

[217] スラッジ等の産業廃棄物の再利用に関する一実験

正会員 ○依田 和久 (芝浦工業大学大学院)
正会員 十代田知三 (芝浦工業大学工学部)

1. まえがき

近年の環境問題・省資源・省エネルギーの観点から、生コン工場から発生するスラッジや建築物解体時に発生するコンクリート塊に対して従来の単なる廃棄に代わる新しい処理方法が模索されてきた。スラッジ水についてはある程度まではコンクリートに添加しても問題はないとされているが、スラッジ発生量に比べて処理能力が小さい。そこで、スラッジ処理・再利用の一方法として、圧搾脱水したスラッジケーキを乾燥後粉砕し、高炉スラグと混合し、化学刺激剤を添加したセメント（以下再生セメントという）が開発された。コンクリート塊は粉砕して骨材（以下再生骨材という）として使用する規準がすでに提案されている。これら再利用の材料を用いたコンクリート（以下再生コンクリートという）を使用することができれば、一連の建設行為（建設-解体）にサイクルが完成し有効である。

本研究はこの再生セメント、再生骨材およびそれらを用いたコンクリートの基礎的性状を把握し、実用上の適用範囲を明らかにすることを目的とする。本報告は、まず基礎的段階としてワーカビリティ、強度乾燥収縮などについて実験・検討したものである。

2. 実験概要

- 2.1 使用材料および調合 表1～表5に示す。
- 2.2 試験項目 表6に示す。

表1 セメントの物理試験成績表

項目	セメント				
	普通	再生	高炉C種*		
比重	3.14	2.79	2.99		
比表面積 (cm ² /g)	3340	4560	3970		
凝結	水量 (%)	28.3	37.5	28.8	
	始発 (t)	2-3.4	4-2.5	3-2.4	
	凝結 (t)	4-4.1	6-4.5	4-4.8	
	室温 (°C)	20.7	20.1	20.0	
安定性	良	良	良		
フロー値	261	230	250		
強度 Kgf/cm ²	曲げ	3日	37	15	18
		7日	53	31	34
		28日	70	55	69
	圧縮	3日	165	71	69
		7日	265	138	141
		28日	417	240	365

*参考値

表2 セメントの化学分析結果

項目 ()	普通	再生	高炉C種
ig. loss	0.6	1.6	0.8
insol	0.1	16.1	0.5
SiO ₂	21.8	23.0	28.4
Al ₂ O ₃	5.1	8.5	11.2
CaO	64.3	40.6	49.8
Fe ₂ O ₃	2.8	2.0	1.5
MgO	1.8	3.8	4.0
SO ₃	2.0	2.1	2.2
Na ₂ P	—	0.3	—
K ₂ P	—	0.6	—
Total	98.5	98.6	98.4

表3 骨材の試験成績表

	骨 骨 材					
	普通A	普通B	普通D	再生R	再生R	
産地名	木更津	大井川	富士川	仁淀川	T社製	
最大寸法	5	20	25	25	20	
比重	絶対	2.28	2.49	2.62	2.64	2.41
	表乾	2.43	2.55	2.65	2.67	2.50
吸水率 (%)	6.10	2.37	1.20	2.12	3.89	
単容重	1.50	1.59	1.63	1.68	1.44	
実積率 (%)	65.6	65.4	62.2	64.3	62.1	
粗粒率	2.84	6.90	6.81	6.95	6.80	

表4 略号

略号	セメント混合率 (%)		
	再生	普通	
セ	0	100	
メ	25R	25	75
	50R	50	50
	75R	75	25
ン	100	0	
ト	0	100	
粗骨材	Na	普通粗骨材A	
	Nb	普通粗骨材B	
	Nd	普通粗骨材D	
	R	再生粗骨材	
コンクリート	○ - ○ セメント略号-粗骨材略号 *粗骨材は共通		

表5 調合条件

シリーズ	モルタル 略号	水セメント比 (%)		砂セメント比 (%)	単位水量 (kg/cm ³)		
		重量	容積				
III	00R	55		200	288		
	50R	58	1.75	209			
	100R	61		220			
IV	コンクリート	水セメント比 (%)		細骨材率 (%)	単位水量 (kg/cm ³)		
	略号	重量	容積				
	00R-Na	60	1.88			37.6	
IV	50R-Na		1.80	37.2	196		
	00R-Na		1.71	36.7			
IV	N-Na	70	2.21	49.3	208		
	N-R						
V	00R-Na	60	1.88	34.6	196		
	25R-Na					1.83	34.3
	50R-Na					1.80	34.2
	75R-Na					1.75	33.9
	00R-Na					1.72	33.6
VI	N-Na	70	2.21	48.1	208		
	N-Na					2.20	47.3

表6 試験項目

シリーズ	試験項目
I	骨材の破砕強度試験 (BS812)
II	モルタルのブリージング試験
III	モルタルの乾燥収縮試験
IV	コンクリートの骨材とセメントの組合せによる強度比較
V	コンクリートの再生セメントと普通セメントの混合率による強度比較
VI	コンクリートの養生条件による強度比較

3. 実験結果および考察

3.1 セメントの比較

再生セメントを普通セメントと比較すると以下ようになる。

物理的性質を表1に示す。比重は小さく、比表面積が大きい。フローが小さいのはこれが主な原因である。凝結は始発・終結ともにおよそ2時間遅い。また、曲げ強度は材令7日で5.8%、28日で7.8%、圧縮強度は材令7日で5.2%、28日で5.8%となっている。すなわち、早期材令では強度の発現が悪いが4週では良くなり、混合セメントの特性に似ている。

化学成分を表2に示す。CaOの含有率が低く、不溶残が多い。

3.2 粗骨材の比較

再生粗骨材を普通粗骨材と比較すると以下ようになる。

表3より、比重が小さく、吸水率が大きい。図1より破碎率が高いことがわかる。これは、再生粗骨材にはもとのコンクリート（以下原コンクリートという）においてモルタル分であったものが含まれているためと考えられる。なお、普通粗骨材NaはNbに比べて破碎率がかなり高い。

3.3 モルタルの比較

再生セメントを用いたモルタルを普通セメントを用いたモルタルと比較すると以下ようになる。

(a) ブリージング 図2より、いずれの水セメント比の場合も、凝結が遅いにもかかわらずブリージング時間は約半分で終了しておりブリージング水総量は1/3~1/4となっている。これは再生セメントの比重が小さいので粒子が沈みにくく、比表面積が大きいので保水性が高くなるためであろう。

(b) 乾燥収縮 図3より、再生セメント無混入のモルタルと50%混入のものの収縮率は、ほとんど変わらないが、再生セメントのみのモルタルの収縮率がかなり大きくなっている。これは再生セメントの比表面積が大きい、モルタルの空気量が多く（無混入が3.4%、50%混入が3.5%、再生のみが4.8%）、そして強度が最も低いことなどによると考えられる。また、50%混入が無混入とほとんど変わらないのは普通セメントとの混用の影響を受け有利になったためと考えられる。

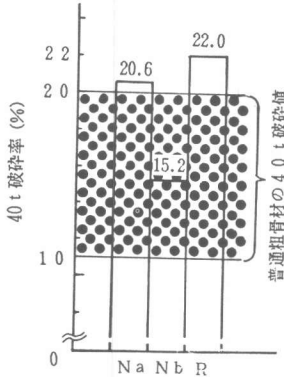


図1 各粗骨材の40t 破碎率

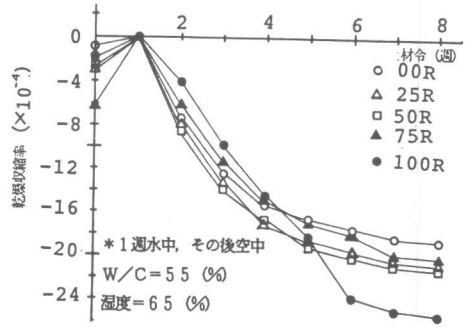


図3 材令と乾燥収縮の関係

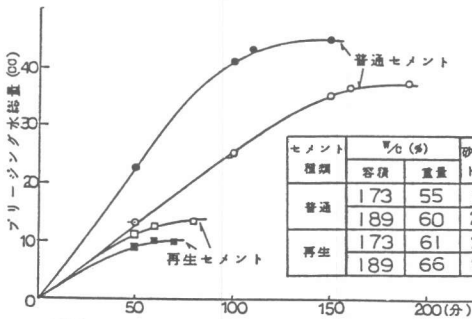


図2 モルタルのブリージング水と時間との関係

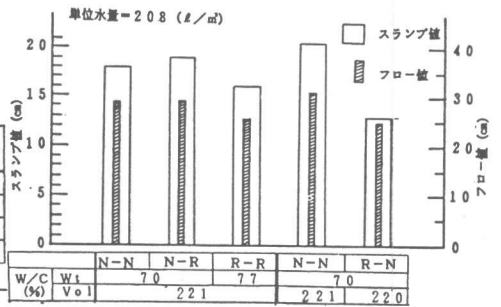


図4 各種コンクリートのスランプ、フロー値

3. 4 フレッシュコンクリートの性状比較

再生・普通セメントと再生・普通粗骨材Naとを組み合わせると以下ようになる。

図4より、粗骨材を一定とした場合、R-NaをN-Naと比べるとスランプ、フローとも小さな値となっている。これは再生セメントの比表面積が大きく比重が小さいため、保水性が高くなり、粘性が増すためと考えられる。もったりとした様相から、分離抵抗性が大きいと言えよう。

セメントを一定とした場合、N-RはN-Naに比べ、スランプ、フローはあまり変わらないが、がさついた様相を示し、ワーカビリティは悪い。これはこれまでも言われているように再生骨材の粒形と表面状態にと考えられる。

上記より、再生コンクリートそのものであるR-Rは、骨材の短所をセメントの長所で補完するため、N-Nに比べ、ワーカビリティはやや良くなる。特に単位水量とW/C重量比を一定とした場合、ペースト量が増すのでこの傾向が強まる。

3. 5 コンクリート強度の比較

(a) セメントと骨材の組合せによる比較 図5より、粗骨材一定とした場合、再生セメントのみのコンクリートが無混入のものに比べると4週圧縮強度は低く、ほぼ半減する。これはセメント強度試験結果における差(3.1)より大きい。

セメントを一定とした場合、再生粗骨材を用いたコンクリートを普通粗骨材Naを用いたものと比べると4週圧縮強度はNaに対して約15%、Nbに対して約5%ほど増加する。これは普通粗骨材Naも破碎率が高く(図1)、吸水率が大きく、かつ比重が小さい(表3)ことに見られるように、その品質が低いものであったためと考えられる。また、コンクリートの種類別による引張強度の違いは圧縮強度の場合とほぼ同様な傾向が得られた。このことは圧縮強度と引張強度との関係を示す図6からもうかがえる。すなわち、この関係にセメント・骨材の差異の影響は認められない。

(b) 再生セメントの混合率(重量比)による強度の比較 無混入のコンクリートに対する普通セメントに再生セメントを混入したコンクリートの圧縮強度比は、図7より、材令が経つにつれて大きくなっている。また、高炉セメントC種を用いたコンクリートの強度比が50%混入のものとはほぼ等しいことは興味深い(図8)。

1週圧縮強度比について無混入から75%混入までは平均で20%ずつ低下しているが、75%と再生のみの間には大差ない。4週圧縮強度比については25%から75%混入までの伸びが著しく、無混入と25%混入の差はわずか9%で、25%混入から再生のみまでは平均で約16%ずつ低下する。13週圧縮強度比については無混入と25%混入との差はわずか2%で、無混入と50%混入との差も10%となるなど、25%から75%混入までの伸びも4週同様、著しい。26週圧縮強度比については25%混入が無混入よりわずかながら、高くなっている。また、25%混入から再生のみまでの伸びは13週のものと同様な傾向を示し、今まではほど高くない。また、再生のみは普通セメントと混用したものに比べ、伸びは小さい。以上のことにより、普通セメントを混用使用したコンクリートは標準養生の場合、スラグを含む再生セメントの潜在水硬性などが普通セメントの刺激を受けると思われ、有利である。

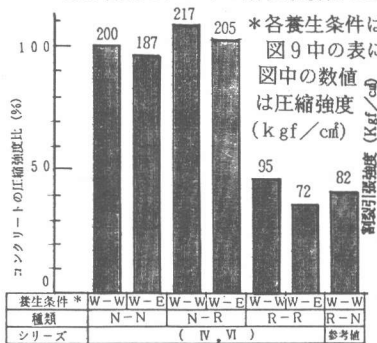


図5 各種コンクリートの養生条件と圧縮強度比(材令4週間)

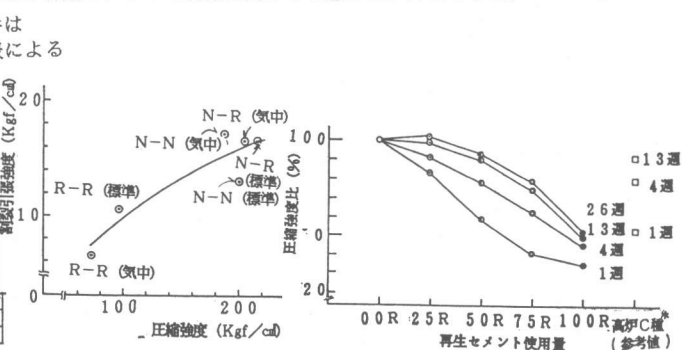


図6 圧縮強度と割裂引張強度との関係
図7 材令別にみた、無混入に対する再生セメント各使用量の強度比(標準養生)

(c) 養生条件による強度の比較 各養生条件の違いによる13週圧縮強度は図9より、W-W、W-E、W-D、D-Dの順となっている。各養生条件について再生セメントのみの割裂を行い破断面を観察してみると、D-Dは各養生の中で一番もろく全体が白色であった。初期養生の有無により、圧縮強度に約30 kgf/cm²の差を与えている。W-Wについては、全体が緑色であった。これは標準養生のみに見られ高炉スラグ中の極微量の成分の影響と考えられる。このことより、再生セメント使用にあたっては、十分な湿潤養生が必要であり、それにより初めて再生セメントの持つ潜在水硬性が発揮されると考えられる。

4. まとめ

水セメント比、単位水量、単位粗骨材量を一定としたコンクリートで比較した場合、次のようになった
 (1) ワークビリティ 再生セメントを用いたコンクリートを普通セメントを用いたものと比べると、スランプ、フローが小さく、もったりとした様相を示しており分離抵抗性はよくなった。

再生粗骨材を用いたコンクリートを普通粗骨材Naを用いたものと比べると、スランプ、フローが小さくがさついた様相を示した。

したがって、再生セメントと再生粗骨材を用いた再生コンクリートは、骨材の短所をセメントの長所で補完するため、普通セメント、普通粗骨材を用いたものに比べ、ワークビリティは遜色ないものとなった

(2) 強度 再生セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を普通セメントを用いたものと比べると、その強度比は1週では35%、4週では45%、13週では48%、26週では50%とわずかずつであるが材令に伴って向上した(図9)。

普通セメントを混合使用する場合、混合率と強度比との関係は、4週では直線的であるが、13週になると、25%再生セメントを混入したコンクリートは無混入のものに比べあまり低下せず、50%混入のもので10%しか低下しない。すなわち強度上、普通セメントとの混合使用が有利となる(図9)。しかし、この傾向は標準養生に限りみられ乾燥条件が含まれると直線的となる(図10)。

なお、再生セメントを用いたモルタルの乾燥収縮は、普通セメントを用いた同一調合のものに比べ、大きかった。しかし、この差は普通セメントを混合したり、初期養生を注意することによって、ある程度押さえることができる。

以上、このような基礎的性状をもつ再生セメントや再生粗骨材は、適材適所に積極的に用いられることが望ましい。特に再生セメントは早強性がないものの、養生さえ良ければ、普通セメントを少しでも混入すると、相乗の効果がある。良質の再生粗骨材は低品質の普通粗骨材との差があまりないようである。

最後に本研究を行うに当たり、ご協力いただいた多くの方々に感謝いたします。

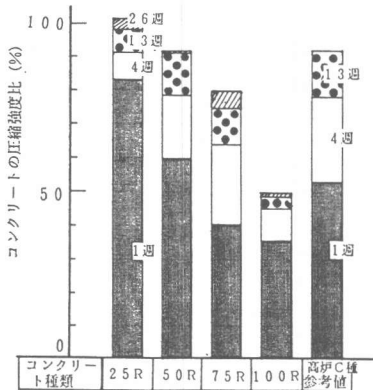


図8 普通コンクリートに対する各種コンクリートの圧縮強度比
参考文献

略号	養生条件		
	材令5日まで	5日~12週	12~13週
W-W	標準	標準	標準*
W-D	標準	屋内気中	標準*
D-D	屋内気中	標準*	標準*
W-E	標準	屋外暴露	標準*

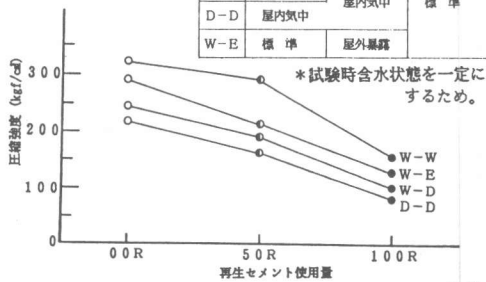


図9 養生別にみた、再生セメント各使用量におけるコンクリートの13週圧縮強度

- 1) 笠井・斉藤：スラッジ混入コンクリート，コンクリート工学 Vol.13, No.9, 1975年 9月
- 2) 建築廃棄物処理再利用委員会：再生骨材および再生コンクリートの使用規準(案)，建築業協会 1977年
- 3) 依田彰彦：研究論文—産業副産物高炉スラグのコンクリート用セメント、混和材、骨材への有効利用に関する実験研究，1983年 9月
- 4) 依田和久・十代田：再生セメントを用いた再生コンクリートの性状(1)，建築学会大会号 1985年