

# 地盤－煙突構造物相互作用系の耐震性評価

地震応答解析, 卓越周期, 共振

名古屋大学 ○中井健太郎, 野田利弘, 伊藤彰浩  
新日鐵住金(株) 伊勢典央

## 1. はじめに

重要構造物や超高層建築物とは異なり, 多くの構造物は, 地震荷重を静的な水平荷重として構造物に作用させることで, 構造物の安定性を確認して設計されている. 解析対象である長尺な煙突構造物は, 杭を一切使用しない独立基礎の構造物であり基礎も浅いため, 継続時間が長く強い揺れが想定される南海トラフ巨大地震時において, 詳細な耐震性評価が求められている. 数値解析による性能照査においては, ①構造物の固有周期と入射波の卓越周期の関係性, ②地盤及び構造物のモデル化の影響, ③地震動の加振方向数の影響, など, 種々の影響評価が必要となる. 本報では, 特に①に着目し, 二次元平面ひずみ条件下での地盤－煙突構造物相互作用系における地震応答解析を実施した. 解析コードは, 砂から中間土, 粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式 (SYS カムクレイモデル<sup>1)</sup>) を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>2)</sup> である.

## 2. 構造物および地盤のモデル化

煙突構造物は, 外径 6.0m・内径 5.0m・高さ 72m・重量約 1720t の中空円筒形であり, 地中部に幅 18m のコンクリート基礎を有する. 図 1 に解析に用いた有限要素メッシュ (地盤に構造物設置後) を, 表 1 に解析に用いた煙突構造物の材料定数を示す. 本解析では, 二次元平面ひずみ条件としてモデル化するため, 奥行き方向に連続の壁体構造物としてモデル化することとなるが (二次元および三次元でのモデル化の影響については別報に譲る), 実物の構造物を参考に, 等価な重量と剛性を有する一相系弾性体でモデル化した. 固有値解析の結果, 固有周期は実物の煙突構造物と等しい 1.367s であることを確認している.

ボーリング柱状図から対象地域の地盤は, 表層から 15m の砂質土層, 15m のシルト層, 5m の硬質な洪積層で構成されているが, 詳細な土質試験が行われていなかったため, 過去に名古屋大学地盤力学研究室で取り扱ったことのある地盤を参考に, A～D の 4 種類の地盤を準備した. 材料定数および初期値の一覧を表 2 に示す. 固有値解析の結果, 地盤のみの固有周期は, 地盤 A が 0.65s, 地盤 B が 0.97s, 地盤 C が 1.12s, 地盤 D が 1.37s であった. 水理境界は, 地表面が水位面と一致するよう水圧ゼロとし, 下端面は透水係数の小さい不透水層の存在を考慮して, 両側面と合わせて非排水境界とした. また, 制約条件として周期境界を設けるために, 両側面の同一高さの全節点の各成分に等変位条件を与えている.

図 2 は解析に用いた入力地震動の加速度履歴とフーリエ振幅スペクトルを示す. 地震波 1 は兵庫県神戸市中

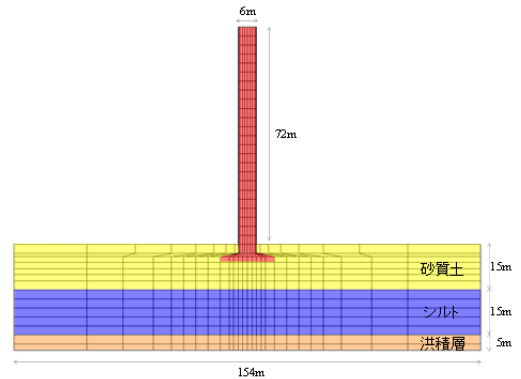


図 1 有限要素メッシュ

表 1 構造物の材料定数

	基礎	煙突	煙突(密度 6 倍)
ヤング率 $E$ (kN/m <sup>2</sup> )	$4.00 \times 10^7$	$9.10 \times 10^6$	$6.04 \times 10^7$
ポアソン比 $\nu$	0.2	0.2	0.2
密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.50	0.67	3.98

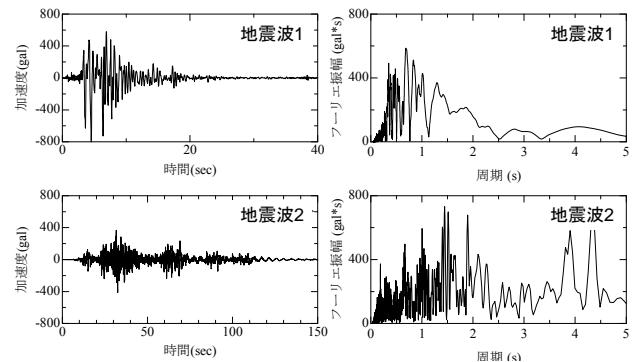


図 2 入力地震動

表 2 地盤の材料定数と初期値

	地盤A			地盤B			地盤C			地盤D		
	基礎	シルト	砂	基礎	シルト	砂	基礎	シルト	砂	基礎	シルト	砂
弾塑性パラメータ												
境界状態定数 $M$	0.60	1.80	1.60	0.60	1.40	1.40	0.60	1.40	1.43	0.60	1.40	1.40
NCL の切片 $N$	2.10	1.96	2.12	2.10	3.02	2.00	2.10	1.75	2.32	2.10	3.02	2.00
圧縮指数 $\lambda$	0.170	0.100	0.040	0.17	0.242	0.10	0.170	0.090	0.240	0.17	0.242	0.10
膨張指数 $\lambda^*$	0.0030	0.0015	0.0015	0.0030	0.0200	0.0025	0.0030	0.0080	0.0020	0.0030	0.0323	0.0032
ポアソン比 $\nu$	0.30	0.20	0.10	0.30	0.10	0.20	0.30	0.10	0.25	0.30	0.10	0.20
発展則パラメータ												
$-D_1^*$ と $ D_2^* $ の割合 $e_s$	1.00	0.30	0.95	1.00	0.40	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.40	1.00
構造化指数 $a$	0.01	0.60	2.00	0.01	0.65	8.00	0.01	0.20	8.00	0.01	0.65	8.00
$b$	1.00	1.00	5.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$c$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
正規圧密土化指数 $m$	10.0	5.0	0.5	10.0	20.0	8.0	10.0	8.0	2.5	10.0	20.0	8.0
回転硬化指数 $br$	0.001	0.001	1.000	0.001	0.200	10.000	0.001	0.100	10.000	0.001	0.200	10.000
回転硬化限界値 $m_s$	1.00	1.00	0.20	1.00	1.00	0.44	1.00	1.00	0.50	1.00	1.00	0.44
物性												
土粒子密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.707	2.660	2.670	2.707	2.690	2.787	2.707	2.625	2.787	2.707	2.690	2.787
透水係数 $k$ (cm/s)	1.004-7	2.004-7	4.004-3	1.004-7	1.00-7	1.004-4	1.004-7	1.004-6	1.004-4	1.004-7	1.00-7	1.004-4
初期値												
初期比体積 $v_s$	1.700	1.948	1.950	1.700	3.350	1.930	1.700	1.730	1.930	1.700	3.350	1.930
初期構造の程度 $1/R_0^*$	50.00	9.00	1.40	50.0	21.75	3.041	50.00	21.80	1.10	50.0	21.75	3.041
初期異方向性の程度 $e_s$	0.000	0.545	0.545	0.000	0.750	1.000	0.000	0.750	0.000	0.000	0.750	1.000

Seismic assessment of ground-chimney interaction system

Nakai, K., Noda, T., Ito, A. (Nagoya University) and Ise, N. (Nippon Steel & Sumitomo Metal)

中央区中山手での兵庫県南部地震の強震記録の NS 成分を等価線形解析 SHAKE を用いて引き戻したものであり、地震波 2 は内閣府が定める南海トラフ地震（基本ケース）の EW 成分を Vs 値の値に応じて補正したものである。最大加速度は兵庫県南部地震の方が大きい、継続時間は南海トラフ地震の方が圧倒的に長い。また、兵庫県南部地震は 0.8s 以下の短周期成分が卓越しているが、南海トラフ地震は 1.3s ~1.6s および 4.0s 付近の長周期成分が卓越している。工学的基盤面にあたる地盤底面全節点の水平方向に加速度を等しく入力し、その地盤底面全節点の水平方向には、 $V_s=400\text{m/sec}$  に相当する底面粘性境界を設定した。

### 3. 地震応答解析結果

図 3 に兵庫県南部地震を入力した時の煙突構造物頂部における水平変位量の比較を示す。地震動の卓越周期と地盤の固有周期の合致する地盤 A で揺れが大きく、合致しない地盤 B, C では揺れが小さい。続いて、図 4 に南海トラフ地震を入力した時の煙突構造物頂部における水平変位量の比較を示す。図 3 とは異なり、地震動の卓越周期と地盤の固有周期の合致する地盤 D で揺れが大きく、その他の地盤では揺れが小さい。最も揺れの大きい地盤で比較すると、最大加速度は兵庫県南部地震の方が大きいにもかかわらず、兵庫県南部地震（地盤 A）と南海トラフ地震（地盤 D）の揺れは南海トラフ地震の方が大きい。これは、地盤 D に南海トラフ地震を入力した際は、入力地震動の卓越周期と地盤の固有周期だけでなく、構造物の卓越周期も一致したからであり、共振によって揺れが増幅されたことを意味する。

しかしながら、今回の解析ではいずれのケースにおいても煙突構造物に大きな残留変位が生じることはなく安定を保った。この要因としては、煙突構造物が中空円筒形であり、比較的軽量であることが考えられる。そこで、仮想的に煙突構造物の密度を 6 倍にし、構造体をもっと重量である場合の地震時挙動を検討した。表 1 に材料定数を示すが、構造物の固有周期が 1.367s となるように、密度に合わせてヤング率も調整している。図 5 に地盤 D に南海トラフ地震を入力した時の煙突構造物頂部における水平変位量の比較を示す。地震中の揺れの絶対値は小さくなるが、地震中に構造物は徐々に傾いていき、地震後に残留変位が生じている。図 6 に、せん断ひずみの経時変化を示す。地震中は残留変位（ $1.6^\circ$  の傾倒）を生じるものの煙突構造物は安定を保っている。しかしながら、構造物が地震中に偏心してしまったため、地震後の地盤の圧密沈下に伴って次第に傾倒していき、地震発生から 10 分後には煙突は転倒してしまう。

### 4. まとめ

本報では、長尺な煙突構造物を対象に、地盤-煙突構造物相互作用系における地震応答解析を二次元平面ひずみ条件下で実施した。その結果、①地盤の上に建つ構造物の地震時挙動は、揺れの大きさのみで評価できるのではなく、構造物の固有周期と入射される地震動の卓越周期との関係性が大変重要であること、②地震動は地盤内でその固有周期に応じた増幅特性を示すので、地盤の振動特性を把握したうえでのモデル化が重要であること、を示した。また、①と②を達成するためには、地盤と構造物の相互作用系の問題として取り扱うことが重要である。

参考文献 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), pp. 47-57, 2002. 2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, S&F, 48(6), pp.771-790, 2008.

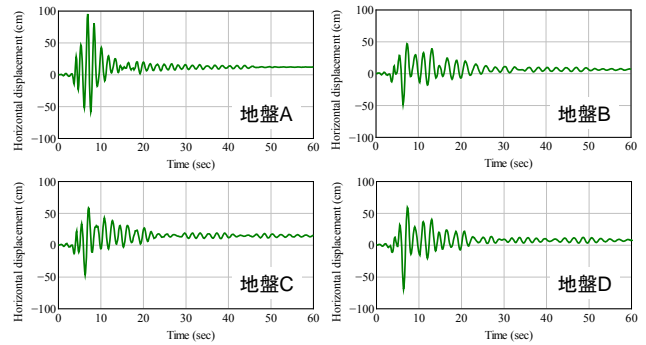


図 3 兵庫県南部地震入力時の煙突頂部の水平変位比較

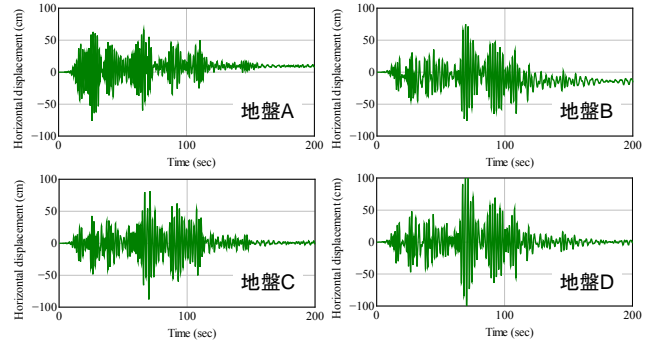


図 4 南海トラフ地震入力時の煙突頂部の水平変位比較

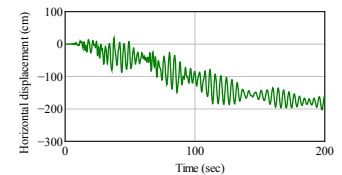


図 5 構造物密度が大きい場合（地盤 D・南海トラフ地震）

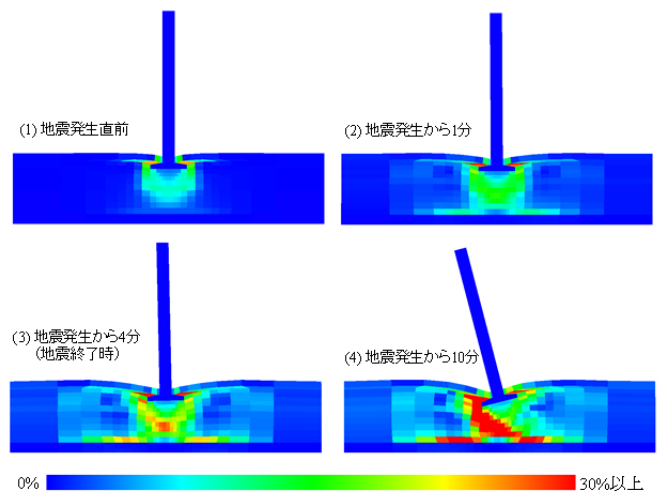


図 6 せん断ひずみ経時変化（地盤 D, 南海トラフ, 密度大）