

正会員 ○金 津 努 電力中央研究所
 正会員 青 柳 征 夫 電力中央研究所
 正会員 佐 藤 良 一 防衛大学校

1. まえがき

近年、クリーンなエネルギー源として輸入が増加している液化天然ガス(LNG)の貯蔵に鉄筋コンクリート製(RC)タンクが使用され、各地にLNGタンクの建設が進められている。LNGは沸点が -162°C と低く貯蔵状態においてはタンク本体も -100°C に及ぶような厳しい条件にさらされることから、鉄筋コンクリートの低温下における耐力のみならず、変形、ひびわれ特性の実験的、理論的解明が急がれている。

本論文では、LNG貯蔵タンクを対象とし、極低温下におけるRCはり材の軸引張りおよび曲げ試験を行なった結果をひびわれ性状に注目し、常温時の場合との比較および既往の算定式による検討を行ない、さらに温度応力の観点からも考察を加えたものである。

2. 実験概要

2-1 軸引張り試験：試験に用いたRCはりは断面 $12.5 \times 20\text{ cm}$ 断面内に数本の鉄筋を対称に配置している。試験区間は 220 cm であり、試験方法、配筋状態、試験体の詳細は図1図2表1に示した。コンクリートは $W/C=59\%$ 、 $S/a=41\%$ で、常温低温の強度試験値はそれぞれ、圧縮強度 $370, 710\text{ Kg/cm}^2$ 、引張り強度 $26, 65\text{ Kg/cm}^2$ 、曲げ強度 $47, 121\text{ Kg/cm}^2$ 、弾性係数 $3.1 \times 10^5, 3.7 \times 10^5\text{ Kg/cm}^2$ であつた。鉄筋の機械的性質は、SD35D16で常温低温それぞれの降伏点応力度 $3620, 4130\text{ Kg/cm}^2$ 、弾性係数 $1.97 \times 10^6, 2.01 \times 10^6\text{ Kg/cm}^2$ であつた。

冷却方法は、断面内に銅パイプを配した試験体を発泡スチロールで覆い、パイプに液体窒素を循環させ、電磁弁により温度コントロールを行ないながら所定の温度(-60°C)まで降下させた。

低温における試験は二つの方法によって行なった。一つは、はりを -60°C まで降下させた後に引張り試験を行なう方法で、もう一つは、約 20°C ずつ温度を降下させるごとに、常温時から収縮した量だけ引張って元に戻す方法(拘束試験)である。拘束試験は -60°C に達した後は引張り試験に切り換えている。

計測は、はり全長の変形を $1/1000, 1/100\text{ mm}$ ダイヤルゲージにより、また、軸方向に 20 cm 間隔にパイゲージを 10 個連続して取り付けそれぞれの区間で発生するひびわれを検知した。

2-2 曲げ試験：曲げ試験に用いたRCはりは断面 $20 \times 40\text{ cm}$ 長さ 330 cm 、引張り縁側にSD35D16異形鉄筋を2本4本7本配置している。載荷方法、配筋状態、試験体の詳細は図1図2表1に示した。コンクリートは $W/C=58\%$ 、 $S/a=44\%$ で、常温低温それぞれの強度試験値は、圧縮強度 $366, 710\text{ Kg/cm}^2$ 、引張り強度 $34, 65\text{ Kg/cm}^2$ 、曲げ強度 $51, 121\text{ Kg/cm}^2$ 、弾性係数 $2.8 \times 10^5, 3.7 \times 10^5$

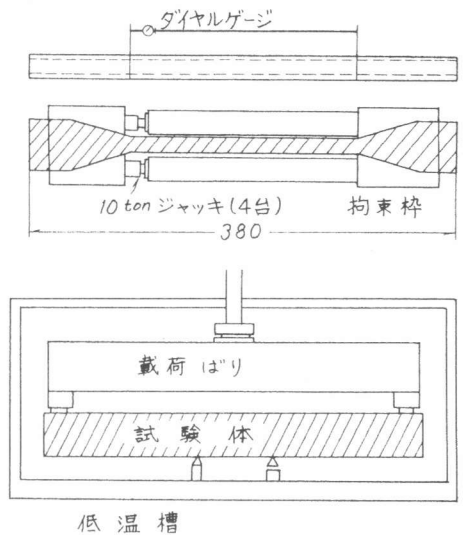


図1 軸引張り及び曲げ試験装置

表-1 試験体の詳細

試験体	試験方法	鉄筋本数	鉄筋比(%)
No.1	引	4D16	3.18
No.1L	引	4D16	3.18
No.2	引	4D10	1.14
No.2L	拘	4D10	1.14
No.3	引	6D10	1.71
No.3L	拘	6D10	1.71
No.4	引	6D13	3.05
No.4L	拘	6D13	3.05
No.5L1	引	4D10	1.14
No.5L2	引	4D10	1.14
No.6	引	2D19	2.30
No.6L	拘	2D19	2.30
No.7L	引	4D10	1.14
No.8L	引	4D16	3.18
A-1	曲常	2D16	0.57
A-2	曲低	2D16	0.57
B-1	曲常	4D16	1.13
B-2	曲低	4D16	1.13
C-1	曲常	7D16	1.99
C-2	曲低	7D16	1.99

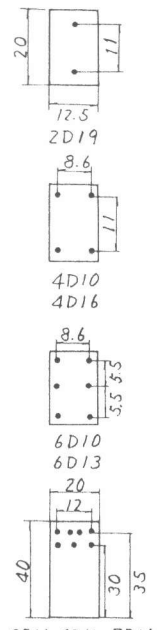


図2 配筋状態

Lは低温下での実験
 曲：曲げ試験
 低：低温、常：常温
 拘：拘束試験
 引：引張り試験

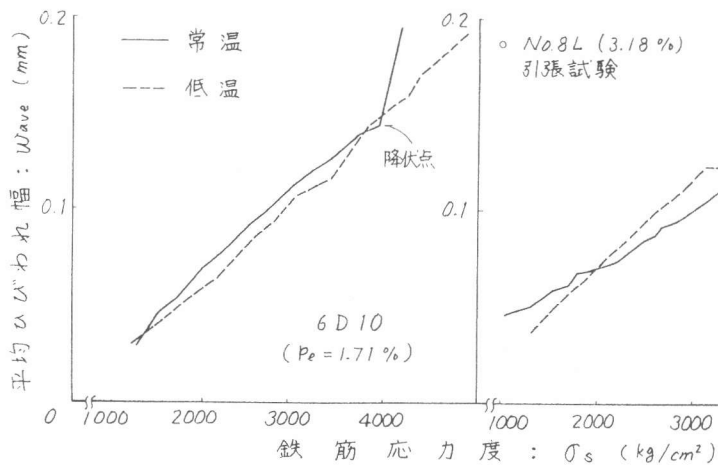


図3 Wave- σ_s の関係

図4 Wave- σ_s の関係

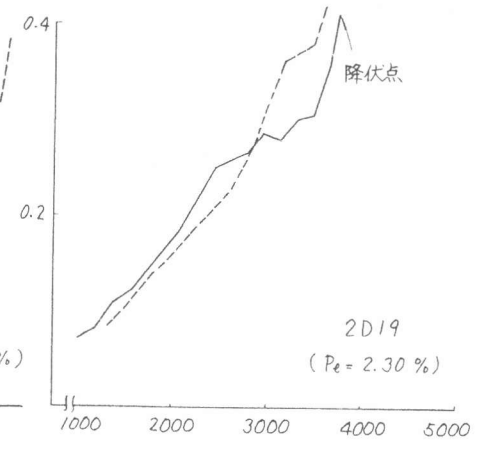


図5 Wave- σ_s の関係

kg/cm²であった。

はり寸法60×160×350 cmの低温槽内に入れ、内部に設置した銅パイプから液体窒素を噴出させ、30数時間をかけて-60℃まで温度を降下させた。

载荷は、ひびわれ発生、鉄筋の許容、降伏、降伏時の5倍の変形、破壊の5段階くり返して、変位制御により行なった。

ひびわれ幅の測定は、低温用に試作した標点40 cmの差動トランス型変位計を2台等モーメント区間の鉄筋位置に取り付け計測した。

また平均曲率は、鉄筋位置の変位計と対になるよう圧縮縁側に変位計を設置し測定した。これらの変位計はあらかじめ1/1000, 1/100 mmダイヤルゲージにより較正を行っており、その線形性は十分な精度で保証されたものである。

3. 低温下における鉄筋コンクリート部材のひびわれ性状

鉄筋コンクリート部材が低温にさらされることにより、コンクリートの物性値の変化およびコンクリートと鉄筋間の付着特性の変化などで、ひびわれ性状は常温とは異なった影響をうけるが、ここでは鉄筋応力度との関連で、ひびわれ幅を現象的にのみ考察している。

図3.4.5は軸引張り拘束試験の結果を鉄筋応力度と平均ひびわれ幅について示したものである。これらの図から、同一鉄筋応力度に関しては常温も低温も見かけ上顕著な差のないことがわかる。しかし、表2に示す平均ひびわれ間隔を見ると、低温の場合の方がひびわれ分散性に劣ることが認められる。また、低温時引張り試験を行なったNo 8L(4D16)の結果を図4にプロットした。ひびわれ発生時での鉄筋応力度は相当大きい、拘束試験の場合(No 4L)の実測曲線上にプロットされ、鉄筋応力度が同じであれば、それまでの荷重履歴に影響されず、平均ひびわれ幅は同じになると言えよう。

図6は曲げ試験の場合について、平均ひびわれ幅と鉄筋応力度の関係を示したものである。同一鉄筋応力度に対しては、低温の場合の方が若干小さな平均ひびわれ幅を示している。ただし、実構造物においてコンクリートが完全に飽水していないで、強度値の増加をあまり期待できない場合や、乾燥収縮、水和熱等によってあらかじめ初期ひびわれが存在している状態をも考えると、低温下での平均ひびわれ幅が常温の場合より小さいとは一概

表2 平均ひびわれ間隔(軸引張り)

試験体	使用鉄筋	ひびわれ本数		平均ひびわれ間隔	
		降伏	終局	降伏	終局
No 3	6D10	26	26	8 cm	8 cm
No 3L	6D10	8	14	27	15
No 4	6D13	27	27	8	8
No 4L	6D13	21	23	10	9
No 5L1	4D10	*	17	*	13
No 5L2	4D10	*	21	*	10
No 6	2D19	13	17	17	13
No 6L	2D19	10	15	21	14
No 7L	4D10	*	3	*	—
No 8L	4D16	10	12	21	18

* ひびわれ発生と同時に降伏

表3 平均ひびわれ間隔(曲げ)

試験体	標点間距離	ひびわれ本数	平均ひびわれ間隔
2D16常	80 cm	6	13
2D16低	80	2	40
4D16常	80	8	10
4D16低	80	5	16
7D16常	80	8	10
7D16低	80	7	11

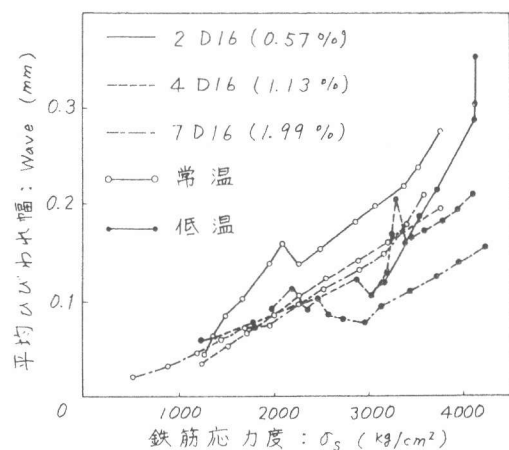


図6 Wave- σ_s の関係

に断定することはできない。

以上のことから、外的な荷重であるか強制変形荷重であるかには関係なく軸引張りおよび曲げに対して、常温と低温の平均ひびわれ幅に相違はないものと考えられる。従って、温度条件の相違によって鉄筋の許容応力度をとくに変更する必要はないものと思われる。

ただし、軸引張りおよび曲げ試験において、ひびわれ発生と同時に鉄筋が降伏した試験体（軸引張りNo7L、曲げ2D16低）では、さらに加力するとひびわれが分散せずに1ヶ所に集中し鉄筋が破断したこともあり、ひびわれ発生時点での温度条件におけるコンクリートの引張り強度の増加を考慮して、最小鉄筋量の選定に留意することが肝要である。

4. 既往のひびわれ幅算定式

既往のひびわれ幅算定式は、低温度下における材料の力学的特性を考慮に入れられるものではないが、ここでは、常温でのRC部材に対して適用実績のあるCEB式¹⁾、森田式²⁾、角田式³⁾による計算値と実測値の比較を行なった。表4は鉄筋応力度 2000 kg/cm^2 における各算定値と実測値の比較である。各式とも常温の場合にはよく合っているが、低温の場合にはひびわれ幅を小さめに算定する傾向にある。これは各式とも部材軸に沿った平均鉄筋歪は、温度降下による付着強度（又は剛性）の増加により常温時より減少するという実際の現象上の傾向を、コンクリートの引張り強度をパラメータとして導入し、一応の考慮が払われているものと考えられる。しかし、平均ひびわれ間隔については、その影響因子がかぶり厚、鉄筋径、有効引張り断面積など、コンクリートの物性値に関係しないものだけであるので、ひびわれ幅を適正に評価するためには、ひびわれ間隔算定式にもコンクリートの物性値が影響を与えるようなパラメータを導入する必要がある。（図7図8参照）筆者らは、先にコンクリートと鉄筋との付着—相対すべりの関係を考慮して軸方向変形解析を行ない⁴⁾、ある程度の精度で実際の性状を予測できることを確かめているが、さらにその一般性を高める検討を行ないつつある。

5. 強制変形荷重を考慮した場合のひびわれ性状

低温にさらされる鉄筋コンクリート部材では、コンクリートの物性値の変化により、ひびわれ発生後においても部材としての剛性が、常温時に比べかなり高まることはすでに報告した。その結果、低温下では部材の変形は小さくなるが、温度変化のような強制変形を考えると、逆に大きな拘束断面力を発生させることになる。

図9図10はこの観点から、軸引張り状態において同一強制変形を与えた場合の鉄筋応力度と平均ひびわれ幅について、常温と低温の場合の比較を行なったものである。この場合、それぞれ同一強制変形量に対して、低温では鉄筋応力度、平均ひびわれ幅が常温の2倍以上の値になっている。また、曲げ試験の場合について、同一強制曲率を与えた場合の鉄筋応力度と平均

表4 平均ひびわれ幅計算値と実測値

試験体	森田式	角田式	CEB式	実測値
No.3	0.065	0.043	0.064	0.064
No.3L	0.025	0.019	—	0.057
No.4	0.079	0.047	0.078	0.070
No.4L	0.056	0.034	—	0.070
No.6	0.158	0.120	0.127	0.172
No.6L	0.092	0.073	—	0.160
2D16常	0.131	0.105	0.126	0.140
2D16低	0.062	0.055	—	*
4D16常	0.095	0.123	0.096	0.085
4D16低	0.072	0.096	—	0.085
7D16常	0.087	0.126	0.095	0.080
7D16低	0.070	0.104	0.050	0.095

— 計算できない * ひびわれと同時に降伏
角田式では $W_{max} = 1.5 W_{ave}$ としている
単位: mm

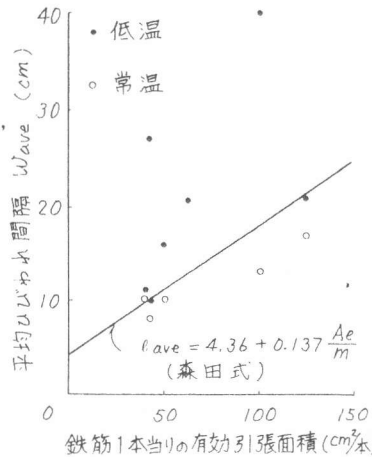


図7 $l_{ave} - A_e/m$ 関係

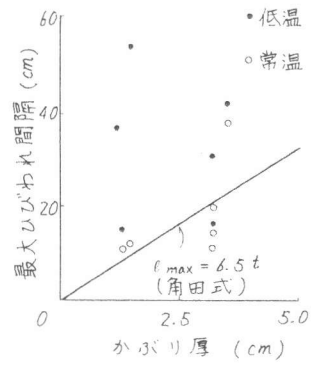


図8 $l_{max} - t$ 関係

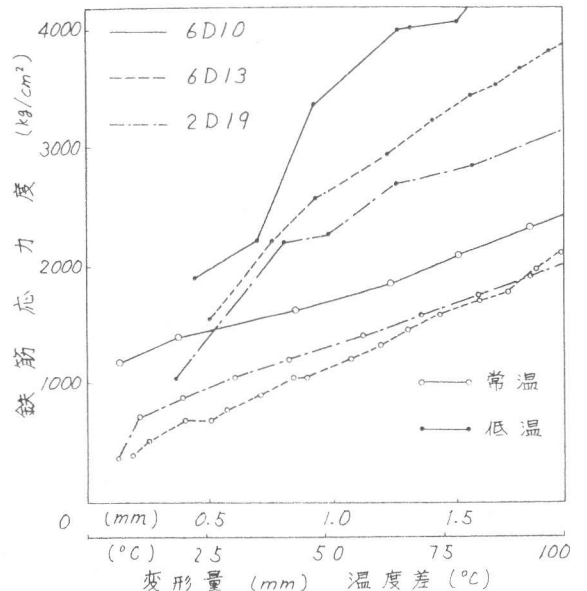


図9 鉄筋応力度—強制変形量—の関係（軸引張り）

ひびわれ幅を示したのが図11図12である。軸引張り試験の場合と同じく、低温の場合の方が相当に大きな拘束モーメントを与えるという結果を示している。なお、サブスケールの温度差表示は、コンクリートの線膨張係数を $9.0 \times 10^{-6} / 1^{\circ}\text{C}$ として温度降下による自由変形量（軸引張り；一軸収縮、曲げ；曲率）を、強制変形量と同一と考えたものである。

低温下においては、たとえひびわれが発生したあとであっても、例えば軸引張り試験の結果にみられるように、そのひびわれの発生が温度の比較的高い、コンクリートの引張り強度のあまり増加のない時点であっても、剛性は常温に比べて1.5倍以上の値を有している。（図13参照）

以上に述べたことにより、温度変化または温度勾配による強制変形荷重を受けるRC部材の応力設計に際しては、断面力を算定する時、部材の剛性値を適切に増加させることが必要であると言えよう。

6. まとめ

以上、低温下におけるRCはり部材の軸引張り及び曲げ試験を行なった結果を、ひびわれ性状に関してまとめると次のとおりである。

- 1) 平均ひびわれ幅と鉄筋応力度との関係は、常温と低温での差はない。また、これは外的荷重であっても強制変形荷重であっても同様である。従って、温度条件の相違によつては許容応力度をとくに変更する必要はない。
- 2) 同一強制変形量をRC部材に与えた場合、低温時においては、たとえひびわれが発生した後であっても、部材としての剛性が相当に大きいことから、応力設計をする場合の断面力の算定に際しては、部材の剛性を適当に増加させる必要がある。

本論文をまとめるに際し、協力をいただいた電力技術整備(株)の紅林，日下，伊藤の各氏に深謝致します。

参考文献

- 1) CEB-FIP MODEL CODE FOR CONCRETE STRUCTURES 1978年
- 2) 森田司郎；コンクリートのひびわれ幅制限で決まる鉄筋の許容応力度，セメント技術年報 昭和44年
- 3) 角田与史雄；鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅，コンクリートジャーナルVol.8 Sept.1970
- 4) 青柳・佐藤；低温度下における鉄筋コンクリート引張り部材の変形とひびわれ性状，セメント技術年報 昭和53年

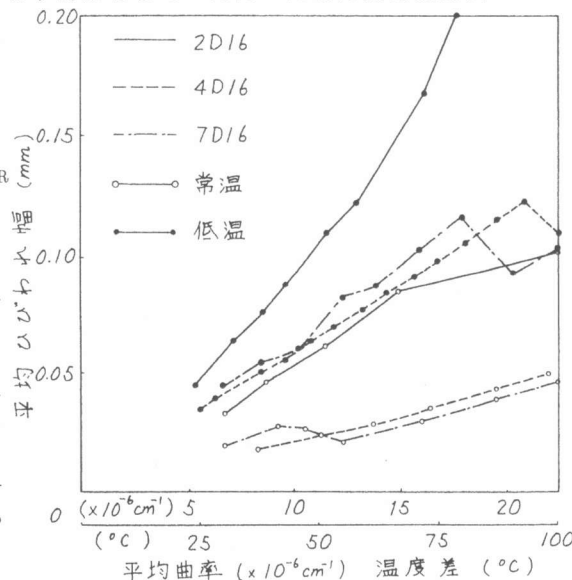


図12 平均ひびわれ幅-強制曲率の関係

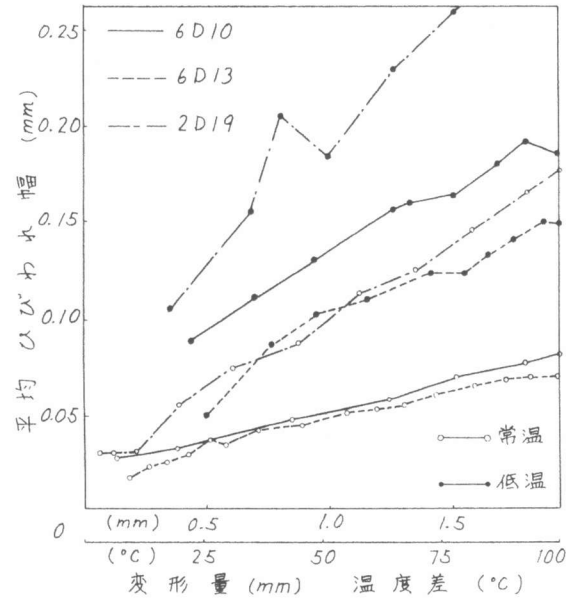


図10 平均ひびわれ幅-強制変形量の関係(軸引張り)

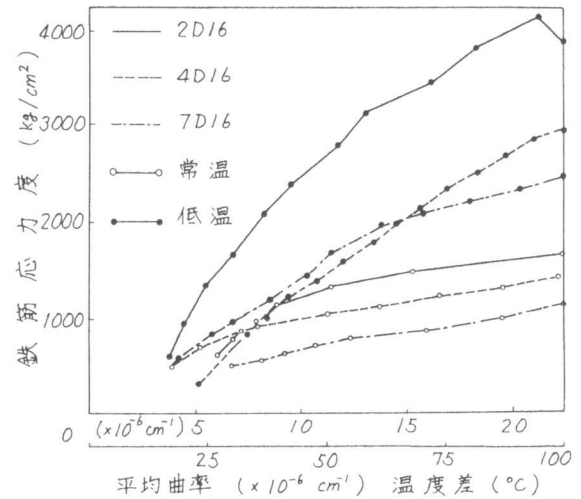


図11 鉄筋応力度-強制曲率の関係

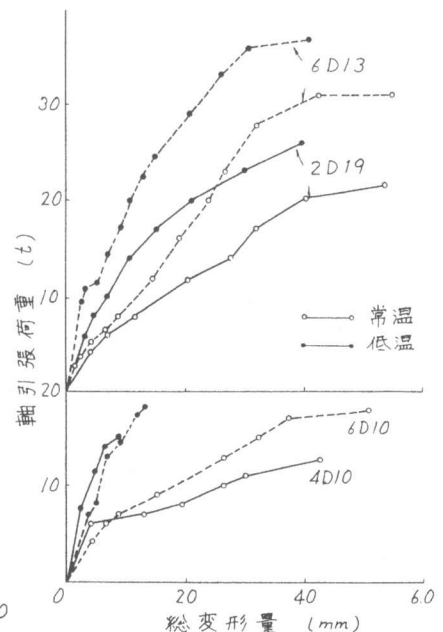


図13 軸引張り荷重-総変形量関係