

PCPV のクリープに関する基礎的研究

—1/40縮尺モデルによるクリープ実験と解析—

田中伸幸
秋山宏
(計算センター)

§ 1. はじめに

プレストレストコンクリートは、すでに建築物を初めとし橋梁、タンク等において実用化されている。原子力発電所においても原子炉压力容器や格納容器に一部採用され、安全性の面から種々の研究が行なわれている。

プレストレストコンクリート压力容器 (Prestressed Concrete Pressure Vessel, 以下 PCPV と称する) は、長期間にわたって一般構造物に比べ、より過酷な荷重サイクルを受けるため構造的に十分な安全性を要求されなければならない。すなわち、PCPV は厚肉のコンクリート構造であり、長期間の運転サイクル中には、高温度勾配、内部圧力の変動を受けるため、コンクリートは複雑な応力状態に置かれる。

内部圧力やプレストレス力に関する PCPV の短期的な挙動については、弾性実験や破壊実験で得られた数多くの実験データにより解明されてきた。弾性挙動や破壊機構に関する理論解についても、有限要素法による数値解析手法が開発され、実験を裏づける結果が得られるようになってきた。

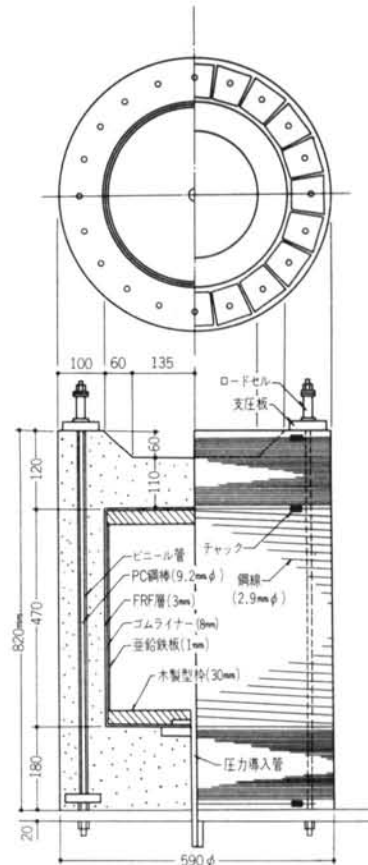
しかし PCPV は長期にわたって用いられ、コンクリート材料の長期性状の影響を考慮しなければならない。すなわち、コンクリートの乾燥収縮、クリープ、強度が時間や温度、コンクリート中の含水量等に依存し変化することにより、長期的にみれば PCPV の挙動は変化していく。このような挙動を明確に把握するには、理論解析と平行して長期間の実験が必要である。

本報告は、これらを考慮して行なったコンクリートのクリープ性状に関する材料テストおよび PCPV モデルに、プレストレス力と長期的内圧を加えた場合の実験を述べ、さらに流速法によるクリープ解析と比較することにより、理論の妥当性と実験法の問題を検討したものである。

§ 2. 試験体および試験方法

2.1 試験体の設定

試験体を設定する場合、対象とする実物との対比関係 (相以則) が重要である。本実験では、プレストレス力および内圧を受ける PCPV のクリープに関する基礎的性状を把握することを目的としている。したがって、形状、寸法、材料などをできるだけ理想化したようなプロ



図一 試験体形状・寸法図

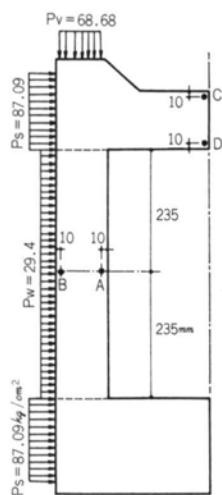


図-2

プレストレス導入および応力チェックポイント

トタイプを次のように設定した。

形状は、Hinkley Point 'B'、または Hunterston 'B' の PCPV を参考としながら原設計を1/40に縮小した軸対称厚肉円筒とした。外径寸法は、図-1に示すように高さ82.0cm、直径59.0cmで、内部寸法は高さ47.0cm、直径39.0cmである。実物のトップスラブには、制御棒の出入のための貫通孔が数多く設けられている。本モデルでは、解析上軸対称回転体として扱いやすくするためこれらを無視した。プレストレスの導入量は、内圧およびプレストレス力に関する弾性解析を行ない、壁中央およびトップスラブ上面においてコンクリートに引張応力が生じないようにフルプレストレスで設計した。設計パラメータは次のとおりである。

(1)コンクリート

圧縮強度： $F_c=450\text{kg/cm}^2$

ポアソン比： $V_c=0.17$

ヤング係数： $E_c=300,000\text{kg/cm}^2$

(2)設計圧 $P_o=45\text{kg/cm}^2$

(3)プレストレス導入量 (図-2)

弾性解析は、要素数269、節点数321の四角形分割を用いた有限要素法プログラムで行なった。図-2に示した各点の応力を表-1に示す。

2.2 試験体

試験体の材料特性およびプレストレス導入方法について述べる。

2.2.1 使用材料

荷重	チェックポイント					
	C		D		A	
	σ_r	σ_r	σ_z	σ_θ	σ_z	σ_θ
内圧 45kg/cm^2	86.94	-55.34	57.33	72.99	8.07	98.1
縦方向プレストレス $P_o=68.68\text{kg/cm}^2$	-1.59	3.43	-54.5	0	-55.47	0
円周方向プレストレス $P_s=87.09\text{kg/cm}^2$	-96.86	-56.31	14.93	3.22	-17.92	-2.04
レストレス $P_w=29.4\text{kg/cm}^2$	9.92	-39.08	-17.74	-81.19	21.30	-98.1
合計	-1.59	-147.30	0.02	-4.98	-44.02	-2.04

表-1 Prototype の弾性解析結果

(単位: kg/cm^2)

仕様	重量調合比			スランブ
	セメント	細骨材	水	
	1	3	0.58	18~21
細骨材	最大粒径	5.0mm		
	粒度分布 (重量比)	2.5mm~5.0mm	50%	
		1.2mm~2.5mm	25%	
	0.3mm~1.2mm	25%		

表-2 マイクロコンクリートの調合



写真-1 完成した試験体

試験体は、マイクロコンクリートを使用した。調合比を表-2に示す。マイクロコンクリートの一軸圧縮強度および応力-ひずみ曲線を図-3に示す。

プレストレス導入に用いた銅材の性質は、表-3に示す。

2.2.2 ライナの製作

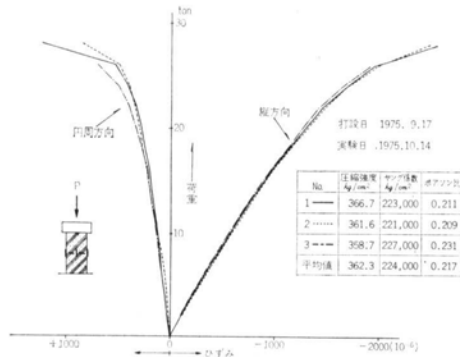
試験体は油圧で荷重を加えるため、油がコンクリート内部に浸透しないようウレタンゴム容器 (ライナ) を使用した。

ライナの製作方法は以下のとおりである。

まず、上下2枚の木製円板に #20 垂鉛鉄板を円筒状に固定して、コンクリート打設時に側圧にも十分耐えるような内わくを作る。この垂鉛鉄板には、直接内部圧力がライナに加わるように直径10mmの孔が不規則に配置してある。ライナーは厚さ8mmであるが、コンクリート面に亀裂が発生したとき、亀裂内部にめり込まないように厚さ3mmのFRP(繊維補強プラスチック)層で保護した。内圧導入のためライナ下部に鉄パイプを設け、油の注入および内部空気抜きに使用した。

2.2.3 コンクリートの打設

コンクリートは正位置で打込んだ。型わくは水平に2



図一3 一軸圧縮試験結果

	9.2φ 鋼棒	2.9φ 鋼線
断面積(mm ²)	64.4	6.65
引張荷重(kg)	10,420(162kg/mm ²)	1,340(202kg/mm ²)
伸び(%)	7.0(G. L. 1000mm)	5.5(G. L. 100mm)
降伏荷重(kg)	7,670(119kg/mm ²)	1,230(185kg/mm ²)
降伏比(%)	73.5	91.8
弾性係数(kg/cm ²)	1.99×10 ⁶	2,045×10 ⁶

表一3 PC鋼棒, PC鋼線の材料特性

分割して、パイプレータを開いて連続的に打込んだ。打込み後3日目に脱型し、コンクリート内部の水分蒸発を防止するためエポキシアクリート系樹脂で表面を養生し、材令28日目にプレストレス導入を行なった。

2.2.4 プレストレス導入方法

a) 縦方向プレストレス

縦方向は、9.2mmφ PC 鋼棒を20本使用し、図一1のよう同円状対称位置に配置した。

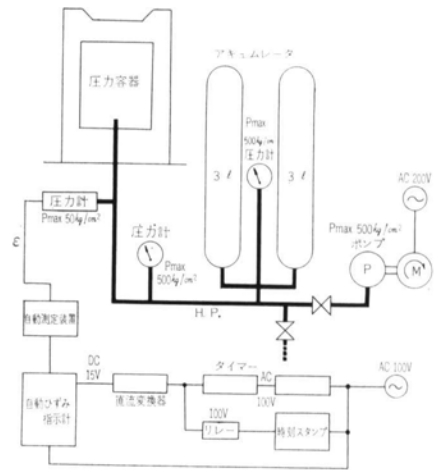
鋼棒の緊張はトルクレンチを用い、鋼棒上端に設けたロードセルのひずみ変化を測定しながら導入量を確認した。

b) 円周方向プレストレス

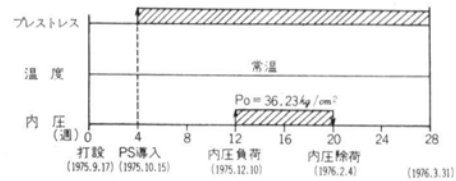
円周方向は、2.9mmφ PC 鋼線をワイヤーワインディング装置⁵⁾を用い螺旋状に巻き付けて緊張した。この際、ロードセルにより緊張力が一定になるようコントロールした。

2.3 加圧方法

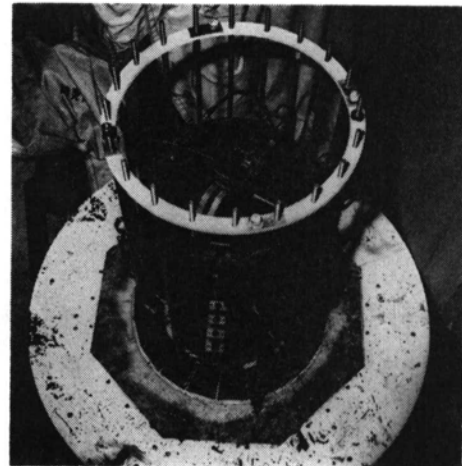
加圧は、試験体下部に設けたパイプを用い、電動油圧ポンプ(最大吐出量4 l/min)で油を送り込む方向で実施した。本実験は、長期間にわたって一定圧力を保持させるため、図一4のような加圧システムによって行なった。なお、加圧システムは全自動で行なうことができるようになっている。本実験では、アキュムレータ2器の蓄圧作用



図一4 実験方法



図一5 荷重履歴



写真一2 埋設ゲージの取付け

を利用し、圧力値を所定圧力の±5%内になるようにコントロールした。

2.4 荷重履歴

本実験の荷重サイクルは図一5に示すように、プレストレス導入から8週間目で設計圧力を負荷し、16週間目で除荷し、さらに除荷後8週間を含めて、この間の挙動を測定した。

§ 3. 測定方法

a) 内圧の検出は、圧力導入管に抵抗線型圧力変換器を取付けた。

b) コンクリートのひずみ変化量は、ひずみ計（共和電業製、標点距離80mm）を用いた。（図-6）

c) コンクリートの温度変化は、埋込み型温度計（共和電業製、測定範囲-20～+80℃）を用いた。（図-6）

以上の他に、外気温測定にははり付型温度ゲージおよび金属製自記温度計を使用し、各測定ひずみの記録は、自動計測機器（共和電業製、デジタルひずみ測定器SD-1000Bおよび自動多点切換器ASB-100B）を使用した。測定は、最小間隔30分、最大間隔24時間のピッチである。なお、プレストレス材の応力変化をロードセル（縦方向）とワイヤストレーンゲージ（円周方向）により測定したが、ロードセルは湿気のため途中で測定不能となった。

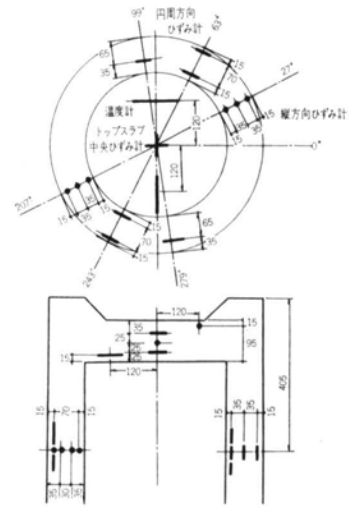


図-6 測定位置図

§ 4. 設計圧およびプレストレス導入量の設定

プロトタイプと試験体のコンクリート一軸圧縮強度比によって、設計圧力およびプレストレス量を設定した。

試験体の一軸圧縮試験結果は図-3である。図中の数値（平均値）を用いると、設計圧力とプレストレス量は表-4のようになる。

§ 5. 実験結果

コンクリートのひずみ、および温度の測定結果と外気温度の結果を図-7～図-10に示す。

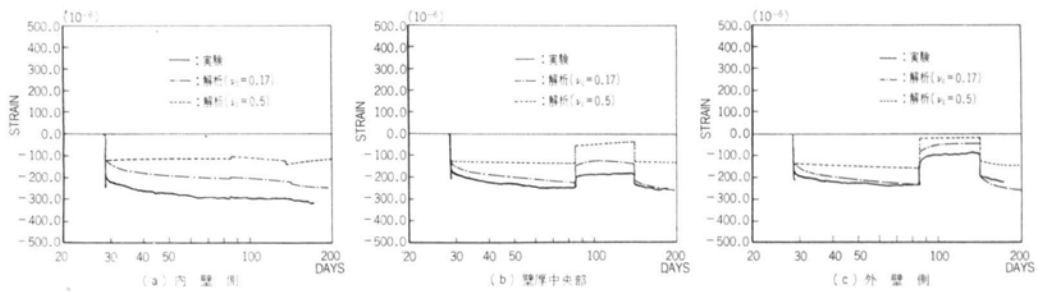
§ 6. 理論解析

コンクリートのクリープ式については、すでに種々の形式が提案されているが、本解析においては、J. M. Illston⁹⁾等によって提案されたコンクリートクリープを不可逆クリープ（流れ）と可逆クリープ（遅延弾性）の2成分に分解する“流速法”（rate of flow method）に基づき行なった。流速法によるコンクリートクリープ則は、単位応力下のクリープに対して次のような仮定をする。

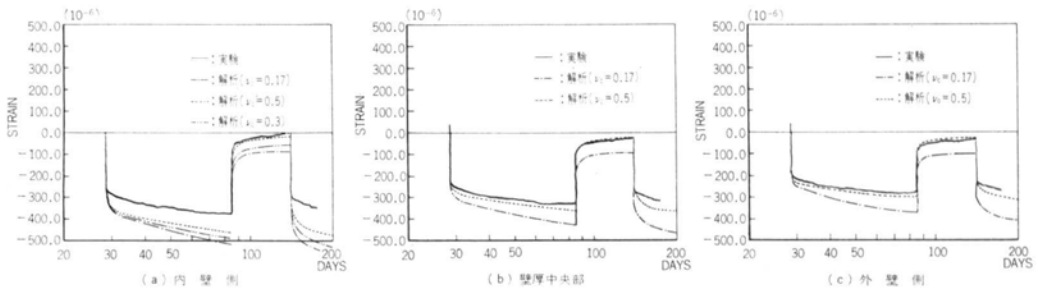
		単位	プロトタイプ	試験体
一軸圧縮強度		kg/cm ²	450	362.3
ヤング係数		kg/cm ²	300,000	224,000
ポアソン比		—	0.17	0.217
設計内圧		kg/cm ²	45	36.23
縦方向 プレストレス (9.2mmφ)	導入量	kg/cm ²	68.68	55.30
	鋼棒本数	本	20	20
	1本当り緊張力	kg	4,228.97	3,404
	鋼棒の応力	kg/cm ²	6,566.7	5,285.7
	鋼棒のひずみ	—	3,299.9×10 ⁻⁶	2,656.1×10 ⁻⁶
円周方向 プレストレス (29mmφ)	P ₁ 導入量	kg/cm ²	29.4	23.67
	鋼線緊張力	kg	745.1	349.13
	鋼線のひずみ	—	6,377.6×10 ⁻⁶	2,567.0×10 ⁻⁶
	P ₂ 導入量	kg/cm ²	87.09	70.12
	鋼線緊張力	kg	867.3	599.85
	鋼線のひずみ	—	6,377.6×10 ⁻⁶	4,410.9×10 ⁻⁶

表-4 設計圧およびプレストレス導入量

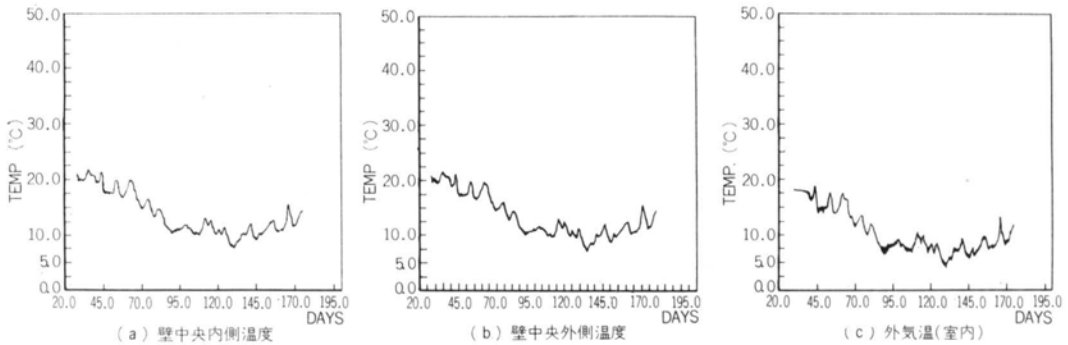
- 1) クリープひずみは、2つの成分すなわち不可逆クリープ ϵ_f と可逆クリープ ϵ_a から成り立っている。
- 2) 可逆クリープは、コンクリートの材令に無関係な極限值 $\epsilon_{d\infty}$ に収束するものである。
- 3) 荷重材令が異なるときのクリープひずみは、不可逆クリープ ϵ_f の速度を荷重時材令に無関係とし、可逆クリープ ϵ_a は、基準となる可逆クリープ ϵ_a における ϵ_f に対応する値とする。
- 4) 2つの成分 ϵ_a と ϵ_f は直接比例するものとし、単位



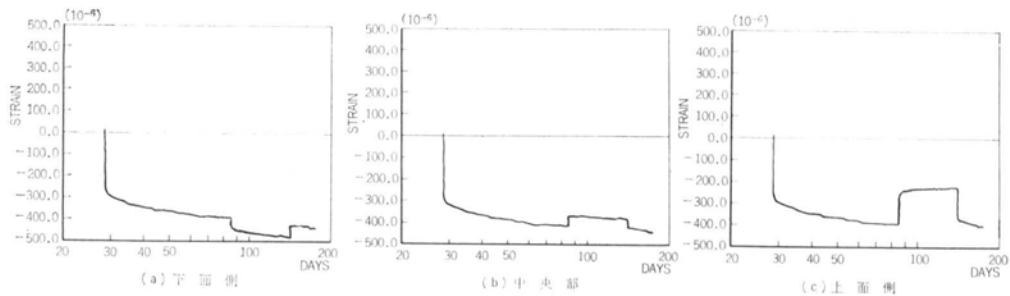
図一七 壁中央縦方向ひずみ変化（2ゲージ平均値）



図一八 壁中央円周方向ひずみ変化（2ゲージ平均値）



図一九 コンクリートの温度および外気温の変化



図一〇 トップスラブのひずみ変化

応力当りのクリープすなわち単位クリープ J_f と J_a を定義する。

5) 時間とともに応力が変化する場合、その区間を分

割し各区間で応力を一定として応力履歴をステップ関係で表す。

以上の仮定条件を考慮した有限要素法解析プログラム

を用い計算を行なった。

本実験の理論解析に用いた材料定数は次のとおりである。

○ヤング係数： $E=242,000\text{kg/cm}^2$

(鋼材の剛性を考慮してコンクリートのヤング係数を平均的に増加した)

○ポアソン比： $\nu=0.17$

(ヤング係数の割増がコンクリートの横ひずみに影響しないようにポアソン比を低下させた)

○単位クリープ関数：

$$J_f(t) = t' = -6.06 \times 10^{-6} + 1.82 \times 10^{-6} \ln t$$

$$J_a(t') = 1.32 \times 10^{-6} \times [1 - \exp(-10.61 \times 10^6 \times t')]$$

ただし、 t ：実時間

t' ： $J_f(t)$ ：疑似時間

J_f ：不可逆単位クリープ

J_a ：可逆単位クリープ

(一軸圧縮クリープ実験から得られたクリープ関数の上限と下限の平均値(テストピース $100\phi\text{mm} \times 200\text{mm}$, 6体)を採用した)

○クリープポアソン比： $\nu_c=0.17$

(弾性ポアソン比と同一に定めた)

なお、比較のために $\nu_c=0.3, 0.5$ に対しても同じ解析を行なった。

6.1 有限要素分割

解析に用いた鉛直断面の有限要素分割を、図-11に示す。

6.2 計算の仮定

1) 材料の弾性係数は材令に関係なく一定とした。

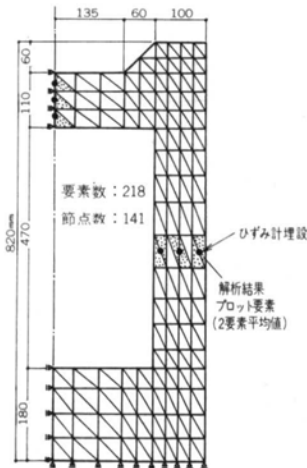


図-11 クリープ解析用有限要素分割図

2) クリープ関係は、実験した範囲内の温度について温度の影響が微小であるものとしてこれを無視した。

3) 鋼材のリラクゼーションならびにコンクリートのクリープに起因するプレストレス量の減少は無視し得るものとし、プレストレス量は全期間にわたり一定とした。

6.3 解析結果

解析によって得られた、実験期間中の主要点における変形とひずみの分布を図-12～図-14に示す。また、解析によって得られた主要個所のひずみ履歴を図-7～図-8に、実験結果と比較して示す。

§ 7. 考 察

図-7～図-8に示した試験体のひずみ履歴と解析値とを比較すると、次のことがわかった。

1) 弾性レスポンスは、図-8に示すように実験値と解析値が全般によく一致している。

2) クリープひずみの進行については、図-8に示すように当初仮定した $\nu_c=0.17$ の解析曲線と類似のカーブを描き、解析がクリープ性状を傾向としてよくとらえていると見ることができ、クリープひずみの絶対値と進行速度にかなり顕著な差異がみられる(解析値のクリープ進行速度が大である)。また、解析曲線は、実験値に比べて不可逆クリープ成分の進行が時期にわたって継続するのに対して、実験値では、負荷後ある程度の時間経過にもなると飽和する傾向を示している。

3) クリープ関数 $J_f(t)$, $J_a(t')$ をそのままにして、クリープポアソン比を $\nu_c=0.3$ および $\nu_c=0.5$ として解析した結果、実験値より近いひずみ履歴が得られた(図-8の…線および一線で示すように)。

以上のような実験値と理論値の差が、何に起因するかはこれまでのデータから確信することは困難であるが、以下に述べる諸点に問題点がかくされていると考える。

(1) 当初、理論的な立場として Illston⁹⁾ の説に従い、クリープポアソン比は一定である。弾性ポアソン比に等しく仮定したが、上記の3)に見るようにクリープポアソン比の値によって解析結果に著しい差異が生じるので、この Illston 説の妥当性を実験的に再検討する必要がある。

(2) 実験では、試験体の乾燥ともなう収縮の影響を取り除くために、一軸圧縮用のテストピースと模型試験体

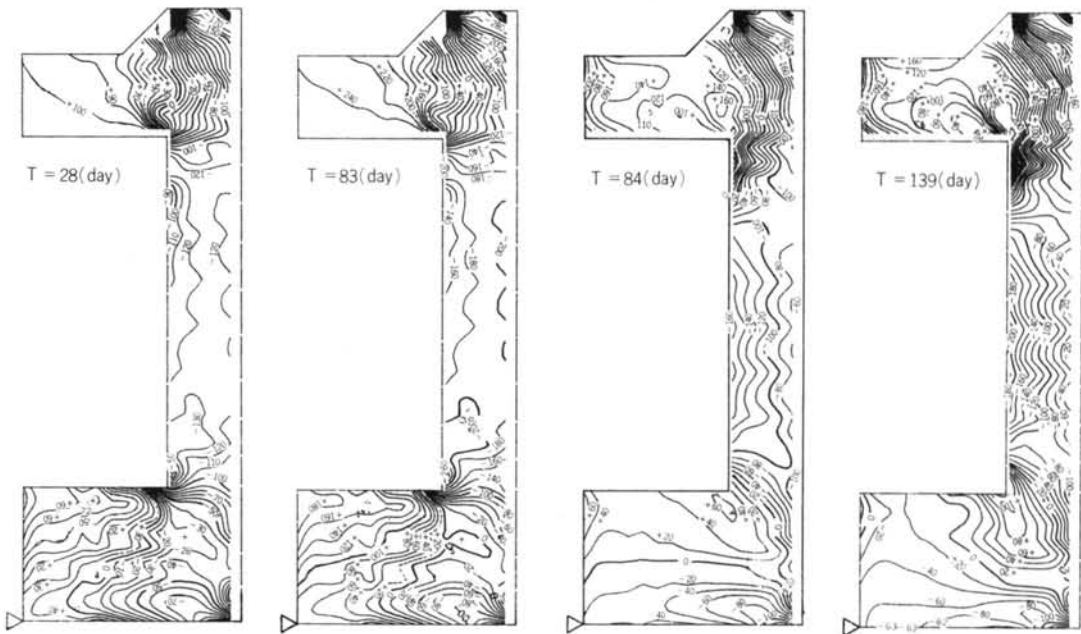


図-12 主要時点におけるひずみ度 ϵ_z の分布 (単位: 10^{-6})

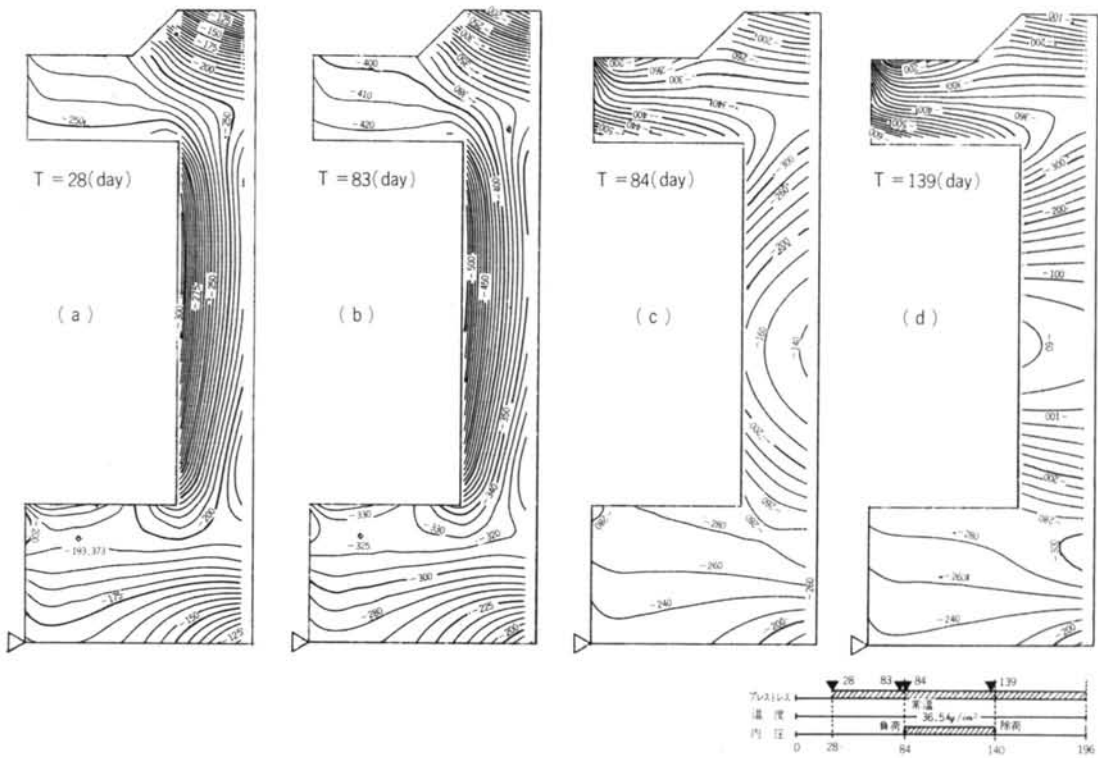


図-13 主要時点におけるひずみ度 ϵ_θ の分布 (単位: 10^{-6})

の両者ともエポキシ樹脂のコーティングによってハールしたが、コーティングの再テスト結果から、完全にシールされたものでなく徐々に水分が失なわれることが判明した。水分が失なわれるとすると、乾燥収縮ひずみの進行が一軸テストピースと模型試験体で異なる可能性がある。

(3)試験体各部とテストピースでは、一般に温度が異なるので、温度ひずみの補償が困難である。本解析では、

温度変化と温度応力を無視しており、試験体のひずみ値には温度ひずみに対する補償が行われていない。

§ 8. まとめ

以上の考察の結果、本実験では弾性レスポンスおよび材料テストに基づくクリープ挙動が、計算と実験におお

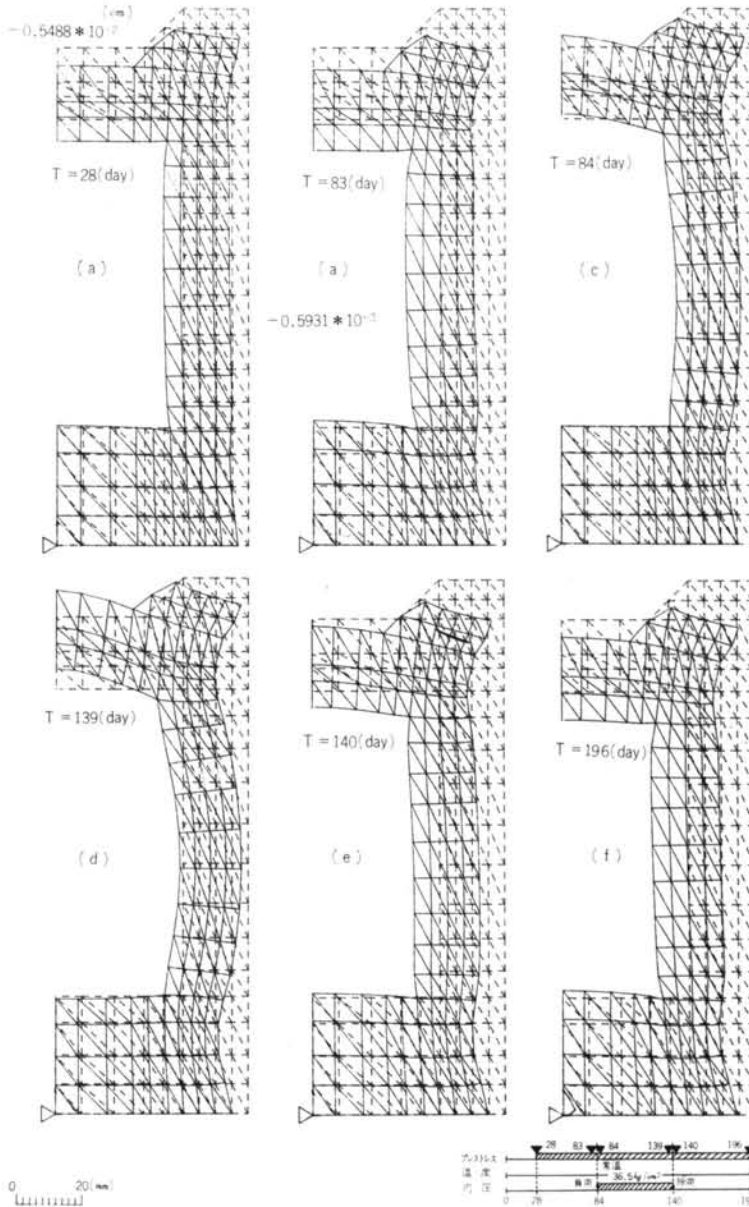


図-14 主要時点の変形

むね傾向が一致した。しかし、定量的には相違が見られる。この原因の1つとして、計算上のクリープポアソン比が正しく設定されていないことが考えられる。また、クリープ関数を決定した一軸圧縮テストピースのクリープひずみは、温度、乾燥収縮などの要因に対し、試験体の各部を正しく代表していないことも指摘できる。

一方、技術面では加圧系統および測定系統、使用ゲージ類などは、長期間の実験でも安定性および信頼性のあるものが確認された。乾燥収縮をさけるためにシーリングしたが不完全であったため、乾燥収縮ひずみと温度変化に伴うひずみが生じ、この量が予想以上に多く、今後

これらを分離できるような実験手法が必要である。

§ 9. おわりに

本実験の実施にあたり、実験の計画から実施、まとめにわたって絶えず助言いただいた川股重也東北工業大学客員教授、塩屋繁松日本大学生産工学部講師、磯畑脩当社研究所主任研究員、また、試験体製作・実験・測定にご援助いただいた河村宗夫氏に、未筆ながら謝意を表わします。

〈参考文献〉

- 1) 川股研究室：“有限要素法による粘弾性解析法とPCPVクリープ解析への適用”PCPV レポート72-1, 1972
- 2) 塩屋繁松, 川股重也, 秋山宏：“コンクリートの材令、温度および乾燥収縮を考慮した流速法によるPCPVのクリープ解析”日本建築学会大会学術講演梗概集, 1975
- 3) 坪井善勝, 川股重也, 塩屋繁松：“Finite Element Method による連結体の解析(その7)線型粘弾性理論によるPCRVのクリープ解析”日本建築学会大会学術講演梗概集, 1970
- 4) 塩屋繁松, 川股重也, 高山誠他：“有限要素法を用いた原子炉圧力容器のクリープ解析—線型粘弾性理論による回転対称体PCRVの解析”コンクリートジャーナル Vol. 2, No. 6, June 1974
- 5) 川股重也, 半谷裕彦, 坪井善勝, 磯畑脩, 大築志夫：“プレストレストコンクリート圧力容器の破壊実験”コンクリートジャーナル Vol. 9, No. 8, Aug. 1971
- 6) 阿部博俊, 青柳征夫, 田辺忠顕：“プレストレストコンクリート圧力容器の高温クリープ性状とクリープ解について”コンクリートジャーナル Vol. 12, No. 6, June 1974
- 7) M. A. Mukaddam & B. Bresler: “Behavior of Concrete under Variable Temperature and Loading” Concrete for Nuclear Reactors (ACI SP-37) ACI, 1970
- 8) R. C. Reese (ed.): “Desinging for Effects of Creep; Shrinkage, Temperature in Concrete Structures (ACI SP-27)” ACI, 1970
- 9) J. M. Illston: “Components of Creep in Mature Concrete” ACI Journal, Mar. 1968
- 10) R. D. Browne: “Properties of Concrete in Reactor Vessels” Proc. Conference on PCPV, Inst. of Civil Engineers Mar. 1967
- 11) Y. R. Rashid, F. S. Ople, Jr. & T. Y. Chang: “Comparison of Experimental Results with Response Analysis for a Model of a Pressel Vessel” Model Techniques for Prestressed Concrete Pressure Vessels, BNES, 1969
- 12) Y. R. Rashid: “Nonlinear Analysis of Two-Dimensional Problems in Concrete Creep” Journal of Applied Mechanics, June 1972
- 13) Z. P. Bazant & S. T. Wu: “Dirichlet Series Creep Function for Aging Concrete” Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Apr. 1973
- 14) Z. P. Bazant & S. T. Wu: “Thermoviscoelasticity of Aging Concrete” Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, June 1974
- 15) Z. P. Bazant & S. T. Wu: “Creep and Shrinkage Law for Concrete at Variable Humidity” Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Dec. 1974

