

膨張コンクリートのクリープ特性に関する基礎的研究

STUDY ON THE CREEP CHARACTERISTICS
IN EXPANSIVE CONCRETE

戸川 一 夫*・中 本 純 次**

By Kazuo TOGAWA and Junji NAKAMOTO

1. 本研究の目的

わが国において、膨張コンクリートに関する研究は過去十数年以前から行われており、膨張性状、強度特性およびケミカルプレストレス等に関する基礎研究から、各種のコンクリート構造物への適用に関する応用研究まで多岐にわたっており、膨張コンクリートの物性あるいは利用分野はしだいに明らかにされてきている。

膨張コンクリートのクリープ特性はひびわれ耐力を把握するうえでの塑性的性質の役割を知るために、また、ケミカルプレストレス量あるいは残存ケミカルプレストレス量を算定するうえで、究明しなければならぬ重要な性状であるが、目下のところ研究報告^{1)~5)}も少なく、さらには膨張という新たな要因が加わるために試験方法に工夫を必要とするため、これまでの報告でもって、クリープ特性が十分に明らかにされているとはいえない。また、最近では同一社の膨張材でもその主成分の割合あるいは粉末度などが過去のものとは比べて若干異なってきたこと、さらにはここ数年間に数社から主成分の割合あるいは製法が異なる膨張材が市販されるに至り、膨張コンクリートの基礎的性質に関して新しいデータの蓄積が望まれていると考えられる。

膨張コンクリートの膨張は微結晶性のエトリンガイトの形成^{6),7)}あるいは水酸化カルシウムの結晶成長^{8)~10)}によって生じると報告されているが、膨張機構そのものはこれらの結晶が形成されるときにいずれも微細な空隙の増加を伴う結果であるといわれている^{11),12)}。また、エトリンガイトは多くの結合水をもっているが、その結合水の挙動は温度、湿度などの環境条件に敏感に影響され、その水は状況によっては脱離しやすい場合もあることが認められている^{13),14)}。さらに、同じ膨張コンクリートに

生じるエトリンガイトでも養生条件が異なると、生成量、生成場所、結晶の大きさを異にするし^{15),16)}、その強度、剛性はCSHゲルに比べて小さいと予測されている。

コンクリートのクリープ特性はコンクリートの内部構造あるいはコンクリート中の水の挙動などに大いに関係していることは衆知のことであるが、上述したように膨張コンクリートは普通コンクリートと比べて異なった内部構造あるいは反応生成物を有していると考えられるので、両コンクリートについての内部構造あるいは反応生成物の物性を比較究明しながら、膨張コンクリートのクリープ特性を解明していくことは現状では有意義な方法であろう。

本研究は、わが国で市販されているカルシウムサルホアルミネート系と称する膨張材1種と石灰系と称する膨張材1種を取り上げて、それぞれを用いて、主としてひびわれ制御用を対象とした膨張コンクリートのクリープ特性を普通コンクリートのそれと対比させて究明するものであり、実験要因として拘束方法、供試体寸法、初期養生湿度ならびに温度、膨張材量および載荷時材令を選んでいる。本研究では、特に膨張コンクリートのクリープ機構を解明する一方法として、クリープ試験供試体に埋め込んだ同配合のペーストのX線回折、熱分析あるいは空隙量測定、さらにはコンクリート供試体の重量測定を行って、クリープ機構をペーストの内部構造あるいは反応生成物の物性等と関連づけて考察している。

2. 実験概要

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(大阪セメント株式会社製)、細骨材は川砂(比重2.55,粗粒率2.82)、粗骨材は最大寸法20mmの硬質砂岩砕石(比重2.61)

* 正会員 工修 和歌山工業高等専門学校教授 土木工学科

** 正会員 和歌山工業高等専門学校助手 土木工学科

表一1 コンクリートの示方配合

C+E (kg/m ³)	W (kg/m ³)	W/C+E (%)	s/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
400	180	45	43	737	1002

E: 膨張材

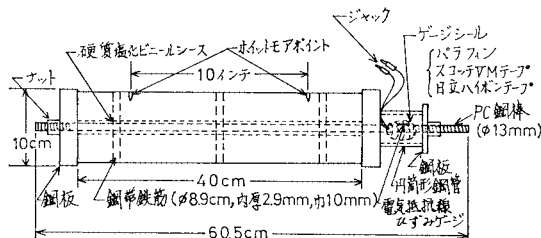
を使用した。膨張材はカルシウムサルホアルミネート系のデンカ CSA #20 (電気化学工業株式会社製, 以下この膨張材を A 膨張材とよび, これを使用したコンクリートを A 膨張コンクリートという) と石灰系のエクスパン (小野田セメント株式会社製, 以下この膨張材を B 膨張材とよび, これを使用したコンクリートを B 膨張コンクリートという) を使用した。コンクリートの配合を表一1 に示す。単位膨張材量は膨張コンクリートをひびわれ制御用として使用して, かつ普通コンクリートと比べて強度低下が軽微である範囲とした。すなわち, 単位膨張材量は主として A 膨張材使用のとき 60 kg/m³, B 膨張材使用のとき 55 kg/m³ であり, これらの値は膨張コンクリートの圧縮強度が普通コンクリートのそれと比べてそれほど低下しないで, 水中養生したとき拘束鋼材比約 1% の供試体の膨張率として 500×10^{-6} 程度を得ることができ, さらに, A および B 膨張コンクリートの膨張率がほぼ同じになるように予備実験して定めたものである。また, 単位膨張材量として, A 膨張材について 44 kg/m³, B 膨張材について 40 kg/m³ の場合も実験計画に含めている。

(2) 練り混ぜおよび供試体の作製方法

コンクリートの練り混ぜには強制練りミキサーを使用し, セメントと膨張材はミキサー投入前にあらかじめよく混ぜ合わせておき, 全材料投入後 3 分間練り混ぜた。

a) 三軸拘束供試体作製方法

供試体の形状寸法を図一1 に示す。供試体の作製は硬質塩化ビニール製の円筒形の型わく (長さ 40 cm, 内径 10 cm) を 3 片に縦割しておき, 型わくにスチールリング (外径 89 mm, 幅 10 mm, 肉厚 2.9 mm) を固定するためのばんせんが通る穴をあけておき, 3 本のリングが所定の位置にくるようにリングと型わくをばんせんで固定し, そのとき型わくの内径が 10 cm になるようにした。

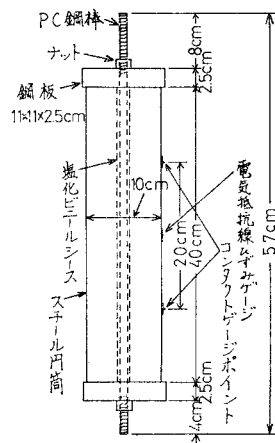


図一1 三軸拘束供試体

次に, 図一1 に示すように PC 鋼棒 (高周波熱錬株式会社製, C種 1号, SBPR 110/125) と鋼製の両端板を組み立てて, 型わく等が所定の位置を保てるよう, ナットで締めつけ, ナット, 鋼板等の接合部に瞬間接着剤を流し込んで, その時点で型わく全体にゆるみがないよう努めた。コンクリートは型わくの上面に位置する一片 (幅 3 cm) をはずして, 横打ちで打ち込んだ。その際, ホイットモアのゲージプラグを埋め込んだ。型わくは材令 1 日で脱型した。

b) 密封三軸拘束供試体作製方法

図一2 に密封三軸拘束供試体を示す。密封三軸拘束供試体は, PC 鋼棒を薄肉のスチール円筒 (長さ 40 cm, 内径 10 cm) の中心部に垂直に立てておき, 円筒内にコンクリートを縦打ちで打ち込んだ後, プリージングが止まったとき (ここでは打ち込み後 3 時間して) に端板を上置してコンクリートと鋼板との間に遊びができないようにナットを締め付けて作製した。



図一2 密封三軸拘束供試体

c) 一軸拘束および無拘束供試体作製方法

一軸拘束供試体は密封三軸拘束供試体の作製方法とほぼ同様の手順であるが, スチール円筒の代りに紙製の円筒型わくを用いており, 無拘束供試体は紙製の円筒型わくにコンクリートを打ち込んで作製し, 両者とも材令 1 日で脱型した。

(3) 養生方法

打ち込み直後から気中養生する供試体ならびに三軸拘束密封供試体を除いて, 供試体は打ち込み直後から材令 1 日までぬれ布とビニールシートで包み, 材令 1 日から所定の養生を開始した。ここで, 水中養生とは温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生槽での養生, 気中養生とは温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 相対湿度 50% の空調室で行う養生をいう。また, 60°C 温水養生とは密封三軸拘束供試体を成型直後より材令 14 日まで 60°C の温水中で養生した場合である。

(4) 長さ変化測定方法ならびにクリープ載荷荷重検査方法

a) 三軸拘束供試体の場合

クリープ試験開始時までのコンクリートの膨張ひずみ

は材令1日までの電気抵抗線ひずみゲージによって得られた結果に材令1日を基長としたホイットモア法による結果を加算して求めた。クリープひずみならびに乾燥収縮ひずみはホイットモア法によって測定した。クリープ試験載荷荷重はP CジャッキのロッドおよびP C鋼棒に貼付した電気抵抗線ひずみゲージによってチェックした。荷重チェックに関して両方法間に差は認められなかった。

b) 密封三軸拘束供試体の場合

供試体の長さ変化はスチール円筒表面にポイントをつけてコンタクトゲージ法によって測定した。基長は供試体成型完了後とした。クリープ試験載荷荷重はP Cジャッキのロッドに貼付した電気抵抗線ひずみゲージによってチェックした。

c) 一軸拘束および無拘束供試体の場合

供試体の長さ変化は基長を材令8時間としてコンタクトゲージ法で測定した。クリープ載荷荷重のチェックは密封三軸拘束供試体の場合と同方法である。

なお、コンタクトゲージ法、ホイットモア法および電気抵抗線ひずみゲージ法の3測定方法はほとんど差がない測定結果を示し得ることを予備実験で確かめている。

(5) クリープ試験方法

クリープ試験載荷方法はP CジャッキでP C鋼棒を緊張する方法を採用した。すなわち、所定の材令まで養生した供試体のP C鋼棒の応力をいったん解除した後、直ちに、P C鋼棒を緊張して載荷した。同一条件につき供試体は2個作製し、試験値は2個の平均値とした。P C鋼棒の引き直しは載荷後材令1, 3, 14, 21, 28, 42, 56, 70, 94, 118日で行った。クリープひずみ量の求め方には、目下のところ筆者らの方法¹⁾と長滝らによる方法²⁾とがある。今回の実験では長滝らによって提案された方法を採用した。長滝らによる方法は筆者らによる方法より同一条件の供試体のクリープひずみを求めるとき、供試体数が少なくすみ、また、両方法でクリープひずみを求めたとき、それらの結果にはおおむね差がないことが認められている。長滝らの方法を簡単に説明すると、1種類のコンクリート供試体につき3段階の載荷応力(材令14日以後載荷の場合20, 40および80 kg/cm², 材令1日載荷の場合13.4, 20.1および33.5 kg/cm²)をかける供試体を各応力階とも2個ずつ作製し、**図-3**に示すよう各載荷応力レベルでの変形量を求め、それらの点を結んで得られる直線の勾配より単位クリープひずみを求め、さらに載荷応力零における潜在変形量(乾燥収縮ひずみあるいは有効膨張ひずみに相当する)を求めて、ある載荷応力を導入したときの全収縮ひずみ(実効クリープ)を求める方法である。

しかしながら、密封三軸拘束供試体の潜在変形量を求めるにあたり、この供試体はクリープ試験開始時に拘束用P C鋼棒の応力を一度開放してもスチール円筒の軸方向拘束は残っており、コンクリートには応力がかかっていることになるので真の零応力状態での潜在変形量は計算によって求める必要がある。

本研究では載荷後材令1日の時点での潜在変形量を求める際には載荷時にスチール円筒の拘束分によって生じているコンクリートの応力を求めて、得られている載荷応力-変形量曲線をその応力分だけ平行移動することによって真の潜在変形量を算出した。なお、載荷時にコンクリートに生じている応力度は、P C鋼棒による拘束を解除した後、スチール円筒の伸びをコンタクトゲージで測定して算定した。次に、載荷後材令3日の真の変形量を求めるには載荷後材令1日の時点で、コンクリートのクリープと乾燥収縮あるいは膨張によって生じるスチール円筒の応力の増減量を求め、その算出方法は載荷後材令1日までの単位クリープひずみに載荷時の全応力を掛けてクリープ変形量とし、さらに載荷時と載荷後材令1日とのみかけの潜在変形量の差を乾燥収縮量あるいは膨張量としてそれらを加算してスチール円筒の変形量を求め、そのときのスチール円筒の拘束によって生じるコンクリートの応力を計算し、前述したと同様にして真の潜在変形量を算定した。順次この方法で各材令での真の潜在変形量を求めた。

(6) クリープ回復試験方法

一部の供試体は載荷後材令119日で除荷してクリープ回復試験を行った。単位回復クリープひずみはクリープひずみの求め方と同様にして、各載荷応力階の供試体の回復クリープ量を求め、それらの点を結んで得られる直線の勾配より求めた。ここで考察に際して用いた用語について説明する。Basicクリープとは水中クリープ試験における単位クリープひずみをさす。Basicクリープのうちの非回復性クリープひずみはBasicクリープひずみから、水中での回復試験で得られる回復クリープひずみを差し引いて求めている。またDryingクリープとはクリープ載荷試験時までは同一条件の供試体の気中クリープ試験での単位クリープひずみと水中クリープ試験でのBasicクリープひずみとの差である。Dryingクリープのうち非回復性クリープひずみはDryingクリープひずみと気中試験での回復クリープひずみとの差である。

(7) 強度試験供試体等作製方法

強度ならびに弾性係数測定用供試体は $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体であり、同一条件の供試体は3本作製し、供試体は対象とするクリープ試験供試体とほぼ同一の養生

条件とした。すなわち、水中養生供試体は脱型しないで型わくで拘束したまま水中養生し、気中養生供試体は材令1日で脱型して拘束状態で気中養生し、密封養生供試体は型わくをつけたままビニールシートで密封して空調室において養生し、それぞれ所定の材令で試験に供した。

(8) X線回折方法

X線回折には理学電気株式会社製のX線回折装置を使用した。測定条件は下記のとおりである。

Slit : 1-1-0.15, Range : 400 c.p.s., Time Constant : 2s, Scanning Speed : 1°/min, Chart Speed : 10 mm/min, 35 kV, 15 mA, Target : Cu, Filter : Ni, Detector : SC

(9) 熱分析方法

熱分析には理学電気株式会社製の示差熱天秤 D-CIHを使用した。測定条件は昇温速度 5°C/min, D.T.A ±100 mV である。

(10) 空隙量測定方法

空隙量測定には水銀圧入式ポロシメータ(島津製作所製, 900/910 シリーズ)を使用した。

(11) 電子顕微鏡写真撮影

電子顕微鏡は走査型電子顕微鏡(日本電子 KK 製, JSM-T 20)を使用した。資料はカーボン蒸着した後、金蒸着した。

なお、(8)~(11)の測定に用いたペースト資料は 20 kg/cm² 載荷用クリープ試験供試体(材令1日載荷の場合は 13.4 kg/cm²)の端部表面にビニール袋に入れて、コンクリート打ち込み時に埋め込んでおり、ビニール袋は材令1日で破った。ペースト資料をX線回折等に供する際には、所定の材令で必要量採取し、3時間真空脱気した後、アセトン液中に約7日間浸漬し、アセトンをろ過した後2日間真空脱気し、さらに高温箱(80°C)に2時間入れて、最後はデシケータ内に保存し測定に供した。

(12) 供試体重量測定方法

重量測定には卓上台秤(秤量 20 kg, 感度 1/2 0000)を用いた。

3. クリープ特性

本実験に用いた供試体の種類、拘束条件、養生条件、形状寸法、クリープ試験開始時材令、載荷材令時の圧縮

強度、動弾性係数、載荷材令時までの最大膨張量、相対収縮量、ケミカルプレストレス量を表-2に示す。

(1) 初期養生条件と気中クリープ特性

材令初期に載荷した膨張コンクリートのクリープ特性について、水中クリープでは膨張コンクリートの単位クリープひずみは普通コンクリートのそれと比べて相当大きくなることは筆者の一人¹⁾あるいは長滝ら²⁾によって一致した結論が示されているが、気中クリープに関しては膨張コンクリートは普通コンクリートより大きくなる¹⁾という報告とむしろ小さくなる³⁾という報告があり、その結論は異なっている。

材令14日で載荷した一軸拘束供試体の気中クリープ特性について、載荷時まで水中養生した場合(水-気-14)と気中養生した場合(気-気-14)との実験結果を図-3および4に示す。

図-3は膨張コンクリートおよび普通コンクリートの載荷後材令1, 28および96日における収縮ひずみの測定値を載荷応力との関係で示した一例である。この図からわかるように載荷応力と収縮ひずみとの関係はほぼ直線関係にあるといえる。この直線の勾配が各材令での単位クリープひずみを示し、載荷応力零点での収縮ひずみ

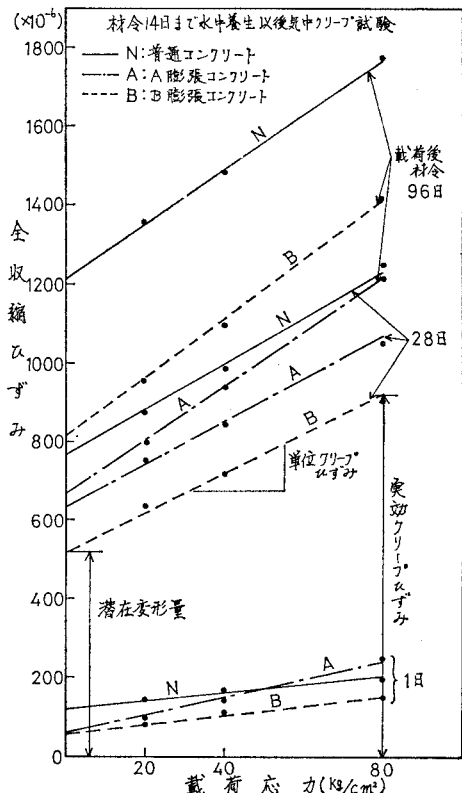


図-3 載荷応力と全収縮ひずみとの関係(一例)
(一軸拘束供試体)

表-2 実験供試体種類と各種試験結果

コンクリート種類	拘束状態	供試体形状寸法 (cm)	軸方向拘束鋼材比 (%)	スチール円筒肉厚 (mm)	クリープ荷重開始時材令 (日)	クリープ試験開始養生条件	クリープ試験中養生条件	クリープ載荷時の		クリープ載荷時までの膨張量(+) 相対収縮量(-)	最大ゲミカ ルプレスト レス量 (kg/cm ²)
								圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ² × 10 ⁵)		
N	一軸	φ10×40	1.78	—	14	水中養生	気中養生	350	4.5	—	—
A	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	339	4.7	+589	21.7
B	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	324	4.7	+520	18.9
N	〃	〃	〃	—	〃	気中養生	〃	287	3.9	-450	—
A	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	371	4.1	-250	8.0
B	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	305	3.8	-220	8.0
N	一軸	φ10×40	1.78	—	1	—	水中養生	58	2.4	—	—
A	〃	〃	〃	—	〃	—	〃	94	2.6	+328	11.9
N	〃	〃	〃	—	〃	—	気中養生	58	2.4	—	—
A	〃	〃	〃	—	〃	—	〃	94	2.6	+328	11.9
N	三軸	〃	〃	—	〃	—	水中養生	58	2.4	—	—
A	〃	〃	〃	—	〃	—	〃	94	2.6	+289	10.5
B	〃	〃	〃	—	〃	—	〃	100	2.6	+280	10.2
N	密封三軸	φ10×40	4.20	0.6	14	密封養生	密封養生	393	4.5	—	—
A	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	360	4.0	+142	11.5
B	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	324	4.7	+190	16.3
A'	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	380	4.5	+78	6.7
B'	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	376	4.0	+78	6.7
A	〃	〃	〃	〃	1	〃	〃	113	2.9	+51	4.4
A	〃	〃	〃	〃	14	60°C温水養生	〃	411	3.9	+181	15.5
A	〃	〃	6.50	〃	〃	密封養生	〃	360	4.0	+109	14.5
A	〃	〃	2.90	0.3	〃	〃	〃	360	4.0	+169	10.0
A	〃	φ15×40	4.30	0.9	〃	〃	〃	360	4.0	+157	13.8
A	〃	φ10×20	4.20	0.6	〃	〃	〃	360	4.0	+155	13.3
N	三軸	φ10×40	1.78	—	101	水中養生	水中養生	405	4.4	—	—
A	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	411	4.7	+573	20.8
B	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	378	4.5	+540	19.6
N	〃	〃	〃	—	〃	〃	気中養生	405	4.4	—	—
A	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	411	4.7	+460	16.7
B	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	378	4.5	+603	21.9
N	〃	〃	〃	—	〃	気中養生	水中養生	322	3.3	-1220	—
A	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	333	3.5	-830	12.0
B	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	297	3.1	-590	8.7
N	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	322	3.3	-1050	—
A	〃	〃	〃	—	〃	〃	気中養生	333	3.5	-760	13.8
B	〃	〃	〃	—	〃	〃	〃	291	3.1	-750	12.5
A	無拘束	φ10×40	0	—	—	水中養生継続(材令100日)	—	—	—	+1240	—
A	〃	〃	〃	—	—	気中養生継続(材令100日)	—	—	—	-780	—

N:普通コンクリート A:A膨張コンクリート(A膨張材 60 kg/m³) A':A膨張コンクリート(A膨張材 44 kg/m³)
 B:B膨張コンクリート(B膨張材 55 kg/m³) B':B膨張コンクリート(B膨張材 40 kg/m³)

が潜在変形量であり、ある載荷応力でのひずみ零からの全収縮ひずみとその応力での実効クリープ量となるわけである。

単位クリープひずみについては図-4に示すように、初期養生条件が水中養生、気中養生ともに膨張コンクリートの単位クリープひずみは普通コンクリートのそれよりも若干大きくなることが示された。気中クリープについて、膨張コンクリートが普通コンクリートより若干大きくなるのは4.で述べるところのエトリンガイトの特性に負うところと考えられる。

クリープ係数に関しては図-4より、膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりもわずかながら大きいことがわかる。

実効クリープについては同じく図-4に示すが、この

値はある載荷応力を受けた状態での全収縮ひずみを示すものであり、プレストレス量の損失を計算する場合などの設計においては実際的である。また、潜在変形量はこの場合乾燥収縮量(相対収縮量)に匹敵するものである。実効クリープは基準とする載荷応力の大きさが異なれば、各種コンクリート間の実効クリープ量の大小の関係は異なってくるものである。

一応、載荷応力が40 kg/cm²の場合で比較すると膨張コンクリートの実効クリープは普通コンクリートのそれよりも小さいことがわかる。これは膨張コンクリートの相対収縮量が普通コンクリートのそれよりも小さいためである。

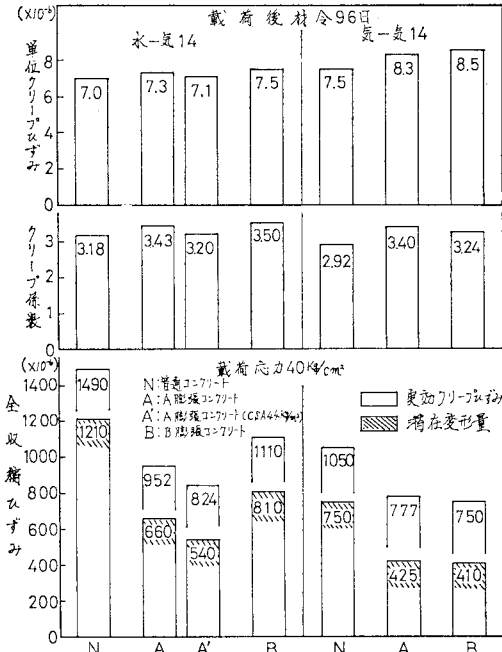


図-4 一軸拘束供試体の気中クリープ実験結果

(2) 軸直角方向の拘束条件と水中クリープ特性

膨張コンクリートは常温では注水後数時間経過すると膨張力を発現し始め、そのために膨張を拘束した膨張コンクリート部材にはケミカルプレストレスが生じ、コンクリートには圧縮応力が作用することになる。したがって、膨張コンクリートは膨張し始めると圧縮応力を受けて、弾性変形およびクリープ変形が生じるわけであるが、ケミカルプレストレスの推定などには膨張コンクリートの若材令時の水中クリープ特性を知る必要がある。一軸拘束状態での膨張コンクリートの水中クリープ特性に関してはかなり明らかにされているが、三軸拘束状態でのクリープ特性に関してはほとんど報告されていないようである。本節では材令1日で載荷した三軸拘束膨張コンクリートのクリープ特性を一軸拘束の場合と比較して考察することにする。図-5に実験結果を示す。

膨張コンクリートについては軸直角方向の拘束条件が異なれば膨張コンクリートの軸直角方向の膨張変形状が異なってくるので、コンクリートの内部構造が変化して軸方向の塑性変形特性にも影響するのではないかと考えられる。しかしながら、実験結果では膨張コンクリートおよび普通コンクリートのクリープ特性は軸直角方向の拘束には影響されないことがわかった。この理由については4.で述べる。なお、AおよびB膨張コンクリートのクリープ特性にはほとんど差異がなく、載荷時材令1日の膨張コンクリートの水中クリープひずみは普通コンクリートの約3倍程度になることが示されており、

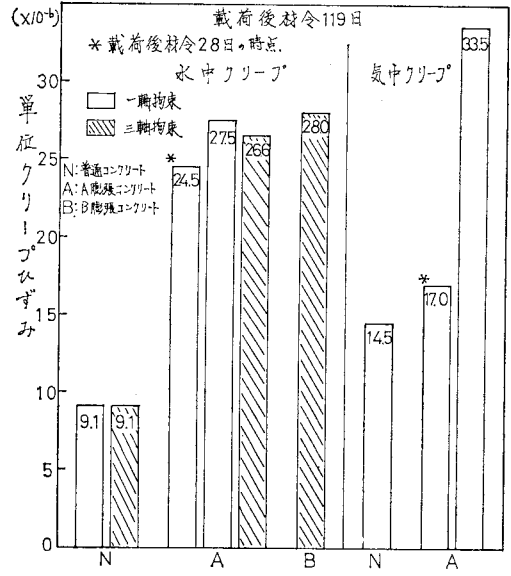


図-5 載荷時材令1日のクリープ実験結果

これらの結果は筆者の一人が以前に報告した結果¹⁾とほぼ同じであり、若材令時の膨張コンクリートの水中クリープひずみは普通コンクリートのそれと比べてきわめて大きいことが特徴である。

なお、載荷時材令1日での一軸拘束供試体の気中クリープについて水中クリープと比較実験を行ったがA膨張コンクリート、普通コンクリートともに水中クリープよりも気中クリープの方が大きくなること示され、膨張コンクリートの気中クリープひずみは普通コンクリートのその約2.3倍程度となっている。ただし図-5にみられるように膨張コンクリートについては載荷期間が若いときは、水中クリープの方が気中クリープよりもクリープひずみは大きくなる傾向があり、このことについては筆者らは以前の研究¹⁾でも確かめている。すなわち、載荷期間が若いときは、膨張コンクリートの膨張要因であるエトリンガイトの生成は水中養生の方が、気中養生よりも活発であり、その結果膨張によってコンクリート内部組織がより疎になるために、水中クリープが気中クリープよりも大きくなるものと考えられる。載荷期間が経過していくにつれて、水中クリープひずみと気中クリープひずみとの大きさが逆転する傾向を示す理由としては、コンクリートの粗い空隙や亀裂は載荷荷重によってわりあい早期に閉じ、さらには水中養生の方が気中養生の場合より、セメントの水和反応がより進むことにより組織がより密実化するため、また水中養生では気中養生と異なり、クリープに関してゲルのシーページ効果が生じないことが挙げられるので、気中クリープの方が水中クリープよりもしだいに大きくなると考えられる。

(3) 密封三軸拘束供試体のクリープ特性

密封三軸拘束状態での膨張コンクリートのクリープ特性については、現在まで研究報告は関ら⁹⁾の報告以外にはないといつてよいが、膨張コンクリートを地下構造物あるいは鋼管コンクリート合成ぐい等に使用するとき、ケミカルプレストレスの損失量等の把握をするのに必要な基礎的性質となろう。

以下に数種の要因に関して実験したので項目別に考察する。実験結果については図-6に一括して示す。なお、図-6(a)はこの節の実験シリーズで基準となる実験結果であり、この節ではこの結果と他の要因に関する実験結果と比較考察していくことにする。

a) 膨張材量とクリープ特性

図-6(a)は密封三軸拘束状態の膨張コンクリートと普通コンクリートの載荷時材令14日のクリープ実験結果を示している。密封三軸拘束した場合でも膨張コンクリートの単位クリープひずみは普通コンクリートのそれよりも大きくなるのが認められた。膨張材量が多くなるほど単位クリープひずみは大きくなる傾向がある。クリープ係数に関してはA膨張コンクリートは普通コンクリートより大きい、B膨張コンクリートは逆に普通コンクリートより小さい場合があり、これはB膨張コンクリートの弾性係数が普通コンクリートより小さかったためである。

密封三軸拘束コンクリート供試体では乾燥収縮は生じないはずであったが、今回の実験では完全な密封養生がなされていなかったためかすべての供試体について水分の蒸散が認められ、たとえばB膨張コンクリートでは

材令100日の時点で13gの重量減少があった。そのために、すべての供試体について収縮側の潜在変形量が生じたわけであるが、実効クリープひずみについては両膨張コンクリートは普通コンクリートよりも小さくなるのがわかった。

b) 若材令載荷クリープ特性

図-6(b)には材令1日で載荷したA膨張コンクリートのクリープ特性を示している。材令1日で載荷した膨張コンクリートは、材令14日で載荷した場合の2倍以上のクリープひずみが生じており、密封養生したときも若材令載荷のクリープひずみは著しく大きいことがわかる。このことについては4.でコンクリートの内部構造と関係づけて説明するが、膨張コンクリートが膨張するときコンクリート内部に多くの亀裂あるいは粗い空隙を残すのではないかと考えられ、若材令載荷のクリープひずみはこの亀裂等がコンクリート内部に多くあるために著しく大きくなるが、この亀裂等へは水和の進行とともに水和生成物が充填されてくるので、さらには載荷前のケミカルプレストレスによるプレクリープによって、材令がある程度経過した時点でクリープ試験を開始する場合は、これら亀裂がクリープひずみに及ぼす影響はかなり低減してくると考えられる。これに関して長滝ら⁹⁾はクリープ載荷前の拘束状態がクリープ特性に及ぼす影響、いわゆるプレクリープの影響が膨張コンクリートの場合、普通コンクリートと比べて特に大きく、載荷前の拘束圧が大きいほど生じるクリープひずみは小さくなると報告している。いいかえれば、膨張コンクリートの若材令時のクリープ特性は、コンクリートの内部構造の構造崩壊の概念によって説明される部分が大きいといえるのである。

c) 初期養生温度とクリープ特性

初期養生温度が膨張コンクリートのクリープ特性に及ぼす影響についての報告はほとんどされていない現況である。本実験では60°Cの温水養生を14日間行い、材令14日で載荷したA膨張コンクリートの密封養生クリープ特性を調べた。実験結果を図-6(c)に示す。初期養生温度が60°Cの膨張コンクリートの単位クリープひずみは20°Cのものよりばらつきを考慮しても若干小さくなるのが認められた。このことは初期の養生温度が高いと水和物の微結晶化が生じたり、この実験の場合では載荷時のコンクリートの圧縮強度が高いのでクリープひずみが小さくなったと考えられる。

実効クリープひずみについて、60°C養生した膨張コンクリートは20°C養生した

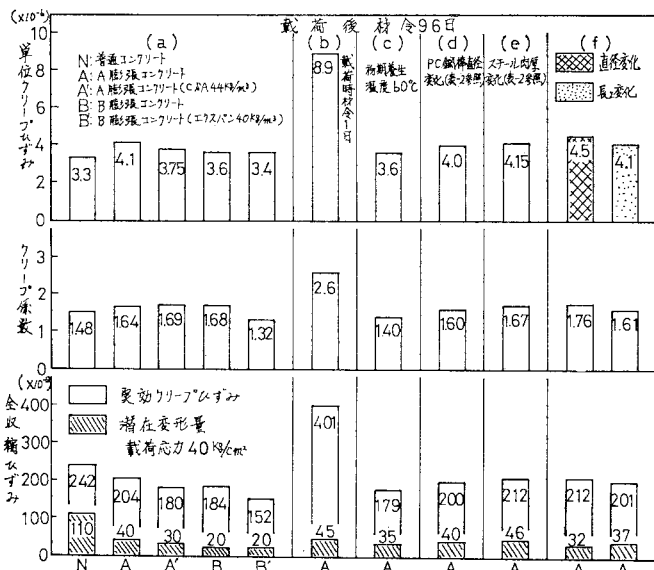


図-6 密封三軸拘束供試体のクリープ実験結果

ものより小さく、さらに 20°C 養生の普通コンクリートよりも小さくなる場合もあることが示された。

d) 拘束条件とクリープ特性

クリープ試験開始前の軸方向の拘束の程度が膨張コンクリートのクリープ特性に及ぼす影響については、プレクリップがクリープ特性に影響することで前に述べたわけであるが、図-6(d)には載荷時材令 14 日の軸方向拘束筋比が 6.5% の場合の実験結果を示す。軸方向筋比が 4.2% の基準コンクリートと比較すると、軸方向筋比が 6.5% の場合の方が単位クリープひずみは小さいといえるが、その差はごくわずかである。また、図-6(e)にはスチール円筒の肉厚を 0.3 mm にして、軸直角方向と軸方向の拘束量を基準コンクリートより少なくした膨張コンクリートのクリープ特性を示している。基準コンクリートと比べて軸方向ならびに軸直角方向の拘束を少なくすると、クリープひずみはわずかながら大きくなるがその程度はごく微小である。したがって、このレベルでの拘束量の多少は膨張コンクリートのクリープ特性にそれほど差異を与えないといえる。

e) 供試体形状とクリープ特性

一般にクリープ試験供試体の寸法が大きくなると気中クリープひずみは小さくすると報告されている¹⁹⁾。

図-6(f)には供試体の直径あるいは長さを変化させた場合の密封三軸拘束供試体の A 膨張コンクリートのクリープ特性を示している。供試体の長さを変えた場合は軸方向の拘束量は同一であるが、直径を変えた場合には直径の大きさに比例してスチール円筒の肉厚ならびに拘束鋼棒の直径を変化させて、軸方向ならびに軸直角方向の拘束条件を基準コンクリートとほぼ同一に保っている。実験結果より、予想どおり密封三軸拘束した膨張コンクリートは供試体の長さあるいは直径が変わってもクリープ特性には差異が認められなかった。このことは膨張コンクリートでもコンクリートとそのまわりとの間に水分の交換がなくて起こる Basic クリープについては部材の形状や寸法の変化による影響を受けないことがわかった。

(4) 長期材令時載荷クリープ特性

若材令で載荷したクリープひずみについて、膨張コンクリートは普通コンクリートに比べて大きくなることを前節で明らかにしてきたが、ここでは材令が十分に経過し膨張が終了し、ペーストの内部組織が安定した時点でのクリープ特性について考察する。

載荷時材令を 101 日として、載荷時まで水中養生し、以後水中クリープ試験をするもの（以下、水-水-101 という）あるいは気中クリープ試験をするもの（以下、水-気-101 という）、さらには載荷時まで気中養生し、以後

水中クリープ試験をするもの（以下、気-水-101 という）あるいは気中クリープ試験をするもの（以下、気-気-101 という）の 4 種類の試験条件を設定して、三軸拘束状態の A, B 膨張コンクリートと普通コンクリートのクリープ特性を究明した。

実験結果を図-7 に示す。実験結果は載荷後材令 119 日の時点のものである。

単位クリープひずみについて、膨張コンクリートは普通コンクリートよりも載荷前の養生方法、クリープ試験中の養生条件を問わず常に大きくなることが示された。膨張材種類が異なってもクリープ特性に差異があるとはいえないようである。

また、載荷時材令が 1 日の三軸拘束コンクリートと比較すると、長期材令時載荷の場合に、膨張コンクリートと普通コンクリートとの単位クリープひずみの差は著しく縮まっていることがわかる。膨張コンクリート、普通コンクリートともに気中クリープひずみの方が水中クリープひずみより大きくなっている。載荷時材令が 380 日の気中クリープについて長滝²⁰⁾は普通コンクリートの方が膨張コンクリートより大きいと報告しているが、本実験では載荷時材令が 101 日であったため膨張コンクリートのクリープひずみの方が普通コンクリートのそれよりも依然として大きい。しかしながら、膨張コンクリートと普通コンクリートとのクリープひずみは載荷時材令がより長期になるとしだいに差が縮まることは予想されるのである。

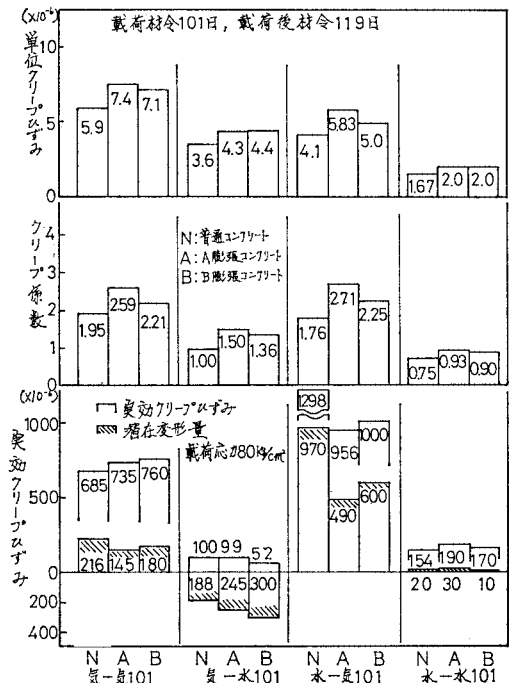


図-7 クリープ試験結果

表-3 クリープ試験分析結果
三軸拘束供試体

コンクリート種類	普通コンクリート					A膨張コンクリート					B膨張コンクリート					普通コンクリート			A膨張コンクリート		
	水中		気中		載荷時1日 材令1日	水中		気中		載荷時1日 材令1日	水中		気中		載荷時1日 材令1日	水中		気中		載荷時1日 材令1日	
クリープ試験前法養生方法	50%		水中		50%	50%		水中		50%	50%		水中		50%	50%		水中		50%	
単位クリープひずみ ($\times 10^{-6}$)	4.10	1.67	5.90	3.60	9.10	5.80	2.00	7.40	4.30	26.60	5.00	2.00	7.10	4.40	28.00	14.5	9.10	33.5	27.5		
Basic クリープ	回復性 ($\times 10^{-9}$)	0.75	0.75	1.13	1.13	1.49	1.10	1.10	1.37	1.37	2.48	1.17	1.17	1.50	1.50	3.22	1.69	1.69	2.46	2.46	
	非回復性 ($\times 10^{-9}$)	0.92	0.92	2.47	2.47	7.61	0.90	0.90	2.93	2.93	24.12	0.83	0.83	2.90	2.90	24.78	7.41	7.41	25.04	25.04	
Drying クリープ	回復性 ($\times 10^{-9}$)	0.32	—	0.82	—	—	0.28	—	0.95	—	—	—	—	0.83	—	—	—	—	0.48	—	
	非回復性 ($\times 10^{-9}$)	2.11	—	1.48	—	—	3.55	—	2.18	—	—	2.72	—	1.87	—	—	4.60	—	5.52	—	

なお、クリープ試験開始前の養生条件がクリープ特性に及ぼす影響について、Hansenら¹⁹⁾はクリープ載荷前の養生湿度が少ない場合ほどクリープひずみは小さくなるという実験結果を報告しているが、本実験の場合は、クリープ載荷前に気中養生したコンクリートの方が水中養生したものより大きいクリープひずみが生じている。これは気中養生した場合と水中養生した場合とでは、載荷時の圧縮強度が前者は後者より大幅に低かったことによると考えられる(表-2 参照)。

実効クリープひずみについて、図-7は80 kg/cm²の載荷応力の場合を示している。注目すべきことは、水気-101 シリーズでは膨張コンクリートの実効クリープひずみが普通コンクリートのそれよりも大幅に小さくなることである。これは膨張コンクリートが普通コンクリートよりも潜在変形量すなわち乾燥収縮量が材令長期に至っても小さいためである²⁰⁾。他の試験条件では実効クリープひずみは膨張コンクリートと普通コンクリートでほとんど差がないことがわかった。また、気-水-101 シリーズでは潜在変形量は膨張側になり、材令101日まで気中養生して乾燥収縮していても水中養生にもどすと相当大きな復元膨張があることが明らかとなった。

クリープ係数については、膨張コンクリートは普通コンクリートと比較して大きく、水中クリープの場合平均約1.3倍、気中クリープの場合平均約1.3倍くらいとなっている。

(5) 回復クリープ特性

クリープ機構に関しては従来より多くの説が提唱されてきたが、クリープに関するすべての実験事実を完全に説明できる説はない。ここではクリープひずみを Basic クリープと Drying クリープとからなると考えた。前者はコンクリート表面からの水の出入がない状態におけるクリープであり、後者は水の出入に起因するクリープである。筆者の一人は以前の研究²⁾において膨張コンクリ

ートは普通コンクリートよりも Basic クリープ, Drying クリープともに大きくなることをほぼ明らかにしている。

回復クリープ特性を明らかにするために、一軸拘束ならびに三軸拘束クリープ試験供試体を載荷後材令120日で除荷して実験に供した。回復試験後材令42日での結果を表-3に示す。回復クリープ実験結果からクリープ機構を分析してみると、載荷時材令1日の水中クリープのメカニズムについては、一軸ならびに三軸拘束の両膨張コンクリートの Basic クリープのうち非回復性成分が普通コンクリートよりも著しく大きいことが注目され、回復性成分も膨張コンクリートが普通コンクリートよりもわずかながら大きいことが示された。載荷時材令1日の一軸拘束の気中クリープ試験については、膨張コンクリートは普通コンクリートよりも Drying クリープが若干大きいことが認められた。また、載荷時材令が101日のクリープについては、水中クリープでは膨張コンクリートの回復性成分が普通コンクリートのそれより若干大きく、非回復性成分については膨張コンクリートと普通コンクリートとではほとんど差がなくなっている。載荷時材令101日の気中クリープについては膨張コンクリートは普通コンクリートより Drying クリープのうち、非回復性成分すなわち、ゲル水のシーページ効果に似た脱水効果が大きいことが明らかとなった。載荷前の養生条件がコンクリートのクリープ機構に及ぼす影響については、載荷前に水中養生したコンクリートは気中養生したコンクリートと比べて、Basic クリープが小さく Drying クリープが大きくなることである。さらに、細かくみると、載荷前気中養生した場合は水中養生した場合と比較すると、膨張コンクリートでは、普通コンクリートより Drying クリープのうち非回復性成分は減少の程度がより大きくなることが読みとれ、これは後述するようにエトリングイトがクリープ試験前の気中養生中に水中養生中の場合より多く脱水していたためと考えられ、また、

表-4 埋め込みペーストの X 線回折, 示差熱分析および空隙量測定結果 (主として三軸拘束供試体)

供試体種類*	X線回折結果		エトリン ガイトの 脱水量 (%)	クリープ試験 後のエトリン ガイトの脱水 量の増減 (%)	細 孔 量 (0/Vol)				クリープ試験後の空隙量の増減 (0/Vol)		
	エトリン ガイト (mm)	Ca(OH) ₂ (mm)			66~100 Å	66~300 Å	300 Å 以上	全空隙量	300 Å 以下	300 Å 以上	全空隙量
N-1	10	181	0	—	9.2	22.2	22.0	44.2	—	—	—
A-1	35	178	2.0	—	1.1	4.3	69.5	73.5	—	—	—
B-1	34	178	2.3	—	1.1	5.4	52.0	57.4	—	—	—
N-水-101	0	170	0	—	8.3	23.0	14.3	37.2	+0.8**	-7.7	-7.0
A-水-101	20	170	5.0	—	3.7	15.4	30.9	46.3	+11.1	-38.6	-27.4
B-水-101	20	170	5.0	—	5.9	15.7	26.5	42.2	+10.3	-25.5	-15.2
N-気-101	0	175	0	—	6.6	20.7	17.0	37.3	-1.5	-5.0	-6.9
A-気-101	0	165	4.5	—	2.3	7.2	39.1	46.3	+2.9	-30.4	-27.2
B-気-101	0	160	4.5	—	2.6	6.5	32.4	38.7	+1.1	-19.6	-18.7
N 水 (1) 水 190	0	182	0	0	8.0	9.1	1.0	10.1	-13.1	-21.0	-34.1
A 水 (1) 水 190	16	181	5.3	+3.3	3.3	12.0	14.4	26.4	+7.7	-55.1	-47.1
B 水 (1) 水 190	18	180	5.0	+2.7	3.7	11.0	20.0	31.0	+5.6	-32.0	-26.4
N 水 (101) 水 190	0	155	0	0	6.2	20.0	3.1	23.1	-3.0	-11.2	-17.1
A 水 (101) 水 190	13	155	5.4	+0.4	2.6	10.0	20.9	30.9	-5.4	-10.0	-15.4
B 水 (101) 水 190	15	155	5.0	0	4.1	12.6	19.1	31.7	-3.1	-7.4	-10.5
N 水 (101) 気 190	0	167	0	0	2.6	8.3	11.6	19.9	-14.7	-2.7	-17.3
A 水 (101) 気 190	0	160	4.8	-0.2	1.8	7.3	24.7	32.0	-8.1	-6.2	-14.3
B 水 (101) 気 190	0	160	4.7	-0.3	1.0	3.8	19.9	23.7	-11.9	-6.6	-18.5
N 気 (101) 水 190	0	155	0	0	12.0	15.8	0	16.5	-4.9	-17.0	-20.2
A 気 (101) 水 190	30	160	5.8	+1.3	2.0	6.3	25.7	32.0	-0.9	-13.4	-14.3
B 気 (101) 水 190	25	155	4.7	+0.2	1.6	5.6	12.8	19.4	-0.9	-19.6	-19.3
N 気 (101) 気 190	0	157	0	0	0.8	7.0	13.1	20.1	-13.7	-3.9	-17.2
A 気 (101) 気 190	0	160	4.2	-0.3	0.5	4.2	26.4	30.6	-3.0	-12.7	-15.7
B 気 (101) 気 190	0	160	4.4	-0.1	0.7	4.3	23.3	27.6	-2.3	-9.1	-11.1
A-水-14***	15	191	—	—	3.3	23.1	43.8	66.9	—	—	—
A-気-14	14	185	—	—	3.0	32.4	26.4	58.8	—	—	—
A-水-182	40	145	—	—	0.7	5.4	27.0	32.4	—	—	—
A-気-182	39	172	—	—	0.3	5.8	24.5	30.3	—	—	—

* 供試体種類のうち () の数字は載荷時材令, 数字は測定日材令, 水は水中養生, 気は気中養生を意味する。N, A, B については表-2 参照。たとえば, N 水 (101) 気 190 は普通コンクリートで材令 101 まで水中養生し, クリープ載荷後気中養生し, 材令 190 日で測定したことを意味する。
 ** [] 内は材令 1 日から材令 101 日までの空隙量の増減を示す。
 *** 無拘束供試体シリーズ

Basic クリープについては非回復性成分の増大の程度が普通コンクリートよりも大きくなる。これは膨張コンクリートはクリープ試験開始前の水中養生時にはケミカルプレストレスを得てプレクリープを生じており, 気中養生した場合より, ペーストの内部組織が密になってコンクリートの強度, 剛性が大きく, 普通コンクリートでは水中養生中でもプレクリープを生じないので, そのために, 膨張コンクリートは普通コンクリートよりも気中養生したときと水中養生したときの Basic クリープのうちの非回復性成分の差が大きくなると考えられる。

4. ペーストの内部組成とクリープ特性

3. (5) で A および B 膨張コンクリートは普通コンクリートと比べて, Basic クリープ, Drying クリープともに大きくなる性質を有することが述べられてきた。

本章では, これらの傾向をペーストの内部構造, 反応生成物の物性およびコンクリートの重量変化との関係が

ら説明していくことにする。

各種供試体に埋め込んだ同配合のペーストのクリープ試験中の X 線回折結果, 示差熱分析結果, 空隙量測定結果ならびにコンクリートの重量測定結果を表-4 およ

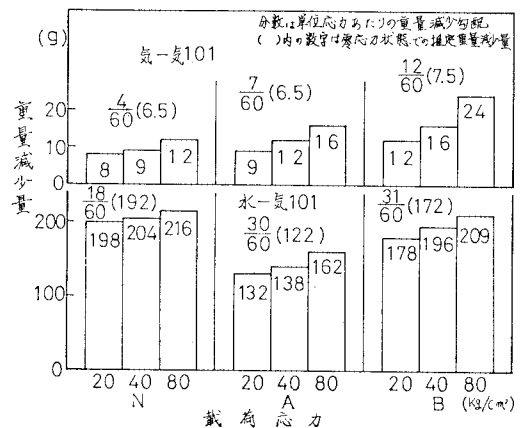


図-8 クリープ試験中の供試体重量減少量

び図-8 に示す。

クリープ試験供試体の埋め込みペーストのX線回折結果から、拘束状態の供試体のクリープ試験開始時の結晶性のエトリンガイトについては、クリープ試験開始時まで水中養生した膨張コンクリートには検出されるが、その他の養生条件の場合あるいは普通コンクリートには検出されない。クリープ試験終了時では、X線ととらえられる結晶性エトリンガイトは水中クリープ試験したAおよびB膨張コンクリートには減少しながらも残存しており、気中クリープ試験の場合には検出することができない。また、クリープ試験前に気中養生したために結晶性エトリンガイトが検出されなかった膨張コンクリートでは水中クリープ試験をすると結晶性エトリンガイトが検出されることがわかった。したがって、結晶性エトリンガイトは加圧乾燥条件下でその構造骨格は残存してはいるが容易に脱水して非晶質化することになり^{13),14),21)}、再湿潤すると再結晶化する性質を有していることがわかる⁷⁾。なお、無拘束の比較用膨張コンクリートに関して、結晶性のエトリンガイトは水中養生、気中養生を問わず材令長期まで存在している。

示差熱重量分析によってエトリンガイトの脱水量を求めてエトリンガイトの生成量を算定する場合、算定されたエトリンガイトはX線ととらえられる結晶性とX線ととらえられない微結晶性のものを含んでいることになる。

示差熱分析によるエトリンガイトについて、クリープ試験開始時点でAおよびB膨張コンクリートにはいずれの養生条件の場合も検出されるが、普通コンクリートにはまったく検出されなかった。さらに、クリープ試験終了時点で膨張コンクリートの場合、水中クリープ試験供試体にはエトリンガイトの若干の増加が示され、気中クリープ試験供試体には若干の減少が示された。結晶性エトリンガイトは気中養生した場合に検出されないの、気中クリープ試験中、示差熱分析で得られたエトリンガイトは微結晶性のエトリンガイトであると判断できる。したがって、気-気-101シリーズで示差熱分析によ

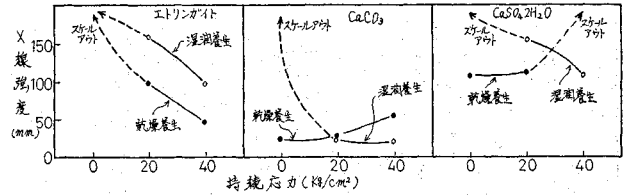


図-9 純薬エトリンガイトのX線回折結果

って検出されたエトリンガイトは微結晶性のものであり、微結晶性のエトリンガイトも加圧乾燥下で若干非晶質化するのではないかと考えられるのである。

ここで純薬エトリンガイトを湿潤状態あるいは気中乾燥状態のもとで加圧して90日目にX線回折を行い、その結果を表-5ならびに図-9に示す。結晶性のエトリンガイトは乾燥条件下でしかも持続応力が高くなるほど非晶質化し、二水石膏や炭酸カルシウムに変化する傾向が強く、湿潤状態でも加圧下で非晶質化している。この結果は吉良ら²²⁾によっても確認されている。また、写真-1に示されているように、エトリンガイトは加圧力が大きくなるほどその結晶構造は綿密化していくことがわかり、加圧すると容積減少を生じ、持続応力下での剛性は小さいことが想像される。

以上述べたように、結晶性ならびに微結晶性のエトリンガイトは加圧乾燥条件下で非晶質化していくことが明らかにされたわけであるが、図-8には材令101日に載荷した気中クリープ試験供試体の重量測定結果を示す。

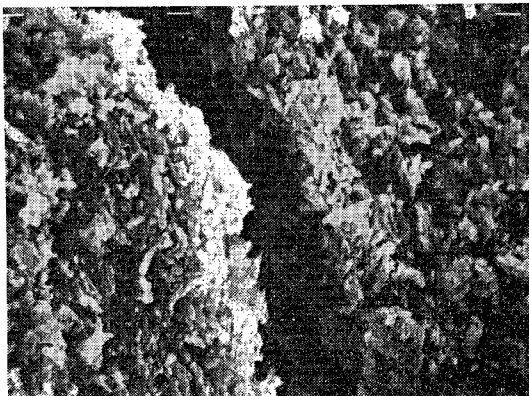
クリープ試験中すべての供試体は重量減少を呈し、単位載荷応力当りの重量減少割合はA、B膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりもいくぶん大きいことがわかる。すなわち、3.(5)でA、B膨張コンクリートの気中クリープ機構に関して水分逸散に伴う脱水効果が普通コンクリートより大きくなることと述べてきたが、膨張コンクリートは普通コンクリートよりも加圧乾燥条件下で脱水しやすいことが立証されたのである。また気中クリープ試験中の潜在変形量について、膨張コンクリートは普通コンクリートよりも小さい結果となっているが、これも図-8で零応力状態の水分逸散量を推定すると、膨張コンクリートは普通コンクリートより少ないようであ

表-5 純薬エトリンガイトとセメントペーストのX線回折結果

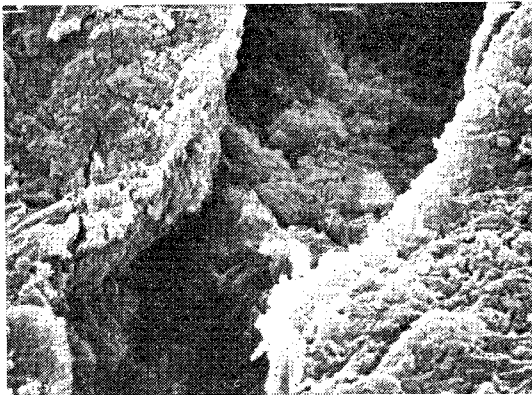
持続応力 (kg/cm ²)	純薬エトリンガイト						普通セメントペースト			
	乾燥養生 (20±2°C, 50%)			湿潤養生 (20±2°C, 100%)			持続応力0 材令	エトリン ガイト (mm)	CaCO ₃ (mm)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (mm)
	エトリン ガイト (mm)	CaCO ₃ (mm)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (mm)	エトリン ガイト (mm)	CaCO ₃ (mm)	CaSO ₄ ·2H ₂ O (mm)				
0 (材令 90 日)	スケール アウト	28	110	スケール アウト	スケール アウト	スケール アウト	1 日	22	0	0
20 (材令 90 日)	100	30	114	160	28	156	4 日	0	0	0
40 (材令 90 日)	50	57	スケール アウト	100	23	110	7 日	0	0	0
合成直後の純薬 エトリンガイト	スケール アウト	0	0	—	—	—	21 日	0	0	0



(a) 持続応力零



(b) 持続応力 20 kg/cm²



(c) 持続応力 40 kg/cm²

写真-1 純薬エトリンガイトの電子顕微鏡写真 (3500倍 一温度 20°C, 湿度 100% で 90 日間持続載荷)

り、水分の逸散が少ないと乾燥収縮量は少なくなると考えられる。

表-4 および図-10, 11 は三軸拘束供試体の空隙量測定結果を示している。膨張コンクリートは普通コンクリートよりも同一材令、養生条件で比較すると全空隙量は多く、細孔径分布のピークは粗い方によっていることが明らかとなった。両膨張コンクリートは普通コンクリートより粗い空隙を多くつくるのがわかる。細孔径分布

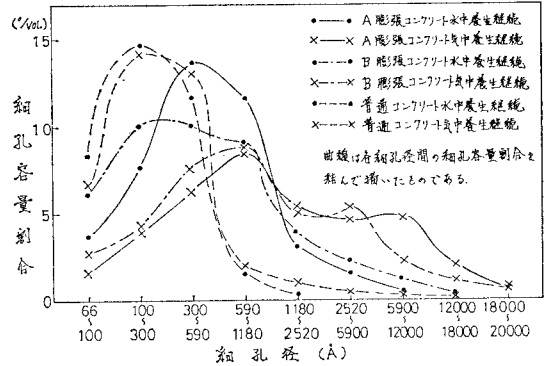


図-10 材令 101 日の細孔径分布の一例

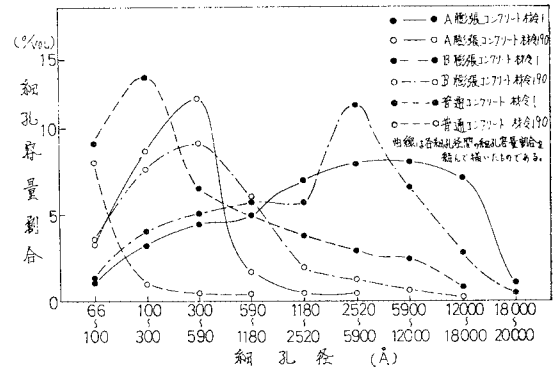


図-11 載荷時材令 1 日の水中クリープ試験中の細孔径分布の一例

について、膨張コンクリートと普通コンクリートともに実験中に水中養生が行われた経歴のあるものは、気中養生を継続したものよりも細孔径分布は細かい方にピークがあり、また、材令が経過すると全空隙量は減少し、細孔径分布のピークはより小さい方に移行する傾向がある。すなわち、膨張コンクリート、普通コンクリートともに水中養生したものは気中養生したものよりも水和生成物が粗い空隙をより多く埋め、あるいは水和生成物のゲル空隙が増加する程度が大きいこと、さらに材令の経過とともに水和生成物がだいに増加すると一般に仮定できるので、上記の細孔径分布の性状の変化は納得できる現象であろう。

材令 1 日で載荷した水中クリープ試験について、材令 1 日と載荷後材令 190 日の空隙特性を比較すると、全空隙量は後者が大幅に減少しており、減少の特徴は 300 Å 以上の粗い細孔が減少していることであり、特に、膨張コンクリートは普通コンクリートよりもクリープ試験中に 300 Å 以上の粗い空隙の減少の程度が著しいことがわかる。載荷時材令が 1 日の膨張コンクリートのクリープ機構に関して、Basic クリープのうちの非回復性成分が普通コンクリートよりもきわめて大きくなったのは、ここで明らかにされたように膨張コンクリートに材令初

期に生成された多量の粗い空隙ないしは亀裂の減少特性から説明できると考えられる(図-11 参照)。

ところで、本実験では材令1日の圧縮強度は膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりも高くなっており(表-4 参照)、この傾向は玉井²³⁾によっても指摘されているが、全空隙量は膨張コンクリートの方が普通コンクリートよりも多いことからみれば、一見矛盾した結果となっている。このことについては膨張コンクリートは普通コンクリートよりも材令1日までの発熱量が多いこと²⁴⁾、さらにはエトリンガイトは生成時に多くの結合水をとるので、みかけ上水セメント比を低減する効果があることの2点が考えられる。しかしながら、若材令時のこの現象は一過性のものであって長期間のコンクリートの性質に関係するクリープ特性に関しては、この場合、圧縮強度よりも空隙特性の方がより強く影響すると考えている。

載荷時材令101日のクリープ試験中の空隙特性に関して、材令101日と載荷後材令90日とでは同一養生条件で比較すると、膨張コンクリート、普通コンクリートともに材令が経過すると全空隙量は減少しており、減少の程度については両コンクリート間でほとんど差がないことがわかる。すなわち、載荷時材令101日のクリープ試験で、Basicクリープのうち非回復性成分については、膨張コンクリートと普通コンクリート間でほとんど差が認められなかったのは、クリープ試験中の空隙量の減少の程度がほぼ同程度であるためと考えている。

空隙の減少の特徴についてさらに分析すると、膨張コンクリート、普通コンクリートともに、300Å以下の細孔量の減少の程度は水中クリープ試験よりも気中クリープ試験で多く、300Å以上の細孔量の減少の程度は気中クリープ試験よりも水中クリープ試験で多い(図-12 参

照)。また、養生条件を問わず、クリープ試験中に両膨張コンクリートでは300Å以上の粗い空隙が減少するのが目立ち、普通コンクリートでは300Å以下の小さい細孔が減少するのがわかる。

これらの原因として、水中クリープ試験では未反応のセメントあるいは膨張材が継続的に反応して、反応生成物が徐々に粗い空隙を埋めていき、細孔径はより細かい方へ移行することが考えられ、気中クリープ試験ではセメント等の水和反応の程度がきわめて緩慢なために反応生成物は少なく、粗い空隙を埋めていく程度は少なくなると考えられる。しかしながら、両膨張コンクリートでは気-気シリーズにおいては水-気シリーズよりも未反応のセメントあるいは膨張材が多く残っていて、そのために前者は後者より気中クリープ試験中に反応生成物を多く生成すると考えられるので、300Å以上の粗い空隙は300Å以下の細かいものよりも減少の程度が大きくなったと推測される。

膨張コンクリートのBasicクリープのうち、回復性成分が普通コンクリートのそれより大きくなっていることに関しては次のような推論をしている。すなわち、エトリンガイトの剛性はセメント水和物のそれよりも小さいこと¹⁷⁾、さらにはエトリンガイトの生成によって形成される空隙はエトリンガイトを部材とした立体トラスの骨格の中に形成されると考えられること²⁵⁾、したがってそのトラス構造はセメント水和物を部材として形成される構造よりも空間は大きく、剛性は小さいと予想されるので持続応力に対する変形は大きく、そのために膨張コンクリートのBasicクリープの回復性成分が普通コンクリートのそれより大きくなるのではないかと著者らは考えている。

3. b) で軸直角方向の拘束条件の差異は、膨張コンク

リートの軸方向のクリープ特性に影響しないことを明らかにした。この結果について次のような説明ができると思われる。筆者らは軸直角方向の拘束量が膨張コンクリートの膨張特性に及ぼす影響を調べた結果²³⁾、軸直角方向の拘束の程度が変わっても軸方向の膨張量に差異はなく、エトリンガイトの生成量にも変化は認められず、すなわち、空隙の形状特性は拘束応力が同じであればその方向の空隙の幅は同じであると推定されるので、軸直角方向の拘束量が変化しても軸方向の拘束量が同じ

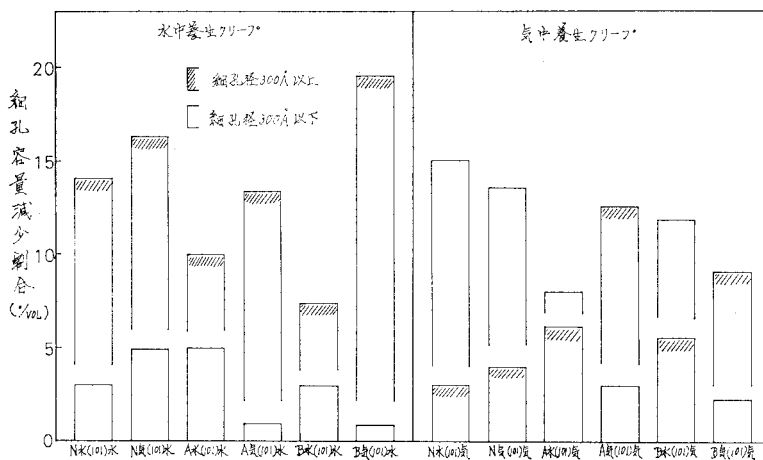


図-12 クリープ試験開始時からの細孔容量減少割合の一例 (材令190日の時点での結果)

であれば、空隙の関与に起因する軸方向のクリープ変形特性には差がないものと推測されるのである。

5. 結 論

本実験結果を要約すると次のとおりである。

本実験によればさらに、膨張材種類が異なってもそれぞれを使用した膨張コンクリートのクリープ特性は基本的に差異は認められなかった。

(1) 膨張コンクリートの単位クリープひずみは普通コンクリートのそれよりも、同一条件の場合で比較すると、常に大きいことが明らかとなった。また、膨張コンクリート、普通コンクリートともに載荷時材令、クリープ試験開始前の養生条件が同一の場合で比較すると、気中クリープの方が水中クリープよりも大きいことがわかった。しかしながら、膨張コンクリートと普通コンクリートの単位クリープひずみの差は載荷時材令が長期になると、プレクリープの効果あるいは膨張コンクリートの内部組織の安定化によって縮まることが認められた。

(2) 膨張コンクリートのクリープ機構は普通コンクリートと比べて、若材令時載荷の場合、Basic クリープのうちの非回復性成分が著しく大きいこと、長期材令時載荷の場合、水中クリープでは Basic クリープの回復性成分が若干大きいこと、気中クリープでは Drying クリープのうちの非回復性成分のシーページ効果が若干大きいことが特徴である。これは膨張コンクリートが膨張すると若材令時に多くの空隙ないしは亀裂を有すること、エトリンガイトが形成する骨格はセメント水和物が形成する骨格より剛性が小さいと予想されること、さらにはエトリンガイトは加圧乾燥条件下で脱水しやすいことに起因すると考えられる。

(3) 膨張コンクリートのクリープ特性は軸直角方向の拘束量の差異によって影響されない。

(4) 初期養生温度が高いと、膨張コンクリートのクリープ量は小さくなる傾向がある。

(5) 膨張コンクリートの Basic クリープ特性は供試体の形状寸法には影響されないと考えられる。

(6) 膨張コンクリートの気中試験での実効クリープ量は普通コンクリートのそれと比べて決して大きくはなく、むしろ小さくなる場合があることがわかった。これは膨張コンクリートが普通コンクリートよりも乾燥収縮量が小さいためである。

【謝 辞】本研究を行うにあたって、多大なご教授を下さいました京都大学 岡田教授、岐阜大学 小柳教授、実験にご協力下された大阪セメント株式会社 中野主任研究員、松原副主任研究員、和歌山高専土木工学科卒業研究生の各氏に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 戸川・荒木：膨張セメントコンクリートのケミカルプレストレスに関する研究，プレストレストコンクリート，Vol. 14, No. 2, 1972.4.
- 2) 戸川・荒木：膨張セメントコンクリートのクリープ特性，セメントコンクリート，No. 316, 1973.6.
- 3) 長滝・後藤：膨張コンクリートのクリープ特性に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第207号，1972.11.
- 4) 岡田・平沢・陳：膨張セメントコンクリートのセルフプレストレスおよびクリープに関する一実験，コンクリート・ライブラリー第39号，土木学会，1974.10.
- 5) 関・松村：膨張コンクリートの使用上の注意点，セメントコンクリート，No. 358, 1976.12.
- 6) 磯貝・斉藤・高橋：カルシウムサルホアルミネート系膨張セメントの水和膨張過程に関する考察，セメント技術年報，31, 1977.
- 7) 戸川・中本・中野：膨張コンクリートの膨張特性におよぼす練り混ぜ時間と養生条件の影響，コンクリート工学年次講演会，1979.
- 8) Bogue, R.H.: The Chemistry of Portland Cement, 1955.
- 9) Chatterji, S. and J.W. Jeffery: A New Hypothesis of Sulfate Expansion, Magazine of Concrete Research, Vol. 15, No. 44, 1963.
- 10) 佐藤・斉藤：石灰-石こう系膨張材における II 型無水石こうの効果，セメント技術年報 33, 1979.
- 11) 山崎：膨張性混和材を用いたコンクリートの膨張機構，セメントコンクリート，No. 352, 1976.6.
- 12) Bentur, A. and M. Ish-Shalom: Properties of Type K Expansive Cement of Pure Components, Cement and Concrete Research, Vol. 4, No. 5, 1974.
- 13) 坂内・中川：エトリンジャイトの加熱変化，Gypsum & Lime, No. 97, 1968.
- 14) Mehta, P.K. and A. Klein: Investigation of the Hydration Products in the System $4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3\text{-CaSO}_4\text{-CaO-H}_2\text{O}$ Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, Highway Research Board, Special Report, No. 90, 1966.
- 15) 磯貝： $3\text{CaO}, 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4\text{-CaO}$ 系膨張セメント硬化体の長期材令での諸性状，セメント技術年報 XXIX, 1975.
- 16) 赤岩・須藤・中村： $\text{C}_4\text{A}_3(\text{SO}_3)$ の水和膨張に関する研究，セメント技術年報 XXI, 1967.
- 17) 近藤・後藤：セメント硬化体の強度，セラミックス，Vol. 8, No. 10, 1973.
- 18) Hansen, T.C. and A.H. Mattock: Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete, Jour. of ACI, Vol. 63, No. 2, 2, 1966.
- 19) Hansen, T.C.: Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Proc. 31, 1960.
- 20) 水沼・六渡・中谷：膨張性混和材を用いたモルタルとコンクリートの長期材令における性状，セメント技術年報 31, 1977.
- 21) 須藤・秋葉・岩崎：カルシウムサルホアルミネート水和物に関する 2, 3 の考察，セメント技術年報 XXX, 1976.
- 22) 吉良・間木野・山本：エトリンガイトの炭酸化，Gypsum & Lime, No. 159, 1979.
- 23) 玉井：発電用導水路トンネルにおける膨張コンクリートの応用実験について，コンクリート工学，Vol. 13, No. 4, 4, 1975.
- 24) 戸川・中本：膨張コンクリートの練り混ぜ時間と膨張特性との関係，土木学会関西支部年次講演会，1979.
- 25) 戸川・中本：膨張コンクリートの拘束条件と膨張特性との関係，土木学会関西支部年次講演会，1979.

(1979.7.23・受付)