

地下空洞の水理解析へのアプローチ

Approaches to hydraulic analysis for underground cavern

佐 藤 邦 明*

はじめに

地下発電所は従来我が国で多数作られてきたが、昨今では石油・液化ガスなど、燃料地下貯蔵のための空洞も建設されつつあり、トンネルも含めた地下空洞の合理的な調査法や水理・水文解析法の開発・確立が望まれている。これらの土木構造物は岩盤地山を対象とすることが多く、工事中、および建設後の湧水、地下水挙動、更に広域的な地下水環境への影響など、広範な岩盤地下水の問題を含むが、これらは広く岩盤の力学的な性質とも深く係り合うものである。

従来、このような岩盤地下水の諸問題に対し、現場調査・研究成果は少ないとはいえず、古典的な地下水運動論や経験的方法の適用によって現場への対応がなされ、更に、近年では電算機の普及もあって、地下水数値シミュレーション手法や高度な水理解析法が岩盤地下水の計算にも応用・適用されるようになり、計算自体の精度・速度は飛躍的に進展している^{1),2),3)}。しかし、沖積地盤における地下水と違って、岩盤中の地下水挙動は元来潜在的な地形・地質要素・岩盤の異方性、断層・割れ目系に強く支配されるため、水理モデル化、水理・地質境界条件の設定、水理定数の決定に固有の経験・知見を要するとされ、解析手法・手順にも工夫を要するのが現状である。

本論は岩盤地下空洞を前提にして、地下水理解析を進めるに際し、地下水収支、空洞周辺の地下水流の性質、および岩盤地下水流のモデル化と境界条件・水理定数に注目して基本事項と問題点を最近の新しい成果を踏まえて、述べたものである。

1. 地下水収支と空洞

現状では地下発電所にしても燃料貯蔵地下空洞にしても陸上地山に作られている。これら土木構造物の建設・施工に際し、水理・水文的な問題として、次の二つに分けて考えることができる。一つは施工・工事自体に係ってある期間に生じる空洞湧水や水圧のごとき、比較的局所的な技術的色彩の強い問題であり、他は工事や建設に伴うかなり広域的な地下水環境の変化である。

まず、前者については、工事中に不測の多量湧水があっ

たり、水圧による空洞の異常変位・水圧、あるいは緩みが生じると現場では施工上支障がある。これは特に空洞周辺の断層・割れ水のような非常に局所的な帯水に起因することが多く、直接施工技术の問題に結びつき、掘削工法自体の工夫やグラウト、水抜きなどの補助工法も併用して対処することになる。したがって、こういった場合、ボーリング・試掘などによる現地調査と同時に空洞を含む鉛直断面内二次元（あるいは三次元）地下水流解析を試み、事前に空洞周辺の地下水の動きを予測しておく必要がある。

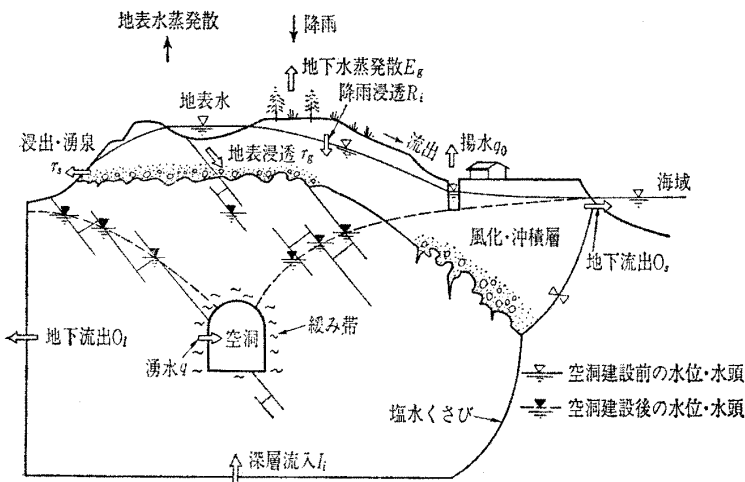
一方、後者の問題についてであるが、周知のように巨視的に地下空洞はトンネルのように線状構造物ではなく、むしろ拠点的なものである。従来の空洞は地表下相当深く設けられ、施工・工事期間も数年に及び、また空洞自体に流入する水のほかに一種の地下水低下工法を併用して、地山地下水を抜き取ることもある。したがって、工事中と構造物完成後に地下深部から相当量の水を抜き取ることがあると考え、その影響は広範に及ぶと想定し、いわゆる広域地下水環境の変化と影響を的確に予測し得る地下水収支・水理解析を行っておく必要がある。

上述した局所的地下水流動も広域地下水環境の変化問題も、いずれも地表水と地下水を不可分一体として捕え、水収支解析、水理解析の両面より検討しておくことが肝心である。その場合、どういった解析をするにしても、まず巨視的に見た水収支の検討が要となる。

いま、水収支の考え方を明確にするため、図-1に示したような場合を想定して話を進めることとしよう。図中の地山は大別して、風化土・沖積層が上部に堆積し、下部は空洞がある岩盤であり、海域に面し、地下塩水くさびがある。この場合、一応二水系、つまり、一つは風化土・沖積地下水系、他は岩盤地下水系に分けられる。いうまでもなく、前者は降雨や地表水の影響を受けやすく、季節的にも場所的にも変動があつて、水理的に見ると地盤中の地下水にある程度の連続性があると考えてよい。しかし、空洞を含む深層岩盤で断層・割れ目系の水は地表の影響を受けにくく、かつ静穏的で、岩盤中の水頭分布は連続性に乏しく、局所性が強いと考えるのが一般的である。

もし、風化土・沖積地盤および岩盤地山が飽和していると仮定すると、全帯水層の水収支式は、

*埼玉大学助教授 工学部



図一 鉛直断面内地下水収支概念図

$$\frac{dS_t}{dt} = (I_i + R_i + r_q) - (r_s + O_i + q_0 + O_s + E_g + q) \dots\dots\dots(1)$$

となる。ここで、 S_t : 全貯留量, I_i : 深層流入量, R_i : 降雨浸透量, r_q : 地表浸透量, r_s : 浸出・湧泉量, O_i , O_s : それぞれ陸側, 海域への地下流出量, q_0 : 揚水量, E_g : 地下蒸発散量, q : 空洞湧水量である。

式(1)は、通常に $dS_t/dt > 0$: 貯留, $dS_t/dt = 0$: 平衡, $dS_t/dt < 0$: 枯渇, のいずれかの状態にあり、自然状態では長期的に見ると $dS_t/dt = 0$ と考えられ、空洞建設に伴って、ある期間 $dS_t/dt < 0$ となり、やがて別の人為的平衡状態が新たに作られるはずである(図中、点線に対応)。

上述の鉛直断面内地下水収支と同じく、便宜上別に平面的な水収支が当然考えられるが、基本的な考え方は同様である。

結果的に、このような水収支算法において、 $dS_t/dt < 0$ の状態をどこまで認めるかと、各量をどうして見積もるかが問題の要となる。実際には式(1)の各量で支配的なもののみを残し得るように、境界条件の採り方を工夫しつつ、調査を進め、後述する地下水解析や地下水シミュレーションの結果をも勘案して、予測精度の向上や大過の防止に役立てている。

2. 空洞周辺地下水流の一般的性質

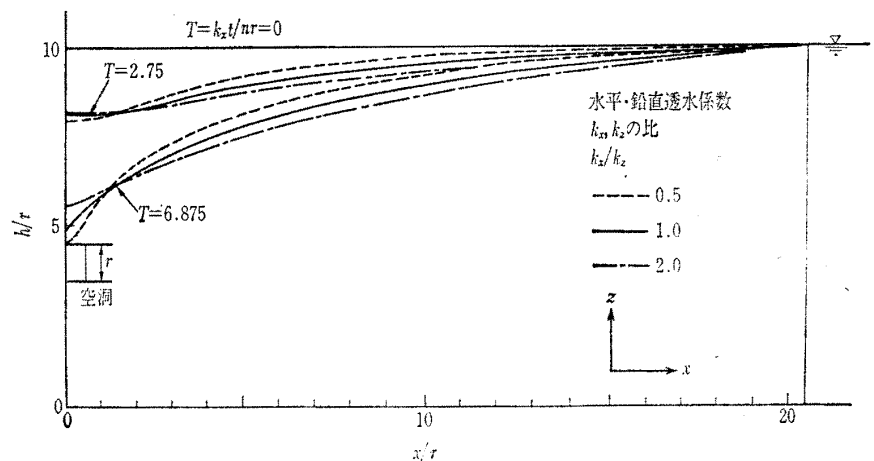
地盤水理学的通念からすると、陸上地山に空洞を設けた場合、自由表面、湧水量の経時変化、特に湧水ハイドログラフのてい減に特色がある。地下水流の自由表面の解釈については次の二つの場合が考えられる。論点を絞りやすくするため、図一の地山に再び注目しよう。上述し

たように、この場合は風化土・沖積地盤と空洞のある岩盤の二つの地下水系があるが、岩盤地山の透水性が風化土・沖積地盤のそれに比べて小さく、空洞湧水量も大きくなければ、降雨浸透量とつり合って自由表面は風化土・沖積地盤の中に形成され、岩盤地山中には自由表面はないことになる。一方、岩盤地山の透水性が風化土・沖積地盤のそれと大差なく、降雨浸透量より浸透量が大きいと、図中の点線水頭分布のように、自由表面は岩盤地山中に形成されることになる。これら二つの自由表面の違いは降雨浸透量を含めた地表からの地下水自然かん(涵)養量と風化土・沖積地盤の規模・帯水能に関係するから、地下水自然かん養量をどう評価するかは空洞周辺の地下水流の性質を議論しようとする際、基本的に重要なことなのである。

そこで、ここでは地下水自然かん養を無視し得る場合、つまり、岩盤地山内に自由表面が形成される流れ、および無視できない場合、すなわち、風化土・沖積地盤中に自由表面がある流れを考え、それらの基本的性質について、ヘル・ショウ実験と水理解析結果を中心に述べる^{4),5)}。

まず、流れの場、境界条件を単純化して、水平一様不圧帯水層中に空洞を設けた場合に注目し、非定常水面形の変化と湧水量経時変化を明らかにしよう。

図二は境界水位を一定に保ち(左右対称)水平帯水層の中央に正方形空洞を設けた直後の自由水面形の非定常変化を示したものである。図中、 r : 空洞一辺の長さ, h : ピエゾメーター水位, x, z : それぞれ水平, 鉛直座標, k_x, k_z : それぞれ x, z 軸方向の透水係数, t : 時間, n : 空隙率である。図中の水面形は地下水の基礎式、自由表面条件、および境界条件(後述式(6)のFDM法による)を用い、ヘル・ショウ実験により検証された結果であり、地盤の異方性を表す水平・鉛直透水係数比 $k_x/k_z = 0.5, 1.0, 2.0$ の3ケースをパラメーターとして無次元時間 $T = k_z t / nr$ によって同時に示している。図中の3ケースについて、空洞



図二 空洞周辺の非定常水面形(FDM計算による)

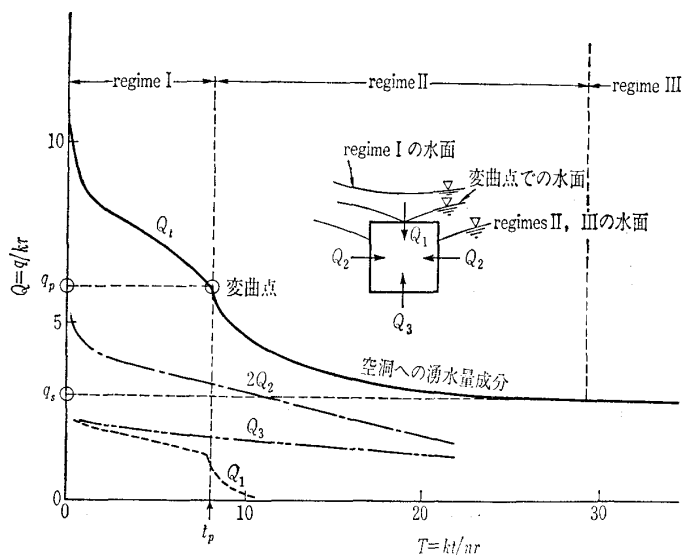


図-3 空洞への湧水成分と湧水ハイドログラフ (図-2中 $k_x=k_z$ の時)

が掘られると同時に、地下水は徐々に全体に低下し、 $k_x/k_z=0.5$ の場合が空洞直上水位低下は最も早く、 $k_x/k_z=2.0$ の場合が最も遅いことが分かる。また、水面形状自体に注目すると、 $k_x/k_z=2.0$ の場合が最も水面勾配 dh/dx の変化が小さく、なめらかとなっている。つまり、一般論として、自由水面の経時変化速度は水平方向の透水係数 k_x より鉛直透水係数 k_z が支配的な影響をもち、少なくとも空洞直上周辺の水位低下は空洞への鉛直湧水による。つまり、空洞掘削とともにまず空洞直上周辺の地下水が空洞に流入し、その後水平遠方からの流入がそれを補う形で流動するわけである。

このことをもう少し分かりやすくするため、図-2中の $k_x/k_z=1.0$ の場合に着目し、湧水機構と湧水ハイドログラフの形状を計算したものが図-3である。図中には全湧水量（無次元量であり、縦軸 q/kr 、横軸 kt/nr 、 q ：単位幅流量） Q_t 、空洞直上下向き鉛直湧水成分 Q_1 、水平湧水成分 Q_2 、および空洞直下上向き鉛直湧水成分 Q_3 、それぞれを分離したものが湧水ハイドログラフとして示されている。したがって、 $Q_t=Q_1+2Q_2+Q_3$ が成り立つ。この計算湧水ハイドログラフから分かるように、湧水機構に興味深い特徴が見られる。まず、湧水ハイドログラフのてい減に関し、二つの傾向の違ったてい減曲線があること。次に、てい減部に変曲点（今の場合、 $T=8$ ）が存在し、この点を挟んで指数関数的に湧水量が経時変化することである。この理由は湧水量成分ハイドログラフから分かるが、空洞直上下向き鉛直湧水成分 Q_1 の経時変化に起因するものであり、図中に概念的に示したように、水面が空洞の直上に到達するまでと到達してからの Q_1 の経時変化に関係する。同様の湧水ハイドログラフの変曲点は

三次元的に見るとトンネル切羽がある場合にも生じることが分かっている。

通常、空洞にしてもトンネルにしても現場工事は決してこの計算のように一時に掘削が完了するわけではないので、現地湧水量の測定ではこのような変曲点が明りょうに現われるとは限らないが、湧水現象の一つの特色であることは確かである。現場ではこういった湧水ハイドログラフの基本的性質を踏まえて、指数関数でてい減式、

$$q = A \exp(-at) + q_s \dots \dots \dots (2)$$

によって、湧水量 q と時間 t の関係を予測するとよい。ここで、 A 、 a ：定数、 q_s ：恒常湧水量である。

図-3には上述した湧水特性から、一応三つの湧水特性 regime I（変曲点までの時間 t_p に対応した湧水量 q_p ）、regime II（変曲点から $t \rightarrow \infty$ で q_s に到る間）、regime III（恒常湧水量 $q_s=$ 一定となる間）と分けてある。なお式(2)が regimes I、IIの間で定数 A 、 a は異なるが指数関数式でよく近似できることは室内実験、理論、および現場で確認されている。上越新幹線榛名トンネルの抗内現場実測では、regime IIで全工区で $A=24.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 、 $a=0.158$ 、 $q_s=61 \text{ m}^3/\text{min}$ とすると、相関係数 0.96 の一致で式(2)が成り立っている⁶⁾。

次に、上述した風化土・沖積地盤中に自由地下水面がある場合について、基礎的な湧水量の経時変化の性質を調べよう。

いま、図-4に示したように、風化土・沖積層の厚さ20m、岩盤厚さ123mの水平地山に縦横18×15mの空洞を設けた場合を考える。風化土・沖積層中には岩盤上10mに自由水面が一定で存在し、岩盤上面 $z=0$ での水平・鉛直透

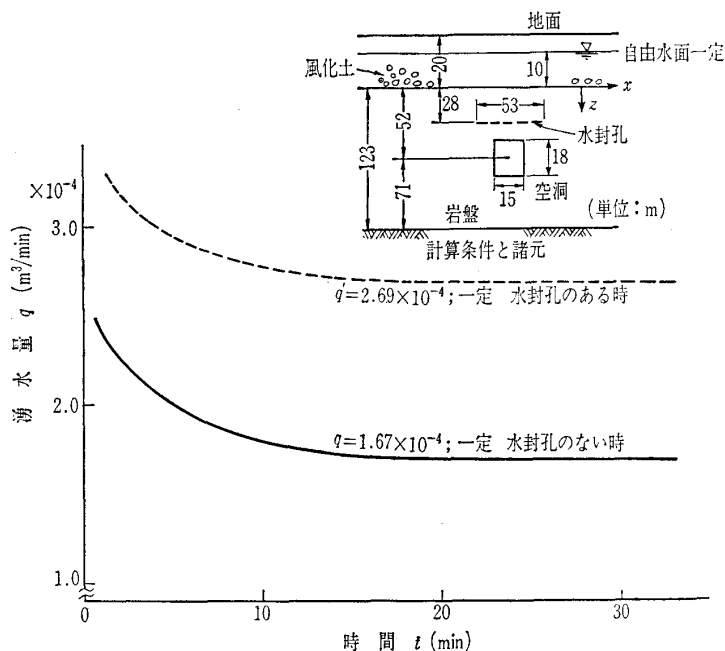


図-4 地下空洞への湧水量の経時変化（空洞内圧力水頭は大気圧のそれより -5m 低く、水封孔内水頭は自由表面より 5m 高い場合）

水係数 $k_{x_0} = 2.98 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $k_{z_0} = 3.22 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ であり、後述する岩ブロックモデルより、立方岩ブロック寸法 1 m, 均等割れ目幅 $1.51 \times 10^{-5} \text{ m}$ として計算している⁷⁾。縦軸は単位幅湧水量 $q (\text{m}^3/\text{min})$ であり、横軸は時間 $t (\text{min})$ ととり、燃料貯蔵のための地下空洞の場合も勘案し、空洞直上に水封孔を設けた場合と設けない場合について、湧水量の経時変化が示されている。このように風化土・沖積地盤中に一定水位の自由表面があるようなとき(あるいは海底トンネルも含め)、空洞のある岩盤地山は一種の被圧状態と見られるから、空洞掘削と同時に湧水が始まり、岩盤地山中の割れ目間隙水圧は空洞内の圧力水頭(今の場合、大気圧より -5 m)に従って、徐々に空洞周辺に低下・拡大しつつ減少する。したがって、湧水量の経時変化は図-3 に示したものと違い、短時間(図中 $t = 20 \text{ min}$) に定常となってしまう、いわゆる湧水量経時変化に伴う非定常性は弱く、早期に恒常湧水に至ることが分かる。このことは水封孔から水を供給した場合(孔内圧力は自由表面 + 5 m) でも同じである。このようなことから、従来、海底トンネル湧水の予測には定常流理解析が専らなされた理由が明快に説明されるのである。

3. 岩盤地下水流のモデル化と境界条件・水理定数

従来、沖積地盤を対象とした水理解析・計算例は少なくとも岩盤地山のそれに比べれば、多くの適用・応用例があり、進んでいるが、岩盤の場合は流れの場となる断層・割れ目系が複雑で、かつ異方性に富むため流れのモデル化に研究の余地がある。しかし、水理現象として、本質的には運動・連続方程式を境界条件のもとで解く方向で問題は解決できるはずである。

岩盤地下水流の水理モデルの導入に当たって、少なくとも、1) 岩盤中の断層・割れ目系の分布、脈絡、規模、2) 岩自体と割れ目系の間隙水圧変化に伴う変形・圧縮性、3) 帯水層として被圧・不被圧、部分帯水の程度、の三つは固有のものとして念頭におく必要がある。従来の水理モデルの多くは上述三つの事柄を空間的にも時間的にも平均化して、運動方程式として Darcy (ダルシー) 則を用い、連続方程式と組み合わせ、所要の境界条件のもとで解く方向を採り、水理定数によって水理モデルと実際現象との対応づけを行うものである。

図-5 は岩盤水理モデルの基本となるものを概念的に示したものである。図中(a)は平行間隙モデルと呼ばれ、最も直観的で単純なものであり、岩盤中の割れ目系を一つの平行間隙中の粘性流と類似されるモデルである。特に、抵抗則に力点を置いた水理モデルで透水係数 k は、

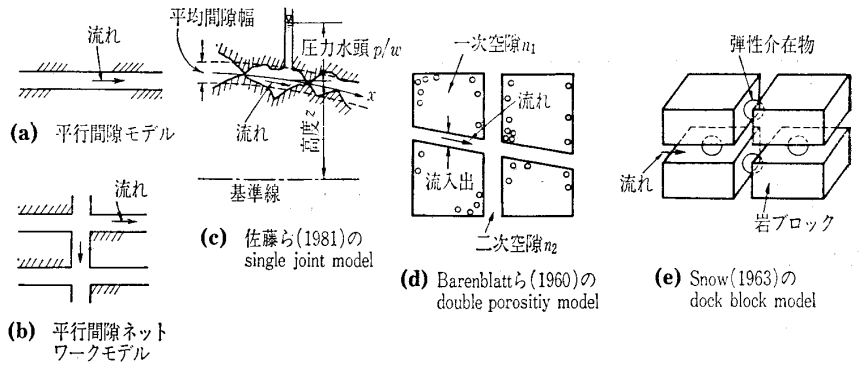


図-5 岩盤浸透流の水理概念モデル

$$k = \frac{C}{\nu} g d^2 \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここで、 C : 定数、 ν : 水の動粘性係数、 g : 重力加速度、 d : 間隙幅である。

式(3)から、単純な岩盤地下水流では動水勾配が分かると、流速や流量が算定できる。次に、図中(b)のように、平行間隙モデルを一組のネットワークに組み立てると、少し発展させた水理モデルとなり、基本方程式は Darcy 則と連続式から式(6)と同形の支配方程式が得られる(後述)。

次に、図中(c)は佐藤ら(1981)⁹⁾ によって提案されたもので、単一断層・割れ目モデル(single joint model)と名づけられ、単一割れ目に注目して、壁面凹凸の各接点(場合によっては破碎岩)の弾性変形と水の圧縮性を考慮した水理モデルである。支配方程式は一次元流れとして、水の運動方程式と連続式から、

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = S_s \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{g}{k} \frac{\partial h}{\partial t} \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで、 h : ピエゾメーター水頭 ($= p/\rho g + z$, p : 水圧, z : 高度), $S_s = 1/(\alpha + \beta)\rho$, ρ : 水の密度, α, β : それぞれ水と割れ目の圧縮率, x : 流れに沿う座標, t : 時間である。

式(4)で特に慣性項 $\partial^2 h/\partial t^2 = 0$ とおくと、通常の多孔体中の一次元流れにおける Boussinesq (ブーシネスク) の式と呼ばれるものである。式(4)は比較的大きい節理や石灰岩中の連結空洞に適用され得る。

図中(d)は Barenblatt (バーレンブラット) ら(1960)⁹⁾ によって提唱されたもので、二重空隙モデル(double porosity model)と呼ばれ、割れ目の発達した砂岩質の岩盤浸透流に適用できるといわれている。周知のように、元来岩盤はその生成後、何らかの外的、内的な力学・化学・熱作用を受けて断層・割れ目系・空洞が形成されているから、岩盤質中に本来含まれている一次空隙(primary porosity) n_1 と外的・内的作用により作られた二次空隙(secondary porosity) n_2 とに流れの場は分解して考えてもよい。大部分の岩盤で $n_1 > n_2$ であることが知られ、二次空隙中の浸透流速 v_2 、一次空隙中のそれを v_1 とすると、 $v_1 < v_2$ なの

である。 $n_1 > n_2$, $v_1 < v_2$ であることから別に一次空隙系を貯留系空隙, 二次空隙系を流路系空隙と呼ぶことができる。double porosity model による流れの支配方程式は Darcy 則と連続式をそれぞれ一・二次空隙系に別々に立てて

$$\mathbf{V}_i = -\frac{k_i}{\mu} \text{grad } p_i, \quad \frac{\partial}{\partial t}(n_i \rho) + \text{div } \rho \mathbf{V}_i \pm q = 0 \dots (5)$$

を同時に解くこととなる。ここで, \mathbf{V} : 流速ベクトル, μ : 粘性係数, q : 一・二次空隙系相互の交換流量, p : 水圧, $i=1, 2$ であり, それぞれ一・二次空隙系の諸量を表す。式(5)中, $\mathbf{V}_1 = n_1 = 0$ なら流れは二次空隙系においてのみ生じ, 通常多孔体中の流れと同じである。Barenblatt らや Warren (ワーレン) ら (1963)¹⁰⁾ は式(5)を変形して実際の流れの解析に応用している。

次に, 図中(e)は Snow (スノウ) (1963)¹¹⁾ によって導入された岩ブロックモデル (rock block model) と呼ばれ, 堅岩・硬質岩盤が破碎され, 帯水している岩盤では間隙水圧の変動 (例えば, 地震, 空洞掘削, 揚水など) に呼応して岩質自体, 割れ目系の壁面凹凸の接触部 (図-3(c)参照), および水の圧縮変形が生じ, 割れ目呼吸 (fracture breathing) 現象が現れる。硬質岩盤中の流れや圧力変動を考える場合, 岩質, 割れ目系, および水の圧縮率を考慮するため, 岩ブロック間に弾性介在物 (Snow は弾性球を導入し, 飯沢・佐藤は弾性柱を用いた) を設定して, 間隙水圧変動による割れ目の変位をモデル化したのが特色である。支配方程式は Darcy 則と連続式を用い,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \dots (6)$$

となる。ここで, S_s : 広義の比貯留量である。

この比貯留量の類似の概念は沖積地盤の被圧帯水層における Jacob (ヤコブ) のものがあるが, 岩盤の水理モデルでは S_s は空隙率, 岩質, 割れ目中の介在物の弾性係数, 岩塊ブロック寸法, 割れ目幅, 水の密度, 岩質のポアソン比に関係する量である。式(6)中 x, z 軸方向透水係数 k_x, k_z は通常岩盤地山では深度とともに減少するもので, 地山水平側方変位を固定すれば, k_x の鉛直下方向の減少は, 300m 下位で 2 けたオーダーが変わることがある。

飯沢・佐藤はこれら透水係数の減少を岩ブロックモデルにより理論的に解析し, 現場ルジオン試験結果と比較・検討し, 理論結果の有効性を認めた。

上述したように, 岩盤浸透流の水理モデルを単純なものから徐々に複雑なものへと発展させてゆくと, 流れに係る定数やパラメーターの数が増し, 実際にはそれらを合理的に決定するための岩盤試験の種類や精度が要求されるという事に帰結する。

水理解析や岩盤地下水シミュレーションを上述のように水理モデルによって進めようとする, 境界条件と水理定数・パラメーターの適切な選定・決定が不可欠である。境界条件の設定に当たって, 岩盤地下水が沖積地盤のそれに

比べて特に難しい点は, 1) 流れの場の被圧・不被圧の程度の判断と空間構造の把握, 2) 水理・水文的境界条件と地質境界条件の設定, である。まず, 1) について, 流れの場が被圧性が強い, 不被圧性が支配的であるかによって, 水理モデルの支配方程式中の係数・パラメーター, 例えば, 式(6)に含まれる比貯留量 S_s は不被圧の場合 $10^{-1} \sim 10^{-2}/\text{m}$ から¹²⁾, 被圧の $10^{-4} \sim 10^{-7}/\text{m}$ と大きく違ってくることになる。実際の岩盤水理解析では広い範囲をとり得る係数・パラメーターを被圧か不被圧のいずれか支配的なもののほかに併せて, 平均化した値を分布させて採用することになる。次に, 地山の空間構造の把握については水理地盤モデル自体の構造を支配することに結びつく。

上述2)の境界条件に関して, 一つは水理・水文境界条件であり, 他は地質境界条件に分かれるが, 両者は必ずしも一致しないと考えるのが一般的である。いうまでもないが, 水理・水文境界条件は水理モデルの具体的な解析・計算の入力条件として不可欠であり, 地質境界条件は水理モデルの作定に大いに関係をもってくる。

いま, 図-1を参照して水理境界条件を抽出すると, a) 地表下自由表面, b) 塩水くさびの界面条件, c) 陸側地下水位・水頭条件, d) 空洞下深部境界条件, e) 空洞内浸出面と圧力条件, ということになる。一般的に, これら諸条件は水位・水頭 (圧力) と境界流速で与えることとなるが, 多くの場合, 前者だけを用いるよう工夫して計算を進めている。

元来, 上述した1), 2)の流れの場や境界条件は水理定数 (有効空隙率, 貯留係数 (あるいは比貯留量), 透水係数 (あるいは透水量係数) とは一応切り離して考えるべき性格のものであるが, 実際の現地地下水解析や地下水シミュレーションを実施した結果をよく検討してみると, 地層・岩盤モデルや水理モデル自体の構築の仕方, 境界条件にも水理定数の決定数値が関係していることがしばしばある。つまり, 水理定数そのものは岩盤試験や現地試験 (例えば, ルジオン試験, 揚水試験) によって, 決定すべきものであるが, 実際にこれら諸試験の結果を用いて計算を実施しても, 観測・実測結果 (例えば, 実測水位・水頭変化) と整合しないことが多く, 地山全体の平均値として水理定数を修正して用いることとなる。水理定数そのものは実際現象とそのモデルの間の不一致を整合・修正する役割をもっているから, モデル自体や境界条件の決定・構築に不備があったとしても, 実際の観測・測定とモデル計算結果を一致させるように水理定数を決定することは計算上可能である。このことから単に水理定数を得るための諸試験の精度の議論にとどまらず, むしろモデル自体や境界条件の決定と水理定数は表裏一体として考えたいものである。

地下空洞の水理解析・地下水シミュレーションの解析手順は, 通常, 沖積地盤を対象に従来実施されたものと大差ないが¹³⁾, ただ空洞工事中と完成後に予測結果は必ずその

適否が判定されることとなる。したがって、多くの場合、空洞建設の進行に伴って現場実測を並行して進め、予測結果を修正しつつ事後に資するよう努めなければなるまい。特に、燃料貯蔵のための地下空洞などでは完成後の操業・運転に係る地下水管理が要求されることとなるから、地下水の常時の動態観測とともに解析結果が活用されるよう結果を整備・マニュアル化しておくことが大切である。

むすび

空洞やトンネルに係る工学上の問題は岩盤力学、トンネル工学、土質工学、水理・水文学、応用地質・地形学、地盤調査法といった多分野の技術・知識を集約・総合したものの中で解決されるものと思われるが、本論は地下空洞に対し、水理・水文的諸問題へ水理的にどうアプローチするかについてまとめたものである。岩盤地下水流の水理的取扱いはまだ緒についたばかりの感があり、今後研究の余地があるが、空洞水理現象の基本的な事柄を究明しつつ、どういった水理モデルが岩盤と水の共存場の力学として最適かを明確にすると同時に、水理解析・岩盤地下水シミュレーションの精度と信頼性のレベル評価法を現場諸試験の可能な範囲で明らかにすべきであり、現地試験法の開発や観測・計測法の改良も併せて大切である。

最後に、本論の水理解析に伴う計算作業に当たって、電源開発株式会社、飯沢雅人氏に労を煩わした。記してお礼申し上げる。

参考文献・資料

- 1) 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の技術開発に関する研究(その2)，電力中研報告，1979. 4.
- 2) 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)，電力中研報告，1979. 7.
- 3) 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回土木学会水講演文集，1981. 2.
- 4) 飯沢雅人・佐藤邦明：地下空洞の非定常湧水に関する実験と解析，第35回土木学会年講，1980. 9.
- 5) 飯沢雅人：岩盤空洞周辺の地下水流に関する研究，埼玉大修士論文，1981. 2.
- 6) 国土開発技術センター：上越新幹線ずい道掘削に伴う地下水等の調査研究報告書(資料編)，1980. 3.
- 7) 飯沢雅人・佐藤邦明：透水係数の動的変化を考慮した岩盤浸透流の解析，第25回土木学会水講演文集，1981. 2.
- 8) 佐藤邦明・飯沢雅人：岩盤浸透流の支配方程式とその性質，第25回土木学会水講演文集，1981. 2.
- 9) Barenblatt, G.I. et al: Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks, PMM. Vol. 24, No. 5, 1960.
- 10) Warren, J.E. and P.J. Root: The behavior of naturally fractured reservoirs, Soc. Eng. J. 1963. 9.
- 11) Snow, D.T.: Fracture deformation and change of permeability and storage upon changes of fluid pressure, Qual. Colorado School Mines, Vol. 63, No. 1, 1963. 1.
- 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，1978. 9.
- 13) 佐藤邦明：広域地下水の観測・管理システムに関する技術的検討，土木学会誌，1980.

(原稿受理 1981. 4. 6)

書籍紹介

「新しい国土の創造」—沖合人工島構想—

編集：運輸省 大臣官房・船舶局・港湾局
(社)経済団体連合会海洋開発推進委員会
(社)鋼材倶楽部

海上に人工島を建設し、新たな産業空間・生活空間を創設することは、四面を海に囲まれた我が国にとって、長年の夢でありました。本書は、西暦2000年における我が国のエネルギー、食料等の重要課題の需要予測を行い、今後必要とされる広大な用地を確保するために既存国土から相当距離離れた外海の沖合に人工島を建設することを提案しています。

沖合人工島に関する調査は、運輸省、経団連、鋼材倶楽部の官民一体で進められており、本書は55年度までの研究成果が取りまとめたものです。

本書は次の4編から構成されています。

第1編 西暦2000年における我が国のエネルギー・食糧・リサイクル

第2編 沖合人工島による新しい国土の創造

第3編 沖合石炭エネルギー基地構想

第4編 沖合人工島構想の実現をめざして

本書の内容は、膨大な資料、データーをもとに近い将来我が国の海注開発事業の柱となる沖合人工島建設プロジェクトの全貌が明らかにされています。特に沖合海域における防波堤、護岸等の海洋土木技術を初め出力300万kWの浮体式による石炭火力発電プラントや容量40万tの貯炭船の将来展望まで述べられています。

沖合人工島建設プロジェクトは、社会的コンセンサスを果たしたナショナルプロジェクトとして全産業が一致協力して取り組む必要性が強調されており、実現化をめざして大規模な技術開発を実施する必要があります。

最後に、今後の技術開発課題とその推進方策が詳述されており、国土開発、海洋開発に携わっておられる方々の参考の書として活用されることと思われます。(岡村秀夫記)

B5判 222ページ

定価 8,000円 昭和56年11月1日発行

発売元 丸善(株) 03-763-2251