

地下ダムの貯留効果に関する評価手法の研究

平間 邦興 桑原 徹

串間 正敏

(本社 技術開発本部土木技術第二部)

Study of Analytical Methods Concerning Storage Effect of Underground Dam

Kunioki Hirama

Tohru Kuwahara

Masatoshi Kushima

Abstract

Various methods of calculating groundwater balance for estimation of storage were evaluated utilizing data observed during a period of about 5 years on an underground dam catchment area. The methods were the following four: (1) water balance equation, (2) combination of tank model and water balance equation, (3) numerical calculation by finite element method, and (4) hybrid model of finite element method and tank model. Consequently, it was possible to evaluate the storage at the underground dam and its characteristics under the following conditions when permeable layers consist of sand and conglomerate of an alluvial system: (1) accumulation of observational data over a long period, (2) correct information on hydrogeology, (3) suitable construction of tank model, (4) reasonable numerical model and (5) hybridization of tank model and finite element method.

概要

地下ダム流域に関する水収支の把握は、地下ダムの効率的な調査・設計・施工・維持管理に必要である。筆者らは今回、約5年間にわたる長期間の地下水観測データを利用して、地下ダムの貯留効果について各種の水収支の解析方法を用いて評価を行なった。解析にあたっては次の4つの方法を用いた。(1) 水収支の式、(2) タンクモデルと水収支式の組み合わせ、(3) 有限要素法による数値解析、(4) 有限要素法とタンクモデルによるハイブリッドモデル。その結果、今回のように帯水層が砂れき層の場合、地下ダムの貯留状況やその特性が評価できることが分かったが、評価にあたり以下の点が極めて重要である。すなわち、(1) ある程度長期間の観測データの集積、(2) 水理水文地質状況の正確な把握、(3) タンクモデルの適確な構成、(4) 適確な数値解析モデルの作成、(5) ハイブリッドモデルなど解析の複合化、などである。

1. はじめに

地下ダム流域に関する水収支の把握は、地下ダムの効率的な調査・設計・施工・維持管理に必要である。このためには長期間にわたる地下水の各種調査・観測が望まれる。筆者らは従来、主に調査・設計・施工の段階での水収支について検討してきた^{1)~4)}。今回某地下ダムで約5年間の観測結果をまとめることができたので、これを一つの事例として、地下ダム建設における地下水の貯留効果に関する評価手法につき総括的検討を実施した。流域の水収支は、「調査・設計」段階と「維持管理」の段階の2つに分けて解析を行なった。

2. 貯留効果の評価手法

貯留効果の評価手法、すなわち水収支の解析方法はこ

こでは次の4つを用いている。

- (1) 水収支の式
- (2) タンクモデルと水収支式の組み合わせ
- (3) 有限要素法による数値解析
- (4) 有限要素法とタンクモデルによるハイブリッドモデル

解析方法は調査観測データの質・量及び解析の目的・内容より選択される。ここでは概略設計用には上述の(1)、(2)の方法を、詳細設計用には(3)、(4)を、維持管理用には(2)を用いている。

概略設計時、(1)、(2)は地盤の水理定数を十分に把握できない場合でも、降雨量・地下水位・地表流量などが測定されていれば実施可能であり、ある程度長期間のデータがあれば、(2)のタンクモデルも十分利用することができる。詳細設計時には既に水理定数を決定しているので、

ボーリング及び地下水観測井(B-1~9)*	
地質観察	
地下水測定	簡易揚水試験, 全層揚水試験, 岩盤ルジオン試験
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*	
地下水利用状況	気温・潮位観測 揚水量の記録

*継続調査を含む

表-1 地下ダムにおける調査試験項目

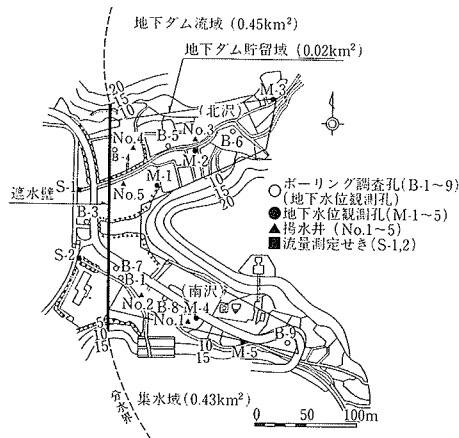


図-1 地下ダムにおける調査配置

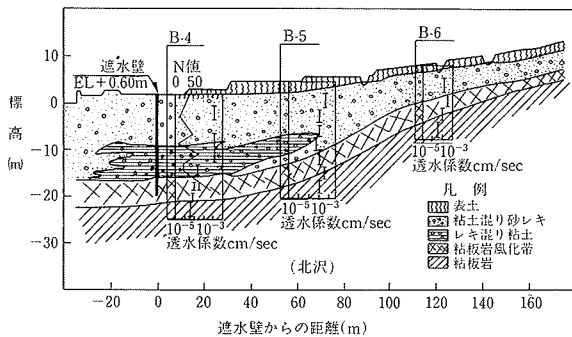


図-2 地下ダム流域の地質断面図

	透水係数(cm/sec)	貯留係数
礫混り粘土	5.0×10^{-4}	0.05
粘土混り砂礫	5.0×10^{-3}	0.07
粘板岩風化帯	1.0×10^{-4}	0.03
粘板岩	3.0×10^{-5}	0.01

表-2 水理定数

(3), (4)の数値解析が可能である。特に(3)は定常解析による開発水量の算定, (4)はタンクモデルにより長期間の観測データをまとめて有限要素法の入力データとするもので, 非定常解析による長期間の地下水位変動の解析に有

効である。また維持管理のためには, 長期間の地下水観測データに基づき貯留域の地下水特性を把握する必要があるが, 数年間のデータを解析に取り込むには, (2)のタンクモデルが最適である。以下に貯留効果の評価方法について, 「調査・設計」段階と「維持管理」の段階とに分けて検討した。

3. 水文地質条件

地下ダムにおける調査項目と調査配置の例は表-1と図-1にそれぞれ示す。この事例における代表的地質断面は図-2に示すが, 次のような特徴が認められる。

- (1) 帯水層は粘土混ざり砂れき層とれき混ざり粘土層からなる沖積層であり, 遮水壁地点での沖積層の厚さは16~19mである。
- (2) 不透水性基盤はチャート及び粘板岩からなり, 新鮮な岩盤ではルジオン値が5以下で, 一方風化帯は厚さ4~6mであり, ルジオン値は5~25である。
- (3) 水理定数は揚水試験などから表-2のようにまとめられる。

4. 調査・設計時の水収支解析

4.1. 水収支式

ある流域における水収支式は一般に次式で表わすことができる。

$$R - (D_o - D_i) - E - (G_o - G_i) + S - Q_d = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$S = M + W_s + P_a * H \quad \dots\dots\dots(2)$$

R: 降雨量, D_i, D_o : 地表流入, 流出量, E: 蒸発散量, G_i, G_o : 地下流入, 流出量, S: 貯流量変化, Q_d : 揚水量, M: 土湿変化, W_s : 地表における水量変化, P_a : 有効間隙率, H: 地下水位変化

これらは地下ダム流域の諸条件を考えると次式のように簡略化できる。

$$R - E = D_o + G_o + Q_d \quad \dots\dots\dots(3)$$

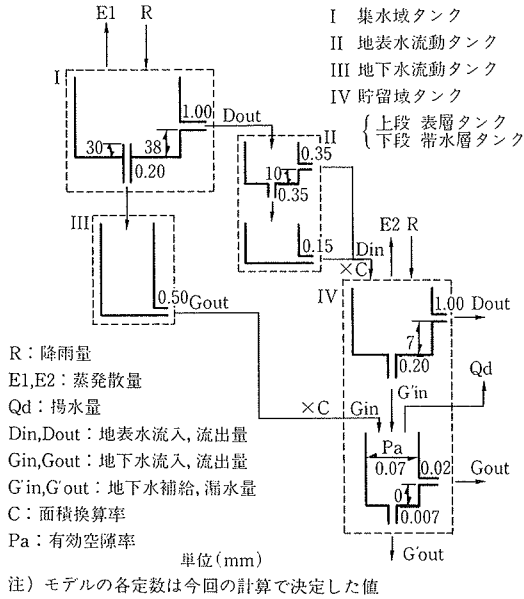
左辺は流域の最大かん養量であるが, 地表流出量 D_o のデータの有無, あるいは最大かん養量に対する地下かん養量の推定が重要な問題となる。降雨量 R は月別降雨量を用い, 蒸発散量 E は月別平均気温からソーンスウェイト法を用い, 緯度による日照時間の補正を行ない算定した。表-3は30年間の統計降雨量に基づき地下ダム流域の最大かん養量を求めた例である。

4.2. タンクモデルと水収支式

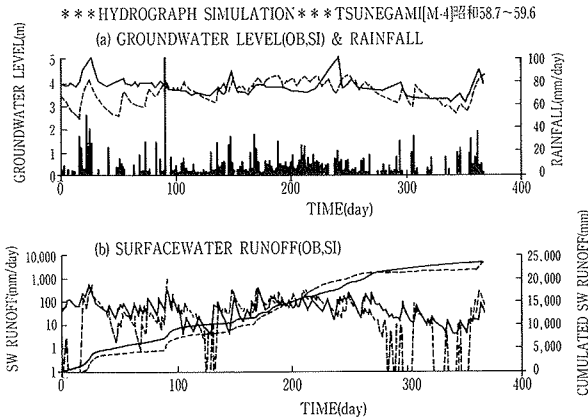
タンクモデルは河川の流出と降雨量の関係が指数関数であることを表わし, 従来河川の流出解析に用いられてきたが⁵⁾, 地下水流出を表わすタンクに地盤の有効間隙率を与えて, 地下水位変動と降雨量の関係が指数関係で

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

表一三 水収支式による算定



図一三 タンクモデルの構成



図一四 タンクモデルによる地下水位変動と地表流量のシミュレーション

		(mm)												
		58.7	8	9	10	11	12	59.1	2	3	4	5	6	年間
貯留域	R	255	87	259	100	189	240	264	164	122	91	86	201	2,058
	E	87	101	63	71	57	34	29	44	57	92	105	86	826
	Din	3,213	858	2,040	1,777	1,503	3,224	3,883	2,370	1,559	84	465	1,354	22,330
	Dout	3,387	801	2,194	1,762	1,595	3,387	4,075	2,450	1,580	99	432	1,499	23,261
集水域	Gin	297	123	280	311	301	680	821	599	563	58	105	291	4,429
	Gout	55	-117	72	245	184	594	808	552	579	-44	-10	35	2,953
	Pa・ΔH	-6	-24	64	-42	22	36	-9	-6	-34	-34	-7	76	36
	Qd	242	307	186	152	135	93	65	93	62	120	136	150	1,741
水	R	255	87	259	100	189	240	264	164	122	91	86	201	2,058
	E	86	99	62	69	57	33	29	43	56	91	102	86	813
	Dout	149	40	95	83	70	150	180	110	73	4	22	63	1,039
	Gout	14	6	13	14	14	32	37	28	26	3	5	14	206
城	ΔS	6	-58	89	-66	48	25	18	-17	-33	-7	-43	38	0

注) 貯留域の1mm=20m³に相当する。集水域の1mm=430m³に相当する。

表一四 タンクモデルによる水収支の算定

あることも示された⁶⁾。このとき帯水層タンク内の貯留量の減衰と流出量は次式で表わされる。

$$h = h_0 * \text{EXP}((-a/Pa)/t) \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$q = a * h \quad \dots\dots\dots(5)$$

h, h₀: タンク内の水位, a: 流出孔係数, Pa: 有効間隙率, t: 時間, q: 流出量

ここでは地下ダム流域を集水域と貯留域に分け、図一三のような5個のタンクからなるタンクモデルを構成した。図中で集水域タンクは集水域における降雨の入力と地表流出・地下浸透を表わし、地表水流動タンクは集水域から貯留域への地表流出過程を表わす。地下水流動タンクは集水域で浸透した地下水の貯留域への流入過程を表わす。貯留域タンクは上下2段に分れ、上段は地盤の表層を、下段は帯水層をそれぞれ表わす。下段の帯水層タンクは有効間隙率を考慮した構造で、タンクの水位は集水域と貯留域の面積比を換算して求める。タンク側方の流出孔は地下ダム遮水壁位置における地下水流出を、タンク底の浸透孔は岩盤への漏水をそれぞれ表わす。

各タンクの流出孔係数 a₁・浸透孔係数 b₁・流出孔の高さ h₁ は、1年間365日の降雨量 R, 揚水量 Qd に基づきシミュレーションを繰り返し、地表流出量と地下水位の観測データに最も良く適合するように設定した。図一四はこのようなシミュレーションの例であり、計算結果と観測結果との良好な一致を示している。このモデルに従い次年度の予測シミュレーションを行なうと、観測結果と良い一致が見られた。これらの計算結果に水収支の(3)式を組み合わせると、表一四のように月ごとの地下水貯留量が求まる。

4.3. 有限要素法による開発水量の算定

地下ダムの開発水量は「遮水壁建設位置における地下水流出量」と定義される。従ってまず地下水流動の現況シミュレーションが必要となる。水理定数・水文地質構造・解析上の初期条件及び境界条件としての地下水位や流量の検討を経た上で、現況地下水位分布を再現できるような貯留域の解析モデルを設定する。このモデル上で、遮水壁位置での地下水総流出量が求めるべき地下ダムの開発水量である。図一五は準三次元浸透流解析により現況シミュレーションを実施した結果である。準三次元における地下水流動の基礎式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ T(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ T(h) \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + q = S(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(6)$$

T(h): 透水量係数, S(h): 貯留係数, q: 揚水量

このような定常解析の結果、開発水量は約 236 t/日となり、完成後の取水量に近い結果となった。

4.4. ハイブリッドモデルによる地下水位変動の解析

次に現況シミュレーションの結果を初期条件として、非定常解析により地下水位変動の解析を実施した。解析領域は前節の定常解析と同様である。地層構成は定常解析直後に遮水壁部分をモデル化し、併せてその水理定数を設定した。初期条件は定常計算時の地下水位分布を用いた。境界条件としては、流入境界に4.2.節タンクモデルで得られた貯留域への地下水流入量がある。これは定常計算による流入境界上各節点間の流量比に従い、タンクモデルによる地下水総流入量を各節点間に比例配分して与える。また遮水壁下流側は定常計算時に与えた初期水位で一定とした。揚水量は月揚水量を日量に換算して揚水井を表わす節点に与え、地表からの地下水かん養量はタンクモデルによる帯水層への地下水補給量を浸透率100%として、遮水壁部分を除く全節点に与えた。時間増分は1日として計算は1カ月ごとに進め、合わせて3カ月間の地下水位変動を計算した。

図-6は地下水位変動の計算結果を観測結果と比較したものである。これによると両者は解析領域の内部では比較的一致しているが、領域の周辺部分ではやや異なる結果となった。この理由としては、(1)遮水壁位置で地下水位を固定した影響や、流入境界における流入量の算出方法など、解析領域周辺部における境界条件の設定方法に問題が残る、(2)地下水位観測データは観測井周辺の局所的な地質条件に支配される場合もある、などである。しかし長期間のシミュレーションという点を考慮に入れると、全体としては観測結果を良く反映していると言えよう。

5. 維持管理時の水収支解析

地下ダム完成後地下水の調査解析は、地下ダム運用に当たっての地下水の管理基準の作成を最終的な目標としている。ここでは約5年間の地下水観測データを用い、タンクモデルに基づき地下水開発量の変化についてシミュレーションを実施した。タンクモデルの構造と各種定数は4.2.節と同様である。

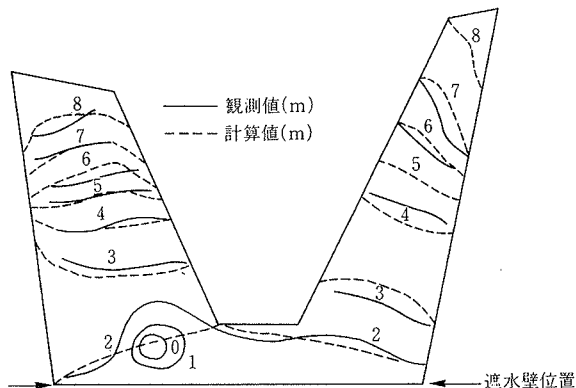


図-5 準三次元浸透流解析による開発量の算定 (定常解析)

シミュレーションを実施した。タンクモデルの構造と各種定数は4.2.節と同様である。

解析結果は図-7に示し、図中には地下水の開発水量(貯留量変化+揚水量)の他に地下水の塩分濃度・月間最高最低水位・地下ダムの施工過程(遮水壁構築及び地下浸透式かん養工の施工)も示した。これらの結果は以下のようにまとめられる。

- (1) かん養工実施前では、貯留量変化(貯留域の地盤中での地下水の増減)はほぼプラス・マイナスゼロで、揚水量は開発水量にほぼ等しくなり、地下ダムで貯留した地下水を限界まで揚水していたことになる。
- (2) かん養工実施後は貯留量変化は大きくプラス側に転じ、開発水量は約2倍に増加し、それに伴い揚水量も著しく増大した。これはかん養工が十分機能している証拠である。
- (3) 地下水中の塩分濃度と月間地下水位との関係によると、400 ppm以上の塩分濃度はかん養工実施前では地下水位がEL+2.5 m以下で生ずる。この水位を管理上の「限界水位」とすると、かん養工実施後はEL+1.5 mと判断され、実施前に比べて1 m低下したことになる。これ

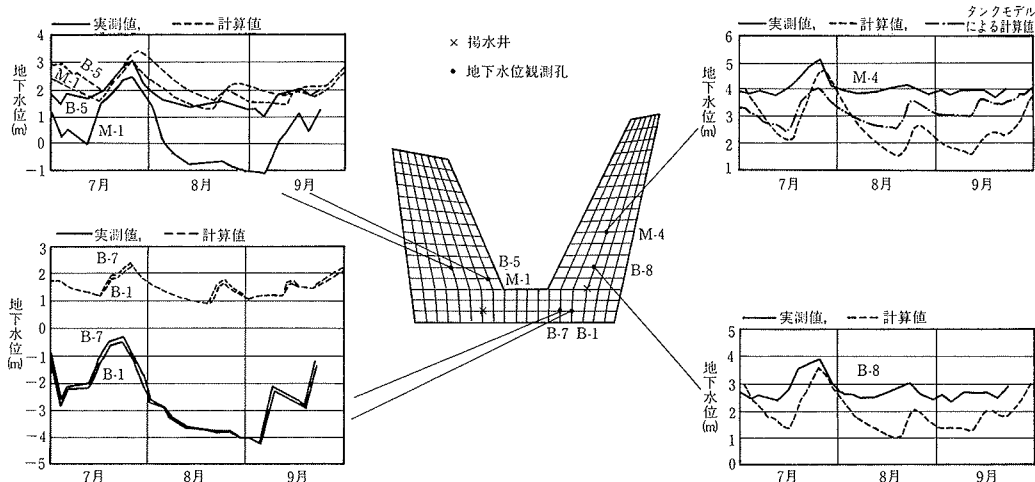
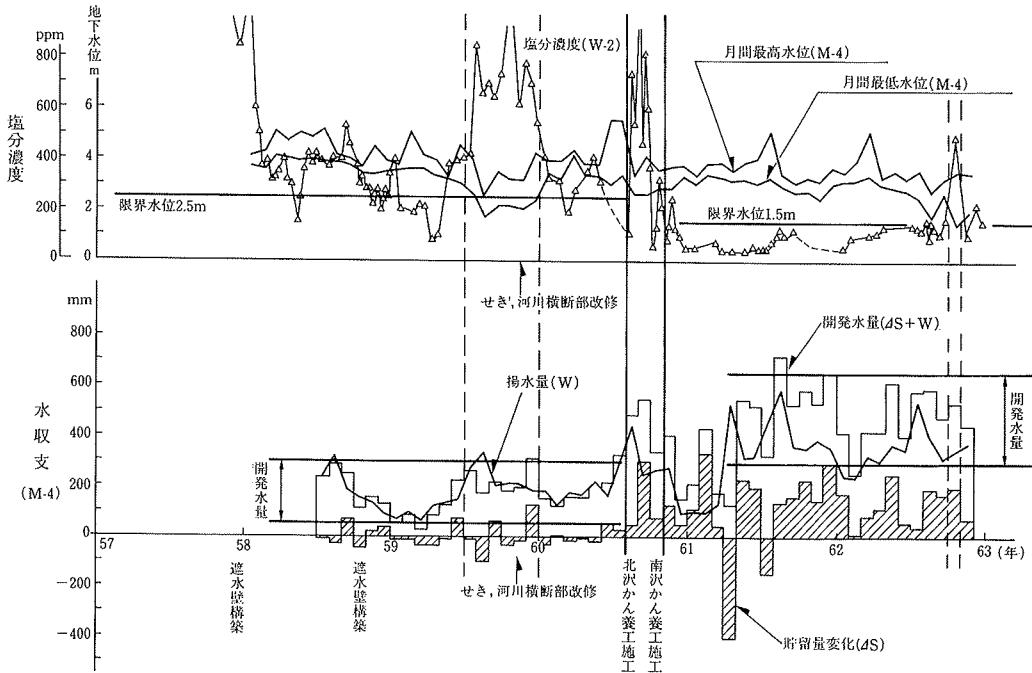


図-6 準三次元浸透流解析による地下水位変動のシミュレーション (非定常解析)



図一七 タンクモデルによる開発水量の算定

は貯留量が増大したために水位が低下しても塩分濃度が相対的に増えなくなったためと考えられる。

(4) 現状の限界水位を維持して、残りの開発水量をどの程度利用できるかを評価するために、揚水量を現状よりも5%毎増加させながら地下水位の予測シミュレーションを実施した。その結果図一八のように揚水量15%増で限界水位を下回り、約10%の余裕があることが予測できる。

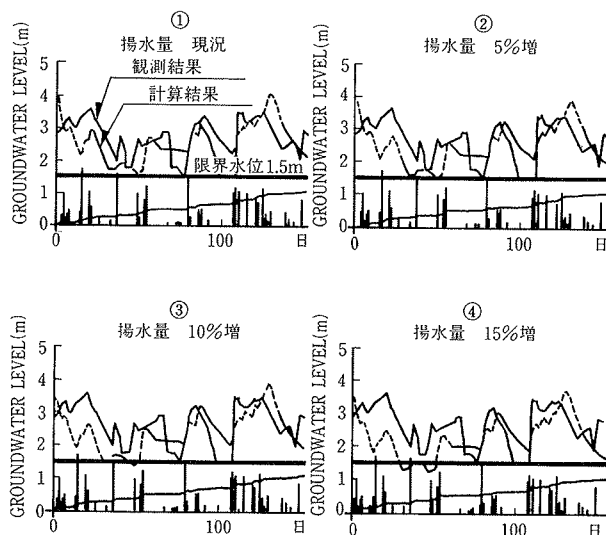
6. まとめ

筆者らは今回、約5年間にわたる長期間の地下水観測

データを利用して、地下ダムの貯留効果について各種の水収支の解析方法を用いて評価を行なった。その結果今回のように帯水層が沖積砂れき層の場合、地下ダムの貯留状況やその特性の評価は可能であるが、次の点が評価にあたり極めて重要となる。すなわち、(1)ある程度長期間の観測データの集積、(2)水理水文地質状況の正確な把握、(3)タンクモデルの適確な構成、(4)適確な数値解析モデルの作成、(5)ハイブリッドモデルなど解析の複合化、などである。これらの特性は帯水層を構成する地質条件によっても異なるので、今後各種地盤での観測結果をデータベース化することも必要であろう。

参考文献

- 1) 中村 弘, 他: 常神地下ダムの調査・設計および施工, 大ダム, No. 111, (1985), pp. 1~17
- 2) 中村 弘, 他: 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, Vol. 27, No. 7, (1985), pp. 2~14
- 3) 平間邦興, 他: 地下ダム建設技術における調査・設計, 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 11~16
- 4) 平間邦興, 他: 地下ダムタンクモデルによる地下水収支解析法と適用例, 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp. 12~16
- 5) 菅原正巳: 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かん養と流出の構造解析, 応用地質, Vol. 23, No. 1, (1982), pp. 1~6



図一八 タンクモデルによる限界揚水量の算定