

無害化した都市ごみ焼却灰と 低品質発生土を用いた多機能地盤材の開発

棚橋 由彦*・蔣 宇静*・野口 博徳**・日高 公大***

Development of the multirole foundation material using the harmless municipal solid waste incinerator ashes and construction waste soil by

Yoshihiko TANABASHI *, Yujing JIANG *,
Hironori NOGUCHI ** and Koudai HIDAKA ***

Recently, the municipal solid waste discharged from the home is being increased. How to develop the technique for the decontamination and recycle from the viewpoint of environmental pollution and lack of the disposal space from reclamation sites is becoming an important subject. Moreover, a lot of construction waste soil is produced by urban development or underground use while the disposing space is limited. It is becoming an important subject, too.

In this paper, the municipal solid waste is turned harmless, the possibility of a mixture of the harmless municipal solid waste incinerator ashes (Ecoash) and construction waste soil recycling as soft ground improvement material is discussed from both dynamic and chemical sides.

1. 序論

国民生活や産業活動に伴って発生する廃棄物は、我が国の経済成長や国民生活基準の高度化とともにその量を急激に増大させ、質的にも多様化するところとなった。この膨大な廃棄物を適正に処理することは、環境保全、資源保全を図るうえで極めて重大な課題となっている。現在では、家庭からのごみの排出量はリサイクル技術の開発により抑制されつつあるが、未だに一般廃棄物の約7割が焼却処分され、その焼却灰は年間約600万トンも発生している。大部分の焼却灰は有害物質の排除を行わずにそのまま埋立処分され、最終処分場の残容量問題や埋立地からのダイオキシン類、重金属類の溶出による環境汚染問題を招いている。そこで現在、都市ごみ焼却灰の無害化及び再利用の早急な実現が望まれている。一方、有明粘土等の高含水比粘土は低品質な汚泥として利用が困難であり、処分適地の確保も困難な状況にあるため、その再資源化が緊急の課題となっている。軟弱地盤上に盛土を構築すると、周辺地盤に沈下や側方変位が生じ、近接する構造物に様々な影響を及ぼす。国土が狭く人口の多いわが国では、軟弱地盤上にも構造物を建設せざるを得ない場合が多いことから、多数の軟弱地盤対策工法

が開発されている。

本研究では、無害化した都市ごみ焼却灰(エコアッシュ)と低品質発生土との混合材に対し、力学・化学的安定性の両面から軟弱地盤改良材としての再利用可能性を検討する。

2. リサイクルシステムの処理フローと特徴

2.1 無害化処理の原理

本システムにより生成された都市ごみ焼却灰のダイオキシン類分析結果をTable.1、Table.2に、重金属類の溶出特性をTable.3に示す。

都市ごみ焼却灰の性状は、含有内容として、水分、非鉄金属、鉄分、未燃炭素分、灰分等があり、粒度は数mm～数十mmの粒塊を多く含み、有害物質としてダイオキシン類及び重金属類の溶出が懸念されている。今回の焼却灰リサイクルシステムでは、最終製品であるリサイクル資材の品質一定化のため、前処理において、水分、非鉄金属、鉄分及び未燃炭素分を除去する。鉄分及び非鉄金属は、磁力選別され異物として除去される。水分及び未燃炭素分は回転式焼却炉により、800～900℃の加熱雰囲気中で蒸発、或いは燃焼し除去される。

平成15年10月24日受理

* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

** 長崎菱電テクニカ株式会社 (Nagasaki Ryoden Technica Co., Ltd.)

*** 生産科学研究科博士前期課程 (Graduate Student, Graduate School of Science and Technology)

前処理後、ダイオキシン類分解除去処理及び重金属類安定固化処理を行うが、両処理に共通して、100 ミクロンアンダー程度の微粉砕化処理により反応面積を増大させ、処理速度の向上と処理の安定化を図る。

ダイオキシン類分解除去処理は、石炭を主成分とする機能向上剤を予混合し、バーナー内熱式回転型焼却炉に投入し、低酸素独活雰囲気 (O_2 :6%以下) かつ還元雰囲気 (バーナー火炎 CO 及び H_2) にて、850 ~ 900 °C の加熱処理を行う。この反応系は、通常の蒸発ガス加熱分解に加え、脱塩素化による沸点下降 (ダイオキシン類庭訓沸点 400 °C → 200 ~ 300 °C)、蒸発ガス化促進が加味され、分解除去率が上昇する。

重金属安定固化処理は、硫黄を含む無機の重金属固化剤を用いて、重金属類の不溶化を図る。本薬剤は重金属との結合反応速度が速く数秒オーダーで重金属の硫化物が生成される。重金属硫化物は安定しており、水に対する溶解度が極めて小さく、通常の条件では重金属が溶出することは殆どない。なお、都市ごみ焼却により特に懸念されるばいじんに関しても、排ガス対策として 850 °C 以上の高温状況において 2 秒以上の滞留を設け、再合成防止として急冷装置、HCl 及び SO_x 対策として消石灰噴射式バグフィルタ、 NO_x 対策および非常用として活性炭吸着塔等により大気汚染防止法にのっとり排煙設備としており無害化が図られている。

2. 2 リサイクルシステム処理フロー

Figure. 1 にエコアッシュリサイクルシステムの処理フローを示す。本システムによりダイオキシン類と重金属類の無害化が行われ、採取場所、時期などにより異なる都市ごみ焼却灰の品質が、微粉化、乾燥処理、余分鉄分の除去などの処理を施すことにより均一に近づき、二次製品への使用が容易となる。本研究では、長崎と佐賀の 2 つの異なる産地のエコアッシュを使用するが、処理工程は同様である。

一般廃棄物焼却場から排出された焼却灰はいったん貯留装置によって受け入れられる。その後供給量 1 ~ 2.5 t/hr で制御され節目 50mm 以上の大形ごみが選別装置によって除去される。除去後の焼却灰は搬送され 850 °C 以上の雰囲気を持つ乾燥装置で処理されるが、さらに破砕機で細かく砕かれ、磁選機で鉄分を除去し、粉砕機で 100 ~ 150 ミクロンアンダーまで細かく粉砕される。次に添加剤 A が投入され一次反応装置へと進む。ここでは 900 °C 以上の温度雰囲気で焼却灰中ダイオキシン類を分解するが、排ガスは集塵機を通し、飛灰を除去した後、活性炭吸着

Table.1 The result of dioxin kind analysis of management ash

Item	PCDDs	PCDFs	TOTAL
Original ash (ng-TEQ/g)	0.2381	0.1828	0.42
Management ash (ng-TEQ/g)	0.0002	0.0026	0.0028
Resolution rate (%)	99.9	98.6	99.3

Table.2 The result of dioxin kind analysis of fly ash

Item	PCDDs	PCDFs	TOTAL
Original ash (ng-TEQ/g)	0.57	0.25	0.82
Management ash (ng-TEQ/g)	0.000	0.000	0.000
Resolution rate (%)	100	100	100

Table.3 Heavy metals kind containing rate and elution character

Item	Original ash		Management ash	The welfare ministry standard
	Content (mg/kg)	Elution character (mg/l)	Elution character (mg/l)	Elution character (mg/l)
Cd	3.7~4.0	Under 0.01	Under 0.01	Less than 0.3
Pb	205~1206	Under 0.01~0.08	Under 0.01	Less than 0.3
As	2.43~13.5	Under 0.01	Under 0.01	Less than 0.3
T-Hg	0.028~1.09	Under 0.0005	Under 0.0005	Less than 0.005
Cr ⁶⁺	46.0~52.2	Under 0.01~0.04	Under 0.01	Less than 1.5
Se	24.0~62.2	Under 0.01	Under 0.01	Less than 0.3

Cd: Cadmium, Pb: Lead, As: Arsenic, Hg: Mercury, Cr: Chromium, Se: Selenium.

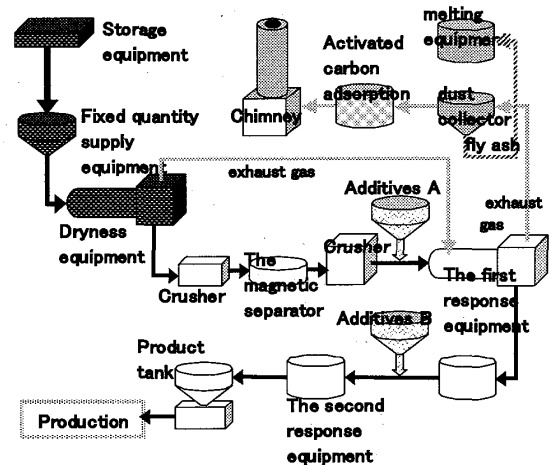


Figure.1 Processing flow of recycling system.

塔を通してダイオキシン類を除去し、煙突から外へと排出する。集塵機で捕獲された飛灰は、溶融装置へ送られ溶融処理される。

一方、一次反応装置で処理された焼却灰は、添加剤Bが投入され二次反応装置へと進み、ここで焼却灰は攪拌され、重金属の安定化処理が施される。そして最終工程の製品タンクへ送られ、袋詰めされる。

3. 力学的特性評価

3. 1 既往研究

エコアッシュの物性値を調べた結果、単体では圧縮強度が低い場合、エコアッシュのみでの建設材料としての使用は困難であった。そこで、長崎産エコアッシュ(N)、佐賀産エコアッシュ(S)、有明粘土(A)、蓮池粘土(H)の各種材料をTable. 4に示すケースと組み合わせで、エコアッシュ：低品質発生土=50:50、消石灰添加率5%（いずれも質量比）にて地盤改良材としての適正を研究した結果、Table. 5に示す圧縮強度を発現できることが解明された。また、海成粘土である有明粘土は塩分濃度が高く消石灰による固化、強度増加が有効であると考えられているが、淡水・汽水域で堆積した塩分濃度が低い蓮池粘土も十分な強度増加を示しており、エコアッシュが多種の低品質発生土の地盤改良材として有効に機能する可能性を示した。

3. 2 試験概要

既往研究と同配合にてNA、SAの各混合材で高さ10cm、直径5cmのモールドで供試体を作成し、材齢1、3、5、7、14、28、42、60日の一軸圧縮試験を行う。供試体を作成した後は、温度25℃、湿度95%の恒温槽において養生を行う。通常は、成型した翌日に脱型を行うが、本実験では、脱型時強度が弱く崩壊する可能性があるため、材齢7日以上のもは7日養生時に脱型し、それ以外のもは試験直前に脱型する。

各試料の物性値をTable. 6、Table. 7に示す。Table. 6内の括弧内の数値は既往研究のものである。本研究の背景には、エコアッシュ生成時における品質管理の改善がある。こうして得られたエコアッシュには、シルト分や粘土分といった細粒分の割合が大きくなり粒度分布がよくなったこと、エコアッシュの採取産地に関わらずその密度と粒度分布が均一になっていることが特徴として挙げられる。これらが強度発現にどのように反映されるか既往研究と比較及び検討を行い、これを力学的特性評価とする。

Table.4 The experimental conditions

Case	Ecoash	Clay
NA	Nagasaki	Ariake
NH	Nagasaki	Hasuike
SA	Saga	Ariake
SH	Saga	Hasuike

Table.5 The result of compressive tests

Item		Curing day (day)			
		7	14	28	60
Uniaxial compressive strength (kPa)	NA	2300	2650	2850	3100
	NH	2050	2600	2910	3030
	SA	980	1350	1450	1600
	SH	860	990	1150	1920

(Ecoash: clay=50:50, lime additive rate 5%, water content of clay is natural)

Table.6 The characteristics of ecoash

Item	Unit	Nagasaki (N)	Saga (S)
Soil particle density ρ_s	(g/cm ³)	2.75 (2.46)	2.70 (2.319)
Grain occasion distribution	Sand	(%) 11.97 (29.3)	21.83 (63.0)
	Silt	(%) 56.3 (61.7)	53.17 (31.0)
	Clay	(%) 32.0 (9.0)	25.0 (6.0)
Optimum moisture content W_{opt}	(%)	20.5	28.0
Maximum dry content ρ_{dmax}	(g/cm ³)	1.51	1.40

(The inside of a parenthesis is past-studied.)

Table.7 The characteristics of clay

Item	Unit	Ariake (A)	Hasuike (H)	
Soil content	(mg/kg)	20500	179	
Soil particle density ρ_s	(g/cm ³)	2.5	2.6	
Natural water content W_n	(%)	139	97.2	
Liquid limit W_L	(%)	125	125.2	
Plastic limit W_P	(%)	45.8	48.2	
Grain occasion distribution	Sand	(%)	38	2.3
	Silt	(%)	35	28.2
	Clay	(%)	27	69.5

3. 3 基準強度

軟弱地盤の一軸圧縮強度は約70kPa以下とされているが、特に含水比の高い粘土や有機質土は軟弱で、そのままでは盛土材料として使用することは難しい。そこで、これらに改良を加え、より高い強度を持たせることで再利用を可能にする。その場合に必要な一般盛土材料としての改良強さは、一軸圧縮強さで100～300kPaと言われ

ている。そこで、本研究での目標強度としては 300kPa を基準に定めた。

3. 4 強度特性

Figure. 2 に一軸圧縮試験の結果を示す。白抜きのプロット点は既往研究の結果を示している。本研究において、既に NA、SA とも材齢 1 日時点で基準強度の 300kPa を上回っており、材齢 60 日においては 5MPa にまで達している。また、2 ケースとも材齢 42 日で材齢 60 日の強度の 90 % を発現しており、材齢は 42 日でも十分と言える。材齢が増加するにつれ、強度も増加していくこと、また、有明粘土は消石灰による固化及び強度増加が有効と考えられ、エコアッシュが有明粘土の地盤改良材として有効に機能する可能性が再確認された。

既往研究と比較してみると、本研究は既往研究より強度発現が明らかであり、材齢 60 日において NA では 1.5 倍以上、SA では 3 倍以上の強度発現が見られる。また、既往研究ではすべての材齢において NA が SA よりも 1Mpa 強度が大きいのにに対し、本研究では NA と SA の強度差が小さくなっている。この要因として、前述のとおりエコアッシュの採取産地に関わらずその粒度分布が均一になっていることが考えられる。このように、強度発現がエコアッシュの粒度分布と同様の傾向を示していることで、混合材の強度発現はエコアッシュの粒度に起因することが考えられる。

以下は、化学的特性評価と併せ、強度発現のメカニズム及び既往研究との相違がどのようにして生じたかを説明する。

4. 化学的特性評価

4. 1 X線回折分析

Figure. 3 に NA の材齢 7 日及び 14 日、また有明粘土、エコアッシュの X 線回折分析結果を示す。

NA に関し、材齢 7 日、14 日において、 $2\theta = 11.2^\circ$ 付近にフリーデル氏塩 ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$) と考えられるピークが認められるが、これは有明粘土、エコアッシュ単体には存在しないものである。フリーデル氏塩の生成はセメントの強度増加の一要因であると言われている。海成粘土である有明粘土は、塩化物(塩化カルシウム等)を多く含むと推定され、粘土成分中の Al_2O_3 が、エコアッシュあるいは添加した消石灰と反応することにより、フリーデル氏塩を多く生成し、強度が発現すると考えられる。それに加え、エコアッシュおよび消石灰にはフリーデル氏塩の生成に寄与する成分が潤沢に存在し、フリーデル氏塩の生成が促進されることで、強度が上昇すると考えられる。また、今回使用したエコアッシュは

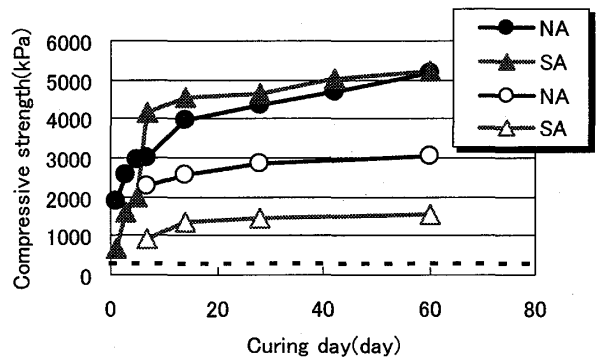


Figure.2 The relationship between compressive strength and curing day.

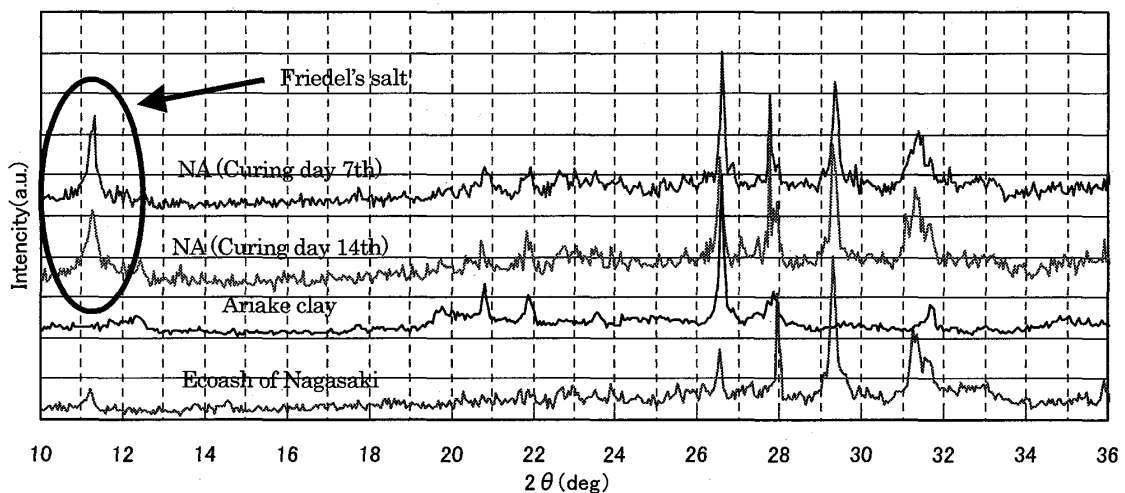


Figure.3 The result of X-ray diffractometer analysis.

Table.8 The result of heavy metals kind elution character

Item	Pb	Cr ⁺⁶	Cd	As	T-Hg	Se
The welfare ministry standard	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01
Ecoash of Nagasaki	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01
Ariake clay	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.0005	<0.01
Hasuike clay	0.32	<0.05	<0.01	0.02	<0.0005	<0.01
NH	Curing day 14th	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.0005
	Curing day 28th	<0.01	<0.05	<0.01	<0.01	<0.0005

Table.6 に示したように細粒分が多い。そのために反応面積が増加したということも要因として考えられる。

4. 2 重金属溶出試験

本研究で使用した有明粘土には環境基準値以上の重金属類が含まれていなかった。そこで、環境基準値以上の重金属類を含む蓮池粘土について、長崎産エコアッシュと消石灰を本配合で混合し、重金属溶出試験を廃棄物に含まれる重金属類で環境汚染の原因として特定される Pb, Cr6+, Cd, As, T-Hg, Se について行った。Table.8 に試料および混合材料の材齢 14, 28 日の重金属溶出試験結果を示す。蓮池粘土で環境基準値を超えて検出された Pb, As はエコアッシュとの混合後は検出されなかった。よって、エコアッシュと低品質発生土を消石灰とともに混合することで重金属類の溶出を抑制することが可能であり、化学的安定性を得ることが確認された。

4. 3 pH 測定試験

重金属溶出試験に続いて、蓮池粘土、エコアッシュ、消石灰、及びそれらの混合材について pH 測定試験を行い、その結果を Figure.4 に示す。

重金属類は酸性の環境で溶出しやすく、アルカリ性の環境では溶出しにくいという性質を持っている。弱酸性である蓮池粘土は、強アルカリ性のエコアッシュ、消石灰と混合することにより、その混合材は強アルカリ性となることがわかる。よって、エコアッシュは土壌由来重金属類の安定化という優れた特性を有する高機能地盤材であると言える。また、近年問題となっている酸性雨による土壌汚染抑制効果も期待できる。

この配合により Pb は水酸化物に、As は低溶解度化合物となり、これらは化学的に、また長期的に安定した化合物である。その化学反応式を (1)、(2) に示す。

5. 結論

既往研究により、都市ごみ焼却灰と低品質発生土（有明粘土）を混合することは軟弱地盤改良材として基準強

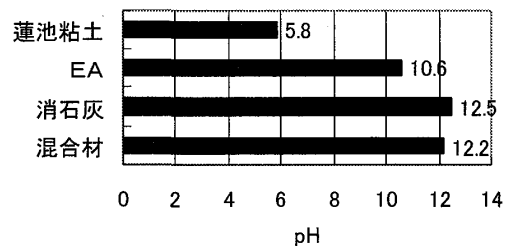


Figure.4 The result of pH measurement tests.

度を満足し、環境汚染抑制に効果を有していることが立証されている。しかしながらそのメカニズムの解明には至っていない。そこで本研究では、既往研究で使用したエコアッシュより、品質管理が整ったエコアッシュを使用し、既往研究との力学的特性の相違を理解し、化学的メカニズムの解明を検討した。以下に本研究で明らかとなった知見を述べる。

①力学的特性評価

有明粘土とエコアッシュとの混合材は、材齢 1 日時に基準強度を上回り、地盤改良材として十分機能すると言える。その後、さらに強度増加を示したことから、締固め、養生状態などの管理を確実に行えば高い再現性を示す。また、品質管理の改善により、既往研究のものよりも強度発現が大きくなっており、材齢 60 日では、NA, SA ともに一軸圧縮強度は 5MPa を上回る。

②化学的特性評価

有明粘土もしくは蓮池粘土とエコアッシュと混合し、消石灰を添加することでフリーデル氏塩が生成され強度発現に影響を及ぼす。

エコアッシュと蓮池粘土を消石灰とともに混合することで蓮池粘土に含まれている重金属類の溶出を抑制することが可能である。

混合した材料は強アルカリ性であることが明らかとなり、土壌汚染の浄化効果及び増強材（鉄筋等）の酸化抑制効果に期待できる。

以上の結果より、無害化した都市ごみ焼却灰と低品質発生土を使用した軟弱地盤改良材は、力学的にも、化学的にも十分安定性を有しており、再利用可能であることがわかる。

【参考文献】

- 1) 棚橋由彦, 長野卓, 蔣宇静, 辻龍二, 力武幸: 無害化处理した都市ごみ焼却灰の軟弱地盤改良材としての適正評価, 第36回地盤工学研究発表会講演概要集, 地盤工学会, 徳島, 第1/2分冊, D-05/446, pp. 879-880 (2001.7)
- 2) 蔣宇静, 棚橋由彦, 石橋康弘: 都市ごみ焼却灰の建設素材としての再利用に関する研究, 平成13年度科学研究費補助金研究成果報告書 (2002.3)
- 3) 棚橋由彦, 蔣宇静, 野口博徳, 梁瀬好康, 村岡昌之, 日高公大: 無害化处理した都市ごみ焼却灰と低品質発生土を用いた多機能地盤材料の開発, 第58回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 徳島, III-138, CD-ROM (2003.9)