

地下ダム建設における琉球石灰岩の3次元水理地質解析

並 木 和 人
伊 藤 不 二 夫
(本社 土木技術本部
技術第4部)

桑 原 徹
串 間 正 敏
(本社 土木技術本部
技術第4部)

平 間 邦 興

Three-Dimensional Hydrogeological Modeling and Groundwater Analysis in Ryukyu Limestone of Southwest Japan in Underground Dam Construction

Kazuto Namiki Tohru Kuwahara Kunioki Hiramata
Fujio Ito Masatoshi Kushima

Abstract

The underground dam is a new technology in the civil engineering, and is used to newly develop groundwater. From the view point of hydrogeology, construction sites in Japan are divided into the Southwest Islands and other areas. The former is composed of Ryukyu Limestone and tertiary soft rocks, and the later is composed of alluvial sand and gravel and pre-tertiary basement rocks. In construction, water balance analysis in the catchment and storage area is important to clarify the possibility of new development groundwater and to prevent change in regional environments. In this study, we carried out three-dimensional hydrogeological modeling and groundwater analysis using the geological and hydrological data in the Sunagawa Underground Dam of Okinawa, Miyakojima Island, Japan. The area is composed of an aquifer of porous Ryukyu Limestone and impermeable Tertiary Shimajiri Mudstone Formations. The distribution of the aquifer is characterized by a buried valley formed by fault movements. These analyses were carried out from before to after construction, that is, the natural condition (pre-construction), during each step of construction, and after construction. Consequently, accurate hydrogeological modeling was assured, and we were able to determine both the characteristics and anomalies of groundwater flow in the area based on the asymmetrical geological structure induced by faulting.

概 要

地下ダムは、近年新しい水資源開発手法として注目されている技術である。地下ダム建設サイトを水理地質的に見ると、主に多孔質琉球石灰岩と不透水性新第三紀層軟岩からなる南西諸島と、主に沖積砂礫層と不透水性中硬岩の堆積岩・花崗岩からなるいわゆる本土で大きく異なる。地下ダムの計画・調査・設計・維持管理に際しては、流域の水収支評価が、水資源開発の可能性ばかりではなく流域環境の保全という立場からも不可欠である。また効率的な施工という立場からも流域の地下水状況の把握は重要である。この研究の目的は、最近の地下ダム解析技術の進歩を背景として、琉球石灰岩地域での地下ダム建設において、3次元解析技術の確立と設計施工のための水収支評価の精度向上を目指したものである。すなわち、沖縄地方・宮古島の砂川地下ダムを事例として、既往の地下構造データおよび地下水観測データを用いて3次元FEMによる地下水解析を行い、自然状態から、止水壁施工過程、および止水壁締切り直後までに関して、検討を行った。これらの解析を通じて、不透水性基盤層中の断層帯、帯水層中の埋没谷などにおける地下水流動の特異性を明らかにすることができた。これらの特異性は、いずれも断層による非対称の水理地質構造に起因するものであり、準3次元解析では表現できないような、3次元による地下構造モデリングと解析の有効性を改めて確認するとともに、琉球石灰岩の水理地質の評価について基礎を固めることができた。

1. はじめに

地下ダムは、近年新しい水資源開発手法として注目されている技術で、現在国内では竣工・建設中のものを合わせて14箇所にはのぼる。地域的には、いわゆる南西諸

島（沖縄県、鹿児島県）で6箇所、九州地方（南西諸島を除く）で4箇所、四国地方1箇所、近畿地方2箇所、東北地方1箇所という現状である。地下ダムの建設サイトを水理地質的に見ると、南西諸島では主に、多孔質琉球石灰岩からなる帯水層、新第三紀層の軟岩からなる不透水性基盤で構

成されているのに対して、それ以外のいわゆる本土では、沖積砂礫層からなる帯水層と、古～中生代の中硬岩の堆積岩・花崗岩といった不透水性基盤で構成されている。また前者では地下ダム貯留域はしばしば断層構造と関連しているのが特徴であるのに対して、後者では谷底の平地や扇状地を対象とすることが多い。こうした地形的特性から、地下ダムとしては前者では大規模なものが、後者では小規模なものが多い。

地下ダムの計画・調査・設計・維持管理に際しては、流域の水収支評価が、水資源開発の可能性ばかりではなく流域環境の保全という立場からも不可欠である。また効率的な施工という立場からも流域の地下水状況の把握は重要である。従来地下ダムの水収支の技術としては、水文気象的な手法、タンクモデル、FEMを利用した2次元・準3次元・3次元解析など、またタンクモデルとFEMを組み合わせたハイブリッドモデルなどがある。これらの手法は、解析の目的・地質地下水データのレベルなどに応じて、それぞれの建設段階で必要に応じて使い分けられている。

この研究の目的は、最近の地下ダム解析技術の進歩を背景として、琉球石灰岩地域での地下ダム建設において、3次元解析技術の確立と設計施工のための水収支評価の精度向上を目指したものである。すなわち、沖縄地方・宮古島の砂川地下ダムを事例として、既往の地下構造データおよび地下水観測データを用いて浸透流解析を実施しながら流域の3次元水理地質構造モデルを作成し、次に止水壁の構築過程における地下水変動解析によりモデルの妥当性を検証し、琉球石灰岩の水理地質特性を把握しようとするものである。

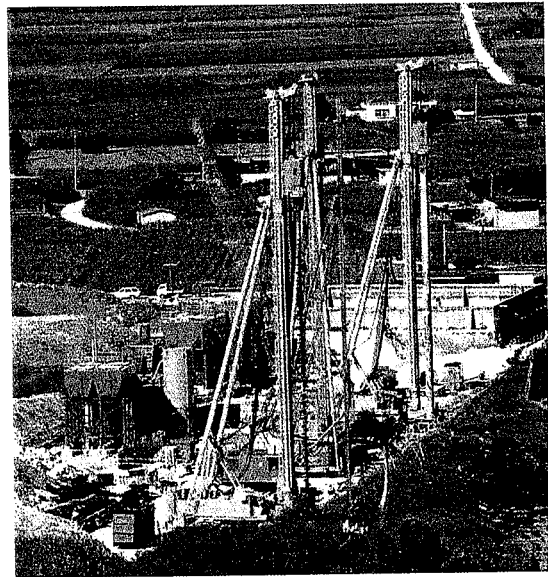


Photo1 砂川地下ダムの施工状況
View of the Sunagawa Underground Dam

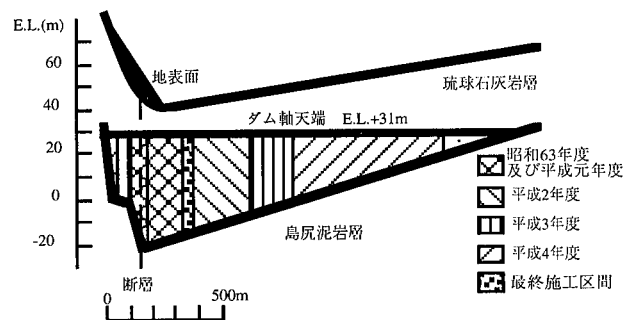


Fig.2 砂川地下ダムの施工段階
Step of the Cut-off Wall Construction

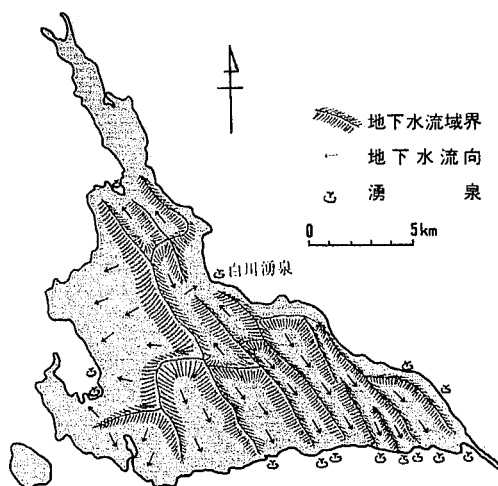


Fig.1 宮古島の地形
Geography of the Miyakojima Island

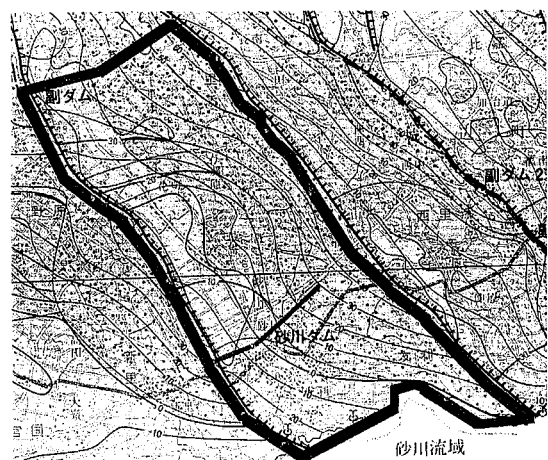


Fig.3 浸透流解析範囲 (太枠部)
Catchment Area of Groundwater Analysis

2. 宮古島の水理水文地質的特徴と砂川地下ダムの概要

2.1 地形と地質

宮古島の地形は平均標高60m前後の台地で構成され、全体的には平坦である。しかしその中に北西-南東方向に1~2km間隔で数列の起伏が存在している。地質は、第三紀鮮新世から第四紀更新世の約100万年前に堆積した島尻泥岩層、および約50万年前にその上に不整合に堆積したサンゴ礁を起源とする琉球石灰岩層で構成されている。表層には大野越粘土層と呼ばれる粘性土が一部に分布するが、全体的には琉球石灰岩層が広く地表を覆っている。

したがって、水理地質的には、島尻泥岩層を不透水性基盤、琉球石灰岩層を帯水層とする二層構造とみなすことができる。地形的起伏の成因は正断層活動によるもので、この断層変位に対応して不透水基盤の形状も地表と同様な起伏をなしている。地下水の帯水層は最大で60mの層厚をなし、断層に沿って埋没谷と呼ばれる特殊な地形が存在している。これらの断層地形・断層構造と帯水層分布は、地下ダムの適地となるのに有望な条件を形成している。

2.2 気象と水文特性

宮古島における1951年から1980年までの年間降水量の平均は2,197mmで、東京に比べ約700mm大きい。また降雨量のうち、地下浸透が降雨量の40%余りを占め、地表流出が10%未満と小さい点が大きな特徴となっている⁴⁾。これは帯水層である琉球石灰岩層の透水性が非常に高いことに起因している。その一方で、浸透した地下水はごく短時間のうちに海へ流出してしまい、地下水が帯水層に貯留されないことが欠点である。このような状況から、地下水の無効流出の抑制と積極的な利用が課題となっていた。

2.3 砂川地下ダムの概要

砂川地下ダムは、こうした海への地下水の無効流出を抑制することで新規の農業用灌漑用水を創出することを目的とした貯留型の地下ダムである。砂川地下ダムの流域は、Fig.1に示すように、北西-南東方向の断層に挟まれた幅広い谷地形をなし、大きな河川はなく、また集水域と貯留域はおおむね同じ区域となっている。施工は、Photo1およびFig.2に示されるように、昭和63年度から平成5年度にかけての6年間という長期間、ならびに止水壁の段階的な施工を特徴としている。止水壁の壁長は1,853m、最大堤高49m、最大掘削深度65m、止水壁厚0.5m、総貯留量は950万トンと国内最大級で、ソイルミキシングウォール (SMW) 工法と注入工法によって施工された⁵⁾。

3. 解析手法

3.1 解析の目的

沖縄地方の地下ダムの設計では、通常、地下水位の時系

Table 1 地層の飽和透水係数および貯留係数
Hydrogeological Parameters

	琉球石灰岩	島尻泥岩	断層破砕帯	止水壁
飽和透水係数 (cm/s)	3.5×10^{-1}	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-6}
貯留係数	0.1	0.001	0.075	0.001

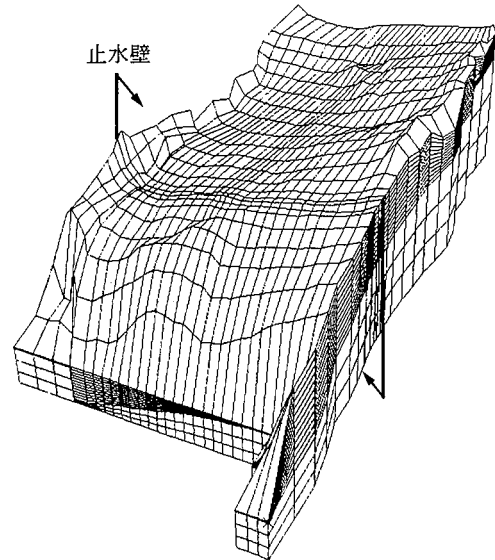


Fig.4 3次元FEMメッシュモデル
3-D FEM Mesh Model

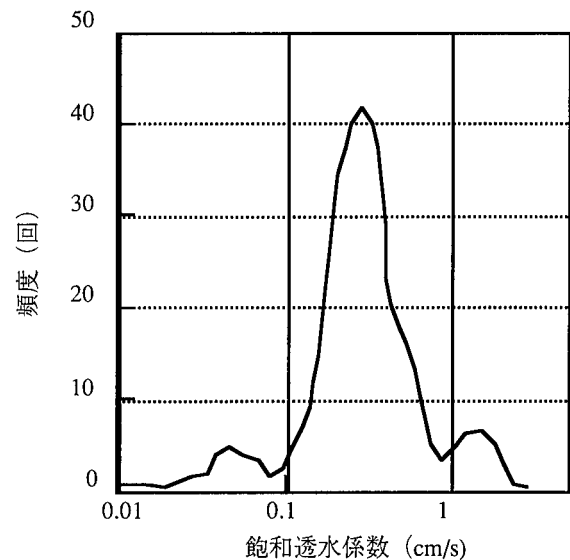


Fig.5 琉球石灰岩層の透水係数頻度分布²⁾
Distribution of Permeability of Ryukyu Limestone

Table 2 解析ケース
Cases of Simulation

ケース1	施工前
ケース2	平成2年度終了時
ケース3	平成3年度終了時
ケース4	最終施工区間終了前
ケース5	施工終了後

列変化と流入流出状況を流域内の区域ごとにモデル化し（タンクモデルあるいは貯留モデルと呼ぶ）、これらを初期条件や境界条件として準3次元FEM解析を行い、流域の水収支あるいは取水量の設計等がなされている^{6)~8)}。

今回の解析の目的は、砂川地下ダムの止水壁の施工過程を反映させた解析を実施し、施工過程と水収支・地下水流動の関連を把握し、従来とは別の見地から地下ダム設計を検討する資料にしようとするものである。従来このような予測は可能な限り水位観測を密にする以外、有効な手段は存在しなかったが、水位観測井の設置の限界もあり正確な把握は困難であった。今回のようなシミュレーションは、最近の数値解析技術の発展に負うところが大きい。

3.2 解析モデルの作成および解析条件

解析にあたっては、既往調査報告書で明らかにされている流域の地形・地質構造、水理地質特性、および止水壁の構造、施工の進捗状況を反映させた3次元モデルの作成を行った。解析は有限要素法による3次元浸透流解析を実施した。自然状態を初期条件として、地下ダム貯留域について、止水壁工事の進捗による地下水の貯留状況および流向流速の変化について検討した。

解析範囲をFig.3に示す。地層モデルは帯水層である琉球石灰岩層と不透水性基盤である島尻泥岩層の二層の構造とし、その他に島尻泥岩層中に存在する断層破碎帯、および止水壁を表現した。作成した3次元メッシュモデルを図をFig.4に示す。モデルに与えた水理パラメータのうち、飽和透水係数および貯留係数をTable 1に示す。このうち、琉球石灰岩層の飽和透水係数については、地下ダムの設計施工のために実施した揚水試験結果から作成された飽和透水係数の分布曲線が、Fig.5に報告されている⁹⁾。このような透水係数のばらつきは、琉球石灰岩層の岩質が、泥岩、石灰岩の礫を含む部分、珊瑚礁性石灰岩、砂質石灰岩、泥質石灰岩などから構成されているためである。今回は、この図の中で最も頻度の多い値である $3.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ を解析パラメータに採用した。また貯留係数に関しては、取水実験から10~15%とされている⁹⁾。

不飽和水分特性については、文献資料より砂、風化岩および新鮮岩の水分特性曲線を収集し、それらを比較することにより最も妥当と思われる水分特性曲線を作成した。

解析ケースは、Table2に示すように施工前の自然状態から止水壁施工完了までの年度ごとの施工過程において、合計5ケースをそれぞれ定常解析で実施した。

4. 解析結果

4.1 止水壁による貯留効果の検証

解析結果は、全水頭値・圧力水頭値・流速ベクトルに関して、鳥瞰図・2次元平面図・2次元断面図で表すとともに、自然状態（ケース1）に対する変化率を各ケースごとに図化出力し、結果の考察を行った。解析結果の例を

以下に示す。

止水壁構築後（ケース5）の全水頭および圧力水頭の分布を示した鳥瞰図をFig.6およびFig.7に示す。Fig.6は集水域全体の地下水のポテンシャルの分布を示しており、止水壁の上側と下側との間に大きな水頭差が存在していることが示されている。Fig.7は、集水域の飽和、不飽和の程度の分布を示しており、濃い赤色の部分が飽和帯すなわち地下水が存在している部分となる。上流側に存在する黄色の範囲には、後述する埋没谷の効果が現れている。

帯水層である琉球石灰岩内（最下部層）の地下水の流速ベクトルの変化を示す例として、流域平面図を、施工前の自然状態（ケース1）および施工後の状態（ケース5）についてFig.8に示す。ケース1では、昭和56年11月の地下水位分布³⁾が再現されるように、水位拘束条件を設定し、合わせて地層モデル・入力パラメータの妥当性を検証した。再現された全水頭分布は、水理的基盤である島尻泥岩層の基盤高度と調和しており、この流域での地下水の賦存状況は島尻泥岩の上面の形状に支配されていると言える。地下水の流れが卓越しているのは、埋没谷と一致しており、こうしたごく狭い範囲に地下水流が集中し、地下河川のような流れを形成している。ケース5では、止水壁の構築完了によって集水域全体の地下水の流れが大きく減少していることが示されており、これは止水壁による貯留効果が現れているものである。

止水壁横断面位置での流速ベクトルの変化、すなわち（該当ケースの流速/自然状態ケース1の流速）の比の例として、Fig.9にケース2、Fig.10にケース4のケース1に対する変化率を示す。両者を比較すると、不透水性基盤を構成する島尻泥岩層中での、止水壁の構築の進捗に伴う流速ベクトルの増大傾向が顕著である。これは構築が進むにつれ、琉球石灰岩層での全水頭値が大きく上昇しないにもかかわらず、島尻泥岩層中の地下水が全体的に被圧する傾向に進むことを示している。

解析結果より、地下ダム集水域での地下水流動の特徴について、以下のようにまとめられる。

(1) 自然状態 水頭分布・流速ベクトル分布とも分布状態に埋没谷の形状の影響が現れている。

(2) 施工過程 水頭分布：止水壁施工の進捗にもかかわらず水頭値は大きく上昇しない。

流速ベクトル分布：琉球石灰岩中では止水壁未施工部で増加する。島尻泥岩層中でも増加に向かう。

(3) 施工後 水頭分布：止水壁の完成により全体的に大幅に増加し、特に止水壁直上部で顕著である。

流速ベクトル分布：琉球石灰岩中では大きく減少する。島尻泥岩層中ではさらに増加に向かう。

4.2 実測データによる検証

止水壁の最終施工区間の施工前後における、集水域縦断面における地下水位観測データ、および解析で得られた地下水位を比較したものをFig.11に示す。施工前の状況を比較すると、解析値と実測値は良く一致していると言える。一方施工後の状況を比較すると、止水壁直上では良く一致しているものの、ダム軸から上流側500~1,500mの距

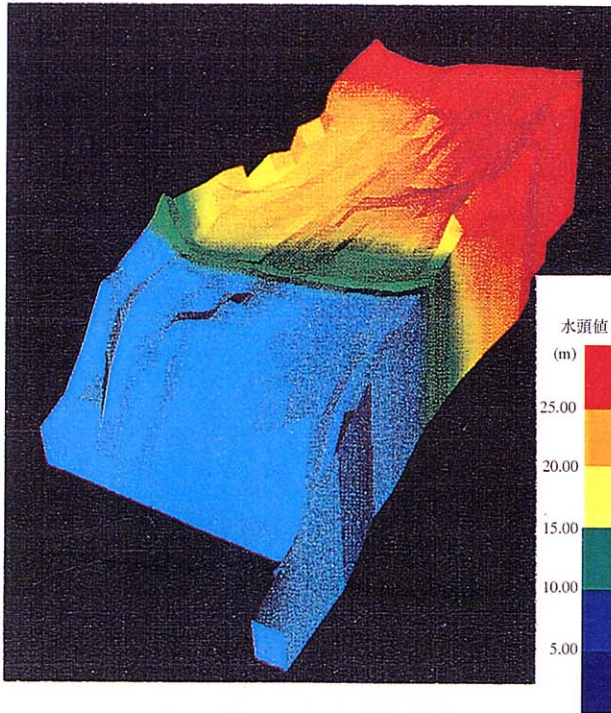


Fig.6 施工後の全水頭値分布の鳥瞰図
Bird View Diagram of Hydraulic Head
(Case 5; post construction)

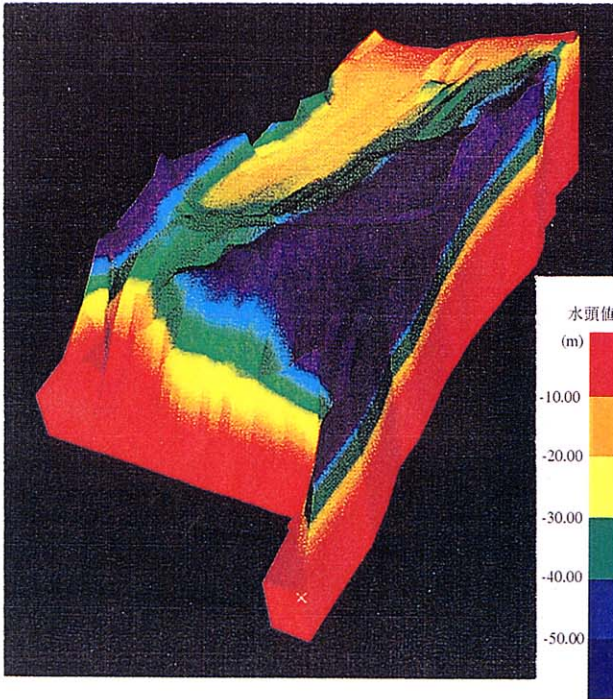


Fig.7 施工後の圧力水頭値分布の鳥瞰図
Bird View Diagram of Pressure Head
(Case 5; post construction)

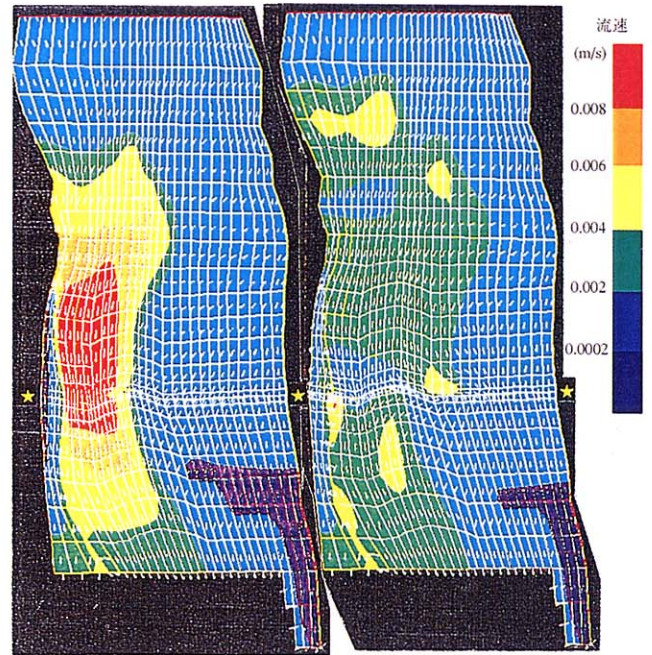


Fig.8 琉球石灰岩層内の流速ベクトル平面図
(左:ケース1,右:ケース5,星印間が止水壁)
Flux in the Horizontal View in the Ryukyu Limestone
(Left:Case 1,Right:Case 5)

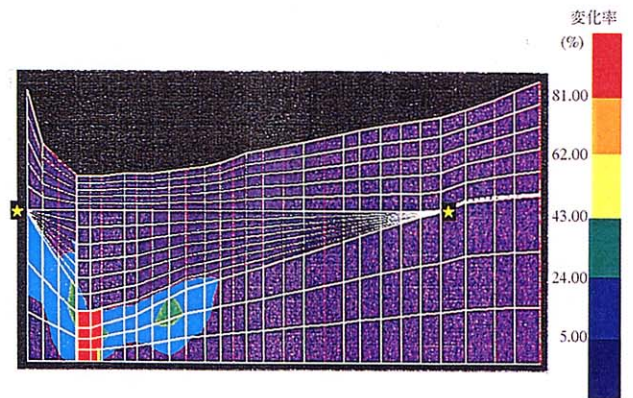


Fig.9 止水壁横断面,ケース2のケース1に対する
流速ベクトル変化率分布 (星印間が止水壁)
Ratio of Current Speed to the Natural State in the Cut-off
Wall (Case2/Case1)

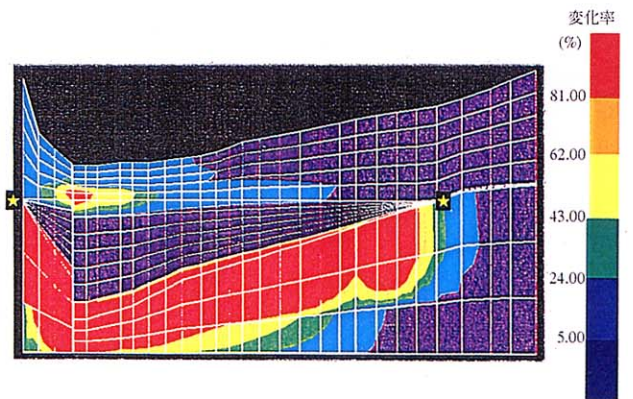


Fig.10 止水壁横断面,ケース4のケース1に対する
流速ベクトル変化率分布 (星印間が止水壁)
Ratio of Current Speed to the Natural State in the Cut-off
Wall (Case4/Case1)

離の範囲では解析値の方が高く算出されている。また、止水壁の下流側においても、解析値の方が実測値より高く算出されている。一つの理由として、解析が定常状態であるのに対して、実際の地下水は満水状態に向かってまだ非定常状態にあるといった違いが、あるものと思われる。また止水壁の要素と地層の要素のメッシュの大きさの違いにも起因するものと考えられる。止水壁周辺の地層のメッシュを細分化することによって、より良い一致が期待されるものと思われるが、今回はコンピュータの物理的な制限から断念している。

5. まとめと今後の課題

今回、沖縄地方・宮古島の砂川地下ダムを事例として、3次元FEMによる地下水解析を行い、自然状態から、止水壁施工過程、および止水壁締切り直後までに関して、検討を行った。これらの解析を通じて、不透水性基盤層中の断層帯、帯水層中の埋没谷などにおける地下水流動の特異性を明らかにすることができた。これらの特異性は、いずれも断層による非対称の水理地質構造に起因するものであり、準3次元解析では表現できないような、3次元による地下構造モデリングと解析の有効性を改めて確認するとともに、琉球石灰岩の水理地質の評価について基礎を固めることができた。

ところで今回の解析に先立って実施した、降雨量に基づくタンクモデルによる水収支解析によると、地下水涵養量の増減は、降雨の発生パターンに伴い、2ないし3年の周期性の存在が示唆されている。また非定常準3次元解析によると、止水壁構築後満水に至るまでの過程の再現性については、貯留係数の設定が大きく影響している。砂川地下ダムの止水壁の施工は平成5年11月に完了し、約2年後の平成7年10月には満水状態に達して現在に至っている。今後、より高精度な解析を実施するためには、中期的な涵養量変化の予測や、貯留係数の場所による違いの考慮などが課題としてあげられる。今回実施したような解析の流れは、設計・施工・維持管理上のさまざまな事項を検討する上でも、事前のフィージビリティスタディとして有効であると考えられる。

謝辞

本研究に際して、農用地整備公団九州支社 宮古地下ダム事業所からは様々な御協力とご指導を得た。ここに記して御礼申し上げます。

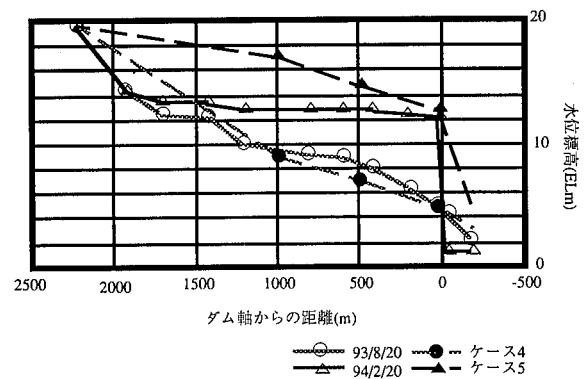


Fig.11 実測地下水位と解析結果の比較
Comparison of Observed and Analytical
Groundwater Table

参考文献

- 1) Kunioki Hirama, Toru Kuwahara: Water Resource Developments Technology by Underground Dams, Symposium on the Greening of G.C.C.Countries (in Tokyo), Vol.1, p.313~330, (1992), Executive Committee Symposium on the Greening of the G.C.C. Countries
- 2) 農林水産省構造改善局計画部, 沖縄総合事務局農林水産部: 皆福地下ダム ー地下ダム,新しい水資源を求めてー,(1981)
- 3) 農用地整備公団九州支社 宮古地下ダム事業所: 宮古区域農用地保全事業概要書 亜熱帯農業のための地下ダム,(1996)
- 4) 農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会編: 日本の地下水,地球社,pp.934,(1986)
- 5) 福島一祐, 国弘実, 串間正敏, 戸田完一: 砂川地下ダム止水壁,基礎工,第18巻,11号,p.31~37,(1990)
- 6) 農林水産省: 地下ダム計画技術指針 (第2次案),(1984)
- 7) 今泉真之, 前川統一郎, 長田実也, 富田友幸: 宮古島地下ダム計画の水理計算シミュレーションについて,地下水学会誌,第30巻,第1号,p.11~23,(1988)
- 8) 今泉真之, 前川統一郎, 長田実也, 富田友幸: 宮古島地下ダム計画の取水施設設計について,地下水学会誌,第30巻,第4号,p.203~214,(1988)