

宮古島の地下ダム

Groundwater dam in Miyako-jima Island of the Ryukyus

くろ かわ むつ お
黒 川 睦 生*

1. はじめに

沖縄県宮古島における地下ダム技術開発については、本誌1979年9月号のニュースに既にその概要が紹介されている。宮古島の実験地下ダム（皆福ダム）は1979年3月に地下ダムの締切り工事を完了し、その後地下水の貯留も順調に進んだことから、現在この地下ダムを使用して種々の試験を実施している。

地下の状態を直接目で見るできない地下ダムの貯留量を決定することは、地下ダム計画においては重要な課題である。皆福ダムではダム建設によって貯留された水量の確認、地下水の水文構造の解明を旨として地下ダムの水をくみ上げる取水試験を、締切り工事完了後既に3回実施した。この結果皆福ダムにはほぼ当初計画に近い水量が貯留されていることが確認され、さんご礁石灰岩地域では地下ダムによる水資源の開発は、極めて有望であることが立証された。ここでは皆福ダムの概要と技術開発の経過について紹介する。

2. 宮古島の地形・地質・地下水

2.1 地形

宮古島は沖縄島の南西約 300 km に位置する面積が約

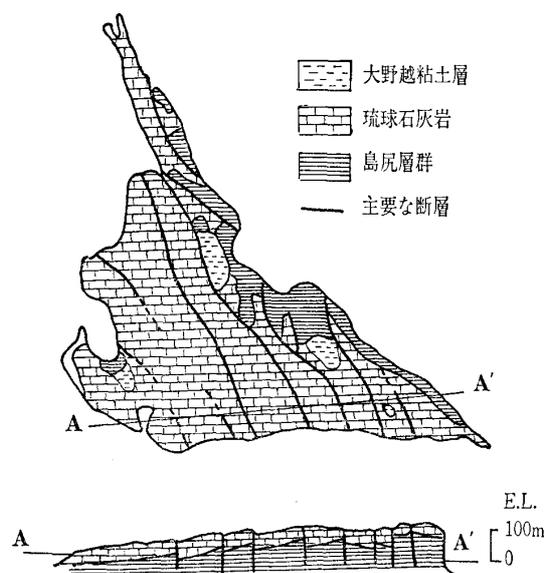


図-1 宮古島の地質図

159 km²の隆起さんご礁の島で、高所でも標高 120 m 程度の平たんな島で海岸の多くは断崖をなしている。

地形を更に詳しく見ると、北西—南東方向に延びた帯状の小高い山と平地よりなる繰返し地形が分かる。この地形は極めて新しい時代の断層の上下方向のずれによるケスター地形で、この断層は島の水文地質構造を支配している。河川は西部の咲田川、流路の短い枯川を除くと自然の河川は見られない。このほか洞穴・海岸に湧水が多いのもこの島の特徴となっている。

2.2 地質

図-1は宮古島の地質を示したものである。主なる地質構成は島尻層群（新第三紀鮮新世から一部第四紀洪積世に堆積した弱固結の主として泥岩）とその上に重なる琉球石灰岩（主として洪積世に堆積した隆起さんご礁石灰岩）よりなる。島尻層群は極めて厚い地層で宮古島の北東部および西部に露出しているが、そのほかは琉球石灰岩に覆われている。琉球石灰岩は最大層厚 70 m（多くは 40~60 m）の多孔質・透水性の半固結石灰岩で砂状、礫状、結晶質の硬質岩など複雑な層相を示す。島尻層群および琉球石灰岩はいたるところで断層により帯状に切断され、その主断層の間隔は 1~2 km、落差は大きいところで 50 m程度と推定

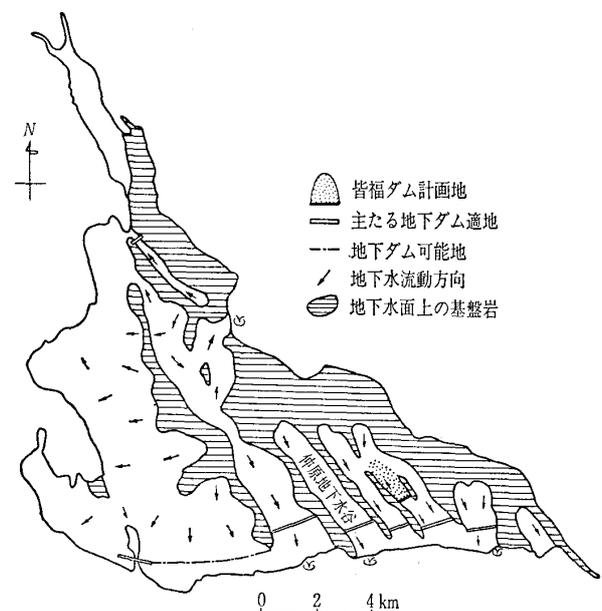


図-2 宮古島の水文地質構造と地下ダム構想

*農林水産省 九州農政局計画部 地質官

している。

2.3 地下水

図-2は宮古島の水文地質構造の概略を示す。琉球石灰岩が主要な帯水層となっており島尻層群は不透水性基盤岩である。地下水は基盤岩上面の構造に規制されて流動している自由地下水（一部では被圧）であるが、琉球石灰岩は層相の変化が激しいこと、水に溶解しやすいこと、断層が多いなどの特徴をもっていることから、宮古島の地下水は非石灰岩地域の地下水とは異なったいくつかの特徴がみられる。

1) 断層によって形成された地下水谷の形態を示す地下水盆が多い。降雨のうち相当量は地下に浸透して地下水となり、地下を流下してやがて海へ流出する。

2) 地下水位変化と降雨変化はよく一致しており、年2回の高水位と低水位を示す多雨期に対応した長周期の変化と各々の降雨に対応した急激な短周期の変化が見られる。また地下水盆の上流部と下流部の地下水位変化を比較すると上流では急激な変化、下流ではゆっくりした変化が卓越しており、地下に空洞が存在する可能性を示す。

3) 帯水層の透水係数は $\alpha \times 10^{-3} \sim 10^{-5}$ m/s 程度であり、透水係数が大きいところは地下空洞の発達と関係があるものと思われる。

4) 年平均降雨量は約 2 250 mm で、このうちの約60%は地下に浸透して地下水となる。

5) 地下水の多くは石灰分を飽和濃度に近い状態まで溶解している。地下水温は 23.5℃ 前後。

3. 地下ダム構想

南西諸島には年間 2 000 mm を越える降雨があるものの季節的なばらつきが大きく、特に夏期には干天が続くことが多い。しかも保水力に乏しい土壌地帯が広いこともあって過去の記録によると 4 年に 1 回の割合で、この地域の農業は何らかのかんばつ被害を受けており農業振興をはかるためには安定した水源の確保が、この地域での大きな課題

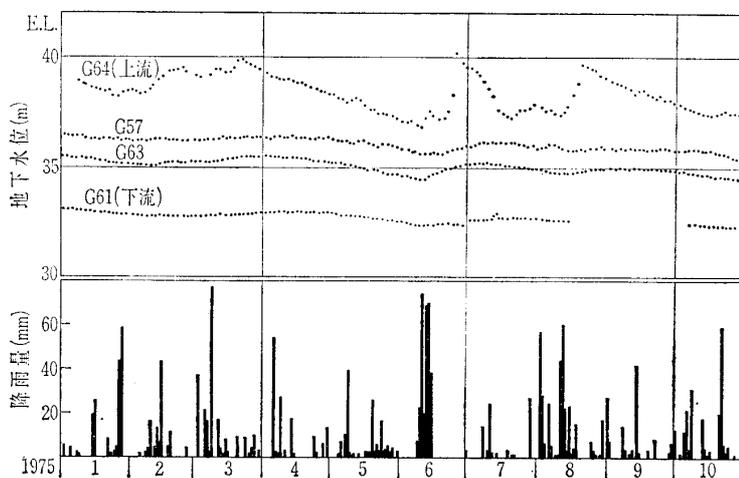


図-3 地下水位観測事例（仲原地下水谷）

となっている。

3.1 琉球石灰岩と地下ダム

琉球石灰岩は地下ダム建設に極めて適した自然条件をもっている。列記すると

1) 琉球石灰岩の厚さは一般には60 m以内であり、しかもその下位には難～不透水性の地層が存在している。このことは地下水を人工的に貯留するための地下構造としては都合がよく、基盤岩が比較的浅いことは地下水の流出を抑制する止水壁の施工にも好都合となる。

2) 地下に貯留する水源についてみると、人工的に水を地下に注入し貯留するには、その水源の確保のほかに注入施設、注入技術の確立、注入費が必要となるが琉球石灰岩地域では、自然のまま降雨の多くが地下に浸透しており、降雨をそのまま水源として利用できる。

3) 琉球石灰岩の有効間隙率は少なくとも10%と推定しており、各島々に分布する琉球石灰岩の規模から概定しても、南西諸島には 1×10^6 m³ 以上の貯留量をもつ地下ダム候補地が数多く存在しており、地下ダムは将来有望な水資源の開発方法となる。また地上ダムと同じような複数回の貯留利用も可能になること、農業用に利用すれば農地に散水した場合の還元水の利用も見込まれることなど、経済的にも有利な水資源開発方法となり得ることが期待できる。

4) 帯水層の透水係数が大きく、貯留した水の取水が容易であり、地下の空洞等が取水施設の一部として利用可能となれば更に効果的な取水が可能となる。

5) 地下水の貯留・取水に伴う地盤沈下、あるいは洪水等による大きな災害がなく安全である。

6) 貯留地域の土地はほぼ従前のまま使用可能であり水没補償等の問題も少なく、土地の有効利用ができる。

7) 宮古島以外の地下ダム建設が有望な地域として喜界島・沖永良部島・徳之島・与論島・沖縄島・久米島・与那国島・波照間島などがあげられる。

ここでは地下ダムの利点のみ記したが欠点がないわけではない。しかしながら利点を有効に生かすことによる利益の方が大きいと見ており、この欠点の克服は今後の課題としてとらえる必要がある。

3.2 地下ダムの構造と機能

皆福ダムの建設を含む宮古島における地下ダム技術開発計画は、琉球石灰岩という我が国では特殊な地質条件での、地下ダムによる水資源開発技術の確立を旨として実施しているものである。地下ダム建設地の自然条件あるいは社会条件はそれぞれの地域によって異なるが、地下ダム建設技術は常にこれらの条件に合致した手法が必要であり、地下ダム技術開発計画の内容も立地条件を正しく反映した発展性のある技術であることが要求される。このような立場に立って将来の地下ダムの構造・機能を次のように想定した。

3.2.1 止水壁（堤体）

止水壁は地下ダムのもっとも重要な構造物である。止水壁の機能は、主として渇水時あるいは平水時において地下水を地下水盆内に適切に貯留できる止水性を有することである。耐久性も当然要求されるが必ずしも完全な不透性の構造物でなくとも地下水の供給が多い場合には地下ダムの効果を示す。止水壁による地下水盆の縮切り方法は完全縮切り・不完全縮切りが考えられるが、地下ダム建設地の立地条件に合った適切な方法を選択すべきである。地下水のかん養量（付加量）が少ない貯留型の地下ダム、あるいは海水等外部の水の侵入を防止することを目的とした地下ダムには完全縮切りが必要であろうし、地下水の付加量が多い場合、あるいは帯水層の基盤が深くて完全縮切りが困難な地域では不完全縮切りによる地下ダムが考えられる。

止水壁工法として既存の工法を応用するとすれば注入工法・地下連続壁工法・打込み工法が考えられる。注入工法は深さ50 m以上の深層の地盤・硬質な岩盤に施工可能なこと、工事費が安いこと、補強工事が容易なことなどの利点がある。一方では注入材料の行方の制御が困難なために、止水壁を設計どおりに施工できない可能性があること、遮水性、耐久性にも問題が残されている。地下連続壁工法は止水壁工法として強度、遮水性、耐久性などすぐれた面が多いが、施工深度に限界があること、工事費が高いことなどの欠点がある。打込み工法は硬岩に対して直接施工が困難で、しかも施工深度に限界があるなど琉球石灰岩地域の地下ダムの応用は困難であろう。

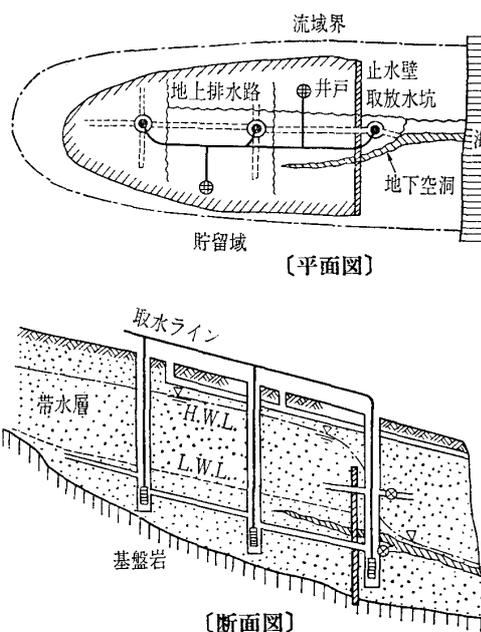
3.2.2 取水施設

地下ダムの貯留水を有効にしかも経済的に使用するには取水工法の決定、取水施設の配置の検討は重要な課題となる。地下ダムの死水量を少なくすることは貯留水を有効に利用する面においては重要であるが、地下ダムは地上ダムと異なり地層の抵抗によって貯留水位と取水水位に水位差が生じるため、死水量を少なくするには取水施設数を多くする必要があるなど、取水コストが高くなる恐れがある。このため、地下ダムの取水施設は広く普及しているボーリング深井戸取水にこだわらず、地域の特性にあった高能率の取水工法の開発が必要であろう。地下空洞の利用、集水暗きょ工法は琉球石灰岩地帯では有効な取水方法となろう。

3.2.3 排水施設

地下水洪水の排除、悪水の除去等に排水施設が必要となろう。地下水洪水は長期間継続することから排水施設は地下ダムの排水施設とは異なる工法および能力の検討が必要となるが、建設地域の立地条件を十分に検討して決定することが必要である。また洪水量および洪水排除の解析手法の確立も必要となる。

排水工法としては地上排水路の設置、地下水盆の部分縮切り、止水壁越流（地表と止水壁天ばの間に余裕高を設置）、排水トンネル等の設置が実用的である。皆福ダムで



図一 4 地下ダム構造模式図（構想）

は排水工法の検討と現地試験を行うため、止水壁上方に余裕高を設置したほか地下排水横ボーリング孔が設置してある。地下空洞を排水施設として利用することは有効な手段であるが、皆福ダムでは空洞の存在を確認できなかった。図一4に琉球石灰岩地域における将来の地下ダム想像図の一例を模式的にかいてみた。

4. 皆福ダムの施工

4.1 皆福ダム建設の目的

(1) 地下ダム建設による水資源開発技術の実証と普及
地下ダムを将来にわたって実用化するには、建設技術の実証、水資源を利用する人々への知識の普及、地下ダム事業の制度化などが必要と思われ、その手段として実験地下ダムを建設し使用する。

(2) 地下ダム建設に必要な調査内容と手法の確立
地質調査、帯水層調査、水質調査、水収支調査（シミュレーションを含む）等の調査内容、調査方法、解析方法の確立をはかる。例えば地下ダムの貯留量の決定に必要な有効間隙率の調査方法を解明することなど。

(3) グラウト工法による止水壁工法試験とその評価
止水壁工法としてグラウト工法を採用した場合に欠点と利点があることについては先に述べたとおりであるが、皆福ダムではグラウト工法による止水壁建設が可能であること、経済的であることからこの工法を採用し、グラウト工法の問題点の解明をはかることとした。

(4) 水文機構の解明。
水の循環機構を簡略に表現、解析する手法として水収支解析方法が用いられる。長期の水収支計算式としては

$$G=P-E-O\cdots\cdots(1) \text{ となる。}$$

ここで G : 地下水付加量 E : 蒸発散量

P : 降雨量
O : 地表流出量

地上ダムなど山岳地帯での(1)式は $P \gg G$ となり P および O が実測可能であることから E の計算ができる。琉球石灰岩地域では P , O の実測は可能であるが, G , E の実測は困難かあるいは不可能であることから, この地域での水収支計算では間接的な手法により G , E を推測することとなる。間接的な手法で求めた水収支資料の精度・信頼性は地下ダムの設計条件を満たすものではなく, 適正な水利用が可能な地下ダムを建設するには, 更に実証的な水収支解析が必要となる。地下ダムを建設することによって閉鎖した地下水系をつくるならば G の実測が可能となり, 水収支計算の精度は飛躍的に向上し, 水文機構の解明が可能となる。

(5) 取水工法の確立 皆福ダムではボーリング深井戸と横孔ボーリングによる取水工法の検討を行うこととした。深井戸による取水では帯水層の異方性あるいは井戸の干渉による取水能力の低下についての試験と井戸配置の検討を行うこととしている。

(6) 地下ダム管理技術の検討 肉眼で直接見ることができない地下水を安全に, しかも有効に管理するには, 地下水の現在および将来の挙動を的確に把握するとともに予測できる施設の設置と管理手法の解明が必要となる。この場合実験地下ダムの実例が参考となることは言うまでもない。

地下ダムの管理と設計は表裏一体の関係にあるが, 地下水を有効に利用するためには管理手法の決定・設計の段階において, 貯留水の季節管理水位の設定あるいは洪水排除のための事前放流などの検討が必要となる。

4.2 皆福ダムの構造物とその施工

4.2.1 止水壁

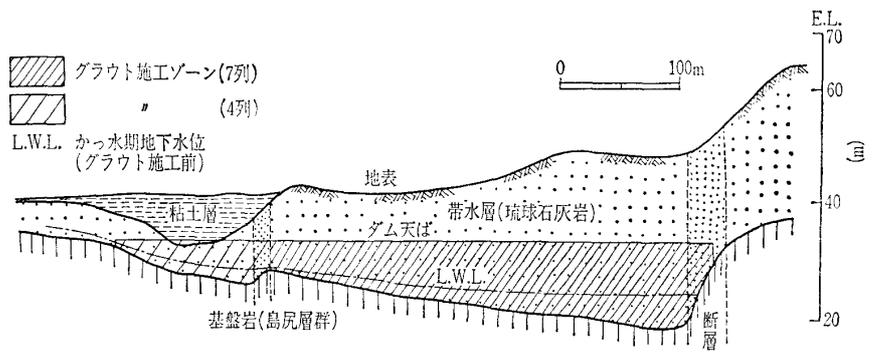


図-6 皆福ダム断面図

皆福ダムの主要諸元は, 止水壁長: 500 m, 止水壁幅: 5 m (設計値), 止水壁天ば高: 標高 33 m, 止水壁高: 16.5 m, 計画貯留量: $7 \times 10^9 \text{ m}^3$, 流域面積: 1.8 km^2 である。

グラウト工法による止水壁の施工は, 右岸から 350 m の区間は 7 列の注入孔 (改良目標値 $5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$), 残りの 150 m は 4 列の注入孔配列とした。注入ステージ区分は第 1 ステージ長を 1~2 m, 第 2 ステージ以深は 3~4.5 m と短くして均一な施工が可能となるよう設計し, 第 1 ステージはキャップロックとして利用したが, 上方へのリークを抑制するため低圧注入を実施した。注入材料は 1 次注入孔に高炉セメントを, 2 次注入孔に粘土セメント (セメント: 粘土, 7: 3) を使用した。

施工数量は 注入区間ボーリング延長: 16 300 m, 非注入区間ボーリング延長: 18 800 m, 注入セメント量: $2.2 \times 10^6 \text{ kg}$, 注入粘土量 $3 \times 10^5 \text{ kg}$, m 当たり注入量 153 kg となった。また止水壁には延長 5 m おきに検査孔を設置した。

4.2.2 地下水位観測施設

地下水位の経時観測を主目的とする自記観測施設 (11箇所) と地下水面の形状を調査するボーリング観測孔 (地質調査兼用) 等を地下ダム流域の内外に広く設置した。図-5 にその位置を示す。多数の施設の設置によって地下水位の変化がほぼ完全に調査可能となり, 地下水位観測値から計算する地下ダム貯留量の相対的な誤差は $\pm 5\%$ 以下になっていると推定している。

また水位観測施設は水温水質の調査孔として利用できる構造となっている。

4.2.3 取水施設

取水施設として多くの工法が考えられるが, ここではボーリング深井戸 (5 井) と水平ボーリング ($l=100 \text{ m}$) を貯留域のやや上流と止水壁に隣接させて設置した。水平ボーリングは止水壁の上下流に延びているが, 中央部でたて

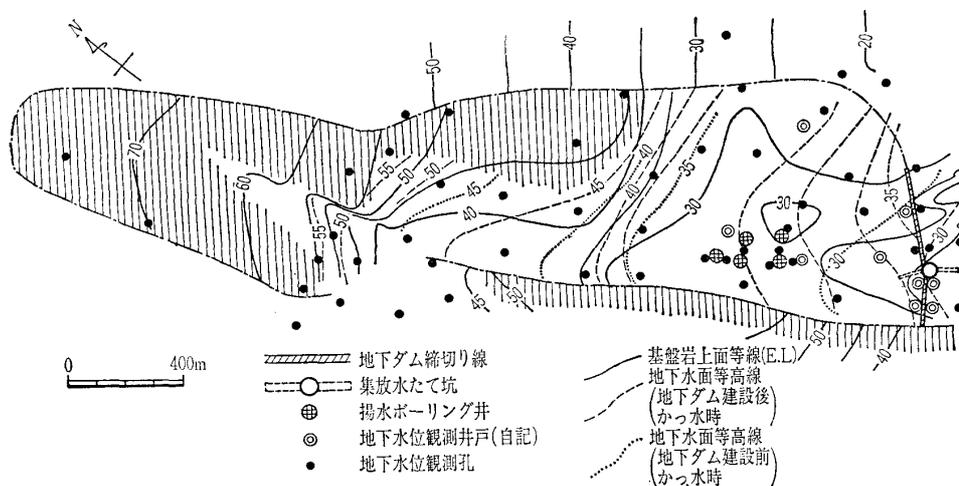
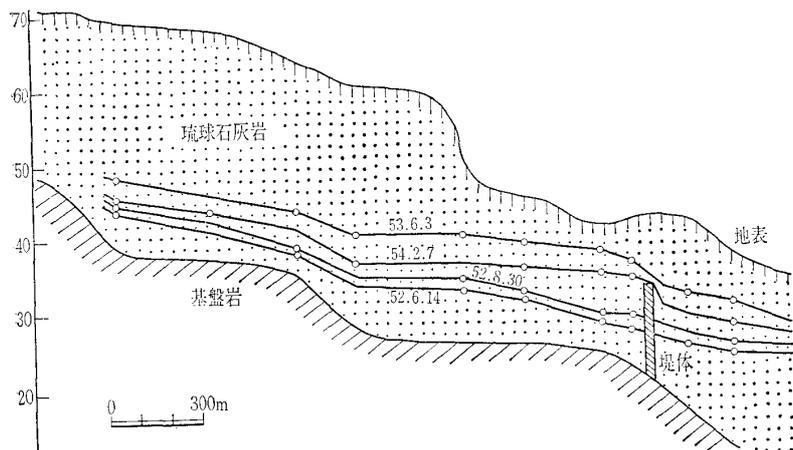


図-5 皆福ダム平面図



図一七 皆福ダム貯留状況図

坑によって接続されているため、ダム貯留水の取水施設としての機能のほかに、地下水洪水時等の排水施設として使用できる。

4.2.4 雨量計

宮古島气象台と現地とでは降雨が異なることから現地に2箇所設置した。

4.3 止水壁施工後の地下水位と貯留量

図一七および八に止水壁施工前後の貯留量，地下水位，降雨変化を示す。地下ダム締切り第1期工事は右岸取付け部から左岸に向けての延長270mの区間の締切り，1977年8月から1978年3月の間に施工した。第2期工事は残りの区間を1978年12月から1979年3月に行った。

地下水位の変化を見ると1977年11月から止水壁上流の水位が急に上昇しはじめ，12月には止水壁天ばまで上昇する。この時期は第1列目の注入孔の施工が完了した時期と一致する。その後3月までは降雨量が平年をやや下回る量であったため，満水状態のまま推移するが4月からの連続した降雨（5～6月は梅雨にあたる）によって6月には最高水位に達する。この時の水位は地下水洪水状態にあり地下ダ

ムは地下水面下に没している。

第2期締切り工事後の地下水位は大きな降雨がないにもかかわらず徐々に上昇し，地下ダム施工前の水位より約3.5mほど高くなるが，これは締切り工事がほぼ計画どおり施工されたことによるものと見ている。1979年7～8月，11～12月の急激な水位低下は取水試験時の地下水のくみ上げによる低下である。地下水位の変化について特記すると

- 1) 止水壁上流の地下水面勾配は 1/250 程度で，止水壁施工前の約 1/2 に小さくなった。
- 2) 地下水洪水時，取水試験時を除くと止水壁付近および主要貯留域の各観測地点の地下水位は似たような水位変化を示す。このことは地下水の流動が定常状態にあることを示している。

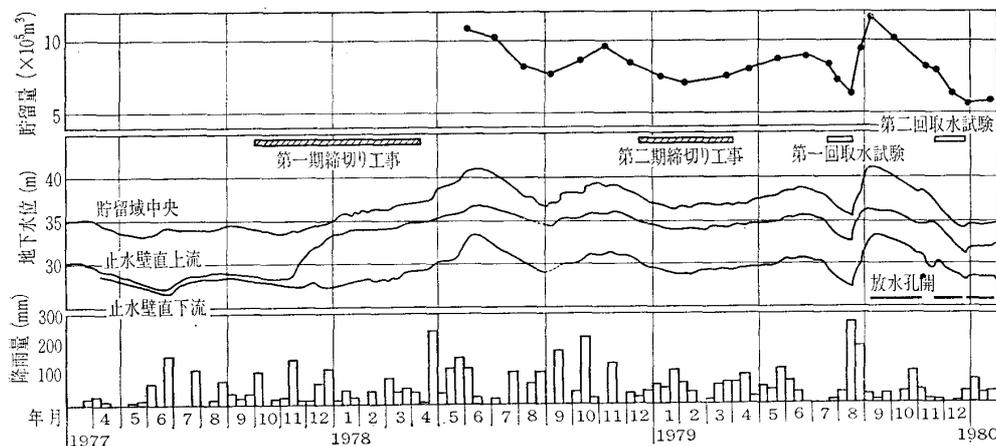
貯留量の変化と地下水位の変化はよく一致する。1979年末までの最大貯留量は $1.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ （有効間隙率を13%として計算），最小は $5.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ であった。地下ダムの貯留水面は勾配を有するため，満水量を（用語の定義の問題でもあるが）決定することは興味のあるところであり，総貯留(水)量についても定義が必要となろう。総貯留量を渇水時(期)の貯留量と定義すれば，渇水期を厳密に検討していないが，1979年7月上旬がほぼ渇水期に当たるものとして総貯留量を計算すると総貯留量は $8 \times 10^5 \text{ m}^3$ となる。更に渇水期を厳しい時期とした場合でも $7 \times 10^5 \text{ m}^3$ 以上の総留量となろう。

5. 取水試験

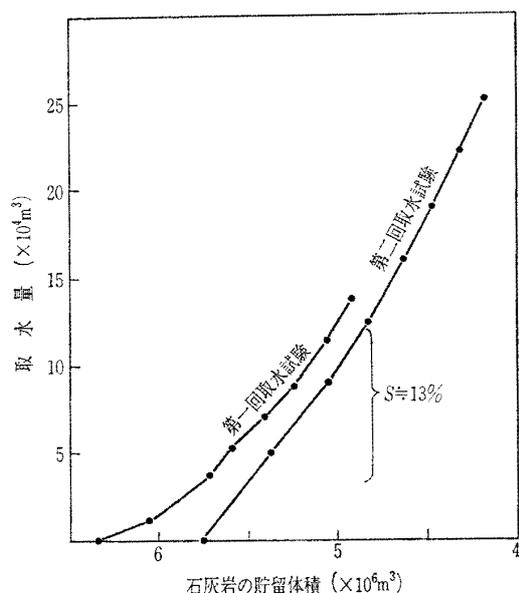
取水試験は貯留した地下水をくみ出しながら各種の試験を行うもので，地下ダムの完成を実証する最良の機会であるばかりでなく，施工したダムの構造物・施設の検査，貯留量の確認，地下の水文機構解明をするのに必要な帯水層の有効間隙率，降雨による地下水付加量などに関する信頼度の高い資料の取得等が可能である。

第1回取水試験は帯水層の有効間隙率の決定を主目的として沖縄では晴天が最も続く梅雨明けの時期を選び，なるべく多量の取水ができるように計画した。第2回目は冬期の小降雨が多い時期に地下水付加量の解明等を目的とした。なお第2回の試験時には放水孔は開放にした。

図一八に取水試験時の取水量(Q)と貯留体積(V)



図一八 皆福ダム地下水位変化・貯留量



図一 9 取水試験の取水量 - 貯留体積

との関係を示す。ここでは地下水で飽和した帯水層の体積を貯留体積と呼ぶこととした。

図一 9 のグラフの勾配 dQ/V は有効間隙率を示し、勾配が大きいほど有効間隙率は大となる。第 1 回取水試験についてみると取水開始後から $Q=4 \times 10^4 \text{ m}^3$ までの間の $Q-V$ グラフの勾配は緩い曲線を示すが、その後 $Q=1.2 \times 10^5 \text{ m}^3$ までほぼ直線となり、更に勾配が大きくなる傾向を示す。第 2 回では取水開始から $Q=1 \times 10^5 \text{ m}^3$ までグラフは直線となった後勾配はしだいに大きくなる。2 本のグラフの直線部から皆福ダムの帯水層の有効間隙率は 13% とした。

つまり第 1 回取水試験初期の勾配が小さく貯留係数が見かけ上小さいのは、止水壁を越流（漏水も含まれる）する地下水があることによるもので、この間に 1 日平均 4500 m^3 の越流があることを示している。またこのグラフから越流停止時の V は $5.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ で有効間隙率 (S) を 13% とすれば、この時の皆福ダムの貯留量は $7.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ となる。この貯留量に対応する止水壁直上流の地下水位は標高 33m 程度となり止水壁の設計天ば高と一致する。

第 2 回取水試験初期に第 1 回と同じ現象が見られないのは、放流孔を開放し続けたことにより止水壁直上流の地下

水位が、局部的に低下し越流量が減少したことによるものと見ている。また第 2 回取水試験の後半の見かけの貯留係数が 20% となるのは、皆福ダムの左岸に隣接する地下水盆からの流入によるものと見ている。この左岸からの地下水の流入については今後試験等により更に内容を解明してゆきたい。

6. 今後の展望

皆福ダムの試験施工によって地下ダムによる大規模な水源開発が、技術的にも経済的にも可能であることが実証された。今後更に地下ダムによる水源開発の推進が望まれるところであり、このためには、まず皆福ダムの有効利用が必要であり、現地ではその準備が進められている。

しかしながら同じ琉球石灰岩地域であっても、地形、地下の水文構造など地下ダム建設の立地条件は、皆福ダムと同一ではないであろうし、今後新しく地下ダムを建設するに当たっては、その立地条件を最大限に利用することが必要であると同時に、地下ダムの利点を生かす工夫が常に必要となろう。例えば地下ダム計画とは(圃)場整備計画、道路計画など一体的に実施すること、地下空洞の積極的利用、締切り工事の段階的的施工等々である。

宮古島においては「宮古島地下水保護管理条例」により、地下水についての管理権が認められており、地下ダムの事業化に伴う地下水の貯留と取水は問題がないものと判断している。一般的には地下水についての法的な管理権が認められている例は少ないことから、今後地下ダム事業を推進するためには事業制度の確立のほかに、地下ダム事業によって貯留した地下水を専有して使用するためには、地下水の所有権についての法的な問題解決が必要となろう。

参考文献

- 1) 菅原利夫：宮古島における地下ダム構想と調査計画について、地下水と井戸とポンプ、第 16 号，pp. 8-11, 1974
- 2) 沖縄総合事務局：宮古島地下ダム開発計画，1978
- 3) 農林水産省：宮古島における地下ダムの技術開発，1979
- 4) 相場瑞夫・黒川睦生：宮古島における地下ダムの技術開発、水と土、第 37 号，pp. 45-53, 1979
- 5) 相場瑞夫：宮古島における地下ダム技術開発、土と基礎、第 27 巻，9 号，pp. 87-89, 1979
- 6) 黒川睦生：宮古島における地下ダム開発計画について〔V〕、第 54 回農業土木学会九州支部講演集，pp. 45-46, 1979
(原稿受理 1980. 10. 17)