■斜面防災技術の国際化の課題と最近の取り組みについて

Issues related to internationalization of slope disaster management technology and recent efforts

榎田充哉* Mitsuya ENOKIDA / 国土防災技術株式会社 Japan Conservation Engineers & Co., Ltd

キーワード：技術移転，技術基準書，対策工設計

Key words: Technology Transfer, Technical Standards, and Design of Countermeasures

1. はじめに

日本の様々な防災技術の海外展開を支援する日本防災プラットフォーム（以下、JBP）という組織が平成26年6月に設立され筆者も理事を務めている。JBPの設立主旨がそうであるように、現在、日本の海外支援における防災の主流化がいろいろなところで話題となっている。その中で、斜面防災技術も日本の海外支援の一つとして注目されている。日本はいろいろなタイプの斜面災害が多発する国であり、日本の斜面防災技術は海外から取り入れた技術と日本独自の技術を融合させて独自に進化してきた。斜面防災技術については日本が世界一であると考えている専門家も少なくないと思われる。しかし、実際に開発途上国等で斜面防災に関する技術移転を行うといろいろな問題が発生する。

最も身近なところでは、土木地質区分とそれに対応した切土勾配の問題である。日本では道路土工などの基準書に地質区分毎の標準的な切土勾配が掲載されているが、それをそのまま海外で使おうとすると相手国の担当者から「それは日本の地質に応じた基準値だから自国では使えない」という主旨の意見がでる。地質条件は国によってさまざまである。日本の土木地質区分に対して標準的な切土勾配を決めた方法を参考にして、それぞれの国でオリジナルの切土勾配の基準を作る必要がある。しかし、技術基準書の値を使うことに慣れた日本の技術者の多くは、どのようにして切土勾配の基準値が決められたのかを知らない。よって、相手国でどのようにすれば切土勾配の基準値を決めることができるのかわからない。

斜面防災分野のみの特有の問題もある。例えば、同じ構造物でも所管の省庁毎に設計方法が異なる点、力学的に間違った方法や理論的な根拠の無い方法が長年慣用されている問題などである。理論的な根拠を示さないと相手国の技術者や研究者は納得しない。

このように世界一を自負する日本の斜面防災技術も、それを国際社会で利用するためには解決しなければならない課題が数多く存在する。ここでは現状における国際化の主な課題を整理するとともにこれを解決するための最近の取り組みについて説明する。なお、本稿は平成28

年6月の日本地すべり学会シンポジウムで榎田（2016）が発表した内容を加筆・修正したものである。本稿は3章以降に記述している最近の取り組みの紹介に主眼をおいている。この活動を理解頂き、本活動やそれに続く活動により多くの研究者や技術者が参加して頂くことを願っている。その取り組みの意義や重要性を理解して頂くために2章において国際化に関する主な課題を概略的に紹介する。

2. 斜面防災技術の国際化の主な課題

斜面防災技術の課題そのものを認識しないと最近の取り組みの重要性等が理解されない。ここでは主な課題を8区分に分けて説明する。

2.1 設定経緯が明確でないパラメータ

日本では「道路土工一切土工・斜面安定工指針」（日本道路協会, 2009）などの技術基準書で、盛土材料や地山の土質などに応じて盛土や切土の標準勾配が決められており、計画・設計時にその値をそのまま利用することが一般化している。しかし、どのような検討過程を経て、その標準勾配が決定されたかを知る技術者は少ない。「災害手帳」（全日本建設技術協会, 2016）では地すべりの安定解析において「原則として土塊の単位体積重量は $18\text{kN}/\text{m}^3$ とし」と明記されている。この記述は本書が建設省監修であった時代（少なくとも平成初期、当時は $1.8\text{t}/\text{m}^3$ ）から何十年も継続している。これに象徴されるように斜面の安定解析では地山の単位体積重量 γ を $18\text{kN}/\text{m}^3$ とするのが一般的となっている。 γ がこれより小さい地山や大きい地山は多数存在するが、一般値として18という数値がどのように決定されたのか、その経緯を知る技術者も少ない。

このほか、日本の技術基準書には何気なく日常的に利用されている定数が数多く存在するが、その決定根拠はほとんど知られていない。

2.2 理論的な根拠の乏しいパラメータ

斜面安定解析における粘着力 c' (kN/m^2) は、最大又は平均のすべり面深度 h (m) の数値部分のみを、単位を無視してそのまま代入して設定する方法が日本では多用されている。これは正規圧密粘土の粘着力に近いという考え方もあるが、その理論的な根拠は明確では無く、

* 連絡著者 / corresponding author
〒330-0074 さいたま市浦和区北浦和2-12-11
2-12-11, Kitaurawa, urawa-ku, saitama, 330-0074, Japan

まして、正規圧密粘土ではない一般斜面の地盤に適用できるという科学的な根拠は無い。

計画安全率 F_p の範囲（1.05～1.20）や地すべり事業での地下水排除工の計画水位低下高（3m, 5m, 8m）なども科学的根拠が無い数値である。アンカー工の付着強度 τ の標準値も文献によって大きな違いがあり、根拠に乏しい。

抑止杭等の設計に用いられる水平地盤反力係数の推定式は日本での経験式であるが、道路橋示方書の式と港研式では同じ N 値に対する水平地盤反力係数 kh が大きく異なる。また、これらは地すべり抑止杭のための経験式ではなく基礎杭のための経験式である。両者共に応力解放されている面である地表に近い、概ね深度10m未満の杭頭部に載荷することを想定した試験値を元にしており、地すべり抑止杭やシャフト工を必要とする大規模地すべりの深いすべり面深度（応力解放が無い）の地盤（風化岩など）と適用条件が異なる。しかし、地すべり地のすべり面深度付近での試験値は圧倒的に少なく、それを元にした水平地盤反力係数の推定式（長野県の式）（長野県、1985）は存在するものの、あまり利用されていない。

2.3 設計方法が確立していない構造物

身近なところでは、アンカー工の場所打ち独立受圧板の設計方法が確立していない。「グラウンドアンカー受圧板設計・試験マニュアル」（土木研究センター、2004）では2.2節でRC受圧板の設計方法の統一案が提案されているが、現在多く採用されている設計方法は厳密にはここに掲載された方法と矛盾しており、更に設計者によって分布荷重の算定方法や上部水切り部分の取り扱い等が異なる。

落石防護柵の基礎部の設計方法も確立していない。現在改訂作業が進められている「落石対策便覧」であるが、これまで利用されてきた平成12年版（日本道路協会、2000）では落石防護柵の基礎部の照査の式が間違っており、現在はこれとは違う方法で設計されている。しかし、構造力学的に正しい方法で基礎部を設計すると実用的ではない大きな構造物となることから曖昧な設計内容となっていることが多いようである。

2.4 所管の省庁による基準の違い

ライナープレート製の集水井工の設計方法は地すべりを所管する省庁によって異なる。バーチカルスティフナやラテラルストラットの必要性の判断も省庁によって異なり土圧の計算方法や井筒の構造計算方法も異なる。バーチカルスティフナは地すべり推力に耐えることが出来ず地すべりによる集水井の破壊を助長するという考え方と、集水井の構造を補強可能であるという考え方があるが、後者の場合のバーチカルスティフナの構造計算方法は確立していない。

アンカー工の必要抑止力の算定方法も省庁によって異なり、シャフト工の長杭判断基準や標準的に利用する安定解析式も省庁によって異なる（Fellenius式、Janbu式）

など、省庁による基準の違いは複数の技術で存在する。

2.5 理論的に間違った慣用手法の蔓延

日本では鉄筋やロックボルトを使った斜面補強土工法の設計では抑止力を安定解析式の分子項として処理している。これは力学的には間違った方法であるが、それを知っている技術者は少ない。アンカー工の引留め効果を安定解析式の分子項として説明している技術基準書と分母項として説明している技術基準書が存在するが、後者の方が力学的には正しい。前者の間違った方法が日本で蔓延しているのは歴史的な背景があるが、日本では力学的に間違ったアンカー工の設計方法が主流となっているため、鉄筋挿入工などの補強土工法の設計方法にも影響し、その間違った設計方法が補強土工法でも標準となっている。

一方、Fellenius式を簡便式と称して非円弧の地すべりに適用しているのは日本のみである。欧米で販売されている英語の安定解析ソフトでは非円弧すべりにFellenius式は適用できない。Eurocode 7（2013）：Geotechnical Design Worked examplesの中でもFellenius式は回転モーメントの釣り合いしか取り扱えないと明記されている。

2.6 設計習慣の違いに関する課題

日本では急傾斜対策事業や地すべり対策事業において現状の安全率を0.95～1.00などに設定して、土質パラメータ（ c, ϕ ）を逆解析で設定する方法が採用されている。しかし、海外では c, ϕ を与えて安定解析をする順解析が一般的な国が多く、英語の安定解析ソフトの中には土質パラメータの逆算機能が無いものもある。

海外では“何故、逆解析を使うのか”の説明を求められることが多いが、日本では当たり前になっている逆解析の必要性を説明できない技術者が多い。

また、英語の安定解析ソフトが容易に手に入る海外では二次元解析でも三次元解析でもSpencer法などの高度な安定解析式が利用されており、なぜ、今更Fellenius式やJanbu式を使うのか、その必要性の説明が求められる。その必要性を説明できない技術者が多い。

2.7 テクニカルタームの英訳の課題

ここからの2つの課題は、技術的な課題と少々異なる。斜面防災に関する様々な技術用語の英訳が確定していない。地すべりの“すべり面”や“陥没帯”、“抑止工”などの一般的な用語でも複数の英訳があり、日本独自の技術用語は更に混乱している。例えば地すべり抑止杭の設計理論では“抑止杭”という全体を包括する用語と“抑え杭”という個別の設計理論を表す用語をどのように区別するのか、“楔杭”では無い“くさび杭”を適切に表現する英訳は何かなど、確定していないテクニカルタームは多い。

2.8 技術英文を作成する能力の低さ

過去のいろいろな海外プロジェクトで整備された英文の技術マニュアルや技術基準書について、その英文のレ

ベルの低さが問題となっている。英文のレベルの低さから使用されていないそれらの成果品が複数存在するとJBPや学協会等の複数の会議で話題となっている。日本国内で作成され、国内で公表された斜面防災関連の英文の技術文書にも英文レベルの低いものがある。

日本において有名な国立大学を卒業した新入社員でも、彼らが入社1年目に書いた日本語の業務報告書や技術論文は、繰り返しの添削と大幅な修正を行わなければ実用に堪えないレベルである事が多い。日本語を母国語とする日本人誰もが適切な日本語の技術文書（論文等）を作成・添削できるわけではない。また、専門分野が全く違うと技術者でもあっても作成・添削はできない。日本語を実用レベルで使えることと日本語の技術文書を作成・添削する能力が違うように、日本人が英語を実用レベルで使えることと、ネイティブのベテラン技術者と同じレベルで英語を使いこなすのは別物である。翻訳会社のネイティブも専門が異なる技術者ではネイティブチェックに限界がある。そして、日本語の技術文書の添削と同レベルで英文の技術文書の添削ができる日本人技術者は少ないと感じている。

3. 国際化の課題に関する最近の取り組み

（公社）日本地すべり学会では、斜面防災事業の国際化に対応するため研究調査部の活動の一環として「斜面防災技術国際化小委員会」（以下、本委員会）を設置した。その取り組み内容を以下に説明する。

3.1 本委員会の取り組み内容

技術の国際化に向けた具体的な取り組み内容は以下の通りである。

- ①国際化を行う上での各種国内基準の設計上の課題に関する整理
- ②関連する国際基準の変遷に関する整理
- ③各種国内基準の技術背景及び制定過程の整理
- ④国際的に利用できる技術基準の整備
- ⑤日本の技術基準の海外への発信（専門用語の英語表現検討も含む）

現在の委員会メンバーの構成は表－1の通りで総勢14名である。今後、国の研究機関の研究者など、必要なメンバーを増やして行きたいと考えている。

3.2 本委員会の成果品

本委員会で作成する具体的な成果品を表－2に示す。日本語版のみのものと英語版のみのもの、その両方を作

表－1 現在の委員の内訳（2016年11月現在）

区分	参加人数
大学研究者	4
民間コンサルタント	10
計	14

表－2 本委員会での主な成果品

No.	成果品	内容
1	技術基準の対比表	技術基準書等における設計の違いを対策工毎に対比する（日本語版）。
2	日本における斜面对策工の設計上の課題と解説	日本における斜面对策工の設計上の矛盾点や問題点を示し、その背景や論理的な解説を記述する。（英語版＋日本語版）
3	技術基準の基準値の制定の背景の解説書	土質毎の切土勾配など、技術基準書で利用されるさまざまな数字の制定の背景を解説する（日本語版）。
4	主な斜面对策工の設計手法解説書	主な斜面对策工の設計マニュアルを整備する。（英語版）
5	テクニカルターム一覧表	斜面对策工の設計に必要な専門用語の英語表現を学会として提案する。（英語版）
6	欧米等における斜面对策工の設計マニュアルの内容紹介	開発途上国が自国の技術基準書を作成する時に参考とした欧米等の過去の技術基準書の主な内容を紹介する。（英語版）

成するものに分かれる。平成29年度末までの3年間の小委員会活動で全ての成果品を完成させることは難しいと考えているが、3年間で一定の成果を残した後、それを引き継ぎ、より拡大した委員会等の活動を継続したいと考えている。次章以降に途中段階であるが成果品の素案の一部を紹介する。

4. 斜面对策工の設計上の課題整理の例

安定解析と集水井工設計を例に課題を整理した例を表－3と表－4に示す。これは途中段階での検討資料であり最終成果ではない。

安定解析は必要抑止力の算定や対策工効果の推定など、斜面对策工を設計する上での基礎となる技術であることから対策工設計と同等に一つの項目として扱っている。

5. 斜面对策工の設計上の課題と解説の例

安定解析を例に対策工の課題とその解説の例を表－5と表－6に示す。これは途中段階での検討資料であり最終成果ではない。

6. おわりに

本稿で示した国際化の課題は概略的な内容である。その詳細は1つの技術報告では書ききれない程の種類や数がある。3章以降ではその課題に関する最近の取り組みを紹介するとともに、課題を解決するための現時点の方向性のようなものを示した。これらの課題を個人で解決することは困難であり、本委員会のような学会の委員会等でいろいろな立場の研究者や技術者が集まって議論を

表－３ 安定解析の課題の整理の例

区分	課題	対応方針
安定解析の方法及び種類	○地すべり防止技術指針（H20）では理論的に正しくないと説明しながら Fellenius 法の非円弧すべりへの適用を推奨している。 ○道路土工（H21）ではすべり面形等に応じて適した安定解析式を採用すると説明しているが簡便法（Fellenius 法）の式を代表的な安定解析式として提示している。 ○治山技術基準（H25）ではすべり面形や間隙水圧の賦存状況などによって安定解析式を使い分ける方法を示している。 ○道路土工（H21）では自由地下水となる可能性が高い盛土の安定解析でも被圧地下水対応の修正 Fellenius 式を標準としている。	○すべり面形や地下水の種類による安定解析式の使い分けを解説する。 ○日本で Fellenius 法を非円弧すべりに適用した経緯と利点を説明し、その論理的な問題点についても解説する。
単位体積重量	地すべり防止技術指針（H20）や道路土工（H21）では土塊の単位体積重量を 18kN/m ³ と指定している。これについてもその値に固定することの妥当性が問題となる。 道路土工－仮設構造物工指針（H11）などで採用している土の湿潤単位体積重量の一般値も全世界共通ではない可能性がある。	○道路土工における地質毎の単位体積重量が決められた経緯を調べる。 ○ 1.8tf/m ³ が標準値となった経緯を調べる。
初期安全率と計画安全率	初期安全率 $F_0=0.95\sim1.00$ 、計画安全率 $F_p=1.05\sim1.20$ の妥当性	初期安全率と計画安全率がこの値となった経緯を調べて解説する。
土質強度定数の設定	地すべり防止技術指針（H20）では $c=h$ 法のみを説明しているが、この方法の理論的な根拠は不明確である。加えて逆算される ϕ に安定解析式の不完全性による悪影響が含まれる。例えば、Fellenius 式は一般に小さな安全率を算出するため逆算される ϕ は過大に算出される傾向にある。その結果、 ϕ を実際より過大に推定すると地下水排除工の効果やアンカー工の締め付け効果を過大に評価するため危険側の設計となる。 道路土工（H21）は c を設定して ϕ を逆算する方法を優先的に説明しているが ϕ を設定して c を逆算する方法も示している。また、地すべりが活動中であるか否かで分けて設定方法を示している。 一方、治山技術基準（H25）では ϕ を設定して逆算する方法と c を設定して逆算する方法の他、残留係数法についても記述され、それらの留意点についても記述されている。 いずれも逆算法の一種であるが、海外では c 、 ϕ 共に土質試験値を用いる順解析に対する要望が多い。地すべり対策では順解析を用いない理由を明確に記述する必要がある。	○地すべり対策では順解析が不適切な理由を理論的に解説する。 ○逆算法の長所短所を理論的に解説する。短所については c を設定して ϕ を逆算する方法と ϕ を設定して c を設定する方法のそれぞれについて解説する。

し、偏りのない解決策を検討することが重要であると考ええる。

本委員会の成果品が、斜面防災分野で海外進出している技術者の座右の書となり、海外において日本の良質な技術が正しく技術移転されることを願っている。本委員会は平成27年度から活動を開始し、学会研究発表会など

表－４ 集水井工設計の課題の整理の例

区分	課題	対応方針
掘削深さ	治山技術基準はすべり面より下の基盤岩に 2～3 m 程度貫入させることを前提としている。	基盤岩に貫通させる完全井と貫通させない不完全性の長所短所を理論的に解説する。
構造	治山基準はライナープレートと補強リングの組み合わせを基本としているのに対し、地すべり防止技術指針ではバーチカルスティフナーやラテラルストラットの採用を前提としている。農地の基準は治山基準とほぼ同じ内容。	バーチカルスティフナーやラテラルストラットを必要とする考え方と不要とする考え方を解説する。
設計	○土圧の与え方がそれぞれ異なる。 ○ライナープレートの応力計算の方法が異なる。 ○地すべり技術指針で採用されているバーチカルスティフナーやラテラルストラットの設計方法は明示されていない。	主に国交省と林野庁の設計の考え方の違いを解説する。
排水ボーリング	治山基準では排水ボーリングの管径の算定方法が記載されている。	排水管の必要管径の算定方法は掲載する。

の機会を利用して、平成28年度末までに 7 回の委員会を開催している。まだ委員の数も不足している状況であり、本委員会の趣旨に賛同して頂ける委員を随時増やして行きたい。

表－５ 斜面对策工の設計上の課題と解説（例）－その 1

1. 安定解析式の選定（解説の素案）

1. 1 課題

地すべり防止技術指針（H20）や道路土工（H21）ではすべり面形等に応じて適した安定解析式を採用すると説明しているが、非円弧のすべり面形が多い地すべりの安定解析として Fellenius 式や修正 Fellenius 式を標準としている。一方、治山技術基準（H25）ではすべり面形や間隙水圧の賦存状況（自由地下水、被圧地下水）などによって安定解析式を使い分ける方法を示しているが、非円弧すべりでは簡易 Janbu 式を標準としている。

道路土工（H21）では自由地下水となる可能性が高い盛土の安定解析でも被圧地下水対応の修正 Fellenius 式を標準としている。

1. 2 解説

1. 2. 1 日本における歴史的背景

日本における 1980 年代前半までの地すべり対策は図 1.1.1 に示すように、非円弧のすべり面形に接する円弧を複数組み合わせ、それぞれの円弧すべりについて安定解析を実施していた。コンピュータが普及していなかったため手計算でも計算可能な Fellenius 式が多用された。

図 1.1.1 昭和 40 年代の安定解析事例（山田ほか，1971）

表－6 斜面对策工の設計上の課題と解説（例）－その2

1980年代の後半からは、各種調査から求められたすべり面の分布をそのまま利用して、非円弧のすべり面形に対して安定解析を行うようになったが、国土交通省所管の地すべり調査業務ではこれまで利用してきた Fellenius 式をそのまま慣用した。一方、林野庁所管の地すべり調査業務ではその頃から非円弧すべりに対しては簡易 Janbu 式を標準的に利用するようになった。Fellenius 式ではすべり面傾斜が急角度となるスライスで有効土圧が負となる不具合が発生することから平成 11 年版の道路土工から修正 Fellenius 式を標準とするようになった。

地すべり地では移動層に自由地下水が形成され全層流的な地下水の流下が確認されることが少ないことから被圧地下水対応の安定解析式が利用されている。自由地下水の場合、スライスの両側面に作用する地下水圧又は浸透水圧を考慮する必要があるが、地すべり分野ではこのような認識を持つ専門家が少ない。多くの専門家が、道路土工のように自由地下水が関与する可能性の大きな斜面の安定解析に地すべりと同じ被圧地下水対応の安定解析式を適用することに違和感を持たなくなっている。

1. 2. 2 理論的な解説

(1) 非円弧すべりに Fellenius 式や修正 Fellenius 式を適用することの理論的な問題点

一般に、数学的に正しい力の加算法則は以下の3つのみである。

- ①同一軸方向の力のみを加算する
- ②ベクトルの加算法則に従って加算する
- ③モーメントの加算法則に従って加算する

非円弧すべりに Fellenius 式や修正 Fellenius 式を適用すると力の加算にスカラーの加算法則を適用することになり、算出される値は物理量が定義されていない値（以降、非物理量と呼ぶ）となる。非物理量は、無次元値でないにもかかわらず、単位を持たないし、その値を利用して、抑止工の必要抑止力を算定するなどできない。よって、力学的にはすべり面の縦断形に応じた安定解析式の選定が必要となる。

(2) 極限平衡法では斜面の絶対的な安全率を算定できない論理的な理由

極限平衡法の安定解析式は移動体を剛体と見なして、スライス間での構造力学的な力の釣り合いから斜面の安全率を求める方法であり、地盤の弾塑性的な性質は全く考慮されていない。極限平衡法によって三次元的な移動現象である地すべりや崩壊の移動体内のひずみや強度の偏在を再現することは不可能である。また、末端など、移動層の一部に加えた力が移動体の全域に 100%伝達し、不動層には伝搬しないという現実を無視した条件で解析が行われる。よって、斜面の真の安全率又はそれに近い値を評価することはできない。

(3) 非円弧すべりに Fellenius 式や修正 Fellenius 式を適用することへの肯定的な考え方

日本の地すべり事業での Fellenius 式や修正 Fellenius 式の活用は、非円弧のすべり面形を解析対象とするようになってから、すでに 30 年程度が経過し、これまで全国で数千カ所～数万カ所におよぶ地すべり事業や急傾斜事業、道路防災事業などで利用されてきた。その間に、安定解析式の違いによる事故などは報告されていない。このように利用実績が多く、実務での信頼性は高い。また、Janbu 式のような収束計算も不要で、解析も容易であることから、取り扱いや解析結果の検証も容易で、計算ミスも発生しにくい。

一方、極限平衡法は斜面の真の安全率又はそれに近い値を評価することはできない。極限平衡法による斜面の安全率は、異なる条件での相対的な安全率の比較を概略的に行うためのものであると考えれば、力学的な不具合とそれによる計算誤差は、実務の世界では大きな問題とならない。

(4) 盛土など自由地下水が存在する斜面で被圧地下水対応の安定解析式を利用することについて

地すべり対策では標準的に地下水位観測孔を設置し、地下水位変動をモニタリングするが、急傾斜対策での崩壊対策では、一般に地下水位のモニタリングは実施しない。

<引用文献>

- 1) 山田剛二，渡正亮，小橋澄治(1971)：地すべり・斜面崩壊の実態と対策，山海堂，580p

引用文献

- 1) 土木研究センター（2004）：グラウンドアンカー受圧板設計・試験マニュアル，83p.
- 2) 日本道路協会（2009）：道路土工一切土工・斜面安定工指針，570p.
- 3) 全日本建設技術協会（2016）：災害手帳，pp. 407.
- 4) 日本道路協会（2000）：落石対策便覧，422p.
- 5) 長野県治山課（1985）：治山事業調査（地すべり対策調査）報告書，林野庁地すべり対策協議会.
- 6) 榎田充哉（2016）：斜面防災技術国際化小委員会の活動とその重要性，日本地すべり学会シンポジウム－地すべり研究・対策技術を国際協力に生かすために－講演集.
- 7) Eurocode 7 (2013)：Geotechnical Design Worked examples, pp. 59－63.

（原稿受付2017年1月18日，原稿受理2017年3月21日）