

低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げ特性

岡田 武二

今井 実

長沢 保紀

国島 正彦

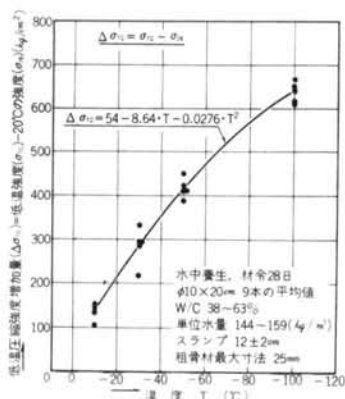
(土木技術部)

§ 1. まえがき

コンクリートの利用範囲は、近年ますます広くなりつつあり、低温領域における対象温度は -100°C におよぶ場合もある。低温度条件下のコンクリート構造物を設計するためには、低温下におけるコンクリートの特性や部材としての特性を明らかにして、設計で用いる材料定数を把握する必要がある。

液化天然ガス(LNG)などを貯蔵する地下式コンクリート製タンクの場合、貯蔵後約30年で -100°C まで冷却される。このような低温下においては、コンクリートや鋼材の力学的特性ならびに部材としての挙動が常温の場合と異なるものと考えられ、基礎的な性状を明らかにした実験報告がある^{1),2)}。また、コンクリートは低温になると常温時に比べて強度が増加する傾向にあるが、より安全側になるとして常温における材料定数を用いて設計しているのが現状である。

低温下におけるコンクリート部材をより経済的に設計するためには、材料の力学的特性が温度によって定量的にどのように変化するかを評価すること、ならびに部材による検証が必要で、これらを系統立てて実験した資料はほとんどみられない。



図—1 コンクリートの低温圧縮強度増加量

そこで、コンクリートの圧縮強度、引張強度、曲げ強度、弾性係数、クリープ係数ならびにPCストランドの引張強度などの力学的特性を低温下における実験で求めた。さらに、低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げ試験、および低温下において温度勾配を与えた部材のクリープ試験を行ない、低温度による材料定数の変化を考慮した部材設計方法について検討した。

§ 2. 低温下におけるコンクリートの力学的特性

低温下におけるコンクリートの力学的特性は、コンクリート内部の含水量によって大きく影響することが指摘されている¹⁾。LNG地下タンクを対象とする場合には部材厚さが100~200cm以上と比較的大きいこと、屋外にあり雨水の浸透があること、および地盤からの水の供給があることなどの理由から、コンクリート内部の含水量は大きいと考えられる。

以下に述べる実験は、すべて湿潤状態のコンクリートを対象としたものである。

2.1 コンクリートの強度

水セメント比が $w/c=38\sim63\%$ のコンクリートの圧縮強度試験結果によれば、温度 0°C の圧縮強度は 20°C の場合とほぼ等しいが、 -10°C 以下の圧縮強度は温度が低くなるにつれて増加している。この増加傾向は、各水セメント比の配合ごとにほぼ等しい。そこで、 -10°C 以下の各試験温度の低温圧縮強度 σ_{Tc} から 20°C の圧縮強度 σ_{28} を差引いた値 $\Delta\sigma_{Tc}$ (以下これを低温圧縮強度増加量と呼ぶ)に着目し、各試験温度の $\Delta\sigma_{Tc}$ の値を図示すると図—1のとおりである。

本実験結果から、低温下における $\Delta\sigma_{Tc}$ は式(1)で求められる。

$$\Delta\sigma_{Tc} = 54 - 8.64T - 0.0276T^2 \quad \cdots(1)$$

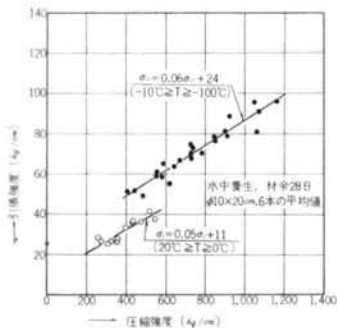


図-2 低温下コンクリートの引張強度と圧縮強度との関係

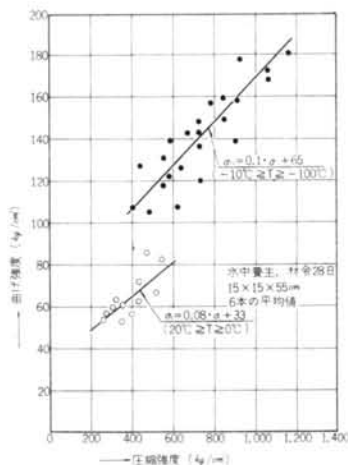


図-3 低温下コンクリートの曲げ強度と圧縮強度との関係

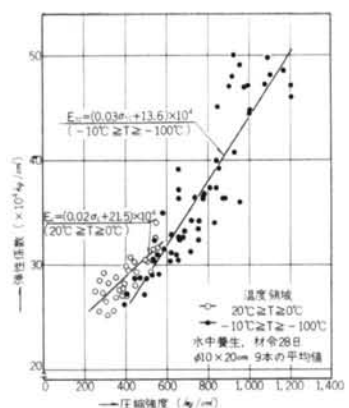


図-4 低温下コンクリートの静弾性係数と圧縮強度との関係

ここに、 $\Delta\sigma_{Tc}$: 低温圧縮強度増加量 (kg/cm²)

T : 試験温度 (°C, $-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}$)

したがって、コンクリートの低温下圧縮強度は、常温 (20°C) 下圧縮強度と低温圧縮強度増加量との和として、式(2)のように求めることができる。

$$\sigma_{Tc} = \sigma_{25} + \Delta\sigma_{Tc} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 σ_{Tc} : 低温下圧縮強度 (kg/cm²)

σ_{25} : 常温下圧縮強度 (kg/cm²)

$\Delta\sigma_{Tc}$: 低温圧縮強度増加量 (kg/cm²)

低温下における引張強度および曲げ強度は、圧縮強度と同様に温度が低くなるにしたがって増加する傾向にある。図-2および図-3は、常温下あるいは低温下における圧縮強度に対する引張強度および曲げ強度との関係を表わしたものである。これらの図より、実験値は20°C ~ 0°Cと-10°C ~ -100°Cの二つのグループに区別することができる。本実験結果から式(3)、(4)の関係が得られる。

$$\sigma_{Tt} = 0.06\sigma_{Tc} + 24 (-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}) \quad \dots\dots(3)$$

$$\sigma_t = 0.05\sigma_c + 11 (0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots(3')$$

$$\sigma_{Tb} = 0.10\sigma_{Tc} + 65 (-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}) \quad \dots\dots(4)$$

$$\sigma_b = 0.08\sigma_c + 33 (0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots(4')$$

ここに、

σ_{Tc} : $-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}$ の圧縮強度 (kg/cm²)

σ_{Tt} : $-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}$ の引張強度 (kg/cm²)

σ_{Tb} : $-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}$ の曲げ強度 (kg/cm²)

σ_c : $0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$ の圧縮強度 (kg/cm²)

σ_t : $0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$ の引張強度 (kg/cm²)

σ_b : $0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$ の曲げ強度 (kg/cm²)

式(3)および(4)の値は、同一の圧縮強度に対する低温下引

張強度、曲げ強度が常温のそれらよりそれぞれ約40%、約70%大であることを示すものである。また、引張強度と曲げ強度との関係は、常温では一般に $\sigma_b = 1.6\sigma_t$ なる関係式があるが、本実験結果の場合には-10°C ~ -100°Cで $\sigma_{Tb} = 2.0\sigma_{Tt}$ の値が得られ、低温の性状の一つとしてあげられる。

以上のことから、コンクリートの強度について、温度-10°Cを境として、20°C ~ -10°Cでは常温の性状、-10°C ~ -100°Cでは低温の性状としてあつかうことが妥当である。-10°C ~ -100°Cにおける強度は、常温における圧縮強度から式(1)、(2)、(3)および(4)で求めることができる。

2.2 コンクリートの静弾性係数、ポアソン比

各試験温度における圧縮強度と静弾性係数との関係を図示すると、図-4のとおりである。図-4より明らかに、コンクリートの静弾性係数は圧縮強度と一次の相関が認められる。本実験結果から式(5)の関係が得られる。

$$E_{Tc} = 0.030\sigma_{Tc} + 13.6 (-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}) \quad \dots\dots(5)$$

$$E_c = 0.018\sigma_c + 21.5 (0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}) \quad \dots\dots(5')$$

ここに、

σ_{Tc} : $-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}$ の圧縮強度 (kg/cm²)

E_{Tc} : $-100^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}$ の静弾性係数 ($\times 10^4$ kg/cm²)

E_c : $0^\circ\text{C} \leq T \leq 20^\circ\text{C}$ の静弾性係数 ($\times 10^4$ kg/cm²)

コンクリートのポアソン比は一般的に常温下で0.14 ~ 0.20の範囲であるが、-10°C ~ -100°Cの低温下では0.19 ~ 0.27の範囲となり、平均で0.23の値が得られた。

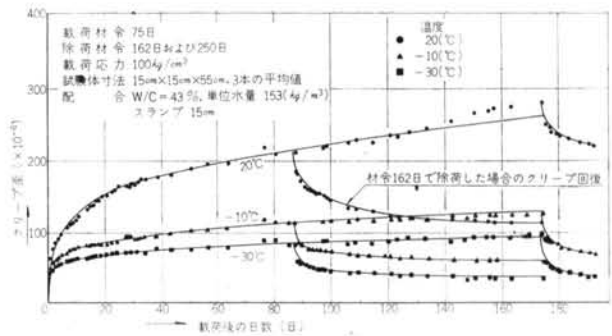
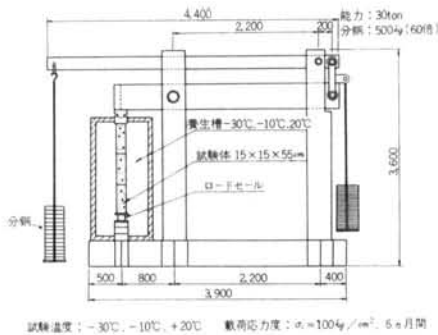


図-5 一軸圧縮クリープ試験装置

図-6 クリープひずみ測定値

2.3 コンクリートのクリープ係数

低温下におけるクリープ特性を調べるために, 20℃, -10℃および-30℃の各温度条件で一軸圧縮クリープ試験を行なった。試験の概要は以下に示すとおりである。

試験体はコンクリート打設後, 材令2日で脱型し, 材令60日まで20℃水中養生し, 直ちにシール剤で全面を覆った。

クリープ試験機は図-5に示す重錘式載荷装置で, 試験体3個を同時に載荷するものである。また, 試験体部分に冷凍庫を取り付け20℃, -10℃および-30℃に制御した。所定の温度まで徐々に冷却し, 約3日間経過後, 材令75日で載荷応力度 100 kg/cm^2 を与えた。

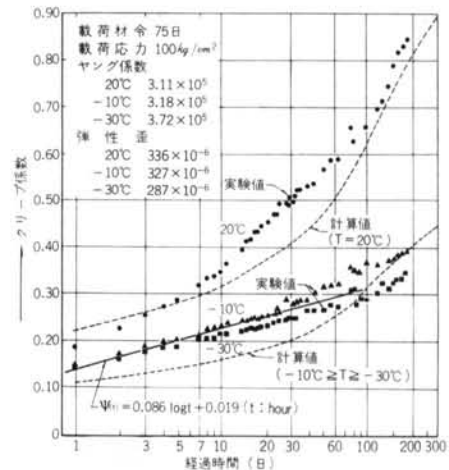
載荷応力はロードセルで検出し, コンクリートの温度はC-C熱電対で, ひずみは低温用ひずみ計を試験体中心部に設置して測定した。

載荷履歴は各温度について次の4種類とした。

- ①(載荷5.5ヵ月)+(除荷1ヵ月)
- ②(載荷3ヵ月)+(除荷3.5ヵ月)
- ③(無載荷3ヵ月)+(載荷2.5ヵ月)+(除荷1ヵ月)
- ④無載荷6.5ヵ月

除荷時は回復クリープの測定であり, 無載荷時は乾燥収縮の測定である。

図-6は, 所定の温度とした後に材令75日で載荷した場合のクリープひずみと載荷後の材令との関係を示したものである。クリープひずみは, 載荷試験体の全ひずみから弾性ひずみと無載荷試験体のひずみを差引いて求めた。載荷後の材令が145日以降の低温下における実験値は, 冷凍装置の故障によって試験体温度が2回, 0℃以上となった影響を補正した値である。図から明らかなように, -10℃および-30℃のクリープひずみは載荷後3ヵ月で20℃の約50%と小さな値である。また-30℃の場合は-10℃の場合の約80%の値であり, 両者には大差がないと考えられる。さらに, 載荷材令がクリープひずみに与える影響は, 20℃の場合には載荷材令162日のクリ



$$\varphi(t) = k(T) \{ 0.4 \times \beta_d(t - t_0) + 1.7 [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] \}$$

図-7 クリープ係数の実験値と計算値との比較

ープひずみの方が載荷材令75日のものより約10%小さくなるが, -10℃, -30℃の場合には載荷材令の差が認められなかった。また, -10℃, -30℃の場合の回復クリープひずみは, 除荷後3ヵ月で20℃の約50%と小さな値である。したがって, -10℃~-30℃の範囲でのコンクリート特性を回復クリープと非回復クリープとに分離して取り扱う場合には, 低温の場合には両成分とも20℃の場合の約50%と考えて大きな誤りはないと思われる。

図-7は, クリープ係数と載荷後の材令との関係を示したもので, -10℃と-30℃の測定値を一つの実験式で表示すると式(6)となる。

$$\phi(t) = 0.086 \log t + 0.019 (-30^\circ\text{C} \leq T \leq -10^\circ\text{C}) \cdots (6)$$

ここに, $\phi(t)$: 載荷後 t 時間のクリープ係数

t : 載荷期間 (時間) $t \geq 1$

以上は, コンクリートが-10℃以下の温度に保持された場合のクリープ特性であるが, 載荷材令の途中で試験

体温度が0℃以上に上昇した場合には、クリープのひずみが20℃のものとはほぼ同等になるなど著しく大きくなる現象が認められ、このような載荷履歴については今後の検討が必要である。

§ 3. 低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げ特性

低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げ挙動を検討するために、20℃および-70℃の各温度条件で、プレストレストコンクリート（PC）はりの曲げ試験を行なった。

3.1 試験方法

試験体は、24×30×290cmの矩形断面はりで、図-8のように配筋した。

CCL工法によってPC鋼より線φ15.2mm 4本でプレ

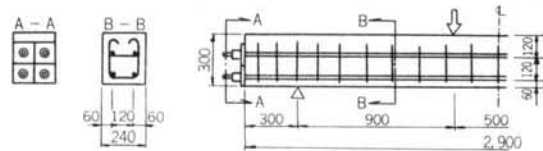


図-8 試験体形状寸法

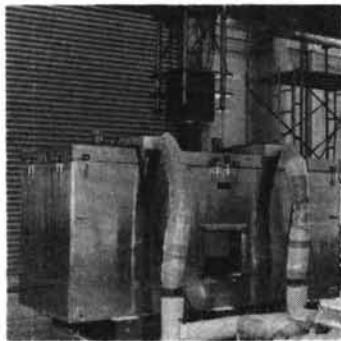


写真-1 低温下における、はりの曲げ試験装置

ストレス力 40ton を導入し、上縁25.4kg/cm²、下縁85.6 kg/cm²のプレストレスを材令35日で与え、材令 115 日で再導入した。その後、材令 121 日でセメントペーストをグラウト注入した。

試験体はコンクリート打設 3 日後に脱型し、水中養生を行ない、試験前に Polybd 液状ゴムを表面に塗布し、水の逸散を防止した。

試験は、スパン230cm、シアースパン 90cm の 2 点集中荷重方式で行なった。低温試験は写真-1 の装置内に試験体を設置し、液体窒素ガスをを用い、試験体温度と槽内温度の差が15℃以下となるように制御しながら冷却し、-70℃±2℃に保持して行なった。

測定項目は、載荷荷重、温度、コンクリートと鋼材のひずみ、スパン中央点のたわみ、ひびわれ幅、およびひびわれ発生状況とした。ひずみは低温用ワイヤーストレインゲージを用い、たわみは電気式ダイヤルゲージを用い、ひびわれ幅とひびわれ状況はトランシットと目視によって測定した。

3.2 試験結果

使用したコンクリートおよびPC鋼材の力学的性質は表-1 および表-2 のとおりである。試験結果の一覧を表-3 に示す。

また、ひびわれ発生状況の例を図-9 に示す。低温度になると常温に較べてひびわれ本数が少なく、ひびわれ発生間隔が若干大きくなるようである。平均ひびわれ間

試験温度 (℃)	材 令 28日			試 験 時		
	σ_{c28} (kg/cm ²)	σ_{t28} (kg/cm ²)	E_{c28} (kg/cm ²)	σ_c (kg/cm ²)	σ_t (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)
常 温	317	27.0	2.73 × 10 ⁵	386	28.9	3.16 × 10 ⁵
-70℃				816	80.1	4.05 × 10 ⁵

注) 水中養生、3 個の平均値

表-1 コンクリート供試体試験結果

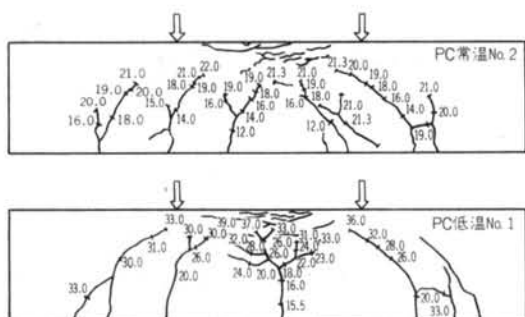
	試験温度 (℃)	降 伏 点		破 断		弾 性 係 数 (× 10 ⁶ kg/cm ²)	伸 び (%)
		荷 重 (t)	σ (kg/cm ²)	荷 重 (t)	σ (kg/cm ²)		
PC 鋼 よ り 線 (7 本よりφ15.2mm)	常 温	24.4	1.75 × 10 ⁴	27.2	1.96 × 10 ⁴	1.92	4.9
		24.4		27.6		1.93	
		24.4		27.2		1.93	
	-70℃	24.8	1.78 × 10 ⁴	28.6	1.96 × 10 ⁴	2.12	4.4
		—		27.6		2.09	
		—		25.8		2.06	

表-2 PC鋼材の試験結果

試験体の種類		実 験 値			計 算 値	
		平均ひびわれ間隔 (cm)	ひびわれモーメント $M_{cr}(t \cdot m)$	破壊モーメント $M_B(t \cdot m)$	ひびわれモーメント $M_{cr}(t \cdot m)$	破壊モーメント $M_B(t \cdot m)$
PC 常温	No. 1	22.4	4.05	10.13	4.7	10.45
	No. 2	20.1	4.50	9.57	(0.91)	(0.94)
PC 低温	No. 1	27.6	6.96	17.55	8.9	15.09
	No. 2	26.8	6.75	17.55	(0.77)	(1.16)

ただし、 M_{cr} 計算値は弾性理論にもとづいており、 M_B 計算値は土木学会プレストレストコンクリート標準示方書 (S.48) 案にもとづいて算出したが、低温下におけるコンクリートの曲げ圧縮極限ひずみは 7.5% とした。また、コンクリート曲げ強度は引張強度実測値の 1.6 倍 (常温)、2.0 倍 (低温) とした。有効プレストレス σ_{ee} は CEB-FIP マニュアル (1973) にもとづき、プレストレス導入力実測値に乾燥収縮・クリープ・鋼材のリラクセーションを考慮して算出した。

表—3 実験結果の一覧



図—9 ひびわれ発生状況

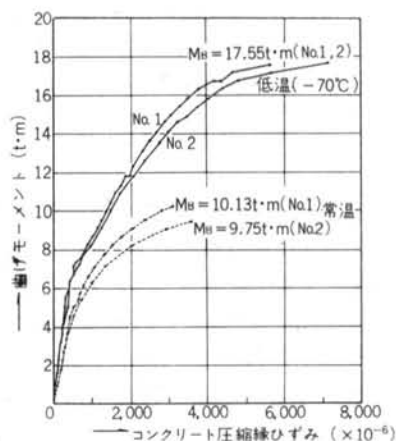
隔の増加は、表—3 に示す程度である。

図—10 はコンクリート圧縮縁ひずみ測定値を示したもので、低温下におけるプレストレストコンクリートはりの曲げ破壊モーメントが、コンクリートの圧縮強度の増加にみあって大きく増加していることがわかる。さらに、低温下における曲げ圧縮極限ひずみ ϵ_{cu} は、常温下における値と比べて大きいことがわかる。

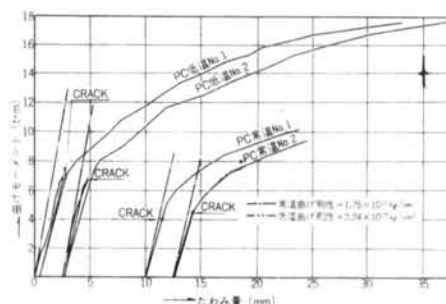
本実験では、常温下で $\epsilon_{cu} = 3200 \times 10^{-6}$ 、低温下 (-70°C) で $\epsilon_{cu} = 7500 \times 10^{-6}$ の値となっている。

各試験体の曲げひびわれモーメントおよび破壊モーメントを、各温度条件におけるコンクリート供試体から求めた力学的定数 (表—1) および鋼材の力学的定数 (表—2) を用いて弾性理論式によって求めると表—3 の値となる。表中の () 内の数値は実験値/計算値を示している。低温下における計算値は、常温下と同程度にほぼ実験値に等しく、低温下におけるコンクリート部材の強度は、コンクリートと鋼材の低温定数を用いることによって推定できることが確かめられた。

図—11 は、試験はリスパン中央点のたわみ測定値を示したものである。図中には、コンクリート供試体圧縮試



図—10 PC はりのコンクリート圧縮縁ひずみ



図—11 PC 試験はリスパン中央点のたわみ

験および鋼材引張試験から求めた弾性係数を用いて算出した曲げ剛性を示した。

これらの図より明らかなように、プレストレストコンクリート部材は低温下において初期の曲げ剛性が大となり、曲げ変形も常温下のものより大きく、むしろ粘りを増すことが検証された。

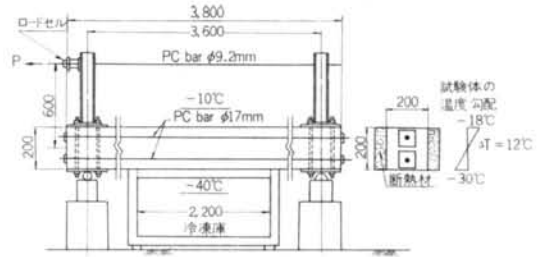
3.3 低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げ特性

低温下におけるコンクリート部材の曲げ特性に関して次のことが明らかとなった。

(1)低温下におけるプレストレストコンクリート部材は、低温におけるコンクリート強度の上昇にともない曲げひびわれモーメントが増加し、ひびわれ間隔が若干大きくなり、コンクリートの弾性係数の上昇にともない曲げ剛性が大きくなるなど、高強度コンクリート部材の特性を示す。

(2)低温下におけるコンクリート部材の曲げひびわれ強度ならびに曲げ破壊強度は、コンクリートと鋼材の低温定数を用いることによって推定できる。

(3)低温下におけるコンクリート部材の変形能は、常温下のものより大きい。すなわち、部材の曲げ破壊時における圧縮縁ひずみは $\varepsilon_{Tcu}=7500 \times 10^{-6}$ の値となり、部材の粘りも大きいことが認められた。



図—12 曲げクリープ試験装置

材令 温度 (°C)	材 令 75 日		材 令 155 日	
	σ_c (kg/cm ²)	E_c ($\times 10^5$ kg/cm ²)	σ_c (kg/cm ²)	E_c ($\times 10^5$ kg/cm ²)
20	518	2.64	537	2.98
-10	701	2.90	697	2.98
-30	914	3.13	911	3.22

σ_c : $\phi 15 \times 30$ cm 圧縮強度 (20°C, 材令28日; $\sigma_c=440$ kg/cm²)

E_c : $\phi 15 \times 30$ cm $1/3 \sigma_c$ における静弾性係数

各値は水中養生, 3個の平均値

表—4 コンクリート供試体試験結果

§ 4. 低温下におけるプレストレストコンクリート部材のクリープ特性

低温下におけるプレストレストコンクリート部材のクリープ挙動を検討するために、-17°C~-30°Cにおいて温度勾配と荷重の作用したプレストレストコンクリート部材の曲げモーメント、および変形の経時変化を実験的に求めた。

4.1 試験方法

試験体は、20×20×380cmの矩形断面はりとした。 $\phi 17$ mm PC鋼棒2本でプレストレス力28tonを導入して、70kg/cm²のプレストレスを材令60日で与えた。その後、直ちにセメントペーストをグラウト注入した。試験体はコンクリート打設7日後に脱型し、材令50日まで水中養生を行ない、樹脂系シール剤を表面に塗布し、水の逸散を防止した。

試験装置は、図—12に示すように試験体の端部にI型钢をPC鋼棒によって緊結し、I型钢脚部にPC鋼棒を配置したものである。また、試験体側面に断熱材を設け、試験体中央部底面220cmの区間に小型冷凍庫を取り付け、温度勾配を与えるものとした。

材令90日に試験体および試験装置を-10°Cの大型冷凍庫内に設置し、材令100日に小型冷凍庫を-40°Cまで冷却し始めた。ただし、2個の試験体のうち1つは、小型冷凍庫冷却開始直前にI型钢脚部に配置したPC鋼棒を

緊張(緊張力1412kg)することにより試験体に曲げモーメントを作用させ、冷却開始後もこの緊張力を維持させた。他の1つは、冷却開始後に生ずる試験体の曲げ変形を打ち消すように、I型钢脚部のPC鋼棒を緊張した。

測定項目は、スパン中央部の温度分布、たわみ、およびI型钢脚部のPC鋼棒の緊張力(以下、偏心拘束軸力と称する)とした。

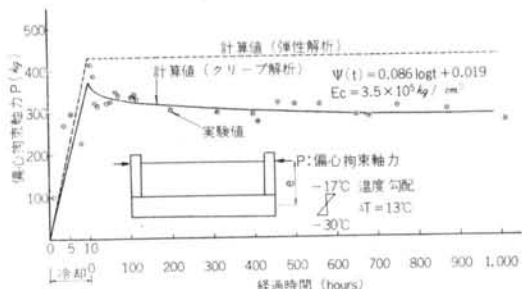
4.2 試験結果

使用したコンクリートの力学的性質は、表—4のとおりである。

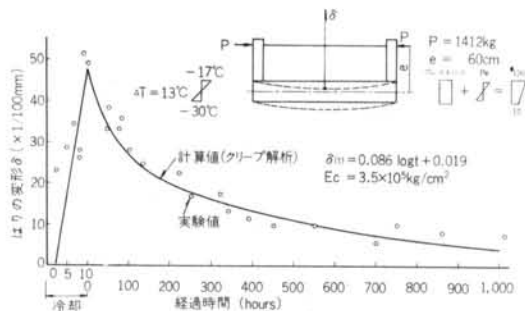
小型冷凍庫冷却開始後の試験体は、約10時間で13°Cの温度勾配(コンクリート頂面温度-17°C、底面温度-30°C)となり、以後定常状態となった。

図—13は、試験体に温度勾配が作用し始めた後に生ずる曲げ変形を零とするような、偏心拘束軸力の経時変化を示したものである。図より、このような偏心拘束軸力が、クリープの影響で経過時間とともに減少してゆくことがわかる。

図—14は、試験体に一定の偏心拘束軸力が作用する状態で温度勾配を作用させた時の、はりの変形の経時変化を示したものである。偏心拘束軸力によって弾性変位を生じ、直ちに冷却開始による温度差で変位が回復するが、温度差が一定常状態となるとクリープによって変位が増加することがわかる。



図一13 変形を一定とした時の偏心拘束軸力 (P) の変化



図一14 偏心拘束軸力を一定とした時のはりの変形の変化

これら図中に示した計算値は、次に示す仮定条件のもとに、有効弾性係数法を用いて解析したものである。

- (1) 低温下 (−17℃〜−30℃) におけるクリープ係数は式(6)による。
- (2) 低温下 (−17℃〜−30℃) における弾性係数は、一定値 $E_{Te} = 3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とする。
- (3) 低温下 (−17℃〜−30℃) における熱膨張係数は、一定値 $\alpha_{Te} = 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ とする。

図一13および図一14より、クリープ解析値は実験値と比較的よく一致しており、一軸圧縮試験から得たクリー

プ係数値を用いて、温度勾配および荷重の作用したプレストレストコンクリート部材のクリープ特性をほぼ推定できることが検証された。

4.3 低温下におけるプレストレストコンクリート部材のクリープ特性

低温下におけるコンクリート部材のクリープ挙動に関して、次のことが明らかとなった。

低温下におけるプレストレストコンクリート部材に荷重および温度勾配が作用した時のクリープ挙動は、一軸圧縮クリープ試験から得た式(6)を用いて推定できる。

§ 5. 低温下におけるプレストレストコンクリート部材の設計定数

LNG地下タンクのように、コンクリート部材がほぼ湿潤状態と考えられる場合には、コンクリートの温度が−10℃以下になると、前述のごとくその力学的特性が変化するので、これらを考慮して設計するのが合理的である。ここでは本実験結果に基づいて、低温下における設計定数を仮定し、PCはりの設計曲げモーメントを試算する。

低温下における設計定数を次のように仮定する。

(a) 部材断面の温度 T (温度勾配がある場合には最高温度) が−10℃以下の場合、コンクリートの設計基準強度 σ_{Tck} は、常温設計基準強度 σ_{ck} に式(1)の $\Delta\sigma_{Te}$ を加算して次のように定める。

$$\sigma_{Tck} = \sigma_{ck} + \Delta\sigma_{Te} (\text{kg/cm}^2) \quad \dots\dots(7)$$

(b) 低温下におけるコンクリートの設計引張強度 σ_{Tetk} は、上記(a)の σ_{Tck} を式(3)に代入して次のように定める。

$$\sigma_{Tetk} = 0.06\sigma_{Tck} + 24 (\text{kg/cm}^2) \quad \dots\dots(8)$$

(c) 低温下におけるコンクリートの設計用静弾性係数

試験体名	M_{er}	M_B	M_I	M_{III}	M_{er}/M_I	M_B/M_I	M_{er}/M_{III}	M_B/M_{III}
PC 常温	4.28	9.85	2.92	3.85	1.47	3.37	1.11	2.56
PC 低温	6.86	17.55	2.94	5.35	2.33	5.97	1.28	3.28

M_{er} ; 曲げひびわれ発生モーメント実測値平均 (t・m)

M_B ; 曲げ破壊モーメント実測値平均 (t・m)

M_I ; I 種プレストレストコンクリート許容設計曲げモーメント (t・m)

M_{III} ; III 種プレストレストコンクリート許容設計曲げモーメント (t・m)

設計曲げモーメント M_I , M_{III} は土木学会プレストレストコンクリート標準示方書 (S.48) 案にもとづいて算出した。

表一5 試験はりの設計モーメントと実験値

E_{Te} は、上記(a)の σ_{Tek} に対して式(5)に代入して次のように定める。

$$E_{Te} = (0.03\sigma_{Tek} + 13.6) \times 10^4 (\text{kg/cm}^2) \quad \dots\dots(9)$$

(d)上記以外の設計上の仮定ならびに許容応力度は、土木学会プレストレストコンクリート標準示方書(S.48)案によるものとする。

各試験はりの常温下コンクリートの設計基準強度 σ_{ek} を、表—1の試験時常温供試体強度 $\sigma_{ek} = 368 \text{ kg/cm}^2$ とする。

試験はりの設計モーメントを上記(a)~(d)の条件で求めると、表—5のとおりである。

I種プレストレストコンクリートの設計モーメント M_I は、引張縁のコンクリート許容引張応力度 ($\sigma_{ca}' = 0 \text{ kg/cm}^2$) で決定しているの、低温におけるコンクリート強度上昇による設計モーメントの増加は当然のことながら見込めない。しかし部材の温度が -10°C 以下の状態で軸力が増加する外力条件では、圧縮縁応力度で設計モーメントが決定する場合もあるので、低温における設計モーメントの増加を見込むこととなり、低温定数の導入の合理性がでてくる。一方、III種プレストレストコンクリートの設計モーメント M_{III} は、引張縁のコンクリート許容応力度 ($0.8 \sigma_{Tek}$) で決定している。したがって、低温におけるコンクリート引張強度上昇による設計モーメントの増加 ($\frac{5.35}{3.85} = 1.39$ 倍) を見込むこととなるので、低温定数の導入の合理性がでてくる。この時、低温定数を導入した設計モーメント M_{III} のひびわれモーメント、破壊モーメント実験値 (M_{cr} , M_B) に対する比率 (M_{cr}/M_{III} , M_B/M_{III}) は、常温下におけるものより大きくなっており、安全側にある。

以上のことから、低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げ応力計算には、前記(a)~(c)設計定数を用いることにより、従来より合理的な設計が可能となる。

2.3に述べたように、低温下におけるクリープ係数は常温下の50%であり、 40°C 以上の高温下におけるクリープ係数に比べて絶対値が著しく小さい。さらに、 -10°C のクリープ係数と -30°C のクリープ係数はほぼ等しく、青柳らの研究⁴⁾によっても、 -20°C と -80°C のクリープひずみはほとんど変わらないことが認められている。

したがって、 -10°C ~ -80°C の低温下では、この間の温度差によるクリープ係数の差異はないものとしても大きな誤まりはないと考えられ、クリープ係数を常温の場合の50%となることを考慮する必要がある。

図—7の点線は CEB—FIP, State of Art Report 1973 に示されているクリープ係数算定式に、低温下における

補正係数 $k(T)$ を乗じて求めた計算値を示している。 $k(T)$ は、今回の一軸圧縮クリープ実験結果から 20°C の場合を基準に、 -10°C から -30°C の範囲では回復クリープひずみおよび非回復クリープひずみとも $k(T) = 0.5$ となるとし、 -10°C と 20°C との間は便宜上直線で補間したものである。計算値は実験値よりやや小さいが、この計算方法で -30°C までの低温下におけるクリープ係数をほぼ推定できる。

-10°C ~ -80°C の範囲で、プレストレストコンクリート部材のクリープによる温度応力の緩和、有効プレストレスの減少および変形などを検討する場合には、クリープ係数は温度差によって異ならず、常温の値の50%として取扱っても実用上大きな誤りはない。

§ 6. まとめ

湿潤状態のコンクリートの低温下における力学的特性、コンクリート部材の低温下における曲げ特性、およびクリープ特性について以下のことが明らかとなった。

(1)低温下におけるコンクリートの圧縮強度は、常温下圧縮強度と低温圧縮強度増加量との和で表示できる。常温下圧縮強度 $250 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートに対しては式(2)で推定できる。

(2)低温下におけるコンクリートの引張強度および曲げ強度は、低温下圧縮強度の一次関数として表示できる。低温下圧縮強度 $400 \sim 1200 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートに対して式(3)および式(4)で推定できる。

また、低温下においては曲げ強度と引張強度の比は約2.0であり、常温下のものより大となる。

(3)低温下におけるコンクリートの静弾性係数は、低温下圧縮強度の一次関数として表示できる。

低温下圧縮強度 $400 \sim 1200 \text{ kg/cm}^2$ のコンクリートに対して式(5)で推定できる。

低温下におけるコンクリートのポアソン比は約0.23であり、常温下のものより大となる。

(4)低温下におけるプレストレストコンクリート部材に荷重および温度勾配が作用した時のクリープ挙動は、一軸圧縮クリープ試験から得た式(6)を用いて推定できる。

(5)低温下におけるプレストレストコンクリート部材は低温におけるコンクリート強度の上昇および弾性係数の上昇にともない、高強度コンクリート部材の特性を示す。低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げひびわれ強度ならびに曲げ破壊強度は、コンクリートと鋼材の低温定数を用いることによって推定できる。

また、低温下におけるコンクリート部材の変形能は、常温下のものより大きい。

(6)低温下におけるプレストレストコンクリート部材の曲げ応力計算には(1)～(4)に記した設計定数を用いることにより、従来より合理的な設計が可能となる。

(7)－10℃～－80℃の範囲で、プレストレストコンクリート部材のクリープによる温度応力の緩和、有効プレストレスの減少および変形などを検討する場合には、クリ

ープ係数は温度差によって異ならず、常温の値の50%として取扱っても実用上大きな誤りはない。

本研究を行なうに際し、クリープ試験に関して貴重な助言を頂いた東京大学岡村甫博士、電力中央研究所青柳征夫博士に謝意を表する。実験実施に当り数々の助力を頂いた立部正則、松本学、中谷孝志、李功轍の各氏に感謝する。

<参考文献>

- 1) G. Wischers & J. Dahms: "Das Verhalten des Betons bei sehr niedrigen Temperaturen" Beton Vol. 20 (1970)
- 2) A. Doi, H. Tomioka & Y. Tanaka: "Physical Properties of Prestressing Wire at Low Temperature" プレストレストコンクリート Vol. 16, Extra Number (1974.5)
- 3) 青柳征夫、川崎道夫: "温度勾配を与えたプレストレストコンクリート部材のクリープ性状に関する研究" 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集第5部 昭和48年10月
- 4) 青柳征夫、川崎道夫: "極低温下におけるコンクリートの諸性質に関する実験的考察" 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集第5部 昭和50年10月

