

# [72] 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

正会員 三浦 尚 (東北大学工学部)  
 正会員 ○村野 清一郎 (東北電力)

## 1. まえがき

極低温下において、コンクリートは、一般に強度は大幅に増加するものの、それに対し、塑性変形量は相対的に小さくなり、破壊は非常に衝撃的なものとなる。また、鉄筋も極低温下において、延性が失われ脆的なものとなる。そのため、コンクリートが引張りを受け、ひびわれが発生する際の衝撃によってもコンクリート中に埋め込まれた鉄筋が破断することが考えられる。また、鉄筋の重ね継手部においても、重ね合わせたコンクリートが鉄筋に沿って割裂した時、その際の衝撃で横方向鉄筋が破断する場合があると言われている。本研究は、このような環境下で使用される鉄筋に要求される耐衝撃性を把握するためにコンクリート破壊時に発生する衝撃の大きさや、破壊時に鉄筋に生じる歪(歪の大きさや歪速度)を定量的に求めることを目的とする。

## 2. 実験概要

本研究では、円柱供試体中に鉄筋比を変えて鉄筋を埋め込んだ供試体を作製し、割裂破壊させ、その時の衝撃の大きさ、その際に鉄筋に生じる歪および歪速度の大きさを測定した。尚、供試体中に埋め込む鉄筋は、曲げ加工しない鉄筋と残留歪20%に曲げ加工した鉄筋(曲げ内半径が鉄筋直径の2倍)の2種類を用いた。さらに、コンクリート中の水分量の供試体破壊時の衝撃に及ぼす影響を調べるため、3種類の異なった方法で供試体を養生し、コンクリート中の水分量を変化させた。また、応力状態がより実際の構造物に近いと思われる両引き供試体を用いて、コンクリートを引張破断させ、その際に生じる鉄筋の歪および歪速度も測定した。

表-1 鉄筋の化学成分

	成 分 %				
	C	Si	Mn	P	S
D10	0.23	0.23	1.23	0.31	0.024
D22	0.21	0.20	1.12	0.041	0.031

### 1) 使用材料およびコンクリート配合

本研究で使用したセメントは、早強ポルトランドセメント、細骨材は川砂、粗骨材は碎石である。水セメント比 W/C は50%、細骨材率は38%である。混和剤として、ポリオキシエチレンアルキルアニルエーテルを主成分とした AE 剤を用いた。また、使用した鉄筋は、市販の異形棒鋼(SD30) D10(降伏点39kg/mm<sup>2</sup>、引張強度57kg/mm<sup>2</sup>)と異形棒鋼(SD35) D22(降伏点39kg/mm<sup>2</sup>、引張強度57kg/mm<sup>2</sup>)である。表-1に、使用した異形棒鋼の化学成分を示す。

### 2) 実験方法

本実験で用いた円柱供試体は、φ150×200mmのものである。この円柱供試体中に、図-1(a),(b)に示す様に、曲げ加工しない鉄筋および残留歪20%に曲げ加工した鉄筋をそれぞれ鉄筋本数を変えて埋め込み、計6種類の供試

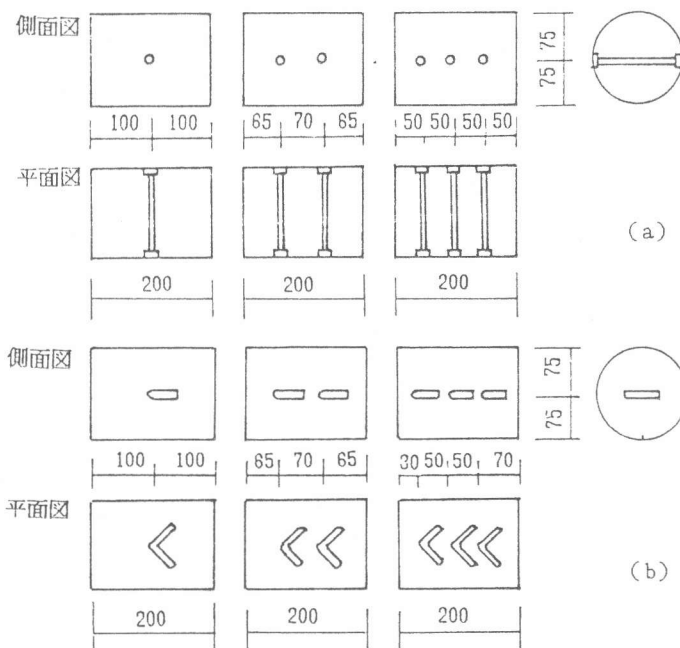


図-1 本実験で用いた円柱供試体  
 (a) 曲げ加工しない鉄筋  
 (b) 20% 曲げ加工した鉄筋

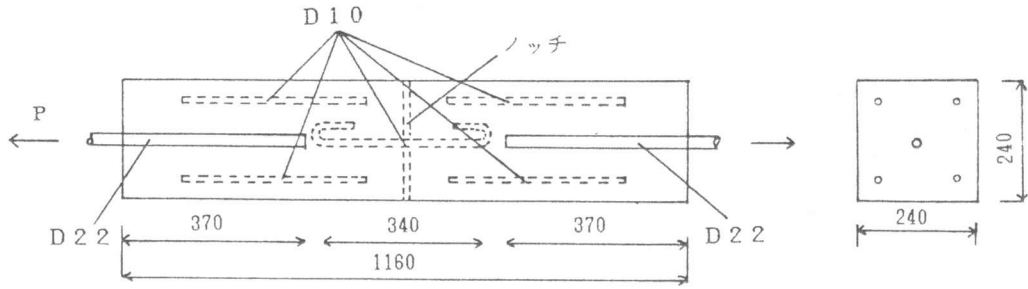


図-2 両引き供試体の1例

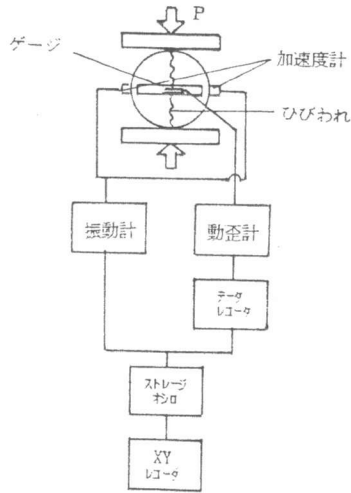


図-3 測定手順

体を作製した。養生は、コンクリート中の含水量を変化させるため水中養生、膜養生（脱型後表面に皮膜養生剤を塗布し恒温室に放置）、および気乾養生（RH60%、室温 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温室に放置）等の3種類の方法で行なった。曲げ加工しない鉄筋を埋め込んだ供試体については、 $-10^\circ\text{C}$ 、 $-30^\circ\text{C}$ 、 $-50^\circ\text{C}$  および $-100^\circ\text{C}$ 、残留歪20%に曲げ加工した鉄筋を埋め込んだ供試体について

は、 $-80^\circ\text{C}$  および $-100^\circ\text{C}$  に冷却し割裂試験を行なった。尚、冷却は、供試体を低温槽中に入れ、槽中に液体窒素を噴霧することで行なった。

図-2に、断面 $240 \times 240 \text{ mm}$ の両引き供試体を示す。この図の様に歪測定用の鉄筋を配置した供試体中央部のコンクリート表面にノッチを設け、両引き載荷した時、この部分で破壊が生じる用にした。また、残留歪の影響を調べるため、引張り載荷して残留歪15%を与えた鉄筋（引張り載荷によって鉄筋に、一様に残留歪を与える場合、15%が可能な限度であった）を供試体中央部に配置した供試体についても実験した。本実験では、この他に断面 $80 \times 80$ および $180 \times 180$ 等の計3種類の供試体を用いた。これらの供試体は、脱型後、水中養生し材令7日で $-100^\circ\text{C}$ まで冷やし、両引き試験を行なっている。尚、冷却は、低温槽内に供試体をセットし、槽内に液体窒素を噴霧する方法で行なった。

図-3に加速度と歪の測定手順を示す。割裂試験の場合、供試体破壊時の加速度は、供試体側面に取り付けた加速度計を用いて測定した。尚、両引き試験では、供試体破壊時の加速度は測定していない。また供試体破壊時に、中に埋め込んだ鉄筋に生じる歪は、鉄筋中央部にゲージを貼り付け動歪計を用いて測定した。尚、両引き供試体では、供試体中央部に配置した鉄筋の中心部にゲージが貼り付けてある。また、割裂試験および両引き試験ともに、載荷速度は、毎分約10ton程である。

表-2 割裂試験結果（曲げ加工しない鉄筋）

養生方法	鉄筋本数	因子	試験温度			
			$-10^\circ\text{C}$	$-30^\circ\text{C}$	$-50^\circ\text{C}$	$-100^\circ\text{C}$
水中養生 含水量 =6.27%	1本	供試体の加速度	200 G	395	450	645
		鉄筋の歪	980 $\mu$	1380	1640	2080
		鉄筋の歪速度	2.5sec <sup>-1</sup>	4.2	5.1	7.0
	2本	供試体の加速度	85 G	155	190	275
		鉄筋の歪	580 $\mu$	820	960	1220
		鉄筋の歪速度	1.8sec <sup>-1</sup>	3.4	4.5	6.5
	3本	供試体の加速度	30 G	70	102	160
		鉄筋の歪	320 $\mu$	440	540	780
		鉄筋の歪速度	1.3sec <sup>-1</sup>	2.5	3.4	5.7
膜養生 含水量 =5.22%	1本	供試体の加速度	10 G	63	85	195
		鉄筋の歪	680 $\mu$	1030	1240	1200
		鉄筋の歪速度	0.5sec <sup>-1</sup>	2.3	3.4	5.3
	2本	供試体の加速度	15 G	65	93	125
		鉄筋の歪	460 $\mu$	650	770	980
		鉄筋の歪速度	0.5sec <sup>-1</sup>	2.1	3.3	5.1
	3本	供試体の加速度	—	30 G	53	105
		鉄筋の歪	190 $\mu$	340	440	620
		鉄筋の歪速度	0.4sec <sup>-1</sup>	1.6	2.5	3.8
気乾養生 含水量 =4.47%	1本	供試体の加速度	8 G	30	55	115
		鉄筋の歪	400 $\mu$	660	790	860
		鉄筋の歪速度	0.2sec <sup>-1</sup>	1.7	2.6	4.3
	2本	供試体の加速度	5 G	25	45	65
		鉄筋の歪	300 $\mu$	440	540	630
		鉄筋の歪速度	0.2sec <sup>-1</sup>	1.3	1.8	2.7
	3本	供試体の加速度	—	15 G	30	75
		鉄筋の歪	100 $\mu$	200	300	460
		鉄筋の歪速度	0.01sec <sup>-1</sup>	0.9	1.3	2.0

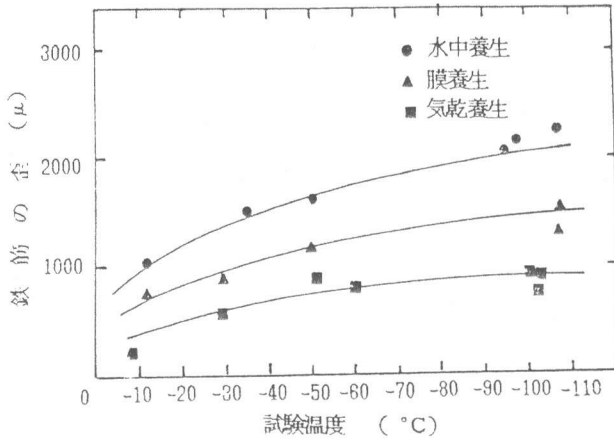


図-4 試験温度と鉄筋の歪の関係

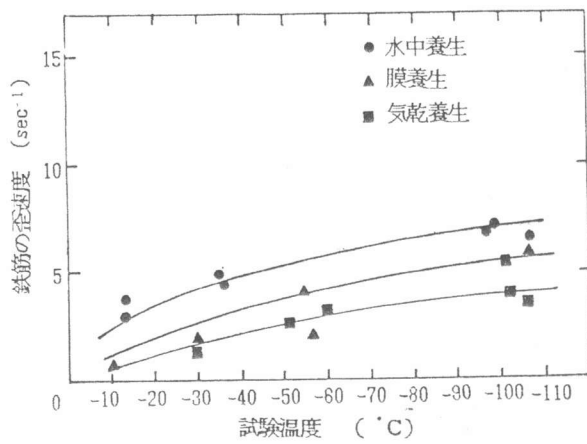


図-5 試験温度と鉄筋の歪速度の関係

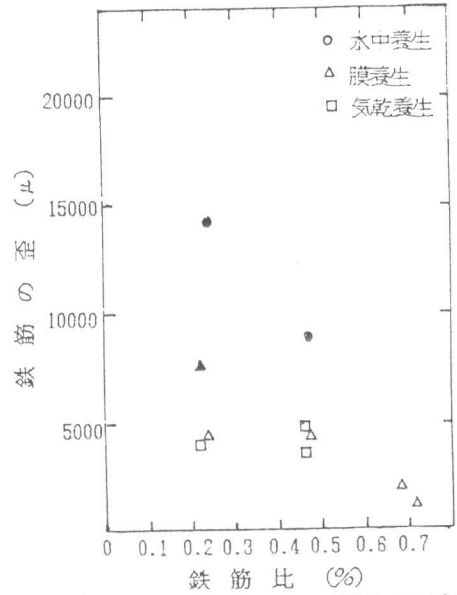


図-6 鉄筋比と鉄筋の歪の関係 (-80°C)

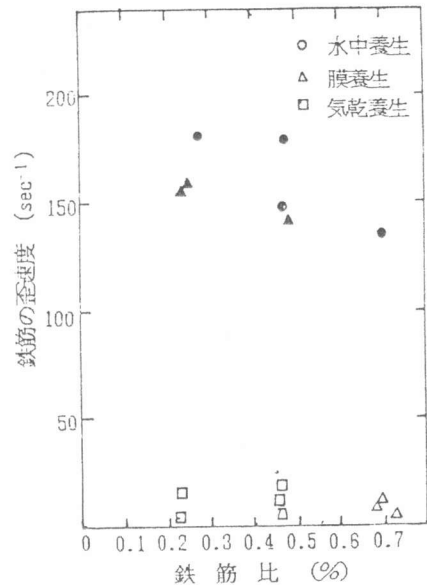


図-7 鉄筋比と鉄筋の歪速度の関係 (-80°C)

### 3. 結果

#### 1) 曲げ加工しない鉄筋を埋め込んだ円柱供試体

表-2に割裂試験結果を示す。図-4に、鉄筋1本埋め込んだ供試体における、破壊時に鉄筋に生じる歪と試験温度との関係を示す。また、図-5に、鉄筋1本埋め込んだ供試体における、破壊時に生じる鉄筋の歪速度と試験温度との関係を示す。供試体破壊時に鉄筋に生じる歪および歪速度は、試験温度の低下および含水量の増加に従い増加する。この傾向は、供試体中に埋め込む鉄筋本数にかかわらず同様である。また、鉄筋本数が増えるに従い、鉄筋の歪および歪速度は減少している。また、常温下において鉄筋に生じる歪が約100~450μであったことに対して、-100°Cにおける鉄筋の歪は常温時の約4倍であった。さらに、常温下における鉄筋の歪速度が $2.0 \sim 6.0 \times 10^{-4}$ であったことに対し、-100°Cにおける鉄筋の歪速度は、その約1万倍となっている。

#### 2) 残留歪20%に曲げ加工した鉄筋を埋め込んだ円柱供試体

図-6および図-7に、試験温度-80°Cにおける鉄筋比と鉄筋の歪および歪速度との関係を示す。また、図-8および図-9に、試験温度-100°Cにおける鉄筋比と鉄筋の歪および歪速度との関係を示す。これらの図において、黒く塗りつぶしたものは、供試体破壊時の衝撃によって、供試体中に埋め込まれた鉄筋が脆性破断したことを示している。これらを見ると試験温度-80°Cにおいては、鉄筋が破断したものの歪速度は $135 \text{Sec}^{-1}$ 以上、-100°Cにおいては、鉄筋が破断したものの歪速度は、 $120 \text{Sec}^{-1}$ 以上であった。また、各養生方法における鉄筋の破断の有無から判断すると、含水量の影響は大である。また、図-4および図-5に示した曲げ加工しない鉄筋に生じる歪および歪速度と、残留歪20%に曲げ加工した鉄筋に生じる歪および歪速度とを比較してみると、残留歪20%に曲げ加工した鉄筋に生じる歪および歪速度は曲げ加工しない鉄筋に生じる歪および歪速度の10~20倍程度である。

3) 両引き試験

表-3に実験結果を示す。供試体Aと供試体Bでは供試体中央部の鉄筋が延性破断した。また、供試体中央部に埋め込んだ鉄筋に一樣引張りで残留歪15%を与えた供試体Dでは、鉄筋が脆性破断した。尚、供試体Cでは鉄筋は破断しなかった。

供試体Dと供試体Cとの歪速度の比は約10倍であるが、この値はこれらの鉄筋比にほぼ反比例していることがわかる。また、曲げ加工した鉄筋の内側の歪は、直な鉄筋の10~20倍程度であることを考えると、鉄筋の脆性破断時においては円柱供試体においても、両引き供試体においても、鉄筋に働く平均的な歪速度は、どちらも10Sec<sup>-1</sup>程度であったことがわかる。

4. 結論

本研究より、次の様な結論を得た。

- 1) 極低温下で使用される鉄筋コンクリート部材においては、場合によっては、コンクリートの引張破断の衝撃によって、中の鉄筋が脆性破断することがあり、この点を十分考慮した材料の選択が必要である。
- 2) 極低温下において、コンクリート破壊時に、鉄筋に作用する歪および歪速度は、含水量の増加に従い指数関数的に増加する。
- 3) 常温下と比較して、-100°Cにおける鉄筋の歪および歪速度は、約4倍および1万倍となった。
- 4) 残留歪20%に曲げ加工（曲げ内半径が鉄筋直径の2倍）した鉄筋の折曲げ内側部に発生する歪は、直な鉄筋に発生する歪と比較して10~20倍程度大きくなる。
- 5) コンクリートが引張破断する時に鉄筋に発生する歪速度は、その鉄筋コンクリート部材の引張部の鉄筋比にほぼ反比例する。
- 6) 今回の実験に用いた鉄筋では、鉄筋に15~20%程度の残留歪を与えた場合、-100°Cで平均的な歪速度が10Sec<sup>-1</sup>程度以上になると鉄筋は破断する可能性がある。
- 7) 以上のことから、極低温下で使用される鉄筋に要求される耐衝撃性の値は、使用する構造物の状態や鉄筋の曲げ加工の状態、使用温度等によって定まってくる事がわかる。

尚、本研究の実施にあたり、多大の御協力をいただいた卒研、松橋敏君に謝意を表します。

参考文献 三浦・村野・伊藤 「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」  
昭和59年 セメント協会技術年報

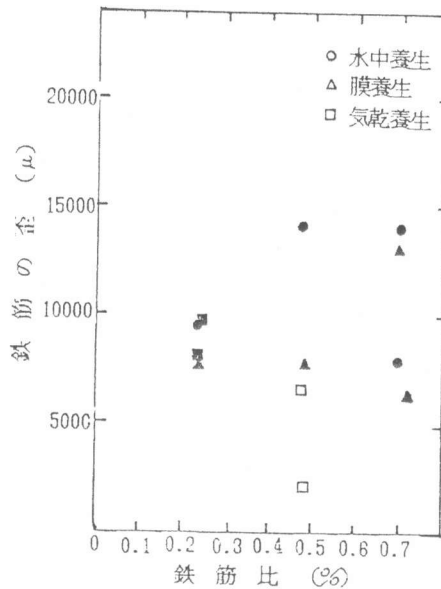


図-8 鉄筋比と鉄筋の歪の関係 (-100°C)

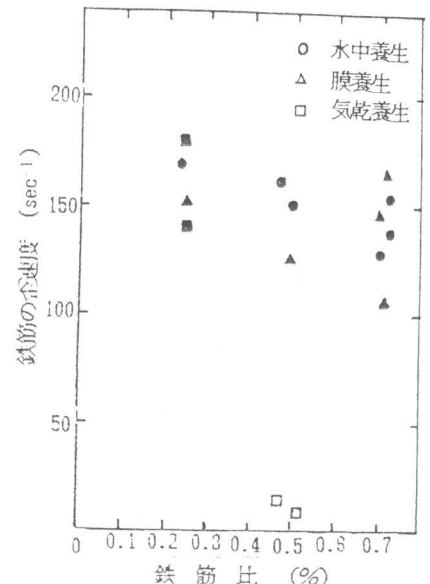


図-9 鉄筋比と鉄筋の歪速度の関係 (-100°C)

表-3 両引き試験の結果

	断面	鉄筋比	残留歪	強度	鉄筋の歪	鉄筋の歪速度	破断状況
A	180×180 mm	0.28 %	—	65.7 kg/cm <sup>2</sup>	10028 μ	169sec <sup>-1</sup>	延性破断
B	240×240	0.18	—	51.9	13052	262	延性破断
C	80×80	1.48	15 %	54.5	3923	1.1	破断せず
D	240×240	0.18	15	81.6	7875	11.4	脆性破断