

汎用並列地震応答解析手法の開発と応用

堀 宗朗 海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

澤田 昌孝^{*1}, 羽場 一基^{*2}, 堀 宗朗^{*3}^{*1}電力中央研究所サステナブルシステム研究本部, ^{*2}大成建設原子力本部, ^{*3}東電設計株式会社, ^{*4}海洋研究開発機構 付加価値情報創生部門

キーワード：並列有限要素法, 断層挙動解析, 地震応答解析, サロゲートモデル

1. はじめに

並列計算機を使用した高速・大規模計算の実務利用が現実的になってきている。これを背景に、本課題は、地震工学分野での汎用並列有限要素法の開発と、実務利用のための解析モデル構築・解析結果の活用方法の検討を目的としている。継続的に汎用並列有限要素法のプログラム^[1]の開発を行うとともに、昨年度は、断層変位および重要構造物を対象として、実用化を考慮した課題設定を行い、検討を実施した。断層変位を対象とした課題では、詳細な断層挙動を解析するためのモデルを作成し、確率論的断層変位ハザード解析への適用を試みた。重要構造物を対象とした課題では、大規模構造物（原子力発電所）と周辺の地盤を一体とした解析モデルを作成し、そのモデルによる地震応答解析結果を用いたサロゲートモデルの作成を試みた。

本年度は、上記の2つの課題について、高速計算を利用することで、さらに検討を深めているため、その検討内容について報告する。

2. 断層変位

構造物の耐震設計で考慮すべきハザードとして、地震動とともに断層変位が重要である。重要施設直下での断層変位を確率論的に評価することに対する社会的要求が高まっている。これを実現する確率論的断層変位ハザード解析（PFDHA）が提案されているが、そのうち、地震アプローチと呼ばれる手法は、既往地震で観察された地表地震断層データを基に実施されるため、評価対象の施設周辺での断層や地質の状況を必ずしも考慮できなかった。一方、数値解析では、施設周辺の地質調査をもとに断層や地質の状況を解析モデルとして考慮できる。数値解析によるPFDHA手法の検討を昨年度に引き続き実施した。

2014年長野県北部の地震（震源：神城断層北部）で観察された地表地震断層の北端付近を対象に、その断層で地表断層変位が発生する確率を算出するための解析を実施した。神城断層で地震が発生する際の震源特性モデルに関するロジックツリーを昨年度までに構築した。このロジックツリーは、断層の場所と規模、地震の発生間隔、レイク角、大すべり領域の位置等で分岐しており、震源断層のすべり分布を36通り設定した。ロジックツリーのシナリオ数は3456に及ぶが、共通のすべり分布を用いることができるため、すべり分布の数は抑えられる。

図1のような有限要素モデルを昨年度までに構築した。解析領域は5×5×1 kmである。節点数は約115万である。

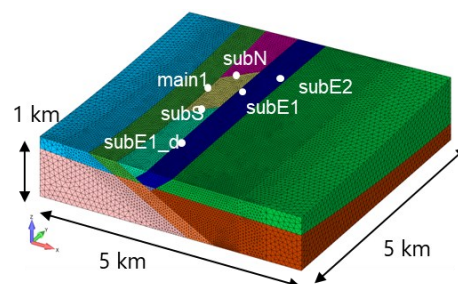
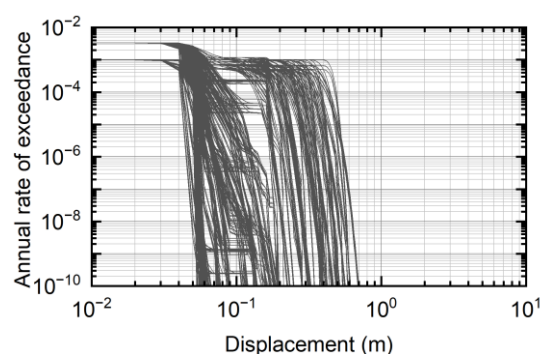
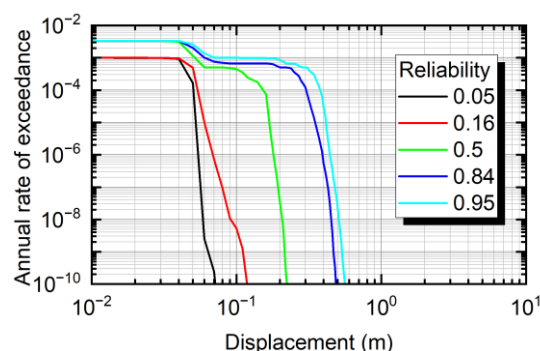


図1 有限要素メッシュと評価点



(a) 全ハザード曲線 (3456 通り)



(b) フラクタイルハザード曲線

図2 数値解析から得られた断層変位ハザード曲線

評価点のうち、main1は震源断層が地表に到達した主断層であり、その他は、主断層の周辺に分布する副断層である。まず、食いだいの弾性論で断層のすべりによる広域の地盤変形を計算し、モデル底面での断層ずれ変位と地盤変位を境界条件としたプッシュオーバー解析を実施し、断層のずれの進展を解析した。解析は120CPUコアを用いた並列計算で実施した。断層のずれについては非線形構成式を用いた。36通りの境界条件に対して、岩盤および断

層面の物性値の不確実を考慮し、ラテン超方格法を用いてサンプル数 10 あるいは 30 の多数回解析を実施した。各シナリオについて、断層変位の大きさとそれを超える年超過頻度の関係（ハザード曲線）を求めた。図 2(a)は SubE1 で得られた 3456 の全ハザード曲線、図 2(b)はそれを基にしたフラクタイルハザード曲線である。図 3 は数値解析による PFDHA と従来の地震アプローチから得られた 95%信頼フラクタイルハザード曲線を 3 地点で比較したものである。主断層との離隔は SubS(100m) < SubE1(500m) < SubE2(1000m)で、地震アプローチでは距離減衰に従っているのに対して、数値解析では、逆の傾向となっている。これは、評価地点の地質状況を反映した結果である。

3. 重要構造物

本節ではコンクリート重要構造物を対象とした地震応答評価のサロゲートモデルの構築について述べる。大規模地震時のライフライン確保や早期復旧のためには、原子力発電所等の重要コンクリート構造物の健全性を即時に評価することが求められる。即時の評価にはサロゲートモデルが有効である。高詳細な地盤・構造物モデルの地震応答解析結果を学習したサロゲートモデルは、観測点のモニタリングデータから観測点以外の応答を高精度に予測できると考えられる。昨年度、地震応答評価のためのサロゲートモデルのプロトタイプを作成した。本年度は、学習データを拡充し、サロゲートモデルの妥当性を検討した。

本稿では、原子力施設の耐震評価に用いられる米エネルギー省モデル (DOE モデル) を対象に、図 4 に示す数値解析モデルを作成した。本モデルは原子力建屋と地盤から構成され、構造物及び地盤はソリッド要素でモデル化した。構造物には RC 非線形性を考慮し、建屋と地盤の間はジョイント要素により建屋・地盤相互作用を考慮した。また、地盤の側面と底面には粘性境界要素を設定した。

開発したサロゲートモデルは、観測点の加速度フーリエスペクトルから評価点の加速度フーリエスペクトルを予測する。この時、観測点及び評価点、並びにそれらの接続をグラフ構造とみなし、グラフ畳み込みネットワーク (GCN) を用いることで、不規則に配置された観測点及び評価点の応答を効率的に推定できるようにした。図 5 に本解析モデルの観測点・評価点のグラフ構造を示す。

学習データ作成のため、1100 回の水平 2 方向の地震動を入力した地震応答解析を実施した。入力地震動は東京都内某所を対象としたハザード解析で生成した加速度波形に基づき、最大加速度と 2 方向の振幅比を変化させた地震波を作成した。最大加速度は 200~1700gal の一様分布、振幅比は 0.5~2.0 の一様分布として、ラテン超方格法により 1100 サンプルを生成し、1000 サンプルを学習データ、100 サンプルをテストデータとして用いた。

図 6 に訓練損失およびテスト損失の推移（損失曲線）を示す。損失関数には評価点の加速度フーリエスペクトルの二乗平均平方根誤差 (RMSE) を用いた。訓練損失・テ

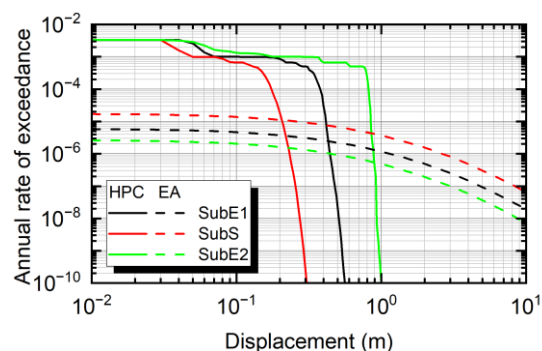
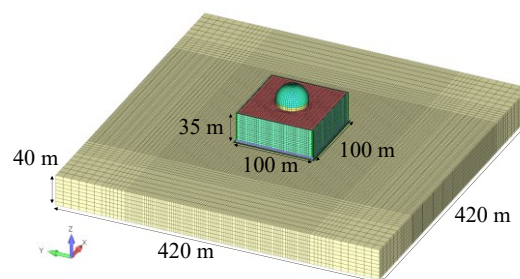
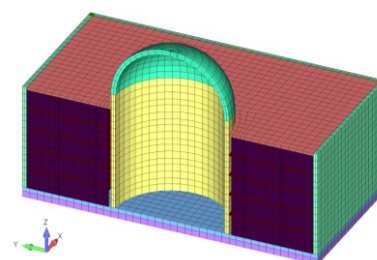


図3 数値解析 (HPC) と地震アプローチ (EA) 断層変位ハザード曲線の比較



(a) 全体



(b) 構造物 (中央での断面)

図4 DOEモデルを対象とした解析モデル

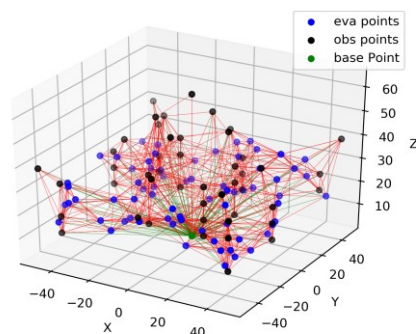


図5 観測点, 評価点及び接続構造

スト損失はエポック数に伴い減少し収束しており、過学習することなく適切に学習されていると判断される。

図 7 に入力地震動の平均加速度スペクトルと入力波の

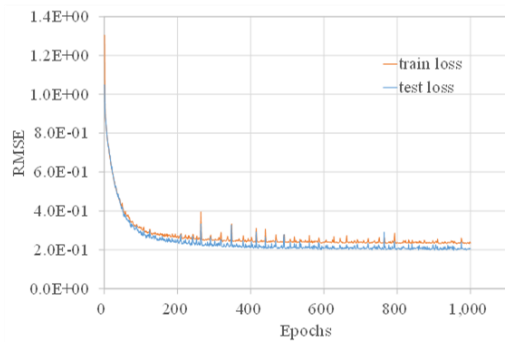


図6 損失曲線(青線及び橙線は訓練損失及びテスト損失)

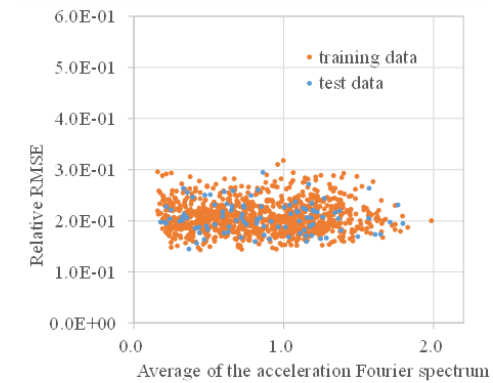


図7 入力地震動の平均加速度スペクトルと正規化した RMSE

スペクトルで正規化した RMSE の関係を示す。入力波で正規化した RMSE は入力地震動レベルに依らずほぼ一定である。このことは、地震動レベルの上昇に伴いコンクリート非線形性が增大しても、相対誤差が一定に保たれることを示しており、サロゲートモデルが良好な精度で評価できていることの裏付けとなる。

文献

- [1] Motoyama, H., Sawada, M., Hotta, W., Haba, K., Otsuka, Y., Akiba, H. and Hori, M., “Development of a general-purpose parallel finite element for analyzing earthquake engineering problems,” *Earthq. Engng. Struct. Dyn.*, Vol.50, pp.4180-4198, (2021).