

# 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(元・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)

## はじめに

- ✓ 統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES<sup>1)</sup>) 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が、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。
- ✓ 本研究では粒度が大きく異なる工学系数値解析と社会科学系数値解析とを連成させる方法論を構築する。検討対象は、構造物応答解析と交通流解析とする。

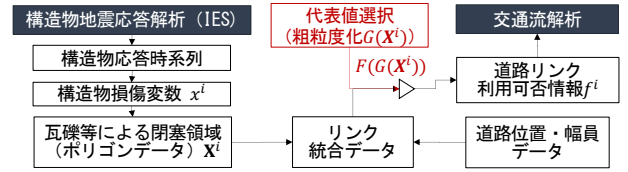


図1. 時空間分解能(粒度)の異なる数値解析間統合の数理的手法

## 粗粒度化の方法論 (図1参照)

- ✓ 各数値解析の粒度比較

構造物応答解析出力粒度：構造物損傷 (構造物単位) > 交通流解析入力粒度：交通容量 (道路単位)  
 相対粒度 (粗粒度化)

- ✓ 方法論の定式化

$$f^i \approx F(G(X^i))$$

$f^i$ :  $i$  番道路リンクの減少交通量  
 $x^i$ :  $i$  番目構造物の損傷変数  
 $X^i$ :  $i$  番目道路リンクに隣接する構造物の損傷変数の集合  
 $F$ : 構造物損傷を減少交通流へ変換する関数  
 $G$ : 粗粒度化関数 (道路リンク全てに共通)

- ✓ 粗粒度化  $G$  の方法例

代表値選択 (ベクトル変数→スカラー値への変換) の方法:

- ① 平均値選択: 減少交通流を構造物の平均的な損傷から決定
- ② 最大値選択: 減少交通流を道路リンクの最も遅い部分によって決定

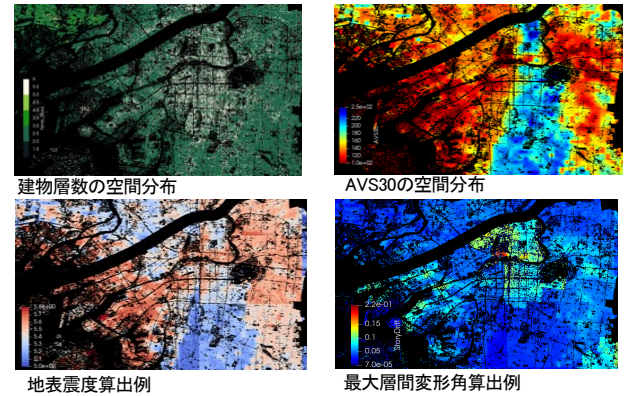


図2. IESによる阪神間エリア被害推定例 (大阪周辺closeup)

## 都市への適用例

### (1) 対象領域と解析手順 (図2参照)

- ✓ 対象領域 阪神間5市 (神戸市, 芦屋市, 尼崎市, 西宮市, 大阪市)
- ✓ 領域内粒度 構造物応答解析 : 建物数 1,266,706  
交通流解析 : 道路リンク数 495,595
- ✓ 解析条件 表層地盤 : AVS30<sup>2)</sup> に基づいて表層Vsを設定した2層モデル  
(構造物応答) 建物 : 形状データと構造種別に基づきモデル化  
入力地震動 : 内閣府提供シナリオ地震<sup>3)</sup>  
解析手法 : 1次元応答解析 (地盤線形, 建物非線形)
- ✓ 評価手順 建物損傷に伴う瓦礫等による影響域を軒高と  $\theta_{max}$  の関数として算出  
→ 影響域と道路リンクとの最短距離からリンク通行可否を評価
- ✓ シナリオ 表1の地震シナリオ5ケースを対象

### (2) 粗粒度化方法による道路評価への影響

- ✓ 変換関数 : 各リンクに対して損傷変数  $x^i$  の平均値または最大値  $G(X^i)$  が 0.5 を超える場合に  $x^i = 0$  となるような関数  $F$  を適用
- ✓ 計算 (図3) : 各地震動に対する全リンク残存道路幅を算出
- ✓ 結果 (表1) : 最大値選択では選択に比して閉塞リンク数が10倍以上平均値一経験上は最大値選択がより適切と考えられるもののこの定性的な差はオーダーの違いとして無視し難い。今後はさらなる検討が必要。

### (3) 交通ネットワーク評価例

- ✓ 効率性指標

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

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

$G$ : 交通ネットワーク  
 $V$ :  $G$  を構成するノード集合  
 $W$ :  $G$  を構成する始終点ペア (ODペア)  
 $w$ :  $W$  の要素  
 $f_w$ : ODペア間最短経路の自由流旅行時間  
 $G$  を構成するリンク集合<sup>4)</sup>  
 $G(V, E)$  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

- ✓ 評価例1:  $I(F)$  は閉塞リンク数  $|F|$  とともに増加の傾向、ただし比例関係にない (図4) → 閉塞リンクの空間分布がネットワーク効率性に影響することを示唆
- ✓ 評価例2: ランダムに閉塞リンクを啓開した場合 (RAN) に対しリンク重要度の降順 (DOI) に啓開した場合、ネットワーク効率性が早く回復。  
(参)  $I(g)=0$  (全閉塞リンク啓開) となるまでの RAN の  $I(g)$  に対する DOI の  $I(g)$  の平均的な比率は 20~38%

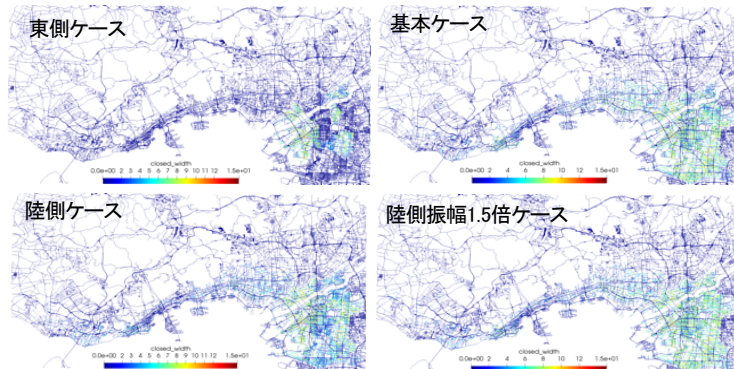


図3. 道路残存幅の空間分布 (地震シナリオ: 陸側ケース) とそのクローズアップ

表1 粗粒度化の方法の違いによる通行不可リンク数 (5地震シナリオの例)

| 災害シナリオ                 | 平均値選択 | 最大値選択  |
|------------------------|-------|--------|
| Case1 基本ケース            | 3,489 | 45,022 |
| Case2 東側ケース            | 2,290 | 32,223 |
| Case3 陸側ケース            | 1,747 | 26,889 |
| Case4 陸側ケース (振幅1.5倍時)  | 3,252 | 47,023 |
| Case5 陸側ケース (Vs値1.3倍時) | 3,440 | 46,805 |

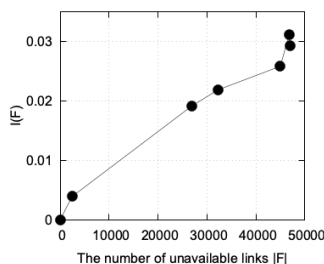


図4. 通行不可のリンク数とネットワーク効率性低下との関係

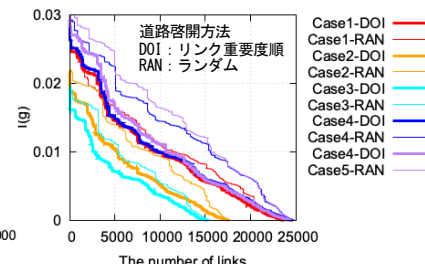


図5. 道路啓開方法の違いによる啓開リンク数と交通流の変化

## まとめ

- ✓ 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、粗粒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、最大値を用いる粗粒度化の有効性を示した。
- ✓ 交通ネットワーク評価から IESを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 Ltd, Chapter 11, 2018.
- 2) Wakamatsu, K. and Matsuoka, M.: Nationwide 7.5-Arc-Second Japan Engineering Geomorphologic Class 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/](https://www.geospatial.jp/gp_front/)
- 4) Latora and Marchiori: Efficient Behavior of Small-World Networks, Physical Review Letters, Vol.87, No.