

火山由来土からなる斜面の地震被害リスク評価手法開発のための基礎的研究

群馬大学 学生会員 ○瀧野誉将
 火山灰考古学研究所 非会員 早田勉
 足利工業大学 正会員 西村友良
 群馬大学 正会員 若井明彦

1. 研究背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震により、東北・北関東地方の各地で土砂災害が発生した。特に斜面では、火山灰質粘性土からなる斜面に含まれる風化軽石等の鋭敏な粘土層の周辺が長時間の地震動により攪乱されて強度低下を引き起こし、流動性地すべりが発生した。本研究では、様々な手法を用いてその原因とされている軟弱粘土層の関東地方における分布状況の解析を試行的に行う。

2. 軽石層の現場観察と採取試料の分析

2.1 栃木県高根沢町上柏崎地区の被害事例

東北地方太平洋沖地震により栃木県高根沢町上柏崎地区では、流動性の高い地すべりが発生した（写真1）。



写真1 地すべりの状況

今回検討する地点において行われたボーリング調査結果から、表層付近に一定の厚さを有する埋め戻し土、その下には段丘の主たる構成層である約26m層厚の火山灰質粘性土層が確認されている。また、その下部に凝灰質粘性土が1.5mほど堆積し、最下部には砂礫層が存在している。

この地すべりは、鋭敏な凝灰質粘土が震動により急激に強度を失ったために斜面全体が不安定化し、地下水と上部土砂が移動土塊の流動化を促したことによって発生したと考えられる。斜面下の凹地で一部湛水が見られ、周囲では竹が繁茂していることから、地すべり発生箇所は集水部であることがわかる。そしてこのような平常時の滞水環境が、軽石の風化等による鋭敏な軟弱粘土層の形成を助長する。そのため、こうした湿潤状態が維持されやすい地形・地質的条件が、火山性堆積物からなる斜面地での地震地すべりの危険素因

と考えられる¹⁾。

この地すべり地点において、軽石が風化して形成された凝灰質粘性土層は、約20万年～60万年前に広範囲に堆積したことがわかっている²⁾。他の地域でも、対象とした斜面と同じような条件下におかれたときに、軽石は風化が進行しやすく、凝灰質粘性土層として斜面中に存在していることが予想される。

2.2 群馬県安中市松井田町横川地区における露頭観察

軟弱粘土層の土質特性を把握するために、土質試験を行った³⁾。群馬県松井田町横川地区にある、道路拡張のために斜面を掘削して法面を成形した箇所地盤においてブロック状のサンプリングを行った（写真2）。



写真2 現場斜面の様子

現場付近は、土壌の主な母材の給源火山となる浅間山から約20km離れており、度重なる噴火活動による噴出物を挟在する火山由来土に厚く覆われている。掘削した法面の露頭観察によれば、表面直下に比較的新しい軽石層が明瞭に堆積しているのをはじめ、それ以深の地層中には、各種のテフラ層が観察される。注目すべきは、より下位に見られる浅間板鼻褐色軽石(As-BP)グループで、その一部が乳白色に変色しており、強風化による鋭敏粘土化が認められることである。

試験を実施した試料は、As-BPグループの乳白色風化軽石(試料W)、未風化軽石(試料U)、火山灰質粘性土(試料L)である。また、実施した土質試験は、液性・塑性限界試験、一軸圧縮試験、一面せん断試験、粒度試験である。自然含水比は、Wが97.2%、Uが127.6%、Lが91.0%であった。

キーワード：東北地方太平洋沖地震、地すべり、軟弱粘土層、動的コーン貫入試験、ハロイサイト

連絡先 〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1 群馬大学地盤工学研究室 TEL:090-9368-0326 E-mail t11305023@gunma-u.ac.jp



写真3 試料W



写真4 試料U



写真5 試料L

試料 W、L について液性塑性試験を行った。液性・塑性限界の結果を表 1、表 2 に示す。

表 1 液性限界・塑性限界 試料 W

液性限界試験 自然含水比：97.21(%)

試料No.	1	2	3	4
含水比(%)	71.70	71.43	69.57	72.97

塑性限界試験

試料No.	1	2	3
含水比(%)	40.00	47.83	45.45

液性限界 W_L	塑性限界 W_P	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
71.50	44.43	27.07	-1.64

表 2 液性限界・塑性限界 試料 L

液性限界試験 自然含水比：91.03(%)

試料No.	1	2	3	4
含水比(%)	106.45	107.89	109.20	106.35

塑性限界試験

試料No.	60	32	219
含水比(%)	56.25	43.48	59.09

液性限界 W_L	塑性限界 W_P	塑性指数 I_P	液性指数 I_L
107.60	52.94	54.66	-0.97

試料 W では、自然含水比が 97.21% に対して液性限界が 71.50% と、液性限界が自然含水比を大きく上回る結果が得られた。これは、震動によりこの土が攪乱された場合、土粒子間の結合機構が壊れて急激な強度低下を引き起こす危険性があることを示唆する。また、液性指数が 1 以上であることから、試料 W は不安定で鋭敏な軟弱層であることが伺えた。一方、試料 L に関しては、自然含水比が 91.03% に対して液性限界が 107.60% となり、液性限界に近い値となった。

As-BP グループの風化に伴う組成変化を明らかにするため、X 線回折および蛍光 X 線分析を実施した。分析対象は、比較的風化が進んだ橙色軽石層（試料 1）、風化が特に進んだ白色軽石層（試料 2）、新鮮な軽石層（試料 3）、風化がやや進んだ黄褐色軽石層（試料 4）の 4 試料である。

Mg-飽和粘土と K-飽和粘土試料の定方位試料を調整し、粘土鉱物種の同定を行った（写真 6）。Mg1、Mg2、

Mg4 は、それぞれ試料 1、試料 2、試料 4 における Mg 飽和粘土試料を示し、K1、K2、K4 は、それぞれ試料 1、試料 2、試料 4 における K 飽和粘土試料を示す。試料調整の段階から、本試料においてアロフェンや球状ハロイサイトを含むことが示されている。バルク試料の不定方位法による XRD 分析では、試料 4、試料 2 において、一次鉱物の他にハロイサイトと見られるピークが観測された。以上より、風化程度の進行に伴って一次鉱物とともに二次鉱物（粘土鉱物）が出現し、次に粘土鉱物が主体となる傾向が認められた。

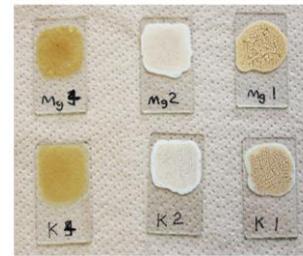


写真 6 粘土画分の XRD 測定用試料

粘土画分の定方位法による X 線回折分析では、風化が進んだ軽石層の試料 4 では、アロフェンを含むことが示唆された。

一軸圧縮試験を試料 W、L のみ実施した。現地でのサンプリングしてきたそれぞれの試料から供試体を各 3 ブロックずつ作製した。一軸圧縮試験の結果を表 3、表 4 に示す。

表 3 一軸圧縮試験結果 試料 W

供試体	高さ(mm)	直径(mm)	重量(g)	最大応力 q_u (kN/m ²)	鋭敏比
W1(不攪乱)	80.60	34.80	100.94	33.64	10.35
W1(攪乱)	58.90	44.50	121.43	3.25	
W2(不攪乱)	80.55	34.55	97.82	26.95	10.09
W2(攪乱)	69.55	41.15	97.82	2.67	
W3(不攪乱)	80.70	35.55	101.28	27.71	8.20
W3(攪乱)	71.60	38.45	101.28	3.38	

表 4 一軸圧縮試験結果 試料 L

供試体	高さ(mm)	直径(mm)	重量(g)	最大応力 q_u (kN/m ²)	鋭敏比
L1(不攪乱)	81.80	35.15	105.65	32.40	16.20
L1(攪乱)	77.50	44.95	105.65	2.00	
L2(不攪乱)	81.45	35.55	103.81	25.64	10.34
L2(攪乱)	77.50	44.95	105.65	2.48	
L3(不攪乱)	80.80	35.25	96.20	31.26	10.45
L3(攪乱)	79.35	39.90	96.20	2.99	

一般的な粘土の鋭敏比は 2~4 であるのに対し、試料 W、L は、ともに鋭敏比が 10 前後と大きな値であった。実験では攪乱後の試料に関して、両試料とも供試体作製後、載荷を行う前にすでに自立することが不可能なほど自重により大きく変形していた。このことから、攪乱供試体の実際の最大応力 q_u (kN/m²)は今回の試験結果よりもさらに低い結果であったと推定される。すなわち、実際の鋭敏比はさらに大きくなることが予想される。以上より、試料 W、L は非常に鋭敏な軟弱粘土であることが確認された。

斜面内の軟弱粘土層の有無の簡便な調査法

斜面内の風化軽石層を簡易かつ迅速に把握する手法の一つに、安価で簡易な動的コーン貫入試験が挙げられる。この方法の有用性を確かめるため、実際に試験を行い、標準貫入試験結果との比較を行った。群馬県安中市松井田町横川地区の斜面において、標準貫入試験が行われた地点の半径 6m 以内の範囲にある 3 点で、簡易動的コーン貫入試験（以下、斜面貫入試験と略す）を実施した。軟弱層が存在する深さにおいて、斜面貫入試験から得られた換算 N 値が 1~2 程度と、標準貫入試験による N 値とほぼ一致していることがわかる（図 1）。

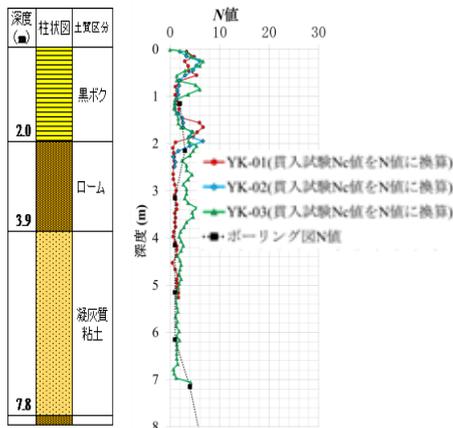


図 1 斜面貫入試験と N 値の比較

火山噴出物の堆積過程から考え、ローム層中に軽石層を挟在していることを考慮すると、標準貫入試験よりも軟弱層の存在位置を詳細に把握できるといえる。

既存の研究より、ハロイサイト含有率の増加とともに N_c 値は小さくなる傾向があることから、ハロイサイトの形成に伴い、降下火砕物の強度が低下していくことが示唆されている⁴⁾。このことから、軟弱層の検出を効率的に行う手法の開発が重要と考える。

3. ローム堆積地の地形・地質に着目した地震地すべり発生場の検討

3.1 火山由来土の風化過程に関する考察⁵⁾

火山灰の風化が進行していく毎に、粘土鉱物であるアロフェンが生成され、それがカオリン鉱物のひとつであるハロイサイトへと変化する。ハロイサイトが生成する反応(水和反応)は、水により促進される。また、ローム層がある程度堆積していると溶脱反応により多くの Cl , SO_4 が溶脱し、それに伴い、軽石層への SiO_2 の供給量も増加する(図 3-1)⁶⁾。

このことから、ローム層が厚く堆積し、かつ地下水面が存在しているような地点において、ローム層の底部に軽石層が存在していた場合、凝灰質粘土に変化している可能性は否定できない。

上記のような条件を満たす地形は段丘あるいは台地・丘陵に多く、そのような地点が長時間の地震動を受けると、流動性地すべりが発生しやすいと考える。

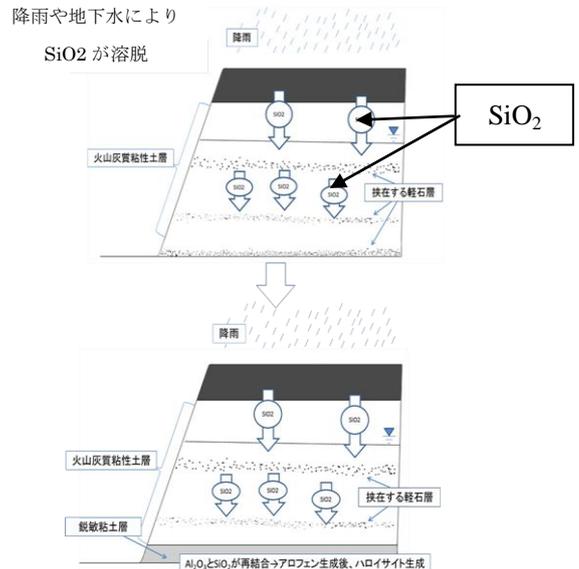


図 2 軟弱粘土層の形成過程

3.2 関東地方における鋭敏な凝灰質粘土層の分布特性と類型化

凝灰質粘土の分布特性を把握するためには、風化する前の軽石層の分布を把握することが重要である。

関東地方には多くの台地・丘陵地帯が存在していることが知られている。これらの中でも、集水地形となっている箇所において、栃木県の事例のように凝灰質粘土層が存在している可能性が考えられる。

江南台地⁷⁾、大宮台地、下総台地、常陸台地などにおいて、台地の下部、砂層上に凝灰質粘土層が発達している例として挙げられている⁸⁾。これらの凝灰質粘土層がどのような力学特性を持つか把握されていないが、火山由来の凝灰質粘土層であることから非常に鋭敏な粘土である可能性は否定できない。

3.3 風化した軟弱層を有する斜面を検出するための簡易手法の例⁹⁾

火山灰の風化により形成された軟弱層を有する斜面を検出するための簡易手法として、地形・地質情報(ボーリング柱状図のデータベース)を手がかりに、リスクの高い地域を抽出することを試みた例を紹介する。

図 3 は、「とちぎ地図情報公開システム」¹⁰⁾の地盤情報データからボーリング柱状図を引用し、ポイントごとのローム層厚をまとめ、東北地方太平洋沖地震によって地すべりが発生した地点を示し、さらに標高データを重ね合わせたものである。そして、ローム層などの堆積状況が微地形や地下の埋没地形などの局所的な地形要因に左右されないよう、一定面積内に含まれるローム層の値の平均値を用いて改めて描いた分布図を示す(図 4)。

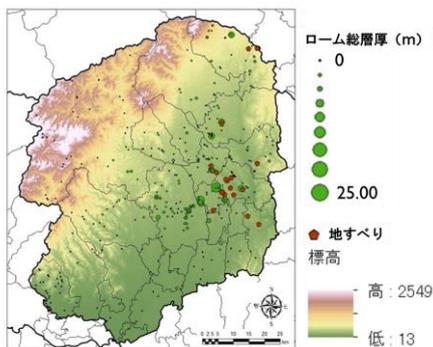


図3 栃木県におけるローム層の分布

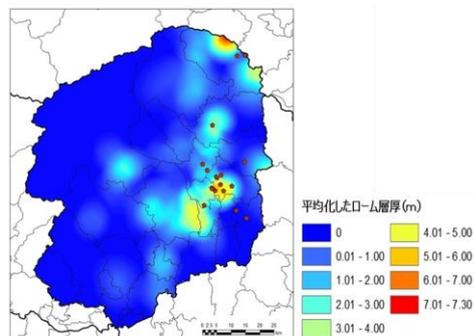


図4 平均化したローム層の分布

これより、栃木県の広範囲にわたり、平均化したローム層が1.00～8.00mの範囲で分布している様子が見られる。また、発生した大規模な地すべりの多くは、ローム層厚が1.00～5.00mの比較的厚い地域に位置しており、ローム層圧と地すべり発生地点にはおおまかな相関があることがわかる。地すべりの発生に影響する要因としては、本件球で取りまとめた素因のほかにも、地震動特性や凝灰質粘土層の風化度合いによる軟化のしやすさなど、様々なものがあると考えられる。今後は、このような他の要因も考慮した複合的な発生場の広域的な検討が望まれる。

4. 結果

凝灰質粘性土の風化が進行しやすい地形は、ローム層が軽石層の上部に厚く堆積しており、かつ地下水が豊富に存在するといった、風化に必要な反応が起こりやすい状況にあることが明らかになった。

また、このような地形は、台地・丘陵地に存在する可能性が高く、今後の研究はそのような地形にも焦点を置いて検討する必要がある。

5. 考察

北関東地域と南関東地域に形成される段丘上の土壌に含まれる火山灰の給源火山は異なるものの、堆積プロセスや堆積年代は非常に類似している。そのため、北関東地域に存在する軟弱粘土層は南関東地域においても存在すると考えられる。

今後、南関東地域で予想される巨大地震による、軟弱粘土層を素因とした地震地すべりの発生には特に注意が必要で、関東地方における軟弱粘土層の分布を広域的に

解明する手法を早急に検討していくことが望まれる。局所的な事例の分析と、広域的な分析を組み合わせることで、より詳細に検討を行うことができると考える。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費助成金(基盤研究(C):地震地すべりリスクから考える関東地域の各種ローム土の類型化(課題番号:2456099), 研究代表者:若井明彦)の補助により実施したものである。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 若井明彦, 松下圭佑, 福島文将(2012):火山灰質粘性土の繰返し軟化特性に基づく地震時流動性地すべりの機構解析, 第47回地盤工学研究発表会講演集, 八戸, pp.1663-1664.
- 2) 山元孝広(2013):栃木-茨城地域における過去30年間のテフラの再記載と定量化, 地質調査研究報告, 第64巻, 第9/10号, pp.251-304
- 3) 田中成季(2014):地震地すべりの素因となりうる斜面内部の軟弱粘土層の特性と発見法に関する基礎的研究, 群馬大学大学院工学研究科修士論文, pp.5-58.
- 4) 吉田昌弘・千木良雅弘(2012):1968年十勝沖地震によって降下火砕物に発生した崩壊と風化との関連について pp213-221
- 5) 小田原卓哉(2014):地震地すべりの素因となりうる斜面内部の軟弱粘土層について, 群馬大学工学研究科卒業論文, pp.29-38
- 6) 小坂・平林・岡田・二木(1984):東京軽石層の風化変質による組成変化, 粘土化学 第28巻 pp106-118
- 7) 中里裕臣・中澤 努(2007):飯縄西山テフラの発見による関東平野北西部, 江南台地のテフラクロノジー. 地質学雑誌 第113巻 pp.628-635.
- 8) 菊地隆男(1981)常総粘土層の堆積環境, 地質学論集 第20号 pp.129-145.
- 9) 木村尚意(2014):ローム堆積地の地形・地質に着目した地震地すべり発生場の広域解析, 群馬大学大学院工学研究科修士論文, pp.17-24
- 10) 「とちぎ地図情報公開システム」
(URL: <http://www.dgis.pref.tochigi.lg.jp/map/login.aspx>)