

貯液用連設地下空洞周辺の地下水流の性質

Flow characteristics of groundwater around underground liquid storage

佐 藤 邦 明*

はじめに

諸外国では石油・液化ガスなど燃料の貯蔵のため、岩盤中に地下空洞が多く建設されている。これらはしばしば一地点に複数建設され、必要な貯蔵量を確保している¹⁾。我が国でもオイルショック後、石油備蓄法(昭和51年12月公布)に基づいて、貯油方式の一つとして岩盤地下備蓄が注目され、特に北欧の実績や技術に学びつつ、本邦で初めて菊間実証プラントが完成している²⁾。これは水封方式と呼ばれる岩盤空洞による貯油方法であるが、空洞の力学的安定性とともな岩盤中の地下水収支・挙動、ゆう水量など、いわゆる地下水現象が本方式のかなめとなる。

従来の地下発電所空洞のように掘削時も完成後も地下水の存在を否定するわけではなく、水封式貯液空洞の場合は適量の地下水が必要であり、貯蔵液体の漏えい防止、漏気や安定封入に地下水とそのゆう水圧は不可欠である。貯蔵液体が原油、軽油、ナフサなど、いわゆる油類の場合とLNG、LPGのような液化ガス類のそのいずれかで地下水にかかわる諸問題は違うものの、地下水の性質をうまくコントロールしながら利用しようとするものであり、地下水が多すぎても排水に経費がかかるし、少なすぎても困る。したがって、適地の選定とともに地下水の挙動や地下水収支を十分に検討しておく必要がある。

實際上、貯液空洞を建設しようとしたとき、現地地山の地形・地質に合致した地下水理シミュレーションの実施により地下水予測をすることになるが、それに先立って、流れにかかわる物理量、流れの基本的性質を実験や解析によって知っておくことは大切である。

本論は、燃料貯蔵のための連設地下空洞を前提にして周辺地下水の挙動とその性質について、ヘル・ショウ実験の結果を中心に述べ、特に、空洞が貯液状態であるか否かによる地下水流の特性およびそれが単設と連設によってどう違うかに注目した。ここでは空洞周辺の地下水に話を限定し、地下水の水文学的な広域水収支については考え方を述べることにしたい。

1. 貯液用連設地下空洞にかかわる地下水流の特性

石油や液化ガスのための岩盤地下空洞は貯蔵の経済性、効率からしばしば複数連設される。この場合、同じ空洞でも地下発電所のようなものと比べて、地下水のとらえ方がずいぶん違い、連設や貯液といったことに関連して定性的にも定量的にも多分の差異が生まれる。特に、水封式貯液空洞の場合は地下水の存在が安定した貯液の前提条件となるため、貯液量、空洞内ガス圧力、ゆう水量、空洞周辺地山の地下水挙動、および地下水系の水収支が空洞自体の力学的安定性とともに対象となる現象の技術的かなめとなる。

ここではこうしたことを水理学的側面から見たときに基本となるべき、水封機能と水収支、および貯液とゆう水について現象的に考えてみることにする。

1.1 水封機能と水収支

石油や液化ガス等を岩盤空洞に貯蔵しようとする際、水封方式と呼ばれるものは次のような考え方に立って行われている。図-1はモデル化して空洞に貯液した状態を示している。その際、最も注目すべきことは、漏液・漏気と空洞の力学的安定性に関することである。ここでは水理的観点から漏液・漏気についてのみ考えることにするが、地下岩盤中には通常地下水が存在し、貯液は水より比重が小さい。したがって、漏液については図に示したように貯液が空洞内に流れ込む地下水と空洞壁面でのゆう水圧によって封じ込められる。ちょうど、貯液は地下水浸出とゆう水圧によって“抱き込まれた状態”となる。これが水封式と呼

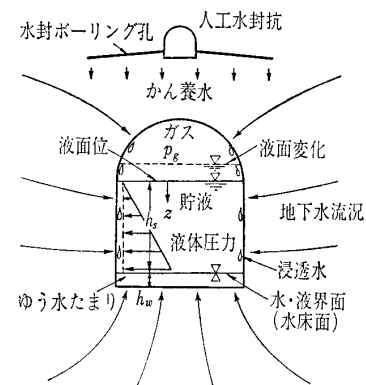


図-1 水封式岩盤貯液空洞のモデルと地下水流

*埼玉大学助教授 工学部

ばれるゆえんである。こういった考え方で貯液すると空洞周辺は浸出面と地下水圧で囲まれている必要があり、地下水は不可欠なものとなる。一方、固定水床式の場合、漏気は貯液面からの蒸気圧と貯液の出し入れによるガス圧力変化に起因して生じる。そのため、漏気に対しては空洞内でガス圧の加わる断面周辺で適当なゆう水圧が作用していることが気密保持の一つの条件となる。今日、これに関してはÅberg (オベルク) の考え方が広く知られているが、それは空洞頂部での浸透流の動水勾配が少なくとも1以上なければならないということの意味する³⁾。そのためには空洞直上に地下水面が存在しなければならず、自由表面が空洞内に浸出してはいけないことになる。

このような観点から、漏液・漏気を防止し、十分な水封性が保たれるためには、空洞を含む地山地下水帯の中で仮に空洞からのゆう水があっても、上述した地下水条件が満たされているか否か水収支の上から考えなければならないことになる⁴⁾。空洞を建設した後、自然状態での地山地下水はゆう水によって変化するが、地上からの降雨浸透によるかん養量が少ないと、かなり水位が低下して、上述した水封機能に支障をきたす。そこで、図-1中に示したように、人工水封とかん養を目的とした人工水封坑を設けることがある。これは大別して二つの目的がある。一つは地下水の人工かん養であり、他は空洞からの漏気を防止する水封幕 (つまり water curtain) の役をもたせることである。今の時点ではこの人工水封坑がどういった場合に必要か、あるいはその配置、密度、更にはその効果についてはいくつかの技術的研究の余地が残っている。

1.2 貯液とゆう水

上述のような水封貯液にかかわる条件が必要であるが、岩盤中に自由表面の有無を問わず、大切なことは貯液量 (液位) とゆう水量の関係を知ることである。貯液量を変化させることは空洞内のガス圧を変化させることにも結びついてくるから、ゆう水量にも影響を及ぼすことになる。したがって、空洞をとりまく周辺地山の遠方水理境界条件が一定であれば、貯液量によってゆう水量は必ず変化することとなる。なぜなら、地下水流の境界条件の一つは空洞内に存在するからであり、空洞遠方の水理境界条件が一定なら、ゆう水量は貯液量とガス圧に支配される。つまり、ゆう水量は地下水流の最下流となる空洞内水理条件で決まる。実際には空洞が空になった状態と満液状態が極値となり、ガス圧は人為的にある程度コントロールされる。基本的には空の状態ではゆう水量は最大となり、満液状態で最小となる。空洞内の境界条件として、貯液内任意点 z の圧力は $p = p_g + \rho_s g z$, $0 < z < h_s$, p_g : 空洞内のガス圧, ρ_s : 貯液体の密度, h_s : 貯液深, g : 重力加速度, となる。また、貯液下部の水床内の圧力 $p = p_g + \rho_s g h_s + \rho_w g (z - h_s)$, $h_s < z < h_s + h_w$, ρ_w : 水の密度, h_w : 水床深, である。通常の貯液では $\rho_s < \rho_w$, $h_s \gg h_w$ であり、 p_g は貯液量の変化 (つまり、貯液

の出し入れに伴うもの) と液体の蒸気圧によって変わる。したがって、満液状態では $p_g = 0$ である。その場合でも、水床面では最大 $\Delta p = (\rho_w - \rho_s) g h_s$ の圧力差が生まれるはずであるから、ゆう水は生じる。實際上、空洞内の境界条件はほとんど p_g に支配される。

空洞内のガス圧が増すと、ゆう水量としては減少することは実験・理論の両面より明らかにされている⁵⁾。つまり、空洞内と遠方境界との動水勾配が相対的に小さくなるからである。ガス圧が限界値を越えると空洞直上からガスが漏気するようになり、自由表面より上の地盤内へ気体の放射流が生じるようになる。

浸透流としては貯液量の変化や降雨浸透量が変わることもあって非定常状態が、特に空洞掘削中、および直後に起こる。また、それにより空洞内ゆう水量も時間的に変わり、その非定常性は空洞掘削中に著しい。もちろんゆう水量の非定常性は空洞の土かぶり、岩盤地山への降雨浸透量、地表の風化土の規模にも関係し、被圧性が強いと短期に終了するが、不被圧性が卓越すると長期に及ぶことになる⁶⁾。こういったことについてかなり理想化した条件であるが、最近地下水数値シミュレーション手法による検討が活発になされつつあり、この種の問題のとらえ方が少しずつ明らかにされつつある^{7), 8), 9)}。

貯液やゆう水量に関係するものとして、ゆう水をどういった形で排水するかがあるが、図-1に示したものは固定水床式と呼ばれるもので、流入地下水がある一定量を越えると人為的に排水され、貯液下端の液・水内部界面はいつも一定となる。

以上、水封式と呼ばれる貯液法の要点を水理学的な側面から述べた。この種の貯液方式では、地山の水収支と空洞内の水理条件が安定貯液の基本となり、また、空洞のごく近傍ではガス、貯液、水の三者とゆう水圧が微妙に絡み合う現象と言える。

2. 空洞周辺の地下水流

上述のように、貯液空洞の地下水は空洞中のガス圧と貯液量によって違った挙動をし、ゆう水量も変化する。ここでは特に、建設の場合の空洞周辺における地下水流の基本的性質をヘル・ショウ実験の結果を中心に述べることにする。実際に空洞建設をしようとした際は現地地山の地形・地質条件に整合した地下水数値シミュレーションを実行することが不可欠となるが、それに先行して流れの基本的性質を十分知っておくことが大切となる。

2.1 ヘル・ショウの実験装置と実験法

ヘル・ショウの実験装置は地下水の流れを微小間隙中の粘性流で類似させるもので、本研究では図-2に示したように長さ1.30m、高さ0.35mのものであり、流れは長さ1.02m、高さ0.3m、間隙幅2mmで起こる。この帯水層の中央部に幅0.04m、高さ0.06m (上部0.02mは半円部分であ

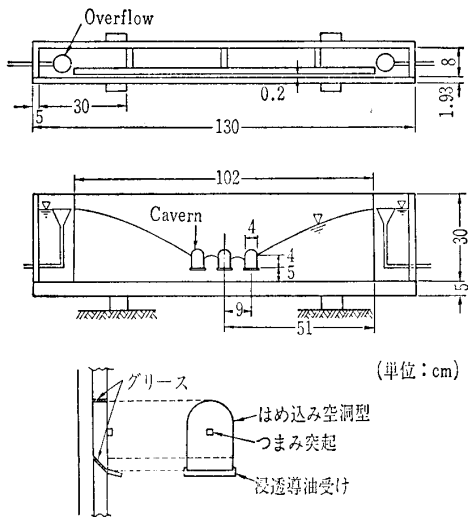


図-2 ヘル・ショウの実験装置

る)の空洞モデルが中心間隔0.09mで3基設けられている。これら空洞周辺の流れは空洞内の貯液量(液位)によって変化するため、(i)貯液していない状態、(ii)貯液している状態、(iii)単設・連設の場合に大別して、定常自由表面とゆう水量が測定される。その際、(iii)の状態を作るためには図-2の下側に示したように透明アクリル板(厚さ19.2mm)にある空洞に同形のはめ込み片を挿入したり、外したりする。また、(ii)の状態は種々の高さをもつ形のはめ込み片を空洞の下端にちょうどせき板のように挿入して得ることができる。次に、空洞左右の一定境界液位は貯液部にあるオーバーフロータンクを上下調節して与えることができ、0.07~0.25mまで変化させる。使用した流体は比重 $\gamma=0.886$ 、動粘性係数 $\nu=2.710\text{ cm}^2/\text{s}$ の粘性の高い油であり、透明である。浸透係数 $k=0.0121\text{ m/s}$ であった。

本報告では連設空洞にかかわる流れの基本的性質を明らかにするのが目的であり、降雨浸透の影響や人工水封孔のない定常流の場合のみを述べる。

表-1にはいろいろな実験ケースを示し、それらに対応した基本となる実験結果をあげている。表中Exp-1', 2', 3'

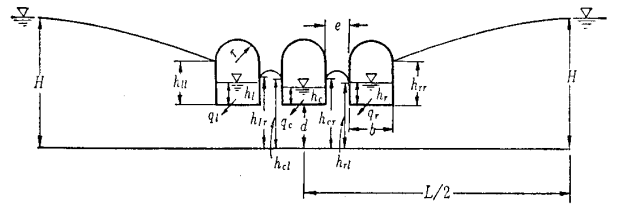


図-3 記号の説明

は図-3に示した記号の説明において、 $d=0$ のときであり、Exp-1~14は $d=0.05\text{ m}$ の場合のものであり、それぞれ空洞が単設、あるいは連設の場合に対して空洞内液位を変えたものである。また、流れの状況を調べるために、帯水層の左側貯液部にトレーサー(実験に用いた油にべんがら微粉末を混合した液)管を実験中に挿入し、流線も写真観測した。

なお、これらすべての実験は室温 19.0°C の恒温・恒湿室内で実施した。

2.2 自由表面形状

実際の地山に空洞を設けた場合、降雨浸透量が小さいと空洞へのゆう水が少なくなり地山内に自由表面が現れることになる。これは単設空洞と連設のそれでは違ってくるが、特に連設空洞相互間の帯水層に特徴が現れてくる。このことを分かりやすく知るため、写真-1, 2, 3によって説明

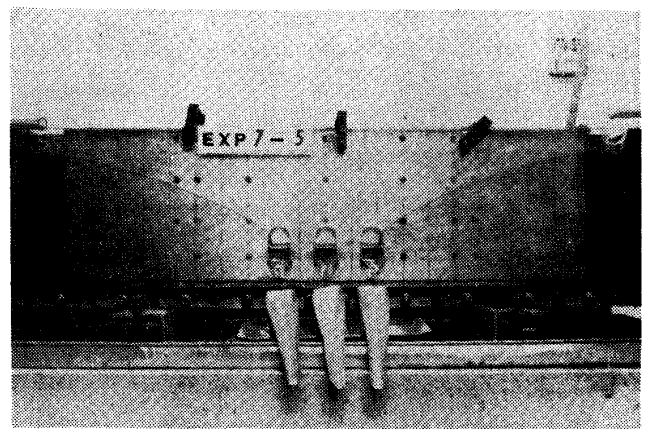


写真-2 貯液時の連設空洞の自由表面 (Exp-7, $H=0.25\text{ m}$ の場合)

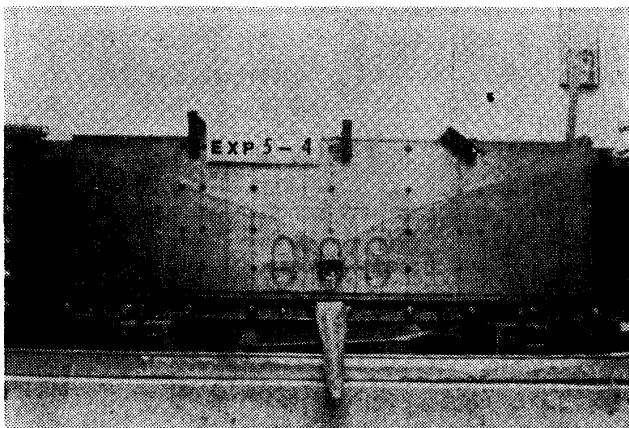


写真-1 貯液時の単設空洞の自由表面 (Exp-5, $H=0.25\text{ m}$ の場合)

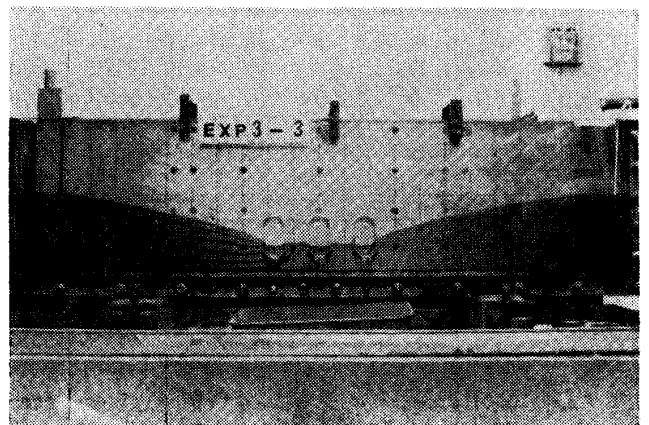


写真-3 無貯液時の連設空洞の自由表面と流線 (Exp-3, $H=0.15\text{ m}$ の場合)

表-1 実験ケースと結果

(水位: cm, 流量: cm²/s)

H	Exp-1'(d=0)				Exp-2'(d=0)				Exp-3'(d=0)				
	q _c	q _l =q _r	h _{cl} =h _{cr}	h _c	q	q _r	h _{ul} =h _{er}	h _l =h _c	q	q _c	h _{ul} =h _{rr}	h _l =h _r	
7.0	1.358	0	5.9	0									
7.5					1.540	0	5.9	0	1.657	0	5.9	0	
10.0	2.500	0	6.4	0	2.635	0	6.3	0	2.867	0	6.4	0	
12.5													
15.0	5.538	0	7.5	0	6.178	0	7.5	0	6.742	0	7.6	0	
17.5													
20.0	10.111	0	9.0	0	11.320	0	9.0	0	12.354	0	9.6	0	
25.0	16.141	0	10.2	0	17.796	0	10.2	0	20.042	0	10.5	0	
Exp-1(d=5)				Exp-2(d=5)					Exp-3(d=5)				
q _c	q _l =q _r	h _{cl} =h _{cr}	h _c	q _l	q _c	h _{ul}	h _{er}	h _{lr} =h _{cl}	q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{cl} =h _{er}	
1.677	0	5.5	0	1.042	0.875	5.5	5.4	5.3	0.214	0.893	5.5	5.3	
2.986	0	5.7	0	2.972	2.306	5.8	5.6	5.3	0.330	1.500	5.7	5.3	
4.703	0	6.0	0	3.005	2.333	6.0	5.8	5.3	0.458	2.542	6.1	5.3	
9.150	0	6.9	0	5.775	4.400	7.0	6.8	5.3	0.625	4.688	7.0	5.3	
15.028	0	8.2	0	9.607	7.286	8.6	8.0	5.3	0.861	8.100	8.5	5.3	
Exp-4(d=5)			Exp-5(d=5)			Exp-6(d=5)			Exp-7(d=5)				
q _c	q _l =q _r	h _{cl} =h _{cr}	q _c	q _l =q _r	h _{cl} =h _{cr}	q _c	q _l =q _r	h _{cl} =h _{cr}	q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{cl} =h _{er}	
									0.161	0.563	7.5	7.4	
1.889	0	8.9	2.438	0	7.6	2.562	0	6.6	0.271	1.292	7.5	7.4	
3.542	0	9.0	4.143	0	7.7	4.278	0	6.9	0.417	2.276	7.6	7.4	
7.875	0	9.3	8.226	0	8.0	8.700	0	7.6	0.618	4.854	8.2	7.4	
13.500	0	9.8	13.571	0	8.9	14.355	0	8.5	0.889	8.153	9.4	7.4	
Exp-8(d=5)				Exp-9(d=5)				Exp-10(d=5)					
q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{cl} =h _{er}	q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{cl} =h _{er}	q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{lr} =h _{rl}	h _{cl} =h _{er}	
0.220	0.495	8.0	8.0										
0.298	1.294	8.1	8.0	0.438	0.953	9.2	9.2	3.074	0	7.3	7.3	5.9	
0.451	2.188	8.4	8.0	0.646	2.063	9.2	9.2	5.263	0	8.2	7.8	6.0	
0.675	4.850	8.7	8.0	0.854	4.500	9.4	9.2	7.500	1.002	9.3	8.8	6.5	
0.969	8.282	9.5	8.0	1.159	8.329	10.2	9.2	8.222	4.292	10.0	9.0	6.9	
Exp-11(d=5)					Exp-12(d=5)					Exp-13(d=5)			
q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{lr} =h _{rl}	h _{cl} =h _{er}	q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{lr} =h _{rl}	h _{cl} =h _{er}	q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	
1.569	0	6.5	6.4	5.4									
3.000	0	7.3	7.0	5.6	2.972	0	7.3	7.1	5.7	2.500	0	8.6	
3.792	0.823	7.5	7.4	5.7	4.692	0	8.1	7.9	6.0	3.889	0.198	9.2	
					5.833	0.714	8.6	8.2	6.2				
3.953	3.133	8.7	7.5	5.8	6.042	2.053	8.9	8.3	6.3	4.423	2.587	9.3	
4.356	6.496	9.3	7.5	5.9	6.333	5.198	9.7	8.3	6.4	4.667	6.000	10.0	
Exp-14(d=5)													
h _{lr} =h _{rl}	h _{cl} =h _{er}	q _c	q _l =q _r	h _{ul} =h _{rr}	h _{lr} =h _{rl}	h _{cl} =h _{er}							
8.4	7.5	2.231	0.047	9.0	8.8	8.2							
8.9	7.7	2.667	0.792	9.1	8.9	8.3							
8.9	7.6	3.104	3.323	9.4	9.0	8.2							
9.0	7.8	3.417	6.583	10.0	9.0	8.3							

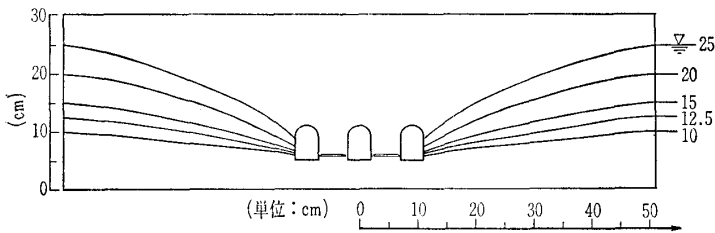


図-4 Exp-3 の場合の自由水面形

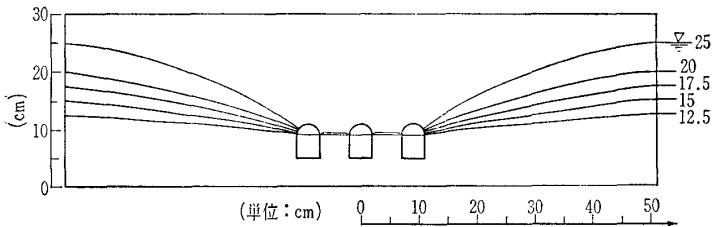


図-5 Exp-9 の場合の自由水面形

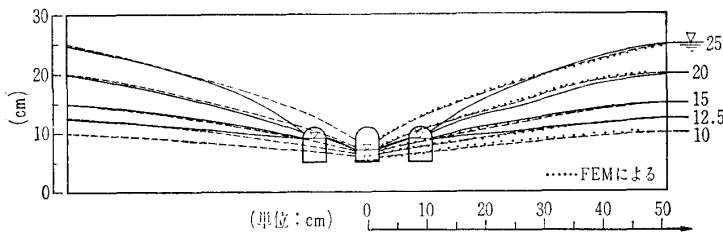


図-6 Exp-1 の場合 (単設, 図中点線) と Exp-13 (連設, 図中実線) の場合の自由水面形

しょう。写真-1 は貯液時の単設空洞の自由表面形 (表-1 中 Exp-5: $H=0.25$ m, $q_c=13.571 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$, $h_{cl}=h_{cr}=0.089$ m のとき, 添字記号 c, r, l はそれぞれ中央, 右, 左の空洞および側の意味を示す) であり, 写真-2 は貯液時の連設空洞の自由表面形 (Exp-7, $H=0.25$ m, $q_c=0.889 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$, $q_l=q_r=8.153 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$, $h_{cl}=h_{cr}=0.074$ m, $h_u=h_{rr}=0.094$ m のとき) である。2 者の自由表面形を比べると, 両者ともに境界水位が $H=0.25$ m と同じでも, ゆう水量が $q_c=13.571 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s} < \sum q = q_c + q_l + q_r = 17.195 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ となり, 大きく違って来る。特に, 写真-2 では三つの空洞の中で中央部分で自由表面はほとんど両側空洞の影響を受けて水平に近くなってしまふ。また, 言うまでもないが, 地下水の低下域は単一空洞の場合より連設のそれが大きい。このことは図-4, 5, 6 に示した自由表面の境界水位の違いによる実験結果から一層よく把握できよう。図-4 は Exp-3 の場合 (表-1 参照), 図-5 は Exp-9 の場合, 更に, 図-6 は Exp-1 の場合 (単設, 図中点線) と Exp-13 の場合 (連設, 図中実線) である。一方, 図中の細点線は FEM 法 (汎関数法) による数値計算結果を示す⁵⁾。図-4 は貯液のない場合, 図-5 は同一量の貯液があるものであり, 左右境界水位が違うものが同時に描かれている。両図から, 境界水位が増減しても中央空洞の左右自由表面の変化がほとんどないのが注目され, 外側の空洞の浸出点 h_u, h_{rr} (図

一 3 参照) は境界水位 H が大きくなると増加することとなる。また図-5 から分かるように, 貯液がある場合は空洞内液位に支配された自由表面形が形成され, 浸出点の位置はさほど高くなる。次に, 図-6 に注目すると, 連設の場合で空洞内液位が両左右と中央のそれで違い, 中央のそれが低いように保ってあるため, 周辺地下水は両端空洞から中央の空洞に向かって流れる。したがって, こういう貯液状態では両端空洞と中央の空洞の液位差によって漏液に対する水封効果が損われることになる。つまり, 連設空洞の場合は各空洞内の液位が水封効果に影響を与えるからあらかじめこの点を検討しておくことが大切である。

次に, 流線については写真-3 (Exp-3, $H=0.15$ m, $q_c=0.458 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$, $q_l=q_r=2.542 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$, $h_u=h_{rr}=0.061$ m, $h_{cl}=h_{cr}=0.053$ m のとき) にその一例が示してある。この場合は連設空洞の各液位がゼロの場合であるが, 流れとしては左右対称であり, 流線は左側帯水層から左側空洞に収束して集まる。したがって, 上述のように $q_c < q_l = q_r$ となり, $q_l + q_r = 5.084 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ であり, ほとんど両端空洞からゆう水が生じ, 中央空洞では 1/10 程度しかゆう水しないことになる。

更に, FEM 法による数値計算結果は実験自由表面形と一致していると思われる。今さらの感があるが, このような流れの解析に FEM 法が十分有効であることを示しているものと受け止められる。

2.3 ゆう水

空洞へのゆう水量が空洞内液位と遠方境界条件にどう関係するかについて考えてみる。

図-7 は単設 (中央空洞のみ) の場合について, 空洞内液位と境界条件を変化させたときの無次元ゆう水量 $q_c/k \cdot b$ (k : 浸透係数, b : 空洞幅) と $2H/L$ (H : 境界水位, L : 帯水層水平長) の関係を示している。表-1 に示したように Exp-1, 6, 5, 4 と順次空洞内の液位が高くなり, ゆう水量が液位の上昇とともに小さくなっている。また, $2H/L$ が大きくなるにつれてゆう水量は急激に増す。この実験結果から分かるように空洞内液位 h_c に比べ H が大きい場合は h_c の増加による $q_c/k \cdot b$ の変化は少ないが, $h_c + d$ が H と大差なくなるとゆう水量に h_c が影響を与えるようになってくる。一般に, 貯油空洞では空洞の安定性の方から空洞土かぶりがかかなり大きいから, H は相当大きくなる。

次に, 図-8 は連設の場合における空洞内液位と境界条件の変化の関係を示したものである。図中, $\sum q = q_l + q_c + q_r$ を示し, q_l, q_r はそれぞれ左側, 右側空洞よりのゆう水量である。この場合, 流れと空洞が左右対称となっているから, $q_l = q_r$ である。Exp-3, 8, 7, 9 と徐々に全空洞内

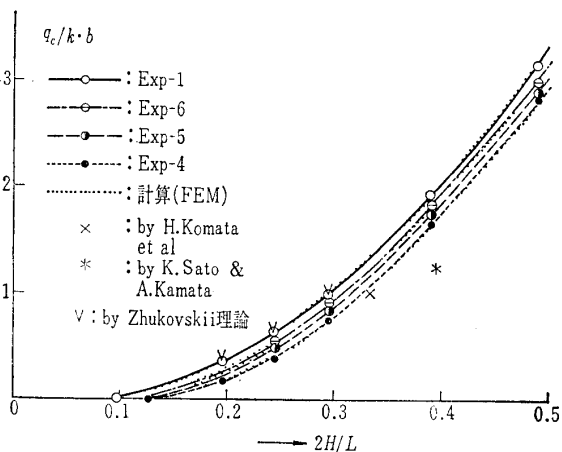


図-7 単設空洞における無次元ゆう水量 $q_c/k \cdot b \sim$ 動水こう配 $2H/L$ の関係

液位は同一ではあるが、その値は増加している。また、Exp-3' は $d=0$ の場合である。Exp-3' の場合には $q_c=0$, $q_l=q_r$ のみであり、実際には $2H/L$ が大きくなったことになることもあって、 $\Sigma q/k \cdot b$ はほかより大きくなっている。連設の場合は $q_l/k \cdot b=q_r/k \cdot b$ が $\Sigma q/k \cdot b$ のほとんどの量を与え、 $q_c/k \cdot b$, つまり中央空洞からのゆう水量は非常に小さくなっている。したがって、連設空洞のゆう水量は両外端の空洞からのゆう水量が非常に大きくなって、その中側にある空洞からのゆう水量は小さくなってしまおうという興味ある結果を示している。これは、例えば、地下掘削工事を行う際、対象工事現場の周辺にウェルを群設して揚水し、中の水位を下げ、掘削する、いわゆるウェルポイント工法の際の地下水流と似ており、対象周辺の水理条件で中側の流れが支配されていることになる。なお、参考のため、図-7, 8に2例ではあるが、駒田らが行った数値計算によるものを示した⁷⁾。この場合貯液はなく、 $k=10^{-6}$ cm/s, $b=23$ m, $H=100$ m, $L=600$ m, $d=335$ m であって、条件は少し違うが、単設の場合、 $q_c/k \cdot b=1.007$, $2H/L=0.333$, 連設の場合 $q_c/k \cdot b=0.252$, $q_r/k \cdot b=0.856$, $\Sigma q/k \cdot b=1.964$, $H/d=2.985$ である。図-8 から傾向としてはほとんど一致している。

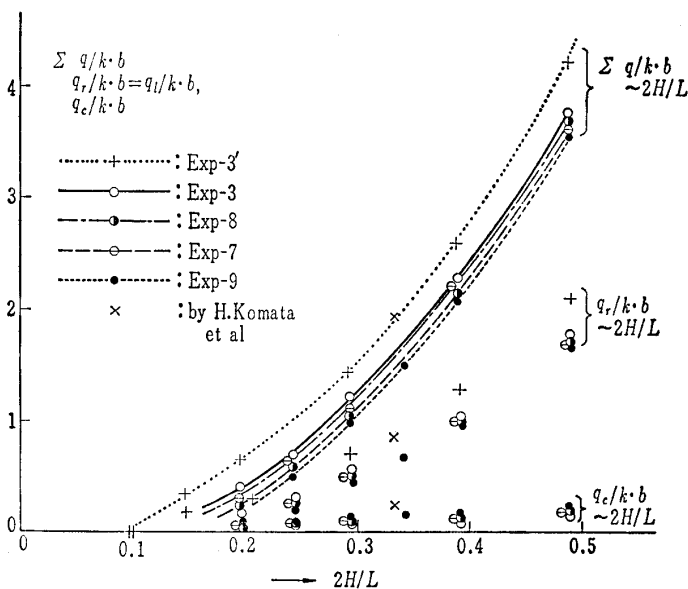


図-8 連設空洞における $\Sigma q/k \cdot b$, $q_r/k \cdot b$, $q_c/k \cdot b \sim 2H/L$ の関係 ($\Sigma q=q_c+q_r+q_l$)

また、図-7 には佐藤・鎌田の実験結果 ($b=0.06$ m, $d=0.07$ m, $L=1.02$ m, $q_c/k \cdot b=1.251$, $2H/L=0.392$: の場合) を示す⁹⁾。更に、同図には、Zhukovskii の水平排水溝理論による計算値を示している。この理論は特に貯液がない場合、 $q_c/2kd = \frac{[1-(y/d)]^2 - \phi_1^2}{(\phi_2 - 2x/d)}$, ($\phi_1, \phi_2: b'/d$ の関数, $x, y: 座標, b':$ 仮想空洞幅) と Zhukovskii の図によってゆう水量 q_c をを求めることができる¹⁰⁾。

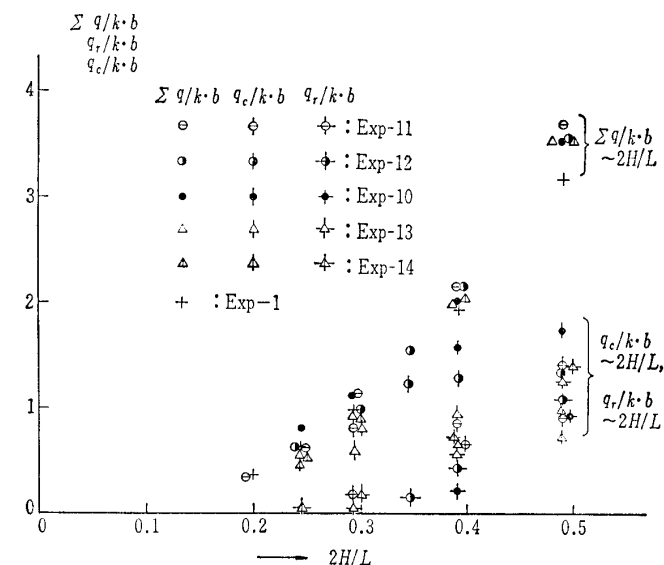


図-9 連設空洞における $\Sigma q/k \cdot b$, $q_r/k \cdot b$, $q_c/k \cdot b \sim 2H/L$ の関係

図-9 は三つの連設空洞において各々の液位を常に中央の空洞が一番低くなるようにして、変化させた場合の無次元ゆう水量と $2H/L$ の関係を与えるものである。この結果では総ゆう水量 $\Sigma q/k \cdot b$ は $2H/L$ の増加とともに増すが、 $2H/L$ が増すにつれて、 $q_c/k \cdot b$ の増加率が小さくなっていく。つまり、中央空洞のゆう水量は $2H/L$ が小さい間では総ゆう水量を支配しているが、 $2H/L$ が大きくなると、 $q_r/k \cdot b$ が支配的となっていく訳である。この場合もやはり図-8 のそれと同様に両側端空洞から中央空洞への流入が相互に生じ、漏液に対する効果が損われることがある。

以上、連設空洞の水理特性の一つとして、空洞内液位がガス圧とともに水封効果にかなり影響を与えるといえる。

2.4 地下水理的論点

上述したような貯液空洞の特殊性、および単設、連設における流れの性質から水理学的な現象の論点をここでまとめておくこととしよう。

ヘル・ショウ実験によって、少なくとも次の事柄は基本的に大切となる。

- (i) 連設空洞の場合、両外側空洞の液位とゆう水量が周

辺流れをほとんど支配する。

(ii) 連設空洞中の両外側空洞を除いた内側空洞の液位は遠方水理境界の変化にあまり関係せず、空洞間の相互の影響に依存する。

(iii) 連設空洞の液位が各々の空洞へのゆう水量や自由表面形に大きく影響を与える。

これらのことは実際の空洞設計、施工にかかわるのみならず、完成後の貯液オペレーションにも関連することである。

む す び

我が国には現在貯液用連設地下空洞はないが、諸外国では多く建設されており、単設貯油空洞は既に菊間実証プラントの建設が完了していくつかの技術的問題は明らかにされている。本報告はこのことをふまえて、連設地下空洞にかかわる水理的性質を基本的にいくつかの実験・計算からまとめた。周知のように今日地下水数値シミュレーション手法はかなり高度に完成されつつあり、岩盤地下水の解析にも応用され、その適用性は認められてきている。このような時点で実際の地形・地質の条件に合わせた地下水流れを解析的手法で解くことは不可能であり、やはり数値シミュレーションに頼らざるを得ない。数値計算の実施に当たって連設地下空洞の場合にどの点に注目し、何を重点に計算をすべきであるか、あらかじめ知っておかなければ、計

算結果が山積するばかりであって、肝心の現象を見逃しかねない。そういったことから、ここで得られた点をふまえて有意義な解析を進める必要がある。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：岩盤タンク貯蔵所の規制のための一般基準作成についての基礎調査（自治省消防庁委託），1981.3.
- 2) 桜井俊男：石油地下備蓄菊間実証プラントについて，土と基礎，Vol. 29, No. 1, pp. 15-22, 1981.
- 3) Åberg, B: Prevention of gas leakage from unlined reservoirs in rock-storage in excavated rock caverns, Rock Store '77, Vol. 2, pp. 399-414, 1977.
- 4) 佐藤邦明：地下空洞の水理解析へのアプローチ，土と基礎，Vol. 29, No. 12, pp. 45-50, 1981.
- 5) 佐藤邦明・鎌田 烈：地下燃料貯蔵空洞への降雨・地下水流出の解析，第26回土木学会水理講演論文集，pp. 607-612, 1982.
- 6) 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回土木学会水理講演論文集，1981.2.
- 7) 駒田広也ほか：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. 71-72, 1980.3.
- 8) 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（その一），電力中研報告，1979.7.
- 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地下水流の解析的検討，第25回土木学会水理講演論文集，1981.2.
- 10) Aravin, V.I & S.N. Numerov: Theory of Fluid Flow in Undeformable Porous Media, Israel Program for Scientific Trans., Jerusalem, pp. 244-253, 1965.

(原稿受理 1982.7.8)

技術手帳

液状化判定指標 F_L, P_L

木 全 俊 雄*

1. F_L の定義と適用例

F_L (Factor of Liquefaction : 液状化抵抗率) は、原位置における液状化の可能性を判定するための指標であり、原位置における土要素が有する動的せん断強度比 R と土要素に作用する動的最大せん断応力比 L の比によって次式のように定義される^{1),2),3)}。

$$F_L = \frac{R}{L} = \frac{\tau_l / \sigma_v'}{\tau_{dmax} / \sigma_v'} \dots\dots\dots(1)$$

ここで R は動的せん断強度 τ_l を、 L は動的最大せん断応力 τ_{dmax} をそれぞれ有効上載圧 σ_v' で除し、無次元化したものである。式(1)は、液状化に対する強度と応力の比を示していることから、 F_L は液状化に対する安全率とも呼ばれ、

これにより $F_L < 1.0$ となる土層は液状化すると判定する。

原位置における動的せん断強度比 R は原位置の各深さにおいてサンドサンプラー等により乱さない状態で採取された試料（サンプリング後に凍結したもの）の動的せん断試験により推定することができる。図-1 は地震時における表層地盤の動的挙動を模式的に示したものであり³⁾、同図 (a) は原位置から採取した不かく乱砂質試料の振動三軸試験時の応力状態、(b) は原位置表層地盤の基盤に地震加速度 a_B が作用したときの任意の土要素内の応力状態を示している。図-1 (a) に示すように振動三軸強度比 R_L は繰返し回数20回、軸ひずみ両振幅5% となるときの応力比として定義され有効上載圧 σ_v' と等しい圧密圧力 σ_c' で等方圧密した後、非排水条件のもとで、数個の供試体について、

*建設省 土木研究所振動研究室