

(44) 円形空洞周囲の間隙水圧分布に及ぼす多孔質弾性パラメータの効果

Effect of Poroelastic Parameters on Pore Pressure Distribution Around Circular Openings

青木 智幸*

Tomoyuki AOKI

Undrained analyses have been previously carried out to investigate the stability of boreholes in low permeability shales. However, the validity of the assumption of the undrained condition needs to be discussed. The transient pore pressure behaviour is mainly related to the permeability and poroelastic parameters of rock. Hence, in this study the effects of such parameters are parametrically studied and the conditions to validate the use of the undrained condition are discussed. In addition, cases of circular tunnels are also investigated.

Keywords: pore pressure, undrained condition, poroelastic parameters, permeability, rate of penetration

1. はじめに

空洞を地中に掘削した際の空洞周囲岩盤の変形における排水条件については、特に多孔質岩石についてはこれまで十分な議論がされていない。一般には、応力・変形と間隙の圧力・流れとの経時的相互作用を考慮した連成解析^{1) 2) 3)}により空洞の安定性を議論する必要があるが、解析が容易でないことや間隙水圧挙動についての理解が充分でないために、実務的にはそのような解析はほとんど行われていない。

石油井戸の深層ボーリングにおいては、貯留層上部の頁岩層で孔壁が崩壊する現象が世界中で問題となっている⁴⁾。これらの頁岩の透水係数は、 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ darcy ($10^{-9} \sim 10^{-15}$ cm/s) と報告されており⁴⁾、頁岩層を対象とした孔壁安定性解析においては、その透水性の小ささから泥水の浸透による間隙水圧変化はしばしば無視されてきた⁵⁾。一方、著者ら^{6) 7)}は、掘削による岩石の変形によって生じる過剰間隙水圧を考慮した非排水条件を用いて、ボーリング孔壁の安定性解析を行った。しかし、この非排水条件の仮定の適用性についてはさらに議論する必要がある。また、円形断面トンネルの場合についても同様な議論をすることができる。近年、TBMを用いた急速掘進施工が盛んであることから、この問題の検討も重要である。

掘削後の円形空洞周囲の間隙水圧変化は、温度変化や化学反応を考慮しないとすると、原位置応力・間隙水圧、透水係数、貯留係数及び変形係数などに依存している。特に、透水係数と一般化圧密係数が重要なパラメータとなるが、多孔質岩石の場合、多孔質弾性理論に基づいて一般化圧密係数はいくつかの基本的な多孔質弾性パラメータの組み合わせで表現されることがわかっている^{8) 9)}。

本報では、ボーリング孔及び円形断面トンネルについて、掘削後の間隙水圧の経時変化に及ぼす透水係数と多孔質弾性パラメータの効果についてパラメトリックに検討し、掘削速度との関係から非排水条件の適用できる条件について考察した結果について述べる。

* 正会員 大成建設(株)技術研究所 岩盤研究室

2. 多孔質弾性理論に基づいた円形空洞周囲の間隙水圧の経時変化の理論解

多孔質岩石の応力－ひずみ－間隙水圧関係は、線形弾性を仮定した場合多孔質弾性パラメータで記述される。多孔質弾性理論 (Theory of Poroelasticity)⁹⁾ は、Biot の三次元圧密理論¹⁰⁾ を起点として発展してきたもので、岩石の固体部分 (鉱物粒子と基質) や間隙流体を圧縮性材料として取り扱う。土質力学ではこれらを非圧縮性として取り扱うが、岩石では泥岩のような軟岩でさえも一般的には圧縮性として取り扱う必要があることは、既報¹¹⁾ で述べた通りである。具体的には、たとえば岩石の固体部分や間隙流体を非圧縮性とみなすことができない場合、有効応力係数 α や Skempton の間隙水圧係数 B が 1 より無視できないほどに小さくなる。

等方均質な多孔質弾性体中に瞬時に掘削されたボーリング孔のような円孔の周囲の応力及び間隙水圧の経時変化については、Detournay と Cheng⁸⁾ によって二次元平面ひずみ状態の場合について理論解が与えられている。この理論解は、Laplace 変換を用いて表現されているが、早期解 (early-time solution) については、実時間領域の簡単な式で与えられている。本報では、非排水条件の適用しうる (早期の) 時間境界について検討するので、この式を用いることができる。

問題を簡単にするために、検討範囲を原位置応力が静水圧 (等方的) 状態の場合に限定する。この場合、空洞周囲の岩石は純粋せん断変形するので体積変化を生じず、すなわち掘削による変形により過剰間隙水圧を生じない。また、間隙水圧は、円周方向に常に一樣な分布を示す。間隙水圧変化によって (全) 応力は変化するが、本報では破壊についての検討は除外するので、間隙水圧変化のみに着目する。

以上のような条件下で得られた間隙水圧に関する早期解を式(1)に示す。 P は間隙水圧、 P_0 は初期 (原位置) 間隙水圧である。 r^* は式(2)に示すように空洞半径 r_0 で正規化した空洞中心からの半径 r 方向の距離、 t^* は式(3)で定義する無次元の特性時間である。ここで、 t は掘削直後からの経過時間、 c は一般化圧密係数と呼ばれるパラメータで式(4)で定義されるように透水係数と他の多孔質弾性パラメータで表すことができる⁸⁾。 B は Skempton の間隙水圧係数、 G は岩石骨格のせん断弾性係数、 κ は透水係数である。 ν および ν^* は排水及び非排水条件のボアソン比である。

上記の解は、掘削された空洞内に内圧が作用しない場合についてのものであり、無支保状態の円形トンネルを掘削した場合にそのまま適用することができる。一方、深層ボーリングの場合は、孔内より泥水圧が作用する。一般に、孔壁を維持するために原位置の間隙水圧よりも大きい泥水圧が用いられるので、泥水濾過液は時間と共に孔壁から岩石内に浸透し、間隙水圧を上昇させる。この場合は、式(1)の間隙水圧及び原位置間隙水圧をそれぞれ泥水圧との差に置き換え、さらに間隙水の流れ方向が逆であることを考慮して、式(5)のように早期解を求めることができる。

図-1 及び 2 に式(5)を用いて求めた、間隙水圧の経時変化および経過時間毎の間隙水圧分布を示す。

3. 多孔質弾性パラメータの効果に関する検討

著者らは、既報^{7) 12) 13) 14)} で圧密非排水三軸圧縮試験、H 試験およびトランジェントパルス試験により、層理面に沿った面内等方性を持ったオーストラリア産のTrafalgar頁岩の多孔質弾性パラメータ及び透水係数を決定した。本報では、異方性の影響については除外するので、ここでは、それぞれの多孔質弾性パラメータについて三つの主方向の値を平均

$$\frac{P}{P_0} = 1 - \frac{1}{\sqrt{r^*}} \operatorname{erfc} \left(\frac{r^* - 1}{2\sqrt{t^*}} \right) - \frac{1}{8\sqrt{r^*}} \left(1 - \frac{1}{r^*} \right) \times \left[2\sqrt{\frac{t^*}{\pi}} \exp \left(-\frac{(r^* - 1)^2}{4t^*} \right) - (r^* - 1) \operatorname{erfc} \left(\frac{r^* - 1}{2\sqrt{t^*}} \right) \right] \quad (1)$$

$$r^* = \frac{r}{r_0} \quad (2)$$

$$t^* = \frac{ct}{r_0^2} \quad (3)$$

$$c = \frac{2\kappa B^2 G(1-\nu)(1+\nu^*)^2}{9(1-\nu^*)(\nu^*-\nu)} \quad (4)$$

$$\frac{P-P_0}{P_w-P_0} = 1 - \text{式(1)の右辺} \quad (5)$$

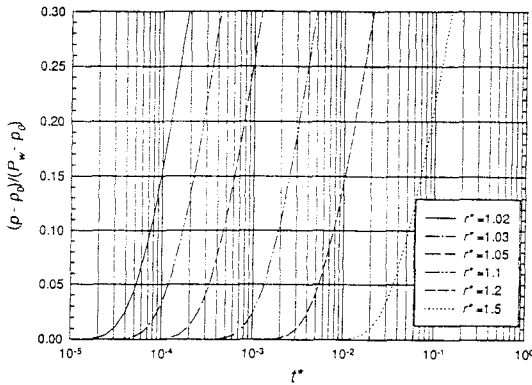


図-1 間隙水圧の経時変化

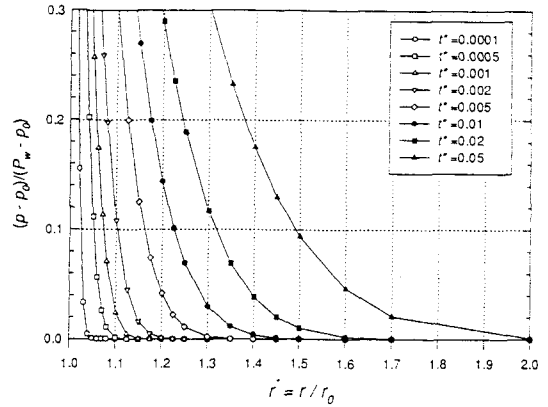


図-2 経過時間毎の間隙水圧分布

して等方性のパラメータを導入した。また、透水係数は、層理面に平行な方向について $\kappa_1=78 \text{ nano-darcy}$ 、層理面に垂直な方向について $\kappa_2=78 \text{ nano-darcy}$ であった (1 nano-darcy は約 $0.97 \times 10^{-12} \text{ cm/s}$)。

Trafalgar頁岩について求めた多孔質弾性パラメータを基準として多孔質弾性パラメータをパラメトリックに変化させ、表-1に示すように6ケースについて検討を行った。ケース1は、オリジナルのTrafalgar頁岩のパラメータを用いたものである。ケース2と3は泥岩などの軟岩の場合を想定して、岩石骨格に関する弾性係数を小さくしたものである。ケース2と3の違いについては後述する。ケース4は、間隙流体の圧縮性は考慮するが、岩石の固体部分は非圧縮性であるとしたものである。里他¹⁾は連成解析の定式化にこの仮定を用いた。ケース5は、岩石の固体部分、間隙流体共に非圧縮性であるとしたもので、これは土質力学で一般的に用いられている仮定である。ケース6は、浸透流解析で時々用いられる条件で、岩石の固体部分と構造骨格が非圧縮性で、間隙流体が圧縮性の場合であり、非連成条件 (uncoupled condition)と呼ばれる⁹⁾。

表-2に、各検討ケースで用いた多孔質弾性パラメータを示す。ここで、 K は岩石骨格の体積弾性係数、 K_s は岩石の固体部分の体積弾性係数、

K_f は間隙流体の体積弾性係数、 E はヤング率である。間隙流体としては、水を想定した。 M と R' は共に貯留係数の逆数に関連した多孔質弾性パラメータで連成問題で重要なパラメータである^{7) 9)}。

ϕ_0 は多孔質弾性パラメータの一つとして定義される有効空隙率である (ちなみに、通常の物理的に測定したTrafalgar頁岩の空

表-1 検討ケース

Case	Compressibility			Comments
	Mineral Constituents	Fluid	Framework	
1	C	C	C	Original
2	C	C	C	Poroeastic (Lower Moduli)
3	C	C	C	Poroeastic (Lower Moduli)
4	IC	C	C	Incompressible Mineral Constituents
5	IC	IC	C	"Soil" type
6	IC	C	IC	Uncoupled

C: Compressible IC: Incompressible

表-2 各ケースの多孔質弾性パラメータ

Case	K [GPa]	G [GPa]	K_s [GPa]	K_f [GPa]	ϕ_0 [%]	E [GPa]	ν	E^* [GPa]	ν^*	K^* [GPa]	M [GPa]	R' [GPa]	α	B
1	11.4	7.61	24.1	2.2	8.94	18.7	0.227	19.7	0.296	16.1	17.0	12.0	0.528	0.557
2	2.28	1.52	24.1	2.2	8.94	3.73	0.227	4.40	0.445	13.3	13.4	2.30	0.906	0.915
3	2.28	1.52	24.1	2.2	25.0	3.73	0.227	4.30	0.412	8.10	7.10	2.00	0.906	0.794
4	11.4	7.61	LRG	2.2	8.94	18.7	0.227	21.3	0.401	35.9	24.6	7.79	1.000	0.684
5	11.4	7.61	LRG	LRG	8.94	18.7	0.227	22.8	0.500	LRG	LRG	11.4	1.000	1.000
6	LRG	LRG	LRG	2.2	8.94	LRG	UND	LRG	UND	LRG	24.6	24.6	1.000	0.000

LRG: Large value and undefined

UND: Undefined

限率は10.6%であった)。添字 u は、非排水条件のパラメータであることを示す。ケース1で、実験^{7) 12) 14)}では E^u 、 ν^u 、 B 、 R' を測定し、他のパラメータを算出している。ケース2～6のパラメータスタディでは、左側に示した基本的な5つの独立なパラメータの組を変化させ、右側のパラメータはそれらより算出した。ケース2と3は、軟岩の場合をシミュレートして K と G をケース1に比べて1/5にしたもので、これらは泥岩の一般的なものの範囲に入る¹³⁾。 K_s は軟岩でもそれほど変化しないと考えられる(実測例がない)。ケース2の有効空隙率は軟岩としては小さめであるので、ケース3では有効空隙率を大きくした。

まず、ボーリング孔の問題について検討する。各ケースにおける泥水の浸透による間隙水圧の上昇速度を比較する指標として、限界時間 t_{cs} を定義する。これは、孔壁より半径方向に直径の5%岩石内部の位置($r^*=1.1$)の間隙水圧が、5%だけ初期の値より変化した時の経過時間である。この条件下での特性時間 t^* は式(5)より0.00133と決定できる(図-1参照)。そのとき、式(3)より決定される t が t_{cs} である。式(3)より t_{cs} は一般化圧密係数 c に反比例し、空洞半径の2乗に比例することがわかる。

掘削による空洞壁面の変形は、孔底(トンネルの場合は切羽)の存在により制限され、考えている断面から見て孔底の位置が $-2r_0$ (手前)から $3r_0$ (通過)の間にほとんどすべての変形が完了する¹³⁾。従って、 $5r_0$ の長さを掘削するのに要する時間 t_d が限界時間 t_{cs} よりも短ければ、実質的には非排水条件が適用できるとみなしてよいであろう。

表-3に、ボーリング孔直径が12.25インチ(311mm)で透水係数が78 nano-darcyの場合について

求めた各ケースの限界時間 t_{cs} を示す。まず、各ケース毎の限界時間 t_{cs} の違いについて考察する。ケース1の限界時間を1として比を取ると、軟岩を想定したケース2と3では、3.7及び4.6倍になっている。これは、弾性係数が小さくなって変形しやすくなったために、さらにケース3では空隙率が大きくなったために、貯留効果が増大したためである。ケース4は、ケース1に対して岩石の固体部分を非圧縮性とした場合であるが、限界時間 t_{cs} は1.2倍と若干大きくなっている。これに対し、ケース5はさらに間隙流体を非圧縮性とした場合であるが、限界時間 t_{cs} は0.65倍と逆に小さく見積もられている。すなわちケース4では、同じ経過時間の時、間隙水圧の泥水の浸透による上昇を小さめに見積もるが、逆にケース5では、大きめに見積もる。ケース6は、限界時間 t_{cs} を0.57倍と最も小さく見積もる。

頁岩中の削孔速度は、たとえばオーストラリア北西部大陸棚の油田地域で12.25インチのボーリング孔で3.5～8 m/hourという値が報告されている¹⁴⁾。これより $5r_0$ の長さを掘削するのに要する時間 t_d を求めると、350

表-3 各ケースの限界時間

Case	K [nano-darcy]	c [m ² /s]	t_{cs} [sec]	Ratio
1	78	1.06×10^{-6}	30.2	1.0
2	78	2.88×10^{-7}	111.	3.7
3	78	2.31×10^{-7}	139.	4.6
4	78	8.78×10^{-7}	36.6	1.2
5	78	1.64×10^{-6}	19.6	0.65
6	78	1.88×10^{-6}	17.1	0.57

t_{cs} : Critical time when change of normalised pore pressure at $r^*=1.1$ is 5%.

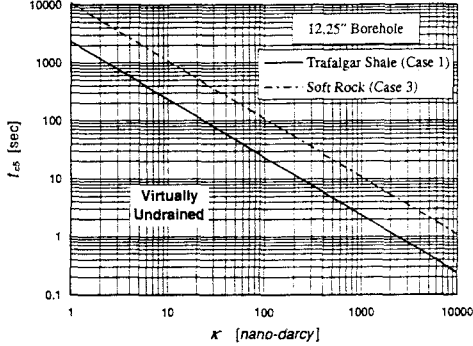


図-3 ボーリング孔の限界時間

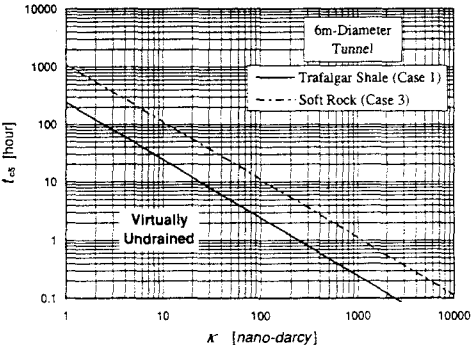


図-4 円形断面トンネルの限界時間

～790 秒 となる。従って、表-3 のケースでは、どのケースでも非排水条件を仮定して孔壁の安定解析を行った場合誤差が大きいといえる。

図-3 に、上述のボーリング孔についてケース1 と3 場合について透水係数を 1 nano-darcy から 10 micro-darcy に変化させた際の限界時間 t_{cs} との関係を示す。両者は、前述したように反比例の関係にあるので、両対数グラフ上で直線で表されている。ある透水係数の岩石中に削孔したときの t_d を図上にプロットして直線の下側にあれば、孔壁周囲の岩石は、実質的に非排水状態で変形するとみなすことができる。 t_d が350秒の時には、透水係数が約 6.2 nano-darcy 以下の場合にそのような条件が成立する。

以上の議論と同様に、円形断面トンネルについても検討することができる。図-4 に直径6mのトンネルについて、ケース1 と3 のパラメータを用いて求めた透水係数と t_{cs} との関係を示す。最近のTBMでは、最高 2 m/hour 程度の掘進速度を出すことがあるので¹⁷⁾、その場合の t_d は 7.5 時間となる。図より、この場合はケース3 の軟岩では透水係数が 0.13 micro-darcy 以下の時に実質上非排水状態で変形するとみなすことができる。

4. まとめ

空洞を掘削した際に、周囲の岩石が非排水状態で変形すると原位置の応力が異方的なときには（地下深部ではこれが一般的であるが）空洞周囲に過剰間隙水圧が発生して壁面が破壊し易くなる。また、その過剰間隙水圧や初期の間隙水圧も壁面の排水条件によって時間と共に変化する。一般的には、このような現象は三次元の連成数値解析³⁾を行う必要があるが、本報ではそのような連成問題において圧縮性に関する多孔質弾性パラメータの選定が解析で得られる間隙水圧分布に大きな影響を及ぼすことを示した。

5. 参考文献

- 1) 里 優、他：間隙水の移動を考慮した岩盤の変形解析手法に関する一試案、資源・素材学会誌、Vol.108、NO.11、pp.783-789、1992
- 2) 大津宏康、他：間隙水と変形・応力の連成を考慮した地盤構造物の設計に関する一考察、土木学会論文集、No.457/III-21、pp.87-96、1992
- 3) Cui, L. et al.: Finite Element Analyses of Anisotropic Poroelastic Problems, Proceedings of 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, pp.1567-1572, 1994
- 4) たとえば van Oort, E.: A Novel Technique for the Investigation of Drilling Fluid Induced Borehole Instability in Shales, Eurock' 94, Balkema, pp.293-308, 1994
- 5) たとえば Aadnoy, B.S.: Modelling of the Stability of Highly Inclined Boreholes in Anisotropic Rock Formations, SPE Drilling Engineering, September, pp.259-268, 1988
- 6) Aoki, T. et al.: Stability Analysis of Inclined Wellbores in Saturated Anisotropic Shales, Proceedings of 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Balkema, pp.2025-2030, 1994
- 7) Aoki, T.: Stability of Boreholes in Saturated Porous Anisotropic Shales, PhD Thesis, Submitted to University of Melbourne, 1996
- 8) Detournay, E. and Cheng, A.H.-D.: Poroelastic Response of a Borehole in a Non-hydrostatic Stress Field, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.3, pp.171-182, 1988
- 9) たとえば Detournay, E. and Cheng, A.H.-D.: Chapter 5 Fundamentals of Poroelasticity, Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol. 2, pp.113-172, 1993
- 10) Biot, M.A.: General Theory of Three-dimensional Consolidation, Journal of Applied Physics, Vol. 12, 155-164, 1941
- 11) Aoki, T.: Discussion on the Effective Stress Law for Soft Rocks, Submitted to the post-conference volume of Proceedings of International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials based on the floor discussion, Balkema, vol. 2, 1994
- 12) Aoki, T. et al.: Pore Pressure Response of an Anisotropic Shale during Loading in an Undrained Condition, Proceedings of International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Balkema, pp.451-456, 1994
- 13) 青木智幸、井尻祐二、下茂道人：高精度トランジェントパルス透水試験機の開発、土木学会第49回年次学術講演会、III-43、pp.80-81、1994
- 14) Aoki, T. et al.: Determination of Anisotropic Poroelastic Parameters of a Transversely Isotropic Shale by Means of Consolidated Undrained Triaxial Tests, Proceedings of 8th International Congress on Rock Mechanics, Balkema, Vol.1, pp.173-176, 1995
- 15) Brady, B.H.G. and Brown, E.T.: Rock Mechanics for Underground Mining, George Allen & Unwin, Chapter 11, 1985.
- 16) Berean, D. et al.: Planning and Drilling of Sinuous Horizontal Wells for the Griffin Area Development, Australian Petroleum Exploration Association Journal, pp.19-31, 1994
- 17) Bamford, W.E.: Personal Communication.