

(14) スタッドの疲労強度向上に関する実験的研究

大阪大学工学部 松井 繁之
 摂南大学工学部 平城 弘一
 日本スタッドウェルディング ○三 好 栄 二

1. まえがき

鋼とコンクリートの合成構造は、経済性に加え、騒音・振動などの公害防止あるいは維持管理面で有利な構造として認められ、種々の構造物への適用が計られつつある。鋼とコンクリートとを一体化させる要のすれ止めには、今後もほとんどといってよいほど施工の容易さからスタッドが使用されるであろう。一方、土木構造物の多くは、疲労荷重が支配的であり、スタッド自身あるいはスタッドを溶接する鋼板の疲労強度を向上させることは、合成構造をさらに有利にさせる。

単純合成桁のような圧縮域のコンクリートにスタッドが埋込まれた場合、図1に示すように加力方向から発生したスタッド根元部の2種類のクラック（クラック 1、2）、または加力方向と反対側から発生したスタッド軸部のクラック（クラック 3）によって、スタッド自身の疲労破壊に至ることが多くの押抜き¹⁾および梁²⁾の試験において観察されている。

一方、スタッドが引張応力を受ける部材、たとえば連続合成桁の中間支付近（負曲げ領域）の鋼桁上フランジ、あるいは正曲げを受ける合成床版の鋼板に溶接された場合、スタッドの溶接部が鋼板の疲労破壊進行の発端点となる。そして、実際の連続合成桁および合成床版では、図2に示すように鋼板に引張力、スタッドにせん断力を同時に受ける応力状態となり、複合加力での試験が必要になってくる。複合加力の試験結果から鋼板に引張力のみ^{3), 4), 5), 6)}あるいはスタッドにせん断力のみを作用させた場合よりも大幅な疲労強度の低下を示すことがすでに明らかにされている⁷⁾。

著者らは、この疲労強度の低下の原因がスタッドの溶接部の止端形状にあると判断し、この止端形状を改良することによって疲労強度の向上が計

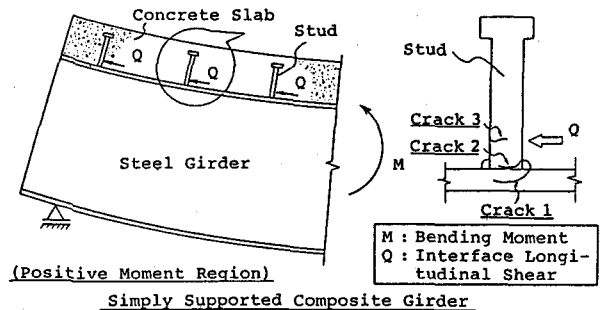


図1 スタッドの疲労破壊

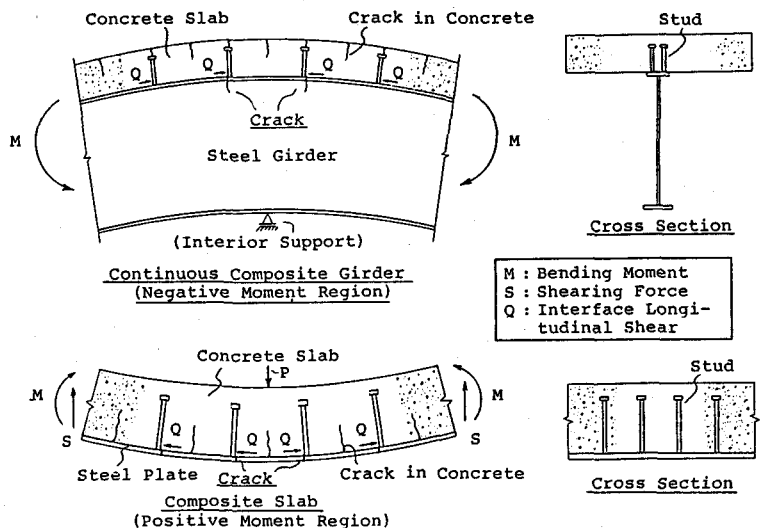


図2 鋼板の疲労破壊

れるものと考えた。そこで、フェルールを改良・試作し、溶接法の改善を計った。この改善を加えたフェルールを用いて溶接されたスタッドおよびスタッド付き鋼板について各種の疲労試験を実施した。その結果、疲労強度が大きく向上させることができた。

本文はこれらの結果および考察を述べるものであり、引張応力を受ける鋼板に対する新しいスタッド溶接法を提案するものである。

2. 余盛り形状の改良

2.1 改良フェルールおよび溶接法の特徴

従来のフェルールを用いた溶接法（Aタイプ）は、鋼板と接触するフェルール下縁に切欠き溝を放射状に設け、溶接時のアーク熱によるガスをこの溝から噴出させる。このため、溶接止端部には図3および写真1のAに示すように溝に沿った溶接バリが残り、応力集

Type	A	B	C	D
Sketch				
Ferrule	Usual	Improved①	Improved②	Improved③

図3 溶接止端の形状

表1 溶接条件

Type	A	B	C	D
Current (A)	1500	1700	1700	1800
Plunge (mm)	5	10	8	10
Arc Time (Second)	0.9	1.1	1.2	1.3

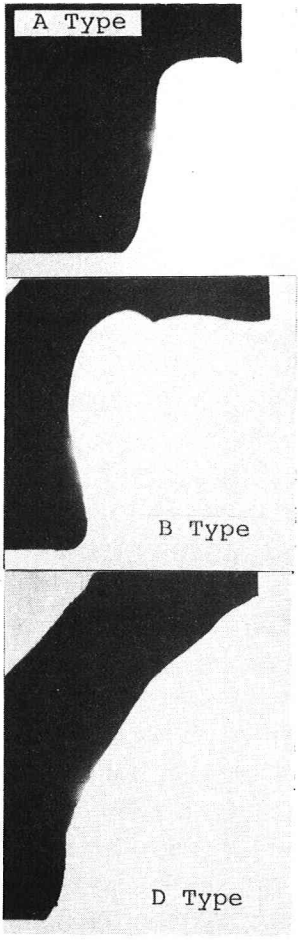
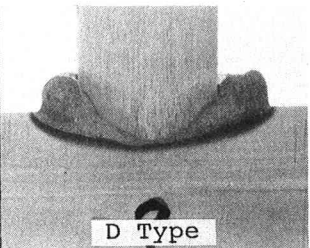
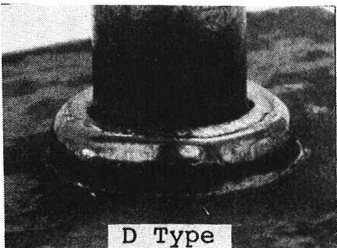
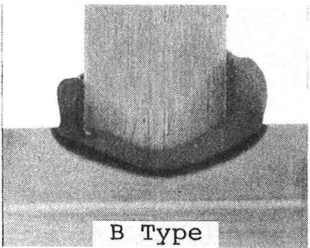
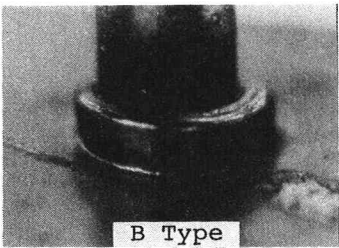
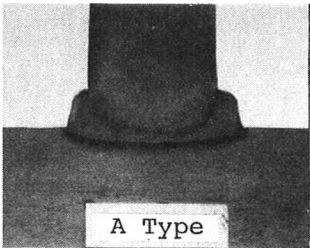
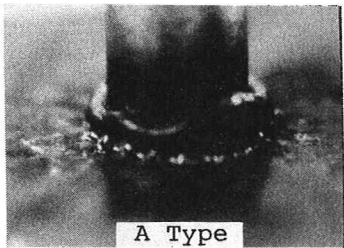


写真1 余盛り部の外観

写真2 余盛り部のマクロ断面

写真3 余盛り部の拡大断面

中あるいは疲労データのバラツキの原因となっている。このため、本研究では、溶接余盛りの断面寸法が大きくなり、溶接止端部が滑らかで、かつ、余盛りに傾斜をもたせてスタッド溶接ができるような新しいフェルールを試作した(図3参照)。溶接は、JIS規格⁹⁾に従うスタッドの試験結果に合格し、適正な溶接外観、マクロ断面および余盛り断面が得られるような条件のもとで行われた(表1～2および写真1～3参照)。表2にJIS規格に従うスタッドの試験結果を示す。表より引張強度は改良型と従来型とに差異が全くなくすべて規定値を満足していることがわかる。また破壊箇所はすべてスタッドの軸部で、曲げ試験結果はすべて good の判定であった。以下に改良フェルールを用いたスタッド溶接法の特徴を述べる。

改良型①(Bタイプ)：鋼板と接触する面の切欠き溝を閉塞し、アーク熱によるガスをフェルール上部より噴出させるようにした。この結果、溶接止端の形状は図3および写真1～3に示すように円滑になった。

改良型②(Cタイプ)：このフェルールによる溶接止端の形状は従来型と同じになるが、ただスタッド根元部の応力集中を軽減させるために、図3のように余盛り部に傾斜をもたせたものである。

改良型③(Dタイプ)：このタイプは、BタイプとCタイプの利点を活用したものである。その結果、図3および写真1～3に示すように、溶接余盛りの形状が円滑で、傾斜のあるものにした。

2.2 各タイプの溶接部形状の詳細測定結果

余盛りの測定はノギス(1/20mm)を用いて余盛りの高さおよび厚さを実寸で、さらに余盛り形状を詳細に調べるため、シリコンゴムで型取りし、拡大投影機を用いて余盛りの溶接止端の曲率半径、角度および切欠き深さを拡大(10倍、写真3)して行った。なお、余盛りの詳細測定はφ19mmスタッドのA、B、Cタイプについてのみ実施した。

余盛り形状の測定結果を表3に示す。これは各タイプ10本で、かつ一本のスタッド当たり4断面に着目した計40箇所の測定結果である。余盛り厚dの平均値はAタイプがもっとも小さく、Bタイプの約65%であり、Dタイプの約49%であった。また余盛り高さhの平均値はDタイプがもっとも小さく、Aタイプの約93%であり、Bタイプの約89%であった。なお、余盛り部の直径D₂は、従来型のスタッドがJohnsonの提案している直径⁹⁾にもっとも近かった。

拡大投影機による余盛り形状の測定結果を表4に示す。着目した断面は、Aタイプについては溶接バリの発生しているO部と発生していないT部の2箇所で、また溶接バリのないB、Dタイプについては任意に選んだ2箇所である。この結果についても上記と同様に計40箇所の測定結果に基づいている。

表2 JISによるスタッドの試験結果

Type	Tensile Test		Bending Test*
	Mean Tensile Strength (kg/mm ²)	Failure Place	
A	47	Shank	good
B	47	Shank	good
C	47	Shank	good
D	47	Shank	good

* : Bending test is a result of visual inspection when stud was bent to 30°

表3 ノギスによる余盛りの測定結果

Reinforcement	Type	Max.	Min.	Mean	Stan. dev.
Thickness d (mm)	A	3.83	2.00	2.95	0.358
	B	6.12	3.03	4.52	0.714
	D	7.30	3.93	6.07	0.643
Height h (mm)	A	7.80	2.02	4.96	1.643
	B	7.90	1.70	5.20	1.667
	D	7.28	2.68	4.62	1.207

(Reference) D₁ = 19 mm
A Type : D₂ = 1.31 D₁, h = 0.26 D₁
B Type : D₂ = 1.48 D₁, h = 0.27 D₁
D Type : D₂ = 1.64 D₁, h = 0.24 D₁
Johnson : D₂ = 1.34 D₁, h = 0.25 D₁

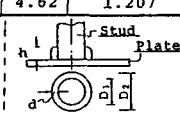
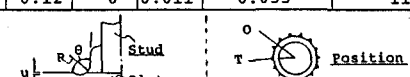


表4 拡大投影機による余盛りの測定結果

Reinforcement	Type	Position	Max.	Min.	Mean	Stan. dev.	Incidence
R (mm)	A	O	0.80	0.05	0.39	0.209	100 (%)
		T	1.25	0	0.30	0.303	84
	B	O	4.01	0	0.59	0.656	97
		T	1.80	0	0.42	0.493	97
θ (°)	A	O	119.8	40.8	78.5	17.95	100
		T	135.8	40.0	87.2	23.72	100
	B	O	125.8	16.0	79.5	24.44	100
		T	152.8	23.6	100.4	25.63	100
u (mm)	A	O	0.19	0	0.029	0.054	26
		T	0.08	0	0.004	0.018	5
	B	O	0.13	0	0.011	0.032	11
		T	0.12	0	0.011	0.033	11

(Notation)
R : Radius of Curvature
θ : Angle
u : Depth of Notch



さて、溶接止端部の曲率半径Rの平均値はAタイプのT位置がもっとも小さく、Bタイプの約51%であり、Dタイプの約71%であった。余盛り部の傾斜角 θ の平均値はAタイプのO位置がもっとも小さく、Bタイプの約90%であり、Dタイプの約78%であった。切欠き深さuの平均値はAタイプのO位置がもっとも大きく、B、Dタイプの約2.6倍であった。

以上の比較より、フェルールを改良することによって、従来型のスタッド溶接法に比べ、余盛り形状の厚さ、高さとも大きくすることができ、止端部の曲率半径および余盛り部の傾斜角を大きくし、切欠きの発生率およびその深さを最小限にとどめられることが明らかになった。それゆえ、新しいフェルールを用い、余盛り部の形状を改善するという当初の目的がすべて達成されたものと考えている。

3. 疲労試験の種類と目的および試験方法

今回実施した疲労試験の種類を図4に総括した。

3.1 シリーズ1

本試験はスタッド付き鋼板の引張疲労強度が溶接法の違いによって向上するか否かを確認するためのものである。試験には±10t油圧サーボ形疲労試験機を用いて、下限荷重0.2tを一定とした部分片振試験で行った。

3.2 シリーズ2

本試験は溶接法によってスタッド自身のせん断疲労強度が低下するか否かを確認するために実施された。試験機、下限荷重および試験法はシリーズ1と同じとした。

3.3 シリーズ3、4

一般にスタッドはコンクリート中に埋込まれている。このような状態下のスタッドのせん断疲労強度が価値をもつ。よって、シリーズ3、4の試験を通じ、スタッド溶接法の改良によってスタッドの疲労強度が向上するか否かを確認しなければならない。シリーズ3の試験はFisherタイプと呼ばれる押抜き試験方法であり、荷重が若干偏心して作用する。一方、シリーズ4の試験方法は標準タイプの押抜き試験方法であり、スタッドに純せん断力が作用する。シリーズ3とシリーズ4のφ13mmスタッドの試験については、シリーズ1、2と同じ試験機、下限荷重および試験法で行った。シリーズ4のφ19mmスタッドの試験については±30t油圧サーボ形疲労試験機を用い、下限荷重3.0tを一定とした部分片振試験で行った。

3.4 シリーズ5

このシリーズの試験は当初の目的である鋼板に引張り、スタッドにせん断力を同時に作用された場合、鋼板の疲労強度が向上するか否かを確認するための最終段階のものである。このため、図5のような引

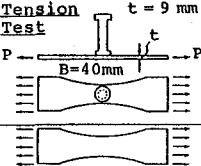
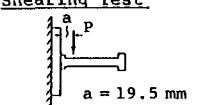
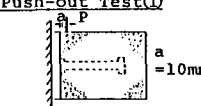
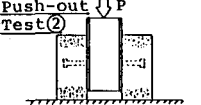
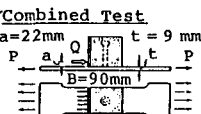
Series	Type	Ferrule	Sketch
1	A	Usual	Tension Test 
	B	Improved①	
	C	Improved②	
	E	Non-Stud	
2	A	Usual	Shearing Test 
	B	Improved①	
	C	Improved②	
3	A	Usual	Push-out Test① 
	B	Improved①	
	C	Improved②	
4	A	Usual	Push-out Test② 
	B	Improved①	
	D	Improved③	
5	A	Usual	Combined Test 
	B	Improved①	
	D	Improved③	

図4 試験の種類

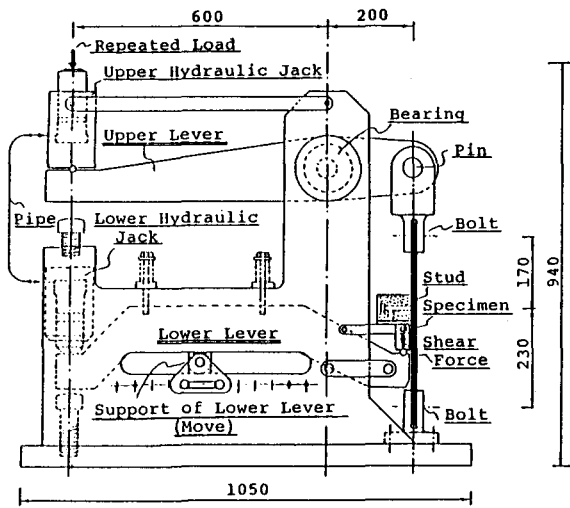


図5 複合加力疲労試験装置（シリーズ5）

張とせん断が同時に作用させることができる特別な疲労試験装置を作製した。この試験装置では、垂直応力とせん断応力の比は任意に変化させられる。

4. 試験結果および考察

4.1 鋼板の引張疲労試験

(シリーズ1)

スタッド付き鋼板の引張疲労試験結果を図6に示す。スタッドが溶接されたA、B、Cタイプの疲労強度は、母材にスタッドが溶接されたことによる幾何学的な変化および溶接時の熱影響による応力集中のために、母材のみの疲労強度からは大きく低下していた。

さて、スタッド溶接法の違いが鋼板の疲労強度に及ぼす影響はわずかであったと言える。試験前から溶接部の余盛り形状のこの程度の違いでは、鋼板の疲労強度に影響しないと予想されていた。ただし、各タイプの余盛り幅が変化するので、試験片の幅を変化させた場合には疲労強度に差が発生するものと思われる。

4.2 スタッドのせん断疲労試験

(シリーズ2)

裸スタッドのせん断試験結果を図7に示す。この図より、Bタイプにおいて若干の疲労強度の向上が認められた。この向上は表2から明らかなように、余盛り高さの違いにより生じたものと推察できる。この試験の場合、疲労破壊箇所がいずれも余盛り上部のスタッド軸部であり、溶接止端の形状の違いは疲労強度に現れない。

4.3 スタッドの押抜き疲労試験

(シリーズ3)

Fisher タイプの供試体を用いた押抜き試験結果を図8に示す。2種の改良型とも従来型に比べ疲労強度が向上した。Cタイプ(改良型②)でも高サイクル領域においては有利性が証明された。この結果から、溶接法を変えるこ

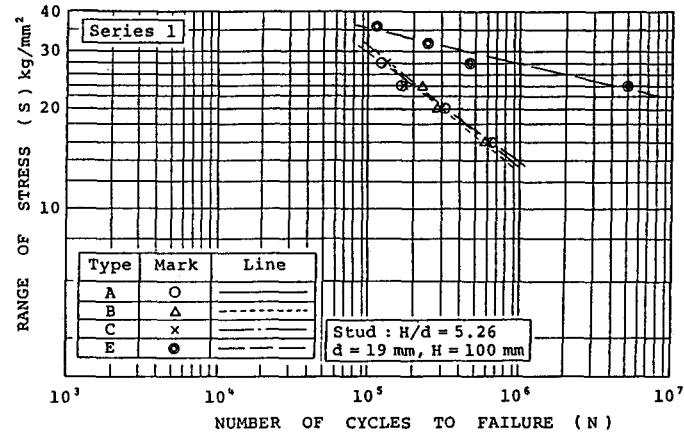


図6 シリーズ1のS-N曲線

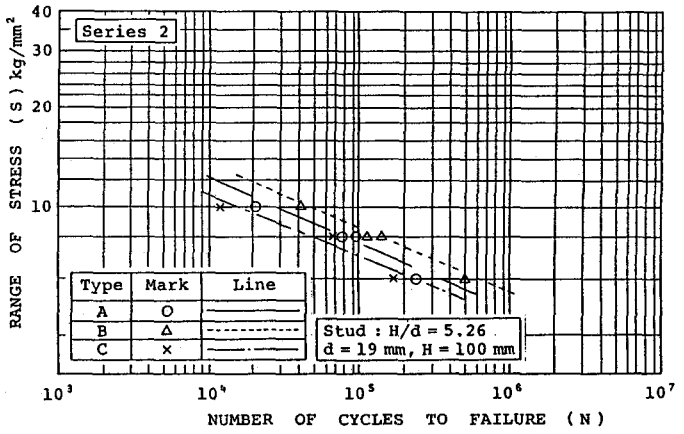


図7 シリーズ2のS-N曲線

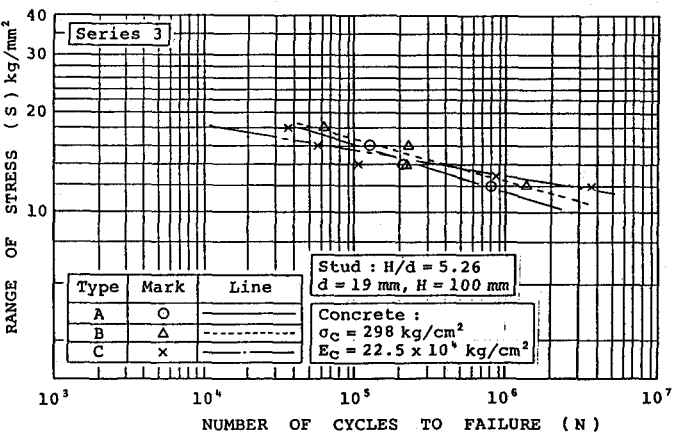


図8 シリーズ3のS-N曲線

とによって純せん断力を受ける場合でも効果が認められたと言える。ただし、この試験の場合、荷重が偏心しているために、スタッドにはせん断力と引張力が同時に作用していることに注意する必要がある。

4.4 スタッドの標準押抜き疲労試験（シリーズ4）

標準型の押抜き供試体（シリーズ4）では疲労試験に先立ち静的試験も実施した。

（A） 静的試験

結果の一例として、スタッド一本当りの荷重と相対・残留ずれの関係を図9、10に示す。これらの図より明らかなように、 $\phi 13\text{mm}$ および $\phi 19\text{mm}$ のスタッドともずれに関しては溶接法を変化させたことによる影響は認められなかった。破壊荷重に関しては改良型が若干の低下を示したが有意な差とは言えない。

（B） 疲労試験

$\phi 13\text{mm}$ および $\phi 19\text{mm}$ スタッドのS-N曲線を図11、12に示す。 $\phi 13\text{mm}$ スタッドに関しては改良型①しか試験していないが、このタイプ（Bタイプ）は溶接法によって大きく疲労強度が向上した。200万回における時間強度を比較した場合、BタイプはAタイプに比べ約20%の向上があった。

Aタイプではスタッド側止端部にクラックが発生し、繰返し回数の増加に伴い溶着金属とスタッドの界面（熱影響部）に沿って進展して破断するケースが多く見られた。一方、Bタイプでは鋼板側止端部にクラックが発生し、回数増加に伴い溶着金属と母材の界面に沿って進展しスタッドが抜け落ちるような破壊形式が多く見られた。また、高サイクル領域ではA、Bタイプともスタッド基部からほぼ直径に等しい位置において加力方向と反対側から発生するスタッド軸部の破壊も見られた。

同様に、 $\phi 19\text{mm}$ スタ

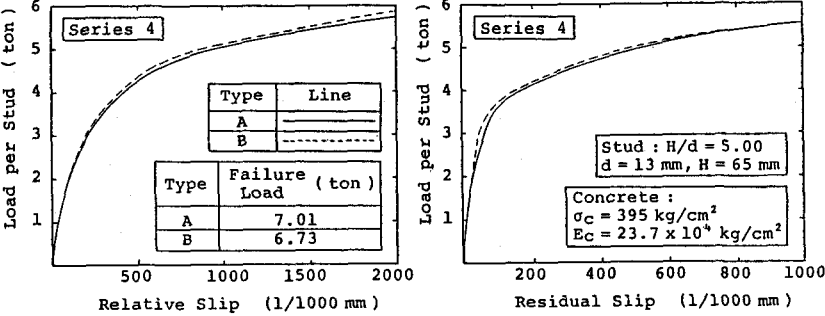


図9 荷重と相対・残留ずれの関係（ $\phi 13\text{mm}$ スタッド）

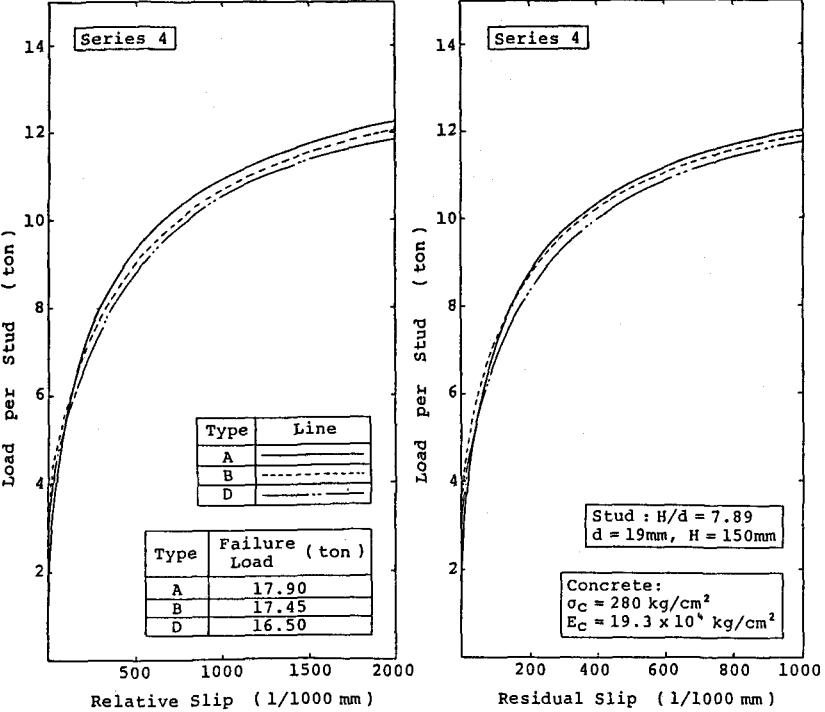


図10 荷重と相対・残留ずれの関係（ $\phi 19\text{mm}$ スタッド）

ッドに関しては、特に高サイクル領域において改良型①、③（B、Dタイプ）が従来型に比べ有利性を発揮した。

200 万回における時間強度を比較した場合、BタイプはAタイプに比べ約 20 %、および、Dタイプは同じく約 10 % の向上があった。またBタイプのS-N曲線の傾きが緩やかになって高サイクル領域では有利になった。疲労破壊は、すべてのタイプともスタッドが抜け落ちる形式であった。

4.5 スタッド付き鋼板の複合加力疲労

試験（シリーズ5）

試験結果の一例として、せん断応力振幅 τ （スタッドに作用するせん断力をスタッドの公称断面積で除した応力の最大値と最小値の算術差）を 3.9 kg/mm^2 とした結果を図 13 に示す。この縦軸のSはせん断加力側の鋼板の引張応力を取っている。この図よりA、Dタイプの結果には大差が見られないものの、BタイプはA、Dタイプに比べ、疲労強度を大きく向上させていることが明らかになった。

疲労破壊はすべてせん断力の作用する側のスタッド余盛りの溶接止端部に疲労クラックが発生し、繰り返し回数の増加に伴い板厚および板幅の両方向に進展して行く破断であった。

なお、本シリーズの試験は引張応力振幅（S）を4レベル、せん断応力振幅（ τ ）を3レベル変化させて行う予定である。ただし、せん断力が 3.9 kg/mm^2 より大きい場合、Dタイプにおいても大きな向上があり、Bタイプではさらに大きな向上があると思われる。試験日程の都合により、本文では $\tau = 3.9 \text{ kg/mm}^2$ の1レベルの結果しか提示できない。残りの結果については発表当日に報告したい。

5. 結 論

一連の試験結果から、フェルールに改

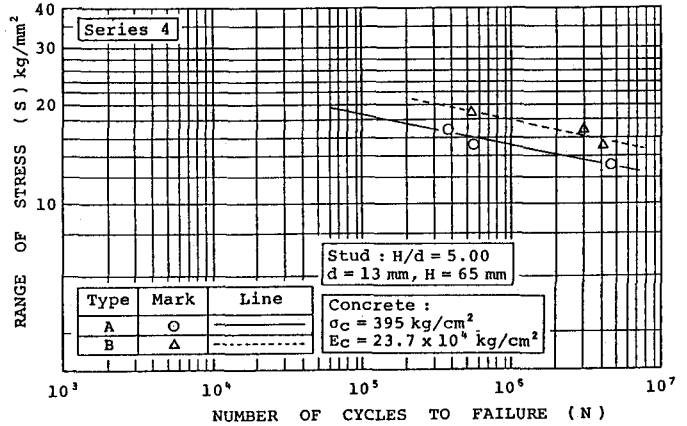


図 11 シリーズ4のS-N曲線（φ13mm スタッド）

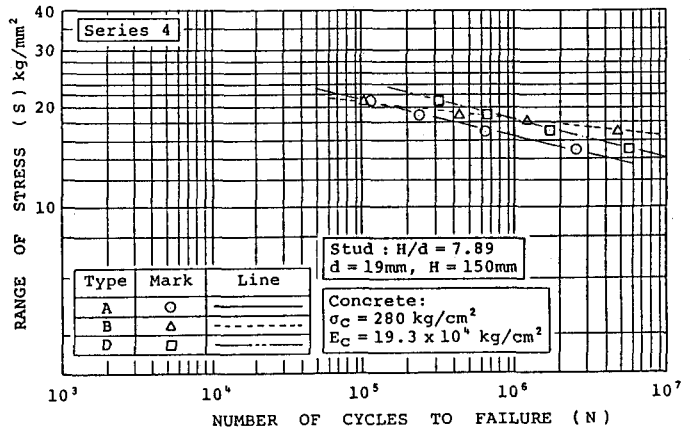


図 12 シリーズ4のS-N曲線（φ19mm スタッド）

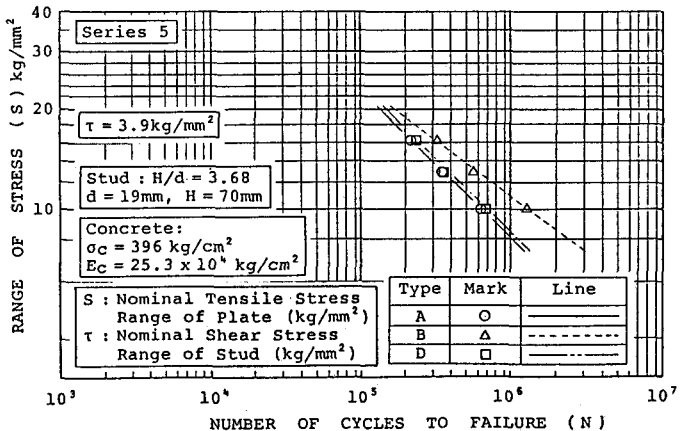


図 13 シリーズ5のS-N曲線

良を加えることにより疲労強度の向上が計られたと言える。本試験の結果を要約すると次のようである。

(1) スタッド付き鋼板の引張試験(シリーズ1)からは、改良型溶接法を用いても従来型と同じ疲労強度が確保された。ただし、鋼板の板幅が大きくなると改良型の溶接方法のものの疲労強度が向上するものと予想される。

(2) 裸スタッドのせん断試験(シリーズ2)からも、全タイプの疲労強度の違いはなく、ガスの上吹きなどの溶接条件の違いの悪影響はなかったものと言える。

(3) Fisher 型および標準型の供試体を用いたスタッドの押抜き試験(シリーズ3、4)からは、スタッドにせん断力のみが作用する場合でも、溶接法の改良によって疲労強度は向上した。特にS-N曲線の傾きが変わり、高サイクル領域において有利性が発生した。このことから、正曲げを受ける合成桁においても疲労強度の向上が計れるものと思われる。

(4) スタッド付き鋼板の複合加力試験(シリーズ5)からは、せん断応力振幅 $\tau=3.9 \text{ kg/mm}^2$ の場合のS-N曲線の結果しか得られていないが、改良型①(Bタイプ)が従来型(Aタイプ)に比べ疲労強度を大きく向上させていることが明らかになった。試験途中で推論の域を出ないが、せん断力が大きくなるとさらに改良の効果が現れるものと考えられる。その結果から連続合成桁の負曲げ領域および合成床版の鋼板にこれらの改良型溶接法を使用することによって、疲労強度向上が計れるものと思われる。

謝辞

本研究に際し、摂南大学工学部土木工学科構造工学研究室卒研究生(昭和58年度~昭和61年度)に協力を得たことを記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) Thürlimann, B.: Fatigue and Static Strength of Stud Shear Connectors, Journal of ACI, Vol.30, pp.1287-1301, 1959.
- 2) 阿部英彦: 鉄道用合成桁のずれ止めに関する実験的研究, 国鉄鉄研報告, No.961, 1975.
- 3) Selby, K.A., Stallmeyer, J.E. and Munse, N.H.: Fatigue Tests of Plates and Beams with Stud Shear Connectors, Civil Engineering Studies, Structural Research, Series No.270, Univ. of Illinois, 1963.
- 4) Roshardt, W.: Einfluss des Aufschweisens von Bolzen auf das Grundmaterial, Schweiz. Bauzeitung 84, Heft51, s.906-908, 1966.
- 5) 若林武忠, 沢野邦彦, 成岡昌夫: スタッドジベルが溶植された鋼板の引張疲労試験, 橋梁と基礎, Vol.5, No.4pp.27-29, 1971.
- 6) 尾形素臣: 合成桁の疲れ強さに関する研究, カラム, No.50, pp.64-67, 1974.
- 7) 梶川靖治, 前田幸雄: 組合せ荷重下におけるスタッド溶接フランジの疲労強度の評価, 土木学会論文集, No.362/I-4, pp.285-292, 1985.
- 8) JIS: 頭付きスタッド, JISB1198-1982, 日本規格協会, 1982.
- 9) Johnson, R.P. and Oehlers, D.J.: Analysis and Design for Longitudinal Shear in Composite T-Beams Proc. Instn Civ. Engrs, Part2, pp.989-1021, 1981.