

論文 下水汚泥焼却灰を混入したコンクリートの基礎的研究

笹岡 信孝*1・横井 克則*2・柳瀬 幸子*3・天羽 和夫*4

要旨：年々排出量が増加し、一層の減量化と有効利用の推進が最優先課題となっている下水汚泥焼却灰を細骨材の一部代替材料としてコンクリートに混入し、その特性を調査した。その結果、普通コンクリートに比べて圧縮強度が増加したことから、セメントの減量化について、その可能性を確認した。また、下水汚泥焼却灰の代替率を変化させ、凍結融解試験や乾燥収縮試験を実施し、AE 助剤などで空気量を確保すると凍害にも対応できること、代替率が高くなるほど乾燥収縮が大きくなることがわかった。

キーワード：下水汚泥焼却灰、圧縮強度、動弾性係数、耐凍害性、乾燥収縮、色彩

1. はじめに

廃棄物として排出された下水汚泥焼却灰は下水道事業の進展に伴い年々増加しており、今後も下水道の普及率向上、高度処理の実施に伴い、発生量が更に増加するのは必至である。しかし、発生した焼却灰を埋立て最終処分するための最終処分地の確保は急速に困難になってきており、下水汚泥処理についてはよりいっそうの減量化と有効利用の推進が最優先課題となっている¹⁾。そのような状況から、建設業界では循環型社会構築に向け、有効利用の一環としてコンクリート製品用の骨材等に再利用するなど、下水汚泥焼却灰を用いた研究がすすめられつつあるが、その研究に関する報告はほとんどなく、フレッシュ性状、硬化体の性能および耐久性などに関しては依然として不明な点が多いのが現状である²⁾。また、コンクリート産業では、コンクリート用材料として良質な川砂利や川砂など、天然資源を大量に消費して枯渇問題が表面化すると共に、自然環境保護の立場や河川管理上から採取規制が強化されている。

そこで本研究では、下水汚泥焼却灰を天然細骨材の代替材料としてコンクリートに混入し、代替率を変化させたときのフレッシュ性状、塩化物含有量、圧縮強度、動弾性係数、乾燥収縮および着色具合を検討し、コンクリートの耐久性指標である耐凍害性についても調査を行った。

2. 実験概要

2.1 下水汚泥焼却灰

下水汚泥焼却灰は、埋立て処理や有効利用を図るために、下水処理の過程で発生する汚泥を乾燥した後、700～1000℃の範囲で焼却処理してできる灰のことである。焼却により、汚泥中の80%程度を占める有機物は、高圧、高温の条件下で消失され、無害の汚泥固形物質となる²⁾。汚泥の焼却は究極の減量化であり、汚泥発生時から比べると、約1/500まで減量化することができる。

下水汚泥焼却灰は主成分として、ケイ素、アルミニウム、リン、鉄からなっている。焼却の前段階の脱水プロセスで添加する凝集剤

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 高知工業高等専門学校 建設システム工学科助教授 博(工学) (正会員)

*3 四国ヒューム管(株) (正会員)

*4 阿南工業高等専門学校 建設システム工学科教授 博(工学) (正会員)

の種類により、石灰系焼却灰と有機高分子系焼却灰に大別され、本実験で使用した下水汚泥焼却灰は、表-1の化学組成に示されるように、酸化カルシウムを5%程度しか含んでいない高分子系焼却灰である³⁾。また、焼却灰は表-2に示すような有害である砒素、鉛、カドミウムおよび水銀などの重金属も若干含有しているが、コンクリートに混入することでセメントによって固化されるので、外部への溶出は抑制され²⁾、表-3に示す重金属溶出試験の結果、環境省が示す土壤汚染に係る環境基準(環境庁告示第46号)をいずれの物質も満足している。

表-1 化学組成(主成分系)

主成分	含有率(%)	主成分	含有率(%)
lg-Loss	1.92	MgO	3.15
Na ₂ O	0.94	CaO	5.14
K ₂ O	1.66	SiO ₂	49.23
Al ₂ O ₃	13.11	Fe ₂ O ₃	9.01
P ₂ O ₅	12.34	TiO ₂	0.16
SO ₃	1.12		-

表-2 化学組成(重金属系)

重金属	含有率(%)	重金属	含有率(mg/kg)
Zn	0.510	Ni	102
Mn	0.691	Cr	167
Ba	0.671	Cu	844
		Cd	3.2
		Se	ND(0.2)
		As	0.8
		Pb	22
		Hg	0.014

表-3 重金属溶出試験

	溶出基準値(mg/l)	分析値(mg/l)
Gd	0.01以下	検出限界値(0.001)以下
Pb	0.01以下	検出限界値(0.01)以下
T-Cr	0.05(Cr6+として)以下	検出限界値(0.01)以下
As	0.01以下	検出限界値(0.01)以下
T-Hg	0.0005以下	検出限界値(0.0005)以下
Se	0.01以下	検出限界値(0.01)以下

2.2 コンクリートの配合および使用材料

本研究で用いた使用材料の特性を表-4に、コンクリートの配合を表-5に示す。

下水汚泥焼却灰の代替率は細骨材の容積置換で0.5,10,15,20%とし、下水汚泥焼却灰に含まれる水量は単位水量に合算した。

コンクリートの種類において、No.1~15は強度特性用試験体の配合で、目標スランブを8cmとし、混和剤にはポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。No.16~21は耐凍害性および乾燥収縮を測定するための配合であり、No.22~26の試験体は塩化物含有量と色彩を測定するための配合である。No.16~26はリグニンスルホン酸系AE減水剤を使用した。

表-4 材料特性

使用材料	種類	密度 (g/cm ³)	その他物性
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	比表面積 3,300cm ² /g
細骨材	(No.1~15) 2.5-0mm石灰砕砂 荒倉山産	2.69	-
	(No.16~21) 川砂+海砂(50%ずつ)	2.63	吸水率 1.07%
	(No.22~26) 石灰砕砂 南国市白木谷産	2.56	吸水率 0.91%
粗骨材	(No.1~15) 20-5mm石灰砕石 荒倉山産	2.69	-
	(No.16~21) 石灰砕石	2.68	吸水率 0.59%
	(No.22~26) 石灰砕石 南国市白木谷産	2.70	吸水率 0.59%
下水汚泥焼却灰	(No.1~21) 高須浄化センター (No.22~26)	2.66	含水率 29.0% BET比表面積5.40m ² /g 含水率 17.4%

表-5 配合表

コンクリートの種類	水セメント比 W/C	代替率	単 位 量 (kg/m ³)						
			セメント	水	細骨材	粗骨材	焼却灰	混和剤	AE助剤
			C	W	S	G			
No.1	55%	0%	330	182	864	1056	0	0	0.0
No.2		5%			821		60	3.0	
No.3		10%			778		120	6.0	
No.4	60%	0%	330	198	844	1032	0	0	0.0
No.5		5%			802		59	3.0	
No.6		10%			760		118	5.9	
No.7	65%	0%	330	215	824	1007	0	0	0.0
No.8		5%			783		57	2.9	
No.9		10%			742		115	5.8	
No.10	60%	0%	330	180	877	1072	0	0.0	0.0
No.11		5%			833		61	3.1	
No.12		10%			790		122	6.1	
No.13	65%	0%	330	195	859	1050	0	0.0	0.0
No.14		5%			816		60	3.0	
No.15		10%			773		120	6.0	
No.16	50%	0%	300	150	834	1039	0.0	0.75	0.0
No.17		5%			792		59.4		
No.18		10%			760		119		
No.19	50%	0%	300	150	823	1025	0.0	0.75	1.2
No.20		5%			781		58.6		
No.21		10%			740		117		
No.22	50%	0%	300	150	812	1047	0	0.75	1.2
No.23		5%			772		51		
No.24		10%			731		102		
No.25		15%			690		153		
No.26		20%			650		204		

2.3 実験方法

2.3.1 強度特性 (No. 1~15)

練り混ぜにはパン型ミキサを使用し、細骨材、セメント、下水汚泥焼却灰、粗骨材および高性能減水剤を混入した水を順に投入し、3分間練り混ぜ、φ10×20cmの試験体を作製し、JIS A 1108⁴⁾に基づき圧縮強度試験を行った。静弾性係数はコンプレッソメータを用いてひずみを測定して求めた。動弾性係数は動ヤング率測定器を用いて求めた。

2.3.2 耐久性 (No. 16~21)

練り混ぜは2.3.1と同様の方法で行い、耐凍害性および乾燥収縮における空気量の影響

を明らかにするために、目標空隙率を No.16～18 のコンクリートでは 2%前後、また No.19～21 では 5%程度となるよう AE 助剤を用いて調整した。

(1) 耐凍害性

断面寸法 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の試験体を用いて、JIS A 1148⁴⁾に基づき凍結融解試験を実施した。開始材齢は 14 日とし、凍結融解の 1 サイクルは 3 時間以上、4 時間以内とし 30 サイクルが完了するごとに全試験体の質量および一次共鳴振動数を測定した。

(2) 乾燥収縮

JIS A 1129⁴⁾に基づきコンクリートの長さ変化試験のコンタクトゲージ法により長さ変化率を求めた。開始材齢を 7 日とし、試験体の保存は、恒温恒湿装置を用いて温度 20℃、湿度 60%の一定とした。

2.3.3 塩化物含有量 (No. 22～26)

電位差滴定法により塩素量を測定する塩分濃度計を用いて試験を行った。練り混ぜは 2.3.1 と同様の方法で行い、フレッシュコンクリートからサンプルを採取し、それを塩分濃度計にセットした酸試薬カップに注入し含有量を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 強度特性 (No. 1～15)

3.1.1 フレッシュ性状

図-1、図-2 にスランプと代替率、空気量と代替率の関係をそれぞれ示す。単位水量一定において、代替率 5%と 10%のコンクリートでは目標スランプの 8cm に調整するため、下水汚泥焼却灰の代替率に応じて高性能減水剤の使用量を変化させたが、スランプ値が小さかった。これより、下水汚泥焼却灰の代替率が大きいほどワーカビリティが低下し、減水剤が必要となる。また、空気量は全体的に低い値を示した。これは、混和剤に AE 助剤を使用していないためと考えられる。

3.1.2 圧縮強度

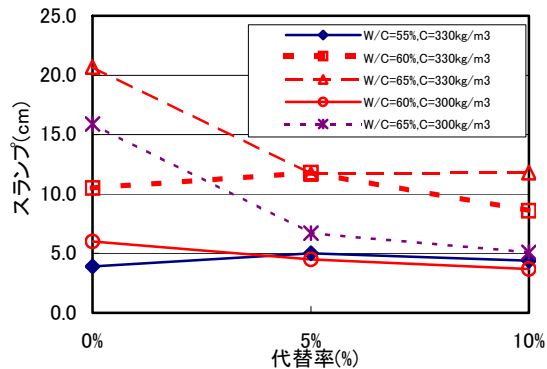


図-1 スランプと代替率の関係

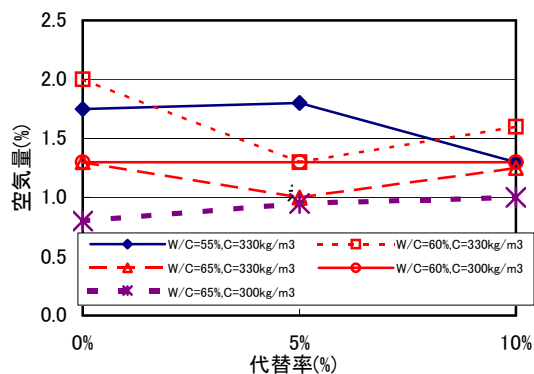


図-2 空気量と代替率の関係

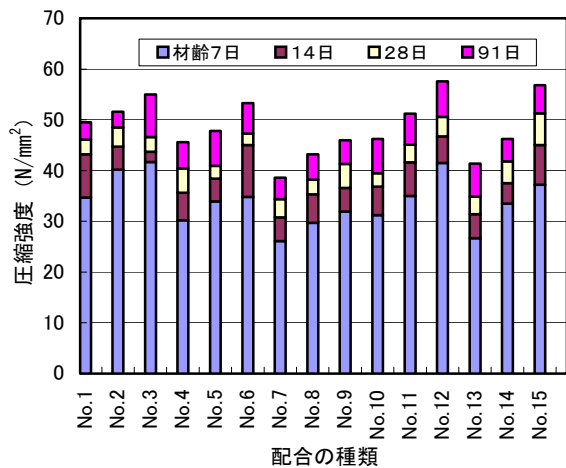


図-3 圧縮強度と養生日数の関係

圧縮強度と養生日数の関係を図-3 に示す。セメント量と水セメント比が同じ配合においては、代替率が 5%、10%と高くなるほど高強度を示している。No.4 と No.14 を比較すると、No.4 はセメント量が多く水セメント比も小さいにもかかわらず、これらはほぼ同じ圧縮強度となった。これは、焼却灰微粒分のマイクロファイラー効果によるコンクリートの緻密

化およびポズラン反応による品質改善の影響であると思われる。水セメント比が同じであっても、セメント量 300kg/m^3 の配合(No.10~15)が、セメント量 330kg/m^3 の配合(No.4~9)と同程度、もしくはそれ以上の強度を有していることから、下水汚泥焼却灰をコンクリートに混入することで、10%程度のセメント量の減量化を図ることが可能であると思われる。

3.1.3 静弾性係数

養生日数が 91 日における静弾性係数と圧縮強度の関係を図-4 に示し、代替率別に累乗式で近似を行った。圧縮強度が増加するに伴い、静弾性係数も大きくなっており、その関係は比較的相関の高い累乗式で表すことができたが、代替率 5%についてはあまり精度がよくなかった。この理由は今後の検討課題とする。また、どの配合においても既往の式 ($E_c=8500f_c^{1/3}$) と比較すると、実験結果は大きい値を示す傾向にあった。この理由としては、後の 3.1.5 で示すように単位容積重量が大きくなるのが原因であると思われる。

3.1.4 動弾性係数

養生日数が 91 日における動弾性係数と圧縮強度の関係を図-5 に示し、代替率別に累乗式で近似を行った。静弾性係数と同様に動弾性係数と圧縮強度の関係は相関の高い累乗式で示すことができた。同じ圧縮強度で比較すると代替率が高いほど動弾性係数は低下していた。また、静弾性係数との比（動弾性係数 E_D / 静弾性係数 E_C ）を表-6 に示す。一般に、静弾性係数との比は 1.10~1.15 となる⁵⁾が、本実験においては、多少のばらつきや小さい値がみられるものの、全体的には普通コンクリートと大差ない値となった。

3.1.5 単位容積重量

表-6 に単位容積重量を示す。一般にコンクリートの単位容積重量は $2300\sim 2350\text{kg/m}^3$ である⁵⁾。本研究における単位容積重量は、15 種類の配合の半分以上が 2400kg/m^3 を超えており、一般値より大きい値を示した。これ

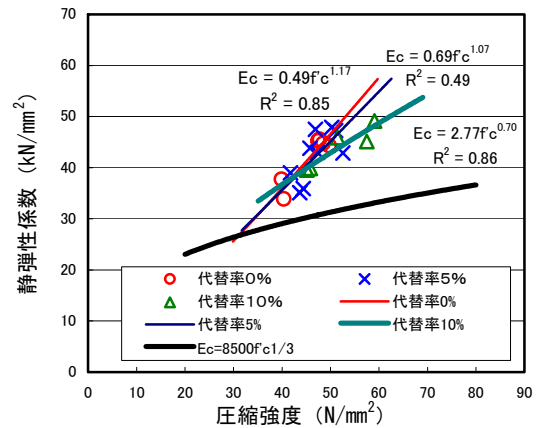


図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

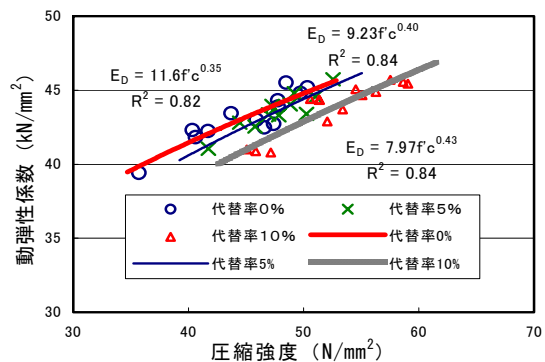


図-5 圧縮強度と動弾性係数の関係

表-6 弾性係数の比較と単位容積重量

セメント量	330(kg/m³)								
	55%			60%			65%		
置換率	0%	5%	10%	0%	5%	10%	0%	5%	10%
空気量	1.75	1.80	1.30	2.00	1.30	1.60	1.30	1.00	1.25
E_D/E_C	1.00	1.00	1.10	1.10	0.95	1.20	1.10	1.10	1.00
単位容積重量 (kg/m³)	2417	2407	2403	2401	2397	2392	2402	2393	2376
セメント量	300(kg/m³)								
	55%			60%			65%		
置換率	0%	5%	10%	0%	5%	10%	0%	5%	10%
空気量	-	-	-	1.30	1.30	1.30	0.80	0.95	1.00
E_D/E_C	-	-	-	1.05	0.90	0.95	1.30	1.00	0.90
単位容積重量 (kg/m³)	-	-	-	2421	2415	2414	2401	2403	2402

は、下水汚泥焼却灰の微粒分がコンクリート中の空隙を充填したため、空気量が小さくなったことが原因であると思われる。

3.2 耐凍害性および乾燥収縮(No. 16~21)

3.2.1 圧縮強度

図-6 に圧縮強度と養生日数の関係を示す。下水汚泥焼却灰を代替した配合(No.17, 18, 20, 21)は、3.1.2と同様にポズラン反応によってコンクリートの組織が密実になり長期強度が増加する傾向にあった。

3.2.2 耐凍害性

図-7 に凍結融解後の質量減少率とサイクル数の関係を、図-8 に凍結融解後の相対動弾性係数とサイクル数の関係を示す。

減少率については、空気量の多い試験体ほど質量減少率は小さくなっており、また空気量の少ない試験体については代替率 5%の試験体が代替率 0, 10%に比べて質量減少率が低い値を示した。相対動弾性係数とサイクル数の関係については、質量減少率と同様に、空気量の多い試験体では、相対動弾性係数は 200 サイクルを超えても 100%を維持しており、このことから代替率が 0~10%程度であれば、一定の空気量を確保すれば、下水汚泥焼却灰混入コンクリートも耐凍害性に対応できるということがいえる。

3.2.3 乾燥収縮

図-9 に各配合の長さ変化率を示す。代替率 0%の試験体 (No.16, 19) は、一般のコンクリートの値である $400\sim700\times 10^{-6}$ 程度⁵⁾におさまっているのに対し、下水汚泥焼却灰を混入したものは焼却灰の代替率が大きくなるにつれ、微細粒分が増えることから長さ変化率は大きくなり、10%の配合 (No.18, 21) は代替率 0%に比べ約 1.5 倍の値を示している。しかし、どの配合においても 80 日以降の増加勾配は小さくなっており、目視によるひび割れ発生は見られなかった。また、空気量の多小による長さ変化率への影響は確認できなかった。

3.3 塩化物含有量および色彩 (No. 22~26)

3.3.1 塩化物含有量

フレッシュコンクリート中の塩化物含有量を表-7 に示す。全塩素イオン重量は $0.30\sim0.60\text{kg/m}^3$ 以下を基準としている⁵⁾が、本研究においては、代替率が高くなるほど若干含有量は高くなったものの、どの試験体においても含有量は 0.03kg/m^3 以下で一般的な塩化物含有量の限度を大幅に下回っており、PC や RC に利用しても問題がないといえる。しかし、下水汚泥焼却灰の化学組成は季節や地域

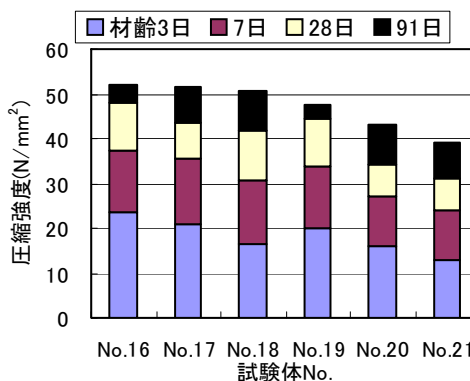


図-6 圧縮強度と養生日数の関係

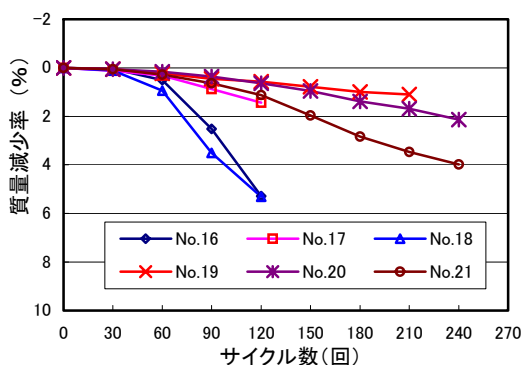


図-7 質量減少率とサイクル数の関係

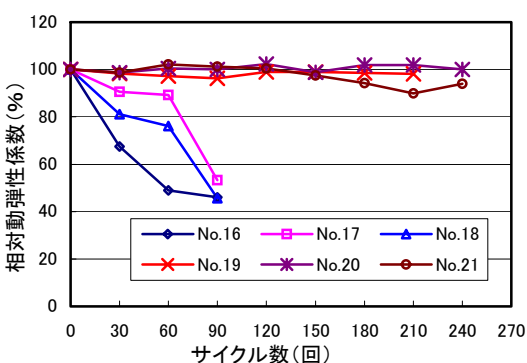


図-8 相対動弾性係数とサイクル数の関係

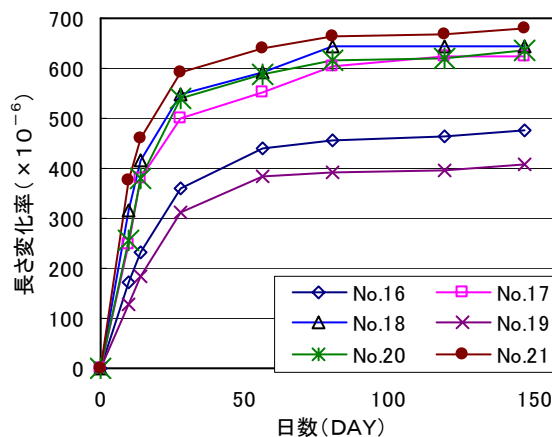


図-9 長さ変化率と日数の関係

によって異なる可能性もあり，地域や季節の違う下水汚泥焼却灰を用いる場合には，塩化物含有量を確認する必要があると思われる。

3.3.2 コンクリートの色彩

画像処理ソフトを用いてコンクリートの色彩を測定した結果を図-10に示す。色彩の測定方法はL*a*b*表色系に従う⁶⁾。代替率が高くなるほどa, b値ともに直線的に増加する傾向にある。L*a*b*表色系ではa, b値の両者がプラスの範囲にあると赤～黄色系の暖色系と規定されており，下水汚泥焼却灰混入コンクリートはa, b値ともにプラスの範囲にあるので肉眼での判断だけではなく，数値的にも暖色系の茶色であるということを確認することができ，また，定量的に扱うことが可能である。

3.4 施工例

写真-1に下水汚泥焼却灰を用いたコンクリートの施工例を示す。写真は2次製品の擁壁ブロックであり，現在，山間部に試験施工され，耐久性などについて継続試験中である。

4. まとめ

- (1) 下水汚泥焼却灰をコンクリートに混入することで，焼却灰微粒分のマイクロファイバー効果，およびポズラン反応による品質改善により圧縮強度が増加するのでセメントの減量化を図れる可能性がある。
- (2) 普通コンクリートと同様に，AE 助剤などの空気を連行する混和剤を使用して，5%程度の空気量を確保すれば下水汚泥焼却灰混入コンクリートも凍害に十分対応できる。
- (3) 下水汚泥焼却灰の代替率が高くなるほど，乾燥収縮は大きくなる。
- (4) 今回用いた配合の範囲では，塩化物含有量は規定値を大幅に下回り，RC および PC に利用できる基準にある。
- (5) 焼却灰をコンクリートに混入することで，暖色系の茶褐色となり，L*a*b*表色系に従い，定量的に扱うことが可能である。

表-7 塩化物含有量

コンクリートの種類	No.22	No.23	No.24	No.25	No.26
塩化物含有量 (kg/m ³)	0.023	0.024	0.025	0.025	0.028

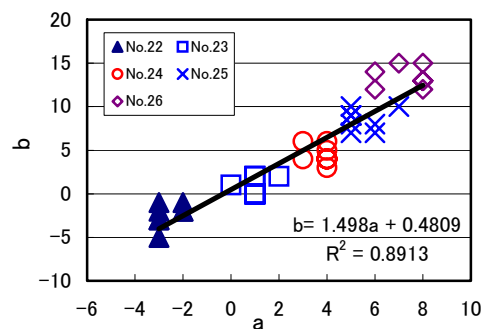


図-10 コンクリートの色彩測定



写真-1 施工例

謝辞

本研究を実施するにあたり，高知県工業技術センターの河野敏夫氏，東洋電化工業（株）の吉田恵郎氏に多大なるご協力を頂きました。

参考文献

- 1) 森田弘昭：下水汚泥の有効利用の現状と今後の展望，環境技術，Vol.29 No.5, pp.334-336, 2000
- 2) (社)日本コンクリート協会 九州支部コンクリートにおける産業廃棄物利用研究委員会編：各種産業廃棄物のコンクリート用材料としての適用性，pp.99-104, 2000
- 3) (社)地盤工学会 廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用編集委員会：廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用，pp.43-45, 1998
- 4) (社)土木学会：コンクリート標準示方書[規準編] JIS 等関連規準，2002
- 5) 河野清・田澤栄一・門司唱：新しいコンクリート工学，朝倉書店，1987
- 6) 近藤恒夫：色彩学，理工図書，1992