

中央環状線山手トンネル換気塔の設計・施工

— 都市景観に配慮したデザイン —

伊東 昇*1・杉江 武洋*2

1. はじめに

首都高速中央環状線山手トンネルは、首都圏の道路3環状の一角を成し、池袋・新宿・渋谷といった3大副都心を結ぶ延長11 Kmの自動車専用道路である(図-1)。周辺環境への配慮から都市高速道路としては初めて基本構造にトンネル構造を採用し、7箇所14本の換気塔が山手通りの中央分離帯に建設される。このうち、新宿～池袋を結ぶ延長6.7 Kmが平成19年12月22日に開通し、5箇所9本の換気塔が建設された。

換気塔が建設された山手通りは、現在道路を拡幅し、広々とした緑豊かな快適でやさしい道路として整備が進められている。高さ45 mを有する換気塔は、その構造規模から沿道景観に与える影響が大きいと考えられ、山手通りの整備コンセプトに沿った都市景観と調和することが求められていた。

この要求に応えるために、換気塔にプレキャスト・プレストレストコンクリート構造を採用し構造物をコンパクトにすることで、現場工程の短縮を図り、視覚的な圧迫感を低減した。また、鉛直方向にプレストレスを導入することで耐震性能も大幅に向上させた。

換気塔デザインの決定にあたっては、住民へのアンケート結果を参考としつつ、専門家からなる委員会を設置し施工上のディテールを含め審議した。その結果「周囲に溶け込み・スッキリとした・清潔な感じ」のデザインを実現させた。代表的なデザイン処理手法として、①排気部と給気部を分離構造とし、給気部の高さを下げることで換気塔全

体のボリュームを落としたこと、②排気部形状は六角形とし6面ある出隅部すべてに面違いを設け、受光の変化によりグラデーションが際立つようにしたこと、③表面に条溝リブを設け外壁面に汚れ、反射、車両騒音の拡散対策を施し、太陽高度の変化に合わせ受光面が変化するようにしたことがあげられる。

このデザインとプレストレストコンクリート技術が融合したことによって、周辺住民から受け入れられる換気塔の建設が可能となった。

ここでは、その設計と施工について報告する。

2. 設計概要

2.1 デザイン選定の流れ

中央環状線山手トンネルの換気施設として山手通り中央分離帯に建設される換気塔は、施設機能の公共性から永く受け入れられるデザインが求められた。このことから、学識経験者や都市景観の専門家等で構成される「中央環状新宿線路内換気塔デザイン選考委員会」(以下、「デザイン選考委員会」)を設け、見飽きることのない美しさを持ち、山手通りの街路景観と調和した換気塔デザインを創出するため、地元住民の方々もつ換気塔に対する要望や意見について実施したアンケート調査結果を参考として換気塔デザインを決定した。デザイン決定のフローを図-2に示す。

2.2 地域特性の把握

換気塔建設地の周辺状況を把握し、重要な視点場の特定や各換気塔の見え方の特徴を整理するために計画地の現況調査を行った。また、山手通り整備と周辺地域の歴史的な

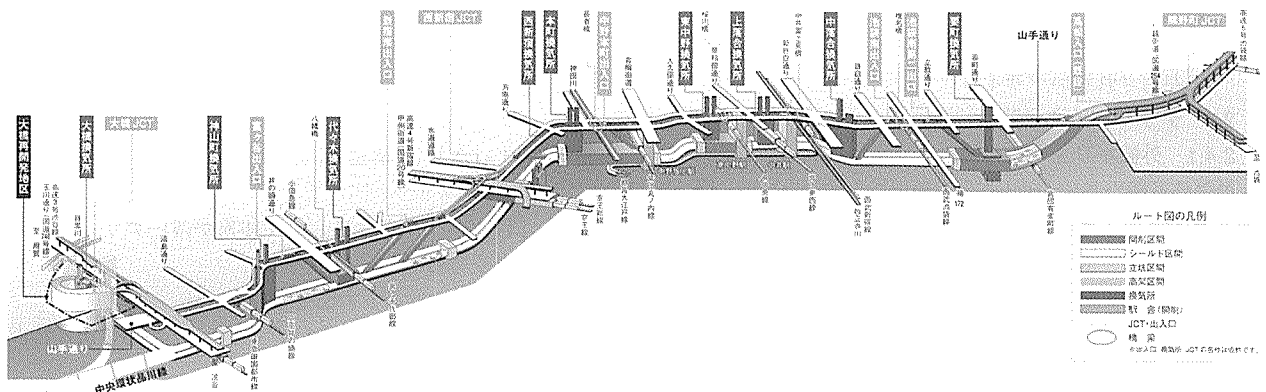


図-1 路線概要

*1 Noboru ITO : 首都高速道路(株) 保全・交通部 交通安全対策グループ
 *2 Takehiro SUGIE : 首都高速道路(株) 東京建設局 設計第一グループ

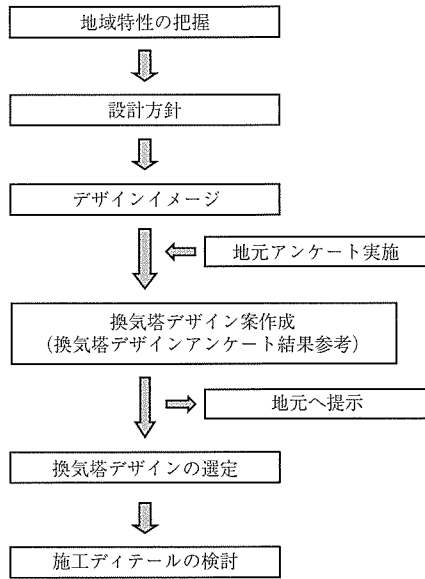


図-2 デザイン決定フロー

発展経過を把握するために、古地図を基に地域の沿革を調査した。

この結果、山手通り沿い 10 Km 程度の限られた範囲の 7 地区がそれぞれ特徴をもつものではなく、都心系と住居系の大きく 2 分類できることを確認するとともに、地区ごとにまったく異なるデザインとするのではなく、統一感や連続感のあるデザインが求められることを確認した。

2.3 設計方針

「デザイン選考委員会」では、以下のような 3 つの設計方針を決定した。

- ① 圧迫感の少ないデザイン
換気塔規模の検討に合わせ、周辺環境へ配慮した圧迫感の少ないデザイン
- ② 周辺環境と調和したデザイン
山手通りの中央分離帯に連続して建つため、都市景観として山手通りと調和したデザイン
- ③ 時（とき）の移り変わりに配慮したデザイン
昼夜、四季の変化や永い年月にも配慮し、時代や流行に左右されないデザイン

2.4 デザインイメージ

2.4.1 外観ボリュームの検討

換気塔外観のボリューム面と形態面から検討を行い、図-3 の 3 タイプのモデルで比較を行った。

- ① フルスケール案
排気部と給気部を一体のボリュームでとらえた案
- ② 上下分離案
給気部の高さを必要最小限の高さにすることで、換気塔ボリュームを最小限に抑えた案
- ③ 排気部・給気部独立案
排気部と給気部の高さを変えると同時に、保守用階段をタラップや自走式ゴンドラなどとする事で取り止め、排気部給気部間をオープンスペースとした案

基本設計案	ミニマム案	
① フルスケール案	② 上下分離案	③ 排気部・給気部独立案

図-3 換気塔外観ボリューム類型

2.4.2 外観のイメージ

換気塔の基本形態は、① 施設が備えるべき機能を満たし、恣意性を排除して工学的に美しい形、② 見飽きることのない美・普遍的な美、経年変化に耐えられる美をもつ形とするため、建築的な形態や装飾的な形態ではなく単純幾何学形態として、図-4 のようなデザインイメージを作成した。その中で、平面形が六角形または八角形案が視覚的圧迫感低減に効果的であるととともに、スリムでシャープなシルエットをもち、下部換気所との構造的な取り合いに優れた案であることが確認された。

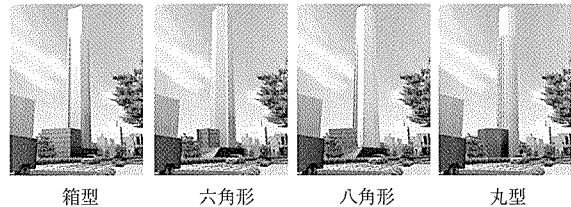


図-4 換気塔デザインイメージ

2.5 デザインアンケート

換気塔周辺の住民の方を対象に上記デザインイメージ案を提示し、併せて換気塔デザインに求めるイメージについて以下のようなアンケートを実施した。

- ① デザインの印象（イメージ）について
 - ② 換気塔の調和とまちの目印（ランドマーク）について
 - ③ デザインの連続性と地域性について
 - ④ 換気塔デザインについての意見
- アンケート結果としては以下のようなものであった。
- ① 「すっきり」「清潔」「明るい」「落ち着いた」の意見が多い。
 - ② 「目印になるように」と「印象が薄いデザインに」が同程度であった。
 - ③ 「地域性を配慮」の意見が多い。
 - ④ 「煙突のように見えないデザイン」「周囲に溶け込んだもの」「地域との調和」

このような結果を受け、下記のようなデザイン対応を行うことを決定した。

- ① 「地域と調和」したデザイン要望を反映し、換気塔は山手通りの利用者から連続的に見えるため、全体的に統一性のあるデザインとする。

- ②「周囲に溶け込んだもの・印象を薄く・存在感の薄い・煙突らしくない」デザイン要望を反映し、都市景観を考慮し排気部は印象を薄くするようなデザインとする。
- ③「地域性を配慮、まちの目印」となるようなデザイン要望を反映し、地域性に配慮して給気部はまちの目印となるようなデザインとする。
- ④「すっきり、清潔、明るい感じ」のデザイン要望を反映し、換気塔の平面形態や外壁面の肌合い等を検討し、すっきり、清潔で、明るい感じのデザインとする。

2.6 デザインの選定

「設計方針」「デザインイメージ」「デザインアンケート」を基にデザイン案を作成し、「デザイン選考委員会」で審議・選定を行い、換気塔周辺住民の方を対象として説明会を開催した。

2.6.1 排気部・給気部基本形状の決定

- ① 排気・給気部を分離し当初設計より給気部を低くすることで実現したミニマムなデザインとした(図-5)。
- ② 至近景での圧迫感を考慮し、給気開口を上部に設け給気部高さ5mとした。また、排気部と異なる幾何学形である立方体とした。
- ③ 排気部は単純幾何学モデルとしたデザインのなかで視覚的圧迫感低減のため、スリムでシャープなシルエットをもち、下部換気所との構造的取り合いに優れた六角形の平面形とした。

2.6.2 排気部外壁デザインの決定

・六角形出隅部面違い(図-6)

六角形の平面形は外壁受光面の変化により、1日の時間や季節感が感じられる。この光のグラデーションが際立つよう、六角形の出隅部に面違いを設け、すっきりしたデザインとした。各面の面違いは、歩行者の至近景に配慮し、あらゆる視点から視認できるよう6面に設けた。また、面違いの向きは時計回り方向で、太陽の影が落ちる方向に設けることとした。

・条溝リブ(図-7)

1日の太陽の変化に合わせた面違いの採用

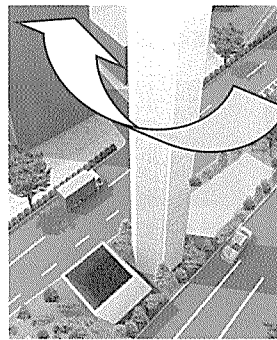
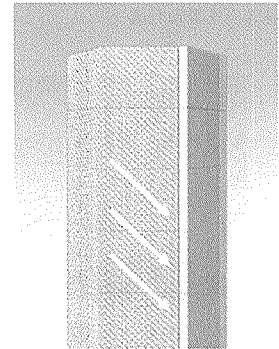


図-6 面違いの採用



【面違い+斜めリブ】

図-7 リブの採用

排気部の外壁面は、汚れ対策や光の反射対策、車両騒音の拡散反射対策として効果的である条溝リブを設け、何年経っても清潔感のあるすっきりしたデザインとした。また、リブは太陽高度の変化に合わせ、常時受光面の変化がグラデーションとして認識され、水切り効果も期待でき、汚れが目立たない斜めリブのデザインとした。

・排気部外壁仕上げ

周辺地域との調和と清潔感のある明るいイメージの換気塔となるよう、排気部は周辺のどのような色とも調和することができるコンクリートの素材色とした。

・給気部外壁仕上げ

給気部の外壁仕上げは、地元アンケート結果から「地域性への配慮」を反映することとした。

その色合いについては、主な沿道建物外壁の平均色と同系の色彩とした。

2.7 施工ディテールの検討

選定された換気塔デザインを適切に実現させるため、換気塔のディテール等を原寸モックアップ模型や色見本を用いて審議・検討を行い施工段階に反映した。

2.7.1 排気塔リブ

リブについて検討し、幅55mm、深さ15mmとした(図-

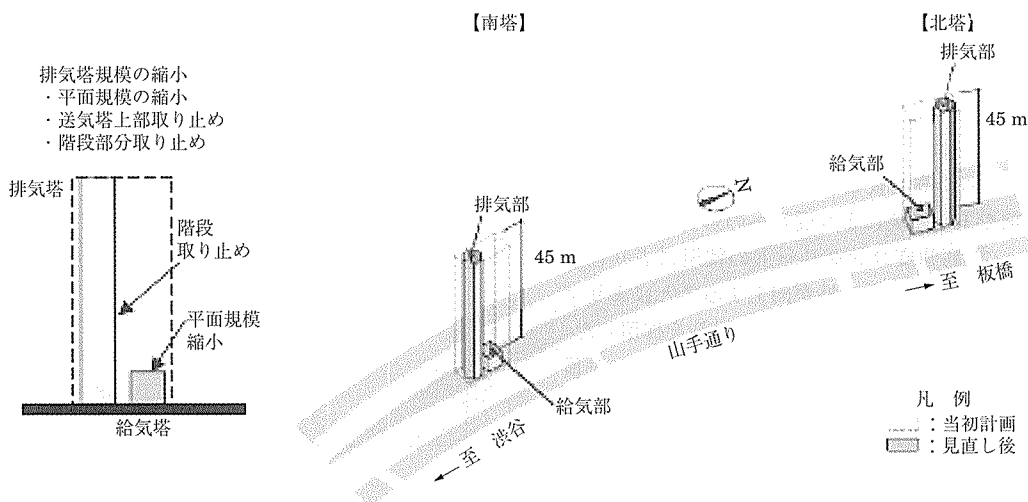


図-5 外観ボリューム低減

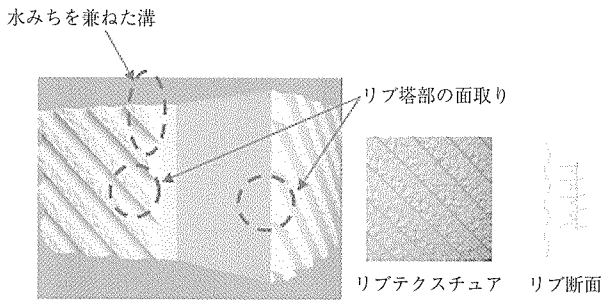


図 - 8 リブと面違い

8)。リブ底面の面状について平坦タイプとはつりタイプのモックアップを製作し、換気塔建設現場で地上 30 m の位置まで吊り上げ検討した結果、はつりタイプとした。また、はつりの形状について、できるかぎり均一化を図るために型枠を調整し実現することとした。

2.7.2 排気塔の色彩・塗装

原寸模型に自浄作用のある光触媒塗料を用いて塗装し明るさ加減を検証した結果、「5Y7.5 / 0.5」の光触媒塗装に決定した。

2.7.3 排気塔の面違い

六角形の一辺約 3 m に対する面違い部の幅について、100 mm, 200 mm, 300 mm とでプロポーショナルを検証し、バランスの優れた 200 mm を採用した。また、塗装面の仕上げ粗さについてモックアップで 3 パターンを作成し多少荒らしたマットな仕上りに決定した。

2.7.4 給気塔のテクスチャ・色

外装デザインコンセプトを踏まえて、石材、タイルサンプルを製作し、換気塔建設現場ごとに周辺建物の色調を確認しながらテクスチャを含め決定した。

2.7.5 その他

- ① パラペット笠木見付高さは、既製品を使用しながらも目立たないようにするため 40 mm とした。
- ② 斜め条溝リブを設けているので、デザイン上、水平目地を設けないこととしていたが、現場建方精度に配慮し、最低限の寸法として水平目地を 20 mm とした。

上記のような流れで決定したデザインの特徴を図 - 9 に示す。

3. 構造概要

排気塔の構造は、① 工場で施工することにより複雑なリブ形状の実現といった高品質なものができること、② 現場施工工期の短縮や工場塗装により周辺への影響を極力少なくできること、③ 高強度コンクリートの使用により軽量化・コンパクト化が図れ、耐久性が向上することによりプレキャスト・プレストレストコンクリート構造を採用した。

排気塔平面の寸法は、標準で一辺の長さが 3.0 m, 対頂間が 6.0 m, 対辺間 5.4 m の六角形である (図 - 10)。

このサイズのセグメントが運搬可能となるように 1 段分を二分割で工場製作し、現場搬入後接合した。1 段の高さは 2.5 m であり、18 段積み上げることで 45 m の高さとした (図 - 11)。

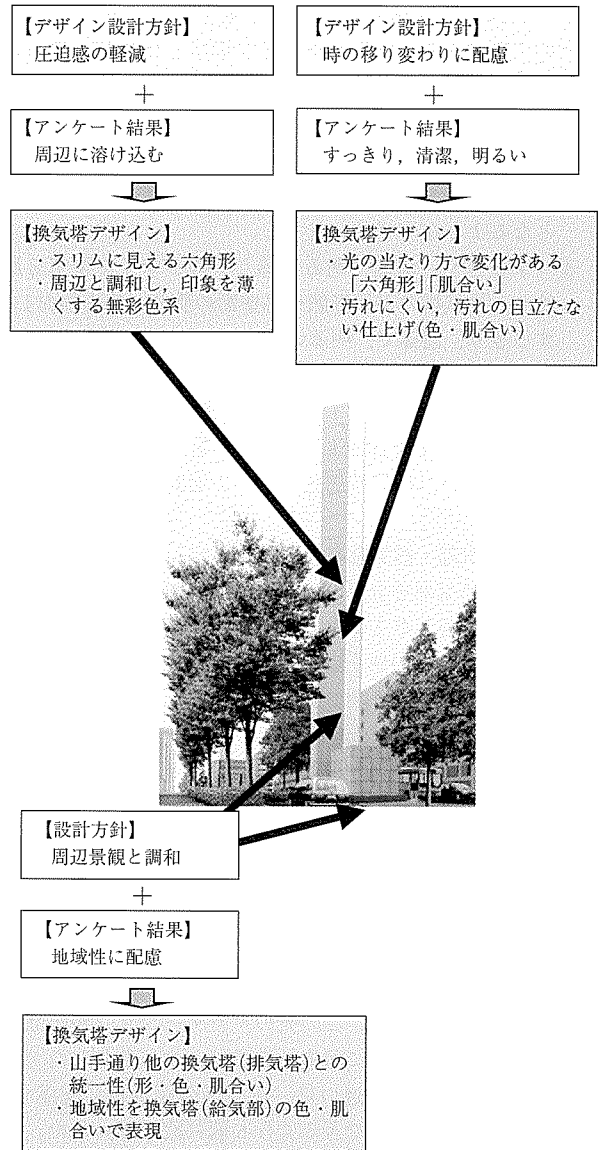


図 - 9 換気塔デザインの特徴

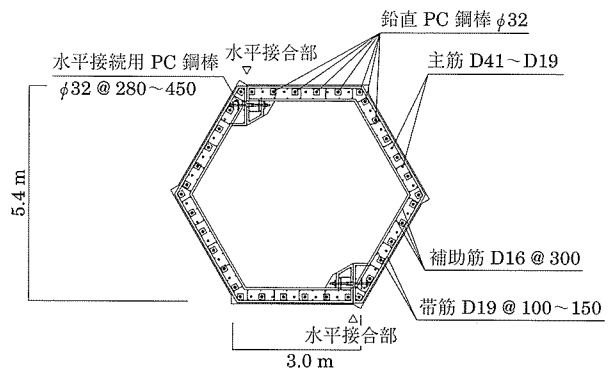


図 - 10 排気部平面

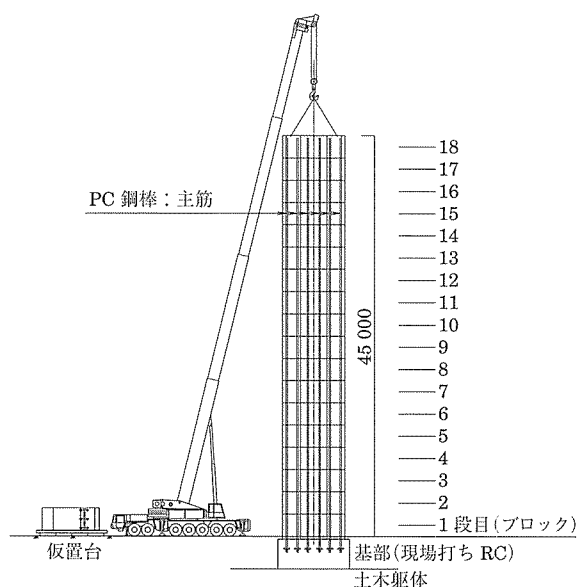


図 - 11 排気部立面

二分割のセグメントを接続するために水平方向のプレストレスを導入し、地震時に生じる曲げに伴うせん断応力度に抵抗している。

鉛直方向の接続は、36本のPC鋼棒と30本の主筋を段ごとに接合し積み上げた。

耐震安全性の目標は、大地震後構造体の補修をすることなく使用できることを目標とし、人命の安全に加えて十分な機能確保を図ることとしている。

4. 施工概要

換気塔は、山手通り（片側2車線）の中央分離帯のエリア内に構築するが、その作業帯幅は18m程度と狭く、45m上空の作業高さからは第三者（車両・歩行者・建築物）通行帯は作業直下に等しい。

第三者通行帯の頭上または換気塔周囲の地上からの防護設置は、そのスペースの確保および管理上の理由より適当でないと判断し、セグメント架設時ごとに設置するブラケット型の防護兼足場を採用した。

セグメントは工場で作成後、運搬に低床トレーラーを用い、取り卸し・架設にトラッククレーンを使用した。現場では部材を水平方向接合する接合ヤードと接合した部材を仮置いてブラケット足場をセットする仮置きヤードを設置した。

水平方向の接合は、接合面（マッチキャスト面）に接着剤を塗布し、微妙な不陸を修正しPC鋼棒にてプレストレスを与えた。

鉛直方向の接合は、鉛直鉄筋を機械継手にて接続し、目地モルタルの硬化後、PC鋼棒でプレストレスを与えた。架設工程は、当初3.0日/段を1サイクルと想定していたが、2.5日/段の工程短縮を図り、換気塔1塔の施工日数は2.5日×18段＝45日（実働）を目標とした。

4.1 排気塔セグメントの製作

セグメント一節の高さは2.5mで、重量は約43tである。コンクリートの設計基準強度は $f_{ck} = 50 \text{ N/mm}^2$ で流動化コ

ンクリートを使用した。

セグメント切離しの際は、一旦水平方向にスライドさせて、セグメントを切り離した後、セグメントを吊り上げる型枠構造とした（写真-1）。そのため、外型枠は6面がそれぞれ開く構造とし、ガイドレールを使用してスムーズに移動できるようにし、型枠の組合いが人力でできるようにした。

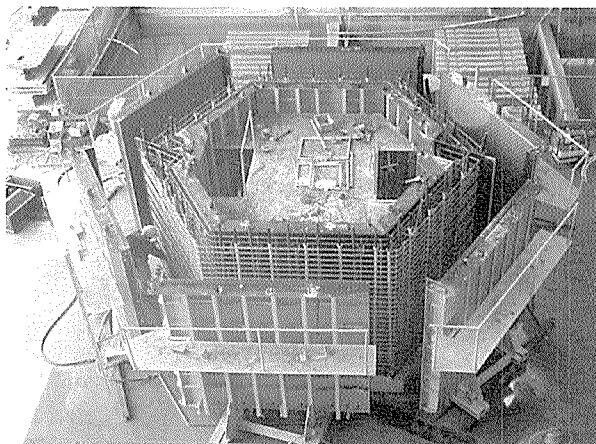


写真 - 1 型枠全景

鉄筋の組立ては型枠の隣において別途地組をし、組み上がった鉄筋をクレーンで吊り上げ、所定の位置にセットした。

鉄筋の吊り上げ時にバラバラにならないよう、高負荷用鉄筋グリップで確実に鉄筋どうしを固定した。主鉄筋の位置、カップラーシースの位置は高い精度を必要とするため、取り付け治具を底版に固定し、主鉄筋が動かないよう工夫した。PC鋼棒定着具のアンカープレートは埋込みタイプとせず、コンクリート天端に箱抜きをして、現場施工時に取り付ける構造とした。

打設方法は、プラントより、アジテータ車で運搬し、コンクリートホッパーにて打設した。

打設後、大型のシートで型枠ごと覆い、一晩高温促進養生を行った。

脱型されたセグメントは養生を行い、光触媒塗装を行った。

4.2 排気塔の築造

・セグメント現場搬入・反転

セグメントを搬入ののち、反転架台上でセグメントの反転を行った。トレーラーにより運ばれたセグメントをL字形をした反転架台にのせ350tクレーンを主フックと補助フックを使用して反転した（写真-2）。

・セグメントの接合

プレキャスト部材をスライドして接合するため、底版には塩ビ板（10mm＋10mm、グリス塗布）を配置した。2分割の部材を20cm程度の間隔を空けて取り卸し、水平PC鋼棒を接続した。接着剤はエポキシ樹脂系の接着剤を使用し、塗布厚を1mm以上の厚さで可使時間内に塗布した（写真-3）。



写真 - 2 セグメントの現場搬入

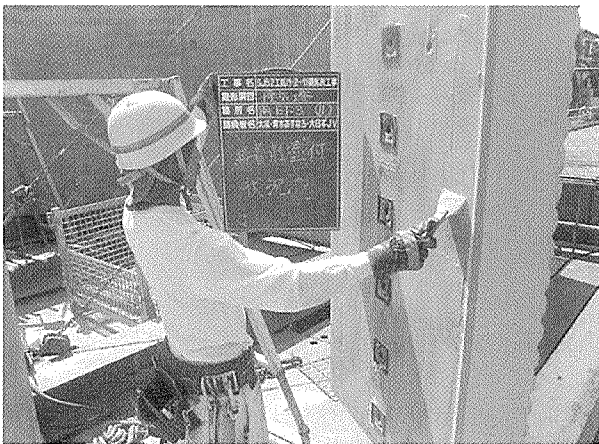


写真 - 3 水平接合部への接着剤塗布

・水平 PC 鋼棒の取付け・緊張

水平鋼棒は、セグメントを約 50 mm のところまで引き寄せてから接続を行った。ねじ込む PC 鋼棒には、ねじ込み長さのマークをあらかじめつけておき、目視で確実にねじ込まれたかを確認した。

水平鋼棒（φ 32）の緊張は 70 t 緊張ジャッキを 2 台使用し、両方の接合面を同時に緊張した（写真 - 4）。本緊張に

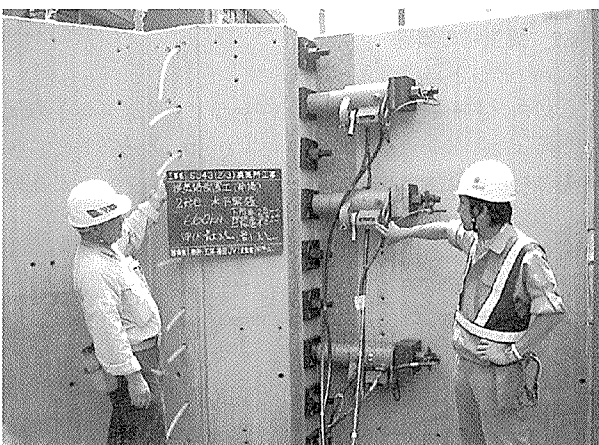


写真 - 4 水平 PC 鋼棒緊張状況

先立ち、接合面のなじみを取るために予備緊張を行った。予備緊張は、中心鋼棒、上端鋼棒、下端鋼棒の 3 本で行い、所定の緊張力（660 kN/本）の 60 % の緊張力を与えた。鉛直接合面を均一の緊張力で接合させるために、接合部材の中心から、外側（上端、下端）へ向かって緊張した。最後に、予備緊張を行った 3 本の鋼棒に所定の緊張力を導入した。

緊張完了後、あらかじめセグメントに埋め込まれた注入用ホースを利用し、グラウトを充てんした（写真 - 5）。

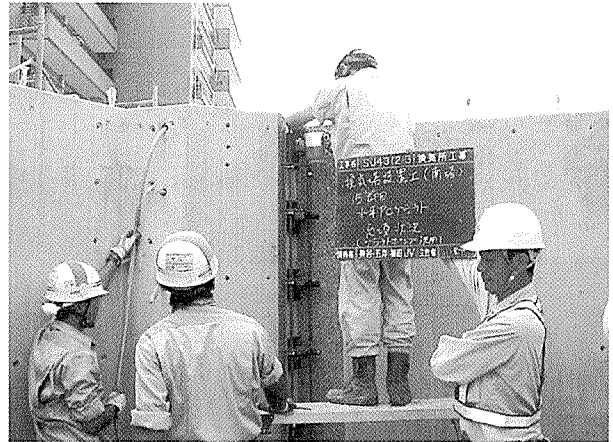


写真 - 5 水平 PC グラウト注入状況

・セグメントの架設

地上で組み上げた 1 節のセグメントをクローラークレーンで架設した。

積み上げるセグメント間には、20 mm の水平目地を設けた（図 - 12）。水平目地には、高強度グラウト材を電動モルタルポンプにて充てんした。まんべんなく注入するため、仕切りを設けて、片押しした。

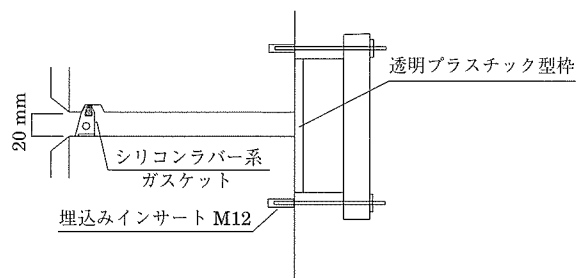


図 - 12 水平目地断面

注入口 1 から注入したモルタルが注入口 2 からふきだすまで注入した。その後注入口 2 から注入し、注入口 3 からふきだすまで注入した。順次、注入口 6 まで注入を確認した（図 - 13）。なお、外側にはシリコンゴムのガスケットを取り付け、モルタルが漏れないように注意しながら作業した。内側には透明型枠を使用し、注入状況がわかるようにした。注入作業時のポンプの圧力は 0.1 MPa 以下を目安とし、注入時間は約 60 分であった。圧縮強度は毎回テスト

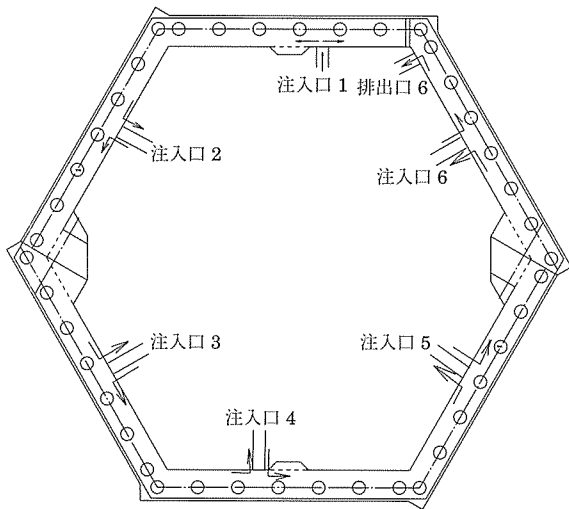


図 - 13 水平目地モルタル注入手順

ピースを採取し、材齢 18 ~ 24 h で 35 ~ 50 N/mm² の強度発現を確認した。

水平目地の無収縮モルタルの圧縮強度 ($\sigma = 35 \text{ N/mm}^2$) 確認後、緊張作業を行った (図 - 14) (写真 - 6)。緊張により構造物へ偏心力がかからないよう、ジャッキを対角線上に配置し、順次緊張を行った。鉛直方向の PC 鋼棒 ($\phi 32$) を 1 断面あたり 36 本使用しており、1 本あたりの緊張力は 690 kN であった。

緊張完了後、グラウト注入を行った (写真 - 7)。

鉄筋継手部分には高強度モルタルを注入した。注入作業は、ジョイントの下部注入口から注入し、上部排出口から排出を確認した後、ゴム栓で蓋をした (図 - 15)。

この作業を 18 節繰り返し、45 m の換気塔 1 塔が完成

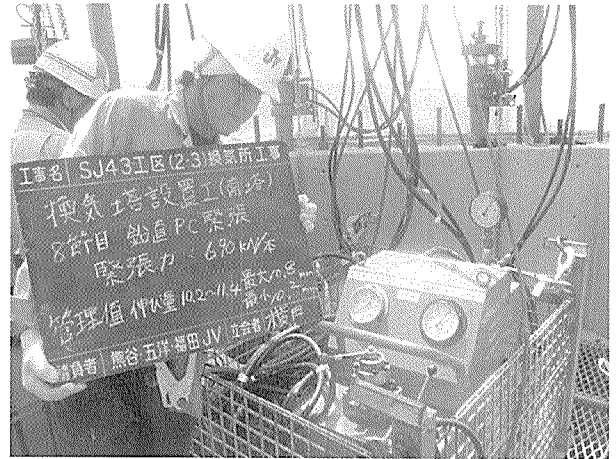


写真 - 6 鉛直 PC 鋼棒緊張状況



写真 - 7 鉛直 PC グラウト注入状況

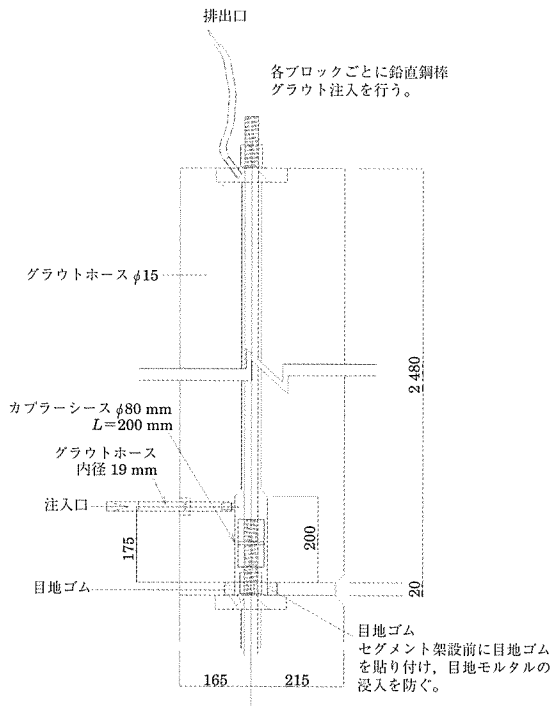


図 - 14 鉛直 PC 鋼棒接合部断面

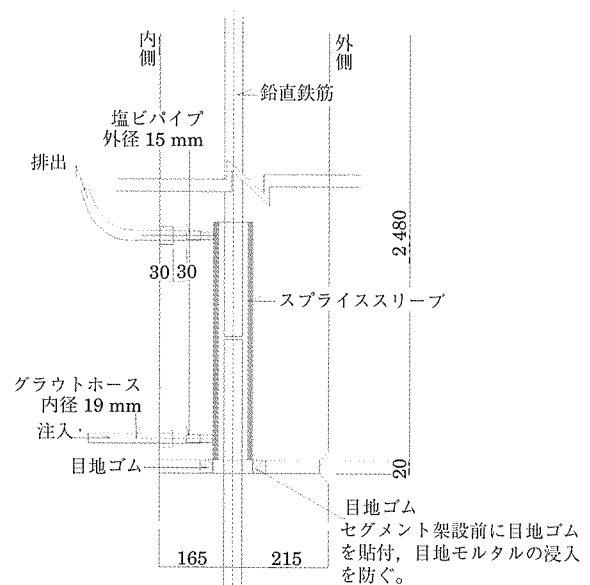


図 - 15 鉛直鉄筋接合部断面

した（写真 - 8, 9）。



写真 - 8 完成写真（全景）



写真 - 9 完成写真（排気塔）

5. おわりに

今回、都市景観に配慮した換気塔の設計および施工について報告した。

今後の都市内高速道路建設では、トンネル構造を基本とせざるを得ない状況であり、その際の必要施設である換気

塔について、今回の事例が一つのベンチマークとなると思われる。

最後に、これまで換気塔デザインの選定および換気塔の施工に携わっていただいた関係各位の方々に感謝の意を表します。

【2008年3月14日受付】



図書案内

PC技術規準シリーズ

外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準

頒布価格：会員特価 4,000 円（送料 500 円）

：非会員価格 4,725 円（送料 500 円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版