

東北太平洋沖地震による斜面崩壊発生に対する土壌水分状態の影響

堤大三・藤田正治・宮田秀介・里深好文⁽¹⁾・堀田紀文⁽²⁾

(1) 立命館大学理工学部

(2) 大学院生命環境科学研究科

要 旨

2011年3月11日、東北太平洋沖地震が発生、地震に伴い発生した津波により、東北太平洋側地域に甚大な被害をもたらした。また、福島県白河市葉ノ木平地区等では、人的な被害を伴う土砂災害が発生した。被害は決して小さなものばかりではなかったが、全体的に見ると、地震の規模や記録された地震動の加速度の大きさにもかかわらず、山地部における斜面崩壊等の土砂災害は少数であり、規模も小さかった。また、人的被害を伴う土砂災害は、福島・栃木県に限定されていた。この原因について検討するために、地震発生時の土壌水分状態と地震の加速度を考慮した静的な斜面安定解析を行い、土壌水分状態が斜面安定性に与える影響を検討した。その結果、地震発生時期の先行降雨が少なかったことで、斜面安定性は大きく低下しなかったことが判明、仮に夏季の降雨イベント後に地震が発生していたら、実際よりも大きな被害がもたらされたと結論付けられた。

キーワード: 斜面崩壊, 東北太平洋沖地震, 土壌水分状態, 静的斜面安定解析

1. はじめに

2011年3月11日14:46に、東北太平洋沖地震が発生し、地震とそれに伴って発生した津波によって、福島、宮城、岩手を中心とした東北太平洋側地域に甚大な被害をもたらした。筆者らは、福島県を中心に、人的な被害の発生した白河市葉ノ木平地区等の土砂災害の発生状況を調査した。ひとつひとつの現場を見ると、被害は決して小さなものばかりではなかったが、全体的に見ると、地震の規模や記録された地震動の加速度の大きさにもかかわらず、山地部における斜面崩壊等の土砂災害は少数であり、規模も小さかった。また、人的被害を伴うような土砂災害は、東南北部の福島県を中心とした地域に限定されていた (Fig. 1参照)。確かに、土砂災害の被害が集中した福島県白河市周辺で記録された地震動の最大加速度は1000 galを超す大きなものだったが、同等の加速度はそれ以外の地域でも記録されており、地震の加速度だけでは、斜面崩壊発生を説明できない。この原因について検討するために、地震発生時の土壌水分状態と地震の加速度を考慮した静的な斜面安定解析を行い、土壌水分状態の違いによって斜面の安定

性がどのように影響を受けるかを検討した。

2. 地震の概要

東北太平洋沖地震の震源は、北緯38.10, 東経142.86の太平洋に位置し、マグニチュードは9.0であった (防災科学技術研究所 <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)。この地震によって、関東から東北北部の広い範囲に激しい揺れがもたらされた。Fig. 1に震源の位置と、各地の観測点で記録された地震の最大加速度の分布を示す。この図から、非常に大きな加速度が福島県から宮城県、岩手県の南部にかかる太平洋側の地域で記録されていることが確認できる。最大の加速度は2933 galであり、宮城県築館観測点で記録されている。地震による土砂災害が集中した福島県白河市では、最大加速度1425 galが記録されている。

3. 福島県内で発生した土砂災害

地震によって、多数の土砂の崩落や斜面崩壊が発生したことが報告されているが、津波の被害と比較

すると、地震によって発生した土砂災害は小規模であり、範囲も限定されている。確かに、谷埋め盛土等の住宅造成地の斜面崩壊や、小規模な崖からの土砂崩落等は広範囲に発生したようであるが、自然斜面の崩壊で、人的被害を伴うような比較的規模の大きいものは、福島県南部や栃木県北東部に限定されている。筆者らは、これらの斜面崩壊発生地において現地調査を行い、地震によって発生した斜面崩壊の特徴等を検討した。(37.14N, 140.22, Fig. 2)

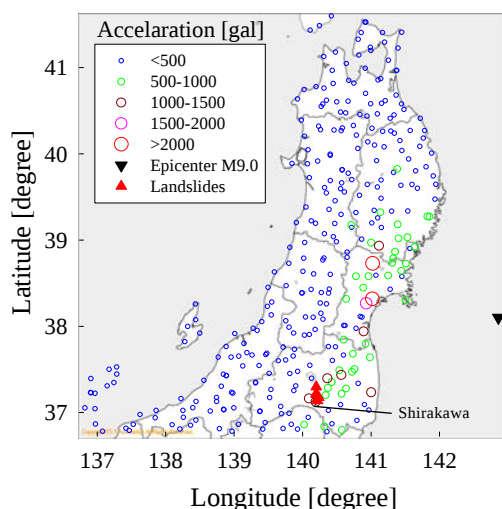


Fig. 1 Observed maximum seismic acceleration by the earthquake on 11th of March, 2011 (Data is obtained from National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan)

3.1 白河市葉ノ木平地区

斜面崩壊の発生地点は、北緯37.14，東経140.22の住宅街の裏山である (Fig. 2a)。崩壊土砂によって、住宅10棟が全壊し、13名の住民が死亡した。崩壊は、大きく二つに分かれており、上部崩壊は馬蹄形をしており北方向に移動し、下部の崩壊は東北方向に流下した。崩壊の幅、長さはそれぞれおよそ70 m, 100 mである。崩壊深は場所によって異なり、計測されていないが、上部の崩壊でおよそ5m前後である。斜面の傾斜は約22°である。崩壊地の斜面の植生はスギ林であった。近隣住民の目撃証言によると、本震発生時にスギの立木が激しく揺れだし、崩壊が発生し、数秒のうちに崩壊土砂が斜面脚部の住宅地に到着したとのことである。崩壊跡地においては、粘土上の基岩が露出しており、それが土層下部の不透水層をなし、同時に滑り面となっていたと思われる (Fig. 2b)。住宅地を押しつぶした崩壊土砂の残骸の一部は、塊のまま残存しており、流動化せずに流下したことを示している (Fig. 2c)。

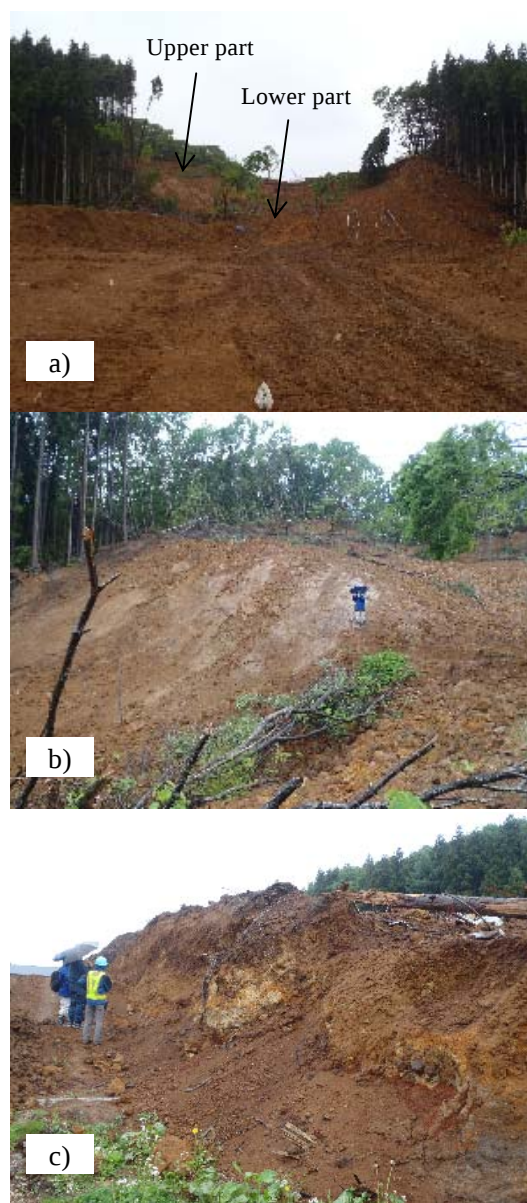


Fig. 2 Landslide at Hanokidaira site; a) landslide scar, b) exposed clayey bedrock, c) sliding mass

3.2 白河市岡ノ内地区

斜面崩壊の発生地点は、北緯37.21，東経140.20の道路わきの斜面である (Fig. 3)。崩壊土砂によって住宅1棟が全壊し、その住民1名が死亡した。崩壊斜面は南向きで、馬蹄形の形状を呈していた。崩壊幅と長さはそれぞれおよそ50 mと100 mであり、斜面傾斜角は約18°である。植生はやはりスギ林であり、斜面最下部において林道が横切っているため、斜面の安定性を低下させていた可能性がある (Fig. 3b)。

3.3 白河市北ノ入地区

斜面崩壊の発生地点は、北緯37.17，東経140.24である (Fig. 4)。この斜面崩壊による物的、人的被害



Fig. 3 Landslide at Okanouchi site; a) landslide scar, b) a forestry road lay at the lowermost part of the slope

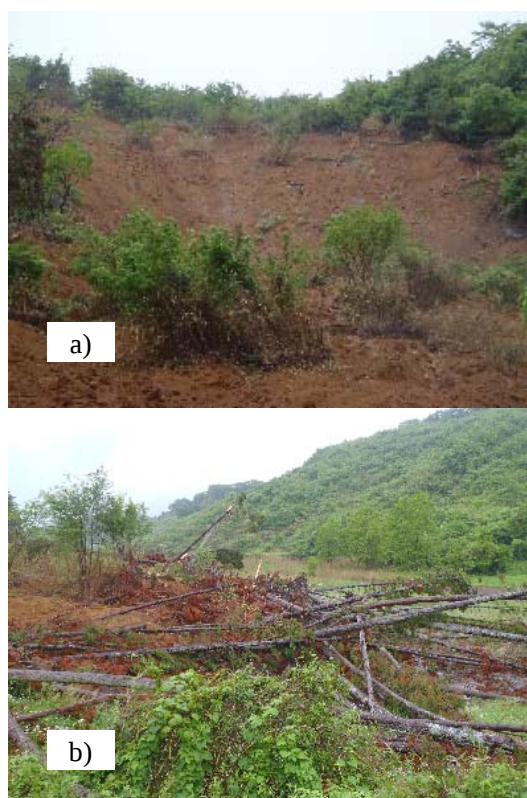


Fig. 4 Landslide at Kitanoiri site; a) landslide scar, b) deposition of sliding mass with many wood debris at a paddy field

は発生していない。崩壊土砂は、流木を多量に含み、斜面脚部の水田に流入していた（Fig. 4b）。斜面向きは南向きであった。崩壊幅と長さはそれぞれおよそ40 mと200 m、斜面傾斜角は約 15° であった。崩壊深は3 m以下である。崩壊斜面における植生はスギ人工林であったが、周囲は広葉樹の自然林に囲まれている。崩壊跡地の上部には凹型を呈した基岩面が露出しており、この基岩地形が地下水の集中を促して、斜面安定性低下の一因となった可能性がある。崩壊跡地上部にはほとんど土砂土砂は残されておらず、流動性の高さを示している。

4. 地震による斜面崩壊に関する数値実験

地震発生時における斜面安定性変化に対して、土壌水分状態が及ぼした影響を検討するため、降雨浸透解析により土壌水分状態を再現し、それらいくつかの水分状態を想定のもとで静的な斜面安定解析を行う数値実験を実施した。対象とした斜面は特定の実斜面ではなく、白河市で発生した斜面崩壊の代表的なものを仮想的に作成した（Fig. 5）。この斜面に対し、白河市で実測された地震発生前40日間の降雨（Fig. 6）を与えてx-z二次元の降雨浸透解析を行い、地震時の土壌水分状態を計算した。その状態と比較

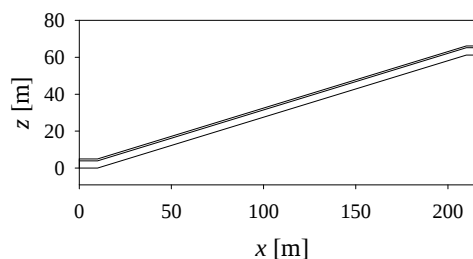


Fig. 5 Hypothetical sloped soil domain assumed for water infiltration and slope stability analysis.

するために、その後の降雨も継続して与え（Fig. 6）、梅雨最中の7月1日と、2011年新潟・福島豪雨災害直後の8月1日の土壌水分状態を計算した。これら3つの異なる土壌水分条件の斜面に対し、白河市で観測された地震動の加速度（Fig. 7）を水平方向と鉛直方向の2成分に分割して与える静的な斜面安定解析（簡易Jambu法）を行い、最小となる安全率 F_s を算出した。加速度の入力においては、8方位に面した斜面を仮定し、それに対応する水平方向の加速度を与え、斜面安定性の方位依存性についても検討を行った。斜面安定解析においては、DP法を用いて、最小安全率となる場合の滑り面形状を算出し、崩壊形状の比較も

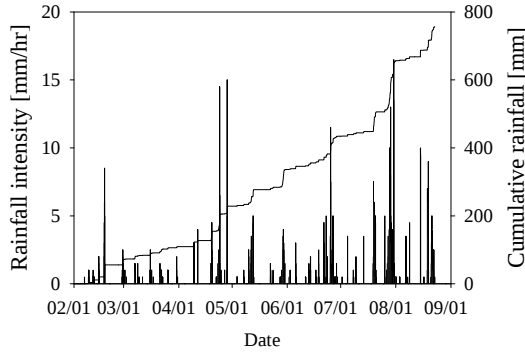


Fig. 6 Observed rainfall at Shirakawa observatory, Fukushima Prefecture, used for rainwater infiltration analysis

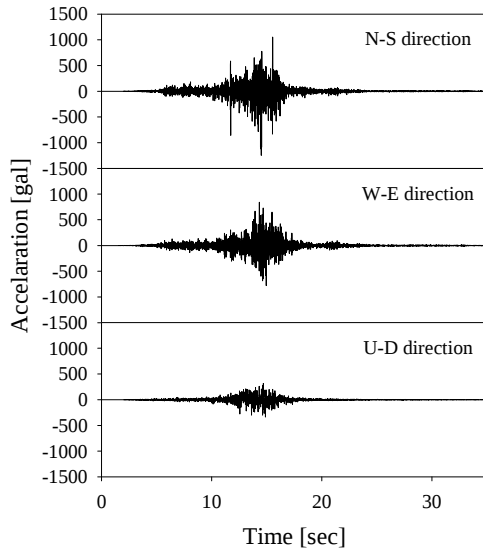


Fig. 7 Observed seismic acceleration at Shirakawa observatory, Fukushima Prefecture, used for slope stability analysis

行った。以下に、降雨浸透解析と斜面安定解析の詳細を示す。

4.1 降雨浸透解析

斜面土層内の降雨浸透は、以下に示す Richards 式を x - z 斜面を対象に有限要素法によって解くことで求めた。

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [K(\psi) \nabla (\psi + z)] \quad (1)$$

ここで、 $C(\psi)$ は比水分容量、 $K(\psi)$ は透水係数であり、不飽和条件下 ($\psi < 0$) では、以下に示す対数正規モデルを用いた (Kosugi, 1996)。

$$C(\psi) = \frac{\theta_s - \theta_r}{\sqrt{2\pi}\sigma(-\psi)} \exp\left\{-\frac{[\ln(\psi/\psi_m)]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (2)$$

$$K(\psi) = K_s \left[Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma}\right) \right]^{1/2} \left[Q\left(\frac{\ln(\psi/\psi_m)}{\sigma}\right) + \sigma \right]^2 \quad (3)$$

ここで、 θ_s [m^3/m^3] は飽和体積含水率、 θ_r [m^3/m^3] は残留体積含水率、 ψ_m [m] は空隙径分布のメジアンに対応する圧力水頭、 σ は空隙径分布の分散を表す無次元パラメータ K_s [m/s] は飽和透水係数である。関数 $Q(x)$ 残余対数分布を表わしており以下の式で表わされる。

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (4)$$

飽和条件下 ($\psi \geq 0$) では、 $K(\psi) = K_s$ 、 $C(\psi) = 0.0$ である。

4.2 静的な斜面安定解析

降雨浸透解析によって得られた斜面土層内部の圧力水頭分布を静的な斜面安定解析の入力値として用いた。安定解析には任意の滑り面形状に対応可能な簡易 Jumbu 法を採用した。この手法で算出される安全率は以下の式で表わされる。

$$F_s = \frac{\sum \{c'_i l_i \cos a_i + \{(1 + k_v) W_i - u_i l_i \cos a_i\} \tan \phi'_i\} / m_a}{\sum \{(1 + k_v) W_i \tan a_i + k_H W_i\}} \quad (5)$$

$$m_a = \cos^2 a_i (1 + \tan a_i \tan \phi'_i / F_s) \quad (6)$$

ここで下付き添え字 i は鉛直に分割された土層スライス番号、 c'_i と ϕ'_i は土層の粘着力と内部摩擦角、 W_i はスライスの重さ、 a_i と l_i はスライス内を通過する滑り面の傾斜と長さ、 u_i は滑り面における圧力水頭を、それぞれ表わす。また、 k_v と k_H は鉛直方向と水平方向の地震動の加速度であり、 z 方向では上向きが正、 x 方向では斜面方向が正である。

既往の研究 (久保田ら, 1991; Yamagami and Ueta, 1988) により、ダイナミックプログラミング法 (DP 法) を用いて、安全率 F_s が最小となる滑り面を探索する方法が開発されており、ここではその手法を用いた。

4.3 計算条件

(1) 降雨浸透解析

計算対象とした斜面は、仮想的な斜面であり、Fig. 5 に表わすように、斜面長 200 m、土層深 5 m、傾斜角 17° である。斜面の上端、下端にそれぞれ 10 m の水平部が接続している。5 m の土層深の内、表面から 1 m

Table 1 Parameters of hydraulic properties of soils which were used for the water infiltration analysis

Parameters	Surface layer	Deeper layer
θ_s [m ³ /m ³]	0.645	0.595
θ_r [m ³ /m ³]	0.398	0.441
σ [-]	1.19	1.36
ψ_m [cmH ₂ O]	- 43.9	- 595
K_s [cm/sec]	0.02	0.0033

は、表面土層とし、それより深い土層と区別して、異なる水理特性を与えている。表層土には、一般的な森林土層で得られた水理特性を与え、以深の土層には、大分県の斜面崩壊現場で得られた水理特性を暫定値として与えた（Table 1参照）。

斜面上端と底面には、フラックスが無い境界条件を、斜面下流端にはシーページフェイス境界条件与えた。比較的乾燥した仮想条件に、総雨量120 mmのsinカーブ状の降雨を24時間かけて与え、その後24時間自然排水させた状態を土層内の圧力水頭の初期条件とした。降雨条件は、福島県の白河観測所で記録された2011年2月から8月までの降雨を入力した（Fig. 6）。降雨記録から、3月11日の地震前には降雨は少ししか記録されていない。6月から雨季が始まり数ヶ月間続いている。また、7月の終わりには総雨量145 mmの連続降雨が記録されている（2011年新潟・福島豪雨災害による降雨）。次に示す斜面安定解析の入力条件としては、1）地震発生時の3月11日、2）梅雨きの7月1日、3）降雨イベント直後の8月1日を採用した。

(2) 斜面安定解析

斜面安定解析では、白河観測点で記録された水平方向と鉛直方向の地震動の加速度を入力値として用いた（Fig. 7）。水平方向の加速度は、南北と東西の2方向に分離して記録されているため、任意の方角に面した斜面における水平方向の加速度は、以下の式によって求めた。

$$k_H(\theta_D) = k_{N-S} \cos \theta_D + k_{E-W} \sin \theta_D \quad (9)$$

ここで、 θ_D は北から時計回りで示す斜面向き、 $k_H(\theta_D)$ θ_D 方向の斜面における水平地震動の加速度、 k_{N-S} と k_{E-W} は、それぞれ観測された南北方向と東西方向の地震動の加速度である。ここでは、東西南北と北東、南東、南西、北西の8方向に面した斜面を想定して、斜面安定解析を行った。土層の内部摩擦角 ϕ と粘着力 c はそれぞれ、37.5°と0.0kgf/m²とした。

4. 4数値実験の結果

浸透解析により得られた斜面土層内の圧力水頭の

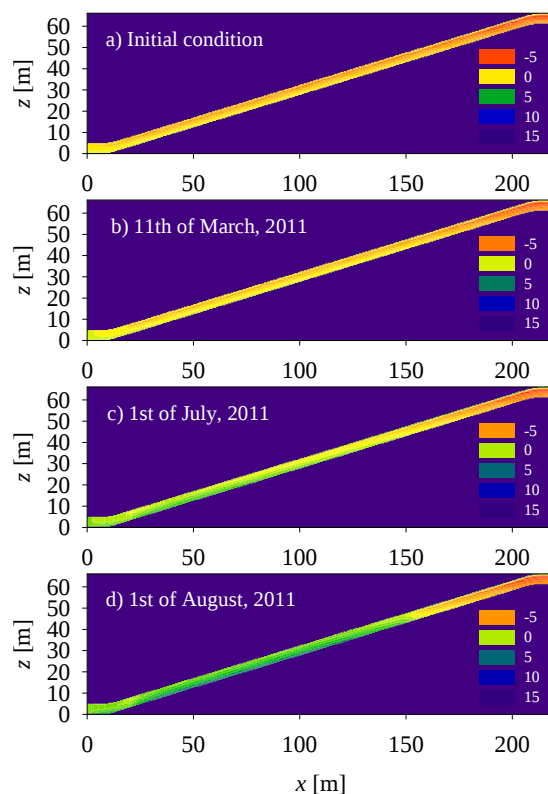


Fig. 8 Simulated distribution of pore water pressure; a) initial condition, b) 11th of March, c) 1st of July, and d) 1st of August, 2011

分布を初期条件の分布と共にFig. 8に示す。冬季の終わりの時期であるために先行降雨がほとんどなかったことから、地震が発生した3月11日時点における斜面土層内の水分状態は乾燥状態であることがわかる。しかし、梅雨期の7月1日の土壌水分状態は湿潤となり、さらに降雨イベント後の8月1日にはさらに湿潤状態になり、地下水面が発達していることが示されている。

対象とした斜面において、3月11日の土壌水分状態を用いて行った斜面安定解析の結果を北東向き斜面を例として、Fig. 9に示す。地震前の斜面安全率 F_s はおよそ2.5程度を示しているが、地震発生後に地震動の変化と共に安全率が振動し始め、一時的に1.0を下回ることが示されている。計算された斜面安全率の最小値は0.58である。安全率低下の斜面方向への依存度を見るため、8方位の斜面を対象とした解析から得られた最小安全率をFig. 10に示す。ここで、斜面安定性を相対的に表わすため、北向き斜面の最小安全率を用いて、標準化している。この結果から、全方位の内、南、南西および北向きの斜面安全率の低下が顕著であり、西、北西および北東方向の斜面の安全性は比較的減少しにくいことが示された。この傾向は、実際に崩壊が発生した岡ノ内地区と北ノ入

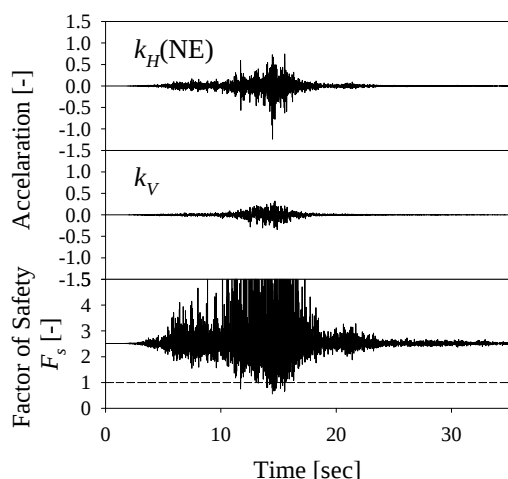


Fig. 9 Simulated temporal change of the factor of safety for the north-east facing slope (45°) with acceleration data

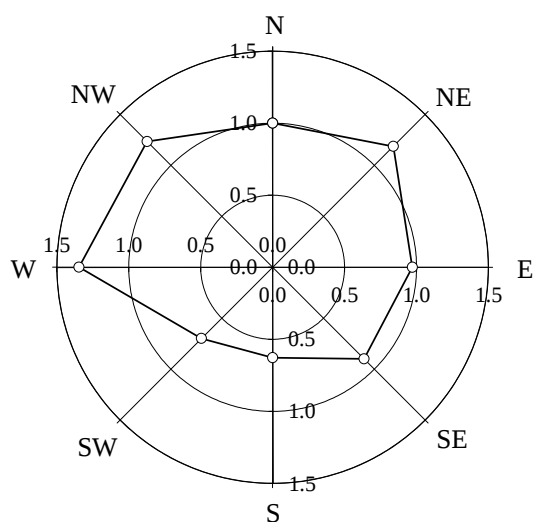


Fig. 10 Dependence of slope instability on slope direction, where minimum factor of stability of north facing slope adjusted to be 1.0

地区の斜面方向が南向きであったことと一致している。また、葉ノ木平地区の斜面崩壊では、斜面崩壊は最終的に北東に向かって流動したが、崩壊斜面の上部は北向きであったことも、解析結果とよく対応している。

土壌水分状態が斜面安定性に及ぼす影響を調査するため、3月11日、7月1日、8月1日の時点における土壌水分状態を条件として、実施した斜面安定解析結果の内南向き斜面のものをFig. 11に示す。地震発生前の安全率は、それぞれ2.5、2.2、1.6であり、地震動の影響が無い状態において、土壌水分の違いが斜面安定性に影響を与えていることが分かる。地震発

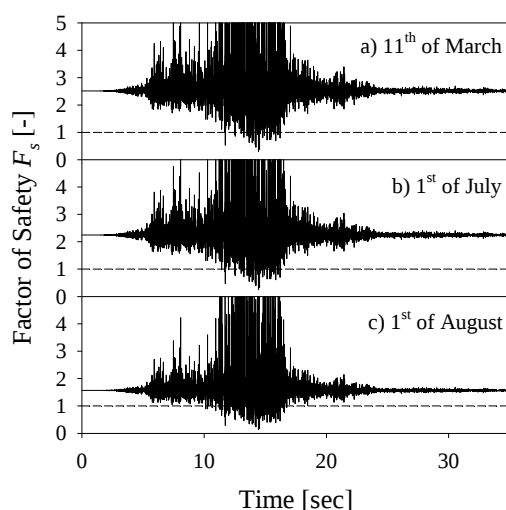


Fig. 11 Simulated temporal change of the factor of safety for the south facing slope (180°), on a) 11th of March, b) 1st of July, and c) 1st of August, 2011

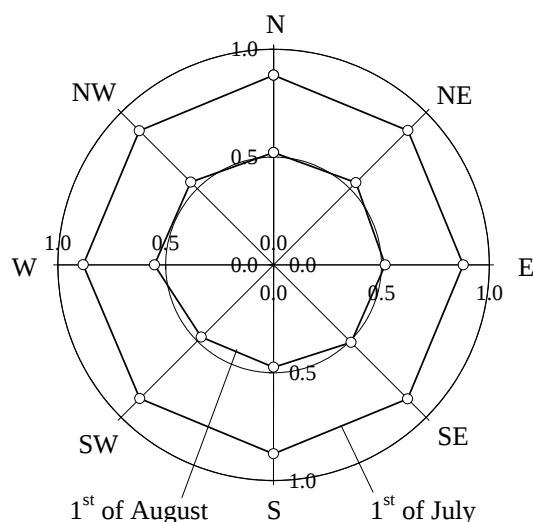


Fig. 12 Dependence of slope instability on soil moisture conditions, where minimum factor of stability on 11th of March are adjusted to be 1.0

生後は、3月11日比べ、7月1日、8月1日の結果では、より頻繁に安全率が1.0を下回っている。7月1日と8月1日の各方向の斜面に対する安定解析結果を、Fig. 10と同様に、3月11日の北側斜面の最小安全率によって標準化してFig. 12に示す。この結果から、全ての方位を向いた斜面で、7月1日と8月1日の安全率が低下し、特に降雨イベント後の8月1日の場合は、3月11日のおよそ1/2にまで低下している。

3月11日、7月1日、8月1日の土壌水分状態で行った斜面安定解析において最小安全率が算出されたタイ

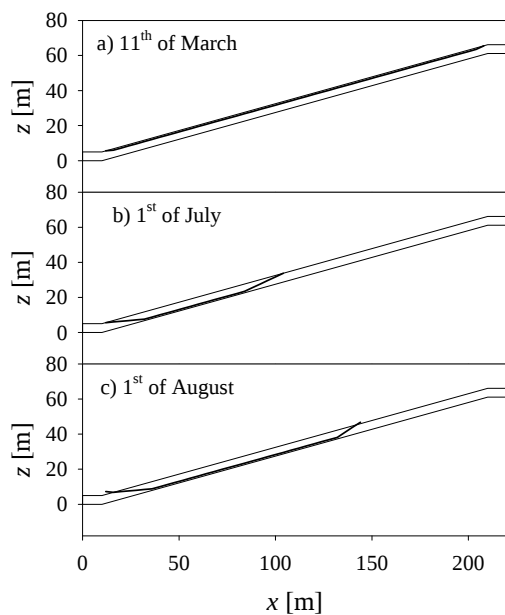


Fig. 13 Simulated slip surface of the landslides for the south facing slope (180°), on a) 11th of March, b) 1st of July, and c) 1st of August, 2011

ミングでの滑り面形状を比較し、その形状をFig. 13に示す。図からは、3月11日の崩壊が、表面土層を通る非常に薄い形状を呈しているのに対し、7月1日、8月1日の解析では、滑り面が深部に達するものであり、特に8月1日の場合は、斜面長の半分以上が基盤面まで達する滑り面形状を呈し大規模な崩壊形状を示した。

以上の解析結果は、地震発生時の斜面土層内部の水分状態が、斜面安定性に大きく影響を及ぼし、梅雨期や降雨イベントの後に地震が派生した場合、比較的乾燥状態であった3月11日の斜面安定性と比較して、安全性が低下し、場合によっては半分程度まで低下することが分かった。

5. おわりに

2011年3月11日発生した東北太平洋沖地震によって発生した斜面崩壊の現地調査を行い、その特性を検討した。その結果から、地震の強さに関わらず、発生した斜面崩壊の規模が小さく、発生した箇所も福島県白河市を中心とした比較的狭い範囲に限定されていたことが示された。また、発生した斜面崩壊跡地では、基岩形状の特徴的な集水地形等がみられ、土壌水分が斜面崩壊発生に関与した形跡がみられた。

これらのことから、地震発生時に斜面土層内の土壌水分状態が斜面安定性に対して与える影響度を検

討するため、降雨浸透解析と斜面安定解析を行い、相対的な安全率の変化を比較した。その結果、地震が発生した3月11日の斜面土層内の土壌水分状態は、それまでの先行降雨の少なさから比較的乾燥状態であった。それに対して梅雨期の7月1日や降雨イベント後の8月1日の時点における土壌水分状態は、3月11日に比較して湿潤となっており、その結果、それらのタイミングで3月11日と同じ地震が起こった場合、安全率の低下が顕著となり、発生した崩壊の規模も深部に達する大規模なものとなる傾向を示した。以上のことから、地震時の斜面土層内の土壌水分状態は、斜面安定性に大きく影響を与え、東北太平洋沖地震が発生した3月11日は先行降雨が少なかったため、地震の規模が大きかったにも関わらず、比較的斜面崩壊による土砂災害が規模、範囲ともに小さかったことを説明するものである。また、斜面崩壊が南部の福島県や栃木県に限定して発生したことには、雪解け時期の違いによって、南部では雪解けが進み、降雨の代わりに融雪水が浸透して比較的土壌水分状態が湿潤になっていたが、北部では雪解けが進んでいなかったため乾燥状態であったことが理由となる可能性があると考えられる。

3月11日に発生した地震によって、沿岸部では甚大な津波災害が発生したが、実際には内陸部の幹線道路を利用して南北の交通を確保し、そこから櫛の歯状に沿岸部にアクセスして救助活動や救援物資の補給活動が可能であった。しかし、ここで検討したように、もし仮に地震が3月11日ではなく、梅雨期や降雨イベントの後のような土壌水分状態が湿潤な時期に発生していれば、より大規模な土砂災害が広範囲に発生した可能性があり、その場合、内陸部の幹線道路も大きな被害を受けた可能性が示唆され、土砂災害だけでなく、沿岸部の津波災害の2次被害が拡大していた恐れがある。今後、発生が懸念されている、東海・東南海・南海地震が梅雨期や降雨イベント後に発生した場合を想定してその対策に貢献できるような情報提供が望まれる。

参考文献

- 久保田哲也・中村浩之（1991）：臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法，地すべり，27（4）
- Kosugi, K. (1996): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, Water Resources Research, 32, pp. 2697-2703.
- Yamagami, T., Ueta, Y. (1988) Search for critical slip lines in finite element stress fields by dynamic programming, Proc. 6th International Conference on

Effect of Soil Moisture on Landslide Occurrences by the Earthquake - Tohoku Pacific Ocean Earthquake

Daizo TSUTSUMI, Masaharu FUJITA, Shusuke MIYATA,
Yoshifumi SATOFUKA⁽¹⁾ and Norifumi HOTTA⁽²⁾

(1) College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Japan

(2) Graduate School of Life and Environmental Science, Tsukuba University, Japan

Synopsis

The pacific side of Tohoku region, Japan was suffered by a devastating earthquake on 11th March, 2011. Several hillside slopes were collapsed due to the earthquake in inland region, and a number of people were also killed by the sediment related disaster. Contrasting with the devastating earthquake which suffered wide area, the landslides were limited in its number, area, and size. To understand the reasons of this limited landslide occurrences, distribution of the maximum earthquake acceleration was investigated. The effects of the slope topographical properties such as slope gradient, direction, and bedrock geomorphology were also investigated by the field observation. Numerical experiments were also conducted to demonstrate the effects of the slope topographical properties and soil moisture conditions on the landslide occurrences. From the field investigations and numerical simulations, it is elucidated that the reasons of the limited landslide occurrences are 1) limited suffering area of strong acceleration by the earthquake and 2) relatively dry soil moisture condition of slopes at the earthquake occurrence.

Keywords: landslide, Tohoku-Pacific Ocean Earthquake, soil moisture condition, static analysis of slope stability