

# 大本山永平寺の森における 表層崩壊危険度と森林の生育状態

RISK OF THE SHALLOW LANDSLIDE AND FOREST GROWTH IN EIHEIJI

斎藤 泰久<sup>1</sup>・新貝 文昭<sup>1</sup>・上野 紗綾子<sup>1</sup>・原田 光則<sup>2</sup>・塩原 孝英<sup>3</sup>

Yasuhisa SAITOU, Fumiaki SHINKAI, Sayako UENO, Mitsunori HARADA and Takahide SHIOHARA

<sup>1</sup>パシフィックコンサルタンツ㈱地盤技術部（〒206-8550 東京都多摩市関戸1丁目7番地5）

E-mail: yasuhisa.saitou@tk.pacific.co.jp

<sup>2</sup>大本山永平寺禪の里事業推進室（〒910-1294 福井県吉田郡永平寺町志比5-15）

<sup>3</sup>森ビル㈱設計統括部（〒106-6155 東京都港区六本木6丁目10番1号）

**Key Words:** shallow landslide, forest, DEM, geomorphic analysis, Eiheiji

## 1. はじめに

近年、豪雨に伴う表層崩壊と土石流の発生は毎年異なる地域で発生しており、累積雨量や降雨強度の増大は同時多発的に表層崩壊を発生させている<sup>1)</sup>。平成16年に足羽川流域で発生した福井豪雨による土砂災害は、永平寺伽藍から一つ尾根を越えた近傍で発生した災害であった。曹洞宗大本山永平寺は、およそ700年前に福井県永平寺町の永平寺川流域の深山に開山されて以来、多くの修行僧が生活をしてきた修行の場であるが、平成24年4月に発生した伽藍山門前に生育するスギ巨木が強風により幹折れし、鐘楼などの伽藍建築物が破損する事態が生じた。これを機に、修行の場である伽藍の安全・安心を確認し維持していくことの必要性が検討され、土砂災害についても、永平寺川流域で福井豪雨と同じ規模の豪雨が発生したらどのような事態が生じうるのかを把握し、土砂災害に対する理解と警戒避難といった対応について準備を行う必要が認識された。一方、永平寺伽藍を囲む斜面の森林には、伽藍に生育している高さ50m程度のスギ巨木と類似した巨木も生育しているがこれまで特別な森林の整備を行ってきたわけではなく、土砂災害に対して強い森林であるのか弱い森林であるのかといった疑問も生じていた。

このような背景のもと、筆者らは大本山永平寺における土砂災害対策の一貫として、永平寺伽藍を囲む森林斜面の表層崩壊危険度を把握するための調査研究を行ってきた<sup>2)~4)</sup>。本研究では、まず、国土地理院による

1/25,000 地形図に基づく10mDEM やレーザープロファイラー(以下、「LP」)により、10m メッシュ以下の詳細なDEM を取得することが比較的容易となってきたことから、山地の隆起と侵食といった地形発達の状態をDEM による地形解析で相対化し、表層崩壊を発生しうる斜面のポテンシャルとしてランク付けを行い、検討対象地域の斜面の表層崩壊の危険性を俯瞰的に把握することを行った。次に、斜面のどこで表層崩壊が発生しうるのかについて、豪雨時の表層崩壊の発生は斜面の表層土層の地下水位の上昇が影響していることから、集水地形の条件として尾根の平坦面とその下の斜面の凹地形状の配置から、表層崩壊が生じうる斜面が残存しているのか否かという観点で表層崩壊危険斜面の抽出を行った。そして、これら二つの方法を重ね合わせ、検討地域において表層崩壊が発生する危険性が高い斜面を抽出した。さらに、抽出した表層崩壊危険斜面を対象として、表層土層厚さや地質状況、森林状況等を把握する現地調査を行い、DEM の地形解析で抽出した斜面の真的表層崩壊の危険性を詳細に検討し、永平寺の森の土砂災害に対する強さについての考察を行った。

なお、永平寺の森においては、0.5m メッシュで LP データが取得されている。

## 2. 研究の方法

### (1) 研究の流れ

永平寺の森を対象とした表層崩壊危険度の評価は図-1 の流れで実施した。はじめに、1/25,000 精度の10mDEM を用いて永平寺の森が位置する越前中央山地北部地域の地形発達状況を検討し、侵食が進みやすい支流域の抽出を行った。次に、同じ手法でLP データの10mDEM を用い永平寺の森の斜面の地形発達状況を検討し、侵食が進みやすい斜面の抽出を行った(A)。次に、LPデータの10mDEM を用いて地形形態から表層崩壊が発生する可能性のある斜面を抽出した(B)。本検討では、福井豪雨が発生した場合の表層崩壊の可能性について、表層土層の層厚やせん断定数を仮定し、鉛直一次元飽和不飽和浸透流解析と準三次元浸透流解析を組み合わせた表層土層の地下水深の算出とこれを用いた無限長斜面の安定計算による表層崩壊シミュレーションを実行し、豪雨時に表層崩壊が発生する可能性の高い斜面を抽出した(C)。これらの結果を重ね合わせ表層崩壊の危険性の高い斜面を抽出した(D)。危険性が高いと判断された斜面は、表層崩壊が発生した場合、崩壊土砂が伽藍を直撃する可能性のある位置であったことから、表層崩壊の危険性をより詳細に把握するための現地調査を行った(E)。現地調査では、表層崩壊の発生に影響する表層土層の厚さを把握するための調査を実施した。この結果から(C)の表層崩壊シミュレーションのパラメーターの修正を行って再

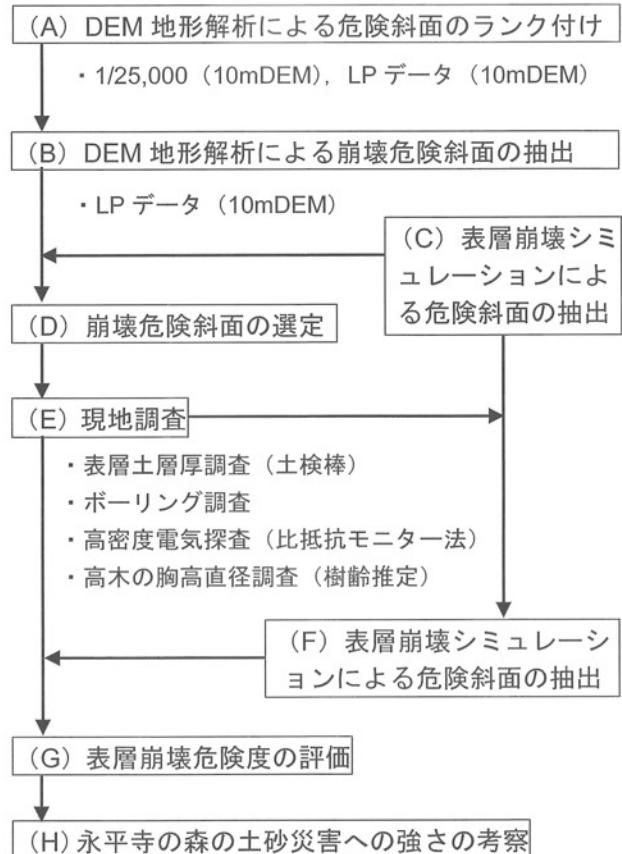


図-1 調査・研究の流れ

計算する(F)とともに、抽出した斜面の表層崩壊危険度の評価を行った(G)。また、当該斜面に生育しているスギ巨木の根系の生長を把握するために行った高密度電気探査を応用した比抵抗モニター法でスギ根系の深さを推定するとともに、当該斜面のスギ等の胸高直径を測定した結果と伽藍のスギ巨木の樹木直径と樹齢の関係から、当該斜面に生育しているスギ巨木の樹齢を推定し根系の状況を推定することで、永平寺の森の土砂災害に対する強さを考察した(H)。

## (2) 研究方法

### a) DEM 地形解析による危険斜面のランク付け

日本列島の山地の地形発達について、一定範囲の平均標高と高度分散量との間には一般にべき乗の関係がみられ<sup>6)</sup>、高度分散量は侵食速度と関係していることが明らかとなっている<sup>7)</sup>。また、山地斜面の侵食量を支流の浸食度合いとして相対化する指標として重み付横断面平均傾斜を用いた検討が行われている<sup>8)</sup>。本研究はこの地形学的知見を活用し、山地斜面で構成される支流域や支流域を構成する斜面の、高度分散量と重み付き横断面平均傾斜の組み合わせから、山地斜面の侵食度を相対化して、現時点で侵食が進みやすい斜面を相対的にランク付けした<sup>2),3)</sup>。DEMを用いた任意の対象範囲の高度分散量と重み付き横断面平均傾斜は次式で表される。

$$D = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (M - A_i)^2}{(i-1)} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、D: 高度分散量(m), M: 対象範囲の平均標高(m), A<sub>i</sub>: i番目のメッシュの標高(m), i: 対象範囲のDEMのメッシュ総数(n個)

$$\alpha w = \frac{(Av \alpha 1 \times L_1 + Av \alpha 2 \times L_2 + \dots + Av \alpha i \times L_i)}{(L_1 + L_2 + \dots + L_i)} \quad (2)$$

$$Av \alpha = 1/n \sum_{j=1}^n \alpha_j \quad (3)$$

$$\alpha_j = \arctan | (H_{j-1} - H_j) / (D_{j-1} - D_j) | \quad (4)$$

ここで、 $\alpha w$ : 重み付き横断面平均傾斜,  $Av \alpha$ : 横断線の平均傾斜( $^\circ$ ),  $\alpha_j$ : 横断線上のメッシュの傾斜( $^\circ$ ),  $L_i$ : i番目の横断線の長さ(m),  $H_j$ : j番目のメッシュの標高(m),  $D_{j-1}$  -  $D_j$ : 隣り合うメッシュの幅(m), これらのデータの計測イメージは図-2に示すとおりである。

### b) DEM 地形解析による表層崩壊危険斜面の抽出

降雨に伴う表層崩壊発生メカニズムが、斜面の傾斜、表層土層の厚さ、降雨時の地下水深の影響を受けるとの着目した。

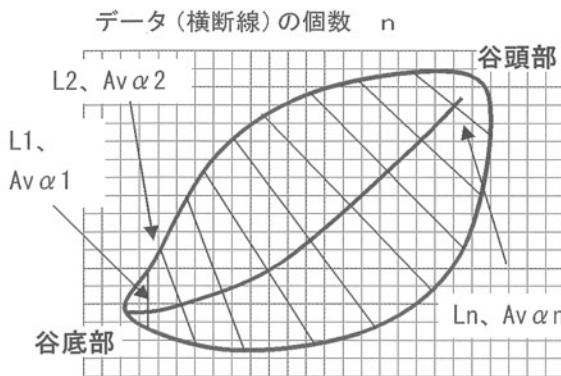


図-2 重み付き横断面平均傾斜を求めるための計測内容

表層土層の地下水位が上昇しやすく、かつ表層崩壊の発生源となる表層土層が存在している斜面を抽出するため、DEM を用いて尾根の平坦面と平坦面から斜面にいたる遷急線、遷急線の下方に存在する凹地地形を抽出し、遷急線の下方に表層土層が残存する急斜面の有無を判読した。平坦面の存在は、降雨時に残存する急斜面の表層土層への地下水の供給源となる場合があり、急斜面に残存する表層土層が周囲の斜面に比べて相対的に表層崩壊を発生させやすいと判断した。

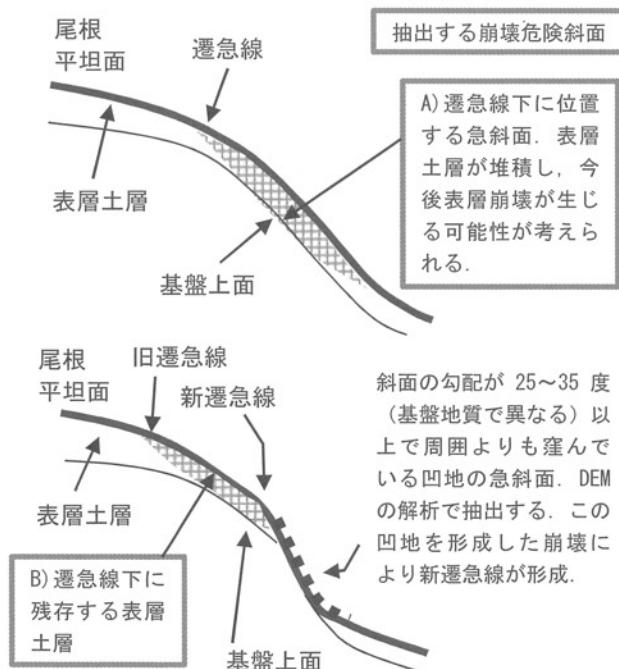


図-3 DEM の地形解析で抽出する危険斜面の模式横断面

DEM 地形解析は、傾斜と曲率を組み合わせて平坦面と凹地地形を抽出し、その後、図-3 の観点で A と B の崩壊危険斜面の抽出を行った<sup>4)</sup>。なお、解析メッシュの大きさについては、幅 10m 程度の斜面の凹地を抽出できるよう、検討地域の地質や斜面勾配などを勘案して 2m から 10m 程度の間で試行検討を行い 5m とした。

### c) 現地調査

現地調査は、図-1 に示す内容の調査を行った。表層土層の厚さは、抽出した表層崩壊危険斜面において土層強度検査棒(以下、「土検棒」)を用いた貫入試験により複数地点を調査し、その貫入不能深さの等深度線図を作成した。斜面の地質・土質状況を把握するため、1箇所でボーリング調査を行い、コアの採取、標準貫入試験、単孔式現場透水試験、孔内水位確認等を行った。そして、ボーリング地点(横断測線)近傍のスギ巨木の根本で散水しながら比抵抗モニター法を行い、およそ 1 時間ごとに探査を行って比抵抗値の変化を求め、散水した水の浸透状況の可視化を行った。調査地点は図-4 に示すとおりである。

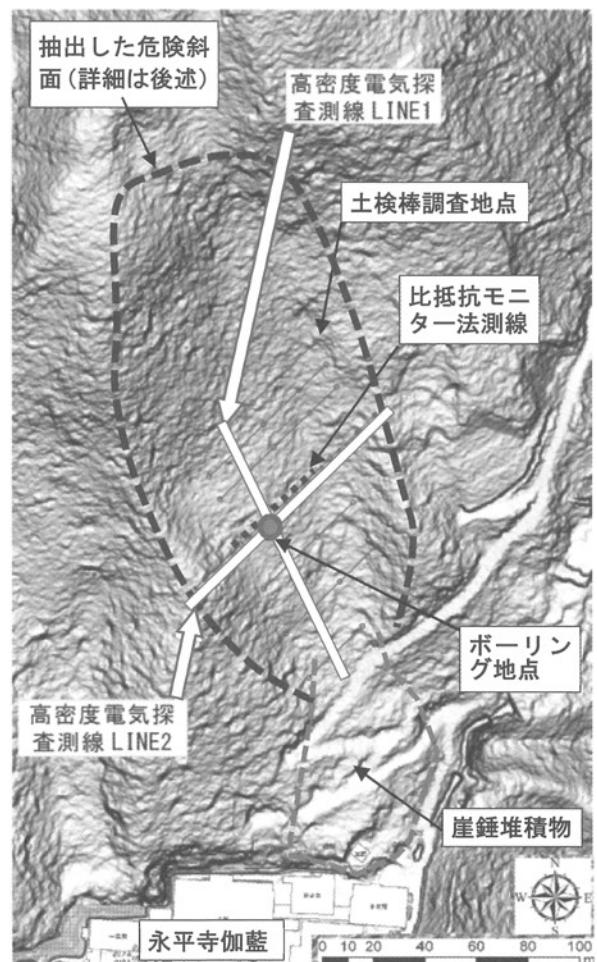


図-4 現地調査位置図 \* 背景は LP データによる陰影図

## 3. 調査結果

### (1) DEM 地形解析

#### a) 越前中央山地北部の危険斜面のランク付け

越前中央山地を支流域に区分しDEMを用いて計測した高度分散量を縦軸に、重み付き横断面平均傾斜を横軸に整理した結果を図-5(a)に示す。重み付き横断面平均傾斜が大きい支流は侵食が進み表層土層厚が薄い傾向にあり、また、高度分散量が大きい支流も斜面の傾斜が大きいことから表層土層厚は薄い傾向にあると推察できる。表層崩壊の安定解析に用いる無限長斜面の式によれば、斜面の傾斜が大きく表層土層が厚いと安全率は低くなると考えられる。そこで、斜面傾斜の指標になると考えられる高度分散量の最大値と、斜面の表層土層の厚さの指標になるとと考えられる重み付き横断面平均傾斜の最小値で各支流のそれぞれの値を正規化した。図-5(b)のように、表層崩壊が発生する危険度が最も高くなるのは、高度分散量と重み付き横断面平均傾斜の指標値が両者とも1.0となる最大値の場合であり、この最大値と各支流の指標値の距離によって支流域間の危険度を相対化した。その結果は図-6のような正規分布となった。最大値からの距離が小さい流域ほど表層崩壊が発生する危険度が相対的に高いと評価することができると考え、最大値からの距離の標準偏差によって危険斜面のランク付けを行った。危険斜面ランクの分布は図-7に示すとおりである。越前中央山地北部は山地が隆起する傾向のある地域と考えられており、尾根の標高が高い山地中央付近にランク2の支流が比較的多く分布するが、山地外縁の支流にもランク2の支流は分布している。永平寺の森が位置する支流はランク2とランク3となっている。

### b) 永平寺の森の危険斜面のランク付け

同様の手法を用いて永平寺の森の斜面を対象に表層崩壊が発生する危険度を検討した。この検討ではLPデータを用い0.5mメッシュの中央の標高データを用いて高度分散量と重み付き横断面平均傾斜を計測した。図-8に永平寺の森の表層崩壊危険斜面の分布を示す。1/25,000地形図の10mDEMを用いた図-7の地形解析では、ランク3に区分された永平寺伽藍北側の支流において、LPデータの10mDEMを用いた地形解析ではランク1やランク2の相対的に表層崩壊が発生する危険度が高いと考えられる斜面(谷次数の小さい谷)が存在することが把握された。

### c) DEM地形解析による永平寺の森の表層崩壊危険面の抽出

永平寺の森の斜面を対象としてLPデータのDEMを用い、5mメッシュ内の平均標高を用いて傾斜と曲率から凹地を抽出し、図-3の考え方に基づいて表層崩壊危険斜面の抽出を行った。図-8からも把握できるが、永平寺の森をつくる斜面の傾斜は大きく、尾根筋に残る平坦面も小さい。すなわち、侵食が進んでいる山地斜面であ

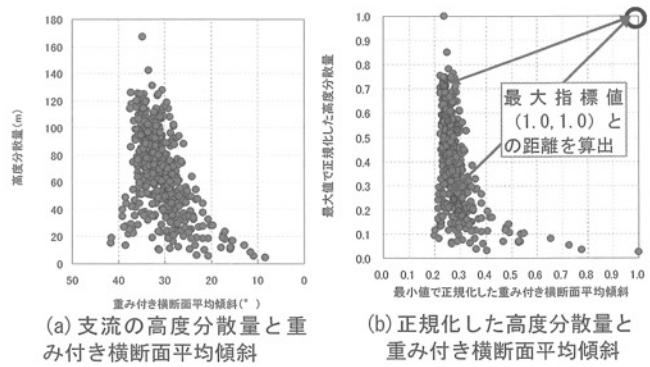


図-5 支流の高度分散量と重み付き横断面平均傾斜

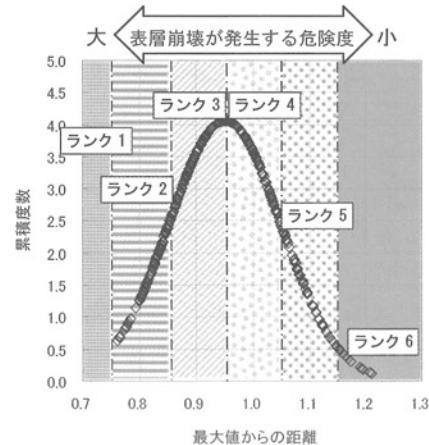


図-6 指標地最大値と各支流の指標地の距離の分布

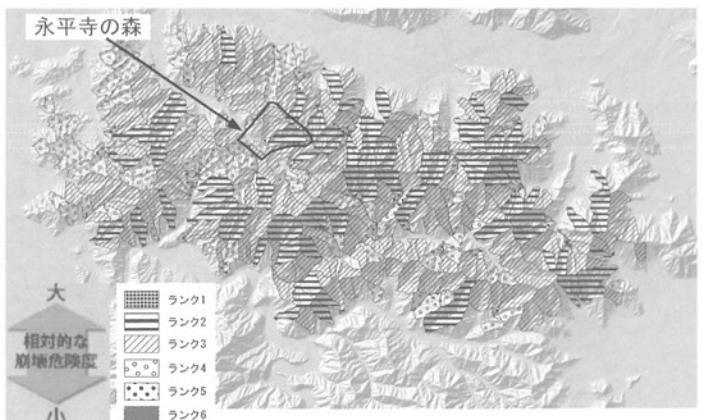


図-7 越前中央山地北部の表層崩壊危険斜面の分布

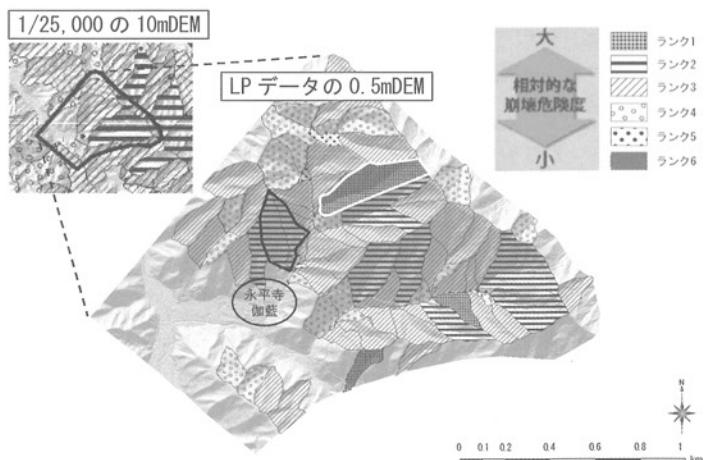


図-8 永平寺の森の斜面の表層崩壊危険斜面の分布

ると考えられる。このため、図-9に示すとおり凹地の上方、下方において抽出される遷急線は少なく、また遷急線の上方に表層崩壊の誘引となる表層土層の分布は比較的多くないと判断した。

図-3 の考え方に基づくと  
この付近に崩壊危険斜面が  
抽出された

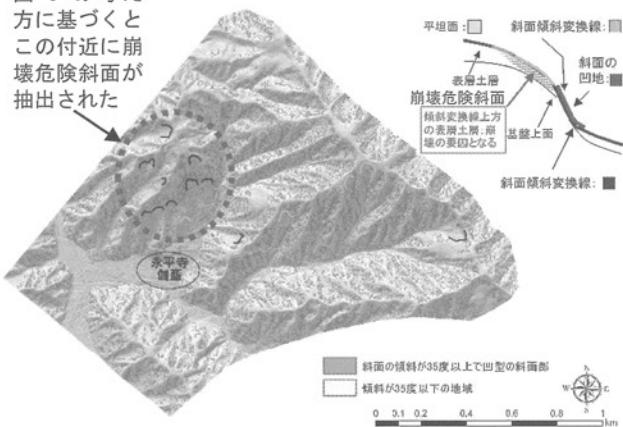


図-9 永平寺の森の表層崩壊危険斜面の抽出

## (2) 表層崩壊シミュレーションと危険斜面の抽出

試行計算により表層土層厚を2m、表層土層の内部摩擦角 $35^\circ$ 、粘着力 $7.5\text{kN/m}^2$ と仮定し、平成16年福井豪雨の降雨が発生した場合の表層崩壊発生状況を無限長斜面の式により計算した。図-10のとおり、永平寺の森では谷筋で安全率が1.0を下回る場所が多く、永平寺伽藍北側斜面において安全率1.0を下回る状況が把握された。図-8ではランク2に区分される斜面であり、図-9では表層崩壊危険斜面も分布すると判断している。

以上の結果から、永平寺の森をつくる斜面のうち、表層崩壊が生じた際に土砂が伽藍へ到達して土砂災害を招く可能性がある斜面は伽藍北側斜面であると判定し、図-4に示す詳細な現地調査を行った。

詳細調査が必要であると判断した伽藍北側斜面

安全率が1.0を下回った斜面

永平寺伽藍

安全率  
■ 1.0未満  
□ 1.0以上-1.05未満

谷筋で安全率が1.0を下回った

図-10 永平寺の森の表層崩壊シミュレーション結果

## (3) 現地詳細調査

### a) 地質・土質状況と表層崩壊シミュレーション

土検棒を用いた簡易貫入試験の結果、表層土層への最大貫入量は平均して0.5m程度であり局的に0.7mから1.0mの貫入量が計測された。また、ボーリング調査の表層土層厚は深度1.15mで簡易貫入試験と概ね同じ状況であった。表層土層は礫を少量含む粘性土主体の崖錐堆積物であり、深度0.15mから0.45mまでのN値は2と軟らかい状況であった。表層土層の下位は、深度12.65mまで安山岩の強風化層で、その下位は新鮮な安山岩が出現した。地下水位は、深度14m付近に確認された。掘削中は深度3m付近で孔内水位を確認したが、下方への掘削で孔内水位は低下したことから、強風化層の最上部に滯水していた地中水であると考えられた。これらの調査より、確認した実際の表層土層の厚さはDEMを用いた地形解析と表層崩壊シミュレーションで仮定した厚さよりも薄いことから、調査結果を考慮して表層土層厚を1.0mとし、他の条件は同じとして表層崩壊シミュレーションを再度行ったところ、安全率は1.0を下回らない結果となった。

### b) 高密度電気探査によるスギ巨木の根系

図-4に示す測線で高密度電気探査を行った。図-11のように、表層土層が礫質なところで比抵抗値が高くなり深度2m付近に比抵抗値の境界が把握された。また、スギ巨木の根本付近において、深さ5m~6mまで高比抵抗部が浮かび上がっており、スギの根系を捉えている可能性を考えられた。

次に、スギの斜面下側に横断測線を配置し、スギの斜面上側の根本の約 $2\text{m}^2$ 程度の範囲に $1\text{m}^3/\text{時間}$ の散水を5時間継続し、散水前から1時間おきに計6回の測定を行って、水の浸透状況をモニターした。

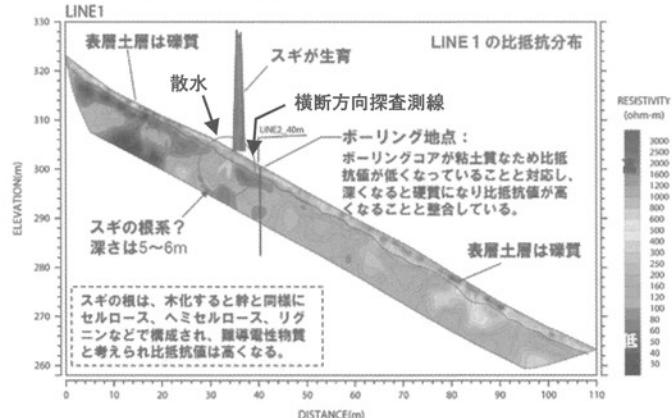


図-11 高密度電気探査結果

散水前と5時間経過後の比抵抗の変化率は図-12に示すとおりである。根本に見られる水平根からスギの根系と思われる位置に、水の浸透による比抵抗値の低下が生じている。その深さは約6mから8m程度と読み取ることができる。このスギは胸高直径が60cm程度の樹齢の大きな高木であり、戦後植林された根系が薄いスギとは異なって、根系が大きく生長していることを推察できる。

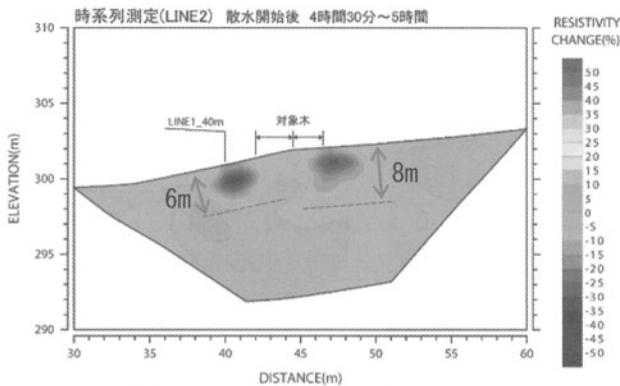


図-12 比抵抗モニター法による散水時の比抵抗値の変化

#### 4. 考察

現地詳細調査の対象として抽出した斜面には、図-13に示すように樹冠直径 10m を越えるスギやケヤキが多く生育している。両樹木とも自然林であれば根系は地下で大きく生長し、根系の水平への広がりは一般に樹冠程度と考えられる。また、永平寺伽藍のスギ巨木を用いた年輪調査により、樹齢 =  $54.02 \times \text{胸高直径(cm)}^{0.4241}$  という相関式を得ている<sup>9)</sup>。この式を用いると詳細調査対象斜面のスギは樹齢 300 年から 380 年程度(江戸時代初期)と推定できる。これらのことから、図-4 に示した崖錐堆積物を発生させた表層崩壊も含め、この斜面では約 300 年から 400 年前から現在までの間で、大きな斜面崩壊は発生していないと考えられる。伽藍を囲む斜面を見渡すと、樹齢 300 年を越えるスギが斜面に多く生育しているのは伽藍の北側に隣接するこの斜面だけであり、合わせてケヤキの大木も多い。高密度電気探査で把握した比抵抗値の低下がスギ根系の広がりを表すのであれば、この斜面ではスギやケヤキの大木の根系が深くアンカーのように生長している状況にあると考えら

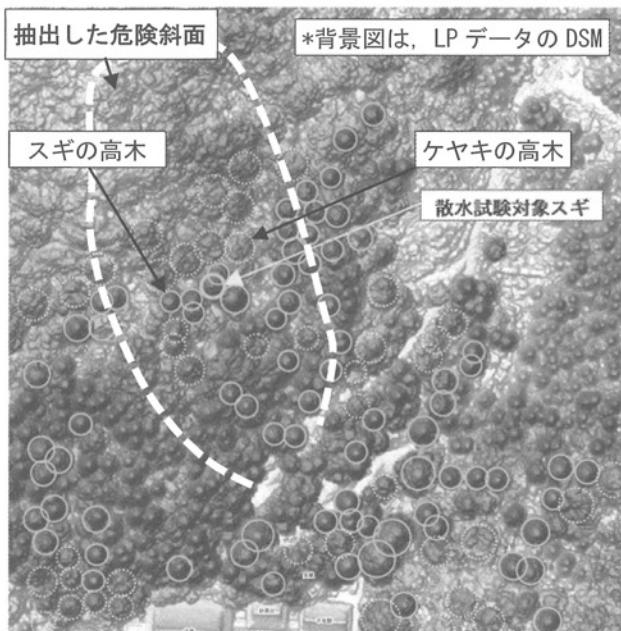


図-13 地形解析で抽出された崩壊危険斜面の植生

れる。かつて永平寺の山守は、木の根系が広く生長する特徴を知っており、斜面を安定させるために木を大きく生長させるような管理を行ってきた可能性を推察できる。なお、ケヤキについてはこの斜面以外においても意図的に伐採せず大きく育てたのではないかと考えられる大木が多く見られる。現在、高木となったスギやケヤキの下には中・低層木、下層植生が繁茂し、生態環境の豊かな健全な森が形成されている。永平寺の森は、土砂災害に強い健全な森林の一例であると考えられる。

#### 5. 結論

DEM を用いた地形解析によって表層崩壊の発生する可能性が高い斜面を抽出し、崩壊発生可能性の危険度をより精度高く把握するための詳細調査を永平寺の森に適用実施した。一連の手法は、広い山地森林域を対象として表層崩壊の危険性を把握するための調査・解析手法として、一定程度の妥当性を有していると考えている。また、永平寺の森を対象としたことにより、土砂災害に強い森林の一例を把握することができた。

謝辞：本研究にあたり大本山永平寺の皆様の多大なご配慮をいただきました。ここに御礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 海堀ら:2010 年 7 月 16 日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告, 砂防学会誌 Vol.63 No.4, p.30-37, 2010
- 2) 斎藤泰久他:DEM データを用いた斜面安定評価と森林再生方法の検討(その 1), 平成 24 年度砂防学会研究発表会 2012.
- 3) 新貝文昭他:DEM データを用いた斜面安定評価と森林再生方法の検討(その 2), 平成 24 年度砂防学会研究発表会 2012.
- 4) 上野紗綾子他:DEM データを用いた斜面安定評価と森林再生方法の検討(その 3), 平成 24 年度砂防学会研究発表会 2012.
- 5) 山寺喜成:自然環境再生の緑化技術, (社)日本碎石協会, 2010
- 6) 大森博雄:日本島山地における隆起と侵蝕のダイナミクス, 月刊地球 1 号外 No.32, 2001
- 7) 藤原治他:日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, 5, 85-93, 1999
- 8) Zhou Lin, Takashi Oguchi : Longitudinal and transverse profiles of hilly and mountainous watersheds in Japan, Geomorphology 111, p.17-26, 2009.
- 9) 大本山永平寺:大本山永平寺「永平寺の森」環境調査・解析業務(その2) 報告書 平成 24 年

(2014. 5. 9 受付)