

論文

[1147] 極低温下における曲げ加工された鉄筋の耐衝撃性に関する研究

瀬戸謙一郎*1・三浦 尚*2・船本 浩二*3

1.はじめに

近年、LNG貯蔵タンクの建設材料に鉄筋コンクリート（以下、RCと呼ぶ）が使用されるようになってきており、また、将来的には超電導利用施設へのRCの利用も考えられる。このように、極低温下でRCが利用されるようになると、その温度でのRCの力学的性質を十分に知る必要がある。

極低温下においては、コンクリートの引張強度は温度の低下に伴って増加し、さらにその破壊はより脆性化する。そのために、RCのコンクリート部分に引張ひびわれが生じる場合、常温の時と比べて鉄筋に衝撃的に荷重が作用し、鉄筋に大きな歪や歪速度が発生する。一方、極低温下において鉄筋は破壊に際しての歪速度依存性が大きくなり、衝撃的な荷重下では脆性的に破壊する。したがって、極低温下にさらされるRC部材は、コンクリートひびわれ時の衝撃により、鉄筋が脆性破断する恐れがあると考えられる。またこの場合、鉄筋が冷間曲げ加工されていると、与えられた予歪による加工硬化の影響により、加工していない場合に比べてより脆性的に破断する可能性が大きくなることが示されている[1]。さらに、冷間曲げ加工によって予歪を与えられた鉄筋は、歪時効硬化の現象によって、長期間放置すれば、時間の経過とともに次第に硬化し、脆くなる。そのため、この現象によって、冷間曲げ加工された鉄筋は、時間の経過とともに耐衝撃性が低下すると考えられる。

本研究ではこのような問題を明らかにするため、まず、極低温下のRC部材のコンクリートひびわれ時の衝撃によって鉄筋に生じる歪や歪速度を両引供試体を用いて測定し、そこから得られた結果[2][3]を参考にして鉄筋単体にその歪と歪速度を与え、極低温下における鉄筋の耐衝撃性に及ぼす鉄筋の曲げ加工や温度の影響について調べた。また、歪時効による鉄筋の耐衝撃性の低下を調べるために、歪時効をおこさせた鉄筋を用いて同様の試験を行った。

なお、本研究では、超電導利用施設へのRCの利用を念頭において、非磁性鉄筋の衝撃試験も行った。

2.実験概要

2.1 使用鉄筋

本研究での供試体には、メーカーの異なる4種類の普通異形鉄筋（鉄筋1、鉄筋2、鉄筋3、鉄筋4）と非磁性鉄筋を用いた。鉄筋1は、横ふし異形棒鋼SD295Aであり、鉄筋2、鉄筋3および鉄筋4は横ふし異形棒鋼SD345である。鉄筋径はいずれもD25とした。また、非磁性鉄筋は波形異形棒鋼で、鉄筋径は同じくD25とした。それぞれの鉄筋の機械的性質と化学成分を表-1に示す。

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東北大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*3 東北大学 工学部土木工学科

表-1 鉄筋の試験成績

	機械的性質			化学成分 (%)				
	降伏点	引張強度	伸び	C	Si	Mn	P	S
鉄筋1	36 kgf/mm ²	58 kgf/mm ²	26%	0.24	0.21	0.80	0.03	0.05
鉄筋2	41 kgf/mm ²	59 kgf/mm ²	25%	0.25	0.23	1.11	0.03	0.04
鉄筋3	40 kgf/mm ²	57 kgf/mm ²	23%	0.24	0.17	0.71	0.03	0.03
鉄筋4	40 kgf/mm ²	60 kgf/mm ²	23%	0.27	0.10	0.77	0.03	0.03
非磁性鉄筋	40 kgf/mm ²	82 kgf/mm ²	65%	0.34	0.49	20.9	0.03	0.01

2.2 実験装置

本研究で使用した衝撃試験機は、図-1に示すような 50kgf・mASTMシャルピー衝撃試験機を改良して作製したものである。

極低温下の衝撃力による鉄筋の破断は、与えた歪速度と最終歪によって決定される。適当な歪速度と最終歪を与えるために、ハンマーの振り上げ角と重量を調節した。試験機のハンマー重量の調節は、滑車ごとにおもりを取りつけることによって行った。

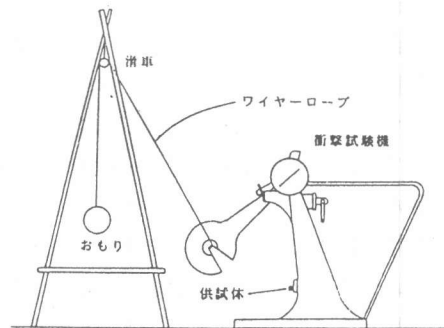


図-1 衝撃試験機

2.3 実験方法

本研究が対象としている状況は、RC構造物において、鉄筋の曲げ加工部周辺のコンクリートに引張破壊が生じ、鉄筋に衝撃的な引張力が作用する場合である。また、鉄筋の破断は、鉄筋の曲げ加工部の内側から発生することが明らかにされている[1] ので、本研究では、図-2に示すような供試体を用い、曲げ加工部の内側に引張が発生するような曲げ載荷により、脆性破壊の発生限界を求めた。

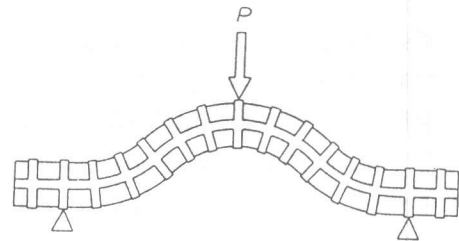


図-2 鉄筋供試体

さらに、鉄筋に発生する歪は曲げ加工部の内側ではまっすぐな鉄筋の場合よりも大きくなるが、実験では、常に鉄筋がまっすぐな場合に発生する歪に換算した。

曲げ加工の影響を評価するために準備した供試体の曲げ内半径の種類は、鉄筋1、2では、2.0φ、3.0φ、5.0φ、6.0φ、10.0φの5種類、鉄筋3では、2.0φ、3.0φ、4.0φ、5.0φ、6.0φの5種類、鉄筋4では、2.0φ、2.5φ、3.0φ、5.0φ、6.0φの5種類、非磁性鉄筋では、1.1φ、2.0φの2種類である。供試体の支持間隔は試験機の大きさから約200mmとした。

過去に行われた両引試験[2][3]などによって、コンクリートの引張破壊時に鉄筋に生じる最終歪や歪速度が観察されている。これらの結果を参考にして、本研究では、極低温下の耐衝撃性を調べるために発生させる衝撃力として、ハンマーの振り上げ角をそれぞれ40°、50°、60°と設定した。ハンマー重量調節のためのおもりは12.5kgである。表-2に、それぞれの振り上げ角のときの歪速度と最大歪を示す。これは、常温で曲げ加工を施していないまっすぐな鉄筋で、その中

中央部分のふしとふしの間に貼付した歪ゲージによって測定した。なお、キャリブレーションのため、あらかじめ歪ゲージの読みと鉄筋応力との関係を調べた。

それぞれの曲げ内半径の鉄筋が破断する温度を調べるために、まず温度-196℃から試験を行ない、破断が見られるまで徐々に温度を上げて測定を行った。温度の幅は、温度計の精度の関係から 5℃とした。

2.4 歪時効処理の条件

今回、冷間曲げ加工が鉄筋の耐衝撃性に及ぼす影響に加えて、鉄筋4を用いてその加工によって起こる歪時効による鉄筋の耐衝撃性の低下についても調べた。そこで、まず曲げ加工してすぐの状態と、その後歪時効を起こした状態とで双方の比較をすることによって、耐衝撃性の低下の度合いを見ることにした。

歪時効を起こした鉄筋は、100℃ 1時間と 1時間半の歪時効促進処理を行ったもの、および、曲げ加工後45日間の自然放置によるものの3種類である。

表-2 各振り上げ角のときの歪速度と最大歪

振り上げ 角度	歪速度 (s^{-1})	最大歪 (μ)
40°	1.4	3000
50°	3.0	5400
60°	7.0	17200

(1) 鉄筋 1

振り上げ 角度	歪速度 (s^{-1})	最大歪 (μ)
40°	2.5	2900
50°	4.1	5600
60°	11.1	9200

(2) 鉄筋 2

振り上げ 角度	歪速度 (s^{-1})	最大歪 (μ)
40°	1.3	3300
50°	3.3	7500
60°	5.8	12900

(3) 鉄筋 3

振り上げ 角度	歪速度 (s^{-1})	最大歪 (μ)
40°	1.5	3600
50°	3.0	8500
60°	7.0	19900

(4) 鉄筋 4

振り上げ 角度	歪速度 (s^{-1})	最大歪 (μ)
40°	1.3	2700
50°	3.3	4800
60°	4.2	6900

(5) 非磁性鉄筋

3. 結果および考察

3.1 試験結果

それぞれの鉄筋の試験結果を表-3に示す。それぞれの鉄筋についてこの結果から得られた各曲げ内半径での曲げ加工によって鉄筋に与えられる予歪量と破断温度の関係のグラフを図-3～図-9に示す。

3.2 曲げ加工による予歪の影響

図-3～図-6において、鉄筋1～4の全ての鉄筋について予歪量の増加にともない、破断温度の上昇が見られる。このことから、予歪量が増加すると低温下の耐衝撃性が低下することがわかる。

今回、鉄筋1、鉄筋2および歪時効前の鉄筋4では予歪量と衝撃破壊を起こす破断温度の間にはほぼ線形関係が見られた。しかし、鉄筋3は大きな予歪量を与えられた場合、破断温度がかなり上昇していることがわかる。このことは、鉄筋3が加工硬化によって脆化しやすいことを示していると考えられる。さらに、極低温下では線形関係が見られるが、温度の上昇にともない、予歪量の増加による破断温度の上昇が頭打ちになっている。

以上のことから、極低温下における予歪の影響について次のようなことがわかった。一般の良好な鉄筋では、曲げ内半径 2ϕ までの曲げ加工の範囲において、予歪量と破断温度の関係はほぼ

表-3 曲げ内半径と破断した最高温度

(単位は℃) ×は-196℃でも破断せず

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
2.0φ	-65	-55	-35
3.0φ	-115	-90	-80
5.0φ	-150	-135	-130
6.0φ	-175	-170	-150
10.0φ	×	-185	-165
直鉄筋	×	×	×

(1) 鉄筋 1

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
2.0φ	-100	-100	-100
3.0φ	-160	-130	-125
5.0φ	-196	-160	-160
6.0φ	×	-180	-180
10.0φ	×	×	×
直鉄筋	×	×	×

(2) 鉄筋 2

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
2.0φ	-70	-5	5
3.0φ	-90	-35	-20
4.0φ	-140	-85	-65
5.0φ	×	-170	-155
6.0φ	×	×	-190
直鉄筋	×	×	×

(3) 鉄筋 3

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
2.0φ	-120	-105	-90
2.5φ	-150	-130	-130
3.0φ	-180	-155	-150
5.0φ	×	-196	-180
6.0φ	×	×	-190
直鉄筋	×	×	×

(4) 歪時効前の鉄筋 4

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
2.0φ	-105	-85	-70
2.5φ	-125	-110	-100
3.0φ	-160	-135	-120
5.0φ	×	-196	-170
6.0φ	×	×	-190

(5) 100℃1時間の歪時効処理した鉄筋 4

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
2.0φ	-90	-80	-65
2.5φ	-115	-105	-95
3.0φ	-155	-130	-115
5.0φ	×	-196	-170
6.0φ	×	×	-190

(6) 100℃1.5時間の歪時効処理した鉄筋 4

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
2.0φ	-100	-90	-70
2.5φ	-130	-115	-100
3.0φ	-160	-125	-120
5.0φ	×	-190	-170
6.0φ	×	×	-190

(7) 45日間自然放置した鉄筋 4

曲げ内半径	振り上げ角		
	40°	50°	60°
1.1φ	×	-196	-190
2.0φ	×	×	×

(8) 非磁性鉄筋

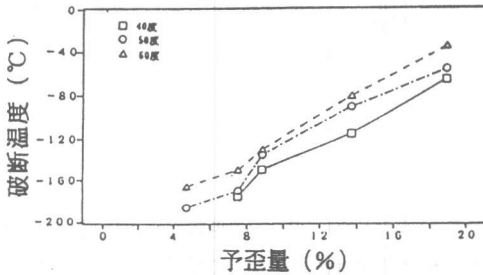


図-3 鉄筋 1 の予歪量と破断温度の関係

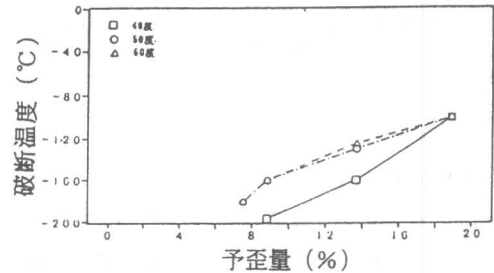


図-4 鉄筋 2 の予歪量と破断温度の関係

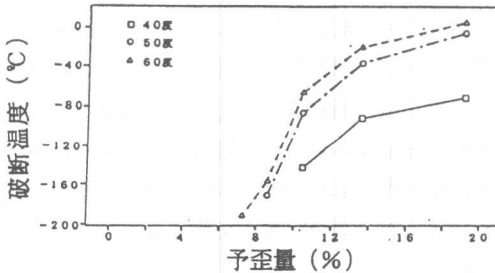


図-5 鉄筋 3 の予歪量と破断温度の関係

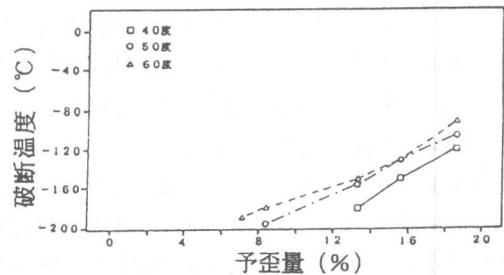


図-6 歪時効前の鉄筋 4 の予歪量と破断温度の関係

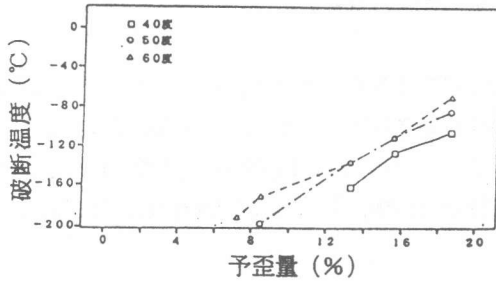


図-7 100℃1時間の歪時効処理をした鉄筋4の予歪量と破断温度の関係

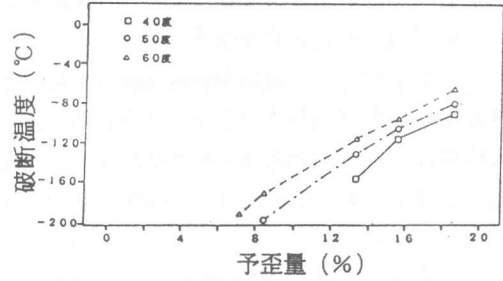


図-8 100℃1.5時間の歪時効処理をした鉄筋4の予歪量と破断温度の関係

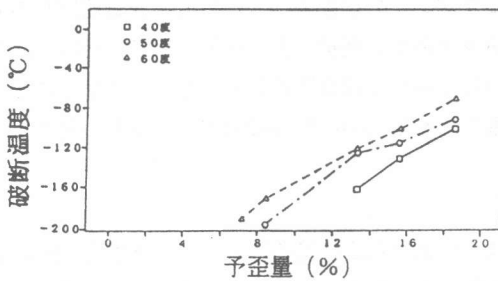


図-9 45日間自然放置した鉄筋4の予歪量と破断温度の関係

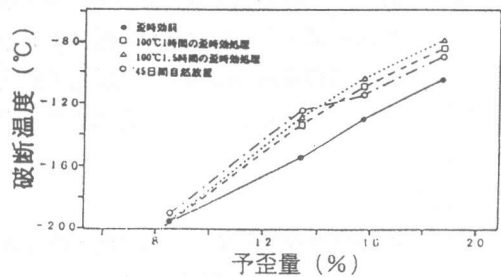


図-10 振り上げ角50°での歪時効前と時効後の比較

線形を示すが、曲げ加工の影響を大きく受ける鉄筋では、予歪量が大きくなると破断温度がかなり上昇するために、温度の上昇にともない、予歪量の増加による破断温度の上昇が頭打ちになると考えられる。

3.3 歪時効の影響

今回、歪時効による鉄筋の耐衝撃性の低下について調べてみた。図-6～図-9において、歪時効前の鉄筋と歪時効後の鉄筋とを比べると、歪時効後の鉄筋の方に破断温度の上昇がみられた。このことから、歪時効を加えることによって鉄筋が脆化していることがわかる。歪時効による脆化の度合いを明確にみるために、一例として、ハンマーの振り上げ角が50°での歪時効前、歪時効後それぞれの予歪量と破断温度の関係を一つのグラフにしたものを図-10に示す。

図-10に見られるように、歪時効促進処理 100℃ 1時間の鉄筋と、45日間自然放置で歪時効を起こした鉄筋とでは、予歪量の小さいところでは破断温度に若干差があるものの、全体ではほぼ傾向が似通っていた。歪時効促進処理 100℃ 1.5時間の鉄筋では、それ以上の破断温度の上昇がみられた。したがって、45日間の自然放置はほぼ 100℃ 1時間程度の歪時効促進処理に相当することが予想される。

また、図-10を見てもわかる通り、歪時効によって破断温度は、歪時効促進処理 100℃ 1時間の鉄筋と45日間自然放置の鉄筋で、曲げ内半径 2φ～3φでは、15℃～20℃上昇したが、曲げ内半径 5φ～6φではほとんど上昇しなかった。歪時効促進処理 100℃ 1.5時間の鉄筋でも同様に、曲げ内半径 2φ～3φでは、25℃～35℃上昇したが、曲げ内半径 5φ～6φではほとんど上昇しなかった。つまり、歪時効による鉄筋の耐衝撃性の低下は、予歪量の大きいところで顕著に現れ、

予歪量の小さいところでは、歪時効の影響は小さいと考えられる。

3.4 非磁性鉄筋の耐衝撃性

今回の試験では、超電導利用施設へのRCの使用に対する安全性を検討する一つとして、非磁性鉄筋の耐衝撃試験を行った。この結果、示方書に規定されている最小曲げ内半径 2ϕ では、どの衝撃に対しても破断はみられなかった。それ以上の 1.1ϕ の曲げ内半径で曲げ加工したもので破断が見られた。したがって、今回使用した非磁性鉄筋の極低温下での耐衝撃性は大変優れていると考えられる。

3.5 鉄筋の種類による耐衝撃性の相違

本研究では数種の鉄筋を用いることによって、鉄筋の種類による耐衝撃性の違いについて調べた。鋼材の耐衝撃性は伸びなどの機械的性質や化学成分によって変化することが知られている。非磁性鉄筋は今回の実験で優れた耐衝撃性を示したが、この理由の一つとして、非磁性鉄筋の伸びが65%と非常に大きく、また耐衝撃性を向上させるMn含有量が他の鉄筋の約30倍近いことが挙げられる。他の4種の鉄筋では機械的性質及び化学成分はほぼ類似しており、耐衝撃性における若干の違いは、ふし形状による応力集中の程度の差や他の冶金的性質の差によるものと考えられる。

4. 結論

(1) 一般の良好な鉄筋では、曲げ内半径 2ϕ までの曲げ加工の範囲において、予歪量と破断温度の関係はほぼ線形を示すと考えられるが、曲げ加工の影響を大きく受ける鉄筋では、予歪量が大きくなると、破断温度がかなり上昇するため、温度の上昇にともない、予歪量の増加による破断温度の上昇が頭打ちになると考えられる。

(2) 今回の試験では、歪時効によって鉄筋が脆化することが確認された。

(3) 歪時効による鉄筋の耐衝撃性の低下は、予歪量の大きいところで顕著に現れ、予歪量の小さいところでは、歪時効の影響は小さくなることがわかった。

(4) 今回の試験で使用した非磁性鉄筋については、極低温下での耐衝撃性は大変優れていることが確認された。

(5) 以上のことから、実際の設計にあたっては、極低温下で引張を受ける鉄筋コンクリート構造物に用いられる鉄筋の許容曲げ内半径は、鉄筋の材質や形状、使用温度に応じて個別に制限されなければならないことが明らかになった。

参考文献

- 1) 三浦 尚・妹島淳生：極低温下における鉄筋の重ね継ぎ手性状に及ぼす横方向鉄筋の性質の影響、コンクリート工学年次論文報告集、vol.5、pp.385-388、1983
- 2) 三浦 尚・村野清一郎：極低温下で使用される鉄筋に要求される耐衝撃性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、vol.7、pp.285-288、1985
- 3) 早川博之・三浦 尚・堀 宗朗：極低温下においてコンクリート破断時の衝撃が鉄筋に及ぼす影響、平成2年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要、pp.466-467、1991