2016年熊本地震における斜面崩壊形状の調査

浜田 友康¹・宇津野 衛²・松下 智昭³

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂六丁目5-30)

E-mail: hamadtom@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂六丁目5-30)

E-mail: utsuno@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目19-1)

E-mail: mattomoa@kajima.com

崩壊のおそれのある斜面に近接して施設構造物を設置する際は、斜面の崩壊状況を想定し適切な離間距離を確保しておく必要がある。土砂到達距離の簡易推定法は各種指針類に示されているが、各推定法には差がある。そこで、2016年熊本地震における代表的な崩壊斜面を調査し、土砂到達距離を各種指針類の斜面高さに基づく推定法と比較するとともに、到達距離に及ぼす斜面高さ以外の影響因子について検討した。その結果、最大到達距離/最大崩壊高さは、強度の小さい火山灰・軽石層の崩壊では指針類の簡易推定法を上回る事例もあるが、岩盤崩壊では指針類の推定法に比較して小さい。また、崩壊高さに比較して崩壊土量が多い程、崩壊土の強度特性が小さい程、到達距離は大きくなることがわかった。

Key Words : slope failure, sediment flowing, evaluation method, outflow reaching distance

1. はじめに

地震時に崩壊するおそれのある斜面に近接して重要施設構造物を設置する際には、斜面の崩壊状況を想定し、適切な離間距離を確保して施設構造物を設置するか、あるいは、斜面崩壊を防ぐ適切な補強対策を施すことが必要となる。図-1に示すような崩壊斜面から流出する土砂の到達距離の推定には、簡易的には各種指針類が参照されるが、その距離推定法は指針類により差があり、適切な離間距離の設定方法が課題となる。

2016年熊本地震においては、多くの斜面が崩壊した。そこで、上記の観点から代表的な崩壊斜面を選定して調査を行い、各種指針類における崩壊土砂の到達距離の推定法と比較検討を行い、それを踏まえ今回の熊本地震における斜面崩壊の性状について分析を行う。

2. 各種指針類における斜面崩壊土砂の到達距離の推定法

崩壊斜面から流出した土砂の到達距離について、各種指針類には以下のように示されている。

(1) 原子力関連の指針類

a) 原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987¹⁾

地震等による斜面崩壊の最大堆積長(到達距離に相当する)について、以下のように示されている。

・斜面高さの約1.4倍以内、あるいは、約50m以内

ここで、斜面高さおよび堆積長は図-2 のように示さ

図-1 斜面崩壊土砂の到達距離

図-2 JEAG4601-1987に対応した斜面の諸量の定義²⁾

れている。

b) 原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>²⁾

2004年新潟県中越地震における崩壊事例135件の分析の結果、最大堆積長は原子力発電所耐震設計技術指針の内容でほぼ包絡できるとされている。なお、包絡されない3件の事例については谷筋に沿う流下であることから、水の影響を受けて移動距離が長くなったと想定されている。

(2) 宅地等の防災関連の指針類

a) 土砂災害防止法令の解説³⁾

地震を含む自然災害を対象に、急傾斜地の崩壊に係る宅地等の警戒区域指定として、以下の範囲が示されている。

- ・傾斜度 $\geq 30^\circ$ かつ斜面高さ $\geq 5\text{m}$ の急傾斜地について
- ・斜面下端からの水平距離 $\leq$ 斜面高さ $\times 2$ 、かつ $\leq 50\text{m}$

ここで、斜面高さは「急傾斜地の上端～下端までの高さ」とされている。

b) 宅地防災マニュアルの解説⁴⁾

地震を含む自然災害を対象に、開発事業区域周辺の土砂災害危険箇所のうち、宅地造成に伴う災害に最も関連の深い急傾斜地危険箇所として、土砂災害防止法令の解説と同様の範囲が示されている(図-3)。

3. 2016年熊本地震における崩壊斜面の調査

(1) 崩壊斜面の抽出

斜面前面に施設構造物が設置された整地地盤における崩壊土砂の到達距離の調査を目的とするため、熊本地震における斜面崩壊の中から、前面地盤が平たんであり、土砂流出に繋がる河川等のない地形の事例を抽出する。また、調査対象地点は阿蘇山周辺であり、火山灰等の堆積状況、岩盤深度、および、斜面の起伏に、地域による偏りがあると考えられるため、分散した地点から事例を

図-3 急傾斜地崩壊危険箇所の要件⁴⁾

抽出する。崩壊した土質については、現地調査や写真等により判別できる範囲で、火山灰・軽石層の斜面崩壊、および、岩盤崩壊などに分散させて斜面を選定する。なお、斜面の崩壊形状として地殻変動による断層変位等が含まれないように、断層近傍の斜面は極力避けて選定する。

(2) 計測方法と計測項目

斜面の崩壊形状は、地形図および航空測量結果を基に、斜面の崩壊前後の比較から整理する。

崩壊後の形状は2016年4月19～23日に調査された航空レーザ測量1mDEMにより計測する。また、崩壊前については地理院による1/25000地形図を使用すると共に、地理院による5mDEMも併用して計測する。これらの崩壊前後の比較から求まる斜面崩壊形状の計測精度は、高さ方向で0.5m程度、水平方向で1m程度の誤差と推定される。

以上の調査結果から整理する斜面縦断方向の崩壊形状の主な項目を図-4に示す。崩壊前の斜面最急勾配線と崩壊土砂底面の水平線との交点を「斜面下点」と定義し、同位置からの最大崩壊高さおよび崩壊土の最大到達距離をそれぞれ H_0 および L_2 とする。なお、最大崩壊高さ H_0 は、2.の指針類において参照される全斜面高さなどとは異なる定義となっている。その他、斜面の最大崩壊深さ $D_{\max}$ と崩壊土の平均堆積深さ D_2 、および、最大斜面角度 $\tan^{-1}i_0$ と崩壊土の平均堆積角度 $\tan^{-1}i_1$ を整理する。また、見通し仰角 θ についても整理する。

(3) 計測結果

表-1に選定した11斜面の計測結果を示す。また、火山灰・軽石層の崩壊斜面および岩盤崩壊斜面の例を図-5に示す。

図-4 斜面崩壊形状の調査項目

表-1 計測結果

番号	土質	距離高さ比 L_2/H_0 (—)	崩壊高さ H_0 (m)	到達距離 L_2 (m)	崩壊深さ D_{max} (m)	堆積深さ D_2 (m)	斜面角度 $\tan^{-1}i_0$ (°)	堆積角度 $\tan^{-1}i_1$ (°)	見通し仰角 $\tan \theta$ (—)
1	火山灰・軽石層	1.36	47	64	7	5	20	6	0.25
2	火山灰・軽石層	2.14	22	47	7	5	31	6	0.24
3	火山灰・軽石層	1.98	20	39.5	6	3	40	7	0.23
4	火山灰・軽石層	1.08	26	28	2	3	37	7	0.37
5	火山灰・軽石層	0.13	26	3.5	2	2	44	37	0.79
6	火山灰・軽石層	0.83	36	30	5	4	47	8	0.50
7	岩盤	0.35	89	31	6	3	35	8	0.56
8	岩盤	0.81	57	46	13	7	82	20	0.77
9	岩盤(落石)	0.60	20	12	(—)	(—)	(—)	(—)	1.67
10	表層堆積物	0.03	66	2	4	1.5	26	26	0.49
11	表層堆積物	0.11	74	8	5	1	34	19	0.69

※ 9岩盤(落石)のデータは目測及び地形図による.

図-5 崩壊斜面の例

図-6 崩壊高さ H_0 へ到達距離 L_2

と推測される. 一方, 岩盤崩壊については, 今回のデータ範囲では L_2/H_0 の差は比較的小さく, 0.8 程度以下となっている.

2.において示したように, 到達距離は, 原子力関連の指針類では $1.4H$ もしくは 50m 以下, 宅地等の防災関連の指針類では $2.0H$ かつ 50m 以下とされている. これに対し, 本評価では, 斜面高さの定義が指針類と異なるため大きめの評価となる点に注意が必要であるが, 岩盤崩壊については指針類をかなり下回る到達距離となっている. 一方, 火山灰・軽石層の崩壊については, $1.4H$ を上回るものもある.

(2) 到達距離へのその他の影響因子

到達距離 L_2 に対する崩壊高さ H_0 以外の影響因子について調べるため, L_2/H_0 と崩壊土の平均堆積深さ D_2 /崩壊高さ H_0 , および, 斜面の最大崩壊深さ D_{max} /崩壊高さ H_0 の関係を整理して図-7に示す.

4. 斜面崩壊形状の分析

(1) 崩壊高さ到達距離の関係

図-6 に斜面の最大崩壊高さ H_0 と崩壊土の最大到達距離 L_2 の関係を示す. 各斜面の L_2/H_0 は $0.1 \sim 2$ 程度の大きな差があり, 火山灰・軽石層の崩壊では L_2/H_0 が大きく, 岩盤崩壊では L_2/H_0 が小さい. 火山灰・軽石層における斜面崩壊は, H_0 が $20 \sim 47\text{m}$ の範囲に対し, L_2 は $3 \sim 64\text{m}$ の大きな差がある. L_2/H_0 では $0.1 \sim 2.1$ 程度の差となり, 到達距離に影響する因子は, 崩壊高さ以外にもあるもの

注 直線は全崩壊データに対する回帰線。Rは相関係数。

図-7 L_2/H_0 と D_2/H_0 および D_{max}/H_0 の関係

図-8 L_2/H_0 と D_2/H_0 および D_{max}/H_0 の関係

堆積深さ D_2 /崩壊高さ H_0 は L_2/H_0 と良い相関があり、 D_2/H_0 が大きいほど L_2/H_0 は大きい。このことは、図-8に示すように、崩壊高さに比較して崩壊して流出する土量が多い程、より遠くまで到達する状況を表していると考えられる。同様に崩壊深さ D_{max} /崩壊高さ H_0 についても L_2/H_0 と良い相関があり、 D_{max}/H_0 が大きい程 L_2/H_0 が大きくなる傾向がある。このように、崩壊高さに比較した相対的な崩壊土量の違いが、相対的な到達距離 L_2/H_0 の差

注 直線は全崩壊データに対する回帰線。Rは相関係数。

図-9 L_2/H_0 と $\tan^{-1}i_1$ の関係

図-10 L_2/H_0 と $\tan^{-1}i_1$ の関係

注 直線は全崩壊データに対する回帰線。Rは相関係数。

図-11 L_2/H_0 と $\tan \theta$ の関係

に影響していると考えられる。

つぎに、 L_2/H_0 と崩壊土の平均堆積角度 $\tan^{-1}i_1$ の関係を図-9に示す。

崩壊土の平均堆積角度 $\tan^{-1}i_1$ も、火山灰・軽石層および岩盤を併せた全体的な傾向としては L_2/H_0 と良い相関があり、 i_1 が小さいと L_2/H_0 は全体的に大きくなっている。土質別では、火山灰・軽石層の $\tan^{-1}i_1$ は概ね $6 \sim 8^\circ$ であり、岩盤はそれより大きめとなる傾向がある。崩壊

した土砂の堆積勾配は、図-10 に示すように、堆積土量が多く安息角で同量が堆積する状況であれば、強度の小さい火山灰・軽石層は崩壊土の到達距離が長くなり、一方、強度の大きい岩ずりは到達距離が短い傾向になると考えられる。

なお、表層堆積物として分類した2斜面については、火山灰や軽石等の堆積物の崩壊土砂のほとんどが斜面上に滞留する状態になっており、斜面下点より前面に流出する土砂の堆積勾配の評価にはそぐわないため、 i_1 が大きい値として示されている。

火山灰・軽石層の強度に関しては、既往研究⁵⁾によれば、深さ1m程度の表面崩壊箇所における火山灰層の一面せん断強度で粘着力 $c=2\text{kPa}$ と内部摩擦角 $\phi=18.4^\circ$ 、深さ3m程度の崩壊箇所においては14kPaと23.4°のデータが得られている。火山灰層の表層強度は小さく、このことが到達距離が非常に長い要因になっていると考えられる。

L_2/H_0 と崩壊斜面の見通し仰角の勾配 $\tan \theta$ の関係を図-11 に示す。崩壊斜面の見通し仰角勾配 $\tan \theta$ が小さい程、 L_2/H_0 が大きくなる相関がある。 $\tan \theta$ は斜面崩壊形状を表す L_2/H_0 と類似の指標になっていると考えられる。

5. まとめ

本報告では、2016年熊本地震における斜面崩壊を調査し、崩壊土砂の流出到達距離を指針類の崩壊高さに基づく評価法と比較すると共に、その他の影響因子について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大到達距離/最大崩壊高さ(L_2/H_0)は、火山灰層・軽石層の崩壊では0.1~2.1程度、岩盤崩壊では0.8程度以下である。指針類と斜面高さの定義が異なるため、本検討の方が L_2/H_0 が大きい評価となる点に注意は必要であるが、火山灰・軽石層の崩壊の到達距離は、

一部については指針類による評価距離を上回るものがある一方、岩盤崩壊の到達距離については、指針類に比較して小さい。

- (2) 到達距離 L_2 に及ぼす崩壊高さ H_0 以外の影響因子について検討した結果、崩壊高さに比較して崩壊土量が多い程、また、崩壊土の堆積勾配すなわち強度特性が小さい程、到達距離は大きくなっていると考えられる。
- (3) 今回の斜面崩壊に多い火山灰層について、既往の研究によれば、特に表面崩壊箇所における強度特性は非常に小さく、このことが、到達距離の長くなる要因になっていると考えられる。

今回調査した斜面崩壊事例に対し、指針類の斜面高さに基づく崩壊土砂到達距離の推定法によれば、概ね安全側の結果が得られることがわかった。また、土質試験や斜面安定計算などに基づいて、想定される崩壊土砂強度や斜面崩壊形状を把握すれば、その推定精度は向上すると思われる。

参考文献

- 1) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987, p. 89, 1987.
- 2) 土木学会 原子力土木委員会：原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術〈技術資料〉, pp. 143-149, 2009.
- 3) 全国治水砂防協会：改訂版 土砂災害防止法令の解説, pp. 73-78, 2016.
- 4) 宅地防災研究会：宅地防災マニュアルの解説〔第二次改訂版〕II, pp. 231-232, 2007.
- 5) 松四雄騎, 齋藤仁, 福岡浩, 古谷元：平成24年度7月九州北部豪雨による阿蘇山カルデラ壁および中央火口丘での斜面崩壊, 京都大学防災研究所報, 第56号B, 2013.

(2016. 11. 2 受付, 2017. 1. 13 修正, 2017. 2. 18 受理)

INVESTIGATION OF SLOPE COLLAPSE SHAPE IN THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Tomoyasu HAMADA, Mori UTSUNO and Tomoaki MATSUSHITA

In order to install the facility close to the slope that could collapse during an earthquake, it is necessary to predict the slope failure shape and ensure a proper separation distance. There is a difference in the methods of guidelines applied to the estimation of the reach of sediment flowing out by the slope failure. The issue is how to set the appropriate separation distance.

In 2016 Kumamoto earthquake, a lot of slopes collapsed. Therefore, a survey was conducted into selected typical slope failure. The outflow reaching distance of collapse sediment was analyzed, and the evaluation methods based on slope height of guidelines were compared. Also we investigated the influence factors on the outflow reaching distance other than the slope height.