

# 鉛直方向に長大な地中構造物への応答震度法の適用性に関する検討

松元 茉伊<sup>1</sup>・志波 由紀夫<sup>2</sup>・渡辺 和明<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大成建設(株)技術センター土木技術研究所  
(〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)  
E-mail:swdmi-00@pub.taisei.co.jp

<sup>2</sup>大成建設(株)技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)  
E-mail:shiba@ce.taisei.co.jp

<sup>3</sup>大成建設(株)技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)  
E-mail:kwatanab@ce.taisei.co.jp

応答震度法は、幅広い地中構造物の耐震性評価に汎用的に用いられているが、その適用性については、十分な検討がなされていない場合があると考えられる。そのうち、本稿では、鉛直方向に長い地中構造物の場合として、長大立坑を採り上げ、地盤と構造物の応答の関係性に着目し、適用性を検討した。その結果、従来の応答震度法は、立坑に生じる面内せん断応力の評価には適しているが、鉛直方向の軸応力は適切に評価できないことがわかった。そこで、立坑の鉛直軸応力と関係を持つ地盤の応答について検討し、立坑の鉛直軸応力の評価に適した応答震度法の考案を試みた。本稿では、その一例を紹介する。

**Key Words :** *Ground Response Acceleration Method ,dynamic analysis ,vertical underground structure, FEM analyses*

## 1. はじめに

三次元的な構造を有する地中構造物の耐震性評価において、FEMによる動的な地震応答解析は、最も詳細な方法のひとつである。しかし、その反面、大規模な地中構造物を対象とする場合、膨大な計算時間を要するため、静的解析による検討が行われることが多い。FEMによる静的な地震応答解析<sup>1),2)</sup>には、いくつかの種類があるが、その中でも応答震度法は、地中構造物と地盤の剛性の相互作用を合理的にモデル化できる点で優れている。

応答震度法は、静的な地震荷重により、地震時に構造物にとって最も厳しいと考えられる状態を再現することで、構造物の変形・応力状態を評価するものである。一般に、構造物位置での地盤のせん断ひずみが最大となる場合を再現することが多い。対象構造物としては、ボックスカルバートなどの高さがさほど高くない地中構造物が中心であるが、簡便かつこれまでに多くの実績が蓄積されてきたことから、長大立坑などの鉛直方向に長い地中構造物にも汎用的に適用されている(例えば<sup>3)</sup>。

しかし、ボックスカルバートと長大立坑では、地震時の基本的な変形挙動が異なることに注意しなくてはならない。前者は、せん断変形が主だが、後者は、特に地層境界部などで、せん断変形に加えて、曲げ変形も卓越する。このような理由から、

長大立坑を対象に応答震度法を適用する場合は、改めてその適用性を検討する必要があると考えられる。

本稿では、長大立坑を対象に、地盤と立坑の地震時変形挙動の関係性に着目し、動的解析による結果と比較することで、応答震度法の適用性について検討した。また、立坑断面に生じる鉛直方向の軸応力のメカニズムを分析し、これと関係を持つ地盤の応答を用いて、立坑の鉛直軸応力の評価に適した応答震度法の考案を試みた。

## 2. 検討対象

大規模な地中構造物のひとつとして、地層処分施設の一部を想定した立坑と横坑から構成されるコンクリート造の鉛直地中構造物<sup>3)</sup>を検討対象とした。

図-1に解析モデルの概要を示す。地盤、構造物ともに線形弾性とした。3層からなる地盤は、ソリッド要素でモデル化し、メッシュ高さは、各層において、地震動に含まれる周波数10Hzの波の波長を5要素以上で近似できるように設定した。境界については、地盤側面は水平ローラーとし、底面は粘性境界とした。立坑および横坑の覆工は、シェル要素でモデル化した。ただし、立坑の底部に

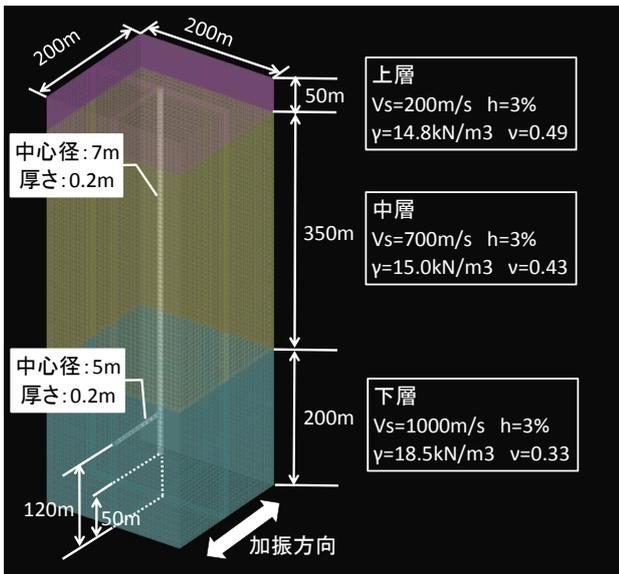


図-1 解析モデルの概要

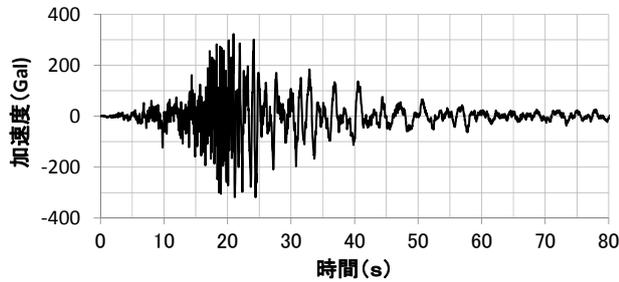


図-2 入力波の加速度波形

は、ベースコンクリートが設けられていることを想定し、下底から10mは、コンクリートの物性を有するソリッド要素でモデル化した。

加振方向は、横坑軸方向のみとし、入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計<sup>4)</sup>で用いられる動的解析用地震波の中から、海洋型地震のスペクトルIの特性をもつG1地盤用のL2地震動(図-2)とした。

### 3. 動的解析による評価

前章で示した長大立坑を対象に、動的解析を行った。図-3a)に、地表面変位が最大となる時間断面における立坑の変形図を示す。加振方向にせん断変形すると同時に、2つの地層境界部と上層部で、曲げ変形が卓越した変形挙動を示している。図-3b)は、これらの変形によって生じる立坑覆工の面内せん断応力と鉛直方向の軸応力に着目し、それぞれの最大値の深さ方向の分布を示したものである。いずれの応力成分も上層と中層の地層境界で卓越しているが、面内せん断応力は深部においてもある程度生じているのに対し、鉛直軸応力は、中層以深ではほとんど生じていない。すなわち、図-3a)の変形図に示すように、立坑が全層にわたってせん断変形しているが、曲げ変形は上層

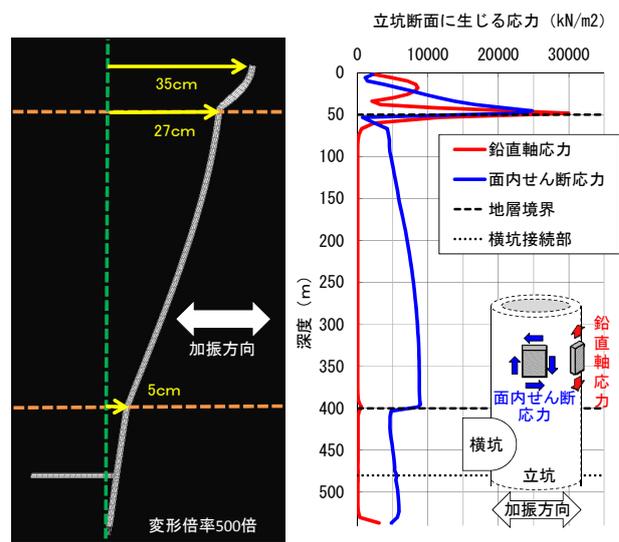


図-3 a) 立坑の変形図(地表面変位最大時)(左)  
b) 立坑断面に生じる応力の最大値分布(右)

部のみ際立っていることが図-3b)からも読み取れる。

次章では、ここで示した動的解析で得られた2つの応力成分の最大応答値分布を応答震度法で静的に再現し、各応力成分の評価に応答震度法が適しているか検討する。

## 4. 長大立坑への応答震度法の適用性

### (1) 立坑に適用する応答震度法の概要

外力評価が異なる2つの応答震度法を立坑に適用する。ひとつは、検討対象位置を地層境界部や構造変化部にしぼって、そこでの地盤のせん断ひずみが最大となる時間断面における慣性力を地盤と構造物に作用させる方法<sup>3)</sup>(方法1)である。地盤の最大せん断ひずみは、重複反射理論による一次元地盤の動的解析により求めた。図-4a)に、この深さ方向の分布を示す。また、図-4b)に、図-4a)に示された最大値が発生した時刻を示す。図-4b)中には、前章で求めた立坑の面内せん断応力と鉛直軸応力の最大値発生時刻も併記している。なお、時刻は、加振開始時刻を0秒としたものである。

方法1では、検討対象位置ごとに地盤のせん断ひずみが最大値を示す時間断面を選定し、計算・評価する必要がある。この手間を省き、全層における評価を1度の計算で済ませようとするものが、もうひとつの方法である。この方法では、地盤の各層でせん断ひずみが最大となるよう地盤と構造物に慣性力を作用させる<sup>3)</sup>(方法2)。すなわち、図-4a)に示す最大せん断ひずみの分布が静的に再現される。

### (2) 地盤のせん断ひずみと立坑の応答の関係性

前述した2種類の応答震度法は、いずれも地盤

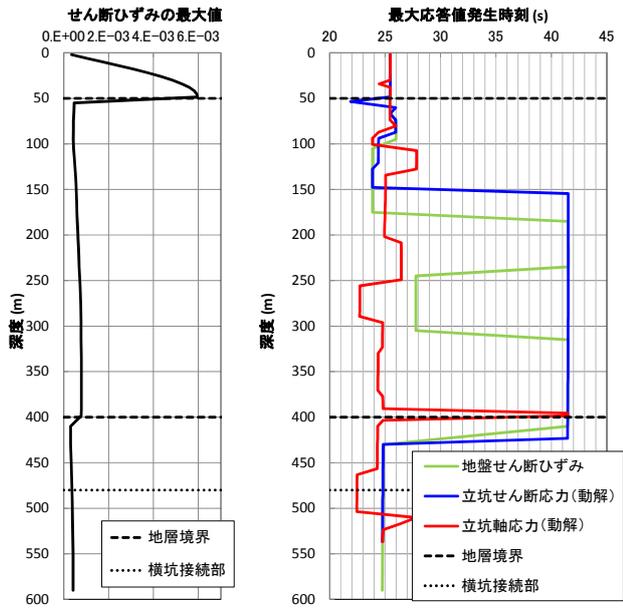


図-4 a) 地盤のせん断ひずみの最大値分布 (左)  
b) 最大応答値発生時刻の分布 (右)

のせん断ひずみが最大になるとき、構造物に生じる応力が最大になることを前提としている。すなわち、地盤のせん断ひずみと評価する構造物の応力の間に力学的な関係がなければ、これらの応答震度法では正しく評価することができない。

この関係性に着目し、これらの応答震度法により、立坑の面内せん断応力と鉛直軸応力を適切に評価できるか検討する。まず、これら2つの応力成分の最大値発生時刻を地盤のせん断ひずみのそれと比較する。地盤のせん断ひずみとの間に強い関係があれば、最大値発生時刻は一致すると考えられる。図-4b)より、立坑の面内せん断応力の最大値発生時刻は、地盤の最大せん断ひずみの発生時刻と、深さ方向のいずれの位置においても概ね一致しているが、鉛直軸応力の時刻は、上層部と2つの地層境界を除いて、大半の位置で大きく異なる。これより、地盤のせん断ひずみと立坑の面内せん断応力との間には、強い関係があるが、鉛直軸応力との間には、関係がないと考えられる。

これは、応答波形を比較するとより明らかになる。一例として、図-5に、深さ350mにおける3つの応答波形の比較を示す。ただし、各波形は、比較しやすいようそれぞれの最大値で除して正規化している。立坑の面内せん断応力と地盤のせん断ひずみの波形は重なり合うが、鉛直軸応力はこれらとは全く異なる形状を示している。なお、深さ方向の他の位置でも、同様の傾向を示した。

(3) 動的解析との比較による応答震度法の立坑への適用性の検討

地盤のせん断ひずみとの関係性から、先に示した2つの応答震度法は、立坑の面内せん断応力の評価には適しているが、鉛直軸応力の評価には適

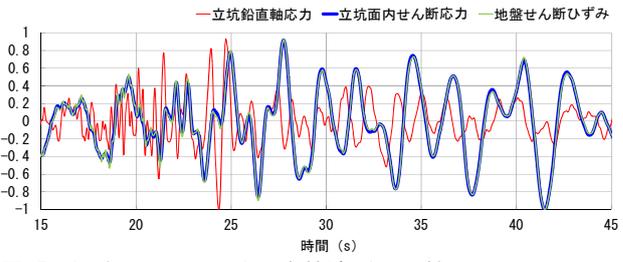


図-5 深さ350mにおける応答波形の比較

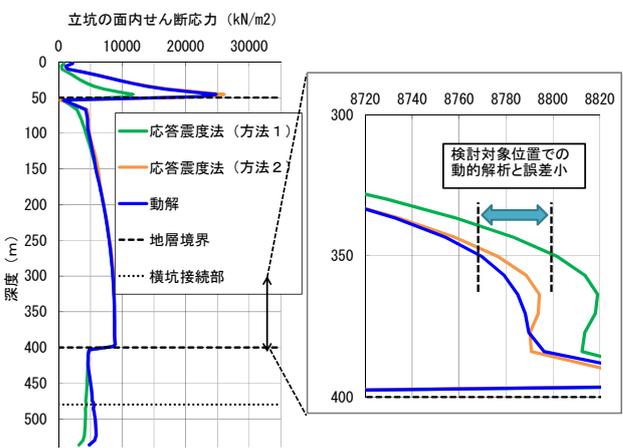


図-6 応答震度法と動的解析による立坑の面内せん断応力の評価の比較

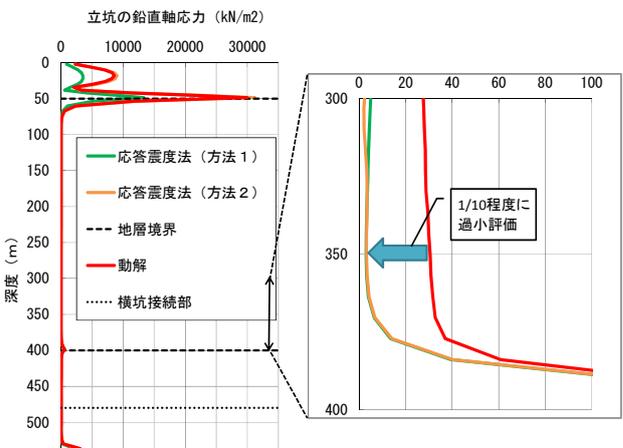


図-7 応答震度法と動的解析による立坑の鉛直軸応力の評価の比較

さないと考えられる。これを確かめるため、両応力を2つの応答震度法で計算し、動的解析の結果と比較した。

図-6に、方法1、方法2および動的解析により得られた立坑の面内せん断応力の最大値の深さ方向の分布を示す。ただし、方法1では、検討対象位置を深さ350mの位置とした。なお、この位置において、地盤のせん断ひずみが最大となる時刻は、41.5秒である(図-4、図-5参照)。方法1では、検討対象位置から遠く、地盤のせん断ひずみの最大値発生時刻が検討対象位置と大きく異なる150m以浅や400m以深では、動的解析による結果より小

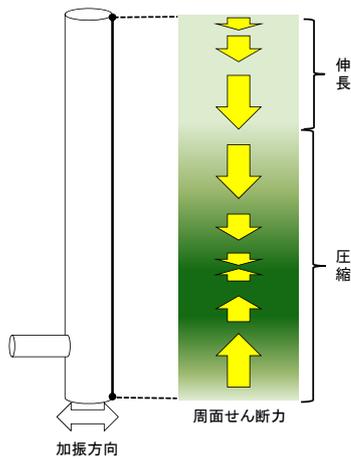


図-8 周面せん断力の変化に起因する立坑の伸縮

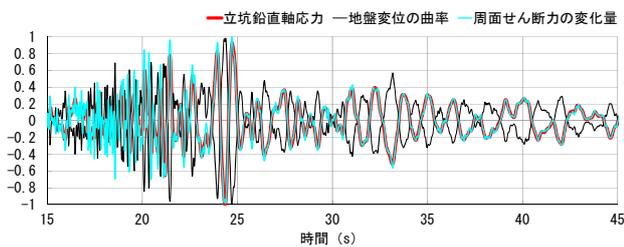


図-9 立坑の鉛直軸応力と関係を持つ地盤の応答波形 (深さ350m)

さいが、検討対象位置付近においては、動的解析と整合している。一方、方法2では、深さに関わらず、動的解析による結果とよく整合している。

立坑の鉛直軸応力についての同様の最大値分布を図-7に示す。一見したところ、面内せん断応力の場合と同程度に、応答震度法と動的解析の結果が整合しているように見える。しかし、応答値自体が小さいため、気づきにくいですが、中層以深での評価は、動的解析よりも大幅に過小である。深さ350m付近の拡大図を見ると、2つの応答震度法の評価値はともに、動的解析の1/10程度であり、正しく評価ができていないことがわかる。本検討においては、過小評価となっている箇所での応答が小さいため、評価結果全体に及ぼす影響は小さいが、応答が大きい箇所でもこのような過小評価が生じる場合も想定される。なお、上層部では応答震度法と動的解析の結果が整合しているが、これは、地盤のせん断応力と立坑の鉛直軸応力は関係を持たないが、互いの最大応答値を示す時刻が偶然一致したためである。

## 5. 長大立坑の鉛直軸応力の評価に適した応答震度法の検討

### (1) 立坑の鉛直軸応力に関わる変形

本章では、立坑の鉛直軸応力と関係を持つ地盤の応答について考え、先に示した応答震度法を応

用し、鉛直軸応力の評価を試みる。

立坑の鉛直軸応力は、主に加振方向への曲げ変形により生じると考えられる。すなわち、加振方向に凸な変形をしている側面では鉛直軸方向に引き伸ばされ、逆に凹な変形をしている側面では圧縮されると考えられる。しかし、本検討の場合、凹凸と圧縮・引張の関係が上層部では想定通りであったが、地層境界を除く中層以深では、想定とは逆の関係になっていた。

これは、立坑の鉛直軸応力は、曲げ変形だけでなく、立坑の鉛直方向の伸縮によっても生じるためである。ただし、この伸縮は、本検討の加振方向は水平一方向のみであるため、鉛直方向の慣性力によるものではない。ここでは割愛するが、詳細な分析の結果、立坑側に作用する鉛直方向の周面せん断力によるものであることがわかった。周面せん断力は、深さ方向に一定な場合は、立坑に伸縮を生じさせないが、変化する場合は局所的な伸縮を生じさせる(図-8参照)。先に示した曲げ変形で説明できない中層以深の位置での応力・ひずみは、この周面せん断力の変化に起因する伸縮と整合しており、深さ位置によって鉛直軸応力に支配的に寄与する変形は異なると考えられる。

### (2) 立坑の鉛直軸応力と関係を持つ地盤の変位

前節で示した立坑の鉛直軸応力に寄与する2つの立坑の変形を一次元地盤の動的解析で得られる地盤の応答から推定する。このような地盤の応答を、先に示した応答震度法で用いた地盤のせん断ひずみの代わりに用いれば、立坑の鉛直軸応力の評価に適した応答震度法となると考えられる。

立坑の曲げは、立坑と周囲の地盤が一体となって曲げ変形すると考えた場合、地盤変位の曲率で表現することができる。地盤に対して、曲率という表現はふさわしくないかもしれないが、これは一次元地盤の動的解析で得られた地盤変位の深さ方向の変化率を用いて求めることができる。

一方、立坑側に作用する鉛直方向の周面せん断力は、立坑に接する地盤の水平方向のせん断力と釣合う力であり、一次元地盤の動的解析により推定できる。すなわち、これの深さ方向の変化量を立坑の剛性で除したものは、立坑の周面せん断力の変化に起因する伸縮に相当すると考えられる。なお、この量を以降は、簡便に周面せん断力の変化量と呼ぶことにする。

これら2つの立坑の変形を推定する地盤の応答と立坑の鉛直軸応力の関係性を確認するため、応答波形を比較した。一例として、深さ350mにおける比較を図-9に示す。なお、各波形は、図-5と同様の方法で正規化したものであり、鉛直軸応力、地盤変位の曲率、周面せん断力の変化量の正は、それぞれ引張、凸、伸長を表す。3つの波形はす

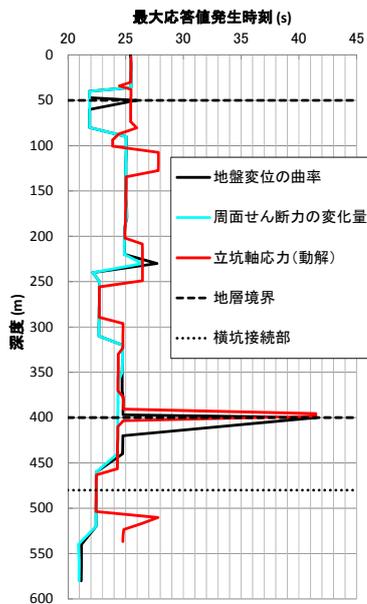


図-10 立坑の鉛直軸応力と関係を持つ地盤の応答の最大応答値発生時刻の分布

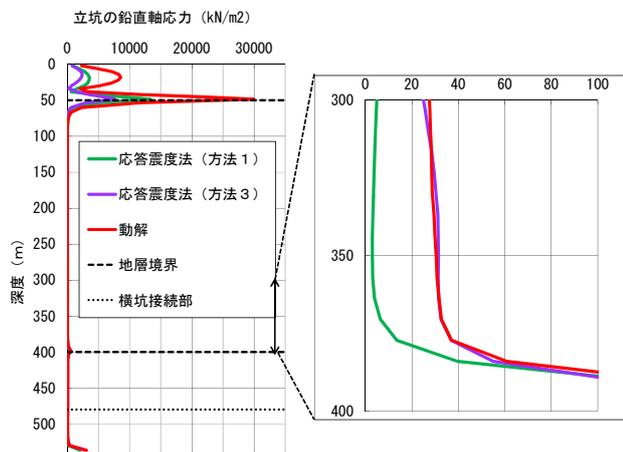


図-11 立坑の鉛直軸応力の評価を目指した応答震度法の適用性

べて相似形であり、互いに関係していることがわかる。ただし、鉛直軸応力の位相は、周面せん断力の変化量と同位相であるが、地盤変位の曲率とは逆位相の関係にある。これは、周面せん断力の変化量が鉛直軸応力に支配的に寄与することを意味しており、前節で述べたように、中層以深では、周面せん断力の変化に起因する伸縮が鉛直軸応力に支配的に寄与することと整合する。

なお、他の深さ位置についても波形の比較を行ったところ、底部のベースコンクリート部分の影響が現れる部分を除いて、3つの応答波形はほぼ相似形であり、互いに関係を持つことを確認している。図-10は、これらの最大値発生時刻を示したもののだが、いずれの深さ位置でも比較的良好一致している。また、位相については、中層部以深では、先に示した深さ350mの場合と同様で、上層部と地層境界では、逆に鉛直軸応力の位相は、地盤

変位の曲率と同位相で、周面せん断力の変化量とは逆位相の関係であった。

このように、本検討では、上層部と地層境界部では、地盤変位の曲率が鉛直軸応力に支配的に寄与し、中層以深では周面せん断力の変化量が支配的であることがわかった。しかし、ある深さ位置で、どのような条件の場合に、地盤変位の曲率もしくは周面せん断力の変化量が支配的になるかは、まだ十分に把握できていないため、今後検討する予定である。

### (3) 立坑の鉛直軸応力の評価を目的とした応答震度法の拡張

前節で、立坑の鉛直軸応力は、地盤変位の曲率と周面せん断力の変化量の両方と関係を持つことがわかった。ここでは、方法1を応用し、時間断面の選定において、地盤のせん断ひずみの代わりに、地盤変位の曲率と周面せん断力の変化量が最大となる時刻に着目した慣性力評価を行う方法(方法3)を考え、立坑の鉛直軸応力の再現を試みる。

前章で示した動的解析との比較による応答震度法の鉛直軸応力の評価への適用性の検討を方法3についても同様に行う。静的震度は、検討対象位置の深さ350mで、鉛直軸応力に支配的に寄与する周面せん断力の変化量が最大となる時刻(24.7秒)で設定した。なお、検討対象位置が上層部や地層境界である場合は、地盤変位の曲率が検討対象位置において、最大となる時刻で静的震度を設定するのが適切と考えられる。図-11に、方法1、方法3および動的解析により得られた立坑の鉛直軸応力の最大値の深さ方向の分布を示す。鉛直軸応力と関係性を持たない地盤のせん断ひずみを用いる方法1では、検討対象位置において、動的解析による評価と大きくずれていたが、方法3では動的解析と整合する結果が得られている。この結果から、方法3は、立坑の鉛直軸応力の評価に適した応答震度法のひとつになりうると考えられる。

## 6. まとめ

長大立坑を対象に、地盤変位と立坑の応答の関係性に着目し、応答震度法の適用性について検討した。その結果、立坑の面内せん断力は地盤のせん断ひずみと関係を持ち、従来の応答震度法で適切に評価できることが確認できた。しかし、立坑の鉛直軸応力は、地盤のせん断ひずみと直接の関係を持たず、従来の応答震度法では正しく評価できないことがわかった。

そこで、従来の応答震度法を応用して、立坑の鉛直軸応力を適切に評価するため、立坑の鉛直軸応力と関係を持つ地盤の応答について検討した。

その結果、立坑の鉛直軸応力は、曲げ変形と周面せん断力の変化に起因する鉛直方向の伸縮によって生じ、これらの変形を生じさせる地盤の作用を、それぞれ地盤変位の曲率と周面せん断力の変化量としたところ、ともに立坑の鉛直軸応力と関係を持つことが確認できた。なお、地盤変位の曲率と周面せん断力の変化量の立坑のそれぞれの鉛直軸応力への寄与の程度は、深さ位置によって変化し、本検討例では、上層部と地層境界部では地盤変位の曲率が支配的であり、中層部以深では周面せん断力の変化量が支配的となった。

さらに、立坑の鉛直軸応力と関係を持つ2つの地盤の応答を用いて、応答震度法の新案を試みたところ、鉛直軸応力を適切に評価できることを確認した。今後は本案の汎用性を検討するとともに、より効率的・汎用的な長大立坑に適した応答震度

法の検討を進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 社団法人土木学会：開削トンネルの耐震設計—トンネルライブラリー第9号—，pp. 95-105, 1998.
- 2) 大成建設土木本部土木設計部編：耐震設計の基本，山海堂，2007.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分開発第2次取りまとめ—，分冊2 地層処分工学技術，pp. IV 252-IV271，1999.
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計，pp. 25-42, 1999.

## A STUDY ON THE APPLICABILITY OF GROUND RESPONSE ACCELERATION METHOD TO DEEP VERTICAL UNDERGROUND STRUCTURES

Mai MATSUMOTO, Yukio SHIBA, Kazuaki WATANABE

This paper discusses the applicability of ground response acceleration method to seismic analysis for deep vertical underground structures. To examine the applicability, an analysis of relativity between response of ground and the shaft was conducted. It was found from the analysis that vertical axial stress of the shaft was not correspond with shear stress of ground. Accordingly, it was concluded that the axial stress was not evaluated correctly by the existing method. Therefore, to extend the applicability of the method, ground responses correlated with the axial stress were studied and a new method using these ground responses was devised.