

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

正会員 志波 由紀夫

1. はじめに

シールド立坑の合理的な耐震設計法について検討を行い有益な情報を公開することを目的として、トンネル工学委員会技術小委員会の中に「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）が設置され、現在活動中である。筆者はその一員であり、構造解析等のWGに参加している。本稿は、検討の中で得られた知見の一部を紹介するものである。

2. 検討の目的

シールド立坑の耐震解析では、立坑をシェル要素を用いてモデル化した3次元FEM解析が行われることがある。ただ、側壁厚が深さ方向に大きく変化する立坑のモデル化においては、壁芯とシェル要素の配置関係が問題になる¹⁾。また、地盤からの荷重の作用点が壁厚の1/2だけズレることも、解析結果に影響する可能性が考えられる。そこで、図-1のようなシールド立坑・地盤系を想定して実際に耐震解析を行い、数値解析的に上記の問題を検討してみた。

3. 検討方法

解析モデルは3次元FEMモデルで、系の対称性により1/2をモデル化した。地盤はソリッド要素で、要素数は約44,000。立坑については、図-2に示す4通りのモデルを作成した。

①フルソリッド要素モデル：全体をソリッド要素でモデル化。これによる解析結果を基準（正解値）と考える。

②シェル要素モデル-A：頂版および側壁をシェル要素で、底盤をソリッド要素でモデル化。側壁のシェル要素は上半部も下半部も上半部の壁芯に合わせた。

③シェル要素モデル-B：上半部・下半部それぞれ、シェル要素を本来の壁芯位置に配置した。壁厚変化箇所では、上下の要素の節点間を「剛はり結合」させた。

④シェル要素モデル-C：立坑のモデル化はBと同じだが、地盤のモデル化を立坑外周面までとし、壁厚の1/2だけ空いた空隙は、地盤節点と立坑節点とを「剛はり結合」（実際には剛性の極めて大きなはり要素[地盤側ピン、立坑側剛]で連結）させた²⁾。

以上4つの解析モデルそれぞれに対して、加速度100Gal相当の静的な水平震度を載荷した。

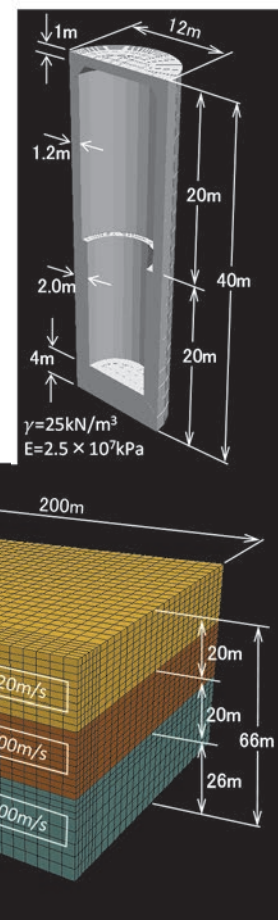


図-1 検討対象の立坑・地盤系

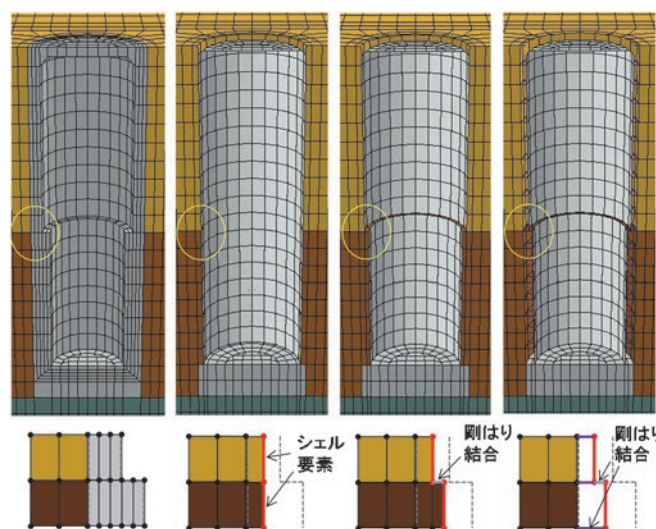


図-2 検討した解析モデル（立坑部分の拡大図：左から、フルソリッド要素モデル、シェル要素モデル-A, B, C）

キーワード 立坑, 耐震解析, 3次元モデル, シェル要素, FEM (有限要素法)

連絡先 e-mail: yshiba@jcom.zaq.ne.jp

4. 検討結果

解析モデル全体の変形状況の一例を図-3に示すが、4 ケースとも目視で認められるような変形の差はなかった。立坑に発生した応力の状況として、図-4 は、立坑を1本の「鉛直方向はり」に見立てたときの曲げモーメントとせん断力の深さ方向分布を示している。これは各モデルの立坑構成要素の応力値（要素中心での値）を断面全体で積分したものである。また図-5 は、側壁上半部・下半部のそれぞれ中央部付近の水平断面について、面内せん断応力（円周方向成分）と面外せん断応力（半径方向成分）の断面内分布を示したものである。フルソリッド要素モデルでは側壁を3層または5層に要素分割しており、その層ごとに見ている。シェル要素モデルでは、出力値を壁厚で除して応力値にしてある。これらの図から、以下のことが言える。

- 1) 3つのシェル要素モデルはどれも、フルソリッド要素モデルで計算された曲げモーメントおよびせん断力をおよそ再現できているが、中でもモデル-Cの一致度が高い（せん断力図ではほぼ重なっている）。
- 2) せん断力に関して、モデル-AとBはやや過小の結果になっていて、さらに下半部においてBの方がAより過小の結果になっている。こうしたことから考えると、前述の“壁厚の1/2のズレ”が解析結果に影響していることがうかがわれる。その理屈としては、解析モデル上、立坑の外周面が縮小され、地盤からの周面せん断力等の作用が過小評価されることが考えられる。
- 3) 断面内の応力分布では、シェル要素は壁厚の中心位置での応力を算出していると解釈されるので、フルソリッド要素モデルの中央層で見比べると適当であるが、それに最も近いのはモデル-Cである。

5. まとめ

シールド立坑の耐震解析をシェル要素を用いた3次元モデルで行うとき、①側壁厚が大きく変化するケースでは、それぞれの壁芯に合わせてシェル要素を配し、壁厚変化箇所では上下の要素の節点を「剛はり結合」すればよいこと、②壁厚の1/2だけ縮小した幾何形状になることの影響には留意する必要がある、その対処法としてはモデル-Cのような解析技法を用いればよい、という知見が得られた。

参考文献

- 1) 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，p. 3, 32，土木学会，2015。
- 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 ―3D地盤・はりモデルの有用性―，第40回地震工学研究発表会講演論文集，A13-1594，2020。

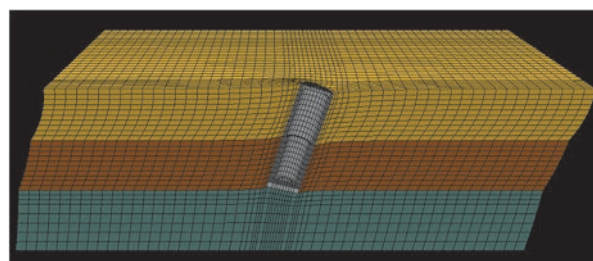


図-3 フルソリッド要素モデルの変形状況
(変形を500倍に拡大して描画)

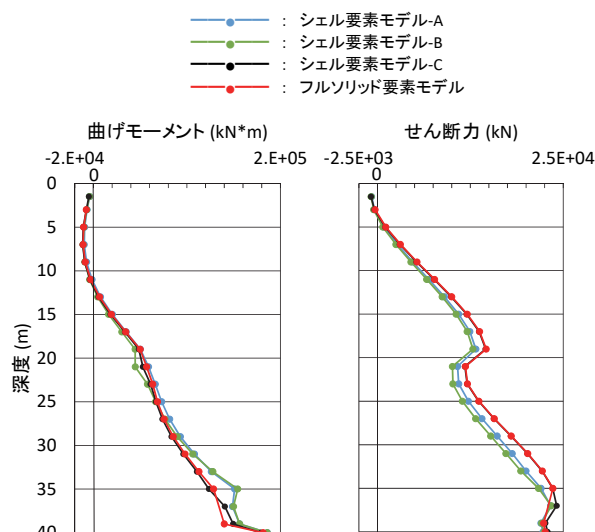


図-4 算定された立坑断面力の比較

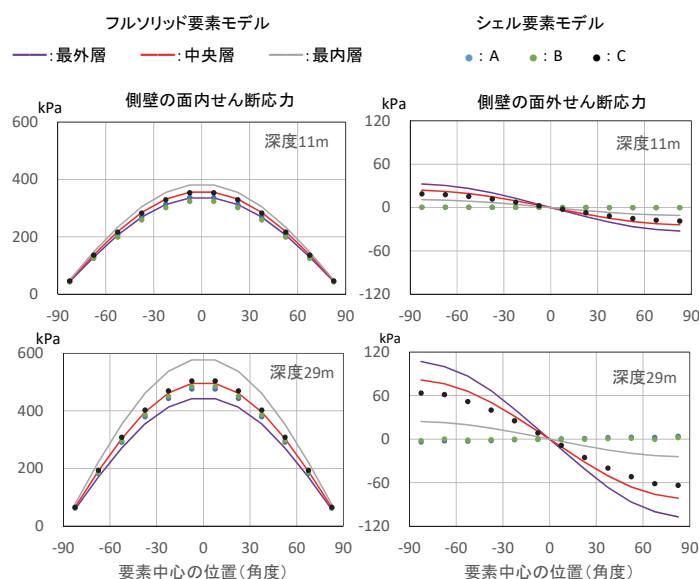


図-5 側壁内部応力の比較