

巨大地震時の地すべり運動メカニズムに関わるすべり面地下水沸騰の可能性

濱崎英作 (株)アドバンテクノロジー、渡辺修 渡辺水文企画
橋本修一 東北電力(株)/現・(株)東北開発コンサルタント、山科真一 国土防災技術(株)

1. はじめに

2008年岩手・宮城内陸地震(M7.2)の際に発生した荒砥沢地すべりは幅900m、長さ1300m、深度100mを超える巨大地すべりで、主要すべり面の平均勾配は約 2° と著しく緩いながら移動距離で300~350mにも達するものであった。ただ、そのような長大な移動にもかかわらず、移動体縁辺部以外のすべり面前後の破砕はほとんど無い、あってもごくわずかであり移動体全体での損傷も少なかった。他方、2004年中越地震(M6.8)で発生した東竹沢地すべりも移動は約100mありながら”地すべり移動層はほぼ原形を保って”^[1]いるなどの類似所見がある。ともにすべり面がシルト岩に近いもので、層面すべりという共通点があるがその移動メカニズムは未解明である。

本論では、このメカニズムに対し強震動時に発生する摩擦熱がすべり面近傍の水を沸騰させ、その際に発生した泡によってすべり土塊の荷重がすべり面に作用できなくなるヴェイパーロック現象(vapor lock)を起こし、これが地すべり移動を容易にし、移動体損傷を軽減する役割を果たしたのではないかと、というモデル仮説を示す。

2. 解析手法

エネルギー保存則にもとづき力学的エネルギー(摩擦)が熱エネルギー(Q)として全て蓄えられるとするとき次の式が成り立つ。

$$N \tan \phi x = m C \Delta T \quad (= W, = Q) \quad (1) \text{式}$$

ここに、左辺はすべり面方向に沿って生じる仕事(W)で、摩擦に抗って作用する力 $N \tan \phi$ と岩盤と土塊との相対移動距離(x)の積で表される。 N は垂直応力で ϕ は内部摩擦角である。右辺の m は温度上昇するべき層の重量、 C は比熱、 ΔT は層の温度上昇量である。左辺については、基盤の強震動にตอบสนองする斜面上の土塊(剛体ブロック)でモデル化する。榎^[2]は摩擦体としての土の安定について地震時の剛塑性体の挙動をダランペールの原理による慣性力の関係と加速度の連続条件でモデル化(図1)することを提唱しており、ここではこのモデルに従う。基盤と土塊が分離もズレもせず同体となるのは $N > 0$ 、せん断力 T

がせん断抵抗最大値 S_{max} を絶対値で下回るときである。一方、ズレ下がる時は下向きに作用する $|T|$ が S_{max} を上回るときで、逆にズレ上がる時上向きに作用する $|T|$ が S_{max} を上回るときとなる。ここに S_{max} は(2)式で示される。

$$S_{max} = |N \tan \phi + c / \tan \theta| \quad (2) \text{式}$$

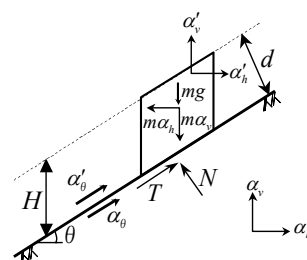


図1 無限長斜面土塊の地震時応答モデル^[2]

式の c は粘着力で θ は斜面勾配である。ここで、滑っている間は基岩から土塊には摩擦抵抗の最大値に相当するせん断応力 T しか伝わらない^[2]。基盤の地震加速度は α_v 、 α_h 、物体の地震加速度は a'_v 、 a'_h でズレ運動時は $a_v \neq a'_v$ 、 $a_h \neq a'_h$ であり、加速度の連続条件を考慮することで a'_v 、 a'_h を各々求めることが可能となる。結果すべり面方向での相対加速度増分 Δa_θ がもとめられ、時間(dt)で2回積分をすることで摩擦運動に関わる移動距離 x が求まる。よって(1)を使うことにより相当する位置での m と C が既知であれば温度上昇 ΔT が得られる。

3. 荒砥沢地すべりでのモデル検討

3.1 相対移動量(x)と仕事(w)

荒砥沢地すべりではこれまでの調査結果から、層厚 $H=100$ m、勾配 $\theta=2^\circ$ 、水頭 $H_w=70$ mで試算した。詳細な物性値・条件は図2に示すとおりである。

強震動は荒砥沢ダム基礎岩盤監査廊に埋設された地震計のデータを用い最大地すべり方向での水平成分(α_h)と鉛直(α_v)に変換して用いた。図2の α_θ はすべり面方向に変換した基盤の地震加速度である。 a'_θ は移動体でのすべり面方向加速度であり、ともに上向き正である。また $distance$ は移動距離 x と等しい。この図から12.65秒までは移動体は基盤とズレることなく同体であるが、その後徐々に移動

し始め 15 秒から 16 秒の間で 4cm の移動量を示す。結果的に地震によるトータルの相対移動量は 5.1cm となる。式(1)左辺を用いると、すべり面面積 1 m²で摩擦($\phi=20^\circ$)のみが熱上昇の仕事(W)に関わるとし刻々の垂直応力 N (図 3) と相対変位(x)の積分から、総仕事量 $W=1,589,590J(=kgf \cdot m^2/s^2)$ が求められる。

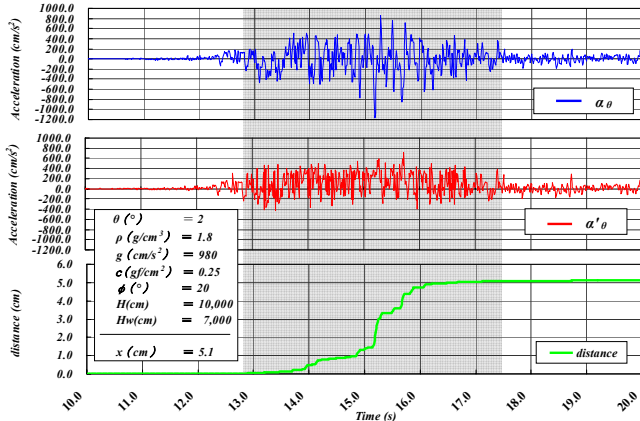


図 2 斜面土塊の地震応答と相対変位量

3.2 相転移と必要熱量 (Q)

今、すべり面付近での変形層厚を 5mm と想定し、有効空隙率 0.1、岩盤の密度 $\rho=1.7 g/cm^3$ 、土粒子の比熱 $Cb=0.8J/g \cdot ^\circ C$ とする。このとき地下水の温度を $15^\circ C$ と仮定すれば、水の比熱 $Cw=4.178J/g \cdot ^\circ C$ となる。すべり面での水頭を 70m と想定していることから、飽和水蒸気圧は概ね 8atm となり国際研究用状態式 (IAPWS-95) から約 $170^\circ C$ がすべり面深度での水の沸点となる。この場合、温度上昇幅で $155^\circ C$ 以上となる熱量が得られれば、すべり面地下水は沸騰し得る (液相-気相混合状態に変化し得る)。すなわち (1) 式右辺を使えば水蒸気になるのに必要な熱量は $Q=1,272,395J$ となる。

3.3 ヴェイパーロック現象と爆発

上記より $Q < W$ となり地震で移動した土塊の摩擦エネルギーが水を水蒸気にする可能性があることが示された。この状態の初期は水と泡の混合状態であると予想され、この間図 2 のように 2 秒と懸からない急速下での現象である。

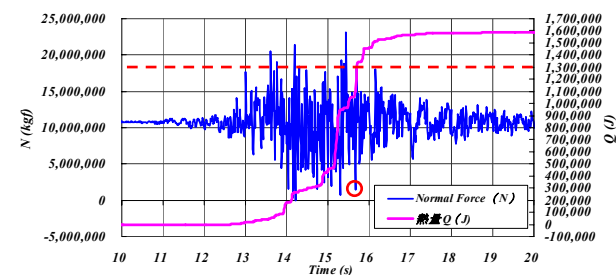


図 3 垂直応力(N)の変化

つまり図 3 に示すような垂直応力 (N) の変化

のなかで摩擦熱が発生し $Q \leq W$ となった瞬間 (赤○) から気泡が生じ水と気泡の混合状態となっていると予想される。

ところで、ヴェイパーロック (vapor lock) は自動車のフットブレーキが過熱した際、伝達系統である液圧系統内部に気泡が生じ、そのために利かなくなる現象である。すなわち、液体はほとんど圧縮されないため効率良く圧力を伝えることができるが、熱の冷却が間に合わないで液体と気泡の混合状態下にあるとき、気体は容易に圧縮されるために圧力をうまく伝えることができなくなる。この状態がすべり面で生じるものと仮定する。つまりすべり面付近の状態において $Q \approx W$ になった瞬間から、蒸気 (気泡) が発生し土塊の垂直応力 (N) の変化に対して気泡の体積が縮んだり膨張したりするだけで、基盤に伝える圧力 (荷重) が上らなくなって見かけの ϕ が 0 となるばかりか、移動時の微起伏を乗り越えるクッションアブソーバーが形成される (図 4)。なお、等温状態では気体はボイルの法則より圧力と体積の積が一定である。すなわち $Q < W$ を超え気泡が出来た瞬間以降、土塊に上向きの加速度が働き N が急激に低下するとき (図 3 の赤○)、その瞬間に体積が爆発的に増加し移動体の加速を増加させる可能性もある。

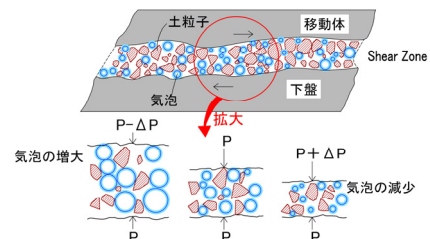


図 4 ヴェイパーロック(vapor lock)の概念図

4. モデルの検証手法

気体への相転移に必要な温度が 170° であれば地質温度計としての方解石の晶出があるかもしれない。地すべり変動は短時間と予想されるので晶出量は少なく X 線回折では検出困難な恐れがあるが、顕微鏡観察などで観察は可能であろう。また気泡の発生が剪断強度に与える影響を確認するには直接的にセン断試験装置に発熱装置を組み込み、強制的に気泡を作ることの一つの試みとして考えられる。

【参考文献】

- [1] 中村浩之 (2009) : わかりやすい砂防技術 (15) 地震と地すべり, 砂防と治水 Vol. 41, No. 2, Page65-69
- [2] 榎明潔 (2007) : 摩擦体としての土における安定と変形の解析法, 電気書院, pp266

一般社団法人日本応用地質学会東北支部 第18回 研究発表会プログラム

開催日：平成 22 年 7 月 23 日
会 場：せんだいメディアテーク(スタジオシアター)
講演集：1,000 円
協 賛：東北地質調査業協会

開 会

- 10:00 開会
10:00～10:10 支部長挨拶(橋本)
発表(午前の部)・・・(座長：正木、副座長：初貝)
10:10～10:30 切土法面における緑化プロセスと表土改良のモニタリング調査
杉山洋介(基礎地盤コンサルタンツ株)
10:30～10:50 火砕流成堆積構造の空間的变化と形成プロセス：伊豆諸島における第四紀層の研究
根本欣典(応用地質株)
10:50～11:10 順次再動した日本海拡大時リトリック正断層，後期中新世カルデラ縁正断層，
地表地震逆断層，一関市・奥州市での 2008 年岩手・宮城内陸地震(M6.9)
遅沢壮一(東北大学大学院理学研究科)
11:10～11:30 ゆるみ岩盤の事例紹介<形態と内部構造の特徴>
畚野 匡(日本工営株)
11:30～11:50 巨大地震時の地すべり運動メカニズムに関わるすべり面地下水沸騰の可能性
濱崎英作(株アドバンテクノロジ)
渡辺 修(渡辺水文企画)
橋本修一(東北電力株)ノ現・東北開発コンサルタント)
山科真一(国土防災技術株)
..... * * * *
11:50～13:00 (休憩、昼食)
..... * * * *
発表(午後の部)・・・(座長：大内、副座長：菅蒲)
13:00～13:20 七五三掛地区での地すべり緊急対策
大沼 秀幸
(国土交通省東北地方整備局新庄河川事務所赤川砂防出張所)
13:20～13:40 山形県七五三掛地すべりの経緯と恒久対策計画について
森 一司、寺田 剛(農林水産省東北農政局)
高見 智之(国際航業株)
13:40～14:00 地質調査業の停滞は誰の責任か(超簡易型ボアホールカメラ撮影で解決できないか)
太田 保
14:00～14:20 みちのく GIDAS 上に統合した地質・地盤・災害情報
布原 啓史(株テクノ長谷)
総合討論 座長：代表幹事(小林)
14:20～14:40
..... * * * *
14:40～15:00 (休憩)
..... * * * *

特別講演

司会：橋本
15:00～16:30 地理情報システム(G I S)を用いた技術のイノベーション
江崎 哲郎 氏 (前一般社団法人日本応用地質学会会長、
九州大学東アジア環境研究機構)

閉 会

- 16:30 閉会
16:30 副支部長挨拶(高見)

懇親会

17:00～19:00