

7. 高品質の再生骨材を用いた再生コンクリートの特性に関する研究 (その4. 骨材品質の違いが強度および収縮性状に及ぼす影響)

Studies on Properties of Recycled Concrete Using High Quality Recycled Aggregate (Part 4. Effect of Aggregate Qualities on Strength and Cracking Properties)

山崎 順二*

立松 和彦*

要 旨

粗骨材に吸水率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、細骨材に吸水率7%程度(Ⅱ種相当)の再生細骨材を用いて、再生コンクリートの骨材品質の違いがコンクリートの強度および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、Ⅱ種相当の品質の再生骨材を用いた再生骨材コンクリートは、強度は若干低くなるがひび割れ抵抗性に与える影響は少なく、普通コンクリート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がわかった。また、粗骨材量を補正して乾燥収縮率を低減した場合、普通コンクリートと同等のひび割れ抵抗性を有することを確認した。

キーワード：再生骨材／強度／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、再生骨材の有効利用を図ることが必要である。そのためには、再生骨材コンクリートが、一般砕石を用いたコンクリートと同程度の強度発現性やひび割れ抵抗性を有することが必要である。しかし再生骨材を用いたコンクリートの場合は、一般砕石を用いたコンクリートよりも乾燥収縮ひび割れが生じやすくなると考えられ、上部構造体などの乾燥を受け易い部位への使用が懸念され、制限されている。

既報¹⁾において、著者は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れば、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利用が可能となることを示した。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、砕石を用いた場合と同程度のひび割れ抵抗性を有することも示した²⁾。建設省の暫定品質基準(案)³⁾(以下「基準(案)」)のⅡ種相当の品質をもつ再生骨材を用いた場合でも、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考えられる。

本報では、再生骨材の品質の違いがコンクリートの強

度および乾燥収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討するために、品質の異なる2種類の再生粗骨材を用いて行った実験の結果について述べる。

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種として細骨材に天然(山砂+砕砂)あるいは再生を用いた再生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)あるいは再生とした再生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と砕石を用いた普通コンクリート(G0)の計5種類とした。実験要因は、まず、普通コンクリートの呼び強度として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。

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), 砕砂(高槻産)[山砂:砕砂混合比=70%:30%] 再生細骨材(Ⅱ種相当)
粗骨材	砕石(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)

*建築工法・材料研究室

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%の基準(案)Ⅰ種に相当する高品質の再生粗骨材であり、「再生Ⅱ」が表乾密度2.49kg/ℓ、吸水率4.4%の基準(案)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る。再生細骨材は吸水率が7.1%程度であり、基準(案)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 コンクリートの調査

コンクリートの調査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査は、現在、大阪兵庫地区で一般に使用されている普通コンクリートの調査に基づいて定めた。コンクリートはスランプを18cm、空気量4.5%を目標として調査した。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0.04m³/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、単位粗骨材量から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査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（GIS・G2S）については、凍結融解抵抗性を考慮して計画空気量を

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
ふるい分け通過率(%)	25	—	—	100	100	100
	20	—	—	95	98	94
	15	—	—	66	93	88
	10	100	—	40	55	44
	5	99	100	2	7	9
	2.5	90	91	0	2	1
	1.2	71	61	—	0	0
	0.6	46	40	—	—	—
	0.3	18	20	—	—	—
	0.15	4	6	—	—	—

表-3 コンクリートの種類および調査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 c×%	
							山砂	砕砂	碎石	細骨材	粗骨材		
普 通	55G0	24	55.0	47.5	178	324	573	255	952	—	—	0.8	1.19
	47G0	30	47.0	45.5	182	387	530	236	952	—	—	0.7	1.17
	40G0	36	40.0	41.6	193	482	451	202	957	—	—	0.5	1.11
	35G0	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

1%増大させ、再生粗骨材コンクリートの天然細骨材（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、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。その他については関連する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、標準養生供試体における材齢4週圧縮強度とセメント水比の関係を示す。両者の間には、いずれの

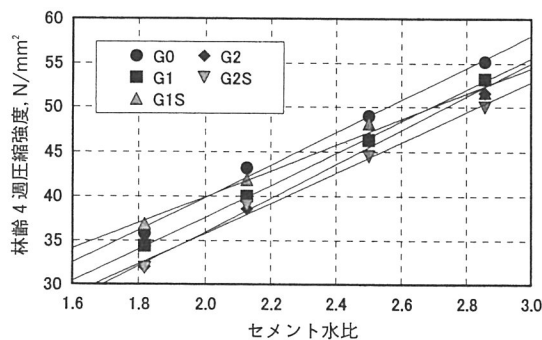


図-1 圧縮強度とセメント水比の関係

コンクリートにおいても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（回帰線の傾き）もほぼ同程度であった。

つぎに、使用骨材の品質の違いによる影響を、細・粗骨材の容積と吸水率から計算される骨材等価吸水率⁹⁾を用いて評価する。図-2に、材齢4週圧縮強度と骨材等価吸水率の関係を示す。骨材等価吸水率は、表-3に示すようにG0→G1→G2→G1S→G2Sの順に大きくなるが、各水セメント比のコンクリートはいずれも骨材等価吸水率の増大（骨材品質の低下）に伴って圧縮強度が低くなる傾向にあった。

図-3に標準養生供試体における材齢4週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、G0と比較して15～20%程度低くなった。これは、低品質の再生骨材ほど、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である。これより、骨材品質の高低は、圧縮強度よりも引張強度に大きく影響を与えると考えられる。

図-4に、使用骨材の違いが静弾性係数に及ぼす影響を示す。図より骨材品質の低下（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、とくに再生細骨材を使用したG1SとG2Sの静弾性係数の

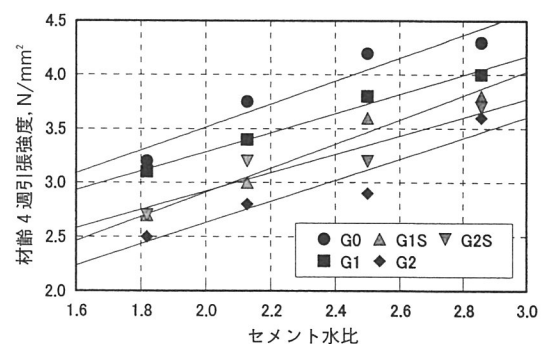


図-3 引張強度とセメント水比の関係

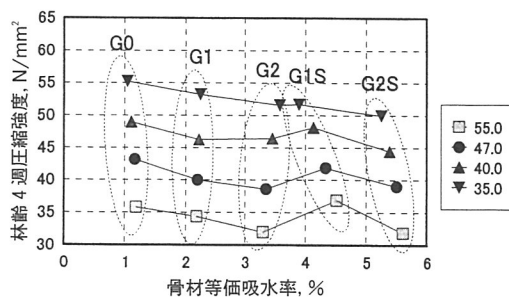


図-2 骨材等価吸水率の違いによる圧縮強度の差

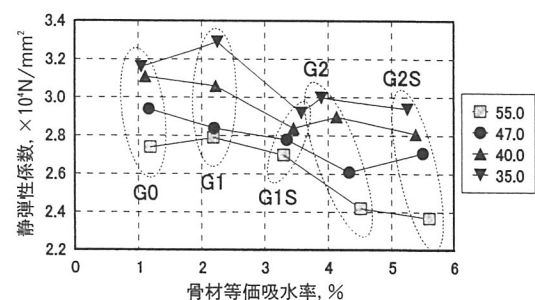


図-4 骨材等価吸水率の違いによる静弾性係数の差

低下が顕著となった。これより、再生コンクリートの静弾性係数に与える影響は、再生粗骨材より再生細骨材の方が大きいことがわかる。なお、これらは、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認められた。

3.2 乾燥収縮ひび割れ性状

(1) ひび割れ発生日数

各コンクリートの乾燥開始時から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。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されておらず、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を低減でき、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っても、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。

一方、拘束収縮ひずみと自由収縮ひずみの測定結果から、ひび割れ発生の危険性は、拘束引張ひずみ（自由収縮ひずみと拘束収縮ひずみの差）が 100×10^{-6} を超える

と高くなることがわかった。また、ひび割れ発生時の拘束板のひずみは、ひび割れ発生材齢が長くなると徐々に大きくなるが、いずれも $100 \sim 160 \times 10^{-6}$ の範囲であった。この結果から、ひび割れ発生時期の予測に、内部鉄筋や拘束鋼材のひずみを指標として用いることは有効な手法であると考えられる。

(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⁷⁾を図-7に示す。水セメント比が小さくなるほど自己収縮応力度が増大するが、同一水セメント比においては、骨材等価

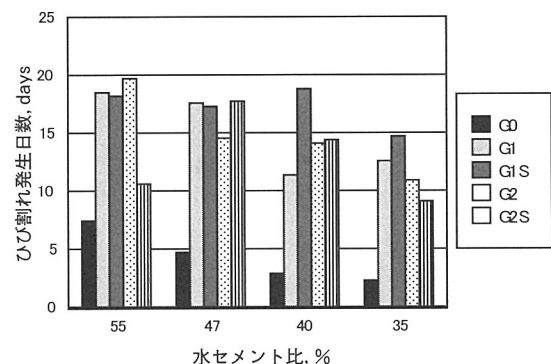


図-5 コンクリートのひび割れ発生日数

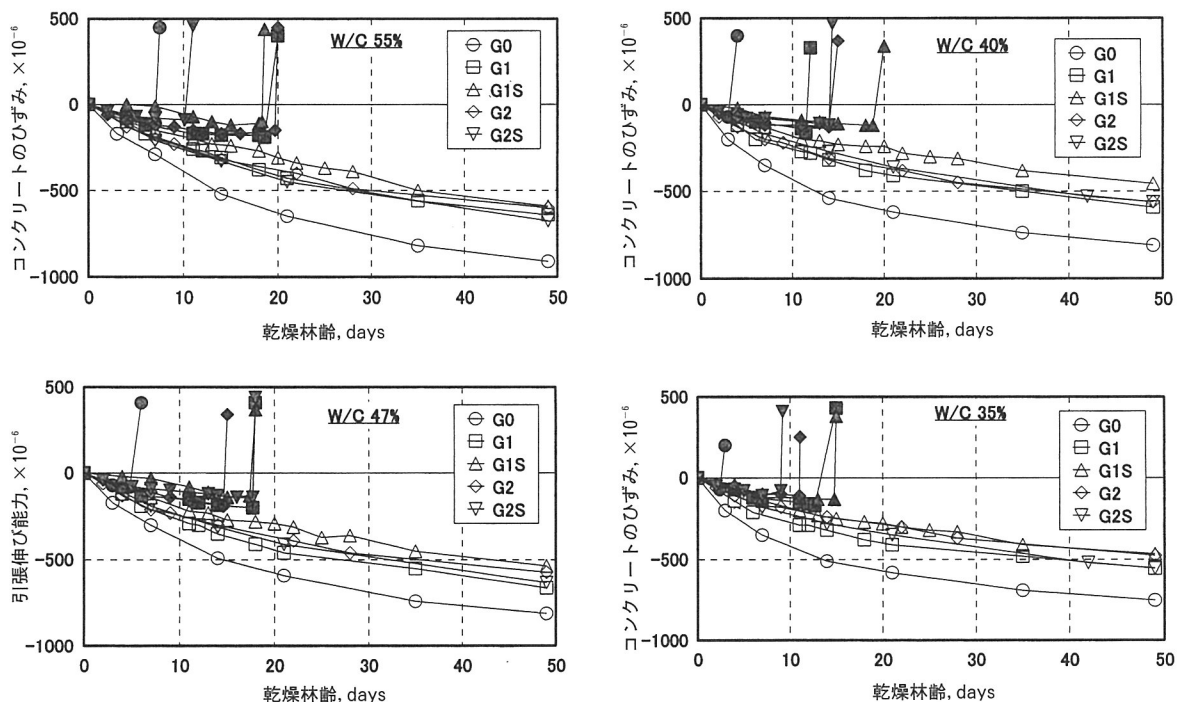


図-6 コンクリートの乾燥収縮ひずみ（自由収縮および拘束収縮）測定結果

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。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⁷⁾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⁷⁾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

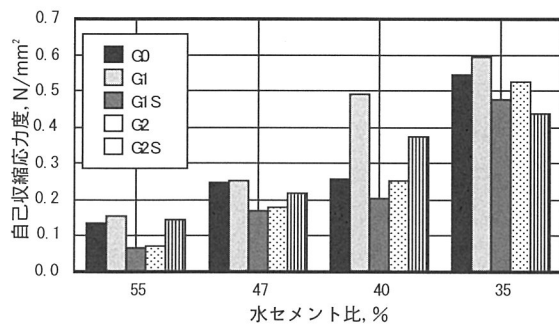


図-7 自己収縮応力度と水セメント比

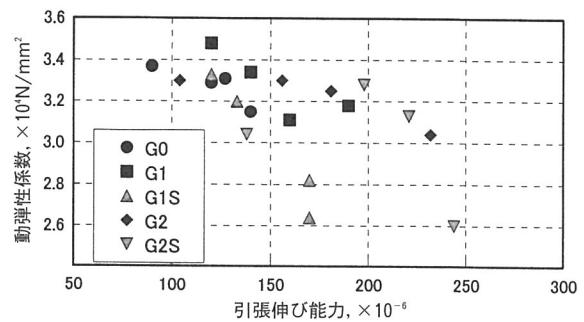


図-10 動弾性係数と引張伸び能力

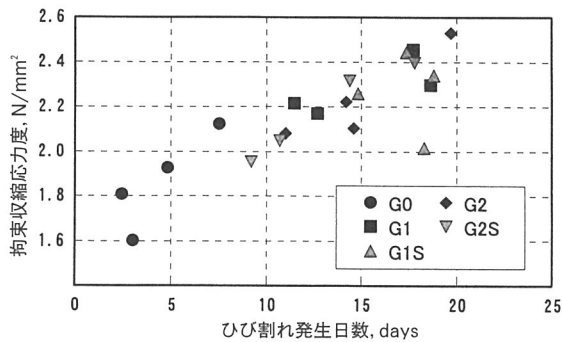


図-8 拘束収縮応力度とひび割れ発生日数

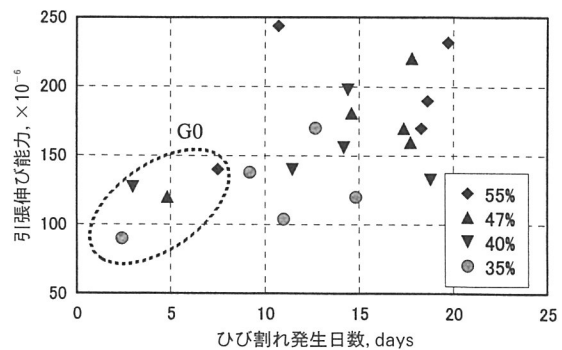


図-11 引張伸び能力とひび割れ発生日数

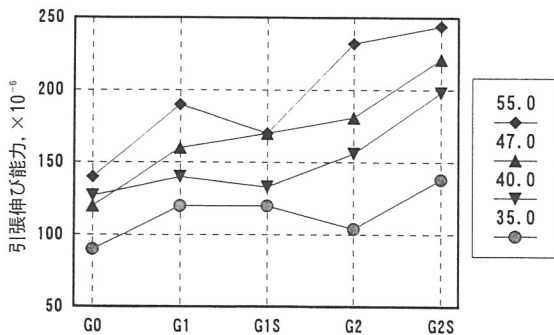


図-9 コンクリートの引張伸び能力

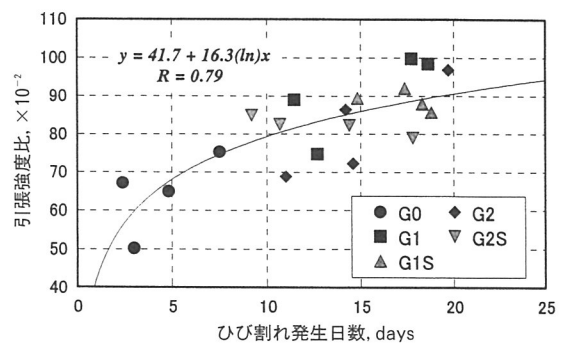


図-12 引張強度比とひび割れ発生日数

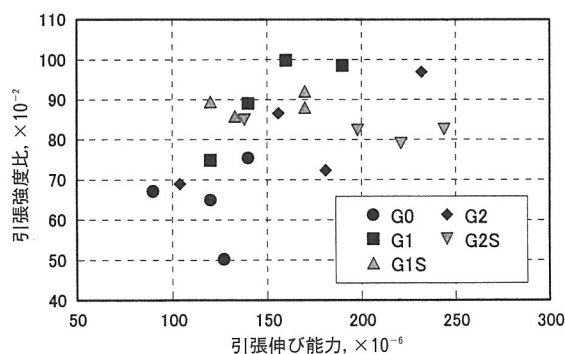


図-13 引張強度比と引張伸び能力

早期にひび割れるのに対し、引張伸び能力が大きくひび割れ発生日数の長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。

拘束ひび割れ試験において、ひび割れ発生日数が比較的小さい場合、外部拘束を受けた状態で乾燥を受け、乾燥程度の不均一さによって供試体断面内の応力分布に差が生じ、収縮応力度が引張強度に達する前にひび割れが発生する。逆に、ひび割れ発生日数が長くなると、乾燥材齢も長くなるために供試体断面内の応力分布がほぼ均一となり、主として外部拘束力によりひび割れが発生する。これらの理由から、一般にひび割れ発生日数が長くなると引張強度比が100%に近づくことになる。

また、図中に引張強度比とひび割れ発生日数との回帰式を示した。両者には相関係数0.79とほぼ良好な相関が認められるため、ひび割れ発生時期の予測に引張強度比を用いることは有効な手法と考えられる。

図-13に引張強度比と引張伸び能力の関係を示す。ひび割れ発生日数の長い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。

コンクリートのひび割れ発生の主原因は、拘束収縮応力度がコンクリートの引張強度に近づいて発生する場合と、マトリックスの引張伸び能力が限界に達して発生する場合の2通りが考えられる。再生骨材コンクリートは弾性係数が普通コンクリートに比べてやや小さいため、主として引張伸び能力が限界に達してひび割れが発生すると考えられる。

これらより、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が主原因と考えられる。

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圧縮強度、引張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である。
- (2) 再生Ⅱ種の粗骨材を用いた場合でも、粗骨材実績率による単位水量補正など、調合面での対策を施すことによって乾燥収縮率を低減できる。
- (3) 再生骨材コンクリートは、普通コンクリートよりも弾性係数が小さいために引張伸び能力が大きくなり、ひび割れ発生日数が長くなる。
- (4) ひび割れ発生時期の予測に、拘束鋼材のひずみもしくはコンクリートの引張強度比を用いることは、有効な手法である。

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。

今後は、再生粗骨材の高度処理によって多量に発生するⅢ種程度の再生細骨材の有効利用についても検討を加えてゆきたい。

[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) 財団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、pp857-858、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.
- 7) 山崎順二・立松和彦:高品質再生骨材を用いた再生コンクリートの特性、その3、浅沼組技術研究所報、No.11、pp.51-56、1999.