

下水道資源活用透水性レンガ製造技術 の実用化研究

1. 研究目的

下水道事業の進捗に伴って発生量が増加の一途をたどっている下水汚泥の安定的な処理処分は、今後の下水道事業における最重要課題の一つであり、地球環境保全等の観点からも下水道事業における資源、エネルギーの有効利用を図ることが求められている。

大阪市では、年間約27万t発生する脱水汚泥を全量焼却した後の焼却灰や、管きよ浚渫で発生する洗砂等を海上埋立処分しているが、その能力は有限であり、新たな処分地の確保は環境保全の面からもますます困難となることが予想される。

本技術は、このような状況の中で下水道の持つ資源、エネルギーを有効利用し、透水性レンガを製造する技術であり、下水汚泥焼却灰を主原料に、管きよ浚渫等により生じる洗砂および管きよ工事により生じる陶管くずを主要骨材として積極的に活用するとともに、レンガ焼成の燃料として消化ガスを利用することを特徴とする。

本実用化研究は、平成6年度から平成9年度まで実施したものであり、透水性レンガ製造技術について、

- (1) 下水道資源有効利用率の向上
- (2) 主要原料および燃料の組成および発生量の変動に対応する最適運転操作条件の確立
- (3) 個々の単位操作技術を総合的にまとめた実

用規模の技術の確立

に関する検討、評価を行うことにより、下水道資源を有効利用した透水性レンガ製造技術の確立を図ることを目的とするものである。

2. 研究内容

本年度は平成6～7年度に実施した下水道資源有効利用率を高めた配合率調査で得られた最適焼成条件、最適配合条件に基づき、実証施設で製品生産を行い、実証施設の性能、経済性、製品物性評価を行うとともに最適操業条件を決定するものである。

主な研究内容は次のとおりである。

2.1 下水道資源の物性調査

(1) 焼却灰物性調査

外観、粒度分布、化学組成を調査し、テストピース焼成により熔融グレードを決める。テストピースの焼成条件と熔融グレードの判断基準は次のとおりである。

- ① 焼成条件：最高温度1,050℃、1時間保持
- ② 判断基準：収縮率により熔融グレードを決定
 - ・収縮率15.0%以上；溶けにくい灰
 - ・収縮率15.0%未満；溶けやすい灰

(2) 洗砂物性調査

夾雑物、外観、含水率、化学組成、粒度分布を調査する。

- (3) 陶管物性調査
外観、色、形状、寸法、化学組成を調査する。
- (4) 消化ガス変動調査
全発生量および施設使用量を調査する。

2.2 実証施設単位操作に関する調査

- (1) 前処理工程
 - ① 洗砂前処理
 - ・洗砂スクリーンの処理量、夾雑物分離性
 - ・仮焼後の粒度分布
 - ・分級機での7~30メッシュの回収率、回収品の粒度分布
 - ② 陶管前処理
 - ・粗砕処理量、粗砕品の粒度分布
 - ・粉碎品の粒度分布
 - ・仮焼後の粒度分布
 - ・分級機での7~30メッシュの回収率、回収品の粒度分布
- (2) 焼成工程
 - ・焼却灰溶融グレードに応じた焼成条件（温度パターン、最高温度、保持時間など）および配合条件の調査
 - ・規格を満足する配合の決定

2.3 製品評価

- (1) 製品規格
製品は建築学会規格と日本工業規格に基づき、**表-1**の条件を満足するものとする。
レンガは上層（厚さ7mm）と下層からなっており、上層の材料は磁器粉、粘土、顔料で、下層は次項に示す材料と配合である。

表-1 透水性レンガの製品規格

項目	判定基準	準拠規格
曲げ強さ	30kgf/cm ² 以上	JASS7 M-101
透水係数	1.0×10 ⁻² cm/s	JASS7 M-101
長辺寸法	198±3.0mm	JIS A5209
短辺寸法	98+2.5,-0.5mm	JIS A5209
厚さ	60(80)±2.0mm	JIS A5209

- (2) 基本配合条件
規格を満足する配合条件について、これまでの調査で得られた基本配合を**表-2**、**表-3**に示す。
資源発生量を考慮した配合は、骨材に磁器粉（購入材料）を添加するもので、下水道資源を最

表-2 資源発生量を考慮した配合条件

(単位：%)

原料	焼却灰の溶融レベル	
	溶けにくい	溶けやすい
焼却灰	45.0	38.3
粘土	4.5	11.2
骨材	洗砂	17.7 (35)
	陶管	5.0 (10)
	磁器	27.8 (55)

() 内は、骨材中の比率を示す。

表-3 下水道資源を最大に利用する配合条件

(単位：%)

原料	焼却灰の溶融レベル	
	溶けにくい	溶けやすい
焼却灰	45.0	38.3
粘土	4.5	11.2
骨材	洗砂	10.1 (20)
	陶管	40.4 (80)

() 内は、骨材中の比率を示す。

大に利用する配合とは、骨材を下水道資源のみで構成する配合を示している。

- (3) 製品の評価
 - ① 物性調査
 - ・曲げ強さ
 - ・透水係数
 - ・形状・寸法：参考データとして測定
 - ② 溶出特性：環境庁告示第46号による土壤の汚染に係る環境基準を満足すること。

2.4 下水道資源活用効果の評価

- (1) 製品に対する下水道資源利用率の評価
 - ・焼却灰、洗砂、陶管の利用率の評価
 - ・焼却灰、洗砂、陶管の年間利用量の評価
- (2) 消化ガス使用による燃料削減効果の評価

3. 実証施設の概要

図-1に実証施設のフローシートを示す。

3.1 各工程の概要

- (1) 原料受入工程
 - ① 焼却灰、骨材、粘土等の原料を受入れ貯蔵ホッパに保管する。
 - ② 焼却灰の性状等、各原料の物性検査を行う。

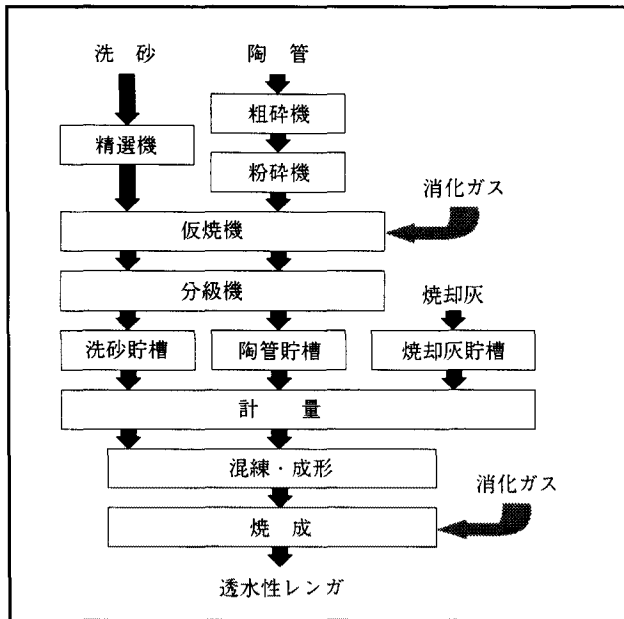


図-1 透水性レンガ製造フローシート

3.2 主要機器の概要

(1) 前処理設備

① 洗砂精選機

下水道管きよ浚渫土砂および、下水処理場沈砂を洗浄した洗砂より、3.5mesh (5.66mm)以上の異物をジャンピングスクリーンにより分離する。

② 陶管粗碎機

下水道用埋設管に使用した陶管を回収し、受入ホッパ底部破碎機で50×100mmに破碎したものをジョークラッシャにより20mm程度に粗碎する。

③ 陶管粉碎機

20mm程度に粗碎した陶管をロールブレーカにより7mesh程度に粉碎する。ロールの間隙調整により粉碎粒度を調整する。

④ 仮焼機 (洗砂・陶管共通)

洗砂および陶管を最高850℃で仮焼し、原料に付着または混入している可燃物を焼却する。

外熱炉ロータリーキルンで仮焼し、燃焼は消化ガスを用いる。また、後処理は水冷式ロータリーキルンで冷却する。

⑤ 分級機 (洗砂・陶管共通)

仮焼した洗砂または陶管を円筒多段振動ふるいで7mesh(2.41mm)以上、7~30mesh(0.5mm)、30mesh以下の3種に選別し、7~30mesh品を骨材製品とする。

(2) 前処理工程

- ① 洗砂は精選機による異物除去、仮焼機による可燃物の焼却、振動ふるいによる分級を行う。
- ② 陶管は粒度調整のため、破碎、粗碎、粉碎し、仮焼、分級を行う。

(3) 混練、造粒、乾燥工程

- ① 上層、下層の製品性状に適する配合割合で各原料を自動計量し、混合造粒する。
- ② 造粒した混合物は乾燥機で含有水分の調節を行う。

(4) 成形工程

- ① 混合造粒物を油圧プレスで二層構造の一体加圧成形する。
- ② 製品の表面を汚れにくくするため、釉薬掛け後、成形品をサヤ積みし、台車に積載する。

(5) 焼成工程

- ① 台車をトンネル炉に入れて焼成する。焼成帯温度は1000℃~1100℃、焼成時間は20~27時間で制御する。
- ② 焼成燃料は消化ガスを使用する。

(6) 製品選別および梱包工程

- ① 焼成後、台車に積載したサヤから製品を取り出す。
- ② 製品を抜き取り、製品検査を行う。
- ③ 製品をパレット積みし、梱包する。

(2) 混練・造粒設備

① 混練・造粒機

焼却灰、粘土の粉体原料を縦形バッチ式造粒機により解砕、均質化し、骨材(洗砂、陶管)を加え混練、加湿、造粒を行う。造粒後の形状はφ3~5mmである。

② 乾燥機

焼却灰、粘土、骨材(洗砂、陶管)等を混練造粒機により粒状化したものを、成形に適する水分に振動流動乾燥機により乾燥する。

(3) 焼成設備

① 焼成炉

造粒、乾燥、成形した原料をサヤに入れ、台車上にサヤ積みし、炉長31.2mのトンネルキルンで成形品を連続焼成する。焼成温度は1000~1100℃、焼成時間20~27時間である。焼成燃料は消化ガスを使用する。

4. 研究結果

4.1 下水道資源の物性調査

(1) 焼却灰

焼成試験に用いる焼却灰の性状を把握するため物性の調査を行った。焼却灰の入手先は放出下水処理場である。調査結果を表-4に示す。

表-4 焼却灰の物性調査結果

採取年月日		H.9.12.9.	H.6.7~H7.6.
含水率 (%)		26.4	22.9~35.1
化学組成	SiO ₂	29.9	25.6~35.1
	Al ₂ O ₃	15.1	14.7~17.9
	Fe ₂ O ₃	18.4	15.0~24.4
	CaO	7.88	5.18~7.88
	MgO	2.47	2.18~2.74
重量%	P ₂ O ₅	19.2	13.5~19.7
強熱減量 (%)		1.78	1.47~2.41
収縮率 (%)		20.37	12.95~19.01

(2) 洗砂

放出下水処理場から搬入された洗砂を受入ホッパより採取した。調査結果を表-5に示す。

表-5 洗砂の物性調査結果

採取年月日		H.9.10.31.	H.6.8., H7.4.
入手場所		放出処理場	大野処理場他
色等外観		黒色, 異臭	黒または茶色
含水率 (%)		20.7	8.1~21.0
強熱減量 (%)		6.6	2.8~9.2
粒度分布	7mesh以上	21.6	19.8~31.8
	7~10	3.8	3.7~5.1
	10~14	8.0	7.7~12.0
	14~20	7.2	7.1~15.0
	20~30	20.6	20.6~31.2
%	30mesh以下	38.8	14.5~37.2

今回搬入された洗砂はこれまでの調査結果に比べて、水分、強熱減量とも高いものが多い。洗砂の洗浄方法等により性状に差が現れたものと考えられる。また粒度分布についても、30mesh以下の細粒分の割合が比較的高いことがわかる。

(3) 陶管

搬入された陶管を目視によって分類すれば、陶器質(茶色)のものが約90%、残りは石器質(焦げ茶)である。

陶管の大きさと比率は、30cm以上が40%、10~30cmのものが40%、10cm以下が20%であった。

(4) 消化ガス発生量

消化ガス発生量、ボイラ使用量、実証施設使用量、余剰ガス量の調査を行った結果を表-6に示す。ただし、レンガ製造施設では焼却炉のみの運転であった。

表-6 消化ガス発生量 (単位: Nm³/日)

測定年月	H.10.1.	H.5.1. (平均)
全消化ガス量	17,730~18,780	17,061
ボイラ使用量	14,270~15,450	12,165
レンガ使用量	2,480~ 2,990	—
余剰ガス量	470~ 850	4,896

4.2 実証施設単位操作に関する調査

(1) 洗砂前処理工程

① 洗砂精選について

搬入量を処理時間で除して算出した処理量は平均4,950kg/h(設計値5,000kg/h)であった。

また分離量から算定した回収率は、60.4~85.2%(平均75.3%)であった。これまでの検討結果では74.6~85.1%であり、今回の結果が低かった理由はビニール類、汚泥が多く混入していたため、スクリーンの分離性が阻害されたためと思われる。

② 洗砂の仮焼

仮焼機の処理量は513~572kg/h(設計値564kg/h)であった。

また仮焼後の洗砂の強熱減量は1.45%でありレンガの物性に影響を与える量ではなかった。

③ 洗砂の分級

処理量平均550kg/hに対して回収量は平均221kg/hであり、回収率は40.1%であった。搬入洗砂の性状に影響されたため、洗砂の回収率が50%を下回ったものと考えられる。

図-2に洗砂の各処理過程での粒径加積曲線を示す。

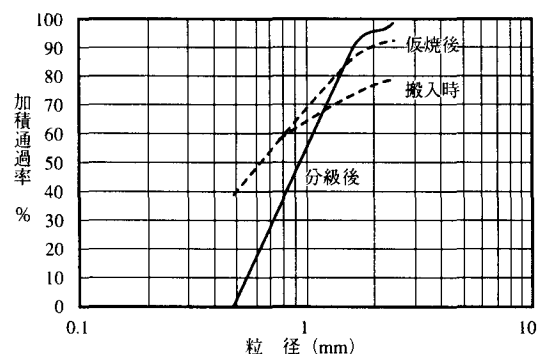


図-2 洗砂の各処理過程での粒径加積曲線

(2) 陶管の前処理工程

① 陶管の粗砕

搬入量2,000kgを処理時間で除して算出した処理量は平均500kg/hで、設計値500kg/hと同等であった。

粗砕品の最大粒径は20mm以下であり、粉砕機への投入条件を満足している。

② 陶管の粉砕

粉砕品搬送コンベアにおいて計測した処理量は310kg/hで設計値300kg/hを満足する。

③ 陶管の仮焼

処理量は421kg/hであり、施設計画値420kg/hと同等である。

④ 陶管の分級

仮焼後の陶管は全量が分級機へ送られ、分級機の処理量は421kg/hとなり、設計値420kg/hと同等である。

処理量に対する回収量から、回収率を算出すると、47.7%である。回収率が基準値50%と比べて小さかった原因として、分級機から排出される30mesh以上の陶管を、分級機下部に設置された粉砕機で過粉砕したためと考えられる。

陶管の各処理過程における粒径加積曲線を図-3に示す。

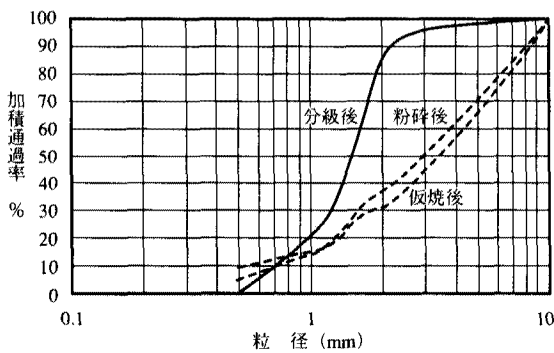


図-3 陶管の各処理過程での粒径加積曲線

(3) 焼成工程および焼成条件

① レンガ厚さ60mmの場合

焼成条件は最高温度1,065℃、焼成時間20時間とした。

② レンガ厚さ80mmの場合

焼成帯の最高温度を1,065℃、焼成時間を27時間とした。

炉内の温度パターンを図-4に示す。

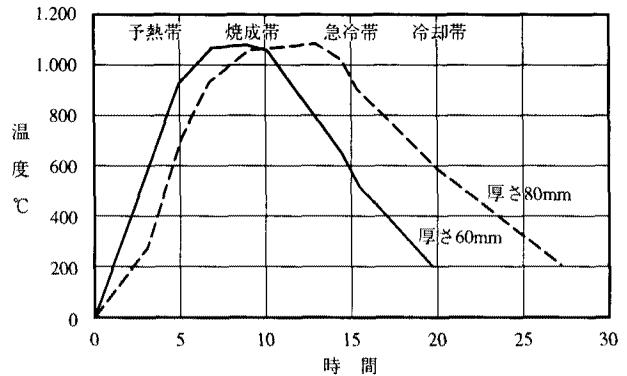


図-4 炉内の温度パターン

4.3 製品評価

焼成試験結果一覧表を表-7および表-8に示す。

(1) 製品規格を満足する配合と焼成条件

① 資源発生量を考慮した配合

厚さ60mmの透水性レンガについては、基本配合(9-1)では、透水係数が小さく規格を満足しなかった。洗砂配合率を25%に減じた配合(9-1B)で、曲げ強度38.4~50.8kgf/cm²、透水係数1.13~2.10×10⁻²cm/sで、ともに規格を満足した。

図-5および図-6に洗砂配合率をパラメータにした場合の、曲げ強度および透水係数の関係を示す。

表-7 焼成試験結果 (資源発生量を考慮した配合)

焼成条件		厚さ (mm)	配合番号	骨材配合率 (%)			製品評価	
最高温度	時間			洗砂	陶管	磁器	透水係数	曲げ強度
1065℃	20時間	60	9-1	35	10	55	×	○
			9-1A	30	10	60	×	○
			9-1B	25	10	65	○	○
1065℃	20時間	80	9-5	35	10	55	×	○
			9-5A	30	10	60	○	×
			9-5B	25	10	65	○	×
1065℃	27時間	80	9-9	35	10	55	×	×
1070℃			9-9①	35	10	55	×	×
1065℃			9-9B	25	10	65	○	○
1070℃			9-9B*	25	10	65	×	○

表-8 焼成試験結果 (資源最大に利用する配合)

焼成条件		厚さ (mm)	配合番号	骨材配合率 (%)			製品評価	
最高温度	時間			洗砂	陶管	磁器	透水係数	曲げ強度
1065℃	20時間	60	9-2	20	80	0	○	○
			9-2A	15	85	0	○	○
1065℃	27時間	80	9-7	20	80	0	○	×
1065℃			9-11	20	80	0	○	○
1070℃			9-11 ①	20	80	0	×	○

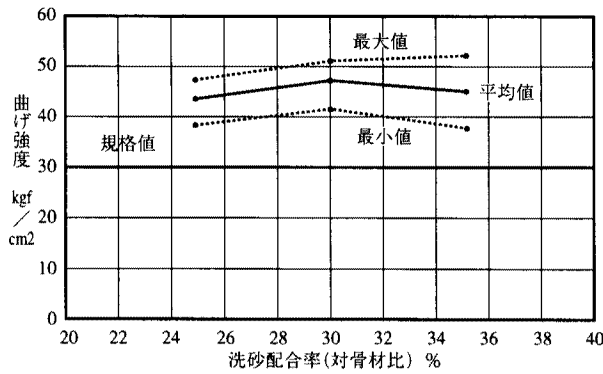


図-5 洗砂配合率と曲げ強度の関係
(焼成温度1065℃,20時間,厚さ60mm)

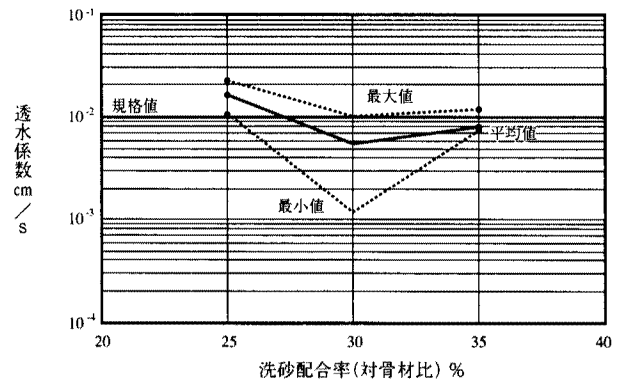


図-6 洗砂配合率と透水係数の関係
(焼成温度1065℃,20時間,厚さ60mm)

厚さ80mmの透水性レンガについて、焼成時間20時間では、基本配合および洗砂を減じた配合においても、曲げ強度、透水係数ともに規格を満足しなかった。焼成時間の延伸、焼成温度の上昇の2案で対応することとした。

焼成時間を27時間にした場合、基本配合(9-9)では曲げ強度、透水係数ともに規格を満足しなかったが、洗砂を減じた配合(9-9B)では、曲げ強度31.1~37.8 kgf/cm²、透水係数1.42~1.90 × 10⁻² cm/sとなり規格を満足した。焼成時間を長くとることにより、透水係数の低下は見られるものの曲げ強度は増大しており、焼成が進行しているものと考えられる。

一方、焼成帯の最高温度を1,070℃に上昇させた場合、基本配合(9-9①)および洗砂を減じた配合(9-9B①)ともに、曲げ強度は規格値以上であったが、透水係数が規格を満足しなかった。これは焼成温度の上昇に伴う過焼傾向を示しているものと考えられる。

② 下水道資源を最大に利用する配合

厚さ60mmの場合、基本配合(9-2)で、曲げ

強度30.3~39.1 kgf/cm²、透水係数1.03~1.97 × 10⁻² cm/sで規格を満足した。また、洗砂を減じた配合(9-2A)でも、強度31.9~37.9 kgf/cm²、透水係数1.08~1.55 × 10⁻² cm/sとなり規格を満足した。

曲げ強度が小さくなっているのは、骨材中に磁器を含まないためと考えられる。

厚さ80mmの場合は、資源発生量を考慮した配合と同様に焼成不足気味であり、曲げ強度が規格を満足せず、焼成時間の延伸と焼成温度の上昇策を検討した。

焼成時間を27時間とした場合、曲げ強度31.5~39.9 kgf/cm²、透水係数1.01~1.27 × 10⁻² cm/sで、規格を満足した。しかし焼成温度を1,070℃に上昇させた場合、曲げ強度は満足するものの、透水係数が0.50~1.27 × 10⁻² cm/sであり過焼傾向を示した。

図-7 および図-8 に洗砂配合率をパラメータとした場合の曲げ強度および透水係数の関係を示す。

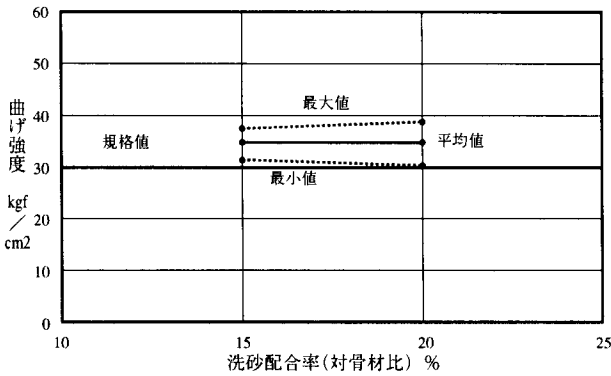


図-7 洗砂配合率と曲げ強度の関係
(焼成温度1065℃,20時間,厚さ60mm)

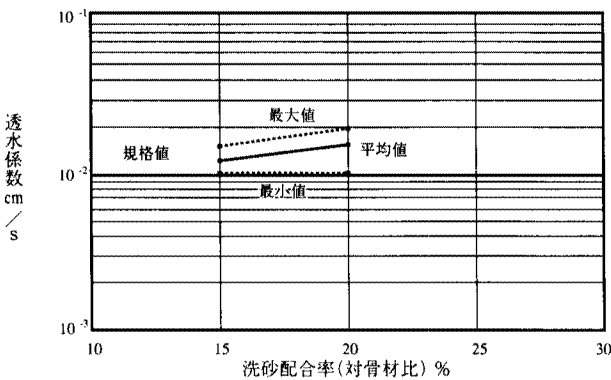


図-8 洗砂配合率と透水係数の関係
(焼成温度1065℃,20時間,厚さ60mm)

以上の結果から、収縮率20%程度の焼却灰の配合条件および焼成条件を表-9のように決定する。

表-9 規格を満足する配合条件と焼成条件

配合名称	厚さ	洗砂/陶管/磁器	最温 高度	焼成 時間
資源発生量 考慮配合	60mm	25/10/65	1065 ℃	20時間
	80mm			27時間
資源最大 利用配合	60mm	20/80/0		20時間
	80mm			27時間

(2) レンガの寸法

透水係数および曲げ強度を満足する配合においては、長辺寸法、短辺寸法、厚さともに、日本工業規格を満足した。

(3) 溶出特性

透水性レンガの安全性を確認するために溶出試験を行った結果、すべての項目について土壌の汚染に関する環境基準値以下であり、透水性レンガの安全性が確認された。

4.4 下水道資源活用効果の評価

(1) 下水道資源利用の評価

- ① 透水性レンガに占める下水道資源の割合
資源発生量を考慮した配合、下水道資源を最大に利用する配合について、透水性レンガ下層に占める下水道資源の割合を表-10に示す。

表-10 レンガ下層に占める下水道資源の割合

(単位：%)

項目	配合	
	資源発生量を 考慮した配合	資源を最大利 用する配合
焼却灰	45.0	45.0
粘土	4.5	4.5
骨 材	洗砂	12.6
	陶管	5.1
磁器	32.8	0
下水道資源利用率	62.7	95.5

(2) 消化ガス利用量の評価

① 1日当たり消化ガス利用量

消化ガスの使用量は、仮焼工程および焼成工程ともに時間当たり約140N^m/hである。各工程の運転時間を、それぞれ8時間、24時間とすれば、1日当たりの消化ガス利用量は4,480N^m/日である。

② A重油換算量

消化ガスの熱エネルギーを5,500kcal/N^m、A重油の熱エネルギーを9,900kcal/lとすれば、1日当たり約2.5klの重油使用量に相当する。

5. まとめ

大阪市大野下水処理場に建設された実証施設において、使用した下水道資源の性状調査を行うとともに、単位操作に関する調査および透水性レンガの物性評価を行った。さらに、下水道資源利用効果について評価を行った。以上の結果をまとめると次のようである。

(1) 下水道資源および原料物性

- ① 実証施設での焼成に用いた焼却灰の収縮率は20.4%であった。これまでの資源性状変動調査では収縮率が13.0~19.0%であったのに対して今回は大きな値を示した。
- ② 洗砂の物性値は、含水率21.6%、強熱減量6.6%、粒径0.5mm~2.41mm含有率39.6%であり、粒径0.5mm以下の細粒分が比較的多いため、含

水率および強熱減量ともに大きな値を示した。

- ③ 消化ガス発生量は17,730~18,780N^m/日で、そのうち実証施設での使用量は、2,480~2,990 N^m/日、ボイラ使用量14,270~15,450N^m/日、余剰ガスは470~850N^m/日であった。

2) 実証施設単位操作

- ① 洗砂の前処理は、洗砂精選、仮焼、および分級の各工程からなる。仮焼で水分と有機物がほとんど除去され、分級により所定の粒度に調整することが可能であった。

また、搬入洗砂の性状により回収率は40.1%と、これまでの調査結果より低い値を示した。

- ② 陶管の前処理工程は、ジョークラッシャによる粗砕およびロールブレイカーによる粉碎、仮焼、分級の工程からなる。粗砕、粉碎、仮焼後分級により使用粒度（粒径0.5~2.41mm）に調整することができた。また、処理量調査による回収率は47.7%であった。

- ③ 焼成炉内の温度パターンについて検討を行った結果、建築学会規格を満足する透水性レンガを得るためには、焼成帯の最高温度を1,065℃に設定する必要があることが判明した。

- ④ 焼成時間については、厚さ60mmのレンガは20時間、厚さ80mmのレンガは27時間とした。

(3) 透水性レンガの製品評価

透水性レンガの製品評価を行い、日本建築学会の規格を満たすレンガの配合を次のように決定した。

- ① 下水道資源発生量を考慮した配合は、焼却灰45%、粘土4.5%、骨材50.5%（材料比率は洗砂25%陶管10%磁器65%）で、基本配合より洗砂を減じた配合とした。

- ② 下水道資源を最大に利用する配合は、焼却灰45%、粘土4.5%、骨材50.5%（材料比率は洗砂20%陶管80%）で、これは基本配合である。

(4) 下水道資源利用効果の評価

- ① レンガ下層中に含まれる下水道から発生する材料の比率を、下水道資源の利用率と定義すれば、資源発生量を考慮した配合では62.7%、下水道資源を最大限に利用する配合では95.5%の利用率となる。

- ② 消化ガスの使用量は、骨材仮焼工程で140N^m/hr、レンガ焼成工程で140N^m/hrである。日当たりの消化ガス使用量は4,480N^mである。

- ③ 消化ガスの熱エネルギー換算で、消化ガスの利用量をA重油使用量に換算すると、日当たり約2.5klとなる。

●この研究に関する問い合わせは 研究第一部長
研究第一部主任研究員
研究第一部研究員

山根 昭
馬渡 裕二
王尾 和寿