

降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動 に関する解析的検討

ANALYTICAL INVESTIGATION ON GROUNDWATER FLOW IN ROCK GROUND CONSIDERING RAINFALL INFILTRATION

百田博宣*・藤城泰行**・青木謙治***・花村哲也****
By Hironobu MOMOTA, Yasuyuki FUJISHIRO, Kenji AOKI
and Tetsuya HANAMURA

Rainfall infiltration is an important factor to be considered in analyzing groundwater table in rock ground. However, hydrogeological condition to rock ground and its effect on groundwater are not yet clarified. This paper presents analytical assessment of groundwater flow taking rainfall infiltration into consideration. Kikuma Test Plant for underground oil stockpiling and a small granite island are chosen as application examples. These analyses are carried out by vertical two-dimensional FEM model and quasi-three-dimensional FEM model using actually-measured permeability and estimated hydraulic conditions. The theoretical results are compared with results of field measurements particularly for relationship between water balance and groundwater level. This analytical investigation enables to furnish both method for modeling rainfall infiltration from water balance calculation and informations for adaptability of hydraulic analyses to actual phenomena.

Keywords : rainfall infiltration, water balance, groundwater level, rock ground, Kikuma Test Plant

1. ま え が き

近年、岩盤内燃料用備蓄空洞や放射性廃棄物処理場など、岩盤地下空間の多様な利用形態が計画されつつある。これに伴い、各種地下空洞の計画・設計に際し、不可欠な検討項目の一つとして、岩盤水理挙動に関する解析技術の向上が望まれている。地下空洞にかかわる岩盤水理挙動といった場合、空洞湧水や間隙水圧分布および周辺地下水位変動などが、その対象となる。これら項目の基本的な性質に関しては、これまで解析的または実験的アプローチによって、かなり詳細に把握されている^{1)~6)}。しかし、実際の地下水挙動の予測・解析において、技術的な課題が残されていることも実状であり、その一つが合理的な水文・地下水解析の確立と考えられる。

とりわけ燃料用備蓄空洞の場合は、地下水の効果で燃

料類の貯蔵を可能にするものであり、周辺地下水位の保全が重要かつ基本的な検討課題に挙げられている。このような問題を考える場合、少なくとも降雨の影響を考慮する必要があるが、既往の研究^{1), 5)}では水文学の見地に立った降雨浸透量の評価法や適用性について、厳密な検討はなされていない。また本量を用いた地下水解析による実現象の再現性に関しても、綿密な検討例は見当たらず、実際の観測結果に着目した詳細な解析の実証例が、望まれるところである。このような現状に対し、石油公団が建設した菊間実証プラント^{7), 8)}では、実証項目の一つとして長期にわたる水文および地下水調査より、実測結果に基づく水収支と地下水位変動の関係が把握されつつある。また、降雨浸透を考慮した地下水解析結果と実測結果を比較し、解析の実用性も吟味されつつある。

本論文では、このような経緯を踏まえ、岩盤を対象とした合理的な水文・地下水解析の確立に資料を供するため、花崗岩質の小島⁹⁾と菊間実証プラントにおける実測の水文状況と地下水挙動に注目した解析的アプローチを行ったものである。すなわち、前者の事例では定常解析を用いて水収支計算による降雨浸透量の定量的な適用性、後者では非定常解析を用いて降雨浸透量の時間依存性に関するモデル化や解析による実現象の再現性、を明確にすることを目的としたものである。

* 正会員 工修 清水建設(株)大崎研究室
(〒100/千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル)

** 正会員 建設省福井工事事務所 所長(元 石油公団備蓄計画部調査役)

*** 正会員 工修 鹿島建設(株)技術研究所第一研究部主任
研究員

**** 正会員 工修 大成建設(株)技術本部技術開発部エネルギー開発室長

2. 解析的アプローチの考え方

実際の解析に先立ち、解析法の選定や降雨浸透量の評価法について述べ、本研究の考え方を明確にする。

(1) 地下水解析法の選定

周知のように、地下空洞にかかわる地下水位変動は、広域の地下水挙動とみなし得る。この観点から地下水解析法を選定すると、平面二次元解析、深さ方向の水利定数変化を考慮した準三次元解析¹⁰⁾、三次元解析などが挙げられる。しかし、實際上、地山は未風化な岩盤上部に表土・風化土をもつ二層系地山であることが多い。このため、地下水面位置に応じた透水性や空隙率の変化に対処できることも肝心であり、水位変動に伴う水利定数変化を無視した平面二次元解析では検討が困難である。また水文学的立場からみれば、降雨浸透量は地表面で評価することが簡単かつ合理的である。この点に関しては、飽和-不飽和領域を対象とした理論を用いることで対処でき、準三次元解析にもこの考え方が導入されている¹¹⁾。

ここでは実現象を対象とするため、目的に合致する飽和-不飽和の準三次元解析¹²⁾と三次元解析のうち、取り扱いが簡単な前者を用いる。いま、水平面上に x, y 軸を設定し、時間を t とすれば、飽和-不飽和帯における準三次元地下水流の基礎方程式は式 (1) で与えられる¹¹⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q + i = (S_1 + S_2) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h : 地下水のピエゾ水頭、 T : 透水量係数、 S_1 : 貯留係数、 S_2 : 有効空隙率、 Q : 注水量または排水量、 i : 地表面での流入地下水流速であり、 T と S_2 には不飽和帯の影響が加味されている。

式 (1) では、 i は降雨浸透量に対応するが、準一様流仮定を設けているため、地下空洞の境界条件を入力できない欠点がある。しかし、空洞長さが長く湧水量に関して工学上二次元構造物とみなし得る場合には、鉛直二次元解析で空洞湧水量を事前に推定し、式 (1) 中の Q に排水条件を与えると、空洞の影響を考慮することも可能である。ここで実際の数値計算では、式 (1) をガラーキン法で離散化して計算を実行する。

一方、地下空洞を対象とした地下水挙動の検討には、飽和-不飽和の鉛直二次元 FEM 解析が多用されているのが現状である⁹⁾。このため、解析法の比較の意味で本解析法も使用するが、この場合も降雨浸透量を地表面で入力することが可能である。

(2) 降雨浸透量の評価

図-1 に一般的な水収支状況と水収支対象領域を示

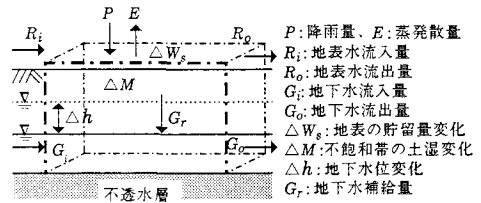


図-1 水収支対象領域の立体的境界¹²⁾

す。この場合、水収支式として、次式が成立する¹²⁾。

$$\left. \begin{aligned} P &= (R_o - R_i) + E + (G_o - G_i) + \Delta S \\ \Delta S &= \Delta W_s + \Delta M + \mu \Delta h \\ G_r &= (G_o - G_i) + \mu \Delta h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 ΔS : 貯留量変化、 μ : 地下水位変化部分の含水量変化であり、他の記号は図-1 中にまとめて説明した。

本研究のように、地表面で降雨浸透量 i を算定する場合、式 (2) は次のように変形できる。

$$i = G_r + \Delta W_s + \Delta M = P - E - (R_o - R_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、地表水の水収支では、分水界を水収支領域の境界に選べば、地表水の流入項は無視できる。すなわち、

$$i = P - E - R_o \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、 P, E, R_o の各項目を測定すれば、降雨浸透量 i が算定でき、 i を考慮した地下水解析が行える。

3. 花崗岩質の小島における定常地下水挙動解析

研究地域は、東西に約 1 km、南北に約 3 km で最大標高が 154 m の瀬戸内海に位置する花崗岩質の小島である。本島において、13 本のボーリング孔を使用した地質調査、水文調査、および定常時の地下水位測定および水圧測定などが実施されている。さらに定常鉛直二次元解析を実施して、降雨浸透量の推定も行われている⁹⁾。

ここでは、広域の岩盤地下水に対する定常地下水挙動の検討例として、花崗岩質の小島全体を対象とした解析的実証例を示す。すなわち、飽和-不飽和の準三次元解析を用いて降雨浸透下の定常地下水面を算出する。さらに実測地下水位との比較を通じて、広域の降雨浸透量の推定を試み、水文調査結果との整合性を検討する。

(1) 調査観測結果

本島の水収支は、水文調査結果に基づく水収支計算によって、図-2 のように得られている⁹⁾。すなわち、降雨浸透量は約 1.0 mm/day (350 mm/year) と把握されている。また、地質調査結果によれば、本島は数 m~20 m 程度の風化帯に覆われたクラッキーな花崗岩質の岩盤より構成されており、透水性は $10^{-6} \sim 10^{-8}$ m/s で全体の透水性はかなり低い特徴をもつ。いま、地表面は地形図

注 1) 文献 11) では二層系地山解析とよばれているが、ここでは、一般的な名称として準三次元解析と称す。

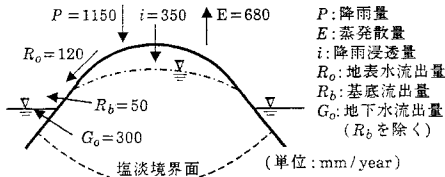


図-2 花崗岩質の小島の水収支²⁾

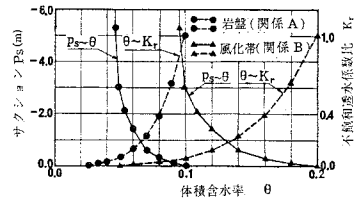


図-6 風化帯および岩盤の $P_s \sim \theta \sim K_r$ 関係

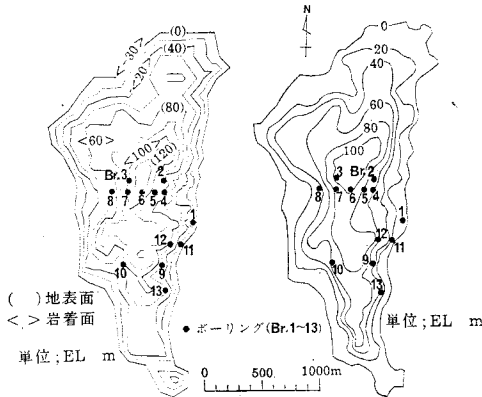


図-3 地表面と推定岩着面の概況 図-4 実測結果より推定した地下水位平面分布

から読み取り、ボーリング結果から風化帯の厚さを20m程度と推定すれば、図-3のように地表面と推定岩着面が得られる。また、13本のボーリング水位結果に図-3の結果を考慮すれば、図-4の地下水位平面分布が推定できる。本図より、本島はおおむね最高水位がEL+100m程度のドーム状の地下水面といえる。

(2) 飽和-不飽和の準三次元解析による検討

a) 解析条件

解析上の地質構造モデルは、図-3の構造上部に一律に厚さ40mの仮定の風化帯を付け、図-5のように設定した。解

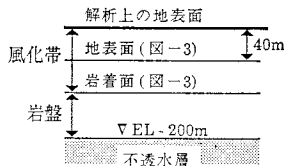


図-5 解析上の地質構造モデル

析上の地表面は、計算水位が実際の地表面を越えた場合も、計算可能なように設定したものであり、不透水層位置はEL-200mと仮定した。岩盤と風化帯の飽和透水係数 K_0 は、おのおのの全測定データを対数平均した結果、岩盤では $K_0=4 \times 10^{-8}$ m/s、風化帯で $K_0=2 \times 10^{-7}$ m/sと算定できた。一方、不飽和の浸透特性については、砂質土に関する研究^{13),14)}はあるが、岩盤を対象としたものは見当たらない。しかし、駒田は不飽和の浸透特性に関する実用的な推定法を提案し¹⁵⁾、かつ岩盤を対象とした研究に適用している^{2),16)}。ここでは、空隙率や有効空隙率¹⁷⁾および毛管上昇高^{2),16)}を仮定し、駒田の方法を用いて岩盤と風化帯の不飽和浸透特性を推定した。これを図-6に示す。

このような条件下で、降雨浸透量 i をパラメーターとした定常地下水位を求めるが、 i は水収支計算の結果を参考にして、 $i=0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25$ mm/dayの5ケースを解析の対象とした。

b) 解析結果とその考察

解析による地下水位平面分布を図-7に示す。本図によれば、降雨浸透量の増大に伴う地下水面の上昇を明快に把握できる。これらの計算結果を図-4に示す実測推定値と比較すると、おおむね $i=0.75 \sim 1.25$ mm/dayの条件下で、実測結果を再現していると考えられる。しかし、定量的な比較が難しいため、ここでは孔内水位の実測値 ($H_1 \sim H_{13}$) および対応する計算水位 ($H'_1 \sim H'_{13}$) を用いて、次式で定義される計算誤差 ΔH を計算した。

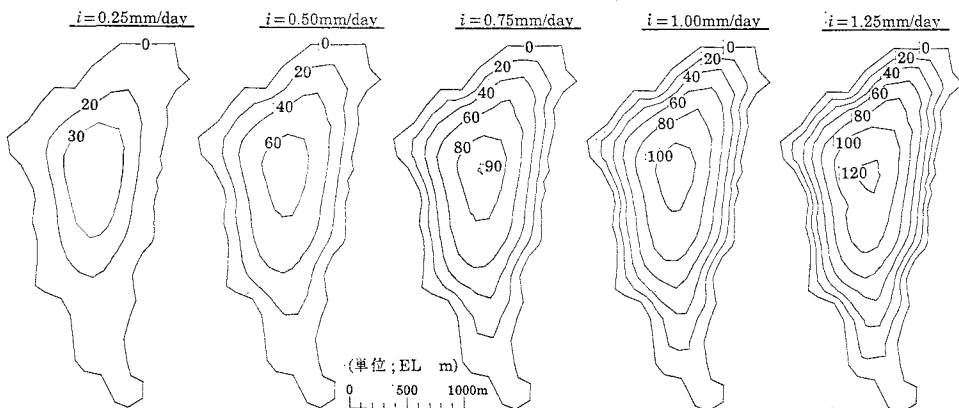


図-7 降雨浸透量をパラメーターとした地下水位平面分布の算出結果

$$\Delta H = \sqrt{\frac{s}{N}}, \quad s = \sum_{i=1}^N (H'_i - H_i)^2 \quad (N=13) \dots \dots (5)$$

i と ΔH の関係を図-8

に示す。また実測水位の最も高いボーリング No. 6 孔位置の水位も判断資料として、同図中に記した。本図によれば、 $i = 1.0 \text{ mm/day}$ の条件下で ΔH が最低値となるとともに、計算による No. 6 孔の水位 H'_6 も $i = 1.0 \sim 1.25 \text{ mm/day}$ の条件下で実測値を再現しているといえる。

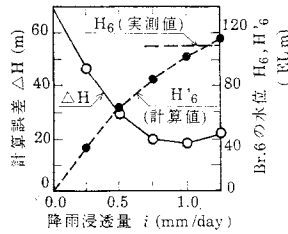


図-8 実測水位と計算水位の比較

以上のような検討結果を踏まえて、本地域の定常降雨浸透量は $i = 1.0 \text{ mm/day}$ 程度と判断できよう。この結果は図-2 に示した水収支計算結果とも整合性がよく、合理的な値が得られたものと考えられる。このように、計算上の最適な広域降雨浸透量が推定できれば、地下空洞が掘削された場合などについて、地下水位変動に関するモデル解析も可能と考えられる¹³⁾。

4. 菊間実証プラントにおける非定常地下水挙動解析

図-9 に示す菊間実証プラントは、石油公団がわが国における石油地下備蓄技術の開発を目的として、愛媛県菊間町に建設したパイロットプラントである^{7),8)}。図中の貯油槽の構造寸法は、高さ 20m、幅 15m、長さが 112m で、深さは海面下 -42m ~ -62m である。また、他の構造物についても、概要を図-9 中にまとめている。

ここでは、1982年12月16日~1985年12月15日の3年間(1095日)の地下水関連の調査観測結果を対象として、降雨浸透下の非定常地下水挙動を解析的に検討する。本期間中は、図-9 中の水封および作業トンネル

ル、払出および受入配管立坑への人工水の供給を停止した条件下である。したがって、水収支的には降雨浸透、空洞湧水(貯油槽、ドライポンプ室)および周辺地下水補給が対象となる。

(1) 調査観測結果

地下水関連調査として、水文調査(降雨量、蒸発量、表面流出量)と地下水調査(地下水位、間隙水圧)および空洞湧水量調査などが実施されている。水文学の測定位置、水位測定用の観測ボーリング孔(21孔、計器設置位置 EL -10m)と精査 No. 1 孔(孔底は EL -72m)の平面配置を図-10 にまとめる。また本地域は、風化帯と良好な花崗岩質の岩盤で形成されており、岩盤表面(岩着面)を地表面とともに、図-10 中に併記している。

まず、水文調査結果を式(4)で整理し、降雨浸透量の変化傾向を図-11 に示す。本図中、上段が日変化、下段が月変化、年変化および調査期間平均値である。本図によれば、降雨浸透量は激しい日変化を示している。また、3年間平均値が 0.957 mm/day であることから、調査2年目は小雨年、3年目は多雨年であり、調査1年単位にみても変化が大きいことが特徴的である。

本対象期間中には、原油の受払い等の実験も行われて

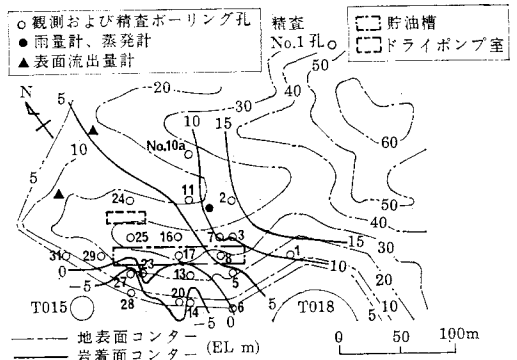


図-10 地下水位、水文量測定位置と地質状況

番号	名称	規模・寸法	備考
1	貯油槽	巾 高さ 延長 15m×20m×112m	タンク容量 25,000 ㎥ (原油)
2	水封トンネル	巾 高さ 延長 4.0m×4.0m×282.4m	地下水面の低下を防止し、人工注水効果を実証する。
3	サービストンネル	巾 高さ 延長 4.5m×4.5m×134.6m	配管類を通すためのトンネル
4	受入配管立坑	高さ 4.3m×4.3m×4.65m	原油を受入れるための配管類を通すトンネル
5	払出配管立坑	高さ 6.0m×6.88m	原油を払出すための配管類を通すトンネル
6	ドライポンプ室	延長 8.0m×3.40m	原油を払出すためのポンプ類を置く部屋
7	作業トンネル	巾 高さ 延長 4.5m×4.5m×442.7m	貯油槽本体に取付するための作業用廊下

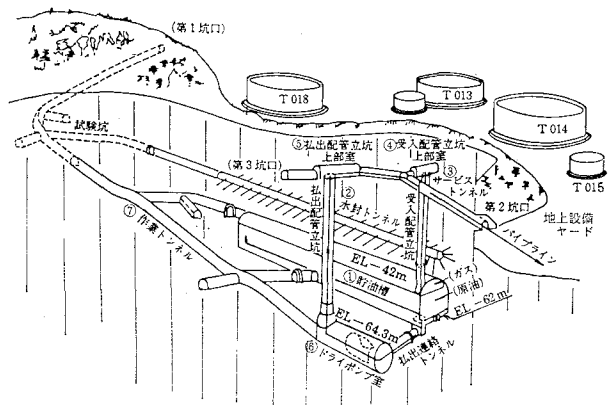


図-9 菊間実証プラントの鳥瞰図と構造概要⁹⁾

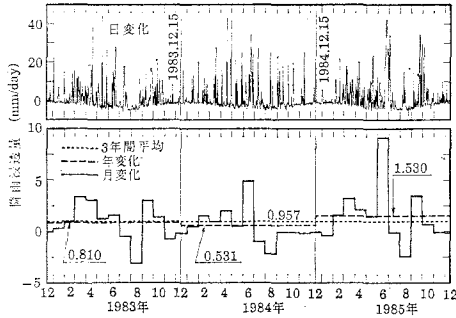


図-11 菊間における降雨浸透量経時変化図

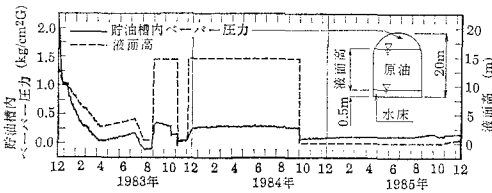


図-12 貯油槽内ペーパー圧力および液面高の経時変化

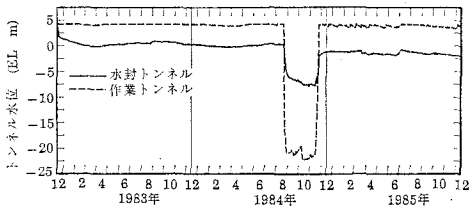


図-13 水封トンネルおよび作業トンネル水位の経時変化

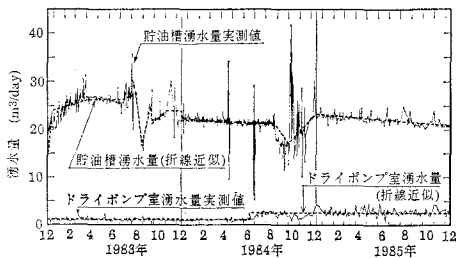


図-14 貯油槽およびドライポンプ室湧水量の経時変化

おり、貯油槽内ペーパー圧力と液面高を図-12 に示す。また、水封および作業トンネル水位を図-13 に示すが、1984年8月中旬～11月下旬まで極端な低下期間がある。これは、同期間中に図-9中の試験坑で実験用工事のための強制排水を行ったことに起因している。

貯油槽とドライポンプ室湧水量の測定結果を図-14に示す。いま、貯油槽湧水量に注目すると、激しい日変化も認められるが、これは貯油槽の水平断面積が大きいことから液面高の僅かな読み取り誤差に起因した測定誤差と判断されている。したがって、本量は図中の折線で近似できる。本変化傾向は、貯油槽内圧力や水封トンネル水位などの変動とよく対応しており、降雨浸透量の日

変化傾向にはほとんど関係しないようである。たとえば、1983年3月までは貯油槽内圧力の低下のため湧水量は増大するが、1984年8月～11月は水封トンネル水位などの低下で湧水量は減少している。

次に、観測ボーリング孔における地下水位変動の一例を図-15にまとめた。これらのボーリング孔水位の変化傾向は、複雑で画一的ではない。とりわけ、図-11の降雨に対する応答性状の違いに関する判断が難しい。したがって、研究地域の大局的な水位変動傾向を把握するため、調査期間途中で観測不能となったNo. 24孔を除く20孔の平均水位で変化傾向をまとめ、図-16に示す。同図中では、変化傾向を日変化、年変化および3年間変化で表現している。ここで、1984年8月～11月の水位低下は試験坑の工事の影響と判断されている。図-16によれば、平均水位の変化傾向は2つの成分に分けられそうである。第一の成分は、1年ごとの緩やかな変動であり、概観すれば調査2年目まではわずかな水位低下であるが、3年目は幾分上昇傾向をもつ。これは、図-11に示した降雨浸透量の年変化傾向によく対応しており、空洞湧水量と平均的な降雨浸透量のバランスに起因した現象と判断できる。一方、第二の成分は平均水位の季節変動傾向である。これは、図-11中の月変化のような短期間の降雨浸透量変化に強く影響を受けたものと推察できる。

(2) 水理定数の推定

地質調査結果を踏まえ、風化帯と岩盤の水理定数を推定する。計算に必要な水理定数は、飽和透水係数、比貯留量、不飽和浸透特性である。しかし比貯留量については、貯油槽内の圧力変動に対して大半の間隙水圧計が即

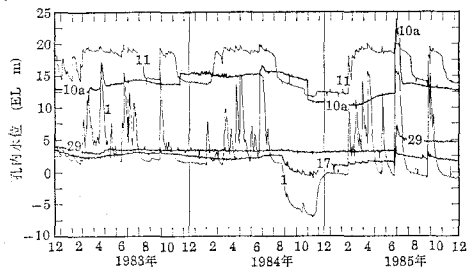


図-15 観測ボーリング孔水位の経時変化 (No. 1, 10a, 11, 17, 29)

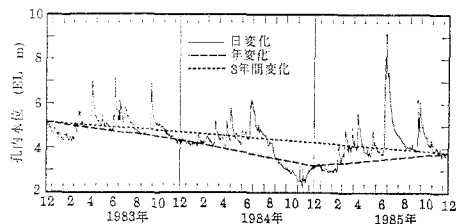


図-16 観測ボーリング孔平均水位の経時変化

座に応答することから、無視できるものと判断した。

飽和透水係数 (K_0) については、岩盤では空洞周辺の観測ボーリング孔などの全ルジオン試験結果を対数平均し、 $K_0=2.5 \times 10^{-6}$ m/s と推定した。これに対し、風化帯には透水試験結果がないため、岩盤中の高透水性部分の値を参考にして、 $K_0=5.0 \times 10^{-6}$ m/s と仮定した。また、不飽和の浸透特性には実測データがないため、図-17 の関係を仮定した。この関係の設定にも、駒田の推定法¹⁵⁾を参考とした。

これらの水理定数については、後述する飽和-不飽和の準三次元解析モデル (図-18) で予備検討を実施している。この結果、用いる水理定数はおおむね合理的であるが、地下水面と地表面の距離が大きいことから、図-17 の不飽和特性の影響は小さかったことを付記しておく。

(3) 飽和-不飽和の準三次元解析による検討

a) 解析条件

降雨浸透を考慮した条件下で、1982年12月16日から3年間にわたる非常常解析を行う。まず解析モデルとして、地表面と岩着面コンターおよび初期水面コンターを図-18に示す。解析領域は図-10、18に示す精査No.1孔の水位変化が小さいことから、貯油槽と精査No.1孔の距離を指標として決定した。また、図-18中の地山構造は、図-10の地質調査結果をモデル化したもので、下部の不透水層位置はEL -120mと設定

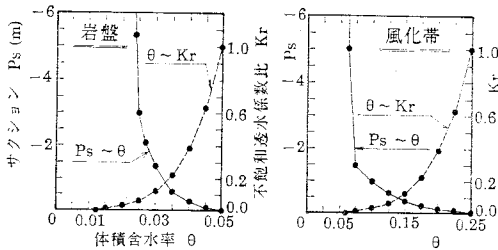


図-17 実証プラントの解析に用いる不飽和浸透特性

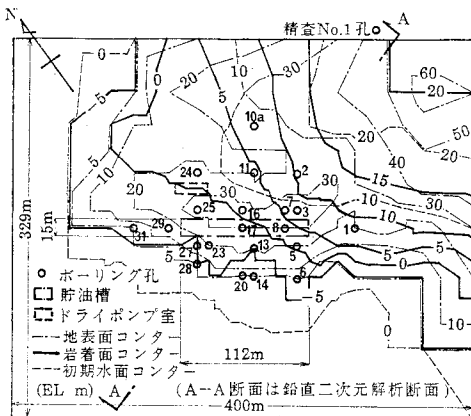


図-18 菊間実証プラントの準三次元解析モデル

し、風化帯と岩盤の水理定数には前述の(2)の推定結果を用いる。また、初期水面は後述する図-20の実測結果をモデル化し、解析領域周囲は境界上の初期水位を固定した。

残る入力項目は降雨浸透量と貯油槽およびドライポンプ室の湧水量であり、湧水量の入力は準三次元解析で考慮できない貯油槽内圧力や水封トンネル水位などを流量の形で評価したことを意味する。ここで入力する空洞湧水量は、図-14中の実測値の折線近似値を用いる。一方、降雨浸透量 (図-11) は、場所的な分布と時間依存性に関するモデル化が重要と考えられる。ここでは、図-11の降雨浸透量と図-16の平均水位変動傾向が対応していたことに注目し、降雨浸透量の時間依存性のみを焦点をあてて解析ケースを設定した。これを表-1に示す。表中のCASE-1~3は、図-11の下段のモデル化に一致し、またCASE-4は降雨浸透量の効果を他のケースと比較するため設定したものである。以上の条件下で、降雨浸透量と空洞湧水量の流量条件を同時に考慮するが、図-18に示す空洞上部とそれ以外の部分で、入力流量 Q_0 を次のように評価する。

$$\left. \begin{array}{l} \text{空洞上部} \quad Q_0 = i - \frac{Q_c}{A} \\ \text{空洞上部以外} \quad Q_0 = i \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Q_c : 貯油槽またはドライポンプ室の湧水量、 A : 空洞の水平断面積である。

表-1 降雨浸透量のモデル化と解析ケース

解析ケース	CASE-1	2	3	4
降雨浸透量のモデル化	3年間平均	年平均	月平均	0.0

b) 解析結果とその考察

まず、No. 24孔を除く観測ボーリング孔位置の平均水位に注目して、実測値と計算結果の比較を図-19に示す。調査期間中の平均水位低下量に注目すると、実測値は1.38m、CASE-1~4ではおおよそ0.34m、0.04m、0.88m、4.46mである。図-19によれば、降雨浸透量を無視したCASE-4は、他のケースおよび実測値と比較して水位低下量が大きく、降雨浸透量の効果を明かに把握できる。これに対して、1984年8月~11月の

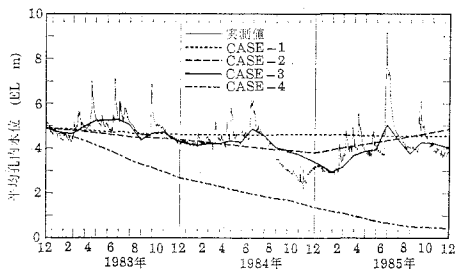


図-19 観測ボーリング平均水位の計算値と実測値の比較

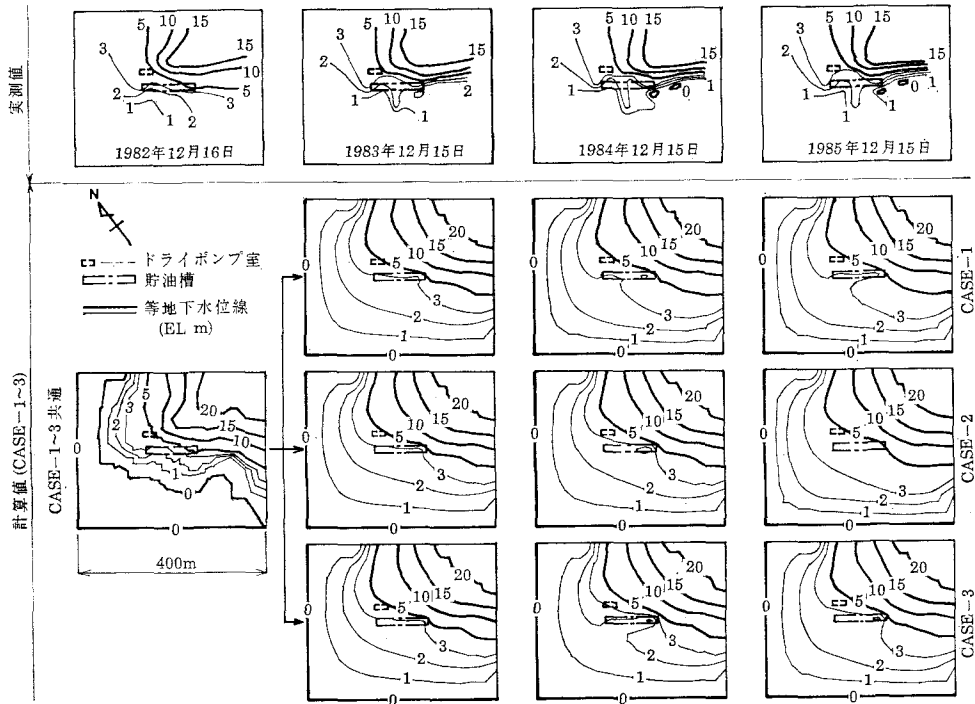


図-20 地下水位平面分布の推移状況に関する実測値と計算値の比較

実測水位低下が前述の工事の影響であることを考えると、CASE-1~3は実測結果とかなり対応するものと判断できる。すなわち、3年間平均降雨浸透量を入力したCASE-1では、平均水位が若干低下する傾向であり、年平均値を入力したCASE-2では2年間は降雨浸透量が少ないため水位低下傾向であるが、3年目は降雨浸透量が大きいため水位は上昇傾向を示す。これらCASE-1, 2は、降雨浸透量のマクロなモデル化に対応して、図-16の実測平均水位の3年間変化と年変化傾向を説明できている。また、月平均値を入力したCASE-3は、実測地下水位のピーク部分を別とすれば複雑な上昇・下降傾向を的確に追跡できており、季節変動も表現しているといえる。以上のような解析と観測の比較を通じて、準三次元解析では、実測された降雨浸透量のモデル化に応じた合理的な平均水位の変動傾向が、再現できるといえよう。

次に、地下水位平面分布の推移状況に関する実測値とCASE-1~3の計算結果の比較を図-20にまとめた。推移状況は別として平面分布について両者を比較すると、貯油槽上部およびドライポンプ室側(北東側)はある程度よい対応を示すが、地上タンク側(南西側)の合致性はよくない。この地上タンク側の不一致は、実際の降雨浸透量の場所依存性、岩盤のモデル化および水理定数の分布などが、解析モデル全体には正確に反映されていないためと考えられる。しかし、貯油槽近傍に限定する

と、CASE-1~3の計算結果は、降雨浸透量のモデル化で水面高が異なるものの、各ケースにおける平面分布および推移状況とも合理的な結果が得られている。すなわち、図-20の計算結果は必ずしも実測結果とは一致しないが、CASE-1~3の計算結果はおおの図-16の平均水位計算結果に関する変化傾向を定性的に示している。たとえば、CASE-2の結果は、2年後まで貯油槽近傍で水位が低下し、3年後は水位上昇結果が得られており、図-16の平均水位の年変化傾向と合致している。

次に、各観測孔の実測水位と計算水位に注目し、No. 13, 17, 31孔の比較例を図-21に示す。本図は、実測水位と計算水位が比較的一致した例であるため、局所的な変動傾向に対する解析の再現性を言及することは難し

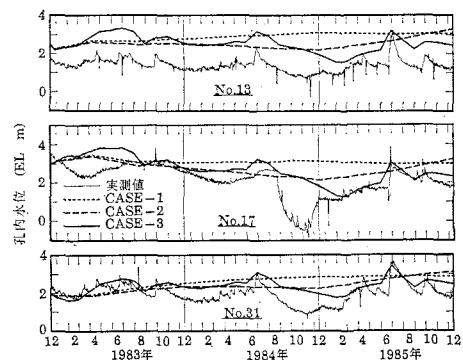


図-21 孔内水位計算値(準三次元解析)と実測値の比較

いが、図-20の結果も含めて類推すると準三次元解析に用いる解析モデルが現実にならば、再現精度も向上するものと推察される。

(4) 飽和-不飽和の鉛直二次元解析による検討

a) 解析条件

本解析では初期水位を与え、本時点で定常解析による初期水圧を求め、その後、非定常解析による断面地下水位変動と貯油槽湧水量を算出する。

図-22に示す解析モデルは、図-18中のA-A断面を対象としており、図-20の実際の地下水位平面分布から、地下水流が卓越する支配断面を選定したものである。この断面は貯油槽を斜めに切断するため、貯油槽の幅は18.66mであり、岩盤構造は調査結果をモデル化した。水理定数は準三次元解析と同様であり、図-22中の初期水面、側方境界位置の静水圧は実測値をモデル化したものである。また境界条件として、貯油槽内ペーパー圧力と液面高は図-12、水封および作業トンネル水位は図-13の各実測値を折線で近似して用いる。ここで、原油の比重は0.9である。また両トンネル水位は、人工水供給停止期間中でも周囲の自然地下水位とバランスした圧力が、既設の両トンネル位置で作用するものと考え、入力するものである。降雨浸透量については、本解析では3年間平均値 $i=0.957 \text{ mm/day}$ の1ケースを解析の対象とする。

b) 解析結果とその考察

図-22中のNo. 2, 7, 17, 28孔位置の3年間水位変動量に着目して、実測値と計算値を表-2に示す。表中、正值は水位上昇、負値は水位低下を意味する。本表によれば、図-22の貯油槽左側(No. 17, 28孔)では、計算水位は上昇しており、実測結果を説明できないが、これは初期水面と岩着面のモデル化の問題と考えられる。すなわち、地上タンクヤード側の計算水位が実測値より高い結果は、準三次元解析結果(図-20)でも認められた傾向である。これに対し、貯油槽右側のNo. 2, 7孔位置では、計算結果は実測結果とある程度対応しているようである。このような結果から、鉛直二次元解析による水位変動の再現性に関する判断は難しいが、実測水位変動量が小さい現象は、表現できているものと考えられる。

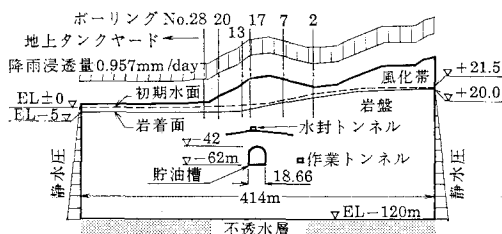


図-22 菊間実証プラントの鉛直二次元解析モデル

次に、計算で得られた貯油槽湧水量を、実測値およびその折線近似とともに図-23に示す。これによれば、計算湧水量は実測値と比較すると、全体的に大きい値となっている。しかし、実測結果そのものが、1982年以前の同条件下より3割以上減少しているようで、目詰まり等による岩盤の透水性の低下が原因したものと考えられている。たとえば、文献7)のFig. 5にも上記の目詰まり現象が説明されている。このため、計算湧水量が透水係数に比例することを念頭におけば、実測結果と計算値は定量的かつ定性的によく一致したものと判断できる。したがって、対象とした複雑な貯油槽の貯蔵条件下でも、非定常鉛直二次元解析で実測湧水量の経時変化傾向を追跡でき、本解析の有効性を示し得たものと考えられる。

表-2 3年間水位変動量の実測値と計算値の比較

ボーリング No.	2	7	17	28
実測値 (m)	-0.97	-0.83	-1.70	-0.27
鉛直二次元解析値 (m)	-3.27	-0.80	+3.30	+4.20

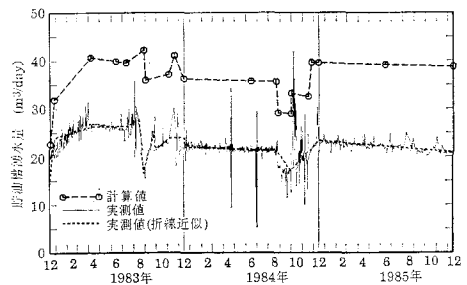


図-23 鉛直二次元解析による貯油槽湧水量と実測値の比較

5. 結 語

岩盤内構造物の建設にかかわる地下水挙動は、基本的には岩盤水理条件下における降雨浸透や構造物への湧水に起因した水収支問題と考えられる。この観点から、本研究では降雨浸透下の水文・地下水解析の確立を目指し、実測地下水挙動に注目した解析的アプローチを行った。本研究で得られた成果を要約すると、次のようになる。

(1) 花崗岩質の小島の地下水位シミュレーションで得られた降雨浸透量は、水文調査結果とよい一致をみた。このため実証プラントの検討結果も含めて判断すると、水収支計算に基づく降雨浸透量は地下水解析の入力条件として適用性があると結論づけられた。

(2) 菊間実証プラントの準三次元解析では、実測の降雨浸透量を時間依存性でモデル化し、地下水位の経時変化傾向を求めた。この結果、モデル化に応じた合理的な変動傾向が得られ、実現象を明快に説明できた。

(3) 同プラントの鉛直二次元解析では、降雨浸透下の地下水水位変動と貯油槽湧水量を算出した。これによれば、本解析の顕著な有効性は、複雑な境界条件下でも、実測湧水量の経時変化傾向を的確に追跡できる点であった。

(4) 準三次元解析は、複雑な岩盤水理定数の分布を加味した条件下で、広域の地下水挙動を簡単に解析でき、降雨浸透を考慮した検討に適するものと判断できた。

おわりに、本論文の執筆にあたり、菊間実証プラントの貴重なデータを提供して頂いた石油公団ならびに関係各位に感謝を表する次第である。また、同プラントの地下水解析の実施に多大の協力を頂いた清水建設(株)大崎研究室の吉田 順、福武毅芳の両氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 田中伸和・安芸周一：燃料地下タンクの技術開発に関する研究(その1)、電力中央研究所報告, No. 379006, 1979年7月。
- 2) 駒田広也・中川加明一郎・北原義浩・林 正夫：水封式燃料地下貯蔵用空洞周辺岩盤の浸透流に関する検討, 土木学会論文報告集, No. 300, pp. 69~80, 1980年8月。
- 3) Sato, K. and Iizawa, M.: Groundwater analysis of underground cavern by means of rock block model, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 4, pp. 30~44, Dec., 1982.
- 4) 佐藤邦明：岩盤地下空洞の湧水, 土木学会誌, pp. 69~75, 1983年3月。
- 5) 伊藤 洋・佐藤邦明・清水昭男：岩盤地下空洞の地下水に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 342, pp. 97~106, 1984年2月。
- 6) 百田博宣・楠本 太：多孔質地山の地下空洞を対象とし

た三次元地下水解析, 第29回水理講演会論文集, pp. 739~744, 1985年2月。

- 7) Kato, M.: On performance test of the first pilot plant in Japan for underground stockpiling of crude oil, J. Japan Petrol. Inst., Vol. 27, No. 3, pp. 179~187, May, 1984.
- 8) 宮下国一郎・青木謙治・花村哲也・田島孝也：岩盤内原油備蓄タンクの計測技術, 土木学会論文集, No. 355/VI-2, pp. 30~37, 1985年3月。
- 9) 百田博宣・嶋田 純・楠本 太：原位置実測データを用いた岩盤内地下水流の解析的検討, 第25回水理講演会論文集, pp. 391~397, 1981年2月。
- 10) 河野伊一郎・西垣 誠：有限要素法による広域地下水の準三次元解析, 岡山大学工学部土木工学教室 Report, No. 82-1, 1982年12月。
- 11) 百田博宣・佐藤邦明：割れ目系地山のトンネル・空洞を対象とした地下水の三次元挙動の解析, 土木学会論文集, No. 364/III-4, pp. 41~50, 1985年12月。
- 12) 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, pp. 47~53, 1983年9月。
- 13) 河野伊一郎・西垣 誠：不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 307, pp. 59~69, 1981年3月。
- 14) 西垣 誠：飽和・不飽和領域内の土中水の浸透特性に関する2, 3の考察, 土質工学会論文報告集, Vol. 23, No. 3, pp. 165~177, 1983年9月。
- 15) 駒田広也：飽和-不飽和土中の非定常浸透流解析, 電力中央研究所報告, No. 377015, 1978年2月。
- 16) 駒田広也・西岡利道・松尾和俊：高瀬ダム湛水過程の浸透流に関する実測値と解析値との比較検討, 土木学会論文報告集, No. 311, pp. 103~111, 1981年7月。
- 17) 前出12) : p. 75.
- 18) 百田博宣・吉田 順：涵養量を考慮した場合の空洞掘削による地下水水位変動の検討, 土木学会第40回年次講演会, pp. 731~732, 1985年9月。

(1986.7.10・受付)

●土木学会創立70周年記念出版● 一般社会への土木PRとこれから土木を学ぶ学生のためのシリーズ

グラフィックス・くらしと土木〈全8巻〉

1. 国づくりのあゆみ	B 5・148 頁	高 橋 裕 編	2 500 円
2. 山と川と海	B 5・102 頁	中 川 博 次 編	2 300 円
3. 交 通	B 5・106 頁	加 藤 晃 編	2 300 円
4. エネルギー	B 5・108 頁	千 秋 信 一 編	2 300 円
5. トンネル	B 5・96 頁	野 口 功 編	2 300 円
6. 橋	B 5・98 頁	伊 藤 学 編	2 300 円
7. ダ ム	B 5・100 頁	藤 井 敏 夫 編	2 300 円
8. 都 市	B 5・94 頁	樋 口 忠 彦 編	2 300 円

全巻定価 18 600 円のところ会員特価 17 000 円(送とも)でお届けしております。お申込みは土木学会へどうぞ(一般書店経由の場合は定価となります)