

7 - 4 汚泥焼却灰のアスファルトフィラー資源化

流域下水道本部技術部施設管理課

加藤隆三 上野孝司

1. 調査目的

汚泥焼却灰の資源化メニューの多様化を図り、安定的な処分、処理コストの低減を図るとともに環境保全へ寄与することを目的とし、アスファルト混合物の材料の一部として焼却灰を利用することについて調査・検討した。

表 1 焼却灰のアスファルト混合物利用に伴う調査

調査年度	平成 10 年度～平成 13 年度
調査目的	汚泥焼却灰のアスファルト混合物へのアスファルトフィラー利用促進
調査概要	1. 焼却灰の物理性状試験 2. アスファルト混合物の性状試験 3. 安全性の確認（溶出試験） 4. 試験舗装の追跡調査

2. 調査内容

焼却灰は、アスファルトフィラーに類似した物理性状を持つこと、含有する重金属類を安全に処理できること、相当量の需要が長期にわたって見込めることなどの観点からアスファルトフィラーの材料として焼却灰を利用することに着目した。

平成 13 年度に多摩地区の合材事業所で出荷した合材量は約 138 万トンであり新規・再生合材を含めたフィラー使用量は約 5.2 万トンと推定される。この量は当本部で年間に発生する焼却灰 8500 トンの約 6 倍の量に当たり、市場性としては大きな魅力性のある資源化事業である。

また、焼却灰は、「アスファルト舗装要綱」（平成 10 年 6 月、（社）日本道路協会）においては、他の生活活動に伴って発生する「副産物」に分類され、「単体での性状が規格値を一部外れていても何らかの処理によって舗装として良好な性状を示すならば積極的活用が望ましい」としていることからゼロエミッションの社会づくりとして有意義な取組である。

以下の点について検討を行なった。

（1）焼却灰の安全性の確認

焼却灰は、重金属の溶出が懸念されるため、溶出試験を行って環境への安全性を検討する。

□ アスファルト混合物

アスファルト（天然にもしくは石油の蒸留残滓として得られる瀝青）、粗骨材、細骨材、フィラーを所定の割合で混合した材料である。

□ アスファルトフィラー

75 μ m の篩を 70 % 以上通過する粒度分布の鉱物質粉末。石灰岩などに岩石を粉碎した石粉、消石灰、回収ダスト、フライアッシュなどがもちいられる。アスファルト混合物を製造するときに添加する材料で、混合物の空隙を充填し粘度を高める働きがある。

(2) 焼却灰の物理性状の検討

アスファルト混合物の材料としての適性を調べるため、焼却灰の物理性状を把握する。

(3) 焼却灰入りアスファルト混合物の安全性の確認

路上で実際に使用される場合の安全性を確認する必要性がある。

(4) 焼却灰入りアスファルト混合物の物理性状

各種のアスファルト混合物にフィラーの代替として焼却灰を混合し、アスファルト混合物の性状を調査すると共に、焼却灰の適正代替率を検討し、実用可能性を検討する。

(5) 試験施工・試験舗装による調査

試験施工によってアスファルト混合物の製造、品質及び敷ならし等の構築過程といった施工性の検証を行う。これに加え試験舗装によって構築された舗装の状態、供用性及び経時変化を実地調査し、長期耐久性を検証する。

3 調査結果、考察

3 . 1 焼却灰の安全性

焼却灰を市中で大量に使われる舗装材料の原料とするためには、アスファルト混合物での安全性はもとより、焼却灰の段階でも重金属等の含有や溶出に対して十分な安全性の確認を行なう必要がある。

(1) 重金属等の含有

「東京都溶融スラグ資源化指針」(平成 13 年 3 月東京都環境局)を準用し、含有基準を満足することを確認した。なお、平成 15 年 2 月に土壤汚染対策法による測定方法が変更になったため、新たに設定された項目について確認を行い、基準を満足していることを確認した。

(2) 土壌の汚染に係わる環境基準

カドミウム、鉛、ヒ素、総水銀、六価クロムについて溶出試験を行い「土壌の汚染に係る環境基準」(平成 3 年環境庁告示第 46 号)を満足したが、セレンについては規準値を超過する場合があった。消石灰を添加することでセレンが抑制できることから消石灰を添加し不溶化処理を行った結果 3.0%以上の消石灰添加であれば溶出されなかった。

3 . 2 焼却灰の物理性状

東京都土木材料仕様書(平成 13 年度)に各種の規格が設けられている。このうち「安山岩又はこれに準ずる岩石を粉砕した石粉」の規格に準じて焼却灰の物理性状を比較検討した。

(1) 色調と外観

色調は大部分が灰色またはねずみ色を呈しているが、処理場によっては褐色やベージュ色のものも見られた。また、採取時期によっても若干差が見られた。

外観は石灰石石粉とほとんど変わらないが、顕微鏡で拡大してみると微細な粒子が繊維状になっているのが分かる。物理性状にいくつかの差異が認められるが、図のような粒子個々の違いや、粒子径の分布の違いが影響していると思われる。

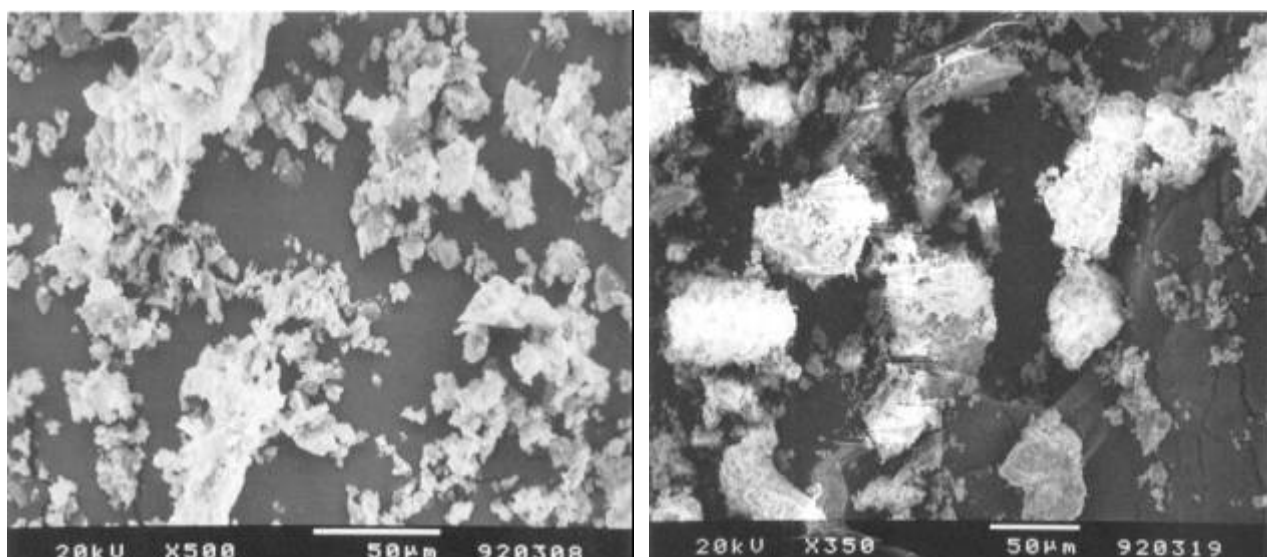


図1 顕微鏡写真（左：多摩川上流処理場焼却灰、右：石灰石石粉）

（２）粒度

焼却灰と石粉を比較すると前者は 600 μm 以上のものが混入しているが全体的には細かいものが多い。各処理場毎の１年間のデータでは月毎に変動が大きく石粉の規格値を満足していない場合もある。

（３）水分

表２ 粒度試験結果

（多摩川上流処理場）

水分を含んだフィラーは計量に誤差をもたらし、結果的にアスファルト混合物の機能を低下させる恐れがある。また、団粒化しやすいため均一な混合物とな

	通過質量百分率（％）			
	600 μm	300 μm	150 μm	75 μm
焼却灰	100	99.8	99.1	92.7
石粉	100	96.1	92.3	81.9
規格	100	---	90～100	70～100

りにくく舗装破損の原因となる。水分率の変動が大きい施設もあるが、各処理場とも平均値、最大値のいずれにおいても規格値 1.0%以下を十分満足している。

（４）比重

比重の小さいものは飛散しやすく、アスファルト混合物事業所での操作性等に問題が発生する場合がある。石粉を実測してみたところ 2.71 g/cm^3 の値を示していた。焼却灰の比重は、石粉の基準値 2.60 g/cm^3 を満足していないものも多く、変動も大きい。比重は、アスファルト混合物の機能を直接左右するものではない。

（５）フロー試験

フィラーのアスファルト吸収性を表す指標として測定する。フロー値が高い程多くのアスファルト量を必要とし、アスファルト混合物の安定度などを低下させるため、規格ではフロー値の上限を設けている。図２に試験結果を示す。処理場によってかなりの差があり、80～130%付近の値となっている。

これは石粉の規格値 50%以下に対して大きく外れており、石粉に比べて焼却灰の吸収率が大きいために、焼却灰を使用したアスファルト混合物はアスファルト量が増えることが推

定される。

このため、石粉の全量を焼却灰に代替するのではなく、石粉に適量の焼却灰を混合することが考えられる。

(6) 浸水膨張試験

アスファルト混合物の耐水性に関係するもので、締め固めたフィラーの膨張量を測定することにより判断する。図3に示すように値の変動幅や処理場ごとの値の変動が大きく、石粉の規格値3.0%以下に比べ高めであり規格値を満足していないものもある。

これに対しても焼却灰に一部代替することが考えられる。

(7) その他

- ・塑性指数が大きいフィラーは水分、油分の吸収が大きく膨張するため、アスファルト混合物の強度が低下し舗装破損の原因となる。塑性指数は、液性・塑性限界試験から求める。各処理場における灰はいずれも塑性限界が液性限界以上であり問題ない結果であった。

- ・高温によるフィラーの変質の程度を評価する加熱変質についても、どの処理場の灰についても問題がない結果であった。

- ・水が作用する条件下において骨材に対するアスファルトの剥離性に与える影響を評価する剥離抵抗性についての試験結果は全ての処理場の灰に異常は見られなかった。

(8) 焼却灰の評価

以上の各項目について評価をまとめると次のようになる。

- ・灰の物理性状は石粉に比べ、若干比重が軽く粒度はやや粗いものも混入している
- ・フロー値及び浸水膨張率は、石粉に比べ大きな値を示し規格を満足しない。

そこで、規格を満足しない項目については焼却灰と石粉を適切に混合し、石粉の規格に近い性質にするものとした。

また焼却灰は、アスファルト舗装要綱においては他の生産活動に伴って発生する「副産物」に分類され、焼却灰と石粉を適切に混合したアスファルト混合物としての性状で評価するものとした。

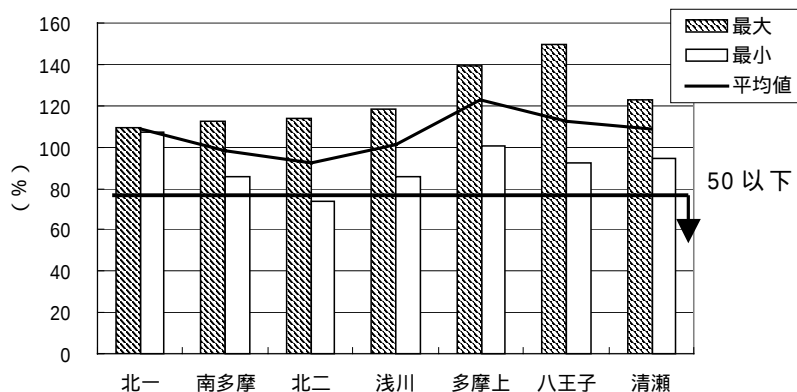


図2 フロー試験

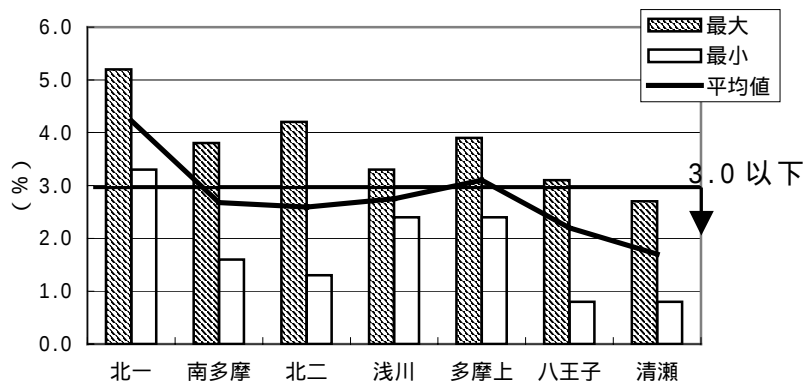


図3 浸水膨張試験

3.3 焼却灰代替率の検討

どの程度の焼却灰を石粉に代替することが適切か検討するため、両者を混合したフィラーの物理性状を確認した。焼却灰単体では規格を満足しない項目のうちアスファルト混合物の機能に与える影響が大きいのはフロー値や浸水膨張率である。これらについて、焼却灰の代替率を 100, 60, 30% と変化させ試験を行った。

(1) フロー値

図 4 に示すように北多摩二号、多摩川上流の両処理場とも焼却灰の代替率が低下するほどフロー値は改善され、30% 程度であれば基準値を満足することが分かった。

(2) 浸水膨張率

図 5 に示すように両処理場とも代替率にはあまり依存性があまり見られなかった。北多摩二号処理場の場合、代替率を 30% まで減少させると基準値を満足した。多摩川上流処理場の場合、基準値はどの場合でも満足するが代替率を減少させるとむしろ性質は悪化した。

以上の(1)、(2)の結果から、焼却灰の値のばらつきがあるものの、代替率を 30% 以下とすることで、ほぼ石粉と同様の物理性状に改善されることが分かった。

3.4 焼却灰入りアスファルト混合物の安全性

焼却灰入りアスファルト混合物は、降雨や散水によって重金属が溶出し土壌汚染を引き起こす可能性があるため、土壌環境基準（平成 3 年 8 月 23 日環境庁告示第 46 号）の適用を受ける。ただし、舗装が地下水面とは離れているため、基準値は、同告示の備考第 2 項が適用される。しかし、舗装材料として廃棄物の焼却灰スラグ利用などの事例もあるため、「東京都溶融スラグ資源化指針」（平成 13 年 3 月）を準用し、より厳しい管理を行うことを想定して安全性を確認した。7 処理場の焼却灰について、焼却灰による代替率を 100%、30% とし瀝青にストレートアスファルトを使用した密粒度アスファルト混合物で溶出試験を行った結果、重金属の溶出は極めて少なかった。焼却灰に対し消石灰を 3% 添加したものについても試験したが、全ての項目について溶出は認められなかった。

これらの結果はアスファルト混合物に混合した場合、焼却灰がアスファルトにコーティングされて更に溶出が抑制されるためと考えられ、環境への安全性が十分確保出来ることが分かった。

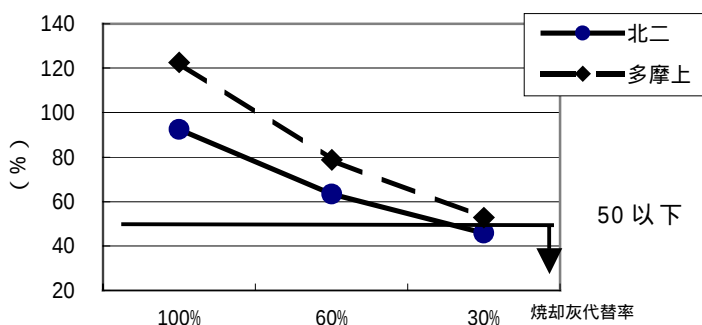


図 4 代替率変化に伴うフロー試験

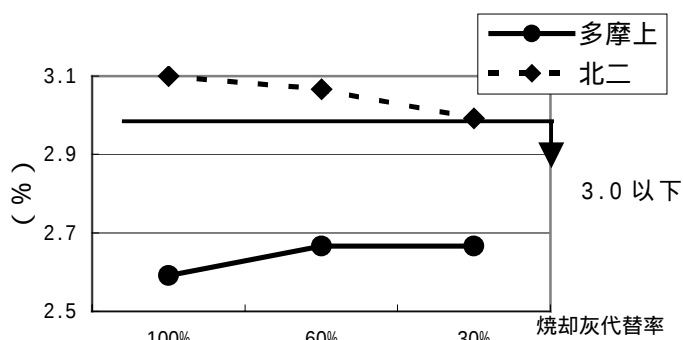


図 5 代替率変化に伴う浸水膨張率

更に、10年間の劣化を想定し135で4時間、85で2週間養生を行い熱風乾燥機から取り出し強制劣化試験も行ったが、溶出量の増加は認められなかった。

以上のことから、焼却灰を配合したアスファルト混合物の十分な安全性が確認された。

3.5 焼却灰入りアスファルト混合物の物理性状

3.5.1 密粒度アスファルト混合物における詳細調査

アスファルト混合物には細粒度アスファルト混合物、密粒度アスファルト混合物、粗粒度アスファルト混合物、開粒度1号・2号アスファルト混合物、特殊開粒度アスファルト混合物などの種類があり、用途に応じて使用する。アスファルト混合物の規格には、全国共通で用いられる「アスファルト舗装要綱」があるが、幹線道路が数多く供用されている東京都においては、要綱を上回る基準を「東京都土木材料仕様書」において定めている。焼却灰入りアスファルトは当然ながら、都の基準を満足するものとして検討する。

これらのアスファルト混合物のうち、最も一般的に使用されている密粒度アスファルト混合物について、焼却灰の代替率をパラメータとして物理性状を確認した。

まず、密度、空隙率、飽和度、安定度、フロー値などのマーシャル特性値を測定し、その結果に基づき「最適アスファルト量」を決定した。最適アスファルト量はアスファルト混合物の使用目的に応じて性状が最も

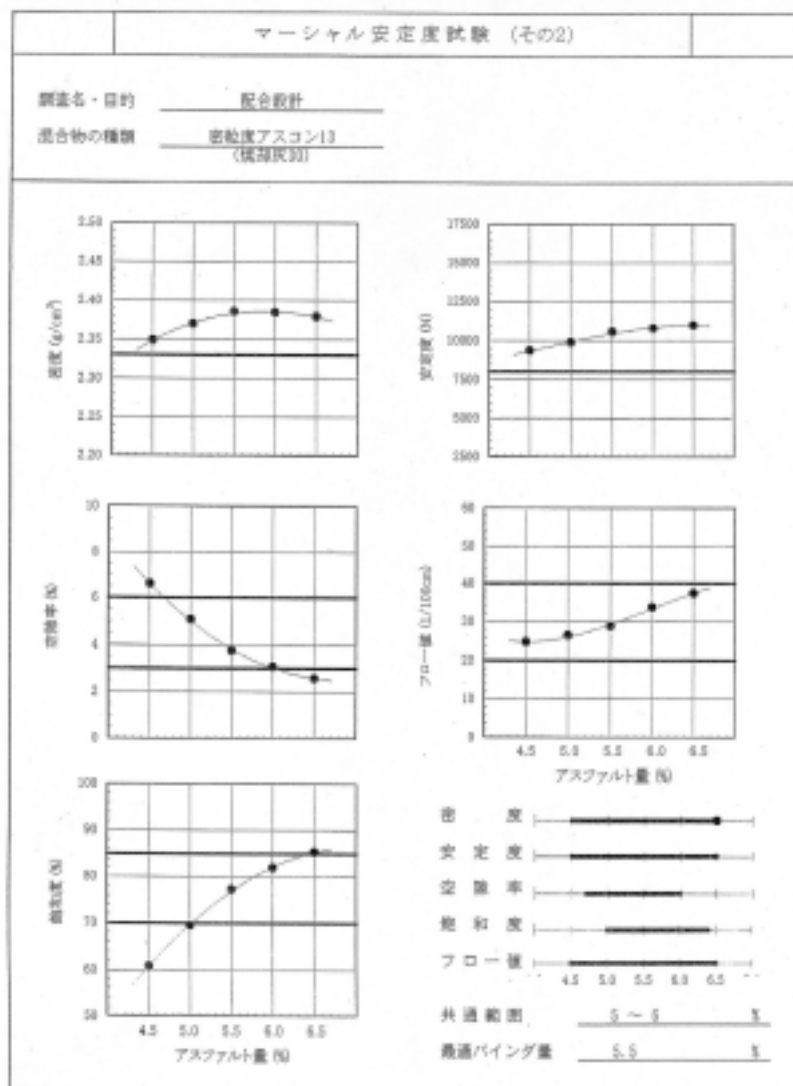


図6 アスファルト混合物配合設計

優れるように決めたアスファルトの配合率のことで、図6に示すように物理性状を表す各項目を縦軸に、アスファルト配合率を横軸にとった場合、各項目の基準値を満足する配合率の共通範囲の中央値として求められる。次に、決定された表2の最適アスファルト量を配合したアスファルト混合物に対しマーシャル特性値を改めて測定するとともに、実用化した場合の安定性や耐久性を示す水浸マーシャル安定度試験、ホイールトラッキング試験、水浸ホイールトラッキング試験を行った。なお、アスファルト混合物はストレートアスフ

ァルトを使用した。

焼却灰の代替率は 30% が目安であるが、アスファルト混合物としての機能が規格を満足すれば実用化が可能であるため、30% の場合に加え 60%、100% の場合も検討した。

(1) 最適アスファルト量におけるマーシャル特性

焼却灰の代替率毎に、最適アスファルト量を配合した供試体のマーシャル特性値を表 3 に示す。何れの場合についても密度、空隙率、飽和度、安定度、フロー値の規格を外れることはなかった。なかでも、アスファルト混合物の強さを表す安定度は規格値 8000 N 以上を大きく上回る結果が得られた。

また、焼却灰の代替率が多いほどフロー値が高いことから、最適アスファルト量も多くなる傾向がみられた。

表 3 焼却灰代替率とマーシャル試験値

項目		灰代替率 (%)	最適アスファルト量 (%)	密度 (g / cm ³)	空隙率 (%)	飽和度 (%)	安定度 (N)	フ ロ ー 値 (1 / 100 cm)
石粉のみ		0	5.5	2.379	4.1	75.4	15491	36
焼却灰の排出処理場	北二	100	5.8	2.367	4.0	76.9	15278	38
		60	5.6	2.377	4.0	76.3	18638	39
		30	5.5	2.395	3.5	78.4	16127	39
	多摩上	100	6.1	2.343	4.5	75.4	16162	34
		60	5.7	2.370	4.0	76.6	18108	37
		30	5.5	2.391	3.6	77.9	15420	36
	北一	30	5.5	2.383	3.8	77.0	17613	35
	浅川	30	5.4	2.389	3.8	76.7	14925	32
	八王子	30	5.4	2.391	3.7	77.2	16092	35
	清瀬	30	5.5	2.391	3.7	77.4	17330	36
	南多摩	30	5.5	2.387	3.8	77.0	15703	33

(2) 水浸マーシャル安定度試験

アスファルト混合物の耐水性を評価する試験であり、評価方法は標準の 30 分養生した供試体と水中で 48 時間養生した供試体のマーシャル安定度試験値の比率を残留安定度として表したものである。この値が小さいものはアスファルトと骨材が剥離しやすいことを示すもので、舗装の早期破損が懸念されるため一般的には 75% 以上が良好とされる。

試験結果は、焼却灰の代替率が高いほど残留安定度が低くなっている。これは焼却灰のフロー値が大きいこと、浸水膨張率が大きいことに起因している。多摩川上流処理場の結果から、代替率が 30% 以下であれば残留安定度 75% 以上を確保でき実用化に供することが出来る。

(3) ホイールトラッキング試験

夏期の路面温度が高温になったときに発生する「わだち掘れ」に対する抵抗を評価する

もので、耐流動性の指標となる動的安定度（DS）を求める試験である。具体的にはわだち掘れ量 1 mmあたりの試験輪通過回数で示される。代替率によってDSに若干の差があるが、いずれの場合も焼却灰を用いた混合物は従来の混合物（標準）のDSを上回っている。これは、焼却灰がアスファルトを吸着しやすいため流動を起こす骨材界面が強化される作用が良い方向に働いたと考えられる。

（４）水浸ホイールトラッキング試験

水浸状態においてホイールトラッキング試験を行い、剥離状況を評価する。各処理場の焼却灰を比較してみると、代替率が高くなるほど剥離が増加し 100%、60%代替の場合は基準値 5 %以下を満足しない場合がある。しかし 30%以下であれば何れの処理場の灰でも 5 %以下の剥離となり標準の混合物とは差異がないことが分かった。

（５）アスファルト混合物の評価

以上の項目をまとめると次のようになる。

- ・物理性状は、灰の代替率が高くなるとアスファルト量が多くなるものの混合物の規格から外れることはない。
- ・安定性、耐久性については灰の代替率が高いほど低下する項目が多く、基準を満足しない場合があった。

しかし 30%以下であれば、基準を満足する。むしろ動的安定度は代替が高いほうが若干の向上がみられた

- ・結局、焼却灰は物理性状が石粉の性状と若干異なっているが 30%以下の代替であればアスファルト混合物（密粒度）として実用上問題ないことが検証された。

3.5.2 各種のアスファルト混合物における調査

アスファルト混合物には、車道部の表層に使用される密粒度アスファルト混合物や、基層に用いられる粗粒度アスファルト混合物、歩道部に使われる細粒度アスファルト混合物の他に、主に滑り止め舗装に用いる開粒度 1 号、排水性舗装に用いられる特殊開粒度アスファルト混合物などがある。また、特に交通量が多い道路においては高い耐久性を求められるため、熱可塑性エラストマー等を添加しアスファルトの性質を改良した改質アスファルト・型、道路橋上の舗装には付着性改善アスファルトなどが用いられている。焼却灰入りアスファルト混合物を実用化するためには、これら各種のアスファルト混合物に対する適用性の検討が必要である。

このなかで、細粒度アスファルト混合物や粗粒度アスファルト混合物は、より使用条件が厳しい密粒度アスファルト混合物の試験結果を準用して考えることが出来る。一方、特殊開粒度アスファルト混合物は水の影響を受け易く、焼却灰単体も浸水膨張試験の試験結果が基準に収まらない場合があり、耐水性の低下が懸念される。このため、試験を必要とする混合物毎に最適アスファルト量に対してマーシャル性状試験や適正試験を行った。

（１）試験結果

マーシャル安定度試験

マーシャル安定度の基準は 8000 N 以上であり、特殊開粒度アスファルト混合物の場合のみ 4000 N 以上である。今回検討した各種の混合物は図 7 のとおりすべて基準を満足した。また、最適アスファルト量についても、今回検討した各種の混合物に対してはすべて基準

を満足していた。

水浸マーシャル安定度試験

焼却灰の代替率が 100% の場合、密粒度アスファルト混合物、再生密粒度アスファルト混合物とも基準を満足しないが、他の種類のものは残留安定度 75% を満足していた。

ホイールトラッキング試験

密粒度アスファルト混合物改質型では動的安定性の基準が定められており、焼却灰の代替率が 30、100% のいずれにおいても、D S 3000 回以上という基準を大幅に上回る性状を示していた。

水浸ホイールトラッキング試験

通常は、付着性改善アスファルトを使用する混合物を確認する試験であるが、今回焼却灰入りアスファルト混合の代替率が 30、100% の剥離率の試験を行った結果、密粒度アスファルト混合物等は満足するが、開粒 1 号を含む特殊開粒度アスファルト混合物は、耐水性が劣った。

(2) 各種アスファルト混合物に対する評価

以上の検討に加え圧裂試験による確認なども行った結果、密粒度、改質アスファルト型等のアスファルト混合物においても焼却灰を 30% 程度混入したものは十分実用化できると判断された。なお、特殊開粒度および開粒 1 号は、耐水性の判断基準である剥離性に劣る性質があるため、今後さらに実用化に向けた検討を継続する。

3.6 試験施工による検証

平成 10 年 3 月、北多摩二号処理場内の舗装工事で焼却灰入りアスファルト混合物の試験施工を実施し、以降、処理場舗装ではゼロエミッションの取組の 1 つとして焼却灰入りアスファルト混合物を積極的に活用している。

また、公道での試験施工は建設局土木研究所の協力を得ながら、平成 10 年度から交通量の多い都道 226 号線で実施したのを皮切りに、平成 12 年までに累計 4 箇所およそ 7500m² を実施した。施工性は標準の混合物と何ら差異はみられず遜色のないものであった。また、これらについて路面性状の追跡調査を行った。調査項目は目視調査、横断形状測定、縦断形状測定、すべり抵抗試験などを行った。

(1) 調査方法

次の項目について舗装試験法便覧に基づき調査した。

- ・路面のわだち掘れ、クラック、混合物の飛散は調査員により目視観察。

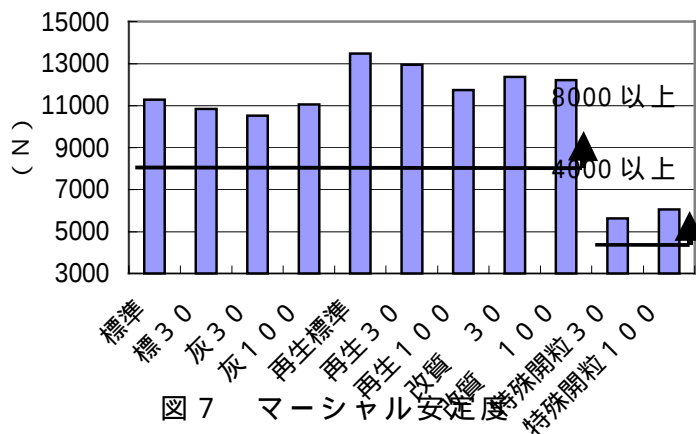


図7 マーシャル安定度

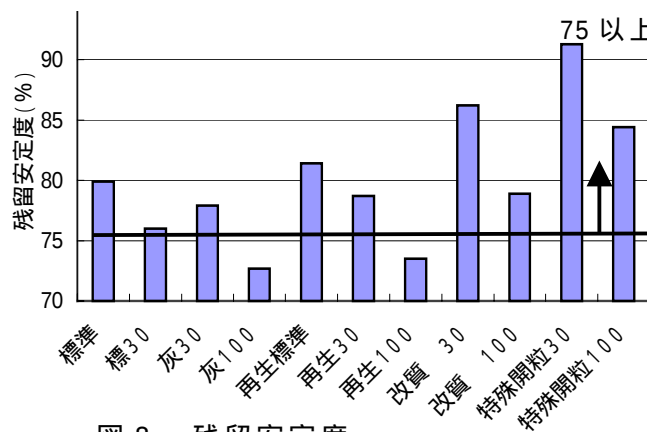


図8 残留安定度

- ・路面の横断形状、車輪走行に伴い発生するわだち掘れ量は水系によって測定。
- ・縦断形状は 3 m プロフィールメーターによって測定。
- ・舗装路面のすべり抵抗は、すべり抵抗測定器により動的摩擦係数として測定。

(2) 調査結果

調査結果のうち都道 226 号においては所々にクラックの発生が見られたが、これは焼却灰を配合していない工区でも発生しており舗装の劣化によるものと思われる。その他の試験舗装ヶ所では異常が見られず、自動車や歩行者の交通障害となるポットホールや大きなわだち掘れは発生しなかった。

以上の結果から、代替率が 30% 程度であれば通常の舗装と同程度の供用年数が確保できるものと判断する。

4 . 技術的検討のまとめ

(1) 安全性

- 1) 焼却灰の段階においても消石灰を 3% 添加することで溶出基準を満足した。
- 2) アスファルト混合物となった場合、灰がアスファルトにコーティングされることもあり、溶出は更に抑制された。
- 3) 強制劣化試験結果においても安全性は問題がなかった。

(2) 物理性状

- 1) 焼却灰単独ではアスファルトフィラーとしての規格を満足しない項目もあるが、石粉に 30% 混合する程度であれば規格を満足した。
- 2) アスファルト混合物とする場合、適用可能な種類に一部制約が残るものの、再生アスファルト混合物を含め、焼却灰の代替率が 30% 程度までなら物理性状をほぼ満足した。また、試験施工、追跡調査によっても現段階（施工後 5 年）問題は生じていない。

5 . 今後の課題

焼却灰のアスファルトフィラー化は、焼却灰の資源化メニューの多様化を図るだけでなく、流域下水道のゼロエミッションに対する取組の柱でもある。この取組を着実に進めるには、資源化製品が広く社会で使われるための行政の主体的役割が益々重要となっている。

本事業においても、焼却灰が単に都の土木材料仕様書に材料として掲載されただけでは、工事毎に多くの試験が必要となるため利用が進まない。行政が主導し（財）道路保全技術センターの製品認定を取得していつでもすぐに使える環境を整備したり、関係市町村の利用に関して協議の場を設けるなどの取組が必要となっている。

今後とも当本部は、ゼロエミッションに寄与する技術開発を通じて、持続可能な社会の発展に役割を果たしていく。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、平成 1 0 年 6 月
- 2) 鈴木勲、武本敏男（2002）下水汚泥焼却灰のアスファルト混合物への利用、平成 1 4 年度「東京都土木技術研究所年報」
- 3) 焼却灰のアスファルト混合物利用に伴う調査委託その 1 ～ 4、下水道局流域下水道本部