

地震応答解析モデル自動構築のための形状判読手法の開発

大谷 英之¹・陳 健²・堀 宗朗³

¹ 正会員 理化学研究所 計算科学研究機構 (〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26)

E-mail:h.o-tani@riken.jp

² 正会員 理化学研究所 計算科学研究機構 (〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26)

E-mail:jchen@riken.jp

³ 正会員 東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

E-mail:hori@eri.u-tokyo.ac.jp

統合地震シミュレーションでは都市の建物一棟一棟に対して地震応答解析を行うため、解析モデルの自動構築手法には堅牢性が必須である。モデル構築の情報源として建物の外形情報を含む GIS データが利用できる。しかし、図示を目的としたものであるため、建物形状は個々に独立した多角形の集合として記述されており、GIS データを基に有限要素法のモデルに代表されるような節点と要素からなる解析モデルを自動構築する問題は単純ではない。本論文は、多角形間の接続状況を推定し形状を判読するための方法論としてテンプレートフィッティングを提案する。本論文では、建築建物の床形状にテンプレートフィッティングを適用した。多様な形状に対応したテンプレートをあらかじめ多数準備し、形状判読の対象に最も形状に近いテンプレートを判読対象の形状と判定することで、床形状の判読に成功したことが堅牢に判定できるのみならず、床形状の判読に失敗したことの判定も堅牢に実行できる。形状判読の対象とテンプレートの相違の程度は、真偽値を用いた 2 次元のグリッド情報によって容易かつ堅牢に計算できる。

Key Words: Integrated Earthquake Simulation, Template-Based Model Construction

1. はじめに

従来、地震被害推定には、距離減衰式やフラジリティカーブといった経験式が利用されている。都市内の全域の地震動や全構造物の被害とその対応を算定するためには、経験式に頼らざるを得なかったからである。大規模数値計算が可能となった現在、新しい方法として、シミュレーションベースの地震被害推定が検討されている。統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES) は、都市を襲う地震災害の 3 つの過程、すなわち、強震動発生・構造物地震応答・被害対応の過程を、さまざまな数値解析手法を組み合わせてシームレスに解析するシミュレーションである。入力された地震シナリオに対して都市の地震被害がシミュレーション結果として客観的に出力されるため、科学的合理性の高い被害想定手法と考えられる。

IES には各種数値解析手法のための都市モデルが必要である。構造物地震応答のシミュレーションでは、都市の建物一棟一棟に解析モデルが必要であり、地理情報システム (Geographical Information System, GIS) に蓄積

された構造物の形状データから自動構築する方法が提案されている。地震応答解析手法そのものは十分成熟しているため、IES の構造物地震応答の信頼度は解析モデルの信頼度によって決まることになる。より高い信頼度を確保するためには、自動構築の手法の改良が重要な課題である。一般に、GIS は CAD (Computer Aided Design) のデータ構造に準拠しており、構造物の幾何形状は 3 次元の点座標が並ぶ多角形の集合として記述される。図示が前提とされているため、「どの多角形とどの多角形が隣り合っているか」といった多角形の接続情報は含まれておらず、「6 枚の多角形で直方体を構成している」といった形状の情報も持たない。一方で、有限要素法のモデルに代表されるように解析モデルには構成要素間の接続情報が不可欠であり、構成要素と接続情報の組み合わせが形状を表す。したがって、解析モデルの自動構築には接続情報を持たない GIS の形状データを、接続情報を持つ形状データに変換する方法が必要である。しかしながら、点・線分・面のデジタル情報の分析・操作を研究する計算幾何の分野でも、接続情報がない多角形の集合を扱う事例は限られており、多角形の接続状況を推定する方法の開発は未

開拓の問題であると考えられる。

建築建物の場合、地震応答解析モデルの基盤は床形状である。大多数の床形状は四角形やその組み合わせであるが、例外的に三角形や円弧を使うこともある。したがって、形状を忠実に取り込む自動構築のためには、複雑かつ多様な図形要素の接続状況を推定することが必要である。これは他の構造物にも共通する。実際、建築建物と同様、土木構造物も複雑かつ多様な図形要素が接続した部材から構成されている、接続状況を正確に推定できれば、複雑な幾何形状を忠実に反映した解析モデルの自動構築が可能となる。

上記を背景とし、本論文は、GIS に含まれる多角形に対して接続状況を推定し、複雑な幾何形状を忠実に反映できる地震応答解析モデルを自動構築する手法の開発を目的とする。自動構築の重要な点は、接続状況を正しく推定し誤りを最小限とする高い堅牢性と、幾何形状の複雑さに対応できる柔軟性の高さである。堅牢性と柔軟性の高さを両立するため、建築建物の床形状を対象として、プレートフィッティングという方法論を考案した。これは、多様な床形状に対応したテンプレートを多数準備し、GIS から抽出された床形状に最も近いテンプレートを選択するという方法論である。テンプレートフィッティングは床形状を判読することで接続状況を推定する手法と考えることができる。床形状を判読すると、床に配置された柱・壁等の位置といった内部構造の推定も可能となる。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章において地震応答シミュレーションに必要な構造物の解析モデルの自動構築を説明し、問題点の抽出と原因の分析を行う。第 3 章ではテンプレートフィッティングという方法論を説明し、従来の方法論に比べた堅牢性と柔軟性の高さを議論する。第 4 章においてテンプレートフィッティングという方法論に基づいたモデル自動構築のアルゴリズムを説明する。開発されたモデル自動構築手法の性能を検証するため、実際の GIS データを用いた計算例を第 5 章に示す。第 6 章において本研究の結論と課題をまとめる。

2. 地震応答解析モデルの自動構築

IES の地震応答シミュレーションでは、対象とする都市内の全建物に対し、解析モデルを使った地震応答解析を行う。地震応答解析のモデルは多岐多様にわたるが、大きく次のように分類できる。

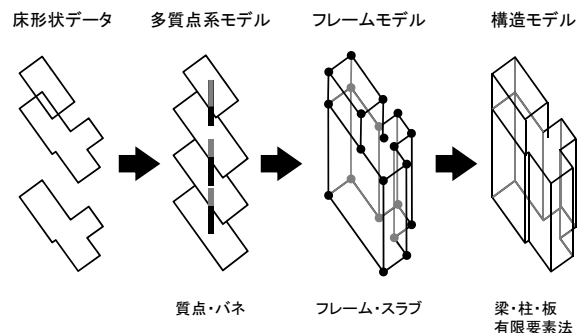


図-1 床形状データからの地震応答解析モデル構築

1. 階毎の質量と階の間の剛性を使った質点系モデル
2. 柱・壁・スラブの部材モデルを使った構造モデル
3. 構造要素やソリッド要素を使った詳細な有限要素法モデル

IES に実装される地震応答解析手法に柔軟に対応できるように、一つの GIS 建物データに対して上記の解析モデルが自動構築できる必要がある。現時点の IES で使われている GIS には、建物の外部形状のみがデータとして含まれており、例えば、階の床形状を多角形として取り出すことができる。内部の構造データは勿論、木造・S 造・RC 造等といった構造形式をデータとして持つ GIS は公開されていない。

前述のように、GIS の形状データは CAD のデータ構造を持っているため、多角形の接続情報は含まれていない。画像として形状を正しく表示するためには、多角形を正しい位置に描画さえすれば十分だからである。例えば床形状の場合、一つの床面が複数の多角形に分解されている場合もある。計測誤差等の原因で、多角形が重なり合う場合もある。したがって、接続状況の推定は決して単純ではないのである。さらに、GIS には、データ量削減のため、建物の底部を表す多角形を除いたものがあり、建物の形状データは 3 次元領域として閉じていない場合もある。このような GIS では接続状況の推定はさらに難しくなる。

建築建物に絞れば、地震応答解析の解析モデルを自動構築するためには、床形状の正確な判読が重要である。床が重量を決める支配的な要因だからである。GIS のデータを使う自動構築では、多角形の組み合わせとして表わされる床形状を正確に判定することが必要であり、これには多角形の接続情報が必須となる。質点系モデルの場合ですら、床形状をより正確に判定するための接続情報が必要となる。

床形状の抽出・判読のような図形処理を計算機を使って

自動的に行うことは、比較的新しい情報学の一分野である計算幾何（Computational Geometry）の主要な研究課題である。なお計算幾何はコンピュータグラフィックスの基礎である。しかし、接続情報をもたず、3次元領域として閉じていない多角形の集合から、解析モデルとなる接続情報と内部構造をもった中身の詰まった3次元形状を自動構築する技術は、著者らの調べた限り、あまり研究されていないようである。これは、多角形の集合が3次元領域として閉じていないために建物の内外判定が難しいことに起因すると考えられる。

通常の方法論では、建物の外形に加えて内部構造までが多角形の集合として与えられた形状データに対し、多角形間の頂点の接続状況を推定し、推定された接続情報から建物の部分ごとの幾何形状を決定・抽出する。しかし、この方法論は、内部構造のないデータには適用できない。また、複雑な形状に対応する例外処理が多くなる他、GISデータの誤差により、自動構築の堅牢性を向上することが難しい。現時点のIESでは、接続情報が補間された形状データとして、床形状を表す2次元多角形を高さ順に列に並べたものを作成することで、質点系モデルなど建物各階の床形状を反映しない簡単な地震応答解析モデルは構築できている。より高度なモデルの構築には、床形状を認識し、柱や梁などの内部構造を付加することが必要であるが、現時点では、抽出された床形状を長方形に近似して行うに留まっている。

多角形の集合に対して、接続情報と内部構造を与えるような汎用技術が計算幾何に開発されていないこととは別に、GISに蓄積された建物の多角形には次の2つの問題点がある。

1. 計測誤差に起因する困難さ：GISに含まれる多角形の頂点の座標は、実際の建物の形状を計測することで得られている。したがって頂点の座標には計測誤差が含まれてしまう。この結果、本来は隣接する二つの多角形が離れる場合や、重なり合う場合もある。これは接続状況の推定を格段に難しくする。
2. 付帯設備に起因する困難さ：近年のGISには、渡り廊下や広告等のような建物の付帯設備のデータも含まれている。地震応答解析の対象とはならない付帯設備は除外しなければならない。付帯設備も多角形として与えられるため、複数の多角形の接続状況を推定した上で、付帯設備であることを判定し、除外するという処理が必要となる。

このため、建物のGISに特化した床形状の抽出・判読技術が必要となる。

3. 形状判読のためのテンプレートフィッティング

本論文で扱うGISでは、建物の形状データが同一の高さにある2次元多角形の集合として与えられている。同一平面に複数の多角形がある場合、テンプレートフィッティングを行うことで、接続状況を推定し床形状の判読を行う。IESが対象とする都市には $10^{5\sim6}$ のオーダの建築建物があるため、形状判読には高い堅牢性が必要である。この堅牢性には次の二つの意味がある。

1. 床形状を正しく判読する堅牢性
2. 床形状を判読できなかったことを判断する堅牢性

分割されたり重なり合ったりする多角形の集合で表わされる形状の判読は、通常、最初に各多角形の頂点を用いてマージし、ついでマージされた多角形に対し、頂点の相対位置を分析することで行われる。数値誤差に起因して、多角形のマージング処理の堅牢性は必ずしも高くなく、GISのデータを使う場合、元の多角形の頂点に計測誤差が含まれるため、さらに堅牢性が低下する。マージング処理以外にも計算幾何の分野では形状判読の方法が研究開発されているが、基礎理論の構築段階にあるものが多く、実用性が検証されているものは少ないようである。

上記の二つの堅牢性を考慮するため、本論文では、個々に独立した多角形が持つ多点情報を分析して形状を推定する代わりに、あらかじめ接続情報の与えられているテンプレートを多数用意し、判読対象に形状が最も近いテンプレートを選択することで床形状の判読を試みる。テンプレート図形と判読対象の形状の近さの計算には、複数の多角形を平面に投影して作られるグリッド情報を使う。平面を格子によりセルの集まりに分け、多角形を含むセルとそうでないセルに区別したものがグリッド情報である。内部に多角形を含むか否かは真偽値によって簡単に表すことができる。真偽値（Boolean）を使ったグリッド情報をB-Gridと称することにする。グリッドの寸法を小さくすることで形状判読の精度が向上することは自明である。ある程度グリッドの寸法を大きくすることで計測誤差の影響を排除することもできる。

次章で詳細を説明するが、テンプレートフィッティングによる床形状の判読は、形状判読の対象とする多角形ない

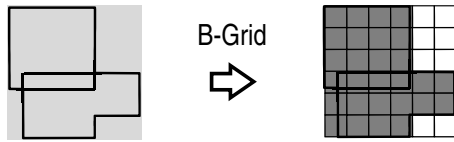


図-2 床形状の B-Grid への変換

し多角形の集合と最も形状に近いテンプレートを，あらかじめ想定された床形状に対応した複数のテンプレートの中から選択することで行う．選択されたテンプレートが表す形状が判読対象の形状となる．形状判読の対象とテンプレート図形の形状の近さは，同じ大きさの正方形の B-Grid に両者を変換して計算される（図-2）．2 つの B-Grid の近さは，2 つの B-Grid の真偽値の異なるセルの数を使って簡単に計算できる．本研究では次の指標を利用する．

$$S = \frac{\text{真偽値の異なるセルの数}}{\text{テンプレートのセルの数}} \quad (1)$$

S の値は，抽出された床形状とテンプレート図形の不一致部分の面積をテンプレートの面積で割ったものに相当する．当然， $S = 0$ は床形状とテンプレートが完全に一致する場合である．グリッド情報を用いると 2 つの図形の近さは容易に判断できるが，多角形の頂点の情報のみを使うと近さの判断には複雑かつ膨大な計算が必要となる．

テンプレートフィッティングでは，十分小さい S が得られた場合，床形状を正しく判読したことになる．なお，B-Grid はグリッド情報であるため，小さい格子寸法を使うと，より正確に判読できることになる．また，できるだけ多くのテンプレートを準備しておけば S が小さいテンプレートを選ぶ可能性は高くなる．テンプレートフィッティングによる床形状の正しい判読に関する堅牢性は高いと考えられる．

テンプレートフィッティングは最も小さい S を持つテンプレートを選ぶが，選ばれたテンプレートが床形状に近いとは必ずしも限らない．これは最も小さい S の値が許容できる閾値を超える場合であり，対象とする床形状に近いテンプレートがなかったと判断できる．したがって最も小さい S が設定した閾値以上となる場合は，床形状の判読に失敗したことになる．テンプレートフィッティングでは，床形状の判読失敗に関する堅牢性も高いと考えられる．

4. テンプレートフィッティングのアルゴリズム

テンプレートフィッティングによる床形状の判読では，

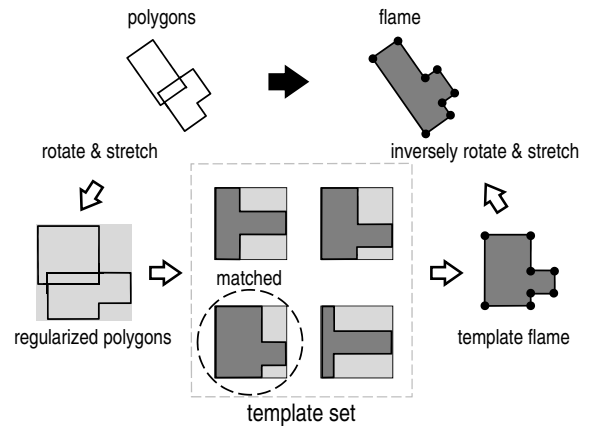


図-3 テンプレートフィッティングの流れ

抽出された床形状と最も近いテンプレートをあらかじめ多様な床形状に対応して用意されたテンプレートの中から選択することで行う．GIS データ抽出される床形状は，複数の多角形が一つの床形状を構成するとして抽出される．テンプレートは，内部構造とひもづけられた四角形や L 字型，凸型等の多角形である．分割されたり重なったりしている多角形で表された床形状に対し，前述の S を計算することで，最も近いテンプレートを堅牢に選択でき，高度な地震応答解析モデルに必要な，柱・壁の数や位置が床形状に確実に付加できる．

あらかじめ用意されたテンプレートに対する床形状判読の手順は次のように整理される（図 3）．

1. 多角形の集合に対し，全体を包含する最小の長方形（以下，フィッティング領域）を決める．
2. フィッティング領域（図の灰色の領域）が原点を中心とする一辺 2 の正方形領域 $\{(x, y) | |x| < 1, |y| < 1\}$ と重なるよう，多角形の集合に対し，回転・収縮を行う．
3. 変換された多角形集合の周の情報を使って塗りつぶしを行い，B-Grid を作る．
4. 全てのテンプレートとの S を計算し，相違の程度 S の値が最も小さいテンプレートを選ぶ．
5. S が閾値を超えていない場合に，判読成功とする．越えた場合には，判読失敗と判定する．
6. 判読が成功した場合に，選ばれたテンプレートに対し，多角形の集合に対して行われた変換の逆を行い，床形状を決定する．

多角形の周の情報を使った塗りつぶしに関しては，既にさまざまなアルゴリズムが開発されている． S の値を使った判定も，B-Grid が真偽値の集合であるため簡単であ

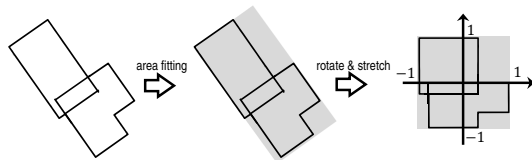


図-4 床形状を表す 2 次元多角形の集合の正規化。

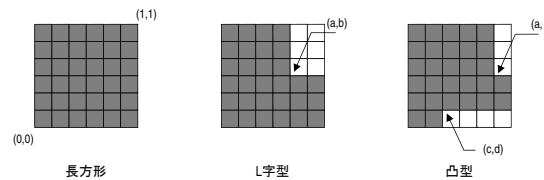


図-6 3 種類のテンプレート

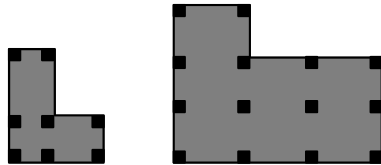


図-5 テンプレートの伸縮に従い変化する柱の数．灰色の領域はテンプレートの形状を示し，黒い四角は柱を示す．

る．したがって，この手順に対応するアルゴリズムは，第一・第二の手順である図形の変換を除き，特に難しいものではない．

多角形の集合に対する第一・第二の手順をまとめて正規化と称することにする．床形状を表す多角形集合は，正規化後にテンプレートと比較される．すべてのテンプレートは，正規化操作を行っても不変である必要がある．これは，自身の形状に対するテンプレートフィッティングで自身が選ばれる必要があるからである．ここで，テンプレートは，90 度毎の回転と，それぞれ鏡像反転をしたものの 8 通りを同一視することにする．これにより，テンプレートフィッティングの計算の際に，8 通りを別のテンプレートとして管理するよりもメモリを節約することができる．

回転や鏡像反転を加えたテンプレートを同一視することは，テンプレートにひもづけられた内部構造などの付加情報がこれらの操作で不変であることを暗に仮定しているが，実際，内部構造などが従うべき建築設計基準などは，回転や鏡像反転によって不変であると考えられる．なお，正規化の逆の変換によりテンプレートは拡大あるいは収縮されるため，テンプレートにひもづけられる内部構造は，図 4 に示す柱の配置のように伸縮に応じて自動的に変化する必要がある．伸縮に対応できない場合には，伸縮のパターンに応じたテンプレートが必要となるため，必要なテンプレートの数が膨大となる．

単純な床形状でない限り，テンプレートに対応する形状が，元の多角形の集合が表す形状と完全に一致することはない．実際，長方形，L 字型，凸型の全ての場合において，テンプレートの形状の頂点の座標は，元の多角形の頂点の座標とは異なる．この誤差は小さい寸法のグリッドを使うことで小さくできる．しかし，判読された床形

状から構築される地震応答解析モデルに，大きな誤差をもたらさない限り，図形の誤差は許容できると考えられる．例えば，質点系モデルの場合，テンプレートフィッティングによって判読された床形状の面積に対し，実際の床形状との誤差が 1% 以下であれば，床面積に起因する質量の誤差は 1% 以下になる．この質量の誤差は十分許容できると考えられる．

5. 計算例

本研究では，テンプレートの形状として，正方形，L 字型，凸型の 3 種類を設定する．テンプレートフィッティングでは，回転・伸縮による床形状の正規化を行うため，正方形のテンプレートを一種類用意すれば，縦横の長さの異なる多様な長方形の床形状に対して対応できる．一方，L 字型と凸型にはさまざまな形がある．図 6 に示すように，L 字型，凸型のテンプレート形状を B-Grid のセルの集合で表すと，L 字型は一点，凸型は二点を指定することで，セルの集合として表せる L 字型と凸型の形状を全て表すことができる．グリッドの寸法を小さくするとテンプレートの数が増え，より精緻な床形状の判読が可能となる．例えば L 字型の場合，5 × 5 のグリッドでは鏡像反転形状を同一視して 10 通り，10 × 10 のより細かいグリッドでは 45 通りのテンプレートとなる．また，L 字型の場合，グリッド寸法の逆数である辺当たりのグリッド数の 2 乗に比例してテンプレートの数が増え，凸型の場合には，4 乗に比例する．本研究では 5 × 5 の B-Grid をテンプレート作成に用いた．

約 38,000 の建物に対し，正方形・L 字型・凸型の 3 種の形状のテンプレートを用いてテンプレートフィッティングを行った．テンプレートフィッティングの成功例と失敗例を図-8 と図-9 にそれぞれ示す．床形状を表す多角形の周が黒線，テンプレートフィッティングにより選択されたテンプレートの形状が灰色の領域で表されている．図-8 の floor shape 1-3 は，それぞれ長方形，L 字型，凸型のテンプレートへの変換が成功した例である．複数の



図-7 選択されたテンプレートと Google の衛星画像との比較

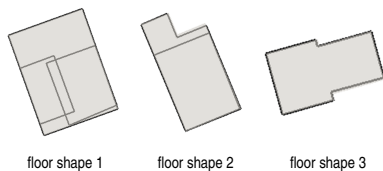


図-8 テンプレートフィッティング成功例

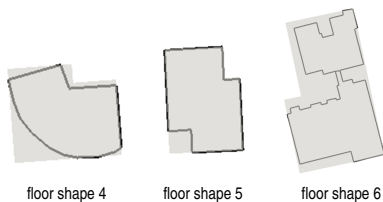


図-9 テンプレートフィッティング失敗例

多角形からなる床形状に対してもテンプレートフィッティングが適用できている。図-9 の floor shape 4 は、床形状に曲線部分が含まれる例であり、floor shape 5 は長方形・L字型・凸型以外の形状に対応したテンプレートを追加すると正しく変換される例である。曲線部分を含む床形状に正確に対応する形状をテンプレートに含めると、膨大な数のテンプレートが必要となるため検討が必要である。図-9 の floor shape 5 は、渡り廊下等の付属構造物によって複数の建物が接続されることで、床形状が複雑になる例である。付属構造物の削除などは今後の課題である。前述した差異の指標 S が一定の閾値以下となるテンプレートが存在しないことからテンプレートフィッティングの失敗、すなわち、モデル構築の失敗が堅牢に判定できた。

自動構築される解析モデルの形状に関する精度は利用する GIS データに従う。地震被害シミュレーションのた

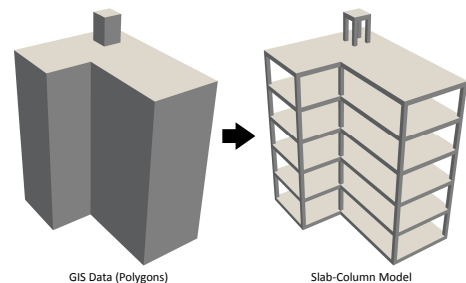


図-10 床・スラブモデル自動構築

めのモデル構築にあたって、実在する都市と市販の GIS データから自動構築されたモデルの形状を比較することは重要である。図-7 に、形状判読された床形状を Google の衛星画像に重ねて示す。おおむね衛星画像と一致する結果が得られているが、一部には、衛星写真にある建物がモデルに含まれていない場合がある。日々刻々と変化する実際の都市と、GIS データのずれに注意する必要がある。

形状判読に成功した床形状を用いて構築した床スラブと柱からなる解析モデルの一例を図-10 に示す。屋上部にペントハウスを持つ L 字型の建物に対してモデル形状の構築が正しく行われている。柱の数・配置などの内部構造は、あらかじめテンプレートに関連付けておくことで付加が可能である。テンプレートに対する適切な内部構造の推定は今後の課題であるが、間取りなどが合理的に決定できれば、テンプレートフィッティングは避難シミュレーションのためのモデルの生成にも利用できると考えられる。

6. おわりに

本論文は、地震応答解析モデルを GIS データから自動構築する手法の開発を目的とし、個々に独立した多角形の集合として記述された GIS の形状データから構成要素間の接続情報を持ったモデル形状を作成するための方法論としてテンプレートフィッティングを提示した。建築物に対するテンプレートフィッティングでは、多様な床形状に対応したテンプレートを多数準備し、抽出された床データに最も近いテンプレートに対応させる形状認識を行うことで床形状の判読を行う。GIS データは建物内部の構造情報、すなわち、柱や壁の数・配置などを持たないが、テンプレートフィッティングを用いれば選択されるテンプレートにあらかじめ関連づけておくことで付加が可能

である。

市販の GIS データに含まれる約 38,000 棟の建築物のデータに対し、正方形、L 字型、凸字型のテンプレートを用意してテンプレートフィッティングを実行した。テンプレートフィッティングにより床形状の判読が堅牢に実行できたが、渡り廊下など付属構造物のために床形状が複雑になる場合があるため、単純な形状のテンプレートだけでは都市の多様な建物形状に対応できないことが確認された。実際の都市の多様な床形状に対応するためには、付属構造物の削除や、テンプレートフィッティングの対象となる床形状に応じたテンプレートの逐次自動生成が今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 堀宗朗, 田中謙吾, Sobhaninejad, G., 市村強, 小国健二, 土木学会論文集 A, 土木学会, Vol.66, No.1, pp.1-12, 2010.1.

A Template-Based Construction of Seismic Response Analysis Model from GIS Data

Hideyuki O-TANI, Jian CHEN, Muneo HORI

A new approach to automatic construction of numerous building models for seismic response analysis is proposed. It is based on a template-based shape recognition method applied to floor shapes extracted from GIS data. In this approach, adequate number of prescribed templates are precomposed, and one of them is selected to adapt each floor shape composed of a set of polygons. Since the differences between templates and floor shapes can be easily calculated using grid data with boolean values, the template-based approach enhances the robustness of floor shape recognition and automatic construction of building models.