

建設汚泥を原料とする 焼成物の焼成条件と物理的安定性

徳永豊¹・炭田光輝²・宇野定雄³・本間毅一⁴・塚田幸広⁵・小川伸吉⁶

¹正会員 五洋建設株式会社技術研究所 (〒 329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町 1534-1)

²正会員 株式会社大林組技術研究所 (〒 204-0011 東京都清瀬市下瀬戸 4-640)

³正会員 株式会社熊谷組エンジニアリング本部 (〒 162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)

⁴正会員 大豊建設株式会社管理本部 (〒 302-0006 茨城県取手市青柳一丁目 8-1)

⁵建設省東北地方建設局 酒田工事事務所 (〒 998-0011 山形県酒田市上安町一丁目 2-1)

⁶建設省中部地方建設局 中部技術事務所 (〒 461-0047 愛知県名古屋市中区大幸南一丁目 1-15)

建設汚泥は、そのままでは再利用が困難なため、脱水処理・固化処理および焼成処理などによる再資源化技術の開発が進められている。本論文では、まず建設汚泥の発生状況、再資源化技術と用途について現状を整理した。次に焼成処理による再資源化を検討するために行った室内焼成試験により得られた焼成物の焼成条件および物理的安定性について述べる。試験結果より建設汚泥を焼成処理することによって十分な物理的安定性を有する粗粒材が製造でき、土木材料としてリサイクルが可能なが確認された。

Key Words: construction waste, recycle, calcination, calcinated material, construction materials

1. まえがき

建設副産物の発生量は、年々増加傾向をたどっており、また、処分場の残容量不足から、その処理・処分は建設事業を遂行していくうえで緊急の課題となっている。建設省は、建設副産物対策の支援方策として平成4年度から平成8年度の5年間にわたって建設省総合技術開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発」を実施した。

建設汚泥は、建設工事に伴って発生する掘削泥水や微細な泥状土などであり、そのままでは盛土などに直接流用できない。このため、現状ではごく一部再利用されるものを除き、大部分は産業廃棄物である「汚泥」として中間処理施設で脱水処理を行い、あるいは直接最終処分場に持ち込まれている。しかし、処分場の不足、遠隔化は深刻な問題であり、建設汚泥の有効利用が望まれている。

建設汚泥は本来自然の土が主成分であり、ほとんどの場合有害な成分は含んでいない。単に含水比が著しく高く、場合によっては、ややアルカリ性であ

るため、土としての用途に適さない場合があるということである。このようなことから、脱水・固化・焼成などの処理をすれば土木材料として十分利用できる性質を有する。

そこで筆者らは、建設汚泥を高度に処理して粗粒材として再資源化を図るために建設汚泥を脱水、造粒したのち焼成して粒状の焼成物を製造し、粗粒材として利用する技術の開発を行った。建設汚泥から焼成物を製造する場合、汚泥の性状にもよるが含水比300%の泥水1m³から約0.3m³の焼成物ができ、現状の汚泥の処理処分費を勘案すると事業化も十分可能である¹⁾。

建設汚泥から焼成物を製造する場合、言うまでもなく焼成条件が重要であり、製造される焼成物の物理的安定性を確保する必要がある。

本論文では、建設汚泥の発生状況・処理処分の現状について整理し、次に電気炉を用いて建設汚泥の室内焼成試験を行い、温度・時間・粒径などの最適焼成条件の検討を行った。また、焼成物を土木材料として有効利用する場合、水浸における物理的安定

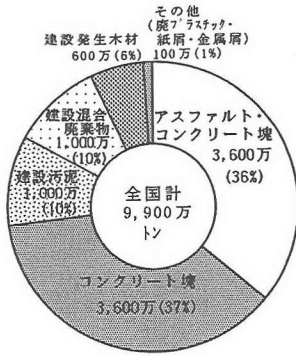


図-1 種類別排出量 (平成7年度)

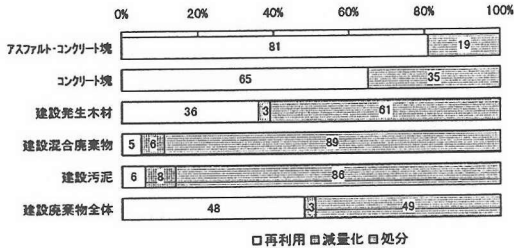


図-2 建設廃棄物の再利用の割合 (平成7年度)

性が問題となるため、強度・粒度・透水性・溶出成分の試験を行い、さらに建設汚泥と原料、製造方法が類似している縄文時代の土器について焼成時期、焼成温度、物性などを調査し、土器との比較から焼成物の物理的安定性を推測した。

2. 建設汚泥の発生状況

(1) 建設汚泥の発生と処理・処分の現状

図-1、図-2に平成7年度の建設副産物実態調査結果を示す²⁾。建設汚泥の発生量は、1,000万t/年であり、建設廃棄物全体の約10%を占めている。このうち、リサイクルの指標となる再利用と減量化の率は、それぞれ6%、8%の計14%であり、建設廃棄物の主要5品目の中でも2番目に低い値となっている。建設汚泥のリサイクルは遅れており、リサイクル率の向上が強く望まれている。

(2) 建設汚泥の発生工種と特長

建設工事に伴って排出される発生土は、建設発生土と建設汚泥に分類される。建設汚泥は標準ダンプトラックに山積みできず、その上を人が歩けない状態のものを称しており、泥水や泥しょうを使用して掘削する泥水掘削工事、泥土圧シールド工事および軟弱地盤を掘削する工事などで発生する。

表-1 建設汚泥の発生工種と性状の一例

工法	施工段階	細粒分含有率 (%)	含水比 (%)	性状		
				液性限界 (%)	強熱減量 (%)	pH (-)
泥水式シールド工法	余剰泥水	82以上	200~665	-	4~9	6.9~11.4
	脱水ケーキ	-	22~93	70~80	-	4.3~11.7
泥土圧式シールド工法	排土	50~60	20~60	30~50	3~5	5.6~11.7
壁式地中連続壁工法	廃棄泥水	86以上	350~2900	100以上	7~12	7.7~11.4
	脱水ケーキ	-	43以下	40以下	-	9~11
	細粒土塊	96	52.6	46.1	5.1	10.5
	遠心分離土	37	37.7	-	3.9	7.9
泥水固化壁工法	廃棄泥水	70以上	300以下	78以上	5	8~11
	脱水ケーキ	-	88.3	78.6	-	11
揚所打ち杭工法	廃棄泥水	51	120.9	43.6	-	8.2
	脱水ケーキ	-	93	82.2	-	12.1
柱列式地中連続壁工法	廃棄泥水	-	97.3	-	-	-

表-2 建設汚泥の再資源のための処理技術と用途例

利用形態	処理技術					利用用途例
	添加材	分級	脱水	固化	焼成	
スラリー	○					掘削泥水
硬化スラリー	○					自硬性安定液、裏込め、枕頭戻し
粘土原料			○			セメント原料、窯業原料
粗骨材		○	(○)	○	○	砂、骨材、ドレン材、盛土材
その他					○	水質浄化材、植栽用土壌

表-1に例示する³⁾ように建設汚泥には、泥水、機械脱水して得られた脱水ケーキ、泥しょうと地山が混合されたもの、軟弱地盤の掘削などにおいて粘性土が泥土化したものなどがある。発生汚泥の含水比は、3,000%程度の著しく高いものから液性限界よりやや高いか、それ以下のものまで様々である。しかし、いずれも粘性土を主体とした無機性の汚泥である。

3. 建設汚泥の再資源化技術と用途

表-2に建設汚泥の再資源化のための処理技術と用途例をまとめたものを示す。工事中あるいは終了時に不要となった泥水は、そのままあるいは添加材などで濃度や粘性を調整して掘削泥水として利用が可能である。また、セメントなどを添加して自硬性安定液や裏込め材としても利用可能である。脱水ケーキは、セメント製造時などの粘土原料として利用されることもある。

一方、建設汚泥中に混入している礫、砂はスクリーンやサイクロンで分級して骨材などの粗骨材として利用が可能である。また、粘土を主体とする建設汚泥も必要に応じて機械脱水などの前処理を行ったのち、固化処理や焼成処理を行うことにより粗骨材として利用が可能と考えられる。焼成処理した建設汚泥は、粗骨材としての利用のほか水質浄化材や植栽用土壌としても利用の可能性が高い⁴⁾。

表-3 建設汚泥の物理・化学特性

土質特性		化学組成 (%)	
土粒子密度 (g/cm ³)	2.687	SiO ₂	62.5
含水比 (%)	58.5	Al ₂ O ₃	22.5
粒度組成 (%)	礫分	Fe ₂ O ₃	3.6
	砂分	CaO	3.6
	シルト分	MgO	2.4
	粘土分	K ₂ O	2.3
液性限界 (%)	85.5	SO ₃	2.1
塑性限界 (%)	38.7	P ₂ O ₃	0.6
塑性指数	46.8	TiO ₂	0.4
強熱減量 (%)	9.5	Na ₂ O	0.3

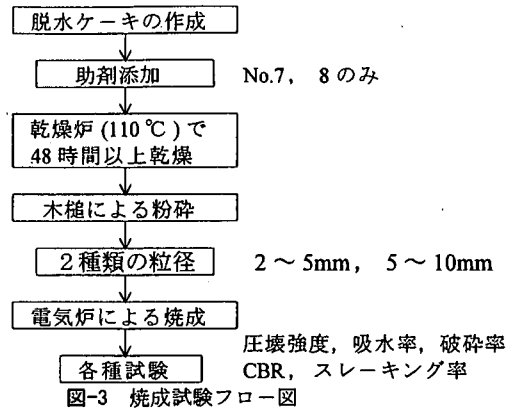


図-3 焼成試験フロー図

表-4 焼成条件と焼成物の試験結果

検討項目	焼成条件					試験結果	
	試験 No.	温度 (°C)	時間 (hr)	助剤	粒径 (mm)	圧壊強度 (MPa)	吸水率 (%)
最適温度	1	1200	1.0	無添加	5~10	溶解のため試験不能	
	2	1000				16.1	27.2
	3	800				4.7	37.0
最適時間	4	1000	0.5	無添加	5~10	14.1	24.7
	5		1.5			21.6	22.8
粒径の影響	6	1000	1.0	無添加	2~5	11.1	26.7
助剤の効果	7	800	1.0	水ガラス	5~10	4.5	36.5
	8			ホウ砂		3.5	35.5

注) 重量減 : (焼成前重量 - 焼成後重量) / 焼成前重量 × 100 %

圧壊強度 : JIS Z 8841 に準じて測定し、全圧を破壊時の断面積で除して算出した。

吸水率 : JIS A 1110 に準じて測定した。

建設汚泥の再資源化にあたっては、利用用途の品質基準に適合することは言うまでもなく、需要量が多いことも重要である。土木材料のうち粗骨材の需要は多く、建設汚泥を粗骨材とする処理技術として焼成処理は非常に有望である。

4. 室内焼成試験

建設汚泥の再生利用の一環として、建設汚泥の付加価値を高める方法として、粗粒化することに着目した。粗粒化する方法のうち、有望と考えられた焼成について、建設汚泥を対象とした場合の処理技術を確認するために室内焼成試験を行った。

(1) 建設汚泥の性状

表-3に室内焼成試験に用いた建設汚泥の物理・化学特性を示す。建設汚泥は、地中連続壁工事から発生した粒子の粗い掘削土を多く含む泥水を脱水した脱水ケーキを用いた。

(2) 試験方法

図-3に焼成試験フローを示す。試験試料は、脱水

ケーキを乾燥炉で 110℃、48 時間以上乾燥したのち、木槌で粉砕し、2~5mm と 5~10mm の 2 種類の粒径のものを電気炉で焼成した。

焼成には左右対称に発熱体をもつ電気炉 (炉内寸法 250 × 300 × 700mm) を使用し、炉内温度が所定の温度に達した後、試料を入れ再び所定の温度に達した時点 (約 10 分) を焼成開始時刻とした。なお、焼成後は、炉から試料を取り出して室温で自然冷却した。

焼成助剤として、水ガラスとホウ砂を用い、試料 1 kg に対して水ガラスは 2 ml、ホウ砂は 3 g をそれぞれ 200ml の水で薄めた液を霧吹きで吹き付け・乾燥を繰り返して表面に均一に添加した。

(3) 焼成条件の検討結果

表-4に焼成条件と焼成物の試験結果を示す。焼成試験は、最適焼成温度、最適焼成時間、粒径の影響および助剤の効果などを検討項目として行った。なお、焼成条件の検討にあたっては、特に焼成物の強度に重点をおき、目標強度を 6MPa 以上⁵⁾とした。

a) 焼成温度

焼成温度は、建設汚泥を焼成する場合、焼成物の

品質および経済性に及ぼす影響が大きい。類似の研究⁶⁾では1000℃前後が採用されており、ここでは最適焼成温度を得るために焼成時間を1時間とし、800℃、1000℃、1200℃の3条件の温度で焼成した。試験試料は、図-3のフローで生成した5～10mmの粒状体のものを用いた。

試験結果によると、1200℃で焼成した試験 No.1 は、ガラス状に熔融して固結し、粒状が維持できなかった。1000℃で焼成した試験 No.2 の圧壊強度が16.1MPaに対し、800℃で焼成した試験 No.3 の圧壊強度は4.7MPaと極めて低い値であった。吸水率においてもNo.3はNo.2より約10%ほど高い値を示している。また、焼成物のSEM観察結果でも800℃では多孔質な内部構造が認められている。これらのことから、強度が要求される粗粒材を製造する場合には焼成温度800℃では焼成が不完全と判断し、焼成温度は1000℃が最適であると考えた。

b) 焼成時間

最適焼成時間を得るために、焼成時間を0.5h、1.0h、1.5hの3ケースについて焼成を行った。

最適焼成温度1000℃で、焼成時間0.5h、1.0h、1.5hとした試験 No.4、No.2、No.5を比較すると、圧壊強度は、14.1MPa、16.1MPa、21.6MPaと焼成時間が長くなるにつれて高くなる傾向にある。0.5hで焼成した焼成物においても十分な圧壊強度を有するが、実機での効率を考慮して最適焼成時間は1時間が妥当と考えられる。

c) 粒径

焼成時の粒径の違いが焼成物の性状に及ぼす影響を調べるために、粒径2～5mmと5～10mmについて焼成を行った。

試験結果によると、粒径2～5mmの試験 No.6 の圧壊強度は11.1MPaであり、粒径5～10mmの試験 No.2 の16.1MPaより約30%低い値を示した。また、吸水率は、粒径2～5mmでは26.7%、粒径5～10mmでは27.2%とほぼ同様な値であった。これらのことから焼成物の粒径の差異は、強度において粒径が小さいほど低い値を示すが、その差は実用上問題はないと考えられる。

d) 助剤

比較的低い融点をもつ物質を助剤として、焼成前の粒状物の表面に塗布することによって最適焼成温度の低下、または焼成物の強度増加を図ることをねらいとして、水ガラスおよびホウ砂の2種類の助剤を用いて焼成試験を行った。なお、焼成温度は800℃、焼成時間は1時間とした。

圧壊強度は、試験 No.7 の水ガラス塗布では4.5MPa、試験 No.8 のホウ砂塗布では3.5MPaであ

表-5 焼成物の品質試験結果

	試験方法	試験結果
圧壊強度 直後 (MPa) 1日水浸	JIS Z 8841	14.5
	〃	10.1
吸水率 (%)	JIS A 1110	25.9
破碎率 (%)	JHS 109	4.6
CBR (%)	JIS A 1211	31.6
膨張率 (%)	〃	0.085
スレキソ率 (%)	JHS 110	0
透水係数 (m/sec)	JIS A 1218	3.0×10^{-3}

注) CBR試験および透水試験に用いた供試体は、粒径2～10mmの焼成物を自由落下により充填し作成した。

表-6 単粒度砕石と焼成物の粒度

ふるい呼称法	ふるい通過質量百分率 (%)				
	20	13	5	2.5	1.2
砕石 S-13(6号)	100	85-100	0-15		
砕石 S-5 (7号)		100	85-100	0-25	0-5
焼成物 2-5 mm			100	19	4
焼成物 5-10mm		100	16	3	0

り、助剤無添加の試験 No.3 の4.7MPaと大差はなかった。また、助剤塗布による圧壊強度は、最適焼成温度(1000℃)の圧壊強度16.1MPaに比較して著しく低いものであった。このことから、助剤を添加して焼成温度を下げる方法は、有効ではないと判断した。

(4) 焼成物の特性

表-5に最適条件(1000℃、1時間、助剤無添加)で焼成した焼成物の特性を把握するために行った品質試験結果を示す。なお、品質試験に用いた試料の粒径は、5～10mmである。

圧壊強度および吸水率は、14.5MPa、25.9%と表-4の試験 No.2 とほぼ同等の値となっている。また、吸水後(1日水浸)の圧壊強度は10.1MPaであり、約30%の水浸による強度低下が認められた。荷重2MPa 載荷後の破碎率は4.6%と低い値であり、焼成物は破碎抵抗性に優れた材料といえる。CBR値は31.6%であり、日本道路公団の材料規定⁷⁾ 路床上部10%以上および路盤下層30%以上を満たしている。また、炉乾燥・水浸を5サイクル行うスレーキング試験では、スレーキング率0%と乾湿繰り返しによる細粒化は認められなかった。

表-6に砕石ドレン材として一般に使用される6号・7号砕石と焼成物の粒度の比較を示す。建設汚泥を焼成した焼成物は、焼成による割れがなく焼成

表-7 脱水ケーキの土質特性 (セメント無添加)

土粒子密度 (g/cm ³)	2.521	
含水比 (%)	234.8	
湿潤密度 (g/cm ³)	1.299	
粒度組成 (%)	砂分	0.4
	シルト分	8.9
	粘土分	90.7
液性限界 (%)	340.2	
塑性限界 (%)	130.1	
塑性指数	210.1	

表-8 試料の化学特性 (単位%)

組成	泥水	脱水ケーキ		
		NP 0%	NP 20%	NP 40%
SiO ₂	60.2	54.0	51.7	46.8
Al ₂ O ₃	22.5	29.2	24.7	21.8
Fe ₂ O ₃	5.6	5.0	5.0	4.6
MgO	2.6	2.1	2.3	2.2
CaO	2.6	0.5	10.0	18.4
K ₂ O	2.4	2.0	1.9	1.6
SO ₃	1.7	4.5	2.1	2.7
Cl	0.7	1.5	1.2	0.8
その他	1.7	1.2	1.1	1.1

前の粒度を保っており、6号砕石および7号砕石に近い粒度で製造することが可能である。

これらのことから、焼成物は強度、破碎抵抗性、安定性および粒度などの試験結果より、ドレーン材などの土木材料として十分適用できると考えられる。

5. 焼成物の物理的安定性

建設汚泥の焼成物は、強度、破碎抵抗性などから排水材や埋め戻し材などの土木材料としての幅広い用途が考えられる。その際、焼成物は、多くの場合地下水や表流水にさらされることとなるため、水中での物理的安定性が求められる。しかしながら、その確認方法には、規格化されたものがないので独自の試験方法で実施した。

建設汚泥は、発生工種によってセメント分が多量に含まれる場合があり、適用にあたってはセメント分の含有量も問題となる。このため水浸日数の影響およびセメント混入量の違いによる焼成物の物理的安定性を評価するために、強度試験や溶出試験を実施した。

さらに、建設汚泥と原料や製造方法が類似しており、安定性が長期にわたって確認されている縄文時代の土器について焼成時期、焼成温度、物性などを

表-9 試験方法

試料	NP 0%, NP 20%, NP 40%
乾燥	炉乾燥, 110℃, 48時間
粒径	ジョークラッシャ粉碎, 2mm ~ 5mm
焼成	焼成温度 1000℃, 1時間
浸漬水	蒸留水, 人工海水
焼成後の試験	圧壊試験 (JIS Z 8841) 粒度試験 (JIS A 1204) 透水試験 (JIS A 1218) 蛍光X線分析, SEM分析
浸漬後の試験	圧壊試験 (JIS Z 8841) 粒度試験 (JIS A 1204) 透水試験 (JIS A 1218) 溶出試験, 蛍光X線分析

注) 透水試験用供試体は、自由落下により作成

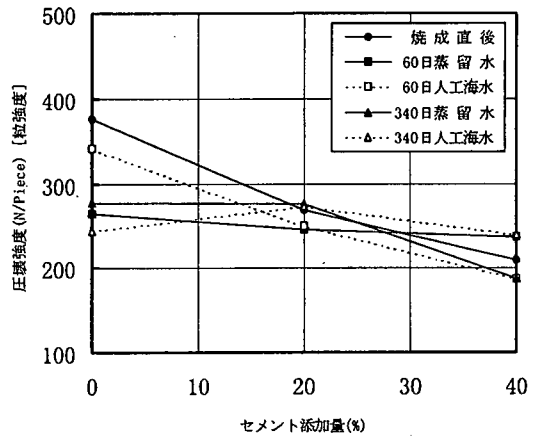


図-4 セメント添加量と圧壊強度の関係

調査し、土器との比較から焼成物の物理的安定性を推測した。

(1) 物理的安定性試験

a) 試料

物理的安定性試験に供する試料は、地中連続壁工法より発生したベントナイトなどの微粒子を多く含む泥水を用いた。泥水に普通ポルトランドセメント (以下 NP と称す) を無添加 (0%)、乾土量当たり 20% 添加、40% 添加した脱水ケーキを試料とした。表-7 に脱水ケーキの土質特性、表-8 に試料の化学特性を示す。NP の添加に伴って CaO が増大し、SiO₂、Al₂O₃ が減少する傾向にあり、NP が多くなると焼成に適した組成⁹⁾ からやや逸脱する傾向にある。

b) 試験方法

表-9 に試験方法を示す。試料は、110℃で48時間乾燥した後、ジョークラッシャで破碎し、2mm

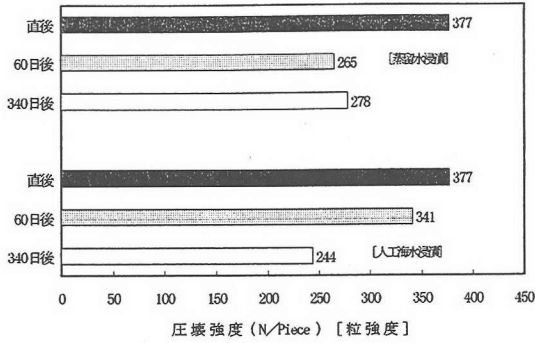


図-5 浸漬日数と圧壊強度の関係 (セメント無添加)

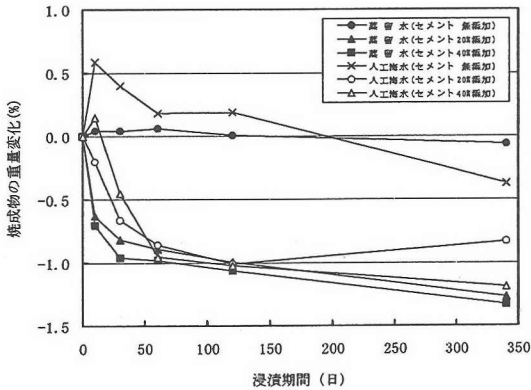


図-6 浸漬期間と焼成物の重量変化の関係

重量変化量 (%) = 浸漬後重量 - 浸漬前重量 / 浸漬前重量 × 100
より算出

～5mmの粒径のものを用いた。焼成条件は、焼成温度を1000℃、焼成時間を1時間とした。また、溶出試験の浸漬水には蒸留水と塩分濃度1.5%の人工海水を用い、所定の期間浸漬したのち溶出量を測定した。

c) 試験結果

① 圧壊強度

図-4に焼成直後、浸漬60日および浸漬340日におけるセメント添加量と圧壊強度の関係を示す。ここで圧壊強度は、焼成物の粒当たりの強度で示している。圧壊強度(粒強度)はセメント添加量の増加に伴い、低下する傾向が見られ、特に、焼成直後の試料と60日人工海水浸漬試料の強度低下は顕著である。

図-5にセメント無添加における浸漬日数と圧壊強度の関係を示す。蒸留水浸漬では、約1年経過後の強度低下は24%程度に対し、人工海水浸漬の場合は、約1年経過後の強度低下は35%程度とやや大きい値となっている。

表-10 水中養生による透水性の変化

試料	試験条件	透水係数 k(m/sec)
セメント 無添加	焼成直後	3.0×10^{-3}
	60日蒸留水	3.1×10^{-3}
	60日人工海水	3.2×10^{-3}
セメント 40%添加	焼成直後	2.9×10^{-3}
	60日蒸留水	3.2×10^{-3}
	60日人工海水	3.2×10^{-3}

表-11 水中養生による粒度変化

試料	試験条件	2mm 残留重量百分率 (%)
セメント 無添加	焼成直後	91.7
	60日蒸留水	98.6
	60日人工海水	99.7
セメント 40%添加	焼成直後	98.4
	60日蒸留水	97.2
	60日人工海水	97.2

② 透水性

表-10に透水性の変化を示す。透水係数は60日水浸後も焼成直後とほとんど同じ値を示し、また、蒸留水と人工海水との浸漬水の違いによる顕著な差異は認められなかった。このことから、建設汚泥の焼成物は、目詰まりによる透水性の低下はなく、排水材として物理的な安定性に優れているといえる。

③ 粒度変化

表-11に水中養生による粒度変化を示す。水浸による粒度変化は、透水係数と同様、セメント添加量の有無、浸漬日数および浸漬水の種類などにおいて認められなかった。焼成物の粒径が2mm～5mmの範囲であることを考えると、焼成温度1000℃、1時間で焼成した建設汚泥は、水浸による形状の劣化はほとんどないものと考えられる。

④ 重量変化

図-6に浸漬期間と焼成物の重量変化を示す。溶出試験は、焼成物を蒸留水および人工海水に浸漬し、所定の期間経過後、2mmふるいを通し焼成物と浸漬水を分離したのち、残留した焼成物の乾燥重量と浸漬前の焼成物の重量との差を求めた。溶出結果によるとセメント無添加の場合は、人工海水の浸漬日数10日、30日において多少のばらつきが見られるが、焼成物の重量変化はほとんどない。一方、セメント添加(20%、40%)の蒸留水浸漬および人工海水浸漬では、約1年で1%前後と僅かな重量変化が認められた。

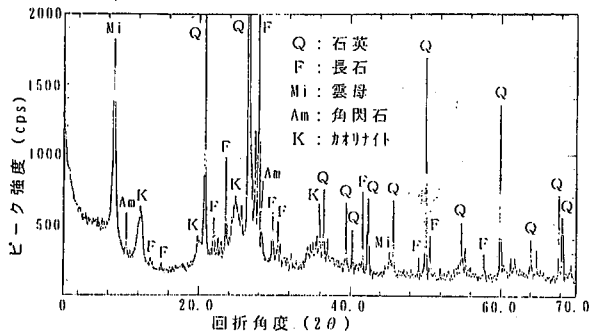


図-7 縄文中期のX線回折分析結果

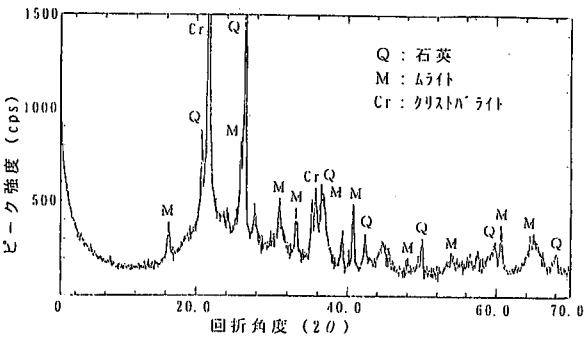


図-8 焼成物のX線回折分析結果

(2) 縄文土器との比較

a) 縄文土器の特長

縄文土器文化は、本州では紀元前約1万年にまでさかのぼり、弥生式土器文化が発生する紀元前500年頃まで続いた。縄文土器の特長は、表面に焼き込まれた紋様があり、紋様の形式により時代区分される。土器は約600～800℃で焼かれたもの⁹⁾であり、泥炭層のように水分の多い場所からの出土物にも、その紋様が残っているように水中でもその形状を維持しており、物理的安定性は高いといえる。

b) 試料および試験方法

建設汚泥の焼成物は、前述したように地中連続壁工法による発生汚泥を脱水、造粒、焼成したものである。縄文土器は縄文中期、後期のものの破片を東京都埋蔵文化財センターから入手した。さらに、縄文土器と同様に野焼き方式で焼成している縄文土器教室の作品を参考試料とした¹⁰⁾。

試験方法は、成分試験として焼成物を粉砕して蛍光X線分析による化学組成の分析、X線回折分析による鉱物の同定を行った。また、土器の物性として破砕物のうち5～10mmの粒状物の圧壊強度と吸水率の試験を行った。

表-12 鉱物組成

試料	年代	含有鉱物
縄文中期	約2500B.C	Q, F, Mi, Am, K
縄文教室 a	現代	Q, F, Mi
縄文教室 b	現代	Q, F, Mi, M, Cr
原料汚泥	現代	Q, F, Mi, Ch, P
焼成物	現代	Q, M, Cr

※ Q: 石英, F: 長石, Mi: 雲母, Am: 角閃石
K: カリナイト, M: ムライト, Ch: クロライト
P: パイライト, Cr: クリストバライト

表-13 縄文土器の物性

試料	年代	圧壊強度 (MPa)	吸水率 (%)
縄文土器中期	約2500B.C	2.4	21.0
縄文土器後期	約1000B.C	11.4	20.1
縄文教室 a	現代	13.5	23.0
縄文教室 b	現代	13.6	18.5
汚泥焼成物	現代	14.5	25.9

c) 試験結果

① 化学組成および鉱物組成

化学組成は、いずれもSiO₂とAl₂O₃の2成分で全体の80～95%を占めており、建設汚泥焼成物と土器との差は、ほとんど見られなかった。

図-7に縄文中期のX線回折分析結果、図-8に焼成物のX線回折分析結果を示す。また、表-12に原料汚泥、建設汚泥焼成物および土器の鉱物組成を示す。原料汚泥には、雲母やクロライトなどの各種の鉱物が含まれているが、焼成により石英を残し他の鉱物は無くなり、新たにムライトやクリストバライトが生じている。これらの鉱物は、1000℃の高温でも安定な鉱物として知られている。

一方、縄文土器では、石英だけでなく長石、雲母も残存している。雲母は通常700℃程度の温度履歴で分解するので、これらの土が700℃以下の温度で焼成されたことを示している。また、縄文教室で焼かれた土器は、雲母が残留しているものの、縄文教室bでは高温で生成するムライトやクリストバライトが検出されており、局部的には高温になったものと考えられる。いずれにしても建設汚泥の焼成物は、縄文土器より高い温度で焼成されたことが含有鉱物からも明らかである。

② 吸水率および圧壊強度

表-13に縄文土器の物性を示す。縄文土器の吸水率は、20%前後の値を示しており、建設汚泥焼成物と著しい差は認められなかった。この値は、土器

表-14 縄文土器と建設汚泥焼成物の特長の比較

	縄文土器	建設汚泥焼成物
製造時期	2500年前～10000年前 (今回は3000年前～4500年前)	現代
化学組成	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ が主体 CaO, MgOなどは少ない	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ が主体, セメントに由来するCaOが含まれる場合がある
鉱物組成	石英, 長石, 雲母, 角閃石, カリナイトで構成される	石英以外の土中の鉱物は消失 ムライト, クリソトハライトなどが生成
焼成温度	600～800℃	1000℃
物理特性	吸水率は年代に関係なく20～21% 圧壊強度は2.4～11.4MPa	吸水率は約25% 圧壊強度は15MPa前後

を構成する粘土が熔融状態にまでは至らず、粘土が骨格を維持した状態で融着して多孔性を示していることを示唆している。

一方、圧壊強度は年代によってかなり異なっており、縄文土器中期(約4500年前)が最低で2.4MPaである。また、縄文教室の土器は、建設汚泥焼成物と同程度の高い強度を有している。土器の強度は原料粘土の性質や焼成方法によっても異なるが、長期の時間経過により低下する傾向がある。仮に、縄文時代の土器製造当初の強度が縄文教室と同程度と仮定すると、約3000年経過で80%程度に、約4500年経過で20%程度に強度が低下することになる。しかし、建設汚泥の焼成物を土木材料として利用する場合には、通常このような長期間は考慮する必要はないと考えられる。表-14に縄文土器と建設汚泥焼成物の特長を比較したものを示す。

縄文土器が、現在長期にわたって安定していることから、縄文土器より高い温度で焼成した建設汚泥は、土木材料として利用しても物理的に十分安定であるといえる。

6. まとめ

建設汚泥を原料とする焼成物の焼成条件、物理的安定性を検討した結果、以下に示すような所見を得た。

- (1) 建設汚泥を焼成し粗粒物を製造する場合、焼成温度1000℃、焼成時間1時間が最適焼成条件であると判断した。
- (2) 粒径2～10mmの焼成物の強度は、粒径が小さいほど低いが、その差は実用上問題ないと考えられる。
- (3) 水ガラスおよびホウ砂の助剤効果は、今回の試験条件からは認められなかった。
- (4) セメント含有量が増加すると焼成物の強度が低下する傾向にあるため、原料を受け入れる場合は、セメント含有量を考慮する必要がある。

(5) 建設汚泥焼成物を土木材料などに有効利用する場合、強度、透水性、粒度、破砕性については、物理的に安定であることがわかった。

(6) 建設汚泥焼成物は、約3000年前の縄文土器の強度、吸水率とほぼ同程度であることから、焼成物の物理的安定性は高いと考えられる。

以上、建設汚泥の焼成物の焼成条件、物理的安定性などから有効利用の可能性を検討した。今後は、建設汚泥の焼成物は、ドレーン材、道路材、骨材、および緑化資材などへの適用について検討したい。

なお、本研究は建設省土木研究所と(財)先端建設技術センターおよび民間22社との共同研究「建設汚泥の高度処理・利用技術」のうち、ドレーン材グループ(建設省土木研究所、(財)先端建設技術センター、(株)大林組、(株)熊谷組、五洋建設(株)、大豊建設(株))の研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 小林正宏, 本間毅一, 塚田幸広, 戸谷有一: 建設汚泥の焼成による有効利用(その2) - ドレーン材としての適用性試験と焼成の事業性 -, 第2回環境地盤工学シンポジウム, pp.243-248, 1997.
- 2) 塚田幸広, 小川伸吉: 建設汚泥の利用技術, 土木学会誌, pp.9-11, 1997.2.
- 3) 建設汚泥の高度処理・利用技術の開発(盛土グループ): 平成6年度共同研究報告書, pp.5-13, 1995.3.
- 4) 徳永豊, 佐藤祐司, 落合良隆, 杉山雅彦: 建設汚泥の焼成による有効利用(その9) - 焼成物のドレーン材以外の用途の検討 -, 土木学会第52回年次学術講演会, pp.476-477, 1997.
- 5) 建設汚泥の高度処理・利用技術の開発(ドレーン材グループ): 平成6年度共同研究報告書, pp.3-23, 1995.3.
- 6) 竹村征三, 丹羽薫, 梶原日出隆, 中村健一, 楠見正之: ダム建設現場における濁水処理スラッジの有効利用(1), ダム技術, No.90, pp.42-48, 1994.

- 7) (社) 日本道路協会 : アスファルト舗装要綱, 1992.
- 8) 川地武, 宇野定雄, 小川伸吉, 飽本一己 : 建設汚泥の焼成による有効利用 (その 1) - 原料汚泥の性状と焼成物の用途 -, 土木学会第 50 回年次学術講演会, pp.644-645, 1995.
- 9) 江藤盛治 : 縄文土器の焼成温度の推定, 人類学雑誌 22, pp.23-46, 1963.
- 10) 川地武, 宇野定雄, 小川伸吉, 杉山雅彦 : 建設汚泥の焼成による有効利用 (その 6) - 縄文土器との比較による焼成物の安定性の考察 -, 土木学会第 51 回年次学術講演会, pp.240-241, 1996.

(1998. 7. 7 受付)

CALCINING CONDITION AND PHYSICAL STABILITY OF CALCINED MATERIAL FROM CONSTRUCTION WASTE

Yutaka TOKUNAGA, Mitsuteru SUMIDA, Sadao UNO, Kiichi HONMA,
Yukihiro TSUKADA and Nobuyoshi OGAWA

Several recycling techniques, such as dehydration, solidification and calcination, for construction waste has been developed because construction waste can not be recycled directly. In this paper, we investigated the actual situation of occurrence circumstances, recycling techniques and uses of construction waste. Then, we examined the calcining condition and physical stability of calcined waste by a laboratory examination to study the recycling by calcination.

As a result, it is confirmed that construction waste can be recycled by calcination for construction materials producing coarse aggregate which has enough physical stability.