

立坑構造物の耐震解析モデルに関する考察 —各種解析モデルの一覧比較—

志波 由紀夫¹

¹ フェロー会員

E-mail: yshiba@jcom.zaq.ne.jp

このノートは、筆者がここ数年取り組んできた立坑構造物の耐震解析モデルの数々について、モデル化の要点や解析性能などを総ざらいつに取りまとめたものである。これまでの既報では、その都度解析モデルを一つ取り上げて、実際に耐震計算例を示しながら議論してきたので、その間に各種解析モデルの実施データが蓄積されてきた。今回、それらを利用して 5 種類の解析モデルにより同一例題を対象にした一斉解析を行い、計算結果の比較をとおして各モデルの特性を一覧にまとめてみた。5 種類とは、地盤・構造物一体型の 3D-FEM 系モデルであるソリッド要素モデル、シェル要素モデル、はり要素モデルの 3 種類、それと、構造物分離型の応答変位法のはり・ばねモデル（従来モデル）、およびその改良を図った改良モデルの 2 種類である。

Key Words: *underground vertical shaft, seismic analysis models, 3D-FEM, performance comparison, overall summary*

1. はじめに

立坑構造物（本稿ではシールドトンネル工事用の立坑、開削トンネルの駅部の躯体など、鉛直方向に深く構築される筒状あるいは箱状の地中構造物のことをいう）の耐震解析モデルに関して、筆者はこれまで検討を重ねてきた。既報^{1)~4)}では、その都度解析モデルを一つ取り上げて、実際に耐震計算例を示しながら議論してきたので、ここ数年の間に各種解析モデルの実施データが蓄積されてきた。今回、それらを利用して 5 種類の解析モデルにより同一例題を対象にした一斉解析を行い、計算結果の比較をとおして各モデルの特性を一覧にまとめてみた。立坑構造物の耐震計算実務に携わる方々の参考となれば幸いである。

2. 取り上げた耐震解析モデル

5 種類の解析モデルとは、

- (a) 3D-FEM_ソリッド要素モデル
- (b) 3D-FEM_シェル要素モデル
- (c) 3D-FEM_はり要素モデル
- (d) はり・ばね_改良モデル
- (e) はり・ばね_従来モデル

である（稿末に取りまとめた表-1 も参照されたい）。

立坑構造物は極めて 3 次元性の高い地下構造物であるので、基本は 3 次元モデルであろう。特に、規模の大きい立坑や構造が複雑な立坑には、3 次元モデルの採用が推奨あるいは示唆されている^{5)~7)}。その場合、立坑躯体としてはソリッド要素またはシェル要素でモデル化するのが一般的であり^{5)~7)}、それが上記の(a)と(b)になる。なお、このモデル化で周囲地盤の方を「地盤ばね」として応答変位法で解析するという方法もあるが、その場合の「地盤ばね」のモデル化に確立された方法がないため、本稿では周囲地盤も 3D-FEM のソリッド要素によるモデル化としている。

(c)は、立坑躯体をはり要素で、周囲地盤を 3D-FEM のソリッド要素で、それぞれモデル化するもので、周囲地盤を「地盤ばね」とするいわゆる“はり・ばねモデル”とは別のものであって、(a)および(b)の解析モデルにおける立坑部分をはり要素で構成した立坑で置き換えた解析モデルである（詳しくは参考文献 3）を参照されたい）。以上(a)から(c)は、立坑と地盤を一体にしたタイプの解析モデルである。そして、周囲地盤を 3D-FEM のソリッド要素でモデル化することは共通で、立坑躯体のモデル化が 3 者 3 様となる。

次に(d)と(e)は、立坑を 1 本の鉛直方向のはりに見立て、周囲地盤は直接はモデル化せずに、「地盤ばね」を導入

することで地震時の地盤・立坑間の相互作用効果を考慮する解析モデルである。地中構造物を地盤から分離して扱うタイプで、応答変位法の手法にしたがい、自由地盤の地震応答計算を別途行って地震時地盤変位その他を算出し、これらを地震荷重として静的に載荷する。モデルの作成や数値計算の負荷が小さいことから、多くの設計指針や技術書^{例えば6,7)}で実務に一般的な方法とされており、根強く使われている。それが(c)の従来モデルである。そして(d)は、従来モデルにおいて周面せん断力が考慮されていないこと等に対する改善を図り筆者が提案^{1,2)}している解析モデルである。

立坑構造物の耐震解析モデルとしては他に、立坑躯体を2次元の骨組み構造（箱型ラーメン）とし、これに応答変位法や応答震度法などを組み合わせる解析手法なども選択肢の一つに挙げる考え方が見受けられる^{6,7)}。しかし2次元性に乏しい立坑構造物を2次元骨組み構造にモデル化することには本質的な無理があり、それらを上記の5つの解析モデルと同列に比較するのは適当ではないため、取り上げていない。

3. 耐震計算の対象および計算条件

耐震計算の対象としたのは、図-1に示す立坑・地盤系である。寸法等がほぼ同じな、正方形断面の立坑と円形断面の立坑で（以下、「矩形立坑」、「円形立坑」と呼称する場合がある）、両立坑とも側壁の厚さが上部と下部とで異なる条件としてある。地盤の条件は同じである。ちなみに、仮にこの2つの立坑の耐震計算を上述の2次元骨組み構造モデルで行おうとすると、断面形状が異なるにもかかわらず、（妻壁をどうモデル化するかによるが）同じ解析モデルになる設定になっている。3次元の解析モデルであればそのようになることはなく、もちろん計算結果にも違いが出るはずである。後章の計算結果に注目されたい。

立坑および地盤に作用させる地震動の条件としては、最も単純な静的一様震度載荷とした。すなわち、立坑・地盤系の全体に、水平方向に加速度100Gal相当の静的な慣性力を一様に作用させた。

立坑、地盤とも材料の非線形性は考えず、線形弾性の条件とした。また、全ての数値計算を汎用3次元動解析プログラムのWindows版TDAP[®] III（骨組+FEM, Large）で行った。

4. 各解析モデルの実際と作成上の要点

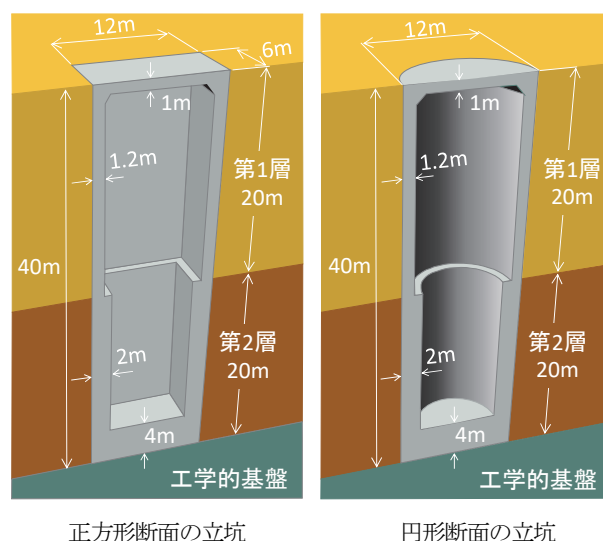
以下、図-1に示した計算対象の具体的なモデル化につ

いて概説するとともに、実際のモデル化過程における要点や留意点について述べる。

(1) 3D-FEM_ソリッド要素モデル

まず、周囲地盤のモデル化について説明する。構造系の対称性を踏まえ、1/2対称のモデルとした。図-2がその3D-FEMモデルとなる（地盤部分のみで、立坑躯体は描いていない）。境界面の拘束条件等が計算結果に及ぼす影響を極力抑えるために、水平方向の広がりには表層厚の5倍にあたる200mとした。深さ方向には、立坑底盤の動きに影響が及ばないように、底盤下26mまでを解析領域に入れた。メッシュ割りは、立坑に接する要素の形状・寸法は矩形立坑と円形立坑とで違いはあるが、いずれも基本的に立坑周辺部では2m以下、立坑から離れた部分では4mとしている。なお、3D-FEM_はり要素モデルでも地盤部分はこれと全く同じモデルであり、3D-FEM_シェル要素モデルでも底盤直下のメッシュ割りが違うだけのモデルにしている。

立坑躯体は図-3に示すようにモデル化した。図-2で「立坑部」と記した部分にピッタリと納まるもので、こ



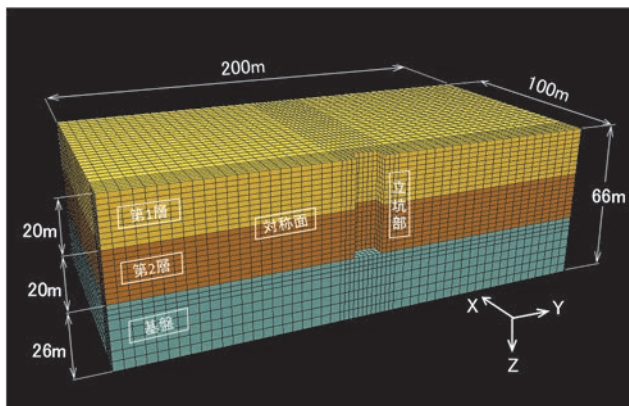
正方形断面の立坑

円形断面の立坑

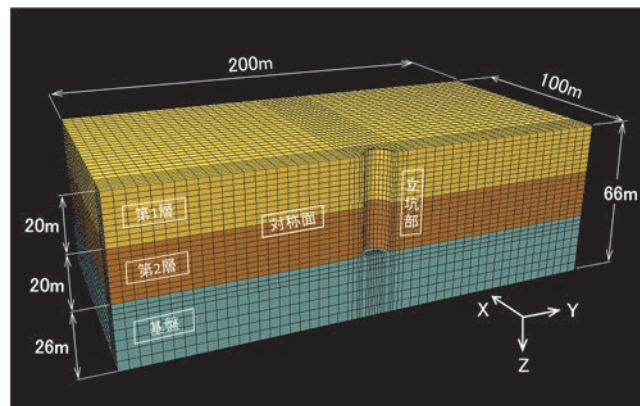
立坑および地盤の諸元

部位	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング率 (kPa)	せん断波速度 (m/s)	ポアソン比
立坑(鉄筋コンクリート造)	25	2.5×10^7	2,020	0.20
第1層	18	7.7×10^4	120	0.45
第2層	20	2.4×10^5	200	0.45
工学的基盤	20	9.1×10^5	400	0.40

図-1 耐震計算の対象とした立坑・地盤



(a) 正方形断面の立坑のモデルの地盤部分
節点数=47,637 要素数=43,544



(b) 円形断面の立坑のモデルの地盤部分
節点数=48,230 要素数=44,056

図-2 3D-FEM_ソリッド要素モデルの地盤部分

	ソリッド要素モデル	シェル要素モデル	はり要素モデル
正方形断面の立坑	地盤要素 (ソリッド要素) ソリッド要素 シェル要素 シェル要素間の不連続点を「剛はり結合」 ソリッド要素 節点数=1,390, ソリッド要素数=1,000	地盤要素 (ソリッド要素) ソリッド要素 シェル要素 シェル要素間の不連続点を「剛はり結合」 ソリッド要素 節点数=450, シェル要素数=234 ソリッド要素数=84	地盤要素 (ソリッド要素) はり要素 立坑底面位置 節点群 剛体結合 節点数=41, はり要素数=40
円形断面の立坑	本来の地盤・立坑接触面 地盤～シェル の間に構造 要素はなく、 節点間を「剛 はり結合」 節点数=1,638, ソリッド要素数=1,168	本来の地盤・立坑接触面 地盤～シェル の間に構造 要素はなく、 節点間を「剛 はり結合」 節点数=546, シェル要素数=256 ソリッド要素数=128	本来の地盤・立坑接触面 地盤～はり の間に構造 要素はなく、 節点間を「剛 はり結合」 節点数=41, はり要素数=40

図-3 3D-FEM系各モデルの立坑部分

の図にはシェル要素モデル、はり要素モデルも比較して示してある。ソリッド要素モデルでは躯体の全ての部分をソリッド要素でモデル化している。ここで、今回の計算例では頂版の応力には特段注目していないため壁厚方向の要素分割は1層としたが、側壁はその応力が注目されることから上部を3層、下部を5層に分割した。

(2) 3D-FEM_シェル要素モデル

立坑躯体のうち、12mの辺長あるいは直径に対して厚さが4mある極厚の底盤はソリッド要素とし、頂版および側壁をシェル要素としたモデルである。シェル要素は言うまでもなく板状の部材の厚さ中央に配置すべきものである。ただ、対象立坑の側壁は途中で厚さが大きく変化するの、その箇所では上部のシェル要素と下部のシェル要素に段差が生じてしまう。これへの対処としては、上下のシェル要素の節点間を「剛はり結合」させた⁴⁾。

「剛はり結合」とは、互いに離れた2つの節点同士を、あたかも剛なはりで結ばれているかのような条件式で関連づけ、一方の節点の変位を他方の節点の変位に従属させる手法である。図-3にその状況が示されている。なお、この図中の書込み説明が正方形断面の立坑と円形断面の立坑とで内容的に異質になっているが、それはスペースの都合上重複を避けるため、どちらに書いてある説明も両立坑に適用されるものである。

モデル化の要点としてもう一つ、シェル要素と地盤要素との結合方法がある。側壁をシェル要素でモデル化すると、要素の壁が本来の外周面から壁厚の1/2だけ内側に位置することになる。それで地盤要素をシェル要素の位置まで形成し、そこで節点同士を結合させるモデル化が普通に行われるかと思われる。しかし、そのようなモデル化では、地盤から立坑に作用する地震荷重の中で大きな比率を占める周面せん断力が適切に作用しない。これは図-4に示すように、周面せん断力は本来は立坑の外周面に作用し、立坑に対して偶力モーメントの荷重となるが、上記のようなモデル化では地盤との接触面が壁厚の1/2だけ内側にずれることにより、周面せん断力が

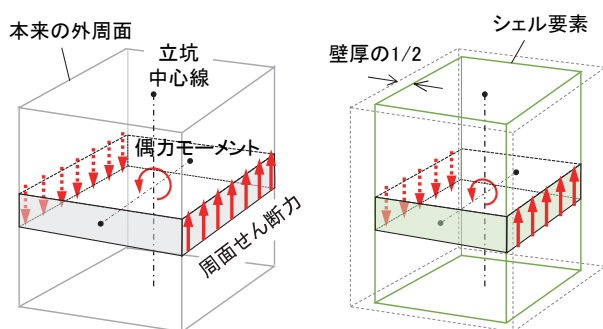


図4 地震時周面せん断力の作用の仕方の違い

作用する面積もモーメント・アーム長も減少してしまうからである。この問題に対して有効なのは、図-3に示したように、地盤要素は本来の地盤・立坑接触面（すなわち立坑の外周面）までしか形成しない。すると、シェル要素との間に空隙ができるが、その空隙を挟んで対面する地盤要素の節点とシェル要素の節点とを「剛はり結合」するのである⁴⁾。こうすることで、厚みの無いシェル要素に壁厚の1/2の長さのアームが付いた形になり、地盤からの周面せん断力や地盤・立坑間の相互作用力が本来の立坑外周面位置で作用することをモデル化できる。

(3) 3D-FEM_はり要素モデル

立坑躯体を1本のはりに見立てる解析モデルである³⁾。図-3から分かるように、シェル要素と同様で、地盤要素は本来の地盤・立坑接触面まで形成し、はり要素・地盤要素間の空隙は「剛はり結合」によって“力学的に埋める”手法をとる。立坑躯体（＝はり）の深さ方向の要素分割を地盤の要素分割と合わせれば、はり要素の1つの節点から同じ深さの複数の地盤節点に放射状に「剛はり結合」を形成することになり、結合のイメージとしては「ボルトブラシ」状である。これも、3D-FEM ソリッド要素で形成した地盤の中に単に埋め込んだ形のはりのモデルでは、地盤から周面せん断力が伝わらないだけでなく、立坑の平面的広がりや矩形・円形といった断面形状も反映されないことに対処したモデル化である。あるいは、シェル要素モデルにおける側壁を立坑中心線へ向けて極限まで縮小したイメージでもある。はりの下端では、剛な底盤が地盤に接地していることをモデル化するため、立坑底面に位置する地盤節点群を剛体結合させ、その中心節点とはりの下端とを剛結させている。

この解析モデルは、次に見る「はり・ばね_改良モデル」と、はり部分が共通している。したがってこの解析モデルは、「はり・ばね_改良モデル」において用いられている各種の地盤ばね要素を、3D-FEM ソリッド要素で形成した連続体の地盤で置き換えたもの、という解釈もできる。

(4) はり・ばね_改良モデル

図-5に、本解析モデルを従来モデルとともに示す。改良モデルでは、側壁と地盤との相互作用効果を表すために水平方向および回転方向の地盤ばねをはりに分布させて取り付ける。また、底盤の変位に対する地盤反力を表すために、はりの下端に水平方向並びに回転方向の集中ばねを付ける。ただし、これらのばねのばね定数を決定するための確立された方法はなく、わずかに限られた指針^{例え⁶⁾}に頼れば、道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編に示されている地盤反力係数を準用して算定するというのが一つのよすがになる。これによれば、図-6に示した

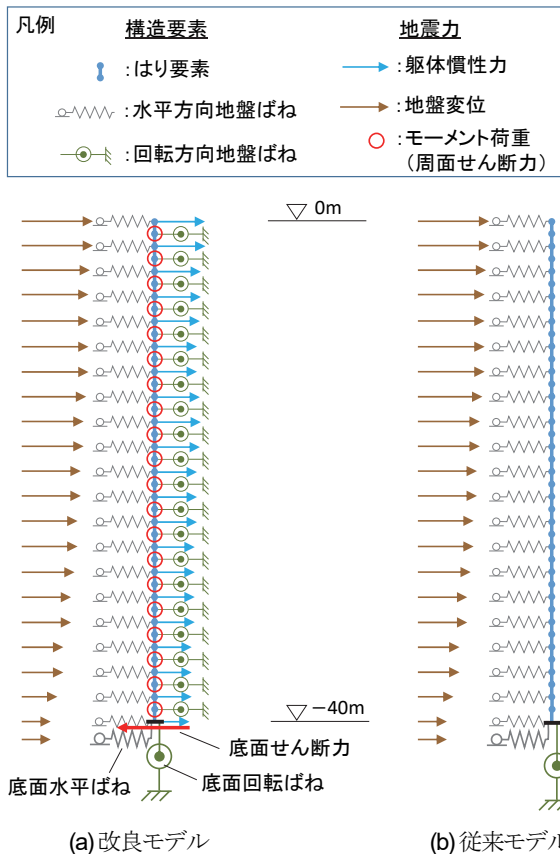


図-5 2種類のはり・ばねモデル

ように、水平方向地盤ばねについては基礎構造物の前背面の水平方向地盤抵抗 k_H と側面の水平方向せん断地盤抵抗 k_{SHD} を、回転方向地盤ばねについては前背面の鉛直方向せん断地盤抵抗 k_{SVB} と側面の鉛直方向せん断地盤抵抗 k_{SVD} を、それぞれ周面で積分することにより、集約化したばねのばね定数 K_h および K_ϕ とすることが考えられる。底面のばねに関しても同様である。立坑の断面形状はその積算過程で反映されるが、具体的な算式など詳しいことは参考文献1)を参照いただきたい。

このはり・ばね構造に作用させる地震力は、躯体慣性力、地盤変位、周面せん断力の3つであり、設計地震動に対する自由地盤の応答をもとに算出する。今回の計算例では一様加速度100Gal相当の静的な慣性力であるので、自由地盤の応答変位および応答せん断応力の理論値は図-7のようになる。地盤変位としてはこの値を用いる。周面せん断力に関しては各節点の深度毎に、その深さでのせん断応力、立坑の平面投影面積（矩形立坑と円形立坑とで違いが出る）、当該節点の受持ち長さ、の3つの積になるモーメント荷重をはり節点に作用させる。

(5) はり・ばね_従来モデル

この解析モデルでは、回転方向地盤ばねは考えない。また、地震力は地盤変位のみであり、地震荷重として矩

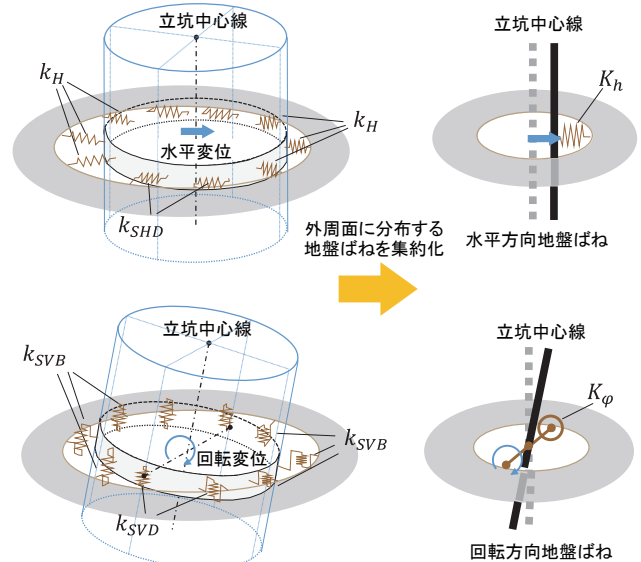


図-6 はり・ばねモデルにおける地盤ばねの考え方

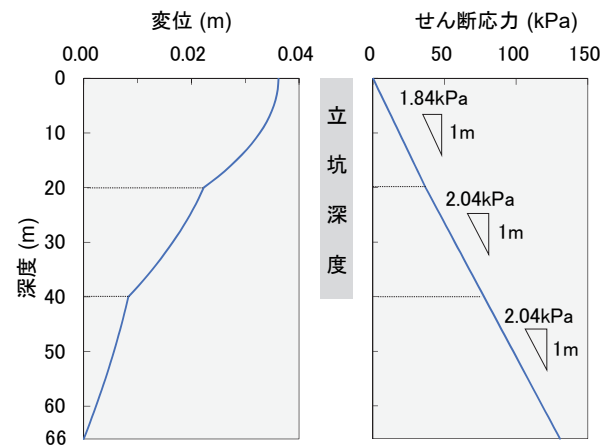


図-7 一様加速度100Galに対する自由地盤の応答（理論値）

形・円形の断面形状の違いが出るのは、はりの曲げ剛性と水平方向地盤ばねとの組合せによって決まってくる、地盤変位起因のばね反力だけになる。

5. 計算結果

はじめに、3D-FEM系の解析モデルの代表として、ソリッド要素モデルによる正方形断面の立坑の地震応答の様子を図-8に示す。図-7で見た地盤変位の理論値どおりの変形になっていることが確認できる。

次に、立坑に生じた応力の比較を全解析モデルの一覧で示したいが、解析モデルごとに応力関係の出力項目が異なるので、何か共通の指標を設ける必要がある。そこでこれを、はりモデルの出力である断面力（曲げモーメ

ントおよびせん断力)とした。ソリッド要素モデルとシェル要素モデルについては、断面深さごとに以下の式により断面力相当値を算出した。

ソリッド要素モデルの計算結果については：

$$\text{曲げモーメント} = \sum \sigma_{zi} \cdot S_i \cdot y_i \quad (1)$$

$$\text{せん断力} = \sum \tau_{yi} \cdot S_i \quad (2)$$

ここに、 σ_{zi} ：要素*i*の鉛直方向の直応力

τ_{yi} ：要素*i*のせん断応力の載荷方向成分

S_i ：要素*i*の面積

y_i ：立坑中心から要素*i*の図心までの距離

Σ は、同一深度の側壁を構成するソリッド要素全部についての総和。

シェル要素モデルの計算結果については：

$$\text{曲げモーメント} = \sum N_{zj} \cdot l_j \cdot y_j \quad (3)$$

$$\text{せん断力} = \sum Q_{yj} \cdot l_j \quad (4)$$

ここに、 N_{zj} ：要素*j*の鉛直方向の面内合応力（軸力）

Q_{yj} ：要素*j*のせん断合応力の載荷方向成分

l_j ：要素*j*の辺長

y_j ：立坑中心から要素*j*の図心までの距離

Σ は、同一深度の側壁を構成するシェル要素全部についての総和。

以上の断面力集計の結果を図-9に一覧にして示す。この図からまず、今回の計算対象は外寸がいずれも12mで壁厚も等しい正方形断面と円形断面の立坑であるが、発生断面力の大きさに少くない差があることが分かる。深さ方向の増加・減少の様子は両者に違いはないが、全体的に、曲げモーメントは概ね6割から7割、せん断力は概ね4割から5割、それぞれ正方形断面の方が大きくなっている。外寸・壁厚が等しくても、正方形断面の方が横断面の断面積が約3割、断面2次モーメントが7割（下部側壁）～10割（上部側壁）大きいことが、こうした断面力の大小を生じさせた基本的な要因であると考えられる。

次に、5種類の解析モデル間での比較であるが、少なくとも以下の3つのことが言えるのではないかな。

1つ目は、はり・ばね_従来モデルで計算したせん断力がほかの4種類の解析モデルで計算したそれよりも異常に小さいことである。そして、その主因が周面せん断力を地震力として考えていないことにあるのは明白であ

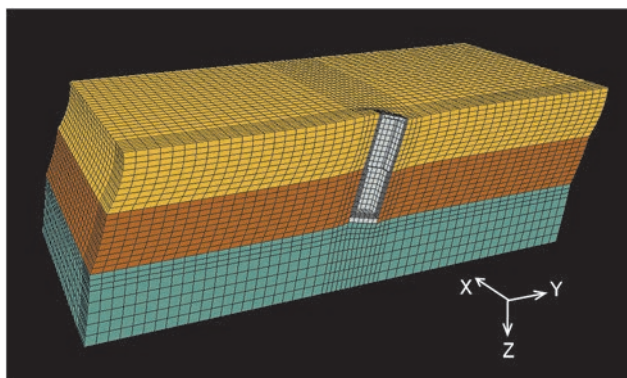


図-8 3D-FEM_ソリッド要素モデルの地震応答の様子
(構造寸法に対し変形量を500倍に拡大して描画)

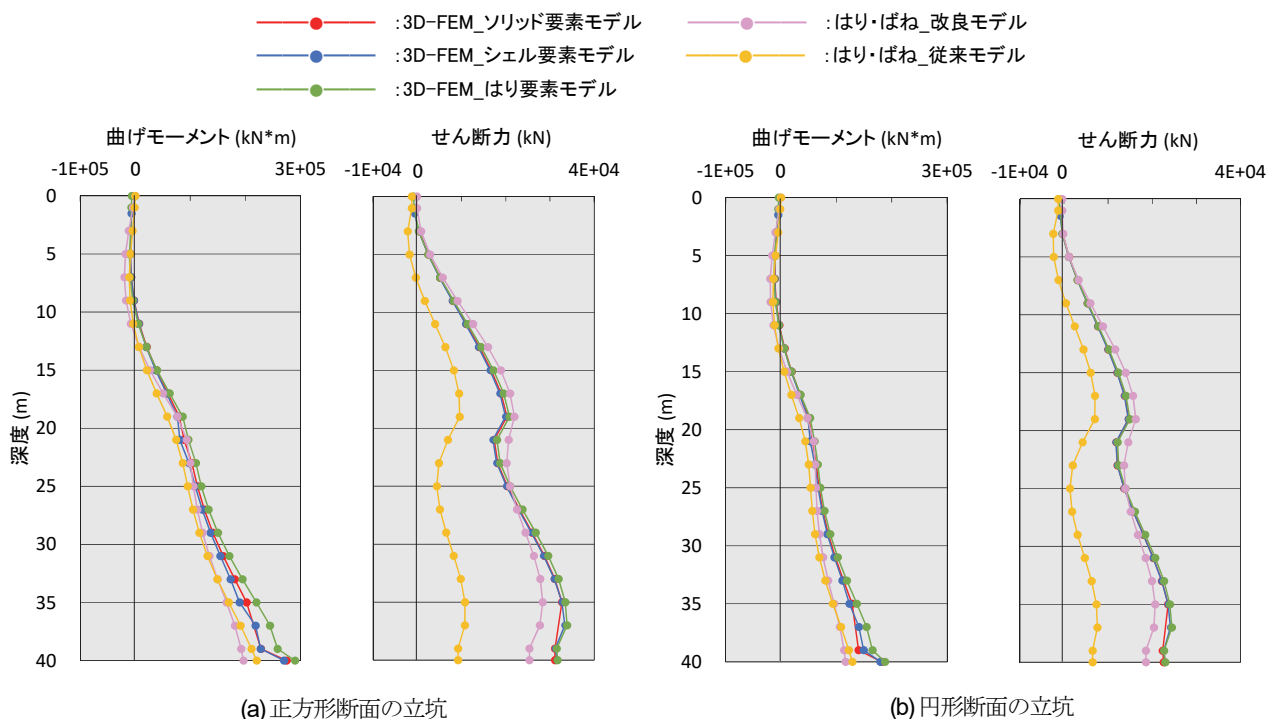


図-9 立坑の耐震計算結果（断面力相当値）の比較

る。

2 つ目は、3D-FEM 系の 3 つの解析モデルの計算結果が、互いによく一致していることである。特にせん断力の一致度はかなり高い。ソリッド要素モデルとシェル要素モデルでは、断面力相当値を式(1)～(4)によってそれぞれ間接的に算出しているにもかかわらず、それらが互いによく一致し、かつ、それらがはり要素モデルで直接計算した断面力そのものにも一致しているのである。こうした結果が導かれたのは、今回の例題の矩形立坑・円形立坑がいずれも、総体としては1本のはりのような振舞い（応力・変形関係）をする条件設定になっていて、

これをソリッド要素、シェル要素、はり要素のいずれでモデル化してもほとんど同じ挙動を示すであろうことに加えて、3 つの解析モデルがいくつかの要点をおさえたモデル化技法によって実質的に同じ力学機構を実現するものになっていたからであろう。

3 つ目は、はり・ばね改良モデルは、十分とは言えないものの、上記の3モデルのグループの計算結果に近い値を出していることである。1 つ目の従来モデルの欠点が改良されていると言えよう。それでも、やや差が出ているのは、地盤・構造物一体型と構造物分離型という解析手法の本質的違いの現れであると考えられる。既述

表-1 各解析モデルの特性

解析モデル の分類	3D-FEMモデル (地盤・構造物一体の解析)			はり・ばねモデル (構造物を分離した解析)	
	ソリッド要素 モデル	シェル要素 モデル	はり要素 モデル	改良モデル	従来モデル
周囲地盤の モデル化の 方法と要点	・ソリッド要素により3D-FEMモデルとする ・立坑の本来の外周面位置までをモデル化する(立坑を取り払って空洞ができた地盤を形成する) ・境界の影響を受けないよう、十分に広い領域をモデル化する ・地盤・構造物間の相互作用は解析演算の中で内部的に実現される			・周囲地盤そのものはモデル化せず、「地盤ばね要素」により地盤・構造物間の相互作用効果を表現する ・ただし、地盤ばねのモデル化が難しい	
立坑躯体の モデル化の 方法と要点	・躯体の全てをソリッド要素で構成 ・側壁の厚さ方向にも要素分割が必要	・側壁等、大部分をシェル要素で構成 ・地盤との間の空隙を剛はり結合させる ・壁厚の変化点では上下の要素を剛はり結合させる	・はり要素で1本のはりとして構成 ・地盤との間の空隙を剛はり結合させる ・下端は、底盤の剛性に応じて、地盤要素と結合させる	・はり要素で1本のはりとして構成 ・下端に水平ばねおよび回転ばねを設置(地盤ばね要素のひとつ)	
地震荷重の 作用方法	・加速度波形の入力による動的解析法が可能 ・一様震度載荷、応答震度法(別途行う自由地盤の地震応答解析から得る深さ方向の震度分布を載荷)等の静的解析法も可能 ・立坑への地震荷重の作用は解析演算の中で内部的に実現される			・応答変位法 ・地盤変位、周面せん断力(自由地盤の地震応答から算出)、躯体慣性力を載荷	・応答変位法 ・地盤変位(自由地盤の地震応答から算出)のみ載荷
立坑躯体応 答の出力	ソリッド要素中心部の 応力(6成分)	シェル要素中心部の 合応力(8成分)	はり要素の断面力 (曲げモーメント、せん断力)	はり要素の材面力(曲げモーメント、せん断力)	
解析精度	立坑躯体の力学的振舞いが「はり」に近ければ、互いに整合する計算結果となる(ほぼ同じ結果となる)			十分ではないが、3D-FEM系モデルに近い結果となる	躯体のせん断力を著しく過小に評価する
設計実務 から見た 特性	利点	・開口部、かまちばり等、細部までモデル化し解析できる	・開口部等の細部をある程度までモデル化できる ・モデル作成の手間はやや軽減	・モデル作成、計算結果の処理を大幅に省力化できる ・地盤ばねの問題がない	・モデル作成が簡単 ・数値計算の負荷が小さい ・計算結果の処理が簡単
	難点	・立坑のモデル化に多大な労力 ・数値計算の負荷が大きい ・計算結果の処理に手間がかかる	・数値計算の負荷が大きい	・立坑の細部はモデル化できない ・数値計算の負荷が大きい	・立坑の細部はモデル化できない ・地盤ばね定数の算定法が未確立 ・得られるせん断力の信頼性が低い

のとおり、構造物分離型では地盤ばねを導入するが、そのばね定数の評価が難しく、設定を変えれば結果も変わってくる。また、地盤ばねは1次元の力学機構であって、3D-FEMでモデル化した地盤であれば表現可能な2次元・3次元の挙動までは表し得ないという、力学モデルとしての本質的な限界もある。

6. おわりに

立坑構造物の耐震解析モデルを5種類取り上げ、例題を1つ設定して一斉解析を行った。表-1に、その結果も含めて各解析モデルの特性を一覧表の形でまとめた。 「解析モデルの選び方次第で計算結果はずいぶん違ってくるものだ」との言説は必ずしも正しくはなく、「解析モデルのタイプが異なっても、それぞれで適切なモデルを作れば、結果は合ってくる」ことの1例を示すノートになったかと思う。

謝辞：本稿で取り上げた耐震計算の一部は、土木学会トンネル工学委員会技術小委員会に置かれた「シールド工事用立坑の耐震設計法検討部会」（部会長：岩波基早稲田大学教授）の一員である筆者が、WGの活動の中で行ったものである。このような機会を与えて下さったWG

の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 志波由紀夫：立坑構造物の耐震解析モデルに関する考察，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 69, No. 4（地震工学論文集第32巻），pp. I_55-I_72, 2013.
- 2) 志波由紀夫：立坑構造物の耐震解析モデルに関する考察—改良型応答変位法の実務性能の検証—，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 76, No. 4（地震工学論文集第39巻），pp. I_180-I_195, 2020.
- 3) 志波由紀夫：立坑構造物の耐震解析モデルに関する考察—3D 地盤・はりモデルの有用性—，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 77, No. 4（地震工学論文集第40巻），pp. I_215-I_228, 2021.
- 4) 志波由紀夫：立坑の耐震解析モデルとしてのシェル要素モデルについての検討，土木学会第76回年次学術講演会 第I部門，I-258, 2021.
- 5) 建設省：大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン（案），建設省総合技術開発プロジェクト「地下空間の利用技術の開発報告書」（第3分冊），pp. 596-598, 1992.
- 6) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2009年版 I 総論，pp. 99-100, 2009.
- 7) 土木学会トンネル工学委員会技術小委員会 シールド工事用立坑の設計法検討部会：シールド工事用立坑の設計（トンネル・ライブラリー27），pp. 3_25-3_51, 土木学会，2015.

A THEORETICAL STUDY ON THE ANALYTICAL MODEL USED IN THE SEISMIC DESIGN FOR UNDERGROUND VERTICAL SHAFT STRUCTURES —AN OVERALL SUMMARY OF THE MODELS—

Yukio SHIBA

This note makes an overall summary of the major points to note and analysis performance of several seismic analysis models for underground vertical shaft structures that the author has been studying on for the past few years. In the previous papers, single analysis model was taken up each time, and discussions were conducted by demonstrating practical calculation examples, and during that time, usable numerical data of those models have been accumulated.

In this note, using them, a simultaneous analysis of the same example using five types of analysis models is performed, and summarized the characteristics of each model by comparing the calculation results. The five types are three types of 3D-FEM technique that integrate the ground and underground structure together: solid element model, shell element model, and beam element model, and two types of seismic deformation method in which the structure is separated from the ground: conventional beam-and-spring model, and the improved model that is an improvement of it.