

被災前後の地形オープンデータを用いた 北海道胆振東部地震の厚真町における広 域斜面の安定性評価

渡邊祥庸¹・井上和真²・池田隆明³

Evaluation of the Wide-Area Slope Stability in Atsuma Town During the Hokkaido Eastern Iburi Earthquake Using Open Topographic Data Before and After the Disaster

Yoshinobu WATANABE¹, Kazuma INOUE² and Takaaki IKEDA³

Abstract

This study evaluated the stability of wide-area slopes in Atsuma Town using open topographic data before and after the damage caused by the Hokkaido Iburi Earthquake by using GIS software. The parameters of the straight slip were determined from the results of previous surveys and numerical elevation models before and after the disaster. As a result, unstable areas were extracted over a wider area than the area where the slope failed due to the earthquake.

In addition, the influence of each parameter applied to the straight slip on the safety factor is examined and the results obtained in this study are discussed. It was found that the actual slope failures during the earthquake could be reproduced better by taking into account the reduction of horizontal seismic intensity according to the direction of slope inclination.

キーワード：斜面災害, 複合災害, 地震災害, 降雨, GIS

Key words: slope failure, complex disaster, earthquake, rainfall, GIS

1. はじめに

防災白書¹⁾によれば令和2年の土砂災害発生件数は1,319件である。過去10年の記録を見るとこの件数はおおよそ年間1,000件前後で推移してい

る。これらはほとんどのケースで地震や豪雨を誘因としており、平成30年7月豪雨や北海道胆振東部地震の発生した平成30年には3,459件、令和元年東日本台風の発生した令和元年には1,998件の

¹ 長岡技術科学大学大学院工学研究科エネルギー・環境工学専攻
Energy and Environment Science Course, Nagaoka University of Technology

² 群馬工業高等専門学校環境都市工学科
Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Gunma College

³ 長岡技術科学大学大学院工学研究科環境社会工学専攻
Civil and Environmental Engineering Course, Nagaoka University of Technology

土砂災害が生じており、記録的な豪雨や地震が発生した年は土砂災害発生件数が大きく増える状況である。併せて1時間降水量50 mm以上の年間発生回数は年々増加傾向にあり¹⁾、土砂災害の発生リスクは年々高まっている状況にある。国土の狭い我が国では人の居住地は開発のしやすい平野部に留まらず、土砂災害と隣り合わせの山間地にまで広がっており、ひとたび豪雨や大規模地震が生じると人の命や資財が奪われている状況である。この状況は、地震や降雨を考慮した斜面の安定性評価および対策が国土形成の重要な課題であることを示している。

また、東日本大震災以降、超過外力や複合災害に対する危機管理²⁾など、ソフト対策として最悪を想定した被害想定をする動きがある。実際、平成30年の北海道胆振東部地震の際は、降雨の直後に地震が発生している。また、令和元年東日本台風の際は、豪雨の最中最大震度4の地震が発生している。稀な例ではあるが、より慎重に災害に備えるためには、このような複合災害に対する評価が必要となる。

斜面の安定性を評価する手法は、①採点方式による方法、②統計的処理方式による方法、③力学的解析手法による方法に大別される³⁾。特に広域における斜面の安定性評価には、②の統計的(経験的)手法を用いる場合が多い。例えば、周ら⁴⁾や上出ら⁵⁾の研究で実施されているようにGISやリモートセンシング、既存の点検記録などを用いて研究対象地域の斜面安定に関する各素因(崩壊履歴、地質、傾斜角度、断層、湧水の有無、地形分類等)を統計的に処理し斜面の安定性を評価している。統計的に処理しているため、過去の崩壊履歴や点検記録など、ある程度のデータ量がなければ結果の精度・信頼性に問題がある。加えて、これまでの崩壊実績をベースとした評価となるため、経験したことのない規模の豪雨・地震を受けた際の評価については精度に懸念がある。一方、力学的モデルを用いた検討としては周ら⁶⁾やMontrasioら⁷⁾、小野ら⁸⁾の研究がある。力学的モデルを用いた場合、解析対象領域の想定されるすべり土塊の層厚や土質定数が既知であれば、地震

や降雨による影響を反映させて斜面の安全率を解析することが可能である。しかし、広域において土質定数を特定することは容易でなく、既往の研究や調査結果から代表的なすべり土塊の層厚や土質定数を設定することが一般的である⁶⁻⁸⁾。そのため、斜面の安定性評価には限界がある。その他、統計的処理方式と力学的解析手法の両面から検証を実施している研究⁹⁾や、斜面の三次元有限要素法による地震時応答解析に基づく手法を導入した研究¹⁰⁾など、様々なアプローチで広域斜面の安定性を予測する研究がなされている。

広域における斜面安定性評価の更なる研究が望まれる中で、近年課題となっている事項として、土砂災害リスクの高い山間地を有する自治体では、人口が少なく技術職員や資金のリソースが不足していることが挙げられる。解析に高機能のPCが必要となる手法や、住民への説明が煩雑となる手法では自治体運営への更なる逼迫につながる懸念がある。

そこで本研究では、地域防災計画に活用することを念頭に、誰でも入手可能なオープンデータを用いて比較的簡易な広域斜面の安定性評価手法を構築することを目的とする。安定性の評価手法としては、今後予測しうる地震・降雨の複合災害への対応を視野に、力学的解析手法を採用した。例えば、これまで観測された最大降雨量と、近傍の断層から予想される規模の地震による複合災害に対して、斜面の被害予測を立てることを想定している。この情報は、より安全な避難経路や避難場所の選定等、地域防災計画の中のソフト対策に役立てられると考える。また、ハード対策を講じる上で優先順位を検討する際に活躍すると考える。

今回の手法は広域斜面に対して一律な土質定数を適用するなど、従来の広域斜面に対する力学的解析手法と同様のパラメータ設定を行っている部分がある。そのため、適用の範囲としては、崩壊リスクの高い斜面を抽出するための1次スクリーニングを想定している。また、崩壊リスクが高いと判定された斜面に対する詳細検討での設計との連携を視野に、今回は実務設計で使用されている力学的解析手法や静的震度の適用手法を採用する

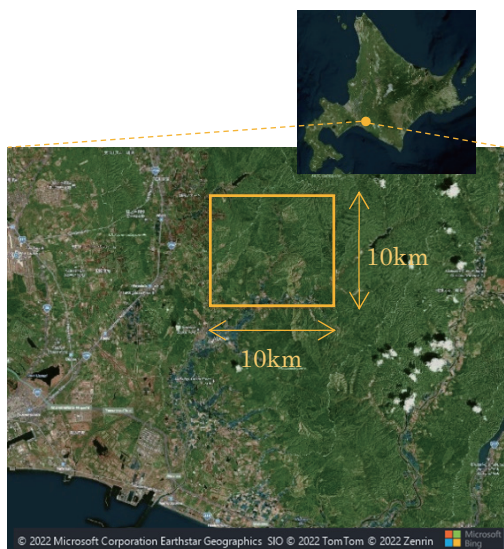


図1 対象地域(厚真町高岡地区)¹¹⁾



図2 厚真町の斜面崩壊状況¹²⁾

こととした。

一方で、近年航空写真測量や航空レーザー測量による基盤地図情報の数値標高モデルがオープンデータとして整備され始め、自然災害による被災前後の地形を比較することが可能となった。このような新たなデータをパラメータとして適用することで、広域斜面の安定性評価の高精度化が図れると考える。本研究では、被災前後の地形の比較により推定した、実際のすべり土塊の厚みを力学的解析手法のパラメータとして適用することとした。

対象地域は北海道胆振東部地震で甚大な被害を受けた厚真町高岡地区とした。図1に対象地域の場所、図2に厚真町の斜面崩壊状況を示す。また、

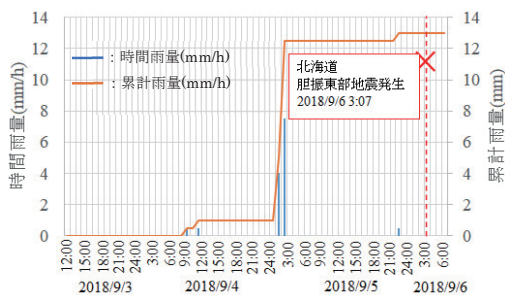


図3 降雨と地震発生の時系列¹³⁾

図3に降雨と地震発生の時系列を示す。

2. 斜面安定の評価方法

2.1 地形情報の取得

QGIS Version3.22.4を用いて広域の斜面に対する安定性評価を行う。地形情報は、国土地理院の基盤地図情報サイト¹⁴⁾から得た、厚真町の基盤地図情報数値標高モデルを利用する。広域の安定性評価に用いる地形データは被災前の2016年10月1日時点のデータ(10 mメッシュ)とし、被災後の地形データは2021年1月15日時点のデータ(5 mメッシュ)を用いた。なお、このデータはxml形式であるが、QGIS上で取り扱えるようにエコリスの「基盤地図情報標高DEMデータ変換ツール Ver1.7.0」¹⁵⁾を使用してGeoTIFF形式に変換した。図4に厚真町の数値標高モデルを示す。QGISで解析するデータは10 mメッシュの地形データとなる。図5に被災前後の地形データの差分のとり方のイメージ図を示す。周ら⁶⁾の研究によれば、2~50 mメッシュで斜面の傾斜角度の頻度分布を確認したところ、2~15 mメッシュの範囲では頻度分布が大きく変わらないことがわかっている。加えて、現地での実測値と10 mメッシュの地形データとの比較の中で、概ね同じ平均傾斜角が得られていることから精度的に10 mメッシュで問題ないと判断した。また、被災前後の地形データでメッシュ間隔が異なるが、上述の通り2~15 mの範囲であれば傾斜角の頻度分布に大きな差がないと考えられることから、5 m間隔のメッシュと10 m間隔のメッシュで標高の差分をとることによる、精度への影響は小さいと判断した。

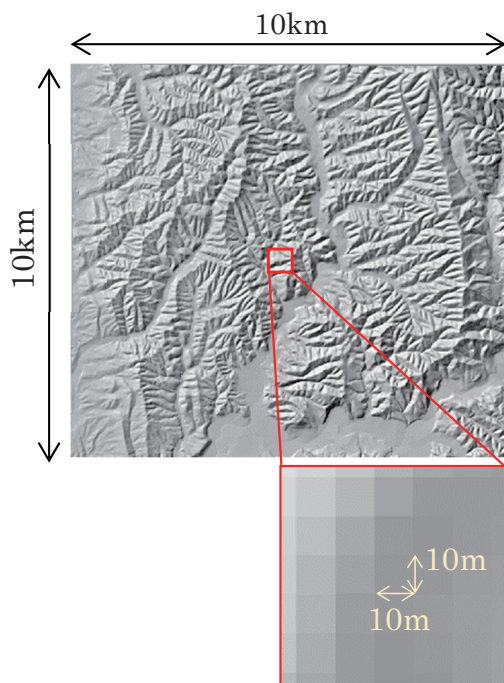


図4 厚真町標高モデル陰影図

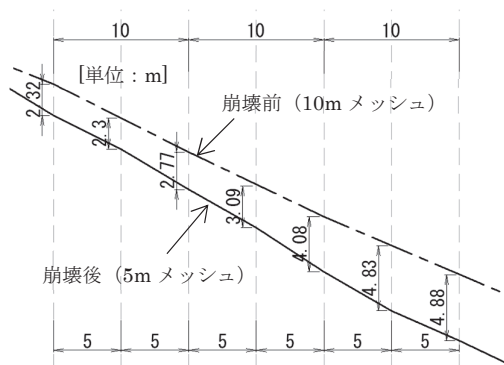


図5 差分の取り方のイメージ図

2.2 斜面の安定性の評価式

斜面の安定性は直線すべりに震度法を適用した式(1)で評価する。この式は道路土工一切土工・斜面安定工指針等¹⁶⁾に掲載されるなど、斜面安定問題に対し広く実務設計で用いられている。すべりのモデルを図6に示す。

$$F_s = \{c \times L + (W \times \cos \alpha - U \times b \times \cos \alpha - K_h \times W \times \sin \alpha) \tan \varphi / (W \times \sin \alpha + K_h \times W \times \cos \alpha)\} \quad (1)$$

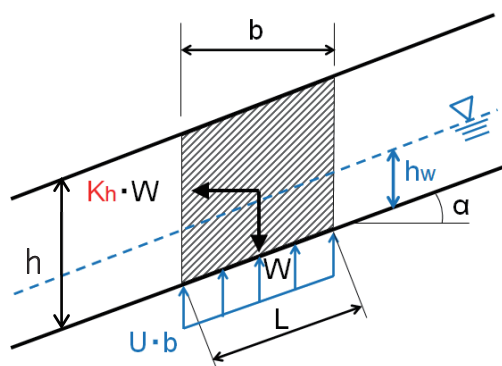


図6 直線すべりの力学モデル

ここに、

F_s : 安全率

c : 粘着力 (kN/m^2)

L : すべり面の長さ (m)

W : すべり土塊の重量 (kN)

α : すべり面と水平面のなす角度 ($^\circ$)

U : すべり土塊底面に作用する間隙水圧 (kN/m^2)

b : 水圧の作用する幅 (m)

K_h : 水平震度

φ : 内部摩擦角 ($^\circ$)

γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3)

h_w : すべり面からの地下水位の高さ (m)

h : すべり土塊の厚み (m)

今回、10 m 間隔の各メッシュに対し直線滑りで安定性を評価するため、水圧の作用する幅 b は 10 m で一定となる。さらに、すべり面と水平面のなす角度 α については各メッシュに対し代表値で与えるため、水圧の作用する幅 b とすべり面の長さ L は式(2)の関係となる。すべり面と水平面のなす角度 α で決まる。すべり土塊の重量は式(3)、間隙水圧は式(4)のようにあらわすことができ、これらを代入することで式(1)は式(5)の通りすべり面長さ L のない形で表すことができる。

$$b = L \times \cos \alpha \quad (2)$$

$$W = \gamma \times h \times b = \gamma \times h \times L \times \cos \alpha \quad (3)$$

$$U = \gamma_w \cdot h_w \quad (4)$$

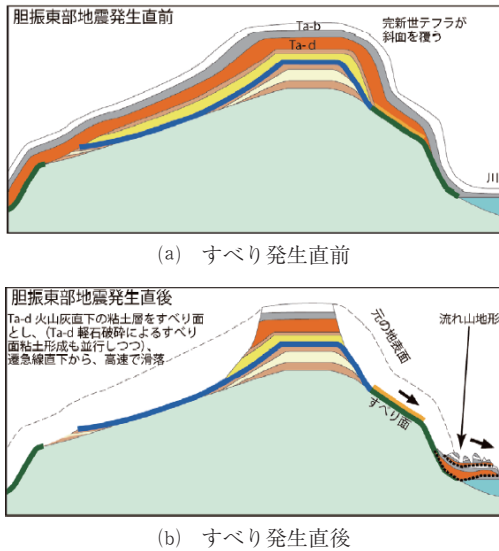


図7 胆振東部地震におけるすべり発生機構¹²⁾

$$F_s = \{c + (\gamma \times h \times \cos^2\alpha - \gamma_w \times h_w \times \cos^2\alpha - K_h \times \gamma \times h \times \sin\alpha) \times \tan\phi / (\gamma \times h \times \cos\alpha \times \sin\alpha + K_h \times \gamma \times h \times \cos^2\alpha)\} \quad (5)$$

なお、地震の影響は静的水平震度 K_h で考慮し、降雨の影響は地下水位による間隙水圧の項 $\gamma_w \times h_w \times \cos^2\alpha \times \tan\phi$ により考慮する。

図7に北海道胆振東部地震のすべり発生機構¹²⁾を示す。これによれば、軽石層や火山灰質土層の降下火砕物が堆積した地質構造になっており、堆積物の中にすべり面が形成されている。千木良ら¹⁷⁾や廣瀬ら¹⁸⁾も同様の報告をしている。これらを鑑みて、直線すべりを採用した。なお、GIS上で一連の斜面を抽出し斜面安定検討を実施するには、地形工学的な知見が必要になるなど、煩雑な評価が必要となる。今回、簡易な広域斜面安定性評価手法を構築する上で、各メッシュで算出した抵抗力と作用力(起動力)の比を安全率と定義した。一般的には連続した斜面に対してすべり面を想定し、その面に対する抵抗力と起動力の比を安全率とするため、留意が必要である。

2.3 直線すべりに適用する各パラメータの設定

直線すべりに適用する各パラメータを表1に示

表1 直線すべりに適用する各パラメータの設定

記号	値	単位	備考
c	5.1	kN/m ²	既往調査より設定 ¹²⁾
ϕ	34.9	°	既往調査より設定 ¹²⁾
γ	12.9	kN/m ³	緑川らの研究より設定 ¹⁹⁾
h	0~3.0	m	被災前後の基盤地図情報数値標高モデルより推定
α	0~85	°	基盤地図情報数値標高モデル
γ_w	10	kN/m ³	一般値
K_h	0.24~0.65	-	距離減衰を考慮して設定
h_w	0.09	m	未崩壊部分で逆算

す。

(1) 単位体積重量 γ

緑川ら¹⁹⁾の研究の中で実施した、厚真町の火山灰質土に対する現場密度試験結果を参照し、湿潤密度 $\rho_t = 1.312 \text{ g/cm}^3$ ($\gamma_t = 12.9 \text{ kN/m}^3$) と設定した。

(2) すべり面のせん断強度 c, ϕ

既往調査で実施された一面せん断試験結果²⁰⁾を参考に、 $c = 5.1 \text{ kN/m}^2$, $\phi = 34.9^\circ$ と定めた。

(3) すべり土塊の厚み h

図8に示す通り被災前後の地形から、崩壊部の断面を作成し、崩壊前の地表面の傾斜とすべり土塊の厚さを整理した結果を図9に示す。この関係性から、式(6)の関係式を得た。この式により地表面傾斜に応じたすべり土塊の厚み h を設定することとした。

$$h = (-0.0018\alpha^4 + 0.3798\alpha^3 - 27.549\alpha^2 + 742\alpha - 3250) / 1000 \quad (6)$$

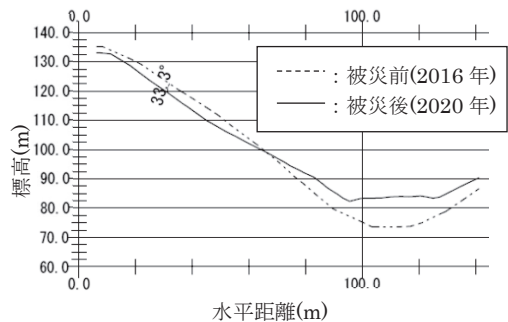


図8 北海道胆振東部地震による斜面崩壊前後の地形の例

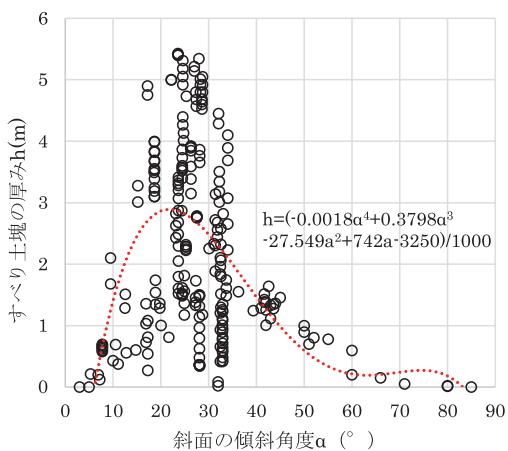


図9 すべり土塊の厚み h と地表面傾斜角度 α の関係

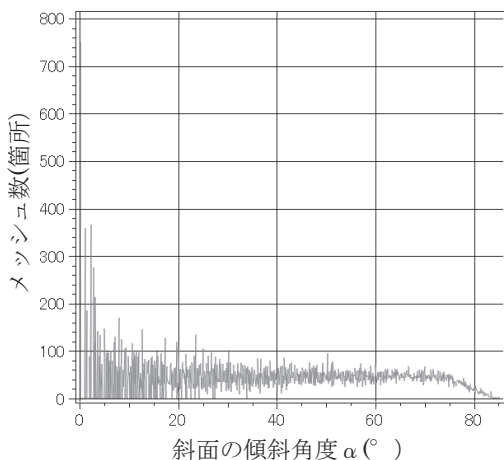


図11 対象地域における傾斜角度 α のヒストグラム

(4) すべり面の角度 α

国土地理院基盤地図情報の数値標高モデルより各地点の傾斜を算出した。なお、各メッシュの地表面の傾斜は QGIS 上の地形解析プラグインを用いて算定した。各メッシュの高さ情報と隣接するメッシュの高さ情報およびメッシュ間の距離 (= 10m) から、地表面の角度 α を算出した。すべり面の角度は、周ら⁶⁾の研究に倣い地表面の角度 α と同じ値とした。図10に対象地域における斜面の傾斜角度 α の分布、図11に対象地域における傾斜角度 α のヒストグラムを示す。

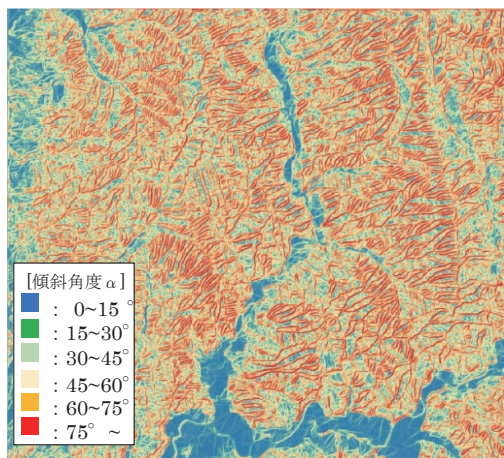


図10 対象地域における斜面の傾斜角度 α の分布

(5) 静的水平震度 K_h

図12に示す断層モデルの断層位置から各メッシュの距離を算定し、司・翠川の距離減衰式²¹⁾より PGA 分布を算出する。断層モデルは「地震調査研究推進本部地震調査委員会：平成30年北海道胆振東部地震の評価」¹²⁾で作成されたモデルを用いた。司・翠川の距離減衰式を式(7)に示す。

$$\log_{10}PGA = 0.50M_w + 0.0043D + 0.61 - \log_{10}(X + 0.0055 \times 10^{0.50M_w}) - kX \quad (7)$$

ここに、

M_w : モーメントマグニチュード (=6.6¹²⁾)

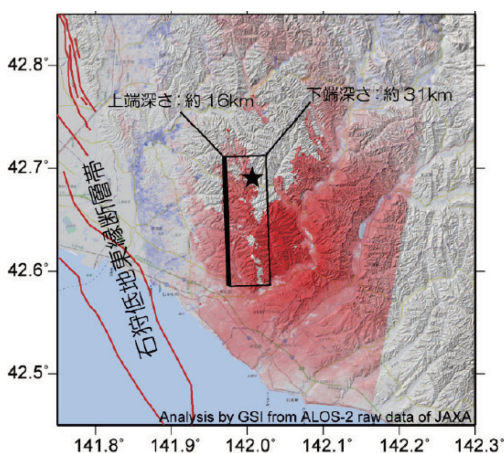


図12 北海道胆振東部地震の断層モデル¹²⁾

- D : 震源深さ (= 37 km¹²⁾)
- X : 各地点の断層からの最短距離 (km)
- k : 粘性減衰に対する回帰係数 (0.02~0.05)

なお、式(7)における粘性減衰に対する回帰係数 k は、対象地域近傍の震度観測点(厚真町鹿沼, 厚真町京町, 新千歳空港, 千歳市新栄, 苫小牧市末広町)で観測された最大加速度に対して残差二乗平均が最小となる値を採用することとし、 $k=0.002$ を採用した。さらに鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計²²⁾に準じて、最大加速度を重力加速度980 galで除した値を各メッシュの水平震度 K_h として与えることとした。図13に対象地域における水平震度 K_h の分布を示す。

(6) すべり面からの地下水位の高さ h_w

前述した各パラメータを用いて、未崩壊部分が $F_s=1.0$ となる際の地下水位を逆算し、設定することとした。図3に示した通り、北海道胆振東部地震は地震発生に先駆けて13 mm程度の降雨があった。この降雨により常時よりも水位が上昇していたことが考えられ、この影響を考慮するために想定すべり面からの水位を設定した。未崩壊斜面が地震発生時に有していた安全率は不明だが、中には限りなく $F_s=1.0$ に近づいた斜面も存在したことを想定し、 $F_s=1.0$ と仮定した複数の未崩壊斜面で逆算した中で、最大となった水位を採用

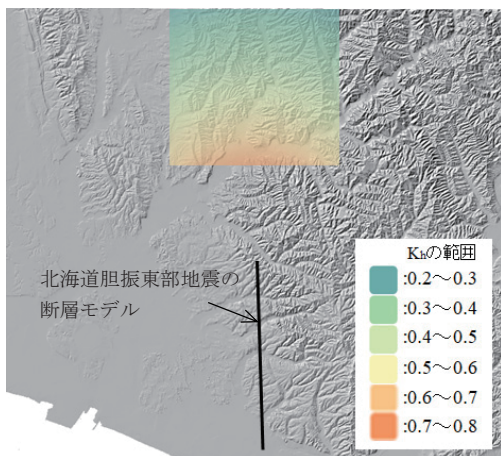


図13 対象地域における K_h の分布

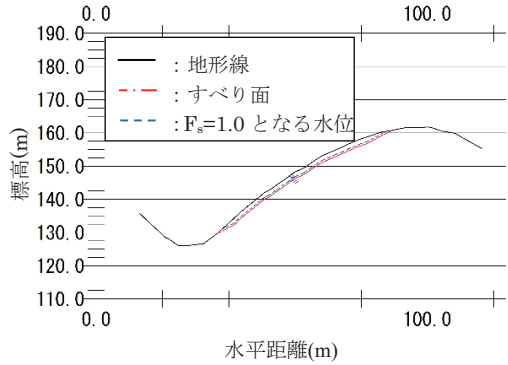


図14 すべり面からの地下水位高さの逆算イメージ

した。図14にすべり面からの地下水位高さの逆算イメージを示す。複数断面検討した中で最も高い水位となった0.09 mと設定した。

3. 広域斜面の安定性評価結果

図15にQGISのラスタ計算機を用いて式(5)により算定した斜面の安全率 F_s の分布、図16に対象地域の衛星写真を示す。図15の斜面の安全率の分布は、斜面の安全率 $F_s < 1.0$ の箇所が不安定となる箇所であり、 $F_s \geq 1.0$ の箇所が安定と評価される箇所である。図16の中で山肌が露出している箇所が崩壊した箇所と想定される。GISの解析により得られた図15に示す斜面の安全率の分布は、

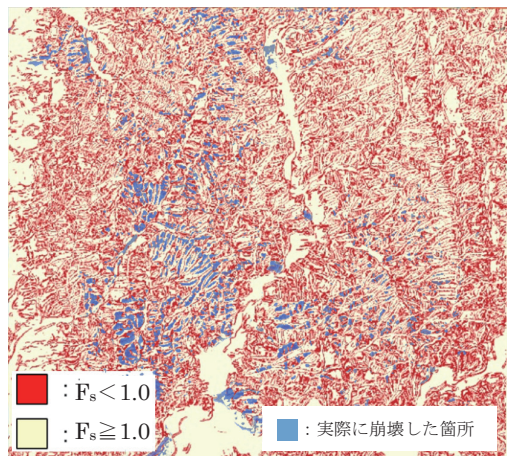


図15 斜面の安全率 F_s の分布図

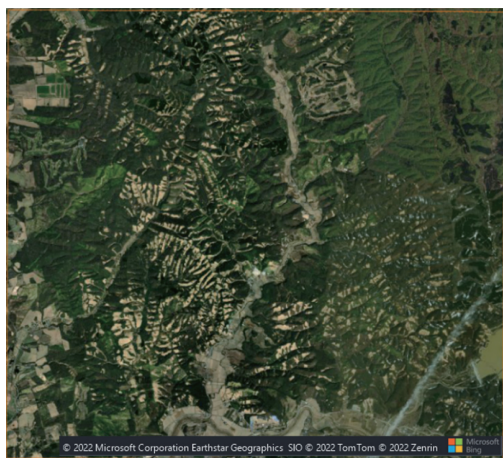


図16 厚真町被災状況¹¹⁾

実際に崩壊した箇所を網羅する結果は得られたものの、未崩壊部分にわたり広範囲で不安定となる結果が得られた。今回設定したパラメータにおいてGISで解析した結果は、実現象の崩壊範囲よりも広範囲で不安定となる結果となった。斜面の傾斜角度が $0 \sim 15^\circ$ の沢部では $F_s \geq 1.0$ であり、山間地では大部分が $F_s < 1.0$ となっている。これは、地表面の傾斜角度が緩いほど斜面が安定するという実現象と一致している。実際の崩壊箇所は概ね網羅できたため、不安定斜面の一次スクリーニング程度の活用は可能と考えるが、より精度を高めるため検討手法を含め各パラメータの設定方法について考察を行う。

4. 広域斜面の安定性評価結果の考察

4.1 直線すべりに適用した各パラメータの安全率 F_s への影響度

図17～図19に斜面の安全率 F_s と各パラメータの関係について示す。

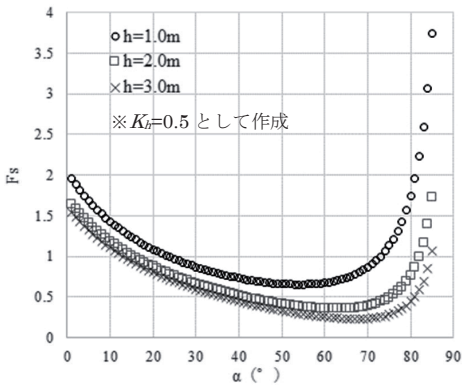
図17は斜面の安全率 F_s と傾斜角度 α の関係である。図17中のいずれのグラフも斜面の傾斜角度 $\alpha = 60 \sim 70^\circ$ 程度までは傾斜角度 α が大きくなるにつれて安全率 F_s が小さくなるが、それ以上傾斜角度 α が大きくなると F_s が急激に大きくなる。斜面が急勾配であるほど崩壊が生じやすくなるのが実現象として一般的である。すなわち、斜面の

傾斜角度 α が大きくなるほど安全率が小さくなるのが実現象と一致する結果であるが、傾斜角度 α が $60 \sim 70^\circ$ を超えると逆の結果が得られている。これは式(5)の分子(抵抗力)において傾斜角度 α の影響を受けない粘着力 c の項の存在に起因する。式(5)の分子(抵抗力)の第2項は斜面の傾斜角度 α が大きくなるにつれて小さくなる。式(5)の分母の第1項は傾斜角度 $\alpha \leq 45^\circ$ では α が大きくなるにつれて大きくなり、 $\alpha > 45^\circ$ では α が大きくなるにつれて小さくなる。この影響で、式(5)の分母(抵抗力)はパラメータにもよるが傾斜角度 α が $30 \sim 40^\circ$ 程度までは傾斜角度 α が大きくなるにつれて大きくなり、それ以降は逆に小さくなる。すなわち、 $30 \sim 40^\circ$ 程度以上に α が大きくなった場合、粘着力 c の影響が支配的となり、 α が大きくなる程安全率 F_s が大きくなる。今回、GIS上の10mメッシュ毎に解析するためすべり面長さ L の項がない形で式を表したことで、抵抗力および起動力が単位幅当りの値となり比較的小さな値となっていることから、粘着力 c の影響が顕著に現れているものと考えられる。

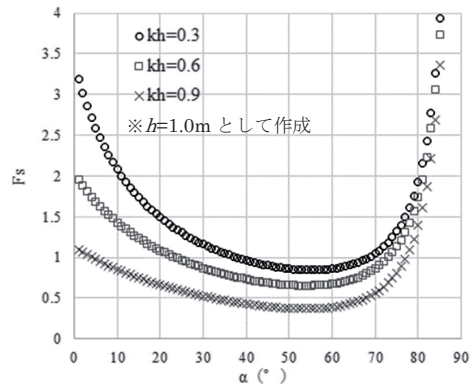
図10に示す通り、今回の対象範囲には傾斜角度が 75° を超える箇所がある。しかし、北海道胆振東部地震で崩壊した火山灰質土層の自然斜面がこのような角度で自立していることは考えにくく、斜面对策工が施されているか基盤岩が露頭していることが考えられる。実際、Kasaiら²³⁾の調査によれば胆振東部地震で崩壊した高岡地区周辺の斜面は傾斜角度 α が $10 \sim 45^\circ$ である。これらから、 60° を超える急傾斜の箇所では不安定な結果($F_s < 1.0$)とならずとも今回の解析上問題ないと判断した。

図18は斜面の安全率 F_s と水平震度 K_h の関係である。いずれのケースも水平震度 K_h が大きくなるほど斜面の安全率 F_s が小さくなる結果となった。斜面の傾斜角度 α が小さいほど水平震度 K_h が大きくなった際の安全率 F_s の低下率が大きいことがわかる。

図19は斜面の安全率 F_s とすべり土塊の厚み h の関係である。いずれのケースもすべり土塊の厚み h が大きくなるほど斜面の安全率 F_s が小さく

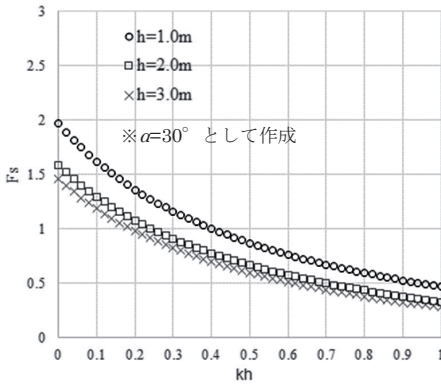


(a) すべり土塊の厚み h を変化した際の斜面の安全率 F_s と傾斜角度 α の関係

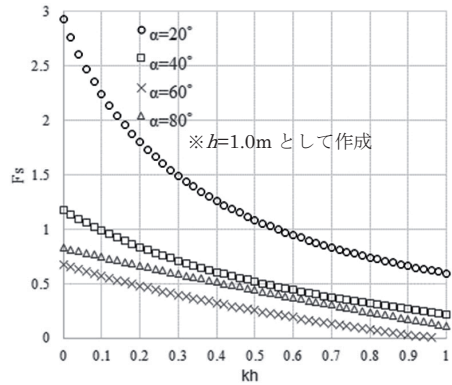


(b) 水平震度 K_h を変化した際の斜面の安全率 F_s と傾斜角度 α の関係

図17 斜面の安全率 F_s と傾斜角度 α の関係

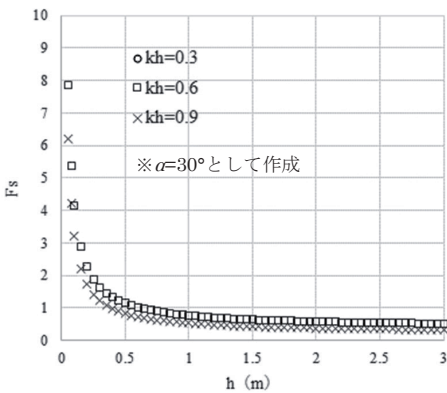


(a) すべり土塊の厚み h を変化した際の斜面の安全率 F_s と水平震度 K_h の関係

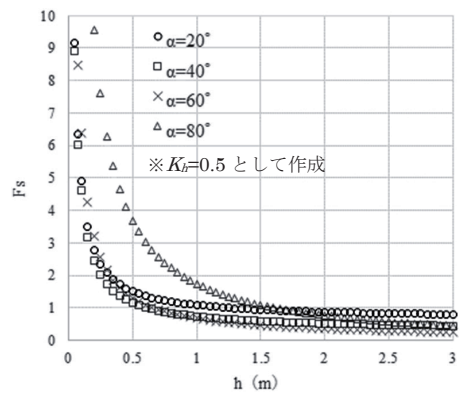


(b) 斜面の傾斜角度 α を変化した際の斜面の安全率 F_s と水平震度 K_h の関係

図18 斜面の安全率 F_s と水平震度 K_h の関係

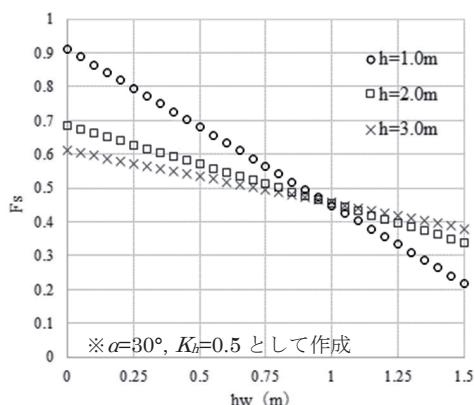


(a) 水平震度 K_h を変化した際の斜面の安全率 F_s とすべり土塊の厚み h の関係

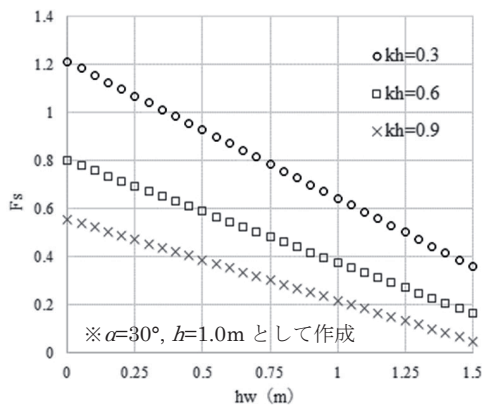


(b) 斜面の傾斜角度 α を変化した際の斜面の安全率 F_s とすべり土塊の厚み h の関係

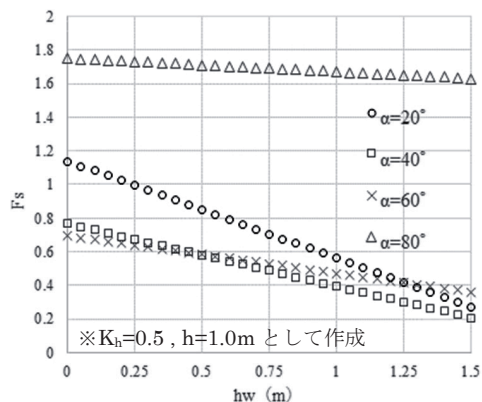
図19 斜面の安全率 F_s とすべり土塊の厚み h の関係



(a) すべり土塊の厚み h を変化させた際の斜面の安全率 F_s とすべり面からの地下水位の高さ h_w の関係



(b) 水平震度 K_h を変化させた際の斜面の安全率 F_s とすべり面からの地下水位の高さ h_w の関係



(c) 斜面の傾斜角度 α を変化させた際の斜面の安全率 F_s とすべり面からの地下水位の高さ h_w の関係

図20 安全率 F_s とすべり面からの地下水位の高さ h_w の関係

なる結果となった。斜面の傾斜角度 $\alpha=80^\circ$ のケースを除き、特にすべり土塊の厚み $h<0.5$ m の範囲で斜面の安全率 F_s への影響が大きいことがわかる。

図20は安全率 F_s とすべり面からの地下水位の高さ h_w の関係である。いずれのケースもすべり面からの地下水位の高さ h_w が大きくなる程斜面の安全率 F_s は小さくなる。図18(a)に示す通りすべり土塊の厚み h が小さい程すべり面からの地下水位高さ h_w の斜面の安全率 F_s への影響は大きくなる。これは、 h が小さいほどすべり土塊の重量が小さくなり、すべり面からの地下水位高さ h_w により作用する間隙水圧の影響が顕著となるためである。

4.2 検討手法・パラメータ設定に関する考察

今回設定した水平震度 K_h は図6に示した直線滑りのモデルの通り、斜面の傾斜方向に対して作用している。これは斜面安定上で最も安全率が低くなる水平震度の作用方向となる。しかし、井上ら²⁴⁾の研究によれば、主軸方向と主軸直交方向の加速度応答スペクトル比の平均値は海溝型地震・内陸直下型地震に依らず0.6~0.7程度となることがわかっている。すなわち、斜面が概ね傾斜方向に崩壊することを鑑みれば、斜面の傾斜方向次第では、今回の震度の与え方は過剰であると言える。

対象地域の最寄の観測点である厚真町京町で得られた強震観測データ²⁵⁾の加速度分散方向を示した結果を図21、加速度軌跡の主軸方向の算出方法²⁶⁾を式(8)に示す。

$$\theta = 1/2 \times \tan^{-1} \left\{ (2\sigma_{xy}^2) / (\sigma_x^2 - \sigma_y^2) \right\} \quad (8)$$

ここに、

σ_x : x軸方向の地震動時刻歴データの分散

σ_y : y軸方向の地震動時刻歴データの分散

σ_{xy} : x軸方向とy軸方向の地震動時刻歴データの共分散

式(8)における主軸の物理的な意味は、水平面内の方位角を θ としたとき、 θ 方向の加速度の分散が最大となる方向である。図21より東北東-西南西方向に最大加速度が得られていることが分

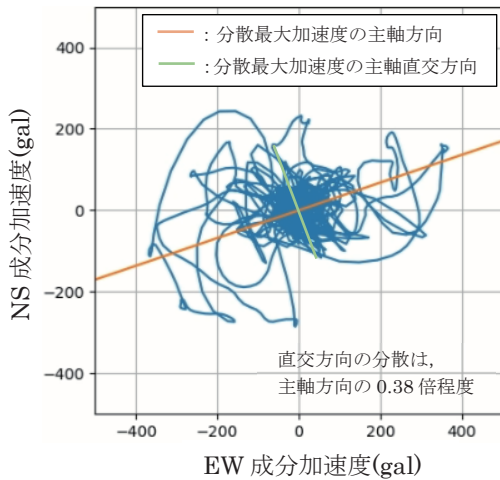


図21 厚真町京町で得られた強震観測データの加速度分散方向

かる。図22～24は対象地域に対し、Autodesk Civil3D 2022の解析ツールを用いて勾配方向をベクトル表示したものである。図23は特に崩壊が密集している地点Aを拡大した範囲である。山肌の露出している崩壊箇所の傾斜ベクトルを見ると、東西方向、北西－南東方向に向けて崩壊している。これは図21に示した分散加速度の比較的大きな方向と概ね一致する。比較的小さい南北方向に向けて崩壊している斜面はほとんど見受けられない。図24は崩壊がほとんど見られなかった地点Bを拡大した図である。崩壊が集中している地点Aと比べると、南北方向の斜面が多く見受けられる。これらより、地震動加速度の加速度方向と斜面の向きが崩壊の有無に大きく影響していると想定される。

図21に示した主軸直行方向の分散最大加速度は、主軸方向に比べて0.38倍程度の値であった。主軸直行方向の震度を模擬するため水平震度 K_h を0.38倍した際の斜面の安全率 F_s の分布を図25に示す。これは、この対象地域において斜面方向が分散最大加速度の主軸直行方向を向いている状態を模擬した結果となる。図15に示した水平震度 K_h を低減しない場合の結果は、 $F_s < 1.0$ となる不安定斜面の分布は、対象地域の面積において36.0%である。水平震度 K_h を0.38倍した図25ではこの値は

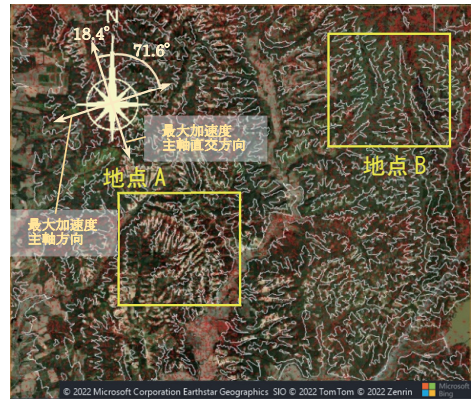


図22 対象地域における崩壊密集地域と未崩壊箇所の位置



図23 崩壊密集地域(地点A)の斜面の勾配方向ベクトル

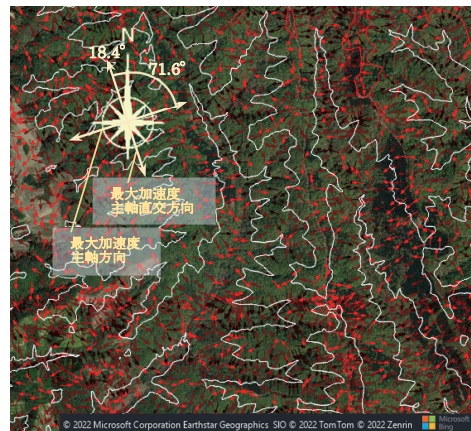


図24 未崩壊地域(地点B)の斜面の勾配方向ベクトル

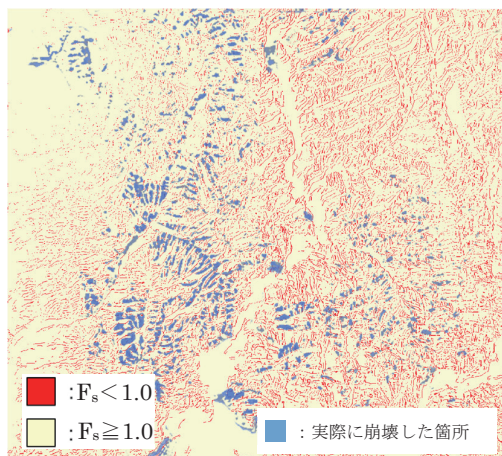


図25 水平震度 K_h を0.38倍した際の斜面の安全率 F_s の分布

11.7%である。水平震度 K_h の低減を考慮することで、 $F_s < 1.0$ の不安定斜面の分布が減少した。斜面の傾斜方向に合わせて適切に水平震度の低減を考慮することで、実際に北海道胆振東部地震の際に崩壊した箇所の再現度が高まることが期待できる。

5. まとめ

誰でも入手可能なオープンデータを用いて、比較的簡易な広域斜面の斜面安定性評価手法の構築を目的に、GISソフトを活用して北海道胆振東部地震で被災した厚真町の斜面崩壊状況の再現を試みた。直線すべりのパラメータは既往の調査結果や被災前後の数値標高モデルから定めた。その結果、GISの解析により得られた不安定斜面の分布は、実際に崩壊した箇所を網羅する結果は得られたものの、未崩壊部分にわたり広範囲で不安定となる結果が得られた。今回設定したパラメータにおいて各メッシュに対して直線すべりで解析した結果は、実現象の崩壊範囲よりも広範囲で不安定となる結果となった。

加えて、直線すべりに適用した各パラメータの安全率への影響度を確認するとともに今回得られた結果について考察した。斜面の傾斜方向に合わせて水平震度の低減を考慮することで、北海道胆振東部地震の実際の崩壊現象の再現度が上がる可

能性があると分かった。

より再現度の高い手法となれば、将来発生する自然災害の外力を想定し、その際の不安定斜面の抽出につながると考える。この情報は、より安全な避難経路や避難場所の選定等、地域防災計画の中のソフト対策に役立てられると考える。また、ハード対策を講じる上で優先順位を検討する際に活躍すると考える。実現象の再現度を向上させるため、今後、水平震度 K_h について、斜面の傾斜方向を考慮した低減を行い、斜面の安定性評価を実施する。

参考文献

- 1) 内閣府：令和3年版防災白書 付属資料20 土砂災害の発生状況の推移, 2020年3月15日, <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r03/honbun/index.html>.
- 2) 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告, 超過外力と複合自然災害に対する危機管理に関する研究, No.64, 2020.2.
- 3) 地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, 第7章, 8章, pp.73-153, 2006.
- 4) 周国云・横や直道・陳光齊・北園芳人：GISを活用した数量化理論による斜面崩壊ハザードマップ作成手法の開発と適用, 応用地質, 第49巻, 第1号, 2-12項, 2008.
- 5) 上出定幸・土肥泰之・小泉圭吾・細木康夫・殿垣内正人・中辻啓二：降雨を考慮した斜面の崩壊危険度評価に関する考察, 地盤工学ジャーナル Vol.5, No.1, pp.159-168.
- 6) 周国云・江崎哲郎・謝漢文・森二郎：GISとモンテカルロ法に基づく広域斜面崩壊確率の評価手法, Theory and Application of GIS, 2003, Vol.11, No.2, pp.11-21.
- 7) L. Montrasio・R. Valentino: A model for triggering mechanisms of shallow landslides, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 8, pp.1149-1159, 2008.
- 8) 小野桂介・風間聡・手塚翔也：タイ王国ペチャブーン県における降雨に伴う表層崩壊ハザードマップの作成, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.5, I_273-I_278, 2012.
- 9) 小野桂介・風間聡：統計のおよび力学的解析手法を用いた豪雨時の表層崩壊危険度評価, 土木

- 学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, I_925-I_930, 2013.
- 10) 若井明彦・田中頼博・阿部真郎・吉松弘行・山邊康晴・渡邊泰介: 中山間地の地震時斜面崩壊リスクを評価するための有限要素法に基づく広域被害予測システム, *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol.45, No.3 (2008), Sep, pp.207-218.
 - 11) 2022 Microsoft Corporation・Earthstar Geographics SIO, <https://satellitemap.watch/>, 2022年3月18日.
 - 12) 公益社団法人土木学会: 地震被害調査シリーズ NO.2, 2018年北海道胆振東部地震被害調査報告書, 2019.9.
 - 13) 気象庁 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2022年6月27日.
 - 14) 国土交通省 国土地理院 基盤地図情報ダウンロードサービス, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>, 2022年1月8日.
 - 15) エコリス: 基盤地図情報 標高 DEM データ変換ツール, <https://www.ecoris.co.jp/contents/demtool.html>, 2021年9月2日.
 - 16) 公益社団法人日本道路協会: 道路土工-切土工・斜面安定工指針, 平成21年度版.
 - 17) 千木良雅弘・田近淳・石丸聡: 2018年胆振東部地震による降下火砕物の崩壊, 特に火砕物の風化状況について, 京都大学防災研究所年報, 第62号 B, 2019.
 - 18) 広瀬亘・川上源太郎・加瀬善洋・石丸聡・興水健一・子安浩理・高橋良: 平成30年北海道胆振東部地震に伴う厚真町およびその周辺地域での斜面崩壊調査(速報), 北海道地質研究所報告, 第90号, pp.33-44, 2018.
 - 19) 緑川雄介・海野寿康・加村晃良・仙頭紀明・風間基樹: 2018年北海道胆振東部地震で被害を受けた火山灰質土の物理特性および力学特性, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.76, No.4 (地震工学論文集第39巻), I_741-I_754, 2020.
 - 20) 「地震による地すべり災害」刊行委員会: 地震による地すべり災害 2018年北海道胆振東部地震, pp.213-215, 2020.9.
 - 21) 司宏俊・翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70, 1999年9月.
 - 22) (財) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, p.119, 平成11年10月.
 - 23) Mio Kasai・Takashi Yamada: Topographic effects on frequency-size distribution of landslides triggered by the Hokkaido Eastern Iburu Earthquake in 2018, *Earth, Planets and Space*, pp.71-89, 2019.
 - 24) 井上和真・渡辺和明・五十嵐晃・畑明仁: 強振動の観測記録の水平2方向特性の分析と水平2方向応答スペクトルに適合する入力地震動の作成法の提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4 (地震工学論文集第35巻), I_555-I_568, 2016.
 - 25) 国土交通省気象庁強震観測データ, <https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>, 2022年3月2日.
 - 26) 日本建築学会: 多次元入力地震動と構造物の応答, 丸善出版, 1998.

(投稿受理: 2022年4月1日)

訂正稿受理: 2022年7月1日)

要 旨

北海道胆振東部地震による被災前後の地形オープンデータを用い, GIS ソフトにより厚真町の広域斜面の安定性を評価した。直線すべりのパラメータは既往の調査結果や被災前後の数値標高モデルから定めた。その結果, 地震によって実際に斜面崩壊した範囲よりも広い範囲で不安定な箇所が抽出された。

加えて, 直線すべりに適用した各パラメータの安全率への影響度を確認するとともに, 今回得られた結果について考察した。その結果, 斜面の傾斜の向きに合わせた水平震度の低減を考慮することで, 実際の崩壊現象の再現度が上がる可能性があることが分かった。