

運輸省港湾技術研究所

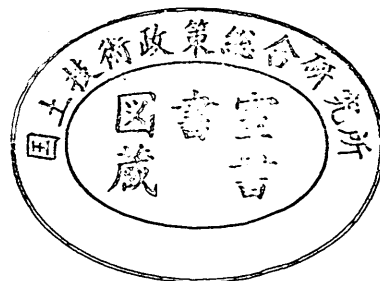
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 1 MAR. 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第30巻 第1号 (Vol.30, No.1) 1991年3月 (Mar.1991)

目次 (CONTENTS)

1. 遠地津波の外洋伝播計算
.....後藤 智明.....3
(Numerical Simulation of the Trans-oceanic Propagation of Tsunami
.....Chiaki GOTO)
2. 碎波および反射を考慮した波浪変形計算
.....高山 知司・池田 直太・平石 哲也.....21
(Practical Computation Method of Directional Random Wave Transformation
.....Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Tetsuya HIRAISHI)
3. 多方向不規則波を用いた波浪変形模型実験
.....高山 知司・池田 直太・小杉 宜史.....69
(Hydraulic Model Test on Wave Diformation by using Directional Random Waves
.....Tomotsuka TAKAYAMA, Naota IKEDA and Yoshifumi KOSUGI)
4. 波の連なりを考慮した長周期波の波高の推定
—波崎海洋研究施設における現地観測における現地観測にもとづく検討—
.....加藤 一正・中村 聡志・池田 直太.....137
(Estimation of Infragravity Waves in Consideration of Wave Groups
—An Examination on Basis of Field Observation at HORF—
.....Kazumasa KATOH, Satoshi NAKAMURA and Naota IKEDA)
5. 現地データによる移動床模型実験の検証
—河原子海岸におけるケース・スタディ—
.....加藤 一正・井上 浩司・柳嶋 慎一.....165
(Inspection of Movable-bed Model Experiments with Field Data
—Case Study at Kwarago Beach—
.....Kazumasa KATOH, Kouji INOUE and Shin-ichi YANAGISHIMA)
6. ヨシ原による水質浄化の特性
.....細川 恭史・三好 英一・古川 恵太.....205
(Characteristics of Water Purification in Coastal Reed Field
.....Yasushi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI and Keita FURUKAWA)
7. 空港コンクリート舗装の不同沈下管理に関する考察
.....八谷 好高・横田 弘.....239
(Differential Settlement Management of Airport Concrete Pavements
on Reclaimed Ground
.....Yoshitaka HACHIYA and Hiroshi YOKOTA)

8. 大変形する単杭構造による接岸ドルフィンの残留変位と累積疲労損傷度
上田 茂・白石 悟.....267
 (Residual Deflection and Cumulative Fatigue Damage Ratio
 of Breasting Dolphin by Single Pile Structure
Shigeru UEDA and Satoru SHIRAISHI)
9. カラーコンクリートの材料特性に関する研究
 —強度特性, 色彩特性, および耐久性—
福手 勤・山本 邦夫・濱田 秀則.....313
 (A Study on the Material Properties of Coloured Concrete
 —Strength, Colouring, and Durability—
Tsutomu FUKUTE, kunio YAMAMOTO and Hidenori HAMADA)
10. 捨石による基礎マウンドの形状および力学特性に関する考察
口田 登・辻垣 武彦・森田 博史.....347
 (Study on Configuration and Mechanical Properties of Rubble Mounds
Noboru KUTIDA, Takehiko TSUJIGAKI and Hirohumi MORITA)

9. カラーコンクリートの材料特性に関する研究 —強度特性, 色彩特性, および耐久性—

福手 勤*・山本邦夫**・濱田秀則**

要旨

現在, 豊かなウォーターフロントの実現をめざして, 優れた景観を有した美しい港湾空間の形成が図られつつある。それにともなって, コンクリート材料の色彩化の要求が高まってきている。

コンクリートの色彩化を図るには種々の方法があるが, その中で比較的耐久性に優れ, かつ経済的な方法の1つに, コンクリートの練りませ時に顔料を添加して製作するカラーコンクリートを用いる方法がある。このカラーコンクリートについては, 建築や舗装の分野での実績は多いが, 海洋環境下での使用実績はそれほど多くないため, 海洋環境下における材料特性には不明な点が多いのが現状である。

このような背景から, 本研究では, カラーコンクリートを海洋環境下のコンクリート構造物に適用することを前提として, カラーコンクリートの基礎的な材料特性を把握するとともに, その海洋環境下における耐久性について検討を行った。

検討の結果, 適切な顔料を選定し, これを適切に添加することにより, 強度特性等を変化させないでコンクリートの色彩化を図ることができるということが確認され, さらに, そうして製作されたカラーコンクリートの海洋環境下での耐久性は, 通常のコンクリートの耐久性と同等であるということが確認された。

キーワード: 色彩化, コンクリート, 海洋環境

* 構造部 材料研究室長

** 構造部 材料研究室

9. A Study on the Material Properties of Coloured Concrete —Strength, Colouring, and Durability—

Tsutomu FUKUTE*, Kunio YAMAMOTO, Hidenori HAMADA****

Synopsis

In these days, beautiful harbour facilities are being built up in relation to the development of comfortable water-front space. Following this trend, the demands on the colouring of concrete as construction material are being increased. One of the durable and economical methods to colour concrete is to use of concrete which is coloured with mixing of pigments in normal concrete as admixture. However, there are some unclear characteristics of these coloured concrete under marine environments.

With this point of view, a series of experiments is carried out to examine fundamental characteristics of coloured concrete under marine environments such as strength and durability.

The conclusions are follows:

- (1) It is possible to colour concrete without reducing its strength, if the proper pigments are properly mixed in concrete.
- (2) The durability of the coloured concrete is same as the durability of normal concrete.

Key Words : Colouring, Concrete, Marine Environment

* Chief of the Materials Laboratory, Structures Division.

** Member of the Materials Laboratory, Structures Division.

目 次

要 旨	313
1. まえがき	317
2. 色彩の表示方法	318
2. 1 XYZ 表色系による色の表示	318
2. 2 $L^*a^*b^*$ 表色系による色差の表示	319
3. 顔料の概要	320
3. 1 顔料の選定	320
3. 2 顔料の特性	321
4. 供試体の概要	321
4. 1 カラーモルタル供試体	321
4. 2 カラーコンクリート供試体	323
4. 3 白華試験用供試体	324
5. 試験方法	325
5. 1 カラーモルタル供試体	325
5. 2 カラーコンクリート供試体	326
5. 3 白華抑制剤の効果に関する試験	327
6. 試験結果および考察	328
6. 1 強度特性	328
6. 2 色彩特性	333
6. 3 耐久性	335
6. 4 白華抑制剤の効果	341
7. 結論	342
8. あとがき	343
参考文献	343
付 録	343

1. まえがき

現在、豊かなウォーターフロントの実現をめざして、優れた景観を有した美しい港湾空間の形成が図られつつある。美しい港湾空間の形成には、構造物や建築物のデザインとともに、それらを構成する建設材料の色彩や肌触りといった材質の果たす役割が大きい。したがって、美しい港湾空間を形成するためには、強度や耐久性、経済性等の条件を満たす範囲で、できるだけ景観に配慮した材料を採用していく必要がある。

良好な景観を形成し人々に潤いを与える材料としては、木材、煉瓦、タイル、自然石等の天然材料がある。一方、強度や施工性を重視し、従来より港湾空間を形成する材料として頻繁に使用されてきたものの1つにコンクリート材料がある。美しい港湾空間を形成するためには、天然材料を採用していくことが大きな効果を持つことは確かであるが、強度や耐久性、経済性の面から天然材料のみでは港湾空間を形成できず、コンクリート材料を有効に活用していく必要がある。したがって、コンクリート材料自体の美観向上を図ることが大切である。美観向上を考える際には、まずコンクリート材料の色彩化が考えられる。

コンクリート材料の色彩化を図る方法には、1)有色骨材を使用する方法、2)着色したレジンコンクリートやポリマーセメントコンクリートを使用する方法、3)コンクリートの練りませ時に顔料を添加してカラーコンクリートとする方法、4)コンクリート表面に塗装を行う方法等

が考えられる。これらの方法のうち、比較的耐久性に優れ、かつ経済的と考えられる方法の1つが、3)のカラーコンクリートとする方法である。このカラーコンクリートについては、建築や舗装の分野での実績は多いが、海洋環境下におけるコンクリートとして使用した実績はそれほど多くない。したがって、海洋環境下におけるカラーコンクリートの材料特性には不明な点が多いのが現状である。

このような背景から、本研究は、コンクリートの練りませ時に顔料を添加することによって色彩化を図ったカラーコンクリートの海洋コンクリートへの適用を前提として、その強度特性や色彩特性といった基礎的な材料特性を把握するとともに、海洋環境下における耐久性について検討するものである。

本研究のフローを図-1に示す。

まず、海洋環境下におけるカラーコンクリートの顔料として要求される特性を整理し、それに適合すると考えられる顔料の机上選定を行った。

次に、選定した顔料を用いてカラーモルタル供試体を製作し、強度特性の検討、色彩特性の検討、および耐久性の検討を行った。基本特性の検討では、顔料の添加がモルタルの施工性、圧縮強度、および曲げ強度に及ぼす影響について検討した。色彩特性の検討では、顔料の種類や添加率の違いがモルタルの色彩に及ぼす影響について検討するとともに、顔料以外の材料の色彩がモルタルの色彩に及ぼす影響、養生方法やモルタルの配合の違いが色彩に及ぼす影響についても検討した。耐久性の検討

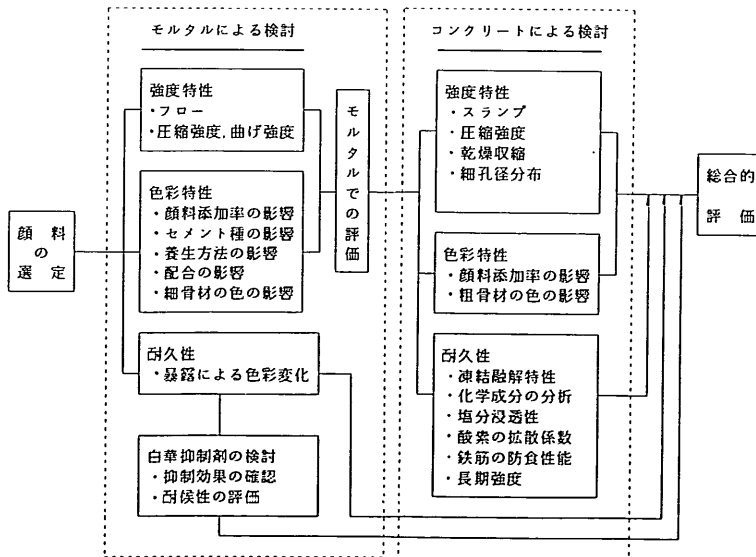


図-1 研究のフロー

では、様々な海洋環境下にモルタル供試体を暴露し、海水の作用がモルタルの色彩にどの程度の影響を及ぼすかについて検討した。

また、海洋環境下での暴露試験の結果、海水の作用がモルタルの色彩に及ぼす影響は殆ど認められなかったものの、気中部に暴露を行ったモルタルに白華現象（白華現象については付録－１を参照）による色彩の変化が認められた。そこで、その対策として、白華抑制剤の使用を考え、市販の２種類の白華抑制剤について、その抑制効果をカラーモルタル供試体で検討した。

次に、以上のようにして得られたカラーモルタル供試体の結果を踏まえて、さらに顔料の種類や添加率を絞り込み、カラーコンクリート供試体を製作して、コンクリートとしての強度特性の検討、色彩特性の検討、および耐久性の検討を行った。強度特性の検討では、顔料の添加がコンクリートの施工性や圧縮強度に及ぼす影響について検討するとともに、カラーコンクリートの乾燥収縮特性や空隙特性についても検討を行った。色彩特性の検討では、顔料の種類や添加率の違い、粗骨材の色彩の違い等がコンクリートの色彩にどの程度の影響を及ぼすかについて検討した。また、耐久性の検討では、凍結融解特性や酸素の拡散性状を検討するとともに、海洋環境下での暴露試験および促進試験を実施して、塩分の浸透性状、コンクリート内部の鉄筋の腐食に対する防食性能、コンクリート自体の耐海水性等の検討を行った。

最後に、これらの結果を総合して、海洋環境下のコンクリートへのカラーコンクリートの適用性について考察した。

2. 色彩の表示方法

物体表面の色彩を定量的に評価するためには、色彩を数値で表す必要がある。本研究では、モルタルおよびコンクリートの表面色の表示方法として、JIS Z8701「XYZ 表色系による色の表示方法」を用いた。また、２つ以上の物体の表面色間の差を表す方法として、JIS Z8730「色差表示方法」中の $L^*a^*b^*$ 表色系による方法を用いた。

2. 1 XYZ 表色系による色の表示

XYZ 表色系による色の表示例を表－１に示す。ある標準の光を測色する物体に当てると物体表面の色によって、ある波長のスペクトルはよく反射したり、またある波長のスペクトルはまったく反射しなかったりする。本表示方法はその性質を利用したものであり、すべての色を表－１に示されるような Y, x, y の３成分で表すこと

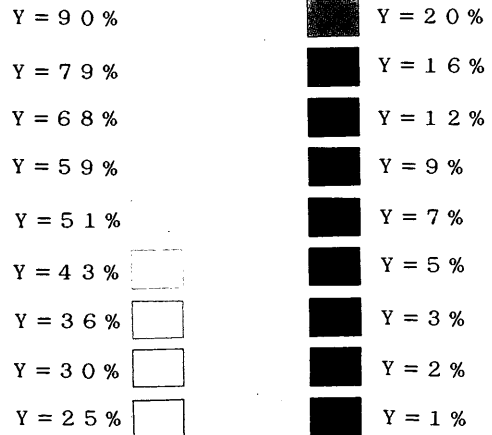
表－１ XYZ表色系によるの表示例

記号	数値
Y	78.8 (%)
x	0.322
y	0.317

が出来る。なお、 Yxy 表示と XYZ 表示とは式(1)のような関係があり、通常座標として表しやすい Yxy 表示が用いられている。

$$\left. \begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z) \\ y &= Y / (X + Y + Z) \end{aligned} \right\} \quad \text{－式(1)}$$

Y は、反射率と呼び、％で示し、目で見た場合の明るさの感じを示すものである。これは、赤、緑といった色の種類に関係なく、写真－１に示されるような明るさのみを表す指標である。



無彩色の反射率 Y

写真－１ 無彩色の反射率

一方、 x および y は、あわせて色度と呼び、図－２に示される斜吊り鐘状の座標で表し、色相と色のあざやかさの両方を示すものである。図－２中の座標の中央($x=0.3101, y=0.3163$)には●がある。これは、測色するために物体に当てた、ある標準の光の位置を示しており、

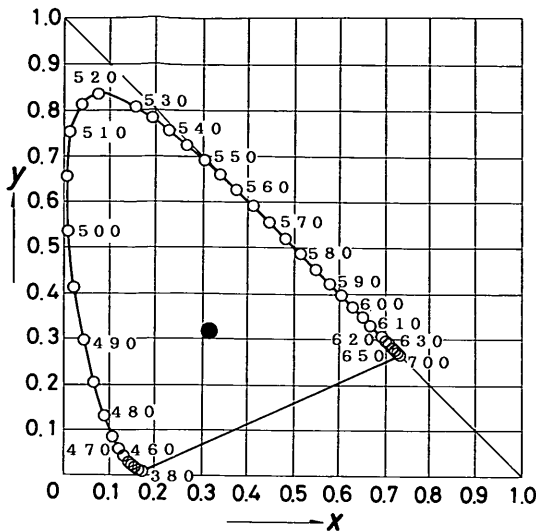


図-2 色度図

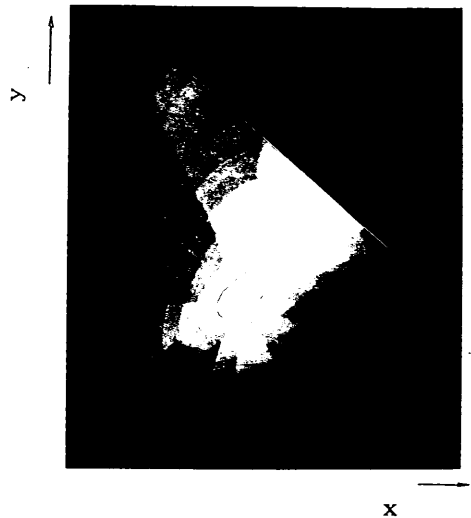
言い替えば白、灰色、黒の無彩色軸 (Y 軸) が図面に垂直に立つ位置である。一方、斜吊り鐘のわん曲部分をスペクトル軌跡と呼ぶ。軌跡上に380~700と書かれた数字はスペクトルの波長をナノメートル (10^{-9}m) 単位で示したものであり、それぞれの波長と色にはおおむね表-2に示すような関係がある。すなわち、斜吊り鐘の右端から中央頂上までは赤→黄赤→黄→緑と変化し、ついで下に落ちてくる部分は緑→青→紫と変化する。

表-2 スペクトルの波長と色との関係

波長(ナノメートル)	色	波長(ナノメートル)	色
700~610	赤	570~500	緑
610~590	黄赤	500~450	青
590~570	黄	450~400	紫

また、●の位置 (無彩色軸の立つ位置) から周辺のスペクトル軌跡に向かえば向かうほど、それは徐々にあざやかな色になることを意味し、その端末であるスペクトル軌跡上は、光を分解した時にもうそれ以上は分解できない単色光であることを意味している。すなわち、●の位置を中心として、放射状に色相が広がり、●の位置からの距離が色のあざやかさを示すということである。

以上のような色度図を実際に色分けして表すと写真-2のように表される (なお、写真の色にはあざやかさに限界があり、スペクトル軌跡周辺の部分は実際の色とは



色度図

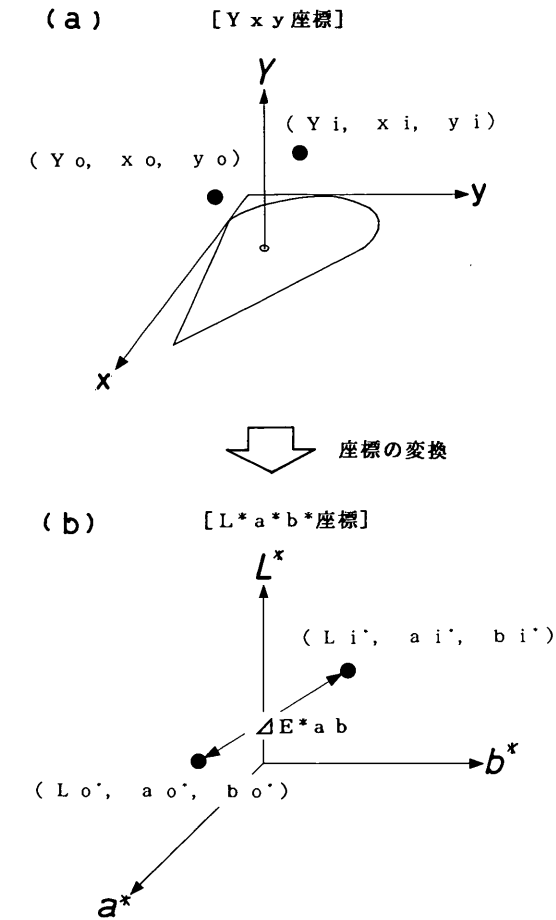
写真-2 色度図

若干異なっている)。また、ここでは XYZ 表色系による色の表示方法の概略を述べたが、その算出方法については付録-2に示す。

2. 2 $L^*a^*b^*$ 表色系による色差の表示

本研究では、2つ以上の物体の表面色間の差を求める場合、物体の表面色を上述の XYZ 表色系による方法で求めた後、それらの値から色差 ΔE^*ab を求め、その大小で評価した。

これについて図-3を用いて説明する。図-3中の (a) は色の比較を行う2つの物体の表面色を Yxy 座標で示したものである。ここで、 Y_0, x_0, y_0 が基準となる物体の表面色であり、 Y_i, x_i, y_i が比較する物体の表面色である。ところが、これらの Y, x, y のそれぞれの関係は視感に対して等間隔ではない。したがって、色差を求めるためにはそれぞれの値が視感に対して等間隔となるような色空間に直す必要がある。これを直した座標が図中の (b) に示される $L^*a^*b^*$ 座標である。図中の L_0^*, a_0^*, b_0^* が基準となる物体の L^*, a^*, b^* であり、 L_i^*, a_i^*, b_i^* が比較する物体の L^*, a^*, b^* である。 Yxy 座標と $L^*a^*b^*$ 座標との関係を式で表せば式(2)のよ



図ー3 色差の概念図

式(3)の通りとなる。したがって、 ΔE^*ab が大きくなるほど、 $L^*a^*b^*$ 座標中の2点間の距離が大きくなり、色彩の差がより大きいということになる。

$$\Delta E^*ab = \{(L_i^* - L_o^*)^2 + (a_i^* - a_o^*)^2 + (b_i^* - b_o^*)^2\}^{1/2} \quad \text{—式(3)}$$

ここに、 ΔE^*ab ：色差

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. 顔料の概要

3. 1 顔料の選定

顔料とは、水、油、アルコール等の溶液に対して不溶性の有色粉末のことである。この顔料を大別すると、無機顔料と有機顔料とに分けられる。無機顔料は金属化合物を主成分とする鉱物系の顔料であり、また有機顔料は水溶性の染料を不溶性の構造に合成したり、染料を無色の顔料に染め付けたりして作られる染料系の顔料である。

一方、海洋環境下におけるコンクリートの顔料として使用するためには、顔料には表ー3に示すような特性が要求される。すなわち、1)練りませ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)着色力が高いこと、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)の耐候性に問題があり、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、その他の特性は優れている。したがって、海洋環境下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。

表ー3 顔料の性質の評価

顔料の種類	海洋コンクリートの顔料として使用する場合に必要な性質				
	分散性	耐アルカリ性	耐候性・耐海水性	着色力	経済性
有機顔料	○	○	×	○	△
無機顔料	○	○	○	△	○

○：良好 △：やや劣る ×：問題あり

本試験では、無機顔料において、使用実績が比較的多く、特に上記の特性が優れていると考えられる酸化鉄顔料、カーボンブラック顔料、酸化クロム顔料、および酸化コバルトと酸化アルミニウムとの合成顔料を使用して、検討することとした。

3. 2 顔料の特性

それらの顔料の名称を A～G とし、それらの基本的な特性を表－4 に示す。表に示されるように、酸化鉄顔料は、化学構造や粒径の違いによって黒色・茶色・黄色・赤色の顔料となる。またカーボンブラックは黒色の顔料であり、酸化クロムは緑色、酸化コバルトと酸化アルミニウムの合成顔料は青色の顔料である。また、顔料は、特有の粒子形状や粒径を有している。粒子形状に特徴のある顔料は、顔料 D (粒子形状は針状) と顔料 G (粒子形状は斜方晶形) である。粒径に特徴のある顔料は、顔料 B (粒径は $0.02\mu\text{m}$) であり、その他の球状の顔料 (粒径はおおむね $0.1\sim0.3\mu\text{m}$ 程度) に比較して著しく小さい粒径の顔料である。吸油量とは顔料粒子の周りに吸着する油の量を表すもの (測定法は DIN53199 に従う) であるが、粒子形状に特徴のある顔料および粒径の小さい顔料ほど比表面積が大きくなり、その結果吸油量も大きくなっている。顔料 B の吸油量は不明であるが、粒径が著しく小さいことから、その吸油量は大きいことが予想される。

4. 供試体の概要

4. 1 カラーモルタル供試体

(1) 使用材料

カラーモルタル供試体の使用材料を以下に示す。

1) セメント

セメントとして普通ポルトランドセメント及び白色ポルトランドセメントを使用した。その試験成績を表－5 に示す。表に示される通り、白色ポルトランドセメント

は、普通ポルトランドセメントに比較して若干早強性のあるセメントである。

2) 細骨材

細骨材として表－6 に示す 6 種類の細骨材を使用した。そのうち、富士川産川砂を除いた 5 種類の細骨材は、細骨材の色彩がモルタルの色彩に及ぼす影響を検討するための供試体に使用したものであり、その他のモルタル供試体には富士川産川砂を使用した。

3) 顔料

顔料として表－4 に示した 7 種類の顔料を使用した。

(2) 供試体の種類

カラーモルタル供試体の一覧を表－7 に示す。

表－6 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 ル	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 系
	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	南巨摩産碎石	2.66	6.43	1.29	黄、緑、黒の混合色系
	b	岩瀬産碎石	2.65	6.61	0.60	黒 色 系
	c	葛生産碎石	2.69	6.39	0.50	白 色 系

粗骨材最大寸法は20mmである。

表－4 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_3O_4)	カーボン ブラック	酸化鉄 (Fe_2O_3)	酸化鉄 (FeOOH)	酸化鉄 (Fe_2O_3)	酸化クロム (Cr_2O_3)	$\text{CoO}/\text{Al}_2\text{O}_3$
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

表－5 セメントの試験成績

No	セメント種類	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	白色ポルトランド	3.06	3720	27.8	2-46	4-01	88	193	272	404
N	普通ポルトランド	3.16	3250	27.6	2-29	3-29	—	162	262	416

表一 7 カラーモルタル供試体の一覧

No.	供試体名	顔料種 ^{a)}	添加率	セメント種 ^{b)}	細骨材種 ^{c)}	本数	No.	供試体名	顔料種 ^{a)}	添加率	セメント種 ^{b)}	細骨材種 ^{c)}	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 ^{d)}	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 ^{d)}	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⁾: 表一4参照 ⁷⁾: 表一5参照 ⁸⁾: 表一6参照

供試体 No. 1 および供試体 No. 2 は、顔料を添加しないモルタル供試体であり、前者はセメントとして白色ポルトランドセメントを、後者は普通ポルトランドセメントを用いたものである。両供試体とも水セメント比は65%、フローは220±5とした。

供試体 No. 3～No. 26は、顔料の種類および添加率を変化させた供試体である。顔料の添加率は、セメント重量に対して2, 4, 8%の3水準とした。これらの供試体の水セメント比は65%、フローは220±5とした。

供試体 No. 27～No. 37は細骨材の種類を変えた供試体である。これらの供試体の顔料には、表一4中の顔料D(黄色)を添加率4%で使用し、水セメント比は65%、フローは220±5とした。

供試体 No. 38～No. 41は、水セメント比を変化させた供試体であり、供試体 No. 38およびNo. 40の水セメント比は60%とし、供試体 No. 39およびNo. 41の水セメント比は55%とした。フローはいずれも220±5とした。

供試体 No. 42およびNo. 43は、セメント細骨材比を変化させた供試体であり、前者のセメント細骨材比は1/3.2(フローは184)とし、後者のセメント細骨材比は1/2(フローは242)とした。水セメント比はいずれも65%とした。

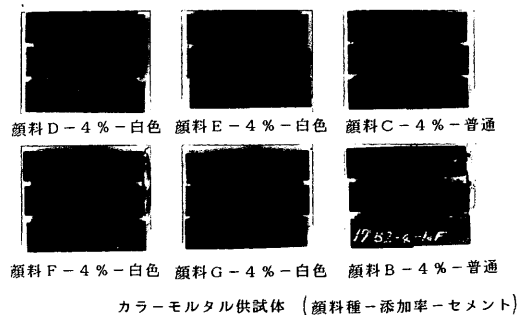
(3)供試体の形状および製作方法

供試体は、4×4×16cmの角柱供試体とした。その製

作は、JIS R5201「セメントの物理試験方法」に準じて行った。

型枠脱型後の供試体は、材令28日まで標準養生を行った。ただし、供試体 No. 13およびNo. 16のうちの各々3本は、養生条件の違いが色彩に及ぼす影響について検討するため、脱型後の供試体の養生は気中養生とした。

以上のようにして製作されたカラーモルタル供試体の一部を写真一3に示す。



写真一3 カラーモルタル供試体

4. 2 カラーコンクリート供試体

(1) 使用材料

カラーコンクリート供試体の使用材料を以下に示す。

1) セメント

セメントとして、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使用した。その試験成績は表-5に示される通りである。

2) 細骨材および粗骨材

使用した細骨材および粗骨材は、表-6に示される通りである。細骨材には富士川産川砂を用い、粗骨材には3種類の砕石を用いた。粗骨材のうち、岩瀬産砕石および葛生産砕石は、粗骨材の色彩がコンクリートの色彩に及ぼす影響を検討するための供試体を使用したものであり、その他のコンクリート供試体には南巨摩産砕石を使用した。

3) 顔料

顔料として、表-4中のA～Fの6種類の顔料を使用した。

4) 混和剤

空気量の調整を目的として、AE 剤ヴィンソル(山宗化学株式会社製)を使用した。

5) 鉄筋

コンクリートの内部に埋め込む鉄筋として、 $\phi 9 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ のみがき棒鋼を使用した。

(2) 供試体の配合の種類

カラーコンクリート供試体の配合の種類を表-8に示す。

供試体 No. 1～No. 12は、顔料の種類および添加率を変化させた供試体である。カラーモルタル供試体では表-4中の顔料A～Gを使用した¹⁾が、顔料Gは経済性に問題があることから、カラーコンクリート供試体では除いた。また、カラーモルタル供試体では、顔料の添加率を2, 4, 8%の3水準として検討したが²⁾、強度特性および色彩特性の検討結果から4%程度の添加率が妥当であると判断されたことから、カラーコンクリート供試体では顔料の添加率を2, 4%の2水準とした。供試体 No. 1～No. 12の水セメント比は60%とし、スランプは $8 \pm 1 \text{ cm}$ とした。

供試体 No. 13および供試体 No. 14は、顔料を添加しないコンクリート供試体であり、前者はセメントとして普通ポルトランドセメントを、後者は白色ポルトランドセメントを用いたものである。両供試体とも水セメント比

表-8 カラーコンクリート供試体の配合の種類

No.	供試体名	1) 顔料種	添加率 (%)	セメ ²⁾ ント種	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-4 参照 ²⁾: 表-5 参照 ³⁾: 表-6 参照

は60%とし、スランプは 8 ± 1 cmとした。

供試体 No.15および No.16は粗骨材の種類を変えた供試体である。これらの供試体の顔料には、表-4中の顔料D(黄色)を添加率4%で使用し、水セメント比は60%、スランプは 8 ± 1 cmとした。

(3)供試体の形状および製作方法

製作した供試体は、 $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体(圧縮強度試験用供試体)、 $10 \times 10 \times 10$ cmの角柱供試体(色彩測定用供試体)、 $10 \times 10 \times 40$ cm角柱供試体(乾燥収縮試験用供試体および凍結融解試験用供試体)、および $15 \times 15 \times 80$ cmの角柱供試体(腐食試験用鉄筋コンクリート供試体)である。それぞれの製作数量は表-9に示される通りである。また、腐食試験用鉄筋コンクリート供試体の断面図は図-4に示される通りであり、鉄筋のかぶり厚は5 cmとした。

供試体の製作は、JIS A1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準じて行った。

型枠脱型後の供試体は、材令28日まで標準養生を行った。ただし、乾燥収縮試験用供試体は、JIS A1129「モルタル及びコンクリートの長さ試験方法」に準拠した養生を行った。

以上のように製作したカラーコンクリート供試体の一部を写真-4に示す。

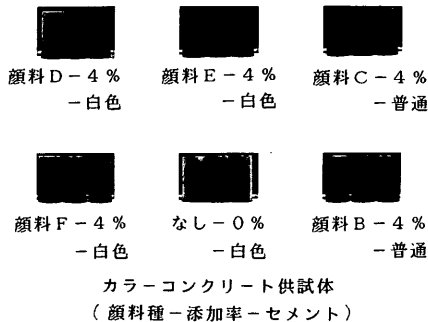


写真-4 カラーコンクリート供試体

4. 3 白華試験用供試体

白華抑制剤の効果を確認するため、市販の2種類の白華抑制剤を塗布したカラーモルタル供試体を製作した。

(1)使用材料

その使用材料を以下に示す。

1) セメント

セメントとして普通ポルトランドセメントを使用した。

表-9 カラーコンクリート供試体の形状の種類および数量

No.	供試体名	供試体の形状の種類および数量				
		圧縮強度用 ($\phi 10 \times 20$)	色彩測定用 ($10 \times 10 \times 10$)	乾燥収縮用 ($10 \times 10 \times 40$)	凍結融解用 ($10 \times 10 \times 40$)	腐食試験用 ($15 \times 15 \times 80$)
1	B1-2-N	6	4	0	2	1
2	B1-4-Na	6	4	2	0	0
3	B2-2-Na	6	4	0	0	1
4	B2-4-Na	6	4	2	0	0
5	BR-2-Na	6	4	0	0	1
6	BR-4-Na	6	4	0	0	0
7	Y-2-Wa	6	4	2	2	0
8	Y-4-Wa	6	4	2	2	0
9	R-2-Wa	6	4	0	0	1
10	R-4-Wa	6	4	2	2	0
11	G-2-Wa	6	4	0	0	1
12	G-4-Wa	6	4	2	2	0
13	Na	6	4	0	0	1
14	Wa	6	4	2	2	1
15	Y-4-Wb	6	4	0	0	0
16	Y-4-Wc	6	4	0	0	0

() 内は供試体形状を示す。〈単位: cm〉

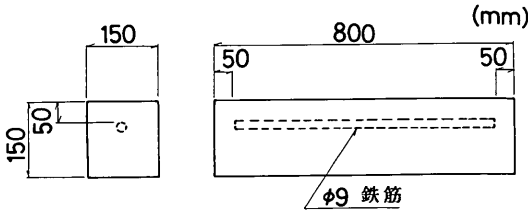


図-4 腐食試験用鉄筋コンクリート供試体の断面図

その試験成績は表-5に示される通りである。

2) 細骨材

細骨材として4号珪砂を使用した。その物理試験結果を表-10に示す。

表-10 細骨材の物理試験結果(白華試験用供試体)

名 称	表乾比重	吸水率(%)
4号珪砂	2.53	2.44

3) 顔料

顔料として表-4中の顔料C(茶色)を使用した。白

華現象は、モルタル表面の反射率が高くなる現象であることから、その現象が顕著に観察できるよう、反射率の低い茶色の顔料を使用することとした。

4) 白華抑制剤

白華抑制剤として、アルキル変性シリコーンを主成分とするもの、およびアクリル樹脂エマルジョンを主成分とするものの2種類の抑制剤を使用した。それらの白華抑制の原理は、表-11に示される通りである。

表-11 白華抑制剤の種類

Type	主 成 分	白華抑制の原理
A	アルキル変性 シリコーン	モルタル表面に撥水性をもたせ、毛細管現象による水の浸透を防ぐ
B	アクリル樹脂 エマルジョン	モルタル表面を被覆することにより、炭酸ガス・水の接触を防ぐ

(2) 供試体の種類および製作方法

製作した供試体の一覧を表-12に示す。白華抑制剤を塗布する前の供試体はすべて同一配合のカラーモルタル供試体であり、その水セメント比は65%とし、顔料添加率は4%とした。

供試体 No. 1 は白華抑制剤を使用しない比較用のカラーモルタル供試体である。

供試体 No. 2 および No. 3 は白華抑制剤 A を塗布した供試体である。供試体 No. 2 は、白華抑制剤の塗布方法として型枠脱型後24時間炉乾燥(40℃)した後吹き付け塗布(塗布量は200g/m²とした)を行ったものであり、また、供試体 No. 3 は、型枠脱型後すぐに同量の吹き付け塗布を行ったものである。

供試体 No. 4 および No. 5 は白華抑制剤 B を塗布した供試体である。供試体 No. 4 は、白華抑制剤の塗布方法として、型枠脱型直後に抑制剤中に5分間浸漬したものであり、また、供試体 No. 5 は、型枠脱型直後に抑制

剤を吹き付け塗布した(塗布量は275ml/m²とした)ものである。

供試体の養生は、材令3日までは気中養生、その後材令7日までは標準養生とした。

供試体は4×4×16cmの角柱供試体とし、白華促進試験用供試体として各配合毎に1体ずつ、屋外暴露試験用供試体として供試体 No. 1, 2, 4 について2体ずつ製作した。

5. 試験方法

5. 1 カラーモルタル供試体

(1) 曲げ強度試験および圧縮強度試験

カラーモルタル供試体(4×4×16cm)の曲げ強度試験および圧縮強度試験は、JIS R5201「セメントの物理試験方法」に準拠して行った。試験は材令28日において実施した。

(2) 色彩の測定

カラーモルタル供試体表面の色彩の測定は材令28日で行った。測定箇所は1供試体につき2箇所(供試体の側面部)とした。測定にはハンディカラーテスター H-CT (スガ試験機株式会社製)を使用した。

(3) 海洋環境下での暴露による色彩変化の測定

海洋環境下でのカラーモルタル供試体表面の色彩変化を測定するため、材令28日より暴露を開始した。暴露した環境は、気中部、飛沫部、海水循環水槽¹⁾内の感潮部、および海中部とし、比較用として標準養生も行った。

その環境を図-5に示す。気中部は、海水循環水槽付近の陸上部であり、潮風のあたる環境である。飛沫部は、1日に2回、3時間ずつ海水の噴水を浴びる環境であり、波しぶきを浴びる海洋環境を模擬したものである。感潮部は、海水循環水槽内の潮汐変化を受ける環境であり、実際の海洋環境では水位の変化により気中部となったり、海中部となったりする環境である。また、海中部は、常時海水循環水槽内の海水中に浸漬した環境である。

暴露は約15ヶ月間行い、その間、定期的に色彩の測定

表-12 白華試験用供試体の一覧

No.	白 華 抑制剤	抑 制 剤 の 塗 布 方 法	白華促進 試 験	屋外暴露 試 験
1	な し	—	2 体	2 体
2	A	脱型後24h炉乾燥の後、吹き付け	2 体	2 体
3	A	脱型直後、吹き付け	2 体	—
4	B	脱型直後、抑制剤中に浸漬	2 体	2 体
5	B	脱型直後、吹き付け	2 体	—

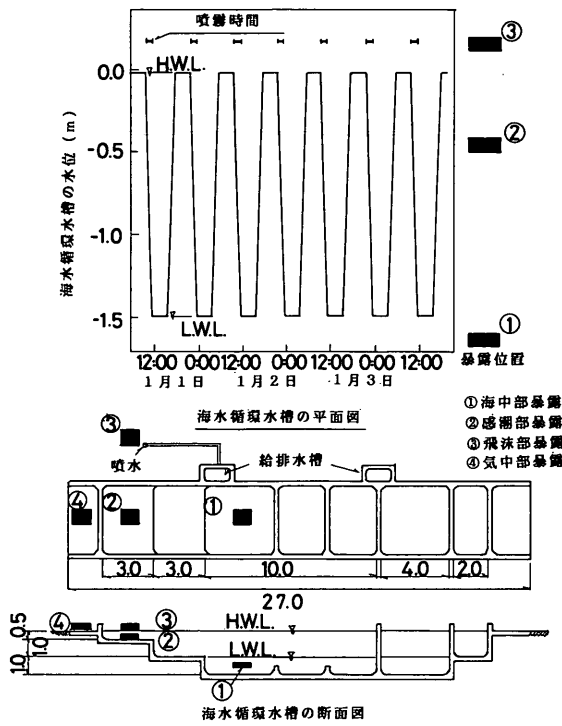


図-5 カラーコンクリート供試体の暴露環境

を行い、暴露前の色彩に対する色差を求めた。色彩の測定方法は(2)と同様である。ただし、飛沫部、感潮部、および海中部に暴露した供試体の色彩は、測定面を水洗いしてから測定した。

5.2 カラーコンクリート供試体

(1)圧縮強度試験

カラーコンクリート供試体(φ10×20cm)の圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。試験は材令28日において実施した。

(2)乾燥収縮量の測定

カラーコンクリートの乾燥収縮量の測定には、10×10×40cmのカラーコンクリート供試体を用いた。測定は、JIS A 1129「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に準拠して行った。測長方法には、コンタクトゲージ法を用いた。試験は材令7日から開始し、約1年間実施した。

(3)細孔径分布の測定

カラーコンクリートの細孔特性を検討するため、材令11カ月まで標準養生を行ったカラーコンクリート供試体

を用いて細孔径分布を測定した。細孔径分布の測定には水銀圧入式ポロシメーターを用い、細孔半径75～750000オングストローム間の細孔量および細孔量割合を測定した。

(4)色彩の測定

カラーコンクリート供試体表面の色彩の測定は材令28日に行った。測定箇所は1供試体につき4箇所(供試体の側面部)とした。測定にはハンディカラーテスター H-CT (スガ試験機株式会社製)を使用した。

(5)凍結融解試験

カラーコンクリートの凍結融解試験には、JIS 原案 A 法 (水中凍結融解試験方法)を用いた。試験は材令28日より行い、凍結融解300サイクルまで行った。その間30サイクル毎に供試体の動弾性係数の測定を行った。

(6)酸素拡散係数の測定

材令11カ月まで標準養生を行った10×10×10cmの供試体より10×10×4cmの試験体2体を切り出し、酸素の拡散係数(1気圧のもとで、濃度差によってコンクリート中を透過する気体状態の酸素の拡散速度)を測定した。試験は、酸素の拡散試験方法(案)²⁾に準拠して行った。試験装置は、図-6に示したようなものであり、試験体の両側に拡散セルを取り付け、拡散セル内に等圧力(1気圧)の窒素ガス、および酸素ガスを継続して流し、試験体を通して窒素ガス中に拡散した酸素の濃度を微量酸素分析計で測定するものである。なお、試験は乾燥状態の試験体で実施した。

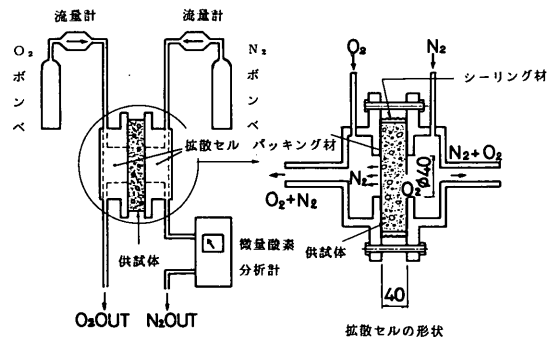


図-6 酸素拡散試験装置の概略

(7)海洋環境下での暴露試験

カラーコンクリートの海洋環境下での暴露試験は、材令28日より10カ月間実施した。暴露環境は、気中部、飛沫部、海水循環水槽内の感潮部、および海中部とし、比較用として標準養生も行った。それらの環境は、モルタ

ルの場合と同様である（図－５参照）。

暴露試験中および暴露試験後に実施した測定項目は、
 １）色彩変化、２）可溶性塩化物イオン量、３）コンクリート中の成分分析、４）圧縮強度である。それぞれの試験項目についてその方法を示す。

１）色彩変化

暴露試験の期間中、定期的にカラーコンクリート表面の色彩を測定し、暴露前の色彩に対する色差を求めた。測定方法は(4)と同様である。ただし、飛沫部、海水循環水槽内の感潮部、および海中部に暴露した供試体の色彩は、供試体表面をあらかじめ水洗いして汚れを取った状態で測定した。

２）可溶性塩化物イオン量

可溶性塩化物イオン量は、飛沫部および感潮部に約10カ月間暴露を行ったカラーコンクリート供試体（10×10×10cm）について測定した。試料数は、配合の種類毎に1試料とし、試料は、供試体表面から1.5～2.5cm（平均2 cm）の位置より採取した。塩化物イオンの抽出方法としては、コンクリート粉末試料を20℃で24時間蒸留水中に静置して抽出する方法を用い、また、その定量方法としては、電位差滴定法を用いた。測定結果は、カラーコンクリートに対する塩化物イオン重量百分率で表示した。

３）コンクリート中の成分分析

暴露試験を実施したカラーコンクリート中に生成された成分を確認するため、海水循環水槽の感潮部に約10カ月間暴露を行ったカラーコンクリート供試体（ ϕ 10×20 cm）よりモルタル試料を採取し、X線回折を行った。モルタル試料の採取位置は、供試体の高さ方向の中央位置で、表面からの距離1 cmおよび5 cmの2箇所とした。

４）圧縮強度

海水循環水槽の感潮部に約10カ月間暴露を行ったカラーコンクリート供試体について圧縮強度を測定し、材令28日における圧縮強度との比較を行った。試験は、JIS-A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。

(8)腐食促進試験

カラーコンクリートの内部に鉄筋を埋め込んだRC供試体について、腐食促進試験を実施した。促進試験は、60℃海水中3日間、気中乾燥4日間の1週間を1サイクルとする試験とし、材令3カ月より12サイクル実施した。

促進試験終了後実施した試験項目は、１）鉄筋の発錆面積率、２）可溶性塩化物イオン量である。それらの試験方法を次に示す。

１）鉄筋の発錆面積率

促進試験終了後のRC供試体を破碎して鉄筋を取り出し、発錆部分をトレースして、プランイメーターによって発錆面積を測定した。測定結果より鉄筋の表面積に対する発錆面積率を求めた。

２）可溶性塩化物イオン量

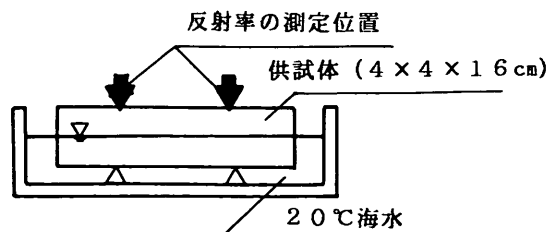
促進試験終了後のRC供試体表面から 2 ± 0.5 cm、および 4 ± 0.5 cmの位置より試料を採取し、可溶性塩化物イオン量を測定した。試料の抽出方法および定量方法には(7)の２）で示した方法と同じ方法を使用した。また、測定結果は、カラーコンクリートに対する塩化物イオン重量百分率で表示した。

５．３ 白華抑制剤の効果に関する試験

試験は２種類実施した。すなわち、(1)白華抑制剤の抑制効果を確認するための白華促進試験、(2)白華抑制剤の耐候性を確認するための屋外暴露試験である。

(1)白華促進試験

通常の屋内や屋外での環境では白華現象が短期間にうまく再現できないことから、白華促進試験を用いることとした。そして、その方法には半水浸法³⁾を用いた。この方法は、図－７に示されるように、供試体の半分を水中に浸漬し、供試体の気中部分に白華を発生させる方法である。一般に白華現象は、セメント水和物中の毛細管空隙を伝って供試体表面に流れ出た浮遊の水酸化カルシウムが³⁾大気中の炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムとなる現象である。半水浸法は、供試体上面への水の拡散を大きくし、水酸化カルシウムを供試体表面に多量に析出させることにより、白華の促進を行う方法である。なお、本研究では海洋環境下のコンクリートを対象としていることから、浸漬水には海水を使用した。



図－７ 白華促進試験状況

このような方法で材令7日より促進試験を開始し、定期的に供試体上面の色彩を測定した。色彩の測定にはハンディカラーテスター H-CT（スガ試験機株式会社製）

を使用した。なお、白華現象は付録－1に示すように、コンクリート表面の色が白っぽくなる現象である。したがって、白華の程度については、反射率で評価することとした。

(2)屋外暴露試験

白華抑制剤の耐候性を検討するための屋外暴露試験は、材令7日より開始した。耐候性の検討は供試体表面の色彩の変化で検討することとし、定期的に供試体表面の色彩を測定した。色彩の測定にはハンディカラーテスターH-CT（スガ試験機株式会社製）を使用し、測定箇所は供試体上面の2箇所とした。また、暴露環境は、図－5中に示した気中部とした。

6. 試験結果および考察

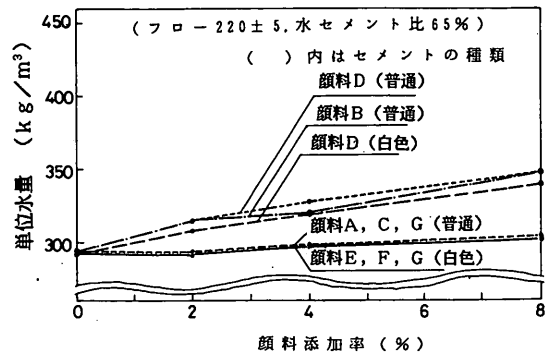
6. 1 強度特性

一般に、コンクリートの配合においては、コンクリートの強度特性を決定する水セメント比と施工性を決定するスランプとをまず選定する。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や施工性にどのような影響を及ぼすかについて把握しておく必要がある。そこでまず、所定のフローやスランプを得るために必要な単位水量が顔料の添加によってどの程度変化するのかについて検討し、次に水セメント比およびスランプ（モルタルの場合にはフロー）を一定とした場合、顔料の添加によって、コンクリートの強度特性がどの程度変化するのかについて検討した。そのほか、カラーコンクリートの基礎的な材料特性として、乾燥収縮特性や細孔特性について検討した。

(1)顔料の添加による必要単位水量の変化

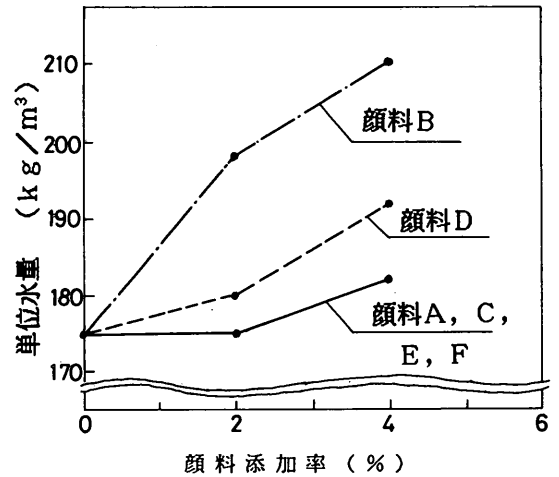
図－8は、カラーモルタル供試体において、所定のフロー（ 220 ± 5 とした）を得るために必要な単位水量が、顔料の添加によりどの程度変化するのかを示したものである。図に示されるように、必要な単位水量は、顔料の種類によって異なっていた。すなわち、顔料A, C, E, F, およびGを使用したモルタルにおいては、顔料の添加率を8%とした場合においても単位水量をこわらず増加するだけで所定のフローを得ることが出来たのに対し、顔料B, および顔料Dを使用したモルタルについては、顔料の添加率の増加とともに単位水量を増大させなければ所定のフローを得ることが出来なかった。

図－9は、カラーコンクリート供試体の場合である。カラーモルタル供試体の場合と同様に、顔料B, および顔料Dを使用したコンクリートにおいては、顔料の添加率の増加とともに単位水量を増大させなければ所定のスランプを得ることが出来なかった。顔料を添加しないコ



図－8 フロー値一定の場合での顔料の添加率と単位水量との関係

(スランプ 8 ± 1 cm, 水セメント比 60%)



図－9 スランプ一定の場合での顔料の添加率と単位水量との関係

ンクリートに対する単位水量の増加量は、顔料Bを4%添加したコンクリートで35kg, 顔料Dを4%添加したコンクリートで17kg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－4より、顔料Bにおいては、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、それらの顔料の比表面積はその他の顔料の比表面積に比較して著しく大きいことが想像される。

以上の結果をまとめると、適切な顔料を選定すれば、

通常のコンクリートの場合とほとんど変わらない配合で所定の施工性を有したカラーコンクリートを製作することが出来るといえる。

(2)モルタルおよびコンクリートの圧縮強度および曲げ強度に及ぼす顔料添加の影響

図-10は、カラーモルタル供試体の圧縮強度と顔料の添加率との関係を示したものである。すべての供試体において、顔料を2%添加すると、プレーンモルタル（顔料を添加しないモルタル）に比べて1~13%の圧縮強度の増加がみられた。圧縮強度増加の理由としては、モルタルの硬化反応の進行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（セメント粒子より細かい粒径の粉末をセメント硬化体中に混入すると若干の強度増加が起こるという効果）による影響が考えられる。

一方、ほとんどの供試体においては、顔料を8%添加しても圧縮強度の低下はみられなかったが、顔料Bを使用した供試体においては、添加率2%程度をピークとして、それ以上添加したものに圧縮強度の低下がみられた。プレーンモルタル供試体の圧縮強度に対するその低下率

は、顔料を4%添加した供試体で約5%、顔料を8%添加した供試体で約30%であった。

図-11は、カラーモルタル供試体の曲げ強度と顔料の添加率との関係を示したものである。圧縮強度と顔料の添加率との関係で得られた傾向と同様に、顔料Bを使用した供試体においては、添加率2%程度をピークとして、それ以上添加したものに曲げ強度の低下がみられた。プレーンモルタル供試体の曲げ強度に対するその低下率は、顔料を8%添加した供試体で約20%であった。

このように、顔料Bを使用した供試体には比較的小さい添加率で強度の低下がみられる原因には、次の理由が考えられる。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一様に分散せず、房状に連なって存在するといわれていることから、図-12に示すように、その他の顔料（図-12中では、顔料Aを例にとった）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、その他の顔料を使用した場合よりも小さい添加率で強度の低下が起きるものと考えられる。

次に、カラーコンクリート供試体を用い、顔料の添加

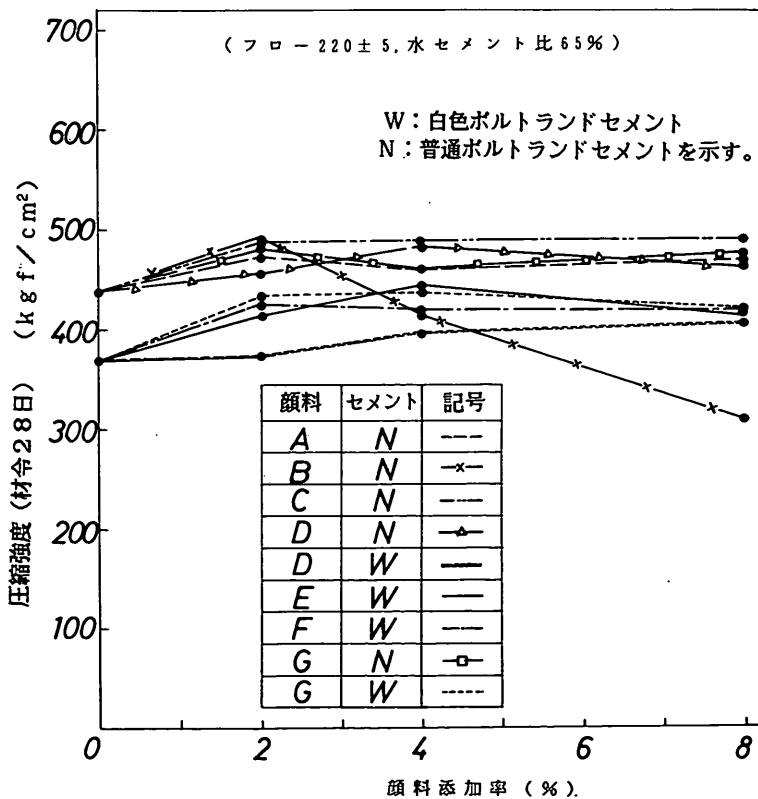
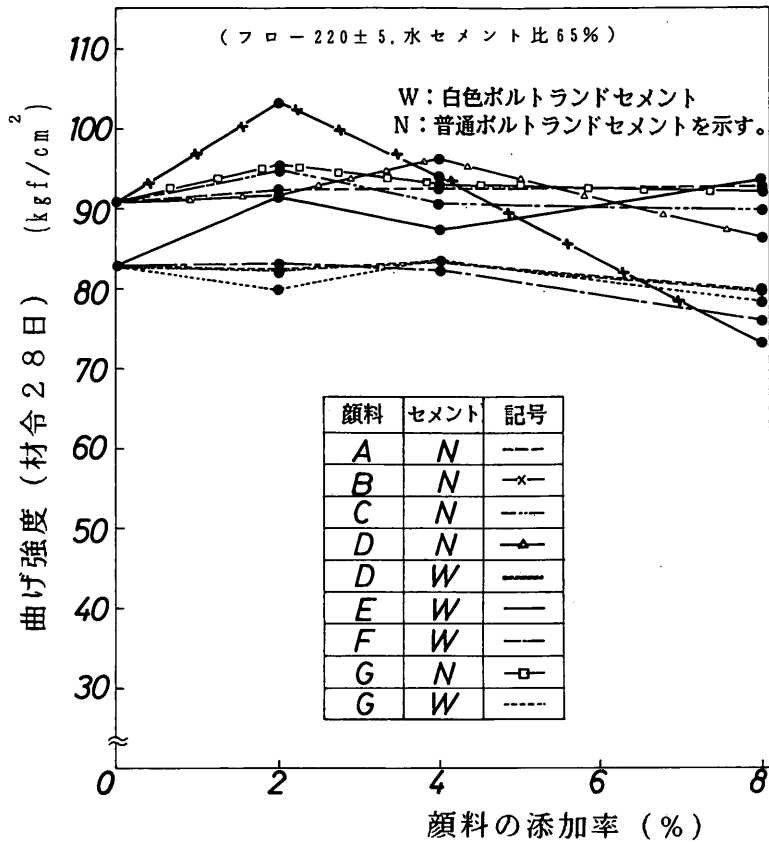
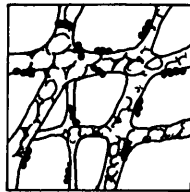


図-10 カラーモルタルの圧縮強度と顔料の添加率との関係

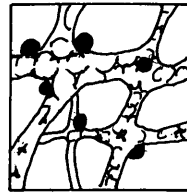


図一11 カラーモルタルの曲げ強度と顔料の添加率との関係

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

図一12 セメントゲル中での顔料粒子 (モデル図)

率を4%迄として圧縮強度と顔料の添加率との関係を検討した。図-13は、その関係を示したものである。図に示されるように、顔料A、顔料B、および顔料Eを使用した供試体で、添加率を4%とした供試体の圧縮強度が添加率を2%としたものに比較して少し低下する傾向がみられた。しかしながら、その低下量は小さく、顔料を4%添加したコンクリートの圧縮強度は、すべてプレーンコンクリート（顔料を添加しないコンクリート）の圧縮強度を上回っていた。

以上、カラーモルタル供試体およびカラーコンクリート供試体の強度試験より、適切な顔料を使用し、その添加率をセメント重量に対して4%程度以下におさえおけば、プレーンモルタルあるいはプレーンコンクリートと同等の強度特性を得られることが確認された。

(3) カラーコンクリートの乾燥収縮特性

カラーコンクリート供試体を用いて、材令7日より乾燥収縮試験を行った。図-14は、同一スランブ（8±1 cm）のカラーコンクリートにおける乾燥期間と乾燥収縮量との関係を示したものである。顔料Bを4%添加したカラーコンクリートにおいては、乾燥期間100日程度で比

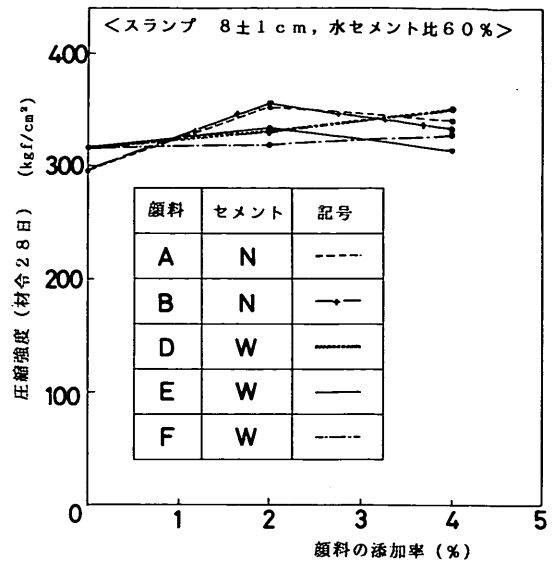


図-13 カラーコンクリートの圧縮強度と顔料の添加率との関係

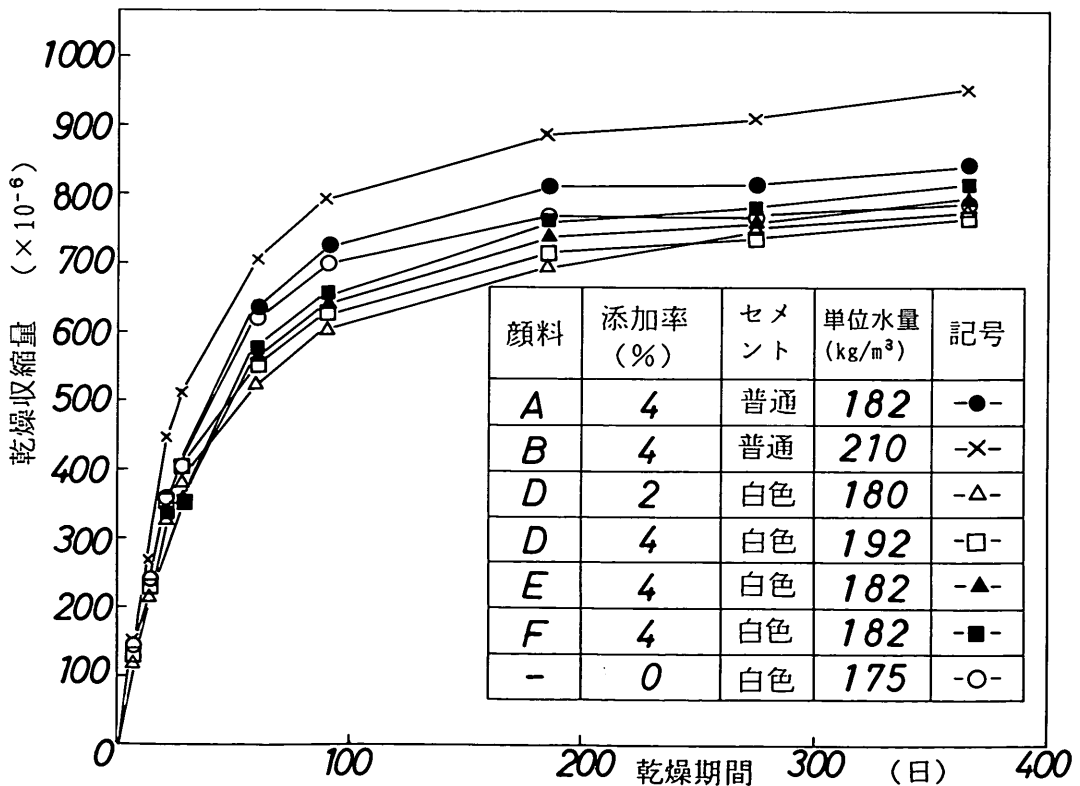


図-14 カラーコンクリートの乾燥収縮特性

較した場合にプレーンコンクリートの乾燥収縮量より 100×10^{-6} 程度大きくなった。これは単位水量が大きいためと考えられるが、同一スランプで比較した場合には、顔料 B を使用したカラーコンクリートの乾燥収縮特性は若干劣っているといえる。一方、その他の顔料を使用したカラーコンクリートにおいては、プレーンコンクリートの乾燥収縮量に比較して同等あるいは小さかったことから、乾燥収縮特性は良好であるといえる。特に、顔料 D を使用したカラーコンクリートにおいては、単位水量が大きかったにも関わらず、その乾燥収縮量は小さいという結果が得られた。

(4) カラーコンクリートの細孔特性

コンクリートの細孔特性は、コンクリートの強度や乾燥収縮、凍結融解等の材料特性に影響を与える要因の 1 つである。そこで、カラーコンクリートの細孔径分布（細孔半径 75～750000 オングストローム間の細孔容積）を測定した。その結果を図-15 に示す。

顔料を添加したコンクリートの細孔径分布とプレーンコンクリートの細孔径分布を比較すると、顔料 A においては、プレーンコンクリートに比較して全細孔量は少ないものの、その分布はほぼ同様である。顔料 B においては、380 オングストローム以下の微細な細孔が多い傾向がみられ、また逆に 6000 から 330000 オングストローム間の

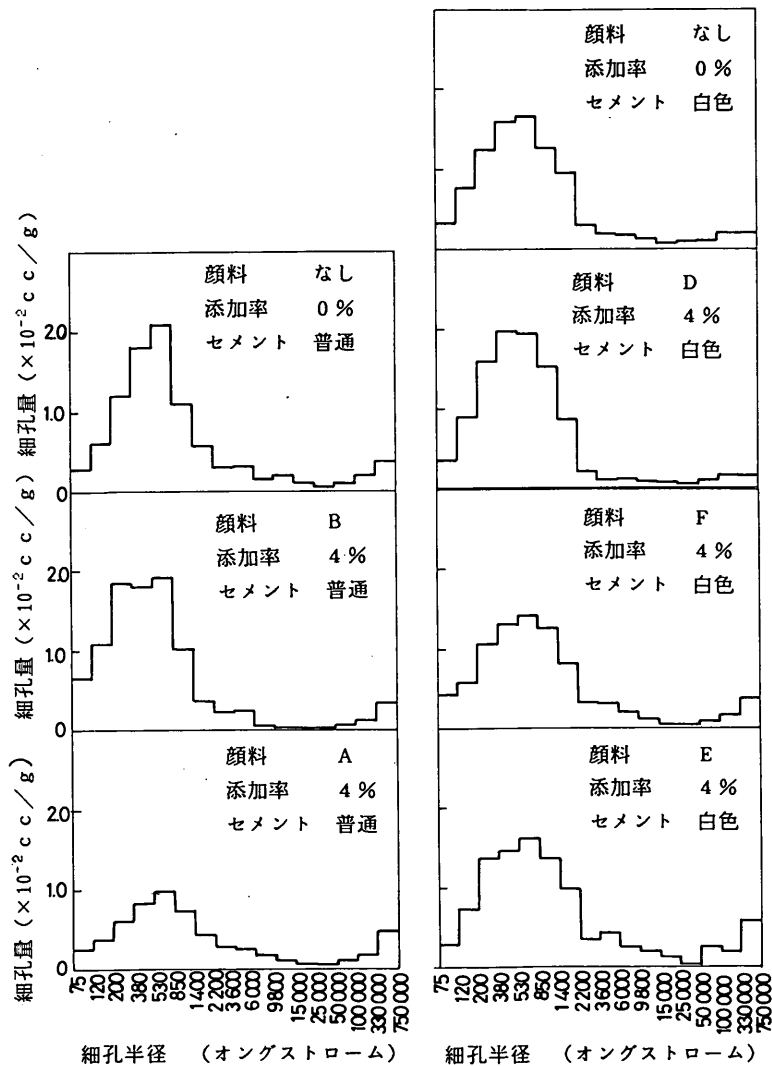


図-15 カラーコンクリートの細孔径分布

比較的大きな細孔がほとんどみられない。これは顔料粒径が200オングストロームと極めて微細なため、大きな空隙には顔料が入り込んでいることによるものと考えられる。顔料Dにおいては、530オングストローム以下の微細な細孔が多い傾向がみられる。これは顔料の形状が針状であることから微細な空隙が出来易いためと考えられる。また、顔料Eおよび顔料Fにおいては、ブレンコンクリートの細孔径分布と同様の傾向がみられる。

一般に、コンクリートの強度低下に影響を及ぼすのは20000オングストローム以下の細孔と考えられ⁹⁾、その量が増加すると強度低下を起こすと考えられている。顔料Bの場合には添加率4%程度から強度の低下がみられたが、細孔径分布の結果と対応している。

6. 2 色彩特性

(1) 顔料の添加率と色彩との関係

顔料の添加率とカラーモルタル供試体表面の反射率との関係を図-16に示す。図より、顔料D(黄色)については、顔料の添加率の増加とともに反射率が増加する(明るくなる)が、それ以外の顔料については、逆に反

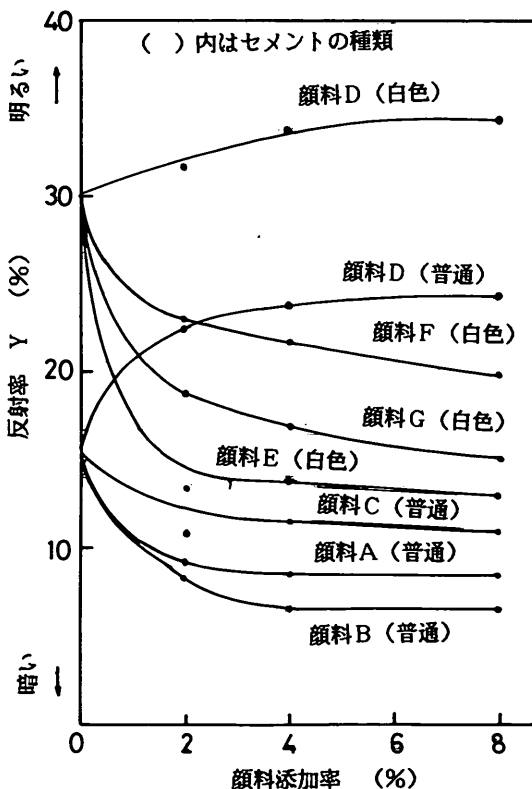


図-16 カラーモルタルの反射率と顔料の添加率との関係

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、添加率4%程度になると、それ以上添加しても反射率はほとんど変化しなくなることがわかる。反射率以外の色彩の成分である色相およびあざやかさ(xおよびy)についても同様の結果であった。なお、これらの結果はモルタル供試体における結果であるが、図-17に示されるようにコンクリート供試体においても同様の結果が得られた。

以上のような結果から、顔料の添加率とカラーコンクリートの色彩との関係をまとめると、次のようにいえる。すなわち、顔料の添加率とカラーコンクリートの色彩との関係は線形関係ではなく、添加率の増加とともに色彩の向上は小さくなる。また、添加率4%程度以上になると、色彩の向上はそれほどないことから、4%程度が妥当な添加率であると考えられる。

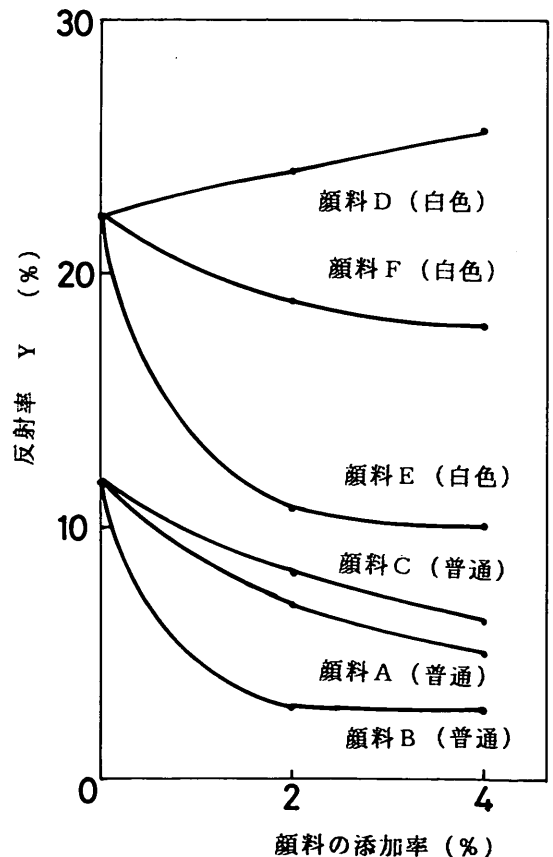


図-17 カラーコンクリートの反射率と顔料の添加率との関係

なお、図-16中で、ともに黒色の顔料である顔料Aと顔料Bを比較すると、顔料Bを使用したモルタルの反射率の方が小さかった（暗かった）ことから、顔料Bの方が着色力が高いといえる。ちなみに顔料Aを4%添加することによって得られる色彩は、顔料Bを使用すれば2%程度の添加で得られることになる。

(2)材料、施工、および配合の要因が色彩に及ぼす影響
カラー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を、また配合の要因として水セメント比ならびにセメント細骨材比を取りあげ、それらの要因が色彩にどの程度の影響を及ぼすかについて、それらの要因の影響を受け易いと考えられる顔料D（黄色）を例にとって検討した。

図-18は、種々の条件で製作したカラーモルタル供試体の色彩を材令28日において測定し、それぞれ条件の異なるカラーモルタル供試体の色彩間の色差を求めたものである。図に示されるように、色彩に最も影響を及ぼ

す要因は、セメントの種類の違い（普通ポルトランドであるか白色ポルトランドであるかの違い）であり、次に養生方法の違い（標準養生と気中養生の違い）、続いて顔料の添加率の違い、水セメント比やセメント細骨材比等の配合要因、最後に細骨材の種類の違いであった。これらの色差を実際に写真でみると、写真-5のようになり、セメントの種類の違いや養生方法の違い等によって明らかに色彩に違いがみられる。

また同様に、顔料D（黄色）を使用したカラーコンクリート供試体を用いて、粗骨材の色調の違いがカラーコンクリート供試体表面の色彩に及ぼす影響について測定した結果を図-19に示す。図に示されるように粗骨材の色調の違いによる色差の程度にはばらつきがみられるものの、添加率の違いによる色差と同等程度の色差がでる場合がある。

以上、ここ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、コンクリートの色彩化を図る際には、顔料の添

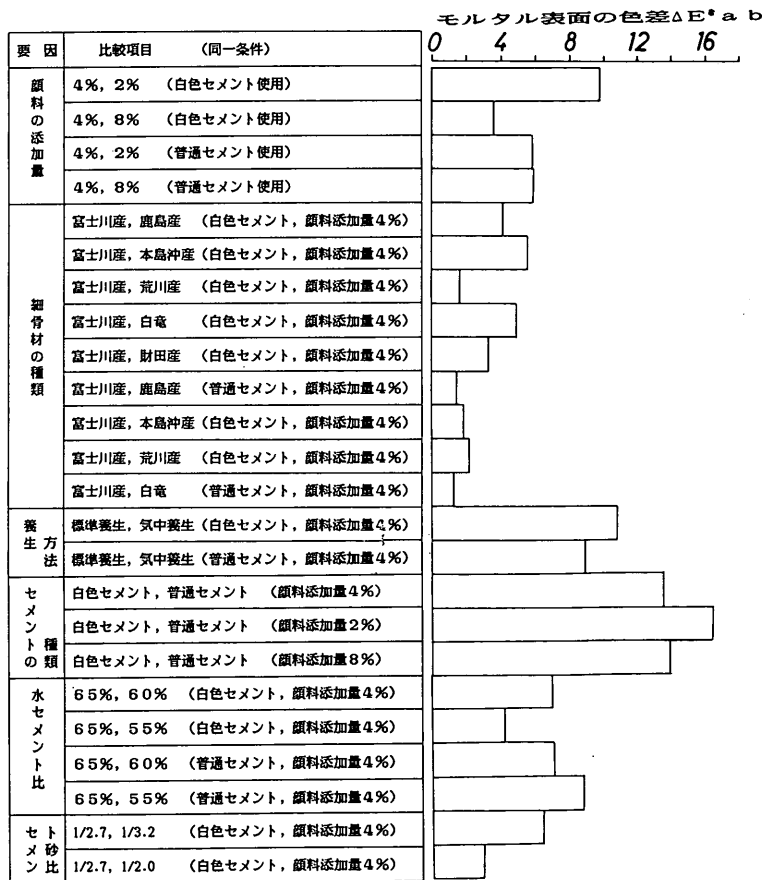


図-18 各種要因がカラーモルタルの色彩に及ぼす影響

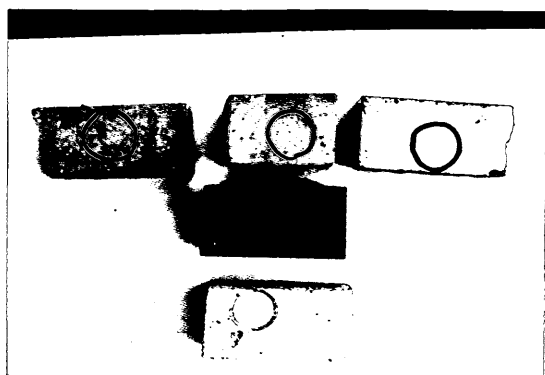


写真-5 各種の要因がカラーモルタルの色彩に及ぼす影響

加率とともにセメントの種類や養生方法等についても注意する必要がある。

6. 3 耐久性

(1) 海洋環境下への暴露による色彩変化

海洋環境下におけるコンクリートは長期間海水の作用を受けることから、海水の作用がカラーコンクリートの色彩に及ぼす影響について検討しておく必要がある。

そこで、カラーモルタル供試体を水道水中（標準養生）、気中部、飛沫部、感潮部、および海中部に16ヶ月間暴露し、色彩の変化を測定した。その結果の一例を図-20に示す。図は、顔料Dを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。

図に示されるように、気中部に暴露した供試体の色差が最も大きかった。その理由には次の2つがあるものと考えられる。すなわち、1) 濡れ色と乾燥色の差（暴露直前の色彩測定および気中部以外に暴露した供試体の色彩測定は、供試体表面が濡れた状態で行ったが、気中部に暴露した供試体の色彩測定は、供試体表面が自然乾燥した状態で行った）、2) 白華現象による反射率の増加、

である。1) は、顔料に限らず一般の粉体にも見られる現象であり、水に濡れた時の色の方が乾燥した時の色よりも濃く見える現象である。これは乾燥した粉末に投射した光はごく表層で乱反射する部分が多く、このため白味がかって見えるが、水に濡れると表層で乱反射する光が少なくなり大部分の光が深層まで達してから出てくるので、その間に選択吸収が行われて、濃い色に見えるという現象である6)。また、2) は白華が生じ、その結果反射率が増大することに起因する。

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小さかった。したがって、暴露期間16ヶ月の範囲では、海水の作用がカラーモルタルの色彩に及ぼす影響は、ほとんどないと思われる。なお、顔料D以外の顔料についても図-20で示された色差の傾向は同様であった。参考として、写真-6に約9ヶ月間それぞれの海洋環境下に暴露を行った顔料Dのカラーモルタル供試体の色彩を示す。

また、図-21は、カラーコンクリートの色彩変化の一例である。モルタルの場合と同様に、気中部に暴露したコンクリートの色彩変化は大きかったが、海水の作用を

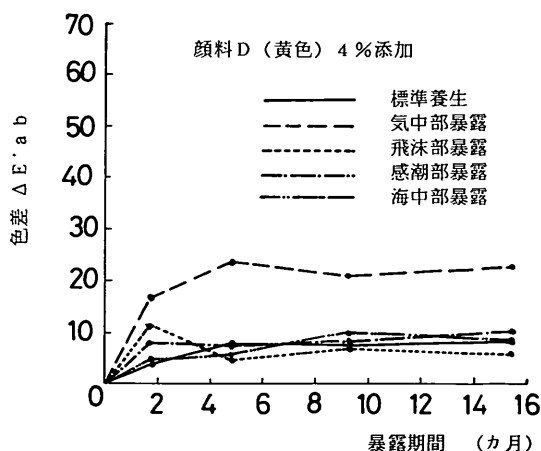


図-20 海洋環境下への暴露によるカラーモルタルの色彩変化の一例

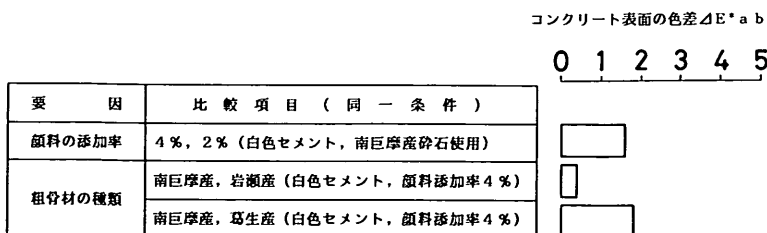
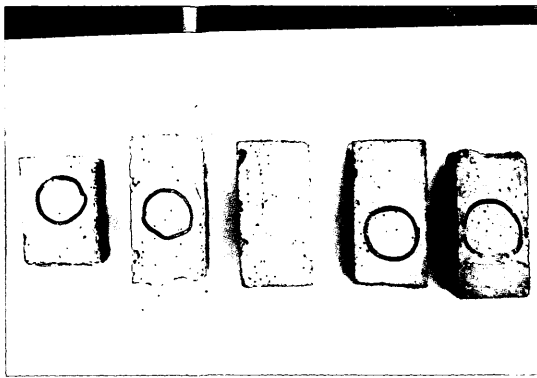
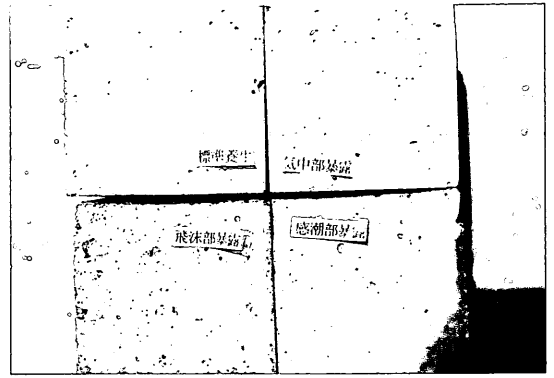


図-19 粗骨材の色調がカラーコンクリートの色彩に及ぼす影響

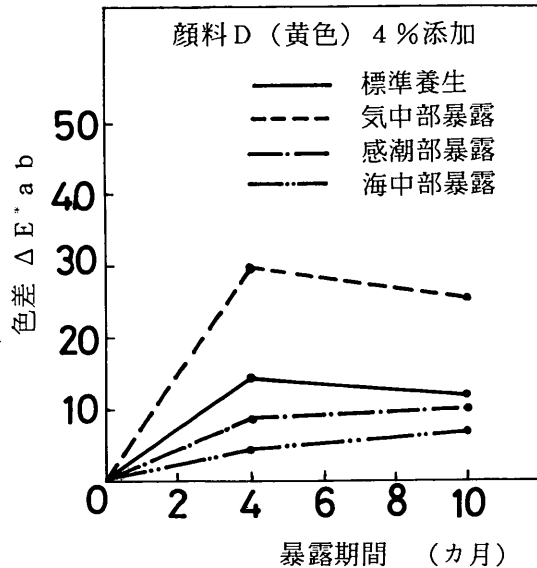


(標準) (気中) (飛沫) (感潮) (海中)

写真一六 海洋環境下に9カ月間暴露した
カラーモルタルの色彩



写真一七 海洋環境下に10カ月間暴露した
カラーコンクリートの色彩



図一21 海洋環境下への暴露によるカラーコンクリートの色彩変化の一例

受ける感潮部や海中部に暴露したコンクリートの色彩変化は小さかった。参考として、写真一七に約10カ月間それぞれの海洋環境下に暴露した顔料Dのカラーコンクリート供試体の色彩を示す。

(2)凍結融解特性

カラー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った。図一22は凍結融解サイクル数と相対動弾性係数との関係を示したものである。なお、相対動弾性係数 P_n は式(3)よ

り求めた。

$$P_n = fn^2 / fo^2 \times 100 \quad \text{—式(3)}$$

ここに、 P_n ：凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数 (%)

fn ：凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数 (H_z)

fo ：凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数 (H_z)

図中の注釈に示されるように顔料Bを使用した供試体では凍結融解30サイクルで動弾性係数の測定が出来なくなった。また顔料Dを使用した供試体では凍結融解のサイクル数の増加とともに動弾性係数が低減していった。一方、その他の顔料を使用した供試体では凍結融解300サイクルまで動弾性係数はそれ程低減しなかった。それらの結果より式(4)を用いて凍結融解に対する耐久性指数DFを求めた。

$$DF = P \times N / M \quad \text{—式(4)}$$

ここに、DF：耐久性指数

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

その結果を図一23に示す。一般に、耐久性指数DFが80%以上であればそのコンクリートは十分な耐久性を有していると評価されている。図に示されるように、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かった。したがって、それらの顔料を使用したカラーコンクリートにおいては凍結融解に対する十分な耐

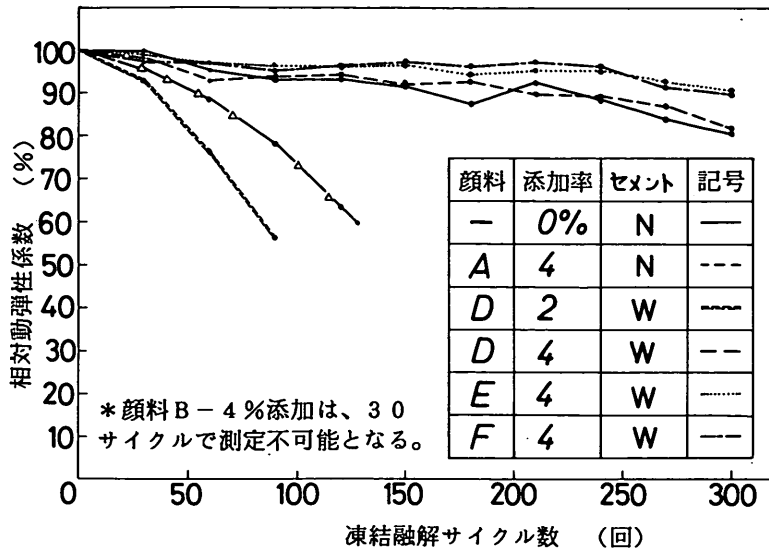


図-22 カラーコンクリートの凍結融解試験結果

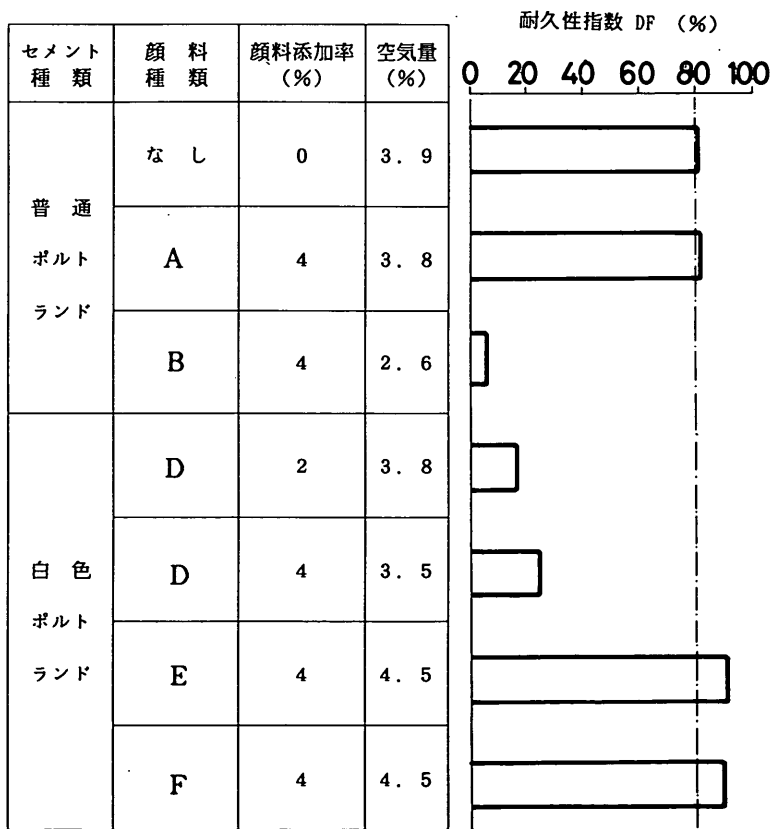


図-23 凍結融解に対する耐久性指数

久性を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空気の連行を目的として混入するAE剤の効果がほとんどなくなるため（凍結融解による組織劣化を軽減する空隙は10000～90000オングストロームの部分である⁵⁾が、図-15に示されるようにその部分の細孔はほとんどない。通常、AE剤の混入によりこの部分の細孔が増えるが、顔料Bの場合にはその効果がみられない。）であり、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ーの占める割合が大きかったためと考えられる。なお、顔料Bを使用したカラーコンクリートには通常の数倍量のAE剤を混入してみたが、その効果は認められなかった。

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ったことから、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評価された。

以上の結果から、凍結融解を受ける地域でカラーコンクリートを使用する場合には、凍結融解に対して問題のない適切な顔料を選定する必要があるといえる。

(3) 酸素の拡散性状

酸素の拡散性状はコンクリート中の鉄筋の防食性を考える場合に重要な因子の1つであり、耐久性の高いコンクリートとするためには酸素の拡散係数はできるだけ小さい方が望ましい。

図-24は、材令11カ月まで標準養生を行ったカラーコンクリート供試体の酸素拡散係数を測定した結果である。測定は供試体の種類毎に2本の試験体を用いて行った。

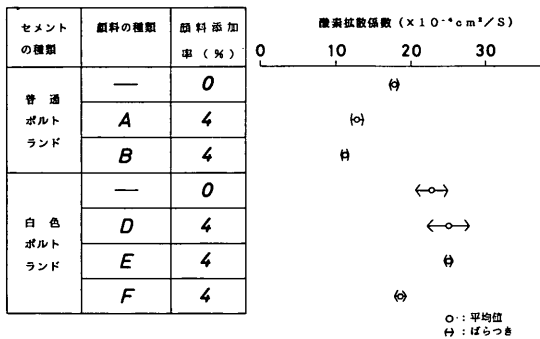


図-24 カラーコンクリートの酸素拡散性状

図中の○印がその平均値を表し、矢印がそのばらつきを表している。

まずセメントの種類の違いによる拡散係数の違いをみると、普通ポルトランドセメントを使用し、顔料を添加しないコンクリートの拡散係数が約 $18 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{S}$ であったのに対し、白色ポルトランドセメントを使用し、顔料を添加しないコンクリートの拡散係数は約 $23 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{S}$ と、白色ポルトランドセメントを使用した方が大きくなる傾向がみられた。

一方、顔料の添加が拡散係数に及ぼす影響についてみると、顔料Aを添加した場合には添加しないものの約70%となり、顔料Bを添加した場合には添加しないものの約63%となった。同様に、顔料Dの場合には110%、顔料Eの場合には113%、顔料Fの場合には82%となった。これらの結果から、顔料を添加することにより若干拡散係数が増加する場合がみられるが、その増加量は小さいものであり、顔料の添加がコンクリートの酸素拡散性状に及ぼす影響はほとんどないと判断される。

(4) 塩分の浸透性状

海洋環境の感潮部および飛沫部に約10カ月間暴露を行ったカラーコンクリート供試体の可溶性塩化物イオン量を測定した。測定箇所は表面から $2 \pm 0.5 \text{ cm}$ である。その結果を図-25に示す。図に示されるように、飛沫部に暴露を行った供試体中の可溶性塩化物イオン量は0.15～0.33%（コンクリートに対する塩化物イオン重量百分率）であったのに対し、感潮部に暴露を行った供試体中の可溶性塩化物イオン量は0.08～0.16%と若干小さ

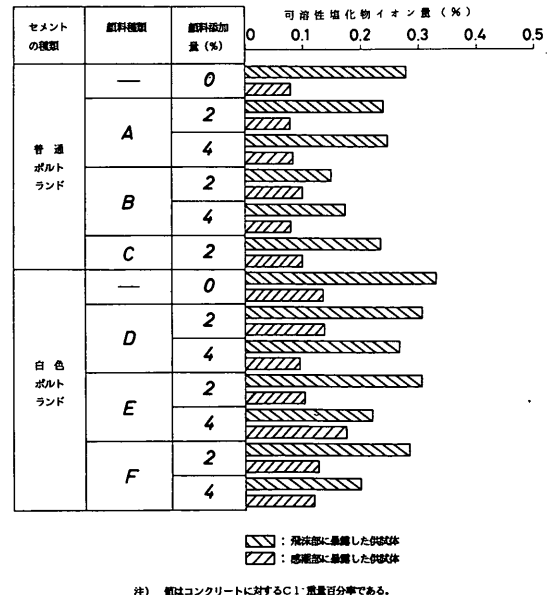


図-25 カラーコンクリートの可溶性塩化物イオン量（暴露試験）

かった。

まず顔料を添加しないプレーンコンクリート中の塩化物イオン量を使用したセメントの種類と比較すると、白色ポルトランドセメントを使用したコンクリートの塩化物イオン量の方が普通ポルトランドセメントを使用した場合より高くなる傾向がみられた。

一方、顔料を添加しないプレーンコンクリートの塩化物イオン量と顔料を添加したカラーコンクリートのそれとを比較し、プレーンコンクリートの塩化物イオン量の平均値に対するカラーコンクリートの塩化物イオン量平均値の比率を求めると、顔料 A の場合で94%，顔料 B の場合で84%，顔料 C の場合で105%，顔料 D の場合で86%，顔料 E の場合で92%，顔料 F の場合で82%となった。したがって、カラーコンクリートの塩分の浸透性状はプレーンコンクリートの場合と同等程度であると評価された。

図-26は、促進試験（60℃海水浸漬3日＋気中乾燥4日）×12サイクルを実施した後のカラーコンクリート供試体より測定した可溶性塩化物イオン量である。測定箇所は供試体表面から 2 ± 0.5 cmの位置、および 4 ± 0.5 cmの位置であった。

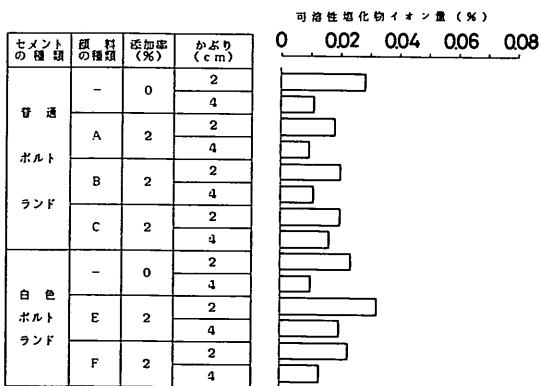


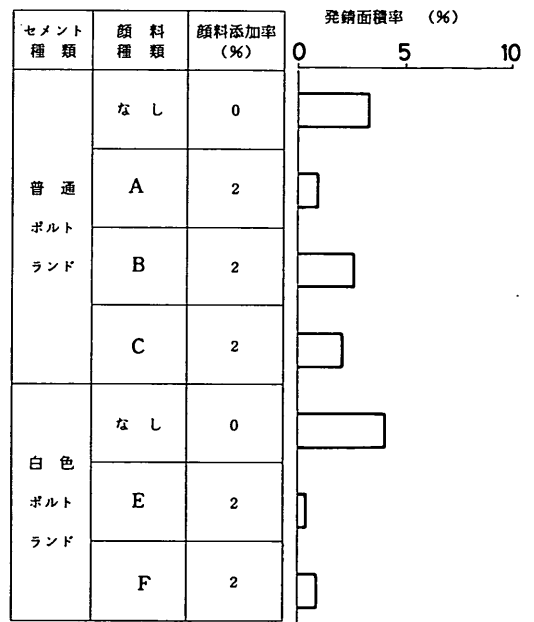
図-26 カラーコンクリートの可溶性塩化物イオン量 (促進試験)

暴露試験の結果と同様に、顔料を添加しないプレーンコンクリートの塩化物イオン量と顔料を添加したカラーコンクリートの塩化物イオン量とを比較し、プレーンコンクリートの塩化物イオン量の平均値に対するカラーコンクリートの塩化物イオン量平均値の比率を求めると、顔料 A の場合で75%，顔料 B の場合で85%，顔料 C の場合で109%，顔料 E の場合で167%，顔料 F の場合で113%となった。顔料 E の場合は100%を大きく上回って

いたものの、その他の顔料 A、顔料 B、顔料 C、および顔料 F の場合は75～113%とプレーンコンクリートと同等程度であった。したがって、促進試験結果と同様、カラーコンクリートの塩分の浸透性状はプレーンコンクリートと同等程度であると評価された。

(5)鉄筋の腐食に対する防食性能

鉄筋の腐食に対するカラーコンクリートの防食性能を検討するため、カラーコンクリートを使用した鉄筋コンクリート供試体を促進試験（60℃海水浸漬3日＋気中乾燥4日）×12サイクルに供し、試験終了後の供試体より鉄筋を取り出して発錆面積率を測定した。その結果を図-27に示す。図に示されるように、発錆面積率は0.4～4.1%程度といずれも小さかった。



促進試験：（60℃海水浸漬3.5日＋気中3.5日）×12サイクル

図-27 促進試験後のカラーコンクリート中の鉄筋の発錆面積率

顔料の添加の有無と発錆面積率との関係に着目すると、顔料を添加しない供試体の発錆面積率が4.1%と3.3%であったのに対して、顔料を添加した供試体（添加率はいずれも2%）の発錆面積率は2.6%以下であり、顔料を添加した供試体の方が小さかった。したがって、2%程度の添加率であれば、顔料の添加が鉄筋の防食性能に及ぼす悪影響はないといえる。なお、この結果は、カラーコンクリートの酸素拡散性状や塩分浸透性が通常のコンク

リートのものと同等であったことから説明される。

(6) 圧縮強度の増加率

海洋環境の感潮部に約10カ月間暴露を行ったカラーコンクリート供試体の圧縮強度を測定し、材令28日の圧縮強度と比較し、暴露前後の圧縮強度比を求めた。その結果を図-28に示す。図に示されるように、顔料を添加しないプレーンコンクリートの圧縮強度比は、普通ポルトランドセメントのもので1.17、白色ポルトランドセメントのもので1.10であった。一方、顔料の添加率と暴露前後の圧縮強度比との関係をみると、値のばらつきはみられるものの、顔料の添加率の増加にともなう圧縮強度比の低下はみられなかった。このように、海水の作用を受ける環境でのカラーコンクリートの強度発現性は通常のコンクリートとほぼ同等であったことから、カラーコンクリートは、通常のコンクリートと同等の耐海水性を有していると推察される。

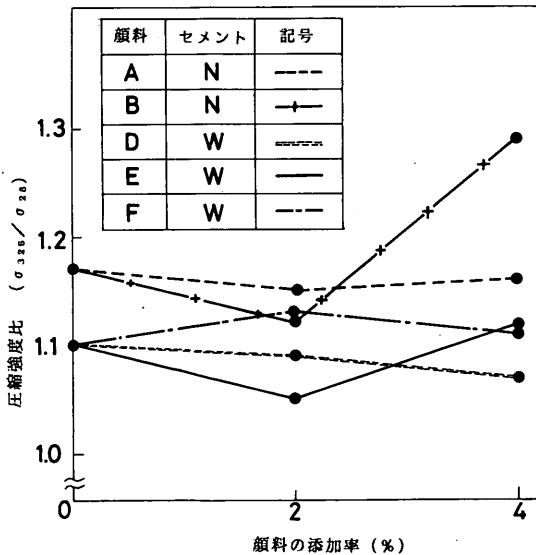


図-28 カラーコンクリートの圧縮強度比と顔料の添加率との関係

(7) コンクリート中の成分分析

海洋環境下の感潮部に約10カ月間暴露を行ったカラーコンクリート供試体の X 線回折を行い、暴露中に生成された鉱物の同定を行った。その結果、すべてのコンクリート中に、エトリンガイト、フリーデル氏塩、水酸化カルシウム、炭酸カルシウムが生成されていることがわかった。

図-29は、それらの鉱物の生成量を定性的に把握する

顔料の種類	添加率 (%)	セメントの種類	水酸化カルシウムの回折強度に対する各鉱物の回折強度比		
			エトリンガイト	フリーデル氏塩	炭酸カルシウム
なし	0	普通	=====	=====	=====
A	4	ポルト	=====	=====	=====
B	4	ポルト	=====	=====	=====
なし	0	白	=====	=====	=====
D	4	ポルト	=====	=====	=====
E	4	ポルト	=====	=====	=====
F	4	ポルト	=====	=====	=====

==: 1~20%, ===: 20~40%, =====: 40~60%,
 =====: 60~80%, =====: 80~100%

図-29 海洋環境下に暴露したカラーコンクリート中の生成鉱物

ため、コンクリート中に比較的多量に存在する水酸化カルシウムは各試料中に一定量含まれていると仮定し、水酸化カルシウムの回折強度を100とした場合の、その他の鉱物の回折強度比を求めたものである。

エトリンガイトは、その生成過程において、体積膨張を起こし、コンクリートにひびわれ等が発生させ、耐海水性を低下させると考えられているが、その生成量については、顔料 B を使用したコンクリート中には多量に認められたものの、それ以外の顔料を使用したコンクリート中にはプレーンコンクリートと同程度の量しか認められなかった。したがって、顔料 B を使用したコンクリートの耐海水性には疑問がもたれるものの、それ以外の顔料を使用したコンクリートの耐海水性は、プレーンコンクリートの耐海水性と同等度であると考えられる。

フリーデル氏塩は、コンクリート中に浸入した塩分の一部が固定化したものであるが、その生成量については、どのコンクリートにもほぼ同じ程度の量が認められ、(4) 塩分含有量で述べた考察（カラーコンクリートの塩分浸透性はプレーンコンクリートのものと同等程度であると評価される）を裏付ける結果が得られた。

炭酸カルシウムは、気中の炭酸ガスとコンクリート中の水酸化カルシウムが反応して生成される鉱物であるが、X 線回折を実施する前、供試体を気中に放置したため、図に示されるようなばらつきがでたものと考えられる。また一般に、海洋環境下でのコンクリートの中性化速度は遅いと言われていることから、それほど問題にはならない。

以上、カラーコンクリートの耐海水性を評価するため成分分析を行い、その考察を述べたが、(6) 圧縮強度の増加率で得られた結果と併せて考えれば、カラーコンクリートの耐海水性は、通常のコンクリートの耐海水性と

程度であると考えられる。

6. 4 白華抑制剤の効果

(1) 白華抑制効果

白華現象の対策として、白華抑制剤の使用が考えられる。そこで、市販の2種類の白華抑制剤の白華現象に対する抑制効果を確認するため、白華抑制剤を塗布したカラーモルタル供試体の白華促進試験を行い、その反射率の変化を測定した。また、試験では白華抑制剤の塗布方法の違いによる効果の違いについても検討を行った。

その結果を図-30に示す。白華抑制剤を使用しない供試体の反射率は、試験を開始してから200時間程度経過した時点から大きくなり始めたことから、この時点から白華現象が起り始めたと推察された。したがって、図-30の縦軸は、試験開始（浸漬開始）から200時間経過後の反射率を基準としてその後の変化量で表した。

図-30中の○が白華抑制剤を使用しない供試体の測定値である。これより、時間の経過とともに反射率が大きくなったことがうかがえる。

一方、白華抑制剤を使用した供試体に着目すると次のようなことが言える。抑制剤Aについては、2種類の前処理を採用し、白華抑制効果の違いを調べた。型枠脱型

後に炉乾燥（40℃、24時間）を行い、その後吹き付け塗布を行った供試体においては、200時間経過後も反射率にそれほど変化がないことから、白華に対する抑制効果は認められると判断された。しかしながら、炉乾燥を行わないでそのまま吹き付け塗布を行った供試体においては、200時間を経過してから白華抑制剤を塗布しない供試体と同様の反射率の変化がみられたことから、白華に対する抑制効果は認められないと判断された。

また、抑制剤Bについては、浸漬と吹き付けの2種類の塗布方法を適用し、促進試験に供した。その結果、2つの方法とも反射率の変化は小さかったことから、白華に対する抑制効果は認められると判断された。

一般に、早期材令でコンクリートを乾燥すると耐久性の低下を招くことから、乾燥は避けなければならない。したがって、コンクリートを乾燥しなければその効果を期待できない白華抑制剤Aは、カラーコンクリートの白華抑制剤としては適さないと考えられる。一方、白華抑制剤Bは、コンクリートを乾燥しなくともその効果を期待できることから、白華抑制剤Bの方がカラーコンクリートの白華抑制剤として適していると考えられる。

参考として、白華促進試験後のカラーモルタル表面の白華状況を写真-8に示す。

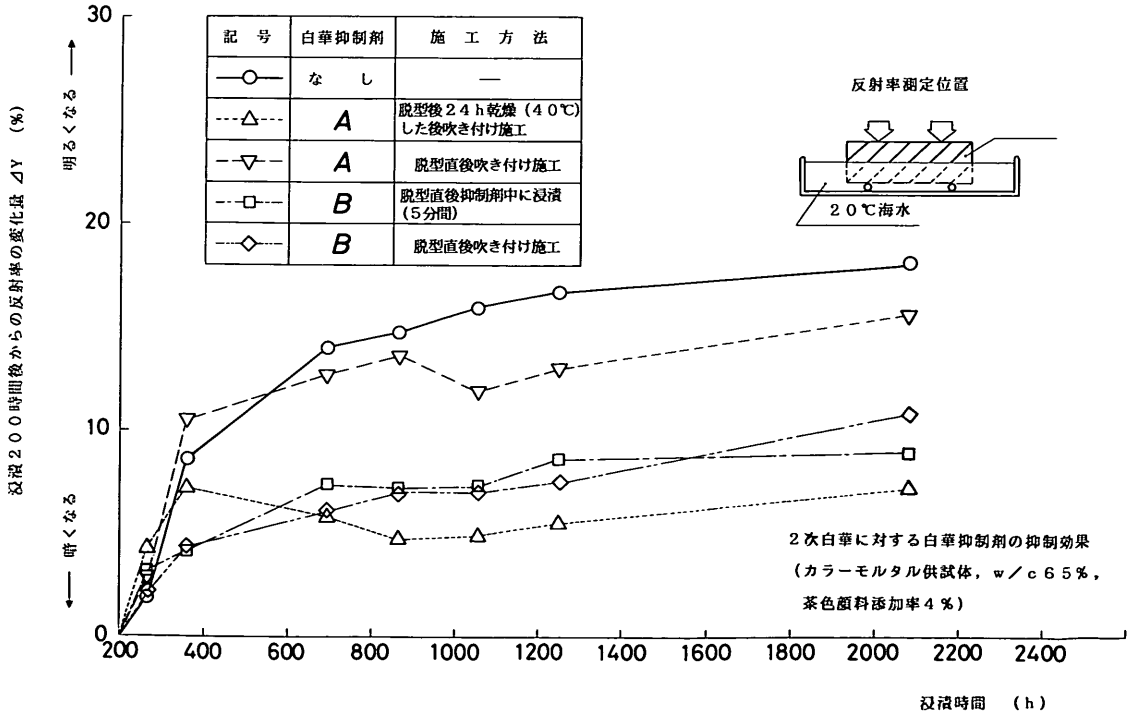


図-30 白華促進試験結果

No.	白華抑制剤	抑制剤の塗布方法
1	なし	—
2	A	脱型後24h 炉乾燥後、吹き付け
3	A	脱型直後吹き付け
4	B	脱型後直後抑制剤中に浸漬
5	B	脱型直後吹き付け

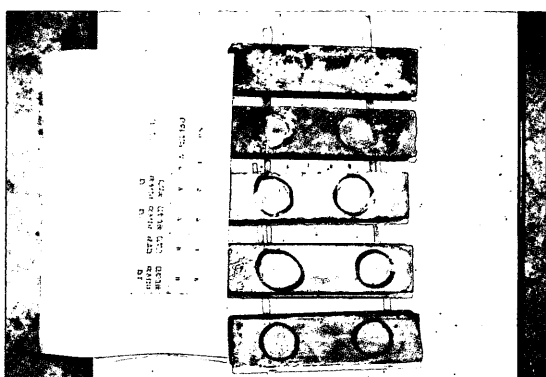


写真-8 白華促進試験後のカラーモルタル表面の白華

(2) 白華抑制剤の耐候性

本研究で使用した白華抑制剤の耐候性を確認するため、

白華抑制剤を塗布したカラーモルタル供試体の屋外暴露試験を実施し、供試体表面の色彩を経時的に測定した。

図-31には、色彩の測定結果より反射率をとりあげ、暴露時間と反射率との関係を示した。図中の○が白華抑制剤を使用しない供試体の測定値であり、△が白華抑制剤Aを使用した供試体のもの、□が白華抑制剤Bを使用した供試体のものである。これらの3つの値はほぼ同様の傾向を示した。すなわち、暴露時間100時間程度までは供試体が徐々に乾燥していき反射率が増加していったが、その後の反射率の変化は小さかった。また、図-31は反射率についての結果であるが、その他の色彩の成分である色相およびあざやかさについても図-31に示された傾向と同様の傾向であった。したがって、暴露時間2100時間（約3ヶ月）まででは、白華抑制剤A、Bともその耐候性には問題がないといえる。

7. 結論

コンクリートの練り混ぜ時に顔料を添加することによって色彩化を図ったカラーコンクリートの基礎的な材料特性の把握、ならびにその海洋環境下での耐久性の確認を目的として行った一連の試験によって得られた成果を列記すると、以下の通りとなる。

(1) 適切な顔料を選定することにより、通常のコンクリートの場合とほとんど変わらない配合で、所定の施工性を有したカラーコンクリートを製作することが出来る。

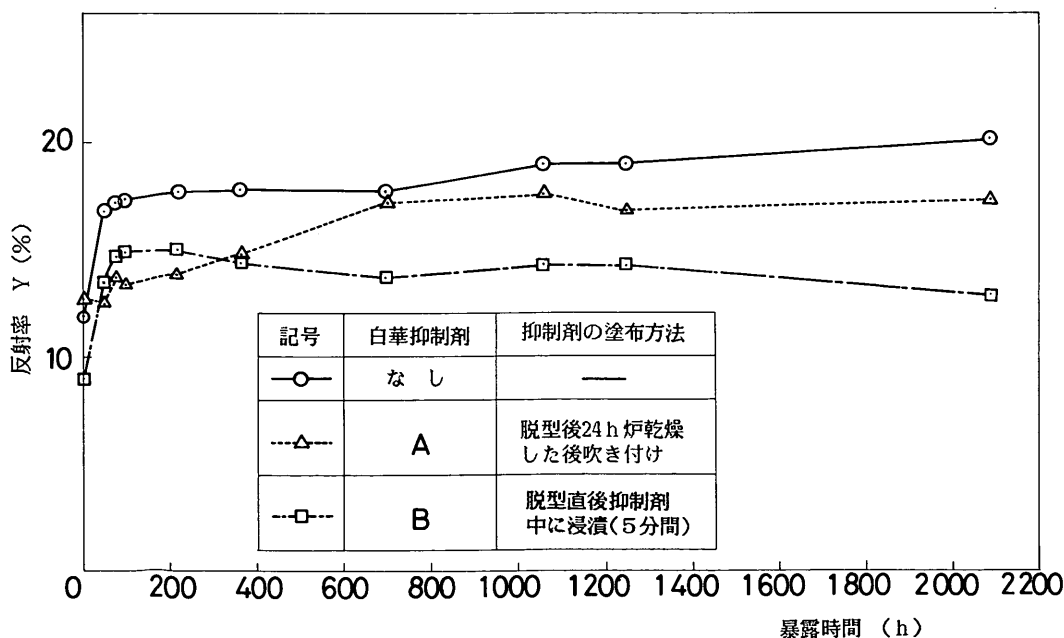


図-31 白華抑制剤を塗布したカラーモルタルの暴露試験結果

(2) カラーモルタル供試体およびカラーコンクリート供試体の強度試験より、適切な顔料を使用し、その添加率をセメント重量に対して4%程度以下にすれば、通常のモルタルあるいはコンクリートと同等の強度特性を得られることが確認された。

(3) カラーコンクリートの乾燥収縮特性は、通常のコンクリートと同等であることがわかった。

(4) 顔料の添加率とカラーコンクリートの色彩との関係は線形関係ではなく、添加率の増加とともに色彩の向上は小さくなり、4%程度以上の添加率になると、色彩の向上はほとんどなくなる。

(5) カラーモルタルの色彩に対して、セメントの種類の違い（普通セメントか白色セメントかの違い）や養生方法の違い（水中養生か気中養生かの違い）の方が、顔料の添加率の違いよりもより大きな影響を及ぼすことがわかった。したがって、顔料の添加率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。

(6) カラーコンクリートを約1年間海洋環境下に暴露し、色彩変化を測定した。その結果、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、ほとんどないことがわかった。

(7) カラーコンクリートの凍結融解試験を実施した結果、いくつかの顔料において、凍結融解に対する耐久性が十分でないものがあった。したがって、凍結融解の可能性のある場所でカラーコンクリートを使用する場合には、凍結融解に対して問題のない適切な顔料を選ぶ必要がある。

(8) 顔料の添加率が4%程度であれば、顔料の添加がコンクリートの酸素拡散性状や塩分浸透性状に及ぼす影響はほとんどないことがわかった。

(9) カラーコンクリートの内部鉄筋の腐食に対する防食性は、従来のコンクリートと同等であることがわかった。

(10) カラーコンクリートの耐海水性は、通常のコンクリートと同等程度であると推察された。

(11) 適切な白華抑制剤を使用することによって、カラーコンクリートの色彩低下につながる白華現象を抑制することができた。また、その白華抑制剤の耐候性は3カ月程度では問題なかった。

これらの一連の成果より、適切な顔料を選定し、これを適切に添加することにより、強度特性等を変化させないでコンクリートの色彩化を図ることができ、またその海洋環境下での耐久性は通常のコンクリートの耐久性と同等であるということが確認された。

8. あとがき

本研究で得られた結論より、カラーコンクリートの海洋環境下におけるコンクリートへの適用は十分可能であると考えられる。参考として、カラーコンクリートの経済性について付録-3に示した。そこに示されるように、カラーコンクリートを用いることにより、比較的経済的にコンクリートの色彩化を図ることができる。今後、カラーコンクリートは、海洋環境下の構造物や建築物の景観材料として積極的に活用すべき材料であろうと考えられる。

最後に、本研究の実施にあたり、住友セメント株式会社渡辺夏也氏の多大なる御協力をいただいたことを付記し、感謝の意を表する次第である。(1990年11月30受付)

(参考文献)

- 1) 大即信明：コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol.24，No.3，1985年9月，p.209
- 2) (社)日本コンクリート工学協会：酸素の拡散試験方法（案），耐久性診断研究委員会報告書，1989年6月，pp.29～36
- 3) 西純二・後藤孝治・坂井公武：エフロレッセンスの防止法に関する2，3の実験，第38回セメント技術大会，1984年5月，pp.282～283
- 4) (社)色材協会・顔料技術研究会・日本顔料技術協会：顔料入門講座，1983年6月，pp.171～173
- 5) 内川浩：組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト，モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点，セメントコンクリート No.507，1989年5月，pp.33～46
- 6) 永井彰一郎：新しい工業材料の科学—建築材料—，金原出版，1963年3月，pp.225～226
- 7) 川上元郎：色の常識，（財）日本規格協会，1986年4月，pp.50～72

付録-1 白華現象

白華（エフロレッセンス）には、コンクリートの表面を白っぽく汚すものからかさぶた状のものまであり、白華現象は、コンクリートの美観を損なう現象として知られている。この白華は、セメントの水和過程で生じた水酸化カルシウムが、コンクリートの空隙水中に溶出し、毛細管現象により表面へ移動し、大気中の炭酸ガスと反応して炭酸カルシウムとなり、表面に沈殿することによって起こる。

このような白華は、一般に一次白華と二次白華とに分

けられる。一次白華は、コンクリートの硬化反応の進行中に生ずるもので、練りませ水に溶解した水酸化カルシウムが表面で乾燥することにより発生するものである。一方、二次白華は、コンクリートの硬化後、屋外暴露等により生ずるものであり、雨水等に溶けこんだ水酸化カルシウムが表面で乾燥することにより発生するものである。

これらの白華現象を完全に防止することはできないが、一次白華については、単位水量を減らし、入念な施工を行って、ブリージング水や水みちの少ない緻密なコンクリートを製作することで多少抑制することができる。また、二次白華については、緻密なコンクリートを製作すること以外に、大気中の炭酸ガスや雨水とコンクリートとを遮断する膜をコンクリートの表面に施工することで抑制することができる。

付録-2 XYZ 表色系による色の算出手順⁷⁾

測色する物体にある標準の光をあてると、物体の表面色によって、ある波長のスペクトルはよく反射したり、またある波長のスペクトルはまったく反射しなかったりする。

物体の色彩を XYZ 表色系で表示するための手順は、おおまかに、各スペクトル毎の反射の程度を測定する作業（分光測色という）とそれによって得られた値を計算する作業との2つの手順に分けられる。

分光測色は、分光光度計を用いて行い、各スペクトル毎の反射の程度は、分光比反射率曲線で表す。分光比反射率曲線は、付図-1中の(2)に示すような曲線のことであり、波長380ナノメートルから780ナノメートルまでのスペクトル間で、物体がどんな分光比反射率（標準の光

を標準白色面に当て、そして反射させた光線と、同一の標準の光を物体に当てて、反射させた光線との各波長毎の比率）を持っているかを%表示で示したものである。

分光測色を行って、分光比反射率曲線が得られたら、次にその曲線から各波長毎の分光比反射率 ρ_λ を読み取り、式(5)に代入し、 X, Y, Z を算出する。

$$\left. \begin{aligned} X &= k \sum P_\lambda \cdot x_\lambda \cdot \rho_\lambda \cdot \Delta\lambda \\ Y &= k \sum P_\lambda \cdot y_\lambda \cdot \rho_\lambda \cdot \Delta\lambda \\ Z &= k \sum P_\lambda \cdot z_\lambda \cdot \rho_\lambda \cdot \Delta\lambda \end{aligned} \right\} \quad \text{一式(5)}$$

ここで、

P_λ : 標準の光のスペクトル分布

$x_\lambda : \left. \begin{aligned} y_\lambda : \\ z_\lambda : \end{aligned} \right\} \text{ スペクトル三刺激値 (JIS で規定)}$

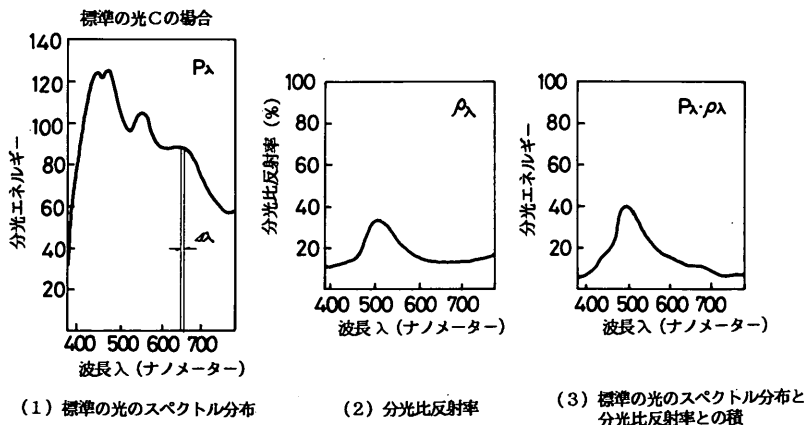
ρ_λ : 分光比反射率

$\Delta\lambda$: 波長間隔

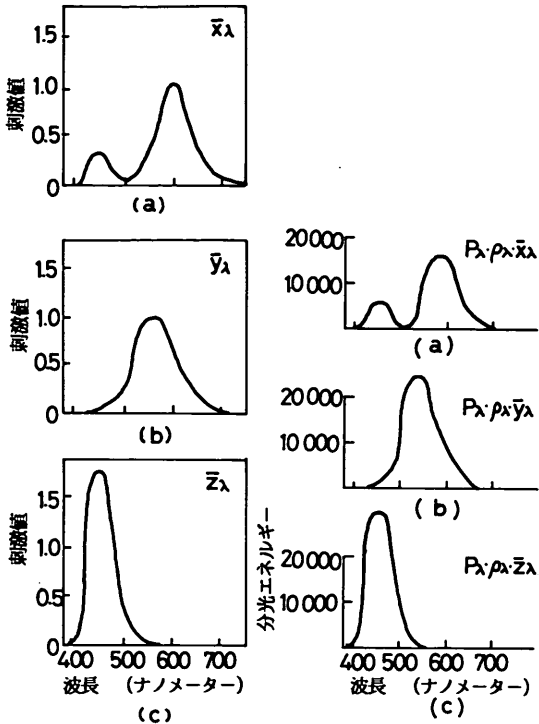
k : 定数 (1/1,000,000)

P_λ は、ある標準の光における各波長毎のエネルギー分布である。この値は、標準の光毎に JIS Z8720 に定められており、本研究で使用した C 光源の場合には付図-1中の(1)のように表される。そして、この P_λ と分光比反射率 ρ_λ との積が標準の光の下で物体を見た場合に、目に入ってくる光の分光的性質である。これをグラフで表すと、付図-1中の(3)のようになる。

一方、光線が目に入ってくると、視神経は付図-2中の(1)に示されるような $x_\lambda, y_\lambda, z_\lambda$ の3種類の色の感じ方をすると考えられている。したがって、 P_λ と ρ_λ の積として目に入った光線は、その後 $P_\lambda \cdot \rho_\lambda$ と $x_\lambda, y_\lambda, z_\lambda$ との各積（付図-2中の(2)）のような姿で色を感じる。



付図-1 標準の光のスペクトル分布と分光比反射率



(1) スペクトル三刺激値

(2) $P_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda}$ と刺激値との積

付図-2 スペクトル三刺激値

このようにして求められた波長10ナノメートル毎の $P_{\lambda} \cdot \rho_{\lambda}$ と x_{λ} , y_{λ} , z_{λ} との各積を波長380ナノメートルから780ナノメートルまで総計することにより X , Y , Z が算出される。この X , Y , Z は、色の三刺激値と呼ばれ、この内 Y はそのまま%表示として、色の明るさを表すことになる。また、色度座標 x , y は、式(6)より求められる。

$$\left. \begin{aligned} x &= X / (X + Y + Z) \\ y &= Y / (X + Y + Z) \end{aligned} \right\} \quad \text{—式(6)—}$$

付録-3 カラーコンクリートの経済性

カラーコンクリートの練りまぜは、通常のコンクリートの場合と同様に生コン工場や生コンプラントで行うことができ、その施工も通常のコンクリートの場合と同様の方法で行うことができる。したがって、カラーコンクリートの経済性には、顔料などの材料単価のみが左右されてくるものと考えられる。

一例として、消波ブロックに使われるような貧配合のコンクリート100m³をカラーコンクリートで製作した場合の材料単価を概算した結果を付表-1に示す。付表に示されるように、普通ポルトランドセメントを使用し、顔料Aや顔料Cを4%程度添加したカラーコンクリートはプレーンコンクリートの1.9倍程度の単価となり、白色ポルトランドセメントを使用し、顔料D、顔料E、顔料Fを4%程度添加したカラーコンクリートは白色ポルトランドセメントを使用したプレーンコンクリートの1.6倍程度の単価となる。これらの単価増は、全工費に占める材料単価の割合を考えれば、それほど大きいものではないと考えられる。

付表-1 カラーコンクリートの材料単価 (概算値)

顔料	添加率(%)	セメント	コンクリート100m ³ の価格
なし	0	普通	700千円
A	4	普通	1320 (1.9)
B	4	普通	1330 (1.9)
C	4	普通	1320 (1.9)
なし	0	白色	1330
D	4	白色	2220 (1.7)
E	4	白色	2100 (1.6)
F	4	白色	2100 (1.6)

() 内は顔料を添加しないコンクリートに対する比を表す。