斜面工事における計測システムの性能を評価 する方法の研究

野村 貢¹・芥川真一²・佐藤 毅³

¹正会員 株式会社建設技術研究所 東北支社 (〒980-0014 仙台市青葉区本町2-15-1)

E-mail:nomura@ctie.co.jp

²正会員 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市東灘区六甲台町1-1)

E-mail:cadax@kobe-u.ac.jp

³正会員 株式会社アサノ大成基礎エンジニアリング 事業推進本部 (〒110-0014 東京都台東区上野2-8-7)

E-mail:satoh-tks@atk-eng.jp

斜面工事を行う場合や斜面施設の管理者は、関係市民や工事関係者の安全を確保するため計測システムを性能規定化する必要がある。計測システムの設計者は、さまざまなセンサーデバイスやアウトプットツールを用いて計測システムを構築するが、これまで各プロセスおよび全体の計測システムについて要求の性能を保有していることを容易に説明できる方法がなかった。本研究は斜面工事に着目し、計測システムの性能を規定した。さらに各プロセスと全体システムの性能を評価する方法を提案し、FMEAを用いることで簡便に計量化する手法を提案するとともに、閾値の提案、実工事での検証結果から実用性があることを証明した。

Key Words : sensing, logic, information, monitoring system, FMEA

1. はじめに

土木工学分野における計測は測定そのものが最終目的であることはなく、測定を通して対象物の状態を把握し、過去の経験や工学的な判断に照らしてその状態が妥当なものであるかどうかを判断したうえで、適切な結果表現により対象者の安全を確保する目的のために用いられる。

筆者らは山岳トンネルの計測を通してトンネルと地山の状態を把握し、設計と施工の関係性を高めるとともに工事の安全性を高める櫻井の「直接ひずみ評価法」を多くのトンネルにおいて導入し、数多くの様々な事例を経験している¹⁾²⁾。この場合では、内空変位などの変位を適切な時期に必要な精度で測定する。その結果を得てトンネルの健全性を判断し切羽の作業員に安全性などの状態を周知し行動させる。この一連の活動により工事の安全性とともに建築限界などトンネルとしての性能を確保することが目的であり、筆者らはこれらを総合して計測工あるいは計測システム（以下、計測システム）と称している。

同様に地すべりの管理においては、計測機器を用いて地すべり土塊の挙動を測定し、これと時間経過を関係付

けることにより指標化して地すべり変動種別の状態を定義することが行われている³⁾。この場合では、測定されるのは土塊移動量と時間であり、管理者はこれらの情報を得て安全性を判断し、対象者への情報提供を行い行動を促すとともに土塊移動の範囲と緊急性の情報を得る。この場合、計測工の目的は市民を行動させ被害を最小化すること、および適切なハード対策の仕様を求めることとその実施時期を評価することである。

このように土木工学分野における計測システムは、計測値から得られる状態の定義と、その状態定義から定式化される対象物の状態に対する判断、そして行動すなわち補強を行うとか避難するとかいった具体的な行動のための結果表現が関係付けられて初めて有用な目的を果たしていると言うことができる。

近年、斜面工事において従来用いていなかったセンサー類を活用、あるいは開発しようとする取り組みが起きている⁴⁾。また、自助、共助の考え方の浸透とともに、情報提供を受け行動する対象者に、いくつかの能動的な活動を期待する取り組みも行われている⁵⁾。

本研究では、斜面工事に着目し、計測システムを「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の3段階のプロ

セスからなる活動と位置付け、それぞれのプロセスの性能を評価することにより、総合的な計測システムとしての性能を表現する方法を提案する。さらにその手法を用いて具体的な性能判断を行うためのスタディの結果と併せ、活用方法について考察する。

2. 研究目的

(1) 斜面災害と計測システムの現状

2005年度以降の10年間に災害救助法が適用された事例は90件であるが、風水害はその70%以上を占めるとともに直近10年で増加傾向にある⁹⁾。

市民生活圏の広がりや災害のトリガーとなる外力の高まりによる発災リスク上昇に加え、危険区域の指定、周知が遅れていること、土砂災害リスクの情報提供が不十分な場合があることなどを受けて、「総合的な土砂災害対策の推進について」が2015年6月に中央防災会議WGから提示された⁷⁾。

ここでは、「地域における土砂災害リスク情報の把握・共有」、「適切な時期・範囲の避難勧告等の発令」、「避難勧告等の情報の伝達方法の改善」が謳われ、自助、共助を軸としたソフト対応の重要性とそれを支援するシステムの重要性が再認識されている。

一方、建設労働災害においては、2015年度327件の死亡災害が発生しており、墜落、転落がその最大要因であるが、崩壊、倒壊やはさまれ、巻き込まれもそれぞれ多数発生している。大規模な開削工事や土工事では労働安全衛生マネジメントシステム(OSHMS : Occupational Safety and Health Management System)に基づくリスクアセスメントが行われるため、それなりに充実した安全管理が行われるが、小規模開削や斜面工事では、施工者能力にも起因し充実した管理は難しいため、なかなか斜面工事での労働災害が減少しない状況である。

これらハード対策の展開の遅れ、経済的理由や知識不足による不十分な管理を背景として、計測システムによるソフト対応が期待されるとともに、計測システム自体においてもさまざまな改善や取り組みが進んでいる。

計測システムのプロセスのうち「計測」では、MEMS技術による慣性力センサーを活用した斜面計測センサー、構造物等の振動計測センサーなどが実用化されているほか⁸⁾、野村ら⁹⁾によりトンネル内附属物の状態監視への実用試験も報告している。その他のデバイスでは、光ファイバーを用いたセンシング技術も多くの実施例¹¹⁾が報告されている。

「判断」、「現地での結果表現」プロセスで芥川ら¹²⁾、¹³⁾が、新しい方法論として組込みロジックによる判断プロセスを表示に直接化するOSV(On-Site Visualization)を

提案しているほか、前掲「総合的な土砂災害対策の推進について」においても、住民等への伝達方法の改善として、防災行政無線や緊急速報メールといった受信者の状況に関わらず情報を伝達可能なPUSH型とともにウェブ、テレビ、ラジオ等の受信者側で何らかのアクションを行わないと情報を閲覧できないPULL型を組み合わせる活用することが提案¹⁵⁾されている。

(2) 計測システム性能規定化の必要性

わが国では、災害防除や道路構造の工事目的物あるいは仮設として切土斜面が数多く設けられている。これら斜面を設計、工事するため技術基準については、土木学会や事業者から示方書や技術基準が提示されており、設計手法、施工管理手法は確立されている。しかし、実際には大規模工事、小規模工事に関わらずさまざまな形態で大小の崩壊事故が発生している。また、さまざまな斜面工事において、設計基準や施工管理基準の整備だけでは工事の安全性確保には十分ではないことが認識され、これと並行した計測システムの重要性が指摘されている。

しかし、どのような計測システムを適用すれば十分であるか、言い換えると「良い性能の計測」であるか、すなわち計測システムの性能的確性については、明確に規定、評価する標準的な方法がない。もとより、労働安全衛生法第25条に「事業者は、労働災害発生の急迫した危険があるときは直ちに作業を中止し、労働者を作業場から退避させる等必要な措置を講じなければならない」と規定されているが、厚生労働省の「斜面崩壊による労働災害の防止対策に関するガイドライン」(2015年6月)では変状時点検表において措置項目として、変状のモニタリング実施の有無を問うだけであり、計測システムとしてのモニタリングの質的評価は問わない書式となっている。

斜面工事の計測システムの性能について論じた研究としては、武士、藤澤ら¹⁶⁾が検知センサーに要求される性能について例示したほか、岩崎¹⁷⁾らがGPS自動変位監視システムの分解性能を実験的に証明した事例、玉手ら¹⁸⁾が斜面の浅い部分のせん断ひずみを崩壊実験により計測し、要求される計測レンジについて実証した事例などがある。これらの研究は計測部分についての開発的研究が主体であり、結果表現と自主的行動につながる理解度まで踏み込み計測システムとしての性能を論じた研究はこれまでにないと考えられる。

多くの公共による斜面工事が限られた予算のなかで施工されていることを踏まえれば、計測システムの必要性は認識され設置されているが、その性能は評価できる状態にないというのは公的アカウントビリティの観点からも望ましい状況ではない。総合的に工事の性能、品質を高めるためには、計測システムの性能を評価する仕組みが必要である。

(3) 本研究の方法論

本研究では、土木工学分野において計測システムの重要性が認識されている代表的工事として、切土斜面工事を主に取り扱う。計測システムは、「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の3段階のプロセスとその間のコミュニケーションにより成立するものと定義し、それぞれのプロセスは独立して設計可能な場合を対象とする。

切土斜面工事にはそれぞれ機能から要求される性能と工事の社会性から要求される性能があり、その性能の達成、維持を支援するものとして計測システムが存在すると考える。したがって、まず斜面工事の性能を規定し、その上で計測システムの性能を規定する。この性能規定について評価を行うことにより個別の計測システムの性能の良否を判定する。

計測システムの性能評価は各プロセスについて行い、総合値をもって計測システム全体としての性能評価を可能とすることを目指している。なお、各プロセスの評価には、機械製品等の信頼性評価において故障解析の手法として用いられる評点法である FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)を導入する。

FMEAは、複雑なプロセスから構成される機械製品等において、不具合モードに着目し、これを影響の深刻さ、起こりやすさの観点から評価する方法で、複数のプロセスからなる計測システムの解決すべき不具合を対策優先順位とともに出力することが可能である。

3. 計測システムを性能評価する方法

(1) 斜面工事における計測システムの性能

ここではまず、斜面工事の性能を規定する。土木学会において各示方書の改訂が行われ、このなかでも性能規定化は大きな潮流である。斜面工事が都市、郊外を問わず行われることが多く、仮設や道路、造成斜面であれば近接構造物が存在すること、地域の自然、社会環境の保全は工事を実施する事業者の責務であるとの観点に立ち、本論では、斜面工事の性能を以下のように規定する。

- ① 所定の形状に切土または盛土できること（所定の空間が確保されること）
- ② 要求された外力に対して安定し、規定内の変形に留まること
- ③ 作業員の安全が確保されること
- ④ 第三者の安全が確保されること
- ⑤ 周辺構造物の使用性が阻害されないこと
- ⑥ 周辺自然環境に悪影響を及ぼさないこと
- ⑦ 所定の期間、①、②の性能が維持されること
- ⑧ 所定の工期、予算で①～⑥が達成されること

これを支える計測システムの性能を、本論では以下のように規定する。

- a) ②～⑥に必要な情報を必要なタイミングで必要な期間、発信すること
- b) a)が予算内で達成されること

a), b)から斜面工事における計測システムの性能に対する要求事項を、本論では以下のように規定する。

- ① 適切な計測対象が抽出されているか
- ② 適切な計器を用いているか
- ③ 適切な測定間隔で測っているか
- ④ 適切な判断ルールを用いているか
- ⑤ 適切な表示方法を用いているか
- ⑥ 現地での結果表現に対する作業員あるいは関係市民への周知、必要な教育が実施されているか

ここで、⑥の周知、教育については、危険予知活動など施工管理および定期訓練によるところが大きいと考えられるが、本研究では十分な施工管理、定期訓練が実施されており、結果表現と避難など具体的行動への心理的な結びつけは完了しているものとする。

以下では、①から⑤について、具体的に定式化し評価する方法を提案する。

(2) 計測システムの機能と性能定義

ここでは、計測システムの3段階のプロセスとその間のコミュニケーションについて機能分離し、定義することを試みる。

斜面工事の計測システムを2つに分類する（図-1）。

Type1 は研究者自身による室内実験などで、計測値が表示されれば一次受領者である研究者はそれを理解し、結果についての判断ができるというものである。Type2 は現地の計測から得た情報により工事または施設管理者が安全性を判断し、現地で何らかの外部表現を行うことにより、情報の最終受領者である作業員や関係市民に行動のための情報を提供するものである。

斜面工事におけるType2 の計測システムを機能に分割すると、それは「測定」、「判断」、「現地での結果表現」のプロセスの組合せとシステム内の内部コミュニケーションおよび表現の最終受領者である作業員、関係市民との警報表示、避難広報等を介した外部コミュニケーションである。

また、これまでは管理者が現地での結果表示を行うことで管理者の責務が果たされるとの認識であった（狭義の計測システム）。しかし、実際には判断を最終受領者が2段階目のコミュニケーションにより受領、認知の結果として具体的な行動としての避難などの措置を実施し生命や財産の安全が確保されたことをもって本計測工の目的が達せられたことになるのであり、2段階目のコミ

コミュニケーションの性能は十分に吟味されるべきである。

この最終受領者の認知まで計測システムの領域を拡大したものを広義の計測システムと呼ぶことにし、本研究では広義の計測システムの性能を定義することにする。

斜面工事におけるType2の計測システムのプロセスとコミュニケーションは、多くの場合において独立した機能として取り出すことができるので、それぞれの機能において性能が規定でき、評価としての性能値を与えることができると考えられる。

さらに計測システムとしての性能は、個々のプロセスとコミュニケーションの性能の総合的な結果と考えるべきであり、計測システムの性能値をもってこの計測システムの性能を評価するべきであるとする。

ここで、計測システムの性能値 P を以下のように定義する。

$$P = P_1^\alpha \times P_2^\beta \times P_3^\gamma \quad (1)$$

ここで、 P_1 は計測ツールと測定のパフォーマンス、 P_2 は計測値判断のパフォーマンス、 P_3 は現地での結果表現のパフォーマンス、 α, β, γ は各パフォーマンスの重要度により定まる乗数である。式(1)では、 P_1, P_2, P_3 は独立したプロセスであるが、計測システムは各プロセスが機能してはじめて効果を発揮することを考慮している。

この P および P_1, P_2, P_3 を用いて、計測システムの各プロセスおよび全体の性能評価を行う。計測システム全体の性能を評価する場合には、総合評価値である P による性能区分を定義し、 P の値の範囲と関連付ければよく、その方法と閾値は別に説明する。

ここで、前項において示した計測システムに対する要求事項と個々のプロセスとの関係は、 P_1 が計測システムに対する要求事項の①、②、③、 P_2 が計測システムに対する要求事項の④、 P_3 が計測システムに対する要求事項の⑤に対応する。

(3) 計測ツールと測定のパフォーマンスの指標化

計測ツールと測定のパフォーマンス P_1 は、適切な対象が抽出されていることのパフォーマンス、適切な計器が選択されていることのパフォーマンスおよび適切な測定間隔で計測していることのパフォーマンスにより評価し、以下のように定義する。

$$P_1 = P_{1-1} \times P_{1-2} \times P_{1-3} \quad (2)$$

ここで、 P_{1-1} は適切な対象が抽出されていることのパフォーマンス評価値、 P_{1-2} は適切な計器が選択されていることのパフォーマンス評価値、 P_{1-3} は適切な測定時間に計測していることのパフォーマンス評価値である。ここで P_1 は、 $P_{1-1}, P_{1-2}, P_{1-3}$ すべてがパフォーマンスを発揮して成立することに注意する。

ここで、計測システムを導入するにあたり適切な対象が抽出されているとは、管理すべき工事現場や斜面などを安全管理の観点から不測の事態が発生する可能性のある独立した最小単位の集合体と捉え、この最小単位が全て認識されていることと定義し、この最小単位をユニットと呼ぶことにする。

地すべりが懸念される斜面において、ひとつの土塊移動が安全確保に決定的な場合、地すべり計（伸縮計）などによりこの土塊移動が滑落崖をまたいで計測されることが必要条件であり、ここにひとつのユニットが設定される。移動土塊が複数ある場合でそれぞれの挙動が独立である場合、各土塊移動を把握しなければならないので、移動土塊数に相当するユニットを設定する必要がある。

また、地下水位上昇が土塊移動のトリガーと考えられる場合には、当該ユニットに水位把握のためのユニットを定義するなど、崩壊による安全管理への影響の大きさを考慮して、ユニットを設定していく。安全管理の主眼となる対象が斜面下の道路およびその利用者である場合には、崩壊の平面的な広がりだけでなく、地すべり面の深さによる崩壊土量の規模を把握する必要があると考えら

図-1 斜面工事の計測におけるプロセスとコミュニケーション構造

れるので、土塊移動量だけでなく、地すべり面の深度とその挙動を把握するユニットを設定する。

図-2 に斜面工事におけるユニットの考え方を示す。この他にも不測の事態が起きる対象としては、近接構造物、周辺部の载荷、地形改変などが考えられ、斜面の安全を確保するためには監視の必要があるので、この監視対象ごとにユニットを設定する。

たとえば、独立3ユニットの斜面が問題とされ、それぞれに土塊移動、地下水位が観測対象とする必要がある場合、総計6ユニットとなる。つまり、6の監視があればこの斜面の監視は網羅されることになる。ここで注意しなければならないのは、大規模地すべりのなかに小規模な地すべりが存在しているような場合で、小規模地すべりのユニットに変状がないまま大規模地すべりが変状することがある。全体系を把握し、ユニットを設定することの重要性は、4章事例において述べる。

次に、計測システムにおける計器の役割は、必要な情報を必要な期間取得することについて、その精度、耐久性、コストの3つの要素を満たすことである。要求される精度、耐久性に対して、これを下回る計器は低性能であることになるので、厳しい予算制約など特別な条件がない限り選定してはいけない。一方でコストは低廉なほうが望ましいという一般的理解に基づけば、無用にオーバースペックなものは低性能であるということになる。

最後に、適切な測定時間、測定間隔で計測していることの性能評価値を定義する。

測定間隔が長すぎると、兆候の発生から崩壊までの動きを捉えられない、言い換えると避難や財産保全など防

災行動の対応ができない可能性があることを意味する。兆候の発生から崩壊までの時間を考慮し、補強、避難、交通規制など必要な対策を講じることができないのであれば計測している意味がなく、低性能である。

一方で測定間隔が短すぎると、データ量が膨大になりコスト増につながる危険性があるため、要求に見合った測定間隔よりも著しく短い場合の性能は低く評価する必要がある。

(4) 計測値判断の性能の指標化

計測値判断の性能値 P_2 は、以下のように定義する。

$$P_2 = P_{2-1} \quad (3)$$

ここで、 P_{2-1} は安全性に対する適切な判断の根拠となる閾値が信頼に足る方法で決定されていることの性能評価値である。

計測値判断の性能は、危険の判断を行う適切な閾値が定められている性能として定義する。センサー計測結果の品質が良くとも、それを用いて行う判断の論理性が稚拙であると正しい結果表現ができず、結果として安全性を損ねるので、計測システムの総合的な性能としては低いということになる。

斜面の切土工事や自然斜面の維持管理には、さまざまな技術基準が存在し、長期にわたり運用された実績があるので、これに拠ればよい場合と新しい計測方法を導入した場合や極めて複雑な構造、複雑な地盤条件や周辺環境条件の場合で技術基準よりも吟味された解析的検討や

図-2 斜面工事におけるユニットの考え方

経験則に基づく閾値のほうが実用性のある場合が考えられる。これに対して、閾値はあるが根拠が不明である場合や計測値による状態表示のみで閾値を定める判断ロジックがない場合の性能は低く評価する必要がある。

(5) 結果表現の性能の指標化

測定と判断の過程を経た結果表現の性能値 P_3 は、情報の最終受領者が避難などの対応、あるいは補強や交通規制など必要な対策を予定時間内に行うために必要な性能であり、広義の計測システムの性能に対応するものである。本性能値は以下のように定義する。

$$P_3 = P_{3-1} \times P_{3-2} \times P_{3-3} \quad (4)$$

ここで、 P_{3-1} は情報が必要な時間内に伝達されることの性能評価値、 P_{3-2} は情報が正しく伝達されることの性能評価値、 P_{3-3} は伝達された情報が正しく認知されることの性能評価値である。

「情報が必要な時間内に伝達されるか」は、2014年に岐阜県で発生した土石流災害の事例により例示すると、必要な情報は役場に集積されていたが、判断を行っている間に災害発生し、結果として危険情報が伝達されない状況が生じた。ここで本論において問題なのは、表示段階における伝達、表示スピードと独立した段階（計測、判断）における時間遅延も結果として「情報が必要な時間内に伝達されるか」の性能としては同じ結果をもたらす点で、結果表現に関する性能のみでは解決できない点であるが、ここでは計測、判断は速やかになされると仮定する。

「情報が正しく伝達されること」とは、外部表現における情報量の性能を意味している。計測値が連続的に得られて閾値により判断を行っていても、外部表現ツールが貧弱であると限られた情報量しか表示できない。一般的に計測システムの外部情報表現は、表示をどのように行うかにより詳細情報や付属的な情報も併せて伝達することが可能であるが、限られた情報量しか表現できないとすると、何か異常が発生していることのみを周知するしかなく、情報提供としての性能は低く評価する必要がある。

「伝達情報が正しく認知されること」は、表現の最終受領者である作業員、影響範囲内の市民との警報表示、避難広報等を介した外部コミュニケーションの性能である。この性能は表示を得てどのように行動するか教育、訓練も含めて設計される必要があるが、予算制約のある表示デバイスでは、次行動や作業員、一般市民の協力を得る共助に期待してレベル設定することも考えられる。したがって、情報の意味が伝わらないことを最も低性能として情報受領者の認知の程度により性能評価する。

(6) 評価方法と活用

ここで、FMEAによる評点法により、式(5)を用いて優先対処目標を抽出するリスクインデックス (RI: Risk Index)である危険優先度指数 (RPN: Risk Priority Number)を算出する。

$$RPN = P \times O \times D \quad (5)$$

ここで、 P はFMEAでは影響の深刻さ (Severity) を表し、計測システムの性能値 P である。 O はその事象の起こりやすさ (Occurance), D はその事象の検出度 (Detection) である。本研究では、FMEAの手法にしたがい最も完全な性能評価に対して1点を与え、最低レベルまで1点きざみの4段階で評価し、危険優先度指数を算出する。

表-1 にこれまで考察した各プロセスの評価項目と具体的な評価内容を示す。 P の4段階評価は、上位から「完全」、「合格」、「放置できない」、「失敗」相当としている。

計測システムを設計、設置し P_1 から P_3 の評価値を得たら、式(1)により計測システムとしての性能値 P が評価できる。この P を用いて RPN を算出し、計測システムとしての総合評価行う。

計測ツールと測定の評価 P_1 、計測値判断の性能の評価 P_2 および結果表示の性能 P_3 の性能評価値はそれぞれ独立であるが、集計値である性能値は連続的な値をとるので、各性能項目の重みを考慮して集計し、別に定義する計測システムの性能ランク S と P の範囲を関連付け、閾値を設定する。これにより、計測システムの性能レベルにより表現することが可能になる。ここで、計測システムの性能ランクは表-2のとおり定義する。

例えば現場内に複数の斜面があり多くの計測システムが設置されているような場合でも、総合評価値による計測システムの性能ランク (表-2) を定義することにより、現場内の複数の計測システムについて性能ランクを比較することが可能になる。さらに優先的に改善すべき計測システムを抽出することが可能になる。さらに、当該計測システムの「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の各プロセスのいずれをどこに着目して優先的に改善すべきかは、表-1の配点結果から抽出可能である。

斜面工事は予算制約下で実施されることが前提であるので、本方法により優先順位を付けて計測システムを改善していき、所与の予算に達した段階で性能ランクⅢ (放置できない) やⅣ (失敗) が残っている場合には、斜面工事の性能を支える計測システムの性能が不十分であるとして予算増額を求めることになる。また、すべての計測システムの性能ランクをⅠあるいはⅡといった目標以上に改善するにあたり費用比較すれば、工事品質の改善の効率化を計量的に表現することが可能になる。

表-1 FMEAによる評価表

RPN(Risk Priority Number)を算出するための項目	評価点	性能呼称	計測ツールと測定の性能 P_1			計測値判断の性能 P_2	現地での結果表現の性能 P_3		
			適切な対象が抽出されていることの性能評価値	適切な計器が選定されていることの性能評価値	適切な測定時間で計測していることの性能評価値	計測値判断の性能評価値	適切な時間内に情報発信されていることの性能評価値	情報内容が正しく伝達される性能評価値	情報内容が正しく認識されることの性能評価値
不 具 合 モード : Failure Mode			計測ツールや測定方法が悪く、良い計測値が得られない			計測値判断が悪く状態把握ができない	結果表現が悪く、情報受領者が正しい行動を取ることができない		
計測システムの性能値 P : 影響の深刻さ Severity	1	完全	クリティカルなユニットも含め全体系が把握されている	要求に見合った精度、耐久性の計器が選択されている	要求に見合った測定時間、測定間隔が実現されている	技術基準または確かな経験則による閾値が決定されている	緊急避難の他、被害最小化などの行動に必要な時間が確保される	情報が正しく伝達される	教育や表示方法の対処により情報の意味が完全に正しく認識される
	2	合格	クリティカルなユニットは把握されているが、全体系までは困難	要求に見合った精度、耐久性の計器が選択されているが、オーバースペック	要求に見合った測定間隔より短い	現地をモデル化した解析的検討または経験則により閾値が提案されている	緊急避難に必要な最低限の時間が確保される	情報がほぼ正しく伝達される	教育や表示方法の対処により情報の意味がほぼ正しく認識される
	3	放置できない	クリティカルなユニットが把握されていない	要求に見合った精度の計器であるが、耐久性について確実でない	要求に見合った測定時間よりも長い	何らかの閾値が定められている	発災までに情報は伝わるが、緊急避難等が保証されない	異常発生などが伝わる	何かが異常であると認識される
	4	失敗	計測されていない	要求に見合った精度、耐久性が満たされない計器が選択されている	測定間隔が検討されていない	状態表示のみで判断ロジックがない	発災に情報伝達が間に合わない	情報が伝達されない	情報の意味が伝わらない
不 具 合 の 起 こ り や す さ : Occurance	1		計測期間中に発生する可能性はないか極めて小さい			<div></div>	計測期間中に発生する可能性はないか極めて小さい		
	2		計測期間中に発生する可能性は小さい				計測期間中に発生する可能性は小さい		
	3		計測期間中に発生する可能性が数回				計測期間中に発生する可能性が数回		
	4		計測期間中にしばしば発生する				計測期間中にしばしば発生する		
不 具 合 の 検 出 度 : Detection	1		自己検知装置等により不具合は確実に検出される				自己検知装置等により不具合は確実に検出される		
	2		不具合の検出は可能で、点検等により検出される				不具合の検出は可能で、点検等により検出される		
	3		異常値など経時変化などから検出可能である				異常発信などにより不具合の検出が可能である		
	4		検出は困難である				検出は困難である		

なお、 O および D は、計測システム不具合対処の優先順位を決める際に重要な項目であるが、斜面工事の計測実績に基づく知見がない。したがって今後導入を検討するものとして、本論では $O = 1$ (計測期間中に不具合が発生する可能性はないか極めて小さい)、 $D = 1$ (不具合は確実に検出される) として扱う。

4. 適用性の検討

(1) 斜面工事事例

本事例は、地域景観保全を目的としてトンネル構

表-2 総合評価値による計測システムの性能ランク

性能ランク S	性能呼称	性能評価
I	完全	財産保全など含め、十分に避難の安全を保証するシステム
II	合格	共助も期待し、生命保全に必要な最小限での避難の安全を保証するシステム
III	放置できない	IIが確実でなく、改善を要するシステム
IV	失敗	緊急に改善を要するまたは工事、施設保全計画の継続に対して警鐘を与えるべきシステム

造により計画された道路における期間限定の仮設切土斜面の掘削である（図-3、図-4）。

切土斜面は施工範囲、時期からA斜面およびB斜面に分けられている。本地域の地質は、更新世の段丘堆積物からなるやや硬質な未固結の粘性土、砂礫、砂質土の互層である。この地域の粘性土層には層状破砕帯が観察されているが、複数のボーリング調査等により連続性は薄いものと判断され、切土斜面の設計が行われた。

工事はA斜面が先行して行われた。2011年7月以降、表層がブロック状にはく離し、小崩壊を繰り返していたため、モルタル吹付けと鉄筋挿入工でその都度補強して斜面の切り下げを実施していたが、2011年10月に斜面頂部から全体が崩壊してしまった（写真-1）。

施工者の原因究明により、直接的な崩壊の原因は、小崩壊を繰り返したことや地下水影響による地山の脆弱化、切土による応力解放であるとされた。切土の安全監視のための計測システムは、A斜面の左端部に地すべり計（伸縮計）を設置し動態監視するとともに、初動対応と関連づけた管理レベルを定めて管理を行っていた。

計測結果によると、崩壊前日に下段（SI-2）変位計の計測値は要監視レベルに近づき3.8mmであったが、崩壊当日（10/16）計測開始時には、要対応レベルを超過し約7

時間後に崩壊、計測不能となっている（図-5）。

この時期は夜間の自動計測は行っていなかったため、要監視レベルから要対応レベルへの移行時期の計測データが得られていない。この結果、変形拡大の検知が遅れたとともに、要監視レベル到達後の挙動が早かったこともあり、押さえ盛土など崩壊抑止の緊急対応がとられることなく崩壊してしまった。

この結果から、計測データ自体は当初予定時刻に得られているのでA斜面に設置された計測システムの機器精度や稼働、監視レベル設定に問題はなかったが、測定時間および測定間隔に問題があったことが考察される。

2段設置された上部の変位計（SI-1）は反応せず、下段である（SI-2）が滑落崖をまたぎ設置されているので、平面的ユニット選択は概ね妥当であったといえる。しかし、弱層の連続性に起因する崩壊を考慮した全体系までは把握できていなかったことが施工者により報告されており、平面ユニットを包括する大きな崩壊ユニットを見逃していたと考えられる。

情報伝達に関する性能では、結果として発災に情報伝達は間に合っていないが、このプロセスへの入力がないことが原因であり、性能は低いとはいえない。また、伝達情報の正しさや認知については、工事続行にクリティ

図-3 開削トンネル掘削の標準部断面図

写真-1 斜仮設斜面の崩壊状況

図-4 開削トンネル掘削斜面配置図

図-5 A斜面の変位計計測結果

カルな人的被害、物的被害は免れており、事前のリスク管理や安全配慮教育はなされていたと考えられた。

遅れて施工されたB斜面では、A斜面崩壊の経験を踏まえ、地すべり変位計の配置を見直し、ユニットの網羅性を高めた機器配置が採用された。また、計測時間間隔も見直され、1回/hrで18時から7時まで夜間のデータ採取を行っていなかったものを夜間を含めて10分ごと測定の動態観測にするとともに、異常判断からタイムラグなしに結果表現を行うOSV(On-Site Visualization)が導入された。

2012年4月、最下段まで掘削を完了していた斜面が、降雨等による表面水および地下水により部分的に変状した(写真-2、写真-3)。

写真-2 B斜面上部の状況

写真-3 B斜面変状の状況

図-6 B斜面の変位計計測結果

計測は、変位計(S2-2)が4月3日10時の降雨とともに引張り側に変位が始まり、同時に下段の変位計(S2-3)が圧縮側に変位していることをとらえている(図-6)。4月5日には目視でも変位計の防護管が変形しているのが確認され、監視が強化されるとともに、応急復旧対策工が検討された。その結果、表層付近の部分的な挙動であると判断されたことから、鉄筋挿入工および水抜きボーリングを追加することで大規模な変状に進展させることなく工事完了することができた。

この2つの斜面における計測システムの性能値 P と危険優先度指数 RPN を、これまでの定義により算出し考察する。斜面Bにおける計測は、ユニットが把握されるとともに、対策工実施の余地のある測定時間で計測され、崩壊の未然防止に成功しているため、計測ツールと測定の性能 P_1 および測定値判断の性能 P_2 、結果表示の性能 P_3 はいずれも最低限満足な性能を有していたといえる。本斜面の計測結果の表示には、OSVに基づく原位置での危険状態表示が取り入れてあり、斜面Aの場合のような急激な変状発生時に斜面下で作業する作業員への避難告知も十分な性能が与えられていた。

一方、斜面Aでは、変位事象はとらえることができたものの、測定時間間隔と情報伝達時間に要求性能に対して不十分な点があり、緊急対応の機会を逸してしまった可能性がある。この考察を表-1を用いて評価し、式(1)による計測システム性能値 P および RPN を算出した(表-3)。ここで、式(1)の α, β, γ および O, D は1.0とした。なお、今後の事例蓄積によりこれらは最適化を目指すこととする。

結果、斜面Aの計測システム性能値 P は $P=96$ となり、改善を実施した後の斜面Bは $P=8$ となった。斜面Aは対応が間に合わないで崩壊しており、計測システムの性能ランクとしてはIV、斜面Bは変状は発生させているものの緊急的な避難の安全は保証できるレベルであったことが推定されることから性能ランクはIIと推定した。

表-3 斜面A, Bの性能評価値およびRPN

性能項目		斜面 A		斜面 B	
P_1	P_{1-1}	6	2	1	1
	P_{1-2}		1		1
	P_{1-3}		3		1
P_2		1	1	1	1
P_3	P_{3-1}	16	4	8	2
	P_{3-2}		2		2
	P_{3-3}		2		2
P		96		8	
O		1		1	
D		1		1	
RPN		96		8	
S		IV		II	

(2) モデルケースによるスタディ

ここで、性能ランクの閾値の設定を試みるため、19ケースのモデルケースを作成し、5名の専門家に判定させるスタディを行った。ここで専門家の属性は、斜面防災の経験が豊富な建設部門、応用理学部門のコンサルタント技術士とし、個々の判定は、アンケート方式によりモデルケース図とコメントにより P_1 から P_3 の評価を行い、自身の判定した集計値を参考として主観により表-2の性能ランクを選定させる方法とした。5名の判定結果の整理方法は、性能評価値は5名の平均値、性能ランクは5名の専門家が判断した性能ランク値を平均し、性能ランクⅠからⅣの性能ランクに関係付けた。ここで、各性能ランク閾値は最小値1.0と最大値4.0を均等に区切ることとし、今後の事例蓄積により最適化する（表-6）。

モデルケースの一覧および判定結果と性能ランク選定の平均値を示す（表-4、表-5）。専門家判定は個別に実施したが、Case6、Case9、Case12で2レンジの判定差となった以外は、性能ランクの判定差が1レンジ以内に収ま

り、概ねバラツキなく判定がなされたものと考えられる。

個別プロセスの集計値である性能値 P を算出した結果および事例研究による判定結果を合わせて示す（図-7）。本図では細部を見るため P の上限値を20としている点に注意が必要である。各ケースの真値は表-5に示す。

モデルケースは、様々な要改善点を持つケースを机上設定したため、個別プロセスの集計値である性能値 P は大きなばらつきを示す結果となった。

改善を要すると判断される性能ランクⅢ、Ⅳと避難の安全が保証されると判断された性能ランクⅠ、Ⅱで区分すると、両者には性能値 P の差が見られるようであるが本ケースのみで閾値を定めることは困難である。

さらに、性能ランクⅢとⅣは改善の緊急性によって性能ランクを区分したモデルであったが、性能ランクⅣの性能値 P が性能ランクⅢを上回るケースも見られ、ⅢとⅣのランク差は有意とはいえない。また、性能ランクⅠ、Ⅱのランク差も本ケースだけでは有意性を求めることは難しい結果となった。

表-4 性能ランク検討のためのモデルケース一覧

Case	Case 内容	Case	Case 内容
1	斜面の安定について意識されていない。そのため、観察や危険区域の指定もなされていない。	11	複数土塊のすべてに計測機器が設置され、判断ロジックや結果表示は良い状態。しかし、クリティカルなユニットがどれか把握されていない。
2	斜面の安定に問題ある事は認識されているが、計測は行われていない。	12	複数土塊のどれがクリティカルなユニットであるか把握されていないし、計器も不十分で測定間隔も吟味されていない。とりあえず計測機器だけは付けてみた状態。
3	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内に提供され理解も容易だが、自宅でCATVを見ないと情報が得られない。	13	複数土塊のなかでクリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置されている。結果表現も良いが、閾値がどのように定められたのか明らかでないため、誤報の可能性がある。
4	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていて全体系が把握されていない。結果表現は時間内に提供され理解も容易だが、自宅でCATVを見ないと情報が得られない。	14	複数土塊のなかでクリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置されている。結果表現も良いが、閾値の信頼性が公知の基準等でなく、現場判断に任されているため、技術的な信頼性に疑問がある。
5	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	15	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され、閾値も良いが、管理事務所経由で情報発信し、素早い広報手段が確立されていないため、発災までに情報が伝わらない。
6	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_1 , P_2 , P_3 とも良いが、土塊 B, C が無視されていて全体系が把握されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	16	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され、閾値も良いが、かろうじて自宅内避難など緊急対応が可能な時間でしか情報が伝わらず、被害を避けることはできない。
7	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、計器がオーバースペックで P_1 が良くない。土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	17	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置されて閾値設定も良いが、かろうじて自宅内避難など緊急対応が可能な時間でしか情報が伝わらない。また情報の意味が周知されていないので、意味が伝わらない。
8	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、計器がオーバースペックで P_1 が良くない。土塊 B, C が無視され全体系が把握されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	18	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され、閾値も良く次行動に必要な時間が確保される。しかし、発光などの情報提供しかなく、周知も不十分なので意味が伝わらず異常としが認識されない。
9	複数土塊 ABC があり、土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、測定間隔が長すぎる。土塊 B, C が無視されていてクリティカルなユニットが認識されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。	19	クリティカルなユニットは把握され、計測機器は適切に配置され結果表現も提供範囲、提供時間について十分に吟味され、確実性がある。閾値も技術基準に基づき信頼性がある。
10	複数土塊 ABC があり、クリティカルなユニット土塊 A に対する計測は P_2 , P_3 とも良いが、測定間隔が長すぎる。土塊 B, C が無視され全体系が把握されていない。結果表現は時間内にその場で提供され、理解も容易である。		

表-5 専門家アンケート判定結果

Case	計測ツールと測定の性能			計測値判断の性能	現地での結果表現の性能			P	S	
	適切な対象が抽出されていることの性能評価値	適切な計器が選定されていることの性能評価値	適切な測定時間で計測していることの性能評価値	計測値判断の性能評価値	適切な時間内に情報発信されていることの性能評価値	情報内容が正しく伝達される性能評価値	情報内容が正しく認識されることの性能評価値	計測システムの性能値	性能ランク 平均値	性能ランク (表2)
1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	16384.0	4.0	IV
2	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	16384.0	4.0	IV
3	2.8	1.0	1.0	1.0	1.6	2.0	1.6	14.3	3.4	IV
4	2.0	1.0	1.0	1.0	1.6	2.0	1.4	9.0	2.8	III
5	2.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.6	5.4	3.0	III
6	2.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.6	4.6	2.2	II
7	2.8	2.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	9.4	3.0	III
8	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	6.7	2.8	III
9	2.8	1.0	2.6	1.0	1.0	1.2	1.4	12.2	3.4	IV
10	2.0	1.0	2.6	1.0	1.0	1.2	1.4	8.7	2.8	III
11	2.6	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.4	4.4	2.2	II
12	3.0	2.8	4.0	3.2	1.2	1.2	1.8	278.7	3.0	III
13	1.0	1.0	1.0	3.2	1.0	1.0	1.2	3.8	3.0	III
14	1.0	1.0	1.0	2.8	1.0	1.0	1.0	2.8	2.4	II
15	1.0	1.0	1.0	1.0	3.8	3.6	3.2	43.8	3.2	III
16	1.0	1.0	1.0	1.0	2.4	1.8	2.0	8.6	3.0	III
17	1.0	1.0	1.0	1.0	2.2	2.4	4.0	21.1	3.2	III
18	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	2.8	3.2	12.5	2.8	III
19	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	I

5. 結論

本研究では、斜面工事の計測システムにおいて性能規定化が必要であるとの認識に立ち、計測システムの性能を評価する方法について、簡便で評価が容易なFMEAの導入を提案、その有効性について検証した。

斜面工事における計測システムを性能規定化することは本研究の方法において可能であり、本研究の方法に拠れば、「測定」、「判断」、「現地での結果表現」の各プロセスにおいて性能を評価し、必要な改善を最小の手順で明確化することができる。さらに事例の収集と研究を進め、さまざまな斜面に対応する性能ランクの閾値を設定することにより性能を数値化しランク評価できれば、関係市民や施設利用者、事業者に対して効果的なアカウントビリティを確保することが可能になると考える。

広がった生活圏のコンパクト化が求められるなか、災害の契機となる外力の高まりや事業者の予算制約が斜面工事における計測システムに低コスト化を要求している。さらにIoT技術の進歩によりインフラ計測全体のありようが変化しつつある。

本研究は、そのような流れのなかで計測システムの性能をどのように評価するかを研究したものであり、このような性能評価指標が明示されることにより、斜面工事だけでなく多くの分野の工事の計測システムを性能評価することが可能になるほか、市民の使用に供されている完成品としての構造物の安全性や維持管理段階での性能

表-6 アンケート性能ランク値と性能ランクの関係

性能ランク平均値	性能ランク
3.25 ～ 4.00	IV
2.50 ～ 3.25	III
1.75 ～ 2.50	II
1.00 ～ 1.75	I

図-7 モデルケース性能値と性能ランクの関係

保持の計測にも展開が可能であると考えている。

謝辞

本研究は、平成24年度国土交通省建設技術研究開発助成制度による採択課題「On Site Visualizationのコンセプトに基づく低コスト・低消費電力型モニタリングシステムの開発」における3年間の研究の一部を取りまとめたも

のであり、産学官テーマ推進委員会（委員長：沖村 孝 神戸大学名誉教授）では各委員より本研究への有用な情報をご提供頂くとともに、本手法の開発についての確なご指導を頂いた。また、国、自治体協力者各位ならびに共同研究者各位には心から謝意を表する。

また、適用性検討で実工事の事例を採り上げるにあたり、計測データをはじめ関連情報をご提供頂いた西松建設株式会社大阪支店各位のご厚意にも合わせて謝意を表する。

参考文献

- 1) 櫻井春輔：トンネル工事における変位計測結果の評価法，土木学会論文集 No.317, pp.93-100, 1982.
- 2) 櫻井春輔：NATM における現場計測と管理基準値，土と基礎，34-2 (337)，pp.5-10, 1986.
- 3) 藤原明敏：地すべり調査と解析－事例に基づく調査・解析法－，理工図書，1987.
- 4) (独)土木研究所：厳しい条件下での使用に耐えうる地すべり観測装置の開発 共同研究報告書整理番号第 393 号，pp.4.1-4.29, 2011.
- 5) 防災白書 平成 26 年度版，pp.37, 2015.
- 6) 防災白書附属資料 平成 26 年度，pp.53-55, 2015.
- 7) 総合的な土砂災害対策の推進について，pp.30-38, 中央防災会議防災対策実行会議 総合的な土砂災害対策検討ワーキンググループ，2016.
- 8) 小林寛，運上茂樹，加納 匠：加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発，土木学会地震工学論文集，vol.28, pp.23-29, 2005.
- 9) 野村貢，戸本悟史，西條敦志，木村定雄，芥川真一：MEMS 技術によるトンネル内付属物保全モニタリングシステムの研究，土木学会論文集 F1 (トンネル工学)，Vol.71, No.3 (特集号)，I_63-I_79, 2015.
- 10) 野村貢，戸本悟史，西條敦志，木村定雄，芥川真一：トンネル内付属物保全モニタリングシステムの実用化についての研究，土木学会論文集 F1 (トンネル工学)，Vol.72, No.3 (特集号)，I_63-I_79, 2016.
- 11) 徳永法夫，井上健一，菊池秀夫，日野泰雄：光ファイバセンサを用いた計測システム等の検討，土木計画学研究・講演集，vol.27, pp.IX(248), 2003.
- 12) 芥川真一，野村貢，山田浩幸，片山辰雄：On Site Data Visualization の概念と岩盤工学における適用可能性について，第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，vol.39, pp.151-156, 土木学会，2010.
- 13) 芥川真一：On Site Visualization による安全・危険情報の原位置可視化手法（特集 防災，安全・安心を確保する社会基盤整備），一般社団法人日本建設機械施工協会誌，66(9)，pp.42-47, 日本建設機械化協会，2014.
- 14) Chitoshi IZUMI, Shinichi AKUTAGAWA, Mitsugu NOMURA, Reiko ABE, Haihua ZHANG: Quality Assessment of Effectiveness of Safety Monitoring Based on On-Site Visualization Using New Devices with Various Cost Ranges, Journal of JSCE, Vol.3, 311-327, 2015
- 15) 大原美保：自治体による PUSH 型・PULL 型の災害・避難情報伝達に関する実態調査，日本地震学会論文集 第 15 巻，第 5 号（特集号），pp.2-16, 2015.
- 16) 斜面の崩落の検知センサーと検出システムの開発，土木研究所共同研究報告書 整理番号 446 号，pp.2_37, 2013.
- 17) 岩崎智治，原口勝則，佐藤渉，増成友宏，内田純二，清水則一：GPS を用いた自動変位監視のための Web システムの開発，Landslides，Journal of the Japan Landslide Society, Vol.49, No.4, pp.174-185, 2012.
- 18) 玉手聡，堀智仁，伊藤和也，吉川直孝：斜面の浅い部分のせん断ひずみ計測による崩壊監視の提案，労働安全衛生総合研究所特別研究報告 JNIOH-SRR-No.42, pp.25-33, 2012.

(2017. 5. 15 受付)

A RESEARCH PROPOSAL FOR ESTIMATING PERFORMANCE OF A MONITORING SYSTEM IN SLOPE CONSTRUCTION

Mitsugu NOMURA, Shinichi AKUTAGAWA and Takeshi SATO

It is an administrative requirement for a slope engineer to secure safety of construction for workers on-site, engineers, owners and citizens. Various monitoring systems have been built and used so far, but there have been no comprehensive way to meet an accountability of the performance of the slope monitoring system up to now.

This paper proposes a new way for slope engineers to design and quantitatively evaluate the performance of a slope monitoring system by using the fundamental concept stated in FMEA with a special interest in employment of the On-Site Visualization strategy. Case studies on an actual slope where a small-scale collapse actually occurred, together with a set of simulation of evaluating fictitious monitoring projects by experienced engineers, demonstrate that the proposed evaluation scheme gives a new way for slope engineers to design and evaluate a monitoring system to secure safety in a quantitative manner.