

高力ボルト摩擦接合継手の低温下における力学的性状

矢 部 喜 堂

石 川 登

藤 盛 紀 明

§ 1. はじめに

最近、環境問題に対する関心が高まりつつあるが、建築構造物においても高温、低温等の特殊環境の問題が少なからず存在する。このうち、低温を対象とした建築構造物としては、寒冷地構造物あるいは冷凍倉庫等が挙げられる。従来より低温にかかわる鋼構造物については、脆性破壊の問題を中心に船舶、圧力容器等の分野に多くの研究が見られる。しかし、外力、構造形成等の相違から自ずと設計理念も異なるため、これらの既往の研究成果をそのまま建築構造物へ適用することには無理がある。したがって、建築構造物としての個有の問題について別の立場で研究が必要と考えられる。

本報告は、鋼構造の一継手である高力ボルト摩擦接合継手に注目し、この継手の低温下における力学的諸性状について実験的に調査したものである。

§ 2. 実験計画

2.1 調査項目

本実験では、室温において接合された高力ボルト摩擦接合継手が低温に冷却された場合をとり上げ、主として以下の項目について低温域での温度依存性を調べた。

1) 継手のすべり耐力

2) 継手の降伏耐力および最大耐力

3) 継手の変形能

4) 継手の破断性状

なお、継手実験に先立ち、供試材の機械的性質の温度依存性を調べた。

2.2 試験要因

高力ボルト摩擦接合の継手機構に及ぼす要因は非常に多く、これらの要因が複合して作用するため、その継手機構を複雑にしている。本実験では、1列ボルト2面摩擦接合継手において下記のものを主たる要因として取上げた。

1) 板幅 (3水準: 60mm, 90mm, 120mm)

2) 片側ボルト本数 (2水準: 2本, 4本)

3) 温度 (4水準: 室温, -50℃, -100℃, -150℃)

これらの試験要因の組合せにより表-1に示す試験体(計32体)を計画した。ここでボルト本数が2本、板幅が60mm, 90mm, 120mmの試験体をそれぞれⅠ, Ⅱ, Ⅲタイプと呼ぶことにする。ボルト軸力は、ボルト本数が2本の場合(Ⅰ, Ⅱ, Ⅲタイプ)接合面の主すべりが主材の全断面の降伏に先行し、ボルト本数が4本の場合(Ⅳタイプ)主材の全断面の降伏が主すべりに先行して生ずる

タイプ	板 幅 (mm)	ボルト 本 数	ボルト 軸 力 (t)	試 験 温 度			
				室 温	-50℃	-100℃	-150℃
Ⅰタイプ	60	2	8	Ⅰ-R T-1	Ⅰ-50-1	Ⅰ-100-1	Ⅰ-150-1
				Ⅰ-R T-2	Ⅰ-50-2	Ⅰ-100-2	Ⅰ-150-2
Ⅱタイプ	90	2	14	Ⅱ-R T-1	Ⅱ-50-1	Ⅱ-100-1	Ⅱ-150-1
				Ⅱ-R T-2	Ⅱ-50-2	Ⅱ-100-2	Ⅱ-150-2
Ⅲタイプ	120	2	21	Ⅲ-R T-1	Ⅲ-50-1	Ⅲ-100-1	Ⅲ-150-1
				Ⅲ-R T-2	Ⅲ-50-2	Ⅲ-100-2	Ⅲ-150-2
Ⅳタイプ	90	4	14	Ⅳ-R T-1	Ⅳ-50-1	Ⅳ-100-1	Ⅳ-150-1
				Ⅳ-R T-2	Ⅳ-50-2	Ⅳ-100-2	Ⅳ-150-2

表-1 試験体種別および試験体名

ように、予め室温にてすべり係数値を試験によって確認してから決定したものである。これは、接合面の主すべりと主材の全断面の降伏との前後関係によって、すべり係数の温度依存性が相違するかを見ることを意図したものである。

§ 3. 試験体

3.1 供試材

継手の主材、添接材はともにSS41を用い、その板厚はそれぞれ16mm、9mmとした。また、高力ボルトはF11T・M20を用いた。ただし、高力ボルトのセットの2枚の座金のうちボルト頭側の座金は、ボルト軸部にひずみゲージを貼布する関係上M22を用いた。今回の実験では、継手の最終破断が主板で生ずるようにボルト材質を選択した。

これらの供試材の化学成分および機械的性質は、表一2および表一3に示すとおりである。

3.2 試験体の形状寸法

各試験体の形状寸法を図一1に示す。継手のボルト孔径はボルト軸部にひずみゲージを貼布する関係上、ボルト軸径よりも3.5mm大きな23.5mmとした。孔ピッチは全試験体とも70mmとした。試験体端部には、試験機にセットするためのボルト孔を設けた。

3.3 試験体の作製

継手接合面の表面状態を均一化するために、主材および添接材の接合面にサンドブラスト処理を施した。その表面あらさは、10点平均あらさで、ほぼ30μ程度であった。継手の接合は表面に錆の発生しないうちにに行った。

ボルトの締付けに当ってはボルト軸部に貼布した1対のひずみゲージによって所定のボルト軸力を導入した。ボルト軸力とひずみとの関係は予めボルト軸力計を用いて較正しておいた。

締付け後のリラクゼーションによるボルト軸力の変動は締付け後100時間で約3%以内であった。

§ 4. 実験方法

加力中の主板と添接材との間の相対すべり量を測定するために、継手片側の中間位置の試験体側面に6mmφボルトをスタッド溶接し、これに治具を取付けてクリップ

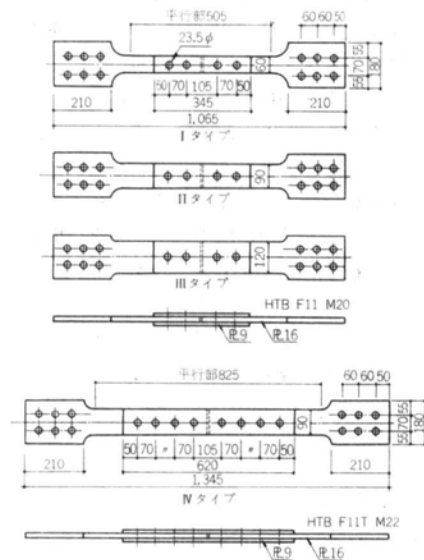
鋼 種	C	Si	Mn	P	S
SS41 片一16	0.11	0.22	0.84	0.023	0.013
SS41 片一9	0.12	0.21	0.73	0.012	0.012
F11T・M20	0.28	0.25	1.49	0.009	0.013

表一2 供試材の化学成分 (wt%)

鋼 種	σ_y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	EI (%)	A. R. (%)	vE_0 (kg・m/cm ²)
SS41 片一16	29.3	48.0	29.8	69.1	14.4
SS41 片一9	33.3	46.3	33.1	65.2	17.1
F11T・M20	105.3	114.1	12.0	65.0	8.5

ここで、 vE_0 : 0℃における2mVノッチシャルピー衝撃値

表一3 供試材の機械的性質



図一1 試験体の形状寸法

ゲージを装着した。このクリップゲージをX-Yレコーダーに接続して、荷重とすべり量を自記録させた。このクリップゲージは、予め各試験温度において較正を行なった。また、試験体の所要個所に低温用ひずみゲージを貼付して、载荷に伴う各部のひずみを測定した。

試験体の冷却に当っては図一2に示すように、試験体に装着した可変低温槽の上部ノズルより液体窒素を噴霧し、ファンで攪拌してほぼ均一な温度分布をした低温雰囲気中で冷却を行なった。試験体および試験槽内の数カ所に熱電対を取付け、温度分布を測定した。試験体表面の主な熱電対取付位置は同図に示すとおりである。温度制御は、試験体表面に取付けた中央位置の熱電対を介して自動温度制御装置により行なった。この結果、所定の

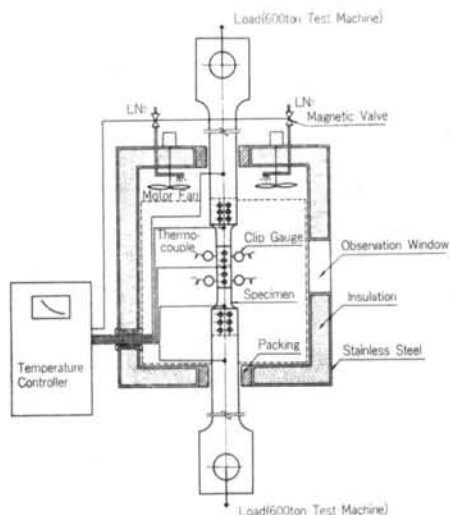


図-2 試験装置の概要

試験温度は試験体の全長にわたり $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 程度に保持することができた。試験体の冷却速度は最大 $-100^{\circ}\text{C}/\text{時}$ とした。

载荷に当っては、600ton 構造物試験機にピン接合された加力治具に試験体端部をボルト接合して単調引張载荷を行なった。

なお、供試材の機械的性質の温度依存性を調べるに当っての小型引張試験においては、継手の場合と同様に液体窒素の噴霧による低温雰囲気中で行なった。

§. 5 材料試験結果

5.1 供試材の機械的性質の温度依存性

図-3～5に各供試材の小型引張試験結果を示す。これによると降伏点および引張強さは、いずれも低温にな

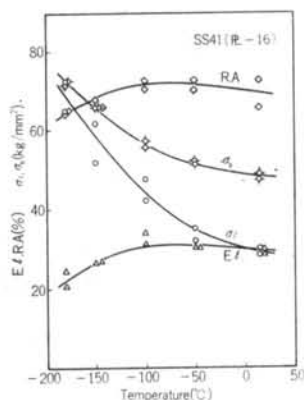


図-3 小型引張試験結果
(SS41, R-16)

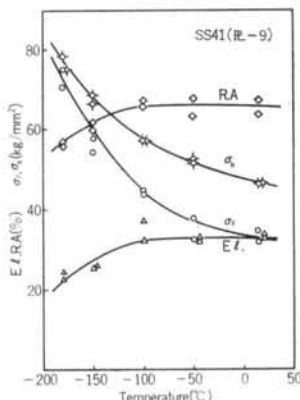


図-4 小型引張試験結果
(SS41, R-9)

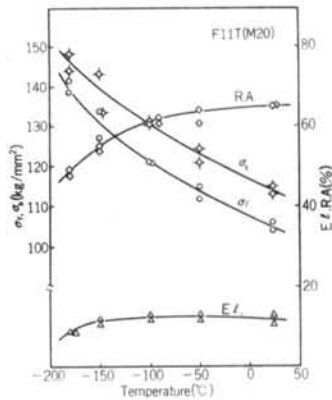


図-5 小型引張試験結果
(F11T・M20)

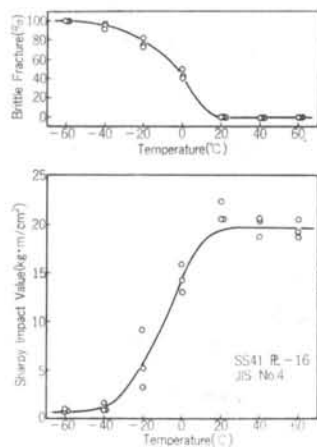


図-6 シャルピー衝撃試験結果
(SS41, R-16)

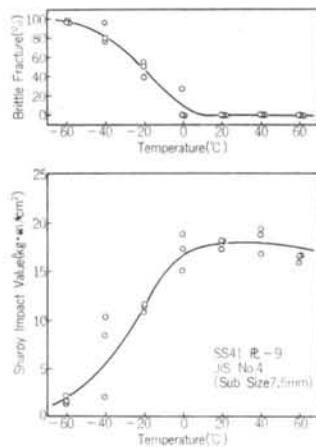


図-7 シャルピー衝撃試験結果
(SS41, R-9)

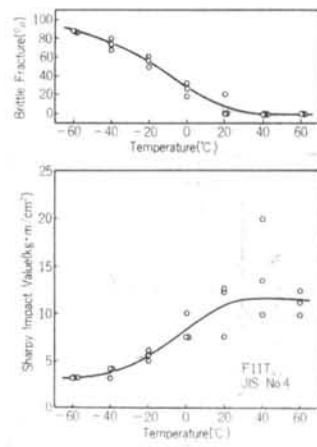


図-8 シャルピー衝撃試験結果
(F11T・M20)

るにつれて上昇する。降伏点の上昇率は引張強さのそれに比べて大きく、 -200°C 近傍で降伏点と引張強さが等しくなる。一方、伸びと絞りも温度低下につれて減少するが、急激な変化は見られず、 -180°C においても延性破断を呈している。

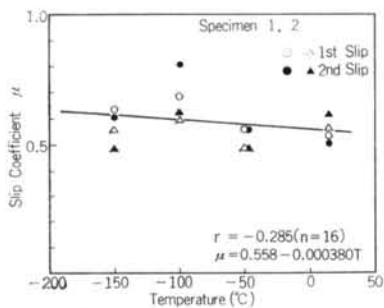
図—6～8に各供試材の2 m Vノッチシャルピー衝撃試験結果を示す。この試験結果における各種遷移温度を求めると表—4のようになる。

5.2 小型引張試験における引張载荷に伴う昇温効果について

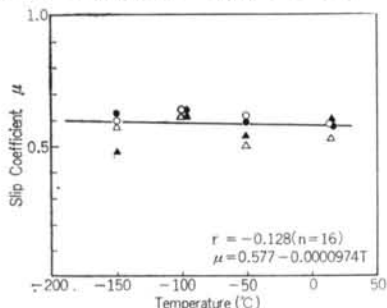
低温試験における試験片の冷却方法は、液体冷媒中に浸漬冷却する浸漬法と低温ガス雰囲気中に放置する雰囲気法が考えられるが、任意な温度条件を得るには雰囲気法が便利である。しかし、引張载荷に伴い内部摩擦、塑性流動等によって生ずる発熱に対しては、雰囲気法は冷却効果が小さいために試験体の昇温を抑えることが困難である。そこで、引張载荷に伴う昇温に関して簡易的な測定を行なった。その結果を図—9に示す。すなわち、

- 1) 降伏点までは若干降温し、塑性流動とともに発熱し昇温する。
- 2) 昇温は室温と低温ではほぼ同様な傾向を示す。

降伏点、弾性係数の降伏前の特性値に関しては、浸漬法、雰囲気法ともほぼ同様であるが、引張強さ、伸び、絞り等の降伏後の特性値については、雰囲気法で得られ



図—10 すべり係数と温度との関係 (Iタイプ)



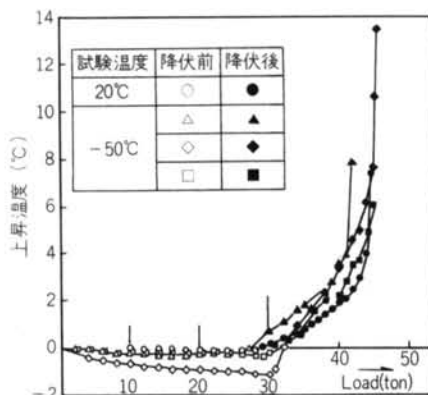
図—11 すべり係数と温度との関係 (IIタイプ)

鋼 種	エネルギー遷移温度	30ft・1b*遷移温度	15ft・1b**遷移温度	破断面遷移温度
SS 41 P16	-9°C	-25°C	-34°C	-3°C
SS 41 P9	-27°C	-46°C	-59°C	-20°C
F 11T・M20	-16°C	-34°C	—	-15°C

*30ft・1b=4.15kg・m

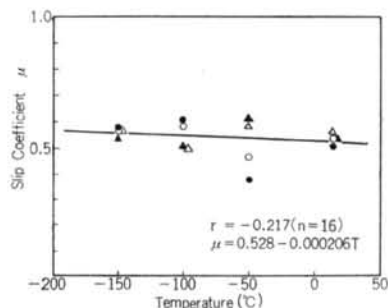
**15ft・1b=2.07kg・m

表—4 シャルピー衝撃試験における各種遷移温度

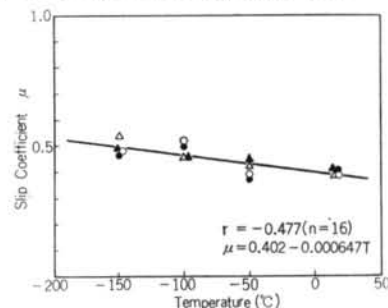


図—9 荷重と上昇温度との関係

る値は、浸漬法に比較していく分高温測の値を測定したことになる。すなわち、雰囲気法では浸漬法に比べて、低温脆性による低応力破壊を起さない温度領域では引張強さは低くなり、伸び、絞り値は高くなる。昇温の程度



図—12 すべり係数と温度との関係 (IIIタイプ)



図—13 すべり係数と温度との関係 (IVタイプ)

タイプ別	試験温度	試験体記号	第1主すべり		第2主すべり		平均値	
			すべり荷重 (ton)	すべり係数	すべり荷重 (ton)	すべり係数	すべり荷重 (ton)	すべり係数
Ⅰタイプ	RT (15℃)	Ⅰ—RT—1	17.3	0.54	16.3	0.51	17.9	0.56
		Ⅰ—RT—2	18.0	0.56	19.95	0.62		
	-50℃	Ⅰ—50—1	18.0	0.56	18.0	0.56	16.9	0.53
		Ⅰ—50—2	15.8	0.49	15.8	0.49		
	-100℃	Ⅰ—100—1	22.0	0.69	26.0	0.81	21.8	0.68
		Ⅰ—100—2	19.35	0.60	20.0	0.63		
	-150℃	Ⅰ—150—1	20.65	0.64	19.65	0.61	18.5	0.58
		Ⅰ—150—2	17.95	0.56	15.65	0.49		
Ⅱタイプ	RT	Ⅱ—RT—1	33.2	0.59	32.6	0.58	32.3	0.58
		Ⅱ—RT—2	29.7	0.53	33.7	0.60		
	-50℃	Ⅱ—50—1	34.9	0.62	35.5	0.60	32.1	0.57
		Ⅱ—50—2	27.8	0.50	30.3	0.54		
	-100℃	Ⅱ—100—1	36.0	0.64	35.7	0.64	34.9	0.63
		Ⅱ—100—2	34.0	0.61	34.0	0.61		
	-150℃	Ⅱ—150—1	33.6	0.60	35.3	0.63	32.1	0.57
		Ⅱ—150—2	32.7	0.58	26.7	0.48		
Ⅲタイプ	RT	Ⅲ—RT—1	45.2	0.54	43.2	0.51	45.3	0.54
		Ⅲ—RT—2	47.4	0.56	45.2	0.54		
	-50℃	Ⅲ—50—1	39.3	0.47	32.0	0.38	43.2	0.52
		Ⅲ—50—2	49.5	0.59	52.0	0.62		
	-100℃	Ⅲ—100—1	49.8	0.59	51.4	0.61	46.7	0.55
		Ⅲ—100—2	42.3	0.50	43.1	0.51		
	-150℃	Ⅲ—150—1	47.6	0.57	49.0	0.58	47.4	0.57
		Ⅲ—150—2	48.0	0.57	45.1	0.54		
Ⅳタイプ	RT	Ⅳ—RT—1	43.9	0.39	46.0	0.41	44.9	0.40
		Ⅳ—RT—2	44.0	0.39	45.5	0.41		
	-50℃	Ⅳ—50—1	44.0	0.39	42.0	0.38	46.2	0.41
		Ⅳ—50—2	47.8	0.43	50.9	0.45		
	-100℃	Ⅳ—100—1	58.3	0.52	55.8	0.50	54.5	0.49
		Ⅳ—100—2	52.0	0.46	51.8	0.46		
	-150℃	Ⅳ—150—1	53.5	0.48	52.1	0.47	55.1	0.50
		Ⅳ—150—2	60.0	0.54	54.9	0.49		

表—5 すべり耐力およびすべり係数

は試験温度に関係なく同程度と推察されるが、強度、伸び、絞りとも低温になるにつれて温度依存性が高いため、機械的性質に及ぼす昇温の影響は低温になるにつれて増す。

§ 6. 継手試験結果

6.1 すべり耐力およびすべり性状

本実験における継手のすべり耐力およびすべり係数を表—5にまとめて示す。各試験体はすべり部分が2カ所あるため、1試験体には2つの主すべりが見られる。片側に見られる最初の主すべりを第1主すべり、もう一方の側に生ずる主すべりを第2主すべりと呼ぶこととし、

同表に示した。ここで、すべり係数は次式によって定義する。

$$\mu = \frac{P_s}{n \cdot m \cdot N}$$

ここに、 P_s ：全接合面すべり荷重

n ：締付ボルト本数

m ：せん断面の数

N ：初期導入ボルト軸力

すべり時にはボルト軸力が変動するため、このように定義されるすべり係数は、いわばみかけのすべり係数である。

試験体の各タイプごとのすべり係数と温度との関係を図-10~13に示す。これらによれば、各タイプともすべり係数は温度との相関係数は小さいながらも、全体的に温度低下に伴い若干の増加傾向を有する。この中でも、主材全断面の降伏が主すべりに先行して生ずるⅣタイプでは、逆に主すべりが主材全断面の降伏に先行するⅠ、Ⅱ、Ⅲタイプに比べて比較的すべり係数と温度との相関性が高く、温度低下に伴うすべり係数の増加傾向が大きい値を示している。

ここで、Ⅳタイプのすべり係数が他の3タイプに比較

して低い値を示しているのは、継手の材軸方向に応力分布を有し、継手端部では主材の降伏に伴う断面収縮によりボルト軸力が減少するために、ボルト軸力の有効性が低下するためである¹⁾。

また、温度低下に伴ってすべり係数が若干増加する要因としては、接合材とボルトの熱膨脹係数の相違によるボルト軸力の変動、接合材の温度低下に伴う材質変化等が考えられる。前者の場合、現時点においてこれらの材料の低温下での熱膨脹係数が未知であるため、その効果については不明である。一方、金属の摩擦機構は2つの接触面の凹凸がたがいにかみ合った状態での掘りおこし抵抗(凹凸説)および2面の凹凸が主としてたがいに凸部で押しつけられた状態で生ずる凝着部分のせん断抵抗(凝着説)で説明される^{2),3)}。すなわち、摩擦の基本現象は凝着によって説明され、凝着による摩擦に凹凸が影響すると考えられている。現時点においては、低温下での凝着部のせん断抵抗についての知見が見当たらないため、温度低下に伴うすべり係数の増加傾向についての十分な結論を得るに至らない。しかし、本実験における継手の場合、仮に主として摩擦機構が凹凸説に支配的であると考えれば、温度低下に伴い材料強度が上昇することから、

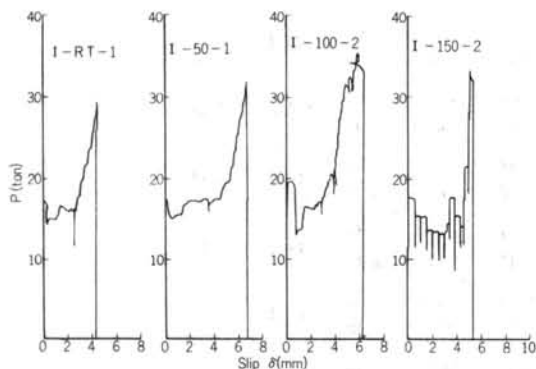


図-14 荷重とすべり量との関係(Ⅰタイプ)

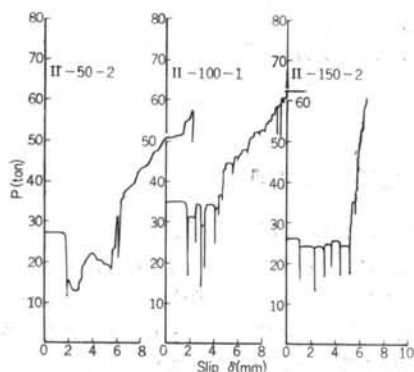


図-15 荷重とすべり量との関係(Ⅱタイプ)

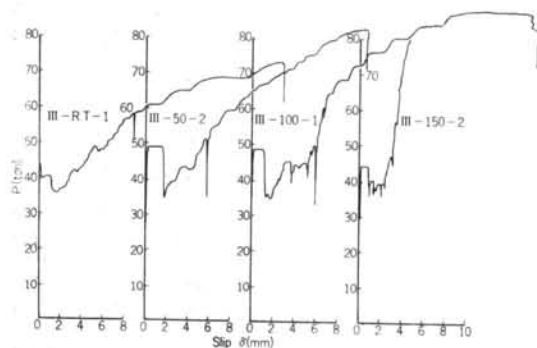


図-16 荷重とすべり量との関係(Ⅲタイプ)

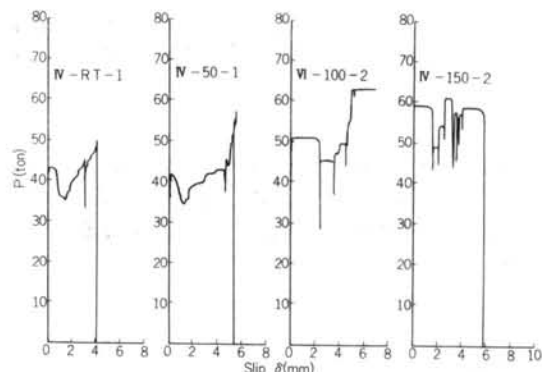


図-17 荷重とすべり量との関係(Ⅳタイプ)

掘りおこし抵抗も増加すると考えられ、すべり耐力も増加することが推論される。

次に、図—14~17に荷重とすべり量との関係を示す。いずれのタイプにおいても、顕著な荷重低下を伴うすべりは、低温において衝撃的に生じ、その回数が多く小さく生ずるようになる。この現象は摩擦現象の1つとして知られている「付着—すべり」(Stick-Slip)現象に類似している。この「付着—すべり」現象は静摩擦が動摩擦よりも高く、すべり面の一方がある程度の弾性自由度をもっている場合におこる²⁾。この現象は脆性材料においてしばしば見受けられるが、その発生限界等についての理論的証明は得られていない。本実験の場合、材質的にかなり脆性化していると思われる-150℃においてこの現象が顕著であることから、本実験での現象は、材料の低温脆性と何らかの関連があるものと考えられる。

6.2 降伏耐力および最大耐力

一般に、継手の添接材に耐力的な余裕のある場合には、主材の最初の降伏はボルト孔を控除した純断面で生じ、主材全断面の降伏は材料の降伏比と純断面のボルト孔控除率との関係で決まる。さらに継手の最大耐力は純断面で決まる。図—6には本実験における継手の降伏耐力および最大耐力についてまとめた。ここで、継手の主材の純断面および全断面における降伏耐力としては、ボルト孔を控除した最小断面部位、および添接材から50mm離れた主材の全断面部位に貼付した低温用ひずみゲージによるひずみ測定値の急変時の荷重を採用した。

図—18~21に試験体の各タイプごとの純断面ならびに全断面の降伏耐力、および最大耐力と温度との関係を示す。図中の曲線は、前述の材料試験結果を用い、断面内

の応力分布状態を一樣と仮定して次式により求めた計算結果である。

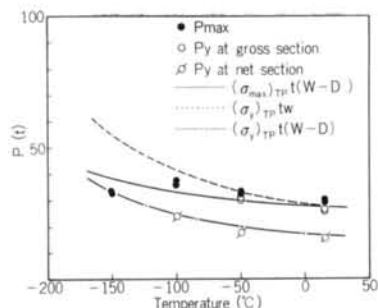
$$\left. \begin{aligned} (P_y)_{net} &= (\sigma_y)_{TP} (W-D)t \\ (P_y)_{gross} &= (\sigma_y)_{TP} Wt \\ P_{max} &= (\sigma_B)_{TP} (W-D)t \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここで、 $(\sigma_y)_{TP}$ 、 $(\sigma_B)_{TP}$ はそれぞれ材料試験結果における降伏点および引張強さを、 W 、 D はそれぞれ板幅

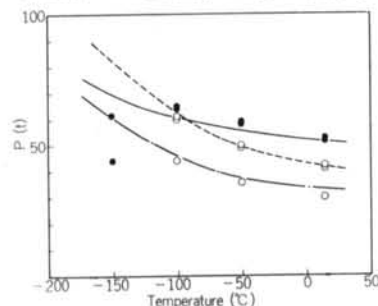
タイプ別	試験温度	試験体記号	純断面降伏		全断面降伏		最大耐力	
			荷重 (ton)	応力 (kg/mm ²)	荷重 (ton)	応力 (kg/mm ²)	荷重 (ton)	応力 (kg/mm ²)
Iタイプ	RT	I—RT—1	16.1	27.0	27.0	28.0	29.9	50.1
		I—RT—2	**	**	27.3	28.2	30.2	49.4
	-50℃	I—50—1	18.0	30.7	31.2	32.6	32.7	55.6
		I—50—2	**	**	32.0	33.2	33.9	57.3
	-100℃	I—100—1	23.9	40.2	35.9	37.1	37.7	63.5
		I—100—2	**	**	36.0	37.3	36.2	62.3
	-150℃	I—150—1	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	34.0	58.6
		I—150—2	**	**	(未降伏)	(未降伏)	33.9	57.7
IIタイプ	RT	II—RT—1	32.0	30.4	41.9	29.1	52.0	49.4
		II—RT—2	**	**	41.6	28.6	52.8	49.8
	-50℃	II—50—1	36.0	34.1	48.1	34.9	59.1	56.9
		II—50—2	**	**	48.0	33.8	58.0	55.4
	-100℃	II—100—1	44.0	41.2	62.0	42.7	64.8	60.8
		II—100—2	**	**	62.0	42.9	64.8	62.1
	-150℃	II—150—1	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	44.0	42.1
		II—150—2	**	**	(未降伏)	(未降伏)	61.9	59.4
IIIタイプ	RT	III—RT—1	44.0	27.9	54.6	27.8	74.6	48.0
		III—RT—2	**	**	56.4	29.3	75.4	48.8
	-50℃	III—50—1	52.0	33.9	68.0	35.7	83.5	54.8
		III—50—2	**	**	66.0	34.4	83.3	54.0
	-100℃	III—100—1	66.1	43.8	79.8	42.5	90.0	59.6
		III—100—2	**	**	76.8	39.9	90.4	58.3
	-150℃	III—150—1	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	80.0	52.0
		III—150—2	**	**	(未降伏)	(未降伏)	81.1	52.9
IVタイプ	RT	IV—RT—1	32.0	30.9	39.9	28.4	50.9	49.2
		IV—RT—2	**	**	39.9	28.4	52.0	50.1
	-50℃	IV—50—1	36.0	34.8	46.0	32.8	58.0	56.0
		IV—50—2	**	**	44.0	31.1	56.7	54.5
	-100℃	IV—100—1	44.1	42.0	58.0	40.7	63.4	60.7
		IV—100—2	**	**	63.0	44.0	64.0	61.2
	-150℃	IV—150—1	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	(未降伏)	60.0	56.9
		IV—150—2	**	**	(未降伏)	(未降伏)	59.9	56.8

注) **: 未測定

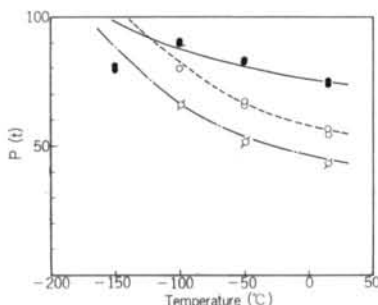
表—6 継手の降伏耐力および最大耐力



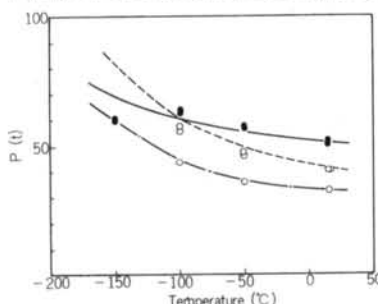
図—18 降伏耐力および最大耐力と温度との関係 (Iタイプ)



図—19 降伏耐力および最大耐力と温度との関係 (IIタイプ)



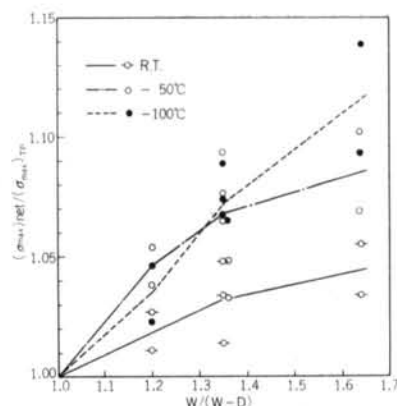
図—20 降伏耐力および最大耐力と温度との関係 (IIIタイプ)



図—21 降伏耐力および最大耐力と温度との関係 (IVタイプ) およびボルト孔径を示す。

また、図中のプロットした値は実験値である。

これによると、純断面および全断面の降伏耐力は計算値とよく一致する。しかし、最大耐力については、室温では実験値と計算値がよく一致するが、低応力脆性破壊



図—22 縁あきと最大応力との関係

が生ずるまでは温度低下に伴って実験値が計算値を上まわってくる。

なお、継手の低応力脆性破壊はいずれの型においても -150°C に至って発生し、その応力レベルは材料試験結果を用いて計算した純断面の降伏耐力に比べて、ほぼ同等か、やや低めの値を示している。この中でIIタイプの -150°C における試験体1体については、クリップゲージ取付用のスタッドボルトの溶接位置において破壊が発生したもののみ25%程度の耐力低下を示している。本実験に用いた供試材の材質では、継手の降伏点以下の脆性破壊発生温度は、ほぼ -150°C 近傍にあるといえることができる。

図—22には純断面におけるネット最大応力と縁あきとの関係を示す。ここで、図の縦軸には各温度における材料の引張強さ $(\sigma_B)_{TP}$ に対する ネット最大応力 $(\sigma_B)_{ne}$ の比として無次元表示されている。この無次元量 $(\sigma_B)_{ne}/(\sigma_B)_{TP}$ は $W/(W-D)$ が增大するにつれて増加する傾向にある。これは Fisher の実験⁷⁾ と一致するものであるが、さらに、その傾向は低温になるにつれて顕著に現われるといえる。

6.3 変形能

図—23には、未破断側の主板における継手の外側に位置するボルト孔の伸び長さの温度依存性について示す。

既往の研究⁴⁾ によれば、最大耐力時のボルト孔の伸び長さ ΔD は大略 $(W-D)/D$ に比例することが知られている。したがって比例定数を k として、 k を材質による一定値と考えれば、

$$\Delta D = k(W-D)/D \quad \dots\dots(3)$$

とおくことができる。したがって、ここでは無次元量 $k/D = \Delta D/(W-D)$ と温度との関係としての同図に示した。これによると、最大耐力時のボルト孔の伸び長さは、

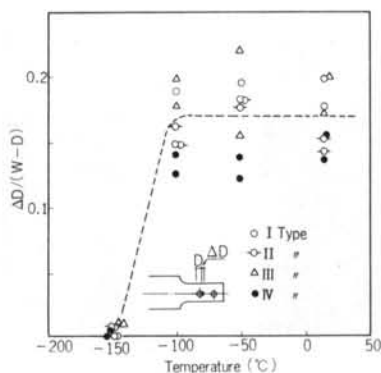


図-23 最大耐力時におけるボルト孔の伸び長さの温度依存性

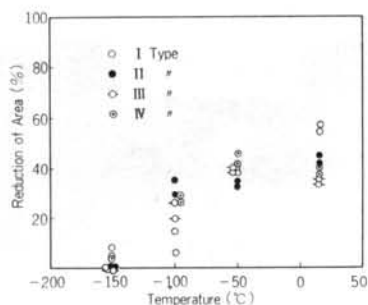


図-24 破断部分の絞りの温度依存性

室温から -100°C の温度領域において各タイプとも温度に無関係にほぼ同等の値を有し、 $-100^{\circ}\text{C} \sim -150^{\circ}\text{C}$ の間において、ボルト孔の変形能の遷移点を明確に見ることができる。

また、図-24に他方の主板の破断部分の絞りの温度依存性について示す。温度低下に伴い絞りは減少するが、この減少傾向を前述の小型引張試験結果と比較した場合、温度依存性の高いことがわかる。

6.4 破断性状

本実験における継手は、いずれも主板のボルト孔部で破断に至っている。添接材については、 -150°C における試験体1体のみ脆性破断を生じたが、その他の試験体では破断は見られなかった。また、ボルトについては、破断はもちろんのこと、ほとんど損傷は認められなかった。

写真-1～8に各試験温度における主板の破断状況および破断面を示す。肉眼による巨視的観察では、室温における破断性状は絞りの大きいせん断による延性破面を示している。 -50°C では室温とほぼ等しい破断性状を示すが、I、IIタイプの各1体ずつに写真-4に見られるように、ボルト孔から発生した延性破壊が破壊の伝播過程でへき開破壊に移行しているのが見られる。 -100°C で

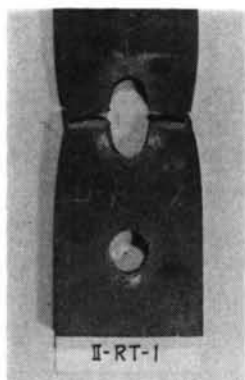
は、ボルト孔縁近傍には断面収縮を有するが、ボルト孔縁より外側へ破壊が進行したことを示すシェブロンパターンが見られ、せん断とへき開の中間的は破面を呈する。 -150°C に至っては、全断面に断面収縮の見られないへき開による脆性破面を呈する。なお、 -150°C においては、すべり量測定用の治具を取り除くためのスタッドボルトの溶接位置より破壊が発生して、ボルト孔へ達するものが見られた(写真-4)。このことはショートビード的な溶接が、脆性破壊につながり易いことを意味するものである。

写真-9～12には、電子顕微鏡観察による各温度における微視的破面の一例を示す。これによると、室温における破面には全断面においてディンプル(dimple)模様から成る延性破壊が認められる(写真-9)。 -50°C においては肉眼的には延性破壊が支配的であるところに微視的には、ディンプル模様とへき開の混在が認められる(写真-10)。また、 -100°C においては全断面にわたってへき開で占められるようになるが(写真-11)、ボルト孔縁の破壊の開始点にはディンプル模様も多少認められる。これは、ボルト孔縁の断面収縮を伴う塑性変形を呈していることに関係する。 -150°C ではディンプル模様は認められず、全断面へき開破面である(写真-12)。

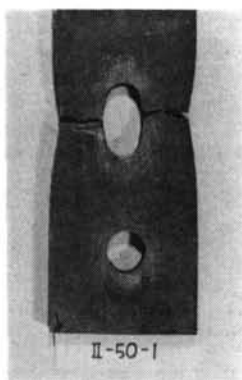
§ 7. まとめ

一般構造用鋼材 S S 41 を用いた高力ボルト摩擦接合継手の、低温下における力学的諸性状について明らかにした。以下に本実験により得られた知見をまとめる。

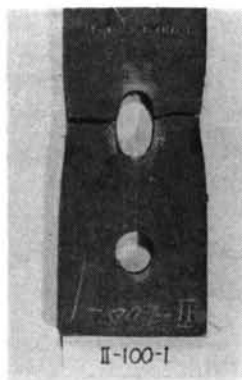
- 1) 見かけのすべり係数は、温度低下に伴い若干増加する傾向にある。主すべりが主板の全断面降伏に先行する場合と、主板の全断面降伏が主すべりに先行する場合とでは、前者に比べて後者の場合にその傾向が温度低下に伴い著しい。
- 2) 顕著な荷重低下を伴うすべりは、温度低下に伴いその回数が多く、1 回当りのすべり量は小さい。また、そのすべり性状は衝撃的である。
- 3) 主板のボルト孔を控除したネット最大耐力は、ボルト孔控除率が大きいほど、また、温度が低いほど大きくなる。
- 4) 本実験で用いた材料において継手の低応力脆性破壊の発生温度 T_b は -150°C 近傍にあると推定にされる。
- 5) 最大耐力時までのボルト孔の伸び能力は、脆性破壊発生温度まで温度に無関係にほぼ同等である。
- 6) 主板破断部の絞りの温度低下に伴う変化は、同一材料



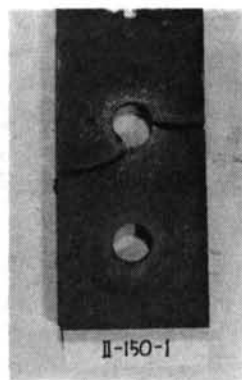
写真一 破断状況：Ⅱタイプ
ブ、室温



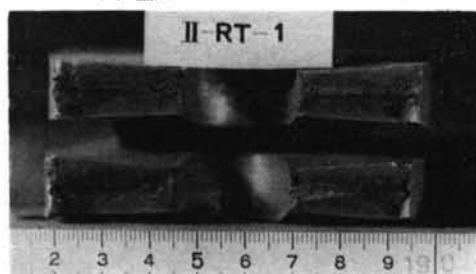
写真二 破断状況：Ⅱタイプ
ブ、-50℃



写真三 破断状況：Ⅱタイプ
ブ、-100℃



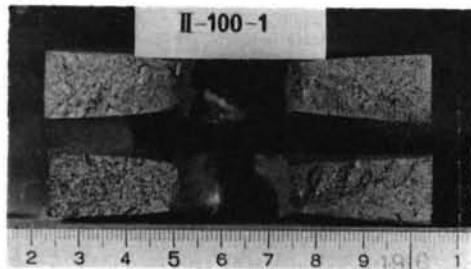
写真四 破断状況：Ⅱタイプ
ブ、-150℃



写真五 破断面：Ⅱタイプ、室温

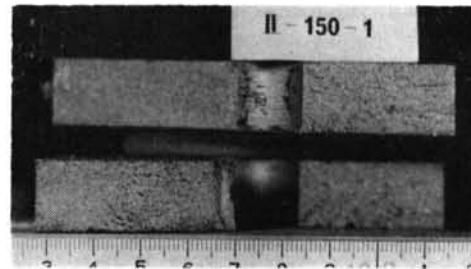


写真六 破断面：Ⅱタイプ、-50℃



写真七 破断面：Ⅱタイプ、-100℃

の平滑丸棒試験片による絞りの変化に比べて急激である。

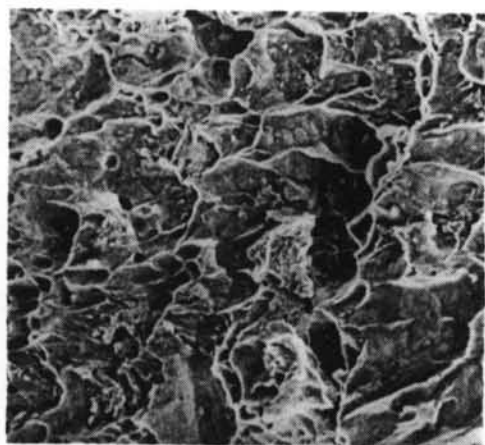


写真八 破断面：Ⅱタイプ、-150℃

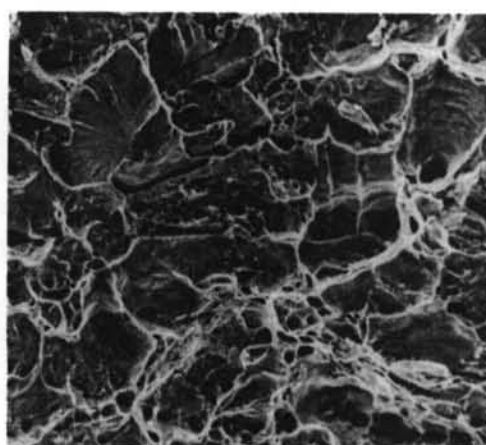
謝辞 本実験を遂行するに当り、当研究所鈴木進、石井氏ならびに安井直登氏（現、橋本電気機）に多大なご援助を受けた、ここに謝意を表します。

＜参考文献＞

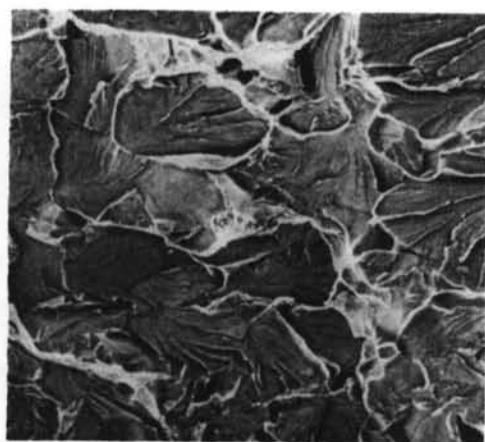
- 1) 田島二郎：“高力ボルト摩擦接合概説” 技報堂 昭和41年
- 2) バウデン、ティパー：“固体の摩擦と潤滑” 丸善
- 3) 曾田範宗：“摩擦の話（岩波新書）” 岩波 1971年
- 4) 佐藤亘宏：“各種鋼板の支圧強さおよび許容支圧応力度に関する実験（その3）” 日本建築学会関東支部発表会（第40回）
- 5) 西山善次，他：“金属の電子顕微鏡写真と解説” 丸善 昭和50年
- 6) 矢部喜堂，他：“任意可変低温引張試験装置の概要とその一試験例” 日本建築学会大会梗概集 昭和51年10月
- 7) John W. Fisher: “Behavior of Fasteners and Plates with Holes” Proc. of ASCE, Journal of the Structural Division (Dec. 1965)
- 8) Joseph M. Plecnik & John G. Shipp: “Bolted Joints on Trans-Alaska Pipeline Structures” Proc. of ASCE, Journal of the Structural Division (Jan. 1977)



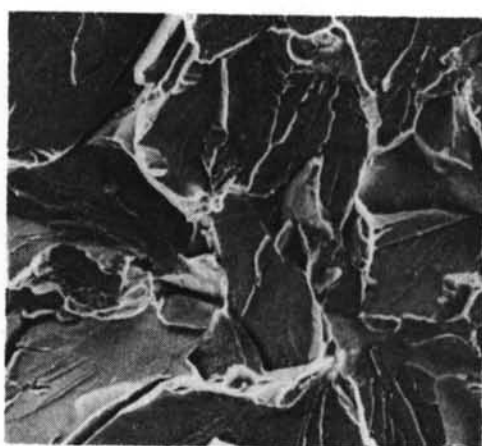
写真—9 室温 (×1000)



写真—10 -50℃ (×1000)



写真—11 -100℃ (×1000)



写真—12 -150℃ (×1000)

