

- 18 GIS を用いた斜面維持管理支援システムの開発と

既設構造物周辺斜面への適用

Slope maintenance system using GIS, and application to slope around the existing structure.

小早川博亮¹・久野春彦²

Hiroaiki Kobayakawa, Haruhiko Kuno

抄録：既設構造物の合理的な保守・管理のためには、構造物に関する地盤情報を一元管理することが重要である。地盤情報を一元管理可能な、GISを用いた斜面維持管理支援システムを開発した。システムは維持管理の段階に応じたマップの作成するための次の3つのツールを核とする。(1)地盤情報や斜面の変位の情報などを蓄積するデータベース、(2)種々の変位の情報の相互関係を把握し斜面全体の挙動を捉える全体挙動評価ツール、(3)斜面の安定性を評価する安定性評価ツール。開発したシステムを、既設構造物周辺の斜面に適用し、各ツールによって斜面の維持管理の段階(観察、計測、安定性の評価)に応じたマップを作成できることを確認し、マップの重ね併せにより斜面を管理する方法を提示した。

Abstract: The geological and geotechnical information for maintenance of slopes around existing structures is usually managed by individual branch in charge of the structure. Unitary management of the information is important for rational maintenance. Then we developed a computational slope maintenance system to deal with both geological and geotechnical information based on geographical information system (GIS). Following tools were programmed to estimate geotechnical information on GIS: (1) database-system of geological and geotechnical information, (2) total behaviors estimation tool for slope displacement data and (3) slope stability evaluation tool. The function of each tool was verified by applying pre-existing study of slope stability. This verification shows an example for practical use of the system. This unitary system could be efficiently used for maintenance works.

キーワード：斜面、維持管理、主成分分析、データベース、安定解析、地理情報システム、計測
Keywords : Slope, Maintenance, Principal component analysis, Database-system, Stability analysis, Geographic information system, Measurement

1. はじめに

既設構造物周辺の斜面を合理的に保守・管理していくためには、斜面に関連する情報を一元管理することが重要であり、随時安全管理上あるいは保守業務遂行上必要となるデータの解析や、安定性評価結果を反映させていくことが重要である。この地盤情報は位置情報と、地質や岩種、あるいは変位や地下水位などの属性情報から構成されており、合理的な管理のためには、各種の属性情報を組み合わせて分析することが必要と考えられる。しかしながら、各属性情報を整理した図は個別に管理されていることが多く、組み合わせて分析することは必ずしも容易ではない。

地理情報システム (GIS) は空間分析を行うためのコンピュータとソフトウェア及びデータからなる一連のシステムである。GIS は、位置情報とそれに関連付けられた属性情報からなる空間情報を管理、分析、表

示することができ、その最大の利点は各種の空間情報を重ね合わせて表示できることである。このため、GIS は先の課題を解決するための有効なツールである。

本研究では、既設の構造物の合理的な保守・管理に役立てるために、GIS を用いて構造物周辺地盤に関する情報を一元管理し、それらのデータを分析できる斜面維持管理支援システムの構築を目的とする。そのプロトタイプシステムとして、水力構造物に近接する斜面を事例とした検討を行う。

以下では本システムの構築に必要な要件とその現状を整理したうえで開発すべき項目(ツール)を示し、具体的なプロトタイプシステムの内容を述べる。そして、本システムを適用した既設水力構造物周辺の斜面の概要を述べ、開発ツールの機能を検証した結果を示す。

1 : 正会員 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域
 (〒270-1194 我孫子市我孫子 1646, Tel :04-7182-1181, E-mail : h-koba@criepi.denken.or.jp)
 2 : 非会員 電力中央研究所 地球工学研究所 地圏科学領域

2. 開発すべきシステム

ここでは、既設構造物の斜面を対象にしたシステムに求められる要件を整理するとともに、それを満たすツールの現状を整理する。その上で、開発システムのご概念と開発項目を述べる。

(1) 開発システムに求められる要件

a) システムの機能

既設構造物の維持管理において、近接する斜面に動きが認められる場合には、動きの性状（動きの範囲、時期、程度、動きに影響している作用力など）を適切に把握する必要がある。この動きの性状の把握は、斜面の維持管理の中で行われる。

斜面の維持管理は、観察・計測による現状での斜面の状態の把握と、必要に応じた安定性評価の実施の段階がある。この維持管理の各段階（観察、計測、安定性評価）で得られた結果は、対象地盤の位置情報と属性情報からなる空間情報として整理することができる。例えば、観察では定期点検記録や地表踏査、ボーリング調査などの結果があり、これらは、地盤変状や微地形、地盤性状等の空間情報である。計測段階での空間情報には、地表面や地盤内の変位やひずみ、地下水位、気象情報（気温や降水量など）などがある。さらに、安定性評価段階では、対象地盤の変形や応力、安全率などを予測・評価した結果がある。

動きの性状はこれらの空間情報に基づいて把握され、特に各空間情報の相互関係の分析は重要である。たとえば安定性評価の変形の大きい箇所と観察による変状箇所の関係を把握することにより、安定性評価の妥当性を検討することができるし、逆に定期点検箇所が適切かどうかの検討や、新たな調査箇所の検討にも役に立てることができる。これら相互関係の分析結果は、斜面の動きの性状の把握に有益な情報を提供することになる。

GISは空間情報を扱うことが可能であり、属性毎にマップを作成できるものである。各マップは位置情報で関連付けられているため、重ね合わせによる分析が可能となる。この重ね合わせの機能を用いることにより、空間情報の相互関係を分析ができる。そこで、斜面の維持管理の観察、計測、安定性評価という一連の流れにおいてGISを用いれば、維持管理における空間情報の分析、特に重ね合わせによる分析が可能となる。よって、システムに求められる要件は、維持管理の段階（観察、計測、安定性評価）における空間情報を、マップで表現可能にすることと考えられる。

b) システムの運用

前述のシステムは構造物の管理に関連する箇所からLANやインターネットを介してアクセスすることにより、効率的な斜面の管理が可能となると考えられる。

本システムを用いた斜面の管理におけるアクセス方法としてインターネットGIS¹⁾が考えられ、現在主流になりつつある。たとえば、防災科学技術研究所と科学技術振興機構によって開発された地すべり地形分布データベース²⁾や新潟県中越地震復旧・復興GISプロジェクト³⁾などはその典型的な例である。

地すべり地形分布データベースではインターネットを利用してサーバに蓄積されている地図や画像、解析結果などの地理情報を、クライアントに配信することを目的として運用されており、これらの情報は、既設構造物の維持管理における調査などに有効である。また、新潟県中越地震復旧・復興GISプロジェクト³⁾は、災害対応、復興活動を支援するとともに、住民に身近な情報を提供することを目的として作成されている。具体的な被災状況やライフライン復旧情報等をWEB上のデジタルマップに集約し、各種関係機関で情報共有を図っている。今後の構造物の合理的な維持管理に参考になる事例と考えられる。

本システムは、以上のような不特定多数を対象とした情報配信でなく、セキュリティを考慮して特定のクライアントにのみ情報配信する仕組みが必要となる。このためにはセキュリティ機能を備えたシステム⁴⁾にサーバを設置してシステムを構築することも選択肢の一つである。もちろん、各箇所にはサーバを設置するシステム構成も可能であり、この場合にはLANなどを介してサーバにアクセスすることになる。システムの運用に関する現状は以上の通りであるが、ここでは、この運用に関する検討は対象としていない。

(2) マップ作成に必要なツールとその現状

a) マップ作成のためのツール

GISで斜面の観察、計測、安定性評価の段階における空間情報をマップで表現するためのツールを検討する。維持管理の合理性の観点から、それぞれのマップを作成するためには、①既設構造物の地盤に関する情報を一元化し、各々のマップ作成のためのデータベース(DB)として機能し、調査結果などを表現するツール、②それらの情報の総合的な分析による地盤の挙動把握を把握し、空間情報として表現するツール、③安定性評価結果を表現可能なツール、の3つが必要と考えられる。

①は、各箇所に散在している情報を一元化して合理化を図るものである。DBは定量的な変位や地下水位などの計測情報と、定性的な変状などの観測記録や地盤の調査結果をデータとして格納し、必要な時期や場所に応じてデータを抽出して解析に用いたり、マップを作成するために用いる。②は種類・量ともに膨大な計測データに基づく斜面挙動の分析の合理化を図るものである。斜面の範囲が広く、たとえば浅いすべりと深いすべりが存在するなどの複合的な動きを示す場合に

表-1 マップ作成に必要なシステムの現状 (2002年12月現在)

ツール	名称		Geo-Analyze ⁶⁾	3次元地質解析支援システム ⁷⁾	発電所地質調査データ管理三次元GIS ⁸⁾	斜面カルテシステム ⁹⁾
	ツールの必要要素	地盤-BASE/Win ⁵⁾				
DB	地盤情報	○	×	○	○	○
	変位情報	×	○	×	×	○ (定性的)
全体挙動データの分析	時系列変動	×	○	×	×	—
	相互関係	×	×	×	×	—
安定性評価	地盤モデル化	×	×	○	△	—
	安定解析	×	×	×	×	—
概要		ボーリング情報をDB化	観測結果の時系列変化を単体で表示	ボーリングデータ、検層・試験結果から地盤のモデルを作成	地質調査結果、柱状図、断面図を表示し、地質データの相互関係を三次元的に把握	斜面の巡視・点検記録をカルテとして作成・管理

は、計測値の相互関係を分析し、計測値が示す動きはどの動きを反映しており、斜面全体としてどのように挙動しているか（ここでは斜面の全体挙動と呼ぶ）を把握することが重要であり、このツールが必要となる。ただし、対象斜面が狭い範囲で、動きの機構が単純で明確である場合には1つの計測器で地盤の挙動を把握することが可能なため、このツールは必要ない。さらに③は、維持管理の段階に応じたマップを重ね合わせて分析することにより、維持管理に対して有益な情報を提供するために必要である。解析方法は、目的に応じて種々の方法があり、その結果を表示する方法が必要である。

b) 斜面の維持管理に関連したマップ作成に必要なツールの現状

上記のツールに関連し、現在までに開発されているシステムを、既往の文献やWEBなどの情報に基づき調査し、主なもの^{5)~9)}をまとめて表-1に示す。表には、開発するシステムに必要と考えられる前述の①既設構造物に関する地盤情報の管理 (DB)、②計測結果に基づく地盤の全体的な挙動の把握(全体挙動データ分析)、③地盤の安定性の検討 (安定性評価) の3つの必要ツールの観点から、特徴を整理した。整理にあたっては、各ツールをなす以下の必要要素を各システムが備えているか否かについて留意した。DBの必要要素は、対象とする地盤の地質や物性、通常の点検・管理などの「地盤情報」と、地盤の計測結果とそれに関連する気温などを含めた「変位情報」とした。また、全体挙動データの分析の必要要素は、地盤の計測結果の「時系列変動」と各計測器の相互関係を把握する「相互関係」と考えた。さらに安定性評価に関しては、評価のための「地盤のモデル化」と安定性評価を行うための「安定解析」をそれぞれ考えた。

表-1に示すように、既往のシステムはボーリング

データに基づく地盤の情報や、変位の情報をDBとして格納することがほぼ可能となっている。地盤情報のうち点検管理記録などの地盤変位に関連する情報については例えば「斜面カルテシステム」は、カルテとして紙ベースで残すことができる仕組みになっているが、それを空間情報としてGIS上で表現するには至っていない。

また、計測結果を時系列で把握することができるものも多いが、いずれのシステムも相互関係を把握することはできず、地盤の全体的な挙動に関する情報を提供できるシステムは存在しない。また、「3次元地質解析支援システム」や「発電所地質調査データ管理三次元GIS」などでは安定性評価のための地盤のモデル化は可能となっている。しかしいずれのシステムも、具体的に安定性評価を行い、その結果を表示できるようなものにはなっていない。さらに、既往のシステムでは、斜面の現状の動きを示す全体挙動の分析結果と、現状での安定性評価の結果が、どのように関係しているかを把握することが容易でない。

(3) システムの概念と開発項目

以上より、開発すべきシステムを、図-1のように考える。図に示すように3つのツール (DB、全体挙動データの分析、安定性評価) をGISで取り扱うことにより、維持管理の3段階 (観察、計測、安定性評価) に対応した3つのマップの作成が可能になる。

図-1には、各ツールの開発箇所を、「本研究で開発した箇所」として灰色で着色して示した。具体的に開発する箇所は以下の通りである。まず、観察情報 (点検管理記録、地表踏査結果、調査による地盤情報など) と、計測情報 (地盤の変位や気象情報) を統合して格納するためのDBと、そこから得られる観察情報をマップとして表現する方法の開発である。これらの観察段階での空間情報を表すマップは、変位とその確認時期

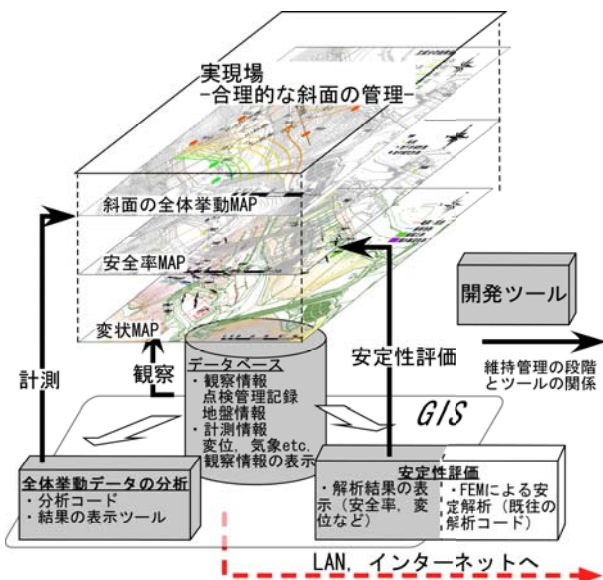


図-1 システムの概念図

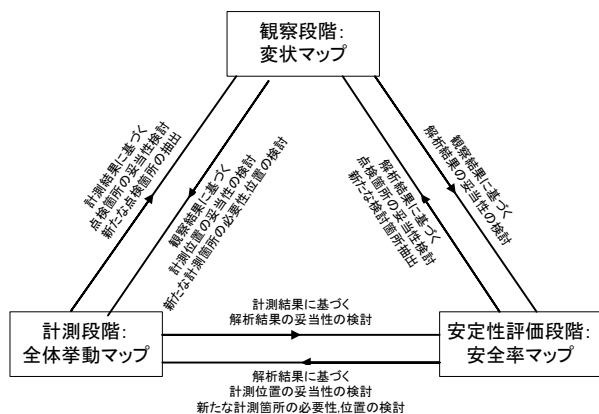


図-2 維持管理におけるマップ重ね合わせの利点を示したものであるから、変状マップと呼ぶ。

次に、各々の計測値の相互関係を明確にし、そこから斜面が全体としてどのように変動しているかを明らかにするための全体挙動分析ツールと、分析結果をマップとして表現する方法の開発である。全体挙動の分析は、システムのDBに格納された変位情報に基づいて行うものである。この分析結果は、具体的に斜面の変位の情報を示したマップとなることから、斜面の全体挙動マップと呼ぶ。このマップは計測段階での空間情報を示したものである。

そして、斜面の安定性評価の結果の表現である。安定性評価は地盤の物性値の設定や外力などによって種々の方法があり、ここでは既往のコードを用いることとする。また、安定性評価に用いる解析モデル断面の物性値は、DBに格納された地盤情報に基づいて作成される。ここでの開発項目は、解析結果をマップとして表現することである。このマップは、斜面の安定性評価段階での空間情報を示しており、安全率マップと呼ぶ。

開発システムはそれのみで斜面管理が行えるわけではなく得られる斜面の全体挙動マップや変状マップ、

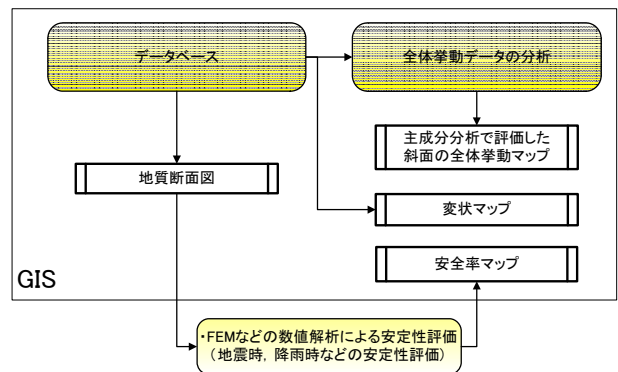


図-3 システムのフロー

さらにはそれらの重ねあわせたものを用いて維持管理を支援するためのシステムであることから、本システム全体を指し「維持管理支援システム」と呼ぶこととする。作成したマップを重ね合わせることによるメリットを図-2に示す。主なメリットは、計測、観察、安定性評価の結果を多角的に検証できる点にあると考えられる。

3. システムの概要

前章で整理したシステムの要件や概念に基づいて具体的に構築したシステムについて述べる。図-1に示したように、システムは、DB、全体挙動データの分析、安定性評価の3つのツールを核としている。これらのツールの関係と、そこから作成する各々のマップの関係をフローにして図-3に示す。

DBはGISにて扱うことを可能としており、そこには地質分布や点検管理記録などを空間情報として格納している。斜面の管理において日常の点検管理は最も重要な項目の1つであり、その結果は変状マップとして作成する。全体挙動データの分析ツールは、DBに格納している各種計測値を読み込み、それらの相互関係を主成分分析によって解析¹⁰⁾する。この解析ツールは、GIS上で稼動するようにし、結果を斜面の全体挙動マップとして作成する。安定性の評価では、地震や降雨などの外力を想定することが多い。解析は、このような外力設定やメッシュ作成などの判断を多く含むので、GISとは切り離して別途計算する。この場合の安定性評価とGISとの情報の流れは次のようになる。まずDBに収録されている地盤情報から、解析用の地盤モデル作成のためのデータ(地質断面図と地盤の力学特性等の空間情報)を抽出する。これらのデータから既往の解析コードの入力データを作成し、数値解析を行う。解析結果(安全率などの情報)をGIS上で安全率マップなどとして表示する。

GISのソフトウェアは上記の機能を持つものであれば選択に制限はない。本報告では、世界で最も広く用

表-2 維持管理段階における主な
シェープファイルと図形の形式

段階	ファイル	図形の形式
観察	変状	L, PLY
	地形図	L
	地層分布	PLY
計測	計測位置図	PT, L
	計測結果	PT, L
	解析メッシュ	PLY
安定性評価	応力・ひずみ	PLY
	主応力・変位	L

PT:ポイント, L:ライン, PLY:ポリゴン

いられている ArcGIS を用いてシステムのプロトタイプを構築した。以下に、DB、全体挙動データの分析ツール、安定性評価の順に述べる。

(1) データベース

DB に収録される情報は、維持管理の段階に応じて種々のものがある。観察段階では点検管理記録、地表踏査の記録、地層の情報がある。計測段階では、地表や地中の地盤の変位に関する情報、地下水位の情報などがある。さらに安定性評価の段階では数値解析に用いたメッシュ毎の変位、ひずみ、応力、安全率等の情報がある。また、情報の種類には前述の通り位置情報と属性情報がある。

本研究で利用した ArcGIS では、空間情報の一般的な形式としてシェープファイルを用いている。シェープファイルは、図形情報、属性情報、図形情報と属性情報の対応を表す情報から構成され、それぞれ拡張子が shp, dbf, shx であるファイルとして保管される。図形情報は、対象図形をポイント、ライン、ポリゴンの3要素で表すもので、座標値(位置情報)で管理されている。一つのシェープファイルが扱えるデータは、ポイントデータ、ラインデータ、ポリゴンデータのうち、1種類のみである。

本研究で構築した DB に収録する主な情報の形式を表-2に示す。表に示した情報のうち、計測情報に関しては各計測データを分析した結果を斜面の全体挙動としてポイントやラインのデータとして表すこととし、個々の計測値はシェープファイル形式では保管していない。これは、計測値は時系列データであり、このような時系列の情報を直接シェープファイルとして扱うと、情報の更新が煩雑となる。そこで、種々の形式で採取されている各々の計測データは図-4に示す形式で保管することとした。そのフォーマットは、①光波測量や傾斜計などの計測機器の種別毎にカンマ区切りの形式(csv形式)のファイルを作成し、②ファイルには1列目に時刻、2列目以降に各計測点に対する計測値を入れ、1行目には各列のタイトル(時刻, P001, P002, …)を入れることとした。このデータを元に、

後述する主成分分析による斜面挙動の分析¹⁰⁾を行い、分析の結果から、全体挙動を表すシェープファイル作成し、DBにはそのファイルを保管することとした。

(2) 全体挙動のデータ分析ツール

対象とする斜面の動きが複合すべりや複数のすべりによる場合、各種計測結果をすべて整合的に説明する斜面の動きを把握することは容易ではない。この場合、個々の計測値が示す動きを解明し、斜面全体としてどのように動いているかを把握することは構造物の管理においては重要である。ここでは、この全体挙動を分析するツールについて述べる。

a) 主成分分析による全体挙動データの分析方法

この方法のひとつに、主成分分析を用いた斜面挙動の分析方法¹⁰⁾がある。主成分分析法はできるだけ情報の損失なしに1つまたは少数個の総合的指標(主成分)で代表させる方法で、多変量データを要約する1つの有力な方法である。

地盤の変位などの計測情報に主成分分析を適用する場合は、次のように考える。まず、計測点 p の時間 i における計測データを x_{pi} として、各々の計測点を式(1)のように線形結合した合成変量 Z_i を考える。合成変量の分散 $V(z)$ は式(2)で表される。

$$Z_i = a_1 x_{1i} + a_2 x_{2i} + \dots + a_p x_{pi} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V(z) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ a_1 (x_{1i} - \bar{x}_1) + \dots + a_p (x_{pi} - \bar{x}_p) \right\}^2 \quad (2) \\ &= \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^p a_i a_j s_{ij} \end{aligned}$$

ここに、 $s_{ij} = (x_{ji} - \bar{x}_j)(x_{ji} - \bar{x}_i)$ は分散共分散行列を、

\bar{x} は変量 x の平均をそれぞれ表す。分散が最も大きい合成変量は、斜面の挙動に関する情報量が多いことから、当該地盤の動きを解釈する上で重要である。分散が最も大きい合成変量を求めることは、式(2)における $V(z)$ を式(3)の制約条件の元で最大化すること等しく、これは、Lagrange の未定乗数法(未定乗数を λ とする)によって式(4)の固有値問題に帰着する。

$$a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_p^2 = 1 \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} s_{11} & \dots & s_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ sym. & & s_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix} \quad (4)$$

この固有値問題によって得られた各指標の工学的な意味は以下のように考えられる。まず、固有ベクトル

の成分 (a_{i1}, \dots, a_{ip}) は、各計測点の増減の傾向を表す指標である。この空間的な分布から、当該主成分 $\vec{a}_1 = (a_{11}, \dots, a_{p1})$ が表す斜面の動きのモードを解釈することができる。

固有値 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$ は当該主成分の分散を表し、すべての主成分の分散の和に占める当該主成分の割合は寄与率であり、寄与率はその主成分が表す動きの割合を示している。

寄与率が最も大きい第1主成分は、当該斜面に卓越している動きを示している。例えば、すべての計測器ですべりによる一方向への動きが捉えられていれば、多くの場合、その動きが検出される。すべりによる動きがない場合には気温と連動する季節的な動き（季節変動と呼ぶ）となることが多い。第2主成分は、寄与率が2番目に大きい動きを示している。第1主成分が季節変動の場合には、第2主成分にすべりのモードを反映したものが現れる場合がある。分析では、寄与率の大きさに応じて、対象とする主成分の数を決めることになる。どの主成分までを対象にするかは種々の考え方があり、たとえば寄与率の合計が8割と考えることがある。

主成分得点は、時間によって推移し、固有ベクトルの成分であらわされる動きのモードとの関係で、当該斜面がどのように動いているかを解釈する。

各計測値の物理的意味が同じもの（例えばすべてが距離の単位など）である場合には、計測データをそのまま用いた固有値問題（式(4)の分散共分散行列 S_{ij} を用いて）を解くことで挙動の分析が可能となる。しかし、例えばある変量は光波測量による2点間の距離で、別の変量は孔内傾斜計による角度などの、計測値の物理的な意味が異なる場合には、変量の標準化（分散を1、平均を0）を行った指標を用いて固有値問題を解くことで分析を行う。この場合、式(4)の分散共分散行列に変わって相関行列を用いることになる。相関行列を用いた場合には、得られた主成分得点の絶対値には意味はなく、その増減によって動きの解釈を行う。

この方法を用いた分析事例は、後述する。また、さらに詳しい事例は文献¹⁰⁾に述べられている。

b) 全体挙動データの分析ツール

前述の分析をGIS上で実行するためのツールを作成した。分析に供する観測データは図-4に示した、カンマ区切りの形式のファイルであり、このフォーマットで保存されたデータであればどのような情報でも取り扱うことが可能である。異なった種類のデータを扱うときには、分析結果を容易に解釈するための工夫が必要である。例えば、計測器のデータ毎に地盤の変位の方向が異なると、分析結果の解釈が複雑となる。こ

時刻	P001	P002	P003	計測点名
				計測機器名

光波.csv 観測データ

図-4 分析に用いるデータのフォーマット

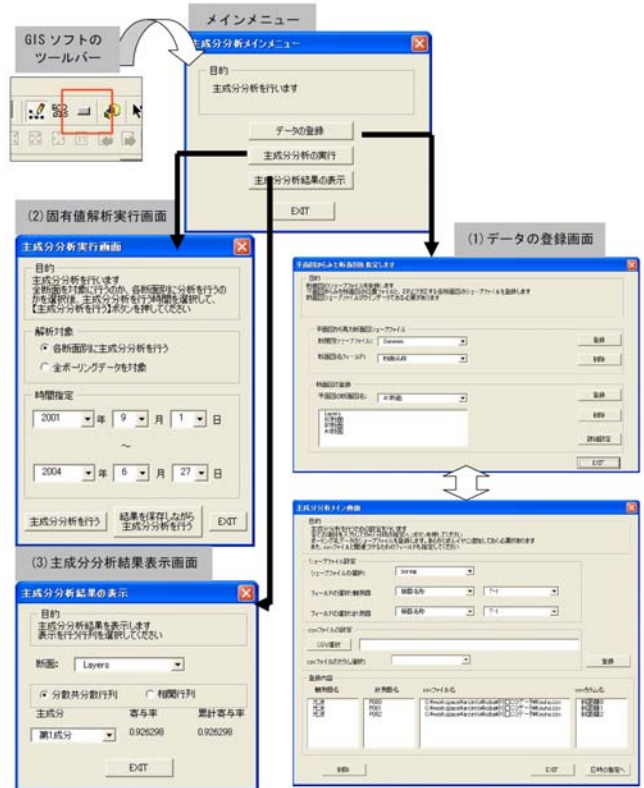


図-5 分析ツールの構成

れを解決するためには、計測データの正負を逆転させて変位の方向を合わせるなどの計測ファイルの準備の段階で注意を要する。

こうしてフォーマットを統一した計測器毎の観測ファイルを準備し、それらをGISで読み込み、全体挙動データの分析を行う。これら一連の分析をGISから実行可能とするために、分析ツールを作成した。分析ツールは操作を簡易にするために、GISのソフト上ではGUIを利用して、図-5に示すような仕組みとした。分析ツールは図-5に示すアイコンを指定することで起動し、分析ツールを操作するためのメインメニューが表示される。メインメニューの中身は(1)データを登録する箇所「データの登録」、(2)分析のための固有値解析を行う箇所「主成分分析の実行」、(3)分析結果をGISで表示可能な形式(シェープファイル形式)に変換して表示する箇所「主成分分析結果の表示」の3つから構成されている。

(1)「データの登録」では、準備したCSVファイルからどのデータを分析に用いるかを登録する。データの登録は、分析対象の計測器が、2次元断面で配置されている場合と、3次元的に配置されている場合を選択

できるようにしている。(2)「主成分分析の実行」では、分析期間を指定するようにした。また、3次元で分析する際にすべてのデータを用いる場合と、各断面別に分析を行う場合を選択できるようにしている。(3)「主成分分析結果の表示」では、計測データをそのまま用いた分散共分散行列による分析結果と、各々の計測値を標準化(平均を0,分散を1)とした相関行列による分析結果を選択できるようにした。さらに、結果を表示する主成分の寄与率および累積寄与率がわかるようにした。

(3) 安定性評価結果ツール

a) GIS と安定解析の連結

DBに含まれる地盤情報には、ある断面での地層の分布や地層の物理特性(密度、弾性波速度など)、強度・変形特性などの地質情報が格納されている。この地盤情報は、安定解析においては解析モデル断面の作成や入力物性値の設定に必要なものである。この関係は図-3に示したように、GISのDBから出力される地質断面図などの情報は、安定解析のための入力情報と考えることができる。一方、この入力情報に加え、外力や解析モデルの境界条件を設定して行った安定解析の結果は、たとえば安全率マップなどとして図-2に示すようにGIS上で安定解析からの出力の一つとして表示することができる。

地質断面図など情報から解析モデルの断面を作成する流れにおいては、地質学上は異なる地層であるものの、物性的には同じとみなしてよいといった工学的な判断や、挙動を詳細に検討したい箇所の解析メッシュを細かくするなどのテクニック、さらには、単位系の統一や物性のパラメトリックな検討の入力情報の整備など、種々の判断項目があり、それぞれの場合に応じた情報を適宜作成する必要がある。ここでは、この解析に用いる入力情報の作成のプロセスは手入力で行うこととした。

解析結果は、作成したメッシュの要素や節点の単位で変位や応力などの情報が出力されることが通常である。そこで、テキスト形式で記述された変位や応力の解析結果を、メッシュ図、節点変位図、主応力分布図としてGISで表現できるようにシェープファイル形式に変換するコードを作成し、GISのソフト上から実行できるようにした。

b) 安定性評価に用いた解析コード

解析に用いるコードは、目的に応じて種々のものを用いることができる。本検討では、対象斜面の地震時の安定性が評価可能な、市販の3次元弾塑性FEMプログラム(GA3D)¹¹⁾を用いることとした。解析コードの主な特徴を表-3に示す。

GA3Dは(社)地盤工学会から出版されている書籍¹²⁾に収録されている解析コードであり、商用・非商用間

表-3 三次元弾塑性FEMプログラムの特徴

項目	内容
構成則	弾完全塑性 降伏基準はMohr-Coulomb 塑性ポテンシャルはDrucker-Prager
非線形方程式の解法	増分法に修正 Newton-Raphson 法を組み合わせた混合法

わず自由に使用できる。この解析コードに必要とされる入力物性値は単位体積重量、ヤング率、ポアソン比、せん断抵抗角、粘着力、ダイレイタンシー角である。

本コードでは、通常の応力変形解析のほかにはせん断強度低減法¹²⁾による全体安全率の評価が可能である。せん断強度低減法とは、式(5)に示すせん断強度低減係数 F と呼ばれる変数を変化させて計算を行い、斜面の安定性を評価する方法である。せん断強度低減係数 F はMohr-Coulombの降伏基準における c 、 $\tan\phi$ を除く係数である。解析においては F を小さい値から徐々に大きな値に変化させ、反復計算が発散した場合の F を斜面の全体安全率 F_s として定義している。この方法で計算される全体安全率 F_s は、極限平衡法で定義される安全率と力学的に同じ意味を持つ¹²⁾。

$$\tau = c/F + \sigma \tan \phi / F \quad (5)$$

4. システムを適用した既設構造物周辺斜面

前章のシステムを適用した既設構造物周辺斜面の概要を述べる。

(1) 斜面の概要

a) GIS と安定解析の連結

対象とした斜面は、既設の水力構造物に近接する斜面であり、地すべりに起因すると考えられる変状が生じていた。当該斜面の地質は少なくとも1枚の厚い泥岩(M0)、2枚の泥岩優勢砂岩・泥岩互層(泥岩優勢砂岩互層:M1, M2)1枚の砂岩層(S1)、および3枚の砂岩優勢砂岩・泥岩互層(砂岩優勢砂岩互層:A1, A2, A3)が分布している。さらに、それらの基盤層を覆って、崖錐堆積物層、現河床堆積物が分布している。これらの基盤層は、さまざまな波長をもつ褶曲構造が含まれており、詳細に同定することは困難である。そこで、力学特性を考慮して、比較的明瞭な岩相の違いで上位から崖錐堆積物層、M0層、A1層、M1+S1+M2層、A2+A3層の3つに区分されている¹³⁾。

対象斜面の地すべりブロックと計測設備の配置を図-6に示す。地すべりブロックは、上流側のAブロック及び下流側のB2断面に代表されるBブロックの2つが存在し、各々の地すべりブロックには、崖錐堆積物層と泥岩(M0層)との境界

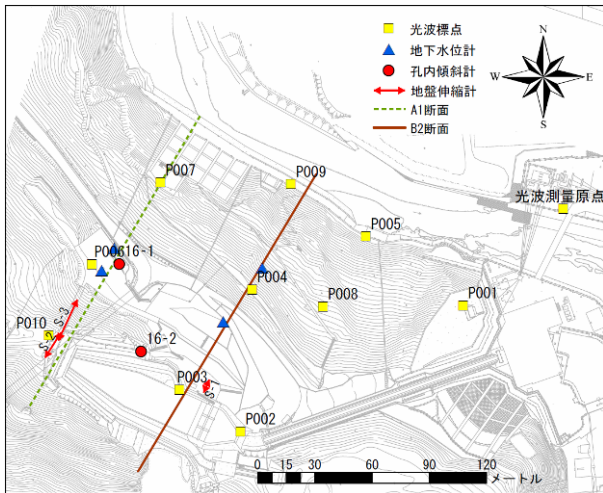


図-6 地すべりブロックと計測位置

(表層すべり), および泥岩 (M0 層) と砂泥互層 (A1 層) の境界 (中層すべり), および砂泥互層 (M1+S1+M2 層) と泥岩優勢砂泥互層 (A2+A3 層) での境界 (深層すべり) の 3 箇所ですべり面が存在する可能性があること¹³⁾がわかっている。

(2) 斜面の計測設備

斜面は, 建設直後から変状が認められたため, 当時から種々の計測が行われてきた。これらの計測を合理的に行うことを主な目的として, 計測設備の再検討が行われている¹⁵⁾。この再検討では, すべり面毎に挙動の変化を捉えるための適切な計測位置と, 挙動の変化を早期に捉えるため計測頻度を考慮している。

その結果, 図-6 に示す位置で, 自動計測による常時監視を基本とした計測が行われることとなった。図-6 に示すように, 計測項目は, 光波測量による地表面変位計測 (10 箇所 (P001~P010)), 孔内傾斜計による地中変位計測 (2 地点 (16-1, 16-2) で深度方向に各々約 30 点の合計約 60 点), 地盤伸縮計による変位計測 (地表 (S-1, 2) 及び作業横坑 (S-3) の 3 箇所) 地下水水位計測 (4 箇所) である。なお, 後述する全体挙動データの分析には, これらのデータのうち光波測量による地表面変位計測のデータを用いている。

5. 開発ツールの機能検証と維持管理支援への適用

プロトタイプシステムを構成する 3 つのツールの機能の概要を示す。具体的には DB から作成した点検管理記録や現地調査結果に基づく変状マップ, 主成分分析に基づく全体挙動の分析ツールを用いた斜面の全体挙動マップ, さらに既往の弾塑性解析コード (GA3D) に基づく安全率分布図をそれぞれ作成することで機能を検証した。この機能検証は GIS を用いた斜面維持管理支援システムの事例となっている。

(1) DB の地盤情報による変状マップの作成

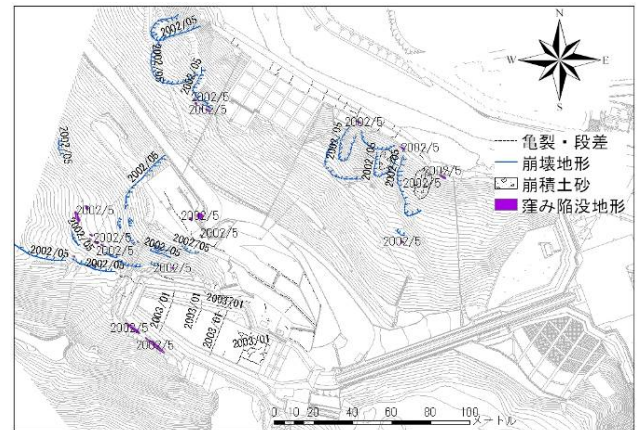


図-7 点検記録と現地調査結果による変状マップ

点検管理記録や現地での調査結果を DB に格納するために, 位置情報とともに情報化し, 変状マップとして作成した。作成した変状マップを図-7 に示す。図には, 現地調査で確認した崩壊地形や崩積土砂の位置とそれを確認した現地調査の時期を示している。また, 構造物の点検の再確認した亀裂の位置と時期も併せて示している。このように, 斜面の動きの性状を把握するための基礎データとして, 定性的な情報を一枚の変状マップで表現できることを検証した。

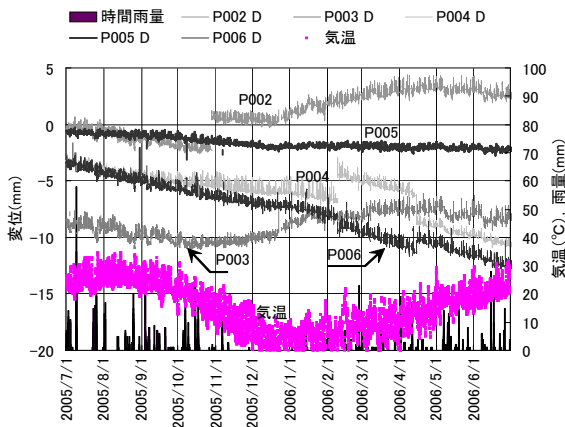
(2) 全体挙動分析ツールによる斜面の全体挙動マップの作成

a) 分析条件

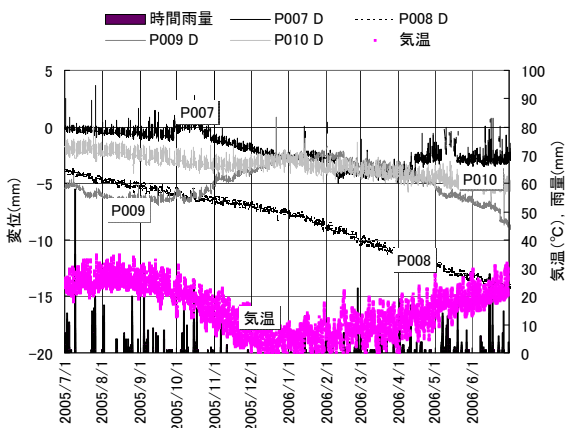
分析対象計測値は, 図-6 に示すように自動で行われている光波測量の測量点のうち, 対象斜面に設置されている (9 点) を対象として行った。光波測量結果を分析対象としたのは, 斜面全体に計測点が配置されており, 当該斜面の全体的な動きの傾向を把握するのに適切と考えたからである。

分析に用いる光波測量による地表面変位の計測結果を図-8 に示す。図-8 に示す変位は, 光波測量の計測結果のうち, 図-6 に示す光波測量原点と P002~P010 の標点の間の距離 (斜距離と呼ぶ) の, 基準時期からの変位を示しており, 正が山側へ, 負が川側へ変位していることを示している。図中, 変位が不連続に分布する時期 (2005 年 10 月下旬, 2006 年 2 月初旬, 4 月中旬) がいくつか認められるが, 計測点の点検などによるものであり, 同じ時期に地盤の変状は認められていない。図より, 変位量の多少はあるものの (P004, P005, P006, P007, P008, P010) においては継続的な川側への変位が増加していることがわかる。一方, それ以外の標点 (P002, 003, P009) ではそのような変位はほとんど認められない。また, いずれの標点においても気温と連動する季節変動が認められる。

それぞれの計測値の平均値と分散を表-4 に示す。表-4 に示す分散の最大値は (P006 : 9.07) であり,



(1) 標点 P002~P006



(2) 標点 P007~P010

図-8 光波測定の結果

最小値 (P005 : 0.28) の約 40 倍であることから、各々の計測値を標準化 (平均値を 0, 分散を 1) とした相関行列を用いて主成分分析を行った。分析期間は、季節変動などの影響を考慮するために 2005 年 7 月 1 日から 2006 年 6 月 30 日までの 1 年間とした。

b) 分析結果

分析の結果得られた第 2 主成分までの固有値、寄与率、累積寄与率を表-5 に示す。第 2 主成分の累積寄与率が 80% を超えており、変動の傾向をほぼ捉えていると考えられることから、第 2 主成分までを分析の対象とする。固有ベクトルの成分をコンター表示したものを図-9 に、各主成分によって、式(1)に基づいて計算される主成分得点の経時変化を図-10 に示す。

固有ベクトルの成分をコンターで表示した図-9 (1) より、水槽位置に設置された P002 と P003、及び河川に近い P009 は正の値を示し、それ以外の斜面部に設置された P004~P008, P010 は負の値を示している。こ

表-4 計測値の平均と分散

標点名	計測器名	平均(mm)	分散
P002	光波測量	1.22	3.21
P003	光波測量	-8.65	1.18
P004	光波測量	-5.84	3.72
P005	光波測量	-1.51	0.28
P006	光波測量	-8.22	9.07
P007	光波測量	-4.78	2.34
P008	光波測量	-7.51	6.85
P009	光波測量	-1.90	2.14
P010	光波測量	-3.19	1.01

表-5 固有値と寄与率

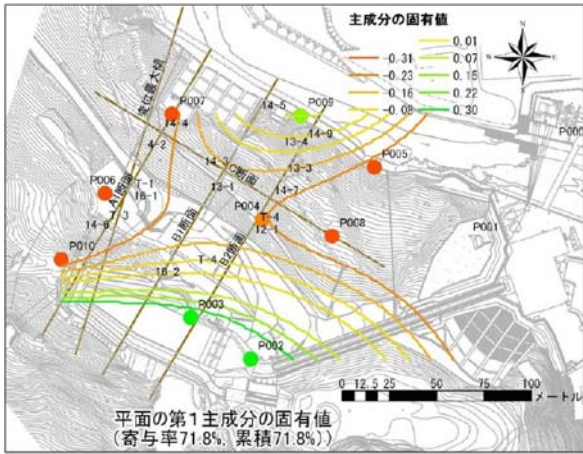
	固有値	寄与率 (累積) %
第 1 主成分	6.46	71.8(71.8)
第 2 主成分	1.41	15.6(87.4)

の正負の違いは、各々の箇所が同時期に別方向へ動いていることを示している。この固有ベクトルをもとに求めた第 1 主成分得点 (図-10) は、時間の経過とともに増加する傾向にあることから、この主成分が示す斜面の動きは、固有ベクトルの成分が負の測量点では値 (この場合は斜距離) がマイナス方向へ、正の測量点では値がプラスの方向へ動くことを示している。つまり各々の測量点のうち暖色系の箇所 (P004~P008, P010) は川側へ変位しているのに対し、寒色系の箇所 (P002, P003, P009) は山側へ変位する (あるいはほとんど変位していない) ことを示している。一方、第 2 主成分得点は増減を繰り返す、その周期はほぼ 1 年程度であることから、季節変動を示す成分であると考えられる (図-10)。

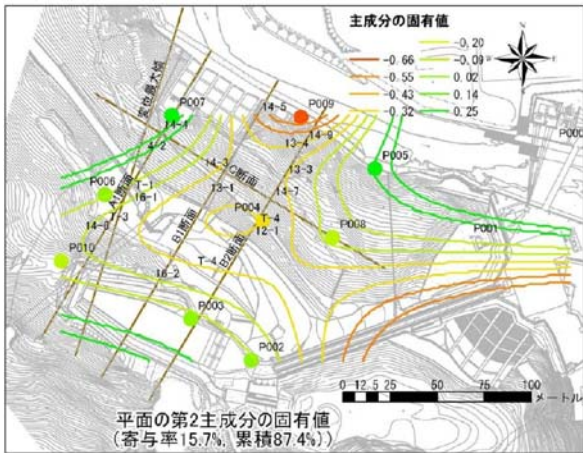
この「主成分分析に基づく固有ベクトルの成分」をコンター表示したものは、斜面全体の変位状況を表していることから、この図は主成分分析で評価した斜面の全体挙動マップといえる。このように、本分析ツールを用いることによって斜面の全体挙動マップが作成できることを検証した。

(3) 安定性評価による安全率マップの作成

ここでは、安定性の評価結果を、GIS 上でマップとして表示する機能の検証を行う。そのために、対象斜面の地震時の安定性を評価した既往の解析¹⁴⁾と同様の条件で、3 章で述べたコード¹¹⁾を用いて解析を行い、その結果からマップを作成する。さらに、作成したマップから、安定性について検討した結果を例示する。



(1) 第1主成分



(2) 第2主成分

図-9 主成分分析による斜面の全体挙動マップ

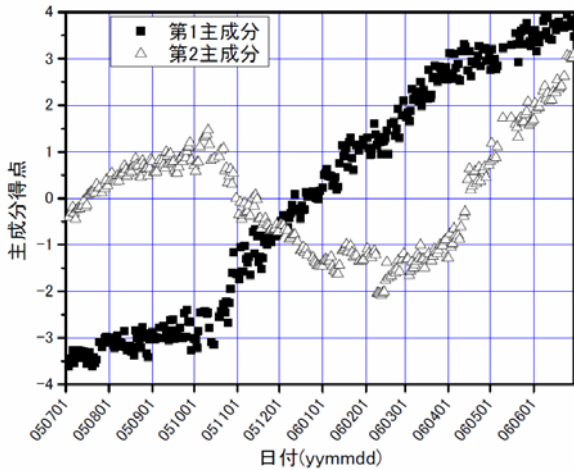


図-10 主成分得点の推移

a) 安定性評価の計算条件

対象とする斜面のモデル断面図は、DBの情報と、既往の検討結果¹⁴⁾を参考に、図-11のように設定した。それぞれの層区分の詳細は、4章に述べたとおりである。さらに、各層に与える物性値は、既往の検討¹⁴⁾では、室内試験に基づいて設定されており、ここでも同様の物性値(表-6)を与えた。また、地震によって地

表-6 解析に用いた物性値

	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)
崖錐	22.4	210	0.33	0.063	41
M0 上部	22.4	830	0.38	0.063	41
M0 下部	25.3	930	0.38	1.69	46
A1	23.7	3600	0.39	0.77	38
M1+S1+M2	22.9	3450	0.39	0.48	32
A2+A3	22.6	13800	0.33	1.2	40
すべり面	22.9	63	0.45	0.098	27

ダイレイタンス角は ϕ と等しいとして与えた

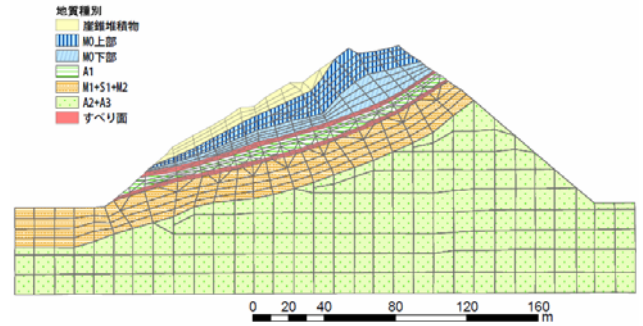
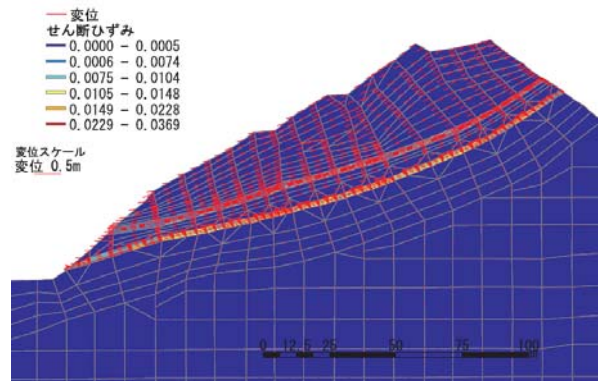
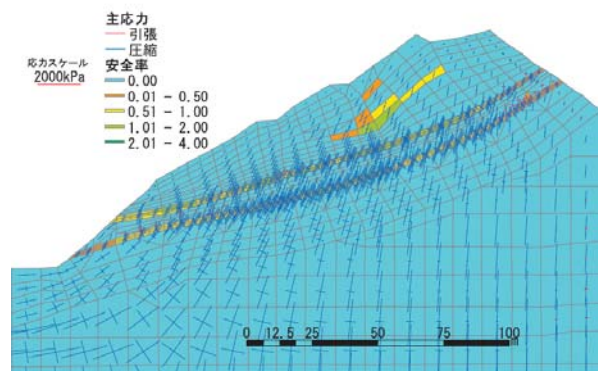


図-11 解析モデル



(1) 変位とせん断ひずみの分布



(2) 主応力と安全率の分布

図-12 $K_h=0.2$ の場合の安全率マップ

盤に生じる作用は、静的な荷重に置き換える震度法によって与えることとし、その値は既往の指針¹⁶⁾を参考に水平震度 $K_h=0.2$ として、すべり面の方向を考慮して左向きに与えることとした。

b) 計算結果と安全率マップ

GA3D¹¹⁾による計算の結果得られた変位ベクトルとせん断ひずみ分布、および主応力分布と要素安全率を図-12に示す。ここで示す要素安全率 f_{elm} (図-12では安全率と表記)とは、式(5)のせん断強度低減係数 F を小さい値から変化させていった場合に、対象要素が初めて降伏した時の F である。したがって、全体安全率 F_s を求める過程で一度も降伏しなかった要素では $f_{elm}=0$ となっている。つまり f_{elm} は、0の場合を除いて通常用いられている局所安全率と同義である。

図-12(1)に示す変位およびせん断ひずみ分布図より2つのすべり面を境に変位が増加しており、特に深層のすべり面でひずみが集中していることがわかる。主応力と要素安全率を示した図-12(2)より、深層すべりや中層すべりで要素安全率が低い領域が多く、特に深層すべりの低・高標高部で要素安全率が極度に低い領域が認められ、それらの領域が連続している箇所も多い。これらのことから、最小の全体安全率を生じているすべり面は深層すべりであることがわかる。

以上のように、GISで安定性解析の結果を主に安全率マップ等で表現できることを検証した。

(4) マップの重ね合わせによる斜面の管理の事例

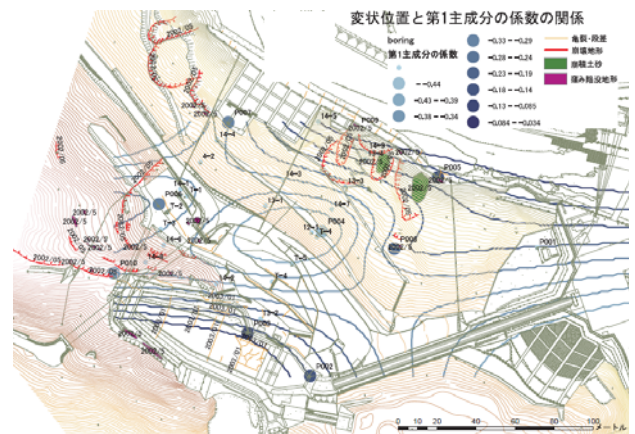
以上より、点検管理記録や現地調査結果に基づく変位マップ、主成分分析法による全体挙動の分析ツールを用いた斜面の全体挙動マップ、さらには既往の解析コードに基づく安全率分布図のそれぞれをGISで表示できることを確認した。ここでは、さらにそれらのマップを用いた斜面管理の事例を示す。

本システムで作成できるマップは一枚でも斜面の管理に使うことのできるものであるが、相互に重ね合わせて表示することにより、より有効な情報を提示できる可能性がある。図-13(1)に示すように、例えば監視・計測による変位マップと主成分分析による斜面の全体挙動マップを重ね合わせることで、変位が生じている箇所と実際に変位している計測点との関係を把握できるとともに、現在の計測点が適切か否かを判断する基礎データとして活用することも考えられる。また、図-13(2)のように安定解析によって得られる要素安全率などの分布と、主成分分析による斜面の全体挙動マップを重ね合わせることで、モデル化した地盤での応答と計測による応答が適合しているかなどを検討することができ、モデル化や解析方法の妥当性の判断に利用できるものと考えられる。

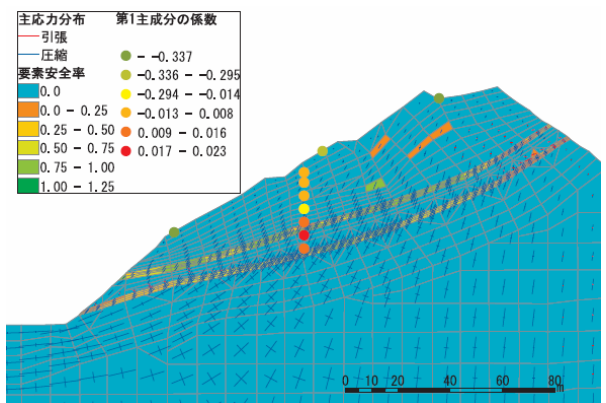
以上より、GISを用いた斜面維持管理支援システムの基本的な機能が検証できたと考える。

5. まとめ

本研究では、既設構造物の合理的な保守・管理に役



(1) 変位マップと全体挙動マップの重ね合わせ



(2) 要素安全率と全体挙動マップの重ね合わせ

図-13 各種マップを重ね合わせて表示した例

立てるために、GISを用いて構造物周辺地盤に関する情報を一元管理し、それらのデータを分析できる斜面維持管理支援システムを構築した。そのプロトタイプシステムを水力構造物に近接する斜面に適用し、システムを構成するツールの機能検証を行った。得られた主な成果は以下の通りである。

1) GISを用いた斜面維持管理支援システムの考案システムに求められる要件を、維持管理の段階(観察, 計測, 安定性評価)における空間情報をマップで表現可能にすることと考え、これに関連する既往のツールを調査した。観察や安定性評価の段階では個別に図面を作成できるツールはあるが、各々を空間情報として一元管理していないことがわかった。システムは、地盤情報と斜面の変位などの計測情報を蓄積するDB、種々の変位の情報の相互関係を把握し斜面全体の挙動を捉える全体挙動データの分析ツール、斜面の安定性評価の結果を表示するツールの3つのツールをGISで利用可能にすることで、合理的に地盤情報を一元管理できることを示した。

2) GISを用いた斜面維持管理支援システムの開発考案したシステムをGIS上で稼動するプロトタイプ

システムとして開発した。DB は斜面の点検管理記録や地盤の調査結果などの地盤情報と、地表面変位や地中変位などの計測情報を収録した。また、計測情報に基づいて斜面の全体的な挙動を把握するために、GIS 上で稼動する主成分分析法を用いた分析ツールを開発し、分析の結果を斜面の全体挙動マップとして表現できるようにした。さらに、斜面の安定性評価の結果を GIS にフィードバックし、安全率マップとして作成することのできるツールを開発した。これらのツールで、地盤情報の一元管理、分析、安定性評価を GIS で実行可能とした。

3) 機能検証と事例の例示

開発したシステムを既往の水力構造物周辺の斜面に適用し、次の機能を検証した。1)DB に収録された地盤情報による変状マップの作成。2)全体挙動データの分析ツールを用いた斜面の全体的な挙動の把握とマップの作成。3)安定性評価結果を表示するツールによる地盤の変形状態や応力の状態の表現

以上より、GIS を用いた斜面維持管理支援システムを開発し実斜面への適用によってツールの機能検証と同時に事例を示した。今後は、既設の構造物周辺の地盤の管理に本システムを適用し、合理的なシステム運用方法を検討する。

謝辞： 構造物周辺斜面のデータの提供に際し、中部電力株式会社の各位には多大なご協力を位いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Plewe,B.: *GIS ONLINE* information retrieval, Mapping, and the Internet, Delmar publishing, 1997. (岡部篤行, 東明佐久良, 那須充共訳: インターネット GIS, 古今書院, 2001).
- 2) 防災科学研究所: 地滑り地形分布データベース, <http://lswelb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/index.asp>, (入手 2007.5).
- 3) 新潟県中越地震復旧・復興プロジェクト, <<http://chuetsu-gis.nagaoka-id.ac.jp/index.html>>, (入手 2007.5).
- 4) 山本広祐, 松山昌史, 萩原豊, 久野春彦ほか: 電中研テクノウェブシステムの開発 (その4) —ソフトウェアの拡充とシステムの実用性の評価—, 電力中央研究所報告 N05031, 2006.
- 5) 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 保全防災センター GIS 事業部: Kiso-GIS, <<http://www.kiso.co.jp/tec/GIS/Pdfs/KisoGIScatalog.pdf>>, (入手 2002.12).
- 6) 応用リソースマネジメント株式会社: 統合版観測結

果整理システム Geo-Analyze,

<<http://www.oyorm.co.jp/Products/index.html#>>, (入手 2007.5).

- 7) 応用地質株式会社: 3次元地質解析支援システム, <<http://www.oyo.co.jp/service/sentan/3d>>, (入手 2007.5).
- 8) 地盤工学会: 空間情報の地盤工学への活用に関する調査委員会報告書, 2002.
- 9) 小宮山賢太郎, 京久野渉, 児玉利明, 荒木義則, 石山栄治: データベースを用いた急傾斜地における斜面管理に関するシステム化の検討, 土木学会中国支部第 50 回研究発表会講演集, pp.643-644, 1998.
- 10) 小早川博亮, 坪野孝樹, 久野春彦: 主成分分析法を用いた斜面挙動の分析方法とその維持管理への適用, 電力中央研究所報告 N06020, 2007.
- 11) 地盤技術者のための FEM シリーズ編集委員会: 地盤技術者のための FEM シリーズ② 弾塑性有限要素法がわかる, 地盤工学会, 2003.
- 12) 地盤技術者のための FEM シリーズ編集委員会: 地盤技術者のための FEM シリーズ③ 弾塑性有限要素法をつかう, 地盤工学会, 2003.
- 13) 岡田博和, 久野春彦, 小早川博亮: 川口発電所水槽斜面の安定性評価 (その1) —調査・計測結果に基づく地すべり形態の解明—, 電力土木 No.318, pp.57-61, 2005.
- 14) 岡田博和, 久野春彦, 小早川博亮, 河井正, 芝良昭: 大井川中流域の地すべり斜面の安定性評価 (その2) —地震時安定性評価—, 電力土木, No.319, pp.40-44, 2005.
- 15) 杉本渉, 池谷邦正, 岡田博和, 久野春彦, 小早川博亮: 大井川中流域の地すべり斜面の安定性評価 (その3) —計測管理—, 電力土木, No.324, pp.25-28, 2006.
- 16) 日本道路協会: 道路土工—のり面工・斜面安定工指針改訂版, 1999.

(2007.5.11受付)