

招待論文 海洋人工島に構築される換気塔の設計 (東京湾横断道路川崎人工島)

THE DESIGN OF A TUNNEL VENTILATION STATION CONSTRUCTED IN AN OFF SHORE MANMADE ISLAND
(KAWASAKI MANMADE ISLAND OF TRANS-TOKYO BAY HIGHWAY)

藤田信一*長谷川明機**壇 峻***黒田正信****

By Shinichi FUJITA, Akinori HASEGAWA, Takashi DAN and Masanobu KURODA

The Trans-Tokyo Bay Highway will connect Kawasaki and Kisarazu city directly by crossing the Tokyo Bay. The highway structure will consist of 9.5 km long tunnels under the Kawasaki water, and 4.4 km long bridges over the Chiba water. The Kawasaki manmade island is halfway of the tunnels. In this island, the ventilation shaft will be constructed. It is used for a ventilation shaft as well as a tunnel access during construction. This structure would be one of the largest marine structures in the world. Advanced technology and know-how shall be used in the design and construction. The Kawasaki ventilation shaft is now being designed and an outline of the design of this structure is described in this paper.

1. はじめに

東京湾横断道路は東京湾湾央部の川崎市と木更津市を結ぶ全長15.1 kmの自動車専用道路であり、トンネル、橋梁及びこれらを結ぶ人工島から構成されている(図-1参照)。川崎側から9.5 kmがトンネル、木更津側から4.4 kmが橋梁であり、トンネルの中央部及びトンネルと橋梁の接続部には人工島(各々川崎人工島及び木更津人工島)を築造する計画である。川崎人工島には海底道路トンネルのための換気用立坑であり、またシールドトンネル施工時の発進用立坑である川崎換気塔を構築する計画である。本換気塔の構造的特徴は、換気塔本体の側壁が地下連続壁を遮水・山留壁として利用し主として逆巻き工法で構築されること、シールド発進用立坑として利用するためシールド開口時に大きな応力が作用すること、換気塔本体の下半分が海底面下、上半分が海水中に位置し既存構造物にあまり例を見ない形状であること、大きな海水圧を受け、止水・防食上厳しい環境下にある大型鉄筋コンクリート構造物であること、等があげられる。

本換気塔は現在設計を進めているところであるが、これらの構造的な特殊性に鑑み、主として地下連続壁完成後から換気塔完成後までの設計概要について述べるものである。^{1) 2)}

-
- | | | |
|----------|--------------------|-----------------------|
| * 課長 | 日本道路公団東京第一建設局事業調整部 | (〒105 東京都港区虎ノ門1-18-1) |
| ** 課長 | 東京湾横断道路(株)設計部 | (〒102 東京都千代田区一番町15-5) |
| *** 課長代理 | 同上 | |
| **** 係長 | 同上 | |

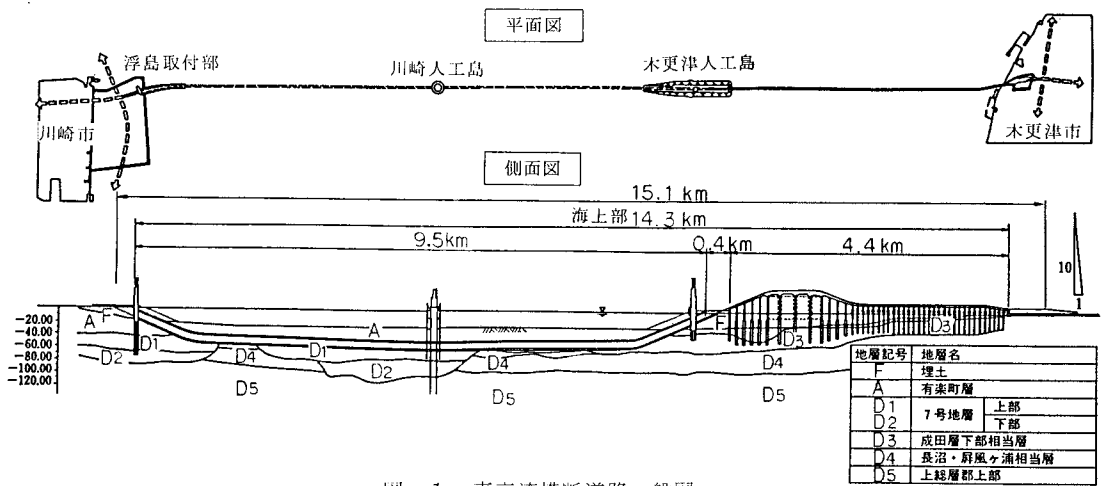


図-1 東京湾横断道路一般図

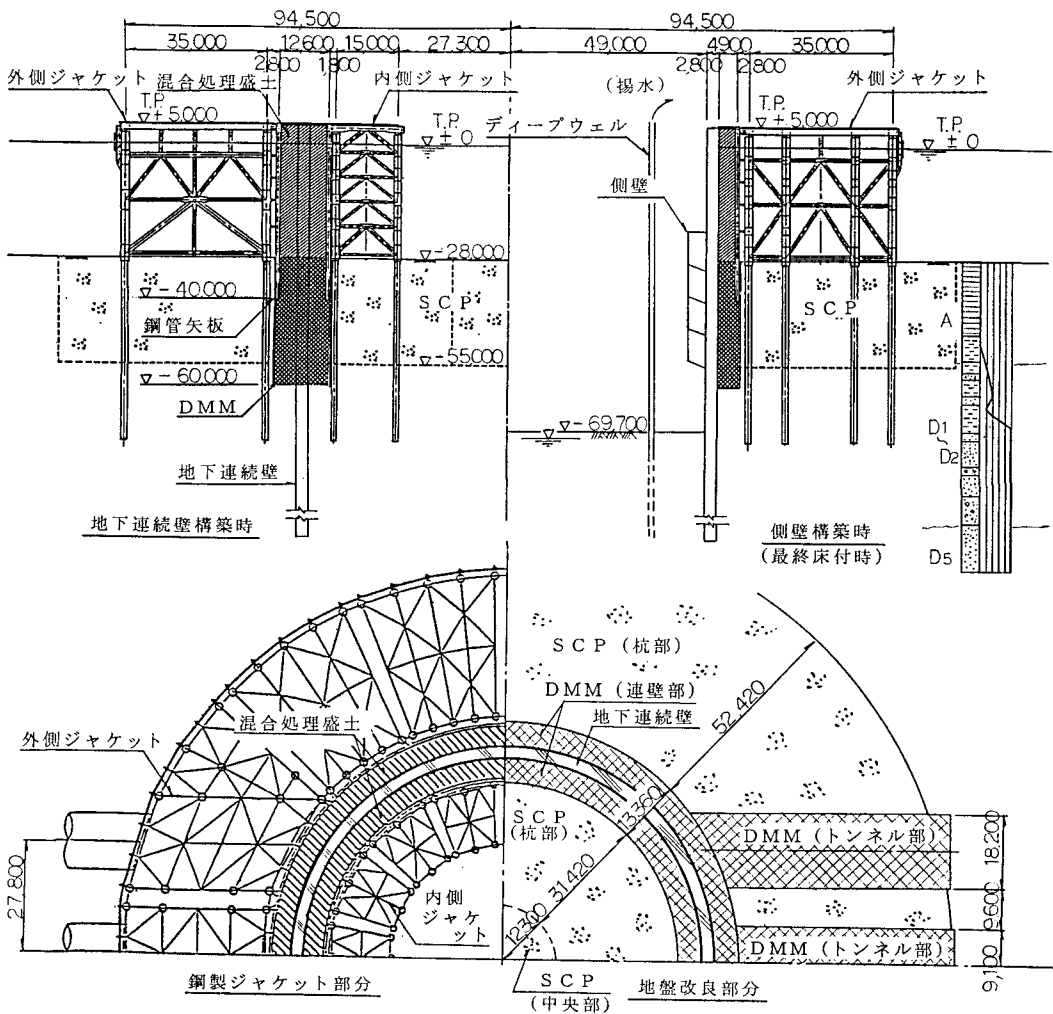


図-2 川崎人工島概要図(施工中)

2. 川崎人工島及び換気塔の概要

(1) 地質概要

川崎人工島付近の水深は約28mであり、地質は図-1、2に示すとおりである。海底面から約25mは沖積層（有楽町層：A層）であり、N値が0の軟弱粘性土から成っている。その下の約35m（D₁～D₂層）は洪積世の堆積層であり、N値が10～70の砂質土と粘性土の互層となっている。T.P.－約90m以深（D₅層）は第三紀鮮新世末期から第四紀洪積世前期にかけて堆積した地層であり、N値が70以上のきわめて密に締まった砂で構造物の設計に当って工学的基盤と考えられるものである。

(2) 人工島の概要

建設中における川崎人工島の概要を図-2に示す。川崎人工島は2重のドーナツ状の鋼製ジャケット、及びその間に挟まれた幅約13mのセメント系混合処理盛土から成り、外径約200m、天端はT.P.＋5mである。この人工盛土上から地下連続壁を円筒状に構築し、地下連続壁を仮設の遮水・山留壁として利用し換気塔本体を構築する。海底面下は軟弱な沖積層であるため、鋼製ジャケットの杭の横抵抗確保のためにSCP工法で地盤改良を行う。混合処理盛土の下部は地下連続壁施工時の溝壁安定のために、またトンネル部はシールド切羽の安定のために、セメントによる深層混合処理（DMM）工法で地盤改良を行う。

図-3は道路完成後における川崎人工島の概要であり、中央の換気塔を中心に、周囲の混合処理盛土及び、船舶衝突の緩衝機能を有する鋼製ジャケットから構成される。これら各部位の機能と仕様を表-1に示す。

(3) 換気塔の概要

川崎換気塔は外径98m、高さ約75mの円筒形大型鉄筋コンクリート構造物である。換気塔の直径はシールド発進時の立坑内部の施工エリア及び、換気塔完成後の内部施設のスペースから設定し、換気塔の深さ（T.P.－69.2m）はトンネルの清掃用排水等を換気塔内の排水槽に流せるレベルとなるように設定した。

換気塔の側壁、底版、隔壁は各々4m、6m、3～4mであり、大きな水圧（最大7kgf/cm²）、土圧、地震力に抵抗できるように、また完成後の浮上り安全率（許容1.25）を確保するように設定した。

隔壁は換気塔内部にトンネル方向に2枚、トンネル直角方向に3枚配置し、大きな土水圧を受ける側壁、

表-1 各部位の機能と仕様

施工 順序	部 位	機 能	仕 様
1	地盤改良 (SCP)	杭部 ・ジャケット杭、本体の横抵抗の確保	・改良率 78.5% ・杭芯N値15以上
		中央部 ・内部掘削時の重機のトラフィカビリティの確保	・改良率 30.1% ・杭芯N値15以上
2	地盤改良 (DMM)	連壁部 ・混合処理盛土の重量に対する安定性の確保	・改良率 約100%
		トンネル部 ・連壁掘削時の溝壁安定の確保 ・シールド切羽の安定の確保 ・SCPと同等以上の横抵抗の確保	・一軸強度 14.7kgf/cm ² (設計用値) ・改良率 約90% ・一軸強度 8kgf/cm ² (28日施工目標値)
3	鋼製ジャケット	・施工時 ・混合処理盛土型枠及び支保 ・連壁コンクリート型枠及び支保 ・足場、資材スペース ・波浪に対する防護他 ・完成後 ・船舶衝突に対する緩衝他	・外側ジャケット 幅 35m 杭 φ1.8m×148本 ・内側ジャケット 幅 15m 杭 φ1.6m×84本
4	混合処理盛土	・施工時 ・連壁構築地盤 ・施工ヤード他 ・完成後 ・船舶衝突に関する緩衝他	・幅 約13m
5	地下連続壁	・換気塔構築のための遮水・山留壁 ・その他	・外径 約104m、厚 2.8m ・f'ck=360kgf/cm ²
6	換気塔	・施工時 シールド発進立坑 ・完成後 道路トンネル換気塔	・外径 98m、高さ 約75m ・f'ck=240kgf/cm ²

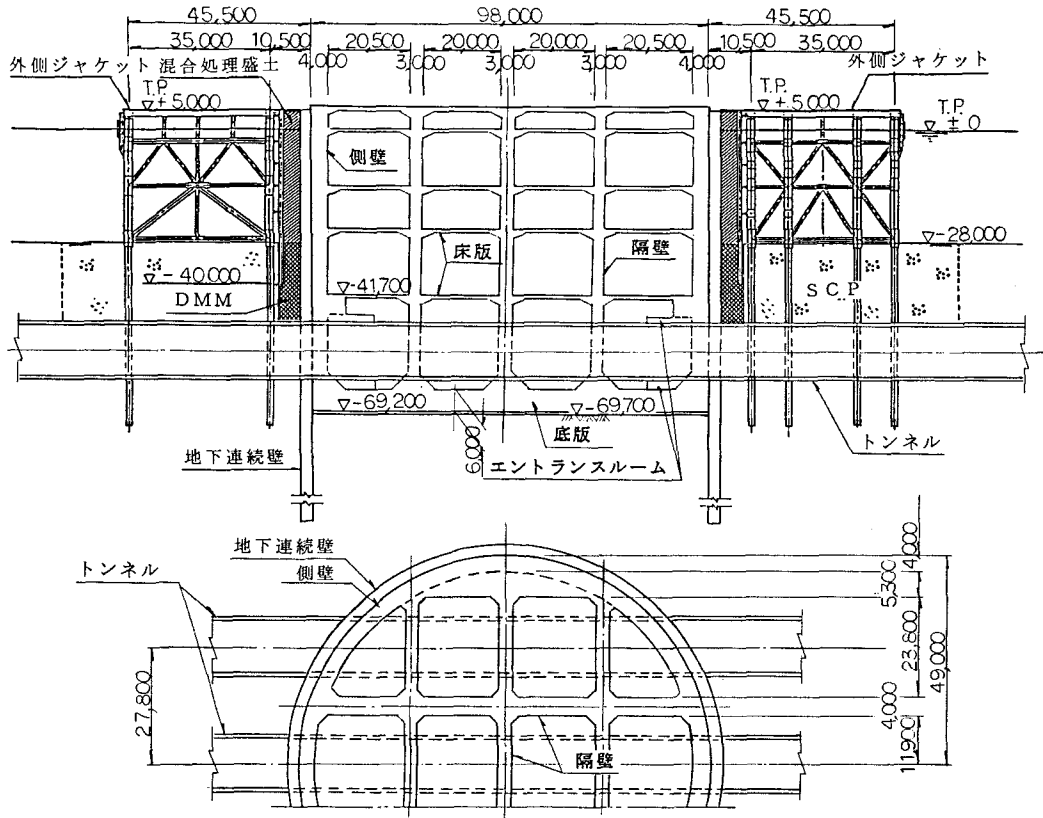
底版の構造上の支点とした。換気塔内部は全7階に区分し、完成後の換気機器等の設備を収納する。各階の床版（厚さ1～2 m）は設備荷重及び自重に対して強度的に安全であるように設計し、側壁の支点とは考えない。従って、換気塔本体の解析にはその存在を考慮しないこととした。

換気塔下部にはトンネル接続のための直径約14 mの開口部が6ヵ所（内、将来線用が2ヵ所）あり、構造上、局部応力に対して留意する必要がある。³⁾ 開口部内側にはシールド発進用のエントランスルームを設けるが、開口部の補強も兼ねるためにエントランスルームを構造物の1部として評価した。

換気塔は完成後のみならず施工時においても構造部材として考慮するため、施工段階を追って各々の時点で構造的に安全でなければならない。換気塔の施工順序、及び各段階での特徴を以下に示す（表－2参照）。

a 側壁構築時（施工順序①）

側壁は地下連続壁を遮水・山留壁として利用し、その内側に構築する。一般に地下連続壁を利用した同種の地下構造物（地下タンク等）では、側壁を逆巻工法により構築することが多いが、本構造では山留としての地下連続壁の安全性を確認の上、工期短縮（約6ヵ月の短縮）を目的として下部逆巻先行・上部順巻工法を採用した。すなわち、海底面まで一気に内水位を下げ、側壁の下半分を先行して逆巻工法にて構築し、その後側壁の上半分を順巻工法にて構築する計画である。本工法を採用するに当っては、山留の逐次掘削解析や静的・動的地震解析は勿論のこと、円筒シェル構造の座屈検討及び設定した設計条件を越える外力、温度荷重、施工誤差、地盤不陸等を想定した故障時解析を実施し、その安全性を照査した。また海底面付近で浅の地下連続壁（T.P.－3.3 mより上部）には、各エレメント間をつなぐ円周方向の横つなぎ鉄筋を設け、山留としての安全性を向上させることとした。



図－3 川崎換気塔概要図（完成後）

表－２ 換気塔の施工順序及び設計上の留意点

施工順序	① 側壁構築時	② シールドトンネル施工時	③ 完成時
概要図			
施工内容	- 連壁を遮水・山留壁として、側壁、底板を図中の番号順に構築する。 - 水替えはディープウェルにて行い、盤ぶくれ、ボイリングを防ぐとともに、施工床付面をドライにする。	- 隔壁を－4.1、7 mまで立上げた段階でシールドを発進させる - 凍土をシールド発進防護工として利用し、連壁にφ14 mの孔をあける。	- 内部構造完成後ディープウェルを止め、復水する。 - 連壁と側壁の間にできる隙間はモルタルによりグラウトする。 - 当初トンネル2本（4孔）であるが、将来トンネルを3本（6孔）とする。
設計上の留意点	- 逐次掘削解析により連壁、側壁に生じる応力を計算し、各掘削段階毎に重ね合わせる。 - 側壁コンクリートの若令時強度弾性係数を考慮する。 - 連壁、側壁の発生応力は②の段階で残留応力として評価する。 - 連壁には大きな円周方向圧縮が作用するので、座掘検討を行う。	- 連壁が負っていた大きな円周方向コンクリート圧縮応力度が解放され、連壁と側壁に再配分されることを考慮する。 - 鏡析り荷重（凍土の背面に作用する土水圧を凍土板により、連壁開口周辺に集中させる。）を考慮する。 - 凍結膨張圧、凍結温度荷重について照査する。	- 水位回復による揚水圧を考慮する。 - 連壁は仮設であるため、これを無視した解析を基本とするが、その存在を考慮した場合の照査も行う。 - 将来線用の孔2孔の有無による差を把握する。 - 海洋環境下で大きな海水圧が作用するので、十分な止水、防食対策を行う。 - 配筋量が多く太径であるので、施工順序や施工性を十分に考慮した配筋とする。

b シールドトンネル施工時（施工順序②）

シールドトンネル発進時には、大きな円周方向圧縮力が作用している地下連続壁に直径約14 mの孔をあけるため、その部分に生じていた応力が解放され、周囲の地下連続壁や側壁に再配分される。地下連続壁と側壁を結合しておくことで側壁に大きな応力が作用するため、開口部周辺では両者を縁切りし、解放力の影響が側壁に伝達しにくい構造とした。

c 完成時（施工順序③）

換気塔構築後、水替えていたディープウェルを止め復水させるため、土水圧により内側に變形していた地下連続壁が元の形に戻り、地下連続壁と側壁の間に1～2 cmの隙間が生じる。この隙間はモルタルによりグラウトし、耐震安定性を向上させることとした。また、大きな海水圧が作用するため構造物の止水、防食対策について特に配慮した（3章（5）参照）。

3. 換気塔の構造設計

（1）設計の考え方

設計に用いる土質条件は主として川崎人工島地区での土質調査結果に基づいて設定した（表－3参照）。また、海水面は水圧及び地震時の動水圧を安全側に評価するため、HWLのT.P. + 0.931 mとした。

使用材料の物性及び許容応力度は道路橋示方書に従った。

なお、設計は許容応力度設計法を基本としたが、面外せん断については主鉄筋の量、軸引張力の大きさによってはコンクリートのせん断耐力が小さくなることも考えられるので、限界状態設計法（コンクリート標準示方書による）によっても照査することとした。また、全断面引張となる部材については面外せん断力を

主鉄筋量で対処するとの考え方から、「原子力発電用コンクリート格納容器技術基準（案）」（通産省資源エネルギー庁 S. 56. 11, CCV 基準）によっても照査することとした。

地震力に対しては震度法を基本とし、動的応答解析により構造物の安全性を照査する。換気塔本体の地震時挙動は換気塔の自由振動が卓越せず、周辺地盤の変形による成分が支配的であると考えられる。その場合、換気塔の慣性力に着目した震度法による検討だけでは換気塔の地震時挙動を適切に評価できない可能性がある。地盤と構造物との動的相互作用を考慮しうる解析モデルを対象とした動的応答解析によっても照査することとした。

震度法の震度は、次のとおりとし、 K_H の分布は右図のとおりとした。

- ・完成時 $K_H = 0.24$, $K_v = 0$
- ・施工時 $K_H = 0.12$, $K_v = 0$

一方、動的応答解析では基盤（D₅層上面）に次の入力波を与え、構造物の安全性を照査する。

- ・完成時 L_1 波, L_2 波
- ・施工時 $1/2 L_1$ 波

L_1 波は、耐用年数内に発生することが予想される地震動であり、構造物が道路機能を損うような損傷を受けないように設計する地震動である。耐用年数を100年とした場合、地震発生を超超過確率0.5であり、許容応力度法によって照査する。

L_2 波は、耐用年数内にまれにしか発生しない地震動であり、構造物が最終的な崩壊に到らないことを照査する非超過確率0.9の地震動である。

(2) 設計荷重及び荷重の組合せ

設計荷重の一覧を表-4に、荷重の組合せを表-5に示す。また、設計荷重の中でも特殊な、土圧、ジャケット慣性力・動水圧については以下に詳述する。

a 土圧（図-6参照）

同種の地下構造物における土圧は静止土圧（ $K_v = 0.5$ ）を用いている例が多いが、川崎換気塔の場合、海底面以浅は鋼製ジャケットでおさえられた

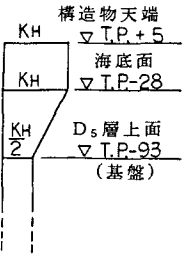


図-4 K_H の分布

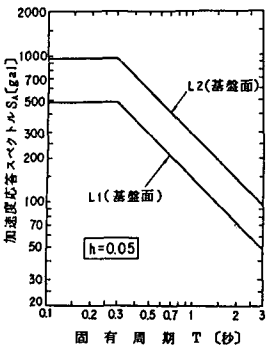


図-5 入力地震動の加速度応答スペクトル曲線

表-3 設計に用いる土質条件

標高 (TP)	土 層		γ (t/m ³)			ϕ (度)			C (t f/m ²)			N 値			E (kg f/cm ²)		
+5.00																	
+0.931																	
-28.00	混合処理盛土		1.9			—			—			—			—		
	原地盤	改良地盤	原地盤	D	S	原地盤	D	S	原地盤	D	S	原地盤	D	S	原地盤	D	SCP
			M	M	C	M	M	C	M	M	C	M	M	C	M	M	% %
-45.50	Ac1	S	1.4	1.4	1.9	—	—	30	2	74	—	—	—	15	20	2300	47 31
-52.00	Ac2	D	1.6	1.6	1.9	—	—	30	5	74	—	—	—	15	57	2300	114 69
-55.00	D1c	M	1.7	1.7	1.9	—	—	30	6	74	—	—	—	15	75	2300	144 85
-56.50	D1s	M	1.8	1.8	—	34	—	—	—	74	—	25	—	—	140	2300	—
-60.20	D1c	—	1.7	1.7	—	—	—	—	8	74	—	—	—	—	75	2300	—
-63.20	D1s	—	1.8			34			—			25			140		
-69.20	D1c	—	1.7			—			10			—			75		
-72.00	D1s	—	1.8			34			—			25			140		
-77.00	D2s	—	1.9			40			—			60			400		
-81.00	D2g	—	2.2			45			—			70以上			830		
-86.00	D2s	—	1.9			40			—			60			400		
-93.00	D2g	—	2.2			45			—			70以上			830		
	D5s	—	2.0			40			—			70以上			770		

幅 5 m（地下連続壁外側）の混合処理盛土であり、また海底面下の沖積層はリング状に DMM と S C P により地盤改良されているため、これらの特殊性を考慮する必要がある。そこで本構造に作用する土圧は次のように設定した。

- ・ 混合処理盛土部（海底面以浅）…… 混合処理盛土の幅による影響は考慮せず、無限地盤の静止土圧（ $K_0 = 0.5$ ）が作用するものとする。
- ・ DMM 部（海底面下沖積層）…… DMM の剛性が S C P に比べ非常に大きいため、混合処理盛土の荷重が DMM に直接伝達され、S C P 部分に分散されないと考える。ただし、DMM と S C P の境界面に働く摩擦だけ上載荷重を低減し、静止土圧（ $K_0 = 0.5$ ）を作用させる。
- ・ 現地盤部（T.P. - 60 m 以深の洪積層）…… $P_1 + P_2$ とする。P1 は洪積層以深の静止土圧（ $K_0 = 0.5$ ，上載荷重 = 0）であり、P2 は沖積層以浅（DMM，S C P，混合処理盛土）の上載荷重を洪積層以深でブーシネスクの方法により荷重を分散させたものである。

b 鋼製ジャケットに作用する慣性力、動水圧（図-7 参照）

鋼製ジャケットに地震力が作用した時、地震作用 0° 方向の鋼製ジャケットは本体構造を押す方向に動き、 180° 方向は離れる方向に動く。従って、 180° 方向では鋼製ジャケットの慣性力、動水圧が本体構造に伝達されないとも考えられるが、鋼製ジャケットはリング状に一体となっているために 180° 方向の鋼製ジャケットの動きに引張られ 0° 方向の鋼製ジャケットがさらに本体構造を押す方向に動く。従って鋼製ジャケットに作用する慣性力、動水圧は 0° 方向に 2 倍の値として作用させる。

（3）構造解析

構造解析は換気塔本体の構造が複雑で曲面部材や大きな開口部を有していることを考慮し、3 次元シェルモデルの有限要素法により行う。特に、地下連続壁の影響を考慮する場合は地下連続壁を外殻とする二重シェルモデルとする（図-8 参照）。また、部材の断面力、変位は表-4 に示す個々の荷重に対して解析し、表-5 に示す組合せに従い断面力、変位を加算する。

各部材断面の応力度はこれらの組合せ後の断面力を用いて算定する。また、シェル構造では面内力が卓越する場合もあるため、類似円筒構造物である原子力格納容器の設計法に準じ、C C V 基準に従い、面内せん断力、軸力、面外曲げモーメントを同時に受ける部材として設計する。

構造解析 F E M モデルには周辺地盤の拘束を評価するバネをつけるが、これらの地盤バネは個々の荷重が作用する際に躯体が地盤側に変位し地盤が圧縮される場合に取付け、地盤から離れる場合は考慮しない。地盤の圧縮バネは基本的に弾性バネとするが、山留逐次掘削解析は変形が大きいことを考慮し、塑性化した部分については地盤バネを考慮せず受働土圧を作用させる。地盤のバネの算定式は各基準で異なるが、ここでは、①トンネル標準示方書（土木学会）、②掘削土留め工設計指針（案）（建設省）、③荻原（首都公団）の提案式の 3 方法により算定した値の中央値とした。なお地盤のせん断バネは軸方向圧縮バネの $1/3.5$ とする。トンネル軸方向には S C P の地盤改良のかわりに DMM で地盤改良を行うため、偏バネ、偏土圧の作用する可能性があるが、これらの影

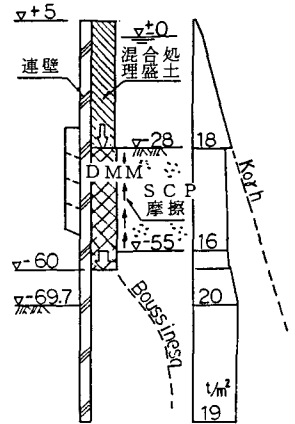


図-6 土圧分布

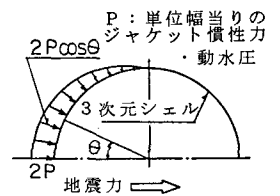


図-7 鋼製ジャケットに作用する慣性力・動水圧

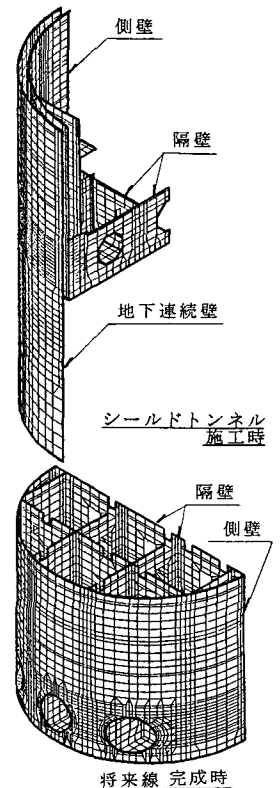


図-8 静的解析モデル

表－４ 設計荷重一覧表

荷 重	構 築 時 期			内 容
	①側壁 構築時	②トンネル 施工時	③ 完成時	
自 重	○	○	○	①連壁及び側壁、②連壁、側壁及び底板、③連壁を除く換気塔全体
土 圧	○	○	○	基本は静止土圧 ($K_0 = 0.5$) だが、混合処理盛土、DMMを考慮した土圧とする。
水 圧	○	○	○	①②は側部静水圧のみを考慮し、③はさらに底板下に揚水圧を考える。
常 時 偏 土 圧	○	○	○	・土圧の20%の両押し荷重とする。ただし、混合処理盛土部は考えない。 ・②③は構造が異方性であるため、直角2方向 (X, Y) で作用させる。
温度荷重	○	○		・構造の表裏に10℃差の温度差を付け、温度差の符号は部材に厳しい方向とする。
波浪荷重	○			・①の段階は波浪の影響を受け易いため、常時波浪荷重を考慮する。 (暴風雨時波浪は許容応力の割増のため、クリティカルとならない。) ・波高は有義波高 $H_{1/3} = 1.2\text{m}$ とする。
施工精度	○			・連壁構築時の施工精度として軸芯のずれ7cmを考える。 ・連壁が厚肉多角形で作られることを考慮し、部材縁応力の増加を加算する。
シールド 解放力		○		・シールド発進用に連壁を開口した時、連壁に生じていた大きな円周方向圧縮応力が解放され、応力が連壁と側壁に再配分される。この解放力を連壁、側壁とも考慮する。
鏡 砕り 荷重		○		・シールド発進防護工として設ける凍結板に土水圧が作用した時、凍結板反力として連壁開口周面に大きな力が作用する。これを、鏡砕り荷重として評価する。
凍 結		○		・凍結板を設けることによって生じる凍結膨張圧及び温度荷重を考慮する。
地震時土圧	○	○	○	・混合処理盛土部は慣性力で評価する。 ・海底面下は地震時主働土圧と常時主働土圧の差を両押しで作用させる。地震時土圧の下限値は、完成後 10tf/m^2 、施工時 5tf/m^2 とする。
慣 性 力	○	○	○	・連壁、本体、混合処理盛土、外側ジャケットの慣性力を考慮する。
動 水 圧	○	○	○	・外側ジャケット防波板及び鋼管矢板に作用する動水圧を考慮する。
動的 断面力	○			・①は連壁と側壁だけの軸対称構造であるため、軸対称回転体構造+地盤の連成モデルで部材の断面力をもとめ、他の荷重による断面力と組合せる。
解 析 土圧他			○	・③は側壁の内側に隔壁があるため、換気塔全体を等価な密実なマスと考えて解析。出力された慣性力と地盤反力(動土圧)を静的解析モデルの荷重とする。
船舶衝突力			○	・大型船舶が外側ジャケットに衝突した際の本体への荷重を評価する。

表－５ 荷重組合せ一覧表

構 築 時 期		① 側壁構築時				② シールドトンネル施工時						③ 完 成 時							
解析モデル		・弾塑性支承上の梁 ・3次元FEM 180° シェルモデル				・3次元FEM 90° 2重シェルモデル						・3次元FEM 180° シェルモデル							
組合せケース		常時	温度有	地震時	動的 解析	シールド 開口時	常時 (X)	常時 (Y)	常時 温度有	地震時 (X)	地震時 (Y)	完成時 4孔	常時 (X)	常時 (Y)	地震時 (X)	地震時 (Y)	動解 (X)	動解 (Y)	常時
常 時	自重・土水圧	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	常時偏土圧	○	○	○	○	○	○ _x	○ _y	○	○ _x	○ _y	○	○ _x	○ _y	○ _x	○ _y	○ _x	○ _y	○
	温度荷重		○			○		○											
	波浪荷重	○	○																
	施工精度	○	○	○	○														
時	シールド 解放力					○	○	○	○	○	○								
	鏡 砕り 荷重					○													
	凍 結					○													
地 震 時	地震時土圧			○						○ _x	○ _y				○ _x	○ _y			
	慣 性 力			○						○ _x	○ _y				○ _x	○ _y			
	動 水 圧			○						○ _x	○ _y				○ _x	○ _y			
	動的 断面力				○														
	解 析 土圧他																○ _x	○ _y	
船 舶 衝 突 力																			○

響を評価した静的解析の結果部材の応力度で数%の影響度であり、また偏土圧20%を考慮した時の安全性を別途照査しているため、周辺地盤は軸対称地盤として地盤パネを求める。

(4) 動的応答解析

動的応答解析は構造物の耐力が最も厳しくなる構築段階として、施工時では側壁構築時(最終床付時)、完成後では換気塔完成時の2段階について安全性照査を行った。ここでは動的応答解析を行うにあたり設定した条件のうち、主なものについて示す。(図-9参照)

- ・ 軸対称回転体構造～地盤連成系モデルの時刻歴応答解析により解析する。⁵⁾ 周囲の地盤改良は図-2に示すように軸対称回転体となっていないが、地盤状況を忠実にモデル化した振動模型実験等によりその影響がほとんどないことが明らかとなったため、動的応答解析は軸対称回転体モデルとした。
- ・ 解析メッシュの大きさは、側方及び下方境界が川崎人工島の構造物や地盤改良の応答に影響しないように大きく設定した。従って、本来工学的基盤として考えられるD₅層上面(T.P.-93m)に与えられる入力地震動は、波動論モデルによる逆算により調整して解析の下方境界(T.P.-240m)に入力し、D₅層上面での応答が当初の入力地震動と同等となるようにした。
- ・ 鋼製ジャケットはその骨組み構造をそのままモデル化できないので軸対称回転体ソリッド要素によってモデル化し、鋼製ジャケットの3次元骨組み解析により得られる荷重と変形の関係から、そのせん断剛性が等しくなるように剛度を設定した。また、鋼製ジャケットを支える杭については軸対称回転体シェル要素によってモデル化し、その円筒としての断面2次モーメントが杭の本数分の断面2次モーメントの総和に一致するようにシェルの厚さを設定した。
- ・ 鋼製ジャケットの重量には、ジャケットを構成する鋼管内部の水の重量を考慮するとともに、鋼管の周囲に存在する海水も同時に動くものと考え付加重量として考慮した。また、混合処理盛土外面の鋼管矢板に作用する動水圧についても、川崎人工島をモデル化した水理模型実験⁶⁾で得られた動水圧を換算して、付加重量として鋼製ジャケットの重量に加算した。
- ・ 側壁構築時(最終床付時)の川崎人工島は地下連続壁と側壁だけの軸対称構造であるため、解析では軸対称回転体シェル要素でモデル化した。従って、動的応答解析によって出力された各部材の断面力をそのまま、別途得られた他の静的荷重による断面力と組合せた。一方、完成後の換気塔本体には格子状に隔壁があり軸対称回転体シェル要素でモデル化できないため、隔壁を等価な剛性、重量を持つソリッド要素でモデル化した。従って、解析で得られた部材の断面力や応力はそのままでは設計に使えないため、解析で得られた慣性力と動土圧(地盤応力)を静的構造解析の外力とした。
- ・ 地下連続壁は仮設であるため完成後の静的解析ではその存在を無視している。また、完成後は換気塔本体に浮力が作用し、底板と地盤のせん断抵抗が小さくなる可能性がある。これらについては、地下連続壁の存在の有無、底板下面の摩擦の有無をパラメーターとした動的応答解析を行ない、安全性を照査した。

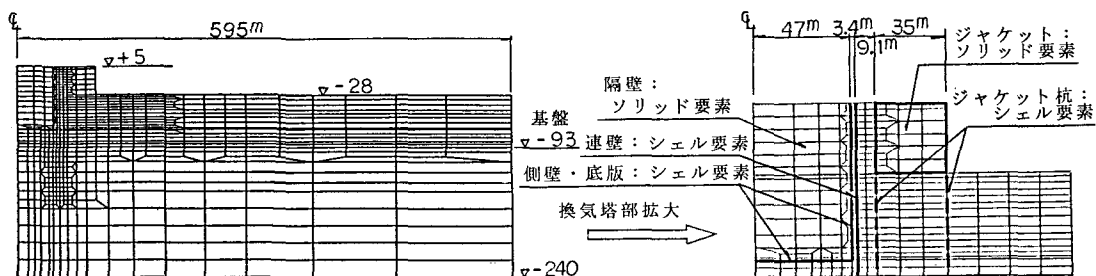


図-9 動的応答解析モデル図(完成後)

(5) 止水・防食

川崎換気塔は海洋環境下におかれることから、止水・防食に対する信頼性の高い構造物であることが要求される。しかし、他の構造物に比べ、止水・防食対策上、下記に示すように厳しい状況下にある。⁴⁾

- ・ マスコンクリートの構造物であり、温度ひびわれ（特に貫通ひびわれ）の発生する確率が大い。³⁾
- ・ 換気塔本体は地下連続壁内側及び海底土中にあり、外側からの補修は不可能である。
- ・ 換気塔本体の周囲は海水に接し、その水圧は最大 7 kg f/cm^2 と大きく、貫通ひびわれが発生した場合は換気塔内側へ漏水するばかりでなく、鉄筋を腐食させる。
- ・ 換気塔のトンネル開口部や側壁逆巻打継面など止水上特に留意する必要がある箇所が多い。

以上の状況を踏まえ換気塔の止水・防食対策の考え方は次のとおりとした。

- ・ 第1種防食法を基本とする。すなわち、十分なかぶりを取り、W/Cやセメント量を制限することにより密実なコンクリートを打設するとともに、ひびわれを極力押さえたコンクリートとする。外力によるひびわれに対しては鉄筋の許容応力度を制限することによって対処し、施工時の温度ひびわれに対しては温度ひびわれ指数で評価し、低発熱セメントの利用、プレクーリングによるコンクリート打設時温度の低減等により対処する。
- ・ 貫通ひびわれ等の弱点の可能性が避けられない場合は、さらに第2種防食法の併用を考える。具体的には、建設時における対策として、鋼板やゴムアスファルトシートによるライニング、局部的な弱点部における止水板等を考え、また建設後における対策としてひびわれ補修（止水、導水、酸素供給の遮断）を考えている。

また、現在、鉄筋コンクリートの貫通ひびわれ内を流れる海水の量と鉄筋腐食の関係や、ひびわれ幅と目詰まりの関係を把握する実験を行っており、止水・防食対策に反映させる予定である。

4. あとがき

川崎換気塔の耐震、耐船舶衝突、防食及び安全・確実かつ経済的な施工法の確立等の技術的諸問題については日本道路公団・東京湾横断道路橋梁構造検討委員会（委員長：久保慶三郎東海大学教授）ならびに東京湾横断道路（株）・川崎換気塔検討会（委員長：多田浩彦（財）道路管理システム研究所長）にて審議検討を行い、その結果を踏まえて現在設計を鋭意進めているところである。他に例を見ない大規模な海洋人工島での換気塔でもあり、慎重かつ十分な検討の下に設計を行いたいと考えている。

最後に、技術的諸問題について種々御指導いただいている各検討会の委員の方々、及び関係諸機関の方々に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 篠原洋司 : 東京湾横断道路における基礎工, 基礎工, 1989, 7
- 2) 多田征夫他 : 東京湾横断道路川崎換気塔の設計概要について, 第17回 日本道路会議
- 3) 藤田信一他 : 東京湾横断道路海中換気塔温度応力の検討, 第18回 日本道路会議
- 4) 長谷川明機他 : 東京湾横断道路川崎人工島開口部補強構造の検討概要, 第18回 日本道路会議
- 5) H. Shinohara et al. : Aseismic Study of Kawasaki Manmade Island in Trans-Tokyo Bay Highway Project, 第5回 日米橋梁ワークショップ
- 6) 長谷川明機他 : カーテンウォールを有する大型円筒構造物の3次元水理特性, 第36回 土木学会海洋工学講演会

(1990年1月26日受付)