

### 古墳時代の遺跡の建物倒壊痕跡に基づく火砕流の衝撃力の推定

群馬大学 学生会員 ○亀山 ひろみ  
 群馬大学 正会員 若井 明彦  
 公益財団法人 群馬県埋蔵文化財調査事業団 非会員 杉山 秀宏  
 株式会社 火山灰考古学研究所 非会員 早田 勉

#### 1. はじめに

6世紀初頭に現在の榛名火山二ツ岳付近で発生した噴火の際には、山麓を火砕流が複数回流下した。それらの流下域に位置する渋川市金井東裏遺跡では、初期の火砕流の衝撃によって柱坑が変形した後に倒壊した掘立柱建物が検出されている。

本研究では、過去の火山災害の痕跡である地盤変状に着目し、火砕流の衝撃力を推定することを試みる。ここでは、火砕流が瞬間的に柱を押し倒し衝撃力として作用したと仮定し、火砕流の作用をある飛翔物体の衝突と置き換え事象を単純化する。この条件において、3次元動的弾塑性 FEM に基づく衝撃力解析を用いて検討する。なお、土の弾塑性構成モデルには、これまで土構造物等の地震応答解析において実績のある UW モデル<sup>1)</sup>を用いた。

#### 2. 金井東裏遺跡の掘立柱建物の被害状況

金井東裏遺跡は榛名山二ツ岳の北東 8.5km に位置しており(図 1)、6世紀初頭の噴火では、榛名二ツ岳渋川テフラ(Hr-FA)と呼ばれるテフラが北東方向に降下し、山麓付近では同じく北東方向に数度の火砕流が発生した。この火砕流によって掘立柱建物が倒壊し、当時の地表面(以降、旧表土と記す)の柱穴に据えられていた柱が地盤を変形させた痕跡が発掘されている。

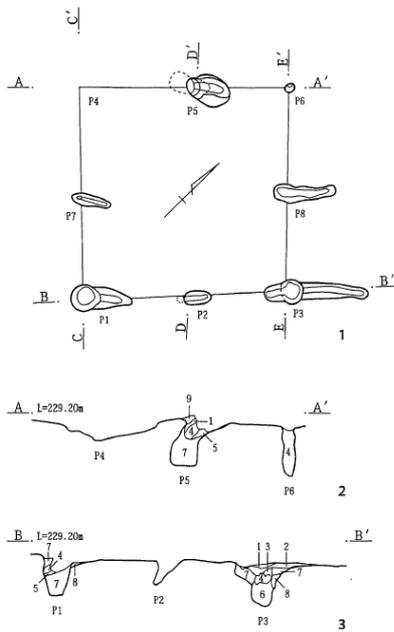


図2 掘立柱建物平面図・断面図

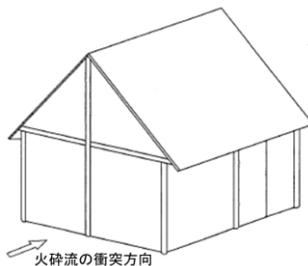


図3 想定される掘立柱建物の復元図



図1 榛名山二ツ岳(点A)と金井東裏遺跡(点1)(国土地理院 20万分の1 長野・宇都宮に加筆)

掘立柱建物は、床面から約 100 個の赤玉が出土したことなどから、簡易な構造の作業場で平地式である可能性がある。図 2 に掘立柱建物の平面図・断面図を示す。柱間 1.6m の 2 間×2 間の方形建物で、柱総数は 8 本である。柱や壁材は腐朽したため材質等は特定できないが、残された柱穴から、柱は直径約 10cm、全長 225cm 程度(地中部 65cm、地上部 160cm)と推定される。周辺の出土状況等を考慮すると、東西に主軸を持ち、南西に入り口を持つ茅葺壁の平入り切妻造掘立柱建物と想定した(図 3)。火砕流は西から東に向け、建物の妻方向に向かっておおむね垂直に直撃したと推定される。

#### 3. 土質試験

解析で用いる物性値を算出するため、旧表土の各種土質試験を実施した。試験結果を表 1 および図 4 に示す。細粒含有率(粒径 75 $\mu$ m での通過質量百分率)が 57%と、細粒分を多く含む高液性限界のシルトである。

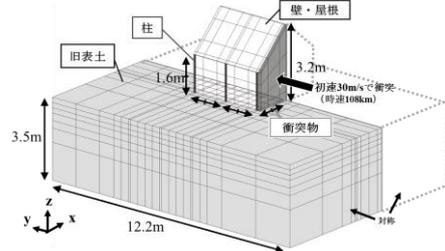


図5 有限要素分割図

表 1 旧表土の各基本物性値

|       |              |                           |
|-------|--------------|---------------------------|
| 最大密度  | $\rho_{max}$ | 1.06 [g/cm <sup>3</sup> ] |
| 最小密度  | $\rho_{min}$ | 0.81 [g/cm <sup>3</sup> ] |
| 湿潤密度  | $\rho_t$     | 1.23 [g/cm <sup>3</sup> ] |
| 乾燥密度  | $\rho_d$     | 0.87 [g/cm <sup>3</sup> ] |
| 土粒子密度 | $\rho_s$     | 2.60 [g/cm <sup>3</sup> ] |
| 間隙比   | e            | 1.99                      |
| 液性限界  | $w_L$        | 109.6 [%]                 |
| 塑性限界  | $w_P$        | 63.1 [%]                  |
| 塑性指数  | $I_P$        | 46.5                      |
| 自然含水比 | w            | 68.9 [%]                  |

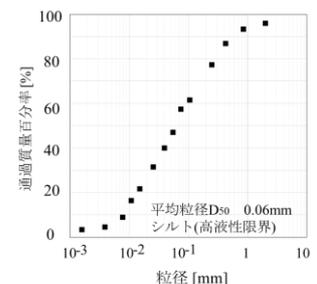


図4 旧表土の粒径加積曲線

キーワード 火砕流, 衝撃力, FEM, 古墳時代遺跡

〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1  
群馬大学大学院理工学府 TEL 0277-30-1621

4. 掘立柱建物と材料のモデル化

掘立柱建物に衝撃力が作用する際の有限要素分割図を図5に示す。掘立柱建物の一面に一樣の力が作用するものと仮定し、衝突物には初速 30m/s<sup>2</sup>を与える。

解析に使用する物性値を表2に示す。衝突物と掘立柱建物は弾性体とした。旧表土は土質試験等から推定した物性値を用いた。壁・屋根は、厚さ 10cm と仮定し、衝突物と接する面での壁の曲げ剛性が、柱1本と等価となるようにヤング率を決定した<sup>2)</sup>。これまでの検討によって、作用した力積の大きさが等しければ変形結果はほとんど変わらないことが示されている。今回は作用した力積のみに着目し、衝突物の質量とヤング率は任意の値を与えた。なお、ヤング率は壁・屋根と等しい値を与えた。衝突物の単位体積重量は、掘立柱建物一棟に対する衝突物の質量が 250, 500, 1000kg となるように与え、3通りの条件で解析を行った(表2を参照)。

5. 解析結果

図6に各解析ケースにおける、せん断ひずみ図、残留変形図、衝撃力の時刻歴を示す。これらは3列の柱の断面を示している。衝撃力の時刻歴は、各時刻における衝突面に作用する衝突方向の力であり、計算の簡単化のため並進力のみに着目した。

残留変形図は、破線が衝突前、実線が衝突後を示している。衝突物に対して前列の柱は抜け上がり、後列の柱は下方に押し込められる傾向にある。

次に、せん断ひずみ分布をもとに、陥没部分に対応する主働破壊領域について検討する。図6の濃淡スケールの黒色閾値は、モール・クーロンの破壊規準に基づく破壊時せん断応力の95%の応力時のひずみの値である、0.035とした。すなわち、黒色の範囲は、地盤が塑性化し破壊及び大きな変形が発生する可能性が高いと考えられる。実測されている柱穴の断面図(図2)と比較すると、衝突物の質量が 250~500kg の場合、すなわち約7.3~14.5kNsの力積が作用したとき、柱穴と同規模の変形が生じるものと推定される。

6. まとめ

本検討の結果、掘立柱建物に及ぼした衝撃力は 7.3~14.5kNs と考えられ、解析条件下においては、質量 250~500kg の物体が初速度 30m/s で衝突した際に受ける力積に相当する。ただし、火砕流の作用を飛翔物体の衝突という簡易なモデル化により表現しているため、前述の質量の数値そのものは物理的意味を有していないことに注意が必要である。

参考文献

- 1) Wakai, A. & Ugai, K. (2004) : A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, Soils and Foundations, Vol.44, No.4, pp.83-97.
- 2) 亀山ひろみ, 若井明彦, 杉山秀宏 (2016) : 榛名二ツ岳渋川テフラ (Hr-FA) 噴火時の火砕流が古墳時代建築物に与えた衝撃力の推定, 公益財団法人群馬県埋蔵文化財調査事業団 研究紀要, 34, pp.39-46.

表2 解析に使用した材料パラメータ

| 材料       | モデル                    | ヤング率<br>E[kN/m <sup>2</sup> ] | ポアソン比<br>ν[-] | 粘着力<br>c[kN/m <sup>2</sup> ] | 内部摩擦角<br>φ[deg] | 単位体積重量<br>γ[kN/m <sup>3</sup> ]                 | Rayleigh減衰 |        |
|----------|------------------------|-------------------------------|---------------|------------------------------|-----------------|---|------------|--------|
|          |                        |                               |               |                              |                 |   | α          | β      |
| 衝突物      | 線形弾性                   | 4.5E+05                       | 0.3           | -                            | -               | m=250のとき 3.37<br>m=500のとき 6.7<br>m=1000のとき 12.3 | 0.172      | 0.0017 |
| インターフェイス | 接触時には線形弾性<br>剥離時には剛性ゼロ | 4.5E+05                       | 0.3           | -                            | -               | 1.0E-20   | 0.172      | 0.0017 |
| 柱        | 線形弾性                   | 7.0E+06                       | 0.3           | -                            | -               | 7   | 0.172      | 0.0017 |
| 屋根・壁     | 線形弾性                   | 4.5E+05                       | 0.3           | -                            | -               | 2   | 0.172      | 0.0017 |

| 材料  | モデル   | ヤング率<br>E[kPa] | ポアソン比<br>ν[-] | 粘着力<br>c[kPa] | 内部摩擦角<br>φ[deg] | 履歴パラメータ          |     | 単位体積重量<br>γ[kN/m <sup>3</sup> ] | Rayleigh減衰 |        |
|-----|-------|----------------|---------------|---------------|-----------------|------------------|-----|---------------------------------|------------|--------|
|     |       |                |               |               |                 | b/ω <sub>0</sub> | n   |                                 | α          | β      |
| 旧表土 | UWモデル | 2.4E+04        | 0.3           | 18            | -               | 2.2              | 1.6 | 14.4                            | 0.172      | 0.0017 |

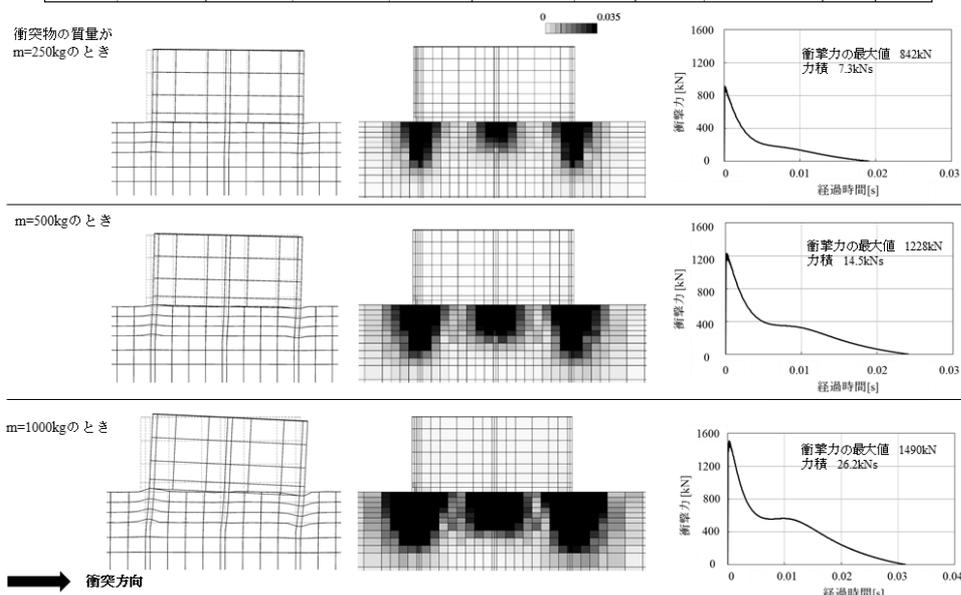


図6 各解析ケースにおける残留変形図(左列), せん断ひずみ図(中央列), 衝撃力の時刻歴(右列)