

資源循環に資するフライアッシュコンクリートの品質評価手法に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2018-11-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 今川, 健一 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/19700

明治大学大学院理工学研究科

2016年度

博士学位請求論文

資源循環に資するフライアッシュコンクリートの
品質評価手法に関する研究

Study on quality evaluation method of fly ash concrete to contribute to the resources
circulation

学位請求者 建築学専攻

今 川 健 一

資源循環に資するフライアッシュコンクリートの品質評価手法に関する研究

【目次】

	頁
第1章 序論	
第1節 序	1
第2節 フライアッシュとは	2
第1項 フライアッシュの定義	2
第2項 石炭火力	2
第3項 フライアッシュの発生工程, 分類	3
第4項 フライアッシュの物性	5
第5項 フライアッシュの発生量	6
第6項 フライアッシュの循環利用用途	7
第3節 産業廃棄物の概要	9
第1項 産業廃棄物とは	9
第2項 産業副産物におけるフライアッシュの位置づけ	10
第3項 フライアッシュ循環利用の社会的意義	10
第4節 本研究の位置づけ	11
第1項 本研究の目的	11
第2項 本研究の構成	12
第5節 参考文献	13
第2章 既往研究の調査	
第1節 序	14
第2節 既往研究調査対象リスト	15
第1項 産業副産物の再生利用に係るもの	15
第2項 石炭灰の混和材利用技術に係るもの	15
第3節 産業副産物の再利用に係る既往研究	22
第1項 産業副産物の再資源化の現状と課題	22
第2項 セメント産業における副産物利用	23
第4節 石炭灰の混和材利用技術に係る既往研究	25
第1項 フライアッシュコンクリートを含むコンクリートの中性化特性	25
第2項 養生条件がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響	27
第3項 混合方法がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響	33
第4項 フライアッシュの反応機構, 反応生成物に関する分析	35
第5項 屋外曝露試験等によるフライアッシュ コンクリートの長期性状分析	39
第6項 フライアッシュの品質がコンクリートに及ぼす影響	41
第7項 コンクリートの中性化抵抗性評価	42

第5節	まとめ	44
第3章 資源循環の枠組みと副産物の利用拡大に係る課題の抽出		
第1節	序	45
第2節	資源循環型社会形成の枠組み	46
	第1項 国の施策	46
	第2項 資源有効利用促進法における 副産物リサイクルの義務付け	47
	第3項 廃棄物処理法に基づく石炭灰の扱い	48
第3節	セメント産業およびコンクリート産業の位置付け	49
	第1項 セメント産業の副産物受け入れ	49
	第2項 セメント生産量の推移	50
	第3項 石炭灰有効利用におけるセメント原材料依存に対する課題	51
第4節	建設廃棄物の循環利用に関する実態調査	53
	第1項 調査の概要	53
	第2項 建材製造業者の意識, 取り組みの実態	53
	第3項 排出事業者の意識, 取り組みの実態	59
	第4項 中間処理業者の意識, 取り組みの実態	64
	第5項 立場の異なる利害関係者間の意識共有	68
第5節	まとめ	69
第6節	参考文献	70
第4章 フライアッシュコンクリート耐久性評価実態の調査		
第1節	序	71
第2節	促進中性化試験結果の収集および分析	72
	第1項 調査対象	72
	第2項 全体調査	75
	第3項 促進試験環境における中性化進行の調査概要	76
	第4項 置換率と中性化進行の関係性	77
	第5項 水結合材比および水セメント比と中性化進行の関係性	77
	第6項 まとめ	79
第3節	屋外暴露試験結果の収集および分析	80
	第1項 調査対象	80
	第2項 調査概要	80
	第3項 各文献の調査結果	81
	第4項 まとめ	88
第4節	促進中性化試験結果と屋外暴露試験結果の相関性の検討	89
	第1項 促進中性化試験の分析結果と 屋外暴露試験の分析結果の比較	89
	第2項 促進中性化試験の分析結果	

および屋外暴露試験の分析結果の集約	89
第3項 フライアッシュの内割置換の中性化抵抗性 に対する寄与度の評価手法	92
第4項 促進中性化試験結果と屋外暴露試験結果の相関性	94
第5節 まとめ	95
第6節 参考文献	96
第5章 長期的性状変化を考慮した耐久性評価方法の検討	
第1節 序	100
第2節 実験概要	100
第1項 使用材料	100
第2項 調合概略	102
第3項 コンクリートの練り混ぜおよび脱型, 養生の条件	103
第4項 試験方法	105
第3節 実験結果	109
第1項 フレッシュ性状および脱型目標到達時材齢	109
第2項 強度発現性	111
第3項 中性化特性	116
第4項 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量	120
第5項 圧縮強度と中性化速度係数の関係	121
第4節 長期的性状変化を考慮した中性化抵抗性評価方法	122
第1項 結合材寄与率の算出	122
第2項 積算温度に基づく養生環境の検討	124
第3項 反応率と結合材寄与率の類似性に基づく養生環境の検討	125
第5節 まとめ	127
第6節 参考文献	128
第6章 耐久性評価の改善にともなう利用方法の提案とその効果の試算	
第1節 序	129
第2節 石炭灰の循環利用の前提	129
第1項 石炭灰の有効利用の現状	129
第2項 石炭灰の輸出の現状	130
第3項 石炭灰の最終処分の現状	131
第4項 循環利用する必要性を有する石炭灰量	131
第3節 石炭灰の有効利用モデル	132
第1項 モデル作成の前提	132
第2項 モデルパターン: 低炭素型	132
第3項 モデルパターン: 長寿命型	133
第4項 モデルパターンのまとめ	135
第4節 石炭灰の資源循環が成立する諸条件および付帯効果	136

第1項 低炭素型モデル	136
第2項 長寿命型モデル	138
第5節 まとめ	139
第6節 参考文献	140

第7章 結論

第1節 序	141
第2節 各章のまとめ	142
第3節 結び	146
第4節 謝辞	147

第 1 章

序論

第1節 序

本章では、本研究の根幹を成すフライアッシュについてその発生工程や分類、化学的特性、物理的特性といった工学的観点から整理した。

また、資源循環型社会の構築に求められる社会的な利用価値の重要性を整理するために、産業副産物の定義と産業副産物としてのフライアッシュの位置付けを明確にした。

また、本研究の主目的と当該目的に対する課題を示し、本研究の構成を示した。

第 2 節 フライアッシュとは

第 1 項 フライアッシュの定義

フライアッシュとは、石炭火力発電所において微粉炭の燃焼の際に生じる石炭灰を分級することにより得られる産業副産物をいう。

第 2 項 石炭火力

図 1-2-1 にわが国の電源ソース別発電量の推移を示す。1970 年台以降わが国の火力発電の主力は石炭から石油へと以降していったことがわかる。しかし、第一次オイルショック以降、確認可採埋蔵量が豊富であること、比較的政情が安定している国々に広く存在していることから、供給安定性に優れ、石油・LNG 等より相対的に安価な海外炭による石炭火力発電の比率が再び高まる機運となった。さらに、2011 年 3 月の東日本大震災による原子力発電所の稼働率低下に伴い、逼迫した電力供給の積み増しのために火力発電に対する需要が高まり、総発電量のおよそ 8 割を火力発電が占めるという事態となった。それに追随する形で、休止していた発電所の再稼働等により石炭火力発電の比率も増加していることがわかる。低下した原子力発電所の稼働率は今後も容易には回復しないことが見込まれる一方で、新規石炭火力発電所の新設も計画されていることから、今後の石炭灰の発生量増加は避けられない見通しである。

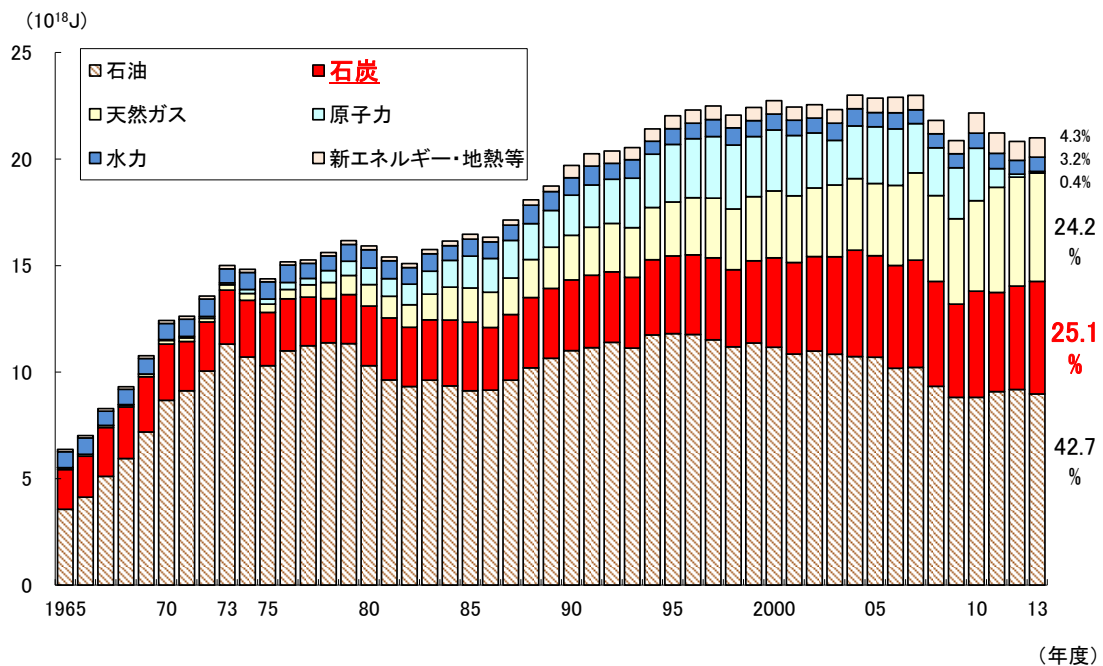


図 1-2-1 わが国の電源ソース別発電量の推移
(データ出典) 資源エネルギー庁「平成 26 年度エネルギーに関する年次報告」

第3項 フライアッシュの発生工程、分類

石炭火力発電所では、微粉碎した石炭をボイラ内で燃焼させる。その際、燃焼した石炭のうち12%程度が石炭灰となって排出されている¹⁾。石炭灰は採取位置によってフライアッシュ（高温の燃焼ガス中を浮遊し、球形微細粒子となって電気集じん器で採取されたもの）、シンダアッシュ（高温の燃焼ガス中を浮遊し、空気予熱器・節炭器などを通過する際に落下採取されたもの）、クリンカアッシュ（燃焼によって生じた石炭灰粒子が相互に凝集し、多孔質な塊となってボイラ底部のクリンカホッパに落下堆積したものを破砕機で砕いたもの）に大別される。これは発生箇所別による分類であり、また有効利用の観点から製品別に分類すると、原粉、JIS規格品フライアッシュ、粗粉、クリンカアッシュとなる。これを以下の表1-2-1～1-2-3および図1-2-2に示す。

表 1-2-1 JIS 火力発電所用語

用語	意味
シンダアッシュ	燃焼によって生成される粗粒灰
フライアッシュ	燃焼によって生成される細粒灰
クリンカアッシュ	燃焼によって生成される灰が塊状となったもの
ボトムアッシュ	燃焼によって生成した灰のうち炉底に落下したもの

表 1-2-2 発生箇所による分類

呼称	意味
フライアッシュ (EP灰)	微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスから電気集塵器 (Electric Precipitator) で採取された石炭灰
シンダアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの燃焼ガスが空気予熱器・節炭器などを通過する際に落下採取された石炭灰
クリンカアッシュ	微粉炭燃焼ボイラの炉底に落下採取された石炭灰

注) フライアッシュ、シンダアッシュを総称してフライアッシュと呼ぶこともある。
ボトムアッシュはクリンカアッシュと呼んでいる。

表 1-2-3 製品別分類

製品	製品の種類別分類	備考
フライアッシュ	原粉: ボイラから発生したままのフライアッシュ	コンクリート用フライアッシュとして利用されるもので JIS規格では I ~ IV種が規定されている。
	細粉: 集じん器の後段集じん区で回収したもの、あるいは原粉を分級し粒度調整した細かいもの	
	粗粉: 原粉を粒度調整した粗いもの	
クリンカアッシュ	クリンカホッパに落下した灰を収集し、破砕・脱水・粒度調整したもの (粒度調整していないのものもある)	

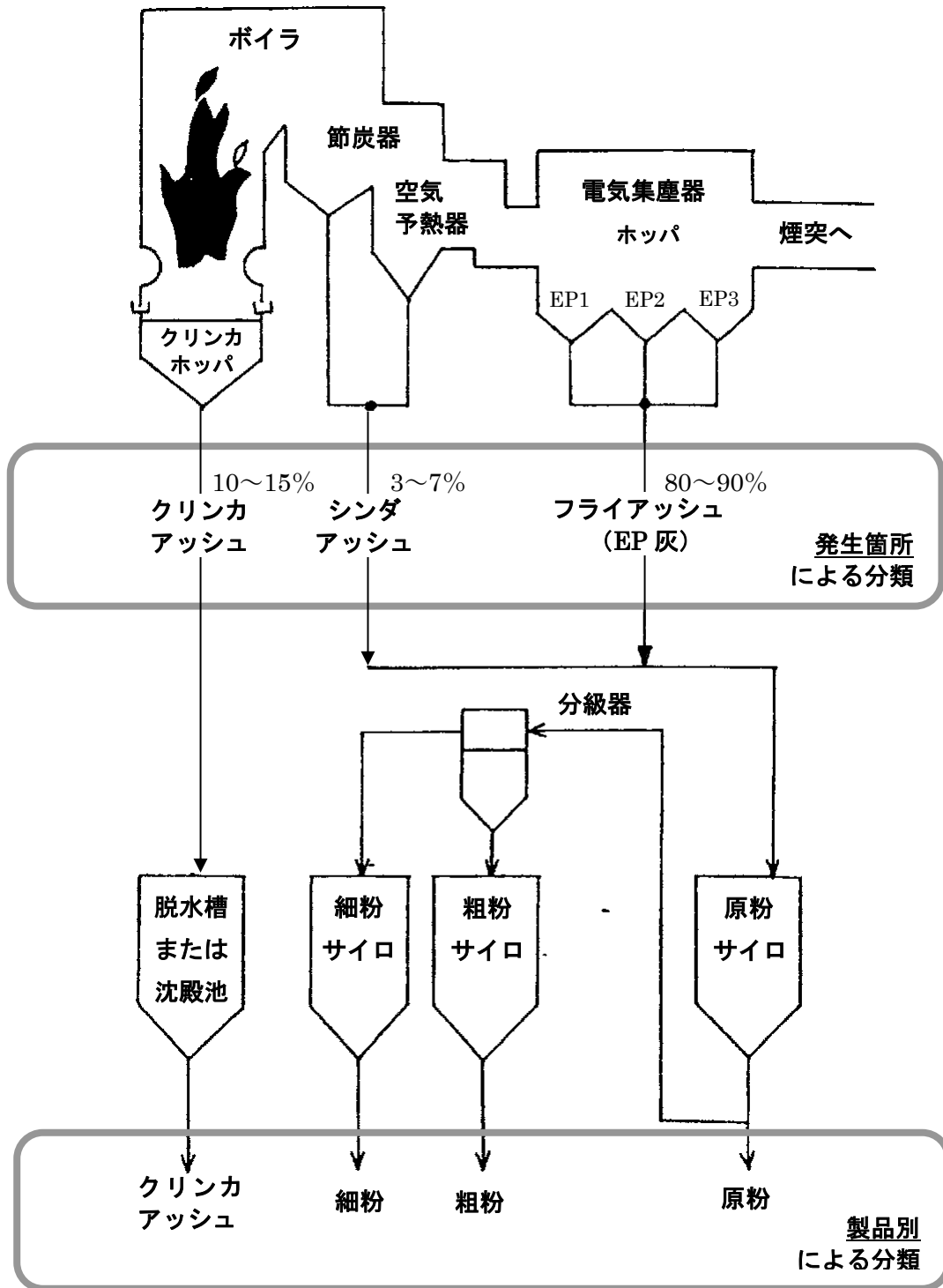


図 1-2-2 フライアッシュの発生工程

3 種類の灰（発生箇所による分類）の石炭灰全体に占める割合は、クリンカアッシュが 10～15%，シンダアッシュが 3～7% でフライアッシュ（EP 灰）が 80～90% となっている。

第4項 フライアッシュの物性

・ 物理的性質

粒形：燃焼に伴い生じる石炭灰は高温の燃焼ガス中を浮遊し、温度の低下するボイラ出口でガラス状の球形の粒子となる。

粒径：灰粒子の大きさは、

- 1) クリンカアッシュ：0.1～10mm,
- 2) シンダアッシュ：0.1～1mm,
- 3) フライアッシュ：20μm～30μm 程度である。

また原粉（フライアッシュとシンダアッシュ）を分級して 0.1～0.05mm としたものを粗粉、0.05mm 以下を細粉として分類する。

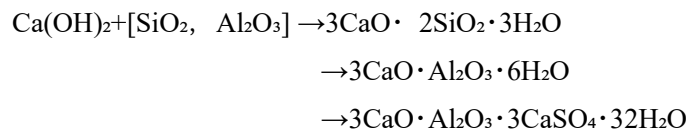
色：大部分が灰白色であるが、未燃分（残留炭素）の多い灰は黒みを帯びる。また、原炭の鉄分が多い場合にはわずかに赤みを帯びることもある。

密度：フライアッシュの密度はおおよそ 1.9～2.5g/cm³ の範囲にある。

・ 化学的性質

フライアッシュの構成物質とその組成割合を表 1-2-4 に示す。

フライアッシュはシリカ(SiO₂)とアルミナ(Al₂O₃)を主体に構成される無機物質である。これらの主体構成物質と水酸化カルシウムとの反応はポゾラン反応といわれ、フライアッシュの特長的一端を成す。ポゾラン反応は下記のような反応式で示される。



また、その構造は結晶性鉱物とガラス状の非晶質より構成される。

反応性に乏しい結晶性鉱物と比較的反応が容易なガラス質の組成割合により、排出されるフライアッシュ自体の反応性に差異が生じるとの指摘¹⁻²⁾もなされている。

表 1-2-4 フライアッシュの化学組成

構成物質	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
組成割合(%)	40.1～74.4	15.7～35.2	1.4～17.5	0.2～7.4	0.3～10.1

第 5 項 フライアッシュの発生量

表 1-2-5 に石炭灰発生量の現状，図 1-2-3 に石炭灰発生量の推移を示す。

石炭火力発電所では，燃料である石炭に 10～20%の灰分が含まれることから，発電に伴って多量の石炭灰が発生する。発生側で灰分の少ない石炭の使用や，発電効率の向上等により石炭灰の発生割合は抑制傾向にあるが，今後も大型石炭火力ユニットの新設や，原発の稼働停止に伴う供給電力の積み増しのための休止火力発電所の再稼働等により，石炭灰発生量の大幅な増加は避けられない見通しである。

表 1-2-5 石炭灰発生量の現状(2014 年度)

	石炭使用量		石炭灰発生量		灰発生割合※ (%)
	量 (千トン/年)	構成割合 (%)	量 (千トン/年)	構成割合 (%)	
電気事業	87108	78.5	9929	77.0	11.4
一般産業	23797	21.5	2964	23.0	12.5
合計	110905	100	12893	100	11.6

※灰発生割合 = [石炭灰発生量] / [石炭使用量] × 100 (%)

(データ出典)一般財団法人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 26 年度実績)」

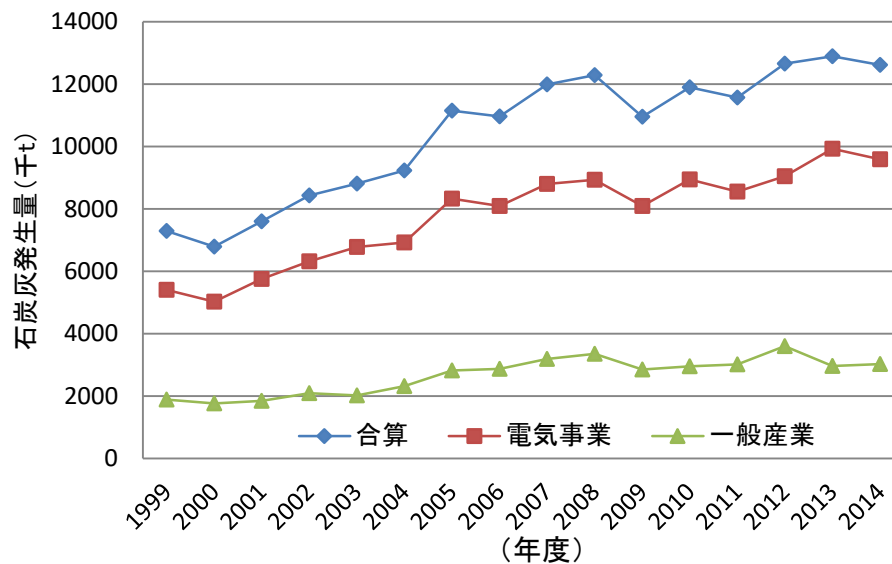


図 1-2-3 石炭灰発生量の推移

(データ出典)一般財団法人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 26 年度実績)」

第6項 フライアッシュの循環利用用途

表 1-2-6 に石炭灰の分野別有効利用内容の内訳を示す。石炭灰の循環利用用途は多岐に渡ることが示される一方で、有効利用の大半はセメント分野が占め、特にセメント原材料としてのものが多いことがわかる。セメント原材料としての利用目的は、ポルトランドセメント中の粘土分と石炭灰の化学組成の類似性に着目し、天然資源の粘土を副産物である石炭灰で置換することにより、その置換率の最大値は約 50%とされる¹⁻³⁾。

表 1-2-6 石炭灰の分野別有効利用内容および内訳

項目		電気事業		一般産業		合計	
分野	内容	利用量	構成比(%)	利用量	構成比(%)	利用量	構成比(%)
セメント分野	セメント原材料	6,031	64.14	2,212	74.33	8,243	66.59
	セメント混合材	78	0.83	10	0.34	88	0.71
	コンクリート混和材	77	0.82	4	0.13	81	0.65
	計	6,186	65.79	2,226	74.80	8,412	67.95
土木分野	地盤改良材	359	3.82	182	6.12	541	4.37
	土木工事用	419	4.46	53	1.78	472	3.81
	電力工事用	78	0.83	0	0.00	78	0.63
	道路路盤材	146	1.55	140	4.70	286	2.31
	アスファルト・フィラー材	6	0.06	0	0.00	6	0.05
	炭坑充填材	413	4.39	0	0.00	413	3.34
計	1,421	15.11	375	12.60	1,796	14.51	
建築分野	建材ボード	130	1.38	269	9.04	399	3.22
	人工軽量骨材	41	0.44	0	0.00	41	0.33
	コンクリート2次製品	34	0.36	0	0.00	34	0.27
	計	205	2.18	269	9.04	474	3.83
農林・水産分野	肥料(含:融雪剤)	35	0.37	7	0.24	42	0.34
	魚礁	39	0.41	0	0.00	39	0.32
	土壌改良剤	36	0.38	54	1.81	90	0.73
	計	110	1.17	61	2.05	171	1.38
その他	下水汚水処理剤	1	0.01	0	0.00	1	0.01
	製鉄用	1	0.01	3	0.10	4	0.03
	その他	1,479	15.73	42	1.41	1,521	12.29
	計	1,481	15.75	45	1.51	1,526	12.33
有効利用合計		9,403	100	2,976	100	12,379	100

(データ出典)一般財団法人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 26 年度実績)」

また、コンクリート材料として用いられるフライアッシュは JIS 灰と呼ばれ、JIS A 6201 によりI~IV種に分類される。以下表 1-2-7 にフライアッシュの分類と項目を示す。それぞれの種別の概要は以下のとおりである。

I種：混入することにより、特にコンクリートの高強度、流動性付与、アルカリシリカ反応抑制に効果があるもの。また、初期強度発現性も無混入の場合と遜色ないもの。

II種：標準的なフライアッシュで、混入することにより、特にコンクリートの水和発熱抑制、長期強度の改善効果があるもの。また、コンクリートへの流動性付与、アルカリシリカ反応抑制について、無混入の場合と比較して十分に効果が発揮されるもの。

III種：混入することにより、特にコンクリートの水和発熱抑制、アルカリシリカ反応抑制、長期強度の改善に、II種と同等の効果があるもの。

ただし、練混ぜ時に、コンクリートの流動性、空気連行性に関して配慮が必要である。

IV種：水和発熱抑制に対しII種と同等の効果があり、アルカリシリカ反応抑制も期待できるもの。強度発現の点で低強度コンクリート、工場製品等に使用可能なもので、鉄筋コンクリート用の普通コンクリートに適用する場合には、事前に強度の発現を確認して使用するもの。

表 1-2-7 コンクリート用フライアッシュの品質 (JIS A 6201)

項目		種類			
		I種	II種	III種	IV種
二酸化ケイ素 (%)		45.0以上			
湿分 (%)		1.0以下			
強熱減量 (%)		3.0以下	5.0以下	8.0以下	5.0以下
密度	(g/cm ³)	1.95以上			
粉末度	45μ mふるい残分 (網ふるい方法) (%)	10以下	40以下	40以下	70以下
	比表面積 (ブレン方法) (cm ² /g)	5,000以上	2,500以上	2,500以上	1,500以上
フロー値比 (%)		105以上	95以上	85以上	75以上
活性度指数(%)	材齢28日	90以上	80以上	80以上	60以上
	材齢91日	100以上	90以上	90以上	70以上

第 3 節 産業廃棄物の概要

第 1 項 産業廃棄物とは

廃棄物とは、廃棄物処理法の定義するところにより、「汚泥、ふん尿などの汚物」または「自ら利用したり他人に有償で譲り渡すことができないために不要になった固形状又は液状のもの」をいう。

該当物が廃棄物に該当するか否かは、物の性状、排出の状況、通常取り扱いの形態、取引価値の有無、占有者の意思を総合的に勘案するものとされる。

また、廃棄物は更に一般廃棄物と産業廃棄物に分類される。

産業廃棄物は事業活動に伴って生じた廃棄物を指し、さらに以下表 1-3-1 に示す 2 分類 19 品目と、産業廃棄物を処分するために処理したもので、上記の産業廃棄物に該当しないものの 20 品目に分類される。

当該法律の規定により、産業廃棄物の処理責任は排出事業者に帰属する。よって、排出事業者自身、もしくは認可を受けた業者が排出事業者の委託により処理する義務を負うこととなる。

表 1-3-1 産業廃棄物の種類と分類

分類	種類
あらゆる事業に伴うもの	燃え殻
	汚泥
	廃油
	廃酸
	廃アルカリ
	廃プラスチック類
	ゴムくず
	金属くず
	ガラスくず, コンクリートくず, 陶磁器くず
	鉱滓
	がれき類
ばいじん	
特定の事業活動に伴うもの	紙くず
	木くず
	繊維くず
	動植物性残渣
	動物系固形不要物
	動物のふん尿
動物の死体	
産業廃棄物を処分するために処理したもの	

第 2 項 産業廃棄物におけるフライアッシュの位置付け

廃棄物処理法の規定する廃棄物の定義および分類を石炭灰に適用すると、フライアッシュは『ばいじん』、クリンカアッシュは『燃え殻』に該当するものである。

これらの定義に基づき、石炭灰は、排出事業者自身、もしくは認可を受けた業者が排出事業者の委託により、中間処理もしくは管理型廃棄物処分場における最終処分といった適性処理を行う必要がある。

第 3 項 フライアッシュ循環利用の社会的意義

石炭灰を含む廃棄物は再資源化もしくは再利用がなされない場合、最終処分されなければならない。石炭灰は、微量な重金属を含有することから、管理型最終処分場に埋立処理する必要がある。そのため、主たる排出事業者である電力会社は発電所構内に処分場を設置し、埋立による最終処分する、もしくは外部の管理型最終処分場で埋立処理を行っているが、図 1-3-1 に示すとおり最終処分場の残余年数は近年向上する傾向にあるものの、依然逼迫しているのが現状である。

石炭灰の循環利用の拡大がなされれば、最終処分に付される石炭灰の減量が成されることと同義であり、最終処分場の残余年数の引き上げに資するものとなる。

また、副産物の循環利用の拡大は製品製造時の新規天然資源投入量の削減に繋がると同時に、製品製造に係る CO₂ 排出量の削減に資するものである。

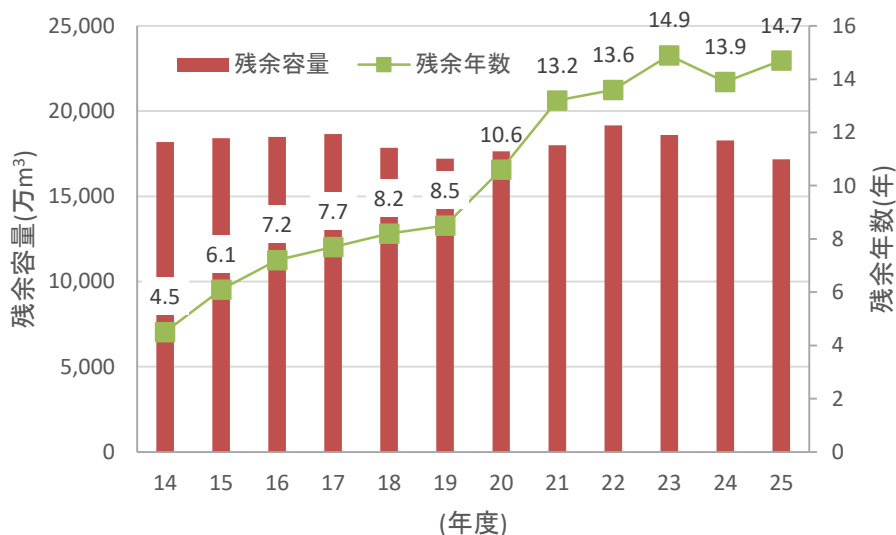


図 1-3-1 石炭灰発生量の推移

(データ出典)環境省：「産業廃棄物行政組織等調査報告書 平成 25 年度実績」
および「平成 27 年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書」

第4節 本研究の位置付け

第1項 本研究の目的

物理的、化学的特性からフライアッシュの循環利用用途は多岐にわたる。しかしながら、現状の有効利用の形態を維持し続けた場合、今後不可避である石炭灰の発生量増加に対応することが難しいのも事実である。

また、持続的発展を可能とする社会を構築するうえで、廃棄物の発生抑制や副産物の循環利用といった環境負荷低減への取り組みは生産活動における重要な責務であることから、石炭灰の循環利用技術の開発および普及は喫緊の課題といえる。

本研究は、建設生産分野において石炭灰の循環利用が期待されるコンクリート材料としてのフライアッシュの利用拡大の方向性とその付帯効果を検討するものであるが、コンクリート材料としてのシェアの拡大、獲得には技術的阻害要因が存在する。

フライアッシュをコンクリート混和材として使用することの長所として、

- ・ ポズラン反応に伴う長期強度の増進
- ・ 乾燥収縮の減少
- ・ アルカリ骨材反応の抑制
- ・ 水和熱の低減
- ・ 水密性の向上
- ・ ワークビリティの向上及び単位水量の減少

などが挙げられる。

一方、短所として、

- ・ 初期強度発現の低下
- ・ 耐久性（中性化抵抗性・凍結融解抵抗性）の低下
- ・ 原炭種の違いによる石炭灰品質の変動

などが挙げられる。

このうち、耐久性の低下、特にコンクリート構造物の耐久性を決定付ける中性化抵抗性に関しては性能の評価方法にも課題を残している。

中性化抵抗性は、結果を速やかに得るために促進試験によって評価することが一般的である。コンクリート中のフライアッシュの反応は緩慢であることが知られており、フライアッシュコンクリートの耐久性を短期間の試験結果に基づき評価することは、フライアッシュの反応により得られる効果を過小評価することにつながる。

そこで本研究は、フライアッシュを用いたコンクリートの耐久性に対する適切な評価を通し、石炭灰の資源循環に資する利用拡大の方向性とその付帯効果を明確に示すことを主目的とした。

主目的を果たすために以下に示すマイルストーンを設定し、達成要件と進捗を確認することで研究を行った。

- 1) 資源循環におけるフライアッシュの有効利用方法の位置付けと現状の分析
- 2) 有効利用拡大の先行例となる廃棄物の利用実態の調査
- 3) 利用拡大に対する障害およびその要因の分析
- 4) 現状の耐久性評価手法の問題点の明確化と改善方法の検討
- 5) 耐久性評価手法の改善にともなう利用方法の提案とその効果の試算

第 2 項 本研究の構成

本研究は、以下に概要を示す 7 章よりなる。

第 1 章 序論

1 章では、本研究の根幹を成すフライアッシュについて発生工程や化学的、物理的特性とといった工学的観点から整理した。

また、資源循環型社会の構築に求められる社会的な利用価値の重要性を整理するために産業副産物としてのフライアッシュの位置付けを明確にした。

第 2 章 既往文献の調査

2 章では、研究の遂行に際し関連する先行研究を調査検討することで産業副産物の循環利用に係る現状の把握および課題を明確化し、本研究の位置付けとその意義を確認した。

第 3 章 資源循環の枠組みと副産物の利用拡大に係る課題の抽出

3 章では、産業副産物の有効利用の位置付けおよび有効利用に至る過程の実態把握を目的とした調査を行った。

石炭灰の利用用途開拓の方向性の検討に先立ち、資源有効利用促進法による指定副産物である建設廃棄物の循環利用に対する意識について実態調査を行った。

調査は、建材製造業者、排出事業者、中間処理業者の立場の異なる 3 業種に対するアンケートにより行った。

第 4 章 フライアッシュコンクリート耐久性評価実態の調査

4 章では、フライアッシュコンクリートの耐久性評価の実態の把握とその課題の明確化を企図し調査を行った。調査は、促進中性化試験 40 編、長期屋外曝露試験 7 編の既往研究からコンクリートの調合、圧縮強度、中性化深さおよび中性化速度係数を収集し、統計処理を施すことにより行った。

第 5 章 長期的性状変化を考慮した耐久性評価方法の検討

5 章では、フライアッシュの長期的反応の実態を考慮した促進中性化試験方法を検討するために、水セメント比、フライアッシュの混合方法、置換率、および養生環境温度および

水分を変動因子とした実験を行った。

第 6 章 耐久性評価の改善にともなう利用方法の提案とその効果の試算

6 章では、耐久性評価に関する知見から、フライアッシュを含む石炭灰の有効利用方法を想定したモデルを作成し、資源循環の成立する諸条件について試算および検討を行った。

第 7 章 結論

7 章では、論文の各章を要約し、本研究の結論と今後の課題を総括した。

第 5 節 参考文献

本章の参考文献を以下に示す。データを引用した図表については各図表に出典を明記したが、全体について以下の文献を参考にした。

- 1-1) 一般財団法人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 26 年度実績），2016
- 1-2) 大塚 拓ほか：フライアッシュの鉱物組成とポゾラン反応性，セメント・コンクリート論文集，Vol. 63, No. 1, pp. 16-21, 2009
- 1-3) 金津 努：フライアッシュの有効利用，環境技術，Vol. 30, No. 4, pp.300-304, 2001
- 1-5) 資源エネルギー庁：平成 26 年度エネルギーに関する年次報告，2015
- 1-6) 環境省：産業廃棄物行政組織等調査報告書 平成 25 年度実績，2016
- 1-7) 環境省：平成 27 年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書，2015

第2章

既往研究の調査

第1節 序

本章では本研究に関わる既往研究について調査検討することで、本研究の位置付けを明確にし、検討を行う上での基礎的な資料とした。

調査対象は、

- I. 産業副産物の再生利用に係るもの
- II. 石炭灰の混和材利用技術に係るもの

の2つの分野に大別した。それぞれの調査内容は以下の項目である。

- I. 産業副産物の再生利用に係るもの
 - (A)産業副産物の再資源化の現状と課題
 - (B)セメント産業における副産物利用
- II. 石炭灰の混和材利用技術に係るもの
 - (A)フライアッシュコンクリートを含むコンクリートの中性化特性
 - (B)養生条件がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響
 - (C)混合方法がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響
 - (D)フライアッシュの反応機構，反応生成物に関する分析
 - (E)屋外曝露試験等によるフライアッシュコンクリートの長期性状分析
 - (F)フライアッシュの品質がコンクリートに及ぼす影響

第2節 既往研究調査対象リスト

第1項 産業副産物の再生利用に係るもの

- (A)産業副産物の再資源化の現状と課題
- (B)セメント産業における副産物利用のあり方

上記の2項目について、調査対象として設定した文献のリストを表2-2-1および表2-2-2に示す。

表2-2-1 収集対象文献リスト(産業副産物の再資源化の現状と課題)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
I-A-1	産業廃棄物行政の現状と課題	環境技術	2002	由田秀人	廃棄物 処理	廃掃法	適性処理
2	廃棄物の排出・再生利用・適正処理処分の現状と今後	表面科学	2015	谷川昇	廃棄物 処理	最終処分	再利用
3	建設副産物の再資源化の現状と課題	建設の施工企 画	2007	新妻弘章	建設 廃棄物	リサイクル 技術	不法投棄

表2-2-2 収集対象文献リスト(セメント産業における副産物利用のあり方)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
I-B-1	セメント産業における廃棄物・副産物利用の今後の可能性	日本 LCA 学 会研究発表会 講演要旨集	2010	橋本征二, 河井 紘輔, 藤井実ほ か	ストック量	セメント 需要	マテリアル フロー
2	石炭灰有効利用の現状と将来	石膏と石灰 (Gypsum & Lime)	1983	和田保男	石炭灰	有効利用	埋立処理
3	廃棄物使用量の増大とCO2 排出量削減に向けたセメントの材料設計	廃棄物資源循 環学会論文誌	2009	丸屋英二, 坂井 悦郎, 大崎雅史 ほか	廃棄物 使用量	CO ₂ 排出量	設計範囲
4	セメントの廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標による各種セメントの評価	セメント・コン クリート論文集	2015	星野清一, 河合 研至, 久保田修 ほか	環境影響 評価	リサイクル 率	廃棄物 指標

第2項 石炭灰の混和材利用技術に係るもの

- (A)フライアッシュコンクリートを含むコンクリートの中性化特性
- (B)養生条件がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響
- (C)混合方法がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響
- (D)フライアッシュの反応機構, 反応生成物に関する分析
- (E)屋外曝露試験等によるフライアッシュコンクリートの長期性状分析
- (F)フライアッシュの品質がコンクリートに及ぼす影響
- (G)コンクリートの中性化抵抗性評価

上記の7項目について、調査対象として設定した文献の出典リストを表2-2-3に示す。

混和材利用技術の調査においては、コンクリート工学年次論文集、および日本建築学会構造系論文集を中心に行った。

既往研究調査である本章は第3節から第4節において調査対象それぞれの主旨をまとめ、続く第5節において既往研究調査の総括および本研究の位置付けについて述べる。

本論文の作成にあたり、参考とした既往文献のリストを表2-2-4～表2-2-11に示す。

表 2-2-3 石炭灰の混和材利用技術に係る収集文献出典リスト

出典番号	出典	調査件数	調査件数(小計)						
			中性化	養生条件	混合方法	反応機構	長期性状	FA品質別	中性化評価
1	コンクリート工学年次論文集	31	3	10	5	5	3	3	1
2	日本建築学会 学術講演梗概集	22	1	10	0	7	4	0	0
3	日本建築学会 構造系論文集	12	5	0	2	3	0	1	1
4	日本建築学会 支部研究報告	5	0	1	2	0	2	0	0
5	土木学会論文集	3	0	1	1	1	0	0	0
6	その他	5	2	2	0	0	0	0	1
合計		78	11	24	10	16	10	4	3

表 2-2-4 収集対象文献リスト(フライアッシュコンクリートを含むコンクリートの中性化特性)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-A-1	コンクリートの炭酸化に関する研究	コンクリート工 学年次論文集	1989	小林一輔 宇野祐一	アルカリ分	孔隙水移 動	炭酸化
II-A-2	フライアッシュコンクリートの中性化、水密性および遮塩性に関する実験	コンクリート工 学年次論文集	1998	和田真平 阿部道彦 ほか2名	促進試験	中性化	水密性
II-A-3	フライアッシュコンクリートの中性化、および耐久設計強度に関する一考察	日本建築学会 構造系論文集	2006	呉富栄 樹田佳寛	中性化進 行形状係 数	中性化深さ の予測	耐久設計 基準強度
II-A-4	フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究(その1)中性化に及ぼす各種要因の影響に関する実験	日本建築学会 構造系論文集	2007	守屋健一 嵩英雄 ほか4名	中性化深さ	促進中性 化	促進環境
II-A-5	フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究(その2)フライアッシュコンクリートの耐久設計基準強度に関する検討	日本建築学会 構造系論文集	2007	守屋健一 嵩英雄 ほか4名	中性化深さ	中性化速 度係数	設計基準 強度
II-A-6	フライアッシュコンクリートの暴露試験に基づく中性化進行予測	日本建築学会 学術講演梗概 集	2006	呉富栄 樹田佳寛	中性化進 行形状係 数	中性化深さ の予測	耐久設計 基準強度
II-A-7	フライアッシュコンクリートの中性化深さのベイズ予測	明石工業高等 専門学校研究 紀要	2012	田坂誠一 服部信彦	中性化深さ	ベイズ予測	
II-A-8	フライアッシュを混合したコンクリートの自然曝露環境下における中性化性状に関する研究	九州大学大学院 人間環境学 研究院紀要	2007	伊藤是清 小山智幸 ほか3名	中性化	自然曝露	大量使用
II-A-9	フライアッシュを混合したコンクリートの中性化進行の予測	日本建築学会 構造系論文集	2001	黄光律 野口貴文 友澤史紀	中性化	ポゾラン反 応	細孔空隙 量
II-A-10	フライアッシュを使用したコンクリートの中性化特性	日本建築学会 構造系論文集	2002	船本憲治	中性化	フライアッ シュ置換率	水結合材 比
II-A-11	石炭灰を多量に混用したコンクリートの中性化	コンクリート工 学年次論文集	1997	狩野敏也 曾根徳明 谷川公一	中性化	中性化深さ	中性化速 度係数

表 2-2-5 収集対象文献リスト(養生条件がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響 1)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-B-1	40℃気中環境下におけるフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状	コンクリート工 学年次論文集	2008	高巢幸二 松藤泰典	40℃気中 養生	外割混合	細孔容積
II-B-2	フライアッシュを使用したコンクリートの強度発現に及ぼす養生変化の影響	コンクリート工 学年次論文集	2003	呉富栄 樹田佳寛 ほか2名	湿潤養生 期間	強度発現	強度寄与 率
II-B-3	養生温度および置換率がフライアッシュの反応性に及ぼす影響	コンクリート工 学年次論文集	2006	上野敦 國府勝郎 ほか2名	養生温度	置換率	Ca(OH) ₂ 量
II-B-4	フライアッシュを使用したコンクリートの長期強度発現に及ぼす湿潤養生の影響	コンクリート工 学年次論文集	2002	呉富栄 樹田佳寛 中村成春	湿潤養生 期間	強度発現	単位容積 質量
II-B-5	フライアッシュコンクリートの強度・中性化に及ぼす養生の影響に関する研究(その2)湿潤養生n打ち切り時期の評価	日本建築学会 学術講演梗概 集	2004	玉井孝幸 渡辺英樹 ほか2名	圧縮強度	打ち切り強 度	湿潤養生 期間
II-B-6	フライアッシュコンクリートの強度発現に関する研究	日本建築学会 学術講演梗概 集	2005	山城洋一 齋藤敏樹	圧縮強度	積算温度	置換方法
II-B-7	フライアッシュセメントB種相当コンクリートの湿潤養生期間が圧縮強度・中性化に及ぼす影響に関する実験研究(その2 中性化)	日本建築学会 学術講演梗概 集	2010	末永龍夫 笠井浩 ほか4名	湿潤養生 期間	せき板	中性化
II-B-8	フライアッシュの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価	コンクリート工 学年次論文集	2000	国府勝郎 上野敦 平野将司	圧縮強度	等値換算 係数	マチュリ ティ
II-B-9	フライアッシュを外割混合使用したコンクリートの促進中性化の評価に関する研究	日本建築学会 学術講演梗概 集	2009	野田良太 伊藤是清 ほか3名	大量使用	促進中性 化試験	暴露試験
II-B-10	フライアッシュを使用したコンクリートの初期強度発現性	日本建築学会 学術講演梗概 集	2002	本田悟 椎葉大和	低温環境	暑中環境	圧縮強度

表 2-2-6 収集対象文献リスト(養生方法がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響 2)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-B-11	フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性に関する研究(その3 各種養生条件におけるフライアッシュコンクリートの強度特性)	日本建築学会 学術講演梗概 集	2009	木下茂 石川嘉崇 ほか2名	耐久性	養生条件	実大壁
II-B-12	フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす温度と養生の影響	コンクリート工 学年次論文集	2008	藤本浩 芦田広喜 ほか2名	養生温度	フレッシュ 性状	圧縮強度
II-B-13	フライアッシュを外割混合したコンクリートの中性化の評価	九州大学大学 院人間環境学 研究院紀要	2009	伊藤是清 小山智幸 ほか2名	大量使用	中性化	ポゾラン反 応
II-B-14	フライアッシュ混入高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす養生温度の影響	コンクリート工 学年次論文集	2007	渡辺新一 菅田紀之	高強度コン クリート	養生温度	積算温度
II-B-15	フライアッシュ置換率40%までのコンクリートの初期性状	コンクリート工 学年次論文集	1999	船本憲治 松藤泰典 ほか2名	混和材料	脱水量	強度発現 性状
II-B-16	コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類、調合および養生条件の影響(その2)各種要因とその効果	日本建築学会 学術講演梗概 集	1985	和泉意登志 押田文雄 高英雄	養生条件	セメント種 類	中性化
II-B-17	養生温度を変化させたフライアッシュ混和ペーストの微細構造	日本建築学会 学術講演梗概 集	2005	胡桃沢清文 名和豊春	養生温度	水和率	フライアッ シュ反応率
II-B-18	水比、混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響	コンクリート工 学年次論文集	1999	小早川真 黄光律 ほか3名	ポゾラン反 応	反応率	不溶残分
II-B-19	養生中の温度および湿度が、フライアッシュを用いたコンクリートの強度に及ぼす影響	土木学会論文 集	1960	左右田孝男 山崎寛司	養生温度	養生湿度	圧縮強度
II-B-20	フライアッシュを外割混合したコンクリートの中性化の評価	日本建築学会 学術講演梗概 集	2009	野田亮太 伊藤是清 ほか3名	養生温度	暴露試験	ポゾラン反 応
II-B-21	置換率および養生条件がフライアッシュを用いたモルタルの品質に及ぼす影響	コンクリート工 学年次論文集	2008	小川由布子 宇治公隆 上野敦	置換率	養生温度	養生期間
II-B-22	蒸気養生履歴がフライアッシュセメントの水和反応と圧縮強度に及ぼす影響	日本大学生産 工学部第44回 学術講演会概 要	2011	臼田康平 佐藤正己 梅村靖弘	蒸気養生	圧縮強度	フライアッ シュ反応率
II-B-23	各種養生条件がフライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状に及ぼす影響	日本建築学会 九州支部研究 報告	2002	田中正彦 椎葉大和 本田悟	養生条件	圧縮強度	中性化
II-B-24	各種セメントを用いたコンクリートの合理的な湿潤養生期間に関する実験(その14 総合考察)	日本建築学会 学術講演梗概 集	2007	大倉真人 中根博 ほか4名	湿潤養生	圧縮強度	耐久性

表 2-2-7 収集対象文献リスト(混合方法がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-C-1	フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性	コンクリート工 学年次論文集	2007	芦田広喜 古賀善雄 藤本浩	外割配合	細骨材	ブレン比 表面積
II-C-2	フライアッシュを45%まで内割使用したコンクリートに関する実験的研究	コンクリート工 学年次論文集	2000	船本憲治 宝口繁紀 ほか2名	コンクリート 温度	強度発現	促進中性 化
II-C-3	フライアッシュを外割混合使用したコンクリートの中性化特性	コンクリート工 学年次論文集	1998	黄光律 野口貴文 ほか2名	外割混合	内割混合	細孔空隙
II-C-4	フライアッシュを外割混合したモルタルの中性化特性	コンクリート工 学年次論文集	1999	黄光律 野口貴文 ほか2名	圧縮強度	細孔空隙 量	Ca(OH) ₂ 量
II-C-5	フライアッシュを外割大量使用するコンクリートの調合則に関する研究- 中性化に関する等ポテンシャルライン-	日本建築学会 九州支部研究 報告	2000	松藤泰典 伊藤是清 ほか3名	外割混合	中性化抵 抗性	ポテンシ ャルライ ン
II-C-6	フライアッシュを混合したコンクリートの圧縮強度発現推定式	日本建築学会 構造系論文集	1999	黄光律 野口貴文 友澤史紀	圧縮強度 発現	推定式	フライア ッシュセ メント 式
II-C-7	フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性	土木学会第55 回年次学術講 演会	2000	望月真 尾之内厚志 ほか2名	細骨材代 替	外割置換	粉末度
II-C-8	フライアッシュ外割混合コンクリートの諸特性に関する研究	日本建築学会 九州支部研究 報告	2009	山内信英 松藤泰典 高果幸二	外割混合	細孔分布	水酸化カル シウム量
II-C-9	コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率 の影響に関する実験的研究	日本建築学会 構造系論文集	2006	全洪珠 嵩英雄	置換率	圧縮強度	中性化
II-C-10	石炭灰を大量使用したコンクリートの強度・中性化特性	コンクリート工 学年次論文集	2000	小山智幸 松藤泰典 ほか2名	調合則	中性化抵 抗性	等ポテン シャルライ ン

表 2-2-8 収集対象文献リスト(フライアッシュの反応機構, 反応生成物に関する分析)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-D-1	フライアッシュセメントの水和反応が微細構造および強度発現に及ぼす影響	日本建築学会 学術講演梗概 集	2006	山城洋一 齋藤敏樹 ほか2名	強熱減量	水和率	細孔量
II-D-2	フライアッシュのポゾラン反応による硬化体の空隙・組織の変化	コンクリート工 学年次論文集	2001	小早川真 羽原俊祐	ポゾラン反 応	反応率	BET比表面 積
II-D-3	フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察	土木学会論文 集E	2007	山本武 金津努	ポゾラン反 応	ポロシティ	圧縮強度
II-D-4	フライアッシュを使用したセメント硬化体の初期強度発現性(その2.ポゾラン反応速度および細孔構造)	日本建築学会 学術講演梗概 集	2003	本田悟 椎葉大和	ポゾラン反 応速度	細孔構造	圧縮強度
II-D-5	フライアッシュのポゾラン反応率の算定式の一提案	日本建築学会 学術講演梗概 集	1999	黄光律 小早川真 ほか3名	ポゾラン反 応率	拡散係数	結合水量
II-D-6	フライアッシュの反応速度に関する研究	コンクリート工 学年次論文集	2007	谷口円 佐川孝広 桂修	ポゾラン反 応	水酸化カル シウム	反応速度 式
II-D-7	フライアッシュを大量混和したコンクリートの微細組織と圧縮強度	日本建築学会 構造系論文集	1999	黄光律 野口貴文 友澤史紀	圧縮強度	ポゾラン反 応	細孔空隙 量
II-D-8	フライアッシュを大量混和したコンクリートの中性化特性に及ぼすポゾラン反応の影響	日本建築学会 構造系論文集	2000	黄光律 野口貴文 友澤史紀	中性化	細孔空隙 量	Ca(OH) ₂ 量
II-D-9	フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造	コンクリート工 学年次論文集	1998	黄光律 小早川真 ほか2名	空隙径分 布	水和組織	ポゾラン反 応
II-D-10	フライアッシュを添加したセメントペーストおよびモルタルのポゾラン反応と強度発現	日本建築学会 構造系論文集	2005	呉富栄 梶田佳寛 杉山央	ポゾラン反 応	水酸化カル シウム量	結合水量
II-D-11	フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造	コンクリート工 学年次論文集	2012	黄光律 小早川真 ほか2名	空隙径分 布	水和組織	ポゾラン反 応
II-D-12	フライアッシュを添加したセメントペーストおよびモルタルのポゾラン反応と強度発現	日本建築学会 構造系論文集	2019	呉富栄 梶田佳寛 杉山央	ポゾラン反 応	水酸化カル シウム量	結合水量
II-D-13	フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造	コンクリート工 学年次論文集	2026	黄光律 小早川真 ほか2名	空隙径分 布	水和組織	ポゾラン反 応
II-D-14	フライアッシュを添加したセメントペーストおよびモルタルのポゾラン反応と強度発現	日本建築学会 構造系論文集	2033	呉富栄 梶田佳寛 杉山央	ポゾラン反 応	水酸化カル シウム量	結合水量
II-D-15	フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造	コンクリート工 学年次論文集	2040	黄光律 小早川真 ほか2名	空隙径分 布	水和組織	ポゾラン反 応
II-D-16	フライアッシュを添加したセメントペーストおよびモルタルのポゾラン反応と強度発現	日本建築学会 構造系論文集	2047	呉富栄 梶田佳寛 杉山央	ポゾラン反 応	水酸化カル シウム量	結合水量

表 2-2-9 収集対象文献リスト(屋外暴露試験等によるフライアッシュコンクリートの長期性状分析)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-E-1	10年屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリートの性状	コンクリート工 学年次論文集	2007	安田正雪 阿部道彦 ほか2名	屋外暴露	圧縮強度	中性化
II-E-2	コンクリートの長期性状に関する材齢10年の実験報告	日本建築学会 関東支部研究 報告集	2006	平原武 岡野智哉 ほか4名	長期性状	屋外暴露	屋内保存
II-E-3	45年経過した混合セメントコンクリートの長期強度発現性について	コンクリート工 学年次論文集	2012	植木康知 大塚勇介 ほか2名	長期耐久 性	長期材齢	空隙構造
II-E-4	フライアッシュコンクリートを使用した建築構造物の耐久性に関する研究 その3 既設構造物の耐久性評価	日本建築学会 学術講演梗概 集	2002	中村一孝 石川嘉崇 ほか4名	中性化	塩分拡散 係数	既設構造 物
II-E-5	フライアッシュコンクリートを使用した建築構造物の耐久性に関する研究	日本建築学会 関東支部研究 報告集	2002	中込卓史 石川嘉崇 ほか4名	中性化	圧縮強度	既設構造 物
II-E-6	フライアッシュコンクリートを使用した建築構造物の耐久性に関する研究 その6 材齢21年コアについてのEPMA分析結果	日本建築学会 学術講演梗概 集	2003	中村一孝 石川嘉崇 山本一雄	EPMA	マッピング 分析	既設構造 物
II-E-7	フライアッシュを使用したコンクリートの屋外暴露試験	コンクリート工 学年次論文集	2000	安田 正雪 阿部 道彦 ほか2名	屋外暴露	圧縮強度	中性化
II-E-8	フライアッシュを使用したコンクリートの材齢9年における屋外暴露試験 報告	日本建築学会 学術講演梗概 集	2007	船本憲治 小山田英弘 ほか3名	暴露試験	中性化速 度係数	水結合材 比
II-E-9	フライアッシュを使用したコンクリートの長期材齢における強度寄与率の 検討	日本建築学会 学術講演梗概 集	2008	岡野智哉 小山智幸 ほか3名	長期材齢	強度寄与 率	置換率
II-E-10	石炭灰を大量使用したコンクリートの強度・中性化特性	コンクリート工 学年次論文集	2000	小山智幸 松藤泰典 ほか2名	調合則	中性化抵 抗性	等ポテン シャルライ ン

表 2-2-10 収集対象文献リスト(フライアッシュの品質がコンクリートに及ぼす影響)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-F-1	フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性	コンクリート工 学年次論文集	1998	福留和人 坂本守 ほか2名	硬化体	フリーディ ング	強度特性
II-F-2	フライアッシュを使用するコンクリートの諸特性について	コンクリート工 学年次論文集	2001	木村正彦 愛甲安富 ほか2名	単位粉体 量	単位水量	比表面積
II-F-3	フライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状	コンクリート工 学年次論文集	2001	本田悟 椎葉大和	大量使用	圧縮強度	中性化
II-F-4	コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率 の影響に関する実験的研究	日本建築学会 構造系論文集	2006	全洪珠 嵩英雄	置換率	圧縮強度	中性化

表 2-2-11 収集対象文献リスト(コンクリートの中性化抵抗性評価)

番号	文献名	出典	年度 (年)	著者	キーワード		
					1	2	3
II-G-1	促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価	土木学会論文 集	1988	大賀宏行 長瀧重義	中性化	中性化予 測	促進試験
II-G-2	コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究	日本建築学会 構造系論文集	1990	阿部道彦 柘田佳寛 田中斉 柳啓	促進試験	評価	炭酸ガス 濃度
II-G-3	コンクリートの促進中性化試験方法の変遷に関する調査	日本建築学会 技術報告集	2014	中村則清 阿部道彦	コンクリート	促進中性 化	試験方法

第3節 産業副産物の再利用に係る既往研究

第1項 産業副産物の再資源化の現状と課題

産業副産物の再利用および有効利用を論じるにあたり、産業副産物および建設廃棄物の処理や再利用の現状や課題を明確にする目的で、産業副産物の処理実態や再資源化に関連性を有すると考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

I-A-1. 産業廃棄物行政の現状と課題

由田は、循環型社会を実現するためには、廃棄物の減量化の促進、および適正処理の体制整備を大きな課題として指摘している。しかし、実態として適性処理に資する設備の整備は十分とはいえず、不法投棄量の増大を招く結果となっている状況を踏まえ、廃掃法改正の背景、および概要に触れたうえで、行政側において適正処理推進の観点から強化された規制等の取り組みについて述べている。

行政の規制の強化により、適正な処理を行おうとする業者が、不適正な処理により処理費用を安くあげようとする業者に圧迫されてしまい、規制を強化しても優良な処理業者が育ちにくいという状況が続く結果として、不適正な業者による不法投棄等の続発という構造は改善が見込まれる。

I-A-2. 廃棄物の排出・再生利用・適正処理処分の現状と今後

谷川は、廃棄物の排出抑制には限界があること、廃棄物の再生利用では効率性、環境負荷、経済的負担等への配慮も必要になること、産業廃棄物の再生利用では事業採算性が最優先になることを指摘し、最終処分場の重要な役割の永続性を示した。

一方で、最終処分場の適地が少なくなっていること、最終処分場の新規建設にあたっての住民合意等が得にくいこと等から、最終処分量が急減しているにもかかわらず、最終処分場の埋立残余容量は、長期的な微減傾向が続いている現状を指摘し、産業廃棄物最終処分場の安定的確保を図る必要性を示した。その際には、最終処分場事業者だけではなく、産業廃棄物の排出事業者、中間処理事業者、収集運搬事業者が、法令を遵守し、それぞれの責任を果たさなければならないとしている。

I-A-3. 建設副産物の再資源化の現状と課題

新妻は、高度経済成長期に建設された建造物が更新時期を迎え、解体廃棄物の増加が予測されることや、最終処分場の逼迫する残余容量などの課題を指摘し、今後の循環型社会形成に向けて、建設産業のリサイクル推進のための取組みの強化や技術開発の進展は重要であるとしている。続いて、建設廃棄物の排出の現状および再利用の流れを品目別に示した。結びとして建設リサイクル法の制定による特定建設資材の分別と再資源化の義務付け、グリーン購入法による環境物品などの調達等の整備による、資源循環型社会の形成の枠組み

の成立に言及し、構造物の長寿命化や既存の構造物の維持管理、更新技術などの発展に伴う廃棄物の発生抑制が資源循環型社会の実現に資するものとした。

第 2 項 セメント産業における副産物利用

セメント産業は天然資源を加工し、製品を製造する動脈産業としての一面を有する一方で、他産業から排出された産業副産物を燃料や原料として受け入れる静脈産業としての一面も有する。これを鑑み、セメント産業における副産物利用の位置付けを考察する際に必要と考えられる既往の研究を調査した。

I-B-1. セメント産業における廃棄物・副産物利用の今後の可能性

橋本らは、2030 年頃までの必要ストック量および新規着工量の推計を基にセメント需要量の予測を行った。また、その結果からセメント産業における廃棄物および副産物の利用の可能性について検討した。その結果、現状の廃棄物および副産物の利用総量の維持にはセメント 1 トンあたりに廃棄物および副産物の利用原単位を 600kg/t-セメントとする必要があること、および利用原単位の向上が見込めない場合には利用総量は現状の 3 分の 2 以下となることを示し、状況を踏まえた廃棄物および副産物の管理が求められると指摘している。

I-B-2. 石炭灰有効利用の現状と将来

和田は、現在より 30 年ほど前から石炭灰の資源としての有効利用に言及し、その発生量および性状や利用の現状とその課題を明確にしている。そのうえで、石炭灰の利用量拡大においては、国のエネルギー政策としての支援、および呼びかけが不可欠とし、これを受けて国民も石炭灰活用政策に協力する必要があるとしている。さらに、上記の客観的視点のみならず、主たる排出側である発電業については利用技術の拡大、新技術の開発、材料としての規格化・公認化、競合業界との調整、使用者への PR 等を主体的に行うべきとした。

I-B-3. 廃棄物使用量の増大と CO₂ 排出量削減に向けたセメントの材料設計

丸屋らは、セメント産業は他産業で発生した廃棄物を原料や燃料として大量に受け入れており、資源循環システムにおいて基幹的な役割を果たしているとしている。またセメント産業の廃棄物利用による経済効果の試算結果を、4,800 億円/年に上るとしている。一方で、原料としての廃棄物の利用が飽和状況にあり、セメントの生産量の増加も見込めない現状と併せ、廃棄物使用量の増加方策を課題として挙げている。

その一方策として、ポルトランドセメントの化学組成を変更し、石炭灰や汚泥等に多く含まれる Al₂O₃ 成分を増加させる例を挙げ、調合計算と硬化時の水和生成物相を予測する相組成モデルを組み合わせた手法を用い、廃棄物使用量と強度発現性を満足するための最適な間隙相組成の検討を行った。

一方で、セメント産業は CO₂ 排出量の多い主要業種として位置づけられており、CO₂ 排

出量削減をセメント産業における重要な課題の一つとして挙げた。高炉スラグや石炭灰の混和は、混合材量に比例してCO₂量を低減できるが、そのみに基づき混合材の利用を推進した場合、クリンカの生産量が減少し、他の廃棄物使用量の低減を招くおそれがある。種々の混和材料の特性を利用し、セメント代替とすることでコンクリートの品質向上を図る研究が進められているが、廃棄物使用量総量を維持拡大できるという前提の基で、実用化がなされる必要があると指摘している。

このような前提を満たす材料設計手法を確立するための一環として、クリンカの鉱物組成および混合材添加量と廃棄物使用量、CO₂排出量、強度発現性との関係を試算し、今後あるべきセメントの姿について検討を加え、以下の結論を導いている。

- (1) クリンカの間隙相量を1%増加することで、廃棄物原単位を14~25 kg/t 増大でき、国内で最終処分された量の3~5%に相当する廃棄物を処理できる可能性がある。
- (2) クリンカの間隙相量を増大することにより、セメントの廃棄物使用量を拡大しつつ、添加量25~35%を上限として混合材の活用を図れることがわかった。
- (3) CO₂排出量に対しては、間隙相量の増加よりも混合材の添加による効果が大きく、添加量10%で年間190万t程度以上、添加量20%では年間580万t程度以上のCO₂を削減できる可能性があることがわかった。
- (4) 欧州規格42.5クラス相当の強度発現性を満足する混合材添加量の上限値は、C₃A量を増加した系で20~35%の範囲、C₄AF量を増加した系では15~20%の範囲にあると推定された。
- (5) クリンカの間隙相量を2~3%増大し、かつ混合材添加量を10%とすることで、現状の普通ポルトランドセメントよりも主要な廃棄物使用量が10%多く、製造時のCO₂排出量が5%少ないセメント組成物を具現できる可能性が示された。

I-B-4. セメントの廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標による各種セメントの評価

星野らは、セメントの廃棄物活用による環境への貢献を定量化するための手法構築を目的に、リサイクル率を反映した廃棄物指標により各種セメントの評価を行った。廃棄物指標による評価結果はポルトランドセメント(PC) >フライアッシュセメントB種(FB) >高炉セメントB種(BB)の順に大きく、廃棄物活用による環境への貢献はPCが最も大きいと評価した。また、日本版被害算定型影響評価手法(LIME2)の統合化評価結果においても、廃棄物活用による環境への貢献はPC > FB > BBの順に大きいものと評価し、両手法による評価値は相対的に高い一致性を示すこと、リサイクル率を反映した廃棄物指標は、セメントの廃棄物活用による環境への貢献を定量化するための指標として有効である可能性を明らかにした。

第4節 石炭灰の混和材利用技術に係る既往研究

第1項 フライアッシュコンクリートを含むコンクリートの中性化特性

フライアッシュコンクリートの品質評価を論じるうえで、耐久性能を代表する中性化に対する評価の現状を把握する目的で、フライアッシュコンクリートを含むコンクリートの中性化に関連性を有すると考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

II-A-1. コンクリートの炭酸化に関する研究

セメント中のアルカリ分、コンクリート内部の孔隙水の移動はコンクリートの炭酸化を促進させる。このことは普通ポルトランドセメントを用いた場合のみならず、高炉スラグ等を混合したコンクリートにおいてもいえ、特に孔隙水の移動は高炉スラグコンクリートにおいては炭酸化を顕著に促進させる。

II-A-2. フライアッシュコンクリートの中性化、水密性および遮塩性に関する実験

品質の異なる3種類のフライアッシュを普通ポルトランドセメントの15, 30, 45%代替として用いた水結合材27, 40, 55%のコンクリートについて、水結合材比、圧縮強度および水セメント比をそれぞれ同一として通常コンクリートと比較すると、フライアッシュコンクリートの中性化は同一水セメント比で同程度の結果が得られるのみであった。水密性は同一水セメント比では同等以上、同一強度では同程度であったが、遮塩性に関してはすべての条件で同等以上の性能が得られるという結果が得られた。

II-A-3. フライアッシュコンクリートの中性化、および耐久設計強度に関する一考察

フライアッシュコンクリートは普通コンクリートに比べて、所定の期間(65~100年)で同一中性化深さ(40mm)以下とするために必要な圧縮強度は約 3N/mm^2 程度割増す必要があることが確認された。しかし、フライアッシュコンクリートの屋外暴露試験では、中性化進行形状係数 b は中性化期間が長くなるにつれて小さくなっていく傾向にあり、長期にわたる屋外暴露試験のデータが十分でないはないため、長期暴露試験データが必要である。

II-A-4. フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究(その1)中性化に及ぼす各種要因の影響に関する実験

(1)試験温度の影響はフライアッシュ置換の有無、置換率および供試体の断面寸法によって異なる。

(2)また、フライアッシュコンクリートの中性化の進行は \sqrt{t} よりも少ない。またフライアッシュ置換率15%では温度と供試体断面寸法の影響は少なく、長期の中性化は鈍化し、置換率25%では断面寸法が大きいほうが中性化の進行は速い。

(3)促進中性化中にコンクリートが湿潤状態になる場合、フライアッシュの有無に関わらず中性化の進行は低減する。

II-A-5. フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究(その2)フライアッシュコンクリートの耐久設計基準強度に関する検討

フライアッシュを混和することによる設計基準強度の割増は屋根スラブ、床スラブ、非耐力壁については一般で 1.0N/mm^2 、標準で 2.0N/mm^2 必要であることが分かった。よって1999年のフライアッシュ指針の強度割増は最大でも 3N/mm^2 あればよく、現行のフライアッシュコンクリート指針の推奨する耐久設計基準強度の割増は過大であるといえる。また、屋外に使用するフライアッシュの耐久設計基準強度は JASS5 に示す値でよく、屋内部のスラブ、非耐力壁においては耐久設計基準強度またはかぶり厚の割増が必要である。

II-A-6. フライアッシュコンクリートの暴露試験に基づく中性化進行予測

- 1) 中性化進行形状係数 b の経時変化は、中性化期間が短いときは安定せず大きくばらつくが期間が長くなるにつれて収束していく。
- 2) 屋外暴露試験の中性化進行形状係数はフライアッシュコンクリートの場合は 0.37 、普通コンクリートの場合は 0.47 である。
- 3) 所定の期間(65~100年)において中性化が 40mm 以上進行しないために必要な圧縮強度は、 \sqrt{t} 則に従うとする前提のもとでフライアッシュコンクリートでは、普通コンクリートに比べ $3\sim 4\text{N/mm}^2$ 、 b_0 乗則に従う前提のもとで $1\sim 2\text{N/mm}^2$ 程度割増す必要がある。

II-A-7. フライアッシュコンクリートの中性化深さのベイズ予測

- 1) フライアッシュを内割り置換したコンクリートは、無混合や外割り混合のコンクリートに比較して中性化進行が速い。
- 2) 中性化深さと水セメント比は非常に強い相関を示し、圧縮強度の逆数との相関より高い相関係数を示した。
- 3) 中性化深さ進行に係る \sqrt{t} 則は、必ずしも精度的に十分とはいえない場合がある。予測に付随する不確定性の定量的評価を取り入れた高精度予測を行うにはベイズ推定手法が有効である。
- 4) ベイズ推定に MCMC を組み合わせた予測手法は応用性に優れており、特に非線形数式モデルのパラメータ推定に活用できる。

II-A-8. フライアッシュを混合したコンクリートの自然曝露環境下における中性化性状に関する研究

フライアッシュを外割混合した場合、促進試験、自然曝露試験においても単位フライアッシュ混合量の増加に伴い中性化速度係数は減少すること、フライアッシュの中性化低減への寄与率は促進試験と自然曝露試験では自然曝露試験の方が大きいことが分かった。内

割混合した場合、中性化速度係数に及ぼす脱型時材齢の影響は大きく、屋内暴露よりも屋外暴露の方が顕著であった。また、種々の条件によらず中性化速度係数は水セメント比で評価が可能となり、計画供用期間に対し置換率 20%以下に要求される水結合材比は一般 60%、長期 45%が妥当であることを確認できた。

II-A-9. フライアッシュを混合したコンクリートの中性化進行の予測

フライアッシュを混和したコンクリートはポゾラン反応によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が消費され、中性化抵抗性が減少するが、組織は緻密になり拡散係数が減少し、中性化抵抗性は大きくなることが説明された。また、フライアッシュを混和したコンクリートの中性化速度は初期材齢では、無混和の場合に比べ大きい値を示しているが、材齢が長くなるにしたがって減少することを予測できた。

II-A-10. フライアッシュを使用したコンクリートの中性化特性

JASS5「高流動コンクリート」の要求性能を満足するための置換率の最大値は、水結合材比 35%の場合で 50%、水結合材比 40%の場合で 40%、水結合材比 55%の場合で 20%程度である。また、上記性能を満足できる水セメント比の最大値は 65%である。中性化速度はフライアッシュの置換の有無によらず、水セメント比と良い相関が得られた。同一水セメント比では、フライアッシュがセメント外割として作用することから無置換のコンクリートよりも良好な結果を示した。中性化速度は 28 日圧縮強度との相関性が低く、フライアッシュ置換率 20%以下では、耐久設計基準強度の割増は不要である。

II-A-11. 石炭灰を多量に混用したコンクリートの中性化

屋内および屋外環境において、同一水セメント比の無置換コンクリートと比較すれば、石炭灰の混合は中性化深さを低減する。促進および屋内暴露は \sqrt{t} 則が適用できるが、屋外暴露ではその相関性がやや低くなる。同一水セメント比の無置換コンクリートに対し、石炭灰を多量混和することで、中性化速度係数を 0.4 から 0.9 倍程度に低減することが可能となる。石炭灰を多量に混用したコンクリートにおいても水セメント比と密接に関係がある。

第2項 養生条件がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響

フライアッシュコンクリートの品質評価を論じるうえで、材齢初期の養生条件が長期的性状変化および耐久性におよぼす影響を把握する目的で、フライアッシュコンクリートの初期養生条件に関連性を有すると考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

II-B-1. 40℃気中環境下におけるフライアッシュ外割混合コンクリートの強度性状

普通コンクリート領域の単位セメント量と高強度コンクリート領域の単位セメント量の2水準において、フライアッシュを外割大量混合したコンクリートについて40℃気中養生というコンクリートには厳しい環境下での強度発現性状に関する実験を行い、標準養生の場合と比較検討した。40℃気中養生条件下では、単位セメント量600kg/m³以上のフライアッシュ無混合コンクリートでは標準養生と同程度の圧縮強度を確保できないが、フライアッシュを200kg/m³程度外割混合したコンクリートでは標準養生と同程度の圧縮強度を発現することができた。

II-B-2. フライアッシュを使用したコンクリートの強度発現に及ぼす養生変化の影響

- 1) 水中養生または封緘養生した場合、フライアッシュを混入したコンクリートは、無混入と比較して、材齢7～91日における強度の増加が大きい。
- 2) フライアッシュの強度寄与効果は、水中養生・封緘養生に関わらず、材齢14日間程度以上、湿潤養生した場合に得られる。
- 3) 動弾性係数は、材齢初期から長期間に乾燥の影響を受けると、材齢28日試験時よりも、その後も乾燥し続けた方が低下する傾向がみられる。

II-B-3. 養生温度および置換率がフライアッシュの反応性に及ぼす影響

- 1) 普通セメントモルタルの最終強度は、養生温度が高いほど低下した。一方、フライアッシュII種を用いた場合、最終強度は置換率と養生温度の影響を顕著に受け、養生温度が20および30℃の最終強度は、普通セメントを用いた場合より顕著に大きくなった。また、置換率が30%以上では、置換率の増加による最終強度の低下がみとめられるが、養生温度による強度増進の傾向は顕著となった。
- 2) 置換率15%では養生温度20および30℃ともに材齢14日程度以降で普通セメント以上の性能を発揮した。

II-B-4. フライアッシュを使用したコンクリートの長期強度発現に及ぼす湿潤養生の影響

- 1) 各種養生条件下における単位容積質量の経時変化は、同一W/Cのフライアッシュ無混入コンクリートとほぼ同じ変化を示し、フライアッシュが及ぼす影響は見られなかった。
- 2) 水中、封緘、気中の養生一定下の圧縮強度は、フライアッシュ混入の影響を受けたが、材齢ごとの養生一定下の強度に対する各種養生下の強度変化比は、フライアッシュ混入にあまり影響を受けず、元々のW/Cに依存している。
- 3) 若材齢で湿潤養生が不足した場合、フライアッシュが結合材として強度発現に寄与する比率は、若材齢時の約40%から、あまり変化せず、長期材齢に至っている。

II-B-5. フライアッシュコンクリートの強度・中性化に及ぼす養生の影響に関する研究(その2) 湿潤養生の打ち切り時期の評価

- 1) フライアッシュコンクリートを置換したコンクリートの湿潤養生の打ち切り強度は 15N/mm^2 以上必要である。
- 2) セメントの種類は中性化深さに影響する。
- 3) 供試体の乾湿の影響は大きく、気中養生されたものにその影響は顕著である。

II-B-6. フライアッシュコンクリートの強度発現に関する研究

フライアッシュコンクリートの圧縮強度は、同一水セメント比においてフライアッシュ無混入と比較すると、同程度以上の強度発現が得られた。また、圧縮強度は、セメント水比、単位フライアッシュ量および積算温度により推定可能であることが示唆された。

II-B-7. フライアッシュセメント B 種相当コンクリートの湿潤養生期間が圧縮強度・中性化に及ぼす影響に関する実験研究(その2 中性化)

W/B50%以下のフライアッシュコンクリートの中性化深さは、せき板存置期間を3日以上確保すれば、AIJ 高耐久 RC 造指針の品質目標 25nm 以下を満足することが明らかとなった。また一連の実験結果から脱型時強度および中性化の観点からフライアッシュコンクリートの湿潤養生期間を表として表した。

II-B-8. フライアッシュの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価

フライアッシュコンクリートの圧縮強度は、フライアッシュの種類及び養生温度ごとに、マチュリティの対数表示と比例関係がある。しかし、フライアッシュの反応の温度依存性が推察され、養生温度が異なる場合には普通コンクリートの場合と同様な関係は成立しない。フライアッシュの強度発現に対する寄与は養生温度が高いほど顕著である。フライアッシュ II 種は 30°C 養生の材齢 3 か月で普通セメントの約 0.8、 20°C 養生の 3 か月で約 0.4 程度の効果を示すが、 10°C 養生では強度発現にはほとんど寄与しない。

II-B-9. フライアッシュを外割混合使用したコンクリートの促進中性化の評価に関する研究

養生温度を高くしてポゾラン反応を促進させた場合、中性化深さにおいて 40°C 環境下で前養生したものの方が 20°C 環境下で養生したものよりも、すでに得られた自然曝露試験結果に近い値が得られた。

II-B-10. フライアッシュを使用したコンクリートの初期強度発現性

低温環境下においては、フライアッシュを大量に置換した高流動コンクリートでも大幅

な強度発現の遅延は確認されなかった。暑中環境下においては、フライアッシュ置換率40%以上では標準期を上回り、フライアッシュの大量置換は暑中環境下での強度発現低下を防ぐ有効な手段といえる。脱型時期、養生期間に関しては、ハイボリュームフライアッシュコンクリートでも特に延長する必要はなく、経済性や有効利用の面からも有用と考えられる。

II-B-11. フライアッシュを使用したコンクリートの耐久性に関する研究（その3 各種養生条件におけるフライアッシュコンクリートの強度特性）

材齢91日では水結合材比が55%の場合でも、フライアッシュ置換率が20%までは圧縮強度の低下はなく、長期的にはフライアッシュ置換による圧縮強度の低下はない、あるいは増進すると考えられる。静弾性係数は混和材による補正係数 k_2 を1.1としたNewRC式の線に乗っているが、恒温封緘養生ではやや大きく、標準養生ではやや低い値を示した。

II-B-12. フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす温度と養生の影響

フライアッシュを10%置換したコンクリートの圧縮強度は、養生温度および養生方法に関係なく無混入コンクリートと概ね同等の強度が得られる。フライアッシュを10%および20%置換したコンクリートの断熱温度上昇量は、置換率に関係なく無混入コンクリートと変わらない。以上のことから、フライアッシュを外割り使用したコンクリートの施工・養生に関しては、寒中時および暑中時ともに普通コンクリートと同様に実施しても問題ないことが確認できた。また、断熱温度上昇量に及ぼすフライアッシュ外割り混入の影響はみとめられなかった。

II-B-13. フライアッシュを外割混合したコンクリートの中性化の評価

中性化促進試験に供する前段階における前養生の温度を高くしてポゾラン反応を進行させた試験体の促進中性化性状に関する実験を実施し、ここから得られた結果と長期曝露試験結果との比較を行った。その結果、現行の促進中性化試験方法のように20℃環境下で前養生した場合よりも本研究において行った40℃環境下での前養生のほうが自然曝露試験結果に近い中性化速度係数が得られることがわかった。

II-B-14. フライアッシュ混入高強度コンクリートの強度および収縮に及ぼす養生温度の影響

50℃での高温養生を行うことにより、フライアッシュを混合することによる初期強度の低下を抑制できるが、一定期間のみ50℃での養生を行うと、20℃養生よりも強度が低下するおそれがある。また、乾燥収縮量は半分程度に抑えられることがわかった。

II-B-15. フライアッシュ置換率 40%までのコンクリートの初期性状

暑中環境下 35°C でフライアッシュを使用しない調合では、材齢 5 日以降は強度発現性が小さくなるため、20°C 環境よりも強度が低下する傾向があるが、フライアッシュを使用する調合では、初期から材齢 28 日まで、20°C 環境よりも強度が大きくなることからフライアッシュが暑中環境対策として有効であることを示唆している。

II-B-16. コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類、調合および養生条件の影響(その 2)各種要因とその効果

セメント種類が異なると中性化速度が変化するが、この変化量は養生条件によって著しい影響を受け、また、水セメント比が大きくなると中性化速度がほぼ直線的に大きくなり、水セメント比が 65% を越すと増加の割合が増す。セメント種類、および養生条件に関わらず、中性化速度は圧縮強度の逆数と直線関係にある。

II-B-17. 養生温度を変化させたフライアッシュ混和ペーストの微細構造

フライアッシュの混入は圧縮強度とセメント水和率との相関性を低下させるため、フライアッシュを混和させた試験体の圧縮強度はセメント水和率のみで評価することはできない。初期に高温養生を行うことにより、セメントの水和反応が促進され微細構造は密になることが確認された。また、低水セメント比においてフライアッシュを体積比 50% 混和した場合、温度上昇により十分な初期強度が得られた。

II-B-18. 水比、混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響

フライアッシュの反応率は不溶残分量、および溶出 Al_2O_3 量により精度良く定量することが可能である。フライアッシュの反応率は、養生温度 40°C 粉体比 50%、フライアッシュ置換率 40% では、材齢 7 日において 12%、材齢 1 年では 32% であった。反応率は養生温度が高いほど大きく、水粉体比が高い程大きい。また、ポゾラン反応開始時期は、養生温度 20°C では、材齢 28 日の反応率は 0% であり、それ以降であった。フライアッシュのポゾラン反応は温度依存性が高い。

II-B-19. 養生中の温度および湿度が、フライアッシュを用いたコンクリートの強度におよぼす影響

材齢 28 日の圧縮強度が等しくなるように単位セメント量、フライアッシュ量を決定すれば、湿潤養生の期間を特に延長する必要はなく、養生温度の高低によらず発現強度も劣ることはない。さらに、長期材齢を考えると、ポゾラン反応の効果により、無混合のコンクリートよりも強度発現性に優れる。

II-B-20. フライアッシュを外割混合したコンクリートの中性化の評価

フライアッシュを内割混合、外割混合した試験体の養生温度を高く設定し、ポゾラン反

応を促進させた試験体の中性化性状と長期曝露試験結果との比較を行った結果、20℃環境下での前養生した場合よりも40℃環境下で前養生したものの方が自然曝露試験結果に近い値が得られた。

II-B-21. 置換率および養生条件がフライアッシュを用いたモルタルの品質に及ぼす影響

フライアッシュは養生温度20℃および30℃において置換率35%に比べ、25%および15%の方が強度発現は良好であり、長期材齢では普通セメント以上の性能を発揮する。養生温度10℃では、フライアッシュは強度発現性に寄与しない。また、フライアッシュの置換率が大きいほどモルタルの中性化深さは大きくなる傾向にあり、ポゾラン反応による組織の緻密化より、試験体中の水酸化カルシウム量の低下による中性化促進作用が卓越している可能性が示唆された。

II-B-22. 蒸気養生履歴がフライアッシュセメントの水和反応と圧縮強度に及ぼす影響

前置、昇温、最高温度継続時間を短縮しても、圧縮強度の低下は確認されず、降温時間を短縮すると脱型材齢1-3日で低下、材齢7日以上では同等となった。フライアッシュの反応率は降温時間の短縮により、材齢14日までは低下、材齢28日以降では同等となった。

II-B-23. 各種養生条件がフライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状に及ぼす影響

温度が高くなるに従い、高性能AE減水剤添加率は増大し、AE助剤添加率は低下する。フライアッシュの強度発現に対する寄与は養生条件によって著しく影響を受け、フライアッシュの大量使用は暑中環境対策として有効である。乾燥収縮率は温度が高くなるほど大きい。また、中性化の進行に養生条件が及ぼす影響は大きく、暑中環境において十分な養生を行った場合には、中性化の進行は抑制される。

II-B-24. 各種セメントを用いたコンクリートの合理的な湿潤養生期間に関する実験(その14 総合考察)

中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおいて、圧縮強度が10N/mm²に到達してから湿潤養生を打ち切れれば、圧縮強度の発現や耐久性が特に劣ることはないという結果を得た。よって現行JASS5で普通および早強ポルトランドセメントに限定されている圧縮強度が10N/mm²での湿潤養生の打ち切りは、中庸熱ポルトランドセメントや低熱ポルトランドセメントでも適用可能であり、10N/mm²に到達する積算養生温度を推定出来る場合には積算養生温度で湿潤養生打ち切り時期を管理することも可能といえる。

第3項 混合方法がフライアッシュコンクリートに及ぼす影響

フライアッシュコンクリートの製造にあたり、コンクリート構成物におけるフライアッシュの位置付けを考慮することは使用方法の多様性の開拓、ひいては製品の付加価値向上に資すると考えられる。そこで、フライアッシュコンクリートの混合方法に関連性を有すると考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

II-C-1. フライアッシュを外割り使用したコンクリートの諸特性

セメント原料として処理されているフライアッシュをセメント外割り使用したコンクリートについて、フライアッシュの品質変動および細骨材の粒度分布の違いに着目し、その諸特性(フレッシュ性状、硬化性状)への影響を室内試験により確認した。その結果、試験に使用したフライアッシュの品質や細骨材の粒度分布の違いの範囲であれば、フライアッシュを外割り使用した場合、細骨材代替率 10%が流動性改善効果から最も実用的であり、圧縮強度も普通コンクリートと概ね同等程度となることが確認された。

II-C-2. フライアッシュを45%まで内割使用したコンクリートに関する実験的研究

- 1) 圧縮強度比(初期高温履歴試験体強度/標準養生試験体強度)は、コンクリート最高温度が高いほど、また、フライアッシュ置換率が小さいほど小さくなる。マスコンクリートにおける構造体強度の管理を標準養生で実施するときの強度補正はフライアッシュ置換率45%の場合は零でもよいが、フライアッシュ置換率30%以下では適切な補正を行う必要がある。
- 2) フライアッシュ置換率35%および45%の初期高温履歴を受けたコンクリートにおける圧縮強度と積算温度の対数には直線的な関係がある。建築学会(案)による試験方法で中性化深さ25mmを満足するには、フライアッシュ置換率は、水結合材比が55%の場合は20%が上限となる。

II-C-3. フライアッシュを外割混合使用したコンクリートの中性化特性

フライアッシュを外割混合したコンクリートに関して、材齢1か月および6か月を二酸化炭素中への暴露開始時点とした場合の中性化特性について検討を行っている。外割混合したコンクリートの中性化抵抗性は内割混合の場合に比べ改善され、前養生期間が長くなると外割、内割混合ともに中性化抵抗性が增大することがわかった。フライアッシュの充填効果、ポズラン反応による組織の緻密化と Ca(OH)_2 の消費によるpHの低下が共に生じるため、中性化抵抗性に関しては前養生期間が短い場合には細孔空隙量の影響が卓越し、長い場合には Ca(OH)_2 量の影響が卓越する。

II-C-4. フライアッシュを外割浪合したモルタルの中性化特性

フライアッシュを内割混和したモルタルの中性化深さは前養生 28 日、6 か月ともに無混和の場合に比べ増加し、内割混和率の増加に伴い増加した。一方、外割混和した場合はその逆の結果が得られた。また、前養生 28 日の場合、中性化深さは 50nm~10 μ m の空隙と良い相関を示したが、前養生 6 か月の場合はその相関性が若干劣った。水酸化カルシウムの減少量は前養生 6 か月の場合において中性化深さに比例する傾向が確認された。

II-C-5. フライアッシュを外割大量使用するコンクリートの調合則に関する研究-中性化に関する等ポテンシャルライン

フライアッシュを外割大量使用するコンクリートの調合則を確立することを目的として、中性化性状に関して検討を行った結果、広範のフライアッシュ使用域において中性化を定量し、中性化速度が一定となる等ポテンシャルラインを示した。これにより、調合段階でフライアッシュを使用したコンクリートの中性化性状の予測が可能となった。

II-C-6. フライアッシュを混合したコンクリートの圧縮強度発現推定式

フライアッシュがコンクリートに混合されたとき、フライアッシュの外割混合による初期強度の低下、ポゾラン反応による長期強度の増加、フライアッシュの混合率と強度増加率または減少率の関係およびフライアッシュのブレン比表面積の強度への影響などを説明できる式を導出した。

II-C-7. フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性

- 1) フライアッシュ置換により、単位セメント量 275kg/m³ 未満の貧配合ではワーカビリティを改善することができる。
- 2) フライアッシュI種では、置換率の増加とともに減水剤量が減少し、置換率 30% では減水剤が不要となった。
- 3) 試験を行った置換率 30% の範囲内ではフライアッシュ置換によるフレッシュ性状、強度等への悪影響はみとめられない。

II-C-8. フライアッシュ外割混合コンクリートの諸特性に関する研究

フライアッシュの外割混合は強度発現性において優れ、40°C 気中養生においてもその傾向は変わらない。また、水セメント比 35-55% の範囲で外割混合した場合、養生条件に関わらず、RC 構造設計基準式で評価が可能である。細孔分布は 30nm~200nm までの範囲ではより小さな細孔径が多いほど圧縮強度は大きくなる傾向がみられた。水酸化カルシウムの生成は養生条件に関わらず、材齢 28 日までにピークをむかえるが、ポゾラン反応は 91 日までの範囲でも活性化していないことが推測された。

II-C-9. コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響に関する実験的研究

フライアッシュ内割混合コンクリートに及ぼす影響は、フライアッシュの種類、置換率により異なり、特に乾燥収縮と耐久性への影響の差が大きい。I、II種は減水効果が大きく、置換率の増加に伴い単位水量が低減する。圧縮強度は置換率の増加に伴い低下するが、置換率25~70%では水結合材比に比例し、圧縮強度と他の強度特性は変わらない。中性化は置換率の増加に伴い増大し、同一水セメント比ではほぼ同じである。同一圧縮強度では無混合より増大し、その程度はフライアッシュの種類、置換率によって異なるため、耐久設計基準強度の適用は困難である。

II-C-10. 石炭灰を大量使用したコンクリートの強度・中性化特性

石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合則を確立することを目的として圧縮強度および中性化性状に関して検討を行った結果、石炭灰を大量使用した場合の圧縮強度ならびに中性化性状は良好であり、また、幅広い調合の範囲でこれらを定量化することにより圧縮強度および中性化速度一定の等ポテンシャルラインを示すことができた。これにより、調合段階において石炭灰を使用したコンクリートの性状の予測が可能となった。

第4項 フライアッシュの反応機構、反応生成物に関する分析

フライアッシュコンクリートの品質評価を論じるにあたり、コンクリート中のフライアッシュの反応挙動を把握する目的で、フライアッシュコンクリートの反応機構および反応生成物に関連性を有すると考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

II-D-1. フライアッシュセメントの水和反応が微細構造および強度発現に及ぼす影響

フライアッシュを置換することにより材齢182日以降は細孔量の減少、圧縮強度の増加、曲げ強度の増加が顕著であった。このことから、セメントの一部をフライアッシュで置換することによりフライアッシュの水和率が異なることで、長期的な反応が望め、細孔量の減少量と強熱減量の増加量には相関性がみられることから、水和物の生成により細孔が埋められたことが示唆された。

II-D-2. フライアッシュのポゾラン反応による硬化体の空隙・組織の変化

硬化体のBET比表面積はフライアッシュ単位量あたりに換算するとフライアッシュ反応率と負の相関がある。水銀圧入により計測したペースト硬化体の経3nm~10nmの空隙量はフライアッシュ反応率と正の相関が、また経10nm~50nmの空隙量は負の相関がある。フライアッシュの反応に伴う硬化体の空隙・組織の変化はフライアッシュ反応率で表せ、セメントの水和により形成される空隙組織とポゾラン反応により形成される空隙組織を合算したモデルで表すことができる。

II-D-3. フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察

フライアッシュのポゾラン反応は材齢 91 日以降に活発化し、モルタル中に形成される孔径 20~330nm の区分細孔容積率は減少する。Ca, Si, Al を主要構成元素とするポゾラン反応相は、フライアッシュ粒子から放射状に成長し、若材齢時にフライアッシュ粒子近傍で形成された細孔を充填するため、組織の緻密化がもたらされる。材齢 28 日までは、フライアッシュ粒子周囲に形成された細孔が残存し、多孔質な水和物組織となるためセメント単味の硬化体よりも低強度となるが材齢 91 日以降活発化するポゾラン反応は細孔充填による組織の緻密化をもたらし密実な組織を形成するため強度が高まる。

II-D-4. フライアッシュを使用したセメント硬化体の初期強度発現性（その 2.ポゾラン反応速度および細孔構造）

ポゾラン反応は養生温度の上昇、水結合材比の増大およびフライアッシュ置換率の減少に伴い活性化する。また、暑中環境下では置換率の増大に伴いポゾラン反応量は増大する傾向がみとめられた。水結合材比およびフライアッシュ置換率の増大に伴い、暑中環境下では、標準環境下に比べて 50nm 以上の細孔容積は減少し、より緻密な組織が形成される。

II-D-5. フライアッシュのポゾラン反応率の算定式の一提案

フライアッシュが完全に反応した時の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量と任意の時点での $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量からフライアッシュのポゾラン反応率の定量を試みた。結果としてフライアッシュのポゾラン反応率は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量から求められ、以下のように表せる。

$$B = 0.68\{1 - \exp(-0.01 \cdot t)\}$$

β : ポゾラン反応率, t : 時間(日)

II-D-6. フライアッシュの反応速度に関する研究

水酸化カルシウム試薬ペーストおよびセメントとの混合ペーストを用いて、フライアッシュの反応について検討を行った結果、フライアッシュでは不溶残分量から結晶分を除いたガラス相中の酸不溶分が主となる反応であった。フライアッシュを混入したセメントペーストを 80°C で促進養生した結果から、潜在的な反応性を確認した。さらに、フライアッシュを混合したセメントペーストを用いて、養生温度を変えた実験を行い、温度の影響を考慮した反応速度式を得た。

II-D-7. フライアッシュを大量混和したコンクリートの微細組織と圧縮強度

フライアッシュを外割混合したコンクリートは材齢初期ではフライアッシュが水隙を充填し大型結晶の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の析出を止めるため、フライアッシュ無混合の場合に比べ高くな

り、長期材齢ではポゾラン反応によってフライアッシュ無混合の場合より高くなった。また、いずれの材齢においても圧縮強度はフライアッシュの混合率の増加に伴い増加した。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量は、材齢28日ではフライアッシュ混合の有無に関わらずほぼ一定であったが、材齢6ヶ月では、フライアッシュの混合率が増加するほど減少し、減少量に比例して強度が増進した。

II-D-8. フライアッシュを大量混和したコンクリートの中性化特性に及ぼすポゾラン反応の影響

中性化試験に供するまでのフライアッシュのポゾラン反応の程度によって中性化速度は水セメント比、フライアッシュ置換率、中性化速度との間の関係は異なる。比表面積が大きいフライアッシュはポゾラン反応が早期に起こり $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が減少、pHが低下する一方でマトリクスの細孔空隙量も減少し、 CO_2 の拡散速度を大幅に低減させる。中性化に関し、フライアッシュ混和の有無の影響が無視される水セメント比が存在し、それ以上の水セメント比ではフライアッシュのポゾラン反応は中性化速度を増大させ、それ以下の水セメント比ではフライアッシュのポゾラン反応は中性化速度を増大させる。

II-D-9. フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造

結合水量と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量より、フライアッシュを内割、外割で混合した場合、フライアッシュのポゾラン反応が生起するのは材齢28日以降である。高炉スラグ微粉末を外割で混合した場合には、材齢3日以降にポゾラン反応が活発化する。強度は混合方法、微粉末の種類、および材齢によらず、50nm以上の毛細管空隙と負の高い相関性を示した。ポゾラン反応の生起により、骨材とペーストの界面に多くみとめられる当該空隙量は減少する傾向が確認された。

II-D-10. フライアッシュを添加したセメントペーストおよびモルタルのポゾラン反応と強度発現

フライアッシュを外割で添加したセメントペーストおよびモルタルの強度発現を、フライアッシュを添加していないモルタルの強度発現およびフライアッシュのポゾラン反応による強度増加と微粉末効果による強度増加と重ねあわせで評価することができ、フライアッシュを使用したモルタルの強度発現推定式を提案した。

II-D-11. フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現とポゾラン反応についての一考察（その3：長期にわたるフライアッシュセメントペーストのポゾラン反応率の検討）

不溶残分と強熱減量の測定結果からポゾラン反応率を求めた結果、ポゾラン反応率は経時的に増加し、フライアッシュの比表面積との相関性が確認された。材齢2年が経過して

もガラス相の残存が確認され、長期的な反応の継続が期待される。

II-D-12. フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現とポゾラン反応についての一考察（その4：フライアッシュの種類と置換率をパラメーターとしたポゾラン反応率の検討）

材齢91日までにおいて、材齢28日以降のポゾラン反応はフライアッシュの比表面積が反応率に影響を及ぼし、置換率の影響は確認されなかった。

II-D-13. フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現とポゾラン反応についての一考察（その7：ポロシティと組織変化）

空隙率は材齢91日まで大きく変化した。それ以降も空隙率は経時的に減少し続け、2年以降も減少が期待される。空隙率の変化はSEM観察からも確認されたほか、水酸化カルシウム量とポゾラン反応率との間には比例関係がみられた。

II-D-14. セメント硬化体中のフライアッシュのポゾラン反応率と各種要因の影響

ポゾラン反応による水酸化カルシウムの反応率あたりの消費量は一定であり、水粉体比、置換率に関わらず一定のC-S-Hが生成すると予想される。フライアッシュ置換率60%養生温度40°Cの反応は、水酸化カルシウムが不足した状態になるため、フライアッシュの反応率は水酸化カルシウムの生成量により決定される。当実験に用いたフライアッシュの場合、積算温度の基準として19.3°Cを用いることにより、養生温度により異なるポゾラン反応の開始時期を、同じ積算温度で表すことができる。また、反応率は水粉体比、フライアッシュ調合量、積算温度を用いたモデル式により表せる。

II-D-15. 異なる養生下での各種コンクリート材料の空隙構造変化に基づく物質移動解析

養生を全く行わなかった場合を除き、材齢初期に乾燥を受けたフライアッシュコンクリートの水分逸散挙動を良好に再現できた。28日間の十分な水中養生を行った場合には、各種コンクリート材料の気体酸素拡散係数の実験値と解析値はおおよそ一致し、拡散係数の算出に用いる有効空隙率や屈曲度自体の妥当性を検証することで、より詳細な分析が可能となる。材齢初期に乾燥を受けた後の拡散係数の増大は、当研究の解析では十分に再現できなかった。

II-D-16. フライアッシュを内割混合したコンクリートの乾燥に伴う表層から内部にわたる細孔構造の不均質性

フライアッシュを添加したコンクリートでは、無乾燥コンクリートに比べ、表層にみられる圧縮強度の低下率が大きくなる傾向にあり、乾燥開始材齢に関係なく、粗大な径に細孔量のピークがみられやすくなり、乾燥開始材齢が早い程、荒い細孔が残る層が表層より

深い層まで及ぶ。また、フライアッシュ置換率が高いコンクリートは総有効細孔量のメデューアン半径の観点では、内部まで乾燥による影響があらわれ、乾燥を遅らせても緻密な細孔構造の形成に寄与しない。

第5項 屋外暴露試験等によるフライアッシュコンクリートの長期性状分析

フライアッシュは長期的反応をもってコンクリートの耐久性に寄与するものである。しかしながら、長期的性状変化を考慮した耐久性評価は汎く行われていないのが現状である。そこで、長期的性状変化の実態を把握する目的で、フライアッシュコンクリートの長期性状分析に関連性を有すると考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

II-E-1. 10年屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリートの性状

品質の異なる3種類のフライアッシュを普通ポルトランドセメントの15, 30, 45%置換して用いた水結合材比27, 40, 55%のコンクリート供試体をつくば、北海道および九州地域にそれぞれ屋外暴露した。フライアッシュを使用したコンクリートの強度増進は材齢1年までが大きく、その後の増進は小さかった。中性化は水結合材比が40%以上のコンクリートで材齢とともに進行し、中性化速度は水セメント比と強い相関があった。

II-E-2. コンクリートの長期性状に関する材齢10年の実験報告

フライアッシュコンクリートを材齢10年まで屋内・屋外暴露した場合中性化は、

- 1) 屋内と屋外での中性化速度係数の比は0.6以下で、既往の調査結果より小さくなった。
- 2) 同一水結合材比ではフライアッシュの種類による中性化の差はみとめられなかった。
- 3) 同一水セメント比における中性化はフライアッシュを用いた方が小さくなった。
- 4) 同一圧縮強度における中性化はフライアッシュを用いた方が大きくなった。

II-E-3. 45年経過した混合セメントコンクリートの長期強度発現性について

高炉セメント、高炉セメントにフライアッシュを置換した供試体を45年間水中養生した場合、いずれの結合材を用いた供試体についても、材齢45年時は表層より約1cmで溶脱による変質がみとめられたものの、スラグ置換率が大きくなるほど長期強度が増進する傾向が確認された。高炉セメントにフライアッシュを添加した場合、混和材が高炉スラグ微粉末のみの場合と比べて長期強度が大きく増進していることが分かった。また、フライアッシュを混合することにより、細孔径分布において6~20nmの細孔量が増加し、組織の緻密化が促進されていることが確認された。

II-E-4. フライアッシュコンクリートを使用した建築構造物の耐久性に関する研究 その3 既設構造物の耐久性評価

中性化の進行は建物外部よりも内部の方が乾燥による影響から中性化深さは大きくなっ

た。また、中性化予測式との比較により、添加率10～15%の範囲のフライアッシュセメントを用いたコンクリート構造物の建物外部側の中性化深さは普通ポルトランドセメントの中性化比率1.0で概ね評価できることが分かった。

II-E-5. フライアッシュコンクリートを使用した建築構造物の耐久性に関する研究

圧縮強度と静弾性係数の関係からRC基準式と比較した場合、得られた静弾性係数は一般的にRC基準式よりも小さい値を示した。また、中性化予測式との比較により、フライアッシュコンクリートの中性化深さは予測値より小さく、フライアッシュコンクリートの耐中性化性能は既往の予測式による評価よりも高いことが分かった。さらに、既設構造物において総細孔量と圧縮強度の関係には相関性がみとめられた。

II-E-6. フライアッシュコンクリートを使用した建築構造物の耐久性に関する研究 その6 材齢21年コアについてのEPMA分析結果

材齢21年の試料において中性化は室内側が室外側より進行しており、それに伴いclの濃縮が確認された。また、セメントペースト部の測定結果から、材齢21年の試料においても未水合のセメント粒子及びフライアッシュ等が確認され、今後も水合並びにフライアッシュのポゾラン反応が進行する可能性のあることがうかがえる。

II-E-7. フライアッシュを使用したコンクリートの屋外曝露試験

- 1) 屋外曝露したフライアッシュを使用したコンクリートの圧縮強度に地域差はほとんどみとめられなかった。
- 2) 強度増進はフライアッシュの置換率が大きく水結合材比が大きいものほど大きい、フライアッシュⅢ種を使用したものはやや小さい。
- 3) 屋外曝露した供試体の中性化速度は水セメント比と強い相関がある。

II-E-8. フライアッシュを使用したコンクリートの材齢9年における屋外曝露試験報告

フライアッシュコンクリートの9年間の中性化曝露試験により、計画供用期間の級毎に要求される水結合材比の最大値として、フライアッシュ置換率20%の範囲では、一般60%、長期45%はほぼ妥当な値であることが確認された。

II-E-9. フライアッシュを使用したコンクリートの長期材齢における強度寄与率の検討

水結合材比40%でⅠ種とⅡ種を用いた場合の強度寄与率は、標準養生では長期的な伸びがみとめられるが、屋内保存と屋外曝露では材齢1年以降の増進がみとめられない。また置換率が小さくなるほど増加する傾向があるが、材齢1年以降は横ばいまたは伸びが小さくなった。逆に、置換率が45%でも標準養生では強度寄与率の長期的な伸びがみとめられる。また、強度寄与率の曝露地による差は小さかった。

第6項 フライアッシュの品質がコンクリートに及ぼす影響

フライアッシュは産業副産物であるが故に品質を均質に保持することが困難である。よって、品質の異なるフライアッシュをコンクリート混和材として用いた際のコンクリートの性状変化を把握することは、実用、および品質保証上重要である。よって、フライアッシュの品質に関連性を有すると考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

II-F-1. フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性

フライアッシュの大量使用にも関わらず、ブリーディングはほとんど発生せず、また、実用上問題のない凝結特性、強度発現性を有していることが明らかとなった。加えて、骨材を使用していないこと、低水粉体比であることから、断熱温度上昇特性および圧縮強度と他の物理的性質の相関性は、一般的なコンクリートと異なることが明らかとなった。

II-F-2. フライアッシュを使用するコンクリートの諸特性について

フライアッシュの比表面積が大きいほど圧縮強度が大きく発現する。特に、粉末度が細かいフライアッシュでは、置換率 15%であれば、無混入のコンクリートと同程度以上の強度を示した。コンクリートの温度上昇は、フライアッシュを混合することにより小さくできる。フライアッシュを混合することによって乾燥収縮を低減することができる。凍結融解抵抗性は、強度発現が十分なされれば、フライアッシュを混入しても確保できる。

II-F-3. フライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状

材齢 91 日で強度管理を行えば、水結合材比を 40%以下にすることで置換率 60%程度までは設計基準強度 21N/mm を満足する強度が得られる。また、フライアッシュ置換率および水結合材比が圧縮強度と静弾性係数および引張強度の関係に及ぼす影響はみとめられない。フライアッシュを大量に使用したコンクリートではフライアッシュの活性度が長期強度に及ぼす影響が大きく、その活性度は二酸化ケイ素含有量と比表面積の積により判断できると考えられる。またフライアッシュの相違が圧縮強度と静弾性係数および引張強度の関係に及ぼす影響はみとめられない。

II-F-4. コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響に関する実験的研究

フライアッシュ内割混合のコンクリートに及ぼす影響はフライアッシュの種類、置換率により異なり、特に乾燥収縮と耐久性への影響が大きい。フライアッシュ I, II 種は減水効果が大きく置換率の増加に伴い単位水量を低減する。中性化に関してはフライアッシュの種類に関わらず置換率の増加に伴い増大し、その程度はフライアッシュの種類、置換率により異なるため、耐久設計基準強度の適用は困難である。以上より構造用コンクリートにおける内割混合置換率の限度は I, II 種では 40%程度と判断される。

第7項 コンクリートの中性化抵抗性評価

コンクリートの耐久性を代表する中性化抵抗性の評価方法として汎く用いられる促進中性化試験の変遷、位置付けを確認する目的で、コンクリートの中性化抵抗性評価方法に関連が深いと考えられる文献を対象として、既往研究の調査を行った。

II-G-1. 促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価

大賀らは、促進試験結果により長期材齢の中性化深さを予測する際には実構造物の中性化深さとの相関性を検討する必要性を指摘している。そこで、水中養生条件および調合条件等の影響について検討するとともに、15年間自然暴露したコンクリートの中性化深さと比較を行うことで促進試験による中性化深さの予測を行った。

その結果、以下に示す知見を得た。

- 1)促進中性化試験を行った供試体の中性化深さは暴露期間の平方根に比例する
- 2)初期水中養生材齢はコンクリートの中性化深さに大きく影響を及ぼし、特にフライアッシュを使用する場合には十分長くとる必要がある
- 3)フライアッシュのセメント置換により中性化深さは増大する。一方、単位結合材料および養生期間の増大によりその影響は軽減される
- 4)中性化深さはコンクリート組織の緻密さに影響されるため、水中養生材齢28日の圧縮強度から推定が可能である。
- 5)促進中性化試験結果から屋内に暴露したコンクリートの中性化深さの推定が可能である。

II-G-2. コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究

阿部らは、促進中性化試験による評価を比較する対象のコンクリートが標準的なコンクリートに対してどの程度中性化に対して抵抗性があるかを相対的に評価する段階にとどまっていると指摘し、供試体寸法および前養生条件、促進試験時の環境条件等をパラメータとして使用材料、調合条件に対する中性化に及ぼす影響を実験的に検討した。

その結果、以下に示す知見を得た。

- 1)中性化深さと時間との関係は試験条件により異なる。中性化深さは平均的には時間の0.47乗に比例するが、実用上は0.5乗として差し支えない。
- 2) 供試体寸法が大きくなると中性化速度は遅くなる。
- 3)封かん養生したものは水中養生したものより中性化速度はやや速くなる。28日間養生したものに比べ、3日間養生したものは2割程度大きくなる。また、乾燥期間が長くなるほど中性化速度は大きくなる。
- 4)促進試験温度が高くなるほど、また、促進試験湿度が低くなるほど中性化速度は速くなる。ただし、促進試験湿度には40%RH付近に中性化速度が極大となる点が存在すると推察される。

5) 中性化速度は平均的には炭酸ガス濃度の 0.483 乗に比例するが、実用上は 0.5 乗として差し支えない。

6) 使用材料・調合が同じ場合、基準とする試験条件に対する他の試験条件の中性化速度係数の比はおおむね以下の式で算出できる。

$$A = A_{\text{size}} \cdot A_{\text{mcure}} \cdot A_{\text{tcure}} \cdot A_{\text{tdry}} \cdot A_{\text{Tem}} \cdot A_{\text{Hu}} \cdot A_{\text{CO}_2}$$

ここに

A_{size} : 断面 15cm × 15cm の場合, 0.94

A_{mcure} : 封かん養生の場合, 1.08

$A_{\text{tcure}} = 0.97 (0.8 / (t_{\text{cure}} + 1) + 1)$

t_{cure} : 養生期間 (日)

$A_{\text{tdry}} = y(t_{\text{dry}} + 157) / 185$

t_{dry} : 乾燥期間 (日)

$A_{\text{Tem}} = (\text{Tem} + 27.3) / 47.3$

Tem : 促進試験温度 (°C)

$A_{\text{Hu}} = \text{Hu} (100 - \text{Hu}) (140 - \text{Hu}) / 192000$

Hu : 促進試験湿度 (% R.H.)

$A_{\text{CO}_2} = (\text{CO}_2 / 5)^{0.5}$

CO_2 : 炭酸ガス濃度 (%)

II-G-3. コンクリートの促進中性化試験方法の変遷に関する調査

中村らは、今後 JIS の見直しを行う上で有益な資料とすることを目的とし、コンクリートの促進中性化試験方法の JIS 化の経緯に触れ、JIS 制定以前の各種方法および欧州における促進中性化試験規格の現状を調査し、JIS との比較検討を行った。

その結果、以下に示す知見を得た。

- 1) 国内における促進中性化試験は 1960～1980 年頃においては、様々な環境条件で実験が行われていた。その後、1980 年代に総プロで使用された実験条件と同じ条件の実験が多くの研究者によって使われるようになった。特に建築分野においては 1991 年の建築学会指針(案)の制定とともに、その試験条件を使用した研究が多くなされている。
- 2) 土木分野および建築分野における促進中性化試験方法には一部ポリマーセメントモルタルの試験方法を踏襲しているものがある。
- 3) 欧州における試験条件と JIS の試験条件の比較から、JIS の方法は、欧州各国が促進試験で対象としている中性化深さの範囲をほぼカバーしていることがわかった。
- 4) 試験規格の制定は研究分野における試験条件の統一化に大きな影響を及ぼしている。

第 5 節 まとめ

副産物の循環利用に関する既往文献の調査結果を整理し、以下の知見を得た。

- 1) 循環型社会を実現のために、廃棄物の減量化の促進、および適正処理の体制整備が課題として指摘される一方で、廃棄物の排出抑制には限界が存在し、廃棄物の再生利用では効率性、経済的負担や事業採算性への配慮も必要になることを確認した。
- 2) 産業廃棄物の適性処理においては、排出事業者、中間処理事業者、最終処分事業者等、立場の異なる利害関係者それぞれの遵法意識、責任意識の共有といった相互連携が不可欠となることを確認した。
- 3) セメント産業は資源循環システムにおいて基幹的な役割を果たしていることを確認した。また、現状の廃棄物および副産物の利用総量の維持にはセメント 1 トンあたりに廃棄物および副産物の利用原単位の向上が必要であること、および利用原単位の向上が見込めない場合には利用総量が現状の 2/3 以下となることから、循環利用用途の新規開拓の必要性を認識した。
- 4) 廃棄物使用量総量を維持拡大できるという前提のもとで実用化がなされる必要があることを確認した。この前提を満たすには、混合材添加量と廃棄物使用量、および CO₂ 排出量と要求性能の関係性を考慮する必要がある。

石炭灰の混和材利用技術に係る既往文献の調査結果を整理し、以下の知見を得た。

- 1) コンクリートの中性化速度は水セメント比と強い相関を有する。このことから、コンクリートの中性化速度係数は圧縮強度の逆数と線形を示す。
- 2) 中性化促進試験に供する前段階における前養生の温度を高くしてポゾラン反応を進行させた試験体の促進中性化性状に関する実験結果から、現行の促進中性化試験方法のように 20°C 環境下で前養生した場合よりも本研究において行った 40°C 環境下での前養生のほうが自然曝露試験結果に近い中性化速度係数が得られる。
- 3) 反応率は水粉体比、フライアッシュ調合量、積算温度を用いたモデル式により表せる。
- 4) フライアッシュコンクリートにおける圧縮強度と積算温度の対数には直線的な関係がある。
- 5) 材齢 28 日の圧縮強度が等しくなるように単位セメント量、フライアッシュ量を決定すれば、養生温度の高低によらず発現強度も劣ることはない。
- 6) フライアッシュコンクリートの中性化抵抗性に関し、屋外曝露試験と促進試験における評価結果の相違を定量的に評価した既往研究は少ない。

第3章

資源循環の枠組みと
副産物の利用拡大に係る
課題の抽出

第1節 序

本研究は、産業副産物であるフライアッシュの有効利用が資源循環に資する効果を検討するものである。その前提条件として循環型社会形成の枠組みにおける発生した副産物の位置付け、および副産物が有効利用に至る過程の詳細把握、およびその課題を明確化する必要があると考えた。

副産物有効利用の過程把握および課題抽出のための手法として、

1. 産業副産物の有効利用の法的枠組み
2. 法的枠組みにおける石炭灰の有効利用の位置付け
3. セメント産業およびコンクリート産業が資源循環に資する役割
4. 指定副産物の有効利用に関する利害関係者間の意識共有

以上の4つの内容に対し調査を行うこととした。このうち、指定副産物の有効利用に関する利害関係者間の意識共有に関してはアンケートによる調査を行った。

第2節 資源循環型社会形成の枠組み

第1項 国の施策

資源循環型社会の形成は、今後の社会経済の規模を拡大、もしくは維持するうえで官、民を問わず取り組むことが求められる喫緊の課題である。

図3-2-1に我が国における資源循環型社会形成の基本的枠組みを示す。

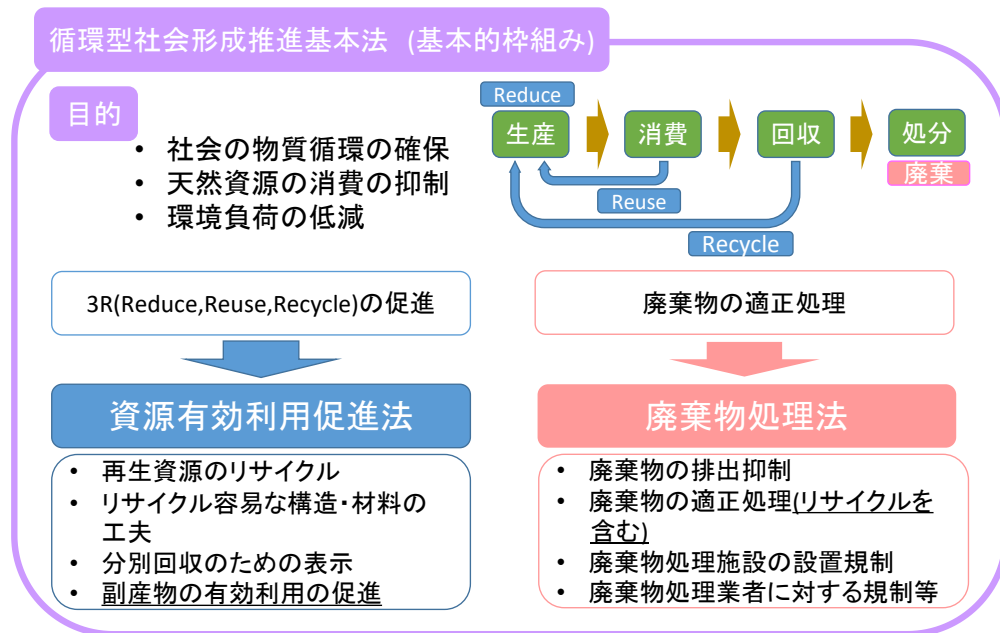


図3-2-1 資源循環型社会形成の基本的枠組み

国の施策としての枠組みにおいては社会の物質循環の確保、天然資源の消費抑制および環境負荷の低減を目的として、3R(Reduce, Reuse, Recycle)の推進および廃棄物の適正処理が柱石とされている。

資源有効利用促進法³⁻¹⁾は、

- 再生資源のリサイクル
- リサイクルのような構造および材料の工夫
- 分別回収のための表示
- 副産物の有効利用の促進

といった資源および材料のライフサイクルにおける循環部分を定義するものである。

一方廃棄物処理法³⁻²⁾は、

- 廃棄物の排出抑制
- リサイクルを含む廃棄物の適正処理
- 廃棄物処理施設の設置規制
- 廃棄物処理業者に対する規制

- ・ 廃棄物処理業者に対する規制
等といったライフサイクルにおける終末期の処理，処分を定義づけている。

第2項 資源有効利用促進法における副産物リサイクルの義務付け

資源有効利用促進法は，10 業種 69 品目を対象に以下に示す7つの類型を適用し，関係事業者には義務を課すことで，取組の促進を企図するものである。

- ・ 資源有効利用促進法の7類型
 - 1) 副産物の発生抑制や再資源化を行うべき業種
 - 2) 再生資源・再生部品を利用すべき業種
 - 3) 原材料等の合理化を行うべき製品
 - 4) 再生資源又は再生部品の利用の促進を行うべき製品
 - 5) 分別回収を促進するための表示を行うべき背品
 - 6) 自主回収・再資源化を行うべき製品
 - 7) 再生資源として利用することを促進すべき副産物（指定副産物）

同法における「指定副産物」とは，エネルギーの供給又は建設工事に係る副産物であって，その全部又は一部を再生資源として利用することを促進することが当該再生資源の有効な利用を図る上で特に必要なものとして政令で定める業種ごとに政令³⁻³⁾で定めるものをいう。

したがって，電気事業（供給量 1.2 億 kwh/年以上）が排出するフライアッシュを含む石炭灰は上記類型の7)の指定副産物に該当する。

また，7)の指定副産物には，上記の電気事業が排出する石炭灰の他に，建設業（施工金額 50 億円/年以上）が排出する建設廃棄物である土砂，コンクリート塊，アスファルト・コンクリート塊，木材が規定されている。以下，図 3-2-2 に指定副産物の概要を示す。

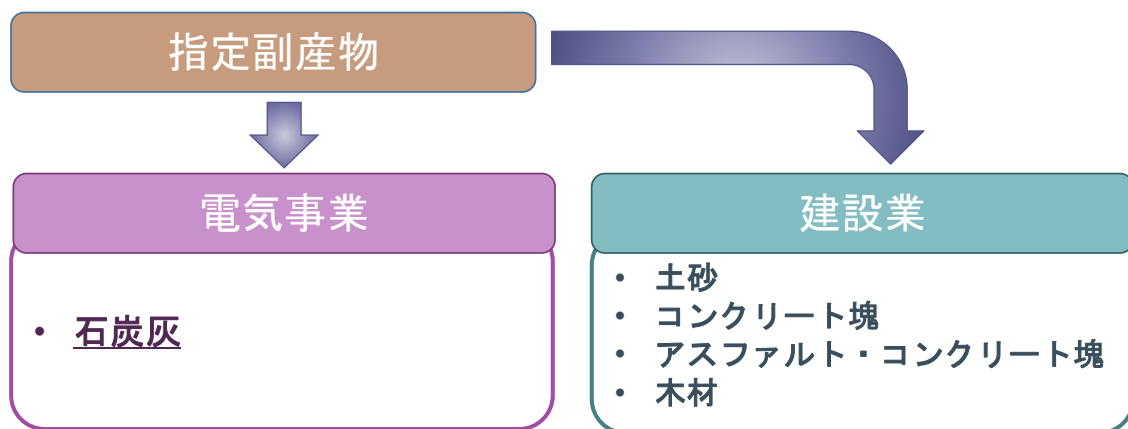


図 3-2-2 資源有効利用促進法に規定される指定副産物

経済産業大臣は事業者に対し、規定する判断の基準となるべき事項(ここでは、再生資源の利用の状況、再生資源の利用の促進に関する技術水準やその他の事情をいう)を勘案して、再生資源の利用の促進について必要な指導および助言をすることができる。また、利用の促進が不十分と判断した際には、勧告およびその勧告に係る措置をとるよう命令を下すことができる。

当該副産物は再生資源としての利用促進が強く求められるとともに、当該副産物の有効利用の確保は廃棄物の発生の抑制及び環境の保全に資するものとされる。

第3項 廃棄物処理法に基づく石炭灰の扱い

廃棄物処理法は廃棄物の排出を抑制し、および廃棄物の適正な分別、保管、収集、運搬、再生、処分等の処理をし、並びに生活環境を清潔にすることにより、生活環境の保全及び公衆衛生の向上を図ることを目的とする法律である。

同法の定義するところによれば、廃棄物とは「汚泥、ふん尿などの汚物」または「自ら利用したり他人に有償で譲り渡すことができないために不要になった固形状又は液状のもの」をいう。

また、廃棄物は更に一般廃棄物と産業廃棄物に分類される。

廃棄物処理法の規定する廃棄物の定義および分類を石炭灰に適用すると、フライアッシュは『ばいじん』、クリンカアッシュは『燃え殻』に該当する。

これらの定義に基づき、石炭灰は、排出事業者自身、もしくは認可を受けた業者が排出事業者の委託により、中間処理もしくは管理型廃棄物処分場における最終処分といった適性処理を行う必要がある。

中間処理とは、産業廃棄物を減量化、資源化するために行う破砕、焼却、乾燥などの処理をいい、現在広範に行われているシリカ分を多く含む石炭灰をセメント会社が引取り、組成の類似するセメント原材料の粘土に代替して用いる行為は、この中間処理による再資源化に該当する。

第3節 コンクリート産業における産業副産物

第1項 セメント産業の副産物受け入れ

石炭灰の有効利用の根幹を成すセメント産業は石炭灰だけでなく、他に多種多様な副産物を受け入れており、その量は増加する傾向にある。表3-3-1に受け入れ品目とその量、および推移を示す。

表3-3-1 セメント産業が受け入れる副産物の品目とその量

(単位:千t)

種類	主な用途	1990年度	1995年度	2000年度	2005年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度
高炉スラグ	原料, 混合材	12,213	12,486	12,162	9,214	7,408	8,082	8,485	8,995	8,065
石炭灰	原料, 混合材	2,031	3,108	5,145	7,185	6,631	6,703	6,870	7,332	7,407
汚泥, スラッジ	原料	341	940	1,906	2,526	2,627	2,673	2,987	3,206	2,970
建設発生土	原料	—	—	—	2,097	1,934	1,946	2,011	2,407	2,598
副産石こう	原料 (添加材)	2,300	2,502	2,643	2,707	2,037	2,158	2,286	2,401	2,320
燃えがら(除石炭灰), ばいじん,	原料, 熱エネルギー	468	487	734	1,189	1,307	1,394	1,505	1,405	1,441
非鉄鉱滓等	原料	1,559	1,396	1,500	1,318	682	675	724	770	723
木くず	原料, 熱エネルギー	7	41	2	340	574	586	633	657	696
廃プラスチック	熱エネルギー	0	9	102	302	445	469	479	518	595
鑄物砂	原料	169	399	477	601	517	526	492	461	454
製鋼スラグ	原料	779	1,238	795	467	400	446	410	423	421
廃白土	原料, 熱エネルギー	40	94	106	173	238	246	253	273	275
廃油	熱エネルギー	90	107	120	219	275	264	273	273	264
再生油	熱エネルギー	51	126	239	228	195	192	189	186	171
ガラスくず等	原料	0	1	151	105	111	149	143	148	157
廃タイヤ	原料, 熱エネルギー	101	266	323	194	89	73	71	65	58
肉骨粉	原料, 熱エネルギー	0	0	0	85	68	64	65	63	58
RDF, RPF	熱エネルギー	0	0	27	49	48	51	50	55	54
ポタ	原料, 熱エネルギー	1,600	1,666	675	280	0	0	0	0	0
その他	—	14	233	253	314	408	376	595	626	485
合計		21,763	25,098	27,359	29,593	25,995	27,073	28,523	30,265	29,212
セメント生産高		86,849	97,496	82,373	73,931	55,903	57,426	59,310	62,241	60,956
セメント1t当たりの使用量 (kg/t)		251	257	332	400	465	471	481	486	479

注1.「建設発生土」は2002年度以降調査を開始。

注2.「汚泥・スラッジ」は下水汚泥を含む。

注3.「ガラスくず等」「RDF, RPF」はその他より独立。

注4.「廃プラスチック」にはシュレッダーダストを含む。

注5.「石炭灰」は電力業界以外の石炭灰を含む。

注6.「セメント生産高」にはその他のセメントを含まない。

データ出典：セメント協会：セメントハンドブック 2015 年度版³⁻⁴⁾

図 3-3-1 にセメント産業の副産物受入量および受入量に占める石炭灰の割合の推移を示す。

2014 年度の産業廃棄物の排出量 392,840 千 t に対して、再利用率は 209,676 千 t であった。同年度のセメント産業の副産物受入量は 29,212 千 t であることから、産業廃棄物の再資源化に対するセメント産業の寄与率は約 14% を占める。このことから、セメント産業は生産活動を通じて副産物の処理を担う「静脈産業」としての重要な一面を有することがわかる。

また、副産物受入量は年度を追うごとに微増する傾向にあり、それに呼応する形で石炭灰の受入量も増加している。2014 年度の受入副産物に占める石炭灰の割合は 25% となり、セメント産業は石炭灰の有効利用用途として非常に重要な位置付けにあることを確認した。

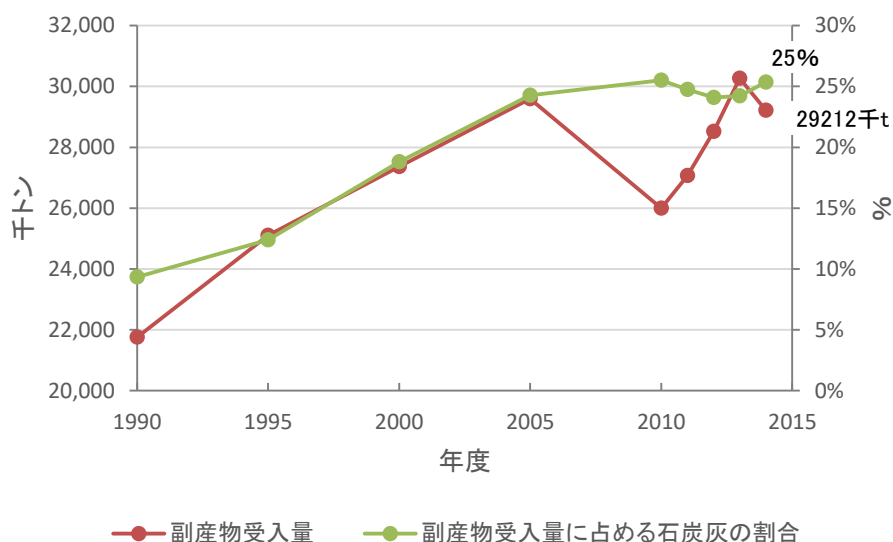


図 3-3-1 セメント産業の副産物受入量および受入量に占める石炭灰の割合の推移
データ出典：セメント協会：セメントハンドブック 2015 年度版³⁻⁴⁾

第2項 セメント生産量の推移

図 3-3-2 にセメント生産量およびセメント 1t 生産あたりの廃棄物使用量の推移を示す。建設投資の減少等を背景に国内におけるセメント生産量は近年減少を続け、最盛期の約 6 割程度まで落ち込んでいる。

一方で、前項で示したとおり廃棄物受入量の増大を受け、セメント 1t 生産あたりの廃棄物使用量は顕著な増大を示している。これは、廃棄物の最終処分量削減といった社会的要請を受けたセメント産業の廃棄物の再資源化技術の開発、向上への尽力によるところが大きいと考えられる。

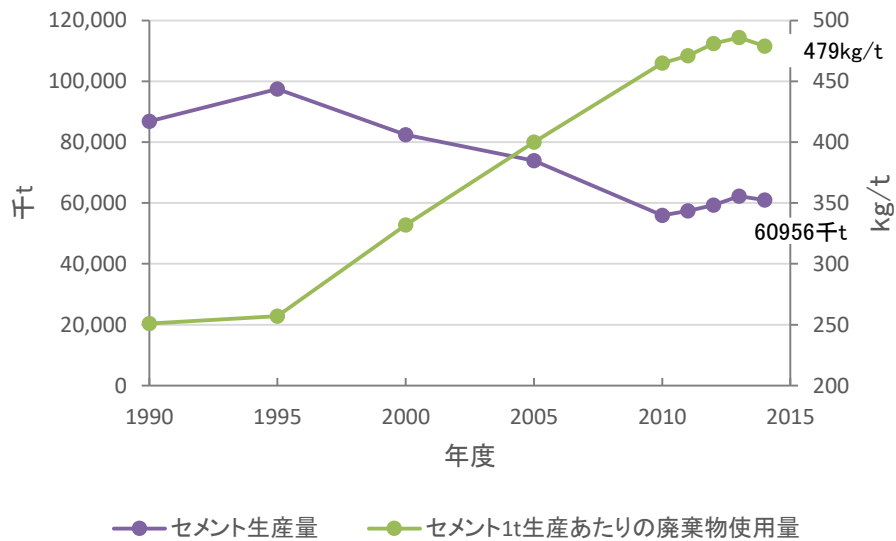


図 3-3-2 セメント生産量およびセメント 1t 生産あたりの廃棄物使用量の推移
 データ出典：セメント協会：セメントハンドブック 2015 年度版³⁻⁴⁾

第 3 項 石炭灰有効利用におけるセメント原材料依存の課題

図 3-3-3 に石炭灰の有効利用分野内訳を示す。セメント分野がおおよそ 7 割を占めており、本節第 1 項で述べたとおり、石炭灰の有効利用にはセメント分野での再資源化に依るところが非常に大きいことが改めて確認された。

また、セメント分野における利用用途としては、セメント原材料としての利用が 98% と非常に高いことがわかる。これはセメント原材料である粘土とフライアッシュを含む石炭灰の組成が類似することによる置換利用である。

しかしながら本節第 2 項で述べたとおり、セメント生産量は全体的に減少傾向にあることに加え、置換利用率にも限りがあることから、セメント原材料としての利用量が向上するとは考えにくい。今後石炭灰の発生量増大は不可避な情勢であることを鑑みるに、石炭灰を今後安定的に使用していくという観点から、利用拡大の余地を残す分野における用途開拓が一つの重要な課題であるといえる。

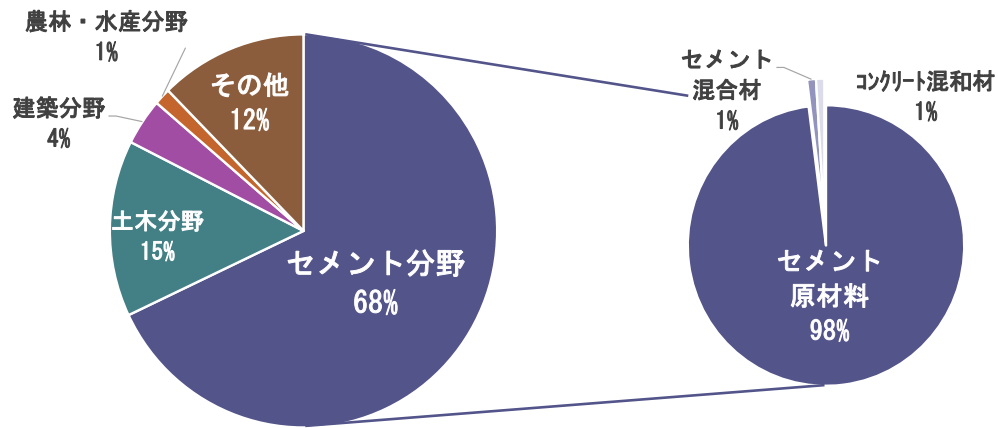


図 3-3-3 石炭灰有効利用分野別内訳(2014年度)
 (データ出典)一般財団法人石炭エネルギーセンター：「石炭灰全国実態調査報告書
 (平成 26 年度実績)³⁻⁵⁾」

第4節 指定副産物の有効利用に関する利害関係者間の意識共有

第1項 調査の概要

本調査は、静脈産業における建設廃棄物の処理および再資源化の実態や意識の違いを明らかにするために行った。対象とした事業者および調査内容を表3-4-1に示す。

表3-4-1 調査対象とした事業者および調査内容

対象事業者	調査内容
①建材製造業者	・製造種別, およびその実績 ・発生する副産物 ・副産物, 廃棄物に対する認識, 管理体制, およびその再利用形態
②排出事業者	・着工実績 ・資材および中間処理業者の選定基準 ・廃棄物に対する管理・指導體制(廃棄物の分別基準等)
③中間処理業者	・受け入れ廃棄物の実態 ・廃棄物中の有害物に対する認識 ・受け入れ・処理等の管理体制(受け入れ基準, 対応等)

調査方法は、郵送調査法によるアンケートとした。各業者に対する調査概要は次のとおりである。

1) 建材製造業者

窯業系、木質系、金属系およびプラスチック系の建材ならびに設備機器を扱う製造者を対象に50社を選定し、自社の製品等に関するアンケートを依頼した。回答のあった業者は21社であり、内訳は建材製造業者が17社、設備機器製造業者が4社であった。

2) 排出事業者

解体工事および改修工事などで建設廃棄物の排出事業者となるゼネコンおよびハウスメーカーを対象に50社を選定し、建材の選定や廃棄物の処理に関するアンケートを依頼した。回答のあった業者は20社であった。

3) 中間処理業者

建設廃棄物を受け入れている中間処理業者を対象に288社を選定し、建設廃棄物の処理に関するアンケートを依頼した。回答のあった業者は、141社であった。

第2項 建材製造者の意識、取り組みの実態

調査に協力を得た製造者の製品種別、発生する副産物およびその処理方法を表3-4-2に示す。

1) 製品製造の際に発生する副産物の取り扱い

発生した副産物の処理方法について図3-4-1に示す。副産物を直接最終処分する行為は全体の10%程度に留まっており、この結果から、建材の製造者は自社工場内から発生する副産物の再資源化に対する意識が十分に高いことがわかる。なお、副産物のリサイクルは、製造している製品原材料の種類によって方法が異なるが、製品ごとに発生する副産物の種類と処理方法は表3-4-2に示すとおりである。

また、工場内のリサイクルを行っている製造者が回答したリサイクル内訳の平均値を図2に

示す。製品種別による影響も大きいと考えられるが、循環型社会形成推進基本法によって熱回収よりも高位と位置付けられる『製品としての再利用を行う行為』は全体の80%以上となっており、ここでも、製造業者における副産物のマテリアルリサイクルへの意識の高さがかがえるが、建設副産物の処理に掛かる費用が再資源化の費用よりも高いためとも推察できる。

表 3-4-2 製造業者の属性、副産物およびその処理方法

製品名称	発生する副産物	副産物の処理方法(%)		
		場内リサイクル	処理業者へ	最終処分
ロックウール化粧吸音版 ロックウール保温・断熱材 プラスチック系床材	製造加工廃材 原料含有不純物(金属等)	99	1	
押出成型セメント けい酸カルシウム板	切断端材	25	50	25
ビニル床タイル ビニル床シート ビニル系巾木(軟質)	うち抜き残材 織布混入スリット残材	96	3	1
レストルーム商品 バス・キッチン・洗面商品 その他	汚泥 廃プラスチック 陶器くず 木くず		100	
MDF	木粉	100		
住宅用グラスウール 一般建築用グラスウール	グラスウール 外被材	15	15	70
ALC	ALC粉・端材 鉄くず 汚泥 廃プラ類	66	23	4
天井板 フロー 収納中段セット・枕棚	合板端切れ材 パーティクルボード端切れ材 MDF端切れ材 石膏ボード端切れ端 木材端切れ端 木材切削くず	60	15	5
アルミ建材	Aスラッジ(含水率10%水酸化アルミ) Bスラッジ(含水率70~80%水酸化アルミ)			99
アルミ製品 樹脂製品 木質製品	アルミ端材 アルミドロス・スラッジ 廃硫酸・廃苛性 樹脂端材・切粉 木屑(MDF・PB・合板等) ウレタン屑	40	59	1
自動ドア開閉装置 自動ドア開閉装置 自動折戸	梱包資材 アルミ端材・切粉 電線屑	15	80	5
ガス温水器 石油温水器 システムバス システムキッチン	金属屑 廃プラ(廃FRP) 廃プラ(硬質) ダンボール 廃プラ(軟質) 一般廃棄物	0.1	99.4	0.5
内装ドア	カット端材・木屑 シート端材(PP、PET、紙) 廃接着剤・塗料	88	10	2
アルミサッシ・ドア等 塩ビサッシ 木質インテリア建材等 板ガラス	アルミ端材 スラッジ 廃プラ 水酸化アルミ 木屑 硫酸アルミ ガラス 木くず 鉄くず 廃プラスチック 汚泥	41	58	1
シャッター製品 ドア製品 窓シャッター等製品 エクステリア製品	副産物なし 加工時のスクラップのみ発生		100	
石膏ボード	廃石膏ボード	100		
金属サンドイッチパネル	切断屑 切断刃	100		
アルミ建材商品	水酸化アルミスラッジA アルミ酸ソーダ 水酸化アルミスラッジB 硫酸アルミ	24		4
錠前 ドアクローザー	スラッジ 汚水 水溶液廃液		100	

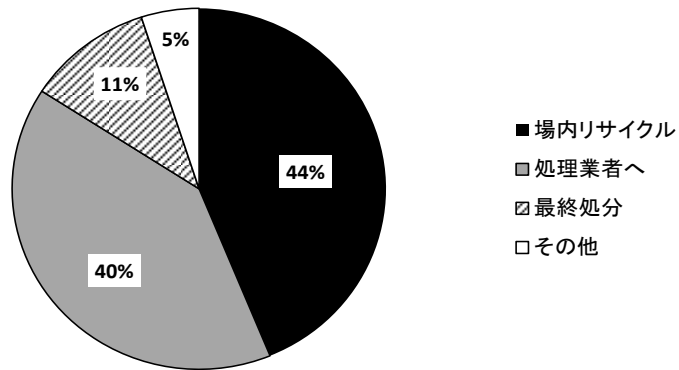


図 3-4-1 副産物の処理方法

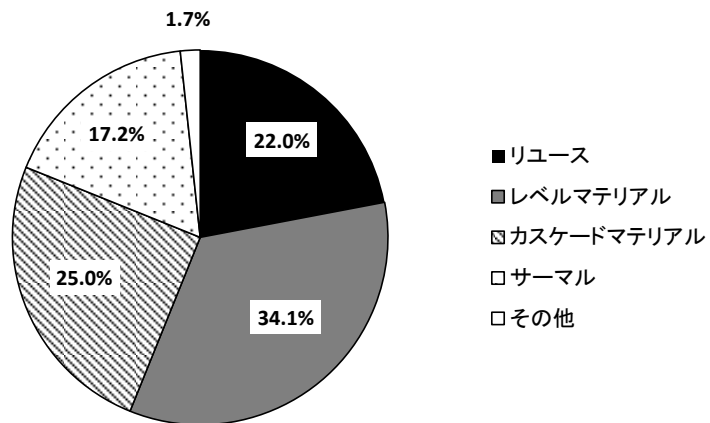


図 3-4-2 場内リサイクルの内訳(15社平均)

2)有害性や再資源化困難性を含む建材に対する認識

建材を再資源化する上での問題点の一つに、有害物の問題がある。これは現在製造していなくとも、過去に類似の製品で有害物を使用している場合も該当する。そこで、有害物を含む建材の製造状況およびその内容についての調査結果を図 3-4-3 および図 3-4-4 に示す。

過去に有害物を含む建材の製造実績のある企業は全体の 67%であり、その製造内容は全回答の 30%を飛散性アスベスト(レベル 3)が占める結果となった。林らが報告³⁻⁶⁾しているとおり、アスベスト含有建材は改修工事などにおいても処理が難しく、仮にこれらの類似製品を再資源化する場合には、過去のアスベスト含有建材が含まれないような注意が必要である。なお、過去にアスベストを含有していた製品と区別するため、現在の製品において、アスベストを使用していないことを表示している JIS 製品もある³⁻⁷⁾。

また、有害物質を含むあるいは再資源化が困難な建材の処理方法についての調査結果を図 3-4-5 に示す。前述のアスベストの例のように処理方法が法的に定められている物質があることや、採算性の問題から、有害物質あるいは再資源化困難性を含む建材の再資源化率は極端に低くなっており、埋め立てや焼却といった最終処分が全体の 80%を占めていることが明らかとなった。

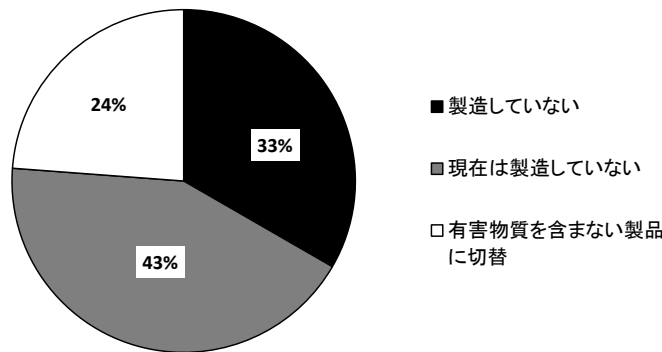


図 3-4-3 有害性や再資源化困難性を含む建材の製造場

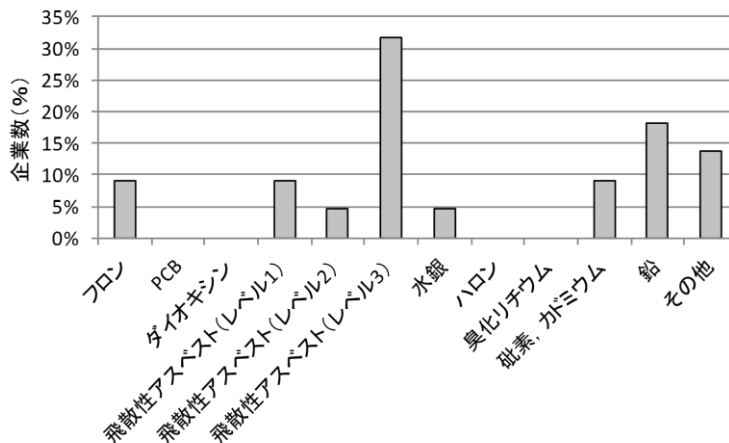


図 3-4-4 製造された建材に含まれる有害または再資源化困難な物質

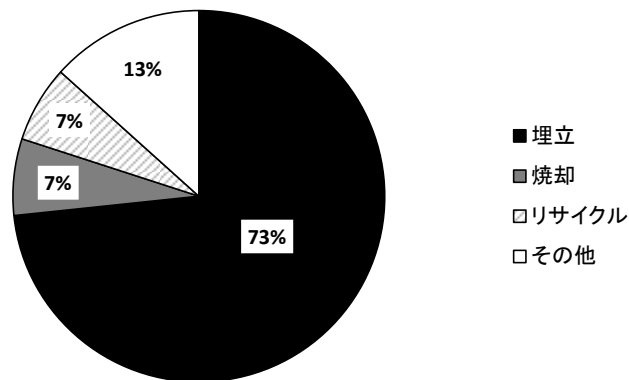


図 3-4-5 有害物等を含む建材の処理方法

3)再資源化可能な製品の製造およびその周知について

次に、使用後に再資源化が可能な製品の製造の有無およびその表示方法についての調査結果を図 3-4-6 および図 3-4-7 に示す。リサイクル可能な建材を製造していると回答した業者は、全体の 90%弱を占めており、製造者は自社の製品の再資源化が技術的には可能と考えている。しかし、40%強の業者(8社、うち1社は設備機器製造)が、製品が再資源化可能である旨を表示していないことから、これを周知させる意識は若干低いといえる。また、技術的には再資源化可能と思われても、解体廃材など異物や不純物が混じってしまえば再資源化ができないことが、無理に再資源化可能の表示をしない理由の一つと考えられる。

自社から出荷され、使用された製品の廃棄物処理または再資源化の際、製品の組成情報が必要となる場合もある。そこで、製品および副資材の MSDS(化学物質安全性データシート)の情報開示の状況について調査した結果を図 3-4-8 に示す。MSDS の情報開示には 70%程度の事業者が開示中との回答であった。なお、不可能または情報開示に意味が無いと回答した事業者は、そもそも MSDS の対象となる物質を扱っていない、もしくは表示義務の範囲外である可能性もあり、潜在的にはかなりの業者が開示に前向きといえる。

4)再生原料を用いた製品と再生原料を用いる際の基準

製造者が、再生原料を用いている製品とその基準についての調査結果を表 3-4-3 に示す。製造者が再生原料を用いて建材を製造する場合に基準として設ける項目としては、製品の品質の維持や保証のために重視すると考えられる、粒度や組成、異物の混入度合等といった物理的因子の他に、コストや安定的な供給といった社会的な因子も重視されることが分かった。

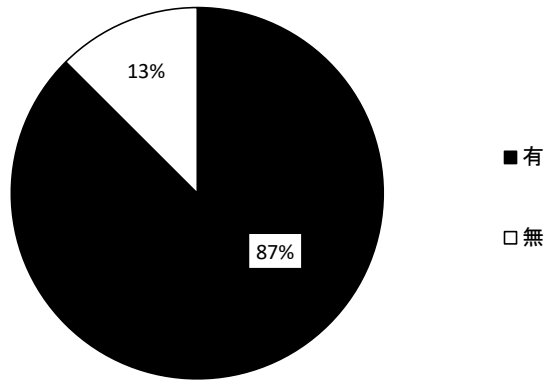


図 3-4-6 リサイクル可能な建材の製造の有無

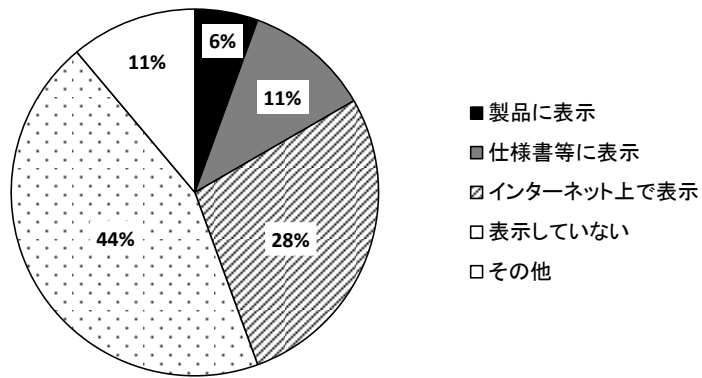


図 3-4-7 リサイクル可能なことの表示方法

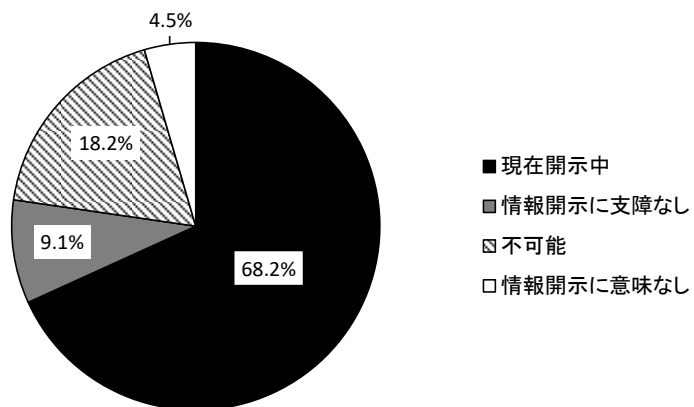


図 3-4-8 MSDS の情報開示法

表 3-4-3 再生原料を用いた製品と再生原料

名称	再生原料	再生原料を用いる際の基準
ロックウール	高滓スラグ	粒度、組成、他
押出成形セメント	再生パルプ	社内規格準拠
けい酸カルシウム板		
ビニル床タイル	農業用ビニルフィルム	安定的購入が可能なこと、有害物・異物の混入がない事、価格がヴァージン材よりも安価なこと、品質が安定していること
ビニル床シート		
建設用石材・タイル	廃ガラス	混入率60%
建設用石材・タイル	窯業廃土	混入率55%
MDF	家屋解体木材	異物除去(金属、プラスチック、石等)
調湿内装材	ALC粉	-
フリーカット中段Cタイプ	パーティクルボード	ボードメーカーへの供給、メーカー説では100%使用可能
セミアンテン	石膏ボード	ボードメーカーへ供給、3%以下の混入量
アルミサッシ	アルミ	コスト
アルミ製品	市中アルミ	特定のアルミ合板であること
システムキッチンのキャビネット等	木材 (MDFパーティクルボード)	明確な基準無し(性能保障のみ)
ガスの給湯器の防音材	PET	明確な基準無し(性能保障のみ)、エコマーク準拠で含有率50%以上
内装ドア	MDF、PB	社外の情報開示なし
アルミサッシ・ドア等	アルミ	社内基準
板ガラス	ガラス屑(ガレット)	品質(成分組織、異物、付着物) コスト(バージン原料との比較)
窯業系サイディング材	フライアッシュ古紙パルプ	生産品、品質基準(強度、耐凍害性)
窯業系サイディング材	本体の粉碎粉	
屋根用スレート	本体の粉碎粉	
アルミサッシ	アルミスクラップ アルミニウム合金	アルミニウム合金6063材

第3項 排出事業者の意識、取り組みの実態

今回の調査に協力を得た排出事業者は、新築工事において建材を選定する立場でもあることから、材料選定の際、対象の建材の再資源化、LCA および LCCO₂ を選定の基準とするか否かについて、調査した結果を図 3-4-9 に示す。積極的に行うと回答した事業者は 15% と少ないが、多少でも考慮する事業者まで含めると全体の 65% と過半数を占めることから、ゼネコンやハウスメーカーは、廃棄物の再利用を含む環境負荷低減を意識していることが明らかとなった。このことから、現在やや消極的といえる製造者側の製品の再資源化可能性を周知する機運が高まることは、排出事業者が環境負荷低減効果に優れる製品を選定する理由となりうる。

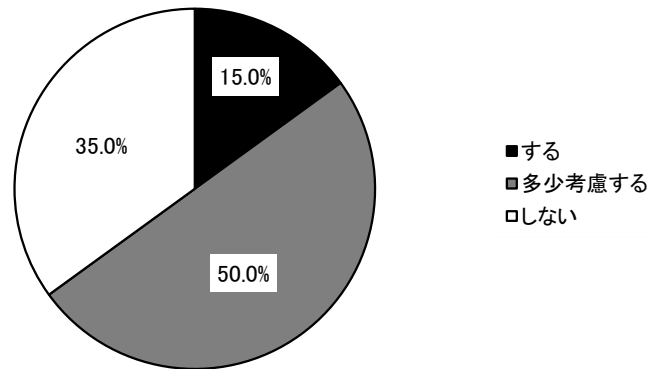


図 3-4-9 排出事業者が材料選定の際に LCA および LCCO₂を選定の基準とする割合

次に、排出事業者が、解体工事や改修工事において設定する廃棄物の分別に対するルール・基準を図 3-4-10 に示す。全社統一の基準設定、支店ごとの基準設定、設定無しと回答した排出事業者がほぼ同数の結果となった。設定無しと回答した排出事業者においては、中間処理業者の基準に準拠するという回答が多くみられたことから、ほぼ全ての排出事業者において廃棄物の分別に何らかの基準を設けていることがわかった。

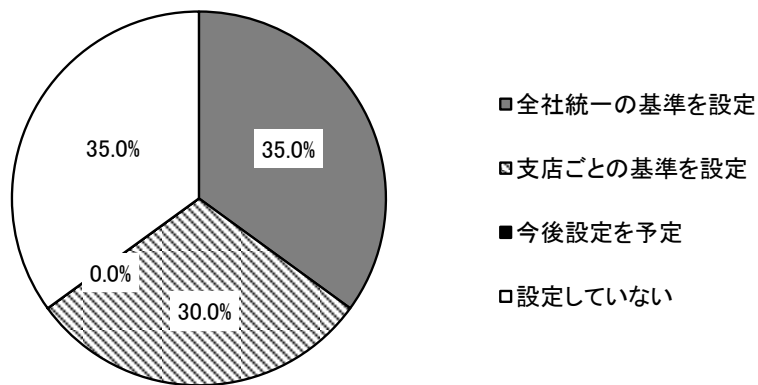


図 3-4-10 排出事業者の廃棄物の分別に対するルール・基準の設定

廃棄物の処理または有効利用のため、分別を細分化する場合に排出事業者の考える問題点を図 3-4-11 に示す。廃棄物の分別の細分化に対して 80%の排出業者が敷地を問題として

いる。これは、現場における廃棄物の保管場所の確保の困難性に起因すると考えられ、特にハウスメーカーでは大きな問題と推察される。次いで多く問題とされたのは処理場の問題と、現場ごとに条件が異なるという点であった。建設物の構造、および用途は多種多様であり、それらに対応し排出される品目やその構成も現場ごとに異なるのは当然であるが、現場から廃棄物を受け入れる処理場の能力や特性の差異も、排出事業者からは問題視されている。これは、排出事業者が廃棄物の分別化を細分化するのに対応するように、細分化された廃棄物それぞれに対し、適切な処理を行うことのできる中間処理業者の存在が不可欠となることを示している。なお、運搬や費用について問題と考える排出事業者は半数以下であった。

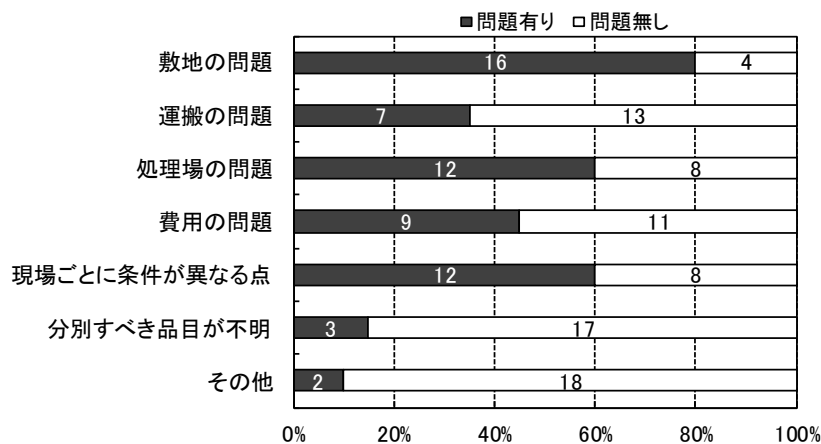


図 3-4-11 廃棄物の分別の細分化の際、問題となる点

排出事業者が中間処理業者を選定する際の基準について図 3-4-12 に示す。中間処理業者を選定する際に最も重視しているのは過去の行政処分の有無であり、次いで許可品目、適正処理ルート of 保持、および十分な処理能力であった。これらの項目がコストよりも優先される傾向にあることから、排出事業者は廃棄物の処理に対し、いわゆる安かろう悪かろうといった処理ではなく、適切かつ合理的、合法的な廃棄物の処理を望んでいるといえる。これは、コストに次ぎ、中間処理業者のマニフェストおよび適正処理状況の現況確認といった適正処理に関するエビデンスの収集可能性に対する注目度も高くなっていることから明らかといえる。また、建設廃棄物の適正処理は排出事業者の責務であり、廃棄物の発生から最終処分が適正に行われるまで責任を負わなければならないとする廃棄物処理法により、排出事業者は廃棄物の適正処理を義務付けられていることも一因である。

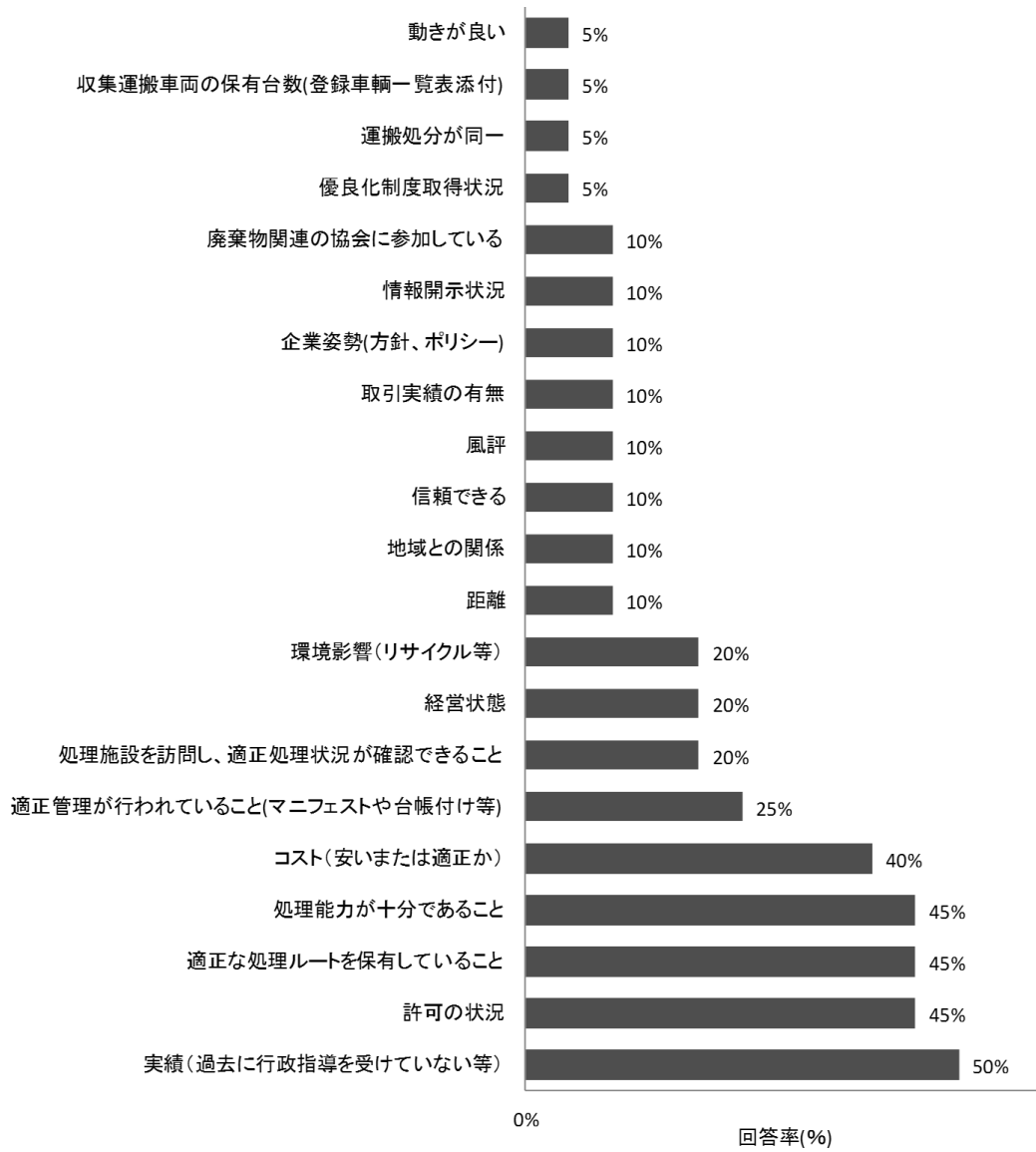


図 3-4-12 中間処理業者の選定基準

排出事業者が、中間処理業者に受け入れ拒否される廃棄物の品目についての調査結果を図 3-4-13 に示す。中間処理業者から受け入れが拒否される品目の区分では、処理困難物よりも特別管理産業廃棄物および特殊な廃棄物が大半を占める結果となった。特別管理産業廃棄物のうち、PCB に関しては国の管理のもと特に厳しい管理がなされており、処理自体が困難であるため受け入れの拒否率が最も高い結果となった。次いで鉛、砒素、カドミウムといった重金属類、ハロン・フロンおよび飛散性アスベスト等の特別に許可が必要な品目の受け入れ拒否率が高い傾向が確認された。

区分	細目	内容	回答割合(%)									
廃油・廃酸	非引火性廃油		27%									
	引火性廃油		27%									
	廃酸		27%									
	LPG他	プロパンガスボンベ	73%									
特別管理産業廃棄物	PCB	トランスコンデンサー	87%									
		蛍光灯安定機器	73%									
		シーリング材	67%									
	飛散性アスベスト	吹き付けアスベスト	53%									
		石綿保温材	53%									
		珪藻土保温材	53%									
		パーライト保温材	53%									
		珪酸カルシウム耐火被覆板	53%									
	煙突用断熱材	47%										
特殊な廃棄物	非飛散性アスベスト	石綿セメント板	33%									
		ビニール床タイル	33%									
		珪酸カルシウム板	33%									
		ロックウール化粧吸音板	33%									
	CCA	CCA処理木材	40%									
	水銀	蛍光管	27%									
		水銀灯	40%									
	臭化リチウム	旧式冷凍機	53%									
	鉛・カドミウム	鉛電池	60%									
		ニカド電池	53%									
	砒素・カドミウム	砒素	67%									
		カドミウム含有石膏ボード	67%									
	フロン・ハロン	冷凍機	67%									
		空調機	67%									
		発泡プラスチック断熱材	47%									
	消火器	67%										
処理困難物	複合材		0%									
	複合製品		0%									
	絡みもの	ロープ		0%								
		紐		0%								
		番線		0%								
	シートもの	ブルーシート		0%								
		農業用シート		7%								
テント			0%									
その他	汚物		47%									
	生ゴミ		40%									

図 3-4-13 中間処理業者に受け入れ拒否される品目

第4項 中間処理業者の意識, 取り組みの実態

中間処理業者の廃棄物処理に関する基本的な受け入れ体制およびその理由について図 3-4-14 および図 3-4-15 に示す。全許可品目を受け入れると回答した中間処理業者は全体の 5% 以下と少ない結果が得られた。再資源化が可能な品目を優先して受け入れると答えた中間処理業者まで含めても、有害物質混入のおそれのある廃棄物の受け入れに積極的と考えられる業者は全体の 1/4 弱となっており、中間処理業サイドでは廃棄物中の有害物に対しては厳しい見方をしていることがわかる。なお、全体の 70% 弱を占める、有害物の混入のおそれの無いもののみを受け入れている業者が、その受け入れ体制を取らざるを得ない最大の理由は処理の許可を取得していないことであった。有害物の処理には専門の許可が必要であるうえに、中間処理業者の能力の範疇を超えるものも含まれると考えられることから、積極的な受け入れは難しいことがうかがえる。

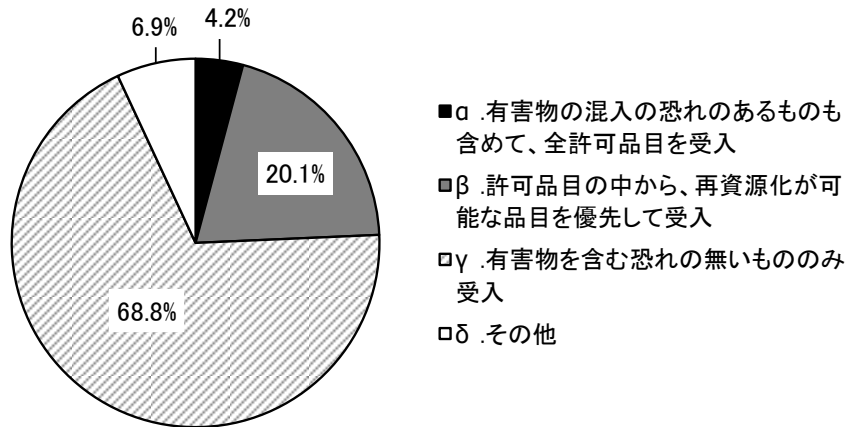


図 3-4-14 中間処理業者の基本的な受け入れ体制

回答	回答の理由	回答率 (%)
α.	管理型該当の品目で有害物質試験データを確認し受入 ただし公害防止協定に反するものは受入不可	17%
	可能な限り事前調査を行い極力受入	17%
β.	許可品目が再資源化可能なため	8%
	事業主体がリサイクルを主としているため	8%
	費用の問題	8%
Γ.	許可を取得していないため	41%
	処理後再生資材として販売するため	15%
	処理に困るため	13%
	環境影響（人体、近隣）の問題	8%
	費用の問題	5%

図 3-4-15 基本的な受け入れ体制をとる理由

受け入れた廃棄物に混入している頻度の高い有害物を図 3-4-16 に示す。排出事業者が受け入れ拒否される廃棄物は、PCB が多かったが、中間処理業者ではアスベストの混入が圧倒的に多いことがわかる。これは単純に受け入れる廃棄物に占めるアスベストの割合が、小規模部品での使用が大半である PCB よりも多いことが原因であると考えられる。また、使用用途が限定的である PCB は受け入れのチェックの段階で含有の可能性についてアスベストよりも認識されやすいことも原因として考えられる。

受け入れた廃棄物に有害物質の混入が認められた場合の措置についての回答結果を図 3-4-17 に示す。その他と回答した業者の具体的な記述内容は、混入が判明した場合に嚴重注意、複数回目の場合は取引停止といった厳しい内容から、二次処理先の手配が不可能な場合は受け入れ拒否といった内容まで様々であったが、回答群全体として受け入れ拒否の方向性が強かった。このことから、中間処理業者の 95%程度は有害物質混入の認められた場合、受け入れを拒否する傾向にあることがわかった。

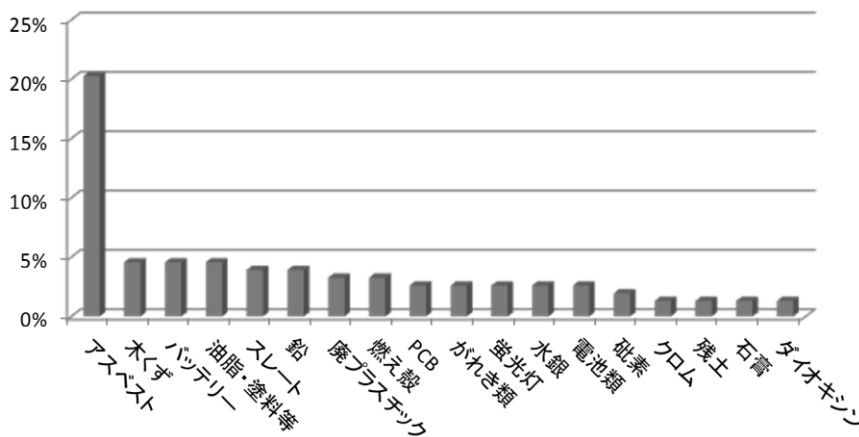


図 3-4-16 受け入れ廃棄物中に混入している頻度の高い有害物質

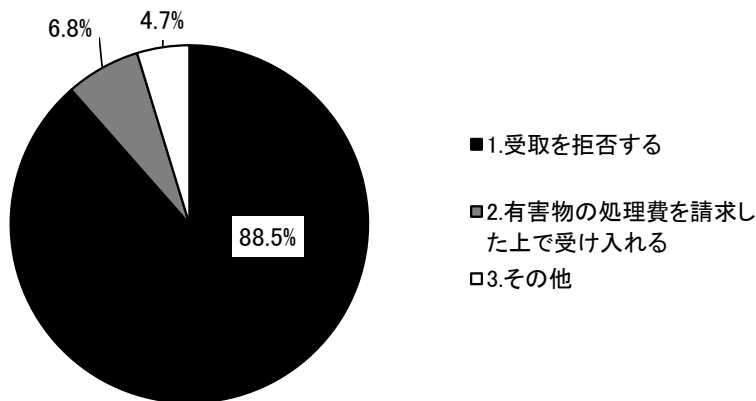


図 3-4-17 受け入れ廃棄物中に有害物質が混入している際の措置

中間処理業者が混合廃棄物を受け入れる理由として得られた回答を図 3-4-18 に示す。

また、中間処理業者が混合廃棄物を受け入れるメリットとして得られた回答を図 3-4-19 に示す。

これらの結果を比較すると、中間処理業者の多くは混合廃棄物を受け入れるメリットを顧客対応の手段、あるいは自社での一元的な契約獲得の可能性といったマーケティング手法として捉えていた。また、最終処分量の削減に関する回答からは、最終処分量の削減はメリットではあるが、受け入れの理由にはなり得ないという考えの存在が確認された。

さらに、混合廃棄物の受け入れに対し、利幅が大きいという認識は 20%強と少ないが、再資源化が可能となる量が増える、あるいは最終処分に付す量を削減できるといった環境負荷軽減に係る要因を利点と捉える業者はどちらも 50%程度存在することから、中間処理業者においても廃棄物の再資源化および削減に対して積極的な姿勢が確認された。

廃棄物処理において、中間処理業者が受け入れ基準を明確にすることで、排出事業者が中間処理場の選定や再資源化を考慮した処理方法の検討が可能となる。そこで、中間処理業者の主要な廃棄物の受け入れ基準の実態を図 3-4-20 に示す。これより、廃棄物の種類ごとに多少の違いはあるが、おおむね寸法形状、種類、異物や有害物の混入状況を受け入れ基準としている。個別にみると、コンクリートがらでは他品目に比べて、受け入れ基準の設定割合が高く、その他の廃棄物ではいずれも 50%前後である。これは、再資源化の用途が明確なコンクリートがらと、用途が明確でなく再資源化率も低い廃棄物で生じた差と推察される。

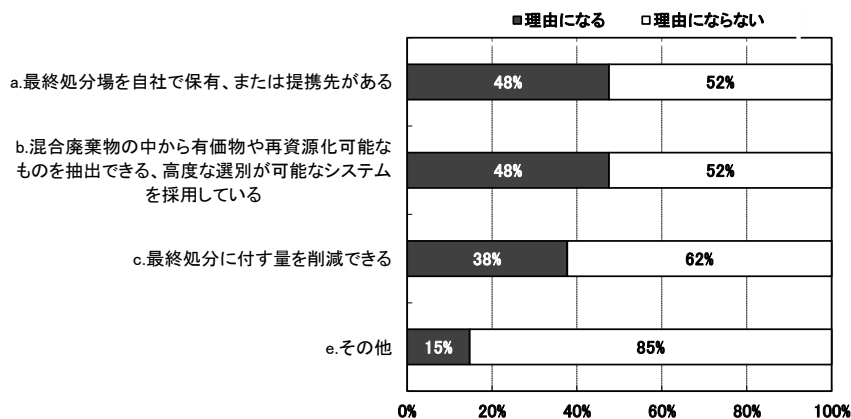


図 3-4-18 混合廃棄物を受け入れる理由

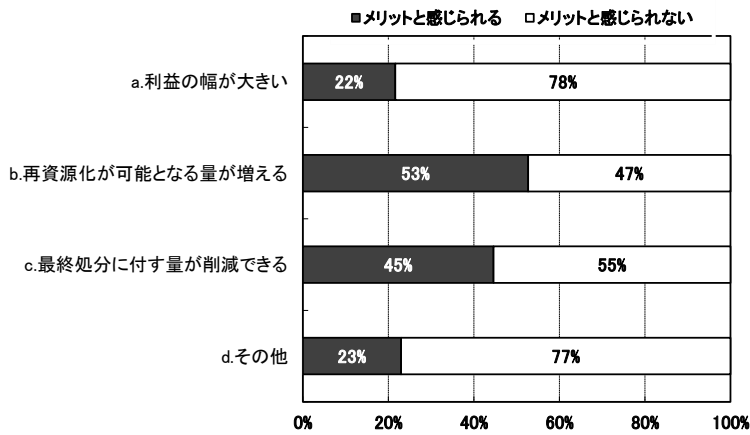


図 3-4-19 混合廃棄物を受け入れるメリット

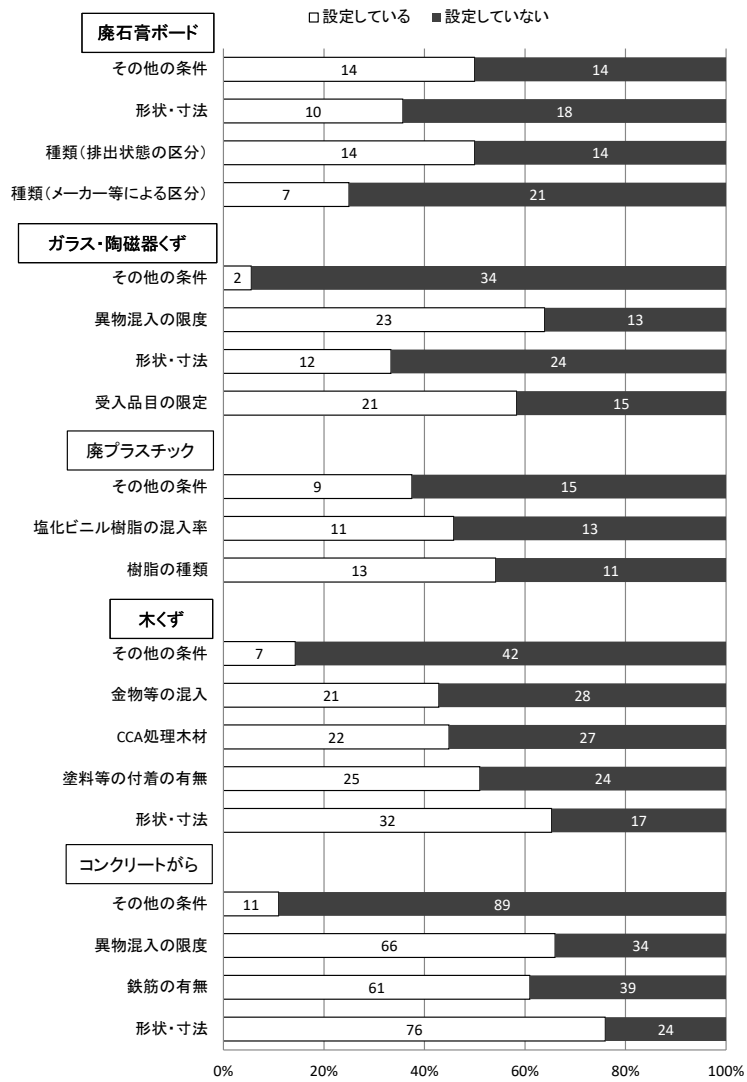


図 3-4-20 中間処理業者における廃棄物の受け入れ基準

第5項 立場の異なる利害関係者間の意識共有

アンケート調査の結果から、以下に示す知見を得た。

1. 建材製造者は、副産物を直接最終処分する割合の少なさ、副産物を製品として再利用する割合の多さ等から、製品の工場内廃棄物の削減、再利用といった環境配慮に対する意識は高く、実践もなされている。
2. 排出事業者が処理を委託する際に、処理業者の選定において重視するのはコストよりも許可内容や処理能力といった適正処理の確実性であったことから、排出事業者の遵法意識が明らかとなった。
3. 廃棄物の分別に関してはほぼ全ての排出事業者が何らかの基準を設けていることから、排出事業者-中間処理業者間の廃棄物の移動、情報の伝達を円滑に行う意思を有する。
4. 混合廃棄物の受け入れに関しては、再資源化可能量の増大、最終処分量の削減を利点と捉える中間処理業者が多いことから、経済的観点のみならず、環境配慮という観点においても中間処理業者と排出事業者との間で廃棄物処理方針の統一がなされている。
5. 建設廃棄物を扱う産業の現状において、製造業者、排出事業者、中間処理業者の三者は廃棄物の削減および再資源化に際し、いずれもそれぞれ取り組みを行っており、大筋で意識は統一されており、廃棄物の循環利用においては利害関係者間の意識共有が必要条件であることがわかった。

第5節 まとめ

資源循環の枠組みと副産物の利用拡大に係る課題の抽出から、以下に示す知見を得た。

1. 産業副産物の有効利用の法的枠組みとして、循環型社会形成推進基本法が存在し、資源有効利用促進法は資源および材料のライフサイクルにおける循環部分、廃棄物処理法はライフサイクルにおける終末期の処理、処分を規定するものとして循環型社会形成推進基本法の柱石を担うものである。
2. 法的枠組みにおける石炭灰の位置付けは、再生資源として利用することを促進すべき副産物(指定副産物)に規定されるものである。指定副産物は石炭灰のほかに、建設業から排出される建設廃棄物が規定されている。
3. セメント産業は生産活動を通じて副産物の処理を担う静脈産業としての重要な一面を有しており、こと石炭灰の有効利用にいたっては利用量の7割を占める最重要利用分野である。
4. セメント生産量は長期的に減少傾向にある反面、石炭灰の発生量増大は不可避な情勢であることから、石炭灰を今後安定的に循環利用する観点においては、利用拡大の余地を残す分野における用途開拓が重要な課題として浮き彫りとなった。
5. 指定副産物の有効利用に関する利害関係者間の意識共有度合の調査から、副産物の循環利用においては利害関係者間の意識共有が必要条件であることがわかった。
6. これにより、指定副産物である石炭灰の循環利用サイクルにおいても、立場の異なる利害関係者間で意識の共有が求められ、新規利用用途における石炭灰利用製品の性能保証や利用に対する付加価値やその効果の定量化は利害関係者間の意識の共有に資するものと考えられる。

第6節 参考文献

本章の参考文献を以下に示す。

- 3-1) 法律：資源の有効な利用の促進に関する法律，1991
- 3-2) 法律：廃棄物の処理及び清掃に関する法律，1970
- 3-3) 政令：資源の有効な利用の促進に関する法律施行令第7条，1991
- 3-4) セメント協会：セメントハンドブック 2015 年度版，2015
- 3-5) 一般財団法人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 26 年度実績），2016
- 3-6) 林昭人ほか：経年後のアスベスト含有成形板の下地調整におけるアスベスト繊維の飛散性の検証，日本建築学会技術報告集，第 39 号，pp.421-426，2012
- 3-7) 日本規格協会：JIS A 5422（窯業系サイディング），2008

第4章

フライアッシュ コンクリート耐久性評価 実態の調査

第1節 序

既往研究の調査から、フライアッシュを用いたコンクリートは促進中性化試験においては内割混合に伴うセメント量の減少により同一水セメント比の無置換コンクリートと比較した場合、中性化進行が速い⁴⁾¹⁾とされることがわかった。

しかし、一方でポゾラン反応に伴う長期的な強度増進による組織の緻密化から、実暴露環境下におけるフライアッシュコンクリートの中性化進行は必ずしも速くなるとはいえないという指摘⁴⁾²⁾もなされている。

促進環境下と実暴露環境下でのフライアッシュコンクリートの中性化評価に齟齬がみられるのは、JISに規定された試験により若材齢から高濃度の炭酸ガス中で促進中性化を行うことで、セメントの水和反応に続いて生じるフライアッシュのポゾラン反応による長期的な強度増進、組織の緻密化について考慮がなされないことに起因すると考えられる。

本章では、中性化に関する既往研究から個々の試験結果を取りまとめ、分析を行なうことで、促進中性化試験による中性化抵抗性評価と実環境に暴露した試験体による中性化抵抗性評価との関係性を明らかにし、耐久性評価の実態の把握とその課題の明確化を目的とした。

第2節 促進中性化試験結果の収集および分析

第1項 調査対象

試験結果の収集対象^{4-3)~4-42)}を以下表4-2-1, 4-2-2, および4-2-3に示す。抽出においては、コンクリート工学年次論文集, および日本建築学会学術講演梗概集を中心に行った。

対象の文献の総数は40件である。

表4-2-1 促進中性化試験結果の収集対象文献リスト(No.1~13)

No.	文献名	発表年度	著者	出典
1	石炭灰を多量に混用したコンクリートの諸特性に関する検討	1995	谷川公一・曾根徳明 他	コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17 No.1
2	分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性および耐久性	1997	深川正浩・中村成春 他	コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19 No.1
3	高粉末度フライアッシュを使用した高強度コンクリートの長期強度・中性化及び耐火性	1998	手島則夫・榊田佳寛・中村成春	コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20 No.2
4	フライアッシュを外割り混合使用したコンクリートの中性化特性	1998	黄光律・野口貴文 他	コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20 No.2
5	フライアッシュコンクリートの中性化, 水密性および遮塩性に関する実験	1998	和田真平・安部道彦 他	コンクリート工学年次論文報告集Vol.20No.2
6	フライアッシュを用いたマスコンクリートの諸性状に関する検討	1998	牧野真之・江口清 他	コンクリート工学年次論文報告集 Vol.20No.2
7	細骨材量の一部をフライアッシュに置き換えた普通及び軽量コンクリートの特性に関する実験研究	1999	梅津裕二・本間敏明 他	日本建築学会大会学術講演梗概集
8	フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化に関する研究	1999	島添洋治・白川敏夫 他	日本建築学会大会学術講演梗概集
9	フライアッシュを大量に内割使用したコンクリートの特性 凍結融解試験と促進中性化試験	2000	金森誠治・渡部聡	日本建築学会大会学術講演梗概集
10	フライアッシュを大量混和したコンクリートの中性化特性に及ぼすボゾラン反応の影響	2000	黄光律・野口貴文 他	日本建築学会構造系論文集
11	フライアッシュを45%まで内割使用したコンクリートに関する実験的研究	2000	船本憲治・宝口繁紀 他	コンクリート工学年次論文集 Vol.22No.2
12	フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究	2001	成田健・成澤謙伸 他	コンクリート工学年次論文集 Vol.23No.2
13	フライアッシュの混和方法によるコンクリートの工学的特性に関する実験的研究	2001	崔世珍・金武漢 他	日本建築学会大会学術講演梗概集

表 4-2-2 促進中性化試験結果の収集対象文献リスト(No.14~30)

No.	文献名	発表年度	著者	出典
14	細骨材として砕砂とフライアッシュIV種を用いたコンクリートの諸特性	2002	松屋武樹・堺孝司 他	コンクリート工学年次論文報告集Vol.24No.1
15	フライアッシュを使用したコンクリートの中性化特性	2002	船本憲治	日本建築学会九州支部研究報告2002年3月
16	混和材が塩害と中性化の複合劣化に及ぼす影響	2002	佐伯竜彦・関谷輝	コンクリート工学年次論文集
17	耐久性改善剤を用いたフライアッシュコンクリートの耐久性に関する実験的研究	2004	西祐宜・高田良章 他	コンクリート工学年次論文集
18	フライアッシュコンクリートの諸性質に及ぼすフライアッシュの種類および置換率の影響	2004	全洪珠・嵩英雄	コンクリート工学年次論文集
19	フライアッシュコンクリートの強度・中性化に及ぼす養生の影響に関する研究	2004	渡辺英樹・玉井孝幸 他	日本建築学会大会学術講演梗概集
20	フライアッシュコンクリートの中性化屋外暴露試験に関する文献調査	2005	船本憲治	日本建築学会九州支部研究報告
21	フライアッシュコンクリートの強度・耐久性に及ぼす連行空気および収縮低減剤の影響	2005	全洪珠・原貴義 他	コンクリート工学年次論文集
22	フライアッシュを結合材とみなさないコンクリートの基本物性	2005	船本憲治・古賀善雄・藤本浩	日本建築学会大会学術講演梗概集
23	フライアッシュコンクリートを使用した構造体コンクリートの諸性質に関する実験的研究 その4.壁状構造体から採取した供試体の中性化	2005	石川嘉崇・榎田佳寛 他	日本建築学会大会学術講演梗概集
24	加圧流動床灰混入コンクリートの強度発現と耐久性に関する実験的検討	2006	野田翼・中下明文・佐藤良一	コンクリート工学年次論文集
25	フライアッシュコンクリートの長期性状に関する材齢10年の実験報告(その2 中性化)	2006	平原武・岡野智哉 他	日本建築学会関東支部研究報告集
26	フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究(その1)中性化に及ぼす各種要因の影響に関する実験	2007	守屋健一・金子樹 他	日本建築学会大会学術講演梗概集
27	置換率および養生条件がフライアッシュを用いたモルタルの品質に及ぼす影響	2008	小川由布子・宇治公隆・上野敦	コンクリート工学年次論文集
28	フライアッシュコンクリートの促進中性化試験に関する検討	2009	野田亮太・伊藤是清 他	日本建築学会九州支部研究報告
29	中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの耐久性に関する実験的研究	2009	船本憲治・阿部道彦	日本建築学会大会学術講演梗概集
30	フライアッシュコンクリートの品質管理手法および硬化コンクリートの特性	2009	西田朗・西祐宜 他	日本建築学会大会学術講演梗概集

表 4-2-3 促進中性化試験結果の収集対象文献リスト(No.31~40)

No.	文献名	発表年度	著者	出典
31	CfFAコンクリートの耐久性に関する研究 (その2.乾燥収縮試験および促進中性化試験)	2010	伊藤七恵・佐藤嘉昭 他	日本建築学会九州支部研究 報告
32	フライアッシュセメントB種相当コンクリートの湿潤 養生期間の違いが圧縮強度・中性化に及ぼす影 響に関する実験研究(その2.中性化)	2010	末永龍夫・笠井浩 他	日本建築学会大会学術講演 梗概集
33	原子力発電所施設用高流動コンクリートに関する 基礎的検討(その3 耐久性能の検討)	2010	陣内浩・早川光敬 他	日本建築学会大会学術講演 梗概集
34	混和材にフライアッシュⅡ種を用いた高強度コン クリートの各種試験結果	2010	兼重克之・安永明博 他	日本建築学会大会学術講演 梗概集
35	低品質再生粗骨材を用いたコンクリート製品に関 する研究(その2.乾燥収縮ひずみおよび中性化 性状)	2010	岡田秀敏・秋吉善忠 他	日本建築学会大会学術講演 梗概集
36	フライアッシュコンクリートの初期養生が中性化に 及ぼす影響	2011	今川健一・中下明文 他	日本建築学会大会学術講演 梗概集
37	フライアッシュを細骨材補充用混和材として用い たコンクリートの検討(その2.高性能AE減水剤を 用いた場合の乾燥収縮・促進中性化)	2011	日高修・宮嶋浩 他	日本建築学会大会学術講演 梗概集
38	高品質フライアッシュコンクリートの特性に及ぼす セメント種類の影響(その2.乾燥収縮および促進 中性化試験)	2012	古賀大嗣・佐藤嘉昭 他	日本建築学会大会学術講演 梗概集
39	フライアッシュを混合使用したコンクリートの強度 および耐久性	2012	中村正義・朝比奈俊和・ 山崎順二	日本建築学会大会学術講演 梗概集
40	塗膜系防水層下のフライアッシュおよび高炉スラ グ微粉末を使用したコンクリートの塩害と中性化	2013	上田隆雄・塚越雅幸・市 川智也	日本建築学会大会学術講演 梗概集

第2項 全体調査

促進試験による耐中性化性能評価全体像の把握を目的とし、調査対象とした全ての文献より圧縮強度および中性化速度係数の測定結果を抽出した。

組織の緻密さと、劣化因子に対する浸入抵抗性には相関性があり、実際に既往の多くの研究が圧縮強度と中性化抵抗性の相関性を指摘している。特に、圧縮強度の逆数と中性化速度係数は線形関係を示すことが知られている。

ここで、調査対象全ての文献から得られた圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係を図4-2-1に示す。

図4-2-1より、既往の研究の指摘のとおり、圧縮強度の逆数と中性化速度係数は線形を示すことが明らかとなった一方で、同一圧縮強度で比較した場合においては、必ずしもフライアッシュコンクリートの中性化進行が無置換のコンクリートと比較して速いという傾向は確認されなかった。

このことから、圧縮強度を指標とした場合、耐中性化抵抗性の評価においてはフライアッシュのセメント置換の有無は影響を及ぼさないことが明らかとなった。換言すれば、圧縮強度の確保により耐中性化抵抗性が担保可能ということである。

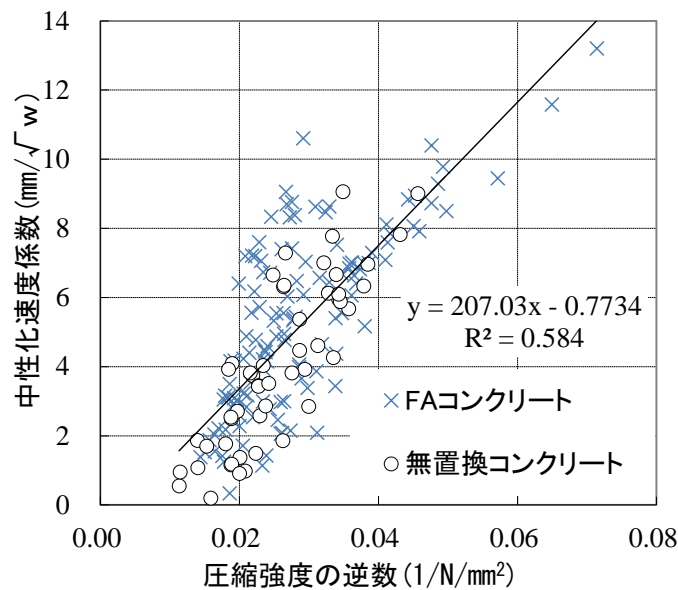


図 4-2-1 圧縮強度の逆数と中性化速度係数

第3項 促進試験環境における中性化進行の調査概要

第2項の全体傾向の調査に続き、フライアッシュコンクリートの促進試験における中性化進行の実態を把握するために、2004年から2014年の11年間に日本建築学会大会梗概集に収録された論文に対して、中性化進行の詳細調査を行った。論文からデータを選択した条件を表4-2-4に示す。なお、中性化深さは論文の図のグラフから直接読み取って数値化した。中性化速度係数のみが記載されている文献については、中性化速度係数から中性化深さを逆算して数値化した。

表4-2-4 データ抽出の条件

項目	内容
FA置換率	0~30%
前養生	4週水中, 4週気中
促進条件	CO ₂ 濃度5%, 60%RH
水セメント比	40~75%
水結合材率	35~70%

調査により得られたデータを水結合材比、フライアッシュ置換率で分類した結果を表4-2-5に示す。また、中性化深さ平均値の分布の例を図4-2-2に示す。

表4-2-5 データの存在比率

データ総数: 141					
水結合材率	データ数	比率	FA置換率	データ数	比率
60~70%	6	4.3%	30%以上	43	30.5%
50~60%	69	48.9%	20~30%	47	33.3%
40~50%	53	37.6%	10~20%	46	32.6%
35~40%	13	9.2%	0%	43	30.5%

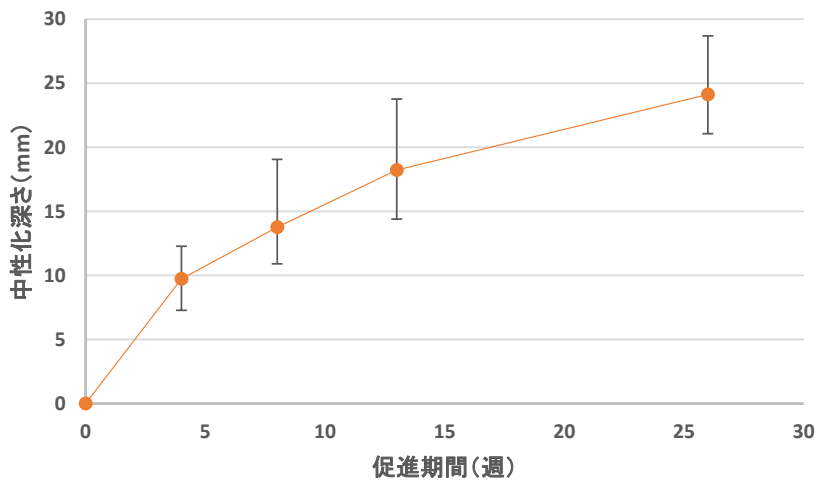


図4-2-2 中性化深さの分布例(フライアッシュ置換率 20%, 水結合材比 50~60%)

第4項 置換率と中性化進行の関係性

ここで、フライアッシュコンクリートの中性化速度係数比を普通ポルトランドセメントの中性化速度係数比で除したものを中性化速度係数比と定義する。最もデータ存在比率の高い水結合材比 50~60%の範囲におけるフライアッシュ置換率ごとの中性化深さ平均値と中性化率を図 4-2-3 に示す。

促進期間 26 週における置換率 0% の中性化深さ平均値は 14.2mm，置換率が 10% の中性化深さ平均値は 22.1mm，置換率 20% の中性化深さ平均値は 24.1mm となった。

また、中性化率の検討より、同一水結合材比の範囲内においてフライアッシュ置換率 10% の場合、無置換コンクリートと比較して平均 43%，フライアッシュ置換率 20% では平均 67% 中性化の進行が速くなるという結果が得られた。

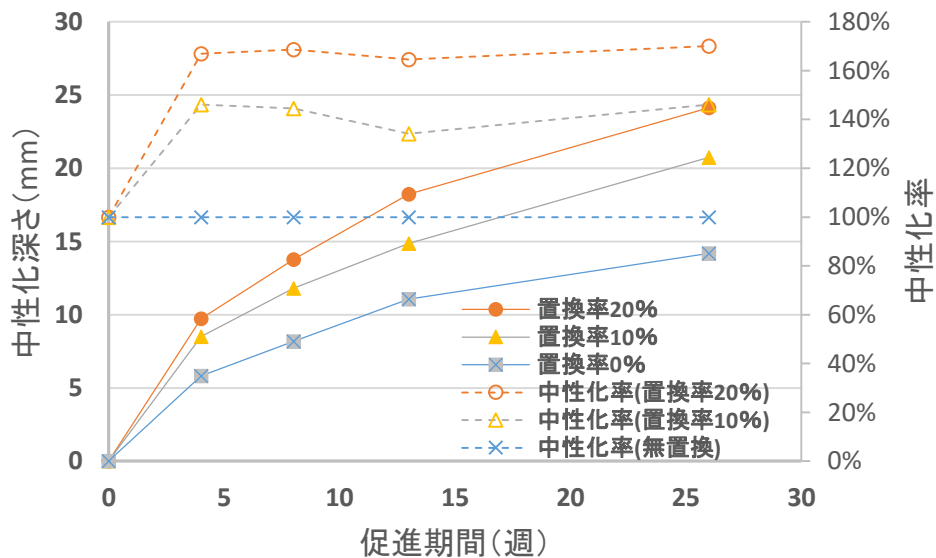


図 4-2-3 中性化深さの分布例(フライアッシュ置換率 20%，水結合材比 50~60%)

第5項 水結合材比および水セメント比と中性化進行の関係性

フライアッシュ置換率 0% の中性化深さ平均値を図 4-2-4 に示す。促進期間 26 週における水セメント比 60% の中性化深さ平均値は 18.6mm，水セメント比 50% の中性化深さ平均値は 11.2mm，水セメント比 45% の中性化深さ平均値は 3.0mm，水結合材比 40% 以下の中性化深さ平均値は 2.7mm となった。

フライアッシュセメント B 種に相当するフライアッシュ置換率 20% 近傍の水結合材比率ごとの中性化深さ平均値を図 4-5-2 に示す。促進期間 26 週における水結合材比 60% の中性化深さ平均値は 31.4mm，水結合材比 50% の中性化深さ平均値は 23.6mm，水結合材比 45% の中性化深さ平均値は 19.0mm，水結合材比 40% 以下の中性化深さ平均値は 10.6mm とな

った。

図 4-2-4, 図 4-2-5 より, フライアッシュコンクリートと無置換コンクリートの中性化進行が近似する水準を図 4-2-6 に示す。フライアッシュを内割 20% 置換したコンクリート (フライアッシュセメント B 種相当) の平均的な中性化進行は概ね水結合材比が 15% 程度大きい無置換コンクリートの中性化進行と一致することが確認された。このことから促進中性化試験環境下での評価においては, フライアッシュの内割置換による中性化抵抗性への寄与は非常に小さなものとなることが明らかとなった。

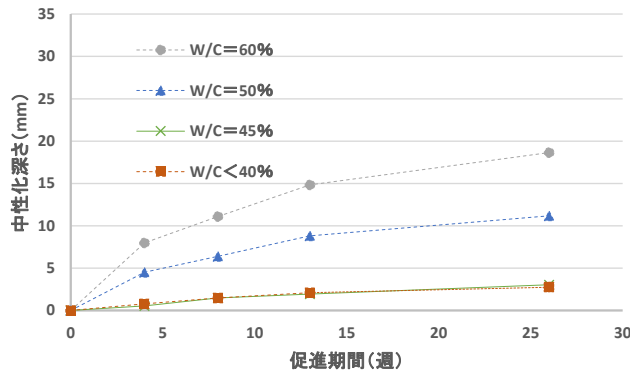


図 4-2-4 無置換コンクリートの中性化進行

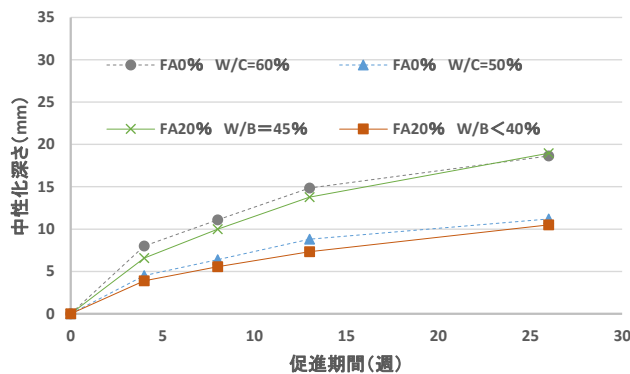


図 4-2-5 フライアッシュコンクリートの中性化進行(フライアッシュセメント B 種相当)

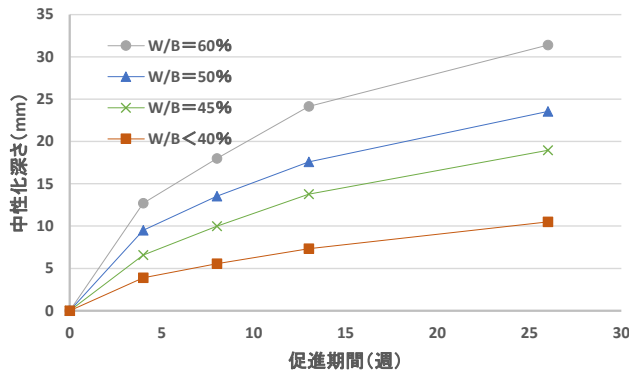


図 4-2-6 フライアッシュコンクリートと無置換コンクリートの中性化進行が近似する水準の中性化進行

第6項 まとめ

促進中性化試験を扱った文献の圧縮強度，中性化速度係数，水結合材比の抽出，および分析から以下に示す知見を得た。

1. 促進環境下においても圧縮強度を指標とした場合，耐中性化抵抗性の評価においてはフライアッシュのセメント置換の有無は影響を及ぼさない。
2. 水結合材比 50～60%の範囲における置換率毎の平均的中性化進行挙動を把握した。
3. フライアッシュセメント B 種相当のコンクリートの水結合材比毎の平均的中性化進行挙動を把握した。
4. フライアッシュセメント B 種相当のコンクリートの平均的な中性化進行は水結合材比が 15%程度小さい無置換コンクリートの中性化進行と概ね一致する。
5. (4)より促進環境下においてフライアッシュの内割置換による中性化抵抗性への寄与はほぼ無いものとして，もしくは非常に小さいものとして評価されているといえる。

第3節 屋外暴露試験結果の収集および分析

第1項 調査対象

試験結果の収集対象^{4-43)~4-49)}を以下表4-3-1に示す。

表4-3-1 屋外暴露試験結果の収集対象文献リスト

No.	文献名	発表年度	著者	出典
1	8種類のセメントを用いたAEコンクリートの中性化速度について	1998	依田彰彦ほか	セメント・コンクリート論文集
2	中性化における環境条件を考慮した暴露試験と促進試験の対応に関する検討	1998	長谷川拓也ほか	第52回セメント技術大会講演要旨
3	フライアッシュを使用したコンクリートの材齢9年における中性化暴露試験報告	2007	船本憲治ほか	日本建築学会大会学術講演梗概集
4	中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの中性化速度係数	2014	押田文雄ほか	日本建築学会技術報告集
5	フライアッシュコンクリートの長期性状に関する実験	2006	建築研究進行協会	材齢10年経過報告書
6	フライアッシュセメントを用いたコンクリートの20年試験	1979	鈴木論一ほか	セメント技術年報 No. 33
7	フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究	1988	土木学会	コンクリートライブラリー第64号

第2項 調査概要

促進試験における中性化進行の評価においては、フライアッシュ混和による中性化に対する寄与はほぼ無いものとされることが明らかとなった。

中性化に対する抵抗性を評価するために広範に用いられている促進中性化試験は、実際のコンクリート利用条件下では長期間かけて発現する中性化に対する抵抗性を短期間で評価することを目的として、非常の過酷な条件下で行われる。フライアッシュコンクリートをはじめとする混和材をセメント代替として用いたコンクリートは、硬化反応自体が緩慢であることが多い。このような評価方法を用いると、ポゾラン反応に代表される長期的な硬化反応等の実態を反映した評価を行うことは難しいといえる。

そこで、既往の研究において屋外暴露試験等、長期間にわたり実際の使用環境に近いと考えられるCO₂濃度での中性化進行を行った文献から、中性化速度係数を中心としてデータの抽出を行った。

収集にあたっては、水結合材比の範囲を40~80%と設定し、フライアッシュコンクリートに関しては、置換率(フライアッシュ/(C+フライアッシュ))が15~30%の範囲にあるも

のを抽出対象とした。

第3項 各文献の調査結果

ここでは、各文献の水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係を示す。

1) 文献番号 1

文献番号 1 の調合概略および中性化速度係数を表 4-3-2 に、水セメント比(W/C)および水結合材比(W/B)と中性化速度係数の関係を図 4-3-1 に示す。

表 4-3-2 調合概略および中性化速度係数(文献番号 1)

種別	前養生	単位量(kg/m ³)			FA/(C+FA)(%)	W/(C+FA)(%)	W/C(%)	中性化深さ		
		w	c	FA				材齢(年)	深さ(mm)	中性化速度係数(mm/√年)
無置換	7日 水中	165	300	0	0	55	55	10	9.9	3.13
FA		157	234	51	18	55	67	10	16.1	5.09
無置換		162	249	0	0	65	65	10	15.5	4.90
FA		154	194	43	18	65	79	10	20.9	6.61

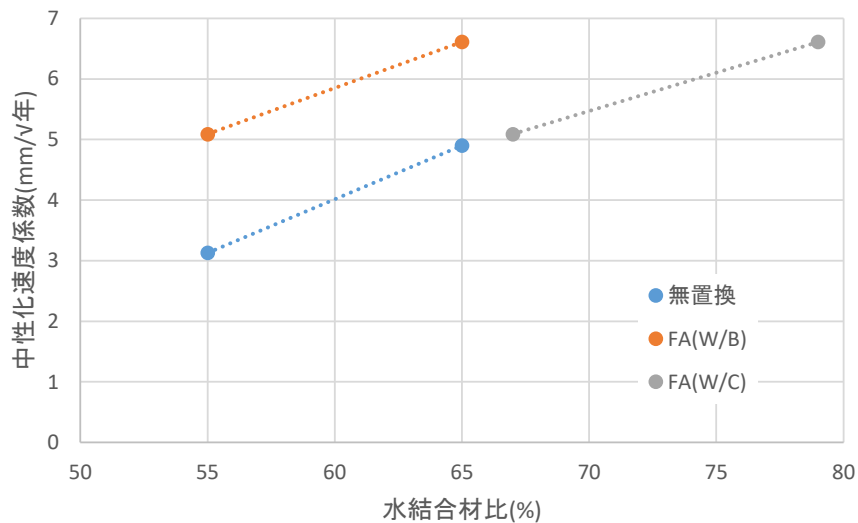


図 4-3-1 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係(文献番号 1)

本文献では設定した収集条件に該当する水準が無置換とフライアッシュコンクリート共にそれぞれ 2 種類となった。

中性化速度係数は暴露開始後 10 年の中性化深さ測定結果より算出した。

また、以降に示す他の文献と比較した場合、本文献の中性化深さおよび、中性化速度係数は著しく大きい。これは、単位セメント量が他の文献と比較して小さいことが要因と推察される。

中性化速度係数を水結合材比(W/B)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの上部に位置しており、同一水結合材比の無置換コンクリートと比

較して中性化速度係数が平均して 1.83 大きい値を示した。

一方、中性化速度係数をセメント比(W/C)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの延長線上に位置することから、促進環境と同様にフライアッシュの混和が結合材として中性化におよぼす効果は、当該環境では確認できなかった。

2) 文献番号 2

文献番号 2 の調合概略および中性化速度係数を表 4-3-3 に、水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係を図 4-3-2 に示す。

表 4-3-3 調合概略および中性化速度係数(文献番号 2)

種別	前養生	単位量(kg/m ³)			FA/ (C+FA) (%)	W/ (C+FA) (%)	W/C (%)	中性化深さ		
		w	c	FA				材齢 (年)	深さ (mm)	中性化 速度係数 (mm/√年)
無置換	28日 水中	178	356	0	0	50	50	10	3.7	1.17
FA		173	284	62	18	50	61	10	5.7	1.80
無置換		176	293	0	0	60	60	10	7.8	2.47
FA		171	234	51	18	60	73	10	9.9	3.13
無置換		176	251	0	0	70	70	10	11.2	3.54
FA		171	200	44	18	70	86	10	14.4	4.55

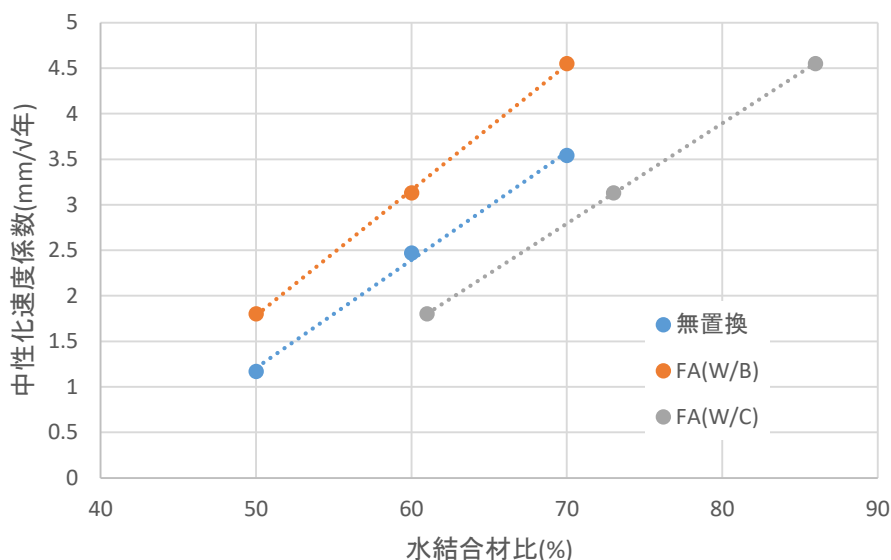


図 4-3-2 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係(文献番号 2)

本文献の中性化速度係数は文献 1 と同様に、暴露開始後 10 年の中性化深さ測定結果より算出した。

中性化速度係数を水結合材比(W/B)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの上部に位置しており、同一水結合材比の無置換コンクリートと比較して中性化速度係数が平均 0.77 大きい値を示した。

一方、中性化速度係数を水セメント比(W/C)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの右側に位置しており、同一セメント比の無置換コンクリートと比較して中性化速度係数は小さくなることわかる。当該環境ではフライアッシュの混和が結合材として中性化に効果をおよぼすことが確認できる。

3) 文献番号 3

文献番号 3 の調合概略および中性化速度係数を表 4-3-4 に、水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係を図 4-3-3 に示す。

表 4-3-4 調合概略および中性化速度係数(文献番号 3)

種別	前養生	単位量(kg/m ³)			FA/ (C+FA) (%)	W/ (C+FA) (%)	W/C (%)	中性化深さ		
		w	c	FA				材齢 (年)	深さ (mm)	中性化 速度係数 (mm/√年)
無置換	5日 封緘	180	450	0	0	40	40	9	2.1	0.70
FA		175	350	88	20	40	50	9	3.8	1.25
無置換	7日 封緘	180	300	0	0	60	60	9	7.8	2.60
FA		175	234	58	20	60	75	9	12.0	4.00
無置換	10日 封緘	180	450	0	0	40	40	9	0.0	0.00
FA		175	350	88	20	40	50	9	3.9	1.30
無置換	10日 封緘	180	300	0	0	60	60	9	6.8	2.25
FA		175	234	58	20	60	75	9	10.5	3.50
無置換	10日 封緘	180	450	0	0	40	40	9	0.0	0.00
FA		175	350	88	20	40	50	9	3.0	1.00
無置換	10日 封緘	180	300	0	0	60	60	9	6.3	2.10
FA		175	234	58	20	60	75	9	10.8	3.60

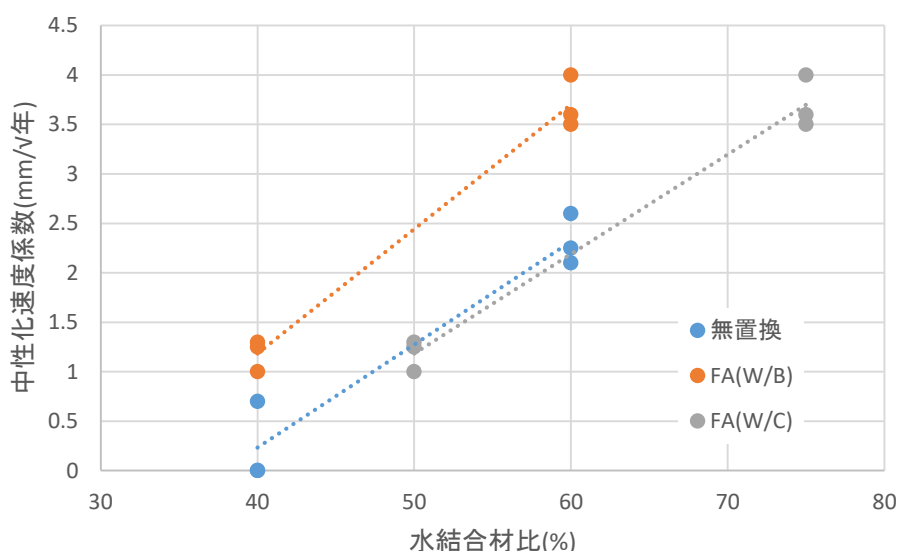


図 4-3-3 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係(文献番号 3)

本文献の中性化速度係数は、暴露開始後9年の中性化深さ測定結果より算出した。

中性化速度係数を水結合材比(W/B)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの上部に位置しており、同一水結合材比の無置換コンクリートと比較して中性化速度係数が平均1.17大きい値を示した。

一方、中性化速度係数を水セメント比(W/C)で評価する場合、文献1と同様に、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートのほぼ延長線上に位置することから、促進環境と同様にフライアッシュの混和が結合材として中性化におよぼす効果は、当該環境では確認されなかった。

4) 文献番号4

文献番号4の調合概略および中性化速度係数を表4-3-5に、水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係を図4-3-4に示す。

表 4-3-5 調合概略および中性化速度係数(文献番号4)

種別	前養生	単位量(kg/m ³)			FA/ (C+FA) (%)	W/ (G+FA) (%)	W/C (%)	中性化深さ		
		w	c	FA				材齢 (年)	深さ (mm)	中性化 速度係数 (mm/√年)
無置換	28日 水中	169	423	0	0	40	40	7	1.1	0.40
FA		169	338	85	20	40	50	7	2.3	0.87
無置換		160	320	0	0	50	50	7	2.4	0.90
FA		160	256	64	20	50	63	7	3.9	1.49
無置換		162	270	0	0	60	60	7	3.7	1.40
FA		162	216	54	20	60	75	7	5.6	2.11

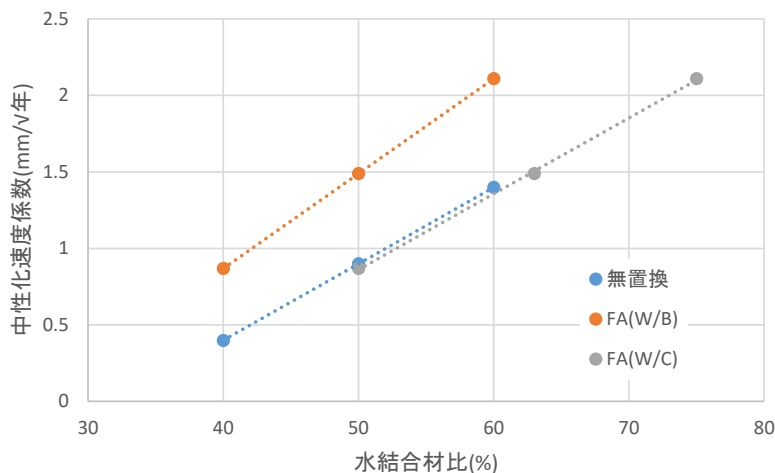


図 4-3-4 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係(文献番号4)

本文献の中性化速度係数は、暴露開始後7年の中性化深さ測定結果より算出した。

中性化速度係数を水結合材比(W/B)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの上部に位置しており、同一水結合材比の無置換コンクリートと比較して中性化速度係数は水結合材比40%の場合0.47, 50%の場合0.59, 60%の場合0.71それぞれ大きい値を示した。

一方、中性化速度係数を水セメント比(W/C)で評価する場合、文献1および文献3と同様に、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートのほぼ延長線上に位置することから、促進環境と同様にフライアッシュの混和が結合材として中性化におよぼす効果は、当該環境では確認されなかった。

5) 文献番号5

文献番号5の調合概略および中性化速度係数を表4-3-6に、水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係を図4-3-5に示す。

表4-3-6 調合概略および中性化速度係数(文献番号5)

種別	前養生	単体量(kg/m ³)			FA/(C+FA)(%)	W/(C+FA)(%)	W/C(%)	中性化深さ		
		w	c	FA				材齢(年)	深さ(mm)	中性化速度係数(mm/√年)
無置換	28日水中	178	324	0	0	55	55	10	1.5	0.49
FA		163	207	89	30	55	79	10	5.7	1.79
無置換		185	463	0	0	40	40	10	0.0	0.00
FA		175	306	131	30	40	57	10	1.6	0.50
FA		180	315	135	30	40	57	10	1.3	0.41
FA		185	324	139	30	40	57	10	1.1	0.36
無置換		178	226	0	0	79	79	10	6.9	2.19

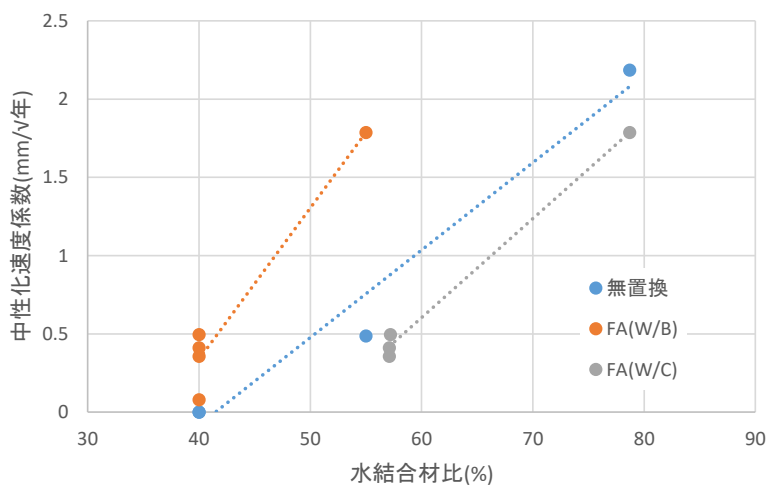


図4-3-5 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係(文献番号5)

本文献の中性化速度係数は、暴露開始後 10 年の中性化深さ測定結果より算出した。

本文献における供試体調合は、水結合材比が他の文献と比較して低いものが多く設定されている一方で、フライアッシュ置換率は高く設定されている。そのため、無置換コンクリートの線形の傾きとフライアッシュコンクリートの線形の傾きが異なり、水結合材比が高い場合にはフライアッシュコンクリートの中性化速度係数は大きくなる傾向が確認できる。

中性化速度係数を水結合材比(W/B)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの上部に位置し、水セメント比(W/C)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの右側に位置しており、同一セメント比の無置換コンクリートと比較して中性化速度係数は小さくなる文献 2 と同様の結果が得られた。

6) 文献番号 6

文献番号 6 の調合概略および中性化速度係数を表 4-3-7 に、水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係を図 4-3-6 に示す。

表 4-3-7 調合概略および中性化速度係数(文献番号 6)

種別	前養生	単位量(kg/m ³)			FA/ (C+FA) (%)	W/ (C+FA) (%)	W/C (%)	中性化深さ		
		w	c	FA				材齢 (年)	深さ (mm)	中性化 速度係数 (mm/√年)
無置換	7日水中	197	290	0	0	68	68	20	12	2.68
FA		180	232	58	20	62	78	20	9.1	2.03
無置換		202	320	0	0	63	63	20	6.8	1.52
FA		179	256	64	20	56	70	20	6.8	1.52
無置換		200	350	0	0	57	57	20	4.3	0.96
FA		179	280	70	20	51	64	20	5.5	1.23

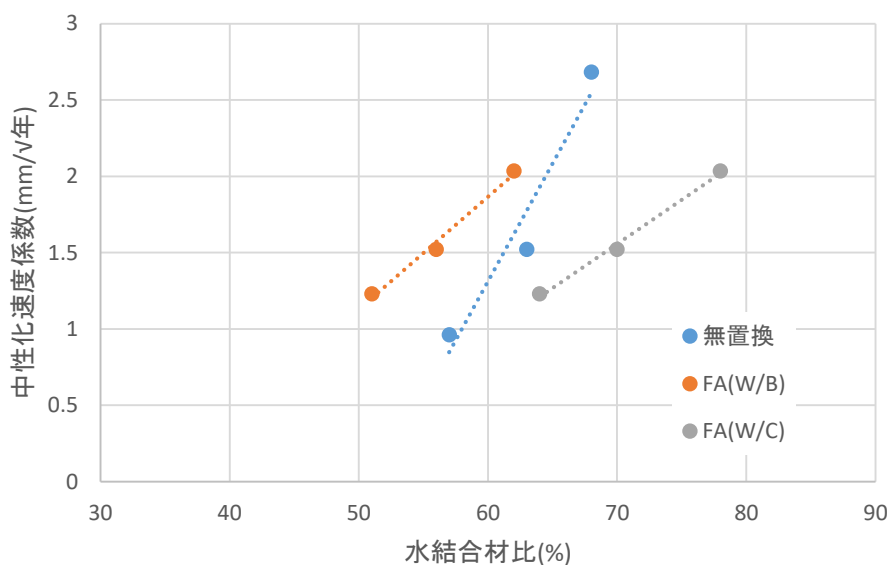


図 4-3-6 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係(文献番号 6)

本文献の中性化速度係数は、暴露開始後 20 年の中性化深さ測定結果より算出した。

本文献の発表年は 1979 年と収集した文献の中で最も古く、供試体の作製は 1950 年台と推察されるため、現在広範に用いられているコンクリートとは骨材、セメントおよび減水剤等の材料品質が異なると考えられる。しかしながら、水結合材比と中性化速度係数が線形を示す傾向にあることは他の文献と同様であることから、収集の対象とした。

中性化速度係数を水結合材比(W/B)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの上部に位置し、水セメント比(W/C)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの右側に位置しており、同一セメント比の無置換コンクリートと比較して中性化速度係数は小さくなる文献 2 および文献 5 と同様の結果が得られた。

線形の傾きは無置換コンクリートの方がフライアッシュコンクリートと比較して大きいことがうかがえる。これは、水セメント比の最も大きい水準の中性化深さが極めて大きいことが原因と考えられる。

7) 文献番号 7

文献番号 7 の調査概略および中性化速度係数を表 4-3-8 に、水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係を図 4-3-7 に示す。

表 4-3-8 調査概略および中性化速度係数(文献番号 7)

種別	前養生	単位量 (kg/m ³)			FA/ (C+FA) (%)	W/ (C+FA) (%)	W/C (%)	中性化深さ		
		w	c	FA				材齢 (年)	深さ (mm)	中性化 速度係数 (mm/√年)
無置換	14日 水中	177	330	0	0	53.7	53.7	20	5.5	1.23
FA		165	231	99	30	50.5	71.4	20	9.8	2.19
無置換		158	330	0	0	47.9	47.9	20	3.6	0.80
FA		149	231	99	30	45.6	64.5	20	7.0	1.57
無置換		177	290	0	0	61.0	61.0	20	7.2	1.61
FA		170	246.5	43.5	15	58.7	69.0	20	9.8	2.19
無置換		161	203	87	30	55.4	79.3	20	14.2	3.18
FA		155	290	0	0	53.4	53.4	20	6.2	1.39
無置換		146	203	87	30	50.5	71.9	20	11.2	2.50
FA		176	250	0	0	70.4	70.4	20	11.8	2.64
無置換		165	175	75	30	66.2	94.3	20	21.0	4.70
FA		152	330	0	0	46.2	46.2	20	5.0	1.12
無置換		143	231	99	30	42.9	61.9	20	9.0	2.01
FA		173	290	0	0	59.6	59.6	20	9.4	2.10
無置換		160	203	87	30	55.5	78.8	20	15.0	3.35
FA		155	290	0	0	53.4	53.4	20	8.1	1.81
無置換		145	203	87	30	50.0	71.4	20	10.6	2.37

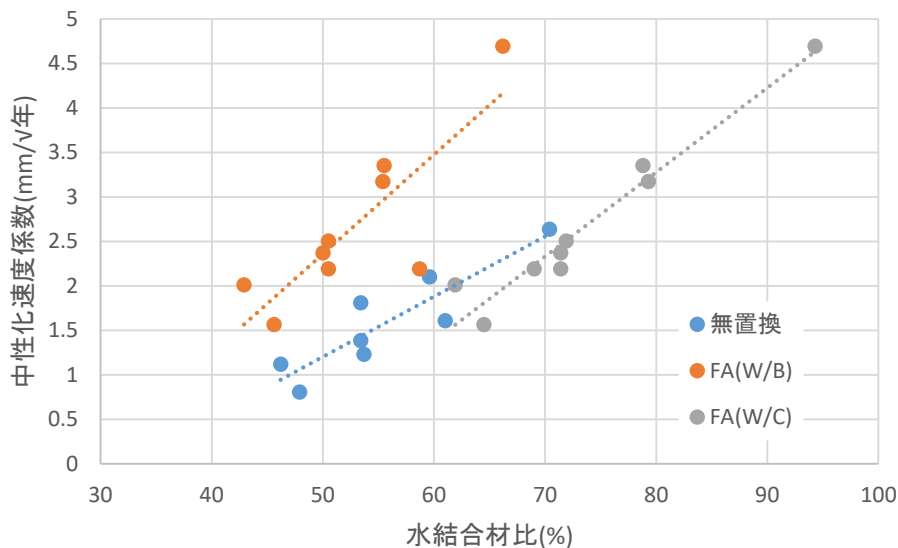


図 4-3-7 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係(文献番号 7)

本文献の中性化速度係数は、暴露開始後 20 年の中性化深さ測定結果より算出した。

文献 5 と同様にフライアッシュ置換率が高く設定されており、無置換コンクリートの線形の傾きとフライアッシュコンクリートの線形の傾きが異なり、水結合材比が高い場合にはフライアッシュコンクリートの中性化速度係数は大きくなる傾向が確認できる。

中性化速度係数を水結合材比(W/B)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの上部に位置し、水セメント比(W/C)で評価する場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの右側に位置しており、同一セメント比の無置換コンクリートと比較して中性化速度係数は小さくなる文献 2, 5 および 6 と同様の結果が得られた。

第4項 まとめ

7 つの文献の中性化速度係数と水結合材比の抽出および分析から以下に示す知見を得た。

1. 中性化速度係数と水結合材比は高い相関性を有し、線形を示す。
2. 線形の傾きはフライアッシュのセメント置換率によって異なるが、フライアッシュセメント B 種相当の置換率 20% では、無置換コンクリートとほぼ同じ傾きとなる。
3. 線形の位置関係は中性化速度係数を水結合材比で評価する場合、無置換コンクリートの上部に位置する。このことから、低濃度の CO₂ に長期間暴露した場合においてもフライアッシュの混和が中性化抵抗性に与える効果はセメントより小さいことがわかった。
4. 全ての文献において中性化速度係数を水セメント比で評価した場合、フライアッシュコンクリートの線形は無置換コンクリートの延長上もしくは右側に位置していた。このことから、フライアッシュの混和が中性化抵抗性に与える効果は少なくとも 0 ではないことが明らかとなった。

第4節 促進中性化試験結果と屋外暴露試験結果の相関性の検討

第1項 促進中性化試験の分析結果と屋外暴露試験の分析結果の比較

第2節における促進中性化試験の分析から、フライアッシュを内割20%置換したコンクリート(フライアッシュセメントB種相当)の平均的な中性化進行は概ね水結合材比が15%程度大きい無置換コンクリートの中性化進行と一致することが確認された。このことから、促進環境下においては、フライアッシュの内割置換による中性化抵抗性への寄与がほぼ無いものとして評価されることがわかった。

一方、第3節における屋外暴露試験の分析からは、フライアッシュの内割置換による中性化抵抗性への寄与は少なくとも0ではないという結果が得られた。

両者の分析結果の差異は暴露環境のCO₂濃度、および暴露期間の違いにより生じており、換言すれば、セメントの水和反応に続いて生起されるフライアッシュのポズラン反応による長期的な強度増進、および組織の緻密化の評価の扱い方の違いによって生じると推察される。

本節では、各試験方法に対し共通の指標を用いてフライアッシュの内割置換による中性化抵抗性への寄与の度合を定量的に評価することを目的とし、検討を行った。

第2項 促進中性化試験の分析結果および屋外暴露試験の分析結果の集約

フライアッシュの混和による中性化抵抗性への寄与を定量的に評価するために、各試験方法の分析結果の集約を行った。

試験方法によらず、中性化速度係数と水結合材比は高い相関性を有し、線形を示すことから、データ集約の際には水セメント比および水結合材比と中性化速度係数をパラメータとして設定した。

集約の際の条件は、

無置換コンクリート：水セメント比 40～70%

フライアッシュコンクリート：水結合材比 35～65%、置換率 20%(フライアッシュセメントB種相当)

とした。

図4-4-1に促進中性化試験の集約結果を、図4-4-2に屋外暴露試験の集約結果を示す。

集約結果より得られた近似曲線のパラメータを表4-4-1に示す。また、これらの式より算出した水結合材比50、60、70%の中性化速度係数を表4-4-2に示す。なお、中性化速度係数が0となる水結合材比については各試験条件の近似式から逆算することにより求めた。

以上の方法で求めた中性化速度係数と水結合材比の関係を、促進中性化試験については図4-4-3に、屋外暴露試験については図4-4-4に示す。

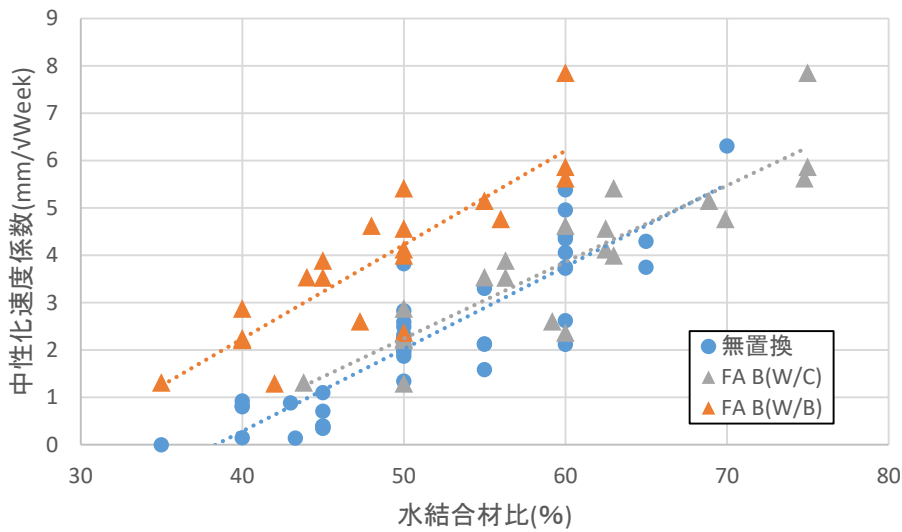


図 4-4-1 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の集約結果 (促進中性化試験)

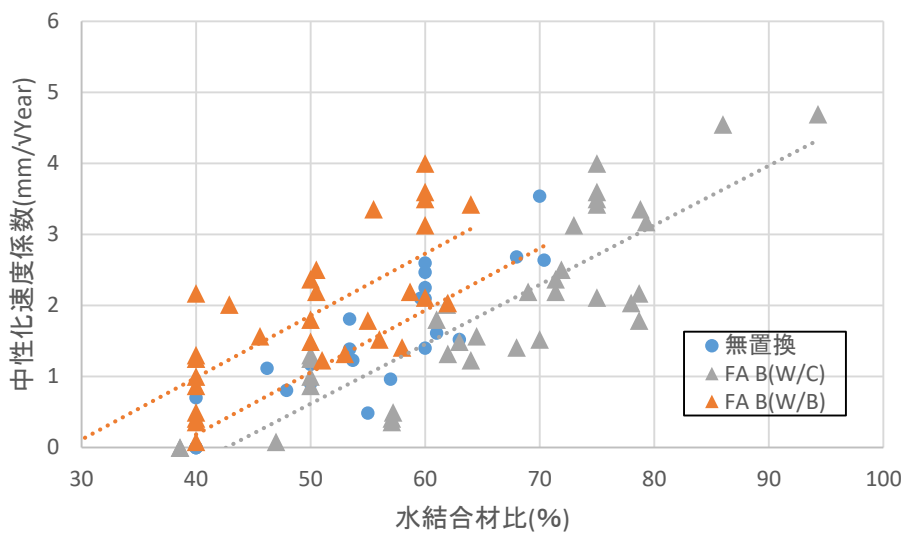


図 4-4-2 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の集約結果 (屋外暴露試験)

表 4-4-1 水セメント比および水結合材比と中性化速度係数の線形近似のパラメータ

試験方法	種別	傾き	y切片	x切片	R ²
促進	無置換	0.162	-5.845	36.146	0.791
	FA(W/B)	0.199	-5.702	28.724	0.744
	FA(W/C)	0.174	-6.660	38.365	0.774
屋外暴露	無置換	0.087	-3.314	37.922	0.778
	FA(W/B)	0.087	-2.508	28.726	0.627
	FA(W/C)	0.084	-3.574	42.652	0.748

表 4-4-2 線形近似より導出した水結合材別の中性化速度係数

促進						屋外暴露					
無置換	水結合材比 (%)	36	50	60	70	無置換	水結合材比 (%)	38	50	60	70
	中性化速度係数 (mm/√週)	0	2.24	3.86	5.47		中性化速度係数 (mm/√年)	0	1.06	1.93	2.80
FA(W/B)	水結合材比 (%)	29	50	60	70	FA(W/B)	水結合材比 (%)	29	50	60	70
	中性化速度係数 (mm/√週)	0	4.22	6.21	8.19		中性化速度係数 (mm/√年)	0	1.86	2.73	3.60
FA(W/C)	水結合材比 (%)	38	50	60	70	FA(W/C)	水結合材比 (%)	43	50	60	70
	中性化速度係数 (mm/√週)	0	2.02	3.76	5.49		中性化速度係数 (mm/√年)	0	0.62	1.45	2.29

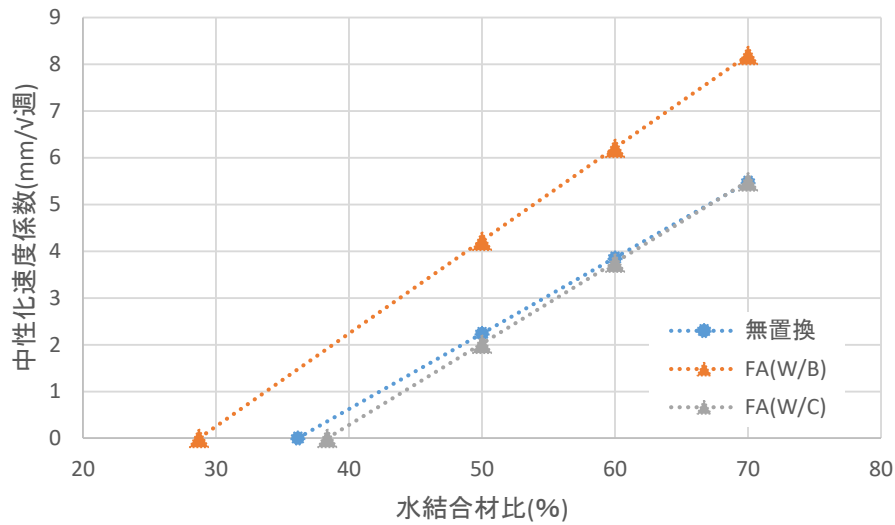


図 4-4-3 線形近似より導出した水結合材比と中性化速度係数の関係 (促進中性化試験)

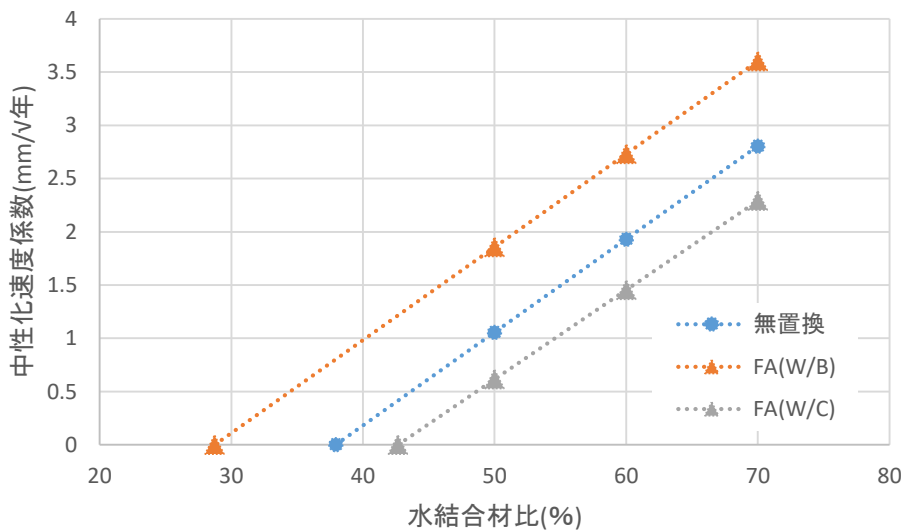


図 4-4-4 線形近似より導出した水結合材比と中性化速度係数の関係 (屋外暴露試験)

第3項 フライアッシュの内割置換の中性化抵抗性に対する寄与度の評価手法

1) 実効結合材量の定義

フライアッシュの混和が中性化抵抗性に寄与する割合を辻⁰らの手法を参考として以下の方法により検討した。

フライアッシュが普通ポルトランドセメントの代替として中性化抵抗性に寄与する割合を中性化抵抗性の寄与率 α と定義する場合、結合材量は以下のように示される。

$$\text{結合材量} = \text{普通ポルトランドセメント量} + (\text{フライアッシュ量} \times \alpha)$$

このときの結合材量を実効結合材量とする。この概念を視覚化すると図 4-4-5 のように示される。

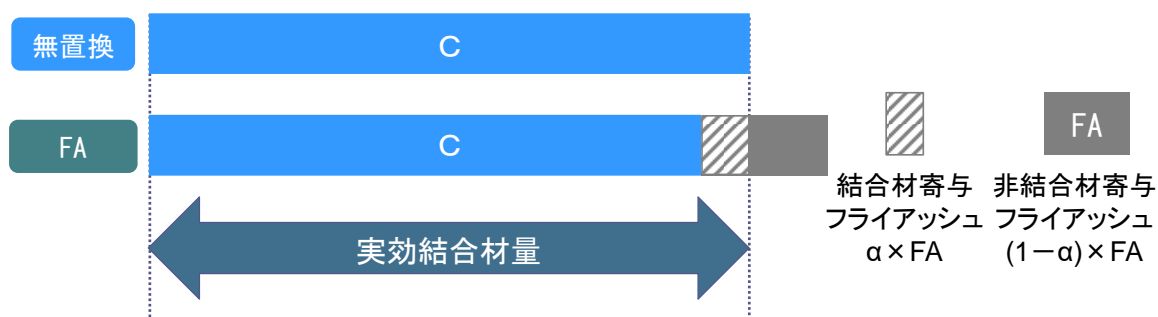


図 4-4-5 実効結合材量の概念

2) 等価水セメント比の算出

フライアッシュコンクリートの実効結合材量を無置換コンクリートのセメント量を基に算出する。

図 4-4-6 に無置換コンクリートとフライアッシュコンクリートの中性化速度係数と水セメント比の線形を示す。

ここに

無置換コンクリートの線形の近似曲線： $f_1(x)$

フライアッシュコンクリートの線形の近似曲線： $f_2(x)$

とおくと、2つの近似曲線の関係性から、

$$f_1(a) = f_2(b)$$

を満たす水セメント比 a , b が存在する。

このとき、無置換コンクリートとフライアッシュコンクリートの中性化速度係数が等価となる。この水セメント比 a 、 b を等価水セメント比とする。

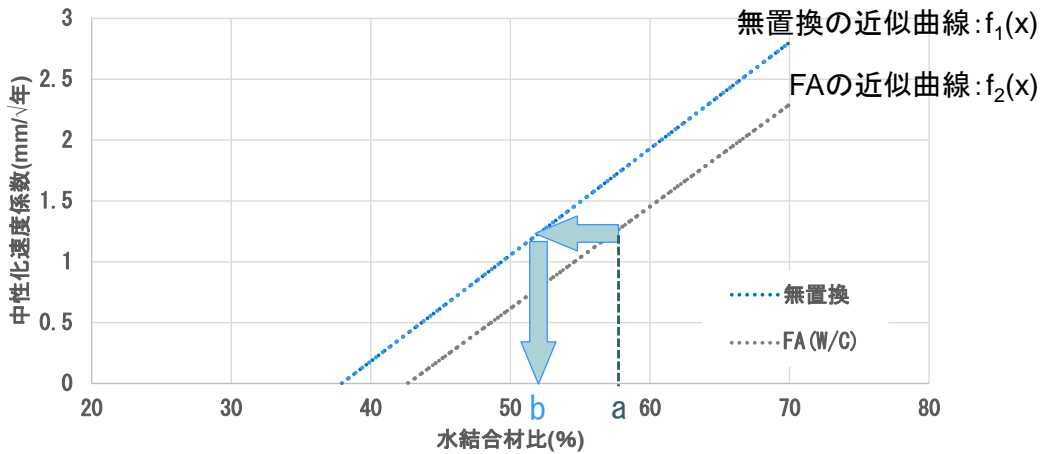


図 4-4-6 無置換コンクリートとフライアッシュコンクリートの
中性化速度係数と水セメント比の線形

3) 実効結合材量の比較

実効結合材量の比較は、等価水セメント比を基に行った。図 4-4-7 にその比較の概念図を示す。

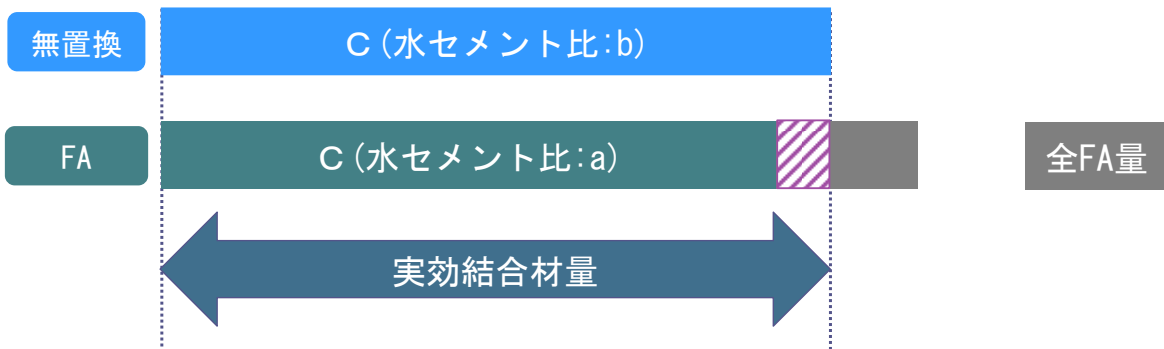


図 4-4-7 実効結合材量の比較

実効結合材フライアッシュ量(図 4-4-7 の斜線部) = 無置換コンクリート(水セメント比 : b)のセメント量 - フライアッシュコンクリートのセメント量(水セメント比 : a)

として算出した実効結合材フライアッシュ量を、フライアッシュコンクリート中の全フライアッシュ量で除すことにより、結合材寄与率 α を算出した。

第4項 促進中性化試験結果と屋外暴露試験結果の相関性

各試験方法の分析結果から得た中性化速度係数と水セメント比の線形近似曲線より算出した結合材寄与率 α を表 4-4-3 および表 4-4-4 に示す。

なお、表中の換算水セメント比とは、等価水セメント比となる時のフライアッシュコンクリートの実質の水セメント比を表すものである。

結合材寄与率の算出結果から、試験方法によらず、水結合材比の増加に伴い結合材寄与率 α は小さくなることが示された。

また、水結合材比 50~70%の範囲における結合材寄与率の平均値の比較から、促進中性化試験の結合材寄与率の平均は屋外暴露試験の 1/8 程度と小さいことがわかる。この結果から、現在の促進中性化試験によるフライアッシュの中性化抵抗性寄与に対する評価は、長期的な性状変化の実態に沿っていないことが明らかとなった。

換言すれば、促進中性化試験環境においてもフライアッシュの結合材寄与率を屋外暴露試験と同程度とすることにより、長期的反応によるフライアッシュの中性化抵抗性寄与の実態に沿った評価が可能となる。

表 4-4-3 線形近似より導出した換算水セメント比と結合材寄与率 α (促進中性化試験)

促進	水結合材比 (%)	50	60	70	平均
	換算水セメント比 (%)	48.6	59.4	70.1	
	寄与率 α (%)	11.2	4.2	-0.6	

表 4-4-4 線形近似より導出した換算水セメント比と結合材寄与率 α (屋外暴露試験)

屋外暴露	水結合材比 (%)	50	60	70	平均
	換算水セメント比 (%)	45.0	54.6	64.1	
	寄与率 α (%)	44.8	39.9	36.5	

第5節 まとめ

フライアッシュコンクリート耐久性評価実態の調査より、以下に示す知見を得た。

1. 圧縮強度を指標とすれば、耐中性化抵抗性の評価においてはフライアッシュのセメント置換の有無は影響を及ぼさない。
2. 中性化速度係数と水結合材比は高い相関性を有し、線形を示す。
3. 促進環境下において、フライアッシュセメント B 種相当のコンクリートの平均的な中性化進行は水結合材比が 15%程度小さい無置換コンクリートの中性化進行と概ね一致することから、フライアッシュの内割置換による中性化抵抗性への寄与はほぼ無いものとして、もしくは非常に小さいものとして評価されている。
4. 結合材寄与率の導入により、促進中性化試験結果と屋外暴露試験結果の相関性を定量的に評価することが可能となった。
5. 促進中性化試験における結合材寄与率の平均は、屋外暴露試験の平均の 1/8 程度と小さいことから、現在の促進中性化試験によるフライアッシュの中性化抵抗性寄与に対する評価は長期的な性状変化の実態に沿っていないことが明らかとなった。
6. 促進中性化試験環境においてもフライアッシュの結合材寄与率を屋外暴露試験と同程度とすることにより、長期的反応によるフライアッシュの中性化抵抗性寄与の実態に沿った評価が可能となる。

第6節 参考文献

本章の参考文献を以下に示す。

- 4-1) 例えば, 大賀宏行: フライアッシュや石炭灰を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.6, pp.69-74, 1996
- 4-2) 例えば, 呉 富栄, 梶田 佳寛: フライアッシュコンクリートの中性化および耐久設計強度に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 606号, pp.15-19, 2006
- 4-3) 谷川公一: 石炭灰を多量に混用したコンクリートの諸特性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.331-336, 1995
- 4-4) 深川 正浩ほか: 分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性及び耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.205-210, 1997
- 4-5) 手島則夫ほか: 高粉末度フライアッシュを使用した高強度コンクリートの長期強度・中性化及び耐火性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.115-120, 1998
- 4-6) 黄光律ほか: フライアッシュを外割混合使用したコンクリートの中性化特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.127-132, 1998
- 4-7) 和田真平ほか: フライアッシュコンクリートの中性化, 水密性および遮塩性に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.121-126, 1998
- 4-8) 牧野真之ほか: フライアッシュを用いたマスコンクリートの諸性状に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.103-108, 1998
- 4-9) 梅津裕二ほか: 細骨材量の一部をフライアッシュに置き換えた普通及び軽量コンクリートの特性に関する実験研究: その4. 長期性状2(中性化及び耐凍害性), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.471-472, 1999
- 4-10) 島添洋治ほか: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.943-944, 1999
- 4-11) 金森誠治ほか: フライアッシュを大量に内割り使用したコンクリートの特性: 凍結融解試験と促進中性化試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.573-574, 2000
- 4-12) 黄光律ほか: フライアッシュを大量混和したコンクリートの中性化特性に及ぼすポゾラン反応の影響, 日本建築学会構造系論文集, 531号, pp.7-14, 2000
- 4-13) 船本憲治ほか: フライアッシュを45%まで内割り使用したコンクリートに関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.73-78, 2000
- 4-14) 成田健ほか: フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.925-930, 2001
- 4-15) 崔 世珍ほか: フライアッシュの混和方法によるコンクリートの工学的特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.219-220, 2001

- 4-16) 松家武樹ほか：細骨材として砕砂とフライアッシュ IV 種を用いたコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.57-62，2002
- 4-17) 船本憲治：フライアッシュを使用したコンクリートの中性化特性，日本建築学会研究報告. 九州支部. 1，構造系，Vol.41，pp.21-24，2002
- 4-18) 佐伯竜彦ほか：混和材が塩害と中性化の複合劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.201-206，2004
- 4-19) 西 祐宜ほか：耐久性改善剤を用いたフライアッシュコンクリートの耐久性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.729-734，2001
- 4-20) 全 洪珠ほか：フライアッシュコンクリートの強度・耐久性に及ぼす連行空気および収縮低減剤の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.187-192，2005
- 4-21) 渡邊 英樹ほか：フライアッシュコンクリートの強度・中性化に及ぼす養生の影響に関する研究：(その 1)実験の概要および結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，材料施工，pp.5-6，2004
- 4-22) 船本憲治ほか：フライアッシュコンクリートの中性化屋外暴露試験に関する文献調査，日本建築学会研究報告. 九州支部. 1，構造系，Vol.44，pp.1-4，2005
- 4-23) 全 洪珠ほか：フライアッシュコンクリートの強度・耐久性に及ぼす連行空気および収縮低減剤の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.27，No.1，pp.187-192，2005
- 4-24) 船本憲治ほか：フライアッシュを結合材とみなさないコンクリートの基本物性，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，材料施工，pp.463-464，2005
- 4-25) 石川嘉崇ほか：フライアッシュコンクリートを使用した構造体コンクリートの諸性質に関する実験的研究：その 4:壁状構造体から採取したコア供試体の中性化，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，材料施工，pp.473-474，2005
- 4-26) 野田翼ほか：加圧流動床灰混入コンクリートの強度発現と耐久性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.28，No.1，pp.683-688，2006
- 4-27) 平原 武ほか：フライアッシュコンクリートの長期性状に関する材齢 10 年の実験報告：その 2 中性化，日本建築学会関東支部研究報告集 I，Vol.77，pp.53-56，2007
- 4-28) 守屋 健一ほか：フライアッシュコンクリートの中性化に関する研究：(その 1)中性化に及ぼす各種要因の影響に関する実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，材料施工，pp.389-390，2007
- 4-29) 小川 由布子ほか：置換率および養生条件がフライアッシュを用いたモルタルの品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集 Vol.30，No.1，pp.207-212，2008
- 4-30) 野田 亮太ほか：フライアッシュコンクリートの促進中性化試験に関する検討，日本建築学会研究報告. 九州支部. 1，構造系，Vol.48，pp.85-88，2009
- 4-31) 船本憲治ほか：中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの耐久性に関する実験的研究：その 4：促進中性化，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，材料施工，pp.173-174，2009

- 4-32) 西田朗ほか:フライアッシュコンクリートの品質管理手法および硬化コンクリートの特性: その5. フライアッシュコンクリートの中性化特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.537-538, 2009
- 4-33) 伊藤七恵ほか: C_fF_A コンクリートの耐久性に関する研究: その2. 乾燥収縮試験および促進中性化試験, 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系, Vol.49, pp.33-36, 2010
- 4-34) 末永龍夫ほか: フライアッシュセメント B 種相当コンクリートの湿潤養生期間の違いが圧縮強度・中性化に及ぼす影響に関する実験研究: その2 中性化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.751-752, 2010
- 4-35) 陣内浩ほか: 原子力発電所施設用高流動コンクリートに関する基礎的検討: その3 耐久性能の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.773-774, 2010
- 4-36) 兼重克之ほか: 混和材にフライアッシュⅡ種を用いた高強度コンクリートの各種試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.985-986, 2010
- 4-37) 岡田秀敏ほか: 低品質再生粗骨材を用いたコンクリート製品に関する研究: その2. 乾燥収縮ひずみおよび中性化性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.1079-1080, 2010
- 4-38) 今川健一ほか: フライアッシュコンクリートの初期養生が中性化に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.695-696, 2011
- 4-39) 日高 修ほか: フライアッシュを細骨材補充用混和材として用いたコンクリートの検討: その2 高性能 AE 減水剤を用いた場合の乾燥収縮・促進中性化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.703-704, 2011
- 4-40) 古賀大嗣ほか: 高品質フライアッシュコンクリートの特性に及ぼすセメント種類の影響(その2. 乾燥収縮および促進中性化試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.537-538, 2012
- 4-41) 中村正義ほか: フライアッシュを混合使用したコンクリートの強度および耐久性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.593-594, 2012
- 4-42) 市川智也ほか: 塗膜系防水層下のフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの塩害と中性化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.733-734, 2013
- 4-43) 依田彰彦ほか: 8 種類のセメントを用いた AE コンクリートの中性化速さについて, セメント・コンクリート論文集 Vol.52, pp.896-901, 1998
- 4-44) 長谷川拓也ほか: 中性化における環境条件を考慮した曝露試験と促進試験の対応に関する検討, 第52回セメント技術大会講演要旨, 1998
- 4-45) 船本憲治ほか: フライアッシュを使用したコンクリートの材齢9年における中性化曝露試験報告: その1 フライアッシュを内割混合したコンクリートの試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.373-374, 2007
- 4-46) 押田文雄ほか: 中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの中性化速度

係数, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.45, pp.451-456, 2014

4-47) 建築研究振興協会: フライアッシュコンクリートの長期性状に関する実験, 材齢 10 年経過報告書, 2006

4-48) 鈴川諭一ほか: フライアッシュセメントを用いたコンクリートの 20 年試験, セメント技術年報 No. 33

4-49) 土木学会: フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究, 1988

第5章

長期的性状変化を
考慮した
耐久性評価方法の検討

第1節 序

鉄筋コンクリート構造物の材料、構造的性能低下に基づく耐用年数は、中性化深さの鉄筋到達時により代表的に表すことができる。

フライアッシュはポゾラン反応による緻密な組織形成や、長期強度増進といった特徴を有し、有用なコンクリート混和材として知られている⁵⁻¹⁾。しかし、耐中性化性能に関し、促進試験による耐久性評価が広く行われている現状においてはポルトランドセメント単味のコンクリートに劣るとされている⁵⁻¹⁾。その一因として、実際の環境下では長期間かけて進行する中性化抵抗性を短期間で評価するために、非常に過酷な条件で促進試験を行うことが挙げられる。フライアッシュコンクリートをはじめとする副産物をセメント代替として用いたコンクリートは、硬化反応自体が緩慢であることが多い。このような評価方法を用いると、ポゾラン反応に代表される長期的な硬化反応等の適切な評価は難しいといえる。

ポゾラン反応による組織の密実化を考慮に加えたフライアッシュの促進中性化試験による耐久性評価を実施するためには、促進試験の開始前にポゾラン反応を活性化する必要があると考えられる。

本章では、促進試験開始前に長期的な強度増進を模擬した養生を施すことが、強度発現性、中性化抵抗性、およびその他の諸性状におよぼす影響を把握し、併せて前章で導出したフライアッシュの結合材寄与率との相関性を検討することで、長期的性状変化を考慮した耐久性評価方法の提案を行うことを目的とした。

第2節 実験概要

第1項 使用材料

ここではコンクリート供試体の作製に用いた材料の物性について示す。

1) セメント

セメントは、太平洋セメント株式会社製の普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)を使用した。使用した普通ポルトランドセメントの物理的性質および化学成分を表 5-2-1 に示す。

2) 骨材

細骨材として多摩産陸砂、粗骨材として多摩産硬質砂岩碎石を用いた。それぞれの物性を表 5-2-2 に示す。

3) フライアッシュ

フライアッシュは副産物であることから、恒常的に同等の品質を維持することは困難である。具体的には、石炭の産出地、燃焼時の温度等により副産する石炭灰原粉の品質が変動することが予想される。本検討においては、中国電力株式会社三隅発電所から発生した石炭灰原粉をふるい分けにより分級したフライアッシュII種(JIS A6201)を用い、調合および養生条件を変動因子として設定することとした。その物性をJIS規格値とともに表5-2-3に示す。

4) 混和剤

高性能 AE 減水剤は株式会社フローリック製の SF500S を、空気連行補助剤として同社製 AE-9B を用いた。それぞれの物性を表 5-2-4 に示す。

5) 練り混ぜ水

練り水は神奈川県川崎市の水道水で、20°C、相対湿度 60% で 24 時間以上静置させた後に使用した。

表 5-2-1 セメントの物性

項目		JIS規格値	試験成績
密度(g/cm ³)		—	3.16
比表面積(cm ² /g)		2500以上	3340
凝結	水量(%)	—	27.4
	始発(h-min)	60min以上	2—15
	終結(h-min)	10h以下	3—20
安定性(パット法)		良	良
圧縮強さ (N/mm ²)	3日	12.5以上	30.3
	7日	22.5以上	45.1
	28日	42.5以上	61.6
水和熱 (J/g)	7日	—	332
	28日	—	384
化学成分(%)	けい酸三カルシウム	—	56
	けい酸二カルシウム	—	18
	アルミン酸三カルシウム	—	9
	鉄アルミン酸四カルシウム	—	9
	酸化マグネシウム	5.0以下	1.41
	三酸化硫黄	3.5以下	2.10
	強熱減量	5.0以下	2.26
	全アルカリ	0.75以下	0.50
塩化物イオン		0.035以下	0.015

※ 安定性試験はパット法による

※ 28 日の圧縮強さ及び水和熱は前月度の値を示す

※ 化学分析試験は規格本体の分析方法による

表 5-2-2 骨材の物性

	骨材種類	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)
細骨材	陸砂	2.55	2.62	2.71	67.60
粗骨材	硬質砂岩碎石	2.68	2.70	0.58	58.30

表 5-2-3 使用骨材の物性

項目	JIS A 6201 フライアッシュⅡ種 【規格値】	発電所原粉 【H20.1～22.9試験値】	本研究用 調整フライアッシュ
SiO ₂ (%)	45.0以上	55.7～69.8	61.6
湿分 (%)	1.0以下	0.1～0.2	0.2
強熱減量 (%)	5.0以下	2.2～4.0	3.7
密度 (g/cm ³)	1.95以上	2.12～2.27	2.21
比表面積 (cm ² /g)	2,500以上	3070～3890	3,480
フー値比 (%)	95以上	100～113	105
MB吸着量 (mg/g)	—	0.22～0.52	0.48
活性度指数 (%)	材齢28日	80以上	86
	材齢91日	90以上	99

表 5-2-4 混和剤の物性

	主成分	外観	比重 (g/m ³ ,20°C)	塩化物イオン量 (%)	アルカリ量 (%)
AE減水剤	リグニンスルホン酸塩 オキシカルボン酸塩	暗褐色液体	1.06～1.12	0.05	0.69
空気連行補助剤	変性アルキルカルボン酸 化合物系陰イオン界面活	透明淡黄色液体	1.02～1.04	0.01	1.70

第2項 調合概略

本検討では、水セメント比、フライアッシュの混合方法および置換率を変動因子として試験体の水準を決定した。

水セメント比は、一般的な鉄筋コンクリート建築物に汎く用いられる 60%、50%の2種類を設定した。水セメント比 60%、50%の無置換コンクリートを基礎として、以下に示す方法、および手順でフライアッシュ混合方法および置換率を変動させた。

混合方法は、フライアッシュを普通ポルトランドセメントに質量置換する内割混合、(試験体記号：C、数値は質量置換割合(%))、フライアッシュを細骨材に容積置換する外割混合(試験体記号：S、数値は容積置換割合(%))の2種類を設定した。

外割置換については、同一単位セメント量に対する単位フライアッシュ量の増加が、硬化コンクリートの強度発現性状、および耐中性化性状等におよぼす効果を検討することを目的として、内割置換と併用する水準のみ設定し、内割混合置換率 20%と併用混合の内割置換率 10%のフライアッシュ置換率(結合材に占めるフライアッシュの割合：フライアッシュ/(C+フライアッシュ))は同値となるよう調合設計を行った。

表 5-2-5 に調合概略を示す。単位水量、および単位粗骨材量は全水準で共通とし、それぞれ 180kg/m³、880kg/m³とした。

表 5-2-5 調合概略

試験体記号	W/C (%)	W/B (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	FA		FA/(C+FA) (%)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)
					C (kg/m ³)	S (kg/m ³)			
N50	50	50	180	360	0	0	0	846	880
N50-C10	56	50		324	36	0	10	833	
N50-C20	63	50		288	72	0	20	820	
N50-C10S6	56	44		324	36	45	20	782	
N50-C20S6	63	44		288	72	45	30	769	
N60	60	60		300	0	0	0	895	
N60-C10	67	60		270	30	0	10	885	
N60-C20	75	60		240	60	0	20	875	
N60-C10S5	67	53		270	30	37	20	841	
N60-C20S5	75	53		240	60	37	30	831	

第3項 コンクリートの練り混ぜおよび脱型、養生の条件

コンクリートの練り混ぜには容量 50 リットルの強制攪拌型コンクリートミキサーを用いた。練り混ぜの手順は以下の通りである。

1. 細骨材およびセメント、フライアッシュを投入後 30 秒混練
2. 予め化学混和剤を混合、攪拌した練り混ぜ水を投入し 60 秒混練
3. 粗骨材を投入し、90 秒混練後、練り板に排出

練り混ぜ後のフレッシュコンクリートは型枠に打設した後、ポリ塩化ビニルのラップで脱型時まで端面を封かんした。

本検討では、養生条件も変動因子の一つとして設定した。ここでは、養生条件の異なる 2 つのシリーズについての枠組みを記し、詳細な条件については、各試験方法の項で後述する。

1) シリーズ I

シリーズIは、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 (以下、JASS5) の湿潤養生の仕様を基に脱型時期を試験条件として設定した。脱型時期および脱型後の養生条件は以下の通りである。

1. 圧縮強度の 10N/mm² 到達を確認し脱型後、気中養生(20℃, 相対湿度 60±5%RH 環境)
2. 圧縮強度の 15N/mm² 到達を確認し脱型後、気中養生(20℃, 相対湿度 60±5%RH 環境)
3. 圧縮強度の 15N/mm² 到達を確認し脱型後、標準水中養生 (水中養生 20±3℃)

2) シリーズII

シリーズIIの養生条件は脱型時期をシリーズIと同様とし、ポズラン反応を活性化させ、強度増進を図る目的で、脱型後の気中養生は温度 40°C、湿度 60~70%の環境下で行った。この養生条件は 40°Cの温度環境がポズラン反応を促進し、かつ、この温度条件で養生したフライアッシュコンクリートの性状と、長期屋外曝露したフライアッシュコンクリートの性状の類似性を指摘した既往の文献⁵⁻²⁾を参考に設定した。脱型時期およびその後の養生条件は以下の通りである。

1. 圧縮強度の 10N/mm² 到達を確認し脱型後、側面封かん処理、気中養生(40°C、相対湿度 60±5%RH 環境)
2. 圧縮強度の 15N/mm² 到達を確認し脱型後、側面封かん処理、気中養生(40°C、相対湿度 60±5%RH 環境)
3. 圧縮強度の 15N/mm² 到達を確認し脱型後、標準水中養生（水中養生 20±3°C）

脱型後の側面封かん処理については、壁・スラブとしての利用されたコンクリートからコア採取する状況を模擬し、側面からの水分発散はないものと仮定して、供試体の上面、下面を曝露、側面をアルミテープおよびエポキシ樹脂にて封緘した。図 5-2-1 にその概念図を示す。

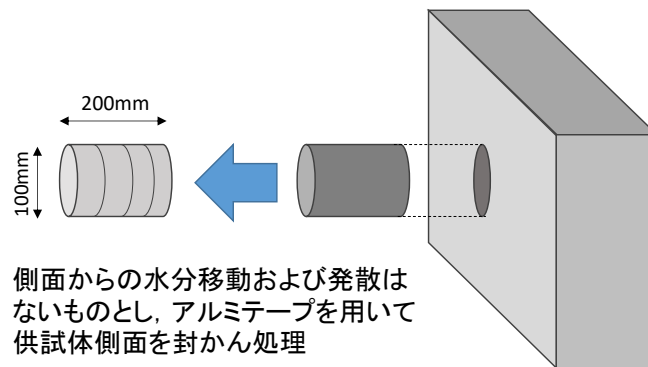


図 5-2-1 養生条件の概念図

また、脱型時期の差異による熱エネルギー収支の差異を低減するため、各試験時期は積算温度による管理を行うこととした。各試験時期については圧縮強度 10N/mm² に到達が最も早かった水準の積算温度を基準とし算出した。これにより、各試験時における各試験体に与えられたエネルギーはそれぞれ同値となっている。以降 4, 8, 13 週についても同様の試験実施時期を設定した。水中養生の水準の試験材齢については積算温度ではなく、経過材齢を基準とした。

第4項 試験方法

1) 圧縮強度

圧縮強度試験は、シリーズIについては脱型時、材齢 1, 4, 8, 13 週において、シリーズIIについては脱型時、材齢 1, 4, 8, 13 週相当時にそれぞれ JIS A1108 に則り行った。

なお、脱型時を判断する強度確認時の圧縮試験においては、石膏を用いてキャッピング処理を施した。

2) 促進中性化試験

シリーズ I

練り混ぜ後 100×100×400mm の鋼製型枠に打設し、所定の脱型時まで塩化ビニル製ラップを用いて封かん処理を行った。

脱型後は前項で述べた養生条件下で材齢 8 週まで静置した。その後の測定は、JIS A1153 に準じた。概略は以下の通りである。

打設面、底面、および両端面の計 4 面をアルミテープおよびエポキシ樹脂にてシールし、促進中性化試験を開始した。促進期間 1 週, 4 週, 8 週, 13 週時に中性化深さを測定した。

中性化深さの測定は、供試体を端部より約 5cm の位置で割裂させた後、割裂面にフェノールフタレインアルコール 1% 溶液を噴霧し、中性化測定箇所における未呈色部の幅の平均値を算出することにより行った。

中性化測定箇所は、1 供試体あたり 10 箇所、1 水準あたり 20 箇所である。各中性化深さの測定には電子ノギスを用いた。

促進環境は、炭酸ガス濃度 5%、温度 20°C、湿度 60%RH である。

シリーズ II

練り混ぜ後 φ100×200mm の軽量型枠に打設し、所定の脱型時まで塩化ビニル製ラップを用いて封かん処理を行った。

脱型後は、供試体側面をアルミテープにて速やかに封かん処理し、前項で述べた養生条件下で材齢 8 週まで静置した。

中性化深さの測定は、図 5-2-2 に示すように供試体を長手方向に割裂させ、割裂面にフェノールフタレインアルコール 1% 溶液を噴霧し、中性化測定箇所における未呈色部の幅の平均値を算出することにより行った。測定方法を図 5-2-3 に示す。

中性化測定箇所は、1 試料あたり上下 10 箇所、1 水準あたり 20 箇所である。各中性化深さの測定には電子ノギスを用いた。

促進環境は、シリーズ I と同様で、炭酸ガス濃度 5%、温度 20°C、湿度 60%RH である。



図 5-2-2 試験体割裂の様子



図 5-2-3 中性化深さ計測方法

3) 示差熱分析

示差熱分析に用いた試料は、各調合計画に従い練り上がったフレッシュコンクリートから、ウェットスクリーニングによって採取した。ウェットスクリーニングには 1.2mm のふるいを用いた。

ウェットスクリーニングによる処理後、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の軽量型枠に打設した。その後の脱型時期および養生条件、方法、試料の採取は他の試験と同様に行った。

試料の採取はコンクリートカッターで断面方向に幅 5mm で切断し、ニッパーを用いて、約 $5 \times 5 \times 5 \text{mm}$ 寸法で採取した。採取した試料の例を図 5-2-4 に示す。



図 5-2-4 粉砕前の示差熱分析試料

試料採取後は、D-dry 法により試料中の水分を取り除き、水和反応を停止させた。

本検討における D-dry 法は、細粒試料をアセトンに 24 時間浸漬し、試料中の水分とアセトンの置換を行った後、 20°C 、相対湿度 60 %RH の環境に設置したデシケータに入れ、ポンプでデシケータ内部を 24 時間吸引乾燥することにより行った。

脱水乾燥後は外気からの水分混入を防ぐために、試験管にゴム栓をして保管し、試験直前に乳鉢を用いて粉末状に砕き使用した。

熱分析は国際熱測定連合によって次のような定義が定められている。

「物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その物質のある物理的性質を温度もしくは時間の関数として測定する一連の技法の総称」

熱分析は加熱炉の中に試料を入れ、温度を変化させた時に生じる様々な物性の変化を調べる手法であり、今回用いた TG-DTA (示差熱重量分析) は試料の重量 (TG) と温度差 (DTA) を測定対象としている。

DTA とは、試料と基準物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、両物質間の温度差を温度の関数として測定する技法をいう。具体的な測定においては、炉体内に試料と基準物質を入れ昇温過程における両者間の温度差を検出する。基準物質は測定温度範囲において熱的变化を起こさない物質を用いるため、基準物質の温度は加熱炉と同じ傾きで上昇する。昇温過程において試料が熱的に安定である間は、基準物質との温度差はゼロである。しかし試料に何らかの熱的变化 (吸熱や発熱、分解など) が起きると、基準物質との間に温度差が生じる。この温度差を時間に対して示すと、図 5-2-5 や図 5-2-6 のような段差として記録される。

例えば試料が融解する場合、基準物質は加熱炉と同じ速度で昇温するが、試料は全て融解するまで温度が一定である。全て融解すると試料は基準物質と同じ温度まで上昇し、その後は同じ速度で昇温することになる。この過程での温度差を記録することで物質の融点を知ることが可能となる。

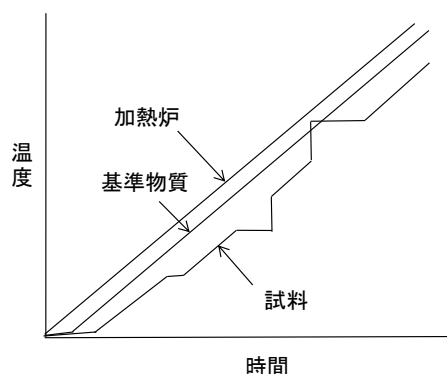


図 5-2-5 DTA 装置の温度変化

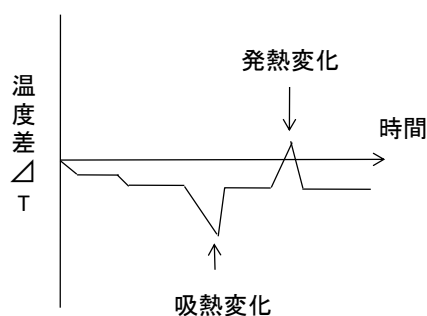


図 5-2-6 試料と基準物質の温度差

一方、TGとは、温度をある一定のプログラムで変化させた時の物質の質量を温度の関数として測定する技法をいう。一般のTG装置は、今回実験に使用した装置のようなDTAとの複合型が多い。また構造としては、天秤部と加熱炉の位置関係により上皿型、吊り下げ型、水平型があるが、今回用いた装置は図5-2-7に示すような水平型である。

試料ホルダーに置かれた試料は加熱される。昇温の過程で試料の重量が変化すると、天秤ビームが傾き、その傾きを検出部が検出する。駆動コイルはビームが常に水平を保つように駆動するが、その時コイルに流れる電流は質量変化に比例するため、あらかじめ重量と電流の関係を校正することにより、試料の質量変化を測定できる。TG-DTAでは試料ホルダー部分の熱電対で試料と基準物質の温度差を検出することで、DTAも同時に測定可能である。

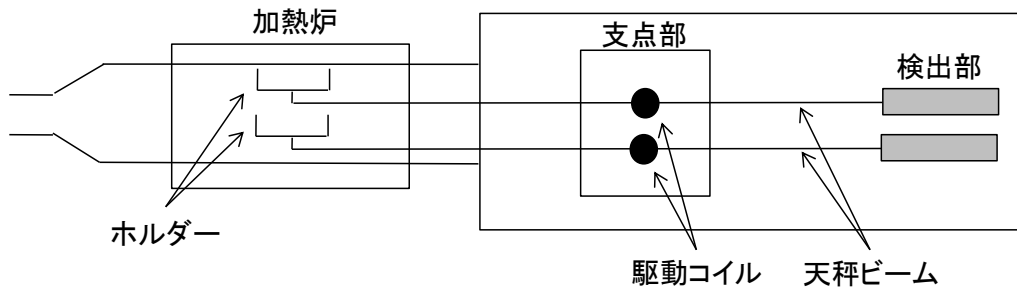


図 5-2-7 水平差動型 TG-DTA 同時測定装置の概略図

セメントの水和反応により、水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が生成される。一方、フライアッシュコンクリート中においては、フライアッシュがポゾラン反応を起こす際に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を消費する。

セメントの水和反応： $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$

ポゾラン反応： $\text{Ca}(\text{OH})_2 + [\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3] \rightarrow 3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

$\rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

$\rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

水酸化カルシウムは $440 \sim 510^\circ\text{C}$ 付近で熱分解を起こし質量が変化するため、強熱した試料の当該温度帯における質量変化を、試料の質量で除すことで試料中の水酸化カルシウムの存在比率を定量した。

第3節 実験結果

第1項 フレッシュ性状および脱型目標強度到達時材齢

1) フレッシュ性状

表 5-3-1, および表 5-3-2 にシリーズI, およびシリーズIIのフレッシュ性状を示す。

シリーズI, IIに共通して, 混合方法と養生条件の差異による細孔構造の変化を明確化するため, フレッシュ性状は同等の値を示すよう調整を行った。特に組織の緻密化に影響を及ぼすと考えられる空気量については, 各水準間で $4.5 \pm 0.5\%$ となるよう調整を行なった。

フライアッシュは多孔質物質のため, 減水剤や空気量調整剤のような界面活性作用を有する物質を吸着する性質を持つ。このことから各水準間の空気量を均一化するために相対的にフライアッシュ量の多い水準では空気量調整剤の量を多く投入することで目標空気量を確保した。

スランプについては, $18 \pm 2.5\text{cm}$ を目標とし, 各水準間で差が生じないように練り混ぜを行った。N50 シリーズの外割混合を併用した水準に関しては, 他の混合方法のフレッシュ性状との整合をとるため, 粉体量の増加に伴うワーカビリティの低下を考慮し, 減水剤の量を多く投入したが, 無混和のものと比較するとスランプが若干大きくなった。これは減水剤の量の影響と考えられるが, フライアッシュの粒型が球状であることによる減水作用も同時に働いたことも要因の一つとなると考えられる。

また, 練上がり温度に関しても, 各水準間で差が生じないように考慮した。しかし, シリーズIIに関しては, 練り混ぜを行った時期が初夏であったため, 練上がり温度がシリーズIと比較して $3 \sim 4^\circ\text{C}$ ほど高くなった。

表 5-3-1 フレッシュ性状(シリーズ I)

試験体記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
N50	18.0	5.3	22.0
N50-C10	19.5	4.6	22.8
N50-C20	18.0	4.7	23.0
N50-C10S6	19.0	4.9	23.0
N50-C20S6	19.5	4.9	22.0
N60	17.5	4.4	21.5
N60-C10	17.5	4.4	23.3
N60-C20	19.0	4.8	21.8
N60-C10S6	19.5	4.8	22.5
N60-C20S6	19.5	4.7	22.5

表 5-3-2 フレッシュ性状(シリーズ II)

試験体記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)
N50	20.5	5.5	26.0
N50-C10	19.5	4.9	26.0
N50-C20	20.5	4.3	25.3
N50-C10S6	21.5	5.0	25.6
N50-C20S6	21.0	5.1	25.7
N60	20.5	5.1	25.5
N60-C10	20.5	4.7	25.4
N60-C20	19.0	4.9	25.3
N60-C10S6	20.0	4.5	25.6
N60-C20S6	20.5	4.7	26.3

2) 脱型目標強度到達材齢

図 5-3-1 および 図 5-3-2 にシリーズ I, およびシリーズ II の各調合の脱型目標強度到達材齢を示す。

シリーズによらず、フライアッシュの内割置換率の増加に伴い目標強度到達までの時間は長くなる傾向にあった。これは内割置換によるセメント量の低減に起因するものである。

また、圧縮強度 10N/mm² 到達後 15N/mm² 到達までに要する時間は、水セメント比の高い N60 をベースとした水準で長くなる傾向が確認された。

さらに、フライアッシュを外割混合した水準は、同一単位セメント量の水準と比較した場合(例えば、N60-C20 と N60-C20S6)、目標強度到達までに要する時間が短くなる傾向にあることが確認された。これは、微粉体であるフライアッシュの混和により、水粉体比が低下することで、本来自由水によって占有される水和物の析出空間が充填され小さくなる⁵⁻³⁾ことが要因として考えられる。

シリーズ間の比較においては、練上がり温度の差異に起因し、シリーズ II の脱型目標強度到達に要する時間は、シリーズ I と比較して 10N/mm² 到達が 0.74 倍、15N/mm² 到達が 0.70 倍となった。

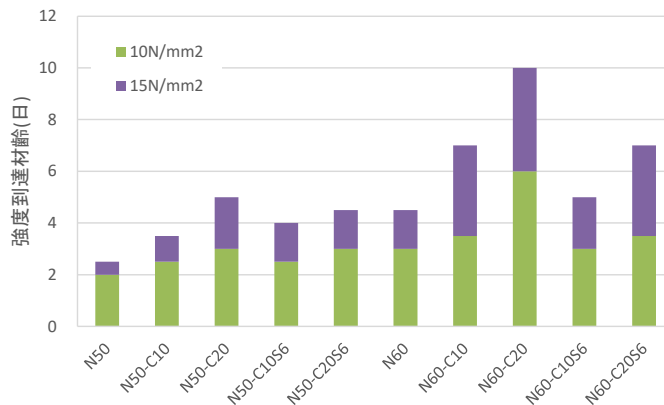


図 5-3-1 脱型目標強度到達材齢(シリーズ I)

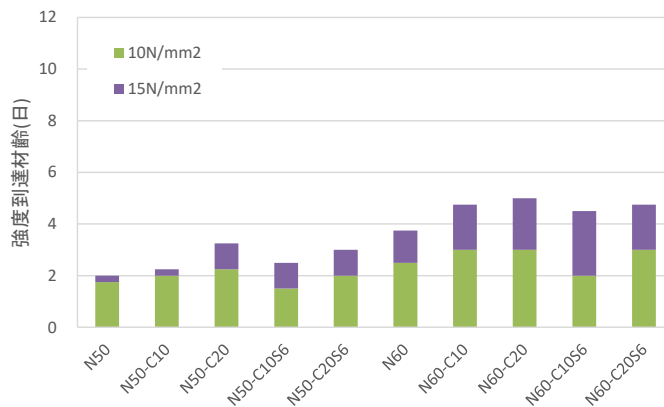


図 5-3-2 脱型目標強度到達材齢(シリーズ II)

第2項 強度発現性

1) シリーズ I

図 5-3-3 および図 5-3-4 に材齢 4 週および 13 週の圧縮強度試験結果を示す。

① 養生方法による強度発現性の相違

普通コンクリート、フライアッシュコンクリートともに気中養生条件(D10N, D15N)では、水分の散逸に起因し、材齢 4 週以降の強度発現は水中養生条件(D15NW)に比べ著しく小さい。また、水中養生平均に対する気中養生平均の強度比は以下の通りであった。

材齢 4 週 : $D10N \approx 0.85 \times D15NW$ $D15N \approx 0.90 \times D15NW$

材齢 13 週 : $D10N \approx 0.70 \times D15NW$ $D15N \approx 0.75 \times D15NW$

一方、気中養生間の比較においては、10N/mm²で脱型した水準は、15N/mm²で脱型した水準と比較した場合、全材齢を通じておよそ 5%程度強度が下回る結果となった。この結果は継続的な湿潤養生と比較してやや小さい。このことから、コンクリートの強度発現のポテンシャルの評価において、脱型後の気中養生による水分発散の影響は、脱型までの時間の長さによる影響よりも大きいといえる。

② 調合方法による強度発現性の相違

全体の傾向として、水セメント比の増大に伴い圧縮強度は小さくなる。この傾向は材齢が若い場合に顕著である。

同一水セメント比の水準間の比較から、フライアッシュを内割外割併用置換したものの圧縮強度は内割置換のみの圧縮強度より大きいことがわかる。これは、脱型目標強度到達に要する期間と同様に、微粉体であるフライアッシュの混和により、水粉体比が低下することで、本来自由水によって占有される水和物の析出空間が充填され、小さくなることが要因として考えられる。

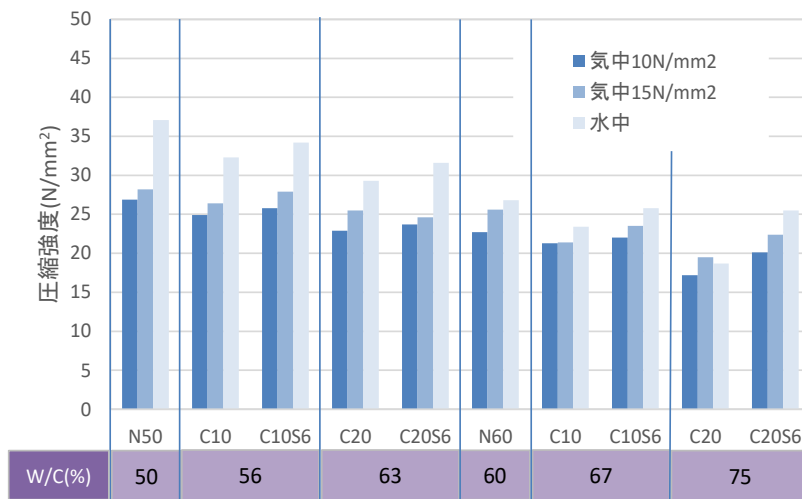


図 5-3-3 4 週圧縮強度 (シリーズ I)

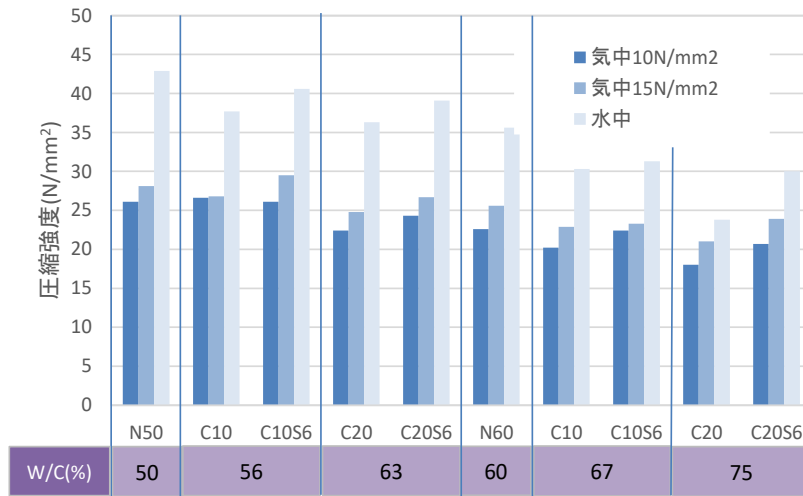


図 5-3-4 13 週圧縮強度（シリーズ I）

2) シリーズ II

図 5-3-5 および図 5-3-6 に材齢 4 週および 13 週の圧縮強度試験結果を示す。

① 養生方法による強度発現性の相違

普通コンクリート，フライアッシュコンクリートともに 40°C環境で養生することによって，脱型時強度に関わらず材齢 4 週以降の強度増進が確認できた。本気中養生環境は，供試体の側面から水分発散しないことを前提として，長期強度の発現等を考慮した養生条件・環境である。また，全材齢においてフライアッシュコンクリートの圧縮強度が普通コンクリートの圧縮強度を上回ることから，フライアッシュコンクリートのポゾラン反応は材齢初期から十分に励起されたといえる。また，水中養生した試験体では 13 週以降の強度増進の様子もうかがえることから，ポゾラン反応の，水分供給および経過時間への依存性が確認された。

② 調合方法による強度発現性の相違

気中養生した水準の圧縮強度は N50，N60 シリーズともにフライアッシュコンクリートが普通コンクリートを上回った。40°C環境下で養生を行なったことによりポゾラン反応が励起された結果，ポゾラン反応生成物が圧縮強度に寄与し，普通コンクリートよりも大きい強度発現がなされたといえる。また，同一水結合材比間で気中養生した水準の圧縮強度をそれぞれ比較すると，内割混合のみの水準では，フライアッシュ混合量の多いものが，内，外割併用混合の水準では，フライアッシュ混合量の少ないものが，それぞれ圧縮強度は大きかった。この傾向から，ポゾラン反応を十分に励起した場合，ポゾラン反応生成物による強度寄与は，単位セメント量に対するフライアッシュ量により決定されるといえる。

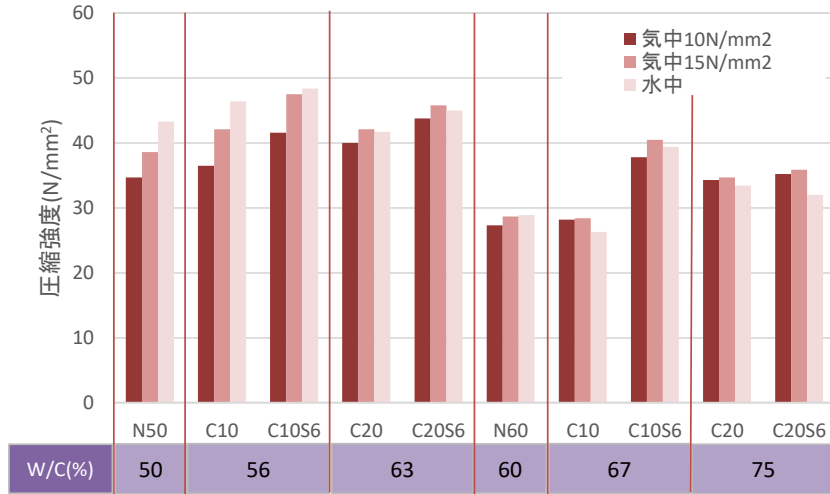


図 5-3-5 4 週圧縮強度 (シリーズ II)

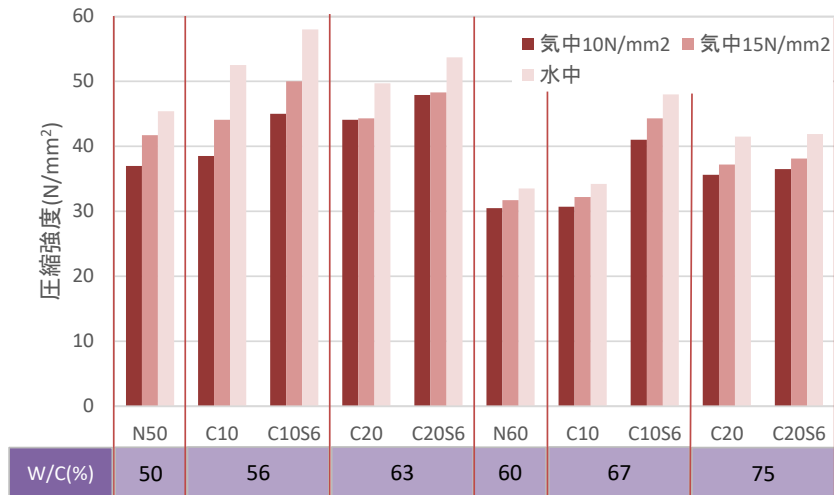


図 5-3-6 13 週圧縮強度 (シリーズ II)

3) シリーズ間の比較

20°C 気中で養生したコンクリートの圧縮強度の経時変化を図 5-3-7 に示す。フライアッシュの内割置換率の増大に伴い圧縮強度は低下する傾向がみられた。細骨材の 10% をフライアッシュに置換したものは、普通コンクリートと同程度の強度発現性が確認された。

40°C 気中で養生したコンクリートの圧縮強度の経時変化を図 5-3-8 に示す。強度発現性は 20°C 気中で養生した場合よりも、大幅に高いことがわかる。また、全材齢においてフライアッシュコンクリートの圧縮強度が普通コンクリートの圧縮強度を上回る。

このことから、40°C で養生することでフライアッシュのポゾラン反応は養生初期から十分に励起されたといえる。図 5-3-8 より、40°C で養生した場合、フライアッシュのセメントに対する置換量の多い水準は圧縮強度が大きくなったことがわかる。また、細骨材の一部をフライアッシュに置換した水準にフライアッシュの置換量による圧縮強度の顕著な増加は確認されなかった。

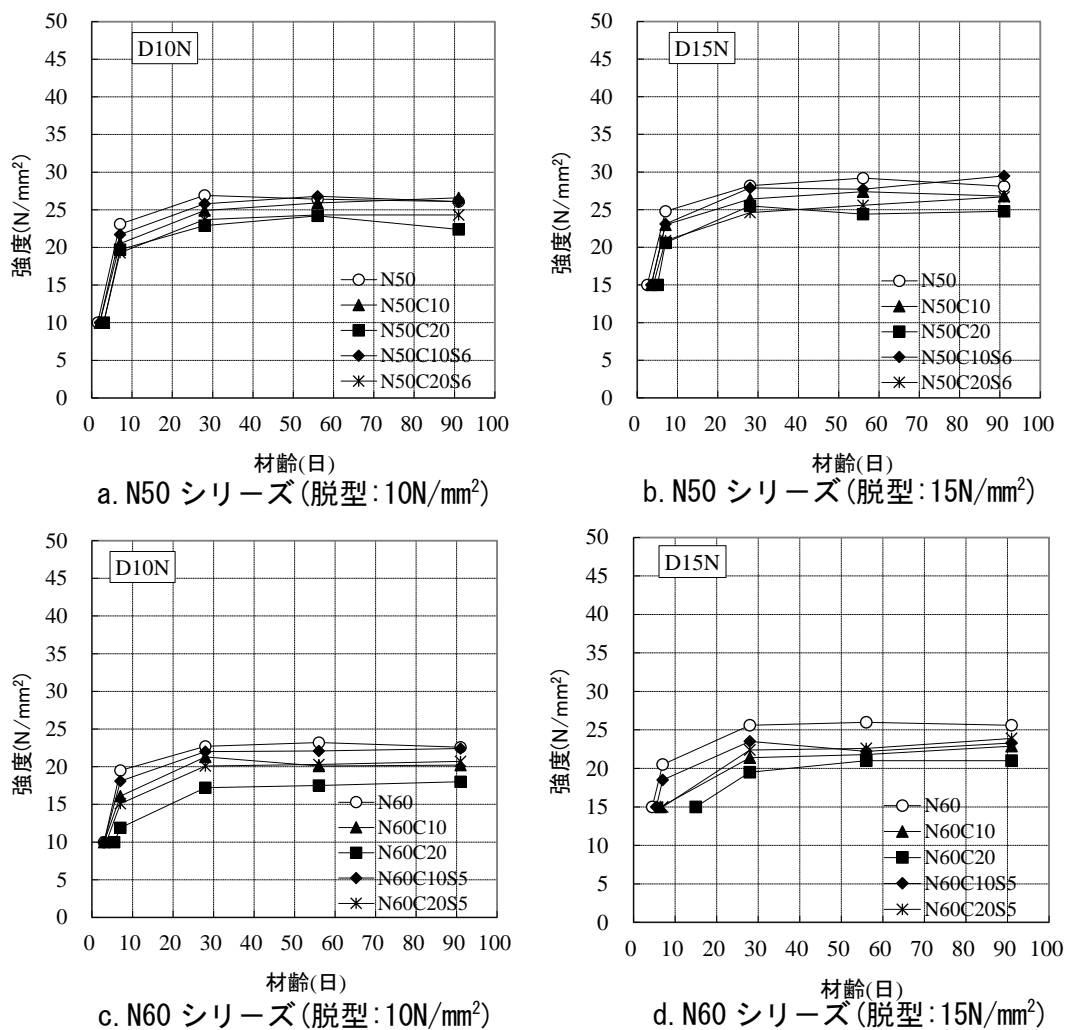
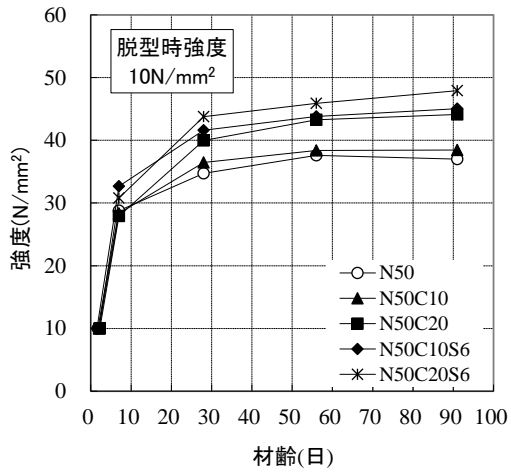
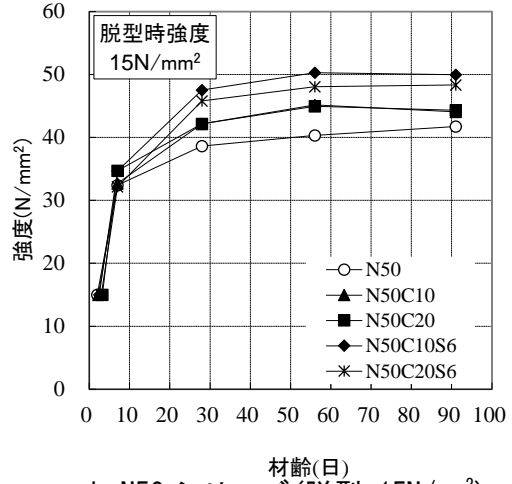


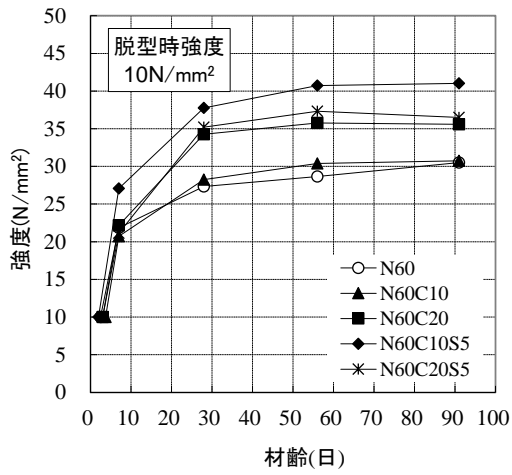
図 5-3-7 圧縮強度経時変化 (シリーズ I)



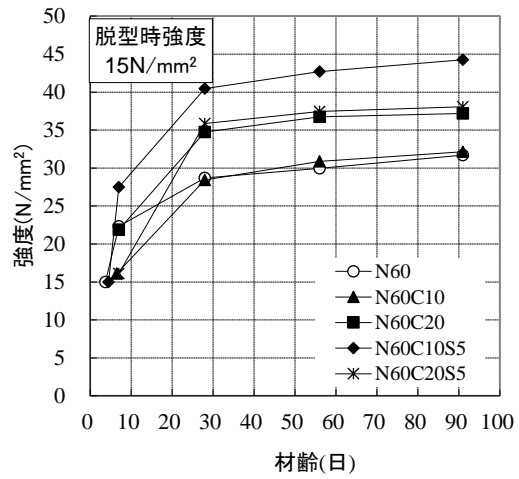
a. N50 シリーズ (脱型: 10N/mm²)



b. N50 シリーズ (脱型: 15N/mm²)



c. N60 シリーズ (脱型: 10N/mm²)



d. N60 シリーズ (脱型: 15N/mm²)

図 5-3-8 圧縮強度経時変化 (シリーズ II)

第3項 中性化特性

コンクリートの中性化深さと材齢の平方根には比例関係がみとめられており、一般に以下の式が成り立つ⁵⁻⁴⁾とされる。

$$C=a\sqrt{t}$$

ここに、

C：中性化深さ

t：時間

a：中性化速度係数

本検討において測定を行ったそれぞれの水準における中性化深さと促進期間(単位：週)の平方根の関係性より、中性化速度係数を算出した。算出においては最小二乗法による回帰分析を行った。

1) シリーズ I

図 5-3-9 に算出した中性化速度係数を示す。

① 養生方法による中性化速度係数の相違

脱型後気中養生した水準と比較して、脱型後水中養生した水準の中性化速度係数は著しく小さい。これは、コンクリート内部の微細空隙に自由水が充填され、CO₂の浸入が妨げられたことに起因すると推察される。

一方、脱型後気中養生を施した水準においては脱型時期の遅いものの中性化速度係数は小さくなることがわかる。このことから、若材齢から促進中性化試験に供する場合には、養生条件が試験結果に与える影響が大きくなることがわかる。

② 調合方法による中性化速度係数の相違

水セメント比の増加に伴い、中性化速度係数は増大することがわかる。また、外割混合を併用した調合の気中養生を施した水準の中性化速度係数は、同一水セメント比の内割混合のみの水準の中性化速度係数と比較して大きくなる傾向にある。一方、前項に示した圧縮強度の比較においては、外割混合を併用した水準の圧縮強度は増進がみとめられた。これらのことから、ポズラン反応による組織の緻密化は起こるものの、それに伴う Ca(OH)₂ の消費も多くなり、その影響が顕著にあらわれたものと推察される。これとは対照的に、水中養生を施した外割混合を併用した水準の中性化速度係数は、同一水セメント比の内割混合のみのコンクリートと比較して同等か、やや小さくなる傾向にあることがわかる。

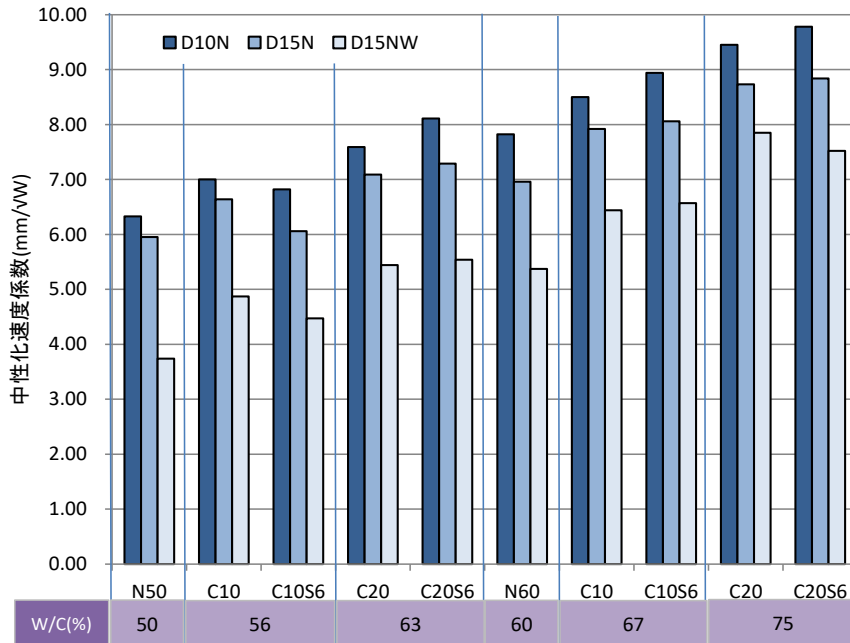


図 5-3-9 中性化速度係数 (シリーズ I)

2) シリーズ II

図 5-3-10 に算出した中性化速度係数を示す。

① 養生方法による中性化速度係数の相違

シリーズ I と同様に、脱型後気中養生した水準と比較して脱型後水中養生した水準の中性化速度係数は、著しく小さい。このことから、高温の養生による反応促進による組織の緻密化の影響よりも、コンクリート空隙中に存在する自由水が気体の浸入および移動を妨げる効果の方が顕著であるといえる。

一方、脱型後気中養生を施した水準においては脱型までの封かん期間の長短が中性化速度係数におよぼす影響に明確な傾向がみられなかった。これは、促進中性化試験開始までにシリーズ I の約 4 倍の熱エネルギーを与えたこと、および気中養生中に側面封かん処理を施したことによる水分発散面積の縮小により、材齢の極めて初期段階における脱型時期の影響が相対的に小さくなったことが要因と推察される。

② 調合方法による中性化速度係数の相違

同一水セメント比間の比較において、外割混合を併用した調合の気中養生を施した水準の中性化速度係数は、同一水セメント比の内割混合のみの水準の中性化速度係数と比較して大きな差がみられなかった。圧縮強度の比較においては、外割混合を併用した水準の圧縮強度には顕著な増進がみとめられた。これらのことから、シリーズ I と同様にポゾラン反応による組織の緻密化は起こるものの、それに伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費も多くなり、その影響があらわれたものと推察される。

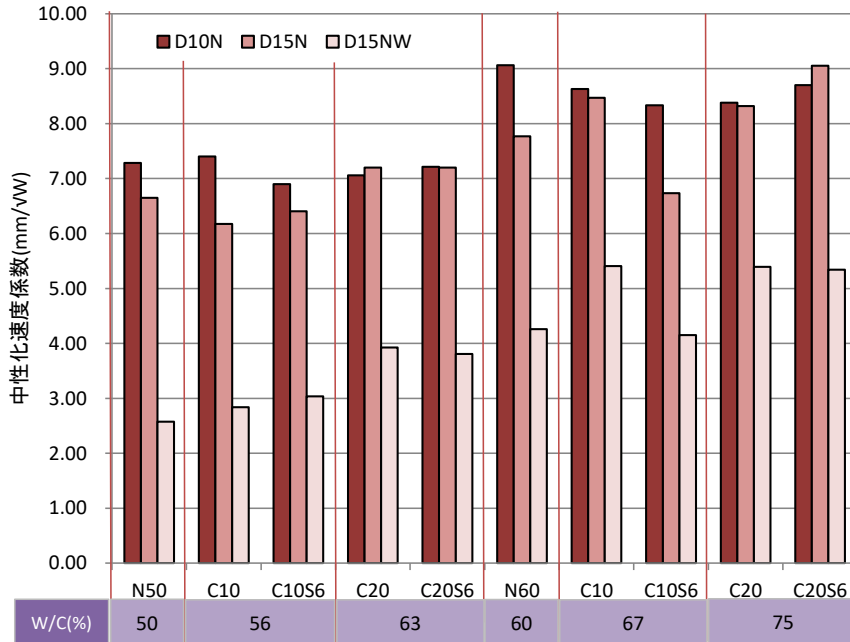


図 5-3-10 中性化速度係数（シリーズⅡ）

3) シリーズ間の比較

養生環境の異なるシリーズ間の中性化速度係数を比較検討するために、各シリーズにおけるフライアッシュコンクリートの中性化速度係数を普通ポルトランドセメントの中性化速度係数で除したものを中性化速度係数比と定義する。

シリーズ毎の中性化速度係数比を表 5-3-3 および表 5-3-4 に示す。

促進中性化試験開始前に 20℃環境下で養生した場合、フライアッシュコンクリートの中性化速度係数は普通ポルトランドセメントコンクリートと比較して約 17%大きくなる。一方、40℃環境下で養生した場合には普通ポルトランドセメントコンクリートとほぼ同じかやや小さくなる。

これは、促進試験開始前にポゾラン反応を励起させたことに起因するといえる。換言すると、促進試験開始前にポゾラン反応を励起させることにより、フライアッシュコンクリートの耐久性評価は向上し、本検討において設定した条件では平均して約 20%の向上がみられた。

表 5-3-3 中性化速度係数比(シリーズ I)

シリーズ I (20°C)				
ベース	混合方法	中性化速度 係数	中性化速度 係数比	係数比平均
N60	プレーン	7.82	100%	117%
	10%	8.5	109%	
	20%	9.45	121%	
	10%外割併用	8.94	114%	
	20%外割併用	9.78	125%	
N50	プレーン	6.33	100%	116%
	10%	7	111%	
	20%	7.54	119%	
	10%外割併用	6.82	108%	
	20%外割併用	8.11	128%	

表 5-3-4 中性化速度係数比(シリーズ II)

シリーズ II (40°C)				
ベース	混合方法	中性化速度 係数	中性化速度 係数比	係数比平均
N60	プレーン	9.06	100%	94%
	10%	8.63	95%	
	20%	8.38	92%	
	10%外割併用	8.33	92%	
	20%外割併用	8.7	96%	
N50	プレーン	7.28	100%	99%
	10%	7.4	102%	
	20%	7.06	97%	
	10%外割併用	7.13	98%	
	20%外割併用	7.21	99%	

第4項 Ca(OH)₂量

20°C気中で養生したコンクリートのCa(OH)₂量を図5-3-11に示す。

材齢1週時におけるCa(OH)₂量と比較すると、材齢8週時のCa(OH)₂量は増加する傾向にある。このことから、材齢1週から材齢8週までの期間においては水和反応によるCa(OH)₂の生成が活発であり、フライアッシュのポズラン反応によるCa(OH)₂の消費は顕著ではないことが推察される。

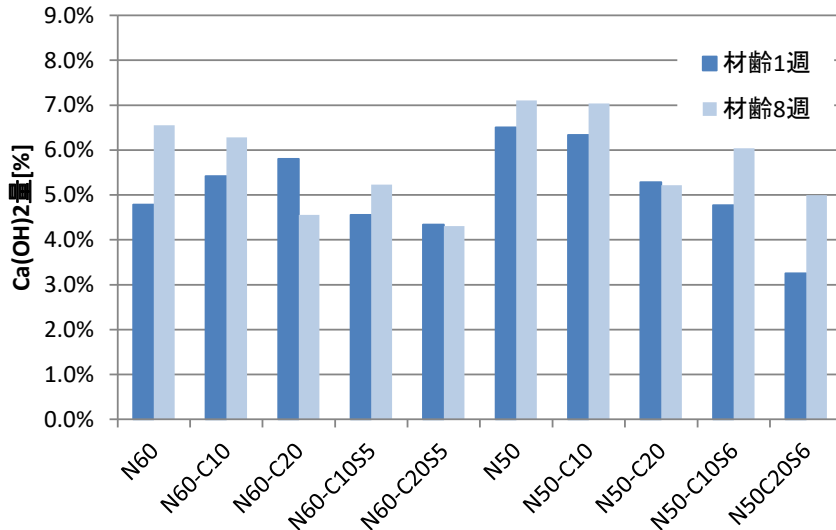


図 5-3-11 Ca(OH)₂量 (シリーズ I)

40°C気中で養生したコンクリートのCa(OH)₂量を図5-3-12に示す。

材齢1週時におけるCa(OH)₂量と比較すると、材齢8週時のCa(OH)₂量は、フライアッシュの置換率が高くなるにつれて減少する傾向がみられた。時間の経過によりCa(OH)₂量が減少する水準もフライアッシュコンクリートには多くみられることから、フライアッシュのポズラン反応によるCa(OH)₂の消費とポズラン反応の温度依存性が裏付けられた。

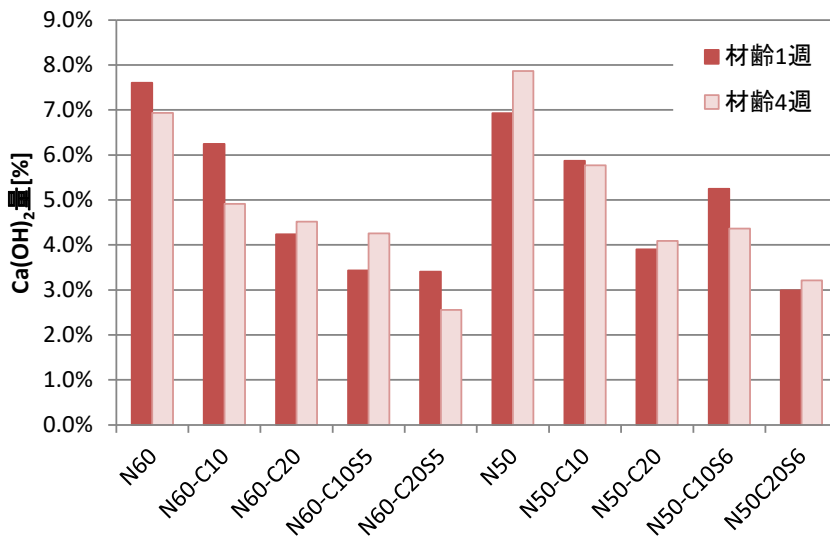


図 5-3-12 Ca(OH)₂量 (シリーズ II)

第5項 圧縮強度と中性化速度係数の関係

材齢8週時の圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係を図5-3-13および図5-3-14に示す。養生温度条件によらず圧縮強度の逆数と中性化速度係数は同様に直線関係で示され、その相関性も高い。これは既往研究^{5-5, 5-6)}による指摘と類似した傾向である。

このことから、圧縮強度を指標とすることで中性化進行の予測が可能となることが明らかとなった。

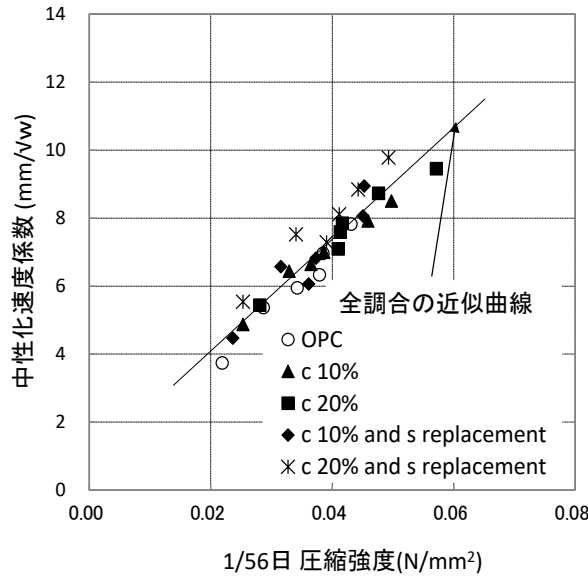


図 5-3-13 圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係 (シリーズ I)

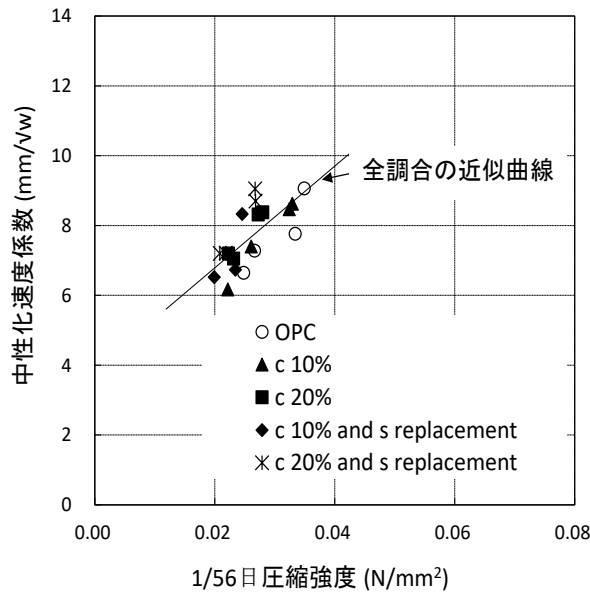


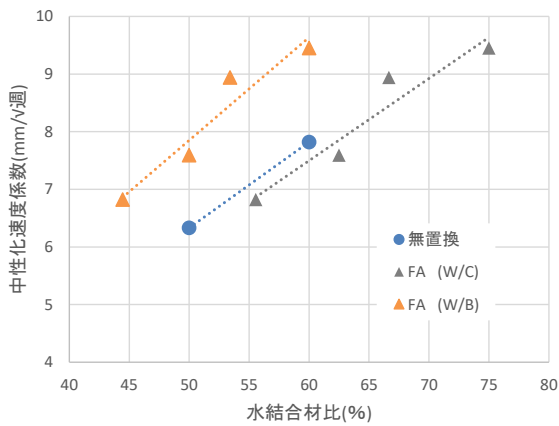
図 5-3-14 圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係 (シリーズ II)

第4節 長期的性状変化を考慮した中性化抵抗性評価方法

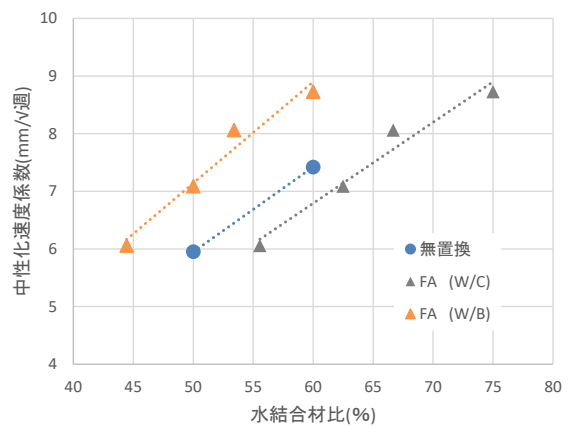
第1項 結合材寄与率の算出

本論文第4章において導出した結合材寄与率の算定手法を本章の実験結果に適用し、長期的性状変化を考慮した耐久性評価方法を検討する。

実験結果より得た水結合材比と中性化速度係数の関係を図5-4-1および図5-4-2、図5-4-3に示す。

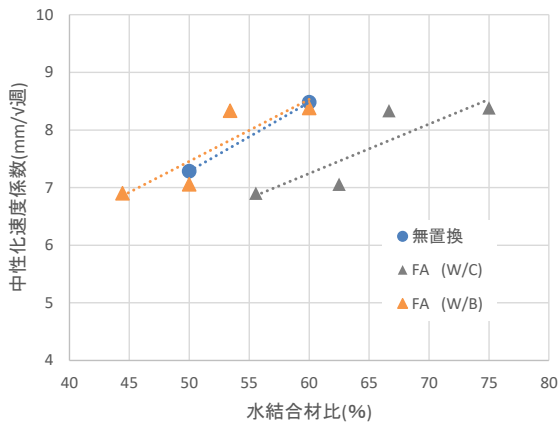


a. 脱型時強度 10N/mm²

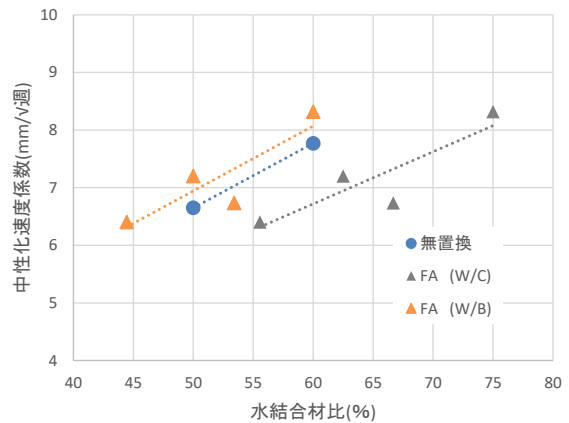


b. 脱型時強度 15N/mm²

図5-4-1 水結合材比と中性化速度係数の関係 シリーズ I



a. 脱型時強度 10N/mm²



b. 脱型時強度 15N/mm²

図5-4-2 水結合材比と中性化速度係数の関係 シリーズ II

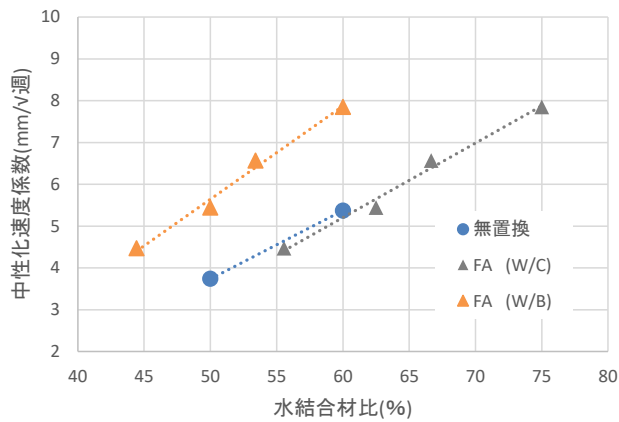


図 5-4-2 水結合材比と中性化速度係数の関係 20°C水中養生

これらの図における水結合材比と中性化速度係数の近似曲線の位置関係より求めた結合材寄与率を表 5-4-1 および表 5-4-2 に示す。

表 5-4-1 および表 5-4-2 より、気中養生した水準においては水結合材比が高いほど、結合材寄与率が高くなる傾向が確認された。これは、気中で養生することによる乾燥の影響で供試体内部が相対的に乾燥することに起因すると推察される。

表 5-4-3 および表 5-4-4 に本論文第 4 章の調査、分析結果より算出した結合材寄与率を示す。表 5-4-2 と表 5-4-3 の数値は近似しており、標準養生を施したフライアッシュコンクリートの結合材寄与率の標準値がこの近傍に位置することが確認された。

一方で、気中養生した水準においては、養生温度を 20°C から 40°C に引き上げることによる結合材寄与率の著しい向上がみとめられた。

表 5-4-4 に示す長期屋外暴露試験結果の収集および分析より得た結合材寄与率の算定結果は、フライアッシュの長期的中性化抵抗性寄与の実態に即した数値である。これを鑑み、本検討における 40°C 気中養生はフライアッシュのポゾラン反応性および結合材としての寄与率を実態よりも高く算定していることを確認した。

したがって、促進試験開始前のフライアッシュの反応促進を長期的性状変化の実態に近似するための養生温度条件の検討が必要であることがわかった。

表 5-4-1 結合材寄与率(気中養生)

			脱型時強度(N/mm ²)					
			10			15		
養生温度(°C)	20	水結合材比(%)	50	60	70	50	60	70
		結合材寄与率 α (%)	14.6	15.1	15.5	33.3	30.8	29.0
	40	水結合材比(%)	50	60	70	50	60	70
		結合材寄与率 α (%)	70.9	83.4	92.8	70.4	74.2	77.0

表 5-4-2 結合材寄与率(水中養生)

	20℃水中		
水結合材比(%)	50	60	70
結合材寄与率 α (%)	16.3	6.9	0.5

表 5-4-3 結合材寄与率(促進試験調査結果)

	促進調査結果		
水結合材比(%)	50	60	70
結合材寄与率 α (%)	11.2	4.2	-0.6

表 5-4-4 結合材寄与率(屋外暴露試験調査結果)

	屋外暴露		
水結合材比(%)	50	60	70
結合材寄与率 α (%)	44.8	39.9	36.5

第2項 積算温度に基づく養生環境の検討

本節第1項の検討結果から、環境温度 40℃での気中養生はフライアッシュのポゾラン反応性および結合材としての寄与率を実態よりも高く算定することとなることがわかった。

コンクリートの諸性状を決定付ける圧縮強度は積算温度(°D・D)に基づき評価が可能であることが知られている^{5-7)、5-8)}。そこで、フライアッシュコンクリートにおいても積算温度が諸性状に対し支配的であると仮定し、屋外暴露試験結果の調査および分析から得られた結合材寄与率と近似する積算温度を算出し、前養生における環境温度を検討することとした。

表 5-4-5 に実験より算出した積算温度と結合材寄与率を示す。積算温度と結合材寄与率が比例するとすれば、積算温度と結合材寄与率の平均値の関係は図 5-4-3 のように示される。

屋外暴露試験調査結果より得られた結合材寄与率の平均値は表 5-4-4 より 40.4%となる。図 5-4-3 より、当該の結合材寄与率を示す積算温度は 2031.8°D・Dであることを確認した。この数値より、前養生期間を本検討における実験と同様に 8 週とした場合、26.3℃の環境で養生すれば、フライアッシュの結合材寄与率を屋外暴露と同等に評価することが可能である。

表 5-4-5 実験より算出した積算温度と結合材寄与率

		試験結果				
積算温度(°D・D)	1680	水結合材比(%)	50	60	70	平均
		結合材寄与率 α (%)	24.0	23.0	22.2	23.1
積算温度(°D・D)	2800	水結合材比(%)	50	60	70	平均
		結合材寄与率 α (%)	70.7	78.8	84.9	78.1

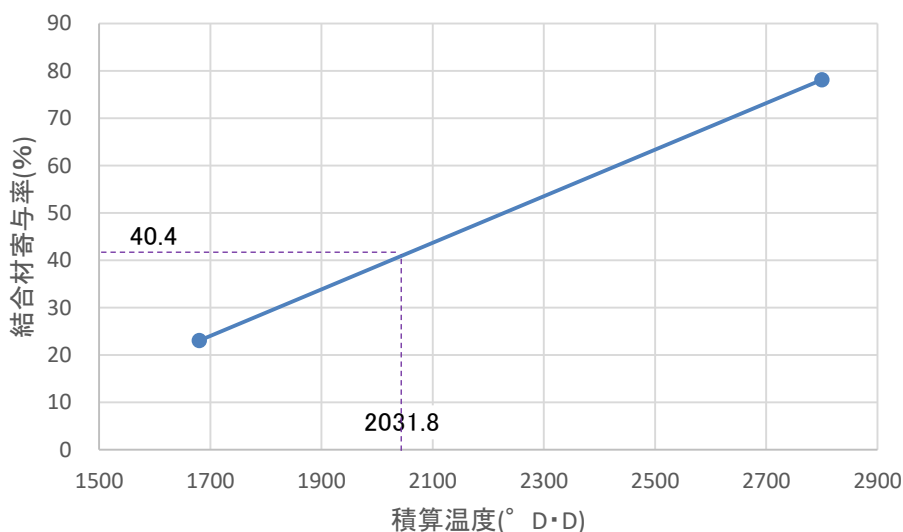


図 5-4-3 積算温度と結合材寄与率の平均値の関係

第3項 反応率と結合材寄与率の類似性に基づく養生環境の検討

フライアッシュの結合材寄与はポズラン反応の付帯効果として生じることから、養生温度の変化に伴う結合材寄与率の変化は、ポズラン反応率の変化と類似の形態を示すと考えられる。本検討の実験からはフライアッシュの反応率は算定できなかったため、環境温度とフライアッシュの反応率について詳細に検討を行った谷口らの研究⁵⁻⁹⁾を参考に反応率を検討した。

文献⁵⁻⁹⁾による、セメントペースト中のフライアッシュが100%反応するのに要する期間を表5-4-6に示す。

期間中、反応速度が平均的に進行すると仮定し、それぞれの温度における期間の逆数をとることで1期間あたりの反応率を算出した。その結果を表5-4-7に示す。

表5-4-7に示した養生温度と期間あたりの反応率の関係を図5-4-3に示す各温度に対する期間あたりの反応率は、指数近似することで非常に精度良く表すことができることがわかる。

結合材寄与率と養生温度の関係はポズラン反応率と養生温度の関係と類似するという仮定のもとに、実験より得た結合材寄与率と養生温度の関係を指数近似した結果を図5-4-4に示す。

得られた近似式から、屋外暴露試験調査結果の結合材寄与率の平均値40.4%を満たす養生温度を求めると29.2°Cとなる。

表 5-4-6 セメントペースト中のフライアッシュが全反応するのに要する年数

温度(°C)	期間(年数)
5	68.9
20	15.7
40	2.7

表 5-4-7 セメントペースト中のフライアッシュの期間あたりの反応率

温度(°C)	期間あたりの 反応率
5	1.5%
20	6.4%
40	37.0%

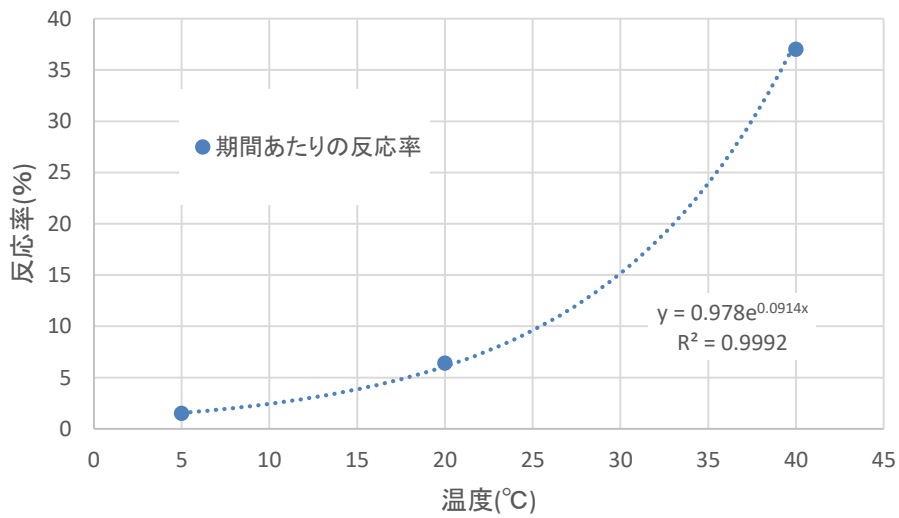


図 5-4-3 養生温度とフライアッシュ反応率の関係

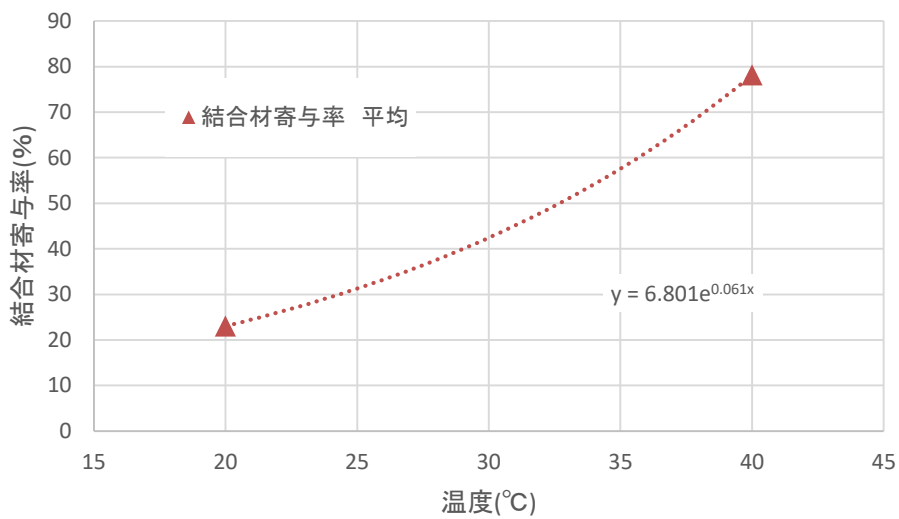


図 5-4-4 養生温度と結合材寄与率の関係

第5節 まとめ

長期的性状変化を考慮した耐久性評価方法の検討を目的とした実験および検討より、以下に示す知見を得た。

1. 20°Cの環境下ではフライアッシュの反応が励起せず、圧縮強度、中性化速度係数ともにフライアッシュ置換率の増大に伴い無置換コンクリートと比較して性能が低下する傾向が確認された。
2. 40°Cの環境下ではフライアッシュコンクリートの強度発現性は材齢初期より高くなり、中性化速度係数は小さくなる傾向にあった。これらのことから、40°C環境においてフライアッシュの反応は十分に活発化された。
3. 圧縮強度と中性化速度係数は養生環境の温度によらず相関性を示し、圧縮強度を指標とすることで中性化進行の予測が可能となる既往研究の調査より得られた知見と同様の結果を確認した。
4. 異なる養生温度環境におけるフライアッシュの結合材寄与率を第4章に示した方法を用いて算定した結果、20°C気中環境における結合材寄与率は平均23.1%であった。一方、40°C気中環境における結合材寄与率は平均78.1%であった。高温環境下で養生を施すことにより、結合材寄与率は3.4倍と著しく向上する。
5. コンクリートの積算温度と結合材寄与率は比例すると仮定し、屋外暴露試験結果の分析結果と同等の結合材寄与率を得る積算温度を算出した。これを現在の促進中性化試験の前養生期間である8週に当てはめた場合、約26°Cの養生温度となる。また、結合材寄与率とポゾラン反応率の類似性より検討した養生温度の数値は約29°Cであった。
6. これらの結果から、フライアッシュコンクリートの促進中性化試験においては、前養生期間の温度を25~30°Cとし、側面封かん養生を施せば、フライアッシュの結合材寄与率を長期的性状の実態に即しおおよそ過不足なく評価可能であることを示した。

第6節 参考文献

本章の参考文献を以下に示す。

- 5-1) 例えば, 大賀宏行: フライアッシュや石炭灰を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol.34, No.6, pp.69-74, 1996
- 5-2) 野田良太ほか: フライアッシュを外割混合したコンクリートの促進中性化の評価に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集. A-1, 材料施工, pp. 757-758, 2009
- 5-3) 小早川真ほか: フライアッシュを内割・外割でセメントに混合したモルタル硬化体の空隙・組織構造, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.739-744, 1998
- 5-4) 岸谷孝一: 鉄筋コンクリートの耐久性, 鹿島出版, 1963
- 5-5) 安田正雪ほか: 10年屋外暴露したフライアッシュを使用したコンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.777-782, 2007
- 5-6) 中村英佑: 暴露試験と促進試験に基づく混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.97-102, 2015
- 5-7) 金 武漢ほか: モルタルおよびコンクリートの積算温度と圧縮強度発現に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集 Vol.355, pp.1-6, 1985
- 5-8) 國府勝郎ほか: フライアッシュの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.79-84, 2000
- 5-9) 谷口 円ほか: フライアッシュの反応速度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.189-194, 2007

第6章

耐久性評価の改善に
ともなう利用方法の提案
とその効果の試算

第1節 序

本研究は、産業副産物の有効利用が資源循環に資する効果を検討するものである。

そこで本章では、これまでに得られた耐久性評価に関する知見から石炭灰の有効利用方法を想定したモデルを作成し、資源の循環が成立する諸条件について検討することを目的とした。

第2節 石炭灰の循環利用の前提

第1項 石炭灰の有効利用の現状

表 6-2-1 に平成 26 年度の石炭灰利用実態を示す。

石炭灰の有効利用用途としてセメント分野、特にセメント原料としての利用が 70%弱と非常に大きな役割を果たしていることは第3章において調査したとおりである。

図 6-2-1 にセメント生産量、副産物の受け入れ量および受入副産物に占める石炭灰の割合の経時変化を示す。

セメント生産量は 1995 年から 20 年間で長期的な減少傾向にある一方で、副産物受入量は増加傾向にあり、また、受入副産物に占める副産物の割合は顕著な増加傾向を示し、ここ

表 6-2-1 石炭灰利用実態

分野	項目 内容	電気事業		一般産業		合計	
		利用量	構成比(%)	利用量	構成比(%)	利用量	構成比(%)
セメント分野	セメント原材料	6,031	64.14	2,212	74.33	8,243	66.59
	セメント混合材	78	0.83	10	0.34	88	0.71
	コンクリート混和材	77	0.82	4	0.13	81	0.65
	計	6,186	65.79	2,226	74.80	8,412	67.95
土木分野	地盤改良材	359	3.82	182	6.12	541	4.37
	土木工事用	419	4.46	53	1.78	472	3.81
	電力工事用	78	0.83	0	0.00	78	0.63
	道路路盤材	146	1.55	140	4.70	286	2.31
	アスファルト・ファイバー材	6	0.06	0	0.00	6	0.05
	炭坑充填材	413	4.39	0	0.00	413	3.34
計	1,421	15.11	375	12.60	1,796	14.51	
建築分野	建材ボード	130	1.38	269	9.04	399	3.22
	人工軽量骨材	41	0.44	0	0.00	41	0.33
	コンクリート2次製品	34	0.36	0	0.00	34	0.27
	計	205	2.18	269	9.04	474	3.83
農林・水産分野	肥料(含:融雪剤)	35	0.37	7	0.24	42	0.34
	魚礁	39	0.41	0	0.00	39	0.32
	土壌改良剤	36	0.38	54	1.81	90	0.73
	計	110	1.17	61	2.05	171	1.38
その他	下水汚水処理剤	1	0.01	0	0.00	1	0.01
	製鉄用	1	0.01	3	0.10	4	0.03
	その他	1,479	15.73	42	1.41	1,521	12.29
	計	1,481	15.75	45	1.51	1,526	12.33
有効利用合計		9,403	100	2,976	100	12,379	100

(データ出典)一般財団法人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 26 年度実績) ⁶⁻¹⁾

数年においては25%付近まで到達している。

この状況を鑑みるに、現状のセメント原材料としての利用は飽和に近づいており、これ以上の受入量の拡大は困難であると考えられる。

一方、セメント混合材およびコンクリート混和材としての利用はどちらも1%を下回る低い水準であることから、利用拡大の潜在的余地を有するものと考えられる。

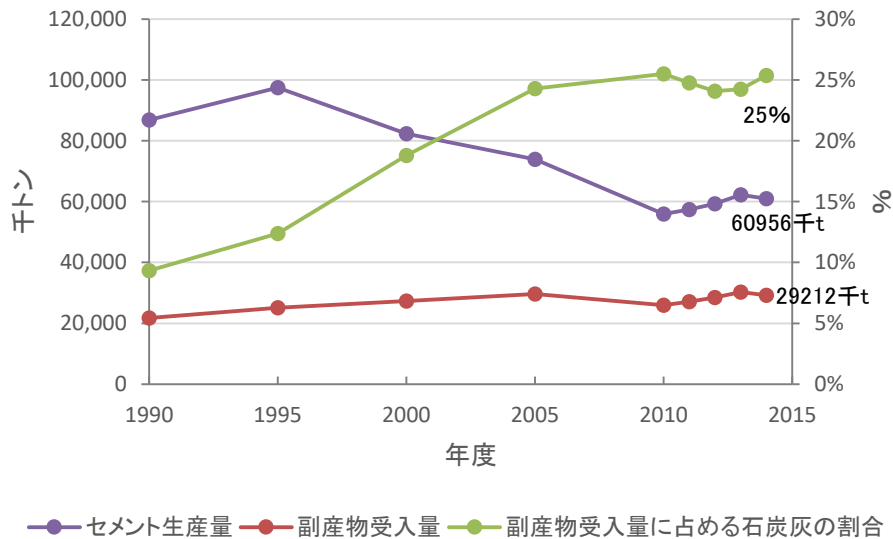


図 6-2-1 セメント生産量、副産物の受け入れ量および受入副産物に占める石炭灰の割合の経時変化
(データ出典：セメント協会「セメントハンドブック 2015 年度版」⁶⁻²⁾)

第2項 石炭灰の輸出の現状

セメント原材料としての利用拡大の困難が予想される一方で、近年有効利用の一端を担っている用途として廃棄物処理法に基づく石炭灰の海外輸出が挙げられる。輸出先は韓国および香港⁶⁻³⁾である。

図 6-2-2 に石炭灰の輸出量の経年変化を示す。輸出量は増加傾向にあり、今後の増加が予想される。また、2014 年度の輸出量は 157 万トンであった。

しかしながら、輸出による有効利用は言わば中間処理費用を投じて諸外国に処理委託を行っていることと同義であり、政治的要因や輸出先の受入状況の変動による費用の増大等、国内で処理を完結するよりも先行きが不透明となる点も懸念される。したがって、本検討では、海外輸出をもって有効利用と計上されている石炭灰も循環利用量に算入することとした。

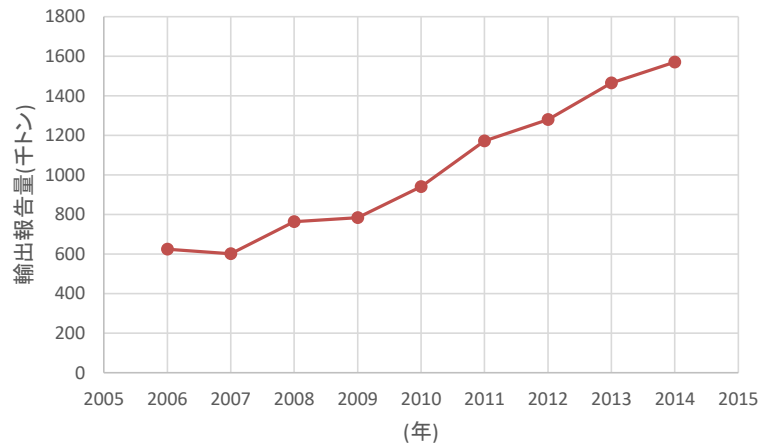


図 6-2-2 石炭灰の輸出品量の経年変化

(データ出典：環境省「廃棄物処理法に基づく廃棄物の輸出確認及び輸入許可に関する資料」⁶⁻³⁾)

第3項 石炭灰の最終処分状況

有効利用に供されない石炭灰は埋立処理により最終処分される。図 6-2-3 に最終処分される石炭灰の発生量に対する割合の経年変化を示す。2000 年以降では最終処分される石炭灰の割合は本節 2 項で述べた石炭灰の輸出の効果から減少傾向にあり、2014 年度の最終処分割合は 1.9%となっており、その量は 25 万トンであった。

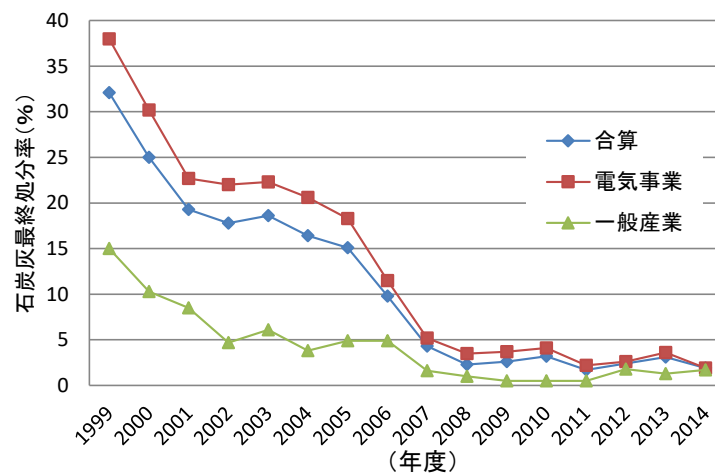


図 6-2-3 石炭灰最終処分率の経年変化

(データ出典)一般財団法人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 26 年度実績）」

第4項 循環利用する必要性を有する石炭灰量

年間に最終処分される石炭灰量と、海外に輸出される石炭灰量、および今後不可避と官がられる石炭灰発生量の増大を総合的に勘案し、本検討において資源として循環利用する必要性を有する石炭灰の量を年間 200 万トンと設定した。以下の検討においては 200 万トンの石炭灰を日本国内で循環利用することを前提とする。

第3節 石炭灰の有効利用モデル

第1項 モデル作成の前提

資源としての循環利用用途として、現状利用が少ない分野であるコンクリート混和材料への利用を想定した。要求される性能が破綻をきたさない条件は4章、および5章の検討に用いた内容である結合材寄与率 α を用い、実効結合材量を算出して設定する。

結合材寄与率 α と実効結合材量の概要を図6-3-1に示す。

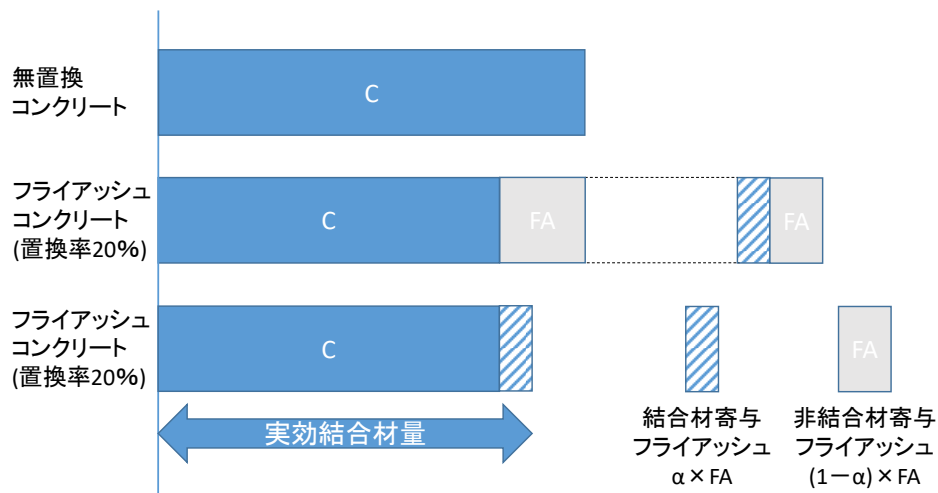


図 6-3-1 結合材寄与率 α と実効結合材量の概要

第2項 モデルパターン I：低炭素型

1) モデルパターンの概要

ここでは、モデルパターン I としてフライアッシュコンクリートの実効結合材量を無置換コンクリートと同値とする考え方をを用いる。モデルパターン I における実効結合材量のとらえ方を図 6-3-2 に示す。同等の中性化抵抗性を有する無置換コンクリートと比較してセメント量の削減が見込めることから、このモデルパターンを低炭素型モデルと呼称する。

また、無置換コンクリートの結合材量(セメント量)を x 、フライアッシュコンクリートの結合材量を y とおくと、 x と y には以下の関係が成り立つ。

$$y = \frac{x}{(1-t) + \alpha t} \quad \text{---(6.3.1)}$$

x : 無置換コンクリートのセメント量

y : フライアッシュコンクリートの結合材量

α : 結合材寄与率

t : 置換率($FA / (C + FA)$)

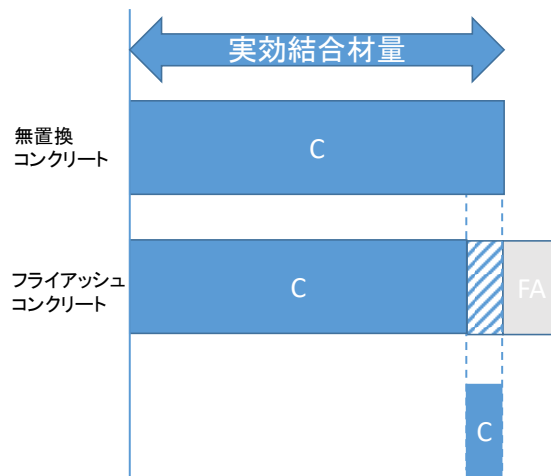


図 6-3-2 低炭素型モデルにおける実効結合材量のとらえ方

2) 低炭素型モデルの利点、欠点

設定した低炭素型モデルは、概要で示したとおり同等の中性化抵抗性を期待される無置換コンクリートと比較してフライアッシュの実効結合材量に相当するセメント量を削減可能である。このことから、コンクリート製造時に当該セメント量分の環境負荷の低減効果が見込まれる。

一方で、純粋な意味での単位セメント量は無置換コンクリートと比較して少なくなるため、初期強度発現性が劣ることが懸念される。このことから、養生期間を長く設定する必要がある可能性がある。

また、フライアッシュの結合材としての反応であるポゾラン反応には水分が不可欠であるため、乾燥の影響を受けやすい部位、部材断面が小さい部位等で結合材寄与率が小さくなるおそれのある部位での使用には適していないことが欠点として挙げられる。

なお、混合したフライアッシュのうち、非実効結合材量分のフライアッシュはコンクリートの調合において細骨材として扱うこととなる。副次的な効果として非実効結合材フライアッシュ量分の細骨材を削減することが可能となることから、骨材事情の厳しい地方においてはコンクリートのフレッシュ性状の改善にも期待ができる。

第3項 モデルパターンⅡ：長寿命型

1) モデルパターンの概要

ここでは、モデルパターンⅡとしてフライアッシュコンクリートの実セメント量を無置換コンクリートと同値とする考え方をを用いる。モデルパターンⅡの概要を図 6-3-3 に示す。同等のセメント量を有する無置換コンクリートと比較して実効結合量の差分中性化抵抗性の向上が見込めることから、このモデルパターンを長寿命型モデルと呼称する。

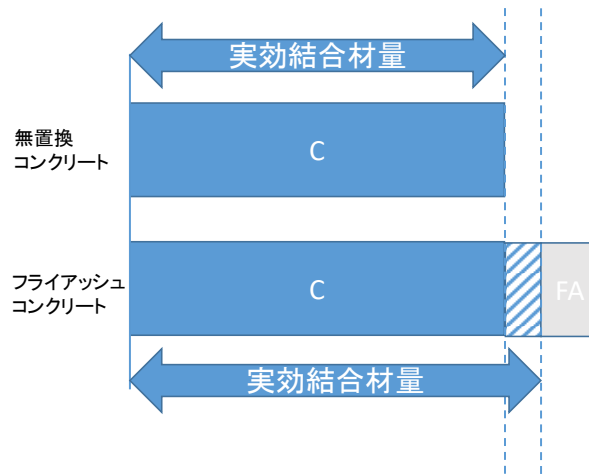


図 6-3-3 長寿命型モデルにおける実効結合材量のとらえ方

2) 長寿命型モデルの利点、欠点

設定した長寿命型モデルは、概要で示したとおり純粋な意味での単位セメント量が無置換コンクリートと等しい。そのため混合したフライアッシュのうち、実効結合材量に相当するフライアッシュ量($\alpha \times$ フライアッシュ量)分の中酸化抵抗性の向上が期待できる。また、単位セメント量が確保されることから、初期強度発現性についても無置換コンクリートと同等と考えられる。このことから、フライアッシュの混合量を任意とすることが可能となり、脱型や養生および使用部位の条件設定自由度は低炭素型より高いといえる。

しかし、単位セメント量が等しいことから低炭素モデルで期待されるセメント量の削減による環境負荷の低減効果は期待できない。一方で、実効結合材量分の中酸化抵抗性への寄与により長期的な観点からはコンクリート構造物の耐用年数の向上が期待される。このことから、コンクリート構造物を物理的性能上の更新サイクルで更新する用途においてはサイクルを長期化することが可能となり、更新時の解体、撤去に伴い排出される廃棄物量の低減効果が見込める。

長寿命型モデルでは、コンクリートの調合において混合したフライアッシュの全量を細骨材として扱うこととなる。前述のとおり単位セメント量の確保により、低炭素型モデルと比較してフライアッシュ混合量の自由度が高いため、フレッシュ性状の改善効果を目的とした混合方法としても期待できる。

第4項 モデルパターンのまとめ

設定したモデルパターンの概要および利点と欠点を以下の表 6-3-1 にまとめる。

表 6-3-1 各モデルパターンの概要

	低炭素型モデル	長寿命型モデル
目的	実効結合材量を無置換コンクリートと同等とし、同等の耐久性を確保する	単位セメント量を確保することでフライアッシュをコンクリートの耐久性向上を企図する
用途	セメント混合材	コンクリート混和材
利点	<ul style="list-style-type: none"> ・実効結合材フライアッシュ量に相当するセメント量を即時に削減可能 ・セメント量と同時に非実効結合材フライアッシュ量に相当する細骨材量を削減可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・無置換コンクリートと比較して耐久性の向上が期待できる ・脱型や養生および使用部位の条件設定の自由度が高い ・フレッシュ性状の改善を主目的とする混合も可能
欠点	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント量を削減することから、結合材寄与率の低下が想定される部位(薄肉部材等)では使用の適性を判断する必要がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・即時的効果には期待できない ・構造物を性能限界までに更新する場合には効果が期待できない

第4節 石炭灰の資源循環が成立する諸条件および付帯効果

第1項 低炭素型モデル

低炭素型モデルはフライアッシュをセメント混合材料として使用することを想定した。また、フライアッシュコンクリートの長期屋外暴露試験を行った各論文の調査結果からフライアッシュの結合材寄与率 $\alpha=0.3$ として算定を行った。

2014年度の年間セメント生産量は6096万トン⁶⁻²⁾であることから、実効結合材量とセメント量の関係((6-3-1)式)より求めた置換率ごとのフライアッシュ利用増加量を表6-4-1に示す。ここで示したセメント削減に伴う損失FA量とは、フライアッシュの混合により当該セメントを生産する際に粘土代替として使用されたであろうフライアッシュの量のことをいう。

理論値ではあるが、セメントの年間全生産量が当該置換率のフライアッシュセメントとなる場合(シェア率100%)のフライアッシュの利用増加量は、最下段に示された値となる。

この数値から、フライアッシュの循環利用目標とした200万トン消費するために必要なシェア率を概算することが可能である。概算した置換率ごとの循環利用目標到達シェア率を表6-4-2に示す。

たとえば、置換率20%のフライアッシュセメントが全セメント量の15%のシェアを獲得すれば、目標とするフライアッシュの循環利用が達成できる。

このシェア率は、当該置換率のフライアッシュセメントのみが普及することによって目標を達成するために必要な数値であり、実際には様々な組み合わせが想定可能である。

表6-4-1 置換率ごとのフライアッシュ利用増加量

置換率	20%	10%	5%	4%	3%	2%	1%
セメント削減率 (%)	7.0%	3.2%	1.6%	1.2%	0.9%	0.6%	0.3%
セメント削減量 (万トン)	425.3	196.6	94.8	75.3	56.0	37.1	18.4
使用FA量 (万トン)	1417.6	655.4	315.8	250.8	186.8	123.6	61.4
セメント削減に伴う損失FA量(万トン)	51.7	23.9	11.5	9.1	6.8	4.5	2.2
FA利用増加量 (万トン)	1365.9	631.5	304.3	241.7	180.0	119.1	59.1

表6-4-2 置換率ごとの循環利用目標到達シェア率

置換率	20%	10%	5%
循環利用目標到達シェア率	15%	32%	66%

表 6-4-3 にポルトランドセメント、フライアッシュおよび細骨材のインベントリデータを示す。この数値を用い、以下に示す方法によりフライアッシュセメント普及に伴う CO₂ の排出削減量を算出した。

CO₂ 排出削減量 = セメント削減量から算出される CO₂ 削減量 - (フライアッシュ利用に伴う排出 CO₂ 量 + セメント量削減に伴い減少する原材料分フライアッシュから排出される CO₂ 量)

算出結果を表 6-4-4 に示す。表の最下段が、当該置換率のフライアッシュセメントのシェア率 100% のときの CO₂ 削減量となる。これを表 6-4-2 で示した循環利用目標到達シェア率で除すと、目標量である 200 万 t のフライアッシュの循環利用に伴う CO₂ 排出削減量が得られる。算出した CO₂ 排出削減量は置換率によらず、年間約 45 万 t となる。

表 6-4-3 コンクリート材料のインベントリデータ

材料名	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)
ポルトランドセメント	765.5
フライアッシュ	17.9

(データ出典：土木学会「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）、コンクリートライブラリー125」⁶⁻⁴⁾)

表 6-4-4 フライアッシュセメント普及に伴う CO₂ の排出削減量

置換率	20%	10%	5%	4%	3%	2%	1%
セメント削減率 (%)	7.0%	3.2%	1.6%	1.2%	0.9%	0.6%	0.3%
セメント削減量 (万トン)	425.3	196.6	94.8	75.3	56.0	37.1	18.4
使用FA量 (万トン)	1417.6	655.4	315.8	250.8	186.8	123.6	61.4
セメント削減に伴う損失FA量(万トン)	51.7	23.9	11.5	9.1	6.8	4.5	2.2
CO ₂ 排出削減量 (万t)	301.1	139.2	67.1	53.3	39.7	26.3	13.0

第2項 長寿命型モデル

長寿命型モデルはフライアッシュをコンクリート混和材料として使用することを想定した。本モデルにおいても、低炭素型モデルと同様に、フライアッシュの結合材寄与率 $\alpha=0.3$ として算定を行った。

本章第3節第3項で述べたとおり、長寿命型モデルの特徴としては単位ポルトランドセメント量の確保が挙げられる。混合したフライアッシュのうち、結合材寄与率分に該当するフライアッシュは普通ポルトランドセメントと同様に中性化抵抗性に寄与することが期待される。

性能限界を中性化深さが鉄筋コンクリート構造物のかぶり厚最小値 20mm 到達と設定した場合、耐用年数とその 1.2 倍の数値は以下の表 6-4-5 のように示される。

表 6-4-6 に水セメント比 50, 60, 70% のコンクリートの耐用年数を 1.2 倍とするときに変動する水セメント比、セメント量および、当該セメント量をフライアッシュで置換する際のフライアッシュ量を示す。表より、生コンクリート 1m³ に 35kg 添加することで流通するコンクリートの性能限界を 1.2 倍以上に引き上げることが可能である。

我が国において年間に生産される生コンクリートは 59,838 千 m³(2014 年度実績)⁶⁻⁵⁾であることを考慮し、全ての生コンに対し 35kg/m³ のフライアッシュを混和した場合には増加する利用量は 209 万 t となる。

したがって、利用目標とした 200 万 t のフライアッシュの利用は、全ての生コンクリートの耐用年数を少なくとも 1.2 倍に引き上げることにより十分達成される。

表 6-4-5 中性化深さ 20mm 到達までの年数

水結合材比 (%)	38	50	60	70
性能限界 (年)	—	358.97	107.43	50.89
性能限界×1.2 (年)	—	430.77	128.92	61.07

表 6-4-6 性能限界を 1.2 倍とするとき変動する項目とその量

水セメント比 (%)	50	60	70
性能限界が1.2倍となる水セメント比 (%)	48.95	58.08	67.21
水セメント比の差分	1.05	1.92	2.79
必要セメント量 (kg/m ³)	8	10	11
必要フライアッシュ量 (kg/m ³)	25.8	33.12	35.65

第5節 まとめ

耐久性評価に関する知見から作成した石炭灰の有効利用方法を想定したモデルから、資源の循環が成立する諸条件について検討した結果、以下に示す知見を得た。

・低炭素型モデル

1. 低炭素型モデルは、無置換コンクリートと比較してフライアッシュの実効結合材量に相当するセメント量を削減可能である。このことから、コンクリート製造時に当該セメント量分の環境負荷の低減効果が見込まれる。
2. 非実効結合材量分のフライアッシュは、コンクリートの調合において細骨材として扱うこととなる。副次的な効果として非実効結合材フライアッシュ量分の細骨材を削減することが可能となることから、骨材事情の厳しい地方においてはコンクリートのフレッシュ性状の改善にも期待ができる。
3. 置換率 20%のフライアッシュセメントが全セメント量の 15%のシェアを獲得すれば、年間 200 万 t のフライアッシュを国内で循環利用することが可能であり、その際削減される CO₂ 排出量は年間 45 万 t である。

・長寿命型モデル

1. 長寿命型モデルのセメント量は無置換コンクリートと等しい。そのため、混合したフライアッシュのうち、実効結合材量に相当するフライアッシュ量分の中性化抵抗性の向上が期待できる。また、単位セメント量が確保されることから、初期強度発現性についても無置換コンクリートと同等と考えられる。このことから、フライアッシュの混合量を任意とすることが可能となり、脱型や養生および使用部位の条件設定自由度は低炭素型より高い。
2. 実効結合材量分の中性化抵抗性への寄与により長期的な観点からはコンクリート構造物の耐用年数の向上が期待される。このことから、コンクリート構造物を物理的性能上の更新サイクルで更新する用途においてはサイクルを長期化することが可能となり、更新時の解体、撤去に伴い排出される廃棄物量の低減効果が見込める。
3. 生コンクリート 1m³ に 35kg のフライアッシュを添加することで流通するコンクリートの性能限界を 1.2 倍以上に引き上げることが可能である。我が国において年間に生産される生コンクリートは 59,838 千 m³(2014 年度実績)であることから、全ての生コンに対し 35kg/m³ のフライアッシュを混和した場合に増加するフライアッシュ利用量は 209 万 t となる。利用目標とした 200 万 t のフライアッシュの利用は、全ての生コンクリートの耐用年数を少なくとも 1.2 倍に引き上げることにより十分達成される。

第6節 参考文献

本章の参考文献を以下に示す。

- 6-1) 一般財団法人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 26 年度実績），2016
- 6-2) セメント協会：セメントハンドブック 2015 年度版，2015
- 6-3) 環境省：廃棄物処理法に基づく廃棄物の輸出確認及び輸入許可（平成 26 年）について，<http://www.env.go.jp/press/100797.html>（2017 年 2 月 16 日）
- 6-4) 土木学会：「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125」，2005
- 6-5) 経済産業省：生コンクリート流通統計調査，<http://www.meti.go.jp/statistics/sei/namakon/result-2.html>（2017 年 2 月 16 日）

第 7 章

結論

第1節 序

本論文は、今後の発生量増加が不可避と考えられる石炭灰の大半を占めるフライアッシュの循環利用量拡大について検討を行ったものである。

フライアッシュの循環利用を論ずるにあたり、産業副産物の定義と産業副産物としてのフライアッシュの位置付けを明確にした。

また、持続的発展を可能とする社会を構築するうえでは、廃棄物の発生抑制や副産物の循環利用といった環境負荷の低減方法の模索は生産活動における重要な課題といえ、現状の把握を通してフライアッシュの循環利用のあり方を示した。

フライアッシュの循環利用用途拡大に際し、解決すべき技術的課題として設定した耐久性評価に対して、長期的反応の実態に即した評価を可能とする指標を導出した。導出した評価指標を基とし、利用拡大に伴い期待される付帯効果を試算により明確にした。

以下に本論文の各章について結論を整理する。

第2節 各章のまとめ

第1章 序論

本研究の根幹を成すフライアッシュについて発生工程や化学的、物理的特性といった工学的観点から整理し、また、資源循環型社会の構築に求められる社会的な利用価値の重要性を整理するために産業副産物としてのフライアッシュの位置付けを明確にした。

第2章 既往文献の調査

研究の遂行に際し関連する先行研究を調査検討することで産業副産物の循環利用に係る現状の把握および課題を明確化し、本研究の位置付けとその意義を確認した。

対象文献を

- A) 産業副産物の再資源化の現状と課題
 - B) 石炭灰のコンクリート混和材利用技術
- にカテゴリー化し、抄録を行った。

第3章 資源循環の枠組みと副産物の利用拡大に係る課題の抽出

産業副産物の有効利用の位置付けおよび有効利用に至る過程の実態把握を目的とし調査を行った。

産業副産物の有効利用の法的な枠組みとして循環型社会形成推進基本法が制定されており、また、枠組みの柱石として廃棄物処理法および資源有効利用促進法が設けられている。電気事業から発生する石炭灰、および建設業から発生する土砂、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、木材の2業種5品目は資源有効利用促進法による指定副産物とされ、再生資源としての利用の促進が強く求められる。

石炭灰の主な受入先であるセメント産業は、石炭灰以外にも多種多様な副産物を受入れており、生産活動を通じて産業副産物の中間処理を担う静脈産業としての重要な一面を有する。そのうち、石炭灰がセメント産業の廃棄物受入量に占める割合は約25%となっており、セメント産業に対する有効利用の依存度の高さが浮き彫りとなった。反面、セメント生産量は減少傾向にあり、利用用途をセメント原材料に依存し続けた場合、処理費用が高額となり不経済となる公算が高い。よって、その他の利用用途開拓が今後の循環利用における重要な課題であることを確認した。

石炭灰の利用用途開拓の方向性の検討に先立ち、資源有効利用促進法による他方の指定副産物である建設廃棄物の循環利用に対する意識について実態調査を行った。

調査は、建材製造業者、排出事業者、中間処理業者の立場の異なる3業種に対するアンケートにより行った。

建材製造業者は副産物の製品利用、排出事業者は材料選定における環境負荷の考慮、中間処理業者は再資源化量の増大や環境負荷の低減に利点を見出すことといった点でそれぞれ

れ取り組みを行っていることが明らかとなったことから、3業種間で廃棄物の削減、および再資源化に対する意識共有がなされており、産業副産物の循環利用においては利害関係者間の意識共有が必要条件であることが示された。

これらの結果から、石炭灰の循環利用に対する課題を整理し、新規利用用途のシェア獲得に際し、当該利用分野における石炭灰利用製品の性能保証および付加価値とその効果の周知、標準化は立場の異なる利害関係者間の意識共有に資することが示された。

第4章 フライアッシュコンクリート耐久性評価実態の調査

フライアッシュコンクリートの耐久性評価の実態の把握とその課題の明確化を目的とする調査を行った。調査は、促進中性化試験 40 編、長期屋外曝露試験 7 編の既往研究からコンクリートの調合、圧縮強度、中性化深さおよび中性化速度係数を収集し、統計処理を施すことにより行った。

促進試験の分析結果から、セメントの一部をフライアッシュで置換したコンクリートの中性化進行は無置換コンクリートと比較して中性化進行が速くなることが明らかとなった。

また、置換率 20%のフライアッシュコンクリートの中性化進行は水結合材比が 15%程度大きい無置換コンクリートと概ね一致することが明らかとなった。

これらの結果から、促進試験による評価においてはフライアッシュのセメント置換による中性化抵抗性への寄与は非常に小さなものとなることが明らかとなった。

続いて、フライアッシュの中性化抵抗性に対する寄与を定量的に評価する手法としてフライアッシュの結合材寄与率の算定を行った。ここでは、結合材寄与率を『フライアッシュが普通ポルトランドセメントの代替として中性化抵抗性に寄与する割合』と定義した。

結合材寄与率は、無置換コンクリートとフライアッシュコンクリートの中性化速度係数と水結合材比の線形関係より、コンクリート中の実効結合材フライアッシュ量を求め、全フライアッシュ量で除すことにより算出した。

促進試験における結合材寄与率は、平均して 4.9%であった。一方、屋外曝露試験における結合材寄与率は平均して 40.4%であった。

促進中性化試験の結合材寄与率は屋外曝露試験の 1/8 程度に留まることから、現在の促進中性化試験によるフライアッシュの中性化抵抗性に対する評価は長期的な反応の実態に即したものとはいえないことが明らかとなった。

第5章 長期的性状変化を考慮した耐久性評価方法の検討

フライアッシュの長期的反応の実態を考慮した促進中性化試験方法の検討を目的に、水セメント比、フライアッシュの混合方法、置換率、および養生環境温度および水分を変動因子とした実験を行った。

養生条件は、気中養生では 20°C、60%RH および 40°C、70%RH の 2 種類、水中養生では水温 20°C の計 3 種類を設定した。

20°Cの環境下ではフライアッシュの反応が励起せず、圧縮強度、中性化速度係数ともに無置換コンクリートと比較して性能が低下する傾向が確認された。一方、40°Cの環境ではフライアッシュコンクリートの強度発現性は材齢初期より高くなり、中性化速度係数は小さくなる傾向にあった。これらのことから、40°C環境においてフライアッシュの反応は十分に活発化されたといえる。また、圧縮強度と中性化速度係数は養生環境の温度によらず相関性を示し、圧縮強度を指標とすることで中性化進行の予測が可能となる既往研究の調査より得られた知見と同様の結果を確認した。

異なる養生温度環境におけるフライアッシュの結合材寄与率を第4章に示した方法を用いて算定した結果、20°C環境における結合材寄与率は平均23.1%であった。一方、40°C環境における結合材寄与率は平均78.1%であった。高温環境下で養生を施すことにより、結合材寄与率は3.4倍と著しく向上することが示された。

コンクリートの積算温度と結合材寄与率は比例すると仮定し、屋外暴露試験結果の分析結果と同等の結合材寄与率を得る積算温度を算出した。これを現在の促進中性化試験の前養生期間である8週に当てはめた場合、約26°Cの養生温度となる。また、結合材寄与率とポゾラン反応率の類似性より検討した養生温度の数値は約29°Cであった。

これらの結果から、フライアッシュコンクリートの促進中性化試験においては、前養生期間の温度を25~30°Cとし、側面封かん養生を施せば、フライアッシュの結合材寄与率を長期的性状の実態に即しおおよそ過不足なく評価可能であることを示した。

第6章 品質評価の改善にともなう利用方法の提案とその効果の試算

耐久性評価に関する知見から、フライアッシュを含む石炭灰の有効利用方法を想定したモデルを作成し、資源循環の成立する諸条件について検討することを目的とした。

年間に最終処分される石炭灰量と、海外に輸出される石炭灰量、および今後の石炭灰発生量の増大を総合的に勘案し、本検討では年間200万tの石炭灰の利用を循環利用目標とするモデルパターンを作成することとした。

モデルパターンは、結合材寄与フライアッシュ量を当該セメント量と置換する低炭素型と、セメント量を確保し細骨材として置換したフライアッシュのうち、結合材として寄与するフライアッシュを耐久性の増分としてとらえる長寿命型の2種類を設定した。

低炭素型モデルの試算は、長期屋外暴露を行った既往の文献を参考にフライアッシュの結合材寄与率を0.3とし、フライアッシュの置換率ごとにセメント削減量およびフライアッシュ利用増加量を算出することにより行った。

また、セメントおよびフライアッシュのインベントリデータからCO₂削減量を算定した。試算結果から、置換率20%のフライアッシュセメントが全セメント生産量の15%のシェアを獲得すれば循環利用目標は達成可能であり、その際のCO₂削減量は約45万tであることを示した。

長寿命型モデルの試算においてはフライアッシュの結合材寄与率を低炭素型と同様に設

定し、鉄筋コンクリート構造物の性能限界を中性化深さ 20mm 到達年数と設定した。性能限界を 1.2, 1.5 倍と設定した際に増加する単位フライアッシュ量を求め、年間に生産される生コンクリート全てに少量のフライアッシュを添加した際に増加する利用総量を算定した。試算結果から、循環利用目標である 200 万 t のフライアッシュは全ての生コンクリートの耐用年数を少なくとも 1.2 倍以上に向上させるのに十分な量であることを示した。

第3節 結び

本研究は、耐久性に対する適切な評価を通じてフライアッシュの資源循環に資する利用の拡大方法、およびその効果を明確化することを目的とし、産業副産物処理の実態調査、既往文献の試験結果の抽出および統計処理、評価指標の実証実験、利用拡大の付帯効果の試算による検討を行った。

一方、長期的性状変化を考慮した中性化抵抗性評価は試算の段階に留まっており、促進開始前の養生温度の精査等、評価精度の向上に対し課題を残すこととなった。また、フライアッシュの資源循環を巡る試算結果は理論上最大値を算出したに過ぎず、より実現性の高い資源循環の成立諸条件の検討も今後の課題として挙げられる。

上記課題は残すものの、フライアッシュの利用拡大のあり方、および方向性について資源循環の視点から足掛かりを構築できたものと思う。

僭越ながら本研究の成果が、今後の石炭灰の循環利用量の拡大、ひいては資源循環型社会構築のための礎石とならんことを心より祈念し、本論文の結びとする。

第4節 謝辞

本論文は、私が建築材料研究室に在籍して以来、7年間にわたり行ってきた研究を取りまとめたものです。

実験、検討に際し、中国電力株式会社ならびに当研究室の所属学生、および修了生、卒業生には多大なご協力を賜りました。また、電源開発株式会社の石川嘉崇氏には研究内容について熱心なご指導、ご鞭撻を賜りました。

副産物処理に係るアンケート調査においては社団法人 日本建材・住宅設備産業協会が実施した再資源化資材品質基準調査委員会において調査したものを一部含みます。関係諸氏に厚く謝意を表します。さらに、本論文の中核となったフライアッシュの結合材寄与率は、既往の数多くの文献の試験値を収集し、分析することによりはじめて導出することが可能となりました。試験値を信頼し引用させていただいた文献の執筆者各位に厚く謝意を表します。

また、本論文の査読および審査にあたり、小山明男教授(主査)のほか、高木仁之教授(副査)、小林正人教授(副査)にご指導、ご助言をいただきました。

以上、多くの方々のご指導、ご協力あってこそ、本論文は博士論文として形を成すことができました。心より御礼申し上げます。

末筆となりましたが、ものの考え方、ものの見方を一からご指導下さいました菊池雅史元教授、厳しく、ときに優しく懇切丁寧にご指導して下さいました小山明男教授、並びに、私の非常に長い学生生活、博士課程修了までを支えてくれた祖父母と母、友人達に深く感謝の意を示し、本論文を結びます。

2017年2月

今川 健一