

鉄筋コンクリート用棒鋼ガス圧接継手の低温引張強度特性

矢部 喜堂
(技術研究所)小早川 恵実
(技術研究所)中辻 照幸
(技術研究所)藤盛 紀明
(総合企画室)

§ 1. はじめに

近年, LNG あるいは LPG の地下式貯槽, 極地における海洋構造物, 寒冷地における建築・土木構造物, 低温実験施設(氷海槽等)など, 低温にさらされる構造物(以下, 低温構造物と呼ぶ)の設計・施工法が構造工学的に重要課題となりつつある¹⁾²⁾.

筆者らは, 低温下における鉄筋コンクリート造の構造物の安全性を確保するために, その構造材料の一つである鉄筋コンクリート用棒鋼(以下, 鉄筋と呼ぶ)およびそのガス圧接継手について, これらの脆性破壊発生特性を明らかにしようと試みるものである。そこで, これまでに既報⁴⁾で, 鉄筋の切欠感受性を円周切欠丸棒試験片によって評価する方法を示した。さらに, 引き続き既報⁵⁾で, 鉄筋表面にガス圧接時に生じたクランプきずが存在する場合に, 低温下でこの表面きずを起点として脆性的な破断が生じ易くなる³⁾ことを考慮し, 使用温度において十分な変形能力が得られるために必要な伸び性能を有する鉄筋の材質評価方法を示した。既報⁷⁾では, 鉄筋のガス圧接継手の圧接部における材質変化について検討を行ない, 鉄筋の表面のふし間隔の縮みによって生じるノッチからの脆性破壊発生特性を検討するために, ノッチをモデル化した円周切欠丸棒試験片により熱影響部における脆性破壊発生特性を調べた。この結果, 切欠きモデルに対して焼準の効果が大きいことを定量的に示した。

本報では, 圧接継手の低温引張強度に及ぼすふくらみ幅, 焼準の影響を実験計画法によって調べ, 圧接部における応力集中を軽減する観点から最適なふくらみ形状, 実際の継手に対する焼準の効果について検討した。さらに, これまでに得られた知見を含めて低温構造物を対象とした鉄筋ガス圧接継手の圧接条件を設定し, 各種の鉄筋のガス圧接継手について, この圧接条件の妥当性を低温引張試験によって確認した。

最後に, 現場における圧接継手の品質管理の一手法として, 硬さ測定による圧接部の焼準の確認方法について

検討を加えた。

§ 2. ガス圧接継手の低温引張強度に及ぼすふくらみ幅および焼準の影響(実験 I)

2.1 目的

鉄筋ガス圧接継手の低温引張強度は, 圧接時に圧接器によって鉄筋表面に生じるクランプきずの影響が大きい³⁾。したがって, 本実験では鉄筋の表面きずを最小限にするため, くさび型のクランプ治具を具備した圧接器³⁾を用いてクランプきずから発生する母材破断を防止し, 必然的に圧接部破断を多く生じさせ, ふくらみ形状および焼準の効果等について実験計画法を用いて定量的に明らかにすることとした。

2.2 実験計画

(1)試験要因と水準

本実験では, 試験要因として鉄筋種, ふくらみ幅, 焼準および温度の4因子を取り上げた。各要因の水準を表—1に示すとおりであり, これらの要因と水準を表—2に示すように, § 4. と同様に実験計画法の L_9 直交表に割り付けた。

各要因の水準の概要は, 次のとおりである。

(i) 鉄筋種

本実験では, ふしの形状および径がそれぞれ異なる3種類の鉄筋を用い, 各供試材の鋼種はいずれも SD35 である。各供試材の化学成分および機械的性質は表—3に示すとおりである。

(ii) ふくらみ幅

本実験では, 圧接部のふくらみの最大径を $1.5D$ (D : 鉄筋の呼び名の数値) と一定にして, ふくらみ幅を $1.2D$, $1.7D$, $2.2D$ の3水準とした。

(iii) 焼準

焼準については, 圧接のまま(無)と焼準したもの(有)

要因	水準		
	1	2	3
A (鉄筋種)	高炉D32	高炉D51	電炉D32
B (ふくらみ幅)	1.2D	1.7D	2.2D
C (焼準)	無	有	—
D (温度)	-75℃	-100℃	-150℃

表—1 要因と水準

No	A (鉄筋種)	B (ふくらみ幅)	C (焼準)	D (温度)		
				-75℃	-100℃	-150℃
1	D32高炉	1.2D	無	2	2	2
2	"	1.7D	有	2	2	2
3	"	2.2D	有	2	2	2
4	D51高炉	1.2D	有	2	2	2
5	"	1.7D	有	2	2	2
6	"	2.2D	無	2	2	2
7	D32電炉	1.2D	有	2	2	2
8	"	1.7D	無	2	2	2
9	"	2.2D	有	2	2	2

表—2 要因の割り付けと繰り返し数

の2水準とした。直交表には、焼準したものをダミーとして割り付けた。

(iv)温度

試験温度については、-75℃、-100℃、-150℃の3水準を取り上げ、これらの水準を直交表の外側因子として割り付けた。圧接部のふくらみ形状および焼準の効果

供試材 記 号	呼び名 製法種別	化 学 成 分 (%)												機 械 的 性 質				
		C	Si	Nn	P	S	Cu	Ni	Cr	solAl	Zn	N	Mn/C	$\frac{\sigma_Y}{(kgf/mm^2)}$	$\frac{\sigma_B}{(kgf/mm^2)}$	EL (%)	$R.A.$ (%)	vT_{rs} (℃)
L	D32 高炉鉄筋	0.24	0.31	1.35	0.030	0.021	0.01	0.024	0.02	0.001	Tr	0.0039	5.63	4.56	64.4	30.5	66.8	0.5
P	" 電炉鉄筋	0.27	0.31	1.02	0.020	0.033	0.24	0.055	0.12	0.001	0.004	0.0117	3.78	48.8	65.3	28.4	55.6	15.9
S	D51 高炉鉄筋	0.27	0.36	1.41	0.024	0.016	0.01	0.026	0.03	0.027	0.002	0.0028	5.22	45.1	66.1	28.5	58.7	5.9

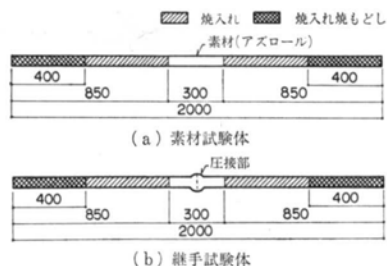
注) σ_Y : 降伏点, σ_B : 引張強さ, EL: 伸び率, R.A.: 絞り, vT_{rs} : 破面遷移温度

表—3 供試材の化学成分および機械的性質 (実験 I)

鉄筋 呼び名	圧接部形状 ふくらみ径 (mm)	バーナ振幅 (mm)							時 間 (sec)							縮 み 代 (mm)		加 圧		ガス流量 (l/hr·atm 0℃)			
		工 程							工 程							工 程		ラム 断面積 (cm ²)	設定圧力 (kgf/cm ²)	還元炎		中性炎	
		3,4	5	6	7	8	9	3	4,5	6	7	8	9	4	7	10	11			O ₂	C ₂ H ₂	O ₂	C ₂ H ₂
D32	1.2D	0	6	14	22	30	38	50	20	15	10	15	20	2	2	16	18	10	400				
	1.5D	0	14	33	43	55	58	53	20	20	10	15	45	2	2	27	29	10	440	1810	2040	2020	1880
	2.2D*	60~80							3 min 00 sec							39		10	440				
D51	1.2D	0	13	28	42	53	64	93	40	43	35	35	35	2	3	28	30	20	410				
	1.5D	0	25	60	72	90	92	99	60	35	35	35	53	2	3	35	37	20	460	3650	4370	4060	4000
	2.2D*	80~120							6 min 35 sec							46		20	460				

注) *: 2.2Dの場合は手動圧接

表—4 圧接条件



図—1 試験体の形状寸法

鉄筋 呼び名	ガス流量 (l/hr·atm 0℃)		発熱量 (kcal/hr)
	O ₂	C ₂ H ₂	
D32	2240	2230	30900
D51	4290	4340	60100

表—5 焼準加熱時におけるバーナの火力

を明らかにするためには、試験体の中にある程度の割合で圧接部破断を生じさせる必要がある。そのため、実際の低温構造物で対象とされる温度よりも低い温度域で実験を行なった。実験の繰り返し数は2回とし、計54体の実験を行なった。

(2)試験体

試験体の形状寸法は、図—1に示すとおりである。

圧接試験体の作成に当たっては、圧接作業のばらつきを少なくするために、自動ガス圧接装置を用いた。ただし、現有の自動ガス圧接装置では、バーナの揺動幅に限界があるため、ふくらみ幅が2.2Dの場合には手動圧接

とした。

いずれの圧接方法においても、ふくらみの最大径は $1.5D$ とし、所要のふくらみ幅が得られるようにパーナの火力は鉄筋径ごとに一定とし、パーナの揺動幅および圧接時間を変化させ圧接した。

各鉄筋径、ふくらみ幅ごとの圧接条件を表一4に示す。

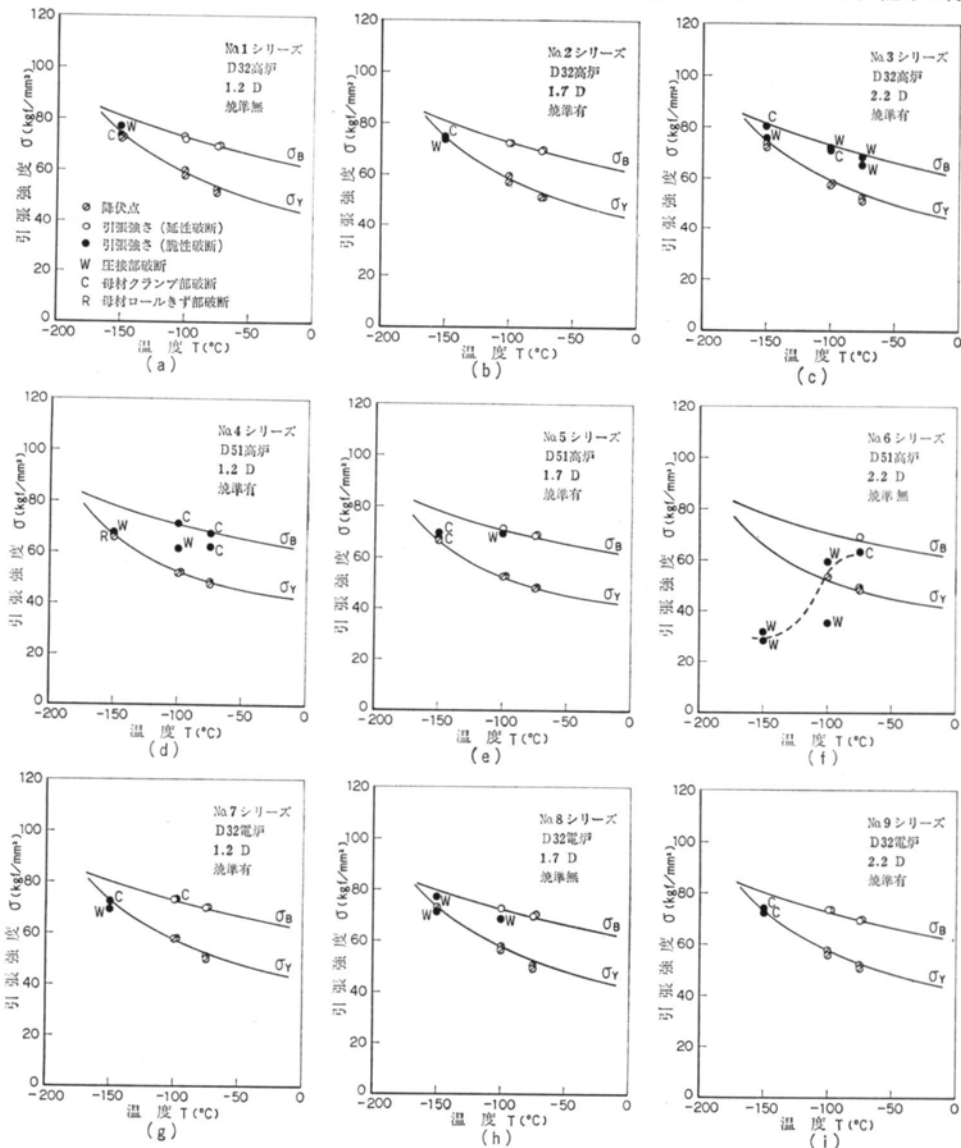
(3) 焼準方法

既報⁶⁾において、圧接部の焼準のための最適加熱時間は、D31の場合1.5分、D51の場合3.0～3.5分であることを明らかにした。D51の場合、表層部と中心部とでは最高到達温度に差異が生じるため焼準組織が若干異なる

が、破壊亀裂が表層から発生することを考慮して、表層部の組織が最も細粒化する3.0分を実用上の最適加熱時間と判断した。焼準時の鉄筋径ごとのパーナの火力は表一5に示すとおりである。

2.3 実験結果

本実験における圧接継手の低温引張試験結果を、実験番号ごとに図一2に示す。ここで、脆性破断を生じた継手の破断部位は圧接のふくらみ部、母材のクランプきず部分、ロールきず部分に大別できる。図中に、それぞれW、C、Rの記号で表示した。なお、記号の付いていな

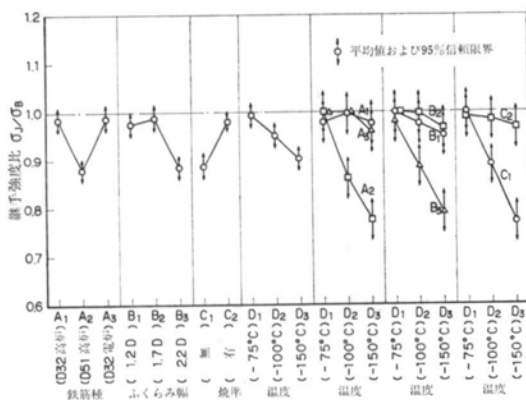


図一2 圧接継手の低温引張試験結果

要 因	自由度 f	変 動 S	分 散 V	分散比 F_0	純変動 S'	寄与率 $\rho(\%)$
A	2	0.1377	0.0689	26.50**	0.1325	13.6
B	2	0.1173	0.0587	22.53**	0.1121	11.5
C	1	0.1081	0.1081	41.53**	0.1055	10.8
e_1	1	0.0012	0.0006			
D	2	0.0734	0.0367	14.12**	0.0682	7.0
A×D	4	0.0914	0.0229	8.81**	0.0810	8.3
B×D	4	0.0465	0.0116	4.46**	0.0361	3.7
C×D	2	0.0878	0.0439	16.88**	0.0826	8.5
e_2	2	0.0022	0.0011			
e_3 (e_3) (e)	33 (35) (36)	0.0916 (0.0938) (0.0938)	0.0028 (0.0027) (0.0026)		0.3589	36.6
計	53	0.9769	0.0184		0.9769	100.0

**：危険率1%で有意

表一六 分散分析表(継手強度比)



図一三 要因効果の推定

いものは母材で延性破断したことを示す。

圧接継手の低温引張強度に及ぼす各種要因の影響について検討するに当たって、各試験温度における継手の引張強さ σ_J と素材の引張強さ σ_B との比、すなわち継手強度比 σ_J/σ_B に関する分散分析結果を表一六に示す。この分散分析において、破断部位がC、Rの場合、圧接部の真の強度は不明であるが、破断部位の影響を除くために母材強度と同等の強度を有するものと仮定して解析し、安全側の評価を行なった。

本実験では、1次要因、2次要因とも危険率1%で高度に有意である。この中でも、要因Aの寄与率が最も大きい。図一三に各有意要因の効果の推定を示す。

これらの結果から次のことがいえる。

1) 本実験における試験温度の範囲内では、鉄筋径によって継手強度比が異なる。すなわち、太径の鉄筋の圧接

継手の場合は、細径の鉄筋に比べて継手強度比が低い。

2) ふくらみ幅が1.7Dの場合は1.2Dに比べて若干継手強度比は高くなるが、2.2Dになると継手強度比は顕著に低下する。

3) 焼準したものの継手強度比は、圧接のままに比べて高い値を示す。

4) 温度は継手強度比に及ぼす影響が大きく、温度の低下に伴って継手強度比は低下する。

5) 温度と鉄筋種、ふくらみ幅、焼準のそれぞれの間に交互作用が見られ、鉄筋種については太径(D51)、ふくらみ幅については2.2D、焼準については圧接のままの場合にそれぞれ温度の低下に伴って継手強度化が著しく低下する。なお、本実験では径、ふくらみ幅、焼準の各要因とも-75℃では水準間に有意差は見られない。

一方、本実験では、クランプきずから破断したものは少なく、しかもその耐力低下は比較的少ない。これにより、くさび型のクランプが有効であることが分かる。しかし、このクランプ型式の場合にも鉄筋のふし上にわずかに軽微なクランプきずが残ることがあり、これが継手の終局強度時に脆性破断を誘起することを考えれば、今後さらに改良の余地がある。

本実験結果および既報³⁾の知見を基に、低温下で使用される鉄筋ガス圧接継手に母材と同程度の継手強度を確保するためには、クランプきずのつかない圧接装置を使用するとともに、ふくらみ径1.5D、ふくらみ幅1.7Dのふくらみ形状とし、圧接部の焼準を行なう必要があるといえる。

§ 3. 各種鉄筋のガス圧接継手の低温引張強度(実験Ⅱ)

3.1 目的

実験Ⅰの結果、低温下における鉄筋のガス圧接継手に高い継手強度比を確保することのできる圧接条件が明らかになった。しかし、この圧接条件は少ない種類の鉄筋による実験結果から得られたものであり、市販の他の種類の鉄筋についても適用できるか否かについて確認しておく必要がある。

ここでは、径およびふし形状の異なる10種類の鉄筋について、現状における実際の低温構造物で対象となる最低温度近傍で圧接継手の引張強度の確認を行なった。

3.2 実験計画

(1) 供試材

供試材 記 号	呼び名	製法種別	化 学 成 分 (%)											機 械 的 性 質					
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	solAl	Zn	N	Mn/C	σ_y (kgf/mm ²)	σ_B (kgf/mm ²)	EL (%)	R.A. (%)	vT_{rs} (℃)
L	D32	高炉鉄筋	0.24	1.31	1.35	0.030	0.021	0.01	0.024	0.02	0.001	Tr	0.0039	5.63	45.6	64.4	30.5	66.8	0.5
M	"	"	0.22	0.42	1.34	0.027	0.032	0.02	0.023	0.01	0.001	Tr	0.0039	6.09	43.2	60.0	31.3	65.3	15.4
N	"	"	0.25	0.25	1.37	0.029	0.025	0.01	0.030	0.02	0.026	0.001	0.0070	5.48	43.5	61.9	30.8	67.5	10.1
O	"	"	0.29	0.33	1.36	0.030	0.024	0.01	0.034	0.06	0.003	0.001	0.0048	4.69	41.0	64.8	28.7	61.4	44.1
P	"	電炉鉄筋	0.27	0.31	1.02	0.020	0.033	0.24	0.055	0.12	0.001	0.004	0.0117	3.78	48.8	65.3	28.4	55.6	15.9
Q	"	"	0.27	0.30	1.11	0.034	0.027	0.32	0.074	0.20	0.001	0.007	0.0124	4.11	40.0	64.7	27.4	54.3	65.0
R	"	"	0.26	0.20	1.02	0.029	0.033	0.35	0.071	0.22	0.001	0.004	0.0114	3.92	41.1	61.2	29.9	58.7	28.6
S	D51	高炉鉄筋	0.27	0.36	1.41	0.024	0.016	0.01	0.026	0.03	0.027	0.002	0.0028	5.22	45.1	66.1	28.5	58.7	5.9
T	"	"	0.27	0.29	1.39	0.038	0.036	0.02	0.035	0.08	0.002	Tr	0.0050	5.15	42.3	62.0	29.6	61.3	36.3
U	"	電炉鉄筋	0.30	0.18	1.13	0.032	0.048	0.40	0.086	0.23	0.001	0.004	0.0110	3.77	42.5	65.9	25.3	48.7	77.0

注) σ_y : 降伏点, σ_B : 引張強さ, EL: 伸び率, R.A.: 絞り, vT_{rs} : 破面遷移温度

表一 7 供試材の化学成分および機械的性質 (実験II)

本実験に用いた供試材は SD35, D32 が 7 種類 (高炉鉄筋 4 種類, 電炉鉄筋 3 種類), D51 が 3 種類 (高炉鉄筋 2 種類, 電炉鉄筋 1 種類) である。各供試材の化学成分および機械的性質は表一 7 に示すとおりである。

(2) 試験体

試験体の形状寸法は実験 I と同様である。圧接試験体の作成に当たっては圧接部のふくらみの最大径を $1.5D$, ふくらみ幅を $1.7D$ とし, 自動ガス圧接装置を用いて圧接した。

圧接部の焼準は, 同一条件で圧接した試験体の半数について行ない, 焼準加熱時間は D32 の場合 1.5 分, D51 の場合 3.0 分とした。

(3) 試験温度

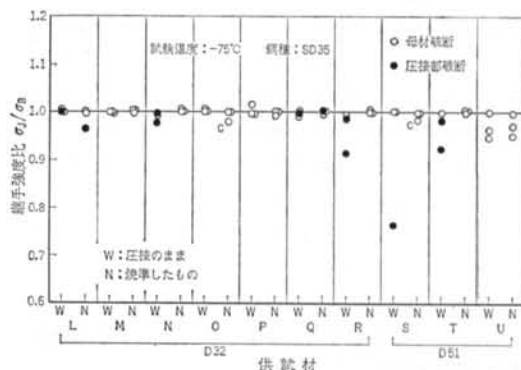
本実験では, 実際の低温構造物で対象にされる最低温度よりも若干低い -75°C において試験し, 安全側の評価を行なった。

3.3 実験結果

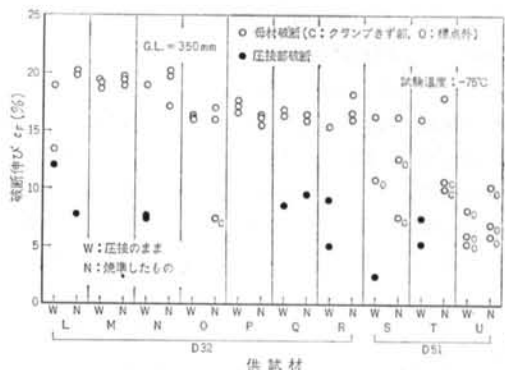
本実験における圧接継手の低温引張試験結果を, 図一 4 および図一 5 に示す。

まず, 破断位置については, 全試験体 30 体中圧接部破断を生じたものは 11 体であり, その内訳は圧接のまま 9 体, 焼準したものは 2 体である。残り 19 体は母材破断である。

圧接部破断を生じた試験体の継手強度比に注目すると圧接のままでは, 継手強度比の低下の顕著なものも見られるが, 焼準したものにはほとんど低下は見られない。すなわち, 圧接のままでは継手強度比の低下は 25% 程度にもなるものが見られるが, 焼準したものでは圧接部破断といえども, 径またはふし形状にかかわらず継手強度



図一 4 各種鉄筋の圧接継手引張強度比



図一 5 各種鉄筋の圧接継手破断伸び

比はほぼ 1.0 で母材強度と同等の強度を示し, 焼準の効果の大きいことが確かめられる。ここで, 焼準したものの中供試材 O および S の場合, それぞれ 1 体ずつ若干強度低下を示しているもの (図中, C の記号を付した) が見られるが, これはふしの上に生じた軽微なクランプきずから母材破断を生じたためである。

次に、破断伸び (D32 の場合 G.L.=300mm, D51 の場合 G.L.=350mm) については、母材破断の場合には 15~20% を呈するが、圧接部破断の場合には高々 10% 程度と低くなる。

なお、供試材 U は母材破断にもかかわらず継手強度比が低く、破断伸びの著しい低下が見られるのは、もともと素材の靱性がきわめて低く ($vT_{rs}=77^{\circ}\text{C}$)、母材のふしの付け根の応力集中によって脆性的に破断したためである。

§ 4. 考察

4.1 ふくらみ幅の影響

(1) ふくらみ幅による応力集中の変化

圧接継手のふくらみ部には鉄筋の表面のふし間隔の縮みによってノッチが形成され易く、そのノッチ底部に応力集中が生じる。低温下での使用を考慮すれば、圧接面の接合強度が損なわれない範囲内でふくらみ径を出来るだけ小さくし、応力集中を少なくすることが望ましいと考えられる。しかし、圧接面に十分な接合強度が得られるためには、ふくらみの最大径は $1.5D$ 程度の大きさが必要である。

そこで、圧接部のふくらみの最大径を $1.5D$ と一定にし、ふくらみ幅を変化させた場合の圧接部の応力集中の変化を有限要素法を用いて検討した。

解析の対象とした圧接継手は、互いにふし形状・径の異なる 3 種類の供試材 M (D32), R (D32) および S (D51) の実物試験体である。試験体の作成に当たっては、ふしの位置が圧接面に対してほぼ対称となるように供試材端面を切断加工して突き合わせ圧接を行なった。応力解析は、実物の圧接継手の縦リブに対して 90° の鉄筋軸断面における圧接部の形状を忠実に再現し、鉄筋軸に対する軸対称問題として弾性解析を行なった。要素分割の一例を図-6 に示す。各供試体の応力集中を相対比較するため、注目するノッチ底部の三角形要素の一辺の最小長さは約 0.1mm とし、各供試材とも最小要素の寸法形状はほぼ同等とした。図-7 に解析結果の例を示す。圧接部表層の応力集中は、主として軸方向に対してふしの圧接面側に生じる。

ここでノッチ底部の応力に注目し、応力集中係数をノッチ底部断面におけるネット応力 σ_{net} に対するノッチ底部の最大応力 σ_{max} の比、すなわち、

$$\alpha = \sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{net}} \quad \cdots \cdots (1)$$

と定義すると、 α は応力集中の程度を示し、また強度低

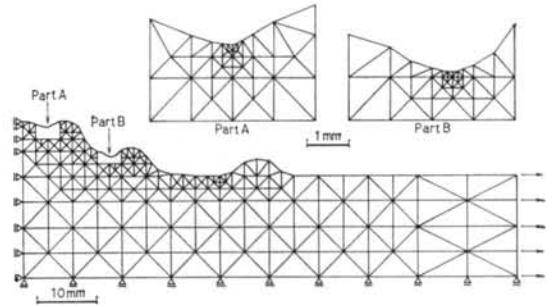


図-6 圧接部の要素分割の一例 (D32, 波ふし)

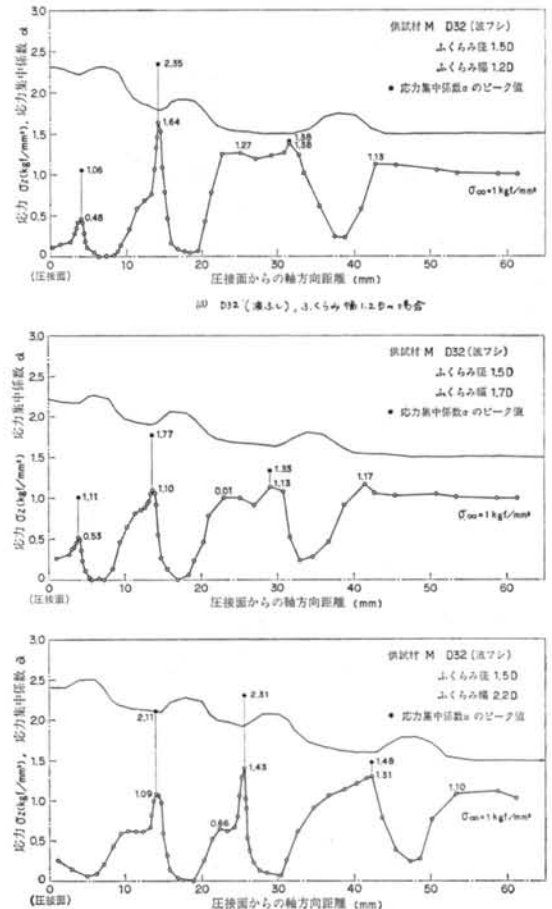
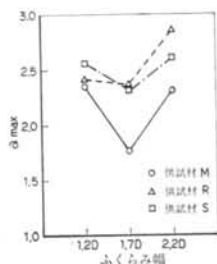


図-7 圧接部の応力集中

下のし易さを示すものと考えられる。図-7 には、応力集中の大きいノッチ底部における応力集中係数 α の値も併記している。

図-8 は、応力解析結果から圧接部のノッチ底部における応力集中係数の最大値 α_{max} を、ふくらみ幅ごとに示したものである。応力集中係数の最大値は、ふくらみ幅が $1.7D$ のとき相対的に最も小さくなっている。な



図—8 応力集中係数とふくらみ幅の関係

お、同図に示した応力集中係数は、縦リブと90°の角度をなす鉄筋軸断面において見られるものであり、圧接部表面の任意の位置における応力集中係数の最大値を意味するものではない。

実際の圧接では、圧接部における各部の軸方向のアプセット量を相対比較すると、圧接面近傍部分のアプセット量が他の部分に比べて大きい。圧接部に大きいふくらみ幅を形成する場合には、このような圧接面近傍にアプセットが集中するためきびしいノッチが生じ易くなる。

ふくらみ幅が大きいほど応力集中係数は小さくなると考え易いが、ふくらみ幅が大きすぎる場合には逆に応力集中係数が大きくなるのがこれによって説明できる。

(2) 圧接部の破断部位における応力集中係数

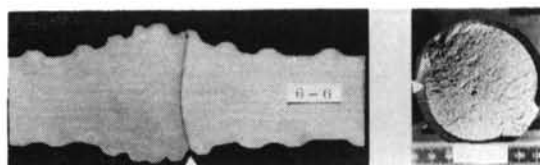
実験Ⅰでは、圧接試験体54体中、16体が圧接部破断を生じた。このうち、破断強度が母材の引張強度に比べて明瞭な低下を示している試験体10体について、破断部位における応力集中を前項(1)と同様に有限要素法を用いて解析した。

解析に当たっては、写真—1に示すように破面観察により破壊の発生点を確認し、この発生点と鉄筋中心軸を通る縦断面における圧接部の形状を拡大して要素分割を行なった。

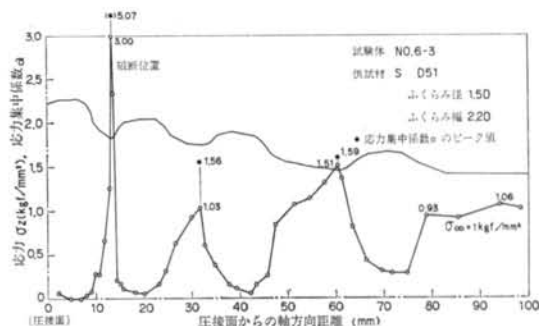
解析結果を図—9に示す。各試験体とも、応力集中係数の最も高い部位より破壊を生じていることが確かめられる。

図—10は、破断部位の応力解析を行なった10体の試験体について、圧接部の破壊応力 σ_{RF} (ネット応力) と応力集中係数 α との関係を示したものである。応力集中係数によって破壊応力がよく整理でき、応力集中係数が高くなるにつれて破壊応力は低下する傾向にあることが分かる。

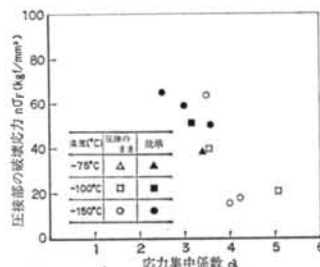
このように、圧接のままでは圧接部の低温強度は、ふくらみ部のノッチ底部の応力集中係数 α によってほぼ決定されることが出来る。ただし、焼準したものの圧接部の破壊応力と応力集中係数 α との関係は、本実験の範囲内では明らかでない。



写真—1 破壊の発生点およびこれを通る軸断面形状 (D51の例)



図—9 圧接部の破断部位における応力集中の一例



図—10 圧接部の破壊応力と破断部位における応力集中係数の関係

前項(1)の検討結果も含め、低温下で使用する圧接継手のふくらみ形状は、ふくらみ径を1.5Dとした場合にはふくらみ幅は1.7Dとするのが最適と考えられる。

4.2 焼準の効果

圧接部の焼準の効果については、既報⁶⁾において円周切欠丸棒試験片による圧接継手の熱影響部における脆性破壊発生特性の評価により適正に焼準が行なわれた場合、素材と同等以上に靱性の向上が見られる。

本報における実験Ⅰでは、実際の継手に対しても焼準の効果を顕著に見ることが出来る。すなわち、圧接のままでは、-75°Cより低温域では温度低下に伴い急激な強度低下を示すのに対し、焼準したものは-100°Cまでほとんど強度低下はなく、-150°Cに至っても母材強度の約10%程度の強度低下を示すのみである。

また、実験Ⅱでも圧接部破断は圧接のままのものに多

く見られるが、焼準したものには極めて少なく、明らかに焼準の効果が認められる。特にD51の場合、ふしの高さが高いため生じるノッチの深さも大きくなり易く、圧接のままでは圧接部破断を生じて強度低下の著しいものがみられるが、焼準したものでは圧接部破断は見られず焼準の効果が極めて大きいことが理解できる。

4.3 寸法効果

実験Ⅰにおいて鉄筋種の主効果がみられ、 A_2 (D51, 高炉) は A_1 (D32, 高炉) および A_3 (D32, 電炉) に比べて継手強度比が低い。

また、温度と鉄筋種の交互作用がみられ、 A_2 は A_1 および A_3 に比べて低温になるほど継手強度比の低下が顕著なことが示された。これは高炉と電炉の相違によるものではなく、鉄筋の径の相違によるものであると推察される。

また、実験Ⅱにおいても圧接部破断を生じたもののうち、D51はD32に比べて著しく強度低下を示すものが見られる。

このように太径になると、その圧接継手は低温下で強度低下を招き、脆性的な破断を生じ易くなると考えられる。この理由の一つとして、太径の場合、細径に比べて相対的にふしの高さが高く、圧接のふくらみ部に深いノッチが形成され易くなることが考えられる。既報⁵⁾に示したように、線形破壊力学的観点からノッチの先端形状が同一であればノッチの深いほど脆性破壊が生じ易いといえる。もう一つの理由としては、既報⁶⁾に示したように圧接のままでは太径ほど圧接部の冷却速度が緩くなり結晶粒の粗大化が生じ、靱性が低くなることが挙げられる。しかし、4.2に述べたように太径の場合でも適正な焼準によって圧接部の靱性を改善し、圧接部の低応力破壊を防ぎ、母材強度と同等の継手強度を確保することができ、実用に供することが可能であると判断される。

§ 5. 現場圧接部の硬さ測定による焼準の確認方法

5.1 圧接部の硬さ測定方法の問題点

圧接部を焼準することによって、脆性破壊発生特性が向上することを4.2で述べた。したがって、圧接部の焼準が耐脆性破壊の目的で要求される場合、圧接部が焼準されているかどうか現場で確認することが重要であり、その手段の一つとして圧接部の硬さを測定する方法が考えられる。



写真-2 ポータブル硬さ計

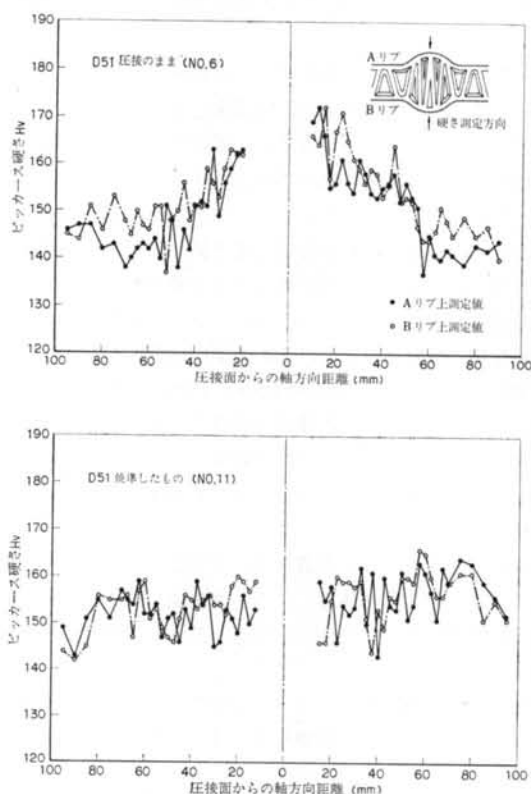


図-11 圧接継手の縦リブ上の硬さ分布

現場で圧接継手の品質管理の目的で行なう圧接部の硬さ測定は、非破壊的に行なう必要があることから、圧接部の表面の硬さをその場で測定しなければならない。したがって、硬さ測定器は軽量・小型で持ち運びが可能でなければならない。そこで、本研究では写真-2に示すポータブル硬さ計を採用した。採用したポータブル硬さ計の原理は鋼球を試料表面に衝突させ、鋼球の衝突前後の速度変化を硬さに換算するものである。すなわち、鋼球の速度変化（反発速度/打撃速度）の1000倍の値がL

値としてデジタル表示装置に表示され、そのL値からビッカース硬さに換算するようになっている。

5.2 硬さ測定位置

実験Ⅱで使用した供試材P(D32) および供試材S(D51)を用いて、圧接のままの継手試験体をそれぞれ3体ずつ、焼準した継手をそれぞれ3体ずつ合計12体作成した。

各試験体の縦リブ上の硬さをポータブル硬さ計で測定した結果の例を図-11に示す。なお、圧接部の外面から縦リブ上の硬さを測定する場合は、圧接中央部は凸凹が大きく硬さ測定ができないためデータが欠測している。

これらの図から、圧接のままの試験体は圧接中央部が硬く母材に近づくにつれて硬さが低下すること、および焼準した試験体の圧接部の硬さは母材とほぼ同一で、一様な硬さ分布になっていることが分かる。

焼準されているかどうかを硬さで確認する場合、試験体の硬さが高く、かつ変化が少ない位置を測定する必要がある。図-11(a), (b)から判断すれば、D32の場合圧接中央から20mm以内、D51の場合圧接中央部から30mm以内が適切であると考えられる。

図-12は、本実験に供した試験片について上記の範囲で測定した圧接部の硬さの平均値と母平均の95%信頼限界、ならびに母材の硬さの平均値と母平均の95%信頼限界を示したものである。図から分かるように、焼準されていなければ圧接部の硬さは母材の硬さより平均的に18～24 Hv 高くなっている。

5.3 硬さ測定による焼準の確認方法

焼準の有無について、圧接部と母材部の硬さを n 点ずつ測定し、その平均値の差が $(\Delta Hv)_{cr}$ 以上であれば、焼準はなされていないと判断することにする。ただし、この場合の信頼度を95%とする。

分散が σ^2 の母集団から n 個($n \geq 5$)サンプリングし、その平均値を求める作業を繰り返すと、平均値の分布は σ^2/n なる分散をもつ正規分布となる(中心極限定理)。

したがって、圧接部の硬さの分散を σ_W^2 、母材の硬さの分散を σ_B^2 とすれば、それぞれから n 点測定した硬さの平均値は、それぞれ σ_W^2/n 、 σ_B^2/n なる分散をもつ正規分布となる(図-13(a)参照)。いま、圧接部の硬さの母平均を $(Hv)_W$ 、母材のそれを $(Hv)_B$ とすれば、それぞれの分布の差の分布は、母平均が $(Hv)_W - (Hv)_B$ で、分散が $(\sigma_W^2 + \sigma_B^2)/n$ なる正規分布となる。ここで、判定基準を $(\Delta Hv)_{cr}$ とすれば、図-13(b)のハッチ部の

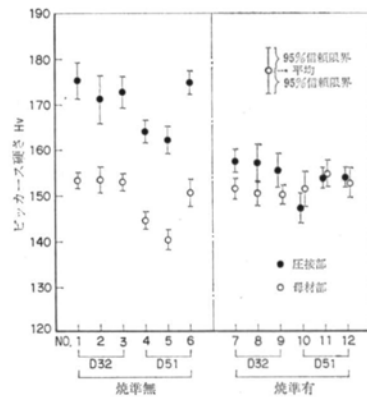


図-12 圧接部および母材部におけるそれぞれの硬さの平均値と95%信頼限界

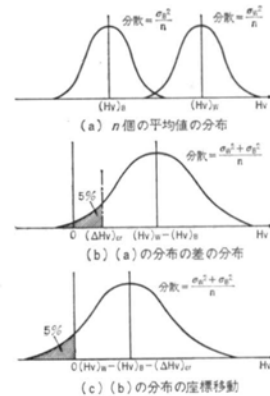


図-13 母材部と圧接部の硬さの差の判定

確率が、圧接部と母材のそれぞれの n 点の平均値の差が $(\Delta Hv)_{cr}$ 以下となる確率、すなわち焼準がなされていないにもかかわらず、焼準されていると判断する確率になる。

図-13(b)を図-13(c)のように座標移動して、ハッチ部を5%とすれば次式が成立する。

$$\frac{(Hv)_W - (Hv)_B - (\Delta Hv)_{cr}}{\sqrt{(\sigma_W^2 + \sigma_B^2)/n}} = 1.65 \quad \dots\dots(2)$$

式(2)において $(Hv)_W - (Hv)_B$ については、前項の結果をもとに安全側の値として、

$$(Hv)_W - (Hv)_B = 18 \quad \dots\dots(3)$$

とした。 σ_W^2 、 σ_B^2 については、本実験では圧接部の硬さの $\sqrt{V}$ の最大値が9.78、母材部の硬さの $\sqrt{V}$ の最大値が7.98であるため安全側の値として、

$$\sigma_W^2 = \sigma_B^2 = 100 \quad \dots\dots(4)$$

とした。また、

$$(\Delta Hv)_{cr} = 10 \quad \dots\dots(5)$$

とすれば式(2)から、

$$n = 9$$

……(6)

となる。

すなわち、圧接部および母材の硬さをそれぞれ9点(約10点)ずつ測定し、その平均値の差が $(\Delta Hv)_{cr}=10$ 以上であれば焼準はなされていないと判断しても、間違える確率は5%以下であるといえることができる。

§ 6. 結論

本報では、鉄筋の表面にクランプきずのつかない圧接器を用いて施工した圧接継手について、実験計画法を用いて低温引張強度に及ぼすふくらみ形状および焼準の影響を調べ、実際に低温構造物で対象とされる最低使用温度において各種鉄筋のガス圧接継手の低温引張強度を確認した。さらに、現場における圧接継手の品質管理を目的として、圧接部の焼準の有無を確認するためのポータブル硬さ計による硬さ試験の適用性について検討した。その結果を要約すると次のとおりである。

(1)低温下において、ガス圧接継手の脆性破壊を生じにくいガス圧接継手の圧接部のふくらみ形状は、ふくらみ最大径 $1.5D$ に対して、ふくらみ幅は $1.7D$ とするのがよい。

(2)鉄筋ガス圧接継手のふくらみ部からの脆性破壊発生

特性は、適正な焼準(焼準加熱時間はD32, D51のそれぞれに対して1.5分, 3.0分)によって改善される。

(3)-75℃における各種鉄筋のガス圧接継手の引張強度は、D32の場合焼準の有無にかかわらず母材と同等の値を示す。D51の場合、圧接のままではかなり低い引張強度を示すものがあるが、焼準したものでは母材と同程度の引張強度を示す。

(4)ポータブル硬さ計を用いて、鉄筋の母材部および圧接部の縦リブ上の硬さをそれぞれ10点ずつ測定することにより、圧接部の焼準の有無を判定することが出来る。

本研究は、既報³²⁾³⁵⁾³⁶⁾および本報を含めて、市販鉄筋およびそのガス圧接継手について低温下における脆性破壊発生特性を調べ、低温構造物への適用性を検討することを目的としたものである。これらの一連の研究結果から、低温構造物を対象とした市販鉄筋の材質選定方法およびそのガス圧接継手の適用方法が明らかになった。

謝辞 本研究の遂行に当たり、東京工業大学名誉教授・神奈川大学教授藤本盛久博士および東京工業大学教授黒正清治博士にご指導頂きました。また、大阪大学助教授豊田政男博士および信州大学助教授中込忠男博士から有益なご教示を頂きました。さらに、日本ガス圧接機専務取締役大井一郎博士の有益なご助言を頂き、頼須山工業所須山美寿社長に終始ご協力頂きました。末尾ながら深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

- 1) E. Happold: "Building under Extrem Conditions and Development of Appropriate Construction Technologies" Introductory Report, IABSE 11th Congress, Vienna, 1980.
- 2) P. Jumppanen: "Structural Engineering in Arctic Regions" Introductory Report, IABSE 12th Congress, Vancouver, 1984.
- 3) 矢部喜堂, 大井一郎: "鉄筋ガス圧接部の低温特性に関する実験的研究" 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集(昭和58年6月)
- 4) 矢部喜堂, 小早川恵実, 藤盛紀明: "円周切欠きを有する鉄筋コンクリート用棒鋼の脆性破壊発生特性" 清水建設研究所報 第38号(昭和58年10月)
- 5) 矢部喜堂, 小早川恵実, 中辻照幸, 藤盛紀明: "低温下における変形能力を考慮した鉄筋コンクリート用棒鋼の材質評価方法" 清水建設研究報告 第40号(昭和59年10月)
- 6) 矢部喜堂, 小早川恵実, 中辻照幸, 藤盛紀明: "鉄筋ガス圧接継手の熱影響部における脆性破壊発生特性" 清水建設研究報告 第41号(昭和60年4月)
- 7) 横川孝男: "自動ガス圧接による鉄筋の接合に関する研究" 学位請求論文(昭和53年7月)
- 8) 山田嘉昭, 横内康人: "有限要素法による弾塑性プログラミング EPIC-IV解説" 培風館(昭和56年3月)
- 9) 石川 肇, 藤森利素, 久米 均: "化学者および化学技術者のための統計的手法" 東京化学同人(1974年6月)
- 10) "新版 品質管理便覧" 日本規格協会(1982年9月)