

川崎製鉄 正員 石 渡 正 夫

同 上 正員 高 橋 千代丸

1. まえがき

合成桁にスタッドジベルが用いられるようになって約10年を経過している。溶接法としてサイクアーク方式のみが用いられていたが、最近になってフィリップス方式がφ22mmまでの太径スタッドにも使用できるようになった。他の溶接法は現在研究段階である。

スタッド溶接はスタッド側と母材側を両極とし、大電流(1,500~2,000A)を短時間(1秒前後)通電しスタッドを母材に溶着させる方法である。スタッド溶接はほとんど自動的に能率よく施工されるが、反面手溶接、自動溶接に比べ品質管理上多くの問題点が残されている。本研究はこれらの問題点を解明するため、スタッド材質、スタッド溶接による母材への影響、溶接施工条件について試験を行った。

2. スタッドジベル材質について

従来はSS41相当品が用いられて来たが、スタッドジベル先端は溶融、接合されるため、溶接棒と同様の機能があり、スタッド材質を規定することは品質管理上重要である。この試験に使用するスタッド材は市販されている棒鋼を入手し、化学分析を行って類別した(表-1)。溶接される母材は表-2に示す厚さ25mmのSM50Aを用いた。溶接条件はサイクアーク方式フィリップス方式ともに現在までの経験から得られている最適条件により施工した(表-3)

X線検査による内部欠陥

各材質5片の試験片を板厚10~12mm(母材厚5mm、スタッド5~7mm)に削成し、X線透過試験により0.25mmまでの内部欠陥を検出することを試みた。欠陥の計量はその鉛直投影面積の総和が表わせるように内部欠陥の大きさを類別した。表-4に各材質と溶接欠陥率を示す。内部欠陥は図-1に示すように、両方式の形状は異っている。サイクアーク方式では溶着金属とジベル、母材との境界部分に不溶着やブローホールが多くみられる。フィリップス方式では溶着金属中心部にブローホール、または中央部に収縮孔のような欠陥が見られる。

スタッドジベル材質とブローホールの関係はC含有量の高い材質ほど内部欠陥率が高い傾向を示している。キルド鋼でC含有量の大中小による欠陥率による分散分析の結果、サイクアーク方式では1%、フィリップス方式では5%で有意であった。リムド鋼とキルド鋼では差異は認められなかった。各材質の硬度試験も行ったが、スタッド側HAZ, bond部に若干の差異が認められた。

くり返し曲げ試験

スタッドの検査に通常用いられる折曲げ試験、AASHO

表-1 試シベルの記号と材質(標準公称22mm)

記号	材質	C	Si	Mn	P	S	備 考
A	NA PA	0.13	0.20	0.50	0.016	0.023	—
B	WB PD	0.29	0.26	0.55	0.016	0.011	34
C	WC PC	0.26	—	0.45	0.009	0.003	29
D	WD PD	0.19	—	0.46	0.016	0.005	28
E	WE PE	0.17	0.24	0.39	0.011	0.040	32
F	WF PF	0.11	0.12	0.36	0.023	0.045	30
H	WH PH	0.11	0.21	0.48	0.009	0.001	31
J	WJ PJ	0.20	0.19	0.76	0.001	0.001	36
K	WK PK	0.23	—	0.80	0.012	0.025	—
L	— PL	0.13	—	0.75	0.009	0.020	22
M	— MJ	0.14	—	0.72	0.009	0.020	26

注 1. 化学成分分析は京浜臨海橋工場の母材の平均値に基いて行われ、Kの平均値を示す。

2. 材質記号Kのものはφ25mmの棒鋼をφ22mmに線引した。

3. 現在使用している3つの材質の炭素含有量とCの分回使用に炭素量の上下限を考慮し、下記に分類した。

C < 0.12% 炭素含有量 低
0.12 ≤ C < 0.25 " 中
C ≥ 0.25 " 高

表-2 試シベルの化学成分と機械的性質

記号	C	Si	Mn	P	S	CAI	σ _b	σ _t	δ ₅	備考
25	0.14	0.21	0.48	0.009	0.001	—	460	380	56	良

$\sigma_b = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/100 + Cr/5 + Ti/10$
 $\sigma_t = 0.8 \sigma_b$
 $\delta_5 = 100 - \sigma_b/10$

表-3 溶接母材使用条件

使用条件	サイクアーク方式	フィリップス方式
溶接機	FRANK-200 (26型)	YD-1400L 1台
電圧	NC-21	YS-221C
電流	NS-101	YS-221G
付属品	FEIL-L TA-7型	スロークラップ(NZFI)
溶接電流	DC 1900 ± 100A	DC 1500 ± 100A
溶接時間	46 ~ 50 / 60 ~	58 ~ 59 / 60 ~

Qualification Test中のくり返し曲げ試験⁵⁾を参考にして板厚25mmのSM50Aの鋼板の両側に溶接されたスタッドジベルを15°交互に曲げて破断するまでくり返し曲げを行い、破断にいたるまでの回数、破断面の位置を観察する。

試験結果を表-5に示す。降伏点、引張強度の高い材ほどくり返し曲げ回数は低下する傾向にあるが、C, Mn, P, Sの含有量とくり返し曲げ回数との間に明確な関係は認められなかった。

破断面の位置についてはスタッド幹部(M)で破断するもの、bond部またはDepo部に一部分破断面が生ずる場合とがある。0.5Mは50%のM部と50%の溶着部破断を示している。破壊の発生はすべて余盛部とスタッド境界部に起り、この亀裂が幹部(M)を進行するか、溶着部を伝わって破断する。この破断位置はスタッド材質、溶接部の内部欠陥とに関係があり、この方法がスタッド材質判定に適しているかどうかはなお検討を要する。

表-4 スタッドジベル材質と溶接欠陥率の関係

スタッド材質	サイクーク方式 (鋼材N)										フィリップス方式 (鋼材P)									
	1	2	3	4	5	平均	バラ	1	2	3	4	5	平均	バラ	1	2	3	4	5	平均
A	0.5	0	6.6	6.0	0	2.6	6.6	0.9	0.9	2.6	6.6	2.9	2.8	5.7	0	0	0	0	0	0
B	—	15.7	13.6	18.4	6.9	13.9	12.5	3.9	12.9	4.7	1.6	7.4	6.1	11.3	0	0	0	0	0	0
C	3.7	2.6	7.1	4.5	5.5	4.7	4.5	0	2.9	2.4	0.9	3.2	1.5	3.2	0	0	0	0	0	0
D	6.6	5.5	4.7	1.8	2.6	2.3	4.8	1.6	0	6.6	0	3.9	2.4	3.9	0	0	0	0	0	0
E	2.9	2.4	1.1	2.4	2.6	2.3	1.8	1.6	1.6	0	0.3	4.7	1.6	4.7	0	0	0	0	0	0
F	0.9	0.5	3.6	1.4	0.8	1.4	2.9	0	0.9	1.6	3.9	0.9	1.5	3.9	0	0	0	0	0	0
H	0.3	2.4	1.9	1.8	1.9	1.7	2.1	0.9	0	0.9	0	0.9	0.5	0.9	0	0	0	0	0	0
J	1.6	1.6	3.4	2.2	2.2	2.2	1.8	3.9	0.5	0	0.3	0.9	1.3	3.9	0	0	0	0	0	0
K	5.5	1.8	1.6	5.8	11.0	5.1	9.4	3.2	3.2	0	6.6	2.4	3.1	6.6	0	0	0	0	0	0
L	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	6.6	0	4.7	1.6	2.6
M	0.3	2.9	1.4	1.6	0	1.2	2.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

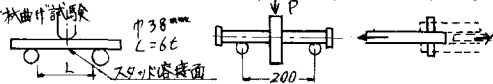
欠陥率 = (欠陥数 / 試験片数) × 100
 欠陥数 = (欠陥点 / 試験片数) × 100
 欠陥点 = 原数 × 係数
 係数 0.1 0.3 0.6 1.2 2.5 4.9 10.0

3. スタッド溶接における母材への影響

スタッド溶接が各種鋼材におよぼす影響についてはサイクーク方式²⁾についての報告がなされているが、本研究においてはサイクーク方式、フィリップス両方式について更に詳細な試験を行った。供試材の化学成分を表-6、機械的性質を表-7、および試験項目を表-8に示す。

母材曲げ試験 素材の母材曲げ試験はすべて良であったが、スタッド溶接した試験片は曲げ角度60°で半数以上のものが20mm以上のワレが発生し、曲げ角度180°まで達したものはわずかであった(図-2)。鋼種別にはSS41, SMA50A, SM58など炭素当量の低い材では曲げ角度が大きく、SM58では予熱の効果は明らかでない。WES溶接構造用高張力鋼板規格ビード曲げ試験において板厚25mmでSM50YA、55°SM58級で45°を規定しているが、スタッド溶接ではこれ以上の値を示しているので実用的に問題ないと考えられる。

表-8 試験項目



くり返し曲げ試験結果

表-5 上段 サイクーク方式 下段 フィリップス方式

鋼種	破断回数				破断位置の割合			
	最大	最小	平均	標準偏差	M	B	D	E
A	2	5	3.8	1.0	1.0	0.8	—	—
B	2	5	3.3	1.0	0.88	0.25	—	—
C	2	4	2.9	0.7	0.7	0.7	—	—
D	3	7	4.2	1.0	1.0	0.75	—	—
E	3	8	5.3	0.9	0.9	0.7	—	—
F	3	6	4.5	1.0	0.9	0.4	—	—
G	4	7	5.3	0.9	0.9	0.9	—	—
H	2	4	3.1	0.89	0.78	0.22	—	—
I	2	4	3.5	0.8	0.8	0.8	—	—
J	2	3	2.8	1.0	0.75	0	—	—
K	2	5	2.7	0.1	0.1	0.1	—	—
L	3	5	3.4	1.0	0.9	0.6	—	—
M	2	5	4.1	1.0	0.9	0.7	—	—
N	3	4	3.3	1.0	0.78	0.44	—	—
O	3	4	3.2	1.0	0.9	1.0	—	—
P	1	4	2.2	1.0	0.9	0.3	—	—
Q	1	2	1.9	0.9	0.9	0.9	—	—
R	2	5	3.6	0.9	0.8	0.2	—	—
S	4	6	5.2	1.0	1.0	1.0	—	—

図-1 溶接内部欠陥

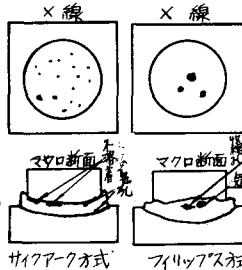


表-6 供試材の化学成分

鋼種	分析	化学成分										We%	
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe	Al	Fe	Al
SS41	分析	0.23	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.235
SMA50A	分析	0.25	0.0024	0.28	0.0026	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SM58	分析	0.24	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SMA50A	分析	0.23	0.0030	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SM58	分析	0.16	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SMA50A	分析	0.17	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SM58	分析	0.13	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SMA50A	分析	0.15	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SM58	分析	0.16	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SMA50A	分析	0.20	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SM58	分析	0.18	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SMA50A	分析	0.21	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SM58	分析	0.12	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SMA50A	分析	0.15	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SM58	分析	0.12	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231
SMA50A	分析	0.13	0.24	0.24	0.0023	—	—	—	—	—	—	0.001	0.231

表-7 供試材の機械的性質

鋼種	寸法 (mm)	引張強度 (TIS)				曲げ試験 (TIS)			
		20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C
SS41	12 x 1000 x 1600	26	62	38	—	—	—	—	—
SMA50A	12 x 1000 x 1300	27	65	38	—	—	—	—	—
SM58	12 x 2000 x 1000	36	50	24	—	—	—	—	—
SMA50A	25 x 1000 x 1000	32	55	28	—	—	—	—	—
SM58	38 x 2000 x 1000	40	60	25	—	—	—	—	—
SM58	25 x 2000 x 1000	38	58	27	—	—	—	—	—
SM58	25 x 2000 x 2000	34	63	31	—	—	—	—	—

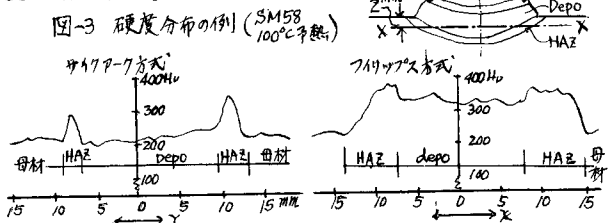
試験項目	SS41		SMA50A		SM58		SM58	
	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C	20°C
曲げ試験	0	0	0	0	0	0	0	0
20°C曲げ試験	0	0	0	0	0	0	0	0
50°C曲げ試験	0	0	0	0	0	0	0	0
70°C曲げ試験	0	0	0	0	0	0	0	0
70°C曲げ試験	0	0	0	0	0	0	0	0

スタッド曲げ試験 曲げ角度180°まで可能であった。ワレの発生した試験片はいずれも余盛部とジベル境界部よりワレが発生した。

スタッドせん断試験 スタッドジベルのせん断破壊はスタッドHAZ、bond部、Depo部に起こり、偏心量の大きな試験片、アンダーカットのある試験片を除くと、大部分が35~40 Kg/mm²を示している。

両方式とも破断面にはかなりの内部欠陥が見られる。せん断強度とブローホール平方和との関係を図-4に示す。両方式ともブローホール平方和が大となると、せん断強度が低下する傾向が見られるが、スタッドジベルの設計値8 Kg/mm²に対しては4以上の安全率を有している。

硬さ試験 硬度試験結果を図-2、硬さ分布の一例を図-3に示す。両方式の硬さ分布は特長があり、サイクアーク方式のものはDepo部の硬さは低いが、フリップス方式ではDepo部の硬さが高く、台形分布をしている。母材熱影響部の最高硬さとCeqとの関係を図-5に示す。熱影響部の最高硬さは普通の手溶接による値に対しておよそHv(10)60高い傾向にある。母材熱影響部の最高硬さと母材板厚の関係を図-6に示す。板厚が大となると冷却速度が大きくなり、急熱急冷により硬度が増加する。



疲労試験

板厚2.5 mmのSM50Aに両方式で溶接したスタッドジベル削除ライン仕上した試験片とジベル付きの試験片での疲労試験結果を図-7に示す。引張試験と疲労試験結果の関係を表-9に示す。母材の疲労限度は33.5 Kg/mm²に対し、スタッドジベル溶接したものはジベル削除後

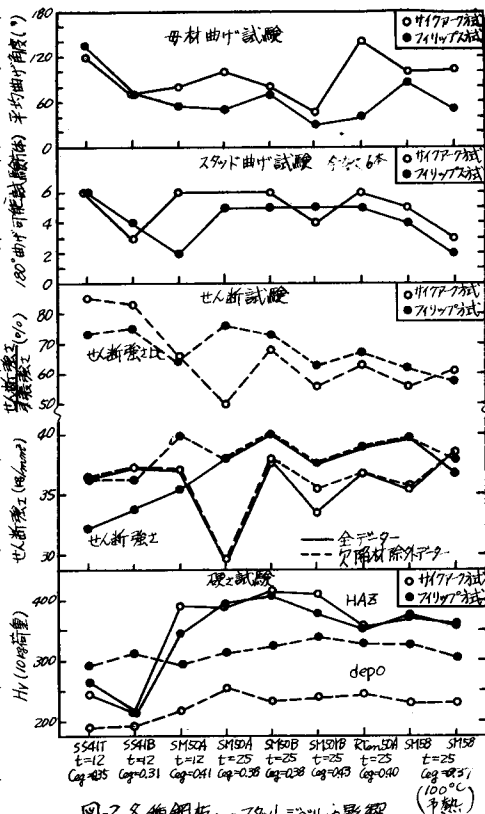


図-2 各種鋼板へのスタッドジベルの影響

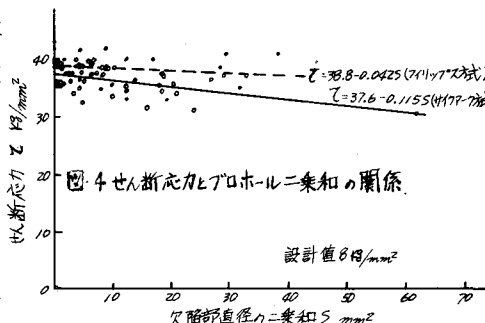


図-4 せん断応力とブローホール乗和の関係

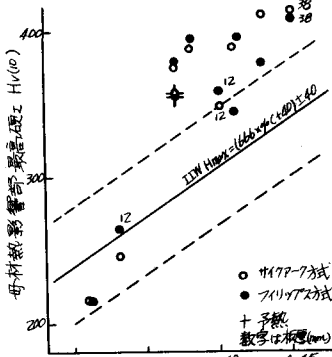


図-5 発生量と最高硬さの関係

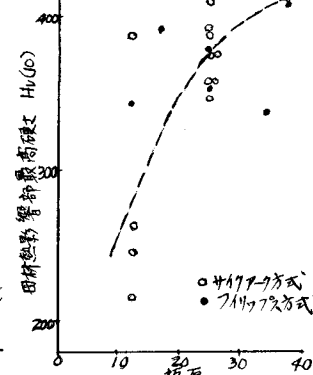


図-6 板厚と最高硬さの関係

グラクンダー仕上げしたもの17~19Kg/mm²、ジベル付の試験片は12~14Kg/mm²でその引張強さに対する耐久比は24~28%であった。またフィリップス方式のもので片振り引張疲労試験で5×10⁶で破断しなかったジベル付き試験片について、片振り圧縮疲労試験を行ったが応力20, 25Kg/mm²で各5×10⁶で破断せず、更に30Kg/mm²の応力で1.2×10⁷で挫屈した。

4. 溶接施工条件について

サイクアーク方式については現場施工条件にスタッド外観、機械的性質についての研究³⁾、電流測定による施工管理法についての研究がある。ここでは両方式について溶接条件と内部欠陥に注目して試験を行った。

電流電圧についてはアーク中熔融金属のふれ合いによる短絡、アークブローによる変動などがある。アーク中の電流、電圧の測定を行ったが、通常の場合5%以内アークブローなどの場合30%程度の電流、電圧の変動が記録された。しかし変動と欠陥との関係は明確に認められなかった。施工中の電流変動の標準偏差は2~3%である。電流が高い場合はアークタイムを短く、低い場合は長くしているが、アークタイムが適正範囲を超えると、熔融金属がたれ下がり短絡が起る。縁端距離、アースよりの距離はアークブローに関係する。アーク距離(サイクアーク方式)、押込み量、附属品(フェール、カートリッジ)の吸湿も品質と関係があるが、欠陥との関係を定量的に把握するためにはなお多くの試験を行なう必要がある。

5. まとめ

スタッド溶接において、各種の試験を行ってスタッド材質についてはC含有量をなるべく低くおさえることが望ましいこと、SM58までの鋼板に対して熱影響部の硬度上昇があるが実用上支障ないことがわかった。内部欠陥は静的せん断試験では問題はないが、疲労強度の低下について確認する必要がある。溶接条件と内部欠陥との関係も多くの試験を行って究明すると共に、溶接機の機構についても研究の必要がある。本研究は昭和44年度建設技術研究補助金の交付を受けて実施したものであり、都立大堀川助教、建設省道路局担当官その他指導者の方々および御協力いただいた大阪変圧器機、松下電器産業機、釘貫商会、岡部機の関係者に深謝の意を表する。

参考文献 1) AASHO, Standard Spec for Highway Bridges, PP260~263
 2) 千葉、田井戸：スタッドジベル溶値による母材への熱影響、土木技術22巻、2号
 3) 奥井、中川他：スタッドジベルの溶接施工に関する実験的研究、溶接技術1967年4,6月
 4) 西野、中村、崎、明石：スタッド溶接の現場施工における諸問題、第20回年次講演会

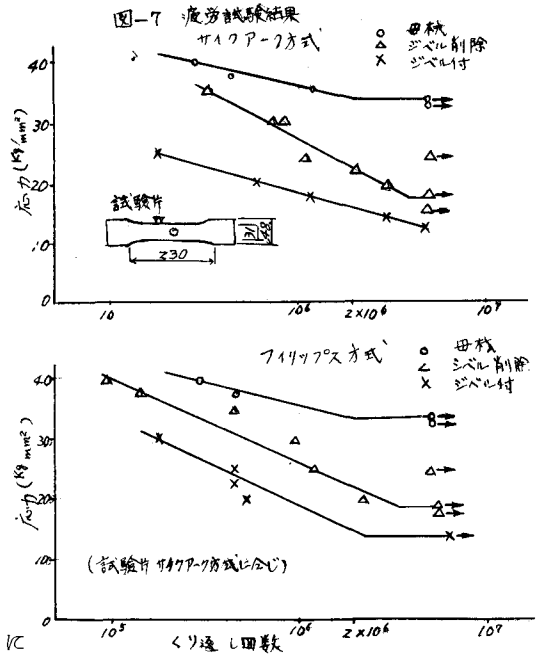


表9 引張試験結果と疲れ試験結果の関係

試験片	サイクアーク方式			フィリップス方式		
	引張強さ kg/mm ²	耐力 kg/mm ²	耐力比 %	引張強さ kg/mm ²	耐力 kg/mm ²	耐力比 %
母材	32	80	26	33.5	28	84
ジベル付	33	50	15	27	33.5	124
ジベル削除	26	17	65	26	14	54