

換気所・トンネル一体構造区間の設計概要 DESIGN OF THE EXCAVATION TUNNEL CONNECTED WITH THE VENTILATION BUILDING

奥西 史伸¹・金治 英貞²・中島 隆³
 Fuminobu OKUNISHI・Hidesada KANAJI・Takashi NAKASHIMA

The ventilation building in the Yodogawa-Sagan Rout is planned on the excavated tunnel structure. Considering this structural distinctiveness, the earthquake resistance of the tunnel structure was examined by two dimension dynamic FEM analysis that considered nonlinear in the ground. As a result, it was confirmed to have earthquake-proof performance.

Key Words :excavation tunnel, ventilation building,dinamic FEM analysis

1. はじめに

現在, 関西のくらしや経済の発展に寄与する道路ネットワーク整備を目的として, 大阪都市再生環状道路の一部として阪神高速道路 淀川左岸線1期区間(約5.7km)の整備を進めている(図-1)。

当該区間はそのほとんどがトンネル構造で構成されており, 坑口集中換気処理設備として2か所の換気所の設置が計画されている。このうち「島屋換気所」(仮称)については, 沖積粘土層を支持地盤とする直接基礎形式として設置されたトンネル躯体上に一体構造物として構築される計画となっている。

換気所及びトンネル躯体は, それぞれの基準・設計法に基づき設計を進めるが, 一体構造物ゆえにその挙動ならびに相互作用による部材に及ぼす影響については分離設計では不明確な部分が大きいことから, それぞれの設計で決定した換気所, トンネル本体の構造仕様を一体的にモデル化し, 周辺地盤も含めた二次元動的FEM解析による耐震性の検証を行った。本稿では, 構造物の沈下・地盤支持力の評価を行うとともに, 二次元動的FEM解析による耐震性評価について報告を行う。

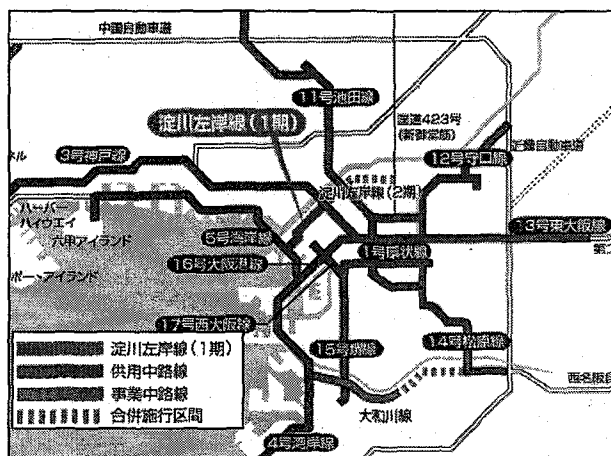


図-1 淀川左岸線箇所



図-2 島屋換気所(個所)位置図

キーワード：開削トンネル, 換気所一体構造, 二次元動的解析

- 1 正会員 阪神高速道路株式会社 大阪建設部
- 2 正会員 阪神高速道路管理技術センター
- 3 正会員 阪神高速道路株式会社 神戸管理部

2. 構造概要

当該換気所は、平面街路である市道桜島守口線の中央分離帯部に構築する計画で、地下1階、地上3階、延長28.7mのSRC構造であり、排気塔を含めると地上40mの高さとなる（図-2）。

換気所と一体となるトンネル函体ブロックについては、隣接するブロックと比べ構造重量が増加するため、地盤反力低減を目的として以下の対策を実施した。

- ・換気所基礎に斜梁を設置し、換気所からの発生力を函体側壁に直接伝達させることで、頂版での発生断面力の低減を図り、函体の壁厚の縮小、及び構造物重量の軽減。（函体部材厚1.8m→1.3mに縮小）
- ・埋め戻し土に軽量盛土材（発泡混合土）を使用し死荷重を軽減。
- ・函体底版を土留壁まで張り出し、底版面積の増加に伴う地盤反力の軽減。
- ・床付け面を地盤改良し、掘削時の応力開放に伴う支持力低下を抑制。

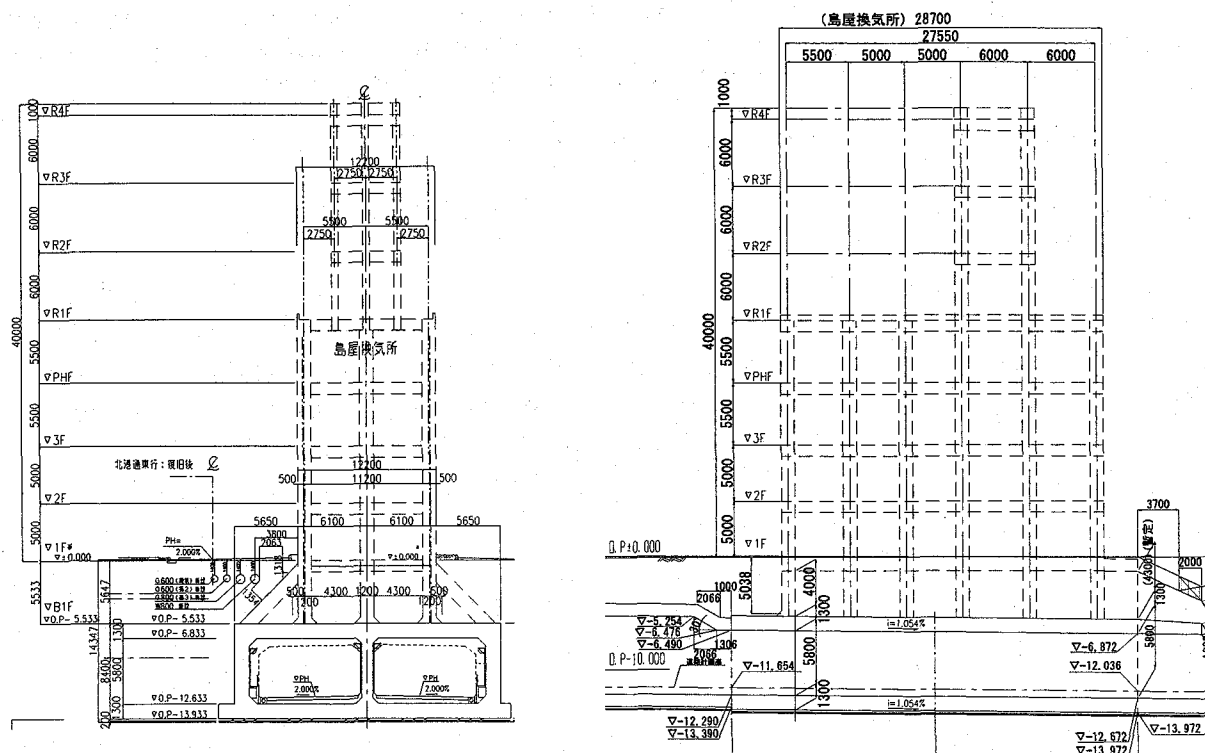


図-2 換気所一般図

3. 沈下・地盤支持力等の検討

(1) 沈下検討

掘削による排土部分に構築される構造物の重量には、躯体（高速本体）重量、路床重量、上載土、換気所重量が挙げられる。これら合計値と排土される現況土被り重量との差（増加応力）を比較した結果、構築応力<排土重量であることが確認されたことから圧密沈下は発生しないものとする（図-3）。

(2) 支持力検討

前述のとおり、当該部の地盤反力軽減を目的として埋戻し土に軽量盛土材（発泡混合土）を使用すると共に、

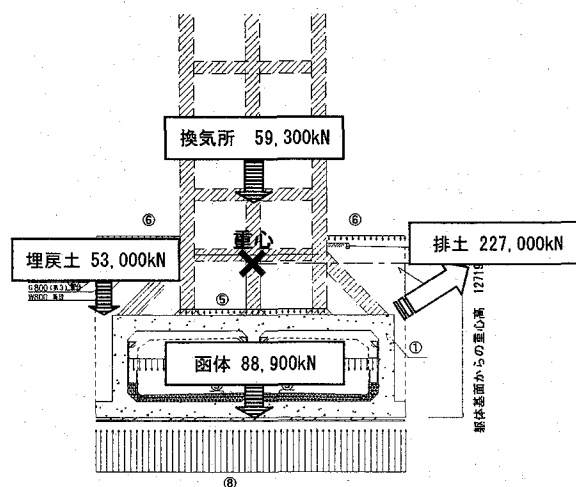


図-3 荷重図

函体底版を張り出すことで地盤反力の低減を図っている。これらの対策の有無における地盤反力について以

$$q_u = \alpha \kappa C N_c S_c + \kappa q N_q S_q + \frac{1}{2} \gamma \beta B_e N_\gamma S_\gamma$$

下の通り比較した。

道路橋示方書Ⅳ。下部工編に基づく浅い基礎における極限支持力は次式から求められる。

ここで、 $\alpha=1.0, \beta=1.0, \kappa=1(Df:0), N_c=5.0, S_c=1.0 C=50 \text{ kN/m}^2$ より $q_u=367 \text{ kN/m}^2$

また、許容支持力としては、掘削底面下の地盤が掘削以前には排土重量の荷重を受けていることから確実な押さえと考え、押え盛土効果の項（第2項）に安全率を考慮しないものとする、常時許容鉛直支持力は

$$q_a = \frac{1}{3} \times 250 + 117 = 200 \text{ kN/m}^2$$

となる。なお、検討にあたっては函体をフレームとして考え、地震時には応答変位法に基づく地震時土圧、慣性力、周面せん断力を考慮した。検討の結果を図-4に示す。ここで、無対策の場合は常時の許容支持力を超過する範囲が部分的に発生するのに対し、対策の実施により最大地盤反力が2割程度低減され、全ての箇所許容支持力内となることが確認された。参考までに、地震時においては、無対策の場合においても全ての箇所許容支持力内に収まっていたことも併せて確認されている。

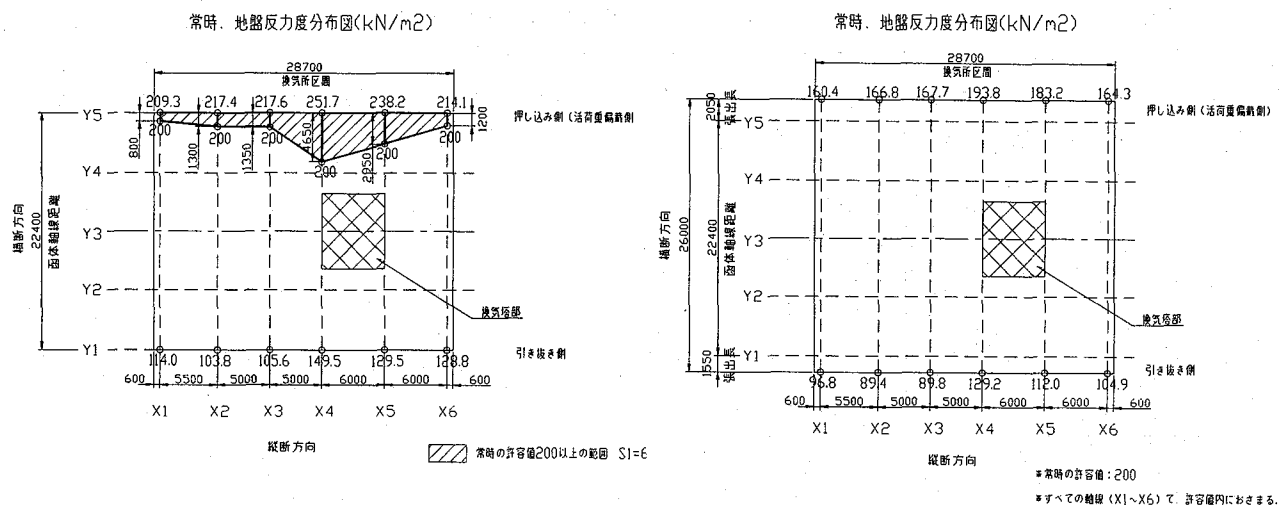


図-4 地盤反力図

4. 耐震検討

本検討においては、地盤の非線形（修正R-Oモデル）を考慮し、換気所・トンネル一体構造物の耐震安全性について2次元動的FEM解析により検討を行った。図-5に2次元動的FEM解析モデルを示す。

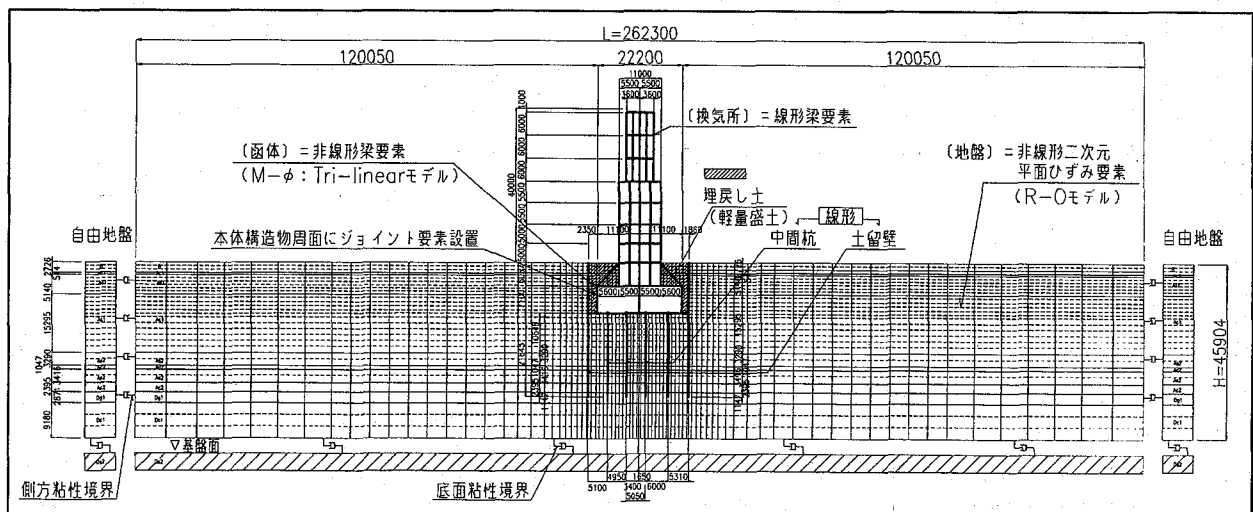


図-5 解析モデル

(1) 解析条件

a) 入力地震動

地震波を入力する基盤面は、地表面下45.9mの洪積砂層とし、入力する地震波形は、ポートアイランド基盤波形を標準加速度応答スペクトル（L2）に適合するように振幅調整したものを使用した。

b) 解析モデル

構造物（換気所、函体、土留工、中間杭）は梁要素、地盤は平面ひずみ要素でモデル化を行い、その他の主な条件は以下の通りである。

- ・ 函体部材は、材料非線形特性を考慮し、履歴モデルは修正武田型の $M \sim \phi$ 関係を与え、軸力変動の影響を考慮する。
- ・ 換気塔の壁の剛性についても考慮する。
- ・ モデル左右端に粘性境界を設定する。

(2) 解析結果

a) 固有値解析

固有値解析結果から、1次モードは構造物と地盤が同時に同じ方向へ動くモードで最も卓越しており、支配的であることがわかる。壁の剛性を考慮しているため換気塔の剛性が大きくなり、トンネル函体を含めたロッキング震動が確認できる。6次モードでは地盤はあまり動かず、換気所のみが1次モードで動くモードであり、ロッキング震動は1次モードより顕著に現われている（表-1、図-6）。

表-1 固有値解析結果

モード 次数	振動数 Hz	固有周期 s	刺激係数		有効質量	
			X	Y	X	Y
1	1.002	0.998	120.840	-0.003	0.724	0.000
2	1.142	0.876	-0.020	-17.960	0.000	0.017
3	1.403	0.713	-2.865	0.022	0.000	0.000
4	1.822	0.549	-0.017	15.394	0.000	0.012
5	2.014	0.496	1.767	-0.086	0.000	0.000
6	2.210	0.452	15.888	0.114	0.013	0.000
7	2.431	0.411	0.243	-8.429	0.000	0.004
8	2.520	0.397	53.107	0.257	0.140	0.000
9	2.524	0.396	1.025	-32.332	0.000	0.054
10	2.542	0.393	-13.278	-1.457	0.009	0.000

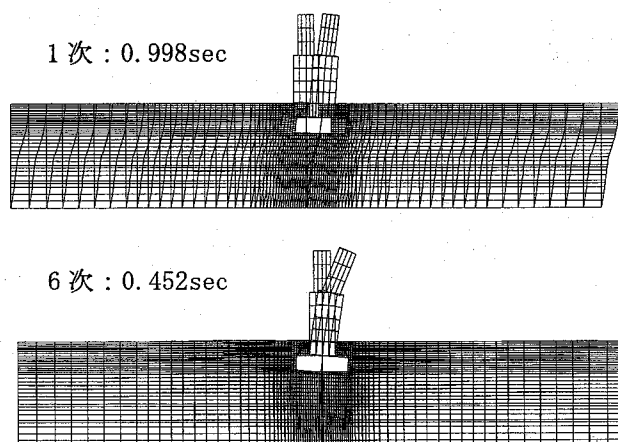


図-6 固有振動モード

b) 地盤および構造物の応答値

図-7に最大応答水平変位分布、及び主要部の最大水平変位・加速度を図-8,9に、最大地盤せん断応力度・せん断ひずみ分布を示す。

換気塔基部における最大水平応答加速度が250gal程度と、換気塔設計時の500galを大きく下回る値となっている。

また、土留壁及び中間杭根入下端付近において、局部的にせん断力が増大しているとともに、構造物周辺の地盤において成層地盤よりせん断ひずみが増大している。換気所の影響により函体を含めたロッキング震動が生じ、函体周辺、特に、函体～地中連続壁間の地盤に局部的に大きなひずみが生じたものと考えられる。構造物周辺地盤の応答には、構造物と地盤の動的相互作用の影響が顕著に

位 置	変位 (cm)	加速度 (gal)
①自由地盤底面	6.1	453.9
②自由地盤上面	32.2	277.7
③換気塔付近地表面	26.2	273.9
④換気塔基部	24.1	254.9
⑤換気塔頂部	35.1	1213.2

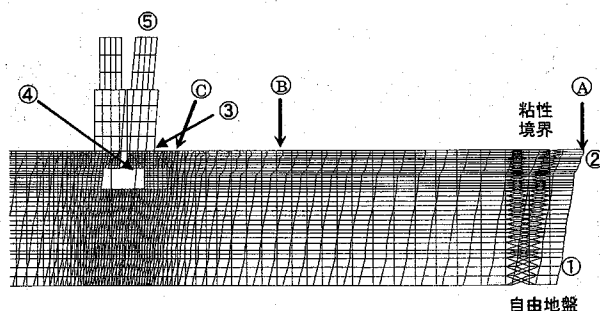


図-7 最大水平変位・加速度

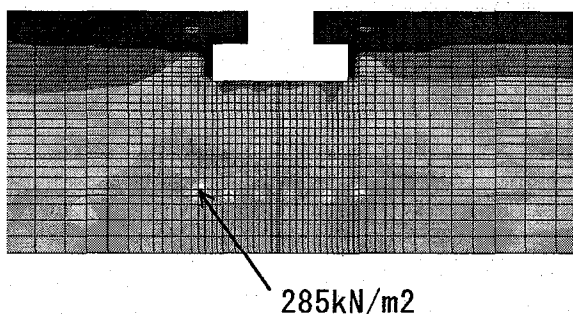


図-8 最大地盤せん断応力分布

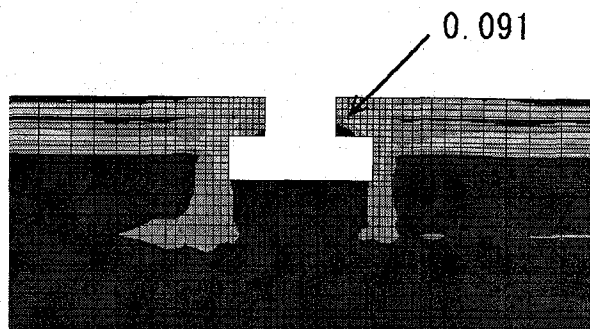


図-9 最大地盤せん断ひずみ分布

生じている。また、図-10に地盤剛性を等価線形とした場合とのせん断ひずみ分布の比較を示すが、構造物周辺地盤でのせん断ひずみが大きく異なっている。これは構造物周辺での動的相互作用の影響と考えられ、本検討モデルにおいては地盤の非線形性を考慮するのが妥当であると考えられる。

c) 函体部材の照査

函体部材の曲げとせん断について照査した結果を表-2、表-3に示す。

応答曲率塑性率(μ)は、軸力変動を考慮した場合の最大値を示すが、許容曲率塑性率(μ_a)は、便宜上、初期軸力に対する値を示した。また、 $M+$ 、 $M-$ は、曲げモーメントの最大、最小を示すが、軸力変動を考慮しているため、必ずしも μ の生起時とは対応していない。

換気塔のロッキング震動による影響がバットレスを介して、側壁部の軸力変動に現れており、側壁上端で降伏点をわずかに超える応答が生じている。また、中壁下端部も降伏点をわずかに超えている程度であり、耐震性能上は特に問題はない。

また、せん断耐力についても、許容せん断耐力以内に収まっているが、ロッキング震動の影響により底版隅角部に許容値と同等程度の応答せん断力が発生している。

d) 軸力の変動について

側壁部の軸力変動の応答について図-11に示す。換気塔のロッキング震動の影響により、バットレスを介して側壁部の軸力変動が生じていることが確認できる。変動幅については上下端とも2200kN程度確認されており、特に側壁上端においては軸力最小時（引張り）における発生曲げモーメントが大きく、初期軸力に対する評価ではひびわれ点を超える程度の応答であるが、軸力変動を考慮した場合には、降伏点をわずかに超える応答となっている。また、側壁下端は軸力引張り時には、発生曲げモーメントが小さく、ひび割れモーメントにも達していないことが確認できた。以上より換気所によるトンネル函体における軸力変動が確

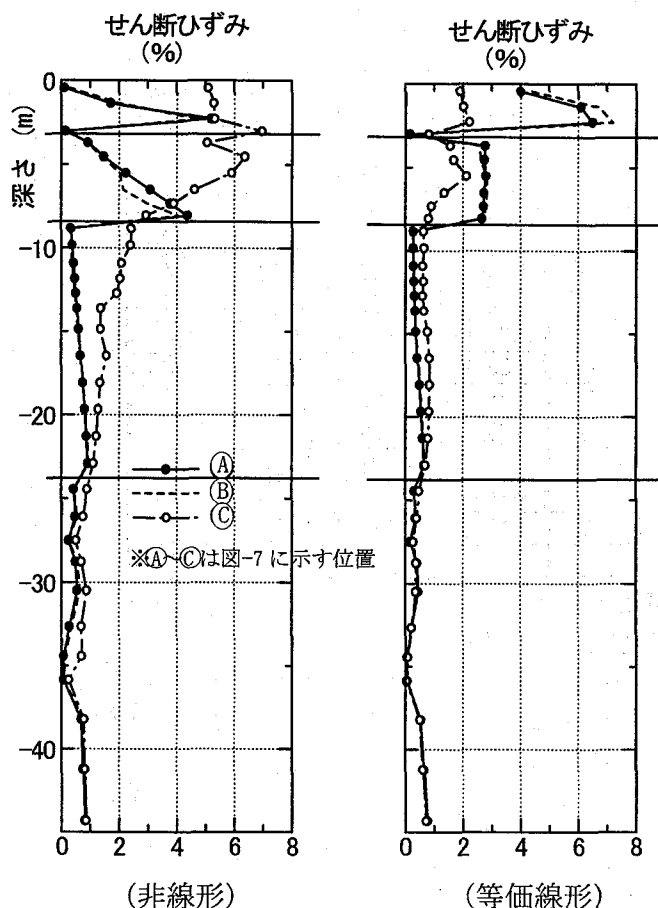


図-10 せん断ひずみ分布の比較

表-2 曲げ耐力照査結果

断面	M+ (kN・m)	μ	μa	判定
1	768.5	0.047	8.37	OK
2	1343.3	0.345	7.95	OK
3	1087.2	0.239	7.95	OK
4	1093.3	0.288	8.37	OK
5	1498.7	0.569	17.68	OK
6	1377.7	0.495	4.02	OK
7	1963.8	0.815	17.68	OK
8	1419.7	0.415	17.68	OK
9	2093.6	1.189	4.02	OK
10	1341.1	0.388	17.68	OK
11	1412.2	0.565	11.66	OK
12	1913.7	0.332	6.15	OK
13	1758.1	0.281	6.15	OK
14	1229.7	0.446	11.66	OK

断面	M- (kN・m)	μ	μa	判定
1	-1126.8	0.494	12.99	OK
2	-758.6	0.098	8.63	OK
3	-838.0	0.041	8.63	OK
4	-919.2	0.438	12.99	OK
5	-1245.1	1.049	16.53	OK
6	-1809.8	0.827	4.02	OK
7	-927.8	0.436	16.53	OK
8	-155.9	—	16.53	OK
9	-1604.4	0.676	4.02	OK
10	-277.1	0.009	16.53	OK
11	-1224.5	0.131	7.09	OK
12	-414.6	—	6.71	OK
13	-519.4	0.033	6.71	OK
14	-1230.7	0.284	7.09	OK

認められたものの、躯体への影響は特に問題とならないことが確認できた。

最後に、構造系全体系の変形に対する安全性の確認として、部材の回転角の照査を行った結果、層間回転角は最大相対変位35.0mm に対して1/203となり、指針で規定されている許容回転角($\theta a=1/50$)を満足する結果となった。

5. まとめ

本検討では、トンネルと換気所が一体となった特殊構造の耐震性を評価した。その結果、構造および地盤の動的特性が明らかとなり、かつ構造各部の部材安全性が確認された。同様の構造は都市トンネルにおいて今後も計画される可能性があり、本検討がその計画、設計の一助となることを期待する。

なお、本検討においては、神戸大学高田至郎教授、京都大学清野純史准教授にご助言を頂いた。ここに深く感謝いたします。

キーワード：開削トンネル、換気所一体構造、2次元動的解析

1 正会員 阪神高速道路株式会社 大阪建設部

2 正会員 阪神高速道路管理技術センター

3 正会員 阪神高速道路株式会社 神戸管理部

表-3 せん断耐力照査結果

断面	S (kN)	Sc (kN)	Ss (kN)	Ps (kN)	S/Ps	判定
1	690.2	535.5	567.2	1102.7	0.626	OK
2	454.0	535.5	819.7	1355.2	0.335	OK
3	626.2	535.5	819.7	1355.2	0.462	OK
4	743.9	535.5	567.2	1102.7	0.675	OK
5	429.5	535.5	567.2	1102.7	0.389	OK
6	860.4	405.0	619.9	1024.9	0.839	OK
7	384.8	535.5	567.2	1102.7	0.349	OK
8	720.8	535.5	567.2	1102.7	0.654	OK
9	855.5	405.0	619.9	1024.9	0.835	OK
10	780.0	535.5	567.2	1102.7	0.707	OK
11	1573.6	468.0	1114.8	1582.8	0.994	OK
12	1325.8	460.2	1625.6	2085.8	0.636	OK
13	2084.3	460.2	1625.6	2085.8	0.999	OK
14	1302.5	468.0	1114.8	1582.8	0.823	OK

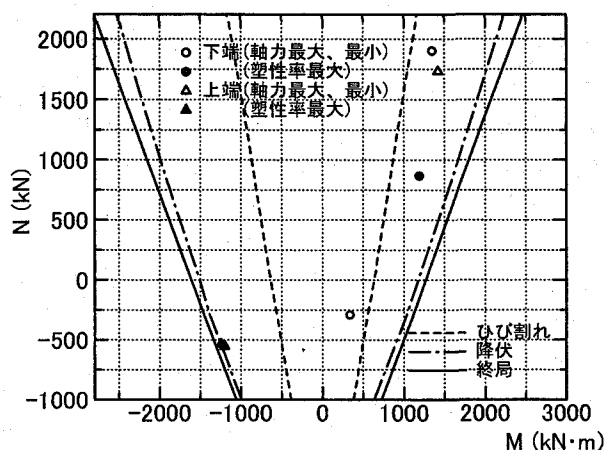
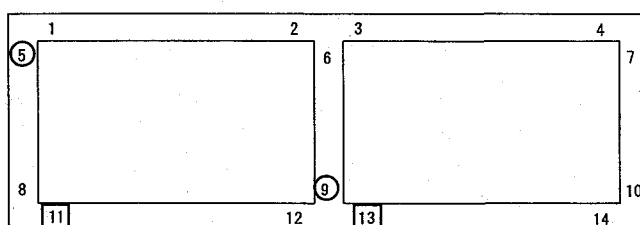


図-11 軸力変動の状況(側壁部)