

カラーコンクリートの港湾構造物への適用に関する基礎試験

運輸省港湾技術研究所 正会員 福手 勤
同 上 ○正会員 山本邦夫
住友セメント株式会社 正会員 渡辺夏也

1. はじめに

現在、豊かなウォーターフロントをめざして、景観の優れた美しい港湾空間の形成が図られつつある。それとともに、港湾コンクリート構造物への色彩化の要求が高まっている。

コンクリートの色彩化を図るには種々の方法があるが、比較的耐久性に秀れ、かつ経済的な方法の1つに、コンクリートの練り混ぜ時に顔料を添加して製作する方法がある。この方法で製作されたカラーコンクリートは、建築や舗装の分野での実績は多いが、港湾環境下での使用実績はほとんどないことから、港湾環境下での特性を把握する必要がある。

本研究は、コンクリートの練り混ぜ時に顔料を添加する方法で製作するカラーコンクリートの港湾コンクリート構造物への適用を目的として、港湾環境下での基礎的な特性を検討したものである。

2. 試験の概要

(1) 試験の流れ

試験の流れを図-1に示す。モルタル供試体を用いて、配合や強度などの基本特性の検討、色彩に関する検討、港湾環境への暴露による色彩変化の検討等を行った後、コンクリート供試体を用いて、乾燥収縮特性、凍結融解特性等の検討を行った。

(2) 顔料の選定

コンクリートへの練り混ぜが可能と考えられる顔料は、有機顔料と無機顔料とに大別される。港湾構造物のカラーコンクリートの顔料として使用するためには、次の項目が要求される。すなわち、1)練り混ぜ時に分散性の高いこと、2)耐アルカリ性が高いこと、3)耐候性、耐海水性が高いこと、4)着色力が大きいこと、5)経済性に優れていること、等である。有機顔料においては、これらの項目の内、3)の耐光性に疑問が有り、また5)の経済性に劣るのに対して、無機顔料においては、4)の着色力はやや劣るものの、その他の項目は秀れている。したがって、港湾構造物のカラーコンクリートの顔料としては無機顔料の方が適していると考えられる。本試験では、表-1に示す無機顔料を使用した。

(3) 供試体の概要

1) モルタル供試体

供試体の一覧を表-2に示す。供試体形状は、4×4×16cmである。供試体No.1~37については、水セメント比65%、フロー値 220±5となるようセメント細骨材比を調節した。供試体No.38~41については、水セメント比を60%ならびに55%とした。セメントとして、表-3に示す普通ポルトランドセメントおよび白色ポルトランドセメントを用い、細骨材として、表-4に示す6種類のものを使用した。

2) コンクリート供試体

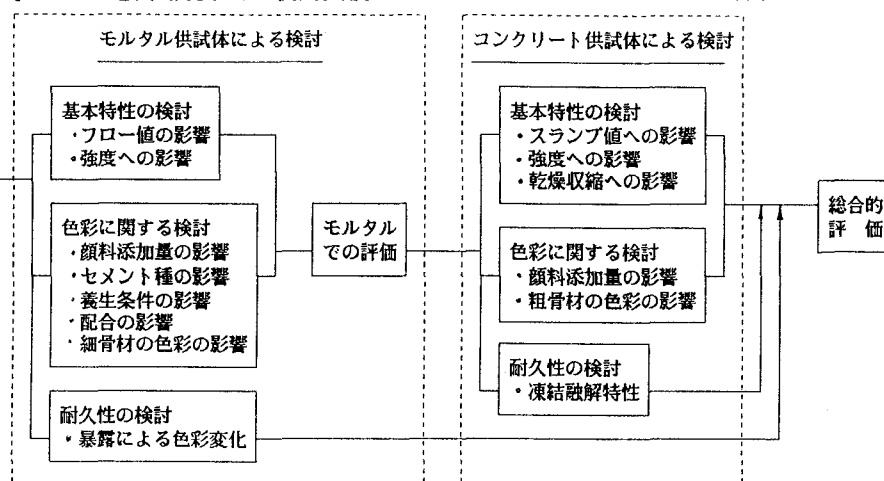


図-1 試験の流れ

表-1 顔料の種類

No.	A	B	C	D	E	F	G
外 観	黒色粉末	黒色粉末	茶色粉末	黄色粉末	赤色粉末	緑色粉末	青色粉末
組 成	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	カーボン ブラック	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	酸化鉄 (FeOOH)	酸化鉄 (Fe ₂ O ₃)	酸化加ム (Cr ₂ O ₃)	CoO/ Al ₂ O ₃
粒 形	球状	球状	球状	針状	球状	球状	斜方晶形
主要粒径 (μm)	0.2	0.02	0.3~0.6	0.1×0.6	0.17	0.3	0.1
吸油量 DBRg/100g	21	—	23	52	26	11	35

供試体の

一覧を表-

5に示す。

供試体形状

は、φ10×

20cmおよび

10×10×40

cmである。

水セメント

比は60%、

スランプ値

は8±1cmと

した。セメ

ントとして、

表-3に示

す普通ボル

トランドセ

メントおよ

び白色ボル

トランドセメントを

用い、粗骨材および

細骨材として、表-

4に示すものを使用

した。また、A/E剤

としてヴィンソル（

山宗化学株式会社製、

を用いた。

（4）色彩の表示方法

物体表面の色彩はすべて、各々独立した3成分で表示することが出来る。本試験では、モルタルおよびコンクリートの表面の色彩表示方法として、JIS Z 8701によるXYZ系表示法の中のYx表示を用いた。Yは反射率（明るさ）を表し、xおよびyは色相および色の鮮やかさを表す。また、色彩の差を表す表示として、JIS Z 8730によるL*a*b*表面系による色差式を用いた。以下にその式を示す。

$$\Delta E^*ab = \{ (L^*i - L^*o)^2 + (a^*i - a^*o)^2 + (b^*i - b^*o)^2 \}^{1/2}$$

$$L^* = 116 \{ (Y/100)^{1/3} - 16 \}$$

$$a^* = 500 \{ \{ x \cdot Y / (98.072 \cdot y) \}^{1/3} - (Y/100)^{1/3} \}$$

$$b^* = 200 \{ \{ (Y/100)^{1/3} - \{ Y(1-x-y) / (118.225 \cdot y) \}^{1/3} \}$$

ここに、ΔE*ab: 色差 L*: 明度指数 a*およびb*: クロマティクネス指数

L*i, a*i, b*i: 比較する物体のL*, a*, b*

L*o, a*o, b*o: 基準となる物体のL*, a*, b*

3. 試験結果および考察

（1）基本特性に関する検討

一般に、コンクリートの配合は、強度に影響を与える水セメント比と施工性に影響を与えるスランプ値を決定し選定される。したがって、カラーコンクリートを使用する場合には、添加する顔料が強度特性あるいは施工性にどのような影響を及ぼすかを検討しておかねばならない。

表-2 モルタル供試体の種類

No.	供試体名	顔料種	添加量	セメント種	細骨材種	本数	No.	供試体名	顔料種	添加量	セメント種	細骨材種	本数
1	WF	-	0%	W	F	3	24	BL-2-WF	G	2	W	F	3
2	NF	-	0	N	F	3	25	BL-4-WF	G	4	W	F	3
3	B1-2-NF	A	2	N	F	3	26	BL-8-WF	G	8	W	F	3
4	B1-4-NF	A	4	N	F	3	27	WK	-	0	W	K	3
5	B1-8-NF	A	8	N	F	3	28	NK	-	0	N	K	3
6	B2-2-NF	B	2	N	F	3	29	Y-4-WK	D	4	W	K	3
7	B2-4-NF	B	4	N	F	3	30	Y-4-NK	D	4	N	K	3
8	B2-8-NF	B	8	N	F	3	31	Y-4-WM	D	4	W	M	3
9	BR-2-NF	C	2	N	F	3	32	Y-4-NM	D	4	N	M	3
10	BR-4-NF	C	4	N	F	3	33	Y-4-WA	D	4	W	A	3
11	BR-8-NF	C	8	N	F	3	34	Y-4-NA	D	4	N	A	3
12	Y-2-WF	D	2	W	F	3	35	Y-4-WH	D	4	W	H	3
13	Y-4-WF ¹⁾	D	4	W	F	6	36	Y-4-NH	D	4	N	H	3
14	Y-8-WF	D	8	W	F	3	37	Y-4-WS	D	4	W	S	3
15	Y-2-NF	D	2	N	F	3	38	Y4WF-60 ²⁾	D	4	W	F	3
16	Y-4-NF ³⁾	D	4	N	F	6	39	Y4WF-55 ³⁾	D	4	W	F	3
17	Y-8-NF	D	8	N	F	3	40	Y4NF-60	D	4	N	F	3
18	R-2-WF	E	2	W	F	3	41	Y4NF-55	D	4	N	F	3
19	R-4-WF	E	4	W	F	3	42	Y-4-WFH ⁴⁾	D	4	W	F	3
20	R-8-WF	E	8	W	F	3	43	Y-4-WFL ⁵⁾	D	4	W	F	3
21	G-2-NF	F	2	W	F	3							
22	G-4-NF	F	4	W	F	3							
23	G-8-NF	F	8	W	F	3							

注) 1): 3本を標準養生、3本を気中養生とした。

2): W/Cを60%とした。 3): W/Cを55%とした。

4): C/Sを1/3とした。 5): C/Sを1/1.5とした。

6): 表-1参照 7): 表-3参照 8): 表-4参照

表-3 セメント試験成績

No	セメントの種類	比 重	比表面積 (cm ² /g)	凝 結			圧縮強さ (kgf/cm ²)			
				水量(%)	始発 h-m	終結 h-m	1日	3日	7日	28日
W	白色ボルトランド	3.06	3720	27.8	2-46	4-01	88	193	272	404
N	普通ボルトランド	3.16	3250	27.6	2-29	3-49	-	162	262	416

表-4 細骨材および粗骨材の物理試験結果

	No	骨材種別	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)	色 系
モ ル タ	F	富士川産川砂	2.62	2.55	2.14	黒 色 系
	K	鹿島産陸砂	2.62	2.49	1.01	黄 色 系
	M	本島沖産海砂	2.55	2.31	2.03	黄 色 系
	A	荒川産川砂	2.52	2.99	2.68	黄 色 系
	H	白竜砕砂	2.68	2.79	0.42	白 色
	S	財田産砕砂	2.54	2.64	2.66	黒 色 系
コ ン ク リ ー ト	F	富士川産川砂	2.65	3.10	1.41	黒 色 系
	a	南巨摩産砕石	2.66	6.43	1.29	黄、緑、黒の混合色系
	b	岩瀬産砕石	2.65	6.61	0.60	黒 色 系
	c	葛生産砕石	2.69	6.39	0.50	白 色 系

粗骨材最大寸法は20mmである。

1) モルタルのフロー値、およびコンクリートのスランプ値に及ぼす顔料の影響

図-2は、顔料を添加した場合に、モルタルのフロー値を一定に保つためにはどれだけ単位水量を調整する必要があるのかを示している。図に示すように、必要な単位水量は顔料の種類によって異なっていた。顔料Bおよび顔料Dにおいては、添加量の増加にともない、単位水量を大きく増加しなければ所定のフロー値を得ることが出来なかった。

図-3は、コンクリートの場合である。モルタルの場合と同様に、顔料Bおよび顔料Dにおいて、顔料添加の増加にともない、単位水量を大きく増加しなければならなかった。その増加量は、顔料Bを4%添加した場合には、ブレンコンクリートに比較して35kg/m³、顔料Dを4%添加した場合には、ブレンコンクリートに比較して17kg/m³であった。

顔料粒子は、その周りに水分子を吸着すると考えられる。したがって、顔料の種類の違いによる必要単位水量の違いは、主に顔料の比表面積の大小によって起こると考えられる。表-1より、顔料Bに

表-5 コンクリート供試体の種類

No.	供試体名	1) 顔料種	添加量 (%)	セメント ²⁾ 種	3) 粗骨材種	単位量 (kg/m ³)				
						C	W	S	G	Col.
1	B1-2-Na	A	2	N	a	292	175	827	1013	5.8
2	B1-4-Na	A	4	N	a	304	182	814	998	12.2
3	B2-2-Na	B	2	N	a	330	198	784	963	6.6
4	B2-4-Na	B	4	N	a	350	210	763	934	14.0
5	BR-2-Na	C	2	N	a	292	175	827	1013	5.8
6	BR-4-Na	C	4	N	a	304	182	814	998	12.2
7	Y-2-Wa	D	2	W	a	300	180	814	998	6.0
8	Y-4-Wa	D	4	W	a	320	192	790	971	12.8
9	R-2-Wa	E	2	W	a	292	175	822	1011	5.8
10	R-4-Wa	E	4	W	a	304	182	811	992	12.2
11	G-2-Wa	F	2	W	a	292	175	822	1011	5.8
12	G-4-Wa	F	4	W	a	304	182	811	992	12.2
13	Na	-	0	N	a	292	175	827	1013	-
14	Wa	-	0	W	a	292	175	822	1011	-
15	Y-4-Wb	D	4	W	b	325	195	786	960	13.0
16	Y-4-Wc	D	4	W	c	317	190	795	985	12.7

1): 表-1 参照 2): 表-3 参照 3): 表-4 参照

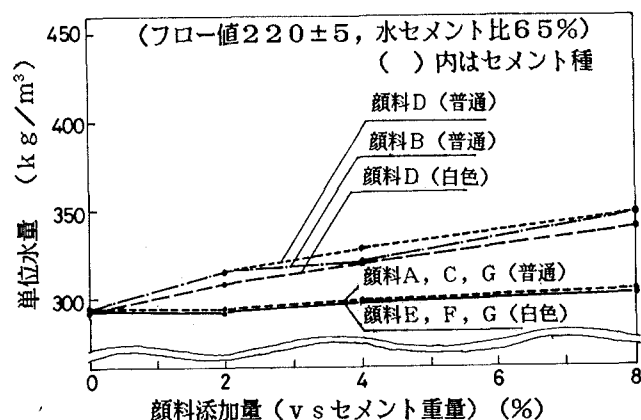


図-2 フロー値一定の場合の顔料添加量と単位水量との関係

おいては、その粒径が小さいことから、また顔料Dにおいては、粒子の形状が針状であることから、比表面積は他のものより大きいことが想像される。

2) モルタルおよびコンクリートの圧縮強度に及ぼす顔料の影響

図-4は、モルタルの圧縮強度と顔料の添加量との関係を示している。すべての供試体において、顔料を2%添加すると、ブレンモルタルに比べて1~13%の圧縮強度増加がみられた。強度増加の要因としては、モルタルの硬化中に顔料がさらに水を吸着し、モルタルの水セメント比を低下させることによる影響、および顔料のフィラー効果による影響が考えられる。また、ほとんどの顔料においては、8%添加しても強度の低下はみられなかったが、顔料Bにおいては、添加量2%程度をピークとして、それ以上添加すると強度の低下がみられた。その低下量は、4%添加で2%添加のものに比較して16%、8%添加の場合には37%であった。

強度低下の原因は、次の理由によるものと考えられる。すなわち、顔料Bは、粒径が小さく、かつセメントゲル中では房状で存在することから、図-5に示すように、顔料Aに比べてより密な状態で存在している。したがって、セメントゲルの結合を妨げる領域が多くなり、顔料Aの場合より少ない添加量で強度低下が起こる。コンクリートの場合には顔料の添加量を4%迄としたが、顔料B以外の顔料においては、添加量の増加による強度の低下は、みられなかった。

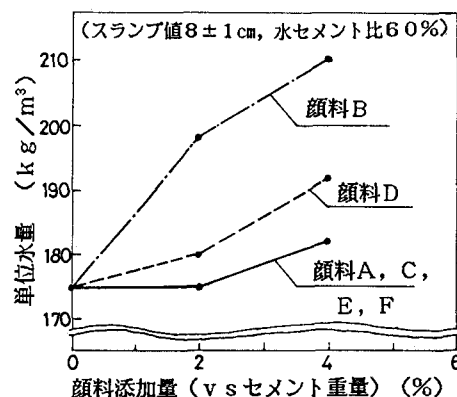


図-3 スランプ値一定の場合の顔料添加量と単位水量との関係

3) コンクリートの乾燥収縮に及ぼす顔料の影響

図-6は、コンクリート供試体における、乾燥期間と乾燥収縮量との関係を示している。図に示す通り、顔料Bの乾燥収縮量が材令3カ月でプレーンコンクリートのものに比較して 100×10^{-6} 程度大きかったものの、他の顔料においては、プレーンコンクリートとほぼ同等であった。したがって、乾燥収縮特性は良好であると考えられる。

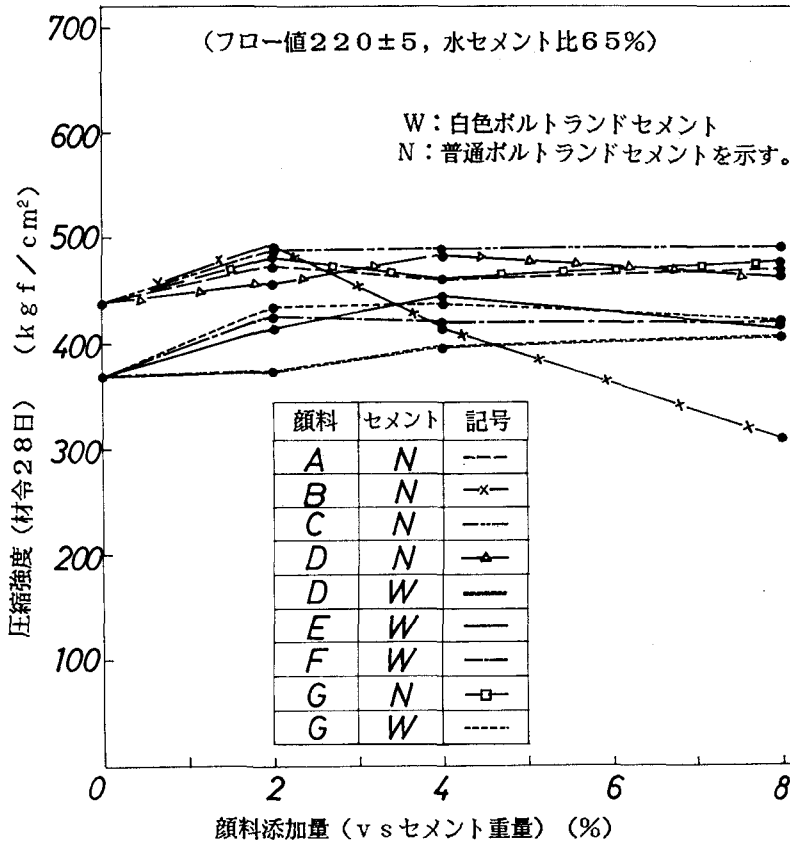


図-4 モルタルの圧縮強度と顔料添加量との関係

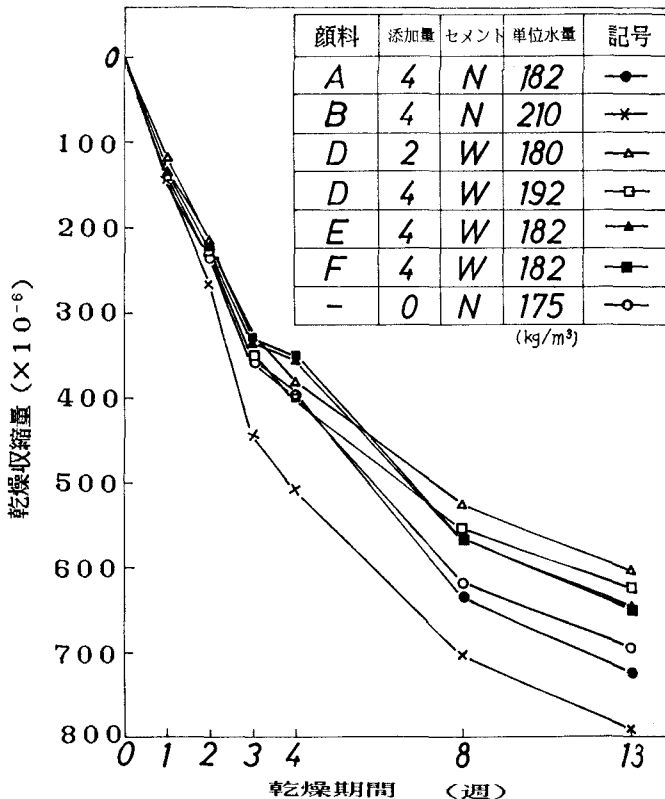


図-6 コンクリートの乾燥収縮量

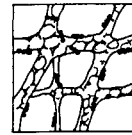
顔料においては、プレーンコンクリートとほぼ同等であった。したがって、乾燥収縮特性は良好であると考えられる。

(2) 色彩に関する検討

1) 顔料の添加量と色彩との関係

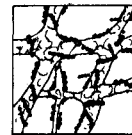
顔料の添加量とモルタル供試体表面の反射率との関係を図-7に示す。図より、顔料D(黄色)については、顔料の添加量の増加にともない反射率が増加する(明るくなる)が、それ以外の顔料については、逆に反射率が低減する(暗くなる)ことがわかる。また、その関係は線形関係にはならず、添加量4%程度になると、それ以上添加しても反射率はほとんど

顔料B 2%添加 顔料A 2%添加



顔料B 8%添加

顔料A 8%添加



●, ○: 顔料粒子

図-5 セメントゲル中での顔料粒子(モデル図)

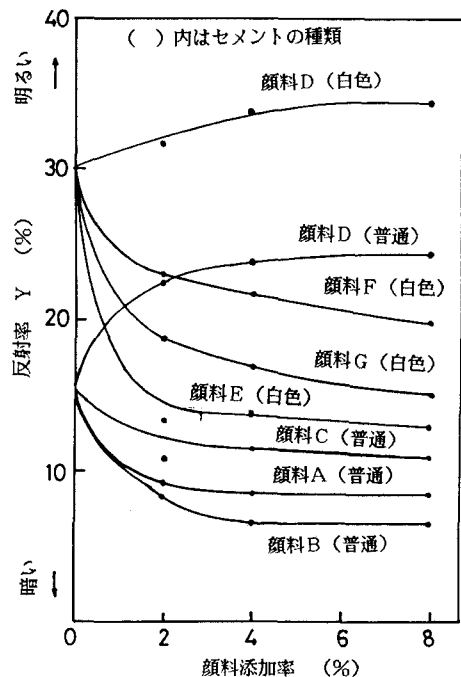


図-7 顔料添加量とモルタルの反射率との関係

ど変化しなくなる。反射率以外の色彩の成分である色相および鮮やかさ（xおよびy）についても同様の結果であった。また、コンクリート供試体においても同様の結果が得られた。なお、ともに黒の顔料である、顔料Aと顔料Bを比較すると、顔料Bの方の反射率が小さかった（暗かった）。したがって、顔料Bの方が着色力が高いといえる。

2) 材料、施工、および配合の要因が色彩に及ぼす影響

モルタル供試

体表面の色彩に及ぼす材料の要因としてセメントの種類ならびに細骨材の種類を、施工の要因として養生方法、また配合の要因として水セメント比ならびにセメント砂比を取りあげ、色彩に及ぼす影響について顔料D（黄色）を例にとって検討した。図-8は、種々の条件で製作した供試体の色彩と比較供試体の色彩とを材令7日において比較し、両者の間の色差を求めたものである。図に示す通り、色彩に最も影響を及ぼす要因は、セメントの種類であり、次に養生方法、続いて顔料の添加量、水セメント比やセメント砂比等

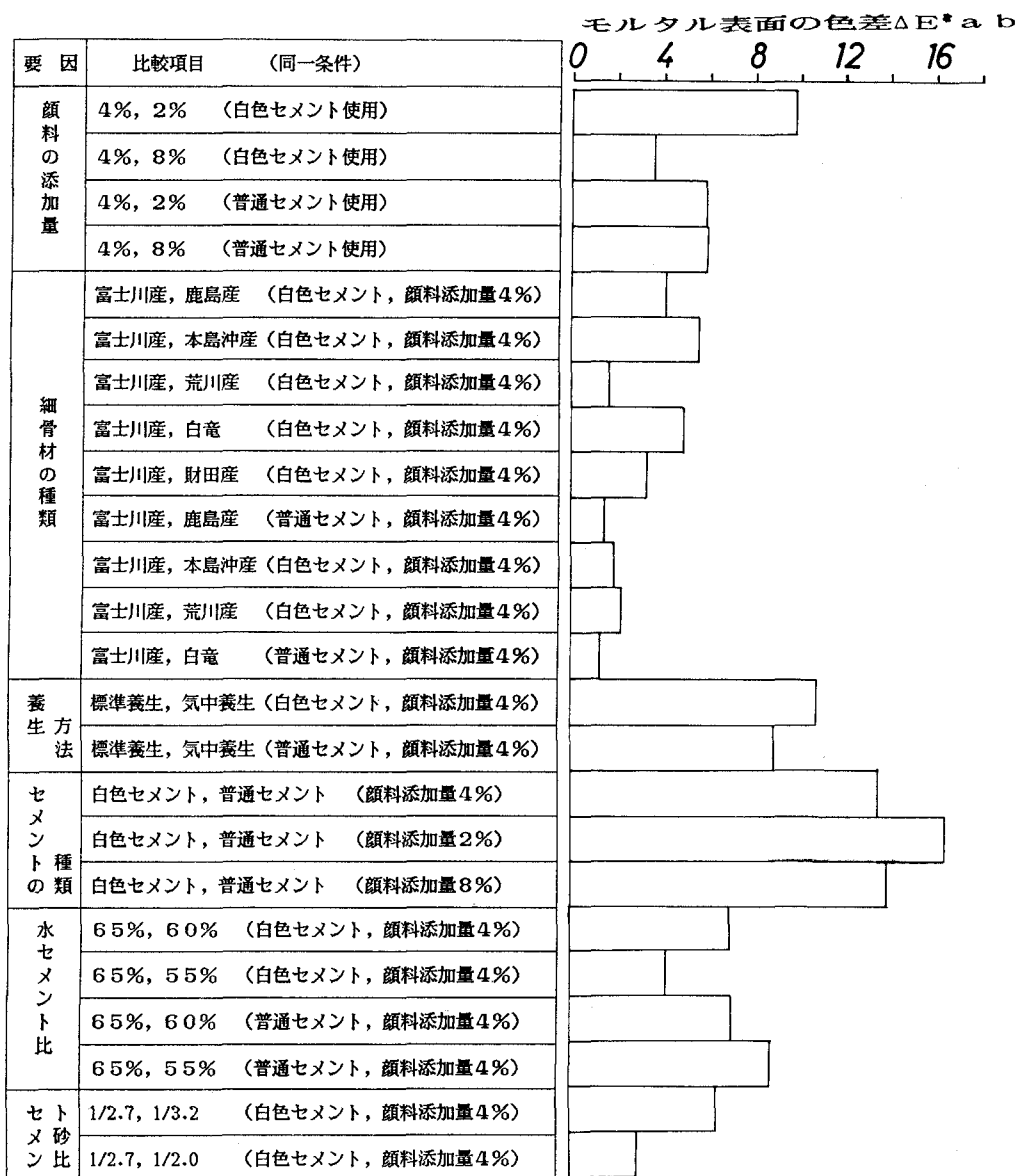


図-8 各種の要因がモルタルの色彩に及ぼす影響

の配合要因、最後に細骨材の種類であった。

本研究では、種々の要因の影響を受け易いと思われる黄色の顔料について検討したため、必ずしも一般的ではないが、色彩化を図る際には、顔料の添加量とともにセメントの種類や養生方法についても注意する必要がある。

(3) 耐久性に関する検討

1) 港湾環境下への暴露による色彩変化

港湾環境下での長期の色彩変化を測定するため、水道水中（標準養生）、気中部、海水飛沫部、感潮部、および海中部にカラーモルタル供試体を暴露し、色彩の測定を行った。その結果の一例を図-9に示す。図は、顔料B、顔料C、および顔料Dをそれぞれ4%添加した供試体のものであり、横軸に暴露期間を、縦軸に暴露直前に測定した色彩に対する色差を示している。図に示すように、いずれの供試体においても気中部に暴露した供試体の色差が大きかった。これは、セメント中の水酸化カルシウムと大気中の炭酸ガスとが反応してエフロレッセンスが生じ、その結果反射率が増大したためである。一方、海水の作用を受ける感潮部や海中部に暴露した供試体の色彩は、標準養生のものと同様に変化が少なかった。したがって、暴露期間9カ月の範囲では、海水の作用が

カラーコンクリートの色彩に及ぼす影響は、ほとんどないと思われる。

2) 凍結融解特性

コンクリート供試体を用いて、JIS原案A法(水中凍結融解試験方法)による凍結融解試験を行い、次式を用いて耐久性指数DFを求めた。

$$DF = P \times N / M$$

ここに、M：300サイクル

P：Nサイクル

時の相対動

弾性係数(%)

N：相対動弾性係数が60%となるサイクル数、または300サイクルのいずれか小さいもの

表-6に示すように、顔料Bおよび顔料Dを使用した供試体の耐久性指数は非常に小さく、凍結融解に対する十分な耐久性は有していないと評価された。耐久性の小さい理由として、顔料Bにおいては、顔料の粒径が小さいため連行される空気が少なかったため(表-6参照)と考えられ、また顔料Dにおいては、目標の空気量は連行されたものの、顔料粒子の形状が針状であるためエントラップドエアの占める割合が大きかったためと考えられる。一方、その他の顔料A、顔料E、および顔料Fを使用したものはブレンコンクリートの耐久性指数に比べて同等以上であり、顔料A、顔料E、および顔料Fを使用したカラーコンクリートは、凍結融解に対して十分な耐久性を有しているといえる。

4. 結論

これまでの試験によって得られた結論は、以下の通りである。

- (1) カーボンブラック、および黄色(酸化鉄)の顔料を使用したコンクリートにおいては、その顔料の添加がスランプ値に及ぼす影響は大きい。
- (2) 酸化鉄あるいは酸化クロムを主成分とした顔料を使用したモルタルにおいては、顔料をセメント重量に対して8%添加しても、圧縮強度の低下はみられなかった。一方、カーボンブラックを使用したモルタルおよびコンクリートにおいては、4%以上添加すると圧縮強度の低下がみられた。
- (3) 酸化鉄あるいは酸化クロムを主成分とした顔料を使用したコンクリートの乾燥収縮は、ブレンコンクリートのものと同等であった。
- (4) 黄色(酸化鉄)の顔料を4%添加したモルタル供試体において、セメントの種類、細骨材の種類、養生方法、水セメント比、セメント砂比等の要因がモルタルの色彩に及ぼす影響について検討した結果、顔料添加量(2-4%)による影響よりもセメントの種類、および養生方法による影響の方が大きかった。
- (5) カラーモルタル供試体を港湾環境下に暴露し、色彩変化を測定した結果、色彩変化の最も大きい環境は、気中部であった。一方、感潮部や海中部に暴露した供試体の色彩変化は、標準養生のものと大差なかったことから、暴露期間9カ月の範囲では、海水の作用が色彩に及ぼす影響は、ほとんどないと思われる。
- (6) カーボンブラックおよび黄色(酸化鉄)の顔料を使用したカラーコンクリートの凍結融解に対する耐久性は小さかったが、その他の顔料を使用したカラーコンクリートは、凍結融解に対して十分な耐久性を有していた。

5. あとがき

これまでの結論より、適切な顔料を選定し、添加量を4%程度におさえれば、カラーコンクリートの港湾コンクリート構造物への適用は十分可能であると考えられる。

なお現在、耐海水性の検討等を行っており、その結果は別の機会に報告したいと考えている。

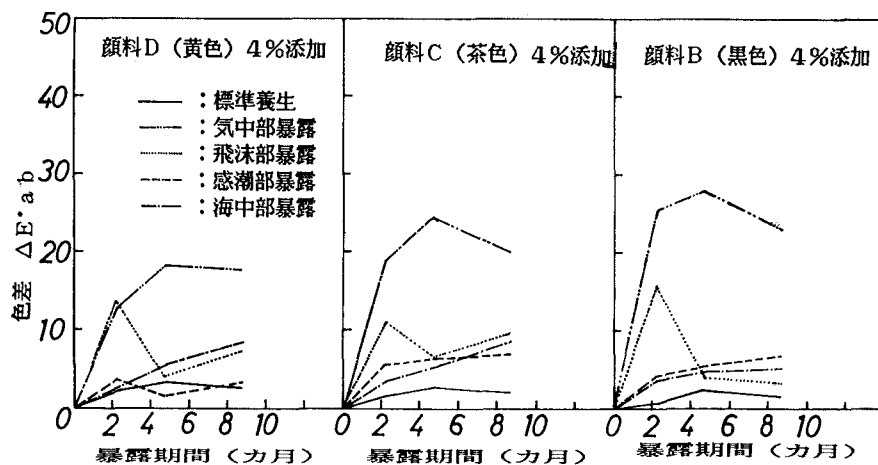


図-9 港湾環境下での色彩変化

表-6 カラーコンクリートの凍結融解特性

顔料種類	添加量(%)	セメント種類	空気量(%)	耐久性指数(%)
-	0	普通	3.9	81
A	4	普通	3.8	82
B	4	普通	2.6	6以下*
D	2	白色	3.8	17
D	4	白色	3.5	25
E	4	白色	4.5	91
F	4	白色	4.5	90

*30サイクルで測定不可能となる。