

## 断層変位を受けるトンネルの非線形シミュレーション解析による健全性評価

日本原子力発電（株） 正会員 ○秋山 隆 非会員 藤原 由起  
（株）構造計画研究所 正会員 三橋 祐太 正会員 島袋 ホルヘ

### 1. はじめに

原子力発電所の新規規制基準では、耐震設計上の重要度が高い施設は活断層等の露頭がない地盤に設置することが要求されている。一方で裕度評価や地震 PRA の観点から、断層変位に対する構造物の定量的な影響評価が必要とされている。本研究では断層変位を受けるトンネル構造物に対して、地盤およびトンネルをソリッド要素でモデル化した有限要素モデルにより検討した。さらにトンネルの要求性能を構造保持と定めた上で、土木学会原子力土木委員会による原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル 2018（以下マニュアル）に従って解析結果を評価することで、断層変位を受けるトンネル構造物の評価手法を示した。なお、本検討ではトンネルに対して入力する変位量は既知として実施した。

### 2. 解析モデル

解析モデルを図 1 に示す。トンネルは鉄筋コンクリート構造を想定し、コンクリートをソリッド要素、鉄筋を平面応力要素によりモデル化した。また、トンネルの周囲には地盤を模擬したソリッド要素を設定し、モール・クーロンの破壊基準に従う非線形材料でモデル化した。トンネルは内径 5m、覆工厚 0.5m の鉄筋コンクリートとした。コンクリートおよび鉄筋は一般的な物性値を設定した。コンクリートは引張および圧縮に対する非線形材料として、鉄筋はバイリニアの非線形材料を設定した。境界条件として、トンネル軸方向の半分は、地盤ソリッド要素のモデル境界部を固定し、もう半分に変位を入力することで断層変位を模擬した（図 2）。解析ケースはトンネルと断層が 90 度で交差するケースと 45 度で交差するケースの 2 ケースを設定した。45 度で交差するケースは、変位の入力方向としてトンネルが圧縮を受ける方向と引張を受ける方向の 2 種類が考えられるが、後述するようにトンネルの圧縮主ひずみに着目し結果を評価するため、解析ケースとしてはトンネルが圧縮を受ける方向に変位を入力することとした。地盤ソリッド要素の物性値として、ヤング係数は 100MPa、せん断強度を 100kPa とした。また、トンネルの土被りを 10m 程度と想定し、相当する初期拘束圧を設定した。

### 3. 解析結果

図 3 にトンネルのひび割れ図を、図 4 に変形図および圧縮主ひずみコンター図を示す。どちらのケースも断層交差部付近で最大圧縮ひずみが卓越しており、トンネルと断層が 90 度で交差するケースにおいては、S 字状に変形するトンネルのうち曲げ圧縮を受ける部分で特にひずみが大きい。ひび割れは断層交差部付近を中心に広範囲に生じている。45 度で交差するケースも同様であるが、トンネルが圧縮を受ける変位が入力されるため全体的に圧縮ひずみが大きくなっており、結果としてトンネルに生じるひずみは 45 度で交差するケースで大きくなっている。横軸に入力した断層変位量を、縦軸にトンネルに生じた最大圧縮ひずみの最大値をプロットしたものを図 5 に示す。入力変位が比較的小さい領域ではどちらのケースも同程度の応答ひずみとなっているが、ある程度変位が大きくなった辺りから 45 度のケースではひずみが急に大きくなる結果となった。これはトンネルのコンクリートが圧縮破壊することでひずみが進展したものと考えられる。

### 4. 解析結果の評価

原子力発電所敷地内に存在するトンネルの用途は通水トンネル又は配管トンネルであり、要求性能は構造の保持、通水性能、機器・配管の支持性能である。機器配管に関しては個々のスペックに依存するが、本研究で実施したような解析の応答変位を入力として個々の機器配管の健全性は評価可能である。通水性を損なうような事象としては構造物の損傷・崩落や土砂の流入による流水断面の欠損などが挙げられるが、いずれも構造の

連絡先 〒110-0005 東京都台東区上野 5-2-1 日本原子力発電（株）開発計画室 TEL 03-6371-7800

保持が損なわれたのちの事象であるため、本研究では構造物の健全性を主に評価することとした。我々が採用したような3次元解析の評価方法はいくつか見られるが、本研究では過去の知見も含めてまとめられたマニュアルに準じて結果を評価する。ただし、断層変位は静的な現象と考えられるため、解析は静的解析により実施する。

マニュアルでは3次元解析により得られた圧縮主ひずみに着目した検討方法が示されており、限界ひずみは要素の代表長さ  $l_r$  に依存する。本検討で用いた断層近傍の解析メッシュはトンネル軸方向、周方向、厚さ方向にそれぞれ 500mm, 500mm, 100mm メッシュであるので代表長さ  $l_r=714\text{mm}$  となり、コンクリートの圧縮強度などから決定される主圧縮ひずみの限界値  $\varepsilon_{cu}=0.006$  が得られる。

図5には  $\varepsilon_{cu}$  を赤破線で示すが、検討を行った 10cm までの入力に対して、構造物に生じる主圧縮ひずみは限界値以下となることが分かる。マニュアルに従って応答値に対して安全係数 1.2 を乗じた照査用応答値も同様に限界値を下回っており、本検討の条件においては 10cm の断層変位に対して構造物は健全性を保つことが確認できた。

5. まとめ

本研究では食い違い断層変位を受けるトンネルの影響評価を目的として、地盤と構造物の非線形性を考慮した有限要素モデルを用いて、断層変位を入力した際のトンネルの応答解析を実施した。さらに応答圧縮主ひずみに着目し、マニュアルに従った照査を行う事で断層変位を受けるトンネルの健全性評価を実施した。

今後は実現象との比較などを通じて解析結果の妥当性を示していきたい。

謝辞：本研究は、電力9社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による原子力リスク研究センター共通研究として実施した。関係各位に謝意を表す。

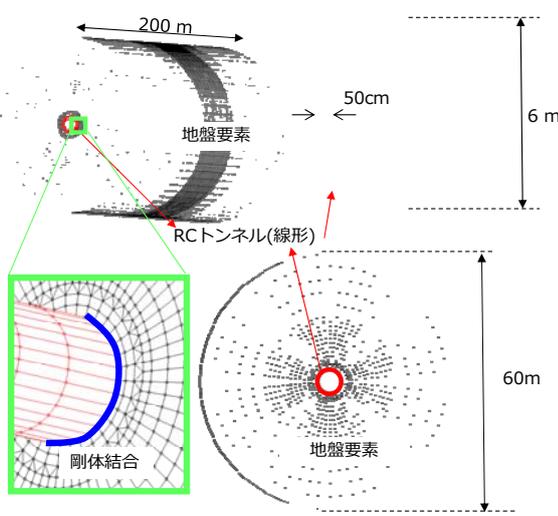


図1 解析モデル図

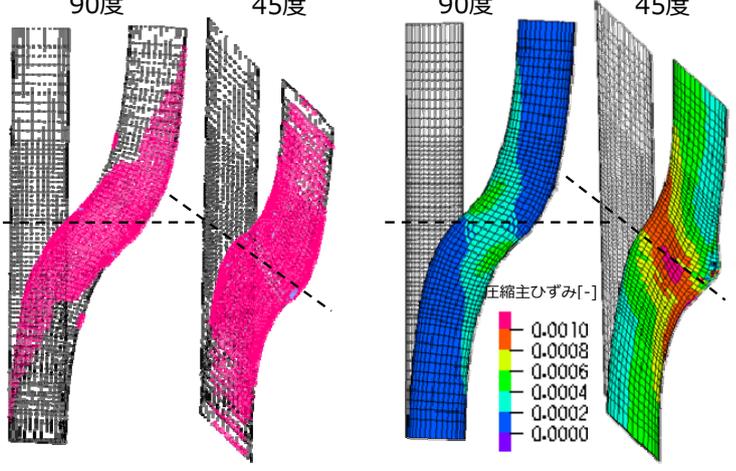


図3 ひび割れ図

図4 最大圧縮主ひずみコンター図

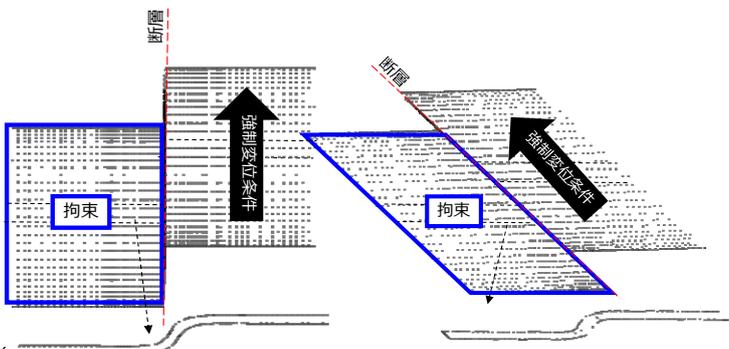


図2 断層変位入力イメージ図

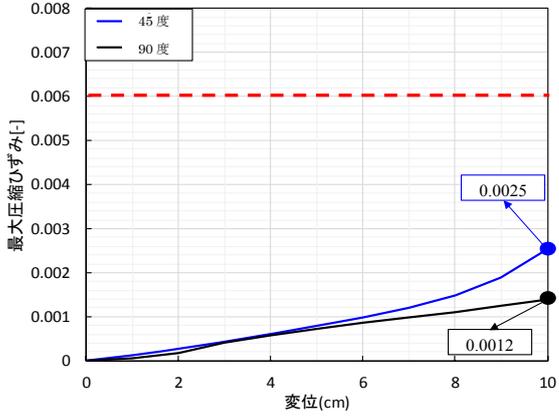


図5 入力変位—応答圧縮主ひずみ関係