

論文

[1153] 極低温下における鉄筋の耐衝撃性に関する研究

正会員 三浦 尚 (東北大学土木工学科)

正会員○瀬戸謙一郎 (東北大学大学院)

1.はじめに

極低温下において、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、鉄筋コンクリートのコンクリート部分に引張破壊が生じる場合、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ことが実験によって示されている[1]。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鉄筋コンクリート部材は、コンクリート破断時の衝撃により、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、鉄筋が曲げ加工されていると、与えられた予歪の影響により、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も示されている[2]。

そこで、本研究ではまず、極低温下の鉄筋コンクリート部材のコンクリート破断時の衝撃が鉄筋に及ぼす影響を定量的に把握するために、鉄筋に生じる歪速度を両引供試体を用いて測定した。そして、そこから得られた結果を参考にして鉄筋単体で、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。さらに実構造物においては鉄筋の曲げ加工やフシの形状は多岐にわたるため、より実際に則した条件での簡単な鉄筋の耐衝撃性の判定法の開発を試みた。

表-1 コンクリートの示方配合

| 粗骨大材寸の法 (mm) | スのラ範ン囲ブ (cm) | 空範気圏量 の (%) | 水トセ比メシ (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |       |       |       |          |
|--------------|--------------|-------------|------------|----------|--------------------------|-------|-------|-------|----------|
|              |              |             |            |          | 水 W                      | セメト C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 (cc) |
| 20           | 11±1         | 4±0.5       | 50         | 38       | 165                      | 330   | 663   | 1210  | 66       |

2. 両引試験 [3]

2.1 実験概要

1) 使用材料および配合

セメントは市販の早強ポルトランドセメント、細骨材は宮城県大和産の山砂 (比重2.53)、粗骨材は宮城県丸森産の碎石 (比重2.86) を使用した。

配合を表-1に示す。混和剤としてAE減水剤を使用した。

鉄筋は、市販の横フシ異形鉄筋D10 (SD295) とD22 (SD345) を使用した。機械的性質と化学成分を表-2に示す。

表-2 鉄筋の試験成績

| (D10) : (a) 機械的性質     |                       |      | (b) 化学成分 |      |      |      |      |
|-----------------------|-----------------------|------|----------|------|------|------|------|
| 降伏点                   | 引張強度                  | 伸び   | 成分 (%)   |      |      |      |      |
| 34kgf/mm <sup>2</sup> | 51kgf/mm <sup>2</sup> | 27 % | C        | Si   | Mn   | P    | S    |
|                       |                       |      | 0.22     | 0.17 | 0.72 | 0.17 | 0.17 |

| (D10) : (a) 機械的性質     |                       |      | (b) 化学成分 |      |      |      |      |
|-----------------------|-----------------------|------|----------|------|------|------|------|
| 降伏点                   | 引張強度                  | 伸び   | 成分 (%)   |      |      |      |      |
| 39kgf/mm <sup>2</sup> | 57kgf/mm <sup>2</sup> | 20 % | C        | Si   | Mn   | P    | S    |
|                       |                       |      | 0.21     | 0.20 | 1.12 | 0.04 | 0.03 |

## 2) 供試体

本実験には、歪測定用供試鉄筋 (D10) を埋め込んだ2種類の鉄筋比の断面を持つ両引供試体を用いた。供試体中央部にはノッチを設け、この部分で破断するようにした。図-1に両引供試体の形状寸法、表-3に各鉄筋比の断面寸法を示す。

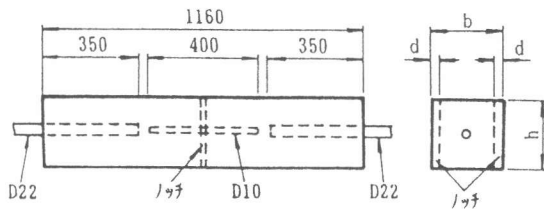


図-1 供試体の形状寸法

表-3 供試体の断面寸法

| 鉄筋比 (%) | 断面寸法 (b×h)(mm) | ノッチ寸法 (h×d)(mm) |
|---------|----------------|-----------------|
| 0.52    | 130×130        | 130×15          |
| 1.48    | 80×80          | 80×10           |

## 3) 実験方法

実験は、供試体を水中養生を行った後、材冷7日で行った。供試体を図-2の荷重装置にセットした後、液体窒素を低温槽内に噴射して供試体を徐々に（1時間に約20℃のペースで）冷却し、所定の温度で一定になったところで、ジャッキで引張荷重した。供試体破断時の衝撃によって鉄筋に生じる歪および歪速度は、鉄筋のフシとフシの間に歪ゲージを貼り付け、動歪形を用いて測定した。また、コンクリートの破断時及びその後の歪の変化を知るために、コンクリートにも歪ゲージを貼り付け、歪の変化を測定した。常温時の強度を確認するために、圧縮及び割裂引張試験を行った。

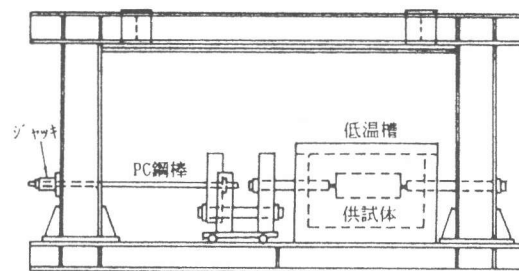


図-2 荷重装置

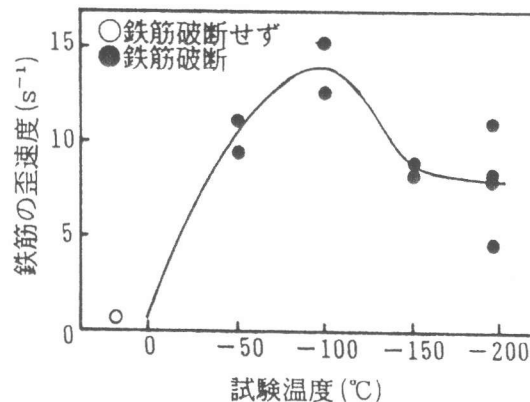


図-3 試験温度と鉄筋の歪速度との関係  
(鉄筋比0.52%)

## 2.2 結果および考察

図-3と図-4は、試験温度と鉄筋に生じる歪速度との関係を示したものである。なお、今回使用した鉄筋は異形鉄筋であり、そこに発生する歪はゲージの貼り付け位置によっても異なると考えられる。したがって、ここに示す-196℃の歪の値は鉄筋中に発生する歪のおおよその値を示していると考えられる。図中の曲線は鉄筋に生じる歪速度の温度低下に伴う変化の傾向を示したものである。

図-3と図-4より、両方の鉄筋比とも常温から-100℃までは、鉄筋に生じる歪速度は温度

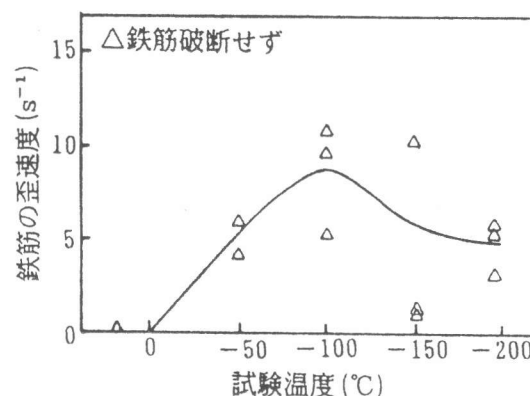


図-4 試験温度と鉄筋の歪速度との関係  
(鉄筋比1.48%)

の低下に伴って増加することがわかる。しかし、-100℃付近でピークを迎え、それ以下の温度では、逆に減少する傾向を示している。また、-150℃以下の温度では、ばらつきが多いものの、鉄筋に生じる歪速度は、ほぼ横ばいか若干減少する傾向を示している。

また、これらの図より同じ温度でも鉄筋比の増加により、鉄筋に生じる歪速度は減少することがわかる。これは、鉄筋比の増加により、コンクリート破断時に鉄筋に加わる荷重が小さくなるためであると考えられる。

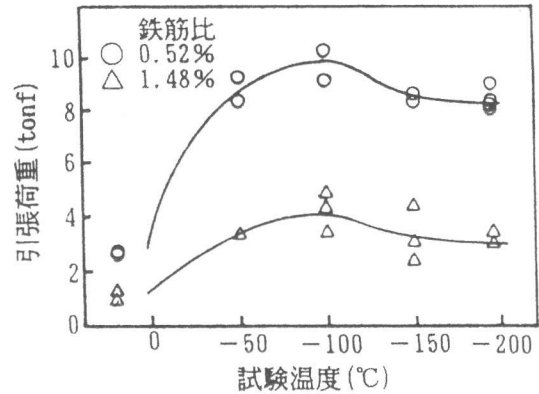


図-5 試験温度と引張荷重との関係

鉄筋の歪速度の傾向について調べるために、

コンクリート破断時の引張荷重について検討を行ってみた。図-5に、2つの鉄筋比についての試験温度ごとのコンクリート破断時の引張荷重を示す。この図において温度低下による引張荷重の変化は、コンクリートの引張強度の変化に等しくなる。したがって、コンクリートの引張強度は、常温から-100℃までは、温度の低下に従って増加するものの、-100℃付近でピークを迎え、それ以下の温度では逆に減少する傾向がみられる。また、-150℃以下の温度では、これもばらつきが大きいもののほぼ横ばいか若干減少する傾向がみられる。この試験温度とコンクリートの引張強度との関係と試験温度と鉄筋に生じる歪速度との関係は似た傾向を示していることがわかる。したがって、コンクリート破断時に鉄筋に生じる歪速度は、コンクリートが破断したことにより鉄筋に加わる荷重の大きさに大きく影響していると考えられる。

### 3. 鉄筋の衝撃試験[4]

#### 3.1 実験概要

##### 1) 使用鉄筋および実験装置

横フシ異形棒鋼SD29

5Aを使用し、鉄筋径は

D25とした。鉄筋の機

械的性質と化学成分を

表-4に示す。使用した

衝撃試験機は、50kgf・m

ASTMシャルピー衝撃試験機を改良して作成したものである。

##### 2) 鉄筋供試体の形状

本研究が対象としている状況は、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、異形鉄筋の場合、フシの付け根に応力集中が起こり、破断しやすくなると考えられるため、鉄筋単体で試験を行うことが必要になってくる。そこで、今回使用した供

表-2 鉄筋の試験成績

##### (a) 機械的性質

| 降伏点                   | 引張強度                  | 伸び  |
|-----------------------|-----------------------|-----|
| 36kgf/mm <sup>2</sup> | 58kgf/mm <sup>2</sup> | 26% |

##### (b) 化学成分

| 成分 (%) |      |      |      |      |
|--------|------|------|------|------|
| C      | Si   | Mn   | P    | S    |
| 0.24   | 0.21 | 0.80 | 0.32 | 0.45 |

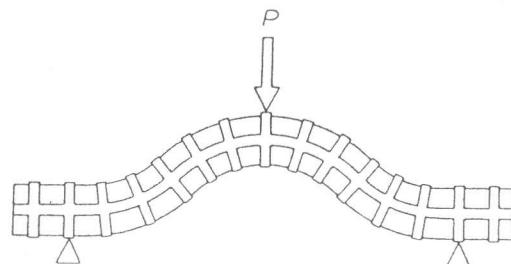


図-6 鉄筋供試体

試体は、図-6に示すような実物の異形鉄筋を種種の曲げ内半径で曲げ加工したものを供試体とした。

### 3) シャルピー衝撃試験機のハンマー重量調節

極低温下で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。衝撃試験機を図-7に示す。

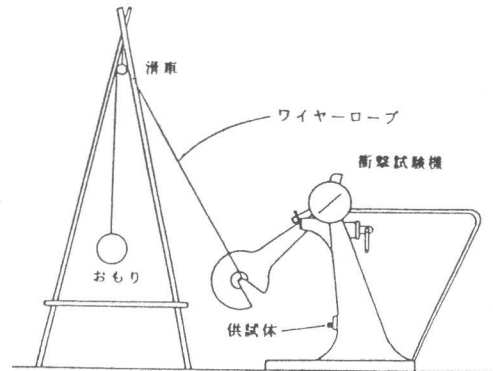


図-7 おもりの設置

### 4) 実験方法

図-6に示すような方向からの荷重によって曲げモーメントが生じ、曲げ加工の内側に引張応力が衝撃的に働くことが考えられるため、この局所的に発生する引張を利用して、任意の曲げ内半径を与えた供試体に衝撃的に引張力を与え、その耐衝撃性を簡便に評価することを試みる。

表-5 各振り上げ角のときの歪速度と最大歪

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、2.0φ、3.0φ、5.0φ、6.0φ、10.0φの5種類である。供試体の支持間隔は試験機の大さきから約200mmとした。

| 振り上げ角度 | 歪速度 (s <sup>-1</sup> ) | 最大歪 (μ) |
|--------|------------------------|---------|
| 30°    | 0.62                   | 1300    |
| 40°    | 1.4                    | 3000    |
| 45°    | 2.0                    | 4260    |
| 50°    | 3.0                    | 5400    |
| 60°    | 7.0                    | 17200   |

前に述べた両引試験などによって、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30°、40°、50°、60°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-5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、その中央部分のフシとフシ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為、あらかじめ歪ゲージの読みと鉄筋応力との関係は調べた。また、鉄筋に発生する歪と歪速度に対する供試体の曲げの影響は十分小さいため無視できると考えている。

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。

表-6 破断しなかった最低温度 (単位は℃)

### 3.2 結果および考察

試験結果を表-6に示す。ハンマーの

| 振り上げ<br>曲げ<br>内半径 | 振り上げ角度 |      |      |      |
|-------------------|--------|------|------|------|
|                   | 30°    | 40°  | 50°  | 60°  |
| 2φ                | ×      | -65  | -55  | -35  |
| 3φ                | ×      | -115 | -90  | -80  |
| 5φ                | ×      | -150 | -135 | -130 |
| 6φ                | ×      | -175 | -170 | -150 |
| 10φ               | ×      | ×    | -185 | -165 |
| 直鉄筋               | ×      | ×    | ×    | ×    |

×は-196℃でも破断せず

振り上げ角が $30^\circ$ の場合、各曲げ内半径の条件について $-196^\circ\text{C}$ でも破断が見られなかった。また、曲げ加工を施していないまっすぐな鉄筋では、いずれの荷重でも $-196^\circ\text{C}$ で破断が見られなかった。その他の条件で破断が見られたとき、破断は鉄筋のフシの付け根から起きているのが観測できた。このことは、フシの付け根による応力集中が破断に影響を及ぼしていることを示している。表-6から、同じ荷重の条件下でそれぞれの曲げ内半径について破断温度を比較した場合、温度の低下により破断した鉄筋の曲げ内半径が大きくなっていくのが明らかになっている。これは、温度低下による鉄筋の脆性化を意味し、最終歪が減少したことに起因すると考えられる。このことから、このような極低温下では、温度低下による鉄筋の脆性化が確認できたといえる。また、同じ曲げ内半径の鉄筋につ

いてハンマーの振り上げ角で比較した場合、振り上げ角を大きくしていくと破断温度が上がっていることが明らかになっている。しかしながら、振り上げ角が大きくなることによって、鉄筋にかかる衝撃力により発生する歪速度と同様に最終歪も増加するので、必ずしも、単純に歪速度だけの影響であるとは断定はできない。次に、曲げ加工が鉄筋の耐衝撃性に及ぼす影響を見るために試験結果をグラフにしたものが図-8である。この図から、曲げ内半径は小さくなればなるほど破断温度が上がっているのが明らかである。特に、曲げ内半径が小さい場合は、曲げ加工が破断に及ぼす影響が温度に対して敏感であることがわかる。鉄筋に曲げ加工を施すと予歪が発生する。そこで、予歪量に注目してグラフにしたのが図-9である。この図より予歪量と破断温度の関係は右下がりのほぼ線形になっていることがわかった。これは、予歪量が大きければ大きいほど、破断しやすくなり、破断温度は予歪に比例して上がることを示している。さらに、今回使用した鉄筋では、 $2\phi$ や $3\phi$ のような曲げ内半径が小さい場合、比較的高い温度下でも破断が見ら

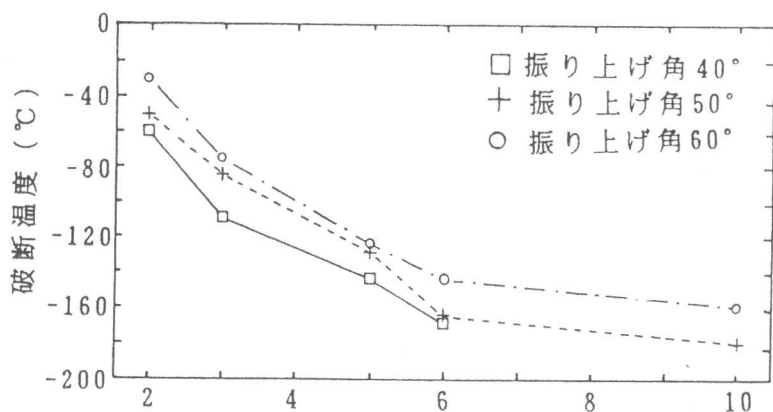


図-8 曲げ内半径と破断温度の関係

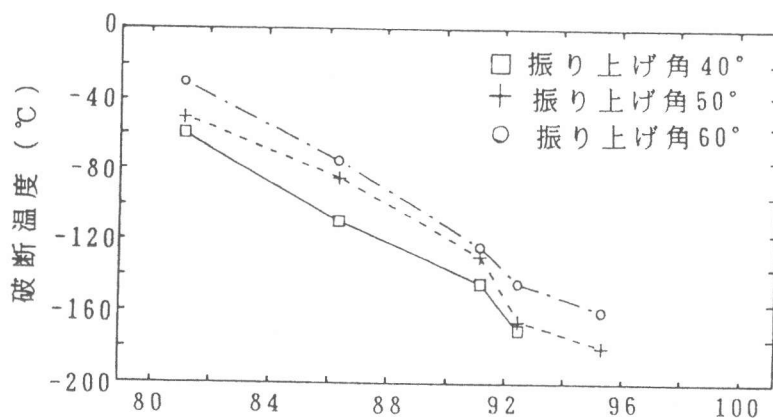


図-9 予歪量と破断温度の関係

生する。そこで、予歪量に注目してグラフにしたのが図-9である。この図より予歪量と破断温度の関係は右下がりのほぼ線形になっていることがわかった。これは、予歪量が大きければ大きいほど、破断しやすくなり、破断温度は予歪に比例して上がることを示している。さらに、今回使用した鉄筋では、 $2\phi$ や $3\phi$ のような曲げ内半径が小さい場合、比較的高い温度下でも破断が見ら

れた。したがって、両引試験の結果と照らし合わせてみると、このような鉄筋を極低温下の構造物で2φや3φといった小さい曲げ内半径で曲げ加工を施して使うことは危険であることを示している。

#### 4. 結論

(1) コンクリート破断時に鉄筋に生じる歪速度は、ばらつきが大きいものの、コンクリートが湿潤状態で鉄筋比が約1.5%以下の場合、常温時でおよそ $0.5s^{-1}$ 程度、 $-50^{\circ}C$ でおよそ $10s^{-1}$ 程度、 $-100^{\circ}C$ で $14s^{-1}$ 程度、 $-150^{\circ}C$ で $10s^{-1}$ 程度、 $-196^{\circ}C$ で $5s^{-1}$ 程度であると言える。

(2) 鉄筋の予歪と破断温度との間には直線関係があることがわかり、この関係を用いることによって使用される温度とその時の鉄筋の許容冷間加工度との関係が求められることがわかった。

(3) 両引試験から得られた結果と照らし合わせてみると、今回衝撃試験に使用した鉄筋は、極低温下においては10φより小さい曲げ加工を施されたとき、鉄筋の耐衝撃性は低下し破断する危険性がある。このように、極低温下で使用される鉄筋の曲げ内半径の最小値は、使用される鉄筋の種類や性質、使用環境の最低温度等を考慮して定められなければならない。

なお、本研究は、文部省科学研究費補助金（試験研究B）によって行われたものである。

#### 謝辞

本研究の実施に際して、ご協力を頂いた東北大学工学部土木工学科 4年井口文広君に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 三浦 尚・村野清一郎・伊藤 円：極低温下におけるコンクリートの破壊衝撃が鉄筋に及ぼす影響、セメント技術年報、vol.38、pp.437-440、1984
- 2) 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
- 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
- 4) 遠藤正文・三浦 尚・堀 宗朗：低温下で使用される鉄筋の耐衝撃性に関する研究、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.468-469、1991