

2011年長野県北部の地震における建物被害の 個別要素法を用いた再現解析

Simulation of Building Damage during the 2011 Northern Nagano Earthquake by using
Distinct Element Method

山田 雅行¹, 谷山 尚², 白井 義朗³

Masayuki YAMADA¹, Hisashi TANIYAMA² and Yoshiro SHIRAI³

¹ (株)ニュージェック 技術開発グループ

Technology Development Group, NEWJEC Inc.

² 埼玉大学 理工学研究科環境科学・社会基盤部門

Division of Environmental Science and Infrastructure Engineering, Saitama University

³ (株)エヌ・イー・エス 技術部

NES Inc.

For the purpose of assuring the route for the emergency evacuation and for the traffic of the emergency vehicle, the simulation method of the building damage using the distinct element method (DEM) has been developed that is highly precise, simple and convenient. This article reports the result that simulates the building damage in the 2011 Northern Nagano earthquake. The damage rate simulated by DEM is compared with the grade of each damaged wooden structure visually surveyed in Sakae-mura village, Nagano prefecture. As a result, though the damage rates by DEM distribute relatively wide in the low grade of damage by survey, the damage by DEM and by survey have generally corresponding relations.

Keywords: building damage, 2011 Northern Nagano Earthquake, distinct element method

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震をはじめ、近年の大地震において多くの建物被害が報告されている。建物被害は、倒壊そのものによる人的、物的被害に加えて、倒壊した建物が道路等を塞ぐことによって、避難行動や緊急車両の通行を妨げるといった2次的被害を引き起こす可能性も考えられる。特に、海溝型地震に伴う津波被害が危惧される地域では、揺れの直後に高所への避難を行うために、その経路を確保することが非常に重要となる。

最近では、実街区スケールの非線形3次元地盤震動解析と構造物群の地震応答解析からなる都市地震シミュレーションが行われている^{例えは¹⁾}。このシミュレーションでは、建築構造物を各階を1質点でモデル化した線形多自由度モデルを用いて効率化を図っているものの、大規模・高速計算能力を有する京コンピュータの活用が不可欠である。地震動強度に応じて発生する人的、物的被害を正確で広範囲に把握することを目的とした研究ではあるものの、簡便で効率がよい、すなわち安価に推計できる手法とは言い難い。

一方、国や自治体によって、各所で地震被害想定が行われている。多くの場合、地震動の予測においては、統計的グリーン関数法などの地震動算定手法を用いて、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性が詳細に考慮された時刻歴波形が作成されている。しかしながら、地震

動強度に応じて発生する人的、物的被害の推定は、過去の被害データに基づいて作成された「地震動強度と被害率の関係」を用いて算定されている。すなわち、地域メッシュごとに予測された地震動の時刻歴波形から計測震度といった地震動強度を算定し、「地震動強度と被害率の関係」^{例えは²⁾}を用いて被害率を求め、その地域メッシュの人口や建物数に被害率を乗ずることによって人的、物的被害を推定するというものである。

山田ら³⁾は、避難行動や緊急車両の通行を確保することを目的として、個別要素法(以下、DEMと呼ぶ)を用いて建物被害の高精度かつ簡便なシミュレーション手法の開発を行っている。山田ら³⁾では、手法の確立に主眼を置いて、仮想的な地域のモデルを対象に建物倒壊シミュレーションが行われている。

著者らは、自治体レベルで導入可能なくらい安価で、現状の「地震動強度と被害率の関係」を用いる方法より実情に合った被害想定を念頭に置き、

- ・市町村または集落といった地域を対象として、
 - ・地域内の全棟を一棟ごとにモデル化し、
 - ・各建物(各モデル)に個別の入力地震動を与え、
 - ・倒壊までシミュレートできる手法を用いて、
 - ・棟ごとの被害から地域の被害を推計し、
 - ・地域の防災計画や避難行動策定などの一助とする、
- ことを目指している。本論文では、
- ・建物のモデル化は外形情報のみで、

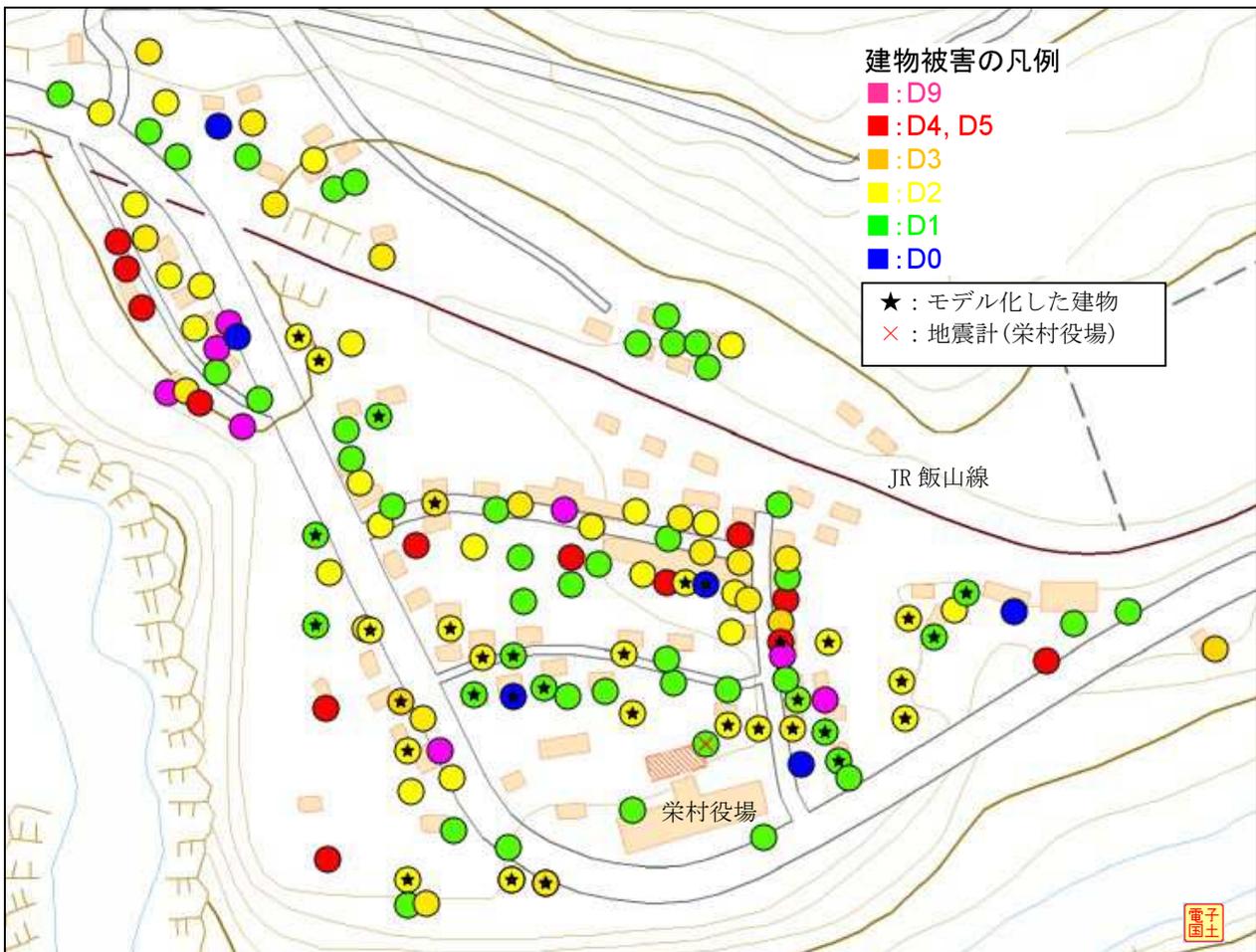


図1 長野県栄村における建物被害調査結果とシミュレーションのためにモデル化を行った地点(電子国土⁶⁾に加筆)

- ・建物モデルの物性は一般的な木造建物を適用し、
- ・入力地震動は地域内で一定、
- ・破壊は建物モデルの“柱”のせん断破壊による、

という制約の範囲で、既往研究において2011年長野県北部の地震時の建物の全棟被害調査が行われている長野県栄村を対象として、DEMを用いた建物被害の再現解析を行い、現在の建物倒壊シミュレーションの有効性や適用範囲について報告するものである。

2. 2011年長野県北部の地震における建物被害

2011年東北地方太平洋沖地震の直後、2011年3月12日3時59分に長野県北部(北緯36.986度、東経138.598度)の地下約8kmにおいて、マグニチュード(Mj)6.7の地震が発生した。この地震は中部地方を中心に東北地方から近畿地方にかけて有感となり、長野県栄村では震度6強、新潟県十日町市、津南町では震度6弱の揺れが観測された。この強い揺れによって、長野県栄村では多くの建物被害やライフラインの被害が発生した⁴⁾⁵⁾。

山田ら(2012)⁷⁾および山田ら(2013)⁸⁾では、同地域の建物被害の全棟調査が実施されており、前者では地震動との関係、後者では自治体による被害調査との比較分析について報告されている。

図1は、山田ら(2012)⁷⁾および山田ら(2013)⁸⁾に示された長野県栄村における建物被害調査結果である。図中の被害度(D0~D9)は、岡田、高井(1999)⁹⁾の提案による指標である。また、図1には、後述する個別要素法を用いた建物

被害のシミュレーションのためにモデル化を行った地点(★)および長野県北部の地震が観測された地震観測点(×)を併記した。

3. 個別要素法(DEM)を用いた建物被害のシミュレーション

(1) 個別要素法 (DEM)

本研究では、個別要素法¹⁰⁾を用いて建物被害のシミュレーションを行った。この際、引張抵抗の影響を考慮できるように、要素間の接触判定条件を拡張し、接触からごく僅かだけ離れた非接触時においても要素間結合力が働くモデルを使用した。

このモデルでは、2つの粒子間距離がある一定の接触許容範囲内に収まる場合、それらは接触と判定され、バネによる引っ張り抵抗が働くが、強い地震動などの入力振動によって粒子間距離が接触許容範囲内に収まらない場合は、引張破壊を起こしたと判断され、接触力は働かなくなる。したがって、その後、各粒子は単体として運動する。一方、接触時に強いせん断力を受け、既に破壊に達してしまった場合、両粒子間には摩擦抵抗のみ働くこととなり、接触許容範囲内にあってもバネによる影響は無く、接触から離れた瞬間に単体として運動する。

(2) 建物のモデル化

木造建物の1階床部分、1階の天井部分(つまり2階の床部分)、2階天井部分に球体の中心を配置することによ

って、図2に例を示すように1軒の建物のモデル化を行った。1階の床から2階の天井までの高さを6m、建築基準法より家屋全体の重量を278kgf/m²(軽い屋根の場合)と想定して、要素球体の質量を0.83ton、半径を1.5mに定めた。なお、最下層要素のモデル化は、将来の検討において、各建物に個別の入力地震動を与えることを容易にするためである。

各建物は、その平面形状にできるだけ合わせるように、1階床部分の要素(最下層要素)を敷き詰め、その上に、1階建の場合は1層、2階建の場合は2層、3階建の場合は3層の要素を積み重ねることで、モデル化を行った。このモデル化では、壁の配置は各建物の平面形状に依存すると仮定していることになる。また、各建物モデルの最下層要素に後述する地震動を入力した。

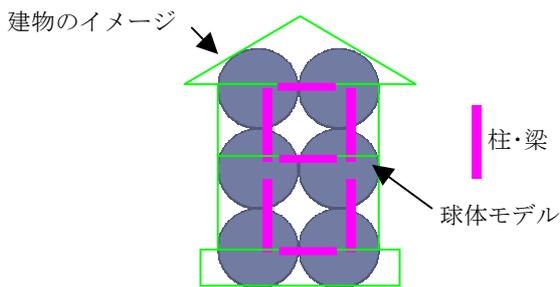


図2 建物のモデル化の例(2階建)

表1 必要壁量の算出結果

要素数	建物No.	床面積 (m ²)	1階部分 (m)	2階部分 (m)
12	29,34	36	10.44	5.40
18	4,5,8,26	54	15.66	8.10
24	14,17,33,36	72	20.88	10.80
27	3,13,24,28	81	23.49	12.15
36	12,15,16,22,37	108	31.32	16.20
39	6	117	33.93	17.55
42	9,27,38	126	36.54	18.90
45	1,10,30,32,39	135	39.15	20.25
48	7	144	41.76	21.60
51	11,18,21,35	153	44.37	22.95
54	40	162	46.98	24.30
60	20	180	52.20	27.00
66	23	198	57.42	29.70
69	19	207	60.03	31.05

このような建物モデルに対して、建築基準法に基づき、必要壁量の算定を行った。木造家屋において、必要壁量は家屋の床面積に地震力係数を乗ずることによって求めることができる。なお、本研究ではすべての家屋を軽い屋根として地震力係数(2階建の1階:29cm/m², 2階建の2階:15cm/m²)を与えた。

要素間を結ぶバネは、伸び縮み(normal)方向のバネとせん断バネ(接線方向)から成っており、鉛直方向に並んだ要素を結ぶバネが柱・壁を、水平方向に並んだ要素を結ぶバネが梁や床の挙動に対応する。ここでは、建物モデルの1階床から1階の天井、2階の床から2階の天井にあたる鉛直方向に並んだ要素の対を繋ぐ要素間バネを柱として考えた(図2)。

既往文献¹¹⁾に、各種の壁の水平せん断試験のデータがまとめられている。図3は、各種の壁の水平せん断試験結果の荷重とせん断変形角の関係を、文献11)に示され

たそれぞれのグラフから読み取り、壁倍率1、壁長さ1mに相当するように換算して比較、図化したものである。壁の種類によって大きくばらついていることがわかる。

それぞれの壁の水平せん断試験データに対して、完全弾塑性モデルを仮定し、木造軸組構法住宅の許容応力度設計法¹²⁾に倣って、降伏耐力(せん断変形角1/120radに相当する荷重)および終局耐力(せん断変形角0.02radに相当する荷重)を求めた。得られた降伏耐力および終局耐力の平均値は、それぞれ3.80kN/m、5.93kN/mである(図3の“モデル”)。

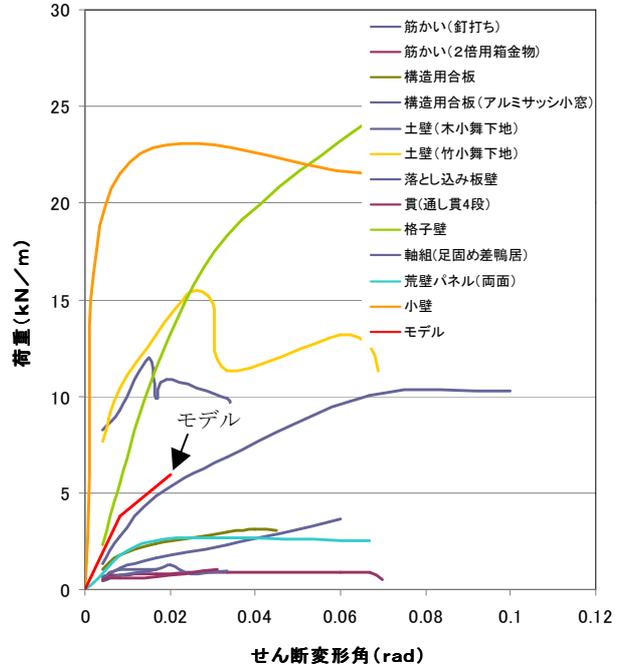


図3 荷重—せん断変形角の関係(壁倍率1, 壁長さ1m)

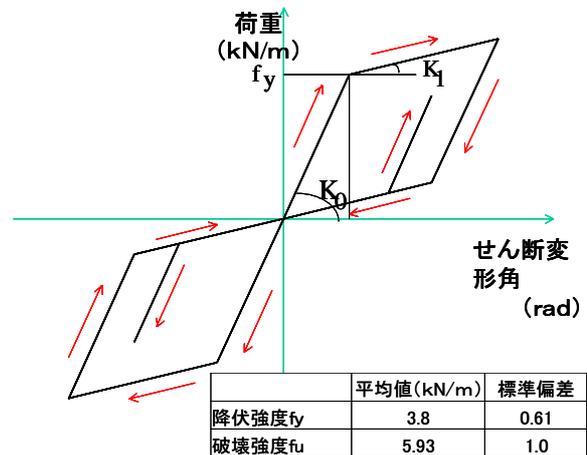


図4 要素間バネの強度モデル

この壁倍率1、壁長さ1mに対する降伏耐力、終局耐力に、必要壁量を家屋(モデル)ごとの柱の数で割った係数を掛けた値を、それぞれ降伏強度、破壊強度として、図4に示すバイリニア-スリップ型の強度モデルを柱、梁に相当する要素間のせん断バネの復元力特性と考えた。なお、柱および梁に相当する要素間の伸び縮み方向のバネは、引張応力が引張強度を超えると切れる特性のみをモデル化し、引張強度は杉材の引張短期許容応力度90kg/cm²¹³⁾によった。

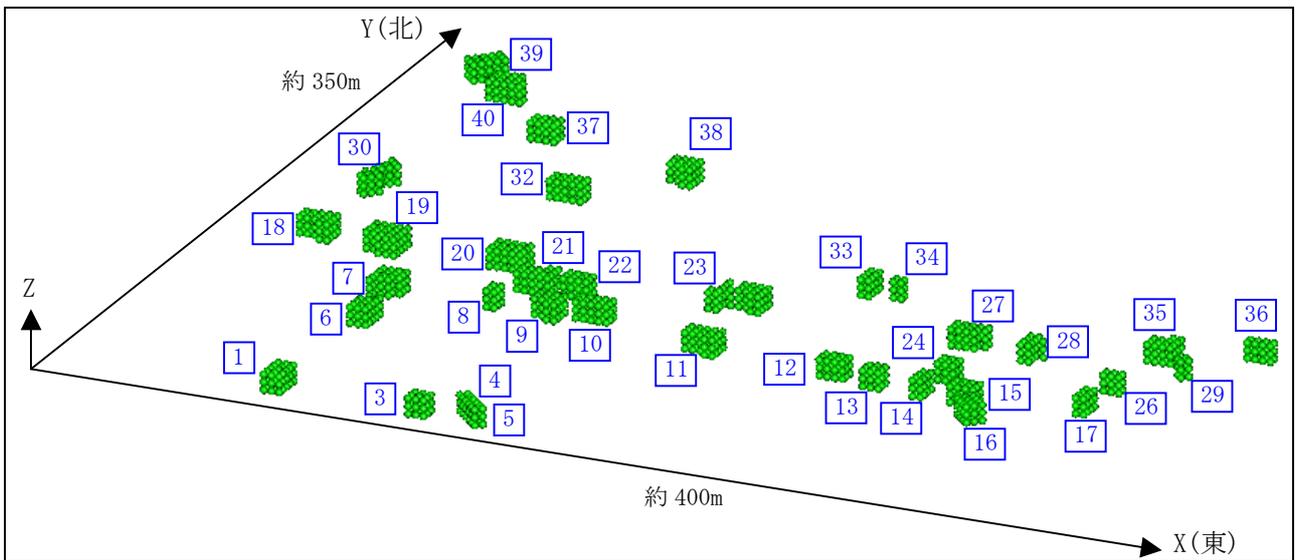


図 5 栄村森地区のモデル化

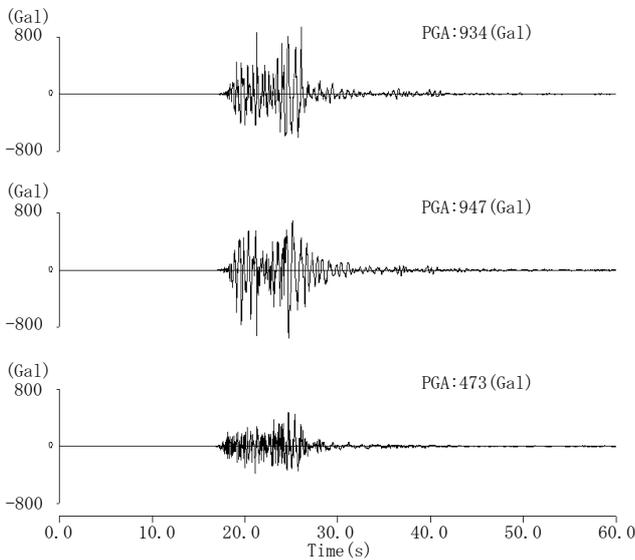


図 6 入力地震動

柱に相当する要素間のせん断バネの強度モデルには、正規乱数を用いてバラツキを有する降伏強度、破壊強度を与えた。柱ごとに 1 つの乱数を与え、この同じ乱数を用いて降伏強度、破壊強度を求めた。このときの降伏耐力および終局耐力の標準偏差は、壁の水平せん断試験データより、それぞれ 0.61kN/m、1.00kN/m であった。なお、降伏耐力および終局耐力の最も小さい値は平均値 -3σ で、それぞれ 1.97kN/m、2.93kN/m となることから、本要素間バネの壁倍率は常に 1.0 以上となる。また、バラツキの検討ケースは、平均的な壊れやすさを議論するために最低限必要と考えられる 5 ケースとした。

(3) 栄村森地区のモデル化

建物被害のシミュレーションを行うテストサイトとして長野県栄村森地区を対象として、地震前の住宅地図を参考にモデル化を行った。長野県北部の地震が観測されたのは、同地区にある栄村役場の敷地内に設置された地震計であることを勘案し、栄村役場から JR 飯山線までの東西約 400m、南北約 350m の範囲をモデル化の対象と考えた。図 5 にモデル化の結果を示す。緑色の●が DEM

の要素を示し、12 個～69 個の要素によって各建物をモデル化した。各建物の横にモデル化に際して付与したモデル No を併記した。

(4) 入力地震動

建物被害のシミュレーションのための入力地震動として、図 6 に示す長野県北部の地震の栄村役場における観測記録を用いた。水平動は、900Gal を超える最大加速度を示し、卓越周波数は 1.2～1.4Hz であった。

(5) シミュレーション結果

図 5 に示した解析モデルに、図 6 の入力地震動を作用させ、長野県北部の地震時の建物の挙動のシミュレーションを行った。

a) 損傷率の算定

家屋の倒壊判定基準については、内閣府¹⁴⁾を参考に、軸組を主体とする在来工法等の場合と考え、次式のように、柱を対象とした損傷率を用いた。

$$\text{損傷率} = (\text{損傷柱の本数}) / (\text{柱の全数}) \times \text{各柱の損傷程度}$$

ここに、式中の“柱”は建物モデルの柱を示し、すなわち、鉛直方向に並んだ要素の対を繋ぐ要素間のせん断バネに対応する。本検討では、柱がせん断破壊と判定された場合、各柱の損傷程度を 100% とみなした。また、シミュレーションは乱数により求めた強度モデルを用いて 5 ケース実施した。図 7、図 8 にそれぞれ 5 ケースの各建物の損傷柱の数、損傷率を示した。図 7、図 8 には、5 ケースの平均値と平均 $+\sigma$ 、平均 $-\sigma$ (σ は 5 ケースの標準偏差を示す)を併記した。

b) 建物の破壊挙動

図 9、図 10 にそれぞれ建物 No.5 と No.34 の動的挙動を示す。建物 No.5 は、図 8 に示した損傷率が比較的小さいものの代表例、建物 No.34 は損傷率が大いものの代表例である。図 9 の建物 No.5 は、揺れはじめから解析終了 ($T=20.0\text{s}$) まで、建物形状はほとんど変化せず、破壊に至らない、または内部に比較的軽度な破壊を生じた程度の動的挙動を示していると考えられる。図 10 に示す建物

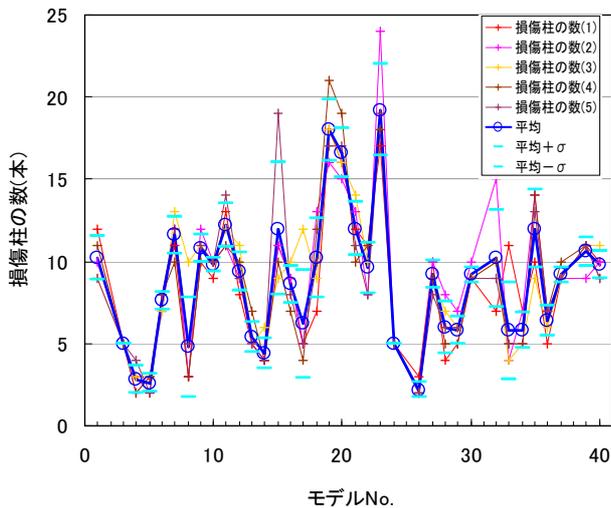


図7 各建物の損傷柱の数

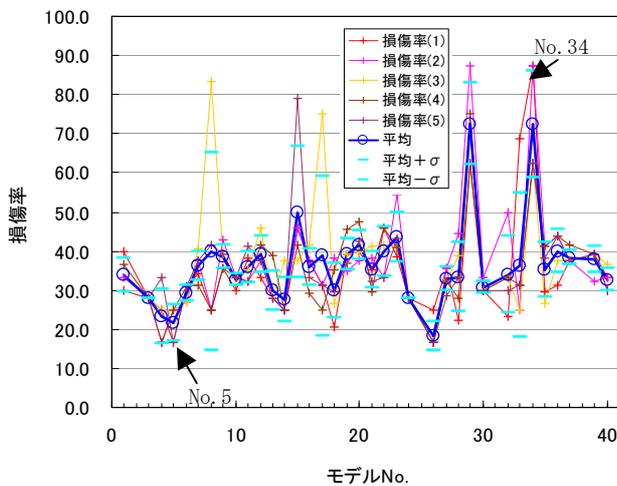


図8 各建物損傷率

No.34 は、主要動による大振幅の揺れによって大きく変形し、 $T=12.0s$ では倒壊に至っている。

図 11 に建物 No.5 の実際の外観を示す。基礎にひびが見られるなどの被害を受けているものの、大きな変形には至っていない。なお、建物 No.34 はシミュレーション結果において大きく変形した例として示したが、後述のように、実際の被害度とはあまり一致しなかった。

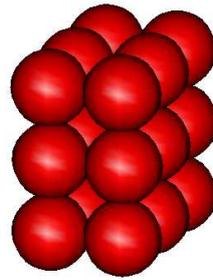
c) DEM による損傷率と外観調査による被害度の関係

図 12 に DEM によって求めた損傷率(平均)と外観調査から得られた被害度の関係を示す。図中×は標準的な木造 2 階建、□は RC 造の 1 階車庫・倉庫の上に木造 2 階建を有する家屋を示す(建物タイプについては 4 章で詳述する)。それ以外はその他の構造を有する建物を示す。解析結果は 5 通りの強度モデルを用いた結果の平均値を示した。

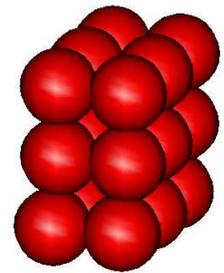
バラツキが大きく、回帰を行うことは容易ではないが、DEM による損傷率と外観調査による被害度の間に正の相関関係はみてとれる。

内閣府¹⁴⁾によると、損傷率と建物の被害程度の判定との関係は、

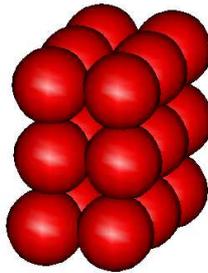
- 0% : 被害なし
- 20%未満 : 一部損壊
- 20~40%未満 : 半壊



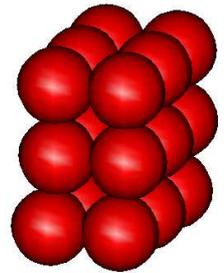
モデルNo. 5-T=5.0s



モデルNo. 5-T=10.0s

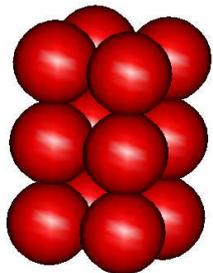


モデルNo. 5-T=15.0s

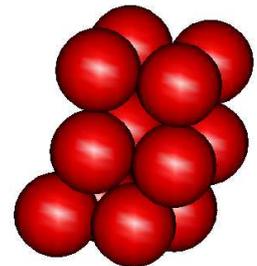


モデルNo. 5-T=20.0s

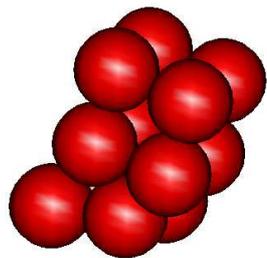
図9 建物 No.5 の動的挙動



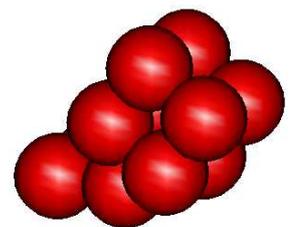
モデルNo. 34-T=5.0s



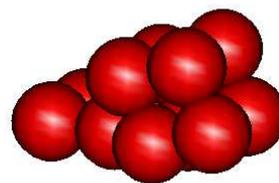
モデルNo. 34-T=10.0s



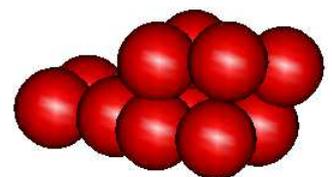
モデルNo. 34-T=10.5s



モデルNo. 34-T=11.0s



モデルNo. 34-T=11.5s



モデルNo. 34-T=12.0s

図10 建物 No.34 の動的挙動



図 11 建物 No. 5 の実際の外観

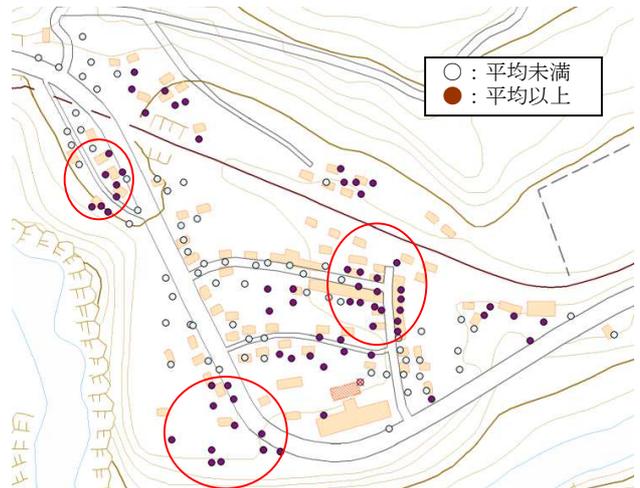


図 14 長野県栄村森地区 PGA(最大加速度)分布

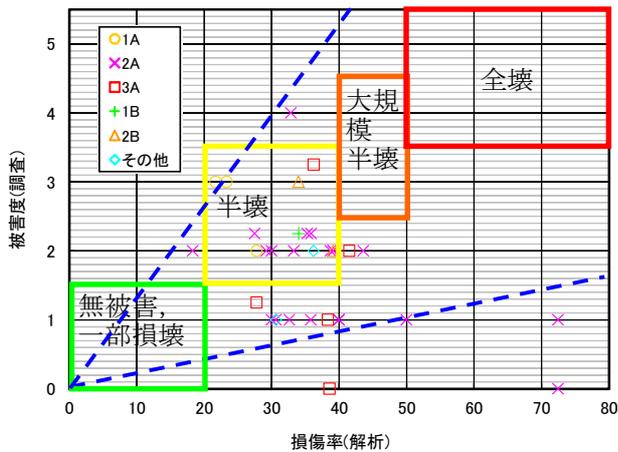


図 12 DEMによる損傷率と外観調査による被害度の関係

40~50%未満：大規模半壊

50%以上：全壊

とされている。

一方、山田ら(2013)⁸⁾によると、外観調査から得られた被害度と建物の被害程度の判定との関係は、

D0~D1：被害なし，一部損壊

D2~D3：半壊

D3~D4：大規模半壊

D4以上：全壊

のように関係づけられている。

この関係を利用して、図 12 に全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊、無被害と判定される範囲を併記した。損傷率が 20%~40%に集中していることもあるが、半壊と判定された建物については、DEM と外観調査の結果はよく整合している。しかしながら、損傷率が 20%~40%のものの中には外観調査では一部損壊、無被害と判定された建物もいくつか見られ、DEM による被害率推定が過大な結果を与える場合が見られた。



1A：1階建 標準

2A：2階建 標準



1B：1階建 屋根重量大

2B：2階建 屋根重量大



3A：3階建(木造+RC) 標準

図 13 建物タイプの分類(例)

4. 考察

(1) 建物タイプ

図 12 にプロットした DEM による損傷率と外観調査による被害度の関係は、建物タイプ別に表示している。建物タイプの記号は、図 13 に示すとおりである。×印で示された 2A の「2 階建 標準」タイプは、DEM と外観調査の結果が比較的よく対応している。△印の 2B や +印の 1B は、DEM と外観調査が対応しているものの、外観調査に比べて DEM の損傷率が小さい傾向が考えられる。これらのタイプが屋根重量大であるにもかかわらず、建物のモデル化に際して、「軽い屋根」と仮定したことに起因している可能性が考えられる。□印の 3A の「3 階建(木造+RC) 標準」タイプは、基礎部分が RC 構造であることに加えて、比較的新しい住家が多く見られた。このため、DEM に比べて外観調査の被害度が小さい傾向が考えられる。

(2) 入力地震動

山田ら(2012)⁷⁾では、長野県栄村森地区を対象として、60 箇所の微動観測を行い、長尾ら(2010)¹⁵⁾、長尾ら(2012)¹⁶⁾に示された手法を用いて、当該地区の面的な地

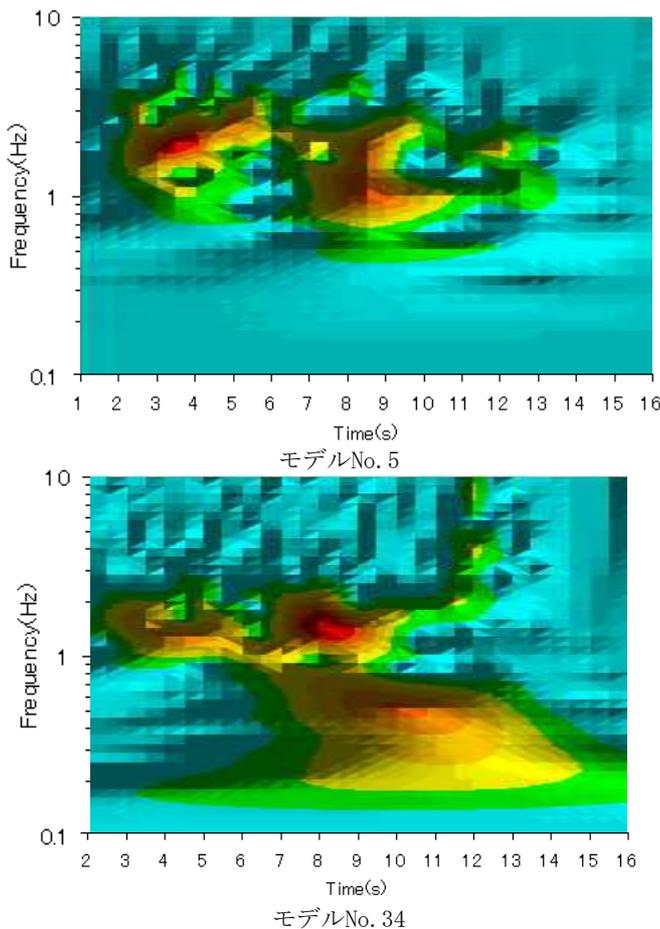


図 15 2階天井要素の非定常スペクトル(速度波形)

震動の推定を行っている。建物位置における地震動推定結果から、PGA(最大加速度)分布を算定し、平均値未満と平均値以上に分類して、地図にプロットしたのが図 14 である。図 14 に赤丸で示した地域では地震動が大きい可能性が示されており、図 1 の外観調査による被害度とも対応関係がよいことがわかる。これは、DEM を用いた長野県北部の地震のシミュレーションにおいて、入力地震動の違いを考慮することによって、より実際の被害度を模擬できる可能性を示唆しているものと考えられる。

(3) 要素間バネの強度モデル

要素間バネの強度は、図 3 に示した種々の既往試験結果の平均値を用いた。この平均化は、壁倍率 1、壁長さ 1m 相当に変換した後の試験データに対して行っている。一方、種々の既往試験結果を平均化した後に、壁倍率の補正を行う方法など、要素間バネの強度のモデル化には議論が残る。要素間バネのモデル化は、外観調査の被害度に比べて、DEM による損傷率が大きい傾向を示す一因と考えられる。

(4) 建物の揺れの非定常スペクトル

図 15 に 2 階天井要素の時刻歴波形(変位)を微分し、0.1~20.0Hz のバンドパスフィルタを掛けた速度波形の非定常スペクトルを示す。

損傷率が比較的小さいモデル No.5 は、揺れはじめから揺れが収まるまで、1~2Hz 付近の揺れが卓越していることがわかる。一方、損傷率が大きいモデル No.34 は、入力地震動の振幅が最も大きい 8 秒付近まで 1~2Hz 付近

の揺れが卓越しているが、その後、破壊を生じたため粒子移動に伴う長周期成分の卓越が見られる。

建物タイプの違いによる揺れ方の違いなど、建物の揺れの挙動をより適切に表現できるように、要素間バネのモデル化をより精緻に行っていくことが重要であると考えられる。

(5) 1 階部分が潰れる倒壊モード

図 16 に 1 階部分が潰れる倒壊モードを示す被災事例を示す。

図 10 の動的挙動では、大振幅の主要動によって 1 階部分の柱がせん断破壊し、建物が大きく変形したのちに倒壊に至ることが表現されている。この挙動は、1 階の柱がせん断破壊するまでは、図 16 の被災事例を再現していると考えられるが、その後、倒壊に至る様相は異なっている。このような建物の被災事例で多く見られる倒壊モードを考慮できるような改良を行うことも、今後の検討課題であると考えられる。



図 16 1 階部分が潰れる倒壊モードを示す被災事例

5. おわりに

2011 年長野県北部の地震における建物被害のシミュレーションを行った。長野県栄村において実施された建物被害の全棟外観調査による被害度と DEM による損傷率との比較を行った。その結果、特に外観調査による被害度が小さい建物についてバラツキが大きい傾向が見られたが、半壊と判定された建物については両者はよい対応を示した。これは、DEM を用いた建物被害のシミュレーションの有効性について示唆するものであると考えられる。

一方、建物のモデル化、特に古い民家のモデル化などの制約条件による適用範囲もある程度明確化でき、今後は、4 章の考察に示した建物タイプの分類や要素間バネの強度モデルおよびそのバラツキの与え方、入力地震動の違いや倒壊モードなどを考慮して、2011 年長野県北部の地震の被害調査結果を正確に再現できるように検討を進める予定である。

謝辞

千葉大学 中村友紀子先生には、本論文の検討において貴重なご意見を頂いた。埼玉大学の学生であった永瀨彩音さんの卒業研究を参考にさせて頂いた。京都大学 山田真澄先生には、長野県北部の地震時の被害調査結果の使用をお許し頂いた。ここに記して謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 藤田航平, 市村強, 田中聖三, 堀宗朗, Lalith MADDEGEDARA: 3次元地盤震動解析と多数シナリオの構造物応答解析による都市地震シミュレーション, 第34回地震工学研究発表会講演論文集, 2014.
- 2) 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ: 首都直下地震の被害想定項目及び手法の概要～人的・物的被害～, 2013.
- 3) 山田雅行, 白井義朗, 香川敏幸: 個別要素法を用いた木造家屋の破壊解析, 第24回地域安全学会研究発表会, 2009.
- 4) 山田真澄: 長野県北部の地震被害調査速報, <http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/~masumi/eq/tohoku/index.htm>, 2011.
- 5) 長野県栄村: 長野県北部地震栄村震災記録集 絆, 2013.
- 6) 国土地理院: 電子国土 Web.NEXT, <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse4/index.html>, 2012.
- 7) 山田真澄, 山田雅行, 福田由惟, スマイス・クリスティン, 藤野義範, 羽田浩二: 2011年長野県北部の地震の震源近傍における高密度の地震動推定と木造建物被害との比較, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第1号, pp.20-30, 2012.
- 8) 山田真澄, 羽田浩二, 山田雅行, 藤野義範, 福田由惟: 2011年長野県北部の地震における学術研究と自治体の木造建物被害調査の比較分析, 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第41号, pp.357-362, 2013.
- 9) 岡田成幸, 高井伸雄: 地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文集, 第524号, pp.65-72, 1999.
- 10) 伯野元彦: 破壊のシミュレーションー拡張個別要素法で破壊を追うー, 森北出版株式会社, 1997.
- 11) 山辺豊彦: ヤマベの木構造-増補改定版-, (株)エクスマレッジ, 2013.
- 12) (財)日本住宅・木材技術センター: 木造軸組構法住宅の許容応力度設計法, 2001.
- 13) 杉山英男: 木質構造, 共立出版(株), 2008.
- 14) 内閣府: 災害に係る住家の被害認定基準運用指針, pp.1-26, 2009.
- 15) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性経験的補正方法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.56, pp.324-333, 2010.
- 16) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 常時微動 H/V スペクトルを構成する波動成分に関する一解釈, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.48-62, 2012.

(原稿受付 2015.3.28)

(登載決定 2015.6.6)