

■斜面表層の振動特性と不安定化

Characteristics of vibration of a surface layer and its instabilization

新潟大学農学部／川邊 洋

Fac. of Agr., Niigata Univ./Hiroshi KAWABE

キーワード：崩壊，地震動，卓越周波数，増幅，常時微動

Key words : landslide, earthquake motion, predominant frequency, amplification, microtremor

1. はじめに

地震動にはいろいろな性質が付随しているが，斜面を不安定化させるのに重要な要因は，最大加速度や周波数特性，継続時間などであろう。簡便な安定解析では最大加速度が使われることが多い。しかし，地震動を最も特徴づけるのは，どのような周波数（周期）の波がどの程度の振幅で含まれているか，という周波数（周期）特性である。この性質により，大きな加速度が作用しても崩壊を起こさなかったり，逆に大した加速度でもないのに斜面が破壊されてしまうことも起こり得る。

本報告では，とくに地震動の周波数特性に注目して，崩壊との関係を論ずる。

2. 崩壊に関する地震動の諸性質

地震動に起因する崩壊の特徴－分布や規模など－の決定には種々の要因が絡んでいる。たとえば，地表面に達した地震動の特性（振幅や周波数構成など）は，①震源における地震そのものの性質，②震源からの距離や地表までの伝播経路にある地殻の性質，さらに③崩壊地周辺の地質・地形・地盤条件の相乗効果を受けている。とくに③は，誘因となる地震動の性質に重要な影響を及ぼすばかりでなく，崩壊発生の素因としても関わっている（図－1）。

これらの誘因と素因の中には，次のような因子が含まれる。

- 誘因
- ・地震断層の位置と破壊過程
 - ・最大加速度（速度，変位）
 - ・周波数特性（卓越，最大振幅）
 - ・主要動の継続時間

- 素因
- ・地質
 - ・地形（傾斜，標高，方位，凹凸，斜面形など）
 - ・地盤の土質工学的性質
 - ・地盤の固有周波数（周期）

・地震前の降雨状況

地震災害との関係で重要な地震動の性質は，最大振幅と周波数（周期）特性および地震動の継続時間である。ここでは，とくに周波数（周期）特性に注目する。

地震動は様々な周波数（周期）の振動が合成されたものである。どのような周波数の振動で構成され，どの周波数の振動の振幅が大きいかは，地震動の性質として大変重要である。振幅の大きい振動成分があるとき，その成分の周波数あるいは周期をそれぞれ卓越周波数あるいは卓越周期というが，表層部が持っている固有の周波数（固有周波数）が，そこに入力される地震動の卓越周波数に一致すると共振が起こり，その表層部は一気に不安定化する。

地震波は軟らかい地盤から硬い地盤には入りにくく，かなり反射してしまうが，反対に硬い地盤から軟弱地盤には入りやすい。したがって，一旦軟弱地盤に入った地震波は，その中に閉じこめられたようになり，軟弱地盤中で何度も反射を繰り返すため減衰しにくい。これは，地盤内での地震波の多重反射によって，特定の周期の波が同じ位相で重なり合うからである。その波の周期（ T ）は， $1/4$ 波長則と呼ばれる次式によって見積もることができる。

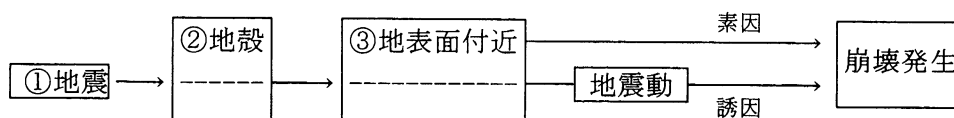
$$T = \frac{4H}{V_s}$$

ここで， H は軟弱地盤の厚さ， V_s は軟弱地盤におけるS波の伝播速度である。

地盤の固有周期とは，多重反射により励起されるであろう振動の周期 T に相当する。岩盤ではS波速度 V_s が大きいため，比較的短周期の振動が卓越し，軟弱な地盤になるにしたがって長周期の振動が卓越してくる。

3. 常時微動の観測による地すべり地表層部の増幅特性

静岡県由比の地すべり地で，土質試験用の観測井を掘



図－1 地震波の伝播と崩壊

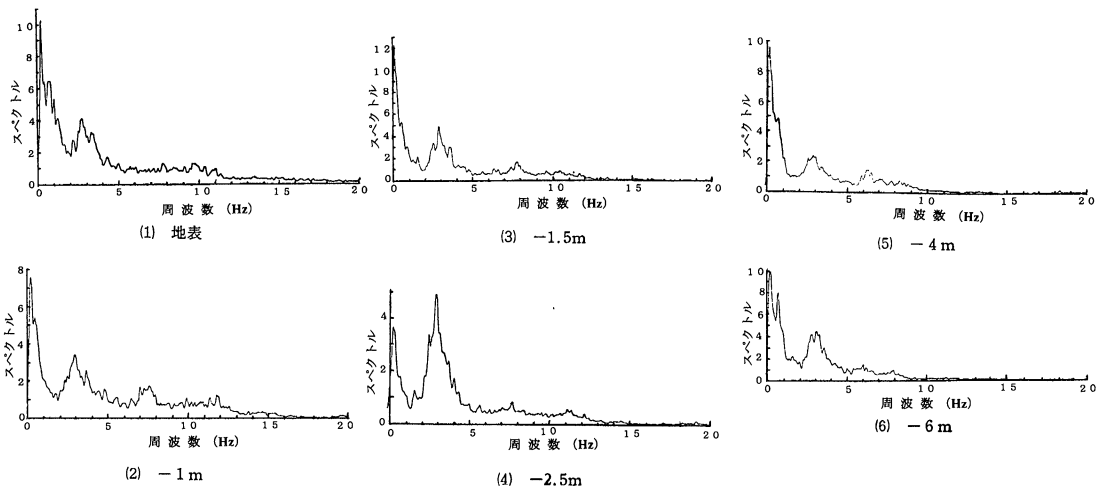


図-2 各深さでの常時微動のスペクトル

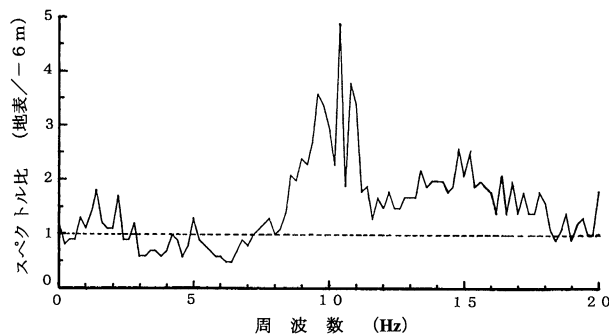


図-3 地表と地下6mでの微動のスペクトル比

り進む過程で、深さ毎の常時微動を測定した(図-2)(川邊・山口, 1983)。縦軸のスケールがバラバラなため、一見ただけでは大小関係はわかりにくい、すべての深さでスペクトル型は類似しており、0.2Hzと3Hz付近にピークが見られる。

図-3は、地表と地下6mで測定された微動のスペクトル比である。この図を見ると、表層(ここでは厚さ約6mの層)で増幅された周波数は10Hz付近に見られるだけである。図-2を丹念に読み取ると、10Hz付近の振幅は、層が厚くなるに従って比例して大きくなっているが、3Hz付近の振幅は、この6mの間でほとんど変化がなく、より深い層で増幅されたものと考えられる。また、0.2Hz付近の長周期振動は、波浪による脈動であろう。

由比での観測例のように、注目している表層部の下面で振動観測するのは一般には難しい。そこで、地表面における振動観測から、表層部の増幅特性を推定できれば大変便利である。強震時の地盤の振動特性を常時微動から推定することは、地盤の非線形性が絡んできて難しい問題があるが、常時微動の水平動と上下動のスペクトル比(水平動/上下動)は、表層地盤の増幅特性をよく反映していると言われている(たとえば、中村, 1988)。

そこで、1997年に発生した鹿児島県北西部地震の被害地域で、地質毎に常時微動を測定し、そのスペクトル比に見られる振動特性と崩壊発生状況の対比を試みた(川

邊・他, 1999)。

当地域の代表的な地質は、入戸火砕流起源のシラス、新第三紀に貫入した花崗岩類、そしてこの地域の基盤である中生代の四万十層群である。これら3種の地質上で常時微動を測定し、スペクトル比を求めた(図-4)。ここでのスペクトル比は、水平動スペクトル2成分の相乗平均を上下動スペクトルで除した値である。

図-4から地質毎に卓越した周波数を読み取ると、次のようになる。

シラス：2Hz

花崗岩：6~10Hz

四万十層群：15~20Hz

地質毎の振動特性の違いが、スペクトル比の卓越周波数に現れている。この卓越振動が表層地盤によって励起されたものと考え、たとえば、花崗岩地域における卓越周波数6~10Hzは、花崗岩地域の表層地盤の固有周波数とみなされる。

基盤における本震の観測記録がないので、その周波数構成がどのようなものであったのかは不明であるが、表層崩壊や落石を集中的に発生させた花崗岩地帯(地頭菌・他, 1997)で卓越する周波数帯が6~10Hzであることから(図-4の中段)、この周波数帯の地震動が花崗岩の表層部に入射して、崩壊を多発させた可能性が考えられる。

一方、この地震動がシラス層に入射しても、シラス層の固有周波数が2Hzを中心とする比較的的低周波帯にあったため、シラス斜面での表層崩壊がほとんど発生しなかった(地頭菌・他, 1997)のではないかと推測される。

4. 周波数に着目した崩壊発生の解釈の例

1999年9月に台湾で発生した集集地震により、雲林省草嶺で大規模な崩壊が発生した。草嶺観測点(CHY080)で記録されたNS方向の加速度(max. 842gal)のスペクトルを図-5に示す。卓越周波数は約1.2Hzで、極めて狭い周波数帯の振動が卓越していたことがわかる。

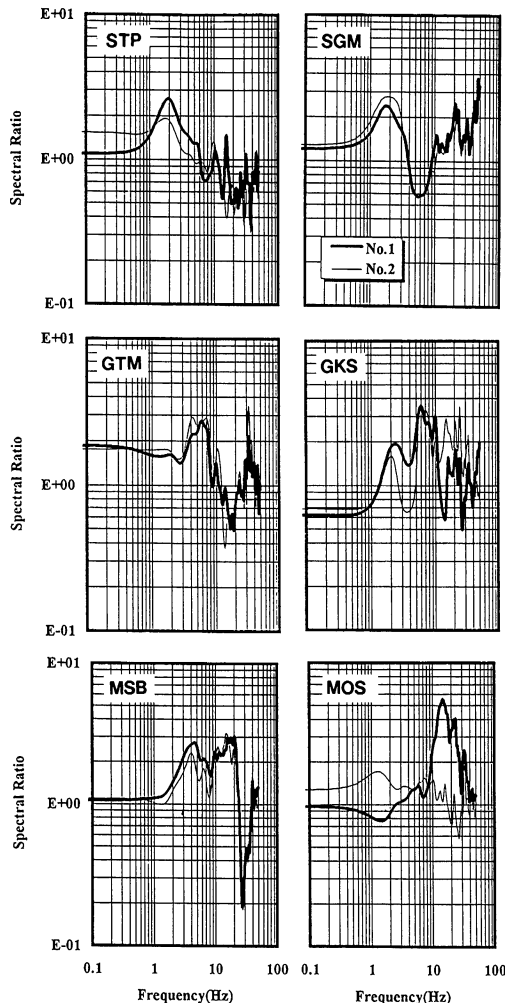


図-4 地質毎の常時微動のH/Vスペクトル比 (上段：シラス, 中段：花崗岩, 下段：四万十層群)

草嶺の平均崩壊深を50mとすると、表層のS波速度が240m/s程度のときに、この層の固有周波数は1.2Hzとなる(1/4波長則を仮定)。崩壊跡での簡易弾性波探査の結果は、同じ崩壊面でも場所によって異なるが、最も遅いP波速度は約410m/sであった。P波速度とS波速度の比を $\sqrt{3}$ としたとき、S波速度は240m/sとなる。斜面の一部で共振に近い現象が起こっていたのかもしれない(川邊・他, 2003)。

2003年5月に発生した宮城県沖の地震では、宮城県築館町で地すべりが発生した(井良沢・他, 2003)。この斜面は、凝灰岩質の火砕流堆積物で覆われた丘陵の谷部が、埋め戻されて造成されたものである。火砕流堆積物自体それほど固結度は高くないが、それを埋土として使用した場合、さらに固結度は低下するであろう。崩壊物質は小さな軽石を含むシラスであった。

そのような地盤に地震波が入射すると、表層の軟弱な埋土の中で多重反射を起こし、ある特定の周波数が卓越した振動が長く継続することになる。豊富に地下水を含んだシラスが、この振動を繰り返し受けることによって、液状化した可能性が考えられる。事実、崩壊堆積物の中

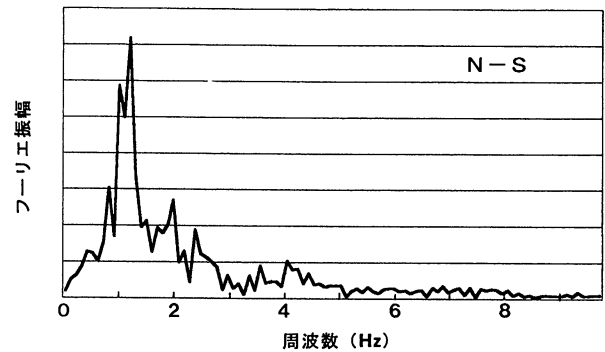


図-5 草嶺における集集地震の加速度スペクトル

に適切な周期でスコップを出し入れすると、土がみるみる液状化していくのが観察された。

防災科学技術研究所のK-NETの観測点が築館町にあるが、本震は記録されていないので、ここでの実際の地震動がどのような周波数特性を持っていたのかは不明である。しかし、軟弱な埋土地盤での多重反射により、土が液状化するほどに周期が延びたことは考えられるであろう。因みに、前述したように、鹿児島の入戸火砕流起源のシラスでは、増幅される周波数はほぼ2 Hzであった。

5. おわりに

崩壊や地すべりを起こす表層部とその下の地盤からなる系は、破壊面形成前はほぼ一体のもののみならずことができ(種々の弱面が介在しているとしても)、地盤-構造物系のように入力部(地盤)と出力部(構造物)を初めから明確に分けて考えることができないため、地震動のどの性質が崩壊発生に重要な影響を及ぼしているのかを、端的に表現するのはなかなか難しい。

しかし、表層部の固有周期は、地質や土質、層厚などによって決定されるその地盤の振動特性を反映しており、下層から入射する地震動の卓越周期(これも通過する地盤の固有周期の影響により変化していくが)との関係から、表層部が安定であるかあるいは不安定になるかを、ある程度は説明することができるであろう。

引用文献

- 井良沢道也・松村和樹・川邊洋・平松晋也・牛山素行・安田勇次 (2003)：2003年5月宮城県沖を震源とする地震による土砂災害(速報), 砂防学会誌, Vol. 56, No. 2, pp.23-31.
- 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳 (1997)：1997年鹿児島県西北部地震による斜面崩壊, 砂防学会誌, Vol. 50, No. 2, pp.82-86.
- 川邊洋・山口伊佐夫 (1983)：地すべりに及ぼす地震動の影響, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 32, No. 2, pp. 5-16.
- 川邊洋・辻本文武・林拙郎 (1999)：1997年鹿児島県西北部地震域における地質毎の震動特性と崩壊, 地震時の斜面の不安定化メカニズムと設計法に関するシンポジウム発表論文集, pp. 1-6, 地盤工学会.
- 川邊洋・林拙郎・近藤観慈・沼本晋也 (2003)：1999年台湾集集地震による草嶺の大規模崩壊とその発生要因, 砂防学会誌, Vol. 56, No. 4, pp.32-39.
- 中村豊 (1988)：常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol. 2, No. 4, pp.18-27.
(原稿受付2004年12月8日, 原稿受理2005年1月12日)