

舗装材料としての下水汚泥焼却灰の
複合的利用技術の開発に関する研究

2013年 9月

岩手大学大学院工学研究科
機械・社会環境システム工学専攻

佐藤 佳之

第 1 章 序論	- 1 -
1.1 本研究の背景と目的	- 2 -
1.2 本論文の構成	- 6 -
参考文献	- 7 -
第 2 章 下水汚泥焼却灰の利用技術に関する研究の動向	- 8 -
2.1 下水汚泥焼却灰の発生と現状	- 9 -
2.1.1 下水汚泥の発生	- 9 -
2.1.2 下水汚泥焼却灰の発生	- 11 -
2.1.3 下水汚泥の焼却処理技術の動向	- 13 -
2.2 下水汚泥焼却灰の建設資材利用に関する既往の研究	- 17 -
2.2.1 下水汚泥焼却灰に含まれる重金属類の把握および対策 ..	- 17 -
2.2.1.1 下水汚泥中の重金属類の実態把握	- 17 -
2.2.1.2 重金属類の環境影響評価	- 19 -
2.2.1.3 焼却灰からの重金属類の溶出対策	- 21 -
2.2.2 下水汚泥焼却灰を利用したリサイクル製品	- 23 -
2.2.2.1 舗装材料	- 23 -
2.2.2.2 モルタル・コンクリート用混和材料	- 26 -
2.2.2.3 その他の用途への利用	- 27 -
2.2.3 焼却灰の有効利用における課題	- 27 -
2.2.4 舗装材料としての有効利用	- 28 -
2.3 結言	- 30 -
参考文献	- 33 -
第 3 章 下水汚泥焼却灰の特性	- 37 -
3.1 諸言	- 38 -
3.2 実験方法	- 39 -
3.2.1 供試材料	- 39 -
3.2.2 評価方法	- 39 -
3.3 実験結果および考察	- 41 -

3.3.1	焼却灰の物理特性	41 -
3.3.2	焼却灰の化学特性	43 -
3.3.3	焼却灰の粒子特性	46 -
3.3.4	焼却灰の安全性	50 -
3.4	結言	51 -
	参考文献	52 -
第4章	下水汚泥焼却灰の路盤材としての利用	53 -
4.1	諸言	54 -
4.2	実験方法	55 -
4.2.1	供試材料	55 -
4.2.2	混合固化破砕物の作製方法	55 -
4.2.3	評価方法	57 -
4.3	実験結果および考察	59 -
4.3.1	混合固化物の特性	59 -
4.3.2	混合破砕物の路盤材としての特性	59 -
4.3.2.1	突固め前後の混合破砕物の粒度	59 -
4.3.2.2	混合破砕物の締固め特性	62 -
4.3.2.3	混合破砕物の支持力	64 -
4.4	焼却灰の改質による混合固化物の品質向上	65 -
4.4.1	焼却灰の改質	65 -
4.4.1.1	焼却灰の粉碎処理	66 -
4.4.1.2	焼却灰の脱リン処理	66 -
4.4.1.3	粉碎灰および脱リン灰の特性	68 -
4.4.2	粉碎灰・脱リン灰を用いた混合固化物の特性	73 -
4.4.3	粉碎灰・脱リン灰を用いた混合破砕物の路盤材としての品質	76 -
4.4.3.1	突固め前後の混合破砕物の粒度	76 -
4.4.3.2	混合破砕物の締固め特性	78 -

4.4.3.3	混合破碎物の支持力	79 -
4.4.3.4	混合破碎物のすり減り減量	81 -
4.5	混合破碎物の安全性	82 -
4.6	結言	84 -
	参考文献	86 -
第5章	下水汚泥焼却灰のアスファルト混合物用フィラーとしての 利用	87 -
5.1	諸言	88 -
5.2	岩手県の焼却灰における適用性	89 -
5.2.1	実験方法	89 -
5.2.1.1	供試材料	89 -
5.2.1.2	アスファルト混合物の作製方法	89 -
5.2.1.3	評価方法	90 -
5.2.2	実験結果および考察	91 -
5.2.2.1	マーシャル特性	91 -
5.2.2.2	残留安定度	93 -
5.2.2.3	動的安定度	93 -
5.2.2.4	摩耗量	94 -
5.2.2.5	圧裂強度	96 -
5.2.2.6	焼却灰中の多孔質粗粒子の影響	97 -
5.3	焼却灰の改質および多種の焼却灰における適用性	99 -
5.3.1	実験方法	99 -
5.3.1.1	供試材料	99 -
5.3.1.2	焼却灰および脱リン灰の粉碎	101 -
5.3.1.3	アスファルト混合物の作製方法	105 -
5.3.1.4	評価方法	106 -
5.3.2	実験結果および考察	107 -
5.3.2.1	マーシャル特性	107 -

5.3.2.2	動的安定度.....	- 110 -
5.3.2.3	残留安定度.....	- 111 -
5.4	残留安定度低下の検証試験.....	- 112 -
5.4.1	実験方法.....	- 113 -
5.4.1.1	簡易供試体による耐水性試験.....	- 113 -
5.4.1.2	電位差滴定法による電荷量の測定.....	- 113 -
5.4.2	実験結果および考察.....	- 116 -
5.5	焼却灰を利用したアスファルト混合物の安全性.....	- 119 -
5.6	結言.....	- 122 -
	参考文献.....	- 124 -
第 6 章	下水汚泥焼却灰の利用可能量評価 および利用コスト試算	- 126 -
6.1	諸言.....	- 127 -
6.2	開発した手法による焼却灰の利用可能量.....	- 128 -
6.2.1	利用可能量算出の条件設定.....	- 128 -
6.2.2	利用可能量の試算.....	- 131 -
6.3	開発した手法による焼却灰利用コストの試算.....	- 135 -
6.3.1	利用コスト算出の条件設定.....	- 135 -
6.3.2	利用コストの試算.....	- 138 -
6.4	結言.....	- 139 -
	参考文献.....	- 142 -
第 7 章	総括	- 143 -
	謝 辞	- 149 -

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景と目的

下水道は人間の文化的かつ衛生的な都市生活を支える基盤施設であり、世界各国の都市で古くから整備が進められてきた。我が国においては明治時代から下水道整備が開始され、明治33年には土地の清潔の保持を目的とした旧下水道法が制定された。その後時代の要請に応じて下水道の役割は広がり、都市の浸水防除・環境整備、公共用水域の保全が目的に加えられ、下水道整備が国の重点施策として積極的に進められた。この結果、全人口に対する下水道利用可能人口の割合（下水道普及率）は年々向上し、平成23年末には75.8%に達している（Fig1-1）。現在では下水道整備の進捗に伴い、下水道資源の有効利用や循環型社会への貢献に至るまで、下水道に求められる役割は広がりを見せている（Fig.1-2）。

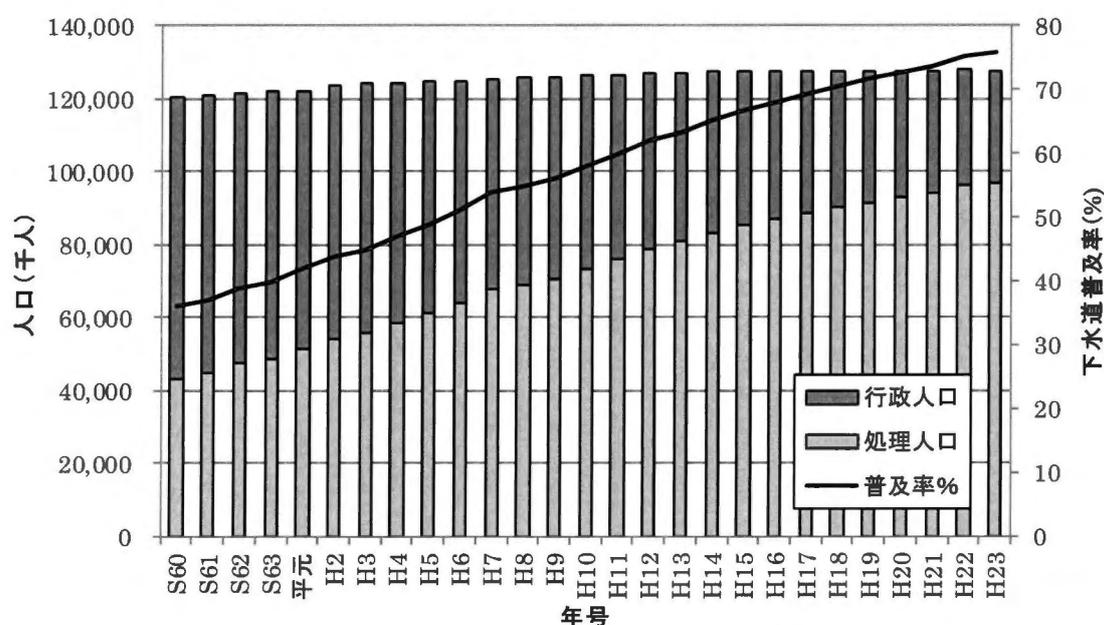


Fig.1-1 下水道普及率および行政人口・処理人口の推移¹⁾

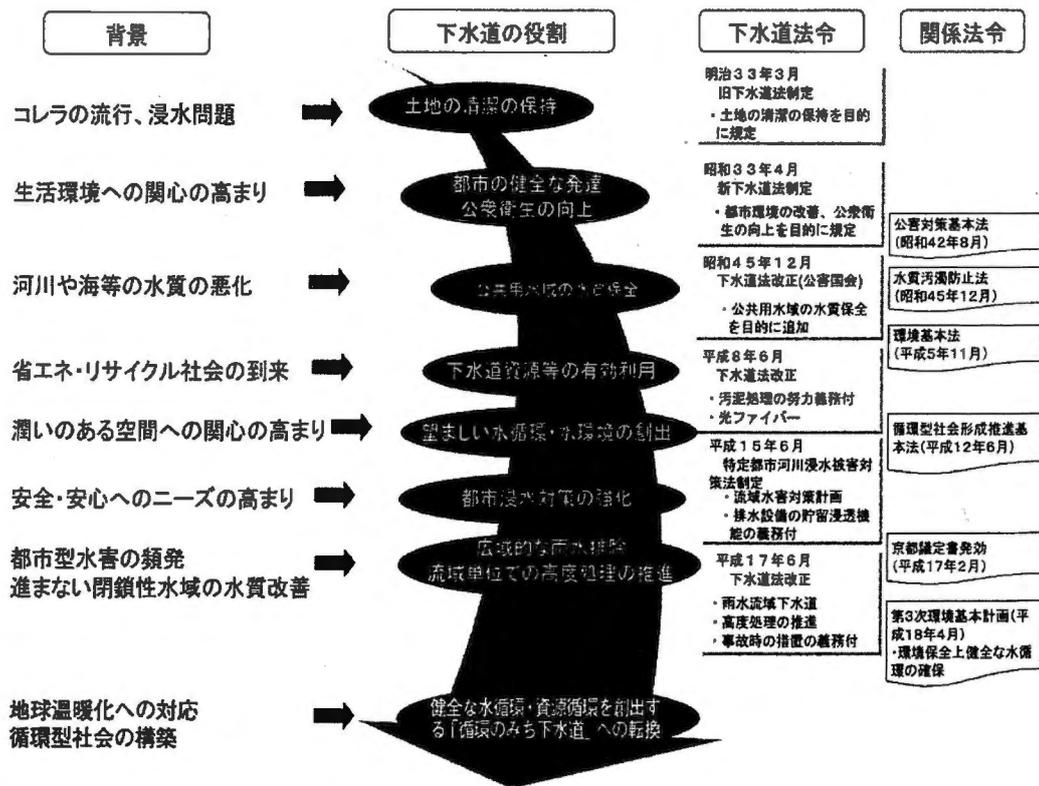


Fig.1-2 下水道の役割の変遷²⁾

下水道施設は、管路と終末処理場の2種に大別され、管路は下水の集約、終末処理場は下水の水処理をそれぞれ担っている。このうち終末処理場では、水処理の過程において、流入下水中の夾雑物のほか、生物処理に利用される活性汚泥の余剰分が下水汚泥として発生し、その8割が焼却処理されて焼却灰となる。流入下水量に対する焼却灰の発生割合は、概ね0.002wt%程であり、H22年度の焼却灰の発生量は221千tにも達した³⁾。この焼却灰は多くがセメント原料として利用されているが、未だ埋め立て量も多く、新たな有効利用方法の開発が求められている。

そこで本検討では、この焼却灰の有効利用について、具体的な利用方法の提案を目的とした検討を行うこととした。本研究の論文構成をFig.1-3に示す。

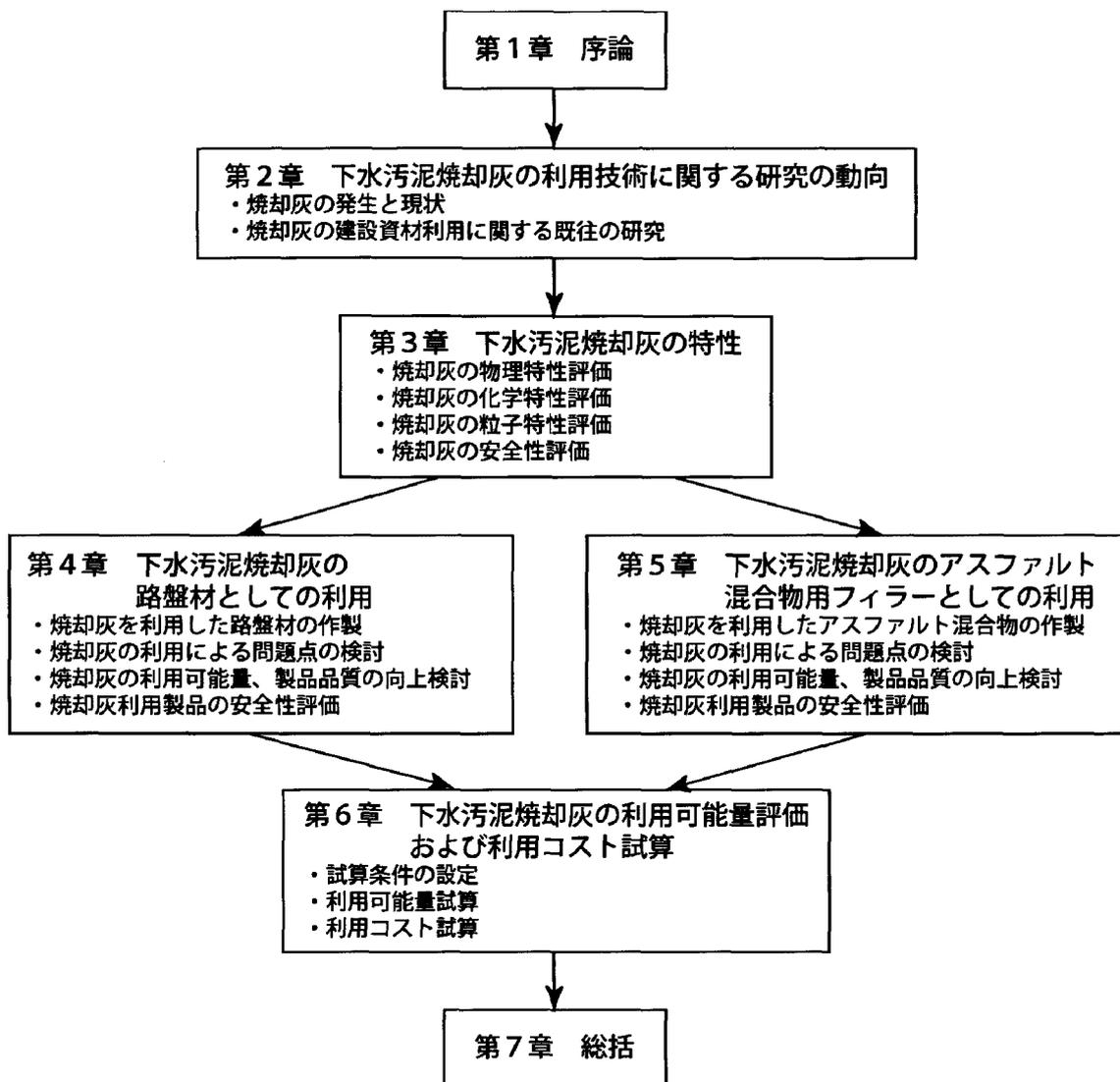


Fig.1-3 本研究の論文構成

本研究では、焼却灰の新たな有効利用技術を開発して、有効利用量を確保することを第一の目的とした。そこで、建設材料に着目し、特に舗装材料への利用が有望であることから、舗装材料としての活用技術について検討し、さらに、実際に利用製品を作製してその品質と利用可能量を検討した。

一般的な舗装構成を Fig.1-4 に示す。舗装に用いられる各層のうち、本研究で検討する舗装材料は、路盤材とアスファルト混合物の2つを取り上げ、舗装構造体全体にわたって利用することを目的とした。な

お、焼却灰は粉体状であり環境中で飛散しやすいこと、単体では支持力が期待できないことから、路盤材としての利用事例はほとんど無い。本検討では、硬化前の生コンクリートと焼却灰を混合固化後破碎し、これを路盤材として適用する手法を提案する。この手法によれば、焼却灰単体で用いるよりも支持力が向上し、施工時のハンドリングも大幅に向上することが期待される。本研究では、作製した路盤材の基礎的な性質を確認することで課題点を摘出し、焼却灰の持つ粉体特性を明らかにすることで、課題の解決と焼却灰の利用量増加手法を検討した。

アスファルト製品への利用については、アスファルト混合物用フィラーとしての利用を検討した。製品利用検討にあたっては、焼却灰の粉体特性の面から焼却灰の利用量増加手法を検討した。さらに、種々の焼却灰を用い、それぞれの粉体特性からアスファルト混合物の特性および品質に及ぼす影響を総括的に考察した。このように、各舗装構造体の各部分へ焼却灰を利用し、その各々の利用量を増大させることで、埋立て処分以外の焼却灰の有効利用法に繋がる総合的な利用量の確保を主な研究の目的とした。

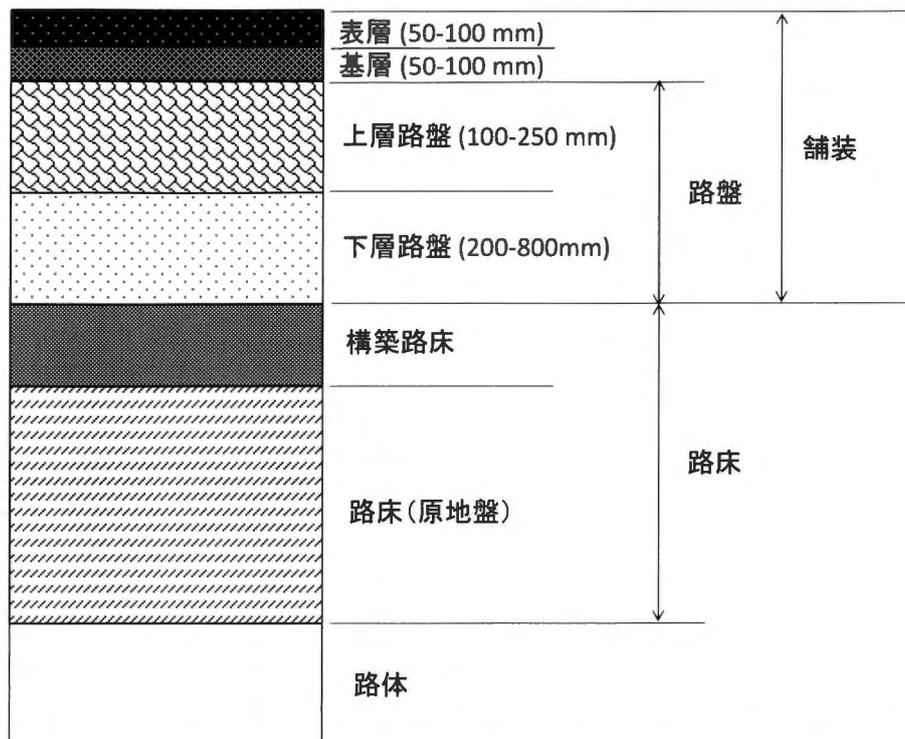


Fig.1-4 アスファルト舗装各層の名称と一般的な舗装厚

1.2 本論文の構成

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、既往の焼却灰の利用に関連した研究について整理し、下水汚泥の焼却技術の動向、下水汚泥焼却灰の舗装材料としての利用の優位性と現状の課題について述べた。すなわち、下水汚泥の焼却および焼却灰中の重金属について現状と既往の知見を挙げ、焼却灰を建設材料に利用する場合に要求される環境安全性等についても触れた。さらに舗装材料としての利用実績量と既往研究の状況を挙げ、本研究で取り上げる理由を整理した。

第3章では、焼却灰の性質について明らかにするため、代表的な焼却灰について物性分析、化学分析、粒子分析および環境安全性等の基礎検討を行い、舗装材料として利用する上で予想される課題をあらかじめ把握した。

第4章では、焼却灰の路盤材としての新たな利用方法として、焼却

灰を生コンクリートと混合し、固化した後に破碎し、破碎物を路盤材として使用する手法を検討した。また、焼却灰の利用に伴う路盤材の品質影響について考察し、利用時の課題点を明らかにした上で、焼却灰試料を前処理によって改質して、路盤材の品質向上と利用可能量の増加を試みた。

第5章では、焼却灰をアスファルト混合物用フィラーとして代替利用する手法を検討した。すなわち、通常使用される石灰石微粉末の代替材料として、焼却灰を置き換えて使用する手法であり、焼却灰の置換量とアスファルト混合物の性質を把握した。さらに、第4章と同様、前処理によって改質した焼却灰試料を使用し、アスファルト混合物の品質向上と利用可能量の増加について検討した。

第6章では、第4章および第5章の検討結果より、焼却灰の利用可能量と利用コストを試算した。利用可能量の試算は舗装材料当たりの利用可能量と舗装面積当たりの利用可能量、さらに舗装材料の出荷量などから整理して、本研究による利用案とその利用可能量についてまとめ、焼却灰の排出量と比較した。利用コストの試算は一定の仮定の元、既存の埋め立て、セメント原料化による焼却灰の受け入れ料金と比較する形で行い、本手法の実現可能性を確認した。

第7章は総括であり、各章のまとめと残された課題について述べた。以上、本論文は計7章からなる。

参考文献

- 1) 平成23年度末の下水道整備状況について：国土交通省 HP (2013)
http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000169.html
- 2) 平成24年度下水道白書 日本の下水道：日本下水道協会 (2012)
p.143
- 3) 平成22年度版 下水道統計 第67号：日本下水道協会(2012)

第 2 章

下水汚泥焼却灰の利用技術に関する研究の動向

2.1 下水汚泥焼却灰の発生と現状

2.1.1 下水汚泥の発生

下水終末処理場の基本的な処理フローを Fig2-1 に示す。まず、流入下水中の固形分を最初沈澱池で取り除く。次に、反応槽で下水に酸素を吹き込み好気性の微生物によって下水中の有機物を分解する。さらに、放流先の要求水質により脱窒および脱磷処理を行い、最終的には沈殿処理後の上澄みを消毒して放流する。この時、最初沈澱池で除去した生汚泥および反応槽で増殖した微生物である余剰汚泥が下水汚泥として発生し、水処理施設とは別の汚泥処理施設で処理される。

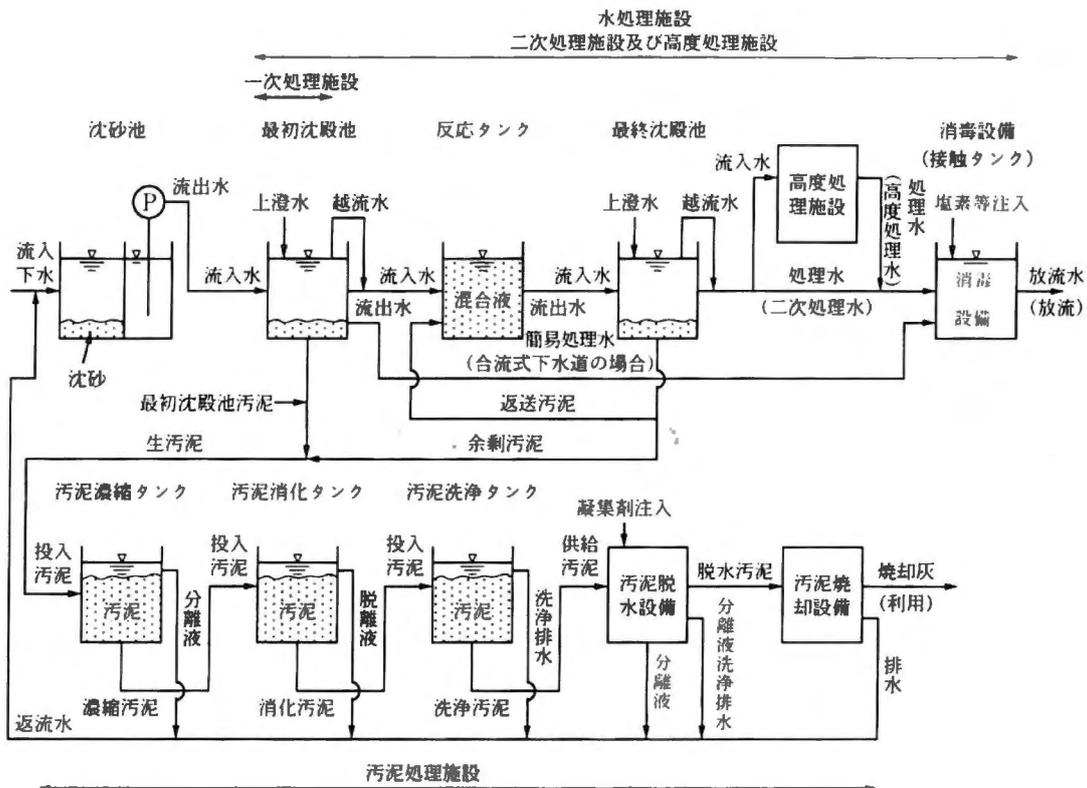


Fig.2-1 水処理および汚泥処理フロー¹⁾

この下水汚泥は水分を大量に含んでいるため、脱水による減容化を基本とした汚泥処理が行われる。汚泥処理の一般的なフローおよび含水率の変化を Fig.2-2 に示す。下水汚泥の発生時の含水率は 95%程度であるが、重力濃縮後の濃縮汚泥で 90%に低減され、さらに機械脱水後の脱水汚泥で 75%程度まで脱水される。近年では、機械脱水時に凝集剤添加等を行って脱水効率を上げる方法が採用されているが、含水率の低下は限定的であり約 65%程度が限度である。汚泥容積を大幅に縮減させるためには、熱処理による脱水が必要となる。

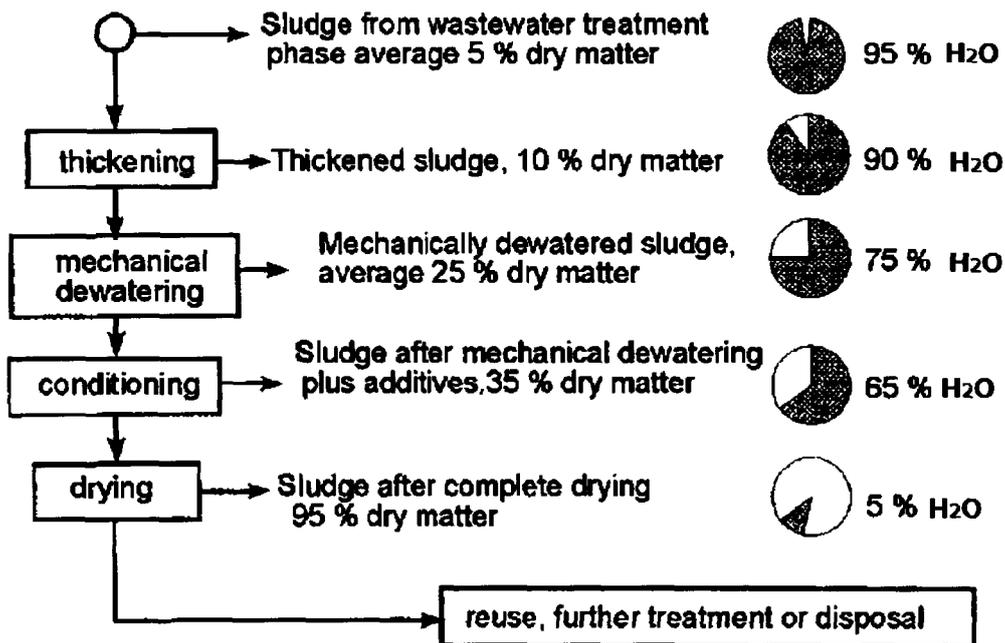


Fig.2-2 汚泥処理工程毎の含水率の変化²⁾

2.1.2 下水汚泥焼却灰の発生

国内の下水汚泥発生量とその処理形態の内訳の推移を Fig.2-3 に示す。下水道整備の進捗に伴い、国内の下水汚泥発生量は年々増加しており、下水汚泥は発生現物量ベースでは、国内の産業廃棄物発生量の約 2 割を占めている。これらを鑑み、平成 8 年の下水道法改正においては、脱水、焼却および再生利用等による汚泥処理量の減量が努力義務として明記された。国内の汚泥減容化処理は、Fig.2-3 に示すように焼却処理が主体となっている。焼却処理は減容量および病原菌・毒性物質の熱分解による無害化の点で有利とされ、特に日本においては、埋立て地の制約などから世界各国と比較して焼却処理の比率が高い²⁾。直近のデータによれば、平成 22 年度の下水汚泥発生量は 2,464 千 t(濃縮汚泥固形物基準)であり、その約 8 割が焼却処理され、221 千 t の下水汚泥焼却灰(以下、本研究では焼却灰という)が発生したとされる³⁾。

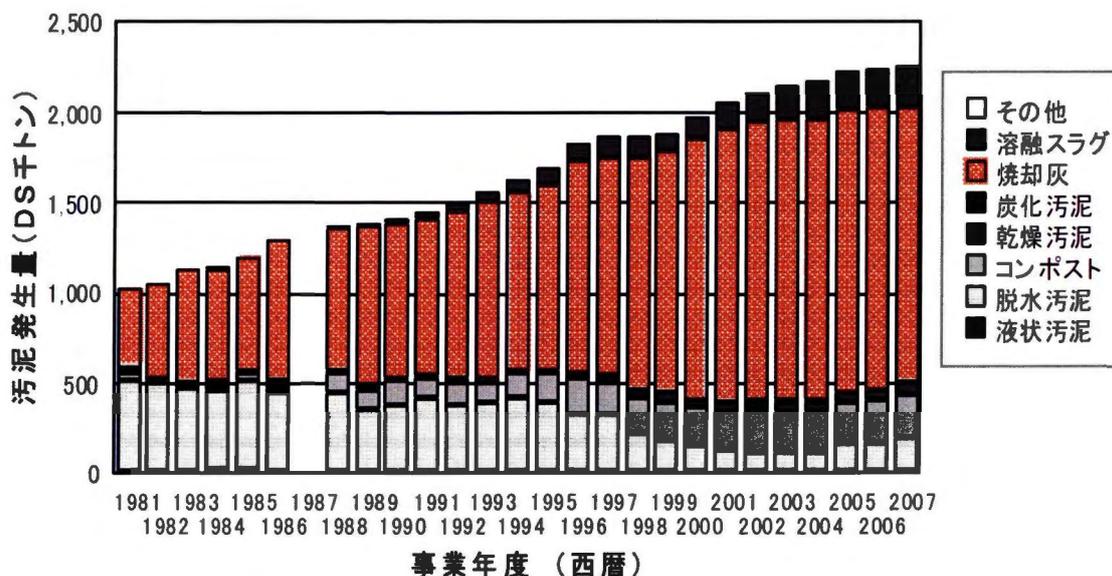


Fig.2-3 下水汚泥発生量とその処理形態別内訳⁴⁾
(濃縮汚泥固形物発生量基準による)

平成 22 年度の焼却灰の処理方法別の実績値を Fig.2-4 に、代表的な焼却灰の外観を Fig2-5 に示す。有効利用先としてはセメント処理が主流であるが、その他に有効な利用法が確立されておらず、未だ埋め立て処分が多いのが現状である。

※焼却灰発生量 221 千 t

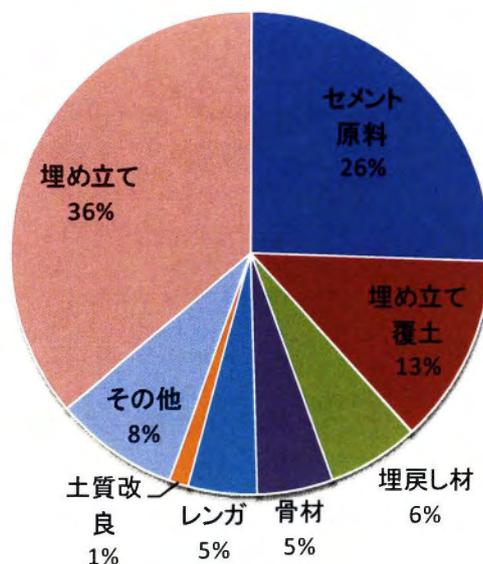


Fig.2-4 日本における焼却灰発生量に対する処理方法別の構成比³⁾

(平成 22 年度下水道統計より作成)



Fig.2-5 焼却灰の外観例 (岩手県都南浄化センター焼却灰)

2.1.3 下水汚泥の焼却処理技術の動向

下水汚泥の焼却は、主に流動床式焼却炉が用いられ、多くの場合、810℃～830℃で燃焼処理されている。流動床式焼却炉の構造例をFig.2-6に示す。この方式は、空気を吹き込み流動状態とした加熱砂層に被焼却物を投入し燃焼させる形式であり、含水比の高い汚泥であってもほぼ完全燃焼が可能であること、汚泥の組成や含水比の変化に対して安定であること、およびメンテナンスコストが比較的安価であることから、下水汚泥の焼却炉として急速に普及し、年々採用割合が高まっている。平成22年度末現在、国内の終末処理場では266基の焼却炉が稼働しており、そのうち87%にあたる231基で流動床式焼却炉が採用されている³⁾。

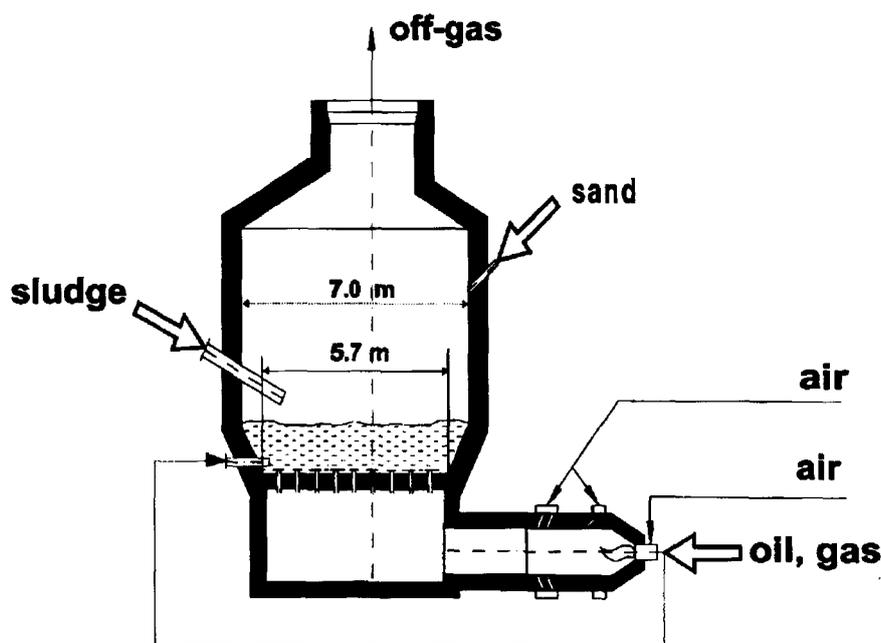


Fig.2-6 気泡式流動床式焼却炉の構造例²⁾

下水汚泥の焼却技術は、焼却時に発生する温暖化ガスの削減に着目した検討が行われている。特に N_2O は CO_2 の 310 倍の温室効果を有しているため、下水汚泥焼却時の N_2O の排出量に関する検討が進められてきた。J. Werther は下水汚泥の焼却における総説の中で、燃焼ガス中の酸素濃度と比例して亜酸化窒素の排出濃度が高くなることを示している²⁾ (Fig.2-7)。安田らは、800℃以上の条件で温度とガスの滞留時間に比例して N_2O の分解率が高まることを指摘した⁵⁾ (Fig2-8)。宮本らは、実炉を用いて高温燃焼試験を実施し、フリーボード上部の目標温度を 810℃から 850℃に上昇させて運転したところ、 N_2O の排出量が 50%~80%低減したことを報告した⁶⁾ (Fig.2-9)。

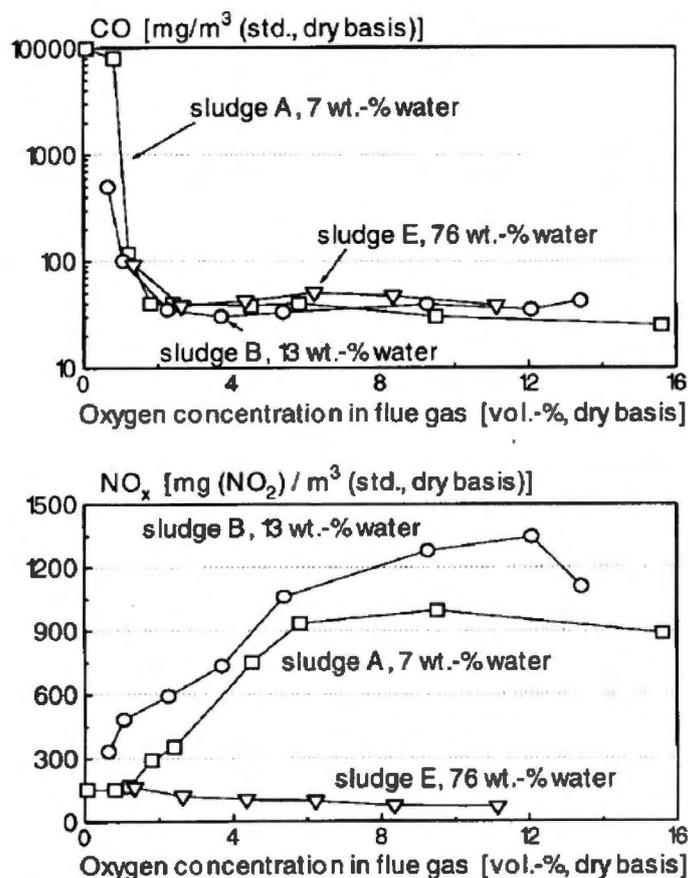


Fig.2-7 燃焼ガス中の酸素濃度と排出ガス中の CO_2 , NO_x の関係²⁾

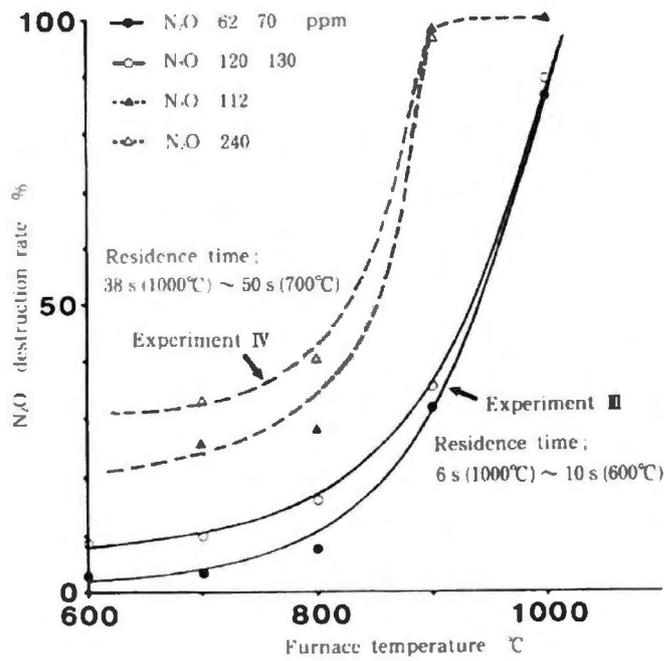


Fig.2-8 異なる燃焼温度における N_2O の分解率 ⁵⁾

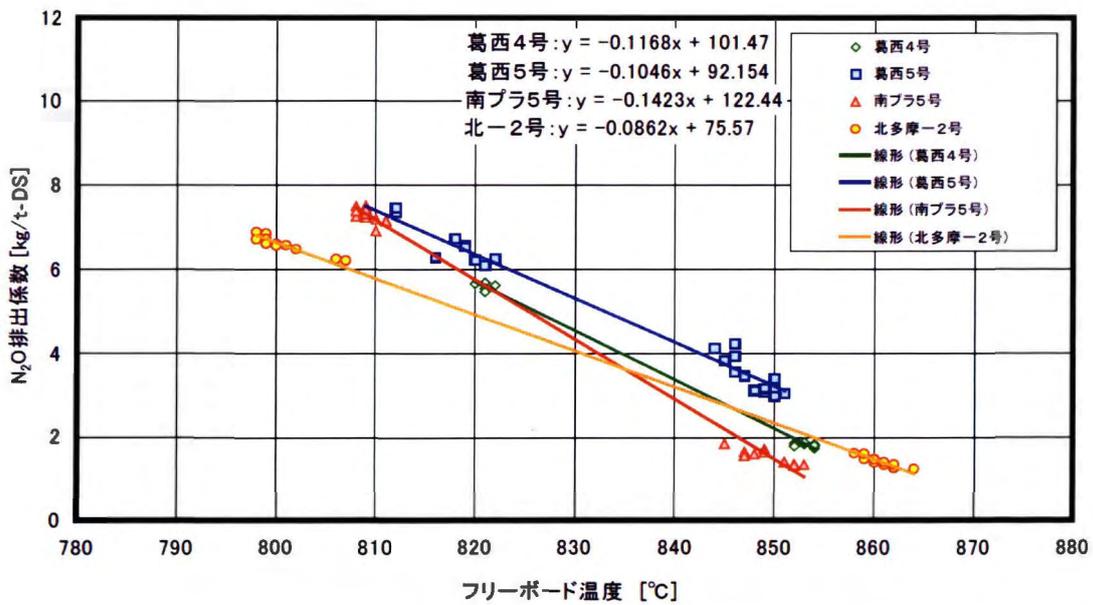


Fig.2-9 フリーボード温度と N_2O 排出係数の関係 ⁶⁾

このように、低空気比と高温条件での燃焼が N_2O 排出量の低減に有効であるとされている。東京都は、既存の流動床式焼却炉の空気比と流動砂量を調整し、オペレータの運転温度管理によって N_2O を 50%削減した⁷⁾。しかし、この手法は鋭敏な運転管理が必要であり燃料の消費量が増加するため、近年では、燃費向上と N_2O 低減の両立を目指した多層燃焼、過給式燃焼その他の改良型の焼却炉が検討されている。

多層燃焼は、砂層部以外のフリーボード部からも燃焼空気を導入して局所的に高温部を形成する手法であり、従来の流動床炉での高温焼却よりも補助燃料を 4-21%低減できるとの試算がある⁸⁻¹⁰⁾。過給式燃焼は、炉内圧力を加圧して燃焼速度を上げ、炉内に高温領域を形成する手法であり、炉の容積が従来の流動床炉と比較して 70%程度とコンパクトで放熱量が少ないことから補助燃料を 25%削減でき、圧縮空気の流動プロアが不要となるため電力を 46%削減できるとした試算がある¹¹⁾。いずれの検討も、燃焼温度は 850℃を目標としており、これは焼却炉の耐熱性向上にかかるコスト増および N_2O 削減率から現実的な目標値として設定されている。各方式とも既に終末処理場への導入が始まっており、既存焼却炉の更新に合わせ、今後は高温焼却に対応した焼却炉が増加すると思われる。なお、高岡らは複数の焼却灰を用いて熔融特性を調査し、焼却灰の軟化点を 1045-1320℃の範囲として報告した¹²⁾。したがって 850℃の焼却温度であっても下水汚泥は熔融に至らず、既存の焼却炉で排出される焼却灰と性質は大きく変わらないものと推察される。

焼却灰の有効利用を考慮し、焼却温度を制御した実施例として、焼却灰の粒子表面を熔融し、灰を球状化して利用する方法が提案されている¹³⁾。これは、焼却の後工程で、軟化点以上の燃焼温度としたバーナー炎を通し焼却灰を表面熔融状態とし、表面張力によって焼却灰を球形化処理するものである。しかし、現時点では適用実績はなく、焼却温度は今後も焼却灰の軟化点以下で行われると考えられる。

2.2 下水汚泥焼却灰の建設資材利用に関する既往の研究

廃棄物の有効利用を検討する場合、用途に応じた材料の物理化学的品質のみならず、環境安全性の評価が求められる。本項では、下水汚泥中の重金属を対象としたリスク評価の実態と評価方法、溶出抑制対策の既往の検討についてまとめ、次に建設資材への利用検討の先例、および課題と動向について述べる。

2.2.1 下水汚泥焼却灰に含まれる重金属類の把握および対策

2.2.1.1 下水汚泥中の重金属類の実態把握

下水中には工場排水や生活污水、さらに土壌由来の重金属が含まれ、これらの成分が下水汚泥に移行する。病原性微生物や有機分と異なり、重金属は焼却しても分解されないことから、汚泥処理によって濃縮され、焼却灰に残存する。したがって、下水汚泥中の重金属に関する挙動については多数の検討および報告がなされてきた。間淵らは、工場排水規制による公害対策が進んだことから、1975年以降汚泥中の重金属濃度が減少傾向にあり（Fig.2-10）、Cd、Pb、Cu および Zn は生活排水に由来する負荷量が高いと述べている¹⁴⁾。このうち Cd と Zn は大便に由来する割合が高いとされており¹⁵⁾、この種の重金属の下水への流入は、今後も継続的に続くものと考えられる。

平成13年の「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」（PRTR法）の施行を受け、独立行政法人土木研究所は重金属類の下水処理場の流入・汚泥への移行の実態について調査を行った¹⁶⁻¹⁸⁾。終末処理場内に流入した重金属類は、汚泥に濃縮されること、水処理工程での除去率および汚泥への移行率は処理場毎に異なることが示された。また、水処理での除去率は、固形性の場合に高く、溶解性で存在する場合は低いことを挙げている。また、処理場内からの物質収支から、Seのように焼却施設排水中に多量に含まれ、施設内を循環する元素が存在することを指摘している。

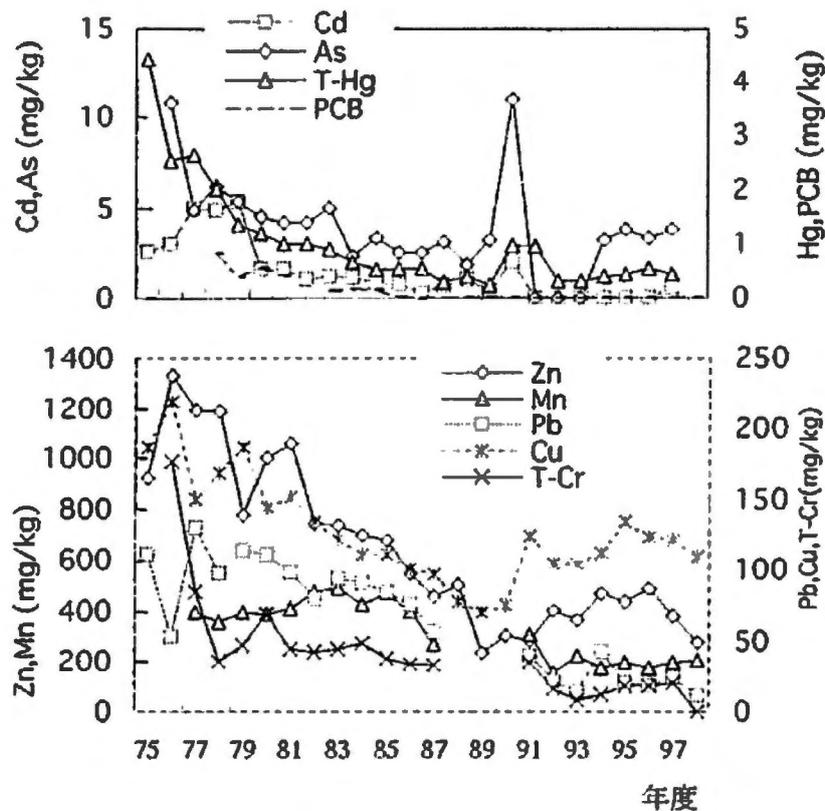


Fig.2-10 脱水汚泥中の重金属濃度の経時変化¹⁴⁾

なお、焼却灰からは As、Se、F、B の溶出の報告例があり、とりわけ As、Se の溶出の報告は数多く、焼却灰の利用上の課題となっている。この原因や挙動については、ほとんど解明されていないが、いくつかの検討および考察がなされている。愛知県の検討では、水処理における好気槽の汚泥滞留時間と Se 溶出量に正の相関があること、電気炉での燃焼時には Se が検出されないことから、燃焼時に気化した Se が集塵工程で温度低下し、灰の表面に凝縮した可能性を報告している¹⁹⁾。さらに東京都の検討では、脱水汚泥から焼却灰の移行率を調査し、Pb、As、Cr、Cd は大部分が焼却灰に移行するが、Se は約 4 割、Hg はわずかに数%しか移行しないことを報告している。同検討では、集塵装置での排ガス温度と有害元素の含有量の関係を調査し、Se、Hg で

は捕集時の温度が低いほど溶出量が高まること、サイクロン集塵機より電気集塵機で溶出量が高いことを指摘しており、各終末処理場での集塵形態が溶出量に関係することを示している²⁰⁾。これらの報告により、下水汚泥中に含まれる重金属類は各終末処理場において個別の確認が必要であると言える。

2.2.1.2 重金属類の環境影響評価

廃棄物をリサイクル材料として利用する場合、材料の環境安全性を評価する必要がある。特に農業利用の際には肥料取締法により汚泥肥料中の有害金属の許容含有量が定められている。しかし建設材料としての利用には公定規格がないため、実際の運用や安全性の判断は各自治体に委ねられてきた。多くの自治体では、土壤環境基準による溶出量を目安としている。

土木研究所が2006年度に示したマニュアルは、土壤環境基準で定める溶出量および含有量を満たすことを要求している²¹⁾。また、可能な限り上流での安全性確認を求め、原料の安全性が確認できない場合に限り、製品の環境安全性で評価することを求めている。

一方、国立環境研究所の肴倉は過剰な環境安全性の要求は避けるべきであるとし、安全品質レベルの合理的な設定とその評価法の提示を行っている²²⁾。これは供用シナリオを想定した試験群による評価であり、その評価フレーム案を Fig.2-11 に示す。特徴的な点を挙げると、建設材料は土壌と異なり、経口摂取の恐れがない製品であるため、含有量基準は要求していない。しかし、供用終了後の再々利用の想定、供用中の長期環境影響の想定等の試験を提案している。今後は土壤環境基準の単純な援用に代わり、実情に即した評価法が選定されてゆくものと考えられる。

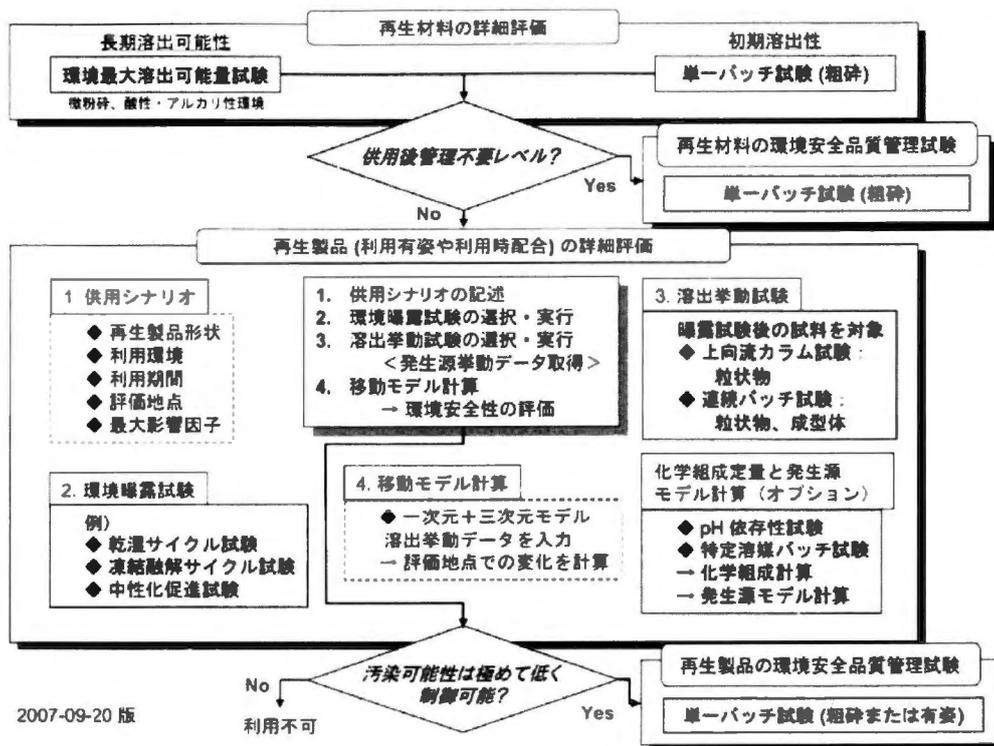


Fig.2-11 環境安全性評価フレーム (案) ²²⁾

2.2.1.3 焼却灰からの重金属類の溶出対策

焼却灰は我が国の法律上、「産業廃棄物」に該当するため、その収集運搬、処理および処分については許認可が必要となる。埋立て処分する場合、廃掃法に基づく埋立基準を満足する必要がある、有効利用する場合、前述した考え方にに基づく環境安全性を満足する必要がある。焼却灰の中には溶出量がこの基準値を超えるものがあり、これらの無害化対策が研究された。その代表例をいくつか挙げる。

i) 薬品添加と加熱処理の併用

最も良く知られている方法は、消石灰を添加することでヒ素およびセレンを難溶解性塩とし、溶出抑制を図る手法である。しかし、酸性条件や炭酸化条件では溶出抑制効果が失われる²³⁾。そこで東京都は、加熱処理を組合せ、チオ硫酸ナトリウムと硫酸第一鉄を添加し、150℃～200℃で加熱することで溶出抑制する手法を提案した²⁴⁾。しかし、横浜市の報告によれば、この手法であっても水銀とセレンの溶出が観察され²⁵⁾、薬品添加量や処理条件は焼却灰に応じ適宜設定する必要があることを指摘している。

ii) 消石灰添加と水熱処理

上述の消石灰添加の改良法として、消石灰を添加した後に高温・高圧の水を使用し、水熱条件下で焼却灰のシリカ分とカルシウム分を反応させてケイ酸カルシウムを合成し、結晶中にヒ素やセレンを封じ込める手法が提案されている。検討によれば、焼却灰重量に対しヒ素は5%以上、セレンは10%以上のケイ塩の添加により、土壤環境基準を満足できることが明らかとなっている²⁶⁾。しかしこの手法は、溶出量が大きい焼却灰には適用できないこと、反応時間を20時間と長く取る必要がある、設備費、維持費とも高価であることが課題である。

iii) セメント固化

セメントおよび水と焼却灰を練り混ぜて固化する手法で、セメント中の水酸化カルシウムによる水酸化物または難溶性塩の形成、セメント水和物への物理的な吸着により不溶化が達成されるとされる²⁷⁾。この手法は、固化物の有効利用が課題である。

iv) キレート処理

焼却灰に高炉セメント、キレート剤、水を加えて混合した後、生石灰を添加して混合する手法であり、金沢市により検討された²⁸⁾。キレート錯体により、有害金属を錯体内に封じ込めることで不溶化を達成させる。金沢市では、焼却灰を民間企業（株式会社金沢舗道）が引取り、キレート処理プラントで焼却灰の不溶化処理を行った後に、アスファルト混合物用フィラーとして販売を行っている。

2.2.2 下水汚泥焼却灰を利用したリサイクル製品

前節では、リサイクル原料としての焼却灰に着目し、焼却にかかる技術動向や含有重金属、溶出抑制などの安全性に着目した。本節では、下水汚泥の利用用途に着目して、建設資材としてのリサイクル利用の検討例を取り上げる。

2.2.2.1 舗装材料

舗装材料とは「舗装を構成する各層に使用される材料」であり、表層・基層材料、コンクリート版用材料、路盤材料および構築路床があり、さらにそれらを構成する舗装用素材と加工品がある。Table 2-1 に舗装材料の例を示す。

Table 2-1 舗装を構成する材料の例²⁹⁾

区分	主な舗装用材料	主な舗装用素材と加工品
表層・基層	アスファルト混合物	瀝青材料、骨材、フィラー
	アスファルト表面処理材料	瀝青材料、骨材、セメント
	樹脂系混合物	樹脂系結合材料、骨材、フィラー、顔料
	樹脂系表面処理材料	樹脂系結合材料、骨材、顔料
	ブロック・タイル系材料	セメント、骨材、混和材料、水、顔料、粘土、長石、陶石、天然石
	木質系材料	木、樹脂、瀝青材料、防腐剤
	土系材料	土、セメント、石灰、瀝青材料、固化材
コンクリート版	コンクリート	セメント、骨材、混和材料、水
	ダウエルバー	鋼材、塗料
	タイバー	鋼材、塗料
	補強用鋼材	鋼材、組立用材料
	ひび割れ分散用鋼材	鋼材、組立用材料、鉄網
	目地板	杉板、瀝青系目地板
	目地材	注入目地材
アスファルト中間層	アスファルト混合物	瀝青材料、骨材、フィラー
路盤	安定処理路盤材料	瀝青材料、セメント、石灰、固化材、骨材
	粒状路盤材料	骨材
構築路床	盛土材料	盛土材
	安定処理材料	セメント、石灰、固化材、原地盛土
	ジオテキスタイル	不織布、織布、編物
	置換え材料	良質土
	凍上抑制層用材料	砂、切込砂利

1) 改良土および埋戻し材料としての利用

構築路床用舗装材料としては、土壌改良材への適用検討例がある。焼却灰の吸水性、焼却灰成分の水硬性に着目した利用方法であるが、名古屋市の検討によれば、焼却灰の添加によって含水率が低下し、高含水率掘削土の調整に有効であり、特に石灰系焼却灰で CBR の改善効果が高いことが報告されている³⁰⁾ (Fig.2-12)。しかし、この利用用途では土壌に単純に混合するのみであるため、環境安全性の確保が難しい。

環境安全性を考慮した手法として、赤木らは、川砂に焼却灰と高炉セメントを混合して流動化処理土とし、埋戻材として利用する手法を検討した³¹⁾。報告によれば、適切な固化材比とすることで強度を確保したうえ、ヒ素、セレンおよび六価クロムの溶出を抑制した製品を製作できるとした。横浜市では、この手法を用いて、PFI 事業により流動化処理土作製プラントを稼働させており、年間 7,000t の焼却灰が利用されている³²⁾。この手法は専用のプラントが必要であること、埋戻し土の需要に利用量が左右されるなどの理由から、現状では実用化例は少ない。

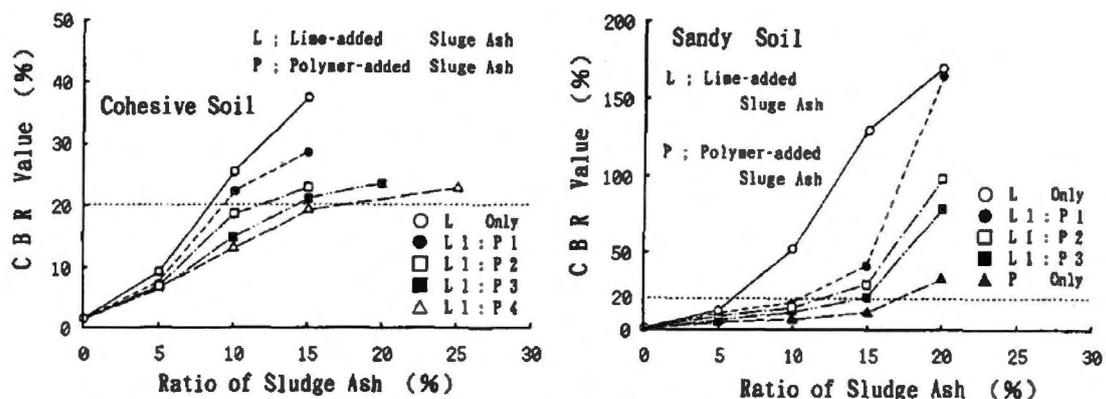


Fig.2-12 各種焼却灰の配合比および添加率と CBR の関係³⁰⁾

2) 路盤材としての利用

既往の検討においては、路盤材としての利用は下水汚泥溶融スラグの事例が多い。既に JIS 規格化 (JIS A 5031「一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化しコンクリート溶融スラグ骨材」) もなされており、有効利用の知見のほか、満足すべき目標値は整っている。しかし前述したように下水汚泥の縮減処理の主体は焼却であり、溶融スラグとしての利用量は少ない。

一方、焼却灰をそのまま路盤材として利用する検討はほとんどなされていない。焼却灰の平均粒径は 50~150 μ m 程度で、単体では製品としての支持力を確保するのが難しい上、施工時に飛散しやすいことから取扱いが困難である。都市ごみ系の焼却灰でセメントや消石灰の添加により支持力の改善を試みた例³³⁾が見られるが、均一な混合が難しく強度が一定しないため、実際の利用事例はほとんどない。したがって、焼却灰を路盤材として利用するためには製品性能の確保とハンドリングを考慮した新規の手法を開発する必要がある。

3) アスファルト混合物としての利用

アスファルト製品への利用は、アスファルト混合物用フィラー（以下、フィラーと言う）との代替利用検討が数多く報告されている³⁴⁻³⁷⁾など。この理由として、通常使用される炭酸カルシウム粉末（以下、石粉という）と焼却灰の粒径に近いことが挙げられる。既往の検討はいずれも、焼却灰の使用に伴って製品に配合すべきアスファルト量が増加することを指摘している。これは焼却灰の利用上の最大の課題となる。なお、いずれの検討も、石粉に対し焼却灰は 30wt%程度までの置換量とすべきと結論付けている。一方、マーシャル安定度や動的安定度等、アスファルト混合物特性への影響は異なる。これは、発生する処理場毎に焼却灰自体の性質が大きく異なることに起因している。

既往の検討は、特定の焼却灰の適用性の検討に主眼が置かれており、

これまで総合的な検討は行われていない。さらに、製品あたりの焼却灰の利用量の向上に関する検討は、これまで全くなされていない。

2.2.2.2 モルタル・コンクリート用混和材料

モルタル・コンクリート用混和材料は、一般的に下記のように分類される³⁸⁾。

- i) ポゾラン作用のあるもの
- ii) 潜在水硬性のあるもの
- iii) 硬化過程において膨張を起こさせるもの
- iv) オートクレーブ養生によって高強度を生じさせるもの
- v) その他（増量材、着色材（顔料）、石灰石微粉末、シリカフュームやエトリンガイト系高強度混和材、超早強混和材など）

このうち、フライアッシュやシリカフューム、火山灰、および珪けい酸白土等は、ポゾラン反応を期待した材料である。J. Monzóらは焼却灰をセメントと置き換えて混和材料として使用した実験から、焼却灰にポゾラン反応が認められるとした³⁹⁾。また神戸市ではプレキャストコンクリート製品の増量材として利用を検討し、焼却灰の吸水量を適切に評価して混合含水比を決定することで、製品重量の0.3wt%までは品質に影響がなく利用できるとしている⁴⁰⁾。これらの使用方法は、焼却灰の粒子が水を収着するため、配合水量が増加する点が課題である。これを解決するため、尾崎は、焼却灰を球状化して吸水性の低い形状としてから、混和材として用いる検討を行った。この検討では焼却灰の球形化により、石灰石微粉末に近い強度と流動性が得られる、との知見を得ている¹³⁾。

セメントとの混合にあたっては、焼却灰中に含まれるリン(P)が課題となる。リンは、セメントの凝結を阻害するため、初期強度が低下することが知られている^{41,42)}。したがって、セメントとの混合用途で

使用する場合、焼却灰の利用量の増加は強度の点の検討が必要となる。

2.2.2.3 その他の用途への利用

焼却灰はセメント原料として最も多く利用されている(Fig.2-4)。セメント産業は、焼却灰以外にも原料や混合剤として廃棄物を多量に受け入れており、平成23年には25百万tの廃棄物を受け入れ、セメント1tあたりの生産に使用した廃棄物は469kgにも達した⁴³⁾。セメント原料化は、セメントの主な天然原料である石灰石、粘土、けい石、酸化鉄その他の代替材料として、所要の構成成分になるよう廃棄物を配合する方法を採用している。下水汚泥焼却灰をセメント原料として利用する場合、材料上の課題はリンの含有であり、使用基準に合致するような混合割合に調整する必要がある。このことから、一部のセメントメーカーの間では、リンの回収技術の検討が盛んに行われている⁴⁴⁾など多数。

セメント原料としての利用は、極めて有力な利用手法であり、実際の使用量も多い。しかし、セメント工場は偏在して立地しており、民間企業によって運営されていることから、撤退や不測の事態による処理停止のリスクが考えられる。下水汚泥焼却灰の処理にあたっては、事業継続性の観点から、セメント資源化以外の新たな活用方法も求められている。

2.2.3 焼却灰の有効利用における課題

廃棄物一般の有効利用においては、建設材料としての利用検討が盛んに行われている。建設材料としての利用が注目される理由は、廃棄物としての処理量確保と、代替材料としての材料コスト低減が主な理由である。さらに、フライアッシュやシリカフェームなど、廃棄物の中には利用によって標準品よりも製品品質の一部特性が向上するものが存在し、このような場合、需要が増加して廃棄物の多量利用につな

がる例がある。

焼却灰についても同様の理由から、建設材料としての有効利用の検討が有力とされ、前述の通り、過去にも多くの検討がなされてきた。しかし、焼却灰の利用に伴い製品性能が低下する例が多い。この場合、利用量を抑制し、性能低下の許容範囲内で有効利用する手段が取られており、この場合は消極的な利用とならざるを得ない。さらに、既往の検討報告は、個別の処理場で発生する焼却灰の適用性の評価にとどまっており、総合的な検討がされず、個々の問題として取り上げられている点も、焼却灰の有効利用が進まない要因と考えられる。

2.2.4 舗装材料としての有効利用

リサイクル製品の開発と利用を促進するため、品質および環境安全性の基準を満たした製品を「リサイクル製品認定制度」として都道府県が認定している。国立環境研究所によれば、全国の 4083 の認定製品中、土木・建築資材関連製品が 3493 製品、そのうち砕石・路盤材、アスファルト製品は約 1200 製品存在し、これを出荷量・都道府県の調達量と比較すれば、砕石・路盤材およびアスファルト製品が殆どを占めていると報告している⁴⁵⁾。このように、舗装材料である砕石・路盤材およびアスファルト製品は、廃棄物の有効利用実績が極めて高い。2011 年の国内のアスファルト混合物の出荷量は、45,700 千 t/年⁴⁶⁾、路盤材の出荷量は、38,770 千 t/年⁴⁷⁾であり、そもそもの使用量が膨大であることが主因であると考えられる。これに加えて舗装材料への有効利用は、以下の優位性がある。

- ・ 舗装材料の発注者が公共利用主体であり、行政が廃棄物利用製品の利用を義務づけることで、需要を自ら創出できること。
- ・ 民間プラントが自らの既存設備を使用して製造可能で、かつ特別の設備を必要としないこと。

- ・ 製造を担うアスファルト合材プラント等の民間施設が全国各地に立地し、各発生地域内での資源循環が可能なこと。
- ・ 他種の廃棄物で多くの利用実績があり、行政・製造者・ユーザーとも廃棄物利用製品に対する理解が醸成されていること。

このような状況下においても、焼却灰の舗装材料への国内利用実績は極めて少なく、平成 23 年度には、路盤材 697t/年、アスファルト混合物用フィラー 230t/年に過ぎない。したがって、舗装材料への適用技術を開発することが、現実的かつ有望な選択肢となりえる。

2.3 結言

日本において、下水汚泥発生量は年々増加しており、汚泥の縮減処理として焼却処理が主体となっている。焼却処理はその地位を維持すべく、技術開発および既存技術の改良が鋭意進められている。焼却灰に関する現状および技術動向は以下のようにまとめられる。

- 1) 下水汚泥は多くが流動床式焼却炉で焼却される。国内で稼働している焼却炉のうち、約9割で同方式が採用されている。
- 2) 下水汚泥の焼却時には温室効果ガスである N_2O が発生する。この排出量の削減のため、 850°C の高温焼却技術が検討されている。高温焼却により燃料消費量が増加するが、この問題は多層燃焼、過給式燃焼等の新たな焼却技術によって解決に至っている。
- 3) 高温焼却による燃焼温度は焼却灰の軟化点より十分低く、今後高温焼却の導入が進んだ場合においても、現在主流の 800°C ～ 830°C で焼却された焼却灰と大きく性状は変わらないと推定される。
- 4) 焼却灰の処理の主体はセメント処理と埋立て処理であり、今後も焼却灰が継続して発生することが予想されることから、新たな利用技術の開発が望まれる。

焼却灰の有効利用に当たり検討すべき環境安全性について、下水汚泥中の重金属を対象とした実態調査、リスク評価の実態と評価方法、および溶出抑制対策における既往の検討は以下の通りまとめられる。

- 5) 1970年代以降、工場排水対策が進み、下水汚泥中の重金属類の濃度は低下傾向にある。しかし工場排水以外に生活排水に由来する重金属負荷も大きく、重金属類については今後も継続して確認を行う必要がある。
- 6) 下水処理場中の重金属類の挙動についてはいくつかの検討が行われ、固体性で存在する重金属類ほど、水処理工程で除去される割合が高い。さらにSe等のように、除去・排出されにくく、下水処理場内を循環する元素もある。
- 7) 焼却灰からAs、Seの溶出が報告されている。Seについては、揮発しガス化したものが集塵工程で凝結して再付着しているものと推測され、高温集塵によって溶出量を低減できる可能性が示唆された。
- 8) 焼却灰の環境安全性の評価は土壌環境基準の援用が行われてきたが、供用シナリオ、利用シナリオに応じた実態に即した評価法が検討されている。
- 9) 焼却灰の重金属の溶出対策は消石灰、チオ硫酸ナトリウムの薬品添加と熱処理・水熱処理の組合せが検討された。キレート剤等の添加も検討され、個別の検討内では、良好な溶出抑制結果が得られた。

次に実際に建設資材への利用検討が行われた例について挙げ、舗装材料への利用の優位性とその課題について調査した結果は、下記のとおりまとめられる。

- 1 0) 舗装材料としての利用は改良土、流動化処理土、路盤材、アスファルト混合物用フィラーとしての利用検討例がある。このうち、改良土と路盤材は焼却灰からの重金属類の溶出が問題となるため利用例は少なく、新たな手法を開発する必要がある。アスファルト混合物用フィラーは通常用いられるフィラーの代替品として概ね 30wt%の置換量で用いられているが、各報告は個別の検討にとどまり、アスファルト混合物の品質低下原因の把握と対策についてはいまだ明らかにされていない。
- 1 1) 舗装材料以外の利用用途については、セメント原料化が有力であり、実際の処理量も多いが、リスク分散の観点からその他の利用手法の開発が望まれている。
- 1 2) 焼却灰の利用に伴い、利用製品の品質は総じて低下する傾向にあり、これが焼却灰の積極的な利用に繋がらない要因であると考えられる。
- 1 3) 各種廃棄物の利用実績および市場の状況から、焼却灰は舗装材料としての使用が最も有望であると結論づけられる。

参考文献

- 1) 下水道施設計画・設計指針と解説（前編）-2009年版-：社団法人日本下水道協会(2009)
- 2) J. Werther, T. Ogada: Sewage sludge combustion, Progress in Energy and Combustion Science Vol.25 (1999) pp.55-116
- 3) 平成 22 年度版 下水道統計 第 67 号：日本下水道協会(2012)
- 4) 落 修一:下水道リン資源の保全・活用、第 47 回下水道研究発表会講演集（2010） p242-244
- 5) 安田憲二、高橋通正、矢島巖、金子幹宏：下水汚泥焼却にともなう亜酸化窒素の排出挙動、廃棄物学会論文誌、Vol.5、No.4（1994） pp.142-150
- 6)宮本彰彦、坂巻兵衛、原島光雄：汚泥処理における温室効果ガス排出量削減調査、東京都下水道局技術調査年報（2004） pp.241-251
- 7)西野信男、中田友三：汚泥焼却における温室効果ガス削減の取組、第 49 回下水道研究発表会講演集（2012） pp.610-612
- 8)長沢英和、落秀一：下水汚泥焼却炉の N₂O 削減技術に関する研究、第 49 回下水道研究発表会講演集（2012） pp.613-615
- 9) 坂井義広：高効率二段燃焼システムにおける N₂O 排出低減効果について、第 49 回下水道研究発表会講演集（2012） pp.616-618
- 10)山本博英、宮内千里、竹下知志：温室効果ガス排出削減を目的とした循環型多層燃焼炉の開発」について その 3、第 49 回下水道研究発表会講演集（2012） pp.619-621
- 11)田中寛仁、首藤和弘、永田俊行、中村功：ターボ型流動焼却炉の導による温室効果ガス削減の取組、第 49 回下水道研究発表会講演集（2012） pp.622-624
- 12)高岡昌輝、藤田淳、藤原健史、武田信生：灰分組成と示差熱分析による焼却灰・飛灰の融点の推定、土木学会論文集 No727/VII -26(2003)pp.91-101

- 13)尾崎正明: 下水汚泥の効率的有効利用に関する研究、京都大学学位論文 (2011)
- 14)間淵弘幸: 下水汚泥肥料中の重金属に係る安全性についての一考察、再生と利用、Vol.33、No.125 (2009) pp32-37
- 15)森忠洋、森山清、荒屋敷秀俊、森泰、斎藤寛、中野篤浩、茅野充男:家庭から下水へ排出される重金属の原単位、水質汚濁研究、Vol.10、No.7 (1987) pp.415-422
- 16)鈴木穰、北村友一: 下水汚泥有効利用に伴うリスク評価に関する研究、平成 13 年度下水道関係調査研究年次報告書集-国土交通省国土技術政策総合研究所 (2001) pp.101-118
- 17)鈴木穰、北村友一、峰松亮: 下水汚泥有効利用に伴うリスク評価に関する研究、平成 13 年度下水道関係調査研究年次報告書集-国土交通省国土技術政策総合研究所 (2002) pp.275-291
- 18)鈴木穰、諏訪守、五十嵐勲: 下水汚泥有効利用に伴うリスク評価に関する研究、平成 13 年度下水道関係調査研究年次報告書集-国土交通省国土技術政策総合研究所 (2003) pp.255-276
- 19) 別府智志、水谷隆信、藁科亮、須藤真琴: 汚泥処理におけるセレンの挙動に関する調査、第 41 回下水道研究発表会講演集 (2004) pp.990-992
- 20) 鈴木清志: 流動床炉集塵装置における有害金属等の捕捉、東京都下水道局技術調査年報 (2002)
- 21)建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル: 独立行政法人土木研究所 (2006) pp.9-10
- 22)肴倉宏史、大迫政浩: 建設系再生製品を対象とした環境安全性評価試験システムの廃棄物学会規格化への取組み、廃棄物学会誌、Vol.18、No.6 (2007) pp.321-329
- 23) 宮澤裕三、上野孝司、清水洋治: 下水汚泥焼却灰等の資源化技術の基礎調査、東京都下水道局技術調査年報 (2000)

- 24) 緒方孝次、杉山佳孝、北村清明、坂本達哉：重金属類を溶出抑制した焼却灰の資源化調査、東京都下水道局技術調査年報（2003）
- 25) 下水汚泥焼却灰の重金属不溶化処理技術について：横浜市環境科学研究所所報第 33 号(2009)
- 26) オートクレーブを用いた焼却灰無害化技術と資源化調査：緒方孝次、宮本彰彦、北村清明、杉山佳孝、東京都下水道局技術調査年報（2004） pp.267-272
- 27) 楠田匡彦、水口裕之、上月康則、上田隆雄：下水汚泥焼却灰の建設材料への利用法に関する一検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22、No.2 (2000) pp1183-1188
- 28) 特許 4217202 号：重金属含有焼却灰の再資源化方法
- 29) 舗装設計施工指針（平成 18 年度版）、日本道路協会（2006） p98-99
- 30) 松川匡利、三羽宏明、長野健示：高分子系汚泥焼却灰の土質改良材としての適用性、環境工学研究論文集 Vol.30（1993） pp.111-120
- 31) 赤木寛一、辻雅行、齋藤泰久：下水汚泥焼却灰を添加した新埋戻し材の埋戻し技術、基礎工、Vol34 (2006) pp.24-27
- 32) 小菅博明、伊熊信男、西山寛：下水汚泥焼却灰を利用した高流動埋戻材の事業開発、横浜市環境科学研究所所報第 31 号（2007）
- 33) 前野祐二、平田登基男：焼却灰の路盤材としての利用に関する研究、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、(1995) pp.442-423
- 34) Mohammed H. Al Sayed, Ismail M. Madany and A. Rahman M. Buali: Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions, Construction and Building Materials, Vol.9(1995) pp.19-23.
- 35) 山田優、田中良穂、小宮正俊：下水汚泥焼却灰を用いた混合物性状と安全性の評価、日本道路会議論文集、Vol.23(1999) pp.126-127
- 36) 鈴木勲、武本敏男：下水汚泥焼却灰のアスファルト混合物への利用、平成 14 年度東京都土木技術研究所年報（2002） pp.121-132

- 37) 堀政信：仙台市における下水汚泥の有効利用と新たな展開への課題、再生と利用、Vol.34、No.127 (2010) pp.32-40
- 38) 日本コンクリート工学協会 HP (2012)
<http://www.jci-net.or.jp/j/whatis/terms/Admixture-b.htm>
- 39) J. Monzó, J. Payá, M. V. Borrachero and A. Córcoles: Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars, Cement and Concrete Research, Vol.26 (1996) pp.1389-1398.
- 40) 津郷俊二、松山哲也、山地功二：神戸市下水汚泥焼却灰を利用したプレキャストコンクリート製品の開発、第49回下水道研究発表会講演集 (2012) pp.435-437
- 41) 金谷宗輝、小澤尚志、本間健一、市川牧彦：クリンカーの品質に及ぼすリンの影響、セメントコンクリート論文集、No.53 (1999) pp.10-15
- 42) 赤木 寛一、渡部 新太郎、神谷 雄三：下水汚泥焼却灰中のリンが流動化処理土の強度特性に及ぼす影響、トンネル工学報告集第16巻 (2006) pp.507-512
- 43) 一般社団法人セメント協会 HP : (<http://www.jcassoc.or.jp/>)
- 44) リン回収・肥料化方法：日本国特許公開2013-27865
- 45) 国立環境研究所：道府県リサイクル製品認定制度の下での実績と効果 (<http://recycle.eco.coocan.jp/b01/mat05.pdf>)
- 46) 一般社団法人 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材製造数量推移 (<http://www.jam-a.or.jp/iinkai/suii/suiiH24.pdf>)
- 47) 経済産業省：平成23年砕石等統計年報
(<http://www.meti.go.jp/statistics/sei/saiseiki/result/xls/agyyear23.xls>)

第 3 章

下水汚泥焼却灰の特性

3.1 諸言

下水汚泥焼却灰の特性に影響を及ぼすものの一つとして、焼却炉の形式が挙げられる。前述したように、下水汚泥の焼却炉として流動床焼却炉が主流となっていることから、本検討では流動床式焼却炉で発生した焼却灰のみを対象に検討を進めることにした。焼却灰の利用にあたり、先ず、材料としての特性を明らかにすることが重要である。焼却灰の特性を左右する要因にはいくつかの報告がある。Franz は流動床式焼却炉のタイプにより焼却灰の粒径が異なり、多段炉を組み合わせた特殊な流動床式の場合は、通常の単一式流動床式で排出される焼却灰よりも粒径が大きいと報告した¹⁾。大下らは複数の焼却灰を用いて検討を行い、焼却灰中のリン含有量が凝集剤の種別および終末処理場に接続する管路の下水排除方式との関係が強いことを明らかにした²⁾。これらの例はそれぞれの利用用途に応じた検討の範囲において、個別に得られた知見である。舗装材料への既往の利用検討例を見ると、焼却灰と標準品の材料規格値の比較および確認にとどまり、焼却灰の特徴について詳細な検討が行われた事例は見当たらない。

そこで本章では、流動床式焼却炉で焼却された代表的な焼却灰を1種選定し、他種の焼却灰の材料規格値との比較と、粉体特性の把握および表面分析の実施により、選定した焼却灰の特性評価を行った。

3.2 実験方法

3.2.1 供試材料

供試材料として、本検討で選定した焼却灰は、岩手県内に位置する流域下水道の終末処理場（都南浄化センター）のから排出される単一式流動床式焼却炉の焼却灰を用いた。対象とした終末処理場は、人口約 27 万人、面積 60km²の地域を網羅しており、市街地の一部を除き、雨水と分流して集められた下水であり、下水処理施設への流入水は生活排水が主体となっている。集積した下水は標準活性汚泥法で処理され、処理により発生した初沈汚泥と余剰汚泥は、嫌気性の消化工程を経て高分子凝集剤が添加され、機械脱水されている。脱水汚泥は、流動床式焼却炉にて温度 830℃にて燃焼され、その燃焼飛灰をサイクロン式集塵機で捕集し、焼却灰としている。本検討では、2009 年 6 月に採取した焼却灰を用いて検討を行った。

3.2.2 評価方法

検討した性質とその方法を Table 3-1 に示す。アスファルト混合物用フィラーの利用を想定しているため、物理性状は、JIS A5008:2008 および舗装調査・試験法便覧（日本道路協会：2007）に規定された石粉に関する試験方法を援用した。これに加え、BET 比表面積を Micromeritex 製 ASAP201 により N₂ 吸着で測定した。さらに、固めかさ密度を JISZ2504:2000「金属粉－見掛密度試験方法」に規定される内径 30mm、容積 25cm³ のステンレス製容器を用いて、落差 1cm で、100 回/分、3 分間タップして焼却灰を充填し、その重量を秤量して求めた。元素組成は、波長分散型蛍光 X 線分析装置（日本フィリップス株式会社製 Magix PRO-S 型）を用い、ファンダメンタル・パラメーター法による半定量分析で算出した。強熱減量の測定は JIS A1226:2009 に従った。焼却灰粒子の形状および表面状態は走査型電子顕微鏡（日本電子株製 JXA-8530F 型）で観察した。粒子内部の観察の

ため、適当量の焼却灰をエポキシ樹脂に包埋して硬化させた後、クロスセクションポリッシャーを用いて、アルゴンイオンビームでスパッタエッチングを施し、樹脂ごと粒子を切断して断面を得た。この断面に対しては、X線マイクロアナライザーを用い、組織観察および特性X線による元素分析も実施した。

焼却灰を建設材料として使用するには、安全性も精査する必要がある。リサイクル材料の安全性は、環境庁告示第46号による溶出試験が援用されることが多く、本検討でもこれを基本条件として土壌環境基準と比較した。定量下限値以上の溶出が認められた元素については、Fig.3-2によるアルカリ溶融-ICP発光分光法でその全含有量も確認した。ICP発光分光分析装置は(株)パーキンエルマージャパン製Optima3300DV型を用いた。

Table 3-1 焼却灰の特性試験方法一覧

Properties	Testing method
<i>Physical properties</i>	
Sieve analysis	
Water contents	JIS A5008:2008
Specific gravity	
Plasticity	
Flow property	Hosou tyousa shikenhon binran:2006
Swelling rate	
BET surface area	Nitrogen absorption
Tap density	Tap speed:100taps/min, Duration:3min
<i>Chemical properties</i>	
Chemical composition	XRF (WDX, FP method)
Loss on ignition	JIS A1226:2009
<i>Qualitative observation</i>	
Particle morphology	SEM
Element distribution	Characteristic X-ray mapping

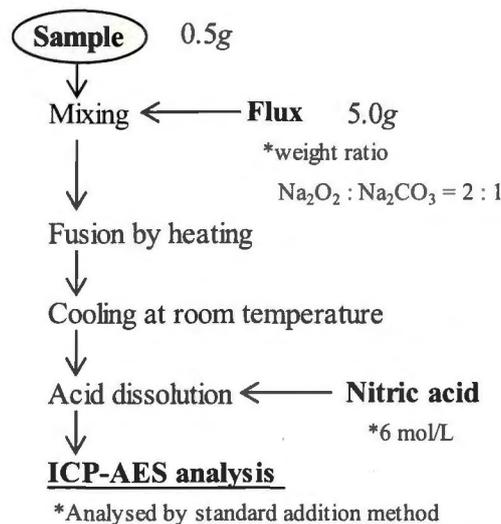


Fig. 3-2 アルカリ溶解法による全含有量分析のフロー

3.3 実験結果および考察

3.3.1 焼却灰の物理特性

供試材料の物性に関する測定結果を Table 3-2 に示す。同表には、既往の報告から他の終末処理場から発生する焼却灰の物性値も併記した。なお、本検討で選定した焼却灰は粗粒分が多く、フィラーに要求される目標範囲を外れる。その粒度分布は神戸市³⁾と近いが、仙台市⁴⁾とは大きく異なっていた。両者は焼却灰の捕集方法に相違があり、神戸市は本検討で選定した焼却灰と同様にサイクロン集塵機を、仙台市はバグフィルタを使用している。バグフィルタは微粒子の捕集能力が高いため、仙台市の焼却灰で微粒分を多く含んでいると考えられる。同表には、回収ダストをフィラーの一部として使用する場合の目標値も示した。塑性指数はいずれの焼却灰も N.P.すなわち非塑性であり、目標を満足する。一方、フロー値については、いずれも目標範囲を上回っており、焼却灰全般に共通する特徴といえる。中でもフロー値は本検討で選定した焼却灰が比較的大きい。このように焼却灰はそれぞれの物理特性が異なり、一元的な利用の難しさの所以となっている。

Table 3-2 焼却灰の物理特性

Physical property	Limestone (control)	SSA *1 (waste)	References		Japan Spec. ⁵⁾
			Kobe ³⁾	Sendai ⁴⁾	
Sieve Size (μm)	Cumulative weight passing (wt%)				
600	100	99.9	99.6	100.0	100.0
300	100	98.7	98.7	100.0	-
150	99.2	75.4	83.7	98.8	90-100
75	93.4	53.6	70.1	96.1	70-100
Water Contents (wt%)	0.2	0.3	0.1	0.2	1.0
Specific gravity (g/cm^3)	2.73	2.60	2.83	2.56	2.60
Plasticity	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.-4
Flow Property (%)	31.8	120.0	72.0	95.5	0-50
Swelling rate (%)	4.5	2.3	1.2	0.5	0-3
Tap density (g/cm^3)	1.6	0.66	-	-	-
BET surface area (cm^2/g)	0.4	5.5	-	-	-

*1 SSA : Sewage sludge ash.

3.3.2 焼却灰の化学特性

供試材料の化学組成の分析結果を Table 3-3 に示す。他と比較して、本検討で選定した焼却灰はリンを高濃度で含有しており、その含有量は 27.8% (P_2O_5 換算) であった。原因のひとつとして、分流式の流入水のリン濃度の影響が考えられる。大下ら²⁾が報告したように、リン含有量は合流式と比較し分流式の下水処理場で高い傾向にある。下水排除方式が分流式（一部合流式）の場合、雨水や流入土砂による下水の希釈が起こらない。そのため流入水のリン濃度は高く、その処理残渣である焼却灰のリン濃度が高まると考えられる。ふたつ目は、下水処理方法の影響である。対象とした下水処理場では活性汚泥のバルキング（膨化による沈降性の悪化）対策として、水処理工程で擬似的な嫌気好気運転を行なっている。この手法では、汚泥の沈降を妨げる糸状性細菌の増殖を抑制すると同時に、ポリリン酸蓄積細菌が処理水中のリンを過剰摂取するため、余剰汚泥中にリンが移行する割合が高くなる⁶⁾。これらの理由によって、焼却灰中のリン濃度が高まったと推察される。なお、リンに次いで含有量の多い元素はケイ素（24.6%）、アルミニウム（14.8%）、カルシウム（12.0%）、鉄（8.7%）、マグネシウム（5.0%）の順であり、これらが焼却灰の主要構成元素であるのは他地域と同様であった。

Table 3-3 焼却灰の化学組成

Component (wt %)			References		
	Lime stone (control)	SSA (waste)	Kobe ³⁾	St.Paul ⁷⁾	Valencia ⁸⁾
SiO ₂	0.5	24.6	23.7	27.0	20.8
Al ₂ O ₃	0.3	14.8	12.6	14.4	14.9
CaO	97.6	12.0	15.9	21.0	31.3
P ₂ O ₅	* ^a	27.8	19.3	20.2	6.7
Fe ₂ O ₃	0.2	8.7	17.9	8.2	7.4
MgO	0.4	5.0	3.0	3.2	2.6
MnO	*	0.2	0.1	- ^b	-
TiO ₂	*	0.7	0.4	2.9	-
ZnO	*	0.4	-	-	-
CuO	*	0.4	-	-	-
K ₂ O	*	1.3	0.4	0.6	-
Na ₂ O	0.7	1.4	0.4	0.5	-
SO ₃	*	0.7	-	0.8	12.4
BaO	*	0.7	-	0.3	-
Cl	*	*	-	-	-
Ig.Loss	36.7	0.6	0.4	0.2	5.1

a " * " means less than 0.1 wt%.

b " - " means not available.

本検討で検討した焼却灰の粒子を Fig.3-3 に示す。粒度分布ごとに整理して示したものであり、赤褐色の粒子と、白色の粒子が全体を占め、特に白色の粒子は、粗粒に偏在している。そこで、粒度毎に蛍光 X 線分析装置を用いて化学組成の半定量分析を行った。結果を、Table 3-4 に示す。粒度により元素組成比が異なることは明瞭であり、粗粒分ほどリンとマグネシウムが多い。

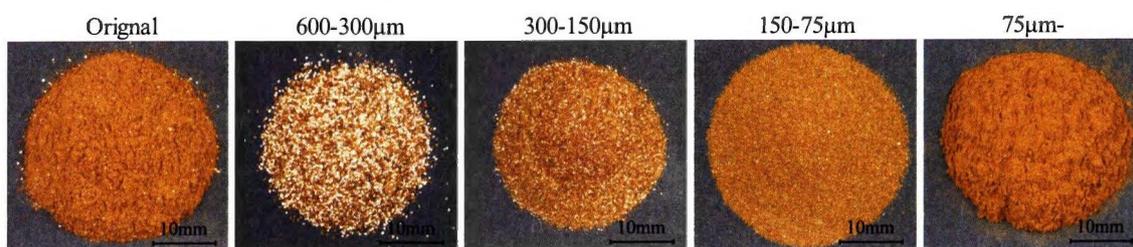


Fig.3-3 焼却灰の粒度別外観

Table 3-4 焼却灰の粒度別の化学組成

Component (wt %)	Original	Sized fractions (µm)			
		600-300	300-150	150-75	75-0
SiO ₂	24.6	15.6	30.5	26.9	23.8
Al ₂ O ₃	14.8	8.7	11.6	14.4	15.3
CaO	12.0	6.4	8.4	11.2	12.8
P ₂ O ₅	27.8	39.3	30.4	28.6	27.7
Fe ₂ O ₃	8.7	6.3	5.9	8.0	9.4
MgO	5.0	19.1	8.9	5.4	4.5
K ₂ O	1.3	0.9	1.0	1.3	1.4

3.3.3 焼却灰の粒子特性

本検討で対象とした焼却灰の表面 SEM 像を Fig.3-4 に示す。全体的に焼却灰は不定形であり、表面は凹凸が多い。断面 SEM 像を Fig.3-5 に示す。比較として石粉の断面像も示した。粒子内部が密実な石粉とは異なり、焼却灰は多孔質の粒子が多く存在する。粒子を特徴別に分類すると、図中の A~C となる。粒子 A は密実で、粒子 B は多孔質であり、粒子 C はそれらの中間と観察される。粒子 B および C の孔の多くには樹脂が充填されており、開孔と判断された。分類した粒子の元素分析結果を Fig.2-6 に示す。粒子 A はケイ素、アルミニウムが主成分であり、下水中の流入土砂に由来する粒子であると考えられる。粒子 B はリンとマグネシウムを主成分とする粒子である。これは嫌気性の汚泥消化工程で析出するとされるリン酸マグネシウムアンモニウム ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$: MAP)⁹⁾ が残存して焼却灰中に移行したものと考えられ、本検討で対象とした焼却灰の大きな特徴である。粒子 C はリン、珪素、アルミニウム、カルシウムが主体で構成されており、マグネシウムはほとんど認められない。このことから、粒子 C 中のリンは、粒子 B と異なりリン酸アルミニウム、リン酸カルシウム等の形態で存在していると考えられる。これら粒子 B、粒子 C の多孔質形状は焼却時に低沸点の物質がガス化して形成されたものと推察される。

本検討で選定した焼却灰中の粒子は 3 種類に大別できる。このうち、粒子 B、粒子 C はリンを含む多孔質な粒子である。多孔質構造が顕著なのは粒子 B であり、これはリンとマグネシウムを主成分とした比較的大きな粒子として存在することがわかった。

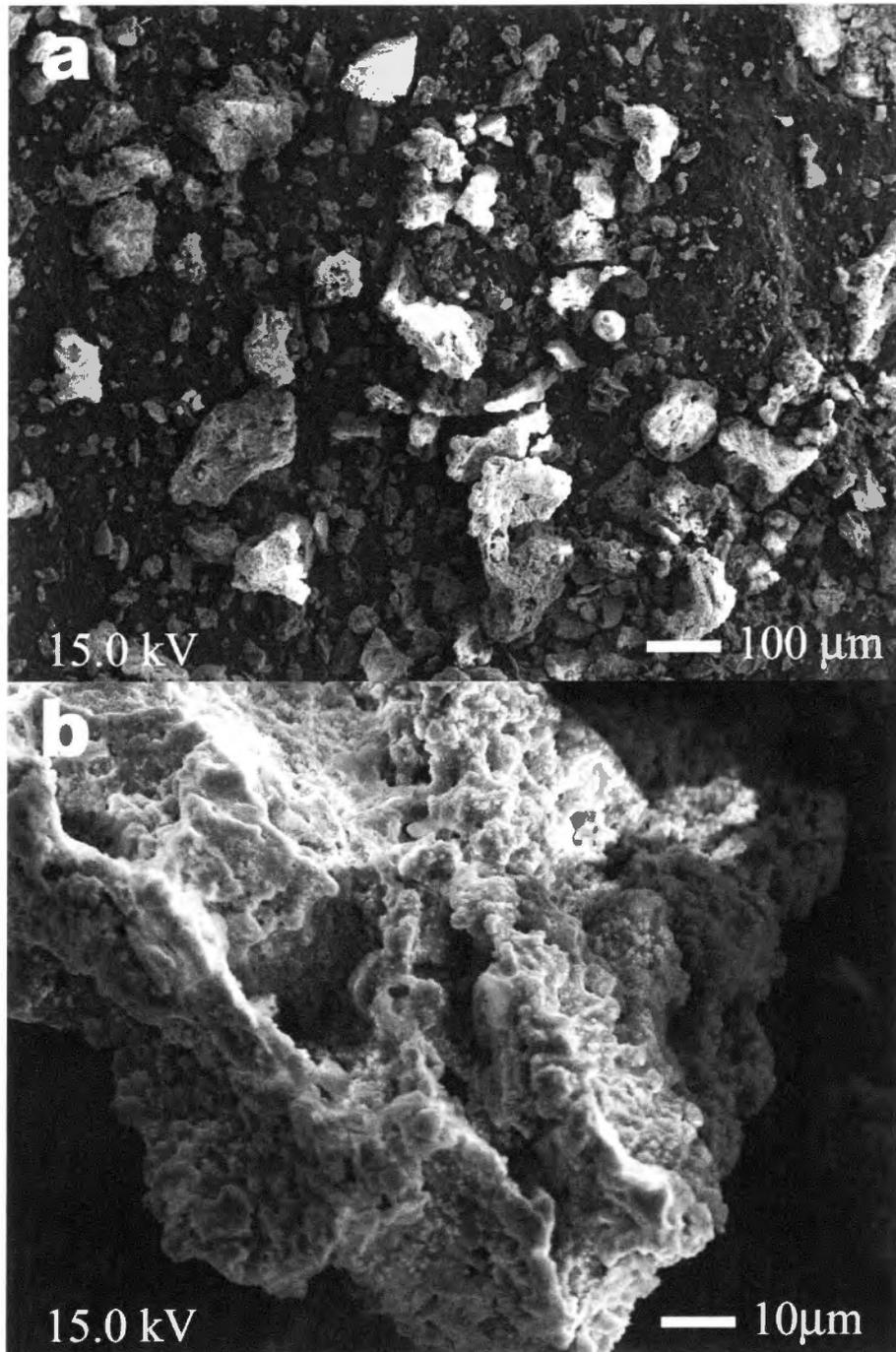


Fig.3-4 焼却灰の SEM 像

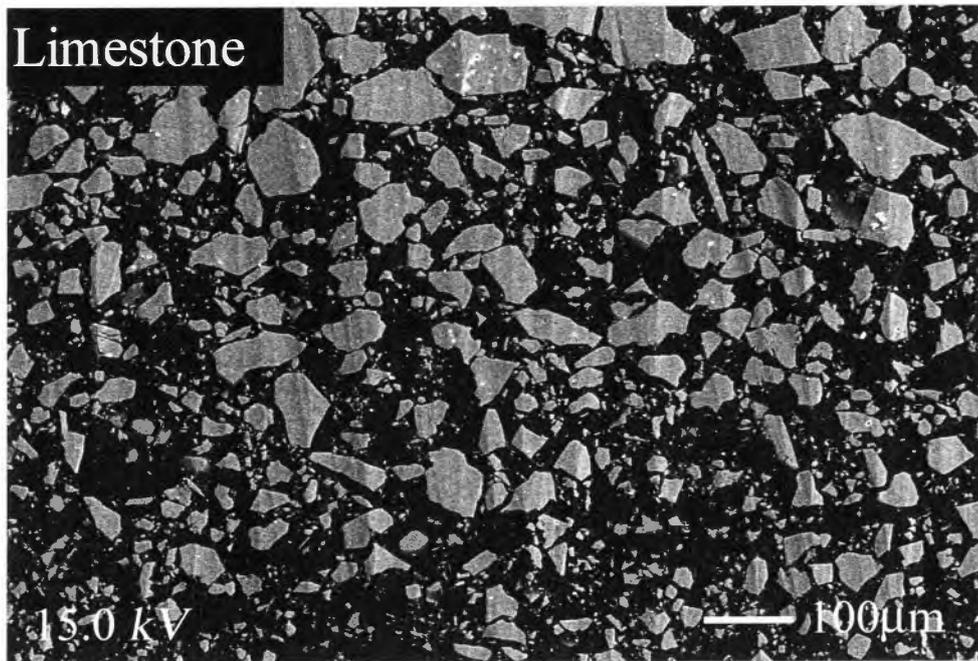
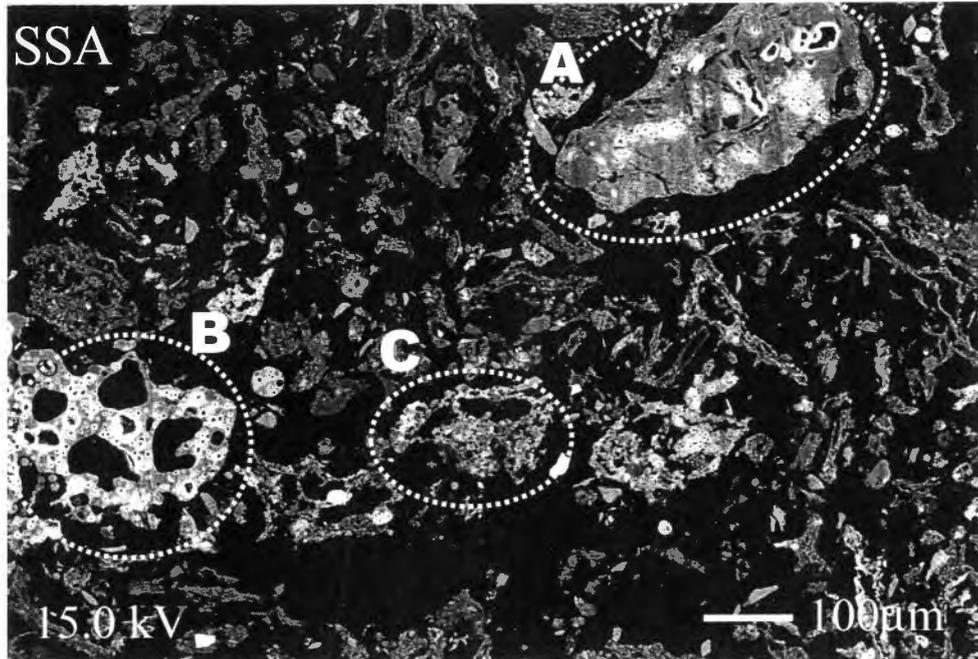


Fig.3-5 焼却灰および石粉の断面 SEM 像

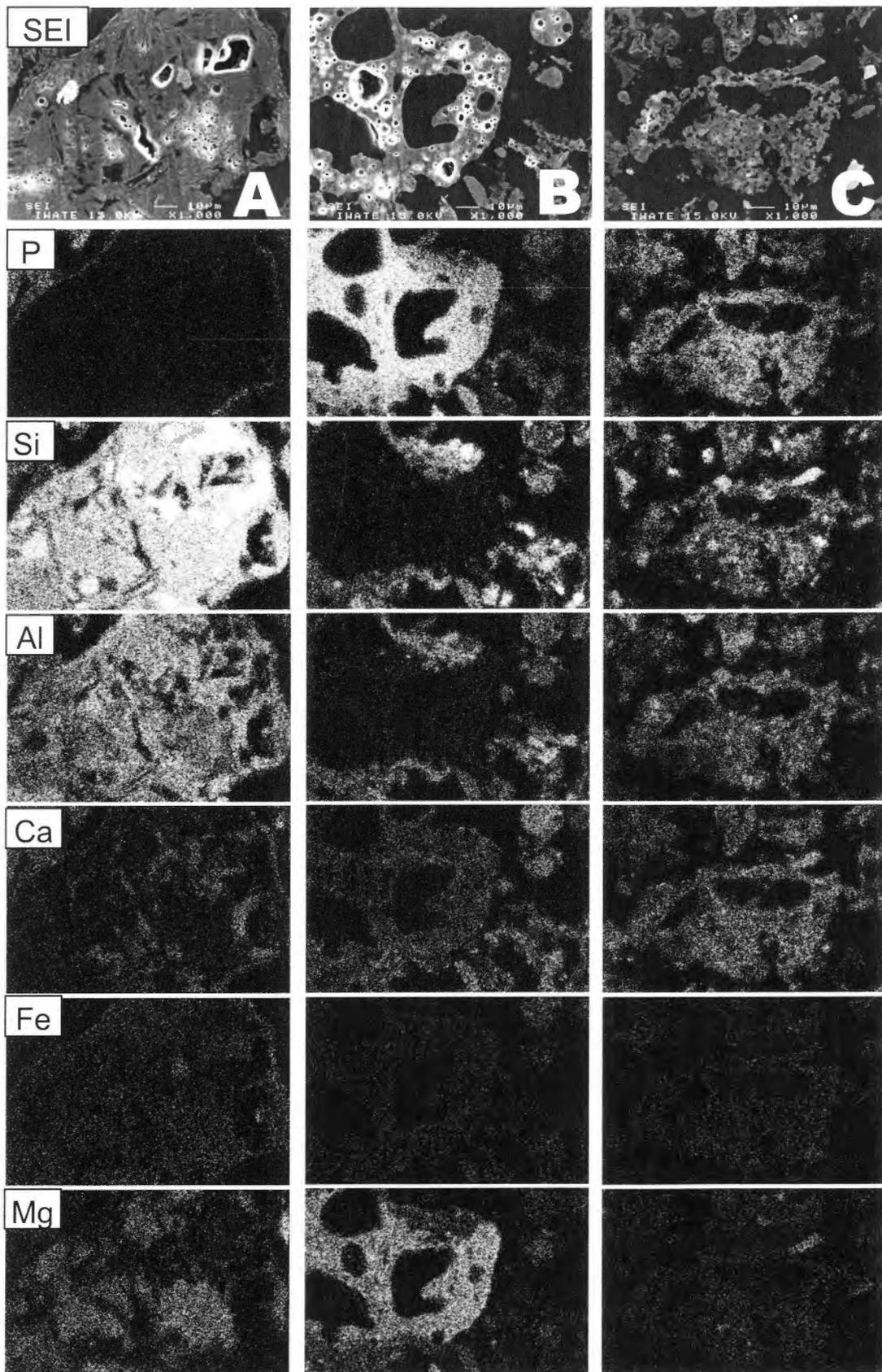


Fig.3-6 焼却灰の粒子別の特性 X 線像

3.3.4 焼却灰の安全性

焼却灰からの環告 46 号に基づいた溶出量および全含有量測定結果を Table 3-5 に示す。溶出量はヒ素、セレンの溶出量が環告 46 号の基準値を上回った。他報で検討された焼却灰でもこれら元素の溶出が報告されている³⁾⁴⁾。ただしこれら 3 つの元素の含有量は、全て 0.01wt% 以下であった。J. Werther らは高い燃焼温度によって気化した元素が冷却時に灰粒子の表面に凝結するため、軽金属ほど粒子の表面に存在する割合が高いと述べている¹⁰⁾。今回得た結果から、焼却灰中のヒ素、セレン、ホウ素は、可溶性の状態となって粒子表面にごく少量が存在していると推察される。したがって、焼却灰の利用にあたっては、田材料の混合等による不溶化処理が現実的な対策となりえる。

Table 3-5 焼却灰の溶出試験および全含有量試験結果

Element	Leaching Concentrations (mg/L)		Constituents (mg/kg)
	SSA	JLT46 Standard limits	
Cd	0.002	<0.01	<0.01
Pb	0.002	<0.01	<0.01
Hg	<0.0002	<0.0005	-
Cr(VI)	<0.02	<0.05	-
As	0.36	<0.01	<0.01
Se	0.079	<0.01	<0.01
F	<0.25	<0.8	-
B	0.74	<1.0	<0.01
CN ⁻	ND	ND	-

*According to the test method and the standard limits in Japanese Environmental Agency Notification No.46(JLT46) .

3.4 結言

本章では、岩手県の都南浄化センターで発生する焼却灰を供試材料として選定し、種々の試験からその特性を検討し、以下のことを明らかにした。

- 1) 選定した焼却灰からは、土壤環境基準を超えるヒ素、セレンの溶出が確認された。しかしこれらの全含有量は極めて少ない。これらは少量が溶出しやすい形態で存在すると考えられる。
- 2) 選定した焼却灰の表面は粗い形状を呈しており、比表面積が大きい。個々の粒子に着目すると、形状および成分が異なる複数種の粒子で構成されている。密実な粒子は珪素、アルミニウムを主体とする粒子であり、流入した土砂や流動砂に由来するものと思われる。その他は多孔質な形状を呈する粒子であり、内部に孔隙を持っている。
- 3) 多孔質な粒子のうち、リンとマグネシウムを主成分とする粒子は $150\mu\text{m}$ 以上の粗粒分に多く含まれる。この種の粒子は嫌気性の汚泥消化工程で発生する粒子が焼却灰中に残存したものと推察され、汚泥消化工程の有無がこの種の粒子の有無に影響すると考えられる。
- 4) 焼却灰は排出される処理場によって粒度に大きな差があり、これは集塵形式の違いが影響していると推察される。サイクロン式で粗粒に、バグフィルタでは細粒になる。
- 5) 選定した焼却灰は他所で排出される焼却灰と比較し、リンの含有量が多い。これは下水排除方式が分流式であること、水処理過程で疑似嫌気好機法を採用していることでリンが汚泥に移行しやすいことが挙げられる。

参考文献

- 1) M.Franz: Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA), Waste Management, 28(2008), pp.1809-1818
- 2) 大下和徹、岩下真理、高岡昌輝、武田信生: 下水汚泥焼却灰からの湿式リン抽出方法の体系化、環境工学研究論文集、No40 (2003) pp395-404
- 3) 山田優、田中良穂、小宮正俊 :下水汚泥焼却灰を用いた混合物性状と安全性の評価、日本道路会議論文集、Vol.23(1999) pp.126-127
- 4) 堀政信: 仙台市における下水汚泥の有効利用と新たな展開への課題、再生と利用、Vol.34、No.127 (2010) pp.32-40
- 5) 舗装調査・試験法便覧 (第2分冊)、日本道路協会 (2007)
- 6) Y.Suzuki: Removal of Phosphorus from Wastewater with Chemical Addition or with A/O Process, Journal of resources and environment, 29(1993), pp1014-1019
- 7) JI. Bhatti and KJ.Reid: Compressive Strength of Municipal Sludge Ash Mortars, ACI Materials Journal, Vol.86 (1989), pp.394-400.
- 8) J. Monzó, J. Payá, M. V. Borrachero and A. Córcoles: Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars, Cement and Concrete Research, Vol.26 (1996), pp.1389-1398.
- 9) 萩野隆生、平島剛: 下水汚泥からのリン回収プロセスの開発、環境資源工学、No52 (2005) pp172-182
- 10) J. Werther, T. Ogada: Sewage sludge combustion, Progress in Energy and Combustion Science Vol.25 (1999) pp.55-116

第 4 章

下水汚泥焼却灰の路盤材としての利用

4.1 諸言

第3章では、岩手県の都南浄化センターで発生する焼却灰を代表として選定し、その材料としての特徴について述べた。本章では焼却灰の路盤材への利用技術の開発について検討を行う。前章で述べたように、焼却灰は単体では支持力が期待できないばかりか、ヒ素やセレンの溶出および飛散の問題がある。これらを解決できる手法として、セメントとの混合が挙げられる。ヒ素、セレンはアルカリ環境下で難溶性のカルシウム塩を形成するほか、セメント水和物はヒ素、セレン、フッ素、ホウ素等有害物質の固定能を有することが知られている。そこでセメント材料と焼却灰の混合および固化によって、その安全性と支持力の確保を期待した。

混合するセメント材料は、生コンプラントから出荷されたのち荷卸されずに帰社する、いわゆる「戻りコンクリート（以下、戻りコン）」に着目した。戻りコンは日本全国で年間 150～200 万 m³ 発生しており、低コストかつ大量処理可能な有効利用技術の開発が望まれている。本研究では硬化前の戻りコンクリートをそのまま利用し、両廃棄物を混合固化して破碎し、これを路盤材として適用する方法を検討した。これまで焼却灰および戻りコンの有効利用の検討は、個別に、数多く行なわれてきたが、本研究のように両廃棄物を一括で処理しようと試みた例は見当たらない。焼却灰の処理を主眼とした検討に着目すれば、コンクリート用細骨材¹⁾、セメント混和材²⁾、流動化処理土³⁾として利用検討を行った報告があり、これらは焼却灰をセメントと混合する点では、本検討と類似している。しかし、これらの検討は適用性に主眼が置かれ、焼却灰の特徴を考慮したものとは言い難い。本検討では、提案する手法で作製した混合破碎物の路盤材としての問題点を挙げ、焼却灰の持つ特徴にその原因を求めて、解決策を検討した。

4.2 実験方法

4.2.1 供試材料

実験に用いる供試材料は、第3章で検討した焼却灰を用いた。本検討で提案する生コンクリートとの混合固化による路盤材利用の検討例はこれまでになく、本検討では焼却灰1種を代表に用いて適用性を検討する。用いた焼却灰は、3章で述べた岩手県の都南浄化センターで排出されるものを用いた。

4.2.2 混合固化破砕物の作製方法

張ら⁴⁾は、生コンスラッジを戻りコンで固化し、その破砕物が路盤材として適用可能であることを報告した。この手法は、特別な工程や設備を必要としないため、岩手県中部の生コンプラントで採用されている。製品は恒常的に生産され市場流通しており、ユーザーの評価も高い。本研究ではこの実績から、同様の作製工程を適用することにした。

本検討で想定した工程を Fig. 4-1 に示す。戻りコンを積載して帰社したアジテータ車のドラム内に、焼却灰を投入する。投入後混合に必要な程度加水し、さらにドラムを高速回転させて均一に混合し、平坦なヤードに排出する。一両日経過後、硬化が始まった混合物（以下、混合固化物）をホイールローダ等を用いて剥ぎ取り、適当な場所に野積する。さらに2週間後、混合固化物をジョークラッシャーで破砕し粒度調整した破砕物（以下、混合破砕物）を、路盤材とする。

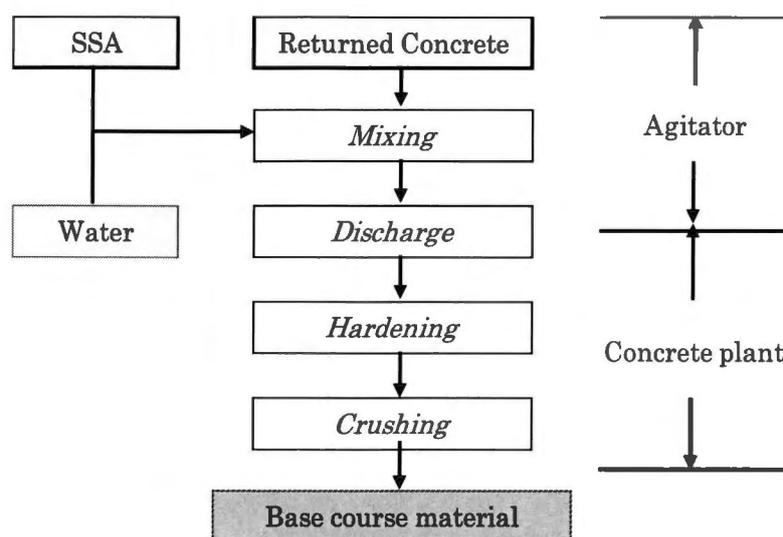


Fig. 4-1 混合破碎物の作製方法

本検討では、一連の工程を実験室内で模擬し、混合破碎物を作製した。戻りコンに相当するコンクリートは、実工程では種々の配合が想定されるが、本検討では出荷実績から設計基準強度 21 N/mm^2 のコンクリートとした。その配合を Table 4-1 に示す。これをドラムミキサで混合後 30 分間放置し、戻りコンに見立てた。この模擬戻りコンの入ったドラムミキサ内に焼却灰を投入し、90 秒間攪拌した。この時、焼却灰はそのままでは戻りコンとの混合が困難である。そこで、あらかじめ焼却灰には水を加え、含水比を 135%としてから混合した。この混合物を内径 $15 \times 15 \times 53 \text{ cm}$ の型枠に入れ、室温で 2 日間湿空養生し、混合固化物とした。これをハンマーで粗砕し、さらに室温で 12 日間保管した後、ジョークラッシャーで最大寸法 25 mm となるよう破碎して、混合破碎物とした。検討した焼却灰の混合割合は加水後の質量割合で、コンクリートに対し外割りで 15、30、45 wt%とした。

Maximum size (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	Air content (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)				Admix.
					W	C	S	G	
25	8	59.5	4.5	43.5	158	266	830	1106	2.66

Table 4-1 戻りコンの配合

4.2.3 評価方法

路盤材に求められる品質基準を Table 4-2 に示す。上層路盤に廃棄物や副産物を利用した例はほとんどないため、本検討では、下層路盤材としての適用を目標とした。舗装施工便覧⁵⁾によれば、下層路盤材の修正 CBR は 20%以上が目標とされている。しかし 30%を超えれば、等値換算係数を大きく取ることができ、望ましい⁶⁾。よって本検討では、修正 CBR 30%以上を目標値とした。また、すり減り減量は舗装再生便覧の規定から 50%以下を目標値とした。混合破砕物の安全性の評価は、環境庁告示 46 号に定められた溶出基準を満足することを目標とした。

Table 4-2 混合破砕物を下層路盤材として利用するための目標値

項目	規格値	出典
修正CBR	30%以上 (an=0.25) 20%以上30%未満 (an=0.20)	舗装設計施工指針 ⁵⁾
PI	6以下	舗装設計施工指針 ⁶⁾
安全性	土壤環境基準(環告46号)以下	環境庁告示46号
すり減り減量	50%以下	舗装再生便覧 ⁷⁾

上記の目標値の確認のほか、本検討ではその他一連の試験を実施して焼却灰の適用性を確認している。まず混合固化物の物性を把握するため、φ10×20 cm の供試体を作製し、材齢 7、28、91 日の圧縮強度 (JIS A 1108 : 2010) を測定した。作製した混合破砕物に対しては、ふるい分け試験 (JIS A1102 : 2010) を行った。その後突固めによる

締固め試験（JIS A1210：2010）を実施し、最大乾燥密度および最適含水比を求め、最適含水比の混合破碎物の CBR（JIS A1211：2010）から修正 CBR を求めた。なお突き固めの方法は、E-b 法に従っている。この突固め操作による試料の粒度変化をとらえるため、92 回突固め後の試料に対してふるい分け試験を行った。突固め後の混合破碎物には発生した微粒分が多量に付着するため、骨材の微粒分量試験（JIS A1103：2003）に準じて慎重に微粒分を洗い流した後、残分の粒度分布を測定した。また、すり減り減量試験（JIS A1121：2007）は、舗装再生便覧（平成 22 年度版）の規定⁷⁾に従い、13～5 mm の混合破碎物を分取し、粒度区分 C の条件で実施した。これらの試験は全て材齢 28 日目を基準として行った。作製した混合破碎物の溶出試験は、混合破碎物のうち 2mm 以下の粒子を分取し、環境庁告示 46 号試験に準拠して溶出操作と溶出液の測定を実施した。これら一連の試験から、作製した各種の混合破碎物の路盤材としての適用性を判断した。

4.3 実験結果および考察

本検討では、第1に供試材料をそのまま使用し、路盤材として用いる場合の問題点を把握した。

4.3.1 混合固化物の特性

混合固化物の圧縮強度試験結果を Fig. 4-2 に示す。焼却灰を混合することで圧縮強度は著しく低下する。特に、外割混合割合が 30wt%を超えると 28 日圧縮強度は 5N/mm² を下回り、圧縮強度はほとんど期待できない。

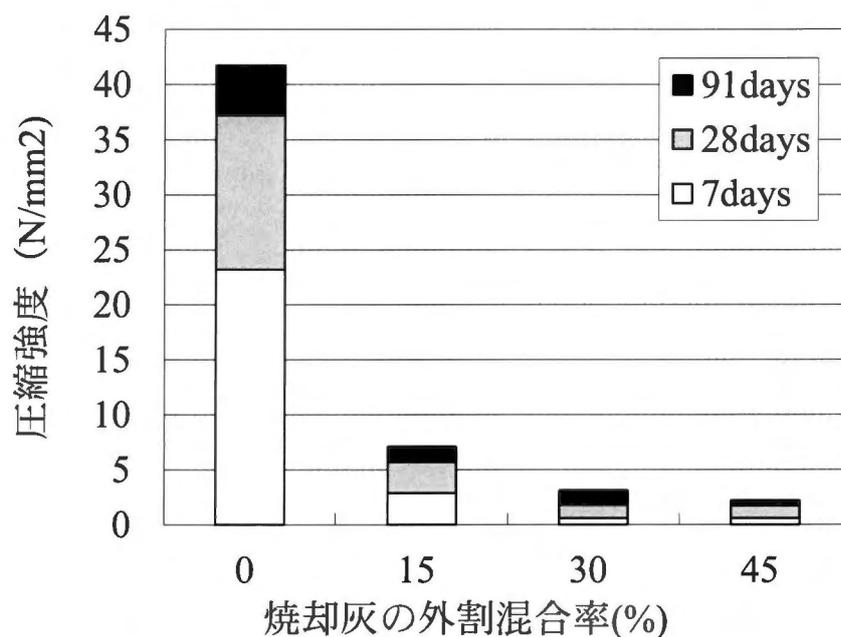


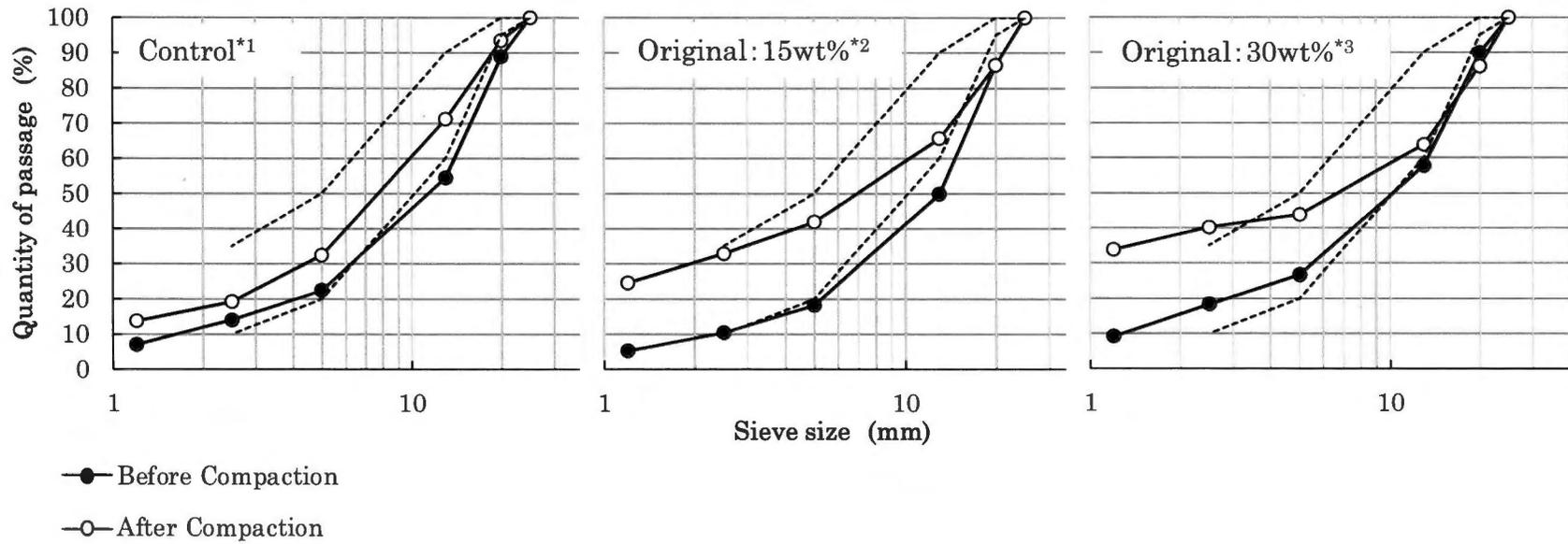
Fig.4-2 焼却灰の外割混合率と混合固化物の圧縮強度

4.3.2 混合破砕物の路盤材としての特性

4.3.2.1 突固め前後の混合破砕物の粒度

混合破砕物は、①骨材単体、②モルタル部が付着した骨材、③モルタル部のみで構成される粒子により構成されている。圧縮強度試験の結果が示すように、混合固化物の強度は低い。これを破砕して作製し

た混合破碎物も同様に強固ではなく、突固め操作時にモルタル部の剥離や破碎が起こると予見された。このような材料では、突固め後の粒度も踏まえその良否を判定すべきである。そこで混合破碎物の粒度を突固め前後で整理し Fig. 4-3 に示した。図中には C-20 の目標粒度範囲も点線で示している。作製直後の混合破碎物の粒度は破碎の程度によって調整できるため大きな問題とはならないが、着目すべきは突固め後の粒度である。焼却灰の混合によって細粒化の進行はいずれも大きくなり、突固め後の粒度曲線が上方に移動する。30 wt%混合した場合は微粒分の増加量が大きくなり、目標粒度範囲を外れた。表中には示していないが、これは外割混合率が 45 wt%の場合も同様である。



*1 Control : Solidified only fresh returned concrete without SSA.

*2 15wt%, 30wt% : Added SSA weight versus fresh returned concrete weight.

Fig.4-3 焼却灰の外割混合割合毎の混合破碎物の粒度

4.3.2.2 混合破碎物の締固め特性

混合破碎物の締固め曲線を Fig. 4-4 に示す。焼却灰を 15 wt%混合した場合は、コンクリート単体よりも最大乾燥密度が大きくなる。コンクリート単体の場合は細粒分が少なく、突固め後の試料モールド中に間隙が多く残存するが、焼却灰を適量混合することで細粒分が増して間隙を充填し、密実な構造となると考えられた。15 wt%の混合が修正 CBR の増大を期待させる結果となった一方で、混合量を 30 wt%、45 wt%に増加させた場合、最大乾燥密度はコンクリート単体よりも低くなり、最適含水比はさらに高まる。この変化は、原灰の混合に伴って水セメント比が増加して、混合破碎物のモルタル分がより多孔質となったためと推察される。最も課題である点は、原灰の混合量を 30 wt%、45 wt%に増加させて作製した混合破碎物に対し突固め試験を適用すると、図中に示すように、最適含水比以上の突固め時にオーバーコンパクションが発生することである。オーバーコンパクションが起きると試料は側方流動する。建設現場でも試験室と同様にオーバーコンパクションが発生すると考えられ、このような材料では施工は困難であり、支持力も期待できない。この現象については、以下のように考察した。前述したとおり、混合破碎物は突固めによって細粒化する (Fig.4-3)。この時、原灰を 30 wt、45 wt%混合した混合破碎物のモルタル部は比較的強度が低く、多孔質で多量の水を収着している。これが突固めによって細粒化されると、多孔質なモルタル内部に捕捉されていた水が吐き出され、自由水となる。その結果、間隙水圧が増加してオーバーコンパクションの発生に至ると推察された。

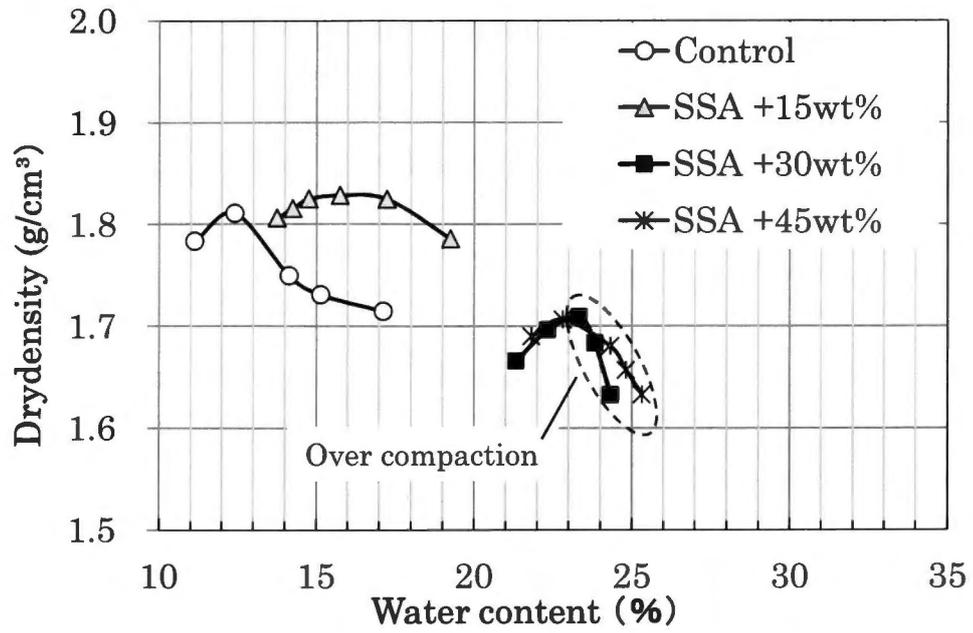


Fig.4-4 焼却灰の外割混合割合毎の混合破砕物の締固め曲線

4.3.2.3 混合破砕物の支持力

突固め回数別の荷重貫入量曲線を Fig. 4-5 に示す。原灰を 30 wt%、45 wt%混合した場合にはオーバーコンパクションが起こり、突固め回数と貫入抵抗に対応関係が見られなくなる。荷重貫入量曲線から求めた、混合破砕物の修正 CBR を Fig. 4-6 に示す。15wt%の混合割合ではコンクリート単体で作製する破砕物より修正 CBR が大きく向上し、本検討で提案する焼却灰の混合一括処理の優位性が示された。しかし混合割合を 30wt%、45wt%に増すと、修正 CBR が急激に低下した。オーバーコンパクションによって突き固めエネルギーを増しても試料の充填が進まなくなるため、焼却灰の外割混合率は 15wt%までとすることが望ましい。

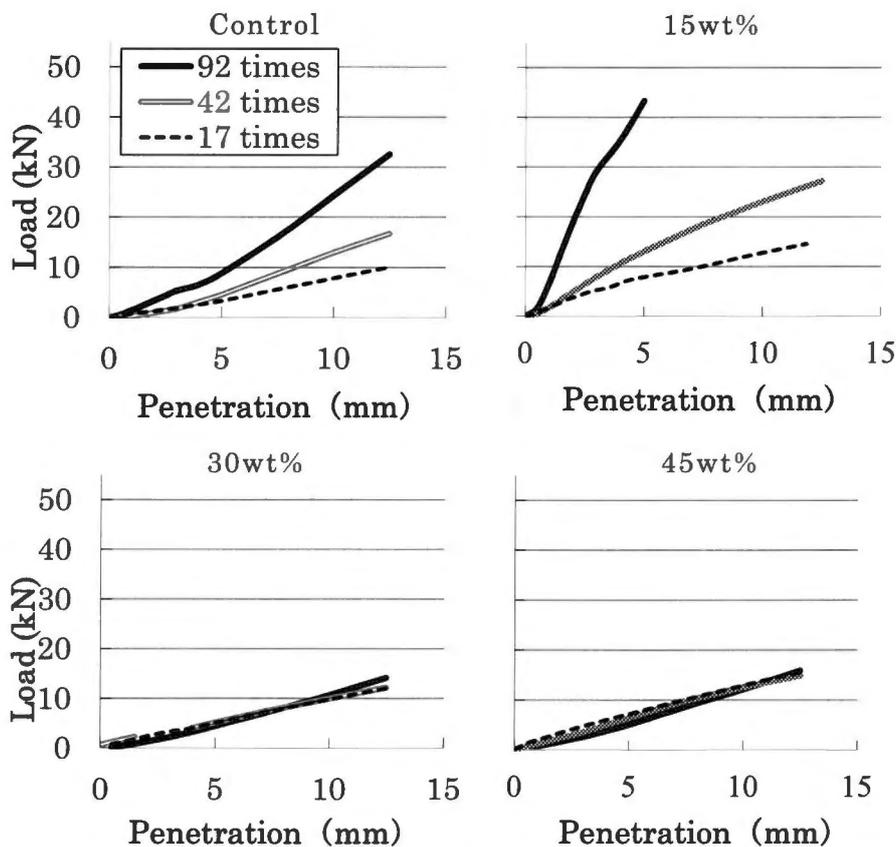


Fig.4-5 焼却灰の外割混合割合毎の混合破砕物の締固め曲線

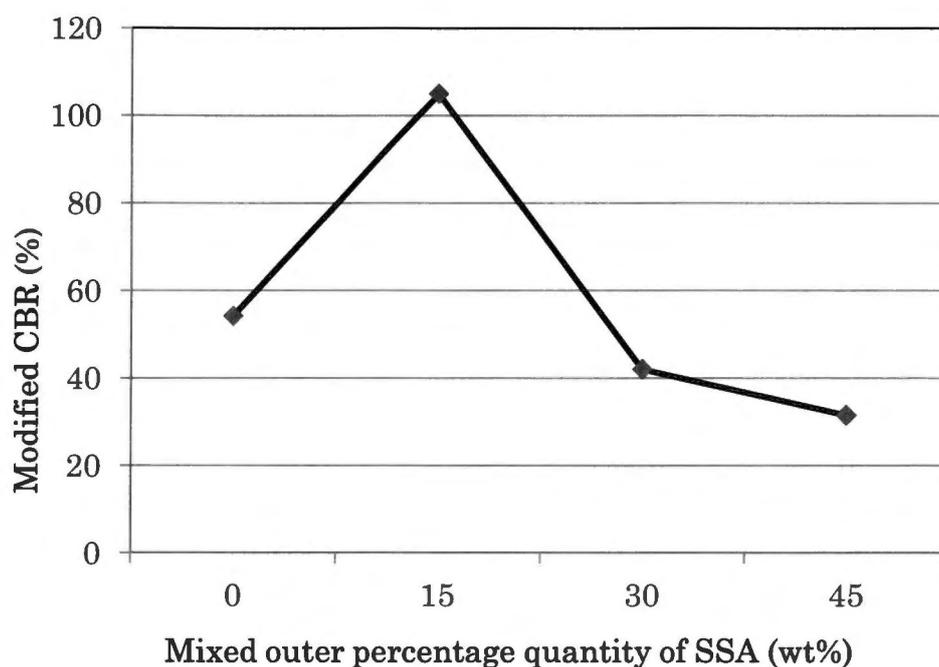


Fig.4-6 焼却灰の外割混合割合毎の混合破碎物の締固め曲線

4.4 焼却灰の改質による混合固化物の品質向上

4.4.1 焼却灰の改質

前章で述べた通り、本検討で選定した焼却灰の特徴は、リンとマグネシウムを主成分とする粗粒かつ多孔質の粒子が含まれていること、そしてリン酸塩を比較的多量に含むことである。多孔質の粒子は脆弱部となり、混合物の強度低下を引き起こす可能性がある。さらに水を収着するために混合時に加水が必要となる点も、強度に影響を及ぼすと考えられる。また、焼却灰中のリン酸塩がアルカリ可溶性であれば、コンクリートと混合した際の初期強度が低下する⁸⁾。そこで、本検討ではこれら焼却灰の特徴を考慮して、採取したままの焼却灰（以下、原灰）に粉碎処理（以下、粉碎灰）およびリンの低減処理（以下、脱リン灰）を行い、混合破碎物の路盤材としての品質向上を試みた。これらの処理によって、焼却灰を利用した舗装材料の品質または焼却灰の利用可能量が向上することで、適用性が高まることが期待される。

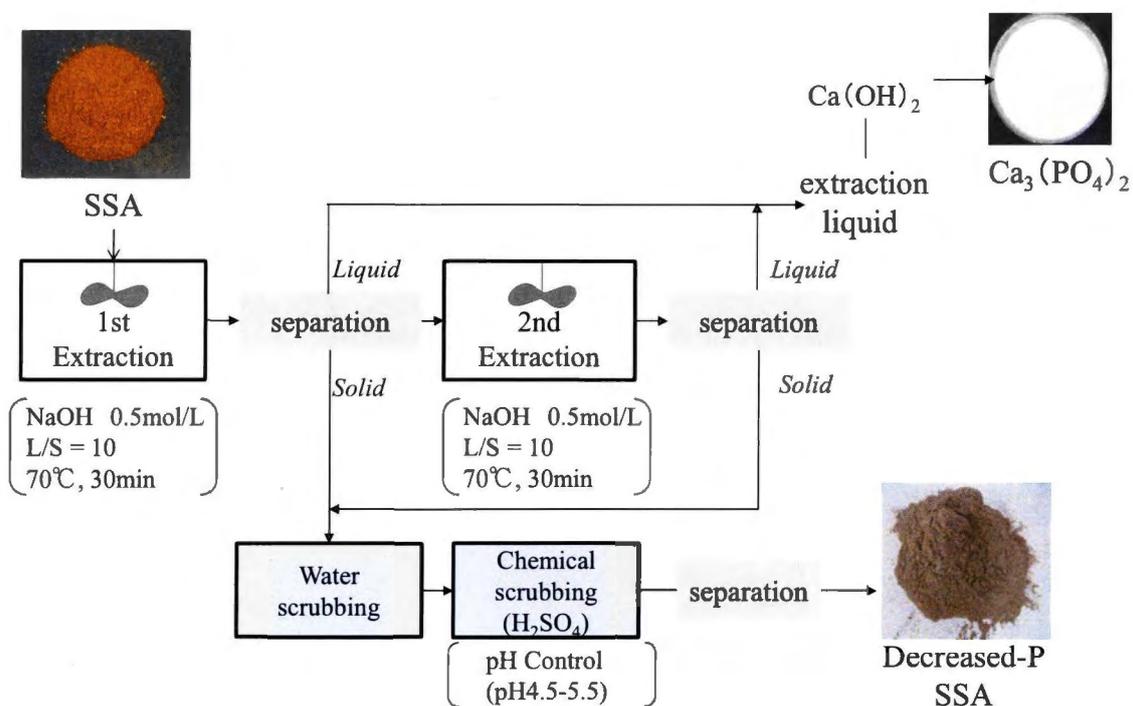
4.4.1.1 焼却灰の粉碎処理

第 1 の改質処理は「粉碎」であり、多孔質粒子の孔隙を解放することで、固化体の強度確保と混合時の加水量の低減を期待した。粉碎灰は、遊星ボールミル（レッチェ社製：PM400 型）を用い、容量 500 mL のアルミナポット中に 150 g の原灰と 20φ のアルミナボールを 25 個投入し、公転速度 300 rpm で 1、5、30 分間粉碎して得た。この遊星型ボールミルは、粉碎速度が速く、短時間で多量に粉碎処理が可能であることから本研究では用いている。得た試料の粒度分析を実施し、粉碎進行速度と粉碎時間を勘案して、5 分間粉碎した試料を試験に使用した。

4.4.1.2 焼却灰の脱リン処理

第 2 の処理は「リンの低減処理」であり、これは生コンクリートと混合した際の固化体の強度確保を期待する処理である。焼却灰からのリンの低減は、安価に処理できる手法であることが望ましく、これは比重分離や磁力選別等で物理的にリンを選別する手法が考えられる。しかしこの手法は粒子そのものにリンが高品位で存在している必要がある。3 章で述べたように、リンの品位が高く、リンとマグネシウムを主成分とする粒子（粒子 B）の存在割合が少なく、さらに大部分は多成分の粒子（粒子 C）として存在しているものが多い。そこで本検討では、多成分の粒子から目的成分の抽出が可能である化学的手法を選択し、アルカリ抽出法⁹⁾によりリンの除去を行った。既にアルカリ抽出法は焼却灰からリンを回収する手法として実用化されており、国内の終末処理場で実用規模のプラントが運転されている。しかし、リン回収後に発生する焼却灰残渣（以下、脱リン灰）の利用実施例はほとんどなく、早期の利用技術の開発が望まれている。この残渣に相当する焼却灰を以下の手法で作製し、本検討ではリン濃度が低減された脱リン灰として利用することにした。作成手順を Fig.4-7 に示す。まず、原灰 100 kg と 0.5 mol/L の水酸化ナトリウムを固液比 1:10 と

し 70℃で 30 分間攪拌して、リンをアルカリ液中に溶出させる。固液分離後、固体残渣に新たな水酸化ナトリウム溶液を加え同じ条件で 2 次抽出を行い、抽出操作が完了した後、固体残渣を水で 2 度洗浄して、最終的に pH 4.5 ~ 5.5 の間で安定するまで希硫酸を加え中和する。これをフィルタープレスで固液分離し、脱リン灰を得た。



* Decreased-P : SSA with decreased phosphorus using NaOH.

Fig.4-7 脱リン灰の作製方法

4.4.1.3 粉砕灰および脱リン灰の特性

作製した粉砕灰および脱リン灰の特性を Table 4-3 に示す。表中には比較として、石粉を 5 分間粉砕した試料も併記した。脱リン灰はリンの含有量が低下しており、生コンクリートと混合した際の強度確保が期待できる。また、脱リン処理により物性にも変化が見られ、BET 比表面積は著しく増加し、固めかさ密度も低下した。これはアルカリ可溶性の成分が抽出されることで、粒子形状が変化したためと考えられる。固めかさ密度の違いは、粒子内部の構造が異なるためである。石粉、原灰、脱リン灰、粉砕灰の断面像を Fig.4-8 に示す。原灰と脱リン灰の粒子が多孔質であるのに対し、粉砕灰は粒子中の孔隙が減少している。固めかさ密度の増加は、粒子中の孔隙が粉砕によって減少したためと考えられる。石粉の場合にほとんど変化が無いのは粒子が密実なためであり、これらは断面像の違いから読み取ることが可能である。

粉砕処理、脱リン処理により、フロー値は大きく変化した。フロー値の変化を Fig4-9 に示す。ここで言うフロー値は、アスファルト混合物用フィラーに用いられる指標で、テーブルフローが直径 20cm となる時の含水比を示している。この指標は、粒子中に収着される水量の影響を強く受け、試料の吸水性を検討する数値として便利である。脱リン灰ではフロー値が増加したが、焼却灰を粉砕すると、粉砕時間の増加とともにフロー値が減少した。このことは、粒子中の孔隙が増減し、粉砕によって開放される水の吸収量に変化したことを示している。前述した固めかさ密度の増加もこの現象を裏付けている。

フロー値の減少が示すように、実際に粉砕灰の混合に要する加水量は大きく減少した。粉砕灰の場合は、含水比 135 %で混合すると流動性が高まって材料分離が著しく、外割混合率 30 wt%で路盤材の作製が極めて困難となった。Fig.4-9 で示したように、フロー値は粉砕灰の場合大きく低下する。これは粉砕灰の場合、少ない加水量で混合時の流

動性を確保できることを示している。そこで混合物の作製にあたっては、粉碎灰の場合のみ、フロー値が 20 cm となる際の含水比 65 %を検討条件に加えた。

Table 4-3 供試材料（原灰、粉碎灰および脱リン灰）の物理特性

	Unit	Limestone (control)		Types of SSA used					Testing method	
		Original	5min	Original	Pulverized ^{*1}			Decreased-P		
					1min	5min	30min			
Phosphorus (P) content	wt %	<0.1		12.6					2.1	Molybdenum blue method
Particle size	D90	77.3	61.3	265	153	66	55.7	178	Laser diffraction	
	D50	26.4	17.4	104	24	9.6	2.5	68		
	D10	3.6	1.1	19	1.4	0.48	0.3	9.4		
Flow property	%	31.8	29.8	120	82.9	65.6	59.2	142	Hosou tyousa shikenhon binran(2006)	
Density	g/cm ³	2.730	2.708	2.715	2.705	2.727	2.816	3.004	JIS A 1202 (2009)	
Tap density	g/cm ³	1.60	1.52	0.66	0.94	0.99	1.12	0.62	Used cylinder : JIS Z2504 (2008) Tap speed : 100 taps / min Duration : 3min Stroke: 10mm	
BET surface area	m ² /g	0.4	1.8	5.5	5.5	6.8	10.2	39.2	Nitrogen adsorption	

*1 Pulverized : SSA pulverized using planet mill.

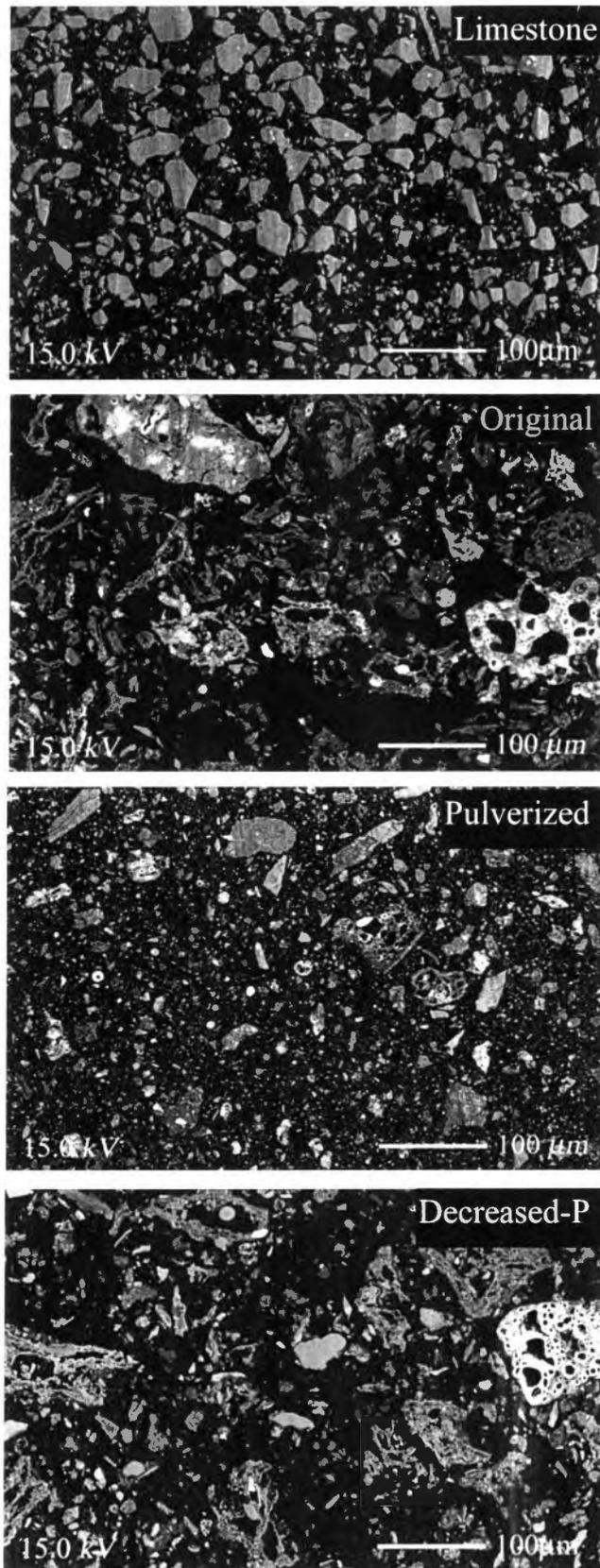


Fig. 4-8 供試材料（石粉、原灰、粉碎灰および脱リン灰）の断面像

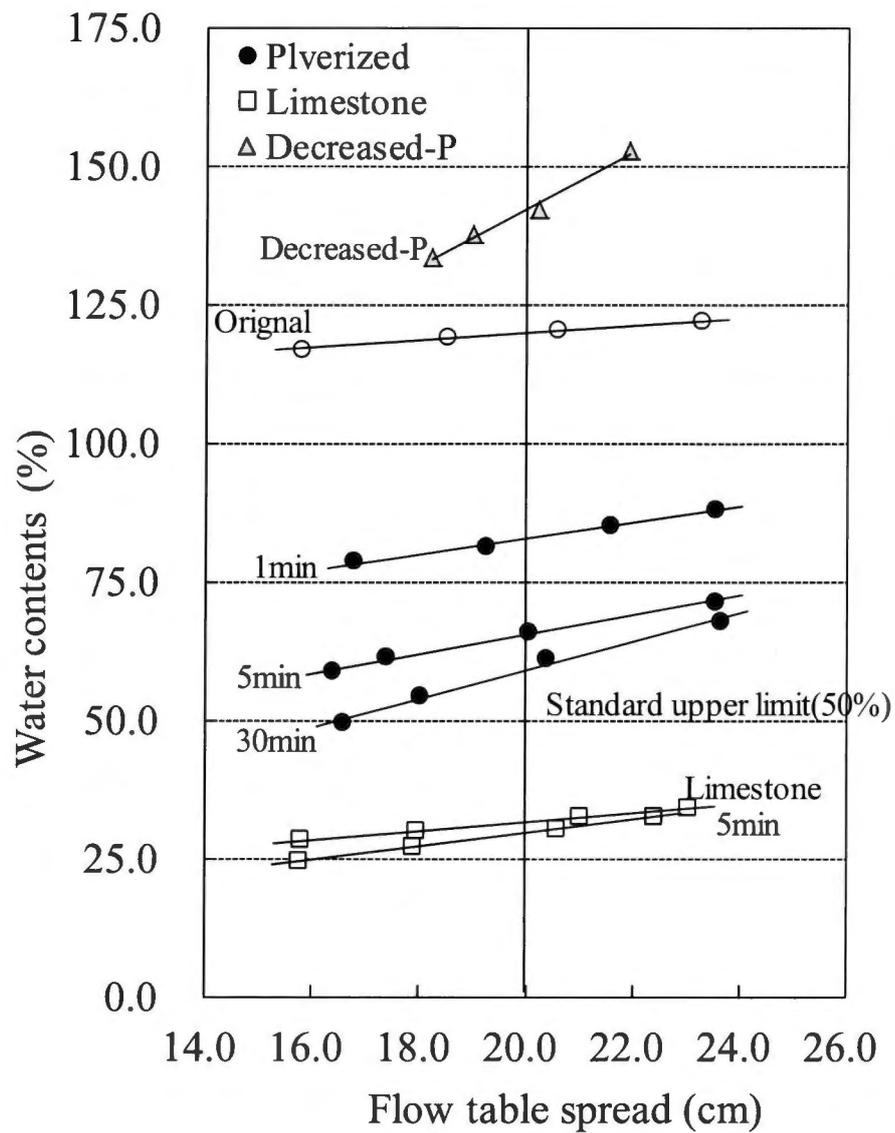
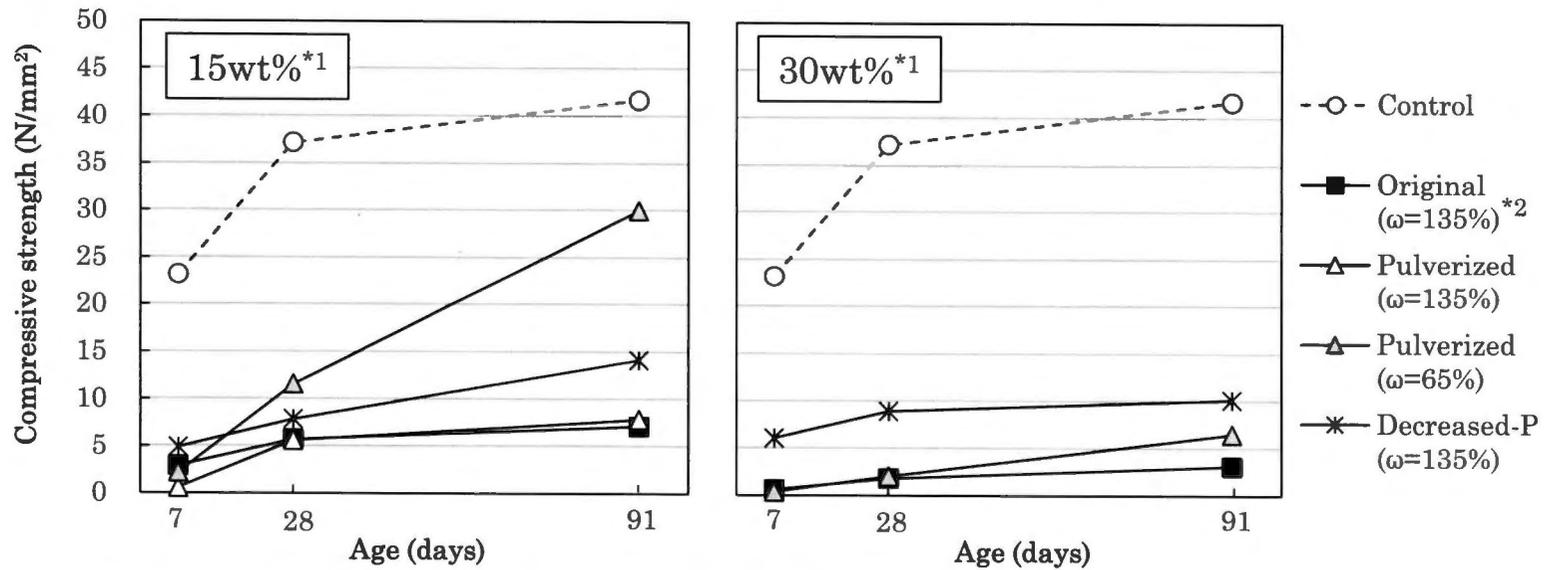


Fig. 4-9 供試材料（石粉、原灰、粉碎灰および脱リン灰）のテーブルフロー

4.4.2 粉砕灰・脱リン灰を用いた混合固化物の特性

焼却灰の種別および外割混合割合毎に整理した混合固化物の圧縮強度試験結果を Fig. 4-10 に示す。前述したように、原灰を混合することで圧縮強度は著しく低下するが、脱リン灰の場合は原灰と比較して強度低下が抑制され、混合割合を増しても比較的強度が保たれている。一方、同様に強度の改善を期待した粉砕灰の 7 日強度は、原灰と比較しても改善が見られない。脱リン灰はリン酸塩の低減によって初期の水和反応が順調に進むものの、粉砕灰は微粒化により原灰よりもリン酸塩の反応性が増し、水和阻害が起こりやすくなったと考えられる。その後の 28 日、91 日強度は含水比 135 %では原灰と同程度の強度となり、期待した多孔質構造の低減による強度増加は起こらないと言える。しかし、粉砕灰は混合時の含水比を減じることが可能であり、含水比 65 %で混合した場合には、28 日、91 日強度が原灰と比較して増加した。そこで、焼却灰に加水した水量を計算に加え、セメント水比と 28 日強度の関係をプロットした (Fig. 4-11)。条件が少ないため、直ちに結論付けることはできないが、両者には直線的な関係がみられ、セメント水比が 28 日圧縮強度を決定づける支配的な要因であると推察される。



*1 15wt%, 30wt% : Added SSA weight versus fresh returned concrete weight.

*2 ω : Moisture content of SSA including added water.

Fig. 4-10 混合固化物の材齢と圧縮強度

ただし、脱リン灰を 30%加えた場合のみ、この関係から外れ、想定より大きな強度が得られている。この強度は、路盤材の性質のみならず、製造工程上も重要な指標となる。前述した実用工程を想定すれば、初期強度を得た時点で速やかに剥ぎ取り、硬化ヤードから野積ヤードに移し、続く排出場所を確保することが望ましい。脱リン処理は初期強度の向上に寄与しており、この点においては、原灰よりも製造性が改善され良質な材料に改善されたと言える。逆に、粉碎灰を使用することで、初期強度が低くなるため、製造にあたってはこの点の注意が必要である。

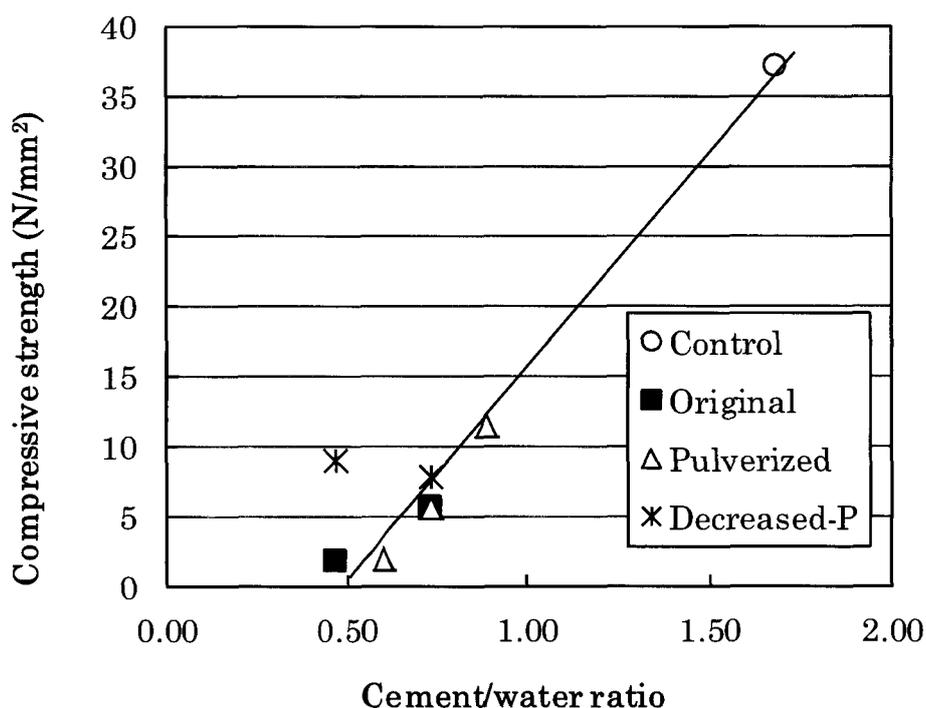


Fig. 4-11 材齢 28 日の混合固化物の圧縮強度とセメント水比の関係

4.4.3 粉砕灰・脱リン灰を用いた混合破碎物の路盤材としての品質

4.4.3.1 突固め前後の混合破碎物の粒度

突固め前後で整理した混合破碎物の粒度を Fig. 4-12 に示す。図中の点線は C-20 の目標粒度範囲である。焼却灰の混合による細粒化の進行は、原灰、粉砕灰を 30 wt%混合した場合に大きく、粒径 2.5mm 以下の粒子の目標粒度範囲を外れた。しかし、脱リン灰は細粒化が抑制されており、目標粒度を満足する。ここで、突固め時の材齢と同じ 28 日圧縮強度に着目すると、Fig. 4-10 に示したように、圧縮強度が 5 N/mm² 以下の配合で突固め後の粒度が目標範囲を外れることがわかる。この時の試料は、骨材とモルタル部が完全に分離しており、モルタル部は破碎・微粒化していることが観察された。固化し、粒状体として用いることを目的とした焼却灰が、使用に伴って再び微粒分に戻ることは、廃棄物処理の観点から望ましくない。その意味においても、路盤材として使用する時点での圧縮強度を 5 N/mm² 以上確保できるよう配合を設定するのが望ましい。

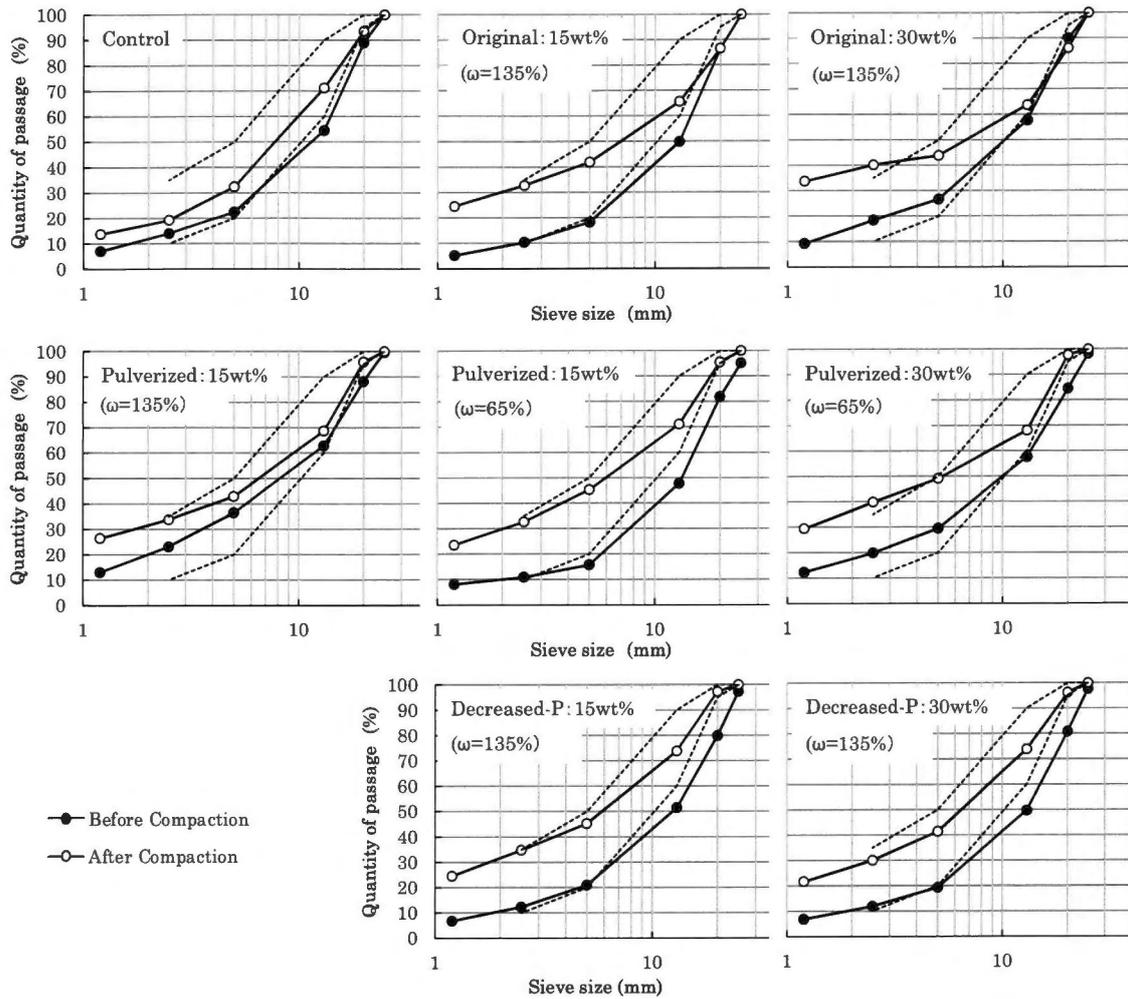


Fig. 4-12 混合破砕物およびその突き固め後の試料の粒度分布

4.4.3.2 混合破砕物の締固め特性

前述の試験結果より、原灰を多量に混合した際のオーバーコンパクションの発生が支持力低下の原因であり、これを抑制するため、モルタル分の強度確保、もしくは最適含水比の低下を指向して、結果として間隙水圧が上昇しないようにすれば良いものと考えられた。これを狙った処理が粉砕処理とリンの低減処理である。

締固め曲線を Fig4-13 に示す。粉砕灰を 30wt%混合した場合、原灰よりも最適含水比が低下した。この条件では、混合時に加えた水量が少ないため、モルタル部が原灰ほど多孔質にならず、混合破砕物への吸水が抑制されたものと考えられる。一方、脱リン灰は最適含水比が原灰よりも大きくなるものの、前述したように、強度は改善して細粒化が抑制された。これらの結果により、粉砕灰、脱リン灰を混合した場合は、30 wt%混合してもオーバーコンパクションが発生せず、原灰と比較して締固め性が改善した。

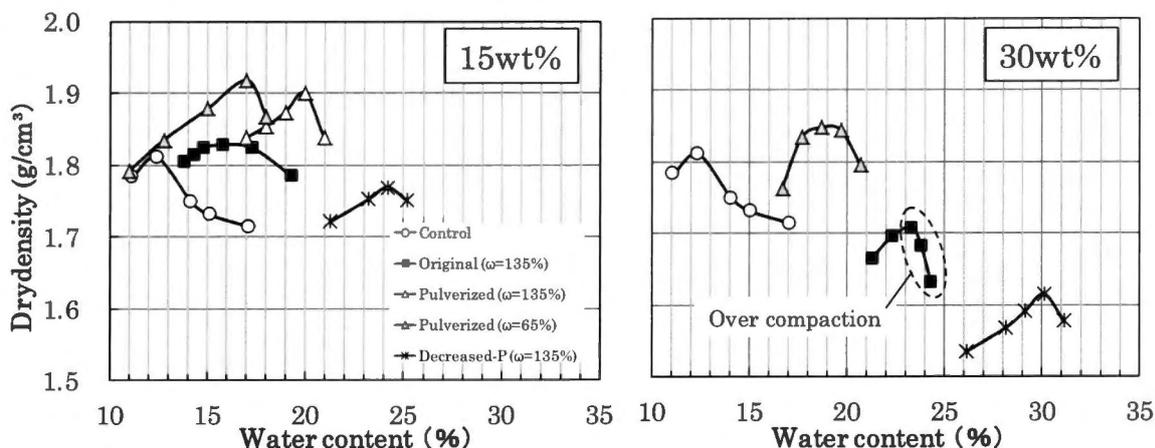


Fig. 4-13 混合破砕物の突き固め曲線

4.4.3.3 混合破碎物の支持力

外割混合割合を 30wt%とした場合の、突固め回数別の荷重貫入量曲線を Fig. 4-14 に示す。原灰を 30wt%混合すると、オーバーコンパクションが起きるため、突固め回数と貫入抵抗に対応関係が見られない。一方、粉碎灰、脱リン灰では突固め回数と貫入抵抗の対応関係は改善されており、30 wt%混合しても支持力が得られている。荷重貫入量曲線から求めた、混合破碎物の修正 CBR を Fig. 4-15 に示す。どの焼却灰においても、15 wt%の混合割合ではコンクリート単体で作製する破碎物より修正 CBR は大きく高まり、本検討で提案する焼却灰の混合一括処理の優位性が改めて示された。原灰では、混合割合を 30 wt%まで増すことにより、修正 CBR が急激に低下するが、締固め性が改善された粉碎灰および脱リン灰では修正 CBR を高値で保持することが可能である。本検討の手法では、焼却灰の粉碎処理、リンの低減処理が極めて有効であることを示している。この結果は、焼却灰混合量のさらなる増大の可能性を示している。

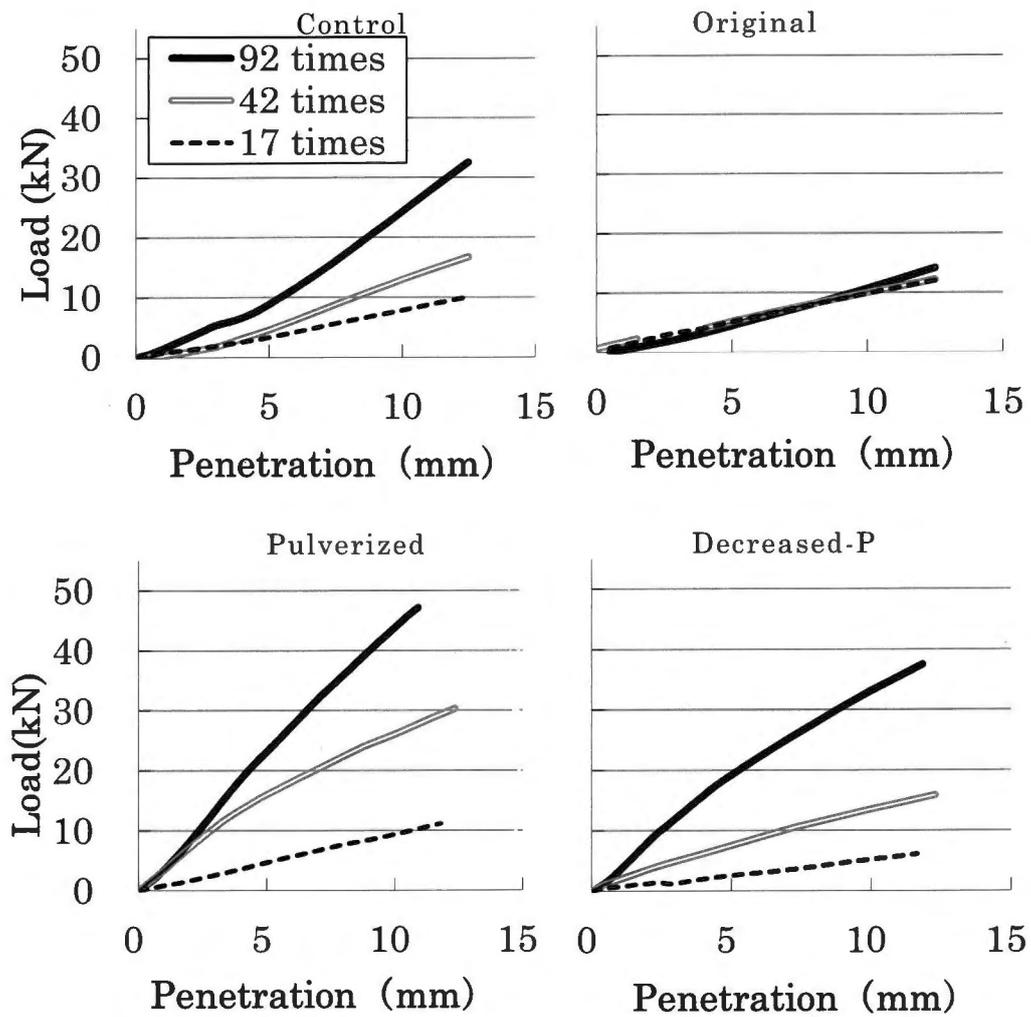


Fig. 4-14 外割混合率を 30wt%とした時の焼却灰種毎の
混合破碎物の突き固め回数別の荷重貫入量曲線

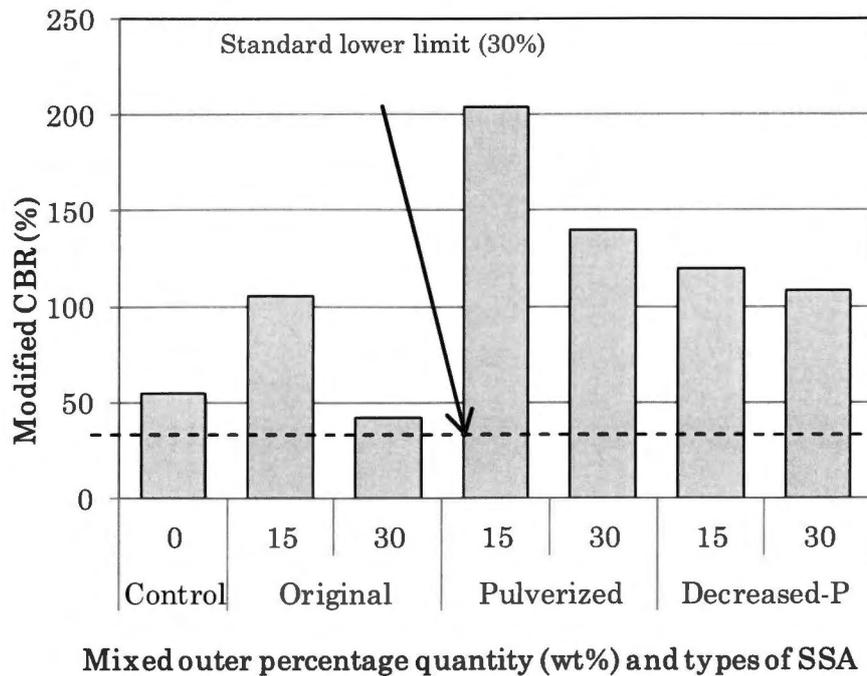


Fig. 4-15 混合破碎物の修正 CBR

4.4.3.4 混合破碎物のすり減り減量

混合破碎物のすり減り減量を Fig. 4-16 に示す。原灰の場合、検討したいずれの外割混合率においても、基準を満たしていなかった。しかし、粉碎灰の場合には 15wt%、脱リン灰の場合には 15wt%および 30wt%で目標値を満たしており、支持力と同様、粉碎処理、リンの低減処理による改善が見られた。本検討の条件では、28 日圧縮強度が 6 N/mm² 以上の時、すり減り減量の規格を満たした。すり減り減量試験では、鉄球の落下衝撃で破碎を進行させるため、すり減り減量は圧縮強度を指標とすれば、ある程度推定が可能であると考えられる。

本検討で作製した路盤は、下層路盤への適用を想定している。なお、アスファルト舗装要綱には、下層路盤材としてのすり減り減量の目標値は示されていない。張ら⁴⁾も述べているように、下層路盤材は集合体としての粒子の粒度および支持力が適切であれば、個々の粒子の性

質は問わない、との考えが根底にあるように思われる。現状から推察するに、再生コンクリート殻を利用する場合のみ目標値が設定されているとおり、この規定は下層路盤材としての品質要求ではなく、配合の不明な廃コンクリート殻を取り扱うことによる管理上の規定を示していると思われる。本検討の結果により、すり減り減量の規定を満足しない場合であっても、支持力を十分に得られる場合も認められた。

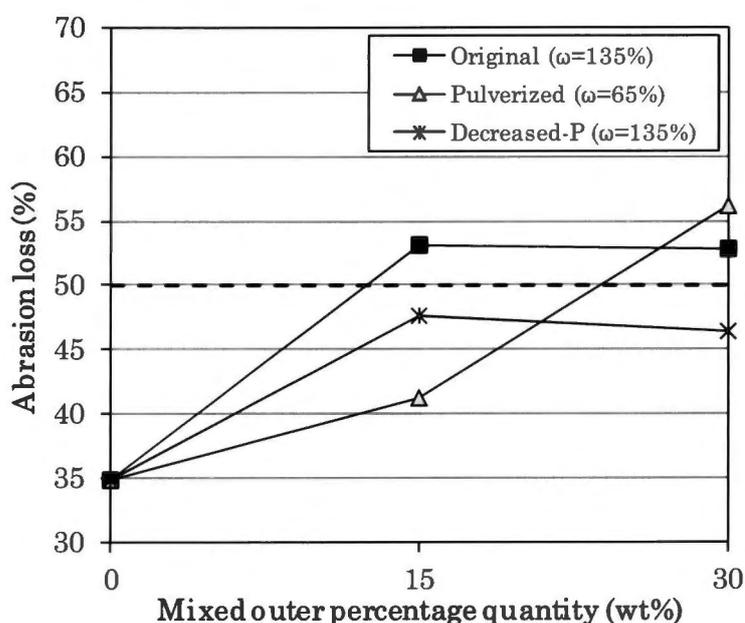


Fig. 4-11 混合破碎物のすり減り減量

4.5 混合破碎物の安全性

混合破碎物の溶出試験結果を Table 4-3 に示す。ここでは焼却灰、粉碎灰および脱リン灰の溶出試験結果も同表に示した。ヒ素、セレンおよびホウ素は、混合破碎物とすると溶出が抑制された。一方、混合破碎物は六価クロムが土壤環境基準を超えて溶出する。六価クロムは焼却灰からは溶出しないことから、焼却灰とセメントを混合した際に特異的に発生すると推察される。なお、セメント水和物の生成を阻害

する物質とセメントを混合した場合、六価クロムが溶出することが明らかとなっている¹⁰⁾。セメント中に含まれる六価クロムは、セメント水和物の生成により固定されるとされるが、焼却灰の混合によりセメント水和物の生成が阻害されたために、六価クロムが溶出したと思われる。なお、高炉セメント B 種を使用した場合は硫黄分が還元剤として働き、六価クロムの溶出量が低減されることが知られている。現在、土木工事用コンクリートは高炉セメントが標準で使用されており、これを使用することで六価クロムの溶出は抑制できる可能性がある。本手法の適用においては、六価クロムの溶出抑制について更なる検討が必要である。

Table 4-3 混合破碎物の溶出試験結果

Element	Concentrations (mg/L)								JIS K0058-1 Standard limits
	SSA			Base course material					
	Original	Pulverized	Decreased-P	Control*1 0%	Original *2 30%	Pulverized 30%	Decreased-P 30%		
Cd	0.003	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01	
Pb	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01	
Hg	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0005	
Cr(VI)	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.11	0.14	0.28	<0.05	
As	0.47	0.38	0.007	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01	
Se	0.048	0.039	0.002	<0.002	0.007	0.003	<0.002	<0.01	
F	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	0.33	<0.20	<0.20	<0.8	
B	0.72	0.80	0.12	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<1.0	

*1 Control : Products made without using the SSA

*2 Types of used SSA and mixed outer percentage quantity

4.6 結言

本章では岩手県の都南浄化センターの焼却灰を供試材料として選定し、戻りコンクリートと混合して混合破碎物を路盤材として利用する検討を実施し、以下の点を明らかとした。

- 1) 焼却灰を改質せず利用した場合、戻りコンに対する焼却灰の外割混合量を 15 wt%とすると、焼却灰を使用しない場合よりも支持力が高くなる。しかし焼却灰の外割混合量を 30 wt%に増すことで、作製した混合破碎物を突き固める際にオーバーコンパクションが発生し支持力が損なわれる。これは、混合破碎物の強度が低下して突き固め時に破碎されて水が吐き出され、モールド中の間隙水圧が上昇するためである。
- 2) 焼却灰を粉碎すると、戻りコンと混合する際の加水量を減じることができる。このことにより、作製した混合破碎物は密実となって、突き固め時の最適含水比が低下する。ゆえに、突き固め時の間隙水圧の上昇を抑制できる。
- 3) 焼却灰の脱リン処理により、焼却灰は多孔質になり、混合破碎物の最適含水比も高くなる。しかし、混合破碎物の強度は向上しており、突き固め時の混合破碎物の細粒化が抑制された。ゆえに、突き固め時の間隙水圧の上昇を抑制できる。
- 4) 粉碎または脱リン処理を行った焼却灰と戻りコンを混合した場合、間隙水圧の上昇が抑制されるため、外割混合量を 30wt%に増した場合においても混合破碎物はオーバーコンパクションが発生せず、支持力が高い。焼却灰の粉碎処理または脱リン処理は、外割混合量を増加させる手法として極めて有効であり、適切な混合設計とするこ

とで良好な下層路盤材が得られる。

- 5) 焼却灰からはヒ素およびセレンが溶出するが、戻りコンとの混合によって溶出量は土壤環境基準以下に低減が可能である。一方、混合破碎物からは六価クロムが溶出する。これは、セメント中に含まれる六価クロムに由来し、焼却灰がセメント水和物の形成を阻害するために、セメント水和物への固定作用が得られないためと推察される。この点は、高炉セメントの利用など、さらなる検討を要する。

参考文献

- 1) JI. Bhattu and KJ.Reid : Compressive Strength of Municipal Sludge Ash Mortars, ACI Materials Journal, No.86 (1989) pp.394-400
- 2) J. Monzó et al., : Use of sewage sludge ash (SSA)-cement admixtures in mortars, Cement and Concrete Research, No.26 (1996) pp.1389-1398
- 3) 赤城寛一、渡部 新太郎、神谷 雄三：下水汚泥焼却灰中のリンが流動化処理土の強度特性に及ぼす影響、トンネル工学報告集、No.16、(2006) pp.507-512
- 4) 張金喜、藤原忠司、諸戸圭一：戻りコンとスラッジを利用した路盤材の開発、土木学会論文集、No.634/V-45、(1999) pp.279-291
- 5) 社団法人日本道路協会：舗装施工便覧(平成 18 年度版)、(2005) pp.77-78
- 6) 社団法人日本道路協会：舗装設計便覧、p.79 (2006)
- 7) 社団法人日本道路協会：舗装再生便覧(平成 22 年度版)、(2010) pp.11-12
- 8) 金谷宗輝、小澤尚志、本間健一、市川牧彦：クリンカーの品質に及ぼすリンの影響、セメントコンクリート論文集、No.53、 pp.10-15 (1999)
- 9) 守屋由介、坪井博和、池田 裕一：アルカリ抽出法による下水汚泥焼却灰からのリン回収システム、用水と廃水、Vol.51、No.10(2009) pp.833-838
- 10) 細谷俊夫：セメント系固化材と六価クロム、材料、Vol.51、No.8、(2002) pp. 933-942

第 5 章

下水汚泥焼却灰のアスファルト混合物用フィラーとしての利用

5.1 諸言

第4章では、岩手県の都南浄化センターで発生する焼却灰を供試材料として選定し、舗装下部に用いられる舗装材料のうち、路盤材への利用技術について検討した。本章ではひき続いて、舗装上部に用いられるアスファルト混合物に使用される「フィラー」の代替利用を検討する。これは、路盤材利用と同様に他材料と混合して使用するため、焼却灰からのヒ素やセレンの溶出および飛散に対して有効な利用法であり、これまでも検討例は多い¹⁻⁴⁾。ただし、各報告はその適用性に主眼が置かれており、アスファルト混合物用フィラーとしての利用にあたっては、各終末処理場で排出される焼却灰ごとに、個別の検討を要してきた。

そこで本検討では、まず代表的な岩手県内で発生する焼却灰について「アスファルト混合物用フィラー」としての適用性の検討を行い、アスファルト混合物の性質に及ぼす影響について焼却灰の特徴を踏まえ考察する。次に焼却灰の持つ特徴を考慮し、アスファルト混合物におよぼす課題の摘出と解決を試みた。アスファルト混合物用フィラーとしての利用および提案する解決策は、複数種の焼却灰に適用できることが望ましい。したがってこの段階では、特徴の異なる複数の焼却灰を用いて、同用途の適用性を広く確認することとした。

5.2 岩手県の焼却灰における適用性

5.2.1 実験方法

5.2.1.1 供試材料

本項の実験に用いる供試材料（焼却灰）は、第3章で検討した焼却灰をそのまま用いた。焼却灰は第3章 Table 3-2、Table 3-3 で示したように、石粉と物理的・化学的に大きな違いがあり、アスファルト混合物の性質への影響を把握する必要がある。なお、焼却灰は使用前に105℃で恒量となるまで乾燥させて使用した。

5.2.1.2 アスファルト混合物の作製方法

本研究で対象としたアスファルト混合物は、表層材料としての使用を想定する。アスファルト混合物の種類は、岩手県内で表層としての使用実績の高い密粒度アスファルト混合物 (20F) とした。使用した骨材およびフィラーの物性は、Table 5-1 に示した。本研究で用いた焼却灰（表中では Iwate SSA）は、アスファルト混合物に使用される舗装用石灰石粉（以下、石粉）より粗粒である。表中には対象としたアスファルト混合物の合成粒度も示している。焼却灰と石粉の粒度は異なるため、厳密には合成粒度は同一とはならないが、石粉との比較を目的とし、フィラー以外の粒度は同一とした。使用したアスファルトはストレートアスファルト 80-100 とした。焼却灰は、石粉に対して置換して混合し、その置換割合は、15、30、45 wt% の3水準とした。

Table 5-1 使用した骨材およびフィラーの物性

Sieve size, (mm)	Crushed stone			Cumulative weight passing (wt %)					Combined aggregate
	S-20	S-13	S-5	Sand			filler		
				River	Pit	Fine	Lime stone (control)	Iwate SSA (waste)	
26.5	100								100
19	94.1	100							99.0
13.2	12.9	96.5	100						84.2
4.75	2.5	1.1	75.8	100	100				62.7
2.36			11.1	87.2	85.4	100		100	47.5
0.6			2.1	33.7	28.2	98.5		99.9	29.9
0.3				18.8	16.5	51.1	100	98.7	19.4
0.15				7.9	6.9	2.4	99.2	75.4	10.2
0.075				3.2	3.2	0.9	93.4	53.6	8.2
s.g. (g/cm ³)	2.89	2.92	2.86	2.78	2.79	2.69	2.73	2.60	-
mix ratio (wt%)	17.4	16.5	16.4	14.8	13.8	13.3		7.8	100

5.2.1.3 評価方法

各水準の置換量でマーシャル配合試験を実施し、舗装設計施工指針で定めるマーシャル基準値より最適アスファルト量およびマーシャル安定度（規格値 4.9kN 以上）を求めた。さらに、各水準の最適アスファルト量で混合物を作製し、残留安定度（規格値 75%以上）を求めた。また、目標値は設定されていないが、動的安定度、ラベリング摩耗量、圧裂強度および圧裂係数を求め、焼却灰の使用によるアスファルト混合物性能への影響を確認した。これらの試験方法は、「舗装調査・試験法便覧」に準拠している。なお、ラベリング摩耗量は往復チェーン型の試験機でクロスチェーンを用いて測定し、供試体の養生および試験温度は-10℃とした。

5.2.2 実験結果および考察

5.2.2.1 マーシャル特性

マーシャル配合試験により得た、特性結果の一部を Fig. 5-1 に示す。フィラー全体の質量および骨材の配合割合は、同一条件とした。横軸は、石粉に対する焼却灰の質量置換割合を示しており、0%は全量石粉を使用した場合を示す。これに配合アスファルト量をパラメーターとして、マーシャル特性の変化を示した。結果、焼却灰の置換に伴いマーシャル安定度およびマーシャルフローは低下し、空隙率は増加する傾向が認められた。このうち、マーシャル安定度の低下は Al Sayed ら¹⁾の報告と同様であるが、一方、鈴木ら³⁾は変化しないと指摘している。その理由として、検討に用いた焼却灰粒子の性質がそれぞれに異なるためと推察される。マーシャルフローおよび空隙率については、骨材間でバインダーとして働くアスファルト（以下、有効アスファルト）の量が強く影響すると考えられており、本実験の結果から、焼却灰の混合によって有効アスファルトが減少したものと推察される。すなわち、使用した焼却灰がアスファルトを吸収する性質を持つことを示している。

各置換割合における最適アスファルト量を Table 5-2 に示す。マーシャル基準値から求めた最適アスファルト量は、焼却灰の置換割合に比例して増加しており、前述した焼却灰によるアスファルトの吸収が原因と考えられる。同表には、最適アスファルト量とした混合物のマーシャル特性も示している。岩手県の焼却灰の場合、焼却灰の置換量増加に伴って安定度／フロー値（以下、本報では S/F 値と呼ぶ）は低下する傾向にあり、荷重に対して変形しやすい混合物となることが明らかとなった。

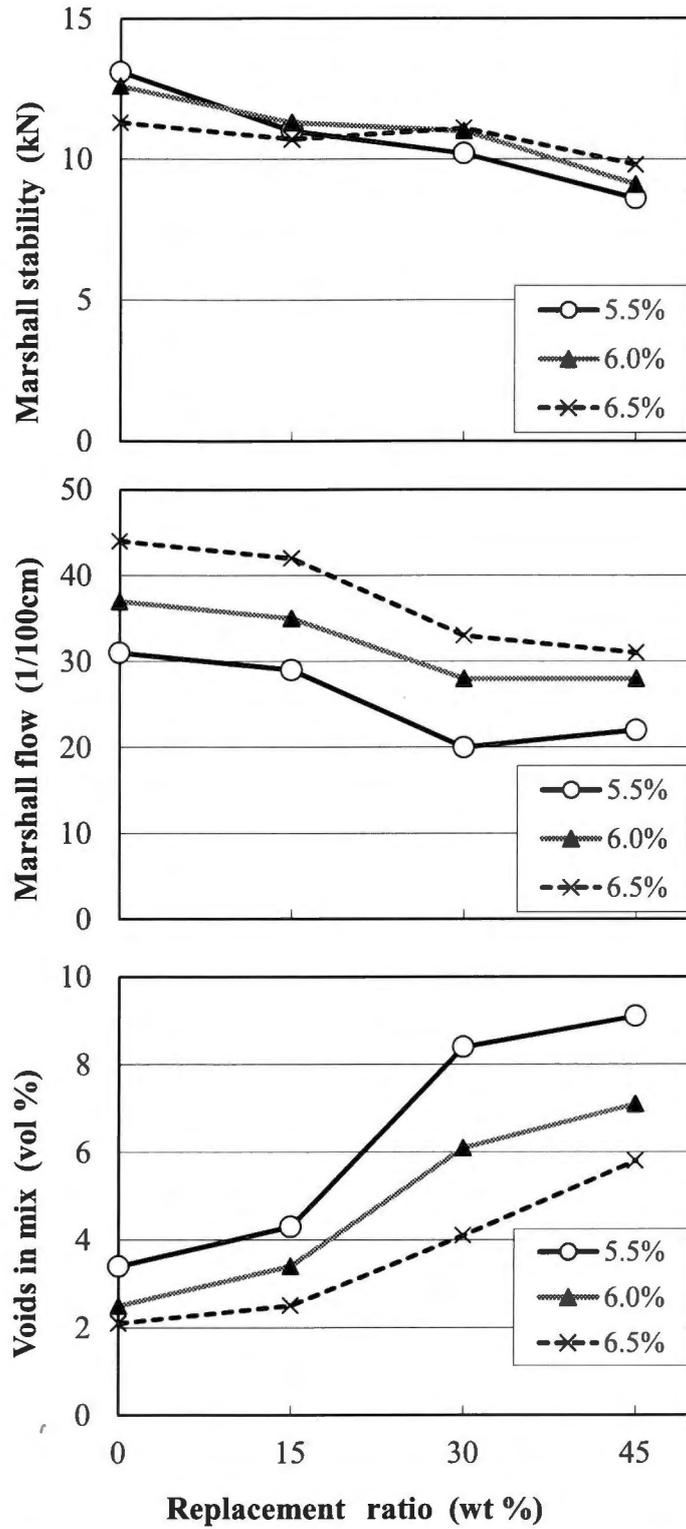


Fig. 5-1 焼却灰の置換量とマーシャル特性の関係

Table 5-2 焼却灰の各置換水準における、
最適アスファルト量時のマーシャル特性

Marshall parameter	unit	Replacement ratio (wt %)				Japan Spec
		0%	15%	30%	45%	
Optimum asphalt content	wt %	5.6	6.1	6.6	7.0	-
Compacted mix density	g/cm ³	2.470	2.448	2.442	2.405	-
Marshall stability	kN	12.1	10.5	8.8	7.3	>4.9
Marshall flow	1/100cm	31	37	35	40	20-40
S/F (Stability / Flow)	kN/m	3,903	2,838	2,514	1,825	1500-4400
Voids in mix	vol %	3.9	4.1	4.2	4.7	3-5

5.2.2.2 残留安定度

残留安定度の測定結果を Fig. 5-2(a) に示す。残留安定度は焼却灰の置換量の増加に伴って低下した。この結果は、焼却灰の混合によって耐水性が劣ることを示している。ただし低下の程度は少なく、試験値はいずれも基準値である 75% を超えており、使用上の課題は生じないと考えられる。

5.2.2.3 動的安定度

動的安定度の測定結果を Fig. 5-2(b) に示す。焼却灰の置換量の増加に伴い、動的安定度、すなわち流動に対する抵抗性は顕著に低下する。動的安定度は、アスファルト量と負の相関、S/F 値と正の相関があるとされており⁵⁾、この傾向を支持する結果となった。この試験では、混合物に対し輪荷重による圧密作用が働き、供試体が塑性変形する。したがって、焼却灰内部に取り込まれたアスファルトが再放出され、流動に寄与する有効アスファルトとして働いた可能性がある。この結果は、焼却灰の配合により、わだち掘れが起りやすくなる傾向を示しており、配合設計に注意を要する。

なお、わだち掘れに対する抵抗性が要求される場合には、一般に改

質アスファルトが使用され、動的安定度は 1500 回/mm 以上が規格値である。そこで動的安定度 4200 回/mm の密粒度アスコン(20)改質Ⅱ型のうち、石粉 30wt%を焼却灰で置換して動的安定度を測定した。その結果動的安定度は 3150 回/mm を保持しており、焼却灰の使用が可能であることが認められた。

5.2.2.4 摩耗量

チェーンラベリング試験の結果を Fig. 5-2(c)に示す。摩耗に対する抵抗性は、アスファルト量、フィラー量が増した場合に向上するとされる⁶⁾。アスファルト量は、焼却灰を多く置換する程増加するため、耐摩耗性は高まることも予想されたが、焼却灰置換量の増加に伴って低下した。焼却灰のアスファルトの吸収により、骨材把握に寄与する有効アスファルトが増加せず、さらに、摩耗抵抗に寄与する密実な石粉粒子が減少することが主因であると推測される。

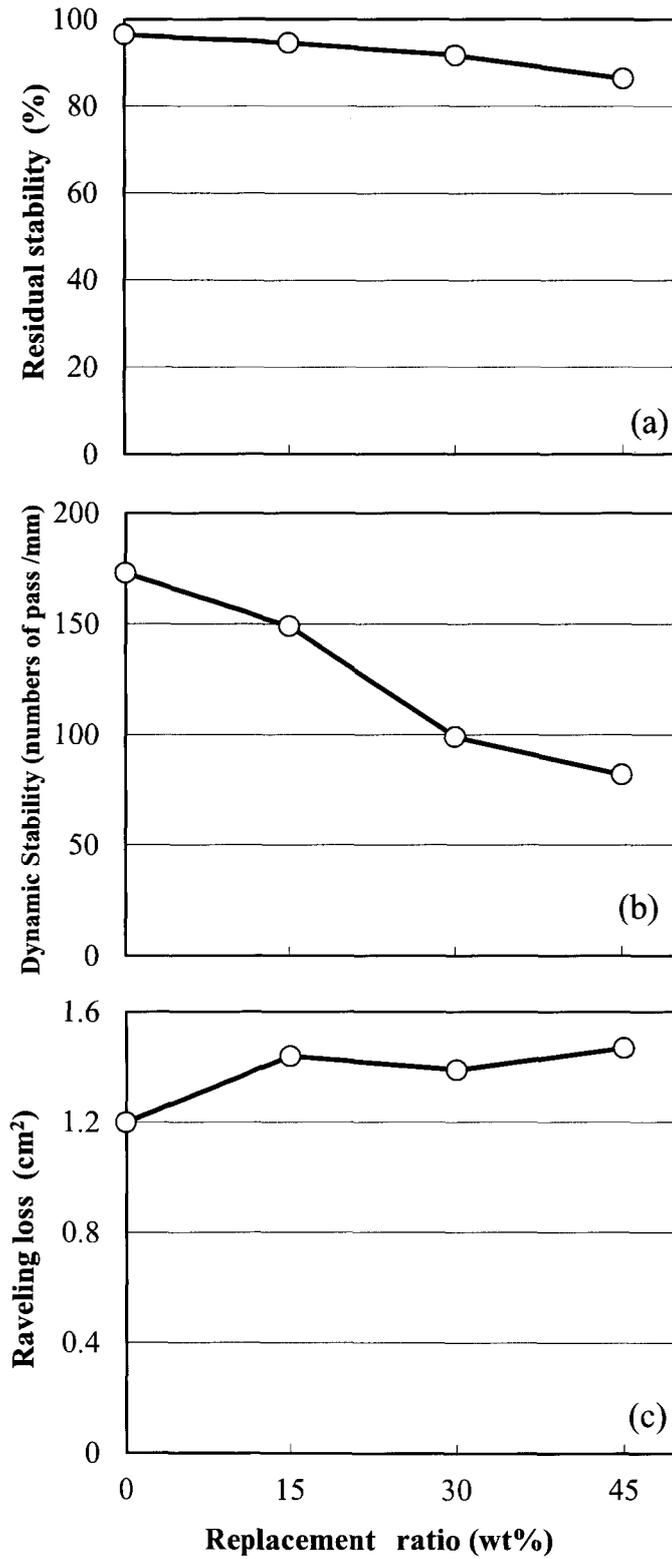


Fig. 5-2 焼却灰の置換量と残留安定度、動的安定度
およびラベリング摩耗量の関係

5.2.2.5 圧裂強度

圧裂強度を Fig. 5-3 に示す。ひび割れ抵抗性はアスファルト混合物の重要な性質の一つとなる。試験の結果、圧裂強度は焼却灰の置換率の増加に伴い低下する傾向にあった。一方、圧裂破壊に至るまでの荷重変位曲線の傾きが圧裂係数であり、焼却灰の置換率の増加に従い、その値は減少した。これら二つの結果を総合すると、焼却灰の置換率の増加に伴い、圧裂破壊までの変形量は大きくなる一方、強度が小さくなることを示しており、結果的にひび割れ抵抗性は低下するものと評価できる。

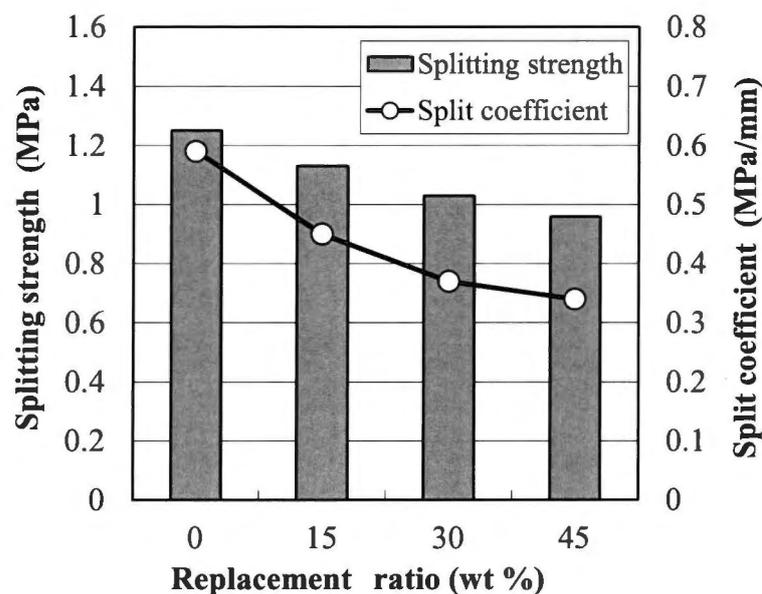


Fig. 5-3 焼却灰の置換量と圧裂強度および圧裂係数

以上のように、岩手県内で発生した焼却灰を石粉として利用した場合、アスファルト混合物の耐久性を表す特性値は総じて低下する傾向が確認された。しかし、焼却灰を石粉と45wt%置換した場合、品質基準範囲を外れるものは確認されなかった。したがって、この置換量以

下で使用するによりアスファルト混合物として必要な性質は満たし、適用が可能であると判断できる。

5.2.2.6 焼却灰中の多孔質粗粒子の影響

前述の通り、岩手県の焼却灰の使用上の課題は主に、配合アスファルト量の増大およびマーシャル安定度の低下に起因する混合物の荷重抵抗性の低下である。これは3章で既に述べたように、使用した焼却灰に含まれる粗粒かつ多孔質のリン酸マグネシウム粒子に由来すると推察された。この推察を検証するため、焼却灰を150 μm ふるい残分(24.6wt%)と通過分(75.4wt%)の2つに分け、150 μm ふるい残分を同じ粒度分布の細砂に置換した試料(以下、粗粒置換灰：図表中では Replaced SSA と略記)を作製して、以下の実験に供した。この部分の除去により、最適アスファルト量の低下やアスファルト混合物の物性の向上が図られれば、経済性を考慮しても適用可能性は高い。

この粗粒置換灰を混合した、アスファルト混合物のマーシャル特性を Table 5-3 に示す。なお、置換率は石粉の30wt%とした。表中には、比較として石粉のみの結果および同量の焼却灰で置換した結果も併記した。粗粒置換灰の最適アスファルト増加量は、そのままの焼却灰を同量混合した場合に比べ、40%(0.4wt%)低下した。これは、予想した通り粗粒部に存在する多孔質な粒子が減少し、孔隙へのアスファルト吸収量が減少したためと考えられる。さらに、粗粒置換灰のマーシャル安定度の低下は未処理の焼却灰と比較して80%(2.6kN)改善した。多孔質な粒子は混合物中で脆弱部となって破壊の起点となり、マーシャル安定度低下の主因となっていたものと推察される。

しかしこの実験では、多孔質な粒子の孔隙だけではなく、化学組成の違いも影響した可能性がある。そこで150 μm ふるい残分を粉碎し、同目開きのふるいを通した焼却灰(以下、粗粒粉碎灰：図表中では

Pulverized SSA と略記) を作製して、これを混合した場合のマーシャル特性についても Table 5-3 に示した。その結果、粗粒粉碎灰は粗粒置換灰と同様に最適アスファルト量が 60%(0.6wt%) 低下し、マーシャル安定度は 110% (3.7kN) 改善した。これらの結果を総合すると、焼却灰を利用する際の問題点であった最適アスファルト量の増加と、マーシャル安定度の低下は、粗粒部の孔隙が影響していると言える。このように、多孔質な粒子の除去および粉碎は、焼却灰の利用可能性を高める方法として極めて有望である。また同時に、焼却灰をアスファルト混合物用フィラーとして利用する場合は、多孔質粒子の存在に特段の注意を要すると考えられる。

Table 5-3 粗粒部を粉碎および置換した焼却灰を用いたアスファルト混合物の最適アスファルト量時のマーシャル特性

Marshall parameter	unit	Replacement ratio (wt %)				Japan Spec
		0%	Original SSA 30%	Replaced SSA ^a 30%	Pulverized SSA ^b 30%	
Optimum asphalt content	wt%	5.6	6.6	6.2	6.0	-
Compacted mix density	g/cm ³	2.470	2.442	2.453	2.457	-
Marshall stability	kN	12.1	8.8	11.4	12.5	>4.9
Marshall flow	1/100cm	31	35	31	31	20-40
S/F (Stabilty / Flow)	kN/m	3,900	2,510	3,690	4,050	1500-4400
Voids in mix	vol%	3.9	4.2	3.4	3.6	3-5

5.3 焼却灰の改質および多種の焼却灰における適用性

前項までの実験により、焼却灰中に含まれるリンとマグネシウムを主成分とする多孔質な粗粒子が、最適アスファルト量の増加およびマーシャル安定度の低下を引き起こすことを明らかにした。第4章では、焼却灰を粉砕することで、粒子中の孔部が減少することを指摘した。そこで本項では、焼却灰を粉砕した後にフィラーとして用いて、アスファルト混合物の性質の改善を試みた。

5.3.1 実験方法

5.3.1.1 供試材料

本項では種々の供試材料（焼却灰）の適用性を判断するため、新たな焼却灰を対象に加えた。以降、前項までに検討した焼却灰を焼却灰 A、本項で新たに検討を加える焼却灰を焼却灰 B とする。各焼却灰を排出した終末処理場の特徴を Table 5-4 に示す。

Table 5-4 試験に用いた焼却灰を排出する終末処理場の特徴

焼却灰種別	下水排除方式	終末処理場所在地	処理能力 (千m ³ /日最大)	汚泥消化の有無	焼却炉形式	燃烧温度 (°C)
焼却灰A	分流(一部合流)	岩手県盛岡市	134	有	流動床式	830
焼却灰B	分流	滋賀県草津市	217	無	流動床式	850

本検討では、現在、全国の各終末処理場で採用されている汚泥処理工程のうち、焼却灰の多孔性に関わる要素として消化工程に着目した。焼却灰 A に含まれる多孔質な粗粒子は、汚泥消化工程等の嫌気性条件下で発生する、リン酸マグネシウムアンモニウム粒子に起因していると考えられ、汚泥消化工程を有する処理場で発生する焼却灰は改質を行わない場合はフィラーへの利用が不適となる可能性が高い。一方、

日本においては、焼却設備を有する 96 終末処理場のうち、消化工程を持たない施設が 75 処理場ある⁷⁾。そこで本研究では、これらの処理場の中から 1 処理場を選定し、ここから排出される焼却灰 B を用いて、焼却灰 A と比較する。

一方、50 年後には高品位リン鉱石の枯渇⁸⁾が予想されており、焼却灰はリン資源としても注目されている。リンの回収方法としては前述した通り、アルカリ抽出法⁹⁾が確立されており、下水処理場への導入が進んでいる一方、リンを回収した後に残る残渣（以下、脱リン灰という）の有効利用が新たな課題となっている。リンを回収した後、その残渣をフィラーとして利用できれば、焼却灰のさらなる有効活用が図られる。しかし第 4 章で指摘したように、アルカリ抽出法を適用した脱リン灰は原灰より多孔質な性状となるため、フィラーとして利用できない可能性がある。本項では、この脱リン灰も粉砕による改質後、フィラーとして用い、アスファルト混合物の性質の改善を図り、アスファルト混合物用フィラーとしての有効利用を試みた。

5.3.1.2 焼却灰および脱リン灰の粉碎

粉碎灰および脱リン灰は、焼却灰 A、焼却灰 B を元に第 4 章で示した方法に準じて作製し、粉碎灰 A、粉碎灰 B、脱リン灰 A、脱リン灰 B を得た。脱リン灰は、調整後、湿潤状態であるため、110℃で恒量となるまで乾燥させ、乾燥時固化したものは極力粒子を粉碎しないよう慎重にメノウ乳鉢でほぐした。この脱リン灰に対し、粉碎灰を得る手順と同様にして粉碎し、粉碎した脱リン灰（以下、脱リン粉碎灰）を得た。この時の粉碎時間は 5 分間とした。得た試料の化学組成を Table5-5 に示す。アルミニウム、カルシウムおよび鉄の含有量は両焼却灰により大きく異なる。処理工程で加えられる薬品（凝集剤など）の相違によると考えられる。両焼却灰においてリンを多量に含む点は共通しており、リン抽出処理後の脱リン灰 A および B は、リンの含有量が元の焼却灰より低下している。

Table5-5 焼却灰、脱リン灰の化学組成

元素 (wt %)	石粉	試料A		試料B	
		焼却灰A	脱リン灰A	焼却灰B	脱リン灰B
SiO ₂	0.5	20.6	23.5	22.0	29.0
Al ₂ O ₃	0.3	12.6	9.0	32.9	28.5
CaO	97.6	15.3	17.9	6.7	8.7
P ₂ O ₅	*	26.4	21.2	27.7	17.0
Fe ₂ O ₃	0.2	13.0	16.3	0.3	4.0
MgO	0.4	4.2	4.6	2.3	3.2
K ₂ O	*	1.4	0.9	1.8	1.5
Na ₂ O	0.7	0.5	1.0	0.9	3.8
SO ₃	*	0.8	1.8	0.6	1.9

検討に用いた焼却灰および脱リン灰の粉体性状の一覧を Table5-6 に示す。表中には、フィラーとして通常使用される石粉の例も示した。粒度は JIS A5008 の評価項目と合わせ、ふるい目開きで整理している。いずれの焼却灰、脱リン灰においてもそのままでは粒度の目標値を満たさないが、粉碎処理によって目標値を概ね満足した。密度は焼却灰 B で目標値を満足せず、粉碎による変化もほとんど認められなかった。密度は飛散抵抗性の確保から定められた目標値であり、アスファルト混合物の性能に直接の影響はないものと考え、以降の検討についても行った。一方、固めかさ密度は各試料で大きく異なり、焼却灰と脱リン灰は石粉と比較して小さい。これは粒子内部の構造が異なるためである。第 4 章の Fig.4-2 に石粉、焼却灰 A、脱リン灰 A および粉碎灰 A の断面像を示した。前述の図が示すように、石粉の粒子が密実であるのに対して、焼却灰と脱リン灰の粒子は多孔質である。これに対し、粉碎灰は粒子中の孔隙が減少している。固めかさ密度は、焼却灰および脱リン灰を粉碎処理すると概ね、20～80% 増加しており、粒子中の孔隙が粉碎によって減少したと考えられる。石粉を粉碎しても固めかさ密度の変化が少ない理由として、粒子中に孔隙がほとんどないためであり、これらは断面像の違いにも表れている。

Table5-6 焼却灰 A、焼却灰 B から作製した試料の物理特性

試料種	対照		試料A				試料B				JISA5008 目標値	測定方法	
	石粉	粉碎石粉	焼却灰A	粉碎灰A	脱リン灰A	脱リン 粉碎灰A	焼却灰B	粉碎灰B	脱リン灰B	脱リン 粉碎灰B			
通過径(mm)	通過質量百分率(wt%)												
600	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	レーザー回折法(湿式測定)
150	96.3	97.9	56.3	95.9	82.3	93.4	81.0	93.3	74.5	86.3	90以上		
75	84.9	90.5	35.4	89.3	65.3	86.5	54.6	84.9	58.8	76.0	70以上		
38	50.9	65.3	15.1	72.9	35.2	73.5	28.1	66.2	36.4	59.6	—		
20	33.0	49.2	8.3	62.5	20.6	64.6	19.4	54.6	26.0	49.9	—		
10	16.5	29.3	3.0	46.2	6.9	50.3	11.2	37.1	14.0	35.3	—		
密度(g/cm ³)	2.730	2.708	2.715	2.727	3.047	2.923	2.453	2.513	2.783	2.658	2.6以上	JIS A 1202 (2009)	
フロー値(%)	31.8	29.8	120	65.6	132	64.6	112.2	74.6	205	90.9	50以下	舗装調査・試験法便覧(2006)	
固めかさ密度(g/cm ³)	1.6	1.5	0.66	0.99	0.57	1.04	0.74	0.83	0.55	0.86	—	JIS Z2504 (2008)規定容器使用 落下高 10mm, 100 回 / 分, 3分間	
BET比表面積(m ² /g)	0.4	1.8	5.5	6.8	46.7	35.1	5.0	7.1	54.3	52.1	—	窒素吸着法	

焼却灰 A は、粉碎によってフロー値が改善する（第 4 章 Fig.4-9）。同様に、焼却灰 B、脱リン灰 A および脱リン灰 B においても、フロー値は粉碎によって大きく改善し、粉碎処理は種々の焼却灰に対しても有効であることが明らかとなった。焼却灰における粉碎時間毎のフロー値の変化を Fig.5-4 に示す。なお、比較として同条件で粉碎した石粉も示した。粉碎時間の増加とともにフロー値が低下しており、この変化は粒子中の孔隙が粉碎の進行によって徐々に開放され、水の収着量が減少するためと考えられる。本実験の範囲では、フロー値は石粉の目標値である 50%を下回る成果は得られなかったが、粉碎によるフロー値の改善効果は明らかに認められた。以上の結果により、焼却灰や脱リン灰等の多孔質な材料に対して粉碎処理が有効であり、粉碎によって粒子中の孔隙が解放されることが明らかになった。

フロー値は、水を用いて得た試験値であるが、経験的にはアスファルト混合物に用いた際のアスファルト吸収量とも強い関係があるとの報告がされている¹⁰⁾。この結果は、アスファルトと混合した際、粒子へのアスファルト吸収量の減少による、最適アスファルト量の増加抑制の効果の可能性を示している。

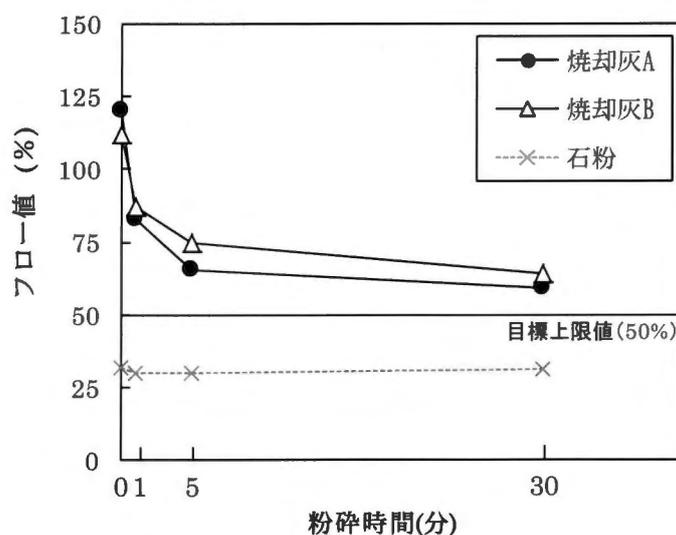


Fig. 5-4 粉碎時間とフロー値の関係

5.3.1.3 アスファルト混合物の作製方法

試験を実施するアスファルト混合物種は前項までと同様に、表層として利用実績の高い、密粒度アスファルト混合物 (20F)とした。なお、前項の検討と骨材の採取時期が異なるため、骨材性質が若干異なることから、Table 5-7 の配合の通り、規定の範囲内で調整した。前項と同様、石粉との比較を目的とし、フィラー以外の粒度は同一とし、使用したアスファルトはストレートアスファルト(80-100)とした。石粉と試料の置換率は 30 wt%を中心として設定し、場合により置換率 15 wt%、45 wt%、100 wt%を条件に加えた。

Table 5-7 骨材配合

ふるい目開き (mm)	質量通過百分率 (wt %)						石粉
	S-20	S-13	S-5	川砂	山砂	細砂	
26.5	100						
19	90.4	100					
13.2	13.7	98	100				
4.75	0.9	3.8	84.4	100	100		
2.36	0	0.6	7	82.1	87.2	100	
0.6			1.1	30.1	35.1	95	
0.3			0	17.2	18.6	43.6	100
0.15				6.8	6.7	1.7	99.5
0.075				1.9	1.8	0.9	93.3
s.g. (g/cm ³)	2.89	2.90	2.98	2.78	2.79	2.69	2.73
配合比(wt%)	17.0	21.1	9.8	19.2	9.9	14.3	8.7

5.3.1.4 評価方法

前項と同様に、各試料の各水準でマーシャル配合試験を実施した。舗装設計施工指針で定めるマーシャル基準値から OAC を求め、アスファルト混合物を作製し、マーシャル安定度と残留安定度を確認した。さらに、適用可能性のある混合物については動的安定度を求めて粉碎処理の効果を確認した。チェーンラベリング試験は、近年ではスパイクタイヤの廃止により本州では検討されないケースが多く、前項の検討でも特に課題が認められなかったことから、検討から除外した。

5.3.2 実験結果および考察

5.3.2.1 マーシャル特性

マーシャル安定度試験により求めた各配合の OAC を Fig.5-5 に示す。OAC は焼却灰あるいは脱リン灰を用いることで、置換率の増加に伴い増加するが、粉碎した試料ではこの関係が失われ、置換率によっては石粉のみの配合と同等、あるいはそれよりも低下することが確認された。粉碎灰あるいは粉碎脱リン灰は、粉碎前よりかさ密度が大きいため、同じ重量を混合すると混合物全体として容積が小さくなる。具体的には、混合物密度は焼却灰 A を利用した場合は 2.452 g/cm^3 、粉碎灰 A を利用した場合は 2.490 g/cm^3 である。したがって単位重量あたりの容積の変化に伴うアスファルト量にはほとんど相違がない。ゆえに、OAC の低減は、フィラーの容積が少ないためでなく、粉碎による焼却灰の物性の変化によって引き起こされると考えられる。

OAC が低減した理由は、

- ・ 粉碎により、粒子中の孔隙が解放されてフロー値が低くなり、粒子内部への吸収アスファルト量が少なくなる
 - ・ 粒子の粒径が小さくなり骨材間へのフィラーの充填効果が高まる
- の 2 点が挙げられる。Fig.5-6 に、アスファルト量を 5.5%、石粉に対する置換率を 30wt% に設定し作製したマーシャル供試体の空隙量を示す。いずれの焼却灰も、粉碎を進行させるほど空隙量が低下する傾向にある。粒度分布をもつ試料の充填率は、粒子径分布が広がるほど高くなることが報告されており¹¹⁾、粉碎により粒子径分布が広がることで、微粒化した焼却灰が骨材間の空隙を充填し、空隙に充填されるアスファルト量が少なくなって OAC が減少すると考えられる。比較のため、粉碎後の石粉をフィラーとして全量用いたところ、OAC は粉碎前の 5.5% から 4.6% へと減少した。したがって、細粒化によって OAC の低減効果が得られたため、細粒化の効果が確認された。

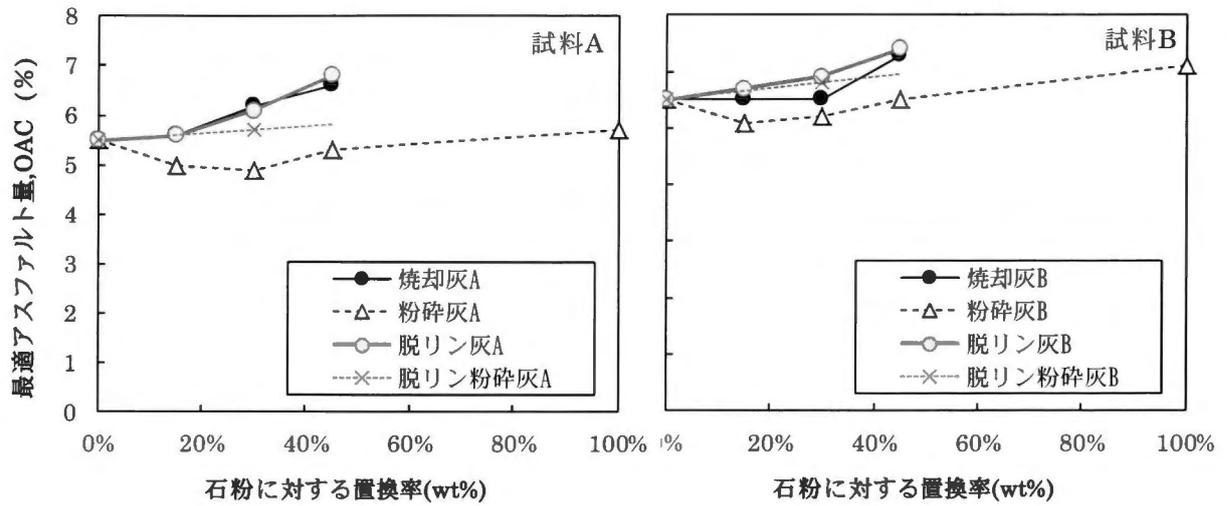


Fig.5-5 各試料の石粉に対する置換率と OAC の関係

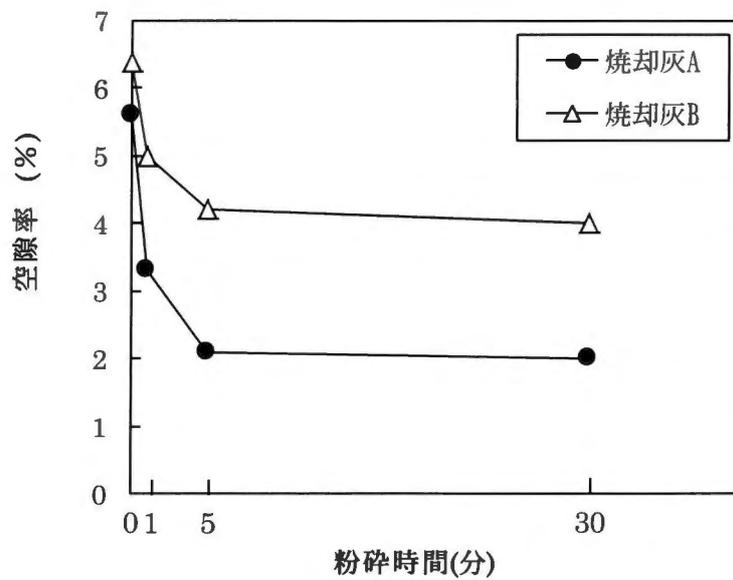


Fig.5-6 石粉に対し 30wt%置換する焼却灰の粉砕時間と空隙率の関係

各置換率における、OACで作製したアスファルト混合物のマーシャル安定度を Fig5-7 に示す。焼却灰 A を使用する場合、マーシャル安定度が低下する傾向にあるが、粉碎処理によって改善できる。これは前項で述べたとおり、リンとマグネシウムを主成分とする多孔質な粗粒子（以下、多孔粗粒子）が粉碎され、脆弱部となる粒子内の孔隙が低減したためと考えられる。多孔粗粒子を含む場合、マーシャル安定度の低下に対し、粉碎処理は極めて有効である。一方、焼却灰 B では、焼却灰の置換率を増加させた場合のマーシャル安定度の増加は見られなかった。焼却灰 B の汚泥処理工程には消化工程がないため、多孔粗粒子がほとんど含まれない。したがって、焼却灰を改質せず用いてもマーシャル安定度の低下が生じないと考えられる。

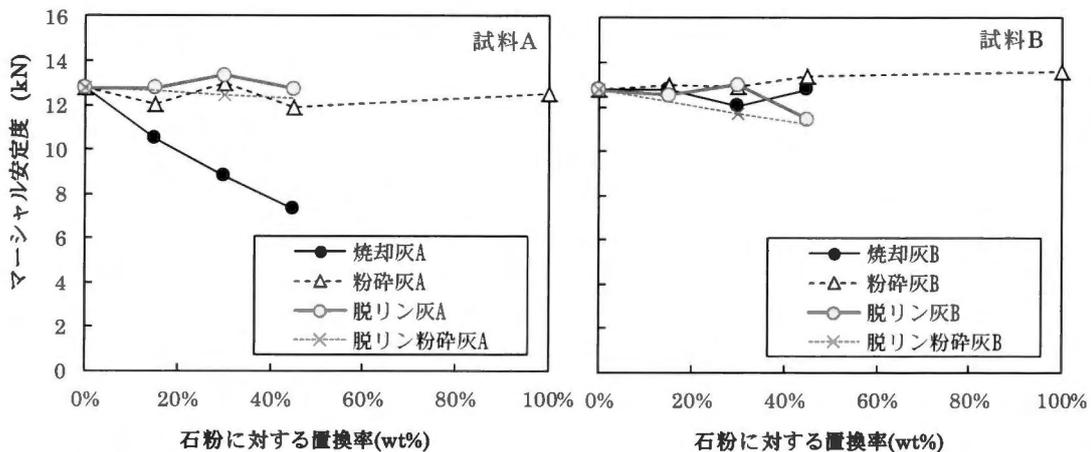


Fig.5-7 各試料の石粉に対する置換率とマーシャル安定度の関係

5.3.2.2 動的安定度

ホイールトラッキング試験結果を Fig.5-8 に示す。ここでは、費用の制約から実用化の可能性がある、焼却灰 A について確認した。焼却灰 B は、実際には灰溶融されて溶融スラグ化されており、焼却灰として排出される見込みがないため除外した。

焼却灰をそのまま使用した場合、動的安定度は低下するが、粉碎処理によって改善され、石粉のみの配合を上回る。動的安定度は、アスファルト量との負の相関が強いことが知られており、本検討の結果もこれに従って解釈が可能である。焼却灰を利用した場合、アスファルト量が増加し、動的安定度が低下する報告が多い。粉碎処理によるアスファルト量の減少は、動的安定度確保の点でも有利な結果と言える。

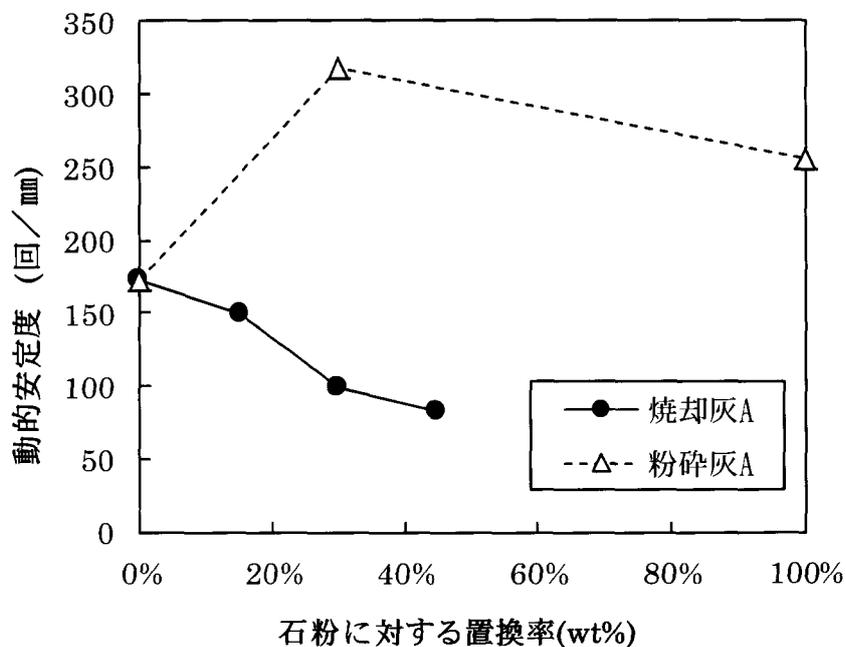


Fig.5-8 焼却灰 A、粉碎灰 A の置換率と動的安定度の関係

5.3.2.3 残留安定度

残留安定度の測定結果を Fig5-9 に示す。前項では、焼却灰 A を用いた際に置換率を増すことにより、残留安定度が低下することを述べた。Fig.5-9 に示す様に、焼却灰 B でも同傾向が認められ、残留安定度は低下し規格値である 75% に近づく。粉碎灰を使用した場合も同様の傾向があり、焼却灰よりも残留安定度はさらに低下する傾向にある。粉碎灰は、焼却灰と同様に 45 wt% 置換までは規格値を満たすが、石粉と全量置換した場合には残留安定度は大幅に低下して規格値を下回る。脱リン灰の場合は、石粉との置換量が 15 wt% を超えた場合においては取り出し前に水槽内で崩壊するものもあり、脱リン灰の残留安定度の低下の程度が著しい。脱リン灰を粉碎処理することで残留安定度の改善は見られるが、試料 A では規格値を満たしていない。脱リン灰を粉碎した際に残留安定度が改善する点は、粉碎灰とは異なる傾向であった。このように、粉碎処理は残留安定度に強く影響を及ぼし、条件によっては残留安定度の規格値を下回る場合もあり、粉碎処理の適用および脱リン灰の利用上の制約となる。そこで、残留安定度の影響因子を明らかにするため、検討を加えることにした。

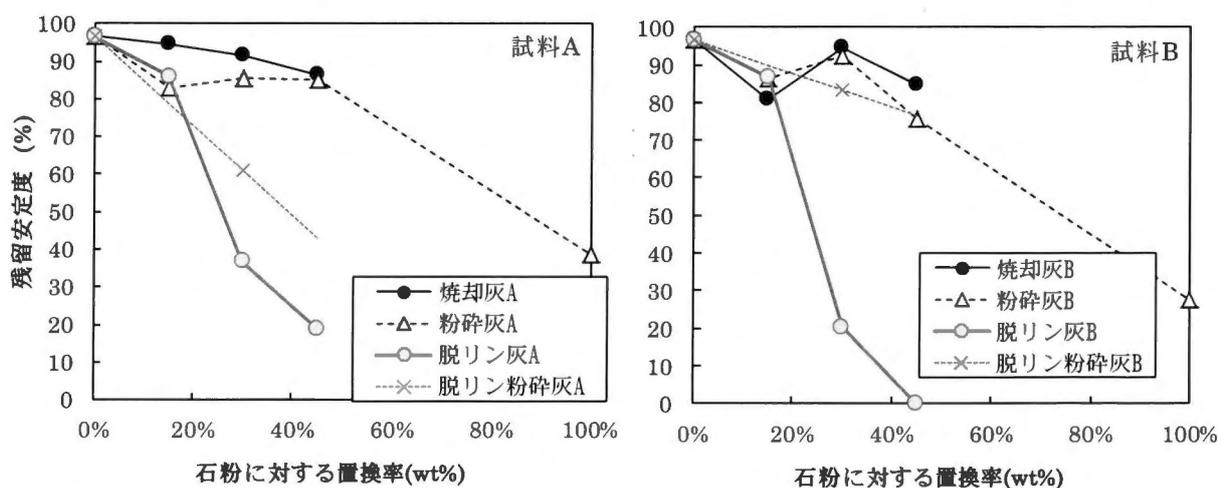


Fig.5-9 石粉に対する各試料の置換率と残留安定度の関係

5.4 残留安定度低下の検証試験

水の存在下でのアスファルトの剥離現象のメカニズムについては、未だ統一的な見解が得られていない¹²⁾。骨材の表面エネルギーと水の濡れ性を関連付ける説が現段階で最も支持されている。ケイ酸質骨材を用いた際のアスファルトの剥離現象が広く知られているが、この説によれば、負に帯電しているケイ酸質骨材の表面に極性を持つ水分子が浸入する力がアスファルトと骨材の付着力を上回るためと説明される¹³⁾。この他、骨材の表面形状等による機械的な結合力も影響することも知られており、剥離現象の解釈は難しい。

本研究では、水分子の付着がアスファルトの付着性を阻害する要因であり、フィラーの電荷量が大きいほど、水分子が付着して剥離が生じやすいと考えた。実験ごとに照合すると、粉砕灰では粉砕処理による粉体の帯電、脱リン灰は希硫酸による中和処理を行った際の硫酸塩の導入が考えられ、いずれも電荷量の変化による影響が大きい可能性がある。そこで本研究では、フィラーの電荷量と供試体の剥離状態とを比較調査し、残留安定度の低下原因の究明を試みた。

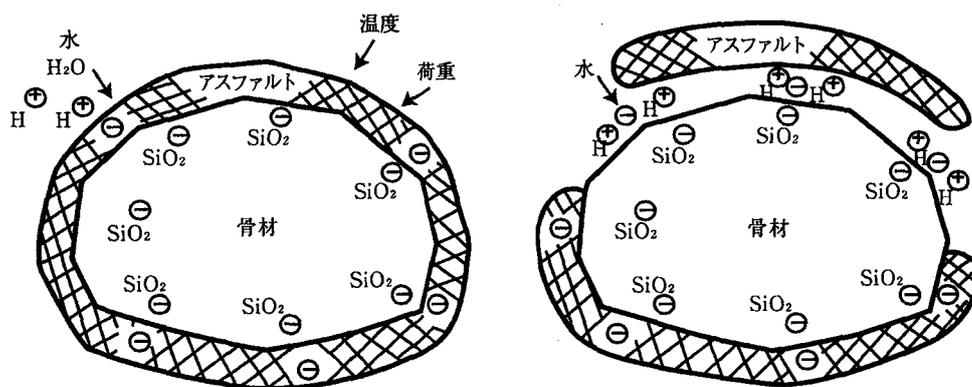


Fig.5-10 剥離のイメージ¹³⁾

5.4.1 実験方法

5.4.1.1 簡易供試体による耐水性試験

はじめに、種々の条件下でアスファルトの剥離現象を詳細に把握することとした。多数の条件で試験を行うため、簡便な供試体作製方法を考案した。方法を以下に示す。マーシャル配合試験で使用した骨材配合のうち、粗骨材を除いて使用した。さらに配合するフィラーに応じた OAC でアスファルトを規定の温度で混合し、直径 70mm、厚さ 15mm の金属製の型枠に充填し、これを上方から 5kN で締め固めて供試体とした。この供試体が室温となるまで冷却した後、60℃ の恒温水槽に入れ、7 日間剥離の状況を観察した。この試験に用いるフィラーは試料 A とした。電荷量と剥離の関連を調査するため、石粉および焼却灰 A に酸処理、アルカリ処理を施した試料も用いた。これは試料に 0.5mol/L の硫酸、0.5mol/L の水酸化ナトリウムをそれぞれ L/S=10 で浸漬させて濾過した後、乾燥させて得た試料であり、脱リン灰のリン抽出工程、中和工程を個別に模したものである。石粉は酸と反応して容易に溶解するため、アルカリ処理のみ試験を行った。

5.4.1.2 電位差滴定法による電荷量の測定

フィラーの電荷量の測定は、電位差滴定法を用いた。試料 A を選定し、対照として石粉の測定も行った。0.05mol/L の水酸化ナトリウム水溶液 50mL に対し、試料およそ 1g を加え、スターラーで攪拌しながら 0.25mol/L の硝酸水溶液を自動滴定装置で 20ml 滴下して滴定曲線を作成した。測定値は 2 回測定の平均値を用い、炭酸ガスの溶解による pH 変化を防ぐため、窒素バブリングを行った。次にブランク曲線と試料を加えた際の滴定曲線を比較し、pH7 の時の滴下量の差を求め、試料への H⁺イオンの脱離または吸着量を求めた。この時の代表的な滴定曲線図を Fig5-10 に示す。pH7 としたのは、残留安定度試験で浸水させる水を想定したためである。この時の酸の滴下量と試料重量

から、フィラー1gあたりの電荷量 σ を以下の式(1)で求めた。

$$\sigma = M \cdot F \cdot \Delta V / m \cdot \cdot \cdot (1)$$

σ : 電荷量 (C/g)

M : 酸の濃度 (mol/L)

F : ファラデー定数 (9.65×10^4 C/mol)

V : 酸の滴定量 (L)

m : 試料重量(g)

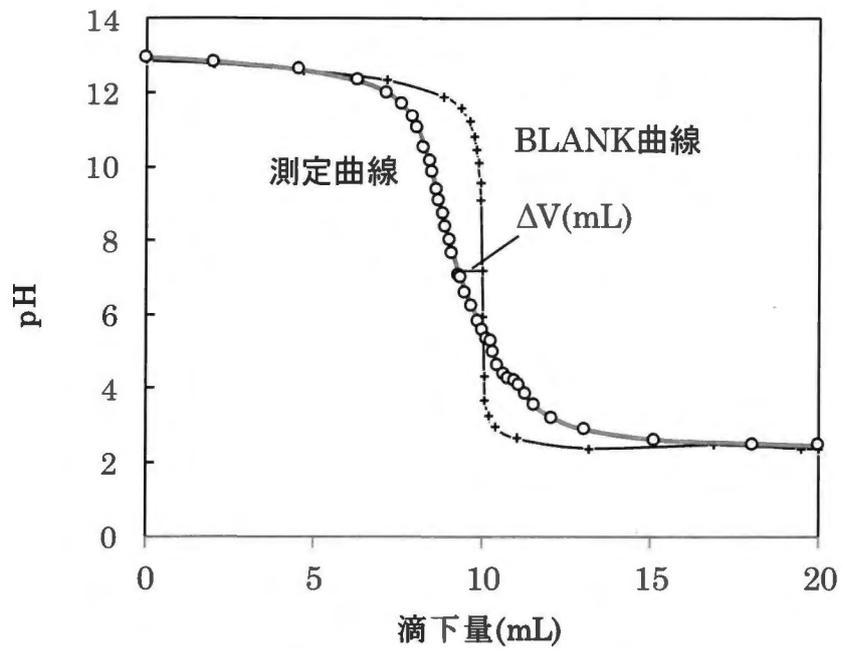


Fig5-11 電位差滴定による電荷量の測定の一例

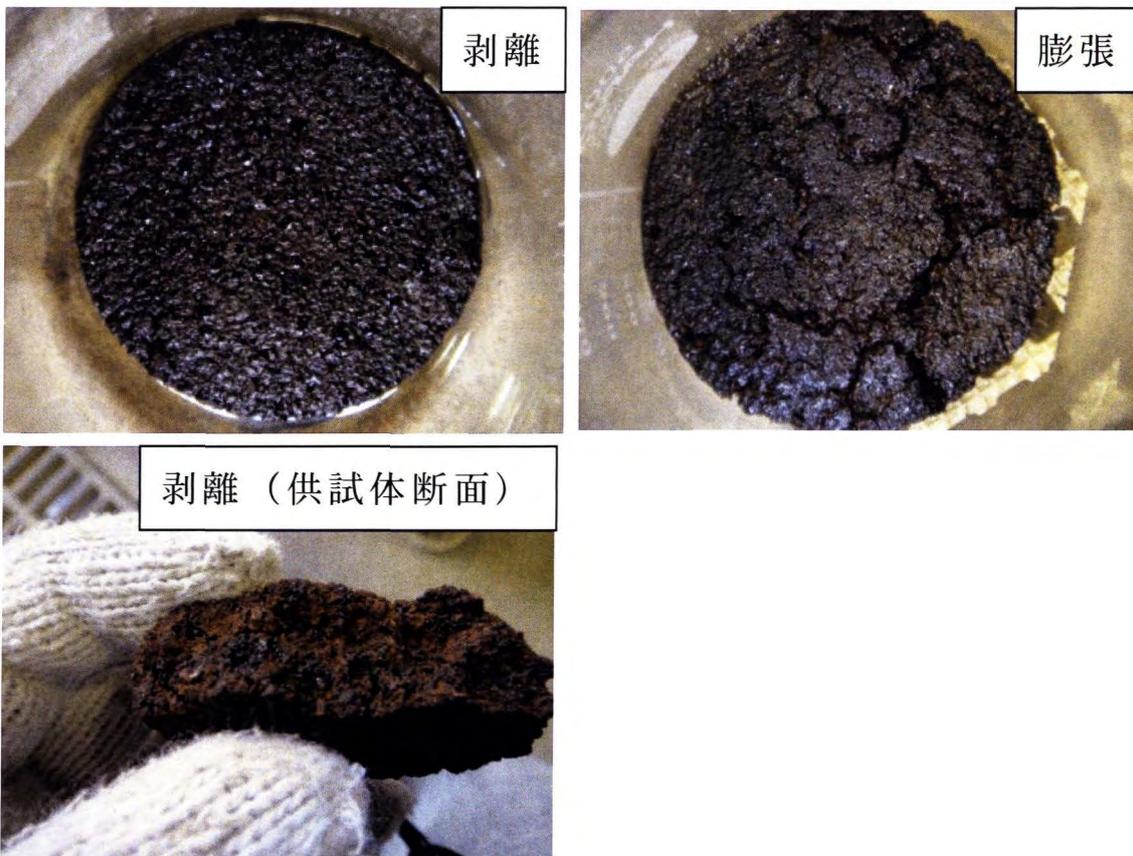


Fig.5-12 アスファルト混合物供試体の剥離および膨張状況

5.4.2 実験結果および考察

簡易供試体による耐水性試験結果を Table 5-8 に示す。残留安定度の結果と概ね一致しており、残留安定度が低下する配合で異常が観察された。Fig.5-11 に代表的な供試体の変状の例を示す。大別すれば、変状は剥離と膨張に分類される。剥離とは、アスファルトが油滴となって表面に浸出あるいは内部に集積する際に生じるアスファルトの骨材からの分離を指す。膨張とは、供試体が膨らみ亀甲状に割れるものである。傾向として、アルカリ処理を行った試料で剥離が、酸処理を行った試料で膨張が確認された。また、粉碎灰では剥離主体、脱リン灰では膨張主体の変状が起こると判別された。

フィラーの電荷量の測定結果を Table 5-8 に示す。焼却灰の持つ電荷は、粉碎によって正から負に移行した。また、脱リン灰を粉碎した場合も、正電荷の減少が見られた。これは粉碎時に摩擦や衝撃によって粒子が帯電した、もしくは焼却灰が強い粉碎力によってメカノケミカルな反応を起こしたためと推察される。

Table 5-9 の電荷量は、残留安定度およびアスファルトの剥離状況との間に関連が見受けられる。フィラーは、剥離主体の変状が起こる場合は負に、膨張主体の変状が起こる場合は正に帯電しており、その絶対値が大きく、混合量が多いほど剥離・膨張が顕著に発生すると考えられる。ただし、石粉の電荷量はカルシウムの溶解に酸が消費され、pH7 の時点でも高めに算出されたと考えられ、本手法では適切に評価できなかった。そこで石粉について除外して考察すると、本研究の範囲では、石粉との置換によってフィラー全体の電荷量が絶対値 5C/g を超えた時、残留安定度が規格値の 75%を下まわることが明らかである。

これらの結果から、粉碎後の焼却灰の電荷量に注意を要することが言える。ただし、Fig5-8 で示したように、粉碎時間 5 分の試料を用い

た場合には、粉碎灰は焼却灰と同様に置換率 45%まで用いることが可能である。

一方、消石灰は剥離防止材としてフィラーに加えられ使用されることが多い。焼却灰、粉碎灰および脱リン灰に対して消石灰を 10wt%配合した場合、置換量を増しても剥離および膨張は見られなくなった (Table5-7)。消石灰による残留安定度の向上は、骨材に含まれる酸の中和、アスファルトとの化学的結合による付着性の向上等が挙げられており¹³⁾、焼却灰の使用時にも現実的な対策として有望であると考えられる。

Table 5-8 簡易供試体による耐水性試験結果

試料種	処理	石粉に対する 置換量 (wt%)	異常の有無		残留安定度 (%)
			剥離	膨張	
焼却灰A	なし	15	-	-	94.6
		30	-	-	91.7
		45	+	-	86.4
	消石灰添加	45	-	-	-
	NaOH浸漬処理	45	+	-	-
	H ₂ SO ₄ 浸漬処理	45	+	+	-
試料A 粉砕灰A	なし	15	-	-	82.9
		30	+	-	85.5
		45	+	-	85.3
		100	+	-	38.7
	消石灰添加	100	-	-	-
脱リン灰A	なし	15	-	-	86.1
		30	+	-	36.9
		45	+	+	19.2
	消石灰添加	45	-	-	-
脱リン粉砕灰A	なし	30	+	-	60.9
石粉	なし	-	-	-	96.5
	NaOH浸漬処理	100	+	-	-

Table 5-9 電位差滴定法による電荷量測定結果

試料種	処理	滴下量ΔV(ml)	電荷量(C/g)
焼却灰A	なし	-0.21	5.1
	NaOH浸漬処理	0.37	-8.8
	H ₂ SO ₄ 浸漬処理	-7.03	169.1
粉砕灰A	なし	0.33	-8.0
脱リン灰A	なし	-0.86	20.8
脱リン粉砕灰A	なし	-0.78	18.8
石粉	なし	0.62	-14.9

5.5 焼却灰を利用したアスファルト混合物の安全性

供試試料の溶出量は、環境庁告示 46 号試験にしたがって測定した。また、アスファルト混合物の安全性について、肴倉らは建設資材のリサイクル材料に対する環境安全性を利用有姿での溶出量で判断すべきと提案している¹⁴⁾。そこで、本研究においてもこれに準拠し、「利用有姿」での安全性を確認するため、焼却灰および脱リン灰を使用したアスファルト混合物からの溶出量を測定した。アスファルト混合物は供用を終えた後、取り壊され、路盤材として再利用されることが多い。そこで、この状態を想定して溶出量を測定した。供試体は、最適アスファルト量で作製したマーシャル供試体を、圧縮試験機で圧壊し、粒径 80mm 以下程度に分割して得た。溶出液は化学物質試験方法—第一部：溶出量試験方法 (JIS K 0058-1:2005) に従い、固液比 1:10 とし、200rpm で溶媒を 6 時間攪拌したあの上澄みを検液とした。

溶出試験結果を Table 5-10 に示す。焼却灰 A、焼却灰 B ともヒ素とセレンが土壤環境基準を超えて溶出する。しかしこれらは粉碎しても溶出量はほとんど変化しない。粉碎しても溶出量が増加しないのは、第 3 章で考察した通り、ヒ素およびセレンの焼却灰中の含有量が極めて少ないためと考えられる。脱リン灰はヒ素とセレンの溶出量が低下しているが、これは希硫酸による中和処理の際に洗浄されたためと考えられ、脱リン灰は焼却灰より安全性が向上すると言える。各試料を使用したアスファルト混合物からの溶出試験結果を Table 5-11 に示す。測定した元素の溶出は見られなかった。これは既往の検討結果と同様であり、アスファルト混合物とすることで、焼却灰およびフィラーが被覆され溶出が抑制されたものと考えられる。安全性の点でも、アスファルト混合物としての利用は有利であると言える。

Table 5-10 各試料からの溶出試験結果

(mg/L)

元素	試料A				試料B				JLT46 基準値
	焼却灰A	粉碎灰A	脱リン灰A	脱リン 粉碎灰A	焼却灰B	粉碎灰B	脱リン灰B	脱リン 粉碎灰B	
As	0.47	0.38	0.007	0.007	0.021	0.018	0.007	0.018	<0.01
Se	0.048	0.039	0.002	<0.002	0.045	0.015	0.006	0.015	<0.01
F	<0.20	<0.20	<0.20	<0.20	0.21	<0.20	0.2	<0.20	<0.8
B	0.72	0.80	0.21	0.12	0.24	0.20	0.11	0.15	<1.0
Pb	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01
Cd	0.003	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01
Hg	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.0003	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0005
Cr(VI)	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.05

Table 5-11 各試料を配合したアスファルト混合物の溶出試験結果

(mg/L)

試料種 置換率	試料A				試料B				JLT46 基準値
	焼却灰A 45%	粉碎灰A 100%	脱リン灰A 45%	脱リン 粉碎灰A 30%	焼却灰B 45%	粉碎灰B 100%	脱リン灰B 45%	脱リン 粉碎灰B 30%	
As	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01
Se	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01
F	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.8
B	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<1.0
Pb	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01
Cd	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.01
Hg	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0005
Cr(VI)	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.020	<0.05

5.6 結言

本章では、焼却灰をアスファルト混合物用フィラーの代替材料としての利用を検討し、以下の結果が得られた。

1) 焼却灰を石粉の代替材料としてアスファルト混合物に用いた場合、石粉との置換量を増すことで混合物の最適アスファルト量が増加する。マーシャル安定度への影響は試料によって異なり、岩手県の都南浄化センターの焼却灰（焼却灰 A）の場合は低下し、滋賀県の湖南浄化センターの焼却灰（焼却灰 B）の場合は影響がない。

2) 焼却灰 A の場合、耐流動性（動的安定度）、耐摩耗性（ラベリング摩耗量）および耐水性（残留安定度）は焼却灰置換量の増加に従い低下するが、置換量が 45wt% 以下の範囲では、実用上の基準範囲内となる。焼却灰 B も残留安定度について、同様の結果が得られた。

3) 焼却灰 A について考察した結果、粗粒部（150 μ m ふるい残留分）がアスファルト量の増大と、マーシャル安定度の低下に強く影響することを明らかとした。これは、焼却灰 A 粗粒部に多く含まれる、多孔質なりん酸マグネシウム粒子の影響である。

4) 焼却灰 A、焼却灰 B を粉砕すると、フロー値が低下する。これらを使用することで最適アスファルト量の増加を抑制でき、その置換量によっては、石粉のみの配合よりも最適アスファルト量が低下する。これは焼却灰の細粒化によって、骨材間の空隙の充填効果が上がるためである。

5) 焼却灰 A は、粉砕してから使用することで動的安定度の低下、マーシャル安定度の低下を抑制できる。

6) 脱リン灰もアスファルトフィラーとして利用できる。しかし、焼却灰と同様に最適アスファルト量の増加と、残留安定度の低下が生じる。残留安定度については、焼却灰よりも低下が顕著であり、規格値の範囲で用いるためには石粉との置換率 15 wt%を限度とする必要がある。

7) 脱リン灰を粉砕することで却灰の場合と同様にフロー値が低下し、これをフィラーとして使用する場合、粉砕前と比較して最適アスファルト量の増加を抑制できる。ただし、焼却灰の場合と異なり、その効果は小さい。

8) 粉砕処理した焼却灰および脱リン灰をフィラーとして用いるとアスファルトの剥離および膨張が起こり、残留安定度が低下する。この現象は、フィラーの電荷量と関係があり、電荷量が正の場合には膨張が、負の場合には剥離が主体となっており、電荷量の絶対値が大きいほど変状は大きくなる。

9) 焼却灰および脱リン灰をフィラーとして用いた際、アスファルト混合物から有害物質は溶出せず、安全に利用できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Mohammed H. Al Sayed, Ismail M. Madany and A. Rahman M. Buali: Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions, *Construction and Building Materials*, Vol.9(1995) pp.19-23.
- 2) 山田優、田中良穂、小宮正俊 :下水汚泥焼却灰を用いた混合物性状と安全性の評価、*日本道路会議論文集*、Vol.23(1999) pp.126-127
- 3) 鈴木勲、武本敏男:下水汚泥焼却灰のアスファルト混合物への利用、平成 14 年度東京都土木技術研究所年報 (2002) pp.121-132
- 4) 堀政信:仙台市における下水汚泥の有効利用と新たな展開への課題、再生と利用、Vol.34、No.127 (2010) pp.32-40
- 5) 建設省:アスファルト舗装の塑性流動に関する調査研究、第 30 回建設省技術研究報告、(1977) , pp.243-269.
- 6) 熊谷茂樹:構造設計と使用材料、アスファルト、Vol.29 (1987) pp.12-22.
- 7) 平成 22 年度版 下水道統計 第 67 号 :日本下水道協会(2012) pp.87-88
- 8) 黒田章夫、滝口昇、加藤純一、大竹久夫:リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発、*J. Environ. Biotechnol.*, Vol.4, (2005) pp.87-94
- 9) 守屋由介、坪井博和、池田 裕一:アルカリ抽出法による下水汚泥焼却灰からのリン回収システム、*用水と廃水*、Vol.51、No.10(2009) pp.833-838
- 10) 舗装調査・試験法便覧 (第 2 分冊)、日本道路協会 (2007) p68
- 11) 鈴木道隆、市場久貴、長谷川勇、大島敏男:粒子径分布のある多成分粒子ランダム充填層の空間率、*化学工学論文集*、Vol.11、No.4、(1985) pp.438-443

- 12) E. Ray Brown et al. : Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design & Construction -3rd Edition, NAPA Research and Education Foundation, (2009) pp.152-154
- 13) 牛尾俊介、今井博文 : はく離防止への対策、アスファルト、Vol.42、No.203 (2000) pp.3-8
- 14) 肴倉宏史、大迫政浩 : 建設系再生製品を対象とした環境安全性評価試験システムの廃棄物学会規格化への取組み、廃棄物学会誌、Vol.18、No.6 (2007) pp.321-329

第 6 章

下水汚泥焼却灰の利用可能量評価 および利用コスト試算

6.1 諸言

本研究は焼却灰の特性を把握し、最適条件を見出すことで総合的に利用量を確保することを目的としている。第4章では路盤材として焼却灰を使用する手法を、第5章ではアスファルト混合物用フィラーとして焼却灰を使用する手法を検討した。本章では、検討した二つの利用手法による焼却灰の総合的な利用可能量と利用コストの試算を行った。前章までに得られた、各々の焼却灰の利用可能割合および材料の特性値を用いて、舗装材料の単位量当たりの利用可能量を求め、その値から代表的な舗装構成を選定し、各々舗装面積当たりの焼却灰利用可能量を求めた。さらに、年間のアスファルト合材出荷量実績および路盤材作製に必要となる戻りコンクリートの発生量から、年間の焼却灰利用量を試算した。

利用コストの試算は、仮定した利用シナリオに応じて設備投資費、維持管理運転費を仮定し、これを上回る焼却灰受け入れ料金を利用コストとして試算した。

6.2 開発した手法による焼却灰の利用可能量

6.2.1 利用可能量算出の条件設定

本検討では、日本国内における焼却灰の最大利用可能量を試算する。道路は一般に「設計期間」、「舗装計画交通量」、「目標性能」から舗装構成および舗装材料が決定される。その種別は多岐に渡り、個別の利用可能量を詳細に積上げることは難しい。そこで本検討では、焼却灰の利用可能量を知るため、代表的な例の仮定に基づいて焼却灰の利用可能量の試算を行った。試算は以下の方法で個別に行うこととした。

- i) 各舗装材料の焼却灰の利用可能単位量
- ii) 焼却灰利用舗装材料を用いた場合の、舗装面積当たりの焼却灰の利用可能量
- iii) 国内の出荷量実績等から算出される焼却灰の最大利用可能量

これらの試算にあたり設定した舗装の設計条件、想定舗装構成を Table 6-1 に示す。前提条件は舗装設計施工指針（平成 18 年度版）を参考に代表的なケースを 3 種選定した。表中の設定条件 1、設定条件 2 は舗装計画交通量の比較的少ない路線に使用されることを想定しており、新材と再生合材の 2 パターンを作成した。新材と再生合材の割合はアスファルト合材製造量平成 23 年度実績値¹⁾から 7:3 とし、再生骨材の使用率はアスファルト合材統計年報²⁾から 30%とした。設定条件 3 は舗装計画交通量が大きい路線での改質アスファルトの使用を想定した。改質アスファルトは通常新材のみで使用される。したがって本試算の仮定では、舗装構成はこの 3 種のいずれかに該当するものとした。

焼却灰を使用した舗装材料は、第 4 章および第 5 章の検討に基づき、表層と基層のアスファルト混合物および下層路盤材に用いることとし

た。なお、上層路盤材にリサイクル材料が使用された例はほとんどないため、焼却灰を利用した舗装材料の設計 CBR が上層路盤材の基準を上回った場合においても、焼却灰使用材料は下層路盤材にのみ使用する想定とした。アスファルト混合物の想定配合を Table6-2 に示す。路盤材については密度を 2.30g/cm^3 、締固め後の空隙率を 5% とした。これらは本研究の検討で得た実績値を使用している。

焼却灰の利用可能割合は、第 4 章および第 5 章で得た結果から、Table 6-3 に示す値とした。路盤材としての支持力を十分に得られていること、下層路盤への適用を前提とするためすり減り減量の規定値は考慮しないこととし、そのまま用いた場合は戻りコンクリートに対して外割配合量で 15wt% (含水比 135%)、粉碎した場合は 30wt% (含水比 65%)、脱リン処理を行った場合は 30wt% (含水比 135%) を使用可能量と仮定した。アスファルト混合物の場合は、利用可能量は残留安定度の規定値から決定される。そのまま用いた場合は石粉に対する置換可能量で 45wt%、粉碎した場合は 100% とした (ただし消石灰を 10% 添加して使用)、脱リン処理を行った場合は 15wt% とした。

Table 6-1 想定した舗装設計条件

項目	設定条件1	設定条件2	設定条件3
設計期間	10年	10年	10年
信頼性	90%	90%	90%
設計CBR	3	3	3
舗装計画交通量	250台未満	250台未満	250台以上
表層混合物種類	密粒度As (20F)	再生密粒度As (20F)	密粒度As(20)改質Ⅱ型
再生合材使用量	0%	30%	0%
全合材出荷量に占める割合	15%	70%	15%
表層	5	5	5
上層路盤 (粒度調整碎石)	15	15	15
下層路盤 (クラッシュラン)	35	35	47
合計厚	55	55	72

Table 6-2 アスファルト混合物の想定配合

項目	設定条件1	設定条件2	設定条件3
合材種	密粒度As (20F)	再生密粒度As (20F)	密粒度As(20)改質Ⅱ型
再生骨材混入率(wt%)	0	30	0
アスファルト配合率 (対骨材wt%)	6.0	6.5(新5.0+旧1.5)	6.0
粗骨材(wt%)	50.0	35.0	50.0
細骨材(wt%)	42.0	29.4	42.0
石粉(wt%)	8.0	5.6	8.0
空隙率(wt%)	3.5	3.5	3.5
密度(g/cm3)	2.36	2.36	2.36

Table 6-3 焼却灰の利用可能割合

焼却灰種	路盤材 配合可能割合 (対コンクリート外割(%))	アスファルト混合物 配合可能割合 (対石粉置換率(%))
原灰	15	45
粉碎灰	30	100
脱リン灰	30	15

6.2.2 利用可能量の試算

前項で設定した条件による利用可能量の試算結果を以下に示す。

i) 各舗装材料重量当たりの焼却灰の利用可能単位量

各舗装材料における単位量当たりの焼却灰の利用可能量の試算結果を Table6-4 に示す。表中には、製品中に配合可能な焼却灰重量を乾物量で示した。製品重量あたりの利用可能量は下層路盤材としての利用が有利であり、アスファルト混合物利用の倍量が確保できる。さらに、焼却灰の粉碎処理を行うことでそれぞれの舗装材料の利用可能量を約2倍～2.5倍に増大させることが出来る。利用可能総量と同様、単位利用量の確保できることが、利用上望ましく、粉碎処理は有用である。

脱リン灰は路盤材の場合に利用可能量が倍量となるものの、アスファルト混合物への利用は 1/3 となる。脱リン灰は路盤材としての利用に限定して使用することが考えられる。

Table 6-4 製品当たりの焼却灰の利用可能量

焼却灰種	製品当たりの焼却灰利用可能量 (kg / t)			
	下層路盤材	アスファルト混合物		
		密粒度 As (20F)	再生密粒度 As (20F)	密粒度 As(20)改質Ⅱ型
原灰	60	34	24	34
粉碎灰	154	68	48	68
脱リン灰	113	11	8	11

ii) 焼却灰利用舗装材料を用いた場合の、舗装面積当たりの焼却灰の利用可能量

表層および下層路盤に焼却灰利用材料を使用した場合の焼却灰利用可能量を Table 6-5 に示す。Table6-1 で仮定した場合における、舗装面積当たりの利用可能量で整理した。舗装面積あたりの焼却灰利用量は、下層路盤材が表層アスファルト混合物と比較し圧倒的に多い。舗装構成中で路盤使用量が多く、焼却灰の利用可能単位量も大であるためである。限られた工事箇所では焼却灰を大量に利用するには、路盤材への利用が有効である。なお、舗装面積当たりの利用可能量に着目した場合には、路盤材の利用量が殆どを占めるため、粉碎処理および脱リン処理はともに利用量の確保に有効であると言える。

Table 6-5 舗装面積当たりの焼却灰利用可能量

項目		設定条件1	設定条件2	設定条件3	
設計条件	設計期間	10年	10年	10年	
	信頼性	90%	90%	90%	
	設計CBR	3	3	3	
	舗装計画交通量	250台未満	250台未満	250台以上	
	表層混合物種類	密粒度As (20F)	再生密粒度As (20F)	密粒度As(20)改質Ⅱ型	
舗装面積当たりの焼却灰利用量の	原灰	表層(kg/m ²)	3.9	2.7	3.9
		下層路盤	45.9	45.9	61.6
		合計 (kg)	49.8	48.6	65.5
	粉碎灰	表層	7.7	5.5	7.7
		下層路盤	117.7	117.7	158.0
		合計 (kg)	125.4	123.1	165.7
	脱リン灰	表層	1.3	0.9	1.3
		下層路盤	86.6	86.6	116.3
		合計 (kg)	87.9	87.5	117.5

iii) 国内の出荷量実績等から算出される焼却灰の最大利用可能量

国内のアスファルト合材出荷量¹⁾から、その出荷量を全て焼却灰入り製品とした場合の焼却灰の利用可能量を試算した。アスファルト合材の出荷割合は Table6-1 に示す想定割合を使用した。

建設現場で使用されるコンクリートの 1%~2%が戻りコンクリートとなり、その発生量は全国で 150~200 万 m³とされる。本検討では戻りコンクリートの発生量を 150 万 m³として、そのすべてを焼却灰と混合し、混合破碎物として再生路盤材とすると仮定した。この量は道路用の再生碎石出荷量 1,818 万 t (平成 23 年度実績値)³⁾と比較すると 1/10 と小さく、需要量として十分市場に受け入れられると判断した。試算結果を Table6-6 に示す。

舗装材料の出荷量等から判断すると、アスファルト混合物が利用可能量を圧倒的に多く確保できる。本検討では路盤材の作製に戻りコンクリートの利用を想定としており、戻りコンクリートは排出量が限られるため生産量が限定的となる。戻りコンクリートに頼らず、新コンクリートの使用により採算の確保が可能であれば、利用可能量は戻りコンクリートの排出量の制約を受けないことが予想されるが、これは今後の検討事項である。

Table 6-6 舗装面積当たりの焼却灰利用可能量

項目	アスファルト混合物				路盤材		
	設定条件1 密粒度 As (20F)	設定条件2 再生密粒度 As (20F)	設定条件3 密粒度As (20)改質Ⅱ型		下層路盤材		
想定出荷量(千t年)	15% 6,227	70% 33,253	15% 6,227	合計 45,707	1,500		
単位利用可能 量(kg/t)	原灰	34	24	34	60	アスファルト混 合物+路盤材 合計	
	粉砕灰	68	48	68	154		
	脱リン灰	11	8	11	113		
合計最大利用 可能量(千t/年)	原灰	212	798	212	1222	90	1312
	粉砕灰	423	1596	423	2443	231	2674
	脱リン灰	68	266	68	403	170	573

6.3 開発した手法による焼却灰利用コストの試算

6.3.1 利用コスト算出の条件設定

開発した利用法が、実際に適用可能なものか検証するため、焼却灰の利用コストの算出を行った。本検討では、焼却灰の利用にかかる増加費用（設備投資費、運転管理費など）その他の収入を考慮して、これらがバランスする焼却灰の受け入れ料金を利用コストとした。コスト試算は、本検討で代表として用いた岩手県の都南浄化センター焼却灰を取り上げ、発生量等の基本条件は2012年現在の現況値を用いた。なお、現状のセメント処理、埋立て処理のコストをTable6-7に示す。

次に、粉碎コストの試算をTable6-8に示す。粉碎設備の初期投資費用には流域下水道の国庫補助の活用、ボールミルによる粉碎を想定した。この条件で岩手県の都南浄化センターの焼却灰発生量で1tあたりの粉碎費用を算定したところ、5,000円/t-ashの試算値が得られた。なお、焼却灰の脱リン処理費はリン回収事業で見込むものとして本試算では見込まないものとした。

Table6-9に路盤材利用試算で用いる設備投資費、材料費を、Table6-10にアスファルト混合物用フィラー利用試算で用いる設備投資費、材料費を示す。なお、試算に用いる焼却灰の最大利用可能割合は、前項と同様、第4章および第5章で得た結果から、Table6-3に示す値とした。また、焼却灰と戻りコンの混合時の含水比やOACの増減値等試算に用いる条件値も第4章および第5章の検討時の実績値とした。

Table6-7 都南浄化センター焼却灰の焼却灰現況処理コスト

(単位:円/t-dry)	処理費	運搬費	合計
セメント原料化処理	16,000	7,000	23,000
埋立て処理	37,000	7,000	44,000

Table6-8 焼却灰 1t 当たりの粉砕コストの試算

初期投資	10,000 万円	ボールミル(1t/h)、サイクロン等一式
耐用年数	15 年	
国庫補助率	66.7 %	流域下水道の国庫補助率
残価率	10 %	
①原価償却費	199.8 万円/年	
補修費率	0.5 %	
②装置補修費	50 万円/年	
電気料金	12 円/kWh	東北電力電気料
電力使用量	26.5 kW/h	ボールミル、サイクロン等運転
管理人員	0.2 人	
人件費	1000 万円/人・年	
稼働率	50 %	
③運転管理費	111.1 万円/人・年	
④年あたり費用 (①+②+③)	360.9 万円/年	
⑤焼却灰発生量	700 t/年	岩手県都南浄化センターを想定
粉砕処理費 (④/⑤)	5000 円/t-ash	

Table6-9 路盤材利用試算条件

初期投資	3,000 万円	分級設備、保管ヤード
耐用年数	9 年	
補助率	50 %	岩手県補助金利用を想定
残価率	10 %	
①原価償却費	150 万円/年	
製造手間・損料	870 円/t-製品	ローダ運転、ローダ損料
諸経費	100 円/t-製品	産廃手続き事務費、人件費等
②運転管理費	970 円/t-製品	
(その他試算条件)		
焼却灰の外割添加率	X %	
配合時の焼却灰含水比	a %	OACの変動を考慮する
粉砕費用	5000 円/t-ash	
(その他収入)		
再生砕石売価	2,000 円/t	1000円/m ³ (ルーズ比重2.0)
戻りコン処分費	1,500 円/t	650円/m ³ (比重2.3)

Table6-10 アスファルト混合物用フィラー利用試算条件

初期投資	1,000 万円	焼却灰保管サイロ
耐用年数	17 年	
補助率	50 %	岩手県補助金利用を想定
残価率	10 %	
①原価償却費	26 万円/年	
諸経費	100 円/t-製品	産廃手続き事務費、人件費等
②運転管理費	100 円/t-製品	
(その他試算条件)		
混合物中の石粉割合	8 %	
焼却灰の石粉置換率	X %	
アスファルト使用量	a %	OACの変動を考慮する
粉砕費用	5000 円/t-ash	
粉砕灰100%置換時の 消石灰添加量	10 wt%	粉砕灰重量に対して
(材料費)		
アスファルト単価	100,000 円/t	
石粉単価	6,000 円/t	
消石灰単価	20,000 円/t	

6.3.2 利用コストの試算

路盤材として利用する場合の焼却灰受け入れ料金の試算結果を Table6-11 に、アスファルト混合物用フィラーとして利用する場合の焼却灰受け入れ料金の試算結果を Table6-12 に示す。あくまで試算ではあるものの、全てのケースで現状の埋め立て処理料金を下まわる結果が得られた。なお、アスファルト混合物用フィラーとして粉砕して利用する場合は、高価なアスファルト量を大きく低減できるため、粉砕コストを見込んでも処理コストは逆有償となる。これは粉砕することによって有価で取引される材料となる可能性を示しており、本研究で提案する手法の優位性が確認された。

Table6-11 路盤材として使用する場合の
焼却灰受け入れコスト試算結果

ケース① 原灰	
焼却灰の外割添加率	15 wt%
配合時の焼却灰含水比	135 %
受け入れ料金	-9,000 円/t (逆有償)
ケース② 粉砕灰	
焼却灰の外割添加率	30 wt%
配合時の焼却灰含水比	65 %
受け入れ料金	3,000 円/t
ケース③ 脱リン灰	
焼却灰の外割添加率	30 wt%
配合時の焼却灰含水比	135 %
受け入れ料金	-3,000 円/t (逆有償)

Table6-12 アスファルト混合物用フィラーとして使用する場合の

焼却灰受け入れコスト試算結果

ケース① 原灰	
焼却灰の置換率	45 wt%
最適アスファルト量	+0.5 %
受け入れ料金	20,000 円/t
ケース② 粉砕灰	
焼却灰の置換率	30 wt%
最適アスファルト量	-0.5 %
受け入れ料金	-17,000 円/t (逆有償)
ケース③ 粉砕灰	
焼却灰の置換率	45 wt%
最適アスファルト量	-0.2 %
受け入れ料金	-3,000 円/t (逆有償)
ケース④ 粉砕灰	
焼却灰の置換率	100 wt%
最適アスファルト量	+0.2 %
受け入れ料金	6,000 円/t

6.4 結言

本章では、本検討によって得た、焼却灰の利用可能割合および焼却灰を利用して作製した混合物の物性値を用いて、焼却灰の利用量を試算し、試算結果から以下の点を明らかとした。

- ・製品重量当たりの焼却灰使用可能量は、路盤材の場合は 60kg/t、アスファルト混合物の場合は約 30kg/t であり、路盤材への利用がアスファルト混合物への利用よりも有利である。これは粉砕処理を行うことで路盤材、アスファルト混合物とも 2 倍超に増大させること

が出来る。

- ・ 舗装面積当たりの焼却灰利用可能量は、アスファルト混合物の $3\sim 4\text{kg/m}^2$ と比較して路盤材が $45\sim 60\text{kg/m}^2$ と圧倒的に多く、路盤材によってほぼ決定される。これは、路盤材への利用は製品重量当たりの焼却灰使用可能量が多いこと、かつ舗装構成中での路盤材の使用量が多いためである。

- ・ 上記2点から、限られた舗装面積で多量に焼却灰を使用する場合は、粉碎処理もしくは脱リン処理した焼却灰を路盤材として用いるのが良い。

- ・ 焼却灰の利用可能絶対量は、舗装材料の国内出荷量実績、製作に必要な材料（戻りコンクリート）の排出実績等から判断すれば、路盤材とアスファルト混合物の合計値で、原灰 131.2 万 t/年、粉碎灰 267.4 万 t/年、脱リン灰で 57.3 万 t/年となる。この時、アスファルト混合物は路盤材の約 10 倍の利用可能量を確保できる。

- ・ 本検討の手法により焼却灰を舗装材料に利用すれば、全国の年間発生量を大きく上回る量の焼却灰を有効に利用できる。さらに、アスファルト混合物の場合は焼却灰の粉碎処理、路盤材の場合は焼却灰の粉碎処理および脱リン処理により利用可能量を高める手段として有効である。

- ・ 路盤材、アスファルト混合物用フィラーとして利用する場合の焼却灰の受け入れ料金は、岩手県の都南浄化センターを例とした試算においては、現状の処理料金よりも安い。

- ・アスファルト混合物用フィラーとして粉碎灰を用いると最適アスファルト量が低減できるため、製造コストの低減に大きく寄与する。このことにより、焼却灰が有価で取引される可能性がある。

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本アスファルト合材協会：アスファルト合材製造数量推移 (<http://www.jam-a.or.jp/iinkai/suii/suiiH24.pdf>)
- 2) 日本アスファルト合材協会:アスファルト合材統計年報(2012)
- 3) 経済産業省：平成 23 年砕石等統計年報
(<http://www.meti.go.jp/statistics/sei/saiseiki/result/xls/agyear23.xls>
)

第 7 章

総括

下水道の終末処理場で発生する下水汚泥焼却灰の発生量は増加の一途をたどっており、日本国内の発生量は平成 22 年度には約 221,000 トン、うち岩手県内の発生量は約 1,000 トンに達した。この焼却灰は、セメントの原料として使用される以外、ほとんどが埋立て処分されており、多量に利用が可能な新たな技術の開発が望まれてきた。路盤材およびアスファルト混合物などの舗装材料は多量に利用が可能な用途の一つである。これまで、溶融スラグ等その他の廃棄物を舗装材料に利用した実績が高いが、下水汚泥焼却灰の適用例はほとんどなく、検討の余地がある。本研究の目的は、舗装材料である路盤材およびアスファルト混合物に着目し、両用途に複合的に焼却灰を利用することで、多量に利用が可能な技術を開発することにある。現況の発生量を上回る利用可能量を確保するため、本研究では、両用途へ下水汚泥焼却灰を利用した場合の品質への影響原因を考察し、利用可能量の向上対策をそれぞれ提案することで、総合的な焼却灰の利用可能量を確保しようとした。検討の結果、下水汚泥焼却灰の多孔質な特性が路盤材とアスファルト混合物の両舗装材料の品質低下に、リンの含有が路盤材の品質低下に起因していることを見出した。そこで下水汚泥焼却灰の粉碎処理および脱リン処理を試み、品質および利用可能量の向上に成功した。これらの結果をもとに、路盤材およびアスファルト混合物への下水汚泥焼却灰の利用可能量の総合的な試算を行い、現状の焼却灰の排出量を十分に超える利用可能量が確保できることを確認した。さらに、開発した手法による焼却灰利用コストの試算を実施し、舗装材料としての利用は、セメント原料化および埋立て処理よりも有利な手法となることを確認した。以下に各章の総括を記す。

第 1 章は序論であり、下水汚泥焼却灰の有効利用の現状と課題、並びに本研究の目的について述べた。

第 2 章では既往の下水汚泥焼却灰の利用に関連した研究について整理し、下水汚泥の焼却技術の動向、下水汚泥焼却灰の舗装材料としての利用の優位性と現状の課題について述べた。すなわち、既設の下水汚泥焼却炉に採用されている大部分が流動床式焼却炉であり、現状では低空気比と 850℃ の高温焼却による N₂O 排出の削減技術開発が行われていることを述べた。その目標燃焼温度から、将来にわたっても既存の下水汚泥焼却灰と性状は大きく変わらないと推測され、本検討で既存の下水汚泥焼却灰を対象に検討することの意義を確認した。次に下水汚泥焼却灰中の重金属について現状と既往の知見について挙げ、今後も排出される終末処理場ごとに継続的な確認が必要であることを述べた。また、焼却灰を建設材料に利用するにあたって要求される環境安全性は、供給シナリオを勘案した現実的な試験フレームでの評価法に移行しつつあることについて触れた。さらに焼却灰の利用技術の動向とリサイクルの実態から、舗装材料としての利用が最も有効であるものの、下水汚泥焼却灰の舗装材料への実績利用量は少なく、有効な利用技術の開発が望まれていることを述べた。

第 3 章では、下水汚泥焼却灰の性質とその特徴について明らかにするため基礎検討を行った。すなわち、下水汚泥の燃焼炉の形式として主流である流動床式焼却炉で燃焼された焼却灰を選定して、物性分析、化学分析、粒子分析、環境安全性について検討した。その結果、リンが P₂O₅ 換算で合計 25wt% を超えて存在し、一部はリン酸マグネシウムとして、多孔質な大きな粒子として存在することを明らかとした。さらに、焼却灰は概ね 300 μ m 以下の微粒子であり、作業時の飛散が懸念されること、焼却灰からヒ素とセレンの溶出が見られ、その含有

量が僅かであることから、そのまま利用するよりも他材料と混合して、溶出しにくい処理を行い、利用することが有利であると結論付けた。

第4章は、第3章で検討した焼却灰を利用した路盤材の開発を行った。焼却灰を生コンクリートと混合してから硬化させ、破碎して、その混合破碎物を路盤材として使用する手法であり、生コンクリートに対する焼却灰の外割混合割合と混合破碎物の品質の関係を検討した。その結果、焼却灰の混合割合が15wt%であれば生コンクリート単体よりも支持力が高い路盤材として利用できることを明らかとした。さらに焼却灰の混合割合が30wt%を超えると、締固めエネルギーの増加によって支持力が低下するオーバーコンパクションが発生することを見出した。これは混合破碎物の締固め時に粒子が細粒化することで、粒子中に収着された水が自由水となることが原因と推定し、最適含水比の低下、強度の増加を指向して焼却灰の粉碎処理または脱リン処理を行ってから混合したところ、両対策ともオーバーコンパクションの発生を抑制でき、焼却灰を多量に利用した場合でも混合破碎物の支持力を確保できることを確認した。一方、同手法で作製した路盤材からは六価クロムの溶出が起こることを明らかとし、この点については今後の検討課題とした。

第5章は下水汚泥焼却灰をアスファルト混合物用フィラーとして使用する手法を検討した。通常使用される石灰石微粉末（石粉）に対して焼却灰を置換して用いたところ、置換率を45wt%としてもアスファルト混合物の目標品質を満足することを明らかとした。しかし、置換量の増加に伴ってマーシャル安定度が低下し、配合すべきバインダー量（最適アスファルト量）が増加する。この点について、150 μm 以上の粗粒分を分画し、これを除去または粉碎した試料を用い、粗粒分がマーシャル安定度と最適アスファルト量の増加に大きく寄与しているこ

とを明らかとした。第 3 章で明らかとしたとおりこの分画の粗粒分にリン酸マグネシウムの多孔質粒子が多く含まれるため、焼却灰の多孔質な性状がマーシャル安定度の低下と最適アスファルト量の低下原因と断定した。この結果を受け、焼却灰を全量粉砕して用いたところ、石粉と 100wt%置換した場合でもマーシャル安定度、最適アスファルト量は石粉のみの基準配合と遜色ない結果が得られた。これと同時に、粉砕した焼却灰の置換量によっては石粉のみの基準配合よりも最適アスファルト量が低くなることを明らかとし、実用上焼却灰が積極的に利用される材料と成りうることを見出した。なお、粉砕した焼却灰を 100wt%用いると、残留安定度が規格値を下まわる。この点については、粉体の表面電荷量に着目して検討し、粉砕時に粉体の表面電荷量が負に移行したことが、剥離を引き起こした原因であることを示唆した。なお、残留安定度は消石灰のような一般的な剥離防止材の添加によって改善でき、この対策を加えることで下水汚泥焼却灰の利用可能性を向上できることを述べた。

第 6 章では、複合的に舗装材料へ利用した場合の焼却灰の利用可能性および利用コストを評価した。下水汚泥焼却灰の利用可能性を前章までの検討結果と標準的な舗装構成の仮定および舗装材料の出荷実績から試算した結果、材料当たりの利用可能性と舗装面積当たりの利用可能性からは、路盤材としての利用が有利となった。ただし、路盤材の作製に使用する生コンクリートは廃棄物の戻りコンクリートを想定しており、その排出量が限られていることについて触れ、これを考慮すれば利用可能性が限られる点を課題として挙げた。また、本検討で提案した焼却灰の粉砕処理は、利用可能性を倍程度高めることができ、路盤材、アスファルト混合物のどちらの用途でも、検討した下水汚泥焼却灰の利用可能性は発生量よりも十分に大きく、今回検討した手法が利用可能性の確保に対し有効な技術であると結論付けた。さらに本

章では本研究による検討で得た値を用い、一定の仮定の下で焼却灰の受け入れ料金を試算した結果、路盤材およびアスファルト混合物用フィラーとしての利用は現状のセメント原料化および埋立て処理料金より有利となり、一部の使用条件では焼却灰を有価物として取扱いできる可能性も示された。したがって本章では、今回提案した路盤材およびアスファルト混合物用フィラーとしての利用手法が利用可能量の確保、利用コストの両面で有効であると結論付けた。

謝 辞

本研究は、著者が岩手大学大学院工学研究科機械・社会環境システム工学研究科在学中に岩手大学工学部教授 羽原 俊祐博士、岩手大学工学部准教授 小山田 哲也博士の懇切なるご指導により遂行したものであり、心より感謝の意を表します。また本論文の審査過程において、ご助言とご指導を賜りました岩手大学工学部教授 岩崎 正二博士、岩手大学工学部教授 海田 輝之博士、岩手大学工学部教授 中澤 廣博士に謹んで感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたり、岩手大学工学部社会環境工学科建設材料研究室の卒業生である尾形 悟氏（現：株式会社 NIPPO）、河村 竜太氏（現：株式会社 NIPPO）、蛸島 悠介氏（現：平成建設株式会社）、今 雄希氏（現：東亜建設工業株式会社）をはじめ同研究室の卒業生、学生の皆様には多大なるご協力を頂きました。深く御礼申し上げます。

株式会社金沢舗道 山本 幸人氏、同社 大矢 昌樹氏にはアスファルト混合物に関する試験の共同実施をはじめ多大なる御協力を頂きました。また、株式会社 NIPPO 菊池 昭浩氏、同社 金子 晴夫氏にはアスファルト混合物に関する試験の御協力、材料提供およびご助言など、多大なご尽力を頂きました。東北化学工業株式会社 代表取締役 鈴木 昭彦氏には路盤材作製試験に関する材料提供およびご助言を頂きました。メタウォーター株式会社 守屋 由介氏には焼却灰のリン回収におけるご助言、リン回収試験プラントでの試料作製等にご協力頂きました。公益財団法人 岩手県土木技術振興協会の皆様には試験器材の無償貸与とご助言を、公益財団法人 岩手県下水道公社および岩手県北上川上流流域下水道事務所の皆様には、焼却灰試料の提供およびご助言をいただきました。本研究の遂行にあたって御協力頂いた皆様に厚く御礼申し上げます。

なお、2011年3月に発生した東日本大震災は、本研究において極め

て大きな障害となりました。東京電力福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質が下水汚泥焼却灰に混入し、実験実施上の制約となったほか、本研究で主に検討した岩手県の都南浄化センターの焼却灰は放射能物質で汚染され、当該処理場で発生する焼却灰は当面の間、有効利用が困難となりました。さらに在学中の2012年4月には、被災地における復興業務の増大が遠因となり、著者は岩手県工業技術センターの研究職から、岩手県庁の行政職へと異動を命じられました。このような状況にありながらも、歴代の岩手県県土整備部長、副部长、技監そして下水環境課総括課長 伊藤 茂樹氏、主査 佐藤 秀三氏のほか岩手県県土整備部の皆様には深いご理解と多大なご配慮を賜り、研究を継続させていただきました。さらに岩手県工業技術センターの歴代理事長、副理事長、理事ならびに工業技術センターの皆様には、転出後も在籍時と同様、深いご理解とご支援を賜りました。関係の皆様には厚く御礼申し上げます。そして日頃から激励とご助言を頂戴した、岩手県工業技術センターものづくり基盤技術第2部 部長 池 浩之博士、専門研究員 岩清水 康二氏、同 佐々木 昭仁博士、企画支援部 浪崎 安治氏、菅原 龍江氏ならびに実験及びデータ処理等のサポートを頂いた工業技術センター顧問 小向 隆志氏、研究スタッフ 関川 貴子氏に対し、深く御礼申し上げます。

最後に、本論文をまとめるにあたり、長期間にわたり、大きな負担をかけながらも、最後まで笑顔で支えてくれた妻 瞳、長女 葉月、次女 美咲、そして父、母、義父母に対し、心より感謝の意を記し、謝辞といたします。

論文目録

氏名	佐藤佳之
学位論文題目	
舗装材料としての下水汚泥焼却灰の複合的利用技術の開発に関する研究	
原著論文	
①題目「下水汚泥焼却灰および戻りコンクリートを利用した路盤材の開発」	
著者名：佐藤佳之，小山田哲也，羽原俊祐，今雄希	
学術雑誌等名：セメント・コンクリート論文集 No.66, pp637-644	
発行年月：2013年2月	
参考論文	
①題目「岩手県の下水汚泥焼却灰の基礎性状およびアスファルト混合物用フィラーとしての適用性」	
著者名：佐藤佳之，小山田哲也，羽原俊祐，佐々木昭仁	
学術雑誌等名：Journal of MMIJ Vol.128, No.8-9, pp519-525	
発行年月：2012年8月	
本論文に関係のある発表	
①題目「下水汚泥焼却灰を利用したアスファルト混合物の特性」	
佐藤佳之，佐々木昭仁，菅原龍江，小山田哲也，尾形悟，藤原忠司	
廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 21巻, B-4	
第21回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2010.11.6	

②題 目「下水汚泥焼却灰と生コンクリートの混合破砕物の路盤材への適用性」

佐藤佳之，小山田哲也，羽原俊祐

第 48 回下水道研究発表会講演集，pp.416-418

第 48 回下水道研究発表会，2011.7.27

③題 目「下水汚泥焼却灰と戻りコンクリートの混合破砕物を用いた路盤材の支持力の改善」

佐藤佳之，小山田哲也，羽原俊祐，今雄希，蛸島悠介

第 49 回粉体に関する討論会講演論文集，pp.145-149

第 49 回粉体に関する討論会，2011.11.16

④題 目「アルカリ抽出法で脱リン処理した下水汚泥焼却灰のアスファルト混合物用フィラーとしての適用性

佐藤佳之，小山田哲也，羽原俊祐，菊池明浩，佐々木昭仁，菅原龍江，阿部貴志

廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 23 巻，B8-6

第 23 回廃棄物資源循環学会研究発表会，2012.10.24

⑤題 目 “Applicability of sewage sludge ash (SSA) for paving materials: A study on using SSA as filler for asphalt mixture and base course material”

Yoshiyuki SATO, Tetsuya OYAMADA and Shunsuke HANEHARA

3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2013,8