

立坑の耐震計算における解析モデルに関する考察

大成建設 フェロー会員 志波 由紀夫

1. はじめに

シールドトンネルの発進・到達立坑などに代表される、鉛直方向に長い形状の地中構造物の耐震計算法は、その力学モデルに関しても地震力の作用方法に関しても、確立しているとはいえない。本稿では、立坑および地盤を「はり・ばね」にモデル化して解析する方法を対象に、合理的な解析モデルのあり方を考察する。

2. 立坑の耐震解析モデルの現状と問題点

立坑の「はり・ばねモデル」は、応答変位法の耐震計算の中で用いられる^{1), 2), 3)}。同じ範疇の中で、立坑部分をはりに替えて3次元立体シェル構造とし、そこに地盤ばねを付けたモデルも見られるが^{4), 5)}、「はり・ばねモデル」の方が簡易である。その解析モデルは具体的には、図-1に示すように、立坑をその中心線上に集約したはりに置き換え、そこに水平方向に地盤ばねを分布させて設け、荷重として周辺地盤の地震時変位を強制変位的に作用させるのが基本になっている^{1), 3)}。しかし、立坑の前・背面にいわゆる「周面せん断力」を上下方向に作用させる必要があるし⁶⁾、立坑の回転変位に伴う地盤反力も考慮する必要があるかもしれない。

3. 新たな解析モデルの試案

立坑の耐震解析モデルのあり方を考えるにあたり、それが地盤の中にあつて地震時に地盤から受ける力や、変位・変形を起こすメカニズムについて考えるための概念図を図-2に示した。地震時のある時間断面を切り出したイメージである。すなわち、地震動による水平震度が作用して、地盤は自体に慣性力を受け、せん断変形を起こす。これによって水平方向に変位するとともに、内部にせん断応力を生じる。仮にこの地盤の中に、現実的ではないのだが地盤と同じ物性の立坑が存在したとすれば、それは立坑の形をした地盤内土柱である。そしてこの「土柱立坑」には、慣性力と、地盤中のせん断応力に対応する形で前・背面を上下方向に擦る力（周面せん断力に相当）、の2つの外力がバランスして作用することによって、地盤と全く同じせん断変形・水平変位を起こす。このとき「土柱立坑」に発生する断面力はせん断力 Q のみで、曲げモーメントは生じない。

これに対して一般の立坑では、質量・剛性が地盤のそれらとは異なるために、同じ震度と周面せん断力が作用しても「土柱立坑」と同じ変位・変形とはならず、外周には地盤からの水平方向の押し・引きあるいは鉛直方向の抵抗力という、2次的な荷重が付加されることになる（以後「水平土圧」、「鉛直擦力」と呼ぶ）。底面にも水平・回転変位に対する反力が働く。こうした付加的な荷重によって、立坑にはせん断力 Q （「土柱立坑」の Q からは変化している）のほかに曲げモーメント M も発生する、と考えられる。以上に述べた「土柱立坑」

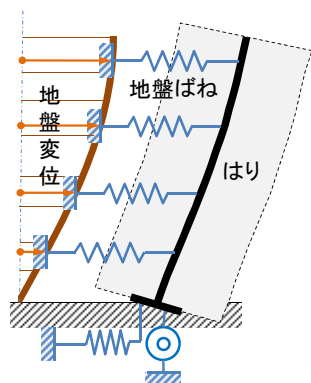


図-1 応答変位法の
解析モデル(従来法)

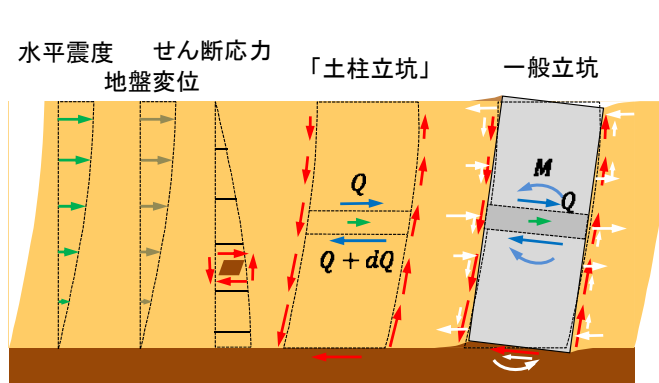


図-2 地震力の作用と地盤・立坑の挙動

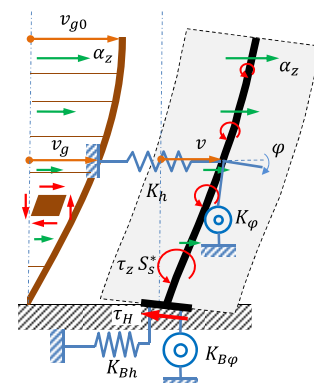


図-3 提案する解析モデル

キーワード 立坑, 地中構造物, 耐震計算, 応答変位法, 動的相互作用

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 TEL: 045-814-7231

から一般立坑までの力学的挙動を一つで連続的に扱えるものとして、図-3 に示す解析モデルを考案した。図-1 の解析モデルとの違いは、以下の4点である。①立坑を表すはりは、せん断変形を考慮できる Timoshenko はりとする⁶⁾。②立坑に水平震度 (α_z) に対応した慣性力を作用させる。③周面せん断力の作用を分布モーメント荷重 ($\tau_z S_s^*$) で考慮する。④立坑の水平断面の回転変位 (φ) に対する地盤反力を考慮する (分布ばね K_φ)。

4. パラメトリック・スタディによる考察

図-2 で考察した「土柱立坑」および一般立坑のケースを、図-1 と図-3 の各解析モデルにより数値解析してみる。ここでの地盤・立坑の条件設定は、次のとおりである。

地盤: 厚さ 40m の均一層、単位体積重量 18kN/m^3 、せん断波速度 120m/s 、基盤層はそれぞれ 20kN/m^3 、 300m/s 。

地盤ばねは、道路橋示方書のケーソン基礎の設計法⁷⁾を参考にしてモデル化。

一般立坑: 横幅 20m × 奥行 15m の矩形断面、壁厚 2m 、深さ 40m 、単位体積重量 25kN/m^3 、弾性係数 $2.5 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ 。

「土柱立坑」: 一般立坑の諸元中、見かけの重量および見かけのせん断剛性を地盤物性と等しくなるよう変更。

地震動: 地表面で水平震度 $\alpha_z=0.5$ となる 1/4 正弦波分布 (この場合、地盤変位は地表面で 0.22m となる)。

構造計算は、図-1 と図-3 の解析モデルどおりにはりのたわみの微分方程式を解くという方法をとった。その意味で厳密解である。まず「土柱立坑」について、「提案モデル」で計算したほかに、「慣性力なし」(前述の②を考へない場合)、「せん断変形なし」(同①を通常のはりとした場合)、そして図-1 の「従来モデル」(①～④全てなしの場合)でも計算した。それらの結果を比較して図-4 に示す。「提案モデル」は図-2 の「土柱立坑」の挙動をよく再現しており、「せん断変形なし」および「従来モデル」では実態を表せない。一般立坑についても、同じように計算の比較を行った。これを図-5 に示す。「従来モデル」だけが他の3つの計算結果と大きく異なっており、特に発生せん断力を過少評価している。「提案モデル」と「慣性力なし」と「せん断変形なし」の3つでは結果にほとんど差がなく、一般立坑の物性になると慣性力とせん断変形の影響は小さいと言える。周面せん断力と地盤反力を加えた「鉛直摩擦力」の大きさは、地盤変位による水平土圧と同等である。

5. まとめ

立坑・地盤の相互作用を合理的に扱える解析モデルの基本を提示できたと思う。今後の課題としては、地盤ばねのモデル化の問題、平面寸法に比して長さ(深さ)が短い立坑へのはりモデルの適用性の検証、強震時の非線形力学問題、などがある。本検討で明確になったのは、立坑の耐震計算の考え方としては、「周りを取り巻く地盤から位置ごとに異なる強制変位を受ける」というよりも、「周りを取り巻く地盤と一体となってせん断作用を受ける」と捉えた方が本質的であるということである。

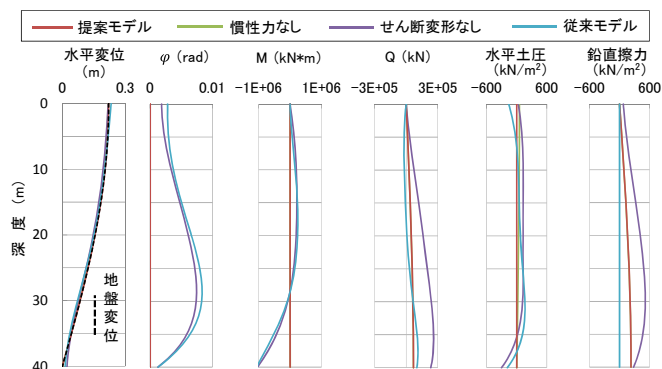


図-4 「土柱立坑」の挙動と作用力

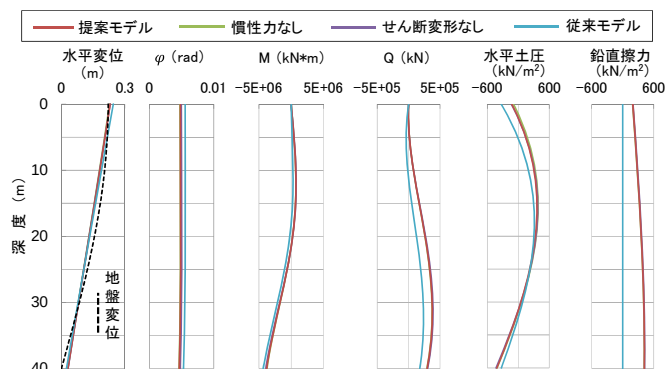


図-5 一般立坑の挙動と作用力

参考文献

- 1) 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. 93-100, 2009 年。
- 2) 土木学会：2006 年制定 トンネル標準示方書[開削工法]・同解説, pp. 70-72 および 114-120, 2006 年。
- 3) 土木学会関西支部：シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン (案), pp. 97-110, 2001 年。
- 4) 川島一彦編著：地下構造物の耐震設計, pp. 141-154, 鹿島出版会, 1994 年。
- 5) 國近光生：大深度分割式立坑の耐震設計法の開発に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 2005 年。
- 6) 志波由紀夫・立石章：応答変位法における地震力評価の問題点とその改善, 大成建設技術研究所報, 第 24 号, pp. 271-280, 1991 年。
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 [I 共通編・IV 下部構造編], pp. 295-320, 2002 年。