

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}, 園部 秀明^{*2}, 山本 実^{*3}, 大塚 悠一^{*3}, 堀 宗朗^{*4}^{*1}電力中央研究所 原子力リスク研究センター, ^{*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, 地震応答解析, 断層挙動解析, 解析モデル自動構築

1. はじめに

高速化・大規模化に加え廉価化の結果, 並列計算機の実務利用が進み, 並列計算機の性能を活かす高性能のプログラムも必要となっている。これを背景に, 本研究は, 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。昨年度は, 重要構造物の地震応答および地表地震断層を対象課題として, モデル化を行い, 開発プログラムによる解析を行うことで, 妥当な結果が得られることを確認した。

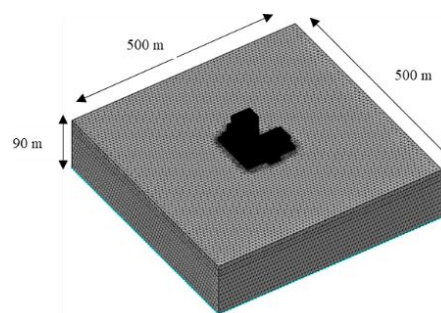
本年度は工学的応用の観点から, 2つの重要構造物の地震応答解析と地表地震断層の挙動解析について報告する。

2. 重要構造物(1)

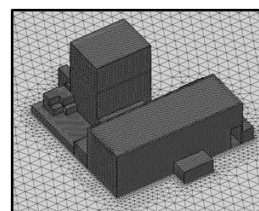
原子力発電所を対象に詳細な地震応答評価を目的として, 実構造物と周辺地盤を対象としたモデル構築, 解析ならびに観測記録との比較を行った。重要構造物である原子力発電所では, 今後, より詳細な検討を実施していく必要があることから, 従来のような構造要素を多く用いるモデルではなく, ソリッド要素を基本としたモデルの利用が重要となる。これに対応したモデル化・解析ならびに検証が目的である。

構築した解析モデルを図1に示す。実構造物に対し, 地震応答に影響の小さい鉄骨部を除いたモデルとした。物性値は鉄筋コンクリート(RC)の代表的な値(ヤング率: 31300 MPa, ポアソン比: 0.2, 密度: 2.4 t/m³)を使用した。地盤は, 水平方向に建屋群の5倍の500×500 m, 鉛直方向に90 mの領域である。解析モデルは四面体2次要素で構成されており, メッシュサイズは建屋が1 m, 地盤が7 m程度である。モデルの自由度はおよそ500万自由度となった。モデル下端に図2に示す地震動を水平2方向に入力した。本地震動は, 東日本大地震時の観測波を引き戻した地震動である。解析は線形動的解析とし, 時間刻みを0.01 s(時間ステップ数15,000step)とした。解析には地球シミュレータ(ES4)上でE-FrontISTR^[1]を用い, 解析時間は1024並列でおよそ5時間であった。

解析結果として原子力発電所建屋の基礎の加速度応答スペクトル(EW方向)を図3に示す。図には, 比較のため観測記録も重ねて示した。観測記録と解析結果は, 特にEW方向について概ね整合していることが確認できた。今後, 本検討で簡略化した点を中心にさらなる改良の検討を行う。



(a) 全体図



(b) 建屋拡大図

図1 解析モデル

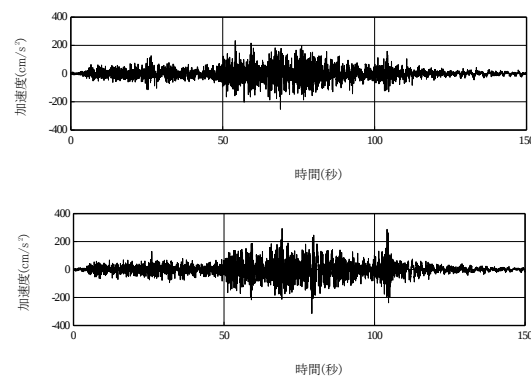


図2 入力波形(上: NS方向, 下: EW方向)

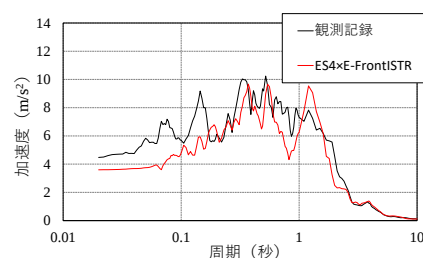


図3 加速度応答スペクトルの比較(EW方向)

3. 重要構造物(2)

本節は原子力発電所の建屋を対象としたサロゲートモデルの構築について示す。大地震により停止した原子力発電所を再起動するには、建屋の健全性を点検・解析により評価する必要がある。災害時の電力安定供給には、瞬時に健全性を評価することが望まれる。これには、原子力発電所建屋の観測点で観測された加速度応答から、観測点以外の加速度応答を予測するサロゲートモデルを構築することが有用である。学習データに使用する詳細有限要素モデルの非線形解析の収束性について示し、サロゲートモデル構築について示す。

3.1 非線形解析の収束性

RC 非線形解析では、解析の収束性が他の建設材料を対象とした場合と比べて困難であることが知られている。ここでは、RC 非線形解析における解析条件の設定方法の基礎的検討を実施した。解析モデル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) を元に作成した。部材間の接続に MPC を用いたモデルとしている。解析には、E-FrontISTR を使い、前川らのコンクリート構成式^[2]に基づく RC 非線形性を考慮した。

まず、鉛直方向の自重漸増解析を行った。準静的解析条件と動的解析条件で比較を行った。動的解析では、慣性力の効果を抑えるために時間刻みを 10000 s と十分大きく設定している。それぞれ 30 ステップで解析したところ、ドーム頂部の変位の違いは 2%以下に抑えられた。次に、水平方向に体積力を作用した漸増解析を実施し、残差力の影響を確認した。ここでは、解析刻みごとに残差力を持ち越す場合と、残差力を捨てる場合を比較した。重力加速度の等倍の水平力を 30 ステップで載荷した場合、両条件でドーム頂部の変位の結果に違いはほぼ生じなかった (0.15%) が、重力加速度の 5 倍の水平力を 30 ステップで載荷した場合は、2 倍以上の違いが生じた。後者は残差力の影響が顕著に出ているが、載荷ステップを大きくすることで差が縮まることを確認した。強い非線形性が生じる地震応答解析において、残差力による影響が小さくなる解析時間刻み、収束判定値等の設定が可能であることが示された。

3.2 サロゲートモデルの構築

上述の DOE モデルのサロゲートモデルを構築する。サロゲートモデルの学習データは、建屋と周辺地盤のモデルに入力地震動を変えた 3 次元地震応答解析で得られた加速度応答を用いた。入力地震動として、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 方向の振幅比を変えた地震波を作成した。この時、最大加速度の範囲は 300~1700 gal である。図 4 に地震応答解析の結果の例を示す。

サロゲートモデルに用いるニューラルネットワークは、評価点とそれらの間の伝達関数 (例えば、図 4 の点と線) をグラフ構造とみなし、図 5 のグラフ畳み込みネットワークを用いた。実際のグラフ構造を図 6 に示す。黒点及び緑点が観測点、青点が評価点、各線がその連結構造を示している。本サロゲートモデルでは、観測点 (黒点及び緑点)

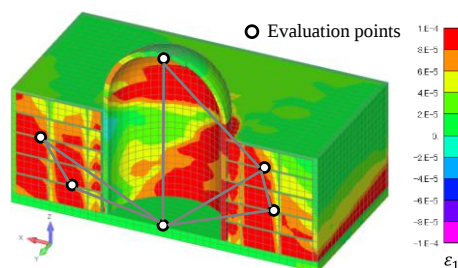


図4 建屋の最大主歪分布の評価例

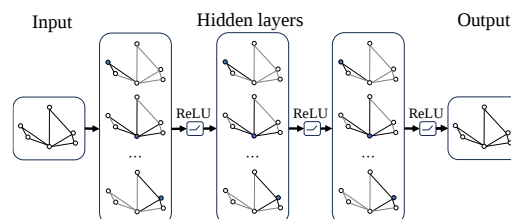


図5 グラフ畳み込みネットワークの概念図

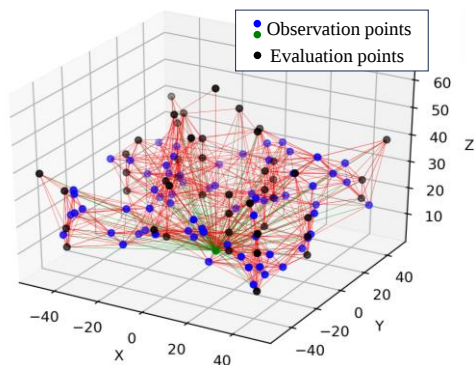


図6 DOEモデルで設定したグラフ構造

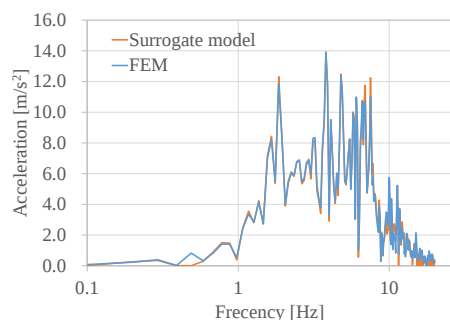


図7 評価点の加速度フーリエスペクトルの評価例

の加速度応答から評価点 (青点) の加速度応答を予測する。

構築したサロゲートモデルによる評価結果を図 7 に示す。学習データと同様に、ハザード解析で作成した波を入力する場合、良い精度で評価点の加速度応答を再現することが分かった。

4. 地表地震断層

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。近年、重要施設直下で

の断層変位を確率論的に照査することに対する社会的要求が高まっている。従来の確率論的断層変位ハザード解析 (PFDHA) の地震アプローチでは、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ているため、評価対象の施設周辺での断層や地質の状況を考慮できなかった。一方、数値解析では、施設での調査結果を基に断層や地質の状況を考慮できる。数値解析による PFDHA 手法の検討を実施した。

2014 年長野県神城断層地震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構築した。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、図 8 のようなすべり分布を 24 通り設定した。

図 9 に解析モデルを示す。解析領域は $5 \times 5 \times 1$ km であり、地盤を四面体 2 次ソリッド要素、断層を三角形 2 次ジョイント要素でメッシュ分割し、節点数は約 115 万となった。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、食い違いの弾性論で断層すべり分布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。入力変位の増加に伴う各評価点におけるずれ変位の増加を図 10 に示す。主断層である main1 では 0.7 m、副断層の subE2 では 1.75 m のずれ変位が断層底部に入力されたときにずれ変位が急増している。

岩盤および断層面の物性値の不確かさを考慮するため、ラテン超方格法を用いてサンプル数 30 の多数回計算を実施した。副断層 subE2 においてずれ変位が 0.1 m を超過する累積確率を入力ずれ変位との関係で整理したものが図 11 である。この整理を複数のずれ変位の値で実施し、さらにロジックツリーの各シナリオについて同様の計算を実施することで評価地点での断層変位がある値を超過する確率を算出した。

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).
- [2] Maekawa K, Okamura H, Pimanmas A., "Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete," Taylor & Francis, (2003).

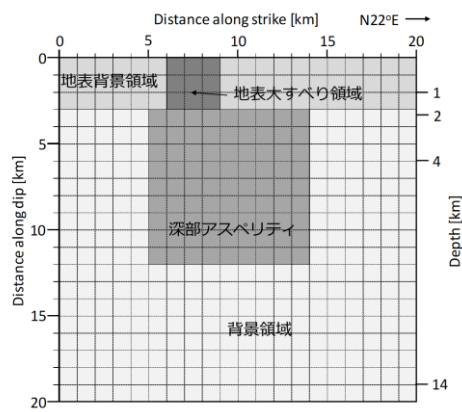


図 8 震源断層上のすべり分布の例

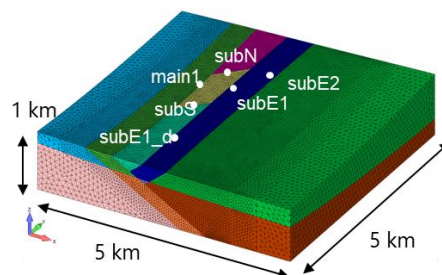


図 9 有限要素メッシュと評価点

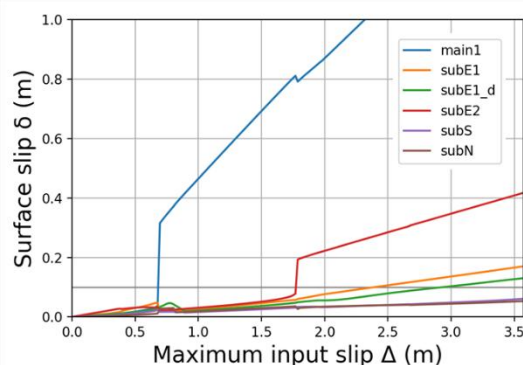


図 10 入力ずれ変位と各評価点におけるずれ変位

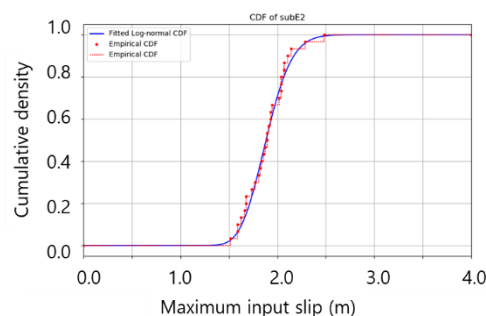


図 11 ずれ変位が 0.1 m 以上となる累積確率 (subE2)