

太径鉄筋のTS式スリーブジョイントの低温特性（その1）

矢部喜堂
杉田稔
石川登
小野定
(土木技術部)

§ 1. はじめに

近年、公害対策および石油に代る代替エネルギーの必要性から液化天然ガス(LNG)の需要が増大し、LNG貯蔵タンクの建設が各地で散見される。このLNG貯蔵タンクは、最近では地下式または半地下式とされ、その主体構造を鉄筋コンクリート構造で作られるようになり、次第にその規模も大型化して行く傾向にある。

一方、LNGの貯蔵温度は約 -164°C という極低温であり、構造体はタンク内面のインシュレーションを介しての熱伝導により、経年の内に相当の低温にまで冷却されることが予想される。このような低温に晒される構造物あるいは構造部材の力学的性状についての研究資料は極めて少なく、むしろ過大な安全率をとって設計されているのが実情である。したがって、本構造物に対して安全性および経済性の両面が満足された合理的な設計法が確立されるためには、さらに多くの研究資料の蓄積が必要である。その1つに、低温下における鉄筋継手の安全性を挙げる事ができる。これまでに大型構造物を対象とした太径鉄筋の接合工法は種々開発され、これらの継手の力学的性状についての報告は室温の場合では多くあるが、低温の場合は皆無に等しい。

本報は、各種の鉄筋接合工法のうちTS式スリーブジョイント工法に注目し、これを太径鉄筋D51に適用して、その継手の低温下における力学的諸特性について調べる実験研究の緒端である。

§ 2. 実験の目的

一般に、鋼材は低温になるにつれて靱性が低下し、切欠き等の“欠陥”が存在する場合には、低荷重で脆性破壊する傾向にある。また、鋼材に塑性歪(予歪)を与えると、その靱性が低下し、脆性破壊し易くなることが報告されている¹⁾。TS式スリーブジョイント工法は、接合する異形鉄筋をスリーブに挿入して油圧プレス機にて

スリーブを締付け、鉄筋のフシおよびリブのスリーブ内面への喰い込み代による、いわゆるダボ効果により継手の引張強度を期待しようとするものである²⁾。そのため、継手スリーブは塑性変形し、しかも先天的に切欠きを有するため、低温下における継手は脆性的な破壊を起すことが懸念されるところである。

本実験では、TS式スリーブジョイント工法を低温構造物に使用する場合に、継手の性能を十分に確保することのできる適正施工法を検討するために、材料および継手の低温特性、スリーブの塑性化による低温特性の変化等について、定量的に把握することを目的としたものである。

§ 3. 実験概要

3.1 実験計画

本実験では、実験目的に応じ下記の試験を行なった。

1) スリーブ締付試験

本試験では、次項の材料試験に供するために、スリーブに所定の締付圧力による塑性変形を与え、締付圧力とスリーブ伸び率との関係を調べる。

2) 材料試験

本試験では、鉄筋スリーブの素材ならびにスリーブの締付材(予歪材)より試験片を切り出し、小型引張試験、シャルピー衝撃試験により、材料の機械的性質の温度依存性を調べる。

3) 低温継手引張試験

本試験では、締付圧力および締付方法を種々かえたD51のTS式スリーブジョイントの -196°C における力学的性状について調べる。

3.2 供試材

本実験に供した鉄筋は、SD35、D51であり、新日本製鉄製デーコンおよび川崎製鉄製リバーコンの2種を用いた。前者はいわゆる斜めブシ、後者は横ブシを代

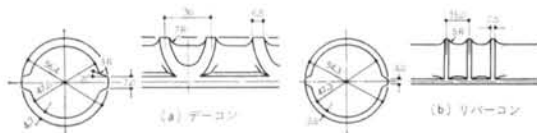


図-1 鉄筋D51の標準形状寸法

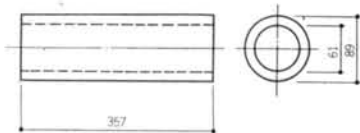


図-2 D51用スリーブの標準形状寸法

表させたものである。これらの鉄筋の標準形状寸法は図-1に示すとおりである。

一方、スリーブは JIS G 3445 (機械構造用炭素鋼鋼管) に規定されている STKM 13A である。このスリーブの標準形状寸法は図-2に示すとおりである。

供試用の鉄筋およびスリーブの化学成分および機械的性質は表-1に示す。

鋼種	成分元素 (%)					機械的性質		
	C	Si	Mn	P	S	降伏点 kg/mm ²	引張強さ (kg/mm ²)	伸び率 (%)
デーコン SD35	0.21	0.46	1.47	0.001	0.010	39.6	63.2	33
リバーコン SD35	0.20	0.36	1.52	0.006	0.008	37.3	56.7	—
スリーブ STKM13A	0.20	0.30	0.55	0.001	0.023	31.4	50.0	33

表-1 供試材の化学成分および機械的性質

締付母材	丸鋼	異形鉄筋
締付圧力	300kg/cm ² 400 500 600	350kg/cm ² 400 450 500

表-2 スリーブ締付圧力

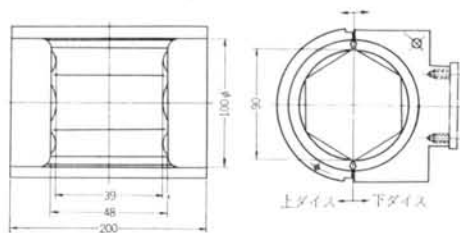


図-3 D51用締付ダイス形状寸法

§ 4. スリーブ締付試験

4.1 試験方法

本実験における材料試験の目的の1つは、締付スリーブから採取した試験片により、締付による塑性変形(予歪)が材料の諸々の機械的性質に及ぼす影響について調べることにある。元来、TS式スリーブジョイントの締付スリーブには、接合部の応力伝達の機構上、異形鉄筋のフシ・リブの喰い込みが生じ、スリーブの材軸方向に対して材質的不均一を生じる。そのために、このような締付スリーブから採取した試験片による材料試験結果は、ばらつきが大きくなるのが予想される。こうしたばらつきを少なくするために、異形鉄筋にかわって丸鋼を使用することとした。使用した丸鋼はS30Cで、材質的に鉄筋SD35とほぼ近いものである。また、異形鉄筋D51のフシおよびリブの高さを考慮して、丸鋼の直径を58mmとした。この丸鋼を芯としたスリーブの締付圧力は、従来の締付圧力およびスリーブの伸び率を考慮して表-2に示す4段階とした。

一方、実際のジョイントの対象は異形鉄筋であるため先の丸鋼を芯とする場合との相関性を調べるために、異形鉄筋SD35、D51を芯としてスリーブを締付け、その時の締付圧力とスリーブ伸び率との関係を調べた。異形鉄筋の場合、予備試験を行ない、母材と同等以上の継手耐力が出るために必要なスリーブ締付圧力は $P=350$ kg

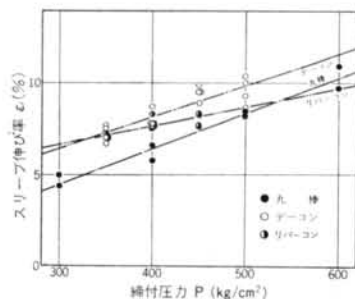


図-4 締付圧力とスリーブ伸び率の関係

/cm² のジャッキ油圧力値であることを確認し、試験の締付圧力は表-2に示す4段階とした。

このとき用いた、スリーブの締付を行なうための油圧プレス機のダイス形状は図-3に示すとおりである。締付スリーブへのダイス接触面積、およびジャッキラムシリンダー径からスリーブに加わる等価圧力値 P_D を求めると、 P をジャッキ油圧力値とすれば、

$$P_D = 7.16 P$$

である。

4.2 試験結果

図-4に、丸鋼および異形鉄筋を芯としてスリーブを締付けた場合の締付圧力(ジャッキ油圧力値)とスリーブ伸び率との関係を示す。これより、スリーブ全長にわた

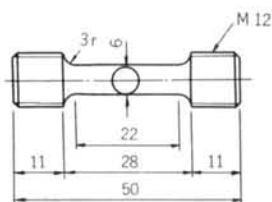


図-5 小型引張試験片の形状寸法

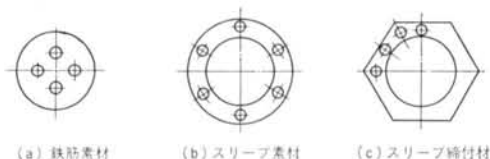


図-6 試験片の採取位置

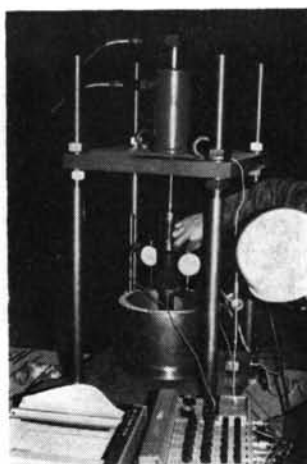


写真-1 小型引張試験装置

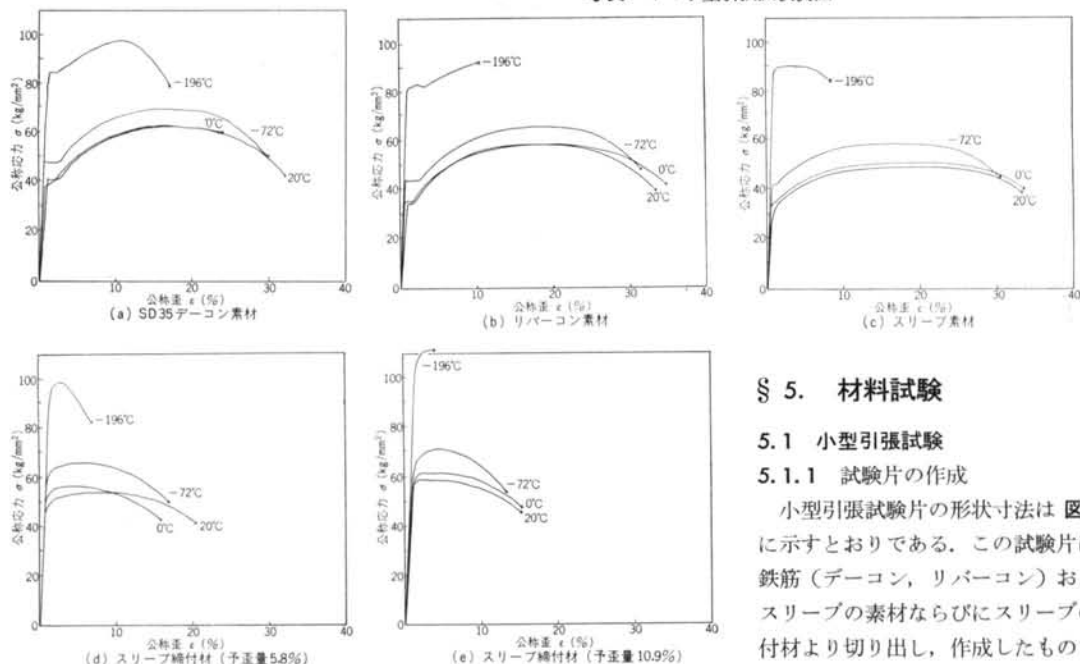


図-7 応力と歪の関係

って一定圧力で締付けた場合の締付圧力とスリーブ伸び率との関係は、締付ける素材によって勾配が多少異なっているが、それぞれ直線関係にある。また、材料試験に供するスリーブ締付材の予歪量と、異形鉄筋を接合する場合のスリーブ伸び率との相関が得られる。これは実際の施工に当って、適正な締付けが行なわれたかどうかを調べるとき、スリーブ伸び率を用いて判定することができることを示唆するものである。

丸鋼を芯として締付けた予歪量の異なる4種類(予歪量 $\epsilon=5.0, 5.8, 8.2, 10.9\%$)である。それぞれの材料から切り出す試験片の採取位置は、図-6に示すとおりである。

5.1.2 試験方法

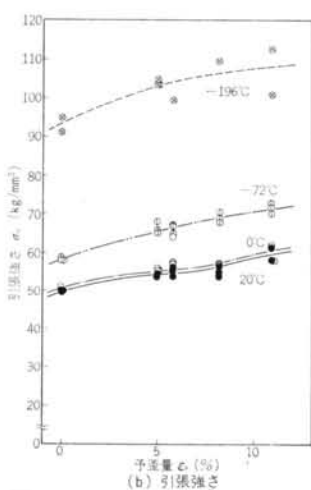
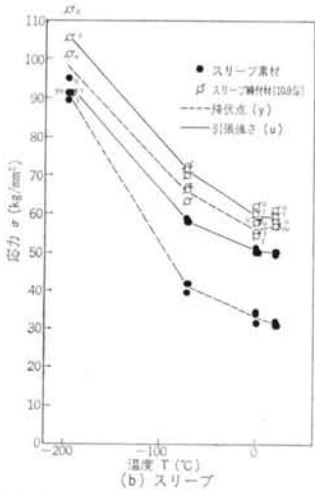
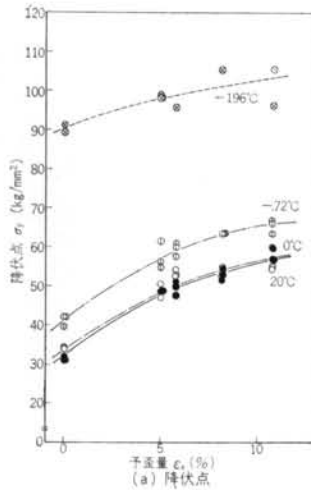
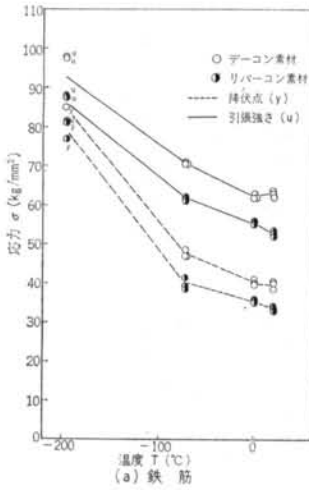
本試験では、写真-1に示すような特別な小型引張試験装置を作製して試験を行なった。試験片は冷却槽中にセットし、この槽内に冷媒を入れて試験片を冷却し、所定の試験温度に一定時間保持してから引張荷重を行なった。この荷重は油圧ジャッキおよび電動油圧ポンプを用

§ 5. 材料試験

5.1 小型引張試験

5.1.1 試験片の作成

小型引張試験片の形状寸法は図-5に示すとおりである。この試験片は、鉄筋(デーコン、リバーコン)およびスリーブの素材ならびにスリーブの締付材より切り出し、作成したものである。ここで、スリーブの締付材は先の



図一八 強度と温度との関係

図一九 強度と予歪量との関係

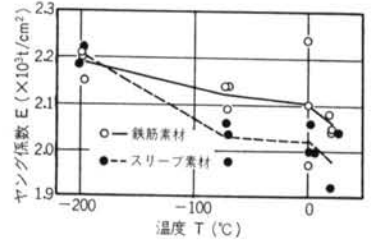
いて行かない，5 ton 用ロードセルにて荷重の検出を行なった。

載荷中には予め試験片平行部に貼付したワイヤーストレインゲージ (W.S.G.) により歪を測定し，一方，試験片引張治具間の変位を電気式ダイヤルゲージ (D.G.) にて検出し，X-Y レコーダにて自記記録させた。前者の歪測定は弾性範囲内について行ない，後者の変位測定は試験片の最終破断に至るまで追跡した。なお，使用した W.S.G. は試験温度が 0°C 以上では常温用ゲージ，それ以外では低温用ゲージを用いた。

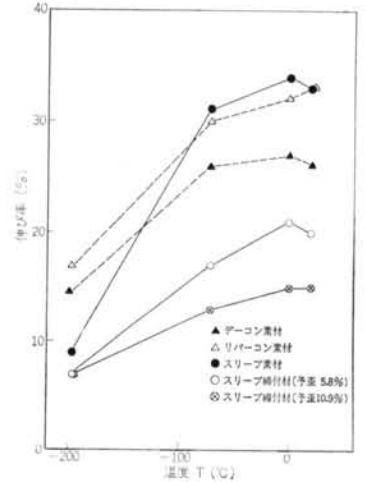
試験温度については，0°C の場合水，-72°C の場合ドライアイスとエチルアルコール，-196°C の場合液体窒素を用いて作り出し，Cu-Co 熱伝対にて温度測定を行なった。

5.1.3 試験結果

(i) 応力-歪関係について



図一十 ヤング係数と温度の関係



図一十一 伸び率と温度との関係

材 料	σ_{0y} (kg/mm ²)	k_y (°K)	σ_{0u} (kg/mm ²)	k_u (°K)
デーコン素材	30.2	79.6	55.1	40.0
リバーコン素材	24.7	92.5	48.8	50.7
スリーブ素材	21.5	110.6	40.0	65.1
スリーブ縮付材 (予歪量5.8%)	39.3	68.8	44.6	61.7
スリーブ縮付材 (予歪量10.9%)	46.6	62.8	47.1	67.1

表一三 材料定数

図一七に鉄筋(デーコン，リバーコン)およびスリーブの素材，ならびにスリーブの縮付材の応力-歪関係が温度に依存する様子を示す。ここでは応力，歪はいずれも公称応力，公称歪に基づくものである。スリーブの縮付材については，代表例として予歪量が 5.8% および 10.9% の場合を示した。

鉄筋の場合，全試験温度にわたって明瞭な降伏点が現われ，歪硬化も十分認められる。一方，スリーブ材では明瞭な降伏点は現われず，歪硬化も鉄筋に比べて小さく -196°C ではほとんど見られない。

また，それぞれの素材の応力-歪関係は，0°C 近傍で

は常温の場合とほぼ類似しているが、 -72°C に下ると強度が増加し、逆に変形は減少する。さらに、 -196°C ではこの傾向が顕著になる。

(i)強度について

図-8に降伏点または0.2%耐力および引張強さと試験温度との関係を示す。図-9には降伏点または0.2%耐力および引張強さとスリーブ予歪量との関係を示す。

降伏点または0.2%耐力および引張強さは、それぞれ温度の低下につれて増大する。 -196°C における強度を常温における強度と比較すると、鉄筋素材の場合、降伏点または0.2%耐力については前者は後者に対して2.1~2.4倍、引張強さについては1.5~1.7倍程度である。また、スリーブの場合、降伏点または0.2%耐力については素材では2.0~2.9倍、予歪量が大きくなるにつれてこの値は小さくなり、予歪10.9%では1.6~1.8倍程度である。引張強さについては予歪量に無関係に概ね1.8~1.9倍である。池田らによると、一般に鋼材の強度と温度との関係が次式で与えられる³⁾。

$$\sigma_y = \sigma_{oy} e^{k_y/T_k}$$

$$\sigma_u = \sigma_{ou} e^{k_u/T_k}$$

ここに、 σ_{oy} 、 σ_{ou} 、 k_y 、 k_u は材料定数、 T_k は絶対温度である。本試験における諸定数は表-3に示すとおりである。

温度を一定としたときの強度は、スリーブの予歪量の増加につれて上昇するが、その上昇の勾配は次第に鈍化し、一定値に飽和する傾向にある。

(ii)ヤング係数について

図-10に試験片の応力-歪曲線より求めた初期剛性すなわちイニシャルタンジェントによるヤング係数と温度との関係を示す。ヤング係数は温度が低下するにつれてわずかながら増加する傾向にあり、 -196°C では常温に比べて約20%程度の増加を示している。

(iii)伸び率について

材料の変形能を評価する指標の1つとして、伸び率を挙げる事ができる。

本試験における伸び率は、試験片の破断時の伸び量をX-Yレコーダ記録より読みとり、これを試験片平行部長さで除して求めたものである。

図-11には鉄筋およびスリーブの素材、ならびにスリーブの縮付材から切り出した試験片の伸び率と温度との関係を示す。これによると、伸び率は温度の低下とともに減少する。概ね -70°C あたりまでは常温の場合と大きく変わらないが、これ以下では急激に減少する。しかし、 -196°C では予歪量に無関係に一定の伸び率に収れんする傾向にある。

5.2 衝撃試験

5.2.1 試験片の作成

本試験における衝撃試験片は、JIS Z 2202(金属材料衝撃試験片)に示される2mmVノッチシャルピー試験片によるものである。

各試験片は前項の小型引張試験片の場合と同様に鉄筋およびスリーブの素材、ならびにスリーブの縮付材(予歪量 $\epsilon=4.4, 6.6, 8.2, 9.7\%$)の図-6に示す位置より切り出し加工した。

5.2.2 試験方法

試験方法はJIS Z 2242(金属材料衝撃試験法)に基づくものである。使用した試験機は50kg・mシャルピー衝撃試験機である。

試験温度の設定に当っては、試験片を温水またはエチルアルコールとドライアイスの中に入れて、一定時間保持してから取り出し、すばやく試験機にセットし、試験片の表面温度が所定温度に達した時点で試験を行なった。

5.2.3 試験結果

図-12に鉄筋およびスリーブの吸収エネルギーと温度との関係を示す。

本試験に用いた鉄筋(デーコン、リバーコン)は他の同種材⁹⁾に比べて15ft 1b遷移温度はかなり低い。また、スリーブの縮付材の素材に対する15ft 1b遷移温度 θT_{15} の上昇量を素材を基準にして示すと図-13のようになる。これによると予歪量が5~6%程度までは遷

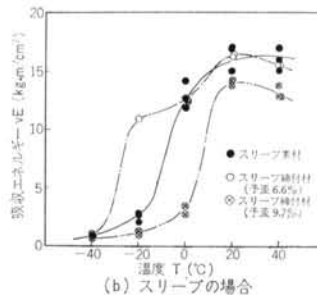
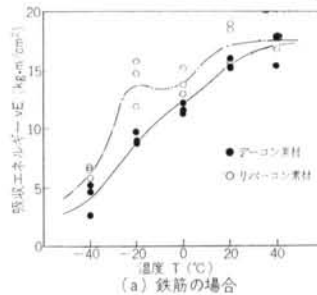


図-12 吸収エネルギーと温度の関係

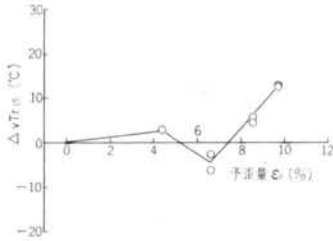


図-13 遷移温度の変化と予送量との関係

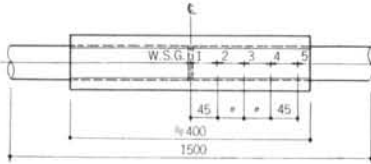


図-14 継手試験体の標準形状寸法

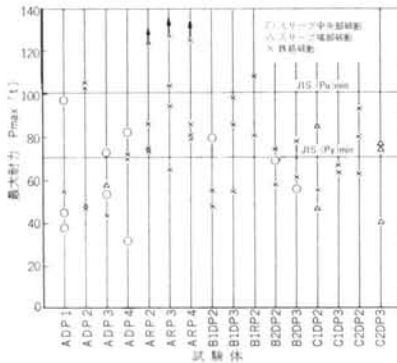


図-15 -196°Cにおける継手耐力 (D51)

移温度の大きな変化はない。したがって本試験の範囲内では、TS式スリーブジョイント工法でスリーブの材質をそこなわない適正締付は、スリーブ伸び率が5~6%となる場合であると判断される。

§ 6. 低温継手引張試験

6.1 試験体の作成

本試験における継手試験体の標準形状寸法は、図-14に示すとおりである。

試験要因は表-4に示すごとく、鉄筋フシ形状(2水準)、締付圧力(4水準)、締付方法(3シリーズ5水準)である。試験体の記号および数量は表-5に示すとおりである。

6.2 試験方法

継手の応力伝達状況を把握するために、同一種の試験体中から1体ずつ選び出して図-14に示すように締付

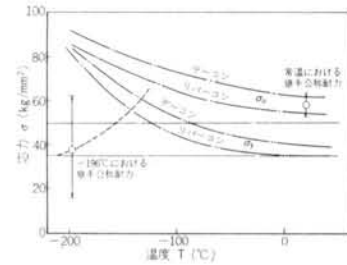


図-16

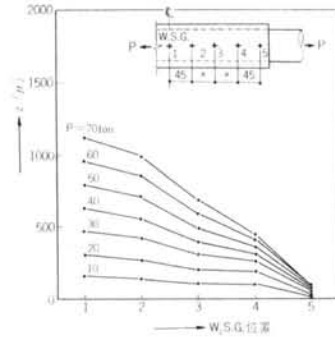


図-17 スリーブ表面の歪分布 (ADP 3-1の場合)

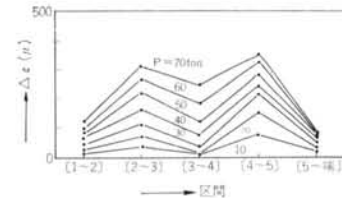


図-18 歪測定区間における歪の増分 (ADP 3-1の場合) スリーブの六角面のうち、平行な2面のスリーブ片側部分に低温用W.S.G.を貼付し、各荷重ステップに対応するスリーブ表面の歪を調べることにした。

試験体は試験体保持部(チャック部)を残して保温材を巻き、-196°Cの液体窒素中に浸せきして冷却した後、槽よりとり出し、すばやく200 tonアムスラー型万能試験機にセットし、単調引張荷重を行なったものである。このとき、試験体に予め取付けたCu-Co熱伝対により温度測定を行ない、試験体継手部が試験中-196°Cに保持されていることを確認した。

6.3 試験結果

6.3.1 最大耐力について

図-15に-196°Cにおける継手の引張最大耐力を示す。本試験の範囲内では継手耐力は非常にばらつきが大きく、試験要因である締付圧力、および締付方法と最大耐力との間には相関性を見ることができなかった。

要因	水準数	水 準
鉄 筋	2	D:デーコン R:リバーコン
締付圧力	4	P ₁ =500 P ₂ =450 P ₃ =400 P ₄ =350 kg/cm ²
締付方法	5	A: スリーブ全長にわたり締付圧力一定 B ₁ : スリーブ端部および中央部の締付圧力を50kg/cm ² 低減 B ₂ : スリーブ端部および中央部の締付圧力を100kg/cm ² 低減 C ₁ : スリーブ端部および中央部に1ストローク締残し C ₂ : スリーブ端部のみ1ストローク締残し

表一4 試験要因

締付方法	鉄筋種	締 付 方 法			
		P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
A	D	ADP1 (4)	ADP2 (4)	ADP3 (4)	ADP4 (4)
	R	—	ARP2 (4)	ARP3 (4)	ARP4 (4)
B ₁	D	—	B1DP2 (3)	B1DP3 (3)	—
	R	—	B1RP2 (3)	—	—
B ₂	D	—	B2DP2 (3)	B2DP3 (3)	—
C ₁	D	—	C1DP2 (3)	C1DP3 (3)	—
C ₂	D	—	C2DP2 (3)	C2DP3 (3)	—

() 内数字は試験体の数量を示す。

表一5 試験体の記号および数量

この耐力を鉄筋の公称断面積で除して公称応力に直し既往の常温継手強度とともに、先の鉄筋素材の強度と比較すると 図一16 のようになる。-196℃における継手強度は、鉄筋素材の強度に比べて大きく低下する。これは極低温下において材料の靱性が著しく低くなり、鉄筋のフシおよびリブのアール部またはスリーブの内面のノッチ部への応力集中によって生ずる脆性破壊によるものである。

6.3.2 スリーブ表面歪について

図一17 にスリーブ表面歪分布の1例を示す。これによるとスリーブ表面歪は常温継手の場合と同様にスリーブ中央部分が高く、端部に近い程低い。この傾向は荷重の増大につれて顕著となる。図一18にはW.S.G.を貼付した歪測定区間におけるスリーブの歪増分を示す。この歪増分は鉄筋からスリーブへの応力伝達量を表わすものである。これを常温の場合と比較すると、スリーブの端部において歪増分が大きい。これは極低温下において鉄筋の変形またはスリーブの変形が極めて小さく、スリーブ端部側における鉄筋フシとスリーブ内面のダボ効果の有効に働くため、鉄筋からスリーブへの応力伝達がこ

の部分で大きいことを示すものである。

§ 7. まとめ

本実験により得られた結果を要約すると次のとおりである。

1) スリーブに丸鋼または異形鉄筋の芯材を通してスリーブを締付けた場合、その締付圧力とスリーブ伸び率とはほぼ直線関係にある。

2) 鉄筋およびスリーブの引張強度は温度の低下につれて上昇し、-196℃では常温に比べて1.6~2.9倍となる。

3) ヤング係数は低温になるにつれてわずかに上昇し、-196℃では常温に比べて20%程度高い。

4) スリーブの引張強度は予歪量が増大するにつれて上昇するが、その上昇の勾配は次第に緩くなる傾向にある。

5) スリーブの伸び変形は常温~-70℃での変化はわずかであるが、これ以下の温度域では温度の低下とともに急激に減少する。しかし、-196℃では予歪量に無関係に一定した値に収れんする傾向を示している。

6) Vノッチシャルピー試験結果より、TS式スリーブジョイント工法の適正締付はスリーブ伸び率が約5~6%となる場合であると判断される。

7) -196℃における継手耐力は、ばらつきが大きくその耐力あるいは破断の傾向と締付圧力、締付方法との相関性は認められなかった。

8) -196℃における継手の鉄筋からスリーブへの応力伝達は継手端部が支配的である。

§ 8. 今後の問題点

本報ではTS式スリーブジョイントの低温特性を把握するために、比較的簡便な試験方法を採用してその目的を達した。今回の継手引張試験は、試験温度の設定の容易さから液体窒素中へのドブ漬け方法により、LNG温度より低い-196℃で試験した。しかし、インシュレーションを施された実際のタンク構造体の温度は長年経過しても-80℃程度と考えられる。したがって、今後は実際の構造体に想定される温度域における継手の力学的性状についても検討して行く必要がある。

最後に、本実験に当り、(株)サトースリーブエンジニアリング、ならびに当社土木部袖ヶ浦地下タンク現場の方

々，研究所の松岡彰，安井直登の諸氏にご助力を頂いた ことを記して，ここに謝意を表します。

〈参考文献〉

- 1) 池田一夫他：“各種鋼板の脆性破壊発生特性におよぼす塑性歪の影響” 溶接学会誌 1969年8月
- 2) 清水建設：“TS式スリーブジョイント工法施工要領書”
- 3) 秋田好雄他：“脆性破壊の発生に関する研究（第1報）” 造船協会論文集 第116号 昭和39年
- 4) 日本圧接協会：“鉄筋の圧接性に関する試験報告” DEC 1974
- 5) A. S. テテルマン他：“構造材料の強度と破壊” 培風館