

コンクリートのクリープの内部機構に 関する一考察[†]

A STUDY ON THE MECHANISM OF CREEP OF CONCRETE

阪 田 憲 次*・西 林 新 蔵**
By Kenji SAKATA and Shinzo NISHIBAYASHI

1. 緒 言

コンクリートのクリープは、乾燥収縮と同様に、コンクリートが有する重要な性質の一つであり、従来より内外の多くの研究者によって種々の面から検討されてきた。最近、多種多様な形式のコンクリート構造物が出現し、その構造物が施工される環境の範囲が拡大されるに伴い、コンクリートの物性をより正しく把握することの重要性が改めて認識されつつある。

コンクリートのクリープにおよぼす諸要因の影響については、従来からの研究においてもかなり詳しく論じられている。しかし、実際の構造物の設計に際しては、クリープの大きさを正しく予知することが必要であり、そのためには、種々の条件下におけるクリープのデータの蓄積ばかりでなく、コンクリートのクリープをその内部機構の面からも検討を加えることは、きわめて重要な研究課題であるといわざるを得ない。

コンクリートのクリープの内部機構については、従来から多くの説が提唱されてきた¹⁾が、単独の説でクリープの機構を完全に説明できるものは今のところ見当らない。これは、コンクリートはセメント、水、骨材などから成る複合材料であること、セメントの水和反応がかなり長期にわたること、セメントペーストの化学的組成が完全に解明されていないことなどに起因すると考えられる。したがって、コンクリートの複合材料特性やセメント水と生成物の化学的組成が解明されていくにつれて、各説の修正ないしは新たな説の展開がしだいになされていくものと考えられる。現在までに提唱されている代表的なクリープの内部機構説は、1) シーページ、ゲル説 (Seepage or gel theory), 2) 遅延弾性説 (Delayed elasticity), 3) 局部破壊説 (Internal Rapture), 4)

結晶のすべり、塑性変形説 (Plastic theory), 5) 粘性流動説 (Viscous theory), 6) 最大安定への傾向、力学的変形説 (Mechanical deformation theory), 7) 不均一な乾燥収縮 (Non-uniform shrinkage) などである。しかし、前述したとおり各説単独ではクリープ現象のすべてを満足に説明できないが、各説のいずれをも全面的には否定できない。したがってコンクリートのクリープ現象は上述した種々の要因が重なり合って起こると考えるのが妥当であろう。このように考えると、クリープの内部機構を考察する場合には、今までに提唱されてきた説を十分に吟味し、いかなる要因が支配的であるかを定量的に検討することも一策であると考えられる。

コンクリートのクリープや乾燥収縮を論ずる場合、コンクリート中の水分の挙動が重要な要因の一つに考えられている^{2),3)}。本研究においては、このコンクリート中の水分の挙動に着目し、天然骨材および吸水率の異なる 2 種類の人工軽量骨材を用いたコンクリートのクリープ試験を実施し、試験中の逸散水量とクリープひずみとの関係、クリープひずみにおよぼす環境の湿度条件の影響について検討し、さらにこれらの結果をもとにしてクリープの内部機構についても若干の考察を加えたものである。

2. 実験概要

本実験に使用した骨材は、天然骨材(記号：N)、ライオナイト(L)および宇部軽骨(U)の3種類(骨材の物理的性質：Table 1)、セメントは大阪製普通ポルトランドセメントである。また、コンクリートの配合は、目標強度を定めず、セメント、水、骨材の容積率がコンクリートの種類にかかわらず一定になるように考慮して決定した (Table 2)。

クリープおよび逸散水量測定用の供試体は、10×10×38 cm の角柱供試体を 2 本直列に並べ、供試体間および

[†] 土木学会第 28 回年次学術講演会で一部発表済

* 正会員 工修 日本建築総合試験所主任研究員

** 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科

Table 1 The physical properties of aggregates used

Kinds of Aggregate		Specific gravity	Water absorption (%)	Weight of Unit Vol. (kg/m ³)	Fineness modulus F.M.
Coarse Agg.	Crushed stone	2.70	1.21	1530	7.29
	Lionite	1.34	2.30	800	6.65
	Ube-Keikotsu	1.57	13.00	840	6.51
Fine Agg.	River sand	2.56	1.23	1420	2.98
	Lionite	1.37	4.00	1100	2.62
	Ube-Keikotsu	1.90	11.50	1120	2.53

Table 2 Mix proportions

Kinds of Concrete	W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	s/a (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Pozz. No. 8
N	45	360	162	45	823	1045	C×0.25%
L	"	"	"	"	548	518	"
U	"	"	"	"	601	607	"

Table 3 Designations of testing condition

Specimens	Temperature	Relative humidity (R.H.)
N	20°C ± 2 deg.	50%
L		80%
U		100% (in water)

両端に鉄製プレート (PI-100×100×10 mm) を挿入し供試体断面の中心に φ14 mm の PC 鋼棒を通したものである。コントロール用の供試体は、10×10×40 cm の角柱、さらに乾燥収縮測定用の供試体は 10×10 cm の断面を有し、長さが 30, 40, 50 および 60 cm の角柱である。供試体は一要因につき各 1 個で、コンクリートの打設後 24 時間実験室内 (室温) に放置した後に脱型し、材令 28 日まで標準養生 (水中) を施した。持続応力の導入は、材令 28 日に、油圧式ジャッキ (センターホールタイプ) を用いて行った。応力の導入に先立ち、クリープ用供試体と同一条件のもとで打設・養生した φ10×20 cm 供試体を用いて圧縮強度および静弾性係数 (1/3 割線弾性係数) を測定し、これらの値をもとにして、導入力の

大きさを決定し、さらに弾性ひずみを測定して所定の応力が導入されているかどうかを検討した。クリープの進行に伴う作用応力の減退を防ぐため、応力導入後 3 日目、1 週目、2 週目以後 2 週目ごとに応力の再導入を行った。なお、クリープ試験の環境湿度条件は **Table 3** に示すとおりである。クリープひずみの測定は持続応力導入後約 150 日間で、そこでいったん除荷し回復クリープを約 30 日間測定した。

逸散水量の測定には卓上台秤 (秤量 20 kg, 感量 1 g) を、一方ひずみの測定にはフーゲンベルガー型ひずみ計 (検長 10 in) を用いて行い、いずれの測定も材令 28 日を基点とした。なお、水中に保存した供試体 (すなわち湿度条件が 100% R.H. のもの) は、水分の逸散がないものと仮定して、逸散水量の測定を行っていない。

3. 実験結果と考察

(1) クリープ試験結果

クリープの試験結果を **Table 4** および **Fig. 1, 2** に示す。**Table 4** 中、 A, B および n は、実験式 $f_c = \frac{t}{A+Bt}$, $f_n = 1/B$ および $n = A/B$ における実験定数を、また **Fig. 1** は、クリープひずみ (f_c) と時間 (t) との関係、**Fig. 2** は単位応力当りのクリープ (f_c/σ) と時間との関係を示したものである。

一般に軽量コンクリートのクリープは、普通コンクリートのそれよりも大きいといわれている⁴⁾。本実験においては、**Fig. 1** から明らかなように、環境が高湿度 (R.H. 80%, 100%) の場合はコンクリートの種類による差はあまり大きくないが、低湿度 (R.H. 50%) の場合には使用した骨材の吸水率が大きくなるにしたがってクリープは小さくなる傾向が見られた。単位応力当りのクリープは、軽量コンクリートのほうが普通コンクリートよ

Table 4 Test results

Types of concrete (Aggregate)	R.H. (%)	Sustained load σ_p (kg/cm ²)	Stress at load removed σ_r (kg/cm ²)	σ_r/σ_p	Initial elastic strain ϵ_i ($\times 10^{-5}$)	Elastic strain at load removed ϵ_r ($\times 10^{-5}$)	ϵ_r/ϵ_i	$\frac{\sigma_r/\epsilon_r}{\sigma_p/\epsilon_i}$	Constants of experimental formula*		Ultimate Creep f_n ($\times 10^{-5}$)	Creep factor φ_n	n (A/B) (days)
									A	B			
N	50	125	102	0.82	30.1	26.3	0.87	0.94	0.246	0.018	54.6	1.82	13.4
	80		112	0.89	33.6	30.3	0.90	0.99	0.222	0.036	27.5	0.82	6.1
	100		103	0.83	31.9	31.0	0.97	0.85	0.459	0.046	21.7	0.68	10.0
L	50	73	54	0.75	50.3	44.4	0.88	0.84	0.330	0.021	47.4	0.94	15.6
	80		75	1.03	52.0	44.3	0.85	1.21	0.382	0.036	27.7	0.53	10.6
	100		73	1.00	48.4	46.3	0.96	1.05	1.033	0.042	23.7	0.49	24.5
U	50	98	76	0.78	56.6	51.3	0.91	0.86	0.443	0.021	47.4	0.84	21.0
	80		94	0.96	54.8	51.0	0.93	1.03	0.456	0.031	32.4	0.59	14.8
	100		90	0.92	55.3	49.1	0.89	1.04	0.927	0.035	28.6	0.52	26.5

* $f_t = \frac{t}{A+Bt}$, $f_n = \frac{1}{B}$

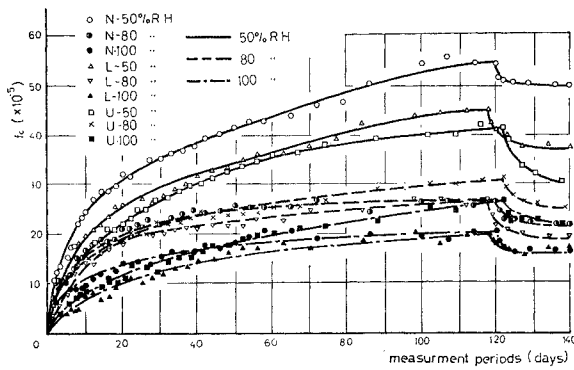


Fig. 1 f_c and measurement periods diagrams

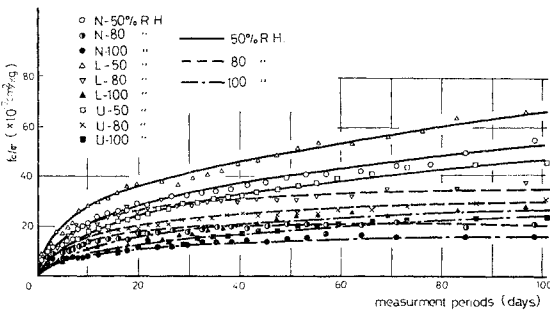


Fig. 2 f_r/σ and measurement periods diagrams

りも大きく、さらに n の値も同様の傾向が見られた。

吸水率の大きい骨材を用いたコンクリートにおいては、骨材中に多量の水を有しているため、持続荷重の導入によってセメントゲル中の水分が外部に逸散しても（すなわちシーページ現象が起こったとしても）骨材中の水によって補われ、クリープひずみの増加の割合が小さく、一定値に収れんするのも遅くなると推察される。なお、軽量コンクリートの終局クリープ係数 (φ_n) は、普通コンクリートのその 50~70% と小さい。

(2) 環境の湿度がクリープにおよぼす影響

Fig. 3 に、測定開始後 100 日における単位クリープと相対湿度との関係を示す。Fig. 3 より、環境の湿度が高くなるとクリープひずみは小さくなり、両者の間にはほぼ指数関数的に関係が認められる。軽量コンクリートと普通コンクリートを比較すると、高湿度においては、明らかに前者のクリープのほうが大きくなっている。前項で述べたように、クリープひずみがシーページ効果のみによる現象であると仮定すると、相対湿度100%におけるクリープひずみは0または0に近い値となるはずである。しかし実際には、相対湿度100%の環境においても若干のクリープひずみが見られている (Fig. 3)。

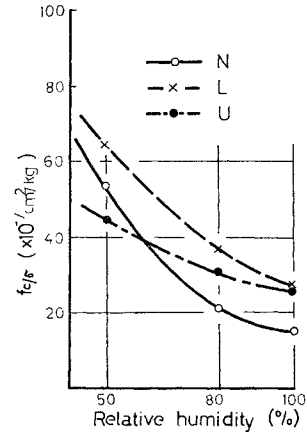


Fig. 3 f_c/σ and R.H. diagram (at 100 days after measurements started)

これは、コンクリートのクリープひずみはシーページ効果のみによって起こるのではなく、他の要因によるひずみも含んでいることを示すものである。

Table 5 は、除荷時のクリープひずみ (f_c) と回復クリープひずみ (f_r) およびそれらの比 (f_r/f_c) の値を示したものである。Table 5 より、 f_r は環境の湿度が高くなるにつれて小さくなる傾向が見られる。一般に、 f_r/f_c は環境の湿度が高くなれば大きくなるといわれているが、本実験においては、この傾向は普通コンクリートのみ認められ、軽量コンクリートにおいては顕著ではない。なお、低湿度においては、軽量コンクリートの f_r/f_c は普通コンクリートのその 2~3 倍となっているが、高湿度 (R.H. 100%) においては両者にほとんど差は認められない。前項で述べたシーページ効果以外のクリープ発生の要因として、遅延弾性による回復性ひずみや局部破壊等による非回復性ひずみが含まれていると推察される。

Table 5 Creep and creep recovery

Types of concrete	R.H. (%)	Creep f_c ($\times 10^{-5}$)	Creep recovery f_r ($\times 10^{-5}$)	f_r/f_c
N	50	54.3	4.8	0.09
	80	26.0	4.3	0.17
	100	20.2	4.2	0.20
L	50	44.5	7.5	0.17
	80	26.3	7.2	0.27
	100	19.5	3.5	0.18
U	50	41.0	10.6	0.26
	80	31.0	6.2	0.20
	100	26.4	4.9	0.19

(3) 逸散水量のクリープにおよぼす影響

Fig. 4 に持続荷重が載荷された供試体の逸散水量と時間との関係を示す。この逸散水量の中には、クリープによるものと乾燥収縮によるものとが含まれている（これを W_{c+s} で表わす）。図からも明らかなように、環境が低湿度 (R.H. 50%) の場合のほうが逸散水量が大となり、さらに軽量コンクリートの逸散水量は普通コンク

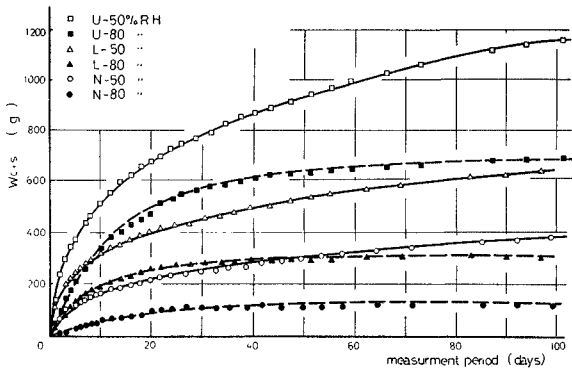


Fig. 4 W_{c+s} and measurement periods diagrams

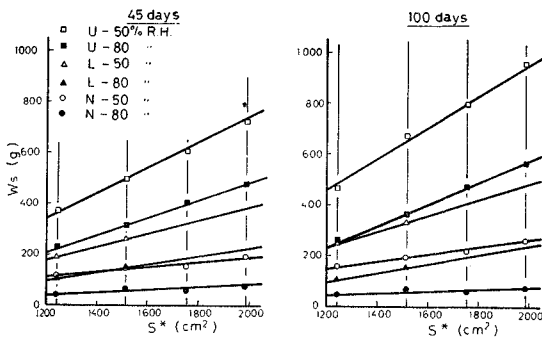


Fig. 5 $W_s \rightarrow S^*$ Lines

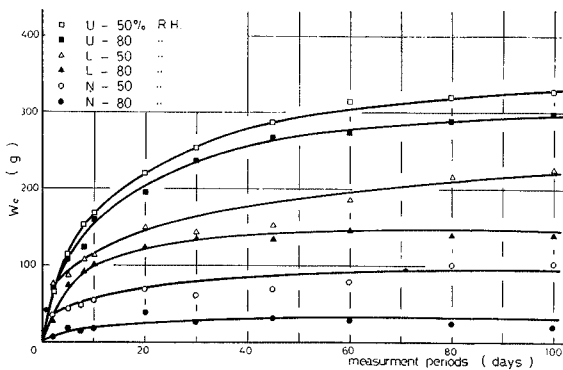


Fig. 6 W_c —measurement periods diagrams

リートのその 2~5 倍とはるかに大きく、明らかに骨材の吸水率の差によるものと考えられる。

クリープのみによる逸散水量を求めるためには、全逸散水量 (W_{c+s}) から乾燥収縮を生じさせるに相当する分 (W_s) を差し引いてやる必要がある。この場合問題となるのは、逸散水量は供試体の寸法、特にその表面積によってかなり異なるので、クリープひずみの場合のように単にクリープ供試体の測定値からコントロール供試体

(収縮測定用供試体) の値を差し引くだけでは求まらないことである。そこで供試体寸法を考慮して、クリープ供試体の乾燥収縮による逸散水量を推量することを試みた。Fig. 5 は、寸法の異なる無載荷供試体の逸散水量と換算表面積 (S^*) との関係を示したものである。ここに S^* とは、各供試体の体積と同一の体積を有する立方体の表面積である⁹⁾。

Fig. 5 より、逸散水量と S^* との間には明確な直線関係が見られるから、クリープ供試体の S^* に対する W_s を求め、これを Fig. 4 の W_{c+s} から差し引くとクリープのみによる逸散水量 (W_c) が求まる。このような手順で求めた W_c と時間との関係を Fig. 6 に示す。 W_c は使用した骨材の吸水率が大きいものほど多くなっている。

いま、Fig. 6 から求められる 100 日における W_c 、クリープ供試体中から逸散する水量 (配合において、骨材中に吸水されている水量を含む全水量からセメントの水和に必要な水量 (W/C に換算して 23%⁹⁾) を差し引いた水量 (W) およびそれらの比 (W_c/W) を Table 6 に示す。

Table 6 より、 W_c/W は軽量コンクリートのほうが普通コンクリートよりもはるかに大きく、低湿度において 2~3 倍、高湿度 (R.H. 80%) において 5~9 倍にも達する。

Fig. 7 は、クリープひずみと逸散水量との関係を示したものである。一般に、 W_c が大になると f_c も大きくなり、骨材の吸水率が小さいものほど

Table 6 Moisture loss from specimen

Type of concrete	R.H. (%)	Total amount of water contents W (g)	Moisture loss during 100 days W_c (g)	W_c/W (%)
N	50	745	97	13.0
	80		33	4.4
	100		0	0
L	50	825	220	26.7
	80		148	17.9
	100		0	0
U	50	1659	331	20.0
	80		295	17.8
	100		0	0

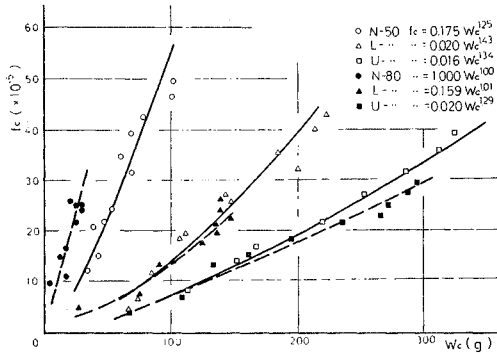


Fig. 7 f_c and W_c diagrams

逸散水量のクリープにおよぼす影響が大きくなる傾向が認められた。

これらの結果を総合的に考察して、コンクリートのクリープに伴う水分逸散の機構を考えてみることにする。

吸水率の大きい骨材を用いたコンクリートにおいては、最初のうちは逸散水量が多いにもかかわらずクリープひずみはそれほど増大しないが、時間が経過するにつれて逸散水量に対するクリープひずみの割合が大きくなる。これは、最初の段階においては、持続荷重によってセメントゲル中の水分が圧出されても、骨材中に吸水されている水によって補われるため、クリープひずみはそれほど増大しない。しかし、このような過程を繰り返しているうちに骨材中の水分が少なくなると、補給される水量が少なくなり、その結果逸散水量に対するクリープの割合が大きくなると考えられる。

一方、吸水率の小さい骨材を用いたコンクリートにおいては、骨材からの水の補給が最初から少ないために水分の逸散量にほぼ比例してクリープひずみも増大するものと考えられる。

4. クリープの機構に関する一考察

コンクリートのクリープの内部機構に関しては、種々の説が提唱されてきた。しかし、これらの説はいずれも不十分であって、単独の説でクリープ機構を完全に説明しきれないとされている。これは、コンクリートの内部構造ないしは組織が金属のように均質でなく、セメント、水、骨材などからなる複合材料であることから十分予想できることである。したがって、実際の現象は、これらの諸説で仮定された要因が重なり合って現れると考えるのが妥当であろう。

いま、簡単のためにコンクリートのクリープ機構を次の3つの要因に大別して考えてみることにする。

- 1) シーページ効果による非回復性ひずみ (f_s),
- 2) 遅延弾性による回復性ひずみ (f_d),

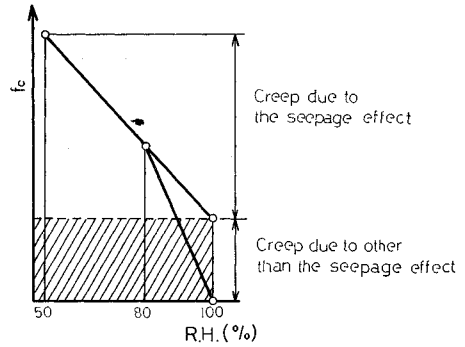


Fig. 8 Relationship between creep and relative humidity

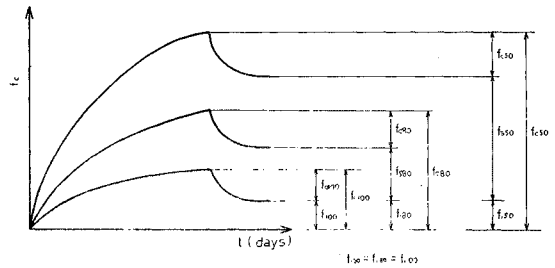


Fig. 9 Strain components

3) コンクリートの局部破壊による非回復性ひずみ (f_i),

したがって、コンクリートのクリープひずみ (f_c) は次式で表わされる。

$$f_c = f_s + f_d + f_i$$

クリープがシーページ効果のみに起因すると仮定すると、環境湿度 100% におけるクリープひずみは 0 または 0 に近い値となるはずである。そこで、いまシーページ効果によるクリープひずみは、相対湿度 100% において 0 であると仮定すると、R.H. 100% における測定値はシーページ効果以外の要因によるものと考えられる (Fig. 8)。

すなわち、 $f_s = 0$ となるので、前式は $f_c = f_d + f_i$ となり、この式の f_d は Table 5 の f_r/f_c から求まる。

R.H. 80% の場合は、 f_d は Table 5 から求め、 f_i は R.H. 100% の場合と同じ値であると仮定する。したがって f_s は、

$$f_s = f_c - f_d - f_i$$

で求まる。

上で述べた湿度 100%, 80% および 50% の場合のクリープひずみ成分を模式的に図示すると Fig. 9 のようになる。なお、 f_i は湿度条件の相違にかかわらず等しいと仮定した⁷⁾。

このような手順で計算した各ひずみ成分を Table 7 に示す。これによれば、シーページ効果によるクリープ

Table 7 Components of strain

Components of strain ($\times 10^{-5}$)	N			L			U		
	R.H. 50%	R.H. 80%	R.H. 100%	R.H. 50%	R.H. 80%	R.H. 100%	R.H. 50%	R.H. 80%	R.H. 100%
f_c	54.3 (1.00)	26.1 (1.00)	20.2 (1.00)	44.5 (1.00)	26.3 (1.00)	19.5 (1.00)	41.0 (1.00)	31.0 (1.00)	26.4 (1.00)
f_s	33.5 (0.61)	5.5 (0.21)	0	21.0 (0.47)	3.1 (0.12)	0	8.9 (0.22)	3.3 (0.11)	0
f_d	4.8 (0.09)	4.3 (0.17)	4.2 (0.20)	7.5 (0.17)	7.2 (0.27)	3.5 (0.18)	10.6 (0.26)	6.2 (0.20)	4.9 (0.19)
f_i	16.2 (0.30)	16.2 (0.62)	16.2 (0.80)	22.0 (0.36)	22.0 (0.61)	22.0 (0.82)	22.1 (0.54)	22.1 (0.69)	22.1 (0.81)

f_c : Total creep

f_s : Creep unrecovery due to the seepage effect

f_d : Creep recovery due to the delayed elasticity

f_i : Creep unrecovery due to the internal rupture

ひずみの全クリープひずみに占める割合 (f_s/f_c) は、環境の湿度が低くなれば大きくなり、R.H. 80% で 0.1~0.2, 50% で 0.2~0.6 となるのがわかる。コンクリートの種類別では、普通コンクリートの f_s/f_c は軽量コンクリートのその 1.5~3.0 倍となっている。このようにコンクリートの種類によってかなりの差が認められるのは、使用した骨材の吸水率、すなわち骨材が持っている水分の違いによるものと考えられる。換言すれば、使用した骨材の吸水率が大きいほど、持続荷重初期におけるシーページ効果によるクリープひずみが小さくなると推察できる。

5. 結 言

本研究は、コンクリートのクリープの内部機構を考える場合に、その要因として考えられるものの中から、特にコンクリート中の水分の挙動に注目し、水分の逸散がクリープにいかなる影響をおよぼすかを中心に検討し、併せて使用骨材の種類(コンクリートの種類)および環境の湿度条件の影響についても検討を加えたものである。

本研究の結果明らかになったことを列挙して結論に代える。

(1) クリープの湿度依存性はかなり大きく、クリープと湿度との間には指数関数的な関係が認められ、環境湿度が低くなればクリープひずみは大きくなる。

(2) 逸散水量は、使用骨材の吸水率が大きいほど多い。さらに、環境の湿度の影響が著しく、湿度が低くなるにつれて逸散水量は多くなる。

(3) 逸散水量の全水量に占める割合は、軽量コンクリートのほうが普通コンクリートよりもはるかに大きく環境の湿度が高くなるに従ってその傾向が著しくなる。

(4) コンクリートのクリープひずみは、逸散水量が多くなるにしたがって増大し、両者の関係は直線ないしは直線に近い曲線で表わされる。また、使用骨材の吸水

率が小さいものほど逸散水量の変化がクリープにおよぼす影響は大である。

(5) コンクリートのクリープひずみは、シーページ効果によるひずみだけではなく、遅延弾性による回復性ひずみや局部破壊による非回復性のひずみも含まれていると考えられる。この場合、シーページ効果によるひずみの全クリープに対して占める割合は、環境の湿度が低ければそれだけ大きくなる。

(6) 使用骨材の吸水率が大きいものほど、シーページ効果によるひずみの全ひずみに対する割合が小さくなる傾向が認められる。これを内部機構の面から考えると、セメントゲル中のゲル水が持続荷重によって圧出されたり、環境の湿度勾配によって蒸発、逸散するのを骨材自身が持っている水分でその減少を補うためであると考えられる。

本研究を遂行するに当たり、多大の労を煩わした友田敏博(オリエンタルコンクリート㈱)、豊田俊作(㈱栗本鉄工所)の両氏に対し、心からの感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) コンクリートのクリープ全般については、A.M. Neville: Creep of Concrete; Plain, Reinforced, and Prestressed および 岡田清: コンクリートのクリープ, コンクリートパンフレット第29号, セメント技術協会が参考になる。
- 2) Hobbs, D.W. and A.R. Mears: The influence of Specimen Geometry upon Weight Change and Shrinkage of Air-Dried Mortar Specimen, Magazine of Concrete Research, 23, June-September, 1971.
- 3) 岡田 清・小柳 洽・阪田憲次: クリープの環境湿度依存性について, コンクリートライブラリー第24号, 1969年10月
- 4) 西林新蔵・千葉静男編著: 人工軽量骨材コンクリート—土木構造物への応用—, 朝倉書店。
- 5) 西林新蔵・阪田憲次: コンクリートの乾燥収縮の内部機構に関する一考察, 材料, Vol. 22, No. 232, Jan. 1973.
- 6) Neville, A.M.: Properties of Concrete, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd.
- 7) 西林新蔵: 人工軽量骨材コンクリートのクリープに関する研究, コンクリートジャーナル, Vol. 7, No. 1, Jan. 1969.

(1974. 5. 23・受付)