

◆ リサイクル特集 ◆

都市ごみ焼却灰等を主原料としたセメントと コンクリートの性状試験

寺田 剛* 明嵐政司**

1. はじめに

産業活動の活発化・高度化と生活レベルの向上に伴い、排出される廃棄物の量は増加の一途を辿っている。国内における都市ごみの発生量は1995年には5000万tを超え、その焼却灰も約400万t発生している。また、これら焼却灰はクロムや鉛などの有害元素が含まれていることから、「特別管理一般廃棄物及び特別管理産業廃棄物の処分又は再生の方法として厚生大臣が定める方法」(平成4年厚生省告示第194号)では、「管理型」の埋立て処分が義務づけられているが、処分地の整備や輸送費用などの問題があり、焼却灰を資源として活用することが望まれている。一方、下水処理の過程で発生する脱水汚泥も都市ごみと同様生活廃棄物の一つとして、2000年には年間800万tを超えるものと予想され、その処分方法も含めた資源化が切望されている。これら社会的要請に応えるべく、平成5~8年に通産省から委託されたNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)と民間協力会社との共同研究で、都市ごみ焼却灰と下水汚泥を主原料とする「環境負荷低減型セメント(通称、エコセメント)」が開発され、現在その実証運転に入っている。

また、平成6~7年に建設省総合技術開発プロジェクト「省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発」の一環として行われた「省エネルギー型土木工法の利用技術の開発」において、廃棄物を再利用することにより、省資源・省エネルギーおよびCO₂削減に有効である3種類の省エネセメントの利用技術を開発した。その成果は「省エネセメントの利用技術の開発に関する報告書-研究成果および利用技術マニュアル(案)-」¹⁾にまとめている。ここで検討したA~C型の3種類の省エネセメントのうち、A型省エネセメントが、都市ごみ焼却灰等の廃棄物を主原料としたエコセメ

ントである。セメント1t 製造するのに年ごみ焼却灰を主とし、下水汚泥焼却灰等の廃棄物を合わせて500kg程度以上クリンカーの原料として用いたものである。

しかし、このA型省エネセメントは、原料に山來して塩化物イオンを0.5~1%程度含有しているために、普通セメントと同様に使用すると鉄筋が腐食する可能性があるため、利用マニュアルでは無筋コンクリートおよび地盤改良固化材に限定している。しかしその後、A型省エネセメントの製造技術が進展し、セメント中の塩化物イオン量の低減化が行えるようになってきた。

本報告書では、塩化物イオン量が0.1%以下に低減されたA型省エネセメント(以下、低塩素型省エネセメント)と、このセメントを用いたコンクリートの基本性状試験を行ったので、その結果について述べるものである。

2. A型省エネセメントの低塩素化

従来のA型省エネセメントは、都市ごみ焼却灰に含まれる塩素(Cl)を積極的に利用し、速硬性の高いカルシウムクロロアルミニート($C_{11}A_7(11CaO \cdot 7Al_2O_3) \cdot CaCl_2$)として、Clを固定させたものである¹⁾。これに対して、低塩素型省エネセメントは、クリンカーの焼成過程において含有されるアルカリなどの成分を塩化物として揮散させることで、 Al_2O_3 を $C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)$ として生成させ、クリンカー中のCl-量を、ENV197/ISOのセメント規格で規定されている0.1%以下に低減することが可能となっている²⁾。しかし、我が国のポルトランドセメントのJIS規格(JIS R5210-1997)に規定されている塩化物イオンの0.02%は満足していない。

3. 低塩素型省エネセメントの物理化学的特性

低塩素型省エネセメント(記号:E)と比較のために、普通ポルトランドセメント(記号:N)および高炉セメントB種(記号:B)について、化学分

析試験、鉱物試験、および物理試験を行った。

表-1に化学組成を、表-2に鉱物組成を、表-3に物理的性質を示す。EはCl量が0.04%であり、従来のA型省エネセメントが0.50%だったのに対して大幅に低減されている。構成鉱物はNと同じC₃S(3CaO·SiO₂)、C₂S(2CaO·SiO₂)、C₃AおよびC₄AF(4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃)であるが、C₃AがNに比較して多いため、SO₃を4%程度とすることにより、凝結始発時間が180分程度に制御されている。

4. 低塩素形省エネセメントを用いたコンクリートの基本性状

4.1 使用材料

1) セメント：普通ポルトランドセメント、

高炉セメントB種、低塩素形省エネセメント

2) 細骨材：静岡県小笠産陸砂(最大寸法5mm、表乾比重2.59)

3) 粗骨材：埼玉県秩父産碎石(最大寸法20mm、表乾比重2.72)

4) 混和剤：AE減水剤(リグニンスルфон酸系)および空気量調整剤

4.2 試験項目およびその方法

表-4にコンクリートの試験項目およびその方法を示す。

4.3 コンクリートの配合

表-5にコンクリートの配合を示す。

水セメント比は45、55および65%の3水準

表-1 セメントの化学成分

セメント 種類	化学組成									
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	P ₂ O ₅	Cl
N	0.6	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	1.6	0.7	0.1	0.00
B	0.5	25.4	8.2	1.9	55.3	3.4	1.7	0.52	—	0.00
E	0.3	17.7	8.3	4.0	61.5	1.9	3.7	0.3	1.2	0.04

N:普通ポルトランドセメント、B:高炉セメントB種、E:低塩素形省エネセメント
R₂O:全アルカリ(Na₂O+0.658K₂O)

表-2 セメントの鉱物組成

セメント種類	C _s S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
	N	53	24	8
E	45	16	15	12

表-3 セメントの物理試験結果

試料	密度 (g/cm ³)	粉末度		安定性	凝結		
		比表面積 (cm ² /g)	(%)		水量	始発 (h·m)	終結 (h·m)
N	3.16	3,370	良	27.4	2-10	—	3-25
B	3.04	4,120	良	28.9	2-40	—	4-15
E	3.19	4,480	良	30.2	2-55	—	4-20

試料	圧縮強さ(N/mm ²)					曲げ強さ(N/mm ²)				
	1d	3d	7d	14d	28d	1d	3d	7d	14d	28d
N	11.8	26.4	43.6	52.9	61.6	3.4	6.9	7.4	8.2	9.2
B	7.8	20.8	34.4	47.3	59.8	2.4	6.3	5.9	7.8	9.0
E	12.2	25.9	36.7	45.8	50.4	3.6	5.2	7.1	7.8	8.1

表-4 コンクリートの試験項目

分類	試験項目	試験方法	水セメント比(%)			備考
			45	55	65	
フレッシュ コンクリート試験	スランプ	JIS A 1101	○	○	○	経時変化 ¹⁾ は、排出直後、 15,30,60,90分後に測定
	空気量	JIS A 1128	○	○	○	
	ブリーディング	JIS A 1123	○	○	○	
	凝結	JIS A 6204	○	○	○	
硬化コンクリートの 強度試験	圧縮および 静弾性係数	JIS A 1108 JSCE-G502	○	○	○	3,7,14,28,92日 コンプレッソメータ使用
	曲げ強度	JIS A 1106	○	○	○	28日
	引張強度	JIS A 1113	○	○	○	28日
	乾燥収縮	JIS A 1129	—	○	—	3,7,14,28,91日
硬化コンクリートの 耐久性試験	凍結融解抵抗性	JIS A 6204	—	○	—	200サイクルまで
	促進中性化	日本建築学会 ²⁾	—	○	—	28日養生後試験開始 1,4,8,13週
断熱温度上昇量試験		空気循環式断熱 温度上昇量装置	—	○	—	14日まで

1) 静置法による 2) 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)付録

表-5 コンクリートの配合

目標 スランプ	セメント 種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					空気量 調整剤 (C×%)
				W 水	C セメント	S	G	AE 減水剤	
8cm	N	45.0	44.0	156	347	786	1050	0.87	0.0050
		55.0	46.0	156	284	845	1042	0.71	0.0030
		65.0	48.0	156	240	899	1023	0.60	0.0030
	B	45.0	43.0	154	342	767	1067	0.86	0.0065
		55.0	45.0	154	280	826	1061	0.70	0.0065
		65.0	47.0	154	237	880	1042	0.59	0.0070
	E	45.0	42.0	158	351	747	1084	0.88	0.0055
		55.0	44.0	158	287	806	1077	0.72	0.0050
		65.0	46.0	158	243	859	1059	0.61	0.0050
18cm	N	45.0	46.0	176	391	781	962	0.80	0.0025
		55.0	48.0	176	320	843	959	0.80	0.0025
		65.0	50.0	176	271	898	943	0.68	0.0025
	B	45.0	45.0	178	396	754	968	0.99	0.0050
		55.0	47.0	174	316	824	976	0.79	0.0050
		65.0	49.0	174	268	879	961	0.67	0.0050
	E	45.0	44.0	178	396	744	995	0.99	0.0050
		55.0	46.0	178	324	805	993	0.81	0.0050
		65.0	48.0	178	274	859	978	0.68	0.0050

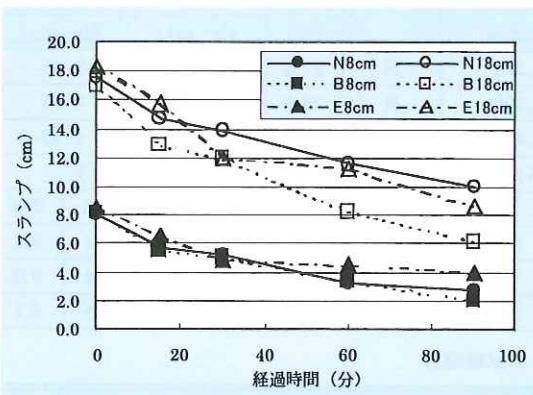


図-1 スランプの経時変化

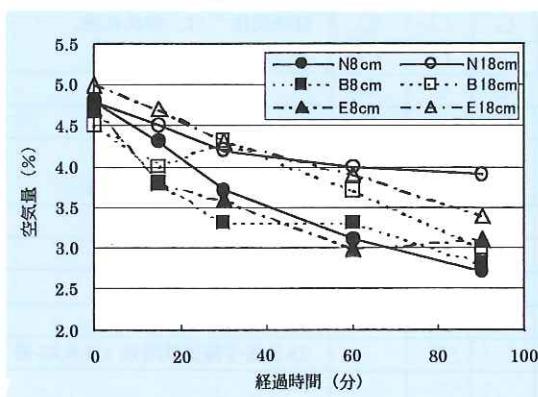


図-2 空気量の経時変化

とし、目標スランプを8±2.5cmおよび18±2.5cm、目標空気量を4.5±1.5%とし配合を選定した。Eは、表-3に示すように粉末度が4480cm²/gと高いため、単位水量および空気量調整剤を若干増加させることで、NおよびBを用いた場合と同様のスランプおよび空気量性状を示した。

なお、断熱温度上昇試験については、単位セメント量320kg/m³と固定し、水セメント比55%、スランプ18cmの条件にて実施した。

4.4 試験結果および考察

4.4.1 フレッシュコンクリートの性状

1) スランプおよび空気量

図-1および図-2にスランプおよび空気量の経時変化を示す。Eを用いた場合のスランプおよび空気量の経時変化は、NおよびBの場合とほぼ同等であることが認められた。

2) ブリーディング

図-3に最終ブリーディング率の測定結果を配合条件別に示す。いずれの配合条件においても、E用いた場合の最終ブリーディング率は、Nを用いた場合とほぼ同等であった。

3) 凝結

表-6に凝結試験結果を示す。いずれの配合条件においても、Eを用いた場合の始発時間および終結

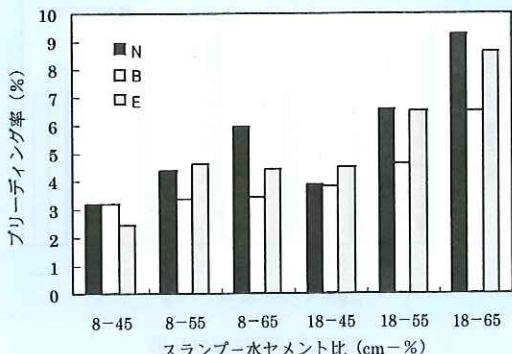


図-3 フリークリング試験結果

表-6 凝結試験結果

目標 スランプ	セメント 種類	W/C (%)	凝結時間(h・min)	
			始発	終結
8cm	N	45	5・25	7・15
		55	5・35	7・30
		65	5・50	8・15
	B	45	6・25	9・00
		55	6・30	9・35
		65	6・35	10・05
	E	45	7・30	9・55
		55	8・20	10・55
		65	7・50	10・40
18cm	N	45	5・45	7・25
		55	6・05	8・05
		65	6・20	8・30
	B	45	7・00	9・25
		55	7・00	9・25
		65	7・05	10・35
	E	45	9・05	11・30
		55	9・25	11・55
		65	9・00	12・05

時間は、他のセメントと比較して2~3時間程度長くなる傾向を示した。これは、EのSO₃量が、Nと比較して多いことが影響していると考えられる。

4) 断熱温度上昇

図-4に断熱温度上昇試験結果を示す。Eを用いた場合の断熱温度上昇は、材齢3日程度まではNと比較して高くなった。これは、EのC₃A量がNより多いことが影響していると考えられる。しかし、発熱がほぼ収束する材齢14日ではほぼ同等の温度上昇量を示した。

4.4.2 硬化コンクリートの性状

1) 圧縮強度

図-5にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。

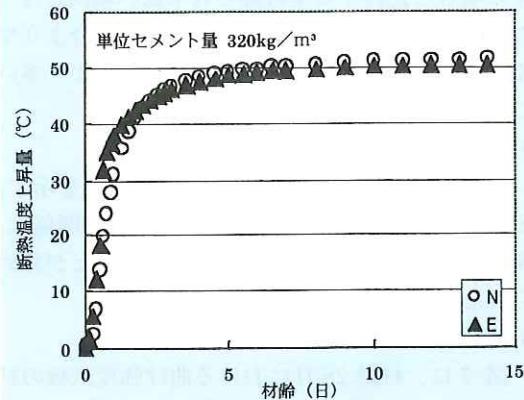


図-4 断熱温度上昇試験結果

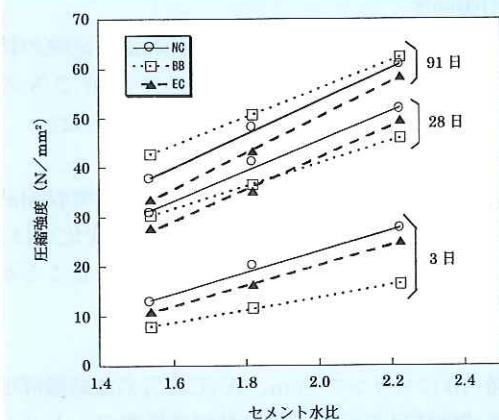


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係

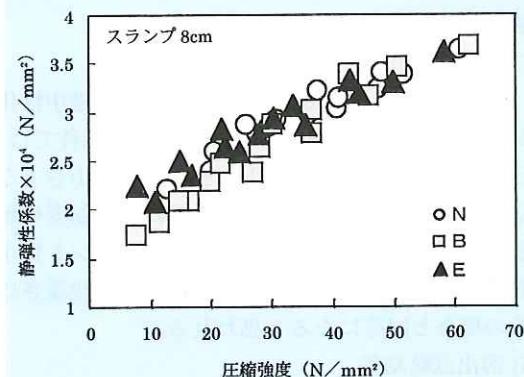


図-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

Eを用いた場合のセメント水比と圧縮強度の関係は、Nの場合と同様に一次式で近似でき、セメント水比則が成立することが認められた。また、同一のセメント水比において、Eを用いた場合の強度は、初期材齢ではBの場合より高くなつたが、

N の場合と比較する全材齢で若干低い傾向となつた。E を用いた場合の強度発現が N の場合よりやや小さい理由として、E の P_2O_5 量が N より多いことが考えられる。

2) 弾性係数

図-6 に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。E を用いた場合の圧縮強度と静弾性係数の関係は、N および B を用いた場合と同様であることが認められた。

3) 曲げ強度

図-7 に、材齢 28 日における曲げ強度試験の結果を示す。E の曲げ強度は W/C およびスランプに関係なく N の 90% であった。

4) 引張強度

図-8 に、材齢 28 日における引張強度試験の結果を示す。E の引張強度はスランプ 8cm で N の 90%、スランプ 18cm で N の 80% であった。

5) 乾燥収縮

図-9 にスランプ 8cm、W/C55% の乾燥収縮試験結果を示す。E を用いた場合の長さ変化率は、N および B を用いた場合とほぼ同等であることが認められた。

6) 凍結融解抵抗性

図-10 にスランプ 8cm、W/C55% の凍結融解抵抗性試験結果を示す。相対動弾性係数は、セメントの種類によらずほぼ同等であり、E を用いた場合も所定の空気量を導入することで、十分な凍結融解抵抗性が得られることが認められた。

7) 促進中性化

図-11 にスランプ 8cm、W/C55% の促進中性化試験結果を示す。水セメント比が同一の条件では、E の中性化深さは、N より大きく B より小さくなる傾向を示した。中性化は、一般に圧縮強度や緻密度と反比例関係にあるので³⁾、水セメント比を低減し圧縮強度を高めることで E の中性化深さは N の場合と同等になると思われる。

8) 溶出試験結果

溶出試験は、ロットの違う 2 種類の E とその原料となった焼却灰 2 種類およびそれぞれの E で製造したコンクリート 2 種類について、環境庁告示 46 号にて試験を行った。その結果を表-7 に示す。焼却灰からは鉛、六価クロム、銅の溶出が確認されたが、E および E 用いたコンクリートからは溶出が認められなかった。

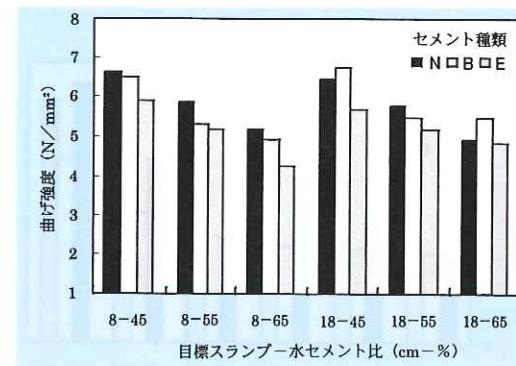


図-7 曲げ強度試験結果

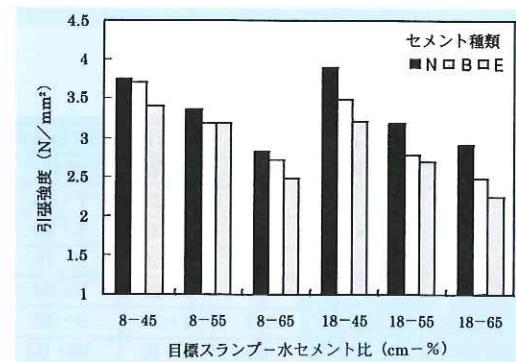


図-8 引張強度試験結果

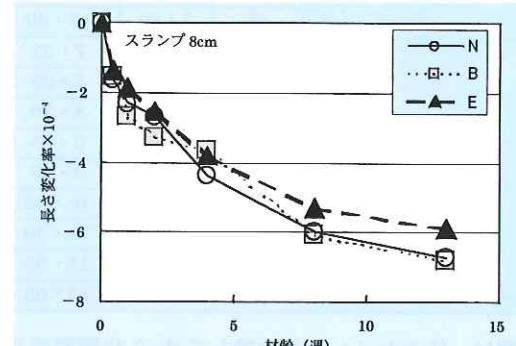


図-9 乾燥収縮試験結果

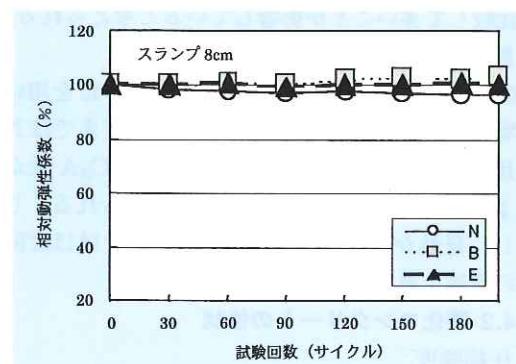


図-10 凍結融解試験結果

表-7 溶出試験結果

項目	E1	E2	Eコンクリート1	Eコンクリート2	焼却灰1	焼却灰2	土壤基準
カドミウム	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	0.01
鉛	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	1.2	3.1	0.01
六価クロム	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	0.05	0.05
砒素	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	0.01
総水銀	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	0.0005
セレン	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	0.01
銅	検出されず	検出されず	検出されず	検出されず	0.09	検出されず	—

5. おわりに

低塩素型省エネセメントを用いたコンクリートの基本性状は、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いた場合と比較して、凝結時間は遅いが、スランプ、空気量の経時変化、ブリーディング率および強度は材齢に関わらずほとんど変わらず、大きな相違もなく、同様に使用できる可能性が認められた。また、焼却灰からは鉛、六価クロム、銅の溶出が確認されたが、低塩素型省エネセメントおよび低塩素型省エネセメントを用いたコンクリートからはいずれの溶出も確認されず、土壤基準では安全上問題ないことが分かった。

なお、鉄筋コンクリートへ適用する際の重要な特性の一つである鉄筋腐食や実際のコンクリート構造物および製品に適用するための性状や耐久性の評価等については、未確認である。これらについては平成11年7月から東京都、麻生セメント(株)、住友大阪セメント(株)、太平洋セメント(株)および日立セメント(株)と共同研究「都市ゴミ焼却灰を用いたコンクリート材料の開発」を行っており、この中で評価確認を行う予定である。

最後に、本試験に用いたセメントを無償提供いただいた太平洋セメント(株)に感謝申し上げる次第である。

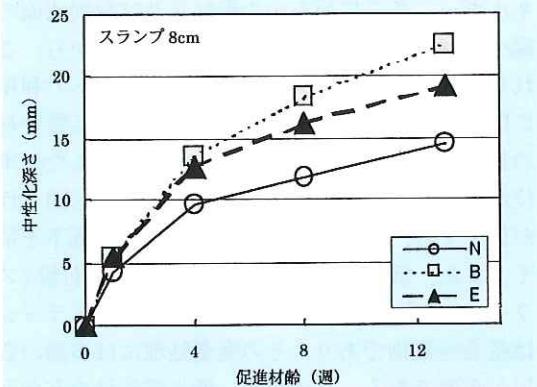


図-11 促進中性化試験結果

参考文献

- 1) 片桐清、坂本浩行、寺田剛：省エネセメントの利用技術の開発に関する研究、土木研究所資料第3496号、1997.3
- 2) 横山滋、中野卓、土田良明、牧巖：都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントクリンカーに及ぼすClの影響、第53回セメント技術大会講演要旨、pp.48-49、(社)セメント協会、1999
- 3) フライアッシュ研究小委員会、フライアッシュを混合したコンクリートの中性化と鉄筋腐食に関する長期的研究、コンクリートライブラリー、No.64、土木学会、1988.3

寺田 剛*



明嵐政司**



建設省土木研究所
道路部舗装研究室研究員
(前 材料施工部化学研究室研究員)
Masaru TERADA

同 材料施工部
化学研究室長
Seishi MEIARASHI