

論文

[1115] 多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープに及ぼす含水状態の影響

河辺伸二^{*1}・岡島達雄^{*2}・溝口雄一^{*3}・高山雄嗣^{*4}

1. はじめに

コンクリートが構造部材として荷重を受ける状態で使用され、かつ温度の上昇や下降の繰り返しを受ける状態で使用されることがある。荷重を受け、常温と異なる温度で使用されるコンクリートについては、コンクリートの多軸を含めた力学的性質だけでなく熱的性質も重要である。

筆者らは、あらかじめ乾燥したコンクリート供試体を用いて熱膨張とクリープについて検討を行った[1]。しかし、コンクリートの諸性質はその含水状態に影響を受けることが知られている。そこで昨年、定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープに及ぼす含水状態の影響について検討を行った[2]。ここでは、乾燥、気乾、湿潤状態のコンクリート供試体を用いて一軸の定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープについての実験を行い、また一軸の定圧縮応力を受ける温度上昇時のひずみを予測している。

今回はさらに、三軸を含む多軸定圧縮応力を受けるコンクリートについて検討する。コンクリートを乾燥、気乾、湿潤の3種類の含水状態にして、それぞれ多軸を含む定圧縮応力下の状態に保持し、温度上昇時(20℃から100℃)と温度下降時(100℃から30℃)のコンクリートのひずみを求める。また、それぞれの含水状態の一軸定圧縮応力を受けるクリープ量より、「温度時間換算則[3]」を用いて任意温度のクリープ量を算出する。そして、温度上昇時の予測クリープ量を算出し、多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみを予測する。

これらの結果は、熱源のある建物の安全及び合理的な設計に貢献できると考えられる。また、日射を受けるコンクリート構造物や、その仕上げに発生するひずみや応力を解析する資料となると考えられる。

2. 実験方法

2.1 供試体の作製

(1) 供試体の形状

供試体は、図-1に示す113 mm角の立方体コンクリートの各稜を、5 mm面取りした形状の面取立方供試体とする。供試体の寸法精度を高くするために、特別の鋼製型枠を用いて作製する。温度測定用のT型熱電対を、供試体の上、中、下の3ヶ所に埋設する。

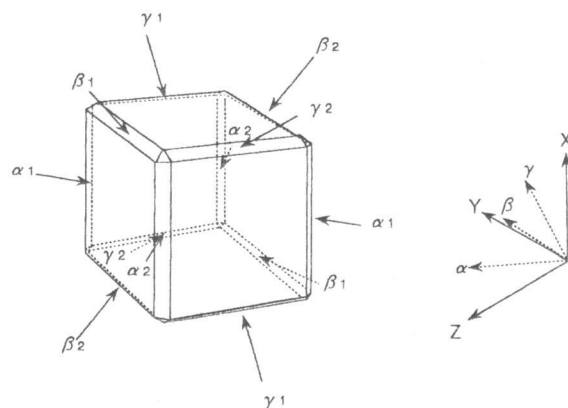


図-1 面取立方供試体と変位計取り付け方向

(2) 使用材料と調合

本実験の使用材料を以下に示す。

- *1 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科、工博(正会員)
- *2 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科、工博(正会員)
- *3 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻
- *4 名古屋工業大学 工学部社会開発工学科

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を、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、以下それぞれの含水状態の供試体を作製する。

- ・乾燥状態 : 3ヶ月間水中養生後1週間気中養生し、6時間60℃の乾燥炉内におき、その後3日間乾燥炉内で105℃乾燥させ、含有水分を放出させる。
- ・気乾状態 : 3ヶ月間水中養生後、1週間気中養生する。
- ・湿潤状態 : 3ヶ月間水中養生後、表面の水を拭う。

載荷の偏心を防ぐために、脱型後3週間ほどで面取立方供試体の打ち込み面を研磨した。

2.2 ひずみ測定方法

図-1 に示す面取立方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付ける。そして α 、 β 、 γ 方向から求めたひずみ ϵ_α 、 ϵ_β 、 ϵ_γ を、式(1)に代入してX、Y、Z方向のそれぞれのひずみを求める。

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_\alpha \\ \epsilon_\beta \\ \epsilon_\gamma \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.3 載荷方法

実験に用いた三軸圧縮引張試験機を、図-2に示す。この試験機は、供試体を同時に直交3方向に圧縮力と引張力を加えることができる。一方向の反力フレームは直径120mmの4本の鋼棒で構成されており、試験機全体の剛性は高い。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、端面摩擦による拘束を除くため、鋼製ブラシ載荷板を使用した。荷重の値は、ロードセルの出力により検出する。

2.4 加熱方法

3方向6個のブラシ載荷板に、バンドヒーター(500w×2)を取り付け加熱した。また供試体に有害な熱応力を生じさせないようにするため、温度制御は供試体に埋設した熱電対の温度に基づき、昇温速度が毎時10℃になるように調整した。供試体を加熱する際、熱が三軸圧縮引張試験機

表-1 骨材の物理的性質

	Maximum size of aggregate (mm)	Water absorption (%)	Specific gravity (oven dry)	Fineness modulus (%)	Weight per unit volume (kg/m ³)
Fine aggregate	5	1.67	2.50	2.61	—
Coarse aggregate	20	1.25	2.58	7.05	1556

表-2 コンクリートの調合表

Slump (cm)	Air content (%)	Water cement ratio (%)	Maximum size of aggregate (mm)	Sand aggregate ratio (%)	Unit weight (kg/m ³)				
					Water	Cement	Sand	Gravel	Admixture
15	4	57	20	42.7	174	305	725	1027	0.06

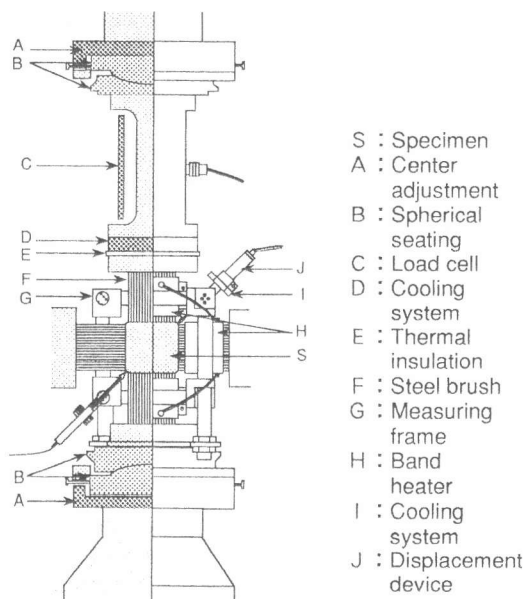


図-2 三軸圧縮引張試験機

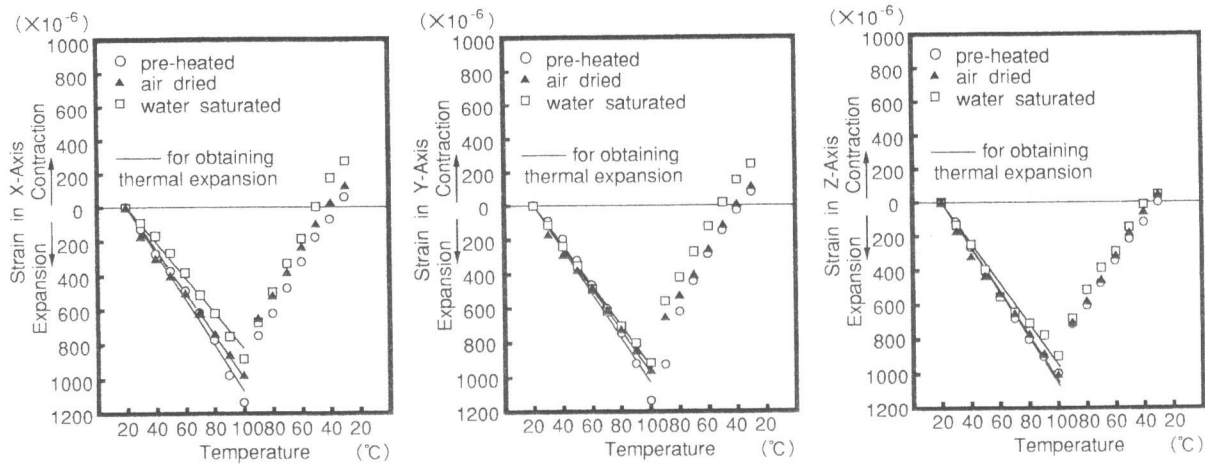


図-3 無応力状態のひずみと温度の関係

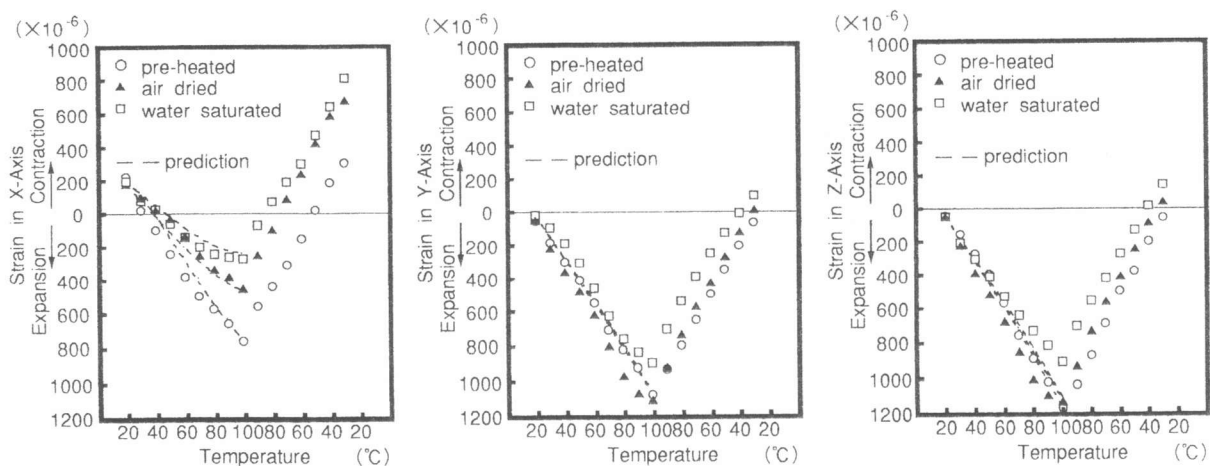


図-4 一軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

に伝わるのを防ぐために断熱板をブラシ載荷板と試験機の間に取り付け、さらにロードセルを保証温度以下に保つために水冷式冷却用ステンレス製円盤を断熱板とロードセルの間に挿入した。また、変位計にも冷却用カバーが取り付けられている。

2.5 実験内容

(1) 無応力状態及び多軸定圧縮応力を受けるコンクリートのひずみ測定

最初に、コンクリートの応力度強度比が次の状態となるように載荷する。

	X軸-Y軸-Z軸		X軸-Y軸-Z軸
無応力状態	: 0 - 0 - 0	二軸定圧縮応力下:	1/3 - 1/3 - 0
一軸定圧縮応力下:	1/3 - 0 - 0	三軸定圧縮応力下:	1/3 - 1/3 - 1/3

そして、この定圧縮応力状態を保ちながら、それぞれ乾燥、気乾、湿潤の3つの含水状態のコンクリートを20℃から100℃まで昇温し、その後30℃まで降温させ、この間10℃おきにひずみを測定する。なお、供試体はノンシール状態とする。また、ここに応力度強度比の1/3は、コンクリートの長期許容圧縮応力度が設計基準強度の1/3であることを念頭においた。

(2) クリープ実験

乾燥、気乾、湿潤の3つの含水状態のコンクリートを、各一定温度20、60、100℃にする。次

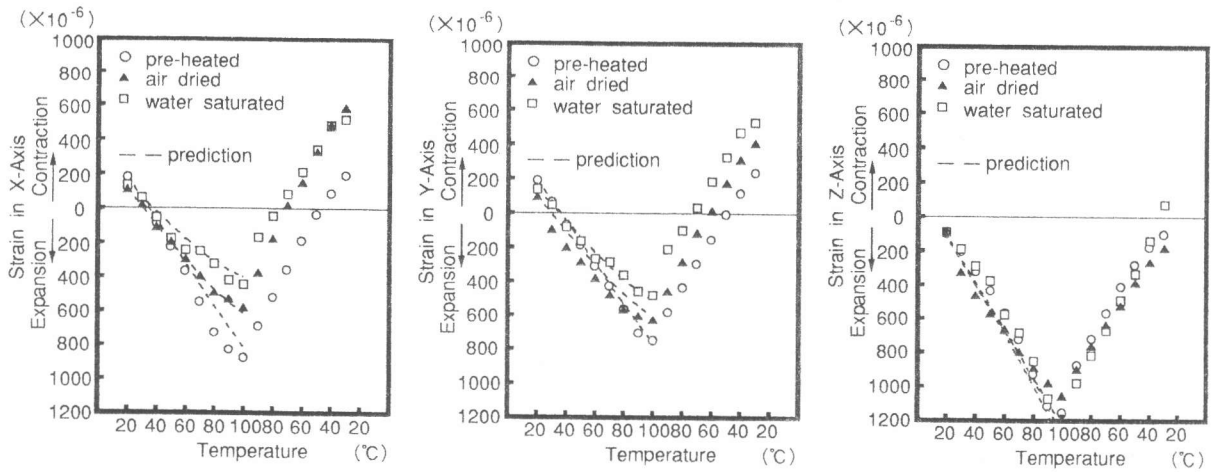


図-5 二軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

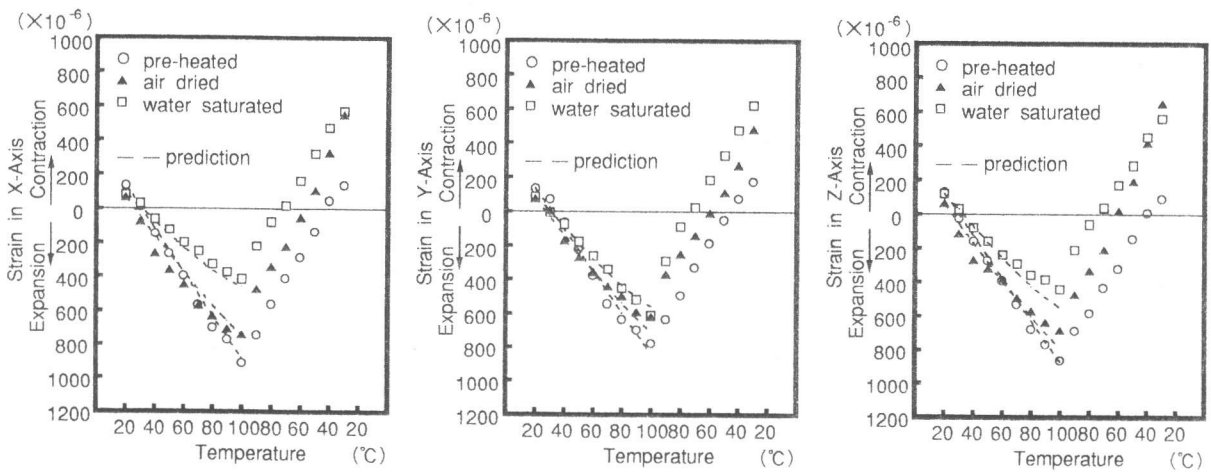


図-6 三軸定圧縮応力下のひずみと温度の関係

にそれぞれの一定温度において、応力度強度比で1/3の一軸定圧縮応力を載荷し、8時間ひずみを測定する。

3. 実験結果および考察

3.1 無応力状態及び多軸定圧縮応力を受けるコンクリートのひずみ測定の結果

図-3に無応力状態の、図-4、図-5および図-6に、一軸、二軸、三軸定圧縮応力を受けるコンクリートのひずみと温度の関係を示す。20°Cのひずみは載荷時の瞬間弾性ひずみである。

図-3より、温度上昇時は気乾と湿潤状態のコンクリートの温度に対するひずみの増分は、乾燥状態の場合の増分より小さいことが分かる。あらかじめ乾燥してあるコンクリートは比較的ひずみの増分が一定となる。気乾と湿潤状態のコンクリートは、温度上昇に伴いコンクリートが乾燥し、乾燥収縮の影響のためひずみの増分が小さくなると思われる。また、温度下降時の収縮量の増分はどの含水状態の場合もほぼ同じである。これは100°Cまでの昇温により気乾と湿潤状態の供試体の含水量が低下し、乾燥収縮の影響が小さいためと思われる。

図-4、図-5および図-6から、多軸定圧縮応力を受ける場合、気乾と湿潤状態のコンクリートの温度上昇時の温度に対するひずみの増分は、乾燥状態の場合のひずみの増分より小さいことが分かる。これは定圧縮応力により生じたクリープと温度上昇により生じた乾燥収縮の影響と

思われる。また温度下降時の収縮量の増分は、どの含水状態の場合もほぼ同じである。これは100℃までの昇温により気乾と湿潤状態の供試体の含水量が低下したため、温度下降時の乾燥収縮が小さいことと、温度下降時はクリープが生じにくいことによると思われる。

図-3と、図-4、図-5および図-6を比較すると、多軸定圧縮応力を受ける場合、温度上昇時の乾燥状態のコンクリートの温度に対するひずみの増分は、無応力状態の乾燥状態のひずみの増分と変わらない。これは乾燥状態の場合、応力度強度比で1/3程度の低い定圧縮応力が作用しても、発生するクリープの影響が無視できるほど小さいことが分かる。これに対し、気乾と湿潤状態のコンクリートの温度に対するひずみの増分は、無応力状態のそれぞれのひずみの増分より小さい。これは、気乾と湿潤状態の場合は、定圧縮応力により生じたクリープの影響が大きく、無視できないものと推定できる。温度に対するひずみの増分の低下を比べると、乾燥収縮の影響よりクリープの影響の方が大きいことが分かる。また温度下降時の傾きはどれもほぼ同じである。これは、温度下降時は乾燥収縮やクリープの影響が小さいためと思われる。

なお表-3に100℃のひずみと20℃のひずみの差を示す。この表よりも以上のことが言える。

表-4に実験前と実験後の重量の変化を示す。湿潤、気乾、乾燥の順に、供試体の重量は減少していることが分かる。また、定圧縮応力にかかわらず供試体の重量はほぼ同じ割合で減少していることが分かる。

3.2 クリープの実験結果

図-7に乾燥、気乾、湿潤状態のコンクリートの各温度のクリープ実験の結果を示す。この図より湿潤、気乾、乾燥の順に含水量が大きいほど、また温度が高いほどクリープ量が大きいたことが分かる。表-5に実験前と実験後の重量の変化を示す。湿潤、気乾、乾燥の順に、また温度が高いほど供試体の重量は減少していることが分かる。

4. 多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみの予測

多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみを測定した結果、乾燥状態の場合

表-3 100℃のひずみと20℃のひずみの差

expansion ($\times 10^{-6}$)	Change of strain : strain(100℃)-strain(20℃)		
	pre-heated	air dried	water saturated
free expansion	1136	978	882
uni-axial stress	980	630	465
bi-axial stress	1058	694	575
tri-axial stress	1042	804	496

表-4 実験前と実験後の供試体の重量変化

Stress (X-Y-Z)	Change of weight (g)		
	pre-heated	air dried	water saturated
0-0-0	1.7	-45.0	-72.4
1/3-0-0	0.5	-61.2	-84.2
1/3-1/3-0	1.4	-46.3	-77.8
1/3-1/3-1/3	1.9	-49.5	-74.8

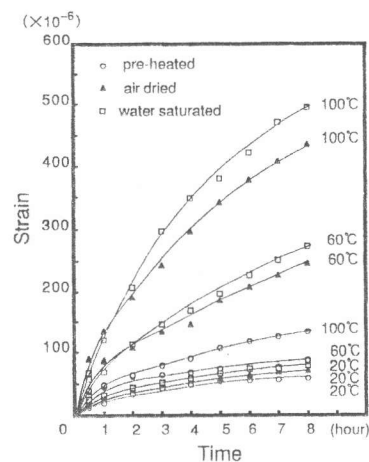


図-7 クリープ実験の結果

表-5 クリープの実験前と実験後の供試体の重量変化

Temperature (℃)	Change of weight (g)		
	pre-heated	air dried	water saturated
20	1.7	-2.8	-3.5
60	0.5	-25.5	-39.0
100	0.1	-81.3	-142.5

は、応力度強度比で 1/3の定圧縮応力を受けるひずみにはクリープの影響を無視できるとした。しかし、気乾、湿潤状態の場合は、応力度強度比で 1/3の定圧縮応力により生じるクリープの影響は無視できないと推定した。そこで、各含水状態とも一定温度におけるクリープ量から、「温度時間換算則 [3]」を利用して温度上昇時のクリープ量を算出し、これを用いて多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみを予測する。

表-6 温度上昇時の予測クリープ量

Prediction of creep ($\times 10^{-6}$ kgf/cm ²)	Temperature (°C)								
	20	30	40	50	60	70	80	90	100
pre-heated	0	0.22	0.41	0.47	0.69	0.76	0.89	1.07	1.33
air dried	0	0.40	0.67	1.01	1.45	2.00	2.62	3.40	4.35
water saturated	0	0.56	0.88	1.32	1.69	2.42	2.97	3.94	4.95

クリープ実験の結果から「温度時間換算則」を用いて、表-6に示す応力度強度比で 1/3の一軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時の予測クリープ量 (ϵ/σ) を求めた [2]。

次に、定圧縮応力を受ける場合、コンクリートの温度上昇時のひずみ ϵ は、無応力状態の温度上昇時のひずみを ϵ^t 、載荷時の瞬間弾性ひずみを ϵ^e 、クリープによるひずみを ϵ^c 、とすれば、式 (2) で表せられると考える。ただし、無応力状態の温度上昇時のひずみは、熱膨張ひずみに乾燥収縮ひずみを加えたものとする。

$$\epsilon = \epsilon^t + \epsilon^e + \epsilon^c \quad (2)$$

非載荷方向及び多軸定圧縮応力のひずみの予測には、静弾性ポアソン比とクリープポアソン比が等しいと仮定し、また重ね合わせの原理を用いる。図-4、図-5および図-6に、多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの温度上昇時のひずみの予測値を点線で示す。これより、気乾と湿潤状態のコンクリートにおいて、応力度強度比で 1/3の多軸定圧縮応力を受ける温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮する必要があることが分かる。

以上より、応力度強度比で 1/3の定圧縮応力を受ける場合、気乾と湿潤状態のコンクリートの温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮に入れるのがよく、乾燥状態のコンクリートの温度上昇時のひずみの予測にはクリープを考慮しなくてもよいことが分かる。またそれぞれの状態の温度上昇時のひずみの予測は、式 (2) を用いて表すことができる。

5. 結論

乾燥、気乾、湿潤状態の各含水状態のコンクリートにおける、多軸定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープについて、本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 無応力状態及び多軸定圧縮応力下においては、含水量が大きいコンクリートほど温度上昇時のひずみの増分が小さくなる。
- (2) 多軸定圧縮応力下の温度下降時の収縮量は無応力状態のそれにほぼ等しい。
- (3) 温度上昇時のひずみの予測は、式 (2) を用いて表すことができる。

参考文献

- 1) 岡島達雄、河辺伸二、岩下恒雄、大岸佐吉：多軸応力下のコンクリートの熱膨張とクリープ、日本建築学会構造系論文報告集、第309号、pp.1~9、昭和63年9月
- 2) 河辺伸二、溝口雄一、岡島達雄：定圧縮応力を受けるコンクリートの熱膨張とクリープに及ぼす含水状態の影響、コンクリート工学年次論文報告集、VOL. 15、NO. 1、PP. 549~554、平成5年6月
- 3) 大岸佐吉：コンクリートのレオロジー挙動に関する研究、昭和46年12月