

気候変動脆弱地域における複合地盤災害リスクの事例検討

Case study for risk assessment of complex geodisasters in climate change vulnerable areas

北海道大学大学院工学研究院 ○フェロー 石川達也 (Tatsuya Ishikawa)

1. はじめに

近年の気候変動により、毎年のように国内各地で観測記録を更新する豪雨が堤防決壊による河川氾濫や大規模な斜面崩壊・土石流などを引き起こしているが、国内他地域と比較して従来降水量が少なかった北海道においても頻繁に豪雨が観測され、広域激甚土砂災害の危険性が高まっている。例えば、平成28年8月北海道豪雨は、地盤工学や水工水文学に携わる研究者・技術者が想定していない形態の衝撃的な土砂災害であった。また、札幌近郊で平成24、25年の春に連続発生した大規模土砂災害は、地球温暖化に起因する融雪期の急速な気温上昇や大雨が引き起こしたと考えられている。さらに、平成30年北海道胆振東部地震では、大規模斜面崩壊や宅地液状化被害などの特徴的な地盤災害が発生しているが、地震発生前の降水量が平年より多かったことや地震前日の台風通過により地下水位が通常よりも高い状態にあったことがその要因として報告されている¹⁾。

国土交通省が作成した今世紀末の最大雨量の予測では、北海道の多くの地域では1.3倍超の降水量が予想されており、今後北海道のような高緯度地域の方が本州など温暖地域の多くよりも気候変動の影響を受け易い。その一方で、北海道は、これまで台風や集中豪雨などの影響が小さく降雨による土砂災害が国内の温暖地域（多雨地域）と比較して少なかったことから、雨慣れ（降雨に対する土砂災害の慣れ）していない地盤が多い。このため、北海道は、多雨地域と比較して土砂災害の限界雨量が小さく、同程度の豪雨が発生した場合には土砂災害が生じ易い。また、被災規模の拡大・深刻化が懸念される。

本稿では、気候変動災害脆弱地域である北海道において近年発生した上述の3つの甚大な地盤災害の事例検討を通して、気象変動に伴い発災が予想される新たな形態の複合地盤災害を、北海道の地域性を考慮して体系化するとともに、そのリスク評価や防災・減災対策に必要な視点を明らかにして、今後の学術研究・技術開発の方向性について検討する。

2. 平成24、25年融雪期土砂災害

2.1 被災事例の検証と教訓

北海道における近年の融雪期の大規模土砂災害事例として、国道230号中山峠で平成24、25年の融雪期に連続発生した斜面崩壊が挙げられる。国道230号中山峠災害対策検討委員会資料²⁾によると、平成24年5月4日に、道路延長約40mの範囲で盛土法面が崩壊し（崩壊土砂量：約13,000m³）、地すべりによる路面変状も観測されたことから20日間の全面通行止めとなった。翌平成25年4月7日には、前年より札幌側で、道路延長

約50mに渡り盛土法面が崩壊し（崩壊土砂は約11,000m³）、6日間全面通行止めとなった。災害箇所への最寄りの気象データ（無意根TM）をもとに、融雪期（3月～6月）において急激に融雪が起きた日あるいは大雨が降った日の日換算雨量（融雪水量+日雨量）を算出し、災害発生過去10年間について比較したところ、H24年被災時、H25年被災時がそれぞれ過去10年間で1、2番目であったと報告されている。この結果、大量の融雪水・雨水の地盤浸透が斜面の不安定化をもたらしたと考えられており、融雪期の道路斜面の維持管理、防災・減災対策にあたっては融雪水の影響を考慮する必要性が広く認識されることになった。しかし、北海道土砂災害警戒情報システムの対象区域は、主に「土砂災害が発生した場合に住民の生命または身体に危害が生ずる恐れがあると認められる区域（住居地域）」であり、避難行動の必要のない民家のない山間部・山沿いなど山地は、その対象地域から外れていることが多い。また、対象としている土砂災害は、豪雨に起因する土石流、急傾斜地の崩壊、地すべりであるが、土壌雨量指数（SWI）の算出に用いられるタンクモデルは全国一律であり、積雪寒冷地で発生する融雪期の斜面崩壊など土砂災害の地域性を考慮したものではない。このため、山地を含む北海道全域で当該システムを年間通して活用するには、その適用性を充分検証する必要がある。

2.2 今後の被災リスクの事例研究

一般に、土砂災害の発生を予見するために、土壌雨量指数・凍結指数等のマクロ指標が広域災害リスクを簡易に判定する拠り所として現在広く用いられている。しかし、異常気象や気候変動により融雪期の豪雨・急激な地温上昇などの外力が過去の観測範囲を超えて増大し、湿潤や融雪など複数の要因がもたらす複合的な地盤災害リスクを広域で予測する場合、統計的手法による土砂災害発生危険度基準線（CL：Critical Line）の設定は観測事例が無いことから難しく、従来の経験的なリスク評価手法に頼るのみでは十分対応できない。この問題の解決のために、予測される気候変動下での地盤の脆弱化や斜面崩壊等の数値シミュレーションを行い、その結果に基づき、土砂災害発生危険度基準線を設定し、融雪量・降雨量を考慮した積雪寒冷地の土砂災害発生危険度評価手法を構築することが検討されている³⁾。例えば、図-1は、平成25年の融雪期に中山峠で発生した斜面崩壊事例について、北海道土砂災害警戒情報システムのCLと前述の方法³⁾により求まる新しいCL、および土壌雨量指数（SWI）と60分間積算雨量によるスネークライン（SL）を融雪量考慮の有無それぞれの場合について描

画したものである。地形・地質・降水条件に応じて CL を設定し融雪を考慮して SL を算出した場合、北海道土砂災害警戒情報システムの予測対象外の山地の融雪期斜面崩壊を精度に予測可能となった。この方法によれば、気候変動に伴って降雨形態の変化や平均気温の上昇など外力が過去の観測範囲を超えて増大する場合でも、数値解析的観点から被災履歴の少ない潜在的な土砂災害のリスク評価の実施や、降雨指標や凍結指標など広域的な評価指標の地域性を考慮した設定が可能となる。一例として、力学的ダウンスケーリング手法に基づき札幌近郊の70年後の気象条件を予測し、この土砂災害リスク評価手法を用いて気候変動が積雪寒冷地斜面の安定性に及ぼす影響を定量的に評価した結果を図-2に示す。気候変動の影響を受け札幌近郊の年間の土砂災害リスクは今後増大が予想される結果となったが、同手法は、北海道のような気候変動災害脆弱地域に対して近未来の地盤防災・減災対策を考える上で有効な手法であるといえる。

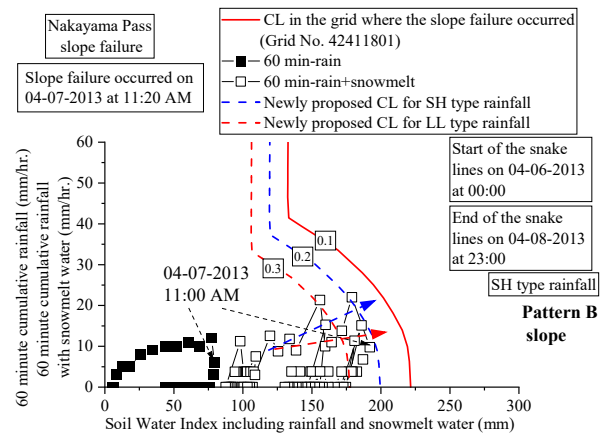


図-1 国道230号中山峠の斜面崩壊安定性評価例

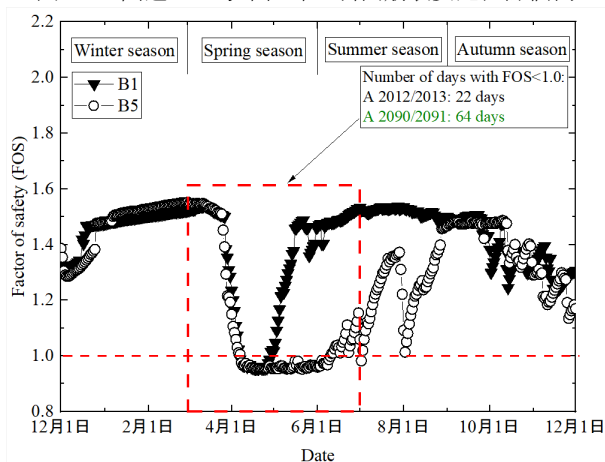


図-2 近未来の中山峠の斜面崩壊安定性評価例

3. 平成28年8月北海道豪雨災害

3.1 被災事例の検証と教訓

平成28年8月17日から8月23日の1週間に、過去に例を見ないほど複数の台風(7号、11号、9号の3個)が続々と北海道に上陸し、北海道東部を中心に降った異常な量の雨により河川の氾濫や土砂災害が発生した。また、8月29日から前線と台風10号の接近による大

雨で十勝川水系や石狩川水系・空知川上流で堤防の決壊や河川の氾濫、日高山脈東側での道路や橋梁の流失などが相次ぎ、甚大な災害をもたらした。(公社)地盤工学会「平成28年8月北海道豪雨による地盤災害調査団」の最終報告書⁴⁾では、北海道の地域性を考慮した今後の地盤工学研究や地盤防災行政を考える上で重要な技術的検討項目として、①雨慣れ・気象慣れしていない地盤の扱い、②従来の想定を超える豪雨対策の検討、③従来と異なる問題土・崩壊形態の顕在化の可能性、④豪雨時に地盤内に浸透しない表面流の扱い、⑤河道の蛇行・流路変動による土構造物の被害、の5点が挙げられている。また、それを踏まえた防災・減災対策の実現に向け今後検討すべき課題として、①従来の想定を超える豪雨に対する潜在的な地盤災害リスクへの対処、②豪雨時に地盤内に浸透しない表流水の対処法の構築、③河川の蛇行・流路変動を想定した土構造物の防災・減災対策の検討、④災害の地域性(特殊土地盤、雨慣れしていない地盤)を考慮した発災評価指標の提案、を提起している。

3.2 今後の被災リスクの事例研究

平成28年8月北海道豪雨では、直前の3つの台風により高い含水状態であった地盤に浸透できなかった大量の表流水が斜面崩壊などの地盤災害を誘発した可能性が指摘されている。図-3は、平成28年北海道豪雨で多数の斜面崩壊により甚大な被害を受けた国道274号日勝峠について、北海道土砂災害警戒情報システムのCLとSLの関係を示したものである。図中のSLは土砂災害警戒情報の発表基準に相当するCLを大きく超過しており、土砂災害の発生を捉えている。これは、気象庁の早期土砂災害警戒システムは、同時多発的に発生する比較的大規模な斜面崩壊(がけ崩れ、法面崩壊、土砂崩れ)をその対象としているためであろう。しかし、この評価手法では、対象領域(5km四方メッシュ)内のどの位置で斜面崩壊が発生するかを予測することはできない。したがって、道路・鉄道沿線における警戒対象斜面個々の崩壊予測のような局所的な土砂災害リスク評価を精度よく実施するには、評価手法を使い分ける必要がある。

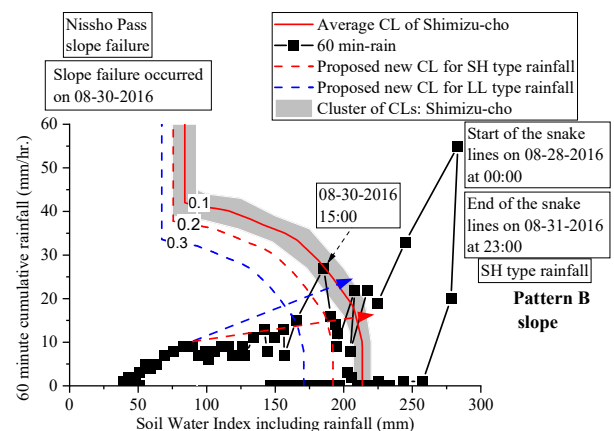


図-3 国道274号日勝峠の斜面崩壊安定性評価例

一般に表面流出は降雨強度が地盤の浸透能を上回る際

に発生するが、発生した地表流の沢部など集水地形への集中が、地表流量を増加させ表面侵食や流路の拡大をもたらし、その結果として土石流や表面侵食型の盛土法面崩壊を引き起こすと考えられる。したがって、地盤の浸透能以上の降雨強度が想定される場合には、降雨時の浸透流に加え地表流を考慮して地盤・土構造物の広域リスク評価を検討する必要がある。例えば、図-4は、地理・地形、地質・地盤、道路や鉄道の付帯構造物などの各種情報を入力し、降雨の浸透・流出に伴う広域斜面崩壊予測を数値シミュレーションで実施した例⁵⁾である。北海道豪雨で観測された地表流と浸透流を地表面での流出・浸透を考慮して連成したことで、日勝峠で発生した大規模斜面崩壊が再現可能となった。この方法によれば、設計降水量では対応できない確率降雨に伴う表流水の発生に対して、土砂災害危険箇所を抽出するとともに、地表流の流出経路となる交通基盤施設の設計・維持管理方法を再構築することが可能になり、今後北海道で増加が予想される集中豪雨時の広域土砂災害リスク評価に有用な手法であるといえる。

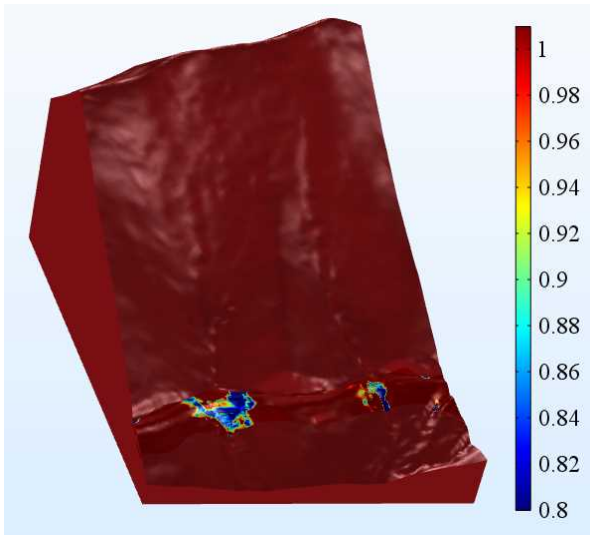


図-4 降雨浸透・流出に因る斜面崩壊ハザードマップ

4. 平成30年北海道胆振東部地震災害

4.1 被災事例の検証と教訓

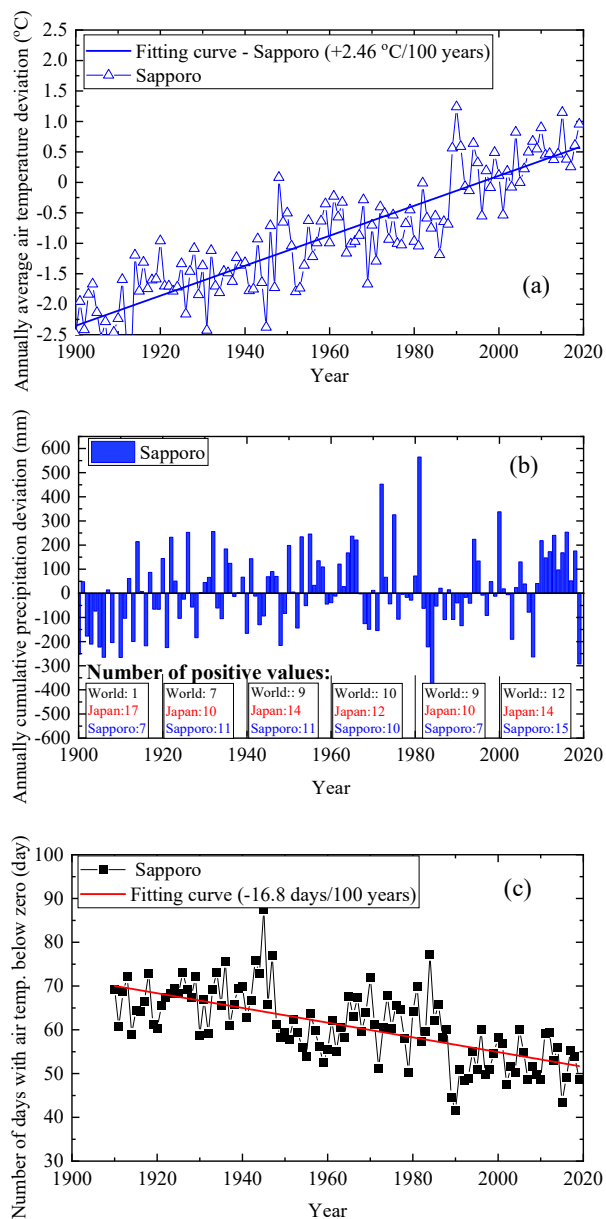
平成30年9月6日午前3時7分に北海道胆振地方中東部を震源として発生した、「平成30年北海道胆振東部地震」は、道内では過去例を見ないほどの強震動であり、最大震度は、震度階級で最も高い震度7を北海道で初めて観測した。この強震動により、火山灰質土を用いて切土・盛土により宅地造成された札幌市清田区の谷埋め盛土の液状化被害や厚真町で観測されたせん断帯での連鎖的な粒子破砕により生じる長距離土砂流動を伴う火山灰質土斜面の広範囲・大規模斜面崩壊など、甚大な被害がもたらされた。(公社)地盤工学会「平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害調査団」の最終報告書¹⁾では、北海道の地域性を考慮した今後の地盤工学研究や地盤防災行政を考える上で重要な技術的検討項目として、液状化被害については①地盤の震動特性の影響、

②谷埋め盛土の液状化危険度の検討、③宅地造成地の地形要因の影響、④宅地造成・住宅建設方法の検討、⑤複合的要因の影響度の検討の5点が、斜面被害については①想定外の地震動への対応方法の検討、②火山灰質土の破砕性・風化劣化の影響、③被害状況のバラツキの要因究明、④異形態斜面崩壊の近接発生の要因究明の4点が挙げられている。また、それを踏まえた防災・減災対策の実現に向け今後検討すべき課題として、①「過去の経験」で対応不能な潜在的な地盤災害リスクへの対処、②火山灰質土の特殊性を考慮した防災・減災対策の構築、③ライフサイクルを考慮した土構造物の設計・維持管理の提案、④想定外の広域・大規模災害の復旧・復興対策の検討、を提起している。

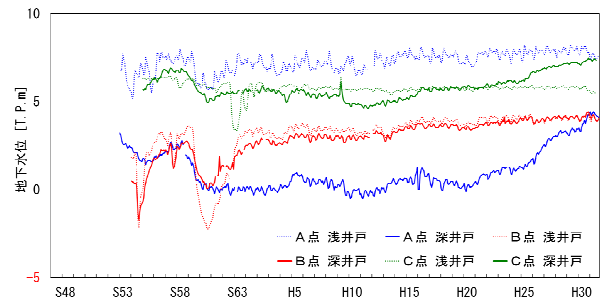
4.2 今後の被災リスクの事例研究

平成30年北海道胆振東部地震による地盤災害のうち、特に火山灰質土を用いて切土・盛土により宅地造成された谷埋め盛土の液状化問題(札幌市)と、せん断帯での連鎖的な粒子破砕により生じる長距離土砂流動(すべり面液状化)を伴う火山灰質土斜面の崩壊現象(厚真町)については、北海道に広く分布する特殊土の問題であることから、地域性を有する地盤災害として社会全体で危機感を共有し、防災・減災対策への取り組みを促進していくことが望ましい。この二つの特徴的な地盤災害(宅地液状化被害、大規模斜面崩壊)に共通する発生要因として挙げられるのは、構成地盤が火山灰質土であることに加え、地震発生前の地下水位あるいは地盤の含水状態である。例えば、地震前日の台風21号通過により札幌市内で35mm、厚真町で12mmの日雨量が観測されており、地下水位が通常よりも高い状態にあった可能性もある。また、厚真町の地震発生前の降水量は平年の約1.6倍と多く、地盤が例年よりも高含水状態にあったと推定される。さらに、時間経過に伴う排水施設の設計能力以上の雨水の流入あるいは排水管の目詰まり等による排水機能の低下が地下水位の上昇を引き起こすことも考えられる。そこで、ここでは、気候変動が地下水位変化に及ぼす影響について検討する。図-5に、気象庁の観測データをもとに札幌の過去120年間(1900~2020年)の年平均気温偏差(1981~2010年の平均値との偏差)、年降水量偏差、および真冬日の年間日数をそれぞれ示す。札幌の気象条件は、気候変動(地球温暖化)の影響を受け、平均気温が100年間に2.46℃上昇し、年降水量が大雨の回数の増加とともに2010年以降急増し、真冬日が100年間に16.8日減少する傾向にある。即ち、この100年間で札幌は平均気温の上昇により年降水量が増え、冬期が短くなった。その結果として、札幌市内で観測される地下水位は、観測局による傾向の違いはあるものの、図-6に示すように全体的には上昇傾向にあり、特に2010年以降その傾向が強まっているように見受けられる。なお、札幌市内の7点の地下水位観測局の過去10年間(2010~2019年)の最高水位上昇量は平均で0.05m/年と別途報告されている。このような近年の地下水位上昇が、札幌市内の住宅地で液状化による大規模な地盤流動や広範囲に渡る再液状化被害の誘因となった

可能性は否定できない。したがって、今後気候変動に伴って発災が予想される可能性のある北海道特有の新しい複合地盤災害形態の体系化や、被災履歴の少ない潜在的な複合地盤災害の危険性の評価が、近い将来の地盤災害の防災・減災対策に重要な意味をもつことになる。災害外力の加速・大規模化あるいは複合化に対するより適切な気候変動への適応策の構築には、「災害外力が過去の履歴を超えて増大した結果、どのような問題が顕在化するか？」について、災害発生率と地形・地質情報、土質特性、降雨履歴、地震動予測、凍結融解作用などとの関係性を整理し、学術的な観点から新しい複合地盤災害の発災要因・被災形態の顕在化の可能性を加味して考察を深めるとともに、それを踏まえ地域性を十分に考慮した災害レジリエンスの強化を図ることが、今後の北海道の持続的な発展には不可欠であるといえる。



図一五 札幌の平均気温、降水量、真冬日の日数の推移



図一六 札幌市内観測局の地下水位計測結果

5. おわりに

(公社) 土木学会北海道支部では、北海道のような気候変動災害脆弱地域において、過去の降雨や地震履歴、経年的に変化する地盤の特性を反映できる手法を検討し、災害リスクの総合的な評価手法を確立することを目的として、昨年度より新たに「気候変動脆弱地域における複合地盤災害リスク評価に関する研究委員会」(委員長: 石川達也 北海道大学教授)を立ち上げ、学際領域を超え、気象学、水工水文学ならびに地盤工学に関する最新の情報収集、それらのデータ解析を行いながら、気候変動に伴い変化する複合地盤災害の潜在的な被災危険度や気候変動適応策について検討している。今後、本委員会の研究活動の一環として、本稿で挙げた研究課題について検討するとともに、発災機構の学術的究明と災害の早期復旧並びに防災・減災技術の向上に向けて、北海道の地域的な問題として社会全体で危機感を共有し、産官学が連携して取り組む体制の構築を進める予定である。

謝辞: (公社) 地盤工学会地盤災害調査団の調査活動にあたり、調査団員各位をはじめ、産官学の多くの方々・機関より御助力を賜りました。特に、国土交通省北海道開発局・北海道・札幌市・厚真町・(一財)北海道道路管理技術センター・(株)ドーコンには、発災直後より被災地への立入許可や資料共有など、特に重要な御協力を賜りました。ここに記し深甚な謝意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学会: 平成 30 年北海道胆振東部地震による地盤災害調査報告書 https://www.jiban.or.jp/?page_id=11421 (参照日 2020 年 12 月 20 日)
- 2) 北海道開発局札幌開発建設部: 国道 230 号中山峠災害対策検討委員会資料、2013.
- 3) Zhu Y., Ishikawa, T., Subramanian, S. S., Luo, B. : Early warning system for rainfall and snowmelt induced slope failure in seasonally cold regions, Soils and Foundations, 59(1): 2021.
- 4) 地盤工学会: 平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査報告書 https://www.jiban.or.jp/?page_id=2569 (参照日 2020 年 12 月 20 日)
- 5) Zhu Y., Ishikawa, T., Subramanian, S. S., Luo, B. : Simultaneous analysis of slope instabilities on a small catchment-scale using coupled surface and subsurface flows, Engineering Geology, 275: 105750, 2020.