

# 地下ダム建設技術における調査・設計

——特に常神地下ダムの水収支解析について——

平 間 邦 興

外 山 聡

串 間 正 敏

(本社 技術本部 土木技術第一部)

古 屋 弘

(本社 技術本部 土木技術第一部)

桑 原 徹

## Research and Design Concerning Construction Technique for Underground Dam

——Analysis of Water Balance at Drainage Basin of Tsunegami Underground Dam——

Kunioki Hirama

Satoshi Toyama

Masatoshi Kushima

Hiroshi Furuya

Tohru Kuwahara

### Abstract

Various researches and tests were carried out in relation to design of the Tsunegami underground dam. As a result, the landform and geology of this drainage basin was judged to be suitable for an underground dam. According to the water balance analyses such as by water balance equation, tank model, and seepage flow analysis, groundwater was abundant enough to be developed for many utilities, and storage by means of an underground dam was also considered to be effective. It was judged from these investigations that the groundwater level at the underground dam does not become lower even with maximum pumping, and that this cutoff wall is effective in preventing intrusion of sea water into this underground dam area.

### 概 要

常神地下ダムでは、その設計にあたり各種の調査・試験が実施された。その結果、当流域は、地下ダムに適した地形・地質であり、また調査・試験結果に基づいて水収支式、タンクモデル、浸透流解析による水収支解析を行なった結果、開発の対象となる地下水も多く、地下ダムによる貯留効果も確認された。水需要量を取水しても問題となる地下水位低下は生じず、同時に塩水化対策としても地下ダムは十分有効であると判断された。

#### 1. 地下ダムとは

地下ダムとは、地下水流の存在する帯水層中に不透水性の遮水壁を作ることによって、①上流からの地下水流をせき止め貯留するもの、②下流からの逆流を防止するもの、と定義することができる(図-1参照)。したがって地下ダムの効果としては、主に年間を通じての地下水の取水が容易となること、また海岸付近の地下水の塩水化を防止できることなどがあげられる。しかし一方では地下ダム貯留の影響として、上流における地表の湿地化や下流における井戸の枯渇という問題点も存在することになる。

地下ダムによって、これまで無効に流出していた地下

水を新たな水資源として開発しようとする場合、対象となる流域に与える地下ダム貯留の影響を未然に防いで、効率的な地下水利用が計画されなくてはならない。そのためには地下ダム流域における水収支状況の把握が必要

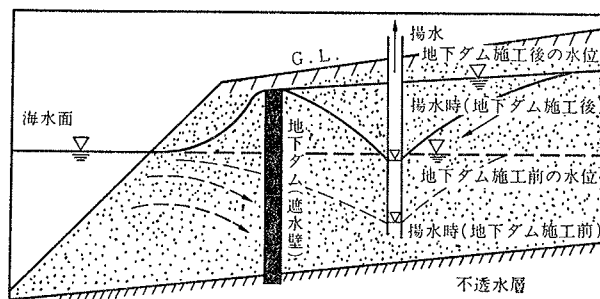
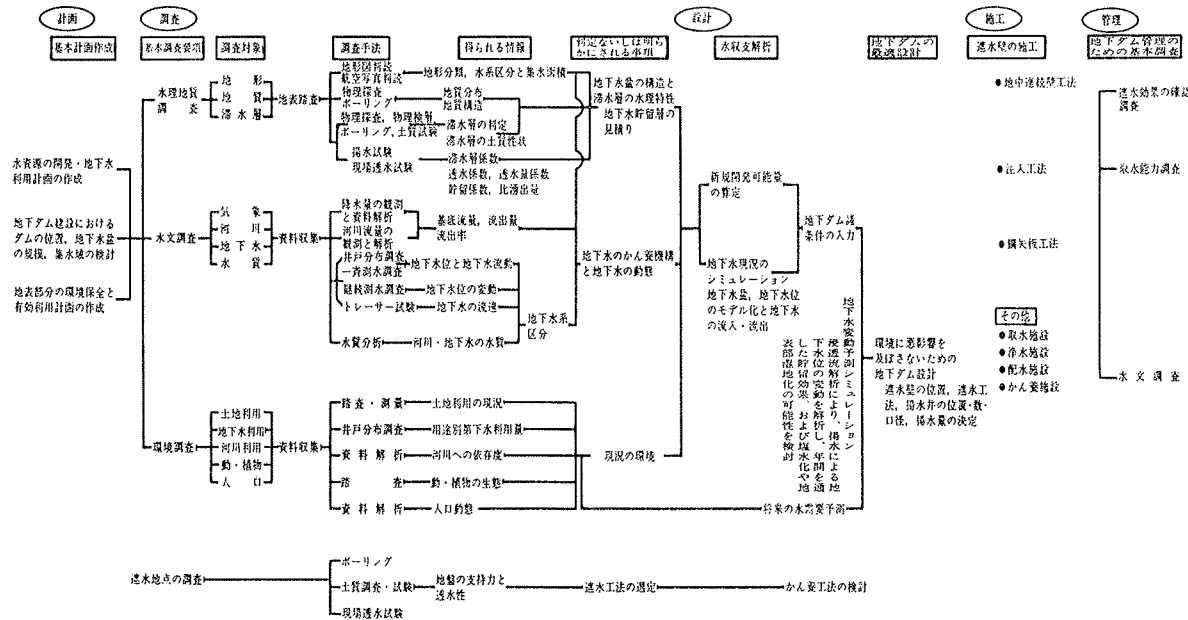


図-1 地下ダム概念図



表一1 地下ダムの計画・調査・設計・施工・管理の流れ

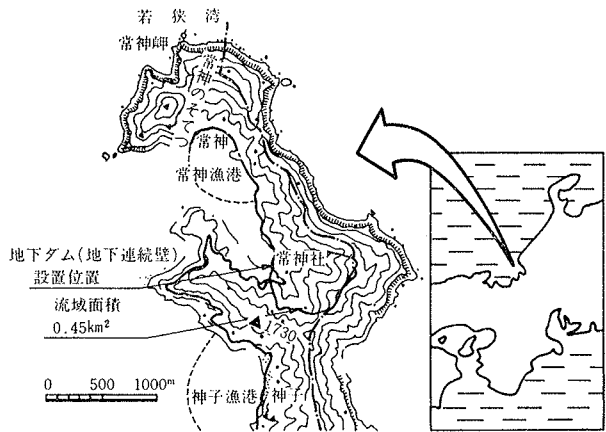
となり、対象流域の地形・地質・水文・地下水理などに関する事前の各種調査・試験結果に基づいて、水収支解析が行なわれることになる。地下ダムはこのような水収支解析の結果を検討したうえで、有効な地下水開発と周辺環境の保全という点に十分留意する必要がある。

地下ダムの計画から管理に至るまでの流れを示すと表一1のようになる。水需要に応じた最適な地下ダム事業は、この流れに沿って進められていくことになる。

2. 常神地下ダムの概要

常神地下ダムは、若狭湾国定公園の中央部に突き出した常神半島の最北端に位置する、福井県三方町常神地区に建設された(図一2参照)。当地区は、扇状地地形を形成しており、生活用水としてはこれまで既設の水源井より90t/日の良質な水が確保されていたが、近年、特に5～9月にかけては過剰揚水による地下水の塩化が進むようになった。そこで、良質な水源確保についての調査が実施された結果、「地下ダム方式」による水資源開発が提案された<sup>1),2)</sup>。

常神地下ダムに関する事業概要を表一2に示す。当地下ダムによって、延長204m×深さ平均17mの範囲にわたり地下水が遮水されることになる。常神地区では、地下ダムによる貯留効果の発現とともに海水の逆流防止が特に重要視されている。そのため、遮水壁の選定にあたっては確実性、耐久性、施工性、経済性などの各方面からの検討を行なった。その結果、一体化施工により遮水性の最も高い自硬性安定液による地下連続壁を採用することとした<sup>3)</sup>。



図一2 地下ダム設置位置

事業種目	工種	規格・材質	数量		
水産飲・雑用水	遮水壁工	地中壁構造	自硬性安定液(S.G.)	一式	
		壁厚	500mm		
		掘削深さ	2.7～21.6m		
		掘削長さ	203.8m		
		掘削面積	3450.0m <sup>2</sup>		
		掘削量	1811.0m <sup>3</sup>		
		SG置換量	2018.1m <sup>3</sup>		
	壁体ジョイント工法	インターロッキングタイプ工法			
	取水施工	集水工	グラベルレイヤル	φ300 ℓ=10m	約20本
		取水施設工	深井戸	φ300	5本一式
ポンプ			2.2kW φ50		
浄水施設工	着水井, 酸化池, ポンプ井, 急速ろ過機, 浄水池, その他		一式		
	送水施設工	送水ポンプ, 送水管, 他	一式		
配水施設工	配水池	3.5m×10.9m×3.45m	1池		
	配水管, 他		一式		
用地整備	公園・運動施設用地	60m×25m	3900m <sup>2</sup>		
		60m×40m			

表一2 地下ダム事業概要

### 3. 常神地下ダムの調査

常神地下ダムにおいては、表-3、図-3に示す各調査を実施した。これらの結果については、地形・地質、水文性状、帯水層の構造と水理定数にまとめ、以下に説明する。

#### 3.1. 地形・地質

当地区は福井県嶺南地区に位置し、若狭湾へ北西に突き出した幅約3km、長さ約6kmの常神半島の先端部にある扇状地地形の平たん地である。背後はコの字形の山稜に囲まれ西方に開いた地形をなしており、東方の尾根からは2本の小川が流下して湾に注ぎ、河口に沖積平野を形成している。嶺南地区には中・古生層が広く分布し、その地質は鳥羽層群に相当するもので、粘板岩が卓越している。常神半島においては、この粘板岩中に厚層約50cmのチャートがレンズ状もしくは巨礫状に存在する。また明瞭な断層や破砕帯は認められないが、常神半島の東側を通る三方断層、小浜を通る熊川断層に囲まれた本地域はこれらに付随する小断層の存在が予想された。

#### 3.2. 水文性状

若狭湾の南東部は、年間2,200~2,600mmの降雨量があり全国の中でも多雨地域に相当している<sup>4)</sup>。また蒸発散量については、ソーンズウェイト法による全国分布をみると<sup>4)</sup>、当地域では降雨量のうち年間800mm前後が蒸発散として消失しており、残りの1,400~1,800mmが余剰水となって流出していることになる。今回の水収支解析にあたっては、常神地区における観測データがないため、当地域の中で常神地区に最も近い三方地区の観測データ(1941~1970)を用いた。これによると、三方地区における年間平均降雨量は2,509mmである<sup>2)</sup>。

#### 3.3. 帯水層の構造と水理定数

帯水層の構造と基盤の状況の一例として、北沢の地質断面図を図-4に示す。常神地区の帯水層の特徴は次のとおりである。

- (1) 基盤岩は透水係数  $10^{-5}$  cm/s 程度の粘板岩が多い。
- (2) 基盤岩の風化帯は厚さ4~6mで、透水係数は  $10^{-4}$  cm/s 程度とやや大きい。
- (3) 遮水壁位置における基盤岩までの沖積層の厚さは16~19mである。
- (4) 沖積層は上部層と下部層に分けられ、粘土混り砂レキにより構成される上部層が主要な帯水層となる。

また、各揚水試験から得られた結果は次のとおりである。まず既設井戸の能力を知るために、W-1(北沢)、W-2(南沢)において段階揚水試験を実施した。この

ボーリングおよび地下水観測井(B-1~9)※	
地質観察	簡易揚水試験、全層揚水試験、岩盤ラジオン試験
地下水測定	
地下水試験※	電気検層、水質分析、pH測定、主要イオン分析
揚水試験(既設の水源井を利用した揚水試験)	段階揚水試験、連続揚水試験
水位観測井(M-1~5)※	地下水位分布図、地下水流向観測
地表水流量観測環(S-1,2)※	雨量計(現場設置)※
その他※	気温・潮位観測
地下水利用状況	揚水量の記録

※継続調査を含む

表-3 調査項目

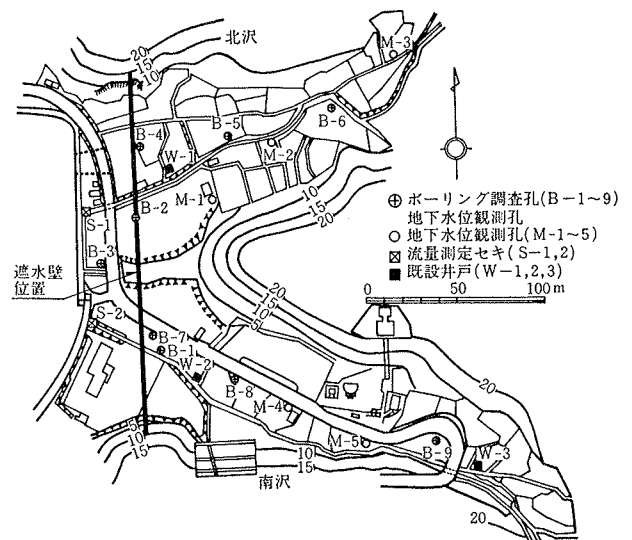


図-3 調査位置平面図

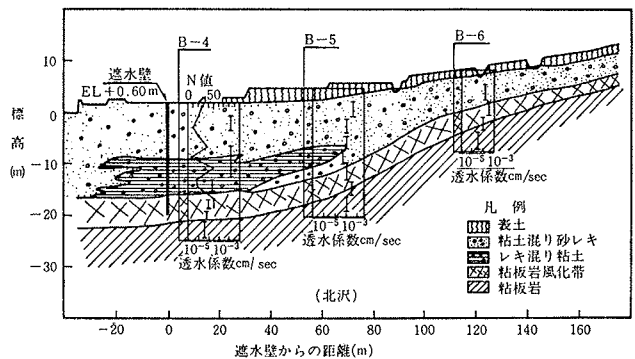


図-4 地質断面図

	最大揚水量		限界揚水量		北 沢	南 沢
	m <sup>3</sup> /日	ℓ/分	m <sup>3</sup> /日	ℓ/分		
W-1 水源井	107	73	88	61	透水係数(T)	5~58m <sup>2</sup> /day
W-2 "	162	113	162以上	113以上	透水係数(K)	5~22m <sup>2</sup> /day
					透水係数(K)	0.5~3.7×10 <sup>-3</sup> cm/sec
					貯留係数(S)	0.5~1.4×10 <sup>-3</sup> cm/sec
						0.20
						0.10

表-4 段階揚水試験結果

表-5 水理定数

試験は限界揚水量、適正揚水量などを求めるもので、既設井戸のポンプを用い最大揚水量を4~5段階に分けて実施した。試験結果を表-4に示す。次に既設のW-1、W-2を揚水井としその周辺のボーリング孔を観測井と

して、帯水層の水理定数を算定するため連続揚水試験を実施した。試験の結果、各水理定数はそれぞれ表-5のように判断された。表-5に示した透水係数の値は10倍程度も異なっており、これは帯水層の不均一性を示すものである。

#### 4. 水収支解析

地下ダムに関する水収支解析は、大きく二つに分けて考えることができる。第1は対象流域における現況の地下水シミュレーションであり、第2は遮水後の地下水変動予測シミュレーションである。これらの水収支解析の方法としては次のようなものがある。

- (1) 水収支式
- (2) タンクモデル
- (3) 浸透流解析

水収支式あるいはタンクモデルは、対象流域における水収支状況をマクロにとらえる点できわめて有効であり<sup>5),6)</sup>、一方浸透流解析は、流域内における地下水の分布形態あるいは変動状況など流域水収支のよりミクロな部分を把握するうえで必要である。したがって常神地下ダムにおいては、水収支式、タンクモデル、有限要素法による浸透流解析の三通りの方法で水収支解析を行ない、それらの結果を比較検討しながら、地下ダムの最適設計という点に十分留意することとした<sup>7)</sup>。

##### 4.1. 水収支式

ある流域における水収支関係は、一般に式(1)のように示される。

$$\left. \begin{aligned} R - (D_0 - D_1) - E - (G_0 - G_1) - \Delta S - Q_d &= 0 \\ \Delta S &= M + W_s + P_a \cdot \Delta H \quad (\text{mm}) \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

R: 降雨量,  $D_{i,0}$ : 地表水流入・流出量, E: 蒸発散量,  $G_{i,0}$ : 地下水流入・流出量,  $\Delta S$ : 貯留量変化,  $Q_d$ : 揚水量, M: 土湿不足,  $W_s$ : 地表における水量変化,  $P_a$ : 有効間隙率,  $\Delta H$ : 地下水位変化

長年にわたる水文統計を用いて水収支期間を1年とした場合には、一般に式(1)に示した貯留量変化は過不足がなく無視できる。また分水嶺によって地下ダム流域を考えているので、地表水および地下水の流入量は0である。したがって、式(1)は式(2)のように簡略化できる。

$$R - D_0 - E - G_0 - Q_d = 0 \quad \dots\dots(2)$$

式(2)をさらに変形して、

$$R - E = D_0 + G_0 + Q_d \quad \dots\dots(3)$$

式(3)は、流域における最大可能かん養量を示す。

式(3)により常神地下ダム流域における最大可能かん養量を求め、その結果から地下ダムによる開発水量の算定を行なった。降雨量は三方地区の統計降雨量により、蒸発散量は三方地区の月別平均気温からソーンスウェイト

法を用い、緯度による日照時間の補正を行なって算定した。結果は表-6に示すとおりであり、年間最大可能かん養量は1,697 mmとなる。この値は、地表水流出量および地下ダムからのオーバーフローによる地下水流出量を含めたものである。したがってこれらの量を考慮し、地下ダムによって開発可能となる水量を最大可能かん養量の15~20%程度と考えると、1日平均310~420 tとなる。この量は豊水年、渇水年を含めての平均値である。

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合計
平均気温(°C)	3.6	3.7	7.1	12.7	17.5	21.4	26.0	27.1	22.8	16.6	11.6	6.7	平均 14.8
降水量R(mm)	296	227	168	139	144	203	219	150	294	210	179	280	2509
蒸発散量E(mm)	5	5	17	46	85	116	161	162	109	62	31	13	812
R - E(mm)	291	222	151	93	59	87	58	-12	185	148	148	267	1697

表-6 水収支式による水収支表

##### 4.2. タンクモデル

前述の水収支状況を考慮し、水の挙動を概念的に把握するため、遮水壁施工前1年間のデータを用いて図-5に示すようなモデルを作成し、試算を行なった。このモデルは地下ダム流域を集水域と貯留域に分け、計5箇のタンクにより構成される。最上段のタンクが地表部分、最下段のタンクが帯水層を表わし、中間のタンクは降雨に対する地下水変動の時間遅れと地下水の保水能力を示す。各タンクからの流出は  $Q = \alpha \cdot H$  ( $Q$ : 流出量,  $\alpha$ : 孔係数,  $H$ : 貯留高 (mm)) としてタンク内の貯留高に比例した流出が生じるものとする。最上段タンクには地表流出を表わす流出孔を設け、地表での保水能力は流出孔の高さで表わす。計算は  $\Delta t = 1$  日として最上段タンクに日雨量と日蒸発散量(ただし降雨日は0)を入力し、時系列により日流量を求める。以上により計算結果を月別にまとめたのが表-7である。この結果から、当地下

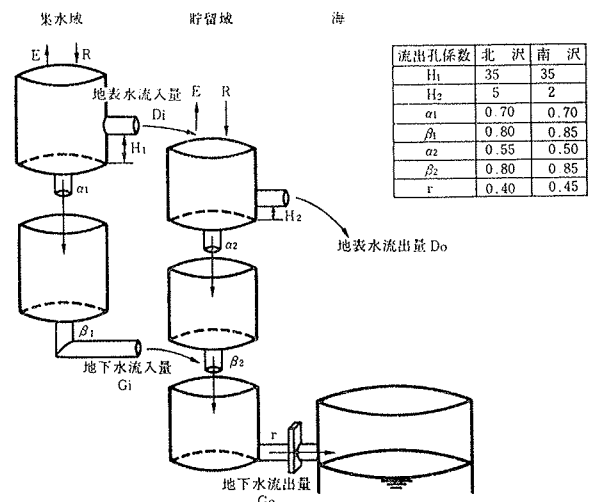


図-5 タンクモデル

ダム流域における昭和56年7月から翌年6月まで1年間の地下水流出量は362 mmであり、1日平均450 tとなる。地下ダムによる開発水量としては、実際にはこの量のうち遮水壁からのオーバーフローを除いた量が考えられる。この結果は前述の水収支式による値に比較的一致し、今回対象とした水収支期間の水文気象がほぼ平年的であることを意味している。

4.3. 有限要素法による浸透流解析

まず、地下ダムによる開発可能量は、対象流域において、有限要素法を用いた平面二次元浸透流解析（定常浸透流解析）による現況の地下水シミュレーションを実施することによって算定することができる。解析領域としては貯留域を考え、図-6に示すような要素分割を行なった。水理定数は表-5に示した各値を採用し、透水量係数については図-6に示すような分布を与えた。境界条件として流入・流出境界での地下水位を与え、流入境界では、谷が地下水盆の領域と接するところから地下水が流入するものとして地下水位を固定し、流出境界では遮水壁位置の地下水位を一定にすることで設定した。さらに貯留域における直接の降雨浸透量として、当流域の年平均降雨量に浸透率を1/3として剰じた量を与えた。解析の結果、地下水位等高線は図-7のようになり、遮水壁位置からの地下水流出量は130~430 t/日となった。

次に、遮水後の貯留効果と揚水による地下水変動について、非定常解析による予測シミュレーションを実施し検討を行なった。予測シミュレーションは月ごとに行なうものとし、初期条件として定常解析の結果得られた地下水位分布を用いた。境界条件は、流入境界では貯留域への地下水流入量として、集水域における降雨浸透量の月値を1箇月遅れで与え、流出境界としては揚水井を設定し揚水量を与えた。また遮水壁位置を不透水境界とし、貯留域における直接の降雨浸透量は月別降雨量から与えた。解析は水需要の多い7月と少ない1月について行ない、揚水量は図-6に示した5箇所の揚水井から各揚水能力に比例した量を揚水させた。図-8に解析結果の一例として、遮水後の7月における揚水した際の地下水位等高線を示す。この例では、揚水量を設計最大揚水量420 t/日とし、初期条件としては地下水流出量430 t/日の場合を用いた。

4.4. 考察

以上三通りの方法による解析結果から、当地下ダム流域において開発の対象となる水量は130~450 t/日と考えられ、遮水壁による貯留効果が認められた。浸透流解析では、水文条件は平年的であるにもかかわらず、帯水層の水理条件によって幅のある結果となった。浸透流解析によって得られた130 t/日という値は、当流域の平年

(単位mm)

	S.56	7	8	9	10	11	12	S.57	1	2	3	4	5	6	合計
降水量R	148	165	118	238	200	253	344	75	136	154	125	169	2125		
地表流量Do	52	92	67	154	110	116	146	21	46	60	48	78	990		
蒸発散量E	161	151	94	50	48	26	11	10	25	40	68	94	778		
R-D <sub>0</sub> -E	-65	-78	-43	34	42	111	187	44	65	54	9	-3	357		
貯留量変化ΔS	-2	-6	-2	1	10	-3	8	-12	8	-9	1	1	-5		
差	-63	-72	-41	33	32	114	179	56	57	63	8	-4	362		

表-7 タンクモデルによる水収支表

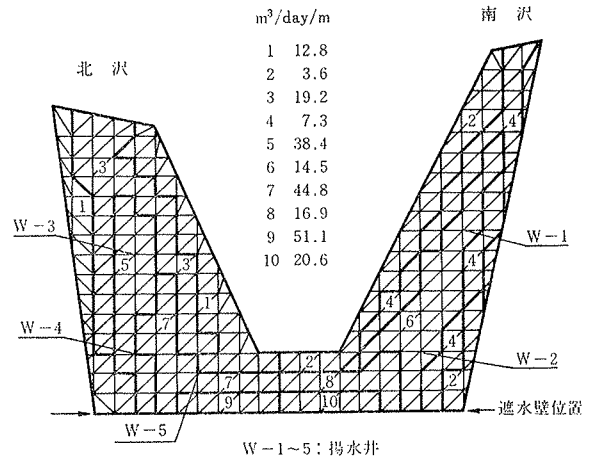


図-6 要素分割および透水量係数の分布

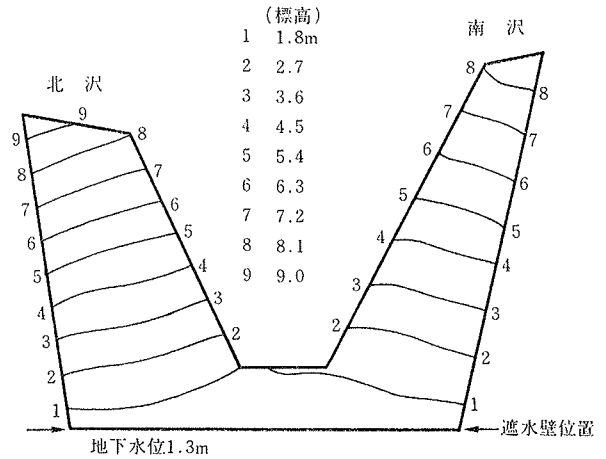


図-7 現況地下水位等高線

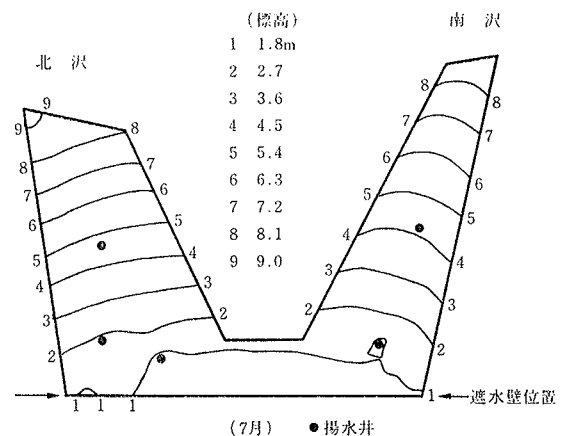


図-8 変動後の地下水位等高線

的な水循環という点からはやや過小であるが、水収支式、タンクモデルによる場合は流域の帯水層構造やその水理定数の考慮に乏しく、決して特異な値とも考えられない。解析方法の違いによる結果の差については、地下ダムの水収支解析としての各解析方法の問題点、改善点として、今後の検討が必要である。

### 5. 遮水壁施工後の維持・管理について

地下ダムによる遮水後の地下水の状況について、タンクモデルによるシミュレーションを行なった(図-9参照)。この結果、地下水位の実測値と計算値は比較的良好な一致を示し、設計時に作成したタンクモデルの妥当性を裏づけるものである。

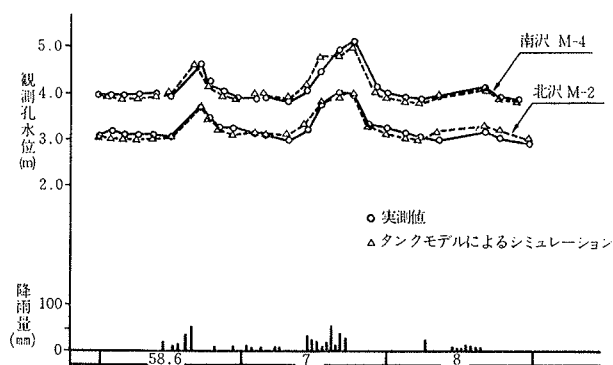


図-9 タンクモデルシミュレーション

設計時における解析結果と施工後の現況との差に起因するものとしては、帯水層構造と水理定数、および降雨量などが考えられる。帯水層の構造や水理定数に関しては、調査・試験の結果得られる情報は点におけるものであることから、タンクモデルなどによるマクロな解析方法の精度向上について検討し、その結果を踏えてよりミクロな解析を行なうといった一連の方法が必要である。

一方、降雨などの水文気象は、長年の間には変動するものである。したがって、設計時の調査のみでなく施工中、施工後を通しての継続調査が重要となる。一例として、地下水位の時系列変化を図-10に示す。地下ダムの設計は、これらの結果を常にフィードバックできる柔軟なものでなければならない。

現在、常神地下ダムにおいては、初期の目的である地下水の塩水化防止にも成功したが、渇水年の取水対策として特に夏季の水需要期を対象とし、地下水の人工かん養施設を施工中である。今回の常神地下ダムの水収支解析例を踏まえて、今後はさらに解析方法などの検討を行ない、地下ダムに関する最適な調査・設計および管理の規準化を進めていく必要がある。

### 参考文献

- 1) 松尾新一郎：常神地下ダム報告書，(1980)
- 2) 松尾新一郎，青木一男：福井県三方町常神地下ダムの調査・設計について，土と基礎，Vol. 31, No. 3, (1983), pp. 11~15
- 3) 中村 弘，内藤和章，平間邦興，串間正敏：常神地下ダムの調査・設計および施工，大ダム，No. 111, (1985. 3), pp. 1~17
- 4) 地下水ハンドブック編集委員会：地下水ハンドブック，建設産業調査会，(1979), pp. 20~22
- 5) 菅原正己：流出解析法，共立出版，(1972)
- 6) 吉川 満：貯留モデルによる不圧の地下水の涵養と流出の構造解析，応用地質，第23巻，第1号，(1982), pp. 1~6
- 7) 中村 弘，桑原 徹，古屋 弘：福井県三方町常神地下ダムの水収支解析，地下水と井戸とポンプ，第27巻，第7号，(1985), pp. 2~14

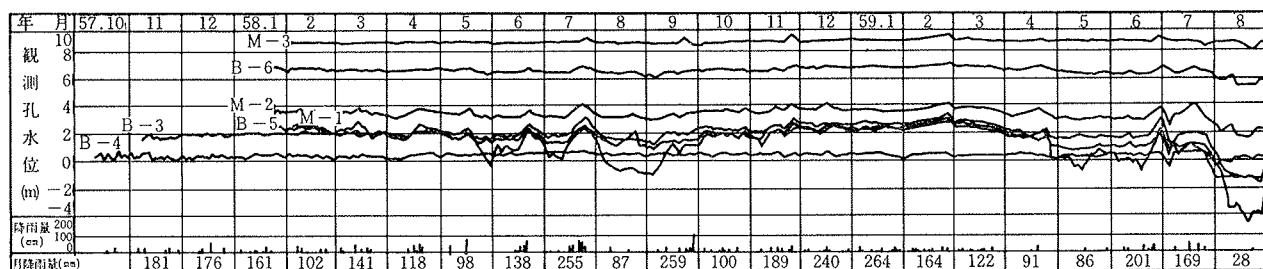


図-10 地下水位時系列変化(北沢)

