

## 個別要素法による動的シミュレーションに基づく基礎岩盤の変形挙動評価

長崎大学大学院 学生会員 ○吉田 敬一      長崎大学工学部 正会員 李 博  
長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静      長崎大学大学院 フェロー 棚橋 由彦

### 1. 研究背景

我が国は地震国であることから重要構造物を設置、稼働させるためには高度な調査、設計技術が必要であり、特に原子力発電所を設置する基礎岩盤は想定される地震力に対して安全性を有していることが前提条件である。そのため、基礎岩盤の選定には地震による断層の挙動を含めた基礎岩盤の強度、変形が構造物に与える影響を評価する必要がある。本研究では基礎岩盤を対象とした場合における建設地点選定の評価手法の1つとして、一般的に動的解析に用いられる有限要素法(FEM)に加え、個別要素法(DEM)による地震動に対する動的数値シミュレーションを実施して、各解析手法の変形特性を比較検討する。さらに、個別要素法(DEM)での動的解析手法を確立させ、その特徴を活かし基礎岩盤の強度特性と変形挙動を詳細に考察する。

表-1 力学特性値

### 2. 対象岩盤および地震動の概要

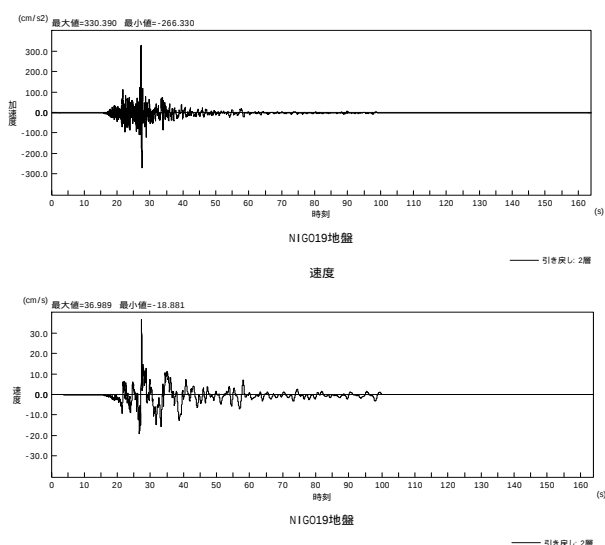
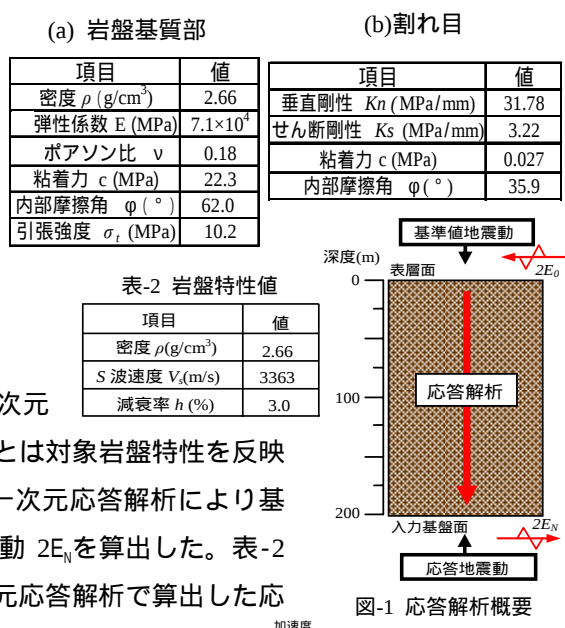
本研究の対象岩盤は硬岩に分類される中生代の堆積岩であり、岩盤変形試験を実施したところ、割線弾性係数は500～1700MPaとなった。岩盤基質部、割れ目の力学特性は、表-1に示す。また、地震動については、平成19年7月16日10時13分に発生した新潟県中越沖地震を対象地震とし、観測地点NIG019小千谷の観測地震動を選定した。

### 3. 一次元応答解析

解析モデルの入力基盤面に入力する地震動を算出するために一次元応答解析を用いた。図-1に応答解析概要を示す。基準値地震動  $2E_0$  とは対象岩盤特性を反映した一次元モデルの表層上で観測地震動を再現したものである。一次元応答解析により基準値地震動  $2E_0$  に引き戻し計算を適用し、入力基盤面での応答地震動  $2E_N$  を算出した。表-2に一次元応答解析モデルの岩盤特性値を示している。図-2は一次元応答解析で算出した応答地震動  $2E_N$  の加速度波形と速度波形を示している。

### 4. FEMとDEMによる動的解析の比較検討

FEMモデルとDEMモデルを図-3に示す。両手法による解析を比較するために、モデルのサイズや対象領域の条件を同じように設定した。解析モデルは、原子力発電所(浜岡)の基礎岩盤をもとに、原子炉建屋及びタービン建屋をモデル化し断層を入れた基本的モデルを作成した。このモデル解析を行い、地震波を与えたときに両解析方法が同様の振動を与えられているかを確認する。なお、岩盤領域の特性値は表-1をもとに決定した。地震動入力方法として、一次元応答解析より算出した応答地震動  $2E_N$  をFEMは加速度、DEMは速度をモデル基盤面に入力する。入力波形は、地震動の最大波形が観測される20.8～30.8sの10秒間を用いた。境界条件としては、両解析方法ともにモデル下端の境界面を底面粘性境界とし、逸散する波動エネルギーの吸収、地震波の上昇波成分のみの入力が可能となる。そして、モデル側方の両境界面では自由岩盤領域を設け、エネルギー伝達境界とした。エネルギー伝達境界によりモデル側面において逸散する波動エネルギーを伝達し、自由岩盤領域で吸収することができる。これにより、



側方境界を半無限地盤領域として評価できる。

FEM と DEM による解析結果において、同等の地震動が起きているかを確認するために、図-3(a)に示す任意の計測点(地下 190m、30m、0m)を選定した。その結果の一つとして地下 190m 地点の比較を図-4 に示す。FEM と DEM の結果が、ほぼ同じ速度波形を示していることがわかる。また、入力波形も同時に比較した結果、基盤面から観測地点の距離が 10m あるために速度波形のピークが遅れてきていることがわかり、両解析方法でほぼ同様の伝わり方を示している。しかし水平速度の最大値を比較すると、FEM は DEM に対して入力波形と差が生じたことがわかる。これは解析手法によって波形の入力方法が異なっているためと考えられる。そのほかの観測地点の結果もほぼ同等の傾向が得られた。しかし、基盤面と違い、地表近くの水平速度の最大値は FEM と DEM で逆転している。これは、DEM 解析では断層の影響が反映されているためと考えられる。これらの結果より、DEM による基礎岩盤の動的シミュレーションでは境界条件等が適切に再現することができた。

#### 5.DEMによる動的シミュレーションに基づく基礎岩盤の変形挙動の検討

前節で述べたように、DEM による動的シミュレーションの解析手法を確立できたので、DEM の特徴を活かし、基礎岩盤内の新規亀裂発生箇所からすべり面を検証する。原子力発電所モデルをもとに図-5 のようにモデルの対象範囲を設定し、潜在面として対象範囲において一辺 10m の正六角形の網目状要素に配置し、最大振幅を含む 10 秒間の地震動を与え、この地震動に対して亀裂がどのように発生するかを検討した。

解析結果を図-6 に示す。時間経過ごとに青色の線に変わっており、新規亀裂が発生したことが判明した。地震動に対して建屋直下の断層付近の岩盤に新規亀裂が発生・進展し、その後、最大地震動に伴い左断層付近に新規亀裂が発生・進展していることがわかる。また主応力の変化については、新規亀裂発生箇所に応力が集中し、特に建屋付近の断層周辺に影響を受けやすいことがわかる。これは、地震動に対して建屋の自重が基礎岩盤を通して断層に影響を与えたために、建屋と断層の間に応力が集中し、その結果、新規亀裂が発生したと考えられる。

#### 6.結論

個別要素法による動的シミュレーションの解析手順を示し、その特徴を活かして、断層が存在する基礎岩盤について新規亀裂の発生箇所が判明し、断層付近の応力集中箇所と亀裂発生箇所とが連動していることが判明した。今後は、潜在面要素の分割方法を再考することで、より正確な新規亀裂の発生状況を捉え、重要構造物の基礎岩盤の耐震評価と補強設計のために基礎データを提供していく。

【参考文献】1) 独立行政法人防災科学研究所：強震ネットワーク(K-NET), 2007. 2) 中部電力株式会社：浜岡原子力発電所 4 号「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果報告書, 2007

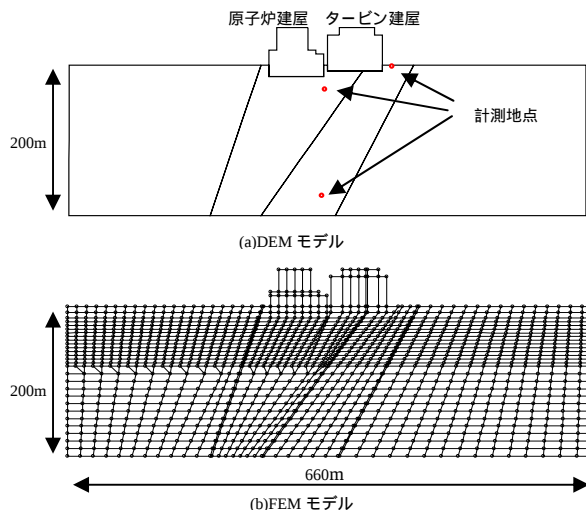


図-3 原子力発電所モデル

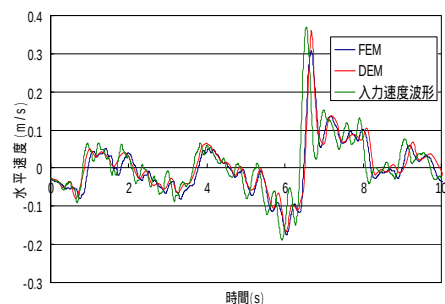


図-4 DEM・FEM・入力速度波形図(地下 190m)

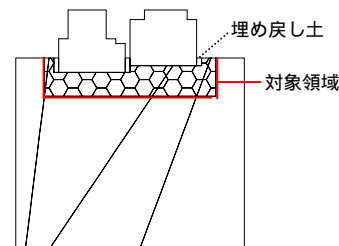


図-5 進展亀裂モデル

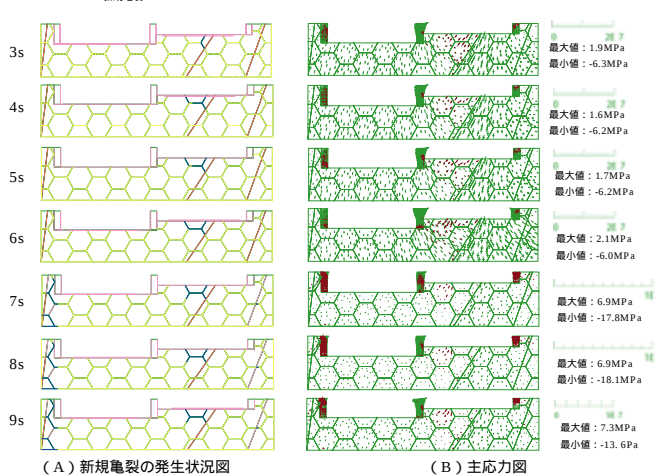


図-6 解析結果