

論文 骨材品質が異なる再生骨材コンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状

山崎順二*¹・立松和彦*²

要旨: 本論文では、粗骨材として吸水率 2.4%の高品質再生粗骨材と吸水率 4.4%(Ⅱ種相当)の再生粗骨材を用い、細骨材として吸水率 7%程度の再生細骨材を用いることによって、骨材品質の違いが再生骨材コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討した。その結果、再生骨材コンクリートは、Ⅱ種相当の品質の再生骨材であれば骨材品質がひび割れ抵抗性に与える影響は少なく、碎石を用いた場合と比べて引張伸び能力が大きくひび割れ発生日数が長くなること、乾燥収縮率は調合上の対策により低減できることなどから、碎石の場合と同等のひび割れ抵抗性を有することが確認できた。

キーワード: 再生骨材, 乾燥収縮ひび割れ試験, 引張伸び能力, 収縮応力度, 引張強度比

1. はじめに

近年の骨材資源の枯渇化や資源の有効利用への対策として、再生骨材コンクリートを有効に利用していくためには、再生骨材コンクリートが一般の碎石を用いたコンクリートと同程度のひび割れ抵抗性を有することが必要となる。しかし、再生骨材を用いた場合は乾燥収縮ひび割れが一般に生じやすくなると考えられ、上部構造体等の乾燥を受ける部位への使用が懸念されている。既報¹⁾において、高品質の再生骨材を用いたコンクリートの強度および耐凍害性について検討した。その結果、現時点では、高品質の再生骨材を用いた場合は、地域的な限定(凍結融解作用を受けない地域)を加えることによって、構造体への適用の可能性を示した。また、高品質の再生骨材を用いてコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状について検討した結果、碎石を用いた場合と同程度のひび割れ抵抗性を有していることが分かった²⁾。さらに、建設省の暫定品質基準(案)³⁾のⅡ種相当の品質をもつ再生骨材を用いた場合でも、乾燥収縮ひび割れ抵抗性が碎石を用いた場合と同程度であれば、強度、弾性係数、中性化抵抗性などについては水セメ

ント比の低減などの対策を講じることによって普通コンクリートと同程度の性能を得ることが可能になると思われる。

そこで本論文は、品質の異なる2種類の再生粗骨材を用いることによって、再生骨材の品質の違いがコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

コンクリートの種類は、粗骨材を再生Ⅰ種として細骨材を天然(山砂+砕砂)および再生とした再生Ⅰ種コンクリート(G1 および G1S), 粗骨材を再生Ⅱ種として細骨材を天然(山砂+砕砂)および再生とした再生Ⅱ種コンクリート(G2 および G2S), さらに比較用として天然の細骨材および碎石を用いた普通コンクリート(G0)の計5種類とした。実験要因として、まず普通コンクリートの呼び強度を24・30・36・40の4水準(水セメント比では55%・47%・40%・35%)を設定した。再生Ⅰ種コンクリートおよび再生Ⅱ種コンクリートは、普通コンクリートと同じ水セメント比とした。これらの計

*1 (株) 浅沼組 技術研究所建築構造研究室 研究員 工修(正会員)

*2 (株) 浅沼組 技術研究所建築構造研究室 主任(正会員)

20 種類のコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状について検討した。

2.2 使用材料および再生骨材の品質

本実験に使用した材料を表-1に示す。再生粗骨材の品質は、「再生Ⅰ」が表乾密度 2.60kg/l, 吸水率 2.4%であり, 建設省の暫定品質基準(案)³⁾のⅠ種に相当する高品質の再生粗骨材である。「再生Ⅱ」は表乾密度 2.49kg/l, 吸水率 4.4%であり, 同基準(案)のⅡ種に相当するものである。両者とも原粗骨材のほとんどが天然砂利であり, 若干碎石が混入したものであった。再生細骨材は吸水率が 7.1%程度であり, 同基準(案)³⁾のⅡ種に相当するものである。本実験に使用した骨材の品質試験結果を表-2に示す。

2.3 コンクリートの調合

コンクリートの調合および骨材等価吸水率⁴⁾を表-3に示す。碎石を用いたコンクリートの調合は, 現在, 大阪兵庫地区で一般的に使用されている普通コンクリートの調合に基づいて定めた。コンクリートのスランプは 18cm を, 空気量は 4.5% を目標として調合した。既往の研究結果⁵⁾によると, 再生粗骨材コンクリートは, 天然粗骨材を使用したコンクリートに対して単位粗骨材かさ容積を 0.04 m³/m³ 程度増加させることができる。しかし本実験では, 単位粗骨材かさ容積は普通コンクリートと等しくし, それぞれの再生粗骨材の実積率から単位粗骨材量を求めた。単位水量については, 普通コンクリートの単位水量を基準として, 再生粗骨材の実積率による補正により求めた。実積率のみを用いた方法を採用したのは, 単位水量の調整まで含めて, 再生粗骨材コンクリートの調合の調整を合理的に行えるように配慮したためである。再生細骨材を用いたコンクリート(G1S・G2S)については, 計画空気量を 1%増大し, 再生粗骨材コンクリ

表-1 実験に使用した材料

| | |
|------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント |
| 細骨材 | 山砂(城陽産), [山砂:砕砂混合比 砕砂(高槻産) = 70%:30%] 再生細骨材(Ⅱ種相当) |
| 粗骨材 | 碎石(高槻産, 硬質砂岩) 再生粗骨材(Ⅰ種相当) 再生粗骨材(Ⅱ種相当) |
| 混和剤 | 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系) |

表-2 骨材の品質試験結果

| 試験項目 | 細骨材 | | | 粗骨材 | | |
|---------------------------|------|-------|------|------|------|------|
| | 山砂 | 砕砂 | 再生 | 碎石 | 再生Ⅰ | 再生Ⅱ |
| 表乾密度 (g/cm ³) | 2.56 | 2.62 | 2.43 | 2.68 | 2.60 | 2.49 |
| 絶乾密度 (g/cm ³) | 2.51 | 2.57 | 2.27 | 2.66 | 2.54 | 2.38 |
| 吸水率 (%) | 1.88 | 1.84 | 7.11 | 0.58 | 2.43 | 4.40 |
| 実積率 (%) | — | — | — | 57.8 | 64.2 | 64.3 |
| 洗い (%) | 1.26 | (合成後) | 1.38 | 0.51 | 0.65 | 0.90 |
| 粗粒率 FM. | 2.72 | 2.82 | 3.08 | 6.63 | 6.38 | 6.52 |
| ふる | 25 | — | — | 100 | 100 | 100 |
| る | 20 | — | — | 95 | 98 | 94 |
| い | 15 | — | — | 66 | 93 | 88 |
| 分 | 10 | 100 | — | 40 | 55 | 44 |
| け | 5 | 99 | 100 | 2 | 7 | 9 |
| 通 | 2.5 | 90 | 91 | 0 | 2 | 1 |
| 過 | 1.2 | 71 | 61 | — | 0 | 0 |
| 率 | 0.6 | 46 | 40 | — | — | — |
| (%) | 0.3 | 18 | 20 | — | — | — |
| | 0.15 | 4 | 6 | — | — | — |

ートの天然細骨材(山砂+砕砂)を, 再生細骨材に全量置換することによって調合した。なお水セメント比 55%の調合についてのみ, 試験練り時に粗骨材が目立ったため, 細骨材率をさらに 2%大きく設定した。

2.4 コンクリートの練混ぜおよび試験

コンクリートの練混ぜは, 温度 20℃・相対湿度 60%の恒温恒湿室で行い, 容量 100ℓの二軸強制練りミキサーを使用した。

コンクリートの試験項目は, 引張強度, 圧縮強度, 動弾性係数, 静弾性係数, 長さ変化(自由収縮)および乾燥収縮ひび割れ(拘束収縮)とした。乾燥収縮ひび割れ試験は JIS 改正案⁶⁾に準じて行った。ひび割れ試験用の供試体は 3 体を 1 組とし, 供試体上下面のひずみをコンタクトゲージを用いて測定した。拘束板のひずみは,

表-3 コンクリートの種類および調合表および骨材等価吸水率

| 種別 | 供試体記号 | 呼び強度 | W/C (%) | s/a (%) | 単位質量 (kg/m ³) | | | | | | | | 骨材等価吸水率 (%) |
|----------|----------|------|---------|---------|---------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|---------|-------------|
| | | | | | 水 | セメント | 天然 | | | 再生 | | 混和剤 Cx% | |
| | | | | | | | 山砂 | 砕砂 | 砕石 | 細骨材 | 粗骨材 | | |
| 普通 | 55G-0 | 24 | 55.0 | 47.5 | 178 | 324 | 573 | 255 | 952 | — | — | 0.8 | 1.19 |
| | 47G-0 | 30 | 47.0 | 45.5 | 182 | 387 | 530 | 236 | 952 | — | — | 0.7 | 1.17 |
| | 40G-0 | 36 | 40.0 | 41.6 | 193 | 482 | 451 | 202 | 957 | — | — | 0.5 | 1.11 |
| | 35G-0 | 40 | 35.0 | 36.3 | 206 | 588 | 366 | 163 | 961 | — | — | 0.3 | 1.05 |
| 再生Ⅰ | 55G1-10 | 24相当 | 55.0 | 43.5 | 168 | 305 | 538 | 239 | — | — | 1014 | 0.8 | 2.19 |
| | 47G1-10 | 30相当 | 47.0 | 41.5 | 172 | 366 | 497 | 221 | — | — | 1014 | 0.7 | 2.20 |
| | 40G1-10 | 36相当 | 40.0 | 37.4 | 182 | 455 | 422 | 186 | — | — | 1024 | 0.5 | 2.22 |
| | 35G1-10 | 40相当 | 35.0 | 32.5 | 194 | 554 | 340 | 152 | — | — | 1027 | 0.3 | 2.25 |
| | 55G1S-10 | 24相当 | 55.0 | 44.6 | 168 | 305 | — | — | — | 736 | 980 | 0.8 | 4.52 |
| | 47G1S-10 | 30相当 | 47.0 | 40.6 | 172 | 366 | — | — | — | 649 | 1014 | 0.8 | 4.33 |
| | 40G1S-10 | 36相当 | 40.0 | 36.3 | 182 | 455 | — | — | — | 547 | 1024 | 0.7 | 4.13 |
| | 35G1S-10 | 40相当 | 35.0 | 31.3 | 194 | 554 | — | — | — | 437 | 1027 | 0.9 | 3.90 |
| 再生Ⅱ | 55G2-10 | 24相当 | 55.0 | 43.5 | 168 | 306 | 538 | 236 | — | — | 975 | 0.9 | 3.30 |
| | 47G2-10 | 30相当 | 47.0 | 41.5 | 172 | 365 | 497 | 217 | — | — | 975 | 0.8 | 3.35 |
| | 40G2-10 | 36相当 | 40.0 | 37.4 | 182 | 454 | 420 | 186 | — | — | 985 | 0.8 | 3.45 |
| | 35G2-10 | 40相当 | 35.0 | 32.5 | 194 | 554 | 340 | 149 | — | — | 988 | 0.7 | 3.58 |
| | 55G2S-10 | 24相当 | 55.0 | 44.6 | 168 | 306 | — | — | — | 736 | 943 | 1.1 | 5.61 |
| | 47G2S-10 | 30相当 | 47.0 | 40.6 | 172 | 365 | — | — | — | 649 | 975 | 1.1 | 5.50 |
| | 40G2S-10 | 36相当 | 40.0 | 36.3 | 182 | 454 | — | — | — | 547 | 985 | 1.0 | 5.39 |
| 35G2S-10 | 40相当 | 35.0 | 31.3 | 194 | 554 | — | — | — | 437 | 988 | 1.0 | 5.25 | |

ワイヤストレインゲージを拘束板の側面に貼り付けて測定した。その他は関連する JIS に準じて試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 コンクリートの強度および弾性係数

図-1に、材齢4週標準養生供試体における圧縮強度とセメント水比の関係を示す。セメント水比との間には、それぞれのコンクリートにおいて高い相関が認められ、水セメント比の低減による強度増進もほぼ同程度であった。使用骨材の違いによる影響は、図-2に示すように、各水セメント比とも、骨材品質の低下に伴って圧縮強度が低下する傾向にあった。

図-3に材齢4週標準養生供試体における引張強度とセメント水比の関係を示す。G1S,G2およびG2Sの引張強度は15~20%程度低くなった。再生粗骨材については、低品質のものほど粗骨材表面の付着モルタルや骨材に含まれるモルタル塊が多くなるため、再生粗骨材の品質が引張強度に与える影響は大きいと考えられる。

図-4に、使用骨材の違いが静弾性係数に及

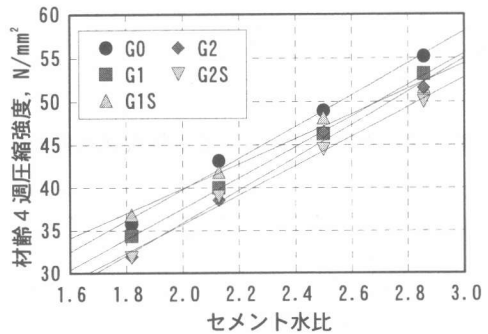


図-1 圧縮強度とセメント水比

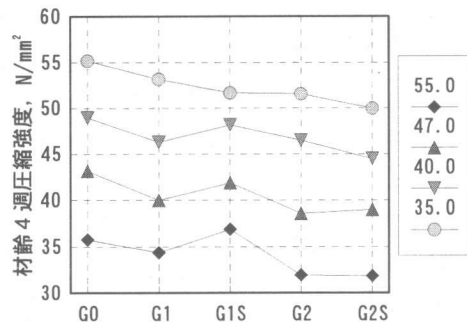


図-2 骨材品質の違いによる圧縮強度の差

ぼす影響を示すが、骨材品質の低下(骨材等価吸水率の増大)に伴って静弾性係数が低下した。

水セメント比が大きくなるほど、骨材品質（等価吸水率）の影響が大きくなり、G1S や G2S の

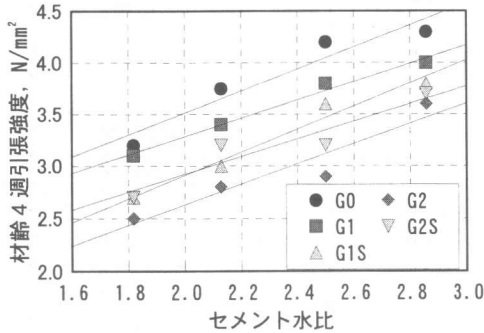


図-3 引張強度とセメント水比

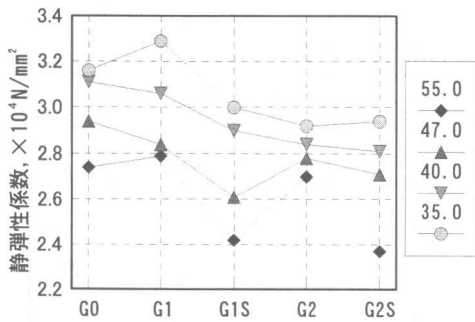


図-4 骨材の違いによる静弾性係数の差

静弾性係数の低下が顕著となった。このことは、静弾性係数との相関性¹⁾が認められる動弾性係数についても同様の傾向があった。

3.2 乾燥収縮ひび割れ性状

(1) ひび割れ発生日数

乾燥開始時からの各コンクリートのひび割れ発生日数を図-5に示す。再生骨材を用いたコンクリート(G1,G2,G1S,G2S)のひび割れ発生日数は、G0と比較して、9日～19日目と長く、水セメント比が低くなると若干早くなる傾向にあった。再生骨材の品質の違いによる影響は、

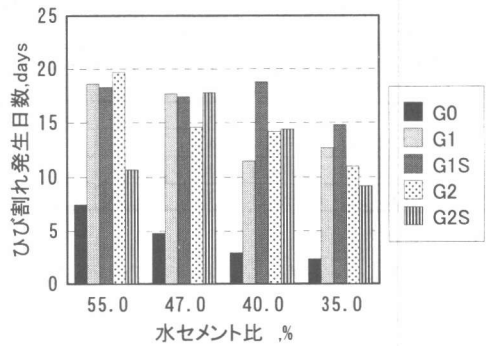


図-5 コンクリートのひび割れ発生日数

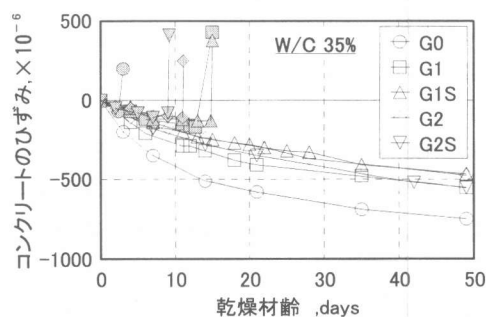
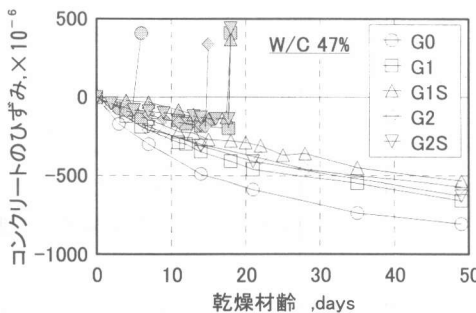
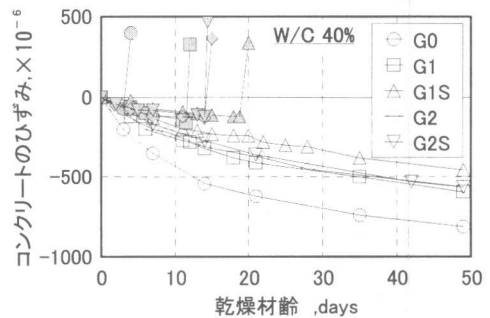
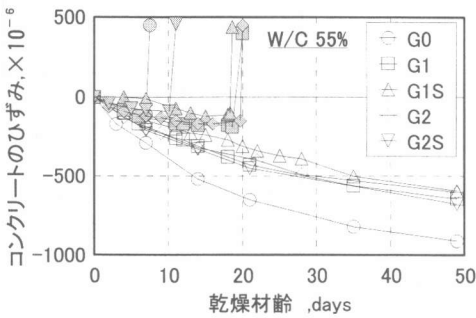


図-6 コンクリートの乾燥収縮ひびずみ（自由収縮および拘束収縮）測定結果

G2 および G2S においてひび割れが早くなる場合があった。図-6に、コンクリートの自由収縮ひずみおよび拘束収縮ひずみを示す。乾燥材齢 50 日までの自由収縮ひずみは、再生骨材の品質にはほとんど影響を受けず、全ての水セメント比において G0 が最も大きくなった。これは、再生粗骨材の実積率が碎石の実積率よりも大きいために再生骨材コンクリートの単位水量が低減でき、かつ単位粗骨材量を大きく設定できたためである。これより、II種相当の品質の再生骨材であれば、調合上の対策によって乾燥収縮率を低減できることが明らかとなった。

(2) 自己収縮応力度および拘束収縮応力度

コンクリートと拘束板のひずみの平衡条件から計算によって求めたコンクリートの自己収縮応力度を図-7に示す。同一水セメント比において、骨材等価吸水率が大きく弾性係数の低い再生骨材コンクリートほど、自己収縮応力が緩和されて小さくなる傾向にあった。図-8に拘束収縮応力度とひび割れ発生日数の関係を示す

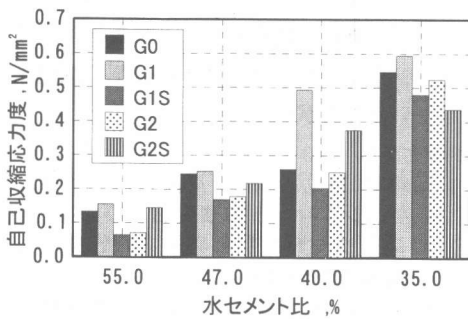


図-7 自己収縮応力度と水セメント比

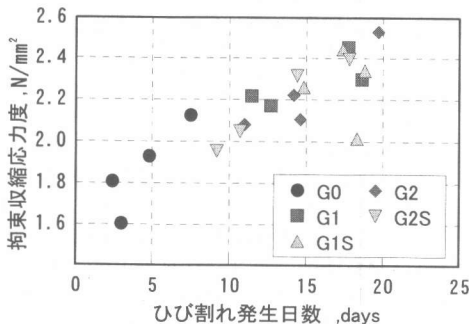


図-8 拘束収縮応力度とひび割れ発生日数

が、再生骨材コンクリートには、ひび割れ発生時に G0 よりも大きな収縮応力が発生している。

(3) 引張伸び能力

ひび割れ直前のコンクリートの自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみとの差によって求められる引張伸び能力と使用骨材との関係を図-9に示す。引張伸び能力は、水セメント比が大きく骨材等価吸水率の高い再生骨材コンクリートにおいて増大する傾向にあった。また、図-10に示すように、コンクリートの動弾性係数が低いほ

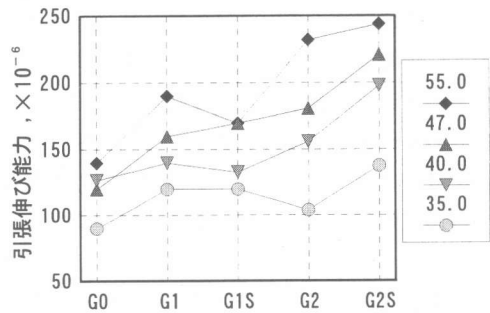


図-9 コンクリートの引張伸び能力

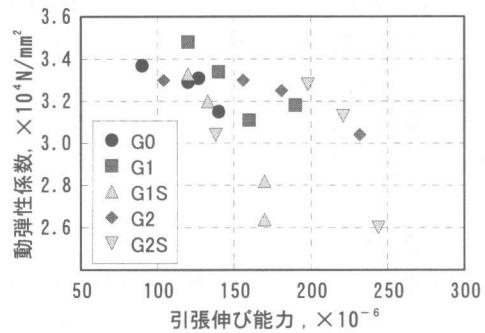


図-10 動弾性係数と引張伸び能力

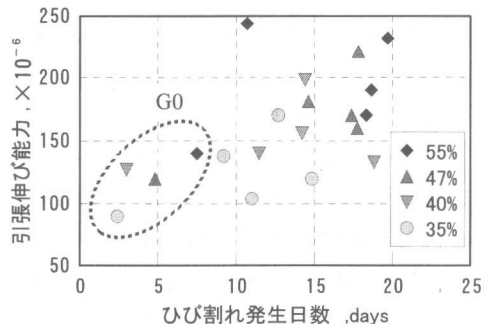


図-11 引張伸び能力とひび割れ発生日数

ど引張伸び能力は増大するため、図-11に示すように再生骨材コンクリートのひび割れ発生日数が長くなったと考えられる。

(4) 引張強度比

ひび割れ発生時のコンクリートの引張強度に対する拘束収縮応力度(ひび割れ発生直前の拘束鋼材のひずみから計算)の比である引張強度比とひび割れ発生日数との関係を図-12に示す。G0はコンクリートの弾性係数が大きいために引張伸び能力が低下し、収縮応力度が引張強度に達する前に早期にひび割れが発生するのに対し、引張伸び能力の大きい再生骨材コンクリートは引張強度比が70～100%の間でひび割れが発生している。図-13に引張強度比と引張伸び能力の関係を示すが、ひび割れ発生日数の長い再生骨材コンクリートは、引張伸び能力が大きくひび割れ時の引張強度比も高くなっている。これより、再生骨材コンクリートのひび割れ発生日数がG0と比べて長くなるのは、再生骨材コンクリートの弾性係数がやや小さいために引張伸び能力が大きくなることと、ひび割れ発生時の引張強度比が普通コンクリートよりも大きくなっていることから再生骨材コンクリートのマトリックスは大きな収縮応力を負担できるとの両方に起因していると考えられる。

4. まとめ

吸水率の異なる2種類の再生粗骨材と再生細骨材を用いて、再生骨材の品質がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 再生骨材コンクリートの強度および弾性係数は骨材品質の低下に伴って低くなり、引張強度においてその影響が顕著になった。
- 2) 再生骨材コンクリートのひび割れ発生日数は普通コンクリートよりも長くなった。
- 3) 再生Ⅱ種の粗骨材を用いた場合でも、調査上の対策によって乾燥収縮率を低減できた。
- 4) 再生骨材コンクリートは普通コンクリートよりも引張伸び能力が大きく、ひび割れ発生

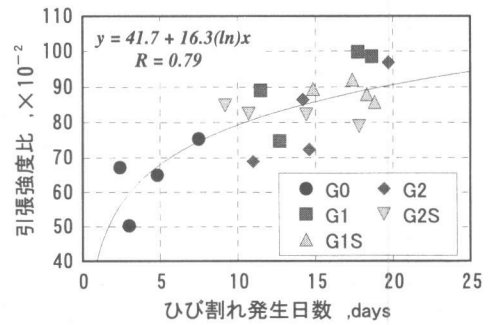


図-12 引張強度比とひび割れ発生日数

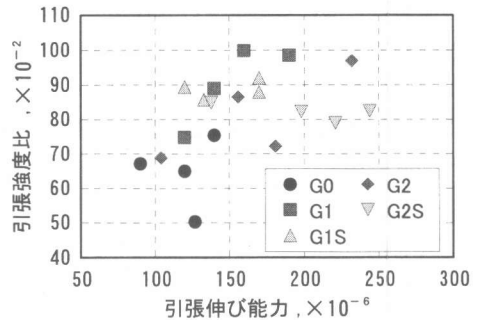


図-13 引張強度比と引張伸び能力

時の引張強度比も大きくなった。

以上、再生Ⅱ種程度の品質を有する再生骨材であれば、骨材品質の差による影響は少なく、普通コンクリートと同程度のひび割れ抵抗性を有していることが確認できた。

[参考文献]

- 1) 山崎順二・立松和彦:「高品質再生骨材を用いたコンクリートの強度および耐凍害性」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1093-1098, 1998.
- 2) 山崎順二・立松和彦:「高品質再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.211-216, 1999.
- 3) (財)国土開発技術センター:「再生コンクリートの利用技術の開発 平成8年度報告書」
- 4) 新井他:「再生細骨材コンクリートの強度および変形性状」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1081-1086, 1997.
- 5) 南波篤志・阿部道彦:「建築系副産物の発生抑制と再生利用に関する研究」その6, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.857-858, 1995.
- 6) ひび割れ研究会:「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究, その4・完」, セメント・コンクリート, No.536, pp.62-71, Oct. 1991.