

## 論 文

[2096] 低熱スラグセメントを用いた高強度鉄筋コンクリートの  
低温時特性

正会員○塙屋俊幸 (清水建設技術研究所)

正会員 滝本和志 (清水建設技術研究所)

正会員 高橋行茂 (東京ガス生産技術部)

峯岸孝二 (東京ガス生産技術部)

## 1. まえがき

本研究は、低温にさらされる部材に高強度コンクリート ( $f'_{ck} = 600 \text{ kgf/cm}^2$ ) を用いることが可能かどうか検討した一連の研究の一部である。ここでは、低熱スラグを用いた高強度コンクリートの低温時特性、高強度鉄筋の低温時特性、高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート (RC) はりの低温時曲げ・せん断特性について報告する。

## 2. 低熱スラグセメントを用いた高強度コンクリートの低温時特性

## 2. 1 実験概要

試験体は  $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$  とし、圧縮強度、弾性係数、ポアソン比、割裂引張強度に関して JIS に準じて実験を行なった。目標試験温度は常温、 $-40^\circ\text{C}$ 、 $-70^\circ\text{C}$ とした。配合を表一に示す。セメントは第一セメント株製低熱スラグセメント (比重 2.96、ブレーン値  $5690 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) とした。粗骨材は武甲山産碎石 ( $G_{max}=20 \text{ mm}$ 、比重 2.70、FM 6.65) を用い、細骨材は岩舟産碎砂 (粗目砂、比重 2.61、FM 3.08) と利根川水系丘砂 (細目砂、比重 2.64、FM 2.02) の 2 種類の細骨材を 6 : 4 の割合で混合して使用した。混和剤はナフタリン系の高性能 AE 減水剤、AE 調整剤を用いた。ミキサは 2 軸強制練り (容量  $3 \text{ m}^3$ ) を使用、練りまぜ量 (1 バッチ) は  $2 \text{ m}^3$ 、練りま

表-1 配合表

配合名	水セメント比 W/C (%)	細粗骨材率 S/a (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					高性能 AE 減水剤 C × %	AE調整剤 C × %		
			水 W	セメント C	砂 S		砂利 G				
					粗砂 SL	細砂 SS					
1	32.0	37.1	170	531	357	237	1037	2.0	0.008		
2	32.0	37.1	160	500	368	245	1072	2.2	0.010		
3	32.0	37.1	155	485	374	249	1089	2.4	0.010		

表-2 コンクリート材料試験結果

配合名	材令 (日)	試験時 温 度	圧縮強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	弾性係数 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	ポアソン比	引張強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
1	76	常温	707	390000	0.22	39.4
			728	410000	0.25	28.1
			706	398000	0.22	42.5
1	78	$-41^\circ\text{C}$	951	452000	0.29	70.3
			945	462000	0.25	62.6
			990	460000	0.28	-
1	79	$-72^\circ\text{C}$	901	511000	0.35	72.1
			1088	507000	0.33	66.5
			1104	482000	0.32	57.1
1	104	$-72^\circ\text{C}$	936	466000	0.27	-
			916	442000	0.22	-
			854	454000	0.33	-
2	104	$-73^\circ\text{C}$	897	435000	0.22	-
			871	500000	0.26	-
			976	530000	0.30	-
3	104	$-73^\circ\text{C}$	955	505000	0.32	-
			991	497000	0.14	-
			791	486000	0.26	-

ぜ時間は2分間とした。試験体はコンクリート打設後、翌日脱型し、試験時まで水中養生を行なった。

養生終了後、試験体を低温槽（冷媒は液体窒素）内に入れ冷却した。温度管理は試験体と同一条件のダミー試験体を作り、その試験体の中心部と側面の位置にT熱電対を配置し、10°C以上の温度差とならないよう半日程度で所定の温度まで冷却し、24時間保冷後実験を行なった。

## 2.2 実験結果と考察

表-2に実験結果を示す。

### ①圧縮強度

図-1に圧縮強度と試験温度の関係を示す。文献-1による普通強度コンクリートの低温下圧縮強度増加量 $\Delta f_{TC}$ を求めた結果を本実験結果とともに図-2に示す。図-2によれば、本実験で用いた高強度コンクリートの低温下における圧縮強度増加量は文献-1の結果よりも小さい。これは、高強度コンクリートの場合、水セメント比が小さく、細孔径が普通強度コンクリートより小さいため、細孔中の水の凍結温度が低くなり、強度に寄与する凍結水が少ないためであると考えられる（文献-2参照）。

図-3に単位水量と圧縮強度の関係を示す。試験温度は約-70°Cである。単位水量の違いによる圧縮強度の差は本実験の範囲内では認められない。

### ②弾性係数

図-4に圧縮強度と弾性係数の関係を示す。圧縮強度が大きくなるにつれて、弾性係数も大きくなる傾向にある。

### ③ポアソン比

図-5に圧縮強度とポアソン比の関係を示す。ポアソン比も圧縮強度が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。

### ④割裂引張強度

文献-1による普通強度コンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を本実験結果とともに図-6に示す。図-6によれば、高強度コンクリートの場合、普通強度コンクリートに比べ低温時の圧縮強度に対する割裂引張強度の比は小さくなる

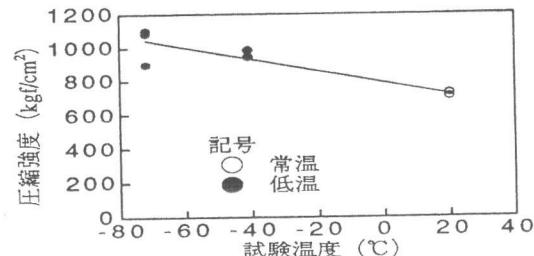


図-1 圧縮強度と試験温度の関係（配合1）

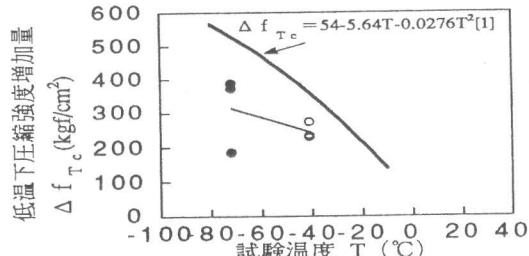


図-2 低温下圧縮強度増加量（配合1）

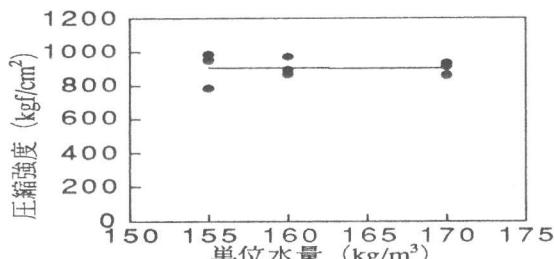


図-3 圧縮強度と単位水量の関係

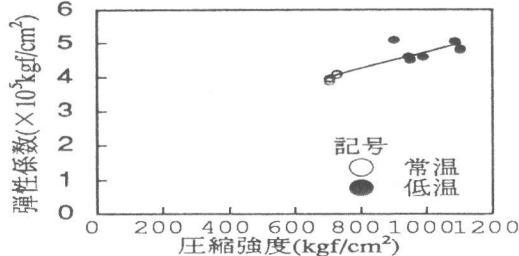


図-4 弾性係数と圧縮強度の関係（配合-1）

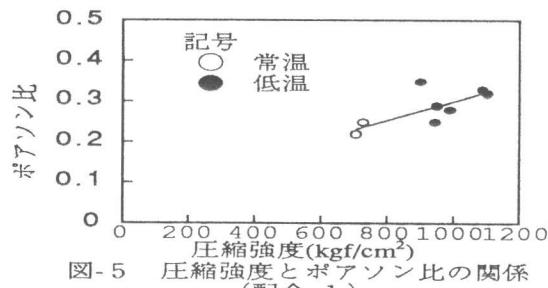


図-5 圧縮強度とポアソン比の関係（配合-1）

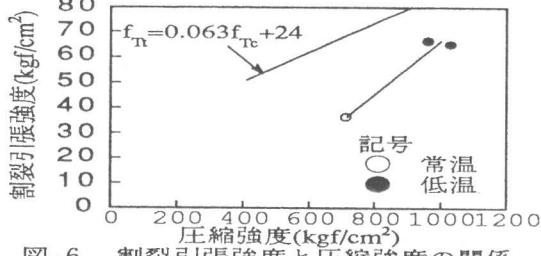


図-6 割裂引張強度と圧縮強度の関係（配合-1）

傾向にある。

表-3 鉄筋の材料試験結果

### 3. 高強度鉄筋(SD50)の低温時強度特性

#### 3.1 実験概要

試験体の一覧を表-3に示す。使用鉄筋はねじ節鉄筋 D10、D19、D35 とし、SD345、SD490について引張実験を行なった。

試験温度は常温、-40°C、-70°Cとした。試験体は低温槽(冷媒は液体窒素)内に入れ冷却した。温度管理として試験体と同一

条件のダミー試験体を作注)各実験値とも3本の平均値

り、その試験体の中心部と側面の位置に T熱電対を配置し、所定の温度まで冷却した後実験を行なった。測定項目は降伏点、引張強度、弾性係数および伸び率とした。試験体のひずみは試験体表面に一対の低温用ワイヤーストレインゲージを接着して測定した。

#### 3.2 実験結果と考察

低温下における高強度鉄筋の強度特性に関する研究例は見当らない。ここでは、文献-1で報告されている強度式と比較することにより、本実験で用いた高強度鉄筋の低温時強度特性を検討する。

##### ①降伏点と引張強度

文献-1によれば低温下における鉄筋(SD345-D16)の降伏点は式(1)で表される。

$$f_{sy} = 2420 \exp(110/T_k) \quad (1)$$

ここに、 $f_{sy}$ :絶対温度  $T_k$ (° K)における鉄筋の降伏点( $\text{kgf/cm}^2$ )

$T_k$ :試験温度(絶対温度 ° K)

式(1)に従って計算した結果を本実験結果の一例とともに図-7、8に示す。

図-7、8によれば、本実験で用いた高

鋼材		試験時 温度 (°C)	降伏点 $f_{sy}$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	引張強度 $f_{su}$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	伸び (%)	弾性係数 $E_s \times 10^6$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )
記号	径					
SD345	D10	常温	3620	5370	18	1.90
		-41	4250	6100	28	2.05
		-71	4630	6450	28	2.18
	D19	常温	4110	5770	18	1.92
		-42	4720	6370	18	1.92
		-73	5090	6630	19	2.00
	D35	常温	3910	5660	23	1.88
		-42	4350	6230	23	1.85
		-71	4560	6500	24	1.89
SD490	D10	常温	4970	6530	15	1.89
		-41	5340	7330	22	2.02
		-71	5650	7690	24	2.11
	D19	常温	6190	8180	11	1.94
		-42	6600	8760	11	1.89
		-72	6970	9060	11	1.92
	D35	常温	5770	7650	16	1.88
		-41	6320	8230	17	1.86
		-72	6600	8490	17	1.91

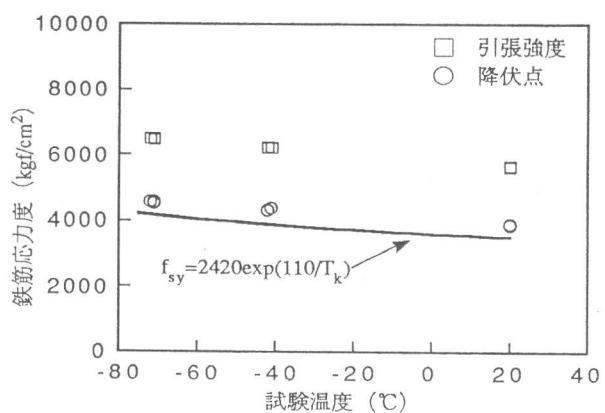


図-7 鉄筋応力度と試験温度の関係  
(SD345-D35)

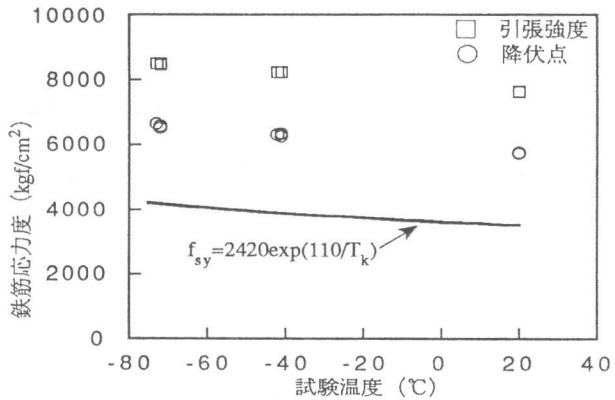


図-8 鉄筋応力度と試験温度の関係  
(SD490-D35)

強度鉄筋 SD490あるいは普通強度鉄筋 SD345の低温時強度増加量は従来の鉄筋引張試験結果と同様の強度増加量となっており、SD490までの鉄筋はSD345と同様の強度増加傾向を示すと考えてよい。

## ②弾性係数

文献-1によれば低温下における鉄筋(SD345-D16)の弾性係数は式(2)で表される。

$$E_{Ts} = 8.5 \times 10^{-4} T_k + 2.1 \quad (2)$$

ここに、 $E_{Ts}$ : $20^{\circ}\text{C} \geq T \geq -160^{\circ}\text{C}$ の鉄筋のみかけの弾性係数 ( $\times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ )

$T_k$ :試験温度(絶対温度。K)

式(2)に従って計算した結果を本実験結果とともに図-9に示す。図-9によれば、本実験で用いた高強度鉄筋SD490あるいは普通強度鉄筋SD345の弾性係数は従来の鉄筋引張試験結果と同様の弾性係数となっており、SD490までの鉄筋はSD345と同様の弾性係数を示すと考えてよい。

## ③伸び率

図-10に伸びと試験温度の関係の一例を示す。図-10によれば、 $-70^{\circ}\text{C}$ までの低温下では低温になっても、鉄筋の伸び

はあまり変化がない。文献-1においても $-70^{\circ}\text{C}$ までは常温と同様の伸びを示しており本実験結果と同様の結果を示している。

## 4. 高強度コンクリートを用いたRCはりの低温時曲げ・せん断特性

### 4.1 実験概要

試験体の種類を表-4に、形状寸法、配筋を図-11、12に示す。コンクリートの配合は表-1の配合-1である。試験体はコンクリート打設後、材令7日で脱型し、材令60日まで水中養生を行なった。その後試験時(材令約90日)まで、包装用フィルムにより乾燥を防いだ。

養生を行なった試験体は、低温槽(冷媒は液体窒素)内に入れ冷却した。温度条件は引張側を $-40^{\circ}\text{C}$ 、圧縮側を常温とした。加力時における支持条件は単純支持とし、2点載荷とした。測定項目は、載荷荷重、コンクリートの表面ひずみ、鉄筋ひずみ、たわみ、温度などである。

### 4.2 実験結果と考察

主な実験結果を表-4に示す。なお、以下のRC計算においては表-4に示す温度依存性を考慮した材料定数を用いている。

#### ①曲げ実験

図-13に荷重～主鉄筋ひずみの関係を示す。図-13より、ひびわれ発生までは、荷重～

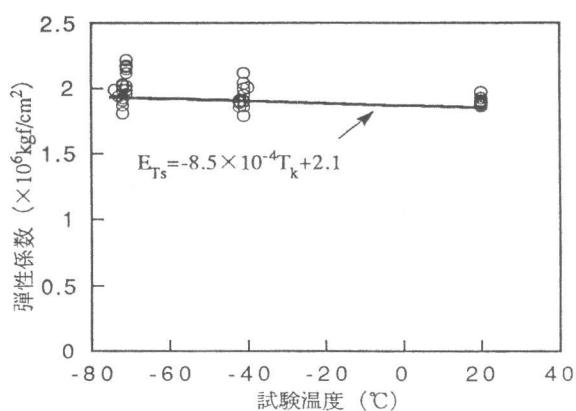


図-9 弾性係数と試験温度の関係

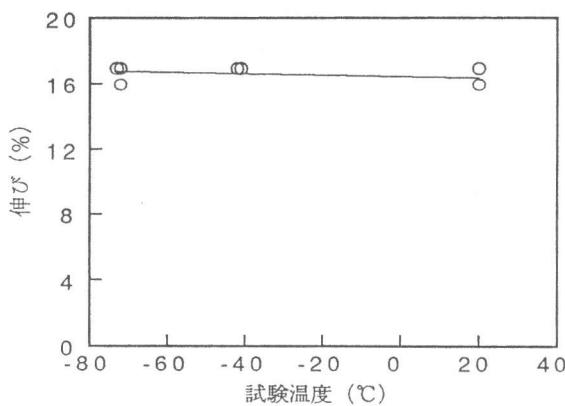
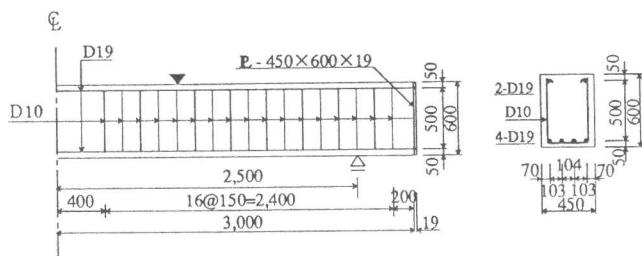


図-10 伸びと試験温度の関係  
(SD490-D35)

主鉄筋ひずみの関係はほぼ直線的であり、ひびわれ発生後は、ほぼRC計算[3]で予測される値に沿ってひずみは伸長する。従って、曲げスパンの主鉄筋ひずみはRC計算式で求めてよいものと考えられる。最大荷重の実験値はRC計算値を2割程度上回った。これは、RC計算においては鉄筋のひずみ硬化を考慮していないためであり、鉄筋のひずみ硬化を考慮した場合の計算値は実験結果とよく一致した。したがって、最大荷重を正確に予測する場合は鉄筋のひずみ硬化を考慮しなければならないものと考えられる。しかしながら、RC示方書[3]においては鉄筋のひずみ硬化を考慮しておらず、通常のRC計算をおこなっておけば安全側の設計となる。

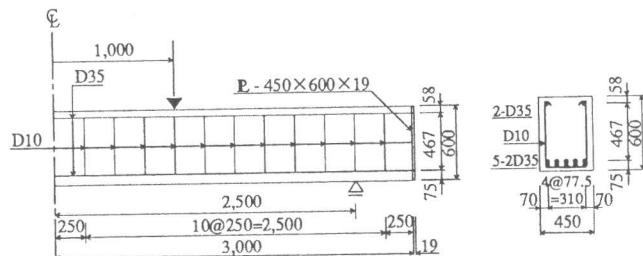
## ②せん断実験

図-14にひびわれ状況を示す。破壊性状としてはプレストレスト・コンクリートにおける斜め引張破壊のような性状を示した。図-15に荷重～せん断補強筋ひずみの関係を示す。計算コンクリート分担せん断力Vc[4]を超える荷重あたりからせん断補強筋のひずみが伸びはじめる。その後、せん断補強筋ひずみは急激に伸長するが降伏



単位:mm

図-11 形状寸法・配筋(曲げ試験)



単位:mm

図-12 形状寸法・配筋(せん断試験)

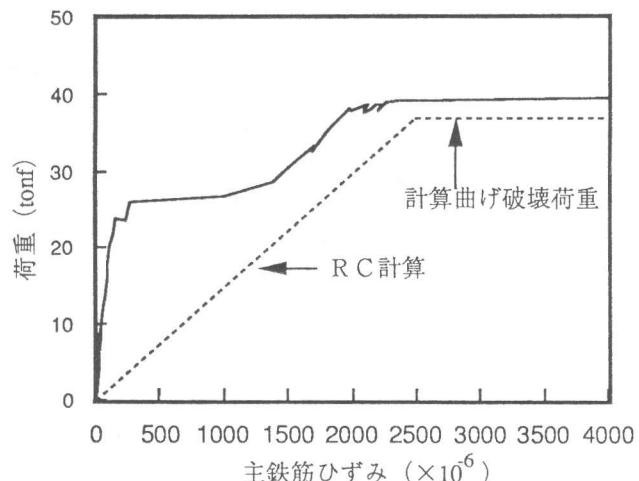


図-13 荷重と主鉄筋ひずみの関係(曲げ試験)

表-4 RCはり試験体一覧

試験 体 名	試験体寸法			コンクリート		鉄筋			鉄筋比		試験温度		実験結果			試験時 材 令			
	有効高 mm	せん断 スパン mm	せん断 スパン 比	圧縮強度		引張強度		主鉄筋 比 (-40°C)	降伏点 せん断 補強筋比 (-40°C)	降伏点 せん断 補強筋比 (-20°C)	主鉄筋 比 (-20°C)	せん断 強 度 比	圧縮部 引張部 荷重		降伏 荷重		破壊 モード		
				圧縮部 (常温)	引張部 (-40°C)	圧縮部 (常温)	引張部 (-40°C)						荷重		荷重				
				kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²		kgf/cm²	mm	kgf/cm²	%	%	℃	℃	tonf	tonf	S:せん断 日	
曲げ	550	1500	2.73	714	962	36.7	66.6	D19	4720	D10	3940	0.46	0.21	17	-40	36	45	M	97
せん断	525	1500	2.86	714	962	36.7	66.6	D35	4350	D10	3940	4.05	0.13	16	-36	—	203	S	90

注) 試験体高さ H=600mm、試験体幅 B=450mm、試験体長さ L=6000mm

ひずみに近くなるとひずみが伸びなくなる。これは、他のせん断補強筋が効き始めたためであると思われる。なお、せん断補強筋は降伏しても破断せずコンクリートが圧壊するまではひずみ硬化域まで伸び続けている。最大荷重は、RC示方書による計算値（ただし、低温下におけるコンクリートおよび鉄筋の強度増加を考慮）を5割程度上回った。その原因は明かではないが以下の理由が考えられる。

①コンクリートの分担せん断力の計算式は実験結果を統計的に整理して求められた式であり、2割程度のばらつきは有り得る。

②ひびわれの角度が傾斜しており、せん断補強筋がより有効に働くひびわれ状況であった。

いずれにしても、実験値が計算値を上回っており、RC示方書によるせん断強度式を用いておけば安全側の設計となることが確かめられた。

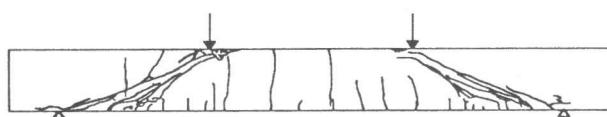


図-14 ひびわれ状況（せん断試験）

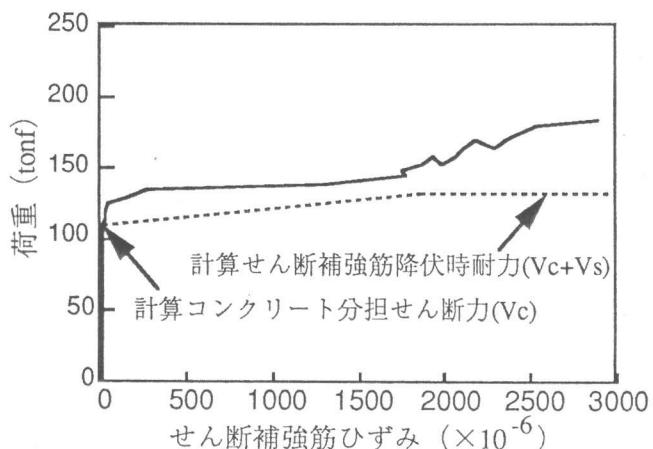


図-15 荷重とせん断補強筋ひずみの関係  
(せん断試験)

## 5. まとめ

①低熱スラグセメントを用いた高強度コンクリートの低温時特性実験結果から、高強度コンクリートは普通強度コンクリートの場合に比べ低温下における強度増加は少ないものの、低温にさらされる部材に適用してよいものと考えられる。

②高強度鉄筋 (SD490) の低温時特性実験から、今回の実験範囲内 (D35, SD345まで) の高強度鉄筋はSD345と同様な性状を示し、低温にさらされる部材に適用してよいものと考えられる。

③高強度コンクリートを用いたRCはりの低温時曲げ・せん断特性実験結果から設計規準強度  $f'_{ck} = 600 \text{ kgf/cm}^2$  程度までの高強度コンクリートを、低温にさらされる部材に適用する場合、従来の鉄筋コンタリート方式の設計法を用いてよいものと考えられる。

〔謝辞〕本研究は東京ガス、大林組、鹿島建設、清水建設の共同研究であり、本研究を御指導頂いた東京大学土木工学科岡村甫教授に対してここに謝意を表します。

### <参考文献>

- [1] 岡田武二、今井実 他：極低温下におけるコンクリート部材の曲げ特性、コンクリート工学、Vol. 15、No. 11、1977
- [2] 今井実：低温下におけるコンクリートの強度増加に関する基礎研究、清水建設研究報告、第35号、昭和57年4月
- [3] 土木学会：RC標準示方書、昭和61年制定、平成3年版
- [4] 二羽淳一郎、山田一宇 他：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、第372号/V-5、1986年8月、pp. 167-176