大深度立坑の耐震設計における構造物と地盤の 臨界面評価に関する数値解析的研究

石井 貴大1·程 传涛2·山口 哲司3·岩波 基4

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻(〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: t_ishii.9@ruri.waseda.jp

²学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻(〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: chengchuantao@fuji.waseda.jp

³正会員 株式会社熊谷組 土木事業部土木設計部(〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1) E-mail: teyamagu@ku.kumagaigumi.co.jp

⁴正会員 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科(〒169-0072 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: miwanami@waseda.jp

本報告は、大深度立坑の耐震設計において、地下構造物と地盤との臨界面で発生する動的相互作用を数値解析的に検討したものである。検討をするにあたって、立坑と地盤間をジョイント要素で接続し、この特性として、線形ばね、剥離、滑り、剥離+滑りの4ケースで3次元FEM動的解析を行った。その結果、立坑と地盤間の臨界面の特性によって、地震時に立坑に生じる断面力に大きな差異が生じることが分かった。また、剥離や滑りの影響は、曲げモーメントでは地表部付近で大きく、せん断力では立坑底面付近で大きくなる傾向が見られた。

Key Words: vertical shaft, underground structure, seismic response analysis, aseismic design

1. はじめに

近年、リニア中央新幹線や外郭環状道路の大深度トン ネルプロジェクトが進行しており、シールド工事用の立 坑として大深度の立坑が多く計画されている. 大深度立 坑は、表層の軟弱地盤と強固な設計上の基盤にまたがっ た設計となるため、地震時にその境界付近で立坑に大き な断面力が生じることが懸念される. また, 立坑のよう な鉛直方向に延びる地下構造物は、トンネルのような水 平方向に延びる地下構造物とは異なり、深度とともに地 震動による水平方向の変位が変化する. これらのことか ら、地震時の大深度立坑の挙動は、地盤の挙動に支配さ れると現状では考えているが、諸条件によっての違いが 想定される. そのため、立坑の耐震性能を評価する上で、 地盤変位と立坑変位の差異について、詳細に検討するこ とは重要であると考えられる. 特に、レベル2以上の地 震波作用時には、地盤と地下構造物間で剥離や滑りなど の現象が生じる可能性がある. この剥離や滑りは、地盤 と構造物の剛性比および常時の内在する応力に大きく影 響を受けるりとされており、構造物の剛性が地盤の剛性

よりも大きい場合は構造物の応答値に与える影響が大きく、逆に小さい場合はその影響も小さいと筆者らが研究で得られた知見から考えられる。上記のように、大深度立坑の地震時挙動と発生断面力を詳細に把握するためには、鉛直方向に長い構造物であり、軟弱地盤と強固地盤にまたがって、地盤と構造物の剛性比の変化し、剥離と滑りの影響を考慮する必要があると考えられる場合には、3次元の今まで行われてこなかったような大規模で詳細な解析が必要である。そこで、本報告は、解析によって特に、地震時における地盤と立坑の臨界面における剥離や滑りの影響を定量的に明らかにすることを目的とする。

2. 検討対象

本報告で対象は、通常の設計で基盤層と見なされる硬質な地層まで深く根入れしている首都圏外郭放水路第一立坑とし、解析結果の傾向を分析しやすいように、両者の地盤条件を単純化にして用いる。立坑の物性値と諸元を表-1、図-1に示す。

地盤の物性値は4層でモデル化した.この物性値を表-2に示す.

3. 解析条件

解析には、地盤と立坑の剥離や滑りの現象をジョイント要素で表現でき、構造物の詳細な挙動を再現することができる 3 次元 FEM による時刻歴動的解析を行う.ここでジョイント要素に与える特性を図-2 に示す.垂直特性では、圧縮力が働いている時は剛性が大きく、引張となる場合には剥離して引張力がほぼ 0 となるものとし、せん断特性はモールクーロン式で降伏条件を採用する.垂直方向剛性率 K_n およびせん断方向剛性率 K_s は地盤反力係数を参考にし、非現実とならない範囲で大きく取った.

表-1 立坑の物性値

単位体積重量	ポアソン比	弹性係数	せん断弾性係数
(kN/m³)		(MN/m²)	(MN/m²)
25	0.2	25000	10417

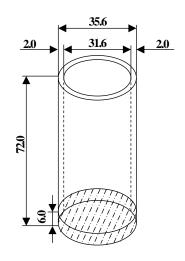


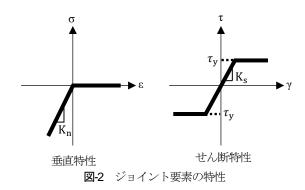
図-1 検討対象立坑の構造と諸元(単位:m)

表-2 周辺地盤の物性値

土質	層厚	単位体積重量	動的	せん断波速度
	(m)	(kN/m³)	ポアソン比	(m/s)
粘性土	5.0	16	0.44	100
砂質土	55.0	17	0.48	300
砂質土	45.0	19	0.45	450
粘性土	35.0	20	0.41	600

地盤および立坑をソリッド要素でモデル化する. 地盤端の境界が解析結果に影響を与えないよう,側方領域は立坑深さの約2倍の150m,下方領域は立坑外径の約2倍の70mをとった.このモデルを図-3に示す.このモデルの要素数は46993,節点数は51250である.

解析に用いる地震波は、レベル2地震動の代表例である神戸波(1995年 兵庫県南部地震)とした。この波形を図-4に示す。また、この地震波形は実際に地表部の観測計で観測された実測波であるため、一次元地盤応答解析によりモデル下端での地震波に引き戻す。モデル下端位置での地震波形を図-5に示す。この地震波を3次元FEMモデルの下端に入力する。



335.6m

図-3 3次元 FEM モデル

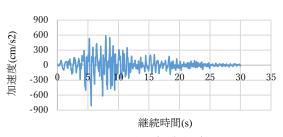


図-4 神戸波 (観測波)

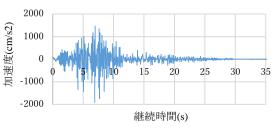


図-5 モデルに入力する地震波(神戸波 142m 引き戻し)

4. 解析結果

解析結果として、地表部の変位が最大となる時刻の結果に着目する.

また,3次元 FEM 解析ではソリッド要素の応力から式 (1,a)と式(1,b)を用いて立坑の水平方向断面の断面力を算出する.ここで,応力から断面力への変換はシールド工 事用立坑の設計²⁾を参考とし,以下の式より算出する.

$$M = \sum \sigma_{yi} \cdot h_i \cdot t_i \cdot \ell_i$$
 (1.a)

$$Q = \sum \sigma_{xi} \cdot h_i \cdot t_i \tag{1.b}$$

ここに

M: 曲げモーメント

Q: せん断力

 σ_{xi} : 要素 i の要素座標系 x 方向の応力度 σ_{xi} : 要素 i の要素座標系 y 方向の応力度

 h_i : 要素iの高さ t_i : 要素iの厚さ

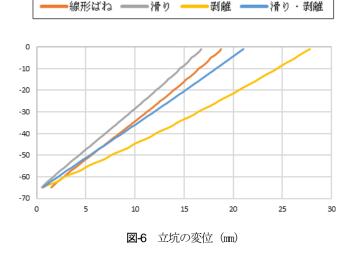
ℓ_i : 断面図心から要素iの図心までの距離

なお、解析ケースとしては、立坑と地盤を接続するジョイント要素に対して以下の条件を与えて4ケースで解析を行った.

- 1)線形ばね
- 2)滑り
- 3)剥離
- 4)滑り+剥離

(1) 深さごとの断面全体に着目した場合の応答値

一般的に立坑の耐震設計では、立坑全体をはりでモデル化して応答変位法により水平断面応答値の算出を行う。この考え方で求められる値と比較しやすいように、深さごとの立坑の変位(立坑底面との相対変位)の平均値を図-6に示す。また、深さごとの立坑水平断面全体の曲げモーメントを図-7、せん断力を図-8に示す。

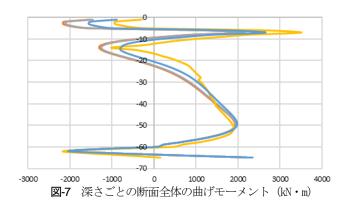


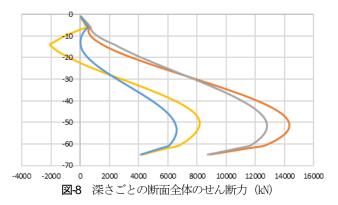
(2) 立坑の部位ごとに着目した場合の応答値

地表部最大変位が発生している時刻における図-9に示した①受働土圧方向,②主働土圧方向,③直角方向の立坑の部位に着目して応答値を算出する.それぞれの部位での外壁断面内の鉛直方向の曲げモーメントを図-10~図-12, せん断力を図-13~図-15に示す.

(3) 立坑の深さごとのリングに着目した場合の応答値

土層境界となる地表部からの深さ 5m, 20m, 40m, 60m での曲げモーメントを図-16~図-19に示す.





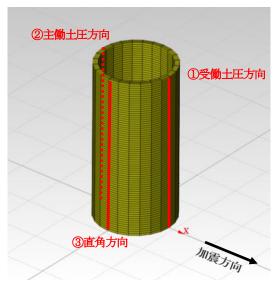
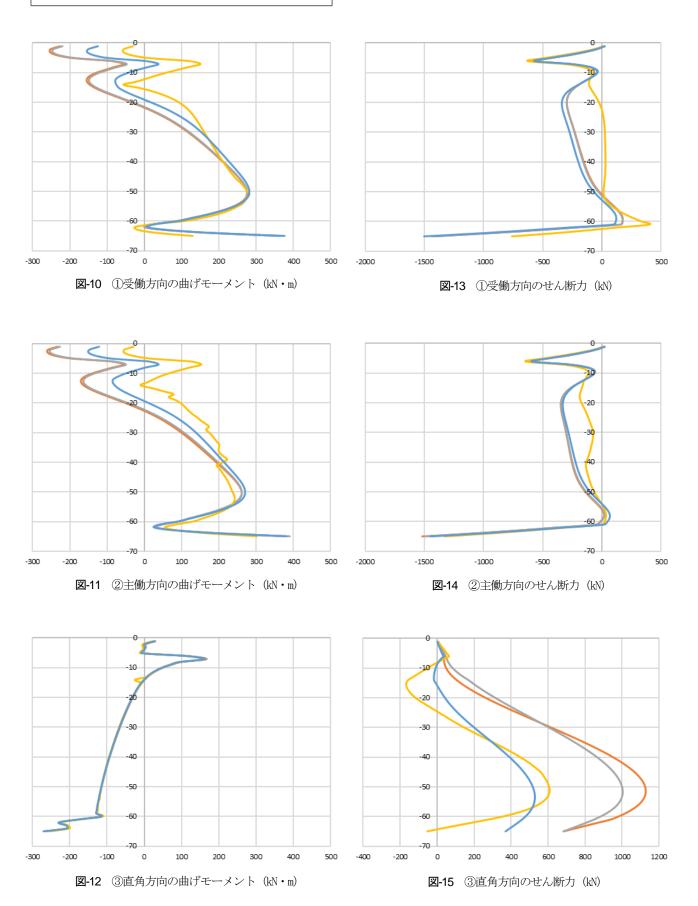


図-9 立坑の着目部





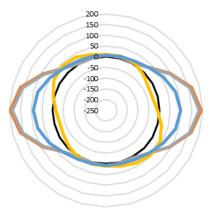


図-16 深さ5mの曲げモーメント(kN・m)

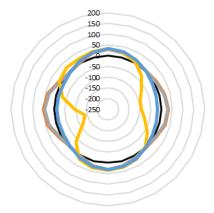


図-17 深さ 20m の曲げモーメント (kN・m)

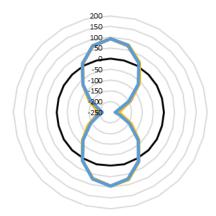


図-18 深さ40mの曲げモーメント (kN・m)

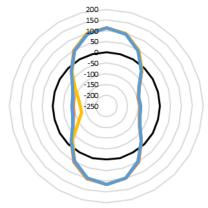


図-19 深さ60mの曲げモーメント(kN・m)

5. 考察

解析結果から、大深度立坑の地震時における応答値は 立坑と周辺地盤との臨界面の表現により大きく差異が生 じた.

立坑の変位は、構造物周辺地盤の変形に支配されるが、 今回のような大規模な大深度立坑の場合には底面による 回転拘束が顕著であり、地盤境界で生じると予想された グラフの傾きの変化が明確にならなかったと考えられる.

立坑に生じる曲げモーメントに関して、地下深くの硬質な地盤中では大きな差異は生じなかったが、比較的浅く軟質な地盤中で地盤と立坑の拘束による違いが大きく生じた. 地表面部は剥離の影響により、曲げモーメントが小さくなり、それを負担する形で中浅深度の曲げモーメントが大きくなったと考えられる.

立坑に生じるせん断力に関して、比較的浅く軟質な地盤中では大きな差異は生じなかったが、地下深くの硬質な地盤中では差異が生じた.これは立坑底面部の剥離により、地盤から加わる力が大きく減少したためだと考えられる.

6. おわりに

本報告から得られた知見としては次のことが言える.

- ○従来の耐震設計のように明確な規定がないまま立 坑と地盤の臨界面を設定したのでは、結果に大き な差異が生じる.
- ○剥離や滑りを考慮しないことにより、安全側の設計を行うことはできるが、今回のような大深度立坑の場合、大きな差異が生じるため、必ずしも合理的な設計とは言えない.

以上より今後の課題として、剥離や滑りが生じる部分を明確にし、断面力を負担する箇所を明らかにする. また、汎用性のため、異なる地震波や地盤条件においても適応できるジョイント要素の特性の与え方について検討する.

参考文献

- 1) 西山誠治,室谷耕輔,西村昭彦:開削トンネルの地 震時挙動に及ぼす構造物・地盤間の剥離・すべりの 影響,第25回地震工学研究発表会講演論文集,1999.
- 2) 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・ライブラリー第27号,2015

(2021.8.6 受付)

NUMERICAL STUDY ON CRITICAL SURFACE EVALUATION OF STRUCTURES AND GROUND IN ASEISMATIC DESIGN FOR DEEP SHAFTS

Takahiro ISHII, Chuantao CHENG, Tetsuji YAMAGUCHI and Motoi IWANAMI

This report numerically examines the dynamic interaction that occurs at the critical plane between the underground structure and the ground in the seismic design of a deep shaft. In the examination, the shaft and the ground were connected by a joint element, and three-dimensional FEM dynamic analysis was performed for the characteristics of this in four cases: linear spring, peeling, slipping, and peeling + slipping. As a result, it was found that the characteristics of the critical plane between the shaft and the ground cause a large difference in the cross-sectional force generated in the shaft during an earthquake. In addition, the effects of peeling and slipping tended to be large near the ground surface for bending moments and large near the bottom of the shaft for shearing force.