

# 論文 再生細骨材と天然骨材を混合使用したコンクリートの各種性状

新谷 彰<sup>\*1</sup>・依田 和久<sup>\*2</sup>・小野寺 利之<sup>\*3</sup>・桜本 文敏<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究で使用する機械式すりもみ装置にて製造した再生細骨材は、現状、JIS A 5021の規定値を満足せず JIS 案に示される中品質に留まっている。これは再生細骨材の小粒度部分に摩砕されたセメントペーストなどが多く含まれることが一因と考えられた。このため、0.6mm のふるいによる分級処理を行うこととした。これにより得た粗目の再生細骨材の品質は、吸水率を除き JIS 規定値を満足した。次に、粗目の再生細骨材と細目の天然砂とを混合したコンクリートの各種性状を調べた。その結果、細骨材に中品質再生細骨材単体を使用したものに比べ、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、中性化抵抗性の性状に向上がみられた。

**キーワード**：再生コンクリート, 再生粗骨材, 中品質再生細骨材, 分級処理, 各種性状

## 1. はじめに

昨今、再生コンクリートの普及に向け、高品質再生骨材の JIS (JIS A 5021) の規格化、低品質再生コンクリートの JIS (JIS A 5023) が規格化された。また、その骨材品質がこれら 2 つの規格の中間にある中品質再生コンクリートについても、その JIS 規格化が検討されている。中品質再生コンクリートは、コスト、リサイクル率の点で高・低品質再生コンクリートに比べメリットが多いとされ、その普及が望まれている<sup>1)</sup>。

本研究で使用する機械式すりもみ方式にて製造する再生細骨材の品質は、現状、中品質に留り、その品質の確認、改善検討を行ってきた<sup>2)</sup>。一方で、中品質再生細骨材の実構造物適用を前提としたコンクリートの検討事例は少ない。

本報では、下記 2 項目を主な目的として行った実験の内容について述べる。

- ①中品質再生細骨材を用いたコンクリートの、一般的なコンクリートとの各種物性の比較による、実構造物への適用性の検討。
- ②再生細骨材の 0.6mm 以下を除去することによる、コンクリートの品質向上の効果の把握。

## 2. 実験計画

### 2.1 実験概要

表—1 に実験要因と水準を示す。地下躯体での適用を考慮し、高炉セメント B 種を主に用いて検討し、比較用に普通ポルトランドセメントを用いた。これらを組み合わせた 12 種類のコンクリートの試験を行い、そのフレッシュ性状、強度性状及び耐久性状を確認した。

表—1 実験要因と水準

実験要因	水準	備考
粗骨材	2	高品質再生, 天然
細骨材	3	中品質再生, 中品質再生粗目+天然細目, 天然
セメント	2	高炉 B, 普通
水セメント比	3	38, 45, 55(%)

### 2.2 使用材料及び調合

原コンクリートは、昭和 39 年に東京都内に竣工した築 41 年の RC 造地上 5 階、地下 2 階建て事務所ビルを産地とする。原骨材の品質を表—2

表—2 原骨材の品質

試験項目		試験方法	試験結果	
原骨材 <sup>*1</sup>	粗骨材	絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	JIS A 1110	2.62
		吸水率(%)		0.86
		アルカリシリカ反応性	JIS A 1146	無害
	細骨材	絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	JIS A 1109	2.61
		吸水率(%)		1.10
		アルカリシリカ反応性	JIS A 1146	無害

\*1 原骨材は解体前に建物から採取したコアを希塩酸に浸漬し採取した。

\*1 鹿島技術研究所 建築生産グループ 研究員 (正会員)

\*2 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士 (工学) (正会員)

\*3 鹿島 建築設計本部 構造設計統括グループ (正会員)

\*4 鹿島技術研究所 建築生産グループ グループ長 (正会員)

に示す。これより、原骨材は、再生骨材の原料として良質と判断された。

再生骨材は、1次処理にて40~5mmにした原コンクリートを機械式すりもみ装置に投入して得た。ここでの機械式すりもみ装置とは、ボールミル方式であり、その装置の概要については文献<sup>2)</sup>を参照されたい。製造した再生骨材は粗骨材と細骨材に分級し、粗目の細骨材は0.6mmふるいにて分級して得た。いずれも製造の最終工程で沈殿水槽に通し微粒分の除去を行った。

使用骨材の物理的性質を表-3に示す。粗骨材は、高品質再生粗骨材(川砂利形状、以下、HG)、及び天然砕石(山口県秋芳産石灰岩砕石、以下、NG)であり、いずれも最大寸法は20mmである。

細骨材は、中品質再生細骨材(以下、MS)、粗目の再生細骨材(以下、HS)、天然砂として千葉県君津産山砂(以下、NS1)及び細目の千葉県君津産陸砂(以下、NS2)を用いた。HSはMSに対し、吸水率で約1%小さく、品質向上が見られた。HSとNS2の混合砂の品質も併せて示す。

細骨材の粒度分布を図-1に示す。混合砂は、HSとNS2を質量比1:1で混合し、JIS A 5005の砕砂の粒度分布範囲に収まるよう調整した。

セメントは、高炉B種(S社製、密度3.04g/cm<sup>3</sup>)、普通ポルトランド(S社製、密度3.15g/cm<sup>3</sup>)、その他の材料は、上水道水、混和剤にポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した。

コンクリートの種類及び調合を表-4に示す。調合は、HG、NGのいずれも粗骨材のかさ容積を0.575m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>で一定とし、W/C=45%を基本に、現場適用を前提として運搬時間のロスを見込み、出荷時の性状として、スランプ20±1.5cm、空気量5.0±1.5%のコンクリートが得られるよう混和剤添加量を調整し、試験を行った。

### 2.3 練り混ぜ方法

練り混ぜは、容量60Lの強制二軸ミキサにて、砂、セメントの後に粗骨材を投入し、空練り10秒間、混練水投入後90秒間練り混ぜて行なった。

### 2.4 試験項目及び方法

試験の項目及び方法を表-5に示す。これらは、

中品質再生コンクリートの現場適用を想定し、必要と考えられる試験項目について取り上げた。

表-3 使用骨材の物理的性質

区分	記号	分類	絶対密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	実積率 (%)	粗粒率
粗骨材	HG	高品質再生	2.55	2.14	0.5	65.1	6.85
	NG	天然砕石	2.68	0.45	0.2	61.9	6.75
細骨材	MS	中品質再生	2.35	4.90	0.6	64.6	2.71
	HS	粗目再生	2.45	3.88	0.4	62.2	3.86
	NS1	天然山砂	2.63	1.01	1.2	-	2.71
	NS2	細目天然陸砂	2.52	2.49	1.3	-	1.86
	HS+NS2	混合砂 <sup>*1</sup>	2.48	3.19	0.9	70.1	2.85

\*1 混合割合は質量比でHS:NS2=1:1とした。

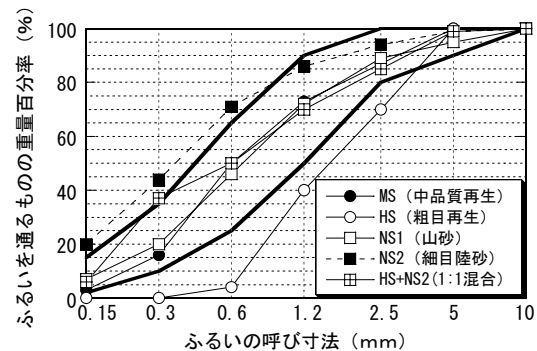


図-1 細骨材の粒度分布

表-4 コンクリートの種類と調合

記号	セメント種類	骨材の種類		W/C (%)	s/a (%)	単位量(上段:kg/m <sup>3</sup> , 下段:L/m <sup>3</sup> )			高性能AE減水剤		
		粗骨材	細骨材			水	セメント	細骨材		粗骨材	
BHH38	高炉B	HG	HS+NS2	38	42.3	170	448	691	957	C×1.2%	
BHH45				45	44.3	170	378	750	957	C×0.9%	
BHH55				55	46.1	170	310	806	957	C×0.8%	
BHM38				38	42.3	170	448	667	957	C×1.1%	
BHM45				45	44.3	170	378	724	957	C×0.95%	
BHM55		55	46.1	170	310	778	957	C×0.8%			
BHN38		HG	NS1	38	42.3	170	448	716	957	C×1.13%	
BHN45				45	44.3	170	378	776	957	C×0.85%	
BHN55				55	46.1	170	310	835	957	C×0.75%	
NHH45		普通	HS+NS2	45	44.7	170	378	760	957	C×1.15%	
NHM45				MS	45	44.7	170	378	734	957	C×1.2%
BNN45		高炉B	NG	NS1	45	46.0	170	378	806	960	C×0.95%
							170	124	304	357	

表-5 試験項目及び方法

区分	試験項目	方法
フレッシュ	スランプ	JIS A 1101
	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	単位容積質量	JIS A 1116
	コンクリート温度	棒状温度計による
	塩化物量	JASS 5T-502
	ブリーディング	JIS A 1123
強度	練り性状	目視観察による
	圧縮強度 <sup>*1</sup>	JIS A 1108
	静弾性係数(ポアソン比)	JIS A 1149
耐久性	割裂引張強度	JIS A 1113
	長さ変化	JIS A 1129-1
	凍結融解抵抗性	JIS A 1148
	促進中性化	JIS A 1153
	クリープ	JIS原案 <sup>3)</sup>

\*1 材齢28, 91日

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の結果を表-6に示す。BHH38でややもったりした性状となったが、全体的に粗骨材の分離がなく、概ね良好であった。

ブリーディング量を図-2に示す。いずれも高耐久性RC造設計指針(案)<sup>4)</sup>に示される $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であり、普通コンクリートに要求される品質を満足した。BHMはBHHより大きく、これは細骨材の $0.6\text{mm}$ 以下の粒度部分(以下、細目部分とする)の保水性の差が一因と考えられる。

#### 3.2 強度性状

##### (1) 圧縮強度

材齢28日におけるセメント水比(C/W)と圧縮強度の関係を図-3に示す。図中にBHH, BHM, BNN45及び粗骨材に砕石を用いた普通コンクリートのプラント実績での実績式を併せて示す。

BHH及びBHMの圧縮強度は、 $C/W=2.22$  ( $W/C=45\%$ )では実績式と比較しほぼ同等であり、普通コンクリートと同等であると考えられる。一方、これらが条件の良い試験室での結果であり、BHH, BHMの $C/W$ 3点の回帰式の傾きがいずれも実績式より小さいことを考慮すると、細骨材に中品質再生骨材を用いた再生コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートと比較し、高強度域では小さくなる可能性が示唆され、実績では、その発現性の確認が必要と考えられる。

##### (2) 静弾性係数

材齢28日の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4に示す。各種再生コンクリート供試体3本の単位容積質量 $\gamma$ の平均値は $22.6\sim 23.3\text{kN}/\text{m}^3$ の範囲にあり、その静弾性係数はRC規準<sup>5)</sup>に示される普通コンクリートの算定曲線の上側にプロットされ、良好な値を示した。BNNは石灰岩砕石を用いており、係数 $k$ に1.2を用いた場合と同等の値であった。BHMは他供試体と比較して静弾性係数が小さい傾向にあり、これは、再生細骨材の細目部分に含まれる原コンクリート起因のセメントペーストがその一因として考えられる。

表-6 フレッシュ時の性状

記号	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	塩化物量 (kg/m <sup>3</sup> )	練上り性状
BHH38	19.0	30.5×29.5	5.3	24.0	0.03	ややもったり
BHH45	20.0	35.0×33.5	5.2	22.0	0.03	良
BHH55	20.0	35.0×33.5	5.4	22.0	0.02	良
BHM38	21.5	36.0×35.0	4.4	22.0	0.04	良
BHM45	20.5	36.0×33.0	5.3	22.5	0.03	良
BHM55	19.5	32.5×31.0	4.9	22.0	0.03	良
BHN38	20.0	34.5×33.0	5.4	22.0	0.03	良
BHN45	19.5	35.5×33.5	5.2	22.0	0.04	良
BHN55	21.0	37.5×35.5	4.5	21.5	0.04	良
NHH45	20.5	36.0×35.5	5.6	25.0	0.03	良
NHM45	21.0	35.5×34.0	4.4	22.5	0.04	良
BNN45	20.0	33.5×33.0	5.0	22.0	0.02	良

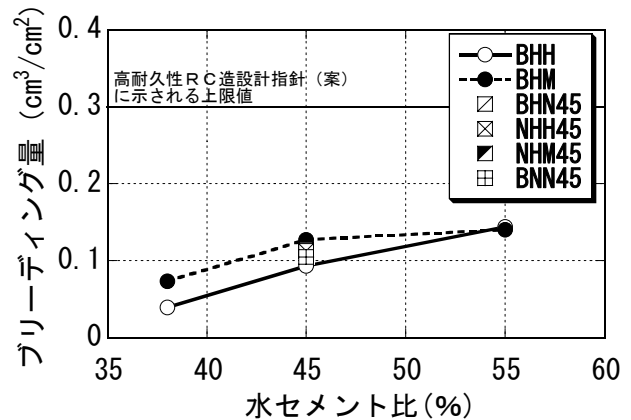


図-2 ブリーディング量

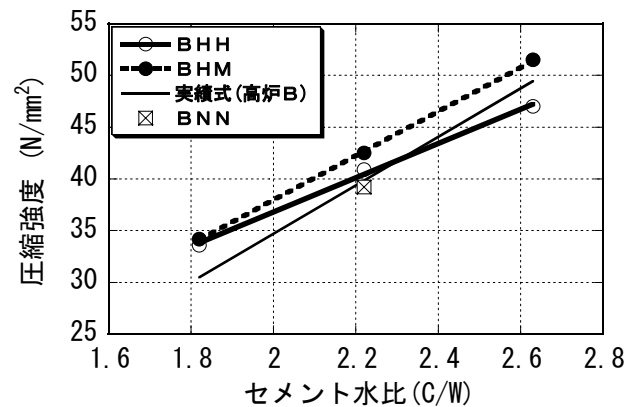


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係

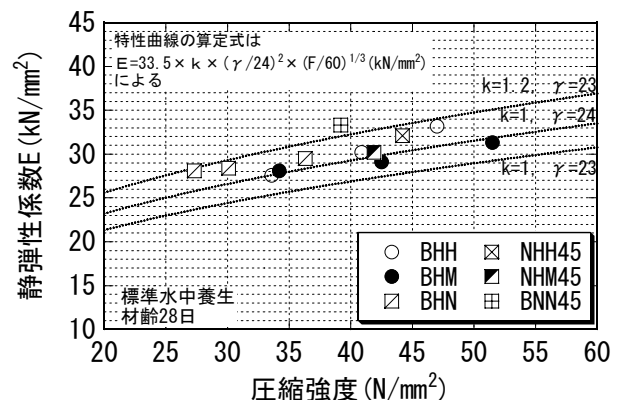


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

### (3) 割裂引張強度

材齢 28 日の圧縮強度と割裂引張強度の関係を 図-5 に示す。いずれも普通コンクリートの特性曲線<sup>6)</sup> 近辺に分布しており、普通コンクリートと同等の性能を有すると考えられる。

### 3.3 耐久性状

#### (1) 長さ変化率

BHH 3 種類, BHN45, NHH45, BNN45 の材齢 1 年までの長さ変化試験の結果を 図-6 に, BHM38, BHM45, BHH38, BHH45, NHM45, BNN45 の結果を 図-7 に示す。BHM55 は供試体間のばらつきが大きく、ここでは省略した。

材齢 1 年目における最終的な長さ変化率の絶対値は 500~800 $\mu$  の範囲にあり、既往の文献<sup>7)</sup> に示される現在市販されるコンクリートの標準的な数値である 800 $\mu$  を下回ることから、普通コンクリートと同等の性能を有すると考えられる。

また、粗骨材に石灰岩碎石を用いた BNN45 が最も小さい値となり、既往の文献<sup>8)</sup> に示されるものと同様の傾向を示した。

図-7 において、材齢 1 年目の長さ変化率の絶対値を比較すると BHH38 が BHM38 よりも 25 $\mu$  小さく、BHH45 が BHM45 よりも約 40 $\mu$  小さかった。このことから、中品質再生細骨材の 0.6mm 以下の部分を天然砂に置換することは、乾燥収縮に対して若干の改善効果を有するものと考えられる。

#### (2) 凍結融解抵抗性

図-8 に凍結融解試験の結果を示す。細骨材に HS を用いた BHH45 は 300 サイクルを超えてもその相対動弾性係数が 80%以上を維持しており、普通コンクリートの凍結融解抵抗性の目安の 1 つとされる 60%以上 (JASS5-2003 における最も厳しい耐凍害性の区分である区分 A の指標) を満足し、良好な結果であった。

一方、細骨材に MS を用いた BHM45, NHM45 は 200 サイクルまで至らず、凍結融解抵抗性に乏しい結果となったため、中品質再生細骨材を単体で用いる場合には、その性能について十分な確認が必要と考えられる。

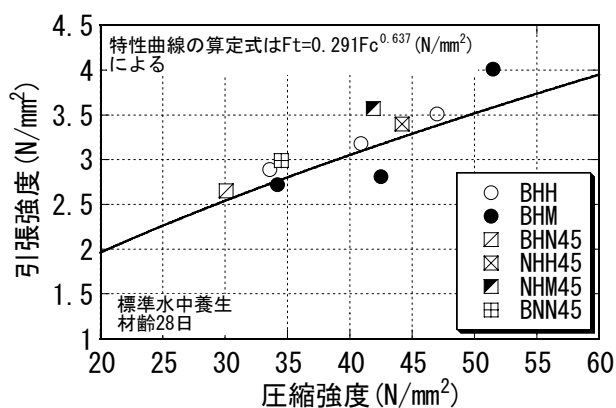


図-5 圧縮強度と引張強度

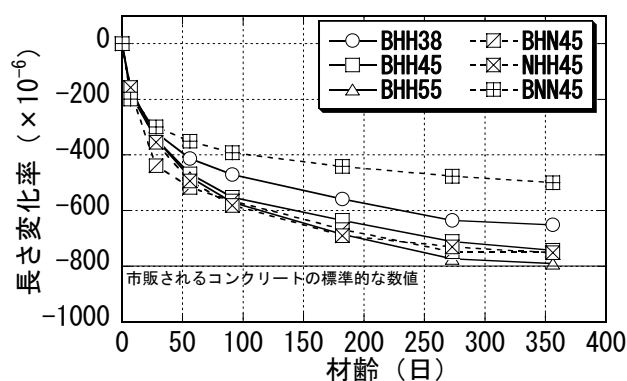


図-6 長さ変化率

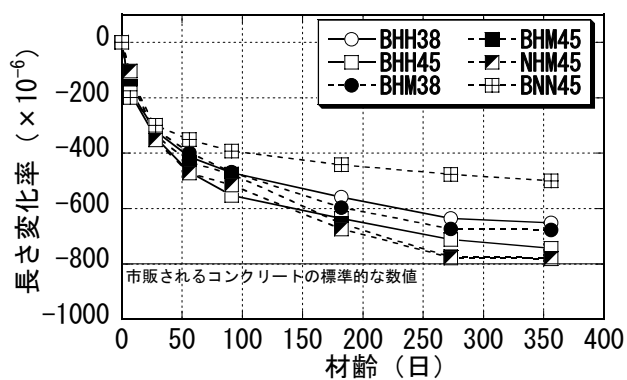


図-7 長さ変化率

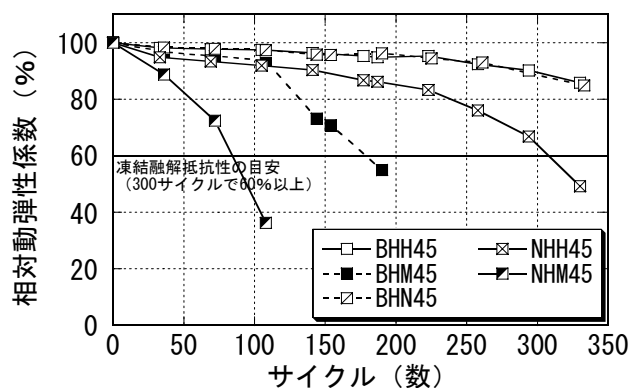


図-8 凍結融解抵抗性

### (3) 促進中性化深さ

図-9にW/C=45%の供試体の促進中性化試験の結果を示す。ここでは、促進中性化深さと材齢(週)の平方根の関係を示し、直線は原点を通る回帰式で示す。ここに、中性化速度係数は、この直線の傾きで与えられる。

W/C=45%の普通コンクリートの中性化速度係数は、和泉らによって示されるJASS5-2003の中性化速度式により求めた場合2.10であった。BHH45は、その中性化速度係数が1.76であり2.10を下回ることから、中性化に対する性状は良好であり、普通コンクリートと同等の性能を有すると考えられる。

また、中性化速度係数が、BHM45が2.50でありBHH45より大きいこと、及び普通セメントを用いた場合においてNHH45<NHM45であることから、MSに対し、細骨材にHSを用いることにより、中性化に対する改善効果が見られる。

### (4) クリープ性状

材齢28日荷重開始時の圧縮強度の1/3の応力を油圧自動荷重装置にて常時荷重し、温度20℃、湿度60%の環境下の気中にて試験を行った。

図-10にクリープ試験の結果から得た単位応力あたりのクリープひずみと荷重材齢の関係を示す。参考に、佐藤らが提案している推定式<sup>9)</sup>に、W/C=45%の普通コンクリートの場合の数値を代入した算定曲線も併せて示す。BHH45とBHM45の単位クリープひずみ曲線は、これに近似した線形を描き、普通コンクリートと同等の性能を有すると考えられる。

図-11にクリープ係数 $\phi$ と荷重材齢の関係を示す。 $\phi$ はBHM45<BHH45であり、それらの単位クリープひずみがほぼ同じであることから、BHM45よりもBHH45の静弾性係数が大きいことが、みかけのクリープ係数を大きくしているものと考えられる。

### (5) コンクリート性状の比較

図-12にBHH45とBHM45の各性状値の普通コンクリートの指標値に対する割合を示す。ここで圧縮強度は、材齢28日での圧縮強度をプラ

ント実績式の強度で除したものを、乾燥収縮は1年目の長さ変化率の絶対値を800 $\mu$ で除したものの逆数、中性化は中性化速度係数をJASS5-2003の中性化速度式より得た2.10で除したものの逆数、凍結融解は300サイクルの相対動弾性係数を60で除したものを、単位クリープは荷重材齢1年目の値を推定式から得た61.5で除したものの逆数で算出した。

BHH45は、乾燥収縮、凍結融解性状、中性化性状がBHM45より良好であり、総じて普通コンクリートと同等の性能を有すると考えられる。

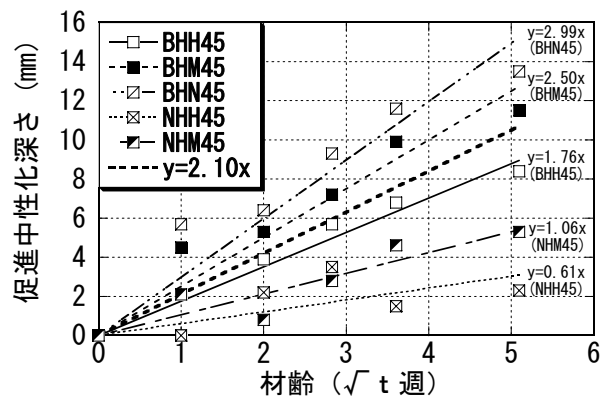


図-9 促進中性化深さ

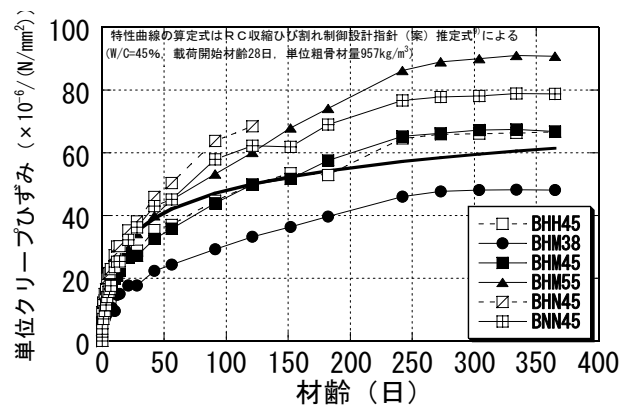


図-10 単位クリープひずみ

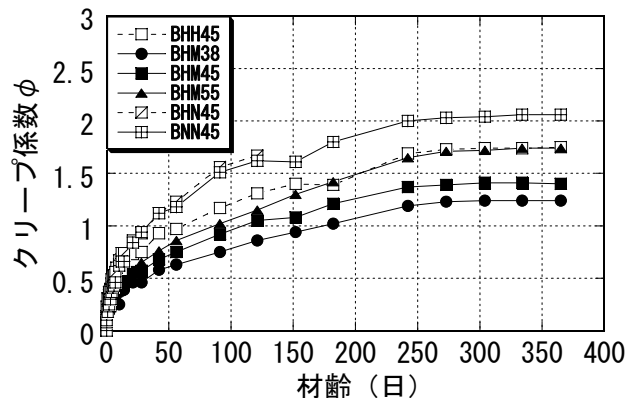


図-11 クリープ係数

#### 4. まとめ

下記に、試験練りにより得られたコンクリートの各種性状をまとめ、得られた知見を示す。

- (1)フレッシュ性状は、粗骨材に高品質再生骨材、細骨材に中品質再生骨材及びこれを 0.6mm ふるいで分級したものを使用した再生コンクリートのいずれも良好であり、そのブリーディング量は普通コンクリートに要求される品質を満足した。
- (2)圧縮強度は、粗骨材に高品質再生骨材、細骨材に中品質再生骨材及びこれを 0.6mm ふるいで分級したものを使用した再生コンクリートのいずれも、高強度域を除き、普通コンクリートとほぼ同等と考えられる。
- (3)長さ変化率、凍結融解抵抗性、中性化深さ、単位クリープひずみのいずれも、細骨材に中品質再生細骨材を 0.6mm ふるいで分級し得た粗目の再生細骨材を用いた場合、普通コンクリートとほぼ同等と考えられる。
- (4)以上より、中品質再生細骨材を粗目部分に限定し用いることで、強度・耐久性に関し、一般のコンクリートと同等の性能を実現する見通しが得られた。また、中品質再生細骨材単体を用いた再生コンクリートは、凍結融解抵抗性、中性化を除く性状は良好と考えられ、寒冷地域を除き、使用が可能と思われる。これについては今後の課題としたい。

**謝辞：**本研究の実施に際し、株式会社小松製作所、有限会社大東土木、宮松城南株式会社、日本シーカ株式会社、三協商事株式会社ほか関係各位に多大なご尽力をいただきました。記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 再生骨材標準化委員会編：コンクリート用再

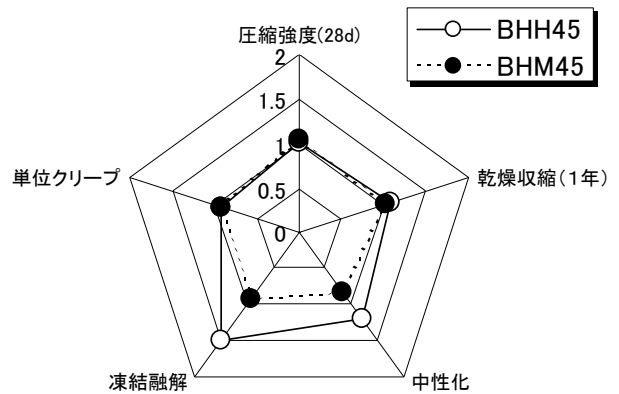


図-12 コンクリート性状の比較

生骨材の普及促進に関するシンポジウム、日本コンクリート工学協会、2005.9

- 2) 依田和久ほか：機械式すりもみ装置により製造した再生粗骨材及び再生細骨材の品質、コンクリート工学年次論文集、Vol.26, No.1, pp.1527-1532, 2004.7
- 3) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート工学「JIS 原案：コンクリートの圧縮クリープ試験方法（案）」、Vol.23, No.3, 1985.3
- 4) 日本建築学会編：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 1991
- 5) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 1999
- 6) 野口貴文・友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係、日本建築学会構造系論文報告集、No.472, pp.11-16, 1995.6
- 7) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説, 2006
- 8) セメント協会：耐久性専門委員会ひび割れ分科会報告、H-23, 1992
- 9) 佐藤嘉昭ほか：国内の実験データに基づいたコンクリートの時間依存性ひずみの予測式、日本建築学会構造系論文報告集、No.599, pp.9-15, 2006.1