

節理を有する基礎岩盤の動的解析による変形特性の評価

長崎大学大学院 学生会員 ○矢野孝樹 長崎大学大学院 学生会員 李 博
 長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静 長崎大学工学部 フェロー 棚橋由彦

1. はじめに

我が国は世界有数の地震国であるため、原子力発電所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る。特に基礎岩盤は想定されるいかなる地震力に対しても安全性を確保するために、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。本研究は、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)による地震動を模擬した動的数値シミュレーションを用いて、対象岩盤の応力、変形特性を比較検討し、各手法による差異を明らかにすることが目的である。

2. 対象岩盤及び地震動の概要

対象岩盤は、高角度の割れ目が卓越している。また、低角度の割れ目も発達しており、間隔は高角度割れ目の間隔の約2倍、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、割れ目の力学特性を表-1(a)、(b)に示す。また、新潟県中越沖地震を対象地震とし、観測地点NIG019 小千谷を選定した。

3. 一次元応答解析

解析モデルに入力する地震動を算出するため、一次元応答解析を用いた。図-1に応答解析概要図を示す。基準値地震動 $2E_0$ とは対象岩盤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、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EW成分を示す。

4. 有限要素法による動的解析

4.1. 解析モデルと解析ケース

図-3に示す有限要素モデルとして、図-3(a)の岩盤モデルと図-3(b)の不連続性岩盤モデルを作成し、ジョイント要素幅を0.35m、傾斜角度を 45° とした。地震動入力方法として、有限要素モデルでは図-2の加速度波形をモデル基盤面に入力する。

4.2. 解析結果

図-4に有限要素モデル解析結果(岩盤モデル)を示す。図-4(a)の水平応力 σ_x と図-4(b)の鉛直応力 σ_y に着目すると埋め戻し土周辺の岩盤部が高応力領域となっている。図-4(c)の水平変位 δ_x に着目すると、左側方から下方全体にかけては変位が卓越

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 ρ (g/cm ³)	2.66	垂直剛性 K_n (MPa/mm)	31.78
弾性係数 E (MPa)	7.1×10^4	せん断剛性 K_s (MPa/mm)	3.22
静ポアソン比 ν	0.18	粘着力 c (MPa)	0.027
粘着力 c (MPa)	22.3	内部摩擦角 ϕ (°)	35.9
内部摩擦角 ϕ (°)	62.0		
引張強度 σ_t (MPa)	10.2		

表-2 岩盤特性値

項目	値
密度 ρ (g/cm ³)	2.66
S波速度 V_s (m/s)	3363
減衰率 h (%)	3.0

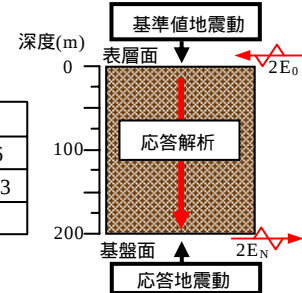


図-1 応答解析概要図

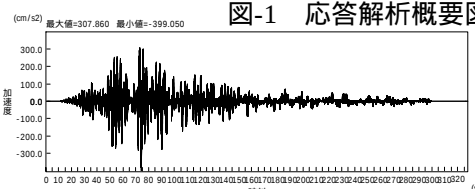


図-2 加速度波形 EW 成分

建屋モデル(平面歪要素) 不連続面(ジョイント要素)
 埋め戻し土(平面歪要素)

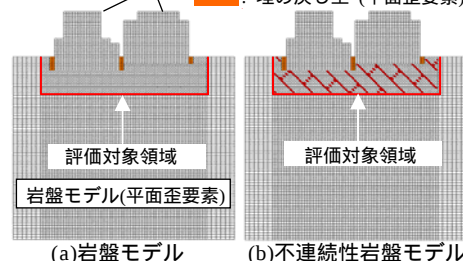


図-3 有限要素モデル

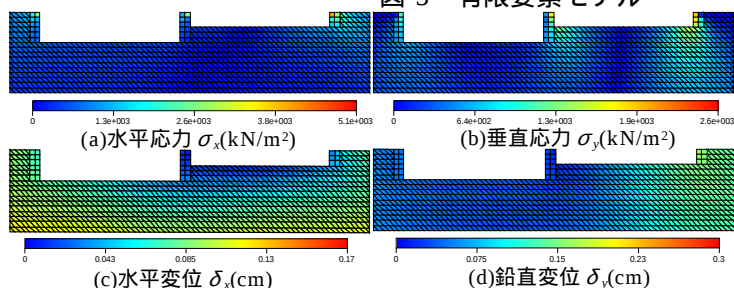


図-4 有限要素モデル解析結果(岩盤モデル)

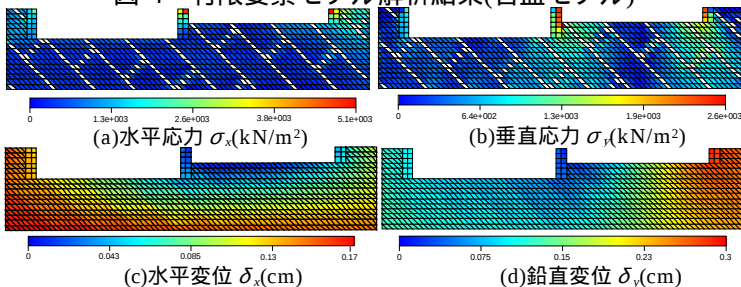


図-5 有限要素モデル解析結果(不連続性岩盤モデル)

している．図-4(d)の鉛直変位 δ_y では右側方に変位が卓越している．図-6 に有限要素モデル解析結果(不連続性岩盤モデル)を示す．図-4 と比較し図-4(a)、図-4(b)の応力、図-4(c)、図-4(d)の変位ともに伝達範囲が拡大している．最大応力及び変位の増分は 1.3 倍程度となり、不連続面の存在が応力伝達範囲及び応力、変位増分に影響を及ぼすことは明らかである．

5. 個別要素法による動的解析

5.1. 解析モデルと解析ケース

図-6 に個別要素モデルを示す．図-6(b)の評価対象領域は対象岩盤性状に基づき、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_{Set1} と Set 2 の間隔 b_{Set2} の比を 1:2 と固定した．地震動入力方法として、個別要素モデルでは式(1)を式(2)に適用させ、速度を応力 σ_s に変換し地震動をモデル基盤面に入力する．

$$v_s = \sin(2.0\pi f T) A \quad (1)$$

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

ここで、 v_s はせん断方向媒体速度(m/s)、 A 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)、 ρ は岩盤密度(kg/m^3)である．個別要素モデルの解析条件を表-3 に示す．ただし、振幅 A 及び振動数 f は図-2 の加速度波形から算出した最大速度、卓越周期より決定した．

5.2. 解析結果

図-7 に個別要素モデル解析結果を示す．図-7(a)の応力ベクトルに着目すると、埋め戻し土底部分を中心に鉛直下方が高応力領域となっている．図-7(b)の変位ベクトルでは、タービン建屋底部で鉛直方向変位が卓越している．水平方向変位は大小にばらつきがあるものの、左側方の埋め戻し土部分から下方全体に渡り卓越しており、特に埋め戻し土部の変位が非常に大きいことがわかる．図-7(c)のせん断破壊部に着目すると、右方部の破壊はジョイント部の傾斜角に沿い下方に、左方部は上方に進展しており、建屋両端での破壊進展傾向が異なる．これより、傾斜角 α 及び t_{Set1} が変われば、破壊領域や進展傾向も変化することが推測される．

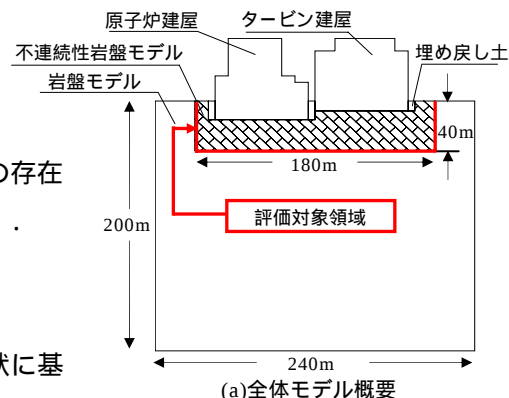
6. 各解析手法による差異

個別要素モデルと有限要素モデルを比較し、埋め戻し土部の変位に大きな差異がみられた．これは、有限要素モデルでは、ジョイント要素により不連続性を与えても各要素は結合された連続体として挙動するため、歪の小さい硬質岩盤を模擬した動的解析では、地震動による大変形を再現できないためであると考えられる．また、有限要素モデルと異なり、個別要素モデルではジョイント部で区切られた各要素が独立して挙動するため、せん断破壊の進展傾向を把握できる利点を有する．対象岩盤も含め自然岩盤は節理により区切られた岩盤要素で構成されているため、地震動解析を実施する場合、個別要素法を用いた動的解析の優位性は高いと考えられる．

7. おわりに

不連続性の存在が基礎岩盤における応力の伝達範囲や変位増分に影響を及ぼすことが明らかになった．また、個別要素法による動的解析結果から有限要素法との差異を明らかにした．今後は、対象岩盤の不連続特性を再現した模型実験を実施し、節理の発達した岩盤の動的解析における個別要素法の優位性を検証していきたい．

【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.



(a)全体モデル概要



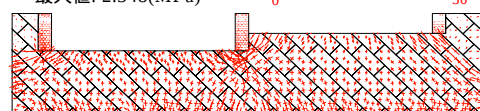
— : Set 1 : Set 2

(b)評価対象領域

図-6 個別要素モデル
表-3 解析条件(個別要素モデル)

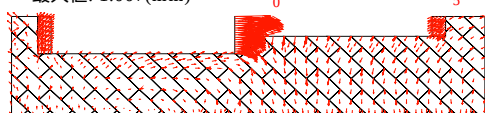
項目	値
振動数 f (Hz)	1.47
振幅 A (m/s)	0.958
波形入力時間 T (s)	0.68
計測時間 T' (s)	5.0
t_{Set1} (m)	6.0
傾斜角 α (°)	45

最小値: -7.174(MPa)
最大値: 2.348(MPa)



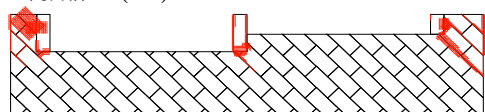
(a)主応力分布(単位:MPa)

最大値: 1.007(mm)



(b)変位ベクトル(単位:mm)

最大せん断変位: 4.976(mm)
開口幅: 0.3(mm)



(c)せん断破壊部(単位:mm)

図-7 個別要素モデル解析結果