

### 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

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

#### 1.はじめに

我が国は地震国であるため、原子力発電所等の重要構造物を設置、稼動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。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.数値シミュレーションの概要

##### 2.1 対象岩盤及び対象地震動

研究対象岩盤は高角度割れ目が卓越している。また、岩盤中には低角度の割れ目が発達しており、低角度割れ目の間隔は高角度割れ目の間隔の2倍であること、高角度割れ目にほぼ直角に切られる関係にある。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。また、新潟県中越沖地震を対象地震動とし、NIG019小千谷<sup>1)</sup>の観測地震動を選定した。ここでは水平加速度成分のみを用いた。

表-1 力学特性値  
(a) 岩盤基質部

項目	値
密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.66
弾性係数 $E$ (MPa)	$7.1 \times 10^4$
ポアソン比	0.18
粘着力 $c$ (MPa)	22.3
内部摩擦角 (°)	62.0
引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	10.2

(b) 割れ目

項目	値
垂直剛性 $K_n$ (MPa/mm)	31.78
せん断剛性 $K_s$ (MPa/mm)	3.22
粘着力 $c$ (MPa)	0.027
内部摩擦角 (°)	35.9

##### 2.2 次元波動論による応答解析

解析モデルに入力する地震動を算出するために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。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。図-2 に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。

##### 2.3 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炉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-3(a))、不連続面を有する不連続性を考慮したモデル(図-3(b))を作成した。地震動入力方法として、有限要素法モデルでは応答地震動  $2E_N$  (図-2) をモデル基盤面に入力する。

##### 2.4 個別要素法モデル及び解析条件

図-4 に個別要素法モデルを示す。図-4(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 6.0m と設定した。個別要素法モデルでは式(1)を式(2)に適用させ、速度をせん断応力  $\sigma_s$  に変換した上で、地震動をモデル基盤面に入力する。

$$v_s = \sin(2.0\pi f T') V \quad (1)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \quad (2)$$

ここで、 $v_s$  はせん断方向媒体速度(m/s)、

$V$  は振幅(m/s)、 $f$  は振動数(Hz)、 $T'$  は波形入力時間(s)、 $C_s$  は S 波伝播速度(m/s)、 $\rho$  は岩盤密度(kg/m<sup>3</sup>)である。

キーワード 地震、節理、有限要素法(FEM)、個別要素法(DEM)、強度・変形特性

連絡先 長崎大学大学院 生産科学研究科 〒852-8521 長崎市文教町1番14号 E-mail:jiang@civil.nagasaki-u.ac.jp

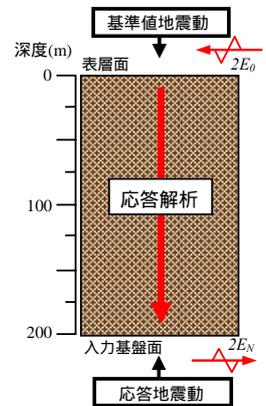


図-1 応答解析概要

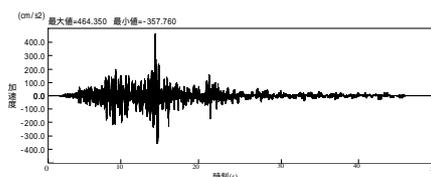


図-2 応答地震動  $2E_N$

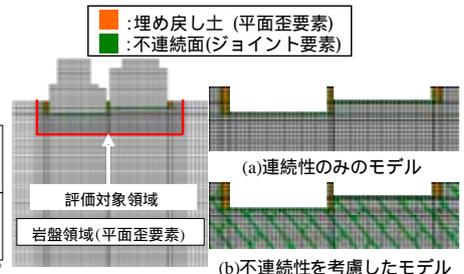


図-3 有限要素法モデル

3. FEM と DEM によるシミュレーション結果の比較

3.1 FEM 解析結果

変位、応力の最大応答値(絶対値)を算出したものを図-5 に示す . 水平応力  $\sigma_x$ 、鉛直応力  $\sigma_y$  に着目すると建屋両端の応力値が高いことが分かる . これは、水平応力  $\sigma_x$  においては水平方向拳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る . また、不連続性の有無による影響として、評価対象領域全体では応力値、分布特性ともに明確な差異はみられないことが分かった . 次に水平相対変位  $\delta_x$  に着目すると、このように上部の変位が大きいのは基礎岩盤と上部構造物における地震波の増幅効果の影響が考えられる . 鉛直相対変位  $\delta_y$  に着目すると、変位は両端で卓越していることが分かる . また、不連続性を与えたことにより高変位領域は拡大しており、最大変位の増分は水平変位  $\delta_x$  及び鉛直変位  $\delta_y$  ともに 1.1~1.2 倍程度であった . これより不連続性の有無による影響は顕著であるといえる .

3.2 DEM 解析結果

図-6 に解析結果を示す . 変位ベクトルに着目すると、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 . 主応力図に着目すると、中央及び両端部で高い応力値を示している . これは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、建屋の基礎は岩盤に埋設された構造であるため、建屋の拳動を抑制し、接岩面に荷重が集中作用したと考えられる . せん断変位に着目すると、タービン建屋右端のから不連続面に沿ってせん断変位が進展している . これは割れ目 *Set1* が高角度の場合では建屋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変位を進展させたといえる . 以上の結果を踏まえると、*Set1* の傾斜角  $\alpha$  及び間隔  $t$  は、せん断変位の進展傾向に大きな影響を及ぼすと考えられる .

3.3 解析結果の比較

FEM 及び DEM の解析結果を比較する FEM と DEM ではモデルや解析条件に違いはあるが、応力特性においては高応力領域がほぼ一致する傾向がみられた . しかし、変位特性に関してはタービン建屋下の岩盤領域で明確な差異が生じていることが分かる . 現段階では歪の少ない硬岩をモデル化した場合、不連続性を適確に再現できる DEM のほうが再現性は高いと推測できるが、さらに模型による振動実験を実施し、解析結果の妥当性を検証する必要があると考える .

4. おわりに

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、不連続面の傾斜角及び分布密度がせん断変位の進展傾向等の岩盤強度に与える影響を把握できた . FEM、DEM において同等の結果が得られる条件設定が可能であることを異なる解析モデルを用いて検証する必要がある .

【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.2007.

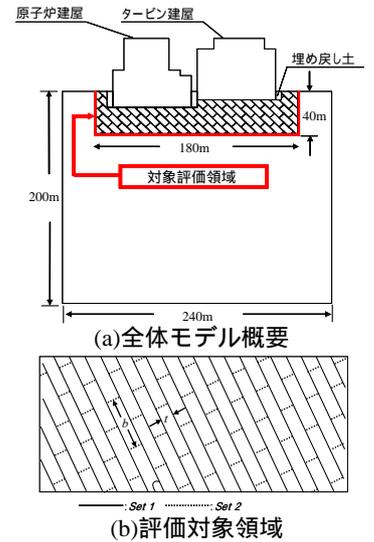


図-4 個別要素法モデル  
表-3 解析条件

項目	値
振動数 $f$ (Hz)	1.47
振幅 $V$ (m/s)	0.985
計測時間 $T$ (s)	5.0
波形入力時間 $T(t)$	0.68
$t$ (m)	6.0
傾斜角 (°)	75

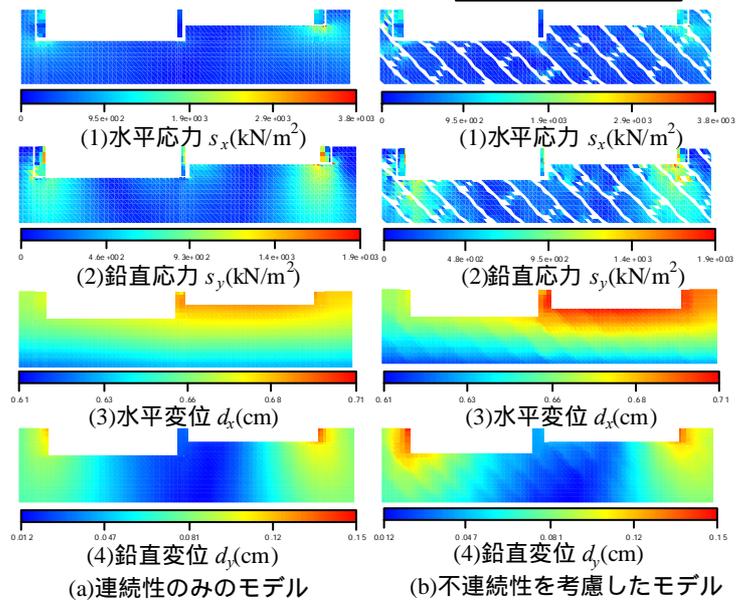


図-5 最大応答値(応力・変位特性)

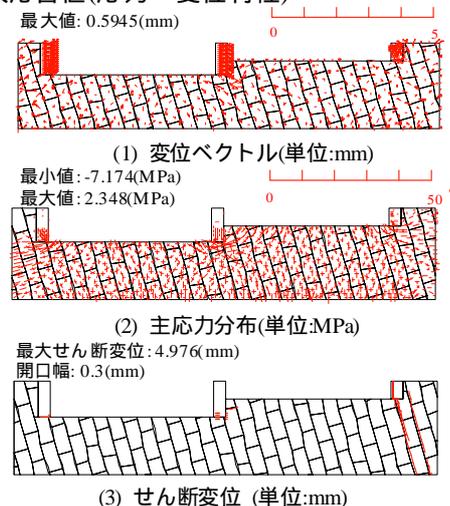


図-6 解析結果