

# 論文 オートクレープ養生した再生コンクリートの品質

竹内 毅典<sup>\*1</sup>・寺西 浩司<sup>\*2</sup>

要旨：筆者らは、再生コンクリートをオートクレープ養生してプレキャストコンクリートに適用することを目的とした検討を行った。低品質な再生骨材を使用した再生コンクリートでは、一般的に、乾燥収縮が大きいことが問題となるが、このような方法であれば、乾燥収縮を低減できる可能性がある。本研究では、オートクレープ養生した再生コンクリートの強度特性および乾燥収縮について検討した。

キーワード：再生骨材，オートクレープ養生，プレキャストコンクリート，乾燥収縮ひずみ

## 1. はじめに

再生コンクリートに関しては古くから多数の研究が報告されているが、実構造物への適用例は未だほとんどないのが実状である。その一因としては、再生コンクリートに低品質な再生骨材を用いると、経済的には有利となるが、乾燥収縮が大きくなり<sup>1)</sup>、適用範囲が限定されることが挙げられる。一方、オートクレープ養生したコンクリートの乾燥収縮は通常よりも小さくなることが知られている<sup>2)</sup>。このことが再生コンクリートに対しても当てはまるのであれば、オートクレープ養生を行うPCaコンクリート部材は、低品質な再生骨材を用いる再生コンクリートの有効な用途のひとつになる。すなわち、このような用途であれば、従来と変わらない方法で、品質を落とすことなく再生コンクリートを適用できる可能性がある。

本研究では、以上のような再生コンクリートの使用方法を想定し、オートクレープ養生した再生コンクリートの基礎的な品質を調べた。本報では、強度特性および乾燥収縮の試験結果について報告する。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験要因とその水準

実験要因とその水準を表 - 1 に示す。本実験では、水セメント比、骨材種別(普通骨材と再生骨材の組合せ方)、置換率およびオートクレープ養生の有無(AC 養生, NO 養生)を要因として、計 54 ケースの試験を行った。なお、これらのケースのうち、各骨材種別における置換率 0% の水準は調合が同一となるが、試験誤差の把握のためにすべてのケースを実施した。

### 2.2 使用材料および調合

使用骨材の品質を表 - 2 に示す。また、骨材以外の材料を表 - 3 に示す。本実験では、路盤材用の再生砕石 RC-40 をふるい分けて、5mm 以下の粒度を再生細骨材、5~20mm の粒度を再生粗骨材とした。これらの再生骨材は、原セメントペーストが付着し、少量のアスファルトを含むものである。なお、表 - 2 中のセメントペースト付着率は、「硬化コンクリートの配合推定のための化学分析方法」(セメント協会)を準用し

表 - 1 実験要因とその水準

| 要因         | 水準   |
|------------|--|
| 水セメント比(%)  | 60, 45, 30   |
| 骨材種別       | 再生粗骨材と普通細骨材(rc-f)<br>普通粗骨材と再生細骨材(c-rf)<br>再生粗骨材と再生細骨材(rc-rf) |
| 再生骨材置換率(%) | 0, 50, 100   |
| オートクレープ養生  | 有(AC 養生), 無(NO 養生)   |

\*1 名城大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 名城大学 理工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

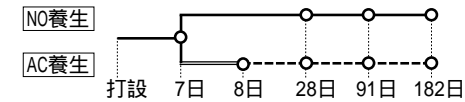
表 - 2 骨材の品質

| 項目                      | 普通骨材   |        | 再生骨材      |      |
|-------------------------|--------|--------|-----------|------|
|                         | 細骨材    | 粗骨材    | 細骨材       | 粗骨材  |
| 産地・仕様                   | 長良川産川砂 | 硬質砂岩砕石 | RC-40 の分別 |      |
| 最大寸法(mm)                | 5      | 20     | 5         | 20   |
| 粗粒率                     | 2.77   | 6.26   | 3.28      | 6.56 |
| 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 表乾     | 2.59   | 2.67      | 2.26 |
|                         | 絶乾     | 2.53   | 2.66      | 2.07 |
| 吸水率(%)                  | 2.35   | 0.64   | 9.39      | 5.42 |
| 単位容積質量 (kg/ )           | 1.63   | 1.54   | 1.40      | 1.36 |
| 実積率(%)                  | 64.5   | 58.0   | 67.6      | 59.3 |
| 400kN 破砕値(%)            | -      | 10.2   | -         | 20.7 |
| 10%破砕荷重(kN)             | -      | 393    | -         | 171  |
| 有機不純物量(%)               | -      | -      | -         | 2.19 |
| セメントペースト 附着率(%)         | -      | -      | 21.4      | 13.1 |

表 - 3 使用材料

| 材料         | 仕様  |
|------------|---|
| セメント       | 普通ポルトランドセメント (密度：3.16 g/cm <sup>3</sup> ) |
| 高性能 AE 減水剤 | ポリカルボン酸系                                  |
| AE 減水剤     | オキリカルボン酸、リグニンスルホン酸塩                       |
| 空気連行剤      | アルキルエーテル界面活性剤                             |

圧縮強度試験



乾燥収縮試験

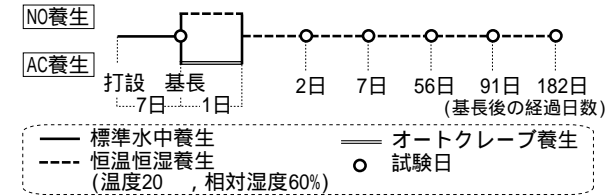


図 - 1 試験日程

表 - 4 コンクリートの調合(置換率 0%の場合)

| 水セメント比 (%) | スランプ (cm) | 空気量 (%)   | 粗骨材のかさ容積 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | 単位水量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 絶対容積 (/m <sup>3</sup> ) |     |     | AE 減水剤 (g/m <sup>3</sup> ) | 高性能 AE 減水剤 (g/m <sup>3</sup> ) |
|------------|-----------|-----------|--|---------------------------|-------------------------|-----|-----|----------------------------|--------------------------------|
|            |           |           |  |                           | セメント                    | 細骨材 | 粗骨材 |                            |                                |
| 60         | 8.0 ± 2.5 | 4.5 ± 1.5 | 0.68                                       | 167                       | 88                      | 306 | 394 | 2783                       | -                              |
| 45         |           |           |  |                           | 117                     | 276 | 394 | 5567                       | -                              |
| 30         |           |           |  |                           | 176                     | 217 | 394 | -                          | 3340                           |

で求めたものである。その際、まず、試験によって再生骨材に占める原骨材の質量比を推定し、その残りの比率をセメントペースト附着率とした。

表 - 4 に、普通コンクリート(置換率 0%)の調合を示す。再生コンクリートの場合、この調合に対して所定の置換率の水準になるように再生骨材を置換した(rc-rf では、粗骨材と細骨材の両方を所定の置換率の水準になるように置換した)。その際、スランプは調整せず、空気量のみを空気連行剤によって 4.5 ± 1.5% に調整した。なお、スランプの試験結果は、1.5 ~ 10.5cm の範囲となり、置換率が高いほど小さくなった。

### 2.3 オートクレーブ養生の方法

AC 養生の場合、材齢 7 日まで標準水中養生した後にオートクレーブ養生を行った。オートクレーブ養生に当たっては、4 時間かけて 180℃、10 気圧まで昇温・昇圧し、その状態を 3 時間保

持した後に自然冷却した。

### 2.4 試験項目および試験日程

本実験では、圧縮試験(JIS A 1108)を行い、圧縮強度およびヤング係数を測定した。また、乾燥収縮試験(JIS A 1129、ダイヤルゲージ法)を行い、乾燥収縮ひずみおよび質量減少率を測定した。試験日程を図 - 1 に示す。NO 養生の場合は一般的な日程で各種試験を実施した。一方、AC 養生の場合、圧縮試験では、オートクレーブ養生の前後(材齢 7、8 日)に試験を行い、それ以降は供試体を恒温恒湿養生(温度 20℃、相対湿度 60%)して試験を継続した。また、乾燥収縮試験では、オートクレーブ養生の直前に基長を測定し、オートクレーブ養生後、恒温恒湿室内に供試体を 1 日間存置した後に 1 回目の測定を行った。以降は、恒温恒湿室内で通常通りの測定を行った。

### 3. 実験結果とその考察

#### 3.1 圧縮強度

##### (1) 経時変化

図 - 2 に、圧縮強度の経時変化の一例(W/C60%・rc-f)を示す。同図によると、NO養生の場合は時間とともに強度が徐々に増加していく。それに対して、AC養生の場合は、オートクレーブ養生時に圧縮強度が増加し、それ以降はほとんど変化がない。また、オートクレーブ養生に伴う圧縮強度の増加量は、置換率の高い試料ほど小さくなっている。

##### (2) 置換率の影響

図 - 3 に、圧縮強度と置換率の関係を示す(材齢 28 日)。ここで、同図における各骨材種別の置換率 0%の圧縮強度を個々に比較すると、値がやや異なっているが、全体的には大差ないため骨材種別間の試験誤差は小さいものと見なして以下の考察を行う。同図によると、オートクレーブ養生の有無に関わらず、置換率の増加に伴って圧縮強度が直線的に低下する傾向が認められる。また、NO養生とAC養生では、AC養生の方が置換率の増加に伴う圧縮強度の低下量が大きい。そのため、AC養生の場合の圧縮強度は、置換率 0%ではNO養生よりも全体的に大きいですが、置換率 100%ではNO養生と同等かまたはそれ以下になっている。ただし、このことに対しては、

実用上、水セメント比の低減により対応できるものと考えられる。

##### (3) 水セメント比の影響

図 - 4 に、置換率 0%および 100%の場合の圧縮強度とセメント水比の関係を示す(材齢 28 日)。同図によると、骨材種別、オートクレーブ養生の有無に関わらず、圧縮強度とセメント水比の間に直線的な関係が認められる。したがって、オートクレーブ養生した再生コンクリートに対しても、通常の調合設計の手順に基づいて水セメント比を設定することが可能である。

#### 3.2 ヤング係数

図 - 5 に、ヤング係数と置換率の関係を示す。同図によると、オートクレーブ養生の有無に関わらず、置換率の増加に伴ってヤング係数が直線的に低下する傾向が認められる。また、NO養生とAC養生では、AC養生の方が同一調合におけるヤング係数が低い。ただし、オートクレー

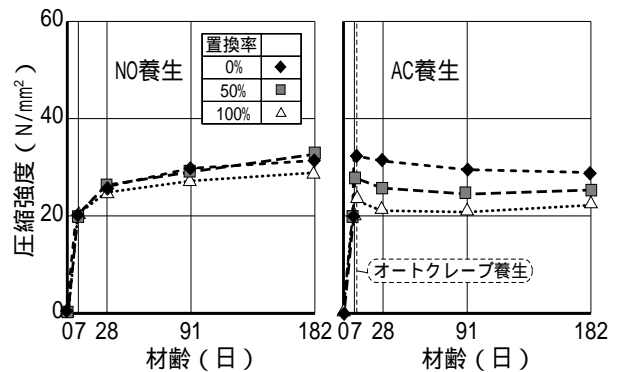


図 - 2 圧縮強度の経時変化(W/C60%・rc-f)

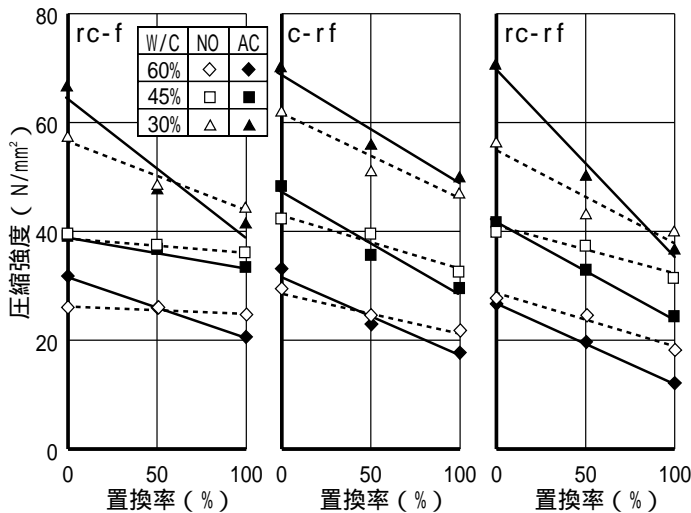


図 - 3 圧縮強度と置換率の関係(材齢 28 日)

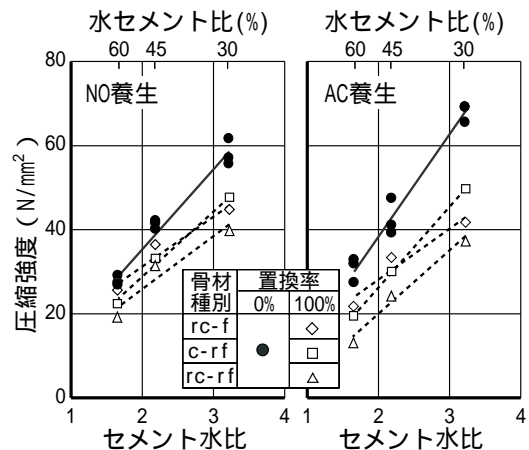


図 - 4 圧縮強度とセメント水比の関係(材齢 28 日)

ブ養生するとコンクリートの単位容積質量も減少する。そこで、このことを考慮するために、下記の旧 RC 計算規準式による計算値を求めて測定値と比較した。

$$E = 21.0 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times (F / 20)^{0.5}$$

ここに、 $E$  : ヤング係数 ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )

$\gamma$  : 単位容積質量 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )

$F$  : 圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

これらの関係を図 - 6 に示す(材齢 28 日)。同図によると、同一ヤング係数に対する計算値は AC 養生の方がやや高くなっているものの、オートクレーブ養生の有無に関わらず、測定値と計算値はほぼ一致している。したがって、オートクレーブ養生した再生コンクリートのヤング係

数は、単位容積質量の減少を考慮すれば、圧縮強度との関係において評価できるものと考えられる。

### 3.3 乾燥収縮ひずみおよび質量減少率

#### (1) 乾燥収縮ひずみの経時変化

図 - 7 に、乾燥収縮ひずみの経時変化の一例を示す。同図によると、NO 養生の場合は、時間とともに乾燥収縮ひずみが徐々に増加していく。それに対して、AC 養生の場合は、オートクレーブ養生時(乾燥期間 1~2 日)に乾燥収縮ひずみがある程度増加し、それ以降はほとんど変化がない。このことは、オートクレーブ養生した再生コンクリートを PCa 部材に適用した場合、建物に取り付けた後に PCa 部材に乾燥収縮ひずみが生じないことを意味している。また、オートク

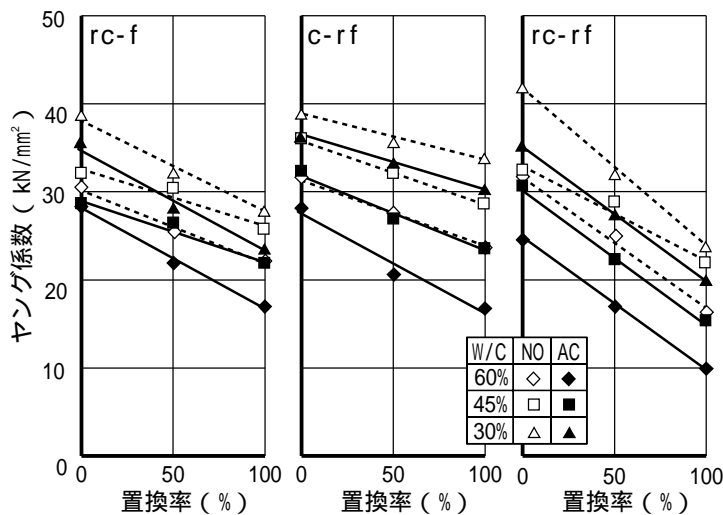


図 - 5 ヤング係数と置換率の関係(材齢 28 日)

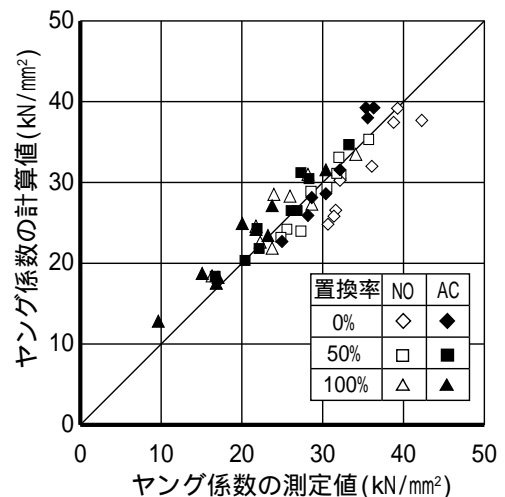


図 - 6 ヤング係数の計算値と測定値の関係(材齢 28 日)

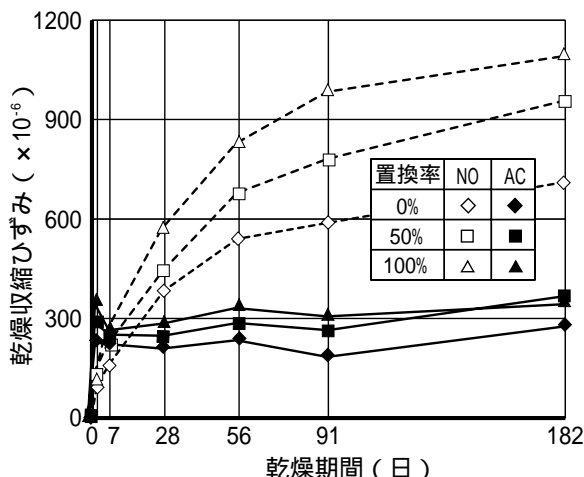


図 - 7 乾燥収縮ひずみの経時変化 (W/C60%・rc-f)

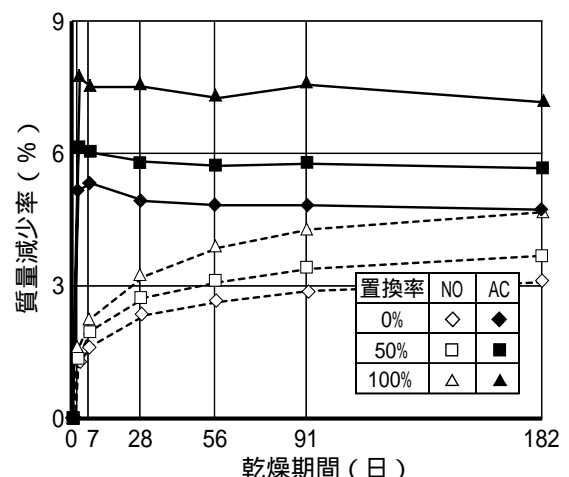


図 - 8 質量減少率の経時変化 (W/C60%・rc-f)

レーブ養生時に生じる乾燥収縮ひずみはそれほど大きくないので、AC 養生の場合の乾燥収縮ひずみは、NO 養生の場合よりも小さくなっている。

### (2) 質量減少率の経時変化

図 - 8 に、質量減少率の経時変化の一例を示す。同図によると、AC 養生の場合、オートクレーブ養生時にコンクリート中の水分が逸散し、それに伴って質量が大きく減少しているが、それ以降は、質量はほとんど変化していない。NO 養生の場合は、時間とともに質量が徐々に減少しているが、乾燥期間 182 日に至っても、AC 養生の方が NO 養生に比べて質量減少率が大きい。また、質量減少率は、オートクレーブ養生の有無に関わらず、置換率が高いほど大きくなっている。

### (3) 乾燥収縮ひずみに対する諸要因の影響

図 - 9 に、乾燥収縮ひずみと置換率の関係を示す(乾燥期間 182 日)。同図によると、オートクレーブ養生の有無に関わらず、乾燥収縮ひずみは置換率の増加に伴って増加している。しかし、AC 養生の場合、その変化量は NO 養生の場合に比べて小さい。すなわち、オートクレーブ養生すると再生骨材混入の影響は小さくなるといえる。

次に、同図において水セメント比の影響に着目すると、NO 養生の場合は、骨材種別に関わ

ず、水セメント比が高いほど乾燥収縮ひずみが大きくなっており、AC 養生の場合は逆の傾向になっている。ただし、AC 養生の場合、水セメント比の影響は NO 養生の場合に比べて小さい。さらに、同図において骨材種別の影響に着目すると、AC 養生の場合、rc-f のケースと c-rf のケースでは、乾燥収縮ひずみは同程度である。また、rc-rf のケースでは、置換率 100% の場合に乾燥収縮ひずみが他のケースよりもやや大きくなっている。

以上の考察からわかるように、再生コンクリートをオートクレーブ養生すると、乾燥収縮ひずみは  $200 \sim 600 \times 10^{-6}$  程度に低減される。また、乾燥収縮に対する置換率、水セメント比、骨材種別の影響はオートクレーブ養生しない場合に比べて小さくなる。

### (4) オートクレーブ養生の影響

図 - 10 に、AC 養生と NO 養生の乾燥収縮ひずみの関係を示す(乾燥期間 182 日)。同図によると、両者の関係は、水セメント比ごとに原点を通るひとつの直線でほぼ表される。すなわち、NO 養生に対する AC 養生の乾燥収縮ひずみの比率(以下、AC/NO と記す)は、水セメント比に依存し、置換率や骨材種別には依存しない。また、AC/NO は水セメント比が高いほど小さくなっている。

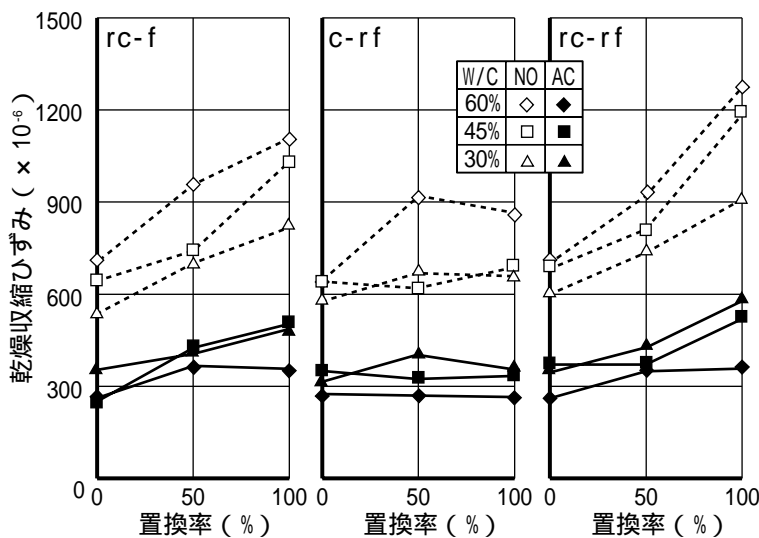


図 - 9 乾燥収縮ひずみと置換率の関係 (乾燥期間 182 日)

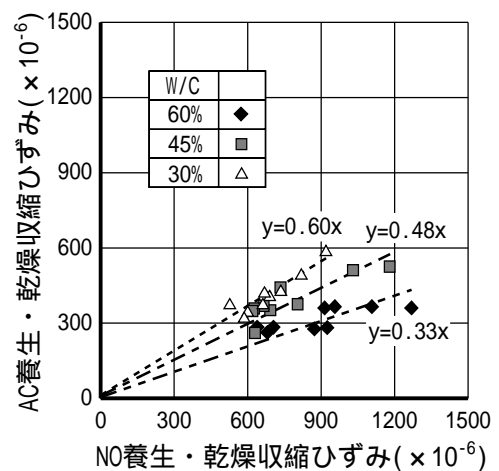


図 - 10 AC 養生と NO 養生の乾燥収縮ひずみの関係 (乾燥期間 182 日)

(5) 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係

図 - 11 に、乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係の一例を示す。同図によると、AC 養生と NO 養生とでは、関係曲線の傾きが全く異なっており、AC 養生の方が傾きが緩やかである。すなわち、オートクレーブ養生すると、コンクリート中の水分は多量に逸散するが、乾燥収縮ひずみは小さくなる。このことは、普通コンクリート、再生コンクリートの区別に関わらず、NO 養生と AC 養生では乾燥収縮のメカニズムが異なることを示唆している。

(6) 乾燥収縮ひずみとヤング係数の関係

図 - 12 に、乾燥収縮ひずみ(乾燥期間 182 日)とヤング係数(材齢 182 日)の関係を示す。同図によると、オートクレーブ養生の有無に関わらず、ヤング係数が高いほど乾燥収縮ひずみが小さくなっているが、AC 養生の場合、NO 養生に比べて回帰直線の傾きが緩やかである。これは、AC 養生では、オートクレーブ養生によってコンクリート中のセメントペースト成分の乾燥収縮ひずみが大きく低減されるため、収縮の拘束要因である骨材のヤング係数の影響度合いが小さくなることが原因と考えられる。

4. まとめ

低品質な再生骨材を用いた再生コンクリートをオートクレーブ養生すると、その品質は以下のようなになる。

- (1) オートクレーブ養生による圧縮強度の増進効果は、置換率が高くなるほど小さくなる。
- (2) 同一圧縮強度に対するヤング係数は、オートクレーブ養生しない場合に比べてやや低下する。ただし、旧 RC 計算規準式などにより適正に評価できる。
- (3) 乾燥収縮ひずみは  $200 \sim 600 \times 10^{-6}$  程度に低減される。また、乾燥収縮ひずみは、オートクレーブ養生以降はほとんど生じない。
- (4) 乾燥収縮ひずみに対する置換率、水セメント比、骨材種別の影響は小さくなる。

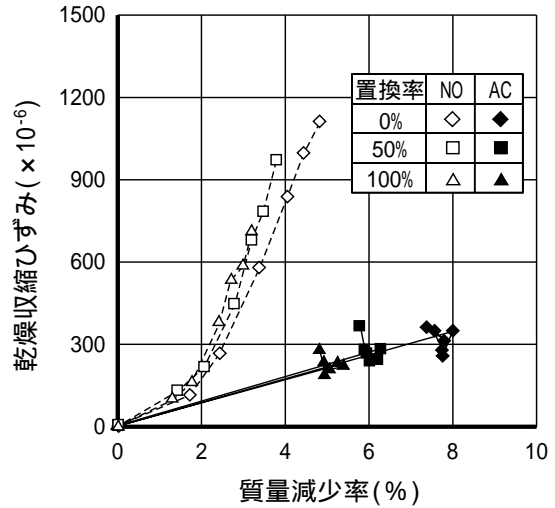


図 - 11 乾燥収縮ひずみと質量減少率の関係 (W/C60%・rc-f)

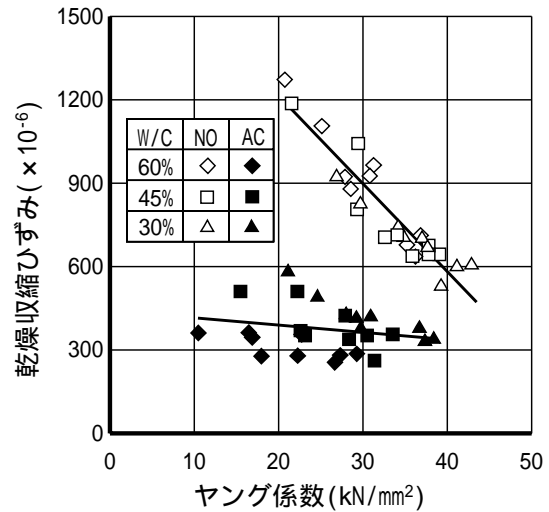


図 - 12 乾燥収縮ひずみとヤング係数の関係

謝辞

本研究の実施に際しては、(株)ナルックス三重工場および東海コンクリート工業(株)三重工場の多大なる協力を頂いた。また、名城大学学生・平林貴光君、廣田紘司君の助力を得た。ここに付記して感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 江口 清, 成川匡文, 寺西浩司, 中込 昭, 岸本 均: 低環境負荷型再生コンクリートの実用化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.570, pp.15-21, 2003.8
- 2) 須藤儀一: 高圧養生, セメント・コンクリート, No.271, pp.27-34, 1969.9