

片面から冷却されたPC部材の変形挙動に関する研究

BEHAVIOR OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS WHEN COOLED FROM ONE SIDE

初崎俊夫*・渡部昭一**・貞光誠人***・三浦尚****

By Toshio HATSUZAKI, Shoichi WATABE, Makoto SADAMITSU and Takashi MIURA

Simulating a part of prestressed concrete dual shell tanks, full-scale beam-shaped specimens were tested. The specimens of three types whose restraining condition at both ends were different were prepared. Rotation was restrained for the first ones, axial shrinkage for the second ones, and both rotation and axial shrinkage for the third ones. To give temperature gradient, the specimens were cooled with liquefied nitrogen from one side, when the opposite side was kept uninsulated and the other two sides were insulated.

Temperatures and stresses at the various locations of the specimens were measured. Besides, yield stress and ultimate strength were measured. The test results were compared with the analytical results, and it was found that the analysis might predict the behavior of the structures with sufficient accuracy.

Keywords: prestressed concrete beam

1. 概要

プレストレストコンクリート製二重殻低温液化ガス貯槽の外槽は、内槽からの万一の漏洩に対して防液堤の役割を果たさなければならない。したがって外槽の設計においては、低温液漏洩時の急冷状態からある程度部材中の温度分布が、安定する状態までの間の外槽の温度応力および、このような温度応力が発生した状態での耐力の評価が、重要な問題となる。温度応力は通常の外力による応力と異なり、ひびわれの発生によって低減するという自己制限的な性格を有している。

したがって、このような部材の温度応力を評価するには、構造物中の部材と同じように変形が拘束された状態の部材が、冷却されたとき発生する応力を調べる必要がある。

本研究は、円筒形のプレストレストコンクリート製二重殻貯槽の外槽壁部材の一部を想定した、はり状の実大

供試体を用いて、断面方向に温度勾配を与えながら、曲げ変形、軸変形および曲げ変形および軸変形の両者を拘束する実験を行い、プレストレス量、鉄筋比、拘束条件、冷却方法、冷却温度の違いが部材剛性、終局耐力に及ぼす影響について検討したものである。また数値解析結果との比較を行い、このような問題への数値解析の適用性の検討もあわせて行った。

2. 実験方法

実験は、プレストレス量、鉄筋比および、配筋の径を変えた各種のプレストレストコンクリートはり供試体を用い、冷却方法、冷却温度、拘束条件等を変えて、これらの供試体を冷却し、そのときに断面に発生する温度応力（拘束力）を調べ、引続いてそのような状態のまま載荷をして終局耐力を調べた。なお、供試体はコンクリート打設後実験まで養生マットを用いた気中養生を行った。また、冷却温度はLN₂およびLPGを考慮して、-196°Cおよび-45°Cの2種類とした。

供試体の形状、寸法を図-1~3に、供試体の一覧を表-1に示す。

このうち、供試体B-1、B-2は、中央のはりの部分がA-1~A-10と同じであるが、軸方向の拘束を行うために、端部を特殊な形状にしたものである。

* 正会員 大成建設株式会社技術研究所首席研究員
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

** 正会員 大成建設株式会社土木設計部
(〒160-91 新宿区西新宿1-25-1)

*** 正会員 大成建設株式会社東北支店工事作業所係長
(〒980 仙台市二日町5-20)

**** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻青葉)

変形に対する拘束の種類としては、

- (1) 拘束なし、(2) 曲げ変形のみ拘束、(3) 軸変形のみ拘束、(4) 軸変形、曲げ変形とも拘束の4種類である。

それぞれの拘束方法は、図-4 に示すとおりである。

なお、供試体に使用したコンクリートの配合を表-2 にまた、コンクリート、鉄筋、PC 鋼棒の特性を表-3 に示す。

冷却方法は、図-5 および写真-1, 2 に示すとおりである。すなわち供試体にガラスクロスで補強した、ウレタン製断熱材を図のように貼りつけて、LN₂ の貯溜槽を製作し、そこに LN₂ を直接溜めて、供試体の片面を急冷する。供試体の反対の面は、空気ダクトを取り付け、その中に送風機で空気を送り一定温度を保持する。

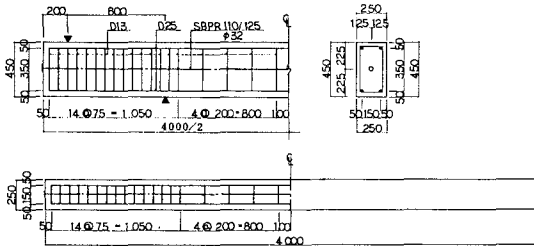


図-1 曲げ拘束用供試体 (A-1~A-10)

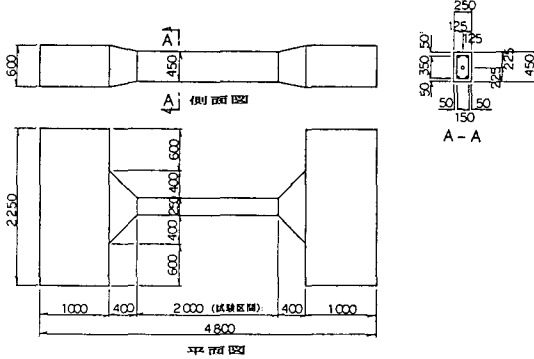


図-2 軸拘束用供試体 (B-1)

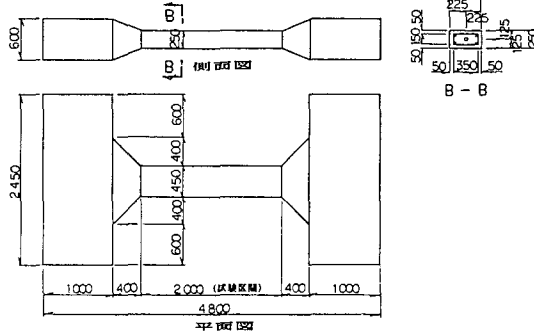
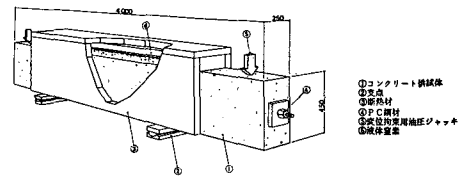


図-3 軸・曲げ拘束用供試体 (B-2)

また、供試体 A-10 を LPG 温度を対象にして -45°C に冷却する場合は、LN₂ で -45°C に冷却したメタノールを用いた。冷却後のはりへの载荷は表-4 に示す要領

表-1 供試体一覧

供試体名	供 試 体 変 数				冷却方法
	拘束条件	フレストレス量	引張鉄筋比	配筋	
A-1	拘束なし	30	1.0%	2-D25	(常温)
A-2	拘束なし	30	1.0	2-D25	急冷 -196°C
A-3	曲げ	30	1.0	2-D25	"
A-4	"	0	1.0	2-D25	"
A-5	"	30	0.5	2-D19	"
A-6	"	30	1.0	4-D19	(再冷却)
A-7	"	30	1.5	2-D32	急冷 -196°C
A-8	"	60	1.0	2-D25	"
A-9	"	30	1.0	2-D25	徐冷 -196°C
A-10	"	30	1.0	2-D25	急冷 -45°C
B-1	軸	30	1.0	2-D25	急冷 -196°C
B-2	軸・曲げ	30	1.0	2-D25	"



実験装置 (曲げ変形のみ拘束)

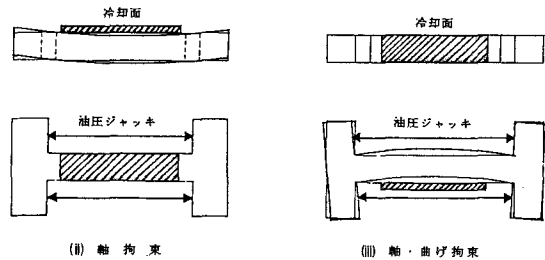
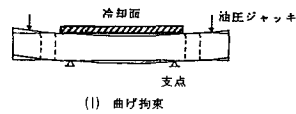


図-4 各拘束方法の概要

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (kg/cm ²)	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	
40.0	25	12	4	37	40.3	154	417	705	1066	1.042

表-3 使用材料の特性

	材令 (E)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ kgf/cm ²)	養生	備考
コンクリート	A-1~A-5	28	430	41.1	2.8	標準
		32	394			現場
		58	418			"
	A-6~A-10	28	455	35.1	2.8	標準
	B-1, B-2	28	450	32.9	2.8	"
29		391			現場	
鉄筋	—	—	62 kgf/cm ²	21,000 kgf/cm ²	—	SD35
P C 鋼棒	—	—	100,530 kgf/cm ²	20,500 kgf/cm ²	—	φ32 SBPR110/125

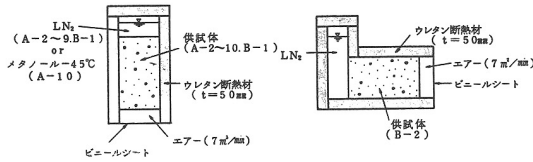


図-5 温度勾配賦与方法

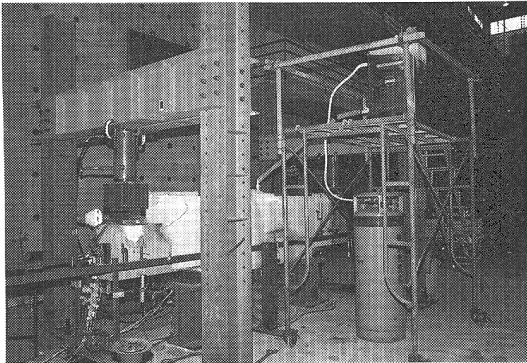


写真-1 曲げ変形拘束実験状況

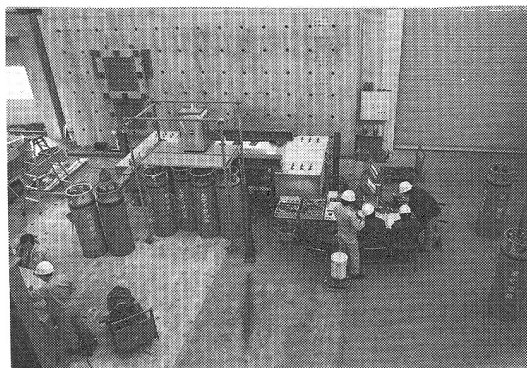


写真-2 軸・曲げ変形拘束実験全景

表-4 荷役方法

実験の種類	拘束条件	冷却方法	供試体名	荷役方法
常温載荷 (I)	拘束なし	常温	A-1	常温状態の供試体を載荷装置に設置し、両端に取りつけたジャッキにより段階的に載荷し、これを供試体の破壊に至るまで続ける。
自由変形 (II)	拘束なし	急冷 (-196℃)	A-2	載荷装置に供試体を設置し、図-5に示す冷却方法で供試体上面を急冷し温度分布が定常状態になるまで冷却を続け、自由変形させた後、実験(I)と同様の載荷を行なう。
曲げ変形拘束 (III)	曲げ	急冷 (-45℃)	A-3	実験(II)と同様に冷却を続ける。この時供試体は、温度勾配により曲げ変形が生じようとする。これを両端に取りつけたジャッキにより曲げ変形が生じないように拘束する。温度分布が定常状態となった後、その状態を保持しながら実験(I)と同様の載荷を行なう。
			A-9	
			A-10	
軸変形拘束 (IV)	軸	急冷 (-196℃)	B-1	実験(II)と同様に冷却を続ける。この時収縮によって生じる軸方向の変形(試験区間両端の軸方向の相対変位)を、曲げ変形を拘束しないように設置した2台のジャッキで拘束する。温度分布が定常状態となった後、その状態を保持しつつ、軸方向のみが作用するように載荷を行なう。
軸・曲げ変形拘束 (V)	軸・曲げ	急冷 (-196℃)	B-2	実験(IV)と同様に温度分布が定常になるまで冷却を行ない、試験区間の軸変形及び曲げ変形が生じないように2台のジャッキ圧力を調節する。温度分布が定常となった後、2台のジャッキ荷重を同じだけ一方は増加、他方は減少させ、軸方向は一定にしながら、曲げモーメントのみ増加させる。

軸・曲げ変形拘束実験 冷却ともなう加力フロー

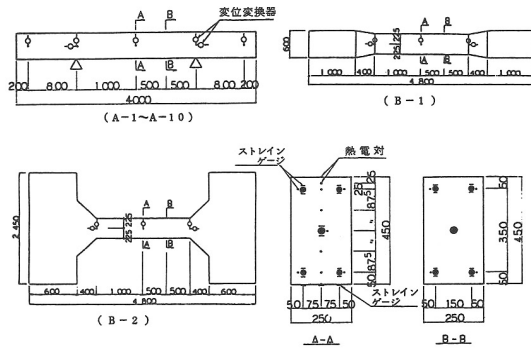
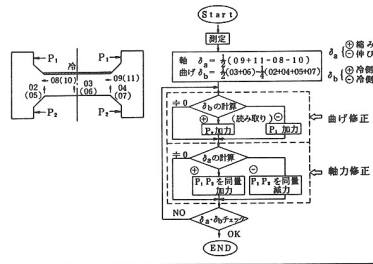


図-6 変位、ひずみ、温度測定位置

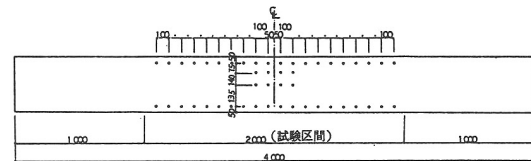


図-7 コンタクトポイントの位置

で実施した。

計測項目は、変位、ひずみ、温度、ひびわれ幅で図-6に变位、ひずみ、および温度の測定位置、図-7にひびわれ幅測定用コンタクトポイントの位置を示す。

3. 実験結果およびその考察

(1) 温度分布

供試体を急冷した場合は、冷却初期の段階では、表面

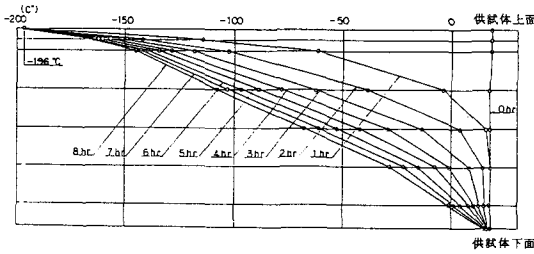


図-8 断面内温度分布の経時変化 (急冷-196°C)

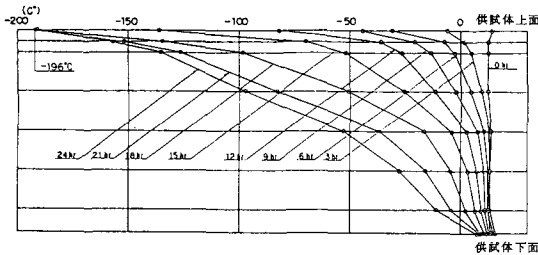


図-9 断面内温度分布の経時変化 (徐冷-196°C)

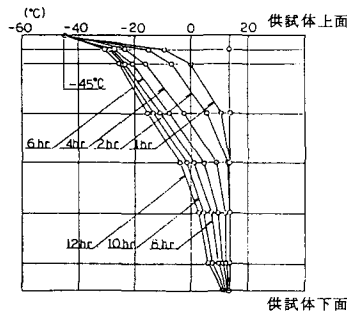


図-10 断面内温度分布の経時変化 (急冷-45°C)

付近のみが冷却され、非常に大きな温度勾配が生ずるが、徐々に供試体内部も冷却されるようになる。そして、厳密に言えば温度分布が直線状になった状態を定常状態と考えるべきであるが、定常状態に近づくにつれて拘束力の変化も小さくなるので、定常状態に近づいたところではほぼ定常状態と考えて冷却を中止した。

また、供試体 A-9 はコンクリートにひびわれを発生させないと想定される冷却速度で徐冷を行い、冷却開始後 24 時間で温度分布がほぼ定常状態となるようにした。これらの場合の温度分布の経時変化を図-8 と 9 に示す。

LN₂ で -45°C に冷却されたメタノールを用いて急冷した供試体 A-10 は、図-10 に示すように冷却開始後 12 時間で温度分布がほぼ定常状態になった。

(2) 温度低下による部材拘束力の変化

実験結果の一覧を表-5 に示す。ここでいう部材拘束力とは、曲げ変形および軸変形を拘束するに要する曲げ

表-5 実験結果一覧

供試体名	拘束条件	コンクリート	鉄筋比	配筋	冷却方法	部材拘束力	剛性残存率	終局耐力	破壊性状
A-1	拘束なし	kgf/cm ²	3.0	1.0	2-D25 (常温)	—	—	3.02tf-m	支点付近のコンクリートの圧壊
A-2	拘束なし	3.0	1.0	2-D25	急冷-196°C	—	—	3.63tf-m	載荷荷重の増加がみられない
A-3	曲げ	3.0	1.0	2-D25	—	14.8tf-m	0.70	3.82tf-m	支点付近のコンクリートの圧壊
A-4	"	0	1.0	2-D25	"	9.1tf-m	0.44	3.76tf-m	"
A-5	"	3.0	0.5	2-D19	"	9.0tf-m	0.43	2.94tf-m	載荷荷重の増加がみられない
A-6	"	3.0	1.0	4-D19	軟冷 (1.38)	14.5tf-m (1.38)	0.70 (0.67)	3.56tf-m	支点付近のコンクリートの圧壊
A-7	"	3.0	1.5	2-D32	急冷-196°C	13.3tf-m	0.65	4.17tf-m	スパン中央部のコンクリートの圧壊
A-8	"	6.0	1.0	2-D25	"	12.2tf-m	0.59	3.35tf-m	"
A-9	"	3.0	1.0	2-D25	徐冷-196°C	12.6tf-m	0.61	3.35tf-m	"
A-10	"	3.0	1.0	2-D25	急冷-45°C	4.9tf-m	0.90	2.78tf-m	支点付近のコンクリートの圧壊
B-1	軸	3.0	1.0	2-D25	急冷-196°C	9.2tf	0.35	1.872tf	2°C 欄棒の降伏で加力中止
B-2	軸、曲げ	3.0	1.0	2-D25	"	8.6, 9.1tf	0.32, 0.32	1.72tf-m	端部降伏により載荷不能

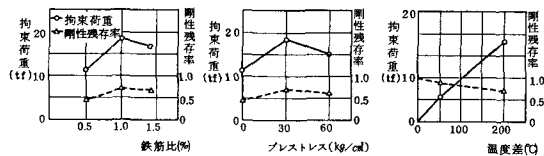


図-11 拘束荷重および剛性残存率の要因別変化

モーメントと、軸方向力のことであり、これは拘束された部材に発生する温度応力ということになる。

剛性残存率とは、文献4)でも述べられているように実験で得られた温度荷重に対する拘束力と常温時の弾性係数、線膨張係数を用いて、全断面有効として計算により求めた拘束力との比であり、片面冷却の温度応力により低下した剛性の残存割合を示す。

a) 曲げ変形拘束：曲げ変形拘束の場合の剛性残存率は次式によって計算する。

$$\text{剛性残存率} = \frac{M}{M_0} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $M_0 = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot b \cdot h^2}{12}$ 、 M ：実際の拘束モーメント、 α ：線膨張係数、 ΔT ：上下縁温度差、 E ：弾性係数、 b ：部材幅、 h ：部材高さ

部材拘束力および剛性残存率に対する鉄筋比、プレストレス、温度差の影響を図-11 に示す。

曲げ変形を拘束して断面内に約 200°C の温度勾配を与えたときの曲げ剛性残存率は、プレストレス量、鉄筋量によって異なり、プレストレスがない場合、および鉄筋比が 0.5% の場合には、0.43~0.44 程度となったが、他の供試体では 0.6~0.7 の範囲であり、文献4) とほぼ同じであった。

また、LPG 温度 (-45°C) での温度勾配では、微小なひびわれが発生しただけで、剛性残存率は 0.9 とほと

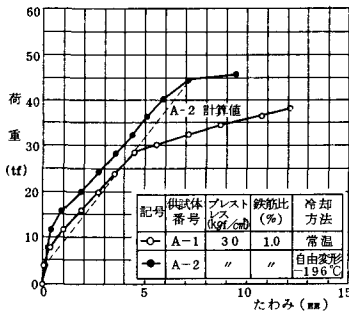


図-12 荷重-たわみ曲線 (冷却の影響)

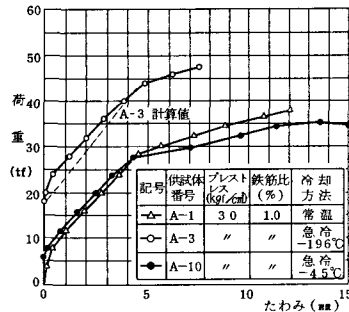


図-13 荷重-たわみ曲線 (温度の影響)

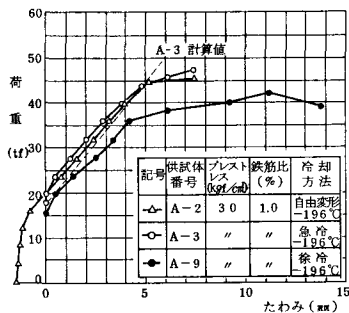


図-14 荷重-たわみ曲線 (冷却方法の影響)

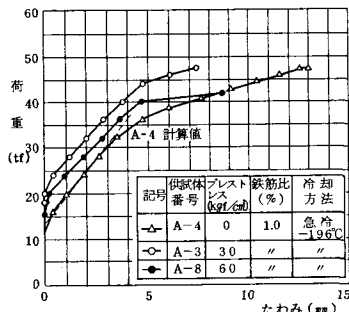


図-15 荷重-たわみ曲線 (プレストレスの影響)

んど剛性の低下はみられなかった。

供試体 A-6 だけは、一度 -196°C まで急冷却し、曲げ変形拘束実験後、常温に戻し再び冷却を行ったが、再冷却においてもほぼ同じであり、2 回程度の冷却では、

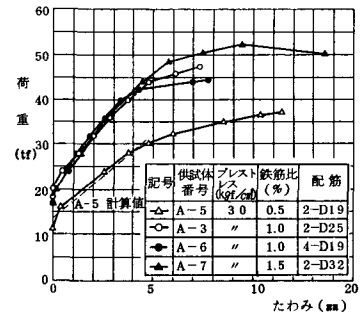


図-16 荷重-たわみ曲線 (鉄筋量の影響)

部材剛性はほとんど変化しない。

また、徐冷と急冷による剛性残存率の違いについては、徐冷した場合の方がやや大きい値となった。

b) 軸変形拘束：軸変形拘束の場合の剛性残存率は次式によって計算する。

$$\text{剛性残存率} = \frac{N}{N_0} \dots \dots \dots (2)$$

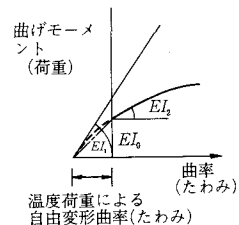
ただし、 $N_0 = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot b \cdot h}{2}$ 、 N ：実際の軸拘束力、 α ：線膨張係数、 ΔT ：上下縁温度差、 E ：弾性係数、 b ：部材幅、 h ：部材高さ

軸拘束をした場合の軸剛性に対する剛性残存率は 0.35 と曲げに対する剛性残存率 (0.6~0.7) と比較して大きな低下がみられた。

c) 軸、曲げ変形拘束：軸変形と曲げ変形を同時に拘束した場合の軸剛性に対する剛性残存率は、0.32 と軸方向のみを拘束した場合、b) の 0.35 とほとんど変わらないのに対し、曲げ剛性に対する剛性残存率は 0.31 と軸剛性の低下の影響を受けている。

(3) 荷重-変形曲線

温度分布がほぼ定常状態になったとみなした直後の曲げ荷重に伴うスパン中央におけるたわみ変化を図-12~16 に示す。これらの関係より、温度荷重とともに外力が作用した場合の部材剛性の変化を知ることができる。なおここでいう部材剛性は下図の EI_2 であり、(2) で



いう剛性残存率は EI_1 と全断面剛性 EI_0 との比である。

図-12は、冷却の影響を示すが、ここではA-2のたわみは温度変形の影響を除いた値である。これを見ると、ひびわれ発生後の部材剛性（荷重-たわみ曲線の勾配）については、低温の影響は認められない。これは、圧縮側のコンクリートは常温に近く、低温側にある鉄筋のヤング係数は、温度によってあまり変化しないためと思われる。

また、 -196°C においては低温になったことによるコンクリートの強度増加により、ひびわれ発生荷重は常温の場合より大きくなり、さらに、はりの降伏強度は、鉄筋の降伏強度の増加にも影響されて同様に大きくなる。そして終局たわみも小さくなる。

図-13は、冷却温度の違いによる場合を示すもので、LPG温度 (-45°C) では、拘束力が小さいため、常温の荷重-たわみ曲線とほぼ一致しているが、コンクリートの変形態が大きくなることから、たわみ量は大きくなっている。

図-14は、冷却方法の影響を示すもので、急冷と徐冷による部材剛性（荷重-たわみ曲線の勾配）の違いは認められないものの、降伏強度、終局強度が急冷の場合よりも低い値になっている。

これは、コンクリートの強度が同じ温度であれば、急冷、徐冷による差はほとんどないと思われることから、常温でのコンクリートの引張強度の差、すなわち A-3 41.1 kg/cm^2 、A-9 35.5 kg/cm^2 の相違によるものと思われる。

図-15はプレストレス量による部材剛性の違いを比較したものである。荷重-たわみ曲線の勾配については、プレストレス量に関係なくほぼ一致しており、温度荷重とともに外力が作用した場合の部材剛性に対するプレストレスの効果は認められない。

なお、拘束力とたわみ量の結果の傾向がプレストレスの大きさと違っているが、これはばらつきによるものと思われる。

鉄筋量による部材剛性の違いを比較した図-16は、鉄筋比0.5%のものと1%のものでは、明らかに部材剛性（荷重-たわみ曲線の勾配）が異なっているが、鉄筋比1%のものと1.5%のものでは、その違いはほとんどなかった。

鉄筋比1.5%の供試体のたわみ量が大きくなっているが、これは圧縮側の鉄筋量が増加したことにより、スパン中央付近のコンクリートが圧壊しにくくなったためではないかと思われる。

軸方向変形を拘束して冷却した後、さらに軸引張力を作用させたときの荷重-変位曲線を図-17に示す。

また、拘束力からコンクリートを無視して、全鉄筋お

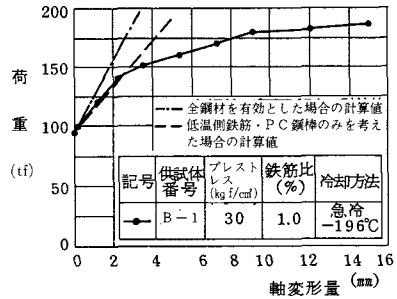


図-17 荷重-軸変形曲線

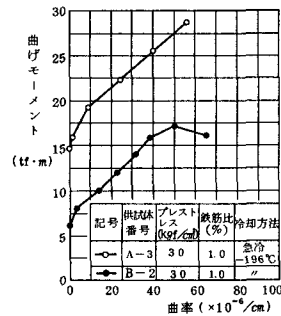


図-18 曲げモーメント-曲率曲線

表-6 ひびわれ性状

供試体	A-1	A-2
	常温で載荷	自由変形後載荷
ひびわれ発生荷重	8 tf	12 tf
平均ひび割れ幅	16 tf	
	0.19 mm	0.07 mm
	30 tf	
	0.51 mm	0.15 mm

よびPC鋼棒から計算した、軸方向の剛性と低温側の鉄筋およびPC鋼棒のみ考えて計算した場合の軸方向の剛性を計算してみると、後者の方が載荷段階における荷重-軸変形曲線の実験値とよく一致していた。

図-18は、軸、曲げ変形を拘束して冷却した後、軸方向は一定にしたまま、曲げモーメントのみ増加させた載荷段階における曲げモーメントと曲率の関係を示す。

載荷段階における曲げ剛性は、軸方向の拘束の有無による違いは認められない。

(4) ひびわれ性状

一例として拘束なしで常温載荷、急冷却後の載荷の場合供試体 A-1 と A-2 のひびわれ性状を表-6 に示す。

供試体 A-2 のひびわれ発生荷重が A-1 に比較してかなり大きくなっており、また同じ荷重における平均ひびわれ幅は A-2 の方が相当小さくなっている。これは文献3) で述べられているように低温によるコンクリートの引張強度増加と、コンクリート、鉄筋の線膨張係数差によるプレストレス効果によると思われる。

また、その場合のひびわれは常温、低温いずれにおいても配筋位置において発生しており、ひびわれの分散性の違いは認められなかった。なお、剛性残存率とひびわれ性状の間には、剛性残存率が小さいほど、平均ひびわれ幅が大きくなる傾向にあった。

(5) 理論解析法の検討

a) 温度解析：図-19のように供試体側面は、断熱材により断熱境界と考えられる。また、軸方向に関しては、供試部分（純曲げ区間）が同様と考えられる。したがって断面について差分法による、一次元非定常熱伝導解析によって温度分布を求めるものとした。

境界条件は、供試体上面 -196°C 、下面は $+10^{\circ}\text{C}$ の定温境界とした。実際の構造物においては、下面も徐々に温度が低下することが考えられるが、実験では下面に送風して対流熱伝達量を大きくしているため、温度降下量が少なく、下面も定温境界とした。

また、解析に用いたコンクリートの熱特性は次の値を用いた。

熱伝導率 $2.0 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ 、比熱 $0.2 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$ 、比重 2500 kgf/m^3

計算による温度分布の経時変化を図-20に示す。

図-8と比較してほぼ一致しており、一次元非定常熱伝導解析により温度分布の把握をすることが可能である

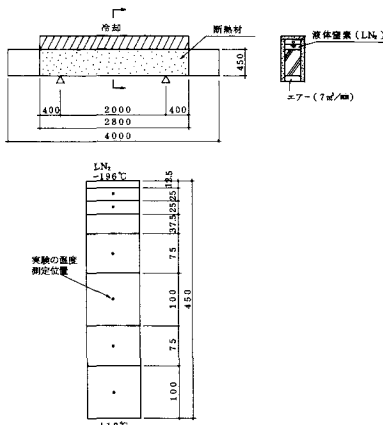


図-19 供試体の冷却状況および解析モデル

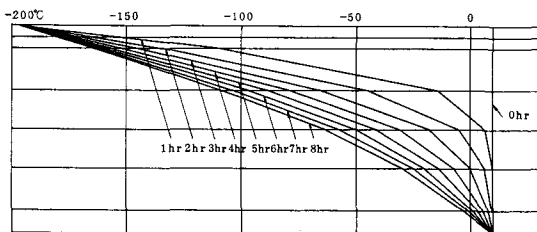


図-20 経時温度分布解析結果

ことがわかった。

b) 線形簡易計算による熱応力解析：

① 曲げ変形拘束の場合

プレストレストコンクリート部材に、温度荷重が作用した場合の部材拘束力の算定および、応力計算を次の仮定に基づいて行った。

- (i) 温度勾配によって生じるひずみは、温度勾配を直線分布と考え、これと相似な三角形分布とする。
- (ii) コンクリートの引張応力は無視する。
- (iii) 応力解析に用いる材料定数は常温の値を採用する。

コンクリート $\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$

ヤング係数 $E_c=2.4 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$

線膨張係数 $\alpha=1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$

鉄筋 (SD 35)

ヤング係数 $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

PC 鋼棒 (SBPR 110/125 $\phi 32$)

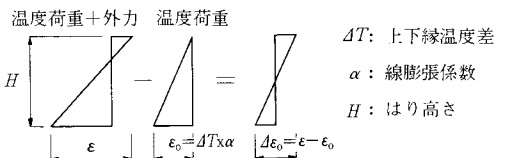
ヤング係数 $E_p=2.0 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

圧縮力としては、コンクリートおよび圧縮域にある鉄筋に作用する力を、引張力としては、引張域にある鉄筋および PC 鋼棒の張力増加を考え、これらの軸方向のつり合いと (i) のひずみ分布より部材中立軸を求め、部材各部の応力状態および部材拘束力を計算する。

温度荷重とともに外力が作用した場合の応力算定は、温度荷重による部材拘束力と外荷重およびプレストレスによる軸方向力を外力とし、コンクリートの引張応力を無視した鉄筋コンクリート部材を考えた計算方法を用いた。

また、温度荷重とともに外力が作用した場合のスパン中央におけるたわみは以下の手順により求めた。

- (a) 載荷荷重 P より、作用モーメント M を求める。
- (b) 作用モーメント M より (温度荷重+外力) 作用時の上下縁ひずみ差を求める。
- (c) (b) より、温度荷重によるひずみ $\Delta T \times \alpha$ を差し引く (結果 $\Delta \epsilon_0$)。

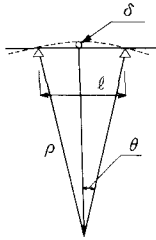


- (d) $\Delta \epsilon_0$ より曲率半径 ρ を求める。
 $\rho = H / \Delta \epsilon_0$
- (e) 曲率半径より、スパン中央におけるたわみ δ を求める。

$\delta = \rho (1 - \cos \theta)$

ここに

$\theta = \sin^{-1} (l/2) / \rho$



② 軸・曲げ変形拘束の場合

プレストレストコンクリート部材に、温度勾配が生じたときの軸拘束力および拘束モーメントは、① (i), (iii) と圧縮縁コンクリートひずみは、温度荷重が作用する前後で変わらないという仮定に基づいて求めた。

温度荷重が作用した場合の部材拘束力は、この仮定に基づき、軸方向の力のつり合いとひずみ条件より、軸拘束力、拘束モーメントを算出する。

また、温度荷重とともに外力が作用した場合は、温度荷重による部材拘束力（軸方向拘束力および拘束曲げモーメント）と外力曲げモーメントおよび、プレストレスによる軸方向力を外力とし、コンクリートの引張応力を無視した鉄筋コンクリート部材を考えた場合の計算方法を用いた。

以上の仮定および計算方法により求めた、各供試体の部材拘束力および、剛性残存率についての計算値と実験値を表一7に示す。

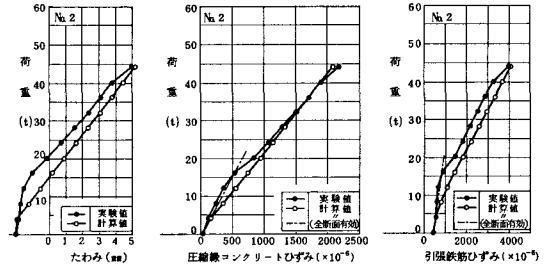
簡易計算式ながら比較的よく一致している。若干計算値の方が大きめなのは、温度勾配によるひずみ分布を直線としていることおよび、線膨張係数に常温の値を採用しているためと思われる。

また、載荷段階におけるスパン中央のたわみおよびひずみの比較を代表例として、供試体 A-2, 3, 4, 5 と B-2 の結果を図一21~25に示す。

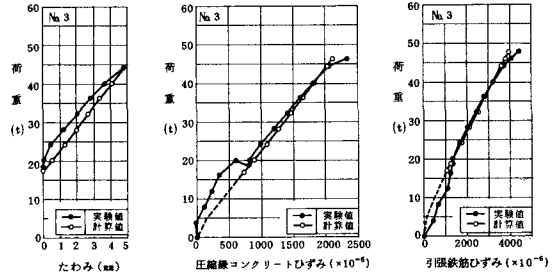
これについても実験値と計算値がよく一致している。これは、供試体が冷却された部分がコンクリートの引張側であり、かつそこでは荷重が大きくなるとコンクリートにひびわれが生じ、コンクリートの引張は無視できる。したがってひびわれが進行し、部材剛性が低下した後では低温の影響が小さいためと考えられる。また全般に計

表一7 温度荷重を受けた PC 部材の変形拘束力

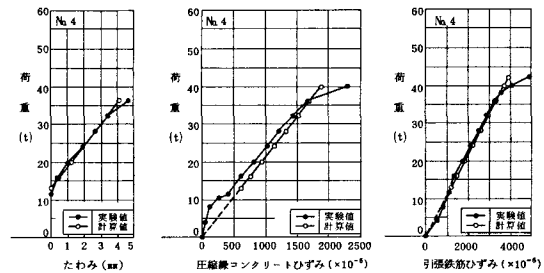
供試体名	拘束	曲げ拘束モーメント (tf・m)			軸拘束力 (tf)			剛性残存率	
		実験値	計算値	実/計	実験値	計算値	実/計	実験値	計算値
A-3	曲げ	14.8	13.5	1.09	—	—	—	0.7	0.64
A-4	"	9.1	10.4	0.88	—	—	—	0.44	0.50
A-5	"	9.0	10.5	0.86	—	—	—	0.43	0.50
A-6	"	14.5	14.2	1.02	—	—	—	0.70	0.69
A-7	"	13.3	16.9	0.79	—	—	—	0.65	0.83
A-8	"	12.2	16.1	0.76	—	—	—	0.59	0.78
A-9	"	12.6	13.1	0.96	—	—	—	0.62	0.65
A-10	"	4.9	5.4	0.91	—	—	—	0.90	0.99
B-2	曲げ・軸	5.0	4.8	1.05	8.69	8.61	1.01	0.32	0.32
								0.32	0.30



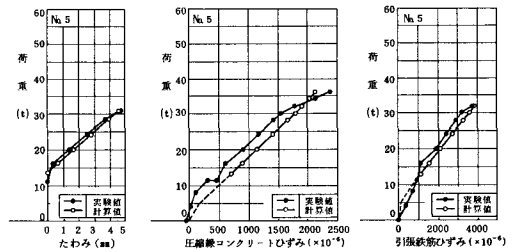
図一21 供試体 A-2 の荷重-たわみおよびひずみ



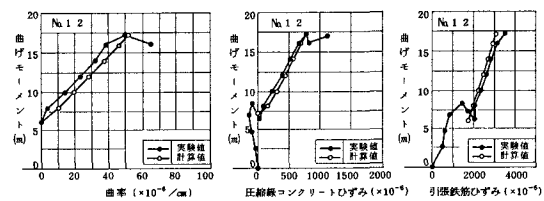
図一22 供試体 A-3 の荷重-たわみおよびひずみ



図一23 供試体 A-4 の荷重-たわみおよびひずみ



図一24 供試体 A-5 の荷重-たわみおよびひずみ



図一25 供試体 B-2 の曲げモーメント-曲率およびひずみ

算値の方が剛性が小さめとなっているのは、実際にはコンクリートの圧縮域であっても若干低温の影響があること、およびコンクリートの引張応力を無視した計算を行っていること等による。以上のように本計算法により十分実用的な精度で安全側の評価が可能である。

c) 非線形応力解析：非線形応力解析を行った。その場合、はりの厚さ方向の影響を無視し対称性を考慮して、図-26に示すような1/2モデルで、要素数130、節点数314とし、四角形要素を用いて二次元解析を行った。

また、低温による各種強度の増加、コンクリートに発生するひびわれ等を考慮して、より実情に近い形で数値解析によるシミュレーションを行った。

コンクリートについては、弾性係数の応力依存性および温度依存性については考慮せず、ひびわれの発生のみを考慮した。

ひびわれは、最大主応力が引張強度を越えた時点で発生するものとし、コンクリートの引張強度は、引張側が低温域になるため、低温での推定値を採用した。

鉄筋については、引張鉄筋が低温域にあるため、低温による降伏応力の増加を考慮した弾塑性材料とした。

また、PC鋼棒は鉄筋と同様に弾塑性材料とするが、温度の影響は考慮しない。

線膨張係数については、鋼材の線膨張係数は一般に超低温下でもほとんど変わらないといわれているが、コンクリートの線膨張係数は、水分の凍結等によりかなり変化することが認められている。

そこで、鋼材とコンクリートとの線膨張係数を同じに

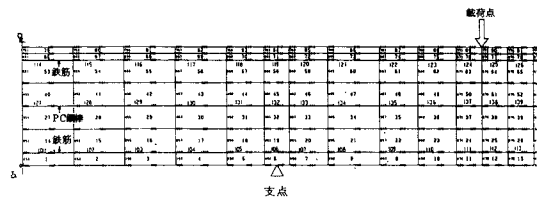


図-26 要素分割図

表-8 物性値

		ANA-1	*ANA-2
コンクリート ($\sigma_{yk}=400 \text{ kgf/cm}^2$)	弾性係数	$2.4 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	-
	ポアソン比	0.2	-
	引張強度	100 kgf/cm^2	-
	線膨張係数	$1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	$0.8 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
鉄筋 (SD35)	弾性係数	$2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	-
	引張降伏点	7350 kgf/cm^2	-
	圧縮降伏点	3500 kgf/cm^2	-
	線膨張係数	$1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	$1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
PC鋼棒 C種(φ110/125)	弾性係数	$2.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$	-
	降伏点	11000 kgf/cm^2	-
	線膨張係数	$1.0 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	$1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

* 全材料について線膨張係数を同じにしたもの
 ** コンクリートと鋼との線膨張係数(低温域までの平均線膨張係数を使用)に差があるもの
 *** ひずみ増量571/400の降伏率
 **** 降伏率

した場合、異なるものとした場合(コンクリートについては低温域までの平均線膨張係数を使用)との両者について計算を行い比較した。

なお、コンクリートと鉄筋およびPC鋼棒は完全付着しているとした。

以上まとめると数値解析に用いた物性値は表-8に示

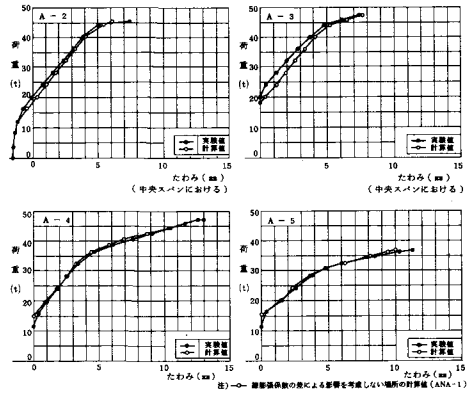


図-27 荷重-たわみ曲線 (実験値と計算値の比較)

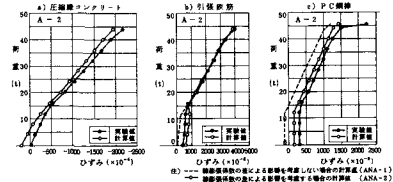


図-28 荷重-ひずみ曲線 (実験値と計算値の比較)

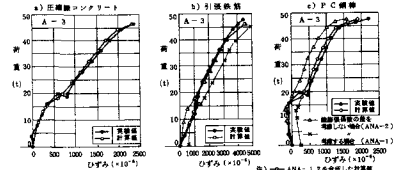


図-29 荷重-ひずみ曲線 (実験値と計算値の比較)

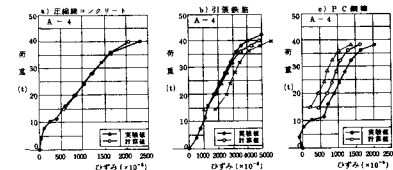


図-30 荷重-ひずみ曲線 (実験値と計算値の比較)

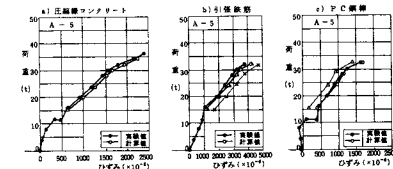


図-31 荷重-ひずみ曲線 (実験値と計算値の比較)

すとおりである。

図—27～31 に実験値と計算値を示す。

以上の結果より次のことが明らかになった。

i) 拘束力の経時変化に関しても、実験値と計算値はほぼ一致する。

ii) 荷重-たわみ曲線には線膨張係数を変えた影響はほとんどみられず、両方の計算値とも実験値にほぼ一致している。

iii) 引張鉄筋の計算ひずみは、ひびわれ発生前は、線膨張係数の差による影響を考慮することで実験値に近くなるが、ひびわれ発生後は線膨張係数が同じ場合の計算値の方がより実験値に近くなる。

iv) PC 鋼棒の位置ではひびわれの影響はなく、線膨張係数の差を考慮した計算値の方が実験値により近い。

v) コンクリートの引張応力を考慮したため、線形簡易計算より実験値に近づいている。

4. 結 論

円筒形のプレストレストコンクリート製二重殻貯槽の外槽壁部材の一部を想定したはり状の実大供試体による冷却実験を行い得られた結論を要約すると以下になる。

(1) 曲げ変形を拘束して温度荷重(約 200°C の温度差)のみを賦与したときの剛性残存率(実際の部材拘束力を、全断面有効として常温時の弾性係数を用いて求める拘束力で除した値)は、プレストレスがない場合、あるいは鉄筋比が小さい 0.5 % の場合には小さい値(それぞれ 0.43, 0.44)を示したが、他の場合はすべて 0.6～0.7 程度であった。

(2) 実際に用いられると考えられるプレストレス 30 kg/cm²、鉄筋比 1 % の供試体で、軸方向の変形を拘束した場合の軸剛性残存率および軸方向の変形、曲げ変形の両方を拘束した場合の軸剛性残存率、曲げ剛性残存率はいずれも 1/3 程度であった。

(3) 温度荷重によるひびわれ発生後の部材剛性は、プレストレスの影響は小さく、鉄筋量の影響が顕著であった。

(4) 今回実験を行った部材における終局耐力は、低温により引張鉄筋の降伏点が上がることにより、常温と

比べ 2 割程度の増加がみられた。また、終局耐力はプレストレスの影響は小さく、主として鉄筋量により決まることがわかった。

(5) LPG 温度(-45°C)までの温度勾配では、微小なひびわれ(0.04 mm 程度)が発生しただけで、剛性残存率は 0.9 と剛性の低下はほとんどみられなかった。また、ひびわれ発生後の部材剛性、終局耐力は常温の場合とほとんど変わらなかった。

(6) 部材が急冷却された場合の温度分布の経時変化は、計算により十分把握することができる。

(7) プレストレストコンクリート部材に温度勾配が生じた場合の強度特性をより高い精度で評価するには、温度分布を正確に把握して、コンクリートの引張応力、低温域にある鉄筋の降伏応力の増加を考慮した非線形応力解析を行う必要がある。なお、その際コンクリートと鋼材と線膨張係数の差によって生じる応力についても考慮する必要がある。ただしひびわれ発生後については、その影響はあまり大きくない。

(8) 温度勾配による部材拘束力は、コンクリートの引張応力を無視した軸方向のつり合いと温度勾配を直線と考えた場合のひずみ分布とより十分実用的な精度で計算することができる。また、温度勾配が生じた部材にさらに外荷重が作用した場合の応力解析もコンクリートの引張応力を無視した計算法により十分実用的な精度で安全側の評価が可能である。

参 考 文 献

- 1) 後藤：極低温下におけるコンクリートの性質、コンクリート工学、15 巻、1977.11.
- 2) 金津・青柳・佐藤：低温下における鉄筋コンクリート引張部材の力学的特性、電力中央研究所報告、379016、昭和 54 年 10 月。
- 3) 青柳・阿部・金津：低温下における鉄筋コンクリート曲げ部材の力学的特性、電力中央研究所報告、379015、昭和 54 年 12 月。
- 4) 金津・青柳：低温領域で温度勾配を受ける鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性とひび割れ性状、電力中央研究所報告、380018、昭和 55 年 11 月。
- 5) 吉本・山本・迎・宮川・森田：プレストレストコンクリートによる LNG、LPG 貯蔵用二次障壁の開発(その 2)、住友建設技術研究所所報、1980.

(1986.12.27・受付)