断面スタッド(PC, PE)の残留ずれの初期接線の傾きが, 通常スタッド(PA, PB)のものに比べて僅かながら小さく, 直線区間が長いことより, 期待どおりに高い剛性を有していることが分かる。また, Ollgaardらの曲線と比較すると通常スタッド(PA, PB)は, ほぼ同じ傾きであるが, 変断面スタッド(PC, PE)は, 若干大きくなっていることが分かる。

表-4 静的押抜き試験結果

タイプ	せん断耐力 Q_{max} (kN/本)	最大ずれ量 δ_{max} (mm)	ずれ定数K (kN/mm/本)	破壊形式
PA-1	118.8	12.1	252.1	スタッド余盛り部上縁のせん断破壊
PA-2	137.9	11.5		
平均	128.4	11.8		
PB-1	81.3	7.7	195.6	せん断破壊
PB-2	74.0	8.7		
平均	77.7	8.2		
PC-1	176.4	6.0	266.7	コンクリートの支圧破壊
PC-2	186.2	4.6		
平均	181.3	5.3		
PE-1	148.0	12.9	213.5	スタッド余盛り部上縁のせん断破壊
PE-2	143.6	5.7		
平均	145.8	9.3		

最大ずれ量: 最大荷重時のずれ量

ずれ定数: 初期接線の傾き(=Q/δ)

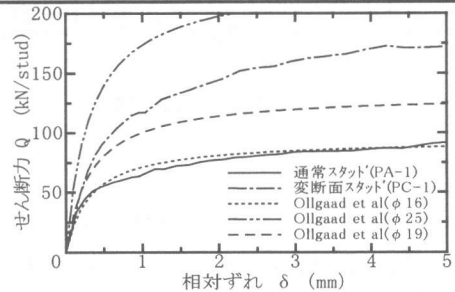


図-4 荷重-相対ずれ関係(軸部φ 16mm)

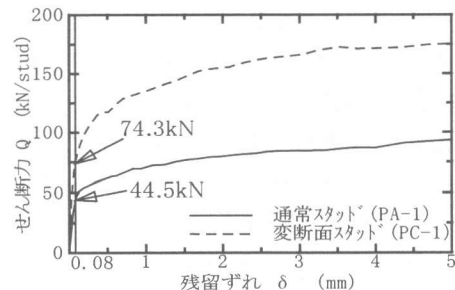


図-5 荷重-残留ずれ関係(軸部φ 16mm)

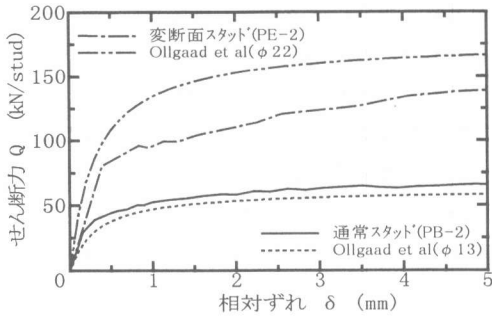


図-6 荷重-相対ずれ関係(軸部φ13mm)

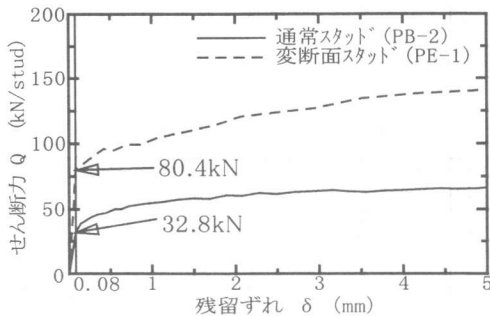


図-7 荷重-残留ずれ関係(軸部φ13mm)

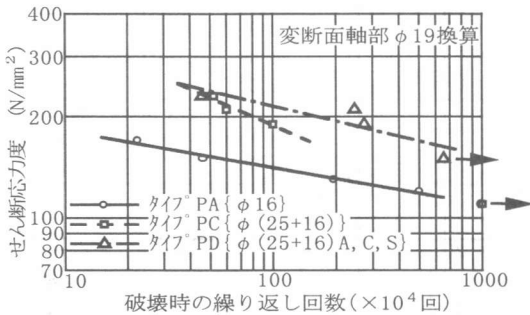


図-8 スタッドのS-N関係図

(3) 疲労強度

図-8に今回の押抜き疲労試験結果を示す。図-8の縦軸は、変断面スタッドではφ19mm、通常スタッドではφ16mmで換算した場合のせん断応力を示す。なお、変断面スタッドにおいてφ19mmを使った理由は、カプラストッドの断面積(円環状の)がφ19mmに相当(図-9参照)していて、疲労破壊がその部分で起こっていたからである。この図より、今回、提案した変断面スタッドのタイプPC、PDの疲労強度は、通常スタッドのタイプPAに比べて極めて高い値を示していることが分かる。繰返し回数100万回で比較したな

らば、変断面スタッドの時間強度は、通常スタッドのものに比べ、約30%向上していた。

3.2 はり試験結果

(1) 曲げ耐力および破壊形式

表-5に、はりの曲げ試験結果を示す。表-5の結果より明らかなように、破壊荷重は通常スタッドを用いたタイプBAよりも変断面スタッドのタイプBC、BD、BEの方が若干高い値を示している。同じ変断面スタッドで、A.C.S溶接方法によるタイプBDが通常溶接法のものより若干高い値を示している。なお、本試験ではスタッド間隔と曲げ耐力の間には相関が見られないことが分かる。破壊形式は、全て鋼桁が降伏した後、コンクリート床版が圧壊したものである。

(2) ひずみ分布

表-6と図-10に、200kNと350kNの荷重時におけるはりの高さ方向のひずみ分布を示す。図-10から明らかなように、設計荷重相当(鋼桁下縁の垂直応力が設計許容応力度に到達する荷重)のP=200kNでは通常スタッドと変断面スタッドのいずれもほぼ平面保持していることが分かる。さらに、鋼桁下フランジで降伏直前の荷重に相当するP=350kNになると、通常スタッドは平面保持しない状態となっているが、変断面スタッドでは平面保持が若干乱されるに過ぎない程度であることが分かる。

表-5 はりの曲げ試験結果

タイプ	破壊荷重(kN)
BA-1	472.9
BA-2	447.9
平均	460.4
BC-1 ₂₂₅	503.7
BC-2 ₂₂₅	490.0
平均	496.9
BC-1 ₃₀₀	485.1
BC-2 ₃₀₀	447.9
平均	466.5
BC-1 ₄₅₀	501.3
BC-2 ₄₅₀	465.5
平均	483.4
BD-1	526.8
BE-1	480.2

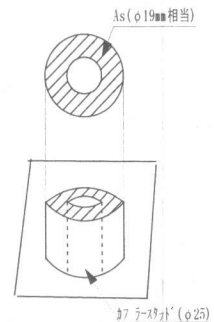


図-9 円環状図

(3) たわみ性状

スパン中央における荷重-たわみ関係を図-

表-6 支間中央点での床版と鋼ばりのひずみ

荷重 P (kN)	測定位置	ひずみ (μ)		
		BA-1	BC-1-300	BD-1
200	床版上縁	-464	-476	-541
	床版下縁	14	51	10
	鋼はり上フランジ	-95	-45	-80
	鋼はり下フランジ	716	667	715
350	床版上縁	-760	-780	-966
	床版下縁	95	54	65
	鋼はり上フランジ	-405	-173	-266
	鋼はり下フランジ	1288	1154	1125

*) スタッド間隔 300 mm

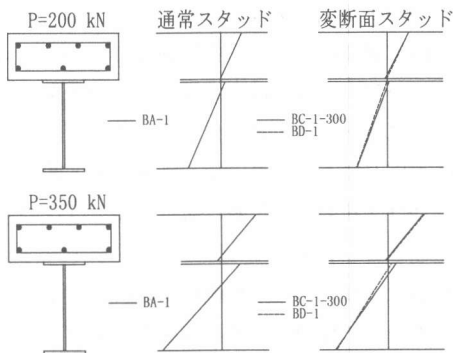


図-10 支間中央点でのひずみ分布

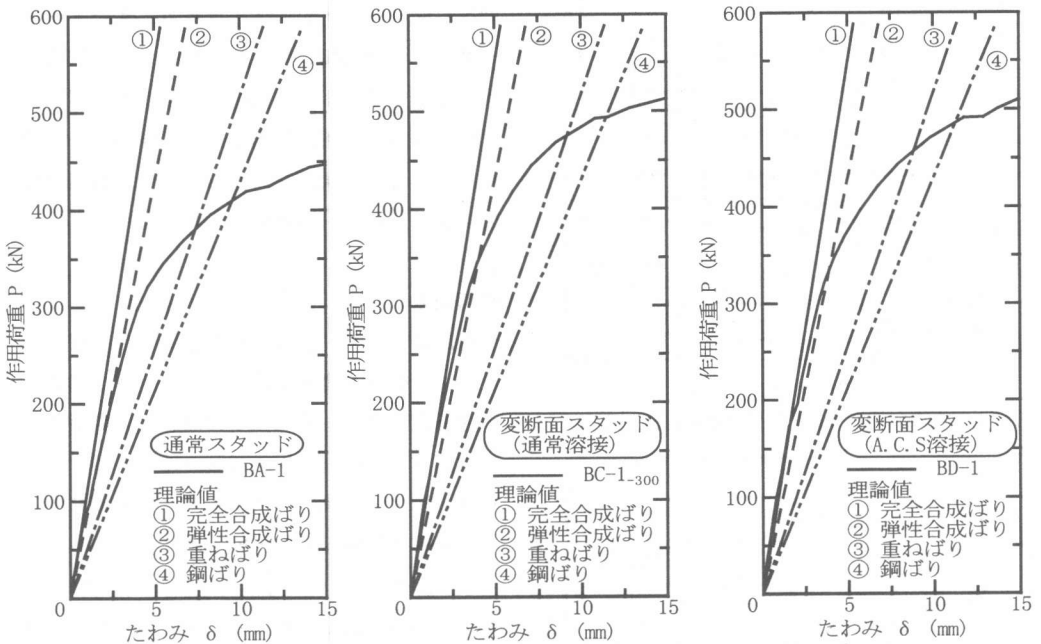


図-11 荷重-たわみ関係(軸部 ϕ 16 mm の比較)

11 に示す。同図には、「完全合成ばり」、「弾性合成ばり (FEM 解析)」、「重ねばり」および「鋼ばりのみ」で計算した「荷重-たわみ関係」も参考のために併記されている。なお、FEM 解析に使用したバネ定数は表-4 の値 (バネ接合はスタッド位置) を使用する。スタッド間隔が同じ 300 mm ピッチで、スタッド軸部が ϕ 16 mm の通常スタッドと変断面スタッドの結果を比較すると、図-11 より明らかなように、設計荷重相当の $P=200$ kN 付近では変断面スタッドのたわみ性状は、完全合成の計算値とほぼ等しいことが分かる。一方、同様に通常スタッドのタイプ BA では、弾性合成ばりの計算値にほぼ等しい傾向を示していることが分かる。また、変断面スタッドの通常溶接と A.C.S 工法の溶接方法の違いによる影響は、見られなかった。図-12 は、 $P=350$ kN 載荷時でのスパン方向のたわみ分布を示している。この図より、変断面スタッドの溶接方法の違いによる影響は僅少であることが分かる。

(4) ずれ性状

図-13 に荷重-相対ずれ関係、図-14 に荷重

一残留ずれ関係を示す。図-13より、変断面スタッドであるタイプBCとBDは、載荷初期においてほぼ同じ挙動を示していることが分かる。しかし、載荷が増加するにつれ、変断面スタッドであるA.C.S溶接のタイプBDのずれ量が通常溶接のタイプBCに比べて、相対的に小さい傾向を示していることが分かる。しかし、破壊近くになれば、両者のずれ性状の差異は僅かであった。また、図-14より、変断面スタッドであるタイプBCとBDの残留ずれは、作用荷重 $P=300$ kNまでほぼ0に近い値となっていることが分かった。

4. 結論

本研究で新しく提案した変断面スタッドに関する一連の試験から、次のようなことが明らかになった。

1) 押抜き試験において、変断面スタッドの静的耐荷力は通常スタッドに比べて、スタッド軸部

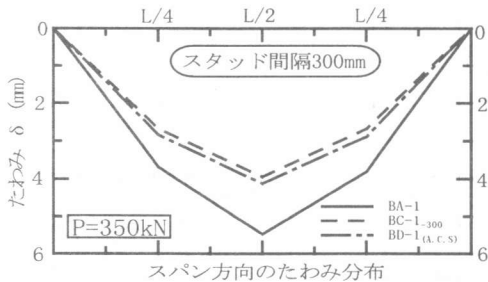


図-12 たわみ分布図(軸部φ16mmの比較)

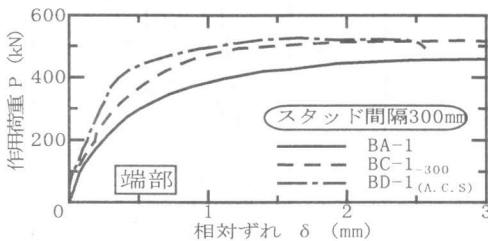


図-13 荷重-相対ずれ関係(軸部φ16mm)

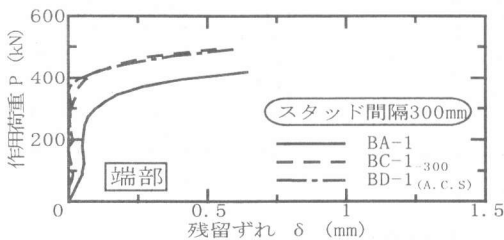


図-14 荷重-残留ずれ関係(軸部φ16mm)

がφ16mmの場合で、約41%、同じくφ13mmの場合で、約88%も向上していることが確認できた。ずれ定数でも同様に、変断面スタッドのずれ定数は通常スタッドのものに比べて、スタッド軸部φ16mm、φ13mmとも、高い値を示す結果となっていた。このことより、期待どおりにずれ定数の向上が図られたことで、本研究の目的は達成できたものとする。

2) 押抜き疲労試験結果より、変断面スタッドの疲労強度は、通常スタッドのものに比べ、極めて高い値を示すことが分かった。100万回の時間強度で比較したならば、変断面スタッドは通常スタッドの約1.3倍であった。

3) はりの曲げ試験において、曲げ耐荷力は変断面スタッドを用いたはりの方が通常スタッドを用いたはりに比べて若干高い値を示していた。破壊形式が同じであったことから、スタッド間隔による曲げ耐荷力への影響は有意な差ではなかった。

以上の結果より、高いずれ剛性が期待できる変断面スタッドの使用は、設計値を高く見積ることができるので、いままで以上に合成桁の合理化が図られるものと考えられる。また、変断面スタッドの機構(工場でガラススタッドが溶接され、現場でスタッドボルトが締結される)を活用し、プレキャスト床版の送出し工法の採用が可能であることなど、架設面においても合成構造の省力化が図られるものと考えられる。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説: 日本道路協会, 1996. 8
- 2) 平城・松井・福本: 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, pp1221~1232, 1989
- 3) 松井・平城・福本: 頭付きスタッドの強度評価式の誘導-疲労強度評価式-, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp1233~1244, 1989
- 4) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, JSSCテクニカルレポート, No. 35, 1996.