

# 動的数値シミュレーションによる節理を有する基礎岩盤の変形・強度特性の評価

蒋宇静<sup>1\*</sup>・吉田敬一<sup>2</sup>・李博<sup>1</sup>・棚橋由彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>長崎大学工学部（〒852-8521長崎県長崎市文教町1-14）

<sup>2</sup>長崎大学大学院 産科学研究科環境システム工学専攻（〒852-8521長崎県長崎市文教町1-14）

\*jiang@nagasaki-u.ac.jp

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不連続面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。本研究では節理を有する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、有限要素法(FEM)及び個別要素法(DEM)による動的数値シミュレーションを用いて不連続性岩盤の強度・変形特性の評価を行う。

**Keyword:** Earthquake, Jointed rock mass, Finite Element Method (FEM), Distinct Element Method (DEM), Deformation behavior

## 1. 研究目的

我が国は世界有数の地震国であるため、原子力発電所等の重要構造物を設置、稼働させるためにはより高度な調査、設計技術が必要である。基礎岩盤の選定には地震による岩盤内不連続面の挙動を含めた基礎岩盤の強度、変形特性が構造物に与える影響を評価する必要がある。このような基礎岩盤のより適切な強度・変形特性評価手法が確立されれば、岩盤を基礎とする重要構造物の建設に際して、より安全性・信頼性が高く、かつ合理的な建設地点の選定が可能になる。本研究では節理を有する不連続性岩盤を対象岩盤とした場合における建設地点選定の評価基準の1つとして、動的数値シミュレーションを用いて対象基礎岩盤の強度、変形特性の評価を行う。

## 2. 研究方法

### (1) 対象岩盤及び対象地震動

本研究対象の岩盤は硬岩に分類される中生代の礫岩であり、傾斜角 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ の高角度割れ目が卓越している。岩盤基質部、割れ目の力学特性は、表-1(a)、(b)の特性値が得られている。対象岩盤において岩盤変形試験を実施したところ、割線弾性係数は $500\sim 1700\text{MPa}$ となった。この試験結果の妥当性を確認するため高角度割れ目を

Set 1, Set 1の間隔を $t$ と称し、Set 1の傾斜角 $\alpha$ を $75^{\circ}$ 、 $t$ を3cm, 5cm, 10cm, 20cmとしたモデル(図-1参照)を作成した。そして、最大荷重1.5MPa時の変形挙動を検討対象として数値シミュレーションを実施し、2~4回の繰返し載荷時に得られた応力-変位関係から、式(1)で算定される割線弾性係数の平均値を用いて評価を行った。

$$E_s = \frac{\pi a(1-\nu^2)}{2} \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (1)$$

表-1 力学特性値

(a) 岩盤基質部

(b) 割れ目

項目	値	項目	値
密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.66	垂直剛性 $K_n$ (MPa/mm)	31.78
弾性係数 $E$ (MPa)	$7.1 \times 10^4$	せん断剛性 $K_s$ (MPa/mm)	3.22
ポアソン比 $\nu$	0.18	粘着力 $c$ (MPa)	0.027
粘着力 $c$ (MPa)	22.3	内部摩擦角 $\phi$ (°)	35.9
内部摩擦角 $\phi$ (°)	62.0		
引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	10.2		

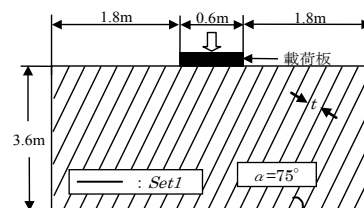


図-1 予備検討用解析モデル

ここで、 $E_s$ は割線弾性係数(MPa)、 $\Delta p$ は荷重応力増分(MPa)、 $\Delta \delta$ は変位増分(mm)、 $\nu$ はポアソン比、 $a$ は荷重板半径(mm)である。

図-2に示す解析結果より、岩盤変形試験結果と比べ高い弾性係数となることが分かった。これより、現解析モデルでは適切に現地の岩盤をモデル化できておらず、試験では確認できない潜在的な低角度割れ目等が岩盤中に発達している可能性がある。図-3に示すコアサンプルスケッチより、岩盤中には低角度の割れ目も発達していることが分かり、低角度割れ目の間隔は高角度割れ目の間隔の2倍程度であること、高角度割れ目にはほぼ直角に切られる関係にあることが分かる。以上の知見より、低角度割れ目を考慮することにより、対象岩盤特性を反映したモデル化が可能であると考えられる。また、本研究では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。ここでは、水平加速度のNS成分、EW成分のみを用いた。

## (2) 一次元波動論による応答解析

地震動は地下深部より地震動を入力する必要がある。そこで、解析モデル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-4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(加速度波形EW成分)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、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-5に一次元応答解析で算出した応答地震動 $2E_N$ の加速度波形を示している。

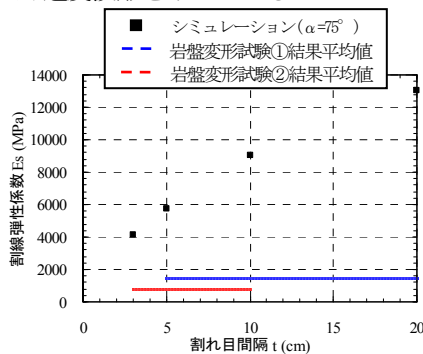


図-2 解析結果と岩盤変形試験の比較( $\alpha=75^\circ$ )

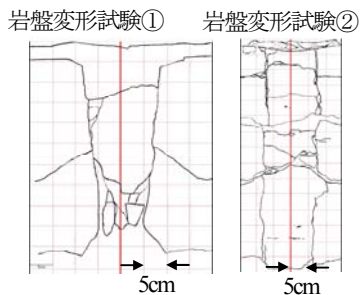


図-3 コアサンプルスケッチ

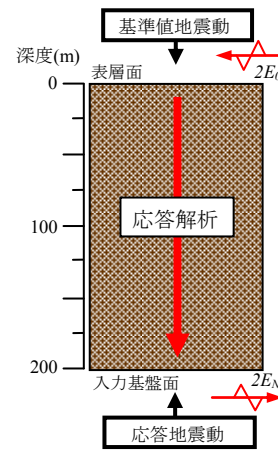


図-4 応答解析概要

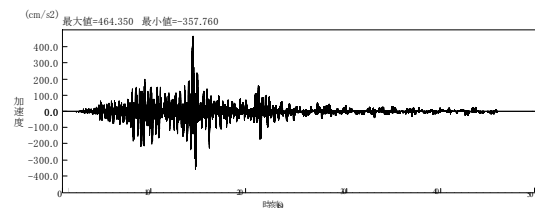


図-5 応答地震動  $2E_N$

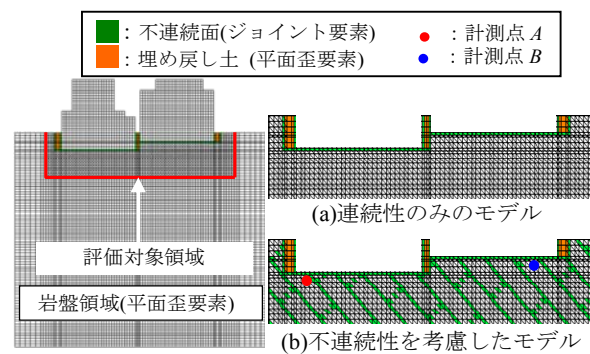


図-6 有限要素法モデル

## (3) 有限要素法モデル及び解析条件

不連続面の有無が岩盤の強度、変形特性に与える影響を明確に捉えるために、岩盤を基盤とする重要構造物として原子力建屋及びタービン建屋をモデル化し、基盤を不連続面の無い連続性のみモデル(図-6(a)参照)、不連続面を有する不連続性を考慮したモデル(図-6(b)参照)を作成した。不連続面(ジョイント要素)及び岩盤領域(平面歪要素)の特性値は表-1を基に決定した。また、埋め戻し土領域では密度 $2.00\text{g/cm}^3$ 、建屋領域では密度 $2.47\text{g/cm}^3$ とし、不連続面(ジョイント要素)幅を1.8m、主要な不連続面の傾斜角度を $45^\circ$ とした。地震動入力方法として、有限要素法モデルでは一次元波動論による応答解析により算出した応答地震動 $2E_N$ (図-5参照)をモデル基盤面に入力する。境界条件として、モデル下端の境界面を底面粘性境界とし、底面境界において逸散する波動

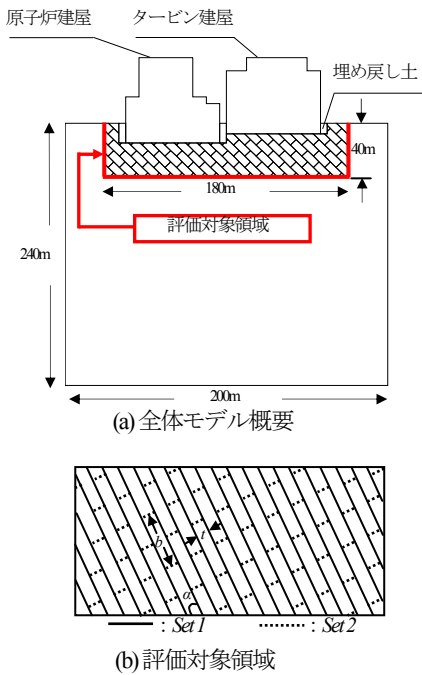


図-7 個別要素法による解析モデル

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．

#### (4) 個別要素法モデル及び解析条件

図-7に個別要素法モデルを示す．図-7(b)の評価対象領域は対象岩盤性状及び力学的特性に基づき，高角度割れ目Set 1と低角度割れ目Set 2をモデル化し，Set 1の間隔 $t$ とSet 2の間隔 $b$ の比を1:2と固定した．解析モデルは割れ目Set 1の傾斜角 $\alpha$ を75°，割れ目Set 1の間隔 $t$ を5.0mと設定したCASE1，さらにCASE1と比較するため，割れ目Set 1の傾斜角 $\alpha$ を45°，Set 1の間隔 $t$ を5.0mと設定したCASE2をモデル化した．境界条件については有限要素法モデルと同様の条件を設定し，モデル側方の両境界面で自由岩盤領域を設けた．地震動入力方法として，応答地震動 $2E_N$ (図-5参照)をモデル基礎面に入力する．

### 3. 解析結果

#### (1) 有限要素法(FEM)による動的数値シミュレーション結果

地震動入力時間50s内の各要素，接点における変位，応力の最大応答値(絶対値)を算出し，変形応力特性を評価する．まず，水平応力 $\sigma_x$ ，鉛直応力 $\sigma_y$ に着目すると

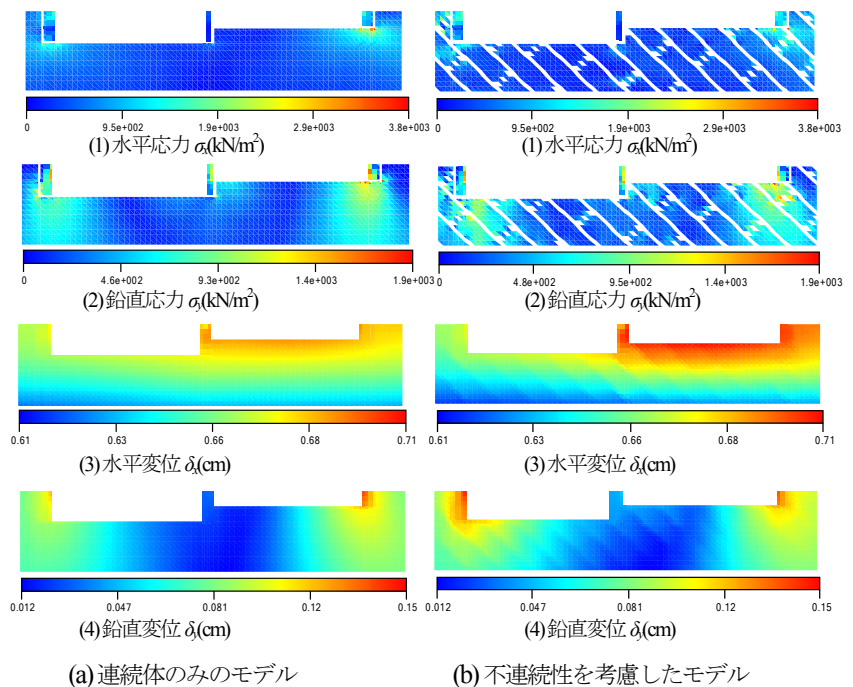


図-8 最大応答値(応力・変位特性)

図-8(a)，(b)ともに建屋両端の応力値が高い．これは，基礎岩盤が左右方向に挙動する際，水平応力 $\sigma_x$ においては水平方向挙動を抑制している両建屋側部の岩盤に圧縮荷重が加わるためであり，鉛直応力 $\sigma_y$ においては両建屋に転倒モーメントが生じるため，建屋両端に圧縮荷重，引張荷重が作用するものと推定される．また，原子炉建屋側と比較しタービン建屋右端で応力値が高いのは，基礎の深度が浅い場合では重心の位置が高くなり，水平地震力による転倒モーメントが発生しやすくなるためである．図-8(a)においてタービン建屋右端では応力集中がみられ水平応力 $\sigma_x$ では3800kN/m<sup>2</sup>，鉛直応力 $\sigma_y$ では1900kN/m<sup>2</sup>を示しており，図-8(b)と比較し応力値が高い．しかし，評価対象領域全体でみると応力値，分布特性ともに明確な差異はみられない．

次に水平相対変位 $\sigma_x$ に着目すると，図-8(a)の評価対象領域上部での水平変位は0.66~0.68cm，下部では0.61~0.63cmを示している．このように上部の変位が大きいのは地震波の増幅効果と上部構造物である両建屋と基礎岩盤との共振効果の影響と考えられる．特に後者の場合，タービン建屋では原子炉建屋と比べ基礎面を浅く設定しているため基礎岩盤との接地面が減り，建屋自体が独立して挙動する．つまり構造物における地震力の増幅効果の影響を基礎岩盤が受けやすいと考えられる．結果，基礎岩盤自体の増幅効果と上部構造物の増幅効果の相互作用により評価対象領域上部の変位が卓越したといえる．鉛直相対変位 $\sigma_y$ に着目すると，評価対象領域両端の変位は0.081~0.15cm，中央部では0.047cm以下であり，変位は両端で卓越していることが分かる．また，図-8(b)と比

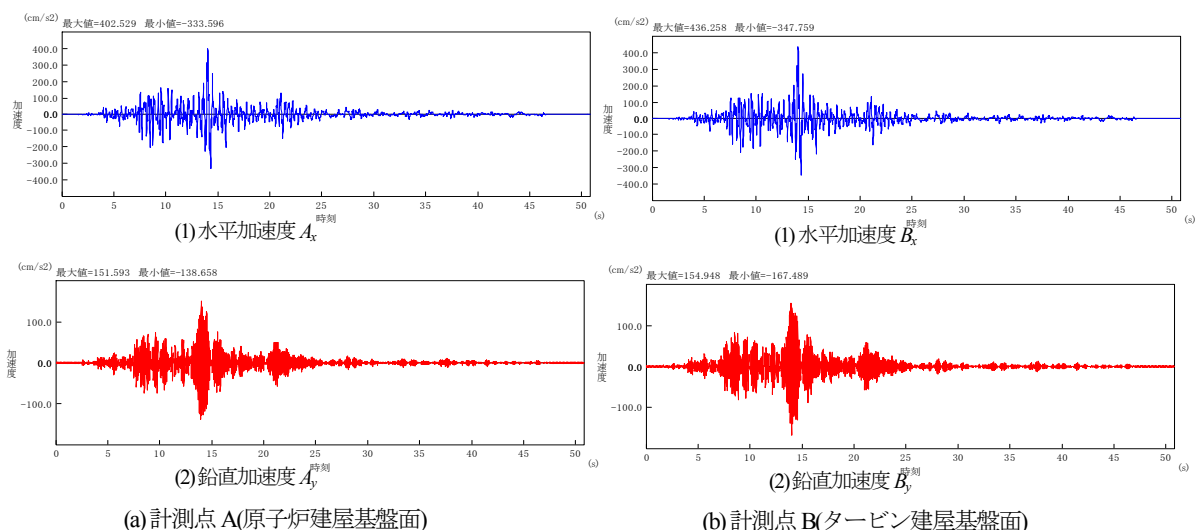


図-9 加速度波形図(計測点 A 及び計測点 B)

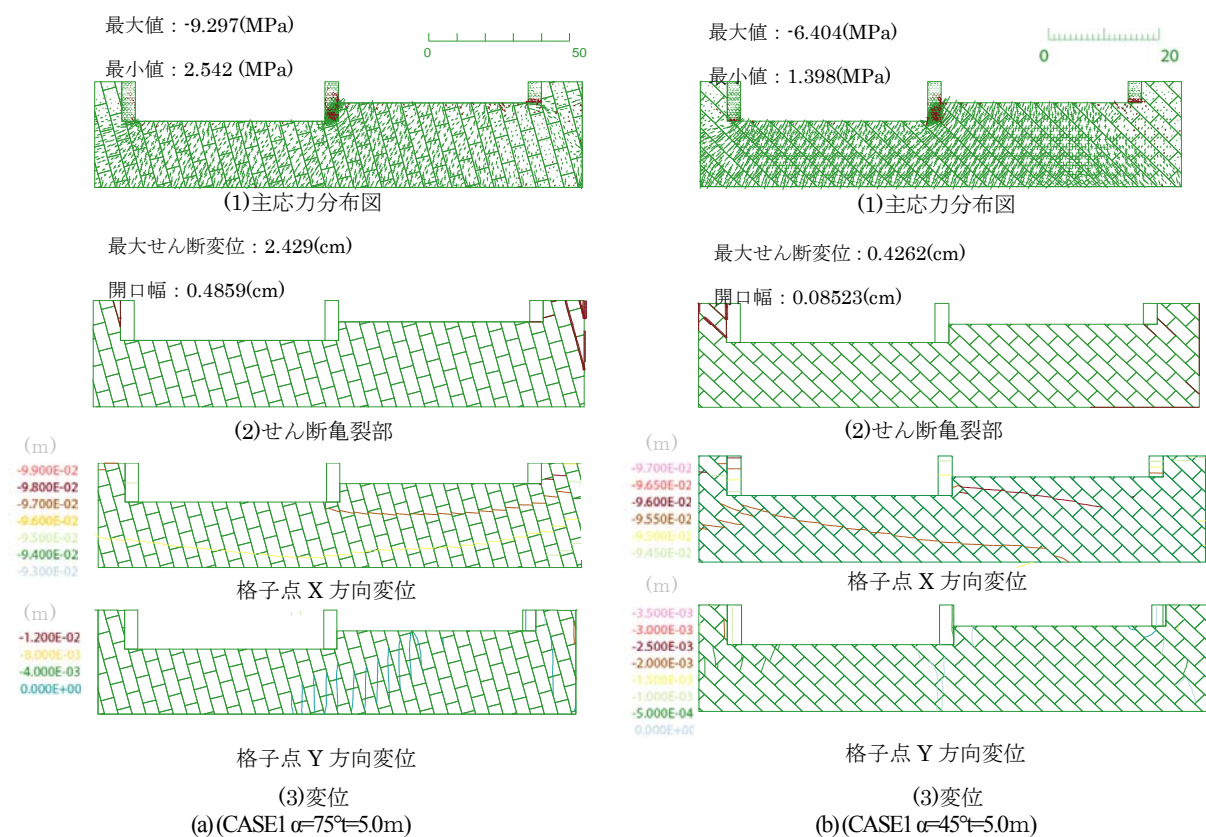


図-10 DEM 解析結果

較すると不連続性を与えたことにより変位の卓越領域が拡大しており、最大変位の増分は水平変位 $\alpha_x$ 及び鉛直変位 $\alpha_y$ ともに1.1~1.2倍程度であった。これらの結果を踏まえると、水平応力 $\sigma_x$ 、鉛直応力 $\sigma_y$ の最大応力の増分は顕著ではなく、応力特性では不連続性の有無による差異は小さい。一方、変位特性では変位の卓越した領域の拡大、最大変位の増分がみられ、不連続性の影響は顕著であるといえる。図-9は計測点A、計測点B(図-6(b)参照)の水平及び鉛直加速度波形 $A_x$ 、 $A_y$ を示す。加速度の最大

値は図-9(a)と比較し図-9(b)のほうが大きい。これは地震波が地表面に近づくほど増幅効果が高まるため建屋基盤の深度を大きく設定した原子炉建屋基盤面では増幅効果が低減されたと推測できる。また、原子炉建屋と比較しタービン建屋は基礎面が浅いため、上部構造物の増幅効果の影響を受け、増幅効果をさらに高めていると考えられる。

(2) 個別要素法 (DEM) による動的数値シミュレーション



## 結果

CASE1( $\alpha=75^\circ, t=5.0\text{m}$ ), CASE2( $\alpha=45^\circ, t=5.0\text{m}$ )の解析結果を図-10に示している。まず、変位に着目する。両結果に共通しているのは原子炉建屋下の岩盤領域で変位が小さいこと、両側方の岩盤領域で水平変位が卓越していることが挙げられる。岩盤領域の変位は図-10(a), (b)で異なり、特に埋め戻し土領域では顕著である。これは割れ目の違いによるものであると考えられる。各モデルの力学的減衰の大きさに差異が生じ任意の計測時間の地震動の振幅(加速度波形)の正負、大小が異なるため、計測時間5s時点における建屋の地震動に対する転倒モーメントも両ケースによって異なるため岩盤領域及び埋め戻し土領域に作用する荷重も異なる。結果、CASE1とCASE2で変位に差異が生じたと考えられる。

次に主応力図に着目すると、両ケースとも両側方部岩盤領域で高い応力値を示している。中央の岩盤領域では埋め戻し土領域下部を中心に円形状に応力が卓越しており、両側方部の岩盤領域では外側に広がるように高応力部が分布している。基礎岩盤を掘り下げた岩盤に水平成分のみの地震動を作用させた場合、上部構造物である建屋の基礎は岩盤に埋設された構造であるため、建屋の挙動を抑制し、接岩面に荷重が集中作用したと考えられる。最後にせん断亀裂の進展傾向に着目する。CASE1ではタービン建屋右端の埋め戻し土領域下部から不連続面に沿ってせん断亀裂が進展し、CASE2では左端部でせん断亀裂が進展しており、割れ目Set 1の傾斜角 $\alpha$ の違いによりせん断亀裂の進展傾向が異なる。これは割れ目Set 1が高角度( $\alpha=75^\circ$ )の場合では、上部構造物の自重及び転倒モーメントによる鉛直荷重が主にせん断亀裂を進展させ、割れ目が $\alpha=45^\circ$ の場合では、 $\alpha=75^\circ$ の場合に比べて亀裂の幅や最大せん断変位が線断面で抑制され、小さくなることがわかった。またこれより、高角度になるほうが亀裂の幅や長さが大きくなることが明らかになった。以上の

結果を踏まえると、Set 1の傾斜角 $\alpha$ 及び間隔 $t$ は、せん断亀裂領域や進展傾向に大きな影響を及ぼすといえる。

## 4. 結論

有限要素法(FEM)による動的数値シミュレーション結果より、岩盤中の不連続性の有無による応力変形特性の変化を捉えることができた。さらに、個別要素法(DEM)では不連続面の傾斜角及び分布密度がせん断亀裂の進展傾向等の岩盤強度に与える影響を把握することができた。今後、有限要素法解析と同等の結果が得られる適切な条件設定が可能であるかを異なる解析モデルを用いて検証し、動的有限要素解析では評価できない現象に着目して動的個別要素解析での評価を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 防災科学研究所:強震ネットワークK-NET, 2007.
- 2) 気象庁:「平成19年(2007年)新潟県中越沖地震」の特集, 2007.
- 3) 社団法人日本材料学会:ロックメカニクス(岩盤力学).2002.
- 4) 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.
- 5) 産総研地質調査総合センター:平成19年(2007)新潟県中越沖地震の地質学的背景, 2007.

# EVALUATION OF DEFORMATION AND STRENGTH BEHAVIORS OF JOINTED ROCK MASS BY CONDUCTING DYNAMIC SIMULATIONS

Yujing JIANG, Bo LI, Keichi YOSHITA and Yoshihiko TANABASHI

It is an important issue to develop advanced survey and design techniques for the construction of important structures such as nuclear power plant due to the frequent earthquake activities in Japan. Therefore, assessing the influences of the deformability of foundation rock on the rock structure is important especially when the seismic waves exist. In this study, the response of jointed rock mass subjected to seismic waves was evaluated by using Finite Element Method (FEM) and Distinct Element Method (DEM). The strength and deformation behaviors of rock mass were assessed by comparing the results of these two methods, which can be served as a approach to choose the construction site.