

ASTER DEM を用いた地震時の斜面崩壊危険度評価

SEISMIC HAZARD ASSESSMENT OF SHALLOW LANDSLIDE USING ASTER DEM

秦 吉弥*・森田 格*・倉岡千郎*・木下慎逸**
 Yoshiya HATA, Itaru MORITA, Senro KURAOKA and Shinichi KINOSHITA

The Mid Niigata Earthquake in 2004 triggered many seismic surface failures such as shallow landslides and surface slope failures causing enormous damage. Conventional slope stability analysis is used for small areas based on local topographical and geological conditions and is not applicable for application to broad areas for landslide hazard analysis. This study evaluated relative seismic slope stability over a wide area using the ASTER DEM and geological data with the earthquake motion prediction method and peak ground acceleration distribution method.

Keywords : Earthquake, slope stability, hazard assessment, shallow landslide, ASTER DEM

1. まえがき

従来、不安定ブロックの抽出に関する検討では、微地形や地質構造に基づいて特定の地すべりやクリープ斜面の安定性が評価なされてきたが、2004年新潟県中越地震において発生した斜面崩壊は、狭義の地すべりの他にも表層崩壊が多発し、その影響は甚大であった。しかしながら大きい流域の斜面の安定性を調査により評価するには領域の大きさの点から限界がある。また広域かつ平面的な側面から斜面の安定性を定量的に検討した事例は少ない。そこで本研究では衛星観測より得られた標高メッシュデータ (ASTER DEM) や地質に関する平面分布データ等を活用し、強震動予測手法ならびに斜面崩壊に関する安全率算定式を用いた広域における斜面安定性の相対的な評価を行った事例を紹介する。

図-1に本研究の位置付けならびにその実施フローを示す。本研究は崩壊の危険性がある斜面の1次スクリーニング、すなわち対象とする領域(流域)全体にわたる斜面崩壊危険箇所を相対的に抽出することを目的としている。

具体的には、まず既往の文献資料等を用いて当該領域内において比較的大きな被害が予想される地震、すなわち想定地震候補を抽出し、その中から比較的大きな影響が予想される地震を想定地震として選定する。そして想定地震による地形的増幅を考慮した最大加速度分布を15mグリッドごとについて算定する。

次に最大加速度および地盤強度などを変数とした無限延

長斜面を仮定した斜面安定安全率式を用いて15mグリッドごとの安全率を算定することで当該領域内における斜面崩壊危険箇所の抽出を行った。

最後に、当該領域の想定地震に起因する斜面崩壊危険箇所の分布図を作成した。

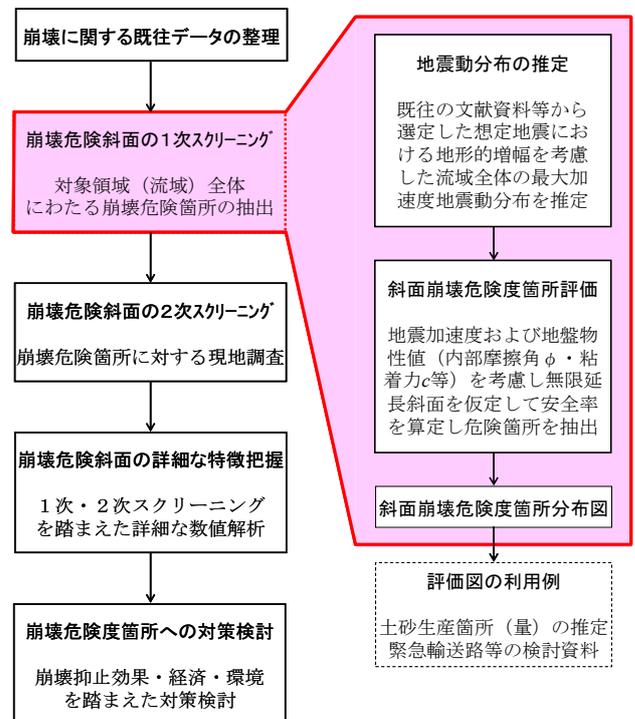


図-1 本研究の位置付けと実施フロー

* 中央研究所 総合技術開発部

** 名古屋支店 技術部

2. 想定地震の選定

ここでは T 川流域に最も大きな被害が予想される地震、すなわち想定地震の選定を行った。参考図書、市町村誌、学術論文等^{1),2)}について調査した結果、T 川流域に大きな被害を及ぼした歴史地震は表-1 に示す 4 つであった。

最新の活断層調査結果および地震被害想定調査結果を参考に T 川流域に比較的大きな影響を及ぼすことが予想される断層位置図を図-2 に示す。同図には上述した T 川流域における歴史地震の震央についても示す。表-2 には司・翠川(1999)の距離減衰式⁴⁾を用いて算定した T 川流域における最大加速度 PGA および最大速度 PGV の推定値(ともにこの時点では地形的増幅を考慮していない)の一覧を示す。本研究では、以下に示す理由により中央構造線赤石山地西縁断層帯による地震および東海地震を想定地震として採用した。

①図-2 より中央構造線赤石山地西縁断層帯は、これまで T 川流域に甚大な被害を及ぼした 715 年遠江地震および 1718 年 T 地震の震源域である可能性が高く、表-2 より T 川流域における強震動の分布が最大となることが予想される。

②東海地震は近年発生する確率が非常に高いことが指摘されており、T 川流域で予想される強震動も比較的大きい。

表-1 T 川流域に大きな被害を及ぼした歴史地震^{1),2)}

地震名	発生時期	マグニチュード	主な被害状況
遠江地震	715年7月4日	M7.0	天竜川の河道閉塞
遠山地震	1718年8月22日	M7.0	遠山川の河道閉塞と決壊
高遠地震	1825年8月14日	M6.0~6.5	高遠城の破損や家屋倒壊
安政東海地震	1854年12月23日	M8.4	諏訪市と飯田市で家屋倒壊の被害

表-2 地表面における最大速度・最大加速度の推定値⁴⁾

想定断層名・想定地震名	T 川流域における地震動の推定値	
	最大加速度 (gal)	最大速度 (kine)
糸魚川静岡構造線断層帯南部	87.2	8.2
糸魚川静岡構造線断層帯中部	126.5	11.4
伊那谷断層前縁断層	232.1	19.5
伊那谷断層境界断層	196.2	16.8
木曾山脈西縁断層帯主部北部	126.6	11.4
恵那山-猿投山北断層帯	168.7	14.7
中央構造線赤石山地西縁断層帯	951.3	71.9
想定東海地震	448.1	34.9

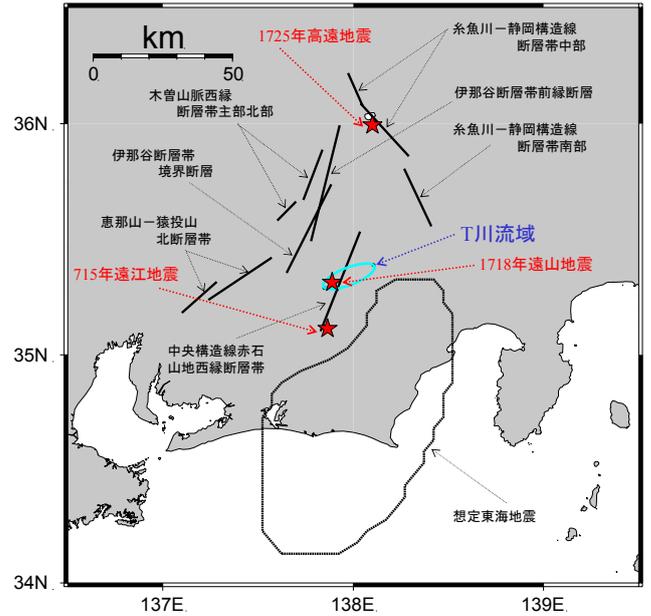


図-2 想定地震候補の断層位置と歴史地震震央³⁾

3. 想定地震における推定地震動分布

ここでは、中央構造線赤石山地西縁断層帯による強震動分布を距離減衰式などの経験的手法を用いて、東海地震による強震動分布をグリーン関数法などに代表される半経験的手法を用いてそれぞれ推定した。

(1) 速度分布(中央構造線赤石山地西縁断層帯)

はじめに、司・翠川(1999)の最大速度 PGV(kine)に関する距離減衰式により、 $V_s=600\text{m/s}$ の硬質地盤における最大速度を推定する。

$$\log PGV = 0.58M_W + 0.0038D - 1.29 - \log(X + 0.0028 + 10^{0.50M_W}) - 0.002X \quad (1)$$

ここに、 D は震源深さ(=10.5km)、 X は断層からの最短距離(=0~20km)である。また M_W はモーメントマグニチュードであり、気象庁マグニチュード M_{JMA} を用いて中央防災会議(2005)から提案されている次式から $M_W=7.32$ と算定した。

$$M_W = 0.88 \cdot M_{JMA} + 0.54 \quad (2)$$

次に、 $V_s=600\text{m/s}$ の硬質地盤層から工学的基盤($V_s=400\text{m/sec}$ 相当)までの増幅率を松岡・翠川(1994)⁵⁾に習い 1.31 倍とし、工学的基盤における最大速度を算定した。最後に、表層地盤の地形的増幅を考慮した地表面における最大速度を算定する。表層地盤による地盤の増幅は、微地形区分ごとに表層 30m の平均 S 波速度を設定し、平均 S 波速度から増幅度を算定する方法により評価する。松岡・翠川(1994)による表層地盤の増幅度評価の方法は次の通りである。まず、国土数値情報に基づいて微地形区

分に分類した上で、各微地形区分ごとに表層 30m の平均 S 波速度を評価する。そして次式を用いて、各微地形ごとに求められた表層 30m の平均 S 波速度から、第三紀ないしそれ以前の丘陵地(平均 S 波速度が 600m/s 程度)を基準とした速度増幅度を評価する方法である。

$$\log ARV = 1.83 - 0.66 \log AVS \pm 0.16 \quad (3)$$

ここに、 ARV は地下 30m から地表までの速度増幅度、 AVS は地下 30m から地表までの平均 S 波速度(m/s)である。本検討においても同様な方法により表層の増幅度を求める。ただし、本検討では S 波速度 400m/s の工学的基盤において強震動を評価し、その最大速度を求めるので、工学的基盤から地表までの増幅度は S 波速度 400m/s の地盤を基準としたものにならない。そこでまず、松岡・翠川(1994)による基準地盤(平均 S 波速度が 600m/s 程度)から S 波速度 400m/s の工学的基盤までの増幅度を式(3)により求める。表層地盤の速度増幅率算定式である式(3)に基づき地表での最大速度を算出する。具体的には 1.31 倍となる。次に、松岡・翠川(1994)に示された手順により求められた表層地盤速度増幅度を 1.31 で除し、得られた値を本検討における S 波速度 400m/s の工学的基盤から地表までの速度増幅度とすることにより、地表における最大速度を算出する。図-3 に本検討による推定地震動分布算定領域付近における S 波速度 400m/s の工学的基盤から地表までの速度増幅度を示す。図-4 には推定速度分布図を示す。対象断層直上にあたる T 川流域においては、最大 70(kine)程度の非常に強い地震動が作用することが予測される。

(2) 加速度分布(中央構造線赤石山地西縁断層帯)

地震波の周波数帯域を限定すれば、地表最大加速度 PGA は上述した地表最大速度 PGV と相関関係にあることが知られており、内閣府(1999)地震被害想定支援ツール⁶⁾では、兵庫県南部地震(1995)、北海道南西沖地震(1993)、釧路沖地震(1993)、能登半島沖地震(1993)、三陸はるか沖地震(1994)の 5 つの地震の合計 128 の気象庁データから経験的に図-5 および次式に示すような相関関係を提案している。

$$PGA = 10^{0.908} \cdot PGV^{1.13} \quad (4)$$

本検討では、上述した地表最大速度 PGV を上式に代入することで、地表最大加速度 PGA を算定した。図-6 には推定加速度分布図を示す。対象断層直上にあたる T 川流域においては、最大で 800 (gal) を超える非常に強い地震動が作用することが予測される。

(3) 震度分布(中央構造線赤石山地西縁断層帯)

翠川ら(1999)⁷⁾によれば、最大速度 PGV (kine) と計測震度 I との間には、次式が成立する。

$$I = 2.68 + 1.72 \log PGV \pm 0.21 \quad (5)$$

本検討では、上述した地表最大速度 PGV を上式に代入することで、計測震度 I を算定した。図-7 に推定計測震度分布図を示す。また図-8 には計測震度を気象庁震度階に換算した場合の推定震度分布図を示す。これらの図より T 川流域においては、計測震度で 5.7、震度階に換算すれば震度 6 弱程度の地震動が作用することが予想される。

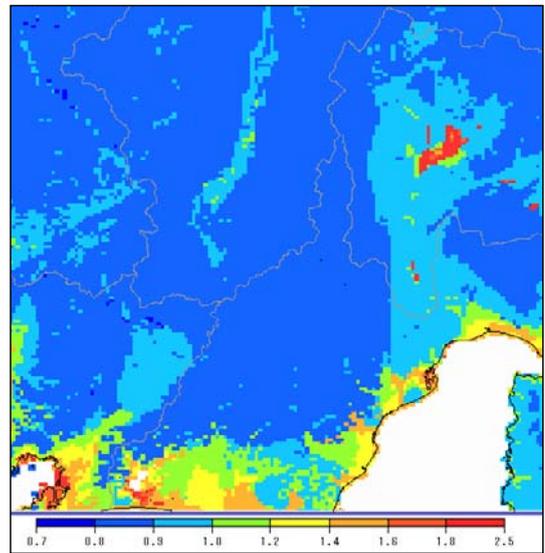


図-3 工学的基盤以浅の速度増幅度 ARV 分布

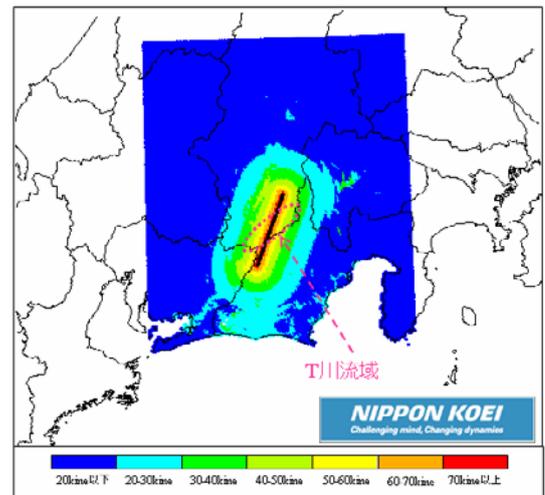


図-4 地表における推定速度分布

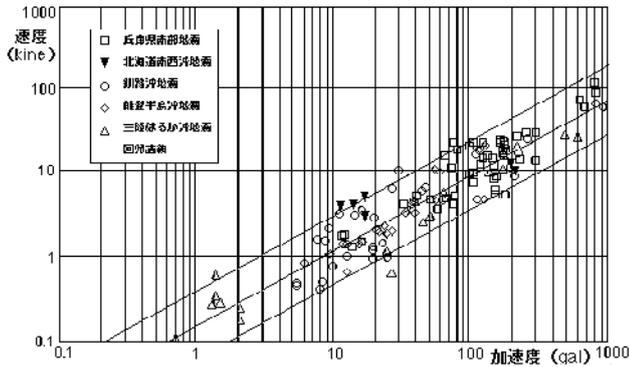


図-5 地表における最大速度と最大加速度の関係⁶⁾

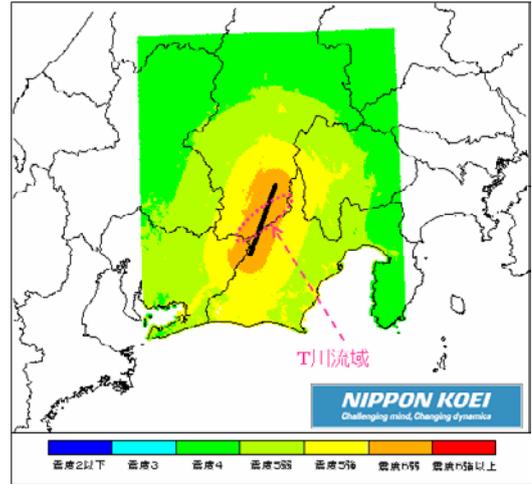


図-8 地表における推定震度階分布

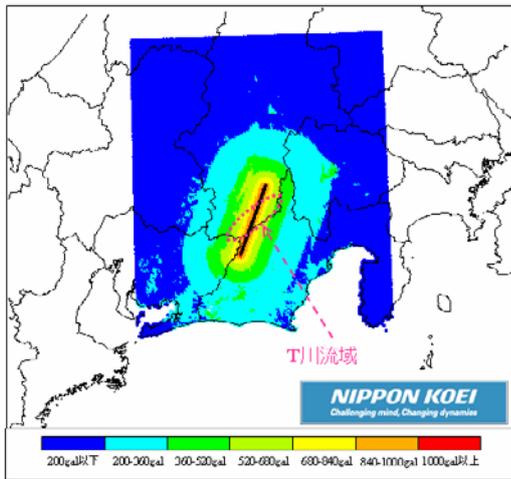


図-6 地表における推定加速度分布

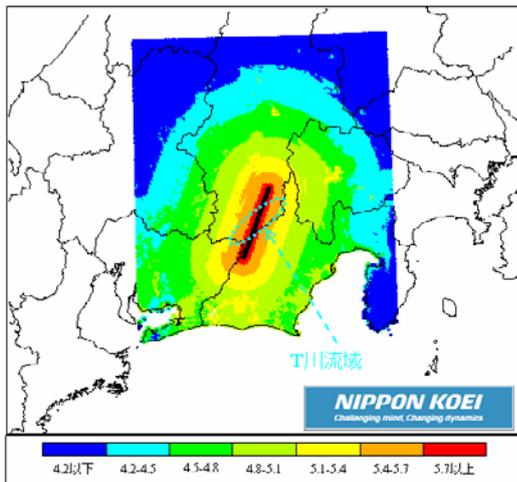


図-7 地表における推定計測震度分布

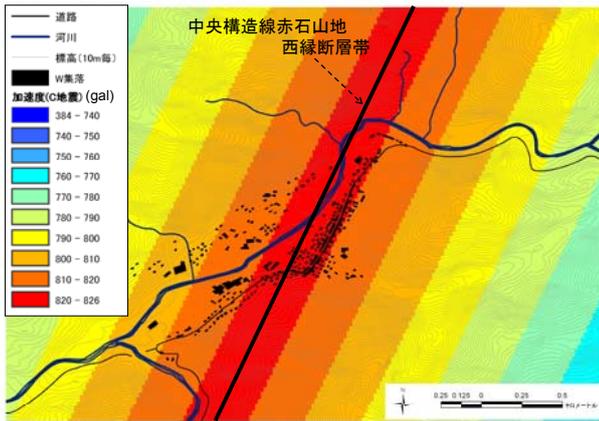
(4) 強震動分布(東海地震)

表-3 は中央構造線赤石山地西縁断層帯による強震動予測手法(経験的手法)と東海地震による強震動予測手法(半経験的手法)の特性を比較したものである。この表によると経験的手法は簡易的に対象地点の強震動を予測することができ実用的であるというメリットを有している。一方で、半経験的手法は、地震学の専門的知識が必要とされ煩雑であるものの、対象地点の強震動を詳細に予測することができ、地形的要因による地震動の増幅、地震動の方向性、水平方向だけでなく鉛直方向の地震動なども直接的に考慮可能となっている。図-9 は T 川流域内の W 集落周辺の強震動予測結果を両手法で比較したものである。この図より赤石山地西縁断層帯による強震動予測結果では、経験的手法を用いているためほぼ等間隔の強震動分布になっているのに対して、東海地震による強震動予測結果では、地震動のディレクティビティの効果や地形的増幅の影響を直接的に考慮されている半経験的手法を用いているため、まばらな強震動分布となっている。なお、半経験的手法としては統計的グリーン関数法⁸⁾を使用し、東海地震の断層モデルパラメータは内閣府中央防災会議による公開値⁹⁾を使用した。

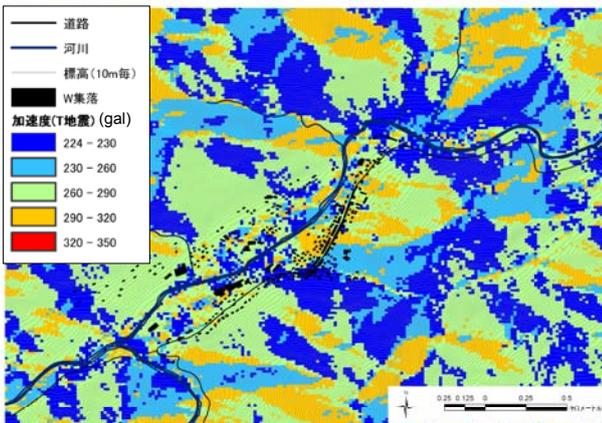
表-3 強震動予測手法の比較

項目	経験的手法	半経験的手法
実用性(簡易性)	○	△
詳細な地震動推定	×	○
地形的増幅	△	○
地震動の方向性	×	○
鉛直方向の強震動	△	○

○:可能, △:一部可能, ×:不可



(a) 経験的手法(中央構造線赤石山地西縁断層帯)



(b) 半経験的手法(東海地震)

図-9 地震動予測手法による強震動分布の比較(W集落)

4. 地震時の斜面崩壊危険度評価

(1) 評価手法

T川流域を対象として、中央構造線赤石山地西縁断層帯において想定地震が発生した場合の斜面崩壊危険箇所の絞込みを目的とし、広域的危険度評価を実施した。斜面崩壊危険度評価では標高、地質、そして前節で求めた任意位置における最大加速度値をそれぞれ入力し、無限延長斜面を仮定した安全率を15mグリッドごとに算出することで、斜面崩壊危険箇所の抽出を実施した。

土砂災害には大きく分けて地すべり、表層崩壊、土石流などが存在する。一般的に、現地調査や航空写真判読等を用いて、技術者の経験に基づき、これらの危険箇所を評価しているが、近年では客観的な評価を実施するために、統計的な手法やソフトコンピューティング技術が活用されている。広域を対象とした地震を誘因とする崩壊危険度評価には、①数量化Ⅱ類・判別分析等の統計的手法、②斜面安定安全率等の物理的手法の2つの手法がある。これらの手法の特徴を表-4にそれぞれ示す。当該流域では地震時における斜面崩壊履歴のデータが得られていないこと、および地形区分などを数値化することが可能であることを勘案して、物理的手法による評価を採用することとした。地

表-4 統計的手法と物理的手法

評価手法	特徴	
統計的手法	長所	数値以外のデータ(地形区分や断層の有無など)を評価に考慮することができる。
	短所	評価精度を向上させるために多くの斜面崩壊履歴を必要とする。(崩壊履歴の無い箇所では評価が困難)
物理的手法	長所	崩壊履歴が無くても危険度の大小を評価することができる。
	短所	数値以外のデータを数値に置き換えて評価する必要がある。(たとえば断層の有無を地盤物性値に反映させるなど)

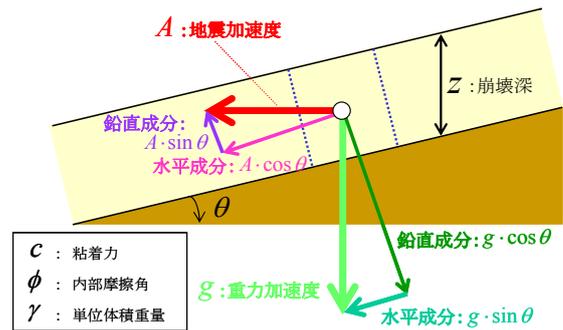


図-10 安全率算定諸量の概念図

震力を考慮した安全率の算出には無限延長斜面を仮定した安全率算定式である Matsukura (1984) の式(以下、松倉式とよぶ)を採用した¹⁰⁾。

$$F_s = \frac{c + \gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot (\cos \theta - A / g \cdot \sin \theta) \cdot \tan \phi}{\gamma \cdot z \cdot \cos \theta \cdot (\sin \theta + A / g \cdot \cos \theta)} \quad (6)$$

ここに、 F_s は安全率、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 γ は単位体積重量、 z は崩壊深、 θ は傾斜角度、 A は水平方向の最大加速度、 g は重力加速度である。図-10には松倉式における安全率算定諸量の概念図を示す。

(2) 使用データおよび地盤物性値の設定

危険度評価図作成にあたっては、①標高データ、②地質データ(調査地質構造概略図)、③図-9で示した想定地震における推定加速度分布データの3つのデータを使用した。標高データに関してはASTER DEM、すなわちTerra衛星ASTERセンサーによって観測され数値処理された15m間隔のグリッド標高データ(2004年11月観測)を採用した。図-11にこれらのデータに基づいて作成したT川流域における地形図を、図-12に地質図をそれぞれ示す。

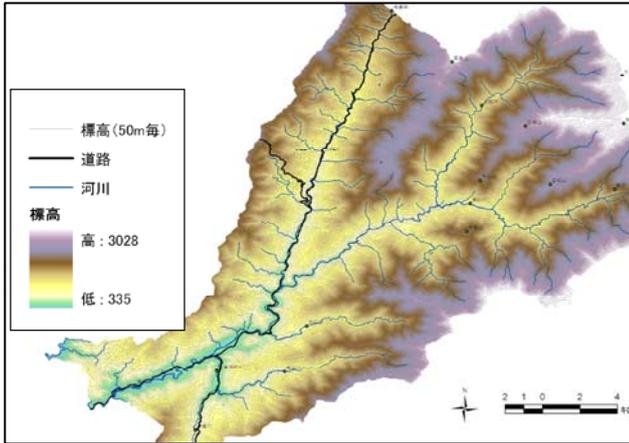


図-11 T川流域における地形図

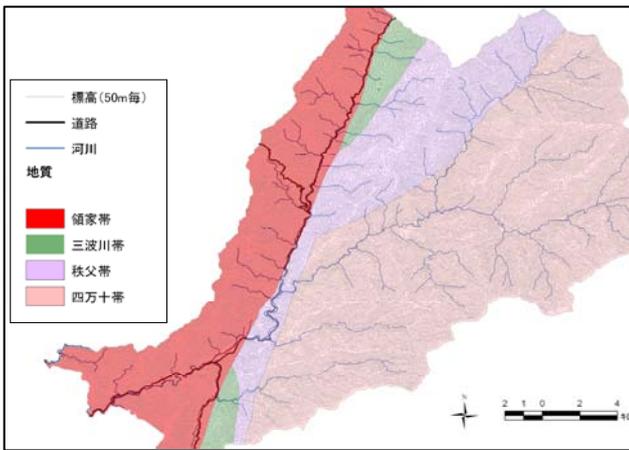


図-12 T川流域における地質図

松倉式において使用する地盤物性値は上述したように①崩壊深 z 、②粘着力 c 、③内部摩擦角 ϕ 、④単位体積重量 γ の4つであるが、これらの物性値は以下のとおり設定した。

崩壊深 z については地形によって大きく変わることが知られており、ここでは代表的な地形の特徴として傾斜に着目し、傾斜ごとに崩壊深を設定した。崩壊深 z の設定では、1998年福島県南部の豪雨災害および2000年鳥取県西部地震において花崗岩帯で発生した崩壊を参考に、傾斜角 θ が20(deg.)未満の場合崩壊深 z は2.0m、傾斜角 θ が20(deg.)以上の場合崩壊深 z は1.0mと設定した(たとえば松倉ら2002)¹¹⁾。

土の粘着力 c や内部摩擦角 ϕ は、地質とその風化具合によって決まるところが大きい。表-5に示すとおりT川流域で代表的な地質である領家帯(花崗岩)、三波川帯(片岩)、秩父帯(粘板岩)、四万十帯(砂岩・泥岩)ごとに土の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を設定した。花崗岩および粘板岩については、日本道路公団¹²⁾の花崗岩および粘板岩の一般値を考慮して設定し、片岩・砂岩・泥岩については日本道路公団¹³⁾の密実な砂質土を参考にしてそれぞれ設定した。なお、土の単位体積重量 γ に関しては、相対的な評価

を目的としていることを勘案して当該流域内で一様として $\gamma = 19\text{kN/m}^3$ とした。

表-5 地質区分と土の粘着力・内部摩擦角

地質区分	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (deg.)
領家帯(花崗岩)	10.0	37
三波川帯(片岩)	10.0	30
秩父帯(粘板岩)	10.0	35
四万十帯(砂岩・泥岩)	10.0	30

(3) 評価結果

図-13にW集落周辺の崩壊危険箇所評価図を示す。算出された安全率の低い箇所を危険度の高い箇所とする。色の分割は、表-6に示すとおり流域内の危険度上位1%を赤、5%を橙、30%を緑、60%を水色、それ以外を青色と設定した。T川流域には、複数の幹線道路(国道)および複数の集落が存在する。ここでは、最も大きな集落であるW集落を対象として、危険度評価結果ならびに保全対象について検討を行った事例を紹介する。

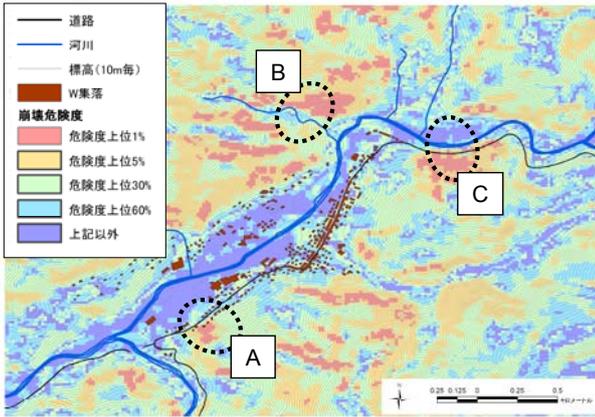
図-13より斜面崩壊危険箇所のうち、とくに保全対象(河川・国道等)に被害が及ぶと予測されるのは同図中A、B、Cの合計3地点である。

- A: W集落の南西端に位置し、建物がまばらになってきたところ。民家数軒に土砂被害が及ぶ可能性がある。
- B: T川右岸の民家がまばらなところ。斜面に隣接する民家数軒に土砂災害が及ぶ可能性がある。
- C: W集落を北へ抜けた少し先の国道。危険度の高い箇所が密集しており、土砂被害が道路にまで及ぶ可能性がある。

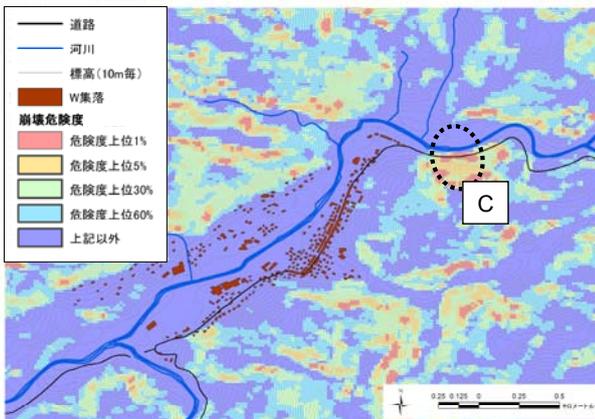
とくに上記C地点では、内陸直下型地震である中央構造線赤石山地西縁断層帯ならびに海溝型地震である東海地震ともに危険箇所として抽出されており、今後は図-1のフローに従い現地調査を実施し、より詳細な検討(動的FEM解析等)を行うことが望まれる。

表-6 斜面崩壊危険度評価図の色区分

色区分	危険度区分	面積占有率
赤	上位1%まで	1%
橙	上位5%まで	4%
緑	上位30%まで	25%
水色	上位60%まで	30%
青	上記以外	40%



(a) 中央構造線赤石山地西縁断層帯による地震



(b) 東海地震

図-13 T川流域W集落周辺の斜面崩壊危険度評価結果

5. まとめ

本研究では、T川流域内のW集落周辺を対象として想定地震時における斜面崩壊危険度評価を行った。その結果、W集落周辺では、民家数件および国道の一部に土砂被害が及ぶ可能性のあることが予測された。

今後は、現地調査を実施することで崩壊危険箇所の評価精度をさらに向上させていく予定である。

参考文献

- 1) たとえば坂本正夫：赤石山地の中央構造線の右横ずれ変位地形の発見とその意義、下伊那教育会、自然研究紀要、第5集、pp.87-97、1982。
- 2) たとえば宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧 [増補改訂版]、東京大学出版会、1996。
- 3) (独)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS
- 4) 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、日本建築学会論文報告集、第523号、pp.63-70、1999。
- 5) 松岡昌志、翠川三郎：国土地理情報とサイスミックマイクロゾーニング、第22回地盤震動シンポジウム資料集、pp.23-34、1994。

- 6) 内閣府：地震被害想定支援ツール、1999。
<http://www.bousai.go.jp/manual/tool/velocity.html>
- 7) 翠川三郎、藤本一雄、村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係、地域安全学会論文集、pp.51-56、1999。
- 8) 釜江克宏、入倉孝次郎、福知保長：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測、日本建築学会構造系論文報告集、第430号、pp.1-9、1991。
- 9) 内閣府中央防災会議：東海地震対策専門調査会公開資料、2003。
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tou-tai/index.html>
- 10) Y. Matsukura : Slope stability analysis for “Murose” debris-slide triggered by the 1949 Imaichi earthquake, Annual Report of the Institute of Geoscience, the University of Tsukuba, Vol.10, pp.63-65, 1984.
- 11) 松倉公憲、田中幸哉、若月強：韓国ソウル郊外の花崗岩と片麻岩山地における土層構造と表層崩壊形状に与える基盤岩質の影響、地学雑誌、Vol.111、No.3、pp.416-425、2002。
- 12) 日本道路公団：設計要領第2集、1995。
- 13) 日本道路公団：設計要領第1集、1995。