

[44] 立方体コンクリートの高温多軸圧縮クリープの研究 (30°~200°C)

正会員 ○大 岸 佐 吉 (名古屋工業大学)
 正会員 小 野 博 宣 (中部工業大学)
 正会員 棚 橋 勇 (名古屋工業大学)

1. まえがき

コンクリート構造物が一方のみから外力を受けることは稀であり、一般には複数方向から外力を受ける。コンクリートの強度と変形の研究は過去において単軸荷重の場合に集中しており、また数少ない高温多軸クリープの諸研究^{1, 9~13)}も80°C以下に関するものが多い。200°C以上を対象とした筆者^{2, 5, 8)}の僅かな研究があるのみで、高温クリープ特性は未だ不明である。本研究は30~200°C間の立方体コンクリートに一軸、等二軸、等三軸の圧縮力を作用したクリープ実験からコンクリートの高温粘弾性を調らべ「温度・時間換算則」を検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体の作成 普通ポルトランドセメントを使用。コンクリート供試体の調合を表1に示す。細・粗骨材の粒径、FM等は同表の脚注を参照。供試体は10cm立方体で、その中心部に2方向にカールソン型ひずみ計を埋設し、材令28日まで20°C水中養生した。材令29日に60°C温水中で6時間水和を促進した。クリープ試験は湿潤と乾燥の2条件とし、後者の供試体は養生後105°Cで3日間乾燥した。ついで全供試体は厚み0.4mmの銅箔で包まれ、継目を銀ろう付により密封した。高温下試験中の水分放中による乾燥収縮を妨ぐためである。

2.2 クリープ実験方法 荷重と試験温度の条件は表3に示す如く、一軸、等二軸、等三軸圧縮の三形式で、クリープ荷重はすべて125 kgf/cm²の一種類とし試験温度は湿潤コンクリートの場合30, 60, 85, 95°Cの4段階、完全乾燥供試体では

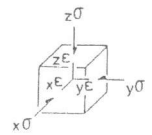
表1 コンクリートの調合

W/C (%)	S/A (%)	Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Slump (cm)
70	58	305	213.5	1033	747	20.9

C: ordinary portland cement, $\rho=3.16$
 S: Ohi river sand, under 5mm, $\rho=2.63$, FM=2.71
 G: Ohi river gravel, under 15mm, $\rho=2.66$, FM=7.00

表2 試験コンクリートの強度と弾性係数

Specimen size (cm)	Age (days)	σ_c	E_i	$E_{1/3}$
		(kgf/cm ²)	(10 ⁵ kgf/cm ²)	(10 ⁵ kgf/cm ²)
10 ϕ x20	28	248	2.6	2.5
	130	310	3.1	2.9
10x10x10	132	386	3.5	3.3



30~200°C間で6段階とした。試験温度、荷重制御、ひずみ観測は自動

制記録方式によった。荷重装置の断面を図1に示す。

クリープ試験の平均材令は132日である。この材令でのコンクリート強度を表2に示す。歪は10⁻⁵秒間観測。

3. 実験結果

図2は一軸圧縮応力下の荷重方向(Z)の全ひずみをも時間に対して示したものである。図3は二軸等圧縮応

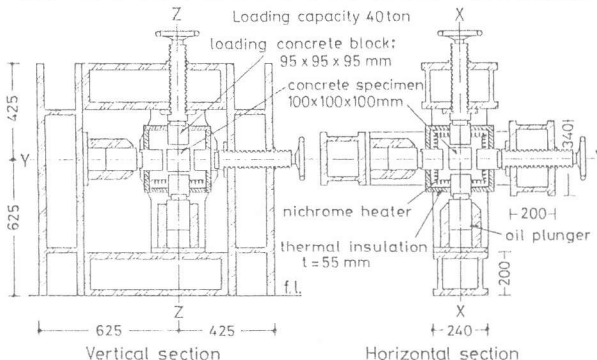


図1 立方体用高温多軸圧縮クリープ載荷装置

表3 多軸圧縮クリープ試験条件(応力、温度、歪計)

Compressive load	Stresses (kgf/cm ²)			Temperature (°C)							Gauge disposition					
	$z\sigma$	$y\sigma$	$x\sigma$	un-predryed			predryed*				zE	yE	xE			
uni-axial	125	0	0	30	60	85	95	30	60	95	110	140	200	1	1	0
bi-axial	125	125	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0	1
tri-axial	125	125	125	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

* Predryed at 105°C during 3 days.

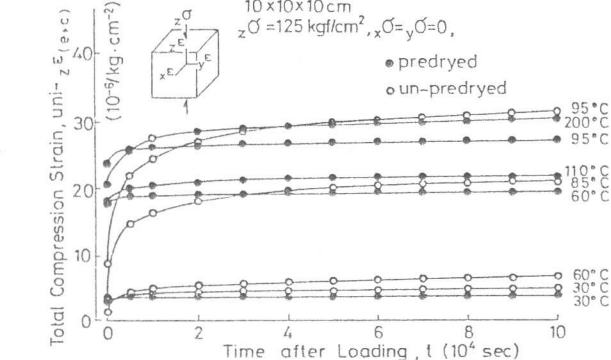


図2 一軸圧縮クリープひずみ曲線

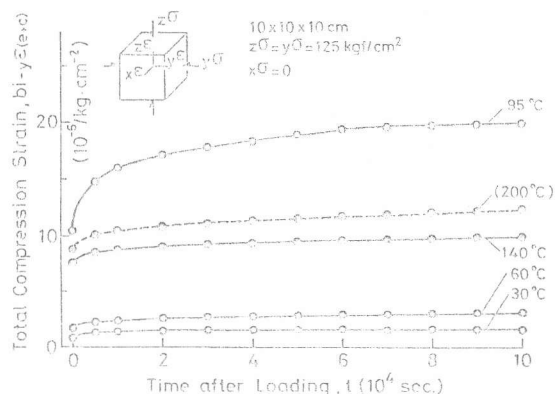


図3 二軸等圧縮クリープひずみ曲線

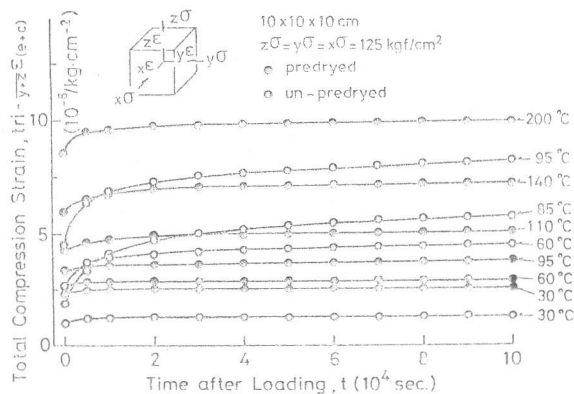


図4 三軸等圧縮クリープひずみ曲線

方下の載荷2方向の平均の全ひずみを示す。図2と図3ではともに無荷重方向の引張りクリープひずみの図示を略した。図4は三軸等圧縮の載荷2方向の平均全ひずみを示す。三者を対比するとき、同一の温度と応力下で載荷軸数が増すほどひずみが小となること、また湿潤コンクリートと乾燥コンクリートの2群では温度と応力が同一でもひずみに大きな差があり前者が大であること、しかし各群の間では概ね高温ほどひずみが大であることがわかる。本実験でのクリープ荷重 125 kgf/cm^2 は立方体一軸圧縮強度 386 kgf/cm^2 の 0.323 倍に相当する。

4. 分析と考察

4.1 粘弾性の温度依存性 図2～図4のクリープ観測結果に Burgers モデルを適用して、コンクリートの瞬間弾性 E_M 、遅延弾性 E_R 、純流動粘性係数 λ_M および遅延流動の粘性係数 λ_R を求めた。この4つの粘弾性係数の温度依存性を図5と図6に示す。前者は一軸圧縮クリープ実験から、後者は三軸等圧縮クリープ実験より求めた結果である。四係数は湿潤と乾燥の両状態で値は大きく相違し、いづれも試験温度の上昇と共に減小する。乾燥状態コンクリートの E_M のみが湿潤のものより小である。これは予加熱乾燥により自由水を失ないコンクリー

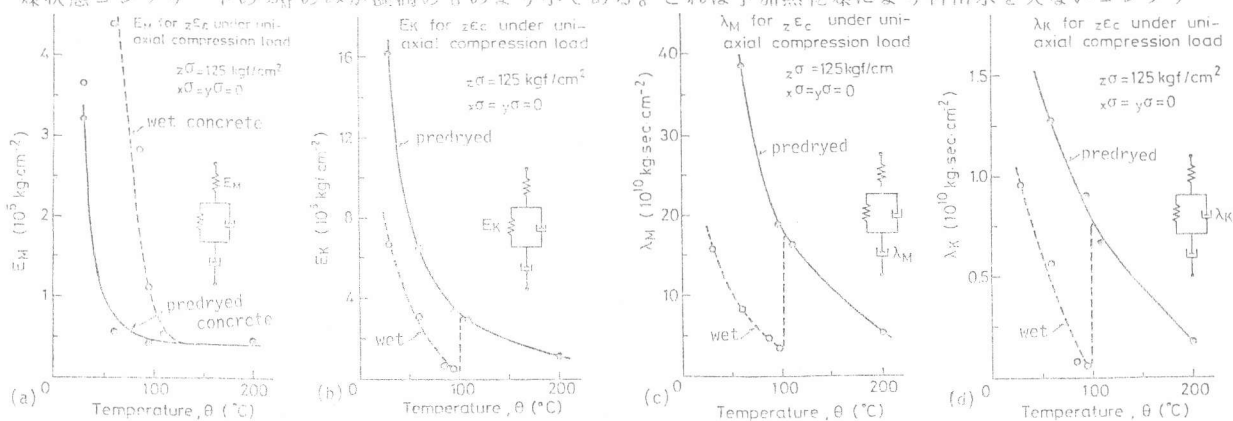


図5 一軸圧縮クリープにおけるコンクリートの弾性係数と粘性係数の温度依存性

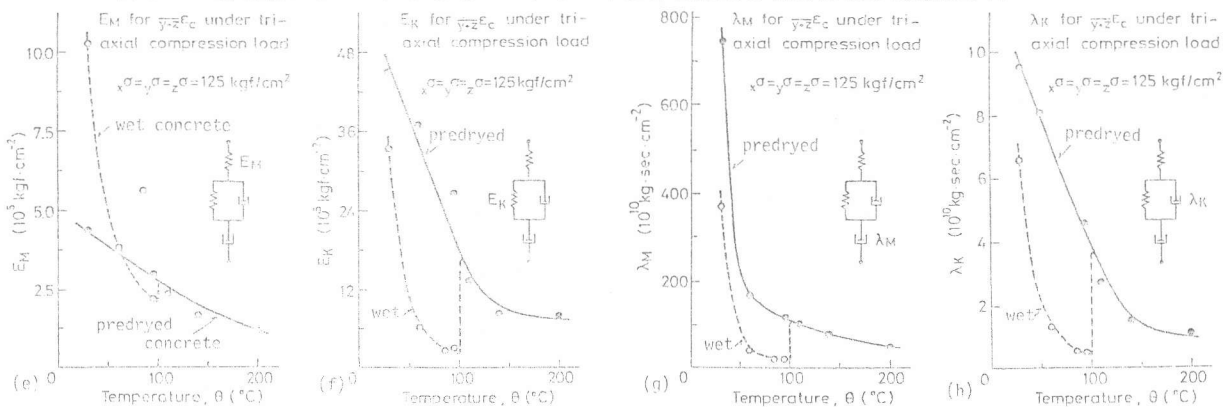


図6 三軸等圧縮クリープにおけるコンクリートの弾性係数と粘性係数の温度依存性

ト内部に空隙や微細亀裂が増大したためと考えられる。四係数は総て三軸載荷の方が一軸より大である。

4.2 活性化エネルギー

図5、図6の(c,d,g,h)に示した軸方向粘性係数 λ よりTroutonの三倍則を適用し通常のせん断応力による粘性係数 η を近似的に算出した。この η を絶対温度に対して示したのが図7と図8である。ここでコンクリートの粘性係数にAndradeの粘度式(2)を適用することを試みる。

$$\lambda = 3\eta \quad (1)$$

$$\eta = A \cdot e^{U/RT} = A \cdot e^{B/T} \quad (2)$$

ここにA: 常数、U: 活性化エネルギー、R: ガス常数(1.986 cal/mol)、T: 絶対温度、 $B = U/R$ 、式(2)を書きかえ、 $\ln \eta = \ln A + B(1/T)$ (3)

式(3)に示す如く実験値 $\ln \eta$ が(1/T)に対して直線であれば、コンクリートの粘性はアンドレードの式で表わし得ると理解される。ここでは図7と8の曲線が近似的に直線置換できるものとみなし、この直線の勾配Bからコンクリートのクリープの活性化エネルギーUを求めた。結果を表4に示した。これらの値は図のA-A'曲線について求めた。乾燥コンクリートの30~200°C、または湿潤コンクリート30~100°Cではそれぞれ近似的に直線とみなされるが、湿潤(30~100°C)から乾燥(100~200°C)を通ずるB-A'区分では、温度100°Cに不連続点があり、式(3)が適用できない。自由水の存否がクリープ現象つまりそれを司る活性化エネルギーに影響することが知られる。コンクリートの活性化エネルギーはまだ良くわかっていないが、表4の値は水分子の活性化エネルギーに近い値なので、自由水と結晶水の水分子などがコンクリートのクリープに大きく関与していると推定される。

4.3 温度時間換算則の検討

この原理はAlfrey¹⁴⁾により提唱されたもので「換算変数法」

表4 コンクリートのクリープの活性化エネルギー

	uni-axial	tri-axial
η_M	U=374 kcal/mol	U=317 kcal/mol
η_K	U=554 kcal/mol	U=397 kcal/mol

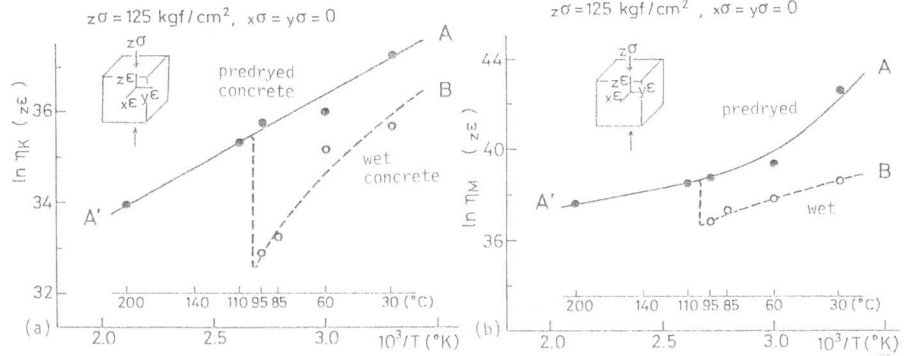


図7 一軸圧縮応力下のコンクリートの粘性係数の絶対温度依存性

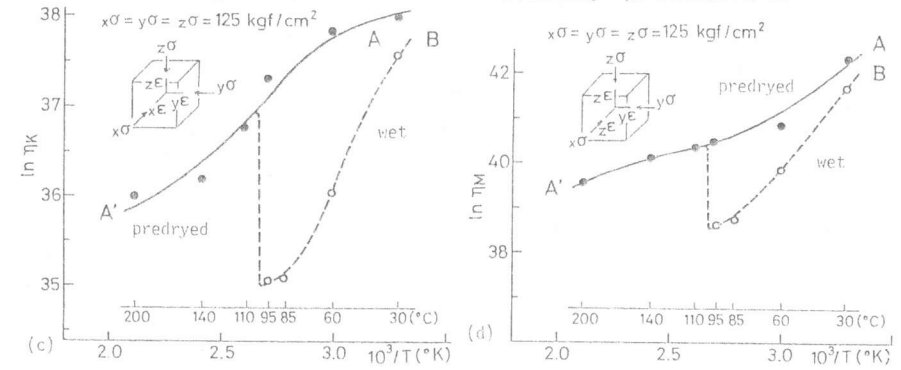


図8 三軸等圧縮応力下のコンクリートの粘性係数の絶対温度依存性

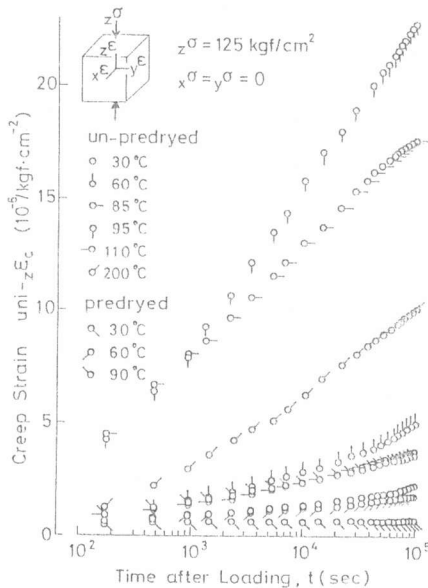


図9 一軸圧縮クリープ曲線群

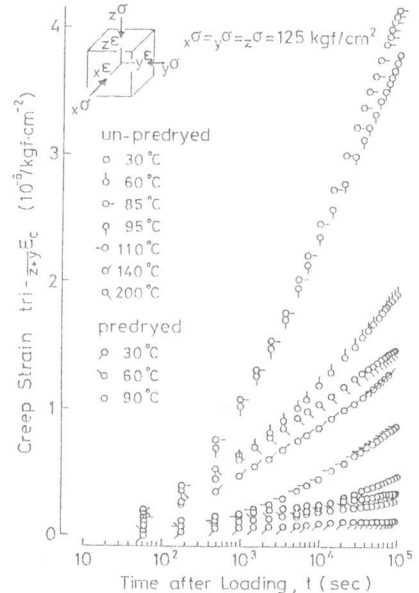


図10 三軸等圧縮クリープ曲線群

表5 一軸、等三軸圧縮クリープひずみの合成曲線をうる場合の移動係数 S_T .

Compressive load	Sliding factor	Temperature (°C)									
		un - predryed (wet)			predryed						
		30	60	85	95	30	60	95	110	140	200
uni-axial	S_T	1.00	33.0	19560.0		0.004	0.439	12.06	14.89		616.7
	$\log S_T$	0.00	1.52	4.29		-2.370	-0.358	1.082	1.173		2.79
tri-axial	S_T	1.00	536.8		10250.0	0.001	0.10	1.69	14.98	151.0	336.0
	$\log S_T$	0.00	2.73		4.01	-2.839	-1.007	0.221	1.175	2.179	2.53

と呼ばれており

B. Bresler ら (

ACI, P. 709,

Oct. 1973) は「タ

イムシフト原理」

といっている。

本方法は温度を

クリープ時間に

換算するもので

あり任意温度下 図11 一軸圧縮クリープひずみの合成曲線

の任意時刻のクリープを予

知する途を拓くものである。

まず図2より対数時間ク

リープ曲線の図9が、また

図4より同じく図10がえら

れる。図9の30°Cを基準温

度とし図11に示すクリープ

の合成曲線が得られた。図

12も同じく図10からの合

成曲線である。図11の合成曲線を作成するのに図9の各温度階の曲線を右方に平行移動させた量、即ち「移動

係数 S_T 」の値を表5に示す。この S_T の温度依存性は図13と14に示す如くであり一軸と三軸とがほぼ同一値である。

5. 結 論

1) コンクリートの弾性係数と粘性係数は高温ほど小であり、三軸載荷の方が一軸載荷より大である。(図6)

2) 弾性と粘性値は自由水の存否で大きく異なり、 E_M 以外は乾燥の方が湿潤より大で100°Cで不連続を示す。

3) クリープの活性化エネルギーは一軸、三軸載荷とも3~5 (kcal/mol) で水分子がクリープに関与する。

4) 一軸、三軸圧縮クリープひずみに関するマスター曲線が存在し、熱レオロジー的に単純な物質である。

5) コンクリートの「温度・時間換算則」は載荷軸数にかかわらず適用でき、クリープの予知に有効である。

謝辞 本研究は昭和57・58年度文部省科学研究補助金によったものである。実験には藤井技官、学生酒井君の

記号

- A : constant of Andrade's formula
- B : value of gradient in curve ($\ln \eta - 1/T$)
- E_M, E_K : elastic modulus of Max. or Kel.-model
- R : gas constant (=1.986 cal/°K)
- S_T : shift time in master creep curve
- T : elevated temperature T(°K)
- U : activation energy, under normal stress
- λ_M, λ_K : coefficient of viscosity in Max., Kel.-Model
- η_M, η_K : coeffic. of visco. in Maxwell or Kelvin-model under shear stress

参考文献

- 1) Ohgishi, S. and H. Ono, Trans. of JCI, Vol.2 pp.179-186 (1980).
- 2) Ohgishi, S. M. Wada and etc., Trans. of AIJ, 285 pp.1-13 (1979).
- 3) Ohgishi, S. and M. Mada, Trans. of AIJ, 269 pp.39-48 (1978).
- 4) Ohgishi, S. K. Kishitani and etc., Trans. of AIJ, 262 pp.1-11 (1977).
- 5) Ohgishi, S. M. Wada and H. Ono, Proc. of ICM-3, vol.2 pp.109-119 (1979).
- 6) Ohgishi, S., Trans. of AIJ, 209, pp. 1-11, (1973).
- 7) Ohgishi, S., Trans. of AIJ, 197, pp.11-25, (1972).
- 8) Ohgishi, S., Trans. of AIJ, 187, pp. 9-18, (1971).
- 9) Jundi, N., T. W. Kennedy and etc., ACI, SP-34, vol.2 pp.641-658 (1972).
- 10) McDonald, J. E., ACI, SP-34, vol.2 pp.735-768 (1972).
- 11) Hannant, D. J., Jour. of ACI, May pp.391-394 (1969).
- 12) York, G. P., ACI, SP-34, vol.1 pp.535-546 (1972).
- 13) York, G. P., ACI, SP-34, vol.2 pp.659-699 (1972).
- 14) Alfrey, T. and P. Doty, Jour. of Appy. Phys., vol.16, p.700 (1950).

助力を得た。付記して謝意を表わす。

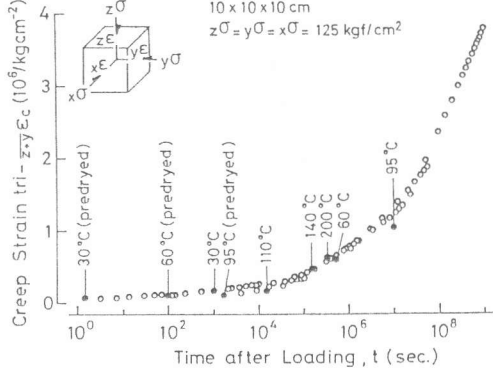
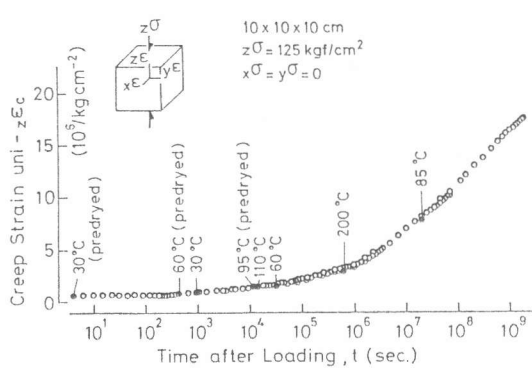


図11 一軸圧縮クリープひずみの合成曲線

の任意時刻のクリープを予

知する途を拓くものである。

まず図2より対数時間ク

リープ曲線の図9が、また

図4より同じく図10がえら

れる。図9の30°Cを基準温

度とし図11に示すクリープ

の合成曲線が得られた。図

12も同じく図10からの合

成曲線である。図11の合成曲線を作成するのに図9の各温度階の曲線を右方に平行移動させた量、即ち「移動

係数 S_T 」の値を表5に示す。この S_T の温度依存性は図13と14に示す如くであり一軸と三軸とがほぼ同一値である。

図12 等三軸圧縮クリープひずみの合成曲線

の任意時刻のクリープを予

知する途を拓くものである。

まず図2より対数時間ク

リープ曲線の図9が、また

図4より同じく図10がえら

れる。図9の30°Cを基準温

度とし図11に示すクリープ

の合成曲線が得られた。図

12も同じく図10からの合

成曲線である。図11の合成曲線を作成するのに図9の各温度階の曲線を右方に平行移動させた量、即ち「移動

係数 S_T 」の値を表5に示す。この S_T の温度依存性は図13と14に示す如くであり一軸と三軸とがほぼ同一値である。

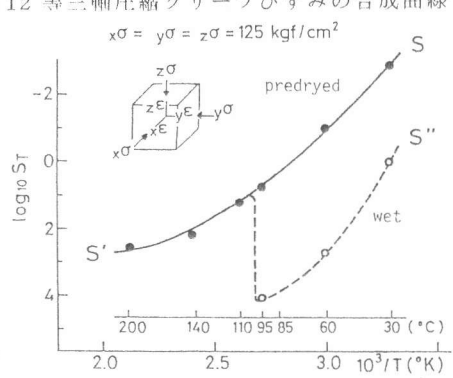
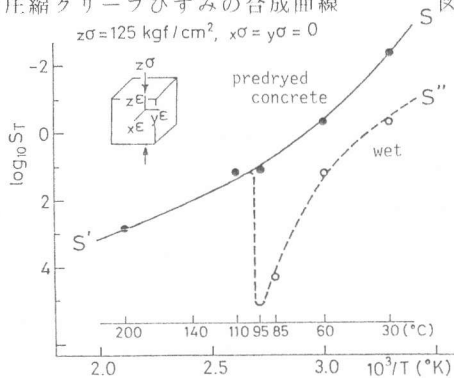


図13 一軸圧縮下 S_T の温度依存性

図14 三軸圧縮下 S_T の温度依存性