

高強度コンクリートの長期性状に関する研究 (その2)

—コンクリートの高温クリープ試験の結果—

高橋久雄 川口 徹

Study on Time-Dependent Behavior of High Strength Concrete (Part 2)

—Results of Creep Tests of Concrete at Elevated Temperature—

Hisao Takahashi Tohru Kawaguchi

Abstract

Uniaxial creep tests at 60°C were performed on highstrength sealed concrete specimens to evaluate the effects of elevated temperature under variable periods of high-temperature curing before loading.

The following observations can be made based on the results of these tests: (1) At elevated temperature the creep of concrete is higher than at room temperature. (2) Creep is greater when concrete is heated shortly before application of load than when it has been at the high temperature since early age. (3) At elevated temperature a larger portion of creep deformation occurs during the first few weeks of loading. (4) Strain recovery after unloading is influenced very little by temperature.

概 要

高温下におけるコンクリートのクリープの基本性状を調べるために、シールしたコンクリートについて、載荷前の高温養生期間を変えて、温度での一軸圧縮クリープ試験を行なった。

試験の結果、次のことがわかった。(1) 高温では常温に比べクリープが大きくなる。(2) 載荷前の高温養生期間が短いほど高温によるクリープの増加が大きくなる。(3) 高温によるクリープの増加は、載荷後の比較的短期間のうちに生ずる。(4) クリープ回復には、温度の影響はほとんどない。

1. はじめに

PCCV, PCR V の設計資料を得ることを目的として高強度コンクリートの長期性状に関する研究を継続して実施している^{1)~3)}。この報告は、高温(60°C)におけるコンクリートの一軸圧縮クリープ性状に関する試験の結果である。

PCCV, PCR V 等の原発施設に要求される高度の安全性を確保するためには、高温下のコンクリートのクリープ性状を考慮した設計解析を行なう必要がある。コンクリート材料の高温下のクリープ性状に関する研究は、PCR V の実用化が検討され始めた1960年頃から活発に行なわれるようになった。その結果、高温では常温よりクリープ量が大きくなるということは明らかになってはい

るが、まだその基本性状が充分解明されたとは言い難い。

この報告は、マスコンクリートを想定してシールした条件下の高温クリープについて、その影響因子と考えられる要因のうちで、特に、繰返しを伴う温度荷重による熱応力の応力再配分の問題との関連で重要となると考えられる載荷前の高温養生期間に着目し、加熱開始時期を変えてクリープの性状の比較検討を行なったものである。試験は、2つのシリーズについて行なった。シリーズ I は、載荷材令100日、シリーズ II は、載荷材令30日でクリープ試験を行なった。シリーズ II の試験は、シリーズ I の確認試験的な意味をもつもので、シリーズ I の試験で不十分であったデータをとれるよう計画した。今回の試験で得られた結果をもとに、既応の文献の結果と

照合しながら、高温クリープの基本性状について検討を加えた。

2. 試験の概要

2.1. 試験条件

試験は、表一に示す2つのシリーズで行なった。なお、シリーズIの試験では、当初計画の試験終了後同一試験温度(60℃)で、当初のコントロール用供試体を用いて、載荷材令365日でクリープ試験(載荷期間429日間、除荷後のクリープ回復測定期間41日間)を行なった。

シリーズ	使用したコンクリート			シールの時期	試験温度(℃)	加熱開始材令(日)	載荷材令(日)	載荷期間(日)	クリープ回復測定期間(日)	供試体の数*
	水セメント比(%)	粗骨材の質	標準養生材令4週強度(kg/cm ²)							
I	40	青緑色系石灰岩	514	打設直後	60	30 97	100	240	61	2(2) 2(2)
II	45	白灰色系石灰岩	481	1週間20℃水中養生後	60	10 28	30	88	14	1(2)** 1(2)**
					20	—				1(1)

*カッコ内はコントロール用供試体の数

**コントロール用供試体のうちの1体は、同一試験温度(60℃)での弾性係数の経時変化を測定するために用意した。

表一 試験条件

2.2. 使用材料とコンクリートの調合

使用したセメントは、中庸熟ポルトランドセメント、細骨材は富士川産天然川砂、粗骨材は石灰岩砕石である。細、粗骨材は、粒度調整を行なって使用した。混和剤には凝結遅延型分散剤を使用した。

コンクリートの調合は、圧縮強度が標準水中養生、材令4週で450 kg/cm²以上になるように試し練りにより各シリーズごとに表二のように定めた。

シリーズ	粗骨材の最大寸法(m/m)	目スランパ(cm)	目標空気量(%)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位水量(t/m ³)	セメント(kg/m ³)	細骨材(kg/m ³)	粗骨材(kg/m ³)	混和剤
I	20	10±1	4±1	40	40.5	166	415	678	1,056	415cc
II				45	41.5	150	333	745	1,115	333cc

(骨材は絶乾状態である)

表二 コンクリートの調合

2.3. 供試体の製作と養生

クリープ試験用供試体の形状は、15φ×40 cm シリンダーとした。供試体の成型には水平打込み型モールドを使用した。強度試験用供試体は、一般的な15φ×30 cm シリンダーを使用した。供試体のシールには、エポキシ樹脂と厚さ0.25 m/mの銅板を使用した³⁾。

シリーズIでは、コンクリート打込み、翌日、脱型直後にシールを行ない、シリーズIIでは、打込み翌日に脱型し、材令7日まで20℃水中養生を行ってからシールした。

高温養生を開始する前の供試体は、20±1℃の恒温室内で養生した。

2.4. 歪の測定方法

歪の測定は、主にダイヤルゲージによる検長250m/mのコンプレッソメーターで行なった。測定方法のちがいでによる応答を比較するため、シリーズIの試験では同一試験条件の2体の供試体のうち、1体にカールソン歪計(検長100 m/m)、残り1体に抵抗線式埋込みゲージ(検長80 m/m)、シリーズIIでは、各供試体に抵抗線式埋込みゲージをセットして軸方向歪の測定を行なった。

2.5. 載荷方法

クリープ試験用供試体への一定荷重の載荷は、公称100 kg/cm²の恒圧油圧発生装置と、油圧ラム付の加力フレームを組合せて行なった。供試体2体を直列にして一台の加力フレームで載荷した²⁾。

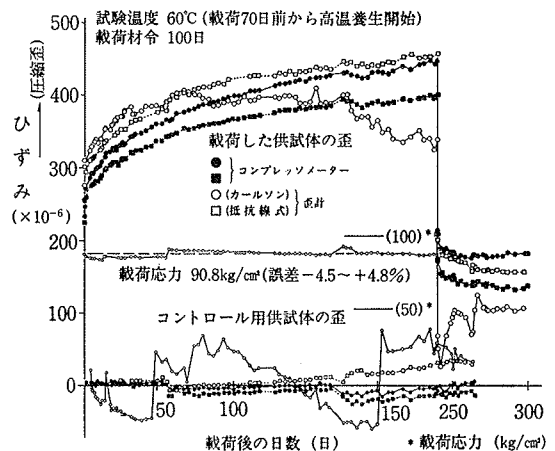
各加力フレームごとにロードセルを挿入して実載荷応力の検出を行なった。実載荷応力は、油圧ラムの摩擦損失により加力フレームごとに変化し、92.4~99.5 kg/cm²の範囲にあった。

3. 試験の結果

3.1. シリーズIの試験結果

シリーズIの試験のコンクリートの圧縮強度は、標準水中養生材令4週で514 kg/cm²であった。材令約1年(346日)でのクリープ試験と同じシールした条件の60℃、20℃の圧縮強度は、それぞれ651, 590 kg/cm²であった。加熱時期別に材令100日で載荷した後の総歪の動きをプロットしたものが、図一1, 2である。

これらの図から次のことがわかる。同一試験条件で2体ずつ供試体に載荷しており、コンプレッソメーターによる測定での2体の歪の動きの差は小さく安定している。一方、カールソン歪計、抵抗線式埋込みゲージで測定した歪の動きは、高温による影響のためかセンサーの断線による測定不能や、絶縁抵抗の劣化に伴うゼロドリフト等により測定値の信頼性が極めて乏しい結果になっている。この原因の一つは、歪計センサーのごく近い部分



図一1 シリーズ早期加熱の歪の動き

(センサーから1m程度)でリード線の接続を行っており、その接続部の防水が完全でなかったため、湿気の浸透でセンサーの劣化を促がしたと思われる。したがって、シリーズIIの試験では、接続箇所を設けないように、センサーから直接長いリード線をつけるようにした。

以上の理由で、結果の整理は、コンプレッソメーターによる測定値のみを採用した。

クリープ試験用供試体は、シールして水分ロスを防止しているにもかかわらず、コントロール用供試体に $20 \sim 60 \times 10^{-6}$ の収縮歪が認められる。これは水分ロスを伴う場合の乾燥収縮歪(drying shrinkage)ではなく、自生収縮歪(autogenous shrinkage)と呼ばれるものである。このような収縮歪は、他の研究でも報告されており^{7)~9)}その量も今回とほぼ同じである。

荷重した供試体にもこの自生収縮歪は生じているはずであるので、試験条件ごとの荷重した供試体の(弾性+クリープ)歪は、次のようにして求めた。つまり荷重した供試体とコントロール用供試体のそれぞれで測定した

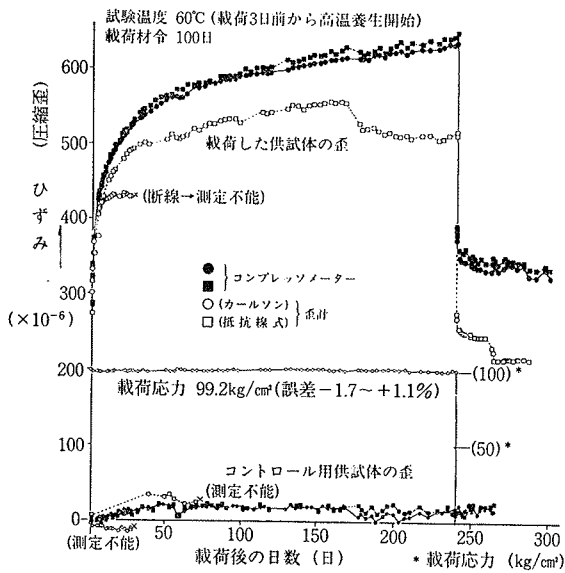


図-2 シリーズI直前加熱の歪の動き

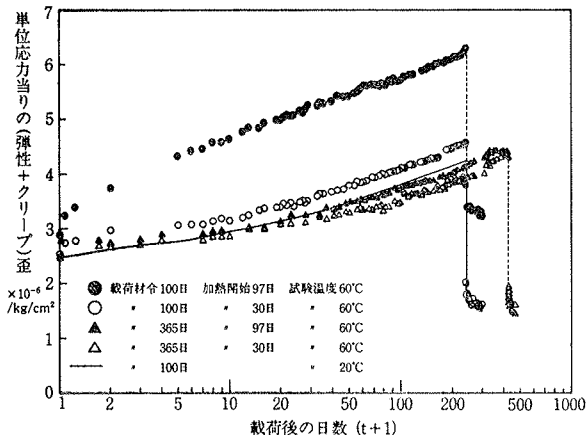


図-3 単位歪曲線(シリーズI)

歪の平均値を求めておいて、前者の歪から後者の歪を差引いた。この(弾性+クリープ)歪を荷重した応力の単位応力当りの歪で表わし、それを対数時間軸にプロットしたものが図-3である。なお、このシリーズの試験では、基準となる常温のデータはとっていないため、これまでで行なった常温の試験結果^{1)~3)}を総合的に判断し、図-3中の実線で仮定した。

3.2. シリーズIIの試験結果

シリーズIIの試験のコンクリートの圧縮強度は、標準水中養生、材令4週で 481 kg/cm^2 であった。クリープ試験用供試体と同じ条件で養生した供試体のクリープ試験の荷重時、除荷時の圧縮強度試験の結果を表-3にまとめた。この試験は、常温で行なったものである。シリーズIと同様に、荷重した供試体で測定した総歪に対して、コントロール用供試体の自生収縮歪を補正し、荷重した応力の単位応力当りの歪をプロットしたものが図-4である。なお、加熱時期別に、コントロール用供試体のうちの1体を使って求めた単位弾性歪の時間的な相対変化を図-5に示した。

このシリーズの試験の埋込みゲージとコンプレッソメーターの歪応答のちがいは、図-4、5に示す通りである。これをさらに細かく検討するため、同一供試体でのコンプレッソメーターによる測定値を基準にして、埋込みゲージによる測定値の比率を調べた。クリープ試験、強度試験および単位弾性歪の経時変化の調査で求めた単位弾性歪の比率のばらつき具合を示したものが、表-4

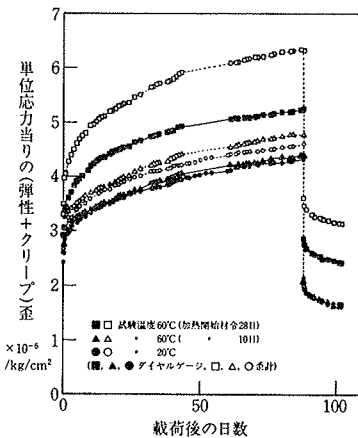


図-4 単位歪曲線(シリーズII)

養生方法	項目	17日	30日(荷重時)	35日	118日(除荷時)
20°Cシール養生	弾性係数	3.80	4.00	—	4.24
	圧縮強度	429	473	—	592
材令10日から60°Cシール養生(早期加熱)	弾性係数	3.95**	3.97	—	4.30
	圧縮強度	491**	522	—	565
材令28日から60°Cシール養生(直前加熱)	弾性係数	—	3.67*	3.82**	4.33
	圧縮強度	—	467*	511**	590

弾性係数... $\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$; 圧縮強度... kg/cm^2
*60°C養生材令2日目, **60°C養生材令7日目

表-3 強度試験の結果(シリーズII)

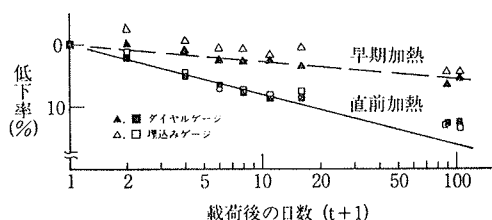
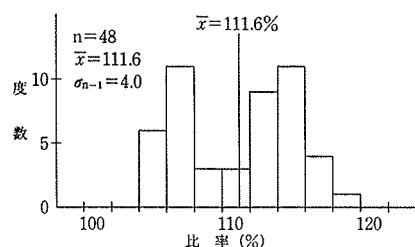


図-5 単位弾性歪の経時変化

(a)のヒストグラムであり、クリープ試験の載荷時、除荷時の弾性歪に対する比率と時間によって変化する歪に対する比率をまとめたものが表-4(b)



(a)単位弾性歪比率のばらつき

	弾性歪		時間依存歪	
	載荷時	除荷時	歪増分	歪回復
直前加熱	113	115	130	106
早期加熱	111	119	104	102
常温	109	108	103	116

(b)クリープ試験時の歪比率(%)

表-4 測定方法のちがいの比較 (歪計/コンプレッソメーター)

埋込みゲージでも絶縁、防湿が完全であれば、高温の場合でもかなり信頼性の高い結果が得られることがわかる。しかし埋込みゲージによる結果は、機械的に測定したものに比べ、全般にその応答が大きくなりがちである。しかも、その比率は供試体によって必ずしも一定していない。両者の測定原理のちがいから推察できるように、コンプレッソメーターによる機械的測定の方が測定値の信頼性は高いと判断される。従って、シリーズIと同様に、以後の検討はコンプレッソメーターによる測定値をもとに行なう。しかし、実構造物のモニタリング等で、機械的測定が困難な部分については、その応答特性をあらかじめ考慮した上で、埋込みゲージを有効に利用することは充分可能であると思われる。

4. 試験結果の検討

クリープ試験の試験温度、加熱時期の試験条件のちがいによる影響を検討するため、常温の結果を基準にして載荷時、除荷時の弾性歪特性の比較を表-5に、時間依存歪特性の比較を表-6にまとめた。

これまでに述べた結果と、表-5、6より次のことがわかる。

4.1. 弾性歪特性について

表-5より、シリーズI、IIの試験とも、高温時の単位弾性歪は、常温に比べて全般に大きい。特に載荷直前に加熱したものの載荷時単位弾性歪は、対常温比で20%程度大きくなり、同じ高温試験の早期加熱したものに比

べてもかなり大きい。同じことが、表-3のシリーズIIの載荷時の強度試験で求めた弾性係数にもあてはまり、直前加熱したものは、他の2者に比べて弾性係数が小さい。なお、ここで言う単位弾性歪と弾性係数は、互いに逆数の関係にあることに注意されたい。除荷時では、加熱条件のちがいによる単位弾性歪の差はほとんどなく、直前加熱したものの弾性係数の回復が顕著であることを示唆している。このことは図-5の単位弾性歪の経時変化の比較からもわかる。なお、除荷時の弾性係数は、試験温度によらず、全般に載荷時より大きくなった。

今回の試験では、高温の影響によるコンクリートの圧縮強度の顕著な低下は認められなかった。

4.2. 時間依存歪特性について

載荷中のクリープ歪の増分は、シリーズIの試験では加熱時期のちがいにかかわらず、常温に比べ高温の方が大きい。しかし、載荷材令の若いシリーズIIの試験の早期加熱したものは、常温と同程度か、それ以下の歪増分しか示さなかった。これは、表-3の強度試験の結果で早期加熱の載荷時の強度が常温より高くなっていることから推察して、早期加熱したものが、高温による促進養生の影響で水和度が熟したためによると解釈される。シリーズI、IIで常温に対する高温の比率を比較すると、載荷材令の古いシリーズIの方が全般に大きい。J. Komendant et al.⁹⁾も、載荷前の加熱条件が同じ場合、載荷材令が古くなるほど高温歪/常温歪の比率が大きくなることを指摘している。

高温では載荷前の加熱時期がクリープにおよぼす影響は特に顕著であり、載荷直前に加熱したもののほどクリープが大きくなっている。これは、シリーズI、IIに共通している。表-6で、期間別に歪増分を比較すると、載

試験のシリーズ	試験条件	載荷時		除荷時	
		単位歪 (×10 ⁻⁴ /kg/cm ²)	比率(%)	単位歪 (×10 ⁻⁴ /kg/cm ²)	比率(%)
シリーズI	直前加熱	2.891	118	-2.497	102
	早期加熱	2.530	103	-2.562	105
	常温	2.450	100	-2.270	93
シリーズII	直前加熱	2.917	120	-2.361	97
	早期加熱	2.643	108	-2.352	96
	常温	2.440	100	-2.282	94

表-5 クリープ試験の載荷時・除荷時の弾性特性の比較

試験のシリーズ	試験条件	歪増分 (×10 ⁻⁴ /kg/cm ²)				歪回復			
		載荷直後から21日まで		21日から除荷まで		載荷直後から除荷まで			
		歪増分	比率(%)	歪増分	比率(%)	歪増分	比率(%)		
シリーズI	直前加熱	2.193	305	1.232	114	3.425	190	-0.479	103
	早期加熱	0.903	125	1.168	108	2.071	115	-0.455	97
	常温	0.720	100	1.080	100	1.800	100	-0.467	100
シリーズII	直前加熱	1.598	136	0.720	101	2.318	123	-0.453	104
	早期加熱	1.003	85	0.765	108	1.768	94	-0.446	106
	常温	1.172	100	0.711	100	1.883	100	-0.427	100

表-6 クリープ試験の時間依存歪特性の比較

荷後の比較的短期間のうちにその影響が特に顕著に生ずることがわかる。たとえば、シリーズ I の試験で全載期間の歪増分に対する載荷後21日までに生ずる歪増分の割合は常温で40%であるのに対し、クリープの大きい直前加熱したものは64%とかなり高い。この現象は直前加熱したものの載荷時単位弾性歪が他より大きいことと共通する原因によるものと考えられる。また載荷後の時間の経過とともに加熱時期のちがいの影響は小さくなり、常温との比較でもそれほど顕著なちがいはあらわれていない。表-6, シリーズ I の載荷中の期間別の歪増分は、常温との比較で、載荷後21日までが直前加熱3.05倍, 早期加熱1.25倍であるのに対し、載荷21日後から除荷までは前者が1.14倍, 後者が1.08倍となっている。このことは、高温養生期間がある程度経過すると、載荷前の加熱開始条件のちがいが、および常温との差は、しだいに小さくなることを意味している。これは、図-3の載荷材令365日の高温クリープ試験で、加熱開始材令30日と97日とで、その結果にほとんど差がないことから確認できる。

表-6から、除荷後の歪回復特性の比較では、載荷後期の歪増分特性と同じように、加熱条件のちがいの影響はほとんどなく、高温と常温の比較でもほとんど差がない。このことから、他の報告³⁾⁵⁾⁹⁾にもあるように、クリープ回復は試験温度に関係しないと考えられる。これは、温度によってクリープが大きくなる成分は、非回復性の粘性流動的なクリープ成分であるということになる⁵⁾。

4.3. 他の研究結果との比較

今回の試験結果を客観的に位置づけるため、シリーズ I の試験結果を、比較的試験条件の似かよった前報の結果³⁾および国内外の著名な研究報告の結果^{6)~9)}と比較してみた。試験条件の比較をしたものが表-7であり、今回の結

果と、各文献の結果を同じ単位応力当りの(弾性+クリープ)歪で比較したものが図-6である。

詳細には試験条件、試験方法が異なるので断定はできないが、おおよそ次のようなことが推察できる。

河角他⁶⁾の試験以外は、すべて粗骨材に石炭岩を用いたものであり、常温の結果はそれぞれ非常に似かよっている。なお、河角他の結果も粗骨材のちがいの影響が初

今回のシリーズ I の試験	セメントの種類	W/C	W	C	スラブ厚	骨材	骨材量	供試体の数	試験方法	試験条件	測定方法	加熱条件	温度	載荷期間	載荷力	載荷時	
	(%)	(t/m ²)	(kg/cm ²)	(cm)	(mm)	(mm)	(kg/cm ²)	(個/cm ²)	(mm)	(mm)	(mm)	(℃)	(日)	(日)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	
今回のシリーズ I の試験	中層熱	40	166	415	10	20	清浄系石灰質	514	2 (15×40)	打設直後	ダイヤルゲージ	—	20	100	240	105.5	—
川口他(3)	中層熱	40	160	400	10	20	白系石灰質	585	1 (15×40)	打設直後	ダイヤルゲージ	—	20	100	214	105.5	—
河角他(6)	普通	40	137	343	5	40	川砂(砂+1)	445 (2.86)	2 (15×40)	打設直後	カルパン	—	20	96	584	90	—
J.E. McDonald et al. (7)	Type II	42.5	172	404	—	19	石灰質	519	1 (15×40)	1日後	—	—	23	105	294	42.2	—
T.W. Kennedy et al. (8)	Type II	42.5	172	404	5	19	石灰質	449	1 (15×40)	1日後	—	—	24	90	365	37.1	—
J. Komendant et al. (9)	Type II Low Alkali	38.3	172	449	10.8	37.5	白系石灰質	468	3 (15×40)	打設直後	—	—	23	—	—	506	—
		38.2	160	419	11.4	37.5	石灰質	461	3 (15×40)	打設直後	—	—	23	90	797	528	—

表-7 試験条件の比較

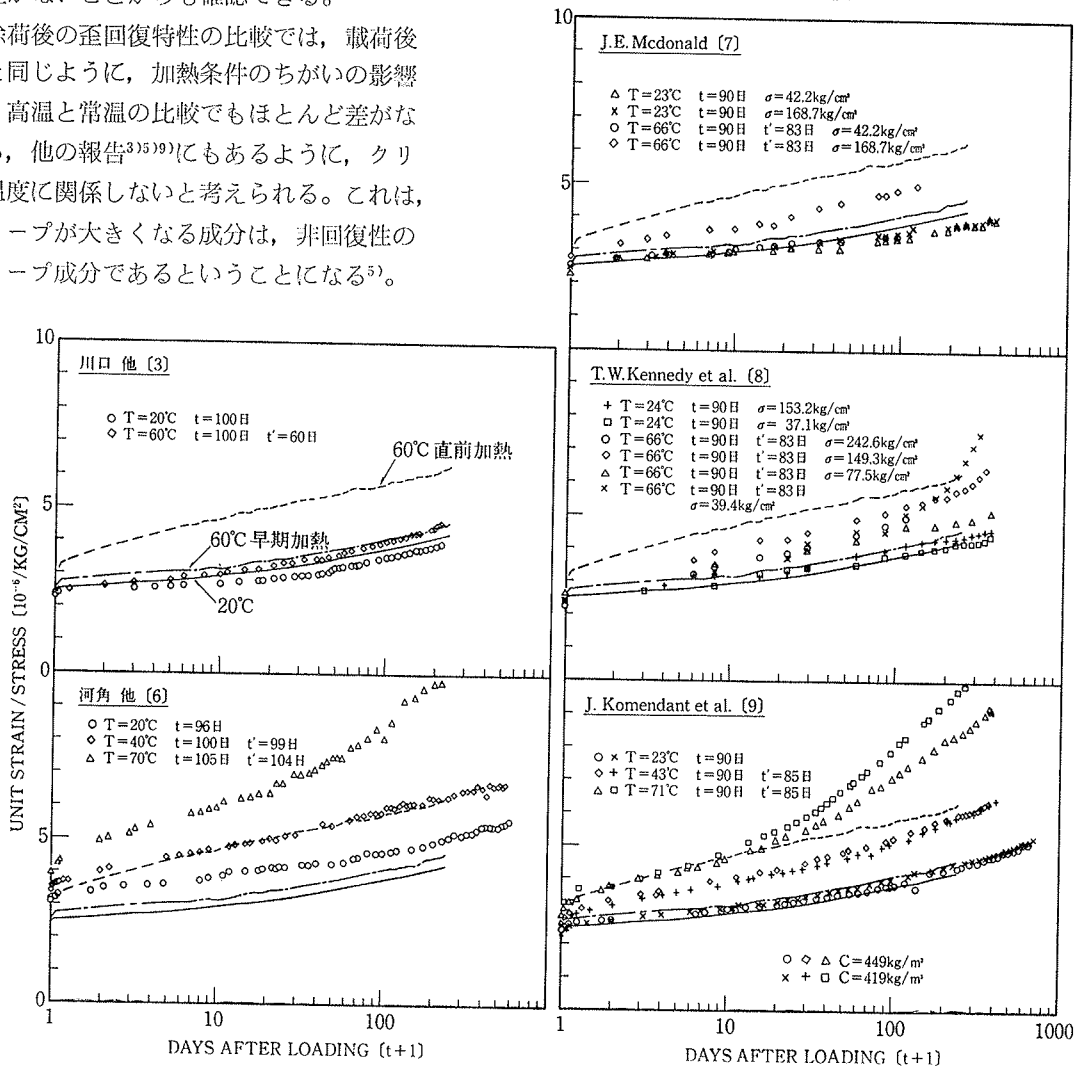


図-6 単位クリープ曲線の比較

期弾性歪の差としては認められるものの、載荷後の時間経過にともなう歪増分の進行度にはそれほど差がない。

高温クリープ試験の結果についてみると、前報の結果との比較で、60℃早期加熱の結果はほとんど差がない。河角他の結果との比較では、粗骨材の違いの影響を常温の結果の差で考慮すれば、今回の60℃直前加熱の結果は、ほぼ妥当なものと考えられる。J. E. McDonald⁷⁾, T. W. Kennedy, et al.⁸⁾の試験条件はほとんど同一であり、両者の高温試験の結果は、載荷応力によってばらつきはあるが、今回の高温試験の直前加熱と早期加熱の中間値に位置している。J. Komendant et al.⁹⁾の結果と同程度の対応を示していると思なせる。

なお、河角他, J. Komendant et al. の試験温度70, 71℃の結果は、両者共載荷後約21日以後の歪増分が常温との比較で顕著に大きくなっている。これは、今回我々の試験結果で指摘した高温でも載荷後の時間が経過するにともない常温との差は小さくなるということに反している。このような違いが、コンクリート自体の性質から生ずるものなのか、あるいは、歪測定法のちがいによるものなのか、判断としない部分が残る。というのは、我々の試験では、コンプレッソメーターによる機械的歪測定を行なっているのに対し、河角他, J. Komendant et al.は両者共カールソン歪計による測定を行なっている。我々のシリーズIIの試験で、一部に機械的測定に比べ歪計(抵抗線式)の測定値がかなり大きくなっている部分があり、さらに、J. E. McDonald, T. W. Kennedy et al.の高温試験(振動弦歪計使用)では、載荷の途中で測定不能になったり、急激に歪の進行が測定された例も報告されている。歪計を使用した高温時の測定値の信頼性に疑問が残っていると思われるからである。高温時の長期なコンクリート物性を詳細に検討するためには、より信頼性の高い、安定性に富んだ歪測定法を確立する必要があると考える。

5. まとめ

以上に述べた今回の高温(60℃)クリープ試験により次のことが明らかになった。

- (1) 既往の文献と同様に、常温に比べ高温ではクリープが大きくなった。
- (2) 同じ高温でも、載荷前の高温養生期間が短いほど高温によるクリープの増加が大きくなる。その影響度は、載荷材令が古くなるほど大きくなるようである。
- (3) 高温によるクリープの増加は、載荷後の短期間のうちに生じ、載荷後の時間が経過するに従い、歪増加量

の常温との差は小さくなる。

(4) クリープ回復は、温度の影響をほとんど受けず高温でも常温でも歪回復量に差がない。

(5) 単位弾性歪もクリープと同じような温度の影響を受ける。高温では、単位弾性歪が大きくなり、載荷直前に加熱すると載荷時の単位弾性歪は特に大きくなるが、高温材令が充分経過した除荷時には、初期加熱条件の影響はなくなる。

今後は、今回明らかになった高温クリープの基本性状をもとに、クリープを考慮したコンクリートの熱応力の評価方法の検討を行なってみたい。

参考文献

- 1) 川口, 高橋: PCR用コンクリートの長期性状に関する研究(その1. 一軸・三軸クリープ試験) 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和50. 10), pp. 25~26
- 2) 川口, 高橋: 高強度コンクリートの長期性状に関する研究(その2. 載荷材令・養生方法がクリープに及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和53. 9), pp. 481~482
- 3) 川口, 高橋: 高強度コンクリートの長期性状に関する研究(その1), コンクリートクリープ特性モデル化への時間依存性線型粘弾性理論の適用, 大林組技術研究所報, No. 21, (1980), pp. 61~69, 同題(その3, 同上副題), 日本建築学会学術講演梗概集, (昭和55. 9), pp. 111~112
- 4) Geymayer, H. G.: Effect of Temperature on Creep of Concrete, A. Literature Review, Concrete for Nuclear Reactors, SP-34, ACI, (1972), pp. 565~589
- 5) Neville, A. M.: Creep of Concrete: Plain, Reinforced, and Prestressed, North Holland Publishing Company, (1970), pp. 162~192
- 6) 河角, 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二研究所報告, No. 72018, (昭和48. 5)
- 7) McDonald, J. E.: Time-Dependant Deformation of Concrete Under Multiaxial Stress Conditions, ORNL TM-5052, (1975)
- 8) Kennedy, T. W., et al.: Prediction of Multiaxial Creep from Uniaxial Creep Tests, SP-34, ACI, (1972), pp. 735~768
- 9) Komendant, J., et al.: Effect of Temperature, Stress Level, and Age at Loading or Creep of Sealed Concrete, SP-55, ACI, (1978), pp. 55~81