

倒壊家屋の内部構造評価のための空間変形指標に関する研究

北海道大学 ○山本 将太, 小野里 雅彦, 田中 文基

要旨

本研究では、倒壊した木造家屋が各部屋ごとにどのように圧縮・変形しているかを評価する空間変形指標を提案し、その指標を用いて家屋倒壊シミュレーションにおける接着強度や地震波形などのパラメータの違いによる倒壊状況の評価・検証を行った。

1. はじめに

1995年1月17日未明に発生した阪神淡路大震災では、救助遅延が問題となり被害が増大した。それを教訓に、特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構 IRS(International Rescue System Institute, 代表: 田所諭 東北大学教授)を中心に全国各地でレスキュー支援機器の研究開発が進められている[1]。

実際の災害現場では、救助活動を行う際に倒壊した家屋のどこに自由空間が残っているのか、倒壊によりもろくなっている部分はどこか、元の構造を維持している部分はどこかといったような内部構造の情報を得ることが重要となる。しかし、外観からは内部構造を知ることができず、安全かつ迅速な救助活動が困難であるといった問題がある。

そこで本研究では、倒壊家屋の外観より得られる情報から内部構造を推定する手法の確立を目標としている。そのために、まず倒壊した木造家屋の居住空間が部屋ごとにどのように圧縮・変形しているかを評価する空間変形指標を、デジタルがれきモデルの分析に基づき定め、倒壊家屋の内部構造を定量的に評価することを本研究の目的とする。

2. 空間変形指標

2.1 座標取得センサを用いた倒壊家屋モデルの特徴点変位抽出方法

倒壊家屋モデルは複雑に要素が重なり合っているため、そのままでは空間変形の分析や評価を行うことが難しい。そのため、屋根の先や梁と柱の交点といった部分を特徴点として定義し、この特徴点の倒壊後の点群データから倒壊家屋モデルの内部構造を評価する。

物理エンジン PhysX[2]を用いた木造家屋倒壊プロセスシミュレーション[3]において家屋モデルの特徴点部分に座標を出力するための大きさを持たない座標取得センサを取り付ける。座標取得センサは、倒壊の前と後で家屋の構造がどのように変化したのかを知るためのものである。家屋の構造を表すことのできる配置にする必要がある。今回は家屋における間取り図を参考にして部屋を床と天井それぞれ4点ずつ合計8点で囲み、家屋全体があたかも直方体の集合になるように配置することとした(図1)。このような配置を行うことで、空間ごとの分析が可能となる。

PhysX 内のすべての要素は中心座標、寸法、姿勢、密度の情報を持っており、重力や摩擦、衝突などの物理現象を計算周期ごとに計算し、その計算結果に応じて各要素の座標などの情報を更新している。PhysX の計算周期ごとに取り付けた座標取得センサの3次元座標を取得することで、倒壊前後の特徴点の座標の変化を得ることができる。

2.2 空間変形指標の提案

シミュレーションにより取得した点群データを利用し、倒壊家屋の内部構造を定量的に表現するための指標の提案を行う。点群データにおけるそれぞれの空間について8点の座標から空

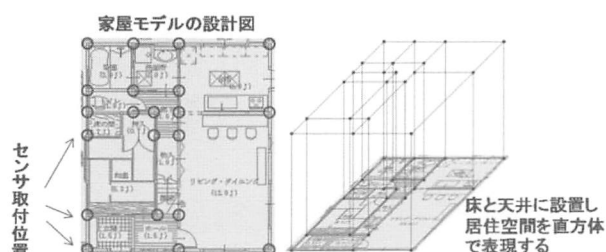


図1 座標取得センサの取り付けイメージ

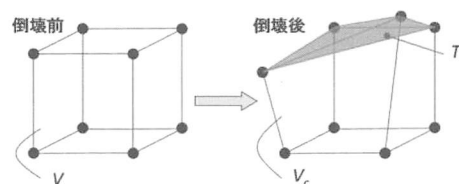


図2 空間変形指標の変数定義

間変形指標を求める。空間ゆがみ率、体積変化率、SDI(Space Deformation Index), SDI を利用して求める家屋全体の空間変形指標 SDI_{ALL} を提案し、導出方法を以下で示す。

空間の変形を表現するために倒壊前後での空間の体積変化を考える。倒壊前の空間は直方体であるので簡単に体積を求めることができるが、倒壊後の空間は体積を一意に定義することが難しい。そこで8点それぞれの3次元座標から、凸包の体積を求め倒壊後の体積 V_c とする。倒壊前の空間の体積を V として体積変化率 p_v を以下の式(1)で定義する。

$$p_v = \frac{V_c - V}{V} \quad (1)$$

倒壊前の空間は、直方体を形成している。しかし、倒壊後においては空間がゆがむことで倒壊前に面を形成していた4点は面を形成せず四面体を形成する(図2)。この四面体は6つの面それぞれで形成され、それらの体積を $T_i(i=1\sim6)$ とする。この T_i の総和が凸包の体積 V_c のうちのどのくらいを占めているかで空間ゆがみ率 t_c を定義する。

$$t_c = \frac{1}{V_c} \times \sum_{i=1}^6 T_i \quad (2)$$

空間が大きく圧縮され体積変化率が大きくなる場合でも空間ゆがみ率が小さい場合や、体積変化率は小さいが空間ゆがみ率が大きく出ている場合がある。このどちらの場合でも空間の変形は大きいと言える。このことから、各指標の平均値を取るだけでは変形の大きさを表現できないことがわかる。そこで体積変化率 p_v と空間ゆがみ率 t_c の2乗和の平方根を空間変形指標 SDI_i として式(3)で定義する。

$$SDI_i = \sqrt{p_v^2 + t_c^2} \quad (3)$$

以上では部屋ごとの変形指標を述べてきたが、家屋全体にお

る変形指標を、各部屋の倒壊前における床面積 S_i に合わせて SDI_i に重みをつけたものを足しあわせた SDI_{ALL} として式(4)で定義する。 w_i は重み係数であり、 S_i の合計に対する割合を示す。

$$SDI_{ALL} = w_0 \cdot SDI_0 + w_1 \cdot SDI_1 + \dots + w_n \cdot SDI_n \quad (4)$$

$$\text{ただし, } w_i = S_i / \sum_{j=0}^n S_j$$

3. パラメータの違いによる倒壊状況の評価・検証

前節で提案した空間変形指標を用いて木造家屋倒壊シミュレーションにおける接着強度や地震波形などのパラメータの違いによる倒壊状況の評価・検証を行った。

まず、OSやCPUなどのPC環境の違いやPCの負荷状況などによって倒壊シミュレーションの結果が異なるのかどうかの確認のために、接着強度や地震波形を変化させず同一条件下で倒壊シミュレーションを行った。地震波形は岩手・宮城内陸地震(2008)の仙台市青葉区(震度5弱)の最大加速度を観測した前後25秒間の合計50秒間で行う。また柱と梁などの部材同士の接着強度を600N、部材を構成する構造素間の接着強度を240Nに設定し、壊れやすい状態にパラメータを設定して行った。使用するマシンはPC1(OS:Windows XP SP3, CPU:AMD Athlon Dual Core 2.6GHz, RAM:4GB)とPC2(OS:Windows Vista SP2, CPU:Core2 Extreme 2.8GHz, RAM:4GB)の2台でそれぞれ2回ずつシミュレーションを行い、その結果を図3に示す。図3を見ると外見上すべて似た壊れ方をしていることがわかる。また SDI_{ALL} がすべて同じ値を示していることがわかる。さらに個々の居住空間ごとのSDIの値についてもすべて同じ値を示した。以上より、同一条件下では同じ倒壊結果を得られることを確認した。また参考までに図4に倒壊シミュレーション前後における内部の様子を示す。

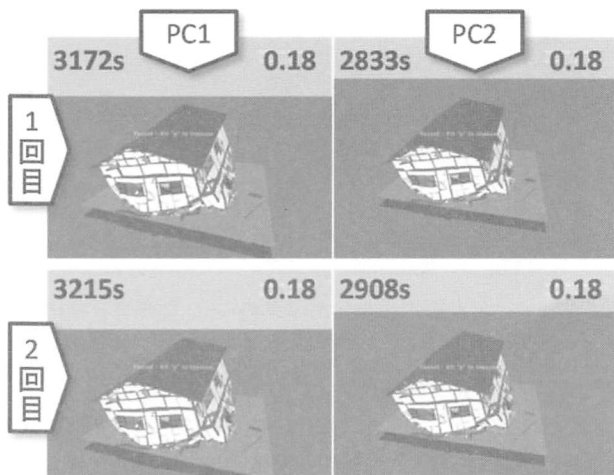


図3 同一条件下での倒壊シミュレーション結果 (左上:処理時間[s], 右上: SDI_{ALL})



(a)倒壊前 (b)倒壊後
図4 倒壊前後の内部の様子(2F 寝室)

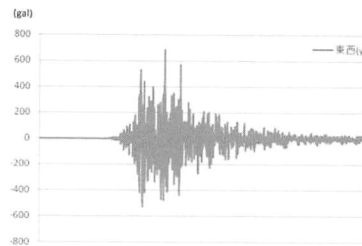


図5 使用した地震波形

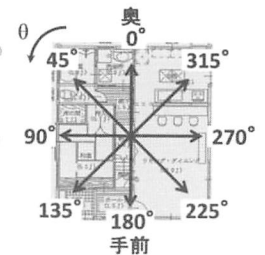


図6 加振方向

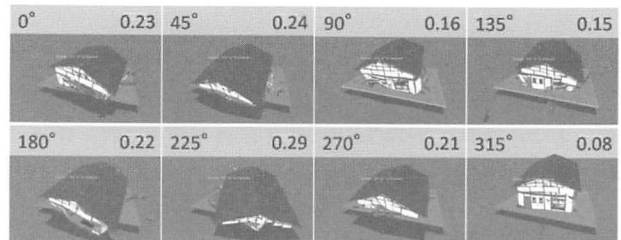


図7 加振角度ごとの倒壊家屋モデル(左上:角度, 右上: SDI_{ALL})

次に地震波形の単一方向成分のみを抜き出して倒壊シミュレーションを行った。単一方向のみの地震を図6のように反時計回りに45度ずつ回転させて合計8パターンの倒壊パターンを求めた。地震波形は岩手・宮城内陸地震(2008)の栗原市(震度6弱)の地震波のうち最も加速度の大きかった東西方向を抜き出して使用し、加振時間は最大加速度を観測した前後25秒間の合計50秒間である(図5)。部材間の接着強度を900N、構造素間の接着強度を1800Nに設定し、壊れやすい状態で倒壊シミュレーションを行った(OS:Windows Vista SP2, CPU:Core2 Extreme 2.8GHz, RAM:4GB)。加振方向は図6に示すとおりである。結果を図7に示す。

一般に、建物に対し振動方向が変化した場合、玄関や窓などの開口部や柱や壁といったものが少ない広いリビングといった構造的に弱い部分に大きく振動が作用した場合に倒壊が大きくなると考えられる。今回の結果では、縦方向に振動するものは玄関やリビングが位置する手前側から崩れ始めた。また、斜め方向の場合、45度と225度、135度と315度で大きく違う結果となった。これは45度と225度の場合、リビングがある方向に地震動が作用したため大きく崩れたと考えられる。以上より、今回の結果は一般的な経験則と概ね一致することがわかった。また地震動の向きや接着強度等を様々変化させることにより、様々なパターンの倒壊家屋モデルが得られることがわかった。

4. おわりに

本報告では、倒壊家屋モデルの内部構造を評価のための空間変形指標の提案と指標を用いた倒壊状況の評価・検証を行った。

今後の課題としては、新しい家屋モデルの追加やGPUを用いた倒壊シミュレーションの高速化、今回提案した空間変形指標を用いた内部構造推定手法の提案などが挙げられる。

6. 参考文献

- [1] 高森年他, “レスキューロボット機器研究会報告書”, (社)日本機械学会, 1997
- [2] NVIDIA 社 PhysX, <http://www.nvidia.co.jp/page/home.html>
- [3] 毛利健二他, “地震観測データを用いた木造家屋の倒壊プロセスシミュレーション”, 2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2009)