

震動特性のモニタリングによる斜面安定性の評価手法の検討

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○柴尾 享
広島大学大学院工学研究科 正会員 一井 康二
日本工営株式会社 中央研究所 正会員 秦 吉弥

1. はじめに

近年、温暖化の影響による台風上陸の増加やゲリラ的な豪雨により大きな災害が発生している。2005 年の台風 14 号では、山陽自動車道岩国 I.C. - 玖珂 I.C. 区間において高さ 23m の道路盛土部が崩壊し、流出した土砂によって 3 名の死者がでたことは、高速道路においてこれまでになかった重大な災害であった。この災害では、長時間の降雨により盛土斜面に降雨が浸透・滞留し、土が飽和状態となり、その結果、土台の地下水位が上昇し、地滑りを引き起こしたものだと考えられている¹⁾。つまり、盛土斜面の安定性に降雨が非常に大きな影響を及ぼしていると考えられる。

道路、鉄道、河川堤防などの延長距離の長い線状構造物の盛土では、一か所の崩壊がシステム全体の機能不全につながる。しかし、既設の盛土斜面等において従来の地盤調査法により排水機能の評価を行う場合、例えば、ボーリング孔を利用した地下水位のモニタリングといった手段があるが、コストと時間がかかるため、全線にわたり診断を実施することは現実的ではない。少なくとも相対的に排水機能の健全・不健全を判断できる程度の精度であっても、実用的な診断法があると効率が良い。すなわち、少ないコストと時間で効率的に盛土斜面等の排水機能の評価する技術の開発が求められている。

前述のように、斜面の降雨時における安定性はその排水機能に依存している。しかし、排水機能を担う排水路は目詰まり等により機能の低下が生じていることがあり、設計で期待しているレベルの排水機能が維持できていない場合がある。そのため斜面の健全性診断として排水機能のチェックがとても重要視されている。そこで、本研究では、安価に、そして手軽に行える排水機能の健全性診断手法として、地盤震動特性のモニタリングによる方法を検討することを目的とする。

2. 降雨による地盤の固有振動数の変化についての検討

実際の地面では、降雨によって地盤の飽和度が上昇し、そのに伴い湿潤密度の増加が生じる。そして、湿潤密度が増加することにより地盤の固有振動数に何らかの変化が生じる可能性がある。そこで、モニタリング実施計画の参考とするために降雨による湿潤密度の増加により地盤の固有振動数にどの程度の変化が生じるのか検討した。ここでは、せん断波速度を一定と仮定し、降雨による湿潤密度の増加に伴う盛土の固有振動数の変化について動的解析プログラム FLIP²⁾を用いて検討した。

図 1 に解析対象断面の土層区分を示す。原地盤の解析定数は、液状化による構造物被害予想プログラム FLIP (Ver.6.0.6) の取扱説明書³⁾に記載されている盛土構造物の例題で使用されているものを用いた。また、盛土部の解析定数は、原地盤のせん断波速度 ($V_s=220\text{m/sec}$) に対して盛土部のせん断波速度がおおよそ半分になるように設定した。また、簡単のため、盛土は線形弾性体を仮定し、原地盤は応力 - ひずみ関係が双曲線モデルで表現されるマルチスプリングモデルを仮定した。今回の目的では原地盤も線形弾性体で十分であったが、実地盤に近づけるため、ここでは参考文献の例題を参照してパラメータを仮定した。

解析方法としては、まず、基盤加速度として加速度一定の正弦波

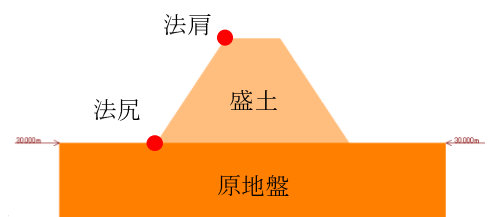


図 1 解析対象断面の土層区分

を振動数毎に入力し、図 1 における法肩・法尻の最大加速度を求めた。そして各振動数における盛土法肩及び法尻での最大加速度の比を伝達関数とし、そのピーク振動数を盛土の固有振動数とした。降雨により盛土地盤の飽和度が一様に上昇したと仮定し、その飽和度に対応する湿潤密度をパラメータとして変化させて盛土の固有振動数の変化を求めた。解析では、重力加速度を作用させ、地盤を初期応力の状態にする初期自重解析を行った後、その結果を用いて地震応答解析を行った。両解析フェーズは同じ構成則を用いており、与えた解析地盤定数も同じである。底面は粘性境界とし、側面は粘性境界により自由地盤部と結合している。図 2 に、解析により得られた固有振動数湿潤密度の関係を示し、表 1 に、固有振動数の変化率をそれぞれ示す。図 2 及び表 1 を見ると、ここで生じた変化率は 3~13% と大きな値であり、従来の常時微動計測により、その変化を捉えることが出来るレベルであると考えられる。

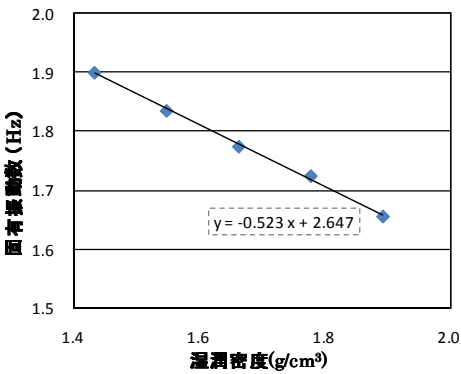


図 2 固有振動数と湿潤密度の関係

表 1 固有振動数の変化率

パターン	飽和度	湿潤密度	固有振動数	変化率
	Sr	ρ_t	f	Δf
	[%]	[g/cm ³]	[Hz]	[%]
①	0	1.432	1.9	-
②	25	1.547	1.835	-3.4
③	50	1.662	1.774	-6.6
④	75	1.777	1.724	-9.3
⑤	100	1.892	1.655	-12.9

3. 斜面安定性評価への利用の提案

ここでは、実際に固有振動数の変化を把握できた場合の応用面を検討する。具体的には、降雨による地盤物性の変化として地盤の飽和度及び湿潤密度に着目し、地盤の排水機能の相違と斜面安定性の変動の関係、及び固有振動数の変化との関係について検討した。検討には、地表面の傾斜角 θ とすべり面の傾斜角 α が等しく、一定の厚さの表土層が無限に分布する無限長斜面を仮定した。図 2 に検討に用いた無限長斜面を示す。本検討では、降雨による影響を表層厚に対する地下水位の割合 β により表現した。地下水位の上昇は、その地盤の排水機能と降雨量及び降雨強度に依存していると考えられる。既往の研究⁴⁾により、地下水位の上昇速度は降雨強度に比例することが確認されている。そして、降雨強度は実効雨量と呼ばれる雨量指標の変化率と対応関係にある。そこで、地下水位の変化は、実効雨量の変化に対応させた。また、地盤の排水機能の相違については、実効雨量の算定に用いる半減期で表現した。実効雨量は式(1)により定義され、排水機能の健全な場合と不健全な場合の半減期をそれぞれ 1.5 時間、72 時間と設定した。

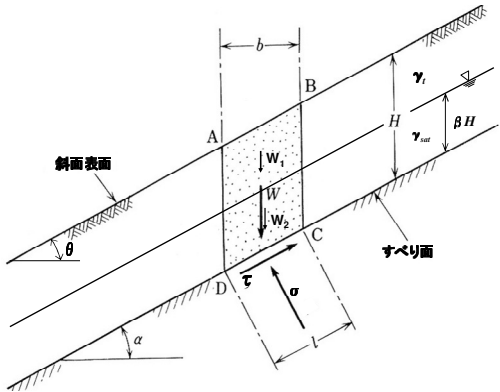


図 3 無限長斜面

$$R_t = r_t + \alpha R_{t-1} \quad (1)$$

ここで、 R_t : 時刻 t における実効雨量
 r_t : 時刻 t における降雨強度
 α : 減少係数 $\alpha = 0.5^{1/H}$
 H : 半減期

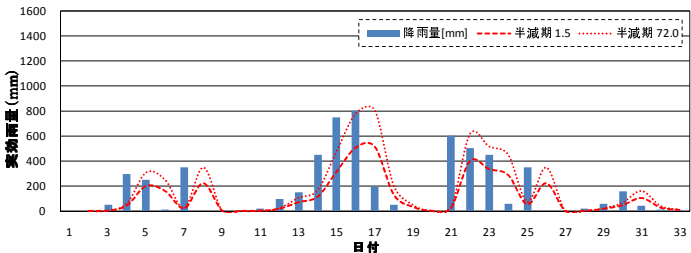


図 4 降雨量データ及び実効雨量データ

図 4 に検討例として使用した降雨量データ及び降雨量データから算出した実効雨量データを示す。この雨量データは検討のために作成した架空の降雨量である。図 4 に示すように、降雨のない日においても実効雨量は、ゼロリセットされることなく、時間とともに少しずつ減少していくことがわかる。また、半減期の違いにより実効雨量の減少の割合に大きな変化が出ていることもわかる。このことから地盤の排水機能の健全・不健全がうまく

表現されていると考えられる。

前述した通り、降雨による地下水位の変化が実効雨量に対応すると仮定した。既往の研究⁴⁾において地下水位の上昇が降雨強度の約8倍の速度で上昇するというデータがあり、ここでは、地下水位は降雨強度の10倍の速度で上昇すると仮定し、一般の安定計算手法により安全率の時間的変化を算出した。図5に安全率の時間的変動を示す。図5に示すように安全率は時間とともに変化する。また、半減期の相違により安全率の変化の程度が異なっており、排水機能の健全・不健全による違いがうまく表現されていると考えられる。

次に、前述の動的解析により得られた湿潤密度と地盤の固有振動数の関係式から降雨による地盤の固有振動数の時間的変化について検討した。式(2)に前述の動的解析から求めた固有振動数と湿潤密度の関係を示す。

$$f = 2.647 - 0.523 \times \rho_{iAVE} \quad (2)$$

ここで、 f ：固有振動数 [Hz]

ρ_{iAVE} ：湿潤密度 [g/cm³]

式(2)は前述の動的解析結果に対して得られた式であり、本来の固有振動数は盛土の形状や物理特性に依存する。ここでは降雨による地盤の固有振動数の時間的変化の傾向をつかむための一例として式(2)を用いている。また、式(2)における湿潤密度は盛土内で一定と仮定し、式(3)により算出した。

$$\rho_{iAVE} = \rho_i \cdot (1 - \beta) + \rho_{sat} \cdot \beta \quad (3)$$

図6に降雨による地盤の固有振動数の時間的変化について示す。図5及び図6に示すように、地盤の固有振動数も斜面の安全率の時間的変化と同様に、降雨による地下水位の上昇により変動する。そして、排水機能の健全・不健全を半減期で表現した時、固有振動数の変化も異なっている。つまり、この例に示すように地盤の固有振動数と地盤の排水機能は関係していることがわかる。したがって地盤の固有振動数のモニタリングが盛土斜面の安定性評価手法となり得る可能性があると考えられる。

4. 高速道路盛土における地盤の固有振動数の計測

次に、実盛土において降雨前後での固有振動数の変化を計測した結果を述べる。

計測は山陽自動車道西条I.C.～志和I.C.間に存在する高速道路盛土において、2009年3月6日、3月19日、3月26日に行った。3月6日は前日まで雨が降っており、晴天が続いていた3月19日、3月26日の結果と比較することによって、降雨による地盤の固有振動数の変化を比較した。

高速道路盛土において常時微動計測の対象とした場所は、KP260.1付近の盛土（斜面長24.8m）である。本来ならば法肩部での計測が望ましいが、安全面を考慮し、盛土の法肩から3.0m下がった地点（以下、法肩）、法肩から14.0m下がった地点（以下、中腹）、法肩から23.0m下がった地点（以下、法尻）の3か所で同時に計測した。図7に高速道路盛土における常時微動計測箇所を示す。

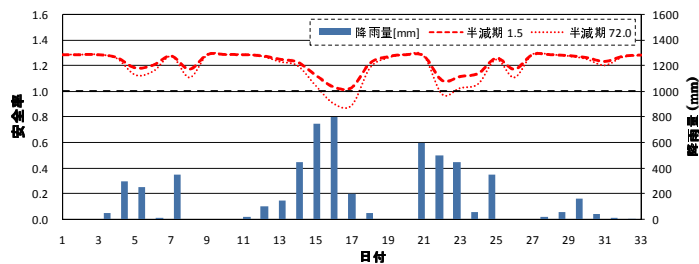


図5 安全率の時間的変動

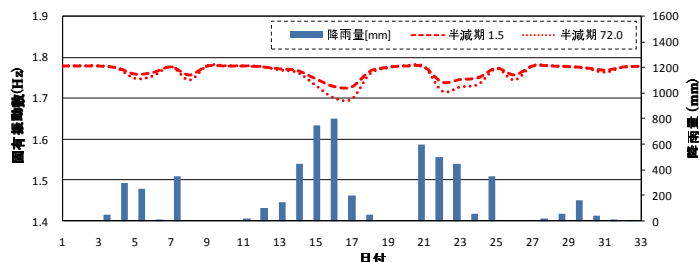


図6 固有振動数の時間的変動

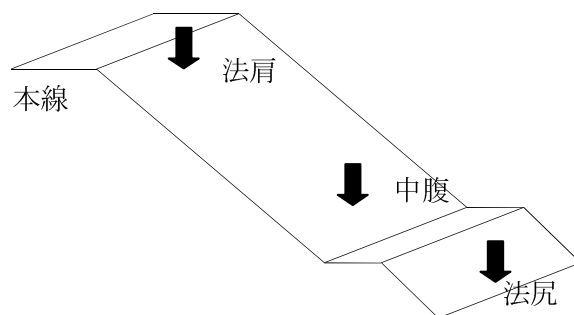


図7 常時微動計測箇所

計測には、物探サービス株式会社製の速度計（GEONET2-283D）を用いてサンプリング周波数 100Hz で 900 秒間計測した。そして、常時微動の時刻歴データから 81.92 秒間のデータを 10 区間選択し、この 10 区間のデータを解析対象とした。そして、選択した 10 区間のデータを高速フーリエ変換 (FFT) しフーリエスペクトルを求め、バンド幅 0.05Hz の Parzen Window で平滑化を行った。そして、水平動フーリエスペクトルを上下動フーリエスペクトルで除して H/V スペクトルを算出し、H/V スペクトルのピークを固有振動数とした。図 8 に計測により得られた H/V スペクトルの一例を示す。

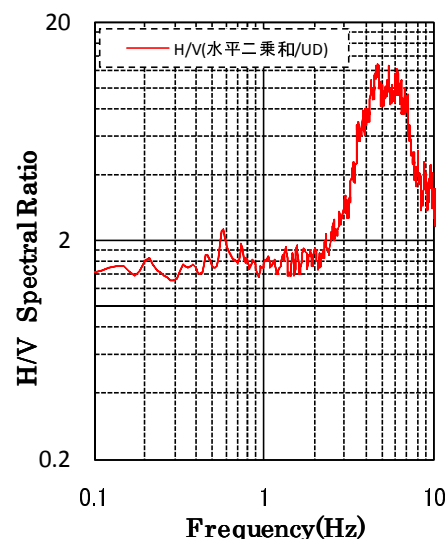


図 8 H/V スペクトルの一例

次に、図 9 に常時微動計測により算出した地盤の固有振動数と含水比の関係を示す。3 月 19 日の計測では、法尻での含水比の計測が出来なかったため、ここでの固有振動数と含水比は法尻における固有振動数と含水比である。図 9 に示すように、降雨があった 3 月 6 日から時間が経過するにつれ、含水比が小さくなっていることがわかる。そして、地盤の固有振動数は、時間の経過とともに高くなっており、前述の解析結果と調和的な結果が得られた。ただし、解析では法肩部の固有振動数を対象としていたが、ここでは法尻部であり、やや疑問は残る。

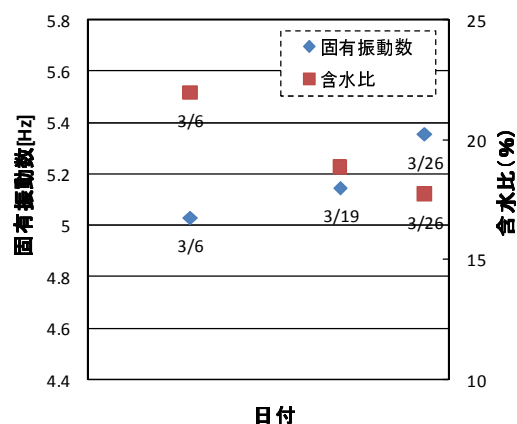


図 9 固有振動数と含水比の関係（法尻）

5. まとめ

- (1) 地盤物性の変化が地盤の固有振動数の変化に与える影響を簡単な動的解析で検討し、降雨による飽和度の上昇によって地盤の固有振動数が小さくなる可能性を示した。そして、固有振動数の変化の程度は数%程度と大きいことから、モニタリングにより降雨による固有振動数の変化を捉える事が出来る可能性があることがわかった。
- (2) 降雨による斜面安定性の変化に関する簡易モデルを作成し、斜面の安定性の降雨による変化と盛土の固有振動数の降雨による変化が対応していることから、盛土斜面において固有振動数のモニタリングが斜面安定性の評価手法になり得る可能性があることがわかった。
- (3) 高速道路盛土での常時微動計測の結果、地盤の固有振動数の分布と含水比の分布とが対応しており、地盤の固有振動数は地盤の含水状態に影響される可能性がある。しかし、データの量が少ないため、今後更なる検討が必要である。

謝 辞

本研究は、NEXCO 西日本中国支社との共同研究の一環として実施した。

参考文献：

- 1) 村田秀一：近年の斜面防災事情，技術情報誌「EXTEC」81 号，VOL.21, NO.1, 2007.6,
- 2) FLIP 研究会ホームページ：<http://www.meisossha.co.jp/flip/index.html>，
- 3) 液状化による構造物被害予想プログラム FLIP(Ver.6.0.6)取扱説明書，平成 19 年 4 月，P.4-18～4-24.
- 4) ティハ，土田孝，佐々木康：自然斜面における雨水浸透・流出の原位置観測，こうえいフォーラム第 16 号／2007.12,