

# ASI-Gauss 法を用いた熊本県益城町の 都市規模木造家屋倒壊シミュレーション

City-Scale Collapse Simulation of Wooden Houses in Mashiki Town  
Using the ASI-Gauss Method

大村浩之<sup>1)</sup> 山下拓三<sup>2)</sup> 磯部大吾郎<sup>3)</sup>  
Hiroyuki Omura, Takuzo Yamashita and Daigoro Isobe

<sup>1)</sup>博 (工) 防災科学技術研究所 研究員 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1, E-mail: homura@bosai.go.jp)

<sup>2)</sup>博 (工) 防災科学技術研究所 主任研究員 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1, E-mail: tyamashi@bosai.go.jp)

<sup>3)</sup>博 (工) 筑波大学 システム情報系 教授 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Conventional macro-simulations using multi-degree-of-freedom models struggle to represent member-level failures and collapse behaviors, while detailed micro-simulations face high computational and human costs for large-scale applications. To overcome these issues, we developed a methodology that automatically generates finite element frame models from CityGML data and analyzes them using the Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss method. Furthermore, to accurately reflect realistic structural characteristics, storey stiffness and storey shear strength are calculated based on the required wall length stipulated by the Building Standard Law and the statistical wall sufficiency ratio for each construction period. The cross-sectional parameters of structural members, such as columns and braces, are then reverse-calculated to satisfy these storey properties. Finally, the proposed method is applied to a city-scale collapse simulation of Mashiki Town during the 2016 Kumamoto Earthquake.

**Key Words** : FEM, Seismic response analysis, Wooden house, City-scale simulation

## 1. 序論

近年、南海トラフ巨大地震や首都直下地震などの発生が危惧されており、都市域における地震被害の事前予測と減災対策が急務となっている。特に我が国の都市部には木造密集市街地が広く分布しており、2016年熊本地震（益城町中心部）で甚大な被害が生じたように、木造家屋の倒壊は人命に直結するだけでなく、倒壊家屋による街路閉塞が避難・救助活動の大きな障壁となる。したがって、単棟の安全性評価にとどまらず、都市空間全体における建物群の倒壊過程や瓦礫の分布を物理的かつ高解像度に予測するシミュレーション技術が求められている。

都市規模の広域地震応答解析として、建物を多質点系 (MDOF) モデル等に置換するマクロな解析手法が広く用いられている。その例としては、Integrated Earthquake Simulator (IES) [1] や OpenSees [2] を用いた Lu et al., (2014) [3] による MDOF 解析などが挙げられる。これらの手法では計算コストを抑えられる反面、柱やブレースの降伏や破壊といった部材レベルの現象を表現することができない。したがって、倒壊を含む非線形応答の再現精度や、倒壊形状および街路閉塞リスクの評価などにおいて課題を抱えている。他方、wallstat [4,5] のような木造家屋を対象とした個別要素法ベースの詳細解析ツールも存在する。このようなアプローチでは、倒壊過程のリアルな追跡が可能である一方、数千から数万棟規模の建物群モデルを扱うことは人的・計算コストの面で非現実的である。

これら課題に対し、GIS データから取得した建物の平

面形と高さ情報に基づき、自動でフレームモデルを生成し、Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss 法 [6,7] に基づくより要素 FEM を用いて都市規模の木造家屋倒壊シミュレーションを行う方法論が提案されている [8]。しかし、当該研究においては、建築年代ごとに定めた代表的な骨格曲線モデルで画一的に建物モデルの構造特性を決定しており、実際の設計フローに即していないといった課題がある。また、ベースとなる GIS データとして平面形と高さ情報のみが格納された SHP 形式を想定しており、スパンや階高をユーザー設定の固定値として扱っていたり、建築年代を同定するために航空写真を用いた建物の抽出作業が必要になるなどの課題もある。

そこで本研究では、CityGML 形式の 3D 都市モデルデータ [9] を活用した木造家屋のフレームモデル自動構築手法を提案する。CityGML では、平面形・階数・建築年・床面積等の属性情報が一元的に格納されているため、建物ごとにそれらを抽出することでフレームモデルを生成する。さらに、実務の設計フローで用いられる要求壁量と壁量充足率から各層の剛性および層降伏耐力を算出し、それが発現するように各要素の断面パラメータを逆算するアルゴリズムを構築する。本稿では、提案手法を用いて 2016 年熊本地震における益城町中心部を対象とした都市規模の木造家屋倒壊シミュレーションを実施する。得られた解析結果と、日本建築学会等による悉皆調査の被害統計データとを比較することで、提案するモデリング手法の妥当性および広域倒壊解析の有用性について検証する。

## 2. ASI-Gauss 法に基づく木造家屋の崩壊解析手法

本研究では、ASI-Gauss 法に基づくフレームモデルの崩壊解析手法を用いて木造家屋の倒壊挙動をシミュレートする。ASI-Gauss 法は、線形 Timoshenko はり要素 [10] における数値積分点と応力評価点の位置関係 [11] を利用し、積分点を要素内でシフティングすることで弾性域および塑性域それぞれにおける曲げ変位解を高精度化する手法である。

ASI-Gauss 法における計算フローを簡単に述べる。まず、1つの部材を2つの線形 Timoshenko はり要素で分割し、骨組構造物を離散化する。要素が弾性状態の場合は、部材が1つの3次はり要素で離散化されている場合と応力評価が等価になるように、部材を構成する各線形要素の積分点を配置する。これにより、線形要素を用いつつも、3次はり要素と同等の変位解精度が担保される。要素が塑性状態の場合、すなわち曲げモーメントの補間計算により要素内で塑性ヒンジの形成が検知された場合は、塑性ヒンジ上で直接的に応力を評価するように積分点の位置をシフトすることで、塑性崩壊荷重の収束性を向上させる。これらのプロセスにより、線形要素かつ少ない要素分割数で、フレームモデルの高精度な弾塑性解析が実現される。なお、座標変換、変位求解、応力積分といった処理内容は一般的な FEM と同様である。

ASI-Gauss 法を大規模な都市域シミュレーションに適用するためには、領域分割型の並列計算が必須となる。そこで、ここではシミュレーションを行うプラットフォームとして、防災科学技術研究所で開発している E-Simulator [12] を用いる。E-Simulator は多様な要素・材料タイプを柔軟に導入できるオブジェクト指向型で開発された大規模非線形 FE 解析ソフトウェアであり、MPI 並列計算のための領域分割機能および反復型線形ソルバーが搭載されている。ASI-Gauss 法に基づくはり要素を E-Simulator に実装することで、容易に同手法による大規模並列計算を実現することができる。

## 3. 都市域の建物群モデル自動生成手法

### (1) CityGML データに基づくフレームモデル自動生成

City Geography Markup Language (CityGML) は 3D 都市モデルの国際標準データ規格であり、建物、道路、橋梁などの地物の形状と属性を XML 形式で記述するものである。特に日本では、国土交通省が推進する都市モデル整備事業で CityGML が採択されており、データの充実化が年々進んでいる。CityGML には、建物の平面形や高さといった幾何学的な情報に加えて、属性情報として階数、建築年、延床面積といった構造特性を同定するために必要なデータが格納されている。

CityGML データから必要な情報を抽出するために、Data Processing Platform (DPP) [13,14] を用いる。DPP は非構造化データを読み取り、意味を解釈することで構造化データ (メタデータ) に自動変換する手法であり、例えば土木構造物の図面から CIM データを自動生成することが可能である。CityGML は構造化データであるため、実際には DPP を構成する機能ライブラリ群のうち、XML などの関連するデータ形式の入出力ライブラリのみを利用することとなる。

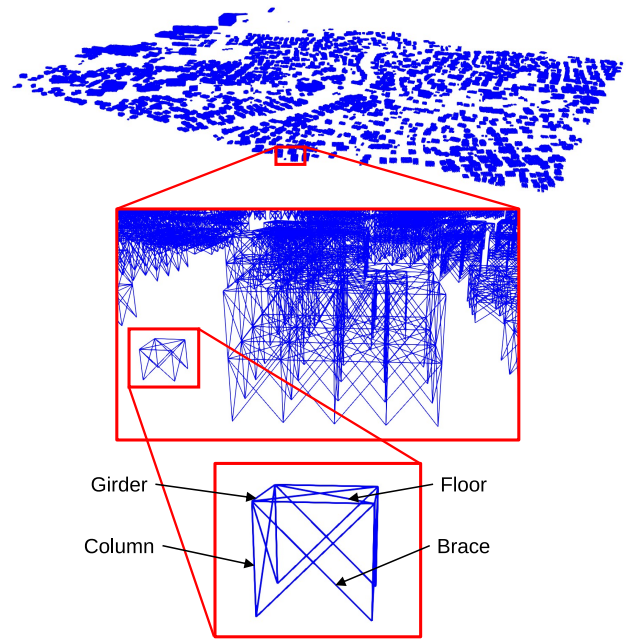


図-1 CityGML に基づき作成した建物のフレームモデル

フレームモデルは、図-1 に示すように、CityGML から建物の平面形ポリゴン、高さ、階数を抽出し、1 スパン 1 層のユニット構造を平面内および高さ方向に連結することで構成する。モデルを構成する要素の種別は柱、ブレース、梁、床である。ただし、スパン長に関する情報は CityGML データに格納されていないため、先行研究 [8] と同様、2.8 m で固定とする。

### (2) フレームモデルの要素パラメータ同定アルゴリズム

先行研究 [8] では、1981 年以前の旧耐震基準、1981 年から 2000 年までの新耐震基準、2000 年以降の現行耐震基準の 3 パターンそれぞれに対して代表的な骨格曲線モデル [15] を定め、それに基づき要素のパラメータを決定していた。このアプローチでは、各年代の骨格曲線モデルとして特定の階高、床面積、階数を有する木造家屋を対象としたものを全ての建物に適用する。しかしながら、実際の木造家屋の設計フローでは階数や延床面積などに応じて各層の要求構造性能は変わるため、先行研究では建物ごとの剛性や耐力の違いが妥当に考慮されていないと言える。

そこで本研究では、上記の課題を解決するために、建築基準法施行令で定められた構造計算フローに基づいた、より汎用的な要素パラメータ同定アルゴリズムを提案する。図-2 に提案アルゴリズムのフローチャートを示す。以下では、このフローチャートの各計算ブロックについて詳述する。

#### a) 層剛性および層降伏耐力

層剛性および層降伏耐力は耐震基準によって規定された必要壁量によって主に決定づけられる。表-1, 2 に旧耐震基準および新、現行耐震基準それぞれで定められている単位床面積あたりの必要壁量を示す。 $N$  階建の建物における  $i$  層目の層剛性  $K_{N,i}$  は次式によって与

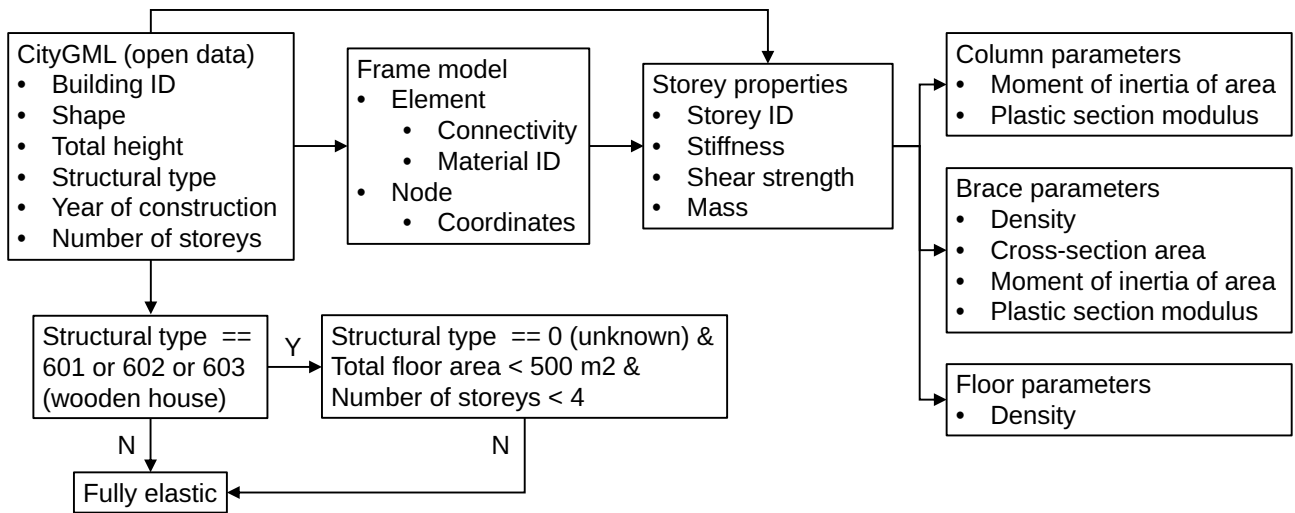


図-2 フレームモデルの要素パラメータ同定アルゴリズムのフローチャート

表-1 旧耐震基準における必要壁量 (cm/m<sup>2</sup>)

階数	階	軽い屋根の場合	重い屋根の場合
1階建	1	12	15
2階建	1	21	24
	2	12	15
3階建	1	30	33
	2	21	24
	3	12	15

表-2 新, 現行耐震基準における必要壁量 (cm/m<sup>2</sup>)

階数	階	軽い屋根の場合	重い屋根の場合
1階建	1	11	15
2階建	1	29	33
	2	15	21
3階建	1	46	50
	2	34	39
	3	18	24

えられる。

$$K_{N,i} = k_0 r_{N,i} A_i \beta \quad (1)$$

ここで、 $k_0$ ,  $r_{N,i}$ ,  $A_i$ ,  $\beta$  はそれぞれ初期せん断剛性、床面積あたりの必要壁量、床面積、壁量充足率である。壁量充足率とは、必要壁量  $r_{N,i}$  に対して、実際の建物がどの程度の水平構造要素を有しているかを表す指標である。このファクターを乗じることで、現実に即した剛性および耐力を設定することができる。ここでは、既存木造家屋の耐震診断結果の統計分布 ([16,17] など) に基づき、旧耐震基準では  $\beta = 1.35$ 、新耐震基準では  $\beta = 1.75$ 、現行耐震基準では  $\beta = 2.50$  とした。 $r_{N,i}$  は表-1, 2 に基づき与えられるため、これらの情報を用いて層剛性を決定できる。ただし、屋根の重さに関しては、兵庫県南部地震後における現行耐震基準の施行前後において、瓦葺屋根の普及率が劇的に変化したことを考慮し、建築年が 2000 年以前の建物は無条件で重い屋根、2000 年以後は無条件で軽い屋根とした。

層降伏耐力  $Q_{N,i}$  も同様に、次式によって計算できる。

$$Q_{N,i} = q_0 r_{N,i} A_i \beta \quad (2)$$

ただし、 $q_0$  は降伏せん断力である。

#### b) 層質量

屋根、床、壁それぞれの単位面積重量は先行研究 [8] と同様、表-3 に示す通りに決定した。

表-3 屋根、床、壁の単位面積重量 (N)

種類	軽い屋根の場合	重い屋根の場合
屋根	500	900
床	1200	1200
壁	350	350

#### c) 要素パラメータ

各要素が有する材料パラメータはヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$ 、降伏応力  $\sigma_y$ 、密度  $\rho$ 、断面パラメータは断面積  $A$ 、断面二次モーメント  $I$ 、ねじり定数  $J$ 、全塑性断面係数  $Z$  である。基本的なアプローチとして、密度以外の材料パラメータは典型的な木材の物性である  $E = 6.865 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.40$ ,  $\sigma_y = 40 \text{ MPa}$  で固定とし、上記で決定した層剛性、層降伏耐力、層質量をフレームモデルとして発現するよう各要素のパラメータを同定する。

まず、所定の層剛性を満足するように、水平方向の抵抗部材である柱とブレースの断面パラメータを決める。柱とブレースの断面形状が正方形であると仮定すると、柱の断面二次モーメント  $I_c$ 、ブレースの断面積  $A_b$  および断面二次モーメント  $I_b$  はそれぞれ次式で求められる。

$$I_c = \frac{(1 - \alpha) K_{N,i} L_c^3}{12 n_c E} \quad (3)$$

$$\frac{n_b E \sin^2 \theta}{L_b^3} A_b^2 + \frac{n_b E \cos^2 \theta}{L_b} A_b - \alpha K_{N,i} = 0 \quad (4)$$

$$I_b = \frac{A_b^2}{12} \quad (5)$$

ここで、 $L_c, n_c$  はそれぞれ柱部材の長さ (すなわち階高) および柱部材の総数であり、 $L_b, n_b, \theta$  はそれぞれブレース部材の長さ、総数、床面とのなす角である。また、 $\alpha$  は柱に対するブレースの剛性負担割合であり、ここでは  $\alpha = 0.8$  とした。

次に、層降伏耐力  $Q_{N,i}$  を満足するように柱とブレースそれぞれの全塑性断面係数  $Z_{pc}, Z_{pb}$  を決める。  $Z_{pb}$  は  $A_b, I_b$  から定まる断面形状に即した値を設定する。  $Z_{pc}$  はブレースの降伏が軸力によって生じると仮定し、目標の降伏耐力  $Q_{N,i}$  からブレース群の保有水平耐力  $Q_b$  を差し引いた耐力を柱の曲げ降伏点とする。すなわち、次式が与えられる。

$$Z_{pc} = \frac{(Q_{N,i} - Q_b) L_c}{2 n_c \sigma_y} \quad (6)$$

$$Q_b = n_b A_b \sigma_y \cos \theta \quad (7)$$

最後に、質量の整合性を取るために床とブレースの密度  $\rho_f, \rho_b$  を調整する。屋根、床、壁の単位面積重量をそれぞれ  $\omega_{\text{roof}}, \omega_{\text{floor}}, \omega_{\text{wall}}$  とすると、ブレースおよび床の密度は次式で与えられる。

$$\rho_b = \frac{r_{N,i} A L_c \omega_{\text{wall}}}{g n_b A_b L_b} \quad (8)$$

$$\rho_f = \frac{\omega_{\text{floor}} A_i - g n_c A_c L_c \rho_c - g n_g A_g L_g \rho_g}{g n_f A_f L_f} \quad (9)$$

ここで、下添え字の  $g$  は梁要素のパラメータであることを表す。床要素が最上階に位置する場合は、 $\omega_{\text{floor}}$  を  $\omega_{\text{roof}}$  とすればよい。

なお、ここで言及していないパラメータについては、0.12 m 角の正方形断面を有するスギ材であるとして設定している。ただし、スギ材の密度は  $380 \text{ kg/m}^3$  とした。また、梁と床は降伏を考慮しないため全塑性断面係数を十分大きい値に設定する。

#### 4. 熊本地震による益城町の被害再現解析

##### (1) 益城町中心部の建物群モデル

本稿では、2016年熊本地震によって顕著な家屋被害が見られた熊本県益城町の中心部を対象とした倒壊シミュレーションを行う。図-3に対象とする区画および生成したフレームモデルを示す。使用したCityGMLデータは3D都市モデル (Project PLATEAU) 益城町 (2020年度) [18] である。PLATEAUが公開する3D都市モデル標準製品仕様書 [19] で規定されている地域基準 (第3次地域) メッシュにおける、490301644, 49301645, 49301654, 49301655 番の区画を対象とした。対象区画は約2 km四方の正方形領域で、総建物数は5,907棟である。フレームモデルのコンターはCityGMLから抽出した建築年を表している。ただし、建築年が不明の建物は灰色で示している。

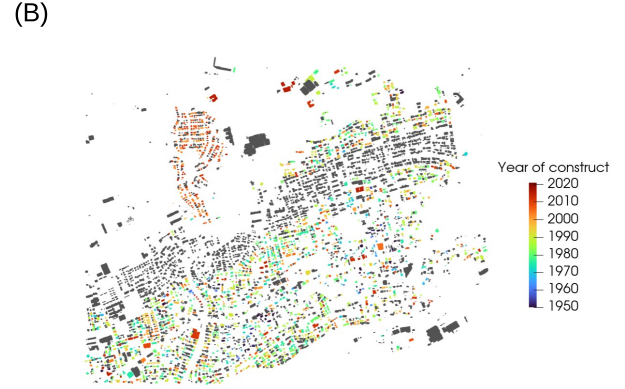
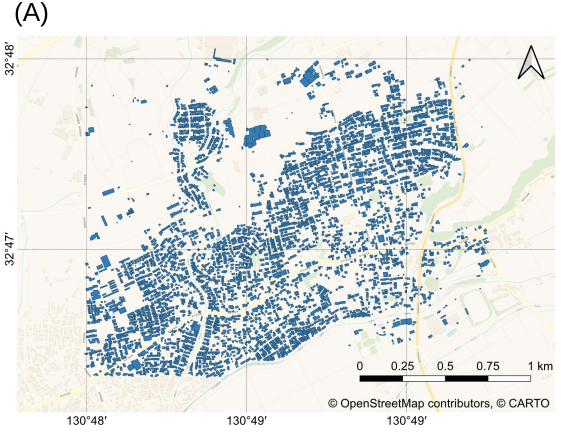


図-3 益城町中心部の (A) シミュレーション対象区画および (B) 建物群のフレームモデル

##### (2) 入力地震動データの生成

本解析で用いる入力地震動データは、KiK-net 益城波をベースとし、益城町周辺の表層地盤における地盤増幅率に基づくスケーリングを適用することで、サイト特性を考慮した地震動データを生成した。表層地盤の地盤増幅率は、Japan Seismic Hazard Information Station (J-SHIS) で公開されている250 mメッシュデータから取得した。

##### (3) 解析結果

詳細は発表にて述べる。

#### 5. 結論

本研究では、ASI-Gauss法を用いた都市規模木造家屋倒壊シミュレーションにおいて、CityGMLデータに基づく建物のフレームモデルの作成および各要素パラメータの同定手法を提案した。具体的には、DPPを用いてCityGMLに格納されている平面形ポリゴン、高さ、階数の情報を抽出し、フレームモデルの要素および節点データを生成する。そのうえで、建築基準法施行令における必要壁量などの規定に基づき、実務の設計フローに準拠したパラメータ決定方法を構築した。これにより、年代ごとの画一的な骨格曲線モデルに基づいてパラメータをキャリブレーションしていた先行研究 [8] に対して、フレームモデルの構造特性の再現性が改善される。また、提案手法の妥当性検証のために、熊

本県益城町における 2016 年熊本地震による被害の再現解析を行った。

今後は、建物の周辺環境に応じて開口部の位置を推測することで、剛性の偏心率をフレームモデルに反映する。これにより、フロア内で要素のパラメータがばらつき、よりリアリスティックな構造特性が再現できると考えられる。

### 参考文献

- [1] M. Hori, T. Ichimura, Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster, *J. Seismol.* 12 (2008) 307–321.
- [2] F. McKenna, OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation, *Comput. Sci. Eng.* 13 (2011) 58–66.
- [3] X. Lu, B. Han, M. Hori, C. Xiong, Z. Xu, A coarse-grained parallel approach for seismic damage simulations of urban areas based on refined models and GPU/CPU cooperative computing, *Adv. Eng. Softw.* 70 (2014) 90–103.
- [4] T. Nakagawa, M. Ohta, Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading I: simulations of two-story frame models, *J. Wood Sci.* 49 (2003) 392–397.
- [5] T. Nakagawa, M. Ohta, Collapsing process simulations of timber structures under dynamic loading II: simplification and quantification of the calculating method, *J. Wood Sci.* 49 (2003) 499–504.
- [6] Y. Toi, D. Isobe, Adaptively shifted integration technique for finite element collapse analysis of framed structures, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 36 (1993) 2323–2339.
- [7] D. Isobe, W.S. Han, T. Miyamura, Verification and validation of a seismic response analysis code for framed structures using the ASI-Gauss technique, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 42 (2013) 1767–1784.
- [8] 石井秀堯, 浅井光輝, 大谷英之, 飯山かほり, 盛川仁, 磯部大吾郎, ASI-Gauss 法による都市全域の木造家屋倒壊予測シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学) 77 (2021) I 563-I 573.
- [9] G. Gröger, L. Plümer, CityGML – Interoperable semantic 3D city models, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 71 (2012) 12–33.
- [10] T.J.R. Hughes, R.L. Taylor, W. Kanoknukulchai, A simple and efficient finite element for plate bending, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 11 (1977) 1529–1543.
- [11] Y. Toi, Shifted integration technique in one-dimensional plastic collapse analysis using linear and cubic finite elements, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 31 (1991) 1537–1552.
- [12] T. Miyamura, T. Yamashita, H. Akiba, M. Ohsaki, Dynamic FE simulation of four-story steel frame modeled by solid elements and its validation using results of full-scale shake-table test, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 44 (2015) 1449–1469.
- [13] T. Takeyama, H. O-Tani, S. Oishi, M. Hori, A. Iizuka, Automatic Construction of Three-Dimensional Ground Model by Data Processing, *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 26 (2021) 2881–2887.
- [14] H. O-tani, K. Iiyama, S. Takaya, M. Yabe, Automated Model Construction of Urban Structures with Limited Digital Data, *J. Earthquake and Tsunami* 16 (2022) 2240004.
- [15] H. Kikitsu, T. Nakagawa, Y. Okuda, Y. Wakiyama, H. Sakata, A study on wind velocity estimated from degree of timber structural damage to develop a method to rate the intensity of tornadoes, *AIJ J. Technol. Des.* 23 (2017) 325–330 (in Japanese).
- [16] M. Kohiyama, F. Yamazaki, VULNERABILITY FUNCTIONS FOR WOODEN BUILDINGS BASED ON THE DATA FROM SEISMIC DIAGNOSIS: Evaluation of minor and more damages using acceleration response spectrum, *J. Struct. Constr. Eng.* 68 (2003) 137–144 (in Japanese).
- [17] C. Tabata, Y. Ohashi, STUDY ON SEISMIC DIAGNOSIS FOR WOODEN STRUCTURES: Comparison between seismic diagnoses, and relationship between evaluation and damage level, *J. Struct. Constr. Eng.* 71 (2006) 119–125.
- [18] 国土交通省都市局国際・デジタル政策課, 3D 都市モデル (Project PLATEAU) 益城町 (2020 年度), <https://cir.nii.ac.jp/crid/1690294973956714368> (accessed April 3, 2026).
- [19] 3D 都市モデル導入のためのガイドブック — 3D 都市モデル標準製品仕様書, <https://www.mlit.go.jp/plateaudocument/> (accessed April 3, 2026).