

膨張セメントコンクリートのクリープ特性 に関する基礎研究

CREEP CHARACTERISTICS OF EXPANSIVE CEMENT CONCRETE

長 滝 重 義*・後 藤 祐 司**
By Shigeyoshi Nagataki and Yuji Goto

1. 緒 言

カルシウム・サルフォ・アルミネートクリンカー系の膨張性混和材を用いた膨張セメントコンクリートは、収縮補償コンクリートあるいはセルフレストコンクリートとして、各種のコンクリート構造物ならびにコンクリート製品に応用されるようになってきている。

この状況に対応して、上記膨張材を使用した膨張セメントコンクリートに関する研究は、わが国における研究論文のみで100編を越え、膨張性状、強度性状、セルフレスト量、等に関する基礎研究から、各種コンクリート構造物への応用に関する研究まで多岐にわたり、膨張セメントコンクリートの物性とその応用範囲は相当に明らかにされつつある。

しかしながら、既往の研究を通覧すると、膨張セメントコンクリートの一つの重要な基礎的性状であるクリープ性状に関しては、研究報告も少なく、したがって、その性状と解析が十分になされていない¹⁾²⁾。

衆知のごとく、コンクリートのクリープは、応力、変形、等の設計計算上あるいはプレストレスの損失の計算上不可欠のものであり、特に膨張セメントコンクリートの場合には膨張という新規要因が加わるため、その性状を明らかにしておくことはきわめて重要なことと思われる。

本研究は、上記の観点から膨張セメントコンクリートのクリープ特性を基礎的に解明することを目的とし、著者らが現在までに行なった研究成果³⁾⁴⁾を参照したうえで、一般の土木工事に使用される標準的な配合のコンクリートを対象にして、

- (i) 膨張材の混入量
- (ii) クリープ試験時の養生条件

(iii) 膨張時の拘束状態

(iv) 載荷材令

の4要因について、それぞれの要因が膨張セメントコンクリートのクリープ性状におよぼす影響について実験的に検討した。なお、本研究は膨張材の効果によるコンクリートの膨張の大部分が終了した時点で単軸圧縮応力を与えた状態でクリープ試験を行なっている。

膨張セメントコンクリートの場合には、拘束による初期膨張量の減少もクリープの一種と考えなければならないことは当然であるが、本論文では膨張時のクリープは一応範囲外とし、一部この膨張時のクリープ、いわゆるプレクリープがその後載荷された場合のクリープ性状に及ぼす影響についてのみ触れている。

本研究で実験の対象とした膨張セメントコンクリートは、配合数も少なく、使用した膨張材も大部分の実験では1種類であるので、ここに得られた結論がすべての膨張セメントコンクリートに適用されるとは言えないが、カルシウム・サルフォ・アルミネートクリンカー系の膨張材を使用した膨張セメントコンクリートのクリープ特性について一応の目安と指針が得られたものと信ずる。

2. 使用材料ならびに試験方法

(1) 使用材料

a) セメント

本研究で使用したセメントは電気化学工業(株)青海工場製の普通ポルトランドセメント(以下セメントAという)および日本セメント(株)西多摩工場製の普通ポルトランドセメント(以下セメントBという)の2種類で、それぞれの試験成績は表-1、表-2に示すとおりである。

b) 膨張性混和材

本研究で使用した膨張性混和材(以下膨張材という)

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 東京工業大学 助手 同

表-1 実験に用いた普通ポルトランドセメントの物理試験成績

セメントの種別	比重	粉末度			凝 結					フロー値 (mm)	強 度 (kg/cm ²)					
		比表面積 ブレン (cm ² /gr)	88 μ 残分 (%)	水 量 (%)	始 発 (時-分)	凝 結 (時-分)	温 度 (°C)	湿 度 (%)	曲 げ			圧 縮				
									3日		7日	28日	3日	7日	28日	
セメントA	3.16	3220	1.7	25.8	2-43	3-45	20.2	84	258	31.8	49.2	70.4	129	228	417	
セメントB	3.15	3020	2.4	27.8	2-30	3-45	20.3	87	241	30.1	45.5	69.6	126	223	412	

表-2 膨張性混和材の試験成績ならびにセメントの化学成分

膨張性混和材およびセメント	比 重	粉 末 度		化 学 成 分 (%)							
		比表面積 ブレン (cm ² /gr)	88 μ 残分 (%)	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Total
膨 張 材 A	2.95	1960	43.2	0.4	3.3	12.5	1.3	53.0	0.5	27.3	99.6
膨 張 材 B	3.05	2250	28.3	0.6	1.3	7.2	0.4	59.7	0.6	30.2	100.0
セメント A	表-1 に示す			0.4	22.1	5.1	3.1	64.8	1.5	1.7	98.9
セメント B	表-1 に示す			0.7	21.9	5.1	3.0	64.8	1.3	2.0	99.2

表-3 コンクリートの標準配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空 気 量 圍 (%)	水セメント 膨張材比 W/C+E (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
					単位水量 W	(単位セメント+膨張材) (C+E)	細 骨 材 S	粗 骨 材 G		ポゾリス No. 5 L
								25~12.5mm	12.5~5mm	
25	5~7	4±0.5	40.5	31.0	141.8	350	578.7	658.7	658.7	0.875

注：1) E は膨張材の単位量を示す

2) 膨張材の置換えはセメント重量の内割りで行なったがこの置換率を膨張材混入量とする

は国産のカルシウム・サルフォ・アルミネートクリンカー系の膨張材であって、電気化学工業(株)製(商標デンカ CSA, 以下膨張材Aという)である。なお、一部の試験では日本セメント(株)製(商標アサノジブカル, 以下膨張材Bという)も使用した。これらの試験成績は表-2 に示すとおりである。

e) 骨 材

骨材は細粗骨材とも富士川産の川砂、川砂利を用いた。細骨材は比重2.61,粗粒率2.70,粗骨材は比重2.67,最大寸法25mm,粗粒率で7.19であった。

d) 減水剤

減水剤として日曹マスタービルダーズ社製のポゾリス No. 5 L をセメントの重量比で0.25%使用した。

e) P C 鋼 棒

住友電気工業(株)製3種P C鋼棒でφ12mmとφ18mmの2種類の呼び径のものを使用した。

(2) 試験方法

a) 供試体の製造

実験に用いたコンクリートの配合は表-3 に示されるように、一般の土木工事に用いられる標準的な配合である。表-3 には膨張材を混入しない普通コンクリートの配合のみを示したが、膨張セメントコンクリートの場合には、膨張材をセメントに置換えて使用したのみである。置換率(以下これを混入量という)は膨張材Aの場合、

11, 13, 15, 17%の4種、膨張材Bの場合13%の1種であり、合計6配合のコンクリートについて検討した。

クリープ試験に使用した供試体は図-1 に示すようなP C鋼棒による単軸拘束はり型供試体で、断面は15cm×15cm,長さは53cmである。一部の試験は長さ30cmのもので試験を行なったが、供試体の長さの相違による影響はほとんど認められなかった。

この方法は簡便なクリープ試験法としてよく知られた方法⁷⁾であるが、材令の経過に伴うクリープおよび乾燥収縮によって載荷応力が減少する欠点がある。本研究ではこの減少した応力を再導入することをせずに、補正計算によって結果の整理を行なった*。

供試体の製造は、図-1 に示す拘束板、シースとして使用した塩化ビニール管、P C鋼棒、およびナットから成る拘束セットをあらかじめ造り、これを型わく内に挿入してコンクリートを打設した。この場合拘束板は型わくの端板の役割りも同時に果たしている。

この方法の利点は打込み直後から生じるコンクリートの膨張を連続的に一定の条件において拘束することがで

* 補正計算は、膨張セメントコンクリートの場合初期の変形量が大いので、材令10日までは、 $y=At$ で近似し、材令10日以後は $y=B+C \log t$ の式で近似して行なった。その結果、最も大きな場合で全収縮ひずみの10~15%の補正が必要であった。なおP C鋼棒のレラクセーションに対する補正は行っていない。ここで y は全収縮ひずみ、 t は材令(日)、A, B および C は試験結果から得られる定数である。

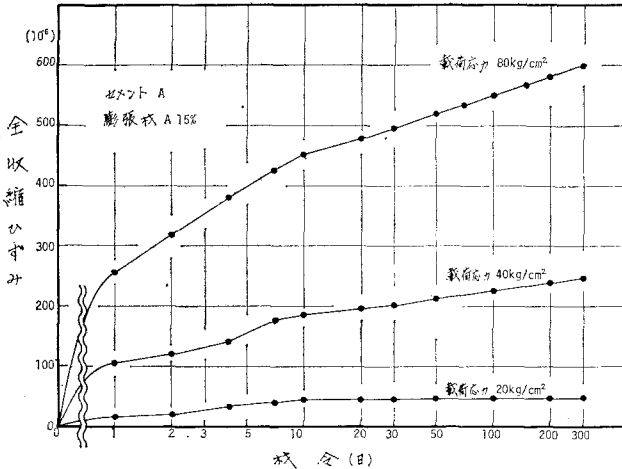


図-2 水中養生条件下の膨張セメントコンクリートのクリープ試験結果の一例

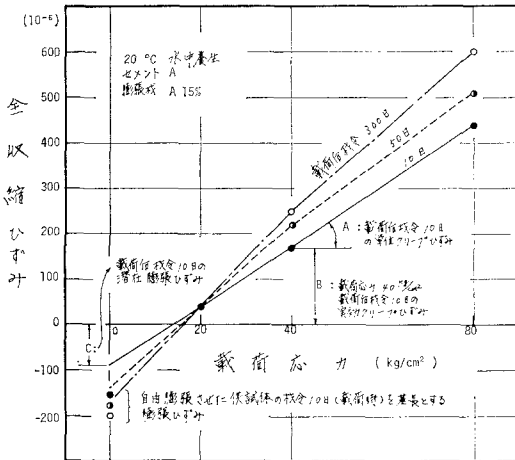


図-3 荷重応力と全収縮ひずみの関係の一例

ンクリートのクリープ特性を議論するに、次の定義を設けた。

(i) 単位クリープひずみ (Unit creep strain)

数段階の荷重応力を与え、それによって生じる全収縮ひずみの値を結んで得られた直線の勾配から求められる単位応力当りのクリープひずみ。

(ii) 実効クリープひずみ (Actual creep strain)

ある荷重応力を導入したときの供試体の示す全収縮ひずみ。

(iii) 潜在膨張ひずみ (Potential expansive strain)

数段階の荷重応力を与え、それらによって生じる全収縮ひずみの値を結んで得られる直線を外挿し、荷重応力 0 において示す膨張ひずみ。

すなわち、下記の 3 つの定義によって示されるひずみの模式図は図-3 に示すようであり、それぞれ次の特徴を有する。

単位クリープひずみは、荷重応力のレベルを変化させた試験から得られるもので、膨張セメントコンクリートのクリープ特性を論じたり、あるいは膨張材の種類、混入量を変化させた膨張セメントコンクリートのクリープ性状を比較する場合には適している。しかしながら、単位クリープひずみは単に図-3 に示した直線の傾きを示すのみであるので、クリープの絶対値を示すには不相当である。

一方、実効クリープひずみは、これを単位応力当たりの大きさで表示することはできないが、ある荷重応力を受けた状態での全収縮ひずみを示すものであるから、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实际的である。

潜在膨張ひずみは普通コンクリートのクリープ試験を乾燥条件下で行なう場合の乾燥収縮ひずみに相当するものであり、潜在膨張ひずみと単位クリープひずみが求められてあれば、実効クリープひずみは算出される。

そこで以下の実験結果の検討は単位クリープひずみと実効クリープひずみの 2 面から行なった。

(2) 膨張材混入量のおよぼす影響

図-4 は 図-3 と同様の方法で、膨張材 A の混入量を変化させた膨張セメントコンクリートの実効クリープひ

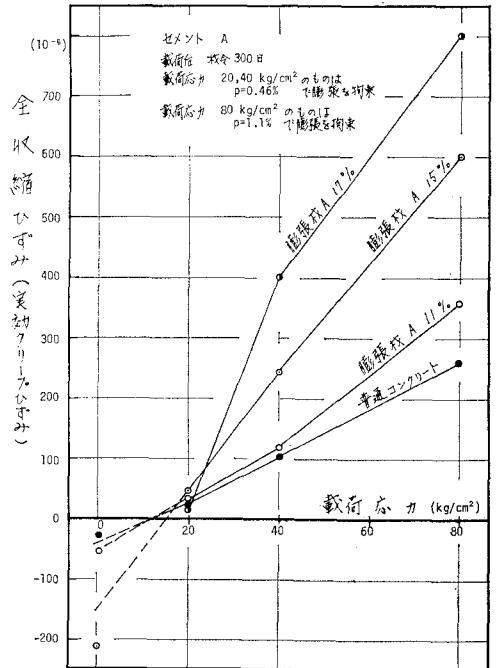


図-4 水中養生条件下における膨張材混入量と全収縮ひずみ (実効クリープひずみ) の関係

表-4 膨張材Aの混入量の相違する膨張セメントコンクリートの実効クリープひずみ (材令 300 日)
(使用セメント A, 水中養生条件, 載荷材令10日)

膨張材の混入量 (%)	材令 300 日における実効クリープひずみ (10 ⁻⁶)			
	載荷応力零 (潜在膨張ひずみ)	載荷応力 20 kg/cm ²	載荷応力 40 kg/cm ²	載荷応力 80 kg/cm ²
0	- 25 (1.00)	25 (1.00)	105 (1.00)	260 (1.00)
11	- 50 (2.00)	30 (1.20)	115 (1.10)	365 (1.40)
15	-211 (8.00)	45 (1.80)	240 (2.29)	595 (2.29)
17	不 能 (-)	15 (0.60)	400 (3.81)	800 (3.08)

注: () 内数字は普通コンクリート (混入量 0%) に対する比率を示す。

表-5 水中養生条件下のコンクリートのクリープ性状 (材令 300 日)

セメントの種類	混入材量 (%)	載荷時の圧縮強度 (kg/cm ²)	載荷時の弾性ひずみ (10 ⁻⁴ %) (kg/cm ²)	単位クリープひずみ (10 ⁻⁶) (kg/cm ²)	クリープ係数
セメントA (載荷材令 10 日)	0% (普通コンクリート)	387	3.9	4.0(1.00)	1.0(1.00)
	A11%	373	4.0	5.1(1.27)	1.3(1.30)
	A15%	275	5.6	9.2(2.30)	1.6(1.60)
	A17%	201	6.3	13.7(3.43)	2.2(2.20)
セメントB (載荷材令 7 日)	0% (普通コンクリート)	287	4.4	5.3(1.00)	1.2(1.00)
	A11%	298	4.1	5.0(0.94)	1.2(1.00)
	A15%	299	4.8	4.8(0.91)	1.0(0.84)

注: () 内数字は普通コンクリート (混入量 0%) に対する比率を示す

ずみと載荷応力との関係を示したものである。混入量によっては3段階の載荷応力によって生じた実効クリープひずみが必ずしも直線を示さないものもあるが、一応図-3において得られた結論がこの場合にも適用できる。この試験結果から前節の定義に基づいて膨張材Aの混入量の相違するコンクリートの材令300日における実効クリープひずみと単位クリープひずみの一覧を求めると表-4および表-5のようである。

表-4によれば、膨張材混入量の相違する膨張セメントコンクリートの実効クリープひずみは、載荷応力 20

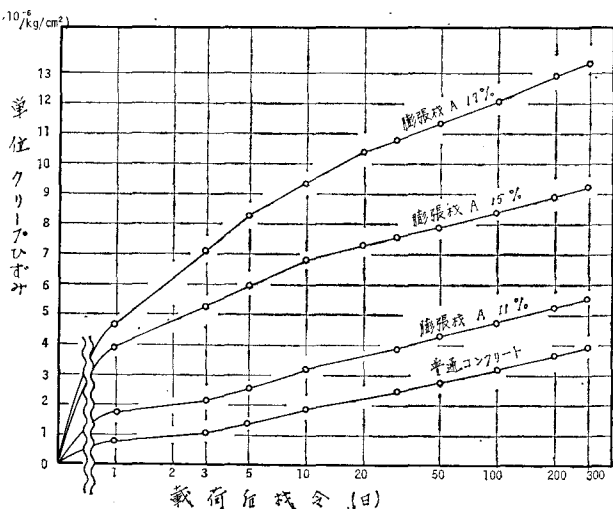


図-5 水中養生条件下の単位クリープひずみの材令に伴う変化

kg/cm² の場合、全く差が認められないが、載荷応力が 40 および 80 kg/cm² の場合には膨張材混入量の増加に伴って実効クリープひずみが著しく増大し、膨張材混入量の大きい場合には普通コンクリートの 2~3 倍にも達することが示されている。

次に、表-5 に示す単位クリープひずみについてみると、普通コンクリートの場合 4.0×10⁻⁶/kg/cm² であったものが、混入量 11% でわずかに増加し、15% では普通コンクリートの 2.3 倍、17% では 3.4 倍となり、膨張材混入量の増加は水中養生条件下の単位クリープひずみをも著しく増加させることが示されている。また、クリープ係数で比較すると、膨張セメントコンクリートの場合、一般に膨張材混入量の増加に伴って強度、ならびにヤング率が低下するため、単位クリープひずみで比較するよりも傾向はいくぶん緩やかにはなるが、やはり混入量の増加に伴ってクリープ係数も増大している。

最後に、図-5 は、単位クリープひずみの材令に伴う変化を示したものである。この図によれば水中養生条件下の膨張セメントコンクリートのクリープひずみの増加速度が大きいのは、特に載荷後の材令初期においてであり、材令が十分に経過したのちには、材令に伴う単位クリープひずみの増加率は、いずれのコンクリートについても同程度である。したがって材令初期におけるクリープひずみの差が長期材令においても継続していることが示されている。

(3) 載荷時までの拘束状態のおよぼす影響

膨張セメントコンクリートの力学的性状は、膨張材混入量の相違のみならず、膨張時の拘束状態によっても著しく影響を受けることが報告されている³⁾。したがって膨張セメントコンクリートのクリープ性状もこの種の拘束状態によって変化することが考えられるので実験的に検討した。

図-6 は、その試験結果を示したものであるが、膨張時の拘束状態のとして

- (i) 自由膨張させたもの
- (ii) φ 12 mm の鋼棒で膨張を拘束したもの
- (iii) φ 12 mm の PC 鋼棒による拘束に加えて、材令 2 日に 10 kg/cm² の機械的ストレスを導入したもの

の 3 段階について検討した。なお、実験は供試体数の制約もあり、載荷応力 40 kg/cm² の場合についてのみ実施した。したがって図-6 の縦軸は 40 kg/cm² の載荷応力を受けた場合の実効クリープひずみで示してある。試験結果によればあらかじめ予想したごとく、膨張時の拘束状態の差異は実効クリープひずみに大きな影響を与えており、

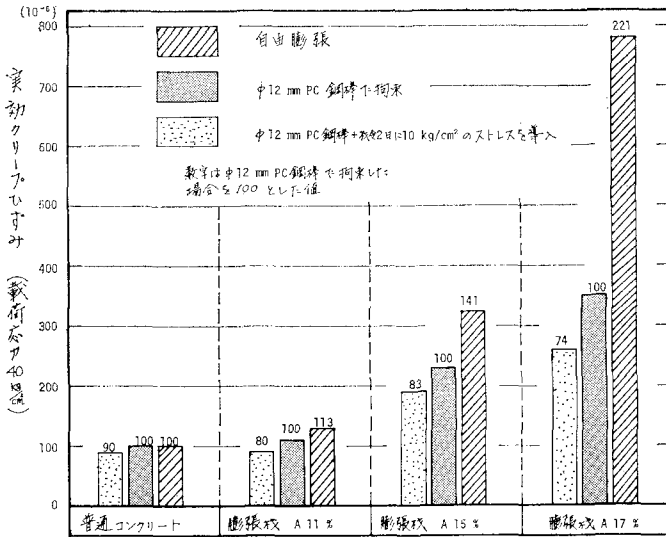


図-6 膨張時の拘束の程度が実効クリープひずみにおよぼす影響 (水中養生, 載荷後材令 300日)

また、その影響は膨張材混入量が大きく、膨張量の大きいコンクリートほど明りように示されている。

たとえば膨張材Aを17%混入した場合、φ12mmのPC鋼棒で拘束した供試体に40kg/cm²の載荷応力を与えた場合の実効クリープひずみを100とすると、自由膨張させた供試体の場合は221にも達し、逆に材令2日で10kg/cm²の機械的プレストレスを導入して拘束状態を増したものは74となりかなり減少しており、膨張時の拘束の大きいほど実効クリープひずみが小さくなること示されている。同様のことが膨張材の各混入量の場合についてもいえるが、混入量が小さい場合にはその影響は微小となり、この傾向は拘束の程度が圧縮強度に及ぼす影響と酷似している^{3), 6)}。この載荷前の拘束状態がクリープに及ぼす影響はいわゆるプレクリープの影響であって、普通コンクリートの場合にも認められる現象であるが、膨張セメントコンクリートの場合には、その影響が特に大きかったと考えることができる。すなわち、膨張セメントコンクリートの場合には、拘束された状態での初期膨張と自由膨張との差をプレクリープと考えることができる。したがって、拘束供試体の載荷後のクリープは自由膨張供試体のクリープよりも、プレクリープの影響により小さくすると理解できる。また、膨張セメントコンクリートの場合、初期膨張の拘束はプレクリープの増加のみならず、コンクリートの微細構造の弱体化をも防止するので、拘束の影響が特に大きく生じるのであろう。

(4) 載荷時の圧縮強度との相関性

前節において、膨張材の混入量や膨張時の拘束状態の

相違が膨張セメントコンクリートのクリープに影響をおよぼすことを述べたが、これらの要因はいずれも圧縮強度、その他の力学的性状にも影響を及ぼすことが知られている^{3), 8)}。

そこで、本節では膨張セメントコンクリートのクリープと圧縮強度との相関性を検討した。

図-7は40kg/cm²の応力を導入したときの材令300日における実効クリープひずみと、クリープ試験体と全く同様にして造られた供試体による載荷時の圧縮強度の関係を示したものである。図中の各点は膨張材混入量および膨張時の拘束状態が、それぞれ相違しているにもかかわらず実効クリープひずみを載荷時の圧縮強度との関係において図示するとかなりよい精度で一つの曲線で表わすことができることが示されて

いる。このことは普通コンクリートと同様、膨張セメントコンクリートにおいても載荷時の圧縮強度とクリープひずみとは強い相関があり、したがって膨張セメントコンクリートの実効クリープひずみの大きさは、膨張材混入量の多少および膨張時の拘束程度にかかわらず、その圧縮強度からある程度推定できることの可能性を示している。

なお、図中に示した×印はφ12mmのPC鋼棒による拘束に加え材令2日に10kg/cm²の機械的プレストレスを

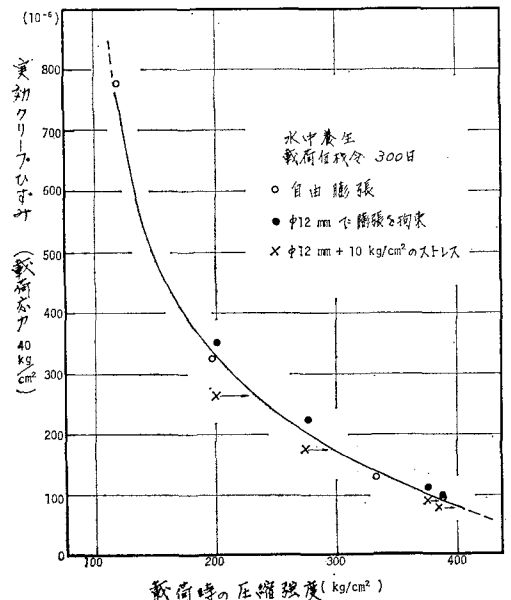


図-7 載荷時の圧縮強度と実効クリープひずみの相関性

導入した供試体の実効クリープひずみを示しているが、この拘束状態の供試体については載荷時の圧縮強度を測定しなかったため、一応 $\phi 12 \text{ mm}$ の PC 鋼棒で拘束した供試体の圧縮強度と同じ値を有するとして図示した。実際には拘束の程度が増加しており、図の矢印の方向に移動する可能性が大きいので、この種の拘束を受けた場合にも、圧縮強度と実効クリープひずみとの相関性の強いことが推定される。その他、膨張セメントコンクリートの実効クリープひずみを、載荷時まで供試体が示す膨張ひずみとの関係において表示すると、圧縮強度との相関性ほどではないが、これらの間にもかなり強い相関のあることが認められた。試験の結果は紙面の都合から省略するが、膨張材の種類、混入量、および初期膨張時の拘束の程度の変化にかかわらず載荷時までの膨張ひずみが 500×10^{-6} 以下であれば、その膨張セメントコンクリートのクリープ性状は普通コンクリートのクリープ性状と全く変わらないことが示された。

(5) セメントの品質の相違がおよぼす影響

膨張材には併用して用いるセメントとの感応性があることは、すでに著者らが指摘してきたことであるが^{9), 10)} 膨張セメントコンクリートのクリープ性状も用いる膨張材とセメントとの相性によって著しく変化することが認められた。

たとえば、図-8 は膨張材 A と併用するセメントの品質の相違が、膨張性状に及ぼす影響を示したものであって、膨張材 A を 15% 使用した場合の膨張ひずみを示している。これまで述べてきたセメント A を用いた場合には、材令 2 日から材令 7 日までの膨張ひずみが、自由膨

張ひずみで 1500×10^{-6} 、拘束膨張ひずみ（拘束鉄筋比 $p=0.46\%$ ）で 800×10^{-6} であって十分な膨張を示しているがセメント B の場合には同期間における膨張ひずみが、自由膨張ひずみで 250×10^{-6} 、拘束膨張ひずみで 150×10^{-6} と極端に膨張ひずみが小さくなっている。このセメントの品質の相違による膨張ひずみの変化は、クリープ性状にも当然影響を及ぼしており、表-5 に示す単位クリープひずみの大きさからわかるように、セメント B の場合は膨張材混入量が増加しても単位クリープひずみは全く変化を示していない。これはセメント B を用いた場合には、膨張材を使用しても圧縮強度の低下もなく、初期膨張も 500×10^{-6} 以下であったことから当然のことともいえる。

4. 乾燥養生条件下の膨張セメントコンクリートのクリープ性状

(1) 膨張材混入量のおよぼす影響

本章では、載荷直後から乾燥条件下に保たれた場合の膨張セメントコンクリートのクリープ特性について検討する。

まず、図-9 は材令 10 日までの水中養生期間に供試体に生じる膨張ひずみを PC 鋼棒により拘束しておき、材令 10 日に一度拘束を弛めたのち、改めて 20, 40, 80 kg/cm^2 の各載荷応力を与え、その後 20°C, 50% R.H. の条件下で乾燥養生した場合に材令 300 日において供試

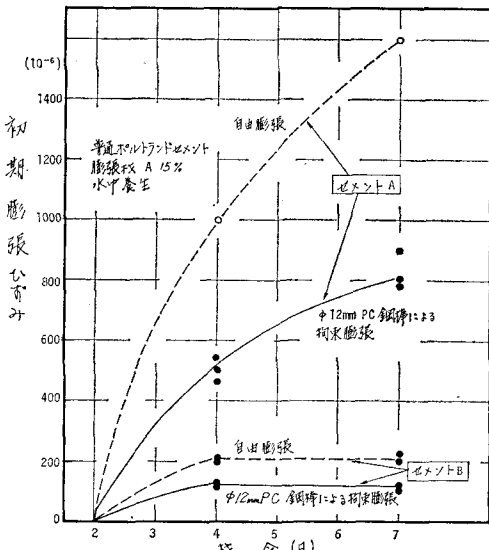


図-8 セメントの品質の相違が初期膨張ひずみにおよぼす影響の一例

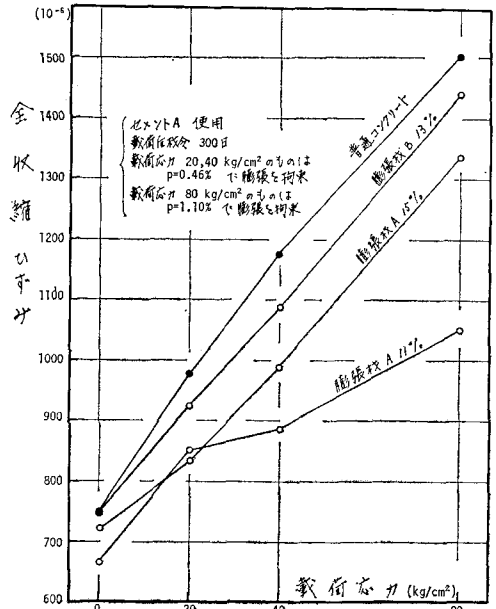


図-9 乾燥養生条件下における膨張材混入量と全収縮ひずみの関係 (20°C, 50% R.H.)

表-6 乾燥養生条件下のコンクリートのクリープ性状
(材令 300 日)

セメント 種別	混和 材量 (%)	載荷時の 圧縮強度 (kg/cm ²)	載荷時の弾 性ひずみ (10 ⁻⁶ / kg/cm ²)	単位クリー プひずみ (10 ⁻⁶ / kg/cm ²)	クリープ 係数
セメントA (載荷材令 10 日)	0% (普通コ ンクリ ート)	387	3.9	9.0(1.00)	2.3(1.00)
	A11%	373	4.0	4.6(0.51)	1.2(0.52)
	A15%	275	5.6	8.5(0.94)	1.5(0.65)
	B13%	280	6.3	8.5(0.94)	1.3(0.57)
セメントB (載荷材令 7 日)	0% (普通コ ンクリ ート)	287	4.4	13.0(1.00)	2.9(1.00)
	A11%	298	4.1	9.0(0.69)	2.2(0.76)
	A15%	299	4.8	7.4(0.57)	1.5(0.52)

注：() 内数字は普通コンクリート (混入量 0%) に対する比率を示す

体に生じる収縮ひずみ、ならびに材令 10 日まで水中にて自由膨張させた供試体の材令 10 日の長さを基長とし、その後上記の乾燥条件下で乾燥させた場合に、供試体に生じる収縮ひずみ (乾燥収縮ひずみ) のそれぞれを載荷応力との関係において表示したものである。したがって、この図は水中養生条件下に保たれた場合の図-4 と対応するものである。

図-9 によれば、乾燥条件下においても載荷応力と収縮ひずみとはよい直線関係を示しており、さらにこの直

線を外挿して得られる載荷応力 0 における収縮ひずみの値は、自由膨張させた供試体の示す乾燥収縮ひずみとよく一致していることが認められる。

既往の研究によれば、膨張時に拘束を受けた供試体と拘束を受けない供試体とでは、乾燥収縮ひずみに差のないことが報告されているので^{3),4)}、図-9 に示す結果は妥当性のあるものと考えられ、乾燥条件下における膨張セメントコンクリートのクリープは、普通コンクリートと全く同様にして整理してよいことが示されている。

しかしながら、ここできわめて興味あることは、膨張セメントコンクリートの全収縮ひずみは載荷応力 0 において小さいばかりでなく、すなわち、乾燥収縮ひずみが小さいばかりでなく、各載荷応力のすべての段階で普通コンクリートの全収縮ひずみよりも小さいことである。さらに図-9 に示された直線の傾きから算出された材令 300 日における単位クリープひずみを表-6 に示したが、この結果によれば普通コンクリートの場合 $9.0 \times 10^{-6} / \text{kg/cm}^2$ の単位クリープひずみを示したのに対し膨張材 A15% 混入、膨張材 B13% 混入の場合には普通コンクリートと同程度、膨張材 A11% 混入の場合には、普通コンクリートの約半分の値を示しており、乾燥条件下における膨張セメントコンクリートの単位クリープひずみは、普通コンクリートと比較して決して大きくなく、かえって減少する傾向にあることが認められる。

次に、水中養生の場合の図-5 と同様に、乾燥条件下の膨張セメントコンクリートの単位クリープひずみの材令に伴う変化を示すと図-10 のようである。この図によれば載荷後の材令の初期においては膨張コンクリートの単位クリープひずみのほうが、普通コンクリートの単位クリープひずみよりも大きい、材令が進行するにしたがって普通コンクリートの単位クリープひずみの増加が著しく、最終的には逆転する傾向にあることが示されている。この傾向は水中養生条件下に保たれた場合と全く相違している。

普通コンクリート、膨張セメントコンクリートの両者に対し、水中養生条件下と乾燥養生条件下での材令 300 日におけるそれぞれの単位クリープひずみおよび載荷応力 40 kg/cm² の場合の全収縮ひずみ (水中養生の場合は実効クリープひずみと定義した) の大きさを比較すると図-11 のようである。普通コンクリートについては、乾燥条件下の単位クリープひずみが水中養生条件下の場合に比較して 2 倍以上に増加していることは、これま

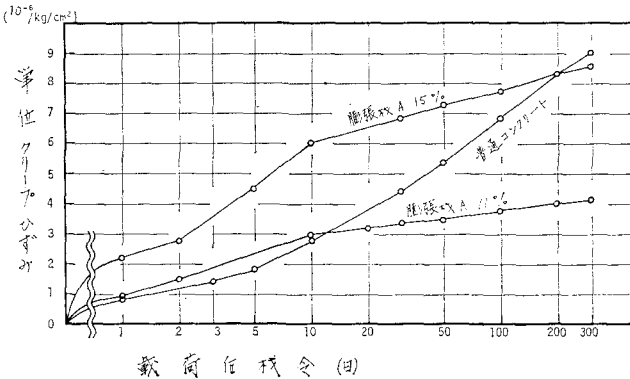


図-10 乾燥養生条件下での単位クリープひずみの材令に伴う変化

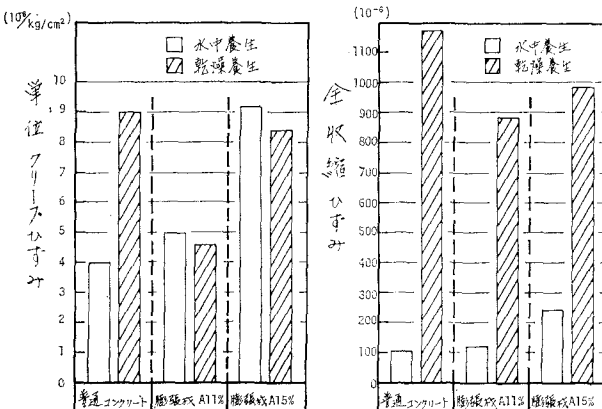


図-11 養生条件の相違がクリープひずみにおよぼす影響
(載荷後材令 300 日)

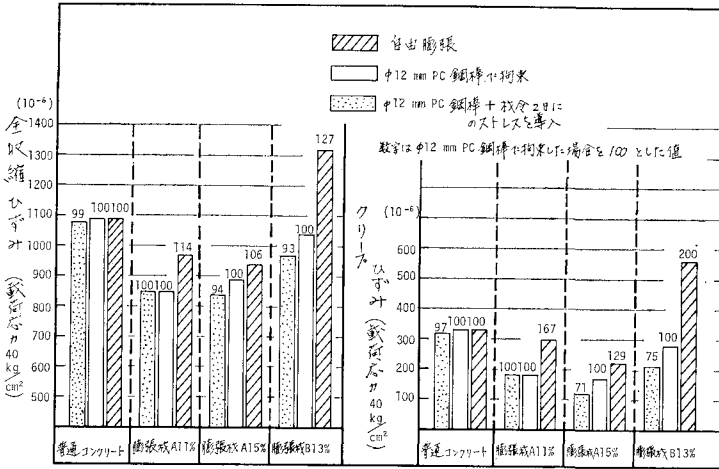


図-12 膨張時の拘束の程度がクリープにおよぼす影響
(乾燥養生 載荷後材令300日)

での研究によって明らかにされているとおりであるが、これに反して膨張セメントコンクリートでは、膨張材Aを11%用いた場合、15%用いた場合のいずれも乾燥養生条件下の単位クリープひずみのほうが小さく、普通コンクリートとは全く相違するクリープ特性を示すことが認められた。なお、図-11に示すように全収縮ひずみで比較すれば、乾燥収縮の影響により乾燥条件下の場合の方が大きいことは当然であるが、その増加の割合は膨張セメントコンクリートの方が小さくなっている。

(2) 載荷時までの拘束状態のおよぼす影響

3.(3)に述べたことと全く同様の実験を乾燥条件下においても実施した。

実験の結果は、図-12に示すようであって、図-6において示したと同様、拘束状態は

- (i) 載荷時まで自由膨張させたもの
- (ii) φ12mmのPC鋼棒で膨張を拘束したもの
- (iii) φ12mmのPC鋼棒による拘束に加えて、材令2日に10kg/cm²の機械的ストレスを導入したもの

の3種類である。

なお図-12ではこの試験が乾燥条件下で行なわれたことを考慮して、縦軸に全収縮ひずみを採用した場合と、クリープひずみ(全収縮ひずみ-乾燥収縮ひずみ)を採用した場合の両者を示している。

載荷時までの拘束状態の相違がおよぼす影響は、全収縮ひずみで比較した場合には水中養生条件下での結果よりも緩和されること、特に膨張セメントコンクリートにおいて、その緩和の程度が著しいこと、また、全収縮ひずみは、1個の資料を除いて普通コンクリートよりも小さくなることなどが示されている。しかしながら、ク

ープひずみで示した結果によれば、拘束状態の相違の及ぼす影響は、水中養生条件下の場合とほぼ同程度となり、やはり膨張時に受ける拘束はプレクリープを発生し、その影響によって乾燥養生条件下でのクリープひずみが、小さくなることが示されている。

(3) セメントの品質の相違がおよぼす影響

膨張材AとセメントBの組合せによって造られた膨張セメントコンクリートは、セメントAを用いた場合に比べて、水中養生期間中の膨張量が著しく小さく、ために水中養生条

件下におけるクリープひずみは普通コンクリートのクリープひずみと同程度であった。したがって、乾燥養生条件下においても、セメントBを用いた場合には膨張材の混入はそのクリープ性状に影響せず、普通コンクリートと変わらない大きさであると考えられた。

しかしながら、実験結果を整理した表-6に示す単位クリープひずみで比較すると、セメントBを用いた場合にも、セメントAを用いた場合と同様に普通コンクリートの単位クリープひずみよりも小さくなることが示されており、膨張をそれほど起こさない場合にも、乾燥養生条件下における膨張セメントコンクリートのクリープひずみは、普通コンクリートのクリープひずみよりも減少することが認められた。

ここで表-6に示す乾燥養生条件下のクリープ試験結果を通覧すると、セメントAを使用した場合には、混入量11%の場合が最小の単位クリープひずみを示しており、セメントBを使用した場合には、混入量15%の場合が最小の単位クリープひずみを示している。この両者のコンクリートの初期水中養生期間における拘束膨張ひずみは、それぞれ170×10⁻⁶および130×10⁻⁶であって、ほぼ同程度の膨張ひずみであった。また、両者とも膨張材の混入による強度低下は認められなかった。

上記の事実から、乾燥養生条件下で膨張セメントコンクリートの単位クリープひずみが最小となるのは、内部構造の劣化を起こすほどには膨張せず、しかも膨張材の混入により、エトリンガイトが十分に発生しているコンクリートであると考えられ、このような配合の膨張セメントコンクリートを使用すれば、乾燥条件下のクリープひずみを普通コンクリートの約半分程度に減少せしめることも可能であることが推定される。

5. 長期材令における膨張セメントコンクリートのクリープ性状

(1) 荷重材令の相違がおよぼす影響

材令が十分に経過し、内部構造的にも十分に安定したと思われる時点における膨張セメントコンクリートのクリープ特性を検討するため、

(i) 荷重材令の及ぼす影響

(ii) 膨張セメントコンクリートのクリープ回復

の2点に関して試験を行なった。

始めに、荷重材令の影響についてであるが、図-5において説明したように水中養生条件下に保たれた膨張セメントコンクリートの単位クリープひずみは、荷重後の材令初期において著しく増加することが示されている。その理由として、膨張による強度低下によるもののほか、荷重後に生成されるエトリングایتによる内部構造の不安定化が考えられる。荒木らは膨張材Aを用いた膨張セメントコンクリートを材令1日で荷重した場合、水中養生下のクリープひずみは著しく増大すると報告し¹³⁾、これを荷重後のエトリングایتの発生が著しいためと考察している。

本研究では、このエトリングایتの生成による内部構造の不安定化がクリープひずみに及ぼす影響を検討すべく、十分に材令が経過し、膨張が完全に終了し、内部構造が安定したと思われる時点で荷重し、クリープ試験を行なった。すなわち、膨張を拘束することなしに、約1年間水中養生を続けた膨張セメントコンクリート供試体に 40 kg/cm^2 の応力を導入し、水中養生条件下でクリープ試験を行なったのである。実験結果の一例は図-13に示すようであるが、この図には比較のため材令10日で荷重した場合の試験値も表示してある。

材令10日で荷重した場合には、膨張材の混入量によって著しい相違があったにもかかわらず、ほぼ1年を経過して荷重した場合には、膨張材混入量の相違の影響が認められない。このことは水中において自由膨張せしめた膨張セメントコンクリートであっても、材令が十分に経過したのちには、クリープひずみが大きくなることを明りょうに示すものと思われる。

(2) 膨張セメントコンクリートのクリープ回復

膨張セメントコンクリートのクリープ回復を検討するため、水中養生条件下で約1年間

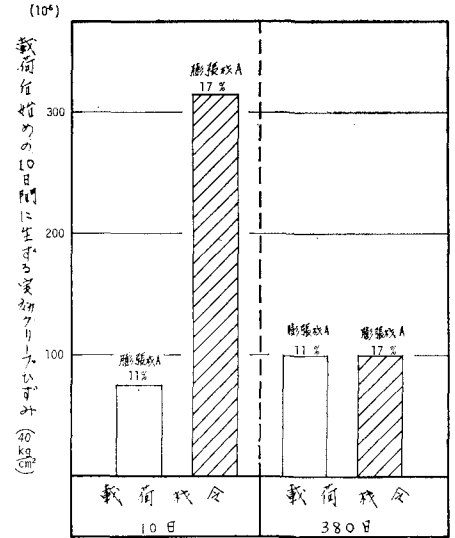


図-13 荷重材令の実効クリープひずみ (40 kg/cm^2) におよぼす影響

にわたってクリープ試験を行なった供試体を除荷し、弾性回復ひずみとクリープ回復を測定した。実験の結果は図-14に示すようである。

まず、図-14に示す除荷時の弾性回復ひずみについては、膨張セメントコンクリートの回復ひずみは普通コンクリートよりもいくぶん大きな値を示しており、膨張材混入量の異なるほど大きな値を示しているが、その差はきわめてわずかである。また、弾性回復ひずみと除荷時の供試体の応力から算出されるコンクリートの弾性係数も、膨張セメントコンクリートと普通コンクリートでは、ほぼ同程度の値を示している。したがって、除荷時の状態では膨張セメントコンクリートの力学的性状は普通コンクリートと変わらないと考えてよいであろう。

次に、クリープ回復については、これも弾性回復ひずみの場合と同様に、膨張セメントコンクリートの方が、

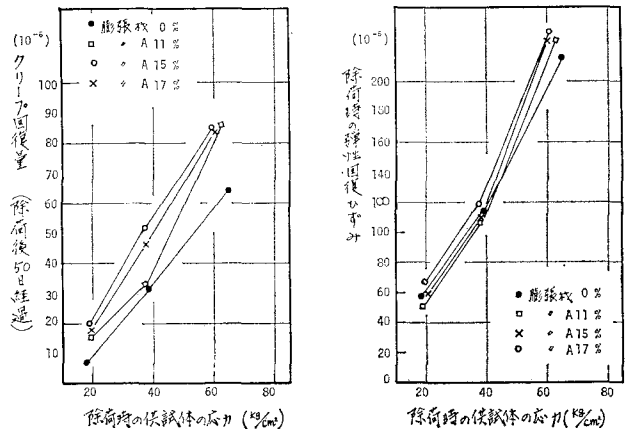


図-14 膨張セメントコンクリートのクリープ回復性状 (セメントA)

普通コンクリートよりもいくぶん大きな値を示してはいるが、本質的な相違は認められない。したがって、水中養生条件下で認められた膨張セメントコンクリートのクリープひずみの増加は、その大部分が非回復性のクリープであるといえる。

以上に述べた現象は、いずれも十分に材令が経過して、内部構造的に安定した場合には、膨張セメントコンクリートのクリープ特性が、普通コンクリートのクリープ特性と変わらなくなることを示している。また、逆の言いかたをすれば、膨張セメントコンクリートにおいては、載荷材令の相違がクリープ性状に及ぼす影響はきわめて著しいと結論できる。

6. 膨張セメントコンクリートのクリープ機構の考察

前章までに述べたように、膨張セメントコンクリートのクリープ性状は養生条件、載荷材令、等の相違によって著しく変化する。たとえば、水中養生条件下において、膨張セメント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に比較して著しく増大するが、乾燥条件下では逆の現象が生じる。また、普通コンクリートの乾燥養生条件下における単位クリープひずみは、一般に言われているように水中養生の場合の2倍以上の値を示したが、膨張セメントコンクリートの乾燥条件下の単位クリープひずみは、水中養生条件下とほぼ同じ値を示したのである。

これらの現象は、膨張セメントコンクリートのクリープ性状が、普通コンクリートに比較してかなり相違していることを明らかに示しており、したがって、膨張セメントコンクリートのクリープ機構も普通コンクリートのクリープ機構と異なることが十分考えられる。本章では、これまでに述べた実験結果について総合的な検討を加え、膨張セメントコンクリートのクリープ機構について考察を加えてみたい。

図-5 および 図-10 に示された単位クリープひずみの材令に伴う変化を模式図で表示すると、図-15 のようである。すなわち、図-15 は横軸に材令を対数目盛で表示し、縦軸には水中養生および乾燥養生条件下における膨張セメントコンクリート、ならびに普通コンクリートの単位クリープひずみを表示したものである。

コンクリートのクリープは、載荷後の材令初期に生じる比較的速度の大きな非定常クリープ (Transient creep) と、それに続くほぼ直線で示される定常クリープ (Steady-state creep) の2段階に分けて解析できるといわれているが^{12)~15)}、今回の実験結果でも普通コンクリート、ならびに膨張セメントコンクリートのいずれも上

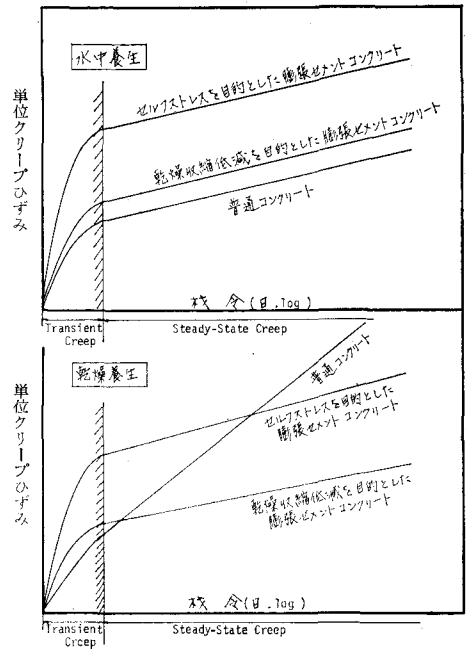


図-15 膨張セメントコンクリートのクリープ性状の相違

記の2段階に分割できるような結果が得られた。

しかしながら、図-15 に示されているとおり、膨張セメントコンクリートと普通コンクリートとは、その性状がかなり相違している。たとえば、水中養生条件下では膨張セメントコンクリートの Transient creep は普通コンクリートよりも大きい、Steady-state creep は同程度である。一方、乾燥養生条件下では膨張セメントコンクリートの Transient creep が大きいことは水中養生の場合と同じであるが、Steady-state creep は普通コンクリートの方がはるかに大きく、ためにある材令において普通コンクリートの単位クリープひずみは膨張セメントコンクリートよりも大きくなる。

これらの現象は、次のような理由によるものと考察される。すなわち、既往の研究によれば¹²⁾、コンクリートのクリープ機構を説明する要因として

- i) Viscous flow
- ii) Plastic flow
- iii) Seepage
- iv) Elastic after-effect

の理論があげられており、材令初期に生じる Transient creep の機構要因としては、セメント硬化体中の構造骨格的な変化を起こすもの、すなわち、Plastic flow および Elastic after-effect が考えられている。膨張セメントコンクリートの Transient creep が水中養生条件、乾燥養生条件にかかわらず普通コンクリートよりも大きいのは、Plastic flow や、Elastic after-effect の影響が、

普通コンクリートよりも大きいことによるのであろう。

膨張材の混入量が多く膨張ひずみが大きい場合には、著しい強度低下が生じることからもわかるように、膨張セメントコンクリートは膨張による空隙率の増加や生成されるエトリンガイトの剛性が小さいことなどのため、構造的には弱体化し、不安定状態にある。このような状態で外力を受けた膨張セメントコンクリートは、容易に構造的な局所破壊 (Plastic flow or micro crack) を惹起し大きなクリープひずみを生じるのであろう。このことは、図-6 や 図-12 に示されたように、膨張時の拘束が少なく載荷時までの膨張ひずみの大きかった場合ほど、クリープひずみが増大することからも実証されていると思われる。

さらに、もう一つの理由として外力を受けた状態でのエトリンガイトの生成が Transient creep を大きくする方向に作用していることが考えられる。これと同様のことは、アルミナセメントコンクリートの転移中に応力が載荷された場合には、転移前および転移後に載荷された場合と比較して著しく大きなクリープひずみが生じることが指摘されており¹⁹⁾、これらは、いずれも内部の結晶構造の変化の途中、すなわち、内部構造骨格が変化を生じているときに外力を受けると、クリープひずみが大きくなることによるものであろう。このことは 図-13 に示されたように長期間材令が経過してから載荷した場合には Transient creep が膨張材の混入量によって影響されないことから実証されていると思われる。

次に Steady-state creep の機構としては、Viscous flow のようなゲル硬化体の連続的な定常流が考えられ、乾燥条件下ではさらに Seepage の影響が考えられている。実験結果によれば、水中養生条件下では膨張セメントコンクリートも、普通コンクリートと全く同様の Steady-state creep を示しており、したがって、上記の理論を適用すると多量のエトリンガイト生成物を含む膨張セメント硬化体も、普通ポルトランドセメント硬化体も Viscous flow は同じことになる。これについては異論もあるところであるが、今回の実験では確かめられていない。

次に、乾燥養生条件下の普通コンクリートの Steady-state creep が水中養生条件の場合に比較して、大きな値を示すのは、Seepage の影響と考えてよいであろう。膨張セメントコンクリートの場合、乾燥養生条件下と水中養生条件下で Steady-state creep に差がないのは、膨張材によって生成されるエトリンガイト自身の結合水がきわめて多く、ためにゲル水が減少すること、また、エトリンガイトは針状結晶構造であることなどが、Seepage の影響を少なくしているものと推定される。このことは表-6 に示したように膨張材の混入によって膨張

しなかったコンクリートでも、そのクリープひずみが普通コンクリートよりも小さかった事実からも裏づけられる。

以上、本実験で得られた資料を基にして、膨張セメントコンクリートのクリープ機構に対していくばくかの考察を加えたが、普通コンクリートのクリープ機構すら完全に解明されていない現状において、上述の考察が不完全であることは当然であり、今後、さらに検討したいと考えている。

7. 結 論

大略 150 本のクリープ試験供試体により、膨張セメントコンクリートのクリープ特性について、実験的に検討した。

実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 水中養生条件下に保たれた膨張セメントコンクリートのクリープ性状は、実効クリープひずみと単位クリープひずみの 2 面から検討されなければならない。ここで、実効クリープひずみとは、ある応力が載荷された供試体の示す全収縮ひずみをいい、単位クリープひずみとは、数段階の水準で載荷された数個の供試体の示す全収縮ひずみを結ぶ直線の傾きをいう。なお、この直線を外挿して載荷応力零で交わる点のひずみを、本論文では潜在膨張ひずみと定義した。この潜在膨張ひずみは乾燥条件下で普通コンクリートのクリープ試験を行なうときの乾燥収縮ひずみに対応するひずみである。

(2) 乾燥養生条件下に保たれた膨張セメントコンクリートのクリープ性状は、普通コンクリートの場合と全く同様にして解析できる。すなわち、ある載荷応力を受けた供試体の示す全収縮ひずみは、乾燥収縮ひずみとクリープひずみの和として示すことができる。

(3) 膨張セメントコンクリートのクリープ性状は、クリープ試験時の養生条件によって著しく相違する。たとえば、水中養生条件下に保たれた場合には、膨張材混入量の増大はクリープひずみ、特に載荷後の材令初期のクリープひずみを増加させる。しかしながら、乾燥養生条件下に保たれた場合には、膨張セメントコンクリートのクリープひずみは普通コンクリートよりも大きくない。さらに、適量の膨張材を混入した場合には、普通コンクリートのクリープひずみよりも小さくなることもある。

(4) 材令に伴う膨張セメントコンクリートの単位クリープひずみの増加過程について検討した結果、載荷後の初期材令に生じる Transient creep は水中養生、乾燥養生条件下を問わず、膨張セメントコンクリートの方が普通コンクリートより大きいことが示された。しかし

ながら、Steady-state creep については、膨張セメントコンクリートのクリープは、水中養生条件下で普通コンクリートと同程度であること、乾燥養生条件下では普通コンクリートより小さいことが示された。

(5) クリープ試験載荷時までの拘束条件によっても膨張セメントコンクリートのクリープ性状は著しく影響される。拘束が少なく、載荷時までには膨張セメントコンクリートに生じる膨張ひずみの大きかったものほど、載荷後のクリープひずみが大きくなる。これは膨張セメントコンクリートの場合、プレクリープの影響が特に大きいことを示している。

(6) 膨張セメントコンクリートの場合、載荷材令のクリープひずみにおよぼす影響は普通コンクリートの場合より大きい。膨張過程が終了したと思われる時期に載荷した供試体の示すクリープひずみは、膨張過程において載荷した場合よりも著しく小さかった。

(7) 銘柄を同じくする普通ポルトランドセメントであっても、用いるセメントによって、同一量の膨張材を混入した膨張セメントコンクリートの膨張性状、クリープ性状は大幅に相違した。このことは膨張材と併用するセメントの選定、ならびにセメントの均質性が特に重要視されなければならないことを示すものである。

参 考 文 献

- 1) ACI Committee 223: Expansive Cement Concrete—Present State of Knowledge, Jour. of ACI, August, 1970.
- 2) Klein, A., Bertero, V.: Effects of Curing Temperature and Creep Characteristics of Expansive Concrete, Proc. of ASTM, Vol. 63, 1963.
- 3) 長滝・米山・後藤・八巻: 拘束を受けた膨張セメントコンクリートの基礎的性状, セメント技術年報 Vol. 24, 1970.
- 4) 長滝・後藤・今井: 膨張セメントコンクリートのクリープ性状, 土木学会第25回年次学術講演会講演集, No. 5, 1970.
- 5) 長滝・後藤: 若材令における膨張コンクリートのクリープ性状, 土木学会第26回年次学術講演会講演集, No. 5, 1971.
- 6) 長滝・米山: 膨張セメントコンクリート舗装に関する研究, 土木学会論文報告集に第206号, 1972.
- 7) 国分正胤編土木材料実験, p. 355, 技報堂 1969.
- 8) Bertero, V.: Curing Effects on Expansion and Mechanical Behaviours of Expansive Cement Concrete, Jour. of ACI, Feb., 1967.
- 9) 長滝・米山: 乾燥収縮防止材料の使用に関する基礎研究(第1報), 東工大土木工学科研究報告 No. 4, 1968年1月.
- 10) 長滝: 土木における膨張セメントの応用, 工業と製品, No. 53, Dec., 1971.
- 11) 荒木・戸川・田原: 膨張セメントコンクリートのクリープに関する基礎的考察, 土木学会第26回年次学術講演会講演集, No. 5, 1971.
- 12) Neville, A.M.: Theories of Creep in Concrete, Jour. of ACI, Sept., 1955.
- 13) Neville, A.M., Ward, M.A., Kwei, G.C.-S.: Basic and Drying Creep of Concrete, Matériaux et Constructions, Vol. 2-N° 8-1969.
- 14) Nevill, A.M.: Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland Publishing Company Amsterdam, 1970.
- 15) Lorman, W.R.: The Theory of Concrete Creep, Proc. of ASTM, Vol. 40, 1940.
- 16) Mishima, K., Koide, S., Seki, S., Kawasumi, M.: Inelastic Behavior of Alumina Cement Concrete under Various Curing Conditions, International Conference on Mechanical Behavior of Materials Abstracts Vol. 2, August, 1971.

(1972.7.2・受付)