

コンクリート破砕物の再利用に関する研究 ——再生コンクリートの弾塑性的性質——

西林新蔵*・矢村 潔*・吉野 公*

(1982年6月11日受理)

The Recycling Use of Waste Concrete as Aggregate ——Elastic and Plastic Properties of Recycled Concrete——

Shinzo NISHIBAYASHI*, Kiyoshi YAMURA*, Akira YOSHINO*

(Received June 11, 1982)

The study on the recycling concrete from wastes to produce useful aggregate for new concrete contributes to the solution of two problems. The first, there is the shortage of aggregate for concrete from river and, secondary, there is the waste disposal problem.

In this study, the elastic and plastic properties of recycled concrete which was produced by the crushed waste concrete in place of the conventional coarse aggregate, are experimentally investigated. Many kinds of test concerning with modulus of elasticity, drying shrinkage and creep of recycled concrete, were carried out and the results obtained from these experiments are discussed comparing with that of concrete containing conventional coarse aggregate.

Through these investigations, it may be concluded that the elastic and plastic properties of the recycled concrete can be presumed by considering in relation together to the properties of aggregate produced from crushed concrete and concrete containing conventional coarse aggregate.

1. はじめに

コンクリート構造物の解体によって生ずるコンクリート廃棄物を破砕して、新たにコンクリート用骨材として再利用する考えは、今後予想される骨材資源の枯渇に対処し、さらに産業廃棄物の処理、資源の有効利用等の面からも多くのメリットが期待されよう。本研究は、このような観点に立って計画されたコンクリート破砕物の再利用に関する研究プロジェクトの一環として行ったものである¹⁾。

従来から各方面でなされてきた研究を通して、コンクリート廃棄物を破砕して得られるいわゆる再生骨材は、

それほど高品質を必要としないコンクリートには十分に利用することが可能であることが知られている^{2)~4)}。しかし、再生骨材にはモルタル分がかなり付着あるいは含有されているので、これを用いたコンクリートではコンクリート全体に占めるモルタルの絶対容積が、同程度の圧縮強度を有する普通コンクリートよりもかなり大きくなり、これがコンクリートの変形挙動、すなわち弾塑性的性質にかなりの影響を与えることが予想される。そこで本研究では、粗骨材として再生骨材を使用したコンクリートのヤング係数、クリープおよび乾燥収縮等を中心とした弾塑性的性質について実験的に明らかにしていく。

* 土木工学科 Dept. of Civil Engineering

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験は、再生コンクリートの変形挙動を明らかにするために計画したもので、静的圧縮試験による応力～ひずみ特性に関する実験、クリープ、乾燥収縮に関する実験が含まれる。なお、実験はそれぞれの要因について、再生コンクリートおよびそれと同一のスランブ、水セメント比を有する普通の砕石を用いた比較用のコンクリート（コントロール用コンクリート）と対応させて行った。試験要因等をまとめて Table I に示す。

2.2 使用材料および再生骨材の製造

本実験で使用したセメントは、宇部興産社製の普通ポルトランドセメントである。破砕して骨材を製造する原料となるコンクリート（原コンクリート）およびコントロール用コンクリートには粗骨材として砕石（骨材最大寸法 15mm，比重 2.70，F. M. 6.55）を使用した。細骨材はすべて川砂と海砂を 4：1 の割合で混合したもの（比重 2.59，F. M. 2.73）を使用した。

原コンクリートの配合を Table II に示す。原コンクリ

ートは、径が 10～20 cm 程度の大きさのブロックとして打設し、28 日間水中養生したあとシートをかぶせて屋外に放置しておいた。破砕はコンクリートの材令 3～4 ヶ月で、ジョークラッシャー（ラサ工業製、シングルトッククラッシャー 107 型）を用いて行った。破砕物の最大寸法は 25 mm 程度になるようにクラッシャーを調整し、また破砕物は 5 mm ふるいでふるって細粒をとり除き、再生粗骨材とした。本実験では、破砕物の細粒分は使用しなかった。

Table I Test program

| Items | | Performance |
|------------------------|----------|--|
| Concrete | Recycled | R-I, R-II, R-III |
| | Control | C-I, C-II, C-III |
| Sustained comp. stress | | $0, \frac{1}{3}\sigma_c, \frac{1}{4}\sigma_c^*$ |
| Static comp. test | | Stress-strain curve Comp. strength Young's modulus |

* σ_c : Comp. strength of concrete at 28 days.

Table II Mix proportion of original concrete

| Max. size of agg. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | Water Cement ratio W/C (%) | Fine agg. ratio s/a (%) | Water W (kg/m ³) | Cement C (kg/m ³) | Aggregate (kg/m ³) | |
|------------------------|------------|---------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|
| | | | | | | | Fine S | Coarse G |
| 15 | 10 | 1.5 | 5.3 | 4.0 | 186 | 350 | 1114 | 713 |

Table III Mix proportions of concrete

| Kind of mix. | Max. size of agg. (mm) | Slump (cm) | Air (%) | Water cement ratio W/C (%) | Fine agg. ratio s/a (%) | Water W (kg/m ³) | Cement C (kg/m ³) | Aggregate (kg/m ³) | | Admixture Pozz No.8 IMP. A (%) | |
|--------------------|------------------------|------------|---------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|--------------------------------|----------|
| | | | | | | | | Fine S | Coarse G | | |
| Recycling concrete | R-I | 25 | 7.5 | 4 | 62 | 42 | 155 | 250 | 789 | 1023 | C × 0.25 |
| | R-II | | | | 45 | 39 | 156 | 350 | 700 | 1027 | |
| | R-III | | | | 36 | 37 | 161 | 450 | 629 | 1004 | |
| Control concrete | C-I | 15 | 7.5 | 5 | 62 | 44 | 155 | 250 | 816 | 1082 | C × 0.25 |
| | C-II | | | | 45 | 40 | 156 | 350 | 707 | 1106 | |
| | C-III | | | | 36 | 38 | 158 | 442 | 636 | 1082 | |

2. 3 コンクリートの示方配合

再生コンクリートの配合は、スランプ7.5 cm, 単位セメント量 250 kg/m³, 350 kg/m³, 450 kg/m³とし、試し練りによって決定した。その示方配合をコントロール用コンクリートの配合と合わせて Table IIIに示す。

2. 4 供試体

クリープ試験用供試体は、断面中心部に塩化ビニール管を配した10×10×38 cm角柱2本を直列に並べ、供試体間ならびに両端に鋼製プレートを挿入し、塩化ビニール管にφ13 mm高周波焼入PC鋼棒を通したものである。乾燥収縮試験用供試体は、断面中心部に塩化ビニール管を配した10×10×38 cmの角柱とした。クリープ試験用、乾燥収縮測定用共、供試体には相対する2面にそれぞれ2組ずつ、ひずみ測定用のプラグを貼付けた。クリープおよび乾燥収縮試験用供試体の概略を Fig. 1に示す。

静的圧縮載荷試験およびヤング係数の測定にはφ10×20 cm円柱供試体を使用した。

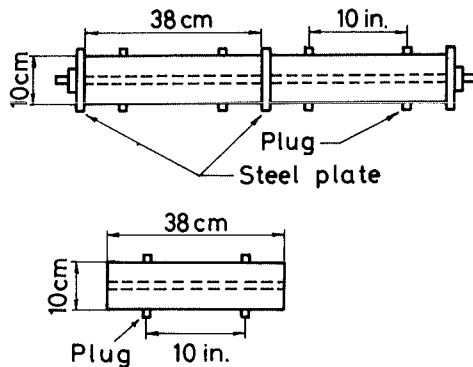


Fig. 1 Test specimens

各供試体は、コンクリート打設後24時間恒温恒湿室(20°C, 90% RH)中に放置した後脱型し、脱型後材令27日まで水中養生を行った。なお、コンクリート打設は原コンクリートを破砕後数ヶ月で行った。

2. 5 実験方法

クリープ試験における応力の導入は、コンクリート材令28日にあらかじめ設置しておいたPC鋼棒をジャッキで緊張することによって行った。応力の導入に先立ち、クリープ試験用供試体と同一条件下で打設、養生した円柱供試体を用いてコンクリートの圧縮強度、ヤング係数を測定し、これらの値をもとに導入応力の大きさを決定した。導入応力の大きさは、Table Iに示すように $\sigma_c/3$, $\sigma_c/4$ としたが、その値が110 kg/cm²を超える場合には、

PC鋼棒の容量から110 kg/cm²とした。応力導入後供試体は恒温恒湿室(20°C, 90% RH)内に静置し、長さ変化(ひずみ)の測定は、フーゲンベルガー型ひずみ計(検長10インチ)によって行った。またクリープ試験用供試体と同一条件のもとで打設、養生した乾燥収縮用供試体は、材令28日からクリープ試験用供試体と同様に恒温恒湿室に静置し、長さ変化を測定した。

各コンクリートは、材令28日、3ヶ月、6ヶ月にφ10×20 cm円柱供試体を用いて静的圧縮載荷試験を行い、圧縮強度を求めると同時に、供試体側面に設置した電気抵抗線ひずみ計によって応力～ひずみ曲線、ヤング係数(1/3割線弾性係数)を求めた。

3. 実験結果および考察

3. 1 静的圧縮載荷試験

再生コンクリートおよびコントロール用コンクリートの材令28日における圧縮強度、ヤング係数を Table IVに、応力～ひずみ曲線を Fig. 2に示す。

一般にコンクリートの応力～ひずみ曲線は、高強度になるほど原点における曲線の立上がり勾配は大きく、曲線型は直線に近くなることが知られているが、再生コン

Table IV Comp. strength and Young's modulus of concrete

| Kinds of mix. | | Comp. strength σ_c (kgf/cm ²) | Young's modulus E_s ($\times 10^5$ kgf/cm ²) |
|---------------|-----|--|---|
| R | I | 209 | 2.31 |
| | II | 303 | 2.76 |
| | III | 407 | 3.02 |
| C | I | 235 | 2.89 |
| | II | 411 | 3.56 |
| | III | 514 | 3.90 |

クリートにおいてもこれと同じような傾向が認められる。一方、対応する配合の再生コンクリートとコントロール用コンクリートの応力～ひずみ曲線を比較すると、いずれの配合においても、再生コンクリートの方が原点における曲線の立上がり勾配は小さく、比較的応力の領域から上に凸の曲線となる傾向が認められる。

次に材令28日におけるコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を Fig. 3に示す。これによると再生コンクリートおよびコントロール用コンクリートとも圧縮強度

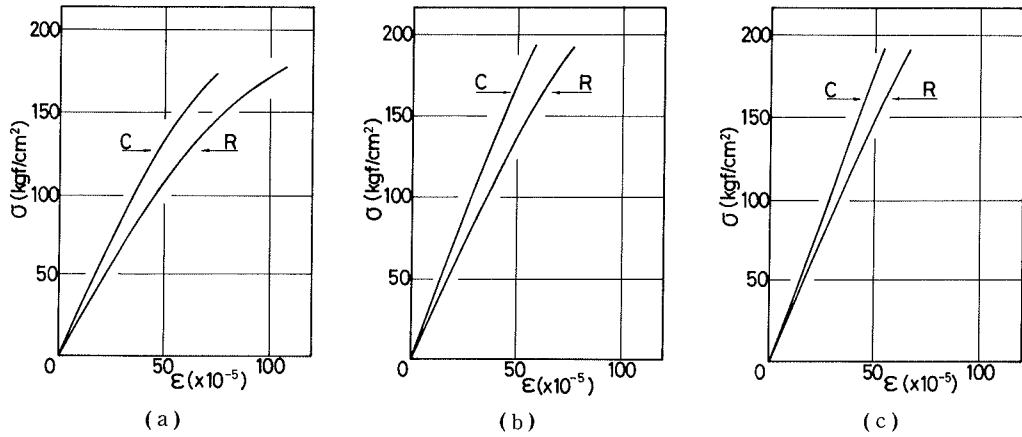


Fig. 2 Stress-strain curves of concrete (a) Mix I (b) Mix II (c) Mix III

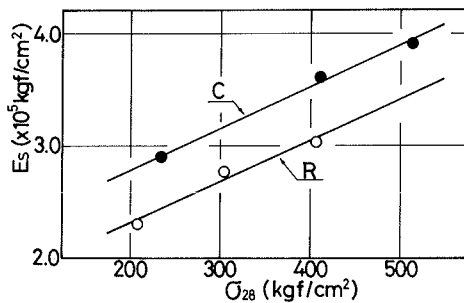


Fig. 3 Relationships between modulus of elasticity and compressive strength

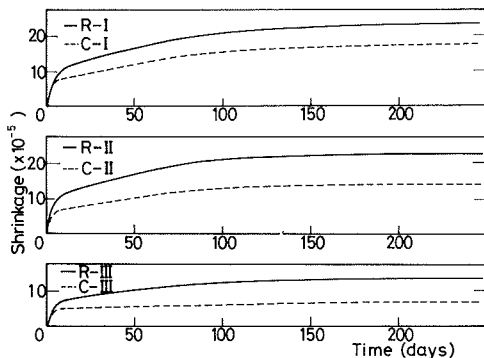


Fig. 4 Results of drying shrinkage tests

とヤング係数は直線関係を示しており、その直線の傾きは両者でほぼ等しい。また再生コンクリートのヤング係数は、同程度の圧縮強度を有し、普通の骨材を使用したコンクリートの85%程度になっている。

Table V Values of A, B and S_m ($\times 10^{-5}$)

| Kinds of mix. | | A | B | $S_m (\times 10^{-5})$ |
|---------------|-----|------|------|------------------------|
| R | I | 0.76 | 0.04 | 22.9 |
| | II | 0.66 | 0.04 | 22.6 |
| | III | 0.33 | 0.09 | 12.4 |
| C | I | 1.15 | 0.06 | 16.7 |
| | II | 1.11 | 0.08 | 12.9 |
| | III | 0.73 | 0.17 | 5.9 |

3. 2 乾燥収縮およびクリープ

材令28日を基点にとったそれぞれのコンクリートの乾燥収縮ひずみ～時間曲線を Fig. 4 に示す。この曲線型を双曲線と仮定し、次式にあてはめて最小2乗法によって実験定数A, Bおよびtを無限大としたときの推定最終乾燥収縮ひずみ ($S_m = 1/B$) を計算すると Table V に示す通りとなる。

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

ここに S_t : 時間 t (日) における乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

S_m : 推定最終乾燥収縮ひずみ

t : 時間 (日)

A, B : 実験定数

表から、実験定数Aすなわち曲線の立上がりは、貧配合のコンクリートほど大きく、また再生コンクリートとコントロール用コンクリートでは、後者の方が大きな

っている。しかし、推定最終乾燥収縮ひずみは、再生コンクリートの方が大幅に大きくなっている。これは、再生骨材の方が碎石に比べて吸水率が大きく材令初期における含水量が大きいため、当初、新しいモルタルに再生骨材から水分の補給がなされ、乾燥収縮の発現がおくれるが、時間がたつにつれて、水分の散逸が継続し、最終的には再生骨材中に含まれているモルタルも乾燥収縮するために、最終的な乾燥収縮ひずみが大きくなると考えることができる。

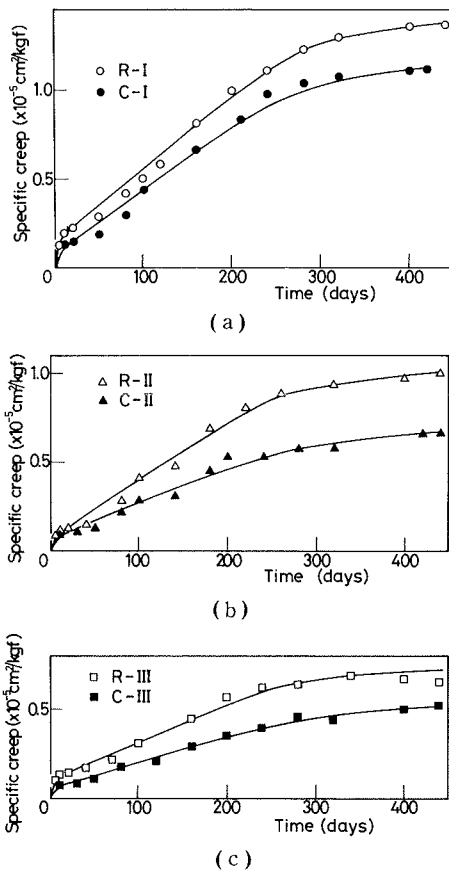


Fig. 5 Results of creep tests
 (a) Mix I (b) Mix II (c) Mix III

次に再生コンクリート、コントロール用コンクリートのクリープひずみ～時間曲線を Fig. 5 に示す。なおクリープひずみは単位応力当りのクリープひずみ ($=f_t/\sigma$, f_t : クリープひずみ, σ : 導入応力) で示す。さらに、導入応力度とクリープ係数を Table VI に示す。ここで、クリープ係数は、クリープひずみ～時間曲線を乾燥収縮の場合と同様に式(1)にあてはめて、 t を無限大として求めた推

Table VI Results of creep test

| Kinds of mix. | | Sustained comp. stress (kgf/cm ²) | | Elastic strain ($\times 10^{-5}$) | | Creep factor | |
|---------------|-----|---|------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | $\frac{1}{3} \sigma_c$ | $\frac{1}{4} \sigma_c$ | $\frac{1}{3} \sigma_c$ | $\frac{1}{4} \sigma_c$ | $\frac{1}{3} \sigma_c$ | $\frac{1}{4} \sigma_c$ |
| R | I | 69 | 52 | 30 | 23 | 3.1 | 3.2 |
| | II | 101 | 76 | 37 | 26 | 2.6 | 2.8 |
| | III | — | 110 | — | 36 | — | 2.0 |
| C | I | 28 | 59 | 27 | 20 | 3.0 | 3.1 |
| | II | — | 103 | — | 30 | — | 2.3 |
| | III | — | 110 | — | 30 | — | 1.9 |

定最終クリープひずみを導入時の弾性ひずみで除した値である。

これらの図表より、それぞれの配合のコンクリートのクレープひずみは、応力導入後、約 250 日から 300 日でクリープひずみの増加はゆるやかになる。一般に再生コンクリートは、再生骨材に含まれているモルタル分がクレープ変形をするために、コントロール用コンクリートに比べ、単位応力当りのクリープひずみは大きくなっている。また、本実験での応力レベル内では、各配合とも Davis-Glanville の法則が成立しており、単位応力当りのクリープひずみは、導入応力レベルに関係なくほぼ等しい値を示している。さらに、水セメント比別に比較すれば、水セメント比が大きくなれば、クリープひずみは大きくなっている。

コンクリートのクリープ機構については、きわめて複雑であり、影響を与える要因も多く、現在でも不明な点が多い。したがって、ここではごく単純に、再生コンクリートとコントロール用コンクリートのクリープひずみ量の差について比較、検討するにとどめる。すなわち、本実験で各配合ごとの単位応力当りのクリープひずみを再生コンクリートとコントロール用コンクリートとを比較すれば、両コンクリートにおいてモルタル分における単位応力当りのクリープひずみ (=コントロール用コンクリートのクリープひずみ) にはそれほど大差がないものと考えられ、したがって、両コンクリートのクリープひずみの差は、再生骨材に付着しているモルタル分のクリープひずみと考えることができる。このような考えで、それぞれの配合について再生、コントロール両コンクリートのクリープひずみを比較してみると、両コンク

リートのクリープひずみの差はII > I > IIIとなっている。また再生コンクリートに含まれる再生骨材量は I > II > IIIとなっており、IIの配合における両コンクリートのクリープひずみ量の差が大き出ている。しかしこれらの差の相違は、同一配合における再生、コントロール両コンクリートのクリープひずみの差に較べてきわめてわずかでであり、再生コンクリートのクリープを、上記考え方で取り扱っておおむねさしつかえないと考えられる。なお、本実験では、対応する配合における再生、コントロール用コンクリートの単位応力当りのクリープひずみの差はおおむね $3 \sim 4 \times 10^{-6}$ であった。この問題に関しては、次項でさらに具体的に検討する。

3. 3 複合則による再生コンクリートの弾塑性解析

一般にコンクリートは骨材とマトリックス(モルタル)との複合材料と考えることができる。そしてこの場合再生コンクリートの特性が普通のコンクリートと異なる原因は、主として粗骨材の特性によるものと考えられる。そこで、本節では複合則モデルに再生骨材の特性を考慮することによって、再生コンクリートの弾塑性解析を試みる。複合モデルとしては、過去数多くの研究者によって様々なモデルが提案されているが、ここでは、それらの中で比較的簡単で力学的に矛盾が少ないとされている U. J. Counto の複合モデルを用いることにする⁵⁾。Fig. 6 に Counto の複合モデルを示す。図中のMはマトリックス、Aは骨材を表わす。この複合モデルでは、全体の弾性係数(ここではコンクリートのヤング係数に対応する)は次式で示される。

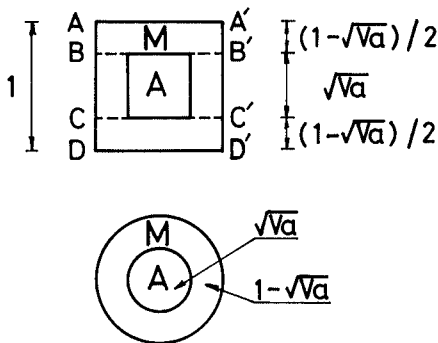


Fig. 6 Model of Counto

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1-\sqrt{V_a}}{E_m} + \frac{1}{\left(\frac{1-\sqrt{V_a}}{\sqrt{V_a}}\right) E_m + E_a} \quad \dots(2)$$

ここに E_c : コンクリートの弾性係数

Table VII Estimation of modulus of elasticity

| Age | kinds of mix. | Modulus of elasticity $E_s \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ | | |
|-----|---------------|---|------------|------------|
| | | Mortar | Exp. value | Cal. value |
| 28 | I | 1.67 | 2.31 | 2.34 |
| | II | 2.26 | 2.76 | 2.79 |
| | III | 2.65 | 3.02 | 3.05 |
| 3 M | I | 1.84 | 2.52 | 2.48 |
| | II | 2.33 | 2.94 | 2.84 |
| | III | 2.88 | 3.20 | 3.20 |
| 6 M | I | 1.90 | 2.68 | 2.52 |
| | II | 2.38 | 3.08 | 2.88 |
| | III | 2.94 | 3.37 | 3.24 |

E_a : 骨材の弾性係数

E_m : マトリックスの弾性係数

V_a : 骨材の絶対容積

ここで、コントロール用コンクリートの弾性係数と、それに用いられている砕石の弾性係数(推定値 $= 7.0 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$)からモルタルの弾性係数 E_m を求め、また、再生骨材の弾性係数は、再生骨材を製造した原コンクリートの弾性係数を用いて再生コンクリートの弾性係数を算定した。その結果を実験値と比較して Table VII に示す。これによると、各配合、材令とも実験値と計算値は比較的よく一致している。

次にコンクリートのクリープひずみに対する複合則について検討する。Counto は Fig. 6 に示すモデルを用いてクリープひずみに関する算定式を提案している⁵⁾が、ここでは骨材はクリープ変形をしないと仮定している。これを「骨材も時間依存性の変形をする」という仮定のもとに修正すると次の式を得ることができる。

$$\begin{aligned} \frac{f_c(t)}{\sigma} = & \frac{1}{E_m} (1-\sqrt{V_a}) \varphi_m(t) \\ & + \frac{E_m \left(\frac{1-\sqrt{V_a}}{\sqrt{V_a}} \right) \left(\frac{\varphi_m(t)}{1+\varphi_m(t)} \right)}{\left[\left(\frac{1-\sqrt{V_a}}{\sqrt{V_a}} \right) \frac{E_m}{1+\varphi_m(t)} + \frac{E_a}{1+\varphi_a(t)} \right]} * \\ & * \frac{+ E_a \left(\frac{\varphi_a(t)}{1+\varphi_a(t)} \right)}{\left[\left(\frac{1-\sqrt{V_a}}{\sqrt{V_a}} \right) E_m + E_a \right]} \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここに E_m : モルタルの弾性係数
 E_a : 骨材の弾性係数
 $\varphi_m(t)$: モルタルのクリープ係数
 $\varphi_a(t)$: 骨材のクリープ係数

ここで、コントロール用コンクリートのクリープひずみ～時間曲線から骨材のクリープ係数を0としてモルタルのクリープ係数 $\varphi_m(t)$ を求め、再生骨材の原コンクリートのクリープひずみ～時間曲線から再生骨材のクリープ係数 $\varphi_a(t)$ を求め、(3)式に代入すると t における再生コンクリートのクリープひずみを計算することができる。その結果の一例を実験値と比較して Fig. 7 に示す。これによると、実験値と計算値は、比較的良好に一致している。

以上のように、再生コンクリートの弾塑性的挙動は、基本的には、普通のコンクリートの弾塑性的挙動に再生骨材の特性を考慮することによって、ある程度まで把握することが可能である。

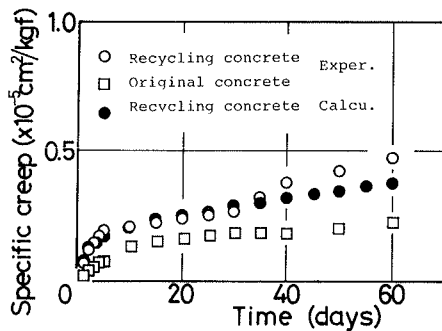


Fig. 7 Estimation of creep of recycling concrete

4. 結 び

本研究は、コンクリート破砕物を粗骨材として使用した再生コンクリートの弾塑性的挙動を把握するために行ったものである。再生コンクリートの静的圧縮載荷実験、乾燥収縮、クリープに関する実験を通して得られた結果を以下に要約して本論文の結びとする。

(1) 再生コンクリートの応力～ひずみ関係は、対応する普通コンクリートと比較して、原点までの立上がり勾配が小さく、比較的低応力の領域から上に凸の曲線となる。また再生コンクリートのヤング係数は、同程度の圧縮強度を有する普通のコンクリートと比較して、およそ85%程度となる。

(2) 再生コンクリートの乾燥収縮ひずみは、初期には

それほど大きくないが、最終的には、普通コンクリートの1.4～2倍程度に達する。

(3) 再生コンクリートのクリープひずみ量は、導入応力が圧縮強度の $\frac{1}{3}$ 以下程度であれば、Davis-Glanvilleの法則に従い、導入応力量に比例する。また、クリープひずみ量の増加割合は、応力導入後250～300日程度でゆるやかになってくる。本実験に関する限り、応力導入後400日程度における再生コンクリートのクリープひずみ量は普通コンクリートと比較して、単位クリープひずみ量で $3 \sim 4 \times 10^{-6}$ 程度大きくなる。この値は、配合等によってあまり大きな差はなく、再生骨材中に含まれているモルタル分がクリープ変形を起こした量であると考えられることができる。

(4) 再生コンクリートのヤング係数、クリープひずみ量等は、再生骨材の原料となる原コンクリートの物性および再生コンクリートの新モルタル部の物性がわかれば、各種の複合則モデルを適用することによってある程度まで推定することができる。

最後に、本研究は著者の一人に与えられた昭和54～56年度文部省科学研究補助金による成果の一部であることを付記するとともに、本研究を遂行するに当り終始御協力を賜った土木工学科材料研究室の諸氏に対し感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 西林, 矢村, 吉野, 湊: コンクリート破砕物の再利用に関する基礎的研究, 鳥取大学工学部研究報告, 第12巻, 1号, 昭和56年10月.
- 2) 建築業協会, 建設廃棄物処理再利用委員会: 再生骨材コンクリートに関する研究, コンクリート工学, Vol 16, No 7, 1978.
- 3) A. D. Buck: Recycled Concrete as a Source of Aggregate, ACI Jour., Vol. 74, No. 5, 1977.
- 4) S. F. Yannas: Waste Concrete as Aggregate for New Concrete, ACI Jour., Vol. 74, No. 8, 1977.
- 5) U. J. Counto: The effects of the elastic modulus of the aggregate on the elastic modulus, creep, and creep recovery of concrete, Mag. of Concrete Research, Vol. 16, No. 48, Sept., 1964.