

報告

[1054] 低温下における動的引張载荷された鉄筋の破断挙動に関する実験的研究

○正会員 初崎俊夫 (大成建設 営業部)
 川崎宏二 (大成建設 技術研究所)
 正会員 三浦 尚 (東北大学 工学部)

1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下PCと言う) 製二重殻低温液貯槽は、防液堤機能を有するPC外槽、常時低温液を貯めているPC内槽及び、内外槽間の保冷材から成っており、この内槽は槽全体が低温液温度まで冷えることになる。したがって、液化天然ガス (LNG) 用の貯槽の場合には、コンクリート中の鉄筋も -162°C まで冷却される。鉄筋がこのような低温に冷却された場合、その力学的性質は常温と大きく異なってくるので、この種の構造物を作るためには、低温下における鉄筋の力学的性質を十分に知る必要がある。特に耐震構造を考える場合、動的荷重に対する鉄筋の挙動をも知る必要がある。

本報告は以上のことから、 -162°C での、鉄筋の力学的挙動を明らかにするため、普通鉄筋ならびに低温用に作られた低温鉄筋について、常温からLNG温度までの間で、静的及び動的な引張試験を行ない、その結果について述べるものである。

2. 試験方法

2.1 試験時におけるひずみ速度の設定及び供試体の長さ

動的引張試験のひずみ速度は、タンクの応答周期が明確でないので、液化天然ガス貯槽保安委員会の実験文献¹⁾と比較出来るようにそこで用いられている値である $5.77 \text{ }^1/\text{sec}$ とした。また、供試体の長さ l は使用試験機の最大ラム変位速度 (V) が $200 \text{ mm}/\text{sec}$ であることから、 $l = V / \epsilon$ より 34.7 mm とした。

鉄筋コンクリートにおいて、コンクリートにひびわれが発生した時の衝撃が鉄筋に与える影響を調べた文献²⁾によると、鉄筋ひずみ速度は室温で $1 \sim 5 \times 10^{-4} \text{ }^1/\text{sec}$ であるの

に対し、 -100°C では $3 \sim 9 \text{ }^1/\text{sec}$ になることが指摘されており、さらに -100°C 以下になると、このひずみ速度よりさらに速くなると想定される。そこで本実験では、供試体の長さをさらに短くしたもの ($l = 10 \text{ mm}$) を用いて実験可能な最大ひずみ速度 $20 \text{ }^1/\text{sec}$ の高速引張試験をも実施した。変位及びひずみの測定には、それぞれ差動トランス式変位計、極低温用箔ゲージを用いた。

2.2 供試体

供試鉄筋は、普通鉄筋D25で、SD35、及び低温鉄筋D25で、SD35相当品 (制御圧延異形棒鋼) である。これらの鉄筋のVノッチシャルピー試験結果を図-1に、化学成分を表-1に示す。

供試体は円形治具とホワイトメタル (6種) でジョイントした図-2に示す形状とした。

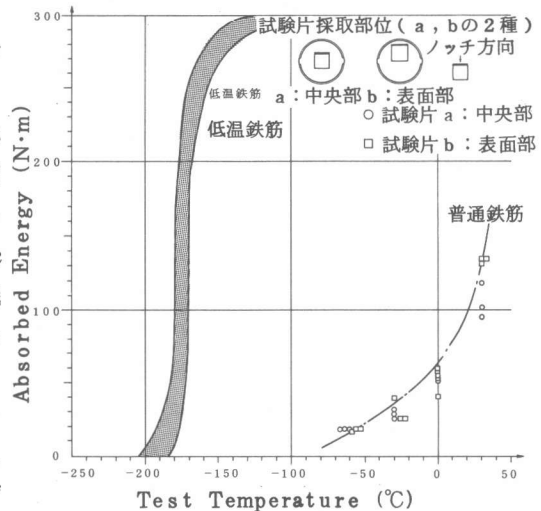


図-1 シャルピー衝撃試験結果

供試鉄筋の冷間加工は次のような方法で与えた。

すなわち、土木学会コンクリート標準示方書の鉄筋の折曲げ部の最小曲げ内半径 (r) の 2.5φ から計算される 17% の引張ひずみを予め試験機によって鉄筋に与え、その後時効を考慮して + 100℃ の沸騰水に 1.5 時間浸漬することとした。

2.3 試験温度及び冷却方法

試験温度は、常温、- 70℃ 及び LNG 温度 (- 162℃) とした。

供試体は低温槽内の加力治

具にセットした後、ダミー用鉄筋内の熱電対と低温槽内の熱電対で管理しながら槽内側部より $L N_2$ を噴霧することにより所定温度まで冷却した。

3. 結果及び考察

3.1 応力-ひずみ曲線

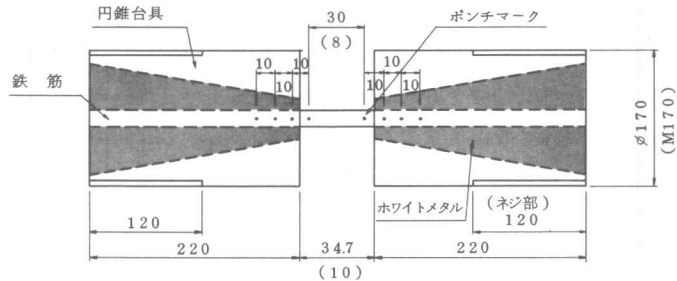
載荷した時の応力-ひずみ曲線は試験条件によって種々な形となる。0.017 $1/sec$ のひずみ速度では、試験温度が低くなくても、一般的なパターン (a) を示している。しかし 5.77 $1/sec$ 及び 20 $1/sec$ のひずみ速度になると、試験温度が低くなるにしたがって、パターンは降伏点がピークになり、引張強さがそれより低い型 (C) になる。また冷間加工した鉄筋はこの傾向が顕著になり、ひずみも小さくなる。

3.2 降伏点及び引張強さ

普通及び低温鉄筋とも降伏点及び降伏後の引張強さは、試験温度の低下に伴って上昇している。また、動的引張における降伏点は、静的引張の場合に比べて 5 ~ 10 kgf/mm^2 の増加があった。動的引張強さの、静的引張強さに対する増加割合は、降伏点のそれに比べて小さくなっている。動的引張では、- 162℃ で普通鉄

表-1 供試鉄筋の化学成分 (W_t , %)

化学成分 供試体	C	S _i	M _n	P	S	C _u	N _i	C _r	S _n	N _b	M _o	V	SoIAl
普通鉄筋	0.23	0.19	1.03	0.037	0.025	0.25	0.10	0.18	0.03	0.09	-	-	-
低温鉄筋	0.05	0.30	1.95	0.017	0.009	0.02	0.04	0.06	-	0.069	0.30	Tr	0.045



注：()内は最大ひずみ速度 20 $1/sec$ に於ける供試体の寸法を示す。

図-2 供試体

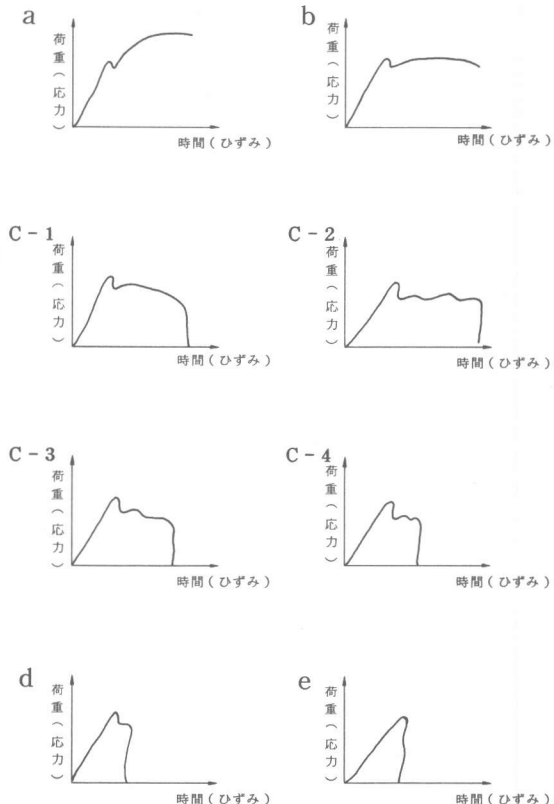


図-3 応力-ひずみパターン

筋の降伏点と降伏後の引張強さが逆転する現象がみられた。低温鉄筋も - 162℃で同じ現象を示したが、室温及び、-70℃では降伏点と降伏後の引張強さはほぼ同じであった。

冷間加工の影響は普通鉄筋が大きく、-70℃及び、-162℃の試験温度では冷間加工した試験体の降伏点が冷間加工しない場合より10kgf/mm程度高い値降伏後の引張強さについても若干高い値を示している。

低温鉄筋では、冷間加工の有無による大きな差は見られなかった。

3.3 延性

静的引張と動的引張による伸びは常温でほぼ同じであるが、温度低下に伴い、動的引張の伸びの方が小さくなる傾向を示す。さらに - 162℃になると伸びのばらつきが大きくなる。また、冷間加工した鉄筋の中には、-162℃になると極端に小さい値を示す鉄筋もあった。普通鉄筋と低温鉄筋とを比較した場合は、一般的に低温鉄筋が普通鉄筋より大きな伸びになっており、低温になってもその傾向はあまり変らない。また、冷間加工してもその相違は認めることが出来なかった。低温鉄筋の絞りについては、静的引張、動的引張とも温度低下に伴う大きな低下は見られなかった。また、冷間加工による影響もほとんど認められない。

一方普通鉄筋の絞りは、静的引張で常温から-70℃、-162℃と試験温度の低下に伴って、各

表-2 鉄筋の引張試験結果一覧表

試験体 No	鉄筋の種類	試験温度	設定歪速度	伸び(1.2D)	破断絞り	降伏点 σ_s	引張強さ σ_s	応力-ひずみパターン	備考
A-20-1	普通鉄筋	R, T	0.017 1/sec	47.6(%)	49.7(%)	41.0 (kgf/mm)	55.9 (kgf/mm)	a	
A-20-2	"	"	"	52.1	56.8	41.9	57.4	a	
LS-20-1	低温鉄筋	"	"	78.2	78.3	46.0	52.7	a	
LS-20-2	"	"	"	69.7	72.3	48.7	52.7	a	
A-70-1	普通鉄筋	-70℃	0.017 1/sec	46.7	45.8	47.8	62.5	a	
A-70-2	"	"	"	50.3	52.6	49.3	60.8	a	
LS-70-1	低温鉄筋	"	"	70.0	69.3	54.3	58.6	a	
LS-70-2	"	"	"	73.3	71.4	51.9	56.2	a	
A-162-1	普通鉄筋	-162℃	0.017 1/sec	42.9	43.3	59.2	66.1	a	
A-162-2	"	"	"	42.3	38.1	59.2	65.7	a	
LS-162-1	低温鉄筋	"	"	77.6	70.9	55.5	57.6	a	
LS-162-2	"	"	"	67.7	71.1	55.5	58.2	a	
A-20-1'	普通鉄筋	R, T	5.77 1/sec	47.9	47.0	51.5	56.8	a	
A-20-2'	"	"	"	52.0	56.0	46.0	53.9	a	
LS-20-1'	低温鉄筋	"	"	70.6	71.8	55.9	54.1	c-1	
LS-20-2'	"	"	"	67.5	68.9	54.3	54.3	b	
A-70-1'	普通鉄筋	-70℃	5.77 1/sec	41.1	41.9	53.4	58.7	a	
A-70-2'	"	"	"	43.4	45.0	53.4	59.2	a	
LS-70-1'	低温鉄筋	"	"	64.5	72.5	56.4	56.4	b	
LS-70-2'	"	"	"	65.9	64.9	60.8	57.6	c-1	
A-162-1'	普通鉄筋	-162℃	5.77 1/sec	33.0	40.1	77.4	68.3	c-2	
A-162-2'	"	"	"	37.7	55.5	69.9	66.7	c-1	B JIS Z22241による縦軸破断位置
A-162-3'	"	"	"	53.5	56.1	68.1	65.3	c-1	
LS-162-1'	低温鉄筋	"	"	65.6	61.1	78.2	63.4	c-2	
LS-162-2'	"	"	"	24.7	68.7	74.8	66.1	c-2	B
LS-162-3'	"	"	"	37.1	61.9	66.5	60.8	c-2	B
A' -70-1'	普通鉄筋(冷間加工)	-70℃	5.77 1/sec	41.0	55.2	71.6	62.6	c-4	B 冷間加工17%時効 1.5h
A' -70-2'	"	"	"	49.0	43.3	66.7	62.6	c-4	"
LS' -70-1'	低温鉄筋(冷間加工)	"	"	76.2	66.1	60.8	57.2	c-3	"
LS' -70-2'	"	"	"	76.1	67.3	60.8	56.8	c-3	"
A' -162-1'	普通鉄筋(冷間加工)	-162℃	5.77 1/sec	22.6(%)	19.3(%)	82.9	(82.9) (82.9)	d	B
A' -162-2'	"	"	"	61.9	49.6	83.9	(83.9)	d	
LS' -162-1'	低温鉄筋(冷間加工)	"	"	70.2	58.3	69.9	64.1	c-3	
LS' -162-2'	"	"	"	69.7	65.9	66.3	61.8	c-3	
				伸び(0.32D)					
Ⓐ-20-1'	普通鉄筋	R, T	20 1/sec	53.5	55.6	47.8	55.7	a	B
Ⓒ-20-1'	低温鉄筋	"	"	127.7	72.9	52.7	50.5	c-2	
Ⓐ-162-1'	普通鉄筋	-162℃	20 1/sec	75.0	55.6	65.7	67.5	a	
Ⓒ-162-2'	"	"	"	78.2	44.7	74.0	67.5	c-3	
Ⓒ-162-1'	低温鉄筋	"	"	125.3	65.2	69.9	62.8	c-3	
Ⓒ-162-2'	"	"	"	104.8	58.3	71.6	63.0	c-3	
Ⓐ' -162-1'	普通鉄筋(冷間加工)	-162℃	20 1/sec	76.9	44.4	76.6	67.5	d	冷間加工17%時効 15h
Ⓒ' -162-1'	低温鉄筋(冷間加工)	"	"	137.1	59.3	72.6	66.1	c-4	"

注() : 降伏点と引張強さが明確でないため引張強さは降伏点強度と同じとした。

注 : 降伏点、引張強さの算出はいずれもD25の公称断面積 5.067cm²を用いた。

々6～7%程度の絞り減少を示した。また、動的引張では、 -70°C 及び -162°C で10%程度の絞り減少を示している、そして -162°C では、冷間加工した試験体の中に非常に小さい絞りを示すものが見られた。

3.4 破断状況

静的引張の場合、普通鉄筋は温度低下に伴って垂直破断面の割合が直線的に多くなっている。低温鉄筋では垂直破断面がわずかに見られる程度で、大部分が延性破断であった。また、動的引張の場合、普通及び低温鉄筋は室温でも、静的引張に比べて垂直破断面の割合が多い。そして、 -70°C 、 -162°C と温度が下るにしたがってその割合は増加するが、あまり顕著でない。しかし、冷間加工した普通鉄筋については、垂直破断面が多くなり、ほぼ100%になった鉄筋もあったが、低温鉄筋は、冷間加工による影響はみられなかった。

4. まとめ

本実験で得られた結論を要約すると以下ようになる。

① 鉄筋の種類、載荷方法の如何を問わず、鉄筋の降伏点及び引張強さは低温になるにつれて増大する。

② 静的及び動的引張の差異は、応力ひずみ曲線にあらわれる。静的引張の全て及び、普通鉄筋で温度が -70°C 以上の動的引張に関しては、降伏点に達した後、より大きな引張強さを示して破断する。しかし、それ以外の動的引張の場合は、降伏点に達した後、ひずみの増大とともに、その応力度は降伏点以下を示したまま破断する。

③ 静的引張の場合、普通鉄筋の破断伸びは常温から -162°C までで約10%低下するが、低温鉄筋についてはほとんど低下しない。

④ 破断絞りは温度の低下とともに減少する傾向があるが、静的及び動的引張とも -162°C において、普通鉄筋でほぼ40%以上、低温鉄筋でほぼ60%以上を示した。しかし、冷間加工した普通鉄筋の動的引張において、 -162°C で他と比べて特別小さな値を示すものがみられた。

⑤ 垂直破断面の割合は温度低下につれて増加する傾向にあり、特にこの傾向は普通鉄筋の静的引張において顕著である。なお、冷間加工したものについては、 -162°C においてほぼ脆性破断したものと思われるものがあつた。

以上の結果から、今回用いた普通鉄筋においては本試験で実施した程度のひずみ速度では、低温下における鉄筋の挙動は特に“動的”という条件で付加される危険性は小さい。ただし、冷間加工を行った試験体の中に -162°C で脆性破断したものがみられ、曲げ加工に対する危険性が皆無でないことが示唆される。低温鉄筋については、このような問題は無いことがわかった。なお、本実験においては、試験機の関係で、ひずみ速度を十分大きくすることはできなかった。したがって、より大きなひずみ速度に対する鉄筋の挙動については、今後の問題であると思われる。

最後に実験に協力していただいた財団法人土木研究センター、株式会社伊藤製鉄所、住友金属工業株式会社に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 液化天然ガス用貯槽の保安調査について、昭和58年社団法人日本瓦斯協会液化天然ガス貯槽保安調査委員会
- 2) 阿部喜則、三浦 尚、加藤恵三；極低温下におけるコンクリートの破壊挙動、土木学会、年次学術講演会概要集（昭和55年）