

## マトリックス地盤ばねを用いた SR モデルの検討

○ 藪内 耕一\*<sup>1</sup> 福島 泰明\*<sup>1</sup>  
小磯 利博\*<sup>2</sup> 岩本 賢治\*<sup>2</sup>

キーワード：地震応答解析 接地率 浮上り非線形 SR モデル

### 1. はじめに

東北地方太平洋沖地震後、高層建物や原子力分野において、設計に用いる地震動の見直しが行われており、これまでよりも大きな地震動に対して新規設計や既設建物の検討が必要になっている。

本報告は、大入力に対して建物の基礎に浮上りが生じた場合、基礎の接地面積比（以下、接地率という）が 50% を下回る場合の地震応答解析モデルについて検討したものである。

### 2. 解析モデルの概要

原子力発電所建物の地震応答解析に用いる解析モデルとしては、原子力発電所耐震設計技術規程<sup>1)</sup>において、接地率が 65% 以上の場合は、浮上り非線形スウェイ・ロッキング (SR) モデル（回転ばねに非線形を考慮）、接地率が 50% 以上では誘発上下動を考慮した SR モデル（回転ばねに加え接地率に応じて変化する鉛直及び回転・鉛直連成ばねを考慮したモデル）を用いることとされている。

接地率が 50% 未満の場合は、特別な検討が要求されているが、具体的な規定は示されていない。接地率が 50% 未満に適用できる解析手法としては、下記の解析モデルが提案されているが、これらの解析手法には、それぞれ課題がある。

- ① 質点系建物+Joint 要素+地盤 3 次元 FEM<sup>2), 3)</sup>
- ② 質点系建物（基礎版離散化）+Joint 要素+ウインクラールばね<sup>4)</sup>

①の FEM モデルは、文献<sup>3)</sup>において接地率が小さい範囲においても「時間領域のグリーン関数法<sup>5)</sup>」と建物の最大加速度と加速度応答スペクトルが合致している。しかし、解析時間が膨大であること、FEM 解析領域の設定、境界条件の設定の他、基準地震動が地中下方で規定されている場合の地盤部の減衰の設定方法に課題がある。

②の基礎版離散化モデルは、①のモデルに比べ大幅に解析時間を短縮することが可能である。しかし、地盤ばね及びダンパを複素地盤ばねから単位面積当たりの鉛直ばねに離散化する際、回転地盤ばねと鉛直地盤ばねでは単位面積あたりの鉛直ばねの値が異なる。そのため、水平応答を主要な応答と考え回転ばねから算出したものを用いることから、鉛直方向の剛性及び減衰が鉛直動単独の場合とは異なることになる。

本報告で提案する解析モデルは、②の基礎版離散化モデルの地盤ばね部の取扱いを改良したものである。

ウインクラールばねに変えて、基礎版を分割した小領域の加振解から基礎版節点位置間の複素地盤剛性マトリックスを求める。時間領域での応答解析では、剛性マトリックス、減衰係数マトリックスに変換し用いる。具体的には支持地盤を実状に応じて成層性を考慮可能な薄層法<sup>6)</sup>等により、複素地盤剛性マトリックスばねを算出する。

半無限均質支持地盤の場合、鉛直方向変位一様でのばね値は剛基礎の振動アドミッタンスによる集約鉛直ばねに一致し、基礎版回転変位一様でのばね値は剛基礎の振動アドミッタンスによる集約回転ばねに一致する。

剛性マトリックスは、振動数が低い領域での複素剛性の実数部 ( $K_r$ ) 最大値を採用し、減衰係数マトリックスは、SR モデルの地盤ばねの減衰係数(C)を算出するのと同様に、複素地盤剛性マトリックスの虚数部 ( $K_i$ ) を建物—地盤相互作用の固有 1 次角振動数 ( $\omega_1=2\pi f_1$ ) で除して減衰係数(C)を算出する。

### 3. 検討条件

#### 1) 解析モデル種類

マトリックス地盤ばねを用いた SR モデル（以下、拡張 SR モデルという）の妥当性を確認するため、以下の解析モデルにより、同一条件での解析を実施し検討する。

- a. 時間領域のグリーン関数法（基礎分割 20×20）
- b. 地盤 3 次元 FEM（基礎分割 20×20）D:建物長さ  
加振方向：5D、直交方向 2.5D、深さ：2D  
鉛直方向要素分割：20Hz 透過厚さ
- c. 拡張 SR モデル（基礎分割 20）

#### 2) 建物モデル及び支持地盤

支持地盤はせん断波速度 ( $V_s$ ) が 700m/s の半無限均一地盤とし、3 次元 FEM の概要及び地盤定数を、図-1 に示す。

対象建物は、支持地盤上に埋込なしで設置し 80m×80m の平面、重心高さ 26m の建物とし、基礎と上部建物の 2 質点にモデル化する。拡張 SR モデル及び建物モデルの概要を図-2 に示す。なお、建屋は弾性とする。

#### 3) 検討に用いる地震動

検討に用いる地震動は、ランダム位相で作成した告示<sup>7)</sup>の極めて稀に発生する地震動に適合した模擬地震波を最

大加速度  $100\text{cm/s}^2$  に規準化して用いる。地震開始から主要動の  $50\text{s}$  を解析区間とする。入力加速度のレベルに合わせて係数倍して  $2000\text{cm/s}^2$  まで用いる。 $100\text{cm/s}^2$  で規準化した入力動の加速度波形及び加速度応答スペクトルを図-3に示す。なお3次元 FEM に用いる地震動は、地表において定義された入力動を地盤解析モデル基盤 (G.L.-160m) へ引き下げた地震波 (30Hz 以上をカット) とし、モデル下端に入力する。地表位置で入力動の再現性を確認した加速度応答波のスペクトルを図-3に合わせて示している。

#### 4) 振動モデルの減衰

3つの解析モデルの建物部の減衰は、ひずみエネルギー比例型減衰とする。なお、3次元 FEM の場合は、地盤部を内部粘性減衰とし、建物部は文献<sup>8)</sup>に基づき SR モデルから算出したひずみエネルギー比例型減衰マトリックスを用いることで建屋部をひずみエネルギー比例型減衰として取り扱うことで、他のモデルと等価な減衰としている。

### 4. 検討結果

#### 1) 解析時間

表-1に3次元 FEM と拡張 SR モデルの解析時間を示す。3次元 FEM モデルでは入力の増加により浮上り範囲が大きくなるため多くの解析時間が必要となる。一方、拡張 SR モデルでは地盤部分の自由度が少なく、浮上り判定のばねの個数も地盤 FEM の  $1/2$  乗と少ないため拡張 SR モデルは3次元 FEM の  $1/1000\sim 1/2000$  の解析時間となる。

#### 2) 上部建屋最大応答加速度

図-4に最大応答水平加速度、図-5に最大応答鉛直加速度を、3モデルを合わせて示す。最大水平応答加速度は、3モデルとも  $800\text{cm/s}^2\sim 1900\text{cm/s}^2$  入力に対し直線的に増加しており、モデル間での応答の差は小さい。最大鉛直応答加速度は、入力の増加により下に凸状に増加しているがモデル間での差は小さい。下に凸状に増加するのは入力の増加に伴い基礎が浮き上がるため急激に誘発上下動が生じることによる。

#### 3) 接地率

図-6に最大入力加速度と最小接地率の関係を、3モデルを合わせて示す。 $800\text{cm/s}^2\sim 1700\text{cm/s}^2$  入力に対し、最小接地率 30%程度までは、3モデルとも、ほぼ一致している。拡張 SR モデルについては  $1800\text{cm/s}^2$  入力についても解析し、接地率が 20%程度となっており、 $1700\text{cm/s}^2\sim 1900\text{cm/s}^2$  のグリーン関数法、3次元 FEM モデルによる直線近似よりやや小さい傾向がみられる。

図-7に  $1700\text{cm/s}^2$  入力時の3モデルの接地率の経時変化を示す。細部を比較すると若干差異があるが最大値発生時刻はいずれも  $8.0\text{s}$  近傍で発生しており接地率の値もほぼ一致している。

#### 4) 加速度応答スペクトル

図-8にほとんど浮上りがない  $800\text{cm/s}^2$  入力時と接地率が約 30%の  $1700\text{cm/s}^2$  入力時の最大応答加速度スペクトル ( $h=0.05$ ) を、3モデル重ねて示す。ここで、地盤3次元 FEM の結果は、20Hz 透過の地盤分割を採用しているため 20Hz より高振動数 ( $0.05\text{s}$  より短周期) は示していない。

水平応答は、入力レベルに関わらずよく一致しており、拡張 SR モデルが若干大きくなっている。

鉛直応答のスペクトルは、 $1700\text{cm/s}^2$  では接地率が小さいためいずれも誘発上下動による水平の 2 倍振動数の  $0.15\text{s}$  から  $0.06\text{s}$  に基礎版が浮上りからの再接地時の振動によるピークが見られる。また、拡張 SR モデルの方が他の方法より応答がやや大きい評価となっている。

### 5. まとめ

地震時の建物の接地率が 50%を下回る大入力時の地震応答解析モデルとして、離散化した基礎版下に Joint 要素を介してマトリックス地盤ばねを設けた拡張 SR モデルを提案した。

拡張 SR モデルによる解析結果は、時間領域のグリーン関数法、地盤3次元 FEM による解析結果と接地率が 30%~20%まで良く対応しており、接地率の小さな範囲の解析モデルとして採用できると考えられる。

今後は、埋込を有する建物に本モデルを適用できるよう改良する予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC-2008, 日本電気協会, 2008
- 2) Nakamura, N. et al. : An Estimation Method for Basemat Uplift Behavior of NPP Buildings, SMiRT18, K04/8, pp. 3105-3115, 2005
- 3) 中村 尚弘, 他 : Green 関数法と地盤 FEM モデルによる大地震時の建物の浮上り挙動の評価, 第 63 回理論応用力学講演会, GS04-02-01, 2014 年 9 月
- 4) 今村 晃, 他 : 浮上りを考慮した構造物の大地震入力時非線形挙動に関する研究 (その 1~その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1255~1262, 2013 年 8 月
- 5) 下村 幸男 : 基礎の浮き上りを考慮した構造物と地盤の動的相互作用に関する研究, 日本大学 学位論文, 昭和 63 年 9 月
- 6) Kausel, E. and Peek, R. : Dynamic Loads in Interior of a Layered Stratum, An Explicit Solution, BSSA, Vol.72, No.5, PP.1459-1481, 1982
- 7) 平成 12 年建設省告示第 1461 号 超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件
- 8) 小磯 利博, 他 : 局部モードに任意の減衰定数を規定した時刻歴応答解析法 : その 1: 減衰行列算定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 259-260, 2010 年 9 月

\*1 鹿島建設原子力部

\*2 鹿島建設技術研究所

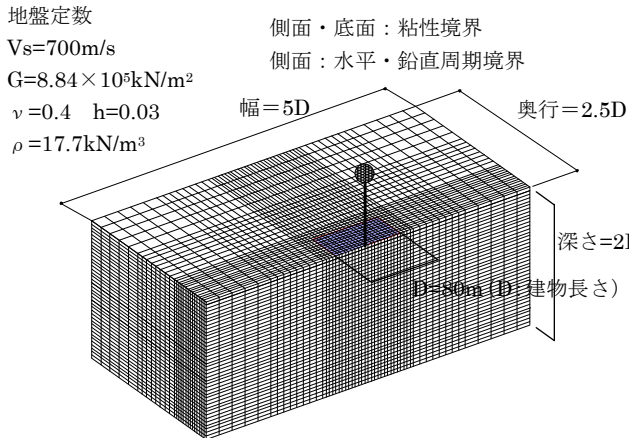


図-1 地盤3次元FEMの概要と地盤定数

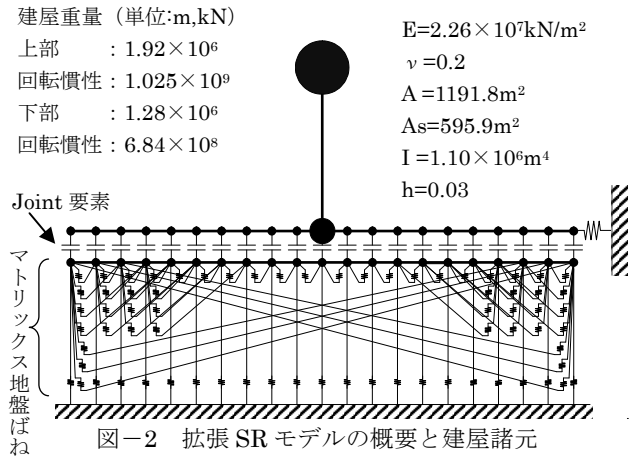


図-2 拡張SRモデルの概要と建屋諸元

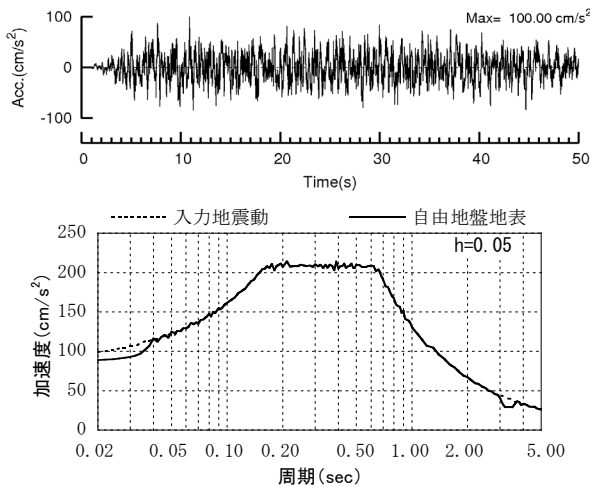


図-3 検討用入力地震動

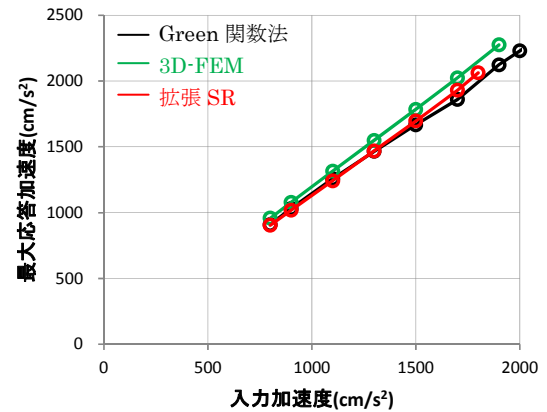


図-4 水平最大応答加速度(建屋部)

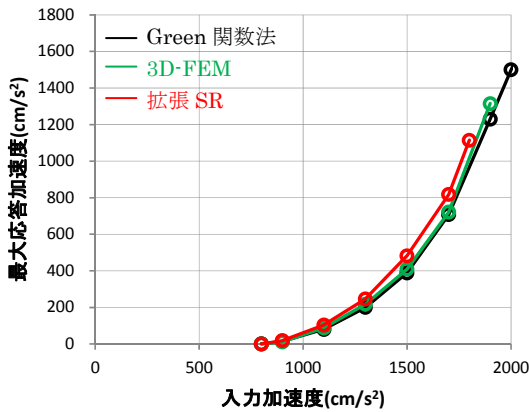


図-5 鉛直最大応答加速度(建屋部)

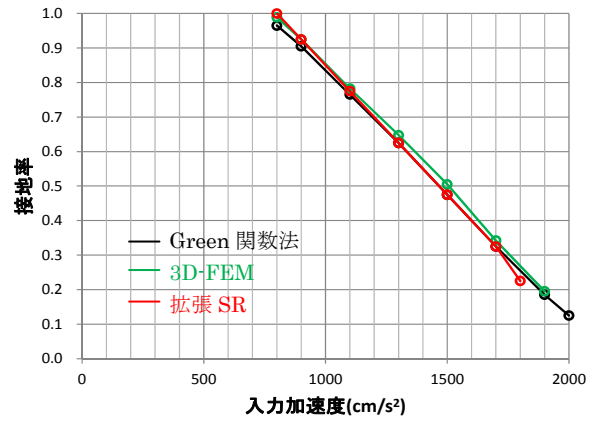


図-6 入力地震動と接地率の関係

表-1 3次元 FEM と拡張 SR モデルの解析時間の比較

	3D-FEM	拡張SR
CPU	Intel Xeon 3.10GHz 4 thread	Intel Xeon 3.30GHz 1 thread
OS	64bit Windows 7	64bit Windows Server 2008
時間刻み	0.01sを100分割	0.01sを20分割
800Gal入力時解析時間	52h34m53s	3m07s
1700Gal入力時解析時間	120h08m15s	3m06s

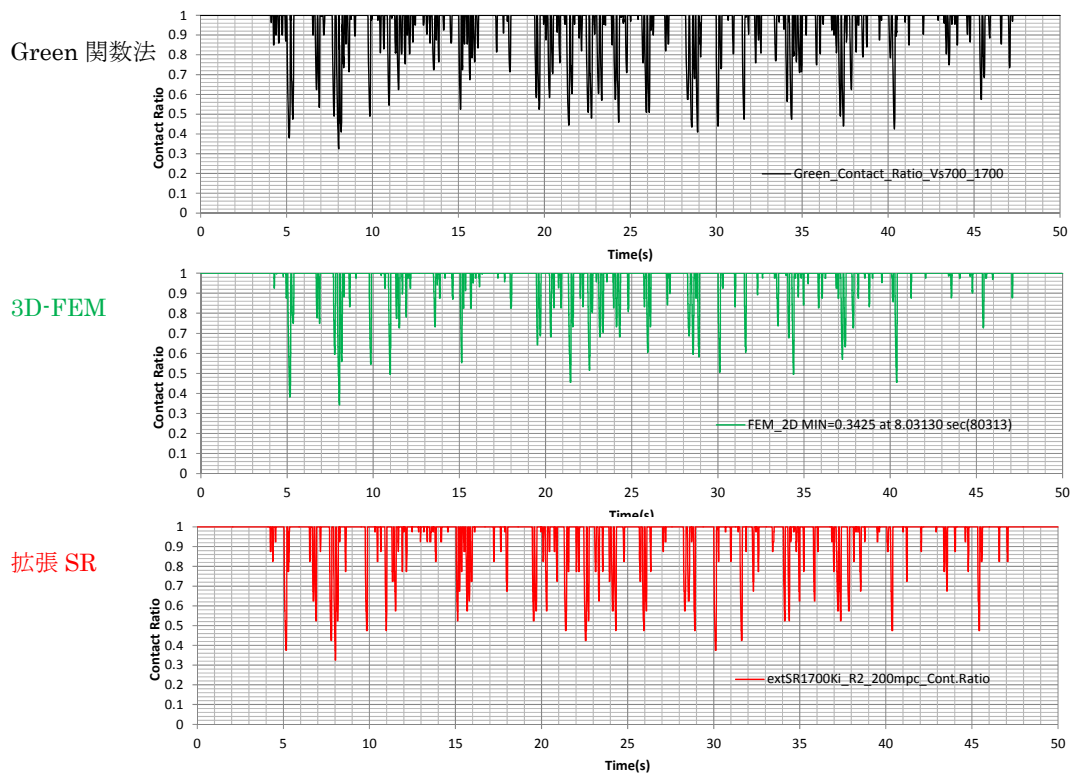


図-7 接地率の経時変化(1700cm/s<sup>2</sup>入力)

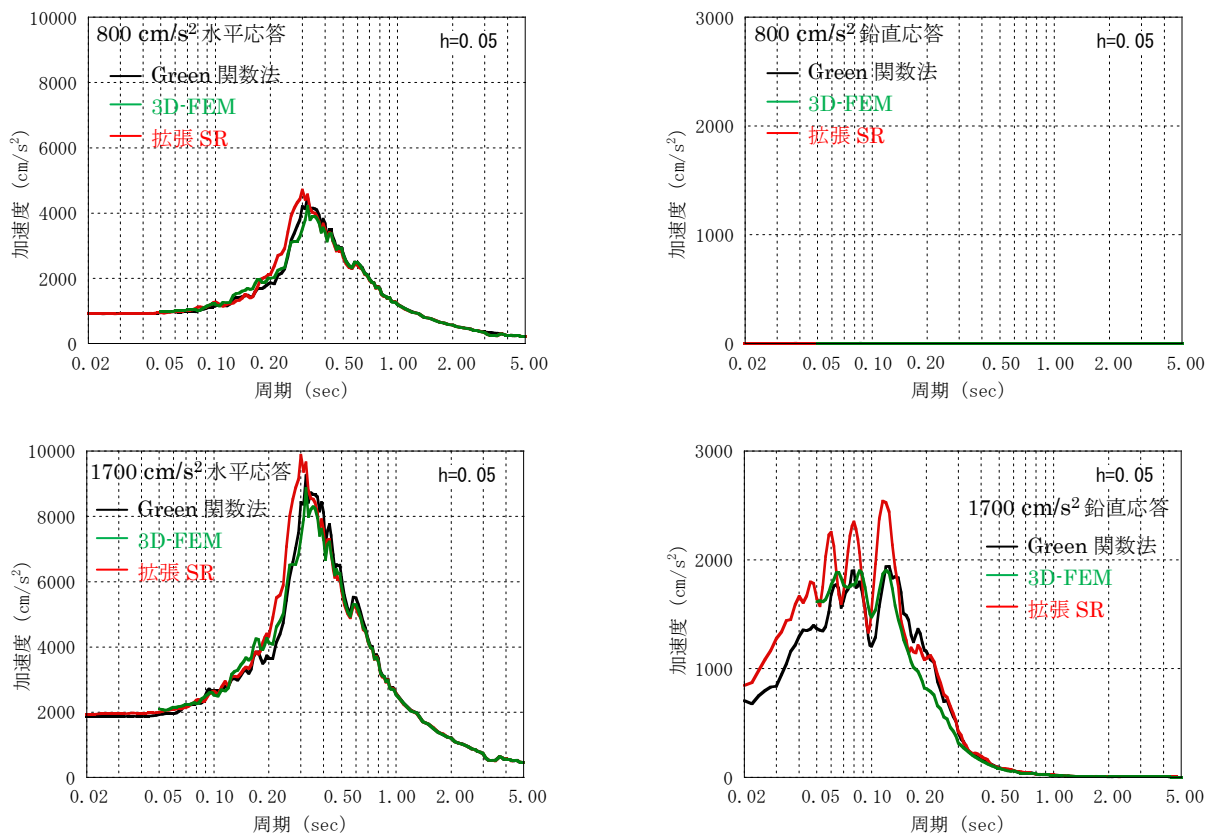


図-8 加速度応答スペクトル(800cm/s<sup>2</sup>入力、1700cm/s<sup>2</sup>入力 建屋応答)