

個々の建物の強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊予測と
宅地における土石流災害対策の検討

京都大学 防災研究所 竹林洋史

個々の建物の強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊予測と 宅地における土石流災害対策の検討

Prediction of building destruction/non-destruction due to debris flow, taking into account the bearing stress of individual buildings and countermeasures against debris flow disasters in residential areas

竹林 洋史¹

Hiroshi TAKEBAYASHI

¹ 京都大学 防災研究所 准教授

要 旨

建物の破壊を考慮した既存の土石流の数値シミュレーションでは、個々の建物の強度の違いは考慮されていない。そこで、精度良く建物の破壊・非破壊を予測するために、個別要素法による建物倒壊解析モデルwallstat（2010）を用いて様々な構造条件と土石流応力条件で建物の破壊解析を行い、土石流による建物破壊応力と建物構造条件との関係を明らかにした。また、建物の経年劣化による地震耐力の低下特性を参考にして土石流による建物破壊応力の経年変化も考慮した建物破壊モデルを土石流の数値シミュレーションモデルであるiRIC-Morpho2DHに導入した。さらに、国土交通省都市局が有する個々の建物の築年数や構造条件を考慮した建物破壊条件を用いて土石流の数値シミュレーションを実施し、建物の全壊・部分破壊・非破壊の判定を行った。

《キーワード：iRIC-Morpho2DH；土石流；建物の破壊；建物破壊応力；数値シミュレーション》

1. はじめに

2024年の線状降水帯の南下による石川県、2022年の停滞前線による新潟県、2018年の西日本豪雨の時の広島県など、降雨強度が強い雨によって発生する表層崩壊に起因した土石流・泥流による土砂災害が毎年のように発生している。今後、地球温暖化に伴い気象特性が極端化することが予想されており¹⁾、表層崩壊に起因した土石流・泥流の発生回数は増加することが予想される。そのため、土石流・泥流から市民の生命と財産を守るために、宅地内の土石流の氾濫範囲や流動特性などを、ハード・ソフト対策を検討するために必要な精度で評価することが重要となる。宅地内の土石流は、建物の存在や道路形状の影響を強く受ける。しかし、土砂災害のハザードマップである土砂災害警戒区域の平面形状は、地形情報のみを用いて決定しているため、実際の土石流の氾濫範囲と大きく乖離していることがある。特に、建物の破壊・損傷のリスクが高い領域である土砂災害特別警戒区域は、小さめに評価（危険側に評価）されていることが多い、早急な改善が必要な状況となっている。

土石流・泥流による建物の破壊・損傷の予測については、中本・竹林・宮田・藤田²⁾によってiRIC-Morpho2DH³⁾による土石流の数値シミュレーションによって検討されている。中本・竹林・宮田・藤田²⁾の検討では、2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流によって全壊・半壊となった家屋の空間分布を予測している。しかし、中本・竹林・宮田・藤田²⁾の予測方法では、個々の建物の強度の違いは考慮されていない。例えば、建物の強度は建設年代で大きく異なっており、個々の建物の強度の違いによって建物の破壊・非破壊の判定結果が異なるとともに、土石流の氾濫範囲も影響を受ける。そこで、精度良く建物の破壊・非破壊を予測するために、個別要素法による建物倒壊解析モデルwallstat(2014)⁴⁾を用いて様々な構造条件と土石流応力条件で建物の破壊解析を行い、土石流による建物破壊応力と建物構造条件との関係を明らかにする。また、建物の経年劣化による地震耐力の低下特性を参考にして土石流による建物破壊応力の経年変化も考慮した建物破壊モデルを土石流の数値シミュレーションモデルであるiRIC-Morpho2DH³⁾に導入する。さらに、国土交通省都市局が有する個々の建物の築年数や構造条件を考慮した建物破壊条件を用いて土石流の数値シミュレーションを実施し、建物の全壊・部分破壊・非破壊の判定を行った。

2. 土石流外力に対する建物耐力の検討方法

図1に土石流外力に対する建物耐力（建物破壊限界応力）の検討の流れを示す。建物の特性と建物への土石流外力に対する耐力の関係の検討のため、表1に示すように、築年代などが異なる8パターンの三次元木造建物モデルを構築し、それらモデルに対して544パターンの土石流外力を与えて計4532ケースの時刻歴応答解析（パラメトリックスタディ）を実施する。次に、パラメトリックスタディの結果を統計分析することにより、土石流外力に対する建物耐力の設定方法（以降、倒壊判定ロジックと呼ぶ）を策定する。最後に、2014年の広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流を対象に倒壊判定ロジックを組み込んだシミュレーションを実施し、実被害が再現できるかを検証する。

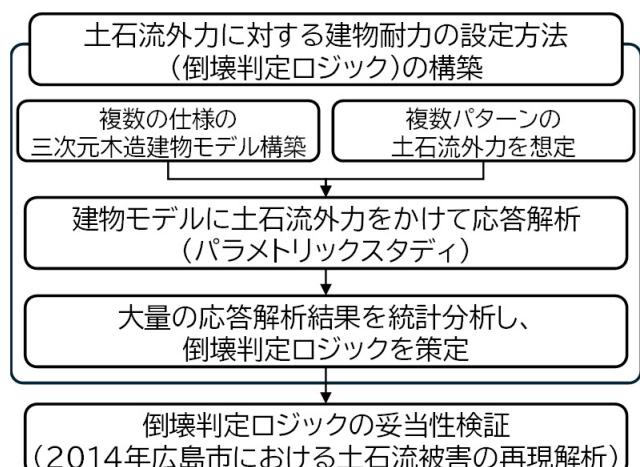


図1 土石流外力に対する建物耐力の検討の流れ

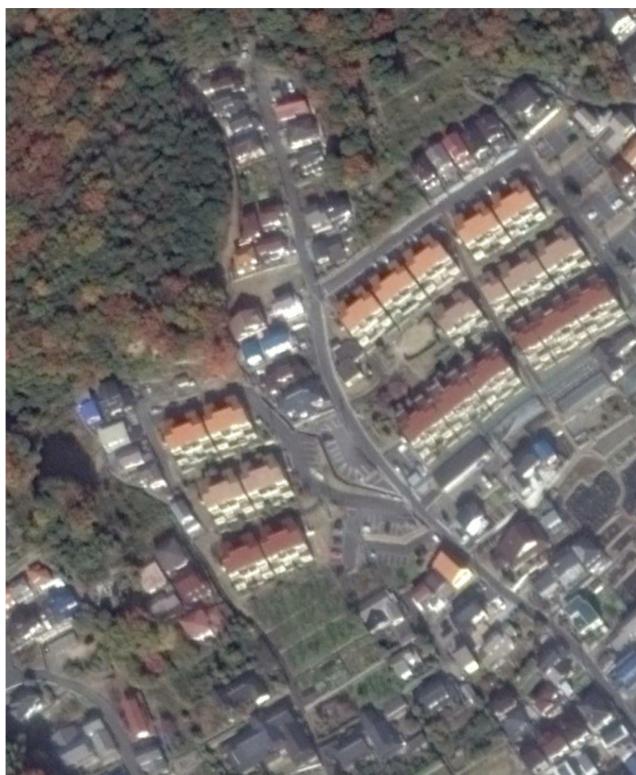
表1 パラメトリックスタディの検討ケース

| 建物モデル(木造在来軸組工法 2階建て) | | |
|----------------------|--------|---------|
| 築年代 | 開口低減率 | 計 |
| B1: 1950～1958 | | |
| B2: 1959～1981 | × 0.7倍 | = 8パターン |
| B3: 1982～1999(基本) | × 0.9倍 | |
| B4: 2000～(耐震等級2) | | |

×

| |
|------------------|
| 土石流外力(合計544パターン) |
|------------------|

=計4352ケース



(a) 被災前 (2014年3月)



(b) 被災後 (2014年10月)

図2 2014年の広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流による木造家屋の破壊 (Google Earth)

図2に、2014年に発生した土石流によって被災した広島市安佐南区八木三丁目の被災前（2014年3月）と被災後（2014年10月）のGoogle Earthによる衛星写真を示す。図2に示すように、2014年3月の写真中央付近の存在していた多くの木造家屋が土石流によって破壊されたことがわかる。一方、破壊された木造家屋の東西に位置するオレンジ色の屋根の建物は、図3に示す鉄筋コンクリート構造の県営住宅である。図3に示す県営住宅の棟は、県営住宅の中で最上流に位置しており、土石流が衝突したことにより、窓ガラスが破壊されるとともに外壁の一部が被災している。



図3 土石流が衝突した鉄筋コンクリート構造の県営住宅



(a) 被災前 (Google Earth)



(b) 被災後 (アジア航測撮影)

図4 2021年に発生した泥流によって建物が破壊された熱海市逢初川流域



図5 泥流が衝突した鉄筋コンクリート構造の建物

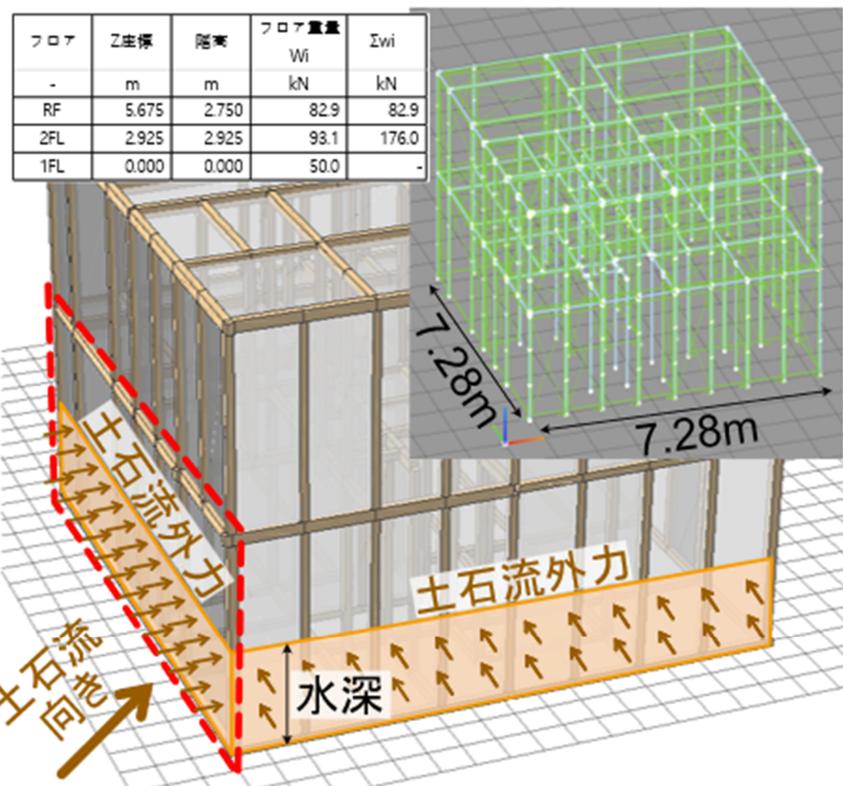


図6 在来軸組工法2階建ての建物モデル

しかし、建物の主構造部は損傷していない。図4に、2021年に発生した泥流によって被災した熱海市逢初川流域の被災前と被災後の様子を示す。多くの建物が破壊・流失しているが、カタカナで表示している3つの建物は泥流流下後の残存していた。図5に示すように、これらの建物は鉄筋コンクリート構造の建物である。以上より、建物に作用する土石流・泥流応力は、木造家屋は破壊するが、鉄筋コンクリート構造の建物を破壊するほど大きくなことがわかる。そのため、本研究では、木造建物の土石流外力に対する耐力を中心にして検討する。

土石流による建物被害パターンは複数存在するが、本研究における倒壊判定ロジックにおいては、「a. 非倒壊：建物の損傷の有無に関わらず、建物全体が土石流をせき止める壁として機能し続ける」、「b. 倒壊：建物全体が崩壊し、土石流をせき止められなくなる」の2パターンのみを考慮する。

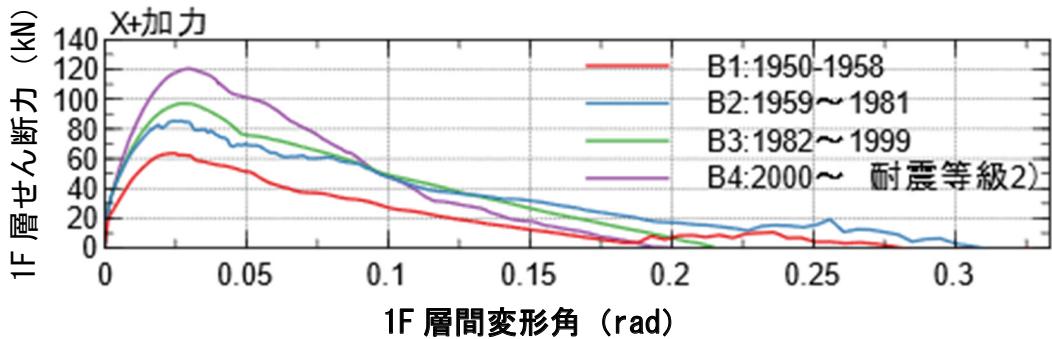


図7 建物モデルに水平に重力加速度をかけて求めた荷重変形曲線

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_m g h^2 \cos \theta + \rho_m (u^2 + v^2)$$

F_h : 建物に作用する単位幅あたりの力(N/m)

u, v : 流速水平2成分(m/s)

h : 水深(m)

ρ_m : 密度(kg/m³)

θ : 傾斜角(rad)

$g = 9.80665$: 重力加速度(m/s²)

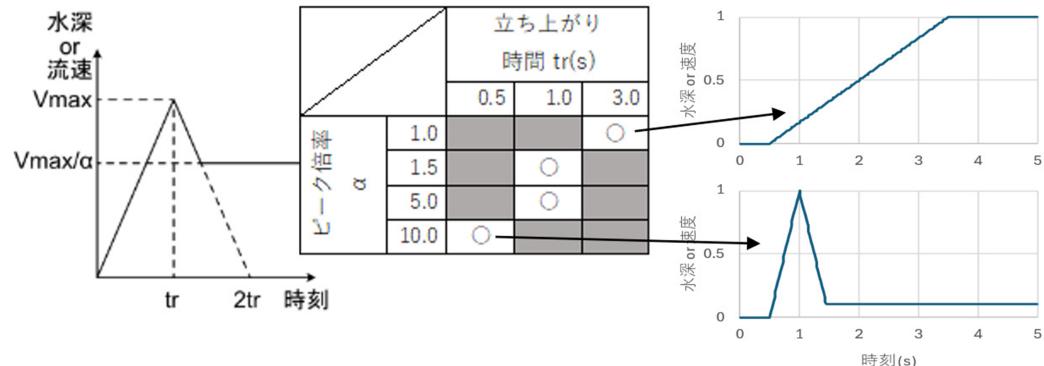


図8 土石流外力の設定方法

図6に示す現行設計基準にて求められている耐力（耐震等級1相当）を持つ在来軸組工法2階建での建物モデルを基本とし、築年代や面外荷重に対する開口低減率による耐力のばらつきを考慮する。建物モデルの間取り・平面形状については、木造住宅の実物大振動実験の試験体⁵⁾を参考に作成する。

築年代については、建物の諸元による耐力の違いについて検討されている既往文献⁶⁾を参考に、4パターン（表1中のB1～B4）を想定する。耐力の違いは、建物の形状や壁配置を極力変えず、壁・筋交い・接合部のばね要素等に与える特性を変化させることで表現する。建物モデルに水平に重力加速度をかけて求めた荷重変形曲線を図7に示す。

開口低減率については、既往の文献⁷⁾を参考に、0.7倍と0.9倍の2パターンを考慮する。

地震応答解析時によく用いられている中川⁴⁾のモデルを基本とし、土石流外力を受けた時の挙動を表現するため、以下の変更を加えている。

- 柱の梁要素を階の途中で分割し、土石流外力がかかる高さの変化を考慮できるようにする。
- 非耐力壁（面内方向に対する耐力がゼロの壁）を含め、壁が面外の外力を受けるようにする。土石流外力の大きさは、受圧面の面積、および壁面と流れの向きの対応により変動させる。壁面が受ける力は、壁面外周の柱・梁の節点に等分配して作用させる。

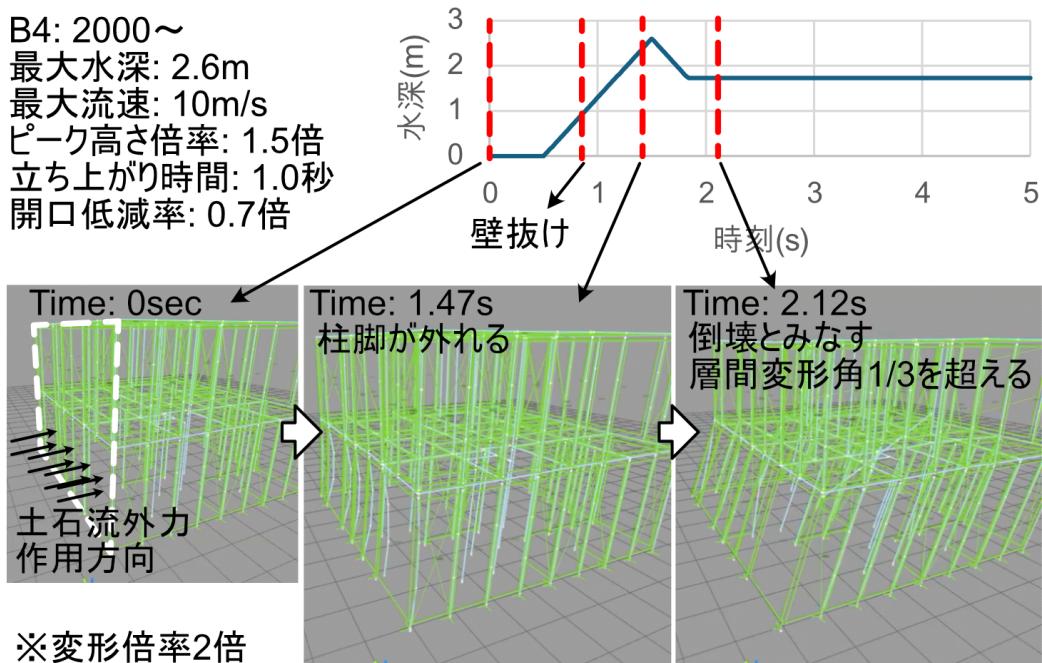


図9 木造建物に土石流外力を作用させた場合のシミュレーション結果の例

3. 開口部の形状は作成せず、開口低減率⁷⁾により土石流外力を変動させることで開口の大小を考慮する。開口低減率は建物全体で一つの値とする。
4. 壁面外方向の耐力を設定しておき、各壁が受ける土石流外力が閾値を超えたら壁が抜けると仮定する。閾値については、木造建物の壁に対する面外加力試験結果⁸⁾を参考に、a) 筋かい無(非耐力壁)=25kN, b) 片筋かい=40kN, c) たすき筋かい=50kNと設定する。
5. 壁が抜けた後は、柱だけで外力を負担するようになると仮定し、土石流外力を0.1倍に低減する。この倍率は、図6の赤破線で示す1階構面の全体幅に対する柱の合計幅の比率を参考に設定した数値である。

倒壊判定ロジック構築のためのパラメトリックスタディ時における土石流外力の設定方針を図8に示す。まず、時々刻々得られる土石流の流速や深さ等の情報を用いて単位幅あたりの力 F_h を求める。その後、 F_h に開口低減率・幅をかけ、さらに壁抜け後については壁抜け後の低減率をかけた値を土石流外力として建物に作用させる。

最大流動深と流速の組み合わせで17パターン、土石流外力の時間変化として立ち上がり時間や残留の大きさ（図中のピーク倍率 α ）を変えた4パターン、さらに、土石流外力の作用方向を8方向想定することで合計544パターンの外力を想定する。

3. 木造建物耐力の検討結果

3.1 土石流外力をうける建物の挙動

図9に木造建物に土石流外力を作用させた場合のシミュレーション結果の例を示す。この条件では、最初に壁が抜けることにより壁に作用していた土石流外力が建物に作用しなくなるため、建物に作用する土石流外力が一度下がり、再び建物に作用する外力が大きくなり、接合部・壁・筋交い等の破壊が発生し、建物は倒壊に至った。本研究では、建物が土石流をせき止められるかどうかに着目するため、木造建物が自重で倒れ始める目安である層間変形角1/3⁹⁾を倒壊の閾値に設定した。今回の解析条件では、多くのケースにて壁が最初に抜ける結果となった。

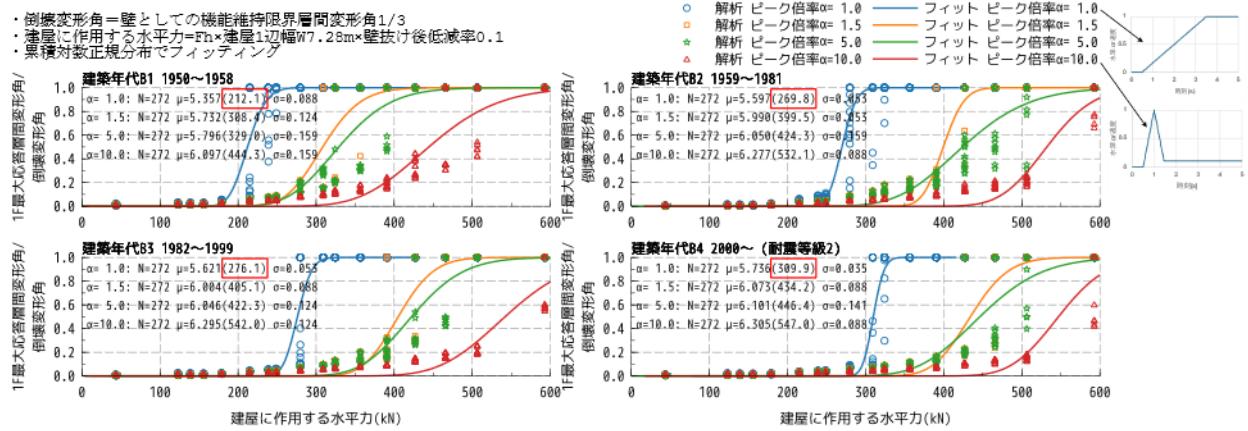


図10 建物に作用する水平力と層間変形角の関係

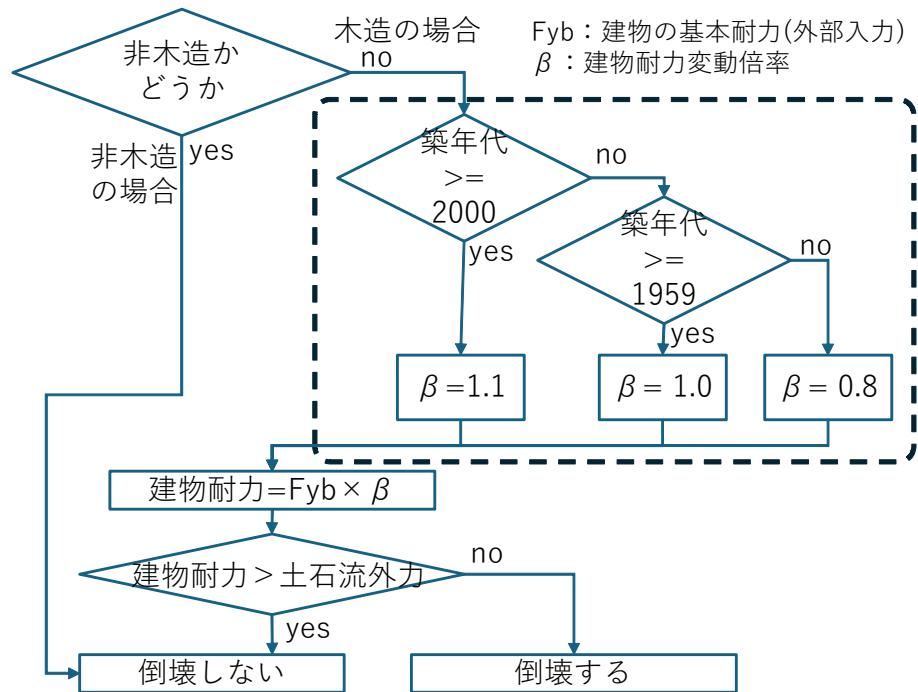


図11 倒壊判定ロジック

3.2 建物の条件による耐力の違い

図10にパラメトリックスタディにより得られた建物に作用する水平力と層間変形角の関係を示す。 F_h に建物1辺の横幅7.28mと壁抜け後の低減率0.1倍をかけた値である「建屋に作用する水平力」を図の横軸としている。縦軸は、層の最大応答層間変形角を倒壊の閾値1/3で割った値である。築年代・ピーク倍率で分けてプロットしており、各分類のデータに対して累積対数正規分布でフィッティングした曲線も重ね描いている。残留の土石流外力が小さい（ピーク倍率が大きい）ケースでは、層間変形角が大きくなる前に土石流外力が小さくなることで倒壊しにくい結果となっていた。逆に残留の土石流外力が大きい（ピーク倍率が小さい）ケースでは、静的な加力を受け続けた場合に近い状況となるため、倒壊しやすくなっていた。

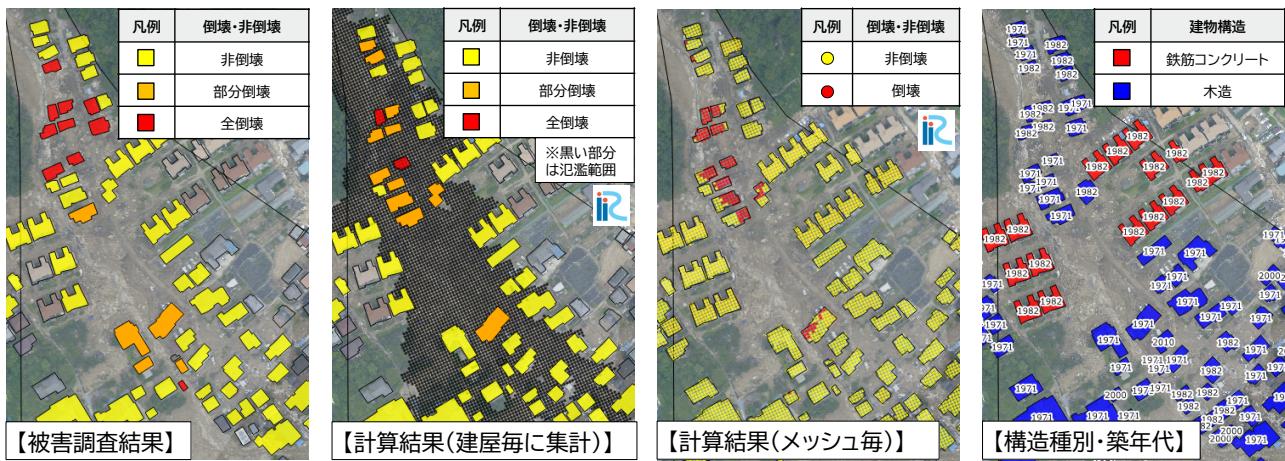


図12 2014年に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流による家屋の倒壊・非倒壊の数値シミュレーション

4. 倒壊判定ロジック

「3. 木造建物耐力の検討結果」を踏まえて設定した倒壊判定ロジックを図11に示す。土石流シミュレーションに用いるiRIC Morpho2DH³⁾への導入を考え、外部入力された構造種別ごとの建物に対する基本耐力の数値を建物の条件に応じて変化させている。また、現状では各計算ステップにおける瞬間の外力値しか使用出来ず、ピーク倍率による区別が出来なかった。そのため、建物が壊れやすい安全側の設定となるピーク倍率1倍のケースをもとにロジックを構築した。

まず、構造種別を判断し、木造の時だけ倒壊する可能性があるとみなし、築年代に応じて建物耐力を変化させた。変化率については、建築年代B3を基準とし、図10赤枠に示す累積対数正規分布の平均値を基に設定した。築年代が1958年以前か不明な場合、安全側の評価結果になるように耐力を低めに設定した。

5. 数値シミュレーションによる個々の建物強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊予測

2014年広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流災害を対象として、上述の倒壊判定ロジックをiRIC-Morpho2DH³⁾に組み込んで土石流の数値シミュレーションを実施した。建物の配置・平面形状・構造種別はPLATEAU¹⁰⁾より取得し、築年代については撮影時期の異なる航空写真を基に建物の有無を確認することで判読した。

図12に解析結果を示す。実被害の調査結果は中本ら²⁾による結果を用いている。図中の「部分倒壊」は、建屋の一部のみが倒壊または流出したことなどを示している。また、図中の「計算結果(建屋毎に集計)」は、各建物に含まれる計算メッシュの内、一つでも倒壊判定となったものがあれば「部分倒壊」とし、全てのメッシュが倒壊判定の場合は「全倒壊」として建物ごとに破壊状況を集計しなおした結果である。解析結果と実被害の結果を比較すると、破壊した建物の場所はある程度再現できている。しかし、現地では全倒壊と判断されている建物について、解析ではほとんどのメッシュが倒壊となっているが数メッシュが非倒壊だったため部分倒壊と判断されている建物がある。これは、全倒壊の判断基準による影響が最も大きいと思われる。つまり、建物を9メッシュで表現し、8メッシュが破壊されて1メッシュが非破壊であった場合、1メッシュ分の部材では建物が自立できない場合であっても部分倒壊と判断されるためである。この点については、様々な破壊状況を想定し、今後検討を行う。

また、現地で全倒壊した建物下流側の非倒壊の建物の一部において、解析では部分倒壊と判断されている。これは、倒壊した建物の部材による土石流の遮蔽が考慮されていないためと考えられる。これについても今後の検討が必要である。なお、今回の研究では、木造の基本耐力（図11中の F_{yb} ）を500kN/mとしたが、この物理的根拠については今後検証していく必要がある。

V. Transport and deposition process of debris/mud flow considering the destruction of buildings

◆ Purpose

The purpose of this chapter is for researchers, river engineers and university students who have the experience of the tutorial "II. Transport and deposition process of debris/mud flow" to learn to perform debris/mud flow analysis considering the destruction of buildings by use of Morpho2DH and visualize the calculated results.

◆ Procedure

Procedure in this chapter is shown in Figure V-1.

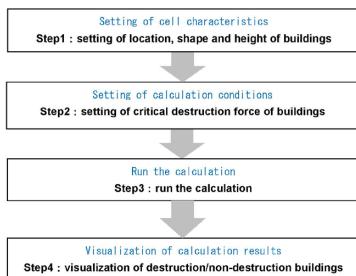


Figure V-1 Procedure in this chapter

46

V.1 Setting of buildings

V.1.1 Setting of building

■ Setting of building

- Click [BuildingHeight] in [Object Browser] by right button and select [Add] and [Polygons].

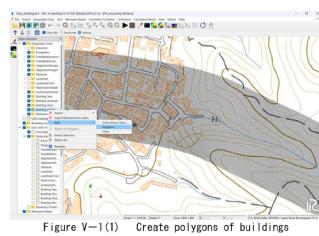


Figure V-1(1) Create polygons of buildings

- Make a polygon by clicking at the corners of the polygon. The horizontal shape of the polygon should be the same as the horizontal shape of each building. Double clicks stop to make the polygon.

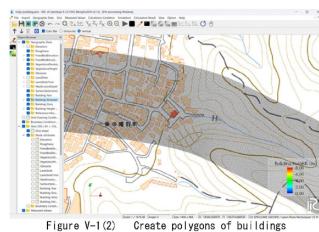


Figure V-1(2) Create polygons of buildings

47

- Enter the height of the building in the small dialog box. The reference elevation of the building height is the initial ground elevation.

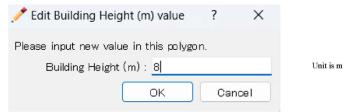


Figure V-1(3) Input the height of building

- Click [BuildingStructure] in [Object Browser] by right button and select [Add] and [Polygons].

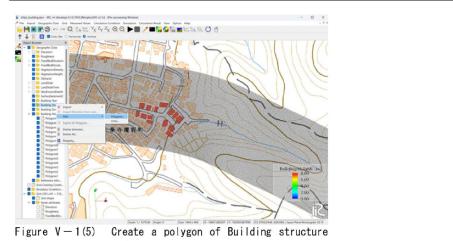


Figure V-1(5) Create a polygon of Building structure code

48

- Make a polygon by clicking at the corners of the polygon. The Building structure code polygon should cover all building polygons here. Double clicks stop to make the polygon.

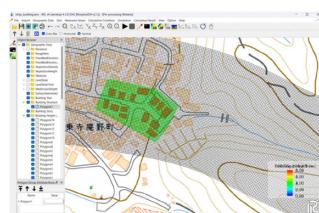


Figure V-1(6) Create a polygon of Building structure code

- Enter the code number in the small dialog box. The code number is associated with the critical destruction force in the setting window of [Calculation Condition] described later.



Figure V-1(7) Input the height of building

49

図13 (a) 個々の建物強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊モデルのチュートリアル

V.2 Setting of calculation conditions

V.2.1 Setting of calculation conditions

■ Enable of building destruction

- Click [Setting] in [Calculation Condition] and select [Building] dialog box.
- Select [Enabled] in [Building destruction].

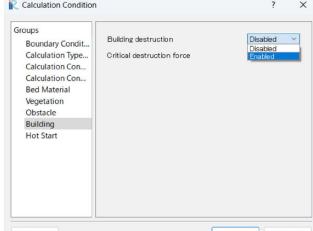


Figure V-2(1) Enable of Building destruction function

3 Press [Edit] in [Critical destruction force].

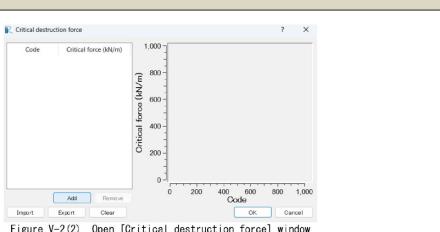


Figure V-2(2) Open [Critical destruction force] window

4 Input [Code] and [Critical force (kN/m)].

5 Press [OK].

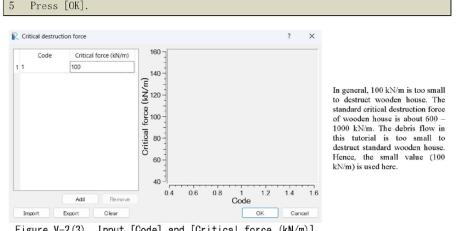


Figure V-2(3) Input [Code] and [Critical force (kN/m)]

6 Press [OK].

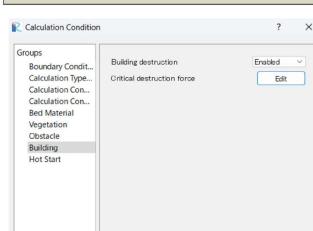


Figure V-2(3) Finish setting building destruction conditions

50

51

■ Run the calculation

- Press [▶] on the tool bar to run the calculation.



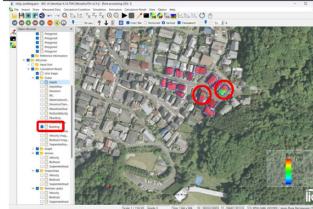
Figure V-2(4) Run the calculation

V.3 Visualization of calculation results

V.3.1 Visualization of destruction/non-destruction of buildings

■ Indication of destruction/non-destruction of buildings

- Horizontal distribution of destruction/non-destruction of buildings is shown by checking [Building] in [Solar] in [Object Browser].
- When you want to modify the format of the contour, please open [Property] by clicking [Building] by the right button.
- If you want to visualize the destruction/non-destruction of buildings only, check off [Fill lower area].



Destruction parts of buildings have a value of 0.5 and are indicated in green. Non-destructive parts of buildings have a value of 1.0 and are indicated in red. The buildings circled in red are judged as half-damaged.

Figure V-3(1) Destruction/non-destruction of buildings

■ Setting of the format of the contour

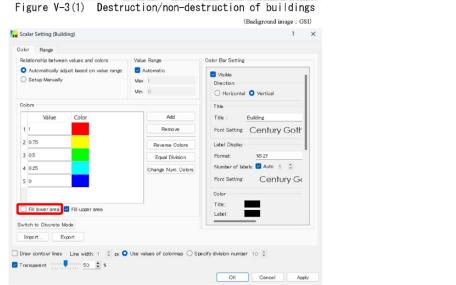


Figure V-3(2) Setting of the format of the contour

図13 (b) 個々の建物強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊モデルのチュートリアル

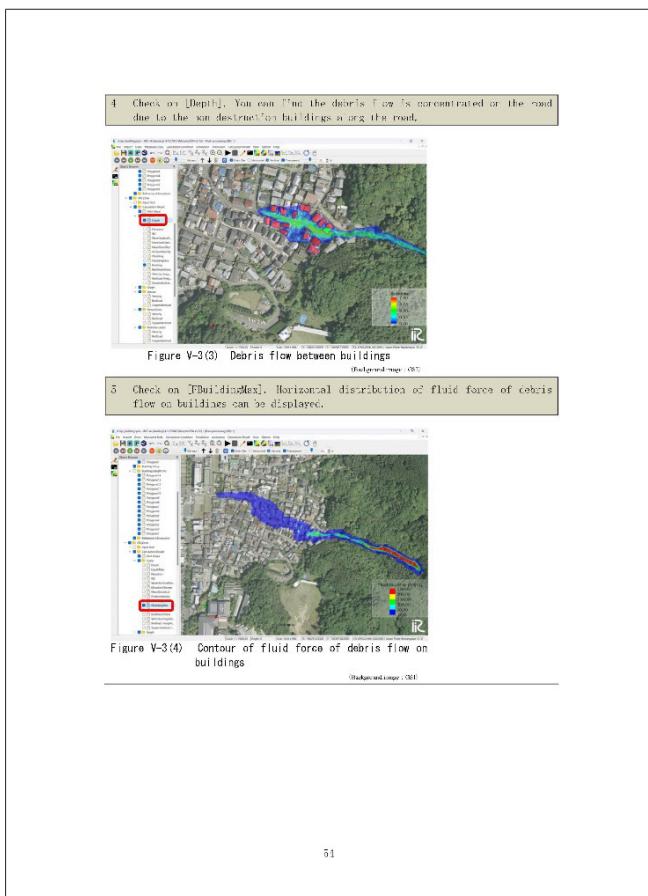


図13 (c) 個々の建物強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊モデルのチュートリアル

6. iRIC-Morpho2DHによる個々の建物強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊シミュレーションのチュートリアル

iRIC-Morpho2DH³⁾で個々の建物強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊モデルを利用できるようになったため、図13に示すような使用方法に関するチュートリアルを作成した。

7. おわりに

本研究では、個々の建物の強度を考慮した土石流による建物の破壊・非破壊予測モデルを構築した。以下に得られた成果をまとめた。

1. 個別要素法による建物倒壊解析モデルwallstat (2010)⁴⁾を用いて様々な構造条件と土石流応力条件で建物の破壊解析を行い、土石流による建物破壊応力と建物構造条件との関係を明らかにした。
2. 建物の経年劣化による地震耐力の低下特性を参考にして土石流による建物破壊応力の経年変化も考慮した建物破壊モデルを土石流の数値シミュレーションモデルであるiRIC-Morpho2DH³⁾に導入した。
3. 国土交通省都市局が有する個々の建物の築年数や構造条件を考慮した建物破壊条件を用いて土石流の数値シミュレーションを実施し、建物の全壊・部分破壊・非破壊の判定を行った。

謝辞

株式会社構造計画研究所及び株式会社ウエスコには、解析モデルの構築及び解析結果のデータ整理などで多くのサポートを頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) IPCC AR4, 2007, Publisher: Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 2) 中本英利, 竹林洋史, 宮田英樹, 藤田正治: 家屋の破壊過程を考慮した土石流の数値シミュレーション, 土木学会論文集B1 (水工学), 74(2), I_919-I_924, 2018.
- 3) Jonathan M. Nelson, Yasuyuki Shimizu, Takaaki Abe, Kazutake Asahi, Mineyuki Gamou, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Takaharu Kakinuma, Satomi Kawamura, Ichiro Kimura, Tomoko Kyuka, Richard R. McDonald, Mohamed Nabi, Makoto Nakatsugawa, Francisco R. Simoes, Hiroshi Takebayashi, Yasunori Watanabe: The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications, Advances in Water Resources, 93, 62–74, 2016.
- 4) 中川 貴文 : 大地震動時における木造軸組構法住宅の倒壊解析手法の開発, 建築研究資料, 2010.
- 5) 建材試験センター : 実大木造住宅の振動実験手法に関する調査研究 2階建て木造軸組住宅の三次元振動台試験報告書, 2007.
- 6) 損害保険料率算出機構 : 住宅の耐震性能に影響を及ぼす要因の調査, 地震災害予測研究会 2014–17 年度報告書, 2019.
- 7) 三浦 弘之・ほか : 土石流高さに注目した数値解析に基づく木造家屋の倒壊危険度評価, 地域安全学会論文集, 2021.
- 8) 川村 将司・ほか : 木造建築物壁の面外加力による限界耐力に関する実験的研究 (その1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 2002.
- 9) 長岡 修・ほか : 木造軸組構法住宅の倒壊限界変形に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 2012.
- 10) 国土交通省 PLATEAU : <https://www.mlit.go.jp/plateau/>