

空間情報技術による地すべりの可視化と解析

Three-dimensional visualization based on spatial information technology

林 義 隆 國 眼 定
Yoshitaka HAYASHI Sadamu KOKUGAN

太 田 英 将 北 方 泰 憲
Hidemasa OHTA Yasunori KITAKATA



日本地すべり学会誌 第42巻 第4号 別刷

空間情報技術による地すべりの可視化と解析

Three-dimensional visualization based on spatial information technology

有限会社 太田ジオリサーチ/林 義隆
Ohta Geo-Research Co.,Ltd./Yoshitaka HAYASHI

有限会社 太田ジオリサーチ/國眼 定
Ohta Geo-Research Co.,Ltd./Sadamu KOKUGAN

有限会社 太田ジオリサーチ/太田英将
Ohta Geo-Research Co.,Ltd./Hidemasa OHTA

国土交通省近畿地方整備局大和川河川事務所/北方泰憲
Yamatogawa Office, Kinki Regional Development Bureau,
Ministry of Land Infrastructure and Transport/Yasunori KITAKATA

キーワード：3次元可視化，空間情報，亀の瀬地すべり

Key words : three-dimensional visualization, spatial information, The Kamenose Landslide

1. はじめに

本報告では、約40年にわたり対策事業が行われている「亀の瀬地すべり地」の電子化データを有効活用した事例を紹介し、今後の電子情報の処理・利用・活用の方法について提案する。

具体的には、亀の瀬地すべり地の地形・地質・地下水・観測データ・対策工などを3次元モデル化し活用した。また、今後の展望として3次元地質モデルのデータを利用した地下水シミュレーション、地すべり安定解析について一般的な事項を取りまとめる。最後にこのモデルを用いた市民説明用のプレゼンテーション資料作成についての事例も紹介する。

2. 地すべりデータの電子化

2.1 データ電子化の基本方針

2.1.1 事業者側からのデータ電子化の必要性

当地すべりは面積約100ha（うち活動域48ha）、地すべり土塊量1500万 m^3 の岩盤地すべりである。対策事業は国直轄として昭和30年代より長期間にわたって展開しており、400箇所以上のボーリング柱状図や160基以上の深礎工を始めとする多くの工事資料が残っている。

地すべり対策事業を進める場合、これらの資料を工事計画や維持管理に利用しようとする、以前はそのつど専門の技術者が、過去の調査資料から必要な紙データ（報告書や柱状図）を取り出し、当該箇所の断面図を作成していた。これらは非常に手間と時間のかかる作業であった。局所的仮設的な工事の場合でも、その工事が地すべり全体に与える影響を常に把握しておく必要があり、作業への負担は大きいものとなっていた。

これらの資産を有効に活用するためには、調査・設計報告書等を電子記憶媒体（CDなど）に記録するような単なる資料の電子化だけでは不十分であった。このため成果内容の整理を行い、地すべり地特有の複雑な地下地質状況を職員が簡単に理解できるシステムや対策工の効

果を把握できるシステムの構築が必要と考えられた。

2.1.2 空間情報技術の水準からみた電子化の方法とその内容について

現在の空間情報技術は、GIS（地理情報システム）を中心に発達してきた。GISは特別なものを除き、2次元であれ、3次元であれ、地図あるいは写真上の要素に位置座標（XYZ）とその属性を与え、空間上で検索や統計・解析を行なえるようになってきている。しかし、地すべり対策とその技術が必要とする空間情報の解析は、位置情報を単に加工したような傾斜区分図やその統計処理程度では不十分である。ボーリングデータから直接3次元的地質モデルを作成したり、地下水位観測孔のデータから自動的に地下水位面等高線図を時系列で表示し、他の地すべり観測データとの比較を行なえるものが必要となる。このような機能が備わってこそ、本当の意味で電子化したデータの有効利用になると考えられる。

地すべり対策事業に必要な情報処理を既存のGISソフト1種類のみで行う場合、機能の不足する部分については使用頻度にかかわらずカスタマイズを必要とし、費用と開発時間の負担が大きい。さらにデータの内部形式化やコンピュータの基本システムの変更によって思わぬ問題が生じる可能性もある。

このため、1種類のGISソフトだけですべてを処理することを考えず、目的に応じてソフトを使い分けることが現実的と考えられる。具体的には、空間基本データベースとしてGISを位置付け、地質モデルの構築、3次元安定解析、地下水シミュレーション、設計ソフト（CAD）等は目的別に専用のソフトウェアを必要に応じて導入し活用する。なお、この場合最も重要な事項はデータの互換性である。基本的なデータについてはテキストデータあるいはCAD基本データ（DXF）、GIS基本データ（SHAPEファイル）等、その構造が公開されているデータ形式で保持あるいは変換して入出力できるようにしておく。

ソフトウェアは、必ずしも事業主体がそのすべてを保持する必要はない。最小限のシステムとして基本データベース的なGISと地質モデリング及び出力のためのCADソフトを保持し、解析や技術計算を必要とする場合は、互換性の高い状態のデータを出力し、アウトソーシングすることも可能である。このようなシステム形態は、むしろ従来の設計委託の形態に近く、費用と時間、技術的ノウハウを分散保持し、効率的に利用・運営できる。

2.1.3 データ電子化の基本方針

以上の課題を解決する方法として、本地すべりに関して特に必要であった電子化の内容を以下に挙げる。

- ①現在までの地質資料を3次元化し、任意の位置の地質状況をすばやく表示できる地質モデルの構築。
- ②地質3次元モデルは、新規の地質情報を入手した場合、容易に更新できる形式が必要。たとえば、新しくボーリングした場合、ボーリング地点の地層境界深度を入力するだけで、直接3次元モデルを更新する(柱状図を基に地質断面図を変更し、それをモデルに反映する形式をとらない)。
- ③地質3次元モデルに加え、対策工と時系列の地すべり観測データを表示できる。
- ④作成した3次元モデルが安定解析や地下水シミュレーションに活用できる。
- ⑤作成した3次元モデルを用いて、対策工の3次元設計ができる。

以上のような機能が必要であると判断し、これを次のソフトウェアを組み合わせることにより実現した(本報告ではこれらソフトウェア群を一括して「地すべり情報複合システム」と呼ぶこととする)。

・基本データベースソフト:

3次元GISソフト(Shapeファイルなど公開されたデータを扱えるもの)を用い、空間データと工事データなどをリンクし、閲覧する。これは、通常の3次元GISソフトウェアを利用すればほぼ問題なく活用できる。

・地質モデリングソフト:

MVS*ソフト(基本形式がテキストデータであり、ボーリングの地質境界深度を用いて直接地質3次元モデルを作成する)を用い、3次元地質情報をモデリングする。

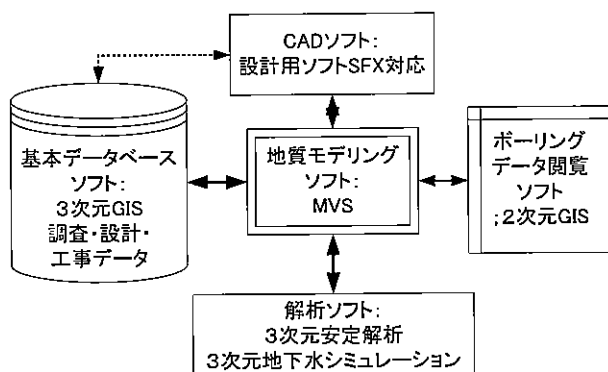


図-1 地すべり情報複合システムの概念図

データはテキスト形式、CAD形式(DXF)、GIS形式(Shape)で入出力可能。従来この分野のソフトウェアは石油・鉱山開発関係のものに限定され、しかも多機能のものは非常に高価であった。しかし、最近では環境関連のソフトウェアで利用価値の高いものが出始めており、MVSはそのうちのひとつである。

・CADソフト(DXF形式で入出力が可能なもの):

地形図や設計図面を扱う。対策工の設計に用いる。通常の土木関連の設計用に用いるSFX対応ソフトウェアであれば問題なく使用できる。

・解析ソフト(3次元安定解析ソフト、3次元地下水シミュレーションソフト):

地質モデリングソフトから出力されたテキストデータを用いて各種解析を行なう。

・ボーリングデータ閲覧ソフト(データはテキスト形式):

地質モデルを作成するときにコア写真や地質種類を確認するために活用する。簡易な2次元GISシステムで、ボーリング番号により、その位置、簡易柱状図、ボーリング諸元、コア写真等を閲覧できるもの。

2.2 データ電子化の方法

「地すべり情報複合システム」で扱うデータの種類とその流れを図-2に示す。

・現地調査データ・計測データ:

地すべりの調査情報は、地表地質踏査、ボーリング調査結果、現位置試験、各種物理探査結果などがある。

地すべり計測データとして、地下水位計、伸縮計、GPS計測、孔内傾斜計計測等のデータが収集整理される。

これらデータについては極力「数値データ」に置き換えて利用する。数値データは最も互換性の高いテキストデータとして、カンマまたはタブ区切りでデータを整理しておく。

・国土基盤情報:

現地での実測図面のほかに、空中写真・数値地図データなどの基盤情報や既存の調査・対策工データがある。これらのうち平面図等についてはすでにDXFやSFXの電子データとなっていることが多い。そのほかのデータについては、基本的にラスターデータとしてスキヤニングしgeotif形式などの平面座標を持った状態で活用する。

なお、「地すべり情報複合システム」の用いる空間座標系については、緯度経度を用いると数値解析に利用しにくくなる。極力国家座標系などの直交座標系を用い、すべてのデータを電子化する段階で同じ座標系で統一することが望ましい。たとえばCAD平面図も作成当初から国家座標系で管理することによって、その後の活用の利便性が大きく異なる。事業の進捗に応じて平面図に表現すべき調査位置や対策工位置などは増え続ける。シス

*Mining Visualization Systemの略で土壌汚染関連のソフトウェアEVS(Environmental Visualization System)を拡張したシステム

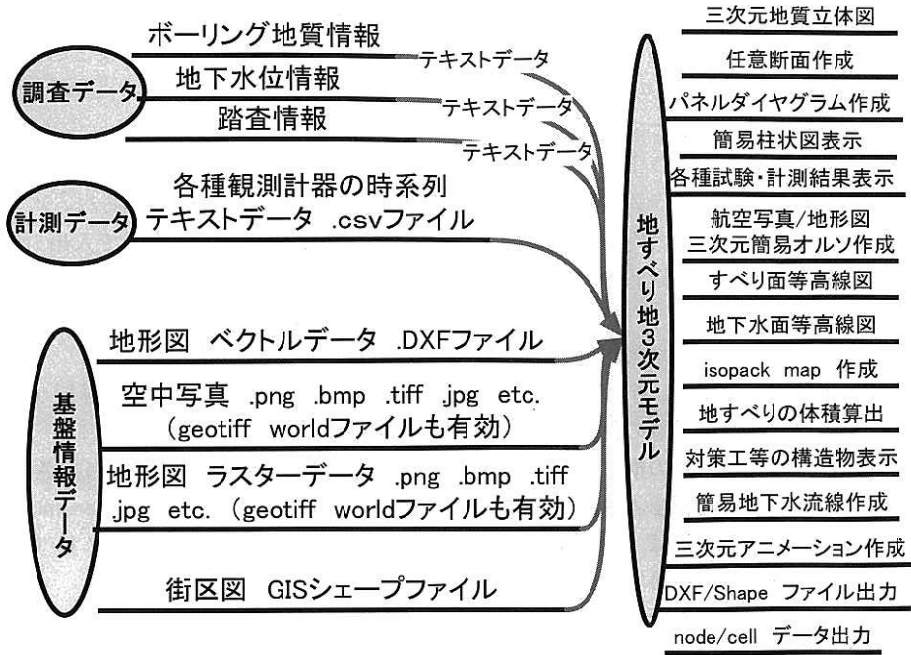


図-2 システム内のデータの流れ

テムに結合する場合, 国家座標系で管理されていれば, いちいち座標変換を行なう必要がないので, 手間が省けるだけでなく, ケアレスミス等をなくすこともできる。

2.3 3次元地すべりモデルの作成方法

2.3.1 モデル化の方法

本報告では, 特に3次元地質モデルの作成に焦点をあて取りまとめる。地質情報の3次元化には次のような方法がある。

- (1) 既存断面図の地層境界を基に, 地層境界等高線図を作成して, 3次元化する。
- (2) ボーリング柱状図から3次元地質モデルを直接作成する。
- (3) C Tech EVS-PRO/MVSのジオロジック・インジケータ・クリギング手法を用いる。

(1)による方法は図-3のように地層境界毎の平面座標とその標高のデータを作成し(図中の表は, surface 1とsurface 2), これを3次的に表現する方法である。

この方法は単純である。しかし, 多くの場合, ボーリングデータを一度断面図に投影し, さらに地層境界等高線図に書き直している。よって, ボーリングデータとの整合性が最終的にとれないという問題を生じる可能性がある。

(2)による方法は図-4に示すようにボーリング毎に分布する地層とその深度をデータにし, これを結んで行く方法である。

この方法は, 確実にボーリングデータを反映できる。地層が欠如する場合は, そのデータもダミーとして考慮する必要がある(図-4の表中の1.0e9がこれに相当する)。

(3)による方法は ボーリングが比較的密に実施され,

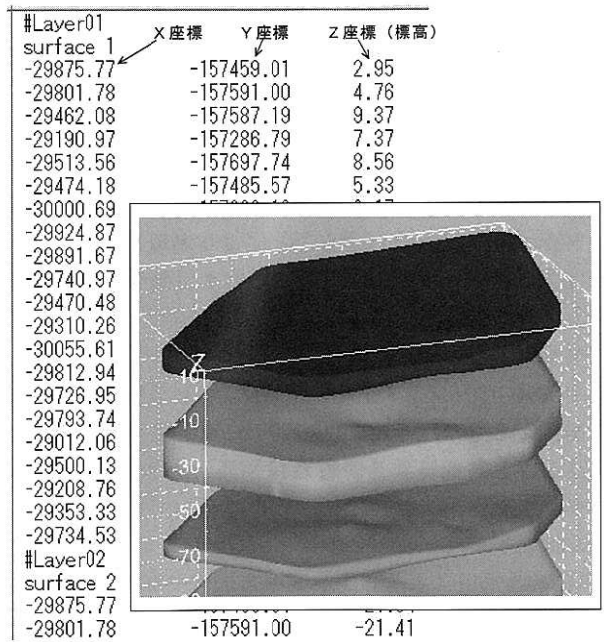


図-3 モデル化の方法1

しかも地質構成が複雑な場合や, 沖積層の砂・粘土細互層の表現を短時間で行いたい場合などに便利である。

補間の方法はボーリングの地質データをもとに, 近傍のボーリングを自動で参照し, 同じ地質について3次元的な広がりやを推定するものである。モデル化に際して地層の上下関係をあらかじめ決める必要はない。

2.3.2 3次元地質モデル作成

本地区では, 地質の層序が確立されているので, 前項(2)の手法を用いてモデルを作成した。なお, 実際の作業では, 深礎工掘削時に地質技術者による目視確認した地質状況を基本にして, 深礎工周辺で基本モデルを構築し,

これをボーリング資料と比較検討しながら次第に地すべり全体に広げ、最終的なモデルを構築する手法をとった(図-6)。

X座標	Y座標	Z座標 (標高)	地層境界の標高又は深度							ボーリング名
X	Y	TOP	BOT 1	BOT 2	BOT 3	BOT 4	BOT 5	BOT 6	BOT 7	NAME
44	8	3	3	2	3	4	3	5	1	A
5.00	3.00	23.50	4.00	-22.00	1.0E+9	-39.00	-70.00	-70.00	-1.0E+9	A
13.00	5.00	26.00	13.00	-18.00	1.0E+9	-36.00	-64.00	-70.00	-1.0E+9	B
24.00	7.00	26.00	22.00	-9.00	-9.50	-32.00	-57.50	-70.00	-1.0E+9	C
42.00	2.00	22.00	1.0E+9	1.0E+9	-3.00	-24.00	-50.00	-70.00	-1.0E+9	D
57.00	6.00	24.00	1.0E+9	1.0E+9	4.00	-15.00	-43.50	-70.00	-1.0E+9	E
76.00	7.00	28.50	1.0E+9	1.0E+9	14.00	4.00	87.00	70.00	1.0E+9	F

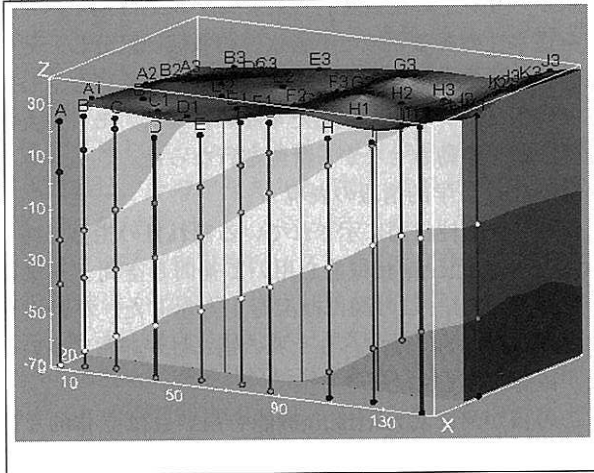


図-4 モデル化の方法 2



図-5 モデル化の方法 3

また、モデルの閲覧は、費用の問題やソフト操作の難易を勘案し、目的別に機能を限定した 3 次元モデルを作成し、フリーのビューワーを用いた。

2.3.3 3次元モデルの利活用

本項では、亀の瀬地すべりの地質 3 次元モデルを活用した事例について紹介する。

(1) 地すべり観測結果とその解釈への利用

①伸縮計及び孔内傾斜計の変位

伸縮計データは変位の大きさとセンス (圧縮と引張) を球の大きさと色で表現した。これと同時に孔内傾斜の計測結果も表示し、地表と地下の変動を同時に把握した。

図-7 は地すべり地に設置された伸縮計の 1 年間の変位を示したものである。伸縮計 No.C-22 から 21 へかけて 5 mm 程度の圧縮が見られた (球が大きくなり、色が赤)。その近傍の孔内傾斜計 200027 では、すべり面ではなく、地すべり土塊内で同じ規模 (5 mm 程度) の変位が観測された。この図に昭和 42 年の亀裂分布を重ねあわせると地すべり当時はいたるところに亀裂が入っていたことがわかる。今回の変動は、この地すべりで発生した無数の亀裂や陥没跡が風化の促進や降雨によって変形し微小な動きを示したためと考えられ、地すべり活動とは直接関係のない「緩んだ地盤の変形」と捉えることができた。

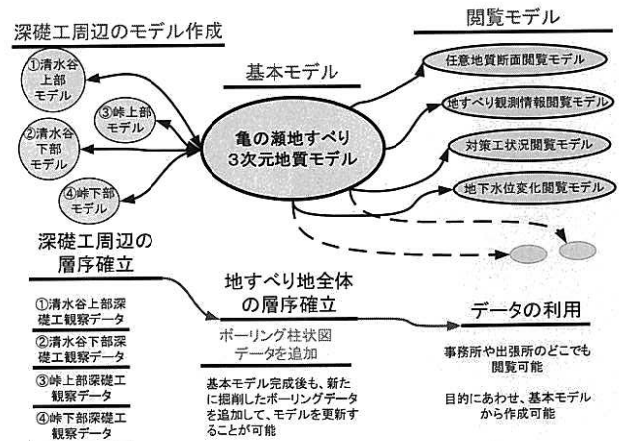
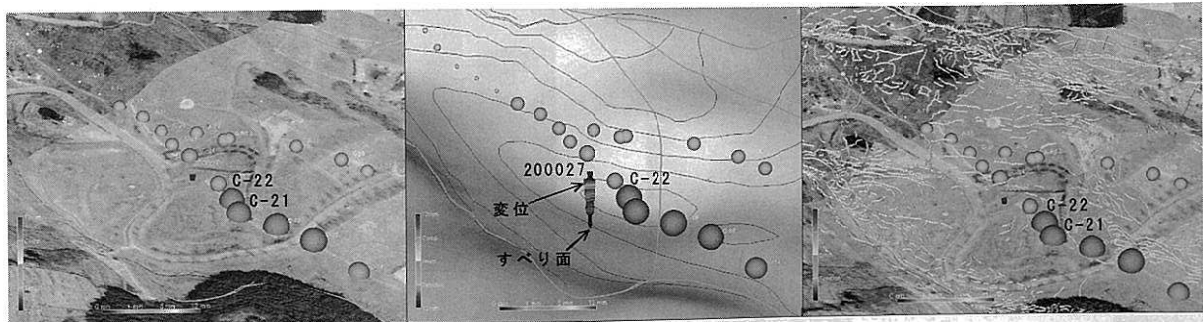


図-6 亀の瀬地質データ 3次元モデルの作成



伸縮計の変位 (図の球の大きさと色で示す)

地表をとり、すべり面と孔内傾斜計伸縮計の関係を表示

昭和42年当時の亀裂を追加

図-7 伸縮計及び孔内傾斜計

②地下水位の変化

図-8は地下水状況を示した一例である。グラフは年間の地下水位変動幅を示している。このほか、降雨期や渇水期の地下水位等高線図の作成、計画地下水位との比較、地下水排除工施工経緯と水位変動など、多様な組み合わせに応じた3次元表示を行うことができる。これらを基に地下水排除工の効果を検討し対策に利用している。

(2) 地すべり対策計画や設計への利用

①排水トンネル・集水井と地質の状況

排水トンネルや集水井から任意の半径で地質状況を表示し(図-9)、目的とする滞水層に関して効果的な集

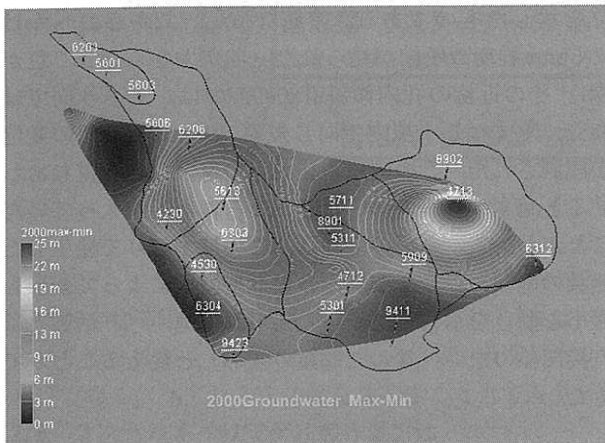


図-8 年間地下水位変動量

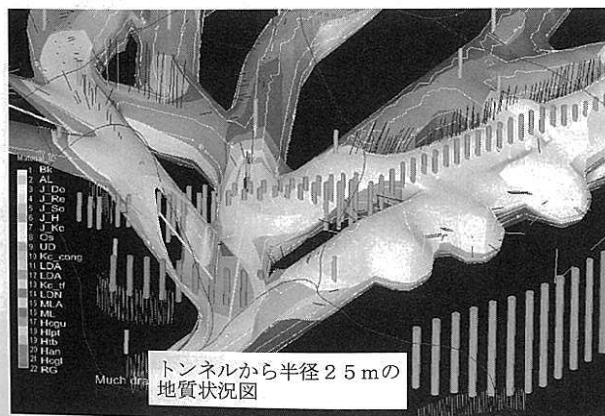
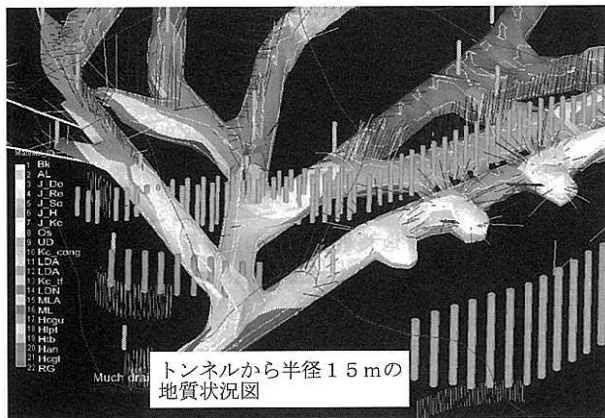


図-9 排水トンネル沿いの地質

水ボーリングの位置・方向・長さを検討できる。これをもとにして、新規排水トンネル計画や既存の排水トンネル等からの追加ボーリング位置の決定、さらには維持管理すべき集水ボーリングの優先順位の決定など、地すべり対策事業計画と施設の維持管理に活用している。

②地表からの集水ボーリングと地質の状況

図-10は深礎工と排水トンネルのある地区で、集水ボーリング計画をした際に用いたモデルである。ここでは深礎工施工前に小規模なすべりが発生した。施工中の安全確保と施工後の地下水排除機能の向上を目的として、集水ボーリングの配置を行った。モデルでは地すべり土塊を透水性のある領域と不透水性の領域に区分し、その境界付近に集水ボーリングを配置できるようにし、しかも深礎工にボーリングがあたらないように、モデル上で地質断面を移動させながら計画を行なった。

③RQD等工学的情報の表現

ボーリング柱状図に示されている割れ目の指標であるRQDを3次元Kriging機能を用いて補間し空間データにした(図-11)。この図には深礎工も示した。不動岩盤に比較し相対的に地すべり土塊の割れ目が非常に多いことが確認できる。

このほか、3次元Kriging機能を用いれば立体的な岩盤区分図やルジオンマップをボーリングデータから直接作成可能である。今までの手法と比べモデル化が非常に容易であり、しかも精度の高い3Dモデルが作成できる。

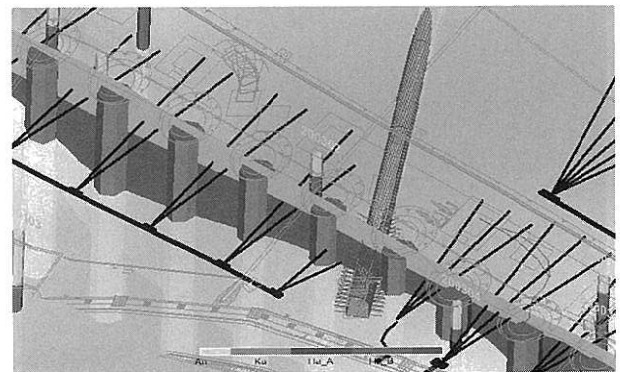


図-10 集水ボーリング計画モデル

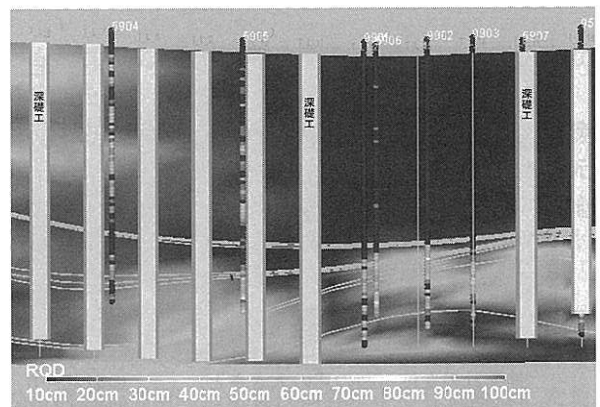


図-11 深礎工沿いのRQDモデル

データ作成の手間やその精度で課題が多かった 3 次元 FEM の基礎モデルとしても有効である。

3. 安定解析・シミュレーションへの応用

本章では、地質 3 次元モデルを数値解析で活用する方法について取りまとめる。

3.1 3 次元安定解析への応用

亀の瀬では、リアルタイム安定解析システムが開発されている (野口ほか, 2000)。MVS で作成した最新の地質モデルを使ってシステムのすべり面形状の更新が容易となった。データは、図-12 のように MVS のデータ出力モジュールでモデルのすべり面等高線を CAD 図面 (DXF ポリライン) に出力し、CAD 図面から直接 3 次元安定解析のデータを生成する。

これと同じように、ある地すべりの 3 次元モデルが構築されれば、そのデータ (地表面・地下水位面・すべり面) は CAD または、メッシュデータとして出力でき、そのまま 3 次元安定解析ソフトで解析に用いることができる (林ほか, 2002)。図-13 は、MVS によって作成したモデルから出力されたデータを用いて計算したある地すべりの 3 次元安定計算結果である。各コラム (3 角柱) のすべり力が抵抗力を上回っているものを円で示した

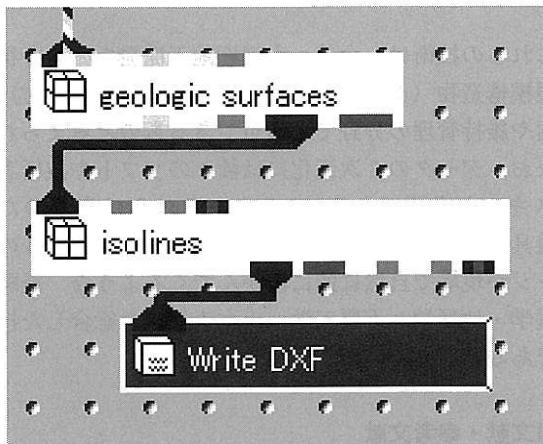


図-12 DXFデータの出力

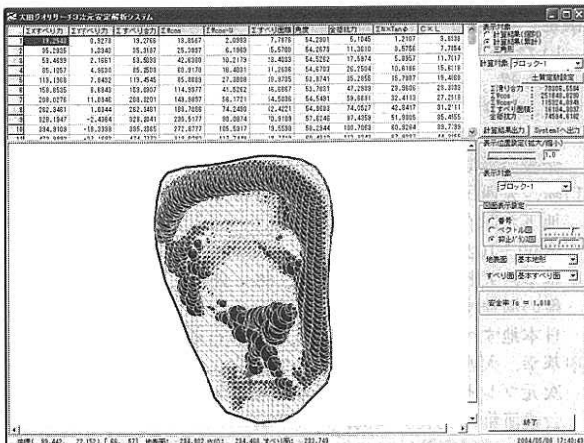


図-13 3次元安定解析システム

(すべり力バランス図)。

3.2 3次元地下水シミュレーションへの応用

亀の瀬地すべりの地下水賦存機構は、田中ほか(2003)、國眼ほか(2005)により詳細に検討されている。國眼ほかは、差分法による 3 次元シミュレーション手法を用い、日降雨量を基にした 1 年間の非定常解析を実施した。この結果は、計算要素に水頭値として示されている。これを MVS に取り込み動的に時系列で地下水の流線や集水井の集水範囲を表示することも可能であり、現在研究を進めている。

図-14 は、3 層構造の定常状態の地下水モデルにドレーンと揚水井を配置した簡単な事例である。色と等高線で水頭を表現し、その水頭を基に流線を描き、さらに地下水の移動速さを矢印の移動速さに置き換えてアニメーションで示すことができる。

一番下の図は各揚水井の揚水範囲 (capture zone) を 3 次元で示したものである。今後、集水井をモデルにして、どの集水井が地すべりのどの範囲の地下水を集水しているかなど、立体的に表現できるものと考えられる。

4. 市民説明用プレゼンテーションの作成

地すべり情報複合システムでは、2 つの方法で動的な 3 次元画像のプレゼンテーションが可能である。

4.1 4 DIM Player

3 次元モデルをそのままの状態で見ることができるシステムである。基本システムで作成したデータを 3 次元的にクリップする機能であり、断面の移動や地下水水位面の時系列変化、観測結果の時系列変化を記録できる。フリーのビューワーでどのパソコンでも閲覧可能である。

閲覧時は、モデルの移動、回転、拡大縮小、視点を変更でき、しかも時系列にデータの変化を確認できる。このことから、空間的な 3 次元表示 + 時系列という意味合いで 4 DIM (Dimension) という名称になっている。4 DIM データの中に視点の移動経路を埋め込んでおくと、3 次元モデルのなかを閲覧者が移動しながら観察できるウォークスルー機能も活用できる。

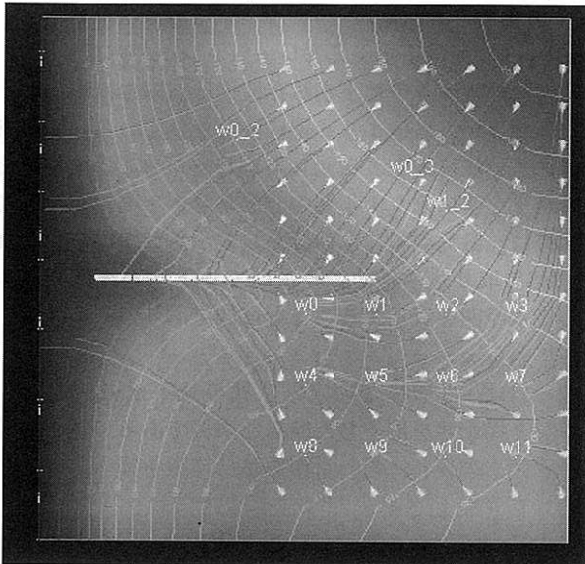
4.2 アニメーションビデオの作成

一方、3 次元モデルの画像変化情報をあらかじめマクロで組んでおき、これを自動で細かく記録することによって、3 D アニメーションを作成できる。

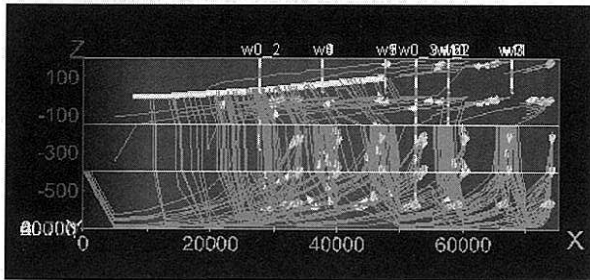
アニメーションは使用用途によって任意の解像度、任意のビットレートで何度でも作成できるため、同じアニメーションをインターネットの配信から DVD 対応の画質まで、自由に作成できる。アニメーション化した画像は、他のコンテンツ (静止画やパワーポイント、他の動画やビデオなど) と合わせてさらに質の高い動画として利用可能である。

5. まとめ

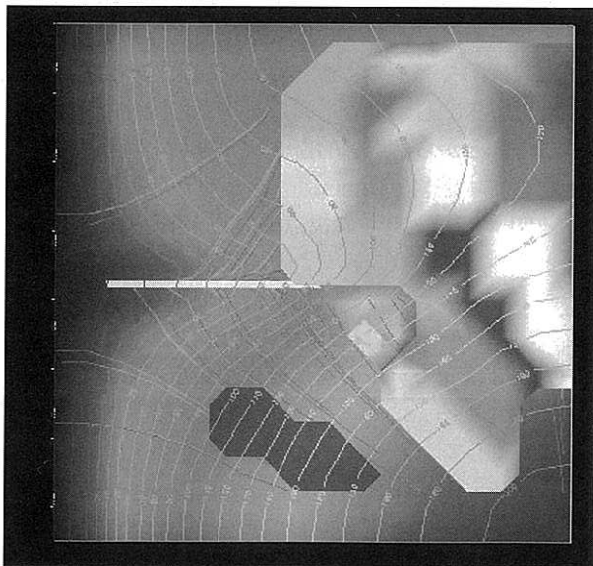
以上述べたように、情報基盤の電子化の進捗によって、



平面図
中央にドレーンが見える
水頭の等高線と流線、
白い三角は流速を示すマーク



断面図
揚水により流線が上向きになる



揚水井による揚水範囲を示す図
(Capture Zone)

図-14 地下水シミュレーションモデル

地盤の解析・設計も三次元で行えるようになった。しかも検討結果はアニメーションなどとして、クライアントや地元説明資料として有効に活用できる。

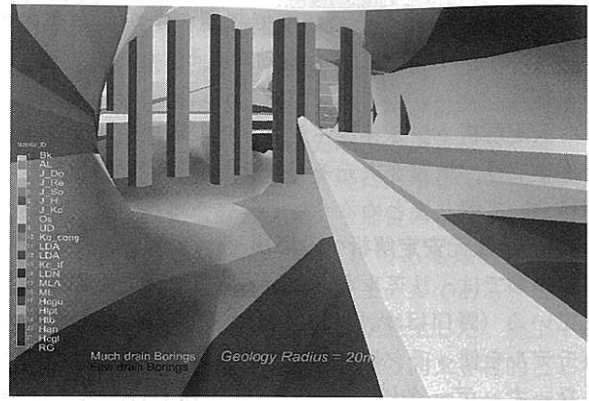


図-15 ウォークスルーアニメーションのシーン

これらの技術は、今後、大深度地下開発を始め各種の大規模構造物（ダム、廃棄物処理場、地層処分など）の計画や維持管理の分野でも活用できるものと考えられる。

なお、データの3次元化には種々のソフトや技術者のITスキルが必要である。しかし、これらは表現のための道具にすぎない。最も難しいのは、3次元モデルのイメージが現場で自然に頭に浮かんでくるような、経験と地質学・地形学・土質工学・土木工学等を総合した技術力であると考えている。

引用文献・参考文献

- 林義隆, 太田英将, 飯室明夫, 宜保清一 (2002): CADを用いた地すべり三次元安定解析プログラム. 第37回地盤工学研究発表会講演集, pp2201-2202.
- 國限定, 林義隆, 太田英将, 北方泰憲 (2005): 地下水モデルを用いた地下水排除工の評価方法. 日本地すべり学会誌, Vol. 42, 3, pp32-41.
- 野口隆, 酒井哲也, 大西民男, 林義隆, 太田英将, 國限定 (2000): リアルタイム三次元安定解析. 第39回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp63-66.
- 野口隆, 大西民男, 林義隆, 太田英将 (2001): 亀の瀬地すべりの地下水賦存機構. 第40回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp99-102.
- 田中基幸, 大西民男, 永野将太郎, 林 義隆, 太田英将 (2003): 亀の瀬地すべりにおける排水トンネルの水文地質的位置付け, 日本地すべり学会誌, Vol. 40, 3, pp50-58.
- 田中基幸, 大西民男, 太田英将, 林義隆 (2002): 地すべり地の3次元プレゼンテーション, 第41回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp459-460.
- (原稿受付2005年4月1日, 原稿受理2005年10月7日)