

古墳に残された地震地すべり痕跡の工学的調査

伊藤寛倫1・小長井一男2・沼田宗純1・山口直也3・寒川旭4

 ¹東京大学大学院 大学院生 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1) E-mail: itouhrnr@iis.u-tokyo.ac.jp, numada@iis.u-tokyo.ac.jp
²東京大学生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1) E-mail: konagai@iis.u-tokyo.ac.jp
³地震防災フロンティア研究センター川崎ラボラトリー 研究員 (〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1-2) E-mail: yamaguchi@kedm.bosai.go.jp
⁴活断層研究センター 主任研究員 (〒540-0008 大阪市中央区大手前4-1-67) E-mail: sangawa.a@aist.go.jp

地震によって発生した地すべりの痕跡が古墳で見つかることがある.古墳の地すべりパターンは明瞭に 観測できる.それは古墳が,人が抱えられる程の土の塊を丁寧に突き固めて造り上げられているからであ る(版築という).したがって古墳でトレンチを掘削すると,本来規則的な版築模様がすべり面に沿って 大きく変形している様子が現れ,これを計測することで土塊内部のひずみの全貌を把握できる.古墳はそ れらが崇拝の対象であったことから,その多くが活断層のような背面に丘陵の迫る場所に沿って分布して いる.これらの変形パターンは当該地域の地震動と強く関係しているはずである.本論文では古墳に刻ま れた地震情報をどのように抽出するか検討する.

Key Words : historical earthquake, ancient mound, landslide, active fault, numerical simulation

1.はじめに

1596(慶長元)年9月5日午前0時頃,現在の大阪 府直下を震源とする推定マグニチュード7.5の伏見 地震が発生した.この地震は,豊臣秀吉が築城して 間もない伏見城を大破せしめるなど,京都をはじめ 畿内の広範囲にわたって甚大な被害をもたらした. 死者は数千人に上り,現在の大阪府全域を震度 程 度の揺れが襲ったと推定されている¹⁾.

近年,大阪府高槻市教育委員会によって,淀川北 岸で最大級の前方後円墳である今城塚古墳に地すべ りの痕跡があることが確認された²⁾.寒川が提唱し 生まれた地震考古学は,「考古学の遺跡発掘調査で 認められる地震の痕跡(住居跡・古墳等の変形等) を手がかりとして過去の地震を探る」学問である³⁾ が,この手法によると,この地すべりは伏見地震に よって発生した可能性が高いと考えられている.

本研究では,実際に今城塚古墳の地すべり跡を調 査し,古墳に刻まれた地震情報を抽出する方法を検 討する.また調査で得られた情報を用いて地すべり のシミュレーションを試みるなど,従来の地震考古 学における考古学的又は地学的な立場よりも工学的 な視点に立っている.

2.今城塚古墳及び伏見地震に関する諸元

(1) 今城塚古墳

今城塚古墳は淀川北岸で最大級の前方後円墳であ り,継体大王の真の陵墓であるとされている(図-1).「今城」の名は戦国時代に織田信長(推定) に城砦として利用されたことに由来し,大きな改変 を受けている.しかし人為的な改変を受けていない 前方部や内濠で,地震地すべりの痕跡が発見された (図-2).地すべり跡に沿ったトレンチ調査の結果, 地すべり土塊が15世紀の放射性炭素年代測定値を示 す試料が含まれる層を覆っていることが判明し⁴⁾, 1596年の伏見地震によって発生したと推定される. a)地すべり土塊に沿ったトレンチ調査結果

平成12年に高槻市教育委員会によって行われた規 模確認調査では,前方部から内濠にかけて約60mの 区間でトレンチが掘られ,地すべりの様子が明らか にされた.図-1の赤点線で示す部分が内濠に向かっ てすべっており,図-2に示すように,トレンチに沿 って地山(砂質粘性土)の上を墳丘盛土からの崩壊 土(細粒分まじり砂及び有機質土)が覆っているこ とが確認された.墳丘は版築と呼ばれる工法により 小さな土の塊を突き固めて構築されており,その織 り成す模様から,他の地盤と識別可能である.この 墳丘盛土が内濠に多く堆積しており,崩壊土である と認定された.本研究では,この前方部で生じた地 すべりを対象とする.なお,トレンチ調査で得られ た地すべり断面を図-3に示す.



図-1 今城塚古墳の現状等高線図



図-2 トレンチ調査によって明らかになった地すべ りの様子(図-1中の点Cの位置)



b) サンプリングを目的とした現地調査

すべり面からサンプルを採取するため,2002年12 月に現地調査を行った.本研究の対象地すべり部分 は既に埋め戻されていたが,造出(図-1参照.墳丘 での祭祀の場として用いられたと言われる.)部分 でトレンチ調査が行われており,この部分でも地す べりの痕跡が認められた.造出の端の部分では,地 山(砂質粘性土)と墳丘盛土(細粒分まじり砂及び 有機質土)との間ですべりが生じており,対象地す べり部分との類似性が認められた.よって造出部分 のすべり面からサンプルを採取し,一面せん断試験 を行ってすべり面の物性を得ることを試みた(3章 参照).

c) 原地形の復元

高槻市教育委員会の規模確認調査,上田⁵及び小 澤⁶による前方後円墳の形状分類研究を参考にし, 地すべり発生前の今城塚古墳の古墳地形の復元を試 みた.上田,小澤の分類方法は異なるが,両者とも, 今城塚古墳と古市古墳群に属する白鳥陵について, 形成された年代,形状,規模等が類似することを指 摘している.また,高槻市教育委員会による規模確 認調査においても白鳥陵と形状や規模が類似してい ることが確認された.白鳥陵は現在も良好に原型を とどめていることから,本研究においては白鳥陵を 雛型として今城塚古墳の復元を試みることとした.

地すべり発生前の今城塚古墳の推定諸元をまとめ たものを表-1に示す.ここでテラスとは墳丘斜面上 に築かれた小段をいう.また,高槻市教育委員会に よる調査で得られた地すべり部分の断面スケッチ (図-3)を元に,すべり面の断面を設定した(図-4).復元地形及び設定すべり面の三次元図を図-5 に示す.すべり面は数値計算のために設定する必要 がある(後述).

本研究においては後円部を対象としないため,前 方部の前面から内濠,内堤部分についてのみ示して いる.なお,地すべりが発生した当時,内濠には水 がはられていたと考えられ,この水面高さを0 mと した相対高さを示している.

表-1 地すべり発生前の諸元(推定)

墳丘(前方部)	前面幅	150 m	
	高さ	15 m	
	地山面高さ	2 m	
	テラス高さ	5 m	
	テラス幅	3 m	
	斜面角度	30度	
内濠	斜面角度	25 度	
	底面幅	16 m	



図-4 想定すべり面に沿った断面図



図-5 復元地形(a)と想定すべり面(b)の三次元図

(2) 伏見地震

a) 伏見地震の諸元

宇佐美¹⁾や宇津⁷⁾らによると,1596年に発生した 伏見地震の震央及びマグニチュードは表-2のように 推定されている.

表-2	伏見地霍の諸	皆元
18 4		ヨノレ

震央	135.6 ° E, 34.65 ° N
(今城塚古墳までの距離)	(約 22 km)
マグニチュード	$7.5(\pm 0.25)$

b) 伏見地震に伴う断層運動

伏見地震では,大阪平野北縁に位置する有馬 - 高 槻構造線断層系が80~100 kmの広範囲にわたって活 動した.今城塚古墳はこの活断層系を構成する安威 断層の東端から約1 kmの地点に位置するが,安威断 層では右横ずれ3 m,縦ずれ0.5 mが生じ,平行して 走る真上断層と積算すると右横ずれが5 m以上に達 した⁸⁾.このことからも強い揺れが今城塚古墳を襲 ったことが予想される.

3.数値計算におけるパラメータの決定

2章に示した調査結果を元に入力パラメータを作 成して,地すべりのシミュレーションを行った. Konagaiらによる擬似三次元ラグランジアン粒子有 限差分法⁹⁹を用いた.この手法は,地すべりブロッ クがマット状(プロックの広がりに比べて厚さの変 化が小さい状態)であると仮定し,そのマット状の ブロックが斜面(すべり面)をすべり下りる様子を 記述する.時刻歴の陽解法であるMPM(Material Point Method)の解析スキームを応用しており,固定 された矩形格子(オイラー座標)上を自由に動ける 粒子(ラグランジュ粒子)で物質を表現するため, 著しく大きな変形まで解析することができる.当該 モデルでは, 地形(すべり面の等高線情報), すべり面の物性, 地すべりプロックの面内変形を 支配する物性,という,いずれも現地で測定され得 る3つのデータセットを設定すればよい.今回は従 来の手法に加えて,ラグランジュ粒子の厚みも考慮 したシミュレーション¹⁰を行った.

地形については図-4及び図-5に示したようなす べり面を設定した. すべり面の物性, 地すべり ブロックの面内変形を支配する物性については,後 に述べるように設定した.

なお、シミュレーションでは入力地震動としてあ る特定の加速度時刻歴を入力する.入力地震動の作 成については後述するが、その目的は伏見地震の地 震動を再現することではない.通常の地震地すべり では、すべる前の斜面が持つポテンシャルエネルギ ーが、地震動によって加わる運動エネルギーよりも 著しく大きい.しかし今回対象とする今城塚古墳の ケースでは地すべりの標高差が決して大きくなく、 かつ地山と墳丘盛土との間のすべり面がほとんど勾 配を持たないため、地震動によって加えられる運動 エネルギーが地すべり土塊の到達距離に大きな影響 を与えると予想される.よって、シミュレーション の目的は、地すべり土塊の到達距離などが地震動の 強さを推定する際の指標になるか検討することであ る.

(1) すべり面で発揮されるせん断応力

墳丘と地山との間のすべり面から採取したサンプ ルを用いて一面せん断試験(a)を行った.サンプル は不連続面を境として,上側が墳丘からすべり落ち た細粒分まじり砂及び有機質土,下側が地山を構成 する砂質粘性土,と物性が異なる.サンプルのすべ り面がちょうど一面せん断試験機のすべり面に一致 するように整形し,湿潤サンプルによって行った. 試験の結果を図-6に示す.

また,版築によって構築された墳丘から採取した サンプルを用いた一面せん断試験(b)を行った.

試験(a),(b)を通じて,直径60 mm,高さ20 mmの 円柱状サンプルを用いて,せん断速度2 mm/minの 定圧せん断試験を行った.また,地すべり発生当時 の含水比等の諸条件を再現することは事実上不可能 なため,サンプル採取時の条件下で行っている.試 験(b)は,含水比が78 %の条件下で行われた.一方, 試験(a)は,サンプル整形時の便宜上水を吹きかけ たため,試験(b)に比べて含水比が高い状態であっ たと考えられる.



図-6 一面せん断試験(a)の結果

ー面せん断試験の結果をもとに,すべり面に沿った 変位量でせん断応力を記述することとする.前述の ように,試験では地すべり発生当事の諸条件を再現 できていない.一方で,例えば一面せん断試験(b) から得られる内部摩擦角(23度)は,地すべりの滑 落崖(図-1及び図-3中のA点)付近で観察されたす べり面(図-7)から得られる内部摩擦角(25度弱) にほぼ等しい.よって本論文では,試験結果より得 られた内部摩擦角の値を信用できる値として適用し, 粘着力はゼロと仮定する.

せん断応力 τ [N/m²] - 変位 δ [m]関係は,一面せん断試験の結果を参考にして,

$$=G'^*\delta \tag{1}$$

のように表現した(図-8).ここでG' [N/m²/m]は, $G' = \tau_{neak} (1 - \exp(A * \delta))$ ⁽²⁾

のように非線形に表現される(Aは定数).最大せん断応力 τ_{peak} [N/m²]は,鉛直応力 σ_n [N/m²]に依存する.なお,変位がある一定量 δ_0 (今回の場合は δ_0 =5.0×10⁻³ [m])以上になると,せん断応力が一定になるとした.



図-7 滑落崖付近のすべり面の様子

(2) 地すべりブロックの物性

図-2に示すように,墳丘盛土として積み上げられ た細粒分まじり砂及び有機質土が地すべり土塊とな

りすべり落ちた.物性は表-3のように設定した. 表-3 地すべり十塊の物性

密度	$1.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
ヤング率	$5.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
ポアソン比	0.30
内部摩擦角	23 度
粘着力c	0 N/m ²

(3) 内濠内での挙動

地すべり部分のトレンチ調査によると,地すべり 土塊は内濠にすべり落ちる付近で,図-8に示すよう に引きちぎられたような挙動を示していた(図-3の 点Cの位置).よって,地すべり土塊が内濠に入っ た時点で,水の存在によってすべり面上のせん断応 力が低下し,よりすべり易くなったのではないかと 考えられる.

上記のようなシナリオを想定して,シミュレーションにおいては,地すべり土塊が内濠に入った時点ですべり面上のせん断応力をゼロとした.



図-8 地すべり土塊の変形の様子4)

(4) 入力地震動の作成

大崎¹¹⁾によると、マグニチュードと震央距離を決 定すると、減衰定数5%の速度応答スペクトル(大 崎スペクトル(1994年版))を用いて、基盤上の地震 動を再現することができる、例えば、表-2に示した 伏見地震のマグニチュードと震央距離を用いると、 今城塚古墳直下の基盤に入力する地震動(加速度時 刻歴)は図-9のようになる、



図-9 今城塚古墳直下の基盤に入力する地震動

今城塚古墳周辺の安威断層近辺の地下地質構造に ついては,寒川らによって調査されている⁸⁾.有馬

- 高槻構造線沿いに発達する幅500 m程度の低地帯 は両側を活断層に挟まれた断層凹地であり、今城塚 古墳はちょうど凹地付近に位置する.この付近では 基盤上に数百メートルにわたって大阪層群が堆積し, 地表面近くに沖積層が存在する.

また,今城塚古墳の周辺における地盤調査で,地 下約20 mの深さまで地盤材料のN値が調査されてい る.この結果によると,地表面から地下約10mまで は概ねN値10以下の軟弱な粘性土が堆積しており, 地下10 m以下ではN値50以上の硬い砂礫層となって いた。

しかしながら,これら調査の結果のみから地表面 での地震動を再現することは難しい.また通常,地 すべりでは, すべり始めてからの地震動の影響は小 さいと考えられる.よって,入力地震動は,振幅A [m/s²],周期T [s]のサイン波を1周期分,X及びY方 向に等しく入力することとした.今回入力した波に ついて表-4に示す.

	周期T [s]	振幅A [m/s ²]
ケース1	1.5	2.45
ケース2	1.5	4.9
ケース3	1.5	7.35

4.シミュレーション結果及び考察

3章に示したパラメータを入力データとして,今 城塚古墳の地すべりをシミュレーションした結果を 以下に示す.

(1) シミュレーション結果

地震動を入力する前の様子を図-10に,ケース1, 2,3の15秒経過後の様子を,それぞれ図-11(a), (b), (c)に示す.また,ケース3の様子を示すアニ メーションを添付する.



図-10 地震動入力前の状態



図-11 地震動を入力した場合(ケース1:(a),ケー ス2: (b),ケース3: (c))

(2) シミュレーション結果の考察

a) すべり面上のせん断応力

本論文では、粘着力を無視し、内部摩擦角は一面 せん断試験で得られた結果を用いたため, すべり面 上で発揮されるせん断応力を過小評価している. に もかかわらず,ケース1など振幅の小さな波を入力 しても盛土はほとんどすべらない.つまり,墳丘盛 土底面のすべり面勾配はほとんどゼロに近く,この ため盛土は安定して動かない.この盛土を内濠に向 かって動かすためには,地震動によって加わる大き な運動エネルギーが無視できないと考えられる. b) 地すべりの規模

15 秒後の時点でケース 1,2,3 を比較すると, 内濠にすべり落ちた土塊の体積,Y方向の最大すべ り距離,及び入力波によってすべり土塊に加わった 運動エネルギーは表-5のようになっている.今城 塚古墳の現状と比較すると,すべった体積及び距離 はケース3の波を入力した場合ですら小さい.今後 は表-5に示したように,波の振幅(最大加速度) だけでなく,地震動によって土塊に加わったエネル ギー量とすべった距離との相関なども考慮する必要 がある.また,墳丘盛土底面の勾配がほとんどゼロ であることから,すべり始めてからも地震動の影響 が大きい可能性がある.

一方で,古墳が構築された6世紀前半から現在に 至る間の種々の因子によるすべりの累積値が,現在 今城塚古墳で認められる地すべり量であるというこ とにも注目し,考慮する必要がある。

表-5 すべり落ちた土塊の諸量

case	体積 [m ³]	到達距離	エネルギー
	(全体に占め	[m]	[N m]
	る割合)		
1	0 (0 %)	3.6	8.2×10^5
2	266.4 (3.7 %)	11.0	2.3×10^7
3	597.5 (8.3 %)	14.5	8.0×10^{7}

5.結論と今後の課題

本論文では、1596年の伏見地震によって生じた今 城塚古墳の地すべりのシミュレーションを試みた. その目的は、地震動及び地すべりを忠実に再現する ことではなく、古墳から抽出した地震情報をパラメ ータとして地震動の強さを推定することにある.古 墳ではどうしても墳丘底部が弱層になる、勾配のほ とんどないこのような弱層に沿ってすべりが生じる とすれば、ポテンシャルエネルギーが土砂到達距離 を支配する自然斜面の地すべりと異なり、地震動そ のものによる運動エネルギーの寄与も決して少なく ない.そのように仮定すると、墳丘盛土の移動状況 は過去の地震強度の累積的な情報を記憶するメモリ として捉えることも可能であろう. 今後は,入力波によって加わった運動エネルギー, 摩擦で失われるエネルギー等まで考慮して,低勾配 の墳丘盛土の到達距離と最も相関の高い地震パラメ ータを抽出し,過去の地震履歴を工学的に記述する 手法の検討を進める予定である.

謝辞:高槻市教育委員会文化財課から,今城塚古墳 で行った現地調査及びその後の資料提供で便宜を受 けた.末筆ながらここに記して謝意を表する.

参考文献

- 宇佐美龍夫:新編日本被害地震総覧[増補改訂版], 東京大学出版会,1996.
- 高槻市教育委員会:史跡・今城塚古墳 平成9-12年 度・規模確認調査 - , 1997-2001.
- 3) 寒川旭:地震考古学,中央公論社,1992.
- 4) 寒川旭,宮崎康雄:今城塚古墳で認められた地滑りの痕跡,日本文化財科学会第18回大会研究発表要旨集,pp. 24-25,2001.
- 5) 上田宏範:前方後円墳,学生社,1969.
- 6) 小澤一雅:前方後円墳の数理,雄山閣出版,1988.
- 7) 宇津徳治:世界の被害地震の表,1990.
- 8) 寒川旭,杉山雄一,宮地良典:有馬-高槻構造線活 断層系の活動履歴及び地下構造,地質調査所研究資 料集No. 259(平成7年度活断層研究調査概要報告書), pp. 33-46,1996.
- Konagai, K. and Numada, M.: Pseudo-three dimensional Lagrangian Particle Finite Difference Method for modeling long-traveling soil flows, *Journal of Japan Society of Dam Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 123-128, 2002.
- Konagai, K. and Numada, M.: Material point method for run-out analysis of earthquake-induced long traveling soil flows, *JSCE Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 27, 2003.
- 11) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島 出版会, 1994.

(2003.7.3 受付)

PHYSICAL INTERPRETATION OF HISTORICAL EARTHQUAKE-INDUCED LANDSLIDE TRACES REMAINING IN ANCIENT MOUNDS

Hironori ITO, Kazuo KONAGAI, Muneyoshi NUMADA, Naoya YAMAGUCHI and Akira SANGAWA

Historical earthquake-induced landslide traces are often found at ancient old mounds. These old mounds were constructed by piling neatly up a huge number of small pieces of soil, and therefore, distorted patchwork patterns that appear on excavated trench walls show how the landslide masses were deformed in intense earthquakes. This paper discusses if these landslide traces can be used as indexes for describing possible intense shakes at particular times and locations.