

# 再生骨材と普通骨材を混合使用した コンクリートの乾燥収縮特性

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○山内 稜  
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 吉田 行  
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

再生骨材をコンクリートに使用すると乾燥収縮が増大するため、その適用拡大を図るには収縮抑制対策が必要である。一方、再生骨材のJIS規格の改正で、所定の条件を満たせば再生骨材Lと普通骨材を混合して再生骨材コンクリートMとして出荷できるようになった。普通骨材との混合使用は収縮低減効果も期待できるため、本研究では、再生粗骨材と普通粗骨材を混合使用したコンクリートの乾燥収縮特性について検討した。

キーワード：再生骨材、混合使用、リサイクル、乾燥収縮

## 1. はじめに

平成30年度に行われた国土交通省の建設副産物実態調査によれば、廃棄物としてのコンクリート塊の排出量は約37百万トンであり、その再資源化率は99%以上に達している<sup>1)</sup>。しかしながら、コンクリート塊の再資源化用途は路盤材が多く、コンクリート用再生骨材など他の用途への再利用化は1%未満である。将来的に、公共工事が減少した場合でも、コンクリート塊の高い再資源化率を確保するには、他の用途への積極的な利用拡大が求められる。

利用用途の一つであるコンクリート用再生骨材（以下、再生骨材と記す）とは、構造物を解体した際に発生するコンクリート塊を粗骨材や細骨材の寸法まで破碎して製造される材料であり、元の解体構造物のモルタルと骨材

が付着し一体化した材料である。

再生骨材は、骨材に付着するモルタル分の量によって品質が異なり、付着モルタル分が多いほど品質は低下し、それを用いたコンクリートの品質や耐久性も低くなる。そのため、再生骨材はJIS（日本産業規格）で品質によるグレードが規定され、その品質毎にコンクリートの適用用途が異なっている（表-1）。

再生骨材の品質を高めるためには、再生骨材に付着したモルタル分の量を減らす必要があり、製造時の破碎や分級だけでなく、加熱・研磨処理などの工程を増やせば普通骨材と同様に構造物に使用できるH骨材の製造が可能だが、コストが高くなり、除去したモルタル分の有効活用にも課題が残る。

一方、中間品質のM骨材は、破碎・摩砕・分級などの処理は同様であるが、H骨材に比べ処理は簡易であり骨

表-1 再生骨材の品質区分

| 再生骨材の種類                    |                          | H骨材                 | M骨材                                             | L骨材                                   |
|----------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------|
| JIS規格                      |                          | JIS A 5021          | JIS A 5022                                      | JIS A 5023                            |
| 再生粗骨材                      | 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.5以上               | 2.3以上                                           | -                                     |
|                            | 吸水率(%)                   | 3以下                 | 5以下                                             | 7以下                                   |
|                            | 微粒分量(%)                  | 1以下                 | 2以下                                             | 3以下                                   |
|                            | 全不純物量(%)                 | 2以下                 | 2以下                                             | 3以下                                   |
|                            | 塩化物量(%)                  | 0.04以下              | 0.04以下                                          | 0.04以下                                |
|                            | アルカリシリカ反応性試験             | 無害                  | 無害                                              | 無害                                    |
|                            | FM凍害指数                   | -                   | 0.08以下ならば耐凍害品に使用可能                              | -                                     |
| 再生細骨材                      | 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.5以上               | 2.2以上                                           | -                                     |
|                            | 吸水率(%)                   | 3.5以下               | 7以下                                             | 13以下                                  |
|                            | 微粒分量(%)                  | 7以下                 | 8以下                                             | 10以下                                  |
| 呼び強度目安(N/mm <sup>2</sup> ) |                          | 18~45               | 18~36                                           | 18~24                                 |
| 適用範囲<br><br>(適用構造物例)       |                          | 普通骨材と同様(JIS A 5308) | 乾燥収縮や凍結融解を受けにくい構造部材<br>(無筋コンクリート部材、地中構造物、PCa製品) | 高い強度・耐久性が要求されない部材(捨てコンクリート、均しコンクリート等) |

材品質は劣る。構造体への使用も可能ではあるものの、乾燥収縮と凍結融解の影響を受けにくい地中構造物や無筋構造物の部材、あるいは乾燥収縮の影響が小さい小型の工場製品に限定されている<sup>2)</sup>。

また、L骨材は、破碎・分級のみにより製造される。H・M骨材と比べ製造コストは低いが、再生骨材としては、品質が低く変動も大きいことから、構造部材に当たらない捨てコン等の極めて限定的な範囲でしか使用できない現状にある。

このような中、2018年に再生骨材コンクリートMのJIS規格が改正され、表-2に示す所定の条件を満たせば再生骨材Lと普通骨材を混合して再生骨材コンクリートMとして出荷が可能となった。これにより、L骨材の利用促進は期待されるが、その場合でも再生骨材コンクリートMの適用範囲に限定されるため、再生骨材の利用拡大に向けては、乾燥収縮抑制対策を講じる必要がある。

他方、普通骨材との混合使用は収縮低減効果も期待できることから、本研究では、再生粗骨材と普通粗骨材を混合使用したコンクリートの乾燥収縮特性について検討した。

## 2. 実験概要

再生粗骨材と普通粗骨材を混合使用した場合のコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響を確認するために、再生粗骨材2種類と普通粗骨材2種類を複数水準の混合率によって混合使用したコンクリートで各種試験を実施した。以下に実験の概要を示す。

### (1) 使用材料および配合

使用した骨材諸元を表-3に示す。セメントは、再生骨材を使用したコンクリートの場合、普通コンクリート

よりアルカリ骨材反応が生じる可能性が高まるため、アルカリ含有量の少ない高炉セメントB種（密度3.05 g/cm<sup>3</sup>、比表面積3.770 cm<sup>2</sup>/g）を用いた。普通粗骨材は、安山岩と石灰石の2種類をロット（年度）が異なる材料も合わせて計4試料とした。再生粗骨材は、石狩市と高槻市の2箇所で作成したものを用いた。石狩産はL規格1種類、高槻産はL規格1種類と骨材に含まれる微粒分の有無が与える影響を検証することを目的にその微粒分をカットした1試料の計3試料用意した。細骨材は、苫小牧市錦多峰産の除塩海砂のロットが異なる2試料を使用した。

表-4に試験に使用したコンクリートの配合および実測したフレッシュ性状を示す。水セメント比は55%の1水準とした。

目標空気量と目標スランブはそれぞれ5.0 ± 1.0%、12 ± 2.5cmとして、AE減水剤（リグニンスルホン酸塩系）とAE剤（変性ロジン酸化合物系）を適宜用いて調整し

表-2 混合骨材を M 骨材として利用する際の条件

|      | 普通骨材と再生骨材の混合利用時の条件(JIS A 5022) |
|------|--------------------------------|
| 粗骨材  | 再生粗骨材Lの容積混合率を50%以下とする          |
| 細骨材  | 再生細骨材Lの容積混合率を30%以下とする          |
| 品質管理 | 再生骨材Mと同じ検査頻度および試験項目にて管理する      |

表-3 骨材諸元

| 種別        | 産出地<br>製造箇所 | 区分  | 凡例<br>記号 | 表乾密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率<br>(%) | 最大粒径<br>(mm) | 微粒分量<br>(%) |
|-----------|-------------|-----|----------|------------------------------|------------|--------------|-------------|
| 普通<br>粗骨材 | 小樽市         | 安山岩 | NA       | 2.67                         | 1.74       | 20           | 0.8         |
|           | 見晴産砕石       |     | NB       | 2.67                         | 1.79       | 20           | 1.7         |
|           | 函館市         | 石灰石 | NC       | 2.71                         | 0.42       | 20           | 0.8         |
|           | 義朗産砕石       |     | ND       | 2.71                         | 0.42       | 20           | 3.4         |
| 再生<br>粗骨材 | 石狩産         | L骨材 | RK       | 2.42                         | 6.67       | 20           | 1.4         |
|           | 高槻産         | L骨材 | RT       | 2.41                         | 5.65       | 20           | 1.9         |
|           |             |     | RTX      | 2.41                         | 5.65       | 20           | ※           |
| 細骨材       | 苫小牧市        | 海砂  | S1       | 2.69                         | 1.19       | -            | -           |
|           | 錦多峰産        |     | S2       | 2.67                         | 1.17       | -            | -           |

※RTから微粒分を除去

表-4 コンクリートの配合と実測値したフレッシュ性状

| セメント | W/C<br>(%) | 骨材混合率(%) (容積比) |     |        |                  | s/a<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |      |      |     | 混和剤 (C×%) |        | スランブ<br>(cm) | 空気量<br>(%) |
|------|------------|----------------|-----|--------|------------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----------|--------|--------------|------------|
|      |            | 再生             | 普通  | 種類     | 粗骨材の相対<br>吸水率(%) |            | W                        | C   | S1  | S2  | 安山岩  | 石灰石  | 再生  | AE減水剤     | AE剤    |              |            |
| BB   | 55         | 0              | 100 | NA     | 1.74             | 45.0       | 154                      | 280 | 846 | -   | 1035 | -    | -   | 0.24      | 0.0020 | 10.0         | 4.3        |
|      |            |                |     | NC     | 0.42             |            |                          |     |     |     | -    | 1045 | -   | -         | 0.0031 | 13.2         | 4.7        |
|      |            | 0              | 100 | NB     | 1.79             | 46.0       | 160                      | 291 | -   | 854 | 1003 | -    | -   | 0.21      | 0.0021 | 11.6         | 5.3        |
|      |            |                |     | ND     | 0.42             |            |                          |     |     |     | -    | 1017 | -   | -         | 0.0036 | 14.5         | 5.3        |
|      |            | 33             | 67  | RK+NA  | 3.37             | 45.0       | 154                      | 280 | 846 | -   | 691  | -    | 314 | 0.28      | 0.0013 | 10.0         | 4.3        |
|      |            | 67             | 33  |        | 5.04             |            |                          |     |     |     | 345  | -    | 627 | 0.36      | 0.0010 | 11.1         | 4.7        |
|      |            | 33             | 67  | RK+NC  | 2.48             |            |                          |     |     |     | -    | 697  | 314 | 0.08      | 0.0029 | 14.0         | 5.5        |
|      |            | 67             | 33  |        | 4.61             |            |                          |     |     |     | -    | 348  | 627 | 0.18      | 0.0018 | 13.0         | 5.1        |
|      |            | 100            | 0   | RK     | 6.67             | 46.0       | 160                      | 291 | -   | 854 | -    | -    | 941 | 0.26      | 0.0008 | 13.5         | 5.3        |
|      |            | 33             | 67  | RT+NB  | 3.06             |            |                          |     |     |     | 673  | -    | 298 | 0.21      | 0.0017 | 11.7         | 5.4        |
|      |            | 67             | 33  |        | 4.38             |            |                          |     |     |     | 331  | -    | 606 | 0.20      | 0.0014 | 12.5         | 4.7        |
|      |            | 45             | 55  | RT+ND  | 2.77             |            |                          |     |     |     | -    | 559  | 407 | 0.04      | 0.0018 | 13.5         | 5.5        |
|      |            | 50             | 50  |        | 3.04             |            |                          |     |     |     | -    | 509  | 452 | 0.05      | 0.0018 | 16.5         | 5.7        |
|      |            | 100            | 0   | RT     | 5.65             |            |                          |     |     |     | -    | -    | 904 | 0.20      | 0.0005 | 14.8         | 5.1        |
|      |            | 50             | 50  | RTX+ND | 3.04             |            |                          |     |     |     | -    | 509  | 452 | 0.04      | 0.0019 | 16.8         | 5.2        |
|      |            | 100            | 0   | RTX    | 5.65             |            |                          |     |     |     | -    | -    | 904 | 0.17      | 0.0008 | 14.1         | 5.0        |

た。

普通粗骨材と再生粗骨材の混合率（容積比）は、式-1に示すようにそれぞれの粗骨材の吸水率と混合率を乗じて加算した粗骨材の相対吸水率が、M 骨材の規格範囲以下となるように設定した。

$$Q_t = Q_v \times (100 - a) + Q_r \times a \quad (\text{式-1})$$

ここに、

$Q_t$ : 粗骨材の相対吸水率(%)

$Q_v$ : 普通粗骨材の吸水率(%)

$Q_r$ : 再生粗骨材の吸水率(%)

$a$ : 使用した再生粗骨材の混合率(%)

## (2) 実験項目と供試体

### a) 圧縮強度試験および静弾性係数の測定

基本特性として、再生粗骨材と普通粗骨材の混合使用がコンクリートの強度に与える影響を確認するため、20℃で水中養生を行ったφ100×200mmの円柱供試体を用いて、材齢28日に試験を実施した。なお、静弾性係数の測定にはコンプレッソメーターを用いた。

### b) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験はJIS A 1129-1に準拠したコンパレータ法で行った。供試体は、100×100×400mmの角柱供試体を材齢7日まで温度20℃環境下で水中養生を行った後に基長を測定した。その後、温度20±2℃、相対湿度60±5%の恒温恒湿室に静置し、乾燥開始後3、7、14、28、56、91、182日にひずみと質量を測定した。

## 3. 試験結果および考察

### (1) 混合使用した場合の圧縮強度と静弾性係数

図-1に各コンクリート供試体の材齢28日の圧縮強度を示す。図の凡例の記号の後に併記した数値は骨材の混合割合を示し、+は混合使用を示している。

粗骨材を単体使用した圧縮強度は、普通粗骨材100%では石灰石(NC、ND)の方が安山岩(NA、NB)より高く、再生粗骨材Lを100%使用したコンクリートは、いずれも普通粗骨材より低く、RK100とRT100はほぼ同程度だった。RTから5mm以下の微粒分を除去した骨材を用いたRTX100の強度はRT100の強度を上回り、NB100と同程度となり、改善された。

普通粗骨材と再生粗骨材の混合使用では、再生粗骨材の種類によらず、概ね再生粗骨材の混合率が高いほど強度が低下する傾向を確認した。さらに、NA、NBよりもNC、NDと混合した方が強度は高いことから、混合使用する普通粗骨材100%使用時の強度が高ければ、再生粗骨材の混合率が同程度でも強度が高くなることを確認した。

図-2に静弾性係数を示す。再生粗骨材を100%使用し

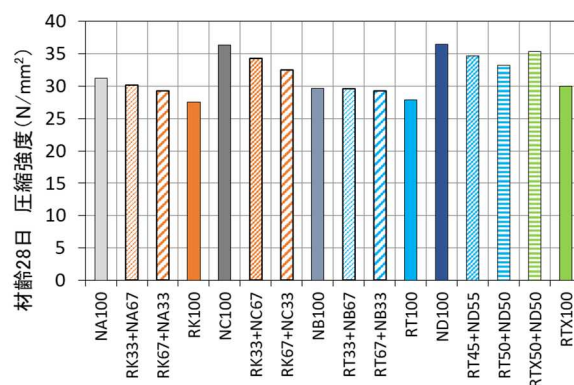


図-1 圧縮強度

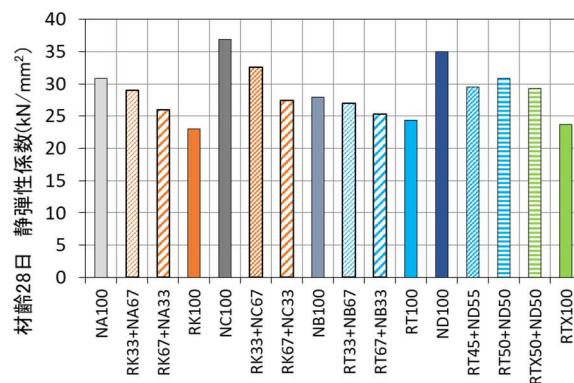


図-2 静弾性係数

たコンクリートの静弾性係数は、材齢28日では、普通粗骨材を使用したコンクリートに比べ低く、圧縮強度の大小傾向と概ね同様の傾向を示した。普通粗骨材と再生粗骨材を混合使用した場合、圧縮強度の場合と同様に再生粗骨材の混合率が高くなるほど静弾性係数は低くなった。なお、微粒分を除去したRTXはRTよりも若干低く、圧縮強度のような改善傾向は確認できなかった。

図-3に再生粗骨材混合率と材齢28日の圧縮強度の関係を示す。上述のように、再生粗骨材の混合率が高くなると、混合使用のベースとなる普通粗骨材のみ使用した場合の圧縮強度から概ね比例的に減少することが確認できる。

図-4に再生粗骨材混合率と材齢28日の静弾性係数の関係を示す。圧縮強度と同様に再生粗骨材の混合率が高くなるとベースとなる普通粗骨材のみの静弾性係数から比例的に減少する傾向を確認した。

以上から、再生粗骨材の混合率が高いほど、ベースなる普通粗骨材のみを使用したコンクリートと比べ圧縮強度と静弾性係数は低下した。また、再生粗骨材の混合率が同じ場合、ベースとなる混合する普通粗骨材のみを使用したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数が大きいほど、混合使用時の圧縮強度と静弾性係数は大きくなることを確認した。

### (2) 混合使用した場合の乾燥収縮

図-5に各コンクリートの乾燥材齢26週(182日)までの

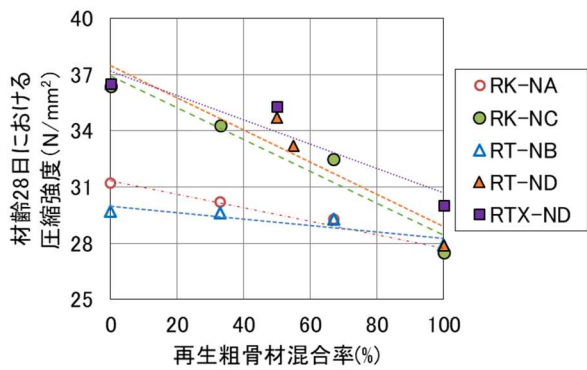


図-3 再生粗骨材混合率と圧縮強度

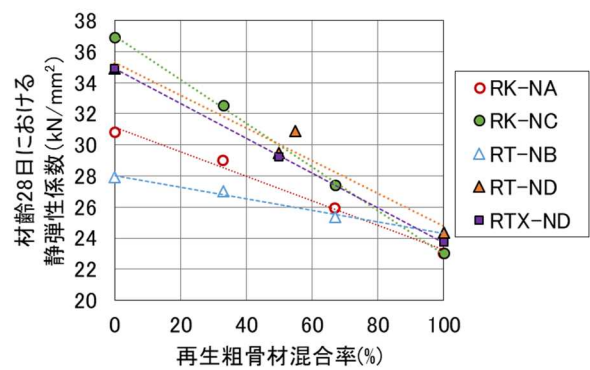
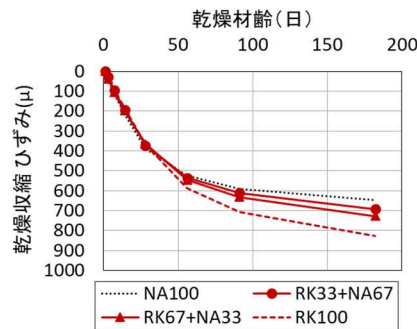
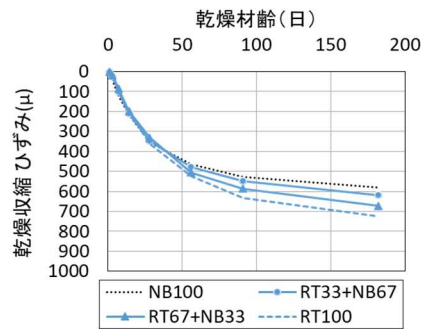


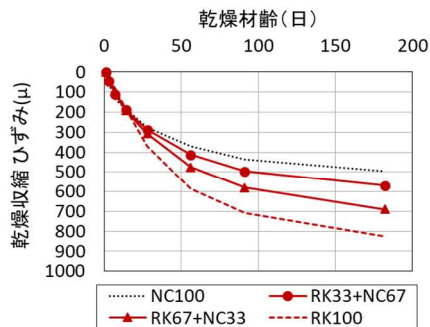
図-4 再生粗骨材混合率と静弾性係数



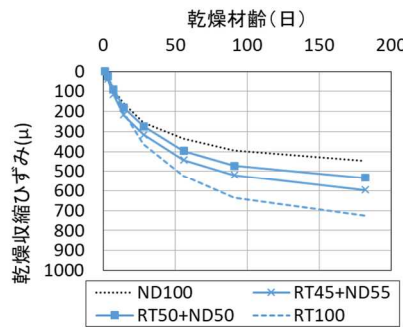
(a)NA(安山岩)とRKの混合



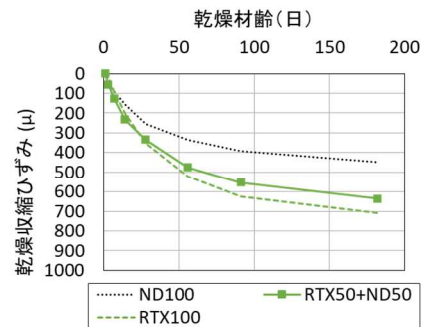
(b)NB(安山岩)とRTの混合



(c)NC(石灰石)とRKの混合



(d)ND(石灰石)とRTの混合



(e)ND(石灰石)とRTXの混合

図-5 乾燥収縮試験結果

乾燥材齢と乾燥収縮ひずみの関係を示す。

普通粗骨材 100%を使用したコンクリートを比較すると石灰石を使用した NC、ND の方が安山岩を使用した NA、NB より乾燥収縮ひずみは小さかった。また、骨材ロットではNAよりNBの方が、NCよりNDの方が乾燥収縮ひずみは小さかった。再生粗骨材を 100%使用した RK と RT では、RT の乾燥収縮ひずみが 100 $\mu$  程度小さかった。また、RT と RTX の乾燥収縮は同程度であり、本試験では粗骨材に含まれる微粒分の有無が乾燥収縮に与える影響は小さかった。なお、普通粗骨材のロットが異なるものや、再生粗骨材 RK と RT の配合は、表-4 に示したように  $s/a$  を変えたため粗骨材容積が異なっており、このことも収縮量に影響していると考えられる。普通粗骨材 100%と再生粗骨材 100%のコンクリートの乾燥収縮を比較すると、安山岩または石灰石の普通粗骨材を使用

したコンクリートより再生粗骨材を使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは大きい。

一方、再生粗骨材と普通粗骨材を混合使用した場合、再生粗骨材 100%使用時より乾燥収縮ひずみはいずれの配合も小さくなり、普通粗骨材の割合が高いほど乾燥収縮ひずみは小さくなった。

図-6 に再生粗骨材混合率と乾燥材齢 26 週の乾燥収縮ひずみの関係を示す。混合使用する再生粗骨材と普通粗骨材の種類によって、乾燥収縮ひずみの絶対量は異なるが、再生粗骨材混合率が高いほど乾燥収縮ひずみは概ね比例的に増加し、普通粗骨材 100%使用時が下限となり、再生粗骨材 100%使用時が上限となった。この結果から、再生粗骨材と普通粗骨材の混合使用は乾燥収縮抑制対策の一手法として有効なことを確認した。

### (3) 粗骨材の相対吸水率と乾燥収縮の関係

上述のように、再生粗骨材と普通粗骨材の混合率によって乾燥収縮ひずみは変化し、普通粗骨材の割合が高いほど、概ね比例的に乾燥収縮ひずみを抑制できることを確認した。一方、粗骨材を混合使用する場合、表-4 に示したように粗骨材の相対吸水率が変化し、普通粗骨材の割合が高いほど、粗骨材の相対吸水率は低下している。これらのことから、乾燥収縮ひずみと粗骨材の相対吸水率の関係を調べた。粗骨材の相対吸水率と乾燥材齢 26 週の乾燥収縮ひずみの関係を図-7 に示す。

乾燥収縮 26 週の乾燥収縮ひずみは、粗骨材の相対吸水率の増加に伴って増加する傾向が確認できる。このことから、材料・配合条件が同一の場合には、混合使用を含め使用する粗骨材の相対吸水率からコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定できる可能性がある。

## 4. まとめ

本研究では、再生骨材と普通骨材を混合使用したコンクリートの乾燥収縮特性について検討した。本研究で得た知見を以下にまとめる。

- 1) コンクリートの圧縮強度、静弾性係数は、再生粗骨材の混合率に応じて変化し、普通粗骨材の割合が高くなるほど改善されることを確認した。
- 2) コンクリートの乾燥収縮ひずみは、再生粗骨材の混合率に応じて変化し、普通粗骨材の割合が高くなるほど減少した。これにより普通骨材との混合使用が、再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮抑制対策の一手法として有効なことを確認した。
- 3) 再生粗骨材と普通粗骨材を混合使用した混合骨材も含めて粗骨材の相対吸水率と乾燥収縮には良い相関があり、相対吸水率からコンクリートの乾燥収縮ひずみを推定できる可能性があることを確認した。

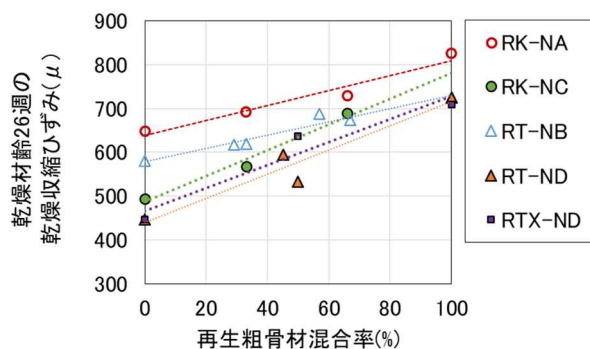


図-6 再生粗骨材混合率と乾燥収縮

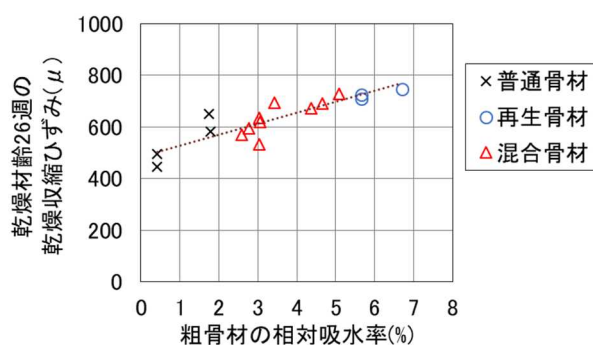


図-7 粗骨材の相対吸水率と乾燥収縮

### 参考文献

- 1) 国土交通省：平成 30 年度建設副産物実態調査結果参考資料、2019.3.
- 2) 国土交通省：コンクリート副産物の再生利用に関する用途別品質基準、2016.4.  
<https://www.mlit.go.jp/common/001126336.pdf>