

下水道資源活用透水性レンガ 製造技術の性能評価研究

1. はじめに

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、今後の下水道における最重要課題の一つであり、地球環境の保全等の観点からも下水道における資源、エネルギーの有効利用やリサイクルを図ることが求められている。

大阪市では、年間約 26 万 t 発生する脱水汚泥は、全量焼却（一部溶融処理）され大半は埋め立て処分される。この焼却灰（3 t/日）と管きよ浚渫等で発生する洗砂・陶管くず等の骨材を原料として、また消化ガスを焼成用燃料として利用した下水道資源有効率を高めた透水性レンガ製造技術の実用化研究を平成 6～9 年度で実施した。

大阪市は、平成 9 年度から透水性レンガ「らいと（来都）」の製造を大野下水処理場内「レンガ工房」で開始している。平成 10 年からの透水性レンガの製造実績を受けて、本性能評価研究は、大阪市が下水道資源の有効利用を目的として、平成 6～9 年度にわたりモデル事業として実用化研究を実施した。レンガ工房で実施される透水性レンガ製造技術に関して、製品の性能、設備能力、再資源化および経済性について、性能評価を行うことを目的とする。

2. 技術の概要

2.1 透水性レンガ製造技術

本技術は、下水汚泥の焼却灰と陶管・洗砂・磁器粉の骨材を配合して、混練・成型・焼成（消化ガスを燃料利用）する透水性レンガ（厚さ：60 mm/80 mm）の製造技術である。すなわち、焼却灰を 1065℃で溶融し陶管・洗砂・磁器粉の骨材と接着させながら約 20～27 時間焼成し、曲げ強度 3/5 MPa・透水係数 1×10^{-2} cm/sec 以上の「透水性レンガ」を製造する。

下水汚泥焼却灰、陶管、洗砂、消化ガス等の下水道資源の有効活用をしながら、処分場不足の緩和や再資源化が期待できる製造技術である

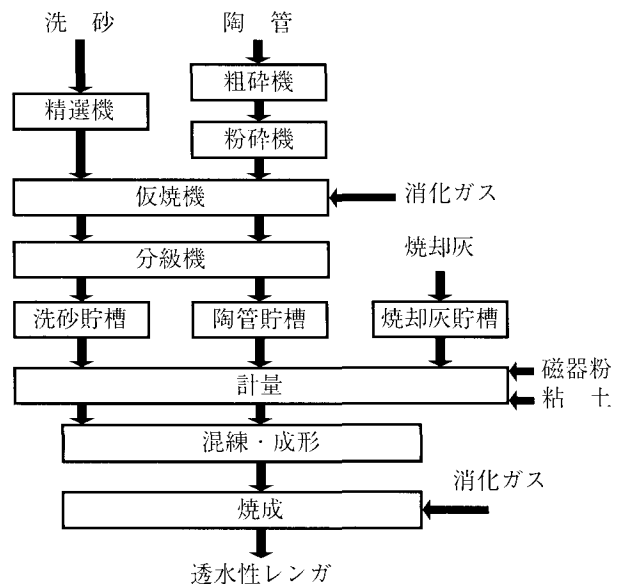


図-1 透水性レンガの製造フロー

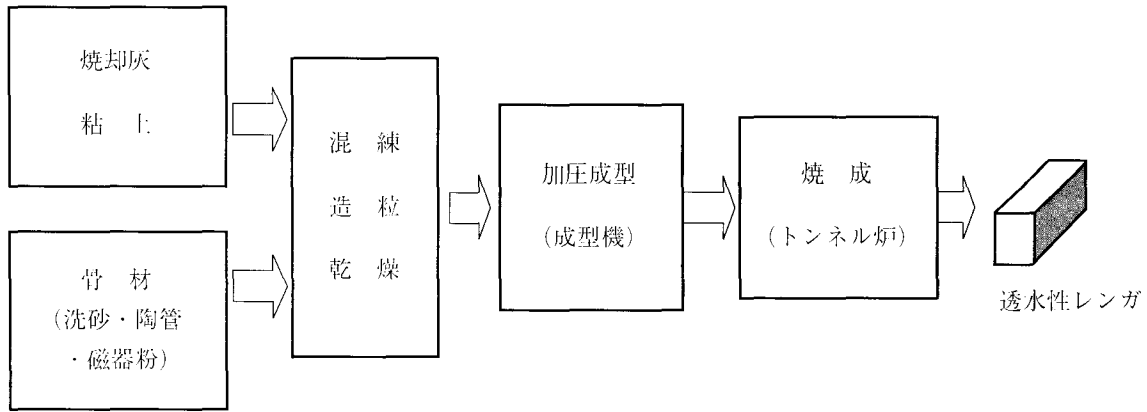


図-2 透水性レンガの製造過程

2.2 性能評価の項目

本研究では以下の項目について検討を行う。

- (1) 製品の性能評価
 曲げ強度・透水試験等の14項目の物性試験と溶出試験（環境庁告示第46号）を実施し、性能評価する。
- (2) 製造能力の評価
 前処理装置（陶管粉砕機・仮焼機等）、混練造粒機、成型機、焼成機を対象に、処理能力・環境性・維持管理性等を評価する。
- (3) 再資源化評価
 下水道資源である焼却灰・陶管・洗砂・消化ガスの再資源化利用率を評価する。
- (4) 経済性評価
 費用便益評価の定量的経済性評価を実施するとともに、ヒートアイランド抑制効果や資源有効利

用効果等の定性的経済効果について検討する。

2.3 製品の性能評価方法

透水性レンガは、製品規格として建築学会（JASS）の透水性インターロッキングブロックに準じ製造された。透水性に関しては透水係数が 1×10^{-2} cm/sec以上であり、インターロッキングブロックとしての強度は曲げ強さが3.0MPa以上であることがその主な性能である。透水性レンガの製品規格は日本工業規格（JIS）においても制定されており、本研究における物性試験は表-1に示す合否判定基準を用いる。また、有害物質の溶出に関しても、実用化研究時に行われている。有害物質の溶出に関する基準値としては、環境庁告示に土壤の汚染を対象とした第46号と、産業廃棄物を対象とした第13号や国土交通省土木研究所による再生建設資材安全

表-1 透水性レンガの物性試験項目

試験項目	検体数	試験方法	合否判定基準	備考
曲げ試験	3	JIS A 5209による	3.0MPa以上	◎
透水試験	3	JIS A 1218による	1.0×10^{-2} cm/sec以上	◎
寸法測定（長さ）	5	JIS A 5209による	198 ± 3 mm（片スパーサ込）	○
寸法測定（幅）	5	JIS A 5209による	$98 + 2.5, -0.5$ mm（片スパーサ込）	○
寸法測定（厚さ）	5	JIS A 5209による	60 ± 2.0 mm	○
反り試験	3	JIS A 5209による	0 ± 2 mm	□
摩耗試験	3	JIS A 5209による	0.1g以下	□
硬さ試験	3	BS 6431 part6による（*2）	モース硬度 6～7以上	□
滑り抵抗	3	ASTM E-303による（*3）	BPN 40以上（*4）	□
空隙率測定	3	大阪市下水道技術協会要領による	（参考値）（*1）	□
耐凍害性試験	3	JIS A 5209による	異常のないこと	□
白華試験	3	ASTM E67-90による	白華現象のないこと	□
圧縮試験	3	JIS R 1250による	17MPa以上（参考）	□
耐貫入性	3	JIS A 5209による	ひび割れ等異常のないこと	□

◎：内部・外部試験，○：内部試験，□：外部試験

性評価法がある。本研究における溶出試験は表-2に示す合否判定基準によるものとする

製品性能評価試験における製造条件を表-3に示す。

2.2 製造設備の能力評価

設備の性能評価は、平成12年度の月報値および本評価研究で実施する実験結果で行うものとする。対象設備は実用化研究の中から主要機種を選定した。

2.3 再資源化評価

過去1年間のデータから、透水性レンガに占める下水道資源の配合比率および透水性レンガ1個当たりの消化ガス使用量を、実用化研究時点に想定されていた値と比較し評価する。

3. 性能評価結果

3.1 製品の性能評価

透水性レンガの製品性能は、焼却灰の収縮率が20%程度の原料を使用して、6パターン（RUN No. 1～6）の焼成実験を実施し、内部試験（基本物性である透水係数、曲げ強度をレンガ工房内で実施）で基準を満足した試料に対して、外部試験（物性試験と溶出試験）を実施した。なお、収縮率とは、焼却灰のテストピースを焼成した後の、焼成前後の長辺方向の寸法割合（%）をいう。

その結果、内部試験結果から透水係数および曲げ強度について、試料数10個（透水係数用5個、曲げ強度用5個）全てに対して満足したものは、RUN-1, 2, 4, 5の4パターンであった。

JIS A 5209に準じた3次元冷却と1次元冷却方式の耐凍害性試験を実施した結果、3次元冷却試験では3回目までで5検体全てに凍害が発生した。

一方、1次元冷却方式では5検体全て15回ま

表-3 製品性能評価試験における製造条件

	厚み	洗砂/陶管/磁器 (%)	最高温度	焼成時間
サンプル	60mm	20.7/7.5/71.8	1,065℃	20時間
		25/10/65		
		20/80/0		
		20.7/7.5/71.8		27時間
		25/10/65		
		20/80/0		
	80mm	20.7/7.5/71.8		27時間

表-2 製品性能評価における溶出試験項目

	項目	環境基準値 (環境庁告第46号)	再生資材評価法 溶出基準
1	アルキル 水銀化合物	不検出	—
	水銀またはその化合物	0.0005 mg/l 以下	0.0005 mg/l 以下
2	カドミウムまたはその化合物	0.01 mg/l 以下	0.01 mg/l 以下
3	鉛またはその化合物	0.01 mg/l 以下	0.01 mg/l 以下
4	有機燐化合物	不検出	—
5	六価クロム化合物	0.05 mg/l 以下	0.05 mg/l 以下
6	砒素またはその化合物	0.01 mg/l 以下	0.01 mg/l 以下
7	シアン化合物	不検出	—
8	PCB	不検出	—
9	トリクロロエチレン	0.03 mg/l 以下	—
10	テトラクロロエチレン	0.01 mg/l 以下	—
11	ジクロロメタン	0.02 mg/l 以下	—
12	セレンまたはその化合物	0.01 mg/l 以下	0.01 mg/l 以下

注) 実用化研究で試験項目に入っていた銅は、基準上含まれていないため除外した。

で凍害は発生しなかった。この凍結機構として、3次元的冷却試験では周辺部から凍結し内部は水のままで、透水性レンガ内部の水分の凍結による体積膨張で大きな内部応力が発生し、その応力が透水性レンガの外部および内部方向に働く。氷の生成は外部より内部方向に進行し、最終的には中心部の凍結による応力が透水性レンガ自身の結合力を越えることでひび割れが生じたものと考えられる。また、1次元冷却方式では、透水性レンガ内の水分は上部からの凍結の圧力が下部に押し出され、透水性レンガを破壊する内部応力が発生しにくいとひび割れは発生しなかったものと思われる。

大阪市下水道技術協会「レンガ工房」が年2回実施している耐凍害性試験ではひび割れは発生していない。また、大阪市内の透水性レンガの施工実績でも凍害クレームは確認されていない。

JISA 5209の耐凍害性試験を実施するとひび割れまたは亀裂が発生する可能性があるが、北海道等の寒冷地での透水性レンガの施工実績でも凍害クレームは発生していない。

焼成試験において透水係数および曲げ強度を満足した試料のうち、RUN-1, 4, 5について溶出試験（外部試験）を実施した。その結果、全ての項目に対して、環境基準値を超える成分は無かった。特

に、実用化研究では測定項目に挙がっていなかったセレンについても、基準値以下であった。また、実用化研究時の測定項目である「銅」については、今回は比較のために測定し、基準値以下であることを確認した。

焼却灰性状（収縮率）は、焼却施設の運転状況により変動している。今回実施した製品性能試験の焼却灰性状は収縮率20%前後と平均的な性状であった。このため焼却灰性状の悪化した時期に製造した透水性レンガ（焼却灰の1,065℃における収縮率が8.8%と15.5%）について、参考として（サンプル数1）物性試験および溶出試験を実施した。その結果、物性性能について、耐凍害性以外は全ての項目に対して基準値を満足した。また溶出性能について、全ての項目に対して、環境基準値を超える成分は無かった。焼却灰性状の悪化した時期に製造した透水性レンガについて、実用化研究時の性能をほぼ満足していることを確認した。

3.2 製造設備の能力評価

設備性能については、主要機器能力、機器の耐久性、維持管理性、環境性について評価を実施した。

(1) 設備能力

設備能力評価では、主要機器についてのすべての

表-4 透水性レンガの物性試験結果（外部試験）

試験項目	検体数	試験方法	合否判定基準	試験結果			
				RUN1	RUN4	RUN5	参考
曲げ試験	3	JIS A 5209による	3.0 (MPa) 以上	7.5	4.7	5	7.3
				8.1	3.8	6.5	6.4
				6.3	3.6	5.9	7.2
				2.7	3.5	2.4	2.1
透水試験	3	JIS A 1218による	1.0 ($\times 10^{-2}$ cm/sec) 以上	3.1	4.0	2.5	1.6
				2.5	4.0	2.4	1.2
				0.02 ~ 0.25	0.01 ~ 0.53	0.01 ~ 0.45	0.01 ~ 0.75
				0.	0.028	0.034	0.018
摩耗試験	3	JIS A 5209による	0.1 (g) 以下	0.	0.019	0.019	0.017
				0.012	0.020	0.027	0.021
				8	8	8	8
				8	8	8	8
硬さ試験	3	BS-6431 part 6による	モース硬度 6 ~ 7 以上	8	8	8	8
				8	8	8	8
				8	8	8	8
				51	55	59	50
滑り抵抗	3	ASTM E-303による	(BPN) 40 以上	50	60	60	52
				51	59	65	51
				18.6	21.3	20.1	12.7
				21.1	21.5	20.0	14.0
空隙率測定	3	大阪市下水道技術協会要領による	20 (%) 前後 (参考)	20.6	21.0	20.7	10.5
				9回目に亀裂	9回目に亀裂	異常なし	異常なし
				10回目に亀裂	10回目に亀裂	異常なし	異常なし
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
耐凍害性試験*	3	JIS A 5209による	異常のないこと	白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず
				白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず
				白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず
				白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず	白華を認めず
白華試験	3	ASTM C67-90による	白華現象のないこと	56.5	32.1	47.2	47.7
				68.4	29.2	54.6	52.7
				50.3	28.8	51.4	58.8
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
圧縮試験(参考)	3	JIS R 1250による	17 (MPa) 以上 (参考)	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
耐貫入性 (ひび割れ試験)	3	JIS A 5209による	異常のないこと	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
				異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

* 耐凍害性試験は、1次元冷却式により所定の性能を確認済

能力評価項目について、満足する結果が得られた。性能評価対象設備の能力評価について、各主要機器の能力評価項目と評価結果を表-5に示す。

表-5 製造設備の性能評価結果

評価項目	精選機	粗砕機	粒砕機	仮焼機	分級機
洗砂	○	○	○	○	○
陶管	-	○	○	○	○
消化ガス	-	-	-	○	-
項目	混練造粒機	成型機	焼成機	ストレッチ包装機	
処理量	○	○	○	○	
処理時間	○	○	○	○	

○：合格

(1) 機器の耐久性・維持管理性・環境性

設備の性能評価中、機器の耐久性・維持管理性・環境性について調査を行ったが、すべての項目に対して良好な結果が得られた。

表-6 機器の耐久性・維持管理性・環境性の評価

評価対象	機器耐久性	維持管理性	環境性
評価	○	○	○
項目	部品交換性	保守頻度	騒音・振動

3.3 再資源化評価

再資源化評価として、下水道資源（焼却灰・陶管・洗砂）および消化ガスの再資源化率、並びにタイル屑より発生する磁器粉を加えた総資源化率を調査した。調査の結果、焼却灰の性状（溶け難い）や原料不足、さらに80 mm 5 MPaの性能基準を守ったことに起因し、実用化研究時よりも下水道資源化率は低下した。

表-7 再資源化評価結果

評価項目	下水道資源合計 (①+②+③)	①焼却灰	②陶管	③洗砂	④消化ガス	総資源化率 (磁器粉含)
再資源化率 (H10~12年度)	55~59%	42~45%	2~4%	9~13%	1.10m ³ N/個	95%
実用化研究	62.70%	45%	5.10%	12.60%	0.99m ³ N/個	95.50%
評価	△	○	△	9~13%	○	○

3.4 経済性評価

(1) 定性的経済効果の結果

透水性レンガの定性的経済効果に関して、①保水性による体感温度抑制、②ヒートアイランド抑制効果、③埋立処分費用抑制効果、④資源有効利用効果、⑤温室効果ガス排出削減効果の5項目について以下にまとめる。

表-8 定性的経済性評価のまとめ

定性的効果項目	定性的経済効果	備考
①保水性による体感温度抑制	体感温度が1~2度低下による夏季の不快感の減少・歩行者等への夏季熱負荷の低減	
②ヒートアイランド抑制効果	夏季のピーク電力量の低減効果・夏季30日間のヒートアイランド抑制効果が期待できる	1℃下がる仮定で2.53 ton-CO ₂ /年削減
③埋立処分費用抑制効果	将来の処分場不足リスクへの対応・焼却灰の二次製品利用は溶融スラグと同様に有効な利用法	約17百万円/年
④資源有効利用効果	透水性レンガのグリーン購入品対象化によるPR効果・普及促進効果・透水性レンガ製造で焼却灰から溶融スラグの利用の可能性期待大	
⑤温室効果ガス排出削減効果	消化ガス/レンガ・ブロック利用によりCO ₂ 削減効果が期待	7.793 ton-CO ₂ /年削減

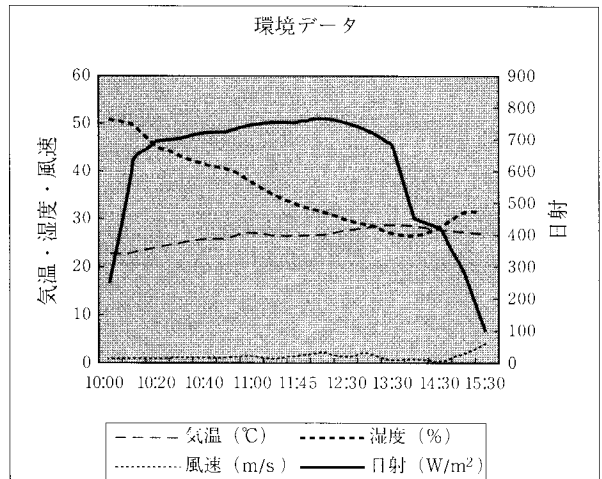


図-3 ヒートアイランド抑制効果気象データ

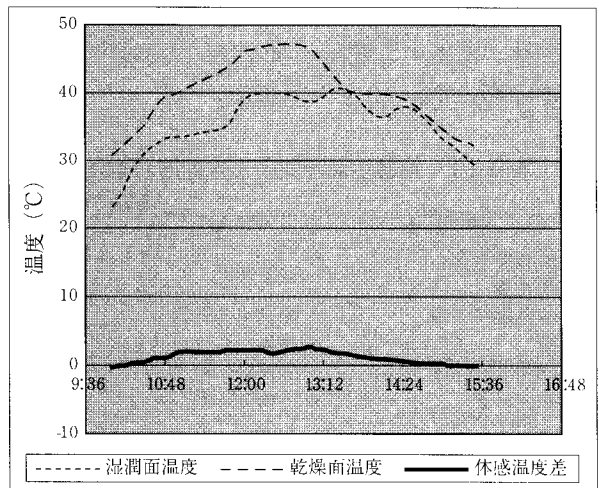


図-4 ヒートアイランド抑制効果（体感温度）

1 m四方の透水性レンガ表面に10 mm降雨の効果測定した結果を図-3に示す。

透水性レンガ表面温度実測の結果は、環境データから計算により求めた体感温度の結果を図-4に示す。

実験および透水性レンガ表面の熱収支式から、乾燥面と湿潤面における体感温度差は、日中約2~3

度程度低下することが想定された。

(2) 定量的経済性評価の結果

本モデル事業の経済性を評価するに際して、実用化研究時の経緯を踏まえて経済性評価について試算的に検討を行う。

費用便益分析で、費用項目は減価償却費・償還費、施設維持管理費、ユーティリティー費からなり、便益項目は、透水性レンガの販売収入、雨水流出抑制効果、処分費に対する代替効果である。

表-9 費用便益分析

単位：円/個

費用		便益	
減価償却費・償還費	113.2	販売収入	120
施設維持管理費	127.4	雨水流出抑制効果	58.7
ユーティリティー費	24.4	処分費に対する代替効果	16
合計	265	合計	194.7

$$194.7/265.0 = 0.734$$

費用対便益は0.734となった。なお、(1)の①～③に示す削減効果は金額に換算できなかったため、これらの効果を勘案した上で判断すべきものと考えられる。また、費用対便益が1になるためには、現行120円の販売価格を190円とする必要がある。

国庫補助金を建設費より除外した場合の費用は、事業主体が支出する費用となるが、この費用に対する便益は表-10のとおりとなる。

表-10 事業主体が支出する費用と便益

単位：円/個

費用		便益	
減価償却費・償還費	56.6	販売収入	120
施設維持管理費	127.4	雨水流出抑制効果	58.7
ユーティリティー費	24.4	処分費に対する代替効果	16
合計	208.4	合計	194.7

$$194.7/208.4 = 0.934$$

この場合、費用対便益が1になるためには、現行120円の販売価格を134円とする必要がある。

4. おわりに

(1) 製品の性能評価を焼成時間20時間/27時間の2種類で評価した。その結果、耐凍害性試験(1次元冷却式)を含めて実用化研究時の性能をほぼ満足していることが確認できた。

また、焼却灰性状の悪化した時期に製造した透水性レンガについて製品性能試験を行った結果、耐凍害性試験(1次元冷却式)を含めた試験に合格し、実用化研究時の性能を満足していることを確認した。

(2) 透水性レンガの製造設備に関して、実用化研究時の能力を確認するとともに、大気汚染、騒音・振動に関する環境性についても、規制基準値以内にあることが確認できた。

(3) 下水道資源利用については、焼却灰性状の変化およびレンガの需要が5MPa用のものに変化したことにより配合比率を変更する必要が生じたため、利用率が若干低下したものと考えられる。

(4) 定量的経済効果の項目の中で、ヒートアイランド抑制効果に関する実験を実施し、保水時の透水性レンガ表面温度低下効果を確認した。

(5) その他の定量的経済評価では、①保水性による体感温度抑制、②ヒートアイランド抑制効果、③埋立処分費用抑制効果、④資源有効利用効果、⑤温室効果ガス排出削減効果について効果を評価した。その結果、ヒートアイランド抑制効果や温室効果ガス排出削減効果により、CO₂削減が約8ton-CO₂以上見込まれることが想定され、CO₂削減単価が公式に設定された場合、埋立処分費用抑制効果と併せて、定量的経済効果にかなり寄与できるものと評価された。

(6) 定量的経済性評価の結果、現行120円の販売価格を190円で販売することで費用対便益を1に向上できる。

●この研究を行ったのは

研究第一部長 宮原 茂
 研究第一部主任研究員 津倉 洋
 研究第一部主任研究員 小野塚敏彦
 研究第一部長研究員 杉本 東

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部長 田中 修司
 研究第一部主任研究員 津倉 洋
 研究第一部主任研究員 小野塚敏彦
 研究第一部長研究員 杉本 東