

柏崎刈羽原子力発電所における2007年新潟県中越沖地震の強震動特性 -2次元FEMによる非線形強震動シミュレーション-

Strong ground motions during the 2007 Niigataken Chuetsu-oki earthquake in Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant -Nonlinear simulation of strong ground motions using a 2-D finite element method-

佐口 浩一郎¹⁾, 倉橋 奨²⁾, 正木 和明²⁾, 入倉 孝次郎²⁾
Koichiro Saguchi¹⁾, Susumu Kurahashi²⁾, Kazuaki Masaki²⁾, Kojiro Irikura²⁾

1) 株式会社日本アムスコ, 2) 愛知工業大学
1) Nihon Emsco Co., Ltd, 2) Aich Institute of Technology

1. はじめに

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震の際、震源域の近傍(震央距離16km)に位置する東京電力柏崎刈羽原子力発電所構内においては非常に大きな地震動が観測され、特に図1に示すように1号機の地下255m(G10)においては最大加速度が993cm/s²(EW方向)であったと報告されている。しかしながら、その波形記録は余震による上書きで消失し、最大加速度のみが残される結果となった。

本研究では、まず、ボアホール記録であるサービスホール地点の強震記録からHASKELL法による1次元重複反射理論に非線形係数を導入した解析手法を用いて地震基盤内における地震動の推定を行う。次に推定した基礎地震動を用いて2次元FEMによる非線形解析を実施し、1号機の地下255m(G10)および5号機の地下312m(G55)における本震記録の再現を試みる。

2. 非線形係数を導入した重複反射理論

本震時には地表近傍の地盤は非線形化するが、SG3が位置する概ね100m以深の地盤はほとんど非線形化しないと考えられる。しかしながら、本震時には非線形化しない深部地盤でも上昇波および下降波が非線形化した上層部からの反射波の影響を受ける。

図2に模式的に示されているように、地表と境界Iとの間の地層は本震時において非線形化するが境界Iより深い地層では本震時も近似的に線形とみなすことが出来ることと仮定すると、非線形形における第1層からの反射波は線形形に対して減少するため、その係数を $c(f)$ ($0 \leq c(f) \leq 1$)と表すことが出来る。なお、図2に示すように、SG4は第3層の上面に位置し、SG3は第2層の上面に位置するとする。また、第1層内において、非線形形におけるS波速度を $V_{S1}' = \beta(i) \cdot V_{S1}$ ($0 < \beta(i) \leq 1$)とする。

したがって、図3に示すように、非線形形における各層内における上昇波および下降波は線形形に比べて $w_{E1}(f)$ および $w_{F1}(f)$ だけ減少することになり、これらの係数を用いることによって、地中観測であるSG4とSG3の伝達関数 $T_{23}(f)$ は次式で表される。

$$T_{23}(f) = \frac{w_{E2}(f) \cdot E_2(f) + w_{F2}(f) \cdot F_2(f)}{E_3(f) + w_{F3}(f) \cdot F_3(f)}$$

3. 地震基盤内における地震動の推定

本研究では、サービスホールにおけるボアホール観測点であるSG4の本震時の強震記録と余震記録の逆解析から得られた地盤構造を用いて上記の手法と以下の手順によって本震時の入射地震動 $E(f)$ を求めることが可能である。

まず、各非線形係数を焼きなまし法による逆解析により同定した。推定するパラメータは非線形係数である $c(f)$ と各層のS波速度の低下量である $\beta(i)$ である。図4に逆解析によって得られた $c(f)$ 、 $w_{F1}(f)$ 、 $w_{F2}(f)$ 、 $w_{E1}(f)$ および $\beta(i)$ を示す。次に、非線形形における地中(SG4)の観測記録を $Au(f)$ とすると、SG4における入射波 $E(f)$ は次式で与えられる。

$$E(f) = Au(f) \left(1 + w_{F1}(f) \cdot \frac{F_1(f)}{E_1(f)} \right)$$

さらに、地震基盤内における地震動はSG4における入射波 $E(f)$ から図5に示す深部地下構造を用いて1次元重複反射理論により推定が可能になる。

推定したSG4および地震基盤内における地震動の最大加速度(EW成分)はそれぞれ604cm/s²および307cm/s²であり、地震基盤からSG4に至るまでの深部地盤構造の影響により約2倍程度増幅されたことが推察される。

4. 2次元FEMによる強震動シミュレーション

2次元FEM解析にあたり、1号機および5号機直下の深部地盤構造を、既往の研究¹⁾を参考に、図7および図8に示す幅7.5km、深さ5kmの地震基盤を含めた8層によりモデル化を行った。また、地盤が非線形化したと考えられる最表層にはMC-DPモデルを用いた。地盤の非線形化における各パラメータは既往の研究²⁾から図9に示す G/G_0 および h - γ 曲線の算出を行った。

柏崎刈羽原子力発電所直下の地震基盤内(深度5km)において推定した本震時の推定地震動を用いて、2次元FEMによる非線形シミュレーションを行った。なお、入射波はモデル下部境界において鉛直入射とした。

図10および図11に示す1号機および5号機モデルにおける解析結果のスナップショットから、堆積層内に入射された地震波は地表に向かい伝播していく過程において、原子力発電所直下の褶曲構造の影響により振幅が増大していることが $T=8.40 \sim 10.4$ のスナップショットより確認できる。更に、1号機に向かって地震波動が集中していく様子が同スナップショットより確認できる。

また、1号機の地下255m(G10)および5号機の地下312m(G55)における最大加速度はそれぞれ図12に示すように、978cm/s²および448cm/s²であり、各観測点における観測値と概ね調的であった。ただし、第3パルス以降に現れる後続位相の継続時間が長く続くことから、浅部地盤構造におけるモデル化に今後の改良の余地が残される。

5. まとめ

本研究では、2007年新潟県中越沖地震の余震記録を用いて、HASKELL法による1次元重複反射理論に非線形係数を導入した解析手法を用いて柏崎刈羽原子力発電所直下の地震基盤内における本震時の入射地震動の推定を行った。推定した入射地震動を用いて2次元FEMによる非線形解析を行った結果、1号機および5号機におけるボアホールにおける計算波形の最大加速度は、観測値と概ね調的であった。

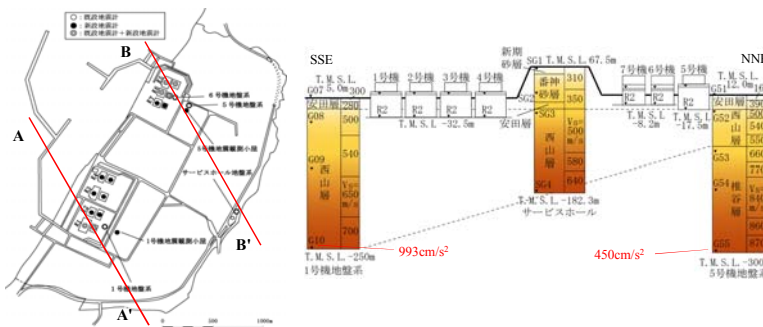


図1 柏崎刈羽原子力発電所内における地震観測点および各観測点における地震計の配置図

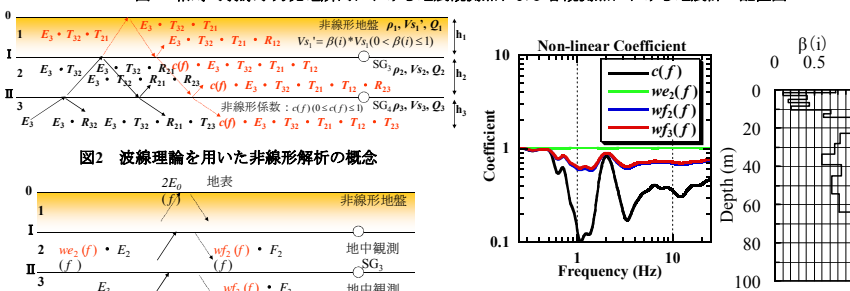


図2 波線理論を用いた非線形解析の概念

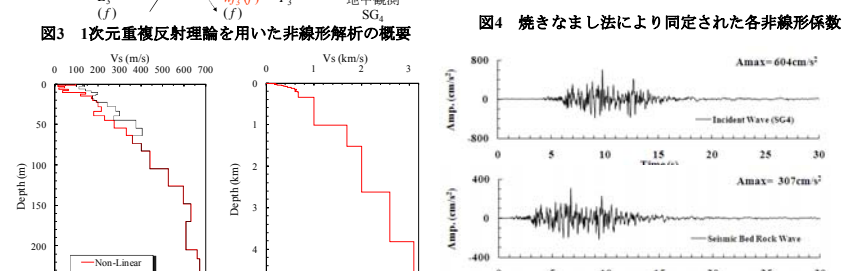


図3 1次元重複反射理論を用いた非線形解析の概要

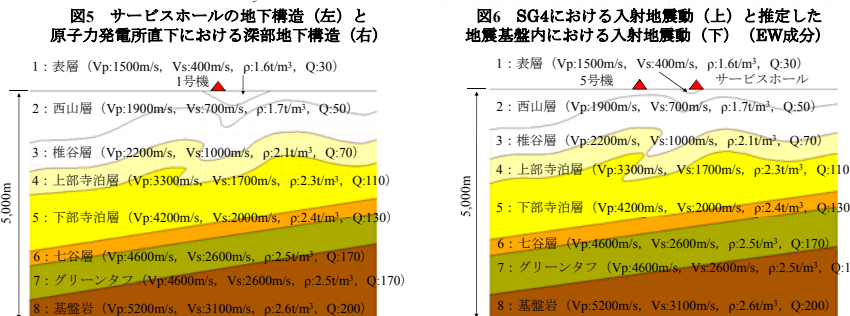


図4 焼きなまし法により同定された各非線形係数

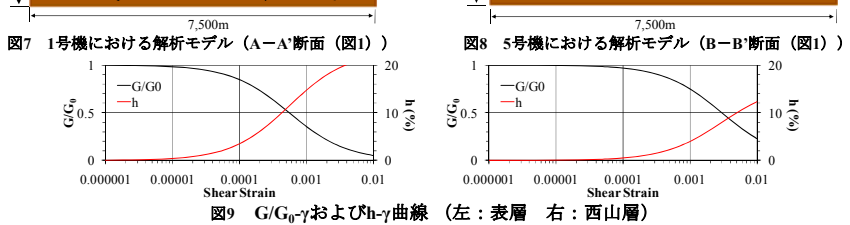


図5 サービスホールの地下構造(左)と原子力発電所直下における深部地下構造(右)

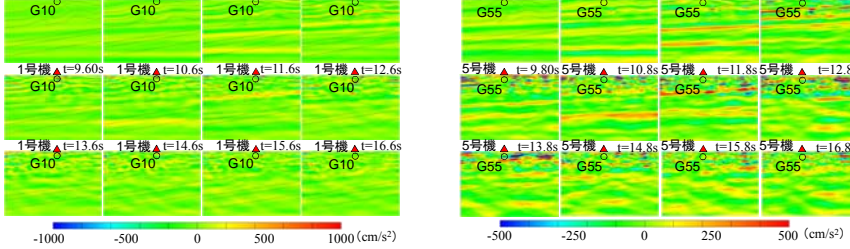


図6 SG4における入射地震動(上)と推定した地震基盤内における入射地震動(下)(EW成分)



図7 1号機における解析モデル(A-A'断面(図1))

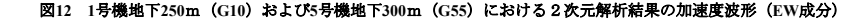


図8 5号機における解析モデル(B-B'断面(図1))

図9 G/G0-gammaおよびh-gamma曲線(左:表層 右:西山層)

図10 1号機モデルにおける2次元解析のスナップショット

図11 1号機モデルにおける2次元解析のスナップショット

図12 1号機地下255m(G10)および5号機地下312m(G55)における2次元解析結果の加速度波形(EW成分)

謝辞: 本研究では、東京電力側から提供された地震観測記録を使用しています。ここに記して感謝致します。
参考文献:
1) 徳元亮一、土方勝一郎、西村功、渡辺哲史、藤井孝文: 柏崎刈羽原子力発電所における不整形地盤の2次元FEM解析 その1 褶曲構造によるサイト増幅の違いと新潟県中越沖地震のシミュレーション解析, 日本建築学会大会学術講演要録(東北), B-2, pp.1019-1020, 2009.8
2) 松崎孝次、新井洋、渡和隆太: 柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレイ強震記録から推定した地盤の非線形性状と露頭基礎波, 日本建築学会構造系論文集, 第630号, pp.1273-1280, 2008.8