「78] 高温下のコンクリートの応力緩和

正会員 〇岡島 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: 普通ボルトランドセメント
- 細骨材:川砂

粗骨材:川砂利

化学混和剂:AE剂

表-1に骨材の物理的性質と表-2にコンクリ -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 いといわれる鋼製プ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	虚	腿水塚	an at at		
	絶乾状態	表乾状態	(%) 粗粒	租权举		
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





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、図ー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): $\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z = 0r - 0r - 0r$ (kgf/cm²) 一軸ひずみ拘束: $\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z = 0r - 0r - 0r$ 40r - 0r - 0r 80r - 0r - 0r 120r - 0r - 0r二軸ひずみ拘束: $\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z = 0r - 0r - 0r$ 40r - 0r - 0r**Exa**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。

 $\varepsilon_{x} = -\frac{1}{E} (\sigma_{x} - \nu (\sigma_{y} + \sigma_{z})) + \alpha \Delta T$ $\varepsilon_{y} = -\frac{1}{E} (\sigma_{y} - \nu (\sigma_{z} + \sigma_{x})) + \alpha \Delta T \cdots \vec{z} \mathbf{1}$ $\varepsilon_{z} = -\frac{1}{E} (\sigma_{z} - \nu (\sigma_{x} + \sigma_{y})) + \alpha \Delta T$ $\oplus UU \vec{J} \partial \varepsilon E \varepsilon \vec{z} \vec{z}$ $E : \tau \nabla \vec{J} \vec{x} \qquad \nu : \vec{x} T \nabla \nabla t$ $\alpha : \delta \vec{k} \vec{k} \vec{x} \qquad \Delta T : \vec{k} \vec{k} \vec{y} \vec{k}$

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



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 3000 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。

緩和剛性率 E(t)=σ(t)/εο …式2 εο: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 at 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 at 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(P1→P1→P2→P2→P3 …)。この 360×X秒は、10℃/時の昇温速度による(P1→ P2、P2→P3 …)。また、曲線に乗り移る量は、 図-9により求められる(P1→P1、P2→P2 …)。

LimX ℃→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 80kgf/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 120~150kgf/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



(kgf/cm²



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

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℃)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 必要であると考える。

																							_
謝辞	本研究は	、文部	ß省	科学训	究費	補助金	(試到	洜研究	• 一般	(研究)	により	の行な	ったす	もので	ある。	共同口		の本学	大岸	佐吉、	棚橋勇	両博士、	
	及び東京	「工業フ	大学	住入	豊和	博士に	謝意な	と表す	ร.														
参考文	献																						
	1)岡島	河辺	• • :	二軸圧	缩応	力を受	けるこ	コンクリ	0 - F	の熱腸	《張率"	第	6回:	コンク	リート	工学	毦次 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#	热膨 張	長とクリ	リーブ"	第	7回:	コンク	リート	工学	手次講	演会論	文集	1985.	PP.293	~296	
	3)神原	他	: "i	高分子	の物	性1"	共	と出版す	龟行	1958.	PP.25	3~26	8										
	4)神原	他	•	力学的	性質	Ⅱ" 濱	分子家	実験学	共立	出版务	着行 1	983.	PP.23	3~61									
	5)谷川	他	: Г	"コン	クリ	- · トの	応力編	爱和特性	生とク	リーフ	「特性は	こつい	τ"	第1	回コン	クリー	- h I :	学年次	請演会	論文集	1979	. PP.69~	·72.
	⊠ - 2 J	の初期	用設定	を応え	ルベ	ルが大	きくか	よるに	つれて	応力線	観和量も	も増加	する作	頃向を	示すこ	とより)、図	-11を	求めた	•			