

8. 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3. 乾燥収縮ひび割れ性状)

Studies on Properties of Recycled Concrete Using High Quality Recycled Aggregate (Part 3. Cracking Properties of Concrete due to Restrained Drying Shrinkage)

山崎 順二*

立松 和彦*

要 旨

本研究は、再生骨材コンクリートの構造体への利用促進を目的として、再生粗骨材の吸水率が3%以下の高品質再生粗骨材と、吸水率が7%程度の再生細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状について評価したものである。実験の結果、高品質の再生骨材を用いたコンクリートは、引張伸び能力が大きいために天然骨材を用いた場合と比較してひび割れ発生日数が長くなること、天然骨材コンクリートと同等の乾燥収縮ひび割れ抵抗性を有すること、単位拘束率を用いてひび割れ発生の主原因が推定できること、ひび割れ発生時期の予測に引張強度比を用いることが有効であることが分かった。

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／単位拘束率／引張強度比／自己収縮

1. はじめに

再生骨材コンクリートを構造体に適用するためには、天然骨材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必要がある。しかし、再生骨材を用いた場合は、収縮ひび割れが生じやすいと考えられており、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。

前報その1¹⁾およびその2²⁾において、再生粗骨材の吸水率が3%以下の高品質再生粗骨材と、吸水率が7%程度の再生細骨材を用いたコンクリートの強度および耐久性を評価した。その結果、凍結融解作用を受けない地域に限定すれば、再生コンクリートは構造体に適用できることを示した。さらに、高品質の再生骨材を用いたコンクリートは、低品質のものをを用いた場合よりも乾燥収縮ひび割れ抵抗性が向上すると考えるが、現時点では十分なデータが得られていない。そこで本論文は、既報¹⁾²⁾に引き続き、高品質の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を、天然骨材を用いたコンクリートと比較することによって評価し、構造体コンクリートへの利用促進を図ろうとすることを述べたものである。

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、細・粗骨材とも再生骨材を用いた再生細骨材コンクリート(S-10)、粗骨材だけを再

生骨材とした再生粗骨材コンクリート(G-10)、比較用として天然の細骨材および粗骨材を用いた天然骨材コンクリート(G-0)の計3種類とした。実験要因として、まず天然骨材コンクリートの呼び強度を24・30・36・40の4水準を設定した。再生粗骨材コンクリートおよび再生細骨材コンクリートは、天然骨材コンクリートと同じ水セメント比とした。これらの計12種類のコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状を評価した。

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。それぞれの再生骨材は、原粗骨材が天然砂利のものである。再生粗骨材の品質は、比重2.60、吸水率2.4%程度であり、建設省の暫定品質基準(案)³⁾の1種に相当する高品質のものである。再生細骨材は吸水率が7.1%程度であり、同(案)の2種に相当する。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を表-3に示す。天然骨材(碎石)を用いたコンクリートの調合は、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。既往の研究結果⁴⁾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

*建築構造研究室(コンクリート材料担当)

コンクリートと等しくし、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を行った。再生細骨材コンクリートについては、計画空気量を1%増大し、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55S-10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。

フレッシュコンクリートの試験項目は、スランプ、空気量およびコンクリート温度とした。硬化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 原案の改正案⁵⁾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、ワイヤストレーンゲージを拘束板の側面中央に貼り付けて2時間に1回の間隔で測定した。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 フレッシュコンクリートの性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。
練上がったコンクリートは、分離などの不具合は認めら

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）、混合比 70% 砕砂（高槻産）、混合比 30% 再生細骨材（原粗骨材は砂利）
粗骨材	碎石（高槻産、硬質砂岩） 再生粗骨材（原粗骨材は砂利）
混和剤	高性能 AE 減水剤（ホリカルボン酸系）

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
表乾比重	2.56	2.62	2.43	2.68	2.60
絶乾比重	2.51	2.57	2.27	2.66	2.54
吸水率(%)	1.88	1.84	7.11	0.58	2.43
実積率(%)	—	—	—	57.8	64.2
洗い (%)	1.26 (含炭)		1.38	0.51	0.65
粗粒率 FM.	2.72	2.82	3.08	6.63	6.38
ふるい分け通過率 (%)	25	—	—	100	100
	20	—	—	95	98
	15	—	—	66	93
	10	100	—	40	55
	5	99	100	2	7
	2.5	90	91	0	2
	1.2	71	61	—	0
	0.6	46	40	—	—
	0.3	18	20	—	—
	0.15	4	6	—	—
	以下	0	0	—	—

表-3 コンクリートの種類および調合表

種別	供試体 記号	呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単 位 重 量 (kg / m ³)							
					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	55G-0	24	55.0	47.5	178	324	573	255	952	—	—	0.8
	47G-0	30	47.0	45.5	182	387	530	236	952	—	—	0.7
	40G-0	36	40.0	41.6	193	482	451	202	957	—	—	0.5
	35G-0	40	35.0	36.3	206	588	366	163	961	—	—	0.3
再生	55G-10	24 相当	55.0	43.5	168	305	538	239	—	—	1014	0.8
	47G-10	30 相当	47.0	41.5	172	366	497	221	—	—	1014	0.7
	40G-10	36 相当	40.0	37.4	182	455	422	186	—	—	1024	0.5
	35G-10	40 相当	35.0	32.5	194	554	340	152	—	—	1027	0.3
	55S-10	24 相当	55.0	44.6	168	305	—	—	—	736	980	0.8
	47S-10	30 相当	47.0	40.6	172	366	—	—	—	649	1014	0.8
	40S-10	36 相当	40.0	36.3	182	455	—	—	—	547	1024	0.7
	35S-10	40 相当	35.0	31.3	194	554	—	—	—	437	1027	0.9

れず、良好な状態であった。フレッシュコンクリートの目標値を、スランプ $18\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.5\%$ としたが、全てのコンクリートにおいて目標値を満足した。

3.2 コンクリートの強度および弾性係数

図-1に、材齢4週標準養生におけるセメント水比と圧縮強度の関係を示す。セメント水比と圧縮強度の間に、全てのコンクリートにおいて相関係数0.99と高い相関が認められ、かつ圧縮強度発現性に大きな差はなかった。

図-2に、材齢4週標準養生における引張強度とセメント水比の関係を示す。引張強度は、圧縮強度と同様にそれぞれに高い相関があるが、S-10はG-0よりも15～20%程度低下した。

図-3に、材齢4週標準養生における動弾性係数および静弾性係数とセメント水比の関係を示す。G-10は、G-0と比較して動弾性係数に若干差があるが、静弾性係数にはほとんど差がない。しかしS-10については、低セメント水比になるほど値の低下が大きくなった。これは、低セメント水比になるほどコンクリート中に占める再生細骨材の量が多くなり、モルタルマトリックスの弾性係数が小さくなったためである。これより、高品質の再生骨材を用いたコンクリートの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と言える。

3.3 乾燥収縮ひび割れ性状

(1)ひび割れ発生日数

図-4に、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生日数を示す。G-0に対して、G-10およびS-10は、乾燥開始からのひび割れ発生日数が12日目～19日目と長くなった。

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

供試体 記号	スランプ cm	スランプ 70- cm×cm	空気量 %	コンクリート 温度 ℃	単位容 積質量 kg/ℓ
55G-0	16.5	28×27	3.5	20.0	2.29
47G-0	17.5	29×28	3.7	20.0	2.30
40G-0	19.5	31×30	4.6	19.0	2.29
35G-0	20.0	32×31	3.3	19.5	2.30
55G-10	17.5	28×27	4.9	21.0	2.25
47G-10	19.0	30×29	5.9	21.0	2.25
40G-10	19.5	30×28	4.0	21.5	2.26
35G-10	20.0	31×30	3.8	21.5	2.27
55S-10	20.0	34×33	6.0	22.5	2.23
47S-10	20.0	32×30	6.0	23.5	2.23
40S-10	18.5	29×27	5.5	24.0	2.24
35S-10	19.0	33×31	5.0	24.0	2.25

図-5に、コンクリートの乾燥収縮ひずみの測定結果を示す。乾燥材齢50日までの自由収縮ひずみは、全ての水セメント比においてG-0が最も大きくなった。これは、G-10およびS-10は、再生粗骨材の実績率が碎石の実績率よりも大きいために、同一スランプを得るため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。また拘束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} を越えると高くなった。図-6に、ひび割れ発生直前の拘束板のひずみを示す。ひび割れ発生日数が長くなると拘束板のひずみがやや大きくなるが、いずれも $110\sim 150\times 10^{-6}$ の範囲であった。

(2)引張伸び能力

図-7に、引張伸び能力(拘束引張ひずみの最大値)と

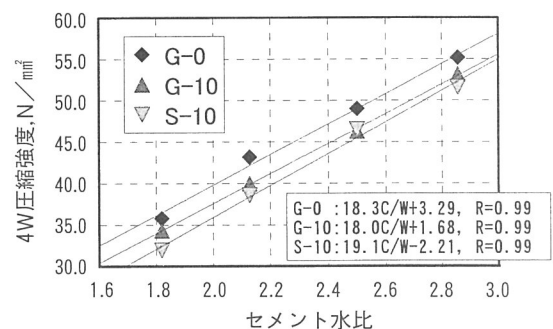


図-1 圧縮強度とセメント水比 (標準養生)

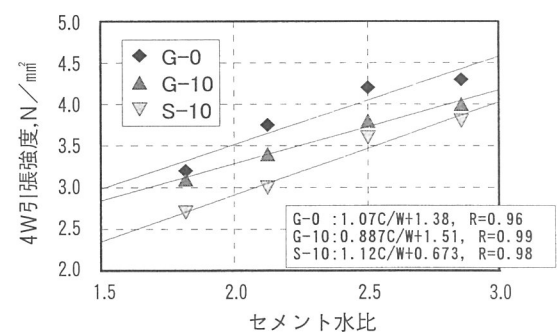


図-2 引張強度とセメント水比 (標準養生)

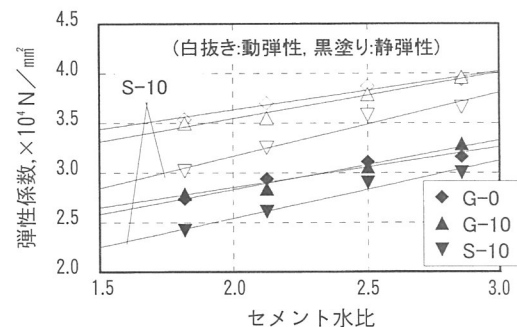


図-3 動弾性・静弾性係数とセメント水比

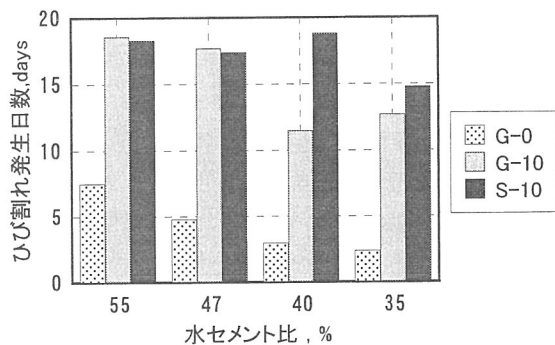


図-4 コンクリートのひび割れ発生日数

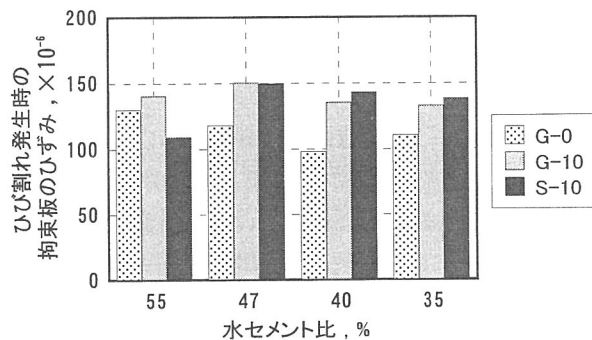


図-6 ひび割れ発生時の拘束板ひずみ

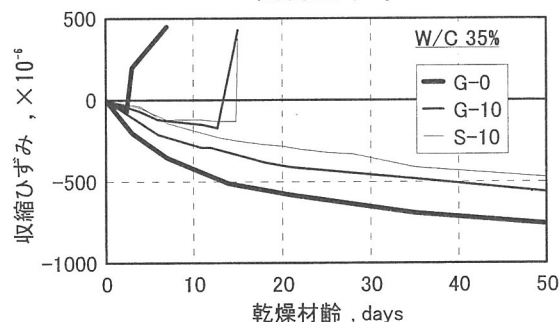
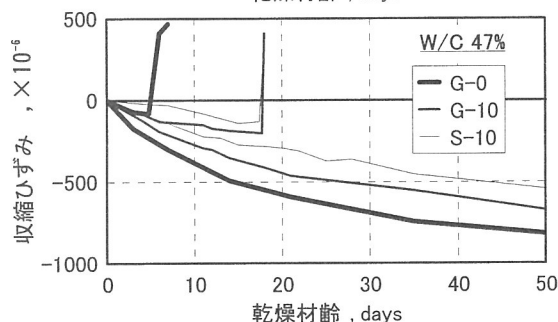
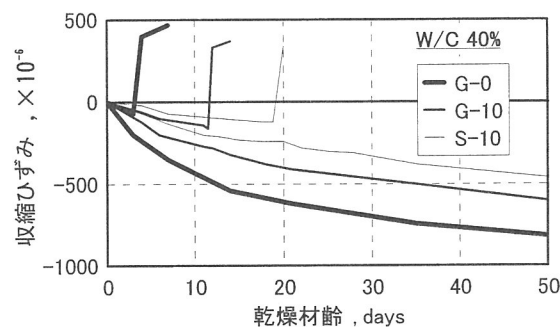
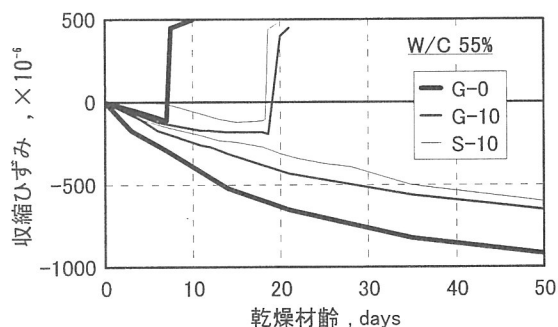


図-5 コンクリートの乾燥収縮（自由収縮および拘束収縮）ひずみ測定結果

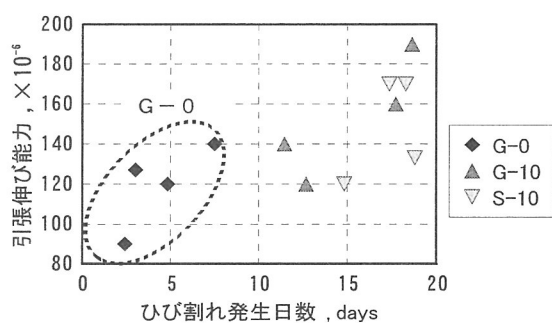


図-7 引張伸び能力とひび割れ発生日数

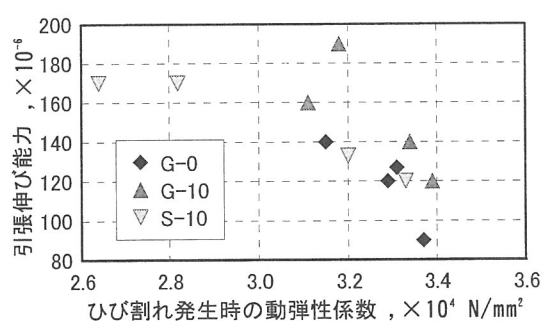


図-8 引張伸び能力と動弾性係数

ひび割れ発生日数の関係を示す。

引張伸び能力は、式(1)によって求めた。

$$\varepsilon_t = S_t - S_r \quad (1)$$

ここに、

ε_t : コンクリートの引張伸び能力(×10⁻⁶)

S_t : コンクリートの自由収縮ひずみ(×10⁻⁶)

S_r : コンクリートの拘束収縮ひずみ(×10⁻⁶)

G-0の引張伸び能力は、G-10およびS-10よりも低めであり、ひび割れ発生日数が長くなるに従って引張伸び能力が増大した。

図-8に、引張伸び能力とひび割れ発生時の動弾性係数の関係を示す。動弾性係数が高い場合に引張伸び能力が低下し、ひび割れ発生が早くなる傾向にあった。これ

より、G-0は、動弾性係数が大きく引張伸び能力が小さいために早期にひび割れが発生したと考えられる。

また、ひび割れ発生日数に及ぼす影響は、粗骨材の物性によるものが大きいと考えられる。つまり、G-0の場合は、モルタルマトリックスに生じる収縮応力を天然骨材（碎石）が拘束することによって引張伸び能力が小さくなり、早期にひび割れが発生する。しかしG-10およびS-10の場合は、モルタルマトリックスの乾燥収縮応力を再生粗骨材が緩和できるために、ひび割れが発生するまでの期間が長くなったと考えられる。

(3)自己収縮応力度

図-9に、水セメント比と自己収縮応力度の関係を示す。自己収縮応力度は、コンクリートと拘束板との平衡条件から、乾燥開始時の拘束板のひずみと凝結開始時の拘束板のひずみとの差を用いて、式(2)によって求めた。

$$\sigma_{ag} = (\varepsilon_1 \times Es \times As) / Ac \quad (2)$$

ここに、

σ_{ag} ：自己収縮応力度（N/mm²）

ε_1 ：乾燥開始時の拘束板のひずみ

－凝結開始時の拘束板のひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）

Es ：拘束板のヤング係数（205940N/mm²）

As ：拘束板の断面積（793.2mm²）

Ac ：コンクリートの断面積（10000mm²）

既往の研究結果⁶⁾と同様に、水セメント比が小さくなるほど自己収縮応力度が大きくなった。

S-10の自己収縮応力度が小さくなる理由は、G-0およびG-10と比較して、コンクリートの弾性係数が小さく強度発現性が緩やかであり、湿潤養生終了時の引張伸び能力が大きくなっているためと考えられる。

(4)拘束収縮応力度

図-10に、ひび割れ発生時の拘束収縮応力度とひび割れ発生日数の関係を示す。拘束収縮応力度は式(2)と同様の考え方で、 ε_1 をひび割れ発生前後の拘束板のひずみの差として求めた。

ひび割れ発生時の拘束収縮応力度は1.6～2.5 N/mm²であり、ひび割れ発生日数が長くなるほど増大した。G-10およびS-10は、G-0よりもひび割れ発生時の拘束収縮応力度が大きく、かつ引張伸び能力もやや大きいため、再生骨材コンクリートマトリックスは、G-0よりも大きな収縮応力を負担できることになる。

(5)クリープひずみ

図-11に、ひび割れ発生時のコンクリートの静弾性係数を適用して、計算によって求めた単位クリープとセメ

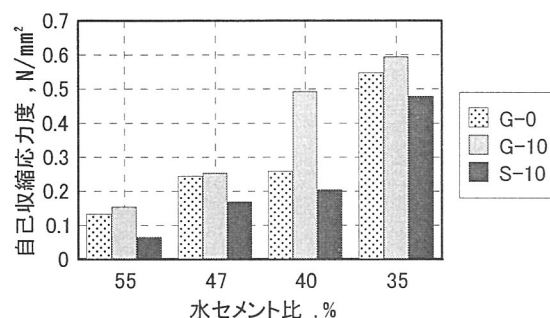


図-9 自己収縮応力度と水セメント比

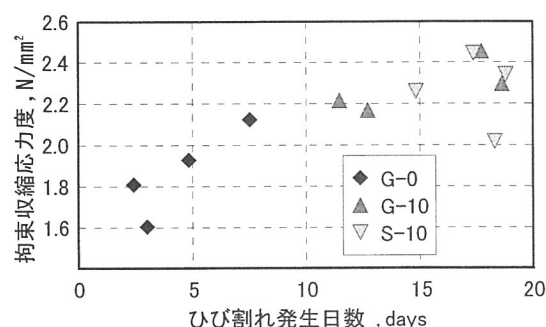


図-10 ひび割れ発生日数と拘束収縮応力度

ント水比の関係を示す。単位クリープは水セメント比が高く、かつ弾性係数の発現がやや遅い再生骨材コンクリートにおいて大きくなる傾向にあった。

(6)単位拘束率とひび割れ発生日数

弾性係数の異なるコンクリートを同一の断面形状をもつ鋼材で拘束することによって、各試験体間での実拘束率が異なる。実拘束率の違いはひび割れ発生日数に影響を与えるため、その影響を回避するため、ここでは単位拘束率を定義する。単位拘束率とは、実拘束率をひび割れ発生時の拘束収縮応力度で除したものとする。図-12に単位拘束率とセメント水比の関係を示す。G-0は、G-10やS-10よりもマトリックスの弾性係数の発現が早いと考えられ、単位クリープが小さくかつ単位拘束率が高くなり、早期にひび割れが発生した。

ひび割れ発生の条件には、引張強度が限界に達して発生する場合とコンクリート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とがある。マトリックスの弾性係数が高い場合は、引張伸び能力が限界に達する以前に収縮応力度が引張強度よりも大きくなることによって、コンクリートにひび割れが発生する。今回の実験結果から、ひび割れ発生時の単位拘束率が高い場合は引張強度が限界に達してひび割れが発生し、逆に低い場合は伸び能力が限界に達して発生する可能性が高いと考えられる。これより、単位拘束率を用いることによって、コ

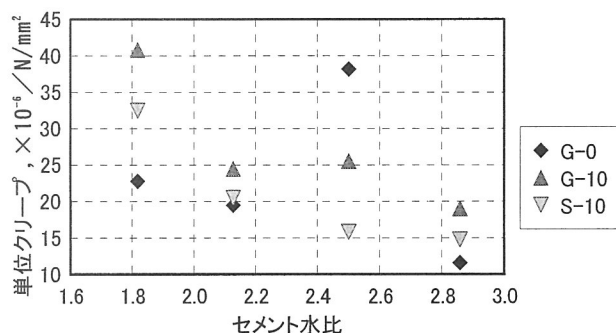


図-11 単位クリープとセメント水比

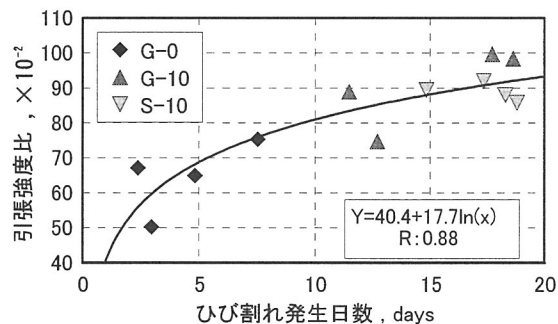


図-13 ひび割れ発生時の引張強度比

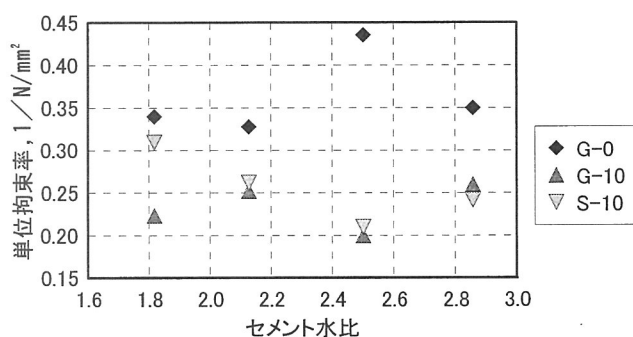


図-12 単位拘束率とセメント水比

ンクリートのひび割れ発生の主原因が推定できる。

(7) 引張強度比

図-13に、ひび割れ発生時の引張強度比(拘束収縮応力/引張強度)とひび割れ発生日数の関係を示す。ひび割れ発生日数が長くなるほどコンクリートの引張強度比が大きくなり、100%に近づいている。既往の研究⁷⁾と同様に、両者には相関係数0.88とやや高い相関があるため、ひび割れ発生時期の予測に引張強度比を用いることは、有効な予測手段であると考えられる。

4. まとめ

高品質の再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験を行い、コンクリートのひび割れ抵抗性について検討した結果、以下のことが確認できた。

- (1) 再生細骨材コンクリートの引張強度は、天然骨材コンクリートよりも15～20%低くなった。
- (2) 再生粗骨材および再生細骨材コンクリートのひび割れ発生日数は、天然骨材コンクリートよりも約4～6倍長く、かつ引張伸び能力もやや大きい。
- (3) 自己収縮応力度は、弾性係数の小さい再生細骨材コンクリートが最も小さくなり、拘束収縮応力度は、ひび割れ発生日数が長いコンクリートほど増大した。
- (4) 単位クリープは、水セメント比が大きく弾性係数の小さいコンクリートにおいて大きくなった。

(5) 単位拘束率を用いて、コンクリートのひび割れ発生の主原因が推定できる。

(6) 引張強度比を用いることによって、コンクリートのひび割れ発生時期が予測できる。

以上の結果から、高品質の再生骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抵抗性は、天然骨材コンクリートと同程度であった。今後更にデータを蓄積し、実構造物への利用促進を目指したい。

[参考文献]

- 1) 山崎順二・立松和彦：「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1. 再生粗骨材コンクリートの強度および耐久性）」、浅沼組技術研究所報、No.9、pp.43-50、1997。
- 2) 山崎順二・立松和彦：「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2. 再生細骨材コンクリートの強度および耐久性）」、浅沼組技術研究所報、No.10、pp.1-8、1998。
- 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) 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。
- 5) 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。
- 6) 例えば、日本コンクリート工学協会：「自己収縮研究委員会報告書」、1996. 11。
- 7) 大野俊夫・魚本健人：「乾燥収縮ひび割れ発生時の引張伸び能力に関する実験的研究」、コンクリート工学年次論文報告集、vol.19、No.1、pp.733-738、1997。