

[78] 高温下のコンクリートの応力緩和

正会員 ○岡島 達雄 (名古屋工業大学工学部)
河辺 伸二 (名古屋工業大学大学院)

1. 序

原子力発電所の格納容器などのコンクリート重要構造物の設計に当たっては、多軸応力を含めた熱的性質に関するデータは極めて重要である。しかし、ひずみを拘束することによって生ずる熱応力に関するデータは多くない。

そこで、本研究は、多軸ひずみ拘束されたコンクリートの熱応力 (20~100℃) について実験し、「温度時間換算則³⁾」を適用した応力緩和を用いて考察し、併せて非拘束方向のひずみについて考察したものである。なお、「多軸応力下のコンクリートの熱膨張とクリープ²⁾」と対をなすものである。

2. 実験方法

2-1. 供試体の作成

(1) 供試体の形状 供試体は、図-1に示す面取立方供試体(113×113×113mm-5mm面取り)を使用した。また、供試体内部に温度分布を測定するCu-Co熱電対を埋設した。

(2) 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント

細骨材：川砂

粗骨材：川砂利

化学混和剤：A E剤

表-1に骨材の物理的性質と表-2にコンクリートの調合を示す。

(3) 養生 コンクリート打設後、6時間でキャッピング、24時間で脱型し、以後材令1週間まで水中養生後、材令7週間まで気中養生を行なった。更に、安定した条件を得るために供試体を予め105℃まで加熱乾燥させ、含有水分を完全に放出させておいた。

2-2. 載荷方法

図-2に直交3方向に圧縮力と引張力を独立に作用させることができる三軸圧縮引張試験機を示す。この試験機は、ひずみに対応して荷重を調整できる。また荷重が供試体の中心に均一にかかるような調心球座を備えている。載荷板は、端面拘束の最も小さいといわれる鋼製ブラシ載荷板を使用した。荷重の値は、ロードセルの出力の値による。

2-3. ひずみ測定方法

図-1に示す供試体の面取り部分に12個の変位計を6方向から対にして取りつける。そして、この変位計の出力の値からX、Y、Z方向のひずみを測定する。また、変位計を取りつけるひずみ測定用フレームを熱膨張の小さいアンバーで特別作製した。

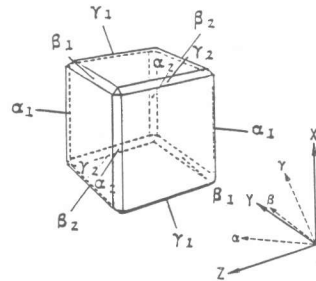


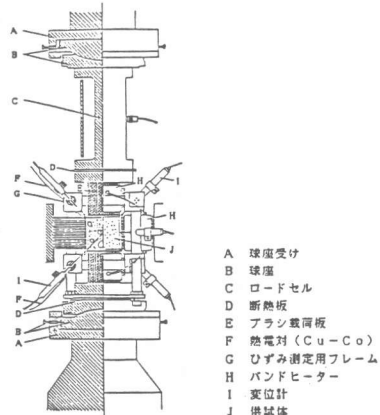
図-1. 面取立方供試体と変位計取り付け方向

表-1. 骨材の物理的性質

	比量		吸水率 (%)	粗粒率
	絶対状態	表乾状態		
粗骨材	2.64	2.67	0.91	2.78
細骨材	2.51	2.55	1.99	2.89

表-2. コンクリートの調合

粗骨最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	化学混和剤
20	18	53	41	4	176	332	698	1058	0.116



- A 球座受け
- B 球座
- C ロードセル
- D 断熱板
- E ブラシ載荷板
- F 熱電対 (Cu-Co)
- G ひずみ測定用フレーム
- H バンドヒーター
- I 変位計
- J 供試体

図-2. 三軸圧縮引張試験機

2-4. 加熱方法

載荷ブラシに取りつけたバンドヒーター（500w×12）で加熱した。供試体に埋設した熱電対で供試体内部温度を測定し、図-3に示すように昇温速度が10℃/時になるようヒーター電圧を変圧器で制御した。

2-5. 昇温、多軸ひずみ拘束下のコンクリートの熱応力の測定

一軸、二軸に初期応力まで載荷し、その時のひずみを初期ひずみとする。ひずみ拘束方向の初期ひずみを一定に保ち、供試体を20℃から100℃まで昇温する。この間、図-3のように10℃ごとに供試体内温度分布一様な場を作り、各温度での応力及びひずみを測定した。

実験で用いた初期応力を以下に示す。ただし、添字Rはひずみ拘束方向、Fはひずみ非拘束方向を示す。

自由膨張（無拘束）：
$$\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z = 0F - 0F - 0F \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

一軸ひずみ拘束：
$$\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z = 0R - 0F - 0F$$

$$40R - 0F - 0F$$

$$80R - 0F - 0F$$

$$120R - 0F - 0F$$

二軸ひずみ拘束：
$$\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z = 0R - 0R - 0F$$

$$40R - 0R - 0F$$

圧縮応力を正とする

2-6. 一定温度、一軸ひずみ拘束下の応力変化の測定

一定温度 20, 60, 100℃において、それぞれ初期一軸圧縮応力 80kgf/cm²を載荷し、その時のひずみを初期ひずみとする。載荷方向をひずみ拘束方向とし、拘束方向の初期ひずみを5時間一定にし続け、その間の拘束方向の応力変化を測定する。同時に、非拘束方向のひずみを測定する。

3. 実験結果と考察

3-1. 多軸ひずみ拘束下の熱応力と非拘束方向のひずみ

図-4に一軸、二軸ひずみ拘束下のコンクリートの熱応力を示す。

弾性範囲内で考えると、次式が成り立つ。

$$\epsilon_x = -\frac{1}{E} (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) + \alpha \Delta T$$

$$\epsilon_y = -\frac{1}{E} (\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)) + \alpha \Delta T \dots \text{式 1}$$

$$\epsilon_z = -\frac{1}{E} (\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)) + \alpha \Delta T$$

伸びひずみを正とする

E：ヤング率 ν：ポアソン比

α：熱膨張率 ΔT：温度変化

これらの式と拘束方向のひずみが一定、非拘束方向の応力が0より、拘束方向の応力が求まる。自由膨張（無拘束）時のひずみより求めたコンクリートの熱膨張率（11.4×10⁻⁶/℃）を上式に代入して求めた熱応力を実線で示す。熱応力実験値は温度が上昇する程、その増加の割合は小さくなる。これは、熱応力に応じた応力緩和が生じていると考える。また、熱応力が120~150kgf/cm²で最大に達し、その後減少する。

図-5に非拘束方向のひずみの測定結果を示す。破線は、自由膨張（無拘束）時のひずみを示す。

3-2. 緩和剛性率の合成曲線

コンクリートの熱応力の測定値を考察した結果、熱応力に応じた応力緩和が生じていると仮定した。そこで、20, 60, 100℃の各一定温度における一軸ひ

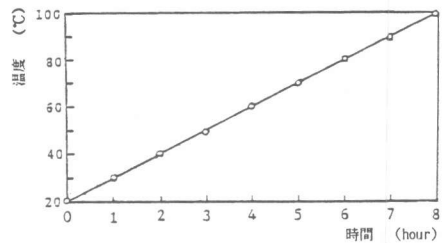


図-3. コンクリート供試体の加熱速度

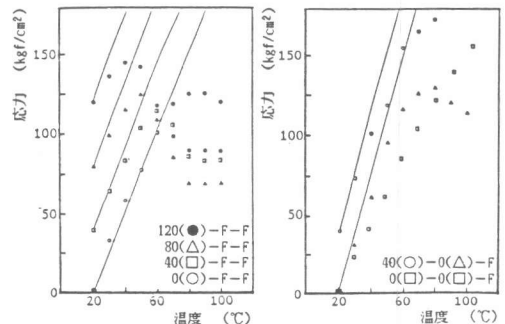


図-4. 一軸、二軸ひずみ拘束方向のコンクリートの熱応力

ずみ拘束下の応力変化を測定し、クリープの場合と同様²⁾に「温度時間換算則」を適用して、20℃から100℃までの温度上昇時の応力緩和量を予測した。図-6に20, 60, 100℃の各一定温度下、初期応力80 kgf/cm²時の一軸ひずみ拘束下の応力変化を示す。各温度の応力変化を図-7のように変換する。緩和剛性率は応力を初期ひずみで除したものとする。

$$\text{緩和剛性率 } E(t) = \sigma(t) / \varepsilon_0 \quad \dots \text{式2}$$

ε_0 : 初期ひずみ

ただし、対数は常用対数を使う。

そして、図-7の各曲線を、20℃を基準温度に時間軸に沿って平行移動させ、図-8の合成曲線を作成した。この時、図-7の曲線を時間軸に沿って移動させた量 $\log a_t$ は図-9のように、絶対温度 T の関数で表わせる。これより、ある温度の移動量 $\log a_t$ を求められるので、20, 60, 100℃以外の緩和剛性率曲線を想定することができる。

次に、20℃から100℃までの間を X ℃ごとの80/ X 本の緩和剛性率曲線を想定する。そして、この曲線上を図-10のように、緩和剛性率は X ℃ごとに曲線上を360× X 秒進んで、次の曲線上に乗り移ると仮定する ($P_1 \rightarrow P'_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P'_2 \rightarrow P_3 \dots$)。この360× X 秒は、10℃/時の昇温速度による ($P'_1 \rightarrow P_2, P'_2 \rightarrow P_3 \dots$)。また、曲線に乗り移る量は、図-9により求められる ($P_1 \rightarrow P'_1, P_2 \rightarrow P'_2 \dots$)。

$\lim X \rightarrow 0$ として無数の緩和剛性率曲線を想定することにより、温度が上昇する時の応力緩和量が予測できる。表-3に、このようにして求めた初期応力80 kgf/cm²、一軸ひずみ拘束下の温度上昇時の予測応力緩和量を示す。図-11のように初期応力が大きくなるほど応力緩和量が増加すること⁵⁾、同一条件(調合、養生等)のコンクリート供試体で、別に求めた図-12に示す温度に対するポアソン比とヤング係数を考慮に入れると、多軸ひずみ拘束下のコンクリートの熱応力を予測できる。

図-13に一軸及び二軸ひずみ拘束下のコンクリートの熱応力の予測値と実験値を示す。応力緩和を考慮することにより、温度が上昇する程、熱応力の増加の割合が小さくなることを表わすことができる。しかし、熱応力120~150 kgf/cm²以後熱応力が減少するのは、コンクリートが塑性変形するものと考え、弾性範囲内で考えた応力緩和を適用しても表わしきれない。

3-3. 非拘束方向のひずみ

図-14に非拘束方向のひずみの概念を示す。これは、多軸ひずみ拘束下のコンクリートの体積膨張が、無拘束下のそれに等しいという条件を仮定する。自

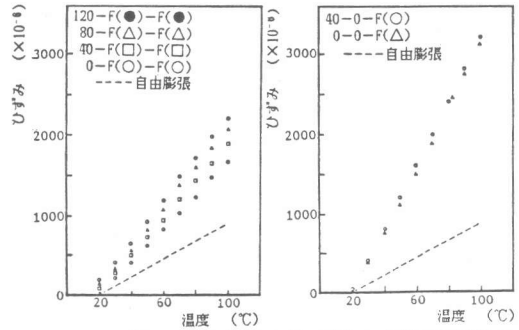


図-5. 一軸、二軸ひずみ拘束時の非拘束方向のコンクリートのひずみ

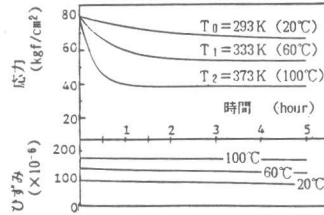


図-6. 20, 60, 100℃の各一定温度下の一軸ひずみ拘束方向の応力変化と非拘束方向のひずみ

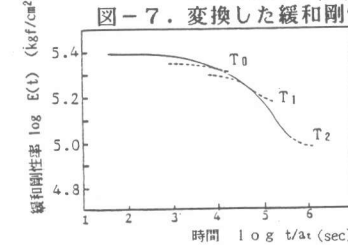
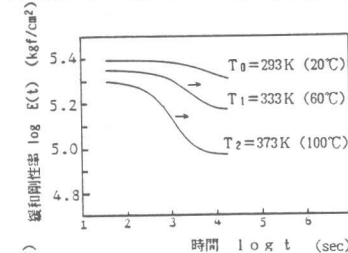


図-7. 変換した緩和剛性率曲線

図-8. 合成曲線

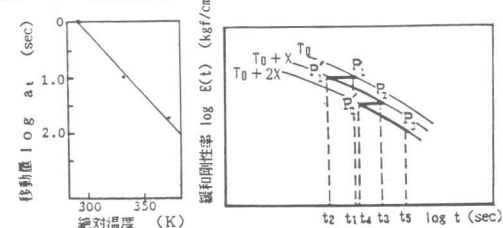


図-9. 移動量 a_t と 図-10. 昇温時の概念図

絶対温度 T の関係

表-3. 温度と予測応力緩和量の関係

温度 (℃)	上				
	20	40	60	80	100
予測緩和量 (kgf/cm ²)	0	14	23	31	39

ただし、初期応力80kgf/cm²の
応力緩和量を1.0とする。

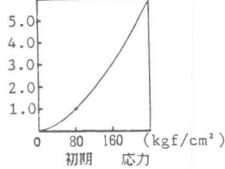


図-11. 初期応力に対する応力緩和量

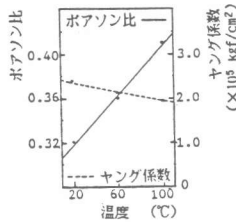
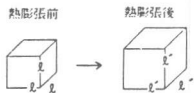


図-12. 各温度に対するポアソン比とヤング係数

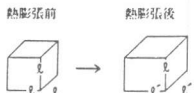
自由膨張（無拘束）



熱膨張後の体積 l'^3
よって、ひずみ ϵ は

$$\epsilon = \frac{l'^3 - l^3}{l^3} = \frac{l'}{l} - 1$$

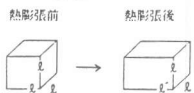
一軸ひずみ拘束



熱膨張後の体積が l'^3 になったと仮定する。
一辺を l に拘束すると、他辺は $l' = \sqrt{\frac{l'^3}{l}}$
よって、非拘束方向のひずみ ϵ は

$$\epsilon = \frac{l' - l}{l} = \frac{\sqrt{\frac{l'^3}{l}} - l}{l} - 1$$

二軸ひずみ拘束



熱膨張後の体積が l'^3 になったと仮定する。
二辺を l にひずみ拘束することにより他辺は $l' = \frac{l'^3}{l^2}$
よって、非拘束方向のひずみ ϵ は

$$\epsilon = \frac{l' - l}{l} = \frac{\frac{l'^3}{l^2} - l}{l} - 1$$

図-14. 非拘束方向のひずみの概念図

由膨張（無拘束）時の場合、体積 l^3 が熱膨張の結果 l'^3 に変化したとする。その時のひずみは、 $\frac{l'}{l} - 1$ である。一軸ひずみ拘束時の場合も、体積 l^3 が熱膨張の結果 l'^3 に変化したと仮定する。一辺を l に拘束することにより他辺は、 $\sqrt{\frac{l'^3}{l}}$ になり、そのひずみは、 $\frac{\sqrt{\frac{l'^3}{l}} - l}{l} - 1$ になる。同様に、二軸ひずみ拘束時の場合、二辺を l にひずみ拘束することにより他辺は $\frac{l'^3}{l^2}$ になり、そのひずみは、 $\frac{\frac{l'^3}{l^2} - l}{l} - 1$ になる。

図-15に、この概念を仮定した非拘束方向のひずみの予測値と実験値を示す。これらによると、予測値は実験値とよく適合している。

4. 結論

本研究の範囲内で以下のことが結論される。

(1) 温度上昇時 (20~100°C)における多軸ひずみ拘束下のコンクリートの熱応力は、緩和剛性率を用いて算出した応力緩和を考慮することにより、ある程度推測できる。しかし、この補正のみではひずみ拘束方向の応力減少は説明できない。

(2) 昇温時、多軸ひずみ拘束下のコンクリートの非拘束方向のひずみは、「多軸ひずみ拘束下のコンクリートの体積膨張が、無拘束下のそれに等しいという条件」から算出されるひずみに等しい。

今後は、コンクリートの塑性挙動を含めた考察や、シールしたコンクリート供試体を使用した実験も必要であると考えられる。

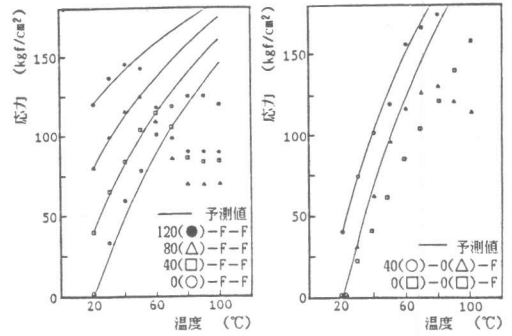


図-13. 応力緩和を考慮した一軸、二軸ひずみ拘束方向の熱応力の予測値と実験値の比較

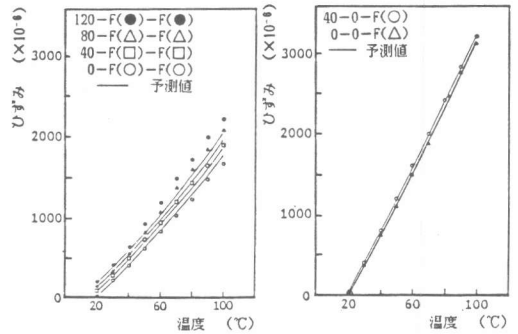


図-15. 一軸、二軸ひずみ拘束時の非拘束方向のひずみの予測値と実験値の比較

謝辞 本研究は、文部省科学研究費補助金（試験研究・一般研究）により行なったものである。共同研究者の本学 大岸佐吉、棚橋勇両博士、及び東京工業大学 仕入豊和博士に謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡島 河辺：“二軸圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張率” 第6回コンクリート工学年次講演会論文集 1984. PP.293~296
- 2) 岡島 河辺：“多軸応力下のコンクリートの熱膨張とクリープ” 第7回コンクリート工学年次講演会論文集 1985. PP.293~296
- 3) 神原 他：“高分子の物性I” 共立出版発行 1958. PP.253~268
- 4) 神原 他：“力学的性質II” 高分子実験学 共立出版発行 1983. PP.23~61
- 5) 谷川 他：“コンクリートの応力緩和特性とクリープ特性について” 第1回コンクリート工学年次講演会論文集 1979. PP.69~72.

図-2」の初期設定応力レベルが大きくなるにつれて応力緩和量も増加する傾向を示すことより、図-11を求めた。