

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

EFFECT OF DIRECTIONS OF CONCRETE PLACING ON BEHAVIOR OF HEADED STUD SHEAR CONNECTORS IN PUSH-OUT TESTS

赤尾親助*・栗田章光**・平城弘一***

By Shinsuke AKAO, Akimitsu KURITA and Hirokazu HIRAGI

Headed studs are exclusively used as shear connectors in various steel-concrete composite constructions. The directions of concrete placing in relation to stud connectors in fabrication of composite constructions influence static and fatigue strength of studs and the composite action between steel and concrete. They can be classified to four cases. In most of the past studies, however, the effect of directions of concrete placing have not been sufficiently given consideration except the one by J. W. Fisher. The present paper discusses the effects based on the results obtained by push-out type test series and proposes design formulas for static and fatigue strength of stud shear connectors.

Keywords: stud shear connectors, push-out tests, static strength, fatigue strength, load-slip relation

1. ま え が き

コンクリートに埋め込まれた頭付きスタッド(以下、スタッドと略記)にせん断力が作用したとき、スタッドの支圧側、特に根元部のコンクリートに高い支圧作用のため、局部圧壊が起こる。このため、鋼部とコンクリートの間にずれを生じ、鋼部に溶接されたスタッドには曲げに伴う根元部の応力集中が起こる。したがって、スタッドのせん断耐力および疲労強度を向上させるためには、コンクリートのスタッド根元部への充填に、特に注意する必要がある。

さて、最近のスタッドの利用範囲は橋梁あるいは建築構造の合成桁(はり)にとどまらず、種々の合成構造に拡大されつつある(Fig.1)。したがって、合成桁とは異なり、スタッドの取付け方向に対し、コンクリートの打込み方向が種々変わるために、スタッド根元部へのコンクリートの充填が悪くなる場合があると予想される。さらに、コンクリートの打込み方向によっては、ブリージングがスタッドとの接触面に空隙層をつくるために、ず

れ性状の悪化ならびにコンクリートの局部圧壊をもたらす、疲労強度を低下させる原因となる。

したがって、コンクリートの打込み方向がスタッドのせん断耐力、疲労強度およびずれ性状に重要な影響因子であることは明白である。このことは、すでにわが国の橘¹⁾、阿部²⁾、牧野³⁾により、またアメリカ合衆国リーハイ大学のJ. W. Fisher⁹⁾により指摘されていたが、著者らのような一連の研究⁴⁾により、スタッドの押抜き強度に及ぼす打込み方向の影響を明らかにしたものはない。

Fig.1の構造物におけるコンクリートの打込み方向は、次の4種類に大別できる。

④タイプ：通常の合成桁と同じ、Fig.1の(a)、(b)および(c)の上フランジコンクリートがこのタイプに属す。

⑧タイプ：④タイプを反転させたもの。Fig.1の(c)および(h)が該当。

◎タイプ：水平方向に取り付けられたスタッドに、コンクリートが上側から打ち込まれたもの。Fig.1の(d)、(e)、(g)および(h)が該当。

⑩タイプ：◎タイプの打込み方向を90°回転させたもの。Fig.1の(f)が該当。

以上の4タイプの打込み方向に対して、スタッド近傍のブリージングは、Fig.2の箇所に発生するものと考えら

* 正会員 工博 大阪工業大学教授 土木工学科
(〒535 大阪市旭区大宮5-16-1)

** 正会員 工修 大阪工業大学講師 土木工学科(同上)

*** 正会員 工修 摂南大学講師 工学部土木工学科
(〒572 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

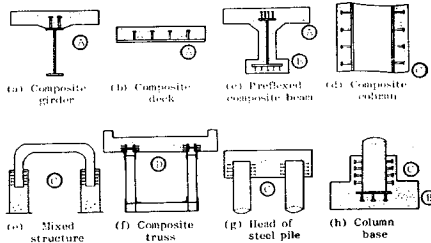


Fig. 1 Applications of stud shear connectors in various steel-concrete composite constructions.

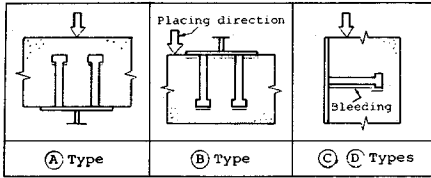


Fig. 2 Bleeding of concrete surrounding studs.

れる。なお、(B)タイプはコンクリートの充填の悪さも加わる。

よって、各種合成構造に用いられるスタッドのせん断耐力、疲労強度およびずれ性状を評価する際、主として合成桁を対象として行われてきた既往の研究成果を直接適用するには問題点が残されている。

以上のことから、本文では、まず既往のスタッドの押抜き試験研究を整理し、供試体の形状寸法、コンクリートの打込み方向、試験法および結果などを比較検討した。次いで直径 19 mm スタッドの押抜き挙動について、コンクリートの配合を一定とし、スタッドの高さを変化させた場合、スタッドの形状寸法を一定とし、コンクリートの強度を変化させた場合について実施した総計 140 体の静的および疲労押抜き試験の結果を考察し、スタッドの静的ならびに疲労の設計強度式、およびスタッドの荷重ずれ性状についての関係式を提案するものである。提案式の妥当性を検証するため、主要各国の現行の設計値との比較検討もあわせて行っている。

2. 既往の研究の整理と問題点

(1) 概要

ずれ止めとしてのスタッドの性状に関する既往の研究は、桁試験に比べ、実験が容易で、せん断耐力の評価が簡明であることから、ほとんど押抜き供試体試験によって行っている。

しかし、同じ押抜きタイプの試験であっても、スタッドとコンクリートの材料特性はもとより、供試体の形状と寸法、コンクリートの打込み方向およびコンクリート内の補強鉄筋量などが不統一であったため、試験結果のばらつきはかなり大きいと指摘されている¹⁸⁾。

この点については、1964年に押抜き試験の標準化を提唱した Chapman に強い影響を受けて、イギリスの建築・橋梁に関する設計規準 CP 117, Part 1, Part 2 が世界で初めて押抜き供試体の形状寸法と補強鉄筋量を規定したが、コンクリートの打込み方向が規定されていなかったため、以後、イギリスで実施されたスタッドの押抜き試験でも、コンクリートの打込み方向にはまったく関心が払われていない。

a) 押抜き供試体の種類

これまでに使用されたことのある供試体の種類を Fig. 3 に示す。標準的な供試体を試験法 ①、② とし、H 形鋼の両側にコンクリートスラブを有している ① が最も一般的である。H 形鋼の片方にしかコンクリートスラブを有していない ② は疲労試験のみに使われている。③ の場合、偏心载荷の状態を試験するため、鋼部とコンクリートの間に引き離そうとする力が働き、スタッドにはせん断力に加えて引張力が同時に作用することになる。したがって、両側のコンクリートスラブの間隔を保持し、対称载荷の状態を試験する ① の疲労強度より低い値を示すことになる。

特別な供試体として、試験法 ④¹⁹⁾、⑤⁶⁾ がある。④ は、実際の桁の曲げ挙動に近づけようとして考案されたもので、桁試験に相当する Uplift が再現できるが、供試体製作が難しいために多用されていない。⑤ の利点は、コンクリートの一括打設が可能で、コンクリートの材令、品質を均一にすることができる点である。これも ④ と同様に供試体の製作が難しい。

b) コンクリートの打込み方向

① の供試体製作時のコンクリートの打込み方向は、Fig. 4 のとおりである。④ タイプは合成桁と同様、正立したスタッドにコンクリートを上側から打ち込むことができるが、両側のコンクリートを 2 回に分けて打ち込まねばならないので、コンクリートの材令、品質にばらつきが生じやすい。③、④、⑤ タイプは、両側のコンクリートを一括して打ち込むことができるので、均一なコンクリートの材令、品質が望める。中でも、③ タイプを逆にした形である ④ タイプは、スタッドの支圧面に形成されるブリージングの影響を完全に排除することがで

Test method	Standard type		Special type	
	Double slab ①	Single slab ②	Double-ended ③	Double shaped ④
Shape of specimen (↓ Direction of loading)				

Fig. 3 Classification of previous push-out specimens.

Table 1 Dimensions of previous push-out specimens.

Investigation (Reference)	Dimensions of push-out specimen (mm)											Concrete Placing direction	Shape of specimen	Test	
	Concrete				H-shaped steel				Stud. N.No. of studs						
	a	b	c	d	e	f	g	D	H	N	p				u
Viest, I.M. (7)	762	178	610	51	216	206	914	19	102	4	0	98	(A)	(I)	Static
Thürlimann, B. (8)	711	152	508	102	210	206	711	19	102	8	254	76	(C)	(I)	Static, Fatigue
Fisher, J.W. (9)	712	152	508	51	210	206	712	19	76	8	305	102	(IC)	(I)	Static
Fisher, J.W. (10)	680	152	508	41	210	206	762	19	102	4	356	102	(A)	(I)	Fatigue
Chapman, J.C. (11)	457	152	305	51	305	127	813	19	102	4	0	64	(A)	(I)	Static
Mainstone, R.J. (12)	457	229	305	51	305	127	737	19	102	4	0	34	(A)	(I)	Static, Fatigue
Menzies, J.B. (13)	457	229	305	80	305	127	707	19	102	4	0	80	(A)	(I)	Fatigue
Sattler, K. (14)	700	110	300	100	180	180	715	19	75	8	200	100	(A)	(I)	Static
Akao, S. (15)	500	150	540	50	150	150	650	19	100	4	0	70	(A)	(I)	Static, Fatigue
Yamamoto, M. (16)	675	160	350	175	150	150	550	19	100	4	0	100	(C)	(I)	Static
Naruoka, M. (17)	700	150	500	50	200	200	800	19	100	4	350	100	(A)	(I)	Fatigue
Abe, H. (18)	550	170	460	30	90	160	650	19	100	4	0	80	(A)	(I)	Fatigue
Hirano, M. (19)	495	120	500	50	150	300	545	19	80	8	205	100	(D)	(I)	Static

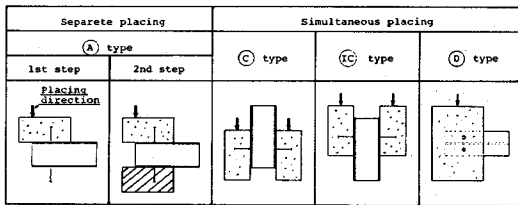
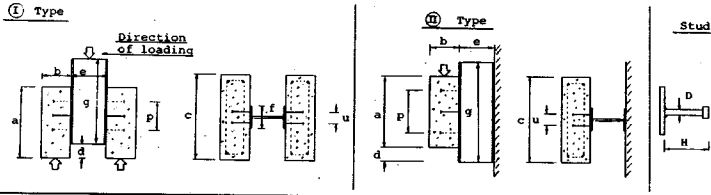


Fig. 4 Concrete-placing direction of previous push-out specimens.

きると考えられる。

Fig. 4 がない⑩の供試体のコンクリートの打込み方向はすべて①タイプであった。なお、前述の⑧タイプによる押抜き試験は皆無であった。

c) 押抜き供試体の形状寸法

既往の代表的な研究における押抜き供試体の形状寸法を Table 1 に示す。内容は、直径 19 mm のスタッドに限定し、コンクリートスラブ、H 形鋼およびスタッドに分けて示されている。この表より、押抜き供試体の形状寸法は研究者の独自の判断、あるいは試験機の制約¹⁶⁾などにより決定されていることがわかる。特に、スタッドのせん断耐力およびずれ性状に影響を及ぼすコンク

リートスラブ幅²⁰⁾あるいはスタッド間隔²¹⁾が統一されていない。

(2) 押抜き試験結果の比較検討

a) スタッドの静的耐荷力

Table 1 の静的試験に関する結果を Fig. 5 に示す。一般に、スタッドの押抜き挙動を評価する際、スタッドの直径と高さ、スタッド材の引張強度と降伏点、コンクリートの強度、スタッドの溶接方法、スタッドの本数と配置、スタッドを溶植する母材の板厚、スラブ内の補強鉄筋量、スラブの幅、およびコンクリートの打込み方向が重要な要因として挙げられる。しかしながら、Fig. 5 の研究には、これらの各要因が詳細に記述されていないため、スタッドの静的耐荷力の比較をこれだけで行うには無理があると思われる。

b) スタッドのずれ性状

Fig. 5 の研究に対するずれ曲線を比較したものが Fig. 6 である。これより、ずれ曲線はスタッドの支圧面に形成されるブリージング量に左右されていることがわかる。特に、③タイプの相対ずれは、①タイプに比べかなり大きく、さらに Fisher の⑩タイプに比べ極端に大きかった。

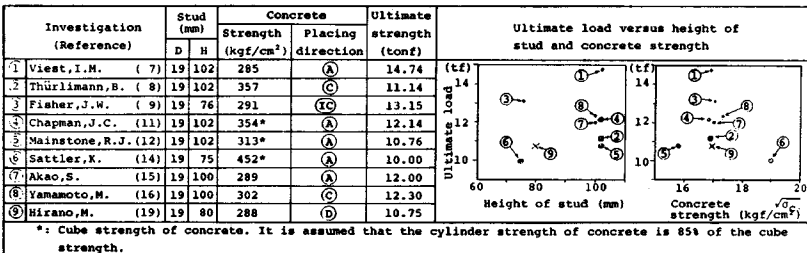


Fig. 5 Ultimate strength.

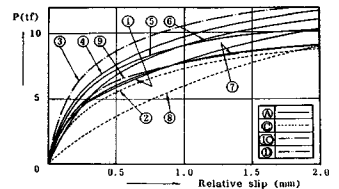


Fig. 6 Load-slip curves.

Investigation (reference)	Stud		Concrete		Shape of specimen
	D	H	Strength (kgf/cm ²)	Placing direction	
① Thürlimann, B. (8)	19	102	387	(C)	(I)
② Fisher, J.W. (10)	19	102	302	(A)	(II)
③ Mainstone, R.J. (12)	19	102	329	(A)	(I)
④ Menzies, J.B. (13)	19	102	300	(A)	(I)
⑤ Akao, S. (15)	19	100	289	(A)	(I)
⑥ Naruoka, M. (17)	19	100	298*	(A)	(II)
⑦ Abe, H. (18)	19	100	430*	(A)	(I)

* Light-weight concrete

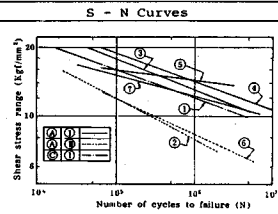


Fig. 7 S-N Curves.

c) S-N 曲線

Table 1 の疲労試験に関する結果を Fig. 7 に示す。使用された供試体は、Fig. 3 の①と②の2種類である。コンクリートの打込み方向は、Fig. 4 の①と②タイプの2種類である。

Fig. 7 の S-N 曲線より、②の供試体の結果は、①に比べ相当低い値を示すことがわかった。②の供試体では、鋼部を固定し、コンクリート側から载荷しているの、鋼とコンクリートとの接触面が開きやすく、スタッドにはせん断力と同時に引張力が働き、この組合せ応力がスタッドの疲労強度を低下させる原因になると考えられる。

Fig. 7 の S-N 曲線からコンクリートの打込み方向の差異を見つけることは難しいが、Thürlimann による③タイプの S-N 曲線は①タイプに比べわずかに低い傾向にあった。また、軽量コンクリートを用いた試験の S-N 曲線は、普通コンクリートを用いた試験に比べわずかに低い傾向を示した。

3. コンクリートの打込み方向が異なるスタッドの押抜き試験

(1) 供試体の種類および製作方法

供試体は、コンクリートの打込み方向の違いにより、Fig. 8 のように①、②、③および④タイプの4タイプに分かれ、さらにスタッドの設計強度式を提案するためにコンクリートの配合を一定とし、スタッドの高さのみを変化させた場合と、スタッドの形状寸法を一定とし、コンクリート強度を変化させた場合の5シリーズに分かれる。

本研究では、コンクリートの品質、材令を均一にするために、Fig. 8 のように、①、②タイプの H 形鋼のウェブを切断し、両側のコンクリートスラブを同時に打ち込むことができる方法を考案して、各シリーズごとの供試体を一度に製作した。この方法を用いることにより、既往の研究の①タイプのようにコンクリートを2度に分けて打ち込むことは避けられる (Fig. 4 参照)。コンクリートの一括打設が可能となり、品質のばらつきは最小限に抑えることができたと思われる。養生後、①、②

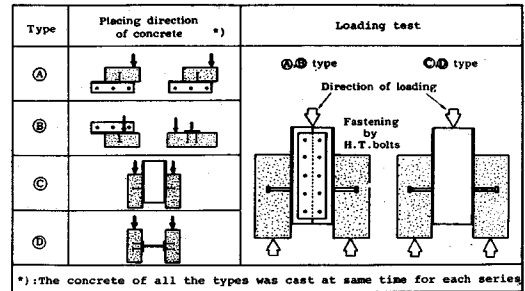


Fig. 8 Classification of specimens and method of push-out specimen test.

タイプの切断されたウェブは、添接板と高力ボルトを用いて接合され、全タイプが同じ形状の押抜き供試体 (Fig. 3 の①) で試験された。なお、既往の研究ではコンクリートの打込みに先だって、H 形鋼のフランジ表面にグリースなどはく離剤を塗布して、鋼部とコンクリートの間に着着力が働くことを防いでいたが、その効果は無視できる²²⁾と考へて、H 形鋼のフランジには何ら処理を施さなかった。

供試体は、静的試験に各タイプとも2体ずつ、疲労試験に同じく5体ずつ用意され、5シリーズのおおのの総数は40体と100体である。供試体の形状寸法を Fig. 9 に示す。

H 形鋼は JIS の規格品 (SS 41) で、スタッド素材は実測平均降伏点 27.5 kgf/mm² のものを用いた。Table 2 にスタッドの寸法を示す。使用したスタッドはすべて直径 19 mm である。スタッドは全シリーズを通じ同一の溶接条件にて H 形鋼の両フランジに各2本溶接した。

また、Table 2 にコンクリートの配合と実測値も示す。コンクリート内には Fig. 9 に示す鉄筋を入れ、载荷時において両側のコンクリートスラブの間隔を一定に保つために、両側のスラブの上下2か所をボルト (φ 12 mm) でつないだ。

(2) 試験方法

a) 静的試験

試験は 100 tf 耐圧試験機を用いて行った。载荷方法は静的反復荷重法とし、最初、スタッド1本当たり 250 kgf に相当するピッチで荷重を徐々に反復増加させ、荷

Table 2 Dimension of studs and properties of concrete.

Series	H (mm)	D (mm)	H/D	Max. aggre. (mm)	Air content (%)	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kg/m ³)				Average slump (cm)	Average strength (kg/cm ²)
								Water	Cement	Fine	Coarse		
1	40	19	2.11	15	4	51	45.3	198	388	756	951	16	342
2	70	19	3.68	15	4	51	45.3	198	388	756	951	18	322
3	100	19	5.26	15	4	51	45.3	198	388	756	951	17	313
4	100	19	5.26	15	4	40	41.3	205	513	640	945	15	377
5	100	19	5.26	15	4	33	40.6	200	606	604	918	12	460

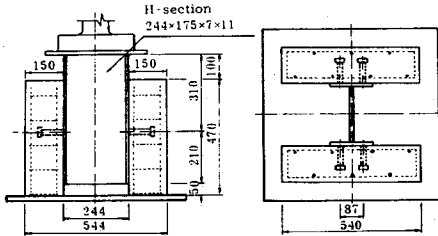


Fig. 9 Detail of specimen.

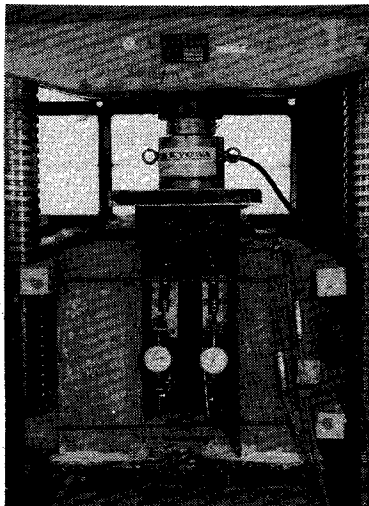


Photo 1 Static test apparatus.

重がスタッド1本当たり7.0tfを越えた時点で、500kgfピッチに変え、さらに载荷を続け破壊まで進めた。

H形鋼とコンクリートとの相対ずれは、ダイヤルゲージ(1/1000mm)と4ゲージ式変位計(1/100mm)を併用し、4か所で計測した。静的試験時の状態をPhoto 1に示す。

b) 疲労試験

試験は40tfローゼンハウゼン型疲労試験機と±30tf油圧サーボ型疲労試験機を用いて行った。荷重設定は下限荷重3tfを一定とし、上限荷重を変えた部分片振せん断で、スタッドの受けるせん断応力度について種々の応力振幅を与えた。载荷速度は5Hzを基準とした。

スタッドの疲労破壊を予知するため、非接触形変位計(渦電流方式)でコンクリートとH形鋼の相対ずれを連続的に計測した。

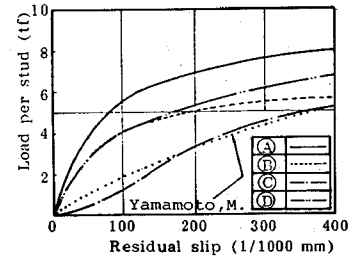
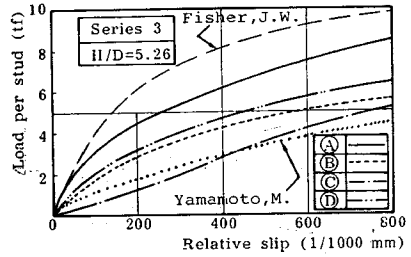


Fig. 10 Load-slip curves at Series 3.

(3) 静的試験結果および考察

a) 荷重とずれの関係

代表的なスタッド1本当たりの荷重と相対・残留ずれの関係をFig. 10に示す(曲線は包絡線を示す)。これらより、◎タイプの相対・残留ずれは、スタッドの支圧面に形成するブリージングの影響により、载荷初期からかなり大きく現われることが確認された。また、同図には本試験とスタッドの形状寸法が同じで、コンクリート強度がほぼ近いFisher⁹⁾および山本¹⁶⁾の研究結果も直接比較のため、併記されている。そして、コンクリートの打込み方向が◎タイプである山本と本試験との結果の比較から、载荷初期の荷重と相対・残留ずれの関係はともによく一致していることがわかる。一方、◎タイプを逆にした打込み方向である◎タイプは、ブリージングがスタッドのずれ性状にまったく悪影響を与えないことも確認できた。

b) スタッド1本当たりの破壊および限界荷重

Fig. 11は、スタッド1本当たりの破壊・限界荷重とスタッドの高さとの関係、およびスタッド1本当たりの破壊・限界荷重とコンクリートの強度との関係を示したものである。ここで、シリーズ1~3はコンクリートの配合が、およびシリーズ3~5はスタッドの形状寸法が一定である。なお、限界荷重の定義は付録に詳述してあ

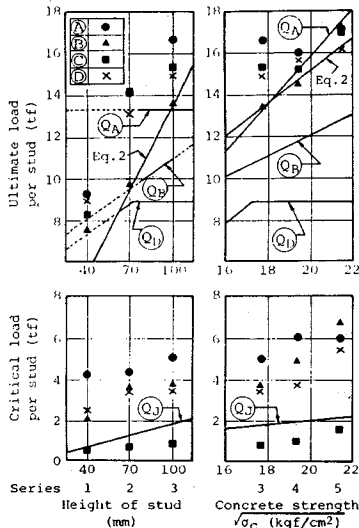


Fig. 11 Ultimate load versus height of stud and concrete strength, and critical load versus height of stud and concrete strength.

る。Fig. 11 より明らかなように、破壊荷重は各タイプともコンクリートの強度を変化させたときよりも、スタッドの高さを変化させたときの方が大きく影響を受けたが、限界荷重は同程度の影響を受けた。中でも、Bタイプはコンクリート強度の平方根に対し、破壊・限界荷重とも直線関係を示した。また比較のため、Fig. 11には、本試験の測定値と主要各国およびわが国の設計値を線で示した。実線は設計値の適用範囲、破線は適用範囲外であるが外挿して表示したものである。ここで、アメリカ合衆国²³⁾、イギリス²⁴⁾、西ドイツ²⁵⁾および日本²⁶⁾の設計値を、それぞれ Q_A 、 Q_B 、 Q_C 、および Q_D と記した。

Fig. 11 より破壊荷重については、シリーズ1のBタイプがDINの設計値 Q_B に、他のタイプがBSIの設計値 Q_C に、シリーズ2のBタイプがBSIの設計値に、他のタイプがAASHTOの設計値 Q_D に、シリーズ3~5の全タイプがAASHTOの設計値に最も近いことがわかる。また、限界荷重については、全シリーズとも、Cタイプが他のタイプに比べ極端に低く、さらに道路橋示方書の設計値 Q_C よりも低いことがわかる。

c) 破壊形式

本試験の破壊形式は、スタッドのせん断破壊とコンクリートの支圧破壊の両形式がみられた。シリーズ1 ($H/D=2.11$) の全タイプとシリーズ2 ($H/D=3.68$) のCタイプのみがコンクリートの支圧破壊を、シリーズ2のCタイプ以外とシリーズ3~5 ($H/D=5.26$) の全タイプがスタッドのせん断破壊を示した。なお、わが国の道路橋示方書では $H/D=5.5$ を上記の両破壊形式の境界としているが、本試験結果から両破壊形式の境界

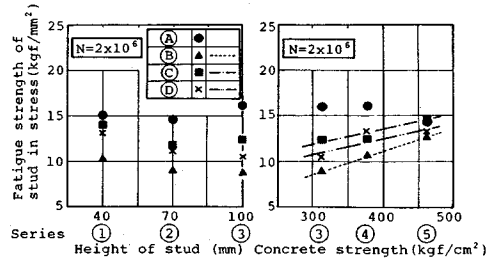


Fig. 12 Fatigue strengths versus height of studs and versus concrete strength at 2×10^6 cycles.

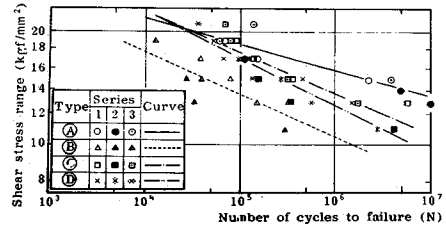


Fig. 13 S-N relations of each type including Series 1~3.

を推定するならば、Cタイプを除いて5.5より低い値と思われる。

(4) 疲労試験結果および考察

a) S-N 曲線

Fig. 12 に、200 万回におけるスタッドの疲労強度の推定値とスタッドの高さおよびコンクリート強度の関係を示す。これより、スタッドの疲労強度には、各タイプともスタッドの高さは影響しないが、Aタイプを除いてコンクリート強度は影響することがわかった。

シリーズ1~3におけるS-N曲線 (Fig. 13) より、Bタイプの疲労強度が他のタイプに比べ低いことがわかる。その理由は、不十分なコンクリートの充填 (特にスタッド根元部) と考えられる。試験後コンクリートとH形鋼を分離したところ、Photo 2のように接触面には多くの豆板が観察された。なお、Cタイプのコンクリートの打込みは、H形鋼のフランジ面に空隙が発生しないように、フランジの片側からコンクリートを流し込むなど十分注意して行っている。

b) P-S-N 関係

スタッドの疲労試験結果は、Fig. 13のように、ばらつきが著しい。したがって、スタッドの疲労強度を評価決定するには、統計的取扱いが望ましく、さらにスタッドの疲労限度に対する安全率を信頼度と結びつけるため、強度の確率分布を知っておく必要がある。本研究では、スタッドの疲労強度の確率分布がワイブル分布するものと仮定した。

ワイブル分布関数は次の式で表わされる。

$$P = 1.0 - \exp\{-[(\chi - \chi_0)/\beta]^m\} \dots \dots \dots (1)$$



Photo 2 Contact surface between steel and concrete after fatigue failure at (B) Type specimen.

ここで、 P : 破壊確率,

χ : 偏差,

m : 形状のパラメーター,

β : 尺度のパラメーター,

χ_0 : 位置のパラメーター.

解析は、3つのワイブルパラメーター m , β および χ_0 を推定することに帰着する。ここでは、最尤推定法に従い3つのパラメーターを求めた。

シリーズ1~3の試験結果を各タイプについて処理した結果を Table 3 に示す。この結果を用いて、破壊確率を考慮に入れたスタッドの疲労強度を推定することができる。

c) δ - N 曲線

シリーズ3の応力振幅 $S=15 \text{ kgf/mm}^2$ における各タイプの繰り返し回数と相対ずれの関係を Fig. 14 に示す。これより、相対ずれは、ほぼ1.0 mm に達したのち、急激に増加することがわかる。したがって、非接触形変位計による連続的な相対ずれの計測は、スタッドの疲労破壊の予知に有用であった。

d) 破壊形式

破壊時には、スタッドの支圧側溶接止端部からフランジへ掘り込むようなクレーター状のクラック (1次クラック) と、そのクラックの進展に伴い起こると予想されるスタッドの溶接部からほぼ直径に等しい距離位置において、加力方向とは反対側から発生するスタッド軸部のクラック (2次クラック) がみられた。1次クラックによる破壊は応力振幅 $19\sim 21 \text{ kgf/mm}^2$ に、2次クラックを伴う破壊はそれ以下の応力振幅に多くみられた。

押抜きせん断時のスタッドの疲労破壊モードを Fig. 15 に示す。スタッドに繰り返し荷重が作用すると、まずスタッド支圧側のコンクリート (特に根元部) が高い支圧により局部圧壊を起こして、スタッドは曲げ変形を生じ、スタッド根元にはせん断力と曲げモーメントが同時に働くこととなる。応力振幅が高いとき、スタッドは1次クラックのみで破壊するが、応力振幅が低くなる

Table 3 Statistical properties at Series 1~3.

Type	S-N Relation		Probability of failure		
	Coefficient		Parameter		
	a	b	Shape (m)	Scale (β)	Location (χ_0)
A	23.235	14.384	3.706	1.596	-1.446
B	14.924	8.749	3.784	1.222	-1.109
C	16.301	9.073	3.803	1.271	-1.154
D	14.740	7.918	4.814	0.972	-0.900
Re-mark	$\log_{10} N = a - b \log_{10} S$ S : Stress range		$P = 1.0 - \exp(-[(\chi - \chi_0)/\beta]^m)$ P : Probability of failure χ : Deviation		

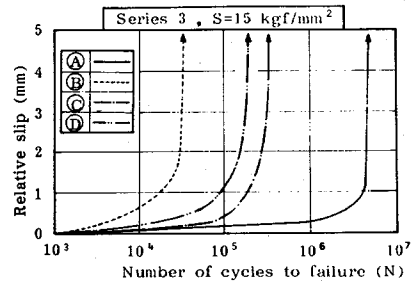


Fig. 14 Number of cycles of loading versus relative slip at Series 3.

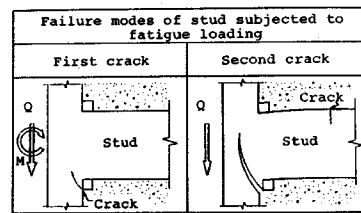


Fig. 15 Mechanism of fatigue failure of stud.

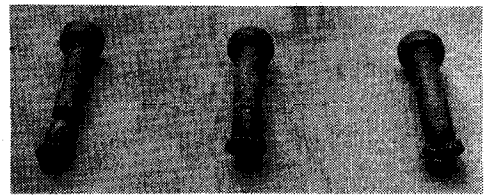


Photo 3 Crack of shank of stud (Second crack).

と、1次クラックの発生で曲げモーメントは激減するが、せん断力は依然として伝達されるので、やがて2次クラックを起こし、スタッドは根元部と軸部の2か所で破断する。このことは、Photo 3のように試験後のスタッドには、2次クラックがわずかに発生したもの (右)、2次クラックがほとんど貫通に近いもの (中央) およびスタッドの軸部でも完全に破断したもの (左) の3つの破壊形式がみられたことより、確認されている。

4. 設計のためのスタッドの強度式

近年、わが国においても構造物の設計方法は許容応力

度設計法から荷重係数設計法あるいは限界状態設計法に移行されようとしている。このことを踏まえ、本研究では、スタッドの終局耐力、使用限界状態における設計耐力、ずれ性状および疲労強度の算定評価式を提案したい。

これらの式は40体の静的押抜き試験と100体の押抜き疲労試験結果に基づいている。ただし、適用範囲は、 $3.0 \leq H/D \leq 5.3$ とする。

(1) 静的強度

a) スタッドの終局耐力 Q_u (全タイプ)

$$Q_u = 40DH \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (\text{kgf}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 D :スタッドの直径 (cm),

H :スタッドの全高 (cm),

σ_{ck} :コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)

式(2)と実験値との適合性を Fig. 11 に示す。

b) スタッドの設計耐力 Q_a (kgf)

$$Q_a = 0.5Q_u \quad (\text{A}, \text{B}, \text{Dタイプ}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_a = 0.35Q_u \quad (\text{Cタイプ}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(3), (4)はスタッドの残留ずれ量をもとにした使用限界状態の設計値である。係数は各シリーズの荷重-残留ずれ曲線から、外挿法により残留ずれの載荷初期の接線と残留ずれが急激に増加した後の曲線に対する接線との交点を求めて決めた。代表的なシリーズ4の荷重と相対・残留ずれの関係を Fig. 16 に示す。

(2) スタッドのずれ性状

スタッドの荷重-ずれ曲線を求める方法としては、過去において、Buttry⁹⁾, Fisher⁹⁾が実験式を、また佐藤²⁷⁾, 安楽²⁸⁾が解析的方法を、そして池田²⁹⁾がブリージングを考慮に入れた実験式を提案しているにすぎない。

本研究では、佐藤の考え方に基づき、スタッドをコンクリートにより弾性支持されている棒とみなし、杭が横荷重を受ける問題で用いられている Chang の方法を適用し、ずれ性状を解析した。なお、式において、スタッド支圧側のコンクリートの変形係数 K には、接触面におけるコンクリートの支圧応力とコンクリート強度 σ_{ck} との比率が関係する形をとっている。ここで、 K はコンクリートのヤング係数 E_c のみならず、 σ_{ck} , せん断力 Q および支圧面積 DH の関数となっている。

弾性支持されたスタッドのたわみに関する基礎微分方程式は、次式で与えられる。

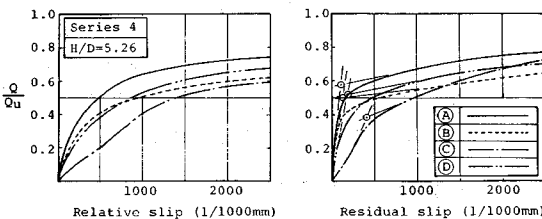


Fig. 16 Load-slip relation at Series 4.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Ky = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 EI :スタッドの曲げ剛性 (kgf·cm²).

これより、スタッドの埋込みが十分長く、スタッド根部の回転が拘束されているものとすれば、スタッド根部の変位 y_0 は、次式で近似できる。

$$y_0 = \beta Q / K \quad (\text{cm}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\beta = \left(\frac{K}{4EI}\right)^{1/4} \quad (\text{cm}^{-1})$

ところが、式(6)の y_0 は式(5)の線形解であるので、スタッドのずれ性状の実状を表わし得ない。そこで、載荷初期におけるスタッドの非線形なずれ性状を表わす K として、次式を提案したい。

$$K = \frac{E_c}{r(0.7+A)} \quad (\text{kgf/cm}^2), \quad A = \frac{6Q}{DH\sigma_{ck}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 r :スタッドのずれ性状に及ぼすブリージングの影響度を表わす係数。

係数 r は、各シリーズにおける荷重とずれの関係から次のように決定した。

$$r = 1.5 \quad (\text{A}, \text{B}, \text{Dタイプ}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$r = 6.0 \quad (\text{Cタイプ}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

代表的なシリーズ4のずれ曲線の実測値と解析値の比較を Fig. 17 に示す。その結果はA, B, Dタイプの下限値およびCタイプのずれ曲線によく近似していることがわかる。また同図には、佐藤の提案に従う曲線を比較のため併記した。

(3) 疲労強度

Fig. 18 に提案式による S-N 曲線を示す。この S-N 曲線は、Table 3 の結果を用いて BSI; BS 5400, Part

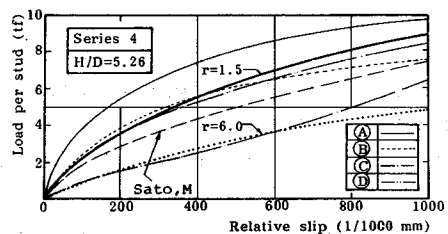


Fig. 17 Proposal of load-slip relation.

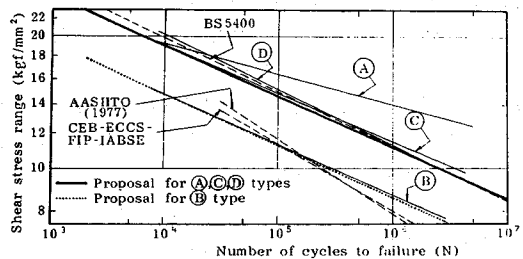


Fig. 18 Proposal of S-N relation.

Table 4 Verification of proposed eqs. (2)~(4), (9), (10) by the design values of foreign standards or codes.

Specification or Code	Static strength†(tonf)		Fatigue strength† (kgf/mm ²)	
	Limit state		N=0.5x10 ⁶	N=2.0x10 ⁶
	Ultimate	Serviceability		
AASHTO	13.00	—	9.49	7.03
BS5400, part 5	10.82	5.95	—	—
BS5400, part 10	—	—	12.24	10.20
DIN	9.08	5.45	—	—
ECCS	9.00	5.40	9.18	7.14
Authors	13.16	6.58* 4.61**	11.99*** 9.32****	10.19*** 7.92****

† Stud: D=19mm, H=100mm, H/D=5.26,
Concrete: $\sigma_c=300\text{kgf/cm}^2$, $E_c=27000\text{kgf/cm}^2$.
Placing direction of concrete: *, ①, ②, ③ Types,
** ; ④ Type, *** ; ①, ②, ③ Types, **** ; ④ Type.

10³⁰の考え方に従い、破壊確率 2.3% として求めたものである。図には AASHTO²³⁾, BSI³⁰⁾, ECCS³¹⁾を比較のため併記している。スタッドの疲労強度は次式より求められる。

$$\log_{10} N = 14.89 - 8.52 \log_{10} S \dots\dots\dots (10)$$

(A, C, ① タイプ)

$$\log_{10} N = 13.96 - 8.52 \log_{10} S \dots\dots\dots (11)$$

(B タイプ)

ここで、N: 破壊に至るまでの荷重の繰り返し回数、
S: スタッドの疲労強度 [せん断応力振幅] (kgf/mm²)

スタッドの直径 19 mm, 高さ 100 mm およびコンクリート強度 300 kgf/cm²の場合について、提案式によるスタッドの終局耐力、設計耐力および疲労強度と主要各国の設計値との比較を Table 4 に示す。

5. 結 論

各種合成構造への適用を考慮したスタッドの設計強度式を提案するため、既往のスタッドの押抜き試験を整理し、不統一であった供試体 (試験方法)、コンクリートの打込み方向および供試体の形状寸法などの試験条件がスタッドの押抜き試験結果に及ぼす影響について検討を加えた。さらに、スタッドの押抜き強度に重要な影響因子であるコンクリートの打込み方向を変化させた場合の押抜き試験を実施し、その結果を考察した。要約すると以下のとおりである。

(1) 押抜き疲労試験において、H 形鋼の片側のみコンクリートスラブを有する供試体 ② は、H 形鋼の両側にコンクリートスラブを有する供試体 ① に比べ、スタッドの疲労強度を低く評価させる。これは、② の場合、偏心載荷で試験されるため、スタッドにはせん断力に加えて引張力が同時に作用するからである。

(2) スタッドの終局耐力式として、コンクリートの打込み方向に関係なく式 (2) を提案した。

(3) ずれ量をもとにした使用限界状態の設計耐力式

として、ブリージングによるずれ性状への悪影響が少ない打込み方向 ④, ⑥, ⑩ タイプに式 (3) を、スタッドの支圧面にブリージングが起り、ずれ性状に悪影響を与える打込み方向 ③ タイプに式 (4) を提案した。

(4) 載荷初期におけるスタッドの荷重とずれの関係を示す簡易計算法として、式 (5)~(9) を提案した。

(5) スタッドの疲労強度を求める設計用 S-N 曲線として、式 (10), (11) を提案した。コンクリートの充填 (特にスタッド根元部への) が悪い打込み方向 ⑧ タイプはスタッドの疲労強度を低下させる [式 (11)]。

今後、さらに直径が 19 mm 以外、長さ 100 mm 以上のスタッドについての試験を実施し、スタッドの押抜き試験方法の標準化に向けて基礎データを蓄積したい。

謝 辞: 本研究を行うにあたり、大阪大学名誉教授 (現近畿大学教授) 前田幸雄先生、大阪大学助教授 松井繁之先生から終始有益なご助言とご指導を賜ったこと、また日本スタッドウェルディング (株)、タイコー (株) および大阪工業大学と摂南大学の両学部卒研生の協力を得たことを記して、深く謝意を表します。

付録 (限界荷重の定義に関する補足説明)

限界荷重とは、Viest が定義したもので、残留ずれ曲線の勾配が急変する点の荷重を意味する。なお、残留ずれ曲線のこの急変点はスタッドの直径が小さい (ϕ 25 mm 以下) 場合には明瞭に現われるが、スタッドの直径が大きく (ϕ 25 mm 以上) となると明瞭でない。したがって、 ϕ 25 mm 以下のスタッドについては、残留ずれ曲線から外挿的に求めた急変点の荷重を限界荷重と称する。この限界荷重に相当する残留ずれは、ほぼ 0.003 inch に近く、また 0.003 inch を越えるものがなかった。それゆえ、 ϕ 25 mm 以上のスタッドについては、0.003 inch の残留ずれが限界荷重を決定する際の基準とされている。このようにして求めた限界荷重に相当する相対ずれは、スタッドの直径が異なっても、同程度になることが確認されている。本研究の場合、スタッドの直径は 19 mm であるが、各シリーズ、各タイプとも残留ずれ曲線において明瞭な急変点は認められなかったので、残留ずれが 0.075 mm 生じたときの荷重を限界荷重とした。

参 考 文 献

- 1) 橘・千葉・田井戸・長崎: 軽量コンクリートを用いた合成桁の実験, 土木学会誌, 51-11, pp. 43~50, 1966.
- 2) 阿部英彦・竹名興英: 合成桁のずれ止め用スタッドの疲労強度 (1), (2), 構造物設計資料 No. 31, 32, pp. 1304~1308, pp. 1349~1352, 1972.
- 3) 牧野・広沢・田畑・高田・牧: スタッドコネクタの押

- し抜き試験について，日本建築学会論文報告集号外，p.455, 1967.
- 4) 平城・三好・栗田・鶴飼・赤尾：SRC構造に使用されるスタッドの一設計式（続），昭和56年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，I-19, 1981.
平城・栗田・赤尾：SRC構造に用いられるスタッドの疲労強度（続），土木学会第36回年次学術講演会概要集，I-119, 1981.
 - 5) Stenhardt, O. und Möhler, K. : Versuche zur Ermittlung der Scherfestigkeit des Betons bei Verbundträgern, Bauingenieur, Vol.39, No.8, pp.312~316, 1964.
 - 6) 三宮和彦・赤尾親助：剛ジベル強度に関する実験的考察，土木学会第21回年次学術講演会概要集，I-109, 1966.
 - 7) Viest, I.M. : Investigation of Stud Shear Connectors for Composite Concrete and Steel T-Beams, Journal of ACI, Vol.27, No.8, pp.875~891, 1956.
 - 8) Thürlimann, B. : Fatigue and Static Strength of Stud Shear Connectors, Journal of ACI, Vol.30, No.12, pp.1287~1302, 1959.
 - 9) Ollgaard, J.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.
 - 10) Slutter, R.G. and Fisher, J.W. : Fatigue Strength of Shear Connectors, Highway Research Record, No.147, pp.65~88, 1966.
 - 11) Chapman, J.C. and Balakrishnan, S. : Experiments on Composite Beams, Structural Engineer, Vol.42, No.11, pp.369~383, 1964.
 - 12) Mainstone, R.J. and Menzies, J.B. : Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beams for Bridges ; Part 1, Static and Fatigue Tests on Push-out Specimens, Concrete, Vol.1, No.9, pp.291~302, 1967.
 - 13) Menzies, J.B. : CP 117 and Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beams made with Normal-density or Lightweight Concrete, Structural Engineer, Vol.49, No.3, pp.137~154, 1971.
 - 14) Sattler, K. : Betrachtungen über neuere Verdubelungen im Verbundbau, Bauingenieur, Vol.37, No.1, pp.1~8, 1962.
 - 15) 安宅 勝・赤尾親助：スタッドシベル押抜試験報告，八幡製鉄研究，第267-268号，pp.1~5, 1964.
 - 16) 山本 稔・中村正平：Stud Shear Connectorの試験報告，建設省土木研究所報告，109号，pp.1~24, 1961.
 - 17) 沢野・浜田・若林・成岡：直径19mmスタッドジベルの押し抜き疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，第174号，pp.1~9, 1970年.
 - 18) 阿部英彦：鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究，日本国有鉄道，鉄道技術研究所，No.961, pp.1~222, 1975.
 - 19) 平野・穂積・吉川・友永：床鋼板つきコンクリートスラブに埋込まれたスタッドコネクタの押抜試験，日本建築学会論文報告集，第281号，pp.57~69, 1979.
 - 20) Taylor, R., Plum, D.R. and Papasozomenos, A.G. : Investigation on the Use of Deep Haunches in Composite Construction, Proc. Instn Civ. Engrs, Vol.47, 1970.
 - 21) Davies, C. : Small-Scale Push-out Tests on Welded Stud Shear Connectors, Concrete, Vol.1, pp.311~316, 1967.
 - 22) 大森・佐々木・長・小林：シャーコネクタの実験的研究，昭和41年度日本建築学会関西支部研究報告集，pp.297~300, 1966.
 - 23) AASHTO : Standard Specification for Highway Bridges 12th ed., 1977.
 - 24) BSI : BS 5400 ; Part 5-Code of Practice for Design of Composite Bridges, 1979.
 - 25) DIN : Richtlinien für Stahlverbundträger, 1980.
 - 26) 日本道路協会：道路橋示方書，1980.
 - 27) 奥田・高島・佐藤・間瀬：スタッドジベルの変位の一般式に関する実験的考察，土木学会第24回年次学術講演会概要集，I-172, 1969.
 - 28) 安楽・武田・竹本：スタッドジベルの弾塑性解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1069~1070, 1974.
 - 29) 池田・大町・森・山口：スタッドジベルによる鋼材とコンクリートとの応力の伝達について，第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.321~324, 1981.
 - 30) BSI : BS 5400 ; Part 10-Code of Practice for Fatigue, 1980.
 - 31) ECCS : Composite Structures, The Construction Press, 1981.

(1986.5.12・受付)