

# ホワイトセメントを用いた沈埋トンネル換気塔の建設

吉平健治<sup>1</sup>・増田崇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>那覇港湾・空港整備事務所 第三工事課（〒901-2100 沖縄県浦添市西洲1-1）

<sup>2</sup>那覇港湾・空港整備事務所 工務課（〒900-0001 沖縄県那覇市港町2-6-11）

那覇沈埋トンネル換気塔は、景観上の観点から沖縄地域特有の琉球石灰岩の色彩に近づけるため白色ポルトランドセメントを用いたコンクリートを採用している。本報告では、沖縄県において出荷実績のないホワイトコンクリートの配合検討と現場施工及びプレキャスト部材の製作について報告する。

キーワード 白色ポルトランドセメント、換気塔、ホワイトコンクリート

## 1. はじめに

那覇沈埋トンネルは、那覇港と那覇空港及び本島南部地域の輸送体系を強化し、国道58号線の慢性化した交通渋滞緩和を目的に計画された、那覇ふ頭地区港口部を結ぶ県内初の海底トンネルである。このトンネルの両端部に、排気ガスを除塵しトンネル外に排出する換気塔が位置し、那覇港のシンボルタワーとして建設されている。

本報告は、換気塔の建設に使用したホワイトコンクリートの施工に関して報告するものである。

換気塔の外観について、1階低層部は琉球石灰岩及び琉球石灰岩風人造石（琉球石灰岩と海砂を白色ポルトランドセメントで固めた擬石）を積み上げた沖縄独特の城（ぐすく）をイメージし、2階より上層は打ち放しによる現場打ちコンクリート部分とプレキャスト部材から構成された25本の柱を有した形状となっている（図-2）。

なお、トンネル内の排気ガスを排出する機能の他に、トンネル内の非常時における避難施設や、換気設備・電気設備を集中管理する管理施設、施設の一般来客者を収容する施設としての機能を併せ持つており、地上約40mの高さからランドマークとしての役割も果たす。

## 2. 換気塔上部構造の概要

本換気塔の概要を表-1に示す。

表-1 換気塔の建物概要

	空港側換気塔	三重城側換気塔
建設位置	那覇市鏡水	那覇市西
構造種別	SRC造、RC造（建物本体）、PC造（モニュメント柱）	
規模	地上4階、塔屋1階	地上5階
建物高さ	1SL+36.3m (DL+43.0m)	1SL+39.0m (DL+43.0m)
敷地面積	8,841.66m <sup>2</sup>	9,926.88m <sup>2</sup>
延床面積	4,132.49m <sup>2</sup>	4,259.42m <sup>2</sup>
諸室構成	特高電気室、高圧電気室、自家発電機室等（1階）、管制室、通信機械室、会議室等（2階）、空調機械室等（3階）、展望室等（4階）	高圧電気室、換気電気室等（1階）、除塵機室等（3階）、展望台等（4階）



図-2 換気塔外観パース（三重城側）

### 3. 使用材料

換気塔の色調のコンセプトとして、沖縄地域特有の琉球石灰岩の色彩に近いものとすることを前提としている。この色彩を再現するために、コンクリートに用いる各種材料について、室内試験練りを行い30cm角の試験体を作製し検討を行った。

#### (1) セメント

普通ポルトランドセメント（以下、「普通セメント」という）を用いた試験体は、セメント自体の色味を消すため多くの顔料が必要となり、色調が濃く表れてしまうため（図-2），琉球石灰岩の淡い色彩を再現するのは困難と考えられた。のことより、色彩調整が比較的容易で沖縄県内でも流通している白色ポルトランドセメント（以下、「ホワイトセメント」という）を採用することとした。

なお、ホワイトセメントは、セメントの呈色成分である酸化第二鉄 ( $Fe_2O_3$ ) や酸化マグネシウム (MgO) を極端に少なくすることで白色化させており、基本的な性質は普通セメントとほぼ同等であることが既往の研究からも報告されている。

#### (2) 骨材

コンクリートの色調に骨材自体が影響を与える可能性はあったが、構造的に強度が満足することが必要であるため、供給する生コンクリート工場で常用している骨材を採用した。

#### (3) 顔料

コンクリートに添加する顔料は、目標とする色彩から黄色と赤の2種類を混合することとした。なお、顔料の添加量及び混合比率は試験体によりケースを絞り、詳細については生コンプラントを用いた実機試験の結果により決定することとした。

なお、室内試験の結果、顔料の添加による強度低下はないことが確認された。



図-2 供試体の色調比較(左：普通セメント、右：ホワイトセメント)

#### (4) AE減水剤

換気塔の柱及び壁には、光と陰影を強調するためと汚れを目立たなくすることを意図し、100mmピッチのリブが設けられている。このような複雑な断面形状を有していることから、コンクリートの充填性の確保が重要であるため、設計スランプ18cmを施工業者の技術提案により高性能AE減水剤を用い、21cmを採用した。

### 4. 実機試験と配合検討

ホワイトセメントを用いたコンクリートは、那覇地区の生コン工場において出荷実績がないため、各工場において配合強度式を有しておらず、また、ホワイトコンクリートのフレッシュ性状についても把握されていない。のことから、室内試験結果を踏まえ実際の施工を想定した実機試験を実施した。

#### (1) 実機試験

実機試験は、後述する配合強度式に用いるコンクリート強度補正值を算出するため、現場条件から選定した生コン工場（3プラント）において、3ケース（W/C=50%, 43%, 37%）の水セメント比を設定し、作成した標準養生した供試体と簡易断熱養生した供試体の圧縮強度を測定している。実機試験の概要と試験項目を表-2に、実験結果を図-3に示す。

表-2 実機試験の概要と試験項目

実施工場		A工場, B工場, C工場
設定条件	セメントの種類	白色ポルトランドセメント
	水セメント比	50%, 43%, 37%
	単位水量	175kg/m <sup>3</sup> 以下
	顔料	セメント量の1.1%
	スランプ	21±2.0cm
	空気量	4.5±1.5%
試験項目	分離性状	単位水量
	スランプ	単位容積質量
	空気量	標準養生供試体の製作
	室温・コンクリート温度	簡易断熱養生供試体の製作
	塩化物量	温度履歴（簡易断熱）

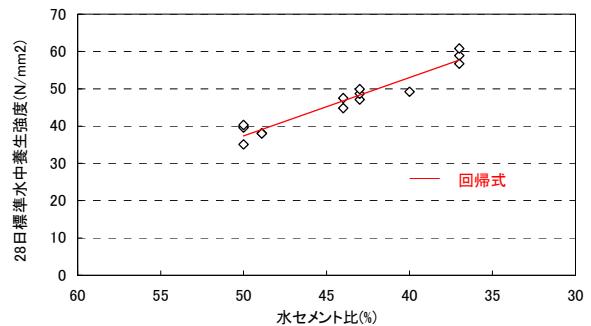


図-3 水セメント比と28日標準水中養生強度の関係

なお、実機試験の結果、同じ配合であっても使用するプラントの構造上の違いにより、わずかではあるが同じ色調にはならないことが確認された。このことから、コンクリートの打ち継ぎ目で色調が変わらないよう、使用する生コン工場を2工場に限定し、残りの1工場はトラブルがあった際の予備工場とすることとした。

### (2) モックアップ試験体の製作

ホワイトコンクリートの施工性の確認と外壁リブの間隔や色彩(顔料の配合)決定を目的に、2m×2mの実物大モックアップを作成した(図-4)。

ここで、型枠の継ぎ目(特に柱の角)の隙間からノロが抜けた箇所において、細骨材が露出し美観を極端に損ねる結果となつたため、実施工では隙間埋めに細心の注意を図り、打設している。

### (3) 配合検討

配合強度は、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」の簡易断熱養生供試体を用いた場合の配合式を用いた。

$$F = F_c + \Delta F + mS' n + 1.73 \sigma \quad (1)$$

$$F = 0.85(F_c + \Delta F + mS' n) + 3\sigma \quad (2)$$

ここに、F:配合強度(N/mm<sup>2</sup>)

F<sub>c</sub>:設計基準強度(N/mm<sup>2</sup>)

ΔF:構造体コンクリートの強度と構造体コンクリートの温度履歴と類似の温度履歴を与えた強度管理用供試体の強度との差を考慮した割増で、3N/mm<sup>2</sup>とする。

mS' n:標準養生した供試体の材齢m日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢n日における圧縮強度との差によるコンクリート強度の補正值(N/mm<sup>2</sup>)。

σ:構造体コンクリート強度管理用供試体の圧縮強度の標準偏差。0.1(F<sub>c</sub>+ΔF+mS' n)とする(N/mm<sup>2</sup>)。

実機試験結果(図-4)から水セメント比に対する標準水中養生28日強度の回帰式を求め、この回帰式より必要な設計基準強度に対する配合を決定した。決定した配合強度を表-3に、配合表を表-4に示す。

表-3 回帰式よりもとめた配合強度

設計基準強度 F <sub>c</sub>	強度 補正值 S	ΔF	呼び強度 (F <sub>c</sub> +S+ΔF)	標準偏差 σ	配合強度 F	(単位:N/mm <sup>2</sup> ) (%)
24	3	3	30	3	35.2	46.5
27	3	3	33	3.3	38.7	44.2

表-4 配合表

設計基準 強度 (N/mm <sup>2</sup> )	配合強度 (N/mm <sup>2</sup> )	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント 比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
24	30	20	21	46.5	50.0	174	375	864	888	3.188
27	33	20	21	44.2	49.1	174	394	834	896	3.349

## 5. 現場打ちコンクリートの施工

### (1) ゴム製型枠の使用

外壁にあるリブの角が脱型時に欠けるといった品質・美観確保のため、通常の型枠材を使用せず、合板ベニヤにリブを設けたゴム板を貼り付け、ゴム製型枠を製作した(図-5)。これにより懸念された角欠けは発生しなかつたが、以下の2点が問題となった。

- (a) ゴムの表面の細かい凹凸により、打設したコンクリート中の気泡が上部に抜けにくくなり、表面に気泡が残って美観を損ねた。
- (b) 型枠の転用を重ねる度にできるセパレータ用の穴の補修や隙間埋めに使用していたパテが、脱型の度に躯体に残った。

この問題に対して、ゴム型枠の表面にシリコン樹脂を塗布し、表面を滑らかにすることにより、型枠に接する気泡が抜けやすくなるようにした。また、この対策は同時に表面をコーティングすることになるため、パテが躯体に付着することを防ぎ、さらなる施工性の向上が図られた。



図-4 モックアップ試験体



図-5 本換気塔で使用したゴム製型枠(壁部分)

## (2) 単位水量、スランプの管理

室内試験及び実機試験において、ホワイトコンクリートの経過時間に伴うスランプの急激な変化があることが確認されたため、スランプ測定の頻度を多くした。具体的には、JIS A 1101に規定されている頻度の他に、 $F_c=24N/mm^2$ の場合は $50m^3$ に1回、 $F_c=27N/mm^2$ の場合は $30m^3$ に1回のスランプ試験を実施した。また、出荷から1時間が経過したコンクリートについても途中段階でスランプ試験を実施した。

## (3) 普通コンクリート箇所との施工区分

換気塔軸体の構築においては、経済性から外壁部分をホワイトコンクリートで、それ以外の軸体部分を普通コンクリートで打ち分けた。このため、打設回数が増え、打ち継ぎ部の処理等で施工手間が増えることによる工程的な課題があった。

もともとゴム製型枠の転用計画があったため、外壁部分の打設箇所や打設量をむやみに増やすことが困難であったが、ゴム製型枠の転用計画に因らない箇所での打設計画見直しにより、工程が延びることを最小限に抑えることができた。

## 6. プレキャスト部材の製作

換気塔のモニュメント柱は、プレキャストのカーテンウォール及びボックス部材を現場打ちの本体部に積み上げる構造となっている（図-7）。プレキャスト部材は、鋼製型枠により製作されており、ここで、施工区分（現場打ち部分とプレキャスト部分）による色調の違いや、カーテンウォールとボックス部材の打設方法による色調の違いが外観を損ねることが懸念された。

また、プレキャスト部分が取り付く現場打ち箇所において、型枠がコンクリートの側圧に起因するわずかな変形を起こしていたため、ボックス据付の際にリブの目地



図-7 プレキャスト部材（ボックス）

違いが目立つて見えてしまう問題が発生した。

色調の違いについては、事前にプレキャスト試験体を作成し、現場打ちモックアップと比較調整して顔料の添加量を決定したため、施工区分による差は見られなかった。また、打設方法の違い（縦打ち、寝かせ打ち）についても、その差は見られなかった。

リブの目違いについては、ボックスを数回回転することで目違いを最小にしている。

## 7. 結論と今後の課題

本換気塔の建設にあたり、ホワイトコンクリートを使用したこと、前提条件としていた琉球石灰岩の色彩に近づけることができた。

現場での施工においても、普通コンクリートとの打ち分けによって打設回数が増え施工上の手間も生じたが、ホワイトセメント特有のフレッシュ性状の経時変化を克服し、品質や美観の確保を図ることができた。

現在、換気塔は、本体に取り付く外部階段を施工中である（図-8）。外部階段の仕上げはそのほとんどが琉球石灰岩風人造石となっているが、一部ホワイトコンクリート施工箇所が残されている。ホワイトコンクリートは製造する工場により品質や色調が異なることから、既設の本体部分との色彩調整や打設時の品質管理には細心の注意を払う必要がある。



図-8 換気塔完成部分（空港側）

## 参考文献

- 1) 桑原 実、柳澤 孝彦ほか:ホワイトセメントを用いたコンクリートの打放し施工（その1 一般的品質と色調），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp187-188, 1993.
- 2) 棚木 隆：ホワイトセメントーその特性と施工事例，セメントコンクリート，No. 753, pp18-22.