

多孔質地山の地下空洞を対象とした三次元地下水解析

Three-dimensional Groundwater Analysis of Cavern in Porous Rock Ground

清水建設 正員 百田 博 宣

清水建設 正員 楠本 太

1. はじめに

近年、地下発電所や燃料用貯蔵空洞などの多様な地下空洞が計画・施工されつつある。これに伴い、空洞湧水量や周辺地下水位変動などの地下水現象が重要視され始めているが、岩盤地山の水理モデル¹⁾の選択や地下水挙動の三次元性の解明、など残された課題もある。これらのうち、前者の水理モデルには現時点の実用性の面から多孔質モデルと亀裂系モデル(不連続体モデル)に限定することが可能と考えられ、著者の一人は亀裂系モデルの基礎的な三次元解析を実施している²⁾。一方、多孔質モデルでは、実験的又は解析的にも系統立った三次元的検討は行なわれていない。このため、本研究では多孔質地山の地下空洞を対象とした三次元地下水挙動を把握する一つの方法として、主要ファクターのパラメータ解析を行なうものである。

一般に、地下空洞を対象とした地下水問題は自由水面自体が未知量となり解析的に解くことはかなり困難で、対象とする三次元問題を取扱った解析解は見あたらないように思われる。一方、数値解析法は目ざましい発達をしており、幾何形状や水理物性の取扱いが簡単なFEM手法を用いた二、三の三次元解析例も報告され始めている^{3) 4)}。このような現状から、ここではFEM手法を用いて検討を行なう。検討内容は定常問題に限定し、自由水面をもつ場合と固定した場合の二タイプについて三次元解析による検討を加える。更に、二次元解析との比較を通じて地下水挙動の三次元性を定量的に把握すると共に、可能な部分については実用的な近似式の誘導も試みる。

2. FEMによる三次元地下水解析理論

FEMによる地下水解析(浸透流解析)には、飽和領域を対象としたものと飽和-不飽和領域を対象とした解析⁵⁾が提案されている。このうち、飽和-不飽和領域の解析は地下空洞を対象とした場合最も煩雑な地下水面の取扱いが簡単であり、ここではこの理論を用いることとする。

いま、水平方向にx, y軸、鉛直上方にz軸を設定し、時間をtとすれば、飽和-不飽和帯における三次元地下水流の基礎方程式は式(1)で与えられる⁵⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q = (c + \alpha_0 \cdot s) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$h = p + Z_0, \quad K = K_0 \cdot K_r, \quad \alpha_0 = 1.0 \quad (P \geq 0.0) \quad \text{or} \quad \alpha_0 = 0.0 \quad (p < 0.0)$$

ここに、h:ポテンシャル、p:圧力水頭、Z₀:位置水頭、K:透水係数、K₀:飽和透水係数、K_r:不飽和透水係数比、q:湧水率、c:比水分容量、s:比貯留量、である。

式(1)をFEM手法を用いて離散化すれば、未知量pに関する連立方程式が得られる⁵⁾。

したがって、地下空洞を対象とする地下水問題においても、外水位や空洞などの境界面において圧力水頭や法線流速に関する境界条件と解析領域内の初期圧力条件を考慮すれば、三次元モデルの圧力水頭を算出できる。これにより、自由水面や湧水量などの所要の地下水量を求めることが可能である。

3. 解析モデルの設定

空洞を対象とした多孔質地山の三次元地下水挙動の基礎的知見を得るため、図-1に単設空洞の解析モデ

ルを対称性を利用して 1/4 領域で示す。図に示すように、実際の地山は岩盤上に風化帯を持つ二層系地山と考えられるため、風化帯厚さ D を地質構造上のパラメータとする。水理物性については、岩盤及び風化帯の飽和透水係数 K_0 を各々 10^{-7} と 10^{-6} m/s とする。また、不飽和領域のサクシオン P_s 、体積含水率 θ 、不飽和透水係数比 K_r は岩盤と風化帯の間隙率が各々 0.1 と 0.2 で最大毛管上昇高が共に 3 m と仮定し、駒田の方法⁶⁾ を基にして岩盤と風化帯で各々 $P_s \sim \theta \sim K_r$ 関係 A, B を図-2 のように設定する。空洞については、内圧 (P_G) は大気圧とし、断面は $W=W'=20$ m の矩形断面に固定する。一方、空洞深さ H や長さ L は三次元性の重要ファクターと考え、空洞構造上のパラメータとする。このような考え方より、図-1 の解析モデルでは D, H, L をパラメータとして三次元地下水挙動を検討する。

いま、外水位 ($EL \pm 0$ m) と空洞中心高さのポテンシャル差を Δh とすれば、本解析モデルでは Δh の影響で三次元的な地下水挙動を生じる。すなわち、空洞天盤、底盤、側壁及び切羽から各々 $Q_1 \sim Q_4$ の湧水 (全湧水量 $Q_T = 4(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4)$) が起こり、空洞天盤中心上で最大水位低下量 Δh の自由水面を形成する。ここでは、このような自由水面を生じるタイプ B と共に自由水面を外水位レベルで固定したタイプ A の場合も含め、FEM による定常解析を行なう。実施する解析ケースをパラメータでまとめ、表-1 に示す。表に示すように、三次元モデルと共に空洞横断面の二次元モデルも併せて検討の対象とし、タイプ A, B の場合について検討する。表中、 $d/r_w, L/r_w, D/H$ の無次元量も示しているが、 r_w は空洞横断面と同一周長を持つ等価半径である ($\pi r_w = W + W'$)。

4. 自由水面を固定した均質岩盤モデルの検討

(1) 球形空洞湧水量の理論解との比較

三次元 FEM 解析の適用性を検討するため、球形空洞湧水量 Q_r と立方体空洞の湧水量 Q_T (CASE A.1.1, A.2.1, A.3.1) を比較する。いま、図-1 中の記号を用いれば、 $EL \pm 0$ m の地下水面下で深さ d に位置する吸込み点源場のポテンシャルは式(2)で与えられ⁷⁾、 Q_r は空洞壁面で $h = -d$ を代入すれば算出できる。

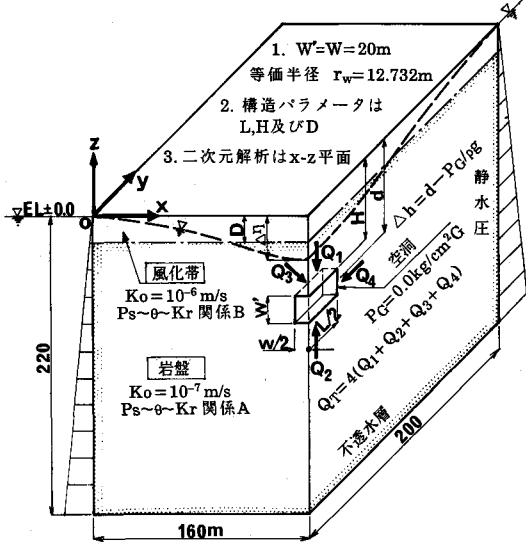


図-1 解析モデル (1/4モデル)

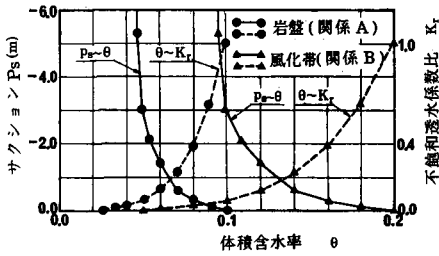


図-2 風化帯及び岩盤の $P_s \sim \theta \sim K_r$ 関係

表-1 解析ケース一覧表 (x.x.....構造タイプ)
解析ケース — 自由水面なし..... CASE A.x.x
自由水面あり..... CASE B.x.x
注) CASE B.3.0.1~B.3.0.3 は実施しない。

構造タイプ	H(m)	L(m)	D(m)	d/r_w	L/r_w	D/H
均質岩盤	三次元	1.1	20	2.356	1.571	0.0
		1.2	60		4.712	
		1.3	100		7.854	
	三次元	2.1	20	5.498	1.571	
		2.2	60		4.712	
		2.3	100		7.854	
	三次元	3.1	20	8.639	1.571	
		3.2	60		4.712	
		3.3	100		7.854	
不均質岩盤	二次元	1.0	20	2.356	—	0.0
		2.0	60		—	
		3.0	100		—	
	三次元	3.3.1	100	8.639	7.854	0.1
		3.3.2	100		—	0.5
		3.0.1	100		—	0.1
	二次元	3.0.2	100	8.639	—	0.5
		3.0.3	100		—	0.9
		3.0.3	100		—	0.9

$$h = \frac{Q_r}{4\pi K_o} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z+d)^2}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z-d)^2}} \right) \quad (2)$$

しかし、壁面位置によって Q_r が異なるため、空洞上端、下端及び高さ中心で求まる値を $Q_{r1} \sim Q_{r3}$ とする。この $Q_{r1} \sim Q_{r3}$ の理論解と立方体空洞の湧水量 Q_T を無次元化して図-3に示す。図-3中、 r_o は立方体空洞と表面積が一致する球半径で $r_o = 13.820m$ 、 Δh は $\Delta h = d$ である。また、 Q_T と Q_{r3} の誤差 E を図中の式で定義し、これも図中にプロットする。図によれば、 Q_T は d/r_o 増大に伴い理論解より大きくなるが、 E は4%以内であり両者の値はほぼ一致する結果と判断できる。

(2) パラメータスタディによる三次元効果の検討

CASE A.1.1～A.3.3について全湧水量 Q_T 、切羽を除いた湧水量 $Q_T - 4Q_4$ 及び切羽湧水量 $4Q_4$ の無次元量 Q_A 、 Q'_A 、 Q''_A を無次元空洞長さ L/r_w に関しプロットし、無次元空洞深さ d/r_w 毎に直線で結んだ。これを図-4に示すが、 Q''_A は d/r_w や L/r_w の影響をそれ程受けず、 Q_A 、 Q'_A と大きく性質が異なることがわかる。すなわち、 Q_A 、 Q'_A 共 L/r_w の増大と d/r_w の低下に伴って大きくなることが理解できる。そこで、湧水量の三次元効果を明確にするため、三次元と二次元解析による湧水量を比較する。この際、二次元の湧水量にはFEMによる値(Q_{T2})と共に次式で示される上田らの湧水量⁸⁾ Q_u を用いる。

$$Q_u = \frac{2\pi K_o \Delta h}{\ln \left\{ (d + \sqrt{d^2 - r_w^2}) / r_w \right\}} \quad (3)$$

よって、三次元FEMによる $Q_T - 4Q_4$ と $Q_u \cdot L$ 又は $Q_{T2} \cdot L$ の比を各々 Q_{ru} と Q_{rf} とする。一方、切羽湧水量 $4Q_4$ は球の理論解 Q_{r3} で無次元化し、これを Q'_r とする。以上の Q_{ru} 、 Q_{rf} 、 Q'_r と L/r_w の関係を図-5、 d/r_w との関係を図-6に示す。両図によれば、 Q_{ru} 、 Q_{rf} 共 d/r_w の増大に対する増加傾向を示すが、 L/r_w に対しては1.0に漸近する低下曲線となることが認められ、 d/r_w が大きく、且つ L/r_w が小さいもの程三次元効果が大きい合理的な結果と言える。一方、 Q'_r は d/r_w には依存せず、 L/r_w の増大に伴って若干の低下傾向を示すことがわかる。いま、図-5、6を基にして Q_{ru} と Q'_r を式(4)、(5)の関数形($a_1 \sim a_5$ は定数)と仮定し、最小二乗法を用いれば、式(6)、(7)の回帰曲線が決定でき、この結果も図-5、6中に示す。

$$Q_{ru} = \frac{a_1}{L/r_w} \ln \left(a_2 \cdot \frac{d}{r_w} \right) + a_3 \quad (4), \quad Q'_r = a_4 \frac{L}{r_w} + a_5 \quad (5)$$

$$Q_{ru} = \frac{1.4426}{L/r_w} \ln \left(0.81994 \frac{d}{r_w} \right) + 1.1945 \quad (6), \quad Q'_r = -0.012684 \frac{L}{r_w} + 0.3750 \quad (7)$$

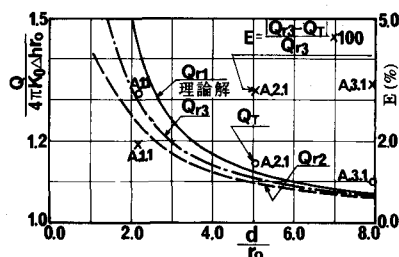


図-3 三次元FEMと球の理論解による湧水量の比較

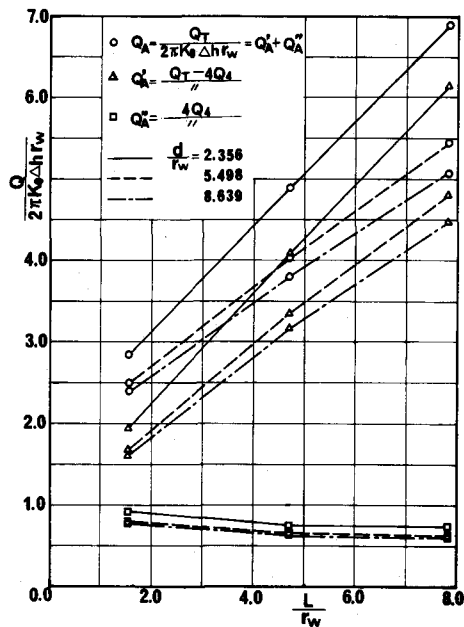


図-4 空洞長さ(L)と湧水量(Q)の関係 (CASE A.1.1～A.3.3)

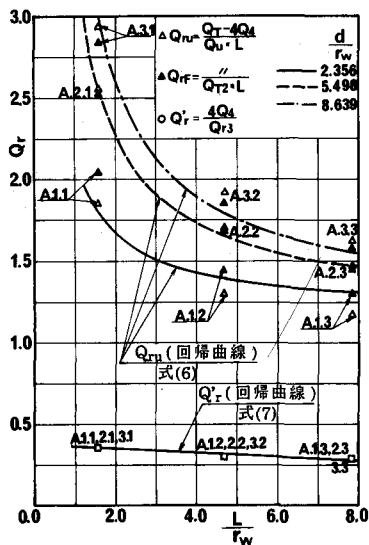


図-5 空洞長さLと湧水量の三次元効果の関係

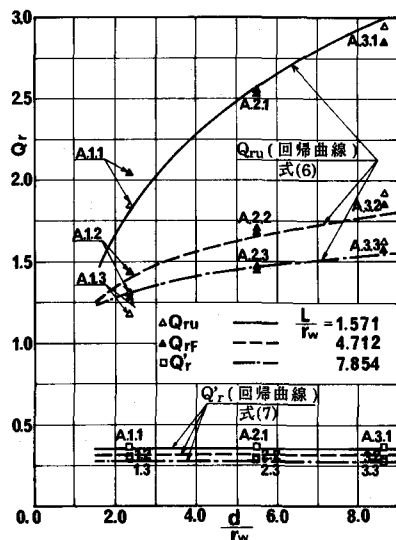


図-6 空洞深さdと湧水量の三次元効果の関係

図-5, 6 中の回帰曲線はFEM解析結果をほぼ再現しており、この結果 Q_T の近似式を次のように表せる。

$$Q_T = Q_{Tu} \cdot Q_u + Q_{Tr} \cdot Q_{r3} \quad (8)$$

次に、CASE A.3.0 ~ A.3.3 の空洞鉛直対称面上の無次元圧力 p/d を図-7 に示し、三次元性を検討する。本図によれば、空洞横断面の p/d は L が長くなる程低下し二次元解析に近づくこと、また空洞軸方向の p/d も L の増大に伴った低下傾向を示し、圧力分布の三次元性を明確に把握することができる。

5. 自由水面を持つ均質岩盤モデルの検討

二次元及び三次元のFEMによるCASE B.3.0 ~ B.3.3 の地下水面形を図-8 に示す。また、空洞天盤中心上の無次元水位低下量 $\Delta\eta/H$ と L/r_w の関係を図-9 に示す。図-9 中、 $\Delta\eta/H \geq 1.0$ は地下水面が天端

中心に到達したことを意味し、この場合、 $\Delta\eta = H - p$ とした。両図によれば、空洞長さ L の増大で自由水面が低下して二次元解析に近づくこと、空洞深さが深くなれば二次元解析との違いが顕著になること、など三次元的な地下水面低下傾向を明確に把握できる。次に図-4 と同様にして、三次元FEMの全湧水量、切羽除いた湧水量及び切羽湧水量の無次元量 Q_A , Q'_A , Q''_A と L/r_w の関係も図-9 中に示す。これによれば、 Q_A と Q'_A が共に L/r_w の増大に伴って増加し、 Q''_A が若干低下傾向であることはタイプAの結果と一致している。一方、 Q_A , Q'_A 共タイプAに対して低い値を示すこと、 d/r_w が大きいもの程 Q_A , Q'_A , Q''_A の全てが大きくなること、など本タイプの特徴も把握できる。また図-5 と同様に、二次元FEM湧水量 Q_{T2} に基づいた切羽部分を除く湧水量 $Q_T - 4Q_4$ の無次元量 Q_{Tr} 、更に全湧水量 Q_T を対応したタイプA

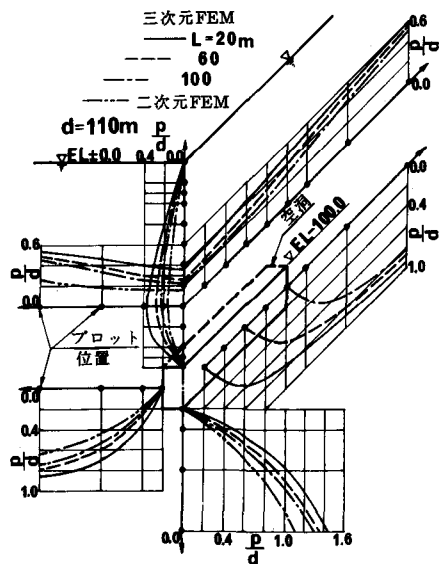


図-7 $H=100m(d=110m)$ の空洞周辺の圧力分布

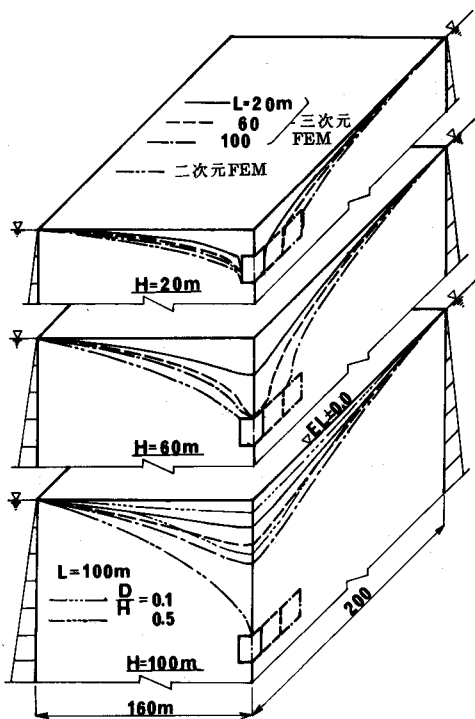


図-8 二次元及び三次元FEM解析による地下水面

の湧水量 Q_{TA} で割った Q_{AB} を算出し、 L/r_w との関係を図-10 に示す。本図によれば Q_{rF} と L/r_w の関係はタイプAと同様であるが、 d/r_w とは $\Delta\eta/H$ と関連した複雑な関係となっていることがわかる。一方、 Q_{AB} は図-9の $\Delta\eta/H$ と密接に関係していると推察でき、両者の関係を図-11にプロットした。これによれば、 Q_{AB} は $\Delta\eta/H$ が小さい範囲では低下が小さいものの、 $\Delta\eta/H$ が1.0に近づくと急激に低下する状況を理解できる。

次に、三次元地下水流の一例として、CASE B.3.0とB.3.3のポテンシャル及び流速分布を空洞鉛直対称面と $EL \pm 0m$ 上で抜き、図-12に示す。本図によれば、三次元解析では空洞周辺のポテンシャル分布が密になっており、湧水量が二次元解析より増大する現象を確実に把握することができる。

6. 不均質岩盤モデルの検討

均質岩盤モデルとの比較を通じて、不均質岩盤モデルの風化帯厚さ D の影響を把握する。自由水面を持つCASE B.3.3.1とB.3.3.2の水面形状は前出の図-8中に示している。また、 $\Delta\eta/H$ と D/H の関係を図-13に示す。これらによれば、 D/H が大きくなるほど風化帯を通じた地下水補給が容易となるため、均質岩盤モデルよりも自由水面が高くなることがわかり、自由水面の検討には D は無視できないと考えられる。次に、風化帯を持

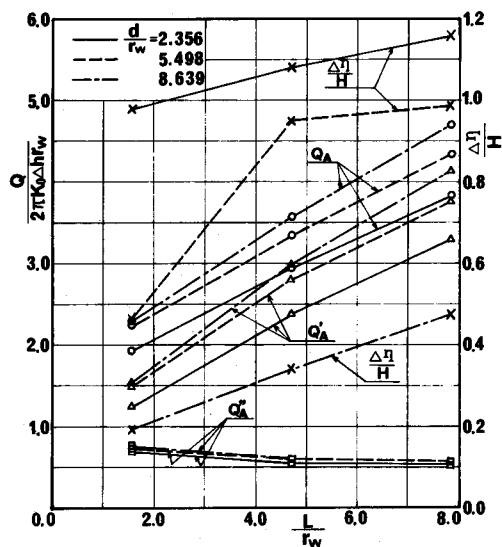


図-9 空洞長さ L と湧水量 Q 、最大水位低下量 $\Delta\eta$ の関係 (CASE B.1.1~B.3.3)

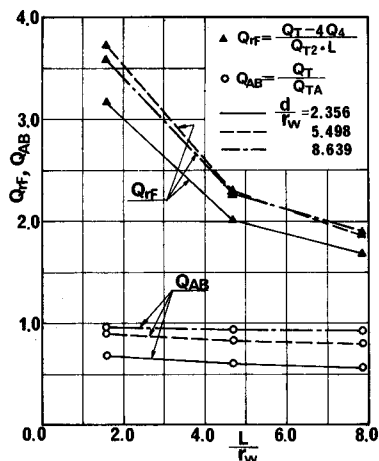


図-10 空洞長さ L と湧水量の三次元効果の関係

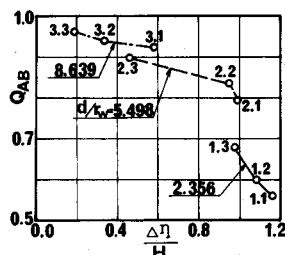


図-11 最大水位低下量 $\Delta\eta$ と湧水量低下 Q_{AB} の関係

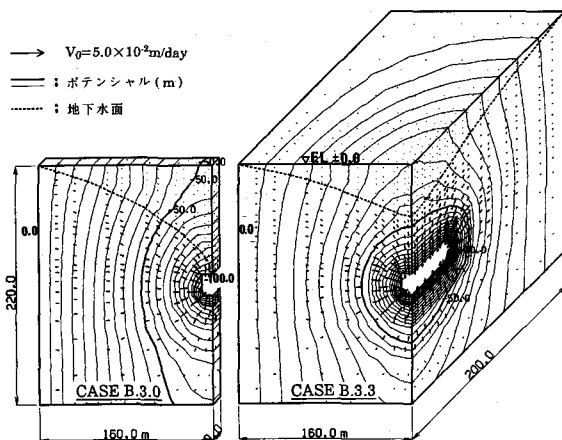


図-12 二次元FEMと三次元FEM解析の地下水挙動の相違

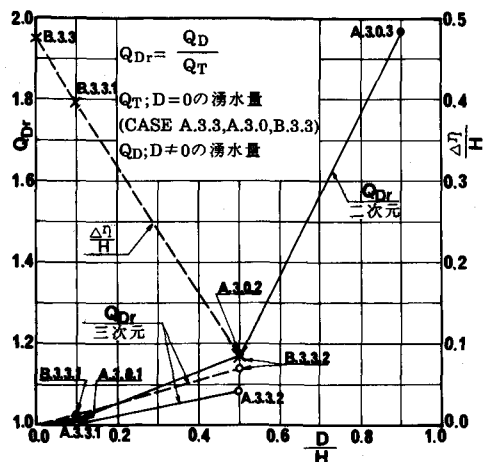


図-13 風化帯厚さ D と湧水量増加率 Q_{Dr} 及び最大水位低下 $\Delta\eta$ の関係

つ場合の全湧水量を Q_D とし、風化帯がない場合の Q_T で除した Q_{Dr} を求め、 D/H との関係も図-13 に示す。先に水面固定の場合を述べれば、 D/H の増大に伴って Q_{Dr} は大きくなるが、三次元による Q_{Dr} は二次元より小さいことがわかる。一方、自由水面がある場合の三次元解析では D/H の増大で $\Delta\eta/H$ が低下するため Q_{Dr} は水面固定の場合より大きい値を示すと理解できる。

7. 結 論

多孔質地山の地下空洞を対象とした三次元地下水挙動を解析により検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 球形空洞湧水量の理論解を用いて三次元FEM解析値を検討した結果、その適用性が認められた。
- (2) 切羽湧水量とそれ以外の湧水量は大きく性質が異なり、その傾向を定量的に把握することができた。
- (3) 自由水面を固定した場合に二次元と三次元解析による湧水量を比較した。その結果、空洞長さが短く且つ深いもの程三次元効果が大きいことが把握でき、三次元湧水量の合理的な近似式を誘導できた。
- (4) 自由水面を持つ場合、空洞長さが短く且つ深さが深いもの程、三次元解析による自由水面が二次元解析より高くなる傾向がある。この水面低下は湧水量に大きく影響し、本タイプと水面固定の場合の湧水量の比は水面低下量との明確な相関関係を示すことができた。
- (5) 風化帯厚さの増大に伴って湧水量は増加するが、特に自由水面への影響が大きく、均質岩盤モデルに比較してかなり高い位置に自由水面を形成することが把握できた。

参考文献

- 1) 佐藤, 飯沢: 第25回水理講演会論文集, pp. 373~378, 1981年2月.
- 2) 百田, 佐藤: 第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 51~55, 1984年2月.
- 3) 駒田, 大町: 大ダム, No. 86, pp. 1~15, 1978年12月.
- 4) 佐藤, 鎌田, 藤崎, 伊藤: 土木学会誌, pp. 16~22, 1984年8月.
- 5) 赤井, 大西, 西垣: 土木学会論文報告集, No. 264, pp. 87~96, 1977年8月.
- 6) 駒田: 電研報告, No. 377015, 1978年2月.
- 7) E. Reinus: Rock Stcre 77, pp. 119~124, 1977.
- 8) 上田, 杉尾: 土木学会論文報告集, No. 194, pp. 91~101, 1971年10月.