

# プレストレストコンクリート原子炉圧力容器 (PCRVR) 構造物に関する研究

—IV—1 常温，一軸・三軸コンクリートクリープ試験—

PCRVR 研究グループ

## Study on Prestressed Concrete Reactor Vessel (PCRVR) Structures

—IV-1 Creep Tests of Concrete Subjected to Uniaxial  
and Triaxial Compressive Stresses and Normal Temperature—

PCRVR Research Group

### Abstract

This report describes the results of creep tests of concrete conducted as a first step to clarify the long-term deformation behavior of a PCRVR. The tests were performed under the conditions of (1) uniaxial and triaxial stresses, (2) two different loading ages (30 days and 90 days), (3) sealed curing, and (4) normal temperature (20°C). Although there were some points in the testing procedures which could be improved, the basic behaviors under uniaxial stress, which are, for instance, unit creep curve, creep recovery and creep Poisson's ratio, were obtained well on the whole. Further, the possibility of predicting creep under multiaxial stresses from uniaxial results was indicated.

### 概 要

本報告はPCRVRの長期変形性状を解明するための第1段階として行った最初のコンクリートのクリープ試験の結果である。試験は常温(20°C)で水分シール養生を行い一軸及び三軸クリープ試験を30日、90日の2種類の載荷材令で行った。試験方法には2,3好ましくない点があったが、得られた試験結果からは、一軸クリープでの単位クリープ曲線、クリープ回復、クリープポアソン比等の基本性状を把握することができた。さらに、一軸クリープ試験からの三軸クリープ性状の予測の可能性を示すことができた。

## 1. はじめに

PCRVRは、長期間に亘り温度・内圧・プレストレスト力等の載荷履歴を受けるため、安全設計上長期間の変形・応力の変動性状をあらかじめ解析的に予測する必要がある。しかし、現状ではコンクリート材料そのものの長期持続荷重下の変形性状—クリープ—に関するデータは十分とは言えない。本研究は、コンクリートのクリープ性状についての基礎データ収集を目的として行った最初のクリープ試験の結果をまとめたものである。

試験は、PCRVRがマスコンクリートで水分の散逸がほとんど考えられないので、コンクリート打設直後から水分シール養生を行い、常温(20°C)下で、一軸、

及び三軸クリープ試験をそれぞれ30日、90日の2種類の載荷材令で行った。一軸クリープ試験からは、単位クリープ曲線、クリープ回復、クリープポアソン比、載荷材令の影響等の基本性状について検討した。三軸クリープ試験では、我々が独自に開発した試験機の性能評価と、一軸クリープ試験結果からの三軸クリープ性状予測の可能性について検討した。

## 2. 試験の概要

### 2.1. 試験条件

試験条件を表—1のように設定した。なお、供試体は各試験条件につきクリープ歪測定用2体、収縮歪測定用2体を用意した。強度試験用としては、標準水中養生と水分シール養生のものを準備した。

条件 記号	調合	養生	温度	応力 状態	応力レベル (kg/cm <sup>2</sup> )	載荷 材令	載荷期間 除荷期間
1-30	一 種 類	脱型直 後シー ル養生	20℃ 一定	一軸	80	30日	60日
3-30				三軸	100:100:100		30日
1-90				一軸	80	90日	90日
3-90				三軸	100:100:100		60日

表-1 試験条件

2.2. 使用した材料

使用した材料は次の通りである。

セメント：秩父セメント(製中)庸熱ポルトランドセメント

細骨材：天然川砂，最下粒径2.5mm以下，FM=2.75  
粗骨材：栃木県鍋山町産石灰岩碎石，最大粒径20mm以下

混和剤：凝結遅延型分散剤ポゾリス No. 8

2.3. コンクリートの調合

コンクリートの調合は、欧米の一般的な PCRV の設計基準強度 450 kg/cm<sup>2</sup> を参考にして、圧縮強度が標準水中養生28日で 450 kg/cm<sup>2</sup> 以上、スランプ10±1cm，空気量5%を目標として試し練りを行い表-2のように決定した。

水セ メント 比	スランプ	砂 率	重 量 調 合 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水	セメント	砂	砂 利	混和剤
40%	10±1 cm	41.5%	164	410	908	1049	0.72

表-2 コンクリートの調合

2.4. 供試体の作製方法

クリープ試験用供試体は、写真-1に示す特製水平打込み型モールドを用いて成型した。このモールドは、載荷面のキャッピングを避けるため、あらかじめ軸方向載荷面の上下に載荷板がとりついている。

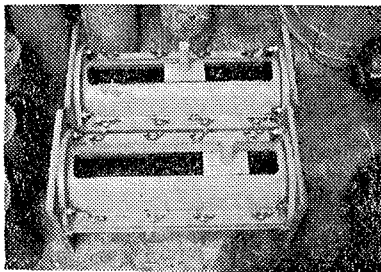


写真-1 特製水平モールド

一軸載荷用試験体は、φ15cm×28cmとして、上下に厚さ20mmの載荷板をとりつけた。

三軸載荷用試験体は、載荷面の影響を除くために標準供試体より10cm長くして、φ15cm×38cmとして、上下に厚さ60mmの載荷板をとりつけた。

養生は、打設後24時間で脱型し、側面に生じた豆板にセメントペーストを充填した後エポキシ樹脂を塗布した。さらにその上から厚さ3mmのゴムシートをま

いて水分の散逸を防いだ。

強度試験用供試体は、標準のφ15cm×30cmとした。シーラ養生供試体はあらかじめ厚さ0.3mmの銅板をモールドに挿入しておき、コンクリート打設後4～6時間でキャッピングを行い24時間後に脱型し上下面に銅板をハンダづけして密封養生を行った。

2.5. 使用した歪計

試験に使用した歪計は、(株)共和電業製埋込み型歪計BS-8A(検長80mm)である。各試験体で、軸方向歪と横方向歪の検出を行った。

2.6. クリープ試験機

一軸クリープ試験機は、最大軸荷重15tまで加力できるバネ式載荷のものである。

三軸クリープ試験機は、φ15cm×40cmのシリンダーを供試体とするもので、図-1に示すような2連式の加压装置である。軸圧と側圧とはそれぞれ独立に任意の設定圧力で加力することができる。油圧発生及び定圧保持装置は、圧力スイッチとアキュムレーターとを組合せて図-2に示す方式をとっている。最大圧力は軸圧・側圧

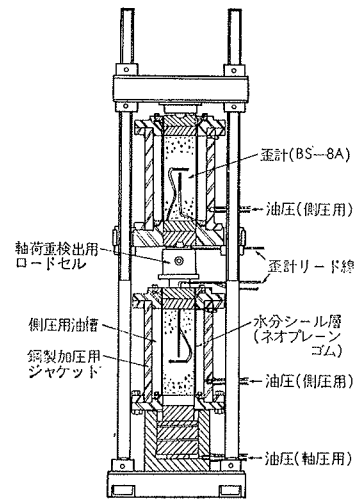


図-1 三軸クリープ試験機

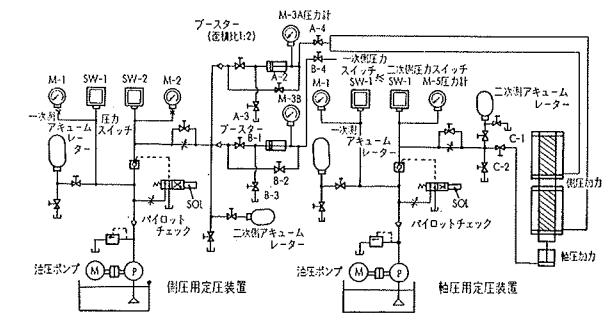


図-2 定圧保持装置

ともに設計上300 kg/cm<sup>2</sup>まで可能となっている。

なお、加力した圧力は、軸圧・側圧共油圧計で検出しているが、軸圧は試験機自身のスリ合せ部分の摩擦力による圧力損失が考えられるので、2体の供試体の間に挿入したロードセルにより実荷重の検出を行うようにした。



歪の終局値及び終局値に達する材令に大きければつきを生じ、長期的な歪の予想は困難になる。文献1), 2)によれば材令1,000日程度まではクリープ歪は進展する状況にあり、その大きさは60日経過時のせいぜい1.5~2.0倍程度であるという報告がなされている。

以上を考慮してここでは以下の形の函数化を試みた。

$$y = f(t) = \sum_{i=1}^n a_i (1 - e^{-b_i \cdot t / 10^{i-1}})$$

ここに  $i=1\sim 4$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  は未知

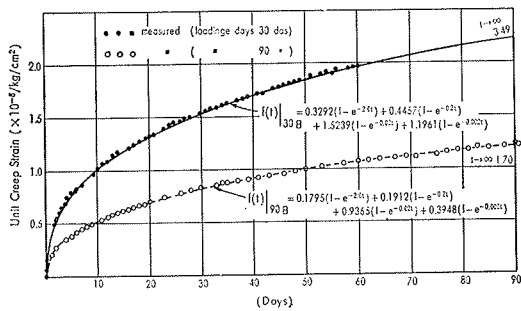


図-8 単位クリープ函数

数。

この形の函数はよく知られた Kelvin Solid の結合である。最小二乗法を適用して決定した函数値と実験値との対応を図-8に示した。

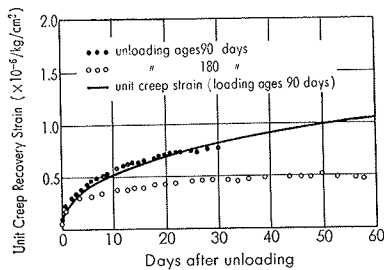


図-9 クリープ回復

(3)クリープ回復 各試験条件での除荷後のクリープ回復を以下のようにして求めた。(図-6 参照)

$$\epsilon_{rec} = \epsilon_1 - \epsilon_{e1} - \epsilon_2$$

ここに

$\epsilon_1$  : 載荷が継続されていると仮定した場合の弾性歪とクリープ歪の和の (図-8) 式による外挿値

$\epsilon_{e1}$  : 除荷時弾性歪

$\epsilon_2$  : 除荷後の残留歪

クリープ回復歪の実測値を図-9にプロットした。なお図中には、重ね合わせの法則が成立するかどうかを確かめるために、材令90日で除荷したクリープ回復に対して材令90日で載荷したクリープ曲線を実線で示

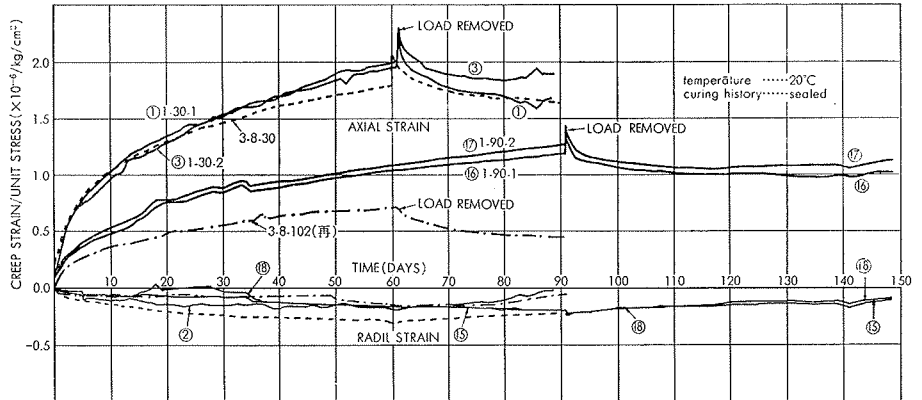


図-7 単位クリープ曲線 (一軸クリープ試験)

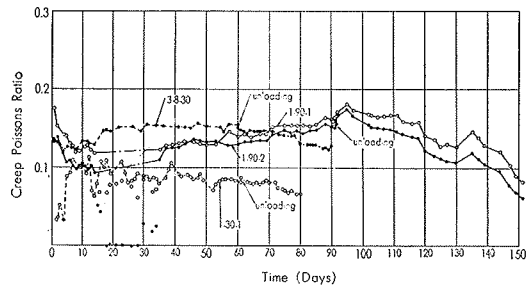


図-10 クリープポアソン比

して比較した。図でも明らかなように、本試験の結果では、コンクリートの材令の影響を考慮すれば、重ね合わせが成立することがわかる。

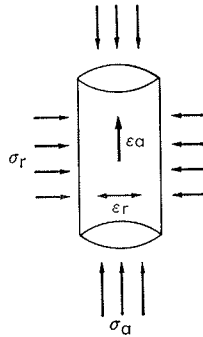
(4)クリープポアソン比 多軸応力状態でのクリープ性状を論ずる場合、クリープポアソン比が材令の経過とともにどのように変化するかは重要な問題である。ここでは、クリープポアソン比を同一試験体の軸方向クリープ歪に対する横方向クリープ歪の比で定義して各試験体のクリープポアソン比の経時変化を図-10に示した。クリープ歪の量が小さい載荷直後及び除荷後長時間経過した時点では、クリープポアソン比の変化は大きい、そのほかでは時間によらずほぼ一定の傾向にある事がわかる。なお、クリープポアソン比の値は、載荷時、除荷時の弾性歪に対するポアソン比が0.198~0.240であるのに対し、0.080~0.160とかなり小さくなっている。

3.2.3. 三軸クリープ試験 三軸クリープ試験の結果を図-11, 図-12に示した。両図の比較からわかるように、一軸クリープ同様に載荷材令の影響が顕著に表われている。さらに、ここでは一軸クリープ試験から求めた単位クリープ曲線とクリープポアソン比を使って三軸クリープ性状の予測を試みた。まず本試験に用いたシリンダー型供試体に軸圧、側圧を独立して作

用させた場合の弾性応力-歪関係式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{軸歪 } \epsilon_a &= (\sigma_a - 2\nu\sigma_r)/E \\ \text{横歪 } \epsilon_r &= \{\sigma_r - \nu(\sigma_r + \sigma_a)\}/E \end{aligned}$$

ここに、E：弾性係数  
 V：弾性ポアソン比  
 $\sigma_a$ ：軸方向応力  
 $\sigma_r$ ：横方向応力



次に、一軸クリープ試験での単位クリープ歪を  $F(t, \tau)$  [t: 載荷後の日数,  $\tau$ : 載荷材令], クリープポアソン比を  $\nu_c(t, \tau)$  とし、軸方向クリープ歪, 横方向クリープ歪をそれぞれ  $\epsilon_{ac}$ ,  $\epsilon_{rc}$  とすると以下の関係式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \epsilon_{ac} &= F(t, \tau) \{\sigma_a - 2\nu_c(t, \tau)\sigma_r\} \\ \epsilon_{rc} &= F(t, \tau) \{\sigma_r - \nu_c(t, \tau)(\sigma_a + \sigma_r)\} \end{aligned}$$

ここで、 $F(t, \tau)$  は  $\tau=30$ ,  $\tau=90$  に対し除荷後も含めて図-7のそれぞれの載荷材令の単位クリープ曲線の平均値を用いた。

また  $\nu_c(t, \tau)$  は図-10の結果から、載荷中も除荷後も時間によらず一定であると仮定し、 $\nu_c=0.1, 0.2$  の2通りについて算出した。計算値と測定値の比較を図-11, 図-12に示した。これによると、仮定する  $\nu_c$  の値によりかなり計算値に差が表われるが、載荷材令によらず  $\nu_c=0.1$  と仮定した場合、実験値とよく対応しており、一軸クリープ試験から三軸クリープ性状の予測の可能性を示しているものと考えられる。ただ、横歪については、計算値が実験値を下回っているが、これは、今回の試験と同じシリンダー型供試体を用いた他の研究者の報告でも同様の傾向であり、供試体の横方向寸法に対するゲージ長が大きすぎるための影響であろうと判断される。使用する歪計との関連で適正な供試寸法、形状については別に検討する必要があると考えられる。

#### 4. むすび

今回行った試験は、試験条件、供試体の数は少なかったが、得られた結果は同一条件でのばらつきも比較的少なく、基本的な一軸クリープ性状および、一軸クリープから三軸クリープ性状の予測の可能性を明らか

Triaxial Creep Test (1)

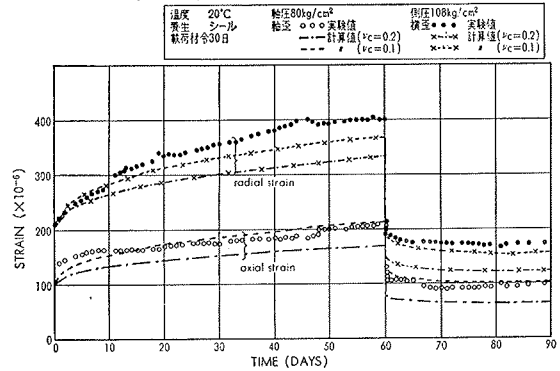


図-11 三軸クリープ試験 (30日載荷)

Triaxial Creep Test (2)

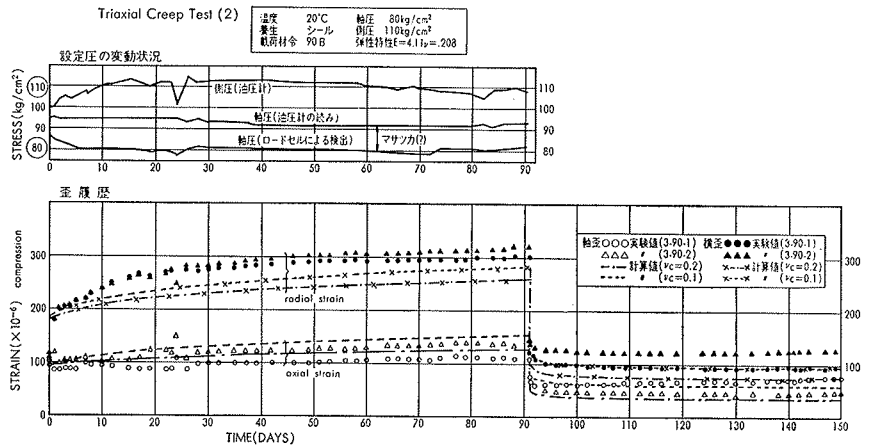


図-12 三軸クリープ試験 (90日載荷)

にすることができた。今後は、今回明らかになった2, 3の試験方法の改良を行った上で、コンクリートのクリープに与える温度・湿度などの影響を明らかにするための試験をすすめてゆくつもりである。

#### 参考文献

- 河角, 関他 “高温下におけるコンクリートのクリープ” 電力中央研究所技術第2研究所報告 No. 72018, '73, 5
- J. W. Chvang, T. W. Kennedy他 “An Approach to Estimating Long-Term Multiaxial Creep Behavior from Short-Term Uniaxial Creep Result” union carbide report No. 2864-3 the University of Texas at Austin, June '70.
- 阿部, 山崎 “高温(65°C)におけるコンクリートの三軸圧縮クリープ実験” 日建大会(九州) '72 鹿島建設技研年報 Vol. 21, '73.
- M. Mukaddam, B. Bresler. “Behavior of concrete under variable temperature and loading” SP-34 ACI. '72.

(文責 川口 徹)