

ASI-Gauss法による 都市全域の家屋倒壊予測シミュレーション

Simulation of wooden house collapse prediction in a whole city
using the ASI-Gauss code

石井秀堯¹⁾, 浅井光輝²⁾, 大谷英之³⁾, 飯山かほり⁴⁾, 盛川仁⁵⁾, 磯部大吾郎⁶⁾

Hidetaka ISHII, Mitsuteru ASAI, Hideyuki OTANI,
Kahori IYAMA, Hitoshi MORIKAWA and Daigoro ISOBE

- 1) 九州大学大学院工学府 建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744, E-mail: ishii@doc.kyushu-u.ac.jp)
- 2) 九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 准教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡744, E-mail: asai@doc.kyushu-u.ac.jp)
- 3) 理化学研究所 計算科学研究センター (〒650-0047 神戸市中央区港島南町7-1-26, E-mail: h.o-tani@riken.jp)
- 4) 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 調布市飛田給2-19-1, E-mail: iiyama@kajima.com)
- 5) 東京工業大学環境・社会工学院 教授 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259, E-mail: morikawa@enveng.titech.ac.jp)
- 6) 筑波大学システム情報系 教授 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

During the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and the 2016 Kumamoto Earthquake have caused devastating damages, collapsing lots of wooden houses. Restoration and reconstruction after these huge disasters delayed removing a large amount of debris including collapsed house members. It is estimated that the same-scale earthquakes and accordingly tsunamis in the Nankai Trough region will be happen. Therefore, it is very important not only estimating the tsunami run-up in advance but also risk management such as evaluating the total amount and spread of debris, securing rescue routes, and temporary rubble storage sites. In this study, the wooden house collapse simulation is conducted with the ASI-Gauss code, which is one of the large deformation FEM code with the Timoshenko beam element. In addition, the ASI-Gauss code is enhanced in order to simulation large scale city models. Then, validation of a wooden house collapse simulation is confirmed by comparing it with the past damage survey results.

Key Words : ASI-Gauss Code, wooden house model, City model, Seismic response analysis

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震・津波,あるいは2016年熊本地震では多くの木造家屋が倒壊し,甚大な被害が発生した。倒壊した木造家屋は道路を閉塞し避難の妨げとなり,また,大量の瓦礫の処理に時間がかかり復旧・復興に遅れを生じさせるなど,直接的な人災を招くだけでなく,災害後の障壁にもなった。今後,南海・東南海地方において,同程度以上の地震・津波被害が生じる危険性が高いことが危惧されている。そのため,津波遡上域を事前に把握し災害に備えるだけでなく,同時に発生する瓦礫の総量と拡散状況までを事前評価し,災害時の救援経路や瓦礫の仮置き場の検討を行うなどの災害リスクマネジメントが重要となる。研究の最終目標は,地震だけでなく津波による木造家屋の倒壊を考慮した津波遡上解析手法を開発し,遡上解析のさらなる高精度化を図るとともに,同時に都市全域に発生・拡散する瓦礫の総量を事前に予測することである。

本研究では,上記の目的のため,まずは木造家屋の倒壊を考慮した都市全域の地震被害予測シミュレーションを行った。解析対象とする木造家屋の軒数は非常に多く,建

物ごとの詳細なモデル化は不可能である。そのため,地理情報システム(GIS)のデータからすべての木造家屋をはり要素により自動モデル化させる方針とし,建築年代ごとの建築基準に基づいた等価な耐力を与えることにした。解析手法には骨組み構造の進行性崩壊解析が可能な有限要素法の一つであるASI-Gauss法^[1]を選択し,大規模解析シミュレーションを実施し,過去の被害調査結果と比較検討することで手法の妥当性確認を行った。

2. 解析手法及び解析モデル

2.1 解析手法の概要

ASI-Gauss法は著者の一人である磯部によって開発された有限要素解析手法である。1部材を2つの線形要素に分割する。1部材を2つの線形要素に分割することで,計算時間を最小限に抑えることができる。また,降伏判定された要素の端部には塑性ヒンジが形成される。降伏関数には次式を採用した。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_0}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

本研究では M_x , M_y , N はそれぞれ x , y 軸回りの曲げモーメント、軸力とし、次式に示す降伏関数を用いた。ここで、右下添え字の“0”は全断面塑性値であることを示す。破断は破断判定された要素の断面力を解放することで表現し、骨組構造の進行性崩壊解析が容易に実施できることが最大の特徴である。増分理論には大変形問題まで扱えるよう更新ラグランジュ記述を採用した。

2.2 木造家屋のモデル化

図-1に木造家屋のモデル化の例を示す。木造家屋をはり要素としてモデル化し、各構成要素に対応した材料特性を与えることで解析を行う。はり要素を用いてモデル化することで、建物の向きによる地震応答の違い、さらにはASI-Gauss法の特徴である崩壊現象まで評価できる。

任意形状の家屋のモデル化を容易にするため、図-2に示す単位ユニットの組み合わせによりモデル化した。単位ユニットを構成する要素は柱、壁、梁、床の4つに分類した。そして、壁と床のせん断剛性はブレース要素により表現するものとし、床は剛体床と仮定することにした。各要素の剛性および耐力は、建築年代ごとの建築基準に基づいた層せん断力と層間変形角の関係^[2]を示すスケルトンカーブ(図-3を参照)にフィッティングさせることで決定した。この際、各要素の重量の設定には、表-1に示す「2012年改訂版 木造住宅の耐震診断と補強方法」^[3]より代表的な建築年代ごとの床面積当たりの重量を参照した。物性値のフィッティングにおいては、物性値はスギの材料特性に固定し、部材の断面形状(断面剛性)および降伏応力のパラメータを決定した。また図-3に示すスケルトンカーブにおいて、層間変形角が $1/120\text{rad}$ を超えるとブレースが先行して降伏し、また $1/30\text{rad}$ に達した時点で柱が降伏するものと仮定した。降伏後の要素は完全弾塑性体とし、最終的に柱が降伏することにより家屋全体の倒壊を再現した。

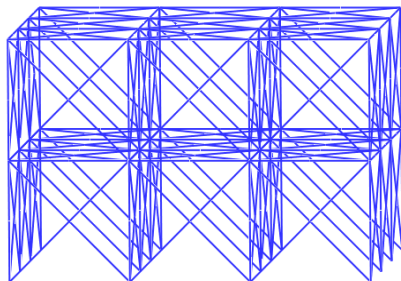


図-1 木造家屋モデル

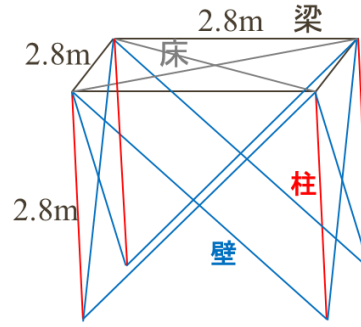
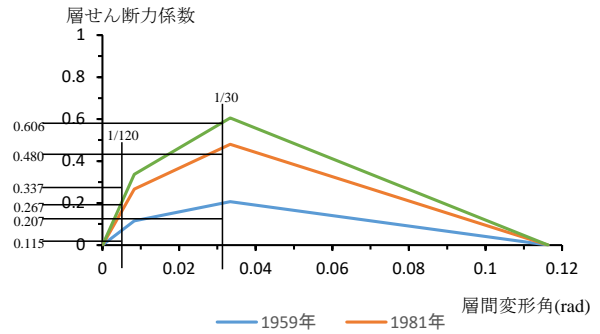
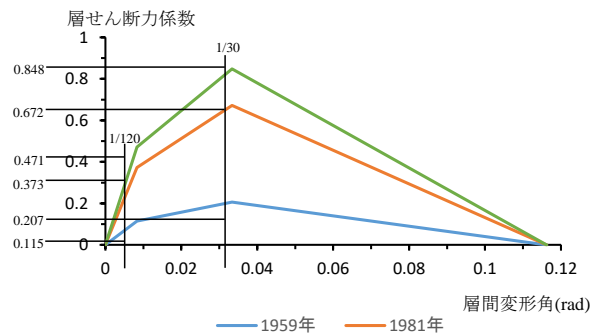


図-2 単位ユニット



(a) 1階



(b) 2階

図-3 層せん断力係数と層間変形角の関係

表-1 住宅の簡易重量表 (床面積当たり, kN/m^2)

建物	非常に重い	重い	軽い
屋根	2.40	1.30	0.95
外壁	1.20	1.20	0.75
内壁	0.45	0.20	0.20
床	0.60	0.60	0.60
積載重量	0.60	0.60	0.60
建築基準	1959年	1981年	2000年

2.3 都市全域のモデル化

都市全域の建物の形状および配置をモデル化するため、地理情報システム(GIS)を用いた。図-4に示すように、地図データに建物の座標、建築年代、敷地面積、階数などの情報を重ね合わせる。そして構造解析に必要な情報を抽出し、都市のモデルを作成した。このようにGISより定義されている建物の位置情報(SHPデータと呼ばれる平面

輪郭情報)と階層情報を参照し、あとは図-2に示す単位ユニットを組み合わせることでSHPデータと整合した建物モデルを自動生成した。また、同データから津波遡上解析に必要な地表面モデルの作成も可能である。

2.4 入力地震動の作成

入力地震動には、2011年東北地方太平洋沖地震においてJMA古川で観測された地表観測記録を使用した。ただし、地震動特性はシミュレーション結果に大きく影響を与えることが考えられる。そのため、できる限り地表で観測された本震記録を再現するような地震動の作成が重要となる。そこで、本研究では既往の研究^[4]において精度が確立されたインバージョン方法を利用し、地点ごとの工学基盤を考慮した入力地震動の作成を行った。

3. 解析条件の設定

3.1 解析対象とする地域

本研究で対象とする都市は、宮城県大崎市古川とした。同地域は2011年東北地方太平洋沖地震において多くの木造家屋に被害が生じた地域である。古川モデル(図-5)の概要は次のとおりである。領域:1.86km×1.69km,建物数:4,405棟,要素数:2,172,546,節点数:1,165,744,データサイズ:0.48GB。都市全域を対象とした解析を一括で実行することも可能であるが、図-5に示すモデルを要素数が同等になるように4つの区画に分類し、計算効率の向上を図った。計算環境には、京都大学「Champhor2」、1ノード、64スレッドを4プロセス使用し、実時間20秒(解析ステップ数:10,000)の解析を実行した。4つの区画の平均所要時間は65.91時間であり、都市全域を対象とした大規模解析を数日のうちに実行することが可能である。

3.2 建築年代の設定

木造家屋では建築年代が保有耐力と強い相関を持っている。本研究においては3つの建築年代(1959年、1981年、2000年)に準拠したモデル耐力を検討しており、各モデルに対応した耐力を付与することが必要となる。しかし、建築年代についての情報を入手することは困難である場合が多く、何らかの方法で推定を行う必要がある。



図-4 都市モデルの作成



図-5 古川モデル

た。そのため、本研究では国土地理院の空中写真を利用し、数年代の家屋状況を比較することで、おおよその家屋竣工年代を推定した。図-6にその分布を示す。カラーコンターは建築年代を表す。ただし、節点数が多く、一般的な木造家屋の床面積より大きなモデルに関しては非木造家屋と判別し、堅牢な耐力を付与することにした。建築年代の分布としては解析領域の中心部分に1959年基準に準拠したモデルが多いことに対し、外周部分に新しい基準に準拠したモデルが多いことが確認される。

3.3 地震動の設定

インバージョンを行った入力地震動の最大応答加速度のマッピングを図-7に示す。地震動は451地点に分類され、家屋モデルには対応する地盤情報を考慮した地震動を与えることとした。最大応答加速度の特徴としては、NS成分がEW成分よりも大きな加速度を持っていることが確認できる。また、分布としては南西エリアおよび北東エリアにおいて強い揺れが生じている傾向が見られ、実際の被害分布ともおおむね一致していることが確認できる。

3.4 被災度の算出

家屋の被害評価結果は指標選定やその判断の仕方に依存するが、本研究では部材の降伏・破断までを考慮できるASI-Gauss法の特徴を利用し、家屋モデルごとの部材損傷割合で評価することとした。損傷評価には木造家屋のモ

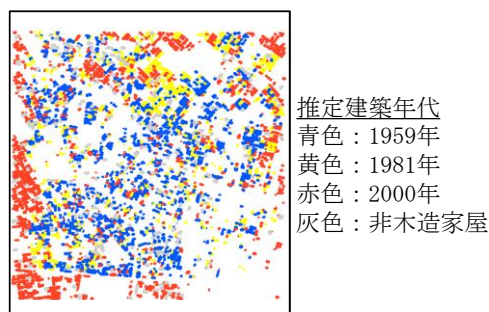
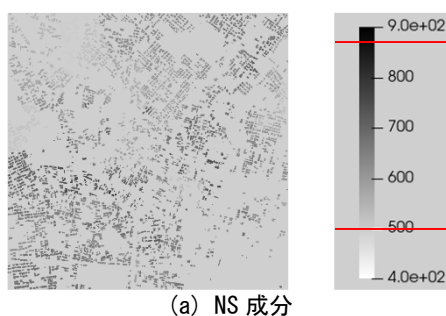
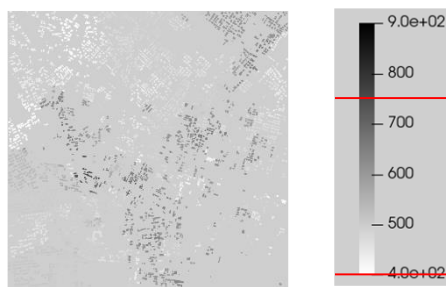


図-6 建築年代



(a) NS成分



(b) EW成分

図-7 最大応答加速度

デル化に大きく関与する柱および壁要素のみを使用することとした。また、柱と壁の降伏・破断の閾値の違いから、それぞれの要素の被災度に重みづけを行い家屋全体の被災度を算出する方針とした。ただし、これらの重みづけに関しては不明瞭なことも多く、今後改良の余地を残す。

4. 家屋倒壊予測シミュレーション結果

前章までで述べた仮定・解析条件の下で都市全域を対象とした家屋の倒壊予測シミュレーションを実施した。その結果を図-8に示す。カラーコンターは被災度を意味する。被災区分は全壊、大規模半壊、半壊、一部損傷、無被害の5つに分類した。また、既往の研究(MDOFモデル)による結果^[5]および震災直後に行われた悉皆調査による被害分布を図-9に示す。これらを比較したところ、はり要素を用いた3次元解析においても実被害と同様な被害分布が得られることが確認された。ただし、解析結果の方が実被害よりも全体的な被災度が高くなる傾向が見られた。家屋は壁量や仕上げなどにより、建築基準より高い耐力を保有することが考えられる。そのため、家屋モデル耐力の割り増しを検討し、解析を実行した。モデル耐力を基準の1.25倍、1.50倍とした解析結果を図-10に示す。また、その他モデル耐力ごとの家屋被災区分を図-11に示す。これらの結果より、全壊数に着目すると1.25倍程度で同等になる一方で、全被害数に着目すると1.50倍程度の耐力が必要となる結果を得た。ここにも考察の余地があり、他の被災事例を用いた検討が必要である。

5. まとめ

ASI-Gauss法による都市全域の家屋倒壊予測シミュレーションに向けた検討を行った。木造家屋をはり要素で

モデル化し、建築基準法に準拠した層せん断力と層間変形角の関係と整合するように、各構成要素の剛性・降伏応力を自動設定した。また地理情報システム(GIS)を用いて都市全域をモデル化し、地震応答解析を行った。木造家屋モデルに建築年代及び、工学基盤を考慮した地震動を付与させることで、はり要素を用いた解析においても実被害と同様な被害分布が得られることを確認した。今後、他の被災事例とも比較検討を行うことで手法の妥当性検証を行う方針である。

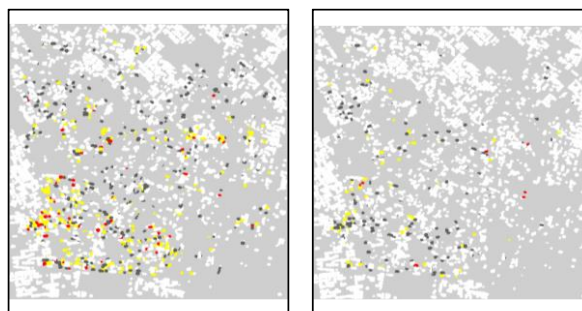


図-10 耐力割り増しモデル解析結果

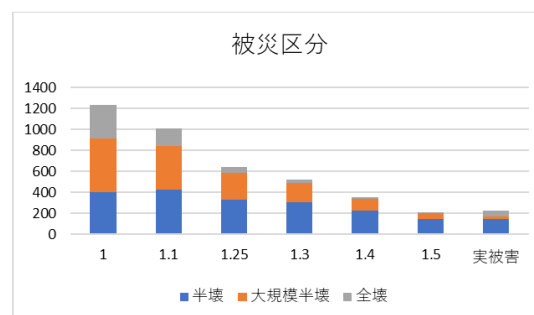


図-11 モデル耐力ごとの家屋被災区分

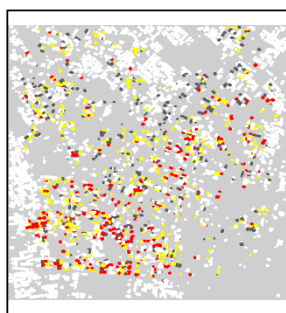


図-8 地震応答解析の結果

被災度
 赤色：全壊
 黄色：大規模半壊
 濃灰：半壊
 薄灰：一部損傷
 白色：無被害

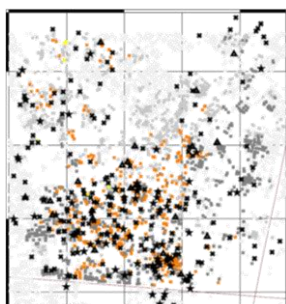


図-9 実被害の分布

被災度
 ★：全壊
 ▲：大規模半壊
 ×：半壊

参考文献

- [1] Daigoro Isobe : Progressive Collapse Analysis of Structures - Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN:9780128130421, Paperback ISBN:9780128129753, 2017.
- [2] 喜々津仁密, 中川貴文, 奥田泰雄, 坂田弘安 : 日本版改良藤田スケールの開発ー木造戸建て住宅のDODと推定風速の概要ー, 平成27年度日本風工学会年次研究発表会, pp.117-118, 2015.
- [3] 日本建築防災協会, 国土交通大臣指定耐震改修支援センター : 2012年改訂版 木造住宅の耐震診断と補強方法.
- [4] Hitoshi Morikawa, Kahori Iiyama : A Method to Find an Appropriate Input Motion Using a Given Motion on Ground Surface, Journal of Earthquake and Tsunami, 2021.
- [5] 飯山かほり, 盛川仁, 市村強, 堀宗朗, 山崎義弘, 坂田弘安, 大野晋, 柴山明寛 : 都市の地震応答シミュレーションのための木造建物モデル設定に関する一検討, 日本建築学会, 構造工学論文集Vol.64B, 2018年