

エージング石炭灰を用いたリサイクル材としての力学特性

浅田 素之 村田 博一 川口 正人 栢山 広幸
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (土木総本部)

Mechanical properties of recycled material using aged coal ash

Motoyuki Asada, Hirokazu Murata, Masato Kawaguchi and Hiroyuki Tochiyama

埋立地でエージングされた石炭灰を有効利用すべく、5～17年前に埋め立てられた5種のエージング灰の力学特性を実験的に検討した。その結果、(1) 3～10%のセメントを添加した混合物は地盤材料として十分な強度を発現する、(2) 5種のエージング灰は均質化されたほぼ同一の材料とみなせる、などの結果を得た。また、(3) 自然含水比が30%を超えるエージング灰は混練中に泥状化を起すため処理工程での対策が必要となる、(4) 混合物の発現強度はセメント添加率、密度、材令で数式化でき、予測できる、(5) 高炉セメントの添加により高い強度が得られる、なども明らかとなった。以上を総合し、また供給可能量の高さや事前チェックの容易さなどを考え併せ、埋立地でエージングした石炭灰は地盤材料としての高いポテンシャルを持っていると結論できる。

Studies on mechanical properties have been carried out to develop effective methods of using coal ash aged for 5 to 17 years, so as to reduce the quantity requiring final disposal. The results are as follows; (1) Aged ashes mixed with 3 - 10% cement developed enough strength as ground materials, (2) five kinds of aged ash were recognized as homogenized materials, (3) ash with more than 30% water content must be handled carefully due to its easiness to become slurry state, (4) mixture strength can be predicted from cement additional rate, density, curing period, (5) blast furnace cement is suitable to get higher strength. Aged coal ash has merits of a large quantity available because it is stocked in landfills and of its quality to be easily tested beforehand. As a result, aged ash would be concluded to have high potential of geotechnical usage.

1. はじめに

ここで取り扱う石炭灰は石炭火力発電にともなって発生する焼却灰である。資源有効利用促進法（リサイクル法；平成3年4月26日法律第48号）で指定副産物に指定されており、事業者は石炭灰の利用を促進することが国から推奨されている。図-1に、1965年以降の電気業における石炭消費量の推移を示す¹⁾。1960年代後半には消費量が2,000万トンを上回っていた。石油へ代替によって1979年には700万トンにまで低下したものの、第二次石油ショック以降は、石油からの代替として増加に転じた。2009年度以降、世界的不景気等により一時減少したが、2011年度以降は東日本大震災により、再び増加傾向となった。

図-2に、1995年以降の電気業からの石炭灰発生量の推移を示す²⁾。石炭消費量の増加にともなって一貫して増加しており、東日本大震災以降は特に、

原子力発電からの転換によって発生量も増加したため、2013年には、約1,000万トンを記録した。図-2には、セメントの生産量も併せて示した³⁾。セメント生産は大量の石炭灰を受け入れてきたが、1996年の1億トン弱をピークに、減少の一途をたどり、2015年には、5,924万トンにまで減少している。

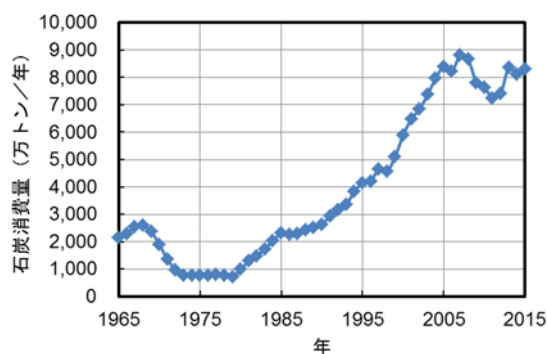


図-1 電気業における石炭消費量の推移

2015年の石炭灰受入量は760万トンであるので、セメントの13%が石炭灰であるが、セメント生産量の減少傾向を考えれば今までになかった活用方法を見いださねばならなくなっている。海面埋立資材としての利用は量的にも質的にも有望であるが、新たな埋立用地の確保は地元の合意を得るのに多大な時間と労力を要する。このため、一般的な地盤材料としての活用を考えてゆかねばならない。

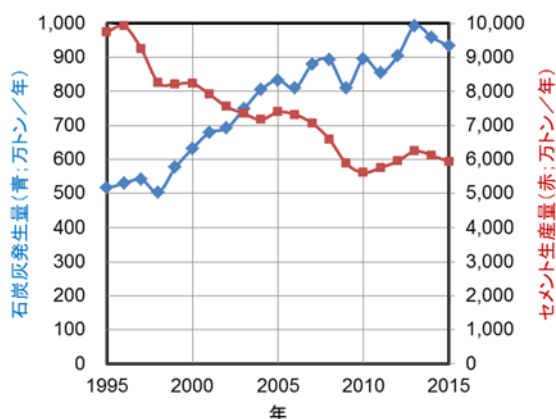


図-2 石炭灰発生量とセメント生産量の推移

石炭灰の活用は新生灰と呼ばれる発生直後のものが主となっている。その一方で、高炉スラグではエージング処理されたものが活用されている。石炭灰では利用を前提としたエージング処理は事例がないが、運輸省が約52,000m³の埋立て処分後の灰を公共岸壁の裏込材に使用した事例が報告されている⁴⁾。処分場に埋め立てられた石炭灰は降雨や空気中の二酸化炭素によってエージングできていると考えられ、化学的に安定化しているため新生灰に比較して用途も広いと思われる。既往の検討で、エージングによってほぼすべての成分の溶出濃度が低下することが分かっている⁵⁾。土木プロジェクトでは大量の資材を短期間に必要となるが、一般的な埋立処分地には数十万トンの石炭灰が保管されているため需要に対応でき、均質化も容易で、事前に配合試験もできる等のメリットがある。

石炭エネルギーセンターではエージング灰の活用促進を目的に、石炭灰混合材料有効利用ガイドライン（エージング灰（既成灰）編）⁶⁾が2016年に取りまとめられた。ガイドラインでは、処分場灰を含むエージング灰の利用に焦点をあて、これを原料とした石炭灰混合材料の品質評価ならびに活用方針を示している。しかしながら、エージング灰自体およびセメントを添加した混合物の力学特性が明らかに

なっておらず、本格的な活用にあたり、計画～設計～施工に必要な物性を明らかにする必要がある。

本報告では、東北電力と共同で実施した実際の処分場から採取したエージング灰の特性評価、およびエージング灰を用いた配合試験^{7),8)}について、主に力学特性を中心に検討した結果を報告する。

2. 試験方法

2.1 エージング灰のサンプリング～性質

エージング灰は、1か所の石炭火力発電所から運び込まれた2処分場の5地点からバックホーで採取し、そのまま密閉容器に保管した。表-1に、エージング灰の種類とエージング期間を示す。エージング期間の影響を検討するため埋め立て後5年未満から17年までの地点を選んだ。なお、埋立てられた灰の採取には自己硬化性による過大な強度発現や過湿状態による泥ねい化が懸念されたが、0.22m³バックホーによる掘削には全く問題がなかった。

表-1 エージング灰の種類とエージング期間

灰種	エージング期間
エージング灰 A	15～17年
エージング灰 B	8～15年
エージング灰 C	12年未満
エージング灰 D	12年未満
エージング灰 E	5年未満

サンプリング後、各試料はスコップで粗く破碎したのち、目開き4mmの篩で粗大粒子を取り除きながら細かく破碎した。含水比が30%を超える試料では、分級中に一部液状化し、篩の網の上に付着した。なお、試料Aと試料Bは破碎したクリンカーアッシュ（埋め立て時のトラフィカビリティを確保するために利用が混入していた。）



写真-1 エージング灰の篩い分け

表-2に、灰種と含水比、強熱減量、pH、電気伝導度(EC)、主要成分を示す。主要成分は、蛍光X線のファンダメンタルパラメーター法で測定した値である。表-2には同一の発電所から排出された新生灰の値も併せて示す。

エージング灰の含水比は降雨の影響で26~36%となっている。強熱減量、pH、主要成分については、発電所から発生した年代が異なるため、原料炭の成分の違いを受けて、SiO₂やAl₂O₃、強熱減量の違いが出ていると考えられる。

2.2 事前突固め試験

混合試験に先立ち、エージング灰A~Eの灰を用いて、加水せずに表-2の含水比状態での突固め密

度を求めた。突固め条件は、15cm モールドに3層で試料を詰め、各層25回ずつ4.5kgランマーを落下させることとした。試験結果を表-3に示す。突固め中に水が浮き出ることなく、突固め後の試料は十分な強度を保っていた(写真-2参照)。

Aの突固め密度が低かった原因としては、クリンカーアッシュの混入が考えられる。表-3中の目標湿潤密度は突固め湿潤密度の90%の値であり、重機による転圧によって容易に達成できる密度を設定した。この密度を目安として以降の供試体を作成することとした。

表-2 灰種ごとの化学組成

灰種	含水比 (%)	強熱減量 (%)	pH	EC (mS/m)	主要成分(wt%)						
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O
新生灰	0.0	1.4	9.2	80	47.8	36.1	5.6	2.5	1.1	0.9	0.5
エージング灰A	25.6	3.0	11.3	78	57.0	24.8	4.5	7.8	0.6	1.1	0.9
エージング灰B	32.0	5.3	9.9	39	55.9	27.5	5.9	3.5	0.6	1.1	2.3
エージング灰C	28.6	3.7	10.6	43	61.0	25.5	5.8	2.0	0.4	0.9	1.5
エージング灰D	36.5	3.9	11.2	84	61.2	24.4	5.7	3.3	0.4	0.6	1.3
エージング灰E	35.8	-	10.8	31	56.7	26.5	5.6	4.4	0.6	1.1	1.4

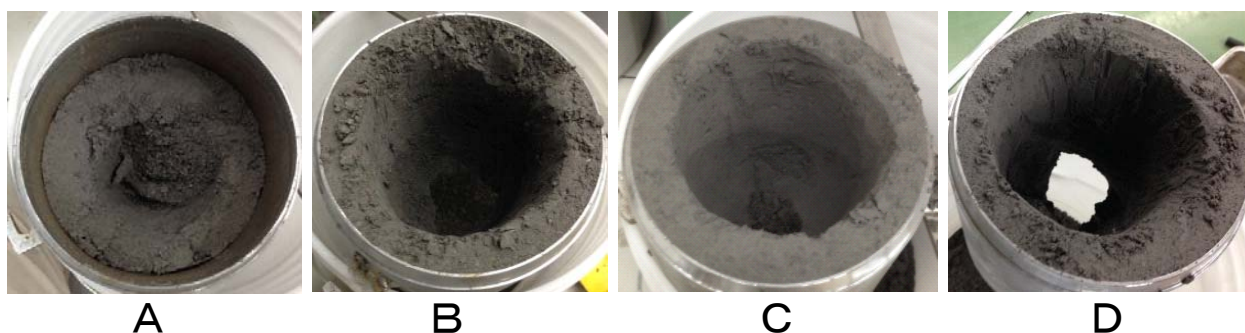


写真-2 平成26年度に実施した突固め試料のようす

表-3 加水しない状態での突固め試験結果

エージング灰		A	B	C	D	E
突固め湿潤密度	g/cm ³	1.36	1.61	1.49	1.57	1.60
突固め乾燥密度	g/cm ³	1.08	1.22	1.16	1.15	1.18
目標湿潤密度	g/cm ³	1.23	1.45	1.34	1.41	1.44

3. 配合試験方法

エージング灰 A～E に対して、表-4 に示す配合で供試体を作成した。供試体の作成方法は、地盤工学会基準(JGS0821-2000)；安定処理土の締めめをしない供試体作成方法に準拠した。セメントは高炉 B 種セメント(BB)を主体とし、比較の目的で普通ポルトランドセメント(OPC)も使用した。水は水道水を使用した。

石炭灰とセメントとの混合にはホバート型ミキサーを使用した。試料の混練について、攪拌速度は回転運動 60rpm、遊星運動 200rpm とした。攪拌時間は 5 分間とし、2.5 分経過時に未攪拌部分がなくなるように容器底部や翼に付着した未混合部分を手でかき落とした。

供試体は直径 5cm、高さ 10cm のプラスチック製モールドに詰めて作成した。表-3 に示した目標湿潤密度に相当する質量の調製試料をはじめに計量し、これを 5 層以上に分けて錘で静的な力を作用させながらモールド中に詰めた。供試体は水分の蒸発を防ぐため、モールド上部をラップで覆い、密封容器中に入れて所定材令まで 20℃で養生した。

表-4 転圧配合試験の仕様

試料名	エージング灰	高炉B種セメント	普通ポルトランドセメント
	g	g	g
A1	1000	30	0
A2	1000	50	0
A3	1000	100	0
A4	1000	0	50
A5	1000	25	25
B1	1000	30	0
B1-H	1000	30	0
B2	1000	50	0
B3	1000	100	0
C1	1000	30	0
C2	1000	50	0
C3	1000	100	0
D1	1000	30	0
D2	1000	50	0
D2-H	1000	50	0
D3	1000	100	0
E1	1000	30	0
E2	1000	50	0
E3	1000	100	0

なお、試料名に-H が付いているものは、モールドリング時にやや強い荷重を掛けて密度を高めた供試体である。

スラリー状の混合物については、表-5 に示す配合で供試体を作成した。高さ 15cm のスランブコーンで流動性を確認した。発現強度は一軸圧縮試験によって測定した。試験方法は、JIS A 1216:1998；土の一軸圧縮試験方法に準拠した。

表-5 スラリー化配合試験の仕様

試料名	エージング灰	高炉B種セメント	水
	g	g	g
A21	1000	50	33
A22	1000	50	133
A23	1000	50	217
B21	1000	50	17
B22	1000	50	80
B23	1000	50	160
C21	1000	50	33
C22	1000	50	100
C23	1000	50	183
D21	1000	50	0
D22	1000	50	67
D23	1000	50	133
E4	1000	50	67
E5	1000	50	133

4. 試験結果

4.1 混練～供試体作成中のようす

写真-3 に、D1 の攪拌直後のようすを示す。ミキサーによる攪拌によって掘削石炭灰は液状化し、全体として泥状になっている。事前の突固め試験ではこうした状況は観察されなかったことから、混練時のせん断力によってエージング灰の微細構造が破壊され、内包されていた水分が解放・分離した結果と考えられる。このような現象は、エージング灰の利用にあたっての使用機材の吟味や使用材料の選定、プロセスの管理方法に大きく影響する。すなわち、掘削、破碎、篩い分け、保管、混合、養生、運搬、転圧、の各工程で、余剰水分への対応を的確に進める必要がある。



写真-3 D1の混練状況

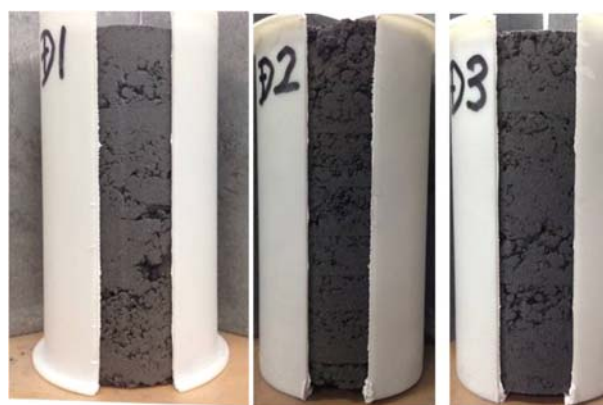


写真-4 転圧配合試験供試体の状況

写真-4は、D1、D2、D3の供試体のようである。攪拌時に泥状化した試料では写真-3のような団粒塊が形成され、目標湿潤密度に合わせるようにして供試体を作成しようとするとき必然的に大きな空隙が残留した。同様の現象は自然含水比の高いエージング灰Bでも見られた。一方、エージング灰AやCでは団粒塊は生じなかった。このことから自然含水比約30%が団粒塊発生閾値と考えられる。

写真-4のようにこの残留空隙の存在量は、D1>D2>D3となっている。これは、セメント添加量が増えることにより、混合物の含水比が低下し、団粒塊が減少したためと考えられる。

4.2 密度と強度発現

表-6に転圧配合試験の供試体密度と強度をまとめた。密度比は、表-3に示した突固め密度との比である。密度を高め調製した-H試料の強度を見ると明らかのように、試料密度は発現強度に大きく影響している。発現強度を考察するには、同一の密度で比較する必要がある。

残留空隙のある試料では低圧力であっても容易に圧密してしまい、供試体の密度をコントロールするのが難しかった。たとえばエージング灰Dは、大きな残留空隙が存在するD1でも密度比が100%となってしまう。また表-6には示していない

表-6 転圧配合試験結果

試料名	湿潤密度		乾燥密度 g/cm ³	含水比 %	7日強度 N/m ²	28日強度 N/m ²	91日強度 N/m ²	182日強度 N/m ²	364日強度 N/m ²
	g/cm ³	密度比							
A1	1.28	0.94	1.04	23.5	0.38	0.53	0.98	0.88	1.33
A2	1.27	0.94	1.04	22.8	0.50	0.85	1.02	1.70	1.69
A3	1.27	0.93	1.06	19.8	0.76	1.20	1.41	2.28	2.19
B1	1.49	0.93	1.16	29.0	0.34	0.63	0.80	1.10	1.67
B1-H	1.63	1.01	1.27	28.8	0.66	1.14	—	—	—
B2	1.49	0.92	1.16	28.0	0.67	1.39	1.68	2.06	2.76
B3	1.47	0.91	1.18	25.1	1.24	2.36	2.67	3.90	4.71
C1	1.38	0.92	1.38	26.2	0.36	0.61	0.83	0.94	1.40
C2	1.36	0.91	1.36	25.2	0.50	0.93	1.27	1.39	2.16
C3	1.35	0.91	1.35	22.1	1.00	1.88	3.00	3.23	4.28
D1	1.58	1.00	1.18	33.6	0.59	0.83	1.05	1.28	1.57
D2	1.46	0.93	1.10	32.3	0.53	0.75	1.09	1.41	2.44
D2-H	1.53	0.97	1.16	31.8	0.70	1.48	—	—	—
D3	1.46	0.93	1.13	29.3	0.96	1.62	2.40	2.86	3.55
E1	1.63	1.02	1.22	33.2	0.94	1.39	1.69	—	—
E2	1.65	1.03	1.25	31.5	1.39	2.50	3.45	—	—
E3	1.67	1.04	1.31	27.5	3.12	7.97	10.91	—	—

が、残留空隙の存在は個々の供試体密度のバラツキを大きくさせており、発現強度にも大きなバラツキが生じた。混練中の泥状化はスラリー化での利用では問題ないが、転圧固化や粒状化ではプロセスに大きな支障となる可能性が高い。たとえば、転圧固化では重機のキャタピラやローラーに混合物が付着し、また側方に流動するなどして、目的とする形状を形成できない可能性がある。また、粒状化処理では形成された団粒が変形したり、団粒同士が結合するなどして所定のサイズの粒子を製造できない。

表-7 にスラリー化配合試験の結果、図-3 にス

ラリーの含水比とスランプ値の関係を示した。混合物の含水比が35%以上になると流動化し、スラリーとしての活用が可能となっている(写真-5,6)。含水比の増加とともにスランプ値は大きくなっているが、例えばスランプ値13cmのスラリーは含水比45~50%で調製できている。この含水比の範囲を新生灰と比べると、図-4 のようになる。この図ではスランプ値11cm に必要となる含水比で比較している。比較対象は、新生灰を使用して人工島を建設した際のデータ⁹⁾である。新生灰は、同じ流動性を持たせるための含水比が広範囲にわたるのに比べ、

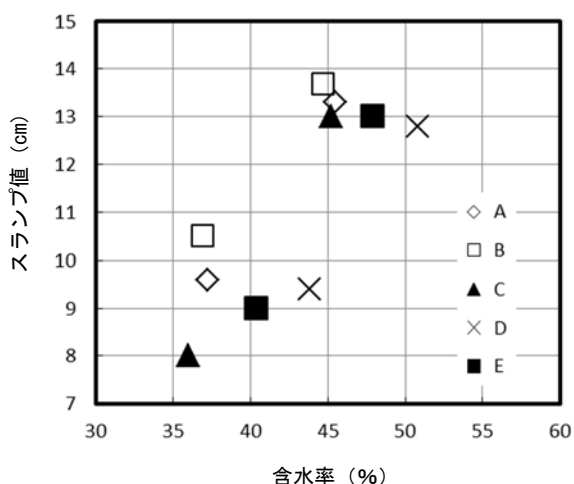


図-3 含水比とスランプ値の関係

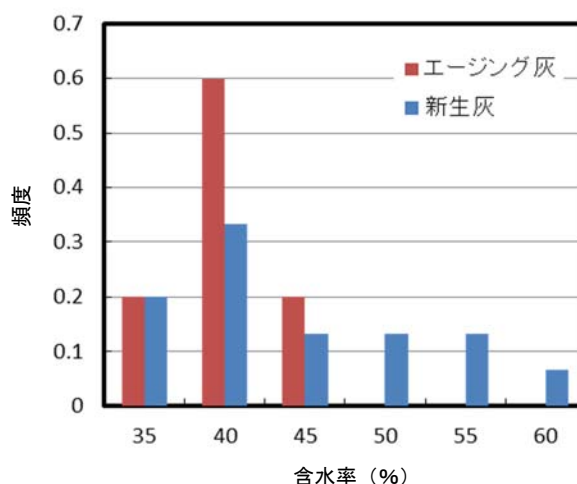


図-4 スランプ値11cmとなる含水比の頻度

表-7 スラリー化配合試験結果

試料名	スランプ cm	湿潤密度		乾燥密度 g/cm ³	含水比 %	7日強度 N/m ²	28日強度 N/m ²	91日強度 N/m ²	182日強度 N/m ²
		g/cm ³	密度比						
A21	—	1.39	1.02	1.10	26.1	0.92	1.48	2.34	2.36
A22	9.6	1.61	1.19	1.18	37.2	0.63	1.22	1.94	2.37
A23	13.3	1.57	1.16	1.08	45.5	0.32	0.58	0.87	1.00
B21	—	1.67	1.03	1.28	29.7	1.26	2.16	3.12	3.60
B22	10.5	1.66	1.03	1.22	36.9	0.78	1.26	1.68	2.07
B23	13.7	1.61	1.00	1.12	44.7	0.39	0.66	0.86	1.02
C21	—	1.47	0.99	1.15	27.6	0.73	1.27	1.90	2.07
C22	8.0	1.63	1.10	1.20	36.0	0.63	1.01	1.30	1.56
C23	13.0	1.59	1.07	1.09	45.2	0.29	0.47	0.59	0.70
D21	—	1.63	1.04	1.21	34.9	0.90	1.46	2.00	2.52
D22	9.4	1.61	1.03	1.12	43.8	0.51	0.81	1.05	1.23
D23	12.8	1.58	1.01	1.05	50.8	0.32	0.51	0.64	0.77
E4	9	1.63	1.02	1.16	40.4	0.75	1.32	1.70	—
E5	13	1.58	0.99	1.07	47.9	0.46	0.70	0.91	—



写真-5 エージング灰スラリー化試料 (E4)



写真-6 エージング灰スラリー化試料 (E5)

エージング灰は 35～45%の範囲に収まっている。エージング灰は、スラリー化条件設定がしやすい材料といえる。

圧縮強度については、若干のばらつきはあるものの、材令の進行にともなって増加している。とくに、半年、一年でも強度は増進しており、エージング灰を高炉 B 種セメントで改質した材料は長期間にわたって高い力学的安定性が期待できると考えられる。

A23、B23、C23、D23、E5 はいずれもスランプ値で 13cm 程度の高い流動性を示す配合であるが、28 日強度で 0.5～0.7N/mm² を発現している。再掘削が必要な埋戻材など、中位の強度が要求されるような地盤材料に適していると考えられる。

5. 考察

5.1 発現強度

図-5～7 に、BB3～10%添加の各配合の強度発現の状況を示す。材令の対数値に比例して強度は増加しており、発現強度 q_u (N/mm²)は、定数 C と材令 t (日)によって以下の式でほぼ近似できている。

$$q_u = C \times \log t \quad (1)$$

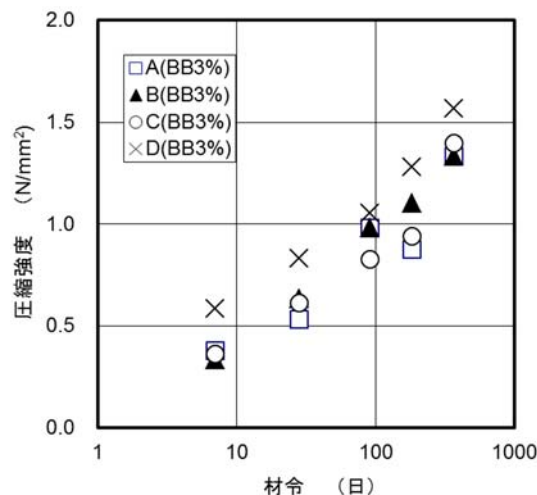


図-5 BB3%添加試料の強度発現

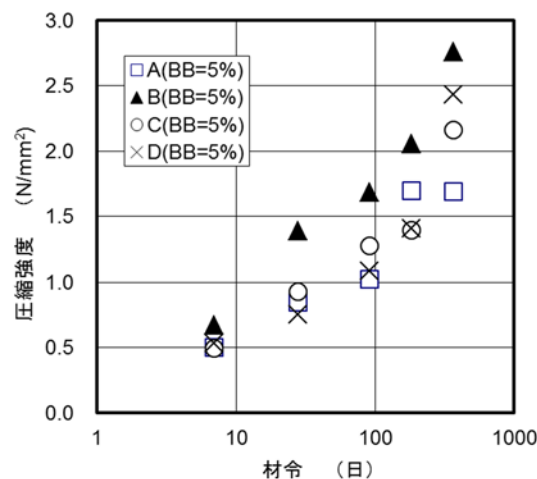


図-6 BB5%添加試料の強度発現

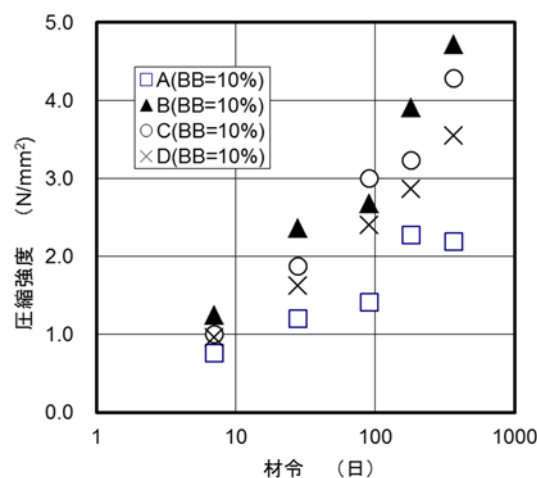


図-7 BB10%添加試料の強度発現

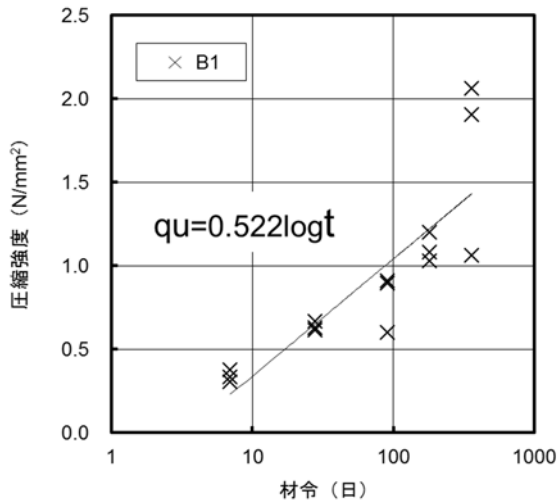


図-8 B1 (灰 B、BB3%添加) 試料の強度

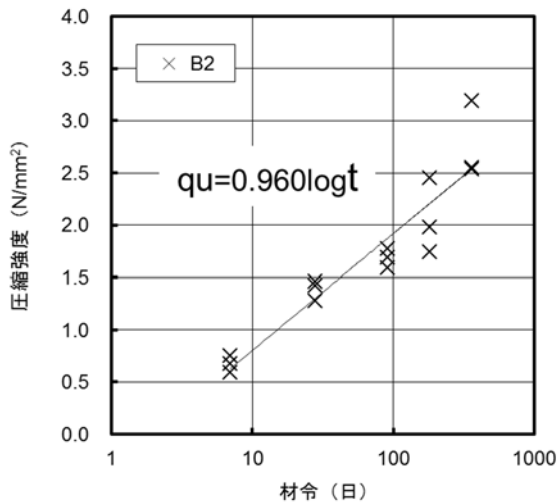


図-9 B2 (灰 B、BB5%添加) 試料の強度

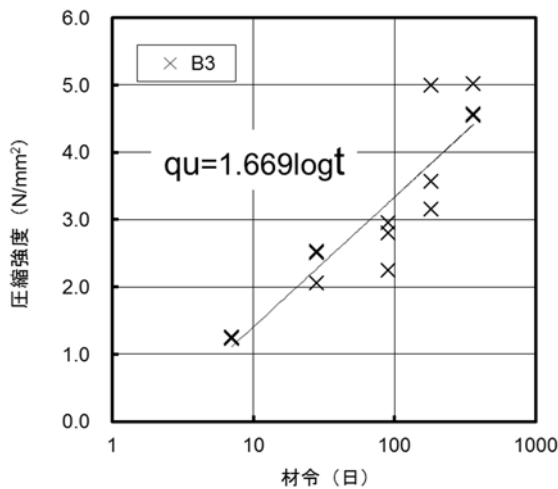


図-10 B3 (灰 B、BB10%添加) 試料の強度

ただ、長期強度の増加は式(1)よりも大きく、たとえばエージング灰 B では図-8~10 に示すように半年から1年の間に1.5倍以上の強度増加がみられる。

図-11 は材令にともなう混合物の含水比変化を示している。半年から一年にかけて、大幅に含水比が低下している。石炭灰は、エージング後であっても高炉セメントとの高い反応性があるためと推察される。

前述のように、発現強度 qu は式(1)で表現できているが、乾燥密度 $D(g/cm^3)$ とセメント添加率 $Ac(\%)$ も同様に qu に影響していると考えられる。そこで、乾燥密度 D と定数 C との関係性をセメント添加率 Ac 別にプロットしてみた。その結果を図-12 に示す。両者は、以下の関係で表現できている。

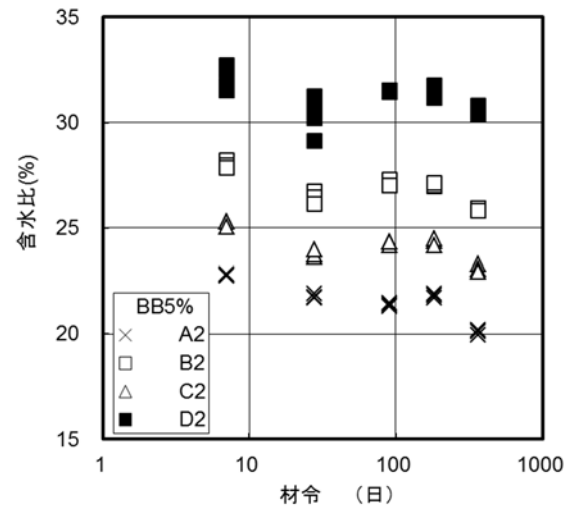


図-11 材令にともなう混合物の含水比変化

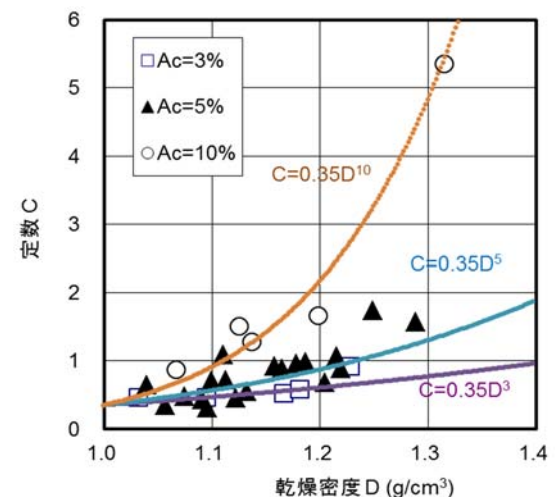


図-12 乾燥密度 D と定数 C の関係

表-8 発現強度 1N/mm²に必要なセメント添加率

エージング灰	乾燥密度 g/cm ³	発現強度1N/mm ² に必要なセメント添加率(%)				
		7日	28日	91日	182日	364日
A	1.19	6.9	3.7	1.9	1.0	0.3
B	1.29	4.7	2.5	1.2	0.6	0.1
C	1.20	6.6	3.5	1.8	1.0	0.2
D	1.22	6.0	3.2	1.6	0.9	0.2
E	1.17	7.6	4.1	2.1	1.2	0.3

$$C = 0.35 \times D^{Ac} \quad (2)$$

式(1)と式(2)とを統合すれば、 q_u は、 D 、 Ac 、 t によって、以下の関係式で表現できることになる。

$$q_u = 0.35 \times D^{Ac} \times \log t \quad (3)$$

発現強度 q_u は、本来、間隙率と間隙形状によって影響を受けると考えられるので、乾燥密度 D より間隙率によって表現した方が精度は上がると予想される。また、セメント添加率 Ac も、エージング灰の乾燥質量との比でコントロールすべきとも考えられる。しかし、5種類のエージング灰に対して、概略ではあるが強度予測が可能となっていることは、石炭灰がエージングによって安定化し、均質化できていることを意味している。発現強度は Ac のみで表現できており、エージング灰は力学面からも使いやすい材料へと変化している。そして、5種のエージング灰に差異がみられなかったことから、少なくともエージング期間は5年以下で十分である。

地盤材料としての要求強度を 1N/mm² とし、各エージング灰の乾燥密度を A22、B22、C22、D22、E4 と仮定する。式(3)によって必要となる Ac を算出した結果を表-8 にまとめる。A22、B22、C22、D22、E4 の実際の強度と比較すると、表-8 の Ac はやや低めとなっている。これは、突固め試料では不飽和となっており、一軸圧縮試験での強度はやや高めとなっているためと考えられる。また材令が進むにつれて極端に必要な Ac が低くなっているが、これは近似の限界を示している可能性があり、今後、近似式を吟味してより正確な強度予測方法を模索する必要がある。

地盤としての利用を考えれば、材齢 28 日で 1N/mm² 程度の強度発現で十分と考えられる。この

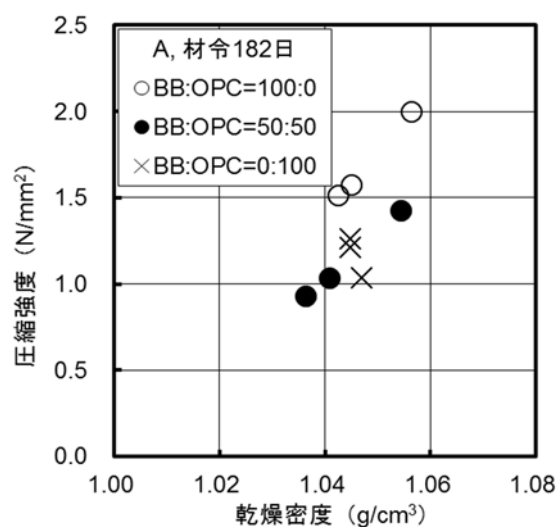


図-13 固化材を変えた場合の乾燥密度と強度 (灰 A、材令 182 日)

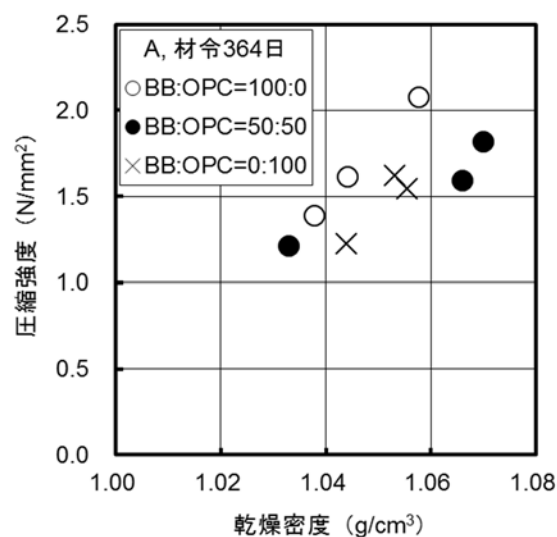


図-14 固化材を変えた場合の乾燥密度と強度 (灰 A、材令 364 日)

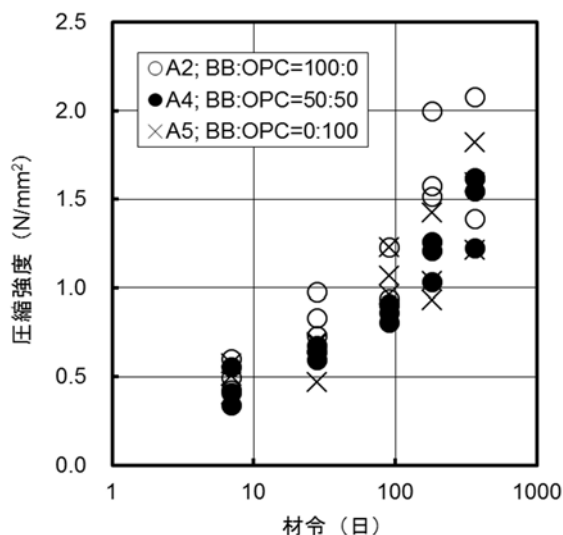


図-15 固化材を変えた場合の材令と強度増加

ため、エージング灰に対して5%のBB添加によって広範囲の地盤材料として活用できると考えられる。

5.2 セメントの種類と発現強度

図-13, 14に、灰Aを用いた材令半年と1年でのセメントの種類による乾燥密度と強度の関係を示す。表-4の仕様のうち、A2 (BB:OPC = 100:0)、A4 (BB:OPC = 50:50)、A5 (BB:OPC = 0:100)を示している。長期的にBB添加試料の強度が高くなっている。また、図-15には、材令と強度増加の関係を示す。材令7日では発現強度に差は少ないが、材令28日以降ではBB添加試料の強度が高くなっている。このことから、固化処理には高炉スラグを配合したセメントが適していると考えられる。

6. まとめ

埋立地でエージングされた石炭灰を有効利用すべく、5~17年前に埋め立てられた5種のエージング灰を使って実験的に検討した。その結果、(1) 3~10%のセメントを添加した混合物は地盤材料として十分な強度を発現する、(2) 5種のエージング灰は均質化されたほぼ同一の材料とみなせる、などが分かった。また、(3) 自然含水比が30%を超えるエージング灰は混練中に泥状化を起こすので処理プロセスに対策が必要となる、(4) 混合物の発現強度はセメント添加率、密度、材齢で数式化でき、予測できる、(5) 高炉セメントは高い強度をえるのに適している、(6)

均質化に必要なエージング期間は5年以下で十分である、(7)材令28日で1N/mm²程度の強度発現には5%のBB添加で十分である、なども明らかとなった。

掘削管理方法や、エージング期間の短縮などの課題が残されているものの、供給可能量の高さや事前チェックの容易さなどを考え併せれば、埋立地でエージングした石炭灰は地盤材料としての高いポテンシャルを持っていると結論できる。

謝辞

本研究は、平成25,26年度 経済産業省 石炭灰利用技術振興費補助事業^{7),8)} 石炭灰有効利用促進調査(都市基盤整備資材としての利用に関する基礎調査)のうち、一部の内容を取りまとめたものである。ここに記して謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁, 平成28年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2017), 2017.
- 2) (一財)石炭エネルギーセンター, 石炭灰全国実態調査報告書(平成27年度実績), 2017.
- 3) (一財)セメント協会, セメントハンドブック2017年版, 2017.
- 4) 荘司喜博, 高橋邦夫, 浅井正, 角田隆: “セメント添加した石炭灰の岸壁裏込め材への利用”; 土木学会論文集, 637/VI-45, pp.137-148, 1999.
- 5) 村田博一, 浅田素之, 川口正人, 大野文良, 栃山広幸: “エージング石炭灰の活用に向けた重金属類溶出抑制に関する基礎的検討”, 清水建設研究報告, 第94号, pp.149-154, 2017.
- 6) (一財)石炭エネルギーセンター, 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(エージング灰(既成灰)編), 2016.
- 7) 東北電力(株), 清水建設(株), 平成25年度 石炭灰利用技術振興費補助事業 基礎調査報告書 一石炭灰有効利用促進調査(都市基盤整備資材としての利用に関する基礎調査)一, 2014.
- 8) 東北電力(株), 清水建設(株), 平成26年度 石炭灰利用技術振興費補助事業 基礎調査報告書 一石炭灰有効利用促進調査(都市基盤整備資材としての利用に関する基礎調査)一, 2015.
- 9) H. Kawasaki, S. Horiuchi, M. Akatsuka, S. Sano: "Fly - Ash Slurry Island: II. Construction in Hakucho Ohashi Project", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.4, No.2, 1992.