

白色セメントを使用した PCa 外壁版の施工

－ 沖縄県立博物館新館・美術館－

九州支店	建築部	早野雄治
九州支店	技術部	吉永健治
九州支店	建築部	岩田勲

概要：沖縄県立博物館新館・美術館は、沖縄の象徴的な建造物『グスク』（琉球石灰岩の石積みの城跡）そのもののイメージを再現する設計とされた。その独特の風合いは白色セメント、琉球石灰岩砕石等、特殊な材料を用いた PCa 外壁版により表現される。この外壁版は他に類を見ない意匠部材であり、PCa コンクリートの可能性を感じさせる作品である。本稿では、その特殊な材料・配合及びコンクリートの色調を中心に施工の報告をする。

Key Words：白色セメント，色調，意匠部材

1. はじめに

この事業は、沖縄復帰 30 周年記念事業に位置づけられ、「沖縄県の自然・歴史・文化等に関する資料を展示公開するとともに、適切に保管できるよう老朽化した県立博物館を移転整備し、また美術作品の鑑賞や創作活動等を通して県民の情操を豊かにし、芸術文化の拠点となる美術館の建設」を目的として計画された。

2. 建築概要

2.1 建築工事概要

工事概要を以下に記す。また、建物全体パースを図-1 に示す。

工事名称 沖縄県立博物館新館・美術館新築工事

建設地 那覇市おもろまち 3 丁目 1 番（那覇新都心地区内）

発注者 沖縄県教育庁文化施設建設室

設計監理 (株)石本建築事務所 (有)二基建築設計室 JV

施工 上門工業(株)・(有)大協建設・(株)町田組 特定 JV

(株)大米建設・(株)東江建設・(株)富士建設 特定 JV

金秀建設(株)・(株)沖創建設・(株)野原建設 特定 JV

PCa 施工 (株)ピーエス三菱

部材製作 (株)技建 大里プレコン工場

構造 鉄筋コンクリート造一部鉄骨造

敷地面積 31,287.44 m²

建築面積 13,483.95 m²

延床面積 23,602.23 m²



図-1 建物全体パース



早野雄治



吉永健治



岩田勲

2.2 PCa 工事概要

2.2.1 PCa 外壁版の採用経緯

本建築物は、建物周辺の地面だけでなく建築全体をランドスケープとしてとらえ、敷地全体を総合公園から続く丘として計画されている。またその段丘は沖縄の『グスク』(写真-1)を想わせるフォルムによって構成され、伝統的文化の一面を表現することを意図している。

このようなコンセプトから本建築の外壁面には特殊な配合のPCa 外壁版が採用され、躯体壁とは独立したダブルスキン構造となっている。



写真-1 グスク (座喜味城址)

2.2.2 構造形式

- ・部材高 5m 以上 プレストレスト鉄筋コンクリートⅢtb
- 部材高 5m 未満 鉄筋コンクリート造
- ・穴開き部材 全断面白色コンクリート
- 穴なし部材 合成コンクリート (白色コンクリート+普通コンクリート)
- ・使用PC鋼材 PC鋼より線 12.7φ (SWPR7B)
- 緊張力 124KN/ケーブル

2.2.3 支承構造

PCa 外壁版は、面外方向の変形に対して下部支点を中心に回転して追随し、面内方向には本体建物から縁を切り、自重による慣性力以外を負担しない非構造部材のカーテンウォールとして設計されている。そのため下部支承はアンカーバーにより水平2方向にピン支持され、上部支承は受け金物により水平面外方向のみ支持されている。支承構造を図-2に示す。

部材の面内方向の回転には、溶接接合により一体化された複数の部材の自重により抵抗する構造になっている。

2.2.4 部材製作数量

- ・PCa 外壁版 5,045ton (775 枚)
- ・型枠形状種別 PC 部材 4 枠
- RC 部材 2 枠
- 正 R 部材 2 枠
- 逆 R 部材 2 枠
- 楕円部材 1 枠

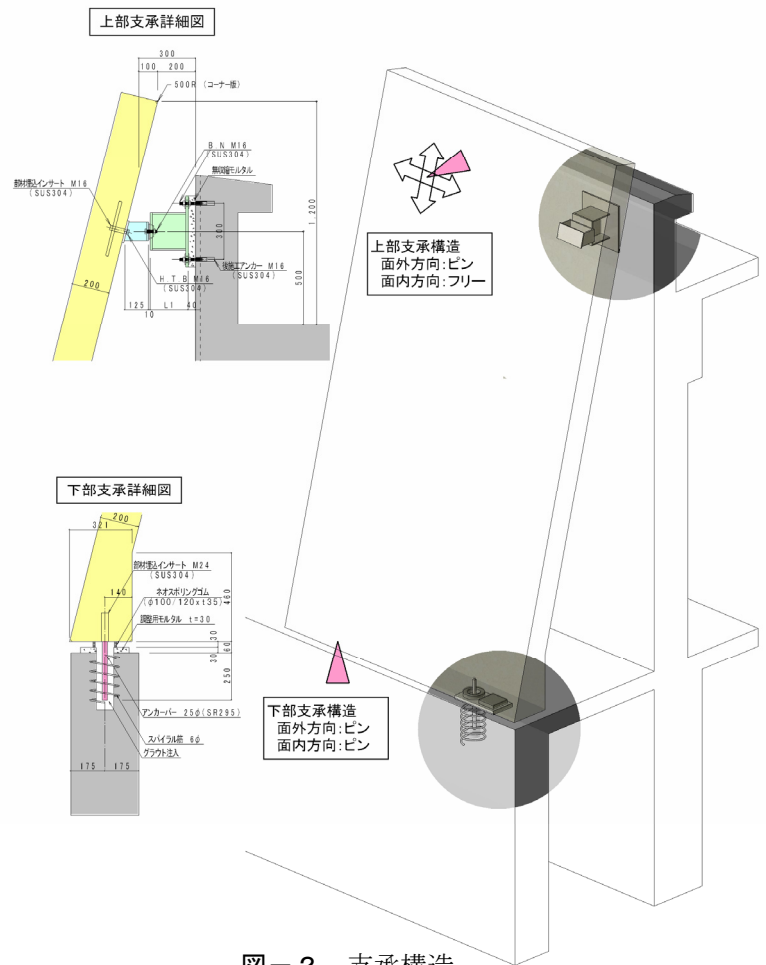


図-2 支承構造

3. 使用材料

3.1 使用材料に対する意匠要求

本 PCa 外壁版は「グスク」を模したもので、琉球石灰岩の淡い灰白色の色を出すには白色ポルトランドセメントの使用が不可欠であった。また、通常の意匠部材の場合、露出面がベツト面になることが多いが、本外壁版では、琉球石灰岩の質感を出すために押さえ面を切削処理することが求められた。当然、表面には骨材が露出することになり、その材料にも「グスク」の表現が求められ、粗骨材には「グスク」そのものである琉球石灰岩砕石が、また、細骨材にも白色度が求められ白色海砂（ビーチコーラル）が採用された。さらに、最終的な色の調整には顔料が使用された。

白色コンクリートの使用材料一覧を表-1に示す。

表-1 白色コンクリート使用材料一覧

	種類
セメント	白色ポルトランドセメント
水	工業用水
粗骨材	琉球石灰岩砕石
細骨材	白色海砂（ビーチコーラル）
混和剤	高性能減水剤標準形
	顔料

3.2 使用材料の特性

3.2.1 セメント：白色ポルトランドセメント

普通ポルトランドセメントの灰色は、酸化第二鉄（ Fe_2O_3 ）と酸化マグネシウム（ MgO ）の影響によるもので、白色ポルトランドセメント（写真-2）は、この酸化第二鉄の量を少なくすることにより、灰色のセメントを白色にしたものである。

普通ポルトランドセメントと白色ポルトランドセメントの化合物組成の一例を表-2に示す。

表-2から白色ポルトランドセメントは鉄アルミン酸四石灰（ C_4AF ）の量が極めて少なく、酸化第二鉄の量が抑えられていることがわかる。またアルミン酸三石灰（ C_3A ）が若干多いのも特徴のひとつである。



写真-2 白色セメント

表-2 ポルトランドセメントの化合物組成の一例（%）¹⁾

種別	C_3S $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3A $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_4AF $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
普通ポルトランドセメント	50	26	9	9
白色ポルトランドセメント	51	28	12	1

白色ポルトランドセメントは JIS 規格外品であるが、一般的な性質は普通ポルトランドセメントと同等と考えられる。これはポルトランドセメントの化合物組成で最も大きな違いである鉄アルミン酸四石灰（ C_4AF ）が強度発現にほとんど関与せず、28日までの強度を支配する C_3S 、28日以降の長期強度を支配する C_2S に、大きな差がないことから、両者の強度発現性にほとんど差がないためである。また1日強度を支配する C_3A が普通ポルトランドセメントと比べ若干多くなるが、本件のようなプレテンション方式の PCaPC で蒸気養生をする場合、1日強度が大きくなり白色ポルトランドセメントの方が多少有利になると考えられる。

3.2.2 粗骨材：琉球石灰岩碎石

沖縄県で通常使用される粗骨材は本部石灰岩碎石で、比重が大きく緻密な骨材である。これに対し今回採用された沖縄本島南部で採取される琉球石灰岩碎石は、比重が小さくポーラスな骨材である。この琉球石灰岩碎石は一般にコンクリート用骨材としては使用されておらず、路盤材として需要がある。今回の工事にあたってはクラッシャー設備を部材製作工場内に設け、市販されている路盤材用の琉球石灰岩碎石（粒径40mm）を最大粒径20mmに破碎し、コンクリート用骨材として使用した。

a. 琉球石灰岩の性質

沖縄本島南部で採取される琉球石灰岩を岩質で区分すると大きく3種類に分けられる。琉球石灰岩の主体となる珊瑚・石灰藻石灰岩は珊瑚礁や化石が緻密に濃縮されたものでトラバーチンと呼ばれている。また碎屑性石灰岩は碎屑物（砂や礫）の周りを炭酸カルシウムで固められたもので、前者に比べ固結度は低い。この2者の境界は漸移的に変化しており、採掘時に区別することは実質的に不可能である。琉球石灰岩の分布状態を写真-3に示す。

その他、琉球層群基底部に位置する赤色石灰岩があるが、前述の2者とは堆積年代も異なり、明らかな境界面で区別でき、今回の工事では対象としない。

b. 琉球石灰岩の色調

琉球石灰岩を色調的にみると上記の岩質と同様に、表-3の2系統の色調に分けられる。

石灰岩の主成分は炭酸カルシウムであり、それ自体は無色透明であるが、結晶体の集合体である石灰岩は、光の屈折により灰白色である（写真-4）。茶褐色系石灰岩も詳細に観察すると、主体の部分は灰白色であり、その表面に赤褐色シルトが沈着して、骨材全体が茶褐色を呈しているように見えていることが写真-5よりわかる。

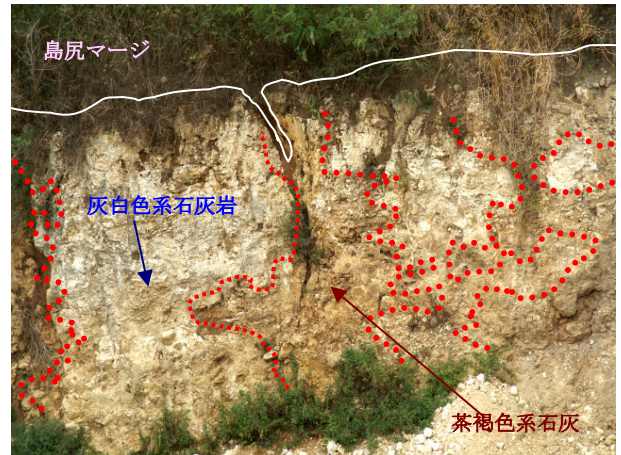


写真-3 琉球石灰岩の分布

表-3 琉球石灰岩の色調系統

	灰白色系石灰岩	茶褐色系石灰岩
岩相	珊瑚・石灰藻石灰岩	碎屑性石灰岩
色調	灰白色	茶褐色
乾燥状態		
湿潤状態		
相対的固結度	大	小
相対的間隙率	小	大



写真-4 灰白色系石灰岩



写真-5 茶褐色石灰岩の水浸部分

c. 骨材としての特徴

現在、コンクリート用骨材として使用されていない本島南部産の琉球石灰岩も、沖縄復帰頃にはコンクリート用骨材として使用されており、1976年にはその骨材の特性が報告²⁾されている。報告によれば、琉球石灰岩砕石は比重が小さく吸水率が高いことがあげられており、フレッシュコンクリートの性質としては粗骨材の粒形が悪いためワーカビリティが悪く、硬化コンクリートは強度が低いことが指摘されている。

使用に際しては、導入強度 30N/mm^2 ・設計基準強度 40N/mm^2 を満たす単位セメント量および水セメント比の設定、骨材吸水量が多く一定でないことに対する水セメント比の安定化、およびワーカビリティ確保を目的とした細骨材率の調整等が課題となった。

3.2.3 細骨材：白色海砂（ビーチコーラル）

白色海砂（写真-6）は、一般の海砂とも異なり、沖縄の海岸から得られる珊瑚礁の屑が主体の海砂である。上記の琉球石灰岩と同様、復帰頃にはコンクリート用骨材として用いられたが、現在では左官工事用として流通している。珊瑚礁の屑、貝殻片が多く含まれ、比重が小さく吸水量が大きいのが特徴で、上記報告²⁾によると、モルタル強度が低い。粗骨材と同様に強度およびワーカビリティの確保が課題となった。



写真-6 白色海砂

3.2.4 顔料

本工事で使用した顔料は無機顔料で、主成分は酸化第二鉄 (Fe_2O_3) である。白色ポルトランドセメントを使用することで、酸化第二鉄が大幅に減ったコンクリートの中に多少の酸化第二鉄を入れていると考え、その影響が少ないことが容易に想像できる。

今回使用した顔料はカラーコンクリートで一般に使用される量の1/10程度で極めて微少であり、これによる影響はほとんど無いことが予想された。そのためベース配合の決定までは顔料の添加を行わず、最終的な色決定時において、顔料を添加していくこととした。

4. コンクリート配合

4.1 コンクリート配合決定までの流れ

コンクリート配合の決定までには、図-3に示す色調に関する検討および配合に関する検討を行い、STEP1から部材製作開始までに約5カ月、STEP2の基本配合の決定では約2カ月をかけ配合を決定した。過去に例のない材料を用いるため多くの課題・疑問があり、その性質を確認して配合を決定するために7回の試験練り（約40バッチ）を行った。

4.2 配合設定の基本方針

試験練りを行う前に以下の基本方針を立てた。

- ①安定した品質の部材を供給できるように配合を決定すること。
- ②設計図書に示された材料を用いること。

一般的にはごく当たり前の方針であるが、今回の工事にあってはこの方針を貫くことは容易ではなかった。

4.3 配合上の問題点

材料の項でも示したように今回使用した骨材では強度が低くなること、さらに、当初の配合においてはスランプの経時変化が大きく、ワーカビリティの確保が重大な課題となった。その一つの要因として、骨材の吸水率が高く、一定でないことがあげられた。また貧配合のコンクリートであり、材料分離の傾向が見られたこと、空気量が安定しないことが問題となった。

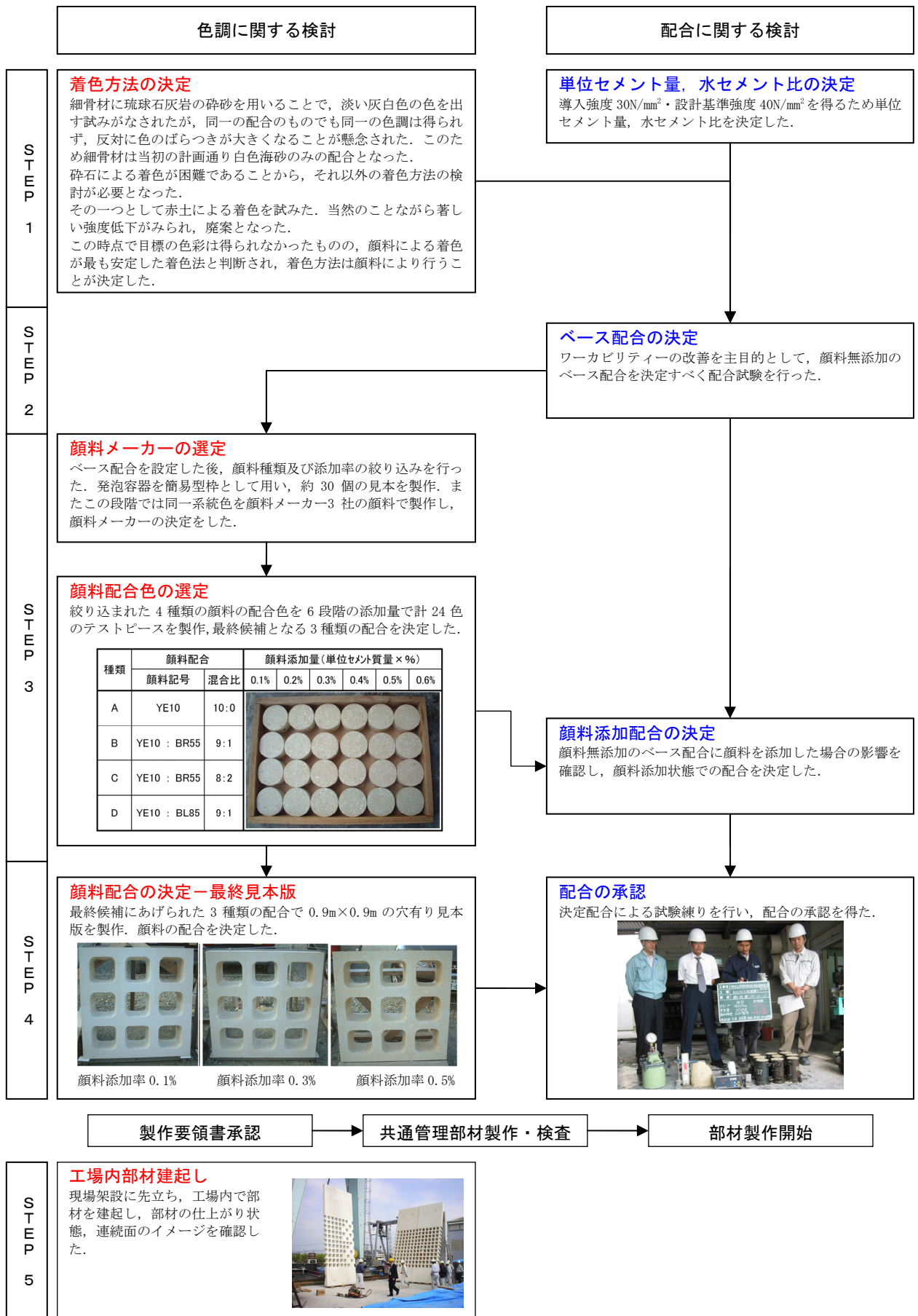


図-3 コンクリート配合決定までの流れ

4.4 配合計画

配合計画では、はじめに所定の強度を得るための単位セメント量、水セメント比を決定した。ここでは、良質な骨材使用が望めないため単位セメント量を増やす必要があった。また水セメント比を管理するにあたって、骨材の吸水率が高く、一定でないことから、その影響を減らすため骨材は湿潤状態で管理することにした。

次に、粒度分布が悪く材料分離の傾向があったため、それを抑えるために細骨材率を検討し、同時に初期スランプが確保出来る混和剤量を決定した。

この時点でワーカビリティも多少改善されていたが、練り上がり 20 分程度までしか良好な施工性は期待できず、また空気量が安定しない傾向が出ていた。この要因としては、上記、骨材の湿潤状態管理の難しさからきているものであった。粗骨材においては比較的湿潤な状態を保つことが出来るが、細骨材ではその状態を保持することが難しい。細骨材の吸水を防ぎ、この影響を取り除くために、練り混ぜ順序の変更を行った。

練り混ぜ順序は研究論文³⁾を参考にセメント、粗骨材、水、混和剤を一次攪拌後、細骨材の投入、二次攪拌の順番とした。

この練混ぜ順序の変更は、スランプの経時変化を大幅に改善し(図-4)、その他の品質も安定する結果を得た。このようにして決定した配合を表-4に示す。

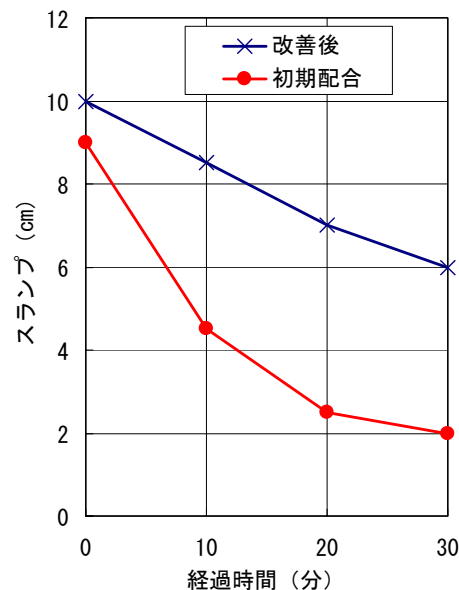


図-4 スランプの経時変化

表-4 白色コンクリート配合表

	種類	単位重量 kg/m ³
セメント	白色ポルトランドセメント	455
水	工業用水	166
粗骨材	琉球石灰岩碎石	678
細骨材	白色海砂 (ビーチコーラル)	993
混和剤	高性能減水剤標準形	5.915
	顔料	0.455

5. コンクリートの色調に影響を与える要因と対策

5.1 コンクリートの色調

本工事においては、図-3で示したようにPCa外壁版の製作を行う前に以下の4段階において色見本の製作を行った。

- ① 着色方法の選定
- ② 顔料メーカーの選定
- ③ 顔料配合色の選定
- ④ 顔料配合の決定

これらの色見本製作時には同一配合の見本部材においても色調のばらつきが見られた。コンクリートの色調は数多くの要因により決定し、通常のコンクリートにおいても色調にはばらつきがある。本工事のPCa外壁版においては、その色調は部材の命といっても過言ではなく、色調のばらつきを可能な限り抑えるため、影響因子の抽出及び色調ばらつきの対策を講じた。

PCa外壁版は特殊な材料を用い、かつ特殊な仕上げを施したコンクリートである。そのため普通コンクリートとは異なった要因が色調に影響を与える可能性もある。色調に影響を与える因子と現場で行った対策を以下に記す。

5.2 色調に影響を与える要因

5.2.1 材料・配合に起因するもの

a. 白色セメント

一般に、普通セメントを用いた場合より高炉セメントを用いた場合の方が色むらは目立つといわれており、その理由として高炉セメントを使用した場合の方がコンクリートの白色度が高いことがあげられている。本工事では白セメントを用いているため、普通セメントを用いた場合よりコンクリートの白色度が上がり、色むらが目立ちやすいと考えられる。

b. 骨材（琉球石灰岩）の色調差

骨材自体に2系統の色調が存在し、このことが必然的にコンクリート色調に影響を与えると考えられる。2系統の骨材の色差は部材製作前に測色計による測定を行い、「非常に大きい」色差と評価された（実験-1）。しかしながら、この2系統の骨材を定量的に管理することは事実上不可能であり、以下のような対策を講じた。

特殊な骨材使用のため、通常の骨材の入手方法では生産が間に合わず骨材の品質にばらつきが生じる傾向が確認された。そのため、工場にクラッシャー設備を設け、材料を大量にストック（攪拌ヤード）し攪拌することで、全体的に均一な骨材を安定的に供給できる体制とし、骨材洗浄設備（洗浄ヤード）の導入を行い、洗浄した骨材を最終ストックヤードに移動するようにした。

c. 顔料

普通コンクリートに用いる顔料の添加量は、対セメント比3~5%程度が一般的であるが、今回の添加量は0.1%と極めて少量であり、顔料自体の影響は考えにくいことが懸念された。この対策として計量時は0.1g単位の計量器による測定を行い、1バッチ当たり1袋の事前袋詰めを行うこととし定量化を図った。

d. 配合

一般的に配合が変われば色合いも変わるが、配合そのものは一定であり、色むらに影響を与えないものと判断された。

1) 試験方法

ミノルタ製分光測色計を用いて粗骨材表面を測色し、L*a*b*表色系(JIS Z 8729)であらわした。試験状況を写真-7に示す。

2) 供試体

供試体は大小2種類の骨材のそれぞれ2系統の色調を選択した。



写真-7 試験状況

骨材(大)はクラッシャー前の状態で約50mm程度のものを鉱山から採取したもので、写真-8に示す○印部を測色した。また、骨材(小)は実際に使用する骨材で写真-9に示す。



写真-8 骨材(大)試験体



写真-9 骨材(小)試験体

3) 測定結果

骨材の測色結果を表-5に示す。

表-5 骨材の測色結果

供試体	L*	a*	b*
骨材(大)灰白色系	81.99	0.96	11.32
骨材(大)茶褐色系	71.05	7.88	23.20
骨材(小)灰白色系	81.08	2.10	12.36
骨材(小)茶褐色系	69.17	6.38	20.56

4) 色差

色差は一般的に表-6のように評価される。

表-6 色差の評価

供試体	色差の感覚
0 ~ 0.5	かすかに感じられる
0.5 ~ 1.5	わずかに感じられる
1.5 ~ 3.0	かなり感じられる
3.0 ~ 6.0	目立って感じられる
6.0 ~ 12.0	大きい
12.0 以上	非常に大きい

色差 ΔE^* は下式により与えられる。

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

上式より、骨材(大)の2系統色の色差 ΔE^* は17.57、骨材(小)においては15.08となり、ともに「非常に大きい」色差と評価される。

実験-1 骨材の色差測定

5.2.2 施工環境に起因するもの

a. 普通コンクリートの混入

白色セメントを使用した工事報告⁴⁾では、白色コンクリート打設日には、前後して普通コンクリートの打設を行わない等の対策を講じている。今回部材製作を行った工場は二次部材工場であるとともに生コン工場でもあり、普通コンクリートの練り混ぜを止めることは出来ず、また工程上も不可能なため、白色コンクリート用のプラントを専用で設けた。

また、打設用ホッパー・バイブレーター等施工に使用する機器材全てを普通コンクリート用と白色コンクリート用に分け、普通コンクリートの混入を防いだ。

特にバイブレーターに関しては以下の実験を行い、使用品を限定・管理した。バイブレターの使用径は合成部材（表層部が白色コン、残り普通コン）の場合の、下部普通コンクリートの巻き上げ状況を実験確認し、 $\phi 30\text{mm}$ とした。また**実験-2**の結果から軽便バイブレーターを使用しないこととした。

b. 気象条件

一般のコンクリートにおいて気象条件は大きく色合いに影響を与え、冬季や雨天時には色むらが発生しやすい。また、脱枠時が雨天の場合、コンクリートの色は濃くなることが知られており、気象の影響はコンクリートの打設時のみに限らない。気象条件により、コンクリートの色合いが変わるのは湿度（乾燥条件）の影響が大きく、コンクリート内部の物質移動（表面のカルシウム生成に影響）によると考えられる。

部材製作工場は屋外にアバットがあるため、気象状況の影響を低減するため、製作ライン上に屋根設備を新設し、側面に風よけを施した。

1) 実験2-1

通常の高周波バイブレーターにて、下記のそれぞれの突き方をした場合の部材の色に与える影響を確認した。

- ①型枠ベツト面に垂直に接地させ、30秒間振動する。（写真-10）
- ②型枠ベツト面に接地させ、30秒間引きずり振動する。（写真-11）
- ③コンクリート内に放置し、30秒間振動する。（写真-12）
- ④バイブレーターをつかない。（写真-13）



写真-10 直突き



写真-11 引きずり



写真-12 放置



写真-13 バイブレーター無し

直突きの場合および引きずりの場合、バイブレーターをついた痕跡が目視で確認できる。バイブレターの接地部は白っぽくなり、その周囲が茶褐色系である。長時間バイブレーターを当てた部分に水酸化カルシウムが移動して白っぽく、また、その周囲に骨材粒子が移動したことで茶褐色系の色に見えていることが推測される。

このときの色のムラは全体的には軽微なものであることから、実際の製作に際してはバイブレーターを長時間型枠に接地させないように留意した。

2) 実験2-2

バイブレターの種類により、部材の色調に影響が出るかを確認するため、**実験2-1**でほとんど影響の出なかった通常の高周波バイブレーター以外に軽便バイブレーター（写真-14）を使用してバイブレターの痕跡実験を行った。



写真-14 軽便バイブレーター



写真-15 バイブレーター痕跡

実験の結果、写真-15に示すような黒染みが発生した。この黒染みは、写真-14の棒状のものだけでなくホースタイプの軽便バイブレーターにおいても同様の結果が得られた。直接的な要因の解明には至らなかったが、上記の結果を踏まえ軽便バイブレーターは使用しないこととした。

実験-2 バイブレーター痕跡実験

5.2.3 型枠に起因するもの

a. 型枠材質

使用する型枠の材質がコンクリートの色調に与える影響の要因としては、①型枠の色移り、②吸水率の違いがあげられる。本工事では主として鋼製型枠を使用しており①による色むらは考えにくい。②に関しては型枠表面がなめらかで吸水しにくく、平滑で密実な水和物の層が形成されるため、打設表面と比べ濃い色あいになる可能性がある。但し、打設表面は切削仕上げとなり、明らかにベツト面とは異なった仕上げであることから型枠材質に起因する色調差に対しては特に対策を講じなかった。

b. 型枠形状組立

型枠形状に起因するものとしては、コンクリート内部の物質移動が主因であり、底面・側面でもその色合いが異なることが研究発表⁵⁾されている。また部材の打込み深さに応じて、明度指数は変化し、打設天端側は明るく、打設深度が深くなるにつれ暗くなる傾向がある。今回は平打ちで、打込み高さも低いため、これらの影響は少ないと考えられる。また、型枠組立時に隙間が出来るとポーラスな表面になり、色合いが変化する。本工事では多数の抜き枠がランダムにセットされるため(1部材当たり約100個)、抜き枠の固定には、水みちが出来ないように考慮した。

また、型枠在置期間の違いが色調に与える影響を調べるために、**実験-3**を行い、その影響が少ないことを確認した。

c. 離型剤に関して

離型剤による色むら(変色)には以下のものがあげられる。

- ①脂肪酸系の添加剤はカルシウム石けんにより離型するもので通常カルシウム石けんが褐色を呈しているため褐色に着色する傾向がある。
- ②離型剤の使用濃度が濃いとき着色しやすい。
- ③油性及びエマルジョンタイプは高温時直射日光に当たる現場では黄褐色に色がつきやすい。
- ④離型剤自体が酸化し変色する場合、コンクリートに着色する。

離型剤に関しては塗布量および塗布から打設までの経過日数に関して**実験-4**を行い、離型剤の希釈に注意を払った。

1) 実験内容

型枠在置期間が穴側面の色調に影響を与えるかを確認するために以下の要領で型枠在置期間に関する実験を行った。

型枠脱枠剤を通常量塗布した抜き枠4個を型枠にセットし、コンクリートを打設する。翌日(打設後1日目)一つ目の抜き枠を脱枠し、その後2日毎に脱枠し、各穴の側面変色を確認する。図-5に試験体の概略図を示す。図中のA1, A2, A3, A4はそれぞれ打設後1, 3, 5, 7日目の脱枠である。

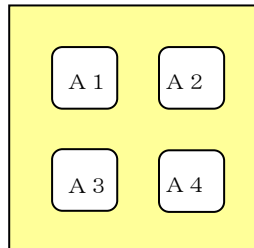


図-5 試験体概略図



写真-16 実験状況(3日目)



写真-17 3日目(A2枠)

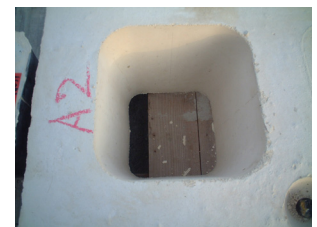


写真-18 5日目(A2枠)

2) 実験結果

写真-16では1日目脱枠に比べ3日目脱枠の方が黒っぽく見える。写真-17はA2枠の脱枠当日で、写真-18はA2枠脱枠2日後の状態である。脱枠直後は黒っぽく見えるが日数が経つと白っぽくなる。これはA1~A4全てに共通しており、打設10日頃には目視での区別がつかない状態になった。但し、実験中の天候が比較的安定していたことも考慮し、実際の脱枠作業は打設後2日目までに行うこととし、連休の場合も同様の対処をした。

実験-3 型枠経時変化実験

1) 実験内容

離型剤が部材の色調に影響を与えるかを確認するために以下の4種類の型枠で比較実験を行った。

- ①離型剤通常量を打設当日に塗布した型枠(B1)
- ②離型剤通常量を打設3日前に塗布した型枠(B2)
- ③離型剤を原液で打設当日に大量に塗布した型枠(B3)
- ④3日前に清掃し、打設日まで放置した型枠(B4)(離型剤無)

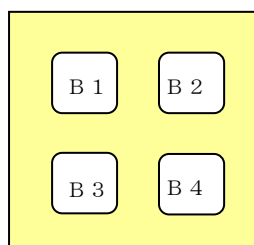


図-6 試験体概略図

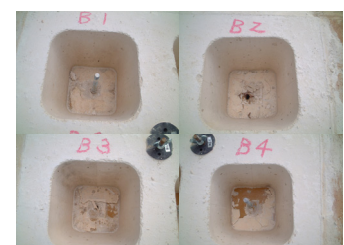


写真-19 脱枠後の部材状況

2) 実験結果

写真-19に部材の状態を示す。実験の結果B1, B2, B4では特に異常は見られなかった。B3の一部に型枠の着色のような黒染みが見られた。全体的な色調は他と変わらなかった。

実験-4 離型剤実験

5.2.4 養生に起因するもの

a. 蒸気養生

蒸気養生の場合、養生温度が管理されコンクリート表面の水酸化カルシウム・炭酸カルシウムの生成状況が均質となり、色調ばらつきに影響を与えにくいと考えられる。但し、蒸気養生においては結露に起因する色むらが生じやすいため、養生シートが部材に接して、一部に水滴がたまらないように、骨組みを密に入れる対策をとった。

b. 部材のストックに関して

部材出荷前のストック状態においても色むらは発生する。主な要因は外気との接し方によるコンクリート内部の物質移動であり、空気に接しない部分は黒くなる。代表的なものに仮置き時の支承痕がある。本工事では凹凸のある支承材を用い、外気が遮断される面を減らすようにした。

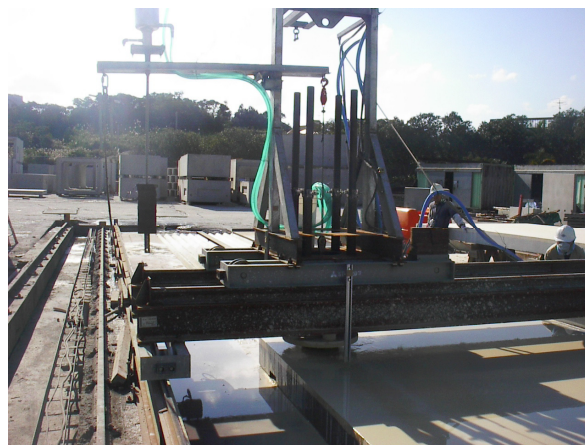
5.2.5 仕上げに起因するもの

a. 押さえ仕上げ

押さえが多くコンクリートが密実になると黒っぽく、逆に押さえが少ないとポーラスになり、白っぽくなる。通常密実な押さえが求められるが、本工事では琉球石灰岩のポーラスな質感が求められ、押さえ回数が制限された。そのため均一な押さえにすることが難しく、工場では従事する作業員を固定する等の対策を行った。

b. 切削仕上げ

工場での切削には、オートメーション化した切削機械（写真－20）を導入し、人力切削による切削加減の不均一さが出ないようにした。また切削影が目立ちやすい部材縦方向の切削ムラを無くすため、まず部材縦方向に切削し、その後横方向に切削することで統一した。切削仕上げによる色むらは、光の反射に関係する。切削の目が粗く乱反射が起きやすい場合は白っぽくなり、目が細かく乱反射が起きにくい場合は黒っぽくになると考えられる。これに対し仕上げを一定にするため、承認を受けた部材と同じ番手のカップを使用することを徹底した。



写真－20 表面切削機

5.3 実施部材の色調に関する諸問題

上記のように数々の対策を講じて製作した部材においても、色調の問題は数多く発生した。特に問題となったのは、見る人によって視感が異なることである。絶対的な評価の導入も検討されたが、今回の部材では測色計を使用して測色を行っても、その部材の色を決定することは不可能であり、結局は目視による相対的な評価以外に方法が無く、検査時の混乱につながった。また、相対的な評価をする場合において、偶発的に並んだ白っぽい部材と黒っぽい部材の色調差が問題となった。

色調に関する問題の多くは、仕上げ時の天候が大きく影響していたと考えられる。部材の色調差が大きいのは冬季の部材であり、沖縄県では日毎の気温差が大きく、雨の多い時期である。夏季の部材は総じて白っぽく、色調のばらつきが少ない。また、製作時期が冬季であっても、夏季に切削を行った部材は同様の傾向であった。

今回の工事において、仕上げ時の天候と部材の色調の関係を実験的に判断することは出来なかったが、今後の類似工事においては留意が必要と考えられる。

6. 部材架設

架設のポイントは、最長で 13m を超える部材の連続する面や穴を目地幅 10mm で、いかに精度よく納めるかであった。単一部材の高い製作精度および据付精度はもちろん、面全体での見栄えを重視し架設を行った。また製作や架設時期の差によって色調に違いが生じないように連続面での製作および架設の時期を考慮した。架設状況を写真-21に示す。

吊具は各部材長毎に運搬、仮置き、架設時に作用する応力を検討し、意匠要求である連続面でのインサート位置の統一を考慮して決定した。

建て方は、最大角度 80° まで建て起こすため、反転機セフターン (20ton) を使用、部材を地切りし吊り上げた状態で建て起こしを行った。揚重機は各ブロックの施工範囲に応じて、それぞれ 65ton クローラー、500ton・360ton・200ton 油圧クレーン各 1 台、高所作業車 1 台を使用し、1 日平均 9 枚の取付けを行った。架設計画図を図-7に示す。



写真-21 架設状況

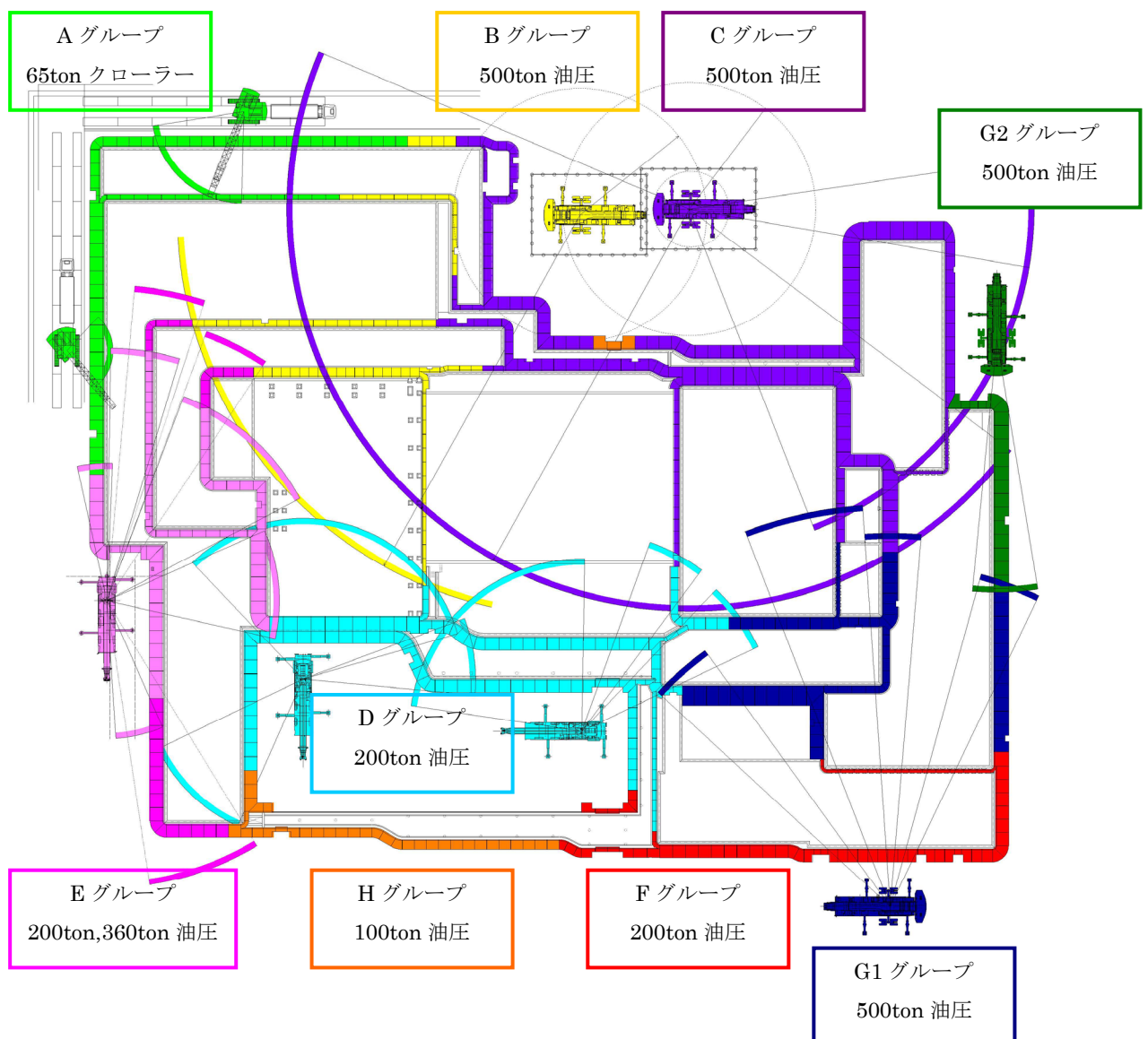


図-7 架設計画図

7. まとめ

数百年前の「グスク」という古く風化したイメージの壁を、まったく新しい特殊な材料で創り出し、抽象的なイメージを形にすることは困難を極めた。外面はグスクを模しているながら、対照的に高い部材精度、色調の均一性が要求されるシャープで幾何学的な部材の複雑な連続面、また、使用実績が無い材料で配合されたコンクリートと切削された仕上げ面、これらが生み出す独特な質感を表現することは、在来の場所打ち工法では難しく、PCa コンクリートに無限の可能性を見出すことができた。

謝辞

本工事においては、沖縄県教育庁文化施設建設室ならびに(株)石本建築事務所・(有)二基建築設計室の方々の多大なご指導をいただき、心よりお礼申し上げます。また本稿では記載出来なかったが、コンクリートの耐力試験等多くの実験を技術研究所に行っていたいただいている。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林一輔・和泉意登志・出頭圭三・睦好宏史：コンクリート辞典，2001.11
- 2) 大即信明・関博：コンクリート用材料としての沖縄産骨材の特性について，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，No.31，p74，1976
- 3) 竹内博幸・濱崎勝利・竜野三生：高流動コンクリートのフレッシュ性状に影響を及ぼす製造過程の変動要因に関する研究，土木学会年次学術講演会講演梗概集第5部，Vol.50，pp1124-1125，1995
- 4) 柳澤孝彦・斉藤勲・中根淳・大池武：ホワイトコンクリート打放しによる美術館の建築，コンクリート工学，Vol.31，No.5，pp27-38，1993.5
- 5) 小林俊秋：材料・養生方法がコンクリートの色調に与える影響，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.21，No.2，pp949-954，1999