

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 —

志波 由紀夫¹

¹ フェロー会員

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

立坑構造物の耐震計算法の合理化を目指して、これまでに、従来の“はり・ばねモデル応答変位法”を改良した計算法を提示するとともに、その実務性能についても検証してきた。残る課題の中でも大きな問題は、この計算モデルの中で使う「地盤ばね」の合理的な設定方法である。本稿では「地盤ばね」の問題への対応の一つとして、“3D 地盤・はりモデル”について検討する。これは、立坑をはり要素で、周囲の地盤を 3 次元ソリッド要素でモデル化した 3D-FEM モデルであり、設定が難しいスプリング形式の「地盤ばね」に代えて、大容量とはなるが 3 次元連続媒体という地盤本来の形を組み込んだ解析モデルである。耐震計算は動的解析または応答震度法により行う。いくつかの例題を設けて試算を行い、この解析モデルの有用性を確認した。

Key Words: *underground vertical shaft, soil-structure interaction, seismic analysis technique, 3D-soil-and-beam model, performance verification*

1. はじめに

シールドトンネル工事用の発進・中間・到達立坑、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、本稿では立坑構造物と称している。トンネルや大規模管渠の施設の計画や設計においては、その物量の大半を占めるトンネル・管渠部分のことについては多くが語られているが、付帯施設的な立坑構造物に関しては、耐震設計の規定も含めてあまり多くのことが取りまとめられてこなかった。しかし、よくよく考えてみれば、大地震の時に地下空間から地上へ避難するにしても、被災後にトンネル部分の修復に向かうにしても、そのほぼ唯一の出入り口は立坑である。そうであれば、地震時の立坑の安全安心はトンネル部分のそれに勝るとも劣らないのではないかと。立坑構造物の耐震設計法の整備、そして耐震計算法の確立が必要である。

本稿は、立坑構造物の耐震計算法の確立を目指して、それに用いる解析モデルについて考察する一連の研究の一つになるものである。これまでに、従来行われてきたいわゆる“はり・ばねモデル応答変位法”の力学的不備を改善した改良型モデルの提案を行い¹⁾、また、この改良型モデルの実務性能を検証している²⁾。結果として、

“はり・ばねモデル応答変位法”のどこをどう改善すればよいのかが概ね明らかになり、その改善点も実務的に受け入れにくいものではなく土木・建築の設計実務で広く使われている汎用構造解析ソフトで難なく対応でき、現状で最も精細な解析手法と考えられる 3 次元有限要素法動的解析法によった場合の計算結果に近づかせることもできることが確認できた。ただ、残された課題が大きく 2 つある。1 つは、“はり・ばねモデル応答変位法”の中で使う「地盤ばね」の設定法の問題である。ばねの硬さであるばね定数を合理的に決める方法について、立坑構造物に関しては未だ有力な指針類がない。それに加えて前報²⁾では、地盤ばねの硬さは立坑構造物の地震時の変位モードによって変化する可能性があることも示唆されている。「地盤ばね問題」は、他の地中構造物の応答変位法においても存在する難問であろう。もう 1 つは、強震時における地盤および立坑躯体の非線形的挙動の取扱いの問題である。躯体の力学的非線形性の取扱いについては既存の多くの知見や計算手法が利用できると思われるが、地盤・立坑間の動的相互作用（立坑への地震荷重でもある）の非線形性の取扱いについては、上記の「地盤ばね」が絡む問題でもあり、これも難しい。

以上のような経緯を踏まえて本稿では、“はり・ばねモデル応答変位法”における「地盤ばね」の問題への対応の一環として、“ばねの形をしていない地盤ばね”を

用いた解析モデル、あるいは、“地盤ばねの代わりをする力学要素”を用いた解析モデルについての検討を行う。その解析モデルとは、立坑躯体はこれまで通りにはりでモデル化し、「地盤ばね」の部分については、立坑周囲の地盤をソリッド要素により 3 次元有限要素法モデル（3D-FEM 地盤）とし、はりと 3D-FEM 地盤とを連結して一体化した“3D 地盤・はりモデル”である。要するに、力学的な設定に苦慮するスプリング型の「地盤ばね」に代えて、はり（立坑）に 3D-FEM 地盤を取り付けた解析モデルである。この 3D-FEM 地盤が「地盤ばね」の代わりをすることになる、というか、これまで大胆な仮定のもとに簡略化して「ばね」としていた部分を、本来の 3 次元的広がりや荷重伝達機構をもった媒体に戻す、といった方がよいかもしれない。

こうした解析モデルを用いて数例の耐震計算を行い、「地盤ばね」の問題を考える一助とするとともに、“3D 地盤・はりモデル”の有用性を評価してみたい。

2. “はり・ばねモデル”と“3D 地盤・はりモデル”

ここで改めて、応答変位法で用いられる“はり・ばねモデル”と、今回検討する“3D 地盤・はりモデル”とを説明する。

(1) 応答変位法で用いられる“はり・ばねモデル”

この解析モデルを図-1 に示す。ただしこれは既報¹²⁾で提示した改良型の解析モデルであり、従来の解析モデル（地震荷重として自由地盤の地震応答変位だけ考

慮し水平方向地盤ばねのみをモデル化する）から以下の点で改善を図っている。

- 1) 地震時周面せん断力を、主要な地震荷重の一つとして考慮する。地震時周面せん断力は立坑の両側面で互いに上下逆向きの偶力となっているので、構造計算上は、はりの節点にモーメント荷重として与えることで等価な作用となる。また、底面にもその面積に応じた周面せん断力（底面せん断力）を与える。
- 2) 立坑躯体に作用する慣性力も考慮する。それには、はりの各節点に、その質量と地盤応答加速度との積として算定した力を節点力として作用させる。

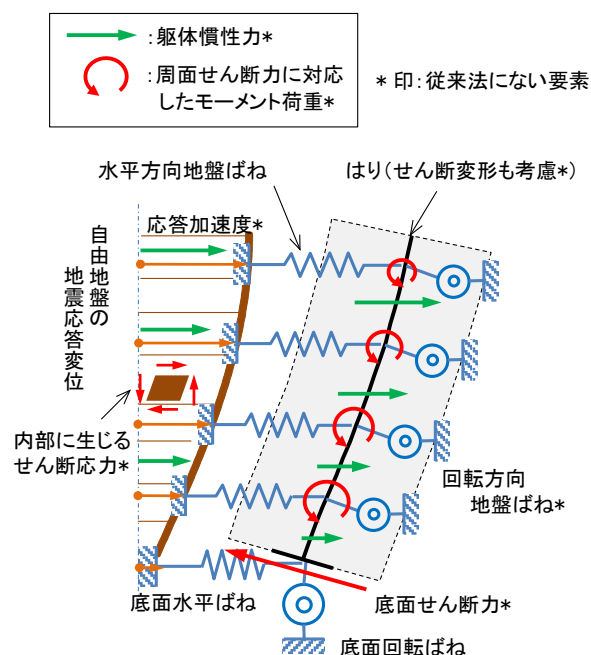


図-1 はり・ばねモデル（改良型）²⁾

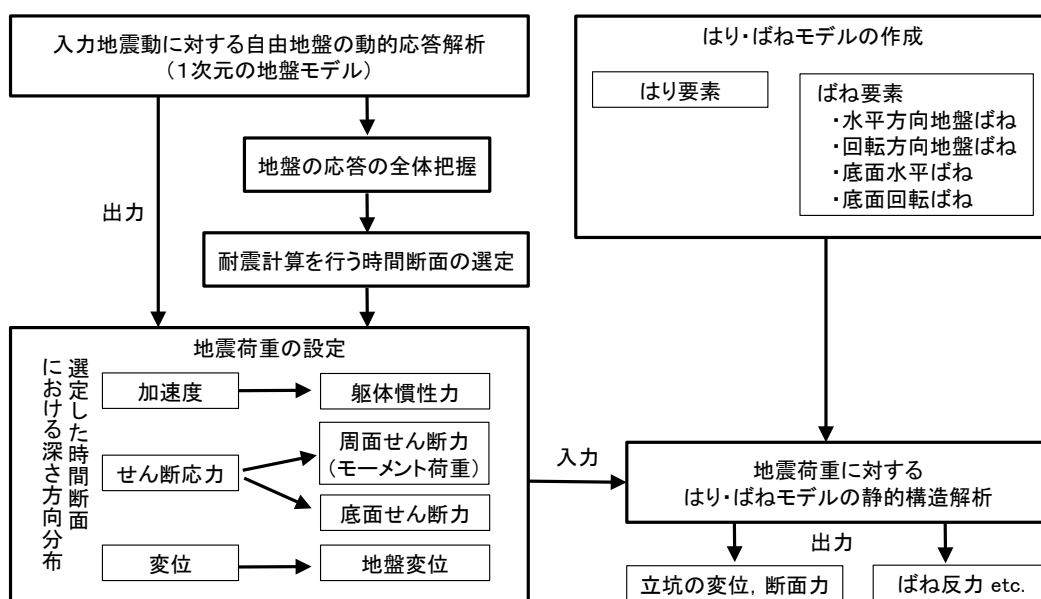


図-2 改良型はり・ばねモデル応答変位法での耐震計算の手順²⁾

- 3) 立坑が傾いたときにそれに抗するように地盤からモーメント反力が働くよう、底面だけでなくはりの軸線に沿っても回転ばねを分布させて設ける。すなわち、「地盤ばね」としては従来から考えられている水平方向のものに加え、回転方向にも考える。
- 4) 立坑躯体をモデル化するはりとしては、せん断変形も考慮できるTimoshenkoはりとする。ただし、これは立坑のせん断変形の影響が大きい条件にも対応できるようにするためであり、通常の立坑構造物の構造条件であれば普通のBemoulli-Eulerはりで構わない。
- この解析モデルによる耐震計算の流れを図-2に示す。
- 他の地中構造物の耐震計算で行われている応答変位法と同様、「はり・ばねモデル」に入力する地震荷重は別途、立坑の存在を考えない自由地盤について設計用地震動に対する動的応答を計算し、その結果から躯体慣性力、周面せん断力（底面せん断力も含む）、および地盤変位という形で算定する。このように、「はり・ばねモデル」は地中構造物を周囲の地盤から抜き出して計算する「分離型」あるいは「サブストラクチャー法型」の耐震計算法である。立坑と周囲の地盤との間で行われる本来複雑な動的相互作用はスプリング型の「地盤ばね」という大胆に簡略化された力学モデルで考慮しようというのがこの手法の本質的特徴である。にもかかわらず、従来の解析モデルであれ、改良型の解析モデルであれ、その「地盤ばね」の特性（ばね定数）を具体的にどう見積もるのかは未だ確立されていない。ある指針においては、①「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編」に示される地盤反力係数より設定する方法と、②構造物・地盤一体のFEMモデルを作成し構造物への静的載荷計算を行って算定する方法、が挙げられ、3次元的な特性を持つ立坑

構造物に関しては②の方法は「複雑であるため実務的とはいえない」とし、①の方法によることを基本としている³⁾。しかし、地盤条件が深さ方向に大きく変化するケース、地盤が砂層・粘土層の互層となっているケースなどでは、①の方法の適用には困難が伴う。

(2) “3D 地盤・はりモデル”

この解析モデルのイメージを図-3に示す。立坑の躯体は、はり要素としてモデル化する。その周囲に、8 節点 6 面体要素（ソリッド要素）で 3 次元的にモデル化した地盤が取り巻く。そして立坑のはり要素と地盤のソリッド要素とは、節点どうしがある一定の関係性をもたせた形で結合されている。これは一見して、ソリッド要素とはり要素で構成された 3 次元 FEM モデルに他ならない。しかし、ここでは見方を変え、平面的な“はり・ばねモデル”のはりを 3 次元的に見て、その周囲のスプリング型の水平方向地盤ばね、回転方向地盤ばね、底面の水平ばねおよび回転ばねに代えて“3D-FEM 地盤ばね”で囲ったもの、と見るのがこの解析モデルの趣旨である。ここで大切なのが、立坑のはり要素と地盤のソリッド要素との結合方法である。これは、立坑と地盤との動的相互作用（周面せん断力の作用も含めて）を立坑外周面と地盤との接触面位置で行わせるのと、はりの横断面の「平面保持の仮定」をセットにして考えた措置で、3D 地盤は実際の立坑の外周面の位置までをモデル化し、立坑の中心軸に配したはり要素との間にできる空きスペースを、構造解析上の「剛はり結合」という形で結合するのが基本である。「剛はり結合」とは、互いに離れた 2 つの節点が、あたかも剛なはりで結ばれているかのように、両節点の変位（各々 6 つの自由度をもつ）に所定の拘束条件を設けて関連付ける手法である。図-3 にそのイメージを示したが、この結合手法の代わりに文字通り剛なはり要素を用いてもよい。その場合は立坑部分がボトルブラシのような形状の解析モデルとなる。なお、これまでも、地盤を FEM、立坑をはりでモデル化し、両者を連結して耐震計算する試みは見られる^{例えば 4)}。

さて、この“3D 地盤・はりモデル”は立坑・地盤一体型であり、地震荷重の作用のさせ方として主に次の 2 つが考えられる。

- 1) 動的解析：設計用地震動波形を入力して動的解析を行う。
- 2) 応答震度法：図-2 の左側の計算プロセスと同様に、別途、自由地盤の地震応答解析を行い、地盤変位（ひずみ）やせん断応力の状態が立坑にとって最も厳しい時間断面を選定する。そして、それと同じ地盤の変位・応力状態になるような静的震度（地盤の深さ方向に変化する）を解析モデルに与える。

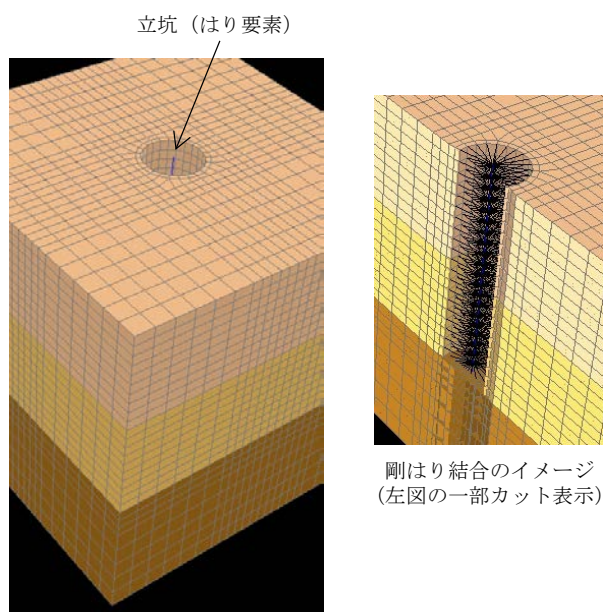
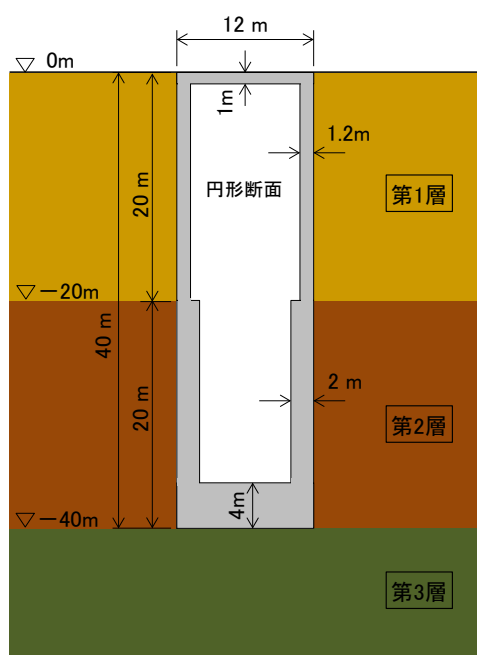


図-3 “3D 地盤・はりモデル”のイメージ

3. “3D 地盤・はりモデル”を用いた耐震計算の試行

(1) 耐震計算の対象

“3D 地盤・はりモデル”の解析性能を調べるために、図-4に示した仮想の立坑・地盤系について耐震計算を行った。これは前報²⁾で設定した例題と同じである。立坑は、前報では12m×12mの正方形断面の鉄筋コンクリート造の構造として設定したが、本稿では問題の3次元性がより高い、外径12mの円形断面とした。深さは40m、壁厚は上半分が1.2m、下半分が2.0mと変化する。頂部には厚さ1mのスラブが、底部には4m厚の底盤があるが、かまちばり、中間スラブ、開口部などは考えていな



地盤の諸元

地層	単位体積重量 (kN/m ³)	せん断波速度 (m/s)	ポアソン比	減衰比
第1層	18	120	0.45	0.10
第2層	20	200	0.45	0.10
第3層	20	400	0.40	0.03

立坑（鉄筋コンクリート造）の諸元

単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング率 (kPa)	ポアソン比	減衰比
25	2.5×10^7	0.20	0.03

図-4 耐震計算の対象とした立坑・地盤

い。

耐震計算としては、これも前報と同じく、2016年熊本地震の本震のときに益城町の地中252mの深さで観測された加速度波形（防災科学技術研究所の記号で2016/04/16-01:25KMMH16）の主要動部20秒間（図-5）で揺すられた場合の立坑の断面力（曲げモーメントおよびせん断力）を算出する。この耐震計算は解析モデルの基本原理の検証が目的であるので、地盤および立坑の非線形力学挙動は考えず、すべて弾性範囲の線形計算とした。

(2) 計算ケース

“3D 地盤・はりモデル”の解析性能を調べるのであるから、何か比較となる基準が必要である。3次元構造系の弾性範囲内の動的挙動を解析するのに現状で最も精緻で信頼のおける解析手法は、3D-FEMによる動的解析であろう。そこで、立坑躯体もソリッド要素により3D-FEMモデル化した“3D-FEMフルモデル”での動的解析を行い、その結果を基準とすることにした。この“3D-FEMフルモデル”を図-6に示す。対称性を考慮して、半分の領域のモデルである。地盤部分の節点数は48,230、要素数は44,056、立坑部分はそれぞれ1,638と1,168である。領域の左右側面はY方向のローラー支持、底面は粘性境界とした。解析に使用したソフトは、汎用3次元動解析プログラムのWindows版TDAP[®] III（骨組＋FEM, Large）である。

“3D 地盤・はりモデル”は、上記の“3D-FEMフルモデル”をベースに作成した。図-7がそれであり、立坑が1本の青い線に見えている。この線は、長さ1mのはり要素40個に要素割りしてあり、地表面から2mごとの節点があり、それに対応する深さの地盤節点（円形断面の半周13点）と「剛はり結合」されている。また、深さ40mの立坑底面を形成する地盤節点（半円形の範囲で52点）については、全節点を「剛体結合」させた上で、立坑はりの下端の節点と同一変位・同一回転角となるように連結した。

耐震計算としては、既述のとおり、動的解析と応答震度法の2方法で行った。応答震度法で作用させる地震荷重（静的震度）は、“3D-FEMフルモデル”の立坑部分

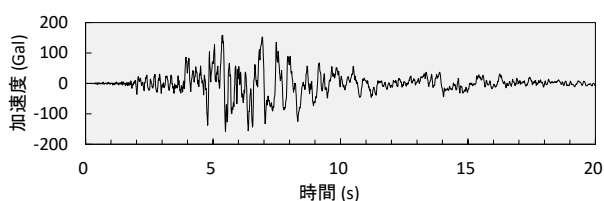
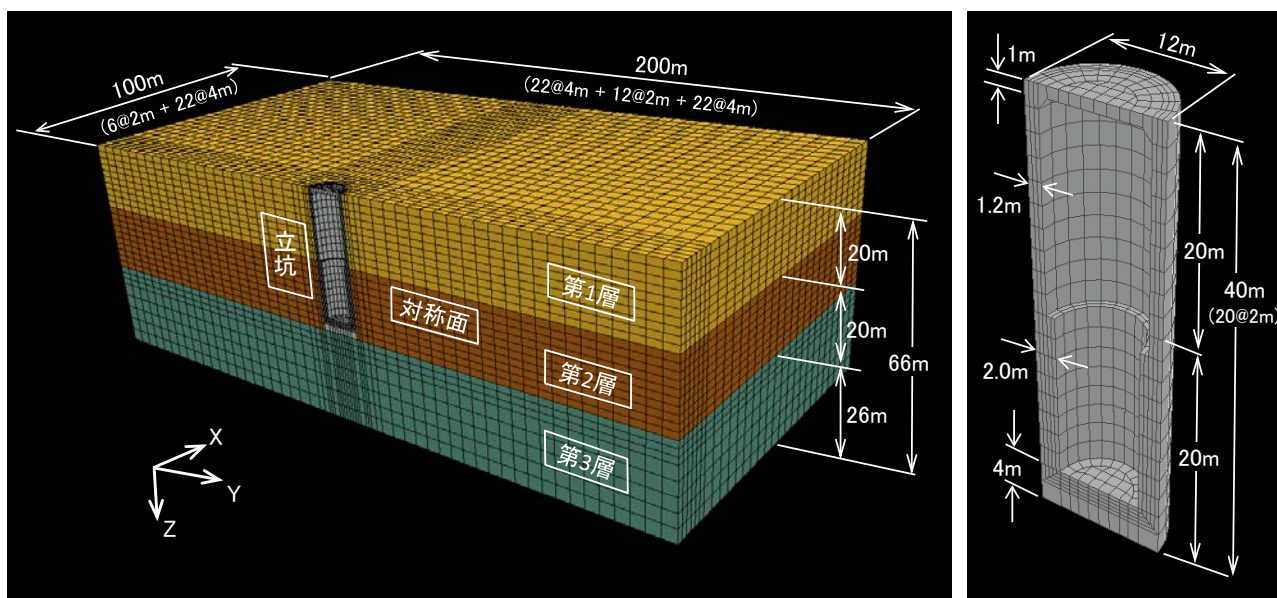


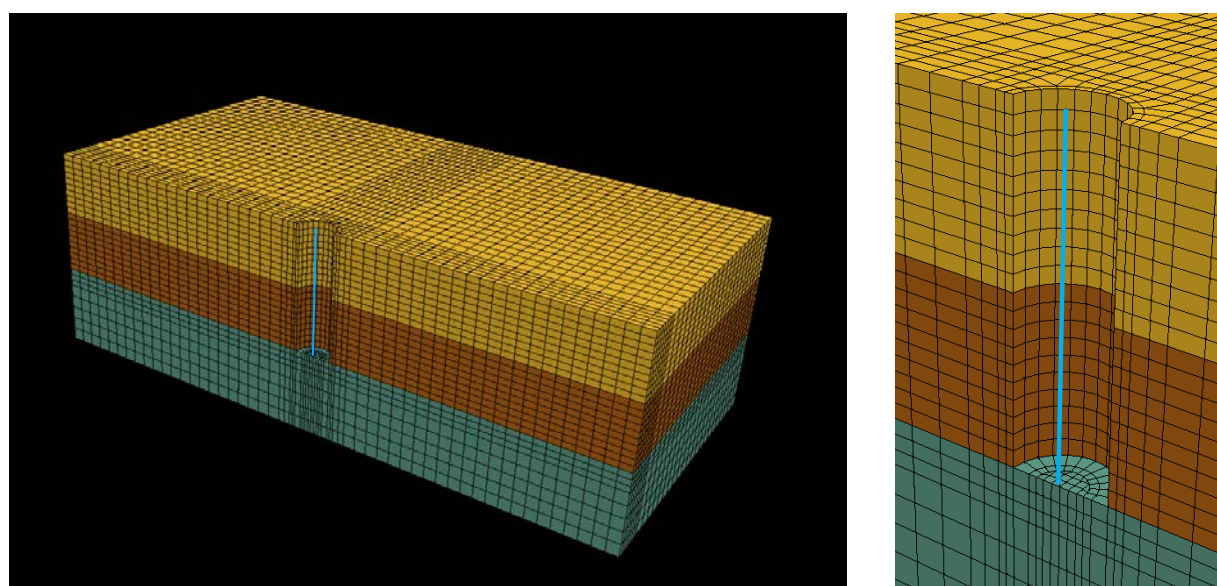
図-5 耐震計算に用いた入力地震動（加速度波形）



(a) 全体図

(b) 立坑部拡大図

図-6 耐震計算の基準を得るための立坑・地盤の“3D-FEMフルモデル”



(a) 全体図

(b) 立坑部拡大図

図-7 “3D地盤・はりモデル”

を地盤で埋め戻した形に作成した自由地盤の 3D-FEM モデル（後述の図-11 の「土柱」参照）について動的解析を行い、その応答結果から特定の時間断面での地盤変位状態（せん断ひずみの分布）を抽出し、これを再現する静的震度分布⁹を算出した。特定の時間断面とは、“3D-FEM フルモデル”の動的解析の結果から、立坑に発生する応力が最大となる時間が加震開始から 7.18 秒後であることが分かっている。その時間断面とした。

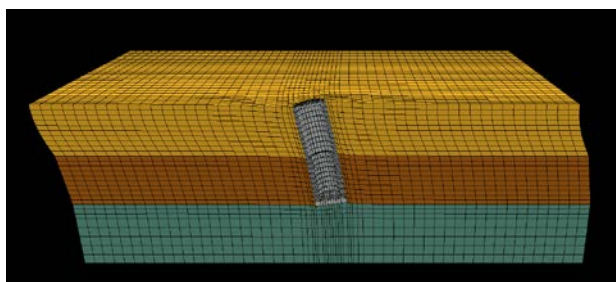
今一つ、参考として“はり・ばねモデル応答変位法”によっても、同じ耐震計算を行った。“はり・ばねモデル”のはり部分は“3D 地盤・はりモデル”でのはり部

分と同一の構造モデルであり、長さ 1m のはり要素を 40 個繋げたものである。地震荷重は、上に述べた自由地盤の動的解析結果の 7.18 秒時間断面から変位、加速度、およびせん断応力の深さ方向の分布を抽出し、応答変位法に用いる形式にして算出した。「地盤ばね」は前章で紹介した指針に従い、①「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編」に示される地盤反力係数より設定する方法と、②構造物・地盤一体の FEM モデルを作成し構造物への静的載荷計算を行って算定する方法、の 2 通りを試した。②については、後章で説明する“3D-FEM フルモデル”の静的水平震度載荷の解析結果から算出した。

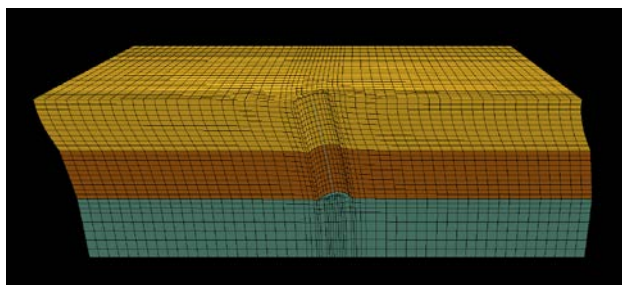
(3) 計算結果

a) “3D-FEM フルモデル”による動的解析（基準値）

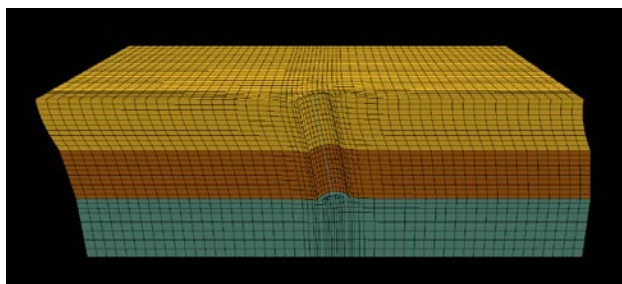
計算結果の中で、立坑の応力に着目したところ、最大となる時間は部位ごとにまちまちであるが、主要な応力は加震開始から 7.18 秒後の時間断面で概ねピークとなっていた。この時間断面での解析モデルの変形の様子を図-8に示す。“はり・ばねモデル応答変位法”以外の3つの計算結果を示したが、いずれも地盤が大きくせん断変形し、立坑が地層境界で若干の変形角を生じているように見える。



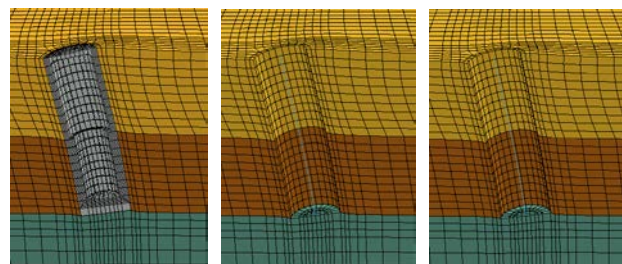
(a) 3D-FEM フルモデル_動的解析 (7.18 秒の時間断面)



(b) 3D 地盤・はりモデル_動的解析 (同上)



(c) 3D 地盤・はりモデル_応答震度法



3D-FEMフルモデル 動的解析 3D地盤・はりモデル 動的解析 3D地盤・はりモデル 応答震度法

(d) 各変形図の立坑近傍詳細図

図-8 立坑の応力が最大になった時の変形図

次に立坑の応力について見てみる。“3D-FEM フルモデル”では立坑応力はソリッド要素の要素中心での値として出力される。一方、立坑をはりでモデル化する計算法では、断面力（曲げモーメントおよびせん断力）として出力される。そこで両者が直接比較できるように、“3D-FEMフルモデル”については応力を深さ方向2m毎に断面全体で集計して、断面力を算出した。この算出法では、要素分割の粗さなどの条件によっては断面力の値にいくらかの誤差が出ると思われるが、本モデルに関しては、せん断力はほとんど誤差はなく、曲げモーメントは誤差 2%程度であることを別途検証してある。断面力の算出結果を図-9(a)に示す。曲げモーメントは、地層境界の深度20m付近まで、片持ちばりに分布荷重がかかったような形で推移しており、それ以深ではほぼ等曲げ状態のようである。せん断力も20mまではほぼ直線的に増え、それ以深では減少していつている。これが、本例題に対する基準値となる。

b) “3D 地盤・はりモデル”による動的解析

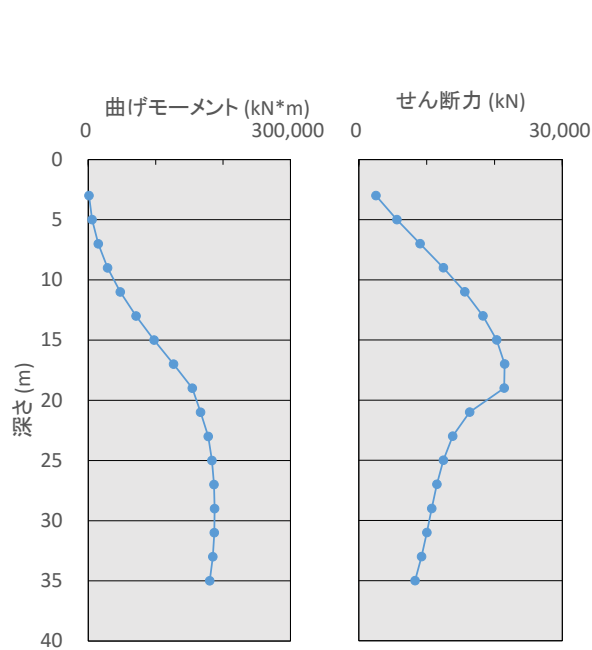
この耐震計算法では、立坑の断面力が時系列で出力される。そこで、上記の“3D-FEM フルモデル”で着目した時間断面である 7.18 秒における状態を取り出し、図-9(b)に両者を比較して示した。見てのとおり、非常に一致を示している。2つの解析モデル・計算手法の違いは、立坑躯体をソリッド要素による中空の3次元構造体になっているか、それを「剛はり結合」の手法を伴って1本のはりに“圧縮”しているか、だけである。この中空の躯体の力学挙動が、はりともなせるようなものであるならば、両者は実質的に等しい力学系になっているのだから、同等の結果が出るのはむしろ当然といえよう。もし、結果に少なからぬ差異が出た場合は、立坑躯体の荷重・変形関係が「はりの」ではないのが原因ということになる。

c) “3D 地盤・はりモデル”による応答震度法

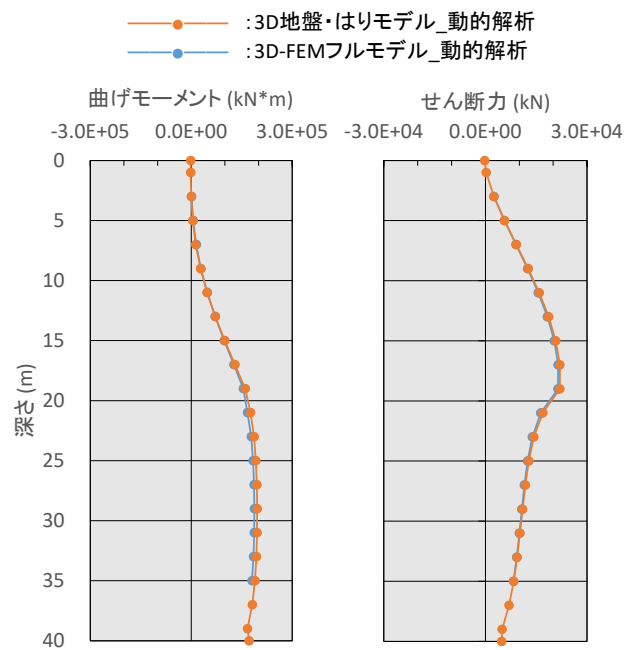
既述のとおり、7.18 秒の時点での等価震度を静的に作用させた計算である。結果を図-9(c)に示す。せん断力にやや違いが出ているが、これもかなりよい結果と言えるのではないかと。前項の計算手法とは、動的か静的かの違いがある。その差異の具体的なことがらとして、応答震度法では静的震度を同一深度ではどこも等しく作用させているが（1次元の）、実際には応答加速度は一様ではなく立坑近傍で乱れがあり（3次元の）、動的解析ではそのことが計算に入っているということが指摘できる。

d) “はり・ばねモデル”による応答変位法

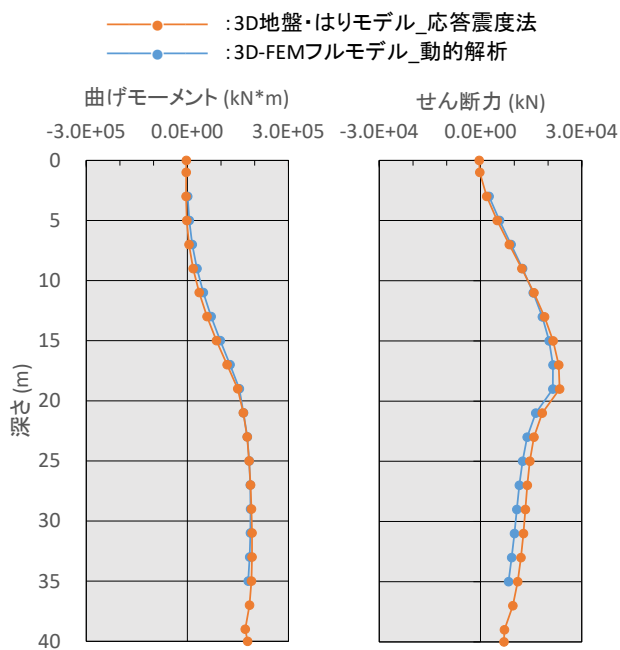
計算結果を図-9(d)に示す。地盤ばねの評価が2通りあるので、それも比較して示してある。なお、これら2通りの評価方法では、ばね定数は最大 2~3 倍の違いがあり、水平方向と回転方向地盤ばねは「示方書地盤ばね」の方が硬く、底面の水平および回転ばねは逆に「解析地



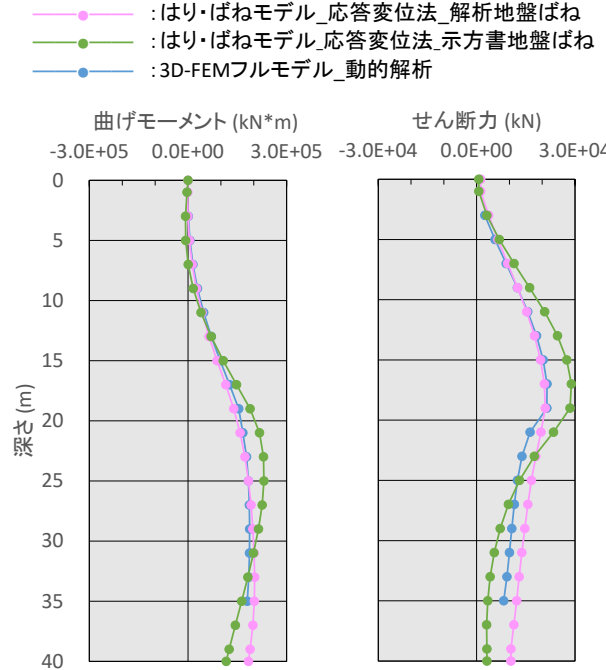
(a) 3D-FEM フルモデル_動的解析 (7.18 秒時間断面)



(b) 3D 地盤・はりモデル_動的解析 (7.18 秒時間断面)



(c) 3D 地盤・はりモデル_応答震度法



(d) はり・ばねモデル_応答変位法

図-9 計算された立坑断面力の比較 (益城波に対する地震応答)

盤ばね」の方が硬く評価された。図から分かるように、耐震計算結果として「3D-FEM フルモデル」の結果（基準値）に近いのは「解析地盤ばね」の方である。20m 以深のせん断力に乖離が少なからずあるが、その他は良好な結果と言えよう。「示方書地盤ばね」の方は、全般的に断面力の深さ方向の変化が大きく計算されており、基準値からはずれていると言わざるを得ない。

4. 参考計算

前章の耐震計算例により、「3D 地盤・はりモデル」の有用性がある程度示されたと思うが、前章の例題は動的な地震動に対する立坑構造物の動的な応答の計算であり、その複雑な挙動の中での 1 つの時間断面を見ただけであつた。そこで本章でさらに 3 つの計算例を試し、この解析モデルの基本性能の確認を十分なものにしたいと

思う。

(1) 計算例の説明

ここで行ったのは静的な問題である。立坑構造物・地盤系に静的な一様震度をかけるといってごく単純な問題を計算してみた。前章で対象にした図-4の条件設定を基本にしたが、立坑部分にバリエーションを考え、次の3ケースの計算を行った。

a) 立坑への静的水平震度載荷

図-4の立坑・地盤系に一様な水平震度を静的に作用させるものである。水平震度としては、加速度値で 1.0m/s^2 とする。解析モデルとしては図-7をそのまま使う。前章で計算した応答震度法と同じ計算種になるが、応答震度法では作用させる震度が深さ方向に変化しているのに対し、この計算では深さ方向に一定の単純な荷重である。また、動的応答では減衰力を含めて釣合いを保つ運動方程式に則った挙動になるのに対して、こちらは減衰力のない、慣性力と復元力だけのより単純な力学機構での挙動になる。したがって、ここでも“3Dフルモデル”による計算も行いその結果を基準値とするが、前章での応答震度法よりも基準値に近い結果が出やすい計算であると考えられる。

b) 「土柱」への静的水平震度載荷

図-10(b)に示すように、立坑部分を周囲の地盤と同じもので埋め戻した形になっていて、立坑部分の実体が土の柱であるので「土柱」と称することにする。“3D-FEMフルモデル”の作成では、土柱部分を周囲地盤とは別個に作成し（要素分割は整合させる）、両パートで同じ位置にくる節点どうしを「剛ばね結合」して一体化させる。はり要素の諸元には「土柱」の物性を当てはめる。この構造系は、「土柱」が埋め込まれた地盤ともとれるが、立坑という「異物」が存在しない自由地盤ともとれる。自由地盤であるならば、水平震度を作用させたとき、地盤内部には水平方向変位とせん断応力以外の変

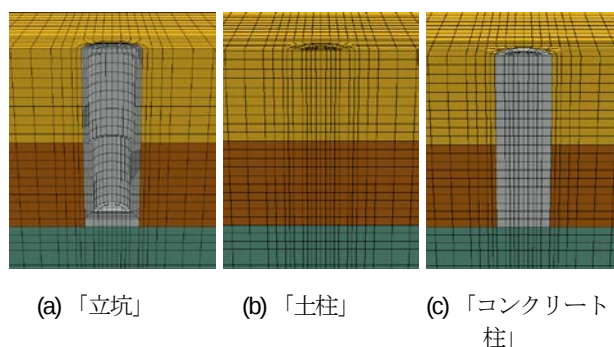


図-10 参考計算の対象

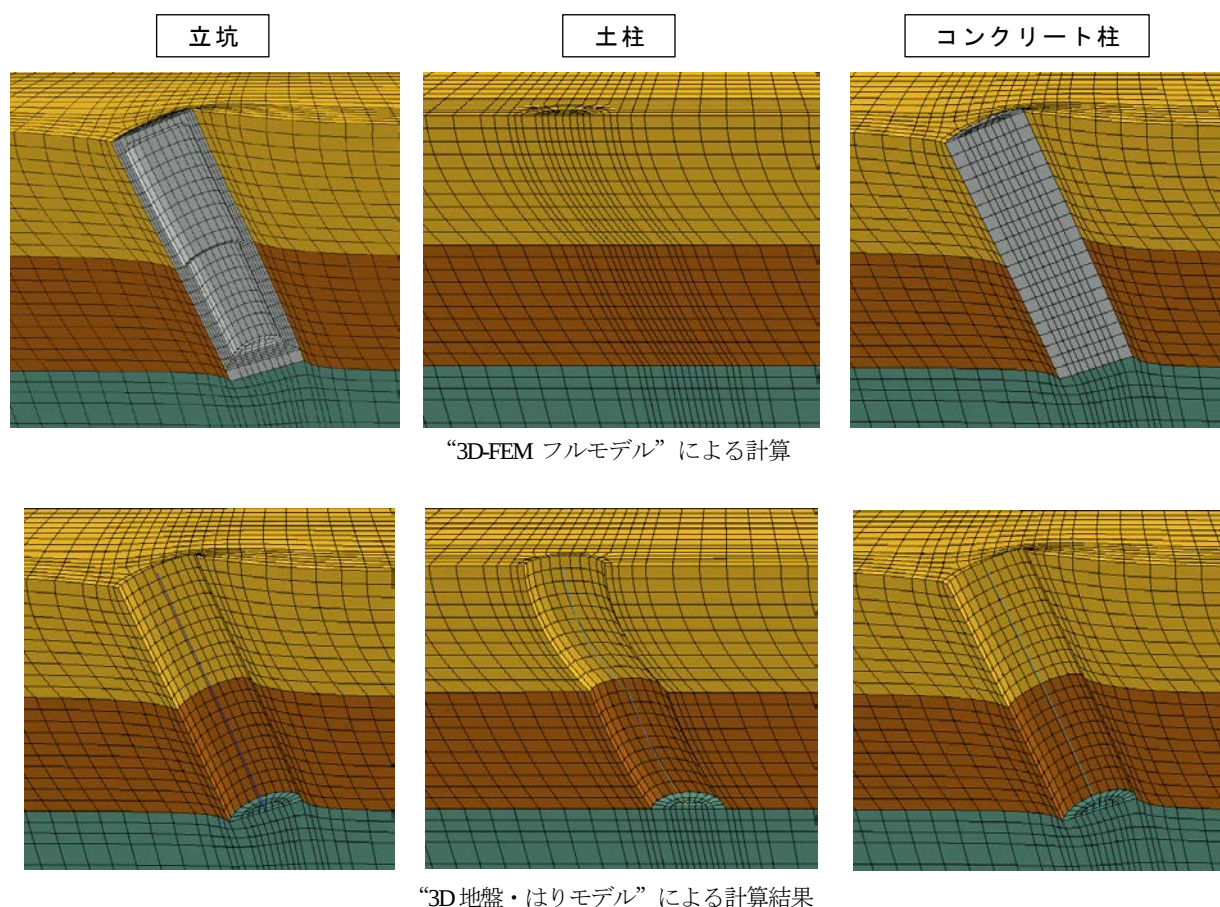
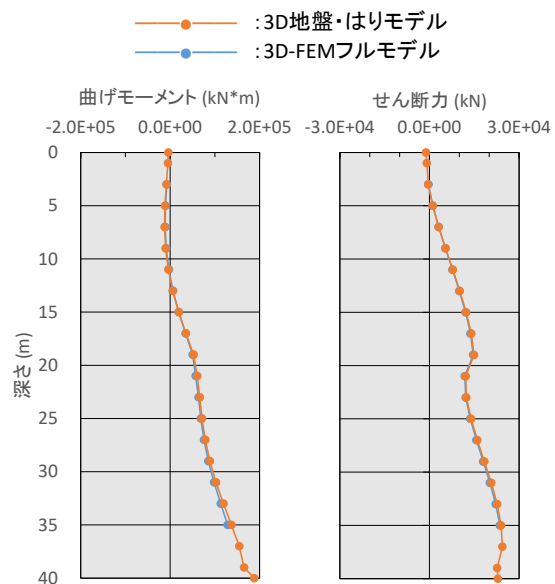
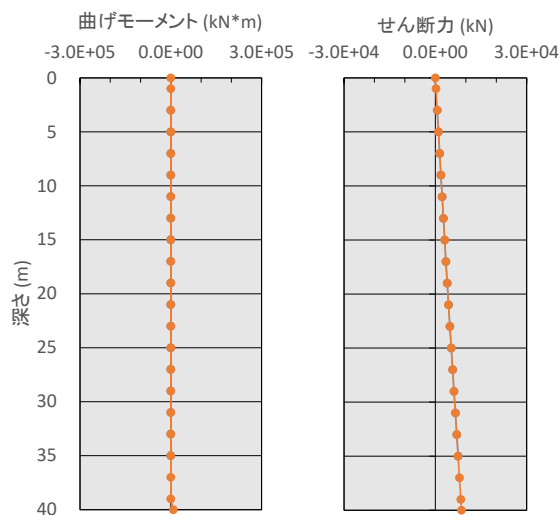


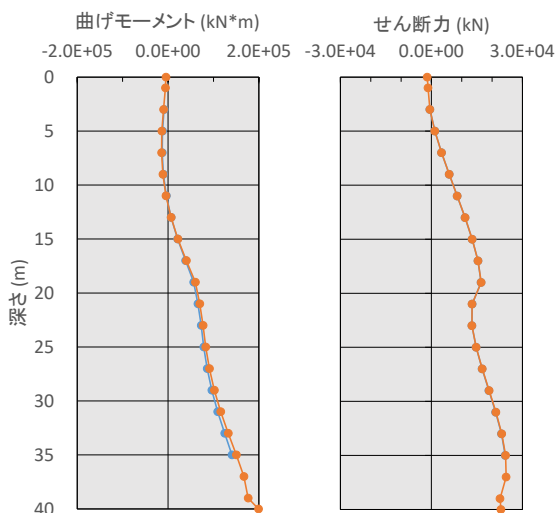
図-11 参考計算の結果（変形図：立坑近傍の拡大図）



(a) 「立坑」



(b) 「土柱」



(c) 「コンクリート柱」

図-12 参考計算の結果（断面力図）

位・応力は生じず、したがって「土柱」の断面力としてはせん断力のみで曲げモーメントは発生しないことになる。またこれらの変位や断面力の大きさは簡単に算出することができる。このように理論的な“正解”が分かっている問題であり、前報⁴⁾でも取り上げたが、解析モデルの V & V (Verification and Validation) の試金石的例題である。

c) 「コンクリート柱」への静的水平震度载荷

上の 2 つの中間的な性格の構造系である。図-10(c)に示すように、上記の「土柱」の材料物性をコンクリートの物性にしたものであり、「立坑」の内部空間をコンクリート材料で充填した形である。まさに均質で剛性の大きい円柱であり、立坑躯体がこれ以上に「はりの」になることはないというケースになるのでとりあげた。

(2) 計算例結果

計算結果として、立坑近傍の変形の様子を図-11 に、立坑または立坑に相当する部分の断面力の発生状況を図-12 に、それぞれ示す。両図ともに 3 つの計算結果を一覧にし、また“3D-FEM フルモデル”で計算した結果も併記してある。

まず、「土柱」の計算結果から、上述の理論的“正解”に至っていることが確認できる。その変形図については、「土柱」が自由地盤なりにせん断変形している様子が、“3D 地盤・はりモデル”のはりにおいてもその通りに再現されている。すなわち、解析モデルではせん断変形を考慮できるはり要素を用いているが、これが曲げ変形なしにせん断変形のみで地盤変位に追随しているし、底盤位置での回転変位もない。断面力図でも、曲げモーメントの発生は微小で、せん断力のみ生じていて理論通りである。

次に「立坑」と「コンクリート柱」とは、計算結果が非常によく似ている。また、どちらも“3D-FEM フルモデル”による基準値とよく一致している。曲げモーメントには少しの差が見られるが、せん断力はほぼ完璧にあっていると云える。したがって、今回検討対象とした立坑は、中空ではあるが十分な剛性をもっており、また、1 本のはりに見立てることは妥当と言えよう。さらに、図-9(c)に示した応答震度法解析の結果と見比べると、静的载荷の方が基準値に近い結果になるだろうという予測のとおりになっている。これにより、応答震度法計算の結果にみられた基準値からの乖離は、応答震度法では立坑近傍の動的応答の乱れまで反映したきめ細かな震度を作用させることができないことが原因であろうとの推論がより確かなものになった。

なお、前章で検討した“はり・ばねモデル応答変位法”における「解析地盤ばね」は、ここで行った「土柱」と「コンクリート柱」の計算結果から算出している。具体

的には、この2つの計算で得られた立坑周面の節点群の応答変位と支点反力について両者の差をとり、これらが応答変位法における地盤ばねの働きに相当すると解釈して、反力差を変位差で除すことにより算出した。

5 まとめ

本稿では、立坑構造物の耐震計算法としての“はり・ばねモデル応答変位法”において難しい課題となっている「地盤ばね」の合理的設定法を考える一助とするべく、“3D 地盤・はりモデル”について検討した。この解析モデルは、一つの見方としては、“3D-FEM フルモデル”の立坑部分を簡略化したものとも言えるが、別の見方として、“はり・ばねモデル”をベースにしつつも、合理的な設定が難しいスプリング型の「地盤ばね」を使うのをやめ、3次元連続媒体という地盤本来の形の「地盤ばね」に代えたものとも言える。本稿では単にモデルの見た目に沿って“3D 地盤・はりモデル”の呼称を使ったが、後者の観点からすれば、“はり・ばねモデル”に対比させた“はり・3D-FEM 地盤ばねモデル”と呼称すべきかもしれない。いずれにしても、これまでの非常にコンパクトな解析モデルを一挙に巨大な数値解析モデルに変貌させるフル・モデル・チェンジである。また、地中構造物・地盤間の相互作用機構をブラックボックス化して思考停止を招く心配もないではない。

耐震計算としては、今回例題を示した動的解析または応答震度法により行うのが妥当と思われる。その場合の計算手順は図-13のようになろう。3次元ということでモ

デル作成に多大な労力がかかることが想起されるかもしれないが、3次元モデルの作成で大変なのは立坑躯体部分の要素作成であって、本稿で対象にしたような“平坦地盤に矩形または円形の穴を掘った形”の地盤だけを作成するのにそれほど手間はかからない。モデルを作成してしまえば、どちらかと言えば動的解析の方が手間を取らない（コンピュータの演算時間は多くかかるが）。応答震度法ではそれ用の地震荷重を算定するために別途、自由地盤の地震応答解析を行う必要があり、ここですなからず手間がかかる。ただ、どちらの方法によっても、“3D-FEM フルモデル”で計算した場合の結果に近い結果を出せることは本稿の計算例を見れば了解されると思う。

「地盤ばね」は、各種地中構造物の耐震解析で使われることが多く、その設定方法について一定の指針が示されているものもある。しかし、3次元的な性質が顕著な立坑構造物に関しては、筆者は個人的には、そのスプリング型の「地盤ばね」の合理的で汎用的な評価式等が今後近い将来に確立されることには悲観的である。ここは振り返って、1980年代の中頃から1990年代にかけて地中構造物の耐震解析手法を巡り活発な議論^{例えば}がなされるとともに、「応答震度法」、「地盤応答法」、「(修正) FEM 応答変位法」などといった、不確定要素の多い「地盤ばね」を用いない手法が模索され編み出されてきた経緯も参考にすべきであろう。

もう一つ、上記のような FEM 系の解析手法を適用するに際し、立坑・地盤系を2次元平面の問題に次元を落として扱うことに対しても、筆者は懐疑的である。実際、そうしたことが矩形断面の立坑の耐震計算法として例示

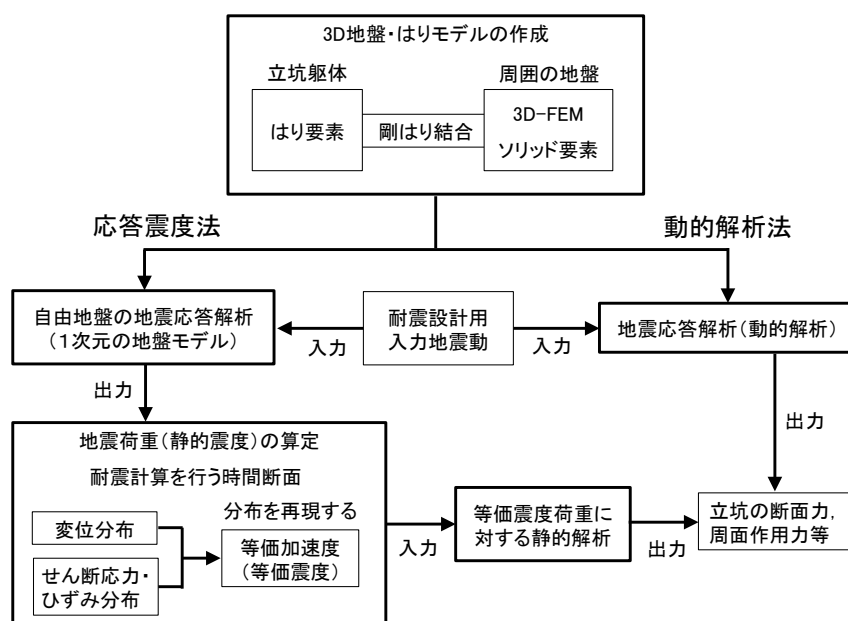


図-13 3D地盤・はりモデルによる耐震計算の手順

されたり^{例えば 9)}、円形断面の立坑への適用を試みている例^{例えば 4)}が見られるが、それらは十分な検証までなされていないか、所期の成果が得られていないものと思われる。「地盤ばね」の問題を避けようとして、3次元現象の2次元化という別の難しい課題の中に入り込んでしまうことになる。「大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案)」⁹⁾という、30年近く前に策定された設計指針でさえ、当時としては3次元モデルで耐震計算するのはハードルが高かったにも関わらず、立坑は3次元のモデルにするのを原則とする方針をとっている。構造計算環境が飛躍的に進歩した現在、それができないはずはなく、事実、本稿の計算は筆者所有の標準的なPC(ただしメモリーを32GBに増設)で行っている。

以上、本稿のまとめと私見を述べたが、“はり・ばねモデル”をベースとして「地盤ばね」をより合理的なものにしようとする方向と、現状で最も精緻で信頼性が高いと考えられる“3D-FEMフルモデル”をベースとしてその簡便化を図ろうとする方向との合流点として、“3D地盤・はりモデル”は位置付けられると思う。そして有用性の高い解析モデルであると思う。非線形領域への適用という残された課題に対しても、この解析モデルであれば、非線形物性に対応した非線形要素を用いることで、一般的な問題として扱うことができる可能性がある。

謝辞：本稿第3章で行った地震応答解析には、防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET、KiK-net の観測データを利用させていただいた。

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）投稿中
- 3) 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.
- 4) 伊海田明宏，坂井康伸，松原菜緒：円形立坑の耐震設計手法に関する検討（その 1），土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp. 653-654, 2018.
- 5) 松原菜緒，坂井康伸，伊海田明宏：円形立坑の耐震設計手法に関する検討（その 2），土木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp. 655-656, 2018.
- 6) 西山誠治，川満逸雄：地盤ひずみに着目した修正震度による応答震度法の適用性，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp. 1251-1252, 2018.
- 7) 立石章：静的 FEM を用いた地中構造物横断面方向の耐震計算法における地震荷重の作用方法の研究，土木学会論文集，No. 519/I-32，pp. 139-148, 1995.
- 8) 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_35, 土木学会，2015.
- 9) 建設省：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.

A THEORETICAL STUDY ON THE ANALYTICAL MODEL USED IN THE SEISMIC DESIGN FOR UNDERGROUND VERTICAL SHAFT STRUCTURES —ON THE UTILITY OF THE “3D-SOIL-AND-BEAM MODEL”—

Yukio SHIBA

The author has been studying on the analytical model and calculation method for use of seismic design for underground vertical shaft structures, and improved the current and popular “beam-and-spring model”, and verified practical performances of the new method. One of the most difficult problems remained for completing the method is adequate modeling of “ground-spring”, mechanical part substituting sophisticated dynamic soil-structure interaction.

In this paper, a new analytical model, “3D-soil-and-beam model” is discussed for the purpose to find a way out of the “ground-spring” problem. This analytical model is composed of a vertical beam which substitutes the behavior of the underground shaft body, and 3D-FEM solid elements around the beam which is built-up with solid elements of FEM and acts as “ground-spring”. The nodes of the beam and the nodes of the surrounding soil ground are mechanically connected by numerical binding condition of “rigid-beam”. Seismic calculation with this analytical model is done in the way of dynamic response analysis or static technique like the GRAMBS (Ground Response Acceleration Method for Buried Structures). A several examples of calculation with use of this new method are illustrated in this paper, and good performances and utility of the method is shown.