

## 温井ダムの基礎処理における3次元GISの活用

Application of three-dimensional GIS on foundation grouting of the NUKUI dam

陶山 幸夫 Yukio SUYAMA (国土交通省中国地方整備局温井ダム管理所長)  
上嶋 宏明 Hiroaki UEJIMA (株) ニュージェック )

計画、設計、施工の段階で徐々に集められる調査、解析、施工の膨大な地盤情報を多様な図面情報と連携して、効率良く一元的に管理するためには、構造物を3次元空間の中に配置した3次元GISモデルを構築し、各種の地盤、設計、施工管理データを、デジタル情報として連携させ、必要な時にいつでも取り出せるCG（コンピュータ・グラフィック）を用いた3次元地中情報管理システムを開発し、活用を図ることが必要となる。ここでは、具体的な適用例としてアーチ式コンクリートダムとして国内第2位の高さ156mを誇る温井ダムの基礎処理におけるグラウチング管理にあたり開発・運用した3次元地中情報管理システムについて紹介する。

キーワード：画像処理、電算機の応用、ダム、止水、地盤改良、ボーリング（IGC：A11, H04, K02）

## 1. はじめに

ダム事業は『土木工事の百貨店』と呼ばれるように、多岐多工種の工事が存在する。これらの工事は地形の制約、経済的な条件等より十分な事前調査が困難であることから、複雑に絡み合い、互いに干渉し設計・計画変更が恒常的に起こりうる側面を持つ。また、計画、設計、施工、維持管理の期間を含めれば、ともすれば数十年を要するような長期に渡る場合もある<sup>1), 2)</sup>。そのため、計画、設計の段階からシステムチックに調査、試験、解析、施工の膨大な情報を「集中的に収集、管理できるシステム」を用意し、的確な意思形成を図ることが、安全な構造物の建設と維持管理に必要となる。

ダム工事のうち基礎処理は、基礎岩盤をボーリングし、その孔からグラウトミルクを注入することにより基礎岩盤の改良を図るものである。これは一般的な建設工事のように建造物を視認することがままならず、これまでは2次元で表示された図面から土木技術者が頭の中で3次元構造をイメージしてきた。

一方、近年におけるCG（コンピュータ・グラフィック）関連のハードウェアやソフトウェアの急速な普及と高性能化により、大型コンピュータやEWS（エンジニアリング・ワーク・ステーション）のみが持っていた高度なグラフィック処理機能が汎用性パソコン（パーソナルコンピュータ）で利用可能となり、3次元表現が試みられている。3次元可視化は技術者の判断を補助し、作業を迅速に処理できる他、プレゼンテーション用などの説明補助システムとして利用できる。

本報告は、これらコンピュータのハード、ソフトの進展を積極的に活用し、パソコンを用いて地質構造等の情報を簡単に入力でき、かつ迅速に3次元ビジュアル化を可能にする、といった所期の構想に沿ったシステムを開発したのでここに報告する。



図-1 温井ダムの位置

## 2. 事業の概要

## 2.1 ダムの概要

温井ダム<sup>3), 4)</sup>は、国土交通省が広島県山県郡加計町の太田川水系滝山川に建設した多目的ダムで、洪水調節、河川環境の保全、広島市及びその周辺地域への水道用水の供給並びに発電を目的としている（図-1）。

ダムの規模は、堤高156m、堤頂長382m、堤体積810,000m<sup>3</sup>のアーチ式コンクリートダムで、本型式のダムとしては富山県にある黒部ダムに次ぐ、国内第2位の高さを誇っている。また、有効貯水容量は79,000,000m<sup>3</sup>で、洪水期である6月11日から10月25日までの間は、洪水調節容量41,000,000m<sup>3</sup>、利水容量38,000,000m<sup>3</sup>で運用している。

本ダムの主な経緯としては、昭和49年4月に実施計画調査を開始、平成3年7月に本体工事に着手、平成6年5月から平成10年12月にかけて本体コンクリートを打設、平成11年10月に試験湛水を開始、13年2月に試験湛水を終了、同年10月8日に竣工式を実施している（写真-1）。

平成14年4月1日には、温井ダム管理所として新たなスタートをしたところであり、同日に一般開放を開始したダム本体や周辺整備地区には、連日多くの見学者が訪れ

ている（写真-2）。

## 2.2 事業の目的

本ダムは、以下の目的をあわせ持つ太田川水系唯一の多目的ダムである。

### ① 洪水調節

本ダムの洪水調節計画は、洪水調節開始流量を400m<sup>3</sup>/sとし、ダム地点における計画高水流量2,900m<sup>3</sup>/sのうち1,800m<sup>3</sup>/sの洪水調節を行い、太田川沿川の洪水の防止、軽減を図るものとしている。なお、太田川の河道改修は整備途上であることから、本ダムの洪水調節効果が最大限発揮できるよう、洪水調節開始流量の際のゲート開度を維持する暫定操作（最大放流量は480m<sup>3</sup>/s）を行うこととしている。

### ② 河川環境の保全

太田川の上流域では、豊かな自然環境の回復が望まれており、下流域では都市化の進行により河川の機能の向上が重要となっている。また、従来から太田川に水源を依存している都市用水などはその不安定な流況によりしばしば水不足となっている。これらに対処するため、本ダムでは河川の流況を改善するとともに、下流の既得用水の補給を行うなど、河川環境の保全を図る。

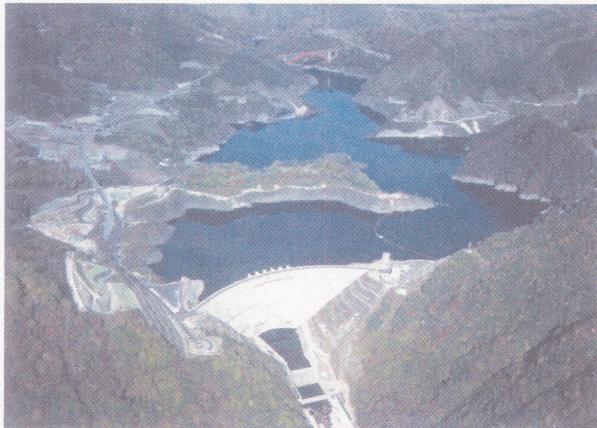


写真-1 温井ダムの全景

### ③ 水道

広島市、呉市などの中核都市及び瀬戸内海沿岸の島しょ部における水利用の需要の増大に対処するため、玖村地点において新たに日量最大300,000m<sup>3</sup>の水道用水の取水を可能とする。

### ④ 発電

本ダムからの放流水の落差を利用した完全従属式の発電（最大出力2,300kw）を行う。

## 2.3 ダムおよび貯水池の諸元

本ダムのアーチ形状は、アーチ中心線の基本形状が放物線で、谷の地形・地質条件から左右非対称となっている。厚さはアーチクラウンで8m、底部で33mある。

ダム及び貯水池の諸元を表-1に、貯水池容量配分図を図-2に示す。

## 3. 基礎処理の計画・設計・施工

### 3.1 ダムサイトの地形・地質

温井ダムは、通称滝山峡と呼ばれる滝山川の狭窄部に位置し、兩岸の山腹斜面は45°～60°と急峻で、河床幅も40～60mと狭くなっている。



写真-2 見学の状況

表-1 ダムおよび貯水池の諸元

ダム	位置：左岸	広島県山県郡加計町大字加計字滝山
	右岸	広島県山県郡加計町大字加計字大平
型式	アーチ式コンクリートダム	
堤高	156.0m	
堤頂長	382.0m	
堤体積	810,000m <sup>3</sup>	
非越流部標高	E L 385.0m	
放流設備	常用洪水吐	3.94m（高）×2.9m（幅）×4門
	非常用洪水吐	4.85m（高）×11.0m（幅）×5門
	中位標高放流設備	1.5m（管径）×2条
	利水放流設備	（主）0.85m（管径）×1条 （補）0.40m（管径）×1条
貯水池	集水面積	253 km <sup>2</sup>
	湛水面積	1.6 km <sup>2</sup>
	総貯水容量	82,000,000m <sup>3</sup>
	有効貯水容量	79,000,000m <sup>3</sup>
	常時満水位	E L 360.0m
	サーチャージ水位	E L 381.0m



図-2 貯水池容量配分図

滝山川には小規模な屈曲が多く、ダムサイトにおいても、直上流で東北東から西南西に向かっていた流れがほぼ直角に流路を変えて、北西から南東に流下し、さらに300m下流で再び流れを西南西に変えるクランク状の地形を呈している。

ダムサイトの基礎岩盤は、堅硬な岩盤から構成されていたが、基礎岩盤中には比較的規模は小さいが多くの弱層が見られた。

断層の発達状況、方向性は左右岸において大きな差が見られた。左岸側には、多くの断層が発達し、その方向もN-S系、NW-SE系の走向を持った高角度断層が卓越していた。一方、右岸側には、下流よりN-S系、NW-SE系の断層系がみられるものの、一般にはNE-SW系のシームが卓越していた。これは河床沿いに存在する当ダムサイト最大の断層であるF-5断層に規制されているものと考えられた。

F-5断層は、下流側では粘土幅50~60cm、破砕幅300~350cmの1本の断層となっていたが、堤敷き付近では数本に枝分かれして、各々の規模は小さくなっていた。

### 3.2 基礎処理の目的

アーチ式コンクリートダムの基礎処理は1, 2次コンソリデーショングラウチング（以降、それぞれ1次コンソリ、2次コンソリという）とカーテングラウチング（以降、カーテンという）に区分される。1次コンソリは2次コンソリの補助的な役割を果たし、コンクリート打設前に着岩付近の粗い割れ目を詰めることを目的とし、着岩面全域を施工した。一方、2次コンソリは本来の意味のコンソリであり、①アーチスラストを受け持つ基盤の割れ目をグラウチングすることにより、基礎岩盤の固密化、均一化をはかり、変形性の改善を図ること、及び、②アバット近傍に幅広い遮水ゾーンを形成し止水も重要な役割を持たせることを目的に上下流フーチング部および堤内通廊部より施工した。また、カーテンは堤体下部および周辺部の岩盤内に連続した難透水ゾーンを形成することにより、貯留水が地山および基礎岩盤を通して貯留池外へ漏水することを抑制すると共に、浸透流による基礎岩盤のパイピングの防止を図ることを目的に施工した（図-3, 4, 5）。

### 3.3 施工の概要

基礎処理の施工は、右岸天端で実施したテストグラウチング（平成5年2月~7月）の結果から得られた資料を注入仕様に反映し、平

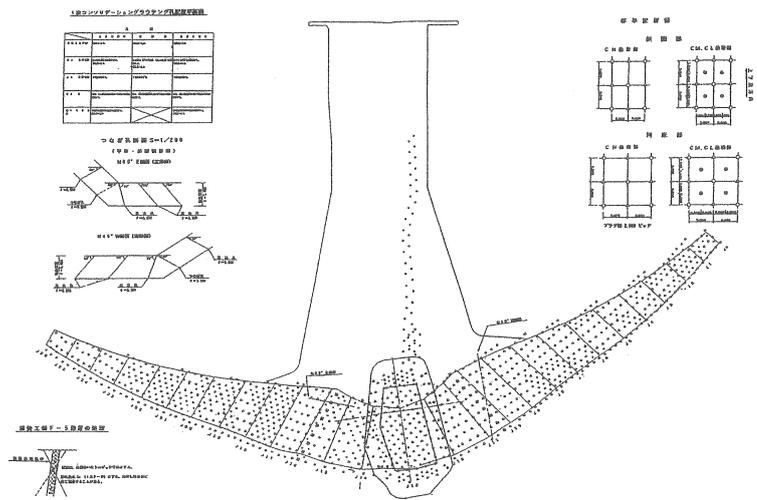


図-3 1次コンソリ計画図

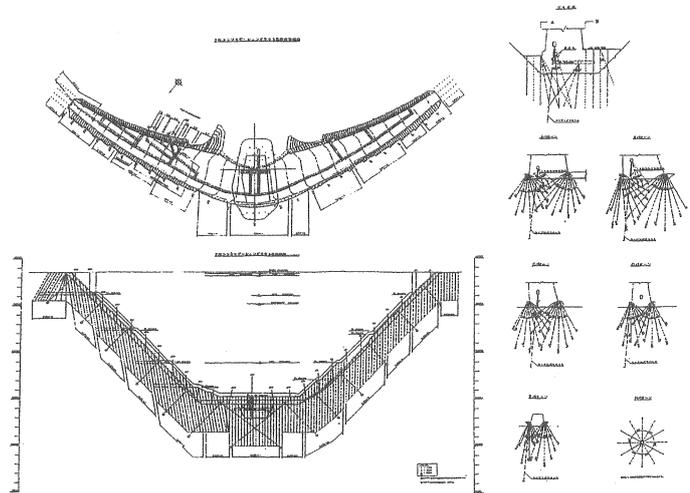


図-4 2次コンソリ計画図

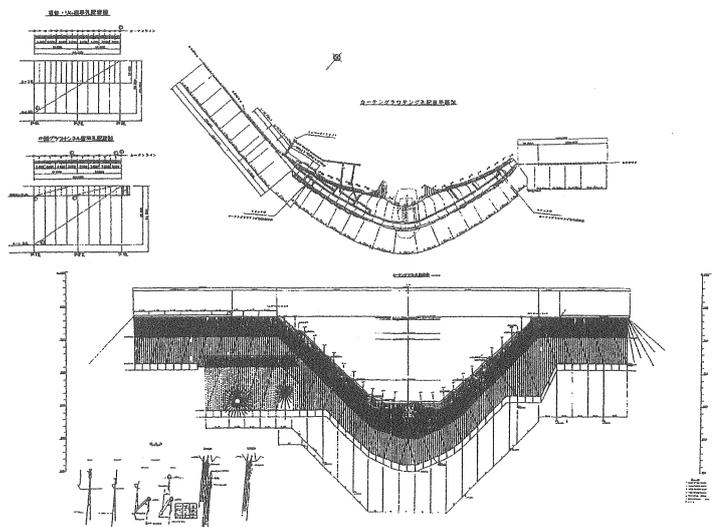


図-5 カーテン計画図

成6年4月には1次コンソリを、同年12月には右岸リム部よりカーテンを開始し、平成8年7月には河床部より2次コンソリを開始した。施工中期では堤体打設の進捗の影響から一部工程の遅れが懸念されたが、後期では順調に施工が進み、平成9年2月には1次コンソリが、平成11年7月、平成11年8月にはそれぞれ2次コンソリ、カーテンが、平成11年10月には閉塞工グラウチングが完了した。

1次コンソリの河床プラグ部では初期の透水性が20Luを超える高透水部および平均セメント量が20kg/m以上の多注入量部が存在した。これに対し斜面部では断層およびその周辺の破碎帯に散発的な高透水・多注入量部が認められたものの、大半は低透水・少注入量部で問題がなかった。

2次コンソリの高透水箇所は、1次コンソリの施工結果とほぼ同様の箇所であり、改良状況は、1次コンソリから2次コンソリへ施工が移行するに従い、透水性および注入量の遞減が確認された。また、河床部においては追加孔が頻繁に発生する状況であったが、改良が収斂している事を確認した。

カーテン部における基礎岩盤の透水性状は、全般に初期段階から低透水な基盤の特徴を反映する結果であった。改良状況は、右岸リム部に代表されるように低透水・多注入量部の傾向が見受けられたが、塑性的な性状を示す基盤ではなく、しかも施工回数に進展に伴い注入量は収斂する傾向にあり、健全に改良されたと判断した。

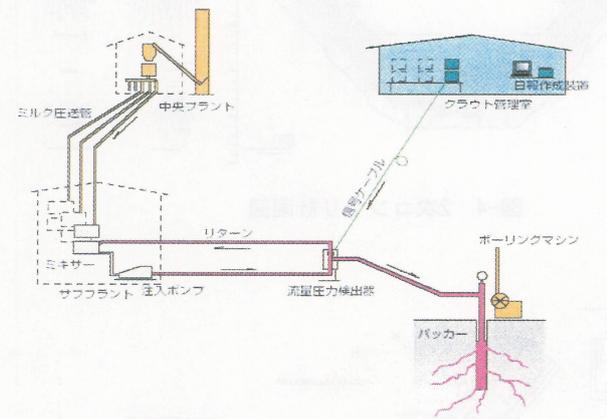


図-6 グ라우チング作業現場状況図

#### 4. システム開発に至った経緯

##### 4.1 従前のグラウチング管理システム

3次元GIS地中情報管理システムを開発する以前より、作業現場の日常的に発生する情報を収集・処理し、追加孔選定等の管理の合理化および省略化を目的としたグラウチング管理システムを使用していた。

作業現場において日々施工された注入履歴、施工条件等のデータは現場に設置された流量圧力検出器を介して、グラウトデータ管理装置により演算処理され蓄積される(図-6)。既往システムは、これらの収集データを用いて解析に必要なデータベースを構築し、集計表、超過率、相関図、遞減図、ルジオンセメントマップ等の図表を作成し、これらの図表を用いて基礎岩盤の性状に応じた最適な方法が採用されているか? 必要十分な改良効果が得られているか? 等を判断するための補助システムであった(図-7)。

##### 4.2 3次元GISシステムの必要性

グラウチング管理は施工結果から得られた情報を正確に把握、分析し、それらを迅速に施工に反映する必要がある。1次コンソリおよびカーテンの改良状況は、それぞれ平面および縦断面による孔配置の違いを別にすれば、2次元表示であるため比較的容易に把握・分析できる。これに対して2次コンソリは、上下流のフーチング部および監査廊内から上下流方向へファン状に、しかも一部は地山方向に角度を付けた配孔であった。さらに、深度方向に対しては最大断面部でおよそ60mもの削孔深度であった。これらの複雑な孔配置と堤体平面形状が放物線であることから、施工の粗密が懸念され、重力式ダムやフィルダムのような単純な2次元表現では改良の管理が非常に難しく、立体的な計画管理が必要とされた。

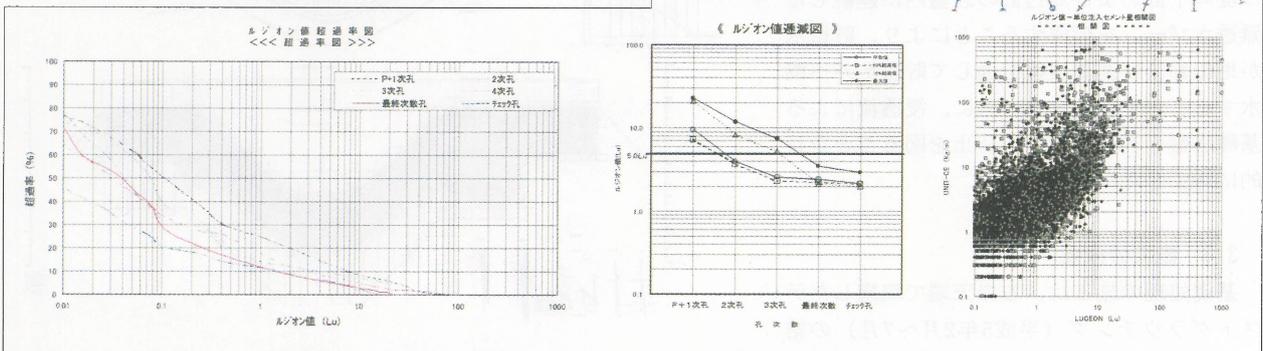


図-7 従前のグラウチング管理システム

そこで3次元CGを用いた立体的な表現により、注入状況、注入傾向等の把握をリアルタイムに行う為のパソコンシステムを新たに開発することとした。

## 5. 3次元GISシステムによる技術支援

### 5.1 システムの構成

#### (1) 3次元CG可視化システム

システムは、当該プロジェクトを、同一立体座標系で、かつ各種の計測情報の一元管理を可能とするために3次元GIS（地理情報システム）の考え方を取り入れることとした<sup>5)</sup>。

また各種計測データ等のデータ蓄積・管理は、EXCEL等の市販ソフトウェアで編集し、それをCSV形式（カンマ区切り）のテキスト形式で取り込みができるよう応用性を持たせることとした。3次元GISを核としたシステム構成を図-8に示す。

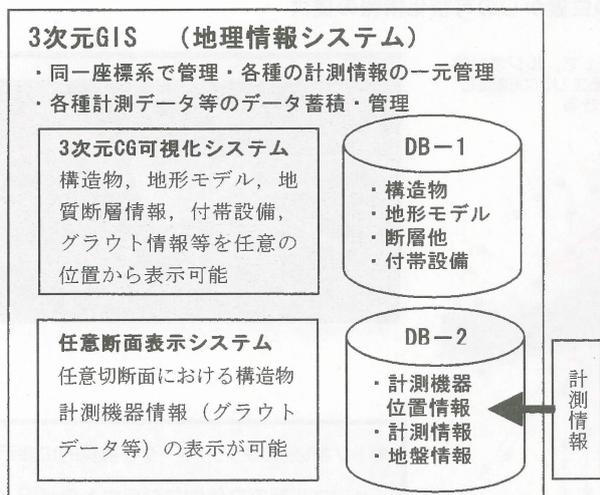


図-8 3次元GISを核としたシステム構成

#### (2) 任意断面表示システム

任意断面表示システムは、当初より定められた断面以外に、追加的に必要とする部分の断面地中情報を取り込むシステムである。

本システムの機能とそれから得られる成果を以下に示す。

①平面図（2次元画面）上において任意の断面を指定し、その断面の標高と角度を入力することにより任意の切断面図が作成でき、さらに入力操作を繰り返すことで、複数の断面が表示できる。

②また、任意断面の指定に幅を入力することにより、2断面内のデータが認識できる。

③任意切断面、例えば着岩沿いの標高スライス断面に、寸法線（グリッド）が表示でき、孔の粗密が確認できる。

④任意切断面データまたは任意の幅を持った2断面内に、共通する各種地盤データ、解析、施工データを取り込み、設計解析、施工管理システム用データに変換できるように、相関、超過確率等の計算と図表出力ができる。

### 5.2 3次元CG可視化システムの事例

3次元CG表示するデータには、固定データと逐次更新データがある。固定データは、地形、ダム堤体、地質（断層を含む）などの形状データであり、逐次更新されるデータは施工が進むごとに現場から提出される注入孔の種別と位置、注入圧力、注入時間、ルジオン値、単位注入セメント量などのグラウチングデータである（図-9, 10）。

2次元では先に示した様に表示に限界があり、グラウトの施工状況も含めその計測値の把握は容易でない。このため、現実的な施工状況の把握を可能とするために3次元グラフィックスによる表示を行う。施工状況の3次

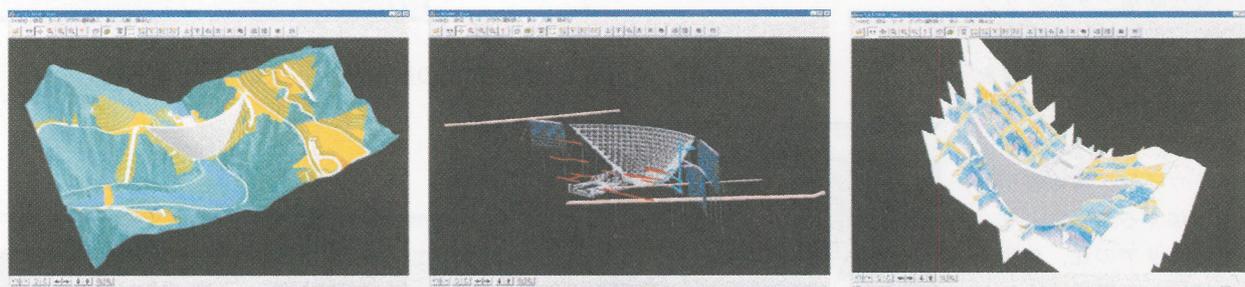


図-9 固定データ：地形、ダム堤体、通廊他、地質（断層）

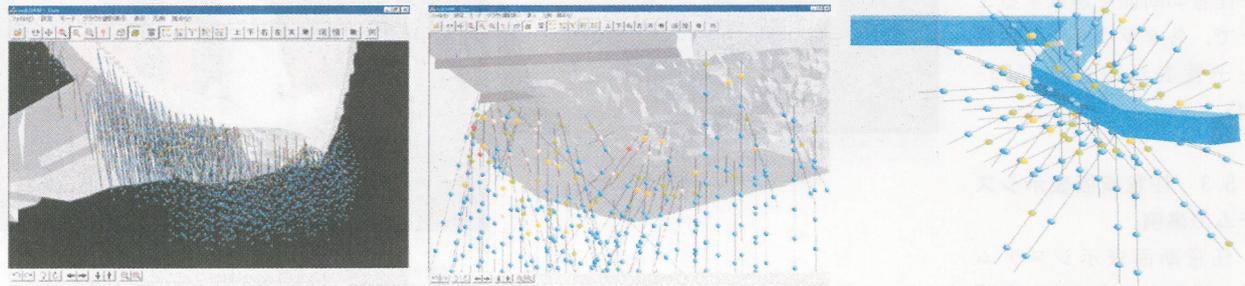


図-10 逐次更新データ：グラウチングデータ（注入孔の種別と位置、注入圧力、時間、ルジオン値、セメント量他）

元表示には、ブラウザ上で3次元グラフィックスを表示させるための言語であるVRML(Virtual Reality Modeling Language)を採用した。VRMLの利用により、施工状況の3次元グラフィックスを任意の視点から見る事ができる。また一定の間隔で処理することにより、施工の流れをアニメーション表示させることも可能である。3次元CG可視化システムは、3次元表現によりあらゆる方向から視覚的に注入状況を管理することを目的とする。本システムの機能とそれから得られる成果を以下に示す。

①CG画像は、マウスの動きに合わせてリアルタイムに動くため、ファン状に施工している注入状況が、任意の位置から視覚的に把握できる(図-11)。

②監査路、連絡通路等のトンネル部の形状を登録することにより、立体的なグラウチング状況とカーテン等他種グラウチングとの関係が把握できる(図-12)。

③主要な断層とダムグリッド測線(地質図)を登録することにより、地質情報を視覚的に確認できる(図-13)。

④グラウチング情報表示機能を付加することにより、任意のエリアの孔、ステージを連続して選択することや任意切断面を選択することで、各グラウチング情報を一覧表示できる(図-14)。

### 5.3 任意断面表示システムの事例

任意断面表示システムは、当初より定められた断面以外に、改良効果の把握

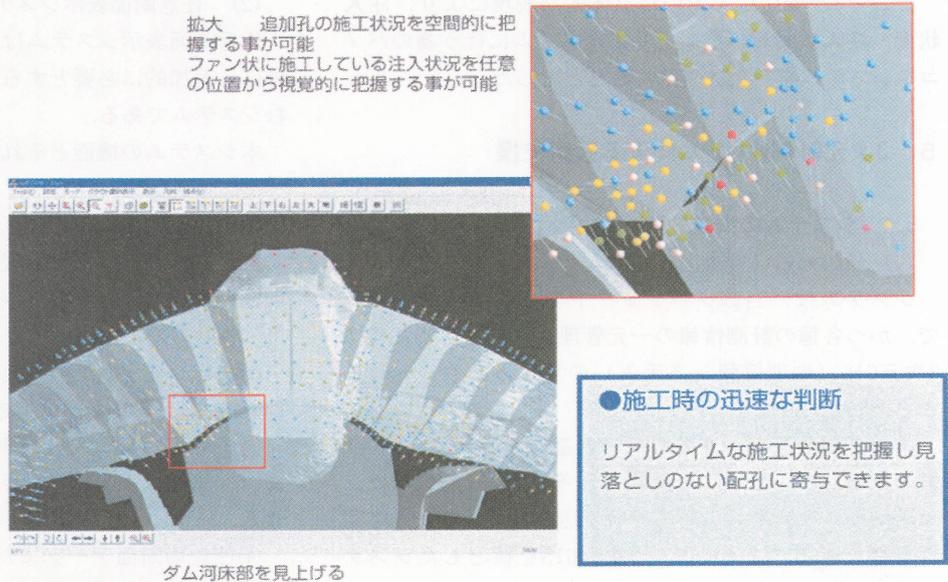


図-11 任意の位置からの可視化情報の提供

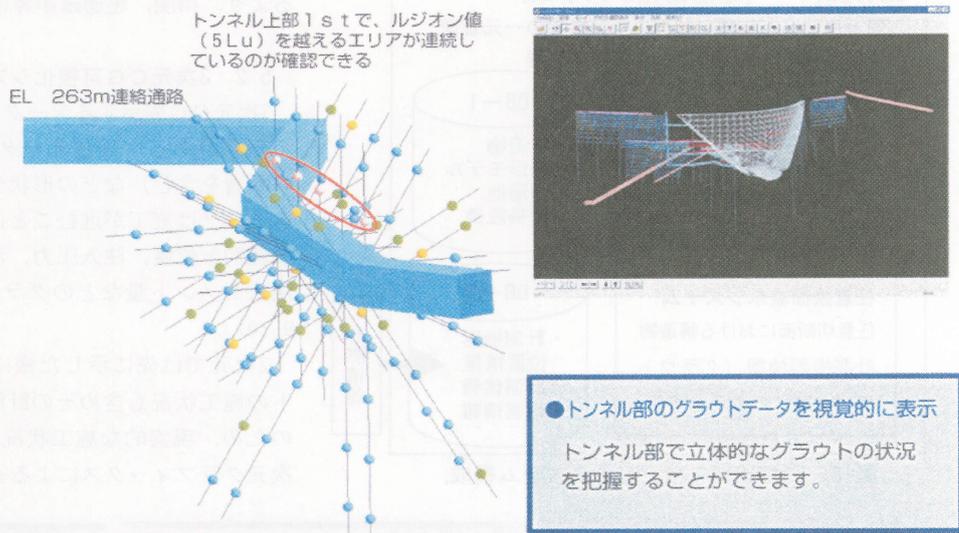


図-12 監査路、連絡通路部の表示例

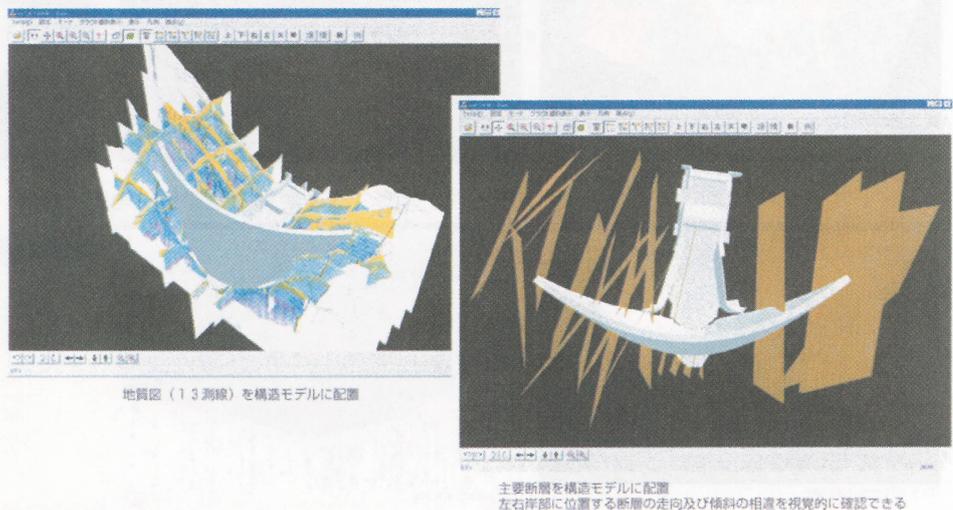


図-13 地質情報の視覚化

を必要とする部分の断面の解析を行うことを目的とする。本システムの機能とそれから得られる成果を以下に示す。

①平面図（2次元画面）上において任意の断面を指定し、その断面の標高と角度を入力することにより任意の切断面図が作成でき、さらに入力操作を繰り返すことで、複数の断面が表示できる（図-15）。

②また、任意断面の指定に幅を入力することにより、2断面内のデータが認識できる。

③任意切断面、例えば着岩沿いの標高スライス断面に、寸法線（グリッド）が表示でき、孔の粗密が確認できる（図-16）。

5.4 システムによるグラウチング管理の具体例

2次コンソリの追加孔基準では、同一孔の上下ステージかつ隣接孔の同位置および上下ステージの注入結果により追加孔の選定を行うため、2次元の図面では複数の断面図を必要とし、これらの関係を確認するのは非常に困難かつ誤りや見落としがある。しかし、本システムの導入により高透水部の連続性を空間的に視認し、ルジオン値、単位注入セメント量等の詳細な注入状況、注入効果を基に、高透水部への注入の見落としが無く、かつ適切な位置に追加孔を選

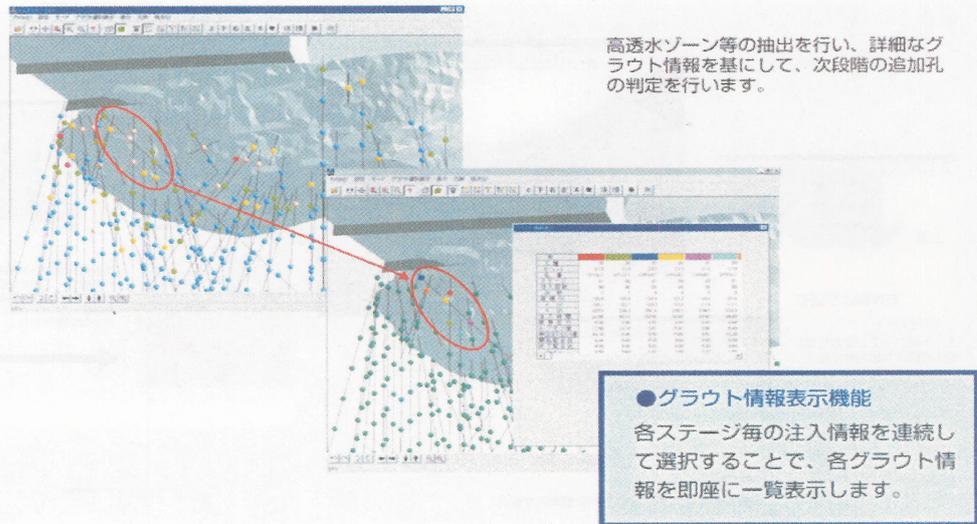


図-14 各グラウチング情報の一覧表示

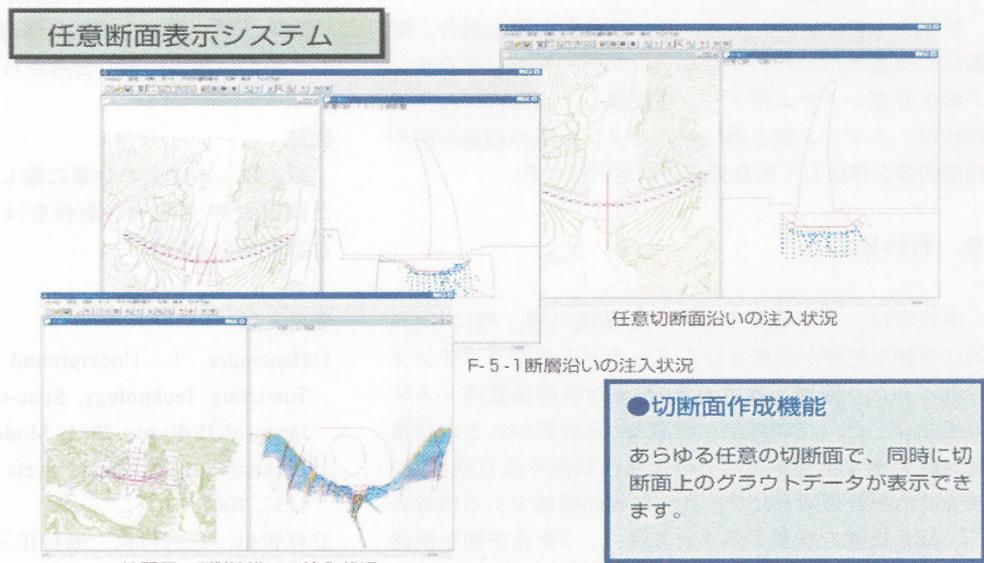


図-15 任意の切断面表示機能

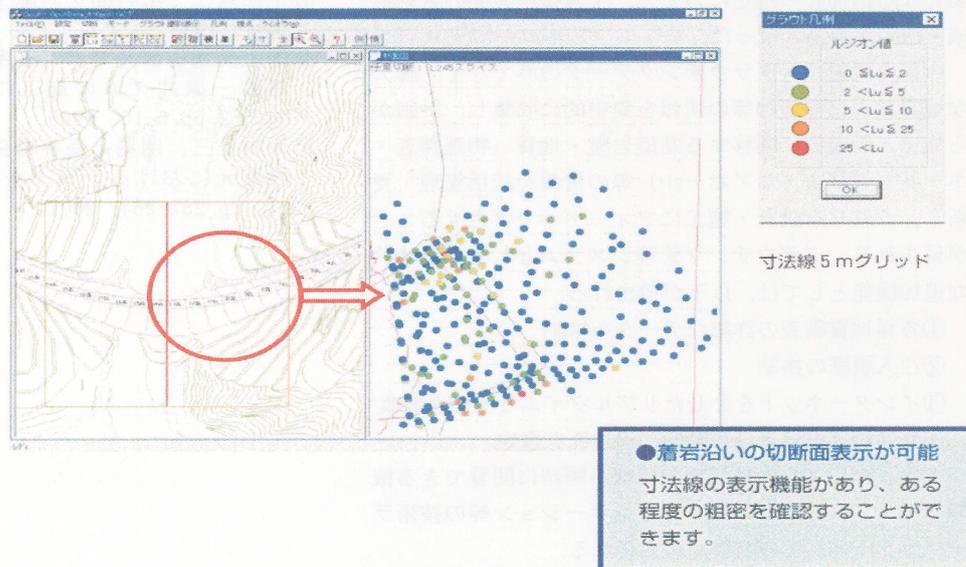


図-16 グリッド表示による孔の粗密状

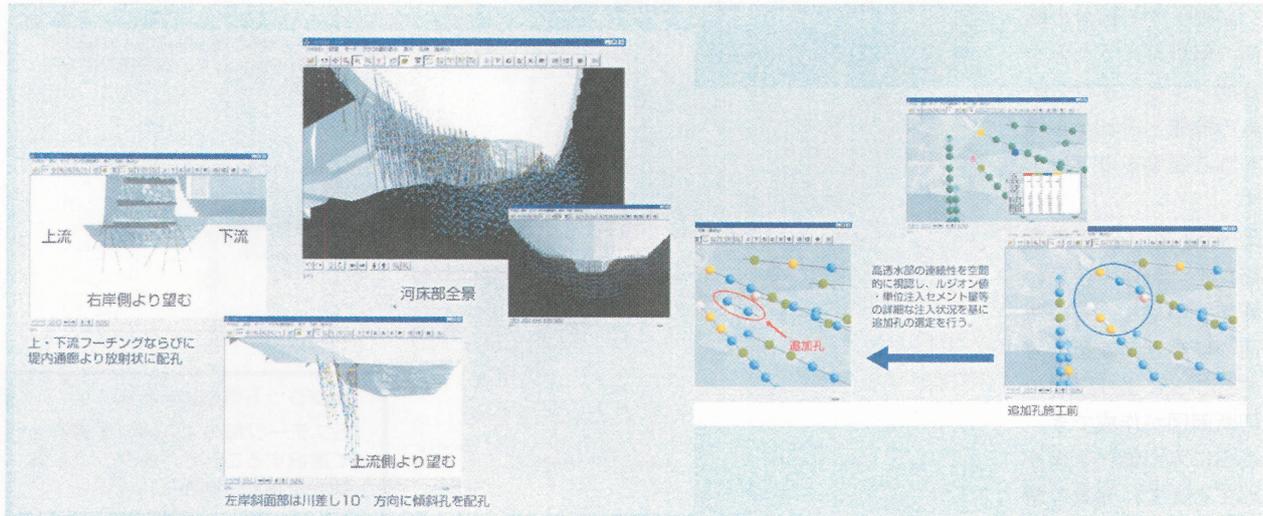


図-17 追加孔位置の選定例

定することができる(図-17)。

さらに、本システムでは、特に改良の必要な部分、断層部や高透水部のみをのグラウチングデータをグラウチング解析管理システム用データに変換し、当該部の改良進捗状況、ルジオン値と単位注入セメント量の超過率図や相関図等を作成して改良効果の判定が行える。

## 6. おわりに

本報告は、ダム建設工事のうち基礎処理、特に3次元に複雑な把握が必要となるアーチダムのグラウチング管理にあたり開発・運用した3次元地中情報管理システムを紹介した。この結果、従来2次元断面から土木技術者が頭の中でイメージしていた注入状況や改良状況が3次元に視覚可能となり、さらに補助機能である情報表示・検索機能を利用することにより、3次元空間を視認しながら、その場で多角的な面から考察・評価が可能となった。また、施工現場において正確で迅速な判断が必要となる追加孔の選定に対して、土木技術者間の意志形成・決定が容易となった。

今後の展望は、グラウチングデータのみでなく、膨大な地質および構造物等の情報を集中的に収集し、計画から施工と段階的に遷移する基礎岩盤・地質(物理探査・ボーリング調査・ボアホール)等の情報を統括管理・更新し、これらを設計・施工にフィードバックさせることが望まれる。グラウチング管理システムとしての具体的な追加機能としては、以下が望まれる。

- ①各種地質調査の詳細なデータを格納
- ②注入履歴の格納
- ③インターネットを介したリアルタイムなデータ収集
- ④条件設定を行えば自動的に追加孔を選定

また、本システムは様々な情報が瞬時に閲覧できる機能を有していることからプレゼンテーション等の技術ライブラリーとしての発展が考えられる。

さらに、本報告に用いた3次元地中情報管理システム

は、ダム事業のみでなく地表から直接観察できないあらゆる地下構造物および地質構造の情報化施工のツールとして用途は無限にあると考えられる。

## 謝辞

最後に、本論文の執筆に際して御指導、御助言下さった岡山大学 花村哲也教授をはじめ、関係者各位に深甚たる謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Hanamura, T.: Underground Space Development and Tunneling Technology, State-of-the-Art of Tunneling in Japan of IS-Kyoto 2001, Modern Tunneling Science and Technology, Balkema (Swets & Zeitlinger), pp. 1127-1137, 2001.
- 2) 乾哲也, 花村哲也, 西村正三: 3次元CGを用いた地中情報管理システムの開発, 地盤工学会「ワークショップテキスト・公募論文」pp. 4-28, 2002.
- 3) 中江兼二: 第44回ダム施工技術講習会テキスト参考資料, 1998.
- 4) 国土交通省温井ダム工事事務所: 巨大アーチダムの建設ー温井ダムの施工についてー, ダム日本, No. 652, pp. 6-10. 1999.
- 5) 西村正三, 関晃, 長谷場良二, 吉原進: 西田橋の移設復元におけるデジタル情報の活用, 土木史研究 21, pp. 257-264, 2001.