

太径鉄筋D51のTSジョイントの低温特性（その2）

矢部 喜堂
石川 登
杉田 稔

§ 1. はじめに

最近、液化天然ガス（LNG）に対する社会的需要が高まるにつれてふえる傾向にある鉄筋コンクリート製の貯蔵地下タンクに対して、その構造体の安全性・信頼性の確保が強く要求されるようになってきた。筆者らは、本構造物を対象とした太径鉄筋D51、ならびにその継手の1例としてTS式スリーブジョイント（以後TSジョイントと略称）を取り上げ、これらの低温下における力学的特性に関する一連の実験を行ってきた。その一部については既に前報¹⁾において報告した。今回は特に、任意に試験温度を変えることのできる低温試験装置を用いて、 -80°C 、および -165°C における鉄筋D51およびそのTSジョイントの低温引張特性について調べた。

本報ではその結果について報告する。

§ 2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験では、太径鉄筋D51およびこの鉄筋に適用したTSジョイントの、室温および低温下における静的引張試験を行ない、耐力、変形能等について検討した。

試験要因として、鉄筋はフシ形状を考慮して新日本製鉄製デーコン、川崎製鉄製リバーコンの2種とし、試験温度は室温、 -80°C および -165°C の3段階とした。ここで、 -80°C は地下タンク構造体の長年経過後において到達すると推定される温度、 -165°C は実際の貯蔵LNGの温度を想定したものである。

2.2 供試材

使用した鉄筋は、JIS G 3112 に規定されているSD35・D51で、上記2銘柄を用いた。また、TSジョイントに用いるスリーブ（以後TSスリーブと略称）の材質は、STKM13Aである。これらの供試材は、前報の実

験に用いた材料と同一ロットである。表-1に、供試材の化学成分および機械的性質を示す。

2.3 試験体の作成

2.3.1 試験体の形状寸法および数量

本実験では、鉄筋母材および継手の試験体をそれぞれ室温用と低温用（ -80°C 、 -165°C ）に分け、特に低温用に対しては図-1に示す形状寸法とした。

一般に、鋼材は低温になるにつれて強度上昇を示す。全長にわたり断面が一様な試験体では、試験体の材軸方向に温度勾配がある場合、最も温度の高い部分がウィークポイントになる。冷却された試験体の両端を室温雰囲気にあるクサビ型チャックによって保持し、引張载荷を行なうと、保持部で破断し、所要の試験結果を得ることができない。したがって、本実験では低温用試験体の端部を図-1に示すように紡錘型スリーブを用いて補強した。すなわち、鉄筋母材および継手の各試験体端部は、内部に環状ひだを有する鋼製紡錘型スリーブを用い、その中央において端部に環状溝を加工した高張力鋼プルロ

| 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

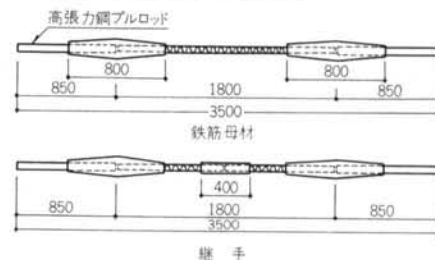
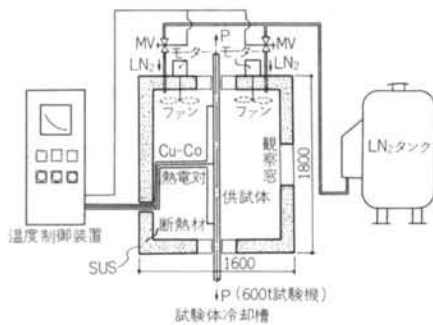
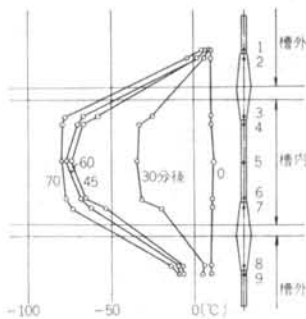


図-1 試験体の形状寸法



図一2 任意可変低温引張試験装置の概念図



図一3 試験体の温度分布 (-80°Cの場合)

ッドと突き合せ、モルタル樹脂を充填することによって接合したものである。

試験体の数量は、各試験温度ごとに同一鉄筋に対して3体ずつとした。ただし、-80°Cにおけるリバーコンの試験は割愛した。

2.3.2 TSジョイントの施工条件

継手試験体の作製に当って、TSジョイントの施工条件は前報の試験結果を考慮し、すべての試験体において次のとおりとした。

- 1) 締付圧力： $P=450\text{kg/cm}^2$ (油圧力)
- 2) 締付方法：TSスリーブ全長にわたり一定圧力で締付け

なお、スリーブ端部の圧着に当っては、スリーブ端部に過大な圧力がかからないように、ダイス端面とスリーブ端面とをそろえて均等に圧着を行なった。

2.4 試験方法

引張試験に当っては当研究所所有の島津製作所製600t構造物試験機を用いた。試験体を予めこの試験機にセットし、これに特別に作製した大型の任意可変低温槽を設置して、試験体の冷却を行ない、所定の試験温度において引張荷重を行なうものである。この任意可変低温引張試験装置の概念図は図一2に示すとおりである。試験



写真一1 低温実験風景

体の冷却に当っては、低温槽内の頂部ノズルより槽内に液体窒素を噴霧し、槽内のファンによってこれを攪拌し、徐々に冷却を行なうものである。このときの温度制御は、試験体の中央部表面に取付けられた熱電対(Cu-Co)を介して、自動温度制御装置により液体窒素供給用の電磁弁が自動的に開閉することによって行なわれる。この冷却過程における最高冷却速度は約 -150°C/時 とした。所定の試験温度に達した後も、試験体温度が定常状態に達して安定するまでは、しばらく同一温度を保持した。

荷重に当たっては、通常の荷重速度 $1\text{kg/mm}^2/\text{sec}$ 程度として単調荷重を行なった。

なお、破断後の鉄筋母材の伸び(残留塑性変形量)を測定するために、鉄筋リブ上に50mmピッチのポンチマーク(標点)を打刻しておいた。

写真一1に、低温実験風景を示す。

§ 3. 実験結果および検討

3.1 試験体の温度分布の確認

図一3に、冷却過程における試験体の材軸方向の温度分布の1例を示す。試験体全長においては温度勾配が大きいが、被試験部分においてはほぼ様な温度分布が得られ、設定温度に対して $\pm 2\text{°C}$ の精度が確保された。

3.2 引張試験結果

本実験における引張試験結果の一覧を表一2、表一3に示す。

| 試験温度 | 銘柄 | 試験体記号 | 降伏荷重 P_y (t) | 降伏応力 σ_y (kg/mm ²) | 最大荷重 P_{max} (t) | 引張強さ σ_{max} (kg/mm ²) | 破断荷重 P_f (t) | 破断応力 σ_f (kg/mm ²) | 破断状況 |
|-------|-------|--------|----------------------|---|--------------------------|---|----------------------|---|----------------|
| 室温 | デーコン | VD-1-1 | 77.6 | 38.3 | 118.6 | 58.5 | 85 | 42 | 鉄筋延性破断 |
| | | VD-1-2 | 77.5 | 38.2 | 118.5 | 58.5 | 87 | 43 | " |
| | | VD-1-3 | 75.3 | 37.1 | 115.3 | 56.9 | 83.5 | 41 | " |
| | リバーコン | VR-1-1 | 78.8 | 38.9 | 118.8 | 58.6 | 85 | 42 | 鉄筋延性破断 |
| | | VR-1-2 | 79.9 | 39.4 | 120.2 | 59.3 | 87 | 43 | " |
| | | VR-1-3 | 76.6 | 37.8 | 117.0 | 57.7 | 85 | 42 | " |
| -80℃ | デーコン | VD-2-1 | 86.9 | 42.9 | 130.1 | 64.2 | 94 | 46.4 | 鉄筋延性破断 |
| | | VD-2-2 | 87.7 | 43.3 | 131.1 | 64.7 | 96 | 47.4 | " |
| | | VD-2-3 | 89.0 | 43.9 | 131.0 | 64.6 | 97 | 47.9 | " |
| -165℃ | デーコン | VD-3-1 | (117) | (57.7) | ≥147.0 | ≥72.5 | — | — | ブルロッド抜け出し |
| | | VD-3-2 | (128) | (63.1) | ≥149.3 | ≥73.7 | — | — | " |
| | | VD-3-3 | (123.6) | (61.0) | 124.8 | 61.6 | 124.8 | 61.6 | フシのアール部で鉄筋脆性破断 |
| | リバーコン | VR-3-1 | (130.4) | (64.3) | 135.0 | 66.6 | 135.0 | 66.6 | ロールマーク部で鉄筋脆性破断 |
| | | VR-3-2 | (122.0) | (60.2) | ≥128.5 | ≥63.4 | — | — | 鉄筋抜け出し |
| | | VR-3-3 | (124.2) | (61.3) | 128.6 | 63.4 | 128.6 | 63.4 | ロールマーク部で鉄筋脆性破断 |

表-2 鉄筋母材の引張試験結果

| 試験温度 | 銘柄 | 試験体記号 | 降伏荷重 P_y (t) | 降伏応力 σ_y (kg/mm ²) | 最大荷重 P_{max} (t) | 引張強さ σ_{max} (kg/mm ²) | 破断荷重 P_f (t) | 破断応力 σ_f (kg/mm ²) | 破断状況 |
|-------|-------|--------|----------------------|---|--------------------------|---|----------------------|---|-----------------|
| 室温 | デーコン | JD-1-1 | 76.8 | 37.9 | 118.9 | 58.7 | 84 | 41 | 鉄筋延性破断 |
| | | JD-1-2 | 74.8 | 36.9 | 116.3 | 57.4 | 83 | 41 | " |
| | | JD-1-3 | 77.8 | 38.4 | 119.6 | 59.0 | 86.5 | 43 | " |
| | リバーコン | JR-1-1 | 77.1 | 38.0 | 117.0 | 57.7 | — | — | 鉄筋抜け出し |
| | | JR-1-2 | 76.2 | 37.6 | 117.0 | 57.7 | — | — | " |
| | | JR-1-3 | 76.9 | 38.0 | 113.8 | 56.1 | — | — | " |
| -80℃ | デーコン | JD-2-1 | 89.3 | 44.1 | 133.3 | 65.8 | 98 | 48 | 鉄筋延性破断 |
| | | JD-2-2 | 89.0 | 43.9 | 133.7 | 66.0 | 95 | 47 | " |
| | | JD-2-3 | 88.8 | 43.8 | 136.6 | 67.4 | 98.5 | 49 | " |
| -165℃ | デーコン | JD-3-1 | — | — | 102.8 | 50.7 | 102.8 | 50.7 | T Sスリーブ端部鉄筋脆性破断 |
| | | JD-3-2 | — | — | 83.5 | 41.2 | 83.5 | 41.2 | " |
| | | JD-3-3 | — | — | 88.4 | 43.6 | 88.4 | 43.6 | " |
| | リバーコン | JR-3-1 | 128.6 | 63.4 | 137.8 | 68.0 | 137.8 | 68.0 | T Sスリーブ端部鉄筋脆性破断 |
| | | JR-3-2 | 116.8 | 57.6 | 125.0 | 61.7 | 125.0 | 61.7 | ロールマーク部で鉄筋脆性破断 |
| | | JR-3-3 | — | — | 117.2 | 57.8 | 117.2 | 57.8 | T Sスリーブ端部鉄筋脆性破断 |

表-3 継手の引張試験結果

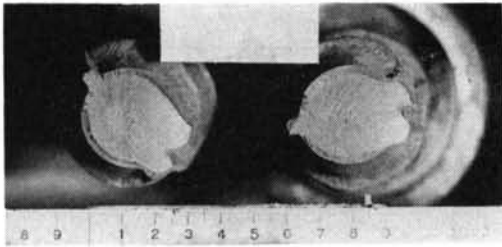
3.2.1 引張強度について

まず、室温における鉄筋母材および継手はデーコン、リバーコンともに J I S 規格に定められている降伏点および引張強さを満足している。

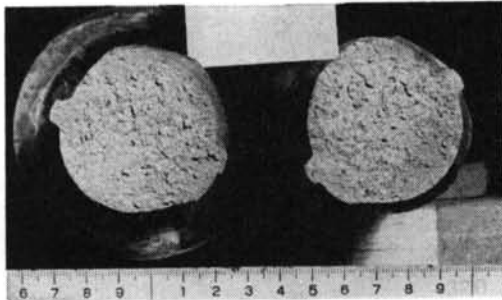
次に、-80℃における鉄筋母材および継手は、ともに室温の場合に比べて降伏点では14~16%、引張強さでは11~14%程度の強度上昇を示し、いずれも安定した強度

が得られている。

-165℃における鉄筋母材は、最終破壊が鉄筋の破断による場合と、引張治具用スリーブからの鉄筋の抜け出しによる場合とに分けられる。前者の場合、-80℃における耐力とほぼ同程度の耐力を有する。後者の場合、鉄筋母材の最大耐力は抜け出しによる最終耐力以上を有することを意味するもので、本試験の範囲では前者の耐力



写真—2 -80℃における鉄筋破断面



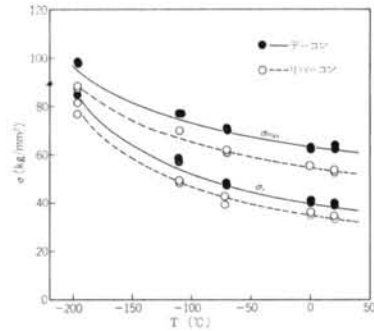
写真—3 -165℃における鉄筋破断面

を保証している。また、-165℃における継手は、TSスリーブ端部の鉄筋母材で破断する場合と、スリーブから離れた鉄筋母材で破断する場合とに分けられる。前者の場合は強度のパラツキが大きい、後者の場合は、前者に比べて比較的安定した強度が得られている。本試験の範囲内では、いずれも室温における母材の降伏点以上の強度を有している。

3.2.2 破断状況について

-80℃における鉄筋母材は室温の場合と同様、絞りおよび伸びの大きい典型的な延性破断を呈する。同温度における継手は、母材破断に至り同様な破断性状を示す。このときの鉄筋のTSシリーズからの抜け出し量は常温の場合と同様、破断後において3~4mm程度である。このことは材料が同温度において、十分な塑性変形を有することを意味している。-165℃における鉄筋母材は、鉄筋フシのアール部あるいはロールマーク等の形状的不連続部を起点として、脆性破断しているものが多い。同温度における継手の場合、TSスリーブの端部、あるいはこれより1~2フシ分スリーブの内側にある鉄筋のフシのアール部で脆性破断している。

写真—2、3には、鉄筋母材の-80℃および-165℃における破断面の1例を示す。前者の場合、絞りの大きなカップアンドコーン型の延性破面を呈し、後者の場合は絞りのない脆性破面を呈している。



図—4 小型平滑丸棒試験片による強度と温度との関係

| 材 料 | A_y | B_y | A_u | B_u |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| デーコン | 1116 | 0.593 | 385 | 0.322 |
| リバーコン | 1249 | 0.636 | 439 | 0.370 |

表—4

3.3 前報試験結果との対応

3.3.1 引張強度について

鉄筋母材から切り出した小型平滑丸棒試験片による試験結果については前報に報告したが、これに一部データを追加して整理すると図—4に示すとおりである。一般に鋼材の引張強度と温度との関係は、前報に示したごとくアウレニウス型の関数で表わすことができるといわれているが、これによると本実験結果は-120℃近傍でよい一致が示されなくなる。本実験の範囲内ではむしろ、

$$\sigma_y = A_y(T_k)^{-B_y} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad \dots\dots(1)$$

$$\sigma_u = A_u(T_k)^{-B_u} \quad (\text{kg/mm}^2) \quad \dots\dots(2)$$

とおいた実験式によってよく近似できる。ここに、 T_k は絶対温度であり、各係数 A_y 、 B_y 、 A_u 、 B_u は表—4に示すとおりである。以下の考察には、この実験式を用いることとする。

図—5、6には、前回試験および今回試験結果を統合し、各試験温度における鉄筋母材および継手の引張強度を上述の実験曲線と対比して示す。図中、室温における鉄筋母材および継手の引張強度が実験曲線上に一致していないのは、応力算定に当って公称断面積を用いているためであると考えられる。

さて、同図によると-80℃では、鉄筋母材および継手の強度上昇傾向は実験曲線のカーブとほぼ一致しているが、-165℃では同一温度における平滑材強度に対して著しく低下し、しかもパラツキが大きくなる。このうち鉄筋母材の引張強さは、前述のごとく比較的安定しており、同一温度における平滑材の降伏点近傍にある。しかし、継手については平滑材強度の約50%程度にまで強度低下を示すものもある。-196℃に至ってはさらに一段

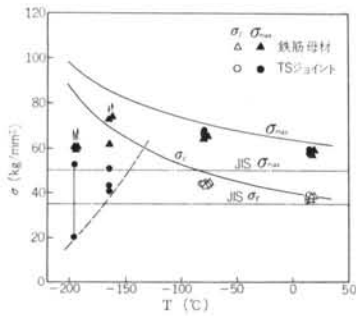


図-5 鉄筋母材および継手の引張強度（デーコンの場合）

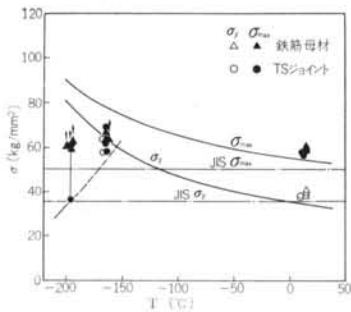


図-6 鉄筋母材および継手の引張強度（リパーコンの場合）
と強度低下が著しい。継手のスリーブ端部より内側に入ったところの鉄筋の1フシ目のアール部には、平均応力の約2.5倍の応力集中を生じていることがFEM解析によって確かめられている⁴⁾。低温下における耐力低下の一要因は、このような高い応力集中によるものであると考えられる。これらの図から、鉄筋母材および継手の単純引張に対するいわゆる脆性破壊発生温度を推定すると、およそ-120℃前後と推定される。

3.3.2 変形能について

構造材料の評価に当って、最大耐力時までの変形は終局設計的な観点から重要な指標の一つと考えられる。

鋼材が延性的に引張破断した場合、材料の伸びはくびれ部分に生ずる局部伸びと、その両側に広がる一様伸びに分けることができる。このうち、一様伸びは材料が最大耐力に達して除荷された後の残留塑性変形量である。したがって、最大耐力時までの変形能はバウシinger効果を無視すれば、この一様伸びに弾性変形量、

$$\epsilon_e = P_{max} / E_T A \quad \dots\dots(3)$$

を加えたものである。ここに、 E_T は各温度 T におけるヤング係数、 A は断面積を表わす。

図-7、8には、それぞれデーコンおよびリパーコンの鉄筋母材の各試験温度における最大耐力時までの一様伸び ϵ_u を示す。これらは、鉄筋の縦リブ上に予め打刻

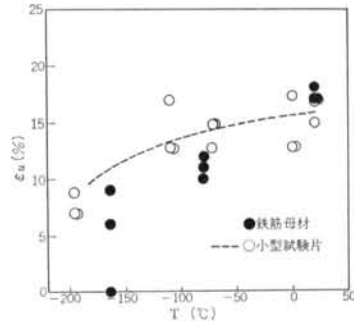


図-7 小型試験片および鉄筋母材の一様伸び（デーコンの場合）

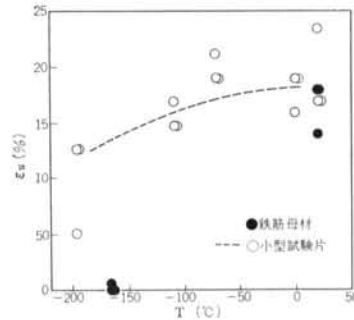


図-8 小型試験片および鉄筋母材の一様伸び（リパーコンの場合）

しておいた標点間の伸びより求めたものである。

また一方、小型平滑試験片の一様伸びは、塑性変形後の体積変化がないと考えると、真歪で表わせば、

$$a\epsilon_u = l_n(A_0/A) \quad \dots\dots(4)$$

として求められる。ここに、 A_0 、 A はそれぞれ引張試験前および後の一様伸び部分の断面積を示す。さらに真歪 $a\epsilon$ と公称歪 ϵ との関係は、

$$a\epsilon = l_n(1 + \epsilon) \quad \dots\dots(5)$$

である。

ここで、前述の小型平滑試験片の一様伸びを公称歪で求め、これを前述の図-7、8に鉄筋母材（異形）の一様伸びと比較して○印で示す。これによると、鉄筋母材の一様伸びは、平滑材に比べて温度の低下にともなう減少の傾向が急勾配である。これは、異形鉄筋のフシ、リブが伸び能力に影響を及ぼすものと考えられる。

§ 4. 結 び

本実験より得られた結果を要約すると次のとおりである。

- 1) -80℃における鉄筋SD35・D51およびそのTSジョイントは、室温における母材強度に対して11~14%程度の強度上昇を示し、その破断性状も典型的な延性破断であり、十分な変形能を有する。
- 2) -165℃における鉄筋母材は、室温における母材強度以上の耐力を有するが、そのTSジョイントは耐力のばらつきが大きい。また、いずれもその破断性状は脆性的であり、変形能も少ない。
- 3) TSジョイントは、-196℃の場合(前報)を除いてスリーブで破断したものは見られなかった。
- 4) TSジョイントの脆性破壊発生温度は、ほぼ-120℃前後と推定される。

§ 5. 今後の問題点

これまで、LNG地下タンクを対象とした太径鉄筋SD35・D51およびその継手の一例としてTSジョイント

をとり上げて、これらの低温下における力学的特性について調査してきたが、この調査結果からさらに多くの問題点を指摘することができる。その中でも、まず鉄筋母材そのものの低温下での力学的特性あるいは脆性破壊特性といった問題については、さらに今後詳細な調査検討が必要と考えられる。また今回の一連の実験では、供試材の材質が限定され、しかも室温における伸び能力が比較的大きい2銘柄について行なわれたものである。材質の相違またはばらつきが低温特性に及ぼす影響についても検討の余地があると思われる。これら母材の特性の把握に続いて、各種継手の低温特性についても調査する必要がある。一般に現在、室温で実用化されている各種継手は、工法によっては鉄筋母材の材質変化をきたしたり、大きな応力集中部を有することがある。したがって、これらの継手工法を低温下で用いる場合、母材よりむしろ継手に多くの問題を有すると考えられる。現段階において、各種低温域に適した継手工法は必ずしも十分解決されているわけではなく、今後の調査研究に待たれる。

<参考文献>

- 1) 矢部、杉田、石川、小野：“太径鉄筋D51のTS式スリーブジョイントの低温特性(その1)” 清水建設研究所報 第25号 昭和51年4月
- 2) 同上、建築学会大会学術講演梗概集 1975年10月
- 3) 同上、日本コンクリート工学協会シンポジウム 1976年3月
- 4) 杉田、矢部、石川：“TSスリーブジョイントの継手部の応力伝達解析”(未発表)
- 5) エヌ・ヴェ・ノヴィスコ他：“低温度における構造用材料の機械的試験法” アイクス
- 6) D. マックリーン：“金属の機械的性質” 共立出版