

都市地震シミュレーションの数値解析統合とその利活用に関する基礎的研究

Fundamental Study on Numerical Analysis Integration for Regional Earthquake Simulation

- Integration Process and Application -

飯山 かほり(東工大) 河瀬 理貴(神戸大) 堀 宗朗(JAMSTEC) マッデゲデラ ラリス(東京大) 井料隆雅(神戸大)
 Kahori Iiyama, Tokyo Institute of Technology
 Muneo HORI, JAMSTEC
 Riki Kawase, Kobe University
 Lalith Maddegedara, The University of Tokyo
 Takamasa Iryo, Kobe University
 E-mail: iiyama.k.aa@m.titech.ac.jp

This study seeks to compromise the temporal/spatial resolution (the granularity) difference in integrating different simulations. There are two approaches for the compromise, taking either average or maximum of results of the finer granularity simulation. We make numerical experiments using Integrated Earthquake Simulator for an actual urban area by integrating structural response analysis and traffic flow analysis, and demonstrate the effect of different approaches on damage evaluation. We also analyze the impacts of the structural damages on the traffic flows.

1. はじめに

近年の計算機の性能向上により、広域都市を対象とした地震シミュレーションが可能となり、その利用が進められている。統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES) ¹⁾ は理学・工学・社会科学の一連の数値解析を統合し、地震による様々な被害を予測することを目的としている。

IES の統合とは、一つの数値解析の出力を次の数値解析の入力とすることである。時間・空間分解能 (粒度) が異なる二つの数値解析を統合することは難しい。特に理工学と社会科学の数値解析は粒度が異なる。粒度の粗い出力をより細かい入力へと変換する際は高粒度化、逆では粗粒度化が必要となり、この高粒度化・粗粒度化の数値的手法を適切に選択することが重要である。

本論文では粒度の異なる数値解析を連成させる方法論を構築する。具体的な対象は、工学の数値解析である表層地盤と構造物の応答解析 (SSRA) と社会科学の数値解析交通流解析 (TFA) である。実都市の都市モデルを使う IES において、構築された方法論に基づいて SSRA と TFA を連成させ、連成の良否を議論する。

2. 粗粒度化の方法論

SSRA を TFA に連成させる場合、SSRA の出力の粒度は構造物単位の損傷、TFA の入力粒度は道路単位の容量となる。TFA の粒度に比べ、SSRA の粒度が細かいため、連成に粗粒度化が必要である。

方法論を定式化するため、SSRA の構造物損傷を x 、TFA の減少交通流を f とする。道路リンクに一つしか構造物がない場合、 $f = F(x)$ となる関数 F は容易に決定できる。しかし、TFA は SSRA よりも粗粒度であり、道路リンクには複数の構造物がある。例えば、第 i 番目の道路リンクに N 棟の構造物があると、この道路リンクの減少交通量 f^i は N 棟の構造物の損傷度合いを並べたベクトル x^i の関数で与えられる。

全ての道路リンクに対して上記の関数を見出すことは現実的ではなく、 F を使うことが代替となる。すなわち、 $f^i \approx F(G(x^i))$ となる適当な関数 G を設定するのである。なお、 G は道路リンク全てに共通に使える関数である (x^i の次元は

i 毎に異なり、次元に応じて関数も異なるが、標記を簡単にするため、同じ記号を用いる)。

関数 G が粗粒度化である。ベクトル変数をスカラー値に変換する G として、 x^i の平均値ないし x^i の最大値が自然である。 x^i の成分は損傷であるため、減少交通流が構造物の平均的な損傷から決定されることは妥当と思われる。一方、減少交通流は道路リンクの最も遅い部分によって決定されるのであれば、 x^i の最大値も妥当考えられる。しかし、一つの構造物の損傷が道路リンクに与える影響を過大評価する危険も懸念される。

3. 都市への適用例

(1) 対象領域と解析手順

IES を用いて SSRA と TFA を統合して数値解析を実施した。対象領域は阪神間 5 市 (神戸市、芦屋市、尼崎市、西宮市、大阪市) である。領域内の SSRA の粒度は $M = 1,266,706$ 、TFA の粒度は $N = 495,595$ であり、統合には粗粒度化の処理が必要となる。表層地盤は AVS30²⁾ に基づいて表層 Vs を設定した 2 層モデルとし、建物は形状データと構造種別に基づきモデル化している。SSRA では内閣府が提供しているシナリオ地震 ³⁾ を用いて一次元応答解析 (地盤: 線形、建物: 非線形) を行い、建物の最大層間変位角 θ_{max} を計算し、この値に基づき損傷変数 x を算出した。計算手順は文献 4 と同様であり、建物の損傷に伴う瓦礫等による影響域 (以下、閉塞領域) を軒高と θ_{max} の関数として算出し、閉塞領域と道路リンクとの最短距離を d とし、リンクの通行可否を求めた。

(2) 粗粒度化方法による道路リンク評価への影響

粗粒度化方法ごとのリンク評価結果の違いを調べるために、各方法を SSRA 結果に適用する。各リンクに対して損傷変数 x^i の平均値または最大値が 0.5 を超える場合 (閉塞領域が道路にかかることで元の道路幅の半分よりも小さくなる場合) に x^i が 0 となるような粗粒度化関数 g^i を適用した。本研究では検討シナリオとして①基本ケース、②東側ケース、③陸側ケース (①②③はシナリオ地震)、④陸側ケースの地震動振幅を単純に増幅させたケース、⑤表層地盤せん断波速度を一律に 1.3 倍にしたケース (陸側ケース適用) の 5 つを用意した。Fig. 1 は陸側ケースの地震動を工学基盤に入力した場合の全対象リンクの残存道路幅の計算

例である。Table 1 より、 x^i の最大値を採用する場合は平均値を採用する場合と比較して閉塞リンク数が 10 倍以上生じる結果となった。この定性的な差は想定範囲内ではあるものの、オーダーの違いとしては無視し難い。道路リンクの一部の損傷によって交通流が遮断された過去の地震災害の経験を踏まえると、最大値をとる手法がより適切であると考えられるが、今後はさらなる検討が必要である。

(3) IES を利用した交通ネットワーク評価例

最大値を採用した結果を適用して、建物損傷による交通ネットワークへの影響を評価する。交通ネットワーク G に対して、次の2つの効率性指標 E^5 , I を導入する。

$$E(G) = \frac{1}{|W|} \sum_{w \in W} \frac{1}{f_w}$$

$$I(X) = \frac{E(G(V, E)) - E(G(V, E \setminus X))}{E(G(V, E))}$$

ここで V , W , w はそれぞれ、ネットワーク G を構成するノード集合、始点と終点のペア (OD ペア) の集合、 W の要素を表し、 f_w は OD ペア w 間の最短経路の自由流旅行時間、 E はネットワーク G を構成するリンク集合である。記号 $|*|$ は $*$ の要素数を表す。 $I(X)$ は、 $G(V, E)$ からリンク集合 E の部分集合 X が閉塞した場合のネットワーク効率性の相対的な低下を表す。

Fig. 2 は閉塞リンク数 $|F|$ と $I(F)$ との関係を表している。 $I(F)$ は $|F|$ とともに増加する傾向にあり、この傾向は直感に合致するものである。一方、 $I(F)$ と $|F|$ は比例関係にない。このことは、閉塞リンクの総数だけでなく閉塞リンクの空間分布が交通ネットワークの効率性に影響することを示唆している。

リンクの各集合 g の重要度は $I(g)$ で評価できる。 Fig. 3 は閉塞リンクの啓開順序によるネットワーク効率性の改善過程の違いを示し、青線はランダムに閉塞リンクを啓開した場合、赤線はリンクの重要度 $I(g)$ の降順に啓開した場合の結果である。 Fig. 3 より、後者のほうが前者よりネットワーク効率性が早く回復していることが読み取れる。参考として、 $I(g)$ が 0 となる (閉塞リンクが全て啓開される) までの両者の $I(g)$ の平均的な比率を算出したところ、36%であった。他の4シナリオに対してもこの比率は20~38%と高かった。これらの結果は、災害後の復旧計画において広範囲の領域内におけるリンク通行可否の空間分布を評価する統合シミュレーションの重要性を示唆するものである。

4. まとめ

本研究では、粒度の異なる数値解析を連成するため、粗粒度化の方法論を構築した。実都市の都市モデルを使う IES において、粗度化がもたらす被害評価への影響について定量的に検討した。この結果、最大値を用いる粗度化の有効性を示した。交通ネットワーク評価から IES が効率的な復旧計画に活用できる可能性を示した。

参考文献

- 1) Hori, M.: Introduction to Computational Earthquake Engineering 3rd Edition, *World Scientific Publishing Europe Ltd.*, Chapter 11, 2018.
- 2) Wakamatsu, K. and Matsuoka, M.: Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Classification Map and Vs30 Zoning, *Journal of Disaster Research*, Vol.8 No.5, pp.904-911, 2013.
- 3) G 空間情報センター : https://www.geospatial.jp/gp_front/

- 4) 飯山かほり他: 都市地震応答シミュレーションでの異粒度数値解析の統合に関する基礎的研究, 第 22 回応用力学シンポジウム講演概要集, 2019.
- 5) Latora and Marchiori: Efficient Behavior of Small-World Networks, *Physical Review Letters*, Vol.87, No. 19, 2001.

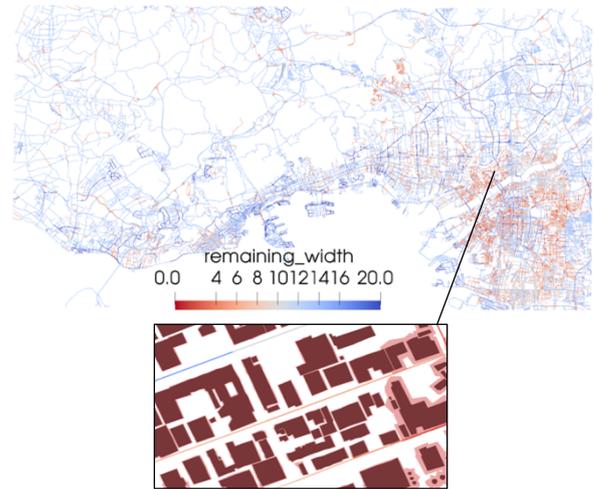


Fig. 1 Distribution of remaining road width for Rikugawa case and its close-up.

Table 1 Number of calculated unavailable links

Scenarios	taking average	taking maximum
Kihon case	3,489	45,022
Higashigawa case	2,290	32,223
Rikugawa case	1,747	26,889
Rikugawa case, 1.5 times amplitude	3,252	47,023
Rikugawa case, 1.3 times Vs	3,440	46,805

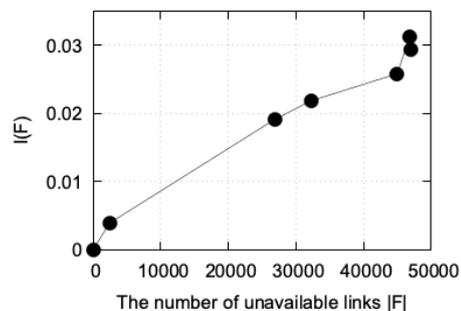


Fig. 2 Relation between the number of links and network efficiency decrease (Rikugawa case, 1.5 times amplitude)

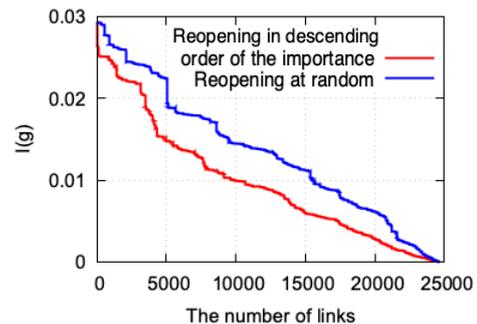


Fig. 3 Change in traffic flow due to order of reopening