統合自然災害シミュレーションのための 堅牢性の高い都市モデル構築手法の開発

Development of robust method to construct urban area model
used in Integrated Natural Disaster Simulation

上戸恭介*・堀宗朗**・市村強***・Lalith Wijrathne****

Kyosuke KAMITO, Muneo HORI, Tsuyoshi ICHIMURA, and Lalith Wijrathne

*正会員 修士 三菱重工業(株) (〒108-8215 東京都港区港南 2-16-5)
**正会員 Ph.D 東京大学教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
***正会員 博士 東京大学准教授 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)
****正会員 博士 東京大学助教 地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

INDS (Integrated Natural Disaster Simulation) is a seamless simulation of disaster, damage, and social reaction. A model must be constructed from GIS (Geographic Information System) for a target urban area. This paper presents the data conversion of GIS of DMD (Digital Mapping Data) format. A key issue is the compensation of lacked data. Several new algorithms are studied, and the most robust one is found; the successful conversion rate reaches more than 99%. The data conversion is applied to Kochi City, and it is shown that the constructed model is able to be used in simulating seismic structure response and emergency mass evacuation.

Key Words : *Disaster Simulation, Computational Geometry, GIS, Seismic Structure Analysis, Multi Agent Simulation*

1. はじめに

統合自然災害シミュレーション (Integrated Natural Disaster Simulation) は、地震・風水害・津波等の自然災害を入力とした、都市に起こる災害の発生、構造物の被害、災害に対する社会の対応行動のシームレスなシミュレーションである^{1),2),3),4),5)}。過去の災害・被害の統計分析に基づく従来の災害・被害の予測と異なり、大規模数値計算を使って災害・被害の物理過程と対応行動の過程のシミュレーションを行う点に特徴がある。なお統合自然災害シミュレーションの構成・要素を説明した文献は、煩雑さを防ぐため、適宜、最も関連する章で示すこととする。

INDS は、災害・被害・対応行動の既開発の数値解析手法を用いることが原則である。INDS に必要とされるものは、実際の都市を対象とした都市モデルである。現在も整備が進む各種の地理情報システム (Geographic Information System, GIS) に蓄積されたデータを利用し都市モデルを構築する。当然のことであるが、一つの都市でも、災害・被害・対応行動のシミュレーションには各々、異なるモデルが必要である。一つの都市の GIS から複数の都市モデルを構築することになる。

都市モデルのサイズは膨大である。対象となる都市の広さを $10^4 \sim 5$ m 四方とすると、空間分解能 $10^0 \sim 2$ m で物理過程のシミュレーションを行う場合、モデル

の自由度は $10^8 \sim 12$ となる。大都市の場合、中に位置する建物の数は $10^5 \sim 6$ となり、1つの建物を $10^2 \sim 4$ の自由度で離散化する場合、総自由度は $10^7 \sim 10$ となる。このため、人力を極力排した自動構築が必要であり、自動構築には高い堅牢性が必須となる。

本研究は、INDS のための堅牢な都市モデル構築手法の開発を目的とする。次世代スーパーコンピュータの戦略課題の一つに、都市の地震・津波シミュレーションが挙げられており、南海地震が高知市を襲う場合を想定し、地震による構造物応答が引き起こす被害と、津波から逃げる群衆避難の対応行動のシミュレーションが行われている。このシミュレーションに供せるよう、構造物群モデルと群衆の避難経路モデルをこう構築することを具体的な課題とする。

2. 都市モデル構築手法

都市モデルは、該当都市の各種 GIS に蓄積されたデータを用いて構築される。同一の都市に対しても、例えば、強震動の分布を計算する地震災害シミュレーション用の都市モデルと、構造物一棟一棟の地震応答を計算する地震被害シミュレーション用の都市モデルは異なる。したがって、 N 個の GIS データから M 個の都市モデルを作る場合、直接 GIS データを都市モデルに変換すると、 $N \times M$ 個のデータ変換モジュールを作成しなければならない。このため、INDS では、GIS を一旦、中間モデルデータ (Common Modeling Data, CMD)⁶⁾

[†] Dedicated to the memory of Prof. Takeshi TAMURA and Prof. Takuo FUKUI

に変換し、この CMD を都市モデルに変換する。CMD を導入することで 2 回のデータ変換が必要となるが、GIS を CMD に変換するための変換モジュールは N 個、CMD を都市データに変換するための変換モジュールは M 個と、計 $N + M$ 個の変換モジュールが必要である。直接 GIS を都市モデルに変換するための変換モジュールの数より少なくすることができる。

INDS が用いる CMD には、Shape と Grid の二つの種類がある。Shape は構造物を対象とし節点と要素から構成される。構造物一棟一棟に Shape が作られる。Grid は、構造物のない空間を格子状に区分し、各格子に整数・実数等を与える。例えば、街区の中で構造物に含まれる格子には 1、構造物に含まれない格子には 0 を割り振ったり、標高の値を格子に割り振ることになる。GIS の用語で言えば、Shape はベクトル型データ、Grid はラスタ型データである。また、Shape は非構造格子の形式、Grid は構造格子の形式となる。

CMD を都市モデルに変換するモジュールは複数開発されている⁷⁾。本研究に関わるモジュールは、Shape を地震被害シミュレーション用都市モデル^{8),9),10),11)}に変換するモジュールと、Grid を群衆避難シミュレーション用都市モデル^{12),13),14)}に変換するモジュールである。地震被害シミュレーションでは、Shape のデータから構造物一棟一棟に非線形ファイバーモデルが構築される。群衆避難シミュレーションでは、構造物等の事物がない空間を避難経路としたモデルが構築される。

本研究で都市モデル構築に利用される GIS データは、2 次元のデジタルマッピングデータ (Digital Mapping Data, DMD) である。DMD は CAD に準拠した形式であり、都市の比較的古い GIS に多用されている。CAD 準拠の GIS には、幾何形状に関するデータが欠損している場合がある。例えば、構造物の GIS の場合、構造物の外周となる輪郭線の連結に関するデータは欠損している。連結とは、どの輪郭線と輪郭線を結ぶことで一つの構造物の輪郭となるかを示す情報である。また輪郭線が数か所欠けている場合がある。CAD 準拠の GIS を図示して使う場合、連結のデータは不要となる。また、輪郭線の欠けた個所には記号や寸法等の数値が記載されているため、欠損があるとはなかなか気付にくい。DMD 形式の GIS データを Shape や Grid といった CMD に変換する際、このデータの欠損を補うことが必要である。すなわち、データ変換モジュールに、自動的かつ欠損を補う機能を持たせ、かつ、その堅牢性を高めることが必要なのである。

CMD の Shape と Grid はその性質が全く異なるため、従来、GIS データを変換する際には、Shape 用への変換モジュールと Grid 用への変換モジュールを独立して作ってきた。変換モジュールも独立して作成すると、DMD 形式の GIS データの欠損に対処する機能も 2 つの異なるものが必要となる。堅牢性を高める努力

図-1 欠損したポリライン

も倍となる。このため、本研究では、DMD 形式の GIS データから Shape、Shape から Grid というデータ変換の手順を取り、データ欠損に対処する機能は、DMD 形式の GIS データから Shape への変換モジュールのみに付けることにする。

上記の手順では、Grid の作成は Shape の作成を経ることになり効率的ではない。しかし、都市モデルの構築は、効率性よりも、モデルの質を確保する信頼性が重要である。実際、CMD を介して都市モデルを作る INDS の方式では、モジュール作成の労力は減るものの、データ変換は 2 度必要でありモデル構築は効率的ではない。これも、多数のモジュールを作成するよりも、数を絞って信頼性の高いモジュールを作成することを意図しているためである。

3. DMD から CMD への変換

前章で説明したように、DMD 形式の GIS データから Shape、Shape から Grid という手順に従い、GIS データを CMD に変換する。データ変換の成功・不成功を定量的に示すため、適切な指標を導入し、この指標を使った堅牢性を高める工夫の効果を説明する。

3.1 DMD 形式の GIS データから Shape への変換

DMD 形式の GIS データでは、一つの輪郭線は線分の集合として記述されている。簡単のため、線分の集合をポリライン、始点と終点が一致したポリラインをポリゴンと呼ぶこととする。輪郭線はポリラインであり、ポリゴンとは必ずしもなっていない。Shape は一棟一棟の構造物の形状データを格納する。この Shape を作るため、構造物の平面の輪郭線となるよう、ポリライン群を適切に選択して結合する必要がある。

DMD 形式の GIS データから Shape への変換を例示するため、図-1 に示す、端点 n_1 , n_2 を共有する 3 つのポリライン p_1 , p_2 , p_3 を考える。 p_1 と p_2 を結合するとポリゴン S_1 , p_2 と p_3 を結合すると、ポリゴン S_2

図-2 ポリラインが隣接したケース

が形成され、この2つのポリゴン S_1 と S_2 は2つの構造物の閉じた輪郭線に対応する。もし誤って p_1 と p_3 を結合しポリゴンを形成すると、 p_2 がこのポリゴンの中に含まれることになり、 p_2 を使ったポリゴンに対応する構造物はこのポリゴンに対応する構造物の中に含まれてしまう。これは齟齬である。したがってポリラインの適切な結合が必要である。

上記は2つのポリラインから1つの構造物の輪郭線が作られる最も単純な例である。実際のポリラインの形状は図-1ほど単純ではなく、多数の線分から構成される複雑な形状のポリラインもある。さらに多数のポリラインが隣接する場合もある。図-2に示すように9本のポリラインが隣接する場合を考える。 $p_1, p_2, p_9, p_8, p_5, p_3$ という6本のポリラインを結合させると、 p_1 の始点と p_3 の終点が一致しないため、ポリゴンが形成されない。正しい結合、例えば、 p_1, p_3, p_5, p_4 や p_4, p_8, p_7 のような結合を行うことが必要である。

ポリラインの結合のアルゴリズムの目標は、端点を共有するような隣接するポリライン群の中から、重複して使われることを許し、適切なポリラインの組み合わせを見出すことである。多数の線分からなる複雑な形状のポリラインが含まれている場合や、隣接するポリラインの数が多い場合でも、正しいポリラインの組み合わせを見出すことが重要である。本研究では次の方針でアルゴリズムを検討する。

1. ポリラインの形状の影響を除くため、ポリラインの最初と最後の線分もしくは端点の点のみに着目し、それ以外の線分や端点の情報は使わないこととする。
2. ポリラインの数が多い場合にも適用できるよう、端点を共有するポリラインの組から最適な結合を選択することとする。

第2の方針は重要である。そもそも連結すべきポリラインは端点を共有するものである。したがって、結合の良否を適当な指標で定量化することで、端点を共有する全てのポリラインの組に対し最適な結合を見出

a) 正常動作

b) 誤動作

図-3 アルゴリズム 1

すことができるのである。結合の指標を考案することが具体的な課題となる。著者らの調べた限り、上記の目的でのポリラインの結合に関する既往の研究は、土木工学や計算幾何学の分野でも見当たらない。そこで下記に示す独自のアルゴリズムを3つ考案した。アルゴリズムの説明は全て図-1を用いる。

(1) アルゴリズム 1

始点 n_1 から終点 n_4 を結ぶ p_1 に対し、終点 n_4 に結合されるポリラインとして p_2 を選択することを正解とする。 p_1 の終点を端点として共有するポリラインとの角度 $\theta_{1\alpha}$ を結合の指標とし、次式で定義する。

$$\theta_{1\alpha} = |\arccos(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_\alpha)| \quad (\alpha = 2, 3, \dots) \quad (1)$$

この $\theta_{1\alpha}$ を最小とするポリライン p_α を選択する。なお $\mathbf{e}_\alpha$ は端点を含む線分の単位ベクトルである。

このアルゴリズムは直感的に妥当であり、簡単である分、高い堅牢性も期待できる。しかし、 p_1 の終点を使うと、 p_1 に結合されるポリラインとして p_2 が正しく選択されるが(図-3a参照)、その一方で、 p_1 の始点 n_1 を使うと、正しい選択が難しくなる(図-3b参照)。これは角度が一致するため順序付けができないためである。

図-4 アルゴリズム 2

図-5 アルゴリズム 3

(2) アルゴリズム 2

上記のアルゴリズムの不備を考慮し、端点からの角度とは別に、端点との距離を結合の指標とする。具体的には、対象とするポリライン p_1 の始点を n_1 と、他のポリゴンの端点に繋がった線分の節点 n_α の距離を使う。すなわち

$$d_{1\alpha} = |n_1 - n_\alpha| \quad (\alpha = 2, 3, \dots). \quad (2)$$

ここで n_1 は始点、 n_α は端点に繋がった線分の節点の座標ベクトルであり、 $|(.)|$ はベクトル $(.)$ の長さである。この $d_{1\alpha}$ を最小とする p_α を選択するのである。

図-4 に示すように、 p_1 の始点に着目すると、 p_2 と p_3 の端点に次ぐ節点を使って指標 $d_{1\alpha}$ を計算する。この場合、正しく p_2 が選択される。しかし、極少数であるが、多数の線分から成る複雑なポリラインには、端点の間近に節点があるものがある。式 (2) の指標を使うと、このポリラインが常に選択されてしまうことになる。

(3) アルゴリズム 3

ポリラインの特徴を捉えるため、端点を結んだ線分を使った結合の指標を用いる。対象とするポリライン p_1 の始点と終点を結んだ線分と、他のポリラインの端点を共有する線分の角度を使うのである。すなわち、

$$\phi_{1\alpha} = |\arccos(e'_1 \cdot e_\alpha)| \quad (\alpha = 2, 3, \dots). \quad (3)$$

表-1 各アルゴリズムの線分変換率

アルゴリズム	無し	1	2	3
R_c (%)	73.00	93.16	98.80	99.57

ここで e'_1 は p_1 の始点と終点を結んだ線分、 e_α は始点を共有する p_α の線分の単位ベクトルである。この $\phi_{1\alpha}$ が小さい p_α を選択する。

図-5 に示すように、 $\phi_{12} < \theta_{13}$ であるから、 p_1 に結合するポリラインは p_2 となる。このアルゴリズムの意味は一見、分かりづらい。しかし、ポリラインの欠落している個所の大きな方向は e'_1 で与えられるということを考慮すると、このアルゴリズムは、 e'_1 に近い方向を持つ線分が端点に繋がったポリラインを選ぶ、というアルゴリズムであると理解できる。

(4) アルゴリズムの堅牢性

異なる結合の指標を用いた 3 つのアルゴリズムの堅牢性を比較し、最適なアルゴリズムを選択する。堅牢性の評価には次式で定義される線分変換率 R_c を用いる。

$$R_C = \frac{N_S}{N_D} \times 100[\%]. \quad (4)$$

ここで N_D は DMD 形式の GIS データに含まれている線分要素の全数、 N_S は変換された Shape に含まれている線要素の数である。当然、 $R_c < 100$ であり、 R_c が高いアルゴリズムが堅牢となる。

DMD 形式の GIS データの例として、高知市街地の一部を対象とする GIS データ (ファイル、N-14.dm) を使い、3 つのアルゴリズムの線分変換率 R_c を計算した。結果を表-1 に示す。N-14.dm は他の街区に比べ構造物が密に含まれている。参考のため、ポリラインの結合のアルゴリズムを使わずにポリラインから機械的に Shape を作成した場合の R_c も記載している (アルゴリズム「無し」)。図-4 に示された元の N-14.dm を変換した Shape を図-5 に示す。なお、図中の Shape は平面に投影した輪郭線である。結合のアルゴリズムを使わない場合に比べ、どのアルゴリズムでも線分変換率は大きく向上することがわかる。

アルゴリズムを使わない場合に比べ R_c が増加したことは確かであるが、直観的に理解しやすいアルゴリズム 1 の場合、約 6% の誤りがある。構造物の専有面積にもよるが、一つの構造物の輪郭線の平均の数は 10 程度であることを考えると、1 つの構造物の形状を正しく変換できる確率は $0.96^{10} = 0.78$ である。すなわち、2 割程度の構造物に対し、些細なものを含め、形状を誤ることを意味する。アルゴリズム 1 に比べ、アルゴリズム 2 とアルゴリズム 3 の R_c は高く、特にアルゴリズム 3 の R_c は 99% を超えている。以上より、本研究では、アルゴリズム 3 を堅牢性が高いデータ変換手法とする。なお、図-4 から分かるように、元の DMD 形式の GIS データとアルゴリズム 3 で変換された Shape

図-6 N-14.dm

の間に、目視によって分かるような顕著な差異は簡単には見つからない。

記号や数値を図示するため、例えば、本来は端点 n_2 を共有すべきポリラインも、最後の線分を短くして記述される場合がある。またはポリラインの途中の線分を除く場合もある。これがデータの欠損である。線分を適切に伸ばしたり、除かれた線分を補うことが必要となる。線分の延長上に他のポリラインの端点があることや、同一のポリラインの他の線分があることを確認することで、ポリラインの延伸と補間を行う。

3.2 Shape から Grid への変換

本来は DMD 形式の GIS データを直接 Grid を変換するほうが効率的であるが、前章で説明したように、本研究では、Shape を Grid に変換することでデータ欠損の対処を回避する。構造物のない空間から群衆の避難経路モデルを作ることを目的とするため、Grid は構造物のある部分に 1、ない部分に 0 が入る格子データとする。構造物の Shape をこのような Grid に変換することは、GIS の分野ではベクトル-ラスター変換、計算幾何の分野では塗りつぶしと称され、さまざまなアルゴリズムが開発されている。

本研究では、塗りつぶしのアルゴリズムの一つである線形塗りつぶし (Linear)¹⁵⁾ を採用する。このアルゴリズムは、ポリゴンの輪郭と内部を格子データに変換する際、走査線を上から下にずらし、輪郭の間の格子を横一列に塗りつぶすアルゴリズムである。計算効率は高くはないが、堅牢性が高いことは定評がある。

Grid の格子寸法が大きい場合、Shape から Grid に変換する際、隣接する構造物の間の狭い空間が構造物に含まれてしまい、この Grid からは誤った避難経路モデルに変換されてしまう可能性がある。勿論、格子寸法を小さくすれば正確な避難経路モデルに変換できるのであるが、避難経路モデルのサイズは格子寸法の逆数の二乗に比例するため、あまり格子寸法を小さく

a) アルゴリズム 1

b) アルゴリズム 2

c) アルゴリズム 3

図-7 N-14.dm から変換された Shape

することは得策ではない。この点を考慮して、本研究は、構造物の輪郭線を含む格子を塗りつぶす Linear のアルゴリズム 1 と、塗りつぶさない Linear のアルゴリズム 2 のどちらかを、Shape から Grid への変換アルゴリズムとすることと検討した。

変換アルゴリズムの堅牢性を検証する指標として次

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図-8 Grid

表-2 2つのアルゴリズムの画像類似度

アルゴリズム	1	2
R_s (%)	95.53	96.77

の画像類似度を定義する.

$$R_s = \frac{N_S}{N_A} \times 100[\%]. \quad (5)$$

ここで N_A は元の Shape のデータを可視化しビットマップ形式の画像とした時に構造物の内部にあるピクセルの総数, N_S は Grid を画像とした時に Shape の画像と一致するピクセルの数である. ビットマップ形式の画像のサイズは Grid のデータに基に作成し, Shape と Grid の画像は同じサイズとなるようにする. この場合, ビットデータが一致するピクセルの数は, 面積に対応すると考えることができる. 塗りつぶされた形が完全に一致すれば, $R_s = 100\%$ となり, 誤った部分の面積は 0 となる. 前述のアルゴリズム 1 とアルゴリズム 2 を使って Shape を Grid に変換し, 画像類似度 R_s を計算した. 前章と同様, 構造物が密な N-14.dm を使う. 格子寸法は 0.5 m である. 結果を表-3.2 に示す. 2つのアルゴリズムとも画像類似度は 95%を超えている. 1%程度の違いであるが, 輪郭線を塗りつぶさないアルゴリズム 2 の画像類似度が高いことがわかる.

格子寸法が小さければ, 輪郭線を塗りつぶすアルゴリズム 1 が高い類似画像度となる. しかし, 格子寸法 0.5 m の Grid では, 輪郭線を塗りつぶすと過剰に多く構造物を格子データに変換することになるようである. 面積にして 1%の僅か違いであることは事実であるが, 画像類似度が高かったアルゴリズム 2 を堅牢なデータ変換手法とする.

4. シミュレーションへの入力

本章では, 前章で開発されたデータ変換手法を用いて構築された Shape と Grid から, 実際に INDS のシミュレーションが実行な都市モデルが構築されることを示す. 都市モデルの確からしさは, Shape と Grid とい

う CMD から都市モデルのデータ変換によるため, 本研究の主眼ではない. 同様に, シミュレーションの妥当性も, 都市モデルと解析手法の妥当性に関わるため, 本研究の主眼ではない. DMD 形式の GIS データからシミュレーションに適用な都市モデルが構築されることを確認した後, モデルの確からしさやシミュレーションの妥当性を検証する.

本章で行う INDS のシミュレーションは高知市全市街地を対象とする. DMD 形式の GIS データから, 構造物一棟一等の地震応答を計算する構造物地震応答シミュレーションと, 津波の襲来を予想した市民が避難を行う群衆避難シミュレーションのための, 2つの都市モデルを構築する. 最初に構造物応答シミュレーションを行い, 被災された構造物による避難経路の閉塞を考慮した群衆避難シミュレーションを行う.

4.1 構造物地震応答シミュレーション

構造物地震応答シミュレーションは, 壁谷澤ら¹⁶⁾による OCM (One Component Model) を数値解析手法として利用する. OCM は, 主に RC 建築建物を対象に, 梁・柱・壁を非線形線材としてモデル化し, 非線形時系列解析を行う数値解析である. 膨大な実験データに基づく非線形解析を行うため, 精度の高さには定評がある.

構造物地震応答シミュレーションの都市モデルは, 構造物一棟一棟の OCM の解析モデルの集合である. 建物高さや床面積から階数を推定し, さらに床の形状から各層での梁・柱・壁の位置と形状を推定する, Shape から OCM の解析モデルに変換するデータ手法は開発されている. 構造物の内部の情報がない場合, このような推定に頼らざるを得ない. したがって OCM の解析モデルは決して現実の構造物の正確なモデルとはならない. 推定されたモデルであることを強調する.

市街全体の構造物 16 万棟全てに対し, Shape を OCM の解析モデルに変換し, 都市モデルを構築した. 入力地震動として, 1995 年兵庫県南部地震で計測された JR 鷹取駅の地震波を入力し, 地震動応答解析を行った. 全ての構造物に対し, 誤動作することなく OCM の解析を実行することが確認された. 構造物地震応答シミュレーションの一例として, 図-9 に解析結果を示す. これは O-16.dm の GIS データを変換された都市モデルの分である. 図のカラーレジェンドは層間変形角を表す.

4.2 群衆避難シミュレーション

群衆避難シミュレーションは, 堀らによるマルチエージェントシミュレーション (Multi-Agent Simulation, MAS) を数値解析手法として利用する. この MAS は, 速度等の異なる能力を持ち, 見る・考える・動くという 3つの機能を持つエージェントが, 自律的に避難経路モデルを動き, 避難経路モデル外に脱出する解析手

図-9 構造物地震応答シミュレーションの例

法である。非一様な群衆が雑然と避難する状況を予測・再現するように開発されている。

MASに必要な都市モデルは、エージェントと避難経路モデルである。エージェントは、総数を与え、能力・位置はランダムに与える。避難経路モデルはGridから構築する。構造物の無い格子が移動可能な格子として避難経路モデルを構築する。Gridから避難経路モデルへの変換は単純である。エージェントの避難は、モデ

ルの境界に接する格子からモデルの外に出た時点で完了する。

MASでは、被災した構造物による道路閉塞の影響は避難経路モデルに現れることになる。本研究では、簡単な手法を使って、被災構造物の影響を避難経路モデルに反映させる。構造物地震応答解析では、非線形解析故、各層の残留変形を計算することができる。構造物の輪郭の頂点の位置に残留変形を加え、元の輪郭外

a) 地震被害前の Shape

b) 地震被災後の Shape

図-10 構造物地震応答シミュレーションの結果を反映した構造物モデル

に出た分を被災した構造物の輪郭とする (図-10 参照). 前章で例とした街区の, 地震被害前と, 被害後の構造物の様子を図-10 に示す. 図示には Shape を使う. 被災を強調するため, 各層の層間変形角の最大値を使い, 構造物の高さを変えている.

構造物の被災による道路閉塞の影響を考慮しない避難経路モデルと考慮した避難経路モデルを使った, 2つの MAS を行った. 避難経路モデルの格子寸法は 1m, 図-10b) に示すように, 残留変形のある構造物の一部が含まれる格子が道路閉塞を起こすと仮定する. 結果の一例を図-11, 図-12 に示す. どちらの避難経路モデルでもエージェント群は支障なく動く. 道路閉塞の影響を考慮しない避難経路モデルは, 前章で開発されたデータ変換手法を使って変換された Grid を基にしており, このモデルの確からしさは別として, 都市モデルの自動構築が可能であることが確認された. 被災の影響をどのように避難経路モデルに反映するかは別の課題であるが, 上述の簡単な手法程度であれば, 構築された都市モデルを変化させ, 別の都市モデルを自動構築できることも確認された.

5. 研究のまとめ

本研究は, INDS のための堅牢性の高い都市モデルの構築手法の開発を目的とする. CAD に準拠した DMD 形式の GIS データを CMD に変換する際には, 事物の輪郭線の結合と欠損の補間が必要である. GIS データを CMD の Shape と Grid に別々に変換する代わりに, 結合と欠損の補間を行って Shape に変換, ついでこの Shape を Grid に変換, という手順で行った.

DMD 形式の GIS データを Shape に変換するアルゴリズムとして, 輪郭線に対応する欠損したポリゴンに対し, その一部を構成するポリラインの位置や方向に着目し, 複数のポリラインを結合して欠損を補うものである. ポリラインの複雑さや隣接するポリラインの

数の多さを考慮し, 欠損した線に最も近い方向の線分を持つポリラインを結合するアルゴリズムを考案した. 本研究で提案した線分変換率では 99%以上の値を示すアルゴリズムである.

Shape を Grid に変換するアルゴリズムは, 塗りつぶしとアルゴリズムの標準の一つである Linear を基にしている. しかし, 最終的に構築される都市モデルのサイズを考慮すると, ある程度の大きさの格子寸法を持つ Grid に変換する必要がある. この場合, 事物の輪郭線の処理という詳細な点の考慮が必要である. 輪郭線を塗りつぶさないことで, 本研究で提案した画像類似度が 96%以上となるデータ変換を行った.

開発されたデータ変換手法を使って, 実際に INDS のシミュレーションが実行な都市モデルが構築されることを確認するため, 高知市を対象とした構造物地震応答シミュレーションと群衆避難シミュレーションを行った. 都市モデルの確からしさやシミュレーション結果の妥当性の議論は今後行うが, DMD 形式の GIS データから INDS に供しうる都市モデルが自動構築できることは確認された.

参考文献

- 1) F. Yang, T. Ichimura, and M. Hori: Earthquake simulation in virtual metropolis using strong motion simulator and geographic information system, 応用力学論文集, Vol. 5, pp. 573-580, 2002.
- 2) 市村強, 堀宗朗, 寺田賢二郎, 山川貴弘: 総合地震シミュレータにおける高分解能強震動シミュレータと都市域の電子情報の利用について, 応用力学論文集, Vol. 6, pp. 615-622, 2003.
- 3) 堀宗朗, 市村強, 中村光, 若井明彦, 海老澤健正, 山口直也: 都市内全構造物の地震応答シミュレーションに関する基礎的研究, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 231-238, 2004.
- 4) M. Hori: *Introduction to computational earthquake engineering*, Imperial College Press, London, 2006.
- 5) M. Hori and T. Ichimura: Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster, *Journal of Seismology*, DOI:10.1007/s10950-007-9083-x, 2008.

a) $t = 0(\text{s})$

d) $t = 150(\text{s})$

b) $t = 50(\text{s})$

e) $t = 200(\text{s})$

c) $t = 100(\text{s})$

f) $t = 250(\text{s})$

図-11 道路閉塞の影響を考慮しない経路モデルによる群衆避難シミュレーション

- 6) S. Nallathamby, M. Hori and Y. Ariga: Improvement of IES wrapper for plug-in of advanced simulation programs, *Journal of Applied Mechanics*, JSCE, Vol. 10, 2007.
- 7) 堀宗朗・田中謙吾・Sobhaninejad GHOLAMREZA・市村強・小国健二: 自然災害シミュレーションのための GIS から都市モデルへの汎用的データ変換, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.1-12, 2010.
- 8) M. Hori, T. Ichimura and K. Oguni: Development of integrated earthquake simulation for estimation of strong ground motion, structural responses and human action in urban area, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Vol.7, No.4, pp.381-392, 2006.
- 9) M. Hori, T. Ichimura, H. Nakamura, A. Wakai, T. Ebisawa and N. Yamaguchi: Integrated earthquake simulator for seismic response analysis of structure set in city, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, Vol. 23, No. 2, pp.1-10, 2006.
- 10) M.H. Serror, J. Inoue, M. Hori, and Y. Fujino: Distributed object-based software environment for urban system integrated simulation under urban-scale hazard – Part I: Infrastructure, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol.36, pp.1561-1579, 2007.
- 11) M.H. Serror, J. Inoue, M. Hori, Y. Fujino, and T. Ichimura: Distributed object-based software environment for urban system integrated simulation under urban-scale hazard – Part II: Application, *Earthquake*

a) $t = 0(\text{s})$

d) $t = 150(\text{s})$

b) $t = 50(\text{s})$

e) $t = 200(\text{s})$

c) $t = 100(\text{s})$

f) $t = 250(\text{s})$

図-12 道路閉塞の影響を考慮した経路モデルによる群衆避難シミュレーション

- Engng Struct. Dyn.*, Vol. 36, pp. 1545–1560, 2007.
- 12) 堀宗朗, 犬飼洋平, 小国健二, 市村強: 地震時の緊急避難行動を予測するシミュレーション手法の開発に関する基礎的研究, 社会技術研究論文集, Vol. 3, pp. 138–145, 2005.
 - 13) 宮島宙, 堀宗朗, 小国健二: 地震避難行動シミュレーションのためのマルチエージェントの開発, 応用力学論文集, Vol. 10, 2007.
 - 14) 堀宗朗・宮島宙・犬飼洋平・小国健二: 地震時避難行動予測のためのエージェントシミュレーション, 土木学会

- 論文集 A, Vol. 64, No. 4, Vol. 1017–1036, 2008.
- 15) 安竹洋平: 領域内高速塗りつぶし法, <http://lee.phys.titech.ac.jp/yasutake/PaintArea.html>.
 - 16) H. Mostafaei and T. Kabeyasawa: Axial-Shear-Flexure Interaction Approach for Reinforced Concrete Columns, *ACI Structural Journal*, Vol. 104, No. 2, pp. 218–226, 2007.

(2011 年 3 月 8 日 受付)