

物性不均質性を考慮した信頼性の高い数値計算による地震ハザード予測の研究

堀 高峰 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

山本 優^{*1}, 西本 昌^{*1}, 吉田 昌平^{*2}, 日吉 善久^{*3}, 堀 高峰^{*3}

^{*1}大成建設 技術センター, ^{*2}大崎総合研究所, ^{*3} 海洋研究開発機構 海域地震火山部門 地震津波予測研究開発センター

キーワード：長周期地震動, 3次元有限要素法, 南海トラフ, 2024年能登半島地震

1. はじめに

本課題では、大規模有限要素法に基づく地震動計算プログラム・E-wave FEM[1][2][3]の社会実装を目指し、民間企業と連携した長周期地震動の評価事例の蓄積を進めている。その一例として、南海トラフ沿いの地震の長周期地震動評価、および2024年能登半島地震の長周期地震動評価に関する取り組み（二編）について紹介する。

2. 南海トラフ沿い巨大地震長周期地震動評価

今後発生が懸念される海溝型巨大地震では、長周期地震動による固有周期が長い建築物への影響が大きいと考えられる。そのため、当該地域での長周期地震動の評価が重要である。また地震発生シナリオは大きな多様性を持っており、次に発生する地震がどのようなシナリオになるか、事前に把握することは極めて難しい。そこで、多様なシナリオ・震源特性を考慮した多数回の地震動評価が行われている。そこで本研究では、南海トラフ沿いの巨大地震を対象に多様な地震発生シナリオを考慮した地震動評価を試みた。

地下構造は図1に示す九州から関東地方までを含む領域とし、3次元不均質地盤構造の四面体二次要素メッシュ（約37億節点、28億要素）を生成した。メッシュを生成し、並列計算用に領域分割するために、地球シミュレータの大規模共有メモリ型サーバ(virgo)を用いた。

震源モデルは、内閣府[4]を参考に、アスベリティ位置4ケース、滑り量と破壊伝搬速度の揺らぎを80ケースの、計320通りの震源モデルを設定した。有限要素法による地震動計算はスーパーコンピュータ「富岳」を用いた。

今後は、地震動計算結果を仔細に調べると同時に設計用地震動としての利用を検討する予定である。

3. 2024年能登半島地震の長周期地震動評価(1)

地震動シミュレーション結果を防災対策に活用するた

めには、過去の地震観測記録と比較しシミュレーションの精度や信頼性を検証することが重要である。そこで本研究では、広い範囲で長周期地震動が観測された2024年能登半島地震について、超高層建築物や免震建築物が多く、かつ長周期地震動が増幅しやすい関東平野を対象に、3次元長周期地震動シミュレーションを実施した。

地下構造は地震本部の全国一次地下構造モデル[5]を使用した。図2の500km×500km×深さ100kmの範囲について四面体二次要素メッシュ（節点数26.8億、要素数19.8億）を生成した。メッシュを生成し、並列計算用に領域分割するために、地球シミュレータの大規模共有メモリ型サーバ(virgo)を用いた。

震源モデルは、巨視的面を140km×24kmの範囲設定し、2km×2kmの要素断層に分割、各要素に三角形のすべり速度時間関数（立ち上がり時間4.4s）を与え、すべり分布が均質と仮定した均質すべりのモデルを構築した。破壊伝播速度は2.7km/sとした。有限要素法による地震動計算はスーパーコンピュータ「富岳」を用いた。関東平野から北西方向に至る測線に沿った速度波形を図2に示す。計算点は図2の青○（基盤深度が浅い地点）と赤○（関東平野内）であり、同色で速度波形を示している。均質なすべり分布の震源のため厳密な比較は難しいが、大まかな振幅や表面波を主体とした長い継続時間を持つ地震動がシミュレーションでも再現されており、基盤深度の浅い地点と深い地点の振幅の違いも再現されている。

今後は、均質すべりではない詳細なすべり分布を用いた解析を行うとともに、長周期地震動伝播の分析を行う予定である。

4. 2024年能登半島地震の長周期地震動評価(2)

2024年能登半島地震は、2024年1月1日16時10分に石川県能登地方を震源として発生した地震であり、北西-南西方向に圧縮軸を持つ逆断層型の内陸地殻内地震であった。この地震により能登半島で長周期地震動階級の最大値である4、新潟県や富山県の広域で長周期地震動階

級 3 が観測されている。長周期地震動は超高層建築物や石油タンク等の固有周期の長い構造物への影響が大きいことが知られており、その生成要因を把握しておくことは工学的な観点から非常に重要である。また能登半島の東側の海域は富山トラフの影響により基盤深度の不整形性が強くなる(図3)ことが知られており、基盤の不整形が地震動に与える影響について把握しておくことも重要である。本検討では長周期地震動の生成要因や基盤の不整形が地震動に与える影響を評価するために2024年能登半島地震の長周期地震動シミュレーションを実施した。計算領域は震源断層や長周期地震動階級の大きかった石川県、新潟県、富山県を含む領域(350km×280km)を設定し、現実的な地盤構造における地震動を3次元有限要素法により評価するため、3次元不均質地盤構造の四面体二次要素メッシュを生成した。メッシュを生成し、並列計算用に領域を分割するために、ES4GPU1 ノードを用いた。有限要素法による地震動計算はスーパーコンピュータ「富岳」を用いた。震源モデルには強震観測記録を用いた震源インバージョン結果[6]を基に作成した(図4)。

長周期地震動シミュレーション結果と観測速度波波形(周期2秒以上)の比較の一例を図5、EW成分の速度波のスナップショットの一例を図6に示す。まず、設定した断層モデルにおける周辺強震観測点の観測記録の再現性を確認した結果、3次元地盤構造を考慮すると観測記録をより良好に再現できる観測点があることを確認した。また速度のスナップショットを確認した結果、不整形地盤の影響で波動伝播が複雑であることを確認でき、3次元の長周期地震動シミュレーションの重要性を示唆している。今後は不整形地盤が地震動に与える影響について定量的に評価することを試みる。

謝辞

本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「富岳」による地震の大規模シミュレーションの基礎拡充と社会実装へ向けた展開(課題ID: hp230203)の一環として実施され、本計算の一部は、スーパーコンピュータ「富岳」上で実施した。また、その計算には東京大学地震研究所が開発中のコード Ewave FEM を提供していただいた。

文献

[1] Ichimura, T., Hori, M., Bielak, J., “A hybrid multiresolution meshing technique for finite element three dimensional earthquake ground motion modelling in basins including topography”, Geophysical Journal

International, Volume 177, Issue 3, 1221-1232, (2009).

[2] Ichimura, T., Fujita, K., Tanaka, S., Hori, M., Lalith, M., Shizawa, Y., & Kobayashi, H., “Physicsbased urban earthquake simulation enhanced by 10.7 BlnDOF× 30 K time-step unstructured FE non-linear seismic wave simulation”, SC’14, (2014).

[3] Ichimura, T., Fujita, K., Quinay, P. E. B., Maddeggedara, L., Hori, M., Tanaka, S. et al., “Implicit nonlinear wave simulation with 1.08 T DOF and 0.270 T unstructured finite elements to enhance comprehensive earthquake simulation”, SC’15, (2015).

[4] 内閣府, 南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告) 強震断層モデル編-強震断層モデルと震度分布について-, (2012).

[5] 地震調査研究推進本部:「長周期地震動予測地図」2012年試作版, (2012).

[6] 吉田、宮腰、香川、「震源インバージョン解析および経験的グリーン関数法を用いた2024年能登半島地震(Mw7.5)の広帯域震源モデルの作成」、日本地震学会2024年度秋季大会、S22-P10、(2024)

[7] Koketsu, K., Miyake, H., & Suzuki, H., “Japan integrated velocity structure model version 1”, Proceedings of 15th world conference on earthquake engineering, (2012)

[8] Hisada, Y. & Bielak, J., “A theoretical method for computing near-fault ground motions in layered half-spaces considering static offset due to surface faulting, with a physical interpretation of fling step and rupture directivity, Bull. Seism. Soc. Am, 93, 3, 1154-1168, (2003)

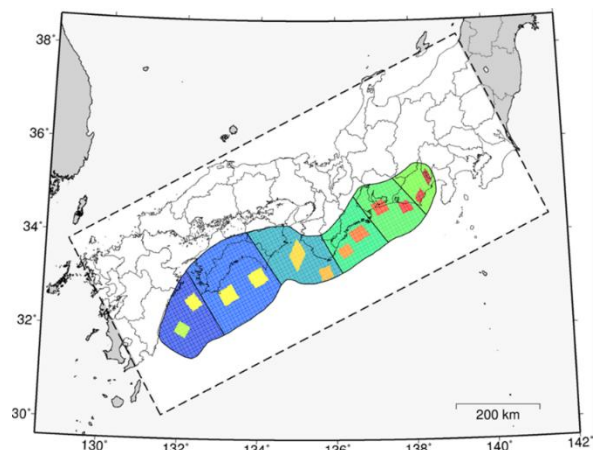
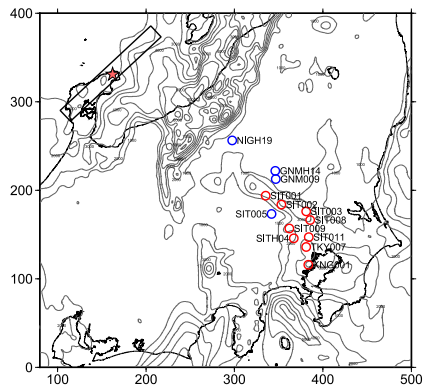
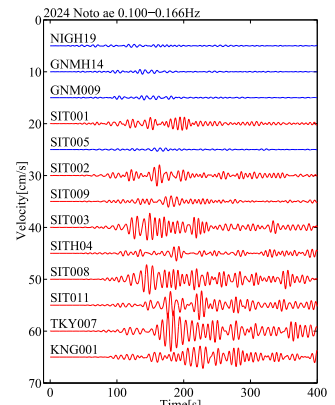
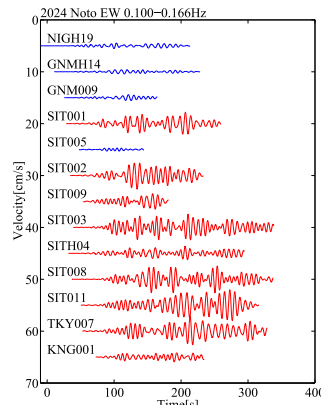


図1. 南海トラフ沿いの地震のモデル化範囲と震源モデルの例



(a)モデル化範囲と計算点



(b) 2024 年能登半島地震観測記録 (左) シミュレーション結果 (右)

図 2. 2024 年能登半島地震の長周期地震動シミュレーション

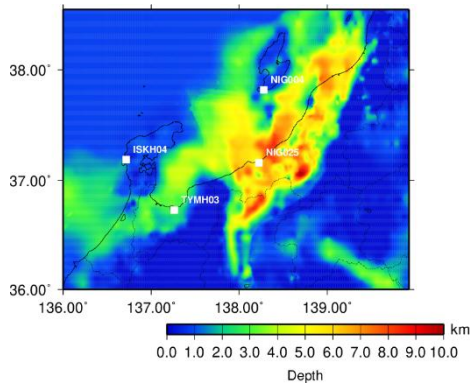


図 3 地震動シミュレーションの対象領域と
全国一次構造モデル[7]の地震基盤の上面深度

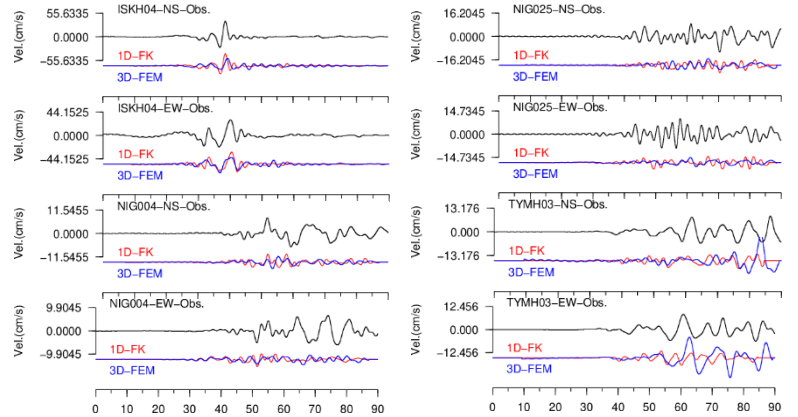


図 5 観測と計算の速度波形の比較(2 秒~20 秒)
(1D-FK : 波数積分法[8], 3D-FEM : E-wave EFEM)

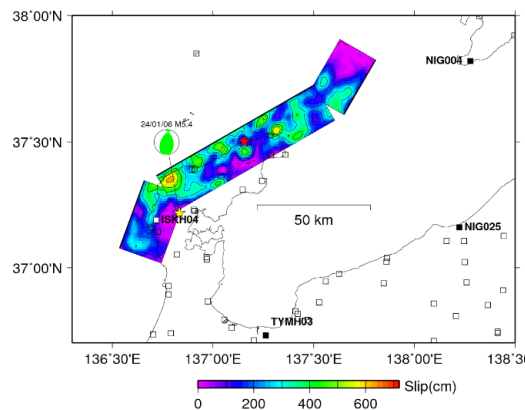


図 4 長周期地震動シミュレーションに
用いた震源断層モデル

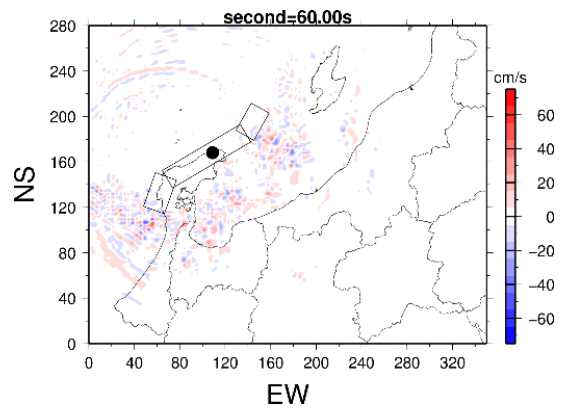


図 6 破壊開始 60 秒後の EW 成分の
速度波のスナップショット