

軽量コンクリートの乾燥収縮とクリープ

奥 島 正 一*
小 阪 義 夫*
大 井 孝 和*

1. ま え が き

コンクリート用天然骨材は、最近次第にその産出量を減じてきたので将来は人工骨材の利用が高まるものと思われる。人工骨材にはその比重に種々のものがあるが、軽量のものにはコンクリートの欠点である重量を減ずる点で有用であるといえよう。PC部材は多くの場合工場で生産されるか、現場の近傍で生産される。いずれにしても部材の運搬または移動はPC構造物ではほとんどの場合に生ずることであり、この際、部材重量の軽減は施工上経済的にも貢献するところが多い。

わが国でもここ二、三年来人工軽量骨材の国産化が企てられており、やがて市場にあらわれてくると思われるが、PC部材にこれを応用するためには国産人工骨材を用いたコンクリートの物性が明らかにされていなければならない。著者等はこれらの物性について研究を行なっているが、その中の一つとして膨張頁岩の人工骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと圧縮クリープひずみの試験を行なっているので、ここにその結果を述べることにする。

以下の報告は材令の関係上、中間報告として述べるもので、試験は続行中であるから長期材令のものについては別の機会に述べることにしたい。

2. 使用材料

セメント：使用したセメントはN社製の普通ポルトランドセメントで、その強度は表-1のごとくである。

骨材：粗細骨材ともM社製の膨張頁岩の人工軽量骨材を用いた。著者等が測定した比重、単位容積重量、吸水

表-1

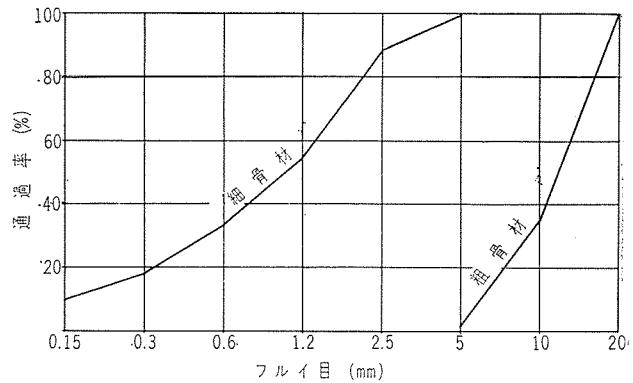
材 令 (日)	曲げ強度 (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)
3	29.7	132
7	46.7	221
28	58.4	409

表-2

骨材種類	比 重	重量 (t/m ³)	吸水率 (%)
細 骨 材	1.41	0.95	22.4
粗 骨 材	1.23	0.74	11.4

* 大阪大学工学部

図-1



率(24時間吸水)は表-2のごとくであり、その粒度は図-1のごとくである。

水：水道水を用いた。

3. 試験体の製作と試験方法

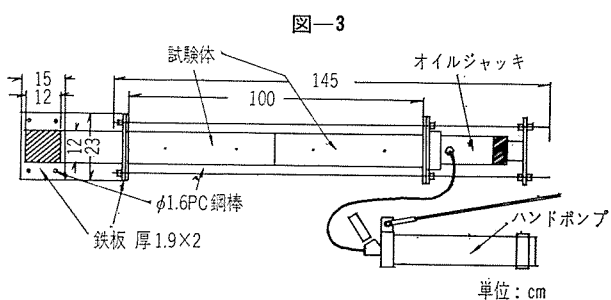
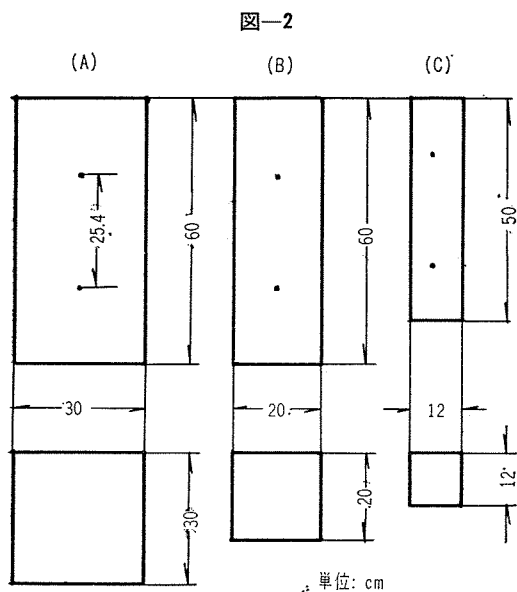
コンクリートの調合は表-3のごとくにした。ここに全水比とあるのはコンクリートの練りまぜどきの骨材含水量(粗、細骨材の含水量はそれぞれ13.4~16.1, 28.2~31.6%であった)と投入水量の和とセメント重量との比である。表-3に示すようにセメント量の多いものからセメント量の少ないものまで作ってある。

試験体は正方形断面をもつ角柱でその大きさは図-2に示す3種とした。断面の大きさを変化させた理由は乾燥収縮ひずみが試験体の大きさにより相違するかを見るためである。ただしクリープ試験では加力装置の都合上図-2の中の(c)の寸法のもののみを用いた。なお型枠は木製であるが、セメントペーストの浸出がせいぜいないように組立てた。

試験体の数は乾燥収縮試験、クリープ試験の各調合に

表-3

調 合 No.	全水比 (%)	調 合 比				スラン プ (cm)	空気量 (%)	生コン クリー プ 比重
		水 (kg)	セメント (kg)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)			
1	63.5	349	550	439	439	4.6	3.3	1.709
2	75.7	352	465	455	455	4.7	2.8	1.682
3	87.6	346	395	474	474	11.0	3.5	1.640
4	93.2	345	370	460	460	11.3	2.9	1.655
5	106.0	355	335	464	464	12.1	3.0	1.617
6	122.3	373	305	466	466	16.3	2.4	1.606



対しそれぞれ2本あてで、コンクリートの練りまぜは機械練りとし、試験体の成型には棒状バイブレーターを用いた。打込日は昭和38年6月8日、14日、21日の3日にわたっている。試験体は成型後実験室内で材令3日まで湿布養生を行ない、材令3日で脱型、ただちにひずみ測定用の鋼製プラグを図-2の黒点の位置に埋込んだ。

なおコンクリート強度を知るために試験体製作と同時に標準試験体も製作し、その脱型は試験体脱型と同時に、その一部は試験体の傍に静置し、他は標準水温で水中養生を行なって材令28日で圧縮試験を施した。

乾燥収縮試験では前記の試験体を実験室内のモルタル床面上30cmの高さにおいた木材の角材の上にならべ

た。温度および湿度の変化による影響をさけるためには恒温恒湿室に置くべきことはいうまでもないが、著者等の恒温恒湿室が狭少のため、やむを得ずこの処置をとったのである。

クリープ試験では、その試験体を乾燥収縮試験体と同様に保存して材令4週で載荷した。その載荷方法は図-3のごとくであり、直径12mmの第4種PC鋼棒を利用してあらかじめキャリブレーションした最大容量30tのオイルジャッキによった。この方法によるとオイルジャッキのそう入、取りはずしが容易で、加圧の大きさが減退した場合、ただちに元の大きさまで修正しうる。この吟味は載荷当初は毎日行なったが、日数が経過した後は吟味日の間隔をのばしてゆくことができた。

乾燥収縮ひずみおよびクリープひずみの測定は Hugenberger の Setzdehnungsmesser (検長25.4cm)を用い、角柱試験体の相対する二つの側面で測り、この面の測定値の平均値をもってその試験体の測定値とし、試験体2個の測定平均値をその調合コンクリートの値とした。しかし測定員が測定不慣れであったため若材令の乾燥収縮試験の測定値には測定誤差がいちじるしかったので、若材令の期間については再試験を行なった。試験体は15×15×53cmの一種とし型わくは鋼製のものを用い、材令1日で静かに脱型して材令3日から乾燥収縮ひずみを測定した。ただし試験体の保存方法は前記の試験体と同様にした。

4. 硬化コンクリートの強度

乾燥収縮試験用、クリープ試験用各試験体と同時に製作した標準試験体の一部は標準水温槽で養生し、他は試験体と同じ状態で実験室内に保存したが、それらの材令28日における比重、圧縮強度、強度の1/3点におけるセカントモジュラス、動ヤング係数を示すと表-4のごとくである。

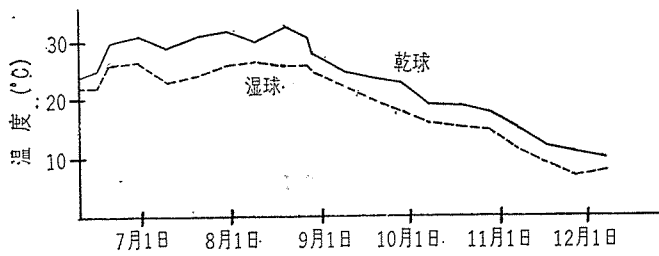
比重は生コンクリートに比し水中養生のものは大差なく、空中養生のものは約2~4%小さくなる。

圧縮強度は水中養生、空中養生のものとほとんど差を

表-4

調合 No.	比 重		圧 縮 強 度 (kg/cm ²)		F ₂₈ /3 点におけるセカントモジュラス (×10 ⁵ kg/cm ²)		動ヤング係数 (×10 ⁵ kg/cm ²)	
	水中養生	空中養生	水中養生	空中養生	水中養生	空中養生	水中養生	空中養生
1	1.707	1.679	385	391	1.76	1.60	1.86	1.81
2	1.665	1.633	321	319	1.67	1.49	1.75	1.69
3	1.646	1.572	224	227	1.55	1.41	1.56	1.54
4	1.640	1.558	228	242	1.50	1.15	1.56	1.51
5	1.643	1.530	193	183	1.28	1.17	1.49	1.39
6	1.658	1.540	182	195	1.27	1.23	1.46	1.42

図-4



認められない。これは空中養生時の日中室温が 24~28 °C、湿度が約 60~70% といったかなり高温であったことに起因すると思われる。

強度の 1/3 点におけるセカントモジュラスは強度の場合の傾向と異なり、空中養生のものが水中養生のものより約 10% 減少し、また動ヤング係数も空中養生のものが水中養生のものより約 4% 減少している。

5. 実験室内の温度、湿度の変化

試験体は 6 月より実験室内に保存したが、この室には恒温設備がないため、温度、湿度が毎日変化した。その乾球、湿球各温度の変化は図-4のごとくである。

6. 乾燥収縮ひずみ測定結果

前項にのべたように試験体保存室の温度は日々変化してきているので、これを温度 20°C における状態のひずみに換算することにする。

膨張頁岩の国産人工軽量骨材を用いたコンクリートの熱膨張係数の資料がほとんどないので、われわれはこの数値を実験で求めることにした。すなわち表-3の各調合について 4×4×16 cm の角柱を 3 個あて作り、材令 3 月まで室内に放置して可及的に乾燥させ、つぎにこれを電気恒温箱に入れて加熱 (60°C まで)、冷却を数回くりかえしてその長さの変化を測定し、定常な変化をすることを確かめてから熱膨張係数を決定した。その結果表-3の調合 No. 1~4 のコンクリートに対しては $0.6 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、No. 5~6 のコンクリートに対しては $0.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ の値を採用することとした。なおこの値は膨張頁岩の人工軽量骨材を用いたコンクリートについて徳田、伊藤¹⁾が発表している値 $0.58 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ とほぼ一致している。

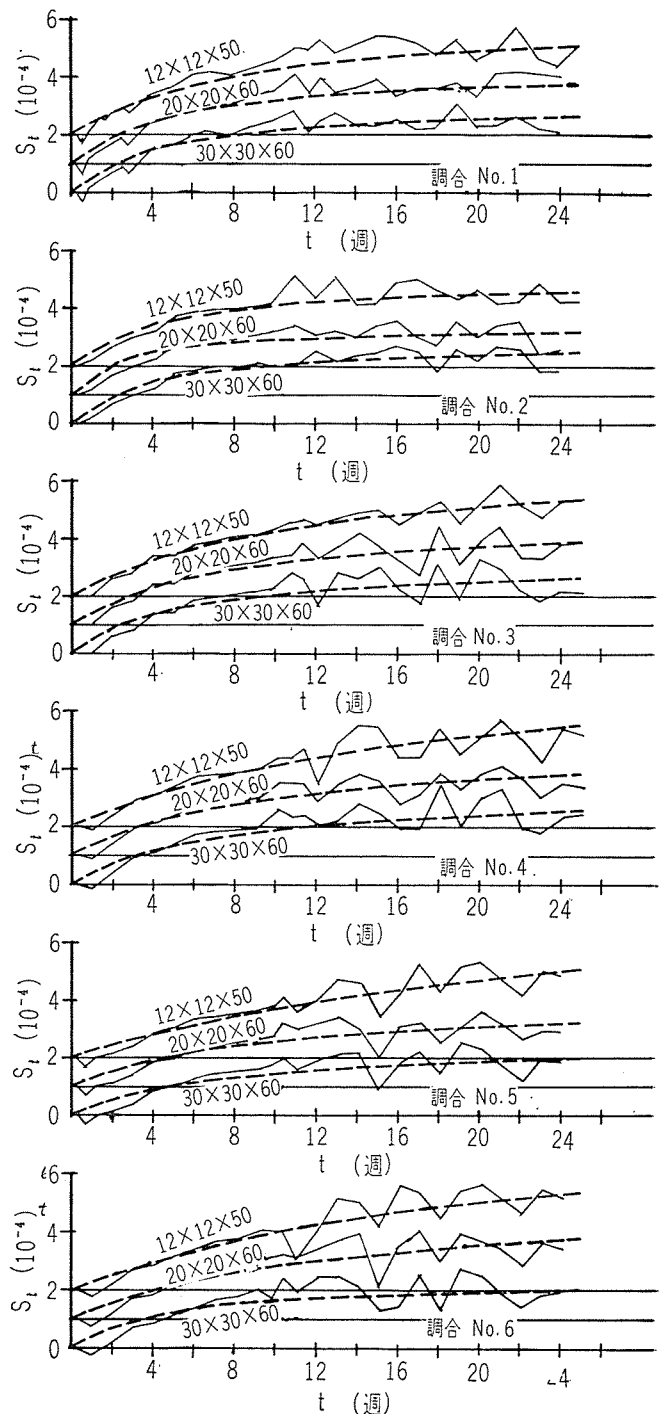
いま前記の熱膨張係数を用いて室温 20°C の恒温状態に換算し (湿度は約 50~70% の範囲で変化していたが湿度による膨張係数が不明であるので補正は行なわなかった)、材令 9 週~10 週までは再試験値を代用してコンクリート材令 t 週と乾燥収縮ひずみ度 S_t の関係を図示すると図-5のごとくなる。ただし材令 9~10 週までは試験体断面 3 種のもの乾燥収縮ひずみ度として断面 15×15 cm の 1 種についてのひずみ度が代用してあり、

この点で若干精確を欠くが、長期材令までの実験式をたてる場合、若材令の測定値が実験式におよぼす影響はいちじるしいこともなからうと思ったのでこの処置をとった。

いま図-5の材令ひずみ度の関係をつぎの式 (1) で表わすものとするとき係数 A, B は表-5のごとくなる。

$$S_t = \frac{t}{A + B \cdot t} \dots\dots\dots (1)$$

図-5



ここに S_t : t 週における乾燥収縮ひずみ度 (単位 10^{-4})

t : コンクリートの材令 (単位 週)

A, B : 係数

図-5 には式 (1) の曲線を点線で示しておいた。

表-5

調合 No.	試験体断面 (cm×cm)	A	B
1	12×12	2.218	0.231
	20×20	1.625	0.300
	30×30	1.471	0.318
2	12×12	1.531	0.325
	20×20	1.000	0.420
	30×30	1.355	0.352
3	12×12	2.447	0.200
	20×20	2.023	0.268
	30×30	1.713	0.313
4	12×12	3.081	0.162
	20×20	2.604	0.248
	30×30	2.281	0.301
5	12×12	4.398	0.153
	20×20	2.958	0.338
	30×30	2.990	0.389
6	12×12	3.552	0.155
	20×20	3.206	0.238
	30×30	1.751	0.438

表-6

コンクリート調合 No.	試験体断面 (cm×cm)	t 日における収縮ひずみ度の測定値			$t=\infty$ における収縮ひずみ度の推定値	
		t	S_t	比	S_n	比
1	12×12		3.1×10^{-4}	1.00	4.32×10^{-4}	1.00
	20×20	175	3.0	0.97	3.33	0.77
	30×30		2.0	0.65	3.15	0.73
2	12×12		2.6	1.00	3.08	1.00
	20×20	175	1.5	0.58	2.38	0.77
	30×30		1.8	0.69	2.84	0.92
3	12×12		3.3	1.00	5.00	1.00
	20×20	169	2.9	0.88	3.73	0.75
	30×30		2.1	0.64	3.19	0.64
4	12×12		3.3	1.00	6.18	1.00
	20×20	169	2.5	0.76	4.05	0.66
	30×30		2.3	0.70	3.32	0.54
5	12×12		3.0	1.00	6.55	1.00
	20×20	162	1.9	0.63	2.96	0.45
	30×30		1.9	0.63	2.57	0.39
6	12×12		3.4	1.00	6.45	1.00
	20×20	162	2.6	0.76	4.28	0.66
	30×30		1.8	0.53	2.28	0.35

この試験では試験体断面寸法が $12 \times 12 \text{ cm}$, $20 \times 20 \text{ cm}$, $30 \times 30 \text{ cm}$ のものについて測定してあるので、つぎに断面の大きさによる乾燥収縮ひずみ度について比較してみよう。測定はなお続行中であるので、一応材令約 6 月のものについての測定値をかかげることになると、これらの値は表-6 のごとくである。図-5 の測定曲線でも判るように測定値は必ずしも滑らかな曲線を画かず凹凸があるから、ある特定日の測定値から断面の大小による乾燥収縮ひずみ度の比を求めても概略値しか求められないが、一応材令 6 月近くのある日における比を計算すると表-6 のごとくなる。すなわち断面 $12 \times 12 \text{ cm}$ のものを 1 とすると断面 $20 \times 20 \text{ cm}$ のものは $0.97 \sim 0.58$ (平均 0.76)、断面 $30 \times 30 \text{ cm}$ のものは $0.70 \sim 0.53$ (平均 0.64) である。

この値は上にも述べたように材令約 6 月目における測定値から求めたものであるが、つぎに $t=\infty$ における最終乾燥収縮ひずみ度を推定してそれについて比較してみよう。

最終乾燥収縮ひずみ度 S_n の推定値は式 (1) で $t=\infty$ とおくことによりつぎの式 (2) で求められる。

$$S_n = \frac{1}{B} \quad (\text{単位 } 10^{-4}) \dots \dots \dots (2)$$

各調合、各試験法について式 (2) から求めた推定値を表-6 に併記する。これらの値を通覧すると断面 $12 \times 12 \text{ cm}$ のものではセメント量大、水比小なる方が、セメント量小、水比大なる方よりひずみ度が小さくなり、断面 $30 \times 30 \text{ cm}$ のものでは反対の傾向になることが見られる。

また各調合について断面 $12 \times 12 \text{ cm}$ の最終乾燥収縮ひずみ度を 1 としたときの断面 $20 \times 20 \text{ cm}$, $30 \times 30 \text{ cm}$ のものの比を求めると表-6 の最終欄のごとくなる。各調合によりこの比は一樣でないが、一応平均的にいえば断面 $12 \times 12 \text{ cm}$ のものを 1 とすれば断面 $20 \times 20 \text{ cm}$, $30 \times 30 \text{ cm}$ のものはそれぞれ 0.68 , 0.60 となる。坂、六車氏²⁾ が 28 日強度 $292 \sim 454 \text{ kg/cm}^2$ の普通コンクリートについて行なった試験 (湿度 $80 \sim 90\%$ 程度の気養生) では最終乾燥収縮ひずみ度が断面 $10 \times 10 \text{ cm}$, $20 \times 22 \text{ cm}$, $30 \times 30 \text{ cm}$ でそれぞれ $4.4 \sim 5.0 \times 10^{-4}$ (平均 4.7×10^{-4})、 $2.3 \sim 2.7 \times 10^{-4}$ (平均 2.5×10^{-4})、 $1.8 \sim 2.2 \times 10^{-4}$ (平均 2.0×10^{-4}) で平均値からの比は $1 : 0.53 : 0.43$ となった。したがって、ここに試験した人工骨材の場合は普通コンクリートに比しその最終乾燥収縮ひずみ度は全体的にやや大きくなっている。また断面寸法の大小による影響については当試験の場合の方が普通コンクリートの試験の場合よりも小さい。

なお J.J. Shideler 氏³⁾ も同様の米国産骨材について

試験し、比較的低強度のコンクリートでは普通コンクリートに比して材令6月で30%、1年で38%大きくなったと述べている。著者等は普通コンクリートについての試験を行っていないので特にこの比を示すこともできないが、28日強度 300~400 kg/cm² 程度のものについて坂、六車氏の試験結果を参照してみると断面 30×30 cm 程度のものではほぼ J.J. Shideler 氏の場合と同様な傾向にあるものと思われる。

7. クリープひずみ測定結果

クリープ試験体に対する荷重は材令4週で行なった。ただしここに製作したものは調合1, 2, 4, 5, 6の場合であり、荷重応力度は空中養生標準試験体強度 F_{28} に対し調合 No. 1, 2 では $0.45 F_{28}$ 、調合 No. 3, 5, 6では $0.33 F_{28}$ とし、調合 No. 2 についてはさらに $0.33 F_{28}$ を荷重した場合についても試験した。調合 No. 2 について $0.45 F_{28}$ 荷重したものを 2-I、 $0.33 F_{28}$ 荷重したものを 2-II と記号づける。なお、おのおの場合についての試験体個数は2個あてでありその測定値の平均値をもってその場合の測定結果とした。

いまクープひずみ度 ϵ_t の測定結果(ただし乾燥収縮ひずみについては修正してある)を示すと図-6のごとくであるが、この結果をつぎの式(3)で表わすと係数 A, B は表-7のごとくなる。

表-7

調合 No.	A	B
1	0.573	0.090
2-I	0.948	0.078
2-II	1.147	0.079
3	1.211	0.175
5	0.580	0.102
6	0.413	0.096

$$\epsilon_t = \frac{t}{A+Bt} \dots\dots(3)$$

ここに ϵ_t : 荷重後 t 週におけるクリープひずみ度 (単位 10⁻⁴)
 t: 荷重後の時間 (単位 週)
 A, B: 係数
 また荷重後 t 週におけるクリープ係数 φ_t はつぎの式(4)で示される。

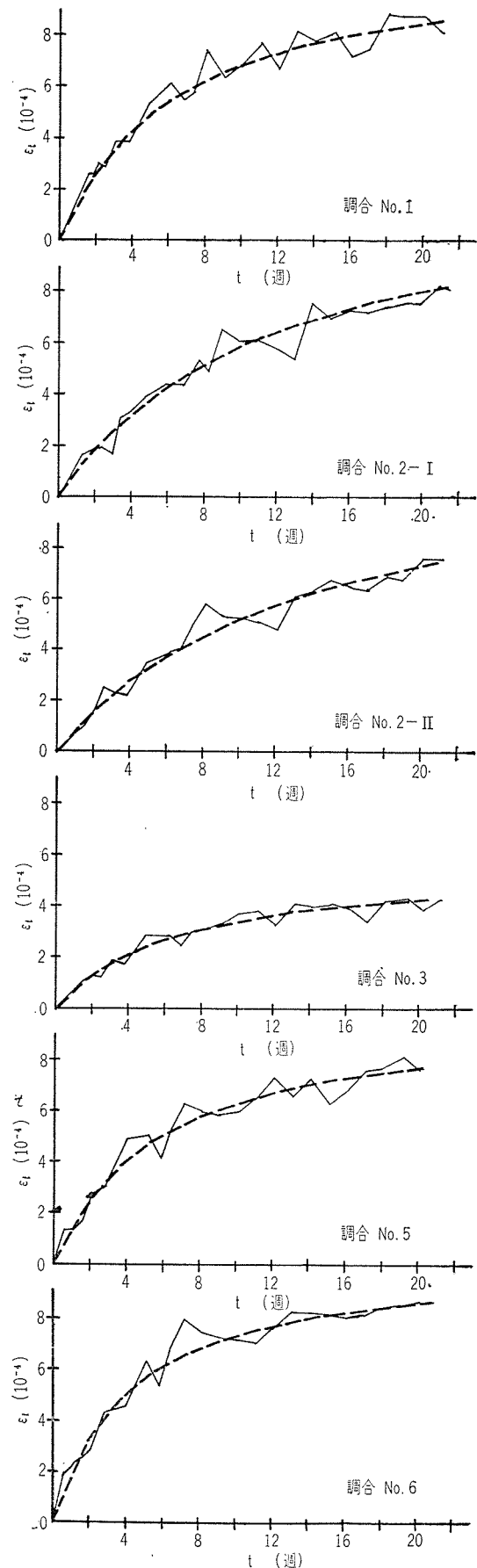
$$\varphi_t = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_0} = \frac{t}{\epsilon_0(A+Bt)} = \frac{t}{a+bt} \dots\dots(4)$$

ここに ϵ_0 : 荷重による弾性ひずみ度
 a, b: 係数
 荷重による弾性ひずみ度は表-8のごとくであったのでこれを用いて式(4)の係数 a, b を求めると表-9の

表-8

調 合	1	2-I	2-II	3	5	6
弾性ひずみ度 (10 ⁻⁴)	10.4	9.6	7.05	5.15	4.8	5.15

図-6



ごとくなり，また式(4)で $t = \infty$ とおいて最終クリープ係数 φ_n を推定すると表-9に併記したごとくなる。

これによると最終クリープ係数 φ_n は約1~2の範囲にあり，P

C設計施工規準で乾燥状態の普通コンクリートに規定している値 $\varphi_n=4$ に比してかなり小となる（なお調査 No. 3 の φ_n が割合小さい値となっているのは標準試験体と試験体のコンクリート品質が異なり試験体に対しては実際の強度の 0.33 倍以下の応力が作用していたためであろうと推察される）。

また P C 設計施工規準では φ_t に関しつぎの式(5)を与えている。

$$\varphi_t = \frac{ab_1t}{1.5+0.25t} \dots\dots\dots(5)$$

ここに t : 載荷後の時間(週)

a_1b_1 : 係数

いま $a=b_1=1$ とし $\varphi_t=1/2\varphi_n$ になる時の t を式(5)から求めると約6週となるが，式(4)から求めると平均約8週となりこの種の人工骨材のコンクリートでは普通コンクリートに比してクリープの進行が長くつづいて行くように思われる。この傾向は西岡，国本氏が試験した他の人工骨材についても同様に現われている。すなわち両氏が $\phi 10 \times 40$ cm のシリンダーで試験した結果，材令180日におけるクリープ係数は普通コンクリートで1.28，膨張頁岩粗骨材と川砂のコンクリートで0.76，

表-9

調査 No.	a	b	φ_n
1	6.0	0.94	1.07
2-I	9.1	0.75	1.34
2-II	8.1	0.56	1.79
3	6.2	0.90	1.11
5	2.8	0.49	2.05
6	2.1	0.50	2.02

大島軽粗骨材と川砂のコンクリートで0.88であったという。

以上のように人工軽量骨材を用いたコンクリートの最終クリープ係数は一般に普通コンクリートのものよりも小さくなる傾向にあると思われる。

8. む す び

膨張頁岩の粗細人工軽量骨材を用いたコンクリートについての乾燥収縮およびクリープ各ひずみの測定結果を述べたが，これは材令約6月の結果とそれから推定される最終値について検討したものにすぎない。測定はなお継続中であり，他日長期材令についての結果を検討する予定であるからここに述べた値は多少変動するかも知れないことをお断りしておく。また実験設備の関係で完全な条件で試験を行なうことはできなかったが，人工軽量骨材を用いた場合のおおよその傾向はこれで知りうるであろう。

終りにこの研究に対し援助を与えられた日本セメント，三井金属鉱業，日本高周波熱錬の各社に対し謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 徳田 弘・伊藤 勉：「軽量骨材を用いたコンクリートの熱特性について」土木学会シンポジウム，1963.10
- 2) 坂 静雄・六車 照：「かた練りコンクリートの硬化収縮ひずみ」セメント技術年報 XIV，1960
- 3) J.J. Shideler："Lightweight Aggregate Concrete for Structural Use"，Journal of A.C.I.，1957.10
- 4) 日本建築学会：「プレストレスト コンクリート設計施工規準」
- 5) 西岡忠郎・国本公瑞：「人工軽量骨材を用いたコンクリートの諸性質」セメント・コンクリート，1963.11

1964.4.21・受付

コンクリートジャーナル購読について

体 裁：B5判 60 ページ 隔月刊

定 価：年間購読料 1000 円（送料共）1部 200 円（送料 30 円）

内 容：コンクリート関係の論文，工事報告，文献紹介，その他

申込先：東京都中央区日本橋本町 3-3 ワカ末ビル

ケンメイヤー技術株式会社気付 日本 A.C.I. 事務局