

[216] コンクリート廃棄物を用いた再生セメント及び再生コンクリート

正会員 ○ 吉兼 亨 (大有建設 中央研究所)
 竹島 宏祐 (大有建設 中央研究所)
 中島 佳郎 (大有建設 中央研究所)

1. はじめに

都市再開発、道路地下埋設工事などで発生するセメントコンクリート廃棄物や、生コン工場の廃水処理により回収する生コンスラッジは、建設廃棄物、産業廃棄物として扱われ、環境保全、埋立地確保などの面でその処分に苦慮しており再生利用技術の開発が強く望まれている。セメントコンクリート廃棄物は破砕加工して舗装の路盤材に再生利用されているが、まだごく一部に限られており、発生量全体からみればわずかにしか過ぎない。また、コンクリート用骨材として再利用する研究も行われているが、ワーカビリティに欠けるなどの問題もあり、特にコンクリートを再生した細骨材にあっては乾燥収縮が普通コンクリートの2倍程度となることが指摘されており¹⁾、著者らの実験でもコンクリートの暴露テストにおいて容易にひびわれが発生すること、中性化速度が早いことが確認されている。これらの現状から判断して今のところコンクリート用再生骨材として用いうるのは粗骨材のみのである。一方、生コンスラッジの方は、昭和47年にコンクリート中に若干混入しても品質に支障を来たさないことを発表した²⁾。また、日本コンクリート工学協会においても、生コンスラッジの練り水への混入について研究委員会が設けられ有害量の限界が示されて³⁾、スラッジ水の使用が可能となった。しかし、これは単に廃棄物の発生量を削減することにはなるものの、使用を誤ればコンクリートの品質を低下させることはあっても、向上には殆どつながらないものだけに、前向きな再利用とは云い難いものであった。

そこで、著者らはこれらの廃棄物、即ち、セメント水和物を主体とした廃棄物の、より高度な再利用を計るため、再生セメントの開発研究に取り組み、高炉水滓とセメント水和物を主原料とし水硬性セメントの製造技術を開発し、その再生セメントを用いたコンクリートの各種性状が、十分な実用レベルに達していることがわかったので、ここにその概要を報告するものである。

2. 再生セメント

2.1. 再生セメントの概要

再生セメントの硬化は、基本的にはコンクリート廃棄物又は生コンスラッジ中に含まれる水和物の粉末と高炉水滓粉末との間の水和反応によるものである。このため高炉セメントのようにポルトランドセメントを用いて高炉水滓粉末との間で水和反応を生じせしめるのとは、原材料の状態においては異なっているが、電子顕微鏡写真やX線回折解析においては、水和による成生物やその成長過程が高炉セメントに類似していることが確認された。(写真-1参照)

2.2. 再生セメントのタイプ

再生セメントには廃棄物により次の2種類がある。

- タイプⅠ： (生コンスラッジ) + (高炉水滓) + (石膏)
- タイプⅡ： (廃コンクリート砕砂) + (高炉水滓) + (石膏)

これに反応を促進させる目的で無機化学刺激材が数%程度添加されている。また、石膏の添加量は2~3%程度で、いわゆる高硫酸塩セメント類のように10%を越える量もちいてはいない。これらの再生セメントはいわば不焼成混合セメントとも云えるものである。

- タイプⅠの特徴：生コンスラッジは低温乾燥では高炉水滓粉との反応速度が遅いので、

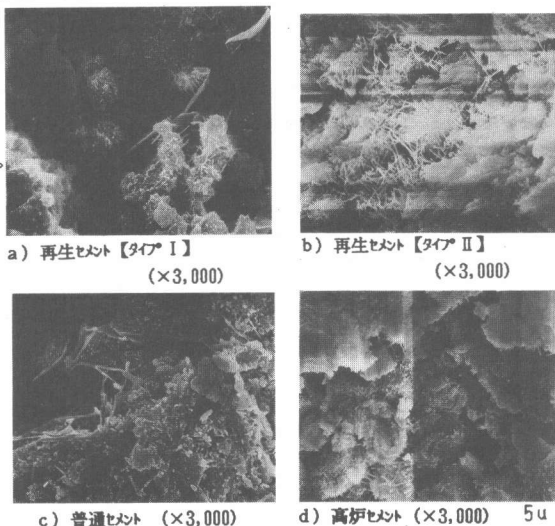


写真-1 セメント水和物の電子顕微鏡写真 (材令7日)

通常の乾燥を行うよりは若干高い 200℃前後で少し時間をかけて乾燥加熱を行うと、スラッジ中の水和物であるエトリンガイトが脱水分解することにより非晶質化され、その結果高炉水滓粉末との水和反応速度が促進される。

○タイプIIの特徴：コンクリート砕砂は、廃コンクリートをクラッシャーで30mm以下程度に破砕し、その破砕物から5mmふるい通過分をとり出したもので、中にはコンクリート中のモルタル分の殆どが含まれている。生コンスラッジのように高温乾燥熱処理は必要ではなく、通常の乾燥と粉砕により高炉水滓粉末との水和が生じる。原料としての廃コンクリートは水和物の量が多いのが好ましいので、通常は富配合のコンクリートである道路舗装や、セメント二次製品の廃材を利用している。

2.3. 再生セメントの性状

表-1 再生セメントの性状試験結果 (JIS R 5201, 5203に準じて)

再生セメントの性状試験結果を表-1に示した。参考までに高炉セメントB種、C種のJIS規格値を示したのがタイプI、タイプIIともその基準値を満足している。この表によれば再生セメントのブレン値は少し高く、特にタイプIの値は高いが、図-5で判るようにコンクリートの硬化乾燥収縮において別段問題とはならない。(粉末度を変化させて乾燥収縮との関係を求めた結果からブレン値が8,000 $\alpha\text{f}/\text{g}$ 以下であれば高炉セメントより収縮が小さい。) モルタル強度試験結果において、高炉B種のJIS基準値にくらべてタイプIでは7日強度で上回るものの、3日、28日強度では若干低い。またタイプIIでは3日、7日強度ともに上回るものの28日強度では若干下回っている。いずれにしてもタイプIとタイプIIとの差はごくわずかである。

セメントの種類	項目	化学分析値 (%)							比重	始発時間 (時間-分)	終結時間 (時間-分)	ブレン値 ($\alpha\text{f}/\text{g}$)※	安定性
		ig loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃					
タイプI		1.9	29.2	10.6	1.6	49.4	4.2	2.4	2.77	1-02	8-54	6,550	良
タイプII		2.5	32.4	13.0	2.9	40.3	5.0	2.2	2.83	3-48	7-08	5,370	良
高炉セメント JIS規格	B種	3.0以下	—	—	—	—	6.0以下	4.0以下	—	60分以後	10時間以内	3,000以上	良
	C種	3.0以下	—	—	—	—	6.0以下	4.5以下	—	60分以後	10時間以内	3,300以上	良

※ ボロシチーによらない測定

タイプIIともその基準値を満足している。この表によれば再生セメントのブレン値は少し高く、特にタイプIの値は高いが、図-5で判るようにコンクリートの硬化乾燥収縮において別段問題とはならない。(粉末度を変化させて乾燥収縮との関係を求めた結果からブレン値が8,000 $\alpha\text{f}/\text{g}$ 以下であれば高炉セメントより収縮が小さい。) モルタル強度試験結果において、高炉B種のJIS基準値にくらべてタイプIでは7日強度で上回るものの、3日、28日強度では若干低い。またタイプIIでは3日、7日強度ともに上回るものの28日強度では若干下回っている。いずれにしてもタイプIとタイプIIとの差はごくわずかである。

3. 再生セメントを用いたコンクリートの性状

再生セメントを用いたコンクリートの各種特性についての実験結果を以下に示す。なお、使用骨材の性状及びコンクリートの配合の代表的なものをそれぞれ表-3、表-4に示した。

3.1. 細骨材率及びスランプと単位水量との関係

表-4によれば、それぞれ同じAE減水剤を使用し同一スランプにおいて適正なワーカビリティが得られるS/Aは、再生セメントを用いたコンクリートの場合には高炉B種を用いたコンクリートに比べて5~6%小さくなる。材令4週における圧縮強度が180 Kg/cm^2 程度の配合のスランプと単位水量との関係を示したものが図-1で、これによれば高炉セメントの場合に比べて再生セメントの方が平均的に単位水量がタイプIで5Kg、タイプIIで2Kg程度多い。これらは、単位セメント量、セメントの絶体容積及び粉末度の差が影響しているとみられる。

表-3 実験に用いたコンクリート用骨材の性状

項目	種類	F.M	最大寸法 (mm)	絶乾比重	吸水率 (%)	実積率 (%)	洗い試験により失われる量 (%)	有機不純物	単位容積質量 (Kg/L)
細骨材	山砂	2.72	5	2.53	1.6	—	2.0	合格	1.61
粗骨材	山砂利	6.83	25	2.59	0.8	63.3	0.3	—	1.64

表-2 再生セメントの強度試験結果 (JIS R 5201)

セメントの種類	項目	ワーカビリティ (mm)	圧縮強度 (Kg/cm^2)			
			3日	7日	28日	91日
タイプI		205	59	138	265	326
タイプII		220	68	133	252	316
高炉セメント	B種	239	108	174	375	431
	JIS B種	—	60以上	120以上	290以上	—
	JIS C種	—	50以上	100以上	280以上	—

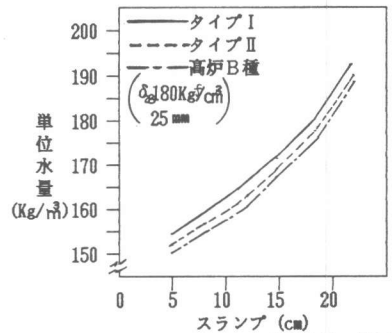


図-1 スランプと単位水量の関係

表-4 実験に用いたコンクリートの配合 (スランプ15cm ϕ 28 180 Kg/cm^2)

セメントの種類	水セメント比 W/C	細骨材率 S/a	単位量 (Kg/m^3)				AE減水剤
			セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	
タイプI	61	40	279	170	707	1078	0.558
タイプII	60	41	280	168	727	1067	0.560
高炉B種	68	46	246	167	840	1002	0.492

3.2.1. 材令と強度との関係

コンクリートの圧縮強度と材令の関係を図-2に示す。これによれば等強度の得られる配合のコンクリートでは、初期材令から長期材令強度発現の傾向は再生セメントはタイプIもタイプIIも高炉セメントB種と殆ど差はない。

3.2.2. セメント水比と圧縮強度の関係

C/W - 圧縮強度の関係を図-3に示す。これよりタイプI、タイプIIとは殆ど差がないものの、材令4週では高炉B種よりは低い、しかしその勾配はほぼ同じであり、材令13週ではその差は小さなものとなっている。

3.3. 凝結時間

プロクター貫入試験による経過時間-抵抗値の関係を求めたものが図-4で、これによれば初期の抵抗値の増加は高炉B種に比べてやや遅れる、タイプIIはタイプIに比べてさらに若干遅れる。しかし、500psi以降の貫入抵抗値ではその増加傾向はほぼ類似した関係にある。

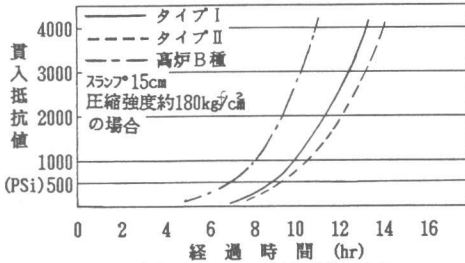


図-4 プロクター貫入試験による時間-抵抗値の関係

3.4. 硬化乾燥収縮

等強度の得られる配合のコンクリートでの硬化乾燥収縮について、JIS A 1129による測定結果を図-5に示す。これより再生セメントの収縮量は両タイプとも、高炉B種を上廻ることはない。

3.5. 凍結融解抵抗

等強度の得られる配合のコンクリートで ASTM C-666 に示される方法により行った結果を図-6に示す。これによれば再生セメントを用いたものはタイプI、タイプIIとも高炉B種よりも凍結融解による動弾性係数の低下率が若干大きいことが判る。

3.6. 水和熱

セメントの水和熱について JIS R 5203 による測定結果を表-5に示した。これによればセメントの単位量当たりの水和熱量は、いずれの材令においても再生セメントが最も低い値を示し、中庸熱セメントよりも低いのが大きな特徴となっている。しかしこれはセメントの単位量当たりの発熱量であるので、実用

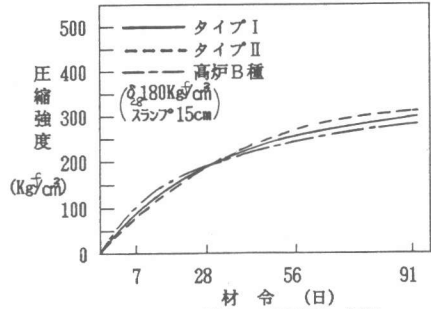


図-2 材令-圧縮強度の関係

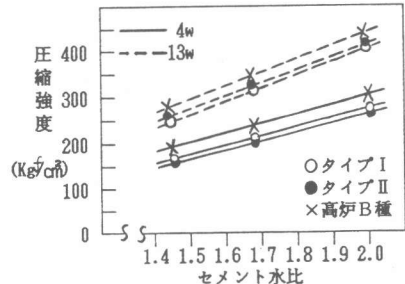


図-3 C/W-圧縮強度の関係

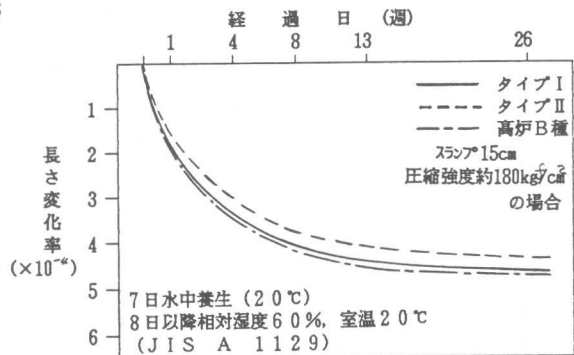


図-5 材令とコンクリートの乾燥収縮量との関係

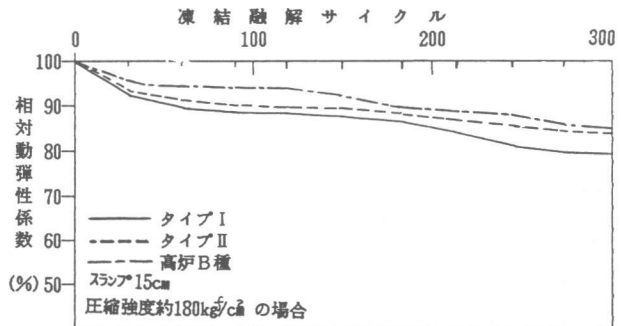


図-6 凍結融解試験結果

的には、等強度のえられる配合のコンクリートと比較する必要があると考え、材令28日で等強度の得られる配合について表-5の結果をもとにコンクリート1m当たりの発熱量を、普通セメントの場合を100として相対比率(%)であらわしたものを表-6に示した。

表-5 セメントの水和熱

セメントの種類	未水和セメントの溶解熱 (Ca Δ /g)	水和熱 (Ca Δ /g)		
		7日	28日	91日
タイプI	508.0	37.6	52.4	59.3
タイプII	506.1	30.6	44.5	52.4
高炉セメントB種	608.3	62.5	80.2	85.0
普通ポルトランドセメント	627.1	75.4	88.0	95.3
中庸熱セメント	593.9	62.7	73.5	79.8

表-6 等強度の得られるコンクリート水和熱比 (計算値)

セメントの種類	単位セメント量 (Kg/m 3)	水和熱比 (%)		
		7日	28日	91日
タイプI	279	60.0	71.6	74.8
タイプII	280	49.0	61.0	66.4
高炉セメントB種	246	87.9	96.6	94.6
普通ポルトランドセメント	232	100	100	100
中庸熱セメント	232	83.2	83.5	83.7

この結果によれば、再生セメントは等強度(材令28日)コンクリートにおいていずれの材令も中庸熱セメントに比べても十分に低い、また普通セメントや高炉B種に比べて発熱量は可成り小さいことが認められる。

3.7. 中性化

等強度配合における中性化の状況を示したものが写真-2で、測定結果を表-7に示す。これによれば再生セメントを用いたコンクリートの方が表面からの中性化は若干早いことが認められる。

4. まとめ

再生セメントの特徴とそれを用いたコンクリートの一般的特徴についての試験結果を示した。これらの結果から、

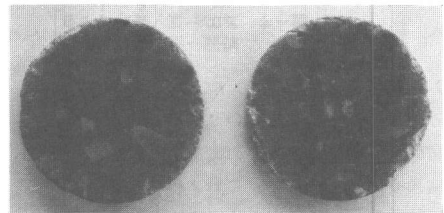
- ① 再生セメントを用いたコンクリートでは、高炉セメントB種に比べて材令28日で等強度を得るためのセメント量が若干多くなることが認められる。しかし、コンクリートの長期強度は高炉B種に比べて増伸する傾向にあるので、長期材令で配合設計をおこなえばセメント量はそれほど増量しなくともよくなる。
- ② 硬化乾燥収縮では材令28日等強度コンクリートにおいて高炉B種と差がない。
- ③ 凍結融解試験の結果では高炉B種に若干劣る。
- ④ 表面からの中性化に若干劣る。
- ⑤ 水和熱の点では中庸熱セメントに優るとも劣らない性状を有している。

以上のことから、再生セメントは簡易コンクリートに十分使用し得るし、地中部のコンクリート、例えば基礎・杭など、特にマスコンクリートには有効なセメントであると云える。

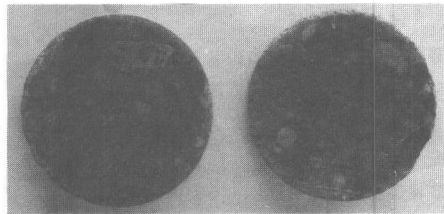
また、地上部分についてはモルタル仕上など表面処理を行うことで十分な対応ができるものである。

表-7 中性化深さ測定結果

セメントの種類	中性化深さ (mm)			
	3ヶ月	6ヶ月	1年	2年
タイプI	1.8	3.5	4.6	4.9
タイプII	1.7	3.6	4.8	5.2
高炉セメントB種	1.3	2.4	2.8	3.5
普通ポルトランドセメント	1.1	1.8	2.0	2.3



a) 再生セメント [タイプI] b) 再生セメント [タイプII]



c) 普通ポルトランドセメント d) 高炉セメントB種
写真-2 中性化の状態
(1ヶ月養生後屋外暴露1年のもの)

(参考文献)

- 1) 向井毅ほか:『破砕物およびそれを用いたコンクリートの性質に関する研究』セメント技術年報, 35巻, 1981, pp.150~153, セメント協会
- 2) 笠井伍朗, 吉兼亨:『生コンクリート工場の廃水より回収したスラッジを添加したコンクリートの性状について』セメント技術年報, 26巻, 1972, pp.310~321, セメント協会
- 3) (社)日本コンクリート会議回収水研究委員会:『回収水研究委員会報告書』, 1975, 日本コンクリート工学協会